

TERÄSBETONIPALKKIEN MURTORAJATILAN MÄÄRITTÄMINEN YHDISTETYSSÄ LEIKKAUS- JA TAIVUTUSRASITUKSESSA

Pekka Nykyri

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 20
No 3 1987, s. 21...48

TIIVISTELMÄ: Teräsbetonirakenteiden käyttäytymistä yhdistetyn taivutus- ja leikkausrasituksen alaisena voidaan analysoida kiertymämekanismiin perustuvalla laskentamenetelmällä. Menetelmässä oletetaan, että rakenne kiertyy halkeaman ja neutraaliakselin leikkauspisteen suhteen. Halkeama on vino leikkausvoiman vaikutusalueella. Betonin ja raudoituksen epätasainen venymäjakautuma palkin pituus- akselin suunnassa otetaan huomioon. Betonin ja raudoituksen yhteistoimintaa kuvataan tartunta- liukuma-riippuvuuden ja yhteistoimintayhtälön avulla. Puristusvyöhykkeen murtokapasiteetti määritetään tasojännitystilän murtoehdon perusteella. Menetelmä antaa varmalla puolella olevia tuloksia teräsbetonisilla suorakaide- ja T-poikkileikkauksilla. Laskentatulokset ovat 0,7 - 1,0-kertaisia koetuloksiin verrattuna silloin, kun leikkaushoikkuus on suurempi kuin 1,0.

JOHDANTO

Leikkausvoiman rasittamille teräsbetonirakenteille ei ole pystytty kehittämään sellaista yleispätevää laskentamallia, jonka tarkkuus olisi riittävä erilaisilla rakennemitoilla, raudoitusmäärillä ja kuormitustapauksilla.

Laskentamallin puute on pyritty korvaamaan käytännön rakennesuunnittelussa antamalla varmalla puolella olevia mitoitusohjeita, jotka estävät murtumisen leikkausvoiman vaikutusalueella. Vahvasti kokemusperäiset mitoitusohjeet antavatkin riittävän murtovarmuuden leikkausvoiman rasittamalle rakenteen osalle tavanomaisissa tapauksissa.

Mitoitukseen tarkoitettujen laskentamallien käyttö on kuitenkin kyseenalaista rakenteen todellisen kantokyvyn määrittämiseen erityisesti silloin, kun rakenteet mitat, materiaalit tai raudoitustapa poikkeavat tavanomaisesta. Tällaisia tapauksia edustavat mm. vaurioituneet rakenteet ja esijännitetyt ontelolaatat. Luotettavan lasentamallin puute haittaa myös uusien rakennetyyppien käyttöönottoa.

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) betoni- ja silikaattitekniikan laboratoriossa on tutkittu leikkausrasitetun teräsbetonirakenteen käyttäytymistä. Tutkimuksessa on pyritty löytämään sellaiset rakenteen toimintamallit, joilla voidaan analysoida erityyppisiä rakenteita sekä voimakkaan leikkausraudoituksen että puhtaan taivutusrasituksen tapauksissa.

Kehitystyön pohjaksi valittiin ns. kiertymämalli, joka on saanut nimensä saksankielisestä vastineestaan, Walther'in /10/ kehittämästä leikkauskiertymä- ("Schubrotation") mallista. Kiertymämallin katsottiin jäljittävän parhaiten sauvarakenteiden toimintaa erilaisilla leikkausrasituksen asteilla. Malli ei luonnollisesti sovellu sellaisten rakenteiden analysointiin, joissa halkeilun jälkeen syntyy jokin muu kuin kiertymämekanismi. Tällaisia rakenteita ovat mm. ohutuumaiset palkit, joissa on leveä alalaippa.

Kiertymämallin keskeinen periaate on se, että halkeillutta teräsbetonirakennetta tarkastellaan epäjatkuvana materiaalina ja halkeaman kohdalla pyritään ottamaan huomioon halkeilun aiheuttamat venymien keskittymät halkeaman kohdalle sekä puristus- että vetopuolella. Tämä merkitsee sitä että kiertymämallissa luovutaan teknisen taivutusteorian soveltamisesta raudoituksen venymän määrittelyssä.

Teknisen taivutusteorian on todettu soveltuvan erittäin hyvin teräsbetonirakenteen murtotilatarkasteluihin. Leikkausrasitetun alueen murtotilatarkasteluissa tekninen taivutusteoria saattaa johtaa huomattaviin virheisiin erityisesti silloin, kun raudoituksen ankkurointiliukuma muuttaa oleellisesti halkeaman leveyden ja jännityksen välistä suhdetta.

VTT:llä kiertymämallia on kehitetty erityisesti erilaisten leikkausvoima-taivutusmomentti-yhdistelmien tarkastelemiseen. Lisäksi on kehitetty raudoituksen toimintamallia.

Laskentamenetelmässä tarvitaan erilliset mallit

- halkeaman kaltevuudelle
- puristusvyöhykkeen muodonmuutokselle halkeaman kohdalla
- puristusvyöhykkeen murtokapasiteetille yhdistetyssä taivutus- ja leikkausrasituksessa
- halkeamaleveyden ja raudoituksen voiman väliselle riippuvuudelle.

Nämä toimintamallit ovat periaatteeltaan toisistaan riippumattomia ja kutakin niistä voidaan kehittää erikseen.

Halkeaman kaltevuuden ja puristusvyöhykkeen muodonmuutoksen lausekkeet ovat puhtaasti kokeellisia. Puristusvyöhykkeen murtokapasiteetin lausekkeet ja raudoituksen toimintamallit on johdettu teoreettisista otaksumista.

Kehitystyön päätavoite on ollut eri osien toimintamallien yhdistäminen toimivaksi kokonaisuudeksi.

KIERTYMÄMALLIN PERIAATTEET

Mallin yleiskuvaus

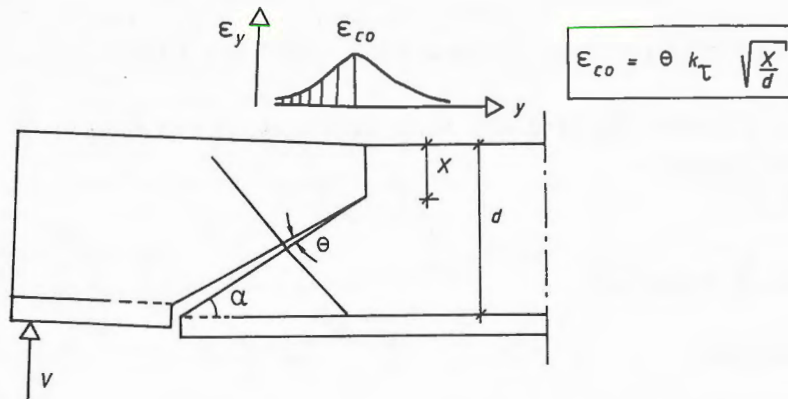
Laskentamallissa tarkastellaan yhtä rakenteen poikkileikkausta kerrallaan. Poikkileikkauksen muodostaa rakenteen akselia vastaan vino tai kohtisuora halkeama ja akselia vastaan kohtisuora puristusvyöhyke (kuva 1).

Halkeamien rajoittamien rakenteen osien oletetaan pysyvän jäykkinä ja kiertyvän toistensa suhteen halkeaman yläpäässä olevan kiertymäpisteen ympäri. Kiertymä aiheuttaa puristusvyöhykkeessä muodonmuutoksen keskittymisen halkeaman ympäristöön. Leikkausmuodonmuutoksia ei oteta huomioon puristusvyöhykkeessä.

