

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Raminta Lygutaitė

**YPAČ STIPRAUS BETONO PANAUDOJIMAS
GAMINANT HIBRIDINES KONSTRUKCIJAS**

Magistro baigiamasis darbas

Darbo vadovas
prof. V. Vaitkevičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

YPAČ STIPRAUS BETONO PANAUDOJIMAS GAMINANT HIBRIDINES KONSTRUKCIJAS

Magistro baigiamasis darbas

Katedros vedėjas

doc.

Data

Vadovas

Prof. V. Vaitkevičius

Data

Recenzentas

doc.

Data

Atliko

STM-4 gr. stud.
Raminta Lygutaitė

Data

**PARENGTO BAIGIAMOJO DARBO SAVARANKIŠKUMO
PATVIRTINIMAS**

Patvirtinu, kad parengtas (bakalauro, magistro) baigiamasis darbas

**YPAČ STIPRAUS BETONO PANAUDOJIMAS
GAMINANT HIBRIDINES KONSTRUKCIJAS**

(įrašyti pavadinimą)

- atliktas savarankiškai ir nebuvo kaip visuma pateiktas jokiam dėstomajam dalykui atsiskaityti šiame ar ankstesniuose semestruose;
- nebuvo pateiktas atsiskaityti kitame KTU fakultete arba kitoje Lietuvos aukštojoje mokykloje;
- turi visas į baigiamojo darbo literatūros sąrašą įtrauktų informacijos šaltinių nuorodas.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Data

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Magistro baigiamasis darbas

**YPAČ STIPRAUS BETONO PANAUDOJIMAS GAMINANT HIBRIDINES
KONSTRUKCIJAS**

Raminta Lygutaitė

Anotacija

Ypač stiprus betonas (YSB) yra šiuo metu viena iš perspektyviausių betono rūšių, dėl savo gerų stipruminių savybių bei atsparumo įvairiems aplinkos poveikiams ir ilgaamžiškumo. Šio betono stipris gniuždant didesnis kaip 100 MPa. Taip pat jis pasižymi labai tankia struktūra. YSB yra plačiai tyrinėjamas jau kelis dešimtmečius, tačiau dėl didelės savikainos plačiai pritaikomas nei užsienio valstybėse nei Lietuvoje dar nėra.

Vienas iš būdų padaryti šį betoną ekonomiškiau yra šiame darbe aprašomas hibridinis betonas. Tai toks betonas, kurio viena dalis yra iš įprastinio betono, o kita dalis yra iš YSB. Pavyzdžiu gali būti sijos, kurių apatinė dalis yra gaminama iš YSB, o viršus gaminamas iš įprastinio betono. Tokia konstrukcija turėtų pasižymėti dideliu stipriu lenkiant. Taip pat hibridinių konstrukcijų pritaikymu gali būti įprastinių konstrukcijų remontas naudojant ypač stiprų betoną tose vietose, kurias labiausiai veikia agresyvus aplinkos poveikis ar reikalingas didelis stiprumas.

Šiame darbe yra projektuojamas hibridinis betonas, norint gauti atitinkamas betono savybes. Taip pat aprašomi hibridinio betono stiprio gniuždant ir lenkiant bandymai bei atsparumas šalčiui. Svarbiausias šio tyrimo tikslas yra nustatyti įprastinio ir YSB betono susitraukimo deformacijas, kurios turi labai didelę įtaką hibridinio betono adhezijai tarp sluoksnių.

Reikšminiai žodžiai:

Ypač stiprus betonas, hibridinės konstrukcijos, betono atsparumas šalčiui, betono susitraukimo deformacijos, adhezija tarp YSB ir įprastinio betono.

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY
BUILDING MATERIALS DEPARTMENT

Master final work

USE OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE MANUFACTURING
HYBRID STRUCTURES

Raminta Lygutaitė

Summary

Ultra high performance concrete (UHPC) is now one of the most perspective concrete types due to its high strength properties and resistance to various environment effects and durability. This concrete compressive strength is more than 100 MPa. It also has very high dense structure. UHPC is widely explored for over two decades, although due to its high price it is not widely used neither in foreign countries nor in Lithuania.

One of the way to make UHPC more economical is hybrid concrete structures. It is concrete structure that one part is made of normal concrete and another part is made of UHPC. The example can be beams which bottom is made of UHPC and top is made of normal concrete. This structure should have high flexural strength. Also hybrid structures can be applied in repairing normal concrete structures using UHPC only in places where is aggressive environment impact or high strength is needed.

In this work hybrid concrete is designed to achieve necessary concrete properties. It is also performed hybrid concrete compressive and flexural strength test results and resistance to frost. The main goal of this research is to determine normal concrete and UHPC shrinkage deformations which has a very big influence on adhesion between different concrete layers.

Keywords:

Ultra high performance concrete, hybrid structures, concrete resistance to frost, concrete shrinkage deformations, adhesion between UHPC and normal concrete.

TURINYS

Įvadas	8
1. Betonas	9
1.1. Betonų rūšys	9
2. Ypač stiprus betonas	13
2.1. YSB gamybai naudojamos medžiagos	13
2.2. YSB maišymo procedūra	16
2.3. YSB savybės, lyginant su įprastiniu betonu	17
2.3.1. Stipris gniuždant ir lenkiant	17
2.3.2. Tamprumo modulis	18
2.3.3. Vandens įgeriamumas	18
2.3.4. Atsparumas šalčiui	19
2.3.5. Atsparumas dilumui	20
2.3.6. Chlorido jonų įsiskverbimas	20
2.3.7. Susitraukimo ir valkšnumo deformacijos	21
2.3.8. Atsparumas ugniai	23
2.3.9. Karbonizacija	24
2.3.10. Ekonominiai rodikliai	24
2.4. YSB pritaikymo sritys	26
3. Hibridinės betono konstrukcijos	27
3.1. Tiklingai gaminamos hibridinės konstrukcijos	27
3.2. Konstrukcijos, kai YSB naudojamas kaip remontinė medžiaga	29
4. Eksperimentinė dalis	32
4.1 Matematinis modeliavimas	32
4.1.1. Hibridinės betono konstrukcijos projektavimas	32
4.1.2. Betono susitraukimo deformacijų skaičiavimas	34
4.2 Tyrimams naudotos medžiagos	36
4.2.1. Cementas	36
4.2.2. Užpildai	36
4.2.3. Mikroužpildai	37
4.2.4. Cheminiai priedai	38
4.2.5. Remontinis mišinys	38
4.3. YSB maišymo procedūra	39

4.4. Tyrimo metodika	40
4.5. Tyrimo eiga	40
4.5.1. YSB tyrimai	41
4.5.2. Racionaliausio betono mišinio sudėties parinkimas taikant artumo idealiam taškui metodą	46
4.5.3. Hibridinės betono konstrukcijos tyrimai	50
4.5.4. Hibridinės betono konstrukcijos atsparumas šalčiui	54
4.5.5. Betono susitraukimo deformacijos.....	55
Išvados	59
Naudota literatūra.....	60

Įvadas

Betonas yra viena iš seniausiai naudojamų statybinių medžiagų. Asirai ir babiloniečiai pastatų statybai naudojo molį, senovės graikai naudojo kalkių skiedinį, o senovės egiptiečiai naudojo kalkių ir gipso skiedinį. Dabartiniiais laikais betonas pradėtas vėl naudoti 1756 m, kai anglų inžinierius Džonas Smitonas patobulino betono savybes, o 1824 m anglų išradėjas Jozefas Aspdintas išrado porlandcementą. Nuo to laiko rišiklio (portlancemento) savybės pakito neženkliai, tačiau betono savybės ir sudėtis yra nuolat tobulinama [36].

Ypač stiprus betonas yra naujos klasės betonas, kuris buvo išrastas ir tobulinamas pastaruosius kelis dešimtmečius. Šio betono savybės yra ženkliai geresnės lyginant su įprastiniu betonu, jis pasižymi didesniu stipriu bei ilgaamžiškumu. Visame pasaulyje mokslininkai nuolat tobulina šio betono sudėtį, tam kad jį būtų galima plačiai pritaikyti pramonėje, tačiau kaina yra pagrindinis rodiklis, kodėl jis dar nėra paplitęs. Nors ir nėra tikslios šio betono sąvokos, tačiau dažniausiai ypač stipriu betonu vadinamas betonas, kurio stipris gniuždant yra daugiau kaip 100 MPa. Šis betonas gaminamas naudojant labai mažą vandens ir rišiklio (V/R) santykį bei tiksliai parenkant reikiamą užpildų dydį.

Viena iš galimybių, kaip padaryti šį betoną lengvai prieinamą yra sukurti hibridinę betono konstrukciją, t.y. naudoti ypač stiprų betoną toje zonoje, kurioje yra reikalingas didelis stipris ir atsparumas, o kitose zonose naudoti įprastinį betoną. Tinkamai suprojektavus tokį betoną, galima pagaminti ekonomišką konstrukciją, kuri pasižymėtų dideliu stipriu, būtų ilgaamžiška, atspari aplinkos poveikiams, tačiau tuo pat metu ir ekonomiška.

1. Betonas

Betonas – tai dirbtinis konglomeratas, gaunamas kietėjant racionaliai parinktų rišamųjų medžiagų, užpildų ir vandens mišiniui. Taip pat į šį mišinį gali būti dedami įvairūs priedai ir mikroužpildai, norint pakoreguoti jo savybes. Dažniausiai naudojamas rišiklis betono gamyboje yra cementas. Betonai yra klasifikuojami pagal tankį, betono mišinio klijumą, stiprį gniuždant, panaudotą gamybai rišamąją medžiagą ir aplinkos poveikio klasę. Visas šias savybes aprašo standartas LST EN 206:2014 „Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis“. Betono struktūroje yra išskiriami trys elementai: cemento akmuo, užpildai ir kontaktinės zonos tarp jų. Šie elementai nulemia betono savybes. Taip pat išskiriama makro ir mikro struktūros. Makrostruktūra apibūdina betono, kaip konglomerato sandarą ir priklauso nuo komponentų santykio ir jų pasiskirstymo vienodumo. Didelę įtaką betono savybėms daro kietėjančiame cementiniame akmenyje ir kontaktinėje zonoje su užpildais susidarantys traukimosi plyšiai. Mikrostruktūrą nulemia cementinio akmens sudėtis, porų dydis ir forma, cementinio akmens ir užpildų kontaktinės zonos. Cemento akmenį sudaro cemento mineralų hidratacijos produktai ir nesureagavusių klinkerio dalelių ir mineralinių priedų intarpai. Pagrindiniai hidratacijos produktai yra kalcio hidrosilikato ir kalcio hidroksido kristalai.

1.1. Betonų rūšys

Nors vis dar dažniausiai yra naudojamas įprastinis betonas, kurio savybės keičiant sudėtį yra koreguojamos neženkliai, per paskutinį šimtmetį atsidaro ženklesnių betono modifikacijų, tokių kaip:

- savaime atsikuriantis betonai;
- persišviečiantis betonai;
- dekoratyvinis (apdailinis) betonai;
- ypač stiprus betonai;
- savaime susitankinantis betonai.

Savaime atsikuriantis betonai (1.1 pav.) buvo išrastas JAV mokslininkų. Šis betonai yra labai lankstus, jį galima sulenkti į U formą ir jis ne tik neperlūžta, tačiau ir išlaiko savo pradines savybes. Šio betono veikimo principas yra paremtas bakterija, kuri įmaišoma gaminant betoną.

Bakterija yra mažose kapsulėse, kurios atsiradus įtrūkiui betone, yra pažeidžiamos ir gavusios vandens ar drėgmės, pradeda daugintis. Bakterijos užpildo savo gamybos produktu (kalcio karbonatu) atsiradusius įtrūkimus, taip atkurdamos pradinį betono stiprumą. Šio betono panaudojimo sritys gali būti įvairios, nuo seisminių zonų iki įprastinių tiltų, kuriuose betonas atliktų kartu ir deformacinių siūlių funkciją. Tai leistų sumažinti priežiūros kaštus, kadangi deformacines siūles tiltuose reikia nuolat remontuoti, taip pat sumažintų automobilių sklaidžiamą garsą, važiuojant per sandūros vietas [40].



1.1 pav. Savaimė atsikuriantis betonas [38]

Persišviečiantis betonas (1.2 pav.) gali dalinai praleisti šviesą. Ši technologija paremta į betoną įdedamomis šviesolaidžio gijomis. Toks betonas padidina natūralios šviesos kiekį patalpoje, tačiau dėl šviesolaidžių kainos neranda plataus pritaikymo [37].



1.2 pav. Persišviečiantis betonas [37]

Dekoratyvinis betonas (1.3 pav.) yra betono atmaina, kuri turi apdailinę funkciją. Tokį betoną galima naudoti grindims, sienoms, takams ar net laikančioms pastato konstrukcijoms gaminti. Tokio betono gamyba gali būti labai įvairi, pavyzdžiui, betonas gali būti štampuojamas, poliruojamas, keičiama betono sudėtis (naudojami pigmentai ar dekoratyviniai užpildai) ar net apdorojamas rūgštimi. Dekoratyvinis betonas dažnai naudojamas norint pakeisti brangias natūralias medžiagas, tokias kaip granitas ar marmuras. Apdorojus betoną, galima pagaminti šių medžiagų imitaciją, kuri pasižymės ir panašiomis mechaninėmis savybėmis [34].



1.3 pav. Dekoratyvinis betonas [34]

Šiuo metu vis dažniau statyboje sutinkamos sąvokos yra savaiame susitankinantis betonas bei ypač stiprus betonas. Savaiame sutankėjantis (susitankinantis) betonas (sutrumpintai SSB) - tai betonas, kuris dėka savo sudėties, veikiamas tik nuosavo svorio tolygiai pasiskirsto užpildomojoje formoje nesukeldamas savyje užpildų išsisluoksniavimo ir vandens atsiskyrimo. Tokio betono visiškai nereikia tankinti ir gaunama tolygi cementinio akmens struktūra (1.4 pav.). SSB naudojimą aprašo standartas LST EN 206:2014, tačiau ypač stiprus betonas vis dar neturi šį betoną apibrėžiančio standartų. Dėl šios priežasties reikia atlikti dar daug tyrimų ir skaičiavimų, norint aprašyti šį betoną.



1.4 pav. Savaime susitankinantis betonas [39]

2. Ypač stiprus betonas

Ypač stiprus betonas (sutrumpintai YSB) – tai naujos kartos betonas, kurio gniuždomasis stipris yra daugiau nei 100 MPa, o stipris lenkiant daugiau nei 10 MPa. Šio betono gamyboje yra naudojamas labai mažas vandens su rišikliu (V/R) santykis, taip pat sudėtyje visiškai nėra stambaus užpildo. Tyrėjas A.K. Azad (2013) savo bandymuose naudojo tokią YSB sudėtį (1 lentelė):

1 lentelė. YSB sudėtis

Medžiaga	Cementas CEM I	SiO ₂ mikro dulkės (micro silica)	Smulkus smėlis	Fibros	Superplastiklis	Vanduo
Kiekis	900 kg/m ³	220 kg/m ³	1005 kg/m ³	157 kg/m ³	40,3 kg/m ³	162,4 kg/m ³

Naudotas V/C santykis yra 0,145. Plieno fibros yra 0,15 mm diametro ir 12,7 mm ilgio, jų stipris yra 2500 MPa. Superplastiklis naudotas Glenium 51. Šiuo atveju gautas gniuždomasis stipris yra daugiau nei 160 MPa, o lenkiamasis stipris siekė 30 MPa [1].

Kita sudėtis yra aprašoma straipsnyje “Production Waste of Granite Rubble Utilisation in Ultra High Performance Concrete” (2 lentelė).

2 lentelė. YSB sudėtis

Medžiaga	Cementas CEM I	SiO ₂ mikro dulkės	Maltas kvarcinis smėlis	Smulkus užpildas (smėlis)	Fibros	Superplastikl is	Vanduo
Kiekis	735 kg/m ³	99 kg/m ³	412 kg/m ³	962 kg/m ³	73,5 kg/m ³	36,76 l/m ³	170 kg/m ³

Šiuo atveju V/C santykis yra 0,23. Gniuždomasis stipris siekia 140 MPa (lenkiamasis stipris nebuvo nustatytas) [28].

2.1. YSB gamybai naudojamos medžiagos

Cementas. YSB gaminti dažniausiai naudojamas įprastas portlancementis, tačiau kuo didesnės stiprumo klasės. Kadangi gamybai naudojamas labai didelis cemento kiekis, reikia atsižvelgti į cemento smulkumo ir susitraukimo parametrus. Kuo smulkesnis cementas, tuo daugiau reikia vandens normalaus tirštumo tešlai paruošti. Taip pat patariama naudoti cementą, kuris turi mažus susitraukimus.

Smėlis. Smėlis yra naudojamas kaip užpildas betone. Dažniausiai yra naudojamas kvarcinis smėlis, kadangi jis nėra chemiškai aktyvus.

Maltas kvarcinis smėlis. Maltas kvarcinis smėlis naudojamas dėl betono mišinio reologinių savybių pagerinimo. Šis užpildas pagerina betono mikrostruktūrą.

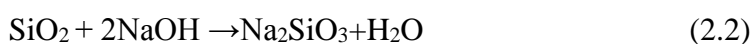
SiO₂ mikro dulkės. Tai ferosilicio gamybos atlieka, kuris pakeičia betono mikrostruktūrą, ją homogenizuodamas, taip pat sumažina vandens ir jo garų pralaidumą. SiO₂ mikrodulkės yra pucolaninis priedas, kurio reakcija vyksta dėl didelio savitojo paviršiaus ploto ir esančio didelio amorfinio silicio oksido kiekio. Reakcija vyksta pagal lygtį:



SiO₂ mikro dulkės taip pat veikia kaip mikroužpildas, kuris dėl savo smulkumo (SiO₂ mikro dulkės yra apie 100 kartų smulkesnės už cemento daleles) užpildo tarpus tarp cemento dalelių, todėl cementinio akmens struktūra gaunama tankesnė ir homogeniškesnė [32].

Weiting. S. (2016) tyrė SiO₂ mikro dulkių poveikį betono gniuždomajam stipriui. Buvo pagamintos sudėty, pakeičiant 5, 10, 15, 20, 25, 30 % cemento kiekiu SiO₂ mikro dulkėmis ir rezultatai lyginami su kontroliniu bandiniu kuriame SiO₂ mikro dulkės nebuvo naudotos. Visuose bandiniuose naudotas V/C santykis buvo 0,3. Gauti duomenys rodo, kad kontrolinio bandinio gniuždomasis stipris po 28 dienų buvo 86,81 MPa. Didžiausias stipris gniuždant gautas naudojant 10 % SiO₂ mikro dulkių, t.y. net 105,82 MPa, toliau didinant šio mikroužpildo kiekį, gniuždomasis stipris mažėjo. Taip pat svarbu paminėti, kad visais atvejais buvo gautas didesnis stipris gniuždant nei kontrolinio bandinio, taip yra dėl didelio SiO₂ mikro dulkių paviršiaus ploto ir vykstančios pucolaninės reakcijos [23, 30].

Nano silika. Nano silika- tai nano dydžio medžiaga, kuria yra bandoma pakeisti įprastines SiO₂ mikro dulkes dėl didesnio paviršiaus ploto bei mikro porų užpildymo. Nano silika gali būti išgaunama SiO₂ pagrindo medžiagas pirmiausiai paveikus NaOH tirpalu, tuomet gaunama reakcija:



Tuomet gautas produktas (silika gelis) yra paveikiamas H₂SO₄, tam, kad būtų sumažintas pH nuo 13,5 iki 8,5, gaunama tokia reakcija:



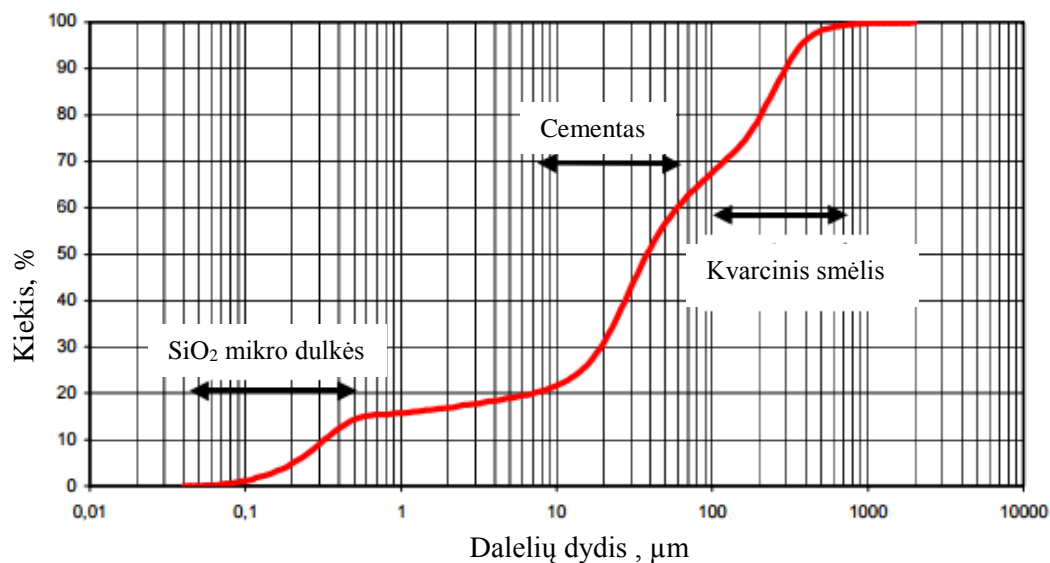
Tuomet pH yra stabilizuojama naudojant NaOH tirpalą ir gautas produktas veikiamas ultragarso bangomis (30 W, 20 kHz). Taip gaunama nano silika, kuri gali būti panaudojama labai įvairiai, t.y. nuo elektronikos, keramikos iki betono užpildo, siekiant pagerinti jo savybes [12, 13].

Said. A.M. (2012) aprašė betono tyrimus naudojant skirtingus kiekius nano silikos betone. Buvo pagaminti trijų sudėčių bandiniai, t.y. kontrolinis, naudojant 3 % nano silikos ir 6 % nano silikos. Rezultatai rodo, kad didžiausias stipris gniuždant gautas naudojant 6 % nano silikos (18 % didesnis už kontrolinio bandinio po 7 dienų), toliau sekė stipris gautas naudojant 3 % nano silikos (4 % didesnis už kontrolinio bandinio po 7 dienų) ir mažiausio stiprio gniuždant buvo kontrolinis bandinys. Atitinkamai tokie patys rezultatai buvo gauti ir išmatavus betono tempiamąjį stiprį skeliant. Naudojant 6 % nano silikos stipris tempiant padidėjo net 25 % už kontrolinio bandinio stiprį tempiant po 28 dienų [18].

Fibros. Dispersinis armavimas labai pagerina eksploatacines betono savybes. Jis neturi didesnės įtakos gniuždomojo betono stipriui ir deformacijų moduliui, tačiau visiškai pakeičia betono suirimo pobūdį. Betoninis elementas, veikiamas apkrovos suįra trapijai, o dispersiškai armuoto betoninio elemento suirimas yra plastiškas. Don, J.K. (2011) straipsnyje aprašo YSB lenkimo charakteristikas, kai betono armavimui naudojamos skirtingos makro ir mikro fibros bei jų konfigūracijos. Bandymai parodė, kad YSB armuotas 1% mikro ir 1% makro fibromis pasiekė geresnius stipruminius rezultatus, nei armuojant tik su mikro (2 %) ir tik su makro (2%). Skirtingų fibrų naudojimas YSB gali būti vienas iš sprendimo būtų ieškant betono sudėties, su kuria būtų pasiekiamas didžiausias lenkimo stipris [4].

Superplastiklis. Dažniausiai naudojami vadinamieji III kartos superplastikliai, kurie yra gaminami polikarboksilano pagrindu. Superplastiklis yra reikalingas dėl gamybai naudojamam mažo V/R santykio. Jų veikimas paremtas atsirandančių paviršinės absorbcijos ir dalelių erdvinio elektrostatinio atskyrimo reiškiniais, veikiančių cemento grūdelius, užpildus ir smulkiąsias frakcijas bei atsirandančio poveikio cemento hidratacijos procesui. Superplastiklio naudojimas pagerina betono mechanines savybes, leidžia naudoti net iki 40 % mažiau vandens kiekio bei suteikia didesnę ankstyvąjį betono stiprį.

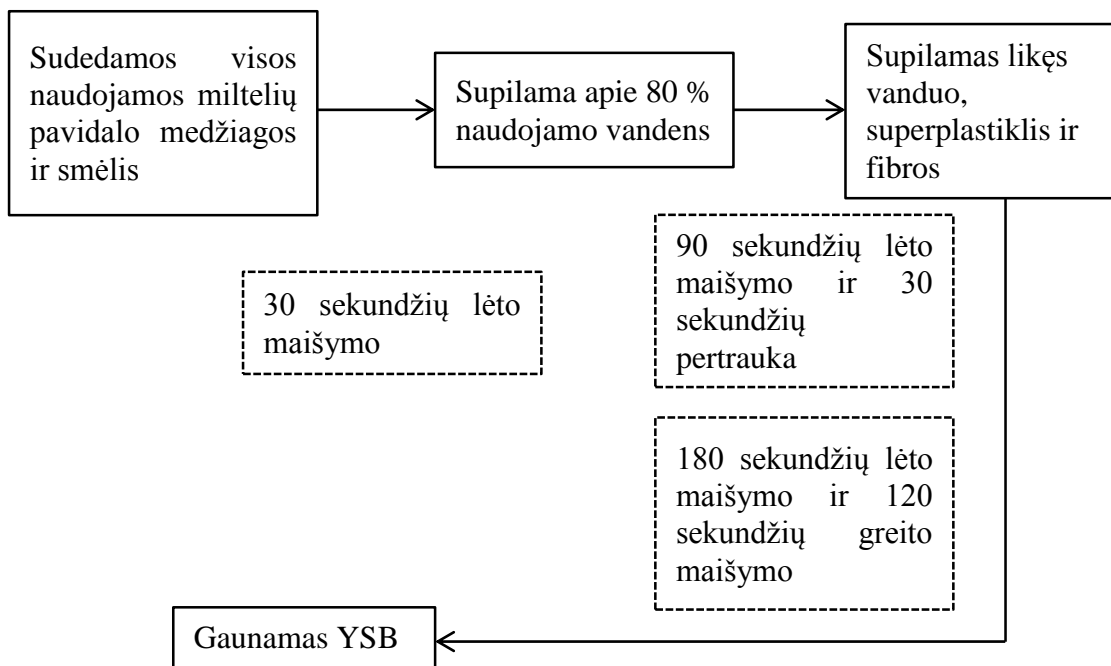
Tinkamas medžiagų parinkimas yra taip pat svarbus kaip ir tinkamas šių medžiagų dalelių dydis. M. Schmidt teigia, kad norint gauti tinkamas YSB reologines savybes, svarbu optimaliai parinkti naudojamus užpildus ir mikroužpildus (2.1 pav.).



2.1 pav. Užpildų dalelių dydžio pasiskirstymas [21]

2.2. YSB maišymo procedūra

Tikslingai suprojektuoti YSB betono sudėties nepakanka, kad būtų gautos jo savybės. Didelis dėmesys turi būti skiriamas ir pačiai maišymo technologijai. Tyrėjas Yu R. (2014) pateikė naudojamą gamybai YSB maišymo schemą (2.2 pav.)

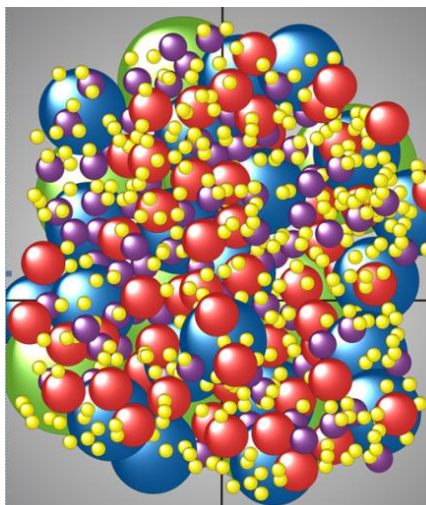


2.2 pav. YSB maišymo procedūra [11]

Pagrindinis YSB mišinio maišymo aspektas yra maišyklė, kuri gali maišyti mišinį intensyviai (dėl mažo V/C santykio) ir sudaryti vakuumą kol maišomas betono mišinys. Tačiau praktikoje tokios maišyklės yra naudojamos retai, ir net pasitelkus paprastesnes priemones galima gauti homogenišką mišinį [28].

2.3.YSB savybės, lyginant su įprastiniu betonu

Ypač stiprus betonas gaminamas taip, kad būtų gaunama kompaktiškiausia dalelių sanglauda, t.y. išretėjusi sandara (2.3 pav.). Pagrindinis išretėjusios sandaros privalumas yra tas, jog tokioje sistemoje, ne tik sumažėja tikimybė atsirasti mikro įtrūkimams, tačiau tokia sistema tampa mechaniškai tvirtesnė, t.y., padidėja stipruminės savybės, tamprumo modulis bei ilgaamžiškumas. Norint išgauti išretėjusią sandarą, reikia išlaikyti tarp stambesnio ir viena frakcija smulkesnio užpildo diametrų minimalų santykį, kuris yra $\frac{1}{13}$. Kitaip sakant smulkaus užpildo dalelės (kvarcinio smėlio) turi būti 13 kartų didesnio diametro nei cementas, o cemento dalelės - 13 kartų didesnio diametro nei SiO₂ mikrodulkės [16].



2.3 pav. YSB struktūra [16]

2.3.1. Stipris gniuždant ir lenkiant

Stipris - tai medžiagos savybė priešintis irimui ir deformacijai, kuriuos sukelia išorinės jėgos (gniuždymo, tempimo, lenkimo, sukimo ir t.t.) ir kiti faktoriai (temperatūros pokyčiai ir t.t.). Stipris yra svarbiausia betono, kaip konstrukcinės medžiagos savybė. Įprastinio betono stipris tempiant yra apie 10 – 20 kartų mažesnis nei stipris gniuždant, todėl betonas dažniausiai projektuojamas kad atlaikytų gniuždymo įtempimus. Standartizuotas betono stiprio gniuždant rodiklis vadinamas

gniuždomojo stiprio klase, t.y. su 95 % tikimybe garantuotas gniuždomasis stipris, suapvalintas iki standartinio dydžio [9].

Įprastiniu betonu galima vadinti tokį betoną, kurio stipris gniuždant yra apie 30-50 MPa, tokiu atveju jo stipris lenkiant yra apie 2-5 MPa. Tuo tarpu ypač stipriu betonu galime vadinti betoną, kurio stipris gniuždant yra didesnis nei 100 MPa. Tokio betono stipris lenkiant priklauso ar buvo naudotos fibros ir koks kiekis buvo naudotas. Nenaudojant fibrų tokio betono lenkiamasis stipris yra apie 5-10 MPa, o naudojant fibras – 7-15 MPa [5, 22].

2.3.2. Tamprumo modulis

Betono tamprumo modulis yra pastovus, kai betonas yra veikiamas nedidelių įtempių, tačiau pradeda ženkliai mažėti, kai betonas yra paveikiamas tokių didelių įtempių, jog gaminys pradeda irti. Betono tamprumo modulio empirinė išraiška priklauso nuo betono gniuždomojo stiprio. Graybeal B.A. (2007) savo moksliniame darbe teigia, kad įprastiniam betonui tinkanti tamprumo modulio priklausomybė netinka ypač stipriam betonui.

Įprastinio betono tamprumo modulis yra artimas apskaičiuojamai reikšmei pagal formulę:

$$E = 4730\sqrt{f'_c}, \text{ MPa} \quad (2.4)$$

YSB tamprumo modulis artimas apskaičiuojamai reikšmei pagal formulę:

$$E = 3320\sqrt{f'_c} + 6900, \text{ MPa} \quad (2.5)$$

arba:

$$E = 19000\sqrt[3]{\frac{f'_c}{10}}, \text{ MPa.} \quad (2.6)$$

Įprastinio betono tamprumo modulis svyruoja nuo 25 iki 45 Gpa, o ypač stipraus betono tamprumo modulis yra 45 -60 Gpa [8].

2.3.3. Vandens įgeriamumas

Vandens įgeriamumas - tai medžiagos savybė sugerti ir išlaikyti aplink esantį vandenį. Įgeriamumas gali būti apskaičiuojamas pagal masę arba pagal tūrį. Vandens įgeriamumas yra labai svarbus, kai betonas projektuojamas hidrotechniniam ar transporto statiniui, kuris bus neapsaugotas nuo vandens. Taip pat įgeriamumas yra reikšmingas betonui, kuris bus eksploatuojamas žemos temperatūros regionuose, kadangi nuo įgeriamumo proklauso medžiagos atsparumas šalčiui [31].

Grafari, E. (2014) atliko YSB bandymus, kuriuose buvo pagaminti kontroliniai ir dar keturi bandiniai. Kontroliniame bandinyje buvo naudotas užpildas SiO₂ mikro dulkės, o kituose naudotas toks pat kiekis SiO₂ mikro dulkių ir papildomai didinamas nano silikos kiekis. Rezultatai rodo, kad

kontrolinio bandinio vandens įgeriamumas gautas 1,212 %, o mažiausias vandens įgeriamumas gautas trečiosios sudėtie (0,808 %), kurioje 3% cemento buvo pakeista nano silika. Šie rezultatai rodo, kad visi YSB bandiniai pasižymėjo labai mažu vandens įgeriamumu, lyginant su Schutter, G.D. (2004) atliktais įprastinio betono vandens įgeriamumo bandymais. Šių bandymų rezultatai rodo, kad neženkliai keičiant įprastinio betono sudėtį, buvo gautas betono vandens įgeriamumas nuo 3,4 iki 6,1 % [7, 19].

2.3.4. Atsparumas šalčiui

Cikliškai šaldomas ir šildomas vandeniū prisotintas betonas gali pradėti trūkinėti, trupėti dėl užšalusio vandens tūrio padidėjimo. Ledas užima 9% didesnį tūrį negu vanduo. Todėl ledo kristalai slegia medžiagos porų bei kapiliarų sienelės, plečia visą gaminį ir gali jį suardyti. Hidraulinio slėgio jėgos dydis priklauso nuo porų užpildymo vandeniū laipsnio ir šaldymo greičio. Jeigu vandeniū užpildoma mažiau kaip 75% porų, užšalancio vandens slėgis nepavojingas. Be to, manoma, kad užšalanciam gaminyje veikia ir osmosinio slėgio jėgos. Vandenyje, esančiame porose, būna ištirpusių junginių ir druskų. Vandeniū virstant ledu, tirpalo koncentracija didėja, ir per porų sienelės vyksta osmoso reiškiniai. Osmosinio slėgio jėgos gali padidinti ledo kristalizacijos jėgas. Gaminys suyra tuomet, kada dėl užšalancio vandens atsirandantys įtempimai yra didesni negu betono arba skiedinio stiprumas tempiant. Vadinasi, kuo medžiaga mechaniškai stipresnė, tampresnė ir kuo mažiau užpildytos vandeniū poros, tuo medžiaga atsparesnė šalčiui.

Betono vandens įmirkis ir atsparumas šalčiui priklauso nuo medžiagos struktūros – poringumo, porų bei kapiliarų dydžio, jų pasiskirstymo ir pobūdžio, t.y., ar poros yra atviros ar uždarnos. Betono atsparumą šalčiui mažina atviros poros ir kapiliarai, kurie susidaro garuojant iš betono laisvajam vandeniū. Tokių porų ir kapiliarų kiekis priklauso nuo V/R santykio dydžio. Kuo didesnis V/R santykis, tuo daugiau lieka nesurišto vandens, o jam išgaravus, atvirų porų.

Įprastinio betono struktūra yra porėta, todėl jis visiškai nėra atsparus šalčio poveikiui. Norint padidinti įprastinio betono atsparumą šalčiui yra naudojami orą įtraukiantys priedai. Sutankintame betono mišinyje turi būti daugiau kaip 3 % įtraukto oro, kad būtų užtikrintas betono atsparumas šalčiui. Didelis įtraukto oro kiekis taip pat yra nepageidautinas, nes gali sumažinti betono mechaniinį stiprumą ir pabloginti kitas jo savybes [32].

Mokslininko Wang D. (2015) publikacijoje bandymai rodo, kad po 600 šildymo-šaldymo ciklų, ypač stipraus betono bandinių masės nuostolis buvo beveik lygus 0. Po 1000 šildymo-šaldymo santykinis dinaminis modulis įprastinio betono ir ypač stipraus betono bandinių

atitinkamai sumažėjo iki 61 % ir 10 %, o stipris gniuždant atitinkamai sumažėjo iki 57% ir 6%. Todėl galima teigti, kad ypač stiprus betonas pasižymi dideliu atsparumu šalčio poveikiui [29].

Atsparumas šalčiui yra apibūdinamas atsparumo šalčiui marke F. Yra nustatytos tokios atsparumo šalčiui markės: F50, F75, F100, F150,....., F600 [31].

2.3.5. Atsparumas dilumui

Atsparumas dilumui – tai medžiagos sugebėjimas priešintis trinties jėgų poveikiui. Šiam rodikliui nustatyti naudojami specialiai pagaminti bandiniai, dilinami disku, pabėrus dilinimo medžiagos. Bandinio dilumas apskaičiuojamas pagal formulę, g/cm²:

$$D_i = \frac{m_1 - m_2}{A} \quad (2.7)$$

čia: m_1 – bandinio masė iki bandymo, g;

m_2 – bandinio masė po bandymo, g;

A – dilinamos plokštumos plotas, cm² [31].

Atsparumas dilumui taip pat gali būti nusakomas kaip bandinio tūrio sumažėjimas, jį lyginant su etalonu. Šiuo atveju etalonas yra stiklas, kurio dilumo koeficientas yra 1,0. Ypač stipraus betono dilumo koeficientas yra apie 2,8, o įprastinio betono apie 4,0 [17].

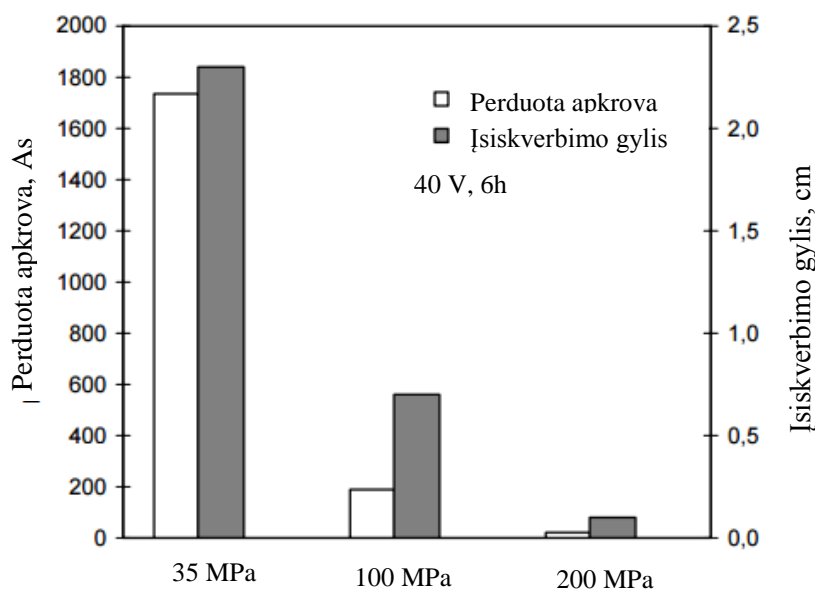
2.3.6. Chlorido jonų įsiskverbimas

Betonas, kuris yra eksploatuojamas prie sūraus vandens telkinių ar tiesiog veikiamas sniegą ir ledą tirpinančiomis druskomis, dažnai praranda savo projektines savybes žymiai greičiau nei eksploatuojant betoną neagresyvioje terpėje. Šiuo atveju betonas yra veikiamas chlorido jonų, kurių įsiskverbimas į gilesniu sluoknius ir sąlygoja savybių pablogėjimą. Žalingi junginiai gali reaguoti su įvairiais sukietėjusio betono komponentais, dažniausiai reaguoja su hidratacijos metu iš cemento susidariusiais produktais. Savybė, kuri apibūdina betono atsparumą įvairių kenksmingų junginių (skysčių, dujų) patekimui į betoną esant tam tikram slėgiui, yra betono nepralaidumas. Įprastinis betonas dėl porėtos struktūros yra pralaidus chloridams, todėl tokioje aplinkoje esančiame betone dažniausiai pasireiškia armatūros korozija, kuri sąlygoja ir betono irimo procesą.

