



Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Geotechnický monitoring – učební texty, přednášky
Metody a zásady vyhodnocování monitorovacích měření,
inverzní analýza

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.

21. Metody a zásady vyhodnocování monitorovacích měření, inverzní analýza

21.1 Metody a zásady vyhodnocení monitorovacích měření

Zpracování a vyhodnocení výsledků monitorovacích měření je v současné době již obvykle nemyslitelné bez využití výpočetní techniky, umožňující základní tabulkové nebo grafické vyhodnocení naměřených hodnot. Na toto základní vyhodnocení monitorovacích měření pak mohou v případě potřeby navázat další vyhodnocovací metody - metody statistické, metody regresní a inverzní analýzy.

Cíle vyhodnocení výsledků měření lze obecně shrnout do následujících bodů:

- vyhodnocení časového průběhu monitorované veličiny
- vyhodnocení rychlosti popř. zrychlení změny monitorované veličiny
- stanovení trendu vývoje monitorované veličiny, prognóza budoucího vývoje
- inverzní analýza pro stanovení charakteristik horninového prostředí, které mohou dále přispět k objektivizaci odpovídajícího matematického modelu
- definice hodnot varovných stavů v návaznosti na projektové řešení

Při zpracovávání výsledků měření je důležité vzít v úvahu všechny objektivní i subjektivní faktory, které mohou daná měření ovlivňovat a které se pak různou měrou odrážejí v chybách a nepřesnostech výsledků měření.

Mezi základní zdroje chyb patří:

- chyby plynoucí z technického principu samotného monitorovacího zařízení
- nevhodná volba monitorovacího zařízení (z hlediska rozsahu, citlivosti, apod.)
- nevhodná prostorová instalace monitorovacího zařízení
- nesprávná technická instalace zařízení
- nezkušenost a nedostatečná připravenost obsluhujícího personálu, provádějící samotné odečítání výsledků měření
- změna klimatických poměrů (vlhkost, teplota)

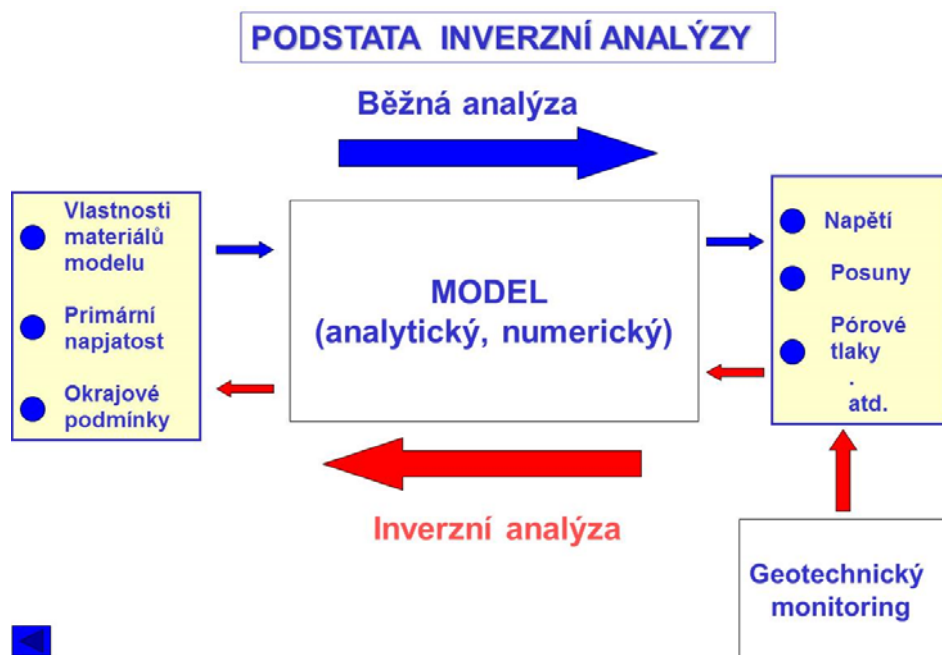
Při zohledňování výše zmíněných chyb ve vyhodnocení výsledků měření je třeba postupovat s velkou citlivostí, znalostí dané problematiky a velkou odpovědností. Nesprávné a neobjektivní vyloučení domněle nepravděpodobných a neobvyklých hodnot z vyhodnocovaného souboru dat a následné analýzy by totiž mohlo znemožnit včasné zachycení nebezpečného chování monitorovaného horninového prostředí. Pokud ke zmíněné datové filtraci dojde, je nutno tuto skutečnost zaprotokolovat a ponechat možnost tuto filtraci popřípadě v budoucnu dále korigovat. K minimalizaci vlivu chyb a nepřesností měření ve vyhodnocování monitorovacích měření je optimální monitorovat danou veličinu dvěma na sobě nezávislými způsoby a dvěma na sobě nezávislými subjekty. Při formulaci závěrů plynoucích z monitorovacích měření a jejich následného zpracování je třeba vždy důsledně rozlišovat, zda se jedná o dlouhodobější trend ve vývoji monitorované veličiny, náhlý výkyv v chování horninového prostředí indikující výraznější stabilitní problémy nebo se jedná pouze o sezónní výkyv, chybu měření či jinou nepravidelnost nepříliš velkého významu.

21.2 Inverzní analýza

Inverzní (zpětná) analýza je určitým vyvrcholením celého procesu kontrolního sledování. Vychází z výsledků monitorovacích měření (např. posunů, pórových tlaků) v horninovém prostředí a na jejich základě pak provádí modifikaci vstupních charakteristik modelu s cílem dosáhnout co největší shody mezi naměřenými hodnotami a hodnotami stanovenými použitým matematickým modelem. Spolehlivost inverzně stanovených materiálových parametrů velkou měrou závisí na spolehlivosti a objektivitě výchozích monitorovacích měření využívaných pro inverzní analýzu.

Součástí realizace inverzní analýzy:

- stanovení cílů inverzní analýzy
- specifikace nároků na geotechnický monitoring
- vypracování algoritmu inverzního modelu
- realizace geotechnického monitoringu
- vytvoření databáze naměřených hodnot
- provedení samotného inverzního výpočtu



Obr. 21.1 Schéma principu inverzní analýzy

21.2.1 Metody inverzní analýzy

Obecně lze postupy inverzní analýzy rozdělit na postupy:

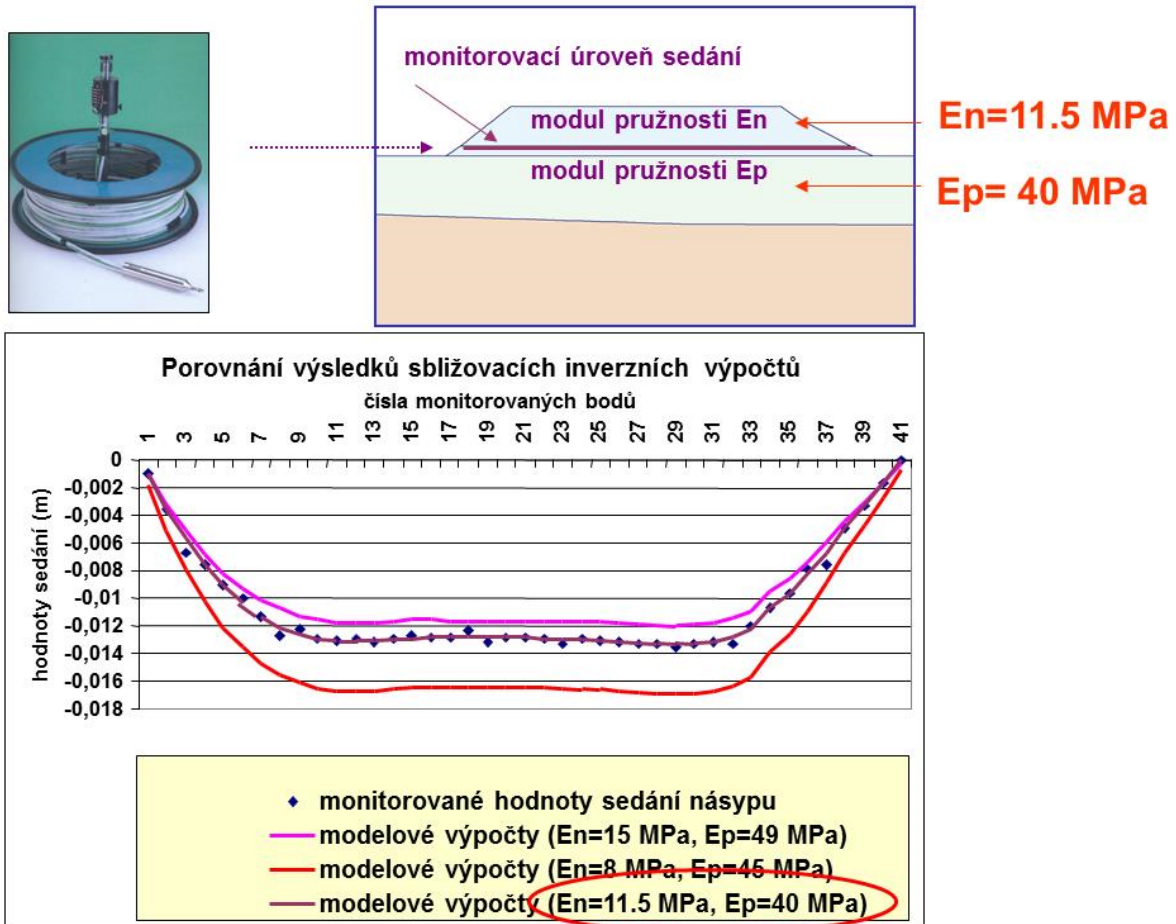
- sbližovací
- graficko - početní optimalizační postupy
- postupy s využitím přímých optimalizačních postupů

21.2.1.1 Sbližovací metody inverzní analýzy

V případě numerických modelů pro řešení stabilitních úloh svahových těles, kdy řešení dostáváme v diskrétním tvaru nikoliv ve tvaru funkce, jsou využívány sbližovací inverzní postupy. Tyto postupy jsou založeny na sérii postupných sbližovacích parametrických výpočtů s různými kombinacemi vstupních parametrů. Cílem je stanovení takové jejich optimální kombinace, která svým vlivem v daném modelu determinuje chování přibližující se chování reálného systému v některých monitorovaných hodnotách (např. posunů v určitých bodech). Tato metoda, z formálního hlediska jednoduchá, však vyžaduje velmi zkušeného realizátora této inverzní analýzy, který by efektivně posoudil citlivost celého modelu vůči určitým

vstupním parametrům modelu. V opačném případě může být tato metoda inverzní analýzy zdlouhavá, neefektivní a nevede k žádoucím výsledkům.

SBLIŽOVACÍ INVERZNÍ METODY



Obr. 21.2 - Princip sblížovací metody inverzní analýzy pro stanovení pružnosti materiálu násypového tělesa a jeho podloží

21.2.1.2 Zjednodušené graficko-početní optimalizační metody inverzní analýzy

Mezi tyto inverzní metody patří např.:

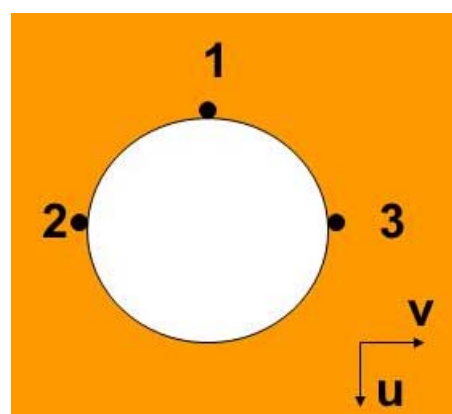
- Graficko – analytický postup pro stanovení přetvárných parametrů horninového prostředí (Gioda 1987)
- Inverzní postup pro stanovení pevnostních parametrů zemin při ztrátě stability svahu s využitím metod mezní rovnováhy (Saito, Yamagami (1984))

21.2.1.2.1 Graficko – analytický postup pro stanovení přetvárných parametrů horninového prostředí (Gioda 1987)

Při realizaci inverzní analýzy založené na numerických metodách modelování lze rovněž použít dále uvedený graficko - analytický postup dle GIODY (1987), založený na těchto krocích (např. pro určení E a ν):

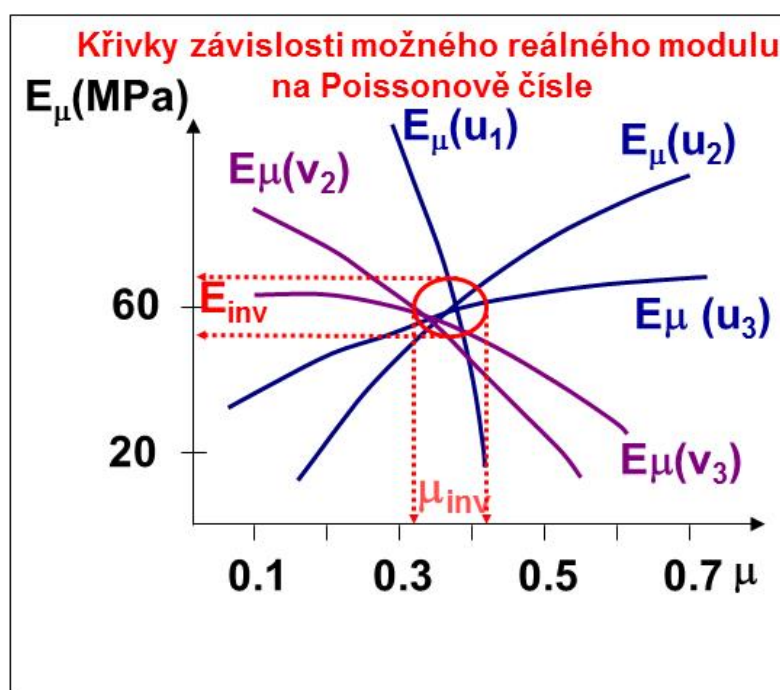
1. Proveďte se určitý počet výpočtů metodou konečných prvků při různých hodnotách Poissonova čísla ν a pro modul pružnosti $E = 1$. Naměřené složky posunů (radiální u_i , tangenciální v_i , $i = 1, \dots, m$) označme δ_i^* a jim odpovídající složky posunů získané příslušným výpočtem označme $\delta_i(\nu)$.
2. Pro v_i , $i = 1, \dots, m$ a pro příslušná ν se stanoví optimální modul pružnosti $E_i(\nu) = \delta_i(\nu) / \delta_i^*$
3. Graficky se vyhodnotí závislost optimálního modulu pružnosti E na Poissonově čísle ν a dostáváme tak soustavu křivek dle obr. 15.1.

Optimální hodnota modulu pružnosti E_C pak odpovídá průsečíku uvedených křivek. Zkonstruované křivky mohou být ovlivněny nezanedbatelnými chybami měření, což způsobuje, že se všechny nemusí protínat v jednom bodě a proto se uvažuje „aproximovaný“ průsečík. Tato metoda ukazuje rovněž vhodnost rozmístění měřících bodů v horninovém masivu. Jestliže některé dvě z uvažovaných křivek mají podobný tvar, poskytují jim odpovídající měření v podstatě stejné informace o materiálových charakteristikách horninového masivu a jedno z těchto měření je tedy možno vyloučit.



vektor hodnot
vypočtených modelem
(posuny, napětí, apod.)
 $u=(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$

vektor monitorovaných hodnot
in situ (posuny, napětí, apod.)
 $u^*=(u_1^*, u_2^*, u_3^*, \dots, u_n^*)$



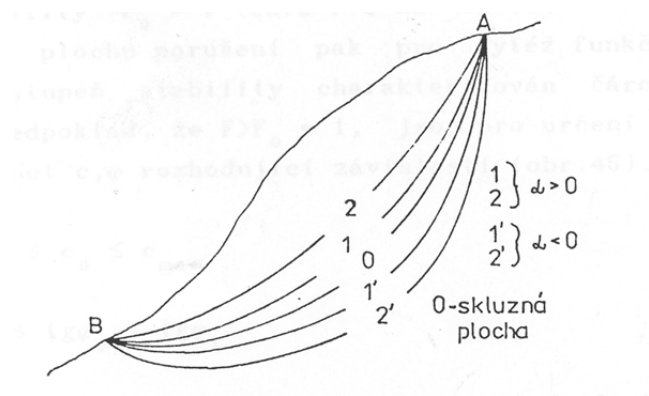
Obr.21.3 – Graficko - analytický postup inverzní analýzy (Gioda)

21.2.1.2.2 Inverzní analýza pro stanovení pevnostních parametrů zemin

Mezi inverzní postupy lze zařadit i následující graficko - početní metodu, využívající metod mezní rovnováhy pro zpětné určení pevnostních parametrů zemin při ztrátě stability svahu. Na rozdíl od klasických inverzních postupů sice nevychází z monitorovaných hodnot měření v horninovém prostředí, ale vzhledem ke shodě cílů tohoto postupu s klasickými inverzními metodami může být rovněž zařazen mezi postupy zpětné analýzy.

Tento inverzní postup, publikovaný Saito (1980) a Yamagami (1984), je založen na těchto předpokladech:

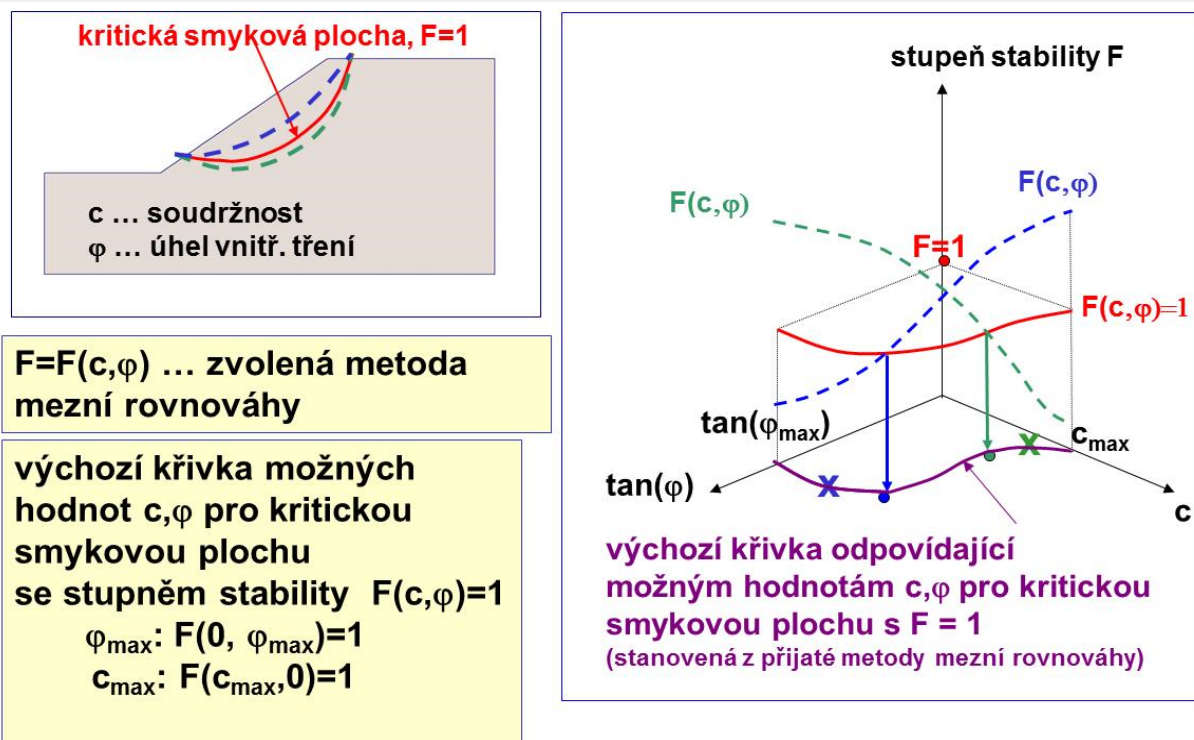
1. Svah je složen z pevnostně homogenní horniny
2. Existuje pouze jedna plocha porušení, na které došlo ke ztrátě stability $F_0 \cong 1$ (prakticky ale F_0 leží v intervalu cca 0,9-1) a tento stupeň stability je minimální hodnotou ze všech F
3. Na každé jiné předpokládané ploše porušení (ležící nad a pod kritickou plochou) je $F > F_0$.



Obr. 15.4 - Schéma možných smykových ploch ve svahovém tělese

4. Pevnostní parametry c_0 a φ_0 musí odpovídat svým vzájemným poměrem závislosti $c = f(\varphi)$, stanovené ze vztahů charakterizujících metodu výpočtu stability pro kritickou smykovou plochu, tj. pro $F_0 \cong 1$.

Teoreticky tyto předpoklady znamenají, že při respektování hodnot c a φ ze závislosti $c = f(\varphi)$ pro kritickou plochu porušení pak jakoukoliv funkční dvojici hodnot φ a c , bude stupeň stability $F_0 = 1$ (červená křivka). Pro jinou předpokládanou plochu porušení pak pro tytéž funkční dvojice φ a c bude stupeň stability charakterizován odlišnou čarou (označena zeleně popř. modře).



Obr. 21.5 - Princip inverzní metody

Nejdůležitějším krokem pro aplikaci této metody je určení výchozí závislosti $c = f(\varphi)$. Tuto křivku je možno určit iteračním postupem z rovnice pro výpočet příslušného stupně stability dle určité metody mezní rovnováhy.

21.2.1.2.3 Přímé optimalizační inverzní postupy

Přímé optimalizační postupy inverzní analýzy, využívající při řešení inverzních výpočtů analytické podmínky pro stanovení extrému funkce vzhledem k neznámým materiálovým parametrům horninového prostředí, jsou vhodné zejména v případě, kdy lze monitorovanou veličinu explicitně vyjádřit pomocí funkčního stavu, do něhož neznámé materiálové parametry vstupují.

Princip přímých optimalizačních postupů vychází ze základní obecné podmínky inverzní analýzy:

$$\min_{\vec{p}} \sum_{i=1}^n (h_i(\vec{p}) - h_i^*)^2, \quad \vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_k), \quad \vec{h} = (h_1, h_2, \dots, h_n), \quad \vec{h}^* = (h_1^*, h_2^*, \dots, h_n^*)$$

($\vec{p}$ je k - rozměrný vektor inverzně stanovených charakteristik prostředí, $\vec{h}$ je n - rozměrný vektor hodnot vypočtených modelem, $\vec{h}^*$ je n - rozměrný vektor monitorovaných hodnot).

Aplikací podmínky pro stanovení extrému funkce dostáváme výchozí vztah přímých optimalizačních postupů inverzní analýzy:

$$\frac{\delta \sum_{i=1}^n (h_i(\vec{p}) - h_i^*)^2}{\delta p_j} = 0, j = 1, \dots, k$$

Aplikace přímých optimalizačních postupů inverzní analýzy vede tedy k řešení soustavy k rovnic pro k neznámých charakteristik horninového prostředí, přičemž tato soustava rovnic může být v závislosti na tvaru analytického modelu jak lineární, tak i nelineární.

Spolehlivost inverzně stanovených charakteristik závisí samozřejmě velkou měrou na spolehlivosti a objektivitě výchozích monitorovacích měření využívaných pro inverzní analýzu.