

Poretryksopbygning under cykliske belastninger med initiale forskydningsspændinger

Jacobsen, H. Moust

Published in:
NGM-88, 10. Nordiske Geoteknikermøde, Oslo 1988

Publication date:
1987

Document Version
Tidlig version også kaldet pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Jacobsen, H. M. (1987). Poretryksopbygning under cykliske belastninger med initiale forskydningsspændinger. I NGM-88, 10. Nordiske Geoteknikermøde, Oslo 1988: Artikler og poster-sammendrag (s. 54-58)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

H. Moust Jacobsen
Aalborg Universitetscenter, Danmark

ABSTRACT: Der er udført en række triaksialforsøg med harmonisk svingende stempeltryk omkring en anisotrop spændingstilstand. Herved er klarlagt initiale forskydningsspændingers indflydelse på poretryksudviklingen i en sandprøve under cykliske belastninger. Der er opstillet et simpelt udtryk, der kan beskrive mobiliseringsgradens udvikling med antallet af belastninger. Såvel bruttilstande "liquefaction" som stabile tilstande, eventuelt med store tøjninger "cyclic mobility" kan på denne måde sættes i samme referenceramme.

INTRODUKTION

I 1966 skrev Seed og Lee den første artikel om liquefaction af sand under cykliske belastninger, og siden da er publiceret et meget stort antal artikler om forsøg udført i triaksialapparatet, hvor sand har været underkastet sinusformede, trekantsformede eller rektangulære belastningsvariationer. Nogle forsøg har været udført som "one way tests", hvor stempeltrykket hele tiden har været positivt. Andre er udført som "two ways tests", hvor stempeltrykket har været skiftevis positivt og negativt, og varierende mellem de samme absolutte værdier.

Ved sammenligning mellem de to forsøgstyper ses det, at liquefaction lettere finder sted i "two ways tests" end i "one way tests". Mange artikler omhandler da også det forhold, at anisotrop konsolidering forøger modstanden mod liquefaction, fx Castro og Poulos (1977), og nogle beskæftiger sig med de initiale forskydningsspændingers indflydelse helt op imod en bruttilstand, fx Luong 1980.

En undersøgelse af "two ways tests" viser da også en meget lille modstandsevne mod liquefaction. Skulle man tage disse forsøgsresultater alvorligt, måtte man forvente, at næsten alle konstruktioner, der udsættes for varierende belastninger fra vind eller bølger, måtte udsættes for bæreevnebrud på grund af liquefaction. En af forklaringerne på, at det ikke sker, er, at jorden under fundamenter altid er udsat for forskydningsspændinger før den storm, der skulle give liquefaction. Forskydningsspændingerne skyldes dels den anisotrope konsolidering af jordlagene, dels belastningen fra konstruktionen. En undersøgelse af forskydningsspændingerne indflydelse må derfor omfatte højere forskydningsspændinger end svarende til den naturlige anisotrope konsolidering.

Fænomenet, som indledningsvis er kaldt "liquefaction", består i en første fase, hvor et poretryk ændres som følge af spændingsvariationerne i udrænet tilstand. I visse tilfælde opbygges et poreundertryk, som virker stabiliserende, og tilstanden under varierende belastning bliver stationær. I andre tilfælde opbygges et poreovertryk, der nedsætter jordens modstandsevne. Muligvis optræder en stabil tilstand med store tøjninger i jorden, "cyclic mobility", eller jorden kan blive helt flydende og altså miste sin bæreevne helt. Det er den sidste tilstand, der omtales som liquefaction. Der er nogen usikkerhed om, hvordan disse forskellige tilstande præcist skal defineres.

Denne artikel er et forsøg på at kvantificere de foreliggende teorier, og ved et enkelt simpelt matematisk udtryk at redegøre for de forskellige tilstande, der er nævnt ovenfor, samt behandle virkningen af initiale forskydningsspændinger, i princippet helt op til udrænet brud. Artiklen er skrevet på baggrund af forsøg i det dynamiske triaksialudstyr, der er udviklet ved Aalborg Universitets Laboratorium for Fundering.

