

Paalutuksen vetorasitusten vaikutus paalujatkosten tartuntaan

Tampereen yliopiston organisoimana toteutettiin laaja monivaiheinen tutkimushanke, jossa paalujatkoksen lukko-osiin kiinnitettyjen tartuntaterästen ja paalun pääterästen välisen limijatkoksen toimintaa tutkittiin lyöntikokeilla ja staattisilla testeillä. Projektin tuloksena kehitettiin myös kansainvälisesti ainutlaatuinen menetelmä paalun vetojännitysten tutkimiseen lyöntirasituksessa.

Asennustilanteessa paaluun muodostuu puristusjännitysten lisäksi myös merkittäviä vetojännityksiä, erityisesti silloin, kun paalua lyödään pehmeän maakerroksen yläpuolella olevan täytön tai kuivakuorikerroksen läpi. Vetorasitusten kannalta kriittinen kohta teräsbetonipaaluissa on paalujatkos. Vetovoimien tulee välittyä osapaalulta toiselle jatkoksen lukko-osiin kiinnitettyjen tartuntaterästen ja paalun pääterästen välisen limijatkoksen kautta.

Jatkettuja paaluja on asennettu vetorasitustenkin näkökulmasta onnistuneesti jo vuosikymmeniä. Uudistuvat raudoitteiden limijatkosten suunnitteluperiaatteet ja suunnitteluohjeiden puutteet asennustilanteen rasituksista ovat kuitenkin lisänneet tarvetta selvittää teräsbetonipaaluille ominaisen limijatkostyyppin toimintaa aiempaa tarkemmin. Paaluihin asennuksen aikana kohdistuva toistuva lyöntirasitus poikkeaa merkittävästi muiden betonirakenteiden rasitustiloista.

Näistä lähtökohdista päädyttiin käynnistämään laaja monivaiheinen tutkimushanke, jonka tavoitteena on ollut lisätä tietoa teräsbetonipaaluissa hyvin yleisesti käytettävän raudoitetankojen limijatkoksen rakenteellisesta toiminnasta erityyppisissä vetorasituksissa. Tutkimus toteutettiin yhteistyössä paalu-, paalutarvike- ja paalumateriaali- ja paalutuskonevalmistajien kesken.

Tutkimushanke päätettiin toteuttaa kolmessa vaiheessa:

1. Vetorasituksen aikaansaavan lyöntikoejärjestelyn kehittäminen
2. Paalujatkosten raudoitetankojen limijatkoksien tyyppillisten erityispiirteiden vaikutusten selvittäminen staattisessa rasituksessa
3. Raudoitetankojen limijatkoksen käyttäytymiserojen selvittäminen staattisessa ja iskumaisessa toistorasituksessa

Lyöntikoejärjestelyn kehittäminen

Paalutustapahtuman vetojännitysten vaikutusten selvittämiseksi ei löytynyt valmista testimenetelmää, joten projektin ensimmäisenä vaiheena oli kehittää kuormitusjärjestely, jossa paalutuskoneen lyöntienergialla aikaansaadaan teräsbetonipaaluun merkittäviä veto-rasituksia.

Lyöntikoeita varten kehitettiin kuvan 1 mukainen teräksinen lyöntikehikko, joka on kiinnitetty paalujen testaukseen käytetyn lyöntikoelaatikon pohjalevyyn. Kuormitusjärjestelyssä tutkittava teräsbetoninen alapaalu kiinnitetään pulttiliitoksien teräksiseen yläpaaluun, johon on hitsattu paalun liikettä alapäin estävä teräskiekkö. Tämä jatkettu paalu nostetaan lyöntikehikkoon, jolloin paalun alapää jää ilmaan ilman kärkivastusta, ja näin ollen paaluun saadaan muodostettua lyönnin avulla merkittäviä vetorasituksia. Yläpaalun ja kehikon välillä käytettiin vaimentimina nylontynyjä, joiden avulla paalulle tuleva vetojännitys on paremmin hallittavissa. Lyöntikokeessa käytettävän paalutuskoneen hydraulijärjestyksen pudotuskorkeuksien ja iskusuojien määrän

Jukka Haavisto, Tampereen yliopisto, jukka.haavisto@tuni.fi

Teemu Riihimäki, A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Teemu Repo, Junttan Oy

Anssi Laaksonen, Tampereen yliopisto

arvioimiseksi kuormitustilannetta simuloitiin GRLWEAP-ohjelmalla. Myöhemmässä vaiheessa tätä simulointimallia tarkennettiin koetulosten perusteella.

