

Jukka Jokela

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 11
No. 1 1978 s.17...25

YHTEENVETO: Artikkelissa tarkastellaan harjatankojen pintakuvioinnille asetettavia vaatimuksia ja pintakuvioinnin vaikutusta tangon ja betonin väliseen tartuntaan. Lisäksi esitetään tangon ja betonin välistä tartuntaa kuvaavia malleja sekä tarkastellaan halkeaman leveyden määrittystä ja tartuntamurtomekanismeja.

YLEISTÄ

Eräs terästen käytön tärkeimpiä edellytyksiä on betonin ja terästen välinen tartunta teräsbetonirakenteissa. Tartunta on tarpeen näiden kahden materiaalin muodonmuutosten pitämiseksi yhtä suurina. Nykyisin raudoituksena käytetään lähes yksinomaan valssaamalla tai muulla tavoin pintakuvioitettuja tankoja. Tämän pintakuvioinnin muoto vaikuttaa ratkaisevasti tangon ja betonin väliseen tartuntaan.

Suomessa betoniterästen valmistus aloitettiin vuonna 1930 Aminneforsin tehtaalla. Valmistusohjelmaan kuuluivat tällöin ainoastaan kuumavalssatut sileäpintaist tangot. Vuonna 1937 perustetussa Imatran terästehtaassa aloitettiin sileiden betoniterästen valssaus 1945. Ensimmäiset suomalaiset harjatangot valssattiin myös Imatralla vuoden 1946 helmikuussa. Tästä lähtien on valmistettu aina 1970-luvulle saakka samantyyppisiä; poikkileikkaukseltaan pyöreitä poikkittaisin harjoin varustettuja tankoja. Nykyisin valmistettavat tangot ovat vinoharjaisia.

PINTAKUVIOINNILLE ASETETTAVIA VAATIMUKSIA

Tangon pintakuvioinnin optimaalista muotoa ja suuruutta tarkasteltaessa olisi otettava huomioon ainakin seuraavat tekijät:

- tangon ja betonin välinen tartuntalujuus,
- tangon taivutussitkeys,
- harjojen muodostamien lovien vaikutus tangon väsytyslujuuteen,
- tangon valmistustekniikka.

Taivutussitkeyden ja väsytyslujuuden alentumisen estämiseksi tangon peräkäisten poikkileikkausten tulisi olla mahdollisimman tasasuuruisesti rasitet-

tuja. Tämän saavuttamiseksi tankojen pintakuviointille on tutkimusten /3/ mukaan asetettava seuraavat vaatimukset:

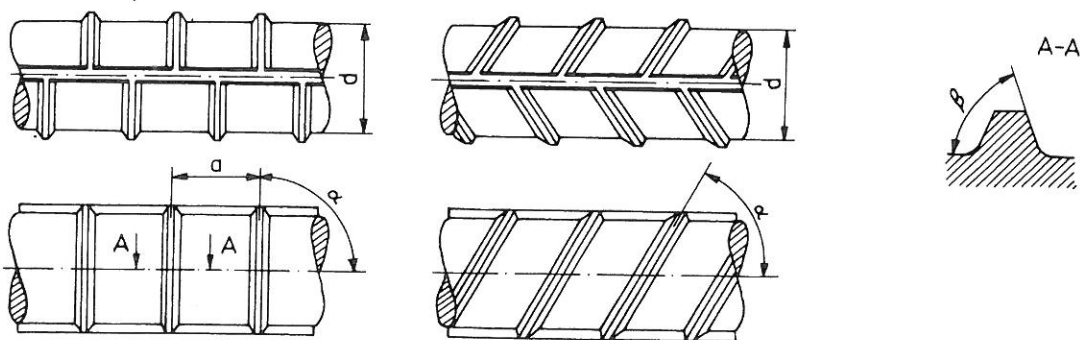
- harjat ovat sirpinmuotoisia,
- harjat ovat vinoja pituusakselin suhteen,
- harjakulma on vino,
- harja yhtyy juoheasti tankoon,
- poikittais- ja pitkittäisharjat eivät yhdy toisiinsa.

Valmistustekniikan kannalta olisi sileäpintainen tanko ilmeisesti paras, mutta esitetyt vaatimukset eivät vaikeuttane olennaisesti harjatankojenkaan valmistusta.

