

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vytautas RIMŠA

DALELIŲ KOMPOZITO DISKRETUSIS MODELIS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)



Vilnius **TECHNICA** 2014

Disertacija rengta 2010–2014 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Konsultantas

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Juozas ATKOČIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Nariai:

prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

prof. dr. Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),

habil. dr. Lidiia NAZARENKO (Medžiagų tyrimo institutas, Vokietija, mechanikos inžinerija – 09T),

prof. habil. dr. Minvydas Kazys RAGULSKIS (Kauno technologijos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2014 m. rugsėjo 29 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2014 m. rugpjūčio 28 d.

Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2261-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-609-457-703-1

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2014

© Vytautas Rimša, 2014

vytautas.rimsa@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Vytautas RIMŠA

DISCRETE MODEL OF THE PARTICULATE COMPOSITE

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (09T)



Vilnius 2014

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2010–2014.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

Consultant

Prof Dr Habil Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Mechanical Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Juozas ATKOČIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

Members:

Prof Dr Habil Marijonas BOGDEVICHIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T),

Prof Dr Alfredas LAURINAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Dr Habil Lidiia NAZARENKO (Institute of Materials Research, Germany, Mechanical Engineering – 09T),

Prof Dr Habil Minvydas Kazys RAGULSKIS (Kaunas University of Technology, Mechanical Engineering – 09T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Mechanical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 29 September 2014.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intended defending of the dissertation was sent on 28 August 2014.

A copy of the doctoral dissertation is available for review on the Internet website <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje skaitiškai nagrinėjamos heterogeninės medžiagos, kaip, pavyzdžiui, asfaltas, sudarytas iš tamprųjų sferų ir klampiai tamprios matricos. Sudaryti asfalto mechaninį modelį dėl jo didelio heterogeniškumo yra sudėtinga, todėl pasirinkta analizės kryptis – daleles, esančias struktūroje, nagrinėti kaip sferas, analizuojant dalelių kontaktą per klampiai tamprą matricą.

Pagrindinis disertacijos tikslas – ištirti dalelių sąveikos mechaniką, pasiūlyti skaitinį-analitinį modelį heterogeninės struktūros standumui nustatyti. Sukurto modelio taikymo sritis – asfalto tipo medžiagos. Disertacijoje siekiama ištirti heterogeninę medžiagą sudarančių medžiagų kiekio ir jų mechaninių savybių įtaką heterogeninei struktūrai.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: taikant dviejų dalelių sąveikos uždavinį, įvertinama normalinė dviejų dalelių sąveika. Vėliau, remiantis gautais skaičiavimo rezultatais, sudaromas vienmatis diskretus elementas (DE), kuriuo diskretizuojamos heterogeninės struktūros.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir du priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikta asfalto mišinių analizės apžvalga, taikomi skaitiniai, analiziniai modeliai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikta normalinės sąveikos analizė taikant baigtinių elementų programą „Ansys“, išvesta analizinė lygtis normaliniam standumui apskaičiuoti, įvertinant matricos plėvelės įtaką.

Trečiajame ir ketvirtajame skyriuose tiriamas diskrečiojo elemento taikymas aštuoniolikos dalelių sistemai ir tipinei asfalto struktūrai – Maršalo bandiniui.

Disertacijos tema paskelbti 4 straipsniai: du – recenzuojamuose mokslo žurnaluose, iš kurių vienas įtrauktas į Thomson ISI sąrašą, vienas – konferencijų medžiagoje, referuotoje Thomson ISI duomenų bazėje, vienas – recenzuojamoje tarptautinių konferencijų medžiagoje, patalpintoje elektroninėje laikmenoje. Disertacijos tema perskaityta 10 pranešimų Lietuvos ir kitų šalių konferencijose.

Abstract

Majority of real engineering materials are heterogeneous and multicomponent mixtures, separate components of which possess large diversity of properties on various scales of heterogeneity. Evaluation of mechanical behaviour of them has been the focus of much research over the last decades and various theories and approaches of different complexity are used for characterization purposes.

Implementation of the particulate solid analysis strategy implies the evaluation of the forces occurring during the binary interaction of two particles. Later this contact behaviour applies for all particulate solid system

The dissertation consists of introduction, 4 chapters, conclusions, references and two annexes.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, science novelty, practical significance of results. The introduction ends in presenting the authors publications on the subject of defended dissertation, offering the material of made presentations in conference and defending the structure of the dissertation.

Chapter 1 describes revised literature for heterogeneous structural analysis by use analytical and numerical methods.

Chapter 2 describes discretization of particulate solid structure in to representative volume. Proposed mathematical model for normal contact of two particles in weak matrix analysis and verification with FE model

Chapters 3 and 4 describe application of the new discrete element for the simplified eighteen particle system and typical asphalt mix of the Marshall sample.

4 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: one article in the Thomson ISI register; one article in DB approved by CSL; one article – in the conference material in Thomson ISI data base; one article in material reviewed international conference. 10 presentations on the subject have been presented in conferences at national and international level.

Žymėjimai

Simboliai

Σ – skaldos dalelių paviršiaus santykinis plotas;

α_m^E t_m – klampiai tamprios medžiagos parametrai aprašantys m – ajį Proni eilutės elementą;

a – koreliacijos koeficientas;

b – bitumo procentinė dalis asfalto mišinyje;

B – parametras įvertinantis granulinės medžiagos įtaką matricos plėvelės storiui;

c – koeficientas, įvertinantis matricos standumo priklausomybę nuo aplinkos temperatūros;

D – dalelės skersmuo;

E – medžiagos tamprumo modulis;

f – santykinė jėga;

f – skaldos dalelių, mažesnių nei 0,80 mm procentinė masės dalis dalelių kompozite;

F_n – normalinė jėgos reakcija;

G – skaldos dalelių, didesnių nei 6,3 mm, procentinė masės dalis dalelių kompozite;

G – šlyties modulis;

H – dviejų sąveikaujančių dalelių sistemos per matricos sluoksnį bendras skersmuo;

k – atskiro elemento standumas;

k – mastikos ir bitumo standumo santykis;

K – tūrinis šlyties modulis;

K_{total} – bendras sistemos normalinis standumas;

L – dviejų sąveikaujančių dalelių sistemos per matricos sluoksnį bendras ilgis;
 L_g – tarpelis tarp kontaktuojančių dalelių;
 p – slėgis;
 R – dalelės spindulys;
 s – 3,15–0,80 mm skaldos dalelių procentinė masės dalis dalelių kompozite;
 S – 6,3–3,15 mm skaldos dalelių procentinė masės dalis dalelių kompozite;
 SAF – paviršiaus ploto koeficientas m^2/kg ;
 T – temperatūra;
 u_i, u_j – mazgų i ir j poslinkiai;
 u_n – poslinkis normaline kryptimi;
 v – greitis;
 E – medžiagos tamprumo modulis;
 w – energija;
 δ – matricos plėvelės storis;
 ε – deformacija;
 η – klampa;
 ν – Puasono koeficientas;
 σ – įtempimai;
 φ – dalelės pasisukimo kampas.

Indeksai

i – atitinkamas mazgas;
 M – Proni eilučių skaičius.

Santrumpos

BEM – baigtinių elementų metodas;
 DE – diskretusis modelis;
 DEM – diskrečiųjų elementų metodas.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	3
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
1. DALELIŲ KOMPOZITŲ ANALIZĖS APŽVALGA	7
1.1. Kompozitai ir jų taikymas	7
1.1.1. Dalelės ir jų savybės	12
1.1.2. Matricos plėvelė.....	13
1.2. Reologiniai modeliai	15
1.3. Mikromechaniniai modeliai.....	17
1.4. Skaitiniai modeliai.....	18
1.4.1. Baigtinių elementų metodas.....	19
1.4.2. Diskrečiųjų elementų skaičiavimo metodas.....	21
1.5. Pirmojo skyriaus išvados.....	24
2. HETEROGENINĖS STRUKTŪROS ANALIZĖ TAIKANT	
DISKREČIUOSIUS ELEMENTUS	25
2.1. Modeliavimo principai	25
2.2. Normalinės sąveikos vaidmuo daugiapakopiame modeliavime	26
2.3. Normalinės sąveikos matematinis modelis.....	27
2.3.1. Prielaidos ir uždavinio formuluotė.....	27

2.3.2. Kontinualus dalelių sąveikos uždavinys	28
2.3.3. Dalelių sąveikos diskretizavimas	29
2.3.4. Atskirų elementų standumo įvertinimas	30
2.4. Normalinės sąveikos analizė	32
2.5. Normalinės sąveikos patikra taikant baigtinių elementų programinį paketą „Ansys“	33
2.5.1. Kraštinės sąlygos	34
2.5.2. Klampiai tamprios medžiagos savybės	35
2.5.3. Medžiagų savybės.....	37
2.5.4. Diskrečiojo elemento standumo tikrinimas su baigtinių elementų programinio paketo rezultatais.....	38
2.5.5. Tarpelio įtaka normaliniam kontaktui.....	39
2.5.6. Kitų parametrų įtaka normaliniam kontaktui	40
2.5.7. Laiko poveikis normaliniam kontaktui	41
2.5.8. Geometrinų parametrų įtaka dviejų dalelių normalinei sąveikai	42
2.5.9. Tempimo ir gniuždymo skirtumai	45
2.6. Antrojo skyriaus išvados	48
3. DISKREČIOJO MODELIO TAIKYMAS HETEROGENINĖSE STRUKTŪROSE..	49
3.1. Teorinis diskrečiojo elemento taikymas dalelių kompozito analizei	49
3.2. Diskrečiojo modelio taikymas kompozito struktūrai modeliuoti.....	51
3.3. 3D modelio sudarymas	52
3.4. Lokali dalelių sąveikos analizė.....	53
3.5. Skaitinių modelių lyginamoji analizė	56
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	59
4. DISKREČIOJO MODELIO TAIKYMAS MARŠALO BANDINIUI ANALIZUOTI	61
4.1. Skaitinio modelio pagrindiniai kriterijai.....	61
4.2. Maršalo bandymo testas, pagrindiniai parametrai	67
4.3. Skaičiavimo rezultatai	71
4.4. Maršalo bandinio atraminės reakcijos priklausomybės esant skirtingiems orientuotos matricos sluoksniams.....	72
4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados	75
BENDROSIOS IŠVADOS.....	77
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	79
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ...	87
SUMMARY IN ENGLISH.....	89
PRIEDAI.....	109
A priedas. Bendraautorų sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje	112
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	116

Contents

INTRODUCTION	1
The investigated problem	1
Importance of the thesis	2
The object of research	2
The aim of the thesis	2
The tasks of the thesis	2
Research methodology	3
Importance of scientific novelty	3
Practical significance of achieved results	3
The defended propositions	3
Approval of the results	4
Dissertation structure	5
1. REVIEW OF THE COMPOSITE PARTICLE ANALYSIS	7
1.1. Composites and its application	7
1.1.1. Particles and their properties	12
1.1.2. Matrix film	13
1.2. Rheological models	15
1.3. Micromechanical models	17
1.4. Numerical models	18
1.4.1. Finite elements method	19
1.4.2. Discrete elements method	21
1.5. Summary of the first chapter	23

2. HETEROGENEOUS STRUCTURE ANALYSIS BY USE DISCRETE ELEMENTS	25
2.1. Modelling principles.....	25
2.2. Influence of the normal interaction role in multilevel modelling	26
2.3. Mathematical model of the normal interaction.....	27
2.3.1. Assumptions and task formulation.....	27
2.3.2. Task of the continual particle interaction.....	28
2.3.3. Discretization of the particle interaction.....	29
2.3.4. The stiffness of the individual elements	30
2.4. Analysis of the normal interaction.....	32
2.5. Normal stiffness analysis with finite element program “Ansys”	33
2.5.1. Boundary conditions	33
2.5.2. Viscos elasticity of matrix	34
2.5.3. Material properties.....	35
2.5.4. Discrete model verification with finite element program “Ansys”	37
2.5.5. Gap between particles influence to normal stiffness.....	39
2.5.6. Influence of other parameters for normal stiffness	40
2.5.7. Influence of relaxation for normal stiffness behaviour	42
2.5.8. Influence of geometric parameters for normal contact stiffness	43
2.5.9. Difference between tension and compression in normal contact model ...	45
2.6. Summary of the second chapter.....	48
3. DISCRETE MODEL APPLICATION IN HETEROGENEOUS STRUCTURES..	49
3.1. Theoretical background of the discrete model for application in heterogeneous structures.....	49
3.2. Discrete model for simulation of the composite structure	51
3.3. Creation of the 3D continuum model.....	52
3.4. The local particle interaction analysis.....	53
3.5. Comparison of the numerical models	56
3.6. Summary of the third chapter	59
4. DISCRETE MODEL APPLICATION FOR MARSHALL TEST ANALYSIS.....	61
4.1. Basic criteria of numerical model	61
4.2. Marshall test and basic parameters	67
4.3. Results	71
4.4. Influence of matrix thickness for Marshall numerical results	72
4.5. Summary of the fourth chapter:	75
GENERAL CONCLUSIONS	77
REFERENCES.....	79
LIST OF THE AUTHOR’S SCIENTIFIC PUBLICATIONS RELATED TO THE TOPIC OF DISSERTATION	87
SUMMARY IN ENGLISH.....	89

ANNEXES	109
Annex A. The co-authors agreement to present publications	112
Annex B. Copies of author scientific publications on the subject of dissertation	116

Įvadas

Problemos formulavimas

Didžioji dauguma šiuolaikinių inžinerinių medžiagų yra kompozitai, sudaryti iš dviejų ar daugiau elementų, kurių mechaniniai ir geometriniai parametrai yra labai nepastovūs. Dalelių kompozitų mechaniniai parametrai priklauso nuo jų sudarančių atskirų elementų fizikinių savybių, kur atskiri kompozitą sudarantys elementai sąveikauja mikro- ir mezo masteliuose. Dėl labai sudėtingos vidinės dalelių kompozito struktūros skaitinių analizės metodų panaudojimas yra labai sudėtingas.

Dalelių kompozito mechaninės elgsenos tyrimas yra vienas iš svarbesnių mokslinio tyrimo objektų, kurių mechaninių savybių įvertinimui pasiūlyta daug teorijų, įvairaus sudėtingumo analizės metodų dalelių kompozitui nagrinėti.

Pritaikyti dalelių kompozito analizei lengvai panaudojamą, bet kartu tikslų skaitinį modelį, yra gana sudėtinga, kadangi dalelių kompozito mechaninė sąveikos analizė yra daugiadisciplininis uždavinys. Dalelių kompozito analizei dažniausiai taikomos BEM, DEM ir struktūrinio tinklo koncepcijos, kurios pakeitė anksčiau naudotus pusiau empirinius analizės metodus.

Šiame darbe nagrinėjama mikrostruktūros įtaka dalelių kompozito makro standumui. Tiriamos dvi pagrindinės problemos. Pirmoji yra dviejų nesluoksniuotų ir sluosniuotų dalelių geometrinių ir mechaninių parametrų

įtaka normaliniam kontakto standumui ir pusiau analizinio diskrečiojo modelio šiai sąveikai įvertinti sukūrimas. Antroji problema yra pusiau analizinio modelio taikymas dalelių kompozito analizei.

Darbo aktualumas

Dalelių kompozitų analizės modeliai, pagrįsti taikant diskrečiųjų dalelių elgsenos tyrimus, leidžia geriau suprasti tokių medžiagų viduje vykstančius procesus, optimizuoti jų sudėtį, siekiant sukurti norimų fizikinių savybių kompozitą.

Tyrimų objektas

Dalelių kompozito diskretusis modelis ir jo taikymas asfalto mechaninėms savybėms tirti.

Darbo tikslas

Sukurti ir ištirti dviejų sferinių dalelių normalinės sąveikos diskretųjį modelį ir jį pritaikyti kompozito makroskopinės struktūros analizei.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Išanalizuoti žinomus dalelių sąveikos modelius.
2. Sudaryti normalinės sąveikos integralinį pusiau analizinį modelį, diskretųjį modelį įvertinantį tamprių dalelių ir klampiai tamprios matricos savybes.
3. Skaitiškai ištirti šio modelio tinkamumą sprendžiant sąveikos uždavinį kontinuumu, taikant baigtinių elementų metodą.
4. Binarinės normalinės sąveikos pagrindu sudaryti makroskopinį diskretųjį dalelių kompozito modelį.
5. Pritaikyti diskretųjį modelį asfalto mišinio Maršalo bandiniui modeliuoti.

Tyrimų metodika

Siekiant atlikti užsibrėžtus uždavinius, darbe taikomas keleto metodų derinys. Tipinei dviejų dalelių normalinei sąveikai tirti pasiūlytas analizinis dviejų sferinių dalelių normalinės sąveikos diskretusis modelis. Siūlomo modelio tinkamumas įvertintas atlikus lyginamąją geometrijos skaitinę analizę su baigtinių elementų programa „Ansys“. Modelio tinkamumas realių heterogeninių struktūrų analizei įvertintas palyginus su eksperimentiniais rezultatais.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant mokslinę disertaciją buvo gauti mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pasiūlytas analizinis dviejų sferinių dalelių normalinės sąveikos diskretusis modelis, esant žymiam dalelių ir tarpinio sluoksnio skirtumui, ploniems dalelių apvalkalo ir tarpinio sluoksnio matmenims. Diskrečiojo modelio tinkamumas įrodytas atlikus lyginamąją analizę su skaitiniais baigtinių elementų modelio rezultatais.

2. Sudarytas dalelių kompozito diskretusis modelis, kuriame dalelių sąveikos aprašomos taikant normalinės sąveikos modelį. Diskrečiojo modelio tinkamumas įrodytas lyginat su skaitiniais baigtinių elementų modelio rezultatais.

3. Binarinės sąveikos pritaikymas makroskopiniams dalelių kontinuumo uždaviniams spręsti (Maršalo bandymais).

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Darbo rezultatai pagilina žinias apie dalelių kompozito mechaninį būvį mikro- ir mezoparametrų įtaką makrostruktūrai. Siūlomas modelis dėl santykinai mažų reikalingų skaičiavimui resursų yra praktiniu požiūriu pranašesnis už klasikinį BEM metodą. Modelis tinkamai įvertina didelius dalelių ir matricos savybių skirtumus, dėl to jis gali būti perspektyvus asfalto mišinio skaičiavimui.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurtas pusiau analizinis diskretusis modelis tirti dalelių normalinę sąveiką minkštoje matricoje, esant dideliems matricos ir dalelių

standumo santykiams ir plačioms tarpelio tarp sąveikaujančių dalelių reikšmės, bei įvertinti matricos plėvelės įtaką.

2. Dalelių kompozito diskretizavimas taikant tik normalinę sąveiką yra pakankamas skaitinei dalelių ir asfalto mišinio analizei.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbti 4 straipsniai iš kurių 3 straipsniai paskelbti recenzuojamuose mokslo žurnaluose. Autoriaus publikacijų sąrašas pateiktas 87 puslapyje.

Disertacijos tema perskaityta 10 pranešimų Lietuvos ir kitų šalių konferencijose:

- Rimša, V., Kačianauskas, R., 2011. Skaldos granulių tyrimas bitumo aplinkoje. XIX Lietuvos skaičiuojamosios mechanikos asociacijos konferencija. Vilnius, 2011 m. balandžio 15 d.
- Rimša, V., Kačianauskas, R., 2011. FE simulation of viscoelastic interface between two spherical particles. Tarptautinė konferencija Optimization and Analysis of Structures, Tartu, Estija, 2011 m. rugpjūčio 25–27 d.
- Rimša, V., Kačianauskas, R., 2012. Dviejų dalelių kontakto analizė klampiai tamprioje terpėje. II-oji Jaunųjų mokslininkų konferencija: Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai, 2012 m. vasario 14 d. – laureatas.
- Rimša, V., Kačianauskas, R., 2012. Skaldos tyrimas bitumo aplinkoje. XX-oji Lietuvos skaičiuojamosios mechanikos asociacijos konferencija, Vilnius, 2012 m. balandžio 15 d.
- Rimša, V., Kačianauskas, R., 2012. Simulation of viscoelastic interface between two spherical particles. Tarptautinė konferencija Mechanika 2012, Kaunas, 2012 m. balandžio 12–13 d.
- Pilkavičius, S., Kačianauskas, R., Rojek, J., Rimša, V., 2012. Investigation of the normal contact between two spherical particles with inter-face material. Tarptautinė konferencija SolMech-2012, Varšuva, Lenkija, 2012 m. rugpjūčio 27–31 d.
- Rimša, V., Kačianauskas, R., Sivilevičius, H., 2012. Simulation of viscoelastic interface between spherical particles. Tarptautinė konferencija 7th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids CHoPS 2012. Friedrichshafen, Vokietija, 2012 m. rugsėjo 10–13 d.
- Rimša, V., Kačianauskas, R., 2013. Skaldos granulių kontakto analizė klampiai tamprioje matricoje. XX-asis Lietuvos skaičiuojamosios mechanikos seminaras, Vilnius, 2013 m. balandžio 12 d.

- Kačianauskas, R., Rojek, J., Pilkavičius, S., Rimša, V., 2013. Interaction of particles via solid interface: model and analysis. Tarptautinė konferencija III International Conference on Particle-Based Methods. Fundament and Applications Particles 2013, Štutgartas, Vokietija, 2013 m. rugsėjo 18–20 d.
- Rimša, V., Kačianauskas, R., 2014. Dalelių kompozito skaitinis tyrimas. XXI-asis Lietuvos skaičiuojamosios mechanikos seminaras, Vilnius, 2014 m. balandžio 25 d.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, literatūra ir šaltiniai, autoriaus mokslinių publikacijų sąrašas, santrauka anglų kalba ir 2 priedai.

Darbo apimtis yra 110 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 34 numeruotos formulės, 45 paveikslai, 3 lentelės. Rengiant darbą buvo panaudoti 85 literatūros šaltiniai.

Dalelių kompozitų analizės apžvalga

Šiame skyriuje pateikti literatūros šaltiniai, nagrinėjantys dalelių kompozitą, kuris mechaniniais parametrais yra artimas asfalto struktūrai. Aptartos kompozitą sudarančių elementų medžiagų savybės ir jų įtaka kompozito mechaninėms savybėms. Aprašyti kompozitų mikro- ir mezomodeliai bei jų taikymo specifika. Analizuojami kompozitams taikomi skaitiniai modeliai, apžvelgiami jų privalumai ir trūkumai. Aprašomi skaičiavimo modelio geometrijos kūrimo būdai, jų trūkumai ir privalumai. Analizuoti darbai, kuriuose taikomi kompozitų analizės metodai, kompozito skaitinio modelio kūrimo, tinkamumo įvertinimo ir taikymo asfalto tipo medžiagoms klausimai.

1.1. Kompozitai ir jų taikymas

Kompozitai – tai medžiagos, sudarytos iš dviejų ar daugiau skirtingos prigimties tarpusavyje netirpių komponentų. Išsisinis komponentas vadinamas matrica, joje pasiskirstęs komponentas vadinamas užpildu Berthelot (1999).

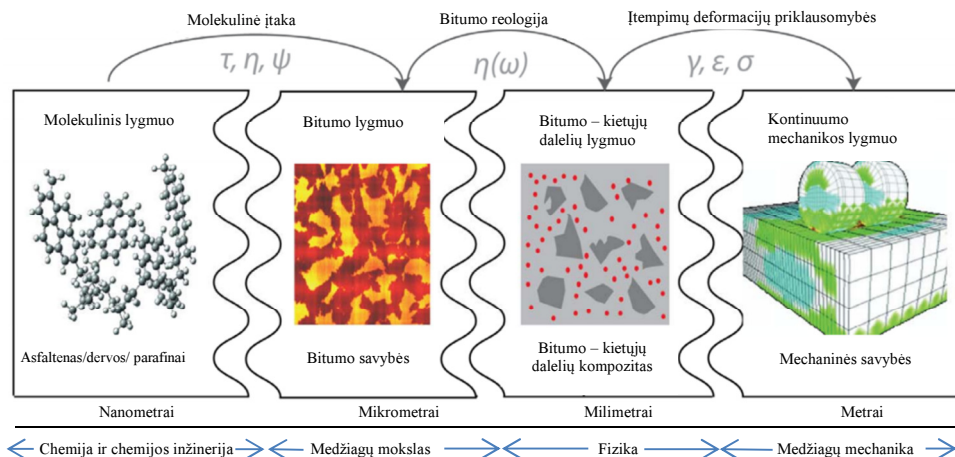
Matricos gali būti skirstomos į metalines (kurią sudaro metalas ir lydiniai) ir nemetalines (kurią sudaro keramika, polimerai, mineralai ir kita). Matricos gali būti skirstomos į vienkomponentės ir daugiakomponentes Hull ir Clyne (1996).

Matrica suriša užpildo komponentus, tolygiau išskirsto apkrovas, suteikia kompozitui formą. Paprastai matricos mechaninės savybės daugiausia lemia viso kompozito atsparumą drėgmei, šilumai, mechaninei apkrovai, įvairioms cheminėms medžiagoms Deborah ir Chung (2010).

Užpildai, arba armavimo elementai, skirstomi į polimerinius, metalinius, natūralios kilmės akmenis ir kita.

Kompozitinių medžiagų yra labai įvairių rūšių: aviacijoje taikomi anglies, stiklo pluošto kompozitai, impregnuoti epoksidine derva; statyboje – betono kompozitas, sudarytas iš skaldos ir cemento pastos; keliams tiesti – asfalto kompozitas, sudarytas iš skaldos ir bitumo mastikos. Struktūriniu požiūriu natūralus kompozitas yra mediena, kuri yra sudaryta iš celiuliozės pluošto užpildo ir lignino matricos.

Vienas iš svarbiausių kompozitų mechanikos uždavinių yra kompozito mechaninių savybių, tamprumo modulio, stiprumo, plastiškumo ir valkšnumo rodiklių nustatymas ir prognozavimas pagal kompozito sudėtį Marčiukaitis (1998). Dažnai kompozitų savybės yra anizotropinės, todėl sprendžiami sudėtingesni uždaviniai: tamprumo rodiklių, plastinio tekėjimo tenzorius nustatymas ir t.t. Yra sukurta kompozitų mechaninių savybių daug skaičiavimo metodikų. Pačios ankstyviausios ir vienos iš paprasčiausių vadinamosios Reuso (Reuss) ir Voigto (Voigt), Hašino (Hashin) ir Štrikmano (Shtrickman) metodikos, aptartos Auriault *et al.* (2009), leidžiančios apskaičiuoti kompozito, sudaryto iš dviejų medžiagų, vadinamuosius efektyvius tamprumo rodiklius: tamprumo modulį ir Puasono koeficientą.



1.1 pav. Asfalto struktūros analizės lygiai; adaptuota remiantis (Pauli 2010)
Fig. 1.1. Asphalt type materials analysis levels; adopted based on (Pauli 2010)

Viena iš tokių kompozicinių medžiagų yra asfaltas. Asfaltas, arba asfaltbetonio polidispersinė struktūra, sudaryta iš skirtingo dydžių dalelių, netolygiai pasiskirsčiusių klampioje matricoje. Asfaltas yra sudėtinga kompozicinė medžiaga, sudaryta iš nereguliaraus dydžio ir formos skaldos dalelių, kurios tarpusavyje kontaktuoja per bitumo terpę. Dėl sudėtingos vidinės struktūros asfaltą pagal dydį sąlyginai galima suskirstyti į keletą analizės lygių.

Kaip matyti iš 1.1 paveikslėlio, keičiantis nagrinėjamojo objekto masteliui, keičiasi ir tiriamasis objektas, kartu ir mokslo šaka. Šiame darbe koncentruojamasi į šiuos du lygmenis: bitumo-kietų dalelių lygmuo ir jų įtaka visos medžiagos kontinuumui. Mažesniųjų mastelių įtaka įvertinama per suvidurkintas medžiagų savybes: klampą, standumą ir kita.

Asfalto struktūros analizė yra sudėtinga, taikomi skaičiavimo modeliai nepilnai atspindi asfalto struktūros kompleksines mechanines savybes. Todėl šiame darbe naudojama sąvoka: heterogeninė klampiai tampri struktūra, apibūdinanti supaprastintą realaus asfalto modelį, kurio mechaninė elgsena yra artima realiam asfaltui, tačiau vidinė struktūra supaprastinta – tiek, kad leistų taikyti skaitinius modeliavimo metodus. Kaip matyti iš 1.1 paveikslėlio, heterogeninių klampiai tampių medžiagų analizė yra kompleksinis daugiapakopis kelių mokslo šakų analizės objektas. Asfalto atskiros sudedamosios dalys priklauso skirtingoms mokslo šakoms, kurių nagrinėjamų komponentų įtaka turi didelę reikšmę visai makrostruktūrai. Pavyzdžiui, bitumą sudarančių makromolekulių sąveika turi įtakos bitumo mechaninėms savybėms, kurios nulemia bitumo ir dalelių kontakto stiprumą. Tai savo ruožtu nulemia makrostruktūros mechanines savybes.

Asfaltas, arba asfaltbetonio polidispersinė struktūra, sudaryta iš skirtingų dydžių dalelių klampių savybių matricoje, pasižyminti netolygiu pasiskirstymu. Ilgą laiką tokių struktūrų savybės buvo aprašomos empiriškai, remiantis eksperimentiniais duomenimis. Šiuolaikinių medžiagų struktūrų analizė ir matematinio modeliavimo metodai suteikia daug naujų galimybių tiriant tokio tipo medžiagų savybes (Shashidhar, Shenoy; 2002; Schapery, R. 1999; Roberts 1996; Sepehr 1994). Modernūs nauji skaičiavimo modeliai leidžia nagrinėti medžiagų savybes ne tik makro, bet ir mezoskalėje, kurioje sąveikauja atskiros dalelės. Heterogeninės klampiai tamprios struktūros medžiagos ir polimerinės medžiagos, kurios sudarytos iš kietųjų dalelių ir minkštos matricos, gali būti vertinamos, kaip atitinkančios nagrinėjamą medžiagą. Klampiai tamprioje terpėje kietos dalelės pasiskirsčiusios netolygiai ir yra nereguliarios formos (Wang ir Birgisson 2007). Matricos (sudarytos iš bitumo ir mineralinių dulkių) mechaninės savybės labai priklauso nuo temperatūros, apkrovimo greičio ir laiko (Chailleux *et al.* 2006).

Grynai inžineriniu požiūriu, klampiai tamprios heterogeninio tipo medžiagos yra nagrinėjamos tipiniais modeliais, kuriems būdingas laipsniškas

savybių kitimas jų apkrovimo metu. Heterogeninės klampiai tamprios medžiagos liekamosios deformacijos yra viena iš pagrindinių priežasčių, formuojančių medžiagos struktūros pažaidas. Literatūroje pateikta išsami mechaninių savybių apžvalga Alavi *et al.* (2011). Taikant mechaninį-empirinį skaičiavimą, modelio tikslumas labai priklauso nuo kalibravimui naudojamų empirinių duomenų tikslumo ir kiekio. Nepaisant to, šis metodas yra plačiai naudojamas inžinerijoje, sudarant sudėtingus modelius, įvertinančius dalelių parametrų įtaką heterogeninės klampiai tamprios medžiagos makroskopiniams mechaniniams parametrų.

Heterogeninių struktūrų skaičiavimuose plačiai naudojamas inžinerinė empirika pagrįstas kontinuumo mechanikos metodas. Šiuo metodu galima įvertinti klampios terpės efektus, taip pat ir kietųjų dalelių, sąveikaujančių su rišančiąja medžiaga, atsirandančius efektus. Schaperio pasiūlytas modelis plačiai naudojamas aprašant netiesinių klampiai tampių medžiagų elgesį Schapery (2000). Tashmanas pateikė klampiai tampių modelių apžvalgą Tashman *et al.* (2005). Klampių modelių susiejimas su struktūros irimo mechanika aprašytas (Schapery 1999; Mun ir Lee 2010; Mun ir Lee 2010); jie sukūrė išplėstinį metodą, taikomą nustatyti heterogeninės klampiai tamprios medžiagos nuovargio parametrus prie žemų temperatūrų.

Dauguma minėtų tyrimų, atliktų taikant mišinių modeliavimą, rėmėsi eksperimentiniu kietųjų medžiagų modeliu (Krishnan ir Rajagopal 2004, Krishnan ir Rajagopal 2005), kuriame taikė alternatyvų metodą, pagrįstą klampaus skysčio modeliu.

Daug tyrimų taikant skaitinius metodus buvo atlikta, siekiant ištirti atskirų komponentų įtaką makroskopiniams parametrų. Dėl didelio nevienalytiškumo baigtinių elementų metodo taikymas heterogeninei klampiai tampa medžiagos struktūrai susiduria su dideliais sunkumais. Todėl skaičiavimuose naudojami dviejų tipų skaitiniai metodai, įvertinantys mikrostruktūrinius efektus ir diskrečiųjų elementų metodas. Diskrečiųjų elementų metodas paremtas kietųjų kūnų dalelių tarpusavio sąveika, kur makroskopinio modelio dalelės kontaktuoja per deformuojamos terpės elementus. Dalelių sąveika aprašoma remiantis jėgų-poslinkių lygtimis.

Taikant kitą metodą, kuriamas skaitinis modelis, kuriuo nėra siekiama tiksliai atkartoti sudėtingą heterogeninę struktūrą, o daromi sąmoningi supaprastinimai, dalelės idealizuojamos, priskiriant reguliarią paviršiaus formą ir struktūrą. Tokiu atveju daromi sąmoningi supaprastinimai leidžia suprasti kontaktuojančių dalelių mechaniką, žymiai supaprastėja uždavinys, lyginant su nereguliarios struktūros modeliu, galima geriau paaiškinti modelio geometrinių ir fizikinių parametrų įtaką heterogeninei struktūrai. Tačiau šis metodas duoda didesnes paklaidas, lyginant su aukščiau aprašytuoju metodu Mo *et al.* (2008).

Apibendrintai galima teigti, kad dabar taikomi modeliai neatspindi heterogeninės klampiai tamprios medžiagos kaip daugiakomponenčio dispersinio kompozito.

Siekiant gauti norimų mechaninių charakteristikų heterogeninę klampiai tamprią struktūrą, reikia mišiniui parinkti jo sudedamąsias dalis. Mišinio sudarymas apima jo sudėtinių dalių parinkimą, siekiant norimų tam tikrų galutinio produkto savybių. Parenkant sudedamąsias dalis, reikia žinoti atskiros medžiagos poveikį heterogeninei klampiai tampriai struktūrai. Taip pat labai didelę įtaką tokio tipo mišinio fizikinėms savybėms turi atskirų elementų erdvinis išsidėstymas.

Projektuojant heterogeninį klampiai tamprų mišinį yra svarbu nustatyti Liu *et al.* (2011):

1. Atskiros komponento įtaką mišinio fizikinėms savybėms.
2. Atskiros elemento tūrio arba santykinio svorio įtaką.
3. Sutankinimo metodo įtaką mišinio fizikinėms savybėms.