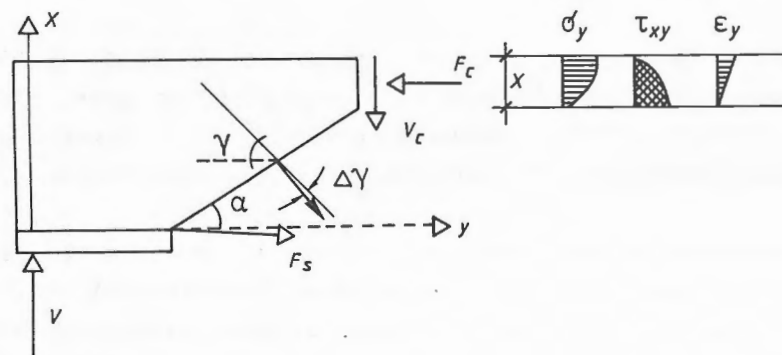
Halkeamaa leikkaavan raudoituksen jännitys määritetään raudoituksen kohdalla olevan halkeamaleveyden ja raudoituksen ja betonin yhteistoimintayhtälöiden perusteella. Raudoituksen suunnasta poikkeavan halkeaman avautumissuunnan aiheuttamat vaarnavoimat ja niiden aiheuttama betonipeitteen lohkeaminen otetaan huomioon raudoituksen jännitystilan määrittämisessä.

Halkeaman kaltevuudelle käytetään kokeellisesti määritettyä yhtälöä.

a)



b)



Kuva 1. Kiertymämallin periaate.
a) muodonmuutokset halkeaman kohdalla
b) voimat halkeaman kohdalla.

Laskennassa etsitään annettua muodonmuutostilaa vastaava tasapainotila. Rajatiloiksi voidaan asettaa

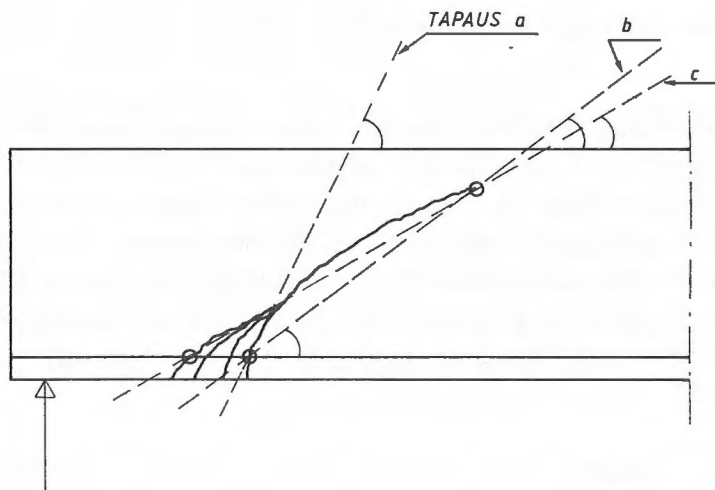
- halkeamaleveys
- puristusvyöhykkeen venymä tai jännitys tai
- raudoituksen venymä tai jännitys.

Halkeaman kaltevuus

Leikkausvoiman vaikutusalueella halkeamat alkavat joko rakenteen vedetystä reunasta tai uumasta. Vedettyyn reunaan syntyvä halkeama on aluksi pystysuora, mutta kaareutuu edetessään vinoksi taivutusmomentin kasvun suuntaan (kuva 2). Uumasta alkava leikkaushalkeama syntyy likimain 45° kaltevuuteen ja etenee tässä kaltevuudessa reunoja kohti.

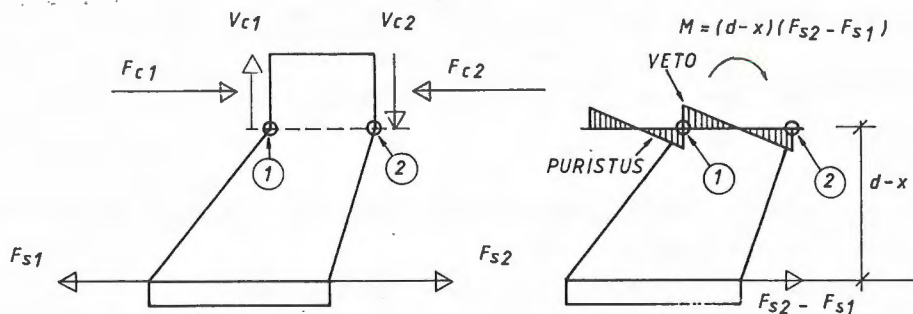
Halkeaman etenemissuunta riippuu halkeaman yläpään jännitystilaan vaikuttavista tekijöistä, joista tärkeimmät ovat

- puristusvyöhykkeen leikkausrasitus ja sen jakautuma ja
- halkeamien välissä olevien betonisauvojen kiinnitysmomentti (kuva 3).



Kuva 2. Leikkaushalkeama ja sen kaltevuuksia eri vaiheissa.

Kiinnitysmomentti johtuu halkemavälillä syntyvästä pääraudoituksen voiman muutoksesta, joka taas johtuu leikkausvoimasta ja raudoituksen tartunnasta. Mitä suurempi on leikkausvoima ja mitä parempi on raudoituksen tartunta, sitä suurempi on raudoituksen jännityksen muutos halkeamavälillä.



Kuva 3. Halkeamien erottamien betoniulokkeiden kiinnittyminen puristusvyöhykkeeseen.

Pelkän puristusvyöhykkeen leikkausvoiman aiheuttama halkeama etenee 45° kulmassa. Tällainen tila vallitsee silloin, kun rakenteen uumasta lähtevä halkeama ei ulotu rakenteen reunaan saakka, jolloin kiertymistä ei tapahdu. Kiinnitysmomentti betonisauvojen ja puristusvyöhykkeen yhtymäkohdassa aiheuttaa vetojännityksiä kasvavan taivutusmomentin puolelle halkeamasta ja puristusjännityksiä toiselle puolelle. Syntyvä jännitystila pienentää etenevän halkeman kaltevuuskulmaa. Leikkausraudoitus pienentää kiinnitysmomenttia ja kasvattaa siten halkeamakulmaa.

Poikkileikkausmuoto vaikuttaa sekä kiinnitysmomentin suuruuteen että halkeman yläpään leikkausrasitukseen.

Halkeaman kaltevuuden analyttisen lausekkeen muodostaminen edellä kuvatun toimintamallin perusteella on mahdollista, mutta silloin tulee tarkastella samanaikaisesti koko rakenteen halkeillutta aluetta raudoituksen voiman muutoksen määrittämiseksi.

Mallin muiden osien testaamiseksi on tyydytty kokeellisesti määritettyyn yhtälöön (1), joka ottaa likimääräisesti huomioon leikkausvoiman suuruuden, leikkausraudoituksen määrän ρ_v ja poikkileikkausmuodon.

$$\alpha_0 = 30^\circ \left(1 + 50 \rho_v \frac{b_w}{b} \right) \quad (1)$$

missä b_w on uuman leveys

b poikkileikkauksen keskimääräinen leveys.

Kulma α_0 on taivutusmomentin nollakohtaan syntyvä halkeama. Halkeaman kaltevuuden muutos jännevälillä lasketaan yhtälöllä /8/

$$\alpha_y = 90^\circ - \frac{V_y}{V_0} (90^\circ - \alpha_0) \quad (2)$$

missä V_0 on leikkausvoima taivutusmomentin nollakohdassa

V_y leikkausvoima kohdassa y .

Kokeellisen yhtälön käyttö on perusteltua, koska laskennassa on todettu halkeaman kaltevuuden muutoksen vaikutus leikkauskapasiteettiin vähäiseksi kokeellisesti määritetyn kaltevuuden arvon ympäristössä.

Puristusvyöhykkeen toimintamalli

Puristusvyöhykkeen muodonmuutos halkeilleessa, taivutusrasitetussa teräsbetonirakenteessa on epätasaisesti jakautunut rakenteen pituusakselilla. Muodonmuutos keskittyy halkeamien kohdalle. Walther /10/ on esittänyt reunapuristuman maksimiarvon ϵ_{co} ja kiertymän θ välille riippuvuuden

$$\theta = \epsilon_{co} \cdot \frac{1}{k_\tau} \sqrt{\frac{d}{x}} \quad (3)$$

missä x on puristusvyöhykkeen korkeus

d poikkileikkauksen tehollinen korkeus

k_τ kiertymäkerroin.

