

SAVIMAALAJIEN MUODONMUUTOS- OMINAISUUKSIA KUVAAVAT REOLOGISET MALLIT

ANTTI LESKELÄ

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 3 No. 3—4 1970 ss. 75—84;
Rakenteiden Mekaniikan Seura, Helsinki

Yhteenveto Kirjoitus on lähinnä kirjallisuustutkimus ja tarkoituksena on lyhyesti esittää erilaisissa kuormitusolosuhteissa käytettyjä malleja ja niiden soveltuvuutta laboratorioissa tehtyihin kokeisiin.

Artikkelissa esitetään aluksi lyhyesti savimaalajien muodonmuutosominaisuuksia kuvaavien mallien perusosat ja yksinkertaisimmat mallit perusyhtälöineen.

Esimerkein ja kirjallisuudessa esitettyjen koetulosten perusteella esitetään sitten erilaisiin kuormitustapauksiin käytettyjä malleja. Relaksaatio- ja retardatio-koekokeet on sivuutettu lyhyillä maininnoilla ja pääasiallinen huomio on kiinnitetty vakiokuormitus-, konsolidaatio- ja sekundaäripainuman malleihin. Lisäksi on esitetty esimerkki toistuvien kuormitusten aiheuttamien muodonmuutosten kuvaamiseen käytetystä mallista.

Lopuksi on lyhyesti viitattu kirjallisuudessa esitettyyn kritiikkiin reologisten mallien käyttökelpoisuudesta ja soveltuvuudesta.

Perusmallit

Savimaalajien reologiset mallit muodostetaan yleensä käyttäen kolmea peruselementtiä, joista kimmoinen jousi (Hooken runko) kuvaa maalajin kiinteää osaa, nestevoimennin (Newtonin runko) plastisia muodonmuutoksia ja St. Venant-runko tietystä jännitysarvosta lähtien tapahtuvia juoksevia muodonmuutoksia. Kuvassa 1 on esitetty nämä perusosat ja niiden muodonmuutoksia kuvaavat kaavat. Lisäksi esittää mm. Langer [9], [10] käytettäväksi orientointitekijää silloin, kun $\sigma > \sigma_u$ tai $\tau > \tau_u$. Orientointitekijällä pyritään esittämään litteiden savipartikkelien järjestäytymistä leikkaustason suuntaiseksi.

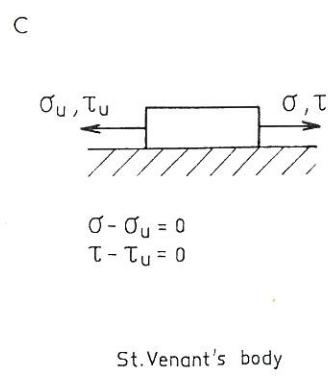
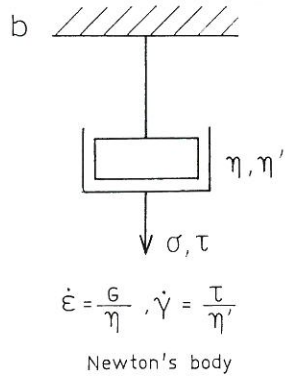
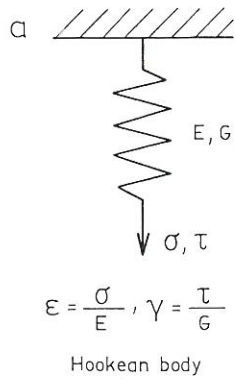
Kuvassa 2a on esitetty ns. Maxwell-malli, jossa Hooken ja Newtonin peruselementit ovat sarjassa. Maxwell-mallia voidaan käyttää ensimmäisenä approksimaationa pyrittäessä esittämään saven juoksemista [17]. Tällöin on kuitenkin jätettävä huomiotta se seikka, että todellisuudessa savilla kimmoiset muodonmuutokset eivät kokonaisuudessaan tapahdu silmänräpäyksellisesti. Kuva 2b esittää Kelvin- eli Voigt-mallia, jossa Hooken ja Newtonin peruselementit ovat rinnakkain. Kelvin-malli esittää kiinteätä kimmoista ainetta, jolla ei ole pysyviä muodonmuutoksia. Kuitenkin esim. Wu ym. [18] on todennut, että em. mallilla voitaisiin approksimoida maalajia, jonka leikkauslujuus muodostuu sekä kitkasta että koheesiosta. Kun Maxwell-malli ja Newtonin runko yhdistetään rinnakkain, saadaan Jeffreys-malli, joka on esitetty kuvassa 2c. Tätä mallia on käytetty esimerkiksi aksiaalissa puristuskokeessa silloin, kun kuormitus on alle kolmasosan murtokuormasta. Letherisch-malli, jossa Kelvin-malli ja Newtonin runko ovat sarjassa, on esitetty kuvassa 2d. Yhdistämällä Maxwell- ja Kelvin-mallit sarjaan, saadaan kuvan 2e mukainen Burger-malli, jonka käyttömahdollisuudet muodonmuutosominaisuuksien kuvaajana