Asfalto mišinio tyrimo tradiciniai metodai, sukurti 20 a. antrojoje pusėje, orientuoti į asfalto mišinio savybių analizę, neįvertinant kiek kiekvienas komponentas įtakoja asfalto mišinio, kaip kompozito, savybes. Pavyzdžiui, Maršalo bandymo metu matuojami bandinio sutankinimo smūgiai, stabilumas, takumas, atskirai neįvertinam, kaip kiekvienas komponentas prisideda prie mišinio efektyvumo. Maršalo bandymo metodas išsamiai aptartas darbuose (White 1985, Roberts *et al.* 1996).

Asfalto struktūros norminis tarnavimo laikas yra 11–15 metų (Palšaitis ir Vidugiris 1999). Tačiau, kaip matyti iš asfaltbetonio mišinių naudojimo praktikos, jų tarnavimo amžius daug mažesnis už norminį. Todėl buvo pasiūlyta super dangos metodas (*SUPERior PERforming asphalt PAVement*), šiuo atveju įvertinamos skaldos ir bitumo mechaninės savybės, tačiau mažiau atsižvelgta į mineralinių dulkių įtaką.

Shashidhar ir Romero (1998) teigė, kad bitumo smėlio mišinys geriau suklįjuoja skaldos daleles, nei grynas bitumas. Taip pat buvo nustatyta, kad šis metodas negarantuoja reikiamų mišinio savybių plačiame transporto apkrovų ir temperatūrų ruože. Yra sukurta daug asfalto tyrimo metodikų, tokių kaip asfalto įvažinėjimas, takumas, nuovargio nustatymas. Tačiau sudėtingiausia yra nustatyti tikslų ryšį tarp išmatuotų parametrų ir asfalto mišinio tūrinių charakteristikų. Šiuo klausimu dirbo daug tyrėjų (Abu Al-Rub *et al.* 2011; Vaitkus ir Vorobjovas 2013; Wong *et al.* 2004; Chen 2001). Atlikti tyrimai rėmėsi labai ribotais eksperimentiniais duomenimis, todėl labai svarbu gerinti heterogeninių klampiai tamprų struktūrų mišinio mechaninių savybių teorinį suvokimą, norint geriau suprasti kiekvieno komponento įtaką mišinio mechanikai. Tyrėjų grupė apžvalginame straipsnyje Lui *et al.* (2011) asfalto analizės uždavinius skaido į:

1. Asfalto mišinio sudėties tyrimą.
2. Mišinio sudėties įtakos analizę, remiantis eksperimentiniais metodais.
3. Mišinio sudėties įtakos analizę, remiantis mikromechaniniais modeliais.
4. Mišinio sudėties įtakos analizę, remiantis skaitiniais modeliais.

Toks siūlomas grupavimas leidžia geriau palyginti esamus analizės metodus.

1.1.1. Dalelės ir jų savybės

Asfaltui tiesti naudojamos mineralinės medžiagos – gamtinės (natūralios) arba perdirbtos uolienos, sudarytos iš skirtingo dydžio ir formos grūdelių ar gabalų. Gamtinės medžiagos: akmuo, rieduliai, žvyras, smėlis.

Perdirbtos medžiagos: akmens, frakcinė, riedulių, sodrinta ir žvyro skalda, frakcinis žvyras, gargždas, skaldytas ir sodrintas žvyras, žvirgždas, atsijos, frakcinės atsijos, frakcinis smėlis, skaldos ir sodrintos atsijos, sodrintas smėlis, žvyro atsijos, mineralinės dulkės.

Žvyras – biri nuosėdinė klasikinė uoliena. Jis yra sudarytas iš labai įvairaus skersmens grūdelių ir nuotrupų. Vyrauja smėlio (0,02–2 mm), žvirgždo (2–20 mm) ir gargždo (10–100 mm) dalelės, dažnai būna didelių riedulių ir aleurito bei molio dalelių priemaišų. Smėlis – nuosėdinė klastinė psamitų grupės uoliena. Susideda iš 50–60 % 0,05–2 mm skersmens įvairios formos (kampuotų, apzulinčių) mineralų grūdelių, daugiausia kvarco, feldšpatų, žėručių. Būna balkšvas (daugiausia priklauso nuo kvarco kiekio); kitokias spalvas lemia priemaišos. Smėlis birus, aktytas (aktyumas 26–49 %). Tankis 2120–2900 kg/m³.

Granitas – magminių intrūzinių uolienų grupė. Susidaro kontinentinėje dalyje veikiant dideliame slėgiui ir temperatūrai. Yra daug granito rūšių, tai priklauso nuo sudedamųjų medžiagų santykio: kvarco, lauko špato, žėručio. Priklausomai nuo feldšpatų ir kvarco santykio, granito kietumas pagal Moso skalę skiriasi, kuris gali būti nuo 5,5 iki 7.

Kietoji frakcija asfalto mišinyje pagal dydį klasifikuojama į skaldą, smėlį ir mineralines dulkes. Kietųjų dalelių granulimetrinė sudėtis asfalto mišiniuose varijuoja nuo 15–17 mm iki dalelių, mažesnių nei 1 μm dydžio. Todėl yra svarbu tiriant mišinius grupuoti daleles pagal jų dydį. Šiuo metu yra paplitę keli skaldos klasifikavimo metodai, vienas iš jų yra Bailey metodas Vavrik *et al.* (2002). Prie stambių priskiriamos tos dalelės, kurios sukuria tarpus, smulkioms dalelėms priskiriamos tos, kurios užpildo stambių dalelių sukurtus tarpus. Klasifikuojant daleles Bailey metodu smulkios ir stambios frakcijos dalelės priklauso nuo nominalios dalelės dydžio. Amerikos medžiagų bandymų draugija (ASTM) naudoja metodiką, pagal kurią stambia skaldos frakcija vadina tas kietąsias daleles, kurias sulaiko tinkas Nr. 4, kurio akių dydis 4,75 mm. Smulkią skaldos frakciją sulaiko tinklas Nr. 200, kurio akių dydis 75 μm.

Bitumo ir mineralinių dulkių mišinys vadinamas mastika. Buvo nustatyta, kad asfalto mišinio rišančioji medžiaga yra ne grynas bitumas, o bitumo ir mineralinių dulkių mišinys Anderson *et al.* (1992). Tai yra, bitumo mastika, kaip atskiras elementas, asfalto mišinyje sąveikauja su didesnėmis skaldos dalelėmis (smėliu ir skalda). Tai patvirtino ir kiti tyrėjai Kim ir Little (2004).

Mohamed ir Hansen (1999a) straipsnyje pasiūlė tikimybinį mikromechaninį modelį, kuriame dalelės mikrolygmenyje nagrinėjamos kaip santvaros elementai, o asfalto vidinė struktūra sudaryta iš dalelių ir matricos.

Kiti mokslininkai mano, kad smulkios dalelės su mineralinėmis dulkėmis ir bitumu veikia kaip vientisa medžiaga, kontaktuojant su stambiomis dalelėmis Dai ir You (2007). Buvo nustatyta, kad asfalto mišinys yra stambių skaldos granulių sambūris, apvilktas bitumo mastika, kuri sudaryta iš smulkių skaldos granulių ir mineralinių dulkių mišinio. Atlikta daug darbų, kuriuose tirta skaldos dalelės, tačiau mikrolygmenyje dar nėra pakankamai aiški dalelių sąveikos mechanika.

Natūriniai eksperimentai plačiai taikomi asfalto charakteristikų tyrimui, tačiau dėl jo kompleksiško yra sunku nustatyti santykį tarp komponentų mechaninių savybių ir asfalto kompozito. Nepaisant šio trūkumo, daug bandymų atlikta. Šių bandymų pradininkai Nicholson (1927), Puzinauskas (1964), Masad *et al.* (2001) siekė nustatyti ryšį tarp dalelių morfologinių parametrų ir asfalto dangos mechaninių savybių.

Li *et al.* (2008) tyrė regeneruotos asfalto dangos mechaninius parametrus. Šių ir kitų tyrėjų atlikti darbai leidžia teigti, kad dalelės paviršiaus tekstūra, oro tarpelių dydis ir išsidėstymas, taip pat ir dalelių tarpusavio padėtis turi didelę įtaką liekamosioms asfalto dangos deformacijoms.

1.1.2. Matricos plėvelė

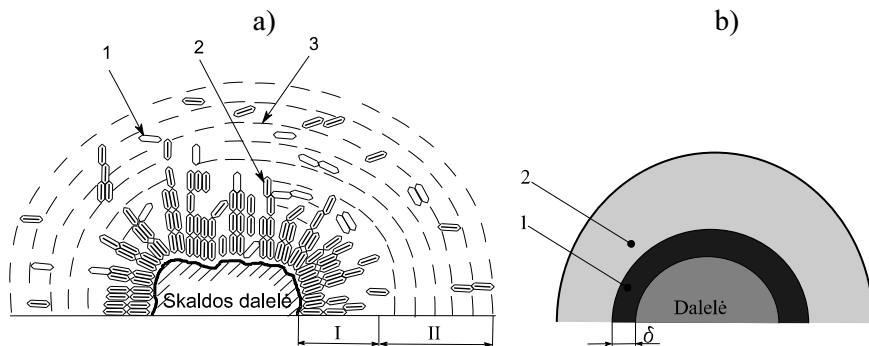
Šiame lygmenyje mechaninės savybės yra nustatomos iš netiesioginių eksperimentų, kurių rezultatai suvidurkinti. Bitumo savybės yra netolygios, kadangi bitumo struktūrą sudarantys elementai yra išsidėstę netolygiai, prie skaldos dalelės susitelkia polinės asfaltenų molekulės.

1.2 paveiksle pateikta mikrolygmenyje esančių elementų išsidėstymo apie dalelę schema, kurioje asfaltenai, supantys dalelę, suformuoja orientuoto bitumo sluoksnį, kurio storis, savybės ir įtaka makromodelio standumui nėra iki galo ištirta.

Orientuoto bitumo storis apskaičiuojamas pagal Koroliovo pateiktą formulę Koroliov (1986):

$$\delta = BD^m, \quad (1.1)$$

čia δ – orientuoto bitumo storis μm ; B – parametras, priklausantis nuo granulės medžiagos; granitui $B = 11$; $m = -0,84$; kalkakmeniui $B = 10,3$; $m = -0,82$; kvarciniam smėliui $B = 8,2$; $m = -0,72$; D – granulės skersmuo.



1.2 pav. Tipinis bitumą sudarančių elementų išsidėstymas apie skaldos dalelę Koroliov (1986) kur: a) mikromastelyje esančių elementų išsidėstymas apie skaldos dalelę, čia 1 – dervos; 2 – asfaltenai; 3 – parafinai; zonos: I – orientuoto bitumo, II – laisvo bitumo zona. b) supaprastintas geometrinis modelis, dengiantis dalelę, kur: 1 – matricos plėvelė; 2 – matrica

Fig. 1.2. The heterogenic bitumen elements distribution around a particle by Koroliov (1986) where: a) detailed elements structure, where 1 – resins, 2 – asphaltenes; 3 – saturates; I – bitumen film zone; II – free bitumen zone; b) 1 – matrix film layer; 2 – the matrix

Kitame šaltinyje (The Shell Bitumen Handbook, Fifth Edition 2003) pateikiama orientuoto bitumo storio skaičiavimo formulė:

$$\delta = \frac{b}{100-b} \times \frac{1}{p_b} \times \frac{1}{SAF}, \quad (1.2)$$

čia δ – orientuoto bitumo storis mm; b – bitumo procentinė dalis asfalto mišinyje %; p_b – bitumo tankis kg/m^3 ; SAF – paviršiaus ploto koeficientas m^2/kg .

Kitas skaičiavimo metodas naudojamas Prancūzijoje, šios šalies standartas (Norme Française. Couches d'asis: Enrobé à élevé 1991):

$$\delta = \frac{b}{a \times \sqrt[5]{\Sigma}}, \quad (1.3)$$

čia δ – orientuoto bitumo storis mm; b – bitumo procentinė dalis asfalto mišinyje %; a – koreliacijos koeficientas; Σ – skaldos dalelių paviršiaus santykinis plotas apskaičiuojamas:

$$\Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 135f, \quad (1.4)$$

čia G – skaldos dalelių, didesnių nei 6,3 mm procentinė masės dalis; S – skaldos dalelių tarp 6,3 mm ir 3,15 mm procentinė masės dalis; s – skaldos dalelių tarp 3,15 mm ir 0,80 mm procentinė masės dalis; f – skaldos dalelių, mažesnių nei 0,80 mm, procentinė masės dalis.

Skaiciavimai pagal lygtis (1.2) ir (1.3) parodė, kad orientuoto bitumo storis realiame asfalte varijuoja tarp 4,5 ir 12 μm . Panašius orientuoto bitumo storius nurodo ir autoriai Sengoz ir Agar (2007), kur orientuoto bitumo storis svyruoja tarp 4,5 ir 11,5 μm . Kitame darbe Burak ir Agar (2007) nurodo orientuoto bitumo storį 4,9 ir 11,4 μm .

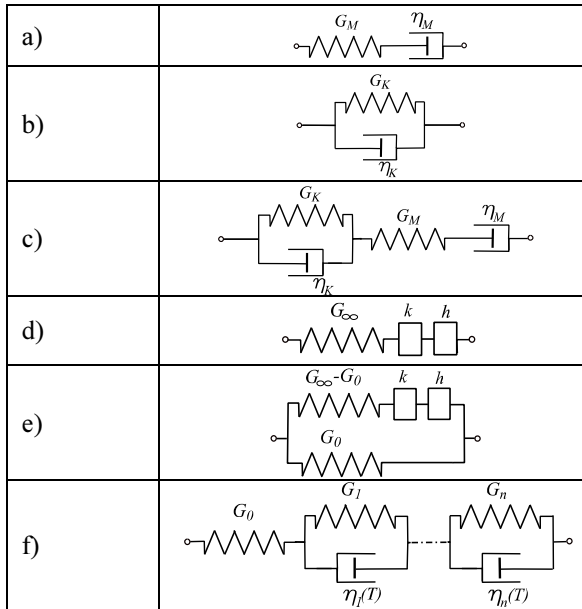
Autoriai Kandhal ir Chakraborty (1996) savo darbe teigia, kad orientuoto bitumo standumas yra nuo dešimties iki trisdešimties kartų didesnis nei laisvo bitumo. Kiti autoriai Sengoz ir Burak (2007) teigia, kad standumo skirtumas gali siekti iki šimto kartų. Orientuoto bitumo tamprumo modulis yra artimesnis kieto kūno – skaldos dalelės tamprumo moduliui, jo įtaka sąveikos stiprumui ir standumui nėra pakankamai ištirta. Orientuoto bitumo tamprumo modulį išmatuoti yra sudėtinga, literatūroje autorių nurodomos vidutinės apskaičiuotos reikšmės, tačiau bitumas gali būti pagamintas iš įvairių naftos rūšių, kurių cheminė sudėtis gali smarkiai skirtis, o tuo pačiu gali skirtis orientuoto bitumo tamprumo modulis ir plėvelės storis. Todėl svarbu ištirti, kokią įtaką daro skaldos dalelių kontaktui orientuoto bitumo tamprumo modulis. Orientuoto bitumo storis priklauso nuo skaldos dalelės dydžio – kuo didesnė skaldos dalelė, tuo storesnis orientuoto bitumo sluoksniu.

Šiame darbe vietoj sąvokos bitumo plėvelė bus vartojamas terminas matricos plėvelė, kurios geometrinis modelis pateiktas 1.2 b paveiksle; šiame darbe bus tiriama matricos plėvelės storio δ ir tamprumo modulio E įtaka mezo- ir makromodelio mechaniniam standumui.

1.2. Reologiniai modeliai

Asfalto mišinio skaldą suklįjuojanti bitumo matrica pasižymi netiesinėmis klampiai tamprėmis mechaninėmis savybėmis, dideliu jautrumu apkrovos greičiui, temperatūrai. Tokio tipo medžiagas nagrinėja reologija. Remiantis šios mokslo šakos sudarytais modeliais, galima nagrinėti tarpinius medžiagų modelius, esančius tarp klasikinės kieto kūno ir niutoninių skysčių mechanikos. Tokiu būdu sudaromi matematiniai modeliai, kuriais remiantis galima atlikti skaičiavimus nustatant medžiagos elgseną, priklausomai nuo mikro- arba nanomedžiagos struktūros. Asfalto struktūroms charakterizuoti dažniausiai taikomi Maksvelo ir Biurgerso modeliai. Jie idealizuoja realią bitumo elgseną, tačiau taikant šiuos modelius jų paklaidos nėra vyraujančios skaitiniame

eksperimente. Šie modeliai turi žymius struktūrinius skirtumus. Biurgerso modelis gerai įvertina liekamasias deformacijas, kai tuo tarpu Maksvelo modelis su taikoma Proni eilute įvertina medžiagos savybes kaip visada tamprias, kurios siekia grąžinti medžiagą į pradinę formą net ir po labai ilgai išlaikytos apkrovos. Maksvelo modelio privalumas yra tas, kad galima nepriklausomai įvertinti tūrinį ir tangentinį modulį. Taip pat taikant šį modelį tūrinis modulis gali būti klampiai tamprus, kai tuo tarpu šlyties modulis tamprus. Biurgerso modelio atveju, tamprumo modulis yra klampiai tamprus, tai lemia, kad ir tūrinis, ir tamprumo moduliai yra klampiai tamprūs. Taikant Biurgerso modelį yra galimybė kisti medžiagos tūriui, kai tuo tarpu Maksvelo modelyje tai neįmanoma dėl didelės ir pastovios tūrinio modulio skaičiaus reikšmės. Klampiai tamprioms medžiagoms analizuoti yra sukurta nemažai modelių, dažniausiai naudojami pateikti 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Tipiniai reologiniai modeliai, kur: a) Maksvelo; b) Kelvino; c) Biurgerso; d) Hueto; e) Hueto-Sayeghos; f) Di Benetto ir Neifar (DBN)

Fig. 1.3. Typical rheological models, where: a) Maxwell; b) Kelvin; c) Burgers; d) Hueto; e) Hueto-Sayegho; f) Di Benetto and Neifar (DBN)

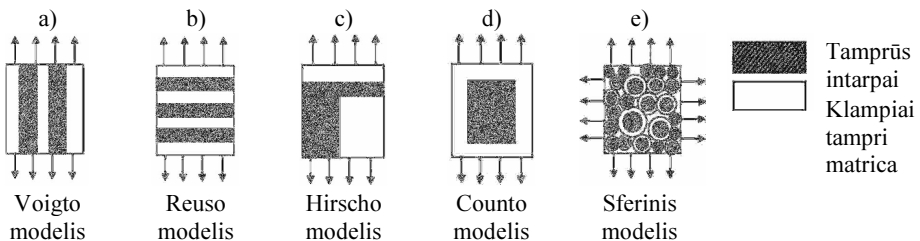
Čia G ir η yra atskiro modelio pastovaus standumo ir nuo laiko priklausančios klampos (standumo) koeficientai; elementai (k ir h).

Maksvelo modelio privalumas yra tas, kad galima nepriklausomai įvertinti tūrinį ir tangentinį modulį. Taip pat taikant šį modelį tūrinis modulis gali būti klampiai tamprus, kai tuo tarpu šlyties modulis tamprus. Biurgerso modelio atveju, G modulis yra klampiai tamprus, tai lemia, kad ir tūrinis, ir tamprumo moduliai yra klampiai tamprūs. Taikant Biurgerso modelį yra galimybė kisti medžiagos tūriui, kai tuo tarpu Maksvelo modelyje tai neįmanoma dėl didelės ir pastovios tūrinio modulio skaičiaus reikšmės.

Šiame darbe klampiai tamprioms medžiagos savybėms aprašyti bus taikomas Maksvelo modelis. Detalesnis šio modelio aptarimas pateiktas antrajame skyriuje. Modeliai 1.3 d; 1.3 e ir 1.3 f paveiksluose autoriaus Monismith *et al.* (1966) teigimu, yra geriau tinkantys asfalto ir bitumo netiesinei sąveikai aprašyti, tačiau šiems modeliams aprašyti reikia daugiau parametrų, taip pat kiekvieno modelio panaudojimo tikslingumas priklauso nuo keliamo uždavinio. Šie modeliai pateikti kaip galima alternatyva panaudotam Maksvelo modeliui.

1.3. Mikromechaniniai modeliai

Dviejų fazių kompozitų teorija, aptariant naudojamus modelius, išsamiai aprašyta Aboudi (1991) knygoje (1.4 pav.).



1.4 pav. Mikromechaniniai modeliai; paimta iš Aboudi (1991)

Fig. 1.4. Micromechanical models by Aboudi (1991)

Labiausiai paplitę mikromechaniniai modeliai yra Voigt (1889); Reuss (1929) modelis; Christensen (1979), Christensen ir Lo (1979); kompozitinis-sferinis modelis Hashin (1965); supaprastinta nuosekli schema Christensen ir Lo (1979) ir kiti.

Buttler ir You (2001) mikromechaninius modelius klasifikavo taip:

1. Modeliai su nesąveikaujančiomis dalelėmis, neapibrėžtos geometrijos (Voigt 1889, Reuss 1929);

2. Modeliai su nesąveikaujančiomis dalelėmis, apibrėžtos geometrijos (Hirsch 1962, Christensen ir Lo 1979);
3. Modeliai su sąveikaujančiomis dalelėmis, baigtinių elementų ir diskrečiųjų elementų metodai.

Modeliai be sąveikaujančių dalelių pasižymi paprastumu, bet kompleksinei asfalto struktūrai sunkiai pritaikomi, kadangi pasižymi didelėmis skaičiavimo paklaidomis. Siekiant juos panaudoti praktiškai, reikia atlikti šių modelių kalibravimą, remiantis, eksperimentiniais duomenimis. Trečiajai grupei priskiriami modeliai pasižymi mažomis paklaidomis, tačiau didžiausias jų trūkumas yra ilgai trunkantis skaitinio modelio paruošimas ir skaičiavimo procesas. Vienas iš galimų sprendimo būdų, norint supaprastinti skaičiavimo modelį, reikia atlikti išsamią analizę mažos, iš kelių dalelių sudarytos sistemos, kurioje būtų galima patikrinti visų galimų sistemą sudarančių medžiagų ir geometrinių parametrų įtaką šios sistemos makroparametrus. Pagal pasirinktus kriterijus mažai svarbių parametrų įtakos visai nevertinti, kitų svarbesnių parametrų įtaką įvertinant koeficientais ar kitais būdais.

1.4. Skaitiniai modeliai

Mechanikoje taikomi du tipiniai metodai, siekiant nustatyti įtempimų-deformacijų funkciją: a) modelis su sąveikaujančiomis dalelėmis (mikromechaninis); b) kontinuumo.

Mikromechaninio modelio atveju kūno mechanines savybes nulemia struktūros defektai, tokie kaip mikro įtrūkimai, dalelių orientacija, sudedamųjų dalių pasiskirstymas ir kita. Šiems parametrams įvertinti naudojami įvairūs modeliai, pavyzdžiui, mikro įtrūkimų plitimo modelis. Tokiu atveju asfalto struktūros įtempimų ir deformacijos funkcijos tyrimas atliekamas su idealizuotu reprezentatyviuoju tūriu, siekiant nustatyti mikrostruktūros defektų įtaką makrostruktūrai. Tokį analizės metodą sudėtinga naudoti dėl asfalto struktūrai būdingos kompleksinės mikrostruktūros ir dėl struktūros tūryje esančių defektų tarpusavio sąveikos. Todėl, neatlikus tinkamų modelio supaprastinimų, skaičiavimo rezultatai blogai koreliuoja su eksperimentiniais duomenimis Park *et al.* (1996).

Asfalto mišinys yra labai sudėtingos struktūros, todėl taikant supaprastintus skaičiavimo modelius, kai nepakankamai įvertinama asfalto struktūra, gauti rezultatai nėra tikslūs.

Būtina skaitinius rezultatus kalibruoti, neįvertinama lokali atskirų elementų sąveika. Naudojant šiuolaikinius kompiuterius vis daugiau inžinerinių uždavinių sprendžiama jų pagalba, vienas iš tokių yra asfalto struktūros uždaviniai, kai

įvertinama bitumo klampiai tamprios savybės, nereguliari skaldos geometrija. Tokie uždaviniai paprastai sprendžiami BEM ir DEM metodais.

1.4.1. Baigtinių elementų metodas

Tai skaitinis metodas, kuris leidžia rasti diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis ar integralinių lygčių apytikslius sprendinius. Metodo esmė – skaičiuojamoji sritis suskaidoma į dalis (baigtinius elementus). Tada daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomas kinta nesudėtingu dėsniu ir diferencialinė lygtis pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų sistemas gaunama bendra sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas Barauskas *et al.* (2004). Šis metodas buvo sukurtas kompleksiniams uždaviniams spęsti, pirmiausia jis buvo pradėtas naudoti branduoliniėje pramonėje ir aviacijoje.

Sulipusias medžiagas baigtiniais elementais pirmasis pradėjo nagrinėti Stankowski (1990). Sepehr *et al.* (1994) pradėjo nagrinėti asfalto kompozitą, Soares *et al.* (2003) sukūrė kohezinį mikromechaninį asfalto irimo modelį.

Baigtinių elementų metodu atliekant analizę sukuriamas baigtinių elementų tinklas, kuris reprezentuoja atskirų granulių ir heterogeninės medžiagos mechaninį elgsenos modelį (Bazant *et al.* 1990, Mora 1992; Sadd ir Gao 1998).

Svarų indėlį įnešė Sepehr (1994); šiame darbe skalda buvo nagrinėjama kaip elastinga, atsitiktinės geometrinės formos ir atsitiktinai išsibarsčiusi, padengta elastingu bitumo sluoksniu. Gauti skaičiavimo rezultatai parodė, kad mikrostruktūrinis baigtinių elementų tinklo skaičiavimo metodas yra žymiai tikslesnis, nei naudojant tiesinį tinklą.

Guddati *et al.* (2002) sukūrė atsitiktinės gardelės modelį, kurį taikant galima atlikti asfalto mikro irimo analizę. Bahia (1999) naudodamas supaprastintą asfalto mišinio modelį nustatė, kad šlyties deformacijos asfalto mišinyje yra žymiai didesnės, nei asfalto tūrinės deformacijos.

Kose *et al.* (2000) skaičiavo asfalto deformacijas naudodamas skenuotus realaus asfalto atvaizdus. Nustatė, kad bitumo deformacijos gali būti iki 1,8 karto didesnės, nei bitumo mastikos; taip pat nustatė, kad tūrinės bitumo deformacijos yra vidutiniškai nuo 7,8 iki 510 kartų didesnės, nei asfalto struktūros.

Masad *et al.* (2001) lygino eksperimentų metu gautus rezultatus su baigtinių elementų programa apskaičiuotais deformacijų pasiskirstymais asfalto struktūroje. Baigtinių elementų modelius bandyta kurti kiek įmanoma artimesnius geometrinių parametrų realiems bandiniams. Buvo nustatyta, kad bitumo mastikos deformacija yra iki 4 kartų didesnė, nei asfalto, tuo tarpu bitumo deformacija yra iki 3 kartų didesnė nei bitumo mastikos deformacija.

Papagiannakis *et al.* (2002) pirmasis pradėjo taikyti bitumui reologinius modelius, kuriais buvo tiesiškai įvertinama bitumo klampiai tamprios savybės.

Sadd (2003) pradėjo taikyti irimo modelį asfalto mikrostruktūros modeliui, gauti rezultatai parodė gerą skaitinio ir natūrinio modelio koreliaciją.

Abbas *et. al* (2004) pradėjo naudoti netiesinius klampiai tamprią bitumo elgseną aprašančius reologinius modelius, buvo sukurtas metodas, leidžiantis kisti medžiagos savybių parametrams kintant medžiagos įtempimams.

Asfalto struktūrai nagrinėti, taikant baigtinių elementų metodą yra keli galimi būdai.

Kai naudojamas kontinuumo modelis, asfalto struktūros sąveika atkartojama taikant suvidurkintas asfalto mechanines savybes, ir atskiram elementui bei mazgui priskiriamos standumo, klampumo, netiesinio klampumo, irimo ir kitos savybės. Šis metodas pritaikytas darbuose: (González *et al.* 2007; Abu Al-Rub *et al.* 2011). Jis gerai tinka nagrinėti asfalto standumą, irimą, įvažinėjimą. Skaitiniai rezultatai leidžia pasiekti artimus eksperimentiniams. Taikant šį metodą reikalingi santykinai nedideli skaičiavimo technikos pajėgumai, šis metodas buvo vienas iš pirmųjų, pritaikytų asfalto struktūros analizei.

Pagrindinis šio metodo trūkumas yra tas, kad kontinuumo modelio rezultatų panašumas pasiekiamas ne atkartojant geometrijos viduje vykstančius procesus, o sukalibruojant mechaninį modelį. Tokiu būdu pasikeitus sudėčiai reikia naujai sukalibruoti skaitinį modelį.

Tobulėjant skaitinei technikai buvo pasiūlytas realaus bandinio tikslią struktūrą atkartojantis metodas, kur skaitinis modelis sukurtas naudojantis skaitmeniniu fotoaparatu, skeneriu ar rentgeno spinduliais (Masad *et al.* 2005, Wang ir Birgisson 2007). Nuskenuotas realus bandinys konvertuojamas į baigtinių elementų ar diskrečiųjų elementų struktūras. Kose *et al.* (2000) aprašė išsamų taikymą ir skaitmeninio modelio kūrimą. Dai ir You (2007) aptarė naujausius šio metodo taikymus, skirtus baigtinių elementų metodui; tuo tarpu Liu *et al.* (2008) aprašė šio metodo taikymą diskretiesiems elementams.

Didžiausias šio skaitinio modelio kūrimo privalumas yra santykinai aukštas realaus bandinio struktūros atkartojimas. Taikant šį metodą galima labai tiksliai įvertinti vidinių asfalto defektų (oro tuštumų, nepadengtos bitumu skaldos ir kita) įtaką pažaidų susidarymui (trūkio formavimuisi, trupėjimui, įvažoms ar kita). Pagrindinis šio metodo privalumas – tai galimybė susieti struktūros mikro- ir mezodefektus su makroskopiniais mechaniniais parametrais; žinant makromodelio jautrumą mikro- ir makrodefektams galima tikslinti asfalto mišinio maišymo, klojimo procesus.

Šio geometrijos kūrimo metodo esminis trūkumas – ilgas skaičiavimo laikas; sudėtingas bandinio geometrinių ir mechaninių parametų koreliacinio

ryšio nustatymas. Daugiau pavyzdžių, naudojančių šį skaičiavimo metodą, galima rasti publikacijose (Sadd 2003; Guddati *et al.* 2002).

Vienas iš perspektyviausių geometrijos kūrimo metodų yra taikant suvidurkintas dalelių dydžio ir bitumo storio geometrinių parametrų reikšmes. Šis metodas pritaikytas darbuose: (Bahia 1999; Mo *et al.* 2008; Sadd, 2003, Sadd, 2003; Tian 2007; Liu *et al.* 2008).

Taikant šį metodą dalelės paprastai nagrinėjamos kaip sferos, padengtos tolygiu bitumo sluoksniu, tokiu atveju makromodelio struktūros standumas yra atskirų suvidurkintų dalelių kontakto standumų suma. Tokiu būdu, esant kitai asfalto mišinio granulimetrinei sudėčiai ir bitumo kiekiui, keičiasi vidutinis dalelės dydis ir bitumo mastikos sluoksnis, kartu keičiasi ir visos struktūros standumas.

Šio metodo esmė yra analizuoti struktūrą sudarant kompleksinį modelį, sudarytą iš tipinių vienodo dydžio dalelių; vienas iš galimų dalelės dydžio apskaičiavimo metodų pateiktas Mo *et al.* (2008). Šiame darbe buvo skaičiuotas didesnių nei 2 mm skersmens dalelių vidutinis dydis, papildomai lyginant skaitinio modelio ir realaus asfalto procentinį oro tuštymų tūrį.

Tokiu būdu sąmoningai suprastinus skaitinį modelį gaunamos didesnės paklaidos, lyginant su anksčiau aptartuoju modeliu, kuris remiasi detaliu vidinės struktūros atitikimu realiai asfalto struktūrai. Tačiau šiuo atveju galima tikslai įvertinti atskirų struktūrą sudarančių elementų geometrinių ir mechaninių parametrų įtaką makroskopiniui modelio standumui.

1.4.2. Diskrečiųjų elementų skaičiavimo metodas

Diskrečiųjų elementų metodu (DEM) skaičiuojamas dalelių judėjimas taikant Niutono lygtis. Bendruoju atveju taikant DEM metodą aprašomas kiekvienos dalelės normalinės, tangentinės, kontakto sąveikos. Taikant iteracinį skaičiavimo metodą ir dalelių kontakto paieškos algoritmus, perskaičiuojamas kiekvienos dalelės poslinkis, tokiu būdu gaunamas visos sistemos standumas. Šiuo metu tai plačiausiai taikomas metodas skaičiuojant sferines ir nereguliarios struktūros daleles, kurios asfalto struktūros analizės atveju yra padengtos bitumo mastika.

Kuomet DEM taikomas asfalto struktūrai modeliuoti, atsiranda papildomų kontakto sąveikų – be normalinės ir tangentinės sąveikos – atsiranda sukimas ir grynasis lenkimas. Taip pat labai svarbu įvertinti asfalto struktūros netiesiškumus:

- a) netiesinės medžiagų savybės;
- b) netiesinę sąveiką tarp skaldos dalelių ir bitumo (taip pat ir galimybė ryšiams nutrūkti);
- c) netiesinius ryšius tarp gretimų dalelių;
- d) oro tarpus ir jų išsidėstymus.

Vieni pirmųjų, pradėjusių naudoti šį metodą, buvo Meegoda ir Chang (1993). Šiuo skaičiavimo metodu (ASBL modelis) asfalto struktūra modeliuojama kaip skaldos sferos, padengtos klampiai tampriu bitumo sluoksniu, kuriam galima priskirti Maksvelo, Kelvino-Voigto ar Biurgerso reologinius modelius. Taikant pasiūlytą DEM skaičiavimo metodiką, galima įvertinant apkrovos ir temperatūros įtaką; gauti rezultatai gerai atitiko eksperimentinius duomenis.

Šio skaičiavimo modelio trūkumai:

- a) negalima pasirinkti nepastovaus dalelės dengiančio bitumo storio;
- b) negalima įvertinti deformacijų, atsirandančių skaldos granulėse ir bitume;
- c) negalima įvertinti mineralinių dulkių geometrijos parametrų ir procentinio pasiskirstymo bitumo matricoje įtakos makromodelio standumui.

Buttlar ir You (2001) pasiūlė mineralinių dulkių įtaką įvertinanti skaičiavimo modelį MDEM, kuriame kietos dalelės skirstomos į stambias, smulkias ir mineralines dulkes. Smulkios dalelės su mineralinėmis dulkėmis integruotos į bitumo mišinį. Lyginant ASBL modelį su MDEM modeliu, jame įvertinamos skaldos morfologinės charakteristikos, tokios kaip forma, kampuotumas, taip pat stambiųjų dalelių galimos deformacijos ir įtempimai.

