

HARJATANGON PINTAKUVIOINNIN VAIKUTUS TANGON KÄYTTÖJÄNNITYKSEEN TERÄSBETONIRAKENTEISSA

Jukka Jokela ja Esa Pukki

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 16
No. 2, 1983, s. 19...32

YHTEENVETO: Kirjoituksessa tarkastellaan harjatangon tartuntaominaisuuksien parantamista tangon pintakuviointia kehittämällä. Harjan pinta-alan suuruuden vaikutusta tangon liukumaan, tangon suuntaisen pitkittäishalkeaman muodostumiseen ja poikittaishalkeaman leveyteen selvitettiin tartunta- ja halkaisukokeiden sekä laskentamallin avulla. Saatujen tuloksien perusteella on laadittu rajakäyrät teräksen käyttöjännitykselle harjan pinta-alan funktiona. Koetulosten mukaan harjan pinta-alan muutoksella ei ollut merkittävää vaikutusta teräksen jännitykseen murtotilassa, kun murtokriteerinä oli tangon ulosliukuminen tai pitkittäishalkeaman syntyminen. Sen sijaan harjojen pinta-alan kasvaessa eri halkeaman leveyksiä vastaavat teräksen jännitykset kasvoivat ohuilla ja paksuilla tangoilla kaikilla betonin lujuuksilla.

YLEISTÄ

Teräsbetonirakenteissa käytetään nykyään lähes yksinomaan valssaamalla tai muulla tavoin pintakuvioituja tankoja. Tangon pintakuviointiin kohdistuvat yhä suuremmat vaatimukset pyrittäessä käyttämään lujempia teräs-laatuja.

Harjan suhteelliselle pinta-alalle asetettavat minimi- ja maksimiarvot eivät yksin ole hyvän tartunnan riittävä tae, sillä tartunta riippuu myös pintakuviointin tyypistä ja geometriasta. Hyvää tartuntaa tarvitaan, koska tartunta vaikuttaa oleellisesti useisiin rakenteen ominaisuuksiin.

Tangon ankkurointipituus, joka tarvitaan tietyn vetovoiman siirtämiseksi betoniin, määräytyy tartunnan perusteella. Halkeamien välit ja halkeamien leveydet ovat sitä pienempiä mitä parempi on tangon tartunta. Tämä tartunnan vaikutus ilmenee selvimmin vähän raudoitetuissa rakenteissa.

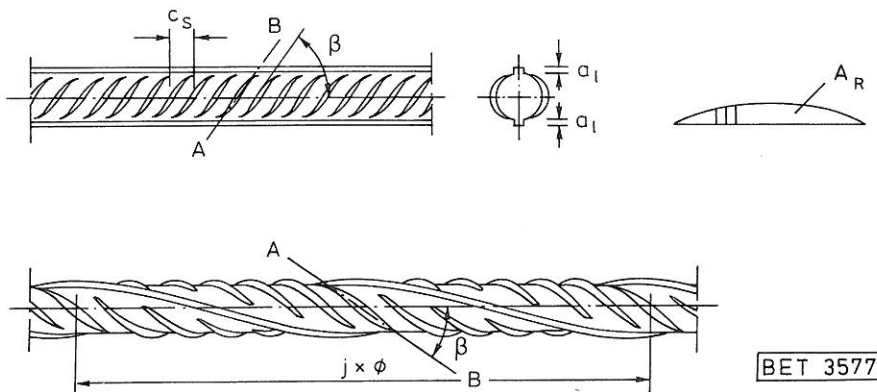
Tangon suuntaiset halkeamat syntyvät tartunnan aiheuttamien tangentiaalisten vetojännitysten vaikutuksesta. Nämä vetojännitykset aiheutuvat harjoja vastaan vaikuttavista betonin suurista paikallisista jännityksistä. Korroosioriskien lisääntymisen ohella tällainen halkeama vaikuttaa rakenteen kantokykyyn, mikäli muodostuvan halkeaman kohdalla ei ole riittävästi poikittaista raudoitusta. Tämänkaltaisen tartuntamurron estämiseksi

si on poikittaisraudoituksen lisäksi kiinnitettävä huomiota myös betoni-
peitteen paksuuteen.

Mitoitettaessa teräsbetonirakenteita taivutukselle rakenteen oletetaan toimivan Bernoullin periaatteen mukaisesti eli poikkileikkauksen tasojen oletetaan pysyvän tasoina. Käytännössä otaksuma ei halkeaman kohdalla kuitenkaan pidä paikkaansa, koska raudoitus liukuu ulos betonista ja betonin puristusvyöhyke kuroutuu oletettua ohuemmaksi. Jotta oletuksen aiheuttama virhe ei johtaisi ennenaikaiseen rakenteen puristuspuolen murtumaan raudoituksen liukuman tulee olla rajoitettu.

