



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Bestemmelse af forbelastningstryk i laboratoriet

Jacobsen, H. Moust

Published in:

NGM-92 : Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde, Aalborg, 28-30 Maj 1992

Publication date:

1992

Document Version

Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Jacobsen, H. M. (1992). Bestemmelse af forbelastningstryk i laboratoriet. I NGM-92 : Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde, Aalborg, 28-30 Maj 1992: Artikler til NGM-92: Session 5-8 (Bind 2/3, s. 455-460). Dansk Geoteknisk Forening.

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.

MB7

NGM-92

11. NORDISKE GEOTEKNIKERMØDE
AALBORG, 28-30 MAJ 1992

NGM-92

Vol 2 / 3

Vol 2 / 3

Artikler til NGM-92: Session 5-8

Maj 1992
dgf-Bulletin

9



DANISH GEOTECHNICAL SOCIETY
DANSK GEOTEKNISK FORENING

9

NGM-92

11. NORDISKE GEOTEKNIKERMØDE

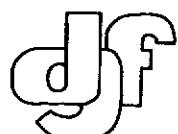
AALBORG, 28-30 MAJ 1992

Vol 2 / 3

Artikler til NGM-92: Session 5-8

Maj 1992
dgf-Bulletin

9



DANISH GEOTECHNICAL SOCIETY
DANSK GEOTEKNISK FORENING

Bestemmelse af forbelastningstryk i laboratoriet

Af

H. Moust Jacobsen, Aalborg Universitetscenter

RESUME

De foreliggende metoder til bestemmelse af forbelastningstrykket σ'_{pc} i konsolideringsforsøg omtales, vurderes og sammenlignes.

INDLEDNING

Belastes en lerprøve op til eller ud over forbelastningstrykket σ'_{pc} , iagttages en kraftig forøgelse af krybningen ("sekundær konsolidering"), og der sker et drastisk fald i konsolideringsmodulet K . Den samlede virkning heraf omtales af Roscoe (1963) som "yielding". Det er naturligvis vigtigt at kunne bestemme σ'_{pc} , og derved blive i stand til at rekonstruere spændingshistorien i laboratorieforsøg og tage "yielding" i betragtning ved sætningsberegninger.

PRIMÆRGRENEN

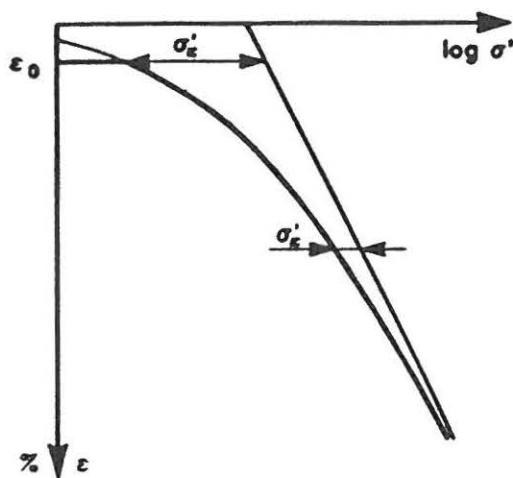
I et konsolideringsforsøg observeres først den såkaldte primærgren, der i logaritmisk afbildning er jævnt krum og for store spændinger har en asymptote, stamkurven, der beskriver en normalkonsolideret tilstand. Primærgrenens udseende antages ofte forårsaget af dårlig prøvetildannelse, men selv med de bedst tildannede prøver måles en krum primærgren. Krumningen skyldes da også, at spændingstilstanden ændres fra isotrop tilstand til hviletrykstilstand.

Det er primærgrenens krumning eller ændring af krybningen, der normalt danner grundlag for bestemmelse af σ'_{pc} .

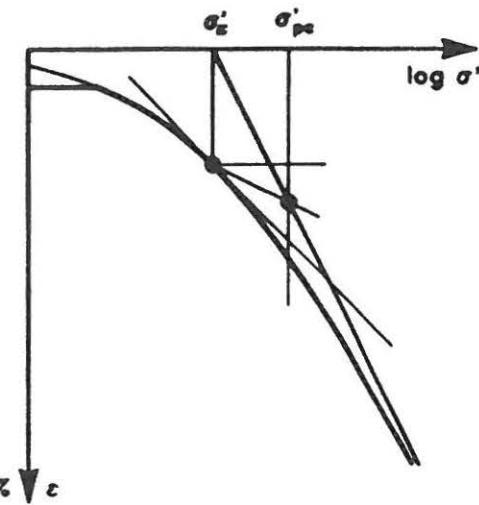
En primærgren kan beskrives ved formlen:

$$\epsilon = Q \log \left(1 + \frac{\sigma'}{\sigma'_n} \right) + \epsilon_0 \quad (1)$$

hvor Q er tøjningsindex og σ'_n er en referencespænding, der gør udtrykket under logaritmetyget dimensionsløst. ϵ_0 er den tøjning, der svarer til poreundertrykket ved prøvetildannelsen. Referencespændingen σ'_n kan ses at være det tillæg til σ' , der gør primærgrenen



Figur 1: Terzaghis konstruktion af asymptote, svarende til normalkonsolideret tilstand.



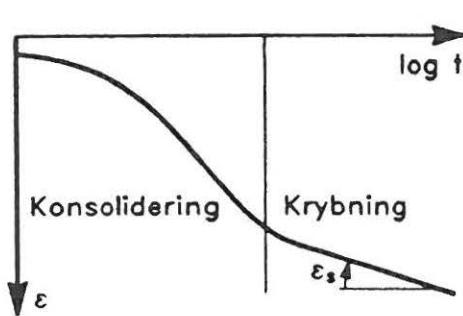
Figur 2: Casagrandes konstruktion af forbelastringstryk σ'_{pc} , anvendt på Terzaghis kurve (fig. 1).

logaritmisk (Fig. 1). Det er allerede foreslægt af Terzaghi, og det er i god overensstemmelse med næsten alle primærkurver.

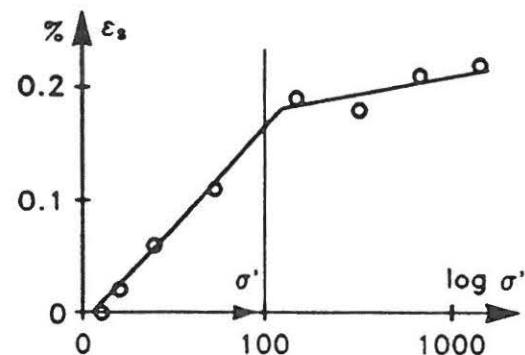
Casagrandes metode er langt den mest anvendte til bestemmelse af σ'_{pc} og kan selvfølgelig også bruges på Terzaghis primærgren (Fig. 2). Man skal da først opsigte punktet med mindst krumningsradius. Ud fra formel (1) kan beregnes, at krumningsradius er mindst for $\sigma' = \sigma'_n$, svarende til $\epsilon = Q \log 2$. Tangenten til kurven i dette punkt har ifølge formel (1) hældningen $0.5 Q$. Vinkelhalveringslinien får altså hældningen $0.25 Q$. Idet asymptoten er $\epsilon = Q \log (\sigma'/\sigma'_n) + \epsilon_0$, fås:

$$\sigma'_{pc} \approx 2.5 \sigma'_n \quad (2)$$

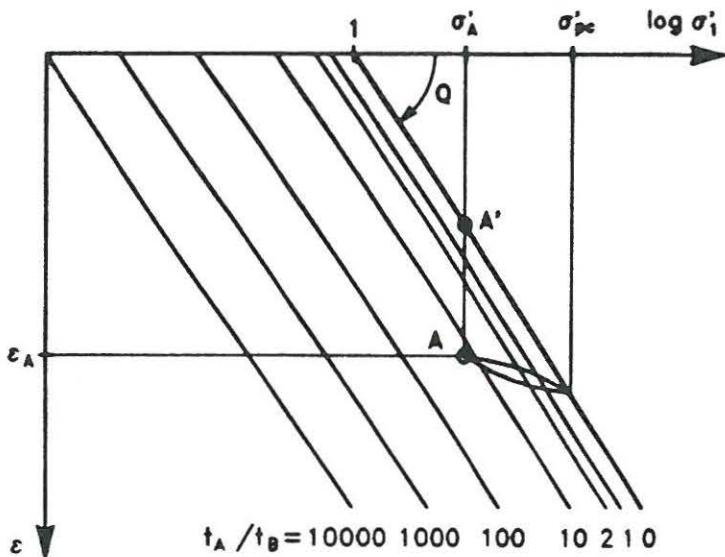
Man kan altså finde σ'_{pc} efter Casagrandes metode ved at finde σ'_n først. Der ses dog bort fra de første punkter, da σ'_n ellers bestemmes for stor. Man behøver således ikke at gætte, hvor på kurven krumningen er størst, eller hvor asymptoten ligger. Den normale fremgangsmåde reducerer faktoren 2.5 i formel (2) væsentligt, fordi asymptoten lægges for tæt på primærgrenen, og punktet med størst krumning let lægges ved for lille tøjning.



Figur 3: Opdeling i konsolideringsfase og krybningfase.



Figur 4: Akais metode til bestemmelse af σ'_{pc} .



Figur 5: Stamkurve og krybningsisokroner.

KRYBNING

Det er velkendt, at krybningens dekadehældning ϵ_s vokser drastisk, når $\sigma' \rightarrow \sigma'_{pc}$. Dette har været anvendt af Akai (1960). En tidskurve deles da op i en konsolideringsfase og en krybningsfase (Fig. 3). Krybningen antages at være logaritmisk afhængig af t med dekadehældningen ϵ_s . Der ses altså bort fra eventuelle krumme krybningskurver. Akai fandt, at ϵ_s vokser proportionalt med σ' , når $\sigma' < \sigma'_{pc}$ og med $\log \sigma'$, når $\sigma' > \sigma'_{pc}$. Herved kan σ'_{pc} bestemmes (Fig. 4). Metoden er kun brugbar ved lange tidskurver. Ellers bliver ϵ_s let overvurderet. ϵ_s er i øvrigt ofte konstant, når σ'_{pc} overskrides.

SAMTIDIG KONSOLIDERING OG KRYBNING

Allerede i 1961 fremkom Brinch Hansen med sin teori om samtidigt forløbende konsolidering og krybning. I 1967 foreslog Bjerrum, at man forenklede det teoretiske grundlag ved først at antage konsolideringen for momentan. En arbejdskurve kan altså gennemløbes til tiden $t = 0$. På figur 5 ses stamkurven til en normalkonsolideret ler, der til tiden $t = 0$ har en spændings-tøjningstilstand, der svarer til punkt A'. Krybningen finder nu sted, idet σ' er konstant. Den antages at forløbe efter formlen

$$\epsilon_{cr} = Q_s \log \left(1 + \frac{t_r}{t_b} \right) \quad (3)$$

idet Q_s antages konstant for en normalkonsolideret ler. t_b er en referencetid, og t_r er den reelt forløbne tid. Kurver gennem punkter, der har krøbet lige længe, er linier parallelle med $t = 0$ kurven (stamkurven). De kaldes i det følgende for krybningsisokroner (Fig. 5).

Referencetiden t_b har betydning for den relative afstand mellem isokronerne i nærheden af $t = 0$ kurven. Disse isokroner dækkes imidlertid af konsolideringsprocessen, og t_b må derfor skønnes, fx til et minut.

Når krybningen har fundet sted i en periode t_A , er punkt A nået. Belastet herfra vil leret optræde med en forbelastning σ'_{pc} , der er større end σ'_A . I praksis vil en normalkonsolideret ler derfor have en forbelastningsspænding, der er større end det lodrette in situ tryk, i nøje overensstemmelse med praktisk erfaring.

Gives prøven en lille spændingstilvækst $d\sigma$ fra punkt A, vil krybningen fortsætte som før, men den observerede tid t skal nu lægges til t_A for at få den reelle tid t_r . Herved fås:

$$\Delta\epsilon_{cr} = Q_s \left(\log \left(1 + \frac{t + t_A}{t_b} \right) - \log \left(1 + \frac{t_A}{t_b} \right) \right) \cong Q_s \log \left(1 + \frac{t}{t_A} \right) \quad \text{for } t_A \gg t_b \quad (4)$$

t_A kaldes for prøvens tilsyneladende alder. For en normalkonsolideret ler er det prøvens geologiske alder ved optagning, men såfremt prøven belastes, bliver t_A reduceret, og t_A vil være meget lille i en normalkonsolideret tilstand. Krybningsisokronerne betragtes som niveaukurver for t_A , idet det stemmer for punkt A med lille genbelastning og for normalkonsolidering hvor $t_A \approx 0$.

Under en normal genbelastning vil genbelastningskurven krydse en række krybningsisokroner, og t_A vil altså variere. For nemheds skyld antages det, at t_A straks antager sin slutværdi. Er formel (4) korrekt, og den sidst gjorte antagelse rimelig, kan man for normalkonsoliderede eller lettere forbelastede lerarter finde følgende:

Q_s findes som den største værdi af ϵ_s , der måles, idet der dog ikke anvendes tidskurver med belastninger, der er væsentlig større end σ'_{pc} .

Derefter kan t_A findes af enhver krybningskurve. Til sidst kan punkter på stamkurven beregnes – stamkurven fastlægges herved med stor præcision (Fig. 6).

Hvis det er rimeligt at anvende formel (4) under hele tidsforløbet, vil konsolideringsfasens tøjninger let kunne udregnes. En yderligere kontrol vil da være, at tøjningsudviklingen i konsolideringsfasen følger den klassiske teori.

KONSOLIDERING

Konsolideringens tidsforløb kan angives ved følgende udtryk (Brinch Hansen 1961):

$$U^{-6} = 1 + \frac{1}{2} T^{-3} \quad (5)$$

hvor U er konsolideringsgrad og T er en tidsfaktor. $T/t = c_k/H^2$ hvor $c_k = kK/\gamma w$. Udtrykket er tilnærmet, men den maksimale fejl er højest et par procent.

Med numeriske beregninger (finite differencer) har Mogens Jørgensen (1991) studeret forløbet, såfremt c_k varierer. Såfremt c_k varierer springvis fra en konstant værdi til en anden konstant værdi, svarende til at σ' passerer σ'_{pc} under tidsforløbet, og yielding opstår i den afsluttende del af konsolideringsfasen, får tidskurven et knæk, som ikke optræder ved jævn variation af c_k . På tidskurven kan findes to konsolideringstider T_I og T_{II} og to begyndelseskonsolideringsgrader $U_I \approx 0$ og U_{II} . Af forholdet T_I/T_{II} og U_{II} kan bestemmes σ'_{pc} , samt forholdet mellem de to c_k -værdier. Da gennemsnitskonsolideringsmodulet K kendes, kan

også de to c_k -værdier bestemmes. Antages permeabilitetskoefficienten at være konstant under belastningstrinnet, kan K_{pc} og K_{nc} findes.

Man kan altså i visse tilfælde finde σ'_{pc} af en tidskurve.

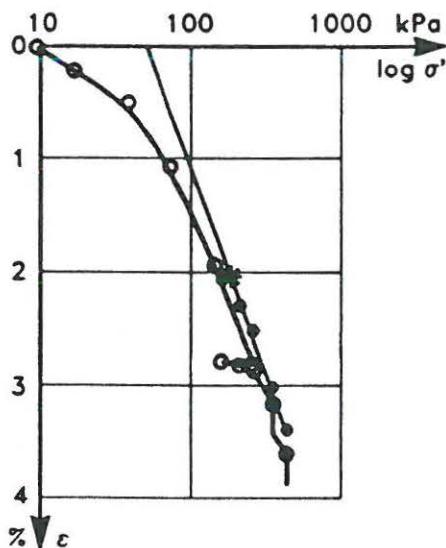
Det er dog ikke problemfrit, blandt andet fordi mange tidskurver ser ud til at have et knækpunkt. Følgende forudsætning skal være opfyldt:

- Den sandsynlige værdi af σ'_{pc} skal ligge indenfor det aktuelle spændingsinterval.
 - Værdierne af konsolideringsmodulet for normalkonsolideret ler K_{nc} og for forbelastet ler K_{pc} skal være rimelige.
 - Da σ'_{pc} er fundet efter fradrag af krybning, skal det beregnede forbelastningspunkt ligge på stamkurven.
 - Knækpunktets konsolideringsgrad U_K skal svare til $0.15 < U_K < 0.85$.
- Specielt ii) medfører en stor sikkerhed for, at det opnåede resultat er rimeligt.

