

POHJAPAIINEEN JAKAUTUMINEN JÄYKÄN PERUSTUKSEN ALLA HIEKKAMAASSA

JORMA HARTIKAINEN

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 3 No. 2 1970 ss. 46–57;
Rakenteiden Mekaniikan Seura, Helsinki

Yhteenveto: Suoritetussa kokeellisessa tutkimuksessa on pyritty selvittämään kuormituksen suuruuden, pohjaveden pinnan korkeuden, perustamissyvyyden ja kuormituksen toistamisen vaikutuksia keskeisesti ja epäkeskeisesti kuormitetun perustuksen pohjapaineen jakautumiseen. Tutkimus on osoittanut kaikkien näiden tekijöiden selvästi vaikuttavan pohjapaineen jakautumiseen. Kolmen ensimmäisen tekijän osuus on tilastollisesti todistettu. Tutkimuksen perusteella voidaan odottaa, että tasoperustuksen mitoitus on aina »varmalla» puolella käyttötilassa, kun pohjapaine lasketaan kokoonpuristuvuusmoduulimenetelmällä yhteen suuntaan ja suoraviivaisena. On osoittautunut, että yleensä kysymykseen tulevilla keskimääräisillä kuormituksilla pohjapaine ei jakaannu selvästi murtotilan mukaisesti paitsi, kun perustamissyvyys $D = 0$. Koekuormituksissa saavutetut kantavuudet antavat aiheen todeta, että haluttaessa perusanturan mitoituksessa todella säästää, kannattaa käyttää Ballan teorian mukaisia kantavuuskaavan kertoimia.

1. Johdanto

Kun perustusta kuormitetaan, maa vastaa kuorman suuruusella reaktiopaineella, jota kutsutaan pohjapaineeksi. Sen jakautuminen määrää perusanturan tai -laatan eri pisteissä vaikuttavan taivutusmomentin ja leikkausvoiman suuruuden. Siksi pohjapaineen jakautuma olisi tunnettava perustusta mitoitetussa.

Teoreettisesti pohjapaineen jakautuminen on pystytty hallitsemaan toistaiseksi vain kahdessa ääritapauksessa, nimittäin kimmo- ja murtotilassa. Molemmissa tapauksissa on jouduttu tekemään runsaasti yksinkertaistavia lähtöoletuksia. Kun teoreettinen tarkastelu kimmo- ja murtotilassa antaa päinvastaisen tuloksen (kuva 1) — ja koska tilanne käytännössä on aina näiden ääriarvojen välillä — on tarpeen kokeellisesti selvittää pohjapaineen jakautumiseen vaikuttavia tekijöitä.

Kun kyseessä on sama maalaji ja samalla vaikutussuoralla oleva kuormitusresultantti, pohjapaineen jakautuminen riippuu seuraavista tekijöistä:

- kuormituksen suuruudesta
- perustamissyvyydestä
- kovan pohjan läheisyydestä
- pohjaveden korkeudesta
- perustuksen jäykkyydestä
- perustuksen muodosta
- perustuksen pohjan karheudesta
- perustuksen pohjan muodosta
- maan tiiviydestä
- kuormituksen toistoista
- ajasta, joka on kulunut kuormituksen lisäämisestä.

Teknillisen korkeakoulun pohjarakennuksen ja maarakennusmekaniikan laboratoriossa prof. Helenelundin johdolla suoritetuissa koekuormituksissa on pyritty selvittämään kuormituksen suuruuden, perustamissyvyyden, pohjavedenpinnan korkeuden ja kuormituksen toistamisen vaikutusta pohjapaineen jakautumiseen. Koekuormituksissa on käytetty neliömuotoista ja ympyränmuotoista koeperustusta sekä keskistä ja epäkeskistä pystysuoraa kuormitusta. Koesarja on pyrkinyt jatkaa ja täydentämään prof. Helenelundin (1966) aloittamaa pohjapaineen jakautumista selvittävää tutkimusohjelmaa.

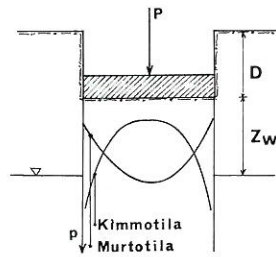
2. Laitteet ja koejärjestely

Koekuormitukset suoritettiin koealtaassa, jossa perusmaana käytetty hiekka tiivistettiin tärykelkalla 15 cm:n kerroksina. Hiekan rakekoko oli 0.2–8 mm, josta hiekkalajitetta oli 80 prosenttia, hietalajitetta 15 prosenttia ja soralajitetta 5 prosenttia. Hiekan keskiläpimitta oli $d_{50} = 0,52$ mm ja rakeisuusluku $d_{60}/d_{10} = 4.2$. Mikroskooppinen tarkastelu osoitti rakeiden olevan vakioläpimittaisia ja kulmikkaita. Hiekan keskimääräinen vesipitoisuus sullottaessa oli $w = 3.2$ prosenttia. Keskimääräiseksi kuivatilavuuspainoksi tuli $\gamma_d = 1.74$ kp/dm³, joka vastaa suhteellista tiiveyttä $D_r = 0.78$. Tässä tiiveydessä oli

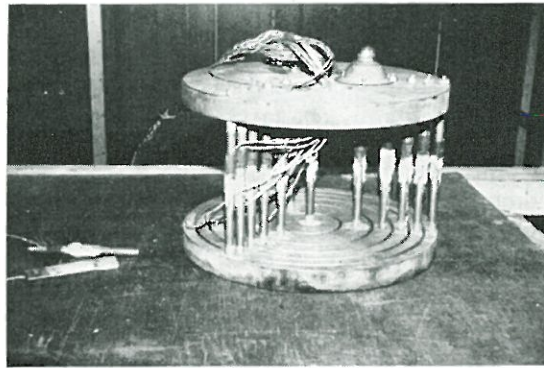
kolmiakiaalikokeen antama tehokas kitkulma $\varphi = 41.8^\circ$. Kokoonpuristuvuusmoduli E_s oli $370 \dots 900 \text{ kp/cm}^2$, kun kuormitus oli $2 \dots 16 \text{ kp/cm}^2$.

Tutkimuksessa on käytetty sekä ympyränmuotoista $\varnothing 30.5 \text{ cm}$ (kuva 2) että neliönmuotoista $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ (kuva 3) koeperustusta. Ympyränmuotoinen koeperustus on Faberin (1933) tyyppiä. Alalaatan muodostavat siinä viisi erillistä rengasta ja niiden keskellä oleva ympyrälevy niin, että kutakin terässauvaa vastaavat pinta-alat ovat yhtä suuret, kun ympyrärenkaat on yhdistetty kukin kolmella ja ympyrälevy yhdellä terässauvalla jäykkään ylälevyyn. Neliönmuotoinen koeperustus on Helenelundin (1966) käyttämää tyyppiä, jossa alalaatan muodostaa kaksikymmentä $6 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ suuruista erillistä osaa, joista kukin tukeutuu jäykkään ylälevyyn terässauvan välityksellä. Perustusta voidaan pitää Schultzen (1964) mukaan jäykkänä silloin, kun taipuman aiheuttama pohjapaineen muutos pienentää maksimitaivutusmomenttia enintään 10 prosenttia. Kunkin osa-alueen pohjapaineen pystykomponentti (normaalijännitys) voidaan mitata terässauvoihin kiinnitettyjen sähköisten venymäliuskojen avulla. Neliönmuotoisessa koeperustuksessa kukin sauva sidottiin lähimpiin sauvoihin alalaatan yläpinnan tasossa siten, että muodostui ruutuverkko, josta eri osa-alueiden pohjapaineiden vaakakomponentit (leikkausjännitykset) voitiin mitata sähköisten venymäliuskojen avulla. Jännitykset todettiin mittauksissa niin pieniksi, että tarkkuus ei ollut riittävä. Siksi tarkastellaan vain pystysuoraa pohjapainetta, joka käytännön kannalta on oleellisin.