Tartuntaan nähden tangoille voidaan asettaa seuraavat toiminnalliset vaatimukset:

- tartuntalujuus on mahdollisimman suuri,
- liukuma käyttötilassa on mahdollisimman pieni,
- murtuminen on sitkeä,
- betoniin syntyvät halkaisuvoimat ovat mahdollisimman pieniä,
- tanko ei saa kiertyä akselinsa ympäri.

Näiden vaatimusten toteuttamiseksi harjojen korkeuden ja keskinäisen etäisyyden suhteen sekä harjojen vinouden ja kaltevuuden tulee olla sopivia ja tangossa tulee olla vähintään yksi pituussuuntainen harja. Tartuntaominaisuuksien kannalta asetettujen vaatimusten ei siis tarvitse olla ristiriidassa muiden, tangon muuhun käyttökelpoisuuteen nähden asetettujen vaatimusten kanssa.



Kuva 1 Tankojen pintakuviointin käsitteitä: vinouskulma on α , kaltevuuskulma on β .

PINTAKUVIOINNIN VAIKUTUS TANGON JA BETONIN VÄLISEEN TARTUNTAAN JA TARTUNTA-MEKANISMEIHIN

Tartuntajäykkyyden kriteerinä voidaan pitää tangon jännityksen ja sen liukuman välistä riippuvuutta. Mitä pienempi on määrättyä jännitystä vastaava liukuma, sitä suurempi on tangon tartuntajäykkyys. Liukuman suuruus riippuu tangon pintakuviointin aiheuttamien betonin jännitysten suuruudesta ja betonin muodonmuutosominaisuuksista.

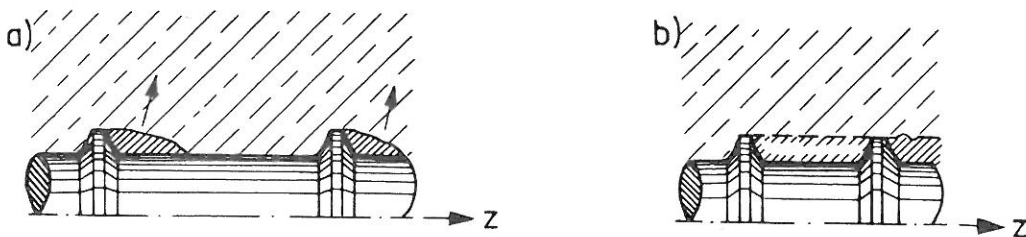
Tartunnan murtuminen voi tapahtua kolmella eri tavalla:

- betoni leikkautuu harjojen muodostamaa pintaa pitkin,

- betoni murskaantuu harjojen edessä,
- harjojen aiheuttamien halkaisuvoimien vaikutuksesta betoniin syntyy tangon suuntainen halkeama.

Ensin mainittu murtumismekanismi esiintyy silloin, kun harjojen korkeuden ja keskinäisen etäisyyden suhde on likimain 0,10...0,15 tai suurempi. Jos korkeuden ja etäisyyden suhde on pienempi, murtuminen tapahtuu betonin murskautuessa harjojen edessä. Edellisessä tapauksessa liukuma murtohetkellä on tavallisesti pieni, kun taas jälkimmäisessä tapauksessa tartuntalujuutta vastaava liukuma on huomattavasti suurempi ja murtuminen näin ollen sitkeämpi. Jos harjojen keskinäinen etäisyys on suuri verrattuna niiden korkeuteen, liukuma käyttötilassa voi olla liian suuri halkeamien leveyden rajoittamisen kannalta. Sen vuoksi harjojen korkeuden ja etäisyyden suhteella on optimialue, joka saksalaisten tutkimusten mukaan olisi likimain 0,06...0,13.

Harjan kaltevuudella ja vinoudella (kuva 2) on myös huomattava vaikutus betonin ja tangon väliseen tartuntaan. Mitä lähempänä 90 astetta on harjan kaltevuuskulma, sitä suurempi on tangon tartuntalujuus. Tietyllä harjan kaltevuudella kitka harjapinnassa ei enää kykene estämään liukumaa. Kokeissa on todettu, että harjan kaltevuuskulman ollessa pienempi kuin noin 40 astetta tiettyä liukumaa vastaava kuormitus alenee selvästi. Harjan kaltevuuskulman ja tartuntalujuuden kasvaessa pienenee tartuntalujuutta vastaavan liukuman arvo.



