

JAKSOLLISEN VAIHTUVAN KUORMITUKSEN AIHEUTTAMAN VIRUMISMUODONMUUTOKSEN MÄÄRITTÄMISMENETELMÄ

Pentti Mäkeläinen

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 12
No. 3 1979 s. 19-29

YHTEENVETO: Artikkelissa esitetään jaksollisesta vaihtuvasta kuormituksesta syntyvän virumismuodonmuutoksen määrittämiskeino, joka perustuu Boltzmannin superpositioperiaatteen integraaliesitysmuodon käyttöön yhdessä vaihtuvan kuormituksen maksimi- tai minimi-intensiteettiä vastaavan staattisen virumiskäyrän kanssa. Jaksollisen kaksiporaisen tykytysvetokuormituksen tapauksessa on kehitetty tarkennettu likikaava virumismuodonmuutoksen arvioimiseen. Likimenetelmälle on vielä kehitetty laajennus mielivaltaista jaksollista tykytyskuormitustapausta varten. Kehitetyn menetelmän tarkkuudesta on annettu esimerkki vertaamalla GR-UP-lujitemuovilaminaatin kaksiporaisista tykytysvetokokeista saatuja venymänarvoja likimenetelmällä laskettuihin arvoihin.

JOHDANTO

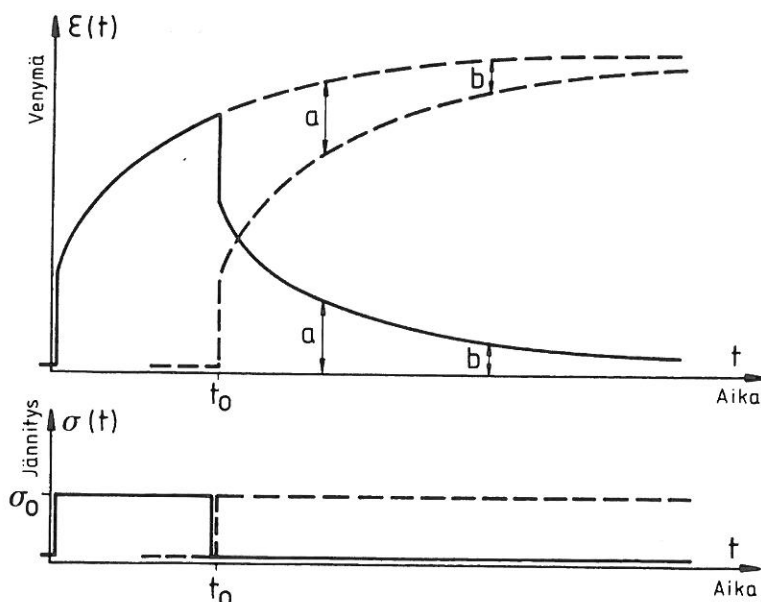
Käytännön rakenteisiin kohdistuvat ulkoiset kuormitukset ovat tarkkaan ottaen lähes aina luonteeltaan vaihtuvia kuormia, eli toisin sanoen kuormituksen intensiteetti ei ole vakio, vaan vaihtelee ajan mukana. Rakenteiden vaste näihin vaihteleviin ulkoisiin vaikutuksiin ilmenee siten vastaavina sisäisinä jännitys-muodonmuutostilojen vaihteluina. Rakenteen materiaalin ollessa nk. ajasta riippumatonta ainetta rakenteen vaste ajan mukana vaihtuvaan kuormitukseen seuraa silloin täsmälleen tätä kuormituksen vaihtumista. Jos sen sijaan rakenteen materiaali on nk. ajasta riippuvaa ainetta, rakenteen vaste ei silloin enää seuraa suoraan ulkoisen kuormituksen vaihtumista, vaan ulkoisen kuormitustilan ja rakenteeseen syntyvän jännitys-muodonmuutostilan välille syntyy viive. Tämän viiveen määrittäminen on yleisesti ottaen vaikea tehtävä. Itse asiassa viive pystytään laskennallisesti määrittämään tarkkaan vain säännöllisen sinimuotoisesti ajan mukana vaihtuvan ulkoisen kuormituksen tapauksessa, kun lisäksi materiaalin käyttäytyminen otaksutaan lineaarisiksi viskoelastiseksi. Tällöin viive määrittyy materiaalin ns. kompleksisen virumisjoustoprojektin reaali- ja imaginaariosan (engl. storage and loss compliance) suhteen eli nk. häviötangentin avulla, joka ilmaisee suoraan kuormituksen ja vasteen sinimuotojen välisen vaihe-erokulman tangentin. Käytännön tapauksissa ulkoisen kuormituksen vaihtelutaajuuden on myös lisäksi pysyttävä niin alhaisena, että materiaalin lämpenemistä ei pääse tapahtumaan, jolloin voidaan otaksua isotermiset olosuhteet.

