

**HÍ**

UMHVERFIS- OG BYGGINGARVERKFRÆÐIDEILD

Tölulegt reiknilíkan til að herma jarðskjálfta-svörun á járnbentum steinsteyptum stoðvegg

Lokaskýrsla (vegna ársins 2023)

Verkefni styrkt af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar

Verkefnisstjóri: Ching-Yi Tsai, Rannsóknasérfræðingu, HÍ

Þátttakendur:

Stefán Grímur Sigurðsson, meistaranemandi, umhverfis- og byggingarverkfræðideild, HÍ.

Bjarni Bessason, prófessor, umhverfis- og byggingarverkfræðideild, HÍ

Dórótea Høeg Sigurðardóttir, lektor, umhverfis- og byggingarverkfræðideild, HÍ

Ólafur Sveinn Haraldsson, forstöðumaður rannsóknadeildar Vegagerðarinnar

Dagsetning: 31. mars 2024

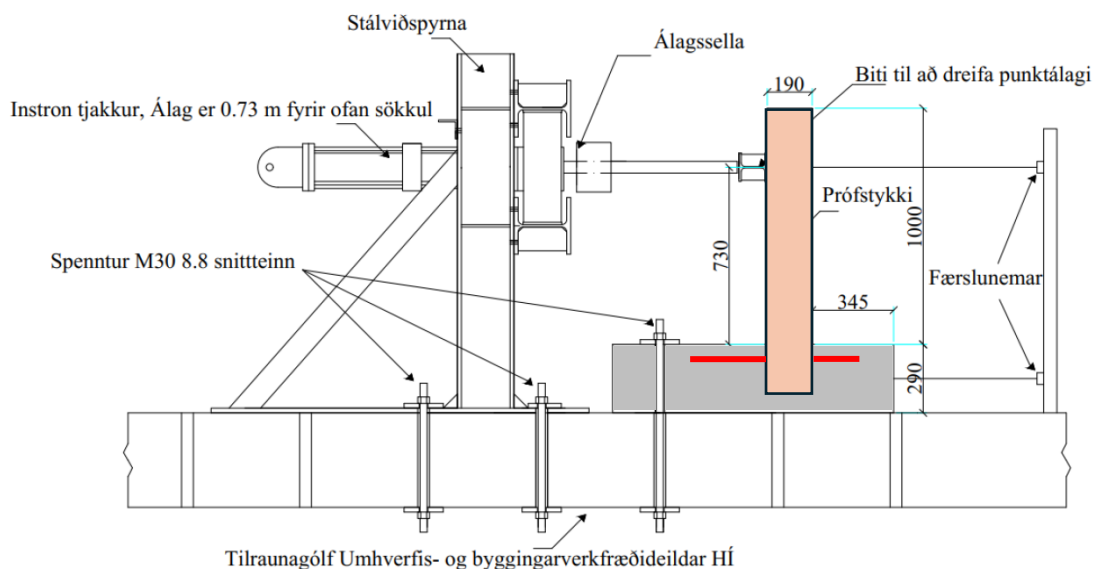
Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

Inngangur og markmið

Járn bent steinsteypa er algengasta byggingarefnið í brúargerð og húsbyggingum á Íslandi (Bessason o.fl. 2023). Þekking og skilningur á eiginleikum og hegðun þessa byggingarefnis gagnvart útrænu álagi er því lykilatriði til að geta hannað hagkvæm, vistvæn og örugg mannvirki.

Meginmarkmið rannsóknarverkefnis var að byggja upp færni og reynslu til að beita þróuðum reiknilíkönum til að herma og greina ólínulega hegðun járn bentra steinsteyptra burðarveggja, sem eru annars vegar útsettir fyrir stigvaxandi stöðuálagi og hins vegar stigvaxandi kviku álagi. Rannsóknáætlunin gerir ráð fyrir að nota svokallað bitastangalíkan (e. Beam-Truss model) til að herma tvær ólíkar rauntílaunir þar sem prófstykki eru prófuð til brots á tílaunastofum. Skynjarar eru notaðir til að skrá krafta, færslur og streitur til að kortleggja svörun prófstykkjanna sem síðan má nota við samanburð á hermdri og mældri svörun. Framvinda sprungumyndanna og skemmda er könnuð með myndtækni og ástandsskoðunum. Önnur tílaunin sem var hermd var framkvæmd á Íslandi en hin á hátækni rannsóknastofu í Portúgal.