Kitas alternatyvus modelis yra klampiųjų dalelių metodas (dvimačiai ir trimačiai modeliai; PFC2D ir PFC3D); šie modeliai sukurti komercinių programų paketo pagrindu. Šiame modelyje kiekvienas kontaktas sudarytas iš trijų dalių: standumo, slydimo ir sukibimo modelių. Standumo dalis aprašo kontakto standumą, slydimo dalis – santykį tarp normalinių ir tangentinių jėgų, sukibimo dalis aprašo normalinius ar tangentinius įtempimus, kuriuos kontaktas gali įvertinti. Naudojant MDEM modelį galima priskirti skirtingus standumo parametrus, tačiau skaičiuojant naudojantis PFC2D ir PFC3D modeliais paprastai naudojamas tiesinis kontakto standumas You ir Buttlar (2005). Šie skaičiavimo metodai paprastai užima labai daug laiko, todėl taikomos įvairios metodikos trumpinti skaičiavimo laiką (superpozicijos principas, taikomas temperatūrai ir apkrovoms) (Liu *et al.* 2008; You *et al.* 2011; Liu *et al.* 2012).

Kitas metodas yra vartotojo sukurtas geometrinis modelis, leidžiantis minimalizuoti skaičiuojamo modelio trūkumus, pavyzdžiui, norint įvertinti skaldos dalelių formos įtaką asfalto stiprumui, reikia minimalizuoti oro tarpelių, skaldos granuliu orientacijos įtakas (Tian 2007, You *et al.* 2008). Naudojantis skenuotais bandiniais išgryninti nagrinėjamą geometrijos įtaką yra sunkiau, o kartais ir neįmanoma.

Skaičiavimo su DEM trūkumai Lui *et al.* (2011):

- Daugelis tyrėjų naudoja DEM asfalto standumui įvertinti, tačiau per mažai gilinamasi į vidinės asfalto struktūros įtaką jo mechaniniams parametrams.

- Dauguma DEM modelių geba įvertinti asfalto mikrostruktūroje esančių mineralinių dulkių ir mezomastelyje esančių oro tarpelių įtaką makroskopiniams asfalto mechaniniams parametrams, tačiau jų reali mechaninė įtaka nėra pakankamai ištirta.
- Nepakankamai įvertinamas Puasono koeficiento dydis Lui *et al.* (2011), tačiau tai labai svarbus parametras, leidžiantis tiksliau įvertinti įtempimus ir deformacijas horizontalia kryptimi.

Atskiras diskretizavimo atvejis yra taikant strypų elementus, kai dviejų dalelių standumo sąveika įvertina per atskiros strypo standumą. Plačiausiai taikomi strypų modeliai yra Oilerio-Bernulio ir Timoshenko (1921). Diskretizavimą strypiniais elementais, kai strypai sistemoje patiria dideles deformacijas, aptarė Argyris (1982), Ostoja-Starzewski (2002) aprašė nehomogeninių struktūrų analizės metodą taikant strypinius modelius. Rena *et al.* (1999) analizavo strypinių sistemų taikymą praktiniams inžineriniams uždaviniams. Kadangi šiame darbe tiriamas objektas yra dalelių kompozitas, pavyzdžiui, asfaltas, tai leidžia supaprastinti nagrinėjamą problemą; ši tema iš dalies aptarta Ostoja-Starzewski (2002) darbe, kur teigiama, kad dalelių kompozite vyrauja normaliniai įtempimai, atskirų dalelių pasisukimai yra labai maži, todėl jų galima nepaisyti.

Toliau tobulinant šį geometrijos paruošimo metodą, dalelių dydį galima segmentuoti į atskirus pogrupius. Viena iš priežasčių yra ta, kad Mo *et al.* (2008) darbe mažesnių dalelių nei 2mm įtaka buvo įvertinta padidinant bitumo mastikos standumą, tačiau mastikos kaip kontinuumo ir realaus bitumo su dalelėmis mechaninės savybės gana žymiai skiriasi.

Skaiciavimo metodai ir modeliai Lui *et al.* (2011):

- Paprastai taikomi metodai skaičiavimo geometrijai sukurti: 1. Naudojama atsitiktinės formos ir atsitiktinio išsibarstymo skaldos dalelės; 2. Naudojama bitumo sluoksniu padengtos sferinės dalelės; 3. Naudojami skenuoti (fotografuoti) realaus asfalto modeliai.
- Baigtinių elementų modeliai taikomi: 1. Asfalto standumui skaičiuoti; 2. Nustatyti lokalias deformacijas; 3. Asfalto irimui modeliuoti; 4. Asfalto standumo anizotropijai įvertinti.
- Asfalto mikrostruktūros analizei naudojami: 1. Tamprūs modeliai; 2. Tiesiniai ir netiesiniai klampiai tamprūs modeliai; 3. Irimą įvertinantys modeliai; 4. Klampiai tampriai plastiniai modeliai ar klampiai tampriai – klampiai plastiniai modeliai.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados

Didėjantys reikalavimai asfalto dangoms parodė, kad nebeužtenka fiziniais eksperimentais pagrįstų kompozitų analizės metodų, vis didesnę reikšmę įgyja skaitiniai analizės metodai, leidžiantys geriau suprasti dalelių kompozito struktūros mechaninę elgseną, ją prognozuoti ir tobulinti. Apžvelgus taikomus skaitinius modelius suformuotos tokios išvados:

1. Taikant tolydaus kontinuumo modelį, vidinės kompozito mechaninės savybės apibūdinamos suvidurkintomis mechaninių savybių reikšmėmis. Sprendžiant šį uždavinį BEM nustatomos suvidurkintos būvio kintamųjų reikšmės. Šis požiūris leidžia žymiai supaprastinti skaitinį modelį, tačiau neatspindi mikro- ir mezo savybių diskretaus pobūdžio, o rezultatus būtina kalibruoti remiantis fiziniais eksperimentais.

2. Kompozitines medžiagas galima modeliuoti BEM kaip heterogeninį kontinuumą, išsamiai apibūdinat atskirus struktūros komponentus. Toks analizės būdas dėl sudėtingos dalelių kompozito vidinės struktūros reikalauja didelių skaičiavimo resursų, todėl šio metodo taikymas kompozito analizei yra neefektyvus. Siekiant išnaudoti BEM galimybes, reikia ieškoti paprastesnių modelių, tinkančių kompozito analizei.

3. Alternatyva kontinuumo modeliams yra DEM. Jis aprašo kompozitą kaip dalelių sistemą ir yra paremtas atskirų dalelių mechanine sąveika. Galimybė tiksliau aprašyti dalelių kompozito diskrečiąsias savybes yra pagrindinis metodo privalumas. Metodo trūkumas yra didelės skaičiavimo apimtys ir universalių modelių stoka aprašant kompozito geometriją ir vidines sąveikas.

4. Esami DEM modeliai nagrinėja tiesiogiai kontaktuojančias daleles, arba sudaromi fiktyviai diskretizuojantį tolydų kontinuumą. Dalelių, esančių kontinuumo sąveika nėra iki galo ištirta.

5. Nepakankamai ištirtos bitumo plėvelės mechaninės savybės ir jų įtaka makromodelio mechaninėms charakteristikoms.

6. Iš atliktos dalelių kompozito analizės matyti, kad šiuo metu egzistuojantys skaitiniai modeliai turi rimtų trūkumų arba reikalauja ypatingai didelių skaičiavimo pajėgumų, kurių reikia vidinei kompozito struktūrai atkartoti, arba yra pernelyg supaprastinti, kai taikomi suvidurkinti parametrai visai sistemai. Todėl reikalingas progresyvesnis diskretizavimo metodas, įvertinantis pagrindinių mikro- ir mezoparametrų įtaką makroskopiniui dalelių kompozitų modeliui.

Heterogeninės struktūros analizė taikant diskrečiuosius elementus

Antrajame skyriuje pateikiamas heterogeninių struktūrų analizės metodo algoritmas ir aprašomos naudotos prielaidos. Pristatomos skaitinio modeliavimo, analitinio modeliavimo metodikos, kurios leidžia apskaičiuoti dviejų kontaktuojančių dalelių per minkštą terpę standumus, pradinio tarpelio įtaką, dalelių dydžio įtaką, matricos plėvelės, dengiančios daleles, tamprumo modulio ir jos storio įtaką normalinio sąveikai.

Skyriaus tematika paskelbti trys straipsniai (Rimša *et al.* 2011; Kačianauskas *et al.* 2013, Rimša *et al.* 2014).

2.1. Modeliavimo principai

Nagrinėjant heterogenines medžiagas plačiai taikomas metodas, kai pagal dviejų tipinių reprezentatyvių elementų elgseną formuojamas sintetinis strypinis ar jungiamasis elementas, atkartojantis šių elementų sąveiką. Priklausomai nuo nagrinėjamojo objekto, gali būti vertinama tik normalinė sąveika (taikant jungiamuosius elementus) ar kompleksinė sąveika, kai įvertinama ir normalinė, ir tangentinė, ir šlyties, ir sukimo įtaka. Gauti duomenys taikomi dalelių sistemai.

Styropinis diskretizavimo metodas leidžia supaprastinti skaitinį uždavinį, neprarandant gaunamų rezultatų tikslumo. Kitas šio modelio privalumas yra tas, kad nagrinėjant dviejų dalelių sąveiką uždavinys yra paprastesnis, todėl galima atlikti aibę skaitinių eksperimentų, kurių metu nustatyti, kaip dalelių ir tarpdalelinės matricos mechaninės ir geometrinės savybės įtakoja sąveikos standumą.

Šis skaičiavimo metodas turi ir tam tikrų trūkumų – svarbu tinkamai parinkti dalelių kontakto sąveikos matmenis (dalelių spindulius, pradinį tarpelį ir t. t.). Todėl atliekant klampiai tamprios heterogeninės struktūros analizę yra labai svarbu atlikti jautrumo analizę – įvertinant skaldos dalelių dydžio, pradinio tarpelio dydžio įtaką dviejų dalelių kontaktui.

Pagrindinės prielaidos:

1. Šiame darbe skaitinio modelio rezultatai bus lyginami su tipiniu asfalto kokybės vertinimo bandymu – Maršalo testu. Šio testo metu dominuoja santykinai aukšta temperatūra ir trumpas apkrovimo laikas. Tokiu būdu, siekiant supaprastinti skaitinį modelį, kitos realaus asfalto savybės, kaip pavyzdžiui, senėjimas, asfaltbetonio atsparumas įtrūkimams esant žemai temperatūrai nevertinami, kadangi jie tokio bandymo metu neveikia ar jų įtaka yra nežymi.
2. Nagrinėjamame kompozite analizuojamos tamprios, vienodo dydžio ir formos dalelės, kontaktuojančios per minkštą matricą. Dalelės su matrica sąveika idealizuota – sulipusios visu paviršiumi, be galimybės atitrūkti esant apkrovai.
3. Matrica modeliuojama kaip kontinuumas, kur mažesnių nei 1 mm dalelių poveikis įvertinamas padidinant matricos standumą.
4. Matricos mechaninės savybės nagrinėjamos pagal Maršalo bandinio apkrovos kraštines sąlygas, kur palaikoma fiksuota 60 °C temperatūra ir 0,847 mm/s apkrovos greitis.

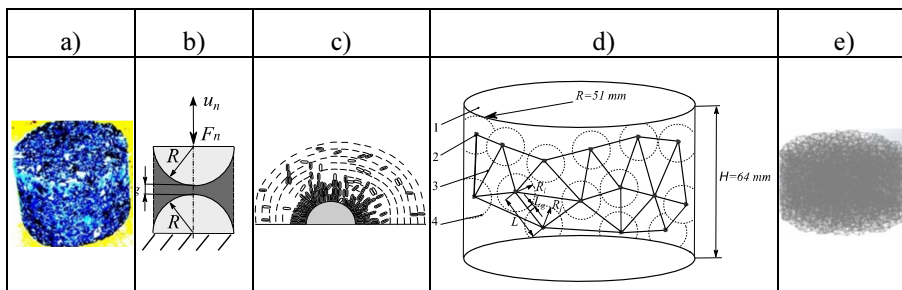
2.2. Normalinės sąveikos vaidmuo daugiapakopiame modeliavime

Dviejų lygių strategija taikoma modeliuojant dalelių kompozitą, modeliavimo seka schemiškai pavaizduota (2.1 pav.).

Pradžioje pasirenkama dalelių kompozitą (2.1 pav., a) aprašanti tipinė struktūra, sukuriamą diskreti sistema, kuria siekiama įvertinti dalelių poslinkius. Ją sudaro:

- struktūrinio tinklo generavimas (2.1 pav., a);

- mikrostruktūros heterogeniškumo įvertinimas (2.1 pav., c); jei reikalinga;
- diskretaus elemento standumo įvertinimas (2.1 pav., b);
- dalelių sistemos poslinkių skaičiavimas taikant BEM ar DEM skaičiavimo metodiką.



2.1 pav. Dalelių kompozito modeliavimo strategija, čia: a) asfalto bandinys; b) dviejų dalelių modelis ir pagrindiniai geometriniai parametrai; c) heterogeninis matricos išsiskaidinimas aplink dalelę; d) diskretusis modelis ir pagrindiniai jo geometriniai parametrai; e) skaitinis asfalto modelis

Fig. 2.1. An illustration of a modelling strategy, where: a) an asphalt sample of the Marshall test; b) a two particles model with basic geometrical parameters; c) heterogeneity of a binder; d) the DE model with basic parameters; e) a numerical model of an asphalt sample

Taikant šią strategiją galima įvertinti atskirų medžiagos ir geometrinių parametrų įtaką makroobjekto standumui, apskaičiuoti kompozite veikiančius įtempimus ir deformacijas.

2.3. Normalinės sąveikos matematinis modelis

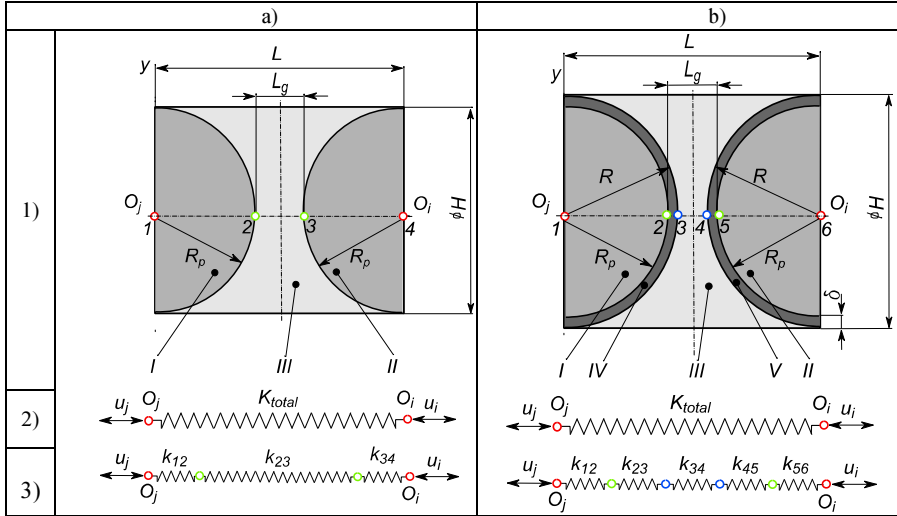
2.3.1. Prielaidos ir uždavinio formuluotė

Skaičiavimuose naudotas metodas, kai tamprios skaldos dalelės kontaktuoja per tampriai klampią matricą. Skaičiavimuose nagrinėta normalinė sąveika, mezomasteliu įvertinanti tarp dalelių esančio pradinio tarpelio įtaką sąveikos standumui.

Normalinės sąveikos analizė gali būti atlikta naudojantis įvairiais metodais. Šiame darbe pasirinktas 3D BEM. Skaičiavimuose naudota poslinkio ir jėgos metodas, įvertinant atraminės reakcijos jėgos ir sąveikos standumo priklausomybę nuo nagrinėjamos sistemos pradinio tarpelio dydžio.

2.3.2. Kontinualus dalelių sąveikos uždavinys

Normalinės sąveikos analitinio modelio pagrindiniai geometriniai parametrai parodyti 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Normalinės sąveikos analitiniai modeliai: a) be matricos plėvelės; b) įvertinantis matricos plėvelės įtaką, čia: 1) geometrinis modelis; 2) skaitinis spyruoklės modelis; 3) nuoseklus spyruoklių sistemos modelis; I ir II dalelės; III – matrica; IV ir V matricos plėvelė

Fig. 2.2. A normal interaction between two equal particles, where a) two particles in a weak matrix; b) two particles in a weak matrix with a film layer through the weaker interface: 1) is general geometry; 2) is a system of sequentially connected springs; 3) is the total spring equivalent in the system of the springs; I and II are particles, III is the matrix, IV and V are the matrix film

2.2 paveiksle pateikti nehomogeniniai cilindrai, kurių sferos be matricos plėvelės sluoksnio (a) variantas ir (b) variantas, kai cilindrai su matricos plėvele. Bendras sistemos standumas:

$$(k_n)^{-1} = (k_{12})^{-1} + (k_{23})^{-1} + (k_{34})^{-1} + (k_{45})^{-1} + (k_{56})^{-1}. \quad (2.1)$$

Skaičiuojant (a) variantą bendras sistemos standumas yra trijų elementų standumų suma (lygtyje (2.1), neįvertinami elementai k_{23} ir k_{34}); kai (b) atveju nehomogeninis cilindras yra sudarytas iš penkių elementų. Siekiant atkartoti vidinę cilindro struktūrą, siūlomas analizinis spyruoklių modelis, sudarytas iš penkių nuosekliai sujungtų spyruoklių, kurių standumas $k_{12}; \dots; k_{56}$ atitinka kiekvieno elemento bendrą standumą (2.2 pav.).

Kiekvieno elemento standumui nustatyti reikia sudaryti jo standumo lygtį.

2.3.3. Dalelių sąveikos diskretizavimas

Sudarant skaitinį modelį svarbu tiksliai atkartoti sudedamųjų elementų deformacijas, tokiu būdu užtikrinant analitinio modelio tikslus sprendinius. Kiekvieną elementą vertinant iš 3D kontinuumo mechanikos pozicijų vidinės būsenos kintamieji, tokie kaip poslinkiai $u(x, y, z)$, deformacijos $\varepsilon(x, y, z)$ ir įtempimai $\sigma(x, y, z)$ yra atskiro objekto taško funkcijos.

Taikomos strypų teorijos prielaidos, homogeninių elementų, veikiančių ašine kryptimi, mechaninei elgsenai aprašyti. Taikant šias prielaidas elementai po apkrovos išlieka plokšti ir standūs. Skerspjūvio poslinkis aprašomas lygtimi:

$$u_x(x, y, z) = u_y(x, y, z) = 0. \quad (2.2)$$

Tokiu būdu deformuotos įsivaizduojamo cilindro juostos išlieka lygiagrečios cilindro ašiai. Aprašoma išilginės linijos padėtis erdvėje koordinatėmis x ir y , kurios ilgis yra $L(x, y)$. Be galo mažas plotas dA taip pat priskirtas išilginei linijai. Linijos būsena charakterizuojama išilginiais kintamaisiais: poslinkiais $u_z(x, y, z)$, deformacijomis $\varepsilon_{zz}(x, y, z)$ ir įtempimais $\sigma_{zz}(x, y, z)$. Siekiant supaprastinti žymėjimus i indeksas z bus praleidžiamas.

Cilindro judėjimas aprašomas per cilindro galų poslinkius $u(x, y, 0) = 0$ ir $u(x, y, L) = u_n$, šiuos parametrus kartu su (2.2) lygtimi galima interpretuoti kaip kraštines sąlygas, apkraunančias tiriamąjį objektą per jo galų poslinkius. Taikant supaprastinę aproksimaciją išilginis elemento poslinkis aprašomas lygtimi:

$$u(x, y, z) = \frac{z}{L(x, y)} u_n. \quad (2.3)$$

Įvertinant lygtį (2.3) ir apsiribojant mažų poslinkių ir deformacijų atveju, išilginė deformacija $\varepsilon_{zz} = \partial u_z / \partial z$ pateikiama:

$$\varepsilon(x, y, z) = \frac{1}{L(x, y)} u_n. \quad (2.4)$$

Ašinės įtempimų linijos σ yra proporcingos deformacijai ε . Siekiant išlaikyti nedeformuotą skerspjūvio formą ašine kryptimi tai įvertinama lygtimi:

$$\sigma(x, y, z) = \tilde{E} \frac{1}{L(x, y)} u_n. \quad (2.5)$$

Siekiant išlaikyti cilindro skerspjūvio nesuspaudžiamumą, tai pasiekama įvertinus Puasono koeficientą:

$$\tilde{E} = \frac{E}{1 - \nu^2}. \quad (2.6)$$

Cilindro elemento standumas randamas taikant deformacijos energijos minimumo principą, kai pirmiausia nustatoma deformacijos energijos tankis taške:

$$W(x, y, z) = \frac{1}{2} \sigma(x, y, z) \varepsilon(x, y, z). \quad (2.7)$$

Vienai linijai tenkanti vidutinė energija:

$$W(x, y) = \int_0^{L(x, y)} w(x, y, z) dz. \quad (2.8)$$

Įvertinama elementarios prizmės ilgio $L(x, y)$ energija su elementariu skerspjūvio plotu dA . Integruojant per elemento ilgį ir įvertinat deformacijas (2.4) ir įtempimus (2.5) gaunama lygtis:

$$W(x, y) = \frac{1}{2} \tilde{E} \left(\frac{1}{L(x, y)} \right) u_n^2. \quad (2.9)$$

Tokiu būdu cilindro standumas yra antroji deformacijos energijos išvestinė

$$W = \iint_A w_S(x, y) dA \text{ arba}$$

$$k_n = \partial^2 W / \partial u_n^2. \quad (2.10)$$

Galutiniai suintegravus (2.10) formulę pagal skerspjūvio plotą gaunama lygtis:

$$k_n = \frac{1}{2} \tilde{E} \iint_A \left(\frac{1}{L(x, y)} \right) dA. \quad (2.11)$$

Įvertinus $r^2 = x^2 - y^2$ ir įvertinant tai kad elementas yra simetriškas išilginei ašiai, standumą geriau pateikti cilindrinėje koordinačių sistemoje:

$$k_n = \frac{1}{2} \frac{E}{1 - \nu^2} 2\pi \int_0^R \left(\frac{r}{L(x, y)} \right) dr. \quad (2.12)$$

Taikant lygtis (2.11) ir (2.12) galima nagrinėti ne tik plokščius skerspjūvius, bet ir kintančio ilgio cilindrų, kurie ir sudaro heterogeninio cilindro atskirus elementus. Pritaikius (2.1) lygtį apskaičiuojamas suminis viso heterogeninio cilindro standumas.

2.3.4. Atskirų elementų standumo įvertinimas

Kiekvieno elemento standumas (2.2 pav.) įvertinamas atskirai nuo jį supančių kaimyninių elementų. Integruojant dalelės standumas gaunamas su tam tikra

paklaida. Siekiant tikslesnio dalelės standumo įvertinimo reikia arba žinoti tikslią deformuotos matricos formą, arba tai tinka, kai dalelės ir matricos standumų skirtumai yra žymūs ir dalelės beveik nesideformuoja, lyginant su matrica.

Dalelės tūris cilindre sudaro pusę sferos, kuri apribota dviem paviršiais, galinė sferos dalis, esanti ties $z = 0$, sudaro vidurinę sferos plokštumą su spinduliu R .

Sferos paviršius apibrėžiamas spinduliu, R aprašomas lygtimi $z(x, y) = \sqrt{R^2 - r^2}$, kuri kartu įvertina ašinės linijos ilgį $L(x, y) = z(x, y)$. Didžiausias ilgis, kuris yra kartu ir spyruoklės ilgis, yra ties ašine linija, tai yra $L_{max} = L(0, 0) = R$.

Tokiu atveju dalelės standumas $k_p = k_{12}$; kurios spindulys R_p galima įvertinti taikant lygtį (2.13):

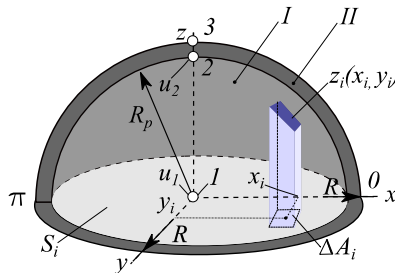
$$k_{12} = \pi \tilde{E} \int_0^{R_p} \frac{r}{\sqrt{R_p^2 - r^2}} dr. \quad (2.13)$$

Suintegravus (2.14) lygtį gaunama dalelės standumas:

$$k_{12} = 2\pi \tilde{E} R_p. \quad (2.14)$$

Matricos plėvelės įtaką galima supaprastinti vertinant tik normalinę projekciją ir $k_f = k_{23}$, tai parodyta (2.3 pav.). Plėvelės ilgis (storis) apskaičiuojamas atimant iš išorinio spindulio vidinį spindulį:

$$L_{plėv}(r) = (R_p^2 - r^2) + (R^2 - r^2). \quad (2.15)$$



2.3 pav. Dalelės ir matricos plėvelės integravimo schema, čia: I – dalelė;

II – matricos plėvelė

Fig. 2.3. A stiffness integration scheme hem-sphere with a matrix film: I – is the particle; II – is the matrix film

Matricos plėvelės standumas:

$$k_{23} = \pi \tilde{E}_{plėv} \int_0^R \frac{r}{\sqrt{R^2 - r^2} - \sqrt{R_p^2 - r^2}} dr . \quad (2.16)$$

Matricos standumas, čia $k_m = k_{34}$, randamas tokiu pačiu būdu, pirmiausia įvertinamas matricos storis:

$$L_{mat}(r) = L_g + (R - z(r)) . \quad (2.17)$$

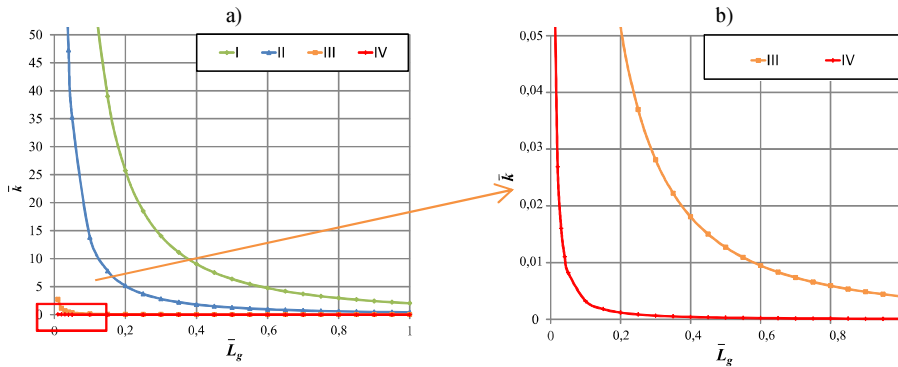
Bendras matricos standumas:

$$k_{34} = \pi \tilde{E}_{mat} \int_0^R \frac{r}{L_g + R - \sqrt{R^2 - r^2}} dr . \quad (2.18)$$

Bendras visos sistemos standumas randamas pagal lygtį (2.1).

2.4. Normalinės sąveikos analizė

Siūlomas analizinis modelis leidžia tirti normalinį dalelių kontaktą, kai dalelių ir matricos standumo skirtumas siekia daugiau nei $E_p/E_b = 21\,400$ kartų (2.4 pav.).



2.4 pav. Santykinio standumo priklausomybė nuo santykinio tarpelio dydžio ir dalelių bei matricos tamprumo modulių santykio (a), kur: I – kai $E_p/E_b = 1$; II – kai $E_p/E_b = 5$; III – kai $E_p/E_b = 500$; IV – kai $E_p/E_b = 21\,400$; b) detalus vaizdas

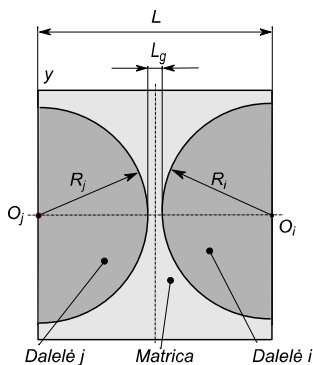
Fig. 2.4. Relative stiffness versus interface length for different interface properties (a), where: I – when $E_p/E_b = 1$; II – when $E_p/E_b = 5$; III – when $E_p/E_b = 500$; IV – when $E_p/E_b = 21\,400$; b) a detailed view

Kaip matyti, didėjant dalelės ir matricos standumo modulių santykiui, mažėja santykinis dalelių sąveikos standumas, kuris taip pat priklauso ir nuo santykinio tarpelio dydžio. Taip pat yra matoma tendencija, kad esant santykinai dideliam tarpeliui, kai $L_g > 0,5$, standumas priklauso nuo tarpelio tiesiškai, mažėjant tarpeliui standumas kinta eksponentiškai.

2.5. Normalinės sąveikos patikra taikant baigtinių elementų programinį paketą „Ansys“

Normalinės sąveikos modelio patikra atlikta su baigtinių elementų programiniu paketu „Ansys“, kuris yra plačiai taikomas inžineriniuose bei moksliniuose skaičiavimuose. Skaičiuojamasis modelis sudarytas iš dviejų sulipusių tamprų sferų, kontaktuojančių per tarpdalelinę matricą. Tarpdalelinė matrica užpildo visą erdvę, esančią aplink skaldos daleles; matricos mechaninės savybės yra klampiai tamprios. Dalelės su matrica sudaro vieningą tūrį, skaičiuojamojo modelio geometrija parodyta 2.5 paveiksle.

Sferų i ir j geometrija apibrėžiama spinduliu R . Sferų centrų taškai O_i ir O_j aprėžiami naudojantis Dekarto koordinatų sistema $Oxyz$, kur sferų centrai išsidėstę vienoje linijoje ašies Ox kryptimi. Tokiu būdu sferų koordinatės aprašomos koordinatėmis x_i ir x_j . Pradinis tarpelis tarp dalelių žymimas L_g .



2.5 pav. Modelio geometrija

Fig. 2.5. Model geometry

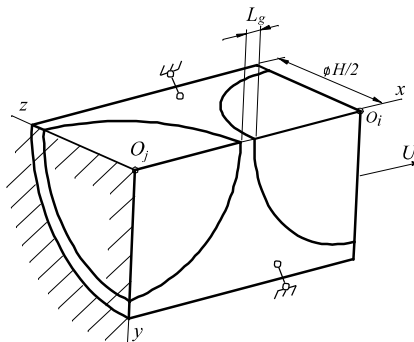
Skaičiuojamojo modelio cilindras apibrėžiamas ilgiu L ir skersmeniu H . Skaičiavimuose plačiai naudojamas cilindrinis reprezentatyvus tūris, kurį autorius Jiangas (Jiang *et al.* 2006) taikė sulipusioms granulėms modeliuoti; toks skaičiavimo metodas gerai tinka modeliuoti sulipusias medžiagas. Akivaizdu, kad nagrinėjamo modelio deformacijos elgsena yra iš dalies kitokia. Remiantis

rezultatais, gautais Chareyre (Chareyre *et al.* 2011), kur buvo atlikta analizė, nagrinėjanti klampaus skysčio su dalelėmis sąveiką, buvo nustatyta, kad reprezentatyvų tūrį galima nagrinėti kaip cilindrą.

Cilindrinio tūrio ilgis L yra suma dviejų dalelių spindulių ir tarpelio L_g , $L = 2R + L_g$. Cilindro diametras H taip pat priklauso nuo dalelės spindulio ir nuo matricos plėvelės storio t_i ; $H = 2(R + t_i)$. Matricos plėvelė sumažina sąveikos standumą ir leidžia išvengti baigtinių elementų tinklo iškraipymų.

2.5.1. Kraštinės sąlygos

Kaip žinoma, kad kraštinės sąlygos turi didelę įtaką skaičiavimo rezultatams, ypač tuomet, kai nagrinėjamos klampiai tamprios medžiagos. Šiuo atveju kraštinės sąlygos formuojamos reprezentatyvaus tūrio savybėms ištirti. Įvedamas apribojimas, kad reprezentatyvus tūris yra didesnio modelio dalis, tai yra reprezentatyvus tūris nėra veikiamas globalių kraštinių sąlygų. Nenagrinėjamas kaimyninių dalelių poveikis, kuris vertinamas skaičiuojant DEM metodu. Šie apribojimai įvesti tam, kad būtų galima nagrinėti tik išgrynintą dalelių normalinę sąveiką, atsisakant kitų galimų efektų. Kaip parodė mano atlikti eksperimentai, cilindro išorinio paviršiaus kraštinės sąlygos turi didelę įtaką lokalioms deformacijoms, tačiau santykinai mažą įtaką dalelių tarpusavio standumui. Kadangi modelis turi dvipusę simetriją, tai skaičiavimuose nagrinėjamas tik ketvirtis. Skaičiuojamojo modelio geometrija parodyta 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Skaičiuojamasis modelis normalinei kontakto sąveikai tirti su kraštinėmis sąlygomis

Fig. 2.6. Boundary conditions

Skaičiuojamojo modelio kraštinės sąlygos (2.6 pav.) leidžia deformuotis tik išilgai simetrijos ašies, kiti poslinkiai yra apriboti. Simetrinės kraštinės sąlygos vertikaliai $Oixy$ ir horizontaliai $Oixz$ plokštumas apriboja poslinkį normaline kryptimi ir leidžiamas poslinkis tangentine kryptimi.

Kinematinės kraštinės sąlygos leidžia atlikti skaitinius eksperimentus apkraunant skaičiuojamąjį modelį normaline apkrova. Tempimo jėga atsiranda slenkant dalelei i atžvilgiu fiksuotos dalelės j poslinkiu u_i . Kai $u_i = U$ ir $u_j = 0$, poslinkį priskiriant visiems taškams, esantiems plokštumose $yOix$ ir $xOjy$.

Skaiciavimuose naudotas sulipęs kontakto tipas tarp dalelės ir matricos.

2.5.2. Klampiai tamprios medžiagos savybės

Daroma prielaida, kad tarp dalelių esanti medžiaga pasižymi klampiai tampriomis medžiagos savybėmis. Klampiai tamprios medžiagos yra tos, kurios turi tamprios ir klampios medžiagos savybių. Vienmačiu atveju tamprioji medžiagos modelio dalis pakeičiama spyruokle, kurios įtempimai σ yra proporcingi deformacijai ε ; tai yra, pastovus tamprumo modulis E ir galioja Huko dėsnis. Klampioji medžiagos modelio dalis sudaryta iš slopintuvo, kurio slopinimas η priklauso nuo įtempimų σ ir deformacijos greičio $\dot{\varepsilon}$, kai deformacijų greitis $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ yra deformacijų išvestinė pagal laiką t .

