

**Modelowanie MES 3D zagadnień współpracy konstrukcji z podłożem w
praktyce inżynierskiej.
Wymagania w odniesieniu do zakresu badań polowych i laboratoryjnych.**

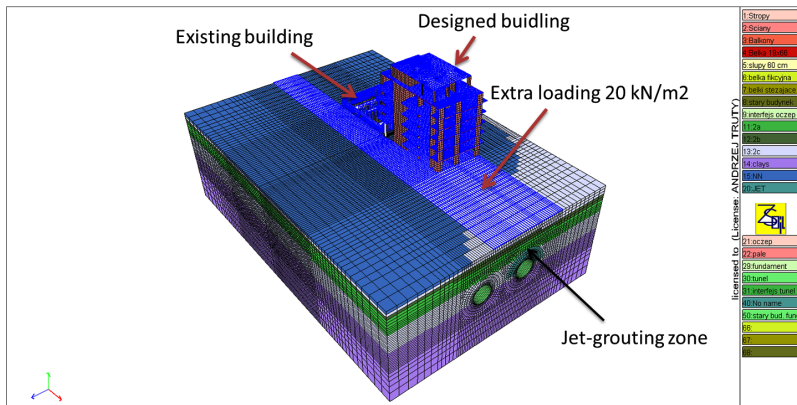
Andrzej Truty

Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska



Modelowanie MES 3D

- Globalna analiza MES współpracy konstrukcji i podłoża
- Uwzględnienie szeregu źródeł nieliniowości oraz zmian pola ciśnień wody w porach
- Uwzględnienie technologii budowy
- Konieczność stosowania złożonych modeli konstytutywnych dla gruntów z uwzględnieniem silnej nieliniowości w zakresie małych odkształceń



Zakres małych odkształceń

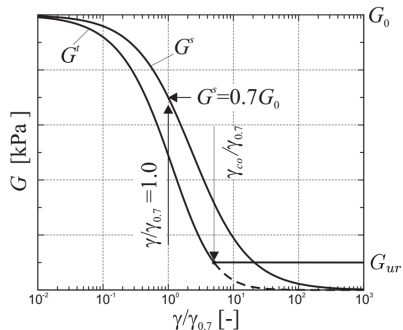
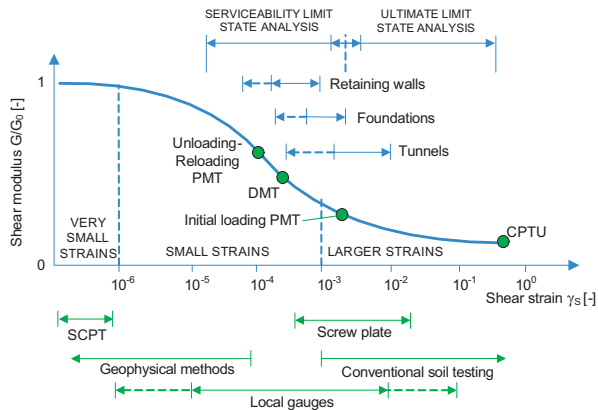


Figure 1.1: Typical representation of stiffness variation in function of the shear strain amplitudes; comparison with the ranges for typical geotechnical problems and different tests (based on Atkinson and Salfors, 1991, and updated by the author); SCPT - seismic cone penetration test; CPTU - piezocone penetration test; DMT - Marchetti's dilatometer test; PMT - Pressuremeter test.

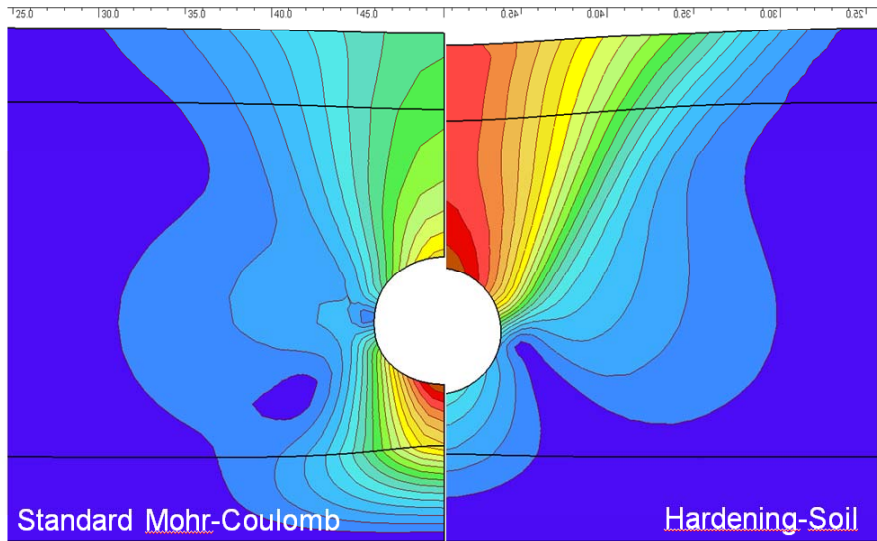
- **Sprężysto-plastyczny model Coulomba-Mohra**
(to jeszcze jakoś inżynierowie rozumieją)
 - Stany graniczne nośności: 🍏 Yes
 - Stany graniczne użytkowości: 🍏 No (na ogół)

- **Hardening Soil + small strain overlay (HSs)**
(używany w praktyce od ponad 10 lat)
 - Stany graniczne nośności: 🍏 TAK
 - Stany graniczne użytkowości: 🍏 TAK

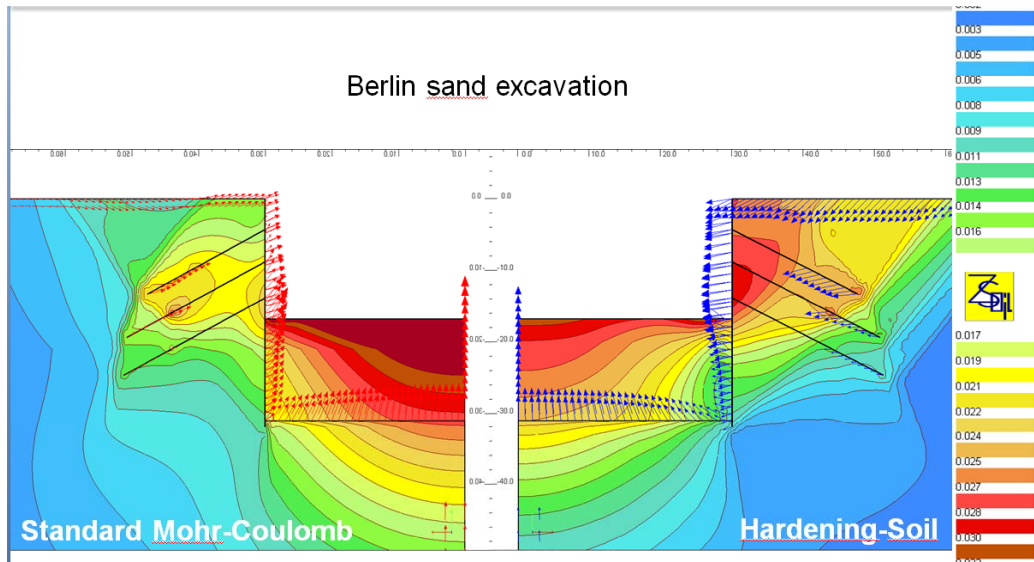
- Model dostępny w większości komercyjnych systemów MES dedykowanych geotechnice

Dlaczego HSs a nie M-C ?

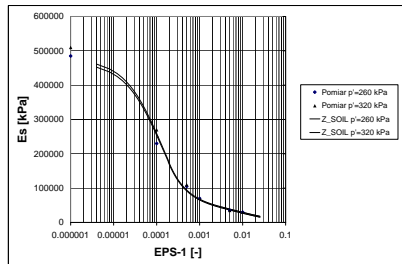
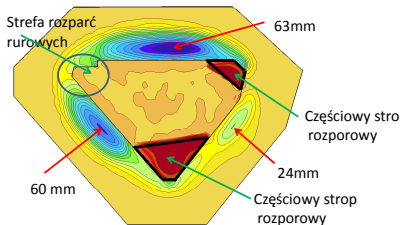
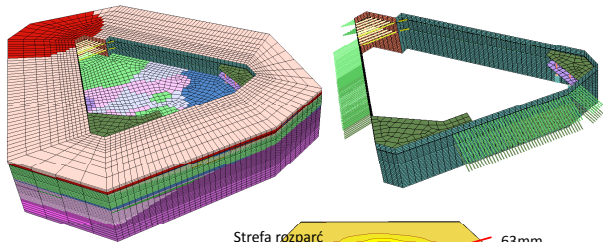
Tunneling



Dlaczego HSs a nie M-C ?

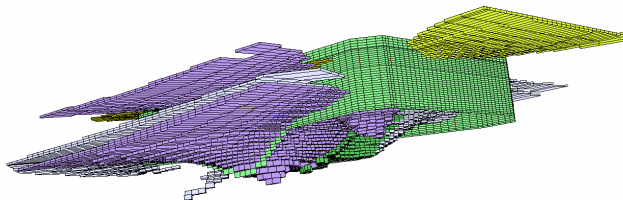
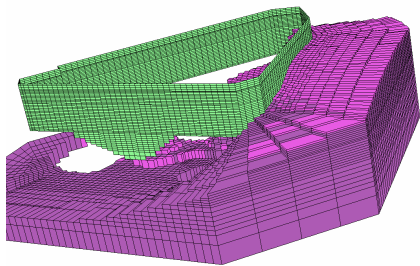


Przykład praktyczny głębokiego posadowienia (Supersam, Warszawa)

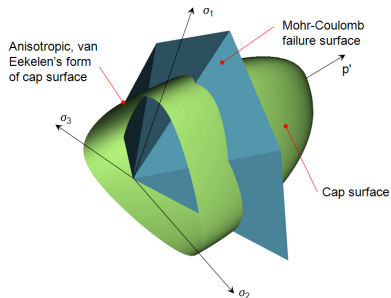
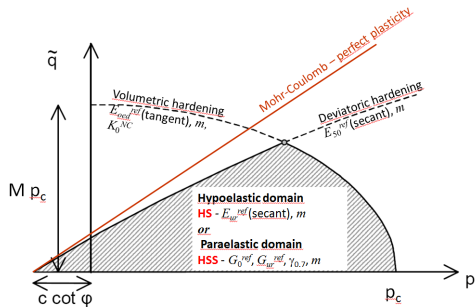


Przykład praktyczny głębokiego posadowienia (Supersam, Warszawa)

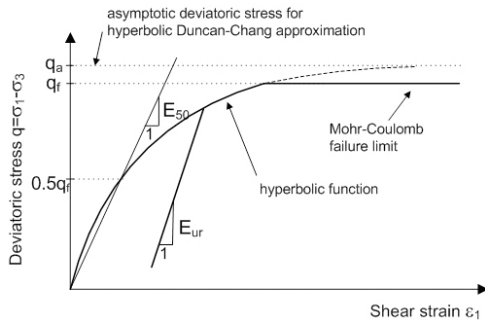
- Złożone uwarstwienie (zastosowanie metody krigingu w ZSoil)



Model HSs-krótka charakterystyka



Model HSS-krótka charakterystyka



1 3 funkcje barotropii

$$1 \quad E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \operatorname{ctg} \phi}{\sigma^{ref} + c \operatorname{ctg} \phi} \right)^m$$

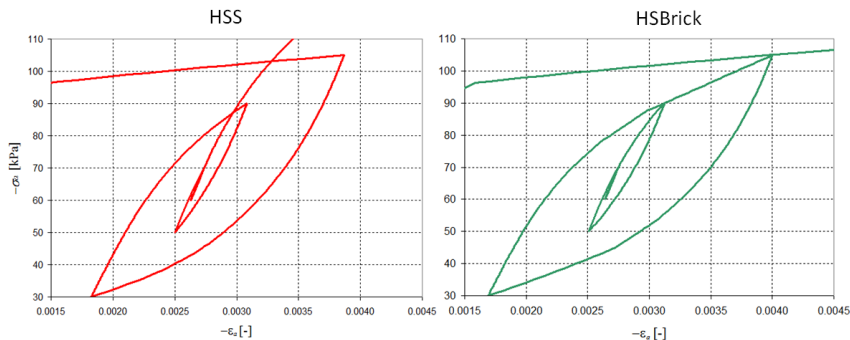
$$2 \quad E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma^{ref}} \right)^m$$

$$3 \quad E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{p}{\sigma^{ref}} \right)^m$$

2 Podobnie dla modułów E_o oraz E_{50}

Wady klasycznego modelu HSs

- Test trójosiowy z odciążeniem i obciążeniem powtórnym



Research Paper | [Open Access](#) | Published: 13 March 2020

Refinement of the Hardening Soil model within the small strain range

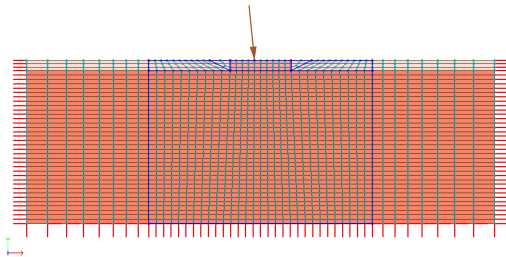
[Marcin Cudny](#) & [Andrzej Truty](#)

Acta Geotechnica **15**, 2031–2051 (2020) | [Cite this article](#)

3971 Accesses | 5 Citations | [Metrics](#)

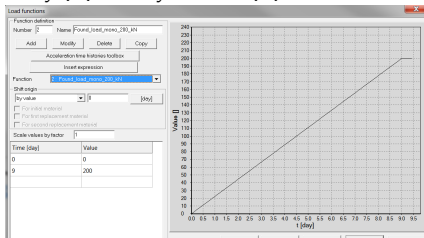
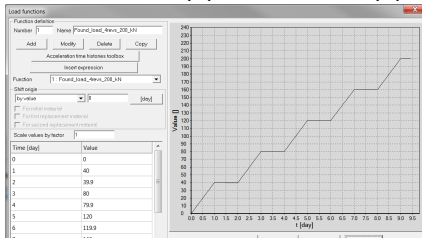
Wady klasycznego modelu HSs: test monotoniczny z obciążeniami

$$F_{x0} = 0.1 \quad F_{y0} = 1.0 \text{ [kN]}$$

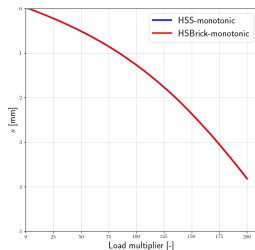
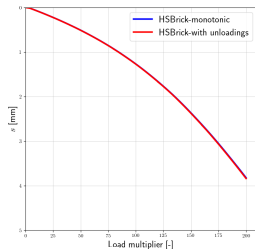
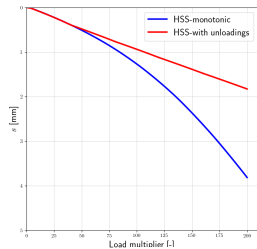


$$F_x(t) = F_{x0} LTF(t)$$

$$F_y(t) = F_{y0} LTF(t)$$



Wady klasycznego modelu HSs: test monotoniczny z odciążeniami



- **Sztywność**

E_o^{ref} , E_{ur}^{ref} , E_{50}^{ref} , m , E_{oed} dla danej wartości σ_v

- **Wytrzymałość** (parametry efektywne)

ϕ' , c'

- **Dylatacja**

$\psi \rightarrow (\phi_{peak} = \phi_{cv} + \psi)$

- **Historia stanu naprężenia**

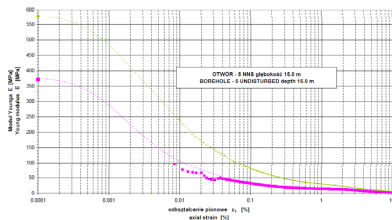
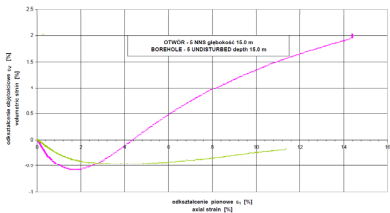
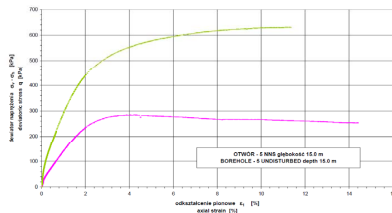
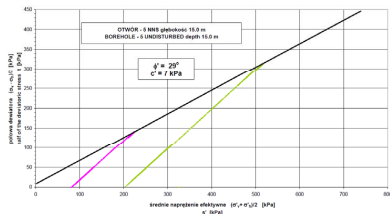
$OCR / q^{POP} \rightarrow K_o$

- Praktycznie we wszystkich typach badań mamy do czynienia z zaburzeniem pierwotnego stanu naprężenia
- Testy trójosiowe (CD/CU) umożliwiają bezpośrednią identyfikację parametrów modeli konstytutywnych jednakże ich wartości są na ogół niższe od tych w stanie in situ
- Kluczowym jest pomiar prędkości fali ścinania v_s w testach SCPTU/SDMT ew. crosshole
- Estymacja wartości G_o z formuł korelacyjnych dla sondowań CPTU lub DMT może być obarczona dużym błędem co skutkuje jeszcze większym błędem w oszacowaniu $G_o = \rho v_s^2$

Badania laboratoryjne i polowe podłoża gruntowego

- Testy laboratoryjne gruntów spoistych są zwykle czasochłonne i stosunkowo drogie (w zależności od kraju) wykonujemy je wyłącznie dla wytypowanych warstw w podłożu
- Stąd powinny być bezwzględnie poprzedzone sondowaniami CPTU/SDMT
- Testy trójosiowe uzupełnione pomiarem prędkości fali oraz testy edometryczne traktujemy jako referencyjne do weryfikacji stosowalności formuł korelacyjnych opracowanych dla CPTU i DMT
- Zdarza się, że rozrzut wyprowadzonych wartości parametrów z testów laboratoryjnych i polowych jest nieakceptowalny....zatem gdzie jest prawda ?

Parametry efektywne: test trójosiowy CD



$$E = \frac{\partial q}{\partial \epsilon_1}$$

Co to jest moduł Younga w mechanice gruntów ?

Odpowiedź: to jest liczba, która podstawiona do wzoru daje wynik taki jakiego oczekujemy

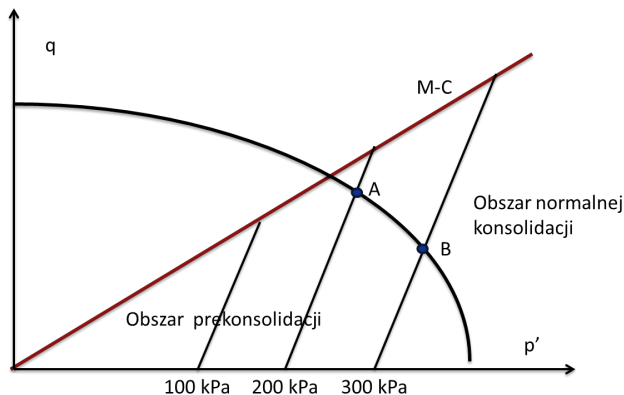
Projektowanie testów trójosiowych

- W celu bezpośredniej estymacji wartości parametrów **testy CD** powinny być wykonywane na próbkach prekonsolidowanych
 - ① Moduł sztywności E_{50}^{ref} **jest kalibrowany bezpośrednio**
 - ② **Kąt dylatacji** jest widoczny
- Powinien być wykonany **minimum jeden cykl obciążenia-odciążenia** (bezpośrednia kalibracja E_{ur}^{ref})
- Należy wykonać pomiar prędkości fali ścinania v_s
- **Nie można polegać wyłącznie na testach laboratoryjnych !**

Testy polowe SCPTU, SDMT

- **Sztywność w zakresie bardzo małych odkształceń** jest wspólna dla testów polowych i laboratoryjnych
- Poznajemy **historię stanu naprężenia (OCR)**

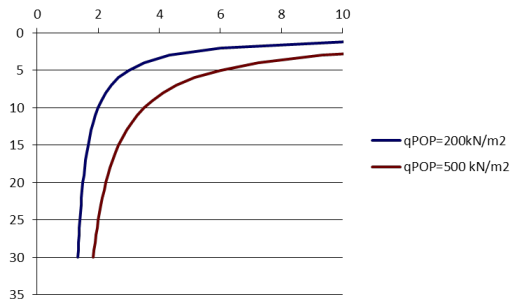
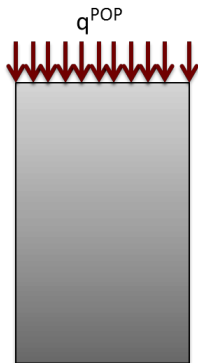
Projektowanie testów trójosiowych



- W tym przypadku konieczne jest wykorzystanie metod optymalizacyjnych
- Identyfikacja parametrów w aplikacji Virtual Lab w środowisku ZSoil

Modelowanie historii stanu naprężenia

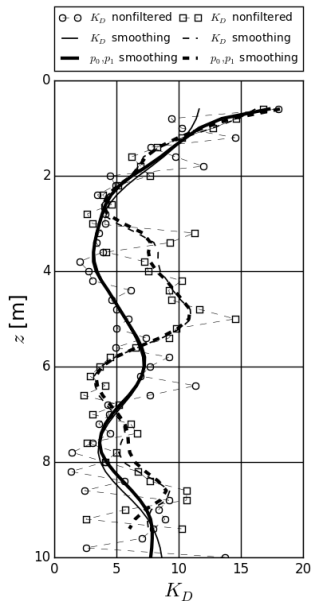
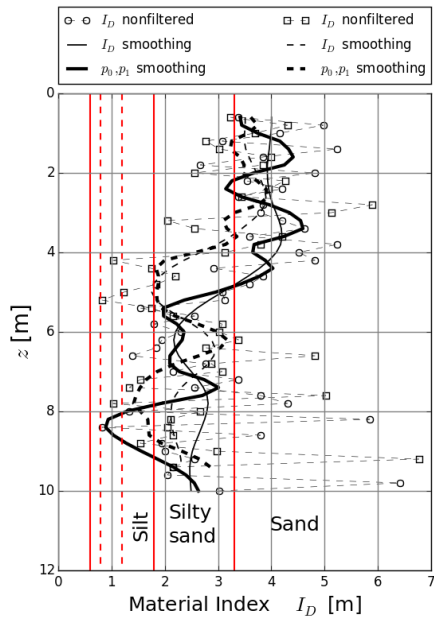
- $OCR = \frac{\sigma'_{zo} + q^{POP}}{\sigma'_{zo}}$
- $s_u = s_u(OCR)$
- $K_o = K_o(OCR)$



Uwagi techniczne związane z przekazaniem wyników badań

- Bezwzględny dostęp do wersji cyfrowych wyników sondowań SCPTU/SDMT (dowolny format .xls, .xlsx, .csv)
- Dzięki temu możemy wykonywać filtrowanie i statystyczną obróbkę wyników badań
- W przypadku badań trójosiowych powinniśmy mieć możliwość wglądu do dokumentacji fotograficznej próbek przed i po badaniu oraz metryki każdego badania w postaci cyfrowej

Filtrowanie wyników badań (test DMT)



Jak kalibrować parametry modelu HS na bazie sondowań ?

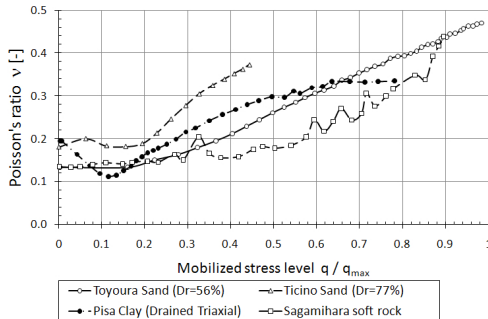
- **Sondowanie CPTU** → duża liczba pomiarów (co 1cm) zatem mamy podstawę do wykonywania analiz statystycznych
- **Sondowanie DMT** → mniejsza liczba pomiarów (co 20cm) stąd populacja wyników w danej warstwie geotechnicznej jest bardziej ograniczona
- **Identyfikacja parametrów**
 - 1 filtrowanie/uśrednianie wyników pomiarów
 - 2 stosowanie formuł empirycznych w celu identyfikacji poszczególnych parametrów

Jakie parametry modelu HS możemy pozyskać bezpośrednio z sondowań

- E_o^{ref} , m
- M^{ref} lub E^{ref} (co to jest za moduł ?)
- kąt tarcia wewnętrznego: ϕ (tylko piaski)
- s_u (grunty spoiste) (podejście SHANSEP)
- kąt dylatacji: ψ
- wskaźnik prekonsolidacji: OCR
- ciężar objętościowy: γ

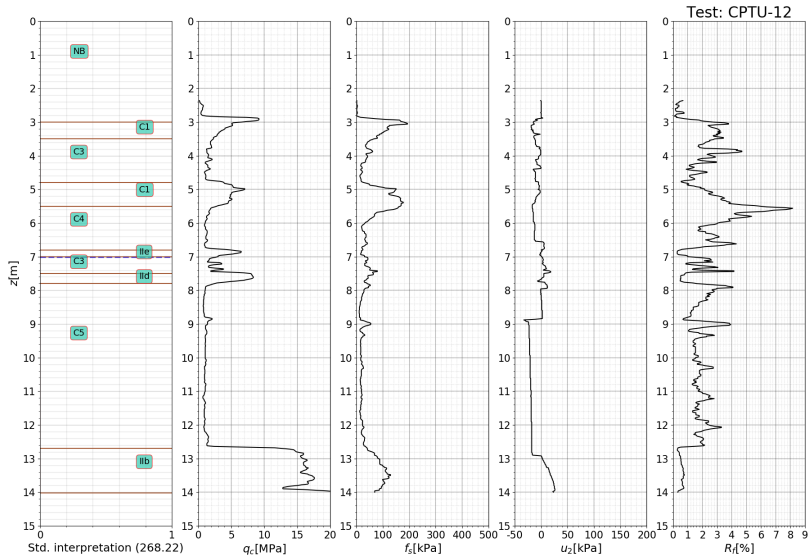
Liczba Poissona dla zakresu bardzo małych odkształceń

$$\nu = -\frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} = -\frac{d\varepsilon_v - d\varepsilon_1}{2d\varepsilon_1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \right)$$

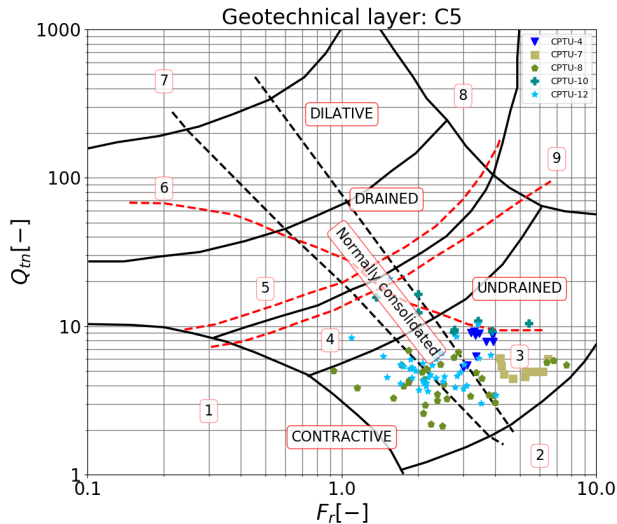


- Liczba Poissona zmienia się od $\nu = 0.1..0.3$
- Na ogół w przypadku piasków należy ją przyjmować jako $\nu = 0.2$
- Dla gruntów spoistych należy przyjmować $\nu = 0.25$

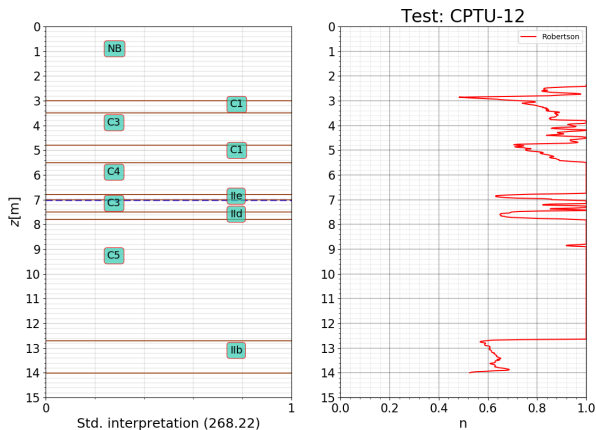
Przykładowa identyfikacja parametrów z sondowań CPTU



Przykładowa identyfikacja parametrów z sondowań CPTU



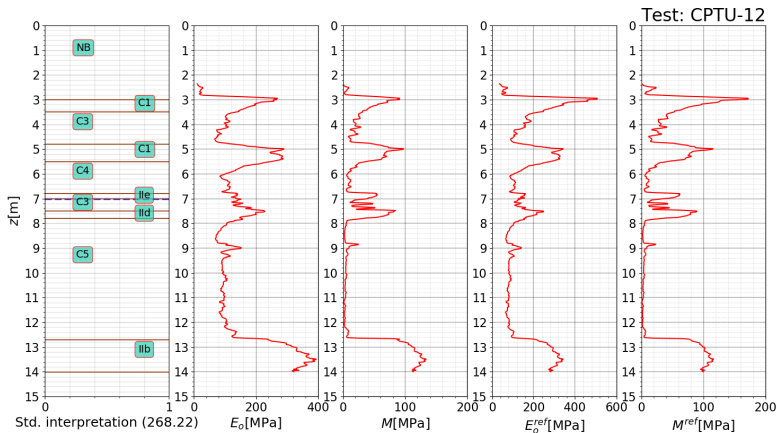
Parametr potęgowy $n = m$



$$m = n = 0.381 I_c + 0.05 (\sigma'_{vo}/p_a) - 0.15$$

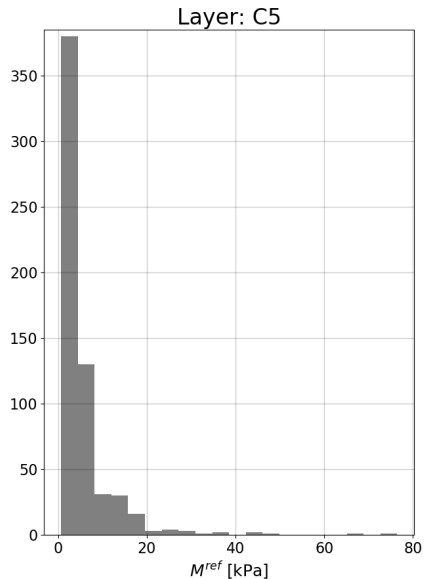
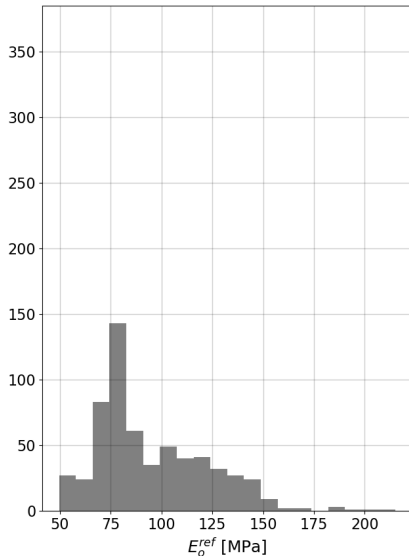
za P.K. Robertson. Canadian Geotechnical Journal 46: 1337-1355 (2009)

Referencyjne moduły sztywności



- aby obliczyć wartości referencyjne modułów sztywności musimy znać ϕ' oraz OCR, a następnie oszacować $\sigma'_{h,o}$
- $\sigma'_{h,o} = K_o \sigma'_{v,o}$
- K_o jest funkcją OCR (w gruntach spoiwych działa formuła Jaky $K_o = K_o^{NC} \text{OCR}^{\sin \phi'}$)
- w piaskach na ogół $K_o = K_o^{NC}$

Referencyjne moduły sztywności: rozrzuty wartości

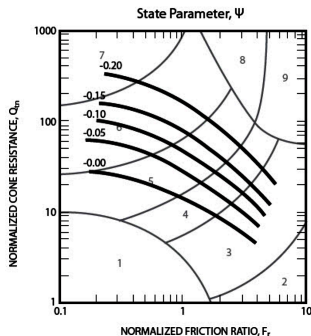


Skąd wziąć E_{ur}^{ref} i E_{50}^{ref} ?

- $E_{ur}^{ref} \geq E^{ref} \geq E_{50}^{ref}$
- **w gruntach niespoistych** $\rightarrow \frac{E_o^{ref}}{E_{ur}^{ref}} \approx 2..3, \frac{E_{ur}^{ref}}{E_{50}^{ref}} \approx 2..3$
- przy większym zagęszczeniu E^{ref} będzie zmierzać do wartości E_{ur}^{ref}
- **w gruntach spoistych** $\rightarrow \frac{E_o^{ref}}{E_{ur}^{ref}} \approx 3..6, \frac{E_{ur}^{ref}}{E_{50}^{ref}} \approx 3..6$
- im mniejszy stopień plastyczności oraz większy wskaźnik OCR tym bardziej E^{ref} będzie zmierzać do wartości E_{ur}^{ref}
- precyzyjna weryfikacja tych zależności wymaga jednak specjalistycznych badań trójosiowych

Kąt dylatacji ψ

Parametr Ψ pokazuje różnicę pomiędzy aktualną wartością wskaźnika porowatości e_o i wskaźnikiem w stanie krytycznym e_{cs} .
Innymi słowy czy grunt jest w stanie początkowym dylatywnym czy kontraktywnym.



$$\Psi = 0.56 - 0.33 \log Q_{tn,cs}$$

Szacowanie kąta dylatacji ψ

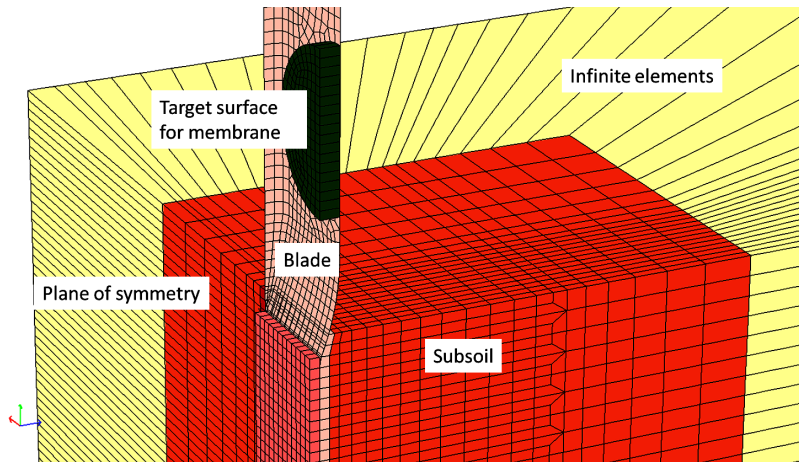
Jeffries i Been (2006)

$$\psi = -48 \Psi$$

$$\phi_{cv} = \phi' - \psi$$

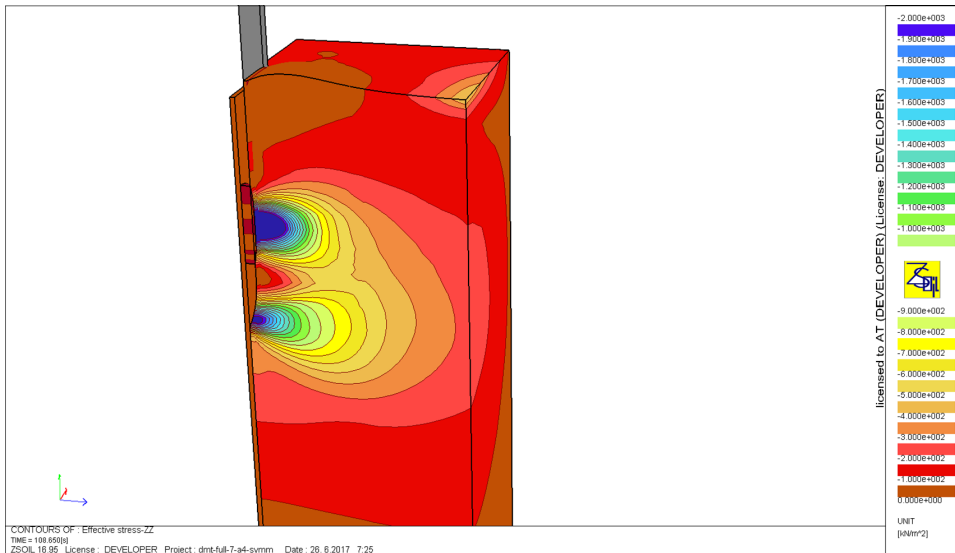
za P.K. Robertson. Canadian Geotechnical Journal 46: 1337-1355 (2009)

Test DMT: model 3D



- Duże odkształcenia (uaktualniony opis Langrange'a)
- Przypadek gruntu niespoistego
- $K_o = 0.5$, $\sigma_{o,v} = 100$ kPa, $E_{ur}^{ref} = 100000$ kPa, $m = 0.5$, $E_{50}^{ref} = 33000$ kPa, $E_{oed}^{ref} = 33000$ kPa, $OCR = 1$, $\phi = 30^\circ$, $\psi = 5^\circ$

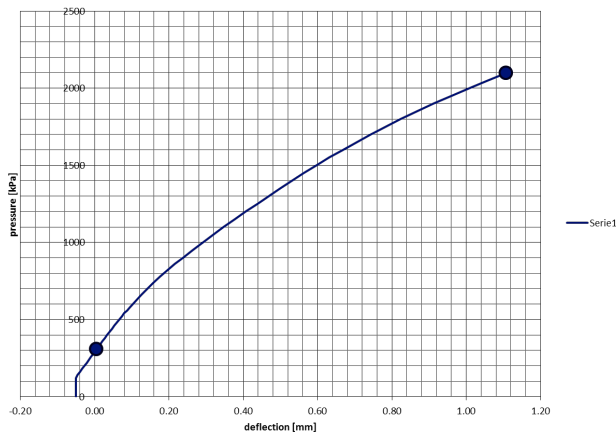
Animation of DMT test



Animation

video

Pressure-deflection curve



- $I_D \approx 6$, $K_D \approx 3$, $E_D \approx 62500$ kPa
- $M_{DMT} \approx 90000$ kPa
- $E_{ur} \approx 0.9 * 90000 = 81000$ kPa
- $E_{ur,insitu} \approx 81000$ kPa

Badania laboratoryjne, polowe i związane z nimi patologie obserwowane w praktyce

- Do czego służy **badanie trójosiowe** ? do oszacowania ϕ i c
- Do czego służy **badanie edometryczne** ? do oszacowania siecznych modułów pierwotnego i wtórnego, oraz naprężenia prekonsolidacji
- Do czego służy **test CPTU** ? na ogół do oszacowania I_L lub I_D , czasem jakiegoś bliżej nieokreślonego modułu sztywności, w porywach do szacowania s_u
- Standardowo jeśli znane jest I_L lub I_D to już mamy **wszystko**, otwieramy normę PN-81-B/03020, a tam..... jest odpowiedź na każde pytanie → **patologia skutkująca stratami finansowymi, oby tylko..., w przypadku awarii**

Uwagi końcowe

- W pełni nieliniowe modelowanie MES 3D to potężny oręż w rozwiązywaniu problemów, które do niedawna były nierozwiązywalne
- Wymagana jest tu jednak specjalistyczna wiedza w zakresie mechaniki gruntów i konstrukcji oraz zasad konstruowania modeli obliczeniowych MES 3D
- Większość dużych i średnich firm korzysta z tego typu oprogramowania i na bieżąco inwestuje czas i środki w edukację swoich kadr
- **Wysoki poziom projektowania i wykonywania badań podłoża** pod kątem wykorzystania ich w modelowaniu 3D **jest warunkiem koniecznym** uzyskiwania wiarygodnych wyników symulacji
- W Polsce obserwowany jest stały wzrost jakości prowadzonych badań, a liczba realizacji dużych inwestycji jest gwarantem ciągłego postępu
- Proste tematy się w zasadzie kończą i będzie tylko trudniej
- **Niech każdy działa w zakresie swoich kompetencji i nie wychodzi poza te, które posiada**