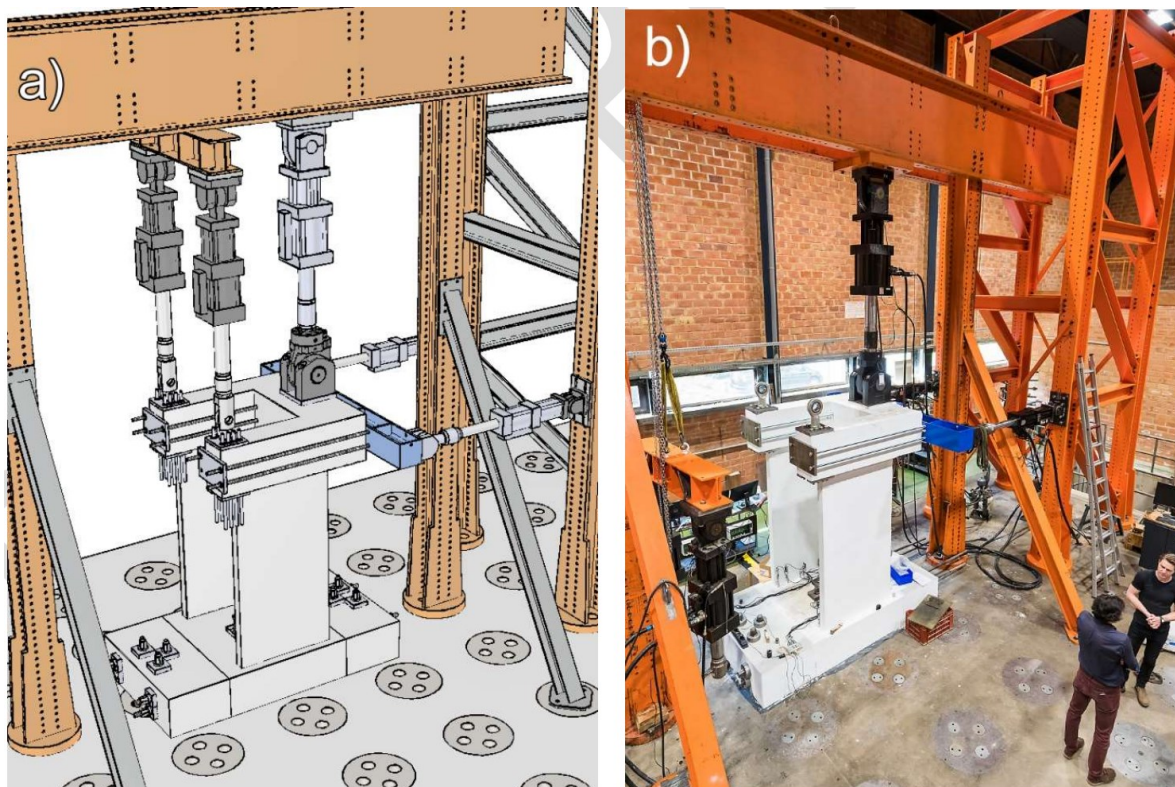
Á Íslandi voru tvær útfærslur af stoðveggjum álagsprófaðar haustið 2022 á tílaunagólfi Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands í VR3 byggingunni við Suðurgötu (sjá mynd 1). Annars vegar hefðbundin staðsteypt lausn, þar sem sökkuleining er fyrst steypt og síðan er slegið upp fyrir stoðvegg og hann steyptur síðar. Hins vegar útfærsla sem ætlað er að hraða framkvæmdaferlinu. Í því tilviki er stoðveggur forsteyptur, tengdur við sökkul og samsteyptur með honum í einni steypuvinnulotu (Haraldsson o.fl. 2023).



