

Civil engineering
Statybos inžinerijaSURENKAMOSIOS MONOLITINĖS GELŽBETONINĖS PERDANGOS
PLOKŠTĖS SU PLASTIKINIAIS INTARPAIS PLEIŠĖJIMO ANALIZĖJuozas MASĖNAS **Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2021 m. gegužės 12 d.; priimta 2021 m. lapkričio 30 d.

Santrauka. Straipsnyje yra analizuojami sluoksniuotosios gelžbetoninės plokštės su plastikiniais intarpais eksperimentinių ir skaitmeninių tyrimų rezultatai. Tiriama sluoksniuotoji gelžbetoninė plokštė yra sudaryta iš surenkamojo ir monolitinio gelžbetoninių sluoksnių. Plokštės tūryje su sferinės formos plastikiniais intarpais suformuotos tuštumos. Atliekant sluoksniuotosios plokštės skaitmeninę analizę nustatomas plokštės pleišėjimo charakteris. Skaitmenine analize gautas pleišėjimas yra palyginamas su eksperimentiniu bandymu nustatytu pleišėjimu. Sudarant skaitmeninį modelį buvo vertinamas surenkamojo ir monolitinio betono sluoksnių jungties standumas šlyčiai.

Reikšminiai žodžiai: eksperimentiniai bandymai, plastikiniai intarpai, pleišėjimo analizė, plokštės atraminė zona, skaitmeninė analizė, surenkamoji monolitinė gelžbetoninė perdangos plokštė.

Įvadas

Daugiaaukščių pastatų statyboje perdangai įrengti dažnai yra naudojamas surenkamosios monolitinės perdangos konstrukcinis sprendinys. Tokio tipo perdangoje surenkamas elementas yra *Filigree/Omnia* liktinis klojinys. Ši konstrukcija yra armuojama plienine erdvine santvara, pagaminta iš plieninių strypų. Plieninės santvaros funkcija yra padidinti liktinio klojinio standumą ikieksploataciniam etape, sustiprinti surenkamojo ir monolitinio sluoksnių jungtį. Santvaros apatiniai strypai eksploataciniame etape yra pagrindinė surenkamosios monolitinės perdangos armatūra. Surenkamasis elementas yra 40...100 mm storio. Įrengiant perdangą jis atlieka liktinio klojinio, ant kurio liejamas monolitinis sluoksnis, funkciją. Plokštė gali būti atremiama viena arba dviem kryptimis (De Hoop Pekso, 2019; Flood Precast, 2019).

Filigree/Omnia perdangos konstrukcinis sprendinys suteikia galimybę perdangoje įrengti tuštumas. Tuštumos gali būti formuojamos plastikiniais intarpais (Hanson, 2009). Panaudojus intarpus sumažinamas konstrukcijos savasis svoris, sumažėja apkrovos į kolonas ir pamatus, galimi didesni tarpatačiai, mažėja reikiamų kolonų kiekis. Be konstrukcinių privalumų, naudojant plastikinius intarpus prisidedama ir prie aplinką tausojančių sprendimų. Plokštėje įrengus ertmes sunaudojama 20 %...30 % mažiau

betono (Bubbledeck, 2008; Cobiax, 2016; Geoplast, 2019; Unidome, 2021). Mažėjant betono kiekiui, mažėja sunaudoto cemento kiekis. Mažinti cemento sąnaudas yra naudinga, nes žinoma, kad 1 tonos cemento gamybai į aplinką yra išmetama net 500 kg CO₂ dujų (Andrew, 2018; Valivonis et al., 2014). Taip pat svarbu paminėti, kad plastikiniai intarpai yra gaminami iš antrinių žaliavų – perdirbto plastiko.

Galima teigti, kad priimant racionalesnius gelžbetoninių konstrukcijų sprendimus teikiama nauda aplinkai.

Būdingiausios surenkamosios monolitinės perdangos plokštės su plastikiniais intarpais vietos, kuriose anksčiausiai susidaro plyšiai, yra atraminė zona (Hegger et al., 2003; Ji & Liu, 2020), plokštės surenkamajame sluoksnyje ties didžiausio lenkimo momento vieta (Mohamed et al., 2020) ir surenkamojo ir monolitinio betono sluoksnių jungtyje (Mohamed et al., 2020; Ibrahim et al., 2019). Irimas atraminėje zonoje ir betono sluoksnių jungtyje gali susidaryti dėl didelio lenkimo momento ir šlyties įtempių.