Ypač stiprus betonas pasižymi labai mažu pralaidumu, kuris yra susijęs su mažu šio betono poringumu. Bendras porų skaičius betone priklauso nuo to, kokių būdu betonas buvo kietinamas.

Jei ypač stipriame betone nebuvo naudojamas terminis apdorojimas, suminis poringumas gali siekti nuo 4% iki 11%. Jei YSB buvo 2 paras kietinamas 90 °C temperatūroje, tai tokio betono suminis poringumas gali svyruoti nuo 1% iki 6%. Įprastinio betono suminis poringumas yra $\geq 15\%$ [20].

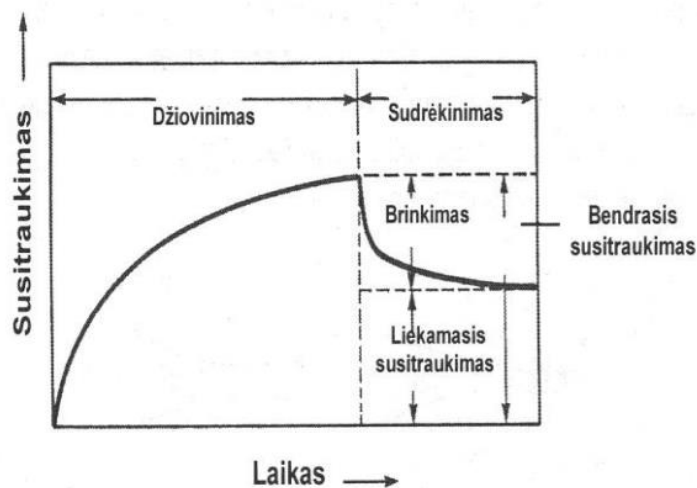
T. Teichmann bandymų metu lygino įprastinio betono (gniuždomasis stipris 35 MPa), ypač stiprus betono (gniuždomasis stipris 100 MPa) ir dar didesnio stiprio betono (gniuždomasis stipris 200 MPa) chlorido jonų įsiskverbimo gylį. Rezultatai rodo, kad įprastinis betonas buvo paveiktas stipriausiai, t.y. chloridai prasiskverbė net 2,3 cm, o YSB, kurio stipris 200 MPa, chloridai prasiskverbė mažiau nei 0,1 cm (2.4 pav.) [27].



2.4 pav. Perduotos apkrovos ir chlorido jonų įsiskverbimo gylis [27]

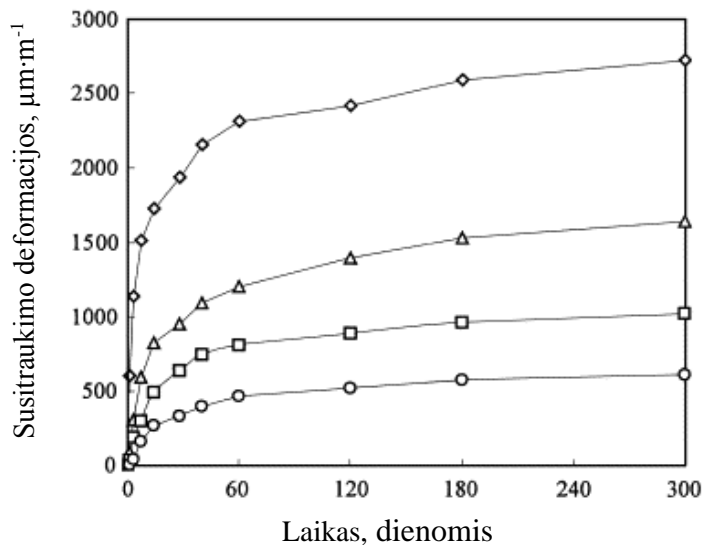
2.3.7. Susitraukimo ir valkšnumo deformacijos

Susitraukimas – tai betono laisvas tūrio mažėjimas laike dėl kietėjimo metu vykstančios cemento hidratacijos (cheminis susitraukimas) bei drėgnumo kaitos (susitraukimas džiustant). Susitraukimas – ilgalaikis procesas. Po 1 mėnesio pasireškia apie 40% pilnų betono susitraukimo deformacijų, o maždaug po 1 metų – 90%. Susitraukimo deformacijų dydis priklauso nuo betono sudėties, elemento formos bei jo laikymo sąlygų, ir gali turėti nemažos įtakos betoninių elementų elgsenai (2.5 pav.) [33].



2.5 pav. Betono susitraukimo deformacijos [33]

Jiang, Z. (2005) ištyrė betono susitraukimo deformacijas, esant skirtingiems V/C santykiams. Gauti rezultatai (pav.) rodo, kad susitraukimo deformacijos gautos didžiausios, kai V/C santykis buvo 0,2, o mažiausios, kai V/C santykis buvo 0,5 (2.6 pav.) [14].



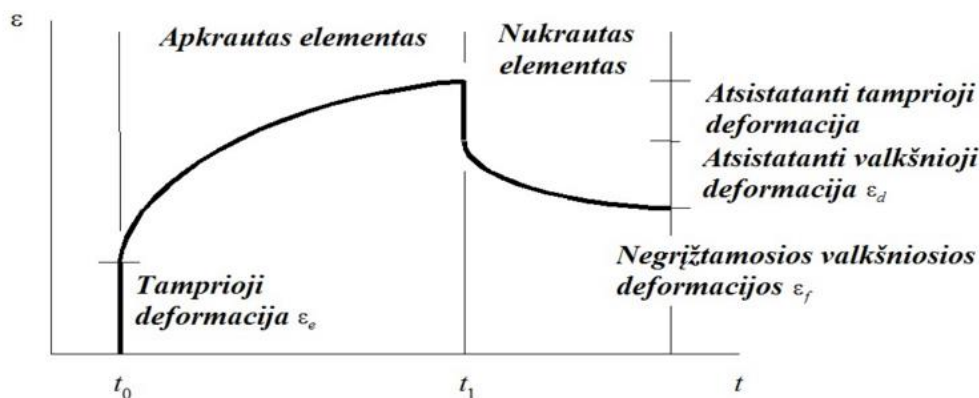
2.6 pav. Susitraukimo deformacijos, esant skirtingam V/C cemento santykiui (\diamond - V/C=0,2; Δ - V/C=0,3; \square - V/C=0,4; \circ - V/C=0,5) [14]

Valkšnumu vadinama betono savybė deformuotis, veikiant laiko atžvilgiu nekintamai apkrovai. Pasaulyje pasiūlyta nemažai šio efekto kilmės hipotezių. Įvairūs autoriai išskiria kelias valkšnumo atsiradimo priežastis: cementinio akmens reologinės savybės, betono kristalinės struktūros plastinės deformacijos, kapiliariniai reiškiniai, vykstantys kietėjant betonui, mikroplyšių atsiradimas bei vystymasis.

Valkšniosios deformacijos yra ženkliai didesnės, kai jas lydi betono susitraukimas. Apkrauto betoninio elemento, esančio higroskopinėje pusiausvyroje su aplinka (laisvojo susitraukimo deformacijos $\epsilon_{sh} = 0$), ilgalaikės deformacijos vadinamos baziniu valkšnumu (angl. basic creep), o papildomos deformacijos, atsirandančios dėl elemento drėgmės pokyčio, - valkšnumu džiūstant.

Valkšnumas yra dalinai grįžtamas procesas. Apkrovus betoninį elementą iškart pasireiškia tampriosios (trumpalaikės), o laikui bėgant ir valkšniosios deformacijos. Nukrovus elementą laiko momentu t_1 , įvyksta staigus tamprųjų bei palaiptis valkšniųjų deformacijų atsistatymas. Jeigu elementas nukraunamas po gana ilgo laiko, atsistato apie 10 – 30 % valkšniųjų deformacijų.

Valkšniosioms deformacijoms didelę įtaką turi įtempių lygis. Kol įtempiai nesukelia betone mikroplyšių, valkšniosios deformacijos yra tiesiogiai proporcingos įtempiams, o valkšnumas vadinamas tiesiniu. Esant tiesiniam valkšnumui, betono deformacijų kreivė laiko atžvilgiu asimptotiškai artėja prie tam tikros ribos. Kai įtempiai pranoksta mikroplyšių susidarymo ribą, tą patį įtempių prieaugį atitinka vis didėjantis plastinių deformacijų prieaugis. Toks valkšnumas vadinamas netiesiniu. Pasireiškus netiesiniam valkšnumui betoninio elemento deformacijos nenutrūkstamai auga tol, kol elementas suyra (2.7 pav.)[33].



2.7 pav. Valkšniosios deformacijos [33]

2.3.8. Atsparumas ugniai

Žmonių saugumas gaisro atveju yra vienas iš svarbiausių gyvenamųjų, visuomeninių ir pramoninių pastatų projektavimo aspektų. Mokslininko D. Wang (2015) tyrimų metu buvo nustatyta, kad įprastinio betono bandinių ir ypač stipraus betono bandinių skilimas atitinkamai įvyko maždaug prie 690 °C ir 790 °C temperatūrų. Ypač stipraus betono stipris gniuždant didėjo, palaiptisui didinant temperatūrą iki 200-300 °C, tačiau temperatūrai dar padidėjus, stipris pradėjo mažėti.

Imitavus gaisro situaciją ir bandinius palaikius pastovioje 500 ± 50 °C ir nustačius įprastinio ir ypač stipraus betono bandinių stiprius gniuždant, gauti rezultatai:

- 1) po 60 minučių pastovioje temperatūroje liekamasis stipris gniuždant atitinkamai buvo 62,2% ir 58,5%;
- 2) po 120 minučių pastovioje temperatūroje liekamasis stipris gniuždant atitinkamai buvo 55,6 % ir 52,7%.

Taip pat nustatyta, kad palaikant tokias pačias sąlygas abiejų betono sudėčių bandiniams, ypač stipraus betono bandinių vidinė temperatūra buvo didesnė nei įprastinio betono. Tai reiškia, kad temperatūrų skirtumas tarp ypač stipraus betono bandinio išorinio paviršiaus ir centro buvo mažesnis, kas sąlygoja mažesnius vidinius įtempimus.

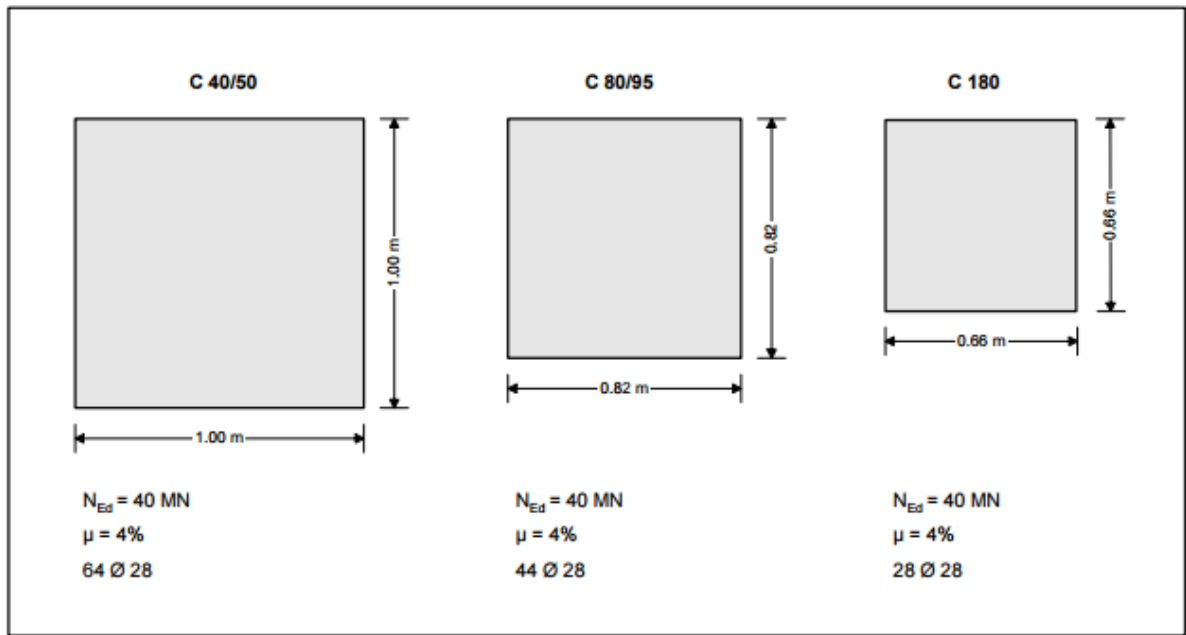
Kadangi ypač stipraus betono bandinių po tokių pačių imituotų gaisro sąlygų gniuždomasis stipris visais atvejais išliko didesnis, nors ir neženkliai, ypač stiprus betonas lyginant su įprastiniu betonu yra atsparesnis ugniai [29].

2.3.9. Karbonizacija

Betono karbonizacija vyksta dėl ore esančių CO₂ dujų. Palankiausios sąlygos vykti karbonizacijai betone yra oro drėgnis 50-60 % ir didelė oro temperatūra. Esant šioms sąlygoms CO₂ dujos gali prasiskverbti į betono sluoksnius ir reaguoti su laisvu kalcio hidroksidu ir kalcio hidrosilikatais. Šis procesas yra labai lėtas ir priklauso nuo betono savybių, tokių kaip, tankis, porėtumas, cemento tipas. Karbonizacijos metu susidarę CaCO₃ kristalai padengia betone esančių kalkių bei kalcio hidrosilikatų paviršių, sudarydami tankią plėvelę, kuri lėtina tolimesnę karbonizaciją. Mechaniniu požiūriu karbonizacija yra nekenksminga ir tik padidina betono stiprumą, tačiau karbonizacija taip pat padidina betono taukimąsi ir mažina betono pH. Norint įvertinti karbonizacijos sukeltą poveikį, yra nustatomas karbonizacijos gylis [31]. Betonų, kurių stipris gniuždant yra ≥ 150 MPa, 100÷150 MPa ir 30÷50 MPa, po trijų metų atitinkamai karbonizacijos gylis vidutiniškai siekė 1,5 mm, 4 mm ir 7 mm [20].

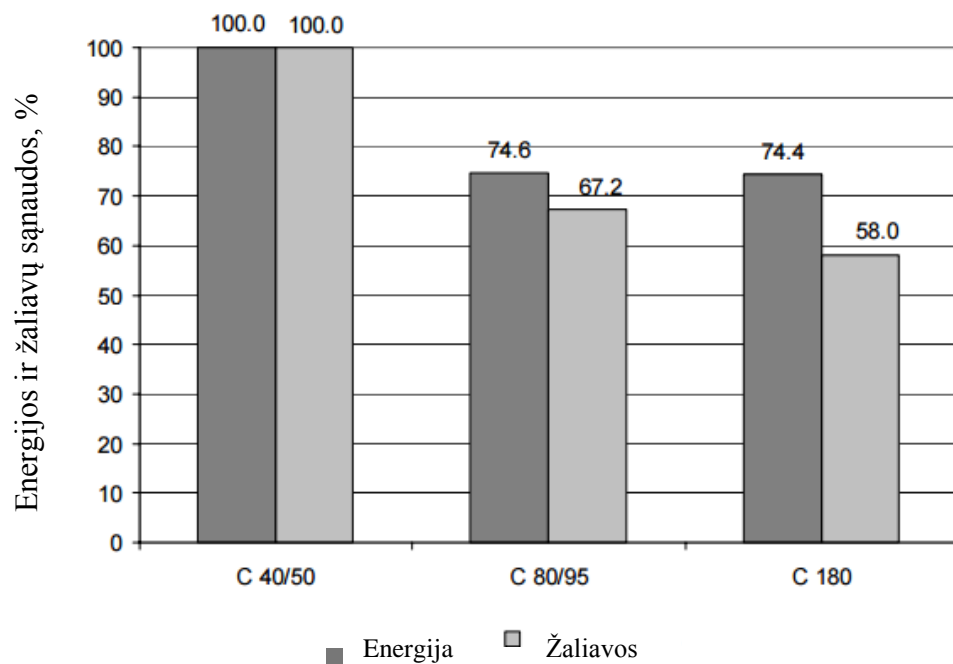
2.3.10. Ekonominiai rodikliai

Tyrėjas Racky, P. (2004) aprašė svarbiausius YSB kainos efektyvumo kriterijus. Svarbiausi iš jų yra energijos suvartojimas ir žaliavų sąnaudos. Pagal šiuos parametrus buvo lyginti trijų stipruminių klasių gelžbetoninės kolonos (C40/50, C80/95, C180). Pirmiausiai nustačius reikalingą atlaikyti skaičiuotinę apkrovą $N_{Ed} = 40$ MN, apskaičiuotas reikalingas kolonos skerspjūvis (2.8 pav.).



2.8 pav. Gelžbetoninės kolonos skerspjūvio plotai, naudojant skirtingas betono klases, kai $N_{Ed}=40\text{MN}$, o armatūros kiekis $\mu=4\%$ [15]

Tuomet prilyginus įprastinio betono (C 40/50 klasės) energijos suvartojimo ir žaliavų sąnaudas 100 % matyti, kad gaminant konstrukcijas iš C80/95 klasės gelžbetonio, energijos sąnaudas yra mažesnės 25,4 %, o žaliavų sąnaudas net 32,8 %. Naudojant C180 klasės betoną, sąnaudas lyginant su C80/95 klasės betonu sumažėjo labai neženkliai, t.y. atitinkamai 0,2 % ir 9,2% (2.9 pav.). Šie rezultatai rodo, kad YSB yra ekonomiškąs.



2.9 pav. Energijos ir žaliavų sąnaudų palyginimas, gelžbetoninei kolonai ($N_{Ed} = 40\text{MN}$, $l = 3,50\text{m}$) [15]

2.4. YSB pritaikymo sritys

Nors ypač stiprus betonas yra nuolat tiriamas visame pasaulyje, tobulinama jo sudėtis bei savybės, plačiai šis betonas dar nėra naudojamas. Kaip galimos pritaikymo sritys yra pastatų, tiltų ar kitų inžinerinių statinių laikančiosios konstrukcijos, kurios gali būti lenktų, sudėtingų formų bei mažesnių matmenų. Taip pat tokį betoną galima naudoti fasadų apdailai ar mažajai architektūrai, kur architektūrinės kompozicijos būtų sunkiai įgyvendinamos naudojant įprastą betoną (2.10, 2.11 pav).



2.10 pav. 2006 Amerikoje pastatytas tiltas iš YSB [41]



2.11 pav. architektūrinis fasadas iš YSB [35]

Viena iš priežasčių, kodėl YSB nėra plačiai paplitęs yra jo kaina. Šiuo metu, net įvertinus, kad šio betono sąnaudos, lyginant su įprastiniu betonu, yra mažesnės, kainos skirtumas yra ženklus. Mokslininkai bando sumažinti kainą vietoj įprastinių užpildų naudojant įvairias atliekas, tačiau kainą daugiausiai sąlygoja naudojamas didelis cemento kiekis bei mikroužpildai (SiO_2 mikro dulkės).

3. Hibridinės betono konstrukcijos

Hibridinės konstrukcijos – tai konstrukcijos, pagamintos iš skirtingų medžiagų. Betoninį gaminį, kuris pagamintas iš dviejų skirtingų sudėčių betonų, t.y. įprastinio betono ir ypač stipraus betono, taip pat galima vadinti hibridine konstrukcija. Pagrindinės tokių hibridinių konstrukcijų pritaikymo galimybės yra dvi. Visų pirma, tokia konstrukcija gali būti tikslingai gaminama dėl geresnių mechaninių ir fizikinių savybių, nei įprasta betoninė konstrukcija, tačiau ekonomiškesnė už tik iš ypač stipraus betono pagamintą gaminį. Antra, ypač stiprus betonas gali būti naudojamas kaip remontinė medžiaga, norint suremontuoti pažeistas jau eksploatuojamas konstrukcijas, suteikiant joms ilgaamžiškumo. Abu šie pritaikymo metodai yra tik teorinės galimybės, kadangi norint įvertinti tokių konstrukcijų tinkamumą, reikia atlikti daug bandymų bei susisteminti rezultatus. Taip pat reikėtų sukurti skaičiavimo metodiką tokių konstrukcijų gamybai.