Yhtälössä (3) kiertymä merkitsee halkeamaleveyden w perusteella määritettyä kiertymää

$$\theta = \frac{w}{d - x} \sin \alpha \quad (4)$$

Kertoimelle k_τ Walther antoi leikkausvoimasta, leikkausraudoitusmäärästä ja halkeama- ja murtokuormasta riippuvan arvon, joka puhtaan taivutuksen tapauksessa

on 1,0 ja leikkausrasitetulla alueella välillä 1,0 - 2,0. Tehdyn koetulosanalyysin perusteella k_τ :lle voidaan käyttää vakioarvoa 1,7.

Kokoonpuristuma puristusvyöhykkeen syvyysuunnassa oletetaan suoraviivaiseksi ja betonin jännitysvenymäriippuvuus yhtälön 5 mukaiseksi

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cy}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

kun $\epsilon_c < \epsilon_{cy}$,

$$\sigma_c = f_c$$

kun $\epsilon_{cy} < \epsilon_c < \epsilon_{cu}$

missä f_c on betonin puristuslujuus

ϵ_c betonin venymä

ϵ_{cy} betonin myötövenymä

ϵ_{cu} betonin murtovenymä.

Puristusvyöhykkeen korkeuden ja halkeamaleveyden välille voidaan yhtälöiden 3, 4 ja 5 perusteella johtaa riippuvuudet

$$w = \frac{3}{2} \frac{d-x}{\sin \alpha} \epsilon_{cy} \cdot \frac{1}{k_\tau} \sqrt{\frac{d}{x}} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4}{3} \frac{F_{cy}}{b \cdot x \cdot f_c}} \right], \quad (6)$$

kun $\epsilon_{c0} < \epsilon_{cy}$

$$w = \frac{1}{3} \frac{d-x}{\sin \alpha} \epsilon_{cy} \cdot \frac{1}{k_\tau} \sqrt{\frac{d}{x}} \frac{1}{1 - \frac{F_{cy}}{b \cdot x \cdot f_c}}$$

kun $\epsilon_{c0} > \epsilon_{cy}$,

joista puristusvyöhykkeen korkeus voidaan ratkaista halkeamaleveyden ja puristusvyöhykettä rasittavan normaalivoiman funktiona.

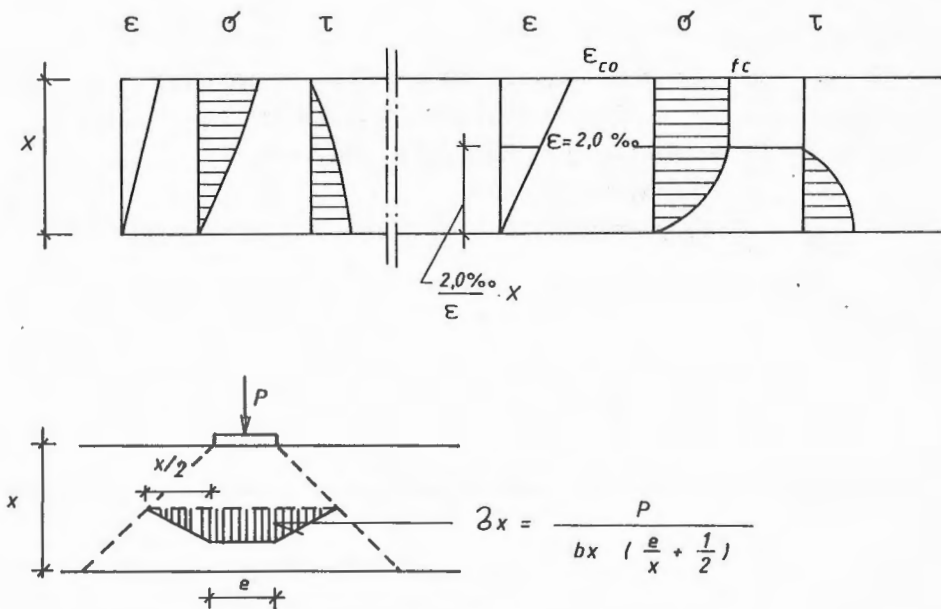
Puristusvyöhykkeeseen syntyviä leikkausmuodonmuutoksia ei oteta huomioon.

Puristusvyöhykettä tarkastellaan tasojännitystilassa ja sille määritetään kaksi murtorajatilaa:

- reunapuristuma saavuttaa arvon 0,4 %
- jännitys täyttää murtoehdon.

Jännitystilan määrittämistä varten oletetaan puristusvyöhykkeen ottavan leikkausrasituksia sillä osalla, jossa kokoonpuristuma on pienempi kuin 0,2 %. Pääjännitykset määritetään leikkausjännitysten jakautuma-alueella keskimääräisen leikkausjännityksen ja normaalijännityksen perusteella.

Ulkoisen kuorman vaikutus puristusvyöhykkeen rasitustilaan otetaan huomioon palkin akselia vastaan kohtisuorana jännityskomponenttina. Pistekuorman aiheuttaman jännityksen oletetaan jakautuvan puristusvyöhykkeessä kuvan 4 mukaisesti. Jännitystilan määrittämisessä käytetään puristusvyöhykkeen keskikorkeudella vaikuttavaa arvoa.



Kuva 4. Puristusvyöhykkeen rasitustila.

Kuorman aiheuttamalla jännityskomponentilla ei ole sanottavaa merkitystä silloin, kun pistekuorma on riittävän etäällä tuelta tai tasaisesti kuormitettu palkki on riittävän hoikka. Lyhyillä leikkausjänniteillä kuormien arvot kasvavat suuriksi ja kuorma lisää puristusvyöhykkeen murtokapasitteettia. Tällöin koko rakenteen murtokuorma lisääntyy, koska sellaiset halkeamakulmat, joilla murto-kohta joutuu pistekuorman vaikutuksen ulkopuolelle, antavat vielä suuremman murtokuorman kuin suoraan pistekuorman kohdalle kulkeva halkeama.

Murtoehdoksi valitaan lähteessä /5/ esitetty murtoehto, joka oktaedraalisen leikkausjännityksen muodossa on

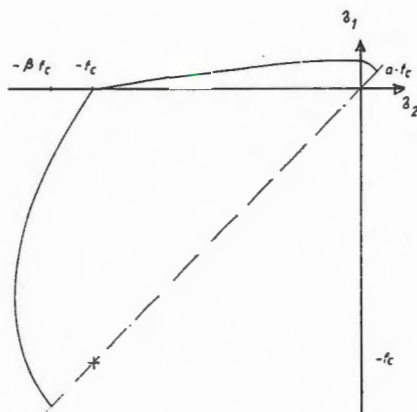
$$\tau_{\text{oct}} + \sqrt{2} \frac{1-a}{1+a} p - \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{a}{1+a} f_c = 0 \quad (7)$$

kun $\sigma_1 > 0$ tai $\sigma_2 > 0$

$$\tau_{\text{oct}} + \sqrt{2} \frac{\beta-1}{2\beta-1} p - \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\beta}{2\beta-1} f_c = 0$$

kun $\sigma_1 < 0$ ja $\sigma_2 < 0$

- missä a on betonin vetolujuuden ja puristuslujuuden suhde
 β tasojännitystilän puristuslujuuden ($\sigma_1 = \sigma_2 = -\beta f_c$) ja aksiaalisen puristuslujuuden suhde
 p hydrostaattinen paine
 σ_1, τ_2 tasojännitystilän pääjännitykset.



Kuva 5. Murtoehto pääjännityskoordinaatistossa.

Laskentamallissa tunnetaan puristusvyöhykkeen murtotarkastelutilanteessa puristusvyöhykettä rasittavien voimien V_c , F_{cy} ja F_{cx} suuruussuhteet, jolloin murtoehdon perusteella voidaan ratkaista murtotilan todelliset voimat.

Esimerkiksi murtotilan leikkausvoimalle saadaan lausekkeet

$$V_{cu1} = f_c b x \frac{2a k_v}{(1-a)(1+k_f) \pm \sqrt{1+3k_v^2+k_f^2+k_f}} \quad (8)$$

$$V_{cu2} = f_c b x \frac{k_v}{(1-\beta^{-1})(1+k_f) + (2-\beta^{-1})\sqrt{1+3k_v^2+k_f^2+k_f}}$$

$$V_{cu} = \min \{V_{cu1}, V_{cu2}\}$$

missä V_{cu1} on vetomurtoehdon mukaan määräytyvä leikkausvoima

V_{cu2} puristumurtoehdon mukaan määräytyvä leikkausvoima

V_c puristusvyöhykettä rasittava leikkausvoima

F_{cy} puristusvyöhykettä rasittava normaalivoima y-akselin suunnassa

F_{cx} puristusvyöhykettä rasittava normaalivoima x-akselin suunnassa

$$k_v = V_c / F_{cy}$$

$$k_f = F_{cx} / F_{cy}$$

Raudoituksen jännityksen määrittäminen

Raudoituksen jännitys voidaan määrittää halkeamaleveyden ja raudoituksen tartuntatilan perusteella /6/. Määrittelymenetelmä perustuu raudoituksen ja betonin tartunta-liukuma-riippuvuuteen ja yhteistoimintayhtälöön eri tartuntatiloissa.

Tartunta-liukuma-riippuvuuden perusyhtälönä käytetään eksponenttifunktiota.

Raudoituksen jännityksen ratkaisussa korvataan eksponenttifunktio kuitenkin lineaarifunktiolla, joka leikkaa eksponenttifunktiota pisteessä t_2 , τ_2 . Liukuma t_2 on yhtä suuri kuin raudoituksen liukuma halkeamassa.

Eksponenttifunktion parametrit määritetään eri raudoitustyypeille tartuntakoetulojen, tankojen betonipeitteen ja keskinäisen etäisyyden perusteella.

Perusyhtälö on muotoa

$$\frac{\tau}{\tau_y} = \left(\frac{t}{t_y} \right)^p \quad (9)$$

missä τ on tartuntajännitys

τ_y tartuntalujuus

t liukuma

t_y tartuntalujuutta vastaava liukuma

p tartuntaeksponentti.

Kun pisteeseen t_2 , τ_2 sijoitetun suoran kulmakertoimenä käytetään arvoa $\sqrt{p} \tau_2/t_2$, on suoran yhtälö muotoa

$$\frac{\tau}{\tau_y} = \left(\frac{t_2}{t_y} \right)^p [1 - \sqrt{p} \left(\frac{t}{t_2} - 1 \right)] \quad (10)$$

Betonipeitteen ja tankojen keskinäisen etäisyyden vaikutus otetaan huomioon yhtälöllä /6, 9/

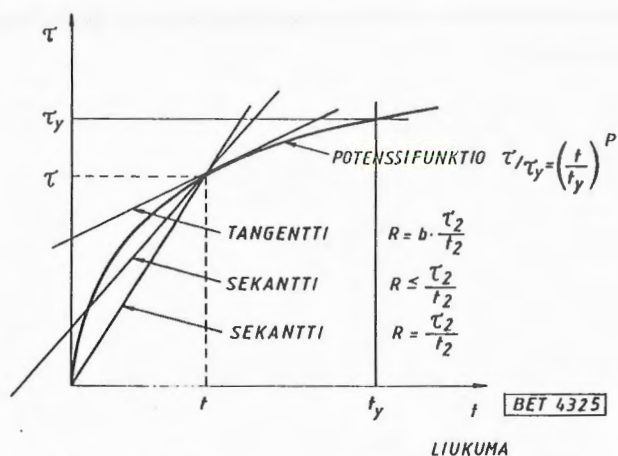
$$\tau_y < f_{ct} \left(\frac{c}{d_s} + 0,5 \right) \quad (11)$$

missä f_{ct} on betonin vetolujuus

c betonipeitteen paksuus tai puolet tankojen välisestä vapaasta välistä

d_s raudoitustangon paksuus.

Samalla periaatteella määritetään erilaisten ankkureiden voima-siirtymä-riippuvuudet /6/.



Kuva 6. Tartunta-liukuma-riippuvuus.

Yhteistoimintayhtälöt eri tartuntatiloissa on johdettu differentiaaliyhtälön

$$\frac{d^2t}{dx^2} = \frac{u_s}{A_s E_s} \tau(t)(1 + n\rho k), \quad (12)$$

missä t on liukuma

- x etäisyys raudoitustangon akselin suunnassa
- u_s tangon ympäröimä
- A_s tangon poikkipinta-ala
- E_s tangon kimmomoduuli
- n betonin ja tangon kimmomoduulien suhde
- ρ tehollinen suhteellinen raudoitusala A_s/A_{ef}
- k betonijännitysten suhde tangon pinnassa ja alueessa A_{ef}

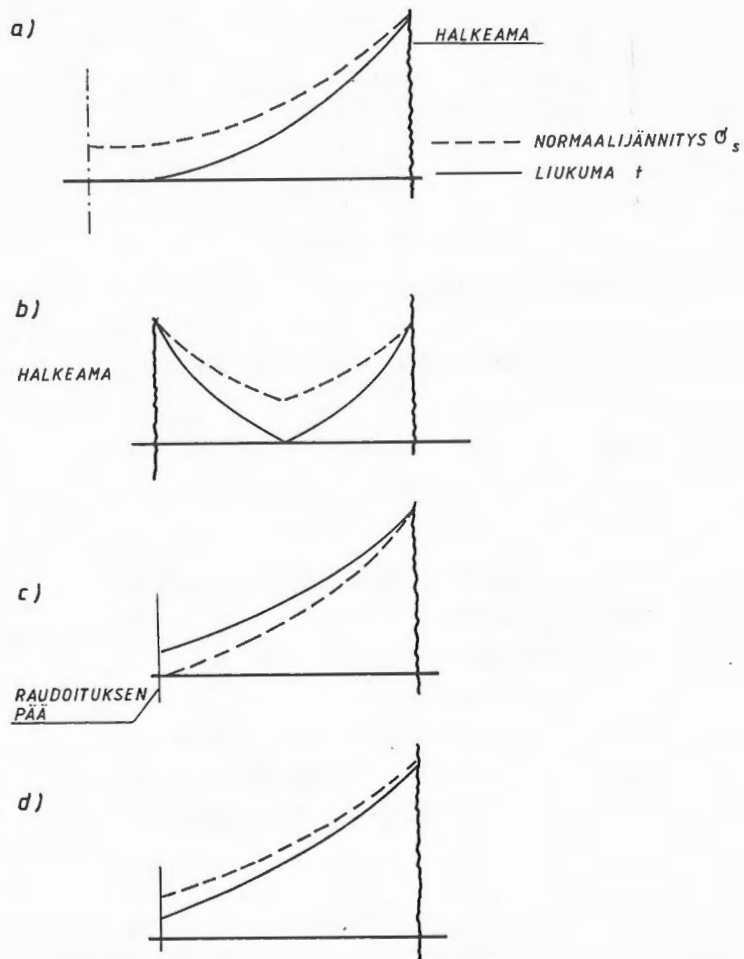
ratkaisun avulla.

Raudoituksella voi olla halkeaman ympäristössä neljä erilaista tartuntatilaa tartunta-alueen reunoilla vallitsevien erilaisten raudoitusten liukuma-jännitysyhdistelmien takia. Yksityiskohtainen ratkaisu on esitetty lähteessä /6/.

Tartuntatilojen määrittely on esitetty kuvassa 7.

Raudoitus on useissa tapauksissa eri tartuntatiloissa halkeman eri puolilla, jolloin raudoituksen liukummat halkeamaan eivät ole yhtä suuret halkeaman eri puolilta. Tällöin tietyllä halkemaleveydellä saavutettava raudoituksen jännitys

joudutaan ratkaisemaan iteratiivisesti. Iteroinnissa etsitään tila, jossa halkeaman eri puolilla syntyy yhtä suuri raudoituksen jännitys ja liukumien summa on yhtäsuuri kuin halkeamaleveys.



Kuva 7. Liukuman ja raudoituksen jännityksen jakautuma tartunta-alueella eri tartuntatiloissa

- a) tartuntatila 1
- b) tartuntatila 2
- c) ankkurointitila, ei päätyankkuria
- d) ankkurointitila, päätyankkuri.

Raudoituksen vaarnailmiö

Kun halkeaman avautumissuunta poikkeaa raudoituksen suunnasta, syntyy raudoitukseen halkeaman suuntaisia vaarnavoimia. Vaarnavoimien suuruus riippuu mm. vaarnasiirtymän suuruudesta, raudoitustankojen paksuudesta, betonin lujuudesta, betonipoikkileikkauksen leveydestä raudoituksen tasossa ja raudoitusta tukevan betonipeitteen paksuudesta /1, 3/.

Vaarnavoimat ovat kuitenkin suurimmillaankin niin pieniä, että niillä ei ole sanottavaa vaikutusta koko poikkileikkauksen voimatasapainotilaan.

Vaarnailmiö vaikuttaa kuitenkin toisella, hyvin ratkaisevalla tavalla koko poikkileikkauksen toimintaan. Vaarnasiirtymä nimittäin aiheuttaa halkeaman muodostumisen pääraudoituksen tasoon ja usein koko betonipeitteen lohkeamisen, mistä on seurauksena raudoituksen tartunnan häviäminen lohjenneella alueella, raudoituksen venymän ja halkeamaleveyden kasvu ja usein puristusvyöhykkeen murtuminen.

Vaarnahalkeaman on todettu syntyvän tavanomaisilla pääraudoitteilla lähes vakio-siirtymällä, joka vaihtelee lähteistä riippuen välillä 0,1 - 0,2 mm /1, 3/. Runsaasta vaarnatutkimusten määrästä huolimatta vaarnahalkeaman pituuteen ja siihen vaikuttaviin tekijöihin ei valitettavasti ole kiinnitetty huomioita, joten kokeellisesti varmennettu tieto tältä osin puuttuu.

Leikkausraudoitetulla rakenteella vaarnahalkeaman voi olettaa etenevän lähimpään leikkausraudoitteeseen saakka.

Leikkausraudoittamattomalla rakenteella vaarnahalkeaman pituus oletetaan yhtäsuureksi kuin leikkaushalkeaman vaakasuora projektio

$$L_v = (d - x) \cot \alpha \quad (13)$$

Yhtälössä oletetaan pääraudoitus palkin alapinnan suuntaiseksi. Halkeaman kaltevuuden käyttö yhtälössä on perusteltua, koska vaarnahalkeamaa auki repivä siirtymä riippuu raudoituksen ja halkeaman avautumissuunnan välisestä kulmasta. Yhtälön mukaan vaarnahalkeaman pituus on nolla silloin, kun vaarnasiirtymää ei synny. Koehavaintojen perusteella yhtälö antaa oikeaa suuruusluokkaa olevia arvoja.

LASKENNAN KULKU

Staattisesti määrätyn rakenteen laskenta voidaan suorittaa tarkastelemalla yhtä poikkileikkausta kerrallaan. Annettua rajatilaa vastaavat kuormat saadaan etsimällä poikkileikkaus, jossa rajatila saavutetaan ensimmäiseksi.

Yhden poikkileikkauksen rajatila ratkaistaan seuraavasti.

1. Annetaan alkuarvot

- halkeamaleveydelle
- puristusvyöhykkeen korkeudelle
- ulkoiselle kuormalle

2. Lasketaan halkeamakulma

3. Lasketaan raudoituksen voima

4. Lasketaan puristusvyöhykkeeseen vaikuttavat voimat

5. Verrataan annettua ulkoista kuormaa ja sisäisten voimien perusteella saatua ulkoista kuormaa. Korjataan tarvittaessa annettua kuormaa ja palataan kohtaan 2.

6. Lasketaan puristusvyöhykkeen korkeus

7. Verrataan laskettua puristusvyöhykkeen korkeutta annettuun. Tarvittaessa korjataan ja palataan kohtaan 2.

8. Tehdään rajatilatarkastelu:

Jos annettuja rajatiloja ei ole saavutettu lisätään halkeamaleveyttä ja palataan kohtaan 2. Jos jokin rajatila on ylitetty pienennetään halkeamaleveyttä ja palataan kohtaan 2.

Jos rakenne on rajatilassa, talletetaan poikkileikkauksen rasitusarvot ja siirrytään seuraavaan poikkileikkaukseen.

KOKEELLISTEN MALLIEN VAIKUTUS LASKENTATULOKSEEN

Laskentamenetelmän yleispätevyys riippuu siitä, kuinka paljon kokeelliset mallit vaikuttavat laskentatulokseen.

Tässä työssä puhtaasti kokeellisia malleja käytetään halkeaman kaltevuuden, puristusvyöhykkeen venymäjakautuman ja vaarnahalkeaman pituuden määrittelyssä. Pääkohdat näiden mallien vaikutuksesta laskentatulokseen on esitetty seuraavissa kohdissa.

Halkeamakulman vaikutus

Halkeamakulman vaikutus murtokuormaan riippuu palkissa ensisijaisesti leikkausraudoitusmäärästä ja kuormitustavasta.

Leikkausraudoitusmäärän suhteellinen kasvu pääraudoitusmäärään nähden lisää murtokuormaa suhteellisesti enemmän pienillä halkeamakulman arvoilla, koska vinoissa halkeamassa toimii enemmän leikkausraudoitusta kuin pystyssä halkeamassa.

Kuormitustapaus määrää rakenteen murtokohdan. Kuormitustapausta kuvataan tässä leikkaushoikkeudella λ , joka yleisesti voidaan määrittää yhtälöllä (14).

$$\lambda = \frac{M}{Qd} \quad (14)$$

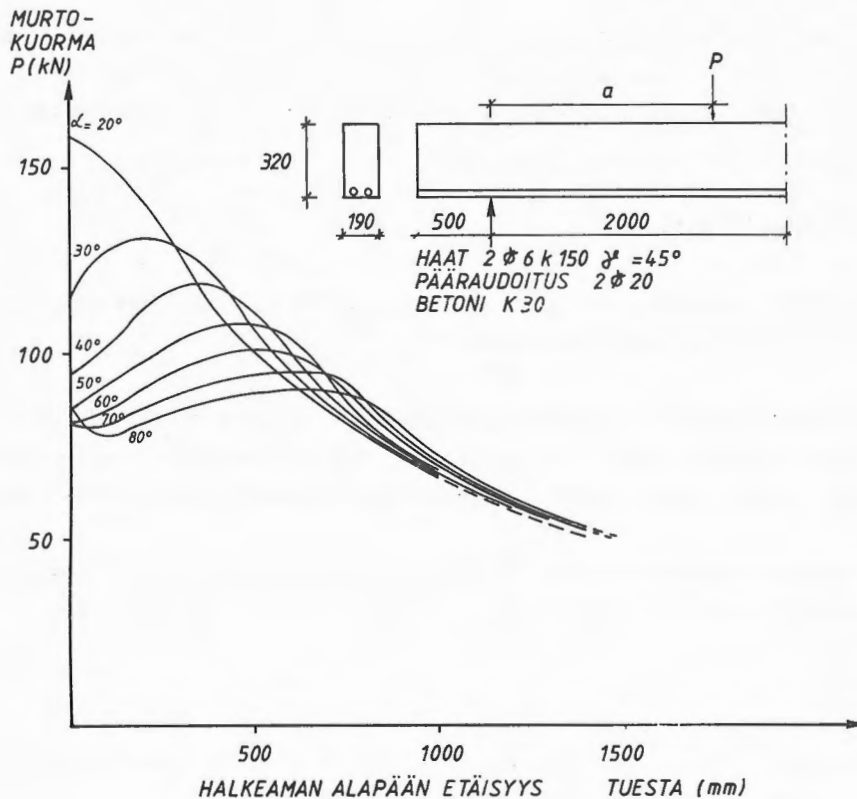
missä M on ulkoisen kuorman aiheuttama taivutusmomentin maksimiarvo
 Q M :a vastaava leikkausvoiman maksimiarvo.

Pistekuormien kuormittamille yksiaukkoisille palkeille yhtälöstä (14) saadaan leikkaushoikkeudeksi $\lambda = a/d$, missä a on momentin maksimikohdan ja tuen välissä olevien pistekuormien resultantin etäisyys tuelta. Tasaisella kuormalla leikkaushoikkeus on vastaavasti $L/(4d)$.