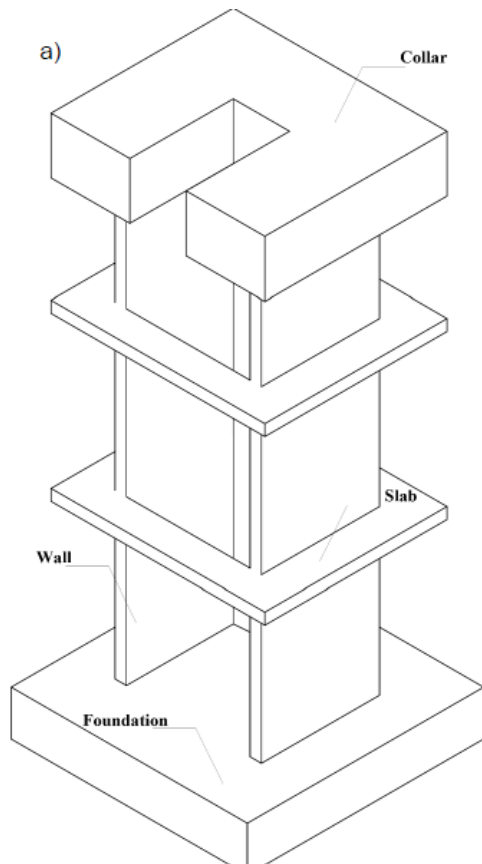
Mynd 1 – Forsteyptur stoðveggur sem prófaður var á tílaunagólfi í VR3-byggingunni í HÍ. Forsteypt veggeining (brún) sem er stungið niður í sökkuleiningu (grá eining) og samsteypt með henni. Sérstökum tengijárnum (rauð) er stungið í gengum forsteyptu eininguna og tengd í járngrind sökkuls áður en steypt er.

Forsaga að seinni tilrauninni, sem framkvæmd var í Portúgal, er sú að vorið 2022 voru tveir U-laga skúfveggir, með fyrirmynd í lyftukjarna í þriggja hæða byggingu, prófaðir í Belgíu undir stigvaxandi stöðuálagi á rannsóknastofu í Univeristé catholique de Louvain (sjá mynd 2). Prófið var skipulagt sem blindtilraunarkeppni (e. blind-test competition) þar sem þátttakendur fá lýsingu á tilraun og upplýsingar um alla efniseigileika en eiga að nota eigin tölvulíkön til að spá fyrir niðurstöðum tilraunar (Hoult o.fl. 2022; Hoult o.fl. 2023) áður en mæliniðurstöður eru þekktar. Þannig má sjá hvernig til tókst án þess að geta kvarðað tölvulíkan fyrir fram. Þegar niðurstöður hafa verið birtar má uppfæra tölvulíkön og læra af niðurstöðunum. Rauntílaunin í Portúgal var framkvæmd veturinn 2023-2024. Þar var U-laga skúfveggur, af sömu gerð og var notaður í Belgíu, settur á hristiborð og stigvaxandi kvikt álag sem svarar til yfirborðshreyfinga í jarðskjálfta notað til að prófa vegginn að brotmörkum (sjá mynd 3 og 4). Þessi tilraun var, eins og þessi í Belgíu, skipulögð sem blindtilraunarkeppni með skilafrest 15. mars 2024. Niðurstöður tilraunarinnar verða svo birtar í lok apríl 2024.

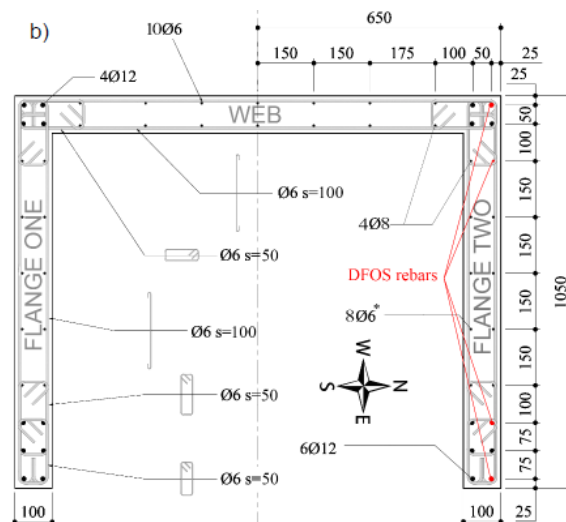
Mikill lærdómur felst í því að herma rauntílaunir og geta þannig sannreynt og metið áreiðanleika tölvulíkana. Slík líkön má svo nota í nýhönnun eða við burðarþolsgreiningu á þegar byggðum mannvirkjum.



Mynd 2 – Uppsetning á blindtilraun í Belgíu, a) skematísk mynd og b) ljósmynd frá tilraun (Hoult o.fl. 2023). Þrír lóðréttir tjakkar eru notaðir til að herma lóðrétt eiginálag en tveir láréttir tjakkar eru notaðir til að keyra stigvaxandi lárétt stöðuálag á tvö eins prófstykki, annars vegar þar sem álagið er stigvaxandi hliðarálag og hins vegar stigvaxandi vinduálag.



Mynd 3 – Uppsetning á blindtilraun í Portúgal, a) skematísk mynd og b) ljósmynd frá tilraun (ALL4wALL, 2024). Prófstykkið stendur á hristiborðinu og efst er búið að bæta við massa.



