

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



Creep zeminy z výsypky dolu

5. květen

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Johana Lacinová

Vedoucí: Ing. Jan Boháč

Praha, květen 2010

Název

Creep zeminy z výsypky dolu 5. květen

Abstrakt

Tato diplomová práce byla vypracována v rámci Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze pod vedením Ing. J. Boháče. Zabývá se creepem výsypkových zemin z dolu 5. květen a jeho laboratorním stanovením při jednorozměrné deformaci v oedometru.

Z laboratorních zkoušek vyplývá, že creep činil po 10 měsících průměrně 57 % z celkové stlačitelnosti neporušených vzorků a 16 % u rekonstituovaného vzorku. V průběhu zkoušek bylo pozorováno kolapsibilní chování těchto zemin. Creep představuje významnou součást sedání.

Name

Creep of the soil of 5. květen landfill.

Abstract

The thesis was written within Charles University, Faculty of Science, under the guidance of Ing. J. Boháč. It concerns with creep of the soil of 5. květen landfill and its laboratory determination during the one-dimensional deformation in oedometr.

After 10 months the result of laboratory tests show that creep was on average 57% of the total compressibility for the intact samples and 16% for the reconstituted samples. A collapse behaviour was observed during the tests. Creep is an important part of the sedimentation.

PODĚKOVÁNÍ	4
1. ÚVOD A CÍL	5
2. VÝZNAM CREEPU	5
3. DEFINICE CREEPU	6
3.1. Charakteristika křivky stlačitelnosti pomocí indexů	7
3.2. Charakteristika creepu pomocí indexů	8
3.3. Rychlost creepu	9
3.4. Alternativní definice creepu	10
3.5. Shrnutí	14
4. ZVLÁŠTNÍ CHOVÁNÍ ZEMIN V PRŮBĚHU CREEPU	16
4.1. Difuzní a girlandovité kolapsy	16
4.2. Experimentální data	17
4.3. Koeficient difuze c_k	20
4.4. Negativní creep	20
4.5. Hyperbolický creep	21
4.6. Vliv tvaru zrn na průběh creepu	23
4.7. Shrnutí	23
5. CREEP V PRAXI	24
5.1. Creep v Praze a v Dudincích	24
5.2. Shrnutí	26
5.3. Letiště Kansai	27
5.3.1. Předpověď sedání podloží v 1. fázi	27
5.3.2. Předpověď sedání v 2. fázi	30
5.3.3. Předpověď průběhu konsolidace	31
5.4. Shrnutí	32
6. VLASTNÍ EXPERIMENTY	34
6.1. Materiál	34
6.2. Vzorky	34
6.3. Metodika laboratorních zkoušek	35
6.4. Vliv teploty na průběh zkoušek	36
7. PŘÍPRAVA VZORKŮ	37
7.1. Typy vzorků dle přípravy	37
7.1.1. Neporušené vzorky	37
7.1.2. Rekonstituované vzorky	37
7.2. Rekonsolidace vzorku	38
7.4. Vliv složení zeminy	38
7.5. Kalibrace oedometrických komor	38
7.6. Číslo pórovitosti	39
7.7. Standardní oedometrická zkouška po creepu	40
7.8. Čára stlačitelnosti	40
7.9. Popis zkoušek	41
7.9.1. Vzorek 1	41
7.9.2. Vzorek 2	43
7.9.3. Standardní oedometrická zkouška po creepu	44
7.9.4. Vzorek 3	44
7.9.5. Vzorek rekonstituovaný	45
7.9.6. Standardní oedometrické zkoušky	46
8. DISKUSE VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK	48
8.1. Hyperbolická transformace	49
9. ZÁVĚR	50
10. POUŽITÁ LITERATURA	51

Seznam tabulek v textu	strana
Tabulka č. 1 :	Přehled vzorků, na který probíhal creep41
Tabulka č. 2 :	Charakteristika vzorku 142
Tabulka č. 3 :	Průběh creepu vzorku 142
Tabulka č. 4 :	Charakteristika vzorku 243
Tabulka č. 5 :	Průběh creepu vzorku 243
Tabulka č. 6 :	Charakteristika vzorku 345
Tabulka č. 7 :	Průběh creepu vzorku 345
Tabulka č. 8 :	Charakteristika rekonstituovaného vzorku46
Tabulka č. 9 :	Průběh creepu rekonstituovaného vzorku46

Seznam obrázků v textu	strana
Obr. 1	grafická definice creepu6
Obr. 2	zobrazení zpožděné stlačitelnosti pomocí čísla pórovitosti a smykové pevnosti [1]10
Obr. 3	definice okamžité a zpožděné stlačitelnosti ve srovnání s primární a sekundární konsolidací [1] 12
Obr. 4	laboratorní zkoušky na plastickém jílu ukazují vývoj zpožděné stlačitelnosti v průběhu 30 dní stlačení [1]..... 13
Obr. 5	model časově závislých křivek stlačitelnosti pro různé stupně mobilizace odolnosti proti stlačitelnosti, křivky jsou počítány pro 5 m mocnou vrstvu plastického jílu v Drammenu, ($p_c/p_o = 1,6$) [1].....14
Obr. 6	sedání vzorku výsypkové zeminy během konsolidace ve smykovém přístroji, $\sigma_{ax} = 60$ kPa [19].....18
Obr. 7a	příklady kolapsů – oedometrický creep suchého volného granulovaného neogenního jílu zatíženém 1000 kPa [15]18
Obr. 7b	příklady kolapsů – oedometrický creep suchého volného granulovaného neogenního jílu pod rozdílným zatížením (50, 100, 200, 300 kPa) [15]19
Obr. 7c	příklady kolapsů – oedometrický creep suchého volného granulovaného neogenního jílu pod rozdílným zatížením (500 a 1000 kPa) [15]19
Obr. 8	definice c_k na suchém jílu [6].....20
Obr. 9	ukázka hyperbolického a logaritmického creepu [16].....21
Obr. 10a	sekundární stlačitelnosti na experimentálních datech [13].....22
Obr. 10b	hyperbolická transformace dat v obr. 9a [13].....22
Obr. 11	změřený průběh sedání obou staveb (Praha, Dudince – křivky 1 a 2, v druhém případě i průběh zatěžování základové spáry) [3].....25
Obr. 12	hypotézy A a B [2].....28
Obr. 13	modelování sedání pomocí zpoždění stlačitelnosti a bez ní [2]29
Obr. 14	průběh sedání během druhé fáze výstavby, srovnání předpovědi a skutečného průběhu (celkové sednutí) [25]31
Obr. 15	křivky stlačitelnosti podložních vrstev pod konstantním zatížením [20]33
Obr. 16	mapa s vyznačeným místem odběru vzorků35

Graf kalibrace komor.....	1
Graf čáry stlačitelnosti.....	2a
Graf čáry stlačitelnosti – detail.....	2b
Graf čáry stlačitelnosti – e/e_0	3
Graf neporušený vzorek 1 - $\Delta h/t$	4a
Graf neporušený vzorek 1 - $e/\log t$	4b
Graf neporušený vzorek 1 - $e/\log t$ – detail.....	4c
Graf neporušený vzorek 1 – standardní zkouška.....	4d
Graf neporušený vzorek 1 – hyperbolická transformace.....	4e
Graf neporušený vzorek 2 - $\Delta h/t$	5a
Graf neporušený vzorek 2 - $e/\log t$	5b
Graf neporušený vzorek 2 – standardní zkouška.....	5c
Graf neporušený vzorek 2 – hyperbolická transformace.....	5d
Graf neporušený vzorek 3 - $\Delta h/t$	6a
Graf neporušený vzorek 3 - $e/\log t$	6b
Graf neporušený vzorek 3 – hyperbolická transformace.....	6c
Graf rekonstituovaný vzorek - $\Delta h/t$	7a
Graf rekonstituovaný vzorek $e/\log t$	7b
Graf rekonstituovaný vzorek $e/\log t$ – detail.....	7c
Graf rekonstituovaný vzorek – hyperbolická transformace.....	7d
Graf standardní zkouška neporušeného vzorku.....	8
Graf standardní zkouška rekonstituovaného vzorku.....	9

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kteří jakýmkoli způsobem přispěli k završení mé diplomové práce.

Zejména děkuji panu Ing. Janu Boháčovi z přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy za trvalý zájem a odborné vedení mé diplomové práce.

V Praze

.....

1. Úvod a cíl

Tato diplomová práce se věnuje jednorozměrnému creepu výsypkových zemin z dolu 5. květen. Výsypkové zeminy patří do skupiny zemin s dvojitou pórovitostí. Creep (sekundární stlačitelnost) je významné a zajímavé chování těchto zemin. Vzhledem k tomu, že výsypky tvoří nezanedbatelnou část území naší republiky, je nejen zajímavé, ale z praktického hlediska i důležité, poznat podrobně jejich chování.

Cílem této diplomové práce je shromáždit stávající poznatky o creepu zemin. Dále jeho laboratorní stanovení při jednorozměrné deformaci v oedometru a ověření možného vlivu tohoto jevu v praxi.

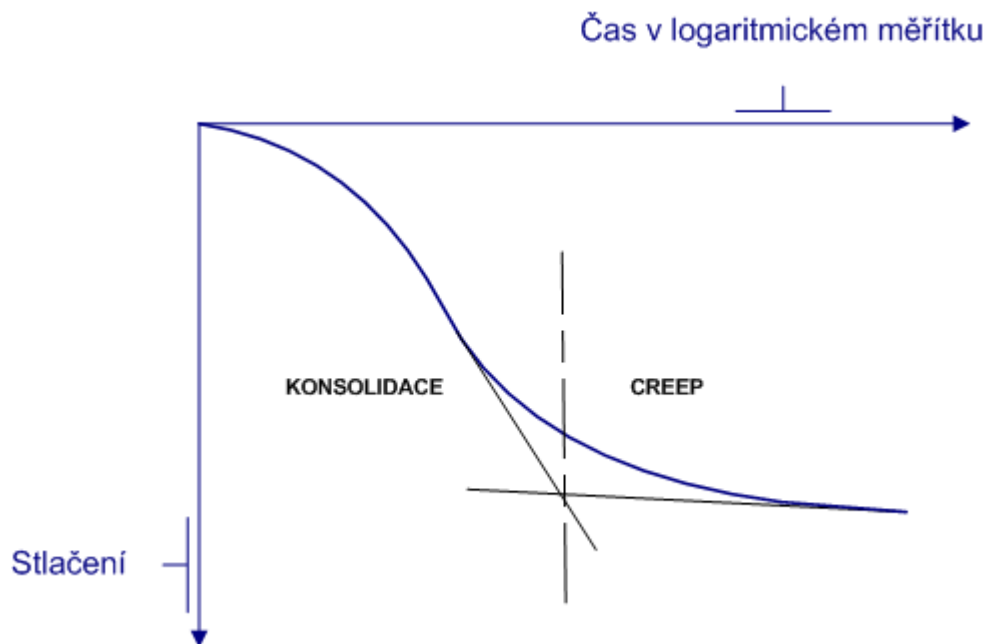
2. Význam creepu

Creep je důležitý v geotechnických problémech, kde nás zajímá dlouhodobé chování zemin pod konstantním efektivním napětím. Průběh creepu se může lišit vzhledem ke vzájemným vztahům ve struktuře zeminy, historii napětí, drenážním podmínkám a změnám v teplotě, tlaku a biochemického prostředí v čase.

Teoretický význam creepu tkví v tom, že se dvojrozměrný obraz mechanického chování hornin, tedy závislost přetvoření na napětí, doplňuje o třetí rozměr, o čas. Ke srovnání průběhu laboratorního creepu s creepem zemin in situ se nejlépe hodí jednoosé stlačení, tj. jednoosý creep. Jeho velikost lze in situ registrovat jako časový průběh sedání staveb po rozptýlení přírůstků pórového tlaku vyvolaného přitížením základové půdy. In situ je však třeba splnit podmínku, že boční deformace základové půdy pod stavbou jsou zanedbatelně malé. Při hledání vhodných výsledků měření se lze setkat s dvojitou překážkou. Je jen málo staveb, u nichž by stlačení dosahovala větších, a proto měřickými chybami méně zatížených hodnot. Za druhé je obtížné najít dostatečně dlouho trvající měření sedání, aby zastihlo i případný creep [4].

3. Definice creepu

Creep je časový růst přetvoření při stálém efektivním napětí.



Obr. 1 grafická definice creepu

Je třeba přesně definovat podmínky, za kterých sledujeme creep. Při jednoosém creepu, kterým se zabývá tato DP, musí být splněna podmínka, že je zemina bočně omezená. V laboratoři je pro tyto podmínky vhodný oedometrický přístroj. Objemový creep, který se vypočítává z objemového přetvoření, se nejlépe zkoumá v trojosém přístroji a tvarový creep vychází ze smykového přetvoření.

Je potřeba splnit podmínku stálosti zatížení zkoumané látky. Pod creep nelze zahrnout procesy, při nichž je totální napětí stálé ale efektivní proměnlivé, jako např. konsolidaci.

Deformace každé látky při stálém zatížení s časem roste v závislosti na pevnosti její struktury. Někdy je více a někdy méně významná. Protějškem ke creepu je relaxace (ochabování), tj. pokles napětí s časem. Z těchto dvou jevů lze creep zemin lépe zkoumat a je technicky významnější [4].

Existující teorie creepu jsou jednodušší a složitější. Stupeň jejich složitosti závisí na povaze zkoumané látky, tj. na její struktuře. K teoretickému zobecnění jsou vhodnější látky s přesně definovanou strukturou. U zemin je

popis struktury na čistě strukturní úrovni prakticky nemožný. Experimentální přesnost, s jakou lze potvrdit teoretickou předpověď, je důležitým faktorem, který ovlivňuje povahu užití teorie creepu. V důsledku složitosti struktury dané látky se lze domnívat, že není možné, aby jediná teorie creepu byla schopná popsat chování všech látek. Tento názor podporují strukturní efekty, které se u různých látek v průběhu creepu uplatňují. Patrně nejvýznamnější a nejobecnější z těchto jevů je zvlnění křivky závislosti creepové deformace na čase strukturními vlivy, které Feda [10] nazývá strukturní perturbací. Vysvětluje ji jako projev periodického strukturního kolapsu, po němž následuje dočasné strukturní zpevnění. Všechny tyto strukturní efekty způsobují, že teoretická předpověď může pro látky se složitější strukturou vymezit jen interval, v kterém budou s danou spolehlivostí skutečné creepové deformace ležet. Tyto okolnosti jsou důvodem, proč teorie nemá v problematice creepu dominantní postavení jako v případě časově nezávislého chování [4].

3.1. Charakteristika křivky stlačitelnosti pomocí indexů

Křivka stlačitelnosti se dá charakterizovat indexem stlačitelnosti C_c a modifikovaným indexem stlačitelnosti $C_{c\varepsilon}$,

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\log \frac{\sigma_2}{\sigma_1}} \{1\}, \quad C_{c\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\log \frac{\sigma_2}{\sigma_1}} \{2\}$$

(Δe je změna čísla pórovitosti, $\Delta e = e_2 - e_1$, jsou-li e_1 a e_2 čísla pórovitosti při zatížení σ_1 , σ_2 (svislá efektivní napětí - počáteční a konečné)), pak platí

$$C_{c\varepsilon} = \frac{C_c}{1 + e_1} \{3\}.$$

Logaritmická křivka stlačitelnosti charakterizuje tak zvanou fyzikálně izomorfní stlačitelnost. To znamená, že představuje charakteristický průběh stlačitelnosti. V mechanice se také používá termínu „normalizované chování“. Všechny křivky stlačitelnosti se stejným parametrem $C_{c\varepsilon}$, C_c , jsou fyzikálně izomorfní. Toto chování je však omezené pouze na určitou oblast. Fyzikálně izomorfní chování má význam jak pro praxi, kde lze jediný experimentálně ověřený konstituční vztah rozšířit na celý obor tohoto chování, tak i pro teorii.

Křivku jednorozměrné stlačitelnosti lze fyzikálně rozdělit na tři části:

- 1) oblast deformačního zpevnování (s rostoucím axiálním efektivním napětím σ'_a roste tečný modul přetvárnosti E_t), v níž převládá vzájemné klouzání částic zeminy, tj. oblast smykových deformací, které vedou ke stlačení zeminy.
- 2) přechodná oblast je lineární. Je to oblast, v níž dochází jak k smykovým deformacím, tak k drcení zrn (kataklastické deformaci).
- 3) oblast deformačního oslabování (změkčování). S rostoucím σ'_a se velikost E_t zmenšuje. Zde převládá drcení strukturních jednotek, které odpor struktury proti přetváření zmenšuje. Je to oblast intenzivně kataklastické deformace (oblast drcení zrn).

Z toho vyplývá, že oblast fyzikálně izomorfního chování je oblastí rovnoměrného zpevnování struktury úměrného působícímu zatížení σ' . Zpevnování se projevuje růstem odporu struktury proti přetvoření a růstem její pevnosti. Strukturní kolaps nepatří do oblasti fyzikální izomorfie.

3.2. Charakteristika creepu pomocí indexů

Creep můžeme charakterizovat indexem sekundárního stlačení C_α a modifikovaným indexem sekundárního stlačení $C_{\alpha\varepsilon}$,

$$C_\alpha = \frac{-\Delta e}{\log \frac{t_2}{t_1}} \{4\}, \quad C_{\alpha\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\log \frac{t_2}{t_1}} \{5\},$$

kde Δe je změna čísla pórovitosti, $\Delta e = e_2 - e_1$, jsou-li e_2 a e_1 čísla pórovitosti v čase. Mezi oběma indexy je vztah $C_{\alpha\varepsilon} = \frac{C_\alpha}{1 + e_p} \{6\}$, e_p je číslo pórovitosti na konci konsolidace, tj. na začátku creepu.

Předpokládáme-li s dostatečnou přibližností, že $e_p \cong e_1$, pak můžeme předpokládat $\frac{C_{\alpha\varepsilon}}{C_{c\varepsilon}} = \frac{C_\alpha}{C_c} \{7\}$. Tento poměr se pohybuje okolo průměrné hodnoty

0,05 [17]. Jeho velikost vypovídá o tom, že zemina během konsolidace sedne značně víc (asi 20x) než v průběhu creepu.

3.3. Rychlost creepu

Rychlost creepu se definuje jako $\dot{\varepsilon}^c = \frac{d\varepsilon^c}{dt}$ {8} a z toho plyne

$$\Delta\varepsilon^c = C_{a\varepsilon} \log \frac{t_2}{t_1} \{9\} [5].$$

Creep můžeme rozdělit podle rychlosti na tři stupně:

- Primární - $\dot{\varepsilon}^c \rightarrow 0$ pro $t \rightarrow \infty$
- Sekundární - $\dot{\varepsilon}^c = \text{konst.}$, tj. $d\dot{\varepsilon}^c = 0$
- Terciární - $\dot{\varepsilon}^c \rightarrow \infty$ pro $t \rightarrow \infty$

Rychlost primárního creepu klesá s rostoucím přetvořením. Je to proces deformačního zpevnování, jako je tomu při fyzikálně izomorfním stlačování. V případě terciárního creepu jde o proces deformačního oslabování (změkčování) [5].

Dle předchozího je existence primárního a terciárního creepu zemin podmíněna jejich strukturními změnami (zpevnováním a oslabováním struktury). Jsou-li oba procesy v rovnováze, tj. jeden kompenzuje druhý, chová se vzorek jako bez strukturních změn. Takový stav odpovídá tzv. sekundárnímu creepu. Protože však zeminy podstupují v průběhu creepu strukturní změny, je jejich sekundární creep omezen na úzkou oblast. V této oblasti mění přírůstek rychlosti creepu svůj smysl, primární creep se mění na terciární [5].

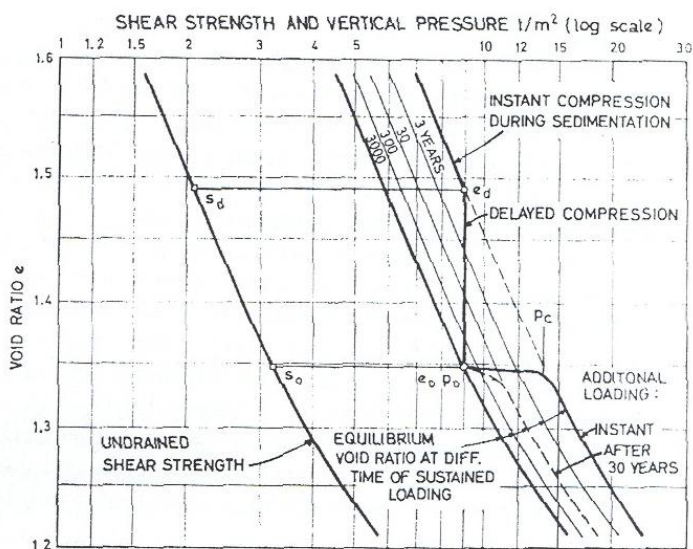
Feda [4] provedl rozbor závislosti rychlosti creepu na čase a potvrzuje, že creep je po odlehčení poněkud pomalejší než po přitížení. Častá je také oscilace jeho rychlosti, která není jednoznačně vázána na nejvyšší zatěžovací stupně.

3.4. Alternativní definice creepu

Bjerrum zkoumal základové poměry v Norsku. Prováděl pozorování v terénu a zkoušky v laboratoři. Ve své práci [1] představuje odlišnou definici průběhu stlačitelnosti.

Je známé, že jílové vrstvy jsou namáhány obrovským sedáním, které narůstá v průběhu ukládání dalšího materiálu. Přizpůsobují se zatížení, které vyvolává stále těžší nadloží. Sedání pokračuje i po disipaci pórových tlaků, které se vznikly v průběhu ukládání vrstev. Toto sedání, které nastalo pod konstantním efektivním napětím a v některých zeminách probíhá po tisíce let, nazývá Bjerrum zpožděná stlačitelnost.

Při charakterizování stlačitelnosti jílu se ukazuje, že zpožděná stlačitelnost nemůže být popsána na jediné křivce v grafu $e/\log p$, ale potřebuje na to systém přímek nebo křivek (obr 2). Každá z těchto křivek representuje rovnovážnou polohu čísla pórovitosti pro rozdílné hodnoty efektivního napětí ve specifickém čase. Křivky jsou přibližně paralelní. To znamená, že rychlost zpožděné konsolidace je stejná v celé homogenní zemině nebo podle zakřivení křivek se snižuje s rostoucím zatížením. Z grafu lze určit i její rychlost[1].

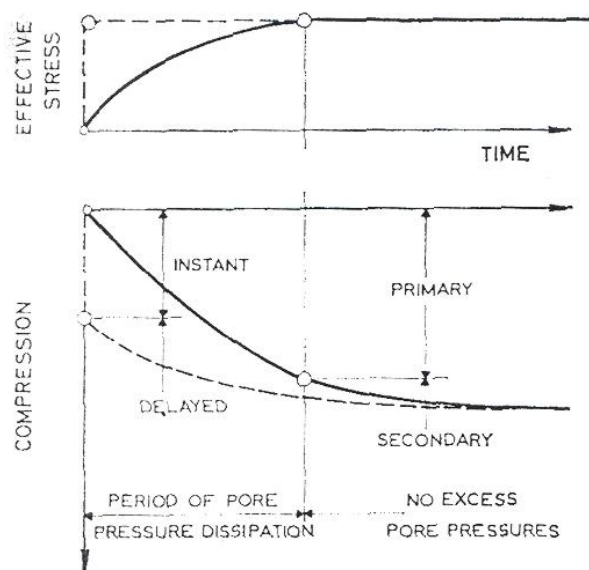


Obr. 2 zobrazení zpožděné stlačitelnosti pomocí čísla pórovitosti a smykové pevnosti [1]

Během zpožděné stlačitelnosti se vyvíjí odolnost proti dalšímu stlačení. Roste s redukcí čísla pórovitosti, resp. s časem. Protože křivky $e/\log p$ pro různé časy jsou přibližně paralelní, je poměr p_c/p_o přibližně stejný v celé vrstvě (p_c je překonsolidační napětí, p_o je svislé efektivní napětí). Jinými slovy, kritický tlak p_c se vyvíjí během zpožděné konsolidace a roste lineárně s efektivním napětím. Na obr. 2 je ukázáno chování jílové vrstvy v určité hloubce, kde na ni působí svislé efektivní napětí p_o . Například jílová vrstva, které je 3000 let stará, dosáhne rovnovážného stavu čísla pórovitosti e_o , $e_o p_o$ jsou na křivce pro 3000 let. Během 3000 let zpožděné konsolidace vzroste smykové napětí (s_d , s_o). Pokud je jíl vystavený dalšímu zatížení, jako je například tíha budovy, a pokud nebude překročeno p_c , bude okamžitá stlačitelnost malá. V případě že je zatížení tak velké, že překročí p_c , bude okamžité sednutí velké [1].

Průběh sedání zemin rozděluje Bjerrum na 2 složky (obr. 3):

- A) V okamžité stlačitelnosti, která nastane současně se vzrůstajícím efektivním napětím a způsobí zmenšení čísla pórovitosti a dosažení rovnovážného stavu, ve kterém struktura odolává přetížení.
- B) Zpožděná stlačitelnost, která reprezentuje zmenšení objemu za stabilního efektivního napětí.



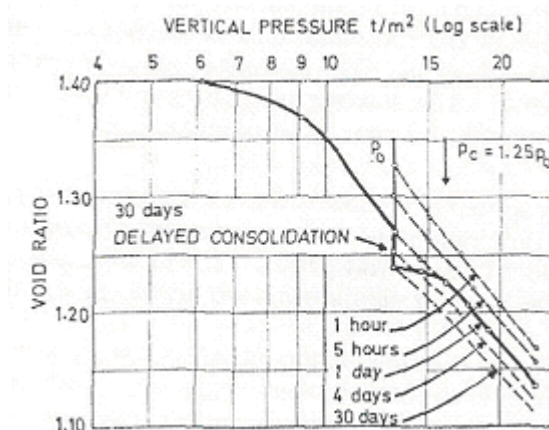
Obr. 3 definice okamžité a zpožděné stlačitelnosti ve srovnání s primární a sekundární konsolidací [1]

Dva nové termíny "okamžitá" a "zpožděná" stlačitelnost popisují reakci zeminy s ohledem na zvýšení efektivního napětí. Jsou v rozporu s dobře známými výrazy "primární" a "sekundární" konsolidace, které rozdělují stlačitelnost do dvou komponent, které nastávají před a po disipaci pórových tlaků. Pro objasnění definice ukazuje obr. 3, jak se stlačitelnost jílové vrstvy vyvíjí s časem, když ji náhle rovnoměrně zatížíme. Čárkovaná čára ukazuje reakci struktury zeminy, která nastane, když pórové tlaky v pórech jílu nejsou schopny zpomalit stlačení a aplikované zatížení je přeneseno okamžitě na strukturu jako efektivní napětí. Tato křivka definuje okamžité a zpožděné stlačení. Zásluhou viskozity vody bude efektivní napětí vzrůstat postupně s tím, jak budou disipovat pórové tlaky. Průběh stlačení bude následovat plnou čáru na grafu[1].

Čas, který je nezbytný pro disipaci pórových tlaků, je závislý na takových faktorech, jako je tloušťka vrstvy, propustnost, drenážní podmínky. Podle Bjerruma [1] je rozdělení stlačitelnosti na primární a sekundární část poněkud nejasné a nevhodné pro popis chování struktury zemin s ohledem na efektivní napětí[1].

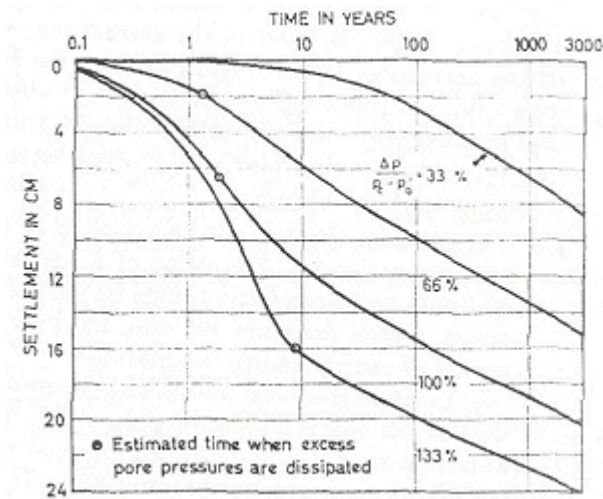
Zmenšení obsahu vody v zemině během zpožděné konsolidace bude vést ke stabilnější struktuře a tedy i větší odolnost proti dalším zatížením. Počet kontaktních bodů mezi částicemi vzroste a s ním poroste i smyková pevnosti. Zemina může nést další přitížení bez významné změny objemu jako je například usmyknutí. To znamená, že pokud další přitížení bude menší než p_c , tak se zemina zachová podobně jako překonsolidovaná a okamžité sednutí bude limitováno elastickou kompresí[1].

Pro příklad je zde uveden na obr. 4 plastický jíl z Drammenu, který byl konsolidován 13 t/m^2 a byl zatížen po 30 dní. Následně byl zatěžován v jednodenních krocích. Získané křivka ukazuje, že na vzorku se projevil kritický tlak p_c , který je pro vybranou rychlost zatížení dosahuje 16 t/m^2 , tedy 1,25 násobek tlaku, při kterém se odehrává zpožděná konsolidace.



Obr. 4 laboratorní zkoušky na plastickém jílu ukazují vývoj zpožděné stlačitelnosti v průběhu 30 dní stlačení [1]

Na obr. 5 je systém křivek, který ukazuje jednotlivé typy křivek sedání, které mohou být očekávány při zatížení různými hodnotami blízkými k p_c . Tyto typy křivek jsou ze zkoušek, kde byla použita různá hodnota $\Delta p/p$ [1].



Obr. 5 model časově závislých křivek stlačitelnosti pro různé stupně mobilizace odolnosti proti stlačitelnosti, křivky jsou počítány pro 5 m mocnou vrstvu plastického jílu v Drammenu, ($p_o/p_o = 1,6$) [1].

3.5. Shrnutí

Bjerrum rozděluje stlačitelnost na okamžitou a zpožděnou složku a jeho koncepce se liší od představy creepu začínajícího po konci primárního stlačení („EOP“), kdy disipovaly pórové tlaky. Dle mého názoru mají obě teorie své klady a zápory. Domnívám se, že Bjerrumovo rozdělení je vhodné pro zeminy, které nejsou zcela nasycené, ačkoliv ale Bjerrum toto užívá pro nasycené zeminy. Neboť pokud pórové tlaky nejsou tak velké, aby zpomalily stlačení, tak je zatížení ihned přeneseno na strukturu. V případě nasycené zeminy budou póry obsahovat vodu a stlačení bude probíhat pomaleji. Pro nasycené zeminy se zdá vhodnější rozdělení na primární a sekundární stlačitelnost (creep). V obou případech je počátek creepu různý, avšak v průběhu času obě křivky sedání splynou.

Hodnota p_c je inženýrskogeologická významná pro jíly vykazující creep. Je však limitována na zeminy jejich „věk“ je mnohem větší ve srovnání s životností stavby. Pokud bude zemina zatížena postupně s dostatečnými časovými odstupy přitížení, bude moci lépe přizpůsobit strukturu (přejít do kompresního stavu). Hrozí menší riziko náhlého kolapsu.

Podle obr. 2 je možné nazvat zpožděnou stlačitelnost creepem. V dalším textu proto byla pro sjednocení nahrazena výrazem creep.

4. Zvláštní chování zemin v průběhu creepu

Vzhledem k tomu, že v průběhu creepu se často vyskytuje nestandardní chování, což dokládají ve svých pracích nejen Feda ale i například Kárník (1998), je důležité si toto chování blíže popsat.

Laboratorní vzorek má jistou počáteční strukturu odpovídající jeho přípravě. Z charakteru struktury vyplývá, že mezi zrny se mohou vyskytovat metastability, které mohou přecházet v nestability. Z experimentů i z numerických řešení vycházejí pracovní diagramy, které nejsou rovné, ale se skoky. Struktura se po zatížení mění, napětí náhle vzroste a začne fungovat systém nových silových řetězců. O těchto nových řetězcích se předpokládá, že nejsou stabilní a v závislosti na stavových veličinách se periodicky hrouť. Napětí migruje a v čase se tak mění geometrické uspořádání těchto řetězců. Řetězce se periodicky stabilizují. Na pracovních diagramech se to projevuje tvorbou girland. Při vyšším napětí se girlandy hrouť a nastupuje difuze. Tento proces opakované strukturní regenerace může být komplikován drcením zrn, která přispívají ke stabilizaci struktury [12].

4.1. Difuzní a girlandovité kolapsy

Feda [13] rozlišuje tak zvaný difuzní kolaps (esovitý tvar stlačování v čase, viz dále) a girlandovité stlačování (série konkávních miskovitých perturbací křivky creepu).

Difuze je proces, v jehož průběhu se homogenizuje původně nehomogenní systém. V mechanice zemin může být jeho příkladem konsolidace. Popisuje průběh disipace pórového tlaku vzniklého zatížením vodou nasyceného vzorku. Matematický model má tvar parciální diferenciální rovnice druhého řádu parabolického typu. S procesem difuze se lze setkat v různých úlohách. Základem řešení je podmínka kontinuity a existence gradientu difuzní veličiny (Darcyho zákon), které představují pohon procesu difuze.

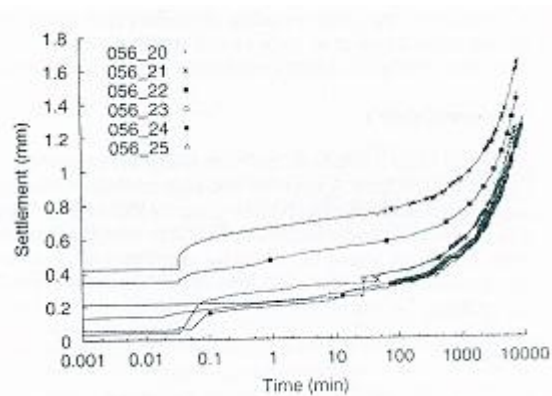
Vedle difuzní složky stlačování se projevují konkávní segmenty stlačování (girlandy). Střídání dvou typů šíření přetvoření lze patrně interpretovat jako projev příčných deformací, které vyvolává nehomogenita vzorku. Creepová přetváření zrnitých látek mohou vyvolat milimetrová až centimetrová sedání [12]. Jedná se tedy o významnou složku přetvoření. V nehomogenním vzorku probíhá v každé části difuze různě. Složením difuzních procesů různé povahy, které probíhají v různých částech vzorku, lze tedy vysvětlit, proč bývá charakter stlačování značně vzdálený od difuzního modelu.

Difuzní šíření přetvoření se řídí známou rovnicí $\frac{\partial u}{\partial t} = c \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ {10} (u je pórový tlak; z je drenážní dráha; c je součinitel difuze). Vyřešením rovnice lze obdržet esovitou křivku závislosti posunu na poloze z [10].

Příkladem difuzního kolapsu je i hydrokolaps – prosednutí vzorku po zalití vodou. Je dobře známý z chování prosedavých spraší. Vyskytuje se i u zemin s dvojitou pórovitostí. Při difuzním kolapsu se zhroucení struktury šíří konečnou rychlostí od zatíženého okraje vzorku. Produktem kolapsu je difuzí generovaný přechod přetvoření vzorku na vyšší úroveň (větší přetvoření). Při velkém zatížení nastává kolaps ihned [10].

4.2. Experimentální data

Herbstová a Herle [19] se zabývali zkoumáním strukturálních změn výsypkových zemin dolu Bílina. V rámci svých laboratorní zkoušek pozorovali také creep při dlouhodobém zatížení pro malé vertikální napětí. Výsledky ze zkoušek jsou na obr. 6. Creep interpretovali jako časově závislý difuzní kolaps relativně slabých jílových úlomků.

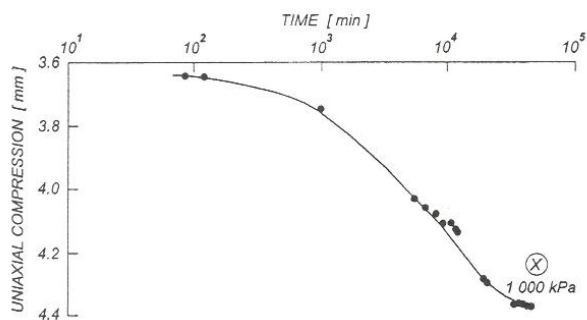


Obr. 6 sedání vzorku výsypkové zeminy během konsolidace ve smykovém přístroji, $\sigma_{ax} = 60 \text{ kPa}$ [19]

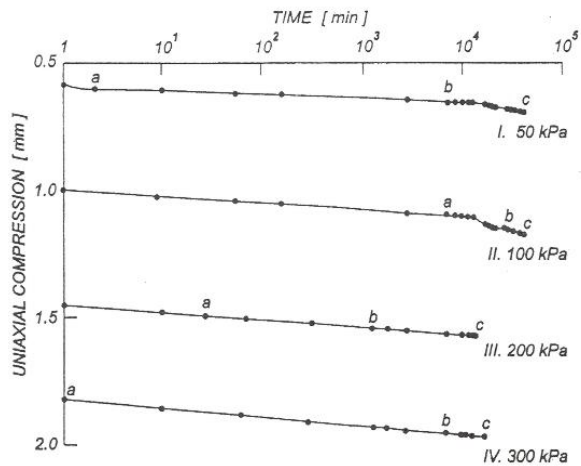
Nejvíce se creepem u nás zabýval Feda. Na jeho četné práce se tato DP odkazuje.

Suchý granulovaný jííl, na kterém Feda prováděl svoje pokusy, je typický zástupce zeminy s dvojí pórovitostí. Tento jííl modeluje chování výsypkového materiálu povrchových hnědouhelných dolů, tj. jistého typu antropogenních sedimentů. Materiál byl zkoušen v oedometrech.

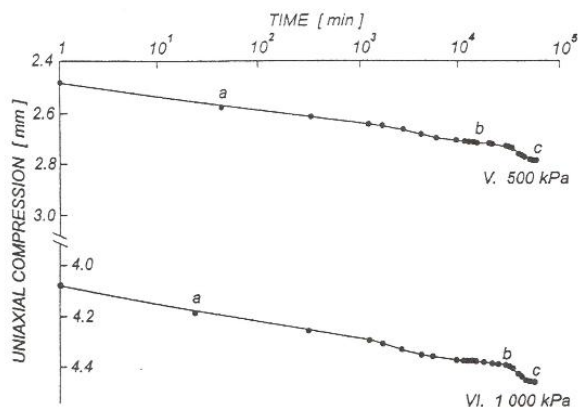
Při sledování experimentálních křivek [15] oedometrického creepu suchého granulovaného jíilu pro různé osové (obr. 7) zatížení je patrné, že creep probíhá odlišně v časovém intervalu pro $t < 10^3$ a pro $t > 10^3$ min. Kritický čas t odpovídá zhruba jednomu dni.



Obr. 7a příklady kolapsů – oedometrický creep suchého volného granulovaného neogenního jíilu zatíženém 1000 kPa [15]



Obr. 7b příklady kolapsů – oedometrický creep suchého volného granulovaného neogenního jílu pod rozdílným zatížením (50, 100, 200, 300 kPa) [15]



Obr. 7c příklady kolapsů – oedometrický creep suchého volného granulovaného neogenního jílu pod rozdílným zatížením (500 a 1000 kPa) [15]

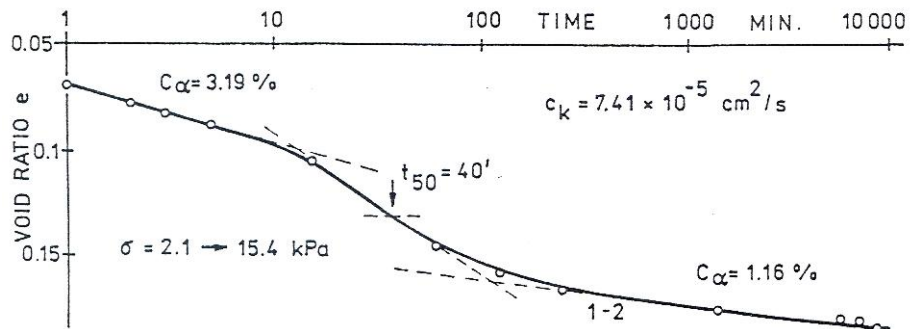
V oblasti $t < 10^3 \text{ min}$ jde o sekundární konsolidaci a přetvoření probíhá podle vztahu $e = e_0 - C_\alpha \cdot \log t$ [11], ($C_c = 0,025$, $C_\alpha = 0,062$, $C_\alpha / C_c = 0,025$).

V tomto intervalu jedná o standardní chování. Hlavním důvodem je převládající vliv vrozené struktury.

Tvorba lokálních kolapsů byla dokumentována okolo $t = 10^3$ a 10^4 min, tj. den až týden po zatížení. V čase $t = 10^3$ min se obraz creepu značně mění a to jak kvalitativně (změna C_α) tak kvantitativně. Vrozená struktura se mění na získanou (tlakovou) v závislosti na velikosti napětí. U uvedených zkoušek jde o kombinaci difuze a girlandy.

4.3. Koeficient difuze c_k

Feda pro popis difuzního kolapsu zavedl koeficient difuze c_k (obr. 8)



Obr. 8 definice c_k na suchém jílu [6].

Odvození koeficientu difuze c_k pro kolapsibilní zatížení $c_k = k \frac{\beta}{\alpha}$ {13},

kde k je převrácená hodnota specifické hmotnosti vody, β je rychlost difuze, α je převrácená hodnota deformačního modulu. Pro výpočet se používá

$c_k = \frac{0,197}{t_{50}} h^2$ {14}, kde h je drenážní dráha a t_{50} je čas. Hodnoty c_k pro

granulovaný jíl se pohybují od $3 \cdot 10^{-4}$ do $1,7 \cdot 10^{-6}$ cm^2/s . Velikost klesá s rostoucím zatížením [8].

4.4. Negativní creep

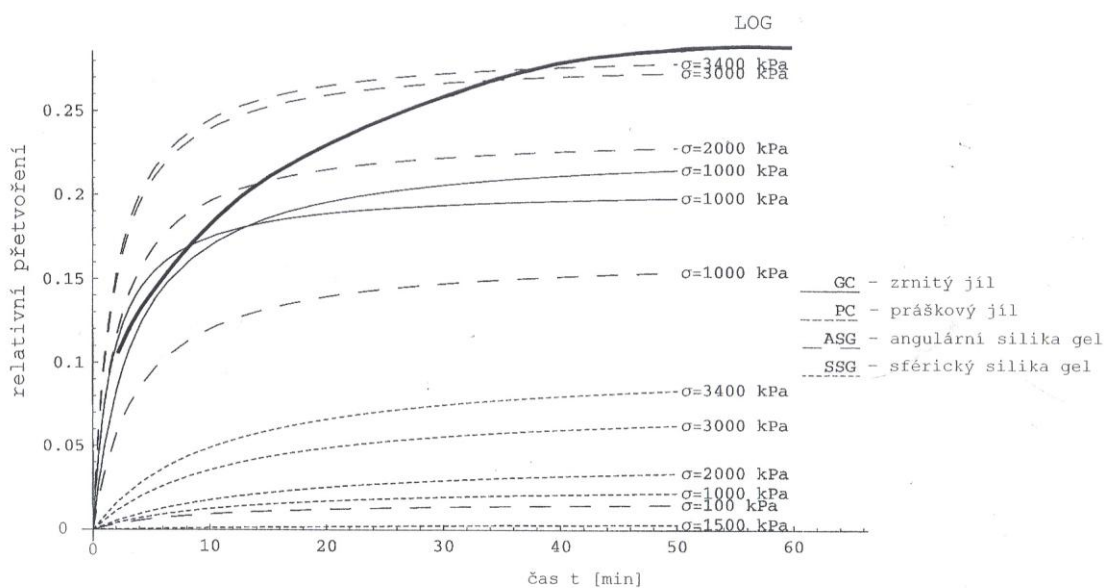
Feda [14] při zkoumání kolapsibilního chování prováděl zkoušky mimo jiné i s organickými látkami, s čočkou a ovesnými vločkami, které vytváří podobnou strukturu jako jíly. Všechny materiály byly nezpevněné a suché. Feda to dokládá tím, že se obsah vody během zkoušek nezvýšil, ba naopak ještě více klesl. U těchto organických materiálů pozoroval negativní creep. Před zatížením jsou zrna partikulární látky, v tomto případě čočky, uspořádána chaoticky. Po zatížení se struktura zpevní a uspořádá se tak, aby zabírala co nejméně místa. Poté může dojít ke kolapsu, při němž se změní struktura látky. Rozbijí se vytvořené vazby a vytvoří se nové, které však mohou mít větší objem.

Toto chování nebylo v rámci této DP pozorováno.

4.5. Hyperbolický creep

Pokud průběh creepu sleduje hyperbolu, nazýváme jej hyperbolický.

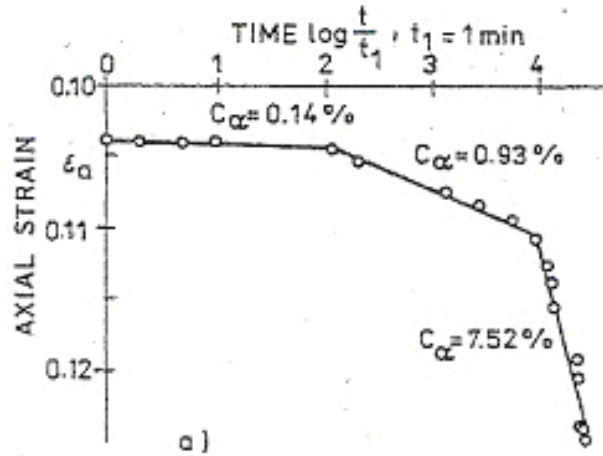
Feda [16] analyzoval jednoosý creep 4 typů zrnitých látek stlačovaných v oedometrech (zrnitý jíl, mletý jíl, silikagel s ostrohrannými a s kulatými zrny). Ukazuje, že průběh creepu je hyperbolický a ne semilogaritmický, jak se obvykle předpokládá. Semilogaritmický průběh je znázorněn na obr. 9 silnou čarou. Je patrné, že experimentální výsledky jsou kvalitativně odlišné. Experimentální creep se ustaluje rychleji a směřuje k asymptotě, kterou semilogaritmický průběh creepu postrádá.



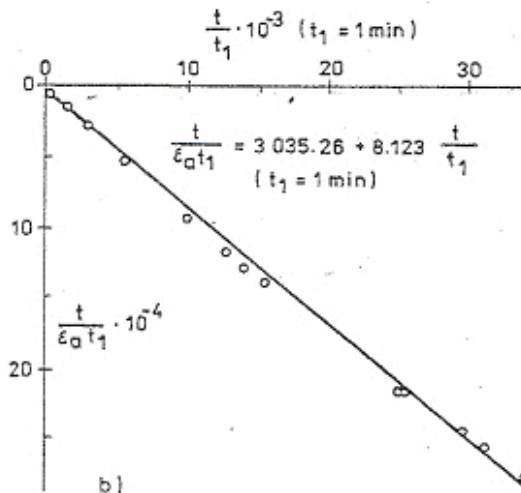
Obr. 9 ukázka hyperbolického a logaritmického creepu [16].

Při bližším zkoumání těchto křivek lze konstatovat, že podmínka linearity je splněna u všech zkoumaných látek, s výjimkou sférického silikagelu. Lze předpokládat, že proces drcení zrn vyvolává odchylky od hyperbolického konstitučního vztahu.

Vhodnou transformací lze testovat předpoklad, zda creep zkoumaných zrnitých látek je hyperbolický. V tom případě závislost času na poměru $\frac{t}{\varepsilon}$ musí být lineární. Obr. 10a a 10b tuto transformaci ukazují.



Obr. 10a sekundární stlačitelnosti na experimentálních datech [13].



Obr. 10b hyperbolická transformace dat v obr. 9a [13].

Křivka creepu na obr. 10a se skládá ze 3 větví semilogaritmických čar. Když předpokládáme, že obrázek reprezentuje sekundární stlačitelnost, potom můžeme definovat 3 koeficienty stlačení C_α . Pokud je hyperbolická transformace lineární křivka můžeme počet parametrů zredukovat na 2.

Fyzikální interpretace se tím zjednoduší, deformační mechanismy jsou monotónní a bez vlivu času [13].

Výsledky hyperbolické transformace na zkoušených vzorcích v rámci této DP jsou na straně 49.

4.6. Vliv tvaru zrn na průběh creepu

Když hyperbolický creep vyjádříme $\varepsilon = \frac{t}{t_1} \left\{ \alpha + \beta \left(\frac{t}{t_1} \right) \right\}$ [15], α , β jsou parametry

creepu (hodnoty rostou se zatížením a závisí na ostrohrannosti zrn). Ostrohrannost zrn tak má velký vliv na zakřivení grafu. Tento efekt je obtížné izolovat u přírodních zemin, protože je to směs zrn různých tvarů.

Po srovnání grafů závislosti napětí a přetvoření ostrohranných a kulovitých materiálů bylo zjištěno, že kulovitý materiál je mnohem méně stlačitelný než ostrohranný. Kulovitá zrna praskají ve směru stlačení snadněji oproti ostrohranným. Tak se zpočátku nehomogenní materiál mění na homogenní. Drcení není rovnoměrný proces. Intenzita drcení má lokální variace a závisí na velikosti napětí. Kulovitý materiál se nejprve musí stát ostrohranným a pak tedy dochází k většímu stlačení [13].

4.7. Shrnutí

Zeminy s dvojitou pórovitostí mají velký sklon ke kolapsibilnímu chování. Zemina mění svoji strukturu v závislosti na velikosti zatížení a snaží se dostat do stabilizovaného stavu. Mohou však vznikat nestability, kdy se zemina z jednoho stavu do druhého dostává skokem. Kolapsy mohou probíhat buď girlandovitě nebo difuzně, může se jednat i o jejich kombinaci. K charakterizování difuzního kolapsu používá Fedá koeficient difuze c_k .

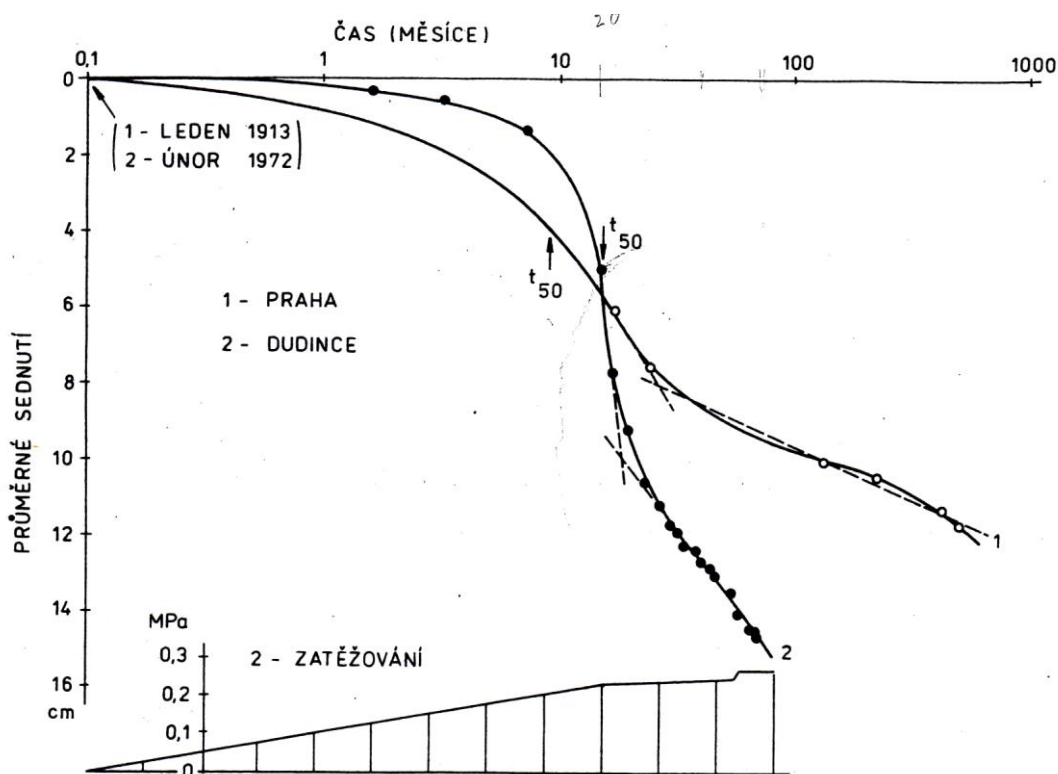
5. Creep v praxi

Creep základových zemin může představovat až desítky procent z celkového sednutí. Měřitelných hodnot dosahují například creepové deformace svahů. Je třeba s ním také počítat při návrhu dlouhodobých zemních kotev, u sypaných hrází s relativně tuhými návodními těsnícími prvky atd. To, že má smysl zabývat se creepem a počítat s ním v praxi dobře zdokumentoval Feda [2] na příkladu dvou staveb. Tyto stavby jsou sice postaveny na jiných zeminách, než byly zeminy použité k laboratorním zkouškám v této diplomové práci, ale byl na nich dobře dokumentován průběh creepu.

5.1. Creep v Praze a v Dudincích

První stavbou je dům čp. 390 v Praze na Nábřeží B. Engelse, jehož sedání popsali Záruba (1948) a Dobr s Paškem (1954). Dům se stavěl v letech 1913 až 1914. Druhou stavbou, kterou je lázeňský dům v Dudincích na Slovensku stavěný v letech 1972 až 1977, velmi dobře zdokumentoval z hlediska mechaniky zemin Hošek (Hošek et al., 1977) [3].

První objekt je postaven na břehu Vltavy z půlky na pilotách a z půlky na základové desce. Obě části budovy jsou odděleny dilatační spárou. Pod stavbou se nalézá více jak 5 m mocná vrstva holocenních bahnitých, jílovotopísčitých a jílovitých náplavů. Touto vrstvou pronikly piloty až do podložního písčitého štěrku zanedbatelné stlačitelnosti. Podle předpokladu část budovy na pilotách téměř nesedla. Sedání základové desky bylo však velké. V průběhu asi čtyřicetiletého měření dosáhlo sedání 12 cm. Rozdíl v sedání různě založených částí budovy vedl ke značným posunům v dilatační spáře. Relativně velké sedání se neprojevovalo na samotné budově, ale na sousedním starším domě, který popraskal typickým systémem trhlin známým z okolí nově zastavovaných proluk [3].



Obr. 11 změřený průběh sedání obou staveb (Praha, Dudince – křivky 1 a 2, v druhém případě i průběh zatěžování základové spáry) [3]

Jak je vidět z grafu průběhu na obr. 11 sedání v čase má semilogaritmické zobrazení zpočátku esovitý tvar, který je typický pro průběh konsolidace, později přibližně lineární průběh prokazující fázi creepu. Jde o creep základové půdy, který je časovým přetvářením jejího skeletu při konstantním efektivním napětí. Z celkového měřeného sedání 12 cm připadá 8 cm na primární konsolidaci a 4 cm na creep. Ze základových poměrů lze předpokládat, že boční roztlačování základové půdy je zanedbatelné vzhledem k umístění domu. Součinitel konsolidace byl $c_v = 5,93 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ ($5,93 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$). Index sekundární stlačitelnosti byl $C_\alpha = 0,51 \%$ (0,0051, Feda vyjadřuje C_α v %, ale výpočet je stejný viz výše) [3].

Druhý objekt tvoří betonový skelet založený na základových pásech. Základovou půdu tvoří měkký organický jíl. Kvůli zmenšení sedání se horní vrstva základové půdy nahradila polštářem z drceného šterkopísku. Celkové sedání, asi 15 cm lze rozdělit na konsolidaci (10 cm) a creep (5 cm). Součinitel konsolidace $c_v = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ ($3,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$). $C_\alpha = 2 \%$ (0,02). Vzhledem

k podmínkám výstavby a výsledkům měření se dá v tomto případě usuzovat, že se základová půda mohla roztlačovat do stran [3].

Přes obdobné základové poměry (c_v) se oba objekty chovají rozdílně. Rozdíly jsou v základové konstrukci a kontaktním napětí. U objektu v Dudincích, stejně jako v Praze, značnou složku celkového sedání tvoří creepová složka a to asi 1/3 celkového sedání. Je to patrně důsledkem značného obsahu organických látek v mělkých říčních náplavech, které mají sklon k intenzivnímu creepu. Velikost C_α je pro objekt v Dudincích 4x větší než u domu v Praze. Creepová složka sedání tohoto objektu se skládá z jednoosého creepu a z tvarového creepu (tvarový creep projeví se, pokud není zemina bočně ohraničená, při jeho výpočtu se používá objemové přetvoření). Je-li pro jednoosý creep $C_\alpha = 0,5 \%$, vlivem tvarového creepu se může časový průběh sedání zvýšit asi až na trojnásobek. Větší rychlost stlačení lze proto v daném případě vysvětlit značným smykovým přetvořením základové půdy [3].

Pro srovnání lze použít příklad známé šikmé věže v Pise. Pro podloží v Pise byl určen sekundární index stlačitelnosti C_α asi 1% [21]. Vzhledem k podobnosti jejího podloží a podloží v obou posuzovaných případech staveb lze přepokládat, že i v případě Pisy byla hodnota C_α zvýšena tvarovým creepem [3].

5.2. Shrnutí

Z výše uvedeného textu vyplývá, jak moc jsou důležité výsledky z praktických dlouhodobých měření pro další využití v praxi.

S creepem počítat zejména pokud základovou půdu tvoří zeminy s vysokým obsahem jílu a organických příměsí. Creep může tvořit až 1/3 celkového sedání. Důležitý vliv na velikost creepu má způsob založení staveb a také možnost roztlačitelnosti základové půdy do stran. Pokud není zemina bočně ohraničena, například sousedními stavebními základy, může se velikost creepu díky tvarovému creepu mnohonásobně zvětšit.

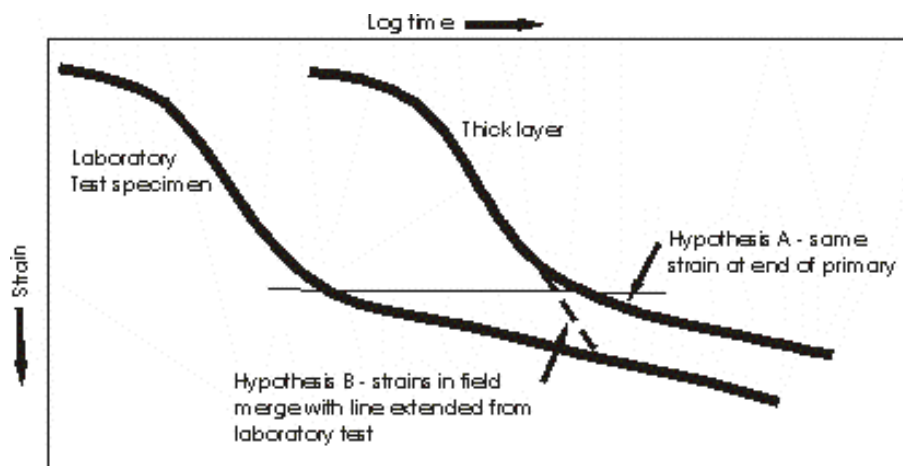
5.3. Letiště Kansai

Jako další ukázkou toho jak je creep v praxi důležitý jsem vybrala stavbu mezinárodního významu. Jde o stavbu mezinárodního letiště pro Osaku, která je geotechnicky velmi zajímavá.

Mezinárodní letiště Kansai bylo naplánováno a postaveno v moři vzhledem k vzrůstající poptávce po letecké dopravě v regionu a kvůli odstranění nadměrného hluku v okolí mezinárodního letiště v Osace. Byl tak vybudován umělý ostrov vzdálený 5 km od pobřeží v Osackém zálivu. Výstavba první fáze (1. část ostrova) byla dokončena v září roku 1994, druhá fáze výstavby navazovala na první a byla dokončena v roce 2007. Letiště je vybudováno v místě, kde moře sahá do hloubky 20 metrů. Pod nimi se nalézají 150 až 300 metrů mocná vrstva stlačitelného jílu. Sedimenty mořského dna jsou složeny z velmi měkkých holocenních jílu doprovázených střídavě pleistocenními jíly a písky. Složité základové podmínky a náročnost stavby letiště vyžadovaly nové metody pro předpověď chování základové půdy. Při výstavbě ostrova se tak očekávalo značné sedání základové půdy. Odhady naznačovaly, že sedání by celkově mělo dosáhnout 12 metrů.

5.3.1. Předpověď sedání podloží v 1. fázi

Při předpovědi sedání podloží se objevil problém, zda je možné aplikovat výsledky laboratorních zkoušek (sedání tenkých vrstev) na podmínky in situ, kde jsou mocnosti vrstev mnohanásobně větší. Podkladem pro koncepci předpovědi sedání se staly dvě teorie. Hypotéza A předpokládá, že napětí na konci konsolidace (v čase, kdy efektivní napětí je konstantní a začíná creep) je stejné v terénu jako v laboratoři. To je standardní postup pro interpretaci a použití zkoušek stlačitelnosti při předpovědi sedání in situ. Hypotéza B oproti tomu vychází z toho, že creep probíhá během primární konsolidace tak i po ní, tj. během disipace pórových tlaků. Křivky laboratorních i polních zkoušek po určitém čase splynou a dále mají stejný průběh creepu. Druhá hypotéza vede k většímu sedání mocných vrstev jílu, jak ukazuje obr. 12 [2].



Obr. 12 hypotézy A a B [2]

Nový model, který byl aplikován při výstavbě letiště, vychází z toho, že sedání zemin probíhá v oblasti někde mezi těmito dvěma extrémními možnostmi – hypotézami A a B. Pro předpověď chování využívá model isotachy – systém časových křivek (Bjerrum), který vychází z laboratorních zkoušek.

Tento model stlačitelnosti jílu předpokládá, že stlačitelnost zahrnuje dvě složky – okamžitou a zpožděnou stlačitelnost (creep). Okamžitá složka je elastoplastická. Zpožděnou složku (creep) reprezentuje rozšířený Kelvinův model (skládá se s paralelně spojené pružiny s pístem). Model se deformuje vratně, ale jeho elasticita není okamžitá, ale časově závislá – zpožděná. Deformace této části modelu koresponduje se změnami, které jsou časově závislé a do značné míry nevratné [2].

Jak již bylo zmíněno, každá křivka – isotacha - koresponduje se specifickou rychlostí zpožděné stlačitelnosti (creepu) $\dot{\varepsilon}_d$. Její pozice je definována s ohledem na pozici srovnávací křivky, která je určena vztahem:

$$\varepsilon_d - \varepsilon_{dref} = C_\alpha \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{dref}}{\dot{\varepsilon}_d}\right) \quad \{17\}, \text{ kde } \varepsilon_d - \varepsilon_{dref} \text{ představují vertikální vzdálenost}$$

mezi časovými křivkami a srovnávací křivkou. $\dot{\varepsilon}_{dref}, \dot{\varepsilon}_d$ jsou rychlosti přetvoření pro srovnávací křivku a ostatní časové křivky. Pro srovnání je v této teorii používána křivka odpovídající 24 hodinovému zatížením.

Vztah mezi $d\sigma'$, $\dot{\varepsilon}_d$, ε_d , který je vyjádřen $d\varepsilon = \frac{C_\alpha}{2.3\sigma'} d\sigma' - \frac{C_\alpha d\dot{\varepsilon}_d}{2.3\dot{\varepsilon}_d} \{18\}$,

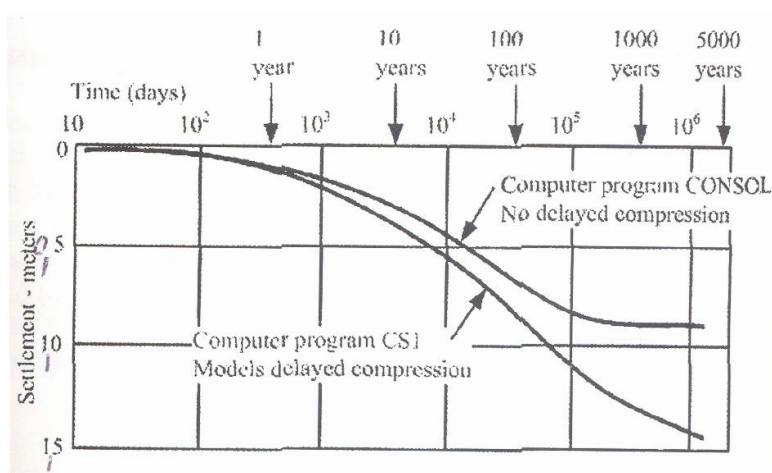
reprezentuje 3 typy chování v závislosti na hodnotě $\dot{\varepsilon}_d$:

- Když je $\dot{\varepsilon}_d$ kladné, stlačitelnost je menší než stlačitelnost v průběhu časové křivky.
- Když je $\dot{\varepsilon}_d$ nula, stlačitelnost koresponduje s časovou křivkou.
- Když je $\dot{\varepsilon}_d$ záporné, křivka efektivního napětí a přetvoření je strmější než časová křivka.

Pokud je efektivní napětí konstantní $\left(d\varepsilon = d\varepsilon_d = -\frac{C_\alpha d\dot{\varepsilon}_d}{2.3\dot{\varepsilon}_d} \{19\} \right)$, potom je

celý průběh shodný s creepem. Začlenění této diferenciální rovnice vede k rovnici {17}, která definuje vertikální vzdálenost mezi časovými křivkami. Při konstantním efektivním napětí také klesá rychlost creepu, který probíhá během vertikálního zatížení. Každá okamžitá rychlost creepu koresponduje s odpovídající křivkou.

Pro výpočty sedání při výstavbě letiště byl vytvořen program, který vychází z hypotézy B, nicméně nemodeluje tak velké sedání. Bere v potaz tloušťku vrstev a počítá ve svých výpočtech s creepem. Rozdíly jsou vidět v následujícím obrázku (obr. č. 13) [2].

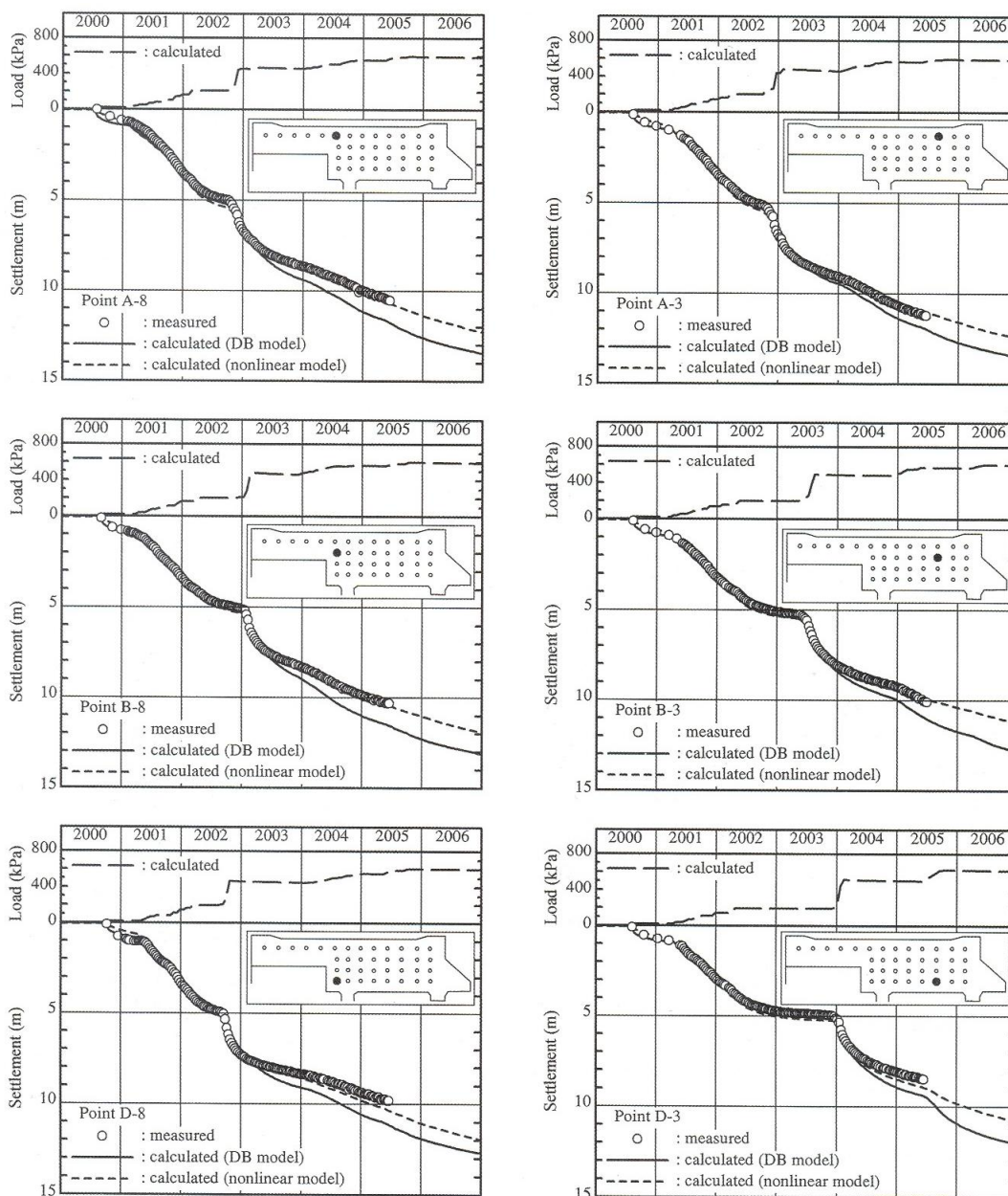


Obr. 13 modelování sedání pomocí zpoždění stlačitelnosti a bez ní [2]

5.3.2. Předpověď sedání v 2. fázi

Předpověď dlouhodobého sedání podloží v druhé fázi výstavby byla založena na jednorozměrné konsolidační analýze. Při výpočtech sedání se použily dva modely. Konstituční model (pojmenovaný DB model) je vytvořen z výsledků laboratorních zkoušek a pozorování in situ během první fáze výstavby. Výsledky zkoušek ukázaly mírnou překonsolidaci a data ze sledování ukázala větší sedání hlubších pleistocenních vrstev. Model byl prověřen v praxi během 10 let pozorování první části ostrova a potvrdila se správnost předpovědi. Avšak pro druhou část ostrova se stal nevyhovujícím vzhledem k rozdílným základovým podmínkám.

Kobayashi et al. vytvořily nelineární model. Tento model předpovídal menší sedání a počítal s mnohonásobně mocnější vrstvou sedimentů. Model předpověděl sedání přesněji, téměř kopíroval skutečný průběh in situ [25]. Výsledky jsou vidět na následujícím obr. 14.



Obr. 14 průběh sedání během druhé fáze výstavby, srovnání předpovědi a skutečného průběhu (celkové sednutí) [25]

5.3.3. Předpověď průběhu konsolidace

Pro předpověď konsolidačního chování KIA jílu byly provedeny oedometrické zkoušky. Z výsledků se sestavil isotachycký model stlačitelnosti. Obrázky ukazují křivku stlačitelnosti $e/\log t$ získanou z konvenčních oedometrických zkoušek při konstantním zatížení p_c . Zkoušeny byly vzorky z různých hloubek, od mělkých nejhlubší (vrstva Ma 12) po nejhlubší (vrstva Ma3). EOP na obr. 15 (strana 33) ukazuje konec konsolidace. V případě

většího zatížení než p_c (překonsolidační napětí), je tvar křivky jako obrácené písmeno S. Na druhé straně, v případě že je zatížení menší než p_c , stlačení netrvá dlouho, ale začíná se postupně projevovat lineárním průběhem [20]. Na průběh zkoušky je patrný vliv umístění měřeného bodu vůči stavbě.

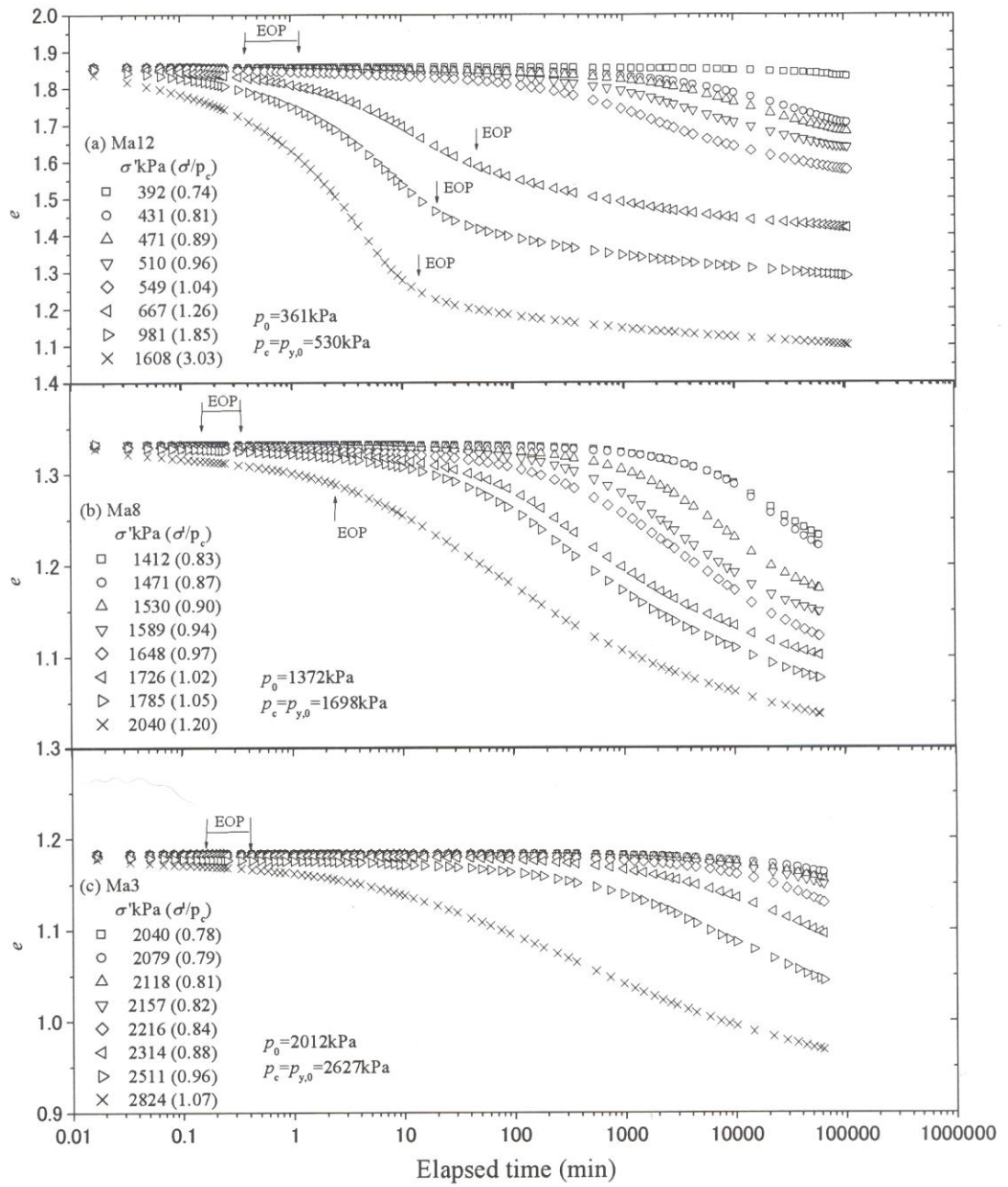
5.4. Shrnutí

Pro každou část základové půdy se hodil jiný model předpovědi sedání. Z výsledků laboratorních zkoušek se určilo optimální řešení. Chování mocných vrstev se liší od chování malého vzorku v laboratoři. Pro předpověď chování mořských sedimentů bylo vhodnější použít model, který pracoval s hypotézou B – tedy předpokládal, že creep zeminy probíhá již během disipace pórových tlaků. Výsledky předpovědi tohoto modelu, který zahrnuje i creep, odpovídaly nejvíce realitě. Tato koncepce předpovědi sedání se shoduje s Bjerrumovými předpoklady a jeho rozdělení stlačitelnosti na okamžitou a zpožděnou složku.

Použití systému časových křivek – isotach zjednodušuje předpovídání chování zemin.

Tak jako v případě české a slovenské stavby i zde může roztlačitelnosti zeminy do stran creep výrazně zvětšit.

Esovitě prohnutí křivek (obr. 15) je podobné jako v případě zkoušek prováděných v rámci této DP. V obou případech průběh odpovídá difuznímu kolapsu.



Obr. 15 křivky stlačitelnosti podložních vrstev pod konstantním zatížením [20]

6. Vlastní experimenty

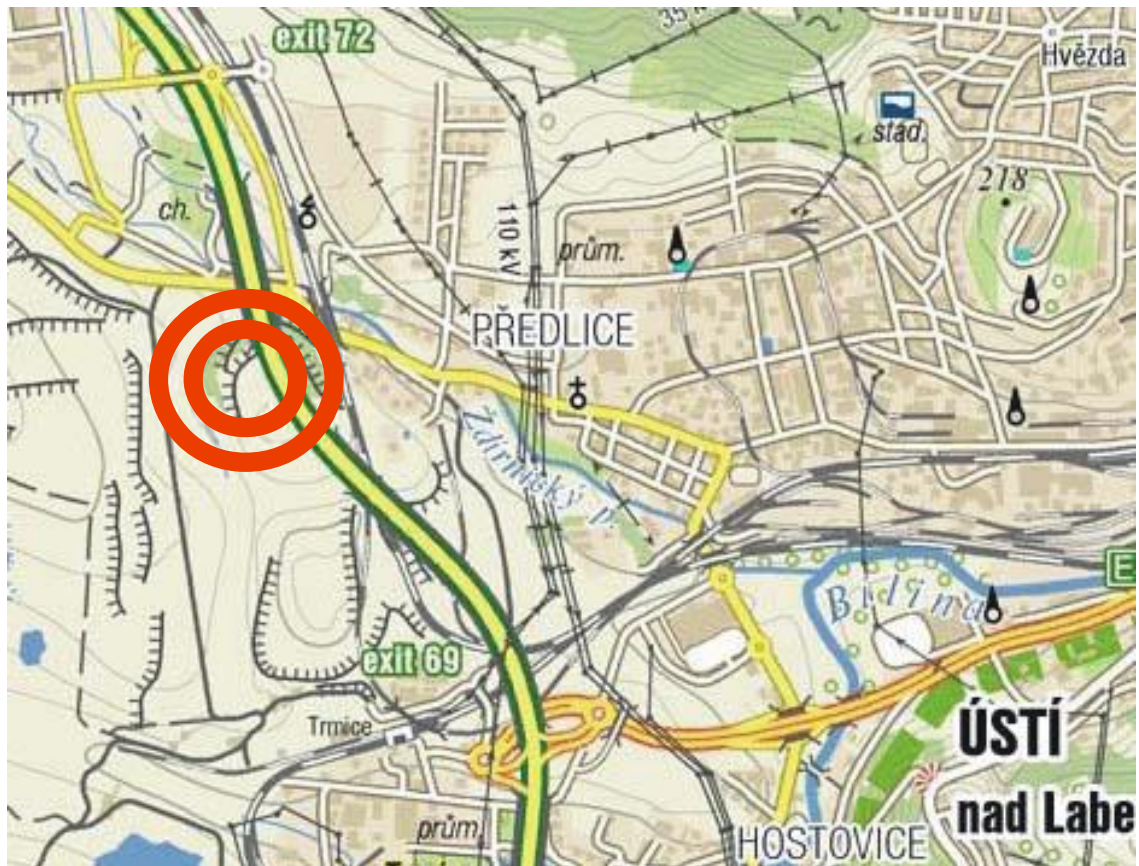
6.1. Materiál

Zeminy s dvojitou pórovitostí se patří ke geomateriálům se složitým mechanickým chováním. Významným vlastností je vysoká celková pórovitost, která zpravidla bývá spojena s kolapsibilním chováním. Typickým příkladem zeminy s dvojitou pórovitostí je materiál výsypek uhelných dolů. Výsypky v severních Čechách jsou tvořeny převážně třetihorními jíly až jílovci, které však během procesu odtěžení a uložení na výsypku změnil svůj charakter. Hornina byla rozdělena na úlomky a bloky velikosti centimetrů až decimetrů. Tento materiál byl ukládán bez současného hutnění. K pórovitosti jílovce se tedy přidává mezerovitost mezi jednotlivými úlomky a hrudkami, vzniká takzvaná dvojitá pórovitost. Povrch sypaniny rychle větrá a tvoří vrstvu o mocnosti několika desítek centimetrů se střípkovitou texturou. Vlastnosti sypaniny se postupně mění vlivem klimatických vlivů, rostoucího nadloží a případným vlivem podzemní vody. Po několika desítkách let, kdy se většinou uvažuje o dalším využití a zastavování, se výsypkový materiál opět svým charakterem blíží spíše jemnozrnné zemině s různou úrovní homogenity, než počáteční granulární sypanině složené z „pseudozrn“.

6.2. Vzorky

Vzorky byly odebrány 5. května 2006 nedaleko obce Předlice u Ústí nad Labem. Lokalita se nachází přibližně 300 m JJZ od křížení dálnice D8 a silnice 253 - Chabařovická. Přesné vymezení místa je na mapě níže (obr č. 16). Jedná se o 40 let starou rekultivovanou výsypku bývalého dolu 5. květen. Zeminy byly do výsypek ukládány volně, bez hutnění, ve velkých mocnostech pohybujících se od několika metrů až do tří desítek metrů. Takto ukládané zeminy vykazují pomalé dotvarování jen vlivem vlastní váhy nadložních vrstev s dlouhodobým průběhem sedání. Výsypková zemina má charakter střípků jílovce s prachovitým jílem, s občasnými úlomky porcelanitu, kameny krystalinika a uhelné drtě. Pro popis lze použít označení kaolinicko - illitický jíl s malou příměsí písčitých zrn [18]. Vzorky byly odebrány z vyhloubené jámy z hloubky

2,1 – 2,2 m pod terénem za suchého počasí. Neporušené vzorky se odebraly zarážením odběrného přístroje s plastovými pouzdry průměru cca 100 mm i ve formě bloku o rozměrech cca 0,2 x 0,2 x 0,2 m, který byl nejprve odkopán a poté podříznut. Dále bylo vzato větší množství porušeného materiálu. Vzorky byly uloženy v chladné místnosti s konstantní teplotou v neprodyšně uzavřených igelitových pytlích.



Obr. 16 mapa s vyznačeným místem odběru vzorků

6.3. Metodika laboratorních zkoušek

Na odebraných vzorcích jsem provedla zkoušky stlačitelnosti v oedometrech. Zkoušky probíhaly v laboratořích přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Gravitační pákový systém na použitých oedometrech má převodní poměr 1:10. Z obou stran vzorku byl vždy použit nasycený filtrační papír vyříznutý podle tvaru filtrační destičky. Vzorek zůstal po celou dobu trvání zkoušky pod hladinou běžné pitné vody.

V rámci této DP probíhaly dva typy oedometrických zkoušek:

1. Creepová zkouška: vzorek byl zatížen jednorázově a v průběhu zkoušky se sledoval creep. Některé vzorky (vzorek 1 a rekonst. vzorek) byly v průběhu zkoušky ještě přitíženy, opět jednorázově.

2. Standardní oedometrická zkouška: vzorek byl pravidelně přitěžován (po 24 a 48 hodin) tak, aby se napětí vždy zdvojnásobilo. Zkouška proběhla za účelem vykreslení čáry stlačitelnosti.

6.4. Vliv teploty na průběh zkoušek

Laboratorní zkoušky v rámci této DP byly prováděny v klimatizované místnosti, kde se udržovala stabilní teplota 22 °C. Pouze ke konci průběhu zkoušek (poslední 3 měsíce) už nebyla místnost z technických důvodů klimatizována. Vzhledem k umístění laboratoře v podzemních prostorách si myslím, že teplota zde zůstala stabilní.

Vzrůst teploty snižuje efektivní napětí, zvyšuje pórové tlaky a oslabuje strukturu zeminy. Rychlost creepu obvykle vzrůstá s vyšší teplotou[21].

U vzorku 3 se objevilo podezření, že nestálost teploty by mohla mít nějaký vliv. Po bližším prozkoumání bylo zjištěno, že zvlnění křivky začalo o měsíc dříve, než se objevily problémy s klimatizací. Její průběh také nevykazuje žádné periodické změny v závislosti na teplotě, resp. na počasí. Z výsledků ostatních zkoušek není patrný žádný vliv teploty.

7. Příprava vzorků

7.1. Typy vzorků dle přípravy

7.1.1 Neporušené vzorky

Neporušené vzorky byly vyřezány z odebraného bloku postupným rovnoměrným zatlačováním prstence a odřezáváním přebytečné zeminy na okrajích. Po zatlačení celého prstence se spodní podstava vzorku odřízla strunou. Horní a dolní plochy vzorku byly zarovnány nožem. Poté byly vzorky s prstencem zváženy, změřeny a uloženy do igelitových pytlíků, aby se zamezilo vysychání vzorků před započítáním zkoušky.

7.1.2. Rekonstituované vzorky

Porušená zemina se vložila do hnětacího přístroje společně s běžnou pitnou vodou. Hnětení probíhalo po dobu cca 8 hodin. V jeho průběhu byly vyměněny hnětací metly od nejhrubší po nejjemnější tak, aby se docílilo co nejlepšího prohnětení a zhomogenizování zeminy.

Poté se prohnětená zemina přemístila pomocí stěrky do velké oedometrické komory o průměru 100 mm a zatížila napětím 100 kPa po dobu 7 dní. Průměr komory byl větší než finální průměr vzorku určeného pro zkoušku. Finální vzorek se vyřízнул z této konsolidované zeminy postupným rovnoměrným přitlačováním prstence.

Rekonstituovaný vzorek určený pro standardní oedometrickou zkoušku byl také připravován v hnětacím přístroji. Další fáze přípravy probíhala v plastovém válci, jehož spodní i horní podstavu tvořily filtrační destičky. Píst ve válci byl zatížen 50 kPa po dobu 7 dní. Poté se zemina z válce vyndala a vzorek se vyřízl.

Odlišná příprava vzorku a jiná hustota zeminy, vytvořená rozdílným poměrem zeminy a vody v hnětacím přístroji, způsobila odlišná počáteční čísla pórovitosti u rekonstituovaných vzorků.

7.2. Rekonsolidace vzorku

Důvodem rekonsolidace je snaha co nejvíce eliminovat vliv stlačitelnosti komory. Dále pak snaha přiblížit se situaci in situ, v tomto případě hloubce 2 metrů pod terénem. Vzorky byly během ní vystaveny napětí 40 kPa tak dlouho, dokud se sedání vzorku neustálilo v řádech tisíců milimetrů. Následně byly úplně odlehčeny opět do ustálení, a to celkem čtyřikrát. Rekonsolidace probíhala na vodou zalitým vzorku.

7.4. Vliv složení zeminy

Složení zeminy má velký vliv na její chování. Zemina je směs zrn různých tvarů a velikostí. Proto je vliv tvaru zrn velmi těžké separovat a posoudit. Lze ale předpokládat, že podstatně ovlivňuje průběh křivky creepu. Obecně je vyšší obsah jílu důležitý pro creep. Na typu jílu, obsahu a plasticitě závisí, jak se rychlost creepu přibližuje ke stabilnímu stavu hodnot. Také je důležitý vysoký obsah vody. Creep a stlačení jsou větší u normálně konsolidované zeminy než u překonsolidované [21].

Přestože všechny neporušené vzorky byly vytvořeny z jednoho bloku zeminy, průběh creepové části zkoušek se u nich lišil. Zejména u neporušeného vzorku 3 byl průběh odlišný. Lze předpokládat, že především náhlé kolapsy mají původ ve složení a struktuře zeminy.

7.5. Kalibrace oedometrických komor

Po skončení oedometrických zkoušek se provedla kalibrace všech komor. Záměrem bylo zjistit chyby vzniklé stlačitelností komory a tím zpřesnit výsledky měření. Při provádění kalibrace se do komory vložil ocelový váleček ve tvaru vzorku a filtrační papíry. Zkouška probíhala pod hladinou běžné pitné vody. Postup a uspořádání bylo stejné jako při průběhu zkoušek se skutečnými vzorky. Měření probíhalo za konstantní teploty. **Naměřené hodnoty byly odečteny u příslušných stupňů zatížení.**

V komoře s průměrem 50 mm byla prováděna creepová zkouška na vzorku 3 a standardní oedometrická zkouška. Při kalibraci se oedometr krokově

zatěžoval až do 3200 kPa, s krokem 40, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 kPa a odlehčován zpět na 1600, 800, 400, 200, 100 a 0 kPa. Při maximálním zatížení bylo naměřeno sednutí 0,477 mm. Předpokládá se, že největší stlačení probíhá ve filtračních destičkách. Stlačení odpovídá předpokladům. U standardní oedometrické zkoušky (nasycený vzorek v oedometrické komoře byl přitěžován s pravidelným časovým krokem o dvojnásobek stávajícího zatížení) tvoří při maximálním stupni zatížení stlačitelnost komory 11,1% z celkového stlačení zeminy, u neporušeného vzorku 3 to bylo 12,6%.

Komora s průměrem 100 mm, ve které se prováděly creepové zkoušky neporušených vzorků 1, 2 a následné standardní oedometrické zkoušky těchto vzorků, byla také krokově zatěžována. Zatížení mělo podobný průběh jako v předchozím případě: 40, 100, 200, 400, 800, 1200, 3200 kPa a odlehčován zpět na 1200, 800, 400, 200, 100 a 0 kPa. Při maximálním zatížení bylo naměřeno sednutí 0,628 mm při 3200 kPa. U neporušených vzorků 1 a 2 tvořila stlačitelnost komory dokonce až 19,3% a 19% z celkového stlačení vzorku (maximální zatížení na konci standardní oedometrické zkoušky).

V komoře s průměrem 76 mm byly zkoušeny všechny rekonstituované vzorky. Tato komora byla kalibrována jen do 800 kPa s krokem 100, 200, 400 a 800 kPa a následné odlehčení na 0 kPa. Při této zkoušce se naměřilo maximální sednutí 0,348 mm. Komora obsahuje jiný typ filtračních destiček. Také byla méně zatížena než ostatní komory, proto je výsledné stlačení menší. Stlačitelnost komory činila jen 5% z celkové hodnoty.

Na grafu v příloze č. 1 jsou vyznačeny hodnoty, které se následně odečítaly v jednotlivých relevantních stupních zatížení.

7.6. Číslo pórovitosti

Pro výpočet čísla pórovitosti se u všech vzorků vycházelo z konečné vlhkosti vzorku. Z té se vypočetlo konečné e po odlehčení a z průběhu zkoušky počáteční e .

7.7. Standardní oedometrická zkouška po creepu

U dvou vzorků proběhlo po creepových zkouškách opětovné zatěžování (standardní oedometrická zkouška). Důvodem bylo:

- 1) zkoumání případné změny ve stlačitelnosti po dlouhodobém zatížení a vykreslení čáry stlačitelnosti;
- 2) ověření funkčnosti oedometrů, protože na nich byly pozorovány různé povlaky a vyrostlice vodního kamene a nabízela se zde možnost nefunkčnosti písků.

Oedometry nevykazovaly po přitížení žádné technické závady.

7.8. Čára stlačitelnosti

Z laboratorních zkoušek byl sestaven graf závislosti $e/\log \sigma'$, **čára stlačitelnosti**. Do grafu se zanesly všechny zkoušené vzorky, neporušené i rekonstituované vzorky.

Výsledky ze standardní oedometrické zkoušky rekonstituovaného vzorku (příloha 9) představují křivku normálního stlačení (NCL). Index stlačitelnosti C_c je 0,479 a modifikovaný index stlačitelnosti C_{ce} je 0,188. Tyto hodnoty byly dále použity pro další výpočty a porovnání pro všechny vzorky, zejména v poměrech

$\frac{C_{\alpha\varepsilon}}{C_{c\varepsilon}} = \frac{C_\alpha}{C_c}$. Poslední zatěžovací stupeň zkoušky jsem do výpočtu směrnice křivky nezahrnula, neboť byl ovlivněn špatným nastavením oedometru (rameno páky se již dále nemohlo pohybovat směrem dolů).

Křivka rekonstituovaného vzorku, který byl dlouhodobě zatěžován (dva zatěžovací stupně), se nachází v horní části grafu nad čarou NCL. Dvojice bodů nad sebou reprezentují creep. Vzhledem k rozdílům v přípravě rekonsolidované zeminy má vzorek pro creepovou zkoušku vyšší číslo pórovitosti než pro standardní oedometrickou zkoušku. Předpokladem je, že kdyby proběhlo další zatěžování tohoto vzorku, jeho průběh by splynul s NCL.

Po creepové zkoušce neporušených vzorků 1 a 2 následovalo ještě přitěžování stejné se standardní oedometrickou zkouškou. Z výsledků se

vykreslila jejich čára stlačitelnosti. Jejich body se z velké části nachází v oblasti překonsolidovaných zemin. Bohužel zkoušky nepokračovaly dostatečně dlouho, aby mohl být zhodnocen vliv creep na průběh čáry stlačitelnosti. Zpevnění struktury z těchto výsledků nelze určit.

Křivka standardní oedometrické zkoušky (příloha 8) koreluje s ostatními neporušenými vzorky. Je zde patrná snaha křivky dosáhnout NCL.

Ze zkoušky neporušeného vzorku 3 jsou v grafu pouze 3 body a ty odpovídají oblasti překonsolidovaných zemin a shodují se s výsledky ostatních neporušených vzorků.

Při zobrazení čáry stlačitelnosti s normalizovaným číslem pórovitosti (e/e_0), které odstraňuje vliv mírných odlišností v počátečním čísle pórovitosti, je vidět tendence všech vzorků dosáhnout stejné směrnice jako má NCL.

Graf čáry stlačitelnosti se nalézá v příloze č. 2a, 2b a 3.

7.9. Popis zkoušek

V následující tabulce č. 1 je přehled všech vzorků a jejich vlastností:

Tabulka č. 1 : Přehled vzorků, na který probíhal creep

název		1	2	3	rekonst
druh vzorku		neporušený	neporušený	neporušený	rekonstituovaný
datum začátku zkoušky		16. 5. 2006	19. 5. 2006	13. 12. 2007	28. 2. 2007
datum konce zkoušky		23. 4. 2008	23. 4. 2008	9. 10. 2008	9. 10. 2008
délka creepu (den)		706	706	302	590
průměr prstence	mm	100	100	50	76
původní výška	mm	20	20	20	17
původní vlhkost	%	29,8	30,5	30,0	84,1
konečná vlhkost	%	26,4	30,7	30,0	40,8

7.9.1. Vzorek 1

Oedometrická zkouška neporušeného vzorku 1 probíhala celkem 709 dní. Počáteční rozměry byly průměr 100 mm a výška 20 mm. Vzorek byl rekonsolidován při napětí 40 kPa a poté zatížen 200 kPa. Po skončení

konsolidace, v čase 1,4 hodin od začátku zkoušky, má křivka lineární průběh a lze ji charakterizovat indexem sekundární stlačitelnosti, $C_{\alpha} = 0,008$. Po dvou dnech bylo provedeno přetížení na 400 kPa. Pod tímto zatížením byl sledován creep. Nejlépe je vidět průběh creepu na grafu závislosti $e/\log t$ (příloha č. 4b). V první části creepu má křivka opět lineární průběh a je téměř rovnoběžná s creepem v prvním zatěžovacím stupni, $C_{\alpha} = 0,007$. V intervalu $\log 6,4$ (cca 30 dní po začátku zkoušky) až $\log 7,3$ (230 dní od začátku zkoušky) je vidět výrazný pokles čísla pórovitosti, tj. zrychlení sedání vzorku. $C_{\alpha} = 0,055$. Po tomto úseku se opět mění průběh křivky do přibližně původního směru charakterizovaného $C_{\alpha} = 0,013$. Toto esovité prohnutí křivky nazývá Feda difúzní kolaps. Lze jej charakterizovat koeficientem difuze, $c_k = 3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Ve srovnání s primární konsolidací (c_v) je přibližně o 4 řády pomalejší.

V tabulce č. 2 je přehled jednotlivých charakteristických indexů:

Tabulka č. 2 : Charakteristika vzorku 1

index	zatížení 200 kPa	zatížení 400 kPa		
	C_{α}	0,008	0,007	0,055
$C_{\alpha\epsilon}$	0,004	0,004	0,032	0,008
$C_{\alpha\epsilon} / C_{c\epsilon}$	0,023	0,021	0,171	0,044
C_{α} / C_c	0,016	0,014	0,114	0,028
$c_v \text{ (m}^2/\text{s)}$	$5,4 \cdot 10^{-8}$	$5,9 \cdot 10^{-8}$		

Podle Fedy [5] se $\frac{C_{\alpha\epsilon}}{C_{c\epsilon}} = \frac{C_{\alpha}}{C_c}$, což výsledky potvrzují. Tyto poměry se pohybují okolo průměrné hodnoty 0,05 [17]. Hodnotu 0,1 převyšují jen poměry v oblasti „difúzního kolapsu“.

Zkoumaný creep v této zkoušce při zatížení 400 kPa činil 0,635 mm z celkových 1,098 mm (celkové sedání v druhém zatěžovacím kroku), to je 57,8 %. Creep byl sledován po dobu 23 měsíců.

Tabulka č. 3 : Průběh creepu vzorku 1

zatížení (kPa)	čas	h (mm)	% z celkového h^*
200	3 dny	0,113	18,3
400	8 měs	0,572	52,1
	10 měs	0,58	52,8
	23 měsíců	0,635	57,8

*Celkovým Δh se myslí změna výšky vzorku za příslušný zatěžovací stupeň.

7.9.2. Vzorek 2

Neporušený vzorek 2 byl zkoušen celkem 706 dní. Vzorek měl počáteční průměr 100 mm a výšku 20 mm. Vzorek byl také rekonsolidován 40 kPa. Po rekonsolidaci byl zatížen na 100 kPa. V počáteční fázi zkoušky je vidět náhlý kolaps, ke kterému mohlo dojít kvůli nehomogenitě vzorku. Také při této zkoušce se po skončení konsolidace křivka během creepu esovitě zvlňila. Toto zvlňení můžeme nazvat difuzním kolapsem. Pomocí indexu sekundární stlačitelnosti lze popsat průběh creepu následovně: $C_{\alpha} = 0,003$, $C_{\alpha} = 0,44$, $C_{\alpha} = 0,006$. Hodnoty se řádově shodují s výsledky vzorku 1. Koeficient difuze je téměř stejný jako u difuzního kolapsu vzorku 1 a to $c_k = 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

V tabulce č. 4 je přehled jednotlivých charakteristických indexů:

Tabulka č. 4 : Charakteristika vzorku 2

index	zatížení 100 kPa		
C_{α}	0,003	0,044	0,006
$C_{c\varepsilon}$	0,002	0,025	0,003
$C_{\alpha\varepsilon} / C_{c\varepsilon}$	0,008	0,135	0,018
C_{α} / C_c	0,006	0,092	0,012
$c_v \text{ (m}^2/\text{s)}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$		

I zde je poměr $\frac{C_{\alpha\varepsilon}}{C_{c\varepsilon}} = \frac{C_{\alpha}}{C_c}$ přibližně stejný, avšak odpovídá intervalu od 0,001 do 0,1. Překračuje ho jen v případě difuzního kolapsu.

Sedání v průběhu creepu je 0,508 mm, to je 38,2 % z celkového sednutí 1,329 mm.

Tabulka č. 5 : Průběh creepu vzorku 2

zatížení (kPa)	čas	h (mm)	% z celkového h^*
100	10 měs	0,495	37,2
	19 měs	0,500	37,6
	23 měs.	0,508	38,2

*Celkovým Δh se myslí změna výšky vzorku za příslušný zatěžovací stupeň.

7.9.3. Standardní oedometrická zkouška po creepu

Po ukončení sledování vývoje creepu bylo u obou výše uvedených vzorků (1 a 2) provedeno ještě standardní oedometrické zatěžování s krokem po 24 hodinách. Vzorek 1 byl zatěžován maximálně 1460 kPa. První 3 stupně nejsou na grafu příliš výrazné (přítěžování o 40 kPa), proto bylo rozhodnuto zatížení zvyšovat o 80 kPa. U vzorku 2 se začalo s počátečním přítěžováním 10 kPa, následně se zvýšilo na 20 kPa. Největší zatížení bylo 390 kPa.

Grafy těchto zkoušek jsou vykresleny v příloze 4d a 5c.

Na konci zkoušek byly vzorky změřeny a zváženy. Výsledky byly vykresleny do grafu čáry stlačitelnosti.

7.9.4. Vzorek 3

Zkouška tohoto neporušeného vzorku probíhala 302 dní v menší komoře než předchozí dva vzorky. Počáteční rozměry: $d = 50$ mm; $h = 20$ mm. Vzorek byl na počátku zkoušky rekonsolidován 40 kPa. Následně se dlouhodobě zatížil 100 kPa. Vzorek má $c_v = 3,9 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

Na grafu $e/\log t$ je vidět v první části, po ukončení konsolidace, náhlý kolaps o velikosti 0,098 mm. Po tomto kolapsu křivka opět pokračuje v lineárním průběhu rovnoběžným s průběhem před kolapsem a s indexem $C_\alpha = 0,002$. Následuje interval mezi 20. dnem po začátku zkoušky a 103. dnem, kde se výrazně mění sklon křivky a lineární průběh se zakřivuje. Průběh křivky sice nemá charakteristické esovité prohnutí, tudíž je problematické určit koeficient difuze, ale je zřetelné, že zde dochází ke kolapsibilnímu chování zeminy. V další fázi creepu se jeho rychlost náhle zmenšuje a ustaluje. $C_\alpha = 0,01$. V posledních 100 dnech zkoušky dochází k rozvlnění křivky z důvodu vyschnutí vzorku a jeho opětovného zalití. Tuto dobu také provázejí problémy s čtecími hodinkami a nefunkčnost počítače.

Tabulka č. 6 : Charakteristika vzorku 3

index	zatížení 100 kPa	
C_{α}	0,002	0,010
$C_{\alpha\epsilon}$	0,001	0,006
$C_{\alpha\epsilon} / C_{c\epsilon}$	0,005	0,300
C_{α} / C_c	0,004	0,020
C_v (m ² /s)	3,9*10 ⁻⁷	

Tabulka č. 7 : Průběh creepu vzorku 3

zatížení (kPa)	čas	h (mm)	% z celkového h*
100	10 měs	0,88	80,2

*Celkovým Δh se myslí změna výšky vzorku za jeden zatěžovací stupeň.

Ze sledování creepu v této laboratorní zkoušce vyplývá, že creep, jehož velikost je 0,888 mm, zaujímá významnou část z celkového sednutí (80,2 % z 1,097 mm).

Výpočet koeficientu difuze není možný z důvodu jiného průběhu kolapsu.

Z této zkoušky bylo možné vykreslit pouze 3 body do grafu čáry stlačitelnosti.

7.9.5. Vzorek rekonstituovaný

Rekonstituovaný vzorek byl zkoušen 590 dní v komoře o průměru 76 mm a výšce 17 mm. Vzorek byl nejdříve zatížen 50 kPa a po týdnu přitížen na 100 kPa z důvodu vyschnutí vzorku. Předpokladem bylo, že by mohlo náhlé vyschnutí vzorku během creepu ovlivnit průběh zkoušky, proto bylo zvýšeno zatížení zeminy. Chybějící čtení po skončení konsolidace prvního zatěžovacího stupně jsou zapříčiněna technickou závadou na čtecích hodinkách. Zkouška však pokračovala během poruchy dále. Index sekundární stlačitelnosti C_{α} v této fázi zkoušky je 0,017. Při zkoušce byl sledován především creep v druhém zatěžovacím stupni. Zde křivka nemá při zobrazení $e/\log t$ zcela lineární průběh, ale je mírně zakřivená. Podobný průběh má i neporušený vzorek 3. Pokud se tento úsek proloží přímkou, jeho index sekundární stlačitelnosti je $C_{\alpha} = 0,078$. Okolo 400. den zkoušky dochází k difuznímu kolapsu o velikosti 0,283

mm. Poté má již křivka lineární průběh se směrnici $C_{\alpha} = 0,011$. Absence esovitého prohnutí křivky při této zkoušce je zřejmě dána kolapsem, který proběhl v druhé polovině zkoušky. I zde, stejně tak jako u předchozí zkoušky, je stanovení koeficientu difuze c_k velmi obtížné.

Tabulka č. 8 : Charakteristika rekonstituovaného vzorku

index	zatížení 50 kPa	zatížení 100 kPa	
C_{α}	0,017	0,078	0,011
$C_{\alpha\epsilon}$	0,006	0,033	0,005
$C_{\alpha\epsilon} / C_{c\epsilon}$	0,030	0,176	0,024
C_{α} / C_c	0,035	0,162	0,022
C_v (m ² /s)	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	

V této zkoušce činil creep při prvním zatěžovacím stupni 0,198 mm z 1,627 mm, tedy 12,2 % za 6 dní. V druhém kroku byl creep 0,941 mm z celkových 4,206 mm, to je 22,4 %.

Tabulka č. 9 : Průběh creepu rekonstituovaného vzorku

zatížení (kPa)	čas	h (mm)	% z celkového h^*
50	6 dní	0,198	12,2
100	10 měs	0,698	16,6
	19 měs	0,941	22,4

*Celkový Δh se myslí změna výšky vzorku za jeden zatěžovací stupeň.

7.9.6. Standardní oedometrické zkoušky

Zkouška neporušeného vzorku probíhala se standardním krokem po 24 hodinách. Zatěžováno bylo z 0 na 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 kPa a následně odlehčováno zpět na 1600, 800, 400, 200 a 100 kPa. Na počátku zkoušky byl vzorek zatížen na 50 kPa a následně zpět odlehčen z důvodů špatné domluvy mezi kolegy.

Během zkoušky rekonstituovaného vzorku proběhlo zatěžování se standardním krokem po 48 hodinách. Zatěžování bylo plánované z 0 na 50, 100, 200, 400, 800, 1640, 3200 kPa a následně odlehčováno zpět až na 0 kPa. Při zatížení 1640 kPa došlo k mechanické překážce (rameno páky se díky

špatnému nastavení nemohlo dále pohybovat směrem dolů), kvůli které se nemohla zkouška dokončit. Koncový bod křivky už pravděpodobně neleží na NCL. Zkouška musela být skončena předčasně.

Výsledky byly vyhodnoceny v grafu čáry stlačitelnosti. Křivka rekonstituovaného vzorku je považována za NCL.

8. Diskuse výsledků zkoušek

Z průběhu zkoušek neporušených vzorků 1 a 2 je patrný esovitý průběh creepu, který popisuje ve svých pracích Feda jako difuzní kolaps. Creep činil z celkového sednutí vzorku 57,8 % a 38,2% (vzorky 1 a 2) po 23 měsících. Pro srovnání se vzorkem 3 to je 52,8 % a 37,2 % po 10 měsících. U vzorku 3 tvoří creep 80,2 % po 10 měsících.

U rekonsolidovaného vzorku činí creep z celkového sedání v druhém zatěžovacím stupni jen 16,6 % po 10 měsících a 22,4 % po 19 měsících. Z toho vyplývá, že převážná část sedání proběhla u rekonsolidovaného vzorku během konsolidace.

U neporušeného vzorku 3 a rekonstituovaného vzorku nebylo pozorováno esovité prohnutí křivky, avšak i zde došlo k výraznému kolapsu v průběhu creepu, který se tvarově shodoval v obou případech. Zpočátku lineární křivka se konvexně prohne a rychlost creepu se zvýší. Poté nastává stabilizování struktury a průběh křivky se stává opět lineární přibližně stejnou směrnici jako před kolapsem. Odlišný druh kolapsu u neporušených vzorků by mohl být důvodem rozdílu procentuálního zastoupení creepu během celkového sedání v příslušných zatěžovacích stupních

Výpočty indexů sekundární stlačitelnosti ukazují shodu u všech neporušených vzorků v počáteční a konečné fázi. Hodnoty C_α jsou v rozmezí 0,001 až 0,008. V oblasti difuzních kolapsů se C_α řádově zvýší. V případě rekonstituovaného vzorku byly hodnoty v intervalu od 0,01 až 0,08. Poměry $\frac{C_{\alpha\varepsilon}}{C_{c\varepsilon}} = \frac{C_\alpha}{C_c}$ se pohybují okolo průměrné hodnoty 0,02 u vzorků 1, 2 a rekonstituovaného vzorku. V průběhu difuzního kolapsu jsou o řád vyšší. U vzorku 3 se poměr nachází okolo 0,005. Předpokládám, že je to dáno jiným typem kolapsu.

Součinitel konsolidace c_v je v rozmezí $2 \cdot 10^{-9}$ až $4 \cdot 10^{-7}$ m²/s, což odpovídá hodnotám pro jíly. Koeficient difuze c_k je přibližně stejný u vzorků 1 a 2 a dosahuje hodnot $2 - 3 \cdot 10^{-12}$ m²/s. Je tedy o 4 řády menší než jejich součinitel konsolidace c_v . Feda [8] udává, že hodnoty c_k jsou o 1-2 řády menší

než c_v pro suché jíly. Vysvětlením rozdílu hodnot je nasycenost materiálu, který se zkoušel v rámci této DP.

8.1. Hyperbolická transformace

Na výsledcích laboratorní zkoušky všech zkoušených vzorků v rámci této DP byla provedena hyperbolická transformace. Výsledná křivka neporušených vzorků 1 a 2 je lineární, tzn. že creep je hyperbolický. U neporušeného vzorku 3 křivka v první úseku strmě stoupá a konkávně se zakřivuje. V druhém úseku, přibližně po 100 dnech zkoušky, se průběh křivky ustaluje a je lineární. Anomálie v průběhu křivky přesně odpovídá kolapsu, který je zřetelný zejména na grafu $\epsilon/\log t$ v příloze č. 6b. Transformace rekonstituovaného vzorku je také lineární, má však menší směrnici. Grafy s hyperbolickou transformací se nachází v příloze 4e, 5d, 6c a 7c. Jsou zde uvedeny i jejich parametry.

Po provedení hyperbolické transformace jsem došla k závěru, že esovité prohnutí křivky creepu které Feda [12] nazývá difúzní kolaps, je standardní průběh creep (str. 22). Potvrzuje to lineární průběh hyperbolické transformace u vzorků 1 a 2. U neporušeného vzorku 3 došlo v průběhu creepové zkoušky ke kolapsu, které neměl esovitý průběh. V hyperbolické transformaci se to projevilo nerovnostmi křivky v prvním úseku (příloha č. 6c). U rekonstituovaného vzorku to také potvrzují nerovnosti na grafu hyperbolické transformace, které odpovídají kolapsům.

9. Závěr

Creep zemin je proces, který je v důsledku jejich složité struktury těžko postižitelný analyticky. Z laboratorních zkoušek provedených v rámci diplomové práce vyplývá, že creep výsypkových zemin dolu 5. květen činil po 10 měsících průměrně 57 % z celkové stlačitelnosti neporušených vzorků. U rekonstituovaného vzorku těchto zemin to bylo 16,6 % z celkové stlačitelnosti. Creep tedy představuje významnou část sedání.

Křivky creepu se mohou lišit kvůli strukturním kolapsům. Ve všech creepových zkouškách prováděných v rámci této DP došlo ke kolapsu. U dvou zkoušek mají typický difuzní průběh ve tvaru S, tak jak ho popisuje ve svých pracích J. Fedá. V dalších dvou případech byl také během creepu zaznamenán kolaps. Jeho průběh byl konvexní s náhlým přechodem do stabilizovaného stavu (lineárního průběhu).

S creepem je třeba v praxi počítat, zejména pokud základovou půdu tvoří zeminy s vysokým obsahem jílu a organických příměsí. Creep může tvořit až 1/3 celkového sedání. Důležitý vliv na velikost creepu má také roztlačitelnost základové půdy do stran.

Praha, květen 2010

Johana Lacinová

.....

10. Použitá literatura

- [1] BJERRUM, L., (1967): Engineering geology of Nerwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buldings. *Geotechnique*, 17:81-118.
- [2] DUNCAN J. M., (2005): Factors Affecting Magnitude of Clay Settlement, *Proceedings of the Symposium on Geotechnical Aspects of Kansai International Airport*. ISBN 4-9902718-0-7.
- [3] FEDA, J.,(1981): Sedání dvou staveb na silně stlačitelné základové půdě, *Inženýrské stavby 12-1981*, Praha.
- [4] FEDA, J.,(1983): *Plouživost zemin*, Academia, Praha.
- [5] FEDA, J.,(1990): Fyzikální izomorfie v reologii zemin. *Staveb. Čas.*, 38, č. 4, VEDA, Bratislava.
- [6] FEDA, J.,(1995): Compression of unsaturated double-porosity clay. *Unsaturated Soils*, ISBN 90 54 10 583 6.
- [7] FEDA, J.,(1995): Perturbatuons of the soil response, *Engineering MECHANICS*, Vol.2.
- [8] FEDA, J.,(1995): Efect of structure on the axially compressed granulated clay. *Acta Techn. CSAV* 40, 309-337.
- [9] FEDA, J.,(1995): Perturbations of the soil response, *Engineering Mechanics*, Vol. 2. No. 6, p.403-412.
- [10] FEDA, J.,(2002): *Perspektivy strukturní mechaniky zemin*, Geotechnika, Praha.
- [11] FEDA, J.,(2004): *Matematický a fyzikální model chování zemin*, Zborník GEOTECHNIKA, Košice.
- [12] FEDA, J.,(2004): Dvojí mechanismus deformace granulovaného materiálu. *Sborník příspěvků, Zakládání staveb Brno*.
- [13] FEDA, J.,(2006): Hyperbolic creep and the effect of angularity of granular soils. *Advances in Geomaterials and Structures, AGS'06, Tunisia*.
- [14] FEDA, J.,(2006): Negative creep of some granular materials, *Acta Techn. CSAV* 51, 87-95.
- [15] FEDA, J.,(2006): Uniaxial creep and compression of soils, *Engineering MECHANICS*, Vol.13.No. 1, p. 49-66.

- [16] FEDA, J.,(2006): Sekundární konsolidace některých zrnitých látek. MS, ÚTAM AV ČR, Praha.
- [17] HOLTZ, R.D., KOVACZ, W.D., (1981): Approximate methods and typical values of compression indices, An introduction to geotechnical engineering.
- [18] HERBSTOVÁ, V., MAŠÍN, D., BOHÁČ, J. (2006): Konstituční modely pro zeminy s dvojitou pórovitostí. In: 9th Int. Conf. Geotechnika.
- [19] HERBSTOVÁ, V., HERLE, I., (2008): Structure transitions of clay fill in North-Western Bohemia. In: Engineering Geology 104 (2009) 157-166
- [20] IMAI G., OHMUKAI N., TAHARA H.,(2005): An isotache type compression model for predicting long term consolidation of KIA clays, Proceedings of the Symposium on Geotechnical Aspects of Kansai International Airport. ISBN 4-9902718-0-7.
- [21] MITCHELL J.K. AND SOGA K., (2005): Fundamentals of soil behavior (third ed.), John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey
- [22] ODA K., TOKI K., MATSUI T., ONO M.,(2005): Elasto-viscoplastic model for expressing strain rate dependency of creep behavior and its applicability to one-dimensional consolidation behavior of Pleistocene clays in Osaka Bay, Proceedings of the Symposium on Geotechnical Aspects of Kansai International Airport. ISBN 4-9902718-0-7.
- [23] SHIBATA T., KARUBE D., (2005): Settlement prediction of Kansai International Airport, Proceedings of the Symposium on Geotechnical Aspects of Kansai International Airport. ISBN 4-9902718-0-7.
- [24] ŠUKLJE, L., (1957): The analysis of the consolidation process of the isotache method. Proc. 4th I.C.S.M.F.E., 1, 200-206.
- [25] TABATA T., MORIKAWA Y., (2005): The second phase construction of Kansai International Airport considering the large long-term settlement of the clay deposits, Proceedings of the Symposium on Geotechnical Aspects of Kansai International Airport. ISBN 4-9902718-0-7.