



Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Modelování v geotechnice – Úvod k programovému systému Plaxis
(prezentace pro výuku předmětu Modelování v geotechnice)

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Inovace studijního oboru Geotechnika CZ.1.07/2.2.00/28.0009.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem ČR.

Úvod ✓
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

software Plaxis (Delft, Holandsko)

výpočetní systém pro řešení geotechnických úloh (rovinné i prostorové úlohy) založený na metodě konečných prvků

VERZE PROGRAMU

Úvod
Verze programu ✓
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu



Plaxis 2D – Modul zaměřený na 2D analýzu napěťo-deformačního a stabilitního stavu geotechnických konstrukcí (existují specializované moduly pro dynamickou analýzu *Dynamic* a analýzu hydrogeologickou *PlaxFlow*) – uvedená prezentace se týká verze 8



3D Tunnel – speciálně vyvinutý pro 3D analýzu tunelů, ale je možno tento modul s jistým omezením využít i pro další prostorové geotechnické úlohy, nejedná se o plnohodnotný 3D software (řez je protahován do délky)



Plaxis 3D Foundation – 3D modul specializovaný na analýzu základových konstrukcí, nejedná se o plnohodnotný 3D software (řez je protahován do hloubky)

Plaxis 3D – komplexní 3D analýza geotechnických konstrukcí (tunely, svahy, stavební jámy, násypy, výsypky, ...), plnohodnotný 3D software

3D -modelování

Modelování v geotechnice – Úvod k programovému systému Plaxis

Úvod

Verze programu ✓

Základy metody konečných prvků

Základní části Plaxis 2D

Základní vstupní data

Typ modelu

Typ prvků

Dimenze modelu

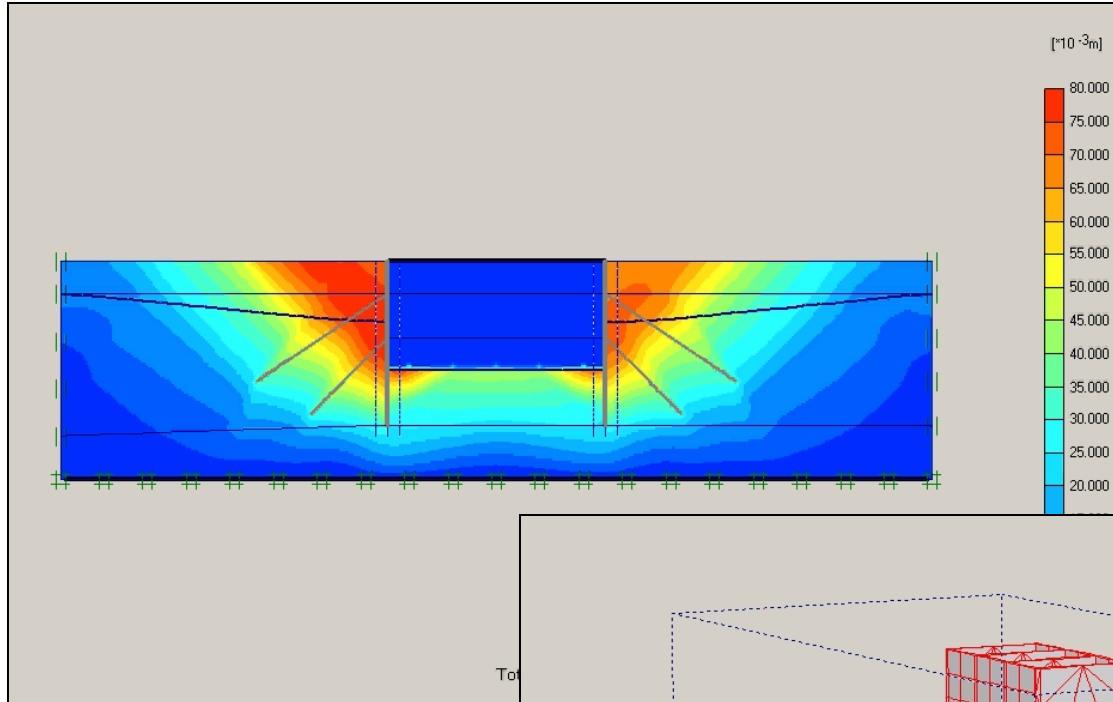
Komponenty geometrie

Zatížení a okrajové podmínky

Vlastnosti materiálu

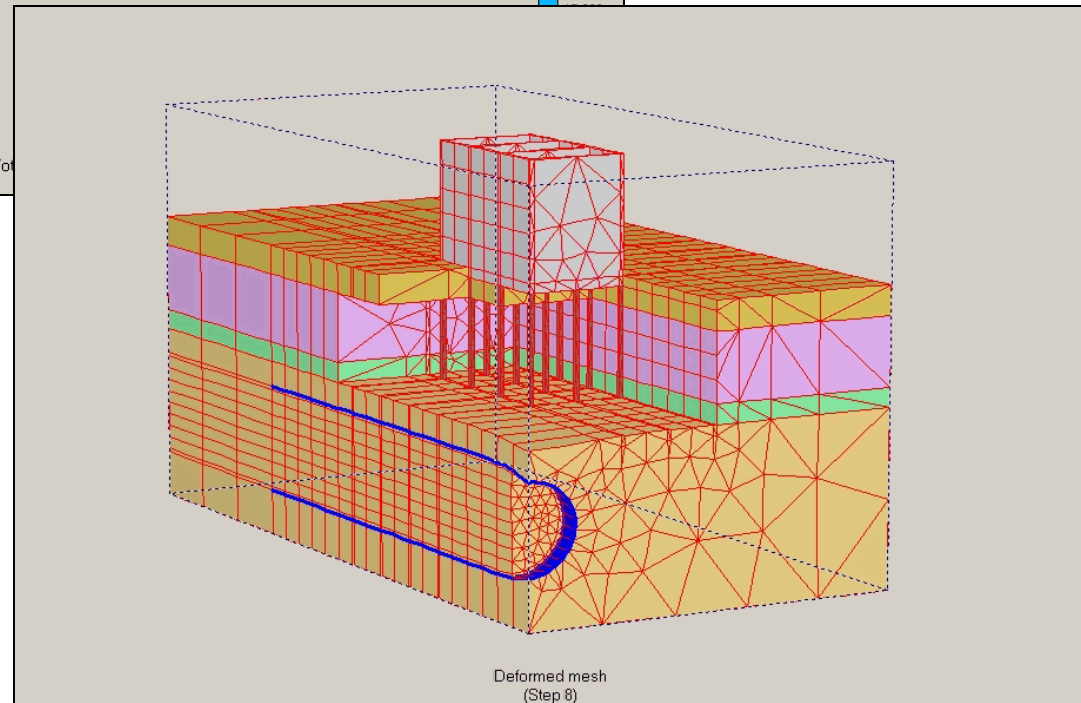
Výpočetní modul Plaxisu

Ilustrace modelování pažené stavební jámy



Ilustrace 3D modelování tunelu →

(www.plaxis.nl)



Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků ✓
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

ZÁKLADY METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

- Metoda modelování kontinua
- Primárními neznámými hodnotami jsou posuny U_i v daných bodech - uzlech (nodes) sítě (mesh)
- Rovina (2D) nebo prostor (3D) je rozdělen na prvky (elements) – v rovině nejčastěji trojúhelníky, které tvoří síť

Modelování v geotechnice – Úvod k programovému systému Plaxis

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků ✓
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

- Na každém prvku je funkce posunů aproximována pomocí hodnot v uzlech U_i , $i=1, \dots, N$

$$2D: \quad u(x, y) = \sum_{i=1}^N N_i U_i$$

N_i : bázové funkce

- Aplikací geometrických rovnic jsou stanovena přetvoření pomocí hodnot posunů v uzlech U_i a odpovídajících bázových funkcí

Modelování v geotechnice – Úvod k programovému systému Plaxis

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků ✓
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

- Aplikací konstitutivních vztahů jsou stanovena napětí na prvcích (nejjednodušší konstitutivní vztah je Hookův zákon):

$$\sigma = D\varepsilon$$

ε - je závislé na U_i

D- matice materiálových parametrů

- Aplikací Langrangeova variačního principu a integrací na prvcích je získána lokální matice tuhosti
- Z lokálních matic tuhosti je sestavena globální matice tuhosti K

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků ✓
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

- Aplikace Langangeova variačního principu vede k úloze minimalizace funkcionálu potenciální energie:

$$\min \left(\frac{1}{2} \vec{u}^T K \vec{u} - \vec{F} \vec{u} \right) \quad \begin{array}{l} \vec{u} \text{ – vektor uzlových posunů} \\ \text{(neznámý)} \\ \vec{F} \text{ – vektor sil (známý)} \end{array}$$



Základní soustava lineárních rovnic

$$K \vec{u} = \vec{F}$$

K – globální matice tuhosti, symetrická a pásová

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků ✓
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

- Řešení soustavy lineárních rovnic

$$\vec{u} = K^{-1} \vec{F}$$

(okrajové podmínky úlohy zajišťují existenci a jednoznačnost řešení soustavy)

- Následně jsou vyhodnoceny na základě stanovených posunů přetvoření a napětí

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D ✓
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

ZÁKLADNÍ ČÁSTI PLAXIS 2D VERZE 8

- *Plaxis Input* – vytvoření modelu (materiálové charakteristiky horninového prostředí a konstrukcí, hraniční a počáteční podmínky, vlastnosti sítě, ...)
- *Plaxis Calculations* – výpočetní sekce, nastavení typu výpočtu (plastic, konsolidace, ...), výstavbové fáze, nastavení výpočtových parametrů (počet iterací, přesnost, ...)
- *Plaxis Output*- vyhodnocení výsledků
- *Plaxis Curves* – vykreslení různých typů křivek, napěťo-přetvárných diagramů, křivek časových vývoju apod. v předem zvolených uzlech resp. prvcích

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data ✓
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

ZÁKLADNÍ VSTUPNÍ DATA

- Základní nastavení (rozsahy, jednotky, typ elementu,...)
- Vytvoření 2D geometrického modelu tvořeného body, liniemi a dalšími komponenty
- Nastavení okrajových podmínek (geometrických, zatěžovacích,...)

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data ✓
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

ZÁKLADNÍ VSTUPNÍ DATA

- Zadání materiálových vlastností
- Generování odpovídající sítě konečných prvků (automatický generátor sítě)
- Stanovení počátečních podmínek (počáteční geostatická napjatost, počáteční hydrostatická napjatost (počáteční pórové tlaky),...)

Modelování v geotechnice – Úvod k programovému systému Plaxis

TYP MODELU

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu ✓
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

Rovinná deformace

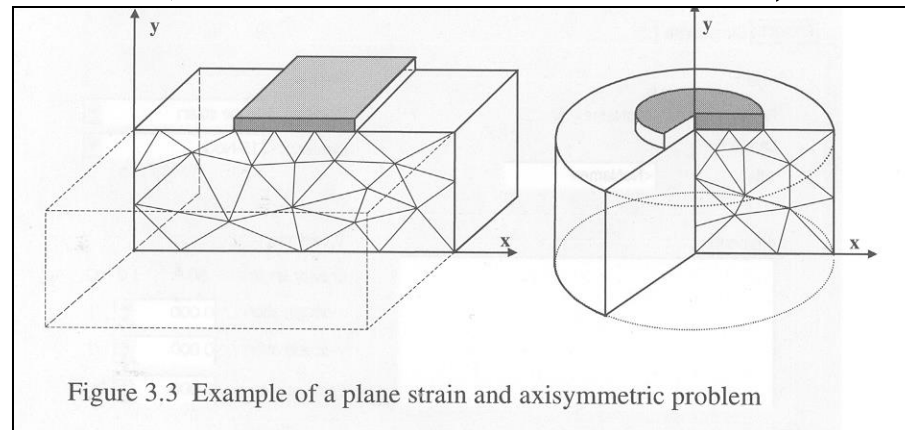
Geometrie, odpovídající napěťový stav a zatěžovací schéma jsou identické ve směru kolmém k modelovanému příčnému průřezu.

Posuny a přetvoření ve směru z jsou nulová, avšak napětí v tomto směru obecně nulová nejsou

Osově symetrický model

Je využíván pro modelování kruhových základů s rovnoměrným zatížením kolem osy symetrie

Posuny a napětí jsou identická v každém radiálním směru kolmém na osu symetrie



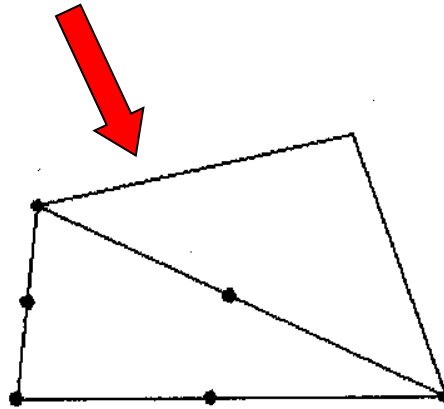
TYP KONEČNÝCH PRVKŮ

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků ✓
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

6-uzlový trojúhelníkový prvek

Posuny na prvku jsou aproximovány polynomem druhého řádu (parabolická závislost)

Element odpovídající nižší přesnosti, dává dobré výsledky pro standardní deformační analýzu, ale není vhodný pro použití v stabilitní analýze a analýze porušení



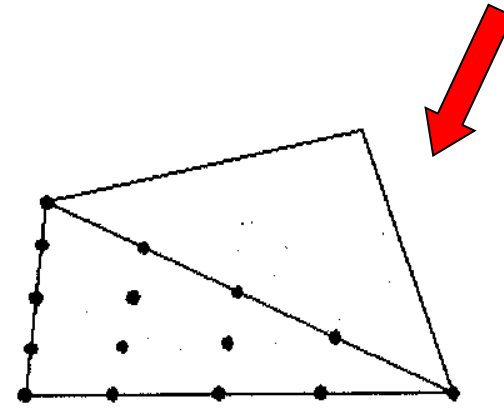
6-node triangle

15-uzlový trojúhelníkový prvek

Posuny na prvku jsou aproximovány polynomem čtvrtého řádu

Element odpovídající vyšší přesnosti používaný především v případě stabilitních úloh

Vyžaduje vyšší nároky na paměť, výpočet je časově náročnější



nodes
15-node triangle

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu ✓
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

DIMENZE (ROZSAH) MODELU

Specifikace rozsahu modelované oblasti:

- Rozsah modelované oblasti musí odpovídat rozsahu geometrie úlohy (stručně řečeno: geometrie se musí do dané modelované oblasti „vejít“)
- Rozsah musí zaručit, že zadávané standardní deformační okrajové podmínky (omezení posunu na hranicích) nebudou negativně ovlivňovat výsledky

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie ✓
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

KOMPONENTY GEOMETRIE

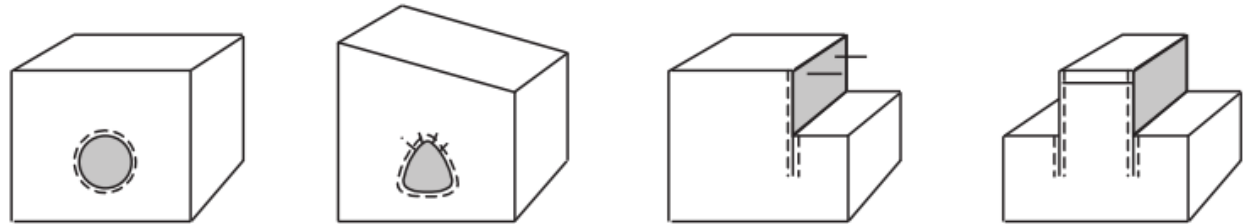
- *Základní komponenty: body, linie* – zadání rozhraní vrstev, zadání rozhraní konstrukčních fází apod.
- *Speciální komponenty:*
 - **plate** – simulace tunelového ostění, pažení stavebních jam apod.
 - **Geogrids** – simulace geotextilií, ...
 - **Kotvy** – simulace kotevních prvků
 - **interface** – simulace interakce mezi zemínou a konstrukcí

Modelování v geotechnice – Úvod k programovému systému Plaxis

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie ✓
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

