



**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

Jūrų technikos fakultetas

Statybos katedra

LAIMIS VAICEKAUSKAS

**GELŽBETONINĖS PIRSO PLOKŠTĖS JUNGTIES SU POLIAIS MODELIŲ  
EKSPERIMENTINIS TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

Uosto statinių studijų programa

Technologijos mokslų kryptis

Vadovas: Lekt. Dr. D. Narmontas

Klaipėda, 2013

## SANTRAUKA

Vaicekauskas L. Gelžbetoninės pirsos plokštės jungties su poliais modelių eksperimentinis tyrimas. Uosto statinių magistro studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas dr. D. Narmontas, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2013. – 50 p.

*Raktažodžiai: pirsas, praspaudžiamasis perimetras, plokštės ir kolonos jungtis, irtis*

Plečiantis statyboms apimtims, kuriose taikoma besijinės perdangos - pramonės, transporto ir uosto objektams, tampa aktualesnis šios konstrukcijos patikimumas. Šiandiena dar nėra vieningos nuomonės apie besijės gelžbetoninės plokštės irties pobūdį, jos atrėmimo vietoje. Taip pat nėra vieningos nuomonės projektuojant minėtą konstrukciją.

Magistro darbe nagrinėjama dispersinio armavimo įtaka gelžbetoninių besijų pirsos perdangos plokščių praspaudimo stipriui. Atlikta eksperimentų metodikų apžvalga ir analizė. Siūloma jungties „plokštė – polis“ modelių bandymo metodika, kai jos modelio plokštės efektai yra adekvatūs visos perdangos sistemos modelio aplinkos vietoje efektams.

Darbe pateikiama aštuonių, besijės perdangos plokštės ir poliaus jungties modelių eksperimentinių tyrimų rezultatai, taikant siūlomą bandymo metodiką.

## ABSTRACT

Vaicekauskas L. Reinforced concrete pier slab-pole connections models experimental research. Port structures Master's degree program. Academic supervisor dr. D. Narmontas, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2013. – 51 p.

Keywords: *Punching shear resistance of the perimeter, slabs and columns connector.*

Expansion of the volume of construction which applies to flat slab - industry, transport and port facilities is becoming more urgent the integrity of the structure. There is currently no consensus on the concrete slab beamless experiential nature of the rebuttal place. There is also no consensus in the design of that structure.

Master's thesis the dispersed reinforcement on reinforced concrete pier beamless slab punching shear strength. Performed experiments methodology review and analysis. The proposed test methodology models convey more realistic load distribution model, in comparison with the actual construction.

The paper presents the eight-pole connector panels and models of experimental results using the proposed methodology.

**Lentelių sąrašas:**

1 lentelė. Koeficientų vertės esant nežinomoms deformacijoms .....	9
2 lentelė. Įvairių šalių norminiuose dokumentuose vertinami veiksniai .....	17
3 lentelė. Dalinių patikimumo koeficientų įtaka .....	19
4 lentelė. Skaičiuojamojo praspaudimo stiprio priklausomybė nuo veiksnių (kartais).....	20
5 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių plokščių praspaudimo reikšmių palyginimas .....	26
6 lentelė. Bandinių parametrai.....	30
7 lentelė. Modelių su gelžbetoninėmis plokštėmis irties apkrovų vertės .....	35
8 lentelė. Plyšių vystymosi etapai, apkrovos ir įlinkiai .....	37
9 lentelė. Irimo piramidės sudaromosios kampai su horizontale.....	38

## Paveikslų sąrašas:

1 pav. Naftos produktų terminalo pirsas.....	6
2 pav. Pirsu perdangos deformacijos, kai jos jungtis su poliais standžioji.....	8
3 pav. XXa. pražios besijų plokščių eksperimentiniai tyrimai .....	10
4 pav. Poliaus ir plokštės jungties suirimo pobūdžio schema .....	11
5 pav. Plokštės su poliumi jungties skersinio armavimo pavyzdys.....	12
6 pav. Žiedinės armatūros įtaka suirimo pobūdžiui ir kritiniam perimetrui.....	12
7 pav. Betono ir dispersiškai armuoto betono $\sigma - \varepsilon$ priklausomybės .....	13
8 pav. Bandinio apkrovimas per standų rėmą .....	14
9 pav. Bandinio apkrovimas per temples .....	14
10 pav. Bandinio apkrovimas per tolygiai paskirstytus keltuvus .....	15
11 pav. Modelių plokščių išlinkių pobūdžiai: .....	16
12 pav. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Kinnunen S., Nylander B. ....	21
13 pav. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Braestrup N. V., Nielsen M. P. ir kt.....	23
14 pav. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Broms C. E. ....	24
15 pav. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Georgopoulos T.....	25
16 pav. Bandomo modelio konstrukcija ir matmenys .....	29
17 pav. Plieno drožlių plaušas .....	29
18 pav. Apkrovos paskirstymo principinė schema ir bandomo modelio bendras vaizdas.....	31
19 pav. Įlinkių jutiklių išdėstymo schema .....	31
20 pav. Modelio 2-A0-F irimo pobūdis ir įlinkiai (a) .....	32
21 pav. Modelių (be išilginės armatūros, bet su plieno plaušu) .....	33
22 pav. Modelių plokštėse plyšių raidos kryptys ir etapai .....	33
23 pav. Modelio iirtis 0,04 sekundės intervale fragmentas .....	34
24 pav. Modelių armuotų plokštės kampo įlinkiai tyrimo eigoje.....	35
25 pav. Ardančiųjų apkrovų palyginamosios vertės.....	36

## TURINYS

<b>ĮVADAS</b> .....	6
<b>1. PIRSŲ KONSTRUKCIJOS SKAIČIAVIMO PRINCIPAI</b> .....	8
<b>2. PIRSO BESIJĖS GELŽBETONINĖS PERDANGOS PROBLEMAS IR TYRIMO TIKSLAS</b> .....	10
2.1. Besijų gelžbetoninių plokščiųjų sistemų ir skaičiavimo metodų raida.....	10
2.2. Perdangos ir polių jungties konstrukcijos problemos ir sprendiniai.....	11
2.3. Plokštės praspaudžiamojo stiprio eksperimentinių tyrimų metodikų apžvalga ir analizė....	13
2.4. Normatyvinių plokštės praspaudimo skaičiavimo metodų apžvalga .....	16
<b>3. BESIJĖS GELŽBETONINĖS PLOKŠTĖS IR POLIŲ JUNGTIES SKAIČIUOJAMIEJI MODELIAI, JŲ ANALIZĖ</b> .....	21
3.1. Skaičiuojamieji modeliai ir jų apžvalga .....	21
3.1.1. Kinnunen S. ir Nylander B. plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis .....	21
3.1.2. Braestrup N. ir Nielsen M. ir kt. plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis .....	22
3.1.3. Moe J. plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis .....	23
3.1.4. Broms C. E. (1990) plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis.....	24
3.1.5. Georgopoulos T. plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis .....	25
3.2. Skaičiuojamųjų modelių analizė ir išvados .....	26
<b>4. BESIJĖS GELŽBETONINĖS PLOKŠTĖS BEI POLIŲ JUNGTIES MODELIŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS</b> .....	28
4.1. Eksperimentinio tyrimo tikslas .....	28
4.2. Bandomieji modeliai .....	28
4.3. Modelių bandymo įranga ir metodika .....	30
<b>5. NESIJINĖS GELŽBETONINĖS PLOKŠTĖS IR POLIŲ JUNGTIES MODELIŲ EKSPERIMENTINIO TYRIMO REZULTATAI, JŲ ANALIZĖ</b> .....	32
<b>BENDROSIOS IŠVADOS</b> .....	39
<b>LITERATŪRA</b> .....	41
<b>PRIEDAI</b> .....	43
1 Priedas. Bandinių modelių įlinkių jutiklių duomenys .....	44
2 Priedas. Bandinių suirimo pobūdis.....	44

## ĮVADAS

Pirsas – uosto hidrotechnikos statinys, kurio išilginė ašis statmena ar kampu uosto kranto atžvilgiu ir tiesiogiai arba jungiančia dalimi susieti su uosto teritorija. Pirsų statyba leidžia padidinti uosto efektyvumą – ženkliai pailginti laivų švartavimo ir jų aptarnavimo barą. Ypač tai racionalu, kai uosto akvatorija ar jo kranto prieplaukų ilgis yra ribotas. Pirsai pagal eilę požymių gali būti klasifikuojami: paskirtį (krovos darbams, keleiviams, laivų statybos ir remonto tikslams ir kt.), tarnavimo trukmę (ilgalaikiai ir laikini), reikšmę uostui (pagrindiniai ir pagalbiniai), konstrukcijų medžiagas (plienines, gelžbetonines ir medines), perdangos – rostverko konstrukcijos tipą (standusis ir liaunasis), skersinio pjūvio tipą (vientisi ir nevientisi) ir t.t.

Nepriklausomai nuo pirsas paskirties ar kitų požymių jo konstrukcijų sistemoje, kai statinio skersinis pjūvis nėra vientisas, išskirtini du pagrindiniai elementai – atramos ir rostverkas (toliau įvardijama „perdanga“).

Pirsas atramos laiko perdangą ir ant jos esančius krūvius, perima laivo švartavimosi ir priešvartuoto prie pirsas laivą veikiančius (vėjo, srovės, bangavimo) poveikius. Pirsas atramos, priklausomai nuo uosto akvatorijos pagrindų geologijos sandaro ir laikomų krūvių, būna įvairių konstrukcijų ir medžiagų (gelžbetoniniai vientiso skerspjūvio ar kevaliniai, plieniniai vamzdžiai, iš plieninio įlaido sudėtiniai profiliai ir kt.) poliai arba didelio diametro kevalinės ar iš masyvių gaminių sumontuoti taurai.

Pirsų perdangos, priklausomai nuo eilės veiksmių (veikiančių apkrovų, statinio kaštų, statybos trukmės, eksploataavimo sąnaudų ir kt.) būna gelžbetoninės (monolitinės ar iš surenkamų gaminių, sijyno ar plokštės tipo) ir mišrios konstrukcijos (sijos metalinės, paklotas – gelžbetoninė plokštė).



**1 pav.** Naftos produktų terminalo pirsas

Pirso monolitinio gelžbetonio besijės plokštės tipo perdanga, kuri pastaraisiais metais vis plačiau taikoma hidrotechnikos statinių statybos praktikoje, turi eilę privalumų:

- mažesni statybos kaštai, lyginant su perdangomis iš surenkamų gelžbetoninių gaminių ar mišrių konstrukcijų;
- didesnis pirsio konstrukcijų sistemos standis, lyginant su mišrios konstrukcijos ar iš surenkamųjų gelžbetoninių gaminių perdangomis;
- mažiausios eksploataavimo sąnaudos - perdangos konstrukcijos paviršius veikiamas nepalankios aplinkos (drėgmės, agresyvaus vandens) yra ženkliai mažesnis už kitos konstrukcijos perdangų sistemas.

Žinoma, be nurodytų pirsio besijės gelžbetoninės plokštės privalumų turi ir nepageidautinų savybių - reikalauja nemažų laiko sąnaudų formuojant armatūros strypynus, ypač jų atrėmimo į polius srityse. Šiose vietose veikia didžiausios skersinės įrašos, todėl tenka sutankinti skersinės armatūros išdėstymą. Tačiau, dėl skersinės armatūros inkaravimosi problemų ir dažno strypų išdėstymo, abejotinas tampa jos efektyvumas. Be to, pirsio perdangos sandūroje su poliumi vietoje, dėl didelės armatūros strypų koncentracijos, neigiamą įtaką gali turėti betonavimo darbų kokybei, reiškia, perdangos patikimumui.

Nurodytiems pirsio besijės perdangos jungties su poliais vietose trūkumams pašalinti ar juos sumažinti racionalu būtų panaudoti kompozicines medžiagas, kurių tempiamasis ir kerpamasis stipriai yra didesni nei betono. Jas panaudojus galima tikėtis atsisakyti arba ženkliai sumažinti plokštės su poliais jungties skersinį armavimą. Šia kompozicine statybine medžiaga galėtų būti plienbetonis (dispersiškai plieniniu plaušu armuotas betonas), kurio kerpamasis stipris 2...2,5 karto didesnis už tos pačios klasės betoną.

Magistrantūros baigiamajame darbe buvo atlikta besijės pirsio perdangos jungties su vidiniu poliu modelių eksperimentinis tyrimas, tikslu nustatyti plienbetonio panaudojimo, tempiamosios zonos armavimo padidrinimo įtaką nurodytos jungties elgsenai – įlinkiams, supleišėjimo eigai ir suirimo pobūdžiui. Tyrimų rezultatai ir išvados pateiktos šioje magistrantūros baigiamojo darbo ataskaitoje.

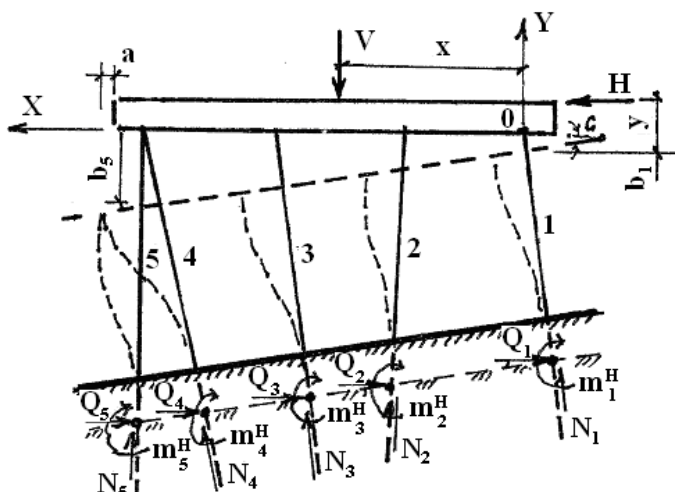
## 1. PIRSŲ KONSTRUKCIJOS SKAIČIAVIMO PRINCIPAI

Gelžbetoniniai pirsai, kurių perdangos plokštė su poliais jungiamos standžiai, konstrukcijos apskaičiavimas vykdomas dviem etapais:

### *1-asis etapas*

Apskaičiuojamos pirsio konstrukciją veikiančios vertikalios ir horizontalios apkrovos. Perdangos plokštės poslinkio ir įrašų polių sąlyginio įtvirtinimo vietose apskaičiavimui priimamos šios prielaidos (pagal prof. N. Gercevanovo metodą):

- perdangos plokštė (rostverkas) be galo standus, jo deformacijos, lyginant su polių, yra be galo mažos;
- poliai yra tamprūs ir apskaičiuojant įrašas juose įvertinama jų deformacijos;
- po poliais pagrindų gruntas nesideformuoja (nenusėda) arba po visais šios deformacijos vienodos.



**2 pav.** Pirsio perdangos deformacijos, kai jos jungtis su poliais standžioji

Pirsio perdangos deformacijos (2 pav.) išreiškiamos per horizontalų poslinkį  $a$ , vertikalų  $b_0$  ir deviaciją  $c$ . Poliuose įrašos  $N$ ,  $Q$  ir  $m$  apskaičiuojamos iš deformuotos sistemos pusiausvyros lygčių:

$$\left. \begin{aligned} ax_{aa} + b_0x_{ab} + cx_{ac} &= H \\ ax_{ba} + b_0x_{bb} + cx_{bc} &= V \\ ax_{ca} + b_0x_{cb} + cx_{cc} &= M_0 \end{aligned} \right\}$$

čia  $H$  ir  $V$  – horizontalių ir vertikalųjų jėgų sudedamosios;  $M_0$  – šių jėgų momentas koordinatinių pradžių atžvilgiu.