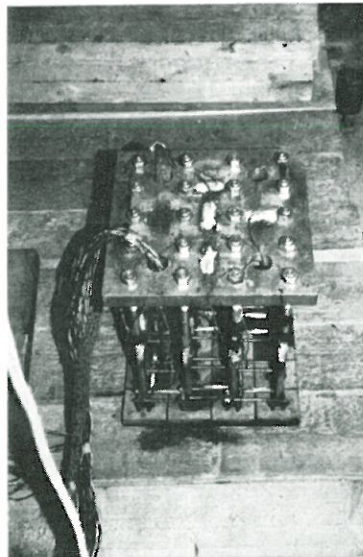
1.



2.



3.



Kuva 1. Pohjapaineen jakautuminen kimmo- ja murto-tilassa.

Fig. 1. Contact pressure distribution in elastic state and at failure.

Kuva 2. Ympyränmuotoinen koeperustus.

Fig. 2. Circular trial footing.

Kuva 3. Neliönmuotoinen koeperustus.

Fig. 3. Square trial footing.

Molemmilla koeperustuksilla tehtiin 56:n koekuormituksen sarja siten, että ympyränmuotoisella koeperustuksella tehtiin keskinen kuormitus, keskinen toistokuormitus ja kaksi epäkeskistä kuormitusta sekä neliönmuotoisella koeperustuksella keskinen ja kolme epäkeskistä kuormitusta kullekin perustamissyvyyden ja pohjaveden pinnan korkeuden yhdistelmälle. Perustamissyvyydet olivat $D = 0, 25, 50$ ja 75 cm ja pohjaveden pinnan korkeudet perustamistasosta lukien $Z_w = 75, 50, 25$ ja 0 cm. Kuitenkaan pohjavesi ei ollut tasoa -0.75 alempana.

3. Tulosten käsittely

Koska havaintomateriaali oli suuri, tulokset pyrittiin saattamaan tietokoneella selkeään graafiseen muotoon analysoinnin helpottamiseksi.

Ympyränmuotoinen koeperustus soveltuu lähinnä vain keskisille kuormituksille, jolloin pohjapaine voidaan ajatella radiaalisesti symmetriseksi. Tällöin on edullista käyttää leikkauskuvausta (kuvat 4–5). Se tehtiin ohjelmalla, joka laskee pohjapaineen radiaalisesti symmetrisen keskiarvon ja korjaa kuormituksen mitattujen venymälukemien summan mukaan. Ohjelma piirtää koordinaattiakselit koeperustuksen keskipiste origona ja pohjapaineen jakautumiskäyrät kullekin kuormitusportaalle käyttäen lineaarista interpolaatiota.

Neliönmuotoinen koeperustus soveltuu hyvin myös epäkeskisille kuormituksille. Pohjapaineen jakautuminen olisi kuitenkin mahdollista esittää niissä tapauksissa yhdellä leikkauksella. Jos taas esittämiseen käytettäisiin useampaa leikkausta, esitystapa ei olisi riittävän havainnollinen. Siksi neliönmuotoisen koeperustuksen tapauksessa käytettiin pintakuvausta. Laaditussa ohjelmassa lasketaan pohjapaineiden keskiarvot symmetrisesti kuormituspisteen suhteen, korjataan kuormitus venymälukemien summan mukaan, ja korjataan nollaviivan paikka. Tämän jälkeen lasketaan suhteelliset pohjapaineet lineaarisella inter- ja ekstrapolaatiolla 61×33 matriisiin ja se tulostetaan rivikirjoittimella niin, että matriisiin kunkin alkion tulostus käyttää vain yhden paikan. Tällöin määrättyä suhteellista pohjapaineväliä vastaa tietty merkki. Valitsemalla merkit sopivasti vuorottelevin tun-

nuksin saadaan selkeä pohjapainekartta (kuvat 6–11). Kun pohjapaineet on laskettu suhteellisina eli jaettuna keskimääräisellä pohjapaineella, saadaan kuormituksen suuruuden, perustamissyvyyden ja pohjaveden pinnan korkeuden vaikutus selvästi esiin topograafisilta pohjapainekartoilta. Rivikirjoittulostusta käytettiin siksi, että se on tehokkaampaa kuin piirturitulostus (Hartikainen 1969).

Useissa tällaisissa tapauksissa (esimerkiksi maastomallit) on todettu, että tulosta ei voida parantaa käyttämällä lineaarista interpolaatiota mutkikkaampia interpolointimenettelyjä. Ainoastaan mittauspisteiden lisääminen ja mittaustarkkuuden parantaminen vaikuttavat ratkaisevasti tuloksiin.

4. Tulosten tulkinta

Kuormituksen lisäämisen reuna-alueen suhteellista pohjapainetta pienentävä ja keski-alueen suhteellista pohjapainetta lisäävä vaikutus on aina selvä (kuvat 4–11). Neliönmuotoisen koeperustuksen keskisessä kuormituksessa (kuva 6) siirtyminen kimmotilasta murtotilaan päin on kuormituksen kasvaessa erityisen selvä.

Perustamissyvyyden kasvamisen reunan pohjapaineen suhteellista osuutta lisäävä vaikutus on selvästi näkyvässä kuvassa 5 ja vertaamalla kuvia 9 ($D = 25$ cm) ja 10 ($D = 75$ cm). Pohjaveden pinnan lähestymisen reunan pohjapaineen suhteellista osuutta pienentävä vaikutus on edellistäkin selvemmin nähtävissä kuvasta 4 ja vertaamalla kuvaa 7,

Kuva 4. Pohjaveden pinnan korkeuden (Z_w) vaikutus pohjapaineen jakautumiseen (a-d) ympyränmuotoisen perustuksen keskisillä pintakuormituksilla ($D = 0$). Kuormituskokoonpuristumakäyrät (e-f).