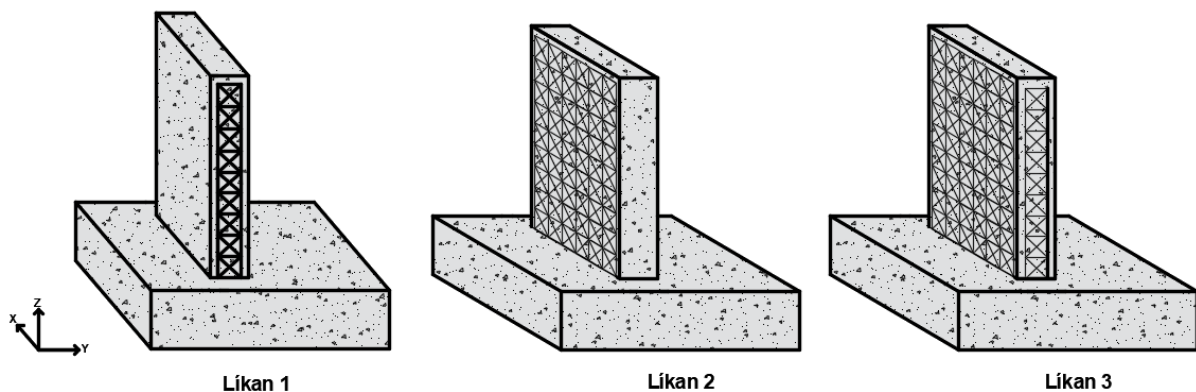
Mynd 4 – Þversnið U-laga veggjaeiningar þar sem flókin járnabending er sýnd (lóðrétt langjárn og lykkjur). Álagstefnur N-S og E-W eru líka sýndar (ALL4wALL, 2024).

Framkvæmdalýsing og verkáætlun

Meginmarkmið verkefnisins var að þróa áreiðanleg tölvulíkön til að herma ólínulega hegðun járnbentra steinsteyptra burðarveggja sem verða fyrir bæði stöðuálagi og kviku jarðskjálftaálagi. Verkefnið var upphaflega skipulagt sem þrír vinnupakkar, VP1, VP2 og VP3. Vinnupakkar 1 og 3 voru skilgreindir sem tvö aðskilin meistaraverkefni en VP2 var þátttaka í blindu tilrauninni í Portúgal. Vinnupakki 2 var umfangsmeiri en áætlað var í upphafi og því var ákveðið að sleppa VP3. Vinnupökkum 1 of 2 er nánar lýst hér að neðan:

VP1 – Bitastangalíkan notað til að greina stoðvegg (Tímabil: jan-maí 2024)

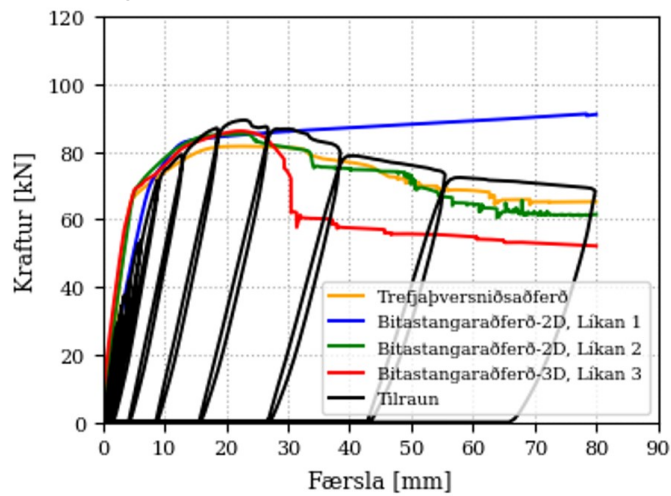
Þessum vinnupakka er lokið. Meistaraneinn, Stefán Grímur Sigurðsson, notaði bitastangalíkan til að herma tilraun sem framkvæmd var á Íslandi. Í þessu líkani eru einingar (bita- og stangaeiningar) byggðar upp með trefjaþversniði þar sem hver þráður getur haft mismunandi ólínulega efniseiginleika (bendistál, bendilukt steypa, óbendilukt steypa o.s.frv.) sjá nánar Lu o.fl. (2014) og Álvarez o.fl. (2020). Þrjú mismunandi bitastangalíkon voru notuð til að herma tilraunirnar á tveimur útfærslum af stoðveggjum sem prófaðar voru á spennigólfi Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar við Háskóla Íslands (sjá mynd 5). OpenSees (2024) hugbúnaðurinn var notaður við líkangerðina. Mynd 6 sýnir meginniðurstöður úr hermuninni fyrir forsteyptu eininguna og samanburð við tilraunaniðurstöður.