Lygčių sistemos koeficientų vertės pateiktos 1 lentelėje

**1 lentelė.** Koeficientų vertės esant nežinomoms deformacijoms

Koeficientai	Standus polių įtvirtinimas grunte ir rostverke
$x_{aa}$	$\sum n_i \sin^2 \alpha_i + \sum V_i \cos^2 \alpha_i$
$x_{ab}$	$\sum n_i x_i \sin \alpha_i \cos \alpha_i$
$x_{ac}$	$\sum n_i x_i \sin \alpha_i \cos \alpha_i - \sum \frac{V_i L_i}{2} \cos \alpha_i$
$x_{bb}$	$\sum n_i \cos \alpha_i$
$x_{cc}$	$\sum n_i x_i^2 \cos^2 \alpha_i - \sum \frac{V_i L_i}{3}$

**Pastaba:**  $n_i = 1/k_i$  ( $k_i$  - pagrindo standumo rodiklis);  $V_i = 12E_i J_i / L_i^3$ , ( $L_i$  - polių skaičiuojamasis ilgis)

Apskaičiavus poslinkių a, b<sub>o</sub> ir c vertes, apskaičiuojamos įrašos poliuose jų įtvirtinimo vietose

$$\left. \begin{aligned} N_i &= n_i b_i' \\ Q_i &= V_i \left( a_i' - \frac{c L_i}{6} \right) \\ m_i^b &= -m_i^h + C \frac{V_i L_i^2}{2} \\ m_i^h &= \frac{V_i L_i}{2} \left( a_i' - \frac{c L_i}{3} \right) \end{aligned} \right\};$$

čia  $a_i' = a \cos \alpha_i - b_0 \sin \alpha_i - c x_i \sin \alpha_i$ ,  $b_i' = a \sin \alpha_i + b_0 \cos \alpha_i - c x_i \cos \alpha_i$  polių galvenos poslinkiai skersine ir išilgine kryptimi atitinkamai (Смирнов Г. и др. 2003).

**2-as etapas**

Vadovaujantis STR 2.05.05:2005 „Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“, apskaičiuojama pirmo elementų (polių ir perdangos plokštės) armatūra, patikrinama perdangos plokštės praspaudžiamasis stipris. Šiame darbe nagrinėjama pastaroji problema.

## 2. PIRSO BESIJĖS GELŽBETONINĖS PERDANGOS PROBLEMOS IR TYRIMO TIKSLAS

### 2.1. Besijų gelžbetoninių plokščiųjų sistemų ir skaičiavimo metodų raida

Statybos praktikoje besijės perdangos ir plokščiųjų sistemos atremtos į atramų konstrukcijas pradėtos naudoti XIX a. pabaigoje, XX a. pradžioje. Vieni mokslininkai teigia, kad šių sistemų raidai, nuopelnai turi būti skiriami inžinieriui George M. Hill, kuris 1899 – 1901 metais minėtos konstrukcijos sandėlius suprojektavo ir pastatė įvairiuose JAV regionuose. Kiti mokslininkai besijų sistemų pradininku laiko Šveicarijos inžinierių Robert Maillart, kuris labiausiai žinomas kaip minėtos konstrukcijų sistemos tiltų projektuotojas. Treti skaito, kad besijė perdangos plokščių sistema buvo sukurta Jungtinėse Amerikos Valstijose ir Šveicarijoje savarankiškai. Rusijoje 1907 - 1913m. buvo atlikta besijės gelžbetoninės plokštės eksperimentiniai tyrimai (3 pav.). Besijės perdangos apskaičiavimui skirti pirmieji teoriniai darbai, naudojant baigtinių skirtumų metodą, buvo paskelbti tik 1921 metais.



**3 pav.** XXa. pražios besijų plokščiųjų eksperimentiniai tyrimai

Plečiantis gelžbetonio, tame tarpe ir besijų plokščiųjų sistemų panaudojimo statiniuose sritims, JAV 1925 m. paskelbtas pirmasis norminis dokumentas „Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas“ (ACI). Šiame dokumente, remiantis eksperimentinių tyrimų atliktų JAV Ilinojaus universitete rezultatais (Sacramento P.V. P. et al. 2012), pirmą kartą buvo pateiktos rekomendacijos besijų plokščiųjų sistemų projektavimui.

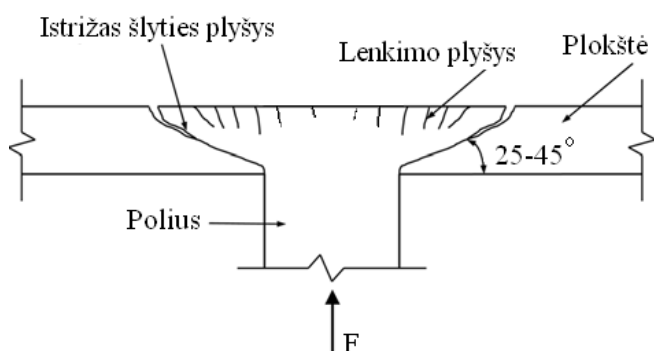
Plečiantis gelžbetonio panaudojimo sritims ir apimtims, 1920-1925 m remiantis mokslininkų Mioršo E. (Vokietija), Freyssineto E. (Prancūzija) ir kt. tyrimais, sukurti teoriniai ir praktinio konstravimo pagrindai, paskelbtos pirmosios gelžbetonio projektavimo rekomendacijos. Po 2-ojo pasaulinio karo gelžbetonio konstrukcijų, tame tarpe ir plokščiųjų, tyrimus atliko Riušas H.

(Vokietija), Guyjonas I. (Prancūzija), Abelesas P. (Anglija), Michailovas V. (Rusija) ir daugelis kitų. Gelžbetoninių plokščių tyrinėjimo srityje išskirtini mokslininkų Loleito A., Hallgren M., Nyderlander B., Nielsen M., Georgopoulos T., Broms C. ir kt. darbai.

Lietuvos mokslininkų įnašas gelžbetoninių konstrukcijų mokslui yra svarus. Pažymėtini mokslininkų akad. Kudzio A., prof. Rozembliumo A., prof. Valikono K., prof. Kaklauskas G. ir kt. darbai. Gelžbetoninių besijų perdangos plokščių tyrimus yra atlikę prof. Vainiūnas P., dr. Popovas P., prof. Marčiukaitis G., dr. Šalna R., kt. Jų moksliniuose darbuose paskelbti gelžbetoninių plokščių tyrimų rezultatai sudaro galimybes suprasti šių plokščių, veikiant apkrovoms, elgseną ir jas projektuoti patikimas ir racionalias.

## 2.2. Perdangos ir polių jungties konstrukcijos problemos ir sprendiniai

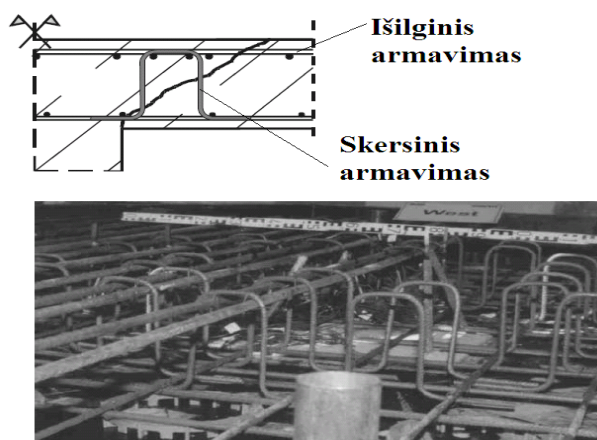
Daugelį dešimtmečių projektuotojus, mokslininkus domina gelžbetoninės plokštės ir atraminės konstrukcijos (poliaus, kolonos) jungties sritis, kuri gali būti veikiamą ne tik lenkiamųjų ir kerpamųjų, bet ir tempiamųjų poveikių, kurios elgsenai gali įtakoti daugelis vidinių (matmenys, armavimas, medžiagų savybės ir kt.) ir išorės (apkrovos, jų pobūdis ir kt.) veiksnių. Prieita prie išvados, kad svarbiausias ir lemiantis plokštės su poliaus jungties stiprį yra kerpamasis veiksnys nuo kurio plokštė yra praspaudžiama. Šiam veiksniai teoriškai sudaryti gelžbetoninės plokštės ir kolonos jungties skaičiavimo metodą, kuris įvertintų skirtingų medžiagų (plienas, betonas) savybes, jų tarpusavio sąveiką, plokštės betone plyšių besikeičiantį pobūdį ir dar daugelį veiksnių yra labai sudėtinga (4 pav.). Dėl šios aplinkybės daugelio valstybių projektavimo normose gelžbetoninių plokščių praspaudžiamąjo stiprio apskaičiavimo metodai sudaryti eksperimentinių tyrimų pagrindu.



4 pav. Poliaus ir plokštės jungties suirimo pobūdžio schema

Vienas iš būdų, siekiant didinti nesijinės plokštės praspaudžiamąjį atsparį, skersinis įstrižo šlyties plyšio zonos armavimas. Šis konstrukcinis sprendinys žymiai padidina plokštės praspaudžiamą atsparį, bet dėl padidėjusio armatūros tankio didina konstrukcijos savikainą, bei komplikuoja betonavimo darbų technologiškumą. Kai tarpai tarp skersinės ir darbo armatūros maži,

jų užpildymas betonu yra sudėtingas ir gali būti nekokybiškas, todėl konstrukcijos patikimumas tampa abejotinas. Šios konstrukcijos sudėtingumą taip pat didina ganėtinai komplikuotas skersinės armatūros inkaravimas (5 pav.).



**5 pav.** Plokštės su poliumi jungties skersinio armavimo pavyzdys

Kitas jungties konstrukcijos sprendinys – tempiamoje plokštės zonoje įbetonuojamas armatūros žiedas. Šis sprendinys leidžia sumažinti įstrižo šlyties plyšio ir suirimo pobūdžio kampą. Padidėja kritinis praspaudimo perimetras, padidėja plokštės praspaudžiamasis atsparis (6 pav.).



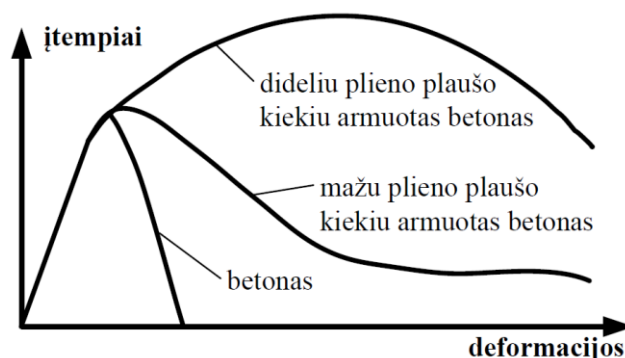
**6 pav.** Žiedinės armatūros įtaka suirimo pobūdžiui ir kritiniam perimetrui

Nurodytas konstrukcijos sprendinys iš dalies padidina jungties stiprį, bet palieka pagrindinę šios jungties problemą – greitą, akimirksninę irtį.

Kitas konstrukcinių sprendinių paminėtinas ir valcuoto plieno profilių (dvitėjų ar lovinių) elementų montavimas praspaudžiamos perimetro zonoje. Tai taip pat didina jungties stiprį, bet labai padidina konstrukcijos savikainą.

Pastaruoju metu, gelžbetoninėse konstrukcijose naudojamas dispersinis armavimas (plieno, polipropileno, stiklo, anglies ir kt. pluoštais), kuris pagerina betono savybes. Dispersinis armavimas nežymiai arba visai nepakeičia betono gniuždomojo stiprio, bet pakeičia betono suirimo pobūdį - iš trapaus į plastišką.

Tipinės betono ir dispersiškai armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės pateiktos 7 paveiksle (Kaklauskas G. ir kt. 2012).



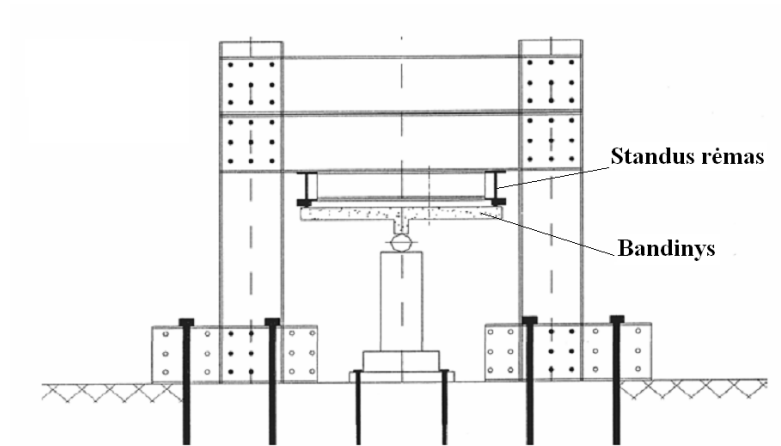
7 pav. Betono ir dispersiškai armuoto betono  $\sigma - \varepsilon$  priklausomybės

Pleišėjant dispersiškai armuotam betonui, pluoštas tempiamoje zonoje perima įtempius ir suvaržo plyšių plitimą. Šios plieniniu pluoštu dispersiškai armuoto plienbetonio savybės gali būti išnaudotos didinant pirmo plokštės ir polio jungties laikomąją galią.

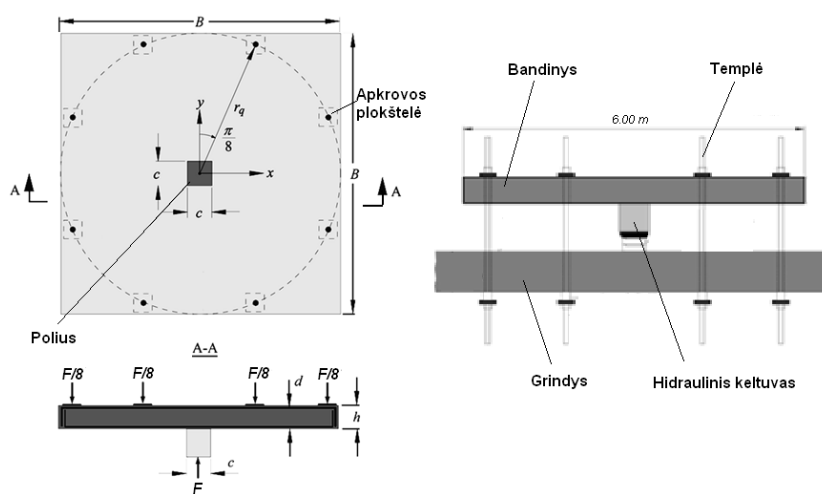
### 2.3. Plokštės praspaudžiamojo stiprio eksperimentinių tyrimų metodikų apžvalga ir analizė

Nors žinomi aptariamų jungties irties požymiai, nors jų pagrindu yra sudaryti plokštės praspaudžiamojo stiprio skaičiavimo metodai, tačiau negalime teigti, kad pastarieji yra visiškai teisingi. Esmė tame, kad didžioji dauguma aprašomo mazgo eksperimentinių tyrimų atlikta skirtingais bandiniais ir skirtingomis bandymo metodikomis. Ypač skirtingomis bandymų metodikomis atliktų jungties „plokštė – atrama“ eksperimentinio tyrimo rezultatų lyginimas gali būti beprasmiškas.