Yra keletas klampiai tamprių medžiagų savybės analizuoti sukurtų modelių, šiame darbe buvo panaudotas Maksvelo modelis, kuris aprašo deformacijas kaip sumą tamprių ir klampių deformacijų (Schapery 1969; *Park et al.* 1996):

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E} + \frac{\sigma(t)}{\eta}. \quad (2.19)$$

Jei medžiaga apkraunama pastoviu įtempimu σ_0 , tokiu atveju suintegravus gaunama lygtis:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta} t. \quad (2.20)$$

Pirmasis lygties (2.20) narys atitinka tampriąsias medžiagos savybes, kurios laiko atžvilgiu yra pastovios, antrasis lygties narys atitinka klampiąsias medžiagos savybes, kintančias laiko atžvilgiu. Esant trimačiam atvejui, sąveikos modelis aprašomas įtempimų ir deformacijų tenzoriais, naudojantis integralu (Schapery 1969; *Park et al.* 1996):

$$\sigma_{ij}(t) = E_0 \varepsilon_{ij} + \int_0^t E_t \frac{d\varepsilon_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau. \quad (2.21)$$

Šis modelis parodo, kad įtempimų relaksacija neprasideda konkrečiu laiko momentu, bet pamažu pasiskirsto per visą apkrovos laiką. Čia E_0 – momentinis tamprumo modulis. Laike kintantis tamprumo modulis E_t aprašo medžiagos savybes kaip laiko funkciją ir žymi įtempimų relaksaciją. Tai aprašoma Proni eilute *Mo et al.* (2008):

$$E(t) = E_0 \left(1 - \sum_{m=1}^M \alpha_m^E e^{-\frac{t}{t_m}} \right). \quad (2.22)$$

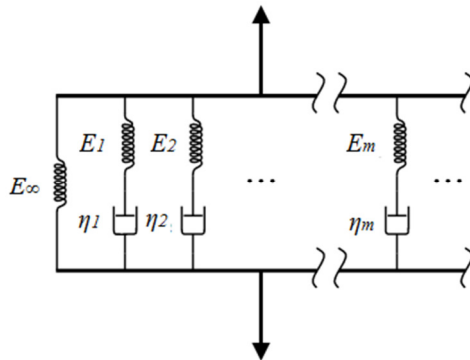
Čia α_m^E ir t_m yra modelio parametrai, aprašantys m – ajį Proni eilutės elementą. Kur M yra Proni eilučių skaičius. Šiuo atveju t_m – parodo relaksacijos greitį m – tajame Proni eilutės elemente.

Įtempimų tenzoriai gali būti išskaidyti į tūrinius ir šlyties, σ_{kk} ir $\hat{\sigma}_{ij}$, tuo tarpu deformacijų tenzoriai kaip ε_{kk} ir $\hat{\varepsilon}_{ij}$, atitinkamai. Tokiu atveju atskirų dedamųjų sąveikos įtaką galima įvertinti nepriklausomai nuo kitų parametru, kaip tai parodyta darbe Schapery (1969). Bendra tūrinių ir šlyties įtempimų įtaka aprašoma:

$$\sigma_{kk}(t) = 3K_0 \varepsilon_{kk} + 3 \int_0^t K_t \frac{d\varepsilon_{kk}(\tau)}{d\tau} d\tau, \quad (2.23)$$

$$\hat{\sigma}_{ij}(t) = 2G_0 \hat{\varepsilon}_{ij} + 2 \int_0^t G_t \frac{d\hat{\varepsilon}_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau. \quad (2.24)$$

Čia medžiagos savybės priskiriamos tūriniui moduliui K ir šlyties moduliui G .



2.7 pav. Maksvelo modelis klampiai tamprių medžiagų skaičiavimui

Fig. 2.7. Maxwell model of viscoelasticity

Įvertinus, kad Puasono ν koeficientas yra pastovus, randami parametrai K_0 ir G_0 , kurie priklauso nuo momentinio tamprumo modulio:

$$K_0 = \frac{E_0}{3(1-2\nu)}, \quad (2.25)$$

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1+\nu)}. \quad (2.26)$$

Nuo laiko priklausančius $K(t)$ ir $G(t)$ galima aprašyti Proni eilute kaip lygtį (2.22).

2.5.3. Medžiagų savybės

Šiame darbe nagrinėjama nevienalytės struktūros mechaninės savybės mezomasteliu, skaitinis modelis imituoja asfalto struktūrą, nagrinėjant dviejų skaldos dalelių normalinę sąveiką bitumo užpildo terpėje.

Granito mechaninės savybės paimtos iš šaltinio (www.matweb.com). Tamprumo modulis $E = 3 \cdot 10^{10}$ Pa; Puasono koeficientas $\nu = 0,25$.

Klampaiai tamprios užpildo savybės paimtos iš literatūros šaltinio Huurman, Woldekidan (2007). Jos priklauso nuo aplinkos temperatūros ir apkrovos greičio. Problemos supaprastinimui skaičiavimuose remtasi tipiniu empiriniu asfalto analizės testu – Maršalo bandymu, pagal kurį bandinio temperatūra turi būti 60 °C ir apkrovos greitis 0,847 mm/s; šie apkrovos parametrai naudoti visuose skaitiniuose eksperimentuose.

Puasono koeficientas naudotas 0,46; nuo laiko priklausantys parametrai pastovūs visame skaičiuojamajame tūryje, jie priskirti kaip Maksvelo modelio konstantos. Nuo laiko nepriklausantis narys $E_{\infty} = 46$ MPa. Kitos reikšmės parametrams α_m^E ir t_m duotos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Nuo laiko priklausančios medžiagos savybės įvertinamos Proni eilute

Table 2.1. Time-dependent properties of the viscoelastic materials related to Prony series

Komponentas m	Reikšmė α_m^E	Laikas t_m
1	0,902	0,637
2	0,072	6,175

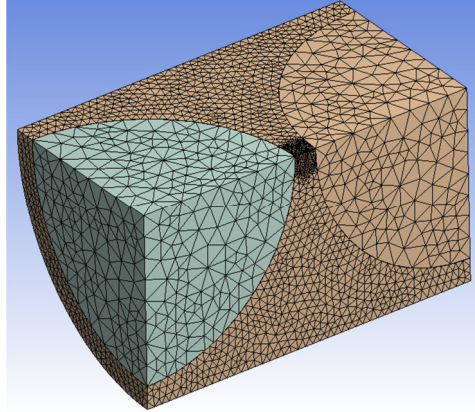
Matricos savybės gautos iš Huurman, Woldekidan (2007) literatūros šaltinio, kur aprašomos jos savybės esant 20 °C, kai tuo tarpu Maršalo bandinys tiriamas esant 60 °C. Matricos standumas perskaiciuotas taikant Viljamo Landelio ir Feri pasiūlytą lygtį, pagal eksperimentinius duomenis, aprašytus, Chailleux *et al* (2006):

$$\log(a_{(T_i - T_{ref})}) = \frac{-c_1^{ref} \cdot (T_i - T_{ref})}{c_2^{ref} + T_i - T_{ref}}, \quad (2.27)$$

čia T_{ref} – pradinė temperatūra, $T_{ref} = 20$ °C, T_i – reikalinga temperatūra $T_i = 60$ °C; c_1 , c_2 – koeficientai, įvertinantys standumo pokytį; $c_1 = 15$; $c_2 = 160$.

Normalinės sąveikos skaitinė analizė atlikta naudojant baigtinių elementų metodą. Skaičiavimai atlikti naudojantis BE programa „Ansys13“.

Tirtas skaitinis modelis parodytas 2.8 paveiksle. Jis sudarytas iš $\frac{1}{4}$ cilindro. Skaičiavimuose panaudotas baigtinių elementų tinklas, kurio programinis kodas SOLID187, šis baigtinių elementų tipas turi 10 mazgų, gerai tinka kieto kūno analizei, taip pat galima taikyti klampiai tamprių medžiagų skaičiavimui.



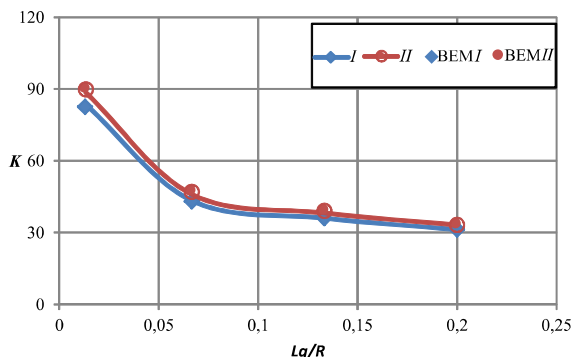
2.8 pav. Baigtinių elementų tinklas
Fig. 2.8. Finite element model

Skaitiniame modelyje kurtas nevienodo tankio tinklas, skaldos dalelių tinklo dydis yra $0,1 R$, užpildo tūryje tinklas siekia $0,05 R$, normalinės sąveikos zonoje tinklas susmulkintas iki $0,01 R$. Taip padaryta todėl, kad didžiausių deformacijų ir įtempimų zonoje tinklas būtų smulkus, siekiant užtikrinti didelį rezultatų tikslumą. Tinklo kokybė atitiko programos „Ansys“ reikalavimus tikrinant baigtinių elementų tinklo išsikraipymą.

Skaitinio modelio baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 19 678 mazgų ir 9967 elementų.

2.5.4. Diskrečiojo elemento standumo tikrinimas su baigtinių elementų programinio paketo rezultatais

Geometrinio netiesiškumo įtaka buvo tirta siekiant suprasti jo įtaką skaičiuojamojo modelio mechaniniams parametrų. Buvo atlikti skaitiniai eksperimentai modelį apkraunant ta pačia apkrovos funkcija, kai $U = 0,5 \text{ mm}$ pasiekiami po $0,59 \text{ s}$. Nagrinėtas modelis su $L_g = 0,5 \text{ mm}$ pradiniu tarpeliu.



2.9 pav. Diskrečiojo elemento modelio palyginimas su BEM modeliu, čia:
I – diskrečiojo elemento modelis be matricos plėvelės; *II* – diskrečiojo elemento modelis su matricos plėvele $\delta = 50 \mu\text{m}$; BEM *I* – skaitiniai rezultatai; BEM *II* – skaitiniai rezultatai.

Fig. 2.9. The validation of the discrete element model with FEM model; where:
I – discrete element model with no matrix film; *II* – discrete element with a matrix film of $\delta = 50 \mu\text{m}$; BEM *I* – model without a matrix film results for given points; BEM *II* – model with a matrix film results for given points

Gauti skaičiavimo rezultatai parodyti 2.9 paveiksle. Skaitiniai rezultatai modelių su matricos plėvele ir be matricos plėvelės gana gerai sutapo, didžiausias skirtumas siekia 3 %.

2.5.5. Tarpelio įtaka normaliniam kontaktui

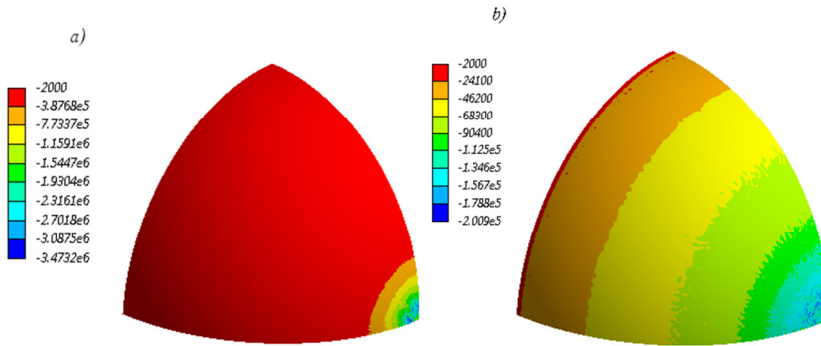
Empiriniai ir teoriniai tyrimai rodo, kad didelę įtaką mišinių mechaninėms savybėms daro tarp dalelių esančios medžiagos. Darbo tikslas yra nustatyti pradinio tarpelio įtaką normalinei atraminei reakcijos jėgai. Pradinis tarpelis – tai mažiausias atstumas tarp dviejų paviršių sąveikos srityse. Realesnis didelių poslinkių skaičiavimo modelis naudojamas skaitiniams eksperimentams. Apkrova sukurama paslinkus sferas vieną nuo kitos į priešingas puses $U = 0,5 \text{ mm}$.

Nagrinėtas geometrinis modelis su skirtingais tarpelio dydžiais. Skaičiavimai atlikti su pradiniais tarpeliais L_g 0,1; 0,5; 1,0 ir 1,5 mm, arba 0,013 R ; 0,066 R ; 0,133 R ir 0,2 R nuo dalelės spindulio. Labiau mažinant pradinį tarpelį reikia atsižvelgti į orientuoto bitumo plėvelės storį.

Tempimo elgsena tirta nustatant normalinės jėgos skaitinę reikšmę iš baigtinių elementų programos skaitinių eksperimentų.

Tarpelio įtaką geriausiai parodo du kraštiniai atvejai, kai $L_g = 0,1 \text{ mm}$ ir $L_g = 1,5 \text{ mm}$. Tempimo jėga atsiranda dėl normalinio slėgio ir tangentinės sukibimo jėgos. Atraminė reakcijos jėga atsiranda dėl slėgio pasiskirstymo ant

sferos paviršiaus. Du kraštiniai atvejai su slėgio išsidėstymu parodyti (2.10 pav.), neigiamos reikšmės rodo tempimo (siurbimo) slėgį paskaliais.



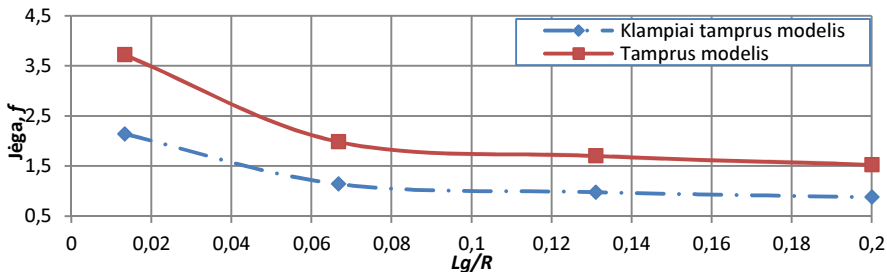
2.10 pav. Slėgio pasiskirstymas ant skaldos sferų: a) $L_{g1} = 0,1$ mm; b) $L_{g4} = 1,5$ mm

Fig. 2.10. Pressure distribution on spherical particles where: a) $L_{g1} = 0,1$ mm; b) $L_{g4} = 1,5$ mm

Didžiausios slėgio reikšmės yra esant mažiausiam tarpeliui. (2.9 pav., a), slėgis siekia tarp $p_{1max} = 3,47$ MPa ir 1,16 MPa esant apskritimo spinduliui $r \approx 0,1 R$. Esant kitam ribiniam atvejui (2.9 pav., b) slėgis $p_{4max} = 0,2$ MPa yra beveik 18 kartų mažesnis; šiuo atveju slėgis ant skaldos dalelės pasiskirsto tolygiau.

2.5.6. Kitų parametrų įtaka normaliniam kontaktui

Atliekant skaitinius eksperimentus buvo siekiama atskirai įvertinti veikiančius efektus, tokius kaip tarpelio dydis ar nuo laiko priklausančių klampiai tamprųjų medžiagų mechaninių savybių įtaka normaliniam kontaktui.

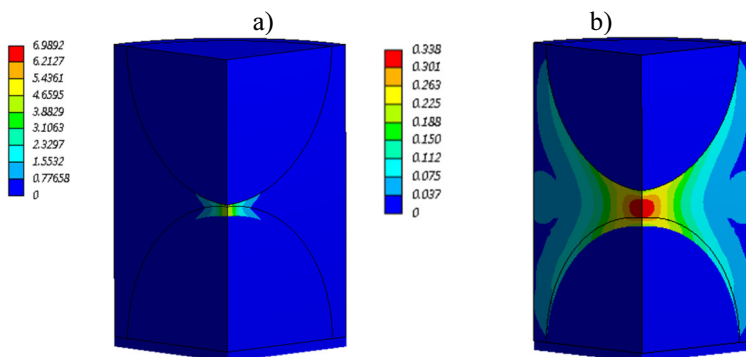


2.11 pav. Normalinės jėgos priklausomybė nuo tarpelio esant skirtingiems medžiagų modeliams

Fig. 2.11. Variation of the normal interaction force values against the size of the initial gap for various models

Kaip matyti iš prieš tai buvusio skyrelio, kad esant mažesniai tarpeliui reikia didesnės jėgos atplėšti daleles vieną nuo kitos, didėjant tarpeliui, jėga, reikalinga atplėšti daleles, mažėja. 2.11 paveiksle parodyta santykinės jėgos f ir santykinio tarpelio L_g/R tarpusavio įtaka.

Parodyta klampiai tamprios medžiagos elgsena (brūkšniuota linija), lyginant su tamprios medžiagos elgsena (ištiesinė linija). Šiuo atveju parodyta santykinė jėga: $f = F/E_0 L_g R$; santykinis poslinkis: $u = U/L_g$.



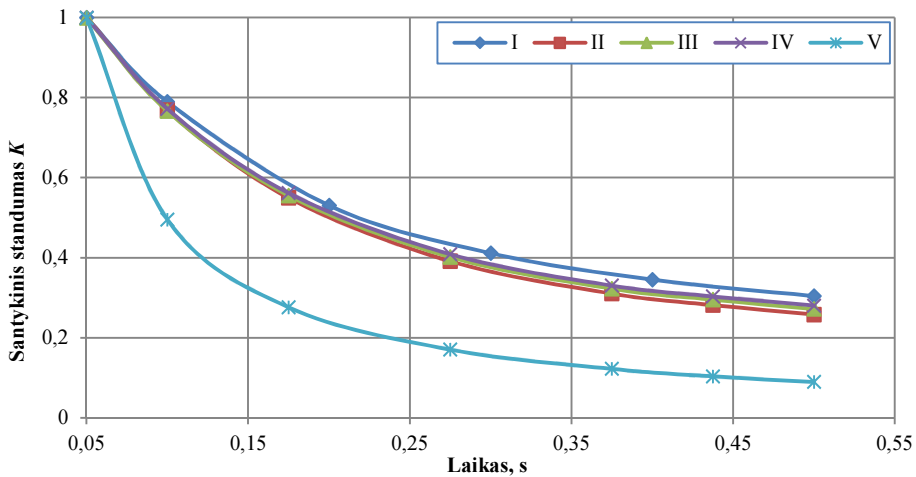
2.12 pav. Didžiausių tampriųjų deformacijų variacija a) $L_g = 0,1$ mm; b) $L_g = 1,5$ mm

Fig. 2.12. Variation of maximum Principal Elastic strain, where: a) $L_g = 0.1$ mm; b) $L_g = 1.5$ mm

Kaip parodyta 2.12 paveiksle, gauti dideli deformacijų elgsenos skirtumai esant pradinio tarpelio minimaliai ir maksimaliai reikšmei; šie duomenys gana gerai sutampa su kitų autorių Liu *et al.* (2011) rezultatais. Paveiksle matoma, kad esant minimaliam pradiniam tarpeliui, deformacijos pasiskirsto siauroje zonoje, didėjant tarpeliui didžiausios deformacijos susiformuoja tarpelio tarp dalelių viduryje.

2.5.7. Laiko poveikis normaliniam kontaktui

Siekiant ištirti laiko poveikio įtaką skaičiavimo rezultatams buvo normalizuotos bedimensinės jėgos-poslinkio kreivės. 2.13 paveiksle parodytos tipinės klampaus modelio kreivės.



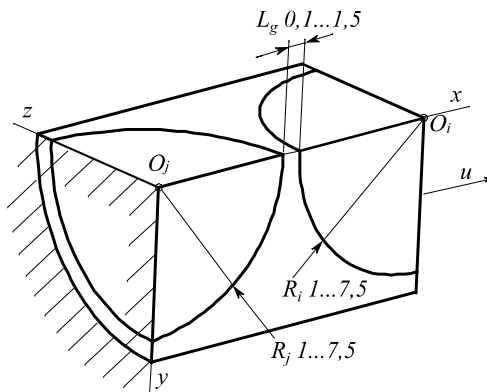
2.13 pav. Normalizuotas standumas – poslinkio priklausomybės su skirtingais pradiniais tarpeliais, kur I; II; III ir IV tarpeliai $L_g = 0,1; 0,5; 1,0$ ir $1,5\text{mm}$; V – matricos klampiąsias savybes aprašanti Proni eilutė

Fig. 2.13. The calculated normalized stiffness displacement relationship under tension for various values for the size of the initial gap; where: I; II; III ir IV gaps $L_g = 0.1; 0.5; 1.0$ and 1.5mm ; V – viscoelastic matrix properties represented by Prony series

Kaip matyti iš 2.13 paveikslo, normalizuotas standumas K nepriklauso nuo tarpelio dydžio, tai yra sugula į vieną kreivę; tokiu atveju galima teigti, kad standumo pokytis, laiko atžvilgiu, esant pastovioms kraštinėms sąlygoms, taip pat yra pastovus dydis. Palyginimui pateikta ir klampiąsias matricos savybes aprašanti Proni eilutės grafinė išraiška, iš kurios matyti, kad atskirai paimtos matricos standumas apkrovos pabaigoje yra $\sim 34\%$ mažesnis, lyginat su dviejų dalelių, sąveikaujančių klampiai tamprioje terpėje, standumu.

2.5.8. Geometrinių parametrų įtaka dviejų dalelių normalinei sąveikai

Dviejų dalelių sąveika plačiai aptarta ankstesniame poskyryje, nustatytos dalelės veikiančios jėgos, slėgių paskirstymas sąveikos zonoje, tarpelio įtaka dalelių sąveikos standumui. Tačiau realiuose heterogeniniuose mišiniuose dalelės nėra vienodo dydžio, dalelių skersmuo realiuose asfalto mišiniuose varijuoja nuo 15 mm iki $0,063\text{ mm}$, dalelės mišiniuose išsidėsto atsitiktinai, ir atsirandančios sąveikos poros gali turėti daug variacijų.



2.14 pav. Modelio geometrija su tiriamųjų parametų ribinėmis reikšmėmis

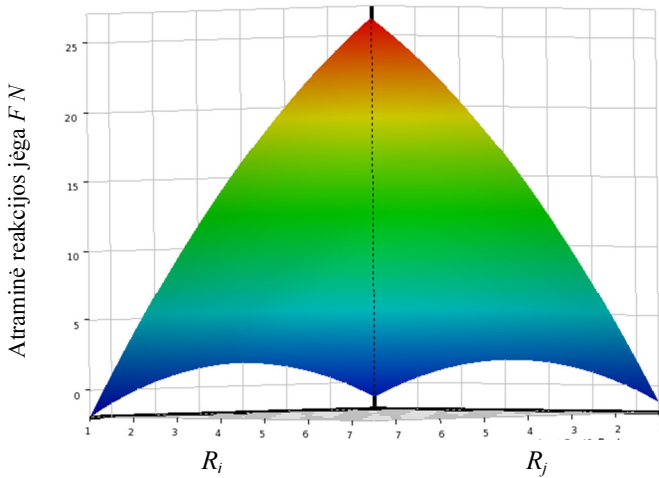
Fig. 2.14. Investigation of parameters sensitivity studies for normal contact analysis

Siekiant geriau suprasti heterogeninių struktūrų mechaninių savybių priklausomybę nuo atskirų geometrinių parametų poveikio, buvo pasirinkta dviejų dalelių pora, kontaktuojanti per matricą. Tiriama normalinės sąveikos atraminės jėgos priklausomybę nuo dalelių dydžio ir pradinio tarpelio L_g .

Kiekvienos dalelės spinduliai R_i ir R_j gali kisti nepriklausomai vienas nuo kito ribose nuo 1 mm iki 7,5 mm. Dalelių, kurių spindulys mažesnis nei 1 mm, sąveika tiesiogiai nevertinama, jų įtaką įvertinama per matricos standumo koeficientą, kuris priklauso nuo dalelių, mažesnių nei 1 mm, tūrinės koncentracijos matricoje. Šiame skyriuje bus tiriama tik dalelių, didesnių nei 1 mm, sąveikos standumas per minkštą matricą, kurioje nėra mažesnių nei 1 mm dalelių ir kurių standumas nėra padidėjęs.

Skaičiavimuose naudotos tos pačios medžiagų mechaninės savybės ir kraštinės sąlygos kaip ir anksčiau aptarto normalinės sąveikos modelio.

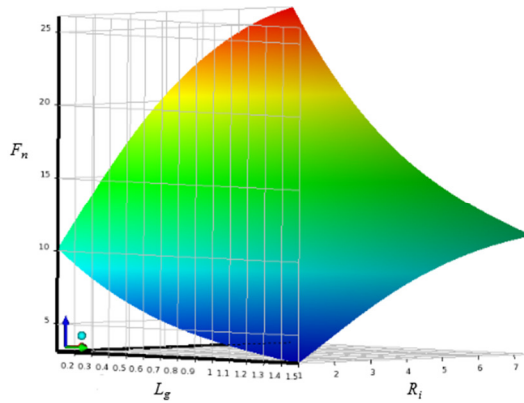
2.15 paveiksle parodyta normalinės jėgos priklausomybė nuo dalelės spindulio R , esant fiksuotam tarpeliui, kai dalelių spinduliai yra $R_i = R_j = 7,5$ mm, tai atraminės reakcijos jėga $\frac{1}{4}$ modelio geometrijos pasiekia kai $F_n = 28$ N. Mažėjant dalelių spinduliui, atraminė reakcijos jėga mažėja, mažiausia jėgos reikšmė pasiekama, kai $R_i = R_j = 1$ mm, tai atraminės reakcijos jėga $F_n = \sim 1$ N.



2.15 pav. Normalinės reakcijos jėgos priklausomybė nuo dalelių dydžio

2.15. Fig. The relationship between normal force reactions, according to the particles radius size

Kadangi dalelių spindulių įtaka normalinei reakcijos jėgai yra simetriška, tai 2.15 paveiksle pakeitus spindulį R_i tarpelio parametru L_g , 2.16 paveiksle, gaunamas informatyvesnis grafikas.



2.16 pav. Normalinės reakcijos priklausomybė nuo tarpelio L_g ir dalelės spindulio R_i

Fig. 2.16. The normal force reaction's dependency on the particle radius R_i and the initial gap L_g

Kaip matyti 2.16 paveiksle, tarpelio L_g ir dalelės spindulio įtaka R_i atraminei reakcijos jėgai F_n yra artima, tik atvirkščiai proporcinga, didėjant tarpeliui, jėga mažėja, didėjant dalelės spinduliui, jėga kyla.



2.17 pav. Geometrinių parametų įtaka normalinės reakcijos dydžiui

Fig. 2.17. Geometrical parameters influence on normal force reactions size

Grafiškai tai parodyta 2.17 paveiksle perskaičiuojant atskiro parametro santykinį (bedimensinį) kontakto sąveikos standumui poveikį pagal statistinėje analizėje plačiai taikomą lygtį:

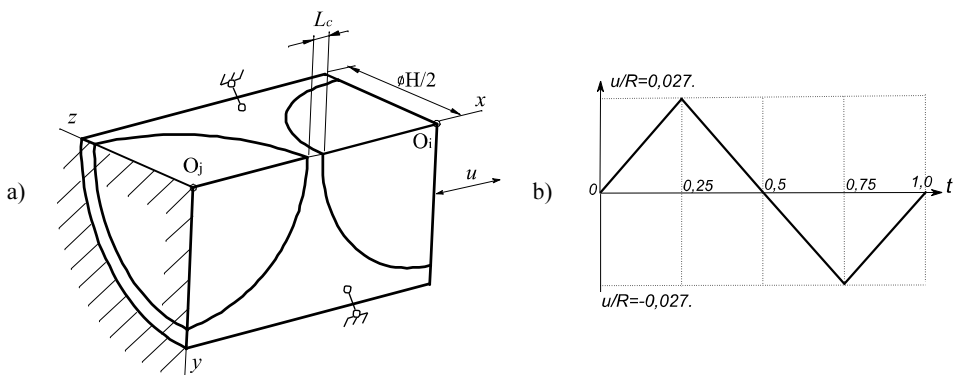
$$I = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{vid}}}, \quad (2.28)$$

čia atskiro tiriamojo parametro P didžiausia, mažiausia ir vidutinė reikšmės.

2.5.9. Tempimo ir gniuždymo skirtumai

Atliekant skaitinę analizę dviejų dalelių minkštoje terpėje sistemai skaitiniai eksperimentai buvo orientuoti į labiau pavojingą atvejį – kai dalelės yra tempiamos viena nuo kitos. Tačiau, ir ne mažiau svarbus yra ir gniuždymo atvejis, parodantis pilną normalinės sąveikos elgsenos modelį.

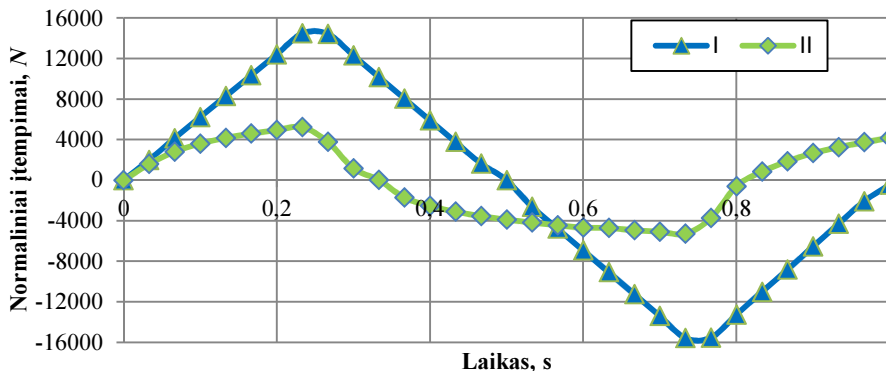
Siekiant ištirti skirtumus, atsirandančius daleles tempiant ir gniuždant, buvo sudaryta apkrovos funkcija, kai dalelė O_i pirmiausia yra patraukiama nuo dalelės O_j atstumu $u/R = 0,027$, vėliau paspaudžiama tuo pačiu dydžiu $u/R = 0,027$, tik į priešingą pusę (2.18 pav., b)



2.18 pav. Kraštinės sąlygos, kur: a) bendras vaizdas; b) dalelės O_i poslinkio funkcija

Fig. 2.18. Boundary conditions, where: a) general view; b) loading function of particle O_i

Kitos kraštinės sąlygos – baigtinių elementų tinklas ir medžiagų mechaninės savybės – liko tokios pačios kaip ir ankstesniame skyriuje, kuriame nagrinėta normalinė sąveika.



2.19 pav. Normalinių įtempimų kitimas laiko atžvilgiu, kur I – tamprus modelis; II – kai matrica klampiai tampri

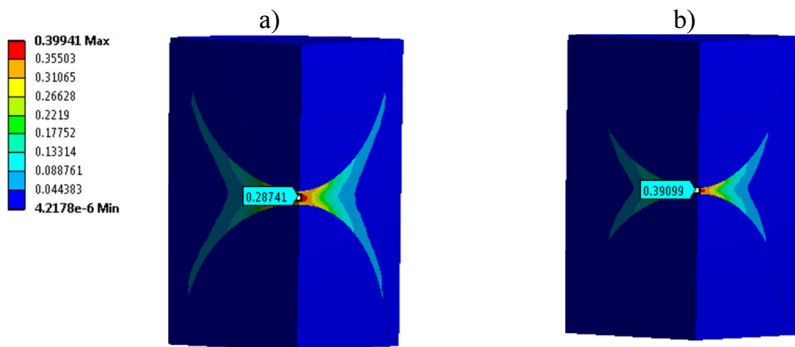
Fig. 2.19. Normal stress time history, where: I – an elastic model; II – when the matrix is visco elastic

Skaitiniai eksperimentai 2.19 paveiksle parodė, kad tempimo ir gniuždymo atveju tamprus modelio įtempimai skiriasi ~8,8 % dėl geometrijos netiesiškumų. Klampaus modelio netiesiškumai yra žymiai ryškesni, klampos poveikį vaizdumo dėlei galima interpretuoti kaip inercijos poveikį kieto kūno mechanikoje, kur inercija priešinas greičio pokyčiui. Šiuo atveju, iki laiko $t = 0,25$ s, kol pasiekiami didžiausi tempimo įtempimai, klampiai tamprus modelio – tai yra modelio pasipriešinimas išoriniam poveikiui mažėjo. Nuo laiko $t = 0,25$ s, kai prasidėjo dalelės O_i grįžimas atgal (gniuždymo fazė), normaliniai įtempimai net 34 % (laiko atžvilgiu) anksčiau pasiekė normalinių įtempimų neigiamas reikšmes ir pradėjo priešintis gniuždymo poveikiui. Paskutinėje fazėje, kai $t = 1,0$ s, kada dalelė O_i grįžo į pradinę būseną, liko žymūs likutiniai įtempimai, sudarantys ~79 % nuo didžiausiųjų eksperimento metu pasiektų reikšmių. Tai yra klampus modelis eksperimento pabaigoje yra ~21 % minkštesnis ir jis pilnutinai negrįžta į pirminę stadiją.

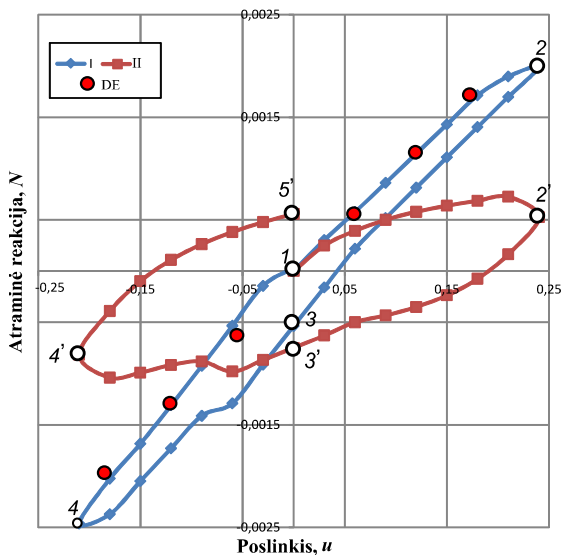
Kaip matyti 2.20 paveiksle, tempimo atveju deformacijos pasiskirsto tolygiau po visą matricos paviršių, gniuždymo atveju deformacijos koncentruojasi siauriausioje tarpelio zonoje. Dėl šių skirtumų atsiranda ir atraminės reakcijos skirtumai.

Tempimo ir gniuždymo poveikį tarp dviejų dalelių 2.21 paveiksle parodo histerėzes kreivė: I – tamprus modelis (mėlyna spalva). Atraminė reakcijos

reikšmė kinta netiesiškai, tempimo metu atraminė reakcija „plokštėja“, tai yra standumas krinta, kai gniuždymo atveju atvirkščiai – standumas kyla. Standumo sumažėjimas dėl netiesinių efektų tempimo atveju siekia ~12 %, kai tuo tarpu standumo prieaugis gniuždymo atveju siekia ~17 %.