PINTAKUVIOINNILLE ASETETTAVIEN VAATIMUSTEN VERTAILU

Tangon pintakuviointin muotoa ja mittoja muuttamalla voidaan vaikuttaa tangon tartuntaominaisuuksiin, taivutussitkeyteen, väsytyslujuuteen sekä valmistustekniikkaan. Tärkeimpiä tangon pintakuviointia kuvaavia suureita ovat harjojen väli, harjan korkeus, harjan suhteellinen pinta-ala, harjan vinous ja kaltevuus sekä itse harjan muoto (kuva 1).



Kuva 1. Tangon geometriaa kuvaavia suureita.

Harjan pinta-ala voidaan esittää seuraavan kaavan muodossa:

$$\alpha_{sb} = \frac{k \cdot A_R \cdot \sin \beta}{\phi \cdot c_s \cdot S \pi l} + \frac{i \cdot a_1}{j \cdot \phi}, \quad (1)$$

missä jälkimmäinen termi otetaan huomioon vain, kun pitkittäisharjat ovat vinot.

Eri maiden rakentamismääräyksissä ja pintakuviointia koskevissa standardeissa tai ohjeissa vaatimukset on yleensä asetettu harjojen geometrialle, harjan suhteelliselle pinta-alalle tai tartuntakokeiden tuloksille (taulukko 1).

Taulukko 1. Eri maissa vallitsevaa käytäntöä harjatankojen tartuntaominaisuuksien toteamiseksi.

Maa/ohje	Harjojen pintakuviointi		Tartuntakokeet	
	harjojen välimatka ja geometria	harjan suhteellinen pinta-ala tai vast. arvo	ulosveto-koe	palkki-koe
Belgia	x			x
CEB		x	x	
Englanti		x	x	
Italia	x			
Itä-Saksa	x	x		x
Itävalta	x			
Japani	x	x		x
Länsi-Saksa	x	x		
Neuvostoliitto	x			
Ranska	x			
Ruotsi	x	x	x	x
Romania	x			
Suomi	x	x		
Sveitsi	x			
Tsekkoslovakia	x		x	
Unkari	x			
USA	x			

Harjan suhteellisen pinta-alan minimivaatimukset eivät vaihtelee sanottavasti eri maissa samanlujuisilla tangoilla, lukuun ottamatta itävaltalaisia vaatimuksia, jotka ovat vain noin puolet muiden maiden vastaavista vaatimuksista. Muista arvoista poikkeava on myös ruotsalaisen Ks 60 tangon varsin korkea harjan suhteellisen pinta-alan vaatimus. Kyseisen tangon tartuntaominaisuudet ovat ilmeisesti varsin hyvät, mutta suurten halkaisuvoimien vuoksi voivat pituussuuntaiset halkeamat muodostua ongelmaksi.

Käytössä olevien harjatankojen pintageometria vaihtelee yleensä melkoisesti eri maissa, mutta niiden halkaisuvaikutus on suunnilleen samansuuruinen /1/. CEB:n mallinormeissa on annettu tietyt minimiarvot kolmelle tankokokoryhmälle. Todellisuudessa on olemassa myös tietyt ylärajat, sillä harjan pinta-alan kasvaessa tartuntaominaisuudet alkavat tietyssä vaiheessa heikentyä ja halkaisuvaikutus lisääntyy huomattavasti. Tämän vuoksi harjan pinta-ala ei saisi ylittää tätä maksimiarvoa. Käytännössä kuitenkin jo valmistusprosessiin liittyvät seikat rajoittavat harjan pinta-alan tätä maksimiarvoa pienemmäksi.

PINTAKUVIOINNIN OPTIMOINTI

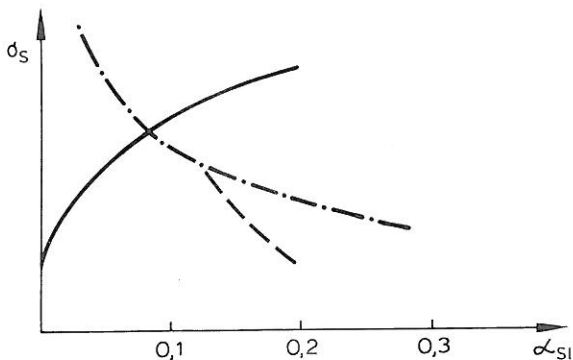
Menetelmä

Tangon pintakuviointin optimoinnin tavoitteena on löytää sellainen harjan suhteellisen pinta-alan arvo, että tangon liukuma ja betoniin muodostuvien poikittaishalkeamien leveys sekä herkkyys pitkittäishalkeamien syntymiselle pysyisivät halutuissa rajoissa.

Tangon tartuntalujuuden ja halkeaman sallitun leveyden ylittyminen rajoittavat usein teräksen lujuuden hyväksikäyttöä. Vähän pintakuvioiduilla tangoilla on teräksen lujuuden hyväksikäyttöä rajoittavana tekijänä usein tankoon nähden kohtisuorien halkeamien leveys. Voimakkaammin pintakuvioiduilla tangoilla määräävänä tekijänä on usein joko tartuntamurto tai tangon suuntaisen pitkittäishalkeaman syntyminen.