Iš literatūros šaltinių nustatyta, kad jungties „plokštė – atrama“ modelių eksperimentinių tyrimų metodikos ganėtinai skirtingos. Vienų (Binici B. et al. 2005) bandomų modelių plokštės kontūras atremtas į standų rėmą (traversą) ir (per imituojamą atramą ( polių ar koloną) gniuždoma iš apačios (8 pav.). Kitų (Muttoni A. 2008) bandomų modelių plokštė tvirtinama keliomis templėmis per atstumą  $r_q \approx 0,22L$  ( $L$ -atstumas tarp plokštės atraminės konstrukcijos – polių ar kolonų) nuo atramos (poliaus ar kolonos) vertikalios ašies ir hidrauliniu presu gniuždomos iš apačios (9 pav.).

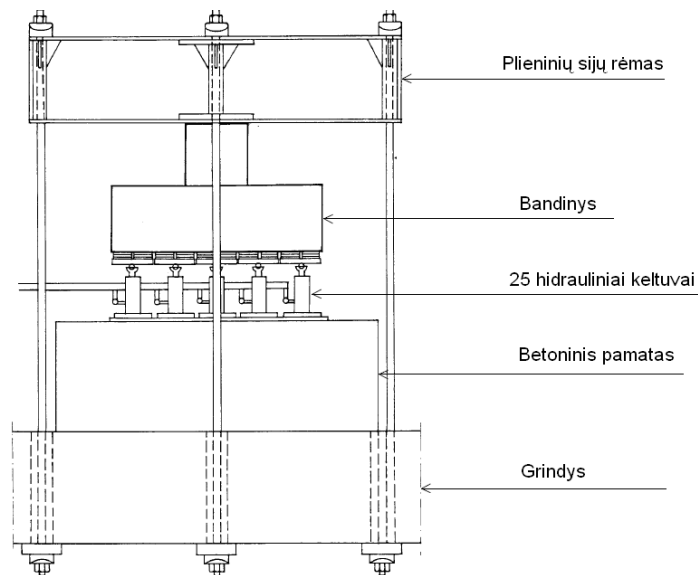


**8 pav.** Bandinio apkrovimas per standų rėmą



**9 pav.** Bandinio apkrovimas per templates

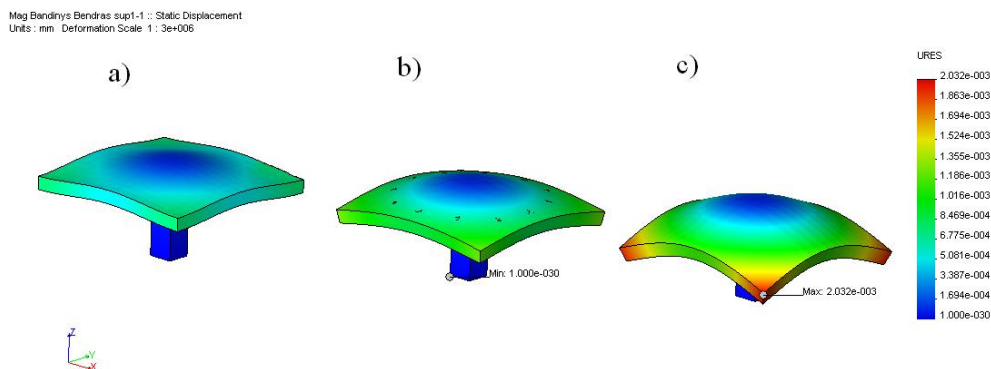
Trečiu atveju (Hallgren M., et al., 1998) bandinio plokštė per imituojamą atraminę konstrukciją atremiama į viršuje esantį standų rėmą ir iš apačios gniuždoma keliolika, tolygiai paskirstytų plokštės plote, hidraulinių daugiafunkciniu presu (10 pav.).



**10 pav.** Bandinio apkrovimas per tolygiai paskirstytus keltuvus

Aišku, kad bandytų modelių apkrovų pobūdžiai jų plokščių elgsenos ypatumai nėra adekvatūs besijės perdangos plokštės atremtos į grupę atramų ypatumams. Galima teigti, kad daugelyje atvejų atliekant modelių „plokštė-atrama“ eksperimentinius tyrimus buvo ignoruojama bandymo metodikos aksioma: pagalbines naudojamos priemonės – plokštės kontūru išdėstytos atramos, traversas jos viršuje, pakabos ar kt. – yra papildoma konstrukcijų sistema, kuri tyrimo etapuose turi įtaką gelžbetoninio bandinio elgsenai, jo supleišėjimo pobūdžiui ir plyšių raidai.

Tikslu įvertinti nurodytuose tyrimuose naudotus bandomosios apkrovos sukūrimo būdus (naudojant traversą, stygas ir rekomenduojamą), buvo atliktas darbe tyrinėto modelio matmenų ir tų pačių medžiagų kompiuterinis modeliavimas (11 pav.). Pirmajame modelyje bandomoji apkrova (nukreipta žemyn) perduodama per plokštės kontūru atremtą traversą. Antrajame modelyje bandomoji apkrova (per polių nukreipta į viršų) perduodama per apskritimo lankė išdėstytas 12 stygų. Trečiajame modelyje bandomoji apkrova (nukreipta žemyn), o jos kaip atliktų eksperimentinių modelių tyrimo metu. Visų trijų bandinių suminės apkrovos (aišku, ir reakcijos) buvo vienodos. Jos didumas priimtas toks, kad bandiniuose tempimo deformacijos nebūtų didesnės už ribines – iki plyšių atsiradimo.



**11 pav.** Modelių plokščių išlinkių pobūdžiai:

- a)- bandomoji apkrova perduodama traversu;
- b) - stygomis;
- c) – tyrinėtų modelių apkrovos pobūdis

Modelių plokštės įlinkių spalviniai tonai rodo, kad iki plyšių atsivėrimo momento, įlinkių pobūdžiai ir jų vertės ganėtinai skirtingos. Kai bandomoji apkrova perduodama traversu, plokštės kontūras įlinksta mažiausiai, lyginant su kitų modelių plokštės įlinkiais. Visų modelių plokštės įlinkių pobūdis atramos (polio) aplinkoj taip pat skirtingas. Sprendžiant pagal modelių plokštės įlinkių pobūdį, dėl bandomosios apkrovos perdavimo plokštei būdo, jose plyšiai atsivers skirtingais momentais. Vadinasi, jų raidos dinamika ir naujų plyšių atsivėrimas turėtų lemti plokštės įtempių bei deformacijų būvį, gali turėti įtaką modelio plokštės ardančiajai apkrovai ir irimo pobūdžiui.

Išvada - plokštės ir atramos (polio ar kolonos) jungties modelių kompiuterinio modeliavimo duomenys rodo, kad jų elgsenai turi įtaką bandomosios apkrovos perdavimo būdas.

#### **2.4. Normatyvinių plokštės praspaudimo skaičiavimo metodų apžvalga**

Įvairių šalių (STR 2.05.05, 2005; Eurocode 2, 2004; BS 8110, 1985; DIN 1045-1, 1999; ACI 318, 1995; CSA, 1984) gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normose pateikti nesijinės perdangos praspaudžiamojo stiprio apskaičiavimo metodai sudaryti ne teorinio modelio, bet eksperimentinių duomenų pagrindu. Eksperimentais nustatyta, kad plokštės praspaudžiamoji irtis įvyksta, kai įstrižųjų plyšių įtakoje susiformuoja praspaudžiamoji nupjautinė piramidė, kurios vienas pagrindas tapatus atramos formai ir plotui, o antrasis – keletą kartų didesnio ploto nei pirmasis. Eksperimentais nustatyta, kad praspaudžiamosios nupjautinės piramidės šoninės sudaromosios pobūdis priklauso nuo eilės veiksmių, kuriuos galima suskirstyti į pagrindinius ir šalutinius. Pagrindinei veiksmių grupei priskiriama: atramos forma, plokštės storis, betono stipris, skersinė armatūra, tempiamosios zonos armavimo intensyvumas, pavojingame pjūvyje įtempių pobūdis, išankstinis betono apspaudimas. Šalutinei veiksmių grupei priskiriami: armatūros diametras

ir jos paviršius, armatūros gmbinis (virbalinis) efektas, išorinių apkrovų pobūdis, atramos (kolonos) gniuždomojo efekto didumas ir kt.

Projektavimo norminiuose dokumentuose (STR 2.05.05, 2005; Eurocode 2, 2004; BS 8110, 1985; DIN 1045-1, 1999; ACI 318, 1995; CSA, 1984) pateiktuose plokščių praspaudžiamojo stiprio apskaičiavimo metoduose dažniausiai įvertinami tik pagrindiniai veiksniai. Reikia pastebėti, kad nurodytų projektavimo normų skaičiavimo metodams būdingas bendras bruožas - sąlyginai apibūdinama skersinė jėga, kurią atlaiko betonas plokštės pavojingojo pjūvio ploto vienetu  $V_{Rd,c}$ , jų veikimo plotas  $A = u \cdot d$ , įvertinami išilginės armatūros ir plokštės aukščio efektai. Kai nėra skersinės armatūros, praspaudžiamojo stiprio sąlyga

$$V_F \cdot \gamma_F \leq \frac{V_{Rd}}{\gamma_c}$$

ir

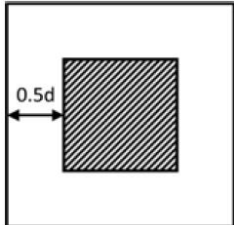
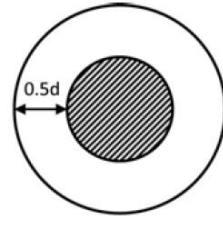
$$V_{Rd} = \tau_c \cdot k \cdot f(\rho_l) \cdot u \cdot d ;$$

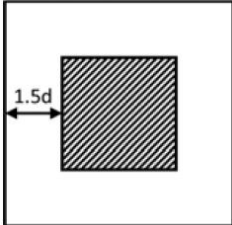
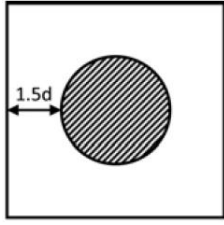
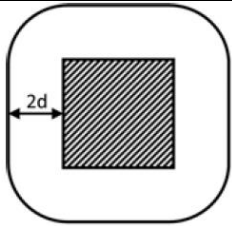
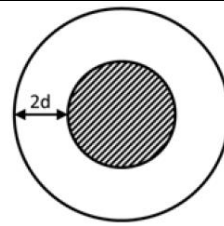
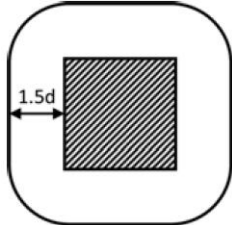
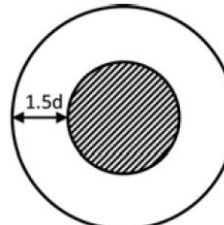
čia  $V_F \cdot \gamma_F$  – skaičiuojamoji skersinė jėga,  $V_{Rd}$  – betono charakteristinis praspaudžiamasis atsparis,  $\gamma_c$  – betono dalinis patikimumo koeficientas,  $k$  – plokštės aukščio efekto koeficientas,  $f(\rho_l)$  – išilginės armatūros įtakos laikomajai galiai funkcija,  $u$  ir  $d$  - atitinkamai kritinis perimetras ir plokštės naudingas aukštis.

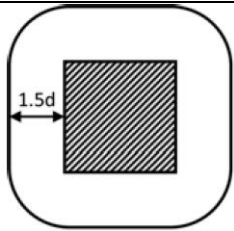
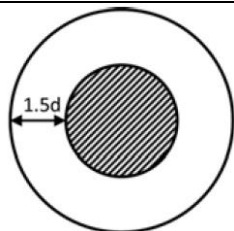
Šiame skyriuje apžvelgiama įvairių valstybių norminiuose dokumentuose pateiktų nesijinių perdangos plokščių praspaudžiamojo stiprio vidinių polių atrėmimo aplinkoje apskaičiavimo metodai, kai plokštėje nėra skersinės armatūros.

Poliaus ir plokštės praspaudžiamojo stiprio skaičiavimai, vadovaujantis įvairių šalių norminiais dokumentais, skaičiuojami skirtingai t.y. įvairūs veiksniai vertinami skirtingai, kai kurie jų iš viso nėra vertinami. 2 lentelė.

**2 lentelė.** Įvairių šalių norminiuose dokumentuose vertinami veiksniai

Norminis dokumentas (šalis)	Kritinis perimetras		Nominali šlyties jėga
	Kvadratinio skerspjūvio polius	Apskrito skerspjūvio polius	
ACI 318-08 (JAV)			$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} b_0 d$ $f'_c$ -cilindrinis betono stipris (MPa) Viršutinė riba $f'_c = 35$ MPa

	$b_0 = 4(c + d)$	$b_0 = \pi(c + d)$	ignoruojama $b_0$ - kritinis perimetras $d$ - efektyvus plokštės storis $c$ - poliaus plotis arba diametras
BS 8110-97 (Anglija)	 $b_0 = 4(c + 3d)$	 $b_0 = 4(c + 3d)$	$V_c = 0,79 \left( \frac{400}{d} \right)^{1/4} (100\rho)^{1/3} b_0 d$ $V_c$ vertė dauginama iš $\sqrt[3]{f_{cu}/25}$ kai $f_{cu} > 25 \text{ MPa}$ Dydžio faktorius $\sqrt[4]{400/d} \geq 1,0$ Viršutinė riba $f_{cu} = 40 \text{ MPa}$ ignoruojama $f_{cu}$ - charakteristinis kūbinis stipris (MPa) $\rho = 0,5(\rho_x + \rho_y)$ - vidutinis armavimo santykis 1,5d atstume
EC2-2003 (Europos sajunga)	 $b_0 = 4(c + \pi d)$	 $b_0 = \pi(c + 4d)$	$V_c = \frac{0,18}{\gamma} \left[ 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right] (100\rho f_{ck})^{1/3} b_0 d$ $f_{ck}$ - charakteristinis cilindrinis betono stipris (MPa) $\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y}$ lenkiamos armatūros santykis $\gamma_c = 1,5$ dalinis saugos koeficientas (laikoma 1,0) $\left[ 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right] \leq 2,0$ dydžio faktorius
STR2.05.05 2005	 $b_0 = 4c + 3\pi d$	 $b_0 = \pi(c + 3d)$	$V_c = \frac{0,18}{\gamma} \left[ 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right] (100\rho f_{ck})^{1/3} b_0 d$ $f_{ck}$ - charakteristinis cilindrinis betono stipris (MPa) $\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y}$ lenkiamos armatūros santykis

			$\gamma_c = 1.5$ dalinis saugos koeficientas (laikoma 1,0) $\left[1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right] \leq 2,0$ dydžio faktorius
DIN 1045-1 (Vokietija)	 $b_0 = 4c + 3\pi d$	 $b_0 = \pi(c + 3d)$	$V_c = 0,14 \left[1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right] (100\rho f_{ck})^{1/3} b_0 d$ $f_{ck}$ - charakteristinis cilindrinis betono stipris (MPa) $\rho = 0,5(\rho_x + \rho_y) < 0,4$ $f_{cd}/f_y < 0,02$ armatūros santykis $f_{cd} = 0,85f_{ck}$ $f_y$ - armatūros takumo riba (MPa) $\left[1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right] \leq 2,0$ dydžio faktorius

Šalių norminiuose dokumentuose numatyta, kad konstrukcija eksploatacijos metu turi atitikti reikalaujama patikimumą. Skirtingų valstybių projektavimo normose priima skirtingos apkrovų reikšmės ir skirtingus apkrovų dalinius patikimumo koeficientus. Daliniai patikimumo koeficientai gali turėti didelę įtaka galutiniams rezultatams. Priėmus tokią pačią nuolatinę ir kintama apkrovas, skaičiuojamoji jėga pagal skirtingas projektavimo normas gali skirtis iki 1,53 karto (3 lentelė) (CEB/FIB techninės rekomendacijos, 2001).