Mynd 5 – Þrjú mismunandi bita-stangarlíkon sem notuð voru til að herma niðurstöður sem fengust á lagsprófi á stoðvegg á tilraungólfi Umhverfis- og byggingarverkfræðideildar við HÍ. Líkan 1 og líkan 2 eru í tvívídd en líkan 3 er í þrívídd.

Niðurstöður þessa vinnupakka hafa verið birtar í meistararitgerð Stefáns Gríms Sigurðssonar (2023) og með veggspjöldum bæði á Meistaradegi Verkfræðistofnunar Háskóla Íslands í maí 2023 og á Rannsóknaráðstefnu Vegagerðarinnar 27. október 2023 (sjá mynd 7).

Ritgerðina má nálgast á vefslóðinni: <http://hdl.handle.net/1946/44569>



Mynd 6 – Niðurstöður greiningar úr OpenSess fyrir trefjabitalíkan og bitastangalíkonin þrjú, og samanburður við tilraunaniðurstöður fyrir staðsteyptan stoðvegg.

Ólínuleg greining á steiptum stoðveggjum með einingaaðferðinni

Stefán Grímur Sigurðsson, Ching-Yi Tsai, Dórotea Høeg Sigurðardóttir og Bjarni Bessason

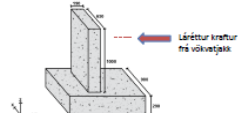
22. Rannsóknarráðstefna Vegagerðarinnar
27. október 2023

Markmið

Meginmarkmið verkefnis var að herra tilraunaniðurstöður frá álagsprófi á steiptum stoðveggjum með tölvutöku reiknilíkan.

Bakgrunnur

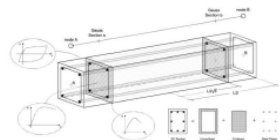
Frákvæmdartími við byggingu á brúm getur verið langur og kostnaðarsamur. Ýmsar lausnir eru í boði til að stytta þennan tíma. Almennt eru sökkir og stoðveggir í landstöpum brúa staðsteyptir. Hægt er að hraða uppbyggingunni með því að nota forsteyptar veggir sem er stungð niður í sökkulíkan áður en steipt er. Haustið 2022 var gerð tilraun til þess að skoða muninn á hefðbundinni staðsteyptri lausn og hönnun þar sem notaðar eru forsteyptar veggir. Tilraunin var framkvæmd í VR-III rannsóknabyggingu í Háskóla Íslands þar sem eitt prófstykki af hvernig var steipt og álagsprófað. Prófstykkin, sem líta eins út enu sjá í mynd 1. Tilraunin var samstarfsverkefni Vegagerðarinnar, Háskóla Íslands, BMA-Vallá og Verkfræðistofunnar Vista.



Mynd 1: Málsett mynd af prófstykkum (öll mál í mm).

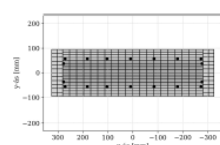
Aðferðir

Reiknilíkan fyrir bæði prófstykkin voru byggð upp með einingaaðferðinni í OpenSess hugbúnaðinum. Tvísnokkjar grunngerðir af líkönum voru skoðuð, annars vegar trefjabitalíkon og hins vegar bitastangalíkon. Trefjabitalíkon eru hentug til þess að greina vægðrot í burðarvirkjum á meðan bitastangalíkon gegna bæði til að greina skerðrot og vægðrot. Mynd 2 sýnir bitastöngu sem byggir á trefjapversniðsaðferð.



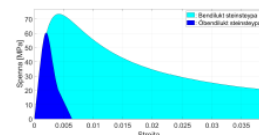
Mynd 2: Bitastönging í líkan sem byggir á trefjapversnið

Trefjapversnið í þessu verkefni var samsett úr óbendiluktri steinsteypu, bendiluktri steinsteypu og jámbendingu þar sem efnisgreinir þessara þriggja efnisgerða eru skilgreindar í stíthvori lagi og lagðir saman í eitt þversnið. Líkanuppbyggingin í OpenSess var í samræmi við fyrirliggjandi gögn frá prófunum á stoðveggjum í VR-III ásamt hönnunartekningum. Þjögur líkön voru byggð með trefjapversniðsaðferðinni. Mynd 3 sýnir trefjapversnið í stoðvegg.