Käyttötilassa sallitun teräksen jännityksen riippuvuus harjan suhteellisesta pinta-alasta voidaan periaatteessa esittää kuvan 2 mukaisilla rajakäyrillä, jotka on laadittu seuraavien ehtojen perusteella:

- halkeamien rajoittaminen käyttötilassa (ehjä viiva)
- riittävä varmuus tangon suuntaisen pitkittäishalkeaman muodostumiseen tai betonipeitteen lohkeamiseen nähden (katkoviiva)
- riittävä varmuus tangon ulosliukumiseen nähden (pistekatkoviiva).



Kuva 2. Hyväksikäytettävissä oleva teräsjännitys σ_s harjan suhteellisen pinta-alan α_{sb} funktiona.

Jos sallitaan suurempia helkeamien leveyksiä, voidaan käyttää hyväksi suurempaa teräksen lujuutta ja tartuntamurto tulee pienemmillä harjan suhteellisen pinta-alan arvoilla määrääväksi. Tartuntamurron määrittelevän rajakäyrän asema riippuu betonin lujuudesta, tangon pintakuviointista ja murtotilaa vastaavasta liukuman arvosta /2/. Tangon suuntaisen pitkit-

täishalkeaman rajaviivaa voidaan nostaa lisäämällä betonipeitteen paksuutta, mikä useassa tapauksessa ei taloudellisesti kuitenkaan ole kannattavaa.

Tangon liukuman perusteella asetettavan rajakäyrän pisteet voidaan määrittää kokeellisesti ulosvetokokeilla. Tällöin hyväksikäytettävissä oleva teräksen lujuus on se teräksen jännityksen maksimiarvo, joka tietyllä tangon tartuntapituudella saavutetaan ennen tartuntamurtoa tai ennen suurinta sallittua halkeaman leveyttä vastaavan liukuman saavuttamista.

Tangon suuntaisen halkeilun perusteella asetetun rajakäyrän pisteet voidaan myös määrittää kokeellisesti ulokekokeilla. Hyväksikäytettävissä oleva teräksen lujuus on tangon suuntaisen halkeaman syntymistä vastaava teräksen jännitys. Jos koekappaleissa ei ole halkeilua rajoittavaa poikkittaisraudoitusta, tangon tartunta betoniin häviää kokonaan halkeaman syntyessä.

Rakenteen säilyvyyden ja esteettisten syiden vuoksi halkeamien leveydet tulee betonirakenteissa rajoittaa ympäristöolosuhteista riippuvan leveyden alapuolelle. Koska halkeaman leveys riippuu teräksen jännityksestä, asettavat halkeamat osaltaan rajan käytettäville teräs-jännityksille.

Tiettyä halkeaman leveyttä vastaava teräksen jännitys voidaan määrittää laskennallisesti käyttämällä hyväksi tartuntakokeista saatuja tuloksia. Seuraavaksi tarkastellaan halkeamien syntymistä stabiloituneessa tilanteessa puhtaan taivutusrasituksen alaisessa suorakaidepoikkileikkauksessa. Halkeaman leveydeksi oletetaan kaksinkertainen teräksen ja betonin välisen liukuman arvo kohdassa, missä betonin vetolujuus ylittyy. Betonin muodonmuutoksen osuus liukumaan jätetään huomioonottamatta. Betonin ja teräksen välisen tartuntayhtälön

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{u}{E_s A_s} (1+n \cdot \rho) \cdot f(\delta) , \quad (2)$$

jossa $u = \pi\phi$, $n = \frac{E_s}{E_c}$, $\rho = \frac{A_s}{A_c}$, ja $f(\delta) = \tau_i$, tarkka ratkaiseminen liukuman selville saamiseksi on työlästä, joten suoritetaan ratkaisu likimääräisesti jakamalla tanko pieniin osiin Δx (kuva 3).

Jännityksiksi pisteessä i saadaan

$$\tau_i = K \cdot c \cdot \delta_i^\beta \quad (3)$$

$$\sigma_{s_i} = \sigma_{s_{i-1}} + \Delta\sigma_{s_i} , \quad (4)$$

ja teräksen jännityksen lisäykseksi matkalla Δx

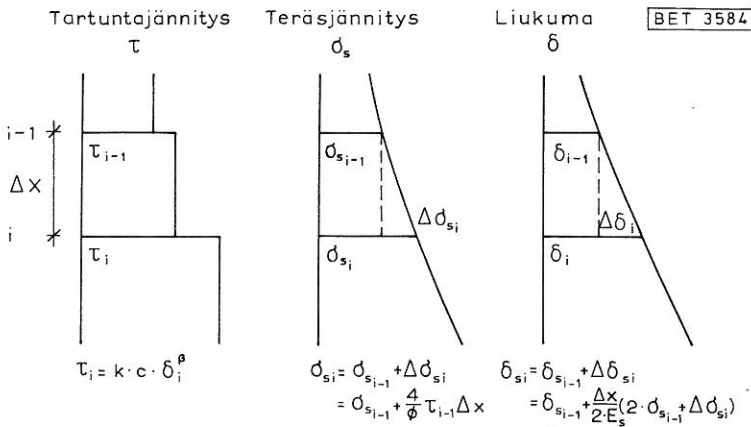
$$\Delta\sigma_{s_i} = \frac{4}{\phi} \cdot \tau_{i-1} \cdot \Delta x \quad (5)$$