2.20 pav. Ekvivalentinės deformacijos: a) tempimo atveju; b) gniuždymo atveju
Fig. 2.20. Equivalent strain where: a) tension; b) compression



2.21 pav. Atraminės reakcijos histerezės kreivė, čia: I – tamprus modelis;
II – klampiai tamprus modelis; DE – diskretaus modelio rezultatai

Fig. 2.21. A force reaction hysteresis loop; where I – an elastical model;
II – the visco elastical; DE- analytical results of the discrete model

Tempimo ir gniuždymo poveikį tarp dviejų dalelių 2.21 paveiksle parodo histerėzes kreivė: I – tamprus modelis (mėlyna spalva). Atraminė reakcijos reikšmė kinta netiesiškai, tempimo metu atraminė reakcija „plokštėja“, tai yra standumas krinta, kai gniuždymo atveju atvirkščiai – standumas kyla. Standumo sumažėjimas dėl netiesinių efektų tempimo atveju siekia ~12 %, kai tuo tarpu standumo prieaugis gniuždymo atveju siekia ~17 %.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Sukurtas diskretusis analizinis modelis, įvertinantis terpėje esančių sferinių dalelių normalinę sąveiką. Modelio pagalba galima įvertinti kontakto standumo koeficiento priklausomybę nuo tarpelio, dalelių ir matricos plėvelės dydžio, matricos ir dalelių tamprumo modulių santykio.
2. Diskretusis analizinis modelis parodė, kad didėjant matricos plėvelės storiui, proporcingai auga kontakto standumas, kai didėjant matricos plėvelės standumui, normalinio kontakto standumas auga, kol matricos plėvelės standumo ir matricos standumo santykis pasiekia ~100 kartų.
3. Diskretusis analizinis modelis patikrintas su BEM, tikrinti du atvejai: su matricos plėvele ir be jos, abiem atvejais analizinio modelio ir BEM skaitinių rezultatų skirtumas siekia ~3 %. Tai leidžia teigti, kad siūlomas modelis gali gerai įvertinti dviejų kontaktuojančių dalelių per matricos sluoksnį normalinį standumą; taip pat gali įvertinti daleles dengiančios matricos plėvelės storio ir standumo įtaką dviejų dalelių mezomodeliui.
4. Deformacijų analizė rodo, kad dalelių deformacija yra žymiai mažesnė nei užpildo ir gali būti nevertinama skaičiavimo modeliuose. Daleles galima analizuoti kaip absoliučiai standžius kūnus, tokiu būdu supaprastinant skaičiavimo modelį.
5. Tiriant tarpelio įtaką buvo nustatyta, kad esant mažesniai nei $0,066 R$ santykiniam tarpeliui, normalinės sąveikos standumas žymiai padidėja.
6. Tempimo ir gniuždymo metu dalelių sąveika skiriasi, tempimo metu įtempimai pasiskirsto tolygiau visame paviršiuje, gniuždymo atveju didžiausios reikšmės koncentruojasi siauriausioje tarpelio vietoje. Tai parodo, kad tempimo ir gniuždymo metu veikia skirtingi netiesiniai geometrinio netiesiškumo faktoriai. Tempimo atveju dėl atsirandančio netiesiškumo atraminė reakcijos jėga sumažėja ~12 %, kai gniuždymo atveju atraminė reakcijos jėga išauga ~17 %.
7. BEM modelio deformacijos parodė, kad taikytos prielaidos diskrečiajam analiziniam modeliui sudaryti, kurios teigia, kad atskiri modelio elementai po apkrovos išlieka plokšti ir standūs yra teisingos, nes BEM ir diskrečiojo analizinio modelio rezultatų skirtumai siekia ~3 %.

Diskrečiojo modelio taikymas heterogeninėse struktūrose

Šiame skyriuje aprašytas naujai siūlomo diskrečiojo elemento modelio taikymas dalelių kompozito analizei. Aprašytos diskrečiojo elemento sistemos ir 3D modelio geometrijos ir pagrindiniai duomenys, kraštinės sąlygos. Atlikta 3D modelio lokali analizė, remiantis keliais kriterijais įvertina labiausiai apkrautų kontaktų porų analizė, įvertinat kontaktuojančių dalelių normalinius, tangentinius ir pasisukimo poslinkius. Diskrečiojo elemento ir 3D modeliai palyginti taikant įvairias kraštines sąlygas ir DE elemento Puasono koeficiento įtaką. Modeliai lyginti taikant šiuos kriterijus: Euklidinės normos; lyginant deformavimo energijas ir maksimalius mazgo poslinkius. Šio skyriaus medžiaga buvo paskelbta autoriaus straipsniuose (Rimša *et al.* 2012; Kačianauskas *et al.* 2013)

3.1. Teorinis diskrečiojo elemento taikymas dalelių kompozito analizei

Dalelių sistema diskretizuojama baigtinių sferų skaičiumi n . Kiekviena dalelė i ($i = 1, 2, \dots, n$) charakterizuojama jos poslinkiu globalioje Dekarto koordinatų

sistemoje $OXYZ$. Dalelės i poslinkis aprašomas vektoriumi $\mathbf{U}_i = \{U_{xi}, U_{yi}, U_{zi}\}^T$, tokiu atveju išorinės jėgos, veikiančios dalelės centrą, aprašomos vektoriumi $\mathbf{F}_i = \{F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}\}^T$.

Kompozito skaitinei analizei taikoma DEM metodika. Tuo atveju dviejų dalelių sąveika pakeičiama vienu diskrečiuoju deformuojamuoju elementu, kurio galų koordinatės i ir j atitinka reprezentatyvaus tūrio sferų centrų padėtis. Daroma prielaida, kad diskretusis modelis apkraunamas, kai elemento mazgas i pasislenka mazgo j atžvilgiu. Sukuriama lokali koordinačių sistema, kurioje normalinė kryptis n atitinka elemento ašinę liniją. Lokali jėga f_n elemente atsiranda iš mazginių jėgų $f_n = \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{n} = -\mathbf{F}_j \cdot \mathbf{n}$, kurios priklauso nuo lokalaus poslinkio elemento ilgio pokyčio $u_n = (\mathbf{U}_j - \mathbf{U}_i) \cdot \mathbf{n}$.

Tuomet nuo laiko priklausanči normalinės jėgos f_n ir poslinkio lygtis u_n :

$$f_n(t) = k_n(u_n, t)u_n(t). \quad (3.1)$$

Lygtis (3.1) yra tipinė DEM metode naudojama formulė, aprašanti normalinę dviejų dalelių kontakto sąveiką, čia $k_n(u_n, t)$ atstojamasis elemento standumas. Mūsų atveju, išraiška (3.1) yra sudėtingesnė. Ji atspindi įvairias kontaktuojančių dalelių savybes, plėvelės sluoksnio poveikį ir t. t., taip pat galima įvertinti įvairius medžiagos ir geometrijos netiesiškumus. Šiai statinei sąveikai galima pridėti laike kintančias apkrovas. Diskrečiojo elemento standumą galima įvertinti analitiniais ar skaitiniais metodais.

Tokiu būdu siūlomas diskretizavimo metodas atitinka tradicinį DEM modelį, kartu šis 1D elementas gali būti laikomas sintetiniu BEM elementu, kurio mechaninės savybės atitinka reprezentatyvaus kūno sąveiką. Taikant BEM metodiką diskretaus elemento savybės charakterizuojamos mazginiais jėgų vektoriais $\mathbf{F}_{ij} = \{\mathbf{F}_i, \mathbf{F}_j\}^T$ ir poslinkiais $\mathbf{U}_{ij} = \{\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_j\}^T$. Tai aprašoma bendra forma:

$$[\mathbf{K}_{ij}]\mathbf{U}_{ij} = \mathbf{F}_{ij}, \quad (3.2)$$

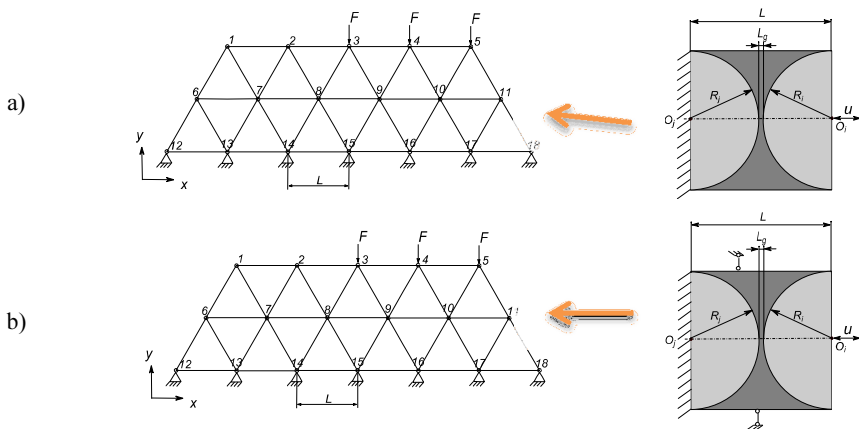
čia:

$$[\mathbf{K}_{ij}] = \begin{bmatrix} k_n & -k_n \\ -k_n & k_n \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

čia atstojamoji yra normalinio standumo matrica, kurios sudėtyje yra sąveikos standumas k_n . BEM atveju, ryšio elementas yra ryšio mazguose veikiančių jėgų vektorių atstojamoji.

3.2. Diskrečiojo modelio taikymas kompozito struktūrai modeliuoti

Diskrečiojo elemento modelis parodytas 3.1 paveiksle skirtas heterogeninių struktūrų analizei, taikant 1D diskrečiuosius elementus. Modelis sudarytas iš reguliarių lygiakraščių trikampių, kurių viršūnės atitinka dalelių centrų padėtis. Mazgų jungiančios linijos atitinka daleles jungiančius elementus.



3.1 pav. Heterogeninės struktūros analizė, taikant jungiamuosius elementus: a) išorinė cilindro siena iš dalies apribota; b) išorinė cilindro siena laisva

Fig. 3.1. An analysis of a heterogenic structure by use of beam elements: a) outer cylinder surface without additional boundary conditions; b) outer cylinder with additional boundary conditions

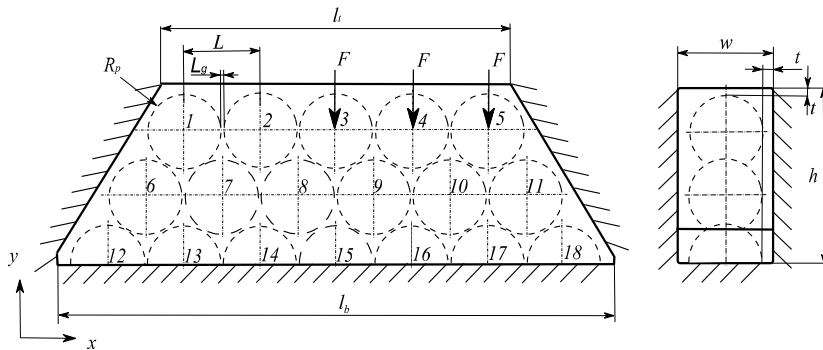
Kraštinės sąlygos diskrečiojo elemento modeliui suformuluotos tokiu būdu, kad kuo tiksliau atitiktų 3D modelio apkrovos kinematiką. Mazgų Nr. 12,13..18 poslinkiai apriboti. Sistema apkraunama per mazgus Nr. 3, 4 ir 5 jėga $F = 12 \text{ N}$.

Standumo parametrai diskrečiajam elementui struktūros analizei priskirti kiekvienam elementui atskirai, kiekvienas elementas dirba tik normaline kryptimi išilgai strypo, normalinis elemento standumas K_n nustatytas iš dviejų dalelių minkštoje terpėje sąveikos uždavinio, kai pradinis tarpelis tarp dalelių $L_g = 0,5 \text{ mm}$, tai standumas yra $K_{0,5} = 0,0841 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ (3.1 pav., a); $K_{0,5} = 0,106 \cdot 10^6 \text{ N/m}$, kai heterogeninio cilindro išorinė siena yra iš dalies apribota (3.1 pav., b).

3.3. 3D modelio sudarymas

Analizuoti dalelių sistemas nors ir taikant šiuolaikines kompiuterines programas yra gana sudėtingas uždavinys, kadangi, didėjant dalelių skaičiui, smarkiai auga skaičiavimo laikas. Iš kitos pusės – analizuojant dviejų ar kelių dalelių sistemą negaunamas sistemos deformacijos pilnas vaizdas, sudėtinga atkartoti dalelių elgseną sistemos viduje. Dalelės pernelyg stipriai veikia išorinės kraštinės sąlygos, jos tampa ar per daug judrios, ar pernelyg suvaržytos. Todėl tinkamo 3D modelio pasirinkimas yra labai svarbus atliekant skirtingų modelių palyginimus.

Skaitinių modelių kokybinei analizei buvo pasirinkta nagrinėti dalelių sistema, sudaryta iš aštuoniolikos sferų, patalpintų prizmės tūryje, sąveikaujančių tarpusavyje per klampią terpę (3.2 pav.).



3.2 pav. Dalelių sistema

Fig. 3.2. Particles system

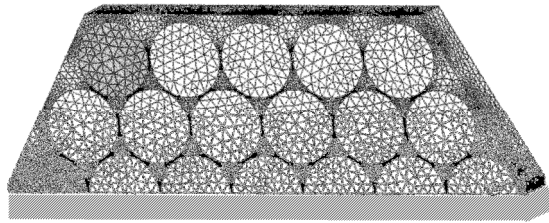
Analizei pasirinkta prizmė, kurios ilgis $l_b = 112$ mm; $l_t = 78$ mm; aukštis $h = 36$ mm ir plotis $w = 18$ mm; mažiausias atstumas nuo sferos iki išorinės sienos $t = 1,5$ mm. Dalelių sistema sudaryta iš vienodo dydžio dalelių, kurių $R_p = 7,5$ mm. Dalelės išsidėsčiusios erdvėje vienodais tarpeliais viena nuo kitos atstumu $L_g = 0,5$ mm.

Kraštinės sąlygos: dalelių Nr. 12,13...18 centrai įtvirtinti, prizmės visos šoninės ir apatinės plokštumos įtvirtintos; dalelės Nr. 3, 4 ir 5 apkrautos jėga y ašies atžvilgiu, $F = 12$ N.

Medžiagų savybės yra tokios pačios kaip ir antrajame skyriuje.

Skaičiavimuose panaudotas baigtinių elementų tinklas, kurio programinis kodas *SOLID187*, šis baigtinių elementų tipas turi 10 mazgų, gerai tinka kieto kūno analizei, taip pat palaiko klampiai tamprios medžiagos nustatymus. Skaitiniame modelyje kurtas nevienodo tankio tinklas, skaldos dalelių tinklo

dydis yra $0,1 R$, užpildo tūryje tinklas siekia $0,05 R$, normalinės sąveikos zonoje tinklas susmulkintas iki $0,01 R$. Taip padaryta tam, kad didžiausių deformacijų ir įtempimų zonoje tinklas būtų smulkus, užtikrinant didelį rezultatų tikslumą. Tinklo kokybė atitiko programos ANSYS reikalavimus tikrinant baigtinių elementų tinklo išsikraipymą.



3.3 pav. Trimatis heterogeninės struktūros baigtinių elementų modelis

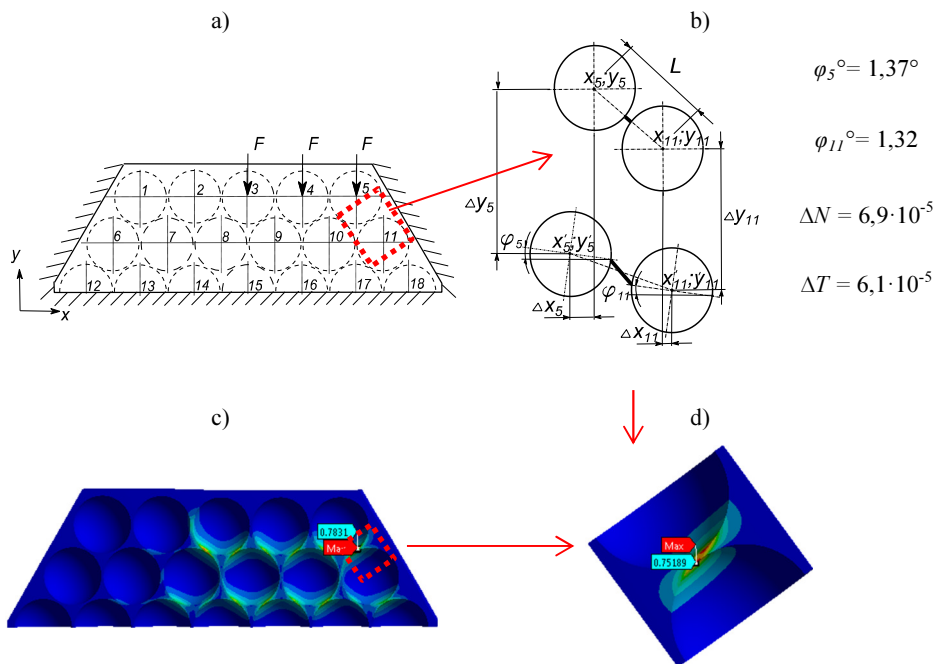
Fig. 3.3. A three-dimensional finite element model of the body of particulate solid

Skaitinio modelio baigtinių elementų tinklas sudarytas iš 830 098 mazgų ir 549 098 elementų.

3.4. Lokali dalelių sąveikos analizė

Makromastelio struktūros mechaniniai parametrai priklauso nuo mezomastelyje sąveikaujančių kūnų. Šiuo atveju heterogeninės struktūros mechaniniai parametrai priklauso ne tik nuo sąveikaujančių dalelių ir matricos mechaninių savybių (tokių kaip tamprumo modulis, Puasono koeficientas ir t. t.), bet ir nuo visos struktūros deformacijos – atsako į išorinį poveikį. Analizuojant heterogenines struktūras labai svarbu suprasti, kurios jėgos vyrauja – ašinės ar šlyties, kiek reikšmingi lenkimo momentai; tai leidžia geriau suprasti vidinę struktūros mechaniką, pritaikyti esamus ar pasiūlyti naujus strypinius modelius.

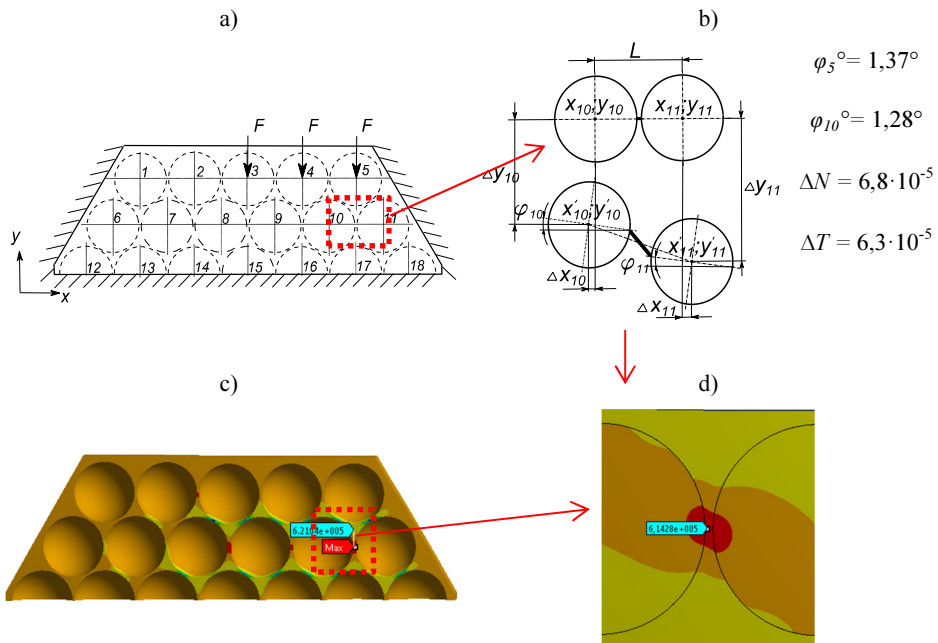
Labai svarbūs kriterijai, kuriais remiantis pasirenkama analizuoti atskirų dalelių, esančių didelėje dalelių sistemoje, sąveikaujančių dalelių pora. Galimi keli variantai, pirmasis, kai pasirenkama vidutinė ar tipinė makro dalelių sistema reprezentuojanti, sąveikaujančių dalelių pora, atitinkanti tam tikrą parametą, pavyzdžiui, vidutiniai įtempimai ar deformacijos. Kitas galimas variantas – nagrinėti pasirenkamos sąveikaujančių dalelių poros, kuriose pasiekiami dalelių sistemos ekstremumai (įtempimai ar deformacijos). Šiuo atveju, kai nagrinėjamas trapečinės formos kūnas apkrautas nesimetrine apkrova, geriau tinka antrasis variantas, kadangi išskirti asimetrinėje apkrovoje tipinę sąveikaujančių dalelių porą yra sudėtinga



3.4 pav. Lokali dalelių sistemos analizė, kai pasirenkama pagal didžiausias deformacijas dalelių sąveikos pora: a) pradinė schema; b) sąveikos pora prieš apkrovą ir po apkrovos; c) deformacijų pasiskirstymas struktūroje; d) lyginamoji analizė su dviejų dalelių modeliu

Fig. 3.4. A local particulate solid analysis according to a maximal strain, where: a) an initial loading scheme; b) a particles position before and after loading; c) a general view of the structural strain d) a comparative analysis with a two particles model

Labai didelę reikšmę lokalsios analizės rezultatams turi kriterijai, pirmasis pasirinktas kriterijus yra didžiausios deformacijos (labiausiai deformuota dalelių pora sistemoje). Remiantis šiuo parametru gerai matosi deformacijų mažėjimo tendencija, tolstant nuo apkrautų dalelių (3.4 pav.). Kita pastebima tendencija yra deformacijų koncentracija siauriausioje tarpelio zonoje, tai yra pastebimos tos pačios tendencijos kaip ir antrajame skyriuje aprašytoje dviejų dalių kontakto sąveikoje.



3.5 pav. Lokali dalelių sistemos analizė, kai pasirenkama pagal svarbiausius įtempimus sąveikos poroje a) pradinė schema; b) sąveikos pora prieš apkrovą ir po apkrovos; c) svarbiausių įtempimų pasiskirstymas struktūroje; d) lyginamoji analizė su dviejų dalelių modeliui

Fig. 3.5. A local particulate solid analysis according to a maximal principal stress, where: a) an initial loading scheme; b) a particles position before and after loading; c) a general view of maximum principal stress distribution within the structure; d) a comparative analysis with a two particles model

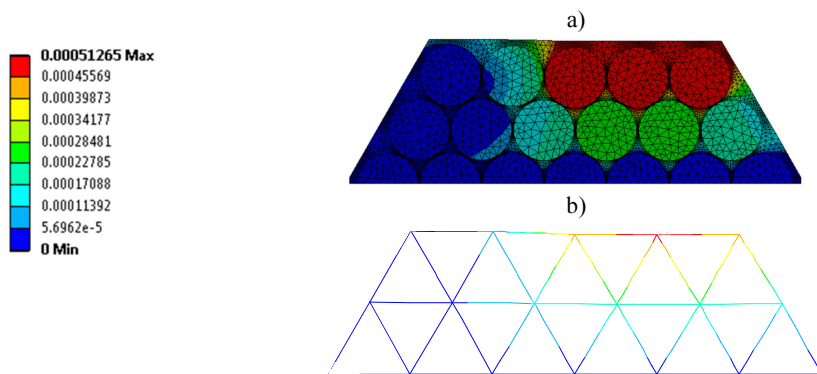
3.4 ir 3.5 paveiksluose pateiktos labiausiai apkrautos sąveikaujančių dalelių poros, remiantis kriterijais: didžiausių deformacijų ir didžiausių svarbiausių įtempimų. Kartu pateikiami ir pagrindiniai duomenys, aprašantys dalelių sąveiką – tai dalelių pasisukimo kampai, ašinės ir tangentinės deformacijos. Iš šių duomenų matyti, kad dalelės abiem atvejais labai mažai pasisuka, $\sim 1,3^\circ$, tai reiškia, kad lenkimo momentai yra labai maži ir jų galima nepaisyti. Dalelių sąveikos porose vyrauja skersinės ir ašinės deformacijos, kurios savo skaitine reikšme yra labai artimos.

Kartu buvo tiriama prielaida, kad apie visą heterogeninę struktūrą galima spręsti iš dviejų dalelių sąveikos modelio. Skaičiavimo rezultatai parodė, kad aštuoniolikos dalelių 3D modelio deformacijos ir pagrindiniai įtempimai yra labai artimi dviejų dalelių minkštoje terpėje sąveikos modeliui, skirtumai siekia

~4 %; ir ~1 %. Tai leidžia teigti, kad remiantis dviejų dalelių sąveikos modeliu, galima įvertinti visos sistemos elgseną.

3.5. Skaitinių modelių lyginamoji analizė

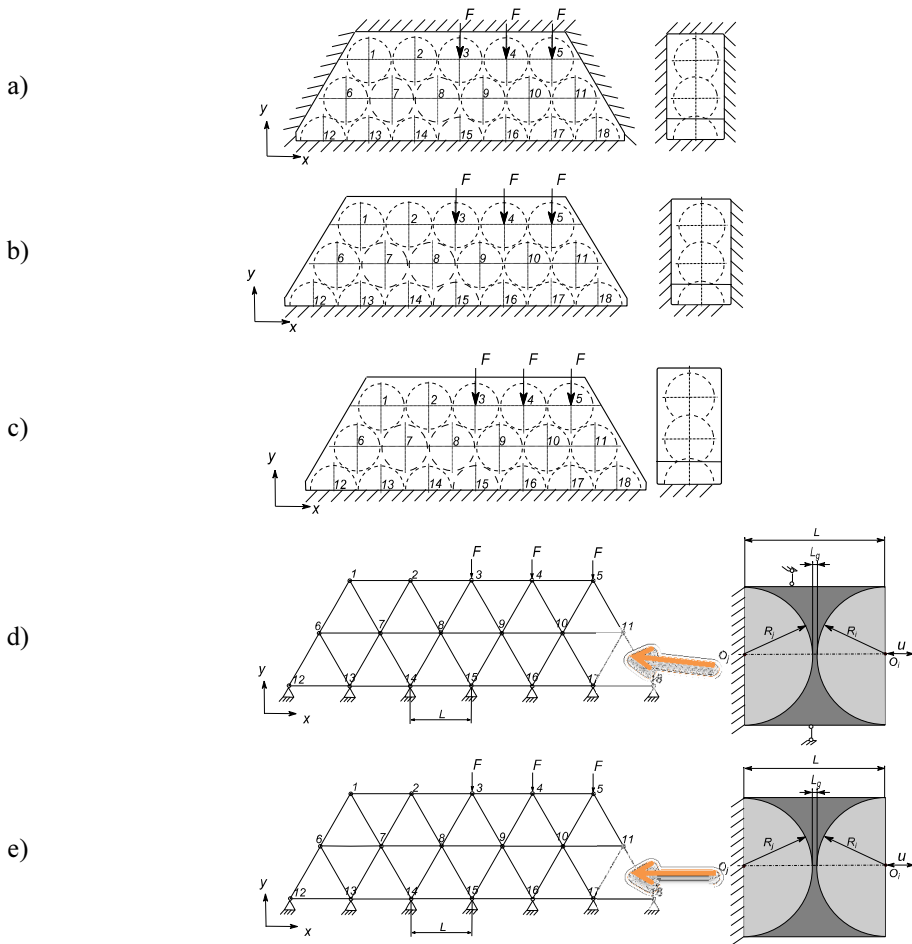
Asimetrisis apkrovos scenarijus buvo pasirinktas, kadangi heterogeninėse struktūrose (cementinės konstrukcijos, asfalto danga ir pan.) vyrauja gniuždymo apkrovos, o esant asimetrinei apkrovai geriau matosi dalelių poslinkių pokyčio gradientas. Tokiu būdu vizualiai galima palyginti ne tik poslinkių ekstremalias reikšmes, bet ir jų mažėjimą tolstant nuo apkrautų dalelių.



3.6 pav. Skaitinių modelių spalvinis vaizdas: a) 3D BE; b) diskrečiojo elemento modelis
Fig. 3.6. Contour plots of the displacement magnitudes in the mid-plane calculated:
 a) by the 3D FE; b) by the discrete element model

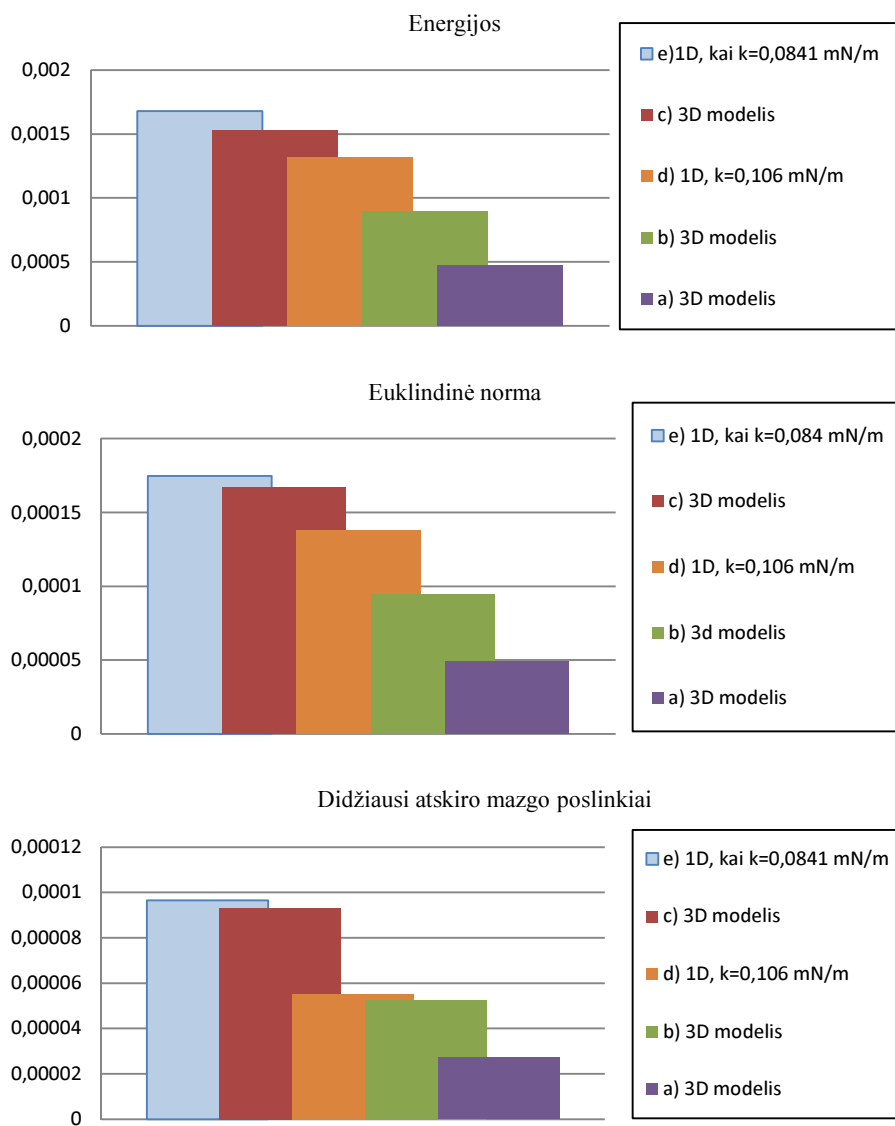
Vienas iš paprasčiausių palyginimų yra sistemų poslinkių vaizdų sugretinimas. 3.6 paveiksle parodyti modelių poslinkiai išilginėje simetrijos plokštumoje; spalvų skalė rodo poslinkių dydžius. 3.6 paveiksle pavaizduoti poslinkiai rodo, kad BE (3.6 pav., a), diskrečiojo elemento (3.6 pav., b) modelių poslinkiai yra panašūs; gerai sutampa tiek didžiausių poslinkių zonos (raudona spalva), tiek sistemų vidutinių poslinkių (žalia spalva) zonos. Ši pirminė poslinkių analizė leidžia teigti, kad šių makromodelių atsakas į išorės poveikį yra pakankamai artimas.

Lokalius sistemų efektus įvertina didžiausia deformuotos sistemos poslinkio reikšmė ΔL_{max} .



3.7 pav. Skaitiniai modeliai kraštinių sąlygų įtakos analizei tirti
Fig. 3.7. Numerical models for the analysis of boundary conditions' sensitivity

Lyginat 3.7 paveiksle pateiktus skaitinius modelius, gauti rezultatai susisteminti 3.8 paveiksle, iš kurio matyti, kad pagal visus tris lyginamuosius kriterijus mažiausi skirtumai yra tarp 3.8c ir 3.8e modelių; kurių mažiausias skirtumas siekia $\sim 9\%$, kai lyginamos potencinės energijos, o euklidinės normos ir didžiausių poslinkių skirtumai siekia $\sim 4,5\%$.



3.8 pav. Skaitinių modelių kraštinių sąlygų įtakos analizė pagal tris kriterijus: energijos, euklindinės normos ir atskiro mazgo didžiausią poslinkį

Fig. 3.8. The validation of numerical models by three criteria energy, Euclidian norm and max nude displacements

Lyginamoji analizė parodė, kad kontinuumo modelių galima diskretizuoti taikant diskrečiuosius strypinius elementus kurie dirba tik ašine kryptimi. Tai

leidžia supaprastinti skaitinį modelį išsaugant priimtina skaičiavimo paklaidą neviršijančią 9 %.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

Taikant dalelių kompozitui diskretizuoti binarinį dviejų dalelių sąveikos modelį, įvertinantį tik normalinę dalelių sąveiką, atlikta lyginamoji 3D BEM modelio bei diskrečiojo modelio analizė ir gautos tokios išvados:

1. Sudarytas diskretusis tinklinės struktūros modelis, kuriame vienas tinklelio elementas modeliuojamas tempiamu-gniuždomu strypo analogu, tai leidžia nenagrinėti dalelių sukimosi.
2. Binarinės normalinės sąveikos pagrindu sudarytas diskretusis modelis pritaikytas dalelių kompozitui modeliuoti. Diskretusis modelis buvo lyginamas su 3D BEM modeliu, lyginant tris parametrus: energijas, euklidines normas ir didžiausius mazgo poslinkius. Mažiausi lyginamųjų parametrų skirtumai gauti, kai DE modelio standumas apskaičiuotas neįvertinant Puasono koeficiento įtakos, o 3D BEM modelio išorinės sienos yra neapribotos (laisvos). Tokiu atveju lyginamuose modeliuose gauti ~8,8 % energijų skirtumai, ~4,5 % euklidinių normų skirtumai ir ~3,2 % didžiausi mazgų poslinkių skirtumai. Tai leidžia teigti, kad siūlomas diskretinis analitinis modelis gali būti pritaikytas dalelių kompozito analizei.
3. Lokali dalelių analizė parodė, kad aštuoniolikos dalelių sistemoje dalelių pasisukimai neviršija $\sim 1,3^\circ$, tokiu atveju lenkimo momentai, veikiantys dalelių sąveikoje, yra nežymūs ir jų galima nepaisyti.
4. Heterogeninėje struktūroje vyrauja skersinės ir ašinės jėgos. Lyginamoji analizė parodė, kad aštuoniolikos dalelių modelio elgseną galima modeliuoti taikant supaprastintą dviejų dalelių, esančių minkštoje terpėje, modelį. Skaičiavimo rezultatai parodė deformacijų skirtumą $\sim 4\%$; kai tuo tarpu pagrindinių įtempimų skirtumas siekia $\sim 1\%$.
5. Viena iš priežasčių, leidžiančių pasiekti tokį didelį šių modelių įtempimų ir deformacijų panašumą yra ta, kad įtempimai ir deformacijos koncentruojasi siauriausioje matricos zonoje, esančioje tarp kontaktuojančių dalelių. Tokiu atveju periferijos įtaka yra labai maža, o tai leidžia pasiekti mažus lyginamųjų parametrų skirtumus.

