

INVERZNÍ ANALÝZA NAPĚTÍ A TENZOR PORUŠENÍ HORNINOVÉHO MASÍVU

Horninový masív zahrnuje několik sad spár, které v podstatě charakterizují mechanické chování masívu. Účinky spár, rozmístěných v horninovém masívu, jsou příliš složité. Aby je bylo možno hodnotit zjednodušeným způsobem, uvažujeme rozdělené spáry charakterizované symetrickým tenzorem druhého řádu - tenzor porušení. V mnohých případech, ovšem, neobdržíme dostatek informací o spárách z povrchového pozorování, takže tenzor druhého řádu nelze přesně stanovit. Za takových okolností mohou být prospěšné informace získané palnými zkouškami horninového masívu. K přesnému hodnocení aplikujeme metodu identifikování tenzoru druhého řádu z pozorování v přírodních podmínkách - měření in situ - pomocí inverzní analýzy. Postup inverzní analýzy je formulování mechaniky puklinatosti horninového masívu a je použit v matematickém modelování, například v metodě konečných prvků (MKP).

V tomto článku se zabýváme novými konstitutivními vztahy k analyzování mechanického chování nespojitých horninových masívů. Mechanické chování horninového masívu všeobecně lze analyzovat pomocí mechanického modelu, založeného na mechanice kontinua, kdežto u nespojitého modelu používáme užitečné prvky puklinatosti. Prvky jsou efektivní plocha povrchu, nesoucí vektor napětí redukovaný spárami, takže vektor napětí je změněn a tenzor napětí působící na porušené oblasti se stane odlišným od tenzoru ve spojitěm tělese. Napětí v porušeném tělese nazýváme "čisté napětí". Jestliže spáry nenesou žádnou sílu, je tenzor čistého napětí dán transformací Cauchyho tenzoru napětí. Metoda je založena na anizotropních konstitutivních vztazích ve výpočtu matematického modelování, například metoda konečných prvků: tenzor porušení, matice pro převod porového tlaku na prostorovou sílu, matice odvodnění, matice porovitosti, matice propustnosti, matice tuhosti, vektor posunu, vektor celkového vodního spádu, vektor síly a hydraulický vektor. Použitá metoda umožňuje objasnit rozdíl mezi rozvolněnými oblastmi a plastickými zónami horninového masívu v důsledku postupu technologických staveb, například podzemní stavby, svahové zářezy a prohloubení stavební jámy. Při uvedené technologii se může vyskytnout rozvolněná nebo plastická zóna v závislosti na geologických a hydrogeologických podmínkách, soustavě spár, mechanických charakteristikách materiálů, počátečním napětí a dokonce na metodě technologického postupu staveb a jejich založení.

Rozvolněnou oblast lze definovat jako zónu, ve které mají všechny nespojitosti tendenci otevírat se nebo klouzat podél určitých kluzných ploch, v důsledku uvolnění napětí způsobeného technologickým postupem výstavby. Na druhé straně plastická zóna se vyskytuje v horninovém masívu pod velkým počátečním napětím. V této plastické zóně vyhovuje stav napětí například kritériím Druckera-Pragera a podobně, která jsou obecně udávána v pojmech napětí.

Je třeba konstatovat, že rozvolněné a plastické zóny se sotva rozlišují v analýze matematického modelování. Je to způsobeno hlavně tou skutečností, že konstitutivní zákon znázorňující mechanické chování rozvolněného horninového masívu obecně používá týž typ kritéria pro analýzu jak rozvolněných, tak plastických zon. Jelikož mechanismus výskytu obou rozdílných zon není stejný, musí se brát zvláštní zřetel na rozlišování jednoho od druhého. Proto zde zavádíme nové konstitutivní vztahy, používané v analýze matematického modelování, které mohou rozlišovat mezi rozvolněnými a plastickými zónami. Metoda je založena na skupině konstitutivních vztahů pro anizotropní materiály. Všechny vstupní údaje a parametry obsažené v těchto nových konstitutivních vztazích, lze určit zpětnou analýzou výsledků měření in situ.

Jako aplikaci na praktické problémy zde uvádíme příklady z různých lokalit v Praze.

Numerický příklad inverzní analýzy napětí: provádí se dvojrozměrová analýza porušení pro zatěžovací zkoušku (deska) a její využití pro vstupní údaje matematického modelování metodou konečných prvků. Máme horninu značné puklinatosti z lokality výstavby z pražské oblasti při založení stanice metra a budování Strahovského tunelu (viz diagram 1). Každá spára v horninových masívech má tvar rovinný a sestává potenciálně z vlastních prvků horniny. Nespojitosť uvažujeme na rozhraní těchto základních prvků. Tenzor porušení horninového masívu je definován pro i -tou sadu spár dle vzorce.

$$[H] = \frac{b}{O} N^i a^k (n^k \otimes n^k) \quad (1)$$

příčemž:

- O je objem horninového masívu
- \otimes označuje tenzorový součin
- N je počet ploch spár obsažený v objemu horninového masívu
- a^k, n^k - povrchová plocha a její jednotkový normální vektor k -té spáry
- b je délka základního horninového bloku
- H je hustota definovaná poměrem plochy celkové spáry k ploše celkového horninového masívu

Napětí v porušené hornině se nazývá "čisté napětí". Jestliže spáry nenesou žádnou sílu, je tenzor čistého napětí dán transformací Cauchyho tenzoru napětí dle vzorce.

$$[\tilde{\sigma}] = [\sigma] + [\sigma (I - H)^{-1} H] \quad (2)$$

příčemž:

- I je tenzor identity druhého řádu

Při analýze konečných prvků pomocí teorie porušení, obdržíme virtuální práce při porušení tělesa a dostáváme následující vzorec:

$$[\tilde{\sigma}] = [D] [B] [U_k] \quad (3)$$

U_k je posun odpovídající neporušení horniny

B, D - matice deformace posunu

Dále vektor přídatné síly F je následující:

$$[F] = [G] [(I - H)^{-1}] [H] \quad (4)$$

G je matice s m sloupci a l řadami

Použitím metody nejmenších čtverců můžeme rozložit tenzor porušení na tenzory pro každou sadu spár. Dle diagramu jedna, modul do 5 000 MPa, uvádíme dvě sady spár pod úhlem 45 a 60 stupňů (značná puklinatost). Zde pro stanovení tenzoru porušení horninového masívu pro vstupní údaje MKP je třeba postupovat dle níže uvedeného vzorce.

$$[H] = \sum_{i=1}^j [H^i] \quad (5)$$

Při zatěžovací zkoušce desky o ploše 5 000 cm² a 2 000 cm² (dle diagramu) byla stanovena číselná hodnota tenzoru porušení pro dvě sady spár následovně.

$$H = \begin{vmatrix} 0,283 & 0,200 & 0.000 \\ 0.259 & 0.283 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Používáním této metody bylo analyzováno mechanické porušení a získány užitečné informace při projektování stavby Strahovského tunelu v Praze.

Numerický příklad rozlišení mezi rozvolněnou a plastic-kou zónou při analýze matematického modelování (metoda konečných prvků):

Uvažujeme malý prvek, který obsahuje nespojitou rovinu. Přírůstkový vztah napětí a deformace vyjadřujeme následovně, přičemž uvedená konstitutivní rovnice představuje rozvolněnou zónu.

$$[\Delta \sigma'] = [D'] [\Delta \epsilon] \quad (7)$$

kde D' rovná se následujícímu: a) viz diagram 1, b) n rovná se poměru E₁ ku E₂, c) m rovná se poměru G₂ ku E₂

Při stanovení rovnice plastické zóny podle teorie plasticity ukazuje hornina tendence klouzat podle dvou skupin potenciálních kluzných rovin z různých úhlů (vnitřní tření) od směru maximálního hlavního napětí. Vztah napětí a deformace pro každou skupinu kluzných rovin je přírůstková deformace ze skupiny dvou kluzných rovin. Následující konstitutivní rovnice, představuje plastické chování horninového masívu a dává dobrý souhlas s výsledky měření in situ v různých lokalitách pražského metra.

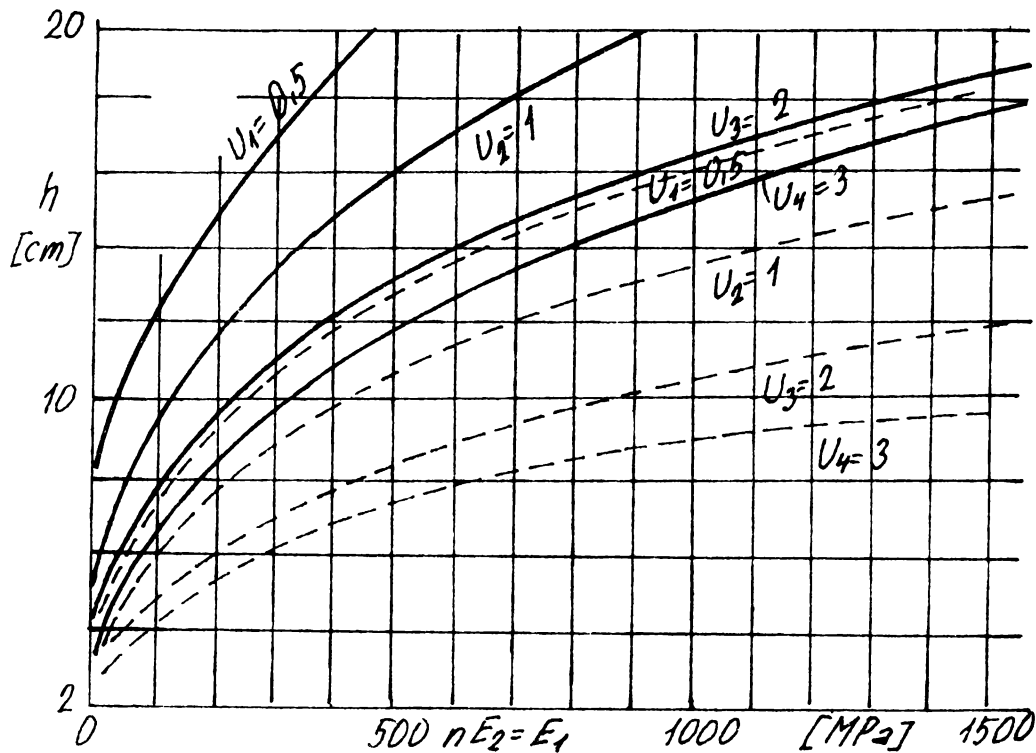
$$[\Delta \sigma] = [D] [\Delta \epsilon] \quad (8)$$

$$\text{kde } [D] = \left[-\frac{1}{2} \left\{ (D_1)^{-1} + (D_2)^{-1} \right\} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$[D] = M \begin{vmatrix} C & R & 0 \\ S & L & 0 \\ 0 & 0 & T \end{vmatrix} \quad \text{Kde: } C = n(1 - n\alpha_2^2), \quad L = 1 - \alpha_2^2$$

$$R = n(\alpha_2(1 + \alpha_1)), \quad S = n(\alpha_2(1 + \alpha_1))$$

$$M = \frac{E_2}{(1 + \alpha_1)(1 - (\alpha_1 - 2n\alpha_2^2))}, \quad T = n(1 + \alpha_1)(1 - (\alpha_1 - 2n\alpha_2^2))$$



Obr. 1 Zatěžovací zkoušky desky - vstupní údaje
MKP, kruhová ocelová deska: (—) plocha
5 000 cm², (----) 2 000 cm², ohebnost U_n

Příklad: Strahovský tunel o průměru 13 m, značné rozpukání (šárecké), tloušťka desky t=12 cm, U₄ = 3, plocha 5 000 cm², E₀ = 300 MPa, E₁ = 500 MPa, H (viz vzorec 6), m = 0,12, n=0,85, α₁ = 0,27, α₂ = 0,31, mez kluzu = 0,03 MPa, vrcholová smyková pevnost (horninový blok) $\tilde{\sigma}_{xy} = 50$ KPa, φ = 29°, vrstevnatost $\tilde{\sigma}_{xy} = 15$ KPa

- Seznam literatury: /1/ NAZARI F. - Following the impact of technological procedures, KOVS, (3), VUT Brno, svazek B, 1989
/2/ NAZARI F. - La stabilité de l'épuisement d'un tunnel, Tunnels et Microtunnels, Paris 1989, Actes du colloque o. a P.
/3/ NAZARI F. - Příspěvek k modelování při výstavbě Strahovského tunelu, Numerické metody v geomechanice, ČSAV, Bulletin č. 14 - 1989
/4/ NAZARI F. - Reverse Stress Analysis Method, Symposium, Bad Honnef/Rhein - West Germany, 1989
/5/ NAZARI F. - Metoda zpětné analýzy napětí při posouzení podzemní konstrukce EAN, červen 1989 Nitra
/6/ NAZARI F. - Chování systému kotvených pilotových stěn, IV. vědecká konference Rozvoj výpočtových metod, Košice ČSVTS 1989

Ing. Ferydun Nazari, CSc., VUT Brno, Barvičova 85, 602 00 Brno