**3 lentelė.** Dalinių patikimumo koeficientų įtaka

Projektavimo normos	Nuolatinė apkrova: $g = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,25 \text{ m} = 6,25 \text{ kN/m}^2$ . Kintamoji apkrova: $q = 5 \text{ kN/m}^2$ .		
	$\gamma_g$	$\gamma_q$	$\gamma_F = \frac{(g\gamma_g + q\gamma_q)}{(g + q)}$
DIN 1045	1,0	1,0	1,0
EC2, MC90	1,35	1,5	1,42
BS 8110-97	1,4	1,6	1,49
STR 2.05.05:2005*	1,35	1,3	1,33
ACI 318-95	1,4	1,7	1,53

Nurodytų norminių dokumentų nuostatose priimta, kad plokštės atramos vietoje kritinis jos perimetras yra  $0,5-2,0 d$  atstumu nuo kolonos (ar polio). Visos šalys jungties skaičiavimo pagrindu priima paprastą "kritinio perimetro šlytis nuo tam tikros kritinės jėgos" metodą ir vertina tik svarbiausius parametrus. Antrasis šalių normų svarus skirtumas - kaip jos įvertina betono stiprį gniuždant  $(f_c)^n$  praspaudimo jėgai, kur  $n$  kinta nuo  $1/2$  iki  $1/3$ .

**4 lentelė.** Skaičiuojamojo praspaudimo stiprio priklausomybė nuo veiksnių (kartais)

Projektavimo normos	Veiksny							
	Naudingas perdangos aukštis		Kolonos matmenys		Išilginė armatūra		Betono stipris	
	$1,5d$	$2d$	$1,5a$	$2a$	$1,5 \rho_l$	$2 \rho_l$	$1,5 f_c$	$2 f_c$
DIN 1045	1,87	2,98	1,26	1,51	1,26	1,41	1,31	1,59
EC2, MC90	2,34	4,36	1,11	1,21	1,12	1,26	1,14	1,26
BS 8110-97	2,30	4,24	1,13	1,26	1,12	1,26	1,14	1,26
ACI 318-95	1,87	2,98	1,26	1,51	nevertinama	nevertinama	1,22	1,41

Pastaba. Naudingas perdangos aukštis ( $d$ ), kolonos skerspjūvio matmuo ( $a$ ), armavimo intensyvumas ( $\rho_l$ ) ir betono stipris ( $f_c$ ) išreikšti sąlyginiais dydžiais

Pateikti duomenys rodo, kad įvairių šalių gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normose jungties „plokštė – kolona (polis)“ praspaudžiamojo stiprio apskaičiavimo metodai šiek tiek skirtingi. Žinodami, kad plokštės praspaudžiamojo stiprio skaičiavimo metodai yra sudaryti eksperimentinių tyrimų duomenų pagrindu, galima teigti, kad tai yra dėl nepakankamos jungties „plokštė – kolona (polis)“ eksperimentinių tyrimo duomenų bazės. Šis faktas leidžia daryti išvadą, kad gelžbetoninės plokštės ir kolonos (polio) jungties eksperimentiniai tyrimai yra aktualūs, ypač kai plokštės betonas yra aukštos klasės (Bompa Dan-V., et al. 2009).

### 3. BESIJĖS GELŽBETONINĖS PLOKŠTĖS IR POLIŲ JUNGTIES SKAIČIUOJAMIEJI MODELIAI, JŲ ANALIZĖ

#### 3.1. Skaičiuojamieji modeliai ir jų apžvalga

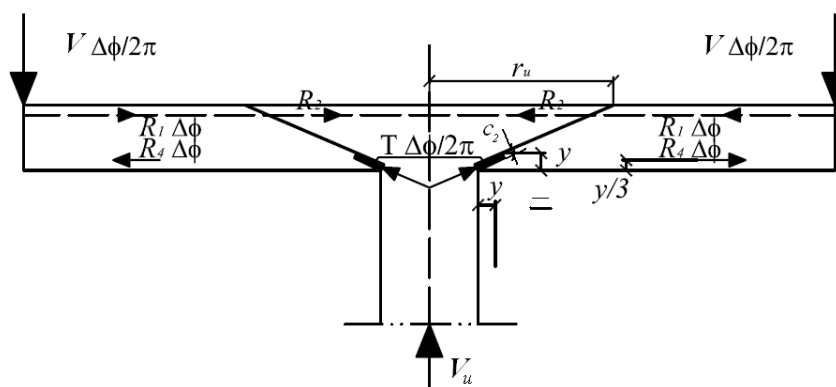
Besijės gelžbetoninės plokštės praspaudimas pasireiškia, kai koncentruota jėga (per atraminę konstrukciją) veikia santykinai mažame plote. Plokštės irimo metu praspaudtos dalies perimetras vadinamas praspaudžiamuoju perimetru. Praspaudimo mechanizmas yra trapus (pasireiškiantis be jokių išpėjamųjų ženklų ir su staigiu laikomosios galios sumažėjimu), todėl siekiant išvengti neprognozuojamos irties buvo bandyta teoriniu pagrindu sukurti įvairius skaičiavimo metodus.

Gelžbetoninės plokštės praspaudžiamą stiprio skaičiavimai pagal įvairių šalių norminius dokumentus rodo, kad nėra vieningos nuomonės apie praspaudžiamąjį reiškinį ir apie jungties „plokštė-atrama (polis)“ skaičiuojamąjį modelį. Jo sudarymui buvo taikoma įvairių teorijų nuostatos – plastiškumo, sudėtinių strypų, irimo mechanikos ir kt.- tačiau vieningos nuomonės modeliams aprašyti taip ir nebuvo rasta. Tai rodo, kad plokštės praspaudimo reiškinys nėra iki galo ištirtas ir reikalauja papildomu eksperimentiniu bei teoriniu tyrimu.

Šiame skyriuje pateikiama klasikinių plokštės praspaudimo skaičiavimo modelių sukurtų Kinnunen S., Nylander B. (1960), Braestrup N. V., Nielsen M. P. (1976) ir kt. „Moe J. (1963), Broms C. E. (1990), bei Georgopoulos T. (1989) apžvalga.

#### 3.1.1. Kinnunen S. ir Nylander B. plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis

Kinnunen S. ir Nylander B. praspaudimo modelis aiškiausiai paaikškina praspaudimo mechaniką – vyksmo procesą (12 pav.). Vėliau šio modelio pagrindu buvo pasiūlyti ir kiti modeliai (Broms, C. E. 1990; Halgren, M. 1996 ir kt.).



12 pav. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Kinnunen S., Nylander B.

Kinnunen S. ir Nylander B. požiūriu, praspaudimo modelis sudaro tam tikro standaus sektoriaus riba - praspaudimo kūgis - susiformavęs sąlyginis kapitelis, kuris prasideda nuo nupjautinio kūgio krašto ir baigiasi susiformavusiu plyšiu (Bompa Dan-V. et al. 2009).

Plokščių be skersinės armatūros praspaudžiamasis stipris yra apskaičiuojamas pagal dvi lygtis:

- 1) Tangentinėms deformacijoms, gniuždomoje zonoje, pasiekus ribinę reikšmę. Tuomet praspaudimo jėga apskaičiuojama iš vertikalių jėgų pusiausvyros lygties:

$$V_{c,u} = \kappa \cdot \pi \cdot \eta \cdot d^2 \cdot y \frac{1 + \frac{2y}{\eta}}{1 + \frac{y}{\eta}} \sigma_{cu} f(\alpha);$$

čia  $\eta = \frac{c_2}{d}$ ,  $c_2$  - sąlyginio kapitelio plotis ir  $f(\alpha) = \frac{\tan \alpha (1 - \tan \alpha)}{1 + \tan^2 \alpha}$ ,  $\kappa$  - koeficientas

įvertinantis išilginės armatūros įtaką.

- 2) Išilginiai armatūrai pasiekus takumo ribą. Kritinė praspaudimo jėga apskaičiuojama iš momentų pusiausvyros lygties:

$$V_{s,u} = \kappa \cdot 4\pi \cdot \rho_l \cdot dr_f \cdot \left[ 1 + \ln \left( \frac{\delta d}{2r_u} \right) \right] \frac{1 - \frac{y}{\delta}}{\delta - \eta};$$

čia  $\delta = \frac{l}{d}$ ,  $l$  - plokštės ilgis.

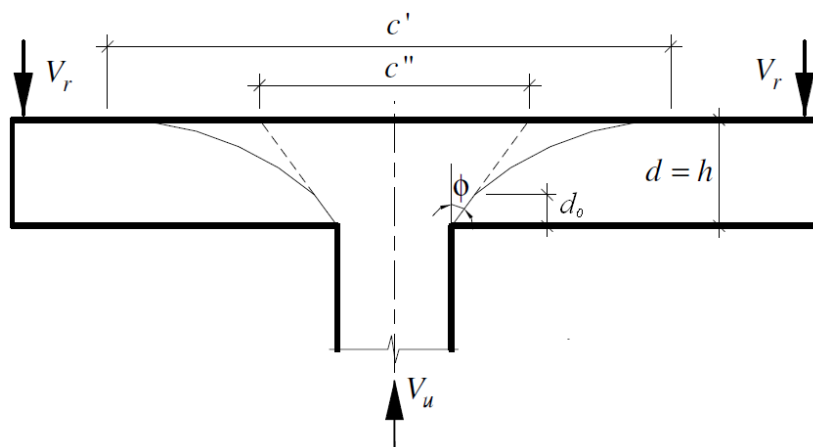
Tai buvo pirmas modelis, kuris gerai atitiko bandymų rezultatus. Kinnunen S. ir Nylander B. mechaninis modelis remiasi 61 plokštės elementų sujungtų su kolona (poliumi) bandymų rezultatais (1960 m.) Šio modelio pagrindas yra daugiausia grindžiamas bandymų stebėjimais ir netiesine baigtinių elementų analize.

### 3.1.2. Braestrup N. ir Nielsen M. ir kt. plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis

Braestrup N. V., Nielsen M. P. ir kt. teorinis modelis (13 pav.) pirmą kartą paskelbtas 1976 m. remiasi plastiškumo teorija (Bompa Dan-V. et al. 2009). Autoriai daro prielaidą, kad betonas yra idealiai

plastika medžiaga, kurios tempiamasis stipris labai mažas  $\left( f_{ct} = \frac{f_c}{400} \right)$ , o irimo kriterijus remiasi

Kulono dėsnio  $(\tau - \sigma \tan \phi - c = 0)$ .



**13 pav.** Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Braestrup N. V., Nielsen M. P. ir kt.

Braestrup N. V., Nielsen M. P. ir kt. Plokštės praspaudimo stiprį siūlo skaičiuoti taip:

$$V_u = 0,5\pi \cdot f_c \left( d_0 (c'' + d_0 \tan \phi) \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} - \left[ k_2 C (d - d_0) + k_2 \left( \frac{c'}{2} \sqrt{\frac{c'^2}{4} - C^2} - AB \right) - k_3 \left( \frac{c'^2}{4} - A^2 \right) \right] \right);$$

čia  $k_2$ ,  $k_3$  - medžiagos konstantos,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  - koeficientai nustatomi iteracijos būdu.

Šiame modelyje, nėra vertinami kai kurie veiksniai (išilginė armatūra, dydžio efektas), be to jis neatsispindi suirimo mechanikos.

### 3.1.3. Moe J. plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis

Moe J. modelis, sukurtas 1963 metais, šio modelio pagrindu sudarytas pirmasis Amerikos norminis dokumentas ACI-318, kuriame pateikiamos rekomendacijos plokštės praspaudimo stipriui skaičiuoti. Modelis buvo sukurtas remiantis bandymų rezultatais ir grindžiamas lenkiamo elemento mechanika (Marčiukaitis G., ir kt. 2010). Šis modelis praspaudimo jėgą susieja su plokštės lenkimo ir atsparumo skersiniai jėgai stipriais.

$$\frac{V_u}{V_{shear}} + A \frac{V_u}{V_{flex}} = 1;$$

čia  $A$  – empirinis koeficientas. Atlikus pertvarkymus, praspaudžiamasis stipris išreiškiamas:

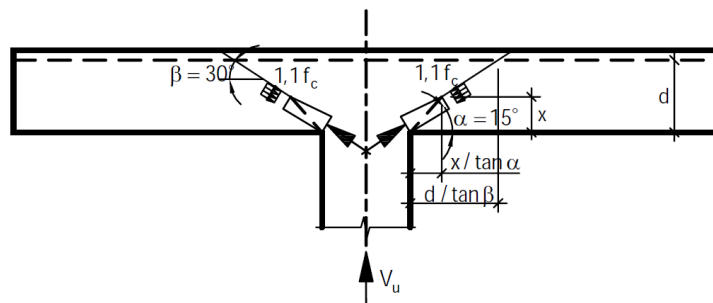
$$V_u = \frac{1.246(1 - 0.059\eta)u \cdot d \sqrt{f_c}}{1 + \frac{0.436}{V_{flex}} u \cdot d \sqrt{f_c}},$$

čia  $V_{flex} = C\omega(1 - 0,59\omega) \cdot d^2 \cdot f_c$ ,  $\omega = \rho_l \frac{f_y}{f_c}$ ,  $C$  – koeficientas, lygus santykiui tarp skaičiuojamojo lenkimo momento ir reikšmės  $V_{flex}$ .

Šis modelis remiasi empirinėmis formulėmis ir neįvertina medžiagos savybių, plokštės ir poliaus geometrijos. Modelio principus panaudojo ir kiti autoriai (Theodorakopolus, D. D. 2002).

### 3.1.4. Broms C. E. (1990) plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis

Broms C. E., remdamasis Kinnunen S. ir Nylander B. (1960) modelio analogija ir kai ką modifikavęs suformulavo du suirimo kriterijus (14 pav.).



14 pav. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Broms C. E.

Pagal pirmąjį suirimo kriterijų, tangentinėms deformacijoms gniuždomojoje zonoje pasiekus ribinę reikšmę  $\varepsilon_{cpu}$ , gniuždomoji zona yra nukerpama. Ribinės deformacijos  $\varepsilon_{cpu}$  išreiškiamos remiantis praspaudimo ir gniuždomų etaloninių cilindrų eksperimentinių duomenų regresinės analize. Jos priklauso nuo plokštės gniuždomos zonos  $x_{cpu}$ :

$$\varepsilon_{cpu} = 0,0010 \left( \frac{25}{f_c} \right)^{0,1} \left( \frac{0,15}{x_{cpu}} \right)^{1/3},$$

$$x_{cpu} = dn\rho_l \left( \sqrt{1 + \frac{2}{n\rho_l}} - 1 \right),$$

čia:  $n = E_s / E_c$ ,  $E_c$  – deformacijų modulis, atitinkantis sąlygines deformacijas 0,001;  $\rho_l$  – išilginės armatūros kiekis;  $f_c$  – betono gniuždomasis stipris. Pagal šiuos duomenis, išsireikštus įtempius armatūroje ( $\sigma_s = E_s \varepsilon_{cpu} (d - x_{cpu}) / x_{cpu}$ ) praspaudimo stipris apskaičiuojamas taip:

$$V_u = \rho_l d^2 \sigma_s \left( 1 - \frac{x_{cpu}}{3d} \right) \frac{8\pi}{2 \ln c / B + 1 - B^2 / c^2},$$

čia:  $B$ ,  $c$  – atitinkamai kolonos ir kritinio perimetro skersmenys;  $d$  – naudingasis plokštės aukštis.