LABORATORIEUDSTYR

Det målesystem, der anvendes er meget moderne, men det betyder naturligvis i sig selv kun lidt for målingernes kvalitet. Det er for det første vigtigt, at der fremkaldes homogene tilstande i prøven. Det betyder, at der må anvendes et udstyr, der tillader glatte trykhoveder og en prøvehøjde, der er lig med diameteren. Alt for mange artikler bygger på udstyr med mange elektroniske finesser, men med dobbelt prøvehøjde. Under et sådant forsøg udvikles prøven normalt fra at være i en homogen tilstand til at blive opdelt i to ret stive områder, der adskilles af en brudzone. Det vides imidlertid ikke, hvornår tilstandsændringen får mærkbar indflydelse på forsøgsresultatet, og de nøjagtige dimensioner på prøvens enkelte dele kendes heller ikke. Derfor er mange artikler om forsøgstekniske detaljer vedrørende indlejningsmetoder, rekonstruktion af spændingshistorien og virkning af belastningsfrekvensen ikke særligt relevante. Det er langt vigtigere at forsøge at opnå homogene tilstande i prøven.

For det andet er det vigtigt, at kalibreringen af udstyret er i orden, og det er blevet meget vanskeliggjort at kontrollere end tidligere.

Det laboratorieudstyr, der er udviklet på Aalborg Universitet for ca. 5 år siden, er vist på figur 1. Det er udbygget med elektronik, både til styring, til registrering og til behandling af data. Det indeholder derfor en lang række faciliteter, som ikke fandtes for få år siden. Udviklingen af de forsøgsprocedurer og udførelsen af de forsøg, der ligger til grund for denne artikel, skyldes i høj grad Ballegaard og Ravn 1984, Østergaard 1986 og Risgaard Madsen 1987.

Såfremt en konstruktion påvirkes af en tilfældigt varierende naturskabt belastning, og en tidsserie er

registreret på bånd, kan den danne grundlag for forsøget. Stempelbevægelsen styres nemlig af en båndoptager eller en generator, der afsender den ønskede tidsserie til en computer. Den styrer det hydrauliske system, der bevæger nederste trykhoved. Der kan også anvendes et signal fra en computer som styresignal.

Triaksialcellen er af den sædvanlige danske type, der benytter glatte trykhoveder og en prøvehøjde, der er lig med diameteren, således at dannelsen af en skrå brudflade undgås. Der måles 1) Stempeltrykket σ_1 , 2) og 3) Prøvens lodrette tøjning som en middelværdi af to målinger. 4) Poretrykket i den vandmættede sandprøves nederste endeflade. 5) Det alsidige tryk i cellen σ_3 .

Forsøgene er udråned, og volumenet er derfor konstant. For at poretryksmålingen skal være repræsentativ for hele prøven, er det absolut nødvendigt, at alle dele af prøven er i samme tilstand, og det sker netop i denne type triaksialapparat

Signalerne fra cellen opsamles af en datalogger, der sender signalerne videre til bearbejdning på en PC'er og til udtegnning på plotter, hvor en række forskellige afbildningsformer er mulige. Der foretages ofte 4000 registreringer med 6 data i hver. Dataene opsamles på diskette, og resultatet foreligger kun i form af figurer eller resultater fra bearbejdelser, foretaget af computeren.

Desuden sender dataloggeren et udvalgt signal til computeren, der sammenligner dette signal med styresignalet fra generatoren. Forskelle mellem de to signaler udløser en bevægelse af stemplet, der reagerer så hurtigt, at der ikke ses nogen forskel på de to signaler. På denne måde kan der i princippet styres på den måling, man måtte ønske. Måleudstyret kan således benyttes til tilfældigt varierende belastninger, helt op til en frekvens på 50-100 Hz.

FORSØGSMATERIALET

Der er anvendt to sandsorter, hvis kornkurver er vist på figur 2.

Vestbjergsand har en middeldorndiameter på $d_{50} = 0.11$ mm og et uensformighedstal på $U = 3.6$. Forsøgene blev udført ved et poretal på 0.62, svarende til en relativ lejringstæthed på 0.77. Statistiske triaksialforsøg viste en effektiv friktionsvinkel $\phi' = 34.7^\circ$ og en effektiv kohæsion $c' = 5$ kPa. På grund af sandets indhold af meget fint materiale måtte prøven opbygges i tynde lag, der derefter blev komprimeret. Vandmætningen foregik under vacuum.

