



Jännebetonipalkin puristusmurtokestävyys

Betonitutkimusseminaari

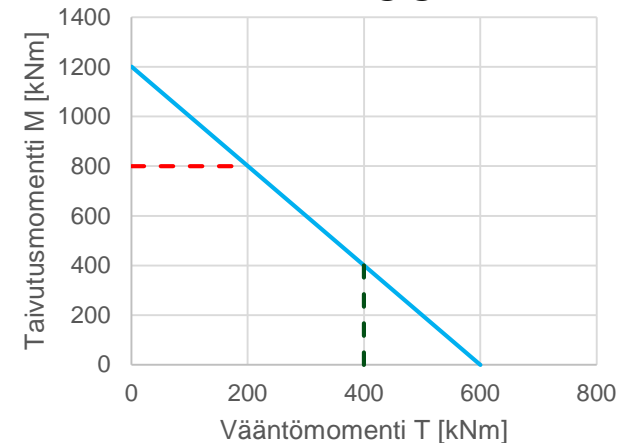
Messukeskus, 31.10.2018

Joonas Tulonen, Tohtorikoulutettava, Tampereen
teknillinen yliopisto

Tutkimusongelma, lähtökohdat

- Tarve: tuntea jännitetyn siltarakenteen väännön, leikkauksen ja taivutuksen yhteisvaikutukset
 - Varsinkin tilanteessa, jossa rakenne on vaurioitunut (jätteitä poikki)
- Ongelma: Suunnittelumenetelmät (NCCI 2, EN 1992-1-1 & 1992-2) soveltuvat uuden rakenteen suunnitteluun
 - Eivät kuvaa rakenteen todellista toimintaa eri kuormitusasteilla
 - vrt. momentti-käyritymän laskenta taivutuksen osalta
 - Kantavuuslaskennassa/tutkimuksessa tarve olisi tarkemmille menetelmille
- Tutkitaan: tarkempien menetelmien (CFT, MCFT, RA-STM, SMM-PC, jne..) soveltamista jännitettyjen suomalaisten siltojen

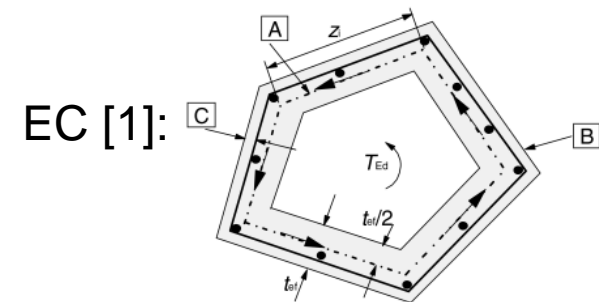
NCCI 2:



— $M_d/M_{pl,Rd,max} + T_d/T_{u,max} = 1$

- - - TR_d

- - - MR_d



(2) Väännön ja leikkauksen vaikutukset sekä kotelo- että umpisauvoissa voidaan laskea yhteen, kun oletetaan sama arvo puristussauvan kaltevuuskulmalle θ . Kohdassa 6.2.3 (2) esitetyt kaltevuuskulman θ rajat ovat myös täysin käyttökelpoisia leikkauksen ja väännön yhdistelmän tapauksessa.

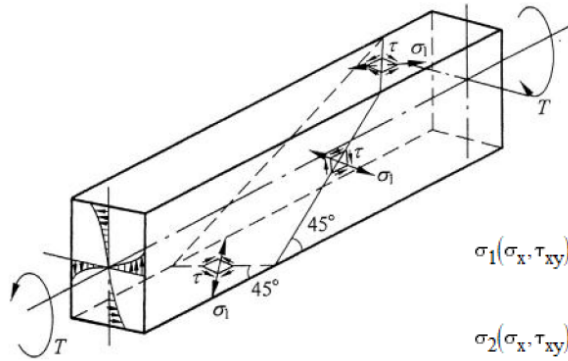
Leikkauksen ja väännön kuormittaman rakenneosan suurin kestävyys saadaan kohdasta 6.3.2 (4).

**ENTÄ VÄÄNTÖ+TAIVUTUS...?
VOIKO KULMAN VALITA AINA?**



Toiminta ennen halkeilua

- Ennen halkeilua TB (ja JB) rakenne toimii homogeenisena poikkileikkauksena ja Saint-Venant teoriaa voidaan hyödyntää
- Pääjännitykset rakenteen pinnalla voidaan määrittää Mohrin ympyrän avulla
- Erilaiset betonin materiaalimallit soveltuvat usein vain hauraan murtokriteerin kuvaamiseen (esim Mohr-Coulomb)



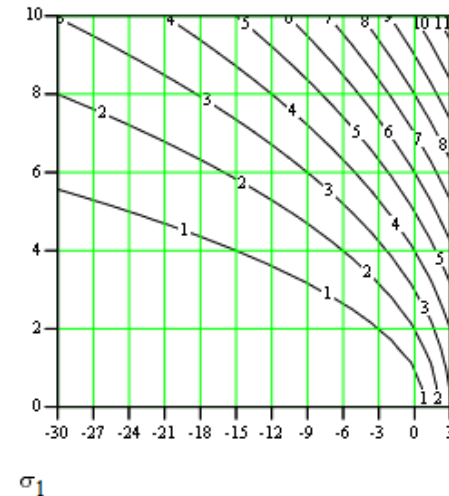
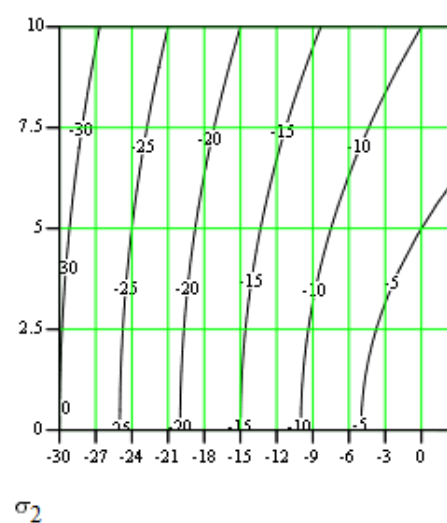
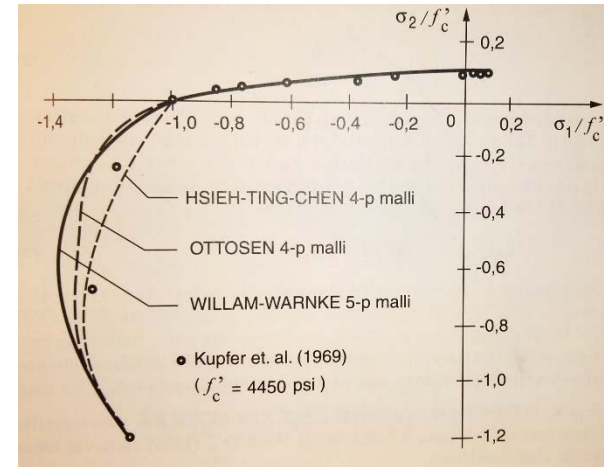
[2]