Kitų autorių tyrimų (Ibrahim et al., 2019; Stehle et al., 2011; Mohamed et al., 2020; Hegger et al., 2003) analizė parodė, kad galima išskirti tris tokio tipo plokščių darbo etapus. Pirmajame etape konstrukcija dirba tampriai, dar nėra pasireiškusios plastinės deformacijos. Antrajame

*Autorius susirašinėti. El. paštas juozas.masenas@vilniustech.lt

etape betone pasireiškia plastinės deformacijos ir plokštė pradeda pleišėti. Abiem etapams galioja įprasta konstrukcijų analizė, konstrukcijos skaičiuojamos tipiniais projektavimo metodais, naudojami įprasti BEM programiniai paketai. Šiuose etapuose jungtis tarp surenkamojo ir monolitinio sluoksnių yra standi. Išorinei apkrovai pasiekus maždaug 50 % konstrukcijos laikomosios galios, dėl didelių šlyties įtempių pasireiškia šlyties deformacijos ir jungtis tarp betono sluoksnių iš standžios gali tapti iš dalies standi. Galiausiai dėl didelių šlyties įtempių gali įvykti sluoksnių atsiskyrimas.

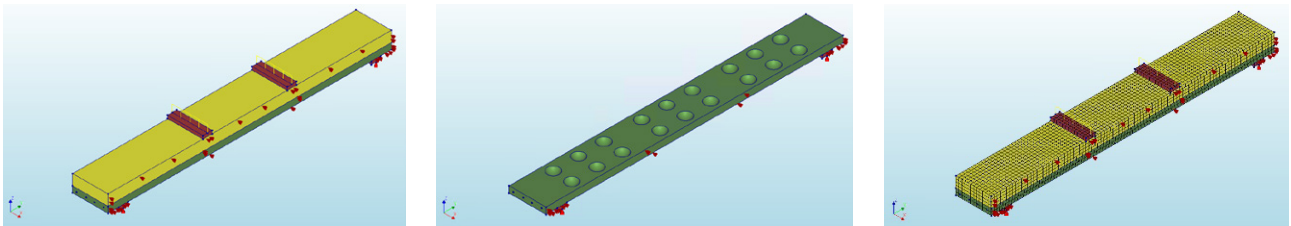
Pagal Ibrahim et al. (2019) sluoksniuotos gelžbetoninės plokštės tyrimų rezultatus galima teigti, kad projektuojant tokias konstrukcijas eksploataciniame etape yra būtina vertinti dalinį jungties tarp betono sluoksnių standumą. Tai padeda geriau apibūdinti konstrukcijos elgseną bei teisingai apskaičiuoti perdangos įlinkį ir laikomąją galią.

1. Sluoksniuotosios plokštės skaitmeninis modelis

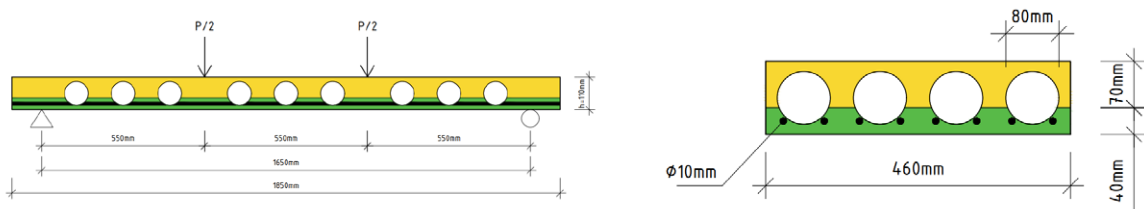
Sluoksniuotosios surenkamosios monolitinės gelžbetoninės plokštės skaitmeninei analizei atlikti buvo sudarytas skaitmeninis modelis baigtinių elementų analizės programiniame pakete DIANA FEA (žr. 1 pav.). Plokštės geometrija (žr. 2 pav.) ir medžiagų charakteristikos (žr. 1 lentelė, 2 lentelė) parinktos pagal (Ibrahim et al., 2019) straipsnyje pateiktų tyrimų rezultatus.