Diskrečiojo modelio taikymas Maršalo bandiniui analizuoti

Šiame skyriuje pateikiama Maršalo bandinio, taikomo asfalto analizei, skaitinio modelio preprocesoriaus kūrimo pagrindiniai kriterijai, dalelės dydžio ir tarpelio nustatymo lygtys. Aptartas tipinis Maršalo bandymas, tipinės eksperimentinės kreivės. Sukurtas dalelių kompozito skaitinis modelis lyginamas su eksperimentiniais duomenimis. Skyriaus medžiaga paskelbta straipsnyje (Rimša *et al.* 2014).

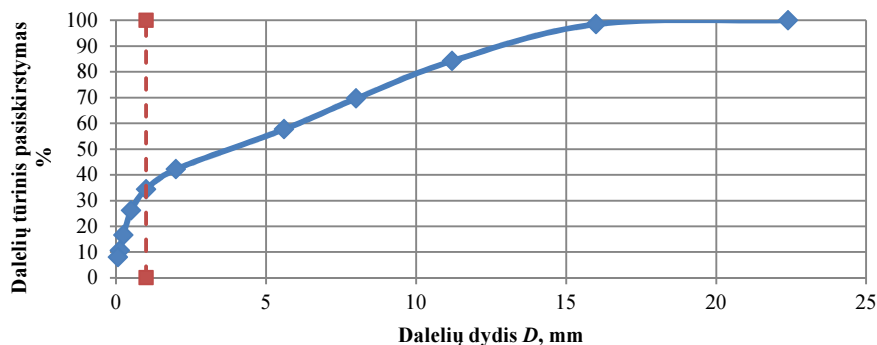
4.1. Skaitinio modelio pagrindiniai kriterijai

Šiame darbe skaitinis modelis kurtas remiantis AC 16 PD 70/100 asfalto markės duomenimis, tai viena iš plačiai taikomų asfalto markių, naudojama viršutinėms dėvimoms kelių dangoms įrengti.

Asfalto struktūros analizė yra kompleksinis uždavinys, kur makromastelio mechaniniai parametrai priklauso nuo mikro- ir mezomastelyje sąveikaujančių elementų mechaninių poveikio, šiuo atveju mezomastelį atitinka atskiros dalelės sąveika su kaimynine dalele. Tačiau siekiant geriau suprasti mezomastelio poveikį visai makrostruktūrai šiame darbe analizuojamas Maršalo bandinys, sudarytas iš vienodo dydžio dalelių, kurių skersmuo artimas mišinio dalelių

vidurkiui. Toks pasirinktas analizės metodas leidžia geriau įvertinti mezomastelio įtaką makroobjektui – Maršalo bandinio skaitiniam modeliui. Šis analizės būdas turi tam tikrų trūkumų – analizuojama vidutinio dydžio dalelių struktūra, kai tuo tarpu realus Maršalo bandinys yra sudarytas iš nevienodo dydžio dalelių, tačiau pirmajam priartėjimui ir vėlesniems palyginimams yra reikalingas skaitinis modelis, sudarytas iš vidutinio dydžio dalelių.

Asfaltas AC 16 PD 70/100 pagal masę yra sudarytas iš 5,2 % bitumo ir 94,8 % kietųjų mineralinių medžiagų, kurių dydis svyruoja nuo 16 mm iki 0,063 mm. Vertinant mišinio sudėtį yra svarbu ne tik mišinį sudarančių dalelių dydžiai, bet ir jų procentinis pasiskirstymas pagal dydį. Asfalto AC 16 PD70/100 dalelių tūrinis pasiskirstymas pateiktas 4.1 paveiksle.



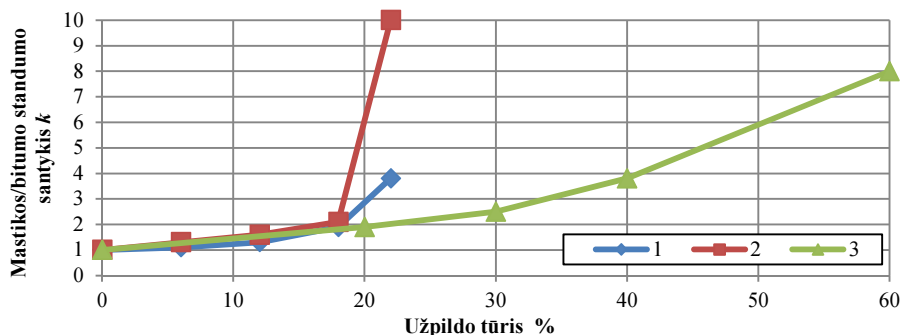
4.1 pav. AC 16 PD 70/100 asfalto mišinio dalelių pasiskirstymas pagal tūrį
Fig. 4.1. AC 16 PD 70/100 asphalt particles distribution by size

Bitumo ir mineralinių dulkių mišinys vadinamas mastika. Anderson *et al.* (1992) teigia, kad asfalto mišinio rišančioji medžiaga yra ne grynas bitumas, o bitumo ir mineralinių dulkių mišinys. Tai yra, bitumo mastika, kaip atskiras elementas, asfalto mišinyje sąveikauja su didesnėmis skaldos dalelėmis (smėliu ir skalda). Tai patvirtino ir kiti tyrėjai Kim ir Little (2004).

Šiuo metu yra paplitę keli skaldos klasifikavimo metodai, vienas iš jų yra Bailey metodas, aptartas straipsnyje Vavrik *et al.* (2002). Kur teigiama, kad prie stambių priskiriamos tos dalelės, kurios sukuria tarpus, smulkioms dalelėms priskiriamos tos, kurios užpildo stambių dalelių sukurtus tarpus.

Peržvelgtoje literatūroje matyti, kad nėra susiformavusios vienareikšmiškos nuomonės nuo kurio dalelės dydžio ją galima priskirti prie stambių dalelių, todėl šiame darbe pasirinktas kompromisinis variantas, kai įvertinama dalelių imtis nuo 16 mm iki 1 mm. Tokiu atveju mažesnių nei 1 mm dalelių koncentracija pagal tūrį siekia 24,1 %.

Panašiam darbe Mo *et al.* (2008) teigiama, kad dalelės, esančios mažesnės nei 2 mm skersmens, negali sudaryti savarankiškų sąveikos porų su kitomis dalelėmis, jos įeina į bitumo sudėtį padidindamos jo standumą. Tačiau tokiu atveju labai padidėja dalelių tūrio koncentracija bitumo mastikoje. Standumo prieaugis, didėjant dalelių tūrinei koncentracijai, literatūroje nėra pateikiamas vienareikšmiškai.



4.2 pav. Mastikos standumo priklausomybė nuo dalelių užpildo tūrio frakcijoje: 1 – kai dalelės 5 μm dydžio, remiantis Chen *et al.* (2007); 2 – kai dalelės 75 μm dydžio, remiantis Chen *et al.* (2007); 3 – mastikos standumo priklausomybė nuo dalelių tūrio mastikoje pateikta Shashidhar ir Shenoy (2002)

Fig. 4.2. The mastic stiffness ratio dependent on fillers' volumetric density where: 1 – the particle size is 5 μm; by Chen *et al.* 2007; 2 – the particle size is 75 μm; by Chen *et al.* 2007; 1 – curve by Shashidhar N, ir Shenoy (2002)

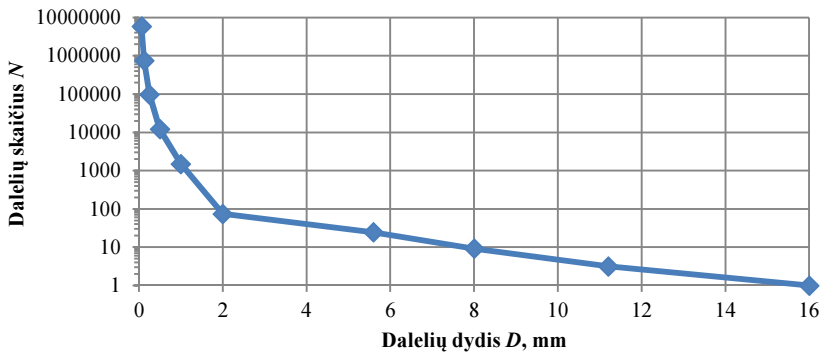
Remiantis 4.2 paveikslu matyti, kad bitumo mastikos standumo didėjimas pateiktas skirtingų autorių ir gerai sutampa, kol dalelių užpildo dydis neviršija ~18%; tai yra visi šie trys modeliai duoda labai artimas reikšmes. Jei skaičiuojant vidutinį dalelės dydį imamas mažiausias dalelės dydis 2 mm, kaip panašiam darbe darė Mo *et al.* (2008), tai mažesnių nei 2 mm frakcijos dalis pagal tūrį bitumo mastikoje išaugtų iki 30%; tokiu atveju nustatyti mastikos standumo prieaugį yra sudėtinga, kadangi turima literatūra duoda dideles standumo variacijas. Iš grafiko (4.2 pav.) pasirenkamas matricos tamprumo modulio padidėjimo koeficientas (lyginant su grynu bitumu) $k = 2$.

Šiame darbe vidutinis dalelės dydis apskaičiuotas remiantis Mo *et al.* (2008):

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \bar{d}_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (4.1)$$

čia n – bendras dalelių skaičius; $\bar{d}$ – vidutinės dalelės dydis, mm; d_i – i -tosios dalelės dydis, mm; w_i – procentinė suma pagal masę i -tojo skirstinio; $\bar{d}_i = (d_i + d_{i-1})/2$;

Remiantis šia lygtimi apskaičiuotas vidutinis dalelės skersmuo $D = 5,73$ mm AC 16 PD 70/100 mišinyje.



4.3 pav. AC-12 asfalto mišinio dalelių skaičiaus N priklausomybė nuo dalelės skersmens D

Fig. 4.3. AC-12 mix asphalt particle number's N dependence on the particle diameter D

Grafike (4.3 pav.) parodyta dalelių skaičiaus santykinė priklausomybė nuo didžiausios dalelės D_{16} vienetų skaičiaus N_1 ; kai dalelės, kurių skersmuo yra 50 % nuo D_{16} dydžio, arba $D_8 = 8$ mm; $D_2 = 1/2 D_{16}$, tai šių mažesnių dalelių vienetų skaičiaus santykis su didžiąja dalele D_{16} asfalto mišinyje siekia $N_8/N_{16} = 10$. Mažėjant dalelės skersmeniui, proporcingai auga jos vienetų skaičius mišinyje; kai dalelės skersmuo yra 12,5 %, arba $D_2 = 2$ mm; nuo didžiausios dalelės dydžio, tai šių mažesnių dalelių skaičius santykis su didžiąja dalele D_{16} asfalto mišinyje siekia $N_2/N_{16} = 74,6$. Toliau mažėjant dalelių dydžiui jų vienetų skaičiaus santykis su didžiąja dalele ima augti eksponentiškai.

Bitumo, dengiančio daleles, storio nustatymas apskaičiuotas remiantis Mo *et al.* (2008), laikant, kad dalelių paviršiai mišinyje tolygiai padengti bitumo matrica, tuo remiantis galima apskaičiuoti bitumo plėvelės vidutinį storį, esantį tarp dviejų sąveikaujančių dalelių. Tam reikia žinoti procentinę mišinio sudėtį.

Dalelių tūrio frakcija k mišinio sudėtyje skaičiuojama laikant, kad visos dalelės yra tolygiai padengtos vienodu bitumo storio, tokiu atveju santykis k gali būti nustatytas dalijant dalelės tūrį iš dalelės tūrio, padengto bitumo sluoksniu:

$$k = \frac{\frac{4}{3}\pi \cdot r^3}{\frac{4}{3}\pi(r+h)^3} = \left(\frac{r}{r+h}\right)^3. \quad (4.2)$$

Teorinis bitumo storis:

$$L_g = r(k^{-1/3} - 1), \quad (4.3)$$

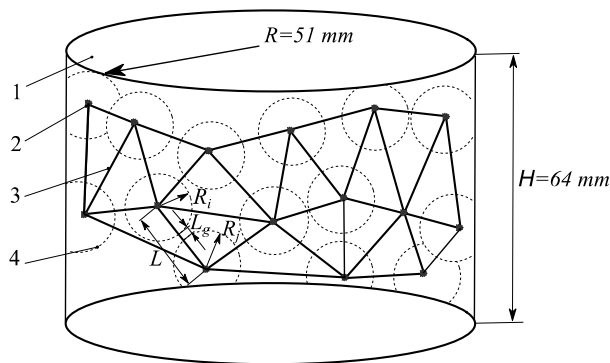
čia r – vidutinės ekvivalentinės dalelės spindulys, mm; k – tūrinė frakcija skaldos dalelių mišinyje; L_g – bitumo plėvelės storis.

Remiantis realaus asfalto mišinio sudėtimi, 5 % pagal masę sudaro bitumas, 81 % pagal tūrį sudaro dalelės ir 14 % pagal tūrį sudaro mineralinės dulkės, tokiu atveju $k = 0,77$; o vidutinis bitumo storis yra 0,34 mm.

Skaitiniam Maršalo bandiniui sugeneruoti buvo pasitelkta C++ programinis paketas. Generuojant skaitinį Maršalo bandinį buvo laikomasi šių principų:

Dalelės – idealizuotos sferos, cilindro erdvėje, sudarančioje Maršalo bandinį, gali išsidėstyti atsitiktine tvarka.

Visų dalelių spinduliai ir tarpeliai tarp kaimyninių dalelių yra pastovūs. Dalelių spindulys $R = 2,86$ mm. Tarpelis tarp dalelių $L_g = 0,34$ mm., tai yra kiekvieno atskiro 1D elemento, sudarančio skaitinį Maršalo bandinį, ilgis yra $L = 2R + L_g = 6,07$ mm.



4.4 pav. Scheminė skaitinio Maršalo bandinio struktūra: 1 – reprezentatyvusis tūris; 2 – mazgas; 3 – 1D elementas; 4 – virtuali dalelė

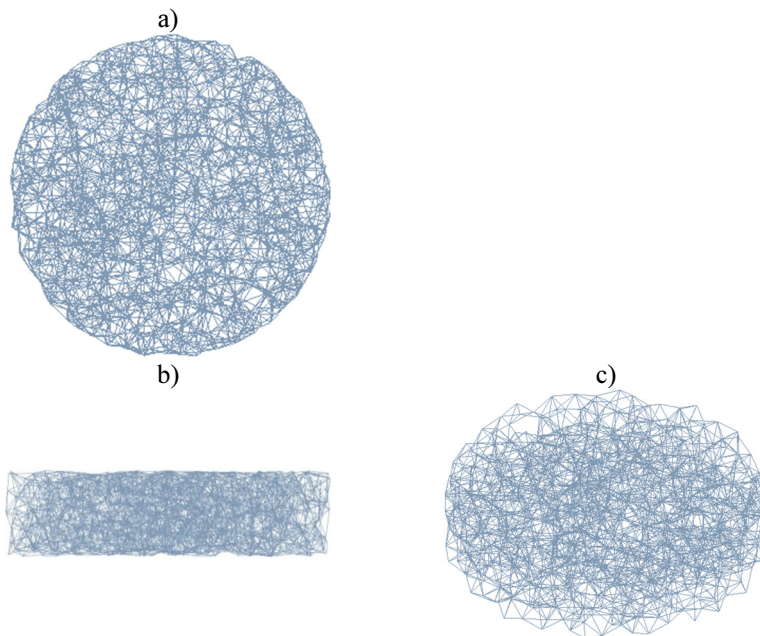
Fig. 4.4. A schematic Marshall test's sample: 1 – representative volume; 2 – node; 3 – 1D element; 4 – virtual particle

Programinis kodas daleles cilindriniam bandinyje stengiasi išdėlioti tokiu būdu:

Dalelių tūris skaitiniame Maršalo bandinyje generuojamas, kol pasiekia 81 % su 2 % paklaida.

Dalelės negali persidengti, dalelės negali kontaktuoti tiesiogiai, jos visada kontaktuoja per bitumo sluoksnį L_g .

Jei dalelės yra nutolusios toliau nei ilgis L , tai tokiu atveju nebus sukurtas 1D ryšio elementas ir dalelės neturės tiesioginės sąveikos.



4.5 pav. Skaitinis Maršalo bandinys, sudarytas iš 1012 mazgų ir 4814 1D elementų:

a) vaizdas iš šono; b) vaizdas iš viršaus; c) aksonometrinė projekcija

Fig. 4.5. A digital Marshall test's sample consisting of 1012 nodes and 4812 1D elements where: a) a side view, b) a top view and c) a trimetric view

Kadangi Maršalo bandinys yra cilindras, tai modelį galima supaprastinti, skaičiuojant tik pusę cilindro tūrio, padalinant cilindą skersine simetrijos plokštuma.

Skaitinis modelis sudarytas iš 1012 mazgų ir 4812 elementų. Tai yra viena sferinė dalelė kontaktuoja su ~5 kaimyninėmis dalelėmis. Bendras didelis dalelių tarpusavio kontaktų skaičius sumažina atsitiktines lokalias tinklo generavimo

paklaidas ir leidžia tikėtis mažų globalaus sprendinio paklaidų. Tinklo struktūra nėra vienalytė, tai geriau atspindi realų Maršalo bandinį.

4.2. Maršalo bandymo testas, pagrindiniai parametrai

Dėl asfalto struktūrą sudarančių elementų netolygumo ir bitumo savybių netiesiškumo, gana sudėtinga užtikrinti jo eksploatacines savybes. Kadangi asfalto struktūra sudaryta iš nevienodo dydžio ir formos dalelių, jos sudaro heterogenines sąveikos poras, tuo tarpu daleles jungianti bitumo matrica pati yra heterogeninė, pasižyminti klampiai tampriomis savybėmis. Tokiu būdu yra sudėtinga įvertinti atskirų parametų įtaką visai asfalto struktūrai.

Dėl ribotų kompiuterinių resursų ilgą laiką vyravo natūriniais eksperimentais pagrįsti asfalto kokybės įvertinimo kriterijai. Vienas iš metodų, įvertinantis asfalto mechanines charakteristikas, yra Maršalo bandymas, sukurtas II pasaulio karo metu gretai ir nebrangiai įvertinti asfalto struktūros standumą.

Maršalo bandymai atliekami apkraunant pastoviu apkrovos greičiu, kadangi bitumo stiprumas laike yra nepastovus, didėjant apkrovos laikui, bitumo stiprumas mažėja. Bitumo stiprumas labai priklauso ir nuo temperatūros, todėl bandiniai yra specialiai paruošiami išlaikant 4 valandas 60°C vandenyje, tokiu būdu bitumo klampiai tamprios savybės nedaro įtakos bandymų tikslumui.

Bandymo metu matuojama atraminė reakcijos jėga, atsirandanti bandiniui priešinantis deformacijai, taip pat matuojamas ir bandinio plastiškumas.

Pagal pastovumo ir plastiškumo santykį yra sprendžiama, kiek tas mišinys yra atsparus deformacijoms. Kuo šis santykis yra didesnis, tuo labiau galima manyti, kad asfaltbetonio mišinys yra atsparesnis (*The Shell Bitumen Handbook*, 1991).

Maršalo bandymo privalumai:

1. Galima kompleksškai įvertinti asfalto pastovumą ir plastiškumą, santykinai nebrangūs bandymai, kurias galima patikrinti atskirų asfalto sudedamųjų dalių įtaką bendram asfalto plastiškumui ir stabilumui.

2. Greitas ir pigus metodas.

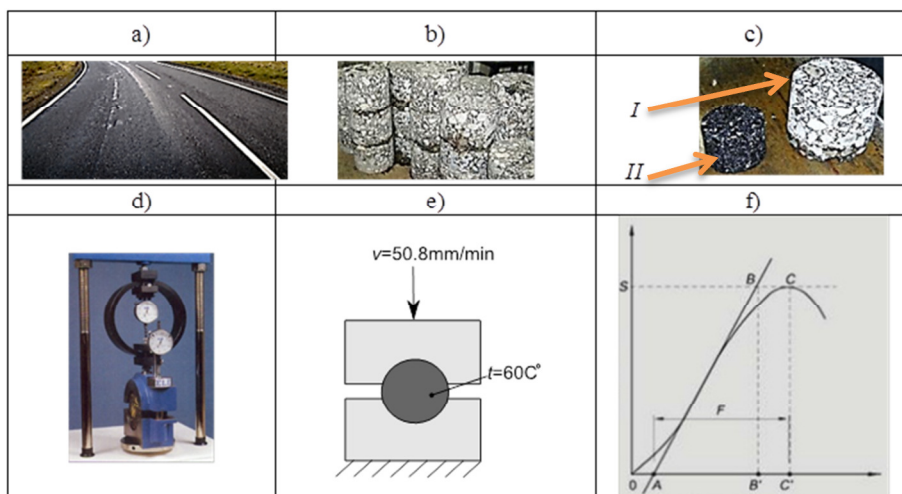
3. Bandymus galima atlikti šalia bandinio paėmimo vietos.

Maršalo bandymo trūkumai:

1. Matuojant bandinio pastovumą ir stabilumą negalima atskirti, kiek kuris asfalto komponentas įtakoja bandymo rezultata.

2. Asfalto bandinys matuojamas esant fiskuotam apkrovos greičiui ir temperatūrai, tačiau realų asfaltą veikia nepastovios apkrovos ir temperatūros. Todėl bandinys, turintis didelį Maršalo stabilumą, ne visada realiame kelyje užtikrina geras eksploatacines charakteristikas.

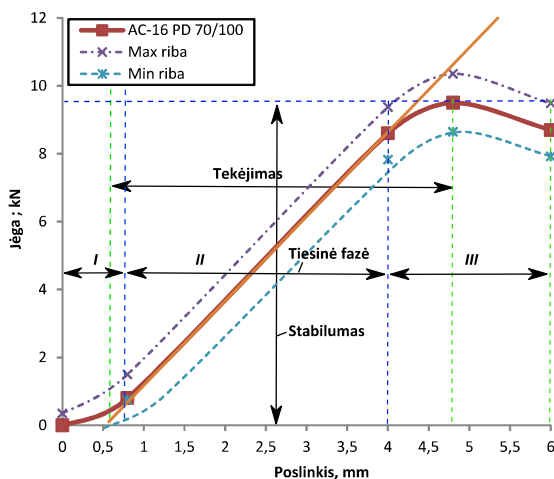
3. Metodas yra pernelyg supaprastintas, kad galėtų tiksliai įvertinti aukštos kokybės ar didelių apkrovų asfalto struktūrą



4.6 pav. Maršalo bandymo schema: a) kelio danga; b) iš dangos išpjauti kelio bandiniai; c) siekiant išvengti atsitiktinių paklaidų, bandiniai performuojami – padaromas Maršalo bandinys (I – pradinis bandinys; II – Maršalo bandinys); d) Maršalo bandymo stendas; e) Maršalo bandymo metu reikia išlaikyti pastovų apkrovos greitį $v = 50,8 \text{ mm/min}$; pastovą bandinio temperatūrą $t = 60 \text{ C}$; f) remiantis bandymo rezultatais brėžiama grafikas, kuriame svarbiausia: AC' – bandinio deformacija (tekėjimas) mm; SC – didžiausia atraminės reakcijos reikšmė, kN .

Fig. 4.6. The Marshall test's work flow: a) road surface; b) cut out samples; c) initial sample (I) and reformed Marshall test sample (II); d) Marshall test machine; e) boundary conditions; f) Marshall test graphic, where most important are: AC' – sample deformation (flow) mm; SC – max force reaction limit (stability) kN .

Kadangi atliekant natūrinius Maršalo bandymus svarbiausia yra didžiausia pasiekama bandinio stiprumo riba, pagal kurią sprendžiama apie asfalto mišinio tinkamumą. Kitas svarbus parametras tai bandinio deformacijos (tekėjimas) bandinio poslinkis eksperimento metu.



4.7 pav. AC 16 PD 70/100 asfalto Maršalo bandymo rezultatas su didžiausiomis ir mažiausiomis leistinomis ribomis

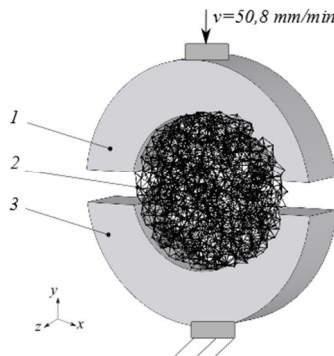
Fig. 4.7. An AC 16 PD 70/100 asphalt Marshall test result with maximal and minimal limits

Iš 4.7 paveikslo matyti, kad didžiausią stiprumo reikšmę Maršalo bandinys pasiekia $9,5 \text{ kN}$, kai bandinio deformacijos pasiekia $\sim 3,8 \text{ mm}$.

Brūkšninėmis linijomis parodytos didžiausios ir mažiausios leistinos ribos į kurias turi patekti tiriamas bandinys. Šis apribojimas susijęs su praktiniais bandymo ir eksploatacinių parametru įvertinimais.

Šiame darbe nagrinėjamas toks atvejis, kai dalelių sąveikos kontaktas, nuo veikiančios apkrovos, daleles jungiantys 1D ryšių skaičius pastovus $N = \text{const.}$, tai yra, negali nei nutrūkti, nei atsirasti naujų. Tokiu atveju nagrinėjama tik ta Maršalo bandymo grafiko dalis, iki pasiekia didžiausią reikšmę, (4.7 pav.); tuo tarpu krintanti grafiko dalis, kurioje vyrauja jungiančių ryšių kontaktų irimas ir dėl to mažėja atraminė reakcija, šiame darbe netiriama.

Kadangi Maršalo bandinys yra cilindras, tai modelį galima supaprastinti, skaičiuojant tik pusę cilindro tūrio, padalinant cilindrą skersine simetrijos plokštuma (4.8 pav.).



4.8 pav. Maršalo bandinio kraštinės sąlygos: kur 1, 3 – metaliniai elementai;
2 – Maršalo bandinys

Fig. 4.8. Marshall test's boundary conditions, where 1, 3 – metal plates,
2 – Marshall test's sample

Skaitinis modelis sudarytas iš 1012 mazgų ir 4812 elementų. Tai yra viena sferinė dalelė sąveikauja su ~ 5 kaimyninėmis dalelėmis. Atskiro 1D elemento standumas apskaičiuotas iš dviejų dalelių sąveikos su vidutiniu dalelės dydžiu, esančiu Maršalo bandinyje. Bendras didelis dalelių tarpusavio sąveikų skaičius sumažina atsitiktines lokalias tinklo generavimo paklaidas ir leidžia tikėtis mažų globalaus sprendinio paklaidų. Tinklo struktūra nėra vienalytė, tai geriau atspindi realų Maršalo bandinį.

Plieninių elementų mechaniniai parametrai: tamprumo modulis $E = 2 \cdot 10^{11}$ Pa; Puasono koeficientas $\nu = 0,3$.

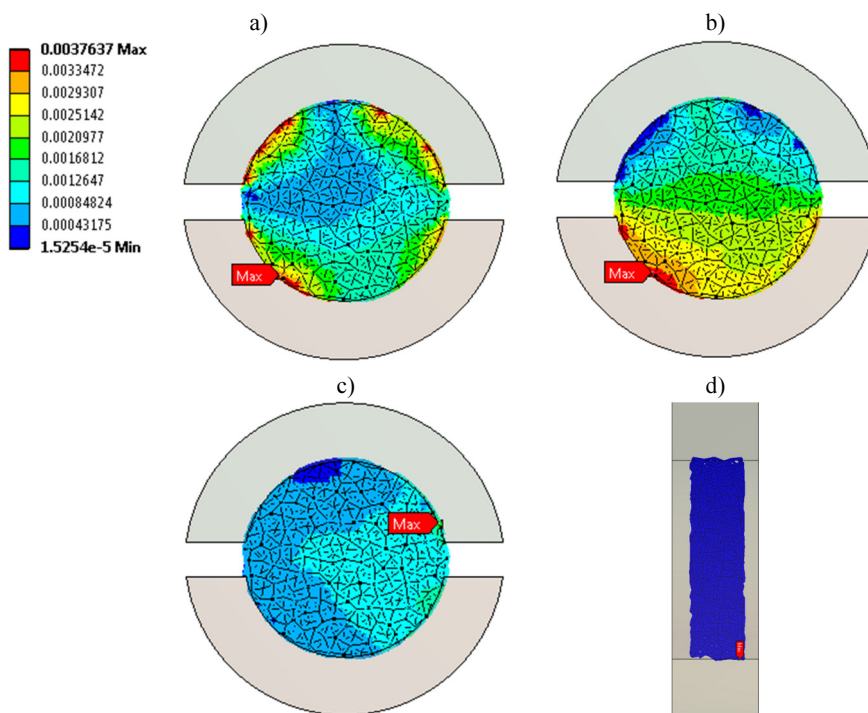
Maršalo bandinys apkraunamas netiesiogiai, o per jį fiksuojančius metalinius pusapvalius elementus Nr. 1 ir 3. Apatinis elementas Nr. 3 yra pilnai suvaržytas, viršutinis elementas Nr. 1 gali judėti tik vertikalia y ašimi pastoviu greičiu $v = 50,8$ mm/min žemyn.

Maršalo bandiniui apkrova perduodama kontakto būdu, 1D elemento sąveika su 3D kūnu yra gana sudėtinga, atliekant realų Maršalo bandymą pačioje pradžioje, kol bandinys „prisitaiko“ prie bandymo staklių yra matyti grafike (4.7 pav.) iki poslinkio ~ 1 mm yra matomos netiesinės apkrovos ir atraminės reakcijos priklausomybės, vėliau, augant poslinkiui, pereinama į tiesinį apkrovos ir atraminės reakcijos dėsnį. Taip yra todėl, kad bandymo pradžioje kontakto zonoje yra santykinai nedidelė trintis, kuri pasiekus poslinkį ~ 1 mm smarkiai išauga, ir nuo ≥ 1 mm apkrovos bandinys visu kontaktuojančiu paviršiumi „sulimpa“ su jį apkraunančiais elementais. Tokiu būdu, siekiant supaprastinti analizę, nevertinant pradinių netiesinių skaitinio modelio rezultatų, galima iš karto formuoti kraštinės sąlygas, kai bandinys yra sulipęs su jį apkraunančiais

elementais. Kontaktas modeliuojamas taikant Lagranžo priaugių kontakto metodą, perskaičiuojant kontakto standumą kiekvienoje iteracijoje.

4.3. Skaiciavimo rezultatai

Skaitiniai rezultatai rodo, kad Maršalo bandinys, veikiamas kraštinių sąlygų, deformavosi netolygiai (4.9 pav.). Taip atsitiko dėl bandinio netolygios struktūros. Iš skaitinių rezultatų matyti, kad didžiausius poslinkius patiria išoriniai bandinio sluoksniai.

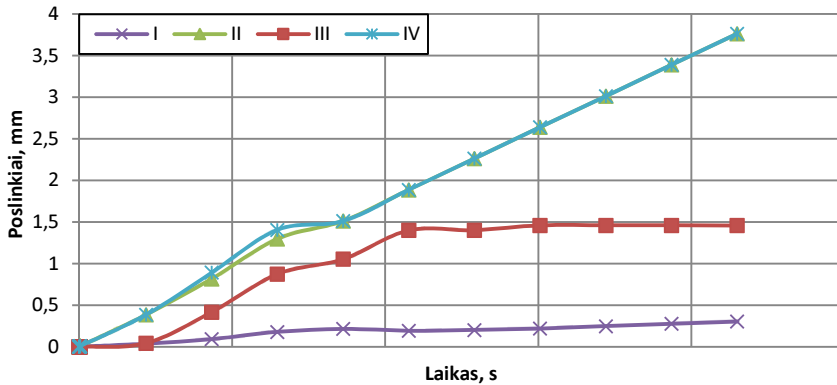


4.9 pav. Maršalo bandinio poslinkiai (m): a) suminis poslinkis; b) poslinkis vertikalia ašimi; c) poslinkis horizontalia ašimi; d) išilginis poslinkis

Fig. 4.9. Deformations of the Marshall digital model test sample, where: a) total; b) vertical; c) horizontal; d) longitudinal

Iš skaitinių rezultatų, parodytų (4.9 pav.), didžiausius poslinkius patiria išoriniai modelio paviršiai, kur (4.9 pav., a) pateiktas suminis poslinkių vaizdas, kuris yra labai artimas poslinkiams, esantiems vertikaliajoje ašyje, kai tuo tarpu

išilginiai ir horizontalūs poslinkiai (4.9 pav., c ir 4.9 pav., d) deformuotame modelyje yra žymiai mažesni.



4.10 pav. Deformuoto Maršalo bandinio poslinkiai, kur: I – x ašimi; II – y ašimi; III – z ašimi; IV – suminis poslinkis

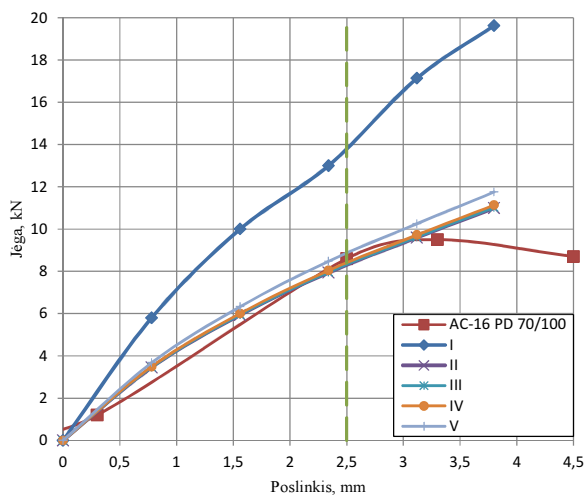
Fig. 4.10. Deformations of the Marshall digital model test sample: I, II, III and IV are displacements in the axis x, y, z and total respectively

Grafike (4.10 pav.) pateikti deformuojamojo kūno poslinkiai laiko atžvilgiu; vertikalus deformuojamojo kūno poslinkis yra artimas tiesiniam, kai tuo tarpu horizontalus ir išilginis poslinkiai nuo tam tikros reikšmės nuo apkrovos nebepriklauso.

4.4. Maršalo bandinio atraminės reakcijos priklausomybės esant skirtingiems orientuotos matricos sluoksniams

Orientuotos matricos įtakos analizė makromastelio modelio atraminei reakcijos jėgai parodyta 4.11 paveiksle.