Kuva 2 Tartuntamurtumismekanismiä a) harjojen etäisyys suuri b) harjojen etäisyys pieni.

Harjan vinoudella on samansuuntaiset vaikutukset kuin harjan kaltevuudella. Tartuntalujuus ei kuitenkaan lisäänty jatkuvasti vinouskulman kasvaessa. Vinouden ollessa 40...70 astetta tartuntalujuus lisääntyy vinouden kasvaessa, mutta kulman ollessa välillä 70...90 astetta tartuntalujuus pysyy likimain muuttumattomana /3/.

TANGON JA BETONIN VÄLISTÄ TARTUNTAA KUVAAVAT MALLIT

Jännitys-liukumariippuvuutta kuvaavia malleja muodostettaessa oletetaan tavallisesti, että tangon pituusyksikön matkalla tapahtuva liukuma on yhtä suuri kuin tangon ja betonin muodonmuutosten ero tällä matkalla, eli

$$\frac{d\Delta}{dx} = \epsilon_s - \epsilon_c \quad (1)$$

Betonin muodonmuutoksilla ei mallin käytön kannalta ole yleensä merkitystä, koska ne ovat vähintään suuruusluokkaa pienemmät kuin teräksen. Teräksen ulosvetokokeessa tasapainoehto on

$$\sigma_s A_s + \sigma_c A_c = 0 \quad (2)$$

Seuraavassa otaksutaan betoni ja teräkset lineaarisesti kimmoisiksi. Kun lauseke (2) jaetaan betonin kimmokertoimella ja ratkaistaan ϵ_c , joka sijoitetaan (1):een, saadaan

$$\frac{d\Delta}{dx} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1 + \frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{A_s}{A_c} \right) \quad (3)$$

Merkitsemällä tangon voiman muutos matkalla dx yhtä suureksi kuin tartunnan kautta siirtyvä voima, saadaan

$$A_s \cdot d\sigma_s = \tau \cdot u \cdot dx, \quad (4)$$

joka pyöreää tankoa varten voidaan panna muotoon

$$\frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{4}{\phi} \cdot \tau \quad (5)$$

Ratkaisua varten on vielä tunnettava liukuman ja tartuntajännityksen välinen riippuvuus

$$\tau = f(\Delta). \quad (6)$$

Kun yhtälö (3) derivoidaan x :ään nähden ja saatuun yhtälöön sijoitetaan (4) ja (6), saadaan tartuntaa kuvaavaksi malliksi tässä tapauksessa yhtälö

$$\frac{d^2\Delta}{dx^2} = \frac{u}{E_s A_s} (1 + n \cdot \rho) \cdot f(\Delta) \quad (7)$$

jossa

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} \quad \text{ja} \quad n = \frac{E_s}{E_c}.$$

Teräksen jännityksen arvo kohdassa x voidaan ratkaista yhtälöstä (3), jolloin saadaan

$$\sigma_s(x) = \frac{E_s}{1 + n \cdot \rho} \cdot \frac{d\Delta}{dx} \quad (8)$$

ja tartuntajännityksen arvoksi kohdassa x saadaan (7):ää hyväksi käyttäen

$$\tau(x) = \frac{E_s \cdot \sigma_s}{u(1 + n \cdot \rho)} \cdot \frac{d^2\Delta}{dx^2} \quad (9)$$

Granolmin hypoteesin /1/ mukaan tartuntajännitys on liukuma kerrottuna liukumamoduulilla eli

$$f(\Delta) = K \cdot \Delta. \quad (10)$$

Uusimpien tutkimusten mukaan, jotka on tehty lyhyellä tartuntapituudella, on todettu funktion $f(\Delta)$ olevan likimain muotoa /5/

$$f(\Delta) = b + c \cdot \Delta^\beta \quad (\beta < 1) \quad (11)$$

Mallin ratkaisua varten on edellisessä tapauksessa tunnettava liukumamoduuli K ja jälkimmäisessä tapauksessa vakiot b , c ja β .

Jos $f(\Delta)$ on yhtälön (11) suuruinen, mallin (7) ratkaisu on mahdollinen suljetussa muodossa vakion $1/\beta$ ollessa kokonaisluku. Esimerkiksi reunaehdoilla

$$x = 0 \begin{cases} \Delta = 0 \\ \sigma_s = 0 \end{cases}$$

ja $1/\beta$ arvolla 2 saadaan

$$\Delta x = \left[\left(\frac{K_2}{4} \cdot x + \sqrt{K_1 + \sqrt{\Delta_0}} \right)^2 - K_1 \right]^2, \quad (12)$$

missä

$$K_1 = (\beta + 1) \cdot \frac{b}{c}$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{2(1 + n \cdot \rho)}{E_s} \cdot \frac{u}{A_s} \cdot \frac{c}{1 + \beta}}$$

$$\Delta_0 = \Delta(x = 0)$$

Derivoimalla ja sijoittamalla yhtälöihin (8) ja (9) saadaan teräs- ja tartuntajännitysten arvot. Nähdään, että suljetussa muodossa mallia ei voida ratkaista yleisessä muodossa, sillä ratkaisu vaatii sopivat reunaehdot ja vakion β arvot. Kätevintä on ratkaista malli likimääräisesti, jolloin tarkkaa ratkaisua voidaan käyttää tarkistuskeinona.

Mallien ratkaisuja on esitetty mm. viitteissä /1/ ja /2/.

Jos ratkaisua sovelletaan esimerkiksi halkeaman leveyden määrittämiseen, halkeaman leveydeksi saadaan kaksinkertainen liukuman arvo kohdassa, missä betonin vetolujuus ylittyy.

RAJATILATARKASTELUT JA TARTUNTA

Teräsbetonirakenteille on yleisesti asetettu vaatimus, että halkeamien leveyden tulee käyttötilassa pysyä tietyn tason alapuolella. Rajoituksen syinä ovat rakenteiden pysyvyyteen ja ulkonäköön asetetut vaatimukset.

Eri olosuhteissa sallittujen maksimihalkeaman leveyksien asettaminen on vaikea tehtävä, eikä tätä ongelmaa vielä ole tarpeeksi selvitetty. Suorite- tuissa pitkäaikaiskokeissa on todettu, että halkeamien leveyden kasvaessa raudoitustankojen syöpyminen lisääntyy /2/. Ongelman vaikeutta kuvaavat selvästi lähes päinvastaiset tutkimustulokset, joiden mukaan korroosioaste on melkein riippumaton halkeaman leveydestä /7/. Jos tiettyä halkeaman leveyden arvoa pidetään kuitenkin määrävänä, tätä kautta voidaan johtaa likimääräinen rajoitus myös betonin ja teräksen välisen liukuman suuruudelle. Halkeilume- kanismiin liittyvien liukumien ja muodonmuutosten määrittäminen kussakin ta- pauksessa on varsin hankalaa, jonka vuoksi liukumaa arvioitaessa on tyydyttävä seuraaviin likimääräistyksiin:

- betonin muodonmuutokset jätetään ottamatta huomioon,

- halkeaman leveydeksi oletetaan kaksinkertainen teräksen ja betonin välisen liukuman arvo halkeaman reunalla,
- ei oteta huomioon halkeaman muodostumishetkellä tapahtuvia sysäyksenomaisia voimista aiheutuvia lisäliukumia.

Usein joudutaan lisäksi rajoittumaan vain tietyn tyyppisiin poikkileikkauksiin.

Halkeaman leveyden katsotaan yleisesti olevan riippuvainen tankojen koosta ja raudoituksen määrästä. Halkeamien leveyden pienentämiseksi rajoitetaankin usein paksujen tankojen käyttöä. On kuitenkin muistettava, että ohuemmat tangot ovat samoissa olosuhteissa alttiimpia korroosion aiheuttamalle lujuuden alenemiselle kuin paksimmat tangot. Tästä syystä paksumpia tankoja käytettäessä voisi korroosion kannalta olla perusteltua sallia suurempia halkeaman leveyksiä kuin ohuempia tankoja käytettäessä.

Betoin ja raudoituksen väliselle tartunnalle on murtotilaan nähden asetettu vaatimus, että raudoituksen ankkurointi ei saa murtua ennen kuin rakenteen laskennallinen kantokyky muihin murtumistapoihin nähden on saavutettu. Tämä vaatimus merkitsee useimmiten sitä, että raudoituksen on myödättävä selvästi ennen ankkuroinnin murtumista. Ankkuroinnin lujuus määritellään usein tiettyä tangon pään liukumaa vastaavana kuormana, jonka vaikuttaessa betoni alkaa murskaantua tai leikkautua harjojen edessä. Tällöin ei siis vielä tapahdu haurasta murtumista.

Jos suojabetonikerros on liian ohut, ankkurointi voi murtua hauraasti jo ennen tangon pään liukuman alkua tangon suuntaisen halkeaman muodostuessa ankkurointialueelle.

Tartuntakokeiden yhteydessä on todettu, että tartuntalujuutta vastaavan liukuman hajonta on suuri ja se riippuu lähinnä betonin lujuudesta ja tangon pintakuvioidinnista. Pintakuviointia kuvaavana suureena käytetään usein ns. suhteellista harjapinta-alaa, joka suurin pitkittäisharjoin varustetulle tangolle määritetään kaavasta

$$f_R = \frac{A_{pr}}{\pi \cdot \phi \cdot a},$$

jossa

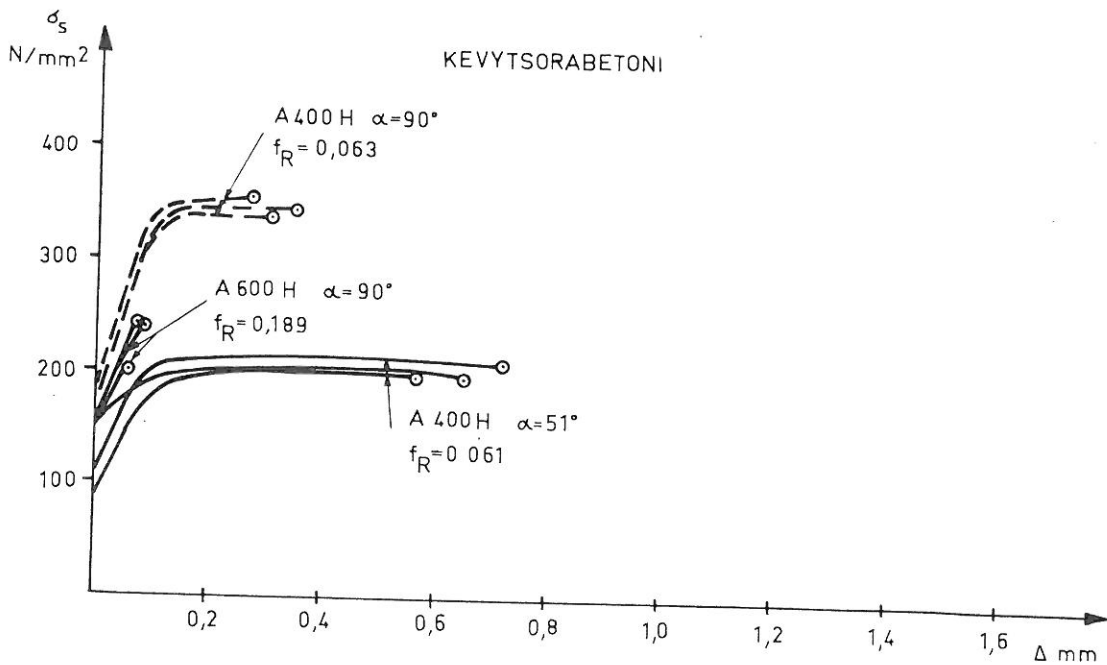
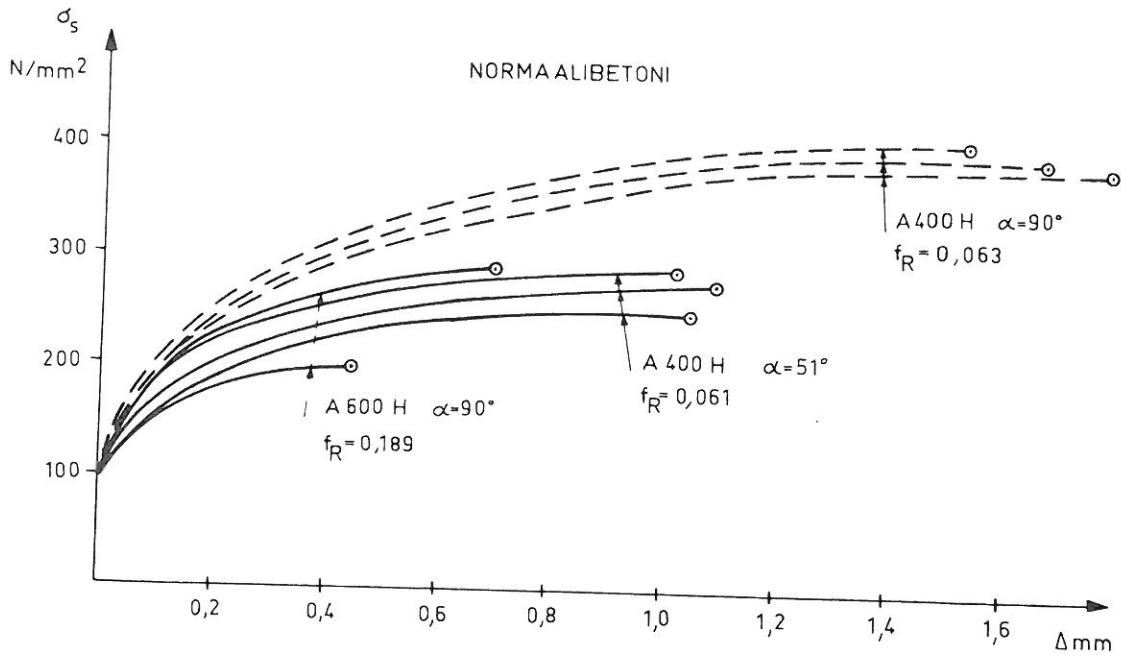
A_{pr} on harjan projektiopinta-ala

a harjojen keskinäinen etäisyys,

ϕ tangon läpimitta.

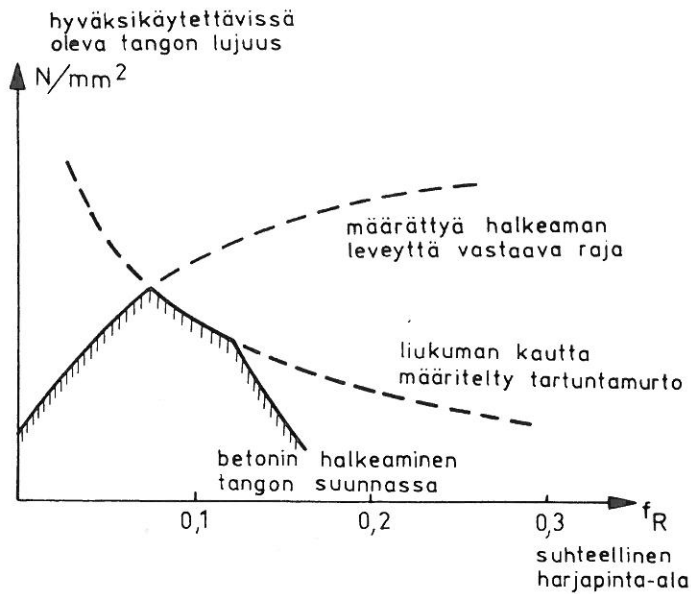
Murtumiskuormaa vastaavan liukuman arvon on havaittu pienenevän betonin lujuuden lisääntyessä ja suhteellisen harjapinta-alan kasvaessa. Oleellinen murtoliukuman arvoon vaikuttava tekijä on myös betonin runkoaineen laatu. On mm. todettu, että kevytsorabetonissa on murtoliukuman arvo selvästi alhaisempi kuin vastaavanlujuisessa normaalibetonissa. (Kuva 3).

Poikkeuksen mainitusta suhteellisen harjapinta-alan vaikutuksesta murtoliukumaan tekevät hyvin heikosti pintakuvioidut tai sileät tangot, joiden murtoliukuman tulisi teoreettisesti olla suuri. Suurta liukumakykyä ei murtotilassa kuitenkaan voida käyttää hyödyksi.



Kuva 3 Härjatankojen ulosvetokokeissa saatuja jännitysliukumakäyriä. Tangon läpimitta 16 mm.

Teräksen lujuuden hyväksikäyttöä rajoittava tekijä on halkeamien leveys vähän pintakuvioidettuja tankoja käytettäessä. Jos pintakuviointi on voimakkaampi, siis suhteellinen harjapinta-ala suurempi, määräävä tekijä on riippuen suojaavan betonikerroksen paksuudesta joko tartuntamurto tai betonin halkeaminen tangon suunnassa. Kuvassa 4 on esitetty kaavio pintakuviointin vaikutuksesta hyväksikäytettävissä olevaan teräksen lujuuteen. Mikäli sallitaan kuviossa esitettyä suurempia halkeaman leveyksiä, tartuntamurto tulee alapäässä määräävämmäksi. Tartuntamurron määrittelevän linjan asema riippuu betonin lujuudesta, tangon pintakuviointista ja murtotilaa vastaavasta liukuman arvosta.



Kuva 4 Periaatekuva eri tekijöiden vaikutuksesta hyväksikäytettävissä olevaan tangon lujuuteen.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Etsittäessä mahdollisimman hyvää tangon harjan muotoa on otettava huomioon monia tangon käyttöön ja valmistukseen liittyviä tekijöitä. Eräs käyttöön liittyvä tekijä on suuri tartuntajäykkyys, jolla tarkoitetaan mahdollisimman pientä tangon liukumaa tietyn kuormituksen vaikuttaessa. Nykyaikaisten harjatankojen pinnan geometria on kehitetty sellaiseksi, että tartuntajäykkyys on yleensä suuri muiden tankojen käyttöön liittyvien tekijöiden siitä kuitenkin kärsimättä. Hyviin tartuntaominaisuuksiin kuuluu käyttötilan pienen liukuman lisäksi myös harjojen pieni halkaisuvaikutus ja murtotilassa riittävä liukumakyky hauraan murtumisen välttämiseksi.

KÄYTETYT MERKINNÄT

A_c	betonin pinta-ala
A_s	vetoraidoituksen pinta-ala
A_{pr}	harjan projektiopinta-ala tangon akseliin nähden kohtisuoralla tasolla
K	liukumamoduuli
a	harjaväli
b	vakio
c	vakio
f_R	suhteellinen harjapinta-ala
n	E_s/E_c
u	tangon ympärysmitta
Δ	liukuma

ϵ_c	betonin suhteellinen muodonmuutos
ϵ_s	betoniteräksen suhteellinen venymä
ϕ	tangon halkaisija
ρ	A_s/A_c
σ_c	betonin jännitys
σ_s	tangon jännitys
τ	leikkausjännitys

LÄHDEKIRJALLISUUS

- 1 Bernander, K.G., Vidhäftningens beroende av kamarea och kamalvstånd hos armeringsstål. *Betong* 37 (1952)1, s. 1...17.
- 2 Martin, H., Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungstählen unter Kurzzeitbelastung. Berlin 1973. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 228. 50s.
- 3 Noakowski, P., Untersuchung und Überwachung der Profilierungseigenschaften der Betonrippenstähle. *Materialprüfung* 18(1976)7, s. 230...235.
- 4 Rehm, G., Kriterien zur Beurteilung von Bewehrungsstäben mit hochwertigen Verbund. Berlin & München. Wilhelm Ernst & Sohn, 1969. Stahlbetonbau. Berichte aus Forschung und Praxis. Festschrift Rüsck. Hrsg. von G. Knittel und J. Kupfer, s. 79...96.
- 5 Rehm, G., Über die Grundlagen des Verbundes Zwischen Stahl und Beton. Berlin 1961. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 138. 59s.
- 6 Schiessl, P., Beschränkung der Rissbreiten bei Zwangbeanspruchung. *Betonwerk + Fertigteil - Technik* 42(1976)6, s. 269...274.
- 7 Schiessl, P., Zusammenhang zwischen Rissbreite und Korrosionsabtragung der Bewehrung. *Betonwerk + Fertigteil - Technik* 41(1975)12, s. 594...598.
- 8 Soretz, S., Einfluss der Rippen von Rippenstählen auf deren Verbund im Beton. Tor-Isteg steel corporation. Luxemburg 1966.
- 9 Jokela, J., Betonin ja raudoituksen yhteistoiminta. Julkaisematon *Jukka Jokela, dipl.ins., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Otaniemi*