

<https://doi.org/10.33112/ije.30.4>

Notkun á bitastangalíkani til að herma burðarþolstilraunir á járnbentum steinsteypum burðarveggjum

Application of the beam-truss model to simulate experimental test results of RC walls

Stefán Grímur Sigurðsson^{a,b}, Ching-Yi Tsai^a, Bjarni Bessason^a
og Ólafur Sveinn Haraldsson^{a,c}

^aUmhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands. Hjarðarhaga 2-6, 107 Reykjavík.

^bÍstak, Bugðufliót 19, 270 Mosfellsbær.

^cRannsóknadeild Vegagerðarinnar, Suðurhraun 3, 210 Garðabær.

Fyrirspurnir/Correspondence:

Stefán Grímur Sigurðsson
stefangrimur@gmail.com

Greinin barst 18. nóvember 2024.

Samþykkt til birtingar 11. febrúar 2025.

Birt á vef 17. febrúar 2025.

Ágrip

Járnbentir steinsteyptir burðarveggir eru algengasta burðarformið í íslenskum húsbyggingum. Frá ómunatíð hafa kröftugir jarðskjálftar reglulega riðið yfir í helstu brotabeltum landsins og reynt á menn, mannvirki og innviði. Til að meta áhrif jarðskjálfta á mannvirki er gagnlegt að hafa aðgang að áreiðanlegum reiknilíkönum sem eru mismunandi eftir því hvers konar mannvirki er verið að greina. Svokallað bitastangalíkan hefur á undanförunum árum verið þróað erlendis til að herma hegðun steinsteyptra burðarveggja. Reiknilíkan af þessari gerð var nýlega notað við Háskóla Íslands til að herma tilraunir þar sem tvær gerðir af stoðveggjum voru álagsprófaðar. Í jarðskjálftaverkfræði er þekkt að halda svokallaðar blindtilraunakeppnir þar sem burðarvirki eru álagsprófuð við stigvaxandi álag. Fyrirkomulagið í slíkri keppni er þannig að þátttakendur fá allar upplýsingar um hönnun prófstykkis en eiga síðan að nota eigin reiknilíkon til að spá fyrir hegðun og brotmynd burðarvirkisins án þess að þekkja tilraunaniðurstöður. Nýlega fór fram alþjóðleg tvískipt blindtilraunakeppni. Fyrri hlutinn var haldinn árið 2022 í UCLouvain háskólanum í Belgíu, þar sem tveir eins U-laga veggir úr járnbentri steinsteypu, með lyftukjarna í þriggja hæða byggingu sem fyrirmynd, voru prófaðir með stigvaxandi stöðuálagi gangvart bæði beygju- og vinduáraun. Seinni hluti keppinnar fór svo fram í Portúgal árið 2024. Þar var samskonar U-laga burðarveggur prófaður á hristiborði gagnvart kvikri jarðskjálftahreyfingu með mismunandi ákefð. Rannsóknahópur frá Háskóla Íslands tók þátt í þessum seinni hluta keppinnar og notaði

bitastangalíkan og opna hugbúnaðinn OpenSees til að spá fyrir jarðskjálftasvörun prófstykkisins. Í greininni er fjallað um notkun á bitastangalíkaninu til að herma tilraunaniðurstöður úr stoðveggjarannsókninni og til að spá fyrir um niðurstöður úr seinni hluta blindtilraunakeppninnar. Eftir að tilraunaniðurstöður lágu fyrir var líkanið endurbætt til ná betri árangri. Heilt yfir gekk vel að herma niðurstöður úr öllum tilraununum og mikilvæg reynsla og aukin færni fékkst úr rannsóknaverkefninu.

Lykilorð: *Járnþent steinsteypa, burðarveggir, jarðskjálftaálag, töluleg reiknilíkön, tilraunaniðurstöður, hermun.*

Abstract

Reinforced concrete (RC) structural walls are the most common structural system in Icelandic buildings to resist lateral seismic loads. Over the centuries, destructive earthquakes have frequently impacted the country's most active seismic zones, causing significant effects on people, buildings, and infrastructure. To assess earthquake response of structures, it is valuable to have access to reliable computational models. A blind test competition in earthquake engineering is a research challenge where participants are tasked with predicting the behavior or performance of a structural system under seismic loading without prior knowledge of the actual experimental results. It gives engineers and researchers the opportunity to identify strengths and weaknesses in current modeling approaches. Recently, a two-part international blind test competition took place. The first part was hosted by the UCLouvain University in Belgium, where two identical U-shaped structural walls tested quasi-static under flexure and torsion loads. The second part of the blind test competition took place in Portugal in 2024. There, an identical U-shaped load-bearing wall was constructed and then tested on a shake-table. A research group from the University of Iceland participated in this second part of the competition. A numerical model was developed using the beam-truss modeling strategy and the open-source software OpenSees to predict test results. This modeling strategy is well suited for simulating RC wall in-plane responses, where shear deformations and shear cracks can occur. Before participating in the blind tests, the modeling strategy was first tested and compared to available test data from experiment with two abutment walls at the University of Iceland. This paper describes the beam-truss modeling strategy and how it was utilized to simulate the abutment walls experimental results as well as the shake-table tests from the second part of the blind competition. Following the announcement of the competition results, the numerical model was further refined to obtain more accurate results. Overall, the results from all the experiments were successfully simulated, and important experience and increased skills were gained from the research project.

Keywords: *Reinforced concrete, structural walls, seismic loads, numerical models, laboratory results, simulation*

1. Inngangur

Á Íslandi er steinsteypa algengasta byggingarefnið í húsbyggingum, og í ýmsum öðrum mannvirkjum. Á höfuðborgarsvæðinu eru meira en 90% af íbúðarbyggingum byggðar úr steinsteypu. Í flestum tilvikum eru þetta veggjabyggingar, þar sem burðarveggir veita viðnám gegn láréttu álagi eins og frá jarðskjálftum, samhliða því að bera lóðrétt álag vegna eigin- og

notálags. Jarðskjálftavá á Íslandi er sú mesta í Norður-Evrópu og sambærileg þeirri sem finna má í Suður-Evrópu (EFEHR, 2024). Í Suðurlandsskjálftunum 2000 og Ölfuskskjálftanum 2008 voru mannvirki á áhrifasvæði jarðskjálftanna útsett fyrir stórum jarðskjálftakröftum. Flest hús sluppu ósködduð eða lítið skemmd en þó urðu sum fyrir umtalsverðum skemmdum og í einstaka tilvikum varð altjón. (Bessason o.fl., 2022). Í þessum atburðum urðu þó hvorki alvarleg slys á fólki né dauðsföll.

Yfirleitt má draga má lærdóm af hverjum jarðskjálfta og oftast kemur eitthvað óvænt eða ófyrirséð fram. Hér má nefna sem dæmi atburði síðustu ára (2020-2024) á Reykjanesskaga og áhrif þeirra í Grindavík. Þeir hafa gefið mikilvægar upplýsingar varðandi sprunguhreyfingar sem fyrst og fremst skemmdu byggingar sem voru staðsettar á eða mjög nærri helstu misgengjunum og útsettar fyrir mismunafærslum á undirstöðum. Suðurlandsskjálftarnir 2000 og 2008 voru hins vegar hefðbundnir jarðskjálftar í þeim skilningi að mesta tjónið þá var af völdum kröftugra yfirborðshreyfinga sem hristu og skóku mannvirki og skemmdu. Á sama hátt og sögulegir jarðskjálftar hafa sagt okkur mikið um frammistöðu torfhúsa í stórum skjálftum, til dæmis árin 1706, 1734, 1784, 1896 og 1912 (Júlíus Sólnes o.fl., 2013), gefa Suðurlandsskjálftarnir 2000 og 2008 okkur gagnlegar upplýsingar um styrk og veikleika lágreistra nútímabygginga úr steinsteypu, timbri og holsteini. Byggt á tjónagögnum frá þessum síðustu stóru skjálftum, sem skráð voru í tengslum við mat á tryggingabótum hjá Náttúruhamfaratryggingum Íslands, hafa verið þróuð tjónnæmislíkön (e. *vulnerability models*) og skemmdaföll (e. *fragility curves*) (Bjarni Bessason o.fl., 2016; Bessason o.fl. 2020; 2022). Tjónnæmislíkön segja til um líklegt tjón sem hlutfall af brunabótamati eða endurstofnverði (e. *replacement value*) fyrir gefna ákefð yfirborðshreyfingar. Skemmdaföll hins vegar, segja til um líkur á yfirstíga tiltekið skemmdastig sem fall af ákefð yfirborðshreyfingar. Skemmdastigin eru oftast skilgreind með orðum, til dæmis: *engar*, *litlar*, *miðlungs*, og *miklar skemmdir*. Slík líkön og föll eru gagnleg við áhættugreiningu, til að bæta jarðskjálftahönnun, við neyðarstjórnun og fleira (Bessason o.fl., 2023).

Um 90% bygginga á áhrifasvæði Suðurlandsskjálftanna 2000 og 2008 voru ein til tvær hæðir og engar byggingar voru hærri en fjórar hæðir. Þróunin á Suðurlandi á síðustu árum, og þá einkum á Selfossi, hefur verið að byggja hærri byggingar. Ef kastljósinu er beint að höfuðborgarsvæðinu eru byggingar þar almennt hærri en á landsbyggðinni. Þar sem ekki eru til tjónagögn fyrir hærri byggingar sem eru hannaðar og reistar með íslensku verklagi, þarf að treysta á töluleg reiknilíkön til að búa til tjónnæmislíkön fyrir þau. Slík líkön þurfa að vera áreiðanleg og gefa niðurstöður sem hægt er að treysta þó óvissa fylgi alltaf spálíkönunum. Jarðskjálftasvörun bygginga þar sem lárétt álag er tekið upp með járn bentun steinsteypum burðarveggjum er mjög krefjandi að herma með tölulegum líkönunum. Á undanförnum árum hafa verið þróuð öflug en ólík töluleg reiknilíkön fyrir slík burðarvirki sem öll hafa sína kosti og galla.