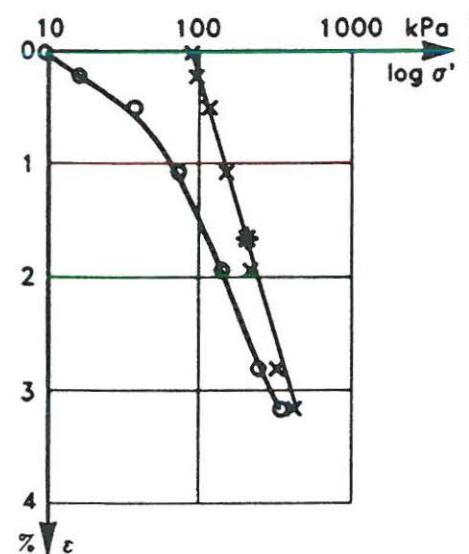
EKSEMPEL

Figur 6 og 7 viser et forsøgsresultat med en moræneler, hvor der kun er udført en mindre af- og genbelastning. Ved brug af Casagrandes metode – i den omtalte modificerede form – findes σ'_n først til 80 kPa, hvorefter σ'_{pc} bliver 200 kPa. De første tidskurver er så korte, at krybningen ikke kan findes med sikkerhed. De 5 sidste tidskurver er derimod benyttet til at finde stamkurven. Her ligger også et forbelastningspunkt, bestemt ud fra en tidskurve. $\sigma'_{pc} = 182$ kPa.

Akais metode er ikke altid velegnet, og σ'_{pc} bliver mere usikkert bestemt end ved de øvrige metoder. Resultatet, der er vist på figur 4, stammer også fra et forsøg på moræneler.



Figur 6: Samme forsøg som figur 7. $t = 0$ kurven er bestemt ved krybningsgrene. * Forbelastningstryk $\sigma'_{pc} = 182$ kPa fundet på tidskurve.



Figur 7: Forsøg på moræneler. * Casagrandes metode. $\sigma'_n = 80$ kPa. $\sigma'_{pc} = 200$ kPa.

KONKLUSION

Der er angivet to metoder til at bestemme σ'_{pc} , og det viser sig, at de stemmer rimeligt overens, således som det vises i eksemplet, og som mange andre forskningsresultater viser. Den ene metode er Casagrandes, der er gjort mere præcis ved at anvende en antagelse som Terzaghi gjorde. Den bygger alene på arbejdskurven. Den anden metode er nyudviklet og bygger på en adskillelse af samtidig forløbende konsolidering og krybning, samt en analyse af tidsforløb hvor σ'_{pc} overskrides.

Det bemærkes, at de to fremgangsmåder fører til forskellige stamkurver. I midlertid er afvigelsen lille, når det tages i betragtning, hvor forskellige metoderne er. Casagrandes metode er derfor - med den nye modifikation - stadig en god måde til bedømmelse af σ'_{pc} .

REFERENCER

- Akai, K. (1960): Die strukturellen Eigenschaften von Schluff. *Mitteilungen Heft 22*. Die Technische Hochschule, Aachen.
- Bjerrum, L. (1967): Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings. *Geotechnique 17*, p. 81 - 118.
- Brinch Hansen, J. (1961): A model law for simultaneous primary and secondary consolidation. *GIB 13*. Danish Geotechnical Institute.
- Casagrande, A. (1936): The determination of the preconsolidation pressure and its significance. *IICSMFE Cambridge*, Vol. 3, pp. 60-64.
- Jørgensen, M.B. (1992): Konsolideringsforløb med varierende konsolideringskoefficient. *NGM92*. Aalborg.
- Moust Jacobsen, H. (1970): Strength and deformation properties of preconsolidated moraine clay. *GIB 27*. Danish Geotechnical Institute.
- Moust Jacobsen, H. (1975): Nogle danske morænelerers styrke- og deformationsegenskaber. *NGM75* København.
- Moust Jacobsen, H. (1992): Karakteristiske belastningstilstande for moræneler. *NGM 92*. Aalborg.