Johdanto

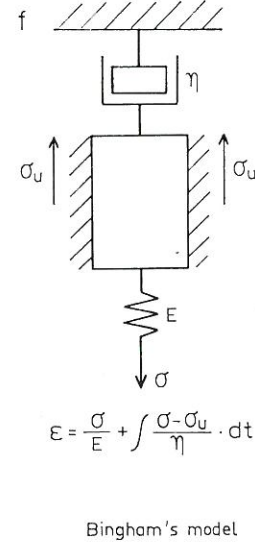
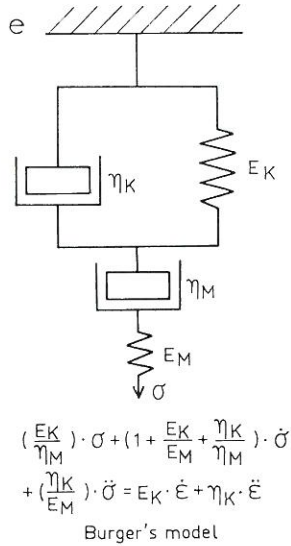
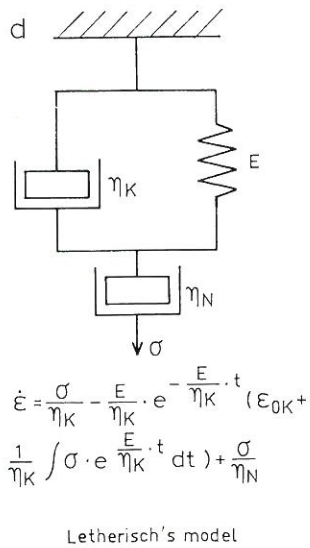
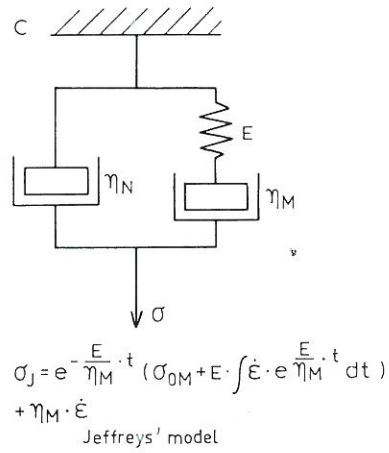
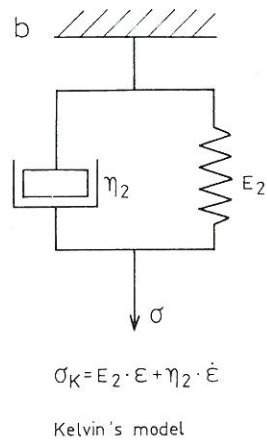
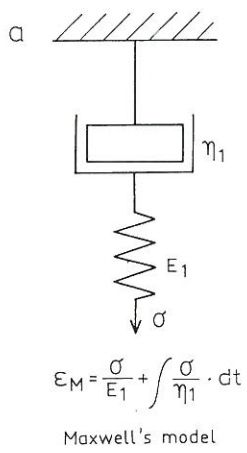
Reologia on fysiikan haara, joka tutkii materiaalien muodonmuutosominaisuuksia ja niiden riippuvuutta jännitystilasta, ajasta ja lämpötilasta. Koska reologiassa huomioidaan ajan ja muodonmuutosnopeuden vaikutus, voidaan sitä soveltaa myös geotekniikassa. Pyrittäessä etsimään matemaattisia malleja maalajien muodonmuutosfunktioille turvautaan etenkin koheesiomaalajien osalta usein reologisiin malleihin, joista seuraavassa pyritään esittelemään yleisimmät. Karkeiden maalajien osalta voidaan todeta, että niiden muodonmuutosominaisuuksia kuvaavat reologiset mallit ovat usein erilaisia kuin savimaalajeille käytetyt maalajit eikä niihin puututa tässä yhteydessä.

Reologisia malleja vastaavia yhtälöitä muodostettaessa on monessa tapauksessa käytetty nopeusprosessiteoriaa [5], [4], [11], jota ei tämän artikkelin puitteissa kuitenkaan tulla tarkemmin käsittelemään vaan esitetään yhtälöt tarkemmin perustelematta, vaikka ne alkuperäisteoksissa olisivat johdettu nopeusprosessiteorian perusteista lähtien.

KUVA 1



KUVA 2



ovat jo suhteellisen monipuoliset. Malleista, joissa on mukana St. Venant-runko, on ehkä yleisimmin käytetty Bingham-malli, joka on esitetty kuvassa 2f.

Reologisten mallien käyttö erilaisissa jännitystiloiissa

Relaksaatiolla tarkoitetaan jännityksen pienenemistä ajan mukana, kun muodonmuutoksella on vakioarvo. Yksinkertaisin relaksaatiomalli on Maxwell-runko. Maxwellin relaksaatioaika vastaa tilannetta, jolloin alkujännityksen σ_0 arvo on pienentynyt arvoon σ_0/e , jossa e on Neperin luku. Jeffreys-mallilla relaksaatio on aivan samanlainen Maxwell-mallin kanssa.

Letherisch-mallin mukainen jännitys relaksaatiokokeessa voidaan laskea kaavasta (1)

$$\sigma = E \cdot \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E}{\eta K + \eta M} \cdot t} \quad (1)$$

Laboratoriossa tehtyjen relaksaatiokokeiden tuloksia on todettu voitavan ainakin joissakin tapauksissa approksimoida (M/H)-mallilla [4] (kuva 3). Kokeet on tehty kolmiakselikokeina ja yhtälönä on käytetty nopeusprosessiteorian avulla johdettua kaavaa (2)

$$D^* = 1 + \frac{1}{B} \cdot \ln \tanh [W(t) + \tanh^{-1} e^{-B}] \quad (2)$$

$$D^* = \frac{D_0 - D}{D_0 - D_\infty}, \quad D = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$W(t) = \frac{1}{2} \alpha \cdot \beta \cdot k_1 \cdot t,$$

$$B = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot (D_0 - D_\infty)$$

Retardaatiokokeissa annetaan materiaalille muodonmuutos ε_0 , jonka jälkeen kuormitus poistetaan. Tällöin muodonmuutos alkaa ajan mukana pienentyä. Yksinkertaisin retardaatiomalli on Kelvin-runko. Retardaatioajalla tarkoitetaan aikaa, jolloin alkuperäinen muodonmuutos ε_0 on pienentynyt arvoon ε_0/e . Letherisch-mallin retardaatio on samanlainen Kelvin-mallin kanssa. Jeffreys-mallilla retardaatio voidaan laskea kaavasta (3)

$$\varepsilon = \frac{\eta_M \cdot \eta_{0M}}{E (\eta_M + \eta_N)} \cdot e^{-\frac{E (\eta_N + \eta_M)}{\eta_N \cdot \eta_M} \cdot t} \quad (3)$$

Retardaatio- ja relaksaatiokokeiden merkitys on geotekniikassa käytännön kannalta usein pieni, joten niistä yleensä on esitetty hyvin vähän tuloksia. Esimerkiksi suomalaisista maalajeista ei tiettävästi ole julkaistu yhtään varsinaisia relaksaatio- tai retardaatiokokeiden tuloksia.

Huomattavasti relaksaatio- ja retardaatiokokeita tärkeämmät ovat vakiokuormituskokeet (creep-test), joiden avulla on selvitetty mm. savimaalajien muodonmuutos- ja lujuusominaisuuksien suhdetta. Erittäin tärkeänä osana näissä selvityksissä on reologisten mallien lisäksi ollut nopeusprosessiteoria. Vakio-kuormituskokeissa on tulosten esittämiseen käytetty lähes kaikkia edellä esitettyjä malleja sekä lukuisia monimutkaisempia systeemejä. Esimerkiksi Goldstein ja Ter-Stepanian [6] ovat esittäneet, että kuvan 3 mallia voitaisiin käyttää pitkäaikaisen lujuuden kuvaamiseen. Yhtälöksi lujuuden ja kuormitusajan välille he esittävät kaavan (4).

$$\sigma_t = \sigma_0 \cdot \ln \frac{T}{t} \quad (4)$$

$$\sigma_0, T = \text{maalajivakioita}$$

Samaa mallia ovat käyttäneet Christensen & Wu [4]. Nopeusprosessiteorian mukaan he ovat johtaneet mallille yhtälön (5).

$$u^* = 1 + \frac{1}{A} \ln \tanh [Z(t) + \tanh^{-1} e^{-A}] \quad (5)$$

$$u^* = \frac{\varepsilon_1 - (\varepsilon_1)_0}{(\varepsilon_1)_\infty - (\varepsilon_1)_0} \cdot A = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \alpha \cdot D \frac{k_1 + k_2}{k_1}$$

$$Z(t) = \frac{1}{2} \alpha \beta \cdot \frac{k_1 + k_2}{k_1 + k_2} \cdot t$$

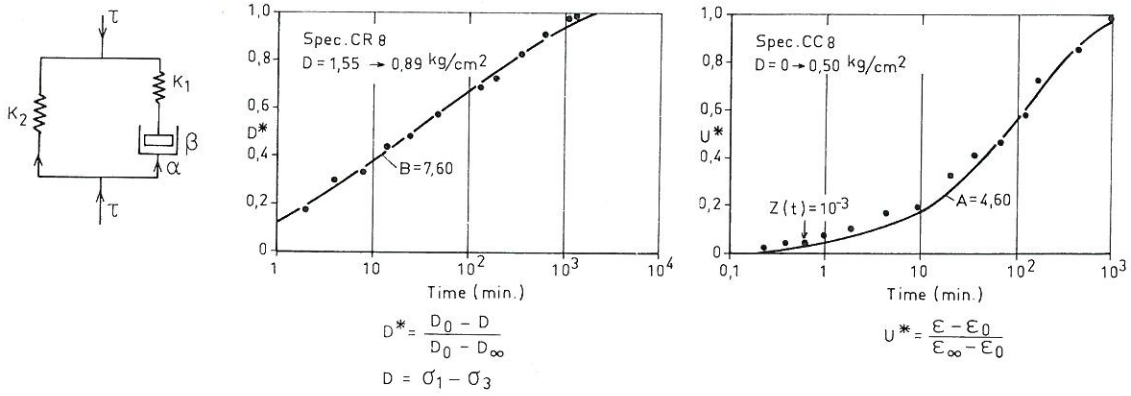
Kuva 1. Mallien perusosat. a) Hookeen runko. b) Newtonin runko. c) St. Venant-runko.

Figure 1. Fundamental parts of models. a) Hookean body. b) Newtonian body. c) St. Venant's body.

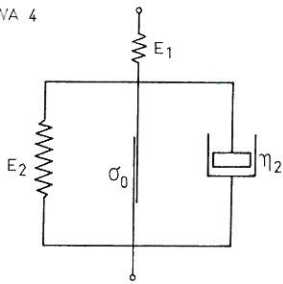
Kuva 2. Yksinkertaisia perusmalleja.

Figure 2. Simple fundamental models.

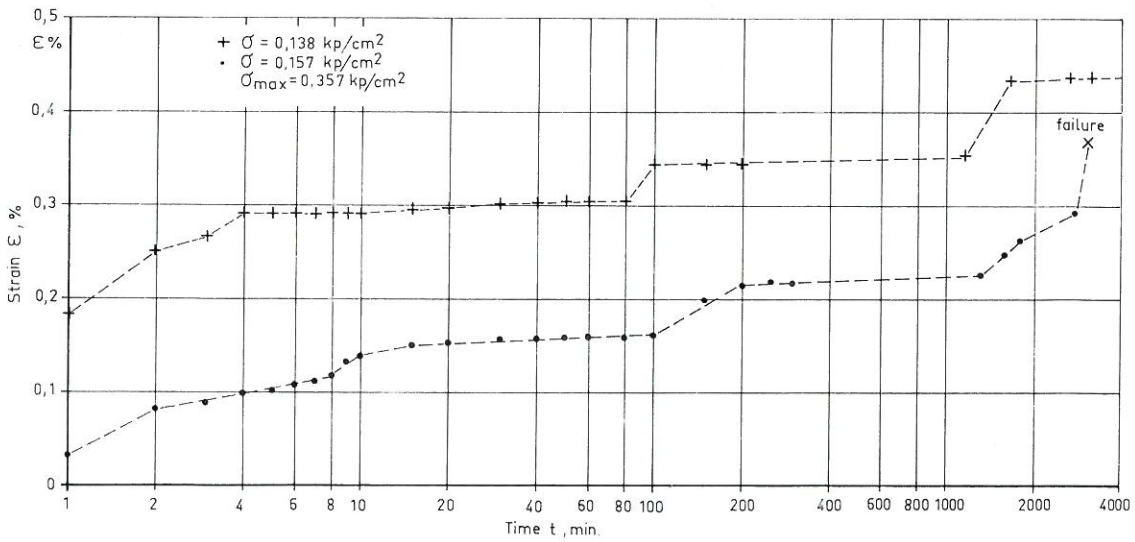
KUVA 3



KUVA 4



KUVA 5



Yhtälö on samanmuotoinen kuin relaksaatio-kokeissa käytetty yhtälö (2), mutta laaduttoman pääjännitysten erotuksen tilalla on nyt dimensioton muodonmuutos. Kuvassa 3 on esitetty yhtälön (2) vertailu käytännön tuloksiin. Kuvassa 4 on esitetty Murayaman ja Shibatan [12], [13] esittämä reologinen malli. Nopeusprosessiteorian mukaan mallia voidaan vakiokuormituksella esittää kaavalla (6).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma - \sigma_0}{B_2 \cdot E_0} \cdot \ln(A_{2v} \cdot B_2 \cdot E_2 \cdot t) \quad (6)$$

Kaava edellyttää, että jännitys σ on pienempi kuin ylempi myötöraja σ_u , jonka Murayama ja Shibata [12] määrittelevät sinä jännityksenä, jonka ylittäminen aiheuttaa muuten muuttumattomissa olosuhteissa maan murtumisen. Tämä murtuminen saattaa viedä hyvinkin pitkän ajan. Kaavan (6) mukaan muodonmuutoksen ja ajan luonnollisen logaritmin välinen yhtälö on suora. Toisaalta muodonmuutoksen luonne muuttuu kun se tulee riittävän suureksi ja jos $\sigma < \sigma_u$, niin muodonmuutos lähestyy pitkän ajan kuluttua asymp-totottisesti arvoa

$$\varepsilon t_{\infty} = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_0}{E_2} \quad (7)$$

Kuvassa 5 on esitetty kaksi geoteknisessä laboratoriossa tehtyä vakiokuormituskokeetta, jotka liittyvät tutkimukseen, jonka tarkoituksena on selvittää (ylemmän) myötörajan määrittämismahdollisuudet ja -menetelmät suomalaisissa maalajeissa. Tuloksista voidaan päätellä, että ainakin joissakin maalajeissa (Sa, SaHs) on ajan logaritmin ja muodonmuutoksen välinen vuorosuhde suoraviivainen.

Näytteen A kuormitus on ilmeisesti ollut lähellä myötörajaa, koska murtuminen on tapahtunut yli kahden vuorokauden kuluttua kokeen aloittamisesta. Näytteen B muodonmuutos alkaa ilmeisesti lähentyä raja-arvoa. Vakiokuormituskokeiden yksi tärkeimmistä käyttöaloista onkin ilmeisesti juuri myötörajan määrittäminen esim. Murayaman ja Shibatan [12] esittämällä menetelmällä, jossa identtistä näytteistä on usealla eri kuormituksella tehty vakiokuormituskoe (kuva 6).

Vakiokuormituskokeista poiketen on painumakoetta varten laadituissa malleissa otettu huomioon myös vapaan huokosveden poistuminen kuormituksen alaisena. Konsolidaatiopainumaa kuvaavia malleja on esitetty kuvassa 7. Kuvassa 7 olevat Murayama-Shibatan sekä Akain mallit ovat Krausen [8] muuntamia, koska niitä alun perin oli käytetty vain sekundääripainuman laskemiseen. Eri mallien soveltuvuutta vertailtaessa ovat Schultze ja Krause [15] todenneet, että Terzaghi-Frölichin yksinkertainen malli sopii koetuloksiin, jos sekundääripainuman osuus on pieni. Kokonaisuutena on tutkituissa silttimaalajeissa paras malli Murayaman ja Shibatan malli [13] tai sen redusoitu muoto [8]. Kuvassa 8 on Krausen esittämiä tuloksia havaintotulosten ja Murayama-Shibatan mallin vertailuista.

Eräs uusimmista konsolidaatiopainumaa käsittelevistä reologisia malleja hyväksikäyttäen tehdyistä tutkimuksista on Bardenin artikkeli [2] normaalisti konsolidoituneista savista. Bardenin käyttämä malli on esitetty kuvassa 9. Barden on yhtälöitä johtaessaan lähtenyt seuraavista kaavoista.

$$\frac{\sigma^2 u}{d_z^2} = \frac{\sigma u}{T} \quad (8)$$

$$\frac{1}{A} \sinh A (1 - \mu - u) = - \frac{\sigma \mu}{d T_s} \quad (9)$$

$$T = \text{Terzaghin aikatekija} = \frac{C_v \cdot t}{H^2}$$

$$T_s = \text{viskositeettiaikatekija} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot t}{a}$$

$$A = \alpha \cdot \Delta p$$

$$u = \text{dimensioton huokosveden paine}$$

$$Z = \text{dimensioton tilamuuttuja}$$

$$= \text{dimensioton kokoonpuristuvuusaste}$$

Kuva 3. M/H-malli [4].

Figure 3. M/H model [4].

Kuva 4. Murayama-Shibatan malli [12, 13].

Figure 4. Murayama-Shibata model [12, 13].

Kuva 5. Vakiokuormituskokeiden tuloksia.

Figure 5. Results from constant load tests.

Kuva 6. Myötörajan määrittäminen vakiokuormituskoekokeiden perusteella [13].

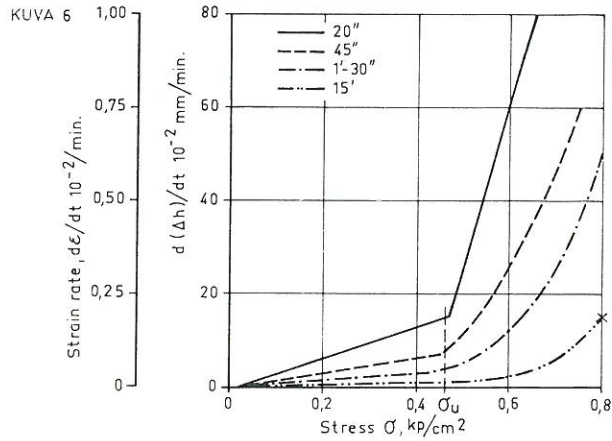
Figure 6. Yield point determined from constant load tests [13].

Kuva 7. Painumakokeen reologisia malleja [8]. a) Terzaghi-Frölich. b) Taylor-Florin. c) Tan. d) Murayama-Shibata. e) Akai.

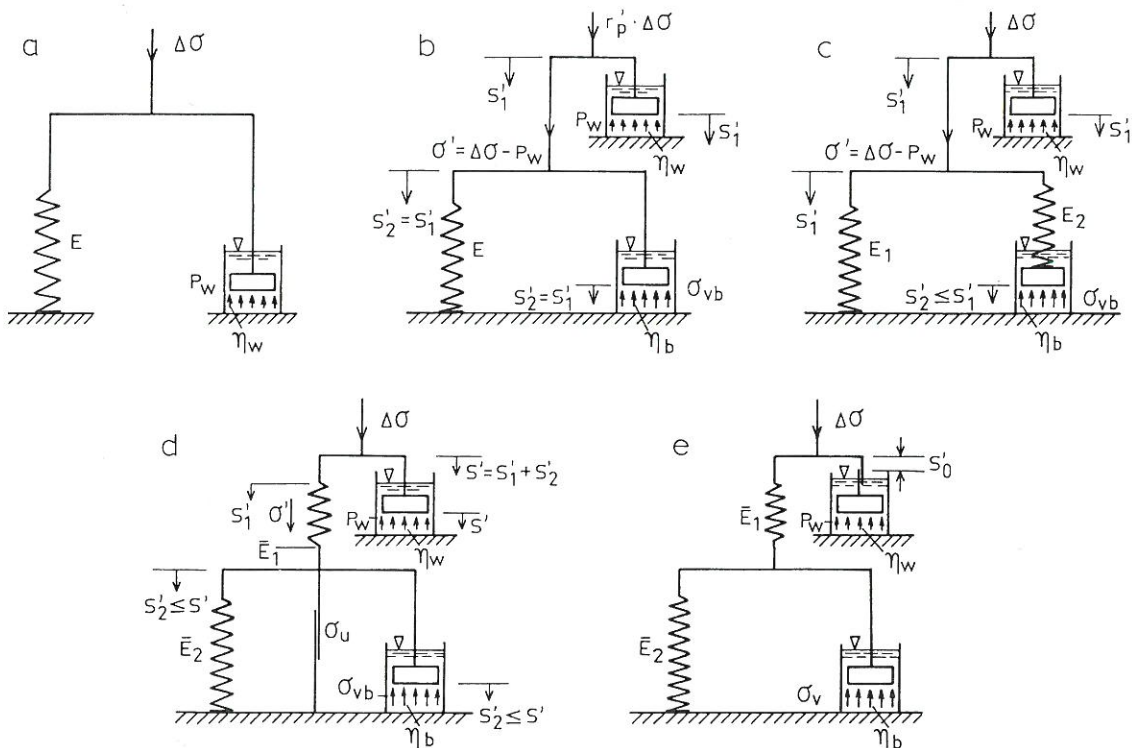
Figure 7. Rheological models for consolidation test [8] of a) Terzaghi-Frölich. b) Taylor-Florin. c) Tan. d) Murayama-Shibata. e) Akai.

Kuva 8. Painumakoetulosten ja mallin (kuva 15d) vertailu [8].

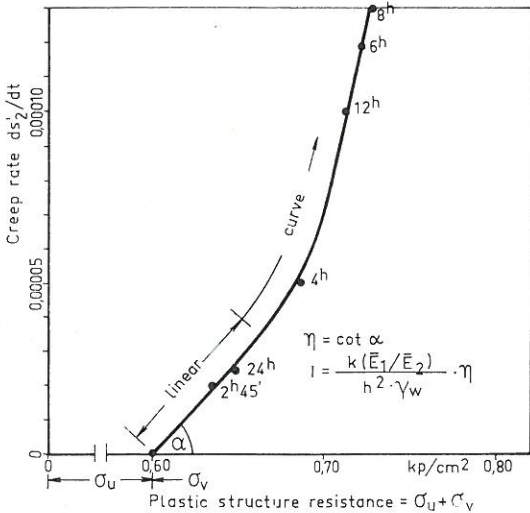
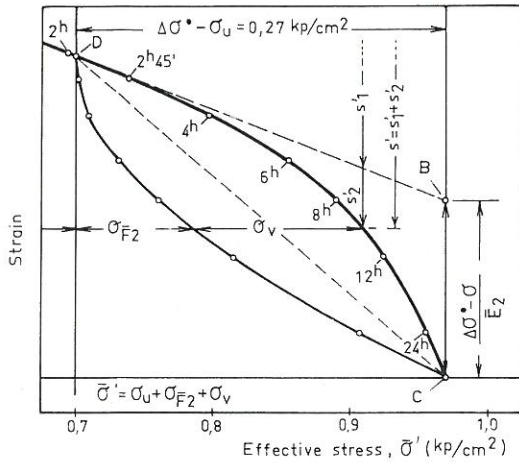
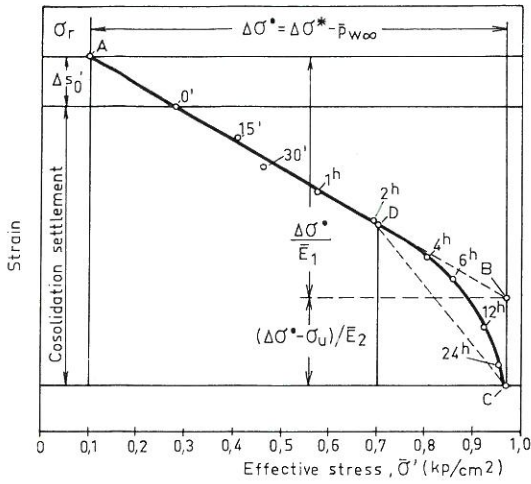
Figure 8. Comparison of consolidation test results with model (figure 15d) [8].



KUVA 7



KUVA 8



Jos määritellään M

$$M = \frac{T}{T_s} = \frac{H^2 \cdot \alpha \cdot \beta}{C_v \cdot a}$$

saadaan kaavoista (8) ja (9)

$$\frac{1}{MA} \sinh A (1 - \mu - u) = - \frac{\sigma u}{t} \quad (10)$$

Kaavaan (10) teoreettisia muotoja on esitetty kuvassa 9.

Varsinaisen konsolidaatiopainuman jälkeen tapahtuvaa sekundääristä painumaa varten useat tutkijat ovat esittäneet erilaisia malleja sekundääripainumalle. Näistä on jo edellä mainittu esim. Murayaman ja Shibatan [13] malli (kuva 4), jonka avulla he ovat myös pyrkineet esittämään sekundääripainuman nopeuden perusteella tapahtuvan esikuormituksen määrittämisen (kuva 10). Määrittäminen perustuu mallin mukaan johdettuun kaavaan (11), joka esittää sekundääripainuman nopeutta.

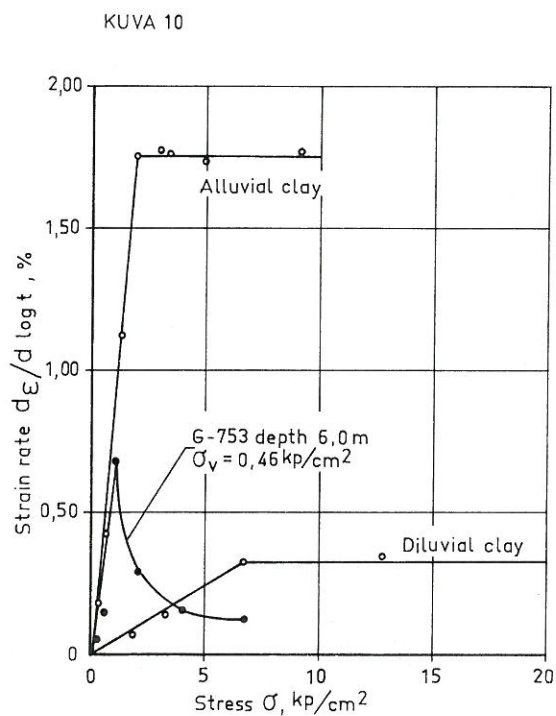
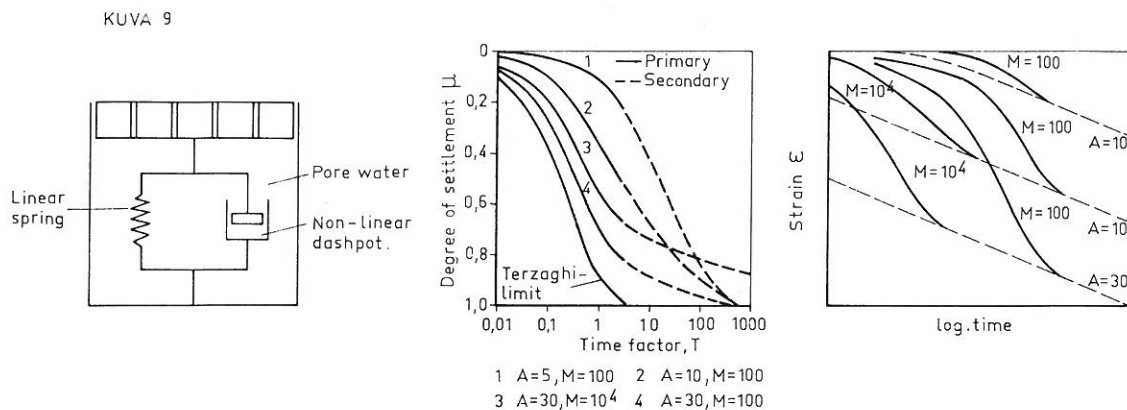
$$\frac{d\varepsilon}{d \ln t} = \frac{1 - K_0}{B_2 \cdot E_{2c}} \cdot \sigma_{Ic} \quad (11)$$