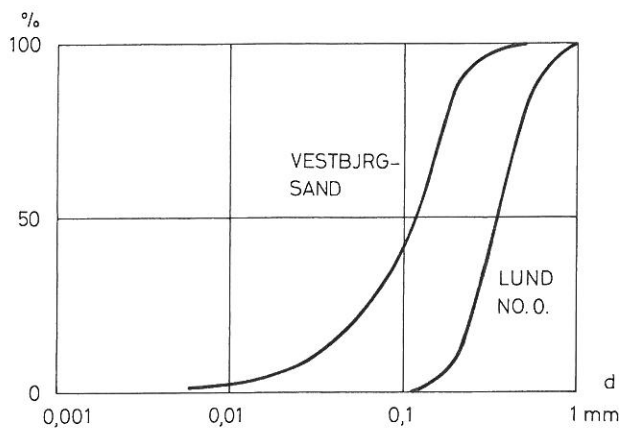


Fig. 2. Kornkurve for de anvendte sandsorter.

Lund no 0 har en middeldorndiameter $d_{50} = 0.4$ mm og uensformighedstallet $U = 1.7$. Forsøgene blev udført med et poretal på 0.63 svarende til en relativ lejringstæthed på 0.7. De statistiske styrkeegenskaber er fundet til $\phi' = 41.8$ og $c' = 4.5$ kPa. Prøverne blev opbygget af tørt materiale, der blev udlejret ved at falde gennem en sigte med en bestemt intensitet. Prøverne blev derefter vandmættet under vacuum, idet vandet, efter at luften var trukket ud af systemet, fyldte prøven ved naturlig strømning med lille gradient.

Alle prøverne har således været underkastet en isotrop forbelastning på tæt ved 100 kPa. Af forsøgstekniske grunde kan der vanskeligt udføres forsøg med normalt konsolideret sand, hvis det samtidig skal være vandmættet.

CYKLISKE FORSØG

De forsøg, der anvendes i forbindelse med denne artikel er alle udført ved styring af stempeltrykket. Der er anvendt harmoniske svingninger omkring et initialt stempeltryk. Frekvensen har været så lav som 0.1 Hz for at sikre, at poretrykket har kunnet nå at forplante sig til transduceren. Der vil være en forsinkelse, hvis prøven ikke er totalt vandmættet, men det har i øvrigt ikke været noget problem.

Før den cykliske del af forsøget er prøven blevet belastet anisotropt under dræned omstændigheder. Herefter er drænen blevet lukket og den cykliske del af forsøget udført. Ventilen, der lukker drænen, sidder inde i trykhovedet, således at det ydre elastiske system helt er afskåret fra at påvirke forsøgsresultatet.

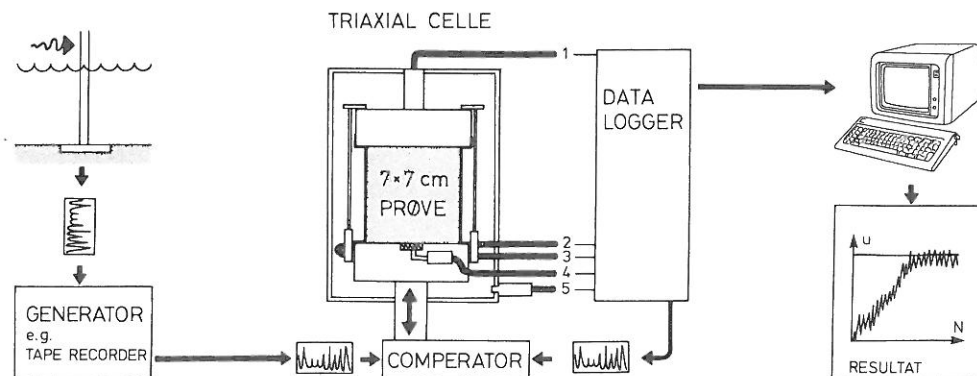


Fig. 1. Princippet i det dynamiske triaksialapparat. Der måles 1 stempeltryk, 2 og 3 lodret tøjning, 4 poretryk, 5 kammertryk.

Resultatet fra et forsøg vises i figur 3-6. Det er ikke typisk for forsøgsserierne, hertil er antallet af cykler for lille, men det er til gengæld overskueligt.

Under forsøget svinger poretrykket u i takt med stempelet, men vokser samtidig, som det ses på figur 3. Kammertrykket σ_3 , der er ca. 30 kPa, er også vist på figuren. Det repræsenterer det totale alsidige tryk, der virker på prøven. Når u får samme værdi som kammertrykket, er prøven helt spændingsløs, og bevægelserne bliver så store, at den elektroniske styring går i svingninger. Figur 3 viser således, at dette forsøg ikke kan bruges, når antallet af cykler overstiger 20.

Variationen i effektive spændinger er vist på figur 4. Den initiale spændingstilstand er markeret med en stjerne. Det ses, at belastningssløjferne i begyndelsen er meget smalle. Poretryksopbygningen får aflastningsgrenene til at blive stejle end belastningsgrenene, hvis hældning er -4 . I de bedste forsøg er denne hældning meget tæt på -3 , svarende til konstant middelspænding. Det antages, at en afvigelse fra -3 skyldes manglende vandmætning. Men det har dog ikke været muligt at måle hertil svarende variationer i mætningsgraden, fordi den kun kan bestemmes med nogen usikkerhed.

Her er også indlagt en modificeret Coulombs brudbetingelse med de egenskaber, der er målt i statiske triaksialforsøg. Det ses, at overensstemmelsen mellem dynamiske forsøg og statiske forsøg findes at være overraskende stor. Fra udrænet brud i ler vides det, at forskydningsstyrken vokser med forsøgshastigheden, og det kunne også forventes her. En dynamisk brudbetingelse kan dog eventuelt findes ud fra de cykliske forsøg, og ville da give en bedre bestemt mobiliseringsgrad og en mindre spredning på de senere beregninger.

I den sidste del af forsøget nærmer spændingstilstanden sig brud i løbet af en sløjfe. Såfremt brudtilstanden indtræder blot et øjeblik, har det meget stor virkning på forsøget. Herved fremkaldes tilsyneladende de før nævnte ukontrollerbare svingninger, der afslutter forsøget.

På figur 5 ses de tilhørende tøjninger. De blivende tøjninger pr. sløjfe skyldes den initiale deviatorspænding. Når brudbetingelsen nås, ses tøjningerne at blive meget store.

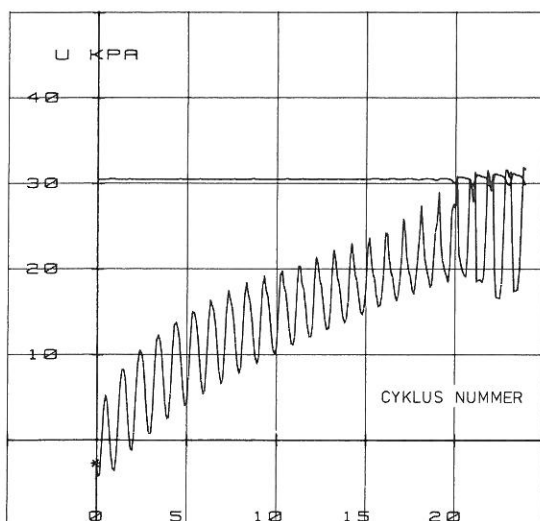


Fig. 3. Poretryksudvikling i forsøg 8733. Kammertrykket er vist som den næsten vandrette linie.

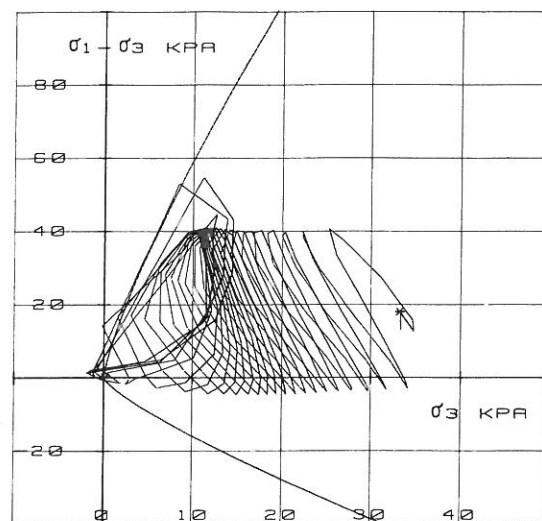


Fig. 4. Udviklingen i den effektive spændingstilstand i forsøg 8733.

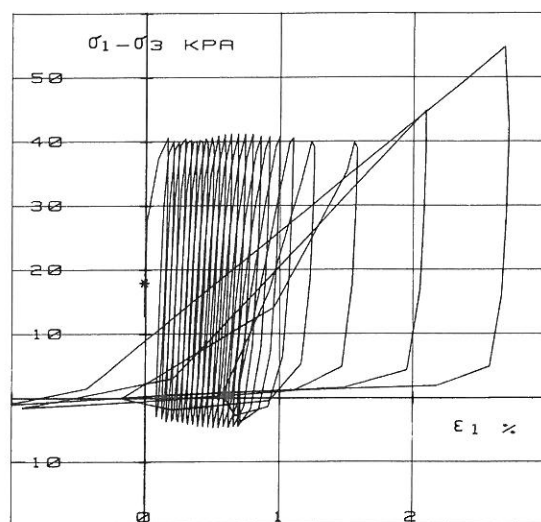


Fig. 5. Lodrette tøjningsvariationer i forsøg 8733.

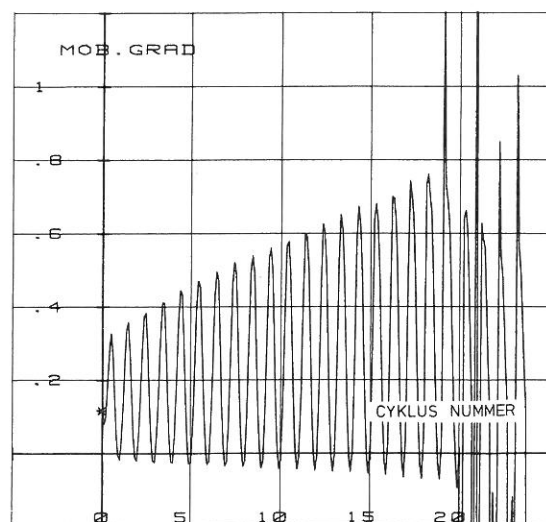


Fig. 6. Mobiliseringsgradens udvikling i forsøg 8733.

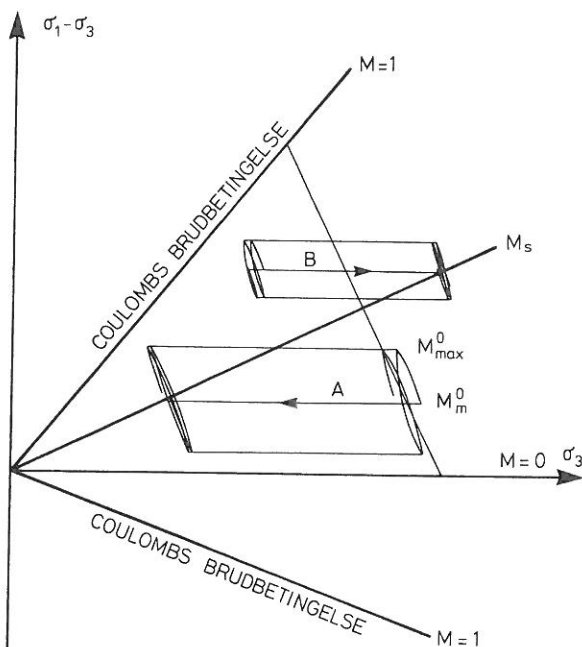


Fig. 7. Cycliske belastninger i triaksialforsøg. Eksempler på to stabile spændingsforløb A: med voksende poretryk. B: med aftagende poretryk.

MOBILISERINGSGRAD

Før en tolkning af forsøgene må spændingerne gøres dimensionsløse. Mange forskere anvender det såkaldte spændingsforhold, der defineres som deviatorspændingen $\sigma_1 - \sigma_3$ divideret med det alsidige tryk σ_3 . Her ved indgår dog stadig jordens styrke, og eventuelle parametre vil afhænge af lejringsstæthed. Derfor anvendes i stedet mobiliseringsgraden M , hvor deviatorspændingen er divideret med deviatorspændingen i brud ved samme mindste hovedspænding.

Figur 7 viser et $\sigma_3, \sigma_1 - \sigma_3$ diagram, hvor Coulombs brudbetingelse for et rent friktionsmateriale er indlagt. Den rette linie med hældningen -3 har konstant middelspænding. Det tilstandsrum, som brudbetingelsen angiver i figur 7, er ikke symmetrisk om σ_3 -aksen, fordi største hovedspænding skifter fra σ_1 til σ_3 , når $\sigma_1 - \sigma_3$ bliver negativ. I dette tilfælde svarer samme middelspænding da også til en ret linie med hældningen $-3/2$. Herved fås samme numeriske brudværdi af $\sigma_1 - \sigma_3$ i brud for samme kammertryk. På figur 4 er anvendt en udvidet brudbetingelse, der angives ved en krum linie, uden at det i øvrigt berører definitionen på mobiliseringsgraden.

Strengt taget skal der også tages hensyn til, at de effektive styrkeparametre afhænger af spændingstilstanden og faktisk er større for negative værdier af $\sigma_1 - \sigma_3$. Da det imidlertid ikke har betydning for disse forsøg, er denne korrektion undladt.

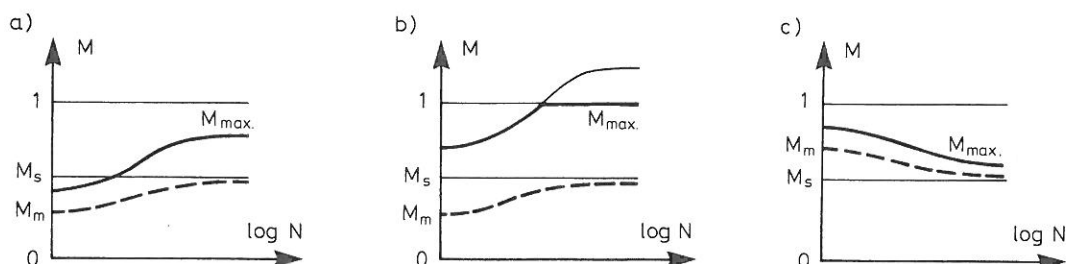


Fig. 8. Mobiliseringsgradens udvikling ved cyklisk belastning i triaksialapparat. a) Voksende M_{max} med stabil sluttetilstand. b) Liquefaction efter få belastninger. c) Stabil sluttetilstand med faldende M_{max} .

Figur 4 kan nu gøres dimensionsløs, som vist i figur 6.

For at kunne behandle cykliske svingninger med initiale forskydningspændinger, er det nødvendigt at indføre følgende definitioner:

M_m , som er middelværdien af M på den aktuelle cyklus. Den initiale værdi kaldes M_m^0 . Denne værdi skal svare til den drænedet tilstand, der fandtes forud for det dynamiske forsøg. Som det ses af figur 3, er det imidlertid vanskeligt at opnå, at svingningerne bliver symmetriske fra den første cyklus. Derfor vil forsøg, der går i liquefaction efter kun 10 cykler eller mindre ikke have en veldefineret værdi af M_m^0 .

M_{max} , som er den maksimale værdi, M antager på den enkelte cyklus.

Det antages, at såfremt en belastningscyklus i gennemsnit har mobiliseringsgraden M_s , ophæves poretryksopbygningen på belastningsgrenen af faldet i poretryk ved aflastning, og tilstanden bliver stabil (Risborg Madsen 1987). M_s viser sig at være en hensigtsmæssig parameter til beskrivelse af den initiale tilstands betydning for mobiliseringsgradens udvikling med antallet af belastninger.

M_s adskiller sig fra den "karakteristiske tilstand", defineret af Loung, ved at tage hensyn til en hel cyklus under cykliske forsøg og ikke kun belastning i et almindeligt udrænet forsøg. Medens den karakteristiske tilstand svarer til en mobiliseringsgrad på ca. 0.9, er M_s langt mindre, kun ca. 0.4.

MOBILISERINGSGRADENS VARIATION UNDER FORSØG

På denne baggrund kan nu opstilles følgende teori: Under en cyklisk belastning vil middelmobiliseringsgraden M_m søge at nærme sig den stabile tilstand. Er $M_m < M_s$, svarende til forløb A på figur 6, vil der derfor opbygges et poretryk. Stabile tilstande kan opstå, når $M_m = M_s$. Men det forudsætter, at M_m ikke inden da overstiger 1. I dette tilfælde indtræder "liquefaction".

Mobiliseringsgradens variation med antallet af cykler kan særlig simpelt studeres i forsøg, hvor variationen af $\sigma_1 - \sigma_3$ er konstant. Hvis den konstante middelværdi kaldes m , og den konstante amplitude kaldes a , indses det let, at

$$M_{max} = k \cdot M_m \quad \text{hvor } k = (a + c)/c \quad (1)$$

En formel for M_m må opbygges, således at M_m ikke ændres, hvis $M_m^0 = M_s$. Den får derfor følgende udseende:

$$M_m = M_m^0 + (M_s - M_m^0) \cdot f(N) \quad (2)$$

hvor $f(N)$ er en funktion, der skal være 0 for $N = 0$ og 1 for $N = \infty$. Det simplest mulige udtryk er

$$f(N) = N/(N + N_0) \quad \text{hvor } N_0 \text{ afhænger af } M_m^0 \quad (3)$$

På figur 8 ses de mulige tilstandsvariationer under et forsøg. a) viser en stabil tilstand med store tøjninger, "cyclic mobility". b) viser en tilstand, hvor brudtilstanden nås, "liquefaction". c) viser en tilstand, hvor mobiliseringsgraden og tøjningerne falder, "stabilization". På denne måde kan indføres en konsekvent definition af de tre begreber.

Formelsystemet er ikke velegnet til at beskrive forsøg med $M^0 = 0$, altså forsøg, hvor der påføres lige store træk- og trykpåvirkninger. Det er imidlertid også et forholdsvis uinteressant tilfælde. Forsøgene vil nemlig i de fleste tilfælde gå i brud for trækpåvirkninger, og prøven bliver timeglasformet, samtidig med at der dannes en næsten vandret liggende brudflade. Denne brudform blev hyppigt observeret i de tidligste forsøg og omtaltes som "necking", Lee 1976. For at undgå necking anvendte F. Ballegaard og D. Ravn det kriterium, at tøjningen i tryk- og træktilstand skulle variere mellem de samme grænser. Herved fandtes den mindst mulige mobiliseringsgrad M_m^0 at være ca. 0.05.

Tabel. Oversigt over forsøg.

Forsøg nr.	σ_3 kPa	σ_{12} kPa	δ_1 kPa	M_m^0	N	k	N_0	M_s
8713	35	18	± 20	0.1	222	2.6	50	0.32
8719	34	50	± 33	0.29	331	1.87	21	0.36
8720	34	42	± 33	0.25	284	2.14	72	0.38
8726	32	35	± 33	0.22	345	2.2	28	0.32
8728	32	26	± 25	0.16	321	2.23	28	0.30
8729	33	22	± 25	0.13	315	2.40	28	0.40
8730	33	50	± 25	0.30	225	1.50	14	0.34
8731	31	75	± 33	0.48	255	1.32		0.39
8732	32	18	± 22	0.11	393	2.95	28	0.30
8740	45	40	± 33	0.12	600	2.94	40	0.28
16*	35	2.5	± 15	0.05	27	(4.76)	96	(0.50)
18*	30	2.5	± 15	0.10	200	2.65	50	0.32

* Vestbjerg sand. Øvrige forsøg med Lund nr. 0.

