KUITUBETONIN MEKANIIKAN PERUSPERIAATTEITA

Rakenteiden Mekaniikka
6 (1973) 3-4, s. 123...
146, Rakenteiden Mekaniikan Seura, Helsinki

S.E. PIHLAJAVAARA

1. JOHDANTO

Lisättäessä aineeseen kuituja tavoitteena on entistä lujempien ja käyttökelpoisempien aineiden aikaansaaminen. Kun tavallisen betonin heikkoutena on sen hauraus ja mitätön vetolujuus, kuitujen lisäämisen tavoitteena on parantaa betonin vetolujuutta, taivutusvetolujuutta, iskulujuutta, murtositkeyttä ja koossapysyvyyttä. Kuitubetonissa on käytetty keraamisia kuituja, lasikuituja, teräskuituja ja muita metallikuituja (lankoja), asbestikuituja ja orgaanisia kuituja. Tavallisesti kuidut tai langat ovat katkottuja ja nykyisin noin 2...4 cm:n pituisia. Kuitubetonin ensisijaisina sovellutuskohteina ovat erilaiset rakennuslevyt, päällysteet ja päällysrakenteet (tiet, lentokenttien kiitoradat, lattiat) sekä putket ja perustuspaalut. Jo vanhastaan runsaasti käytetyn asbestikuidun ohella ovat teräskuidut (teräslangat), lasikuidut ja muovikuidut osoittautuneet laajimmin sovellutuskelpoisiksi. Kuitujen osuus on kuitubetonissa yleensä muutamia tilavuusprosentteja. Kuitubetonin vetolujuus, taivutusvetolujuus ja iskunkestävyys voivat olla moninkertaiset tavalliseen betoniin verrattuna. Kuitubetonin ominaisuuksia ja käyttöä on tarkasteltu laajemmin kirjoituksessa [1].

Kuituvahvisteisten aineiden laajempi ja yhdenmukaisempi teoreettinen käsittely on alkanut 1960-luvun alussa, siis vasta kymmenkunta vuotta sitten. On kuitenkin huomattava, että kuituvahvisteisten aineiden käyttö on alkanut jo useita tuhansia vuosia sitten (olkivahvisteinen savi jne.). Asbestikuituvahvisteista betonia valmistettiin Kanadassa ja Venäjällä jo 100 vuotta sitten. Ludwig Hatschek sai v. 1901 Itävalta-Unkarin patentin kuitubetonilevyille "Verfahren zur Herstellung von Kunststeinplatten aus Faserstoffen und hydraulischen Bindemitteln". Kehitys jatkui ja mm. saksalainen normi Deutsche Normen DIN 274 1936 "Asbestzement-Dachplatten und Asbestzement-Tafeln" ilmestyi 1930-luvulla. Nämä esimerkit osoittavat, että kuitubetoneista oli asbestikuituvahvisteinen betoni jo varhain saavuttanut normituskelpoisen kehitysvaiheen. Jo 1900-luvun ensimmäisen vuosikymmenen aikana perustettiin asbestisementtitehtaita kahteentoista eri maahan mm. Ruotsiin. Varhaisimpia kuitubetonia käsitteleviä kirjoituksia lienevät Porter'in [2] vuodelta 1910, jossa puhutaan lyhyiden teräslankojen käytöstä, ja Weniger'in "Die Asbestzementskiefer-Fabrikation" [3] vuodelta 1914. Siis teräskuitujenkin käyttöä betonissa harkittiin jo tämän vuosisadan alussa.

Merkittävää on myös, että lasikuituvahvisteinen muovi alkoi voittokulkunsa 1950-luvun alussa. On syytä todeta, että kuituvahvisteiset aineet yleensä ja kuituvahvisteinen betoni erityisesti kuuluvat yhdistettyjen aineiden eli komposiittiaineiden laajaan perheeseen. Rakennusainetieteen kannalta lienee ensimmäinen yhdistettyjä aineita käsittelevä kokonaisesitys Holliday'n kokoama oppikirjatyyppinen teos "Composite materials" [4] vuodelta 1966, jossa käsitellään myös kuituvahvisteisia aineita.

1960-luvun kuituvahvisteisten aineiden teoriaa käsittelevistä kirjoista lienevät keskeisimmät ja helpoimmin sovellutuskelpoiset kirjallisuusluettelon [5] ja [6].

Syvemmän oivalluksen kannalta on tärkeätä, että ainakin joitakin keskeisten yhtälöiden johtoja esitetään varsin yksityiskohtaisesti niinkuin yllämainituissa kirjoissa. Krenchelin kirjassa [6] on keskeisessä asemassa kuitubetoni.

Kuitenkin on aiheellista todeta, että kuituvahvisteisten aineiden teoreettinen käsittely on siirtynyt aimo askeleen eteenpäin 1960-luvun keskivälin yleistasosta, vaikkei perustietämyksen kannalta mitään erikoista olekaan tässä suhteessa tapahtunut. Käsityksen kehityksestä antanee ehkä julkaisu [7], mutta luultavasti parhaiten tällä alalla toimiva aikakauslehdistö.

Kuituvahvisteisten aineiden käyttäytymisen teoria ei yleensä ole varsin helposti lukijalle antautuvaa, koska käsitykset eri kirjallisuuslähteissä ovat vielä horjuvia ja ainakin ensisilmäyksellä sekaviakin. Eräs sekavuutta aiheuttava tekijä on matriisiaineen ominaisuuksien mahdollinen huomattavakin muuttuminen kuitumäärän kasvaessa. Tämän kirjoituksen tarkoituksena on esittää yksinkertainen johdatus kuituvahvisteisten aineiden, erityisesti kuitubetonin mekaniikan perusteisiin.

Merkintäluettelo ja kuidun toimintaa käsittelevä liite ovat kirjoituksen lopussa.

2. KUITUBETONIN AINEOSIEN OMINAISUUKSIA

Kuituvahvisteisten aineiden ja siis myös kuitubetonin käyttäytyminen jännitystilassa on moninainen, jonka vuoksi teoreettinen käsittely voi lähteä monelta eri pohjalta. Teorioiden tarkistamista varten tarvitaan niihin sisältyvien muuttujien ja parametrien lukuarvoja. Koska kuitujen lisäämisen ensisijaisena tarkoituksena on kuitubetonin vetolujuusominaisuuksien parantaminen, esitetään seuraavassa taulukossa 1 kuitubetonin aineosien vetolujuusominaisuuksien keskimääräisiä arvoja.

Taulukko 1. Kuitubetonin aineosien ominaisuuksia.

Aine	Veto-lujuus kp/cm^2	Kimmo-moduuli kp/cm^2	Murto-venymä %	Tiheys g/cm^3
Sementtikivi	70	$2 \cdot 10^5$	0,03	2,0
Sementtilaasti	50	$3 \cdot 10^5$	0,02	2,3
Betoni	40	$3 \cdot 10^5$	0,01	2,4
Teräskuitu	$10 \cdot 10^3$	$21 \cdot 10^5$	> 5	7,8
Lasikuitu	$15 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^5$	2	2,6
Asbestikuitu	$7 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^5$	0,5	3,0
Nylon	$5 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^5$	20	0,9
Rock Wool	$7 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^5$	0,5	2,7

Uusimmista kuitubetoneista ovat teräskuitu- ja lasikuitubetonit tärkeimmät, jonka vuoksi seuraavassa esitetään joitakin näihin liittyviä vertailuja.

$$\frac{\text{Teräkuidun vetolujuus}}{\text{Betonin vetolujuus}} = \frac{100 \cdot 10^2}{50} = 200$$

$$\frac{\text{Teräskuidun kimmomoduuli}}{\text{Betonin kimmomoduuli}} = \frac{21 \cdot 10^5}{2,1 \cdot 10^5} = 10$$

$$\frac{\text{Lasikuidun vetolujuus}}{\text{Betonin vetolujuus}} = \frac{150 \cdot 10^2}{50} = 300$$

$$\frac{\text{Lasikuidun kimmomoduuli}}{\text{Betonin kimmomoduuli}} = \frac{7 \cdot 10^5}{2{,}3 \cdot 10^5} = 3$$

Jos oletamme teräskuidun ja lasikuidun kimmoisaksi venymäksi 0,2 %, niin betonin murtovenymän 0,02 % suhde tähän on 1:10

$$\frac{\text{teräs- ja lasikuidun kimmoinen venymä}}{\text{betonin murtovenymä}} = \frac{0{,}2\ \%\ \text{(oletus)}}{0{,}02\ \%} = 10:1$$

3. KUITUBETONIN SALLITTU VENYMÄ

Tarkasteltaessa betonin pintoja yksityiskohtaisesti fluoresoivan halkeamanetsimisnesteen ja ultraviolettivalon avulla [8] voidaan pelkällä silmällä aivan ehjäksi todettavissa pinnoissa havaita jo erittäin runsaastikin halkeamia, esim. yksi ns. mikrohalkeama joka senttimetrillä. Tällainen betoni täyttää ainakin kaikki betonin ulkonäölle tavallisesti asetettavat vaatimukset, jos mikrohalkeamien leveys h täyttää ehdon

$$h \leqq 0{,}01\ \text{mm} \qquad (1)$$

Etsittäessä kriteeriä kuitubetonin tyydyttävälle toiminnalle kuitubetonille voitaisiin sallia varovaisesti arvioiden 100 cm:n matkalla ainakin 100 kpl 0,01 mm (10µ) halkeamia eli yksi 0,01 mm halkeama kullakin senttimetrillä. Tämä vastaisi 1 mm venymää 100 cm:n matkalla, josta kuitubetonin sallituksi venymäksi saataisiin siis

$$\varepsilon_{kb,sall} = \varepsilon_{b,sall} = 0{,}1\ \% \qquad (2)$$

Kuitubetonilla saatujen koetulosten perusteella näyttää mahdolliselta, että kuitubetonin sallittua venymää voitaisiin korottaa edellä saadusta arvoon

$$\varepsilon_{kb,sall} = \varepsilon_{b,sall} \leqslant 0,5 \ \% \qquad (3)$$

ja kuitubetonin kuidun keskijännitys voi siis olla enintään

$$\overline{\sigma}_k = \varepsilon_{kb,sall} \cdot E_k \qquad (4)$$

Sallittu venymä riippuu rakenteelle asetettavista vaatimuksista; esim. perustuspaaluille voitaneen valita varsin suuri arvo. Sallittu venymä on sitä suurempi mitä suurempi on kuitumäärä ja tartunta, koska halkeamien välit tulevat tällöin pienemmiksi ja vastaavasti halkeamien leveydet pienemmiksi. Jos sallittu venymä ylitetään tulee kuitubetoni "käyttökelvottomaksi". Kussakin tapauksessa on varmuuskertoimet harkittava erikseen.

Edellä esitetyn perusteella saadaan I kuitubetonirakenteiden suunnitteluperiaate: K u i t u b e t o n i n s a l l i t t u v e n y m ä o n e n i n t ä ä n y h t ä s u u r i k u i n m a t r i i s i n s a l l i t t u v e n y m ä.

4. KUITUBETONIN MATRIISIN KÄYTTÄYTYMINEN

Edellä jo viitattiin siihen, että kuitubetonille voidaan sallia sitä suurempi venymä mitä suurempi kuitumäärä on. Tämä johtuu siitä, että varsinkin tiheässä sijaitsevien kuitujen ympärillä olevan betonin (rajakerrosbetonin) kimmoviskoosisuus lisääntyy, minkä vuoksi kuituja ympäröivä betoni sietää suuriakin muodonmuutoksia osasten varsinaisesti irtoamatta toisistaan kokonaan, eli siis murtumatta. Kun murtuminen sitten alkaa, halkeamat ovat aluksi äärimmäisen kapeita mikrohalkeamia, jotka jännityksen kasvaessa lisääntyvät ja levenevät matriisin muuttuessa näennäisesti plastiseksi. Tätä prosessia voidaan kutsua kerrannaismurtumiseksi (multiple fracture) ja se on tyypillistä niille kuituvahvisteisille aineille, joiden matriisi on hauras ja joiden matriisin murtovenymä on paljon kuitujen murtovenymää tai myötövenymää pienempi.

Kerrannaismurtumisen edellytyksenä on, että kuitujen suurin mahdollinen kuormitus halkeamien muodostumisen jälkeen on suurempi kuin matriisin (m) ja kuitujen yhdessä kantama kuormitus ennen halkeamista eli

$$\sigma_k V_k > \sigma_m V_m + \sigma_k' V_k \tag{5}$$

Yhtälössä σ'_k on kuidun jännitys hetkellä, jolloin matriisin vetolujuus σ_m ylitetään ja halkeamien muodostuminen alkaa; V_m ja V_k ovat matriisiaineen ja kuitujen tilavuusosuudet kuitubetonissa.

Kuituvahvisteisen aineen lopullinen murtuminen tapahtuu silloin, kun kuidut eivät enää pysty kantamaan matriisilta jatkuvassa murtumisessa kuiduille siirtyvää kuorman lisäystä.

Aveston & Cooper & Kelly [7] ovat käsitelleet artikkelissaan "Simple and multiple fracture" yksittäis- ja moninkertaismurtumaa ja todenneet, että kuituvahvisteisen aineen hauraan matriisin murtovenymä on riippuvainen kuitujen määrästä ja kuidun läpimitasta seuraavasti

$$\varepsilon_{m_{max}} \propto \left(\frac{V_k^2}{r\ V_m}\right)^{1/3} \tag{6}$$

eli kasvaa kuitujen tilavuusosuuden V_k:n kasvaessa ja kuitujen säteen r pienentyessä.

Edellisen perusteella saadaan II periaate: R u n s a s k u i t u i s e s s a b e t o n i s s a k u i t u j e n v ä l i s e n b e t o n i n (r a j a k e r r o s b e t o n i n) l u j u u s - j a m u o d o n m u u t o s o m i n a i s u u d e t v o i v a t e r o t a s u u r e s t i v a s t a a v a n t a v a l l i s e n b e t o n i n o m i n a i s u u k s i s t a.

5. KUIDUN SALLITTU JÄNNITYS

Aineen myötörajan ollessa hyvin selvä kasvavat aineen muodonmuutokset myötörajalla suuresti jännityksen pysyessä likimain muuttumattomana. Esim. tavallisen teräksen myötörajajännityksen ja vetolujuuden (murtojännityksen) suhde on likimain

$$\sigma_{myötö} = \frac{2}{3} \cdot \sigma_{murto} \tag{7}$$

Kerroin vaihtelee aineesta riippuen. Korkealuokkaisilla teräksillä ja lujilla teräslangoilla se on 3/4 tai suurempi. Lasikuiduilla ei tavallisesti ole myötörajaa, vaan niiden jännitys-muodonmuutos-käyrä on varsin lineaarinen murtumiseen asti.

Suurten venymien välttämiseksi kuitubetonin mitoitustarkasteluissa on syytä asettaa ehto, että kuitujen suurin jännitys σ_k' ei saisi nousta kuitujen myötöjännitykseen eli

$$\sigma'_{k,max} < \sigma_{k,myötö} \tag{8}$$

mikäli vaatimuksena on hyvin toimiva ja siis käyttökelpoisena pysyvä kuitubetonirakenne.

6. TEOREETTISET LUJUUSLAUSEKKEET

6.1 Yksinkertainen seossääntö

Jos kahta ainetta 1 ja 2 on sekoitettu keskenään tilavuussuhteissa V_1 ja V_2 ja jos tietyn ominaisuuden arvot aineilla ovat P_1 ja P_2, voidaan seosaineen vastaavan ominaisuuden ensimmäisenä estimaattina käyttää kaavaa

$$P = P_1 V_1 + P_2 V_2 \quad ; V_1 + V_2 = 1 \tag{9}$$

ja toisena arviona voidaan kirjoittaa

$$P = a_1 P_1 V_1 + a_2 P_2 V_2 \tag{10}$$

jossa a_1 ja a_2 ovat sovitettavat parametrit.

Tarkasteltaessa kuitubetonia (kb), jossa on yhdensuuntaiset vetojännityksen suuntaiset kuidut (k), saadaan sen kimmomoduuliksi (E) yhtälön (9) perusteella

$$E_{kb} = E_k V_k + E_b V_b \quad ; V_k + V_b = 1 \tag{11}$$

$$E_{kb} = E_k V_k + E_b (1 - V_k) \tag{12}$$

missä alaindeksi b tarkoittaa betonia eli kuitubetonin matriisia (jolle kirjallisuudessa käytetään usein alaindeksiä m).

Jos edelleen oletetaan, että venymät kuitubetonissa, betonissa (matriisissa) ja kuidussa ovat yhtäsuuret eli

$$\varepsilon_{kb} = \varepsilon_b = \varepsilon_k = \varepsilon \tag{13}$$

saadaan kuitubetonin vetojännitykseksi

$$\varepsilon E_{kb} = \varepsilon E_k V_k + \varepsilon E_b (1 - V_k) \tag{14}$$

eli

$$\sigma_{kb} = \sigma_k V_k + \sigma_b (1 - V_k) \tag{15}$$

6.2 Seossäännön laajennus

Koska kuitubetonissa kuidut eivät yleensä ole yhdensuuntaisia, jatkuvia ja jännityksen suuntaisia, niin yhtälöä (15) joudutaan muuntamaan esim. yhtälön (10) tapaan. Tällöin saadaan esim. seuraava yhtälö vetolujuudelle

$$\sigma_{kb} = \bar{\sigma}_k \cdot V_k \cdot e + \sigma'_b (1 - V_k), \tag{16}$$

jossa $\bar{\sigma}_k$ on kuitujen keskijännitys ja σ'_b betonin (matriisin) jännitys, kun kuitubetoni katkeaa, ja e (=0...1) kuitujen tehokerroin, joka riippuu jännitystilasta ja kuitujen suunnasta.

Tarkasteltaessa lyhyitä kuituja saadaan kuitujen keskijännitykselle $\bar{\sigma}_k$ johdetuksi lausekkeet, jotka on esitetty artikkelin lopussa olevassa erillisessä liitteessä. Näin päädytään taulukossa 2 esitettyyn sovellutuskelpoiseen järjestelmään kuitubetonin vetolujuuden laskemiseksi.

Taulukko 2. Kuitubetonin vetolujuuskaavat, katkotut kuidut.

Kuitubetonin vetolujuuden arvioiminen

Kuitujen pituusehto	Vetolujuus
$\ell \geqslant \ell_{krit} = \frac{\sigma_k \cdot d}{2 \cdot \tau}$	$\sigma_{kb} = \sigma_k \left(1 - \frac{\ell_{krit}}{2 \cdot \ell}\right) \cdot V_k \cdot e + \sigma_b' \, (1 - V_k)$
$\ell < \ell_{krit} = \frac{\sigma_k \cdot d}{2 \cdot \tau}$	$\sigma_{kb} = \frac{\tau \cdot \ell}{d} \cdot V_k \cdot e + \sigma_b'' \, (1 - V_k)$

ℓ = kuitujen pituus (noin 1...4 cm); ℓ_{krit} = kriittinen kuitujen pituus (noin 1...4 cm); d = kuitujen halkaisija (noin 0.001...0.025 cm), τ = kuitujen ja betonin tartuntalujuus (10...100 kp/cm^2), σ_{kb} = kuitubetonin vetolujuus; σ_k = kuitujen vetolujuus, V_k = kuitujen tilavuusosuus (noin 0.01...0.10), e = kuitujen tehokerroin (0...1), joka riippuu kuitujen suunnasta ja jännityksen suunnasta (saadaan seuraavasta taulukosta), σ_b' = betonin jännitys kuitujen katketessa, σ_b'' = betonin jännitys silloin kun kuidut liukuvat.

Kuitujen tehokertoimen e arvioiminen

Kuitujen suunta	Jännityksen suunta	Kuituvahvisteen tehokerroin e
1. Kaikki yhdensuuntaisia	a) Yhdens. kuitujen kanssa	1
	b) Kohtisuorassa kuituihin	0
2. Kuidut kahdessa suunnassa 1 ja 2, kohtisuorassa toisiinsa: Määräosuudet q_1 ja q_2	a) Yhdensuuntainen kuitujen 1 (tai 2) kanssa.	$q_1 (q_2)$
	b) Kulma 45^o kuitujen suuntaa vastaan	1/4
3. Neljä samanlaista kerrosta tai ryhmää kuituja 45^o kulmassa toisiaan vastaan	a) Yhdensuuntainen jonkun kuitukerroksen tai -ryhmän kanssa	3/8
	b) 22,5^o kulmassa jonkun kuitukerroksen tai ryhmän kanssa	3/8
4. Kuidut tasaisesti tasoon jakaantuneet	Mikä tahansa(tasossa)	3/8
5. Kuidut tasaisesti kolmiulotteisesti jakaantuneet.	Mikä tahansa	1/5

Seuraavassa kuitubetonin vetolujuuden tarkastelussa oletetaan, että kuitujen pituus $\ell = \ell_{krit}$, ja lisäksi, että $e = 1$ tai $e = \frac{1}{2}$ eli kaikki tai puolet kuiduista on vetojännityksen suunnassa. Näin saadaan taulukon 2 ylemmän yhtälön mukaan kuitubetonin vetolujuuden arvioimiseksi yhtälö:

$$\sigma_{kb} = \frac{\sigma_k}{2} \cdot V_k \cdot e + \sigma_b' (1 - V_k); \quad \ell = \ell_{krit} \tag{17}$$

Tätä yhtälöä ja taulukon 1 arvoja käyttäen sekä otaksuen, että $\sigma_b' = 50$ kp/cm^2 saadaan taulukossa 3 esitetyt vetolujuudet erilaisille kuitubetoneille.

Taulukko 3. Kuitubetonin vetolujuuden eli suurimman vetojännityksen laskuarviot yhtälön (17) mukaisesti

e	Käytetty kuitu	Kuitubetonin vetolujuus kp/cm^2		
		$V_k = 0.01$	$V_k = 0.05$	$V_k = 0.10$
1	Teräs	100	300	550
	Lasi	120	420	800
	Asbesti	80	170	300
$\frac{1}{2}$	Teräs	70	170	250
	Lasi	90	230	430
	Asbesti	60	110	170

Jos muodonmuutokset (halkeamat) ovat murtotilassa suuria, σ_b':n vaikutus kuitubetonin vetolujuuteen voi olla merkityksetön, jolloin vetolujuusyhtälöksi saadaan yksinkertaisesti yhtälö (18)

$$\sigma_{kb} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_k \cdot V_k \cdot e \tag{18}$$

6.3 Kuitubetonin sallittu vetojännitys

Kuitubetonin sallitun vetojännityksen tarkastelussa on otettava huomioon kuitubetonin (= matriisin) suurin sallittu venymä $\varepsilon_{kb,sall}$ (esim. < 0,5 %), jota suuremmilla muodonmuutoksilla kuitubetoni tulee käyttökelvottomaksi, sekä kuidun myötöjännitys $\sigma_{k,myötö}$, jonka saavuttaminen myös aiheuttaa kuitubetonin turmeltumisen. Nämä ehdot rajaavat kuidun keskijännityksen kuitubetonin sallittua vetojännitystä laskettaessa seuraavasti

$$\bar{\sigma}_k = \sigma_k \cdot (1 - \frac{\ell_{krit}}{2 \cdot \ell}) = \varepsilon_{kb,sall} \cdot E_k < \sigma_{k,myötö} (1 - \frac{\ell_{krit}}{2 \cdot \ell}) \qquad (19)$$

missä E_k on kuidun kimmokerroin ja

$$\ell \geq \ell_{krit} .$$

Taulukossa 2 esitetyn ylemmän yhtälön mukaan ja yhtälön (19) perusteella saadaan kuitubetonin sallitun vetojännityksen arvioimiseksi yhtälöt:

$$\sigma_{kb,sall} = \varepsilon_{kb,sall} \cdot E_k \cdot V_k \cdot e + \sigma_b'''(1-V_k); \; \sigma''' = f(\varepsilon_{kb,sall})$$

$$\sigma_{k,sall} = \frac{\varepsilon_{kb,sall} \cdot E_k}{(1 - \frac{\ell_{krit}}{2 \cdot \ell})} < \sigma_{k,myötö} \quad \text{eli} \qquad (20)$$

$$\varepsilon_{kb,sall} < \frac{\sigma_{k,myötö}}{E_k} (1 - \frac{\ell_{krit}}{2 \cdot \ell})$$

Esimerkkinä lasketaan yhtälön (20) mukaan teräskuitubetonin sallittu vetojännitys seuraavia lukuarvoja käyttäen:

$$\sigma_{k,\text{myötö}} = 8000 \text{ kp/cm}^2$$
$$\varepsilon_{kb,\text{sall}} = 0{,}002 \text{ eli } 0{,}2\ \%$$
$$E_k = 2000000 \text{ kp/cm}^2$$
$$V_k = 0{,}02 \text{ eli } 2\ \%$$
$$\sigma_b''' = 50 \text{ kp/cm}^2$$
$$e = \frac{1}{2}$$
$$\ell = \ell_{krit}$$

$$\sigma_{kb,\text{sall}} = 4000 \cdot \frac{2}{100} \cdot \frac{1}{2} + 50 \cdot 0{,}98 \approx 90 \text{ kp/cm}^2$$

$$\sigma_{k,\text{sall}} = \frac{4000}{1/2} = 8000 \text{ kp/cm}^2 = \sigma_{k,\text{myötö}}$$

Esimerkistä nähdään, että tässä tapauksessa teräskuidun jännityksen nouseminen myötöjännitykseen pienentää sallittua vetojännitystä, koska jo venymän ε_{kb} arvolla 0,2 % teräskuitu joutuu myötörajalle.

6.4 Kuitubetoni, jossa on kahta erilaista kuitua

Kuitubetonin sallitun vetojännityksen yhtälöksi ehtoyhtälöineen saadaan (20) mukaisesti, kun $\ell = \ell_{krit}$ eli kun $\bar{\sigma}_k = \sigma_k/2$:

$$\sigma_{kb,\text{sall}} = \varepsilon_{kb} \cdot E_{k1} \cdot V_{k1} \cdot e_1 + \varepsilon_{kb} \cdot E_{k2} \cdot V_{k2} \cdot e_2 + \sigma_b'''(1 - V_{k1} - V_{k2})$$

$$\sigma_{k1,\text{sall}} = 2 \cdot \varepsilon_{kb} \cdot E_{k1} < \sigma_{k1,\text{myötö}} \qquad (21)$$

$$\sigma_{k2,\text{sall}} = 2 \cdot \varepsilon_{kb} \cdot E_{k2} < \sigma_{k1,\text{myötö}}$$

Tämän yhtälöryhmän avulla voidaan tarkastella kahden erilaisen kuidun käyttäytymistä ja merkitystä kuitubetonissa, kun ε_{kb} valitaan jollakin tilanteeseen sopivalla perusteella. Murtumistarkasteluissa voidaan kuitujen myötöehdoista luopua ja suorittaa tarkastelu vain seuraavan yhtälön avulla.

$$\sigma_{kb} = \varepsilon_{kb} \cdot E_{k1} \cdot V_{k1} \cdot e_1 + \varepsilon_{kb} \cdot E_{k2} \cdot V_{k2} \cdot e_2 + \\ + \sigma_b' \, (1 - V_{k1} - V_{k2}) \qquad (22)$$

Esimerkkinä tarkastelemme kuitubetonia, jossa on kaksi kimmomoduuleiltaan varsin erilaista kuitua, nimittäin teräs- ja nylonkuituja. Taulukosta 1 saadaan lukuarvot

$E_{k1} = 2000000 \text{ kp/cm}^2$

$V_{k1} = 0{,}02$

$E_{k2} = 20000 \text{ kp/cm}^2$

$V_{k2} = 0{,}02$

$\varepsilon_{kb} = 0{,}005$

$e_1 = e_2 = 0{,}5$

$\sigma_b = 50 \text{ kp/cm}^2$

Näillä arvoilla antaa yhtälö (22) kuitubetonin jännitykseksi

$$\sigma_{kb} = 10000 \cdot \frac{2}{100} \cdot \frac{1}{2} + 100 \cdot \frac{2}{100} \cdot \frac{1}{2} + 50 \cdot 0{,}96$$

eli

$$\sigma_{kb} = (100 + 1 + 48) \text{ kp/cm}^2$$

joten varsin suurillakaan venymän arvoilla ei nylon vielä kanna käytännöllisesti katsoen lainkaan kuormitusta.

6.5 Kuitubetonin puristuslujuus

Kuitubetonin puristuslujuudesta, niinkuin yleensäkin kuituvahvisteisten aineiden puristuslujuudesta, ei ole allekirjoittaneen tietämän mukaan esitetty yleistä teoriaa. Tyydymme tässä toteamaan moniin koetuloksiin perustuen ensimmäisenä arviona, että betonin puristuslujuus ei paljoakaan muutu kuitulisäyksestä. Puristuslujuuden kannalta voidaan kuituja siis pitää osarunkoaineena (osakiviaineksena), joskin koetustavasta riippuen voi lisääntynyt vetolujuus aikaansaada myös puristuslujuuden kasvua. On myös havaittu kuitulisäyksen alentaneen betonin puristuslujuutta.

6.6 Kuitubetonin taivutuslujuus

Jos oletamme, että kuitulisäys ensisijaisesti lisää betonin vetolujuutta, murtuminen tapahtuu taivutuslujuuskokeessa puristuspuolella silloin, kun kuitubetonin vetolujuus on kuitulisäyksen ansiosta ylittänyt betonin puristuslujuuden. Eräs kuitubetonin käytännöllinen maksimitavoite on siis lisätä kuitujen avulla kuitubetonin vetolujuutta niin paljon, että veto- ja puristuslujuudet ovat yhtäsuuret.

Käytetyt merkinnät

alaindeksit

b	kuitubetonin betonimatriisi
m	kuituvahvisteisen aineen matriisi
k	kuitu
kb	kuitubetoni

sall	sallittu
myötö	myötö, myötäminen
murto	murtuminen
max	maksimi, suurin
krit	kriittinen
1,2	liittyy aineeseen 1 tai 2

suureet

a_1, a_2	sovitettavat parametrit
d	kuidun halkaisija
e	kuitujen suuntautuvuuden ja jännityksen suunnan tehokerroin
ε	suhteellinen muodonmuutos, venymä
E	kimmomoduuli
h	halkeaman leveys
ℓ	kuidun pituus
ℓ_{krit}	kuidun kriittinen pituus, jolloin tartunta matriisiin estää liukumisen
P	ominaisuus
q	kuitujen suhteellinen osuus tietyssä suunnassa
r	kuidun säde
σ	jännitys, vetolujuus
$\bar{\sigma}$	keskimääräinen jännitys
σ_b'	kuitubetonin betonimatriisin jännitys, kun kuidutkin jo katkeavat ($\ell \geqslant \ell_{krit}$)
σ_b''	kuitubetonin betonimatriisin jännitys silloin kun kuidut liukuvat ($\ell < \ell_{krit}$)
σ_b'''	kuitubetonin betonimatriisin jännitys tietyllä sallitun myötövenymän $\varepsilon_{kb,sall}$ arvolla.

τ tartuntalujuus (oletetaan vakinaiseksi kuidun pinnalle)

V tilavuusosuus

KIRJALLISUUTTA

1 Pihlajavaara, S.E., Johdatusta kuitubetoniin. Rakennustaito 68 (1973) 8, s. 29...34.

2 Porter, H.F., Preparation of concrete. From selection of materials to final deposition. Journal Americal Concrete Institute 6 (1910) s. 287.

3 Weniger, K.A., Die Asbestzementschiefer-Fabrikation. Berlin 1914.

4 Holliday, L., Composite materials. Amsterdam, Elsevier, 1966 540 s.

5 Holister, G.S. & Thomas, C., Fibre reinforced materials. Amsterdam, Elsevier, 1966. 154 s.

6 Krenchel, H., Fibre reinforcement. Copenhagen. Akademisk Forlag, 1964. 159 s.

7 The properties of fibre composites. Conference proceedings. National Physical Laboratory, Nov. 1971. Surrey, IPC Science and Technology Press Ltd, 1971. 90 s.

8 Pihlajavaara, S.E. & Pihlman, E., Kätevä menetelmä silmin näkymättömien halkeamien havaitsemiseksi betonissa ja muissa rakennusaineissa. Fluoresoivat hiukkaset ja ultravioletti-valo. Rakennustaito 68 (1973) 8, s. 17...18.

S.E. Pihlajavaara, fil.tri, tutkija, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Otaniemi.

LIITE

KUIDUN JÄNNITYKSEN, KRIITTISEN PITUUDEN JA HOIKKUUDEN MÄÄRITTÄMINEN

1. Yleistä

Kuituvahvisteisen aineen ollessa vetojännityksen alaisena voidaan otaksua kuvan 1 mukainen vetojännityksen jakautuminen kuidussa ja leikkausjännityksen jakautuminen kuidun ja matriisin rajapinnassa, kun kuidun pituus on suurempi kuin ns. kriittinen pituus, josta myöhemmin puhutaan tarkemmin.

Tarkastellaan nyt yksinkertaista tilannetta (kuva 2), jossa yksi lieriönmuotoinen kuitu on sijoitettu kuituvahvisteisen aineen perusaineeseen eli matriisiin. Vedettäessä kuitua voimalla P ulos matriisista voimme erottaa kaksi perustapausta:

1) Kuitu lähtee liukumaan ulos matriisista tartunnan murtuessa voiman P ollessa suurempi kuin tartuntavoima, mutta pienempi kuin langan murtokuorma eli

$$2\pi \cdot r \cdot \frac{\ell_n}{2} \cdot \tau < P < \sigma_f \cdot \pi r^2 \qquad (1)$$

missä r on langan säde, τ tartuntalujuus (tasaisesti jakautunut kuidun pinnalle) ja σ_f kuidun (fiiberin) vetolujuus.

2) Kuitu katkeaa kuorman P ylittäessä kuidun murtokuorman, joka on tartuntavoimaa pienempi

$$\sigma_f \cdot \pi r^2 < P < 2\pi \cdot r \cdot \frac{\ell_n}{2} \cdot \tau \qquad (2)$$

Jotta kuidun vetolujuus tulisi käytetyksi hyväksi, olisi kuidun oltava niin pitkä, että se ei lähtisi liukumaan, vaan jännitystilanteessa mieluimmin katkeaisi. Jos merkitsemme tällaista kriittistä kuidun pituutta $\ell_n/2 = \ell_{krit}/2$, niin saadaan edellisten yhtälöiden perusteella

$$2\pi \cdot r \cdot \frac{\ell_{krit}}{2} \cdot \tau = \sigma_f \cdot \pi \cdot r^2 \qquad (3)$$

josta saadaan kokonaan matriisissa olevan kuidun kriittiseksi eli vähimmäispituudeksi

$$\ell_{krit} = \frac{\sigma_f \cdot r}{\tau} \qquad (4)$$

eli

$$\ell_{krit} = \frac{\sigma_f \cdot d}{2\,\tau} \qquad (5)$$

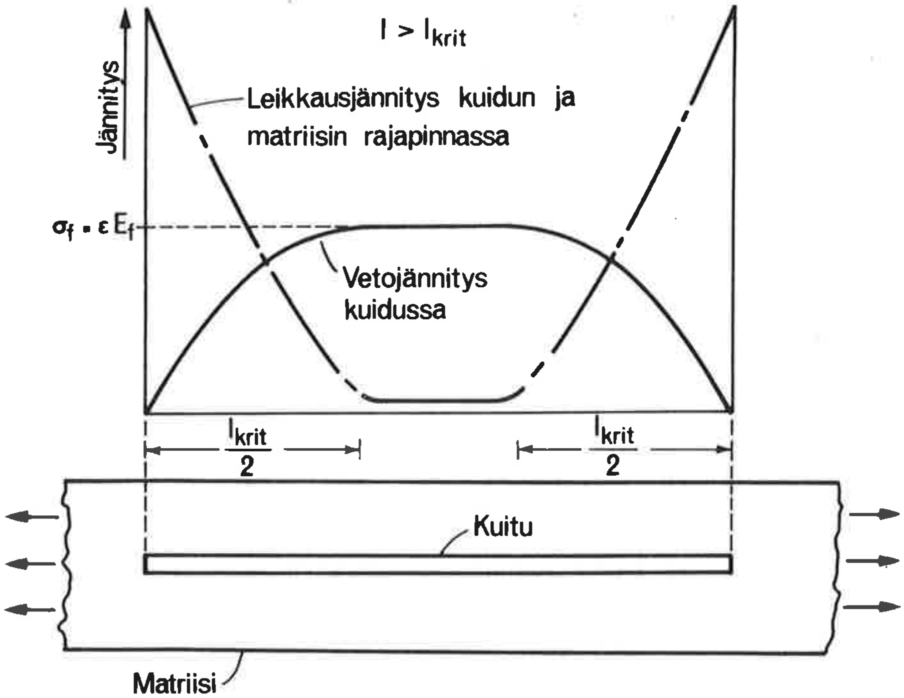
d = kuidun halkaisija

Edelleen saadaan kuidun kriittiseksi hoikkuudeksi eli pituuden ja halkaisijan suhteeksi

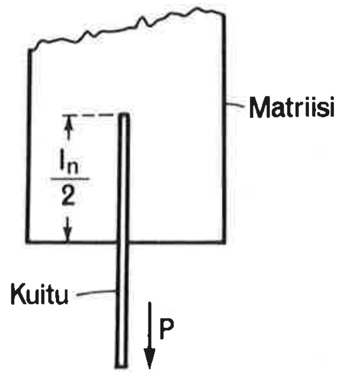
$$\left(\frac{\ell}{d}\right)_{krit} = \frac{\sigma_f}{2\tau} \qquad (6)$$

2. Teräskuidun (teräslangan) vetolujuus, kriittinen pituus, hoikkuus ja tartuntalujuus

Teräskuitubetonin lankojen vetolujuudet voivat vaihdella laajoissa rajoissa esim. 5000...20000 kp/cm^2 ja tartuntaan voidaan vaikuttaa langan muotoilulla ja pintakäsittelyllä sekä sementin ja sementtikiven (betonin) ominaisuuksilla. Tartuntalujuuksien vaihteluväli lienee noin 10...100 kp/cm^2, tavallisesti alle 50 kp/cm^2. Kuva 3



Kuva 1. Kuituvahvisteisen aineen jännitysjakautumat kuidussa sekä kuidun ja matriisin rajapinnassa.



Kuva 2. Kuidun ulosvetokoe. Kuidun pituus $\ell_n/2$.

osoittaa teräslankojen kriittisen pituuden, vetolujuuden ja tartuntalujuuden välisen riippuvuuden yhtälön (5) mukaan laskettuna. Kuvasta nähdään, että 2,5 cm pituinen tavallisen lujuinen teräslanka on riittävän pituinen, kun hoikkuus on noin $\ell/100$ ja tartunta kohtuullinen. Jos käytetään lujia lankoja on tartunnasta pyrittävä erityisesti huolehtimaan.

3. Lasikuidun vetolujuus, kriittinen pituus, hoikkuus ja tartuntalujuus

Lasikuitujen vetolujuus vaihtelee suunnilleen välillä 10000... 40000 kp/cm^2 ja paksuudet yleensä 0,01...0,05 mm. Jos oletamme, että σ_f = 20000 kp/cm^2, d = 0,004 cm ja τ = 20 kp/cm^2 niin yhtälöstä (5) saadaan

$$\ell_{krit} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 20} = 2 \text{ cm}$$

Tästä nähdään, että niin lasikuiduille kuin teräskuiduillekin kriittinen pituus on 2 cm suuruusluokkaa.

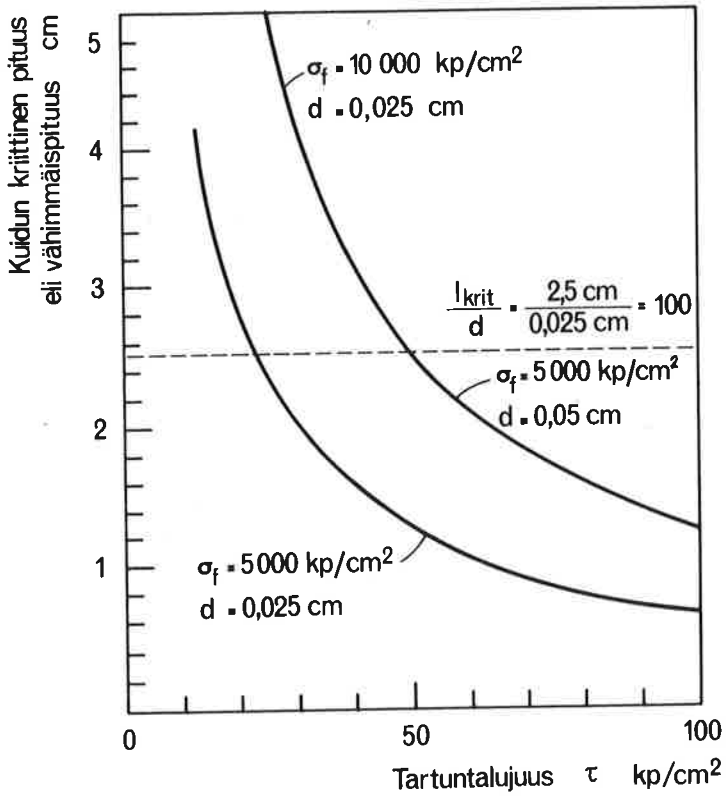
4. Kuidun jännityksen jakautuminen kuidun pituuden mukaan

Kuidun keskijännitys

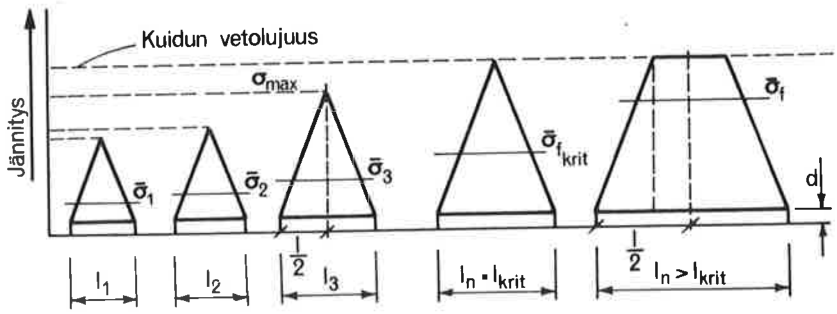
Kuva 4 osoittaa kuituvahvisteisissa aineissa kuidun jännityksen jakautumisen (approksimaatio) ja keskijännityksen kuidun pituuden funktiona. Kun kuidun pituus on yhtäsuuri kuin kriittinen pituus, on kuidun keskijännitys

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{krit} = \frac{\sigma_f}{2} \quad ; \; \ell = \ell_{krit} \qquad (7)$$

Edelleen voidaan kuvasta 4 todeta, että kun kuidun pituus on kriit-



Kuva 3. Teräslankojen kriittisen pituuden, vetolujuuden ja tartuntalujuuden välisiä riippuvuuksia yhtälön $\ell_{krit} = \sigma_f \cdot d/2\tau$ mukaan.



Kriittinen hoikkuus ℓ_{krit}/d

Kuva 4. Kuidun jännityksen ja keskijännityksen $\bar{\sigma}$ riippuvuus kuidun pituudesta ℓ_n.

tistä pituutta pitempi, niin keskijännityksen laskemiseksi saadaan yhtälö

$$\bar{\sigma} \cdot \frac{\ell}{2} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_f \cdot \frac{\ell_{krit}}{2} + \sigma_f \left(\frac{\ell}{2} - \frac{\ell_{krit}}{2}\right) \tag{8}$$

joka voidaan esittää muodossa

$$\bar{\sigma} = \sigma_f \left(1 - \frac{\ell_{krit}}{2 \cdot \ell}\right) \quad ; \ell \geqslant \ell_{krit} \tag{9}$$

missä σ_f on kuidun vetolujuus.

Kun kuitu on kriittistä pituutta lyhyempi saadaan kuvasta 4 (esim. osakuvasta $\bar{\sigma}_3$) pinta-aloja vertaamalla kuidun keskijännityksen laskemista varten yhtälö

$$\sigma \cdot \frac{\ell}{2} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{max} \cdot \frac{\ell}{2} \tag{10}$$

Yhtälön (3) mukaisesti voidaan kirjoittaa

$$\sigma_{max} \cdot \pi \cdot r^2 = 2\pi \cdot r \cdot \frac{\ell}{2} \cdot \tau \tag{11}$$

josta saadaan kuidun suurimmaksi vetojännitykseksi

$$\sigma_{max} = \frac{\tau \cdot \ell}{r} \tag{12}$$

Sijoittamalla σ_{max}:n lauseke yhtälöstä (12) yhtälöön (10) saadaan kuidun keskijännitykseksi, kun $\ell < \ell_{krit}$

$$\bar{\sigma} = \frac{\tau \cdot \ell}{2\,r} \tag{13}$$

eli

$$\bar{\sigma} = \frac{\tau \cdot \ell}{d} \quad ; \ell < \ell_{krit} \tag{14}$$