Realiam asfalto bandinyje veikia keletas netiesiškumų – bitumo savybės kinta laike, skaldos dalelės, pasiekus tam tikrą kritinę reikšmę, yra atplėšiamos nuo bitumo – suardomas adhezinis ryšys, gali plyšti bitumas – suardomas kohezinis ryšys. Dėl šių netiesinių sąveikų mikro- ir mezomastelyje prasideda makromodelio irimas, tai yra, didėjant poslinkiui, atraminė jėga nustoja augti. Šiame darbe pasiūlyti skaitiniai modeliai neįvertina galimybės daliai elementų pasiekus tam tikrą apkrovą nutrūkti. Tai planuojama įgyvendinti būsimuose moksliniuose darbuose.



4.11 pav. Matricos plėvelės įtaka skaitinių modelių atraminei reakcijai, lyginat su fiziniu Maršalo bandymu. Čia I – tamprus modelis be matricos plėvelės; II – klampiai tamprus modelis be matricos plėvelės; III – klampiai tamprus modelis kai matricos plėvelės storis 4 μm ; IV – klampiai tamprus modelis kai matricos plėvelės storis 12 μm ; V – klampiai tamprus modelis kai matricos plėvelės storis 50 μm

Fig. 4.11. The comparison of the matrix film effects on reaction force and validation of the physical Marshall test result, where I – elastic model no matrix film; II – viscoelastic model no matrix film; III- viscoelastic model with 4 μm matrix film; IV – viscoelastic model with 12 μm matrix film; V – viscoelastic model with 50 μm matrix film

Šiame darbe lyginami skaitiniai modeliai su natūriniu bandymu iki vertikalios žalios spalvos tiesės (4.11 pav.); kur fiziniame modelyje nepasireiškia atskirų kontaktų irimas, ar jis nėra vyraujantis. Viršijus šią ribą skaitiniai modeliai dėl neįvertinto irimo negali atkartoti natūrinio bandymo rezultatų.

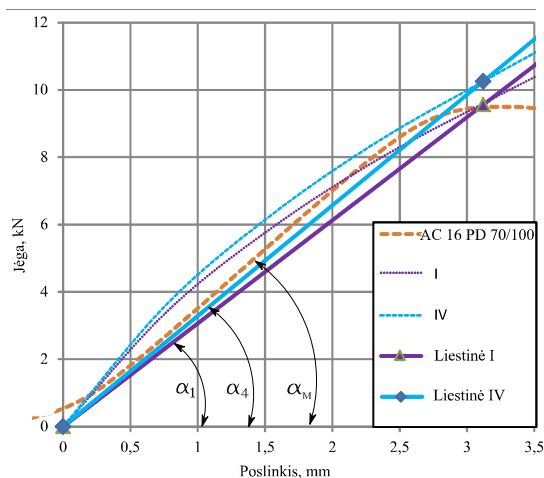
Tampraus modelio standumas yra ~ 50 % didesnis lyginat eksperimentiniais rezultatais, papildomai įvertinus matricos klampos efektus tiksliau atkartojama Maršalo bandinio apkrovos fazė.

Kartu tirta matricos plėvelės įtaka dalelių kompozito standumui. Skaitiniai rezultatai parodė, kad matricos plėvelės įtaka auga didėjant jos storiui, kai matricos plėvelės storis yra 4 μm , tai lyginant su modeliu be plėvelės, padidėja tik ~0,29 %. Tuo tarpu, kai plėvelės storis pasiekia 50 μm , tai šiuo atveju pasiekiamas žymus standumo padidėjimas, siekiantis 6,5 %, lyginat su modeliu be plėvelės.

4.1 lentelė. Plėvelės įtaka normaliniam standumui ir DE modelio atraminei reakcijai**Table 4.1.** Matrix film influence to normal stiffness and DE model force reaction

Matricos plėvelės storis δ ; μm	1D elemento standumas K_{tot} in N/m	1D elemento standumo santykis $K_{tot}^{suplev} / K_{tot}^{beplevel}$ %	Skaitinio Maršalo modelio jėgos reakcija F, kN	Skaitinio Maršalo modelio jėgos pokyčio įtaka %
0 (be plėvelės)	$7,15 \cdot 10^4$	-	9,596	-
4	$7,18 \cdot 10^4$	0,41	9,624	0,29
12	$7,25 \cdot 10^4$	1,38	9,724	1,32
50	$7,59 \cdot 10^4$	5,79	10,25	6,38

Iš 4.1 lentelės matyti, kad 1D elemento standumas koreliuoja su viso modelio standumu.



4.12 pav. Lyginamieji kirstiniai standumai, čia I – kai modelis be plėvelės ($\delta = 0$);

II – kai modelis su plėvele ($\delta = 50 \mu\text{m}$)

Fig. 4.12. Secant stiffness compression with physical results, where: I – no matrix film;

IV – with a matrix film ($\delta = 50 \mu\text{m}$)

4.2 lentelė. Lyginamieji kirstinio standumo kampai**Table 4.2.** Secant stiffness for various models

α_1	$71,92^\circ$
α_4	$73,09^\circ$
α_M	$73,79^\circ$

Lyginti skirtingų modelių standumą patogiausia taikant kirstinio standumo kriterijų didžiausios atraminės reakcijos reikšmės taške; vertinant skirtingų modelių liestinių kampus (4.12 pav.). Šis lyginimo būdas geriausiai tinka, kadangi jis parodo lyginamųjų modelių elgseną, kuri jau nusistovi bandymo eigoje, bet negrįžtamieji irimo procesai dar nėra prasidėję, ar jie nėra vyraujantys. 4.2 lentelėje pateikti standumo kampai (tangentai) yra labai artimi fizinio bandymo rezultatams, tačiau skaitinis modelis yra santykinai 2,3 % minkštesnis (neįvertinant matricos plėvelės) ir 1,1 % minkštesnis (įvertinant plėvelės poveikį). Iš šių skaitinių rezultatų galima teigti, kad asfalto struktūroje matricos plėvelės įtaka yra pakankamai svarbi, nes leidžia tiksliau įvertinant dalelių sąveikos mechaniką.

4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

Pasiūlytas diskretusis analizinis modelis buvo pritaikytas asfalto mišiniui modeliuoti, remiantis gautais skaitiniais rezultatais suformuotos išvados:

1. Siūlomas skaitinės analizės metodas yra tinkamas asfalto kompozitui modeliuoti. Taikant šį diskretizavimo metodą yra įvertinama mikro ir mezo pagrindinių parametų įtaka makromodeliui. Lyginant fizinio ir diskrečiojo modelio kirstinius standumus jų skirtumai matuojamame taške siekia ~1 %.
2. Skaitinė analizė parodė, kad matricos plėvelė įtakoja skaitinio Maršalo bandinio modelio standumą. Didėjant plėvelės storiui didėja jos įtaka ir visos sistemos standumas.
3. Toliau tobulinant šį diskretųjį normalinės sąveikos modelį reikia sudaryti galimybes šiam dalelių sąveikos modeliui nutrūkti, kai pasiekiamos kontaktuojančių dalelių kontakto ribinės reikšmės.

Bendros išvados

1. Sukurtas diskretusis pusiau analizinis modelis, skirtas normalinei dalelių sąveikai per tarpinį matricos sluoksnį tirti. Siūlomas modelis geba įvertinti kontakto standumą plačiose ribose, matricos ir dalelės tamprumo modulių santykis gali siekti nuo 1 iki 20 000 kartų.
2. Įrodyta, kad diskretųjį pusiau analizinį modelį galima taikyti sluoksniuotų dalelių kontakto standumui tirti. Todėl šis modelis yra tinkamas matricos plėvelės įtakai įvertinti asfalto mišiniuose.
3. Siūlomo normalinės sąveikos modelio tinkamumas patikrintas palyginant šį modelį ir kontinuumo modelio analizės rezultatus, taikant baigtinių elementų metodą.
4. Binarinės normalinės sąveikos pagrindu sudarytas diskretusis modelis pritaikytas dalelių kompozitui modeliuoti. Diskrečiojo elemento modelis buvo lyginamas su 3D BEM modeliu. Tokiu atveju lyginamuose modeliuose gauti ~8,8 % energijų skirtumai, ~4,5 % euklidinių normų skirtumai ir ~3,2 % didžiausi mazgų poslinkių skirtumai. Tai leidžia teigti, kad siūlomas diskretinis pusiau analizinis modelis gali būti pritaikytas dalelių kompozito analizei.
5. Siūlomas skaitinės analizės metodas yra tinkamas asfalto kompozitui modeliuoti. Kirstinio standumo su tampria matrica gauti skaitiniai rezultatai yra ~ 50 % didesni lyginant su eksperimentinio modelio

rezultatais, o įvertinant klampiai tamprias matricos savybes šis skirtumas sumažėja iki $\sim 1\%$.

6. Sudarytas dalelių kompozito diskretusis modelis remiantis dviejų dalelių normaline kontakto sąveika yra tinkamas santykinai paprastam Maršalo bandymui atkartoti. Esant sudėtingesniems apkrovų scenarijams būtina ištirti deformacijų rūšių, dalelių formų ir medžiagų modelių įtaką dalelių kompozito mechaninei elgsenai.

Literatūra ir šaltiniai

Abbas, A; Papagiannakis, A; Masad, E. 2004. Linear and nonlinear viscoelastic analysis of the microstructure of asphalt concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering* 16 (2): 133–139. (ASCE)0899-1561(2004)16:2(133). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:2\(133\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:2(133)).

Aboudi, J. 1991. Mechanics of composite materials micromechanical approach. New York: Elsevier Science Publishing Company, p. 200.

Abu Al-Rub; Rashid K.; Darabi, M. K.; Chien-Wei, H.; Masad, E.; Little, I. 2011. A Unified Continuum Damage Mechanics Model for Predicting the Mechanical Response of Asphalt Mixtures and Pavements. *International Journal of Roads and Airports* 1(1): 68–84. doi:10.5568/ijra.2011-01-05.6884

Alavi, A. H.; Ameri, M.; Gandomi, A. H.; Mirzahosseini, M. R. 2011. Formulation of flow number of asphalt mixes using a hybrid computational method. *Construction and Building Materials* 25(3):.1338–1355. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.010

Anderson, D. A.; Bahia, H. U.; Dongre, R. 1992. Rheological properties of mineral filler-asphalt mastics and its importance to pavement performance. San Diego, CA: ASTM, 131–153. *San Diego, CA: ASTM*, 131–153.

Argyris, J. H. 1982. Finite element analysis of two- and three- dimensional elasto plastic frames the natural approach *Comput Meth Appl Mech Engng*, 35, pp. 221, 261.

Auriault J.-L., Boutin C., Geindreau C. Homogenization of Coupled Phenomena in Heterogenous Media. Wiley-ISTE, 2009, 476 p.

Bahia, H. U., Zhai, H., Kose, S., Bonnetti, K., 1999. Non-linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists* 68: 1–34.

Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas, R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai* Vilnius: Technika. 610 p. ISBN 9986-05-792-2. Vilnius: Technika. 610 p. ISBN 9986-05-792-2.

Bazant, Z.; Tabbara, M. R.; Kazemi, Y.; Pijaudier-Cabot, G. 1990. Random particle simulation of damage and fracture in particulate or fiber-reinforced composites. In *Winter Annual Meeting: Damage Mechanics in Engineering Materials, Dallas, Texas, American Society of Mechanical Engineers, AMD Series* 109: 41–55.

Berthelot, J.-M. 1999 *Composite materials: mechanical behavior and structural analysis*. New York, Springer. 613 p.

Burak, S.; Agar, E. 2007. Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt. *Building and Environment* 42, 3621–3628. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.006

Burak, S.; Ali, T. 2007. Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on asphalt thickness. *Building and Environment* 42(5): 3629–3635. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.005

Buttlar, W.; You, Z. 2001. Discrete element modeling of asphalt concrete: microfabric approach. *Journal of the Transportation Research Board* (1757):111–118. doi:10.3141/1757-13

Chailleux, E.; Ramond, G.; Roche, C.; Chantal, R. 2006. A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design. EATA*, 75–92. doi: 10.1080/14680629.2006.9690059

Chen, J. S. 2001. Quantification of coarse aggregate shape and its effect on engineering, *Journal of Testing Evaluation* 29(6): 513–519. doi: 10.1520/JTE12396J

Chen, J. S.; Kuo, P. H.; Lin, P.S.; Huang, C.C. Lin, K. Y. 2007. Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral filler, *Materials and Structures* 41(6): 1015–1024. doi:10.1617/s11527-007-9302-5

Christensen, R. M. 1979. Isotropic properties of platelet reinforced media. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME* 101 (3): 299–303. doi:10.1115/1.3443691

Christensen, R. M.; Lo, K. H. 1979. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 27 (4): 315–330.

Dai, Q.; You, Z. 2007. Prediction of Creep Stiffness of Asphalt Mixture with Micromechanical Finite-Element and Discrete-Element Models, *Journal of Engineering Mechanics* (163):.163–173. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:2(163)

Deborah D. L. Chung 2010. *Composite Materials: Science and Applications* (2nd ed.) Springer London 371 p. ISBN-13: 9781848828308

González, J.M.; Miquel Canet, J.; Oller, S.; Miró, R. 2007. A viscoplastic constitutive model with strain rate variables for asphalt mixtures-numerical simulation, *Computational Materials Science* 38(4): 543–560. doi:10.1016/j.commatsci.2006.03.013

Guddati, M.; Feng, Z.; Kim, Y. R. 2002. Towards a Micromechanics-Based Procedure to Characterize Fatigue Performance of Asphalt Concrete. *Proc. 81st Transportation Research Board Annual Meeting Washington*, <http://dx.doi.org/10.3141/1789-13>

Hashin, Z., 1965. Viscoelastic behavior of heterogeneous media *American Society of Mechanical Engineers – Transactions – Journal of Applied Mechanics* 32 (3): 630–636.

Hull, D., Clyne, T. W. 1996. An Introduction to Composite Materials (2nd ed.). Cambridge University Press 326p. ISBN 0 521 38190 8

Huurman, M.; Woldekidan, M. F. 2007. *Report 7-07-170-3 December 2007 LOT, Mortar response; measurements, test interpretation and determination of model parameters.*

You, Z.; Buttlar, W. 2005. Application of discrete element modeling techniques to predict the complex modulus of asphalt-aggregate hollow cylinders subjected to internal pressure, *Transportation Research Record*, <http://dx.doi.org/10.3141/1929-26> (1929): 218–226.

You, Z.; Liu, Y.; Qingli, D. 2011. Three-dimensional microstructural-based discrete element viscoelastic modeling of creep compliance tests for asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (1): 79–81. <http://dx.doi.org/10.3141/1929-26>

Kandhal, P. S.; Chakraborty, S. 1996. Effect of asphalt film thickness on short and long term aging of asphalt paving. *Paper presented at the 75th Annual Meeting of the Transportation Research Board held in Washington, DC (January 7-11, 1996).*

Kim, Y. R.; Little, D. N. 2004. Linear viscoelastic analysis of asphalt mastics. *Journal of Materials in Civil Engineering* 16 (2): 122–132. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:2\(122\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:2(122))

Kose, S. Guler, M.; Bahia, H. U. Masad, E. 2000. Distribution of strains within hot-mix asphalt binders: applying imaging and finite-element techniques, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1728(1):21–27. doi:10.3141/1728-04

Krishnan, J. M.; Rajagopal, K. R. 2005. On the mechanical behavior of asphalt, *Mechanics of Materials*, 37(11):1085–1100. doi:10.1016/j.mechmat.2004.09.005

Li, H. X.; Suo, Z.; Wang, P. M. 2008. Deformation and damage of bituminous mixtures with different air void, *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*, 11 (3): 306–310.

Liu, Y.; You, Z.; Adhikari, S. 2008. Speed up discrete element simulation of asphalt mixtures with user-written C++ codes, *Proceedings of the 2008 airfield and highway pavements conference, October 15-18, Bellevue, Washington*. [http://dx.doi.org/10.1061/41005\(329\)6](http://dx.doi.org/10.1061/41005(329)6)

Liu, Y.; You, Z.; Dai, Q.; Mills-Beale, J. 2011. Review of advances in understanding impacts of mix composition characteristics on asphalt concrete (AC) mechanics. *International Journal of Pavement Engineering* 12(4): 385–405. doi: 10.1080/10298436.2011.575142

Liu, Y.; You, Z.; Zhao, Y. 2012. Three-dimensional discrete element modeling of asphalt concrete: Size effects of elements *Construction and Building Materials* 37: 775–782.

Marčiukaitis, J. G. 1998 Statybinių kompozitų kūrimo ir savybių prognozavimo principai. Vilnius: Technika 134 p. ISBN 9986-05-353-6

Masad, E.; Olcott, D.; White, T.; Tashman, L. 2001. Correlation of Imaging Shape Indices of Fine Aggregate with Asphalt Mixture Performance. *Presented at the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.* doi:10.3141/1757-17

Masad, E.; Tashman, L.; Little, D.; Zbib, H. 2005. Viscoplastic modeling of asphalt mixes with the effects of anisotropy, damage and aggregate characteristics, *Mechanics of Materials* 37(12): 1242–1256. doi:10.1016/j.mechmat.2005.06.003

Meegoda, N. J.; Chang, K.-N.G. 1993. Novel approach to develop a performance based test for rutting of asphalt concrete. *Airport pavement innovations: theory to practice Conference, Airport pavement innovations: theory to practice*; (1): 126–140 ISBN0-87262-925-2

Mo, L. T. Huurman, M.; Wu, S. P.; Molenaar, A. A. A. 2008. 2D and 3D meso-scale finite element models for ravelling analysis of porous asphalt concrete, *Finite Elements in Analysis and Design* 44(4): 186–196.

Mohamed, A. R.; Hansen, W. 1999. Micromechanical modeling of concrete response under static loading. Part I: Model development and validation, *ACI Mater. J.* 96 (2): 196–203.

Monismith, C. L.; Alexander, R. L.; Secor, K. E. 1966. Rheological Behaviour of Asphalt Concrete, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* 35: 400–450

Mora, P. 1992. A Lattice Solid Model for Rheology and Tectonics, *The Seismic Simulation Procect Tech. Rep.*, 4 (3)-28

Mun, S.; Lee, S. 2010. Determination of the fatigue-cracking resistance of asphalt concrete mixtures at low temperatures, *Cold Regions Science and Technology* 61(2–3), 116–124. doi:10.1016/j.coldregions.2010.02.003

Murali Krishnan, J.; Rajagopal, K. R. 2004. Triaxial testing and stress relaxation of asphalt concrete, *Mechanics of Materials* 36(9): 849–864. doi:10.1016/j.mechmat.2003.08.003

Nicholson, V. 1927. Aggregate affects stability of asphalt mixtures, *Highway Engineer and Contractor* 16 (6): 43–47

Norme Française. Couches d'asis: Enrobé à élevé, 1991: [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. liepos 28 d.]. Prieiga per internetą: http://www.aapaq.org/MC2012/PAB/03_TRL636_The_application_of_EME_in_flexible_pavements_report.pdf.

Ostoja-Starzewski, M. 2002. Lattice models in micromechanics, *Applied Mechanics Reviews* 55(1): 35–60. doi:10.1115/1.1432990

Palšaitis, E.; Vidugiris, L. 1999. *Automobilių kelių projektavimas* 437 p.

Papagiannakis, A.; Abbas, A.; Masad, E. 2002. Micromechanical analysis of viscoelastic properties of asphalt concretes, *Transportation Research Record*, (1789): 113–120 doi:10.3141/1789-12. 0 0

Park, S.; Kim, Y.; Schapery, R. 1996. A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behaviour of asphalt concrete *Mechanics of Materials* 24(2): 241–255.

Pauli, T. 2010. Asphalt Research Consortium Asphalt Microstructure Modeling Models, *Asphalt Microstructure Modeling Models Expert Task Group Friday February 26th, 2010 Beckman Center, Irvine, CA* [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. liepos 20 d.]. Prieiga per internetą http://www.arc.unr.edu/Reports/QuarterlyReport_Jan-Mar_10.pdf

Puzinauskas, V. P. 1964. Influence of Mineral Aggregate Structure on Properties of Asphalt Paving Mixtures, *Highway Research Record No. 51*: 1–18.

Rena, W.; Tanb, X.; Zheng, Z. 1999. Nonlinear analysis of plane frames using rigid body-spring discrete element method, *Computers and Structures* (71): 105–119. doi:10.1016/S0045-7949(98)00230-2.

Reuss, A. 1929. Calculation of flow limits of mixed crystals on basis of plasticity of monocrystals (berechnung der fließgrenze von mischkristalle), *Zeitschrift fuer Angewandte Mathematik und Mechanik*, 9 (1): 49–58.

Roberts, F. L.; Kandhal, P. S.; Brown, E. R.; Lee, D. Y.; Kennedy, T. W. 1996. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. *Trational Asphalt Pavement Association Education Foundation. Lanham, MD*. 585p. ISBN-13: 978-0914313014

Sadd, M. H. 2003. Simulation of asphalt materials using finite element micromechanical model with damage mechanics, *Transportation Research Record* (1832), 86–95. doi:10.3141/1832-11. 0 0

Sadd, M.; Gao, J. 1998. Contact Micromechanics Modeling of the Acoustic Behaviour of Cemented Particulate marine Sediments, *Proc. 12th ASCE Engineering mechanics Conf., La Jolla, CA*.

Schapery R. A. 1969. On the characterization of nonlinear viscoelastic materials, *Polymer Engineering and Science* 9(4), 295–310.

Schapery, R. 1999. Nonlinear viscoelastic and viscoplastic constitutive framework for the nonlinear viscoelastic behavior of pultruded composite materials, *International Journal of Fracture* (97) 33–66.

Schapery, R. 2000. Nonlinear viscoelastic solids, *International Journal of Solids and Structures* 37(1–2): 359–366. doi: 10.1177/1081286509103660

Sengoz, B.; Agar, E. 2007. Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt, *Building and Environment* 42(10): 3621–3628. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.006

Sepehr, K. 1994. Finite element modelling of asphalt concrete microstructure. Udine, Italy: Computational Mechanics Publishers. 225.

Shashidhar, N.; Romero, P. 1998. Factors affecting the stiffening potential of mineral fillers, *Asphalt Mixture Components* 1638: 94–100.

Shashidhar, N.; Shenoy, A. 2002. On using micromechanical models to describe dynamic mechanical behavior of asphalt mastics, *Mechanics of Materials* 34(10): 657–669. doi:10.1016/S0167-6636(02)00166-7

Soares, J.; Colares de Freitas, F. A.; Allen, D. H. 2003. Crack modeling of asphaltic mixtures considering heterogeneity of the material. *Proceedings of 82th Transportation Research Board Meeting, Washington D.C.* doi:10.3141/1832-14

Stankowski, T. 1990. Numerical Simulation of Progressive Failure in Particle Composites: Ph.D. Thesis, University of Colorado.

Tashman, L. Masad, E.; Little, D.; Zbib, H. 2005. A microstructure-based viscoplastic model for asphalt concrete, *International Journal of Plasticity* 21(9): 1659–1685. doi:10.1016/j.ijplas.2004.11.008

The Shell Bitumen Handbook, (5th ed.) 2003. p.250. ISBN: 0 7277 3220X.

Tian, L. 2007. Random generation algorithm for simulation of polyhedral particles in asphalt mixture aggregate and its program, *Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport* 20 (3): 5–10.

Timoshenko, S. P. 1921. On the correction factor for shear of the differential equation for transverse vibrations of bars of uniform cross-section, *Philosophical Magazine*, 744–750.

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V. 2013. Use of local aggregates in high modulus asphalt concrete layers. *Gradevinar* (65): 353–360.

Vavrik, W. R.; Pine, W. J.; Huber, G.; Carpenter, S. H; Bailey, R. 2002. The Bailey Method of Aggregate Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in the Mineral Aggregate, *Asphalt Paving Technology* (70):, 132-175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.948>

Voigt, W. 1889. The relation between the two elastic moduli of isotropic materials, In: *W. Annalen, ed. Annalen Der Physik und Chemie. Leipzig: Ann Phys*, 573–587.

Wang, J.; Birgisson, B. 2007. A time domain boundary element method for modeling the quasi-static viscoelastic behavior of asphalt pavements, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 31(3):.226–240. doi:10.1016/j.enganabound.2006.09.007

White, I. 1985. Marshall Procedures for Design and Quality Control of Asphalt Mixtures, *Asphalt Paving Technology: Proceedings* 5: 265–284.

Wong, W.; Han, H.; He, G.; Wang, Kelvin C. P.; Lu, W. 2004. Rutting response of hot-mix asphalt to generalized dynamic shear moduli of asphalt binder, *Construction and Building Materials* 18(6): 399–408. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.03.003

matweb. [interaktyvus]. [žiūrėta 2010 m. lapkričio 2 d.]. Prieiga per internetą: www.matweb.com

Королев, И. В. 1986. Пути экономии битума в дорожном строительстве [Ways of Economy of Bitumen in Road Construction]. Москва: Транспорт. 149 с.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Rimša, V., Kačianauskas, R., Sivilevičius, H. 2011. Finite element simulation of the normal interaction of particles in the visco-elastic solid, *Mechanics and Control*. 30(4): 245–253. (LMT patvirtintoje DB).

Rimša, V., Kačianauskas, R., Sivilevičius, H. 2014. Numerical analysis of asphalt mixture and comparison with physical Marshall test, *Journal of Civil Engineering and Management* 20(4): 570–580. (Thomson ISI Web of Science). doi:10.3846/13923730.2014.920413.

Straipsniai kituose leidiniuose

Kačianauskas, R., Pilkavičius, S., Rimša, V., Rojek, J. 2013. Interaction of particles via solid interface – model and analysis, In *Proceedings of the III International Conference on Particle-based Methods. Fundamentals and Applications (Particles 2013)*. Stuttgart, Germany, 18–20 September, 2013. Barcelona: *International Center for Numerical Methods in Engineering*, 364–374. ISBN 9788494153181

Rimša, V., Kačianauskas, R., Sivilevičius, H. 2012. Simulation of interaction of particles via viscoelastic interface. *7th International Conference for Conveying and handling of particulate solids (CHoPS 2012)*, 10–13 September, 2012, Friedrichshafen, Germany: EFCE, 1–6.

Summary in English

Introduction

Problem of research

The majority of specific engineering materials are heterogeneous and multicomponent mixtures. Various separate components of these possess a large diversity of properties within different scales of heterogeneity.

Particulate solids often exhibit complex mechanical behaviours, which are far from being fully understood. It is obvious that macroscopic mechanical properties largely depend on properties of particular components. The properties may be defined in terms of their interactions on either meso or micro scales. Due to extremely complicated inner structures of particulate solids, a numerical analysis proves to be extremely challenging to use.

Evaluation of mechanical behaviour of such materials has been explored within a number of researches over the last few decades. As a result various theories and approaches of diverse complexity are now being used for characterization purposes.

A development of the easily accessible but sufficiently accurate numerical model, which is aimed to describe the behaviour of the composite, is an challenging multidisciplinary issue. More recent achievements in the discretization methodology expressed by combining various finite elements (FE) and discrete elements (DE) and structural network concepts have offered a number of interesting alternatives.

The issue outlined above has influenced the choice of topic for this dissertation: the investigation of discrete model of the spherical particulate composite on the macro mechanical stiffness. Two main problems are considered in this dissertation. The first one is the evaluation of contribution of geometrical and mechanical parameters on normal stiffness interaction and development of the adequate discrete element. The

second problem is the application of the developed discrete element with particulate composite.

Importance of the thesis

The analysis of particulate solid mechanical behaviour provides a better understanding and performance of such materials in order to create the required physical properties of the composite solid.

The object of research

The discrete model of particulate composite and its application for macroscopic analysis of the asphalt type materials.

The aim of the thesis

To develop and to validate the discrete element to normal interaction of spherical particles in meso scale and to adapt the model to macroscopic analysis structure of the composite.

Tasks of the work

The following tasks had to be undertaken:

1. To analyse the existing particle interaction models.
2. To develop of the discrete element model for binary normal contact of spherical particles via interface.
3. To validate of the discrete element model on micro scale by FEM.
4. To apply and to validate the discrete element model for macroscopic analysis of heterogeneous composite particle structure.
5. To apply of the model for of modelling for the Marshall test of asphalt specimen.

Methodology of research

The work applied analytical, numerical and experimental methods. Develop of the discrete element model for spherical particles normal interaction analysis. Validation of this model with continuum based geometry by use finite element program Ansys. Applications of this model for analysis of the real heterogeneous structure are validated with experimental results.

Scientific novelty

The following new results present in this thesis:

1. Proposed the mezo scale model with significant particle and matrix stiffness ratio and the thin matrix and matrix film dimensions for normal contact of spherical particles interacting via interface. Suitability of the model is confirmed with numerical finite element model.

2. Developed low CPU resources requiring macro scale DE model for the particulate composite analysis. The DE model is validated with numerical finite element model.
3. Application of the model to simulate the diametric compression of a cylinder asphalt specimen (the Marshall test).

Practical value

The new proposed discrete element model improves knowledge of the mechanical state of the composite particles and allows the investigation of microscopic parameters on a macro scale. The proposed model requires relatively small CPU resources compared with classical FEM approach and suitable in practical terms. The model correctly evaluates large differences of particles and matrix properties, the fore it can be promising for asphalt mix calculation.

The defended propositions

1. The proposed discrete model of normal interaction of two spherical particles via interface is able wide range of interface gap size and up to 20000 times difference of particle-matrix properties
2. Discretization of particulate solid by considering only normal interaction is sufficient for modelling of particulate solid and asphalt mixtures for the case of quasi static loading history.

Approval of the research results

4 articles focusing on the subject of dissertation have been published: one article in the Thomson ISI (Web of Science), list (Rimša *et al.* 2014); one article in data base approved by CSL, list (Rimša *et al.* 2011a); two papers in the conferences paper in reviewed foreign international conference proceedings, list (Kačianauskas *et al.* 2013; Rimša *et al.* 2012). 10 presentations on the subject have been present in various conferences both nationally and internationally.

The structure of the dissertation

The scientific work consists of four chapters, the first one of which is an introduction. In the second chapter the development of the analytical model and verification with FEM is explained. The third chapter provides information on the development of the macro scale DE model of the particulate composite. Finally the application of the model to simulate compression of cylinder asphalt specimen (Marshall test) is presented in the fourth chapter, as well as generalization of archived results and summary of findings. These are followed by the list of literature, list of publications and addenda. The total scope of this dissertation is 110 pages, 45 pictures, 3 tables, 34 numbered formulas and 2 addenda. The list of references comprises 85 items.

1. Review of the composites particle analysis

This chapter contains the overview of composites methods of modelling, numerical models, rheological models, requirements, and advantages and disadvantages of these models. Following the review of literature it is concluded that:

1. Increased requirements for mechanical parameters of today's composite materials show that the development of the composites should be done not only on the basis of physical experiments but also by applying numerical analysis.

2. Homogenization of the heterogeneous composite structure by averaging mechanical properties allows to use continuum-based conventional FEM discretization. It is a significantly simplified numerical model. The weak point of this approach is the fact that there is no assessment of the local effects. Hence, the results of the analysis must be calibrated on the basis of physical experiments.

3. Constituency of the real materials in composites are characterized by a large diversity of sizes. This makes presentation of the internal structure of the continuum significantly complicated. Therefore, this method for the real geometry models requires extremely high CPU resources and is thus unsuitable for practical applications. The main disadvantage is that they relate to a very specific example. It is therefore necessary to look for less complicated models.

4. One of the possible solutions carries out the constituent elements sampling application of various scales.

5. The relative new DEM method is based on the contact model of the individual particles. This method should be evaluated in composition with a particle's mutual interaction and matrix properties. DEM requires an application of more universal model that is easier on particle interaction for evaluating the influence of the matrix properties of composite particles.

6. The matrix film's mechanical and geometrical properties, as well as effects of these properties on layering particle's models on a mezo and macro scale are insufficiently covered by the existing studies.

7. Most of the widely used theories are dedicated to relatively low packing density composite analysis, whilst asphalt type composites are relatively dense the foremost requires further reinforcement.

8. In summary the development of a new interaction models is necessary following these conclusions.

2. Heterogeneous structure analysis by use discrete elements

The discretisation approach applied for modelling of a particulate solid is schematically illustrated in Fig. S1. It specifies conceptual issues of how to develop a discrete model for the highly heterogeneous solid. The representative sample of the solid is in our case the cylindrically shaped specimen as shown in Fig. S1a.

The two-level strategy is applied for modelling of the particulate solid, whilst modelling sequence is schematically illustrated in Fig. S1. The forward sequence of operations which is to discretise a particulate solid (Fig.S1a) is treated as a global analysis, which aims to evaluate the particle's displacements. It comprises of the following actions:

- a) identification and generation specimen data (Fig. S1a);

- b) specification of connection element (Fig. S1b);
- c) characterisation of the film layer (Fig. S1b);
- d) generation of structure network connection the centres of particles and formulation of macroscopic model;
- e) evaluation of the time-histories of particle's displacement by using the DEM or FEM techniques.

The backward sequence of operations that aimed to evaluate the local variables such as strains or stresses by using the global solution may also be involved.

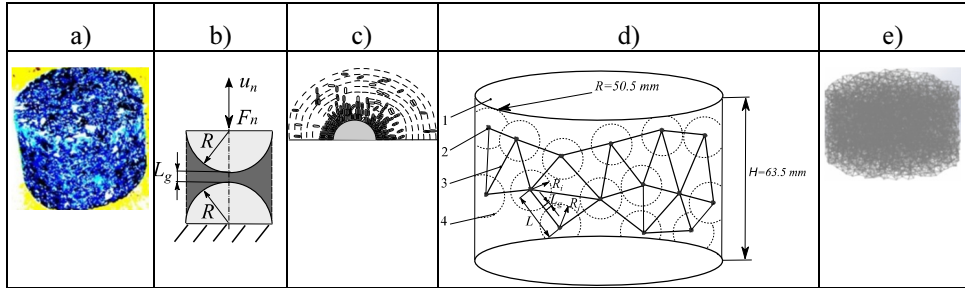


Fig. S1. An illustration of the modelling strategy where the following are presented: a) particulate composite as a specimen of asphalt mixture applied for of Marshall test; b) representative volume use for modelling of interaction; c) illustration of particle matrix interface; d) illustration of the macro model; e) the numerical model cylindrical specimen of the asphalt mixture

Due to a high complexity of the composite particulate's system a number of assumptions are required. These are as follows:

1. The investigation is applied to a particulate solid composed by elastic spherical particles embedded in to viscoelastic matrix.
2. The loading is quasi static.
3. The investigation is restricted to normal interaction of the particles.
4. The matrix and particle contact present a perfect bond without providing a possibility to brake at the loading stage.
5. The viscos properties are linear and depend only on time

The implementation of the strategy outlined above implies the evaluation the binary interaction between the two particles. The particle interaction assumes the relationship between displacements two particles centres expressed in terms inter particle stiffness. Inter particle stiffness compromises representative volume. The geometry of the representative volume is a cylinder composed of two interacting spheres with the radii R_i and R_j , in our case $R_i = R_j$, and the interface in between is shown in Fig. S2. The local Cartesian frame $Oxyz$ positioned at the centre of sphere i and attached to the connection line ij is introduced to ensure the convenience. Here, axis Oz points to the normal direction, while axes Ox and Oy belong to the tangential plane. The distance between the centres of interacting spheres is denoted by L_{ij} while separation distance between surfaces is L_g . The centres of the spheres are defined by the local coordinates $z_i = 0$ and $z_j = L_{ij}$, respectively. The case of homogenisation purpose is shown in Fig. S2a, while layered particle are shown in Fig. S2b. The thickness of the film is denoted

by δ . This parameter is exceptionally used for evaluation of the contact stiffness. This value is considerably smaller when compared to the particle radius, $\delta \ll R$.