$$\frac{d\varepsilon}{d \ln t} = \frac{1 - K_0}{B_2 \cdot E_{2c}} \cdot \sigma_I \quad \sigma_I < \sigma_{Ic}$$

i_c = konsolidaatiokuorma

Kuvaan 10 on piirretty myös yksi tyyppiesimerkki Salon savien painumakokeista, josta voidaan todeta, että kaavat 11 eivät ainkaan kaikissa tapauksissa päde Suomen olosuhteissa. Kaavat edellyttävät, että sekundääripainuman ja ajan logaritmin välinen vuorosuhde on lineaarinen, joka ilmeisesti ei aina pidä paikkaansa. Schiffman, Ladd ja Chen [14] ovat esittäneet sekundääripainumalle useita malleja, joista ovat tarkemmin käsitelleet viisiparametristä mallia, jonka kaavio on H-K-K. Mallilla saadaan parametrejä sopivasti vaihtelemalla esiin ilmeisesti lähes kaikki esilletulevat sekundääripainumakäyrän muodot, mutta mallin käytännöllisyys on kokonaan eri asia.

Erikoistapauksia varten kehitetyistä reologisista malleista on esimerkiksi otettu Kawakamin ja Ogawan [7] esittämä toistuvien kuormitusten takia tapahtuvaa lujisuuden lisäystä kuvaava malli (11). Tällöin (olettaen että kuormitusnopeus on vakio) saadaan muodon-



Kuva 9. Bardenin malli [2].

Figure 9. Barden's model [2].

Kuva 10. Sekundääripainumanopeuden ja kuormituksen välinen vuorosuhde [13].

Figure 10. Correlation between rate of secondary compression and load [13].

Kuva 11. Malli toistuville kuormituksille [7].

Figure 11. Model for repeated loads [7].

muutosnopeuden ja jännityksen välinen yhteys kaavasta (12).

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \left(1 - e^{-\frac{\sigma E}{\eta_1 \cdot \sigma}}\right) + \left[\frac{\sigma}{\eta_2} + \frac{1}{\eta_3} (\sigma - \sigma_{y1})^h\right] + \left[\frac{1}{\eta_4} (\sigma - \sigma_{y2})^h\right] + \dots \quad (12)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = A e^{\alpha D} (t_1)^m \left(\frac{1}{1-m}\right) \cdot t^{1-m} + \text{vakio} & (m \neq 1) \\ \varepsilon = A e^{\alpha D} t_1 \ln t + \text{vakio} & (m = 1) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} D &= \sigma_1 - \sigma_3 \\ t_1 &= \text{aikayksikkö} \\ A &= \dot{\varepsilon} (t_1, D_0) \\ \bar{\alpha} &= \alpha D_{max} \\ \bar{D} &= D/D_{max} \end{aligned}$$

Käytännön tulokset vastaavat suhteellisen hyvin teoreettisia arvoja, mutta mallin soveltaminen on suhteellisen hankalaa.

Reologisten mallien käyttökelpoisuus

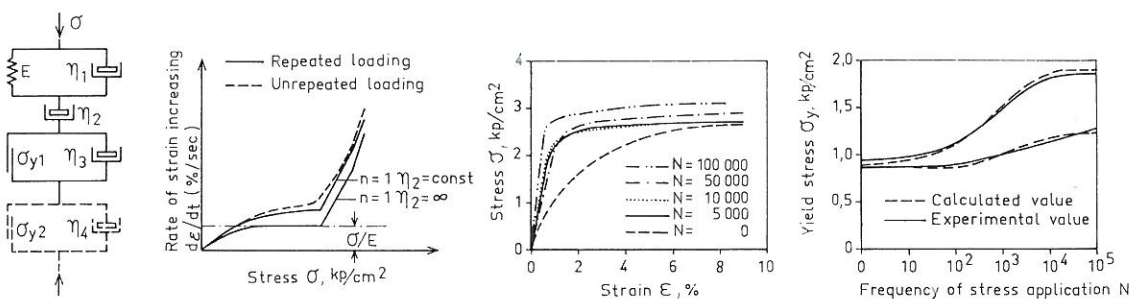
Reologisten mallien käyttöä ovat kritisoineet mm. Campanella [3] sekä Sing ja Mitchell [16]. Lähtökohdiana on ollut perustelu, että mallit yleensä soveltuvat vain tiettyihin malleihin ja olosuhteisiin, kun taas yksinomainen nopeusprosessiteorian käyttö antaisi yleisemmän tuloksen. Jälkimmäisessä tutkimuksessa on mm. esitetty, että kaikki vakiokuormitusolosuhteissa tehdyt kokeet voidaan esittää kaavojen (13) ja (14) avulla, mikäli kuormitus on 30–90 % murtokuormasta.