Lyöntikokeet päädyttiin tekemään kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tehtyjen esikokeiden tavoitteena oli saada kokemuksia kuormitusjärjestelyn toiminnasta ja näiden pohjalta kehittää menetelmää myöhemmin tehtävää toista lyöntikuormitusarjaa varten. Esikokeissa kuormitettiin yhteensä 12 kpl RTB-300-16 paalutyyppin poikkileikkausta vastaavaa paalua, joiden pituus oli 2,7 metriä.

Yksi paaluista oli instrumentoitu referenssipaaalu, jossa paalun pääteräkset oli hitsattu paalun yläpäähän paksuun teräslevyyn. Muissa paaluissa paalujatkoksen tartuntaterästen ja paalun pääterästen välille muodostui raudoitetankojen limijatkos, jonka pituutta ja limijatkoksen alueella käytettyä poikittaisen hakaraudoitteen määrää varioitiin koekappaleiden välillä.

Esikokeiden lyöntitapahtumassa järkäleen pudotuskorkeutta nostettiin portaittain ja yhdellä kuormitusportaalla tehdyn lyöntisarjan pituutta vaihdeltiin koekappaleiden välillä, jolloin oli mahdollista aikaansaada erilaisia kuormitustilanteita paalumateriaalien väsymisen kannalta.

Iskun aiheuttamat jännitykset vaihtelevat testipaalun eri osissa lyönnin epäkeskisyyden ja paalun päistä tapahtuvien kärkiveijastusten seurauksena. Referenssipaalun lyöntikokeessa paalun eri korkeusasemiin asennettujen venymäliuskojen tulosten perusteella

1 Lyöntikoejärjestely.



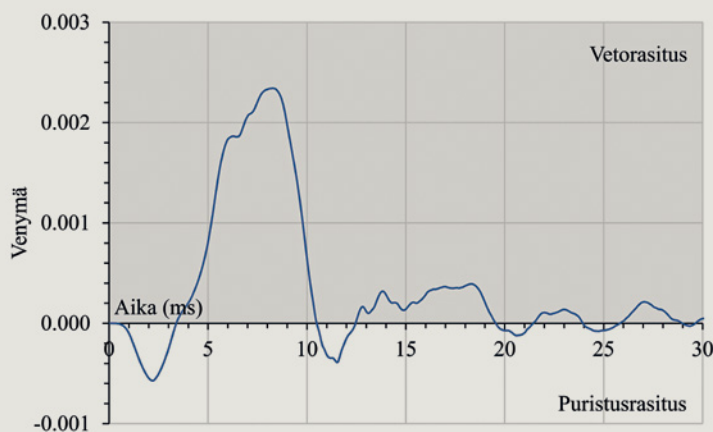
pystyttiin päättämään lyönnin aiheuttaman maksimivetorasituksen vähenevän paalun yläosista kärkeä kohti.

Esikokeiden perusteella venymäliuska-mittauksen todettiin soveltuvan jännitysten mittauksiin käytetyssä testimenetelmässä PDA-antureita paremmin. Menetelmän kehitystarpeiksi todettiin kehikon alapään kiinnityksen vahvistaminen, paalun alapään sivuttaisliikkeen estäminen ja yläpaalun pulttien kiristysten varmistaminen kokeen aikana.

Esikoevaihe todettiin hyvin tarpeelliseksi edellä kuvattujen kehitystarpeiden tunnistamiseksi. Koejärjestely kokonaisuutenaan toimi kuitenkin toivotulla tavalla ja sen avulla tutkittavaan paaluun saatiin muodostumaan merkittäviä vetojännityksiä (kuva 2). Esikokeiden paaluissa limijatkospituudet todettiin kokeiden tulosten perusteella tulleen valituksi liian pitkiä, eikä paaluissa käytettyjen erilaisten rakenneratkaisujen välille saatu kapasiteeteissa merkittäviä eroja. Yläpaalun venymämittauseroista päätellyllä lyöntijännityksen epäkeskisyydellä sen sijaan todettiin olevan havaittava yhteys koekappaleiden kapasiteetteihin.

Lyöntikalustolla ja iskusuojien ominaisuuksilla todettiin olevan suuri merkitys kokeiden onnistumiseen. Kokeiden aikana on tärkeää hallita järkäleen pudotuskorkeutta tarkasti sekä ymmärtää iskusuojien vaikutusta paaluun välittyvään lyöntienergiaan. Kokeessa käytetylle lyöntikalustolle on tyypillistä, että koejärjestelyn kaltaisessa, poikkeuksellisen matalalla pudotuskorkeudella tehtävässä

2 Testipaalun pääteräksistä mitatun yksittäisen lyönnin tyypillinen venymäkuvaaja.



lyöntityössä esiintyy alussa muutamia suhteellisesti suurempia lyöntejä. Näissä tilanteissa riskinä on koepaalun vaurioituminen ennen aikaisesta ja näin ollen kokeen epäonnistuminen. Lyöntienergian hallinta järkäleen pudotuskorkeuden ja iskusuojien kautta on erittäin tärkeää myös käytännön paalutustyössä. Näihin tekijöihin on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta asennuksen aikaiset lyöntijännitykset eivät vaurioita paaluja.

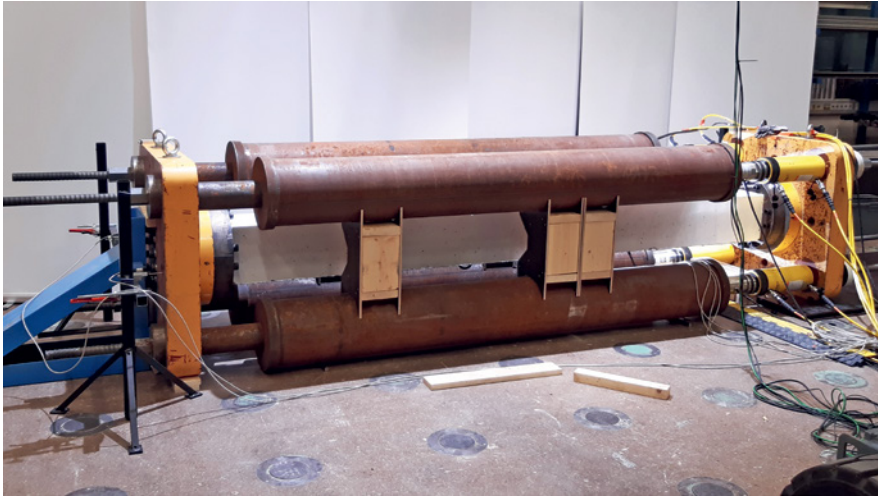
Kehitettyä lyöntikoejärjestelyä kuvataan tarkemmin 2026 julkaistavassa kansainvälisessä vertaisarvioidussa julkaisussa [1].

Staattiset kokeet

Staattisten kokeiden päätavoitteena oli selvittää paalujatkoksen raudotetankojen limijatkoksille ominaisten erityispiirteiden vaikutusta limijatkoksen käyttäytymiseen ja kapasiteettiin, sekä vertailla saatuja koetuloksia olemassa oleviin limijatkosmalleihin.

Tutkimusvaiheessa valmistettiin 19 koepaaluja suoriin vetokokeisiin. Vetokoekappaleiden välillä varioitiin limijatkospituutta, hakarautoitteen tyyppiä ja määrää, paalun pääterästen betonipeitettä sekä jatkoksen tartuntaterästen betonipeitettä ja tyyppiä. Yksi koekappaleista vastasi limijatkospituutta lukuunottamatta ominaisuuksiltaan mahdollisimman hyvin RTB-300-16 tuotantopaalun poikkileikkausta, ja toimi siten useimmissa koesarjoissa täydentävänä vertailukappaleena.

Kaikki koekappaleet olivat poikkileikkaukseltaan 300×300 mm² ja pituudeltaan 3,4 metriä. Niiden molemmissa päissä oli neljä sisäkierteillä varustettua kiinnitysosaa, joiden avulla koekappale oli mahdollista kiinnittää vetokoelaitteistoon. Jatkoksen tartuntateräkset oli kiinnitetty suoraan näihin kiinnitysoosiin, tai 50 mm paksuun päätylevyyn niissä tapauksissa missä tar-



3 Vetokoejärjestely.

tuntaterästen ja lukitusosien keskinäinen etäisyys poikkesivat toisistaan.

Vetokokeet toteutettiin tutkimusta varten modifioidussa kuormituslaitteessa (kuva 3), jossa voima tuotettiin neljällä hydraulisylinterillä. Kokeen aikana koekappaleen muodonmuutoksia mitattiin raudoitetankoihin asennetuilla venymäliuskoilla ja paalun pinnasta digitaalisella kuvakorrelaatiomittauksella (DIC-mittaus).

Koekappaleet kuormitettiin murtoon voimaohjattuna. Murto tapahtui useimmissa tapauksissa betonipeitteen lohkeamisena. Muutamalla paalulla pääteräkset saavuttivat kokeen aikana myötöjännityksen, ja pisimmillä limijatkospituuksilla murto tapahtui pääterästen kuroutuessa poikki. Tämä oli odotettu tulos, sillä PO-2016:n [2] mukaan paalujatkoksen vetokestävyyden tulee olla vähintään yhtä suuri kuin paalun vetokestävyyden.

Koetuloksia verrattaessa olemassa oleviin limijatkosmalleihin, havaittiin laskennallisten ja kokeellisten kapasiteettien täsmäävän erittäin hyvin toisiinsa niissä koekappaleissa, joissa limijatkosalueella oli käytetty harjateräsumpihakoja. Niiden koekappaleiden koetulokset, joissa limijatkosalueella oli käytetty pyöröteräskierrehakaa, jäivät sen sijaan pääosin laskennallisia kapasiteetteja matalammaksi. Kuitenkin myös näissä pääterästen myötölujuutta lähellä olevat tulokset korreloivat hyvin laskennallisten kapasiteettien kanssa, joka on paalujen käytännön suunnittelua ajatellen oleellisin jännitysalue. Tulosten pohjalta Eurokoodin limijatkosmallissa olevalle sulkuraudoitteen huomioon ottavalle termille kehitettiin korjauskerroin tilanteille, joissa limijatkoksessa käytetään harjateräshakojen sijaan pyöröteräskierrehakaa.

Staatistista vetokokeista on luettavissa lisää *Structural Concrete* -lehdessä vuonna 2024 julkaistusta artikkelista *Experimental investigation on the tension lap splices used in the joints of precast RC foundation piles* [3].

Toistokokeet

Tutkimuksen viimeisen kuormitusvaiheen tavoitteena oli selvittää tutkittavan limijatkostyyppin kapasiteettieroja staatteisissa ja iskumaisessa toistorasituksessa ja saada tietoa esikokeiden perusteella päivitetyn lyöntikoejärjestelyn toimivuudesta sekä koekappaleiden tulosten hajonnasta lyöntikokeessa.

Viimeistä vaihetta varten valettiin yhteensä 18 koepaaluja, joissa käytettiin kahta erilaista limijatkostyyppiä (Taulukko 1). Lyöntikokeisiin valmistettiin viisi rinnakkaista, ja laboratoriokokeisiin kolme rinnakkaista koekappaletta molemmista limijatkostyypistä. Näiden lisäksi valmistettiin kaksi 300B-15Ø -tyypin koekappaletta, joille kohdistettiin ensin lyöntirasitus, jonka jälkeen ne kuormitettiin laboratoriossa staatteisesti murtoon.

Laboratoriokokeisiin valmistettujen kolmen rinnakkaisen paalun sarja kuormitettiin käyttäen samaa kuormituslaitetta kuin aiemmissa staatteisissa kokeissa siten, että yksi koekappale kuormitettiin staatteisesti murtoon, yksi toistokuormituksena (300B-15Ø -sarjalla 80 % arvioidusta murtokuormasta ja 300C-20Ø -sarjalla 85 % arvioidusta murtokuormasta), ja yksi kasvavana toistokuormituksena, jossa ensimmäinen toisto oli 75 % arvioidusta murtokuormasta, johon jokaisella seuraavalla toistolla lisättiin 0,1 % arvioidusta murtokuormasta.

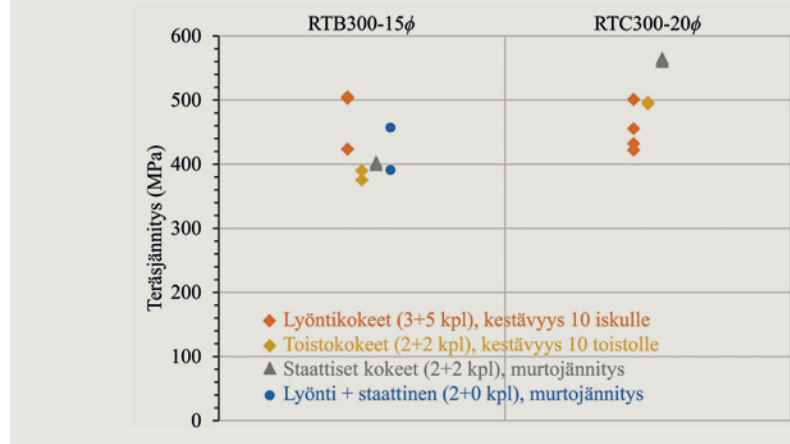
Koekappaleiden kestävyyskysien välisen vertailun osalta haasteena oli, että kokeista ei tuloksena suoraan tule varsinaista murtoarvoa, vaan varsinkin lyöntirasitettuihin paaluihin toistoja tulee huomattavan vaihtelevilla vetojännityksillä ennen murtoa. Koekappaleiden keskinäisen vertailtavuuden mahdollistamiseksi kunkin koekappaleen kuormitushistoria sovitettiin Model Code 2010 [4] mukaiseen betonin vetorasitusten väsymismalliin, jonka

Taulukko 1

Toistokoevaiheen koekappaletyypit.

Koekappaletyyppi	RTB300-15Ø	RTC300-20Ø
Testattu betonin 28d lujuus	$f_{cm} = 46,5 \text{ MPa}$	$f_{cm} = 46,5 \text{ MPa}$
Testattu betonin kimmokerroin	$E_{cm} = 35,4 \text{ MPa}$	$E_{cm} = 35,4 \text{ MPa}$
Paalun rauditus / nurkka	1T16 ($\varnothing = 16 \text{ mm}$), A700HW	2T14 ($\varnothing_b = 19,8 \text{ mm}$), A700HW
Jatkoksen rauditus / nurkka	1T20, B500B	1T25, B500B
Limijatkospituus	$l_b = 240 \text{ mm}$ (15Ø)	$l_b = 396 \text{ mm}$ (20Ø _b)

4 Eri kuormitusilanteiden kapasiteettien vertailu.



perusteella arvioitiin pääterästen vetojännitys, jollaisia koekappale kestäisi kymmenen toistoa.

Kuvassa 4 esitetyistä tuloksista voidaan havaita, että lyöntikokeista määritetyissä kapasiteettiarvoissa on suuri hajonta. Tämä johtuu osittain tutkittavasta ilmiöstä, mutta todennäköisesti enemmän kuormitustapahtumasta, jossa muun muassa reunajännitysten vaihteluiden, yksittäisten kovien lyöntien ja iskuaaltojen vaihtelujen takia rinnakkaisten koekappaleiden välisissä kuormitushistorioissa on suurehkoja eroja. Kaksi lyöntikoeleista murtui ennenaikaisesti kuormituksen alussa tapahtuneiden suunniteltua huomattavasti korkeampien lyöntien seurauksena, eikä niistä saatu vertailukelpoista tulosta.