Liukumaksi kohdassa i ja liukuman lisäykseksi pistettä i edeltäneellä matkalla Δx saadaan

$$\delta_{s_i} = \delta_{s_{i-1}} + \Delta\delta_{s_i} \quad (6)$$

missä

$$\Delta\delta_{s_i} = \frac{\Delta x}{2 \cdot E_s} (2 \cdot \sigma_{s_{i-1}} + \frac{4}{\phi} \cdot \tau_{i-1} \cdot \Delta x) \quad (7)$$



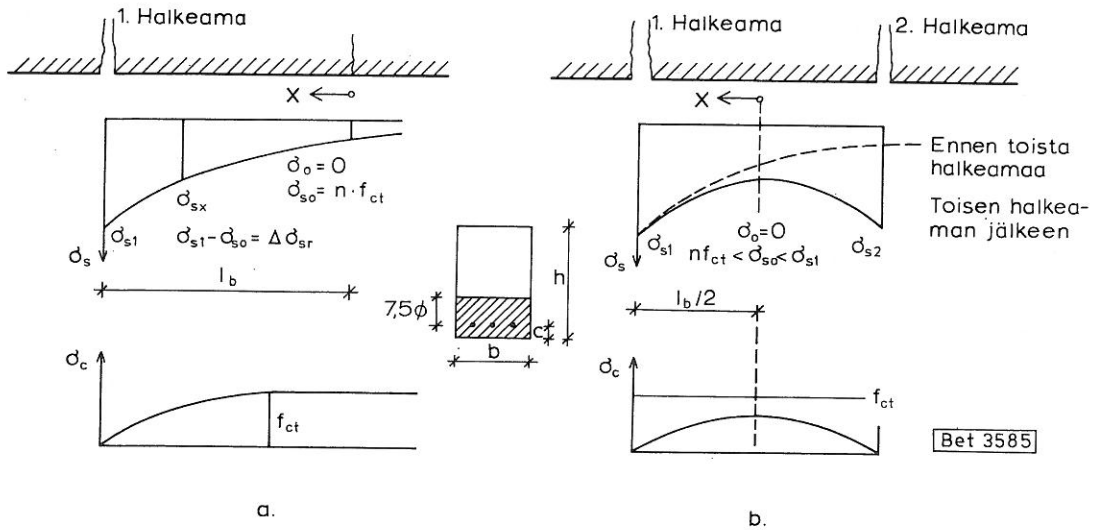
Kuva 3. Likimääräisessä ratkaisussa oletettu tartuntajännityksen, teräsjännityksen ja liukuman jakautuminen /3/.

Lähtemällä annetuista alkuarvoista δ_0 , σ_{s0} ja τ_0 voidaan σ_{sx} , τ_x ja δ_x :n arvot tyydyttävällä tarkkuudella laskea, jos Δx on valittu riittävän pieneksi. Koelaskelmien perusteella voidaan tangon harjavälin pituutta pitää riittävän lyhyenä matkana Δx :lle /3/.

Tartuntayhtälön (3) vakioiden c ja β arvot määritettiin eri tangoille ulosvetokokeista saatujen tartunnan ja liukuman välisien riippuvuuksien perusteella. Ulosvetokokeissa tartuntajännitys oletettiin tasan jakautuneeksi koko tartuntapituudella 5ϕ . Lasketut tartuntayhtälöt ovat kuitenkin vain likimääräisiä, ja poikkeavat jonkin verran jännitys-liukuma-käyrän alku- ja loppupään arvoista.

Halkeaman leveyttä vastaavaa teräksen jännitystä laskettaessa on otaksuttu, että seuraava halkeama voi syntyä jo halkeilleeseen osaan rakennetta vasta sitten, kun teräksestä betoniin siirtyneen voiman aiheuttama vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden. Reunaehdoiksi saadaan pistees-

sä, jossa liukuma on merkityksettömän pieni ja teräksen ja betonin venymät ovat yhtä suuret (kuva 4).



Kuva 4. a) Halkeamavälin muodostuminen.
b) Stabiiloitunut halkeamaväli /6/.

$$x = 0 \begin{cases} \delta_0 = 0 \\ \sigma_s = n \cdot f_{ct} \end{cases} \text{ (hetkellä, jolloin betonin vetolujuus ylittyy),}$$

jossa

$$n = \frac{E_s}{E_c} (1 + \phi) \quad (8)$$

ja

$$f_{ct} = \frac{2,4 + 0,026 \cdot h}{1,0 + 0,040 \cdot h} \cdot 0,075 \cdot (10 K)^{2/3} . \quad (9)$$

Betonin vetolujuuden arvo lasketaan Heilmannin ja Mayerin tutkimuksiin perustuvalla kaavalla, jossa h (mm) ja K (N/mm^2) /4/. Kaavan arvoissa rasitus on oletettu puhtaaksi taivutukseksi.