3.1. Tikslingai gaminamos hibridinės konstrukcijos

Tikslingai gaminamos hibridinės konstrukcijos būtų tokios, kuomet apatinė konstrukcijos dalis būtų iš ypač stipraus betono, taip panaudojant jį kaip armatūrą (dėl lenkiamojo stiprio), o viršutinė konstrukcijos dalis iš įprastinio betono.

Tyrėjas Azad, A.K., (2013) savo straipsnyje aprašo bandymus, kai vietoje armatūros strypų yra panaudojamas ypač stiprus betonas (3.1 pav.). YSB strypai suteikia betoninei sijai reikalingą temiamąjį stiprį. Tokios konstrukcijos gali būti panaudojamos labai agresyviose koroziškumo aplinkose, kuriose didžiausia problema yra armatūros korozija. Dėl korodavusios armatūros, dažnai atsisluoksniuoja ir sutrupa apsauginis betono sluoksnis ir gelžbetoniniai elementai praranda stiprumines savybes. Armuojant įprastą betoną ypač stipraus betono strypais, svarbu, kad YSB turėtų didelį lenkiamąjį stiprį (apie 30 MPa ar net daugiau). Bandymas pasiteisino tik tuomet, kai YSB strypai yra jau sukietėję dedami į formą ir tuomet užpilamas įprastinis betonas [1].

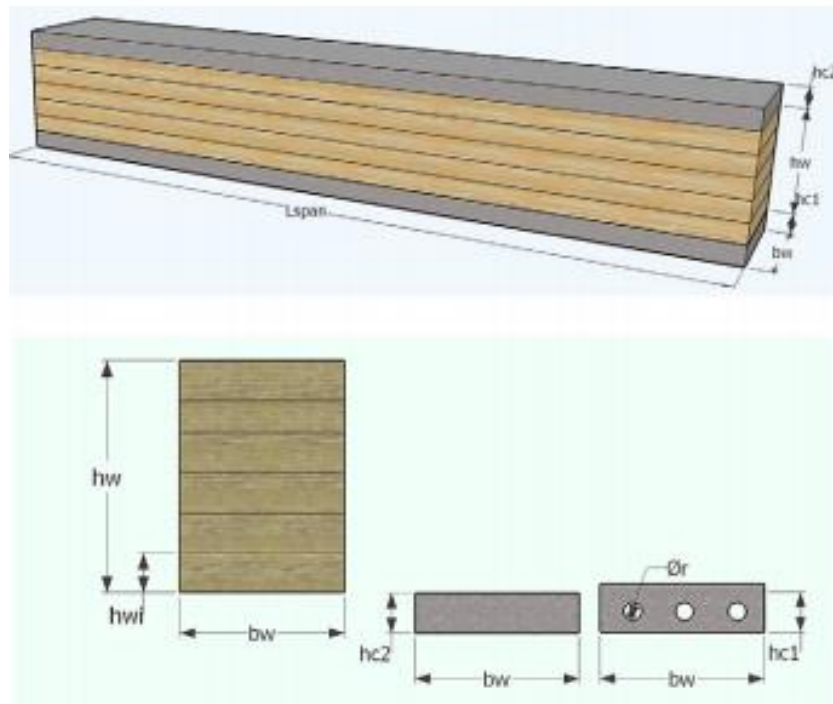


3.1 pav. Hibridinės sijos armuotos strypais iš YSB [1]

Bandymai parodė, kad didesnis lenkiamasis stipris yra pasiekiamas kai naudojami platesni YSB strypai. Padidinus YSB strypo aukštį, nėra žymaus ir didėjančio lenkiamojo stiprio padidėjimo. Tokių sijų lenkimo stipris gali pasiekti 30 Mpa [1].

Kitame moksliniame darbe tyrėjas Azad, A.K., (2013) aprašė eksperimentą, kai sija buvo suarmuota YSB per visą jos plotį. Pirmiausiai į formą buvo supilamas YSB, kai jis sukietėjo ant jo viršaus buvo supiltas įprastas betonas ir taip suformuota sija. Dar vienas ypatingai svarbus aspektas yra sukibimo stipris tarp skirtingų betonų. Suformuotą YSB sluoksnį reikėjo pašiuurkštinti arba bent sudrėkinti, kad sija būtų vientisa, kitu atveju galimas šių medžiagų atsiskyrimas viena nuo kitos. Bandymai buvo atlikti naudojant skirtingo aukščio YSB sluoksnius. Kaip ir tikėtasi, didesnis YSB sluoksnis parodė geresnius lenkimo rezultatus, tačiau pats lenkiamojo stiprio didėjimas nėra proporcingas YSB aukščio padidėjimui. Tokia sija nėra ekonomiškai, kadangi jai pagaminti yra naudojama daug YSB [2].

Tyrėjas Ferrier, E. (2012) suprojektavo hibridinę betono siją, kai pagrindinė jos dalis yra iš klijuotinės laminuotos medienos, o iš abiejų pusių, t.y. viršuje ir apačioje sijos naudojamas ypač stiprus betonas (3.2 pav.). Tokios sijos privalumas yra tas, kad pagrindinė sijai naudojama medžiaga yra ekologiška, t.y. naudojama mediena, kuri yra atsinaujinanti [6].



3.2pav. hibridinės klijuotinės medienos ir YSB sijos koncepcija [6]

Suprojektuota hibridinė sija leido sumažinti reikalingos sijos matmenis, arba ta pati sija turi didesnę laikančiąją galią. Tačiau tolimesni šios sijos bandymai nebuvo atlikti, todėl galima laikyti tai tik koncepcija. Tokia koncepcija leidžia teigti, kad ypač stiprų betoną galima naudoti ne tik kombinuojant hibridines konstrukcijas iš betono ir YSB, bet ir gerinti kitų medžiagų parametrus, panaudojant YSB.

3.2. Konstrukcijos, kai YSB naudojamas kaip remontinė medžiaga

Šiuo metu esamos betono konstrukcijos yra paveiktos ardančio aplinkos poveikio, todėl joms būtina nuolatinė priežiūra ir remontas. Dėl ekonominių priežasčių ypač stiprus betonas gali būti naudojamas remontuojant tas betono vietas, kurios yra paveiktos agresyvios aplinkos arba apkrautos didelėmis apkrovomis [3].

Tyrėjas Tayeh B.A. (2013) savo moksliniame straipsnyje tyrė sukibimo stiprį tarp skirtingų betonų, t.y tarp įprastinio ir ypač stipraus betono. Geriausi sukibimo stiprio rezultatai (3,68 MPa) gauti, kai įprastinio betono paviršius buvo paruoštas srautinio valymo būdu, o mažiausias sukibimo stipris buvo gautas, kai paviršius nebuvo paruoštas visai (1,82 MPa). Srautiniu valymu paruošus paviršių, irimas įvyko per įprastinio betono paviršių, o neparuošus paviršiaus bandinys suiro per

sandūros arba dalinai per sandūros vietą. Tačiau abiem atvejais sukibimą galima įvertinti kaip labai gerą (3.3 pav.) [25].



3.3 pav. betono suirimo tipai (kairėje- per sandūros paviršių, viduryje- dalinai pe sandūros vietą, dešinėje- per įprastinio betono paviršių) [25]

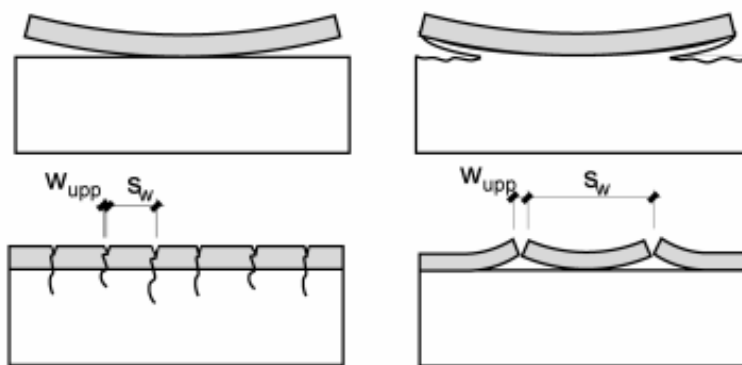
Silpniausia hibridinės betono konstrukcijos vieta yra sandūros zona tarp skirtingų betonų. Gera adhezija šioje zonoje daro įtaką konstrukcijos saugumui, ilgaamžiškumui ir atsparumui aplinkos poveikiui. Adhezija tarp seno betono sluoksnio ir naujo betono sluoksnio yra kompleksinis reiškinys apimantis skirtingus sukibimų tipus. Pirmiausiai tai yra cheminė adhezija (cheminė reakcija tarp remontuojamo paviršiaus ir remontui naudojamos medžiagos), toliau seka mechaninė adhezija (betono remonto medžiagos įsiskverbimas į paviršiaus poras, šiurkštų paviršių) bei galiausiai fizinė adhezija (ji susijusi su van der Valso jėgomis ir paviršiaus tempimo jėgomis). Dažniausiai betonų adhezijai matuoti yra naudojamas atplėšimo bandymas bei cilindrinis tempimo bandymai (3.4 pav.) [10].



3.4 pav. Adhezijos matavimo būdai (kairėje cilindrinis tempimo bandymas, dešinėje atplėšimo bandymas [10])

Tyrėjas Habel K. (2004) moksliniame darbe tyrė kompozitų (hibridinių betono elementų) koncepciją, t.y. visų pirma galima įvardinti dvi tokių konstrukcijų rūšis: pirma rūšis yra kai

naudojamas plonas YSB sluoksnis <5 cm, t.y. tik atstatymui ir antra rūšis, kai naudojamas storesnis YSB sluoksnis (5-15 cm) – konstrukcijų pagerinimui. Šios hibridinės konstrukcijos yra veikiamos vidinių deformacijų ir išorinių poveikių. Vidinės deformacijos dažniausiai atsiranda dėl betono susitraukimo ir šiluminio hidratacijos efekto. Šios vidinės deformacijos ir išoriniai poveikiai gali sukelti 3.5 paveiksle pavaizduotus reiškinius.



3.5 pav. 1) atsisluoksniavimas per laisvus kraštus tieiai per kontaktinę zoną tarp paviršių; 1) atsisluoksniavimas per laisvus kraštus per remontuojamą paviršių; 3) skersiniai vientisi įtrūkimai; 4) atsisluoksniavimas per įtrūkimus. [26]

Minėto šiluminio efekto esmė yra ta, kad vykstant betono hidratacijai, šiluma sklinda į naują sluoksnį, t.y. pradžioje ji stipriai didėja, o tuomet hidratacijos reakcijai silpstant, betono elementas pradeda šaldyti. Temperatūros padidėjimas yra didelis YSB sluoksnyje, tačiau jis yra pakankamai mažas remontuojamame betone, todėl atsiranda didelis temperatūrų gradientas. Dėl šio pokyčio betone gali atsirasti įtempimai, kurie gali sąlygoti įtrūkimus. Šis temperatūrų pokytis yra labai pavojingas esant masyvioms konstrukcijoms.

Betono susitraukimas kaip anksčiau minėta būna cheminis ir susitraukimas džiūstant. Šiuo atveju hibridinėms konstrukcijoms cheminis susitraukimas yra labai svarbus tik pirmosiomis dienomis po YSB sluoknio suformavimo. Cheminis susitraukimas sumažina naujojo sluoksnio susitraukimą gniuždant ir didina tempimo įtempimus, kurie gali sąlygoti įtrūkimus betone. Tuo tarpu susitraukimo džiūstant deformacijos yra pačios svarbiausios projektuojant hibridines betono konstrukcijas, jos daro įtaką tiek naudojant nedidelį YSB betono sluoksnį, tik didelį sluoksnį kaip remonto medžiagą. Susitraukimo džiūstant deformacijos didina drėgmės gradientą remontiniame sluoksnyje, kuris didina tempimo įtempimus paviršiuje. Todėl labai svarbu, kad ypač stiprus betonas būtų veikiamas kuo mažesnių susitraukimo deformacijų [26].

4. Eksperimentinė dalis

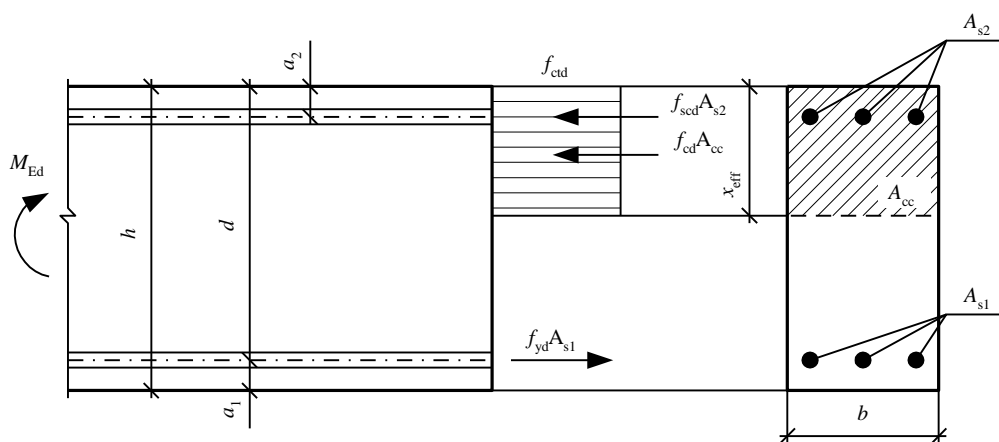
Tikslai ir uždaviniai:

- 1) Atlikti matematinį modeliavimą ir suprojektuoti hibridinio betono konstrukciją;
- 2) Atlikti betono susitraukimo deformacijų skaičiavimus;
- 3) Nustatyti optimaliausią ypač stipraus betono sudėtį, kuri bus naudojama gaminant hibridinio betono konstrukciją;
- 4) Pagaminus hibridinio betono konstrukciją, nustatyti jos stiprumines savybes ir palyginti su gautu atliekant matematinį modeliavimą;
- 5) Atlikti hibridinės betono konstrukcijos atsparumo šalčiui bandymą;
- 6) Atlikti YSB, įprastinio betono ir remontinio mišinio susitraukimų matavimus ir juos palyginti su apskaičiuotais.

4.1. Matematinis modeliavimas

4.1.1. Hibridinės betono konstrukcijos projektavimas

Pagal STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“ 3 priedo IV skyrių galime išreikšti priklausomybes tarp hibridinės konstrukcijoje naudojamo įprastojo betono stiprumo klasės bei jo naudojamo aukščio konstrukcijoje ir norimos gauti maksimalios lenkimo jėgos (lenkiamojo stiprio) (4.1 pav.). Apskaičiavus šiuos dydžius ir gautus rezultatus palyginus su praktiniais rezultatais, galime gauti tokią siją, kuri būtų optimaliausia ekonominiu-stipruminiu atžvilgiu.



4.1 pav. Betono stačiakampio skerspjūvio lenkiamo elemento skaičiuotinė schema

Skaičiavimai paremti tuo, kad betono tempiamos zonos armatūra yra laikomas YSB sluoksnis.

$$x_{eff} = \frac{f_{yd} \cdot A_{s1}}{f_{cd} \cdot b}, \quad (4.1)$$

čia: x_{eff} - betono gniuždomos zonos aukštis;

f_{yd} - YSB stiprumo klasė;

A_{s1} – lenkiamos zonos plotas;

f_{cd} - Įprastojo betono stiprumo klasė;

b - elemento plotis.

$$\frac{x_{eff}}{d} = \frac{1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_{Ed}}}{1} \quad (4.2)$$

$$\mu_{Ed} = \frac{2 \cdot M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}, \quad (4.3)$$

čia: d - atstumas nuo elemento viršaus iki YSB sluoksnio vidurio;

M_{Ed} - didžiausios lenkimo momentas;

Iš šių formulių išsireiškę f_{cd} , gauname:

$$f_{cd} = \frac{f_{yd}^2 \cdot h^2 \cdot b}{2 \cdot f_{yd} \cdot h \cdot b \cdot d - 2 \cdot M_{Ed}}, \quad (4.4)$$

čia: h - YSB betono sluoksnio aukštis.

Apskaičiuoju priklausomybę tarp reikiamo hibridinės konstrukcijos stiprio lenkiant ir reikiamo įprastinio betono stiprio gniuždant.

Priimu, kad:

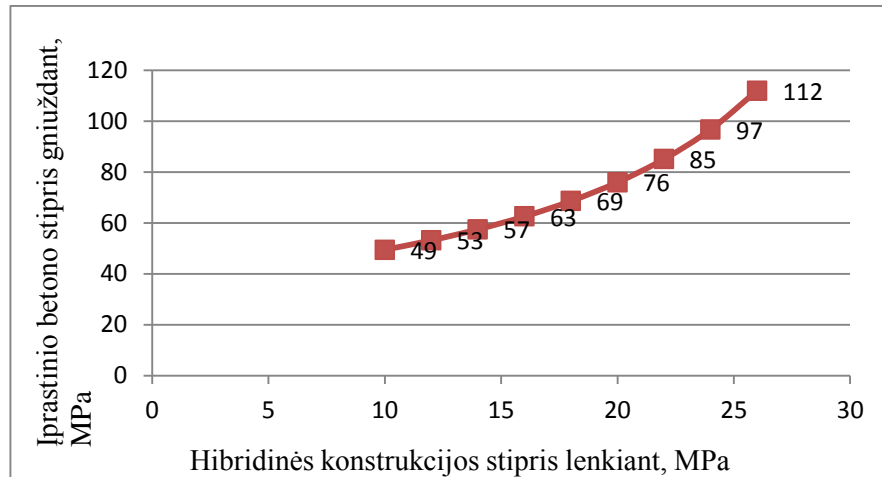
$f_{yd}=110$ MPa;

$h=20$ mm;

$b=40$ mm;

$H=40$ mm, čia H yra konstrukcijos aukštis.

Tuomet gauname 4.2 paveiksle pavaizduotą priklausomybę, iš kurios matome, kad norint pasiekti didesnę konstrukcijos stiprį lenkiant, reikia naudoti didesnio stiprumo įprastinį betoną, kai įprastinio betono sluoksnis yra pastovus, t.y. 20 mm. Pagal 4.2 paveikslą matome, kad norint gauti konstrukcijos stiprį lenkiant 15,2 MPa, kai yra visos aukščiau išvardintos sąlygos, reikia naudoti įprastinį betoną, kurio stipris gniuždant yra apie 50 MPa.



4.2 pav. Įprastinio betono reikiamo gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo reikiamo konstrukcijos lenkiamojo stiprio

4.1.2. Betono susitraukimo deformacijų skaičiavimas

Betono susitraukimo deformacijas sudaro susitraukimo deformacijos dėl drėgmės išgaravimo ir betono kietėjimo sukeltos susitraukimo deformacijos.

Susitraukimo deformacijos apskaičiuojamos taip:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}, \quad (4.5)$$

čia: ε_{cs} – visos betono susitraukimo deformacijos; ε_{cd} – drėgmės išgaravimo sukeltos betono susitraukimo deformacijos; ε_{ca} – betono kietėjimo sukeltos susitraukimo deformacijos.

Susitraukimo deformacijos ε_{cd} apskaičiuojamos:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t - t_s) \varepsilon_{cd,\infty}, \quad (4.6)$$

$$\text{čia } \beta_{ds}(t - t_s) = \left[\frac{(t - t_s)}{350(h_0/h_1)^2 + (t - t_s)} \right]^{0.5}. \quad (4.7)$$

čia: t – betono amžius, kuriam esant apskaičiuojamos betono susitraukimo deformacijos (paromis); t_s – betono amžius baigus drėgnai saugoti betoną; $h_1 = 100$ mm; $h_0 = 2A_c/u$.