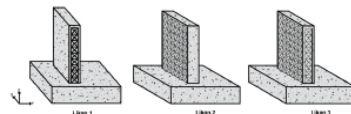
Mynd 3: Trefjapversnið í stoðvegg

Efnisgreinir bendiluktu steinsteypu er stórnað af umfangi lykkjuárna og var grundvöllur á svokölluðu Mander-líkani sem var lagt fram árið 1984. Spennustreitu graf fyrir bæði bendilukta og óbendilukta steinsteypu stoðveggis byggir á því líkani má sjá í mynd 4.



Mynd 4: Spennu-streitu graf fyrir bendilukta og óbendilukta steinsteypu

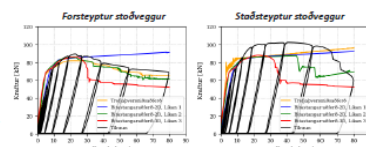
Þrjú líkön voru byggð grundvöllur á bitastangaaðferðinni. Tvö þeirra voru sett upp í tveimur víddum fyrir stíthvora hlíð stoðveggis (Líkan 1 og 2) á meðan eitt líkan var gert í þremur víddum (Líkan 3), sjá mynd 5.



Mynd 5: Skýringarmynd fyrir uppsetningu á öllum þrem bitastangalíkönum

Niðurstöður

Í heildina voru framkvæmdar fjórar greiningar með trefjapversniðsaðferðinni og fjórar greiningar með bitastangaaðferðinni. Líkönin voru greind með mismunandi forsendum hvað varðar efnis- og einingagæðir sem OpenSess býður upp á. Flest líkönin gáfu ásettanlegar niðurstöður. Á mynd 6 má sjá niðurstöður greininga fyrir báða stoðveggir fyrir besta trefjapversniðlíkan og öll bitastangalíkonin og samanburð við tilraunaniðurstöður.



Mynd 6: Niðurstöður greiningar úr OpenSess fyrir báða stoðveggir

Hversu vel greiningarferlarnir féllu að mældum ferli var metið með fjórum mælistikum. Útrá þeirri aðferðarfékkist að trefjapversniðlíkanin gáf bestu niðurstöður fyrir forsteypta stoðvegginn. Hins vegar tókst ekki með því líkani að herra nógu vel ólínulegu hegðuna fyrir staðsteypta stoðvegginn. Í reynd var sá veggur um 10mm þykki en tölvulíkan. Þannig að hluta til má útskýra ósamræmið út frá því. Út frá mælistikum sem notaðir voru í verkefninu fékkist að bitastangalíkanin þar sem álagð verkið þvert á skástífunar (Líkan 2) gáf bestu niðurstöður fyrir staðsteypta stoðvegginn.

Bakkr

Verkefnið var unnið sem meistara- og baccalaverkefni við Háskóla Íslands og styrt af Vegagerðinni sem færir bestu þakkir fyrir.

Mynd 7 – Veggspjald frá Rannsóknaráðstefnu Vegagerðarinnar 27. október 2023.

VP2 – Bitastangarlíkan notað til að greina U-laga burðarvegg undir jarðskjálftaálagi

(Tímabil: október-apríl 2024)