Í þessu rannsóknaverkefni er langtímamarkmiðið að búa til fræðileg tjónnæmislíkön og skemmdaföll fyrir steinsteypdar byggingar sem eru mikilvægt framlag til viðbótar við tjónnæmislíkön sem byggja á tjónagögnum. Áfangi að því markmiði er að sannreyna gæði og áreiðanleika mögulegra reiknilíkana til að herma og greina ólínulega jarðskjálftasvörun steinsteyptra burðarveggja. Sem fyrsta skref í þeirri vegferð var ákveðið að leggja áherslu á að herma tilraunaniðurstöður frá rannsóknastofum. Þannig fæst hlutlægt mat á áreiðanleika slíkra líkana. Við gerð líkansins var valið að nota svokallað bitastangalíkan (e. *Beam-Truss model*) (Lu o.fl. 2016; Álvarez, o.fl. 2020), sem var sérstaklega þróað til að líkja eftir hegðun járn bentra steinsteyptra burðarveggja. Fyrst var líkanið notað til að herma tilraun á tveimur stoðveggjum sem prófaðir voru undir stigvaxandi stöðuálagi í tilraunaaðstöðu Umhverfis- og

byggingarverkfræðideildar Háskóla Íslands (HÍ) (Stefán Grímur Sigurðsson, 2023). Í framhaldinu var ákveðið að taka þátt í alþjóðlegri blindtilraunakeppni (e. *blind-test competition*). Í slíkri keppni fá þátttakendur: smíðateikningar og deili af prófstykkinu sem nota á í tilraunina; mælda efniseigileika fyrir steypu og stál; og loks lýsingu á því hvernig álagi er beitt á prófstykkið. Þátttakendur eiga svo að þróa eigin reiknilíkön og aðferðafræði til að spá fyrir um hvernig prófstykkið svarar álaginu (t.d. færslur og streitur), án þess að þekkja raunsvörun prófstykkis. Þegar niðurstöður hafa verið birtar má uppfæra líkön og læra af niðurstöðunum. Einnig kemur fram með þátttöku í svona keppni hvaða reiknilíkön og forsendur aðrir rannsóknarhópar eru að nota og hvaða aðferðafræði skilar bestum árangri (Hoult og Almeida, 2024).

Þessi grein skiptist í fjóra megin kafla. Kafli 2 fjallar um bitastangalíkanið sem notað var í þessari rannsókn. Í kafla 3 er burðarþolsprófi á stoðveggina lýst og niðurstöður úr mismunandi uppsetningu á reiknilíkani bornar saman við mældar tilraunaniðurstöður. Kafli 4 fjallar um blindtilraunakeppninni. Í kafla 5 er reiknilíkanið sem notað var útskýrt og spáð svörun borin saman við tilraunaniðurstöður. Í framhaldinu er líkanið betrumbætt og fínstillt til að geta betur hermt tilraunina. Loks eru meginniðurstöður rannsóknarinnar dregnar saman í kafli 6.

2. Bitastangalíkan

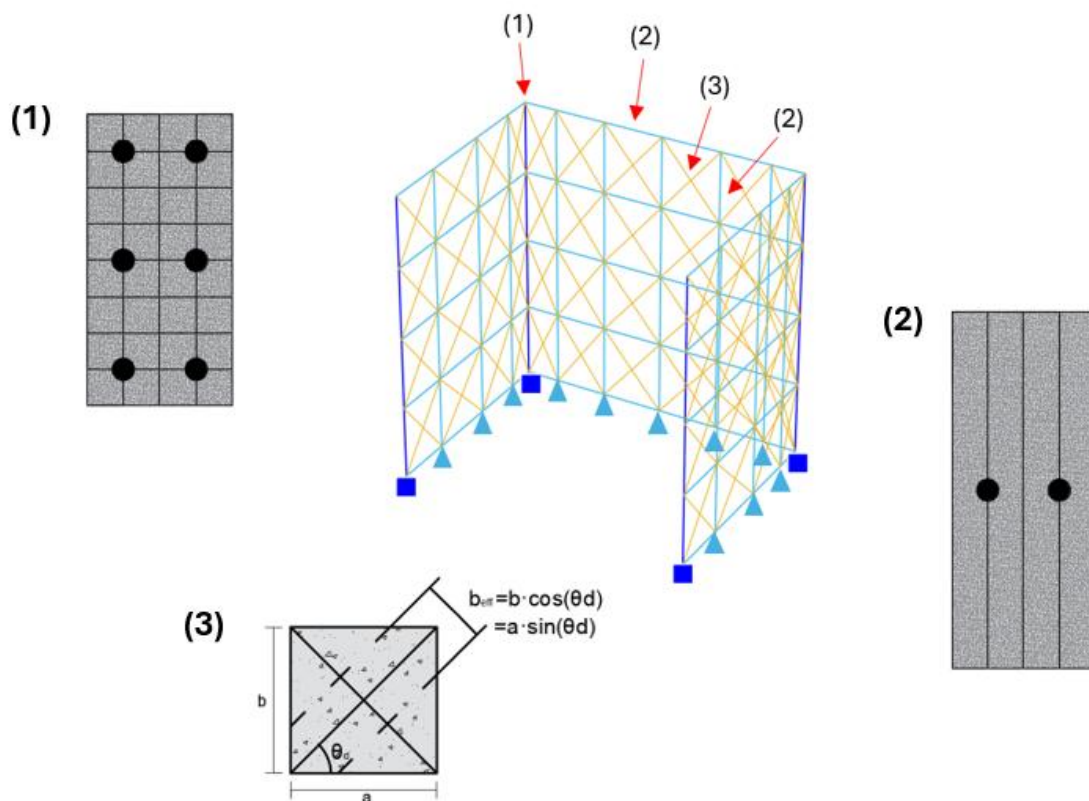
Bitastangalíkanið byggir á einingaaðferðinni (e. *the finite element method*). Það var þróað sem þrívíddaraðferð til þess að reikna svörun járnþentra steinsteyptra burðarveggja sem verða fyrir stöðuálagi eða kviku álagi eins og jarðskjálftaálagi (Lu o.fl. 2016; Álvarez, o.fl. 2020). Segja má að líkanið sé endurbætt útgáfa af svokölluðu stoð-og-toglíkani (e. *strut-and-tie model*), sjá nánar til dæmis Hwang o.fl. (2001). Aðferðin byggist á því að skipta burðarvirki upp í láréttar, lóðréttar og skástæðar einingar af þremur megingerðum (sjá mynd 1):

- (1) Ólínulegir Euler-Bernoulli bitar með stífar tengingar sem eru notaðir fyrir allar lóðréttu einingarnar í endum veggja sem og þar sem veggir tengjast í hornum (bláar einingar).
- (2) Ólínulegir Euler-Bernoulli bitar sem eru liðtengdir um ása sem liggja hornrétt á vegg og eru notaðir í allar láréttar og lóðréttar einingar að undaskildum þeim sem eru í endum veggja (ljósbláar einingar). Liðtengingarnar gera það að verkum að í plani veggja virka burðareiningarnar eins stangir. Formbreytingar úr plani (e. *out-of-plane deformations*) eru hins vegar stífaðar af með vægisstífum teningum um snúningsása í plani veggja. Þannig er stíf tenging um láréttan ás í veggplani fyrir lóðréttar bitaeiningar og stíf tenging um lóðréttan ás í veggplani fyrir láréttar bitaeiningar.
- (3) Ólínulegar stangareiningar eru notaðar í allar skástæðar einingar og er ætlað að herma skúfhegðun (e. *shear behaviour*) í viðkomandi vegg (gular einingar).

Samantekið þýðir þetta að grindarhegðun er ráðandi varðandi burð hvers veggjar í veggplaninu en formbreytingar úr plani eru takmarkaðar með stífum teningum láréttu og lóðréttu bitaeininganna.

Stærð lóðréttra og láréttra bitaeininga byggir beint á raunstærð burðarvirkis, en gerð er ákveðin nálgun þegar þverskurðarflatarmál skástanga er ákvörðuð eins og sést á mynd 1 (Lu o.fl. 2016). Þversnið bitaeininga af gerð (1) er byggt upp sem samverkandi trefjaþversnið (e. *fiber sections*) sem inniheldur annars vegar steypustrendinga og hins vegar stálstangir járnþendur, sem vinna saman sem ein heild. Samverkunin byggir á Euler-Bernoulli nálguninni sem felur í sér að plan í óformbreyttu þversniði er áfram plan eftir formbreytingu (e. *plane sections remain plane*).

Hver steypustrendingur getur verið skilgreindur með mismunandi ólínulega efniseiginleika. Fyrir dæmigert þversnið þar sem lykkjubending er til staðar er gjarnan notast við tvenns konar efniseiginleika. Eina gerð fyrir steypustrendinga sem liggja utan við lykkjubendinguna (e. *unconfined concrete*) og aðra fyrir strengingum sem eru innan hennar og hafa svokallaða bendilukt (e. *confined concrete*), sem eykur styrk og seiglu steypunnar (sjá t.d. Mander o.fl. 1988). Efniseiginleikar stálsins eru einnig ólínulegir. Fyrir trefjaþversnið bita sem svarar til gerðar (2) með annan ásinn liðtengdan, er nóg að vinna með ílanga strengingum sem taka upp beygjuvægi um ás í veggplaninu. Stífni og styrkur skástífa (3) byggir eingöngu á framlagi frá steypunni. Þar er virka breidd b_{eff} þversniðsins ákvörðuð út frá halla einingarinnar (θ_d) og breidd eða hæð hennar (sjá mynd 1). Með því að fylgjast með streitum og spennum í skástífunum þegar reiknilíkanið er keyrt undir stigvaxandi álagi má sem dæmi vakta hvenær togbrott verður í skástífu sem er ávísun á skúfbrot í steypunni. Í þessu verkefni var notast við OpenSees hugbúnaðinn sem býður upp á mismunandi gerðir af ólínulegum efnislíkönunum fyrir bæði stál og steypu (McKenna o.fl. 2000).