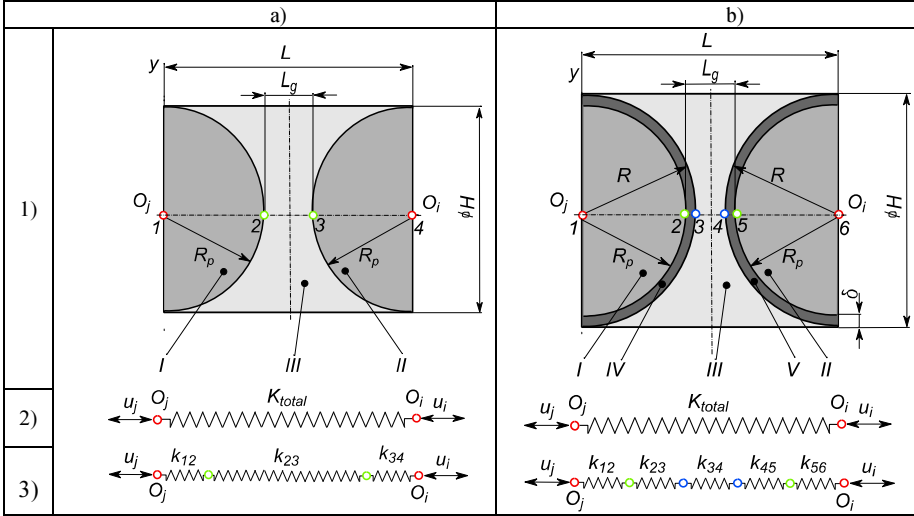


Fig. S2. A normal interaction between two equal spherical particles where a) homogenized particles are in weak matrix; b) two layered particles are in weak matrix with film layer going through the weaker interface: 1) is a general geometry; 3) is a system of sequentially connected springs; 2) is the total spring equivalent to the system of the springs. *I* and *II* are particles, *III* is the matrix, *IV* and *V* are the matrix film

As shown in the picture the element presents compositions local springs. The sequential arrangement of the springs gives the required expression of the total stiffness k_n obtained:

$$(k_n)^{-1} = (k_{12})^{-1} + (k_{23})^{-1} + (k_{34})^{-1} + (k_{45})^{-1} + (k_{56})^{-1}. \quad (S1)$$

Here, each one of the springs of the system corresponds to the particle, bitumen film and matrix respectively. The evaluation of particular components requires a theoretical justification. The stiffness of the each of subdomain of cylindrical element can be found by applying the classical energy approach. Firstly, the density of the deformation energy

$w(x, y, z) = \frac{1}{2} \sigma(x, y, z) \varepsilon(x, y, z)$ accumulated in arbitrary point of the volume is defined

by a scalar product of longitudinal variables: stress σ and strain ε . The stress follow one dimensional constitutive law, while the strain presents relative elongation of the coaxial line of variable length $L(x, y)$. Integration along the length of the bar and by inserting strain and stress yields explicit expression:

$$W(x, y) = \frac{1}{2} \tilde{E} \left(\frac{1}{L(x, y)} \right) u_n^2. \quad (S2)$$

The stiffness of the cylindrical subdomain is defined as the second derivative of the total deformation energy as follows:

$$W = \iint_A w_S(x, y) dA. \quad (S3)$$

It needs to be noted that evaluation of the element stiffness may be done in various different ways and the specific properties of current problem will be taken into account.

Now the stiffness of subdomain may be evaluated by a general expression:

$$k_n = \frac{1}{2} \bar{E} \iint_A \left(\frac{1}{L(x, y)} \right) dA. \quad (S4)$$

Integration of equation (S4) is performed regarding surface A of particulate subdomain.

The volume of a particle in a cylinder is shaped by a hemi-sphere which is limited by two surfaces. The background circular plane fixed at $z = 0$ presents the mid-plane of the sphere of the radius R . Simultaneously, it is the normal section of the cylinder.

The spherical surface defined by radius R is described by the equation $z(x, y) = \sqrt{R^2 - r^2}$, which automatically predefines the length of the arbitrary co-axial line $L(x, y) = z(x, y)$. The maximal length, which is also a computational length of the spring, is at a position of the central line, i.e. $L_{max} = L(0, 0) = R$.

Substitution of the particle data yields:

$$k_{12} = \pi \tilde{E} \int_0^{R_p} \frac{r}{\sqrt{R^2 - r^2}} dr. \quad (S5)$$

Then, the integral defined by the eq. (S6) can be obtained explicitly as follows:

$$k_{12} = 2\pi \tilde{E} R_p. \quad (S6)$$

Geometry of the film layer (Fig. S3) is simplified and only the normal projection is considered for the modelling purposes. Consequently, the stiffness of the film $k_f = k_{23}$ is defined as stiffness of the cylinder bar having radius R_p and the height of δ . The matrix film stiffness is as follows:

$$k_{23} = \pi \tilde{E}_{pl\bar{e}v} \int_0^R \frac{r}{\sqrt{R^2 - r^2} - \sqrt{R_p^2 - r^2}} dr. \quad (S7)$$

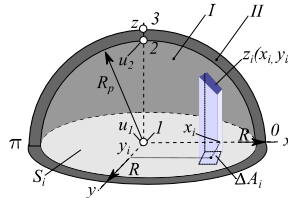


Fig. S3. The stiffness integration scheme hemi-sphere with the matrix film, where I is the particle and II is the matrix film

Now the stiffness of the interface bond $k_b = k_{34}$ may be evaluated in the same manner by a general expression (S8).

$$k_{34} = \pi \tilde{E}_b \int_0^R \frac{r}{L_g + R - \sqrt{R^2 - r^2}} dr. \quad (\text{S8})$$

Integral in expression (S8) in our case is obtained numerically. The total normal stiffness is defined according to (S1).

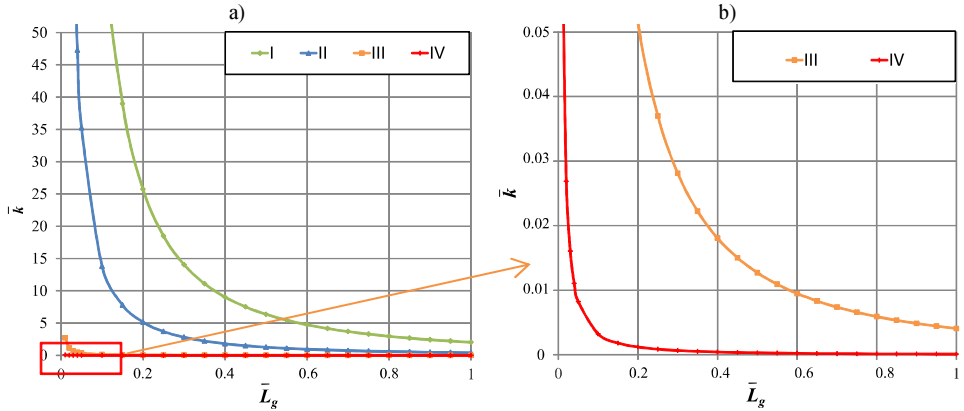


Fig. S4. The relative stiffness versus interface length for the different interface properties as (a), where: I – when $E_p / E_b = 1$; II – when $E_p / E_b = 5$; III – when $E_p / E_b = 500$; IV – when $E_p / E_b = 21400$; b) detailed view

Dependence of the normal contact stiffness behaviour is better represented in dimensionless scale, which is shown in Fig. S4. Here is given the contact stiffness contribution to a relative gap size and relative matrix modulus of the elasticity ratio.

Validation of the DE model was done by FEM. The behaviour of the interface material has been examined by considering the normal force. The value of the force is extracted from the results of an FE calculation. It is obtained as a reaction force of the sphere due to its pulling motion. Two limited cases corresponding to the sizes of inter-particle gap $L_{g1} = 0.1$ mm and $L_{g4} = 1.5$ mm, respectively, were selected for illustration of the force calculation methodology, whilst the results of viscoelastic samples were examined in more detail.

Tension force presents the resultant contribution of the normal pressure. The nature of the force is basically predicted by considering the pressure distribution on the sphere. Two different cases of pressure distributions are illustrated in Fig. S6. The negative value means tension (suck) pressure given in Pascal's.

The pressure colour analysis indicates that for a smaller gap (Fig. S5a) the highest value of pressure $p_1(r)$ varying within the range of $p_{1,\max} = 3.47$ MPa and 1.16 MPa is concentrated within the small circle having radius of $r \approx 0.1R$.

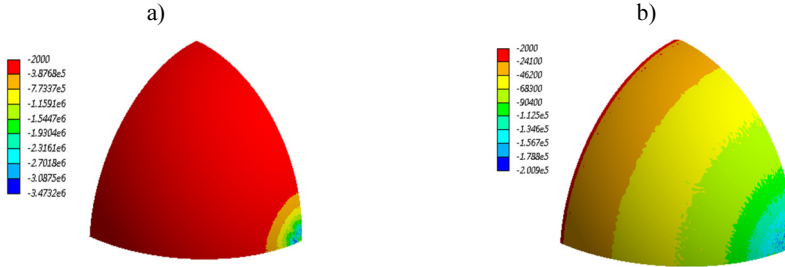


Fig. S5. The contour plot of the pressure on the sphere: a) $L_g = 0.1$ mm; b) $L_g = 1.5$ mm

The distribution of pressure $p_4(r)$ in another sample is much different (Fig. S5b). It presents a gradual decreasing character whilst the maximal pressure $p_{4,\max} = 0.2$ MPa is almost 18 times lower.

In order to better investigate the contribution of nonlinear effects on binary two particle normal interaction it was chosen to test tension and compression in a normal contact model. Basic boundary conditions are given in Fig. S6a and a displacement path is illustrated in Fig. S6b.

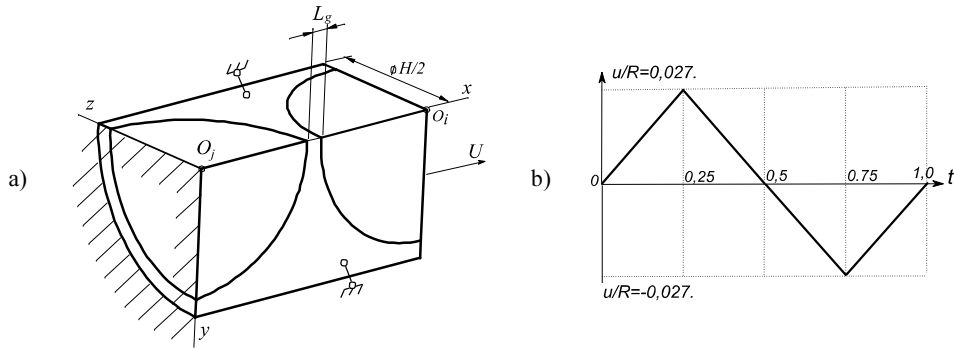


Fig. S6. Boundary conditions: a) a scheme; b) a loading function of the particle O_i

For this investigation the ratio change between displacement u and initial gap between particles L_g were taken, in a case where nonlinear geometrical behavior affects it Fig. S4.

The nonlinear normal contact behaviors are shown in Fig. S7. Here I indicate nonlinear effects of geometrical parameters on achievable deviations due to geometric nonlinearity; II indicates nonlinear effects due to geometrical nonlinearity and the matrix nonlinear behavior. In this case it is a visible force reaction relaxation from point 1 to point 2 due to viscoelasticity of the matrix. From point 2 to point 3 it is a clearly visible resistance of the loading change and particles system comes into the initial phase with some force reaction, however, not to zero like in the I model's case.

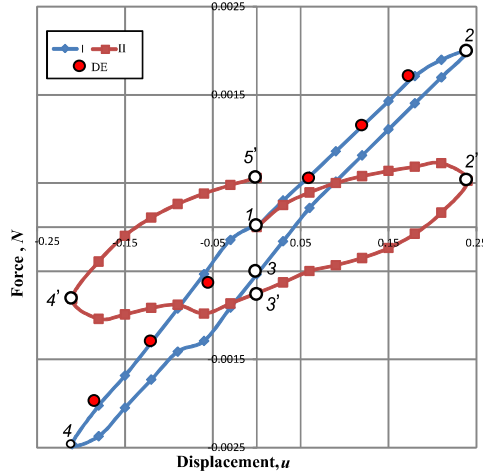


Fig. S7. Force reaction hysteresis loop; where I is elastic model; II is viscoelastic; the DE-analytical results of discrete model

The same manner was obtained in the compression's case, where only the residual force reaction is $\sim 6\%$ higher.

The validation of given discrete element model were made using FEM model as showed in Fig. S8. Here relative particle stiffness is $K = F/E_o \cdot L_g \cdot R \cdot u$. The maximum numerical error exceeds $\sim 1.2\%$ at a minimum gap between particles. It shows that this model is suitable for the particles normal contact stiffness analysis.

The investigation showed that the increase in matrix thickness form $12\ \mu\text{m}$ up to $50\ \mu\text{m}$ or by 24% gives up to 56% increase to the total normal contact stiffness. A thinner matrix film does not provide any significant changes to the total contact stiffness's ratio.

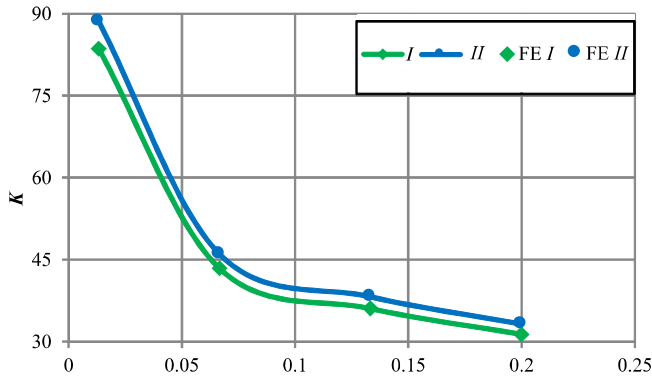


Fig. S8. Validation of discrete element model with FEM model; where: I is the discrete element model without matrix film; II is the discrete element model with matrix film $\delta = 50\ \mu\text{m}$; FE I is a model without the matrix film results for given points; FE II is a model with the matrix film results for given points

The contribution of the film is investigated numerically by considering variations of the film thickness and the elasticity of the modulus variation as given in Fig. S9 and Fig. S10. The investigation showed that the increase in the matrix thickness from 12 μm up to 50 μm or by 24% gives up to 56% increase in the total normal contact stiffness. A thinner matrix film does not provide any significant changes to the total contact stiffness's ratio.

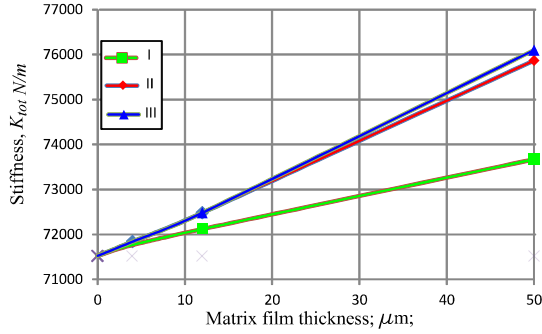


Fig. S9. Variations of the total normal element stiffness versus thickness of the matrix film for different properties of the film: I – $E_f = 4 \cdot 10^6 \text{ Pa}$; II – $E_f = 4 \cdot 10^7 \text{ Pa}$; III – $E_f = 4 \cdot 10^8 \text{ Pa}$

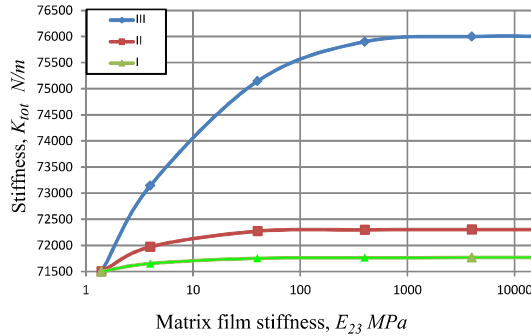


Fig. S10. Variation of the relative film stiffness via modulus of elasticity of the matrix film at different thicknesses δ of the film: I as $\delta = 4 \mu\text{m}$; II as $\delta = 12 \mu\text{m}$, and III as $\delta = 50 \mu\text{m}$

The main conclusion of the film thickness and elasticity investigation is that the increase in bitumen film increases contact stiffness, whilst increase in elasticity modulus is important up to ratio $100 E_{23} = E_{45}$, latter any additional film elasticity modulus increase does not influence the system of contact stiffness.

It can be concluded as follows: the new proposed discrete element model validated by using the FE model and reality a low 1.2% error was obtained. The investigation proved that the increase in matrix thickness from 12 μm up to 50 μm or by 24% gives up to 56% increase in the total normal contact stiffness.

A thinner matrix film does not provide any significant changes to the total contact stiffness's ratio. It was observed that the increase of film thickness or modulus of elasticity of the film reduces the strain gradient in the contact zone between the particle and the matrix.

Table S1. The total normal stiffness of the system of two particles at an average particle size and gap

Thickness T of the film, μm	The total stiffness K_{tot} , N/m
0 (no film)	$7.15 \cdot 10^4$
4	$7.18 \cdot 10^4$
12	$7.25 \cdot 10^4$
50	$7.59 \cdot 10^4$

The matrix film effects are given in table S1 and these normal contact stiffness values will be used for the macro scale model analysis that follows.

3. Discrete model application in heterogeneous structures

The geometry and dimensions of the body of particulate solid under investigation are shown in Fig. S11. Eighteen in-plane located spherical particles were embedded into the mid plane of the body. The basic geometry parameters are as follows: length of the bottom $l_b = 112$ mm; length of the top $l_t = 78$ mm; high of prism $h = 36$ mm and width $w = 18$ mm. In order to keep integrity of the body, the deformable outer layer having minimal distance $t = 0.0015$ m was introduced. In order to imitate the granite filler, which is normally used in an asphalt concrete, the identical particles with radius of $R_p = 0.0075$ m were adopted.

The particles were deployed in such a way that their centres coincided with nodes of a regular equilateral triangular grid. A distance between vicinal nodes of the grid is $L = 0.0155$ m; therefore, the minimum distance between surfaces of particles is $L_g = 0.0005$ m and the relative distance is $L_g/R_p = 0.0667$. The load, $F = 12$ N, was applied on particles 3, 4 and 5. The bottom plane of the body was fully restrained.

The elastic modulus $E_p = 40$ GPa and Poisson's ratio $\nu_p = 0.25$ (corresponding to granite) were chosen to be the same for all particles. Elastic modulus and Poisson's ratio of the weak matrix were $E_b = 1.4$ MPa and $\nu_b = 0.46$ respectively.

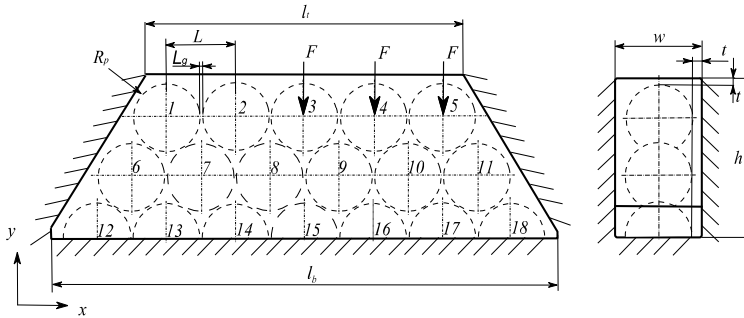


Fig. S11. The particulate system

The discrete spring network model of a particulate solid body is predefined by a regular equilateral triangular grid with 18 nodes located at the centre of each particle (Fig. S12). The nodes are connected with one-dimensional spring elements undertaking the loads. The stiffness calculated by eq's. (1), (3), (5) and (7) are as follows: $k_p = 1884.96$ MN/m, $k_b = 0.100$ MN/m and $K_s = 0.107$ MN/m. The boundary condition, the restrained bottom edge of the body, was realized by suppressing the motion of

particles 12–18 (see Fig. S12). Therefore, the model contains 11 moving nodes with 22 degrees of freedom.

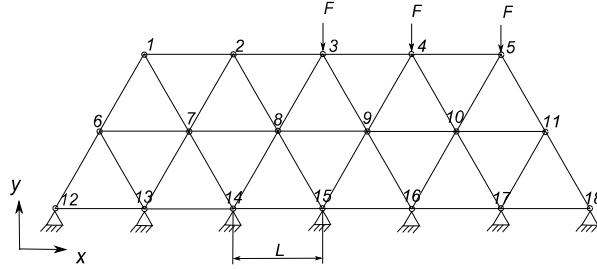


Fig. S12. The plane discrete element model of the body

In the table S2 a comparison of the results of FEM and DE is given. Since $\|u_y\| \gg \|u_x\|$ (the table), then the vertical displacements of the nodes or centres of the particles are much larger than horizontal. As we can see the biggest difference appears in the deformation energy W of entire model and the smallest in the $\|u_y\|$. The biggest displacement appears in node 4 or the centre of the 4th particle.

The maximum of the relative difference is $\max((\|u_i\|_{DE} - \|u_i\|_{FEM})/\|u_i\|_{FEM}) = \|u_{10}\|_{DE} - \|u_{10}\|_{FEM}/\|u_{10}\|_{FEM} = 1.04$; here $\|u_i\|_{DE}$ and $\|u_i\|_{FEM}$ correspond to norms $\|u_i\|$ obtained by methods DE and FEM respectively, $i \in \{1, 2, \dots, 18\}$.

Table. S2 The values of the norms obtained by FEM and DE and their comparison

Model	$\ u_x\ $ m	$\ u_y\ $ m	$\ u\ $ m	$\max\{\ u_i\ \} = \ u_d\ $	Deformation energy, W J
FEM	$2.66 \cdot 10^{-5}$	$1.60 \cdot 10^{-4}$	$1.62 \cdot 10^{-4}$	$8.85 \cdot 10^{-5}$	$1.42 \cdot 10^{-3}$
DE	$2.13 \cdot 10^{-5}$	$1.36 \cdot 10^{-4}$	$1.37 \cdot 10^{-4}$	$7.61 \cdot 10^{-5}$	$1.32 \cdot 10^{-3}$

A remark: corresponding value of the norm $\|\cdot\|$ of FEM was adopted as a reference value for calculation of the relative difference.

This new proposed model for simplified analytical description of the normal interaction of particles embedded in a weaker matrix. A verification of the obtained stiffness of the developed spring model with a more accurate but computationally expensive 3D Finite Element modelling demonstrates good quality of the interacting model by showing a good agreement within wide ranges of the properties of the particles, matrix and the gap between the particles.

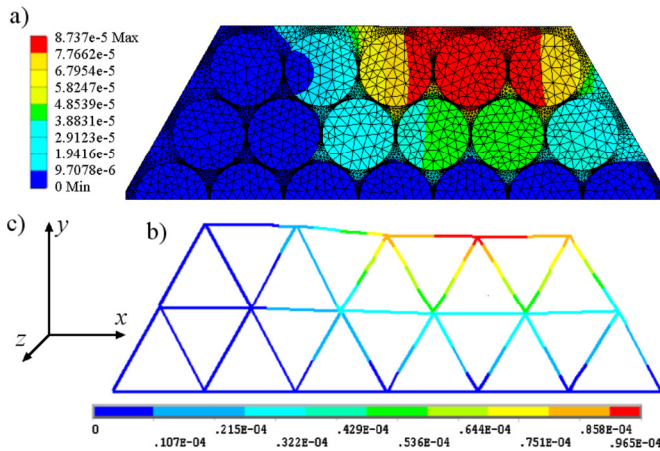


Fig. S13. Contour plots of magnitudes of the displacements in the mid-plane: (a) by 3D FEM, (c) by DE and (c) coordinate axes

4. Discrete model application for Marshall Test analysis

Marshall test is one of the widely used tests for the characterization of asphalt mix materials. Marshall mix design method was originally developed by Bruce Marshall of the Mississippi Highway Department in around the year 1939. The advantage of this test is the complexity of characterization of all heterogenic structure mechanical stiffness. A basic scheme is shown in Fig. S14. A typical test result of force-displacement graphic is given in Fig. S15. Due to the matrix high stiffness nonlinearity and temperature sensitivity this test performs in a strong controlled load speed and temperature.

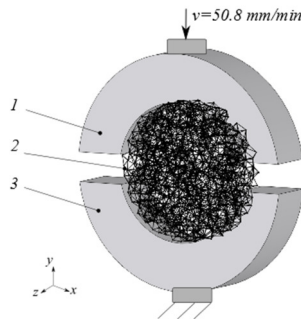


Fig. S14. A scheme of the Marshall test, where 1 and 3 are metal plates and 2 is the Marshall test sample

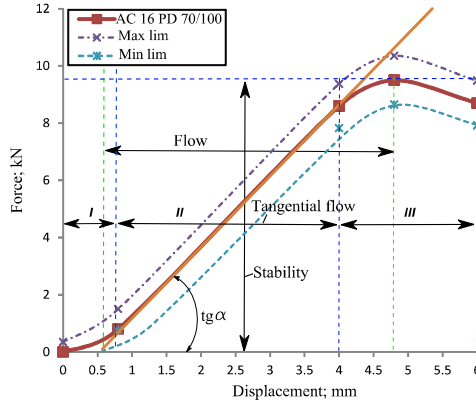


Fig. S15. A typical Marshall test graphic

A discrete model created in such a way that two particles contact interaction represents by 1D element normal stiffness.

In order to model the Marshall test with FEM, a sample was created by C++ program code by spreading out the particles randomly in space according to Delaunay's triangulation methodology.

Program code written in such a way enables the virtual particles not to overlap. The creation of 1D elements stops, therefore, it then reaches required density (in this case 77%). By the use of this method no volume of correction coefficients for full compliance of physical and digital inner volume structures was required. FEM sample represents 1012 nodes and 4812 elements.

The creation of DE model for digital Marshall test analysis is one of the critical steps, since a detailed representation of the inner sample structure increases model accuracy and it also drastically increases the CPU time. 16 PD 70/100 asphalt concrete; particles diameter $D < 1\text{mm}$ percentage distribution by mass are $\sim 34\%$. For the purposes of writing this dissertation a AC 16 PD 70/100 asphalt concrete type was selected. This type is widely used for building road structures.

One of the most important parameters, which characterizes the asphalt concrete, is granular particle percentage distribution by size. Particles' size varies from 0.075mm up to 16mm. In this dissertation the inner model structure created by use of an average particle size approach is used. It is discussed in Mo *et al.* 2008: the average particle as follows:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \bar{d}_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (\text{S9})$$

where: n is a total number of particles in the specimen; $\bar{d}$ is an average diameter of a particle, mm; d_i – i -particle size, mm; w_i – percentage distribution by mass; $\bar{d}_i = (d_i + d_{i-1}) / 2$.

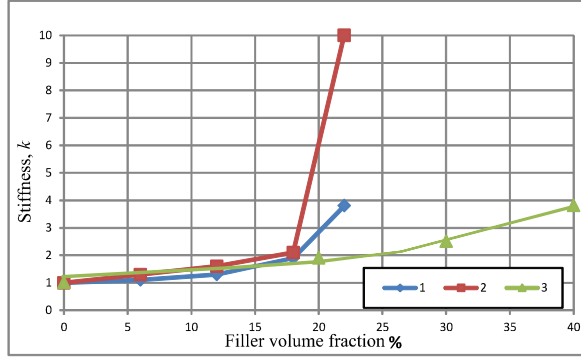


Fig. S16. The mastic stiffness ratio dependent on the fillers volumetric density: 1 – then particle size is 5 μm (Chen *et al.* 2007) 2 – then particle size is 75 μm (Chen *et al.* 2007); 3 – curve (Shashidhar, Shenoy 2002)

According to the Eq. (9), an average particle size is $D = 7.1\text{mm}$ in an AC 16 PD 70/100 asphalt concrete. Theoretical matrix thickness is as follows:

$$L_g = r(k^{-1/3} - 1), \quad (\text{S10})$$

Where r – average particle radius, $r_p = 3.55\text{ mm}$; k – volume fraction of particles in a mixture, $k = 0.77$; for asphalt concrete AC16 PD 70/100 average matrix thickness is $L_g = 0.32\text{mm}$. The effect of particles stiffness, which is smaller than 1 mm, added by increase the matrix stiffness. According to the given asphalt AC16 PD 70/100 data, particles smaller than 1 mm by mass are 34% or by volume 24% stiffness scale factor are $k = 2$.

Numerical analysis results are given in Fig.S17. Maximum differences between the physical digital tests at initial loading phase and at the time of 0.8 second exceed $\sim 9\%$.

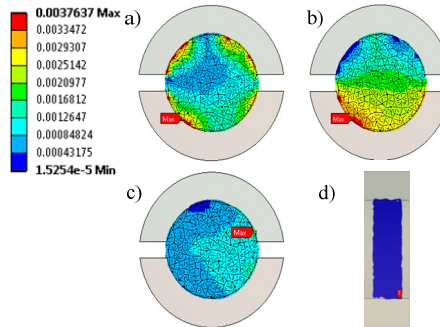


Fig. S17. Displacements of the Marshall discrete element model: a), b), c) and d) are total, vertical, horizontal and longitudinal respectively

In this physical test the most important parameter is a maximum force reaction at deformations of 3.8 mm $F_{AC16 PD70/100} = 9.5$ kN, while $F_{DE} = 10.9$ kN. At this point the difference between a physical and DE models is $\sim 13\%$; this indicates an acceptable error.

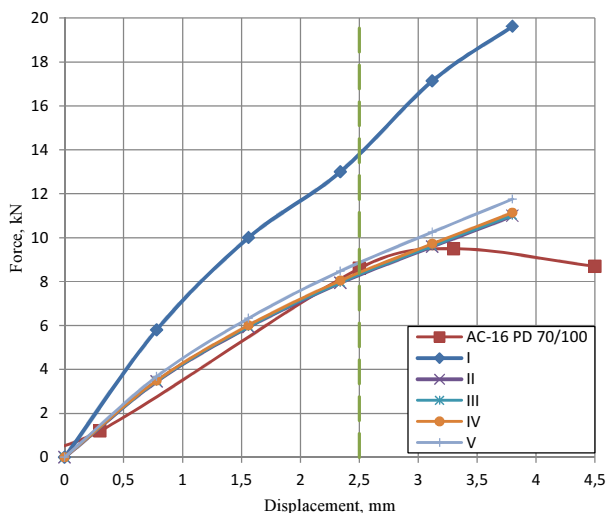


Fig. S18. The comparison of the matrix film effects on reaction force and validation of the physical Marshall test result, where I – elastic model no matrix film; II – viscoelastic model no matrix film; III – viscoelastic model with 4 μm matrix film; IV – viscoelastic model with 12 μm matrix film; V – viscoelastic model with 50 μm matrix film

Comparisons of various models are shown in Fig S18. Elastic model overestimate force reaction of the sample up to $\sim 50\%$ compare with physical test. While viscoelastic model give more accurate results, addition compared the influence of the matrix film. Where influence of the matrix film increases by increasing its thickness as well as providing growth of the force reaction. The difference between no matrix and 4 μm is only $\sim 0.29\%$; whilst the difference between two particles' normal contact stiffness without a matrix film and with a bitumen film is $\sim 0.44\%$.

Table S3. Secant stiffness for given models

α_1	71.92°
α_4	73.09°
α_M	73.79°

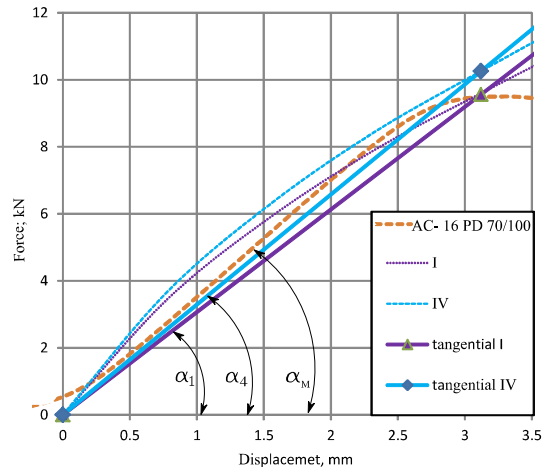


Fig. S19. A comparison of secant stiffness for the given models where: tangential *I* – indicates a model without a matrix film; tangential *IV* – indicates a model with a 50 μm matrix film

The maximum influence on a force reaction is achieved when the matrix film thickness exceeds 50 μm . In such a case the force reaction increases by 6.5% in comparison with the initial model, where the difference between two particles' normal contact stiffness without a matrix film and with a bitumen film is $\sim 5.7\%$. This shows that the two particles normal stiffness can be directly recalculated to represent all Marshall sample stiffness for the given particles size and matrix stiffness.

General conclusions

1. The proposed integral model of normal interaction of spherical particles contacting via interface is suitable to describe normal elastic interaction for wide range of interface gap size and up to 20000 times difference of particle-matrix properties.
2. The model was modified to analyse the composite layered particle it's suitability to model contribution of the matrix film of the asphalt mixtures.
3. The accuracy of the proposed normal interaction model was validated by the results of microscopic continuum analysis by applying the Finite Element Method.
4. Application of particulate interaction model to analyse the particulate composite was provided by solving multiparticle samples, where sufficient accuracy was demonstrated. The difference of displacements fields between discrete and continuum model showed only $\sim 3.2\%$ difference of Euclidian norm, while difference of deformation energy was indicated by sufficient $\sim 8.8\%$ accuracy.
5. Practical value of the developed discretization technique was demonstrated by simulation of the Marshall test i.e. diametric compression of asphalt specimen. The obtained numerical results indicate significant influence of the matrix viscoelasticity to specimen secant stiffness. Numerical results obtained by

assuming elastic behaviour of matrix yields considerable up to 50% of secant cylindrical stiffness of the specimens, while use of the viscoelastic model reduce this difference up to 1%.

6. It should be remarked that elaborated approach capture only simple case of particles interaction. Contribution of other deformation modes, complex particle shapes and material model requires future investigation.

Priedai¹

A priedas. Publikacijų bendraautorių sutikimai teikti publikacijas disertacijos gynimui

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Vytautas Rimša

DALELIŲ KOMPOZITO DISKRETUSIS MODELIS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Mechanikos inžinerija (09T)

DISCRETE MODEL OF THE PARTICULATE COMPOSITE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (09T)

2014 08 28. 10,5 sp. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius