

PASSIIVISEN MAANPAINEEN JAKAUTUMINEN JÄYKÄN ANKKURILAATAN
EDESSÄ HIEKKAMAASSA

RAUNO HIEKKANEN

Rakenteiden Mekaniikka
7 (1974) 2, s. 63...77
Rakenteiden Mekaniikan
Seura, Helsinki

ALKULAUSE

Helsingin teknillisessä korkeakoulussa on viime vuosina tutkittu professori K.V. Helenelundin johdolla tukirakenteiden siirtymiä ja niiden vaikutusta maanpaineen suuruuteen ja jakautumiseen. Tämä tutkimus tehtiin vv. 1972...1973 teknillisen korkeakoulun pohjarakennuksen ja maarakennemekaniikan laboratoriossa Valtion teknillis-tieteellisen toimikunnan myöntämän apurahan turvin.

1. JOHDANTO

Maanpaine laajimmassa merkityksessään tarkoittaa voimia ja jännityksiä, jotka esiintyvät maassa tai maan ja tukirakenteen välisessä kosketuspinnassa. Tukirakenteen liikkuessa siihen rajoittuvaa maata vasten syntyy maamassassa tätä liikettä vastustava voima (passiivinen maanpaine). Voima kasvaa kohti maksimiaan, ja yleensä oletetaan, että maksimi saavutetaan, kun leikkauslujuus murtopinnassa

tai murtovyöhykkeessä on kehittynyt täydellisesti. Maanpaineen suunnan, suuruuden ja jakautumisen on todettu riippuvan maan murtumisesta, fysikaalisista ominaisuuksista, maan ja tukirakenteen välisestä vuorovaikutuksesta sekä tukirakenteen jäykkyydestä, sen liikkumistavasta ja liikkeen suuruudesta.

Ankkurilaattaan vaikuttavan passiivisen maanpaineen ratkaisu eroaa tavanomaisesta tukiseinäprobleemasta, koska laatan korkeus ja leveys sekä etäisyys maanpinnasta vaativat lisäselvityksiä.

2. PASSIIVISEEN MAANPAINEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Useat tutkijat ovat todenneet, että passiivisen kokonaispaineen P_p suurimmat arvot saadaan, kun seinä on translaatiossa, ja pienimmät, kun seinä on rotaatiossa alareunansa ympäri. Seinän kiertäessä alareunansa ympäri syntyy seinän yläreunassa säteittäinen leikkausvyöhyke, joka laajenee rotaation jatkuessa. Suurimmat muodonmuutokset keskittyvät lähelle maanpintaa, ja tämän vuoksi maa saavuttaa siellä ensin maksimijännityksensä. Seinän kiertyessä yläreunansa ympäri syntyy maassa murtovyöhyke, joka kasvaa seinän alareunasta maanpintaa kohti. Seinän ollessa translaatiossa murtopinta laajenee seinän alareunasta ja samalla kehittyy säteittäinen leikkausvyöhyke seinän yläosassa. Seinän translaatioliikkeeseen sisältyy näin ollen kummankin rotaatioliikkeen aiheuttama murtumismekanismi [1].

Klassilliset maanpaineteoriat antavat jäykän seinän edessä lineaarisen painejakautuman. Tällaisen painejakautuman saa aikaan likimäärin vain seinän translaatioliike riippumatta seinän kaltevuudes-

ta [2].

Maamassan ja tukirakenteen välisen seinäkitkan suuruus riippuu seinän sileydestä, täyttömateriaalista ja sen tiiveydestä. Seinän nouseminen tai painuminen aiheuttaa muutoksen seinäkitkan suuntaan. Seinän liikkeessa maahan nähden ylöspäin suuntautuu seinäkitka alaspäin ja vähentää passiivista kokonaispainetta. Vastaavasti seinän liikkeessa maahan nähden alaspäin seinäkitka suuntautuu ylöspäin ja lisää passiivista kokonaispainetta. On todettu, että tukirakenteen taustan täyttämistapa vaikuttaa seinäkitkan kehittymiseen. Taustaa tiivistettäessä maahiukkaset liikkuvat alaspäin. Kun tiivistäminen lopetetaan, vastustaa seinäkitka ylöspäin pyrkivän maan liikettä. Tämä puolestaan aiheuttaa maanpaineen kasvun ennen mitään seinän siirtymistä [3].

Weissenbachin [4] kolmidimensionaalisten maanpainetutkimusten mukaan rakenteilla on olemassa ns. kriittinen leveys b_{kr} , joka tarkoittaa sitä, että kriittistä leveyttä suuremmat rakenteet aiheuttavat maassa todellisen murtokappaleen, kun taas tätä leveyttä kapeammat rakenteet vain työntyvät maan sisään ja puskevat sen sivuun. Kriittisen leveyden on todettu olevan $0,3 \times h$ (h = rakenteen korkeus maassa).

Horn [4] on todennut, että ankkurilaatan kolmidimensionaalisen passiivisen kokonaispaineen P'_p eroavuus kaksidimensionaalisesti lasketusta kokonaispaineesta on merkityksettömän pieni, jos laatan leveys b on suurempi kuin $3,3 \times h$. Kolmidimensionaalinen passiivinen maanpaine P'_p voidaan Hornin mukaan määrätä translaatioliikkeessä olevalle laatalle kaksidimensionaalisesti lasketusta passiivisesta kokonaispaineesta P''_p ($= P_p \times b$) kaavalla

$$P'_p = P''_p A \left(1 + C \frac{h}{B}\right) \quad (1)$$

Kaavassa A on mallitekijä ja C muototekijä. Kitkamaalle voidaan Hornin mukaan käyttää muototekijän arvoa 0,3. Mallitekijän A on todettu vaihtelevan melko paljon. Horn esittää kuitenkin A:lle arvoa 0,75.

Translaatiossa liikkuvan laatan murtotilaisen siirtymän l_m , laatan korkeuden h ja maamassan suhteellisen tiiveyden D_r keskinäisen riippuvuuden Horn esittää kaavalla

$$l_m = 1,04 \times h^{1,5} (1 - 0,625 \times D_r) \times 10^{-3} \quad (2)$$

missä l_m ja h ovat annettu cm:nä. On muistettava, että pienimit-takaavaisissa mallikokeissa maassa vallitsevan koheesion osuus laa-tan kokonaisvastuksesta on huomattava. Sen osuus kuitenkin vähenee laatan syvyyden kasvaessa, koska koheesion osuus lisääntyy syvyyden toisessa potenssissa ja kitkan osuus puolestaan kolmannessa potenssissa [5].

3. KOEJÄRJESTELYT

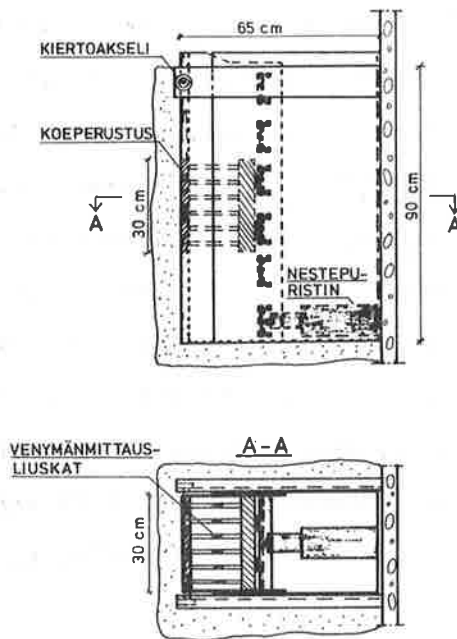
Kokeellisessa tutkimuksessa tarkasteltiin 85 cm, 55 cm ja 25 cm korkeiden laattojen aiheuttaman passiivisen maanpaineen kehitty-mistä ja jakautumista sekä murtovyöhykkeen muodostumista. Laatan kiertoakseli oli laatan ylä- ja alareunassa ja akseli oli koko ajan jäykästi kiinnitetty. Laatta ulottui joka kokeessa maanpintaan.

Koekuormitukset suoritettiin koealtaassa, jossa perusmaana käytetty hiekka (geo-luokituksen mukaan) tiivistettiin tärykellä 10 cm:n kerroksina. Hiekan raekoko vaihteli 0,02...2,0 mm, josta siltilajitetta (0,002...0,06 mm) oli 17%. Rakeiden keskiläpimitta d_{50} oli 0,11 mm ja raekokosuhte d_{60}/d_{10} 3,2. Hiekan keskimääräinen vesipitoisuus w oli sullottaessa 4,0 %. Vastaava keskimääräinen kuivatilavuuspaino γ_d oli 1,45 kp/dm³, joka vastaa suhteellista tiiveyttä $D_r = 0,26$ määritettynä normaali-Proctor-kokeella. Keskimääräistä kuivatilavuuspainoa vastaava kitkakulma θ oli 32° ja keskimääräistä kosteutta vastaava koheesio c oli 0,04 kp/cm². Maamassan ja laatan väliseksi kitkakulmaksi oli kokeellisesti saatu 28°.

Koelaattana toimi kuvan 1 esittämän teräslaatikon etuseinä. Etuseinän kiertoakselin asemaa muuttamalla laatan korkeus voitiin valita lähes mielivaltaisesti. Koska maanpaineiden mittaamiseen käytetyn koeperustuksen koko oli vain 30 cm × 30 cm, sen asemaa jouduttiin välillä muuttamaan koko laatan painejakautuman selvittämiseksi.

Koeperustus jakautui 36 pienempään 5 cm × 5 cm suuruiseen elementtiin. Jokaiseen elementtiin oli kiinnitetty alumiinisauva, joka tukeutui perustuksen jäykkään takalevyyn. Kuhunkin koeperustuksen elementtiin kohdistunut sauvan suuntainen paine mitattiin sauvoihin kiinnitettyjen venymänmittausliuskojen avulla.

Maamassassa kehittyvän murtovyöhykkeen tutkimiseksi laatan eteen upotettiin lasikuitupalojen muodostamia pystysuoria jonoja. Murtopintahavainnot laatan suuntaisissa leikkauksissa kuitenkin epäonnistuivat tilanahtauden takia.



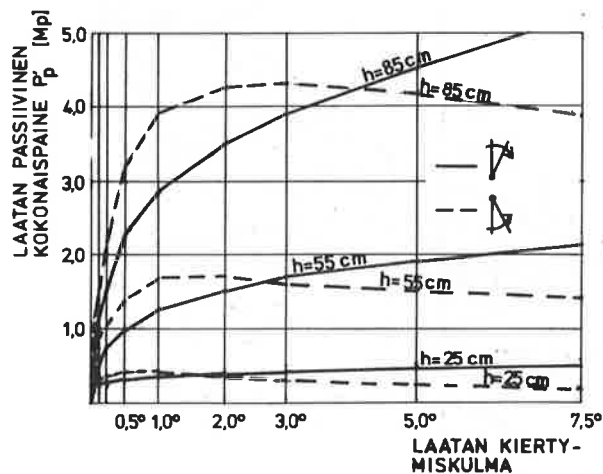
Kuva 1. Kokeessa käytetty laitteisto.

4. KOETULOSTEN KÄSITTELY

Maanpainehavaintojen analysoinnin helpottamiseksi laadittiin tietokoneohjelma, jossa otettiin huomioon venymänmittausliuskojen herkkyystekijä, mitattujen nollalukemien liukuminen kokeen aikana ja kokeen alkutilanteessa vallinnut maanpaine sekä mittaussauvojen symmetrinen asema. Paineet laskettiin lineaarisella inter- ja ekstrapolaatiolla matriisiin 103×31 , 67×31 ja 31×31 riip-puen laatan korkeudesta (85 cm, 55 cm ja 25 cm). Matriisit tulos-tettiin rivikirjoittimella, jolloin määrättyä paineväliä vastasi tietty merkki. Hankaluutena kuitenkin oli, että pienillä laatan kiertymiskulman arvoilla, painekartat olivat lähes kokonaan samaa merkkiä. Vastaavasti suurilla kiertymiskulman arvoilla merkit vaih-tuivat hyvin nopeasti.

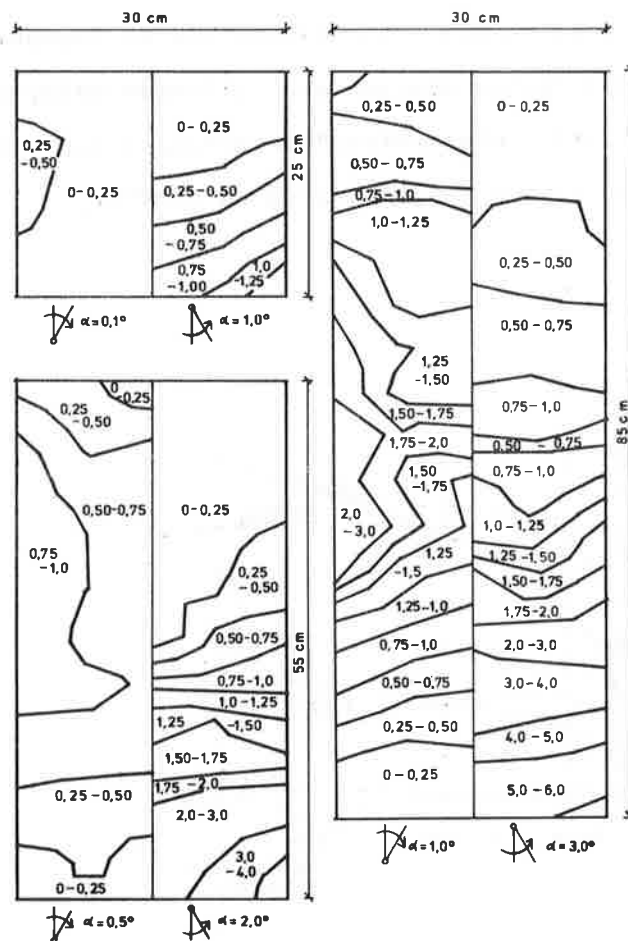
5. KOETULOSTEN TULKINTA

Kokeissa havaittiin, että laatan kiertyessä yläreunansa ympäri laatan passiivinen kokonaispaine P'_p saavutti selvän maksimiarvon, kun taas laatan kiertyessä alareunansa ympäri kokonaispainet kasvoivat koko ajan lähtien vain tiettyä asymptoottia (kuva 2). Ensin mainitussa kiertymistapauksessa kokonaispainet olivat murtotilaan saakka selvästi suuremmat kuin jälkimmäisessä tapauksessa. Kiertoakselin ollessa laatan alareunassa voitaneen selvimpänä murtohetkenä pitää sitä laatan kiertymiskulman arvoa, jolla kokonaispaineen kasvua kuvaavan käyrän kaarevuussäde on pienin.

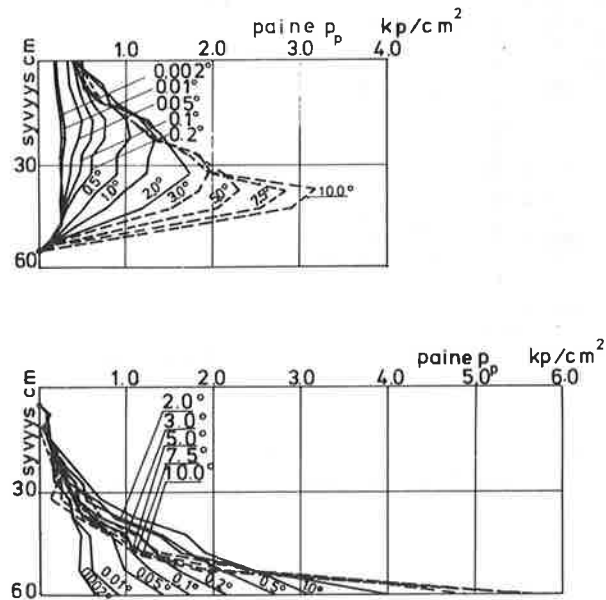


Kuva 2. Laatan passiivisen kokonaispaineen P'_p (Mp) kehittyminen eri kokeissa.

Passiivinen maanpaine jakautui siten, että paineet keskittyivät laatan reunoille (kuva 3). Tämä johtui maassa vallitsevasta näennäisestä koheesiosta ja laatan aikaansaaman murtokappaleen reunojen aiheuttamasta lisävastuksesta. Laatan kiertyessä alareunansa ympäri suurimmat paineet havaittiin laatan alemman kolmannespisteen tienoilla ja vastaavasti laatan kiertyessä yläreunansa ympäri suurimmat paineet havaittiin laatan alareunassa (kuva 4).

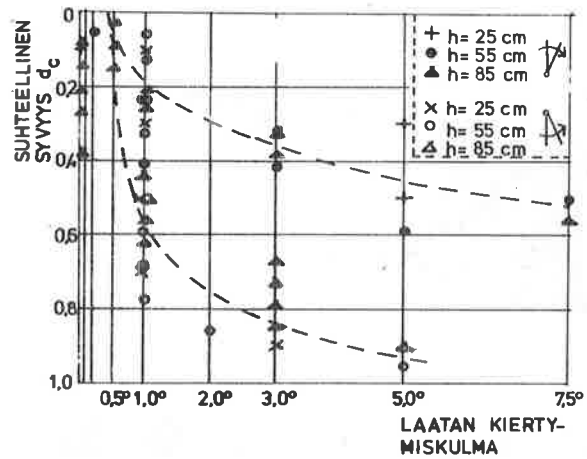


Kuva 3. Passiivisen maanpaineen p_p (kp/cm^2) jakautuminen eri kokeissa murtotilaa vastaavilla laatan kaltevuuksilla.

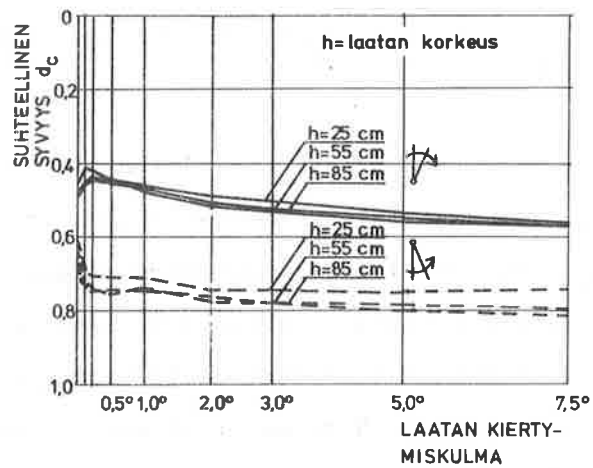


Kuva 4. Passiivisen maanpaineen kehittyminen seinän keskilinjalla laatan korkeuden ollessa 55 cm.

Kuvassa 5 on esitetty vaakarivien elementtien keskiarvon huippupainetta $p_p \max$ vastaava laatan kiertymiskulma eri suhteellisissa syvyyksissä d_c . Huippupaineiden tarkastelu keskittyi vaakarivien elementtien keskiarvoihin, koska pystytasojen painejakautumat ja paineiden kehitys ei aina jatkunut saumattomasti koeperustuksen eri asemien liittymiskohdissa. Kuvan 5 mukaan tietyssä suhteellisessa syvydessä d_c esiintyy huippupaine $p_p \max$, kun laatan siirtymä tässä syvydessä on saavuttanut arvon, joka on tietty osa laatan korkeudesta. Huippupaineet saavutettiin ensin laatan yläosassa kummassakin laatan kiertymistapauksessa. Laatan kiertyessä alareunansa ympäri ko. siirtymä oli suurempi kuin laatan kiertyessä yläreunansa ympäri.



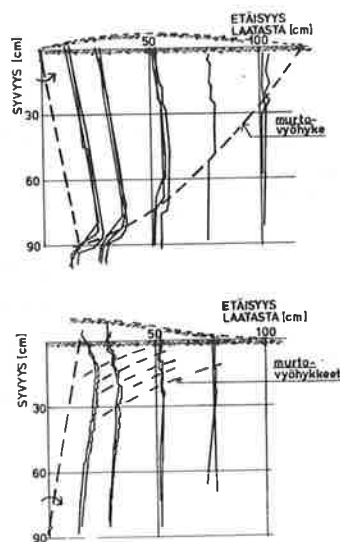
Kuva 5. Laatan vaakarivien elementtien maksimipaineen $p_{p \max}$ (kp/cm^2) keskiarvoa vastaava kiertymiskulma eri syvyyksissä d_c (= tarkasteltava syvyys/laatan korkeus).



Kuva 6. Laatan passiivisen kokonaispaineen P' resultantin vaikutuspisteen sijainti eri kokeissa.

Laatan passiivisen kokonaispaineen P'_D resultantin vaikutuspisteen sijainti muuttui laatan kiertyessä (kuva 6). Laatan kiertyessä alareunansa ympäri resultantin vaikutuspiste sijaitsi suhteellisessa syvyydessä $d_c = 0,4 \dots 0,6$, kun taas laatan kiertyessä yläreunansa ympäri ko. syvyys vaihteli $0,6 \dots 0,8$.

Liukupintahavaintojen mukaan maa murtui logaritmista spiraalia muistuttavaa liukupintaa pitkin, kun laatta kiertyi yläreunansa ympäri (kuva 7). Havaittu liukupinta jää kuitenkin lyhyemmäksi kuin tasotapaukselle laskemalla saatu vaarallisin logaritminen spiraali-liukupinta. Tämä eroavuus johtuu suurelta osin laatan synnyttämän murtokappaleen reunojen aiheuttamasta lisävastuksesta. Laatan kiertyessä alareunansa ympäri maa murtui taas progressiivisesti vyöhykkeinä, vaikkakin 25 cm korkea laatta sai aikaan laatan alareunan kautta kulkevan suoraa liukupintaa muistuttavan murtuman.



Kuva 7. Murtovyöhykkeen muodostuminen, kun laatan korkeus on 85 cm.

Kummassakin laatan rotaatioliikkeessä maa nousi koko ajan laatan edessä. Tämä osoittaa, että seinäkitka on molemmissa kiertymistapauksissa suuntautunut ylöspäin, jolloin myös passiivisen maanpaineen resultantti on suuntautunut vinosti ylöspäin.

6. KOETULOSTEN VERTAILU

Verrattaessa kokeesta saatua laatan keskilinjaa lähinnä olevan mittaussauvarivin passiivista kokonaispainetta P_p tavanomaisimpiin tasotapauksen passiivisen maanpaineen määrittämismenetelmiin todetaan, että laskumenetelmät yleensä antavat pienemmän kokonaispaineen kuin kokeesta on saatu (taulukko 1). Mitattujen ja laskettujen kokonaispaineiden vastaavuus heikkenee laatan korkeuden kasvaessa. Tämä johtuu lähinnä siitä, että laatan korkeuden kasvaessa sen synnyttämän murtokappaleen reunojen vaikutus laatan keskivivon paineeseen kasvaa.

LAATAN KORKEUS	$\frac{P_p}{P_0}$			$\frac{P_p}{P_0}$			
	85 cm	55 cm	25 cm	85 cm	55 cm	25 cm	
Rankine koe	0,22	0,27	0,39	0,13	0,15	0,18	[6]
Blum koe	0,95	1,32	2,54	0,50	0,69	1,15	[6]
Dubrova koe	0,05	0,08	0,60	0,12	0,16	0,28	[7]
Log. spir. liukup. koe	---	---	---	0,45	0,61	1,12	[6]
Brinch Hansen koe	0,79	1,18	2,26	0,62	0,95	1,87	[8]

Taulukko 1. Eri teorioiden mukaan laskettujen passiivisten kokonaispaineiden ja kokeesta saatujen laatan keskilinjän kokonaispaineiden välinen suhde.

Useimmat maanpaineteoriat antavat passiiviselle maanpaineelle hydrostaattisen jakautuman, joka poikkeaa varsin paljon kokeiden antamista tuloksista. Ainoastaan Dubrovan mukaan laskettu painejakautuma on samanlainen kuin kokeessa on havaittu, jos laattaa kiertyy yläreunansa ympäri.

Eri ankkurilaattateorioiden mukaan laskettu laatan passiivinen kokonaispaine P'_p jää yleensä pienemmäksi kuin kokeen antama (taulukko 2). Laatan kiertyessä alareunansa ympäri kokeellisen ja lasketun kokonaispaineen vastaavuus on kuitenkin selvästi parempi kuin laatan kiertyessä yläreunansa ympäri. Paras yhtäpitävyys saadaan Ole Steenin laskumenetelmällä, jos laatta kiertyy alareunansa ympäri. Erot havaittujen ja laskettujen kokonaispaineiden välillä johtuvat suureksi osaksi siitä, että laatan kiertymistapa ei aivan oikein vastaa laatan todellista toimintaa, sillä harvoin voidaan kiertymisakseli olettaa jäykästi kiinnitettyksi.

LAATAN KORKEUS	\overrightarrow{D}			\overleftarrow{D}			
	85 cm	55 cm	25 cm	85 cm	55 cm	25 cm	
Bucholz (koheesio) koe	0,92	0,91	2,45	0,57	0,49	0,40	[5]
Bucholz (koheesio) koe	---	---	0,88	---	---	0,38	[5]
Krey koe	0,81	0,86	1,10	0,46	0,47	0,45	[6]
Hücker koe	0,96	0,86	1,65	0,61	0,46	0,27	[9]
Petermann koe	---	---	2,26	---	---	1,49	[10]
Zweck koe	0,73	0,88	1,23	0,48	0,53	0,53	[11]
Brinch Hansen (jatko kuva laatta)	0,32	0,46	1,07	0,21	0,28	0,46	[12]
Brinch Hansen (yk. koe sit. laatta)	0,78	0,79	0,87	0,52	0,48	0,38	[13]
Krebs Ovesen koe	0,62	0,56	0,70	0,41	0,34	0,30	[14]
Ole Steen koe	0,98	0,97	1,01	0,63	0,59	0,43	[13]
Horn koe	1,12	1,27	2,09	0,63	0,70	0,87	[4]

Taulukko 2. Eri laskumenetelmillä saatujen ja kokeesta havaittujen laatan passiivisten kokonaispaineiden P'_p välinen suhde.

Laskemalla kaavan 1 malli- ja muototekijät murtotilaa vastaavalle laatan kaltevuudelle ja passiiviselle kokonaispaineelle saadaan likimain vakiona pysyvät A:n ja C:n arvot ($A = 0,67...0,61$ ja $C = 0,88...0,90$), jos laatta kiertyy yläreunansa ympäri. Laatan kiertyessä alareunansa ympäri saadut A:n ja C:n arvot vaihtelevat erittäin paljon ($A = 0,31...0,06$ ja $C = 1,06...7,5$).

Laatan murtotilainen siirtymä (kaava 2) voidaan nyt kirjoittaa kummallekin rotaatioliikkeelle

$$l_m = 5,8 \cdot h^{2,8} (1 - 0,625 \cdot D_r) \cdot 10^{-6} \quad (\text{kiertoakseli alhaalla}) \quad (3)$$

$$l_m = 1,09 \cdot h^{1,9} (1 - 0,625 \cdot D_r) \cdot 10^{-3} \quad (\text{kiertoakseli ylhäällä}) \quad (4)$$

joissa l_m ja h on annettu cm:nä ja $D_r = 0,26$.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa todettiin laatan korkeuden ja kiertymistavan vaikutus passiivisen maanpaineen jakautumiseen ja suuruuteen. Kokeessa havaitut painejakautumat poikkesivat huomattavasti klassillisten maanpaineteorioiden antamasta hydrostaattisesta painejakautumasta. Vaikka kokeellisesti saadut paineet yleensä poikkesivat laskeutuista paineista, vallitsi kokonaispaineiden välillä usein lähes vakiona pysyvä suhde. Liukupintahavaintojen mukaan kumpikin rotaatioliike sai aikaan oman murtumismekanismin.

KIRJALLISUUTTA

- 1 James, R.G., Bransby, P.L., Experimental and theoretical investigations of a passive earth pressure problem. *Geotechnique*, Vol. XX, No 1, 1970
- 2 Rowe, P.W., Peaker, K., Passive earth pressure measurements. *Geotechnique*, Vol. XV, No 1, 1965
- 3 Broms, B., The influence of model retaining wall displacement on active and passive earth pressures in sand. Proc. 5th European conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. I, Madrid 1972
- 4 Horn, A., Resistance and movement of laterally loaded abutments. Proc. 5th European conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. I, Madrid 1972
- 5 Buchholz, W., Erdwiderstand auf Ankerplatten. *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft*, Band 12, 1930/31
- 6 *Grundbau - Taschenbuch*. Band I, Berlin 1966
- 7 Harr, M.E., *Foundations of theoretical soil mechanics*, Tokyo 1966
- 8 Hansen, J.B., Spundwandberechnung nach dem Traglastverfahren. *Internationaler Baugrundkursus 1961*. Heft 25. Aachen 1962
- 9 Hückel, S.M., Passiver Erddruck bei Verankerungsrichtungen. *Internationaler Baugrundkurs 1961*. Heft 25. Aachen 1962
- 10 Petermann, H., Bewegung und Kraft bei Ankerplatten. *Bauingenieur* 14, 1933
- 11 Zweck, H., Erdwiderstand als räumliches problem. *Bautechnik* 7. 1953
- 12 Kezdi, A., *Erddrucktheorien*. Berlin 1962
- 13 Hansen, J.B., Resistance of a rectangular anchor slab. The Danish geotechnical institute. *Bulletin No 21*. Copenhagen 1966
- 14 Ovesen, N.K., Anchor slabs, Calculation methods and model tests. The Danish geotechnical institute. *Bulletin No 16*. Copenhagen 1964

Rauno Hiekkanen, dipl.ins., Insinööritoimisto Maa ja Vesi Oy