Plokštės viduryje sumodeliuotos sferinės formos tuštumos, kurios atstoja plastikinius tarpus. Siekiant paspartinti kompiuterinius skaičiavimus buvo modeliuota pusė sluoksniuotosios plokštės ir pridėtos simetrijos sąlygos.

Betono sluoksnių jungties plokštumoje nustatoma sąsaja. Sąsajos tipas – 3D surface interface. Sąsajai užduodama savybė – betono tamprumo modulis $E_c = 32,575$ GPa. Didėjant šlyties įtempiams sluoksnių jungtyje plokštės sluoksniai pasislenka vienas kito atžvilgiu, todėl jungties tarp sluoksnių šlyties standumas mažėja. Modeliuojant



1 paveikslas. DIANA FEA skaitmeninio modelio vaizdas
Figure 1. Numerical model in DIANA FEA



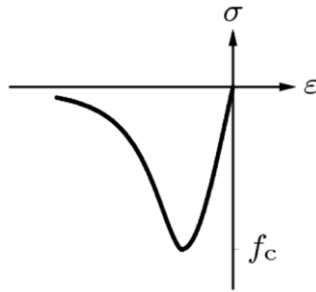
2 paveikslas. Modeliuojamos plokštės skaičiuotinė schema ir skerspjūvis
Figure 2. Structural model and cross-section of the slab

1 lentelė. Skaitmeninio modelio betono savybės
Table 1. Concrete properties in numerical model

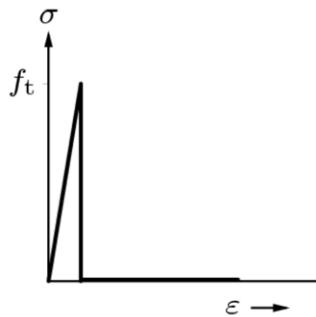
Tiesinės betono savybės			Gniuždomojo betono savybės		Tempiamojo betono savybės		
Tamprumo modulis E_c , GPa	Puasono koeficientas ν	Tankis, kg/m^3	Gniuždomojo betono kreivė	Gniuždomasis stipris f_{cm} , MPa	Didžiausios deformacijos pleišėjimo modelis	Tempiamojo betono kreivė	Tempiamasis betono stipris f_p , MPa
32,575	0,2	2400	Thorenfeldt (žr. 3 pav.)	37	Rotating	Trapus (žr. 4 pav.)	2,832

2 lentelė. Skaitmeninio modelio armatūros savybės
Table 2. Reinforcement properties in numerical model

Tamprumo modulis E_s , GPa	Plieno elgsenos modelis	Tamprumo įtempiai f_y , MPa	Plieno stiprėjimas
199	Von Mises plastiškumas	470	Nėra stiprėjimo



3 paveikslas. Gniuždomojo betono kreivė (TNO DIANA, 2010)
Figure 3. Concrete compression curve (TNO DIANA, 2010)

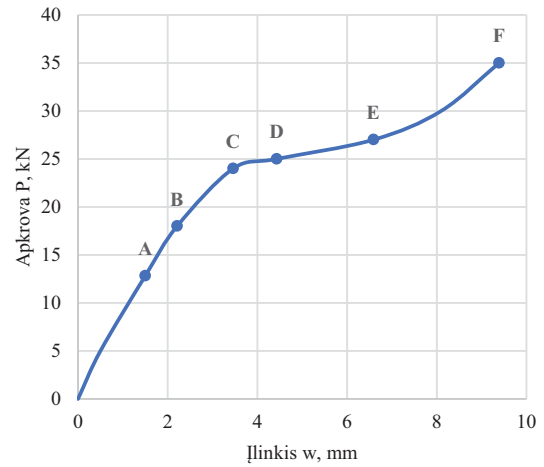


4 paveikslas. Tempiamojo betono kreivė (TNO DIANA, 2015)
Figure 4. Concrete tensile curve (TNO DIANA, 2015)