Muunlaisten kuin sinimuotoisesti vaihtuvien kuormitusten tapauksissa jännitys-muodonmuutostilan ja sen viiveen tarkkaan laskennalliseen määrittämiseen ei yleensä pystytä lineaarisen viskoelastisen materiaalinkaan kyseessä ollen, vaan ratkaisussa joudutaan turvautumaan erilaisiin likimääräismenetelmiin. Seuraavassa tarkastelussa esitetään ensin Boltzmannin superpositioperiaatteen integraaliesitysmuotoon sovellettu likimääräismenetelmä virusmuodonmuutoksen arvioimiseksi jaksollisen, kaksiportaisen tykyttävän porraskuormituksen tapauksessa sekä kirjoittajan kehittämä tarkennus tälle likimenetelmälle. Sen jälkeen esitetään niinikään kirjoittajan kehittämä laajennus menetelmän soveltamiseksi yleiseen jaksolliseen, mielivaltaista tykyttävää vaihtelumuotoa jakson aikana noudattavaan kuormitustapaukseen. Likimenetelmän tarkkuudesta annetaan esimerkki vertaamalla lujitemuovilaminaatin (laskuitulujitteinen tyydyttymätön polyesterimuovi GR-UP) vetokokeissa kaksiporraisesta tykyttävästä porraskuormituksesta syntynyttä venymän vaihtelua likimääräismenetelmällä laskettuun venymän vaihteluun aina tuhannen 2 tunnin mittaisen ja kahdentuhannen tunnin mittaisen jakson aikana.

TEOREETTISEN TARKASTELUN LÄHTÖKOHDAT

Tarkastellaan lineaarisen viskoelastisen materiaalin ajan mukana muuttuvan jännityksen $\sigma(t)$ ja venymän $\epsilon(t)$ välistä riippuvuutta aksiaalisessa jännitys-muodonmuutostilassa. Tämä riippuvuus voidaan esittää tunnetusti Boltzmannin superpositioperiaatteen ilmaisemalla integraaliyhtälöllä, joka on virumistarkastelun tapauksessa muotoa

$$\epsilon(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (1)$$



Kuva 1. Boltzmannin superpositioperiaate.

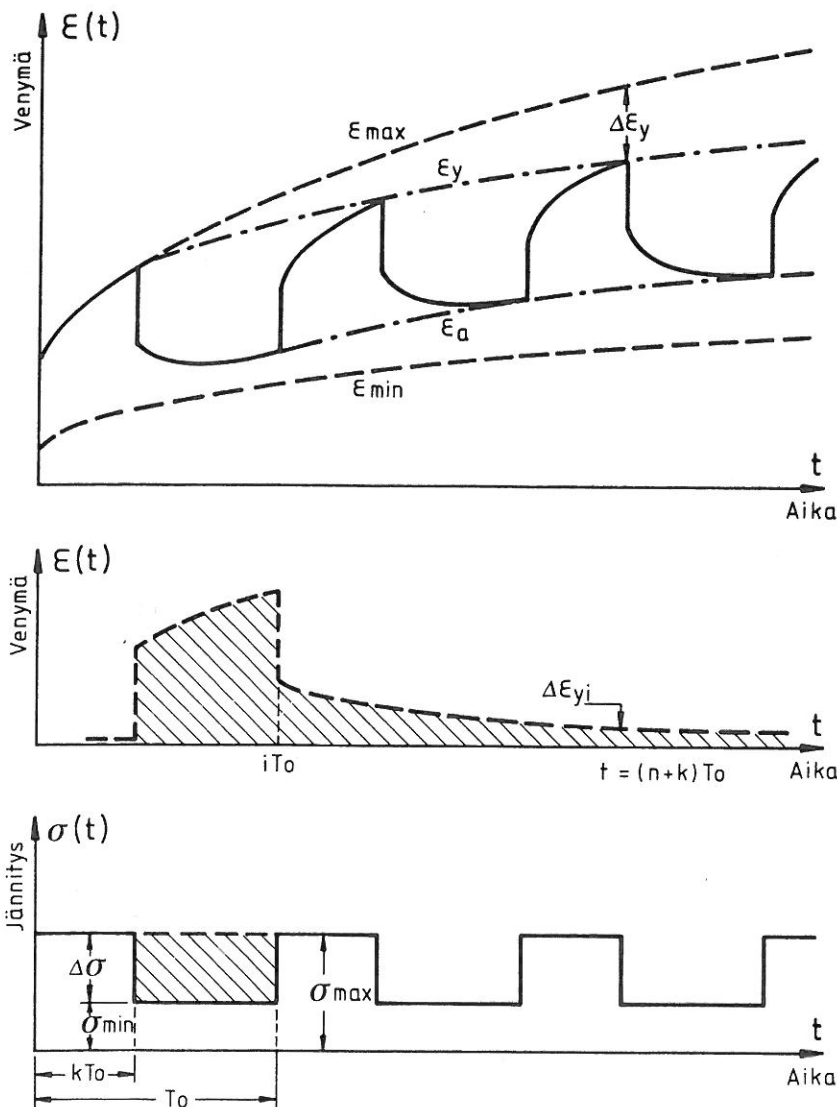
Tämän yhtälön oikeanpuoleisessa nk. perinnöllisyysintegraalissa (engl. hereditary integral) on otettu suoraan integroinnin alarajaksi ajanhetki $t = 0$ ja otaksuttu materiaali kuormittamattomaksi ennen tätä hetkeä. Integrandin ydinfunktio $D(t)$ on nimeltään virumisfunktio. Sille käytetään kuitenkin useimmiten nimitystä virumisjoustokerroin, ja tässä esillä olevassa erikoistapauksessa täsmällinen nimitys on vetotapauksen virumisjoustokerroin (engl. tensile creep compliance).

Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaisen porraskuormituksen perustapaus. Sen esittämä kuormitushistoria on lausuttavissa muodossa

$$\sigma(t) = \sigma_0 [H(t) - H(t-t_0)], \quad (2)$$

missä $H(t)$ on Heavisiden yksikköfunktio. Tästä porraskuormituksesta syntyvä virumisvaste on seuraava:

$$\epsilon(t) = \begin{cases} \sigma_0 D(t), & 0 \leq t \leq t_0 \\ \sigma_0 [D(t) - D(t-t_0)], & t > t_0 \end{cases} \quad (3)$$



Kuva 2. Vetotakytykskuormitus ja syntyvän venymän vaihtelu.

Tämä kaava vahvistaa kuvaan 1 hahmotellun, Boltzmannin superpositioperiaatteen merkitystä havainnollistavan piirroksen sisällön.

Tarkastellaan tämän jälkeen kuvan 2 mukaista jaksollisen tykytysvetokuormituksen tapausta. Yhden kuormitusjakson kokonaisjaksonaikaa merkitään T_0 :lla ja jakson alun maksimikuormituksen ($\sigma_{\max}$) kestoaikaa kT_0 :lla, jolloin jakson loppuosan minimikuormituksen ($\sigma_{\min}$) kestoajaksi jää $(1-k)T_0$. Jaksollisesta kuormituksesta syntyvän venymän vaihtelu ajan mukana on hahmoteltu kuvaan 2. Kuvaan on myös hahmoteltu virumiskäyrät $\epsilon_{\max}(t)$ ja $\epsilon_{\min}(t)$, joita vastaavat kuormitushistoriat ovat $\sigma_{\max}H(t)$ ja $\sigma_{\min}H(t)$. Peräkkäisten kuormitusjaksojen maksimikuormituksen loppuhetkiä vastaavat venymäarvot on yhdistetty kuvassa pistekatkoviivalla käyräksi $\epsilon_y(t)$ ja vastaavasti jaksojen minimikuormituksen loppuhetkeen mennessä palautuneet venymäarvot käyräksi $\epsilon_a(t)$.

Edellä esitettyjen rajakäyrien $\epsilon_y(t)$ ja $\epsilon_a(t)$ määrittäminen on käytännön kannalta tarkastelujen tärkein päämäärä. Tämä voidaan tehdä jatkossa esitetyllä likimääräismenetelmällä, jossa käytetään ns. staattisia virumiskäyriä $\epsilon_{\max}(t)$ ja $\epsilon_{\min}(t)$ vertailukäyriä.

LIKIMÄÄRÄISMENETELMÄ JA SEN YLEISTYS

Kuvan 2 mukaisen rajakäyrän $\epsilon_y(t)$ ratkaisemiseksi tarkastellaan venymien $\Delta\epsilon_y = \epsilon_{\max} - \epsilon_y$ $(n+1)$:nnen kuormitusjakson maksimikuormituksen loppuhetkellä $t = (n+k)T_0$. Se voidaan ajatella muodostuvaksi pienistä "jäännösvenymistä" $\Delta\epsilon_{yi}$, jotka syntyvät tarkastelukohtaan kuvan mukaisesti vinoviivoituksella varjostetusta $(1-k)T_0$ pituisesta kuormitusportaasta $\Delta\sigma$. Kaava $\Delta\epsilon_{yi}(t)$:n määrittämiseksi saadaan Boltzmannin superpositioperiaatteen nojalla muotoon

$$\Delta\epsilon_{yi}(t) = \Delta\sigma[D((n+1-i)T_0) - D((n+k-i)T_0)] \quad (4)$$

Käyttämällä lyhennysmerkintöjä

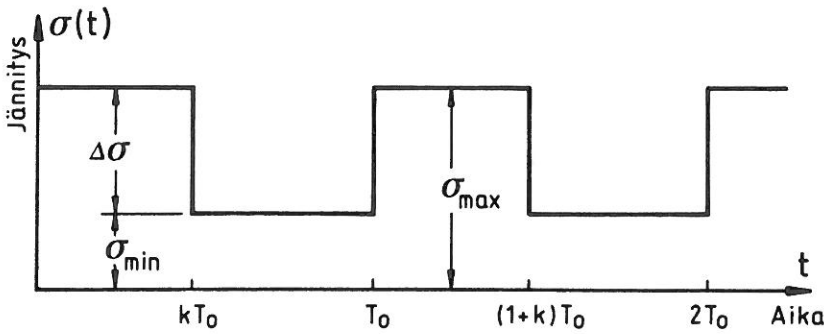
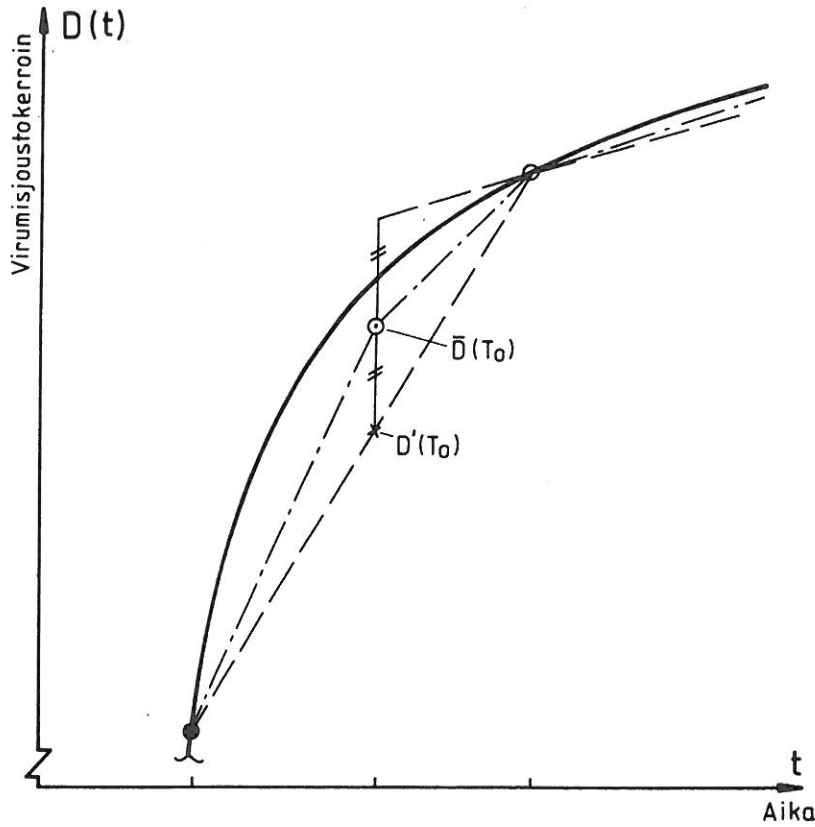
$$D((n+1-i)T_0) \stackrel{\text{def}}{=} D_{n+1-i}, \text{ jne.} \quad (5)$$

$\Delta\epsilon_y$ saadaan lausutuksi summamuodossa

$$\Delta\epsilon_y = \sum_{i=1}^n \Delta\epsilon_{yi} = \Delta\sigma \sum_{i=1}^n (D_{n+1-i} - D_{n+k-i}). \quad (6)$$

Ensimmäisen approksimaation saamiseksi lausekkeelle (6) tarkastellaan kuvan 3 mukaista virumiskäyrän oordinaatta-arvon $D(T_0) = D_0$ suoraviivaista approksimaatiota $D'(T_0) = D'_0$ arvojen D_k ja D_{1+k} avulla. Kuvan perusteella voidaan siten kirjoittaa likikaava

$$D_i - D_{i-1+k} \approx (1-k)[D_{i+k} - D_{i-1+k}], \quad (7)$$



Kuva 3. Virumiskäyrän approksimointi suorilla.

mistä puolestaan saadaan summamuotoa (6) varten yhteys

$$\sum_{i=1}^n (D_i - D_{i-1+k}) = (1-k) \sum_{i=1}^n (D_{i+k} - D_{i-1+k}) = (1-k)[D(t) - D(kT_0)]. \quad (8)$$

Tässä on sovellettu tarkasteluhetken t ilmaismuotoa $t = (n+k)T_0$. Toisaalta kaavan (8) vasemman puolen summalausekkeelle pätevät yhteydet

$$\sum_{i=1}^n (D_i - D_{i-1+k}) = \sum_{i=1}^n (D_{n+1-i} - D_{n+k-i}) = \Delta \epsilon_y / \Delta \sigma, \quad (9)$$

jolloin kaava (6) saadaan kaavojen (8) ja (9) avulla muotoon

$$\Delta \epsilon_y(t) = \Delta \sigma (1-k) [D(t) - D(kT_0)] \quad (10)$$

Tälle $\Delta \epsilon_y$:n ensimmäiselle likiratkaisulle saadaan käytännöllinen esitysmuoto kytkeällä se esimerkiksi staattiseen virumiskäyrään $\epsilon_{\max}(t) = \sigma_{\max} D(t)$, jolloin päästään kaavaan

$$\Delta \epsilon_y(t) = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{\max}} (1-k) [\epsilon_{\max}(t) - \epsilon_{\max}(kT_0)] \quad (11)$$

Kaavan (6) summalausekkeelle voidaan johtaa edellistä tarkempi approksimaatio lähestymällä virumiskäyrän oordinaatta-arvoa $D(T_0)$ kuvassa 3 esitetyllä tavalla, jolloin approksimaatio $\bar{D}(T_0) = \bar{D}_0$ haetaan oordinaattojen D_{1+k} ja D_{2+k} yhdistysjanan jatkeen kohdassa $t = T_0$ saaman arvon ja $D'(T_0) = D'_0$:n keskiarvosta. Tällöin saadaan yleisesti approksimaatiolle $\bar{D}_i$ lauseke

$$\bar{D}_i = \frac{1}{2} [D_{i+k} - k(D_{i+1+k} - D_{i+k}) + D_i] \quad (12)$$

Tämän kaavan (12) sekä kaavojen (7) ja (9) avulla voidaan muodostaa seuraava kehitemä:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \epsilon_y}{\Delta \sigma} &= \sum_{i=1}^n (D_i - D_{i-1+k}) \approx \sum_{i=1}^n (\bar{D}_i - D_{i-1+k}) \\ &= \sum_{i=1}^n (D_{i+k} - D_{i-1+k}) - \frac{1}{2} k \sum_{i=1}^n (D_{i+1+k} - D_{i-1+k}) \end{aligned} \quad (13)$$

