

Glacial konsolidering af moræneler ved Tårnby, Amager

ANDERS BJERREGAARD CHRISTENSEN



Christensen, A. B.: Glacial konsolidering af moræneler ved Tårnby, Amager. *Geologisk Tidsskrift*, hæfte 4, pp. 20–24. København, 1996–12–05.

Investigations of clay till from a lodgement till at Tårnby, Amager shows that the extremely firm characteristics of this till has been caused only by consolidation during glacial load. No signs of cementing or other processes which could have lead to the extremely firm characteristics has been found. Consolidation tests (CRS-type) shows a preconsolidation stress about 5 MPa, corresponding to a load of at least 500–600 m ice.

Anders Bjerregaard Christensen, Hvidkildevej 20 II tv, 2400 København NV

Indledning

Det har længe været kendt, at moræneleren i store dele af København og på Amager er særdeles hård. Dette ses ved gennemgang af de mange geotekniske boringer, der er foretaget i området. I mange af boringerne er vandindholdet w meget lavt (ca. 8%), og i langt de fleste boringer har vingestyrken c_v (allerede i få meters dybde) vist sig at være større, end hvad der normalt kan måles med traditionelt feltudstyr ($c_v < 700$ kN/m²).

Morænelers styrke- og deformationsegenskaber afhænger af en lang række forhold, hvoraf de vigtigste er morænelerens sammensætning og belastningshistorie (Jacobsen 1967 og 1970, Boulton & Paul 1976, Laad et al 1977, Foged & Steenfelt 1992). Belastningshistorien beskrives bl.a. ved forkonsoliderings-spændingen σ'_{vc} , der er den højeste værdi, som den effektive spænding har nået under konsolideringen.

Ud fra forkonsolideringsspændingen er det muligt, at få et skøn over tykkelsen af den gletscher, der dækkede området. Dette kræver dels en forståelse af hvilke forhold som har indflydelse på konsolidering af moræneler, dels en forståelse af de påvirkninger som en moræneler efterfølgende kan blive udsat for.

Konsolideringsprocessen

I det følgende betragtes kun én-dimensional konsolidering, hvorfor det kun er de lodrette effektive spændinger σ'_z og lodrette totale spændinger σ_z , der har interesse. Den generelle spændingstensor kan dermed reduceres til en én-dimensional spændingstilstand med et poretryk u og en effektiv spænding σ' , hvor sum-

men af disse to spændinger giver den totale spænding σ .

Den effektive spænding kan opdeles i direkte kontaktkræfter mellem de enkelte korn og kræfter mellem kornene af fysisk-kemisk oprindelse (Mitchell 1993).

Udsættes et givet volumen af ler for en vertikal belastning p , vil dette umiddelbart føre til en tilsvarende forøgelse af poretrykket, da den effektive spænding kun kan øges ved en deformation af kornskelettet. Hvis poretrykket er lavere uden for volumenet, vil poretryksgradienten være rettet ud af volumenet, og porevandet vil derfor strømme ud. Kornskelettet vil deformeres, og der opbygges effektive spændinger indtil poretryksgradienten er forsvundet. Den del af konsolideringsprocessen, som finder sted, sålænge poretryksgradienten er styrende parameter, benævnes primær konsolidering.

Under langvarig belastning vil de enkelte korn kunne flytte sig i forhold til hinanden til en mere stabil kornstruktur, uden at summen af kræfter virkende mellem kornene ændres, eller med andre ord – deformation uden ændring af den effektive spænding. Denne proces benævnes sekundær konsolidering.

Under en glacial konsolidering vil gletscheren påvirke sit underlag med et tryk p . Denne belastning modsvares af en total spænding σ i den underliggende moræneler. Dræning af porevandet kan finde sted, dels ad subglaciale kanaler, dels gennem de underliggende sedimenter (Paterson 1981, Walder & Fowler 1994). Det er således istykkelse og dræningsforhold, der bestemmer deformationen af kornskelettet og dermed hvilken effektiv spænding, der kan opbygges (Boulton & Paul 1976, Sauer & Christiansen 1988).

Vurdering af istykkelser

Ved vurdering af istykkelsen ud fra en eksperimentelt bestemt forkonsolideringsspænding er der to vigtige forhold, der skal tages i betragtning.

- 1) I situationer med poretryk $u > 0$, under den glacial konsolidering, er den effektive spænding mindre end p . Hvis dette har været tilfældet, da den effektive spænding var på sit største niveau (= forkonsolideringsspændingen), har isens tykkelse været større, end forkonsolideringsspændingen antyder.
- 2) Morænelerens styrke- og deformationsegenskaber anvendes ved bestemmelse af forkonsolideringsspændingen og afhænger bl.a. af kornstrukturen. I tidsrummet efter den glacial konsolidering kan kornstrukturen påvirkes af forskellige processer, som krybning, frost/tø etc. og ved prøveudtagning og prøvetildannelse. Disse påvirkninger kan medføre, at der er forskel på den forkonsolideringsspænding, der bestemmes eksperimentelt og den effektive spænding, der blev opbygget under den glacial konsolidering. Endelig kan cementering påvirke styrke- og deformationsegenskaberne.

Med dette som udgangspunkt er Amagermorænen blevet undersøgt med henblik på bestemmelse af den største forkonsolideringsspænding og dermed at få et bud på tykkelsen af den gletscher, som konsoliderede Amagermorænen.

Feltundersøgelser

I udgravningerne til Øresundsforbindelsens landanlæg, hvor Amagermorænen var blottet i rene profiler, blev moræneleren gennemgået for at finde de hårdeste partier. Ved Tårnby i selve linieføringen mellem Oliefabriksvej og Englandsvej blev der fundet et særdeles hårdt lag af moræneler, som i det følgende vil blive nævnt som Tårnby-morænen.

Tårnby-morænen findes i varierende dybde af 1–3 m under nuværende jordoverflade i en tykkelse af 1–2 meter. Den hårdeste del findes generelt i midten af laget. Under det hårde moræneler findes et lag af smeltevandssand af varierende tykkelse. Moræneleren er karakteriseret ved en usædvanlig stor fasthed, en høj grad af opsprækkethed og et indhold af sten og blokke, som i visse områder er særdeles højt. Stenindholdet, den faste karakter og en stedvis svag laminering viser, at Tårnby-morænen er en lodgement till, og at den derfor er af subglacial oprindelse.

Langs de kraftigst udviklede sprækkeplaner, der umiddelbart er synlige, ses oxiderede jernforbindelser. Oxideringen er derimod ikke observeret i matrix. Forekomster af mindre pyritkonkretioner i matrix samt ovenstående viser, at forvitringen kun har nået moræneleren i de kraftigst udviklede sprækker.

Sammenfattende haves følgende prøvebeskrivelse: Moræneler, svagt hærtnet, sandet, gruset, stedvist meget stenet, med enkelte konkretioner af pyrit, stærkt opsprækket, grå matrix med røde sprækker, kalkholdig, subglacialt aflejringssmiljø (lodgement till), Glacialt, Weichel.

(Prøvebeskrivelsen er foretaget i henhold til Larsen et al. (1988))

Laboratorieundersøgelser

Prøveindsamling

Prøverne blev indsamlet fra et friskt udgravet profil. Bortset fra den mekaniske påvirkning ved udtagning af selve prøverne har moræneleren ikke været udsat for nogen recent udtørring, udblødning eller anden fysisk påvirkning.

Geotekniske klassifikationsforsøg

For Tårnby-morænen ligger det naturlige vandindhold w mellem 7% og 9%. Lerfraktionen udgør ca. 12%, bestemt ved hydrometerslemning. Flydegrænsen w_L er 14.2% og plasticitetsgrænsen w_p er 11.1%. Plasticitetsindekset I_p kan da bestemmes til 4.1% og aktiviteten til 0.34. Der er således tale om en moræneler med et meget lavt plasticitetsindeks. Korndensiteten blev bestemt ved pyknometerforsøg til ca. $2.75 \text{ g/cm}^3 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$, som ligger inden for hvad der kan forventes.

Lermineralogisk analyse

Tårnby-morænen's lermineralogi blev bestemt kvalitativt ved en røntgendiffraktionsanalyse udført på Afdelingen for Mineralogi, Geologisk Institut, Københavns Universitet. Data fra analysen viste, at Tårnby-morænen hovedsageligt indeholder kvarts, illit og kaolin samt kalk og glaukonit. Derimod indeholder moræneleren ikke smectit eller andre svellende lermineraler.

Elektronmikroskopi

For at undersøge om Tårnby-morænen er cementeret, blev den undersøgt ved scanningelektronmikroskopi (SEM). Moræneleren blev prepareret dels i form af en kulbedampet polerprøve (Fig. 1.a) for at vurdere porøsiteten og eventuelle sprækker, dels i form af en guldbedampet brudflade (Fig. 1.b) for at undersøge morænelerens uforstyrrede kornstruktur.

Der blev ikke fundet tegn på cementering på trods af, at der er kalk fordelt i matrix, som kunne være kilde til en cementering.

Porøsiteten består dels af sprækkeporøsitet, dels af

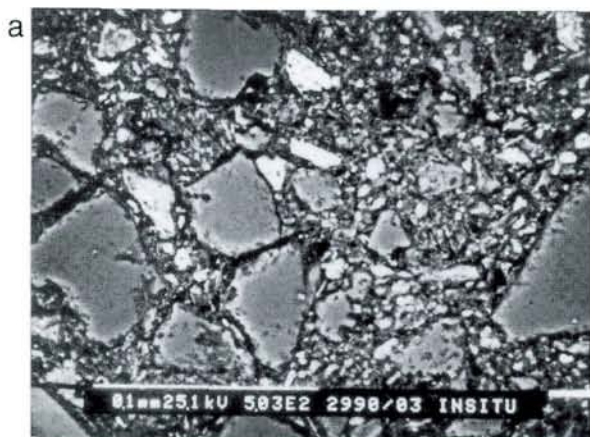


Fig. 1.a. SEM billede, Polerprøve.
SEM picture,



Fig. 1.b. SEM billede, Brudflade.
SEM picture,

intergranulær porøsitet. Den samlede porøsitet vurderes til ca. 25%. Med en korndensitet på 2.75 g/cm^3 svarer porøsiteten til vandindhold på ca. 8% ved 75% vandmætning, svarende til det tidligere målte vandindhold. Med 20% porøsitet haves istedet et vandindhold på 8% ved 90% vandmætning.

Bestemmelse af forkonsolideringsspenningen

Forkonsolideringsspenningen blev bestemt, dels ved konsolideringsforsøg af CRS typen (Constant Rate of Strain), dels ved anvendelse af SHANSEP.

Konsolideringsforsøg

Der blev gennemført 2 konsolideringsforsøg af CRS-typen. Under de gennemførte forsøg blev der kørt med en deformationshastighed på 0.0002 mm/s og med enkeltidet parallel dræning. Da forsøgene blev kørt med konstant deformationshastighed, vil tøjningshastigheden (tøjning = relativ deformation) være stigende under forsøget, men i relation til tolkningen af de gennemførte forsøg kan denne fejlkilde dog negligeres. Den anvendte konsolideringscelle havde en cellehøjde på 80 mm og en cellediameter på 53.5 mm. Konsolideringsforsøgene blev gennemført med følgende belastningsprogram:

Forsøg A: Første belastningsforløb blev kørt til 1.1 MPa med efterfølgende aflastning til ca. 0.25 MPa. Andet belastningsforløb blev kørt til ca. 45 MPa.

Forsøg B: Første belastningsforløb blev kørt til 5.3 MPa med efterfølgende aflastning til ca. 0.25 MPa. Andet belastningsforløb blev kørt til ca. 45 MPa (Fig. 2).

Ved første belastningsforløb deformeres prøven til et spændingsniveau, der ligger lidt under den forventede forkonsolideringsspenning, hvorefter prøven aflastes til et spændingsniveau svarende til overlejringsspændingen. Herved reduceres den indflydelse som prøveforstyrrelser fra prøveudtagning og fra indbygning i konsolideringscellen har på forsøgsresultaterne. Ved andet belastningsforløb køres til et spændingsniveau, der ligger over den forventede forkonsolideringsspenning, hvorved prøven bringes i normalkonsolideret tilstand ($\sigma' > \sigma'_{pc}$). For at konsolideringskurven skal give en repræsentativ beskrivelse af prøven i normalkonsolideret tilstand, belastes til ca. en dekade over den forventede forkonsolideringsspenning.

Tolkningen af konsolideringskurverne (Fig. 2) giver anledning til følgende kommentarer: Indledende konsolideringsforsøg har vist, at Casagrandes metode til bestemmelse af forkonsolideringsspenningen ikke kan anvendes for den undersøgte moræneler grundet problemer med prøveforstyrrelser. Therzaghis metode bygger på konsolideringskurvens krumning ved normalkonsolideret tilstand og er derfor ikke så følsom over for prøveforstyrrelser som Casagrandes metode. Af en matematisk beskrivelse af krumningen kan udledes, at $\sigma'_{pc} \approx 2.5 \sigma'_k$ hvor σ'_k er den spænding, der skal lægges til målepunkterne for at føre konsolideringskurven over i en ret linie (Jacobsen 1992).

Therzaghis metode ses på Fig. 2 som den stiplede kurve og gav værdier af forkonsolideringsspenningen på 4.5 MPa ved forsøg A og 6.3 MPa ved forsøg B.

SHANSEP

Forkonsolideringsspenningen kan også bestemmes ud fra den udrænede forskydningsstyrke ved hjælp af SHANSEP (Stress History And Normalised Soil Engi-

neering Properties). SHANSEP bygger på, at ler med samme OCR men med forskellig forkonsolideringsspenning har spændings-tøjningsegenskaber, der tilnærmelsesvis er ens (Ladd et al 1977), hvor OCR (OverConsolidation Ratio) er forholdet mellem forkonsolideringsspenningen σ'_{pc} og insituspændingen σ'_o . SHANSEP blev oprindeligt udviklet med det formål at bestemme forskydningsstyrkens variation med dybden, men anvendes her til at bestemme forkonsolideringsspenningen på basis af forskydningsstyrken og aflastningsspenningen.

Med udgangspunkt i en normalisering af den udrånedede forskydningsstyrke med den mindste effektive aflastningsspenning, er følgende sammenhæng mellem vingestykken c_v og aflastningsspenningen σ'_{red} blevet udviklet under anvendelse af data fra Storebælt (Christensen et al 1992).

$$\frac{c_v}{\sigma'_{red}} = A \left(\frac{\sigma'_{pc}}{\sigma'_{red}} \right)^\Lambda$$

Materialeparametre A og Λ for Storebæltsmoræneleren blev bestemt til $A = 0.4$ og $\Lambda = 0.85$. Afvigelser fra den faktiske værdi af σ'_{pc} kan opstå, hvis den undersøgte moræneler afviger væsentlig fra moræneler fra Storebælt, da A og Λ i det tilfælde antager lidt andre værdier. Dette gælder ligeledes, hvis den undersøgte moræneler ikke opfylder de normaliseringsbetingelser, der opstille i SHANSEP.

Det var ikke muligt at bestemme vingestykken for den undersøgte moræneler, da dennes vingestykke lå ud over vingestykrets måleområde. Vingestykken blev i stedet bestemt indirekte ved simpelt énakset trykforsøg med glatte trykhoveder, idet vingestykken er ca. 93% af den udrånedede forskydningsstyrke bestemt ved simpelt énakset trykforsøg (Jacobsen 1970). Der blev anvendt kubisk tildannede prøver, og forsøgene blev kørt med en deformationshastighed på 0.5% pr. minut. Trykforsøgene gav udrånedede forskydningsstyrker på 680–820 kN/m², som ved anvendelse af SHANSEP giver forkonsolideringsspenninger på 3–4 MPa. Da normaliseringsbetingelserne fra SHANSEP ikke er undersøgt for Tårnby-morænen, anses den beregnede forkonsolideringsspenning kun for vejledende.

Tildannelsen af de kubiske prøver til de énaksede trykforsøg var forbundet med store vanskeligheder, da der let opstod sprækker i moræneleren. De målte værdier af den udrånedede forskydningsstyrke er derfor konservative. Ved at sammenholde resultaterne fra konsolideringsforsøgene med resultaterne fra trykforsøgene, anslås forkonsolideringsspenningen at være ca. 5 MPa.

CRS-test B

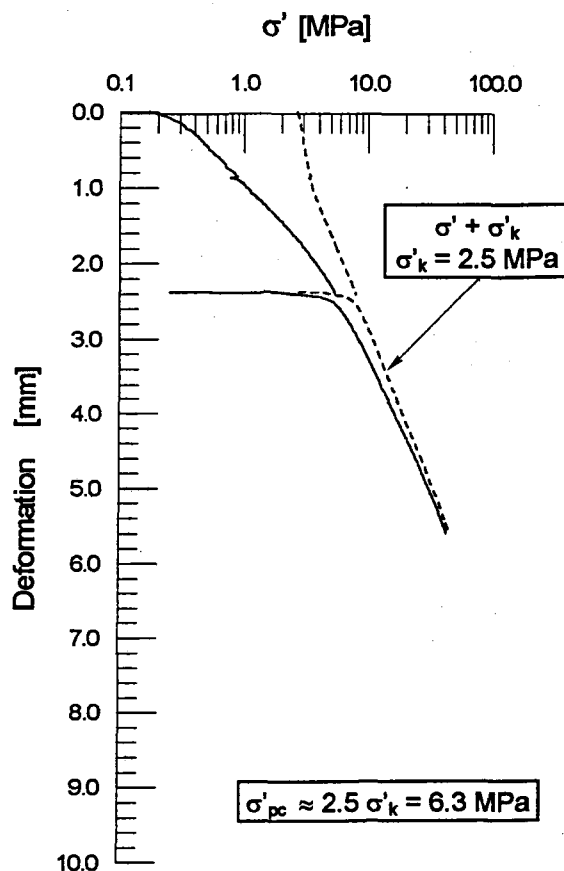


Fig. 2. Konsolideringkurve: (CRS test) prøve diameter 53.5 mm, prøve højde 80 mm og deformationshastighed 0.0002 mm/s. Den stiplede kurve er konstruktion af Terzaghis asymptote.

Consolidation curve (CRS test) sample diameter 53.5 mm, sample height 80 mm and deformation speed 0.0002 mm/s. The dotted curve is construction of Terzaghis asymptote.

Diskussion

Der er ikke fundet tegn på cementering, og det kan således afvises, at cementering er årsagen til Tårnby-morænen fasthed og styrke. Processer som krybning, frost/tø og lignende kan derimod have medført en forstyrrelse af kornstrukturen. Det er derfor muligt, at den eksperimentelt bestemte forkonsolideringsspenning er lavere end den forkonsolideringsspenning, der blev opbygget under isen. Prøveforstyrrelser ved udtagning og tildannelse af prøverne til laboratorieforsøgene har samme effekt og var et stort problem. Den eksperimentelt bestemte forkonsolideringsspenning må derfor anses for at være konservativ, set i forhold

til den største effektive spænding, der blev opbygget under den glaciale konsolidering.

Et andet forhold er poretrykket i prøven. Trykket fra isen er en funktion af istykkelsen og medfører, at der opbygges en total spænding i aflejringerne under isen. Det er dog kun forkonsolideringsspændingen, der kan bestemmes eksperimentelt, mens der ikke findes fornuftige bud på størrelsen af poretrykket under den is, der dækkede Amager. Det er ligeledes sparsomt med litteratur om subglaciale poretryk under glaciationer fra andre regioner. Sauer & Christensen (1988) har, ved at sammenholde forkonsolideringsspændinger (bestemt ved konsolideringsforsøg) med istykkelser (bestemt udfra en simpel modellering af det geometriske profil), anslået, at poretrykket har været 80 % af den totale spænding i en afstand af ca. 600 km fra isfronten. Der er også gjort forsøg på modellering af dræning gennem underliggende lag af sedimenter med forskellige transmisivitet (Boulton & Paul, 1976). Problemet med mange af disse modeller er, at de enten er for generelle og derved indeholder for mange ubekendte faktorer, eller også er de for specifikke over for en bestemt lokalitet. Det er dog klart, at det er et område, der bør arbejdes mere med.

Antages et poretryk $u = 0$ haves en mindste værdi for istykkelsen. Med en forkonsolideringsspænding på ca. 5 MPa har isen således været mindst 500-600 m tyk. Hvis der har været et poretryk af betydning, har isen været tykkere end de 500-600 m.

Konklusion

På baggrund af konsolideringsforsøgene og de énaksede trykforsøg kan det konkluderes, at forkonsolideringsspændingen når op på mindst 5 MPa for den del af Amagermorænen, der er beliggende ved Tårnby. Den høje forkonsolideringsspænding skyldes alene en konsolidering, idet der ikke er fundet tegn på cementsering.

Efter den glaciale konsolidering har moræneleren været udsat for en række forskellige processer, som i større eller mindre grad kan have forstyrret kornstrukturen. Der vil derfor være forskel på den forkonsolideringsspænding, der kan bestemmes eksperimentelt, og den effektive spænding, der blev opbygget under den glaciale konsolidering.

Forkonsolideringsspændingen på 5 MPa svarer til en istykkelse på mindst 500-600 m i en situation med poretryk $u = 0$. Hvis poretrykket har været større, betyder det, at istykkelsen har været tilsvarende større end de 500-600 m, som forkonsolideringsspændingen antyder.

Endelig har arbejdet med Tårnby-morænen vist, at den stærkt forkonsoliderede Tårnby-moræne er særdeles følsom over for prøveforstyrrelser, og at den store opsprækning kræver meget stor forsigtighed ved til-dannelse af prøver til laboratorieforsøgene.

Sammenfatteende kan det konkluderes, at Amager har været dækket af mindst 500-600 m is.

Efterskrift

Følgende artikel bygger på mit afsluttende eksamensprojekt „Konsolideringsegenskaber ved moræneler“ udført i 94/95 ved Institut for Geologi og Geoteknik med Ida Lind og Bent Hansen som vejledere.

I forbindelse med det indledende arbejde har Geoteknisk Institut, A/S Øresundsforbindelsen samt entreprenørerne på landanlæggene været behjælpelige med geotekniske og geologiske data og adgang til udgravningerne i forbindelse med Øresundsforbindelsens landanlæg.

Referenceliste

- Boulton, G. S. & Paul, M. A. 1976: The influence of some genetic processes on some geotechnical properties of glacial tills. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 9 (3), 159-194.
- Christensen, J. L., Schjønning, E. & Foged, N. 1992: Comparison of Clay Till Strength Parameters Using BS and Danish Test Procedures. *Proceedings. NGM 92, Aalborg*, 1., 75-80.
- Foged, N. & Steenfelt, J. S. 1992: An Engineering Geological Approach to Preload Clay Till Properties. *Proceedings. NGM 92, Aalborg*, 1., 75-80.
- Jacobsen, M. 1967: Morænlens deformationsegenskaber geotekniske egenskaber. *Licentiatarbejde. Geoteknisk Institut. København. Genoptrykt 1989: Morænlens geotekniske egenskaber*. 1-4. 220 pp. AUC.
- Jacobsen, M. 1970: *Bulletin No. 27*. 60 pp. København. Geoteknisk Institut.
- Jacobsen, M. 1992: Bestemmelse af forbelastningstryk i laboratoriet. *Proceedings. NGM 92, Aalborg*. 455-460.
- Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. & Poulos, H. G. 1977: *Stress-Deformation and Strength Characteristics*. 9th ICSMFE, Tokyo. 2, 421-494.
- Larsen, G., Frederiksen, J., Villumsen, A., Fredericia, J., Graversen, P., Foged, N., Knudsen, B. & Baumann, J., 1988: *Vejledning i Ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse, DGF-bulletin nr. 1*. 144 pp. Dansk Geoteknisk forening.
- Mitchell, J. K. 1993: *Fundamentals of soil behavior*. 2 nd ed. 437 pp. New York: John Wiley & Sons.
- Paterson, W. S. B. 1981: *The physics of glaciers*, 380 pp. Oxford: Pergamon press.
- Sauer E. K. & Christiansen, E. A. 1988: Preconsolidation pressures in intertill glaciolacustrine clay near Blain Lake, Saskatchewan. *Canadian Geotechnical Journal* 25, 831-839.
- Walder, J. S. & Fowler, A. 1994 : Channelized subglacial drainage over a deformable bed. *Journal of Glaciology* 40 (134), 3-15.