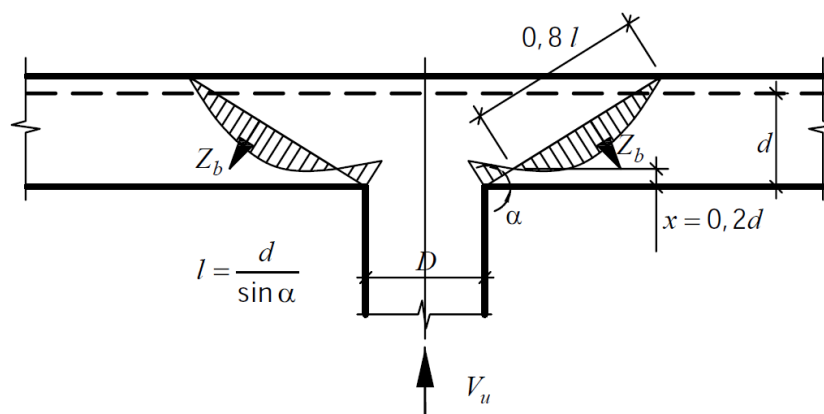
Skaičiuojant pagal antrąjį suirimo kriterijų, teigiama, kad suirimas įvyksta nuo radialinių gniuždymo įtempių  $\sigma_{cu}$  sąlyginiame kapitelyje, pasiekus  $1,1 f_c$  ribą. Tačiau gniuždomosios zonos aukštis  $x_{cpu}$  nustatomas kitaip: atsižvelgiant ne į armatūros tamprumo ir betono deformacijų modulių santykį  $n = E_s/E_c$ , o į armatūros ir betono tamprumo modulių santykį  $n_0 = E_s/E_c$ . Tuomet praspaudimo stiprio sąlyga yra tokia:

$$V_u = \sigma_{cu} t \sin \alpha u \left( \frac{0,15}{t} \right)^{1/3},$$

čia  $t = x/\cos \alpha$  – gniuždomo sąlyginio kapitelio plotis (Marčiukaitis G. 2010).

### 3.1.5. Georgopoulos T. plokštės praspaudimo skaičiuojamasis modelis

Suirimo kriterijus, Georgopoulos T., požiūriu santykiniai svarbiausi tempimo įtempiai įstrižame pjūvyje (15 pav.). Šiame modelyje daroma prielaida, kad gniuždomosios zonos aukštis nekinta ir visuomet lygus  $x = 0,2d$ . Praspaudimo jėgą  $V_u$  apskaičiuojama iš vertikaliųjų jėgų pusiausvyros lygties, darant prielaidą, kad  $V_u = Z_b \cos \alpha$ .



15 pav. Praspaudimo skaičiavimo modelis pagal Georgopoulos T.

Išilginis armavimas įvertintas per praspaudimo kūgio kampą  $\alpha$ , gautą iš eksperimentinių duomenų regresinės analizės:

$$\tan \alpha = \frac{0,056}{\rho_l f_y / f_{c,cube}} + 0,3$$

čia  $f_y$  – armatūros stipris;  $f_{c,cube}$  – kubinis betono stipris;  $\rho_l$  – išilginės armatūros kiekis.

Turint praspaudžiamo kūgio posvyrio kampą, betono tempimo įtempius ir nustačius tempimo įtempių sąlyginę epiūrą, praspaudimo stiprį galima išreikšti taip:

$$V_u = 4,13\sigma_{ct}d^2 \cot\alpha \left( \frac{D/d}{2} + 0,2 + 0,35\cot\alpha \right),$$

čia  $\sigma_{ct} = 0,17(f_{c,cube})^{2/3}$ ,  $d$  - naudingasis plokštės aukštis;  $D$  - kolonos skersmuo (Šalna R.,2008).

Pastaraisiais metais, evoliucionuojant irimo mechanikai ir baigtinių elementų metodui, buvo sukurti nauji plokštės praspaudimo modeliai. Tarp klasikinių ir naujų praspaudimo skaičiavimo modelių skirtumas tėra šlyties perdavimo mechanizmo ir betono tempiamojo stiprio veiksmų įvertinimas. Manoma ir teigiama, kad galutinės išvados apie tikrąją veiksmų įtaką praspaudžiamos gelžbetoninės plokštės elgsenai ir irimo mechanikai dar nėra (Bompa Dan-V., et al. 2009).

Kita svarbi tyrimų kryptis būtų didelio stiprio betono ar plieno pluošto panaudojimas praspaudžiamose plokštėse. Šių eksperimentinių tyrimų duomenų bazė yra labai kukli.

### 3.2. Skaičiuojamųjų modelių analizė ir išvados

Kaip rodo teorinių ir eksperimentinių duomenų palyginimas (5 lentelė), tiksliausias yra Broms C. E. modelis. Jis yra sukurtas pagal 1-ojo modelio analogiją atlikus tam tikrų parametru modifikavimą. Duodami du suirimo kriterijai, tačiau kai kurių parametru įvertinimas empiriniais koeficientais skaičiavimą padaro sudėtingą (Marčiukaitis G. 2010).

**5 lentelė.** Eksperimentinių ir teorinių plokščių praspaudimo reikšmių palyginimas

Eil.Nr.	Autorius	Eksperimentų skaičius $n$	Vidurkis $\mu_x$	Kvadratinė nuokrypa $\sigma_x$	Variacijos koeficientas $\nu$
1	Kinnunen S., Nylander B. 1960	200	1,174	0,304	0,259
2	Braestrup N. V. <i>et.al.</i> 1976	200	0,864	0,403	0,486
3	Moe J. 1961	200	1,057	0,226	0,214
4	Broms C. E. 1990	39	1,034	0,048	0,047
5	Georgopoulos T. 1989	200	1,167	0,315	0,270

Šiuo metu dviejose iš svarbiausių teorijų pateikiamos priešingos vizijos.

Viena mokslininkų grupės (Menétrey, Ph.; Georgopoulos,T. ir kt.) įsitikinimu, kad suirimas įvyksta nuo tempimo įtempių įstrižame kritinio perimetro pjūvyje.

Kita mokslininkų grupė (Kinnunen, S.; Nylander, B.; Halgren, M. ir kt.) skaito, kad suirimas įvyksta kai svarbiausieji įtempiai nukerpa gniuždomą zoną.

Kaip matome ir čia nėra vieningos nuomonės, nors antrosios grupės mokslininkų vizija daug geriau atspindi besijės plokštės suirimo pobūdį. Kita vertus, dauguma mokslininkų besijės plokštės praspaudimo fenomeną analizuoja kaip plokščią uždavinį t.y. dviašį įtempių būvį, nors realybėje gniuždomoje zonoje veikia triašis įtempių būvis (Šalna R. 2008).

Išvada – mokslininkai neturi bendrosios nuomonės apie gelžbetoninės plokštės praspaudžiamąjį vyksmą, teorinius skaičiuojamojo modelio sudarymo principus. Neatsitiktinai praktiniai plokštės praspaudžiamąjo stiprio skaičiavimo metodai sudaryti eksperimentinių tyrimo duomenų pagrindu.

## **4. BESIJĖS GELŽBETONINĖS PLOKŠTĖS BEI POLIŲ JUNGTIES MODELIŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS**

### **4.1. Eksperimentinio tyrimo tikslas**

Literatūros šaltinių duomenys rodo, kad besijė gelžbetoninės perdangos plokštės ir jos atramos (kolonos ar polio) jungtis dar nepakankamai išnagrinėtas derinys, kuriame svarbiausia problema yra praspaudžiamasis veiksnys. Žinoma, įvairiose šalyse atlikta nemažai nurodytos jungties eksperimentinių tyrimų, tačiau dėl bandymo metodikų, bandinių ir jo matmenų bei medžiagų (armatūros ir betono) skirtumo sudėtinga nustatyti vidinių ir išorės veiksnių dėsningumus ir priklausomybę.

Dėl šių aplinkybių nuspręsta magistrantūros baigiamajame darbe nagrinėti ir atlikti statinio konstrukcijų sistemoje esančios vidinės atramos (kolonos ar polio) ir gelžbetoninės plokštės jungties modelių eksperimentinius tyrimus, kai bandiniuose varijuojama tempiamosios armatūros kiekis, betono stipris ir dispersiniu armavimu (plieniniu plaušu)

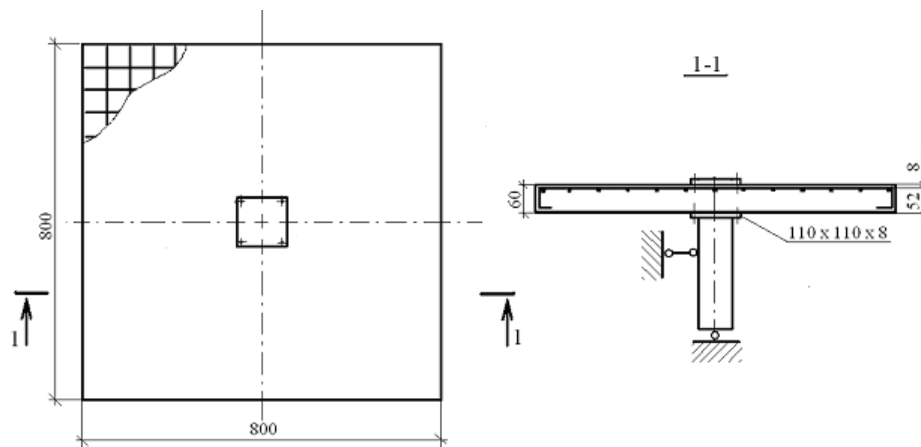
Pagrindiniai darbo tikslai yra šie:

1. Nustatyti pirmojo plyšio atsivėrimo vietą ir jo pobūdį, šiuo momentu bandinio plokštės įlinkius, irimo pobūdį, kai modelio plokštėje nėra armatūros
2. Nuo bandomosios apkrovos nustatyti modelio plokštės įlinkių pobūdį iki suirimo momento.
3. Nustatyti modelio plokštėje plyšių raidą ir supleišėjimo pobūdį bandymo etapuose.
4. Nustatyti modelio ardomąją apkrovą ir irimo pobūdį.

### **4.2. Bandomieji modeliai**

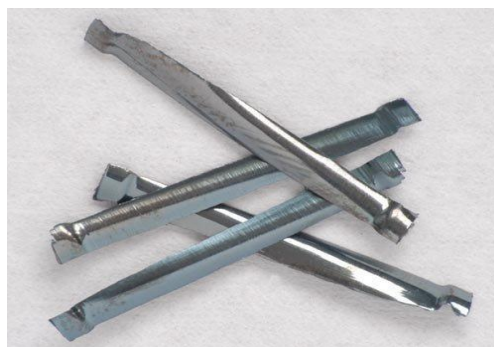
Bandomųjų modelių matmenis lėmė bandomosios įrangos (20 t galios presas) galimybės ir tikslas sumodeliuoti tam tikru masteliu realios konstrukcijos „plokštė-kolona“ jungties fragmentą. Įvertinant minėtas aplinkybes, bandiniai buvo pagaminti masteliu 1 : 4, t.y. keturis kartus mažesni nei jie būtų realių matmenų.

Bandomo modelio plokštės matmenys priimti įvertinant prielaidą, kad kai kolonų (ar polių) žingsnis šeši metrai, tai plokštės tarpatramio ketvirtadaliuose lenkiamieji momentai artimi nuliui, kai jos apkrova yra tolygiai išskirstytas krūvis. Bandomojo modelio konstrukcija ir matmenys nurodyti 16 paveiksle.



**16 pav.** Bandomo modelio konstrukcija ir matmenys

Buvo pagaminti ir išbandyti aštuoni „plokštė – kolona“, jungties modeliai. Šešių modelių plokštės be įprastinio tempiamosios zonos armavimo buvo dispersiškai armuotos plieninių plaušu. Priimant plieninio plaušo kiekį (arba dispersinio armavimo procentą) buvo įvertinta kitų tyrėjų duomenys, kad tikslingai optimalus plieninio plaušo kiekis  $40..50 \text{ kg/m}^3$ . Šešių modelių plokštės betono sudėtyje buvo  $45 \text{ kg/m}^3$  plieninio plaušo (armavimo intensyvumas 0,6%), kurio ilgis 25 mm, jo plieno stipris 700 MPa (17 pav.).



**17 pav.** Plieno drožlių plaušas

Bandomų modelių plokštės tempiamosios zonos armuotos  $\text{Ø}6$  mm, S400 klasės plieno armatūros strypais. Trijų modelių plokščių armavimo intensyvumas 1,0 %, tiek pat plokščių su 1,8 % armavimu. Plokštėse skersinės armatūros nebuvo. Bandinių betono užpildas smulkiagrūdis.

Bandinių betono kubinis stipris buvo skirtingas – nuo 49,70 iki 60,09 MPa.

Bandomųjų modelių gamybos supaprastinimui jų gelžbetoninės plokštės pagamintos atskirai ir tik prieš modelių bandymą prie jų keturiais varžtais buvo pritvirtinamas plieninis stulpelis imituojantis poli.

## 6 lentelė. Bandinių parametrai

Bandinys	Betonavimas							
	1-asis		2-asis		4-asis	5-asis	3-asis	
	$\rho_l=1,0\%$	$\rho_l=1,8\%$	plieno pluoštas	+ plieno pluoštas	+ plieno pluoštas	+ plieno pluoštas	plieno pluoštas	+ plieno pluoštas
Kodas	1-A1-0	1-A2-0	2-A0-F	2-A1-F	4-A2-F	5-A2-F	3-A0-F	3-A1-F
Prizminis stipris $f_{cm}$ , $f_{sfrm}$ MPa	52,2	52,2	44,1	44,1	47,9	53,0	46,1	46,1
Kub. stipris $f_{ck,cube}$ , $f_{sfr,cube}$ MPa	60.09	60.09	53.47	53.47	49.70	62.46	57.01	57.01

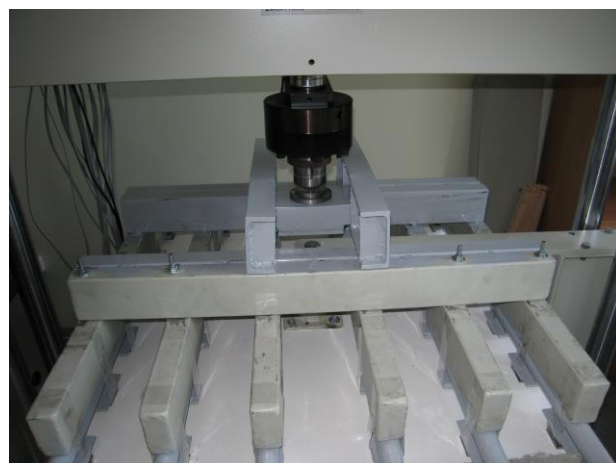
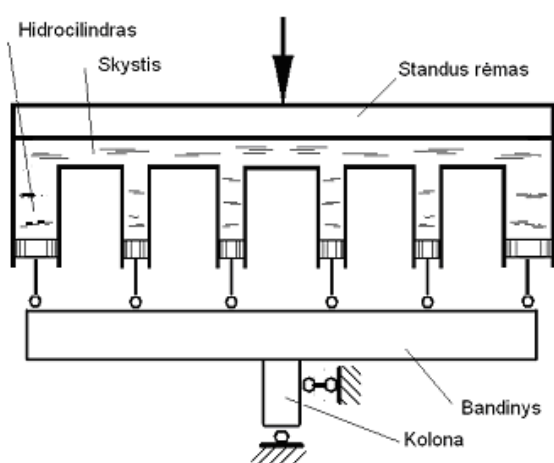
Pastaba. Bandinių kode žymės reiškia: pirmas skaitmuo – betonavimo Nr., antrasis žymuo – armavimo intensyvumas (kai 0, tai armatūros nėra, kai 1, tai 1% , kai 2 tai 1,8%), trečiasis žymuo – 0, tai nėra plieno plaušo, kai F, jo yra.

### 4.3. Modelių bandymo įranga ir metodika

Atliekant pirmo besijęs gelžbetoninės perdangos ir kolonos (polio) jungties modelio tyrimus, privalom jį susieti su visa pirmo konstrukcijos sistema. Žodžiu, modelio bandomosios apkrovos sukūrimas, kad jos dydis, pobūdis ir efektai (įrašos ir įlinkiai) jame atitiktų visos perdangos plokštės efektams, kai jos apkrova tolygiai paskirstyta, yra sudėtinga. Viena aišku, modelio bandomoji apkrova turėtų būti ne tik tolygiai išdėstyta jo plote, bet ir besikeičiančio didumo sutelktinės apkrovos veikiančios jo kontūru. Antra, apkrovos pobūdis neturėtų priklausyti nuo apkrovą perduodančios sistemos ir bandomojo modelio deformacijų.

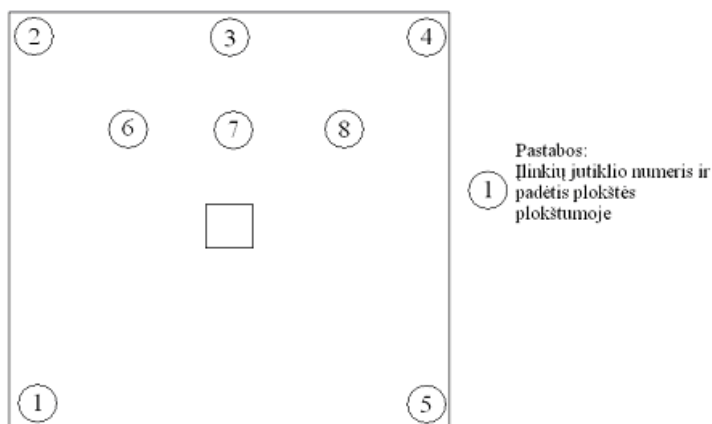
Kompiuteriniu modeliavimu nustatyta, kad nuo vienodų sutelktinių (tolygų sloginį imituojančių) apkrovų, abejomis linkmėmis išdėstyto žingsniu 156 mm, perdangos konstrukcijos visos plokštės modelio ir bandinio modelio plokštės įlinkių (kai deformacijų moduliai vienodi) didumai tose pačiose vietose beveik vienodi, kai pastarojo kontūru veikia sutelktinės apkrovos tris kartus didesnės nei jo ribose.

Modelio aptartos bandomosios apkrovos realizavimui, kad jos pobūdis nesikeistų visuose bandymo etapuose, kad bandymui naudota apkrovos perdavimo įranga neturėtų įtakos modelio elgsenai, buvo sukonstruota ir pagaminta apkrovos perdavimo sistemos specialus traversas (18 pav.). Jos darbo principas paprastas – bandymo preso veikiamo uždara hidraulinė apkrovos perdavimo sistema, kuri ant bandinio buvo atremta 36 cilindriškais su dviejų skirtingų skerspjūvių stūmokliais. Bandomo modelio kontūre atremtų cilindriškų stūmoklių plotas buvo tris kartus didesnis nei esančių jo vidinėje aplinkoje. Bandomo modelio kontūru apkrovą perdavė 20 vnt. stūmoklių, o jo ribose – 16 vnt.



**18 pav.** Apkrovos paskirstymo principinė schema ir bandomo modelio bendras vaizdas

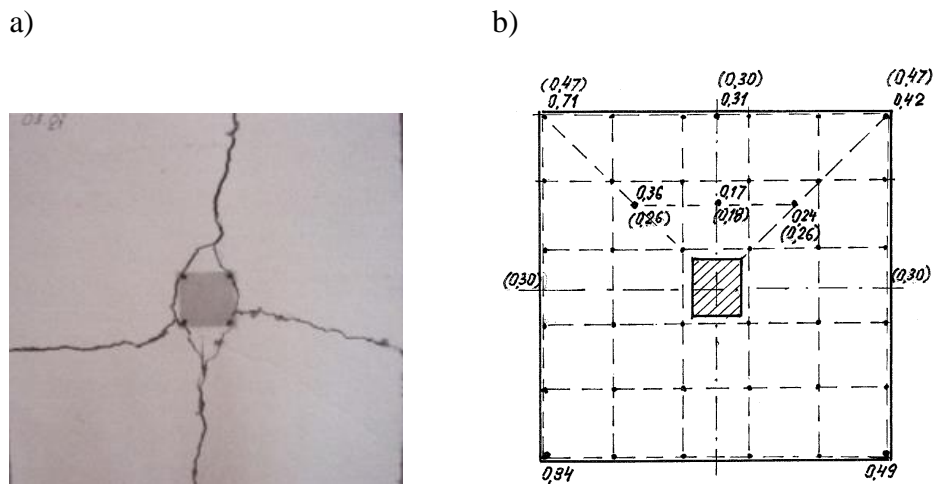
Bandymo metu modelio plokštės įlinkiai matuoti aštuoniose vietose ir registruoti SPYDER sistemos įlinkio jutikliais (19 pav.). Preso darbas automatizuotas, todėl buvo nuspręsta modelius bandyti trumpalaike nuosekliai didinama apkrova. Apkrovos didinimo greitis 200 N/s. Modelių (su armatūra) bandymo trukmė, priklausomai nuo jų suirimo, tęsdavosi 10-15 min.



**19 pav.** Įlinkių jutiklių išdėstymo schema

## 5. NESIJINĖS GELŽBETONINĖS PLOKŠTĖS IR POLIŲ JUNGTIES MODELIŲ EKSPERIMENTINIO TYRIMO REZULTATAI, JŲ ANALIZĖ

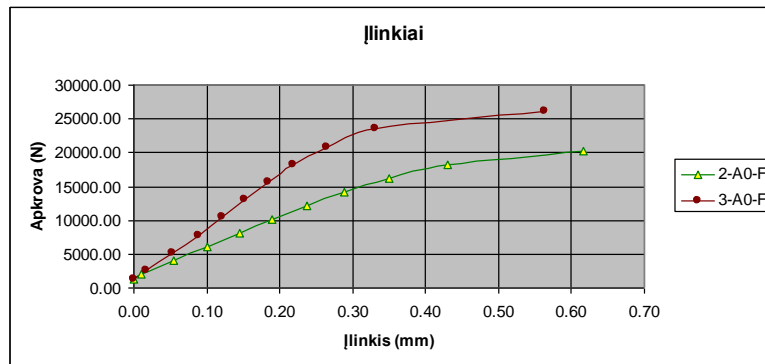
Du bandomieji modeliai (2-A0-F ir 3-A0-F) buvo be išilginės armatūros, tačiau dispersiškai armuoti. Jų bandymo tikslas buvo nustatyti plokštėje pirmojo plyšio atsivėrimo vietą, jo raidos dinamiką ir modelių plokštės suirimo pobūdį (20 pav.). Pirmojo plyšio atsivėrimo momentas buvo stebimas vizualia ir fiksuojama filmavimo kamera.



20 pav. Modelio 2-A0-F irimo pobūdis ir įlinkiai (a) ir (b) modelių 2-A0-F ir 3-A0-F (pastarojo skliaustuose) įlinkiai suirimo metu

Sprendžiant pagal modelio plokštės įlinkių vertes, buvo nustatyta, kad jos irimo vyksmas prasideda polio skerspjūvio kampo srityje. Šioje plokštės vietoje atsivėrė plyšys statmenas plokštės įžambinei. Šių ir greta (kito kolonos kampo srityje) esančių plyšių viršūnėms susijungus, susiformavo bendras plyšys, kurio linkmė – plokštės kontūro briaunos vidurys. Modelio betoninės plokštės nurodytą irimo vietą ir eigą patvirtino irimo momento filmuota medžiaga. Bandyto modelio 3-A0-F plokštės irimo pobūdis kaip 2-A0-F modelio.

Modelių 2-A0-F ir 3-A0-F ardančiosios apkrovos atitinkamai 20,31 ir 26,13 kN, santykinės ardančiosios apkrovos  $V_{exp}/(f_{strem} A_{c,eff})$  atitinkamai 0,0110 ir 0,0136.



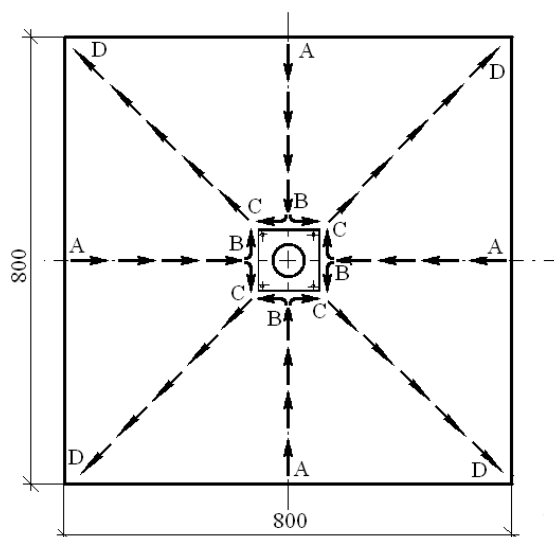
**21 pav.** Modelių (be išilginės armatūros, bet su plieno plaušu) plokštės kampų vidutiniai įlinkiai

Modelių plokštės kampų įlinkių pobūdis ir vertės šiek tik skirtingos – tai plokštės plienbetonio deformacijų modulio įtaka. Modelio 2-A0-F plienbetonio deformacijų modulio vertė 33,50 MPa, o modelio 3-A0-F - 35,49 MPa. Visiškai suprantama – jei plienbetonio deformacijų modulis didesnis, tai funkcijos  $F = F(u_z)$  grafiko posvyris horizontaliosios ašies atžvilgiu yra mažesnis, lyginant su silpnesniu plienbetoniui, kurio deformacijų modulis mažesnis.

Bandinių, kurių tempiamosios zonos armuotos armatūra, bandymo tikslas :

- nustatyti plyšių atsivėrimo momentą , jų raidą ir pobūdį bandymo etapuose;
- nustatyti įlinkių vertes ir pobūdį bandymo eigoje;
- nustatyti modelių plokštės irimo pobūdį;
- nustatyti modelių plokštės irimo apkrovų didumus.

Nustatyta, kad pirmieji plyšiai, kaip bandiniuose su nearmuotomis plokštėmis, atsivėrė polio kampo srityje statmenai plokštės įžambinei.



**22 pav.** Modelių plokštėse plyšių raidos kryptys ir etapai

Modelių, kurių plokštės buvo su armatūra, plyšių atsivėrimo vieta, jų raida buvo panašios. Apibendrintai galima išskirti pagrindinius keturis plyšių vystymosi etapus (22 pav.):

1-as etapas. Plyšiai *AB* atsiveria ir vystosi pradiniam bandymo etape.

2-as „ „ . Plyšiai *BC* formuojasi polių kontūro srityje. Labiausiai praplatėjus plyšiui *BC*, plyšiai *AB* užsiveria.

3-as „ „ . Didėjant plyšiams *BC* , atsiveria *CD* plyšiai .

4-as „ „ . Modelio plokštės irtis įvyksta staiga, ne ilgesniam kaip 0,04 sekundės laiko intervale. Suaižėjant plokštės paviršiui praspaudžiamoji perimetro aplinkoje (23 pav.).



**23 pav.** Modelio irtis 0,04 sekundės intervale fragmentas

Modelio su betonine plokšte bandymo tikslas buvo nustatyti joje pirmojo plyšio atsivėrimo, jos irties ir įlinkių pobūdį šiuo momentu (20 pav.).

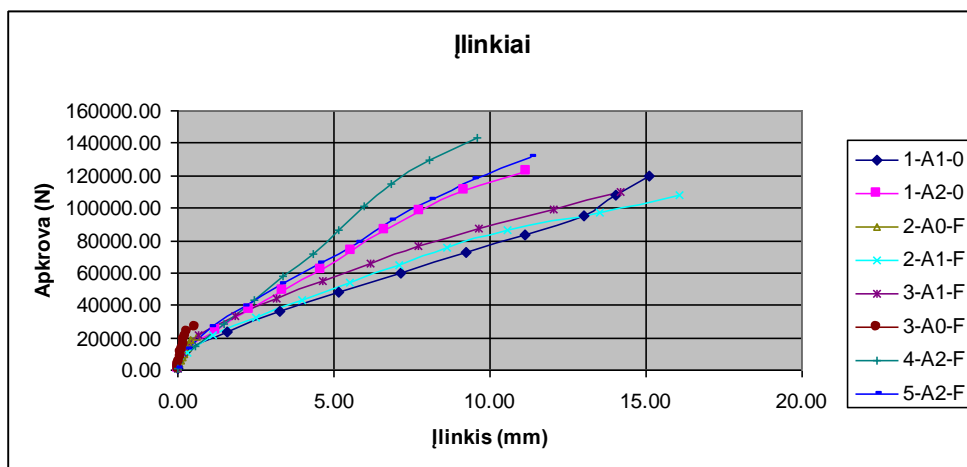
Sprendžiant pagal modelių armuotos plokštės plyšių raidos vizualius stebėjimus ir pagal išmatuotų įlinkių vertes, plokštės irimo pradžia kaip nearmuotų plokščių - polio kampo srityje. Tačiau didėjant apkrovai, atsiveria plyšiai statmeni plokštės briaunos viduriui. Sekančiame bandymo etape, didėjant plyšiui apie polio kontūrą, šie plyšiai užsiveria ir atsiveria plyšiai plokštės įžambinės linkmėmis.

Modelių, kurių plokštės buvo armuotos, irtis įvyko staiga su dideliu trenksmu. Plokščių suirimo pavidalai matomi 2 priede.

Modelių bandymo eigoje buvo išmatuota jų plokščių (aštuoniose vietose) įlinkiai. Tikslas – bandymo pirmame etape, sprendžiant pagal plokštės kampų įlinkius, įsitikinti ar bandomas modelis yra centruotas. Jeigu ši sąlyga nebuvo įvykdyta, bandomo modelio padėtis buvo koreguojama. Antrasis įlinkių matavimo tikslas buvo, sprendžiant pagal įlinkių vertes, nustatyti plyšių atsivėrimo vietas ir sekti jų raidą.