Laskelmissa edetään aina Δx :n pituinen matka, kunnes teräksen betoniin siirtämä vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden ja syntyy halkeama. Jännityksen siirtymiseen tarvittua matkaa merkitään l_b :llä, joka on Δx :n kerrannainen. Betonin halkeamiseen tarvittava teräksen jännityksen lisäys on

$$\Delta \sigma_{sr} = \frac{8,0 \phi + c}{\rho \cdot h \cdot 0,9} \cdot f_{ct} \quad (10)$$

Poikkileikkauksen vetovyöhykkeeksi kaavassa 10 oletetaan Suomen rakenta-

mismääräyskokoelman B4 mukainen alue, jota rajoittavat suorat matkan $7,5 \phi$ päässä yksittäisen tangon keskipisteestä. Betonin vetojännityksen oletetaan saavuttavan koko vetovyöhykkeellä betonin vetolujuuden arvon.

Uusi halkeama muodostuu, jos $l_D/2$:n pituisella matkalla teräkseltä betoniin siirtyneen voiman aiheuttama vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden. Reunaehdoiksi saadaan tässä tapauksessa (kuva 4)

$$x = 0 \quad \begin{cases} \delta_D = 0 \\ n \cdot f_{ct} < \sigma_s < \sigma_{s1} \end{cases}$$

Kun lisää halkeamia ei enää muodostu, on halkeamien väli stabiloitunut ollen ko. tapauksessa pienin mahdollinen. Tämän jälkeen teräksen jännityksen kohoaminen ei lisää halkeamien lukumäärää vaan halkeaman leveyttä.

Stabiloituneessa tilassa tiettyä halkeaman leveyttä vastaava teräsjännitys lasketaan integroimalla teräksen liukuma matkalla $l_D/2$, kun teräksen alkujännitystä muutetaan. Näin muutaman iteraatiokierroksen jälkeen saadaan laskettua tiettyä halkeaman leveyttä $w = 2\delta$ vastaava teräsjännitys /3/.

Laskentamallin mukaan teräksellä, jolla on hyvä tartunta pienillä liukuman arvoilla, on halkeamien väli pienempi ja määrättyä halkeaman leveyttä vastaava teräksen jännitys suurempi kuin heikomman tartunnan omaavalla teräksellä. Teräksen tartunnan lisäksi laskennan tuloksiin vaikuttavat teräksen alkujännityksen suuruus, betonin virumaluku, betonipeitteen paksuus, poikkileikkauksen korkeus ja rauditusprosentti.

Tarkasteltavat tankotyypit

Kokeissa /5/ käytettiin pintakuvioiduiltaan kolmea erityyppistä A400H/SFS 1210:n mukaista kuumavalssattua harjatankoa. Tankokoot olivat 8, 12 ja 20 mm.

Tanko ja harjatyyppit:

Tyyppi 1: ympyräpoikkipintainen ydintanko ja sirpin muotoiset poikittaisharjat

Tyyppi 2: ympyräpoikkipintainen ydintanko ja renkaan muotoiset poikittaisharjat

Tyyppi 3: soikeapoikkipintainen ydintanko ja sirpin muotoiset poikittaisharjat.

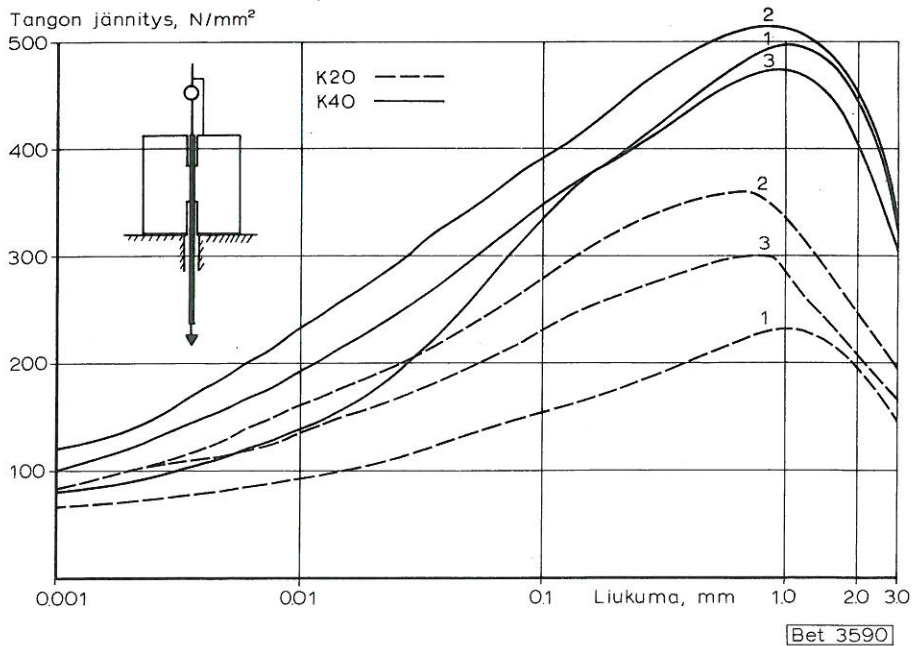
Tankojen tärkeimmät geometriset ominaisuudet on esitetty taulukossa 2. Eniten tankotyypit poikkeavat toisistaan harjan suhteellisen pinta-alan perusteella. Ne ovat kuitenkin optimialueella 0,06...0,13, jolla tankojen tartuntaominaisuudet ovat samantyyppiset /4/.

Taulukko 2. Tankojen geometriset ominaisuudet.

Halkaisija d mm	Tankotyyppi	Harjojen väli c_s mm	Harjan korkeus h mm	Poikittaisharjojen kulmat		Harjan suhteellinen pinta-ala α_{sb}
				α 0	β 0	
8	1	6,4	0,8	49	72	0,08
	2	6,4	0,8	50	77	0,11
	3	6,4	0,8	51	77	0,09
12	1	7,4	1,1	52	76	0,09
	2	7,4	1,1	54	79	0,14
	3	7,5	1,2	59	80	0,12
20	1	12,5	1,9	54	75	0,09
	2	13,4	2,0	55	78	0,13
	3	13,4	2,0	56	80	0,09

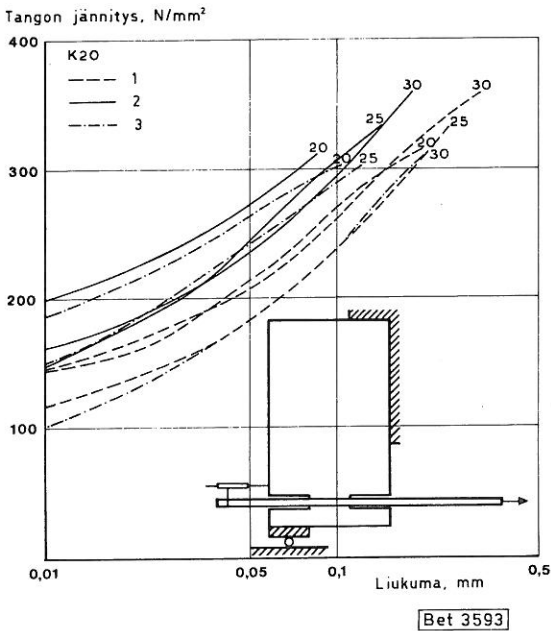
Kokeiden tulokset

Ulosvetokokeissa tankotyyppi 2 oli tartuntaominaisuuksiltaan hieman muita tankoja parempi. Pienillä liukumien arvoilla muiden tankojen jännitykset olivat keskimäärin 15 % pienempiä ja suurimmat jännitykset jäivät noin 10 % tankotyyppin 2 jännityksiä pienemmiksi. Tyyppin 1 ja 3 liukumien suurimilla teräsjännitysten arvoilla olivat keskimäärin 25 % tyyppin 2 liukumia suurempia. Kuvassa 5 on esitetty 8 mm:n harjatankojen jännitys-liukumakäyrät K 20- ja K 40-lujuusluokan betonilla.



Kuva 5. 8 mm tankojen tartuntakokeiden jännitys-liukumakäyrät ja ulosvetokoeappale.

Ulokekokeilla selvitettiin, millä tangon jännityksellä tankoa suojaavaan betonipeitteeseen syntyy halkeamia. Suuria eroja eri tankotyyppien välille ei tässäkään kokeessa havaittu. Pienillä tangoilla tyypit 1 ja 2 saavuttivat yhtäsuuren maksimijännityksen ennen betonipeitteen halkeamista, ja tankotyyppin 3 jännitys jäi keskimäärin vain 10 % edellisten tankojen jännityksistä. Suurilla tangoilla tyyppin 2 maksimijännitykset olivat keskimäärin 10 % tyyppien 1 ja 3 jännityksiä suurempia. Kuvassa 6 on esitetty 8 mm:n harjatankojen jännitys-liukumakäyrät K 20-lujuusluokan betonilla, kun betonipeitteen paksuus on 20, 25 tai 30 mm.



Kuva 6. 8 mm tankojen halkaisukokeiden jännitys-liukumakäyrät ja ulokekoekappale.

Laskelmien tulokset

Laskentamallin avulla saatiin 0,1, 0,2 ja 0,3 mm:n poikittaishalkeaman leveyksiä vastaavat teräksen jännitykset eri tankotyypeille. Kaikilla 8 mm:n tangoilla 0,1 mm:n halkeamaa vastaava jännitys oli alle tangon myötörajan, ja 0,2 ja 0,3 mm:n halkeamaa vastaaviksi laskennollisiksi jännityksiksi saatiin yli tangon murtorajan meneviä jännityksiä. Suuremmilla 20 mm:n tangoilla saatiin ensimmäiseksi halkeaman leveydeksi yli 0,1 mm. 0,2 mm:n halkeamaa vastaavat jännitykset olivat alle myötörajan, ja 0,3 mm:n halkeamaa vastaavat jännitykset myötö- ja murtorajan välillä.