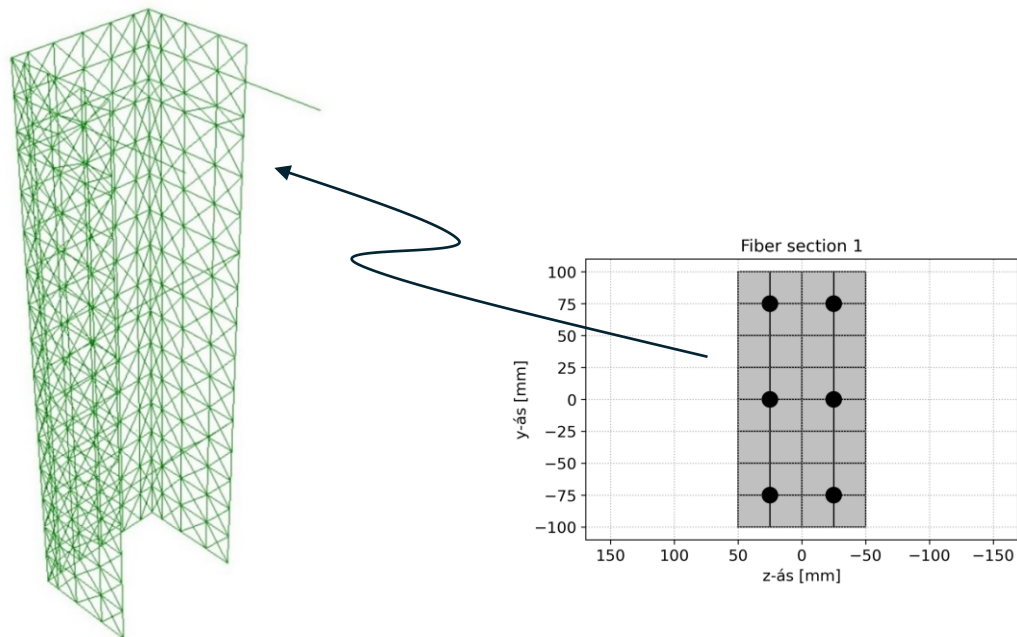
Þessi vinnupakki gekk út á að taka þátt í blindtilraunakeppninni í Portúgal þar sem þátttakendur áttu að spá fyrir hegðun U-laga skúfveggjar undir stigvaxandi kviku álagi (sjá myndir 3 og 4) (ALL4wALL, 2024). Tvær hröðunartímaraðir voru notaðar til að hreyfa undirstöður prófstykkis lárétt, nánar tiltekið stefnuþáttur HNN og HNE, sem mældir voru nálægt upptökum í jarðskjálfta af stærðinni $M_w 6,5$ sem skók Ítalíu 30. október 2016. Líkt og í VP1 var notast við bitastangarlíkanið. Keyrðar voru 9 álagslotur (GM0 til GM8) þar sem stefnuþættirnir voru magnaðir upp smátt og smátt (sjá töflu á mynd 8). Í fyrstu lotu er til dæmis HNN þátturinn látinn virka með 10% ákefð af fullum styrk yfirborðshreyfinga í „East-West“ (E-W) stefnu en HNE-þátturinn var óvirkur (stefnur eru sýndar á mynd 4). Í síðasta álagsskerfinu voru svo báðir stefnuþættir með 100% ákefð, o.s.frv.

	Scale [%]	
	HNN (east-west on shake table)	HNE (north-south on shake table)
GM0	10	0
GM1	25	0
GM2	25	25
GM3	50	0
GM4	50	50
GM5	75	0
GM6	75	75
GM7	100	0
GM8	100	100

Mynd 8 – Kvörðun á tímaröðum í 9 álagslotum sem notaðar voru til að stjórna hristiborði á tilauninni í Portúgl með kviku álagi.

Stefán Grímur Sigurðsson sem lauk meistaraþrófi í júní 2023 (sjá VP1) vann að þessum vinnupakka í samstarfi við aðra þátttakendur í rannsóknaverkefninu. Mynd 9 sýnir bitastangarlíkanið og dæmi um snið í einni einingu. Meginmunurinn á þessum vinnupakka og VP1 er að hér þurfti að notast við ólínulega tímaraðgreiningu (dýnamísk greining) á meðan vinnupakki 1 byggðist á stigvaxandi stöðuálagi (statísk greining). Skila þurfti niðurstöðum 15. mars 2024 en niðurstöður verðar birtar í lok apríl. Á mynd 10 er sýndur hluti af þeim gögnum sem skilað var 15. mars inn til keppnishaldara. Eins og sést þurfti að skila inn tilteknum svörunargildum fyrir hverja álagslotu, GM0 til GM8. Til dæmis reiknuð mesta færsla í tiltekinni hæð, mesti tregðukraftur í sömu hæð (ákvarðaður út frá reiknaðri hröðun og tilteknum massa), varanleg færsla eftir hverja lotu o.s.frv. Tímaraðgreiningin var mjög tímafrek og að keyra allar álagsloturnar tók marga klukkutíma á sæmilegri fartölvu.

Ætlunin er að birta vísindagrein í Verktækni, tímariti Verkfræðingafélags Íslands (www.ije.is) þar sem þátttakan í blindtilraunakeppninni verður lýst. Ljóst er að sú grein verður ekki fullkláruðu fyrir en niðurstöður úr tilrauninni hafa verið birtar.



Mynd 9 – Bitastangalíkan og dæmi um þversnið í einni bitaeiningu.