Murtokuorma muuttuu eri tavalla eri halkeamakulmilla murtokohdan muuttuessa, jolloin murtokohta ja kuormitustapaus vaikuttavat eri halkeamakulmilla saataviin murtokuorman arvoihin (kuva 8).

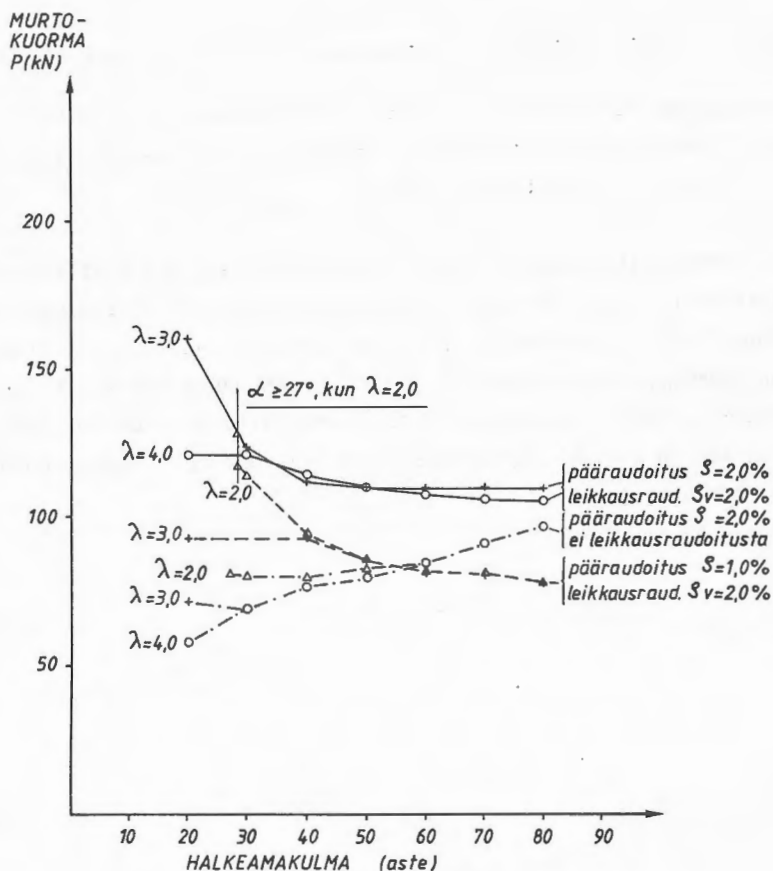
Tehdyn vertailun yhteenvedo on esitetty kuvassa 9. Tulokset osoittavat, että kulman vaikutus on erittäin vähäinen leikkausraudoittamattomassa palkissa pie-

nillä leikkausjänniteen arvoilla ($\lambda < 3,5$). Suuremmilla leikkausjänniteen arvoilla kulman poikkeama $\pm 5^\circ$ aiheuttaa 30° :n ympäristössä kuormapoikkeaman $\pm 7\%$.



Kuva 8. Halkeamakulman suuruuden vaikutus leikkausraudoitetun palkin murtokuormaan koko leikkausjänniteessä.

Leikkausraudoitetussa palkissa kulman vaikutus murtokuormaan on vähäinen, kun halkeamakulma on suurempi kuin 40° . Tätä pienemmillä kulman arvoilla vaikutus riippuu leikkaushoikkeudesta ja pää- ja leikkausraudoitusmäärien suhteesta. Mitä suurempi leikkausraudoituksen määrä on pääraudoituksen määrään nähden, sitä suurempi on halkeamakulman pienenemisen aiheuttama lisäys murtokuormaan. Toisaalta kuitenkin leikkausraudoituksen suhteellisen osuuden kasvaessa taivutus tulee määrääväksi entistä pienemmillä leikkaushoikkeuden arvoilla.



Kuva 9. Yhteenveto halkeamakulman vaikutuksesta palkkien määrävään murtokuormaan eri leikkausjanteiden arvoilla.

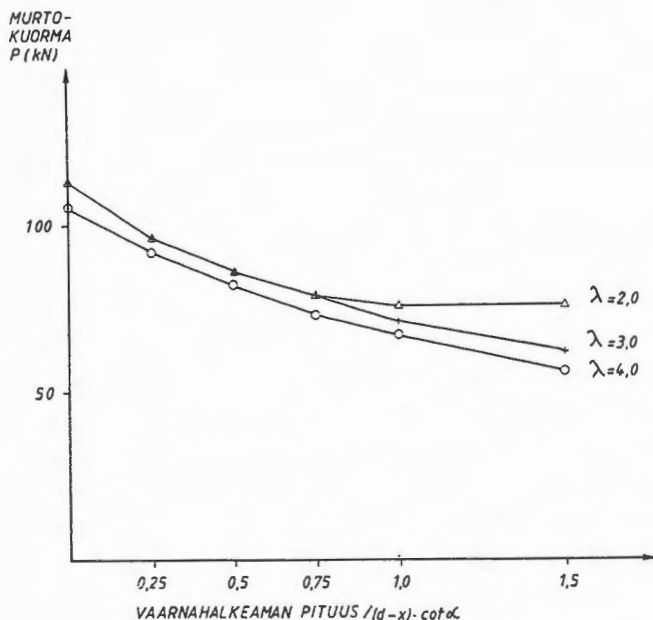
Epäedullisimmassa tapauksessa aliarvioidaan kuormaa n. 20 %, jos todellisen halkeamakulman 25° sijasta käytetään arvoa 30° . Suuremmilla kulmilla tehtävät arviointivirheet aiheuttavat huomattavasti pienemmän virheen murtokuormaan (n. 10 %-yksikköä/ 10°). Koetulosten perusteella halkeamakulman arvo kasvaa leikkausraudoitusmäärän lisääntyessä, jolloin ollaan vähemmän herkällä kulman vaikutuksen alueella.

Kun leikkauskokeissa mitattujen murtohalkeamien kaltevuuksien arvot vaihtelivat välillä $25...35^\circ$ ja runsaasti leikkausraudoitetuissa palkeissa kaltevuudet olivat yli 30° , ovat murtokuormassa tehtävät virheet halkeamakulman yhtälöä (1) käytettäessä pienempiä kuin 10 %.

Vaarnahalkeaman pituuden vaikutus

Vaarnahalkeaman pituus vaikuttaa vain leikkausraudoittamattomien palkkien murtokapasiteettiin. Vaikutus on merkittävä, jos verrataan halkeamatonta vaarnaa ja laskelmissa käytettyä halkeamapituutta (13).

Koehavaintojen perusteella vaarnahalkeama on kuitenkin suuruusluokaltaan lähellä hyödyllisen korkeuden arvoa. Tällöin on perusteltua tarkastella vaarnahalkeaman pituuden vaikutusta käytetyn kokeellisen arvon ympäristössä. Kuvassa 10 on esitetty vaarnahalkeaman pituuden vaikutus 30° :n kaltevuudessa olevan halkeaman kohdalla. Laskentatulokset osoittavat, että vaarnahalkeaman pituuden vaikutus on selvä, mutta kuitenkin kohtuullinen. 20 % virhe halkeaman pituudessa aiheuttaa 5 % virheen murtokuormassa.



Kuva 10. Vaarnahalkeaman pituuden vaikutus murtokuormaan.

KOE- JA LASKENTATULOSTEN VERTAILU

Kirjallisuudessa /2, 4/ esitettyjen teräsbetonirakenteiden kuormituskokeissa saatuja murtokuormia on verrattu kiertymämallilla laskettuihin murtokuormiin. Vertailu on esitetty kuvissa 11, 12 ja 13.

Vertailussa mukana olevissa palkeissa on vaihdeltu mm.:

- palkin korkeutta (80 mm...1250 mm)
- palkin jänneväliä (520 mm...7200 mm)
- leikkaushoikkuutta ($\lambda = 1,0...8,0$)
- pääraudoituksen määrää ja ankkurointipituutta sekä
- leikkausraudoituksen määrää ja suuntaa.