3 lentelė. Ribinės betono susitraukimo deformacijos, ‰

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (N/mm ²)	Santykinis drėgnis, ‰					
	20	40	60	80	90	100
20/25	-0,75	-0,70	-0,59	-0,20	-0,20	0,12
40/50	-0,60	-0,56	-0,47	-0,29	-0,16	0,10
60/75	-0,48	-0,45	-0,38	-0,24	-0,13	0,08
80/95	-0,39	-0,36	-0,30	-0,19	-0,11	0,06
90/105	-0,35	-0,33	-0,27	-0,17	0,06	0,06

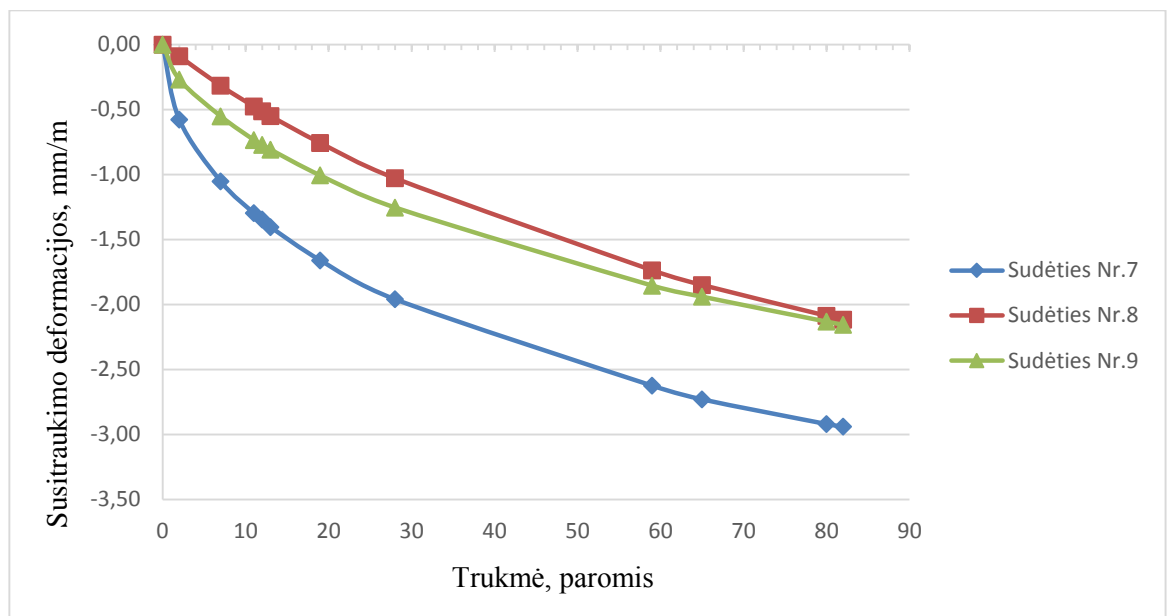
Susitraukimo deformacijos ε_{ca} apskaičiuojamos

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{cc}(t)\varepsilon_{ca,\infty}, \quad (4.8)$$

$$\text{čia: } \varepsilon_{ca,\infty} = -2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (4.9)$$

$$\beta_{cc}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}), \quad (4.10)$$

čia t – laikas paromis.



4.3 pav. Apskaičiuotos betono susitraukimo deformacijos

Apskaičiuotos trijų betono sudėčių (7,8,9) susitraukimo deformacijos, atitinkamai YSB, įprastinio betono ir remontinio mišinio. Gauti rezultatai rodo, kad po 28 parų, YSB susitraukimo deformacijos apskaičiuotos didžiausios, t.y. -1,96 mm/m, toliau sekė remontinio mišinio susitraukimo deformacijos -1,25 mm/m ir mažiausia gauta įprastinio betono (tik -1,03 mm/m). Po 82 parų, įprastinio betono susitraukimo deformacijos pasiekė beveik tokią pačią reikšmę kaip ir remontinis mišinys (atitinkamai -2,12 mm/m ir 2,16 mm/m).

4.2. Tyrimams naudotos medžiagos

4.2.1. Cementas

Tyrimė buvo naudotas Lietuvos įmonės AB „Akmenės cementas“ portlandcementis CEM I 52,5 R, kurio pagrindinės savybės pateiktos 4, 5 lentelėse. Savybės nustatytos pagal LST EN 197-1:2001/A3:2007 standartą. 4.4 pav. pateikta cemento granulimetrinė kreivė.

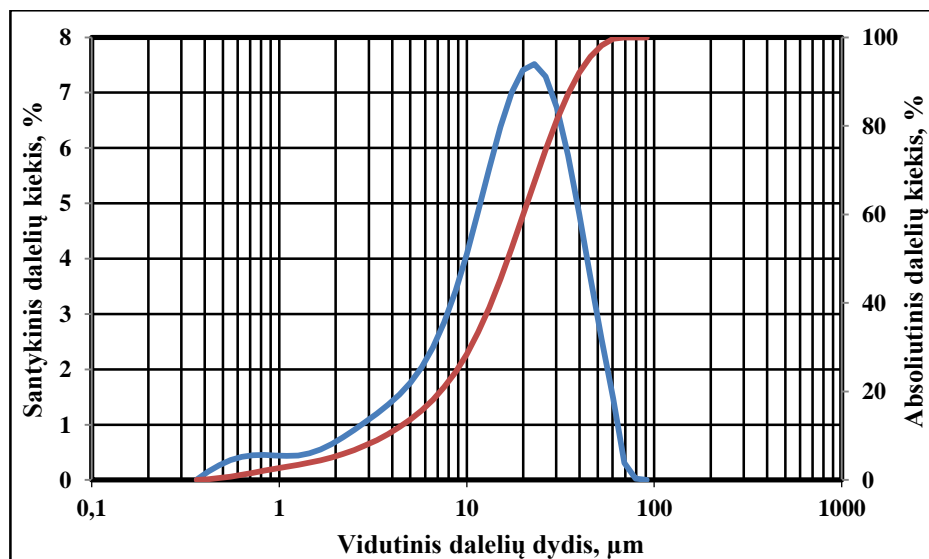
4 lentelė. Tyrimams naudotų portlandcemenčių CEM I 52,5 R fizikinės-mechaninės savybės

Naudotas portlandcementis	Normalaus tūštumo tešla, %	Tūrio pastovumas, mm	Rišimosi pradžia, min.	Savitasis paviršius, m ² /kg	Stipris gniuždant, MPa (po 2/28 p.)
AB "Akmenės cementas"	29,3	1	145	-	38,6/65,3

5 lentelė. Tyrimams naudotų portlandcemenčių CEM I 52,5 R cheminių junginių sudėtys

Cheminiai junginiai, %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Cl	MgO	CaO _{laisvo}	K	N
AB "Akmenės cementas"	20,61	5,45	3,36	63,42	0,8	0	3,84	0,73	0,29	0,05

Pastaba: K – kaitmenys, N – netirpmenys.



4.4 pav. Portlandcemenčio CEM I 52,5 R granulimetrinė kreivė

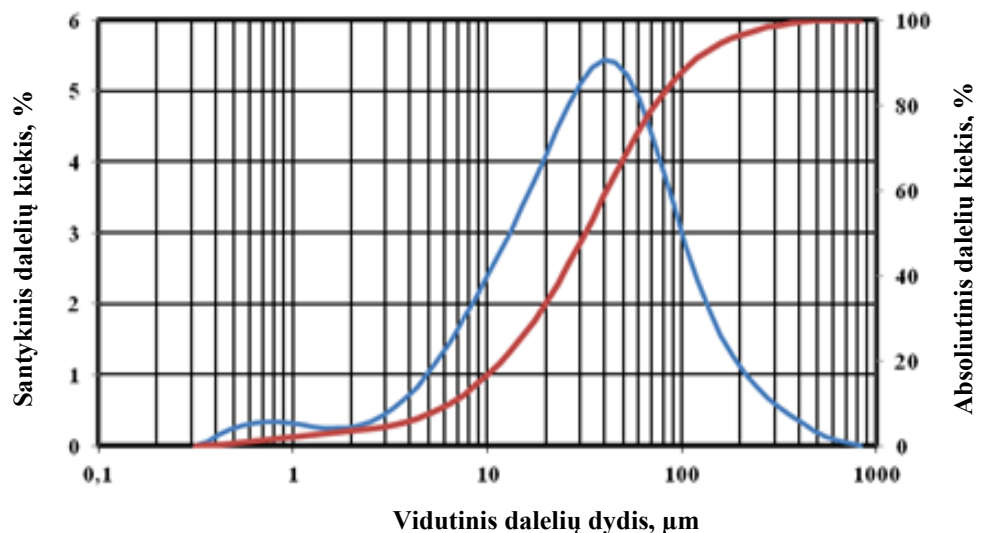
4.2.2. Užpildai

Tyrimams naudotas Anykščių karjero kvarcinis smėlis 0/2 frakcijos, kurio tankis – 2670 kg/m³, piltinis tankis – 1600 kg/m³, molio ir dulkių kiekis – 0,5%. Užpildo savybės tenkina LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus.

4.2.3. Mikroužpildai

SiO₂ mikrodulkės. Jos dėl savo didelio savitojo paviršiaus padidina vandens poreikį tai pačiai betono mišinio konsistencijai gauti, tačiau naudojant superplastiklius šis neigiamas reiškinys yra panaikinamas. Kadangi SiO₂ mikro dulkės telpa tarp cemento dalelių, jos pagerina cemento granulimetrinę sudėtį, padidina cementinio akmens tankį. Jų kiekis turi būti toks, kad užtikrintų optimalų cementinio akmens tankį.

Tyrimams naudotos SiO₂ mikrodulkės. Tai ferosilicio lydinių metu susidarančios labai smulkios dulkės (su dideliu kiekiu amorfinio SiO₂). Pagrindinės savybės: tankis – 2120 kg/m³, piltinis tankis (laisvai supiltu/sutankintu) – 255/329 kg/m³, natūralaus byrėjimo kampas 54°, savitasis paviršius 3524 m²/kg, higroskopiškumas 158 %. Savybės tenkina LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus. 4.5 pav. pateikta SiO₂ mikro dulkių granulimetrinė kreivė.



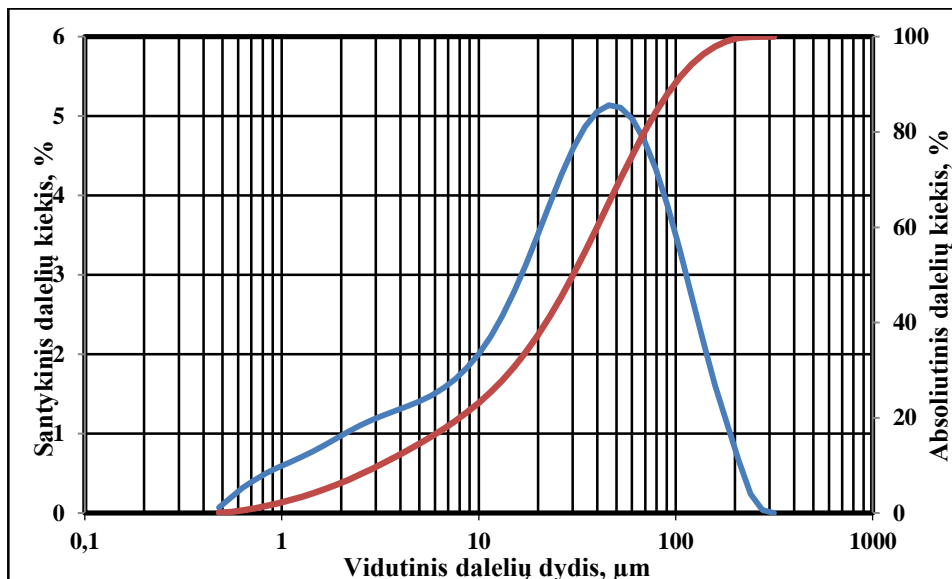
4.5 pav. SiO₂ mikrodulkių granulimetrinė kreivė

Nano silika. Nano silikos gamybos procesas aprašytas 2.1 skyriuje. Nano silika buvo gaminama iš SiO₂ mikrodulkių bei iš malto stiklo.

Maltas stiklas. Tyrimams panaudotas įvairių butelių maltas stiklas. Stiklas buvo malamas iki tol, kol nesimatė plika akimi jokių stambių dalelių ir prasijojamas pro 0,1 mm stambumo sietą. Malto stiklo pagrindinės savybės: frakcija – 0/01; lyginamasis paviršius – 1485 cm²/g; piltinis tankis – 1245 kg/m³; tankis – 2266 kg/m³. Užpildo savybės tenkina LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus.

Maltas kvarcinis smėlis. Tyrimams naudotas AB „Anykščių kvarcas“ maltas kvarcinis smėlis, kurio pagrindinės savybės: tankis – 2670 kg/m³; piltinis tankis – 1425 kg/m³; molio ir

dulkių kiekis – 0,5 %. Užpildo savybės tenkina LST EN 12620:2003+A1:2008 standarto reikalavimus. 4.6 pav. pateikta malto kvarcinio smėlio granuliometrinė kreivė.



4.6 pav. Malto kvarcinio smėlio granuliometrinė kreivė

4.2.4. Cheminiai priedai

Superplastikliai. Tyrimams naudotas superplastiklis polikarboksilato eterių pagrindu. Techniniai duomenys: veiklioji medžiaga – polikarboksilato eteriai; išvaizda – šviesiai rudas drumstas skystis; tankis – $1,010 \div 1,070 \text{ g/cm}^3$; maksimalus chloridų kiekis (pagal masę procentais) – 0,10 %; maksimalus ekvivalentinis šarmų kiekis (pagal masę procentais) – 2,5 %.

4.2.5. Remontinis mišinys

Tyrimams naudotas atsparus ugniai, modifikuotas pluoštu, PCC betono pakaitalas, skirtas betono konstrukcijų remontui, statine ir ne statine prasme reikšmingose zonose. Pagrindiniai parametrai (6 lentelė):

6 lentelė. Remontinio mišinio techniniai parametrai

Parametras	Vienetas	Vertė	Pastabos
Stambiausioji frakcija	mm	2	-
Šviežio skiedinio tūrinis tankis	kg/dm ³	2,06	-
Sauso skiedinio tūrinis tankis	kg/dm ³	1,85	-
Tempimo ir gniuždymo stipris	N/mm ²	4,7/34,4 5,8/50,4 8,5/55,0	Praėjus 2 dienoms Praėjus 7 dienoms Praėjus 28 dienoms
Dinaminis elastingumo modulis	N/mm ²	32500	Praėjus 28 dienoms
Statinis elastingumo modulis	N/mm ²	22600	Praėjus 28 dienoms
Susitraukimas	mm/m	0,78	Praėjus 28 dienoms
Karbonizacijos gylis	mm	0	Praėjus 90 dienų

4.3. YSB maišymo procedūra

Pagrindinis YSB mišinio maišymo aspektas yra maišyklė, kuri gali maišyti mišinį intensyviai (dėl mažo V/R santykio) ir sudaryti vakuumą kol maišomas betono mišinys. Tačiau tyrimo metu buvo naudota paprasta maišyklė (4.7 pav.).

Maišymas prasidėjo nuo mažiausio greičio ir per 15 sekundžių ir buvo padidinamas iki maksimumo. Maišymo trukmė buvo skirtinga įvairioms sudėtims, kadangi mišinys buvo maišomas tiek, kad taptų homogeniškas. Maišymo procedūra yra pateikta 7 lentelėje.



4.7 pav. Betono mišinio maišyklė

7 lentelė. YSB maišymo procedūra

Laikas, s.	Maišymo procedūra
60	Smėlio, SiO ₂ mikro dulkių, cemento homogenizacija
30	Supilama 50 % vandens
30	Supilama 50 % superplastiklio
30	Maišymas
120	Pertrauka
30	Supilamas likęs vandens ir superplastiklio kiekis

4.4. Tyrimo metodika

Betono mišiniams ruošti naudoti sausi užpildai. Cementas, užpildai ir mikroužpildai dozuojami pagal masę, o vanduo ir cheminiai priedai – pagal tūrį. Betono mišiniai sudėti į formas nenaudojant sutankinimo priemonių. Suformuotos formos buvo apdengtos drėgnu audiniu ir paliktos kietėti 1 dieną laboratorinėmis sąlygomis (20±2 °C). Po vienos dienos, bandiniai buvo išformuoti ir įdėti į kietinimo kamerą. Po kietinimo bandiniai buvo toliau kietinami vandenyje 28 paras 20±2 °C temperatūroje.

4.5. Tyrimo eiga

Eksperimente naudotos betono sudėtys 8, 9, 10 lentelės):

8 lentelė. Betono mišinio 1 m³ sudėtis, skirta parinkti racionaliausią YSB sudėtį

Sudėties Nr.	C, kg	Mikroužpildai, kg				Užpildai, kg		Cheminiai priedai, l	V, l	V/C (V/R)
		SiO ₂	Nano silika 1	Nano silika 2	Maltas stiklas	M S _{kvarc}	S _{kvarc}	Superplastiklis		
1	735	99	-	-	-	412	962	36,76	228	0,31 (0,27)
2	735	49,5	49,5	-	-	412	962	36,76	228	0,31 (0,27)
3	735	49,5	-	49,5	-	412	962	36,76	228	0,31 (0,27)
4	735	49,5	-	-	412	-	962	36,76	228	0,31 (0,27)

Pastaba: V/C – vandens ir cemento santykis; V/R- vandens ir rišiklio santykis; V – Vanduo; C – portlandcementis, SiO₂ – SiO₂ mikrodulkės, S_{kvarc} – kvarcinis smėlis; M S_{kvarc} – maltas kvarcinis smėlis; Nano silika1- nano silika, pagaminta iš SiO₂ mikro dulkių; Nano silika 2 – nano silika, pagaminta iš malto stiklo.

9 lentelė. Betono mišinio 1 m³ sudėtis, skirta hibridinės konstrukcijos gamybai

Sudėtis Nr.	C, kg	Mikroužpildai, kg				Užpildai, kg		Cheminiai priedai, l	V, l	V/C (V/R)
		SiO ₂	Nano silika 1	Nano silika 2	Maltas stiklas	M S _{kvarc}	S _{kvarc}			
5	735	99	-	-	-	412	962	36,76	228	0,31 (0,27)
6	527	-	-	-	-	-	1850	4,17	295	0,56 (0,56)

10 lentelė. Betono mišinio 1 m³ sudėtis, skirta susitraukimo deformacijoms matuoti

Sudėtis Nr.	C, kg	Mikroužpildai, kg				Užpildai, kg		Cheminiai priedai, l	V, l	V/C (V/R)
		SiO ₂	Nano silika 1	Nano silika 2	Maltas stiklas	M S _{kvarc}	S _{kvarc}			
7	735	99	-	-	-	412	962	36,76	228	0,31 (0,27)
8	527	-	-	-	-	-	1850	4,17	295	0,56 (0,56)
9	Naudotas remontinis mišinys									

4.5.1. YSB tyrimai

Tyrimo metu buvo suformuoti penkių skirtingų sudėčių bandiniai (8 lentelė). Pirmiausiai buvo suformuoti cilindriniai bandiniai (diametras d=50 mm) (4.8 pav.), pagal atitinkamai 1, 2, 3, ir 4 betono sudėtis po tris kiekvienos sudėties bandinius. Pirmasis bandinys buvo kontrolinis, jam pagaminti buvo naudojama 1 sudėtis. Antrajame bandinyje 50% SiO₂ mikro dulkių buvo pakeista nano silika, t.y. SiO₂ apdirbtos NaOH tirpalu 5 minutes. Trečiajame bandinyje 50% SiO₂ mikro dulkių buvo pakeista maltu stiklu, paveiktu NaOH tirpalu 5 minutes. Ketvirtajame bandinyje visos SiO₂ mikro dulkės buvo pakeistos maltu stiklu. Norint parinkti opimaliausią betono mišinio sudėtį, pirmiausiai nustatomi šie parametrai: betono mišinių klampa, tankis, stipris gniuždant.