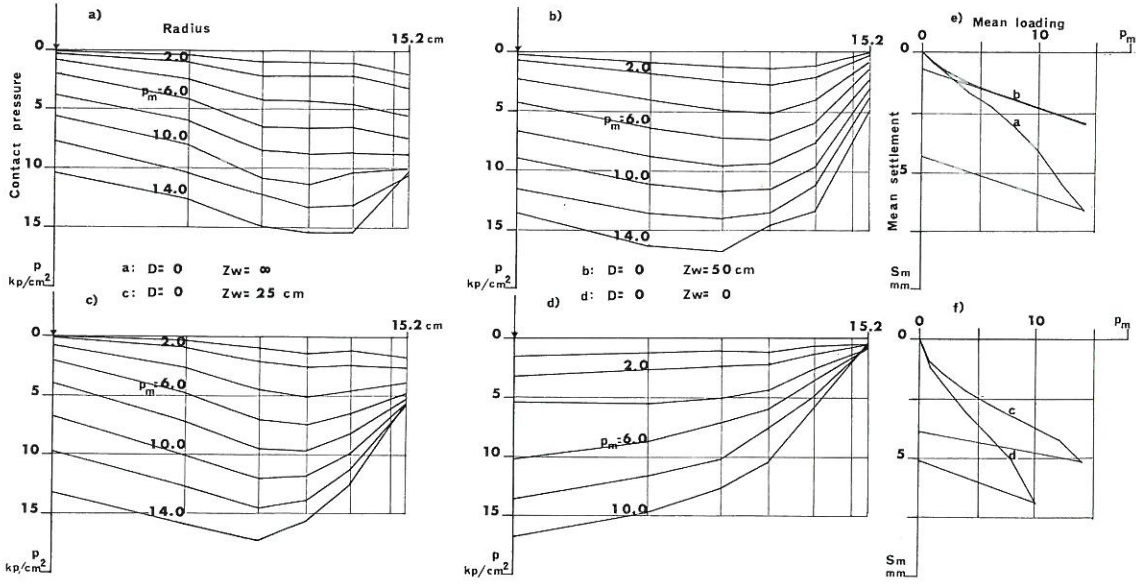
Fig. 4. Effect of groundwater level (Z_w) on the contact pressure distribution (a-d) with centric loads on a circular trial footing at foundation depth $D = 0$. Load-settlement curves (e-f).

Kuva 5. Perustamissyvyyden (D) vaikutus pohjapaineen jakautumiseen ympyränmuotoisella koeperustuksella vedellä kyllästetyssä hiekassa ($Z_w = 0$).

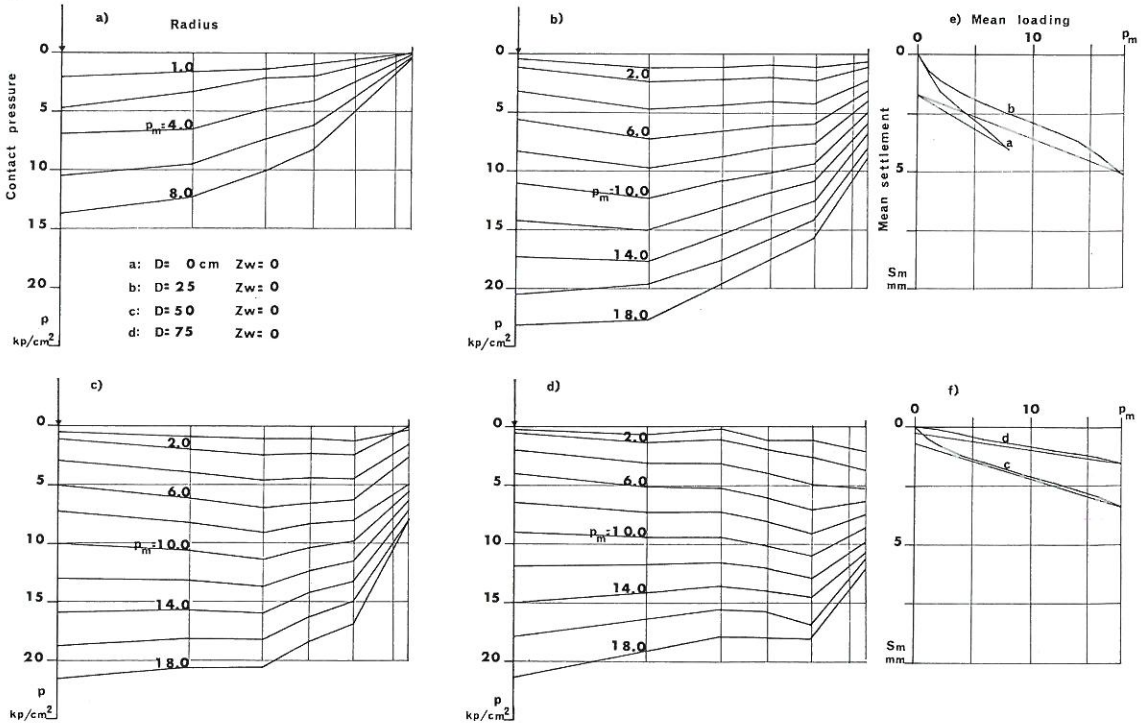
Fig. 5. Effect of foundation depth (D) on the contact pressure distribution with centric loads on a circular trial footing in saturated sand ($Z_w = 0$).

RAKENTEIDEN MEKANIikka

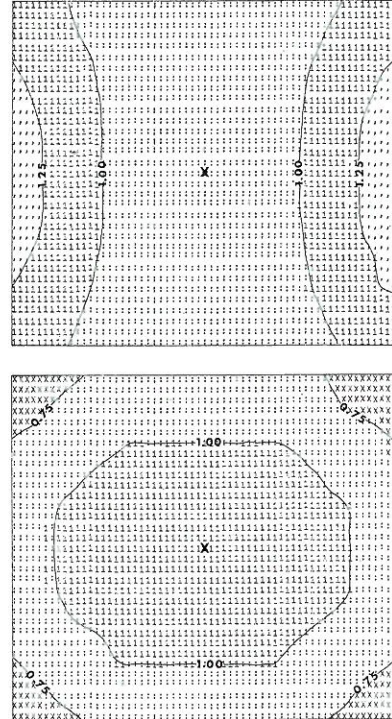
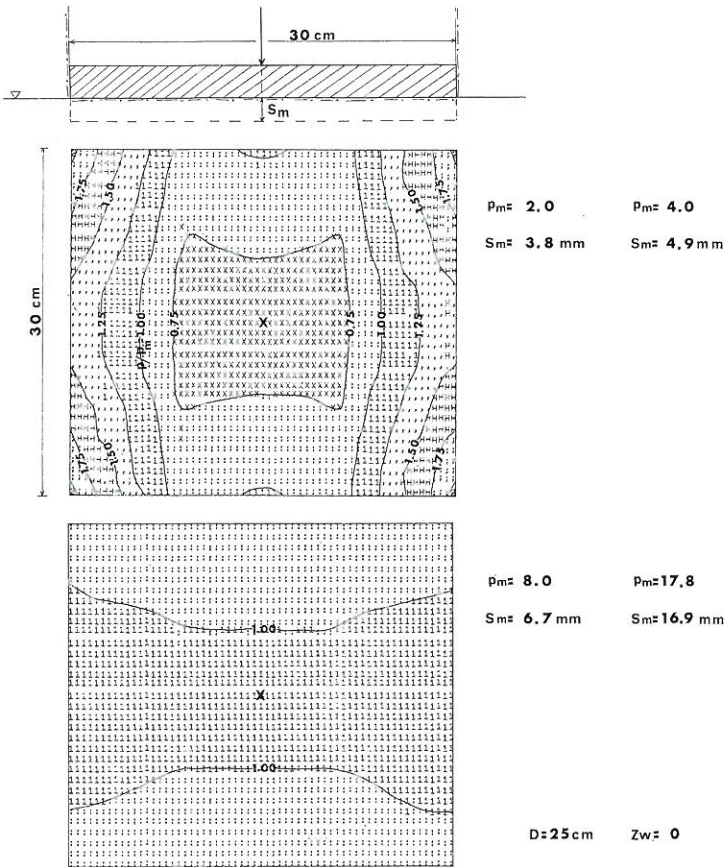
4.



5.



6.



Kuva 6. Kuormituksen suuruuden vaikutus neliömuotoisen koeperustuksen keskisellä kuormituksella suhteelliseen pohjapaineen jakautumiseen, kun $D = 0$ ja $Z_w = 25$ cm. (S_m = keskimääräinen painuma, p_m = keskimääräinen kuormitus).

Fig. 6. Effect of loading intensity on the relative contact pressure distribution when loading a square trial footing centrally and with $D = 0$ and $Z_w = 25$ cm. (S_m = mean settlement, p_m = mean load).

Kuva 7. Suhteelliset pohjapaineisobaarit epäkeskisessä pintakokeessa kuivalla hiekalla (S_{max} = maksimipainuma, S_{min} = minimipainuma).

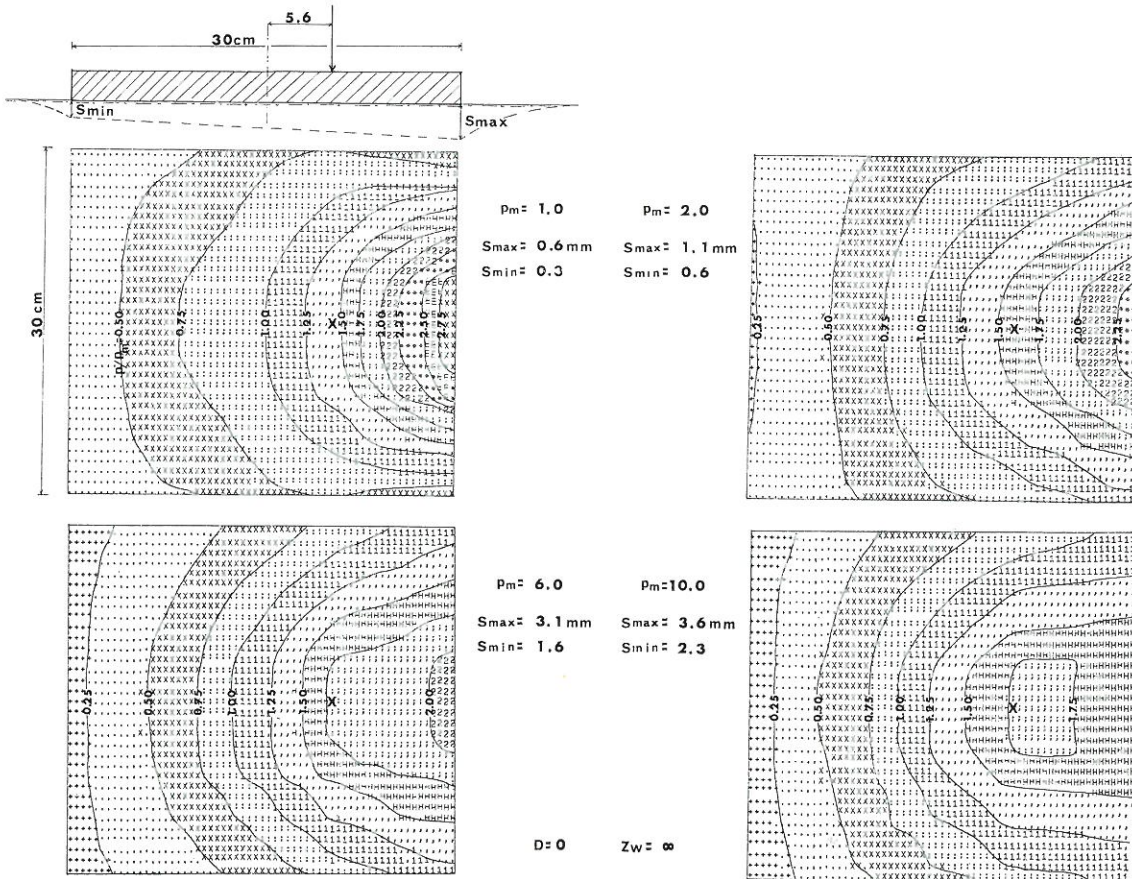
Fig. 7. Relative contact pressure isobars for eccentrically loaded square trial footing on the surface of dry sand (S_{max} = maximum settlement, S_{min} = minimum settlement).

jossa pohjavettä ei ole, kuvaan 8, jossa pohjavesi on perustamistasossa. Kuvat 7 ja 8 ovat epäkeskisten pintakuormitusten ($D = 0$) tuloksia. Tällöin veden ollessa perustamistasossa $Z_w = 0$ (kuva 8) on päästy lähes teoreettiseen murtotilaan. Tämä näkyy siitä, että pohjapaineen isobaarit ovat keskimääräisellä kuormituksella $p_m = 6.0$ kp/cm² jo lähellä X:llä merkitty kuormituspiste keskipisteenä piirrettyjä ympyröitä.

Edellä esitettyjen tekijöiden vaikutus voidaan osoittaa myös tilastollisesti. Tätä varten on tehty tilastollinen malli pohjapaineen jakautumiselle ympyränmuotoisen koeperustuksen alla keskisissä kokeissa. Koska mittauksiakaan ei voida ulottaa aivan reunaan asti, lienee käytännöllistä jättää kapea plastinen reunavyöhyke huomiotta. Tällöin yleiseksi malliksi soveltuisi pyörähdysparaboloidi, jonka akseli yhtyy keskiön kuormituksen vaiku-

RAKENTEIDEN MEKANIikka

7.



tusviivaan. Akselien kautta kulkeva leikkaus on paraabeli. Kun tämän paraabelin yhtälössä otetaan huomioon tutkimuksen ensisijaisina kohteina olevat tekijät, siis kuormitus p_m , perustamissyvyys D ja pohjaveden pinnan korkeus perustamistasoon nähden $Z_w = 60$ cm, voidaan paraabelin yhtälöksi ottaa:

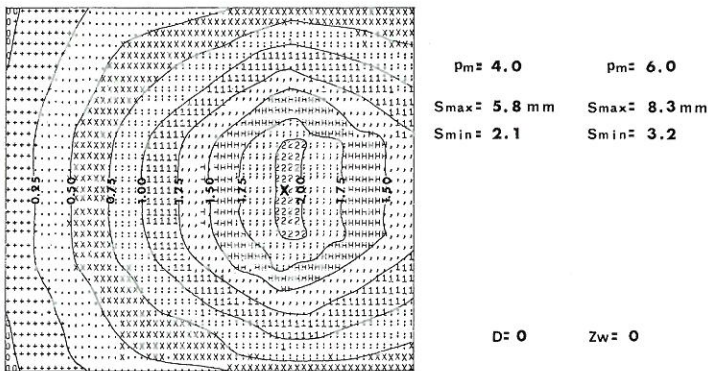
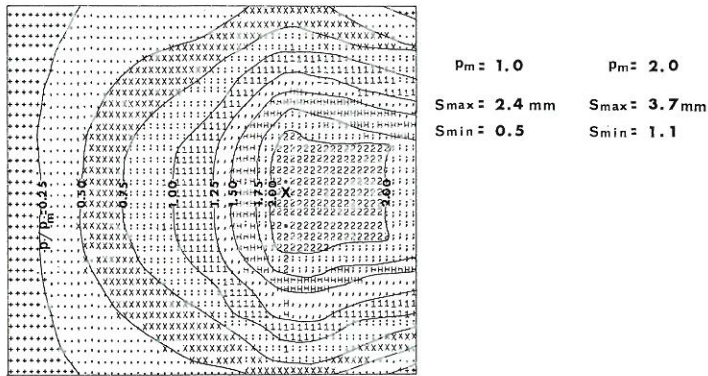
$$p_c = a \cdot D \cdot r^2 + b \cdot Z_w \cdot r^2 + c \cdot p_m \cdot r^2 + d \cdot r^2 + e \cdot D + f \cdot Z_w + g \cdot p_m + h \cdot 1$$

jossa p_c (kp/cm²) on pohjapaine, r (cm) pohjapaineen vaikutuspisteen etäisyys perustuksen keskipisteestä ja a, b, c, d, e, f, g, h ovat kertoimia, joiden suuruus määritetään regressioanalyysiä käyttäen. Ympyränmuotoisella koeperustuksella suoritettujen 28:n keskiarvo koe-kuormituksen kunkin kuormitusportaan tuloksia, jotka on esitetty kuuden pisteen kautta kulkevalla murtoviivalla (kuvat 4 ja 5), pyritään siis jäljittelemään paraabelin puolik-

kaalla. Kun 28 kokeessa oli kuormitusportaita yhteensä 262, valikoiva regressioanalyysi on laskettu 1572 pisteelle. Sen tuloksen perusteella voidaan todeta, että kaikki yhtälön tekijät selittävät mallia yli 99.9 %:n varmuudella (taulukko 1), koska $t > 3.291$ (Lokki 1959).

Lisäksi tilastollinen malli todistaa edellä esitetyn mukaiset perustamissyvyyden pohjaveden pinnan korkeuden ja kuormituksen suuruuden vaikutussuunnat oikeiksi (kertoimet a, b ja c). Näistä kuormituksen suuruuden vaikutus on merkittävin, sitten pohjaveden pinnan korkeuden vaikutus ja miltei yhtä merkittävä perustamissyvyyden vaikutus. Koko mallin keskihajonta on $S = 1.31$ ja korrelaatiokerroin on $r = 0.975$. Voidaan todeta että mallin hajonta tekee sen epäluotettavaksi pienillä kuormituksilla. Sitä vastoin suurilla kuormituksilla $p_m = 5.0 \dots 20.0$ kp/cm² mal-

8.



Kuva 8. Suhteelliset pohjapaineisobaarit epäkeskisessä pintakokeessa vedellä kyllästetyllä hiekkalla.

Fig. 8. Relative contact pressure isobars for eccentrically loaded square trial footing on the surface of saturated sand.

Kuva 9. Pohjapaineen jakautuminen epäkeskisessä kuormituksessa, kun $D = 25$ cm ja $Z_w = 25$ cm.

Fig. 9. Contact pressure distribution at eccentric loading, when $D = 25$ cm and $Z_w = 25$ cm.

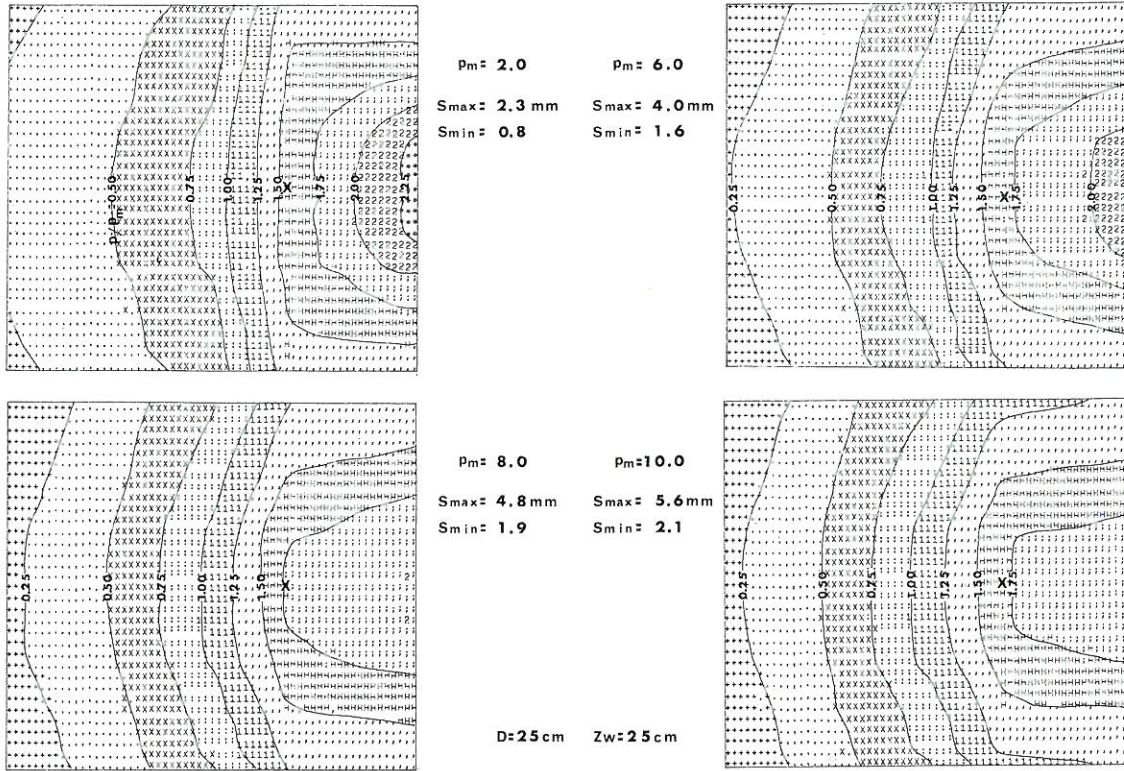
li näyttää hyvin kuvaavan pohjapaineen jakautumista keskeisesti kuormitetulla ympyränmuotoisella koeperustuksella. Tämä tulisi varmistaa laskemalla havaitut ja mallin antamat pohjapaineen momentit ja vertaamalla niitä keskenään. Regressiokertoimen suuruus ei sinänsä ole tae mallin luotettavuudesta, koska se aiheutuu yhdestä huomattavasti muita paremmasta selittäjästä eli vakiolla kerrotusta kuormituksesta $g \cdot p_m$.

Mallia ei ole pyrittykään rakentamaan sellaisenaan käyttöön sopivaksi, koska se kuvaa vain yhtä tutkimusta, jossa maalaji oli sama ja suuri osa vaikuttavista tekijöistä vakioita. Kuitenkin se osoittanee tilastollisen maamekaniikan soveltamismahdollisuuksia, jos käytettävissä olisi riittävän laaja, monipuolinen

ja systemaattisia virheitä sisältämätön aineisto. Tämän hankkimista tehokkaat tietojenkeruulaitteet tulevat edistämään. Tällöin voitaneen kehittää tilastollisia malleja ottamalla huomioon riittävän monet tekijät ja ennen kaikkea maalajitekijät: kitkakulma φ , koheesio c , tehokas tilavuuspaino γ' ja kokoonpuristuvuusmoduuli E'_s . Silloin malli voidaan saada erittäin hankaliksi osoittautuneissa tapauksissa käytäntöön hyvin soveltuvaksi.

Kuormituksen toistamisen vaikutusta ei ole otettu malliin mukaan sen määrittämisessä esiintyneiden häiriötekijöiden takia. Ensimmäinen toistokuormitus antaa yleensä 10–30 prosenttia pienemmän reunan pohjapaineen ja 5–15 prosenttia suuremman keskustan pohjapaineen.

9.

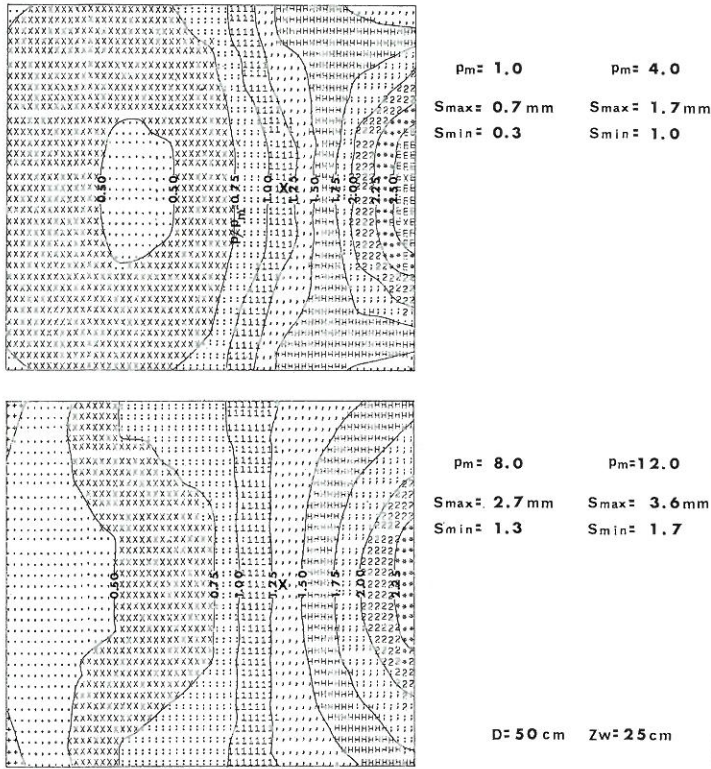


Taulukko 1. Regressiokertoimet hajontoineen.

Table 1. Coefficients of regression with their deviations.

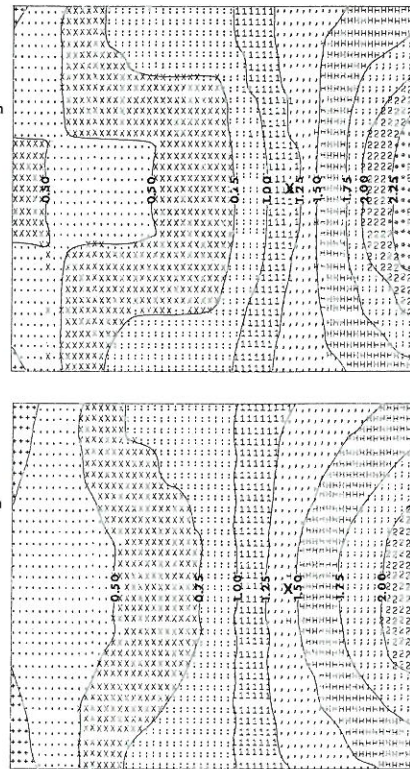
Selittäjä Factor	Kerroin Coefficient	Hajonta Deviation	t-luku t-factor
Dr^2	$a = 0,000286$	0,000017	16,03
Zwr^2	$b = 0,000336$	0,000018	18,02
Pmr^2	$c = -0,001999$	0,000084	23,64
r^2	$d = -0,008537$	0,001184	7,21
D	$e = -0,029047$	0,002224	13,05
Zw	$f = -0,036817$	0,002319	15,87
Pm	$g = 1,228185$	0,010527	116,76
1	$h = 0,757816$	0,147432	5,14

10.



Kuva 10. Pohjapajineen jakautuminen epäkeskisessä koekuormituksessa, kun $D = 50 \text{ cm}$ ja $Z_w = 25 \text{ cm}$.

Fig. 10. Contact pressure distribution at eccentric loading, when $D = 50 \text{ cm}$ and $Z_w = 25 \text{ cm}$.



Kuva 11. Pohjapajineen jakautuminen epäkeskisellä kuormituksella vedellä kyllästetyssä hiekassa, kun $D = 75 \text{ cm}$.

Fig. 11. Contact pressure distribution at eccentric loading in saturated sand, when $D = 75 \text{ cm}$.

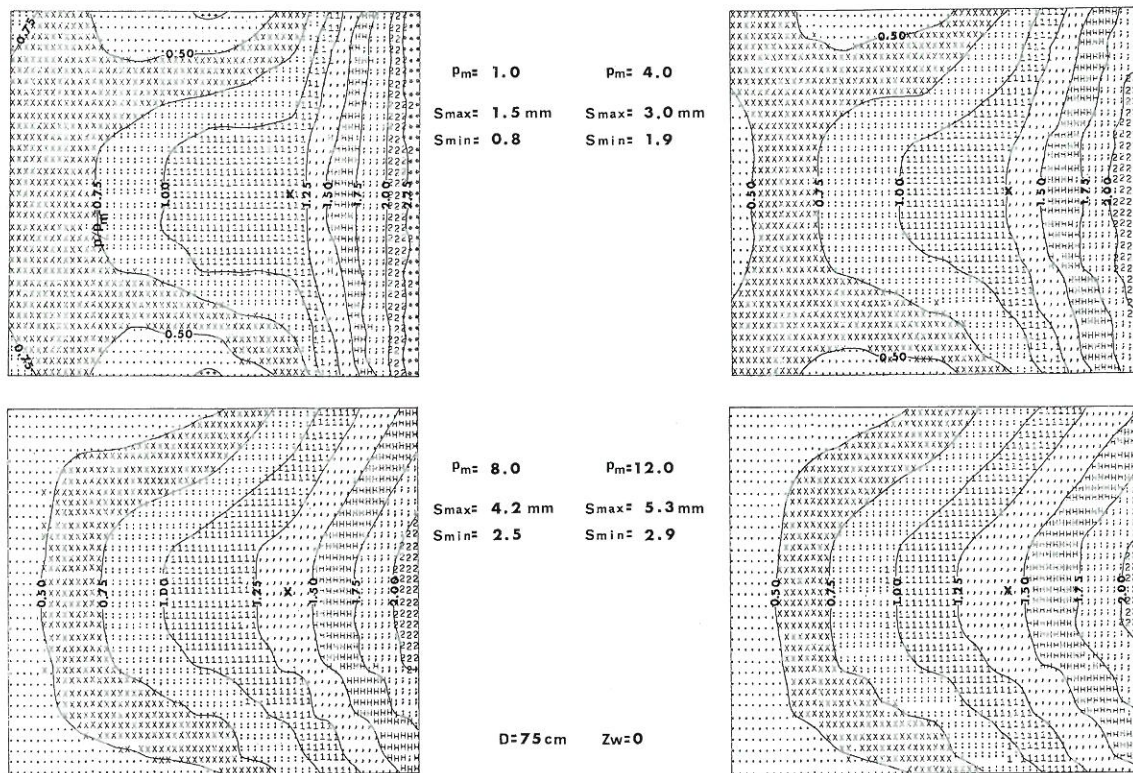
5. Tulosten vertailu

Yleisessä käytössä olevat pohjapajineen laskumenetelmät perustuvat joko Winklerin (alustalukumenetelmät) tai Wieghardin alustamalliin (moduulimenetelmät).

Verrattaessa tuloksia moduulimenetelmään, joksi on valittu Kany'n (1959) menetelmä, sen voidaan todeta antavan »varmalla» puolella olevan tuloksen, kun kysymyksessä on anturaperustus, jossa kuormat keskittyvät perustuksen keskiosaan. Tilanne on päinvastainen, jos kuormitukset ovat keskittyneet laattaperustuksen reunaosille. Tätä on havainnollistettu kuvalla 12, joka esittää kokeissa saadun

reunan maksimipohjapajineen p_e ja Kany'n pohjapajineen p_K suhdetta perustamissyvyyden funktiona. Suhde on esitetty neliönmuotoisen koeperustuksen tapauksessa kuivalle ja vedellä kyllästetylle hiekalle (Z_w ja 0), kun keskimääräinen kuormitus $p_m = 2.0$ ja 10.0 kp/cm^2 , ja kun kuorma on keskinen ja epäkeskinen. Kany'n pohjapajineeksi p_K on otettu menetelmän antama pohjapajine etäisyydellä $0.05 B$ ($= 1.5 \text{ cm}$) reunasta palkkina laskien. Kun lähin havaintopiste on etäisyydellä $0.10 B$ (3.0 cm) reunasta, tämän menettelyn on ajateltu korvaavan lineaarisesta ekstrapolaatiosta reunan pohjapajineeseen aiheutuvan virheen. Laskelmissa on käytetty koko painu-

11.



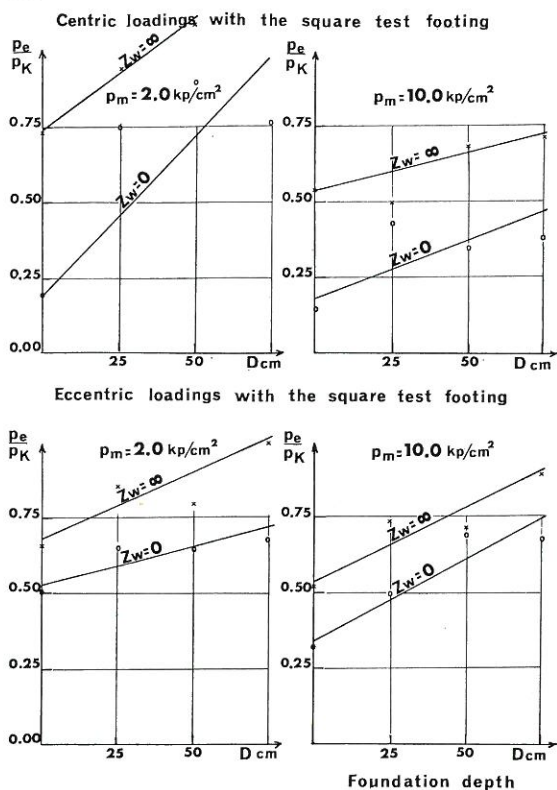
valle maakerrokselle samaa koepurustuksen painumasta määritettyä kokoonpuristuvuusmoduulia. Kuva 12 osoittaa, että suhde on yleensä pienempi kuin yksi paitsi, kun keskimääräinen kuormitus $p_m = 2.0 \text{ kp/cm}^2$, kuormitus on keskinen, perustamissyvyys $D = 50$ tai 75 cm ja pohjavettä ei ole. Tällöinkin suhde on korkeintaan 25 prosenttia yli ykkösen. Kun keskinen kuormitus on $p_m = 10.0 \text{ kp/cm}^2$, suhde on aina vähintään 30 prosenttia ykköstä pienempi. Epäkeskisillä kuormituksilla suhde on aina ykkösen alapuolella. Voidaan myös todeta, että suhteen pieneneminen kuormituksen kasvamisen mukana on vähäisempää epäkeskisillä kuin keskisillä kuormituksilla. Kuvasta 12 ja saaduista pohjapainejakautumisen laskemien vielä palkkikaistoina edellisessä vaiheessa laskettua palkkia vastaan kohtisuorassa suunnassa, joka antaisi 1.53–1.92 kertaa edellisessä vaiheessa saatua reunan pohjapainetta suuremmat nurkan pohjapaineet, näyttää turhalta. Näin on

erityisesti laita epäkeskisillä ja suurilla keskisillä kuormituksilla (Hartikainen ja Helene-lund 1969).

Alustalukuteorian mukaisesti jäykän perustuksen pohjapaine on tasainen, jos kuormitus on keskinen, ja suoraviivainen, kun kuormitus on epäkeskinen. Tämän laskutavan pitäisi olla »epävarmalla» puolella kimmotilassa, kun on kysymys anturaperustuksesta. Tästä syystä kuvassa 13 on esitetty kokeissa saadun reunan maksimipohjapaineen p_e suhde tasaiseen $p_c = p_m$ tai suoraviivaiseen $p_c = 2.12 p_m$ reunan pohjapaineeseen perustamissyvyyden funktiona samaan tapaan, kuin kuvassa 12 on esitetty suhde p_e/p_K . Koska tämä laskutapa on varsin yleinen, on tarpeen tutkia, milloin se koekuormitusten mukaan olisi ollut »varmalla» puolella. Taulukosta 2 nähdään rajat, joista lähtien tasainen pohjapaine olisi ollut anturaperustuksen tapauksessa »varmalla» puolella tilastollisen mallin mukaan.

Tutkimus osoittaa, että käyttötilassa perustusten mitoitus on »varmalla» puolella, kun

12.



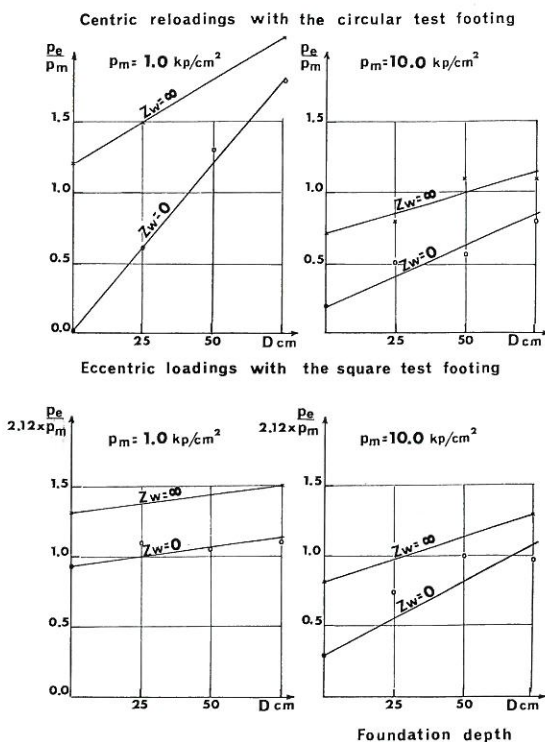
Kuva 12. Kany:n menetelmän ja kokeiden antamien reunan pohjapaineiden vertailu.

Fig. 12. Comparison between edge pressures of Kany and those obtained from the test.

Kuva 13. Suoraviivaisen ja kokeiden antaman reunan pohjapaineen vertailu.

Fig. 13. Comparison between edge pressures with linear contact pressure and from said test results.

13.



Kuva 14. Pohjapaineen jakautuminen jäykän perustuksen alla Winklerin, Wieghardt'in ja Repnikovin alustamalleihin perustuvien menetelmien mukaan.

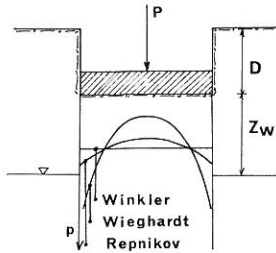
Fig. 14. Contact pressure distribution under rigid foundation according to methods based on the subgrade models of Winkler, Wieghardt and Repnikov.

Taulukko 2. Kuormitusrajat (kp/cm^2), joista lähtien tasaisesti jakautunut pohjapaine on »varmalla» puolella tilastollisen mallin mukaan.

Table 2. The loading limits (kp/cm^2), from which uniformly distributed contact pressure is on the »safe» side according to the statistical model.

$D \text{ cm}$	$Z_w \text{ cm}$	(∞)	(75)	50	25	0
		60	60			
0		5,81	5,81	4,13	0	0
25		9,39		7,87	3,51	0
50		12,97			7,09	2,89
75		16,55				6,47

14.



tze 1969). Menetelmä on valitettavasti erittäin herkkä tässä vaiheessa tapahtuville virheille.

Tutkimuksen tulokset ovat saman suuntaisia kuin tutkimuksissa, joita Leussink, Binde ja Abel (1966) ovat suorittaneet rakeisusikäyrältäään hyvin samanlaisella materiaalilla. Heidän kokeissaan kuormituksen lisääminen on aiheuttanut pienemmästä kitkakulmasta johtuen reunan suhteellisen pohjapaineen nopeamman alenemisen.

Ballan (1962) teorian mukaan lasketut kantavuusarvot näyttävät parhaiten vastaavan koekuormituksissa havaittuja arvoja (Hartikainen 1969).

Kirjallisuutta

- Balla, A.*, Bearing capacity of foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. October 1962.
- Faber, O.*, Pressure distribution under bases and stability of foundations. Structural Engineer 1933.
- Hartikainen, J. & Helenelund, K. V.*, Experimental investigation of the influence of loading intensity, eccentricity, depth of foundation and ground water on the pressure distribution under a stiff foundation on sand. Test results compared with the method of Kany and with linear contact pressure. International Symposium: »On Civil Engineering Structures resting on Soil and Rock». Sarajevo 1969.
- Hartikainen, J.*, Kokeellinen tutkimus pohjapaineen jakautumisesta keskisesti ja epäkeskisesti kuormitetun perusanturan alapinnassa hiekkamaassa. Lisensiaattityö 1969.
- Helenelund, K. V.*, Kitkamaalajien kantavuusominaisuuksista. VTT tiedotus. Sarja III. Rakennus 97. Helsinki 1966.
- Kany, M.*, Berechnung von Flächengründungen. Berlin 1959.
- Leussink, H., Blinde, A. & Abel, P-G.*, Versuche über die Sohldruckverteilung unter starren Gründungskörpern auf kohäsionslosem Sand. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Hochschule Fridericiana in Karlsruhe. Heft 22. Karlsruhe 1966.
- Lokki, O.*, Tilastomatematiikan perusteet. STS 1959.
- Repnikov, N.*, Calculation of beams on an elastic base combining the deformative properties of a Winkler base and an elastic mass. Translated from Osnovaniya. Fundamenty i Mekhanika gruntov N:o 6 1967.
- Schultze, E.*, The combination of modulus of subgrade reaction and modulus of compressibility method. International Symposium: »On Civil Engineering Structures resting on Soil and Rock» Sarajevo 1969.
- Schultze, E.*, Zur Definition der Steifigkeit des Bauwerks und Baugrundes sowie der Systemsteifigkeit bei der Berechnung von Gründungsbalken und -platten. Mitteilungen aus dem Institut der Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Hochschule Aachen. Heft 32. Aachen 1964.
- Jorma Hartikainen, tekn.lis., Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi*

pohjapaine lasketaan molempien edellä mainittujen menetelmien nukaan. Kuvien 12 ja 13 avulla on mahdollista arvioida varmuusmarginaalia ja siten pienentää varmuuskertoimia.

Kuvista 12 ja 13 voidaan myös päätellä, että lähinnä oikea pohjapaineen jakautuminen käyttötilassa on edellä mainittujen menetelmien antamien tulosten välillä. Oikeaan suuntaan päästään alustalukumenetelmissä suurentamalla alustalukua perustuksen reunoille päin, mikä on kuitenkin varsin keinoitekoista. Kokoonpuristuvuusmoduulimenetelmissä tilanne korjaantuu, jos otetaan maan kokoonpuristuvuusmoduuli E'_t paineen p funktiona (Schultze 1969)

$$E'_t = v \cdot p^w$$

jossa v on moduuliluku ja w moduuliekspONENTTI. Tämä on kuitenkin johtanut käytännön kannalta liian hankaliin laskumenetelmiin.

Kany'n menetelmässä voidaan painuva maakerros jakaa lamelleihin. Kokoonpuristuvuusmoduulit otetaan kunkin lamellin keskimääräistä painetta vastaavasti. Yleensä tällöin päästään lähemmäksi koetuloksia.

Repnikovin (1967) menetelmä näyttää myöskin johtavan koetulosten suuntaan (kuva 14). Menetelmä perustuu alustamalliin, jossa on mukana Winklerin alusta ja ideaalisesti elastinen puoliavaruus niin, että ne eivät vaikuta toisiinsa, mutta saavat yhtä suuren painuman. Painumien yhtäsuuruuden perusteella menetelmällä saadaan alustamallin molempien komponenttien kuormitukset, joita vastaavat pohjapaineet lasketaan alustalukuteorian ja Kany'n menetelmän mukaan, jolloin lopullinen pohjapaine saadaan osapaineiden summana. Vakio alustaluku ja vakio kokoonpuristuvuusmoduuli saadaan kahden eri suuren levyn painumista, jotka voidaan saada levukuormituskokeista tai laskemalla (Schul-