$$\sigma_1(\sigma_x, \tau_{xy}) = \frac{1}{2}(\sigma_x) + \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_x)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_2(\sigma_x, \tau_{xy}) = \frac{1}{2}(\sigma_x) - \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_x)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{\max}(\sigma_x, \tau_{xy}) = \frac{1}{2}(\sigma_1(\sigma_x, \tau_{xy}) - \sigma_2(\sigma_x, \tau_{xy}))$$

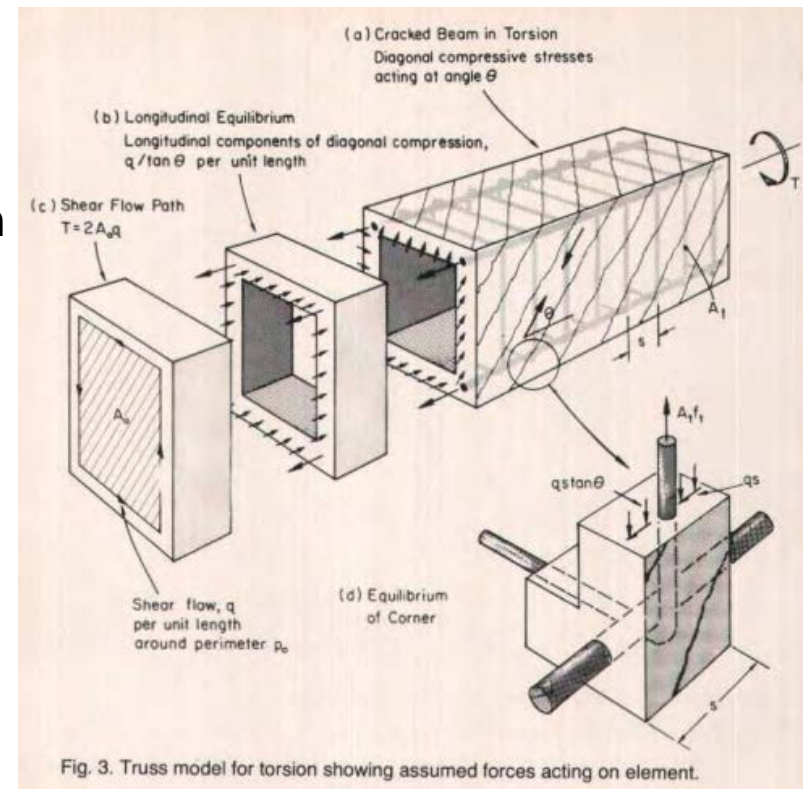
[3]



...ja halkeilun jälkeen

- Kun päävetojännitys (taivutuksesta, leikkauksesta tai väännöstä) ylittyy jossain rakenteen pinnalla, rakenne halkeaa ja toiminta muuttuu
 - Samalla vapautuu usein myös osa yhteensopivuusehdoista/pakkomomenteista aiheutuvista rasituksista
- Eräs tapa kuvata rakennetta vääntöhalkeilun jälkeen on muuttaa rakenne laskennallisesti kotelorakenteeksi tai ristikkorakenteeksi
 - Analogia perustuu siihen, että väännön aiheuttamat rasitukset ovat suurimmat rakenteen reunoilla, jossa myös vääntöä vastustava rauditus sijaitsee

[4]



$$\tau = \frac{T}{2A_k t}$$

τ = leikkausjännitys seinämässä

T = vääntömomentti

A_k = kotelon seinämien keskilinjan rajaama ala
 t = seinämän vahvuus (yleensä 2xraudoituksen etäisyys pinnasta)



Compression Field Theory

- Halkeaman avautumisen jälkeen rakenteen jännitystila on monimutkainen ja sen tarkemmaksi tuntemiseksi kehitettiin 70-80 – luvuilla otsikon mukainen menetelmä
- Vaikka betoni halkeaa kantaa se edelleen kuormaa halkeamiin nähden kohtisuorassa
 - Pääjännitysten suunta muuttuu halkeilua edeltävästä suunnasta
 - Pääjännitysten suunta (eli myös halkeamien) suunta muuttuu kuormituksen lisääntyessä
- Pääoletuksena CFT:ssä on, että päävenymien ja pääjännitysten suunnat ovat samat
 - Asia on osoitettu kokeilla pitävän riittävällä tarkkuudella paikkansa
- Menetelmässä huomioidaan myös betonin puristuslujuuden heikkeneminen poikittaisen päävenymän vaikuttaessa