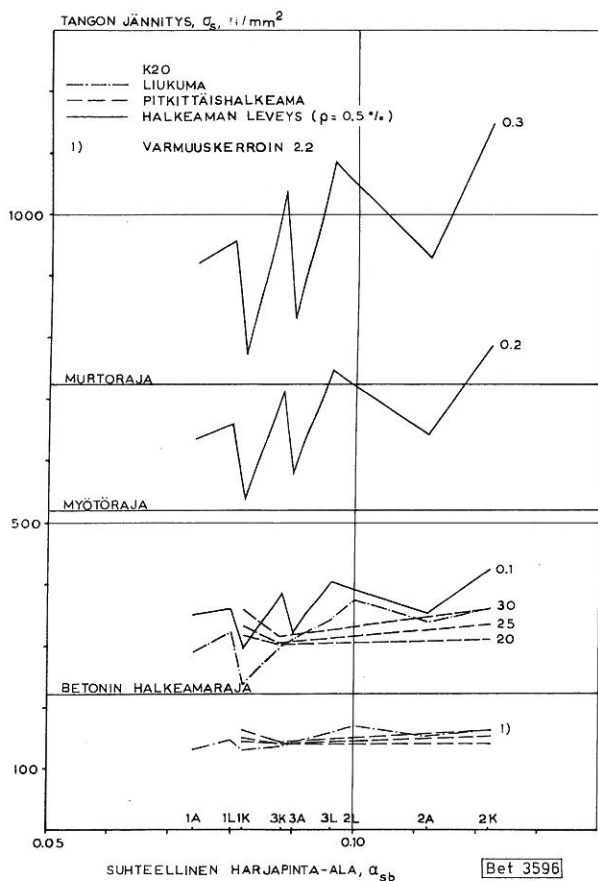
Tuloksia havaittiin, että mitä parempi on tangon tartunta sitä suurempia ovat tiettyjä halkeamien leveyksiä vastaavat teräksen jännitykset ja sitä lyhyempi on halkeamien väli stabiloituneessa tilassa.

Optimointi

Harjatankojen käyttöjännitysten määrittäminen tehtiin rajakäyrien avulla, jotka koostuivat tangon käytettävissä olevaa jännitystä rajoittavista käyristä, jotka on piirretty harjan suhteellisen pinta-alan funktiona.

Tangon liukuman ja tangon suuntaisen halkeilun aiheuttamaa tartunta-murtoa kuvaavat rajakäyrät voidaan määrittää ulosveto- ja ulokekokeiden perusteella. Määrättyä poikittaisen halkeaman leveyttä vastaava rajakäyrä voidaan määrittää ulosvetokokeiden tuloksiin pohjautuvan laskentamallin avulla.

Kuvassa 7 on esitetty 8 mm:n tankojen jännityksen rajakäyrät, kun betonin tavoitelujuus oli K 20. Kuvaan on piirretty myös teräksen myötö- ja murtoraja sekä betonin halkeamaraja. Tämä kuvaa sitä teräksen jännitystä, joka laskelmien mukaan aiheuttaa betoniin ensimmäisen poikittais-halkeaman. Kuvaan on pitkittäishalkeamakäyrien viereen merkitty betoni- peitteen paksuus (mm) ja halkeaman leveyskäyrien viereen halkeaman leveys (mm). Lisäksi liukuma- ja pitkittäishalkeamakäyristä on piirretty vas- taavat käyrät käyttäen varmuuskerrointa 2,2.



Kuva 7. 8 mm tankojen jännitysten rajakäyrät harjan suhteellisen pinta-alan funktiona.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Pintakuvioidin tehostaminen on tarpeen, jos käytettävää teräksen jännitystä nostetaan tai halutaan vähentää tangon suuntaista halkaisuvaikutusta. Korkeampien jännitysten käyttö voi eräissä tapauksissa olla hankalaa, koska halkeamien leveydet ja taipumat saattavat tulla rajoittaviksi. Sen sijaan halkaisuvaikutuksen pienentäminen näyttää helpommalta ja sen vaikutukset ovat merkittävät, sillä jatkosten ja ankkuroinnin murtumisen syynä ovat usein juuri halkaisuvoimat. Halkaisuvoimia on ehdotettu vähennettäväksi mm. pienentämällä harjan korkeutta ja harjojen väliä harjan suhteellista pinta-alaa muuttamatta. Tämä johtaa betonointivirheiden korostumiseen, jonka lisäksi mahdolliset sitkeys- ja väsytysominaisuuksien muuttumiset on otettava huomioon. Pintakuvioidin parantamisen mahdollisuudet ovat siis varsin suppeat eri ominaisuuksien vastakkaisten vaikutusten takia.

Pitkittäishalkeaman syntyminen tangon pään kohdalle näyttää tarkastelujen perusteella muodostuvan lähes aina teräksen jännityksen rajoittavaksi tekijäksi. Tähän on syynä poikittaisraudoituksen puuttuminen ulokepalkeista. Käytännön rakenteissa tangon aiheuttama tankoon nähden kohtisuora jännitys otetaan vastaan betonin lisäksi hakateräksillä. Ainoastaan kaikkein vähäisimmän pintakuvion omaavalla \varnothing 8 mm:n tangolla betonissa K 20 tulee tangon liukuminen määrääväksi.