● *Plate*

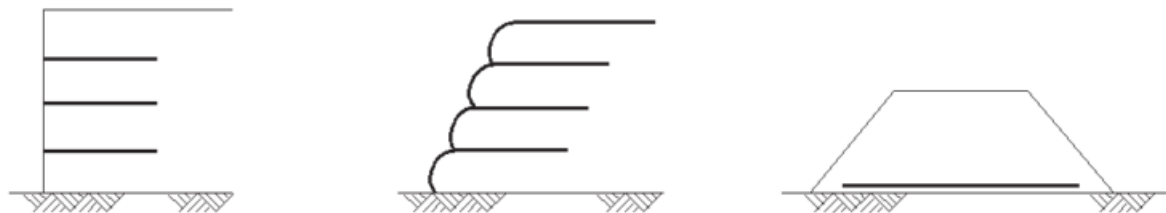
Strukturní objekty používané k modelování tenkých konstrukcí s významnou ohybovou i normálovou tuhostí (stěny, výztuže tunelů,...), ve 2D analýze jsou tyto strukturní objekty tvořeny nosníkovými prvky



zdroj: manuál Plaxis v.8

● *Geogrids*

Tenké konstrukce s normálovou tuhostí, které ale nemají žádnou ohybovou tuhost, mohou přenášet pouze tahové síly, nikoliv síly tlakové



zdroj: manuál Plaxis v.8

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie ✓
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

● *Kotvy*

Jsou k dispozici 2 typy:

- *node-to-node kotva*: modelována dvouuzlovou pružinou, která modeluje spojení mezi dvěma body. Tento strukturní prvek může být zatížen tahovými silami (kotva) nebo tlakovými silami (rozpěra)
- *Kotva s fixovaným koncovým bodem*: pružinový prvek s jedním fixovaným bodem (rozpěra pažící konstrukce, kotevní prvek s jedním pevně fixovaným bodem apod.)

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky ✓
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu

ZATÍŽENÍ A OKRAJOVÉ PODMÍNKY

- *Zatížení:* spojité plošné zatížení, liniové zatížení, bodové zatížení
- *Okrajové podmínky:* určují lokalizaci nulových posunů, standardní podmínky: tuhá vana – na vnějších vertikálních hranicích jsou omezeny posuny ve směru horizontálním, na spodní vnější hranici jsou omezeny posuny v obou směrech

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu ✓
Výpočetní modul Plaxisu

VLASTNOSTI MATERIÁLU

- **zeminový resp. horninový materiál a interface** (v závislosti na zvoleném konstitutivním modelu)
- **plates** (normálová tuhost, ohybová tuhost, Poissonovo číslo, tíha, pevnostní parametry pro plastické chování)
- **geogrids** (normálová tuhost)
- **kotvy** (normálová tuhost, rozteč kotevních profilů v podélném směru (out-of-plane))

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu ✓
Výpočetní modul Plaxisu

PODPOROVANÉ MATERIÁLOVÉ MODELY

- *Lineárně pružný* – reprezentovaný Hookovým zákonem pro izotropní lineární pružnost, zadávány jsou dva materiálové parametry (Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo), většinou používaný pro modelování konstrukčních prvků (beton,...), nikoliv zemin
- *Mohr-Coulombův*- nutno zadat 5 vstupních parametrů: Youngův modul pružnosti, Poissonovo číslo, úhel vnitřního tření, soudržnost a úhel dilatance

Modelování v geotechnice – Úvod k programovému systému Plaxis

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu ✓
Výpočetní modul Plaxisu

- *Skalní model s trhlinami* – anisotropní pružně-plastický model používaný pro zohlednění vrstevnatého nebo trhlinatého skalního masivu
- *Zeminový model se zpevněním* – pokročilý pružně-plastický model s hyperbolickým zpevněním
- *Model měkkých zemin* – pokročilý Cam-Clay model (normálně konsolidovaný jíl, hlína,...)
- *Creepový model měkkých zemin* – simulace časově závislého chování měkkých zemin
- *Uživatelem definovaný zeminový model*

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu ✓
Výpočetní modul Plaxisu

Definování interakce systému „ voda-zeminový skelet“

- *Drénované chování*- nepředpokládá se generování přírůstků pórových tlaků, použití: suché zeminy, zeminy s vysokou propustností- např. štěrk, ..., v případě pomalé rychlosti zatěžování, simulace dlouhodobého odvodněného chování zemin
- *Nedrénované chování* – předpokládá se vývoj přírůstku pórových tlaků, použití: zeminy s nízkou propustností (např. jíl,...), v případě vysoké rychlosti zatěžování, simulace krátkodobého chování zemin
- *Neporézní chování*- není zohledněn ani počáteční ani přírůstkový pórový tlak (beton, konstrukční materiály, ...)

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu ✓
Výpočetní modul Plaxisu

ZÁKLADNÍ MATERIÁLOVÁ VSTUPNÍ DATA ZEMIN (za předpokladu Mohr-Coulombova materiálového modelu)

- *Saturovaná a nenasaturovaná objemová tíha materiálu* – celková objemová tíha zemin včetně kapaliny v pórech

saturovaná – je aplikována pro všechny materiály nad hladinou podzemní vody

nenasaturovaná – je aplikována pro všechny materiály pod hladinou podzemní vody

- *propustnost* – je zadávána pro výpočet konsolidace a výpočet proudění. Program Plaxis rozlišuje horizontální a vertikální propustnost

Modelování v geotechnice – Úvod k programovému systému Plaxis

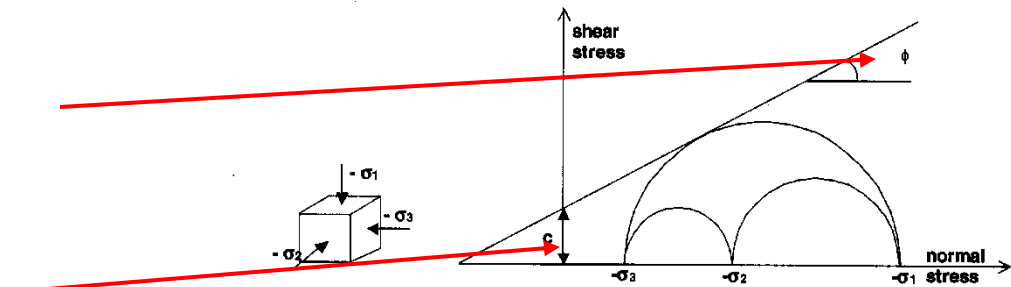
Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu ✓
Výpočetní modul Plaxisu

- *Youngův modul pružnosti* – modul pružnosti, program umožňuje zohlednit rostoucí tuhost s hloubkou, alternativně je možno zadávat edometrický modul a smykový modul pružnosti

- *Poissonovo číslo*

- *Úhel tření*

- *soudržnost*



Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu ✓

VÝPOČETNÍ MODUL PLAXISU

Typ výpočtu:

- **Plastický výpočet** – pružně-plastická deformační analýza, změna přírůstku pórového tlaku není v tomto typu výpočtu zohledněna
- **Konsolidační analýza** – analýza vývoje a rozptylování přírůstku pórových tlaků
- **Phi-c redukce (stabilitní analýza)** – stanovení stupně stability
- **Dynamický výpočet** (vyžaduje dynamický modul)
- **Updates mesh** (pokročilé možnosti)- umožňuje zohlednit vliv velkých deformací, dochází k modifikaci sítě po každém výpočetním kroku

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu ✓

STABILITNÍ ANALÝZA

„**Phi-c redukce**“: pevnostní parametry $\tan \varphi$ a soudržnost c materiálu jsou redukovány až na úroveň kdy dojde k porušení (na konstrukční objekty (plate, kotvy) není tato redukce aplikována)

Stupeň stability
$$M_{sf} = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}}$$

φ_{input} , c_{input} - vstupní pevnostní charakteristiky

$\varphi_{reduced}$, $c_{reduced}$ - pevnostní charakteristiky odpovídající stavu porušení

Úvod
Verze programu
Základy metody konečných prvků
Základní části Plaxis 2D
Základní vstupní data
Typ modelu
Typ prvků
Dimenze modelu
Komponenty geometrie
Zatížení a okrajové podmínky
Vlastnosti materiálu
Výpočetní modul Plaxisu ✓

VÝPOČETNÍ MODUL PLAXISU

Fázování konstrukce:

- *Změna geometrie a materiálové konfigurace:*
Aktivace nebo deaktivace části modelu (zemina, konstrukce, ...), změna materiálových vlastností, aplikace objemového přetvoření na vybrané oblasti (simulace injektáže, ...)
- *Aktivace nebo deaktivace zatížení*
- *Zadání předpětí kotev*
- *Změna rozložení vodních tlaků* (lokalizace hladiny podzemní vody, zadání hraničních podmínek pro konsolidaci resp. proudění vody, odvodnění stavební jámy, ...)