Vertailu osoittaa, että laskettujen murtokuormien ja koetulosten välinen suhde on useimmissa tapauksissa välillä 0,7...1,0. Poikkeuksen tästä tekevät hyvin pienellä leikkausjäteellä ($a/d < 2,0$) kuormitetut rakenteet. Ilmiö on sama tasaisesti kuormitetuilla palkeilla, jolloin a/d :n sijasta tarkastellaan suhdetta $L/(4d)$.

Laskettujen murtokapasiteettien alhaisuus kuormituskokeiden tuloksiin nähden pienillä leikkausjäteiden arvoilla johtuu mahdollisesti osittain mallin puutteista ja osittain siitä, että raudoituksen ankkuroinnissa ei ole otettu huomioon tuen aiheuttaman poikittaisen puristuksen vaikutusta.

Poikittainen puristus lisää paksujen ($d_s > 16$ mm) harjatankojen tartuntavoimia edullisimmillaan jopa 2...3-kertaisiksi /7/. Poikittaisen puristuksen vaikutus riippuu kuitenkin ratkaisevasti tuen ja palkin pinnan välisestä kitkasta, jonka suuruutta ei ole koetulosraporteista pystytty päättelemään.

Poikittainen puristus lisää nimenomaan lyhyittein palkkien raudoituksen ankkurointia, koska kuorma ja tukireaktio ovat suuria ja murtokohta on välittömästi tuen vieressä. Kuvassa 12 esitetty suhteellinen koetulos lyhyimmällä leikkausjäteellä $a/d = 1,0$ nousee arvosta 0,5 arvoon 0,75, jos tartuntajännitys tuella otetaan kaksinkertaisena. Palkissa vaikuttava tukireaktio riittäisi lähteen /7/ mukaan 2,5-kertaisen tartuntajännityksen aiheuttamiseen.

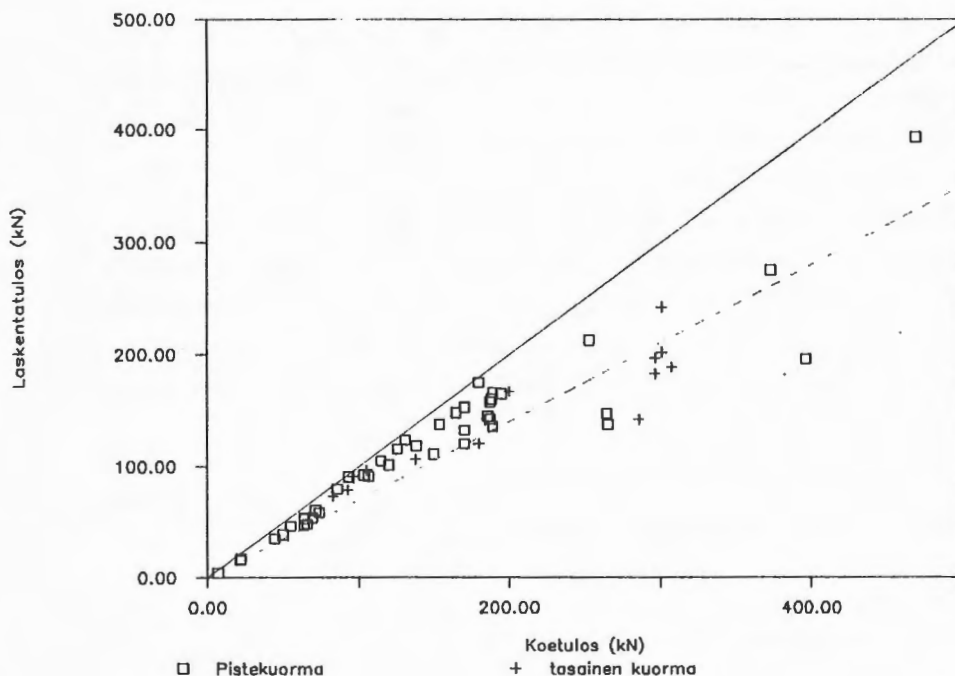
Leikkausjäteellä 3,0 olevien palkkien kuormat kasvavat vain 0...5 %, koska tuen ankkuroinnin vaikutus on vähäinen määräävässä poikkileikkauksessa.

Mikäli poikittaisen puristuksen vaikutus otetaan huomioon raudoituksen ankkuroinnissa, on laskettujen murtokuormien ja koetulosten välinen suhde riippumaton leikkausjätteen suuruudesta leikkausjäteillä $\lambda > 1,0$.

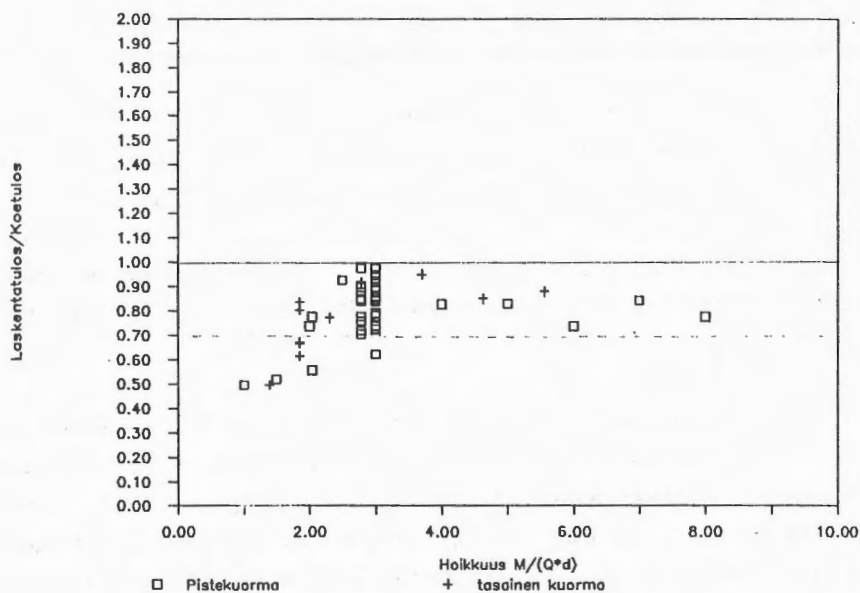
Suhteellisen kuorman suuruus eri rakennekorkeuksilla on tasainen välillä 200...1200 mm. Pienillä rakennekorkeuksilla laskentamenetelmä aliarvio murtokuormaa hieman enemmän kuin suurilla rakennekorkeuksilla.

Laskettujen murtokuormien yleistä poikkeamista koetuloksista alaspäin voidaan pitää toivottavana ilmiönä riittävän varmuuden takaamiseksi.

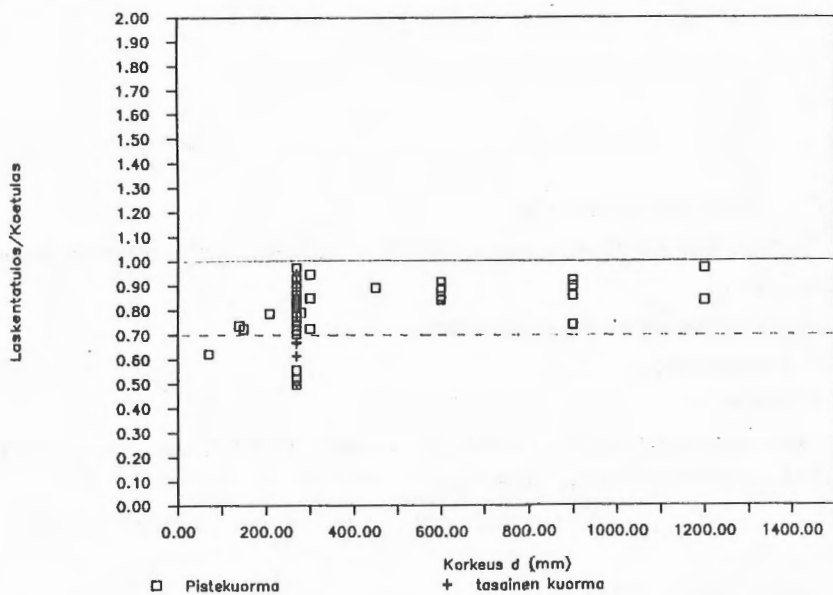
Poikkeama on kuitenkin helposti hallittavissa, koska sitä voidaan muuttaa betonin puristuslujuuden määrittelyä muuttamalla. Laskennassa on käytetty betonin puristuslujuutena suoraan 150 mm:n kuutiolujuutta vastaavaa arvoa. Tavanomaiseen betonirakenteiden mitoittamiseen suositeltua kerrointa 0,7 ei ole käytetty, koska sillä otetaan osittain huomioon halkeamien aiheuttamien venymähuippujen vaikutusta. Tässä menetelmässä kuitenkin määritetään jännitykset venymähuipun perusteella. On ilmeistä, että halkeamien välillä oleva massiivinen betoni jäykistää puristettua vyöhykettä siten, että todellinen toimiva betonin lujuus on suurempi kuin 150 mm:n kuution normilujuus.