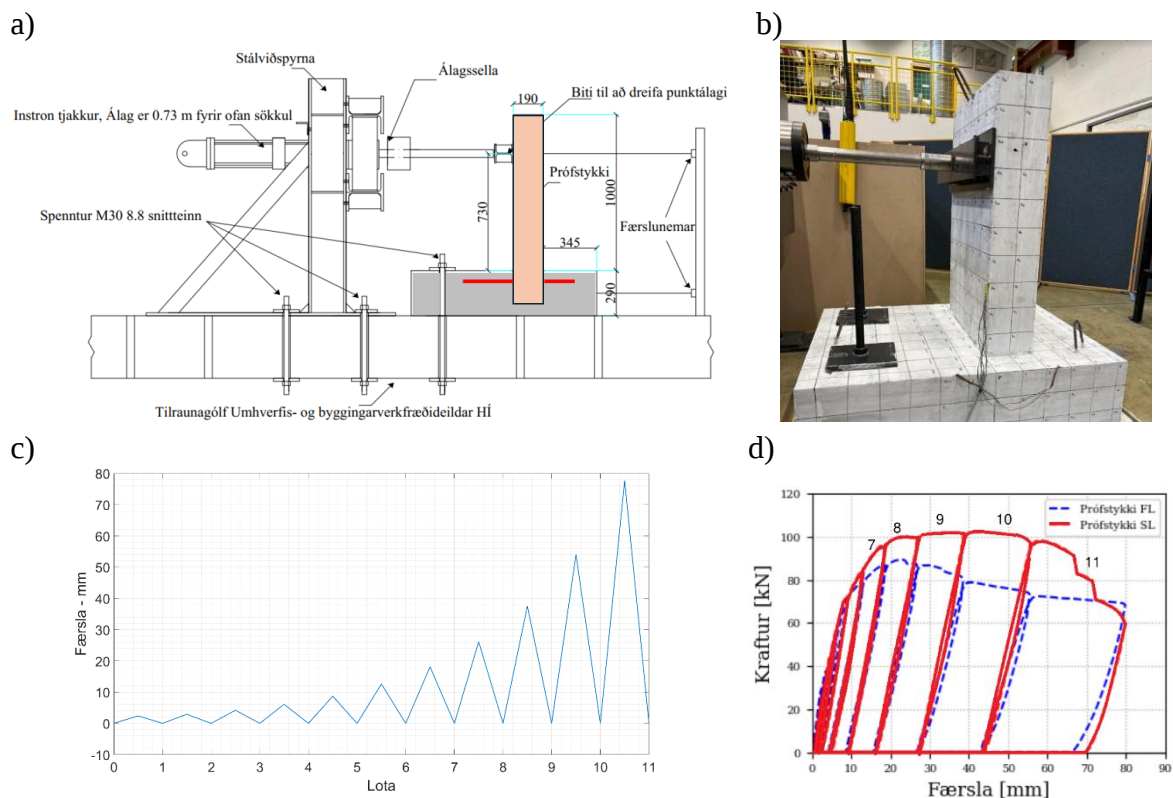


Mynd 1 – Bitastangalíkan fyrir U-laga burðarþolseiningu (t.d. lyftukjarni). Snið (1) er dæmi um trefjaþversnið í endum veggja eða hornum. Þversniðið samanstendur af steypustrendingum (gráir ferningar) og sex stálstöngum (svartir punktar). Snið (2) er dæmi um trefjaþversnið sem notað er í bæði láréttar og lóðréttar bitaeiningar. Í hnútpunktum tengist þessi eining með lið um ás sem liggur hornrétt á ílöngu strengingana. Snið (3) er dæmi um trefjaþversnið fyrir skástífur sem samanstendur einungis af einum steypustrending án járna og hefur virka breidd, b_{eff} , sem ákvarðast sem margfeldi af halla einingarinnar og breidd hennar, a , sem er lárétt bil á milli tveggja hnútpunkta.

3. Burðarþolsgreining með stigvaxandi stöðuálagi

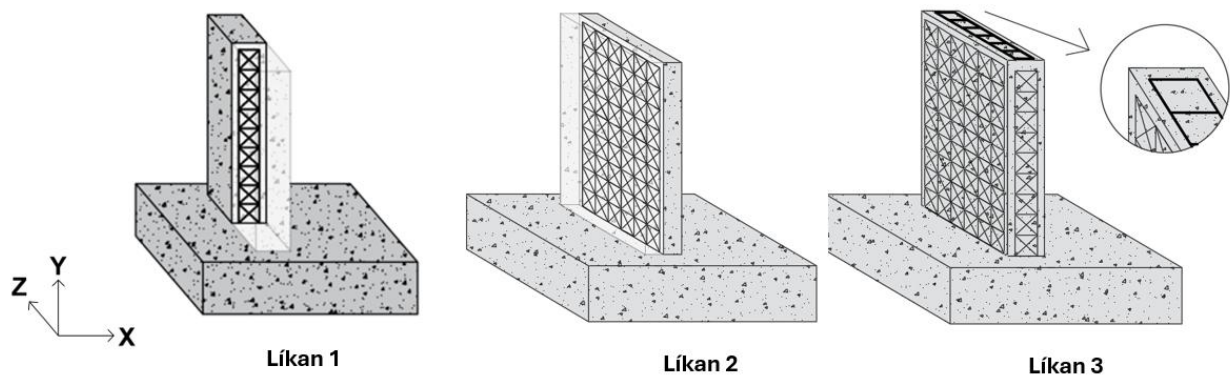
Árið 2022 var framkvæmd tilraun á nýrri tengingu á milli forsteypts stoðveggjar og staðsteypts sökkuls við HÍ (Franz Sigurjónsson 2023). Tilraunin var framkvæmd til þess að athuga hvort tengingin gæti yfirfært álag frá vegg yfir í sökkul með sambærilegu burðarþoli og hefðbundin

staðsteypt lausn. Ávinningurinn með forsteyptum stoðvegg er fyrst og fremst stytting á framkvæmdatíma við smíði brúarlandstöpla eða almennt við smíði stoðveggja (Haraldsson o.fl. 2023). Tvö prófstykki af sömu stærð og með sömu járnþingingu voru smíðuð af Vegagerðinni og BM Vallá. Annað prófstykkið var staðsteypt með hefðbundnum hætti í tveimur steypulotum, þar sem sökkull var steyptur fyrst og í beinu framhaldi hófst vinna við uppslátt fyrir stoðvegg sem var svo steyptur nokkrum dögum síðar (prófstykki SL – Staðsteyptur Landstöpull). Hitt prófstykkið útheimti bara eina steypulotu þar sem notast var við tilbúna forsteypta veggeiningu. Einingunni var komið fyrir í sökkulmót, steypustyrktarjárn í efri hluta sökkuljárnagrindar voru þrædd í gegnum sérstök göt í forsteyptu einingunni, og síðan var sökkullinn steyptur (prófstykki FL – Forsteyptur Landstöpull), sjá mynd 2a. Báðir stoðveggir voru prófaðir undir lárétu stöðuálagi sem var beitt ofarlega á stoðvegginn og dreift jafnt þvert á vegginn með láréttum stálbita (línuálag), sjá myndir 2a og 2b. Þessu álagi var ætlað að herma eftir beygjuárun neðst í vegg frá jarðvegsfyllingu bakvið stoðvegg. Nánar tiltekið er jafngildur kraftur látinn verka í hæðinni 1/3 af heildarhæð stoðveggjar til að herma þríhyrningslaga jarðvegsþrýsting. Krafturinn var settur á með stigvaxandi færslustýrðu stöðuálagi í 11 álagslotum (mynd 2c). Færsla í sömu hæð og ásettur kraftur, sem og tjakkraftur mældur með álagssellu, voru skráð samfelld með stafrænum hætti í gegnum allar álagsloturnar (mynd 2a). Mæld svörun fyrir bæði prófstykkin er sýnd á mynd 2d. Staðsteypta prófstykkið (SL) hefur mikla seiglu (e. *ductility*) og gefur fyrst eftir í álagslotu 11 sem var fyrirfram skilgreind sem síðasta lota. Prófstykkið með forsteyptu veggeininguna (FL) ræður við stærsta kraftinn í álagslotu 8 en byrjar að missa styrk eftir það.

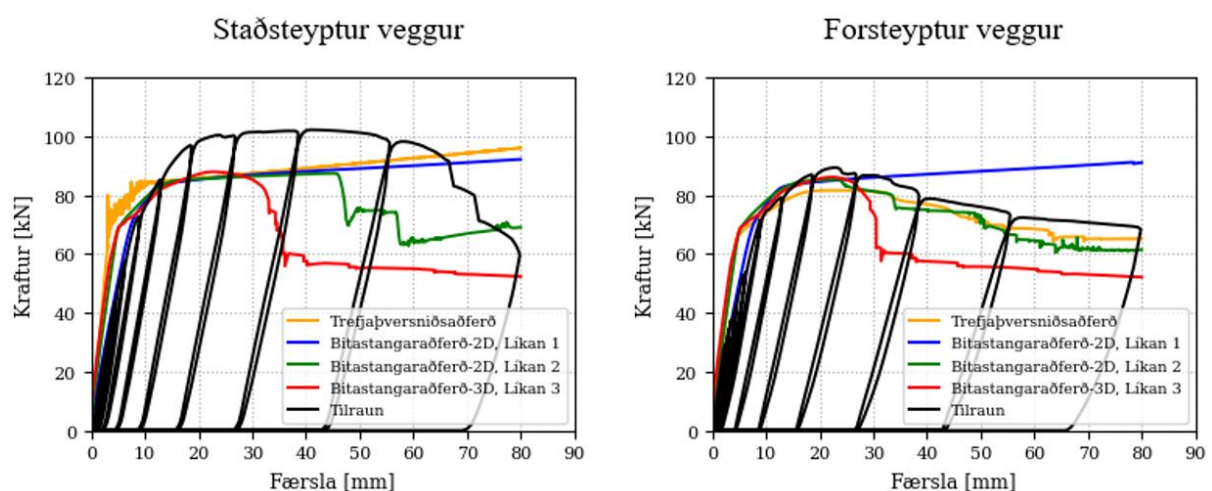


Mynd 2 – (a) Forsteyptur stoðveggur sem var prófaður við HÍ. Forsteyptri veggeiningu (brún) var stungið niður í sökkulmót (grá eining) og samsteypt með sökkli. Tengijárn (rauð) voru notuð til að sambinda einingar. (b) Ljósmynd af uppsetningu. (c) Færslustýrðar ellefu álagslotur. (d) Samanburður á burðarþoli á hefðbundnum staðsteyptum (SL) og forsteyptum landstöpli (FL).

Mældar niðurstöður prófstykkja úr tilrauninni voru hermdar í OpenSees hugbúnaðnum með því að setja upp ólínulegt bitastangalíkan á þrjá mismunandi vegu eins og sýnt er á mynd 3. Tvö af líkönunum voru tvívíð (líkan 1 og 2) en eitt var þrívítt (líkan 3). Einnig var prófað að nota einfalt líkan sem var byggt upp sem ein lóðrétt röð af raðtengdum trefjapversniðsbitum. Þversniðið er svipað og snið (1) á mynd 1, þ.e. margir samsíða strendingar eða þræðir þar sem hver strendingur getur haft mismunandi ólínulega efniseiginleika. Slíkt líkan er hentugt til að greina beygjuvægisbrot í burðarvirkjum en hermir ekki skerbrot. Öll líkönin voru prófuð með mismunandi efnislíkönunum fyrir steypu og stál með það markmið að ná sem bestum samanburði við mældar niðurstöður. Árangurinn er sýndur á mynd 4. Líkan 1 komst næst því að herma niðurstöður fyrir staðsteypa vegginn en líkan 2 stóð sig áberandi vel fyrir forsteypa vegginn bæði m.t.t. stífni og styrks. Hluti af skýringunni tengist mögulega skekkju á þversniðsstærðum (og þar með staðsetningu standandi steypustyrktarjarna) í staðsteypa stoðveggnum sem ekki var leiðrétt fyrir í tölvulíkönunum. Nánari lýsingu á þessu verkefni má finna í MS-ritgerð Stefáns Gríms Sigurðssonar (2023). Notkun á bitastangalíkaninu til að herma niðurstöður fyrir stoðveggjatilraunirnar var góður grunnur fyrir blindtilraunakeppnina.



Mynd 3 – Þrjú mismunandi bitastangalíkon sem notuð voru til að herma tilraun með stoðvegg undir stigvaxandi hliðarálagi.