$$\dot{\varepsilon} = A \cdot e^{-\bar{\alpha} \bar{D}} \left(\frac{t}{t_1}\right)^m \quad (13)$$

Parametrien m , α ja A määrittäminen vaatii vähintään kahden identtisen näytteen tutkimisen vakiokuormituskokeella eri D :n arvoilla.

Yhteenvedona edellisestä esityksestä voidaan todeta, että reologisten mallien matemaattisten ratkaisujen soveltaminen käytäntöön ei aina ole mielekästä, koska parametrien suuri määrä ja yleisessä tapauksessa myös yhtälöiden monimutkaisuus (esim. kuormitusnopeus ja muodonmuutosnopeus ovat ajasta ja lämpötilasta riippuvia, saattaa tapahtua murtumisia jne.) estävät käyttökelpoisten ja yleisten yhtälöiden luomisen. Käytännön tapauksissa on ilmeisesti tarkoituksenmukaisempaa pyrkiä kehittämään empiirisiä yhtälöitä, joiden lähtökohdaksi on saatavissa reologisista malleista tai nopeusprosessiteoriasta. Mallien suurimman merkityksen onkin katsottava olevan siinä, että niiden avulla voidaan havainnollistaa niitä tapahtumia, mitkä hallitsevat maalajien muodonmuutoksia.

KUVA 11



Kirjallisuutta

1. Akai, Koichi, Der strukturellen Eigenschaften von Schluff, Mitt. Inst. f. Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik, H. 22. Aachen. 1960.
2. Barden, L., Time Dependent Deformation of Normally Consolidated Clays and Peats. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 95, No. SM1, pp. 1–31. Ann Arbor. 1969.
3. Campanella, R. G., Effect of Temperature and Stress on the Time-Deformation Behavior of Saturated Clay. Thesis presented to the University of California at Berkeley in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. University Microfilms. Ann Arbor. 1965.
4. Christensen, R. W. and Wu, T. H., Analysis of Clay Deformation as a Rate Process. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE Vol. 90, No. SM6, pp. 125–157. 1964.
5. Glasstone, S., Laidler, K. J. and Eyring, H., The Theory of Rate Processes. New York (1941).
6. Goldstein, M. and Ter-Stepanian, G., The Long-term Strength of Clays and Depth Creep of Slopes. Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Engineering, Vol. II, London. 1957.
7. Kawakami, Fusayoshi and Ogawa, S., Yield Stress and Modulus of Elasticity of Soil Rheology and Soil Mechanics, Symposium Grenoble, April 1–8, 1964. Berlin/Heidelberg/New York. 1966.
8. Krause, J., Das rheologische Verhalten von Schluff beim Kompressionsversuch. Mitt. Inst. f. Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik, H. 35, Aachen. 1966.
9. Langer, M., Zur Theorie der Deformationsvorgänge in Tonen. Geologisches Jahrbuch, Bd. 79, S. 1–22. Göttingen. 1962.
10. Langer, M., Vergleichende rheologische und bodenmechanische Untersuchungen den Tonen. Geologisches Jahrbuch, Bd. 79, S. 255–294. Göttingen. 1962.
11. Mitchell, J. K., »Shearing Resistance of Soils as a Rate Process». Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, No. SM1, pp. 29–61. Ann Arbor. 1964.
12. Murayama, S. and Shibata, T., Flow and Stress Relaxation of Clays. Rheology and Soil Mechanics Symposium Grenoble, April 1–8, 1964. Berlin/Heidelberg/New York. 1966.
13. Murayama, S. and Shibata, T., On the Rheological Characteristics of Clay. Part 1. Disaster Prevention Research Institute, Bulletin No. 26. Kyoto University, Kyoto. 1958.
14. Schiffman, R. L., Ladd, C. C. and Chen, A. T-F., The Secondary Consolidation of Clay Rheology and Soil Mechanics. Symposium Grenoble, April 1–8. 1964. Berlin/Heidelberg/New York. 1966.
15. Schultze, E. and Krause, J., Pore Water Pressure and Creep in One-Dimensional Compression of Silt. Rheology and Soil Mechanics. Symposium Grenoble, April 1–8. 1964. Berlin/Heidelberg/New York. 1966.
16. Singh, A. and Mitchell, J. K., General Stress-Strain-Time Function for Soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, No. SM1. Ann Arbor. 1968.
17. Tan, T. K., Onderzoekingen over de rheologische eigenschappen van klei. Gravenhage. 1954.
18. Wu, T. H., Douglas, A. G. and Goughnour, R. D., Friction and Cohesion of Saturated Clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 88, No. SM3. Ann Arbor. 1962.

Antti Leskelä, dipl.ins., tutkija VTT:n geoteknillinen laboratorio, Otaniemi.