Kuva 11. Laskettujen murtokuormien ja koetulosten vertailu.



Kuva 12. Laskettujen murtokuormien ja koetulosten suhde leikkausjänniteen funktiona.



Kuva 13. Laskettujen murtokuormien ja koetulosten suhde palkin tehollisen korkeuden funktiona.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Teräsbetonipalkeille tehtyjen tarkastelujen perusteella esitetty laskentamalli soveltuu hyvin murtokuormien määrittämiseen leikkausraudoitetuille ja leikkausraudoittamattomille, staattisesti määrätyille suorakaide- ja T-palkeille.

Menetelmä ei sovellu esitettyssä muodossa sellaisen I-poikkileikkauksen laskentaan, jossa leveä alalaippa estää kiertymämekanismien syntymisen leikkausrasiteella alueella.

Staattisesti määräämättömille rakenteille voidaan esitettyä laskentamallia soveltaa siten, että rakenteen voimasuurejakautuma ratkaistaan eri kuormitusvaiheissa laskentamallilla määritetyn taivutusmomentti-leikkausvoima-käyritysmäriippuvuuden perusteella. Haluttu rajatila etsitään tällöin kuormitusta vähitellen lisäämällä. Tällaisessa muodossa menetelmää voidaan käyttää myös rakenteen muodonmuutosten laskentaan.

Menetelmän testausta jatketaan I-poikkileikkauksille sekä esijännitetyille rakenteille.

MERKINNÄT

A_c	betonin poikkileikkuspinta-ala
A_{ef}	betonin tehollinen pinta-ala, so. poikkileikkausala, jolle raudoituksen jännitys siirtyy
A_s	raudoituksen poikkileikkauksen pinta-ala
E_s	teräksen kimmomoduli
F_{si}	raudoituksen voima
F_{cx}	betonin puristusvyöhykkeessä vaikuttava normaalivoima rakenteen pituusakselia vastaan kohtisuorassa suunnassa
F_{cy}	betonin puristusvyöhykkeessä vaikuttava normaalivoima rakenteen pituusakselin suunnassa
K	betonin kuutiolujuus
L	jännemitta
L_v	vaarnahalkeaman pituus
R	lineaarisen tartuntaliukumariippuvuuden kulma-kerroin
V	leikkausvoima
V_{cu}	puristusvyöhykkeen leikkauskapasiteetti

V_{cu1}	vetomurron määräämä puristusvyöhykkeen leikkauskapasiteetti
V_{cu2}	puristumurron määräämä puristusvyöhykkeen leikkauskapasiteetti
V_y	leikkausvoima pisteessä y
V_o	leikkausvoima tuella
a	leikkausjänne, betonin veto- ja puristuslujuuden suhde
b	poikkileikkauksen leveys
$\bar{b}$	poikkileikkauksen keskimääräinen leveys A_c/h
b_w	uuman leveys
c	betonipeitteen paksuus
d	tehollinen korkeus
d_s	raudoitustangon paksuus
e	kuormituslevyn leveys
f_c	betonin puristuslujuus
f_{ct}	betonin vetolujuus
f_y	raudoituksen myötölujuus
h	poikkileikkauksen korkeus
k	raudoituksen pinnassa vaikuttavan ja keskimääräisen betonijännityksen suhde
k_τ	kiertymäkerroin
k_v	$= V_c / F_{cy}$
k_f	$= F_{cx} / F_{cy}$
n	teräksen ja betonin kimmomoduulien suhde
p	tartuntaliukumariippuvuuden eksponentti, hydrostaattinen paine (yhtälö 7)
t	raudoituksen ja betonin välinen liukuma
t_y	tartunnan myötöliukuma
t_2	liukuma halkeamassa
u_s	raudoituksen ympäröisyysmitta
w	halkeamaleveys
x	koordinaattiakseli, puristusvyöhykkeen korkeus
y	koordinaattiakseli
θ	kiertymä
α	halkeaman ja rakenteen pituusakselin välinen kulma
α_0	halkeamakulma momentin nollakohdassa
α_y	halkeamakulma pisteessä y
β	puristuslujuuskerroin
γ	raudoituksen ja rakenteen pituusakselin välinen kulma

$\Delta\gamma$	raudoituksen suunnan muutos halkeamassa
ϵ_c	betonin venymä
ϵ_{cu}	betonin murtovenymä
ϵ_{co}	betonin reunapuristuman maksimiarvo
ϵ_{cy}	betonin myötövenymä
ϵ_y	venymä y-akselin suunnassa
λ	leikkaushoikkuus
ρ	suhteellinen raudoitusala
ρ_v	suhteellinen leikkausraudoitusala
σ	normaalijännitys
$\bar{\sigma}$	keskimääräinen normaalijännitys
σ_c	betonin normaalijännitys
σ_y	normaalijännitys y-akselin suunnassa
σ_x	normaalijännitys x-akselin suunnassa
σ_1	pääjännitys
σ_2	pääjännitys
τ	leikkausjännitys, tartuntajännitys
τ_y	tartuntamyötölujuus
τ_2	tartuntajännitys halkeamassa
$\bar{\tau}$	keskimääräinen leikkausjännitys
τ_{oct}	oktaedraalinen leikkausjännitys

KIRJALLISUUS

1. Baumann, T. & Rüschi, H. Schubversuche mit indirekter Krafteinleitung. Versuche zum Studium der Verdübelungswirkung der Biegezugbewehrung eines Stahlbetonbalkens. Berlin 1970. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 210. 58 s. + liitt. 25 s.
2. Bhal, N. S. Über die Einfluss der Balkenhöhe auf die Schubtragfähigkeit von einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung. Stuttgart 1986, Otto-Graf-Institut, Schriftenreihe Heft 35. 124 s.
3. Krefeld, W. & Thurston, C. Contribution of longitudinal steel to shear resistance of reinforced concrete beams. Journal of the American Concrete Institute 63(1966)3, s. 325 - 343.
4. Leonhardt, F. & Walther, R. Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung. Berlin 1962. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 151. 69 s. + liitt. 12 s.
5. Mikkola, M. & Schnobrich, W. C. Material behaviour characteristics for reinforced concrete shells stressed beyond the elastic range. Urbana 1970. Univ. III, Civ. Eng. Stud., Struct. Res. Ser. No. 367. 47 s.
6. Nykyri, P. Raudoituksen liukuman ja jännityksen määrittäminen halkeamassa tartunta-liukumariippuvuuden perusteella. Espoo 1986, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 419. 62 s.
7. Robins, P. J. & Standish, G. I. The influence of lateral pressure upon anchorage bond. Magazine of concrete research 36(1984)128, s. 195 - 202.
8. Sarja, A. & Nykyri, P. Rotational model for the determination of the shear capacity of reinforced and prestressed concrete structures. Espoo 1982, Technical Research Centre of Finland, Research Report 76. 19 s.
9. Tepfers, R. Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars. Magazine of concrete research 31(1979)106, s. 3 - 12.

10. Walther, R. Über die Berechnung der Schubtragfähigkeit von Stahlbetonbalken. Schubbruchtheorie. Beton- und Stahlbetonbau 57(1962)11, s. 261 - 271.

Pekka Nykyri, dipl.ins., Valtion teknillinen tutkimuskeskus,
betoni- ja silikaattitekniikan laboratorio