Predictions - Specimen UWS1 (Dynamic)											
Compulsory Information											
8a	Failure Mode:	Flexure with reinforcement tension fracture									
8b	If the answer to number 8a is "Other", please describe the governing failure:		GM0	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	GM6	GM7	GM8
9	Maximum relative horizontal displacement (EW-direction) at $h = 4290$ mm	Enter your estimates for each ground motion (GM) and in units of millimeters (mm)	1.4	15.7	24.1	45.6	57.1	79.5	75.1	100.2	93.1
10	Maximum lateral EW inertial force at $h = 4290$ mm	Enter your estimates for each ground motion (GM) and in units of kilo-Newtons (kN)	38.3	131.6	186.5	246.9	225.8	237.7	228.5	251.8	239.6
Optional Information			GM0	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	GM6	GM7	GM8
11	Maximum tensile strain experienced by at the base of the north rebar in the flange end/flange boundary end	Enter your estimates for each ground motion (GM), unitless (e.g., mm/mm)	0.0001	0.0016	0.0044	0.0093	0.0144	0.0187	0.0187	0.0254	0.0229
12	Maximum residual displacement	Enter your estimates for each ground motion (GM) and in units of millimeters (mm)	0.059	0.33	1.53	10.26	16.57	33.46	32.68	52.06	44.22
13	Energy dissipated:	Enter your estimates for each ground motion (GM) and in units of kilonewtons meter (kNm)	31.26	3407.89	10336.00	25095.50	23723.20	33354.80	36494.10	56477.70	58799.40
14	Relative displacement-time history at $h = 4290$ mm (in the EW-direction)	CLICK HERE TO INSERT TIME AND DISPLACEMENT VALUES									
15	Maximum relative torsional rotation at $h = 4290$ mm	CLICK HERE TO INSERT TIME AND ROTATION VALUES									

Mynd 10 – Niðurstöður úr tölvuhermun með bitastangalíkani á svörun U-veggjar fyrir mismunandi álagslotur (GM0-GM8) sem skilað var inn til þeirra sem stóðu fyrir blindtilrauninni í Portúgal.

Lokaorð

Meginmarkmið rannsóknarverkefnis var að byggja upp færni og reynslu til að beita þróuðum tölvureiknilíkönunum til að herma og greina ólínulega hegðun steinsteyptra járnþentra burðarveggja undir bæði stöðuálagi og kviku jarðskjálftaálagi. Ágætis niðurstöður fengust í VP1 en það á eftir að koma í ljós hvernig gekk að herma tilraunaniðurstöður í VP2. Það er mat okkar þátttakenda að meginmarkmiðum rannsóknarverkefnis hafi náðst og að við stöndum feti framar í líkangerð á steinsteyptum veggjum en við stóðum í upphafi verkefnisins.

Heimildir

1. ALL4wALL, (2024). Test description for the *ALL4wALL Blind prediction competition*, conducted by the iMMC at UCLouvain, Version 3.0: 2024.01.23.
2. Álvarez, R., Restrepo, J. I., Panagiotou, M. og Godínez, S, E. (2020) [2]. Analysis of reinforced concrete coupled structural walls via the Beam-Truss Model. *Engineering Structures*, 220(2020), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.1005>
3. Bessason, B., Rupakhety, R., & Bjarnason, J. Ö. (2023). Scenario-Based Seismic Risk Assessment for the Reykjavik Capital Area. *Buildings*, 13(12), 2919.
4. Haraldsson, O. S., Bessason, B., Tsai, C. Y., Sigurjónsson, F., & Smáráson, R. S. (2023, June). New Connection Between Precast Abutment Wall and CIP Foundation Suitable for Accelerated Bridge Construction. In *International Symposium of the International Federation for Structural Concrete* (pp. 1558-1567). Cham: Springer Nature Switzerland.
5. Hoult, R., Pacheco de Almeida, J., Doneux, P. (2022). A blind prediction of the seismic and torsional performance of RC U-shaped core walls, *Proceedings of the 3th European conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Bucharest Romania, September 2022, p. 929 – 937.
6. Hoult, R., Doneux, C., & Pacheco de Almeida, J. (2023). Tests on reinforced concrete U-shaped walls subjected to torsion and flexure. *Earthquake Spectra*, 39(4), 2685-2710.
7. Lu, Y., Panagiotou, M. (2014). Three-Dimensional Cyclic Beam-Truss Model for Non-planar Reinforced Concrete Walls. *Journal of structural engineering*, 140(3), 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000852](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000852)
8. OpenSees (2024): Sótt 31.03.2024 <https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php>
9. Stefán Grímur Sigurðsson (2023), *Ólínuleg greining á steyptum stoðveggjum með einingaaðferðinni*. Meistararitgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóla Íslands (júní 2023). <http://hdl.handle.net/1946/44569>