Lyönti- ja toistokokeiden välillä ei koekappaleiden kestävyyksissä ollut johdonmukaista eroa. 300B-15Ø -sarjan paaluissa lyöntikokeen tulokset olivat keskimäärin selvästi korkeammat, mutta 300C-20Ø -sarjan paaluissa toistokokeiden tulokset olivat keskiarvoltaan hyvin lähellä lyöntikokeiden tuloksia. Paaluille tehdyillä lyöntirasituksilla ei havaittu olevan vaikutusta paalun staattiseen murtokapasiteettiin puhtaisiin staattisiin murtokuormiin verrattuna.

Yhteenveto ja johtopäätökset

Projektissa kehitettiin onnistuneesti uudentyyppinen koejärjestely, jonka avulla voidaan tutkia lyöntityössä tapahtuvien vetojännitysten vaikutusta paalun rakenteeseen. Projektissa kehitettiin myös kyseiselle testauslaitteelle soveltuva GRLWEAP-malli.

Staattisten kokeiden perusteella voidaan todeta lähivuosina käyttöön otettavan eurokoodin limijatkosmallin soveltuvan hyvin testatuissa paalujatkoksissa käytetyille raudoitettankojen limijatkoksille, kun mitoitus tehdään paalun pääteräksen myötölujuudelle. Koetuloksista saatiin hyvä käsitys rakenteen

eri ominaisuuksien vaikutuksesta limijatkoksen kapasiteettiin. Lisäksi eri muuttujien vaikutus kapasiteetteihin voitiin todeta tapahtuvan yhdenmukaisesti koetulosten ja laskentamallien välillä.

Limijatkosten väsymismallin kautta määritetyt kapasiteetit olivat staattisissa toistokokeissa ja lyöntikokeissa melko lähellä toisiaan. Lyöntikokeissa rakenteen rasitusta lisää, että vetorasituksen lisäksi paaluun kohdistuu myös toistuvaa puristusrasitusta.

Selkeänä jatkotutkimustarpeena on paalujen vetojännitysten monitorointi todellisessa asennustilanteessa etenkin sellaisissa maaperäolosuhteissa, joissa on odotettavissa suuria vetorasituksia. Lisäksi paalutuksessa käytettävien iskusuojien vaikutuksesta paalu-

tuksen onnistumiseen olisi tarpeen saada lisää tutkittua tietoa. •

Lähteet

- [1] Haavisto, J., Riihimäki, T., Repo, T., Tupala, T., Ikkala, K. & Laaksonen, A. 2026, valmisteilla. Development of a test method to investigate pile behaviour under tension induced by pile driving.
- [2] RIL 254-2016. Paalutusohje 2016 (PO-2016). Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- [3] Haavisto, J. & Laaksonen, A. 2024. Experimental investigation on the tension lap splices used in the joints of precast RC foundation piles. Structural Concrete, 25(5). pp. 3468-3486. <https://doi.org/10.1002/suco.202301058>
- [4] fib Model Code 2010. Model Code for Concrete Structures 2010.; 2013.

Projektiosapuolet

Rahoittajat

Betoniteollisuus ry:n paalujaos
 Celsa Steel Service Oy
 Rakennustuotteiden Laatu Säätiö sr
 Tampereen yliopisto

Ohjausryhmä

Väylävirasto
 Betoniteollisuus ry
 Celsa Steel Service Oy
 Emeca Oy
 HTM Yhtiöt Oy
 Junttan Oy
 Leimet Oy
 Tampereen yliopisto
 Väylävirasto
 HTM Yhtiöt Oy
 Leimet Oy
 Leimet Oy
 Pirkan Rakentajapalvelu Oy
 Emeca Oy

Paalujen valmistus

Paalutarvikkeet

Lyöntikoejärjestelyt

Paalutusurakoitsija

Valokuvaus

PDA-mittaukset ja tutkimus

Tutkimus ja koordinointi

Junttan Oy
 A-Insinöörit Suunnittelu Oy
 Tampereen yliopisto