4.8 pav. YSB bandiniai

Ypač stiprus betonas dėl mažo V/C santykio yra labai klampus mišinys, tačiau skirtingai nei tradiciniai betonai, dėl puikiai parinktų komponentų pasižymi labai dideliu slankumu, kartais artimu net savaime sutankėjančiam betonui. Dėl gana didelių ypač stipraus betono mišinio šlyties įtempimų, mišinio reologines savybes patogiau įvertinti matuojant mišinio klampą, o ne pasklidimą. Mišinio klampą galima išmatuoti krintančio rutulio metodu. Šio metodo vienas didžiausių privalumų, jog nebūtinai didelis mišinio kiekis, pakankamai greitai gaunami rezultatai, tikslus, vienas iš didžiausių šio metodo trūkumų, jog negalima klampos nustatinėti, jei mišinyje yra tam tikros sukūrinės srovės, t.y. betono mišinys, kuriame nustatoma klampa, negali būti veikiamas jokiais išoriniais poveikiais, turi būti natūralioje būsenoje (pvz., nustatymo metu negali būti mišinys vibruojamas) [26].



4.9 pav. Dinaminės klampos nustatymo įranga [26]

Prieš suformuojant betoninius bandinius, nustatytas betono mišinio klampis. Tam buvo pritaikytas modifikuotas Stokso dėsnis, panaudojant 10,0 cm aukščio ir 4,7 cm diametro plastikinį vamzdelį, kuris buvo užpildytas žinomo tankio betono mišiniu (4.9 pav.). Buvo matuojama pastoviu greičiu skęstančio plieninio rutuliuko laikas. Rutuliuko padėtis cilindriname vamzdyje buvo

fiksuojiama metalo detektoriumi. Prieš matuojant padėtį, plieninis rutuliukas buvo suvilgomas vandeniu. Klampa paskaičiuota pagal formulę:

$$\eta = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 \cdot (\rho_{rut} - \rho_{sk})}{9 \cdot v_{past}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{2,4 \cdot r}{R}}; \quad (4.11)$$

čia:

g - Laisvo kritimo pagreitis;

r - Plieninio rutuliuko spindulys;

ρ_{rut} - Plieninio rutuliuko tankis;

ρ_{sk} - Betono mišinio tankis;

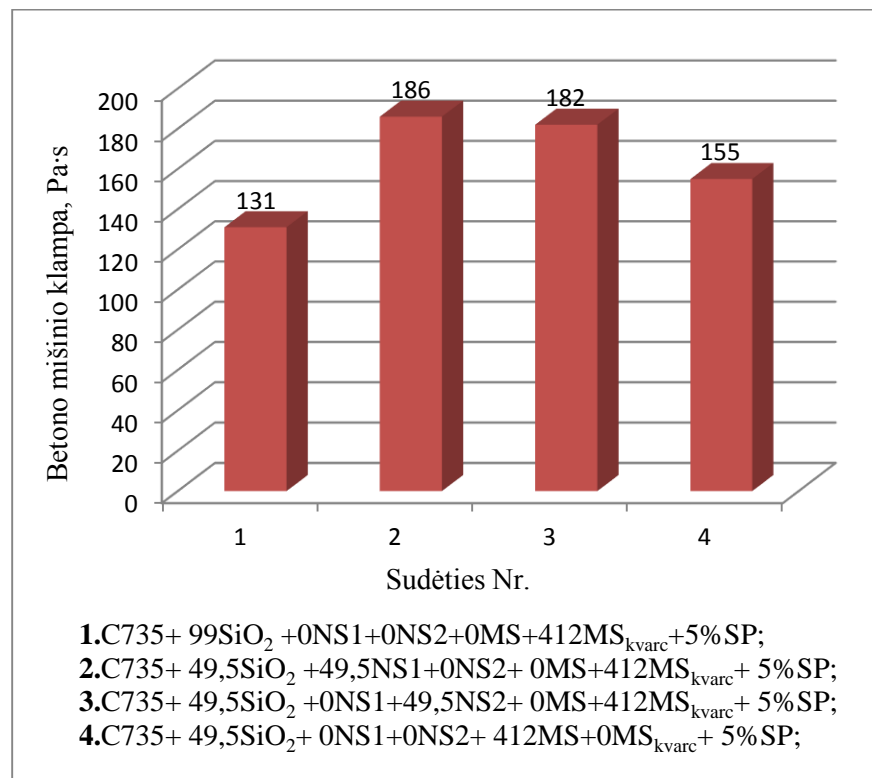
R - Plastikinio cilindro spindulys;

v_{past} - Pastovus plieninio rutuliuko skendimo greitis, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$v_{past} = \frac{l}{t}; \quad (4.12)$$

čia:

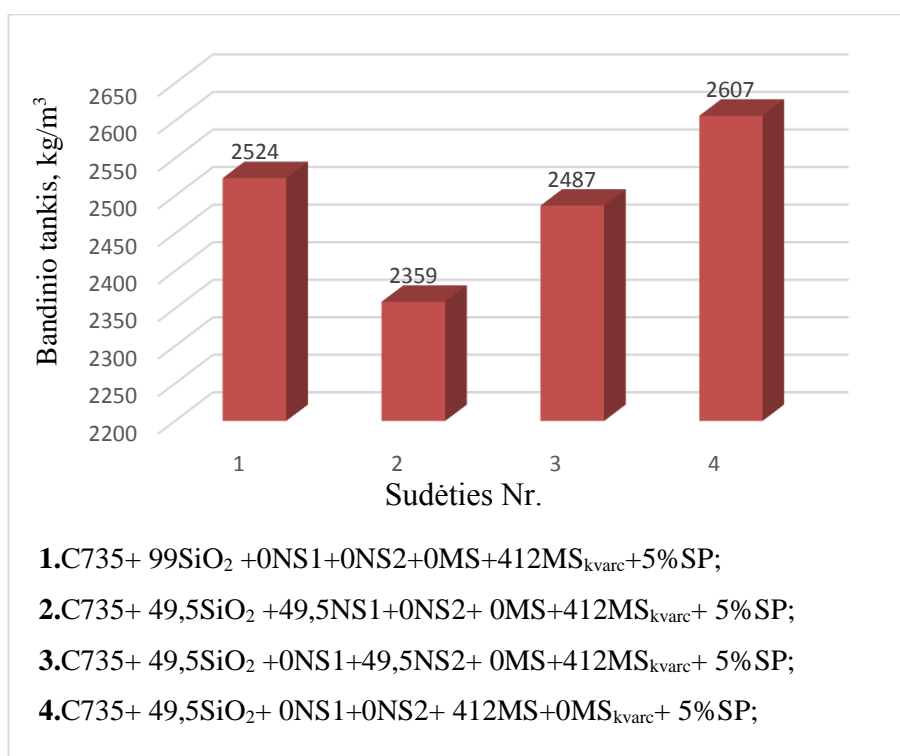
l - Pastovaus plieninio rutuliuko skendimo kelias, per laiką t .



4.10 pav. Betono mišinių klampa, Pa·s

Gauti rezultatai rodo, kad mažiausia betono mišinio klampa gauta naudojant pirmą betono mišinio sudėtį, o didžiausia – naudojant antrą betono mišinio sudėtį, t.y. net 42% didesnė už pirmos betono sudėties mišinio klampą (4.10 pav.).

Tuomet buvo nustatytas šių bandinių tankis, pagal LST EN 12390-7:2009 standartą. Didžiausias betono tankis gautas naudojant 4 sudėtį, t.y. maltą stiklą. Jis yra 3,29 % didesnis, nei kontrolinio bandinio (4.11 pav.). Visuose bandiniuose V/C santykis buvo naudotas 0,31.



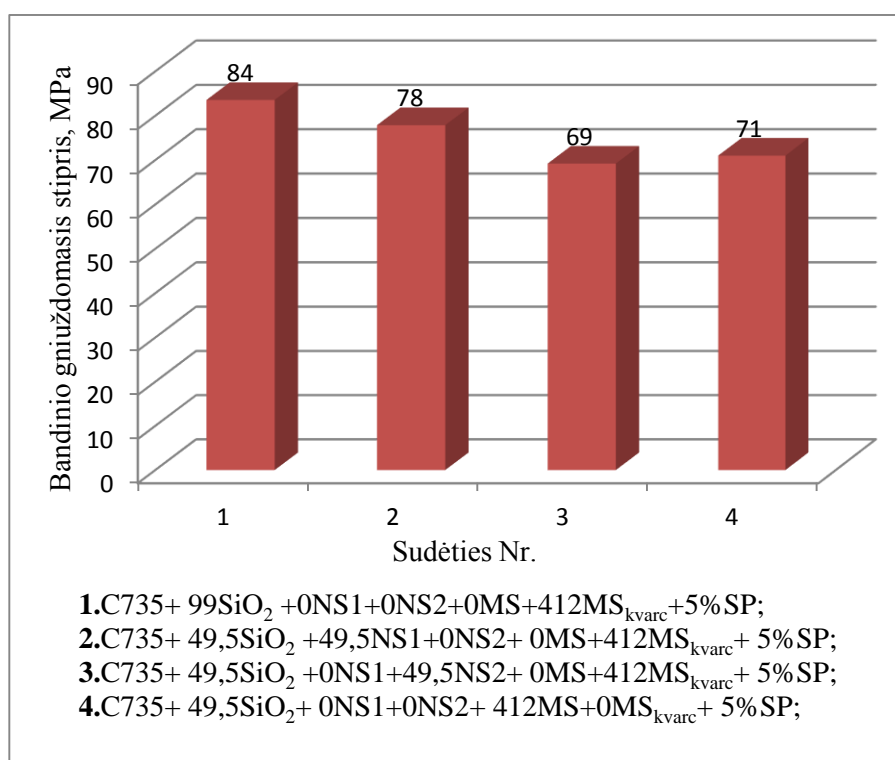
4.11 pav. Bandinių tankis, kg/m³

Stipris gniuždant buvo nustatomas hidrauliniu presu (4.12 pav.) gniuždant prizmių puseles, apkraunant jų šonines (prie formos sienelių buvusias) plokštumas. Kad gniuždomas plotas būtų vienodas, naudojamos specialios plieninės plokštelės. Apkrova bandymo metu tolygiai didinama reikiamu intensyvumu iki bandinio suirimo. Stipris gniuždant nustatytas pagal LST EN 12390-3:2009/AC:2011 standartą.



4.12 pav. Betono stiprio gniuždant nustatymo įranga

Didžiausias betono stipris gniuždant gautas kontrolinio bandinio - 84 MPa. Antrojo bandinio stipris gniuždant - 78 MPa. Mažiausias stipris gniuždant gautas trečiojo bandinio – 69 MPa (4.13 pav.).



4.13 pav. Bandinių stipris gniuždant, MPa

4.5.2. Racionaliausio betono mišinio sudėties parinkimas taikant artumo idealiam taškui metodą

Racionaliausias betono mišinys parinktas taikant artumo idealiam taškui metodą. Šio daugiakriterinio įvertinimo metodo esmė – apibendrinto kompleksinio kriterijaus formavimas, remiantis lyginamų variantų nukrypimų nuo vadinamojo „*idealaus*“ varianto, susidedančio iš geriausių nagrinėjamų variantų kriterijų. Taikant šį metodą, apskaičiuojama K_{bit} reikšmė. K_{bit} reikšmė apskaičiuojama atsižvelgiant į tai, jog kiekvieno sprendimų varianto kriterijaus naudingumo funkcija monotoniškai didėja arba monotoniškai mažėja, t.y. didesnė bet kurio rodiklio reikšmė visada geresnė arba blogesnė už mažesnę to paties rodiklio reikšmę. Tai priklauso nuo to ar naudingumo funkcija didėja ar mažėja. Rodikliai turi būti kardinalūs arba ordinalūs. Jei turime ordinalius (kokybinius) rodiklius, jie turi būti kvantuoti. Be to, turi būti nustatyti kriterijų reikšmingumo dydžiai arba jie priimami kaip lygiaverčiai (vienodai svarbūs) [24].

Tolimesnių lentelių eksplikacija:

A_i – i-tosios sudėties betono mišinys;

Pradinėje alternatyvių sprendimų matricoje:

K_1' – Mišinio kaina, (Eur/m³);

K_2' – Stiprumas gniuždant, (MPa);

K_3' – Dinaminė klampa, (Pa·s);

Normalizuotoje matricoje:

K_1 – Mišinio kaina;

K_2 – Stiprumas gniuždant;

K_3 – Dinaminė klampa;

11 lentelė. Pradinė alternatyvių sprendimų matrica

	K_1'	K_2'	K_3'
A_1	395	84	131
A_2	400	78	186
A_3	393	69	182
A_4	456	71	155
Optimalumas	Min	Max	Min

Kriterijų teorinis reikšmingumas nustatytas pagal entropijos metodą. Šiam metodui atliekamas matricos normalizavimas pagal formulę:

$$\overline{p}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; (V_{ij}, \text{ kai } i = \overline{1, m}; \text{ kai } j = \overline{1, n}); \quad (4.13)$$

čia: \overline{p}_{ij} – Normalizuotos matricos, „j“ eilutės ir „i“ stulpelio elementas; m – Alternatyvų skaičius; n – Kriterijų skaičius; x_{ij} – Pradinis alternatyvios matricos elementas. Pagal 4.13 formulę gaunama normalizuota matrica \overline{P} , kurioje visi elementai yra nedimensiniai dydžiai (x_{ij}).

12 lentelė. Normalizuota matrica

	K₁	K₂	K₃
A₁	0,240	0,278	0,200
A₂	0,243	0,258	0,284
A₃	0,239	0,228	0,278
A₄	0,277	0,235	0,237

Sekančiame etape nustatomas kiekvieno kriterijaus entropijos lygis E_j .

$$E_j = -k \cdot \sum_{i=1}^m (p_{ij} \cdot \ln p_{ij}) \quad (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}) \quad k = \frac{1}{\ln m}; \quad (4.14)$$

Entropijos lygis E_j kinta intervale $[0; 1]$, todėl galime parašyti $0 \leq E_j \leq 1$, kur ($j = \overline{1, n}$).

13 lentelė. Kriterijų entropijos lygis E_j

	K₁	K₂	K₃
E_j	0,999	0,998	0,993

Kitame etape nustatomas kriterijų kitimo lygis d_j .

$$d_j = 1 - E_j, \text{ kur } (j = \overline{1, n}) \quad (4.15)$$

14 lentelė. Kriterijų kitimo lygis d_j

	K₁	K₂	K₃
d_j	0,001	0,002	0,007

Teorinis kriterijų reikšmingumas nustatomas pagal formulę:

$$q_{j(t)} = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}; \quad (j = \overline{1, n}) \quad (4.16)$$

15 lentelė. Teorinis kriterijų reikšmingumas $q_{j(t)}$, %

	K₁	K₂	K₃
q_{j(t)}, %	13,60	21,18	65,22

Racionaliausia betono mišinio sudėtis buvo atrenkama įvertinant tik teorinį reikšmingumą. Pradinės alternatyvių sprendimų matricos P normalizavimas atliekamas taikant vektorių normalizavimo metodą:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad \text{kur } i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (4.17)$$

čia: m – Alternatyvų skaičius; n – Kriterijų skaičius. Svertinės normalizuotos matricos \bar{P}^* sudarymas:

$$\bar{P}^* = [\bar{P}]^* [\bar{q}_j] \quad (4.18)$$

čia: \bar{P} - Normalizuota matrica; \bar{q}_j - Teorinis/subjektyvus kriterijų reikšmingumas.

16 lentelė. Svertinė normalizuota matrica

	K	K₂	K₃
A₁	0,06519	0,14120	0,25890
A₂	0,06602	0,13111	0,36760
A₃	0,06486	0,11599	0,35970
A₄	0,07526	0,11935	0,30634

Nustatomas idealus teigiamas variantas:

$$a^+ = \left\{ \left[\left(\max_i f_{ij} / j \in I \right), \left(\min_j f_{ij} / j \in I' \right) \right] / i = \overline{1, m} \right\} = \{f_1^+, f_2^+, f_3^+\} \quad (4.19)$$

Čia: I – Aibė rodiklių (maksimizuojamų), kurių geriausios reikšmės yra didžiausios; I' – Aibė rodiklių (minimizuojamų), kurių geriausios reikšmės yra mažiausios. Nustatomas idealus neigiamas variantas:

$$a^- = \left\{ \left[\left(\min_i f_{ij} / j \in I \right), \left(\max_j f_{ij} / j \in I' \right) \right] / i = \overline{1, m} \right\} = \{f_1^-, f_2^-, f_3^-\} \quad (4.20)$$

Idealaus teigiamo skirtumo (atstumo) L_i^+ tarp realaus a_i ir a^+ nustatymas:

$$L_i^+ = \sum_{j=1}^n |f_{ij} - f_j^+| ; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (4.21)$$

17 lentelė. Idealaus teigiamo skirtumo L_i tarp realaus a_i ir a^+ nustatymas

	K₁	K₂	K₃	Suma
$L_1^{+} =$	0,00033	0,00000	0,00000	0,00033
$L_2^{+} =$	0,00116	0,01009	0,10870	0,11994
$L_3^{+} =$	0,00000	0,02521	0,10079	0,12601
$L_4^{+} =$	0,01040	0,02185	0,04743	0,07968

Idealaus neigiamo skirtumo (atstumo) L_i^- tarp realaus a_i ir a^- nustatymas:

$$L_i^- = \sum_{j=1}^n |f_{ij} - f_j^-| ; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (4.22)$$

18 lentelė. Idealaus neigiamo skirtumo L_i tarp realaus a_i ir a^- nustatymas

	K₁	K₂	K₃	Suma
$L_1^- =$	0,01007	0,02521	0,10870	0,14398
$L_2^- =$	0,00924	0,01513	0,00000	0,02437
$L_3^- =$	0,01040	0,00000	0,00791	0,01830
$L_4^- =$	0,00000	0,00336	0,06127	0,06463

Santykinio lyginamų variantų artumo idealiam $K_{bit,i}$ nustatomas pagal formulę:

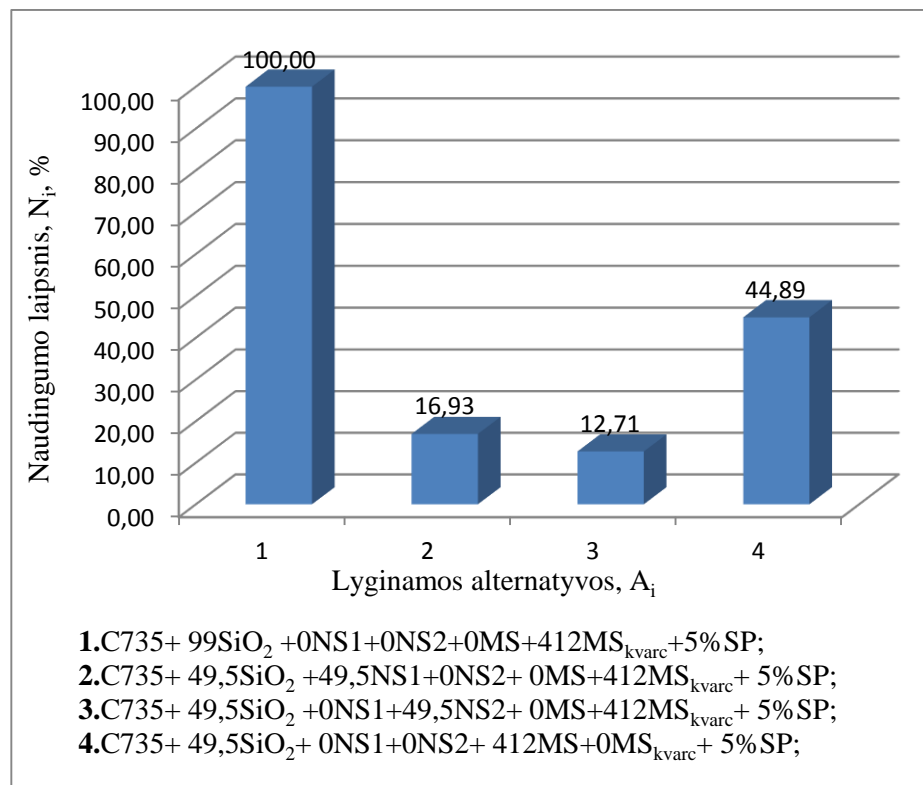
$$K_{bit,i} = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-}, \quad (4.23)$$

Geriausias (racionaliausias) sprendimas bus tas, kurio K_{bit} reikšmė bus didžiausia. Atsižvelgiant į $K_{bit,i}$ gautas reikšmes, sudarome lyginamų variantų prioritetų eilutę. Lyginame nagrinėjamo varianto reikšmę su idealaus varianto reikšme:

$$N_i = \frac{K_{bit,i}}{K_{bit,max}} \cdot 100\%. \quad (4.24)$$

19 lentelė. Santykinio lyginamų variantų artumo idealiam $K_{bit,i}$ nustatymas

	Prioretiškumas		N_i
$K_{bit,1} =$	0,99771	I	100,00
$K_{bit,2} =$	0,16888	III	16,93
$K_{bit,3} =$	0,12683	IV	12,71
$K_{bit,4} =$	0,44784	II	44,89

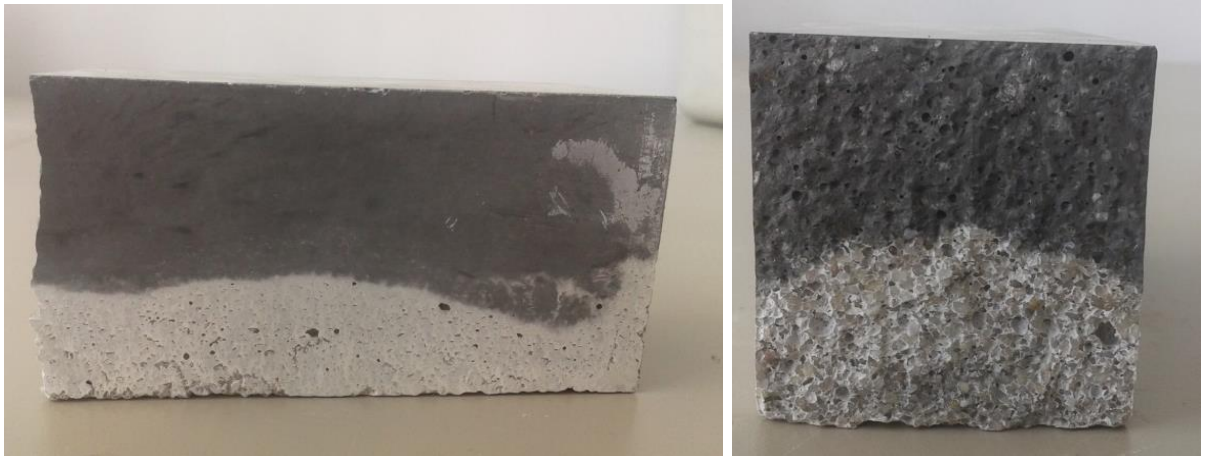


4.14 pav. Naudingumo laipsnio palyginimo schema

Hibridinės betono konstrukcijos gamybai parenkama racionaliausia YSB betono mišinio sudėtis, t.y. kontrolinė sudėtis (4.14 pav.).

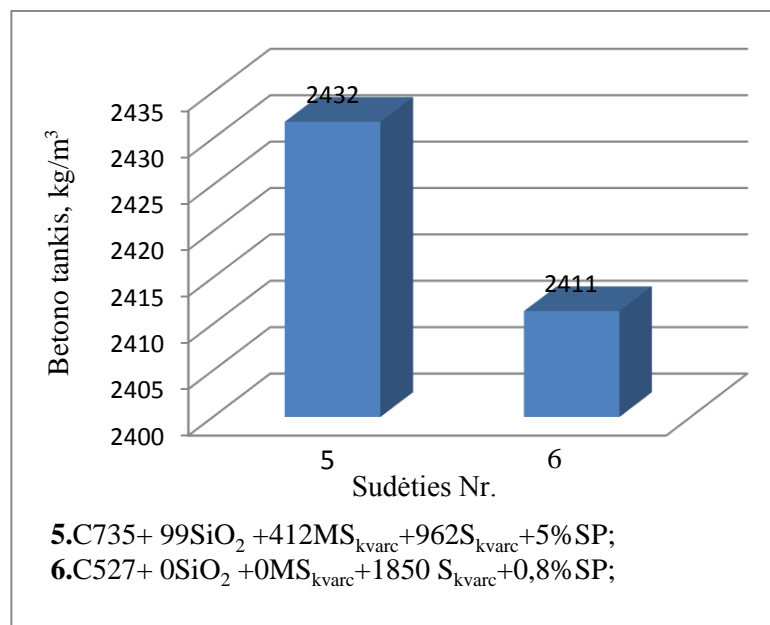
4.5.3. Hibridinės betono konstrukcijos tyrimai

Naudojant betono sudėtis, pateiktas 9 lentelėje, buvo pagaminti dviejų rūšių prizmės formos bandiniai (40x40x160 mm). Pirmasis bandinys buvo gaminamas pagal 5 betono sudėtį, o antrasis bandinys buvo gaminamas taip: prizmės apačia, t.y. 20 mm buvo naudojama 5 betono sudėtis, o viršuje naudojama 6 betono sudėtis, t.y. įprastas betonas (4.15 pav.). Bandinio apatinės dalies betono mišinio V/C santykis buvo 0,31, o viršutinės dalies – 0,56.



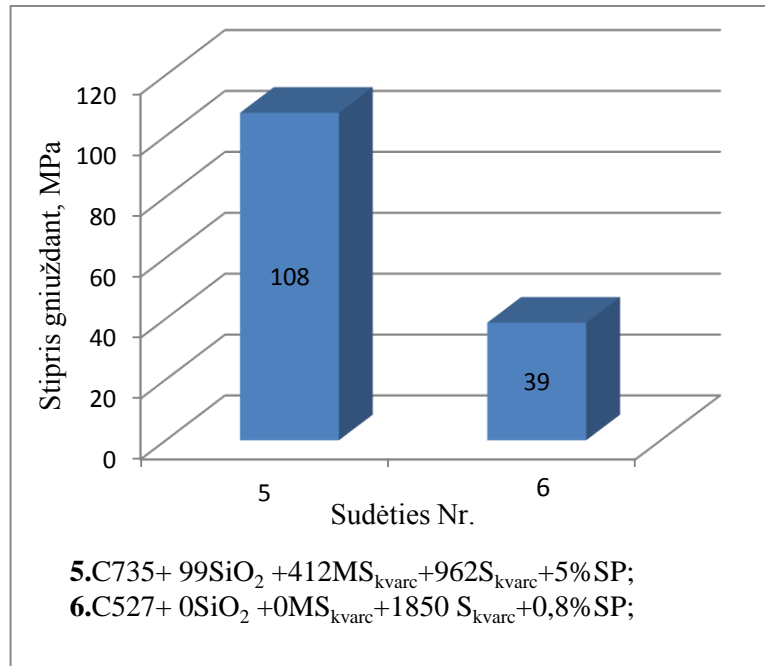
4.15 pav. hibridinio betono bandinys

4.5.1. skyriuje aprašytais bandymo metodais buvo apskaičiuoti bandinių tankiai (4.16 pav.) ir išmatuotas stipris gniuždant.



4.16 pav. Bandinių tankis, kg/m³

Betono stipris gniuždant penktojo ir šeštojo bandinio skyrėsi labai ženkliai, net 2,8 karto, atitinkamai gautos reikšmės 10 ir 39 MPa (4.17 pav.). Rezultatai gauti todėl, kad gniuždant šeštąjį bandinį, gniuždoma zona buvo iš įprastinio betono.



4.17 pav. Bandinių stipris gniuždant, MPa

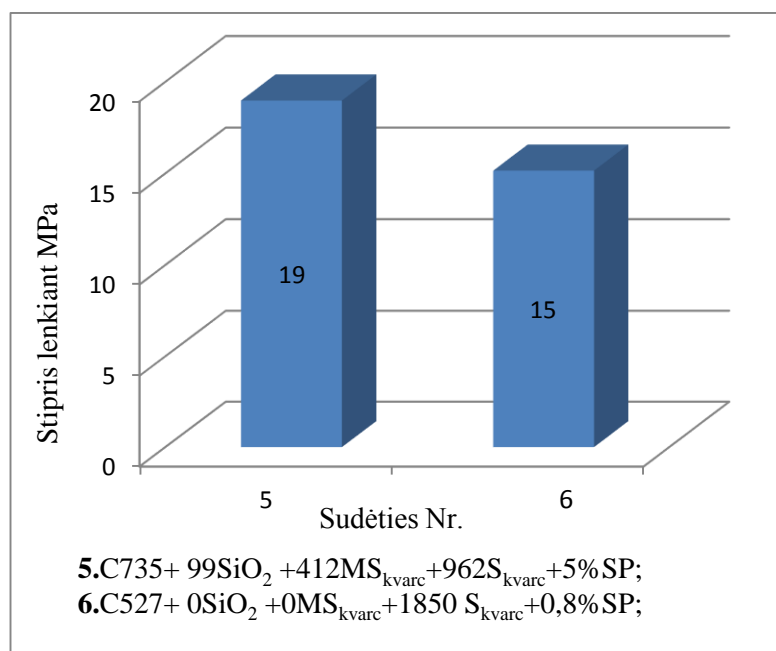
Betono stiprio lenkiant nustatymas buvo atliekamas “Toni Technik” specialia įranga (4.18 pav.) naudojant trijų taškų lenkimo metodą. Atstumas tarp atramų 100 mm, vertikali apkrova perduodama per ritinėį, uždėta ant prizmės viršaus per centrą. Apkrova standarte LST EN 12390-5:2009 nurodytu intensyvumu tolygiai didinama tol, kol prizmelė sulūžta.



4.18 pav. Betono stiprio lenkiant nustatymo įranga

Stiprio lenkiant rezultatai pasiekti geri, atitinkamai penktojo ir šeštojo bandinio vidutiniai stipriai lenkiant yra 19 ir 15 MPa. Tokie rezultatai yra gaunami todėl, kad lenkiamoji zona hibridinės konstrukcijos buvo iš ypač stipraus betono mišinio, todėl įprastinio betono sluoksnis

nepadarė didelės įtakos stiprio lenkiant rezultatams. Šeštajame bandinyje stipris lenkiant sumažėjo 21 %, lyginant su kontroliniu 5 bandiniu (4.19 pav.).



4.19 pav. Bandinių stipris lenkiant, MPa

Siekiant palyginti gautus rezultatus eksperimente su teoriniais skaičiavimais, priimame tokius duomenis:

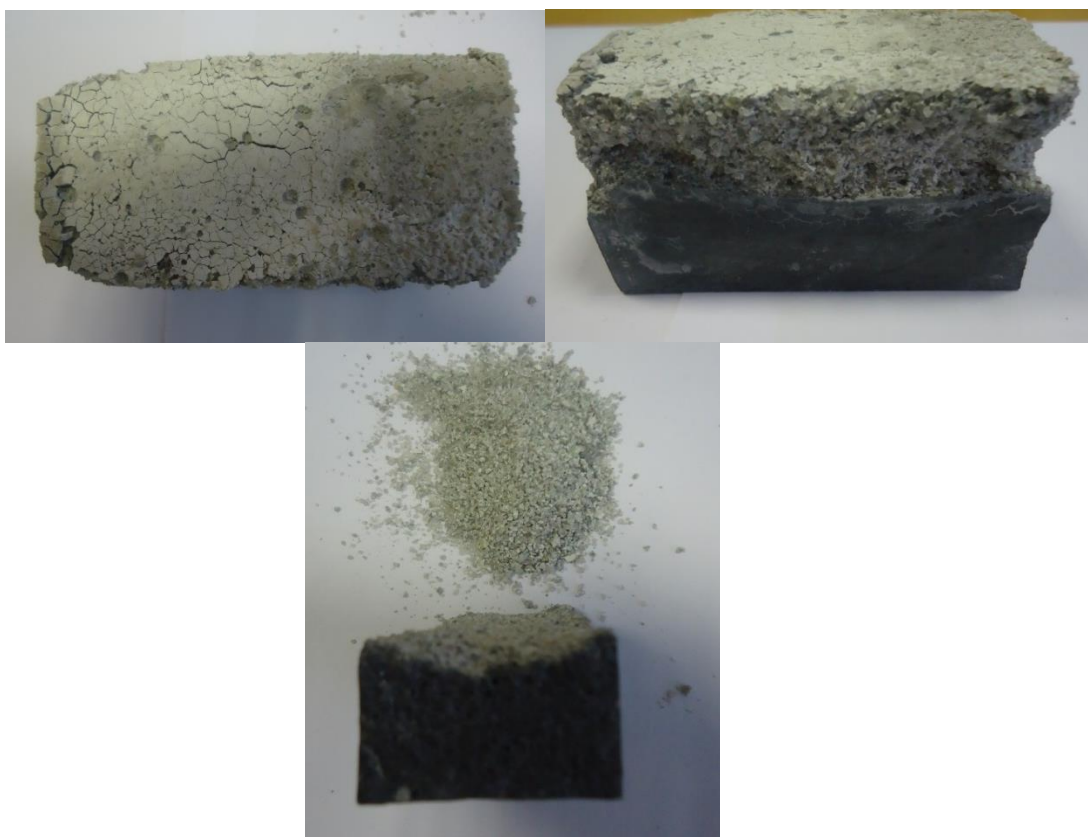
- Ypač stipraus betono stipris gniuždant yra 108MPa;
- Įprastinio betono stipris gniuždant 39 MPa;
- Ypač stipraus betono aukštis bandinyje 20 mm;
- Bandinio plotis 40 mm;
- Bendras bandinio aukštis 40 mm;

$$f_{cd} = \frac{f_{yd}^2 \cdot h^2 \cdot b}{2 \cdot f_{yd} \cdot h \cdot b \cdot d - 2 \cdot M_{Ed}} \quad (4.25)$$

Apskaičiavus lenkiamąjį stiprį, gauname, kad jis turi būti lygis 10 MPa, t.y. net 1,5 karto mažesnis, nei eksperimentiškai gautas stipris lenkiant.

4.5.4. Hibridinės betono konstrukcijos atsparumas šalčiui

Betono atsparumas šalčiui buvo nustatomas prizmės bandiniams atliekant paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklus 3 % NaCl tirpale. Nustatant bandinių atsparumo šalčiui markę, pagrindiniai irimo rodikliai yra vidutinis stiprio gniuždant sumažėjimas (turi būti ne didesnis kaip 15 %) ir vidutinis tūrio sumažėjimas (ne didesnis kaip 0,5 %). Bandinių po 10 šaldymo – šildymo ciklų viršutinė dalis, t.y. įprastinio betono sluoksnio dalis visiškai suiro, pavirsdama į miltelius. Apatinė bandinio dalis išliko nepakitusi (4.20 pav.). Suirimas įvyko tiksliai per skirtingų betonų sąlyčio zoną. Galima daryti išvadą, kad hibridinis betonas visiškai nėra atsparus šalčiui, dėl naudoto įprasto betono.

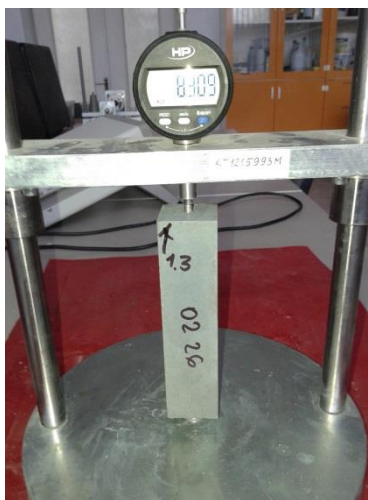


4.20 pav. Bandiniai po atsparumo šalčiui bandymo

Norint hibridinį betoną padaryti atsparų šalčiui, reikia sureguliuoti oro kiekį įprastinio betono mišinyje. Tai galima padaryti į mišinį įdedant atitinkamų priedų- poradarių. Tai yra alyvos, riebalai, natro šarmu apdorotos medžio dervos, organinių junginių sulfonatai ir pan. Šios orą įtraukiančios medžiagos įdėjus nedidelį kiekį į betono mišinį išskiria dujų burbuliukus, kurie pasiskirsto betone, padarydamos jį atsparesnį šalčio poveikiui.

4.5.5. Betono susitraukimo deformacijos

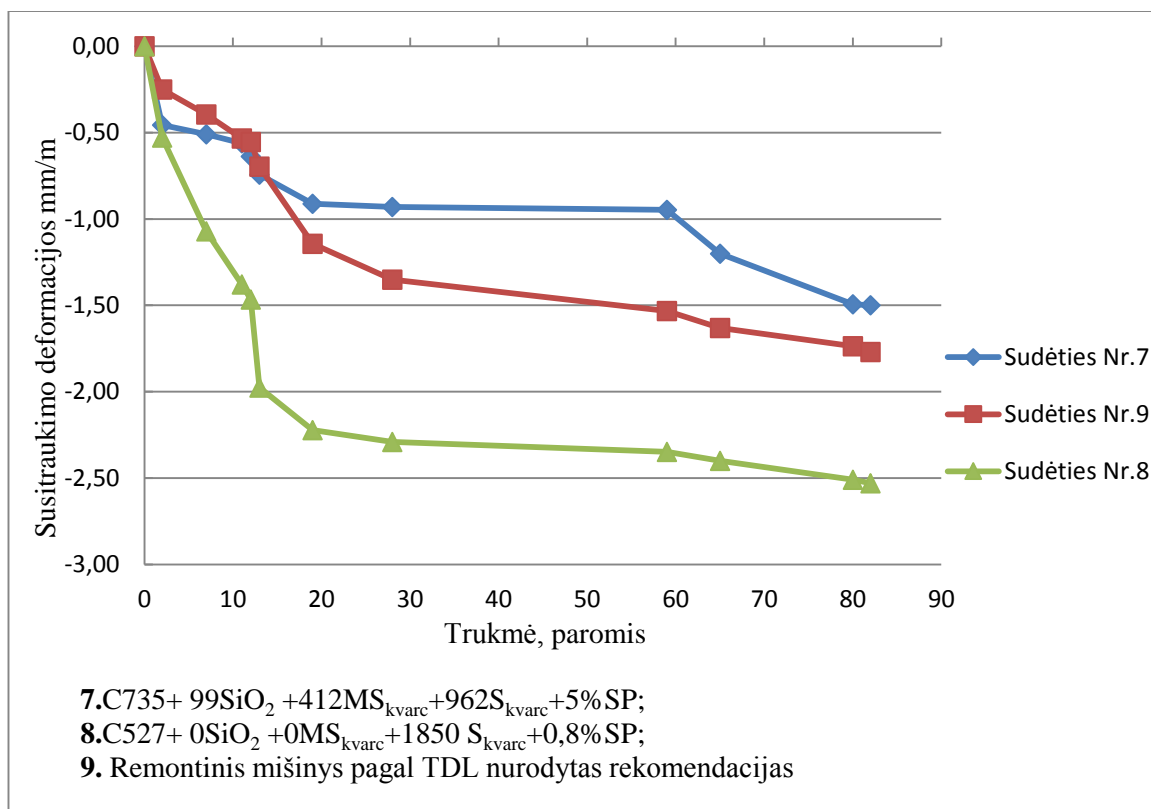
Tyrimo metu buvo pagaminti prizmės formos bandiniai (40x40x160 mm), naudojant 7, 8 ir 9 betono sudėtis. Pirmojo bandinio V/C santykis buvo 0,31, o antrojo bandinio V/C santykis 0,56, o trečiasis gamintas naudojant remontinį mišinį ir jo aprašyme pateiktas mišinio rekomendacijas. Bandymas atliktas siekiant nustatyti, kokios kiekvienu atveju gautos betono bandinio susitraukimo deformacijos, darant prielaidą, kad kuo bus didesnis skirtumas tarp deformacijų esant skirtingiems V/C santykiams, tuo labiau hibridinis betonas bus veikiamas skirtingų deformacijų, kurios sukels šio betono irimą ir atsisluoksniavimą tarp sluoksnių. 4.21 pav. parodytas prietaisas, kuriuo buvo matuotos betono susitraukimo deformacijos. Betono susitraukimo deformacijos buvo pradėtos matuoti po 2 parų, iškart išformavus bandinius. Bandiniai tarp matavimų buvo laikomi laboratorinėmis sąlygomis, aplinkos temperatūra 20 ± 2 °C, santykinis drėgnumas 40-60 %.