Kahdelle viimeiselle summalausekkeelle on edelleen kirjoitettavissa muodot

$$\sum_{i=1}^n (D_{i+k} - D_{i-1+k}) = D_{n+k} - D_k = D(t) - D(kT_0) \quad (14)$$

ja

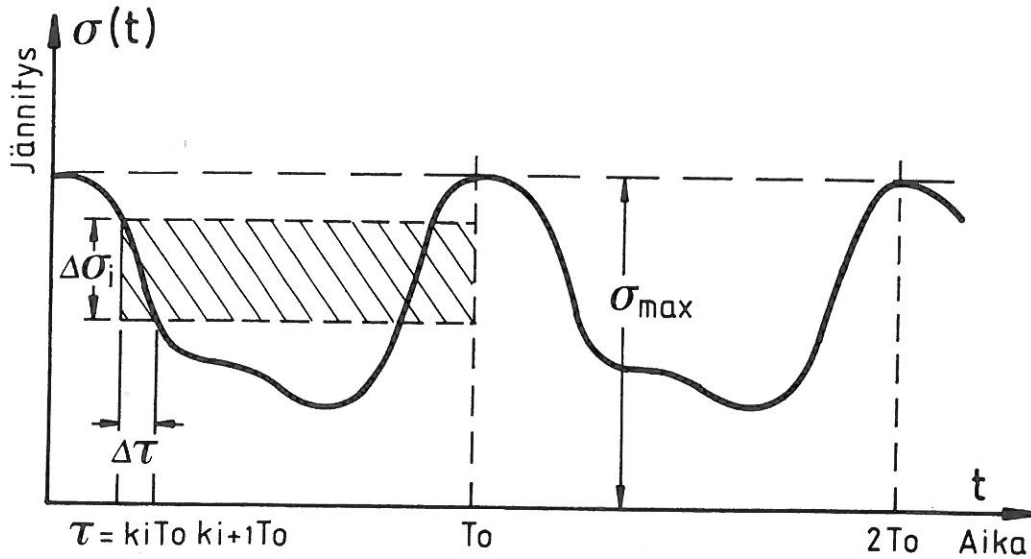
$$\sum_{i=1}^n (D_{i+1+k} - D_{i-1+k}) = D_{n+k} - D_k + D_{n+k} - D_{1+k} = 2D(t) - D((1+k)T_0) - D(kT_0) \quad (15)$$

Tämän jälkeen $\Delta \epsilon_y(t)$:lle saadaan sijoittamalla edelliset lausekkeet kaavaan (13) uusi tarkennettu likiratkaisu

$$\Delta \epsilon_y(t) = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{\max}} \left\{ (1-k) [\epsilon_{\max}(t) - \epsilon_{\max}(kT_0)] + \frac{1}{2} k [\epsilon_{\max}((1+k)T_0) - \epsilon_{\max}(kT_0)] \right\} \quad (16)$$

Kaavan (16) avulla pystytään tarkentamaan vaihtuvan porraskuormituksen aiheuttaman virumismuodonmuutoksen seuraamista erityisesti sellaisissa tapauksissa, missä kuormanvaihtoluku n on suhteellisen pieni.

Edellä esitettyä porraskuormitustapauksen tarkastelua voidaan laajentaa yleistämällä kunkin kuormitusjakson sisällä tapahtuvan kuormitusvaihtelun muotoa. Tarkastellaan tätä varten kuvassa 4 esitettyä jaksollista kuormitushistoriaa, missä jaksonaikainen kuormituksen muuttuminen otaksutaan mielivaltaisen jatkuvan käyrän mukaiseksi; jakson alkuhetki valitaan vain kuormituksen maksimi-intensiteetin kohdaksi. Ajatellaan tämän jälkeen jatkuvaa käyrää approksimoiduksi tiheäjakoisella porrasviivalla, mistä yhden portaan kohta on



Kuva 4. Yleinen jaksollinen vetotokytykskuormitus.

piirretty näkyviin kuvassa 4. Tätä yhtä kuormitusporrasta $\Delta\sigma_i$ vastaava "jäännösvenymä" $\Delta\epsilon_{yi}$ tarkastelukohdassa t on kaavan (11) mukaisesti

$$\Delta\epsilon_{yi} = \frac{\Delta\sigma_i}{\sigma_{\max}} (1-k_i) [\epsilon_{\max}(t) - \epsilon_{\max}(k_i T_0)] \quad (17)$$

Jos tämän jälkeen muodostetaan $\Delta\epsilon_y$ summaamalla kaikkien kuormitusportaiden vaikutus kohtaan t ja annetaan porrastajan tihettä rajatta, muodostuu seuraava raja-arvo summalausekkeelle:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_y(t) &= \frac{1}{\sigma_{\max}} \sum_{i=1}^n (1-k_i) [\epsilon_{\max}(t) - \epsilon_{\max}(k_i T_0)] \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\tau} \Delta\tau \rightarrow \\ &= \frac{1}{\sigma_{\max}} \int_0^{T_0} (1-\tau/T_0) [\epsilon_{\max}(t) - \epsilon_{\max}(\tau)] \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \end{aligned} \quad (18)$$

Rajankäynnissä on siis käytetty yhteyksiä

$$k_i = \tau/T_0, \quad \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\tau} \Delta\tau = - \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (19)$$

Kaava (18) on siten kaavan (11) yleistys mielivaltaisesti jakson aikana vaihtuvan jaksollisen kuormituksen tapaukselle.

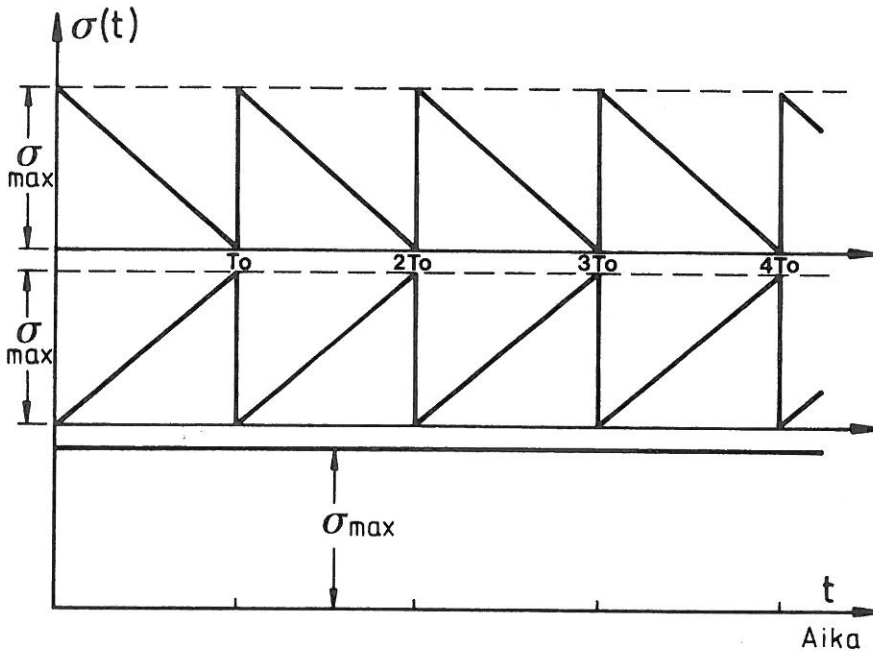
Tarkennetulle likikaavalle (16) voidaan johtaa myös edellä esitettyä rajankäyntiä soveltaen yleistys mielivaltaisen muotoisen jaksollisen kuormitus-historian tapauksessa. Yleistetylle $\Delta\epsilon_y$:n kaavalle saadaan silloin seuraava muoto:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_y(t) &= - \frac{1}{\sigma_{\max}} \int_0^{T_0} \left\{ (1-\tau/T_0) [\epsilon_{\max}(t) - \epsilon_{\max}(\tau)] \right. \\ &\quad \left. + \frac{\tau}{2T_0} [\epsilon_{\max}(T_0+\tau) - \epsilon_{\max}(\tau)] \right\} \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \end{aligned} \quad (20)$$

Tällä kaavalla (20) pystytään taas tarkentamaan yleisen jaksollisen kuormitustapauksen ensimmäisen likikaavan (18) antamaa tulosta erityisesti silloin, kun kuormitusjaksojen lukumäärä on suhteellisen pieni.

SOVELLUTUSESIMERKKI JA KOETULOSVERTAILU

Tarkastellaan kaavan (20) soveltamista kuvan 5 ylimmän jaksollisen kuormitushistorian tapauksessa. Kaavan integrandiin sisältyvälle virumisfunktioille



Kuva 5. Esimerkkitapauksen jaksolliset kuormitusvaihtelumuodot.

$D(t) = \epsilon_{\max}(t)/\sigma_{\max}$ valitaan nk. Findleyn mallin potenssimuoto

$$D(t) = D_0(1 + Mt^N), \quad (21)$$

joka soveltuu monien eri materiaalien primaarivirumisvaiheen kuvaamiseen. Materiaalivakiot M ja N sekä D_0 ($=1/E_0$) otaksutaan lineaarista viskoelastista käyttäytymistä vastaavasti jännitystasosta riippumattomiksi.