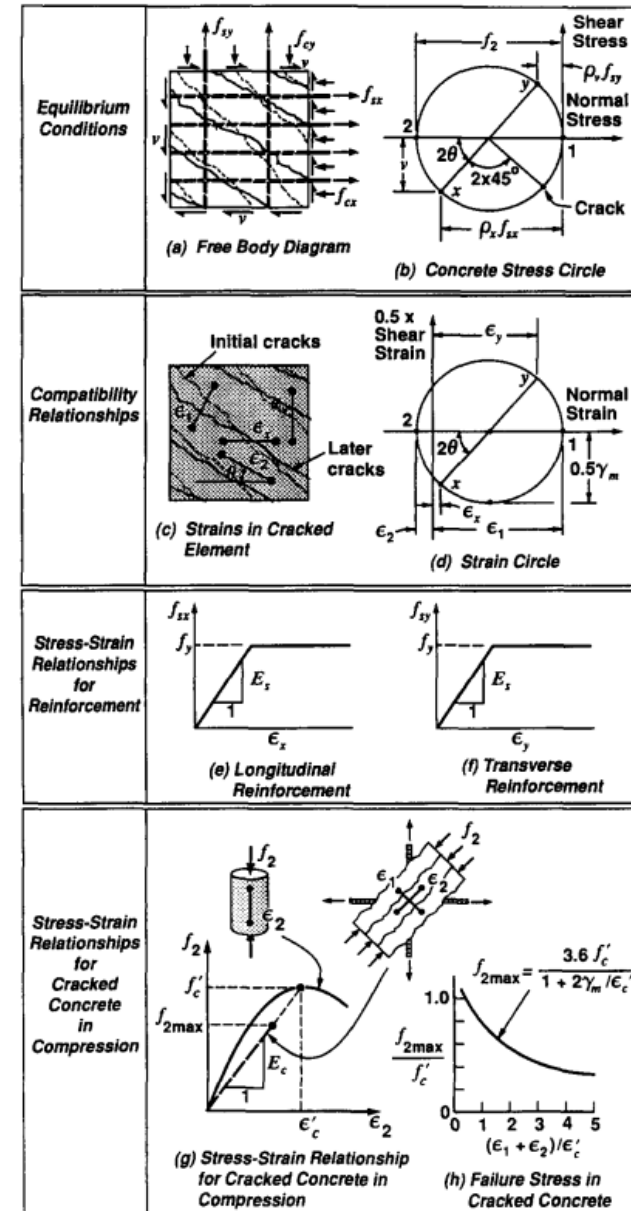


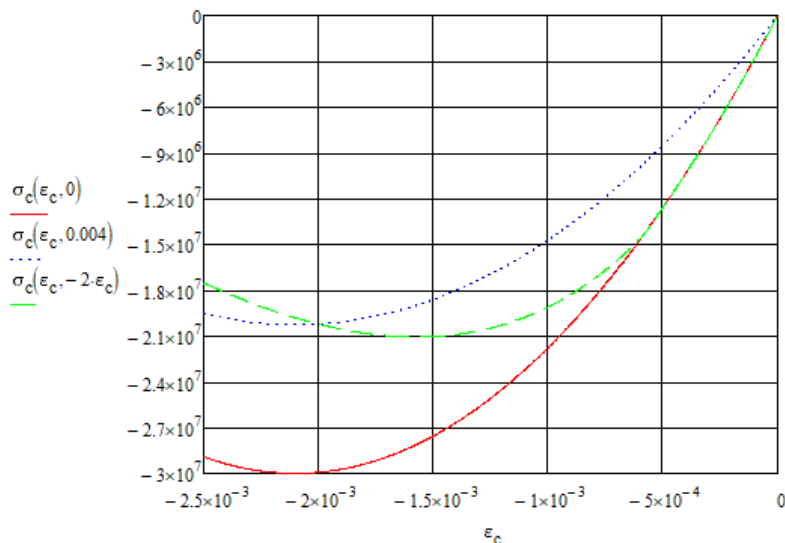
FIG. 4. Compression Field Theory (Mitchell and Collins 1974)



Puristettu ja poikittain vedetty betoni

- Betonin puristuslujuuden ja poikittaisen venymän yhteyttä on tutkittu lukuisilla betonipaneelien leikkauskokeilla ja sen kuvaamiseen on esitetty useita malleja
- Alunperin Mitchell ja Collinsin mukaan yhteys oli: $f_{2max} = \frac{f'_c}{0,8+170\varepsilon_1} \leq f'_c$
 - Ja täten materiaalimalli: $\sigma_c(\varepsilon_2) = f_{2max} \left(2 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right)$
- Täten betonin jännitys-venymä -yhteys riippuu myös venymien esiintymisjärjestyksestä

$$\sigma_c(\varepsilon_c, \varepsilon_1) = \begin{cases} \left[\max \left(\frac{-30\text{MPa}}{0,8 + 170\varepsilon_1}, -30\text{MPa} \right) \cdot \left[2 \frac{-\varepsilon_c}{0,0021} - \left(\frac{-\varepsilon_c}{0,0021} \right)^2 \right] \right] & \text{if } -0,0025 \leq \varepsilon_c \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



[5]

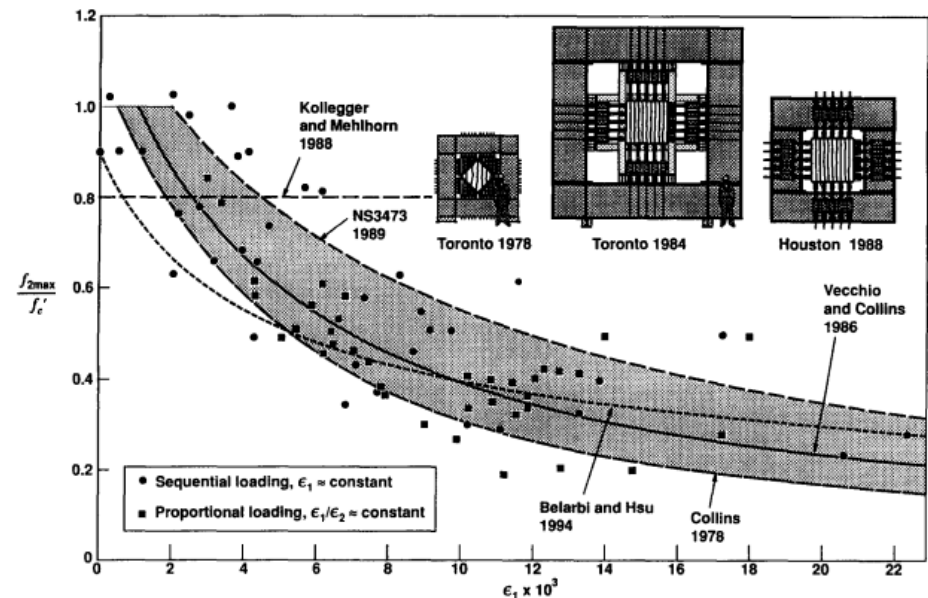
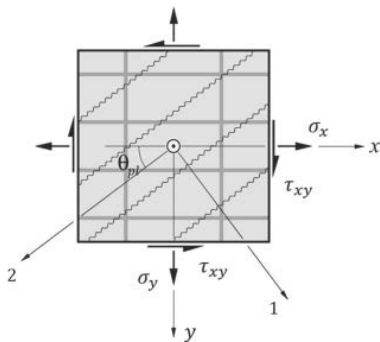


FIG. 5. Maximum Concrete Compressive Stress as Function of Principal Tensile Strain

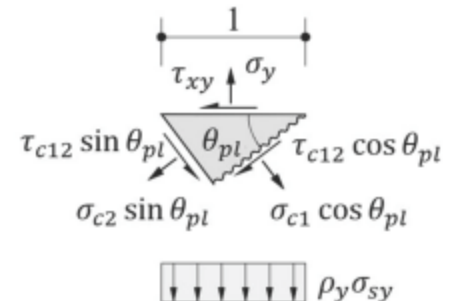
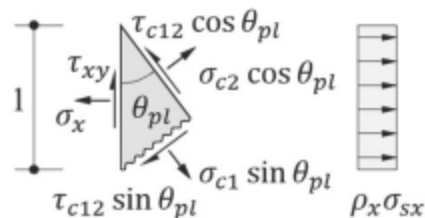
CFT tasapainoyhtälöt

- Kirjoittamalla haljenneeseen betonipaneelin vaikuttavien ulkoisten kuormien ja sekä sen sisäisten rasitusten tasapainoyhtälöt, sekä Mohrin venymäympyrään perustuva Wagnerin yhtälö, voidaan rakenteen venymätila ja sitä vastaavat sisäiset rasitukset ratkaista
- Jos materiaalimallit ovat lineaarisia saadaan tasapainoyhtälöt ratkaistua yksinkertaisesti ratkaisemalla yhtälöryhmästä puristusdiagonaalin suuntakulma θ_{pl}
- Epälineaarisia materiaalimalleja käytettäessä täytyy ratkaista vähintään kaksi muuttujaa



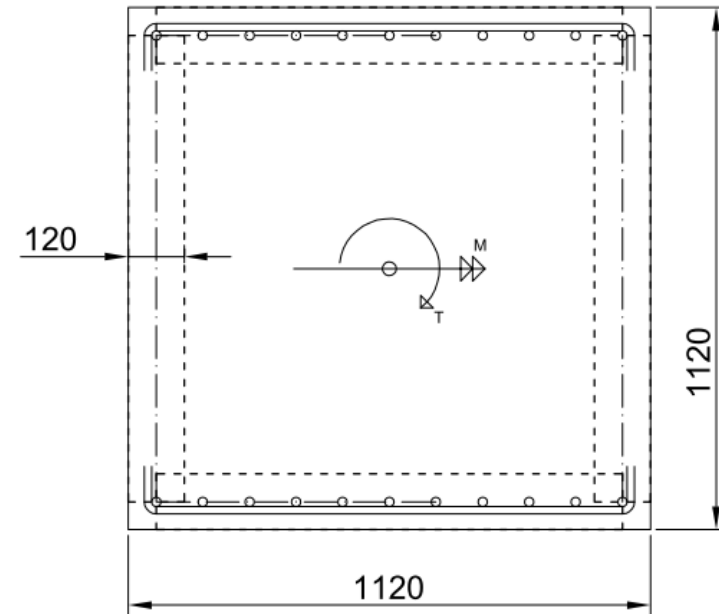
$$\begin{aligned}\sigma_x &= \rho_x \sigma_{sx} + \sigma_{c2} \cos^2 \theta_{pl} \\ \sigma_y &= \rho_y \sigma_{sy} + \sigma_{c2} \sin^2 \theta_{pl} \\ \tau_{xy} &= -\sigma_{c2} \sin \theta_{pl} \cos \theta_{pl} \\ \cot^2 \theta_{pl} &= \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_2}{\varepsilon_x - \varepsilon_2}\end{aligned}$$

[6]



Väännön ja taivutuksen yhteisvaikutus

- Tarkastellaan oheisen kuvan mukaisen poikkileikkauksen puristetun ja vedetyn reunan leikkauskestävyyttä (väännön aiheuttama) eri puristusjännityksen arvoilla
- Kotelopoikkileikkauksen seinämien keskilinja kulkee pituussuunnan terästen kautta
- Oletetaan, että pystyseinämät eivät rajoita vääntökestävyyttä
- Tarkastellaan ylä/alareunaa kuvaavaan betonipaneelin toimintaa eri raudoitussuhteilla
- Teräksillä bilineaarinen plastinen materiaalmalli ($f_y = 500 \text{ MPa}$)
- Betonin materiaalmalli Mitchell&Collins mukainen ($f'_c = 30 \text{ MPa}$)
- Ei huomioida puristusteräksiä



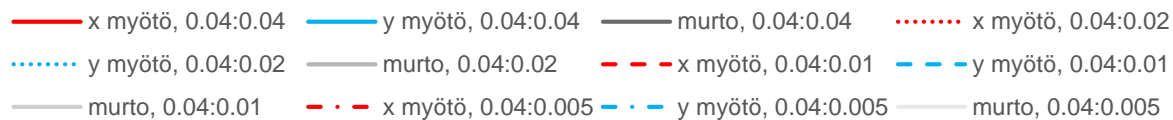
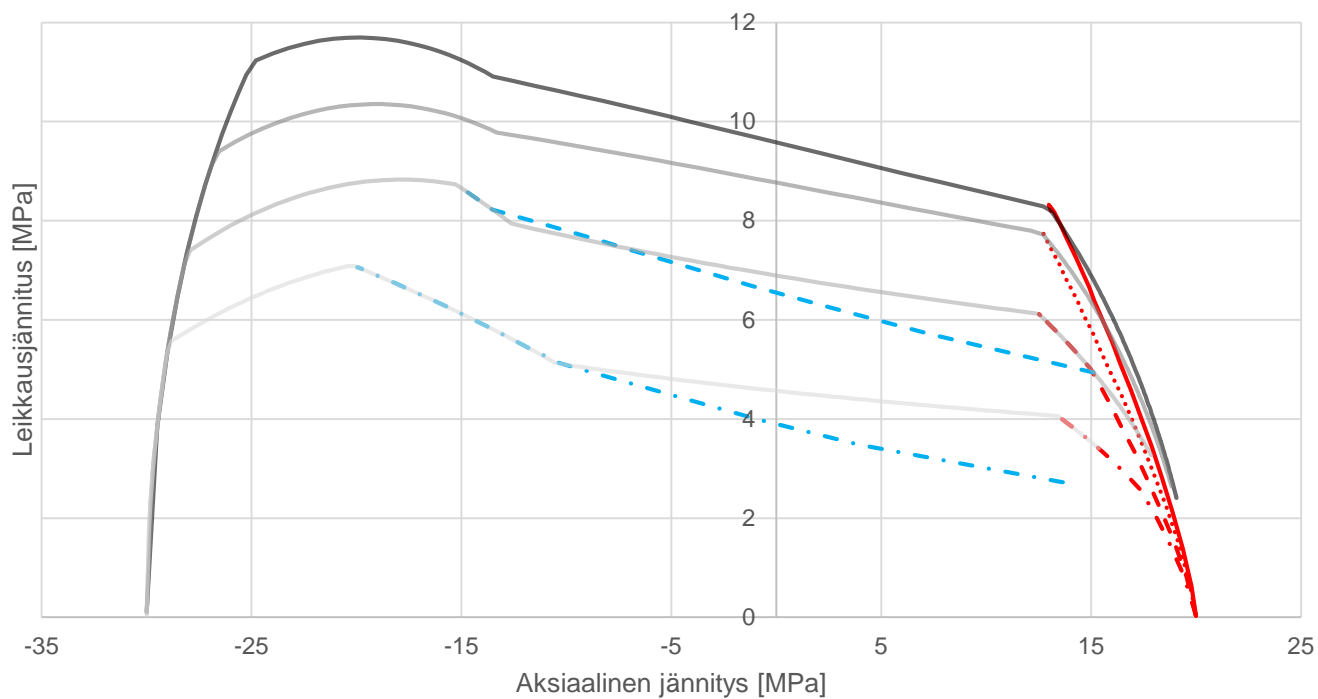
Raudoitussuhteet, kun $t=120 \text{ mm}$:

- 4 %, vastaa n. T16 k42 / T25 k100
- 2 %, vastaa n. T16 k85 / T25 k200
- 1 %, vastaa n. T12 k100 / T16 k170
- 0,5%, vastaa n. T12 k190

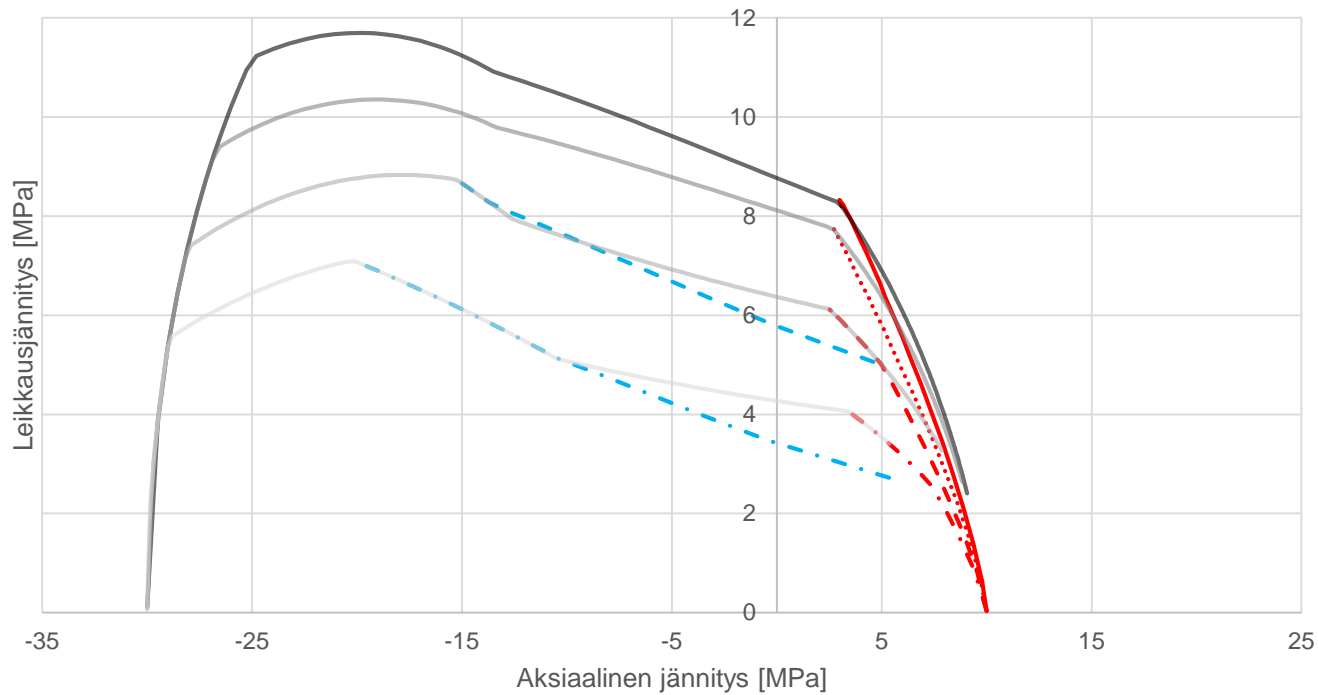
Asmin,pit = n. T20 k200 (n. 1,3 %)

Asmin,poik = T12 k200

Väännön ja taivutuksen yhteisvaikutus 1



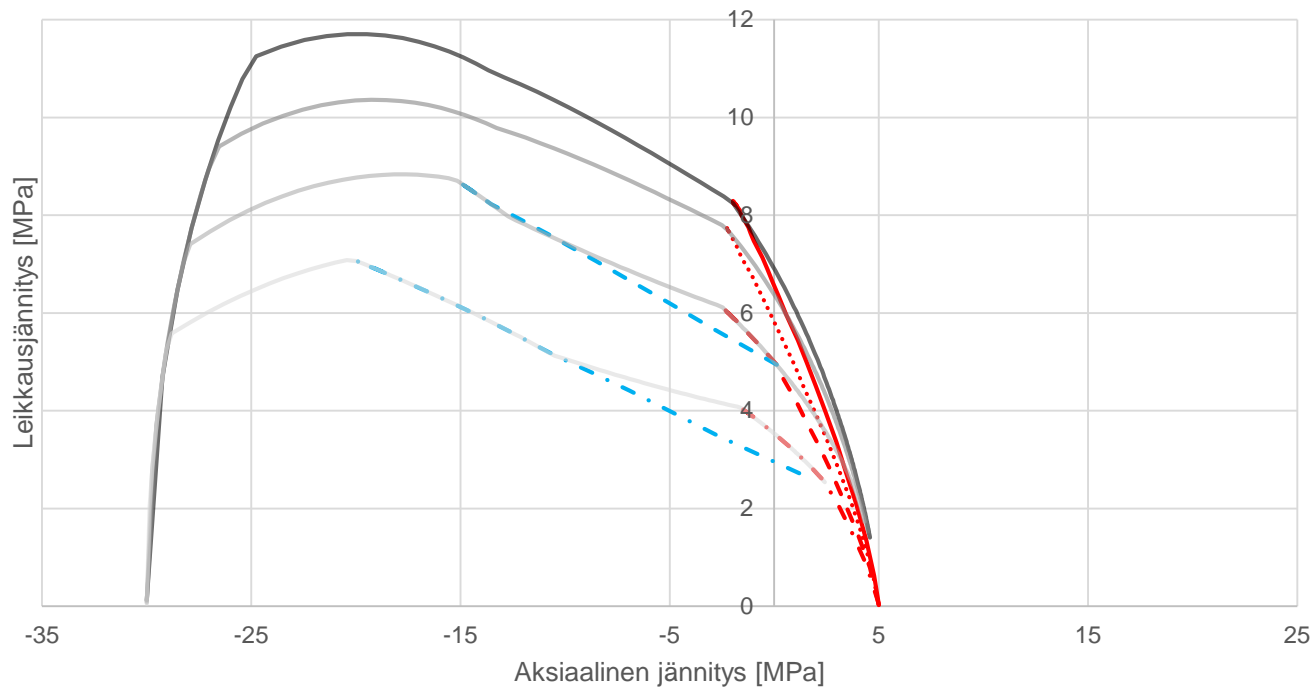
Väännön ja taivutuksen yhteisvaikutus 2



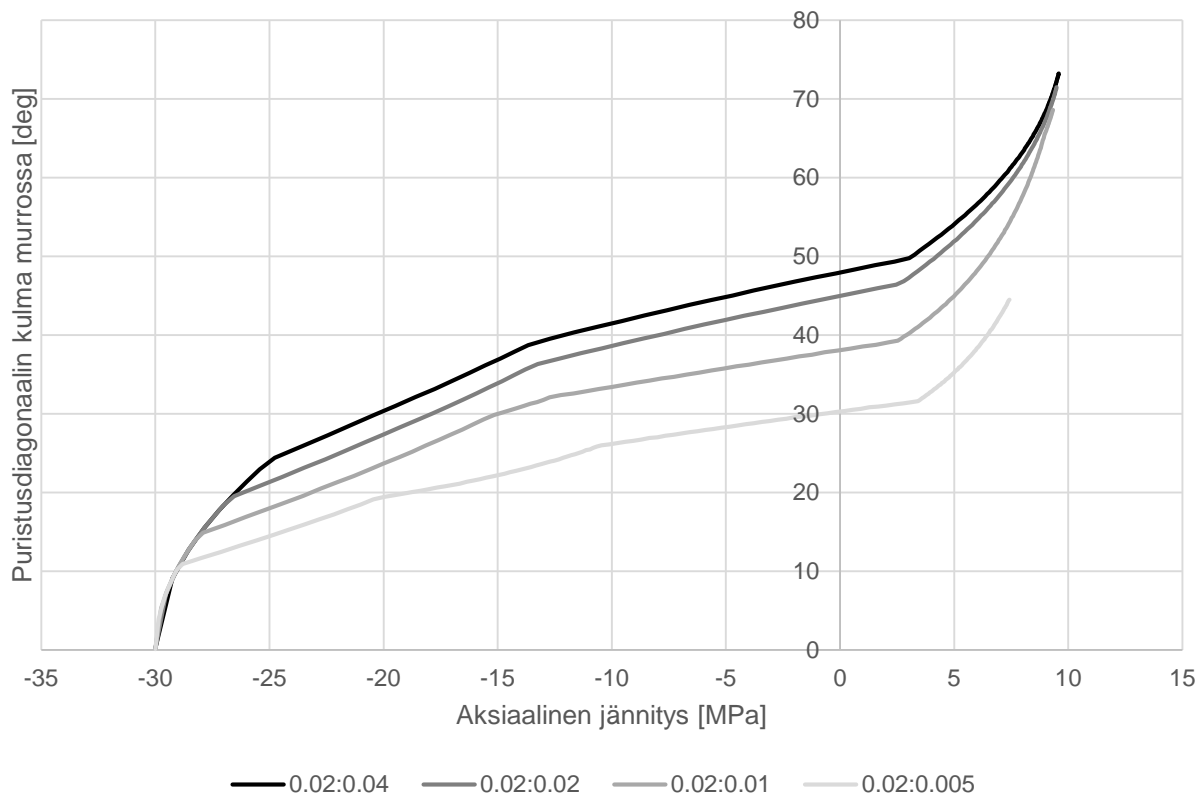
- x myötö, 0.02:0.04
- y myötö, 0.02:0.04
- murto, 0.02:0.04
- ... x myötö, 0.02:0.02
- ... y myötö, 0.02:0.02
- murto, 0.02:0.02
- - x myötö, 0.02:0.01
- - y myötö, 0.02:0.01
- murto, 0.02:0.01
- · x myötö, 0.02:0.005
- · y myötö, 0.02:0.005
- murto, 0.02:0.005



Väännön ja taivutuksen yhteisvaikutus 3



Puristusdiagonaalin suuntakulma murrossa

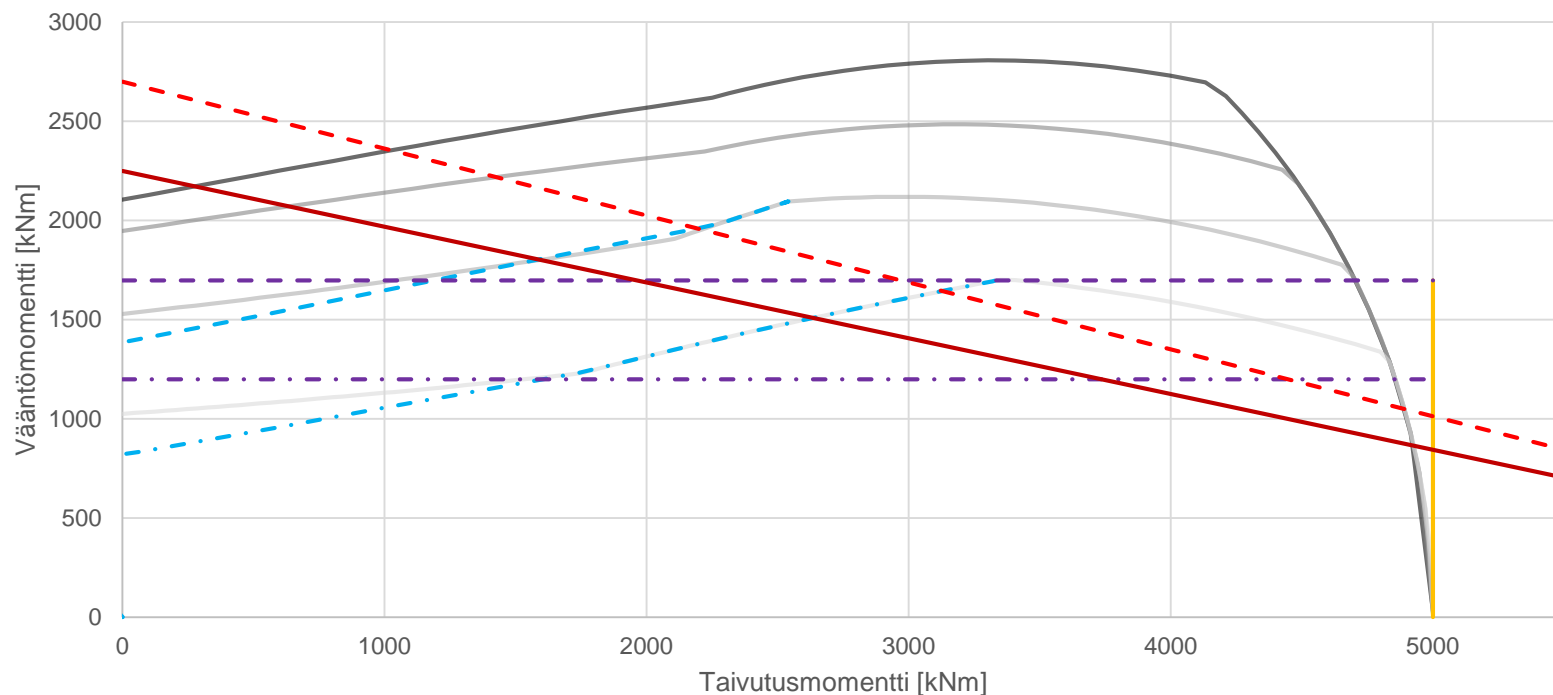


Paneelien rasitukset palkin voimasuureina

- Tarkastellaan betonin puristusmurtoa tapauksessa jossa pituussuunnan raudoitussuhde paneelissa on 2 %.
 - Otaksutaan, että rakenteessa on esijännitettyjä jännepunoksia siten, että $M_{Rd} = 5000 \text{ kNm}$ ja $M_{pl,Rdmax} = 8000 \text{ kNm}$
 - Otaksutaan myös, että puristetun reunan puristusjännitys lisääntyy lineaarisesti taivutusmomentin kasvaessa
 - Leikkausjännitystä vastaava vääntömomentti lasketaan: $T_{Rd} = \tau^2 * A_k * t = \tau^2 * 1,0 \text{ m}^2 * 0,12 \text{ m}$
- Verrataan NCCI 2 laskentaan
 - Poikkileikkauksen maksimi vääntökestävyys: $T_{umax} = 0,25 * f'_c * W_{tr} = 0,25 * 30 \text{ MPa} * 2 * 1,0 \text{ m}^2 * 0,3 * (1,0 \text{ m} / 2) = 2250 \text{ kNm}$ (2700 kNm, jos hyödynnetään esijännitystä)
 - Raudoitussuhteen (poikittainen haka) funktiona vääntökestävyydet ovat:
 - 0,5 %: 1200 kNm (sallittu raudoitussuhde ylittyy)
 - 1 %: 1697 kNm
 - 2 %: 2400 kNm
 - 4 %: 3394 kNm