Iliustracijai 24 paveiksle pateikiama modelių armuotų plokščių kampų vidurkio įlinkių pobūdžiai ir vertės bandymo etapuose. Įlinkių grafikuose pastebimas vienas dėsningumas – kai

modelio plokštės suirimo apkrova mažesnė, tai įlinkis irties metu yra didesnis. Tai sietina su bandinių armavimo intensyvumu.



24 pav. Modelių armuotų plokštės kampo įlinkiai tyrimo eigoje

Modelių su armatūra armuotomis plokštėmis irties apkrovų vertės pateiktos 7 lentelėje, o palyginamosios vertės 25 paveiksle, kuriame:  $V_{exp}$  - modelio irties apkrova, o  $f_{cm}^*$  – betono vidutinis gniuždomasis stipris  $f_{cm}$  arba, kai dispersiškai armuota -  $f_{sfrcm}$ .

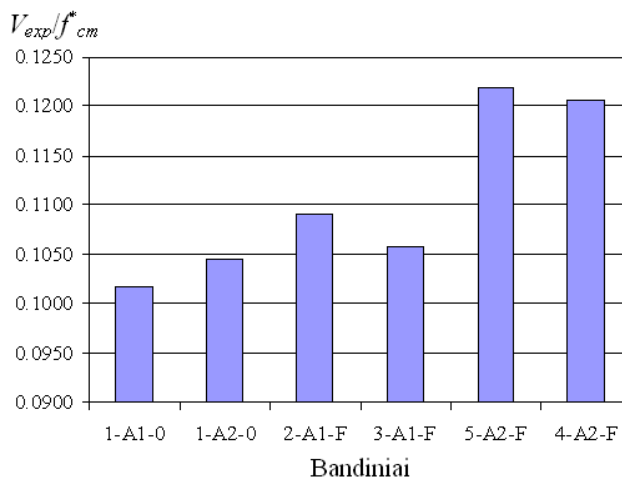
7 lentelė. Modelių su gelžbetoninėmis plokštėmis irties apkrovų vertės

Modelio žymuo	Betono $f_{cm}$ arba $f_{sfrcm}$ , MPa	Ardančioji apkrova	
		$V_{exp}$ , kN	santykinė $V_{exp}/(f_{cm} A_{c,pr})$ arba $V_{exp}/(f_{sfrcm} A_{c,pr})$
1-A1-0	52,2	119,5	0,1017
1-A2-0	52,2	122,9	0,1046
2-A1-F	44,1	108,3	0,1091
5-A2-F	47,9	131,4	0,1219
4-A2-F	53,0	143,8	0,1206
3-A1-F	46,1	109,7	0,1058

Modelių, kurių įprastinis armavimas 1,8 %, praspaudimo santykinė ardančioji apkrova yra 2,9 % didesnė už modelio, kurio armavimo intensyvumas 1,0 %.

Modelių plokščių papildomas armavimas plieno plaušu didina jų praspaudžiamąją ardančią apkrovą. Kai plokštės armavimas 1,0 %, vidutiniškai ardančioji apkrova padidėjo 5,7 %, kai armavimas 1,8 %, tai vidutiniškai ardančioji apkrova padidėjo 15,9 %.

Išvada – papildomas jungties „plokštė-atrama (polis)“ plokštės dispersinis armavimas plieno plaušu padidina jos praspaudžiamąjį stiprį. Jeigu gretinti praspaudžiamąsias modelių armuotų plieno plaušu ir kartu įprastine armatūra 1,0 ir 1,8 % ardančiąsias apkrovas, pastebim, kad efektyvumas padidėja  $(12,8 - 2,9) \% = 9,9 \%$ .

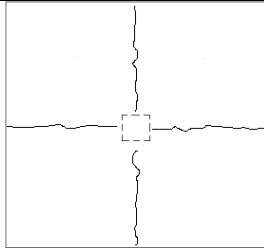
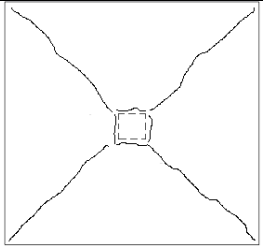
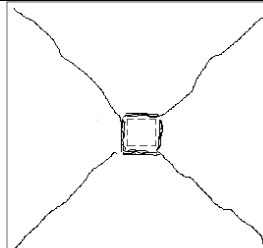
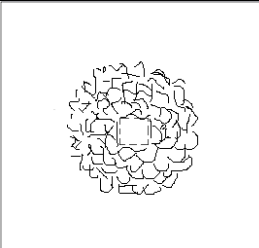


**25 pav.** Ardančiųjų apkrovų palyginamosios vertės

Kaip minėta, modelių 1-A1-0 ir 1-A2-0 plokštės santykinio praspaudžiamąjo stiprio, priklausomai nuo armavimo intensyvumo, skirtumas 2,9 %. Dviejų vienodų (tik skirtingu plokštės betono stipriu) modelių 2-A1-F ir 3-A1-F plokštės vidutinė santykinė praspaudimo ardančioji apkrova  $V_{exp}/(f_{sfrcm} A_{c,pr}) = 0,1075$ . Nurodytų modelių ardančiųjų apkrovų skirtumai nuo vidutinės vertės tesudaro  $\pm 1,6\%$ . Modelių 4-A2-F ir 5-A2-F vidutinė santykinė praspaudimo ardančioji apkrova  $V_{exp}/(f_{sfrcm} A_{c,pr}) = 0,1213$ , o skirtumas su nurodytų modelių ardančiosiomis apkrovomis tesudaro 0,54 %.

Išvada – porinių modelių ardančiosios apkrovos vidutinių nuokrypis nuo jų ardančiųjų apkrovų vidutiniškai tesiskiria  $\pm 1,07\%$ . Šis rodiklis rodo, kad atliktų porinių (ne tik) modelių tyrimai gali būti vertinami labai palankiai.

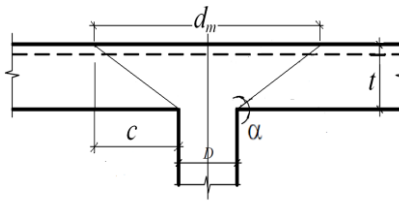
**8 lentelė.** Plyšių vystymosi etapai, apkrovos ir įlinkiai

Plyšių vystymosi etapai, pobūdis ir suminė apkrova prie kurios susiformuoja plyšiai ir bandinio kampų įlinkiai				
Bandinio kodas	I etapas	II etapas	III etapas	IV etapas Suirimas
				
2-A0-F	$Q_I = 20 \text{ kN},$ $v_I = 0,70 \text{ mm.}$ $V_{\text{exp,cr}} = 20,3 \text{ kN},$ $v_{cr} = 0,71 \text{ mm}$			
2-A1-F	$Q_I = 30 \text{ kN},$ $v_I = 2,50 \div 2,60 \text{ mm},$ $\frac{Q_I}{V_{\text{exp,cr}}} = 0,227$ $\frac{v_I}{v_{cr}} = 0,169$	$Q_{II} = 54 \text{ kN},$ $v_{II} = 6,20 \div 6,30 \text{ mm},$ $\frac{Q_{II}}{V_{\text{exp,cr}}} = 0,499$ $\frac{v_{II}}{v_{cr}} = 0,414$	$Q_{III} = 69 \text{ kN},$ $v_{III} = 9,00 \div 9,20$ $\text{mm},$ $\frac{Q_{III}}{V_{\text{exp,cr}}} = 0,637$ $\frac{v_{III}}{v_{cr}} = 0,606$	$V_{\text{exp,cr}} = 108,3 \text{ kN},$ $v_{cr} = 15,11 \text{ mm.}$
4-A2-F	$Q_I = 34 \text{ kN},$ $v_I = 2,20 \div 2,30 \text{ mm}$ $\frac{Q_I}{V_{\text{exp,cr}}} = 0,236$ $\frac{v_I}{v_{cr}} = 0,227$	$Q_{II} = 58 \text{ kN},$ $v_{II} = 4,00 \div 4,20 \text{ mm}$ $\frac{Q_{II}}{V_{\text{exp,cr}}} = 0,403$ $\frac{v_{II}}{v_{cr}} = 0,439$	$Q_{III} = 75 \text{ kN},$ $v_{III} = 5,00 \div 5,10$ $\text{mm}$ $\frac{Q_{III}}{V_{\text{exp,cr}}} = 0,522$ $\frac{v_{III}}{v_{cr}} = 0,534$	$V_{\text{exp,cr}} = 143,8 \text{ kN},$ $v_{cr} = 9,46 \text{ mm}$

Įvairių šalių gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo norminiuose dokumentuose plokštės praspaudžiamojo stiprio skaičiavimai susieti su plokštės (praspautos dalies) irties paviršiaus nuolydžio projekcija  $c$  ir jis įvairiose normose priimtas skirtingas –  $c = 0,5d, 1,5d, 2d$ .

Plokštės praspaudžiamoji irtis vyksta per visą plokštės aukštį, todėl apžvelgiama ne santykis  $c/d$ , ( $d$  – plokštės naudingas aukštis), o santykis  $c/t$  (9. lentelė).

**9 lentelė.** Irimo piramidės sudaromosios kampai su horizontale

Band. kodas	Santykinė ardančioji apkrova	Ilgiai, cm			$tg\alpha$	$\alpha$	$c$ cm	$c/t$	
		$d_1$	$d_2$	$d_m$					
1-A1-0	0,1017	60,3	60,3	60,3	0,249	14°	24,1	4,02	
1-A2-0	0,1046	50,7	50,7	50,7	0,311	17°20'	19,3	3,22	
2-A1-F	0,1091	55,5	55,5	55,5	0,276	15°30'	21,8	3,63	
5-A2-F	0,1219	50,3	45,2	47,8	0,335	18°30'	17,9	2,98	
4-A2-F	0,1206	49,7	57,3	53,5	0,290	16°10'	20,8	3,47	
3-A1-F	0,1058	49,1	37,7	43,4	0,382	20°50'	15,7	2,62	

Apžvelgiant „plokštė-atrama (polis)“ modelių plokštės suirimo duomenis išreikštus santykiu  $c/t$ , pastebim, kad modelių, kurių plokštės be plieno plaušo, santykis  $c/t$  didesnis, kai santykinė ardančioji apkrova yra mažesnė. Šis skirtumas 24,8 %. Modeliuose, kurių plokštės su plieno plaušu, vidutinis dviejų bandinių rezultatų, kai armavimas 1,0 %, santykis  $c/t = 3,12$ , o vidutinė santykinė ardančioji apkrova  $V_{exp}/(f_{sfrcm} A_{c,pr})=0,108$ . Kai plokštės armavimas 1,8 %, tai  $c/t = 3,22$ , o porinių modelių vidutinė santykinė ardančioji apkrova  $V_{exp}/(f_{sfrcm} A_{c,pr}) = 0,121$ .

Apibendrinant modelių bandymo rezultatus galima teigti:

- intensyvėjant plokštės armavimui, didėja jos santykinė ardančioji apkrova, mažėja santykis  $c/t$ ;
- modelių, kurių plokštės armuotos dispersiškai ir įprastiniu armavimu, kai intensyvumas 1,0 ir 1,8 %, santykio  $d/t$  vidutinės (dviejų modelių) vertės panašios ir yra atitinkami 3,12 ir 3,22.

## BENDROSIOS IŠVADOS

1. Besijės perdangos plokštės praspaudžiamojo stiprio skaičiuojamųjų modelių apžvalga rodo, kad mokslininkų tarpe vieningos nuomonės apie jų sudarymo principus ir prielaidas nėra. Plokštės praspaudžiamojo skaičiuojamojo modelio sudarymui mokslininkų siūlomi šie tipai:
  - kai plokštės irtis įvyksta gniuždomiesiems ir tangentiniams įtempiamos pasiekus ribą, nukerpant plokštės gniuždomąją zoną ;
  - kai suirimas įvyksta plokštės betonui pasiekus ribinius tempimo įtempius įstrižo pjūvio suformuotoje praspaudimo piramidėje.

Atliktų besijės plokštės jungties „plokštė-polis“ modelių bandymo rezultatų duomenys artimesni pirmajai skaičiuojamojo modelio sudarymo versijai.

2. Besijės perdangos „plokštė-polis“ jungties eksperimentiniai tyrimai parodė, kad plokštės (jungties srityje) dispersinis armavimas plieno plaušu yra naudingas:
  - kai plokštės tempiamosios zonos įprastinio armavimo intensyvumas 1,0 %, tai modelių 2-A1-F ir 3-A1-F santykinė irties apkrova ( $V_{exp}/(f_{cm} A_{c,pr})$ ) yra 4,0 ir 7,3 % didesnė už modelio 1-A1-0 (plokštė be dispersinio armavimo);
  - kai plokštės tempiamosios zonos įprastinio armavimo intensyvumas 1,8 %, tai modelių 4-A2-F ir 5-A2-F santykinė irties apkrova 15,3 ir 16,5 % didesnė už modelio 1-A2-0 santykinę irties apkrovą.

Jungties „plokštė-polis“ plokštės dispersinis armavimas efektyvesnis, kai jos tempiamosios zonos įprastinis armavimas yra intensyvesnis.

3. Nepriklausomai nuo jungties modelio „plokštė-atrama (polis)“ plokštės armavimo būdo (įprastinis tempiamos zonos ar kartu pastarasis ir dispersinis), jų irimo vyksmas ir pobūdis vienodi. Pirmiausiai atsiveria plyšiai modelio ašių linkmėmis. Didėjant apkrovai, atsiveria plyšiai apypolio srityje ir plokštės įžambinių linkmėmis, kurie iki plokštės suirimo didėja, o pirmieji plyšiai užsiveria. Modelių plokštės irtis įvyksta staiga, susiformuoja kritinė kūgio formos plokštės dalis. Išvada – pagal modelių plokštės elgseną ir irties būdą bei pasekmes yra pagrindas teigti, kad irtis įvyko plokštės gniuždomajai zonai pasiekus gniuždomiesiems ir tangentiniams įtempiamos kritinę ribą.
4. Jungties „plokštė-atrama (polis)“ modelių plokštėse irties metu prspausto kūgio sudaromosios kampas su horizontale, išreikštas santykiu  $c/t$  ( $c$ - atstumas nuo plokštės kritinio perimetro kontūro iki atramos (polio), priklauso nuo tempiamosios zonos armavimo intensyvumo ir nuo dispersinio armavimo. Santykio  $c/t$  kaitos ribos nuo 3,02 iki 4,02, vidutinė vertė 3,83, tai ženkliai daugiau už projektavimo normų deklaruojamą vertę.

5. Jungties „plokštė-atrama (polis)“ modelių plokščių praspaudimo santykinė ardančioji apkrova priklauso nuo tempiamosios zonos armavimo intensyvumo ir dispersinio armavimo. Modelių plokštėse padidinus armavimo intensyvumą 0,8 %, santykinė ardančioji apkrova padidėjo 2,9 %. Plokštės dispersinis armavimas naudingesnis, kai tempiamos zonos armavimo intensyvumas didesnis. Pavyzdžiui, kai plokštės armavimas 1,0 %, tai porinių modelių vidutiniška ardančioji apkrova padidėjo 5,7 %, kai armavimas 1,8 %, tai padidėjo 15,9 %.