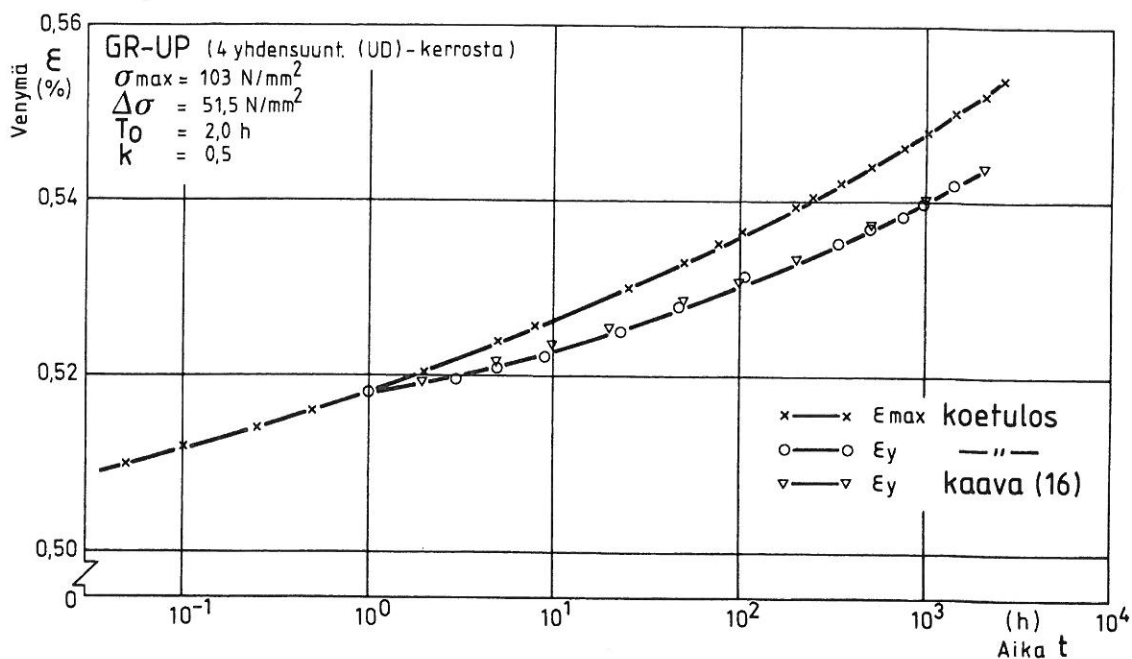
Sijoittamalla kaavan (20) integrandiin tekijät kaavasta (21) sekä "sahaavan" kuormitusvaihtelumuodon aikaderivaatalle arvo $-\sigma_{\max}/T_0$ ja suorittamalla integroinnit lopputulokseksi saadaan kaava

$$\Delta \epsilon_y(t) = \frac{1}{2} \sigma_{\max} D_0 M T_0^N \left[\left(\frac{t}{T_0} \right)^N - \frac{2(1-N \cdot 2^N) + N}{(N+1)(N+2)} \right] \quad (22)$$

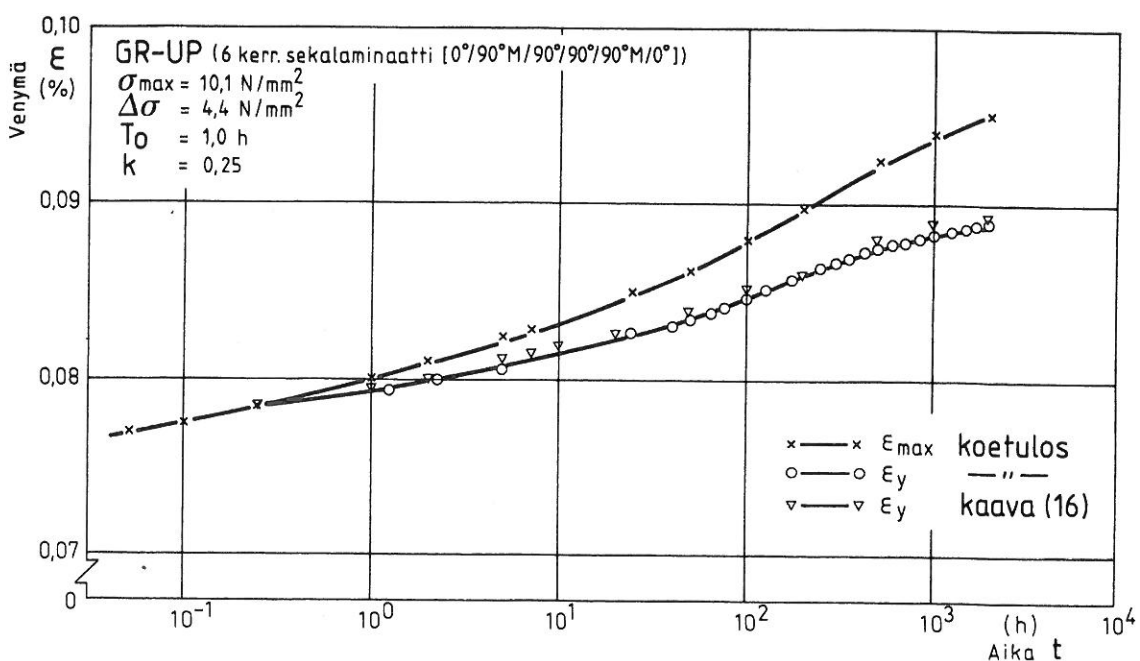
Tätä tulosta hyväksikäyttäen voidaan saada helposti myös kuvan 5 toista "sahaavaa" kuormitushistoriamuotoa vastaavan $\Delta \epsilon_y$:n likikaava. Kyseisistä kahdesta kuormitusvaihtelusta syntyvien virumavaihtelujen välillä pätee nimitäin se ehto, että niiden $\Delta \epsilon_y$ -erotusten summalla on joka hetki sama arvo

kuin kuvan 5 alimmasta vakiokuormitus- $(\sigma_{\max})$ historiasta aiheutuvalle ajasta riippuvalla virumisosalla eli arvo $\sigma_{\max} D_0 M t^N$. Siten kuvan 5 keskimmäistä kuormitushistoriaa vastaavalla $\Delta \epsilon_y$:n kaavalla on täsmälleen sama muoto kuin kaavalla (22) paitsi, että hakasulkulausekkeen sisällä kahden tekijän välissä on +-merkki.

