

Teräsbetonipaalujen lyöntikokeiden avulla tutkittiin iskurasituksen vaikutusta betonin staattiseen lujuuteen

Jukka Haavisto, dipl.ins., projektipäällikkö

Toni Kujala, dipl.ins., diplomityöntekijä

Anssi Laaksonen, tekn. toht., professori
Tampereen teknillinen yliopisto

Lyömällä asennettu teräsbetonipaalu on kuormitushistorialtaan varsin erityinen betonirakenne. Ennen käytönaikaisia kuormia paaluun kohdistuu asennusmenetelmästä johtuen toistuva iskumainen rasitus, jossa betonin jännitykset voivat toteutusstandardien mukaisesti nousta jopa 90 %:iin betonin lyönninaikaisesta ominaislujuudesta. Rakenteen lopullisen käyttötilanteen murtorajatilatarkastelussa kuormien kanssa käytetään osavarmuuslukuja ja ne sisältävät tilastollisesta hajonnasta johtuvan varmuuden. Lyöntivoimat ovat sitä vastoin todellisia ja varmuudella esiintyviä. Silti paalurakenteen on kyettävä ottamaan vastaan myös niistä aiheutuvat rasitukset ilman merkittävää vaurioitumista.

Lyöntirasituksen vaikutusta myöhemmin toteutuvaan betonin staattiseen lujuuteen tutkittiin kenttäolosuhteissa toteutettujen lyöntikokeiden avulla. Lyöntikokeissa teräsbetonipaaluihin kohdistettiin paalutuskoneen tuottama toistuva iskumainen rasitus. Lyöntikokeiden päättävänä oli saada lisätietoa siitä, miten toistuva lyöntirasitus korkeilla jännitystasolla vaikuttaa paalurakenteen betonin mikrohalkeamien kehittymiseen ja tätä kautta betonin lujuuteen. Samassa yhteydessä oli tavoitteena tuottaa lisätietoa erittäin nuorena asennettavien paalujen lyönninkestävyydestä. Tämän vuoksi lyöntikokeet suoritettiin paaluille betonin iän ollessa ensimmäisen koesarjan osalta ainoastaan kolme ja toisen koesarjan osalta 14 vuorokautta.

Lyöntikokeet olivat osa tutkimusprojektiä, jossa tavoitteena on ollut kehittää lyödyn teräsbetonipaalun rakenteellista mitoitusmallin laadinnassa myös laskennan lähtötie-

tojen tarkkuuteen tulee kiinnittää aiempaa enemmän huomiota ja juuri tämän vuoksi tulee tarpeelliseksi selvittää myös lyöntitahtuman mahdollista heikentävää vaikutusta paalurakenteen betoniin. Teräsbetonipaalun rakenteellista mitoitusmallista käsittelevä tutkimusprojekti on jatkoa vuonna 2015 valmistuneelle esiselvitysvaiheelle. Lyöntikokeet ja niistä saadut tulokset liittyivät omana osionaan myös Toni Kujalan alkuvuodesta 2017 valmistuneeseen diplomityöhön ”Betonin puristuslujuus erilaisten rasitustilojen jälkeen”.

Lyöntikokeiden toteutus

Lyöntikokeissa käytetyt koepaalut olivat 6 metriä pitkiä ja ne vastasivat raudoitukseltaan ja betonilaadultaan TB300b-paalutyyppiä. Koepaaluissa oli normaalia lyöntipaaluja järeämpi kalliokärki ja lyöntipäässä kaksi sidevannetta. Koepaalut lyötiin 3 tonnin kiihdytetyllä hydraulijärjestyksellä kalliioon perustettua paksua teräslevyä vasten, jonka päällä oli noin 0,8 metrin paksuinen sorakerros.

Paalujen lyönninaikaisia venymiä mitattiin dynaamisissa koekuormituksissa käytettävän PDA-laitteiston avulla paalun jokaiselta sivulta, paalun ylä- ja alapäästä. Jokaiselle paalulle määritettiin jälkeensä kimmokerroin kokeessa mitatun iskuaallon nopeuden perusteella. Paaluihin kohdistuneet lyöntijännitykset laskettiin näin määritettyjen kimmokertoimien ja venymätulosten perusteella. Lyönneistä aiheutuneet jännitykset saatiin siten määritettyä keskimääräisesti paalun koko poikkileikkaukselle ja myös erikseen paalun jokaiselle sivulle. Lyöntien lukumäärää seurattiin paalutuskoneen lyöntilaskurista.

Lyöntirasituksen jälkeen paalut katkaistiin PDA-antureiden korkeudelta ja jokaisesta katkaisukohdasta porattiin paaluun nähden aksiaalisesti kaksi poranäytettä, jotka kuljetettiin laboratorioon puristus- ja halkaisuveto-juuskokeita varten. Laboratoriossa näytteet katkaistiin koestuspituuteen ja puristuskoe-näytteissä kuormituspinnat myös hiottiin. Tutkimuksen eri vaiheet on esitetty kuvassa 1.

Tulokset

Lyöntikokeissa kuormitettiin 7 paaluja kolmen vuorokauden ikäisenä ja 8 paaluja 14 vuorokauden ikäisenä. Betonin lyöntihetken lieriölujuus paaluissa määritettiin kolmen olosuhdekappaleen perusteella ja se oli 3 vuorokauden ikäisenä $f_{cm,3} = 39,1$ MPa (vastaa suunnitellun kuutiolujuutta K49) ja 14 vuorokauden ikäisenä $f_{cm,14} = 54,5$ MPa (vastaa suunnitellun kuutiolujuutta K66). Paaluihin kohdistettiin lyöntirasitus, joka oli paalusta riippuen 0,6...0,95 fcm. Lyöntimäärä paaluilla oli 30...5000 välillä.

Kuormitusten lyöntijännitys-toistomäärä-yhdistelmät pyrittiin suunnittelemaan niin korkeiksi, että osa paaluista murtuisi lyöntien vaikutuksesta, jolloin saataisiin hyödyllistä tietoa myös paalurakenteen murtotapahtumasta. 14 vuorokauden ikäisistä paaluista murtoon asti lyötiin viisi paaluja ja kolmen vuorokauden ikäisistä paaluista yksi paalu. Näissä kaikissa murto tapahtui paalun alapäässä (kuva 2). Tyypillisessä murtotapahtumassa paalun suojabetonipeite lohkesi, jonka jälkeen paalun kierrehaka murtui, kierrehaan sisäpuolinen betonipoikkileikkaus murskaantui ja paalun pääteräkset nurjautivat.

Rakennekoelieriöiden lujuustulosten perusteella paalujen lyöntirasituksen havait-



1 Lyöntikokeiden eri vaiheet.



2 Kaikki murtoon asti kuormitetut paalut murtuivat alapäästään.

tiin heikentäneen betonin lujuutta 14 vuorokauden ikäisillä paaluilla kaikissa tapauksissa. 3 vuorokauden ikäisistä paaluista porattujen näytteiden tuloksia ei sen sijaan voida pitää vertailukelpoisina johtuen lujuudenkehityksen eroista erittäin nuoressa betonissa. Alla esitetyt tulokset perustuvatkin siten 14 vuorokauden ikäisistä paaluista saatuihin havaintoihin.

Poranäytteiden puristuslujuudet olivat tavoitteellisella jännitystasolla $0,6 \cdot f_{cm,14}$ lyödyillä paaluilla karkeasti $0,85\text{--}0,95$ -kertaisia kuormittamattomiin referenssinäytteisiin verrattuna. Vastaavasti jännitystasolla $0,7 \cdot f_{cm,14}$ lyödyissä paaluissa suhdeluku oli $0,75\text{--}0,95$ ja jännitystasolla $0,8 \cdot f_{cm,14}$ lyödyissä paaluissa $0,65\text{--}0,90$ välillä. Puristuslujuustulokset on esitetty graafisesti kuvassa 3. Halkaisuvetolujuuskokeissa lyödyistä paaluista porattujen näytteiden koetulokset olivat koekappaleesta riippuen $0,70\text{--}0,95$ välillä referenssikappaleisiin nähden.

Neljän lyönneissä murtuneen 14 vuorokauden ikäisen paalun perusteella muodostettiin lyöntikapasiteetille logaritminen sovitte lyöntijännityksen ja lyöntimäärän välille. Sovite muodostettiin erikseen paalujen keskimääräisille jännityksille ja reunajännityksille. Sovitesuorien ja koetulosten välillä havaittiin selkeä korrelaatio. On kuitenkin mainittava, että diagrammi perustuu pelkästään yhteen paalutyyppiin ja hyvin suppeaan määrään tuloksia, jolloin sovitetta voidaan pitää paalun lyöntikapasiteetille vain suuntaa antavana.

Havaintoja lyöntikokeista

Tutkimuksessa lyöntitapahtuman aiheuttamilla rasituksilla todettiin olevan vaikutusta betonin lujuuteen. Tämä tulee ottaa huomioon raken-

teellisessä mitoituksessa etenkin, kun siirrytään tarkempiin mitoitusmenettelyihin.

Koekuormituksissa havaittiin paalurakenteen kestävä erinomaisesti siihen kohdistetut lyöntirasitukset jo hyvin nuorella betonilla. Koekuormituksissa 3 vuorokauden ikäiset paalut kestivät betonin lyönninaikaiseen lujuuteen suhteutettuna jopa korkeampia lyöntijännityksiä kuin 14 vuorokauden ikäiset paalut. Tämä tosin selittyy paalujen halkaisuraudoitteella, joka oli koepaaluilla sama riippumatta betonin lujuudesta tai iästä.

Lyöntikokeen iskut vastasivat periaatteen mukaan normaalin asennustilanteen loppulyöntejä, joissa paalua lyödään kovilla jännityksillä kantavaa alustaa, esimerkiksi kalliota, vasten. Loppulyöntejä paaluihin kohdistuu tyypillisesti

30–50 kappaletta. Paalujen upotuslyönneissä, joita voi parhaimmillaan olla paalua kohden jopa tuhansia, puristusjännitykset eivät normaalisti nouse korkeiksi ja kriittisimmät rasitukset rakenteelle tulevatkin tällöin useimmiten upotuksesta aiheutuvien vetojännitysten muodossa. Koekuormitustilanne ei tältä osin vastannut täysin todellista lyöntitapahtumaa. Betoniin kohdistuneiden puristusjännitys-toistomäärä-yhdistelmien osalta rasitus oli kuitenkin huomattavasti todellista asennustilannetta rajumpi.

Tarkempaa tietoa lyöntikokeista löytyy Toni Kujalan diplomityöstä (<http://URN.fi/URN:NBN:fi:tyy-201703091130>) ja myöhemmin aiheesta julkaistavasta tiedeartikkelista.

Taulukko 1 Projektiosapuolet

Rahoittajat	RTL-säätiö Betoniteollisuus ry:n paalujaos Liikennevirasto
Lyöntikoejärjestelyihin liittyvien lisäkustannusten rahoitus	HTM Yhtiöt Oy Lujabetoni Oy
Paalujen valmistus	HTM Yhtiöt Oy
Paalutarvikkeet	Leimet Oy
Lyöntikoeaikka ja lyöntikokeisiin liittyvät muut järjestelyt	HTM Yhtiöt Oy
Paalutusurakoitsija	Pirkan Rakentajapalvelu Oy
PDA-mittaukset	Inspecta Oy
Paalujen katkaisu	MotoCut Oy
Tutkimus	Tampereen teknillinen yliopisto