## LITERATŪRA

- ACI Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete. 1995. American Concrete institute, Detroit. 77 p.
- Binici B., Bayrak O. 2005. Upgrading of slab–column connections using fiber reinforced polymers. *Engineering Structures*. V. 27, p. 97-107.
- Bompa Dan-V., Onet T. 2009. An Incursion on punching of reinforced concrete flat slabs. Technical University of Cluj-Napoca, Department of Concrete and Steel Structures.  
<<http://www.ce.tuiasi.ro/~bipcons/Archive/148.pdf>>
- BS 8110. Structural Use of Concrete, Part 1: Code of Practice for Design and Construction. 1997. British Standards Institution. London. 168 p.
- CSA Standard CAN3-A23.3-M84. Code for the design of concrete structures and buildings. 1984. Canadian Standards Association: Rexdele, Ontario. 281 p.
- DIN 1045 Beton und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung. 1988. DIN Deutsche Institut für Normung, Beuth, Verlag, Berlin. 188 p.
- Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. 36 B 1050 Brussels, 2004. 225 p.
- Guandalini S., Burdet O. L., Muttoni A. 2009. Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios. *ACI Structural Journal* V. 106, No. 1, p. 87-95.
- Hallgren M., Kinnunen S., Nylander B. 1998. Punching Shear Tests of Column Footings. *Nordic Concrete Research* <<http://www.tekna.no/ikbViewer/Content/739007/doc-21-1.pdf>>
- Kaklauskas G., Bačinskas D., Gribniak V., R. ir kt. 2012. Plieno plaušu ir nemetaliniais strypais armuotos betoninės konstrukcijos: elektroninis paskaitų konspektas. Vilnius: Technika.  
<[http://dspace.vgtu.lt/bitstream/1/1523/1/1412\\_Kaklauskas\\_Plieno\\_WEB.pdf](http://dspace.vgtu.lt/bitstream/1/1523/1/1412_Kaklauskas_Plieno_WEB.pdf)>.

Marčiukaitis G., Šalna R. 2010. Gelžbetoninių besijų perdangos plokščių praspaudimo tyrimo ir skaičiavimo modelių analizė. Statybinės konstrukcijos ir technologijos. 2(3) p. 93–100

Muttoni A. 2008. Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. ACI Structural Journal V. 105, No. 4, p. 440-450.

Punching of structural concrete slabs. 2001. Technical report by CEB/FIB task group: Utilization of concrete tension design. International federation of structural concrete (fib), Lausanne, Switzerland. 304 p.< <http://www.fib-international.org/punching-of-structural-concrete-slabs-pdf>>.

Sacramento P. V. P., Ferreira M. P., Oliveira D. R. C., et al. 2012. Punching strength of reinforced concrete flat slabs without shear reinforcement. IBRACON Structures and Materials Journal, vol. 5, No. 5, p. 659-691.

Šalna R. 2008. Dispersinio armavimo įtaka gelžbetoninių besijų perdangos plokščių praspaudimui: daktaro disertacija. Vilnius.

STR 2.05.05. Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005. 124 p.

Смирнов Г.Н., Горюнов Б.Ф., Курлович Е.В., и др. 2003. Порты и портовые сооружения. Москва: АСВ.

## **PRIEDAI**

## 1 Priedas. Bandinių modelių įlinkių jutiklių duomenys

Kodas 1-A1-0	Įlinkiai (mm)							
Apkrova (N)	Įlinkio jutiklio numeris plane							
	1	2	4	5	3	6	7	8
1219	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11955	0.28	0.22	0.20	0.25	0.11	0.11	0.06	0.10
23902	1.58	1.57	1.65	1.59	0.94	0.86	0.51	0.85
35856	3.08	3.42	3.55	3.09	2.17	1.81	1.21	1.83
47806	4.85	5.56	5.54	4.63	3.53	2.91	1.97	2.85
59758	6.69	7.90	7.73	6.21	5.08	4.13	2.84	3.99
72709	8.62	10.42	10.01	7.84	6.95	5.52	3.89	5.19
83660	10.15	12.69	12.32	9.37	8.93	6.83	5.02	6.47
95611	11.70	14.77	14.58	10.92	10.82	8.12	6.11	7.78
107541	12.68	15.91	15.78	11.78	11.75	8.85	6.68	8.53
119503	13.54	17.32	17.14	12.49	12.89	9.75	7.39	9.39

Kodas 1-A2-0	Įlinkiai (mm)							
Apkrova (N)	Įlinkio jutiklio numeris plane							
	1	2	4	5	3	6	7	8
1217	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12290	0.23	0.27	0.22	0.19	0.12	0.12	0.06	0.10
24577	1.17	1.41	1.29	1.06	0.62	0.69	0.33	0.65
36863	2.17	2.68	2.41	1.99	1.29	1.31	0.70	1.19
49152	3.22	3.92	3.50	2.90	1.99	1.88	1.08	1.74
61460	4.33	5.30	4.80	3.84	2.77	2.54	1.52	2.37
73731	5.23	6.44	5.93	4.65	3.66	3.14	2.01	2.97
86035	6.20	7.63	7.10	5.56	4.66	3.81	2.56	3.61
98326	7.44	8.77	8.29	6.61	5.66	4.46	3.13	4.28
110613	8.92	10.14	9.69	8.04	6.87	5.28	3.82	5.09
122914	11.24	11.83	11.48	10.17	8.40	6.33	4.72	6.14

Kodas 2-A0-F	Įlinkiai (mm)							
Apkrova (N)	Įlinkio jutiklio numeris plane							
	1	2	4	5	3	6	7	8
1225	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2034	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
4060	0.07	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.01	0.02
6098	0.12	0.10	0.09	0.09	0.05	0.05	0.03	0.04
8119	0.17	0.14	0.13	0.13	0.07	0.07	0.04	0.06
10114	0.22	0.19	0.18	0.17	0.10	0.09	0.05	0.08
12171	0.27	0.25	0.22	0.21	0.12	0.12	0.06	0.10
14213	0.33	0.31	0.26	0.25	0.15	0.15	0.08	0.12
16230	0.41	0.38	0.31	0.30	0.19	0.18	0.10	0.14
18267	0.53	0.49	0.36	0.35	0.23	0.24	0.12	0.17
20312	0.84	0.71	0.43	0.49	0.31	0.36	0.17	0.20

Kodas 2-A1-F	Įlinkiai (mm)							
Apkrova (N)	Įlinkio jutiklio numeris plane							
	1	2	4	5	3	6	7	8
1208	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10833	0.34	0.38	0.25	0.20	0.18	0.19	0.10	0.12
21664	1.18	1.39	1.07	0.86	0.71	0.73	0.40	0.54
32495	2.69	2.85	2.40	2.13	1.51	1.49	0.85	1.20
43326	4.34	4.35	3.76	3.48	2.34	2.26	1.32	1.89
54158	6.05	5.91	5.32	4.83	3.29	3.07	1.86	2.68
64987	7.68	7.46	6.88	6.28	4.32	3.90	2.44	3.49
75804	9.26	8.91	8.46	7.81	5.57	4.73	3.15	4.36
86634	11.12	10.82	10.52	9.75	7.31	5.87	4.14	5.55
97465	14.18	13.56	13.49	12.93	9.81	7.51	5.59	7.27
108305	16.92	15.54	15.90	15.93	11.57	8.78	6.71	8.81

Kodas 3-A1-0	Įlinkiai (mm)							
Apkrova (N)	Įlinkio jutiklio numeris plane							
	1	2	4	5	3	6	7	8
1220	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10979	0.19	0.20	0.15	0.14	0.10	0.10	0.05	0.07
21950	0.69	0.75	0.57	0.57	0.41	0.38	0.22	0.27
32919	1.91	2.06	1.62	1.67	1.10	1.04	0.58	0.77
43891	3.38	3.65	2.72	2.86	1.91	1.79	1.00	1.29
54861	4.89	5.48	3.99	4.16	2.94	2.71	1.55	1.91
65812	6.31	7.37	5.58	5.51	4.15	3.67	2.22	2.70
76782	7.56	9.20	7.31	6.85	5.57	4.67	3.01	3.61
87748	9.39	11.27	9.26	8.59	7.37	5.85	4.03	4.69
98726	11.52	14.05	11.90	10.68	9.92	7.53	5.48	6.18
109716	12.93	16.99	14.82	11.95	12.65	9.42	7.21	8.02

Kodas 3-A0-F	Įlinkiai (mm)							
Apkrova (N)	Įlinkio jutiklio numeris plane							
	1	2	4	5	3	6	7	8
1216	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2620	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00
5222	0.08	0.00	0.04	0.09	0.00	0.00	0.02	0.00
7820	0.13	0.00	0.08	0.14	0.01	0.01	0.03	0.00
10438	0.18	0.00	0.12	0.19	0.02	0.02	0.05	0.01
13056	0.21	0.00	0.17	0.23	0.05	0.04	0.07	0.02
15650	0.26	0.00	0.21	0.28	0.08	0.06	0.09	0.03
18269	0.30	0.00	0.26	0.32	0.11	0.09	0.12	0.05
20886	0.37	0.00	0.30	0.39	0.11	0.10	0.13	0.05
23487	0.43	0.06	0.37	0.46	0.16	0.13	0.17	0.08
26129	0.46	0.37	0.78	0.65	0.46	0.31	0.39	0.25

Kodas 4-A2-F	Įlinkiai (mm)							
Apkrova (N)	Įlinkio jutiklio numeris plane							
	1	2	4	5	3	6	7	8
1220	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14376	0.64	0.55	0.49	0.56	0.31	0.29	0.18	0.25
28765	1.56	1.37	1.42	1.55	0.84	0.72	0.48	0.73
43135	2.59	2.17	2.37	2.62	1.36	1.15	0.78	1.23
57517	3.49	3.02	3.36	3.63	1.88	1.59	1.10	1.74
71905	4.27	4.02	4.45	4.52	2.53	2.11	1.48	2.29
86273	4.98	4.93	5.43	5.27	3.33	2.60	1.92	2.83
100663	5.68	5.81	6.39	6.01	4.15	3.10	2.38	3.37
115046	6.39	6.72	7.45	6.83	5.06	3.62	2.87	3.98
129421	8.05	7.42	8.42	8.43	5.79	4.06	3.29	4.54
143762	10.19	8.54	9.55	10.15	6.82	4.85	3.92	5.24

Kodas 5-A2-F	Įlinkiai (mm)							
Apkrova (N)	Įlinkio jutiklio numeris plane							
	1	2	4	5	3	6	7	8
1220	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13139	0.29	0.28	0.30	0.28	0.18	0.14	0.09	0.14
26285	1.00	1.05	1.14	1.04	0.68	0.54	0.35	0.54
39413	2.09	2.12	2.27	2.05	1.38	1.08	0.71	1.08
52563	3.36	3.21	3.56	3.13	2.13	1.62	1.10	1.68
65708	4.58	4.43	4.90	4.28	2.94	2.23	1.53	2.31
78837	5.72	5.62	6.23	5.43	3.81	2.83	2.00	2.96
91987	6.77	6.66	7.43	6.58	4.78	3.43	2.53	3.61
105120	7.96	7.83	8.77	7.81	5.94	4.13	3.18	4.36
118254	9.19	9.22	10.42	9.21	7.42	5.01	4.03	5.33
131389	10.06	11.78	13.13	10.35	10.01	6.64	5.63	7.06

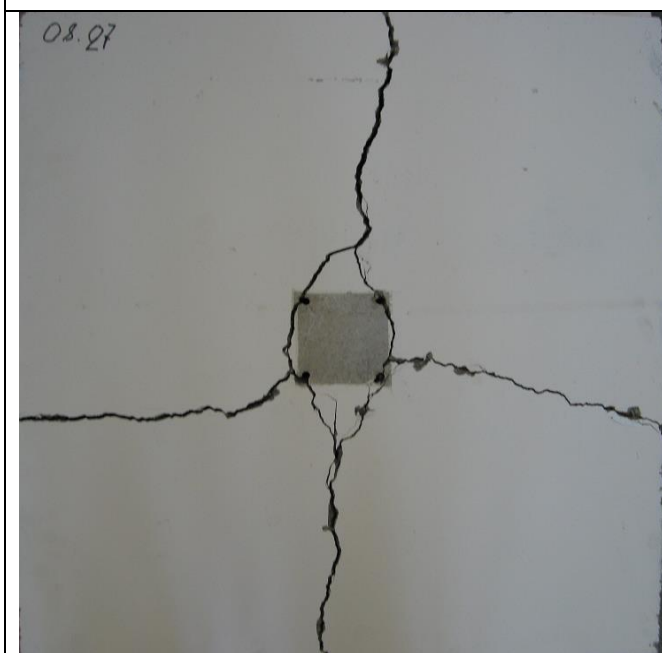
2 Priedas. Bandinių suirimo pobūdis



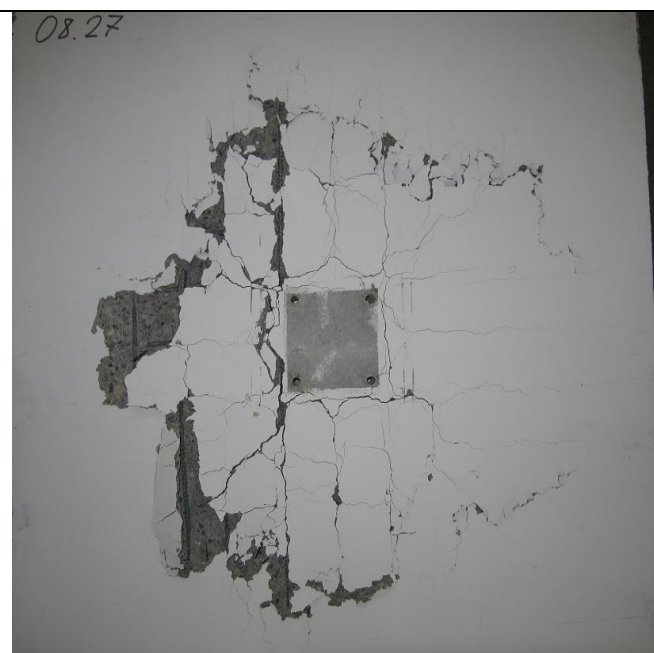
1-A1-0



1-A2-0



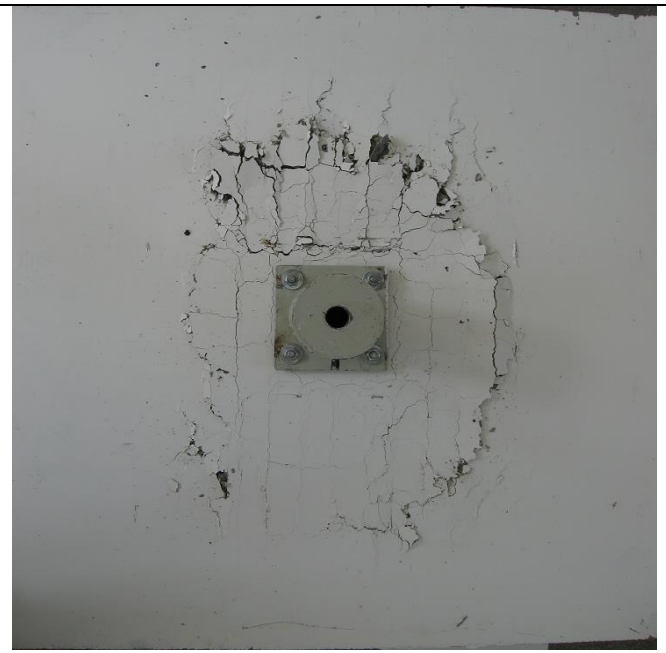
2-A0-F



2-A1-F



4-A2-F



5-A2-F



3-A0-F



3-A1-F