Paneelien rasitukset palkin voimasuureina vrt. NCCI 2

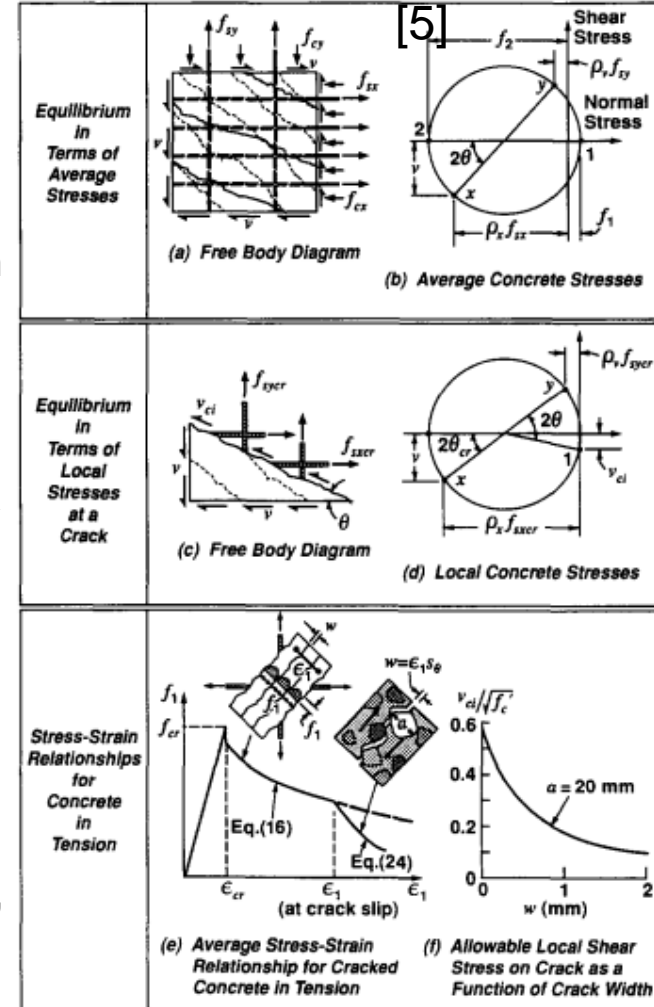


- CFT murto 0.04
- CFT murto 0.01
- - CFT myötö 0.01
- MRd
- - TRd 0.01
- · - TRd 0.005
- CFT murto 0.02
- CFT murto 0.005
- · - CFT myötö 0.005
- · - TRd 0.005
- T/Tumax + M/MplRdmax <1
- - T/Tumax + M/MplRdmax <1 (esijännitys huomioitu)



CFTstä jatkokehityt versiot

- Modified Compression Field Theory (MCFT) kehitettiin jatkoksi perusteorialle ottamaan huomioon vetojäykistysvaikutus ja halkeamassa vaikuttava leikkausjännitys
 - Tulokset vastasivat tällöin paremmin betonipaneelien kuormituskokeita
- Rotating-Angle Softened-Truss Model (RA-STM) on lähes vastaava MCFT:n kanssa, mutta raudoitusten jännityksinä käytettiin keskimääräisiä arvoja ja jännitys-muodonmuutos -yhteyttä muokattiin ottamaan tämä huomioon
- Softened Membrane Model (SMM) ottaa lisäksi huomioon Poisson vakion vaikutuksen ja pyrkii täten ennustamaan tarkemmin murron jälkeistä tilaa
- Kaikista näistä on myös kehitelty erilaisia ”refined” ja ”improved” malleja tiettyjä käyttötarkoituksia varten



Laskentamallien rajoitteet?

Jatkotutkimus

- Ottaako paneelianalogia riittävästi huomioon palkin betoniytimen jäykistävän vaikutuksen?
 - On havaittu, että samalla tavalla raudoitetuilla ontoilla ja umpinaisilla poikkileikkauksilla saavutetaan erilaisia vääntökestävyyksiä
 - Entä tilanne jännitetyn palkin tapauksessa, neutraaliakseli on usein korkealla, ja iso osa rakenteesta on puristettuna
- Menetelmässä ei myöskään ole huomioitu (leikkauksen ja väännön tapauksessa) rakenteessa sisempänä olevia leikkaushakoja
 - Tavallinen ratkaisu suomalaisissa siltapalkeissa
- Ovatko siltojen liikennekuormien aiheuttamat rasitukset kuinka kriittisiä rakenteen puristumurron kannalta?

[7]

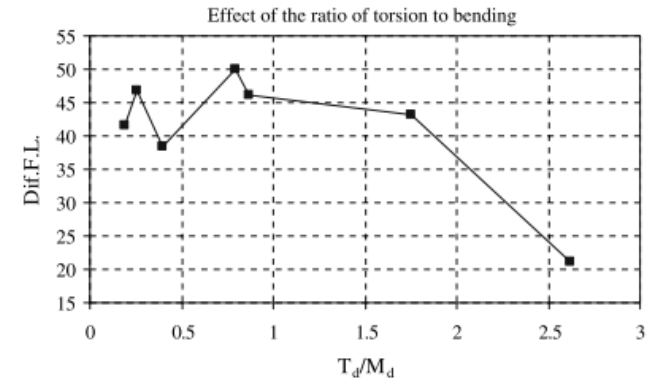


Fig. 12 Effect of the T_d/M_d ratio on the difference in failure loads between solid and hollow beams (a) Dimensions and levels (b) Centre line of torsional shear flow



KIITOS HUOMIOSTANNE!

Kysymyksiä...?

Kuvalähteet

- [1] SFS-EN 1992-1-1
- [2] Guo, Zhennai, Principles of Reinforced Concrete, 2014, Elsevier Science, Saint Louis
- [3] Salmi, Virtanen, Materiaalien mekaniikka, 2008, Klingendahl Paino Oy, Tampere
- [4] Collins, Mitchell, Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams, 1980, PCI Journal/September-October
- [5] ASCE.ACI Committee 445, Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete, 1998, Journal of Structural Engineering, 124(12): 1375-1417
- [6] Pulkkinen, Diplomityö: Betonisen palkin puristusmurtokestävyys yhdistetyillä rasiuksilla, 2017, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere
- [7] Alnuaimi, Al-Jabri, Hago, Comparison between solid and hollow reinforced concrete beams, 2008, Materials and Structures, 41:269-286