Betonin lujuuden noustessa ja betonipeitteen ollessa paksumpi voi pieniläpimittaisilla tangoilla liukuma tulla rajoittavaksi. Suuremmilla tangoilla rajoittaa pitkittäishalkeaman muodostuminen teräs-jännitystä pieniä tankoja selvemmin.

Harjan pinta-alan kasvaessa kasvavat määrättyjä halkeaman leveyksiä vastaavat teräksen jännitykset. Muutos liukumaa ja pitkittäishalkeaman syntyä vastaavissa jännityksissä on hyvin vähäistä ja voi tarkasteltavalla alueella tapahtua kumpaan suuntaan tahansa.

Nykyistä käytössä olevaa harjatankotyyppiä A400H edustaa pintakuvioidinltaan likimain tankotyyppi 1. Jos tämän tangon pintakuviointia korostetaan esim. tenkotyyppiin 2 kaltaiseksi pitkittäishalkeaman muodostumista vastaavat teräs-jännitykset eivät muutu juuri lainkaan, tai kasvu on merkityksetöntä. Sama pätee tartuntamurtoon, joka tapahtuu ulosliukumisena. Tosin pienillä tangoilla \varnothing 8 mm ja betonissa K 20 näyttäivät teräs-jännitykset kasvavan. Sitä vastoin eri halkeaman leveyksiä vastaavat teräksen jännitykset nousevat selvästi, jos harjan suhteellinen pinta-ala kasvaa.

Kokeissa käytettyjen tankojen harjapinta-alan vaihtelulla ei ole selvää vaikutusta teräksen jännityksiin murtotilassa, kun murtokriteerinä on tangon ulosliukuminen tai pitkittäishalkeaman muodostuminen. Eri halkea-

man leveyksiä vastaavat teräksen jännitykset kasvavat pienillä ja suurilla tangoilla sekä kaikissa betoniluokissa.

Koetulosten perusteella selvästi määräävin tekijä tankojen hyödynnettävälle lujuudelle on halkaisuvoimista aiheutuva pitkittäishalkeamien muodostumisriski, mikä varsinkin suurilla tangoilla ja suhteellisen alhaisen lujuuden omaavassa betonissa on joissakin tapauksissa varsin ilmeinen. Tämä pitkittäishalkeaman muodostumisriski pienenee, kun käytetään tankoon nähden poikittaista raudoitusta. Halkaisuvoimien vähentämiseen voidaan pyrkiä myös pintakuviointia kehittämällä, mutta kuitenkin siten, ettei muita tartuntaominaisuuksia heikennetä.

KÄYTETYT MERKINNÄT

A_C	betonipoikkileikkauksen pinta-ala
A_R	harjan projektiopinta-ala
A_S	teräksen pinta-ala
E_S	teräksen kimmomoduuli
K	betonin nimellislujuus
a_1	pitkittäisharjan korkeus
b	vakio, poikkileikkauksen leveys
c	vakio, raudoitusta suojaavan betonipeitteen paksuus
c_s	harjaväli
f_{ct}	betonin vetolujuus
h	poikkileikkauksen korkeus
i	pitkittäisharjojen lukumäärä, alaindeksi
j	pitkittäisharjan nousumatka
k	kerroin, harjojen lukumäärä poikkileikkauksessa
l_b	tangon tartuntapituus
w	halkeaman leveys
x	pituus
\emptyset	tangon halkaisija
α	poikittaisharjan kaltevuuskulma
α_{sb}	tangon suhteellinen harjapinta-ala
β	poikittaisharjan vinouskulma, vakio
δ	liukuma
ρ	suhteellinen teräspinta-ala
σ_C	betonin jännitys
σ_S	teräksen jännitys
$\Delta\sigma_{sr}$	betonin halkeamisen aiheuttava teräs ­ jännityksen lisäys
τ	tartuntajännitys
ϕ	virumaluku

KIRJALLISUUSVIITTEET

- [1] Eligehausen, R., Übergreifungstösse zubeanspruchter Rippenstäbe mit geraden Stabenden. Berlin 1979. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 301. 118 s.
- [2] Jokela, J., Harjatankojen pinnan muodon vaikutus betonin ja teräksen väliseen tartuntaan. Rakenteiden Mekaniikka 11 (1978) 1, s. 17-25.
- [3] Martin, H., Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung. Berlin 1973. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 228. 50 s.
- [4] Noakowski, P., Untersuchung und Überwachung der Profilierungseigenschaften der Betonrippenstähle. Materialprüfung 18 (1976) 7, s. 230-235.
- [5] Pukki, E., Harjatangon pintakuvioidinnin vaikutus teräksen tartuntaan ja halkaisuominaisuuksiin betonissa. Helsingin teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööri-osasto. Otaniemi 1982. 78 s.
- [6] Rehm, G., Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Berlin 1961. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 138. 59 s.

Jukka Jokela, tekn.lis., Esa Pukki, dipl.ins., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Betoni- ja silikaattitekniikan laboratorio.