Jaksollisia kaksiporvaisia tykytysvetokuormituksia vastaavaa tarkennettua $\Delta \epsilon_y$:n kaavaa (16) on testattu Aachenin teknillisen korkeakoulun muovi-instituutissa (Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen) syk-



Kuva 6. GR-UP-yhdensuuntaislaminaatin virumiskokeen ja kaksiporvaisen tykytysvetokokeen käyrät.



Kuva 7. GR-UP-sekalaminaatin virumiskokeen ja kaksiporvaisen tykytysvetokokeen käyrät.

syllä 1977 tehtyjen lujitemuovilaminaattikokeiden tuloksilla [4]. Näistä lasikuitulujitteisen tyydyttymättömän polyesterimuovin (GR-UP) eri laminaattityypeillä tehtyjen kokeiden tuloksista ovat esimerkkeinä kuvissa 6 ja 7 esitetyt käyrät.

Kuvassa 6 on esitetty nelikerroksiselle yhdensuuntaislaminaatille saatu n. 2500 tunnin staattinen virumiskäyrä $\epsilon_{\max}(t)$ jännitystasolla $\sigma_{\max} = 103 \text{ N/mm}^2$ ja sen rinnalla jaksollisella kaksiporaisella kuormitusvaihtelulla $\sigma_{\max}/1\text{h} \rightarrow \frac{1}{2} \sigma_{\max}/1\text{h}$ syntynyt käyrä $\epsilon_y(t)$ tuhannen jakson aikana. Kuvassa on myös esitetty kaavasta (16) laskemalla saatuja ϵ_y -käyrän pisteitä. Niinkuin kuvasta nähdään, likikaavan antama tulos todellisiin koetuloksiin nähden on erittäin hyvä.

Kuva 7 esittää kuusikerroksisella nk. sekalaminaatilla (2+2 ristikkäislaminaattia ja 2 "lasikuitumatto"-kerrosta) tehtyjen kokeiden tuloksia. Maksimijännitystaso on $\sigma_{\max} = 10,1 \text{ N/mm}^2$ ja 1 tunnin kuormitusjaksonajasta minimikuormitus- $(2\sigma_{\max}/3)$ vaiheen osuus on kolmeneljäsosaa. Kahdentuhannen jakson aikana syntynyttä kokeellista käyrää on tässäkin tapauksessa pystytty laskennallisesti ennustamaan kaavalla (16) erittäin tarkasti.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Edellä esitetty menetelmä jaksollisen vaihtuvan kuormituksen aiheuttaman virumismuodonmuutoksen määrittämiseksi perustuu materiaalin osalta otaksuttuun lineaariseen viskoelastiseen käyttäytymiseen ja itse muodonmuutoksen määrittämisen osalta vaihtuvan kuormituksen maksimi- (tai minimi-)intensiteettiä vastaavan staattisen virumiskäyrän hyväksikäyttöön. Tarkastelu, joka on tehty artikkelissa selvyiden vuoksi vain tykytyskuormitukselle, voidaan laajentaa helposti myös varsinaisiin jaksollisiin vaihtokuormitustapauksiin, missä kuormitus vaihtaa merkkiään jakson aikana.

Artikkelissa kehitettyä menetelmän laajennusta kaksiporaisen tykytyskuormituksen tapauksesta mielivaltaisesti jakson aikana vaihtelevan kuormituksen tapaukseen ei ole pystytty vielä testaamaan koetulosten avulla samalla tavoin, kuin on tehty kaksiporaisista GR-UP-lujitemuovin tykytysvetokokeista saaduilla tuloksilla. Tällaiseen testaukseen olisi kuitenkin käytännössä hyvät mahdollisuudet, sillä rakenteet ja niiden materiaalit ovat useimmiten käyttöolosuhteissaan vuorokausi- tai vuodenaikarytmiä noudattavien kosteus- tai lämpötilavaihtelujen alaisina, ja näistä vaihteluista aiheutuu esimerkiksi estyneen muodonmuuttumisen tai siirtymisen kautta rakenteeseen jaksollinen vaihtuva kuormitus.

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Gittus, J., Creep, viscoelasticity and creep fracture in solids. (Chapter 9: Viscoelasticity in Non-Metals), Applied Science Publishers Ltd, London 1975.
- [2] Brand, N., Untersuchung des Einflusses niederfrequenter Belastung auf das Versagensverhalten von ABS, POM und PA6. Forschungsheft des FKM. Frankfurt: Maschinenbauverlag 1976.
- [3] Thebing, U. und Menges, G., Approximate Procedures for the Mathematical Description of the Mechanical Strain-Behavior of Anisotropic Reinforced UP-Resin Laminates under Cyclic Loading und Unloading. SPJ-contribution paper, 33rd ANTEC Febr. 7.-10. Washington D.C. 1978.
- [4] Mäkeläinen, P. und Thebing, U., Näherungsverfahren zur Bestimmung des Verformungsverhaltens anisotrop faserverstärkter UP-Harz-Laminat bei alternierender Beanspruchung. Materialprüfung Bd. 20 (1978) Nr. 9 s. 343...346.

Pentti Mäkeläinen, tekn.tri, Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi