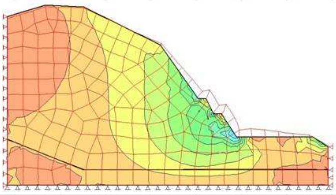
3. Proračun naprezanja i deformacija

- Uvod u metode proračuna
- Teorijske osnove metoda proračuna
- Postavljanje modela i zadavanje ulaznih veličina
- Vrste proračuna
- Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna



Uvod u metode proračuna

- Svrha proračuna
  - Stanje naprezanja
  - Deformacije i pomaci točaka
  - Interakcija između građevine i tla/stijene
  - Simulacije faza izgradnje objekata
  - Promjene pornog tlaka
  - Proces konsolidacije
- Metode proračuna
  - Mehanika kontinuuma
    - Metoda konačnih elemenata
    - Metoda konačnih diferencija
    - Metoda rubnih elemenata
  - Mehanika diskontinuuma
    - Metode diskretnih elemenata

Uvod u metode proračuna

- Računalni programi
  - FLAC (Itasca Cosulting Group, Inc. USA)
  - UDEC (Itasca Cosulting Group, Inc. USA)
  - SIGMA/W (GEO-SLOPE International, Ltd., Canada)
  - EXAMINE (Rocscience, Inc., Canada)
  - PHASE (Rocscience, Inc., Canada)
  - PLAXIS (Plaxis Bv, Nizozemska)

Teorijske osnove metoda proračuna

- Teorija elastičnosti
  - Tenzor naprezanja i deformacija
  - Uvjeti ravnoteža sila i momenata
  - Veze između komponenata naprezanja i deformacija
  - Jednadžbe neprekinutosti (kompatibilnosti)
- Teorija plastičnosti
  - Kriterij čvrstoće (plastičnosti)
- Rješavanje sustava metodom konačnih elemenata
  - Uvođenje konačnog elementa
  - Postavljanje jednadžbe konačnog elementa
  - Numerička integracija jednadžbe konačnog elementa
  - Postavljanje i rješavanje globalnog sustava jednadžbi

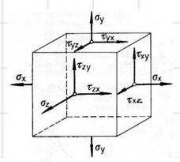
Teorija elastičnosti

- Dio matematičke fizike kojom se pokušavaju izraziti promjene stanja naprezanja i deformacija čvrstog, neprekinutog tijela
- Da bi se poznavalo ukupno stanje naprezanja u nekoj točki neprekinute sredine potrebno je poznavati devet komponenata naprezanja, od kojih σ_x, σ_y i σ_z predstavljaju normalna naprezanja, a τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yx}, τ_{yz}, τ_{zx} i τ_{zy} komponente posmičnih naprezanja na plohama diferencijalno male kockice
- Linearna i nelinearna teorija elastičnosti
- Vrijedi u području malih deformacija materijala, odnosno u području idealne elastičnosti

Tenzor naprezanja i deformacija

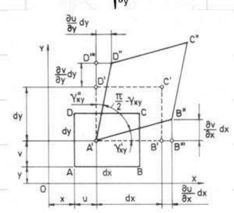
- Tenzor naprezanja

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}$$



- Tenzor deformacija

$$[\bar{\varepsilon}_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$



Tenzor deformacija

- Normalne deformacije

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_x \qquad \frac{\partial v}{\partial y} = \varepsilon_y \qquad \frac{\partial w}{\partial z} = \varepsilon_z$$

- Kutne deformacije

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \gamma'_{xy} \qquad \frac{\partial u}{\partial y} = \gamma''_{xy} \qquad \gamma_{xy} = \gamma'_{xy} + \gamma''_{xy} = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)$$

- Posmične deformacije $\quad \frac{1}{2}\gamma_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) = \varepsilon_{xy}$

$$\frac{1}{2}\gamma_{xz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) = \varepsilon_{xz} \qquad \frac{1}{2}\gamma_{yz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) = \varepsilon_{yz}$$

Tenzor deformacija

- Rastavljanje asimetričnog tenzora deformacija na simetrični dio koji opisuje čistu deformaciju i antisimetrični dio koji opisuje čistu rotaciju

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right) & 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial z}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}\right) & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_{xy} & \omega_{xz} \\ \omega_{yx} & 0 & \omega_{yz} \\ \omega_{zx} & \omega_{zy} & 0 \end{bmatrix}$$

Uvjeti ravnoteža sila i momenata

- Uvjet ravnoteže sila

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0$$

- Uvjet ravnoteže momenata

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \qquad \tau_{xz} = \tau_{zx} \qquad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

Veze između komponenata naprezanja i deformacija

- Prema linearnoj teoriji elastičnosti, veze između komponenata naprezanja i komponenata deformacija ostvarene su preko linearnih funkcija u obliku polinoma uvođenjem fizikalnih svojstava materijala kao npr.

$$\sigma_x = C_{10} + C_{11}\varepsilon_x + C_{12}\varepsilon_y + C_{13}\varepsilon_z + C_{14}\varepsilon_{xy} + C_{15}\varepsilon_{yz} + C_{16}\varepsilon_{xz}$$

$$\sigma_y = C_{20} + C_{21}\varepsilon_x + C_{22}\varepsilon_y + C_{23}\varepsilon_z + C_{24}\varepsilon_{xy} + C_{25}\varepsilon_{yz} + C_{26}\varepsilon_{xz}$$

$$\ldots$$

$$\tau_{xz} = C_{60} + C_{61}\varepsilon_x + C_{62}\varepsilon_y + C_{63}\varepsilon_z + C_{64}\varepsilon_{xy} + C_{65}\varepsilon_{yz} + C_{66}\varepsilon_{xz}$$

- Matrica koeficijenata sadrži ukupno 36 nepoznanica od kojih je za materijal pune anizotropije potrebno poznavati 21

Veze između komponenata naprezanja i deformacija

- Matrica koeficijenata za materijal potpune izotropije, odnosno jednakih vrijednosti u sva tri ortogonalna smjera

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix}$$

- Lameovi koeficijenti

$$C_{11} = \lambda + 2\mu \qquad C_{12} = \lambda \qquad C_{44} = (C_{11} - C_{12}) = 2\mu$$

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)} \qquad \mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Veze između komponenata naprezanja i deformacija

- Fizičke jednadžbe (I grupa)

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)\right] \qquad \tau_{xy} = 2G \cdot \varepsilon_{xy}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)\right] \qquad \tau_{yz} = 2G \cdot \varepsilon_{yz}$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)\right] \qquad \tau_{zx} = 2G \cdot \varepsilon_{zx}$$

Veze između komponenata naprezanja i deformacija

- Fizičke jednadžbe (II grupa)

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\cdot\left[\sigma_x - \nu\cdot\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right] \qquad \varepsilon_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{2G}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\cdot\left[\sigma_y - \nu\cdot\left(\sigma_z + \sigma_x\right)\right] \qquad \varepsilon_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{2G}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\cdot\left[\sigma_z - \nu\cdot\left(\sigma_x + \sigma_y\right)\right] \qquad \varepsilon_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{2G}$$

Jednadžbe neprekinutosti (kompatibilnosti)

- Jednadžbe neprekinutosti (I i II grupa)

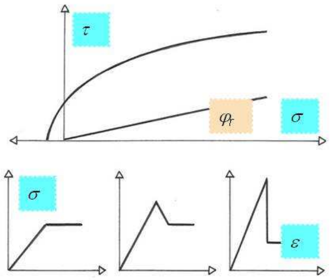
$$2\frac{\partial^2\varepsilon_{xy}}{\partial x\partial y} = \frac{\partial^2\varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varepsilon_y}{\partial x^2} \qquad \frac{\partial^2\varepsilon_x}{\partial y\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial\varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial\varepsilon_{zx}}{\partial y}\right)$$

$$2\frac{\partial^2\varepsilon_{yz}}{\partial y\partial z} = \frac{\partial^2\varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2\varepsilon_z}{\partial y^2} \qquad \frac{\partial^2\varepsilon_y}{\partial z\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial\varepsilon_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial\varepsilon_{zx}}{\partial y}\right)$$

$$2\frac{\partial^2\varepsilon_{zx}}{\partial x\partial z} = \frac{\partial^2\varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varepsilon_x}{\partial z^2} \qquad \frac{\partial^2\varepsilon_z}{\partial x\partial y} = \frac{\partial}{\partial z}\left(-\frac{\partial\varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial\varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial\varepsilon_{zx}}{\partial y}\right)$$

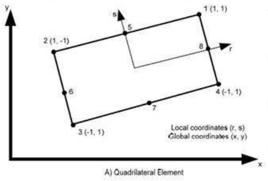
Teorija plastičnosti

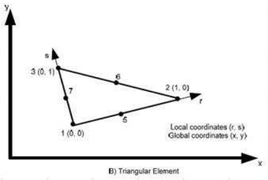
- Dio matematičke fizike kojom se pokušavaju izraziti međusobne ovisnosti naprezanja i deformacija u neelastičnom području, odnosno u području plastičnih deformacija
- Prag između elastičnog i plastičnog područja zadaje se kriterijem čvrstoće
- Deformacije nisu jednoznačno određene jer su znatno složeniji odnosi između naprezanja i deformacija u plastičnom području



Rješavanje sustava metodom konačnih elemenata

- Uvođenje konačnog elementa (četverokutnog i trokutnog sa ili bez sekundarnih točaka)
- Uvođenje pomaka točaka kao veličine polja: {U} – vektor x pomaka i {V} – vektor y pomaka točaka konačnog elementa
- Definicija interpolacijskih funkcija N u točkama: <N> – redni vektor interpolacijaskih funkcija





Rješavanje sustava metodom konačnih elemenata

- Distribucija pomaka unutar konačnog elementa

$$\boldsymbol{u} = < N > \{U\} \qquad \boldsymbol{v} = < N > \{V\}$$

- Definicija relativnih deformacija i matrice deformacija $[B]$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{x}} = < \frac{\partial N}{\partial \boldsymbol{x}} > \{U\} \qquad \varepsilon_y = \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{y}} = < \frac{\partial N}{\partial \boldsymbol{y}} > \{V\}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{y}} + \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{x}} = < \frac{\partial N}{\partial \boldsymbol{y}} > \{U\} + < \frac{\partial N}{\partial \boldsymbol{x}} > \{V\}$$

$$\varepsilon = [B]\begin{Bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{v} \end{Bmatrix}$$

Rješavanje sustava metodom konačnih elemenata

- Matrica koeficijenata

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

- Konstitucijski zakon za slučaj dvodimenzionalnog stanja deformacija (ε_z=0)

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \qquad \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [C] \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

Rješavanje sustava metodom konačnih elemenata

- Jednadžba konačnog elementa

$$\int_V [B]^T [C][B] \cdot dV \cdot \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = b\int_V < N >^T dV + p\int_A < N >^T dA + \{F_n\}$$

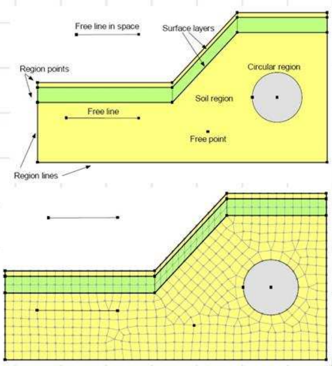
  - b – sile jedinične težine materijala ($\rho\, g$)
  - P – površinski tlak
  - $\{F_n\}$ – koncentrirane sile u čvorovima
- Integracija jednadžbe konačnog elementa u programu SIGMA/W odvija se Gauss-Legendre metodom numeričke integracije
- Rješavanje globalnog sustava jednadžbi u programu SIGMA/W moguće je direktnom metodom (Gaussova metoda eliminacije) i metodom komprimiranja matrice

Postavljanje modela i zadavanje ulaznih veličina

- Postavljanje modela
  - Postavljanje geometrije modela
  - Diskretizacija modela - podjela modela na određeni (konačni) broj elemenata jednostavnih geometrija
  - Određivanje karakteristika konačnih elemenata
- Zadavanje posebnih konstrukcija i mreža konačnih elemenata
  - Gredni i štapni elementi
  - Interface elementi
  - Mreža površinskih i produljenih rubnih elemenata
- Odabir modela materijala i zadavanje pripadnih značajki
- Zadavanje rubnih uvjeta

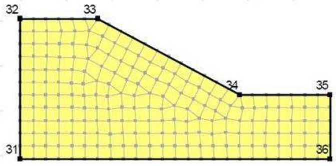
Postavljanje modela

- Postavljanje geometrije modela
  - Zadavanje točaka
  - Kreiranje poligona
  - Kreiranje slobodnih linija i točaka
- Diskretizacija modela
  - Određivanje vrste mreže i vrste konačnih elemenata
  - Određivanje gustoće mreže

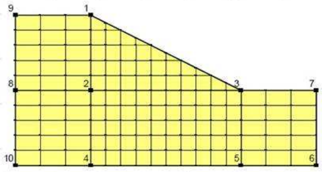


Vrste mreža

- Mješovita nestrukturirana mreža konačnih elemenata četverokutnih i trokutnih oblika

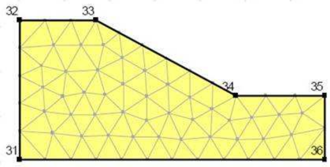


- Mješovita strukturirana mreža konačnih elemenata četverokutnih, trapeznih i trokutnih oblika

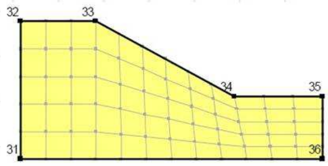


Vrste mreža

- Nestrukturirana mreža trokutnih elemenata

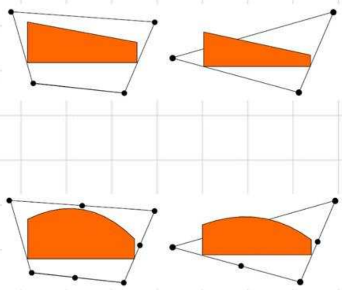


- Kvadratna mreža četverokutnih elemenata



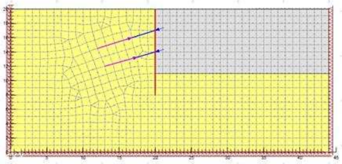
Karakteristike konačnih elemenata

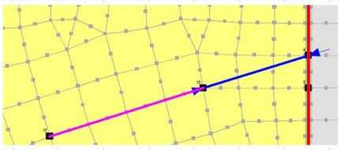
- Oblik i red konačnih elemenata određuju broj čvornih točaka
- Stupanj slobode određen je brojem primarnih varijabli
- Distribucija primarnih varijabli ovisi o redu konačnog elementa
- Ukupan broj jednadžbi sustava direktno ovisi o broju čvornih točaka i stupnju slobode
- Sekundarne varijable određuju se u Gaussovim točkama integracije



Zadavanje posebnih konstrukcija i mreža konačnih elemenata

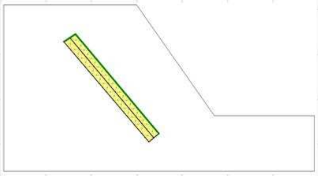
- ❑ Gredni elementi
  - Sastavni dio mreže konačnih elemenata duž cijele dužine segmenta
  - Normalna krutost
  - Krutost na savijanje
- ❑ Štapni elementi
  - Sastavni dio mreže konačnih elemenata samo preko čvornih točaka segmenta
  - Normalna krutost

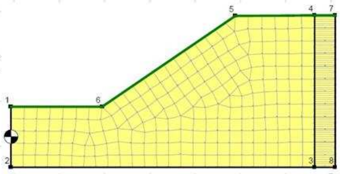




Zadavanje posebnih konstrukcija i mreža konačnih elemenata

- ❑ Klizni elementi (model klizne plohe, diskontinuitet)
  - Klizni element pridružen određenoj liniji
  - Klizni element pridružen elementima mreže generiranih uz određenu liniju
- ❑ Mreža površinskog sloja
- ❑ Mreža s produljenim rubnim elementima



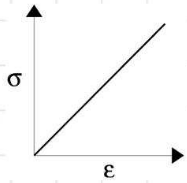


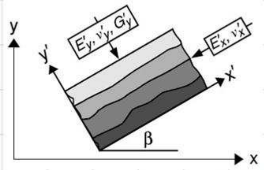
Konstitutivni modeli materijala

- ❑ Null model – koristi se za materijal koji se isključuje iz proračuna
- ❑ Linearno elastični modeli
  - Izotropno elastičan model
  - Anizotropno elastičan model
- ❑ Nelinearno elastičan (hiperboličan) model
- ❑ Elasto-plastičan model
- ❑ Cam-clay model
- ❑ Model klizne plohe
- ❑ Dodatni model – posebno definirani model od strane korisnika

Linearno elastični modeli

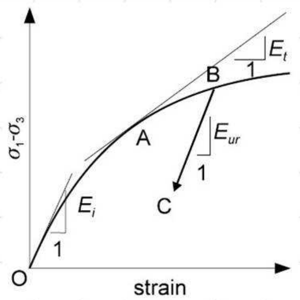
- Izotropno elastičan model materijala
  - Modul elastičnosti E
  - Poissonov koeficijent ν
- Anizotropno elastičan model materijala
  - Moduli elastičnosti E_x, E_y
  - Poissonovi koeficijenti ν_x, ν_y
  - Modul smicanja G_{xy}
  - Kut ravnine anizotropije β





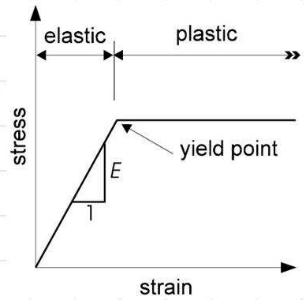
Nelinearno elastičan (hiperbolični) model

- Početni modul elastičnosti E_i koji funkcijski ovisi o naprezanju σ_3
- Tangentni modul elastičnosti E_t koji funkcijski ovisi o početnom modulu E_i, posmičnoj čvrstoći i mobiliziranoj posmičnoj vrijednosti
- Modul rasterećenja-opterećenja E_{ur} koji se uzima kao početni modul elastičnosti E_i



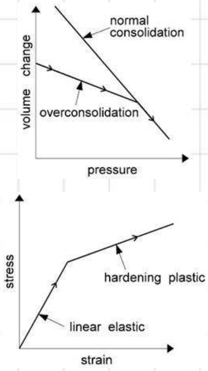
Elasto-plastičan model

- Deformabilnost
  - Modul elastičnosti E
  - Poissonov koeficijent ν
- Kriterij tečenja
  - Kohezija c
  - Kut unutarnjeg trenja φ
  - Kut dilatacije ψ
- Razvoj deformacija ε_p definira se preko funkcije plastičnog potencijala
- Mogućnost promjene parametara u kapilarnom području



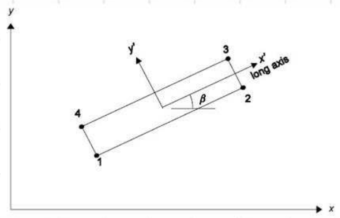
Cam-clay model

- ❑ Deformabilnost
  - Nagib linije normalne konsolidacije λ
  - Nagib linije prekonsolidacije κ
  - Poissonov koeficijent ν
  - Početna vrijednost koeficijenta pora e_0
- ❑ Kriterij očvršćivanja
  - Nagib linije kritičnog stanja u p-q dijagramu M
- ❑ Stupanj prekonsolidacije OCR



Model klizne plohe

- ❑ Deformabilnost
  - Normalna krutost elementa K_n
  - Tangencijalna ili posmična krutost elementa K_t
- ❑ Nagib klizne plohe β

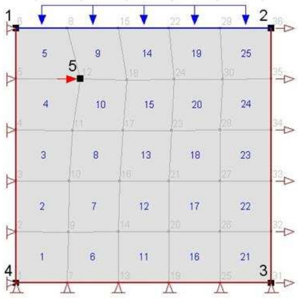


Rubni uvjeti

- ❑ Svrha rubnih uvjeta – postavljanje fizikalnih i projektnih uvjeta u kojima se promatrani model nalazi
- ❑ Pozicije definiranja rubnih uvjeta – točke i linije po rubu modela te slobodne točke i linije unutar mreže konačnih elemenata
- ❑ Vrste rubnih uvjeta
  - Osnovni rubni uvjeti – odnose se na uvjete koji se zadaju preko primarnih varijabli (pomaci i sile)
  - Izvedeni rubni uvjeti – odnose se na uvjete koji se zadaju preko sekundarnih varijabli (naprezanja i tlak)
- ❑ Stalni i promjenjivi rubni uvjeti tijekom faza proračuna

Rubni uvjeti

- Pomaci
  - Zadani pomaci u smjeru osi x ili y
  - Nulti pomaci ili pričvršćenje točaka u smjeru x i y
- Sile
  - U smjeru osi x
  - U smjeru osi y
- Naprezanja
  - Normalna ili posmična
  - Horizontalna ili vertikalna
- Tlak vode



Vrste proračuna

- Proračun "in situ" ili početnog stanja naprezanja – proračun za primarno stanje naprezanja, odnosno opterećenja od vlastite težine materijala, u kojem se za izračun vrijednosti vertikalnih i horizontalnih naprezanja koristi samo gustoća materijala i Poissonov koeficijent
- Proračun opterećenja i deformacija – proračun naprezanja i deformacija uslijed promjena opterećenja, svojstva materijala, izgradnje ili iskopa te uvjeta u kojima se promatrani model nalazi
  - Zadavanje početnog stanja s obzirom na uvjete naprezanja, deformacija i pornog pritiska (najčešće pomoću rješenja za početno stanje ili posebnog zadavanja)

Vrste proračuna

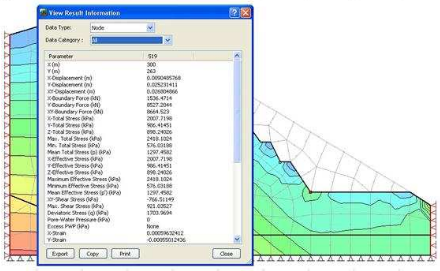
  - Zadavanje dodatnih opterećenja i konstrukcija, promjena svojstva materijala te uvjeta s obzirom na stanje naprezanja i deformacija te promjena rubnih uvjeta
- Posebni tip proračuna kao što je preraspodjela naprezanja u slučaju elasto-plastičnog materijala, kad se u pojedinim točkama dobivaju naprezanja veća od čvrstoće materijala, ili dinamičkih opterećenja
- Simultani (udvojeni) proračuni – višefazni naizmjenični proračuni, kao na primjer proračun procjeđivanja te naprezanja i deformacija u slučaju procesa konsolidacije

Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- Izvješće tijekom i nakon provedbe proračuna
- Pregled izračunatih vrijednosti u pojedinim čvornim točkama na karakterističnim pozicijama modela
  - Provjera zadanih vrijednosti u točkama rubnih uvjeta
  - Pregled i ocjena izračunatih vrijednosti najznačajnijih veličina
- Kreiranje grafičkih prikaza rješenja karakterističnih veličina
  - Grafički prikazi raspodjela (naprezanja, deformacija, pomaka, pornih pritisaka,...)
  - Vektori pomaka i deformacija mreže modela
  - Dijagrami izračunatih vrijednosti za odabrani niz točaka
- Vrednovanje (ocjena) dobivenih rezultata proračuna u odnosu na postavke i zakonitosti teorije elastičnosti i plastičnosti, modela materijala te fizikalnih uvjeta

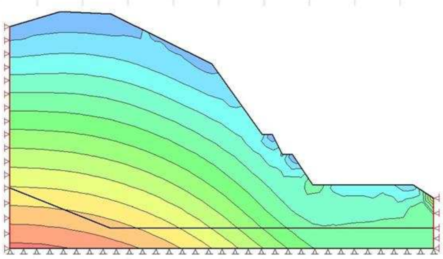
Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- Pregled izračunatih vrijednosti u pojedinim čvornim točkama na karakterističnim pozicijama modela



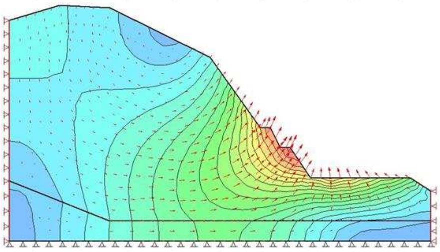
Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- Raspodjela naprezanja $\sigma_1{}'$ (ukupna, efektivna, σ_x, σ_y, τ_{xy}, σ_1, σ_2, τ_{12})



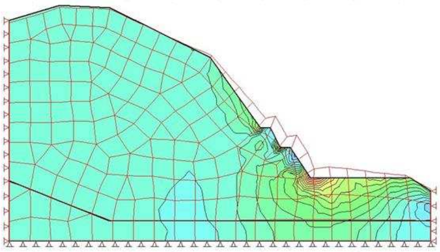
Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- Raspodjela pomaka točaka $u_x v_y$ (u_x, v_y, $u_x v_y$) s prikazom vektora pomaka



Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- Raspodjela deformacija materijala ε_{xy} (ε_x, ε_y, ε_{xy}) s prikazom deformirane mreže modela



Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna

- Dijagrami izračunatih vrijednosti za odabrane točke ili niz točaka