Mynd 4 – Samanburður á mældum og hermdum niðurstöðum fyrir stoðvegg undir stigvaxandi hliðarálagi þar sem prófuð voru mismunandi líkön.

4. Blindtilraunakeppni

Almennt er krefjandi að herma svörun steinsteyptra burðarveggja þegar áraun vex og svörunin víkur frá línulegu fjaðursviði og yfir í ólínulega svörun sem getur verið margslungin og flókin. Þar fléttast saman sprungumyndun og ólínulegar plastískar formbreytingar steypu, flot í járnþvingu, kikkun járnstanga o.fl.. Einnig má nefna að steypa hefur mismunandi efniseiginleika og seiglu eftir því hvort hún er með eða án bendiluktur. Erfiðleikastigið við að herma hegðunina eykst þegar unnið er með kvikt álag eins og vegna jarðskjálfta, og enn frekar þegar burðarvirki verður fyrir endurteknu kviku álagi (endurteknir jarðskjálftar) sem leiðir til uppsafnaðra skemmda.

Í jarðskjálftaverkfræði hefur það lengi viðgengist að halda svokallaðar blindtilraunakeppnir sem felst í því að setja upp tilraun á rannsóknastofu þar sem burðarvirki eru álagsprófuð við stigvaxandi álagi fram að broti. Álagið getur bæði verið stöðuálag eða kvikt þar sem tregðukraftar skipta meginmáli. Slíkar keppnir eru auglýstar innan viðkomandi fagsviðs og áhugasömum rannsóknahópum og einstaklingum boðið nota eigin hugbúnað, reiknilíkön og aðferðafræði til að spá fyrir um útkomu tilraunar. Fyrirkomulagið er þannig að allir þátttakendur fá upplýsingar um hönnun prófstykkisins, svo sem nákvæmar smíðateikningar sem sýna málsetningu prófstykkis og járnþvingu. Einnig eru gefnir helstu efniseiginleikar steypu og stáls þar sem byggt er á stöðluðum prófum, og loks eru álagsforsendur tíundaðar. Tilraunaniðurstöður eru hins vegar ekki aðgengilegar. Til að hægt sé að bera saman niðurstöður frá mismunandi rannsóknahópum eru þátttakendur beðnir um að skila sömu svörunarstikum, til dæmis útgildi færsla í völdum punktum, og skila reiknuðum hysteresuslaufum (krafta-færslu eða spennu-streitu ferlar) sem sýna hrönnun prófstykkis við lotubundið álag. Ef um er að ræða kvikt álag er gjarnan beðið um að skila inn svörunartímaröðum. Til viðbótar er svo krafa um að túlka niðurstöður reiknilíkans og tilgreina brotmynd.

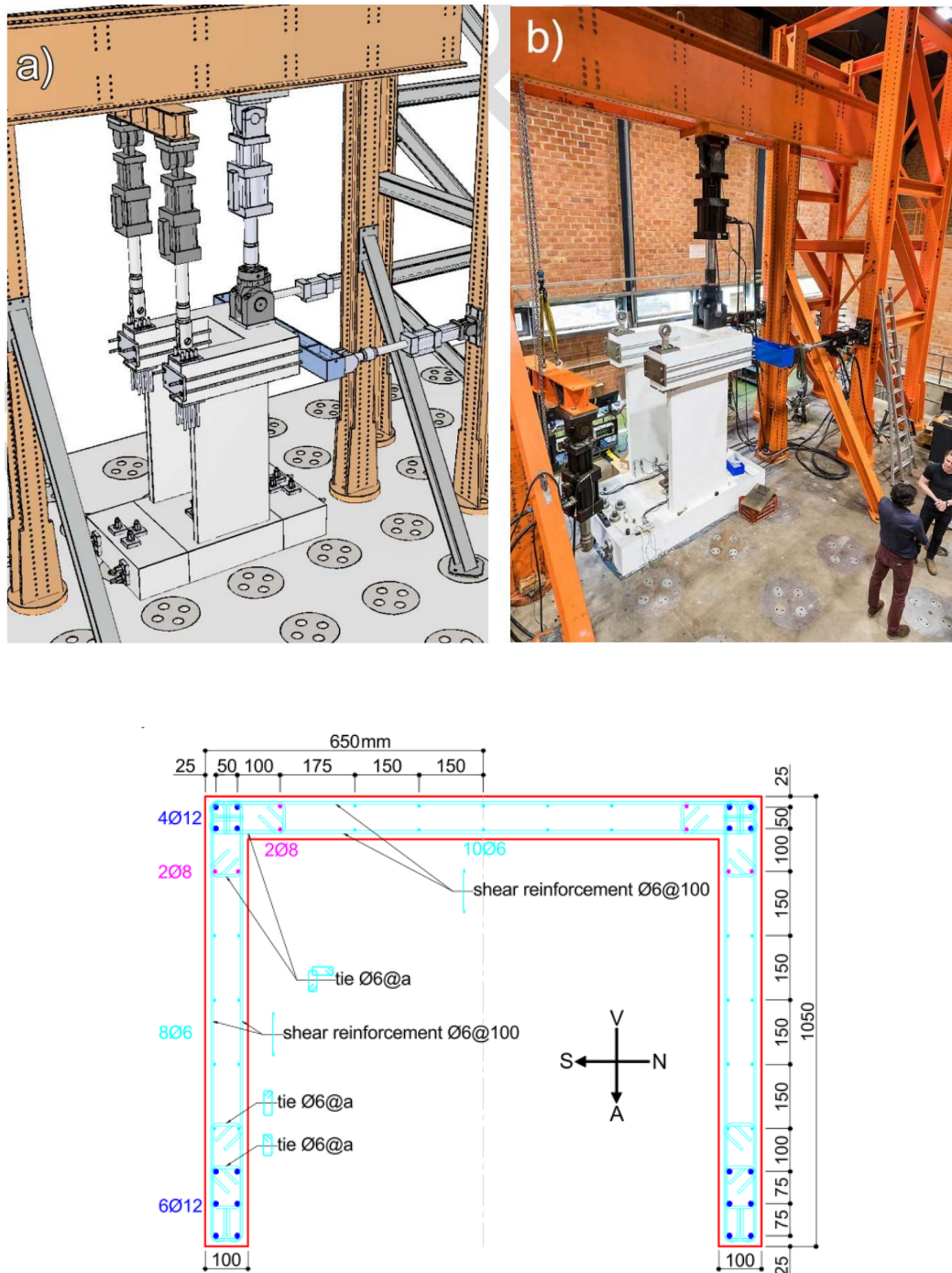
Sú blindtilraunakeppni sem hér var ákveðið að taka þátt í var framkvæmd í tveimur hlutum, annars vegar í Belgíu þar sem notað var stöðuálag og hins vegar á hristiborði í Portúgal þar sem notast var við kvikt jarðskjálftaálag. Hægt var að taka þátt í báðum hlutum keppinnar eða bara öðrum. Hér að neðan er báðum hlutum keppinnar lýst en bitastangalíkanið sem þessi rannsókn miðast við var einungis notað í seinni hlutanum.

4.1 Burðarþolsgreining með stigvaxandi stöðuálagi (Belgía)

Fyrri hluti keppinnar var framkvæmdur árið 2022 í „Laboratoire Essais Mécaniques, Structures et Génie Civil“ (LEMSC), í UCLouvain háskólanum í Belgíu (Hoult o.fl., 2022; 2023). Tveir eins U-laga skúfveggir, kallaðir UW1 og UW2, með fyrirmynd í lyftukjarna í þriggja hæða byggingu, voru prófaðir með stigvaxandi stöðuálagi. Annars vegar fyrir hreinni beygjuvægisáraun (UW1) og hins vegar hreinni vinduáraun (UW2). Veggirnir voru skalaðir niður í 50% af fyrirmynd og einungis fyrsta hæðin prófuð en álagið skilgreint þannig að hermt var eftir þriggja hæða byggingu með því að beita bæði láréttum krafti og beygjuvægi efst á prófstykkið. Uppsetning tilraunar og þversnið veggja er sýnt á mynd 5. Álagið var sett á veggina með láréttum tjakkkröftum í VA-stefnu (sjá stefnur á mynd 5c) og beygjuvægi um láréttan ás var framkallað með þremur lóðréttum kröftum. Álagið var sett á prófstykkið í stigvaxandi færslustýrðum lotum, fram og til baka. Hlutfallsfærslan var skilgreind sem hlutfallið á milli láréttar færslu í áttakspunkti tjakks og hæð punktsins yfir undirstöðu (e. *drift*).

Rannsóknarhópur frá HÍ tók þátt í þessum fyrri hluta, sjá nánar Tsai o.fl. (2024), þar sem notast var við MVLEM-3D eininguna sem þróuð var af Kolozvari o.fl. (2021). Reiknilíkanið var keyrt með

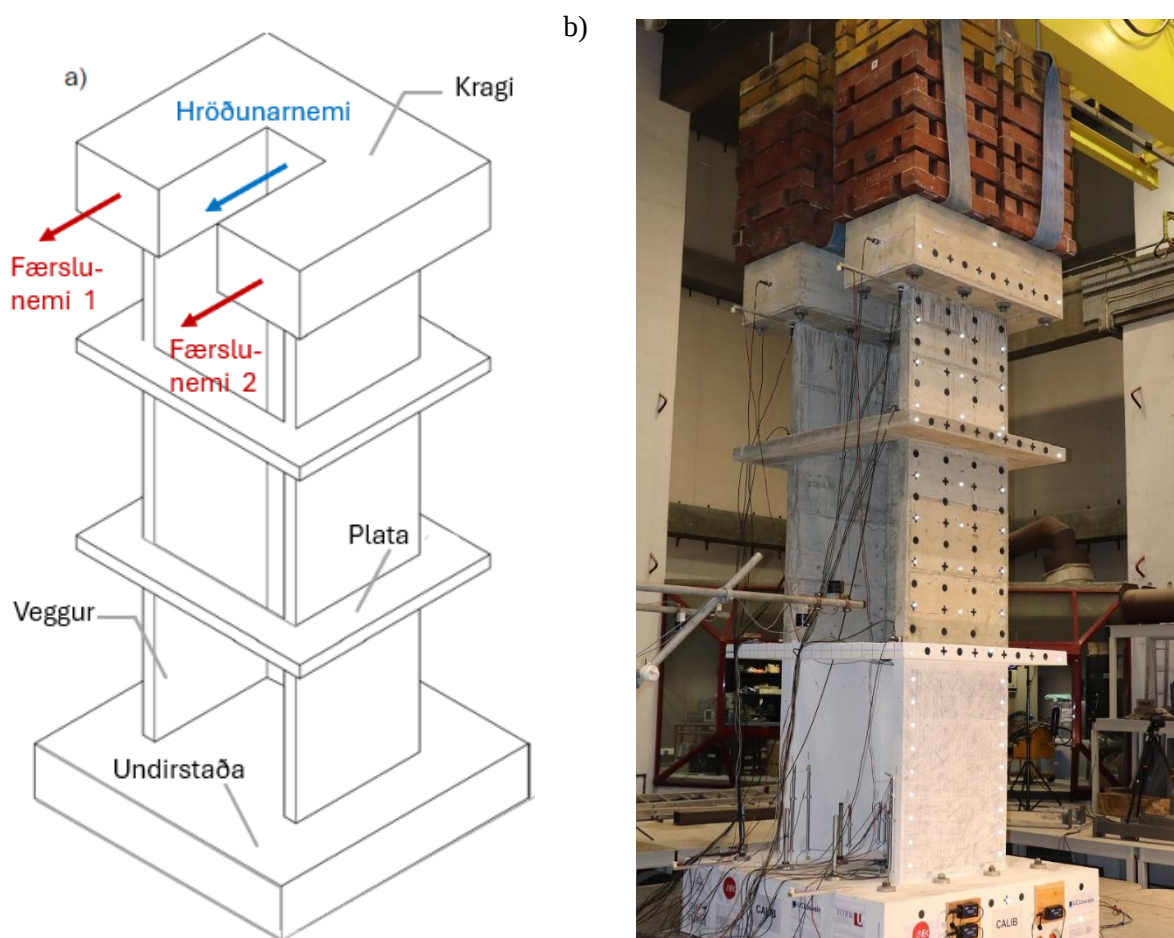
OpenSees hugbúnaðinum (McKenna o.fl., 2000). Eins og fyrr segir var bitastangalíkanið sem þessi rannsókn beinist að ekki notað í þessum hluta blindtilraunakeppninnar og því verður ekki fjallað nánar um þessa tilraun. Þó má nefna að einstaka aðrir rannsóknahópar sem tóku þátt í þessum hluta notuðu það líkan með góðum árangri (sjá nánar Hoult o.fl. 2023).



Mynd 5 – Uppsetning á blindtilraun í Belgíu. (a) Skematísk mynd. Þrír lóðréttir tjakkar voru notaðir til að herma bæði eiginálæg og vægi frá efstu tveimur hæðunum í fyrirmynd prófstykkis (þriggja hæða lyftukjarni). Þetta einfaldaði smíðina þar sem nóg var að steypa upp fyrstu hæðina. Tveir tjakkar voru notaðir til að herma lárétt stöðuálæg á prófstykkid; (b) Ljósmynd frá tilraun; (c) Þversnið í U-laga prófstykkjum þar sem járnabending er sýnd. Álagstefnur NS og VA eru líka sýndar (Hoult o.fl. 2023).

4.2 Burðarþolsgreining byggð á tilraun á hristiborði (Portúgal)

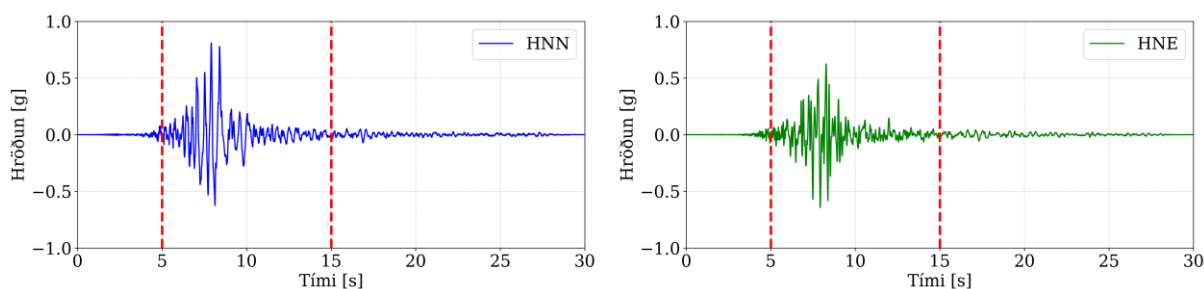
Seinni hluti blindtilraunakeppninnar fór fram í Portúgal (Almeida o.fl. 2024). U-laga burðarveggur með sömu fyrirmynd og prófstykkin frá Belgíu var prófaður á hristiborði (e. *shake table*), í „National Laboratory for Civil Engineering“ (LNEC) í Lissabon. Tilraunin var styrkt af „Engineering Research Infrastructures for European Synergies“ (ERIES) og gengur undir nafninu „ALL4wALL“. Sjö stofnanir og háskólar standa að þessu verkefni, þar á meðal UCLouvain háskólinn sem stóð að fyrri hluta rannsóknarinnar í Belgíu. Í Portúgal var prófstykkið byggt upp sem fullar þrjár hæðir en þó skalað niður um 50% eins og í fyrri tilrauninni (mynd 6). Í stað þess að nota lóðrétt tjakka til að herma eiginlag sem veggja einingin þarf að ráða við gagnvart láréttri jarðskjálftaáráun (e. *contributory mass*) var settur massi efst á prófstykkið (sjá mynd 6b) til að herma það. Þessi lausn er nauðsynleg þar sem verið er að nota hristiborð og allt prófstykkið er hrist og ekki hægt að beita tjökkum.



Mynd 6 – Uppsetning blindtilraunar í Portúgal. (a) Skematísk mynd sem sýnir staðsetningu færslunema og hröðunarnema; (b) Ljósmynd frá tilraun. Prófstykkið stendur á hristiborðinu og efst er búið að bæta við massa. (ALL4wALL, 2024)

Keyrðar voru 9 álagslotur eða jarðskjálftapróf á prófstykkið sem kallaðar voru GM0 – GM8. Notast var við skalaðar hröðunartímaraðir sem skráðar voru í MZ04 mælistöðinni í Mið-Ítalíu jarðskjálftanum 30. október 2016 sem var af stærðinni $M_w=6,5$ (Cheloni o.fl. 2017). MZ04 stöðin er staðsett á setlögum sem flokkast undir jarðvegsflokk C í Eurocode 8 ($V_{s30}=355$ m/s) (CEN, 2004). Stysta fjarlægð mælistöðvar í lóðrétt varpað fótspor af brotflatinum á yfirborð, svokölluð Joyner-Boore fjarlægð (Joyner og Boore, 1981) var 6,4 km. Unnið var með tvo lárétta stefnupætti

frá mælistöðinni, þ.e. HNN- og HNE-stefnuþáttinn, og voru þeir notaðir til að stýra hreyfingum hristiborðs og þannig herma eftir raunhreyfingum í jarðskjálfta. Þegar unnið er með skalað líkan á hristiborði þarf kvarða hröðunarröðina sem stýrir hreyfingum borðsins til að tregðukraftar skili sér rétt og hægt sé að túlka mæliniðurstöður eins og verið væri að hrista burðarvirki í raunstærð. Byggt á þekktu skölunarlögumáli fæst að skölunarstuðullinn $\lambda=2$, fyrir líkan sem er skalað niður um 50%. Því þarf að stytta tímaskala tímaraðanna með stuðlum $1/\sqrt{\lambda}$ (sjá nánar Pinho, 2000; Hoult o.fl. 2024a). Tímaraðir með þessari leiðréttu tímaskölun eru sýndar á mynd 7. Ákefð þessara tveggja stefnuþátta var svo kvörðuð með mismunandi hætti í hverri álagslotu (sjá töflu 1). Í fyrstu álagslotu (GM0) var sem dæmi HNN stefnuþátturinn settur inn með 10% ákefð en HNE var óvirkur (0% ákefð). Álagið var svo aukið í gegnum tilraunina, stundum var bara HNN stefnuþátturinn virkur og stundum báðir. Í síðustu álagslotunni (GM8) voru báðir stefnuþættir með 100% ákefð, þ.e. sömu ákefð og mældist á MZ09 mælistöðinni þegar Mið-Ítalíu jarðskjálftinn 2016 reið yfir. Þegar hreyfingum hristiborðs er stjórnað með hröðunartímaröð á sér stað samverkun á milli prófstykkis og hristiborðs þannig að upphafleg hröðunartímaröð skilar sér aldrei fullkomlega rétt í hristiborðið. Til að leysa úr þessu er hröðunin einfaldlega mæld á sökkli prófstykkis í AV- og NS-stefnu fyrir hverja álagslotu og þær hröðunartímaraðir eru síðan notaðar til að örva tölvureiknilíkönin. Í tilrauninni var HNN stefnuþátturinn látinn virka í vestur-austur stefnu prófstykkis þar sem plúsgildi í tímaröð verka í austur stefnu og HNE-stefnuþátturinn í norður-suðurstefnu þar sem plúsgildi verka í suður stefnu (sjá mynd 5c).



Mynd 7 – Tímakvarðaðar hröðunartímaraðir frá MZ04 mælistöðinni á Ítalíu sem notaðar voru til að stýra hreyfingum hristiborðs, sem og til að örva reiknilíkan. Búið er að marka inn þann hluta tímaraðanna þar sem mesta ákefðin var (sjá Hoult o.fl. 2024a).

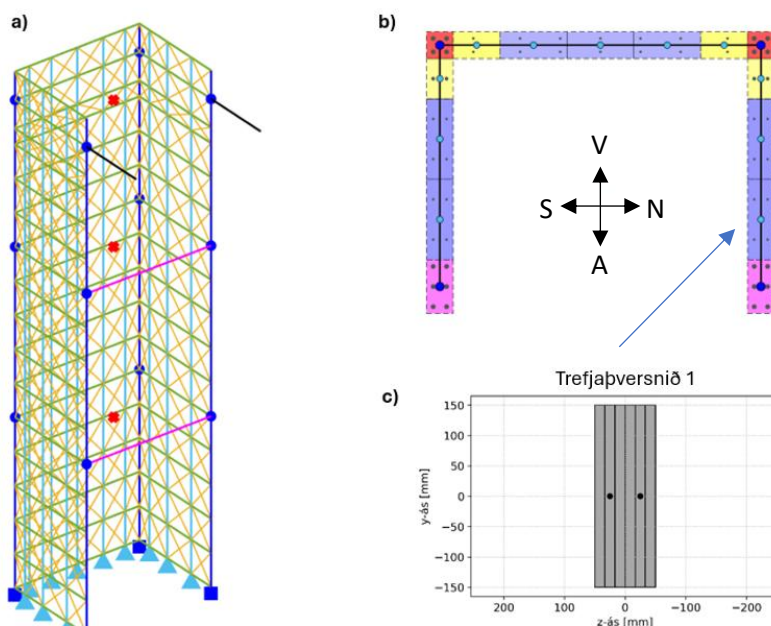
Tafla 1 – Kvörðun á ákefð tímaraða í 9 álagslotum sem notaðar voru til að stjórna hristiborði á tilrauninni í Portúgal með kviku álagi. Tölvulíkan var keyrt fyrir mismunandi stillingar á deyfihlutfalli.

Álagslota	Skölun [%]		Deyfilhlutfall [%]			
	HNN	HNE	Upphafleg spá	Endur-keyrsla 1	Endur-keyrsla 2	Endur-keyrsla 3
Merking	AV-stefna	NS-stefna				
GM0	10	0	5	2	1	1
GM1	25	0	5	2	2	2
GM2	25	25	5	2	5	5
GM3	50	0	5	2	5	5
GM4	50	50	5	2	5	5
GM5	75	0	5	2	5	5
GM6	75	75	5	2	5	5
GM7	100	0	5	2	5	5
GM8	100	100	5	2	5	5

5. Niðurstöður og umræður fyrir blindtilraunakeppnina í Portúgal

5.1 Reiknilíkan

Rannsóknahópur HÍ notaði eitt bitastangalíkan til að herma tilraunina (sjá mynd 8a). Bláu punktarnir sýna staðsetninguna þar sem eiginþyngd mannvirkisins var skilgreind. Þeir eru staðsettir í þeirri hæð þar sem gólfplötur og kraginn eru (sjá mynd 6). Bleiku línurnar sýna sömuleiðis hvar miðplan hverrar gólfplötu er. Gulu skástífunar tákna liðtengdar stangareiningar á meðan grænu og ljósbláu einingarnar eru bitar með trefjaþversniði sem eru liðtengdir í hnútpunktum gangvart formbreytingum í veggplani, en með stífar tengingar gagnvart formbreytingum út úr veggplani. Með öðrum orðum tekur grindarverkun upp vægi í öllum þremur veggplönunum. Undantekning, og til viðbótar við grindarverkunina, er framlag frá lóðréttu bláu bitaeiningunum í hornunum og veggendum sem hafa trefjaþversnið og eru með stífar tengingar um báða lárétta ásana. Staðsetning massamiðju er táknuð með rauðum punkti. Lárétta svörtu strikin ofarlega í líkaninu sýna staðsetninguna þar sem færslur voru reiknaðar í AV-stefnu í hverri keyrslu og skrifaðar út í útgagnaskrá til samanburðar við mældar færslur í tilraun (sjá líka mynd 6a). Notuð var meðaltalsfærslan frá þessum tveimur hnútpunktum / mælipunktum. Mynd 8b sýnir þversnið af U-laga veggnum. Litirnir sýna mismunandi trefjaþversnið. Fyrir stálstangir var notast við einásaefnislíkanið „SteelMPF“ og fyrir steinsteypustrendinga einása efnislíkanið „Concrete04“ sem bæði eru aðgengileg í OpenSees hugbúnaðinum. Hefðbundin ólínuleg tímaraðgreining með tegrar skref-fyrir-skref var notuð til að bæði spá fyrir um niðurstöður í blindtilraunakeppninni og til að herma niðurstöður þegar tilraunaniðurstöður höfðu verið kynntar. Til viðbótar við ólínulega dempun sem framkallast vegna ólínulegra efniseiginleika og hysteresuslaufa var einnig innbyggð í reiknilíkanið Rayleigh dempun þar sem stuðlarnir tveir sem stýra henni eru kvarðaðir út frá deyfihlutföllum tveggja sveifluforma. Tvö fyrstu virku sveifluform í AV-stefnu voru notuð, sem í reynd voru sveifluform 2 og 4, þar sem sveifluform 1 og 3 voru virkust í NS-stefnu.

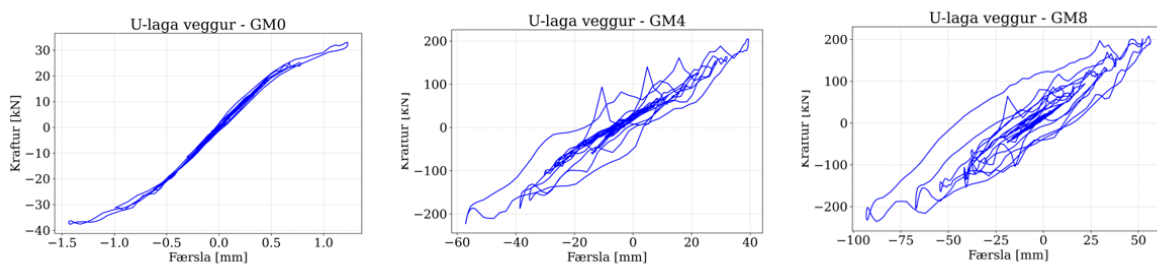


Mynd 8 – (a) Bitastangalíkan af U-laga vegg. Í tilrauninni voru tveir færslunemar staðsettir þar sem svörtu strikin eru efst í líkaninu og hröðunarnemi var staðsettur í massamiðju í sama plani (rauður

punktur). (b) Ofanvarp á vegg sem sýnir skiptingu trefjabversniða. (c) Sýnishorn af trefjabversniði úr hægri vegg

5.2 Spáð svörun fyrir blindtilraunakeppni

Fyrir blindtilraunakeppnina var notað 5% deyfihlutfall til að ákvarða Rayleigh dempunina í öllum álagslotunum eins og sýnt er í töflu 1. Mynd 9 sýnir reiknaða krafta-færslu ferla (hysteresu-slaufur) fyrir þrjár af átta álagslotum (GM0, GM4 og GM8) sem voru framlag HÍ í keppninni áður en tilraunaniðurstöður voru birtar. Í fyrstu álagslotunni er áraunin lítil og líkanið á fjaðursviði, en fyrir bæði GM4 og GM8 er svörunin orðin ólínuleg og hysteresu-slaufur bólgnar, sem sýnir fram á orkueyðingu (e. *energy dissipation*), þegar prófstykkið hreyfist fram og til baka (hreyfiorka umbreytist í hitaorku). Á myndunum má sömuleiðis sjá mestu jákvæðu og neikvæðu hámarksfærslur og við hvaða kraft þær áttu sér stað. Krafturinn var ákvarðaður út frá reiknaðri hröðun í massamiðju kragans í AV-stefnu sem var margfölduð með heildarmassa kragans. Í tilraun var hröðunarnemi á sama stað (sjá mynd 6a) notaður til að skrá niður hröðunina í AV-stefnu og tilraunahaldarar gáfu upp massann sem nota átti til að leggja mat á virkan kraft.



Mynd 9 – Krafta-færslu ferlar á U-laga vegg fyrir þrjú af átta jarðskjálftaskrefum

Í töflu 2 eru sýnd mæld útgildi færslu úr tilrauninni samhliða spáðum færslum frá FE-líkani. Þessi gildi voru send inn í keppnina. Neðst í töflunni er sýnt meðalfrávik fyrir GM1-GM8 álagsloturnar en einnig fyrir GM4-GM8 loturnar sem ákvarðað er með jöfnunni:

$$\text{Meðalfrávik} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta_{\text{tilraun},i} - \Delta_{\text{FE-líkan},i}}{\Delta_{\text{tilraun},i}} \right| \times 100 \quad (1)$$

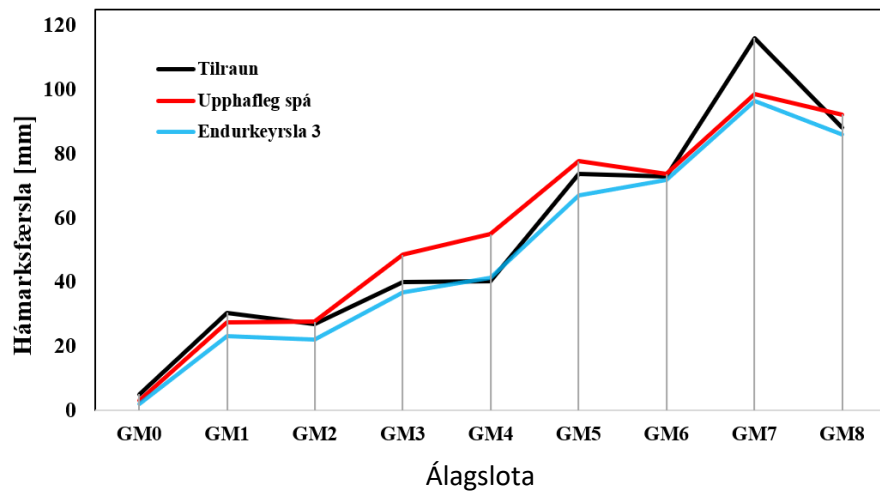
Þar sem $\Delta_{\text{tilraun},i}$ er mælt útgildi færslu í álagslotu nr. i , þar sem færslunemar voru staðsettir í tilraun og $\Delta_{\text{FE-líkan},i}$ er reiknað útgildi færslu á sama stað með sama formerki (sama stefna) og útgildi tilraunar fyrir sömu álagslotu. N er fjöldi álagslota í hvoru tilfelli (8 eða 5). Fyrstu álagslotunni, GM0, er sleppt, enda var sú álagslota hugsuð sem forpróf áður en eiginleg tilraun var keyrð af stað en einnig til að meta eiginleika prófstykkis á fjaðursviði. Í þeirri álagslotu eru færslur líka mjög litlar og mælióvissan er mest, sem þýðir að hlutfallsskekkjan verður mjög stór ef þessi lota er tekin með. Meðaltalssfrávik reiknast sem 18% fyrir allar álagsloturnar (GM1-GM8) og 14.4% ef bara síðustu fimm loturnar eru notaðar.

5.3 Endurkvarðað reiknilíkan

Þegar tilraunaniðurstöður höfðu verið birtar var lögð vinna í að betrubæta líkanið til að reyna að herma niðurstöðurnar betur en til tókst með spálíkaninu. Þrjár endurkeyrslur voru prófaðar. Í endurkeyrslu 1 var notað óbreytt reiknilíkan nema deyfihlutfalli var breytt úr 5% í 2% fyrir allar álagsloturnar (sjá töflu 1) sem breytir Rayleigh stuðlunum í dempunarlíkaninu. Við það að lækka deyfinguna jukust færslur en þó sérstaklega fyrir fyrstu þrjár álagsloturnar þegar hysteresu-slaufurnar eru minna virkar við að dempa færslur heldur en þegar álagið eykst (sjá mynd 9). Hermunin fyrir GM1 álagslotuna batnaði mest en hermdu gildin fyrir GM2 og GM3 urðu töluvert hærri en tilraunagildin. Reiknað meðalfrávik hækkaði aðeins frá upphaflegu spákeyrslunni (sjá töflu 2). Reiknitíminn jókst verulega þar sem reiknilíkanið varð óstöðugra og það þurfti fleiri ítranir til að ná samleitni í hverju tegrunarskrefi. Í endurkeyrslu 2 var deyfihlutfallið haft 2% í GM1 álagslotunni en eftir það 5%. Hér fór meðalfráviknið niður í um 12% fyrir bæði GM1-GM8 og GM4-GM8. Í síðustu atrennunni, endurkeyrslu 3, var massadreifingin í líkaninu betrubætt og færð nær raundreifingu í tilrauninni. Í upphaflega reiknilíkaninu og í endurkeyrslum 1 og 2 var aukamassinn sem var settur ofan á kragann (sjá mynd 6b) bætt við massa kragans og staðsettur með honum í efstu bláu punktunum á mynd 8a. Í þessari lokakeyrslu var hins vegar aukamassinn færður upp um 940 mm og í massamiðju þess massa. Hann var svo tengdur við reiknilíkanið með alstífum bitum (e. *rigid links*). Meðalfráviknið við þessa breytingu var svipað og áður fyrir GM1-GM8 loturnar eða 12,4% en meðalfráviknið fyrir GM5-GM8 fór niður í 6,5%. Í töflu 2 er búið að merkja þau gildi sem eru næst niðurstöðum tilraunar með ljósgrænum lit. Á mynd 11 eru útgildi færsla úr tilraun borin saman við annars vegar spágildi og hins vegar hermd gildi frá endurkeyrslu 3. Heilt yfir er ágætis samsvörun.

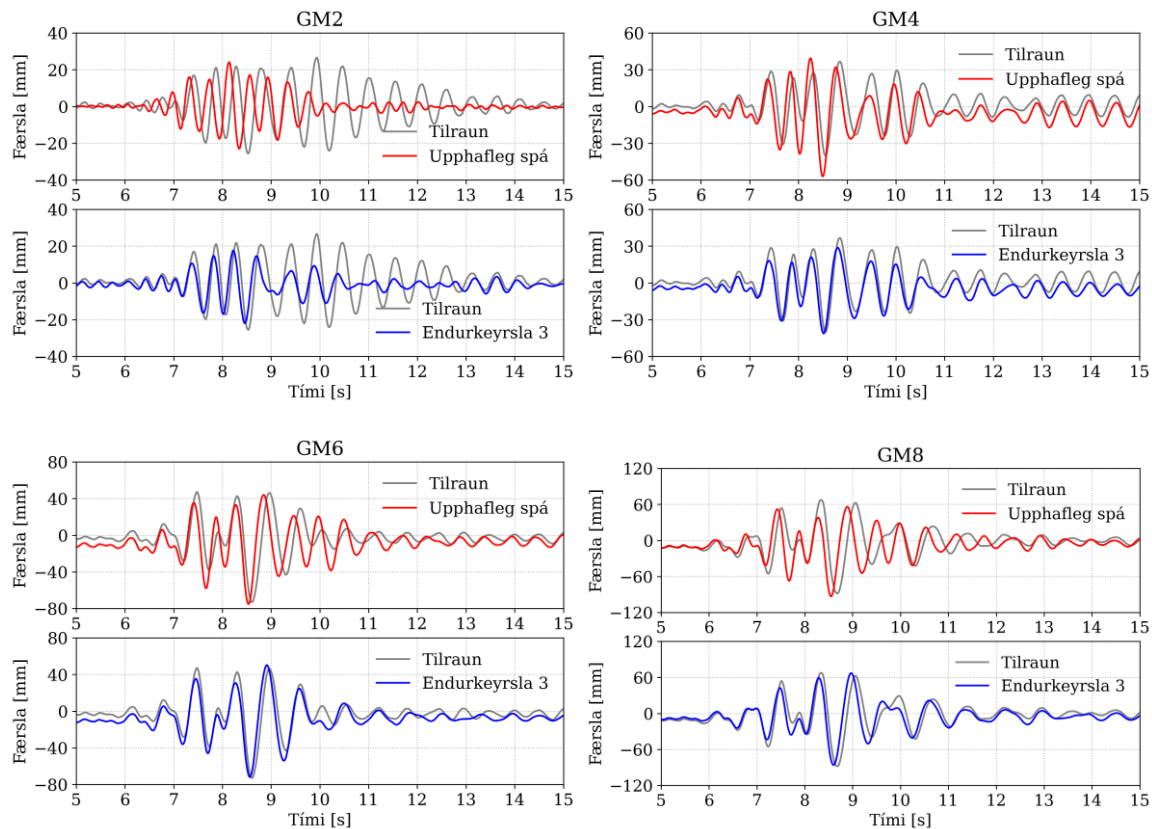
Tafla 2 – Mestu færslur í hverri álagslotu ásamt niðurstöðum tilraunar. Grænn litur sýnir hvaða keyrsla (spá eða hermun) er næst tilraunaniðurstöðunum.

Álagslota	Tilraun	Færsla [mm]			
		OpenSees líkangerð			
		Upphafleg spá	Endurkeyrsla 1	Endurkeyrsla 2	Endurkeyrsla 3
GM0	-4.9	-1.4	-2.5	-3.0	2.0
GM1	30.4	15.7	27.4	27.3	23.0
GM2	26.7	24.1	37.4	27.6	17.6
GM3	-40.0	-45.6	-57.8	-48.5	-36.8
GM4	-40.2	-57.1	-57.9	-54.9	-41.3
GM5	-73.8	-79.5	-81.9	-77.6	-67.0
GM6	-72.9	-75.1	-77.7	-73.6	-71.7
GM7	-116.1	-100.2	-110.6	-98.6	-96.5
GM8	-88.1	-93.1	-100.6	-92.2	-86.1
Meðalfrávik	GM1-GM8	18,0%	21,9%	12,2%	12,4%
	GM4-GM8	14,4%	16,1%	12,5%	6,5%



Mynd 11 – Samanburður á hámarksfærslum úr tilraun við spágildi og hermd gildi frá endurkeyrslu 3 fyrir allar 9 álagsloturnar (GM0-GM9).

Gæði reiknilíkans sem notað er til herma tilraunaniðurstöður ræðst líka af því hversu vel líkanið getur hermt mældar tímaraðir fyrir t.d. færslu, streitu, spennu, og einnig eru hysteresu-slaufur oft bornar saman. Á mynd 12 eru teiknaðar saman mældar færslutímaraðir frá tilraun og reiknaðar færslutímaraðir efst í prófstykkinu (sjá mynd 6a) fyrir þann hluta hröðunartímaraðanna þar sem ákefðin er mest, frá 5.-15. sekúndu (sjá mynd 7). Samanburður er gerður fyrir bæði reiknaðar færslur frá upphaflegu spálíkani (rauðir ferlar) og fyrir færslur frá endurkeyrslu 3 (bláir ferlar) þar sem staðsetning á aukamassanum efst hefur verið betrumbætt. Samanburður er sýndur fyrir fyrir álagslotur GM2, GM4, GM6 og GM8. Í þessum álagslotum er ákefð beggja stefnuþáttanna sköluð með 25%, 50%, 75% og 100% skölun.



Mynd 12. Færslutímaraðir fyrir álagslotur GM2 - 25% ákefð, GM4 - 50% ákefð, GM6 - 75% ákefð og GM8 - 100% ákefð. Sýndur er samanburður á tilraunaniðurstöðum og annars vegar spániðurstöðum og hins vegar niðurstöðum úr endurkeyrslu 3.

Einfalt sjónmat segir að bláu ferlarnir frá endurkeyrslu 3 falla í öllum tilvikum betur að tilraunaniðurstöðunum en rauðu spáferlarnir sem rannsóknarhópurinn sendi í blindtilraunakeppnina. Það að lyfta aukamassanum upp í rétta hæð lengir sveiflutíma tölvulíkansins og þá verða reiknaðar hreyfingar meira í fasa og takt við tilraunaniðurstöður. Heildarmatið er að bláu hermdu tímaraðirnar falla mjög vel að skráðu tímaröðunum úr tilrauninni.

6. Lokaorð

Meginmarkmið þessa verkefnis var að prófa og sannreyna gæði og áreiðanleika þess að nota svokallað bitastangalíkan til þess að burðarþolsgreina burðarvirki úr járnþentri steinsteypu. Líkani af þessari gerð var beitt til að greina annars vegar tvo stoðveggi undir stigvaxandi stöðuálagi, og hins vegar U-laga burðarvegg undir stigvaxandi kviku jarðskjálftaálagi.

Í fyrri tilviksrannsókninni var þremur mismunandi bitastangalíkönum stillt upp til að herma tilraunaniðurstöður úr álagsprófi á stoðveggjum. Færslustýrt stöðuálag var sett á prófstykkið í ellefu álagslotum. Þessi hluti var unnin sem meistaraverkefni við HÍ. Ágætlega gekk að herma tilraunaniðurstöður en mögulega mætti ná betri árangri með því að vinna áfram með Líkan 1 (sjá mynd 3). Í upphaflegri greiningu með því líkani var aðeins ein lóðrétt röð af skástífum (eitt grindarlag). Hægt væri að þetta netið og fjölga grindarlögum í þrjú eða fimm lög. Samhliða mætti að teygja líkanið niður í sökkulinn. Með þessu móti ætti að vera auðveldara að herma skerbrót neðst í stoðvegg og sömuleiðis að fylgjast með streitu- og spennuástandi ofan í sökklinum. Líkanið væri eftir sem áður tvívítt (2D).

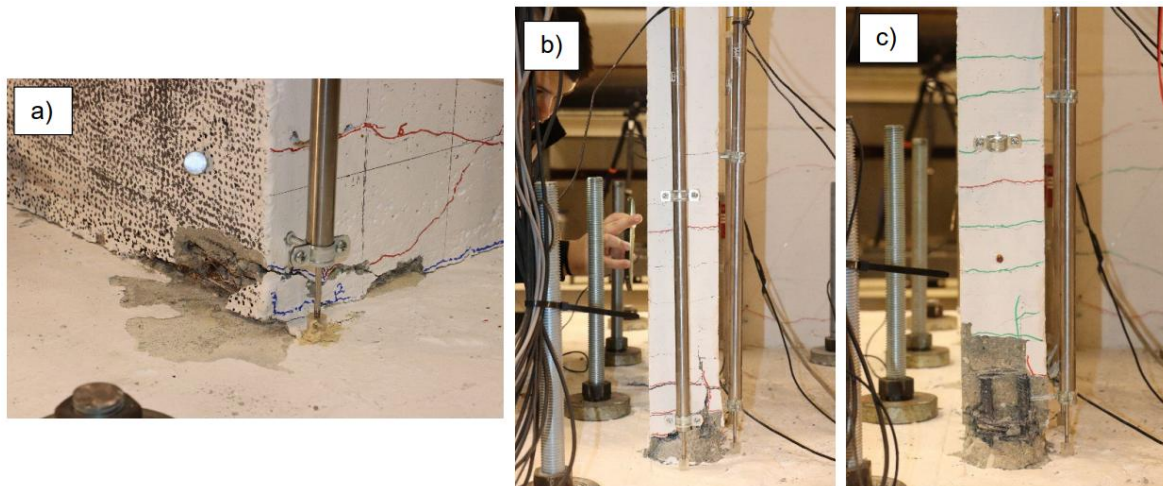
Í seinni tilviksrannsókninni tók HÍ rannsóknarhópurinn þátt í alþjóðlegri blindtilraunakeppni. Í tilrauninni var U-laga steinsteypdur veggur prófaður á hristiborði undir stigvaxandi jarðskjálftaálagi í níu álagslotum. Prófstykkið hafði sem fyrirmynd lyftugöng eða lyftukjarna í þriggja hæða húsi. Slíkir kjarnar eru oft notaðir til að stífa af mannvirki fyrir láréttum jarðskjálftakröftum. Blindtilraunakeppni er skipulögð þannig að þátttakendur velja eigið reiknilíkan og hugbúnað til að spá fyrir hegðun prófstykkis án þess að mæliniðurstöður frá tilraun liggi fyrir. Þátttakendur fengu ítarlegar upplýsingar um prófstykkið, eins og rúmfræði þess og járnateikningar. Enn fremur hefðbundna stíka fyrir efniseiginleika steypu og stáls sem notaðir voru til að smíða prófstykkið og byggðu á prófunum. Loks hröðunartímaraðir sem voru skráðar á sökkli prófstykkis í hverri álagslotu, en höfðu sem fyrirmynd skalaðar hröðunartímaraðir frá mælistöð í 6,4 km fjarlægð frá jarðaskjálfta af stærðinni 6,5 (M_w) sem skók Mið-Ítalíu 30. október 2016. Samtals voru sendar inn í keppnina 24 niðurstöður frá 17 þátttakendum frá öllum heimshornum. Sumir rannsóknarhópar skiluðu inn fleiri en einni lausn. Þrjár niðurstöður byggðu á bitastangalíkaninu.