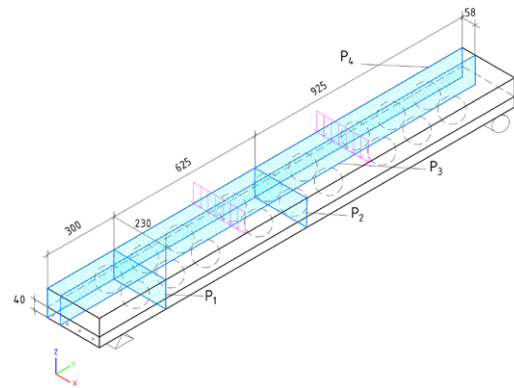
plokštę buvo naudojami 20 mm dydžio 3D kvadratiniai baigtiniai elementai.

2. Sluoksniuotosios plokštės skaitmeninė pleišėjimo analizė

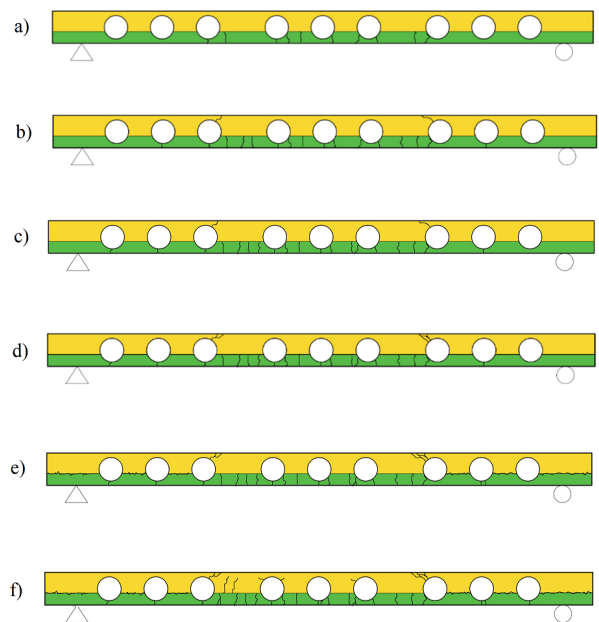
Atliekant konstrukcijos elgsenos netiesinę analizę buvo taikytas arkos ilgio kontrolės metodas. Skaitmeninės analizės tikslas buvo atlikti surenkamosios monolitinės perdangos plokštės pleišėjimo analizę. Norint įvertinti sluoksniuotosios gelžbetoninės plokštės su plastikiniais tarpais pleišėjimo charakterį buvo analizuojama plokštės elgsena šešiuose apkrovimo etapuose. Plokštės apkrovimo etapai yra parodyti 5 paveiksle. Analizuojamos dvi surenkamosios monolitinės gelžbetoninės plokštės zonos: didžiausio lenkimo momento veikimo zona ir plokštės atraminė zona. Pjūviai, kuriuose buvo vertinamas plyšių vystymasis, parodyti 6 paveiksle. Norint parodyti plyšių išsidėstymo charakterį išilgai plokštės tirtas plokštės išilginis pjūvis. Analizuojant skaitmeninio modeliavimo rezultatus nustatyta, kad iki A apkrovimo etapo ($P = 12,82$ kN) plyšiai plokštėje nesusidaro. Pirmieji plyšiai susidarė A apkrovimo etape didžiausio lenkimo momento veikimo zonoje. Čia pirmieji statmenieji plyšiai atsirado apatiniame surenkamajame gelžbetoninės plokštės sluoksnyje (žr. 7 pav.) ties plastikiniais tarpais. Plyšiai kirto visą surenkamojo gelžbetoninio sluoksnio skerspjūvį, tačiau viršutiniame monolitiniame sluoksnyje plyšių nebuvo. Panašus sluoksniuotosios gelžbetoninės plokštės pleišėjimas yra aprašytas Mohamed et al. (2020) tyrime (žr. 8 pav.). B apkrovimo etape ($P = 18$ kN)



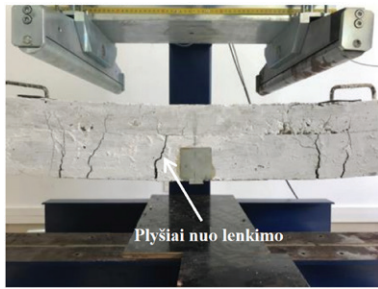
5 paveikslas. Plokštės apkrovimo etapai
Figure 5. Loading steps



6 paveikslas. Pjūvių, kuriuose analizuojami plyšiai, išdėstymo schema
Figure 6. Sections at which cracking was studied



7 paveikslas. a) A apkrovimo etapas; b) B apkrovimo etapas; c) C apkrovimo etapas; d) D apkrovimo etapas; e) E apkrovimo etapas; f) F apkrovimo etapas
Figure 7. a) load step A; b) load step B; c) load step C; d) load step D; e) load step E; f) load step F



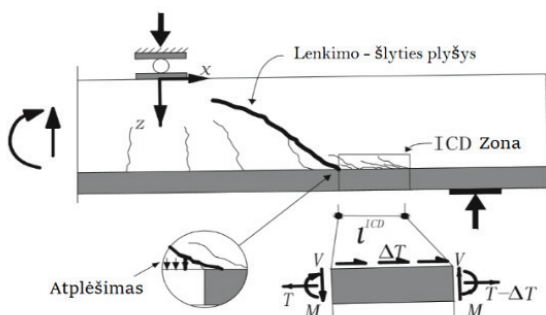
8 paveikslas. Plokštės pleišėjimas didžiausio lenkimo momento vietoje (Mohamed et al., 2020)
Figure 8. Slab flexural cracking (Mohamed et al., 2020)

didžiausio lenkimo momento veikimo zonoje surenkamajame gelžbetoniniame sluoksnyje susidarė tarpiniai plyšiai.

Plyšiai buvo ties plastikiniais intarpais ir tarp jų (žr. 7 pav.). Plokštės atraminėje zonoje šių apkrovimo etapų (A ir B) metu plyšiai nesusidarė. Didinant apkrovą ir pasiekus C apkrovimo etapą ($P = 24$ kN) apatiniame surenkamajame sluoksnyje plyšio plotis pasiekė 0,2 mm, o monolitiniame sluoksnyje, ties jėgų pridėjimo vieta atsirado nedidelio pločio (0,02 mm) statmenieji plyšiai (žr. 7 pav.). C apkrovimo etape plokštės atraminėje zonoje, ties plastikinių intarpų vietomis surenkamajame sluoksnyje taip pat susidarė statmenieji plyšiai.

D apkrovimo etape ($P = 25$ kN) monolitiniame sluoksnyje, briaunoje tarp burbulų, atsirado plyšys. Didžiausio lenkimo momento veikimo zonoje, tarp esamų statmenųjų plyšių, susidarė nauji plyšiai. Monolitiniame sluoksnyje briaunose tarp plastikinių intarpų žymiai padidėjo plyšio kiekis (žr. 7 pav.).

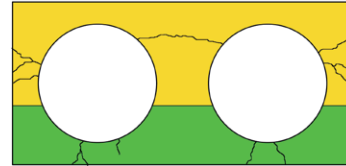
E apkrovimo etape ($P = 27$ kN) atraminėje zonoje tarp surenkamojo ir monolitinio betono sluoksnių susidarė horizontalusis plyšys. Sluoksniai atsiskiria vienas nuo kito ir pradeda dirbti atskirai. Panašus sluoksniuotosios gelžbetoninės plokštės irimas yra aprašytas Ibrahim et al. (2019) ir Ji ir Liu (2020) tyrimuose (žr. 9 ir 10 pav.). Monolitiniame sluoksnyje briaunose tarp intarpų toliau didėja pleišėjimas (žr. 11 pav.). Tarp E ir F ($P = 35$ kN) apkrovimo etapų toliau didėja esamų plyšių plotis ir kiekis. Didėja horizontalusis plyšys tarp sluoksnių. Tarpatramio viduryje (apatiniame surenkamajame gelžbetoniniame sluoksnyje, ties intarpais) plyšio plotis padidėjo iki 0,4 mm. Didžiausio pločio



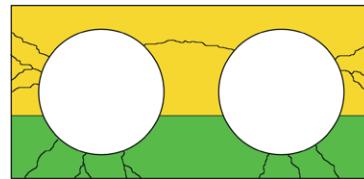
9 paveikslas. Plokštės atraminės zonos irimas (Ji & Liu, 2020)
Figure 9. Slab failure at support zone (Ji & Liu, 2020)



10 paveikslas. Jungties tarp dviejų betono sluoksnių irimas (Ibrahim et al., 2019)
Figure 10. Failure of connection between two concrete layers (Ibrahim et al., 2019)



11 paveikslas. Pleišėjimas P_2 pjūvyje E apkrovimo etape
Figure 11. Cracking in section P_2 at load E



12 paveikslas. Pleišėjimas P_2 pjūvyje F apkrovimo etape
Figure 12. Cracking in section P_2 at load F

plyšys viršutiniame sluoksnyje yra ties įdėklu (apkrovimo zonoje). Plyšio plotis – 0,2 mm. Monolitiniame sluoksnyje briaunose tarp intarpų toliau didėja pleišėjimas (žr. 12 pav.).

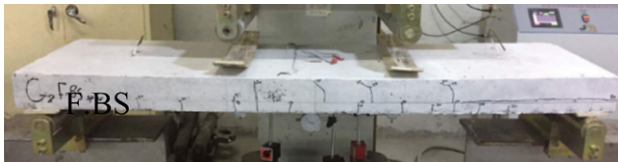
3. Eksperimentinio pleišėjimo charakterio palyginimas

Surenkamosios monolitinės plokštės skaitmeninio modeliavimo metu gautas pleišėjimo charakteris veikiant irimo apkrovai [F apkrovos etapas ($P = 35$ kN)] (žr. 13 pav.) yra lyginamas su Ibrahim et al. (2019) straipsnyje pateiktu plokštės pleišėjimo charakteriu (žr. 14 pav.).

Skaitmenine analize ir eksperimentiniu bandymu gauti plokštės pleišėjimo charakteriai yra panašūs. Normaliniai plyšiai apatiniame sluoksnyje pakankamai gerai sutampa. Daugiausiai plyšių susidarė intarpų zonoje. Taip pat nustatytas panašus pleišėjimas viršutiniame sluoksnyje. Daugiausiai plyšių susidarė intarpų zonoje, arčiau plokštės vidurio. Viršutiniame sluoksnyje susidariusiems plyšiams būdinga „Y“ raidės forma. Taip pat eksperimentiniu būdu ir skaitmenine analize yra gauti horizontalieji plyšiai atraminėje zonoje, jungtyje tarp sluoksnių. Galima teigti, kad skaitmenine analize nustatytas sluoksniuotosios plokštės pleišėjimas tinkamai atkartoja eksperimentiniu bandymu gautą pleišėjimą. Skaitmenine analize nustatyta, kad paveiksluose pavaizduotų plyšių pločiai kinta nuo 0,08 mm iki 0,8 mm.



13 paveikslas. Pleišėjimas P_4 pjūvyje (plokštės krašte)
Figure 13. Cracking at section P_4



14 paveikslas. Plokštės pleišėjimas, nustatytas eksperimentiniu bandymu (Ibrahim et al., 2019)
Figure 14. Slab cracking after experimental test (Ibrahim et al., 2019)

Išvados

1. Norint sumažinti medžiagų sąnaudas bei spręsti šiuo metu aktualius ekologinius klausimus tikslinga surenkamųjų monolitinių perdangos plokščių tūryje įrengti tuštumas. Tuštumas formuoti naudojant iš plastikų atliekų pagamintus plastikinius intarpus.
2. Sluoksniuotųjų gelžbetoninių plokščių kompiuterinė analizė ir eksperimentiniai bandymai parodė, kad iš pradžių pleišėti pradeda apatinis plokštės sluoksniu. Veikiant didelėms apkrovoms jungtis tarp sluoksnių tampa iš dalies standi ir sluoksniai vienas kito atžvilgiu pasislenka.
3. Darbe atlikta kitų autorių atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė parodė, kad kompiuterine analize (programiniu paketu DIANA FEA) gautas konstrukcijos pleišėjimo charakteris pakankamai gerai atspindi tokių plokščių eksperimentinių tyrimų metu gautą pleišėjimo charakterį.