4.21 pav. Susitraukimų deformacijų matavimo prietaisas dilatometras

Gauti rezultatai rodo, kad praėjus 28 paroms, ypač stipraus betono (sudėties Nr. 7) susitraukimo deformacija buvo $-0,93$ mm/m, įprastinio betono (sudėties Nr.8) susitraukimo deformacija buvo $-2,29$ mm/m, o remontinio mišinio (sudėties Nr.9) $-1,35$ mm/m. YSB ir įprastinio betono susitraukimo deformacijos po 28 parų skyrėsi net 2,46 karto, o YSB ir remontinio mišinio susitraukimo deformacijos skyrėsi 1,45 karto. Atitinkamai susitraukimo deformacijų skirtumai po 82 parų buvo: tarp YSB ir įprastinio betono 1,69 karto, o tarp YSB ir remontinio mišinio 1,18 karto.

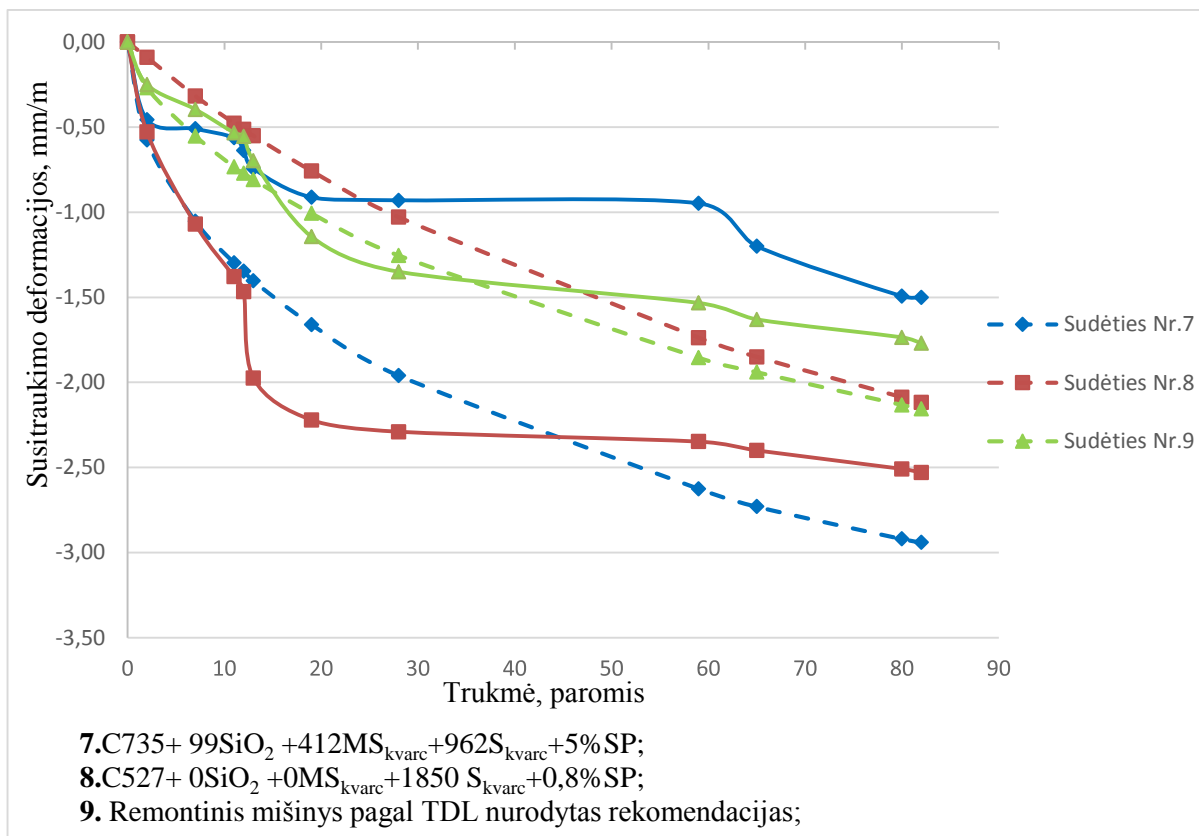
Gautas susitraukimo deformacijų skirtumas tarp skirtingų betonų yra labai didelis, todėl tai turėtų daryti neigiamą įtaką skirtingų stiprumų betonų sukibimui.



4.22 pav. Betono susitraukimo deformacijos

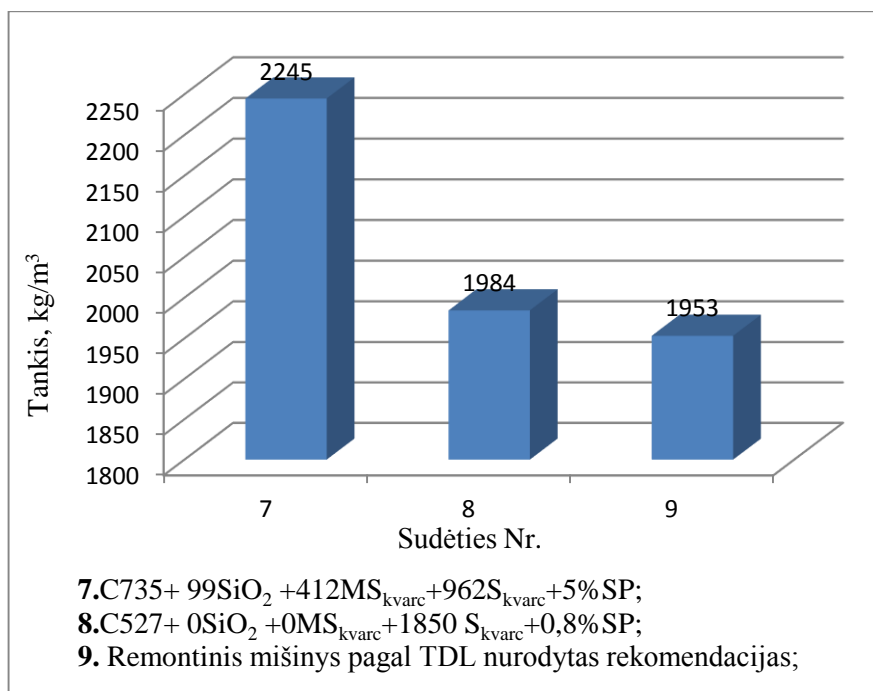
Susitraukimo deformacijos gali būti mažinamos keliais būdais. Pirmiausiai gali būti naudojami įvairūs plaušai ar fibros, kurios ne tik sumažina susitraukimą, bet ir betono suirimas tampa plastiškesnis. Antras variantas yra naudoti betono terminį apdorojimą, t.y. gaminiai turi būti kietinami termiškai. Trečias variantas yra naudoti betono susitraukimą mažinančius priedus.

Lyginant gautus rezultatus su teoriniais betono susitraukimo deformacijų skaičiavimais, galima teigti, kad artimiausi rezultatai gauti sudėties Nr.9, t.y. remontinio mišinio. Šios betono sudėties susitraukimo deformacijos po 28 parų skyrėsi 7,4 %, o po 82 parų 18 %. Ypač stipraus betono bandinių susitraukimo deformacijos praktiškai gautos ženkliai mažesnės nei apskaičiuotos, tuo tarpu įprastinio betono susitraukimo deformacijos praktiniais metodais gautos didesnės nei apskaičiuotos (4.23 pav.).

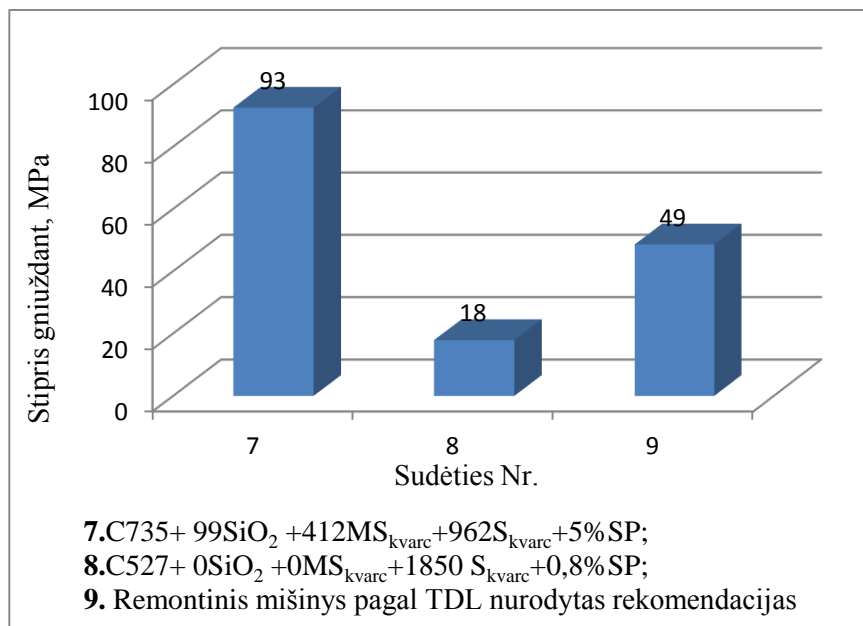


4.23 pav. Apskaičiuotų susitraukimo deformacijų (punktyrinė linija) palyginimas su eksperimentiškai gautais rezultatais (ištininė linija)

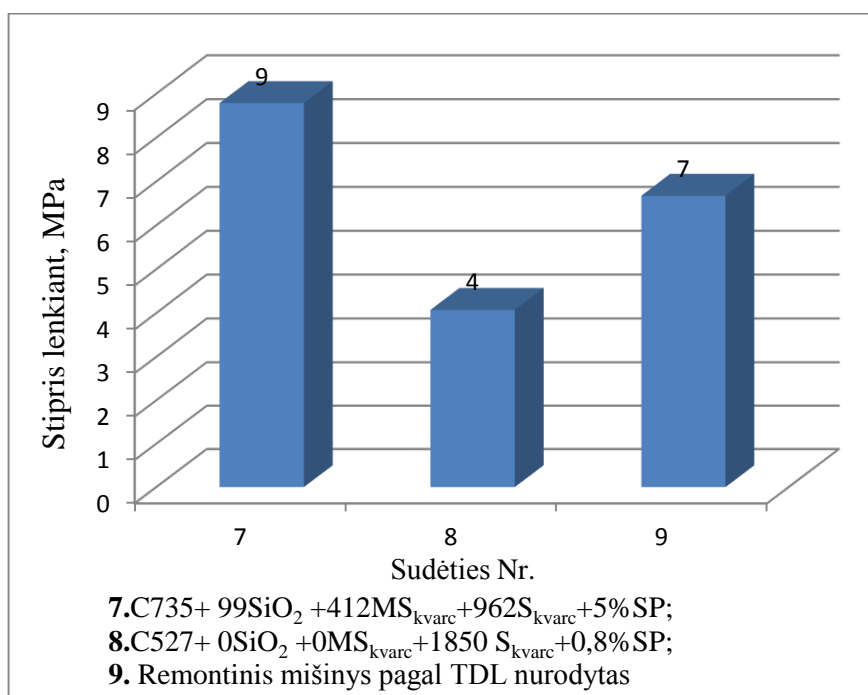
Taip pat buvo atlikti šių sudėčių stiprumo bandymai, t.y. nustatytas tankis, išmatuotas stiprumas gniuždam ir lenkiant. Rezultatai pateikiami diagramose (4.24, 4.25, 4.26 pav.).



4.24 pav. Betono tankis, kg/m^3



4.25 pav. Betono stipris gniuždant, MPa



4.26 pav. Betono stipris lenkiant, MPa

Išvados

1) Atlikus racionaliausio betono mišinio sudėties parinkimą taikant artumo idealiam taškui metodą, gautas rezultatas, kad racionaliausia sudėtis buvo pirmoji, t.y., naudojant mikro užpildą tik SiO₂ mikro dulkes, V/C santykis 0,31.

2) Hibridinės betono konstrukcijos stipris lenkiant gautas 15 MPa, t.y. tik 21 % mažesnis nei iš YSB pagaminto bandinio. Atitinkamai hibridinio betono stipris gniuždant gautas 39 MPa, t.y. net 63,9 % mažesnis už YSB bandinio. Toks rezultatas gautas, kadangi gniuždomoji zona buvo iš įprastinio betono.

3) Palyginus hibridinio bandinio stiprio lenkiant rezultatus su teoriniais skaičiavimais, gauta, kad hibridinio betono stipris lenkiant yra 1,5 karto didesnis nei gautas apskaičiuavus.

4) Atlikus hibridinio betono atsparumo paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklams 3 % NaCl tirpale tyrimą, įprastinio betono dalis visiškai suiro, pavirsdama į miltelius, o YSB išliko nepakitęs. Norint hibridinį betoną padaryti atsparų šalčio poveikiui reikia pakeisti įprastinio betono sudėtį.

5) Atlikus skirtingų betonų susitraukimų deformacijų matavimus, gauti rezultatai rodo, kad YSB ir įprastinio betono susitraukimo deformacijos po 28 parų skyrėsi net 2,46 karto, o YSB ir remonto mišinio susitraukimo deformacijos skyrėsi 1,45 karto. Gautas susitraukimo deformacijų skirtumas tarp skirtingų betonų yra labai didelis, todėl tai turėtų daryti neigiamą įtaką skirtingų stiprumų betonų sukibimui.

6) Palyginus gautus praktinius betono susitraukimo deformacijų rezultatus su teoriniais skaičiavimais, galima teigti, kad artimiausi rezultatai gauti sudėties Nr.9, t.y. remonto mišinio. Šios betono sudėties susitraukimo deformacijos po 28 parų skyrėsi 7,4 %, o po 82 parų 18 %. Ypač stipraus betono bandinių susitraukimo deformacijos eksperimentiškai gautos ženkliai mažesnės nei apskaičiuotos, tuo tarpu įprastinio betono susitraukimo deformacijos eksperimentiniais metodais gautos didesnės nei apskaičiuotos.

Naudota literatūra:

1. **Azad, A.K., Hakeem, I.Y. (2013).** Flexural behavior of hybrid concrete beams reinforced with ultra-high performance concrete bars. *Construction and building materials*.
2. **Azad, A.K., Hakeem, I.Y. (2013).** Flexural behavior of hybrid high performance concrete construction. *Research, Development and Practice in Structural Engineering and Construction*.
3. **Brühwiler, E. (2008).** Rehabilitation of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete.
4. **Dong, J.K., Seung, H.P., Gum, S.R., Kyung, T.K. (2011).** Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*.
5. **Fehling, E. (2004).** Design relevant properties of hardened Ultra High Performance Concrete. *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*.
6. **Ferrier, E., Labossiere, P., Neale, K.W. (2012).** Modelling the bending behavior of a new hybrid glulam beam reinforced with FRP and ultra-high-performance concrete. *Applied Mathematic Modelling*. p. 3883-3902.
7. **Ghafari, E., Costab, H., Júlio, E., Portugal, A., Durãesc, L. (2014).** The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Materials & Design*. P. 1–9.
8. **Graybeal, A. (2007).** Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete.
9. **Graybeal, A. (2006).** Material property characterization of ultra high performance concrete.
10. **Habel K. (2004)** Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC) and reinforced concrete.
11. **Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. (2014).** Mix design and properties assessment of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*. P. 29-39.
12. **Jafari, V., Allahverdi, A. (2014).** Synthesis of nanosilica from silica fume using an acid-base precipitation technique and PVA as a nonionic surfactant. *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*. p.105-112.

13. **Jafari, V., Allahverdi, A. (2014).** Synthesis and Characterization of Colloidal Nanosilica via an Ultrasound Assisted Route Based on Alkali Leaching of Silica Fume. *Nanotechnol.* P. 145-152.
14. **Jiang, Z., Sun, Z., Wang, P. (2005).** Autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research.* P. 1539–1545.
15. **Racky, P. (2004).** Cost-effectiveness and sustainability of UHPC. *International Symposium on Ultra High Performance Concrete.*
16. **Richard, P., Cheyrezy, M. (1995).** Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research*, Oct., Vol. 25, No. 7: 1501-1511.
17. **Roux, N., Andrade, C., & Sanjuan, M.A. (1996).** Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 1-6.
18. **Saida, A.M., Zeidana, M.S., Bassuonib, M.T., Tiana Y. (2012).** Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials.* P. 838–844.
19. **Schutter, G.D., Audenaert, K. (2004).** Evaluation of water absorption of concrete as measure for resistance against carbonation and chloride migration. *Materials and Structures.* P. 591-596.
20. **Schmidt, M., Fehling, E., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R. (2003).** Ultra-High Performance Concrete: Perspective for the Precast Concrete Industry. *Concrete Precasting Plant and Technology*, Vol. 69, No. 3: 16-29.
21. **Schmidt, M., Fehling, E. (2004).** Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe. *International Symposium on Ultra High Performance Concrete.*
22. **Schmidt, M. (2004).** Ultra High Performance Concrete (UHPC). *International Symposium on Ultra High Performance Concrete.*
23. **Sharma, U., Khatrib, A., Kanoungoc, A. (2014).** Use of Micro-silica as Additive to Concrete-state of Art. *International Journal of Civil Engineering Research.* p. 9-12.
24. **Šerelis, E.; Vaitkevičius, V., Lygutaitė, R. (2011).** Racionaliausias ypač stipraus betono mišinio sudėties parinkimas, taikant artumo ideliam taškui metodą. *Statyba ir architektūra: jaunųjų mokslininkų konferencijos pranešimų medžiaga.*
25. **Tayeh, B.A., Bakar, B.H.A., (2012).** Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay.

26. **Tayeh, B.A., Baker, B.H.A., Johari, M.A.M., Zeyad, A.M. (2014).** Microstructural analysis of the adhesion mechanism between old concrete substrate and UHPFC. *Journal of Adhesion Science and Technology*.p. 1846-1864.
27. **Teichmann, T. (2004).** Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC. *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*.
28. **Vaitkevičius, V., Šerelis, E., Lygutaitė, R. (2013).** Production waste of granite rubble utilization in Ultra High Performance Concrete. *Journal of sustainable architecture and civil engineering*.
29. **Wang, D., Shi, C., Wu, Z., (2015).** A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties.
30. **Weiting, S., Lo, T.Y., Wang, W., Ouyang, D., Wang, P., Xing, F. (2016).** Pozzolanic Reactivity of Silica Fume and Ground Rice Husk Ash as Reactive Silica in a Cementitious System: A Comparative Study. *Materials*.
31. **Gurskis, V. (2008).** *Statybinės medžiagos*, Kaunas.
32. **Vektaris, B., Vilkas, V., (2006).** *Betono tvarumas*. Kaunas: Technologija.
33. **Betono susitraukimas ir valkšnumas.** [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 30 d.]. Prieiga per internetą: <<http://iti.vgtu.lt/imitacijosmain/wuc3.aspx>>.
34. **Decorative concrete.** [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. balandžio 2 d.]. Prieiga per internetą: <https://en.wikipedia.org/wiki/Decorative_concrete>.
35. **Ductal® is a family of ultra-high performance concretes that provide a unique combination of superior properties including strength, ductility, durability and aesthetics.** [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. balandžio 5 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.buildingbettercities.ca/products/view/name/ductal>>.
36. **Kas ir kada išrado betoną.** [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 30 d.]. Prieiga per internetą: <http://proin.ktu.lt/~tomablaz/azina/index.php?akcija=klatsas&tema=7&KL_KODAS=26>.
37. **See-Through, Light-Transmitting ... Concrete?!** [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 2 d.]. Prieiga per internetą:< <http://dornob.com/see-through-light-transmitting-concrete-material/>>.
38. **Self-healing Concrete For Safer, More Durable Infrastructure.** [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 2 d.]. Prieiga per internetą: <<https://www.sciencedaily.com/releases/2009/04/090422175336.htm>>.
39. **Self compactive concrete.** [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 30 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.slideshare.net/haidernaem1/self-compacting-concrete>>.

40. **Self healing concrete Repairs Its Own Cracks.** [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 30 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.iflscience.com/chemistry/self-healing-concrete-repairs-its-own-cracks>>.

41. **Ultra-High Performance Concrete.** [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 2 d.]. Prieiga per internetą:<<http://www.cement.org/for-concrete-books-learning/concrete-technology/concrete-design-production/ultra-high-performance-concrete>>.

42. **Statybos techninis reglamentas STR 2.05.05:2005.** Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“.