I tabellen ses nogle eksempler på forsøg, hvor parametrene k , N_0 og M_s er bestemt ved mindste kvadraters metode for hvert enkelt forsøg for sig. Alligevel ligger M_s inden for et ret snævert interval. Forsøgene har næsten samme antal belastninger, men forskellige værdier af M_m^0 og amplitude. Forsøg 8731 har $M_m^0 > M_s$ og her konstateres udvikling af poreundertryk. Dette forsøgs stabile mobiliseringsgrad er en overgrænse for M_s .

Forskellen mellem den aktuelle M_s -værdi og middelværdien på 0.34 er kun lille. Figur 9 viser således

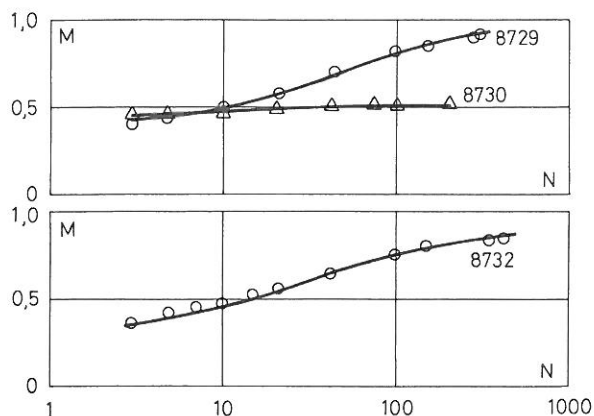


Fig. 9. Sammenligning af teoretisk beregnet variation med $M_s = 0.34$ og observationer, vist som cirkler. 8730 viser en næsten stabil tilstand.

to forsøg 8729 og 8732, hvor forskellen mellem M og gennemsnitsværdien er relativt stor, uden at det har betydning for kurverne.

Desuden vises forsøg 8730, der er meget tæt på en stabil tilstand.

KONKLUSION

På grundlag af en række forsøg med en belastning, der svinger harmonisk omkring en initial, anisotrop tilstand, er opstillet en simpel teori for stabiliseringsgradens udvikling med antallet af belastninger.

Teorien bygger på en antagelse om, at såfremt en svingning finder sted med en bestemt, gennemsnitlig mobiliseringsgrad M_s , ophæver poretrykstilvæksten på belastningsgrenen og faldet i poretryk ved aflastning hinanden, hvorved tilstanden bliver stabil. M_s kaldes den stabile mobiliseringsgrad og antages konstant for en given sandsort og lejringstæthed.

M_s er fundet til 0.33 med den her valgte definition af mobiliseringsgrad. Defineres M_s ud fra samme middelspænding bliver M_s ca. 0.5. Denne værdi er meget lavere end Loungs karakteristiske værdi, der er $M_k = 0.8 - 0.9$. M_s er da også bestemt i de cykliske forsøg, medens Loungs parameter er bestemt i statiske forsøg.

Teorien giver en mulighed for at definere de tre begreber "cyclic mobility", "stabilization" og "liquefaction", se figur 8.

REFERENCER

- ANDERSEN, K.H. 1976. Behaviour of clay subjected to undrained cyclic loading. BOSS 1976. Trondheim.
- BALLEGAARD, F., RAVN, D.L. 1984. Liquefaction i finsand. Afgangsprojekt, Aalborg Universitet.
- CASTRO, G., POULUS, S.J. 1977. Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. PROC ASCE Vol 103 GT 6.
- LEE, K.L. 1976. Fundamental considerations for cyclic triaxial tests on saturated sand. BOSS 1976. Trondheim.
- LOUNG, M. 1980. Stress-Strain aspects of cohesionless soils under cyclic and transient loading. Proc. int. symp. soils under cyclic and transient loading, Swansea, U.K.
- MADSEN, K. RISBORG. 1987. Poretryksoptygning i sand. Afgangsprojekt, Aalborg Universitet.
- SEED, H.B., LEE, K.L. 1967. Dynamic strength of anisotropically consolidated sand. PROC ASCE Vol 93 GT 5.
- ØSTERGAARD, A.M. 1986. Dynamisk Triaxialapparat. Laboratoriet for Fundering. AUC.