Hóparnir áttu að skila inn útgildum fyrir færslur, krafta og streitur á völdum stöðum í prófstykkinu úr hverri álagslotu og einnig tilgreina brotmynd virkisins eftir síðustu álagslotuna. Keppendur gátu valið úr 9 mismunandi brotmyndum sem voru listaðar upp af keppnishöldurum. Gefin voru stig bæði fyrir spáð útgildi úr reiknilíkani, en einnig voru gefin stig fyrir að tilgreina rétta brotmynd. Þetta var svo vigtað saman í eina lokaeinkunn. Í stuttu máli voru útgildin sem HÍ hópurinn skilaði í góðu samræmi við tilraunaniðurstöður eins og lýst er í kafla 5, en hins vegar

giskuðum við á ranga brotmynd, þ.e. beygjuvægisbrot með togbroti í járnþendingu (e. *flexure with reinforcement tension fracture*) og fengum engin stig fyrir þann hluta. Í reynd voru þrjár brotmyndir samþykktar sem réttar:

- 1) Vægis-skerbrot með skriði (e. *flexure-sliding shear*). Í tilraun varð örlítið skrið í neðstu steypuskilum milli veggja og undirstöðu (sjá mynd 13a).
- 2) Vægisbrot með þrýstibroti í steinsteypu (e. *flexure with compression failure of concrete*) (sjá mynd 13b).
- 3) Vægisbrot með kiknun í langjárnnum (e. *flexure with buckling in longitudinal reinforcement*) (sjá mynd 13c).

Þegar mæliniðurstöður höfðu verið gerðar opinberar var lögð vinna í að betrumbæta reiknilíkanið. Deyfihlutföllum var breytt sem skipti mestu máli fyrir fyrstu álagsloturnar þegar burðarvirkið var að mestu óskemmt á fjaðursviði en hafði minni áhrif þegar áraunin varð meiri og deyfing vegna hysteresuslaufa varð ríkjandi. Einnig var aukamassi sem settur var efst á prófstykki í tilraunum færður upp í rétta hæð til herma massadreifinguna betur en gert var í upphaflegu reiknilíkani. Með því að færa massann fékkst betri samsvörun á milli niðurstaða úr tilraun og reiknilíkani.



Mynd 13 – Brotmyndir U-laga veggjareiningar í blindtilraunakeppninni. (a) Þrýstibrot í steypu í SV-horni við lok álagslotu GM6. Hámarks hlutfallsleg færsla eða rek (e. drift) í AV- og NS-stefnu var í þessari lotu $\delta_{AV}=1,65\%$ og $\delta_{NS}=0,65\%$, (b) Þrýstibrot í steypu í syðri flangs í lok GM7. Hér var rekið mest $\delta_{AV}=2,71\%$ (c) Þrýstibrot og kiknun langjárna í syðri flangs í lok GM8 þar sem mest rek varð $\delta_{AV}=1,85\%$ og $\delta_{NS}=0,76\%$, (Hoult og Almeida, 2024b).

Í heild má segja að vel hafi tekist til við að herma niðurstöður frá burðarþolstilraunum á járnþendingum steinsteyptum veggjareiningum. Markmið þessa áfanga rannsóknarverkefnisins hafi þannig náðst og rannsóknahópurinn stendur á traustari grunni við að beita bitastangalíkani á önnur viðfangsefni. Þetta reiknilíkan er áhugaverður valkostur þegar lagt verður í næsta áfanga verkefnisins við að meta með fræðilegum aðferðum tjónnæmi steinsteyptra veggjabygginga.

Þakkir

Þessi rannsókn er styrkt af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar (Styrkur nr. 1800-990) og af SERICE verkefninu (e. *Seismic Risk in Iceland*), sem er styrkt með Öndvegissstyrk frá RANNIS, styrkur nr. 218149-051.

Heimildaskrá

ALL4wALL (2024). *Test description for the ALL4wALL Blind prediction competition*, conducted by the IMMC at UCLouvain, Version 3.0: 2024.01.23.

Almeida, J.P., Hoult, R., Bertholet, A., Candeias, P., Carvalho, A., Correia, A.A., Doneux, C., Gwendal, C., Han, Y., Isakovic, T., Janevski, A., Lo Feudo, S., Mihaylov, B., Orgnoni, A., Payen, B., Palermo, D., Pinho, R., Ribeiro, F., Simar, A. & Sousa, M.L. (2024). Shake-table testing of two U-Shaped RC walls: Overview of the project ERIES-ALL4wALL. *Proceedings of the 18th World conference of Earthquake Engineering*, July 2024, Milano, Italy.

Álvarez, R., Restrepo, J.I., Panagiotou, M. & Godínez, S. E. (2020). 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.2020.111005>

Bjarni Bessason & Jón Örvar Bjarnason (2016). Tjónnæmi lágreistra íbúðarhúsa byggt á gögnum frá Suðurlandsskjálftunum 2000 og 2008, *Verktækni // Icelandic Journal of Engineering*, <https://doi.org/10.33112/ije.22.2>

Bessason, B., Bjarnason, J.Ö. & Rupakhety, R. (2020). Statistical modelling of seismic vulnerability of RC, timber and masonry buildings from complete empirical loss data. *Engineering Structures*, 209, 109969.

Bessason, B., Rupakhety, R. & Bjarnason, J.Ö. (2022). Comparison and modelling of buildings losses in South Iceland caused by different size earthquakes. *Journal of Building Engineering*, 46, 103806. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103806>

Bessason, B., Rupakhety, R. & Bjarnason, J.Ö. (2023). Scenario-based seismic risk assessment for the Reykjavik Capital Area. *Buildings*, 13(12), 2919.

CEN (2004). *EN1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. European Committee for Standardization (CEN).

Cheloni, D., De Novellis, V., Albano, M., Antonioli, A., Anzidei, M., Atzori, S., ... & Doglioni, C. (2017). Geodetic model of the 2016 Central Italy earthquake sequence inferred from InSAR and GPS data. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6778-6787. doi:10.1002/2017GL073580

EFEHR (2024), *European Hazard model*. Sótt 15. sept. 2024 af: <http://www.efehr.org/start/>

Franz Sigurjónsson (2023). *Samanburður á tengingu staðsteypis og forsteypis stoðveggjar við staðsteypa undirstöðu*, MS-ritgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóla Íslands.

Haraldsson, O.S., Bessason, B., Tsai, CY., Sigurjónsson, F. & Smáráson, R.S. (2023). New Connection Between Precast Abutment Wall and CIP Foundation Suitable for Accelerated Bridge Construction. In: Ilki, A., Çavunt, D., Çavunt, Y.S. (eds) *Building for the future: durable*,

- sustainable, resilient. fib Symposium 2023. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol 350. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_159
- Hoult, R., Almeida, J.P. & 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.
- Hoult, R., Doneux, C. & Almeida, J.P. (2023). Tests on reinforced concrete U-shaped walls subjected to torsion and flexure. *Earthquake Spectra*, 39(4), 2685-2710.
- Hoult, R. D., Almeida, J.P. & Correia, A. A. (2024a). Overview and blind prediction from shake table tests of a large-scale RC U-shaped core wall. *Proceedings of the 18th World conference of Earthquake Engineering*, July 2024, Milano, Italy.
- Hoult, R.D., Almeida, J.P., (2024b). *ERIES - ALL4wALL 2023 Blind prediction competition: Shake-table response of 40-ton RC U-shaped wall*. Summary report – may 2024, Version 1.2. Downloaded from: <https://uclouvain.be/en/research-institutes/immc/blind-prediction2023.html> in september 2024.
- Hwang, S.J., Fang, W.H., Lee, H.J. & Yu, H.W. (2001). Analytical model for predicting shear strength of squat walls. *Journal of Structural Engineering*, 127(1), 43-50.
- Joyner, W.B. & Boore, D.M. (1981). "Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2011-2038.
- Júlíus Sólmes, Freysteinn Sigmundsson & Bjarni Bessason (2013). *Náttúruvá á Íslandi – Eldgos og jarðskjálftar*, Háskólaútgáfan og Viðlagatrygging Íslands.
- Kolozvari, K., Kalbasi K., Orakcal, K. & Wallace J. (2021). Three-dimensional model for nonlinear analysis of slender flanged reinforced concrete walls, *Engineering Structures*, 236: Article 112105.
- Lu, Y., Panagiotou, M., & Koutromanos, I. (2016). Three-dimensional beam-truss model for reinforced concrete walls and slabs–part 1: modeling approach, validation, and parametric study for individual reinforced concrete walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(9), 1495-1513.
- Pinho, R. (2000). Shaking table testing of RC walls. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 37(4), 119-142.
- Mander J, Priestley M. & Park R. (1988). Theoretical stress–strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*. 114(8):1804–1826.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- McKenna F., Fenves G.L., Scott M.H. & Jeremic B. (2000). *Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees)*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, USA.
- Stefán Grímur Sigurðsson, (2023). *Ólínuleg greining á steiptum stoðveggjum með einingaaðferðinni, MS-ritgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóla Íslands*.
- Tsai, C.-Y., Bessason, B. & Rupakhety R. (2024). Analytical vulnerability model to evaluate RC wall damages after recent earthquakes in south Iceland, *Proceedings of the 18th World conference of Earthquake Engineering*, July 2024, Milano, Italy.