Literatūra

- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *ESSD*, 10(1), 195–217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- Bubbledeck. (2008). *Plastikinių intarpų ir gelžbetoninės perdangos plokštės su intarpais savybės ir konstrukciniai sprendiniai*. <http://www.bubbledeck-uk.com/>
- Cobias. (2016). *Plastikinių intarpų ir gelžbetoninės perdangos plokštės su intarpais savybės ir konstrukciniai sprendiniai*. <https://www.cobias.com/intl/en/>
- De Hoop Pekso. (2019). *Liktinio klojinio plokštės konstrukciniai sprendiniai ir savybės*. <https://www.dehoop-pekso.nl/>
- Flood Precast. (2019). *Liktinio klojinio plokštės konstrukciniai sprendiniai ir savybės*. <https://floodprecast.co.uk/>
- Geoplast. (2019). *Plastikinių intarpų ir gelžbetoninės perdangos plokštės su intarpais savybės ir konstrukciniai sprendiniai*. <https://www.geoplastglobal.com/en>

- Hanson. (2009). *Liktinio klojinio plokštės ir plokštės su plastikiniiais intarpais konstrukciniai sprendiniai ir savybės*. <https://www.hanson.co.uk/en>
- Hegger, J., Will, N., & Bulte, S. (2003). *Prestressed filigree floors for domestic construction*. Aachen University, Aachen, Germany. https://www.irbnet.de/daten/kbf/kbf_e_F_2430.pdf
- Ibrahim, A. M., Ismael, M. A., & Hussein, H. A. A. (2019). Effect of construction type on structural behaviour of R.C bubbled one-way slab. *Journal of Engineering Sciences*, 12(1), 73–79. <https://doi.org/10.24237/djes.2019.12109>
- Ji, H., & Liu, C. (2019). Ultimate shear resistance of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete beam. *Engineering Structures*, 203, 109825. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109825>
- Mohamed, M. I. S., Thamboo, J. A., & Jeyakaran, T. (2020). Experimental and numerical assessment of the flexural behaviour of semi-precast reinforced concrete slabs. *Advances in Structural Engineering*, 23(9), 1865–1879. <https://doi.org/10.1177/1369433220904011>
- Stehle, J., Karihallo, B. L., & Kenellopoulos, A. (2011). Performance of joints in reinforced concrete slabs for two-way spanning action. *ICE Proceedings Structures and Buildings*, 164(3), 900038. <https://doi.org/10.1680/stbu.9.00038>
- TNO DIANA. (2010). *Concrete compressive behaviour*. <https://dianafea.com/manuals/d942/MatLib/node268.html>
- TNO DIANA. (2015). *Concrete tensile behaviour*. <https://dianafea.com/manuals/d96/MatLib/node84.html>
- Unidome. (2021). *Plastikinių intarpų ir gelžbetoninės perdangos plokštės su intarpais savybės ir konstrukciniai sprendiniai*. <https://unidome.de/>
- Valivonis, J., Jonaitis, B., Zavalis, R., Skuturna, T., & Šneideris, A. (2014). Flexural capacity and stiffness of monolithic biaxial hollow slabs. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(5), 693–701. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.917122>

CRACKING ANALYSIS OF PRECAST – IN SITU REINFORCED CONCRETE SLAB WITH PLASTIC VOID FORMERS

J. Masėnas

Abstract

In this article results of experimental and numerical analysis of precast – in situ reinforced concrete slab with plastic void formers are discussed. Slab is composed of precast and in situ concrete layers. Voids are formed inside the slab using spherical plastic void formers. Slab cracking pattern is determined by numerical analysis. Cracking pattern acquired by numerical analysis is compared to cracking pattern determined by experimental study. Shear stiffness in the bond between precast and in situ concrete layers was specified when numerical model was built.

Keywords: cracking analysis, experimental analysis, numerical analysis, plastic void formers, precast – in situ reinforced concrete slab, slab support zone.