

## PHOTOELASTICINETRICKÁ ANALÝZA NAPJATOSTI HŘEBOVANÝCH KOLMÝCH SVAHŮ

### Úvod

Příspěvek obsahuje řešení napjatosti kolmých svahů, které v tomto případě představují otevřené stavební jámy pro výstavbu podzemních děl. Tyto svahy, zajišťované postupně při odkrývání vodorovnými hřebíky nahrazují technologicky náročnější „Milánské stěny“ nebo např. otevřené stavební jámy se šikmými svahy. Cílem práce, na základě požadavku Metrostavu, bylo zjištění napjatosti homogenních kolmých svahů s gravitačním zatížením pro různá Poissonova čísla materiálu svahu ( $\mu = 0,2; 0,3; 0,4$ ).

Pro analýzu napjatosti bylo použito modelové řešení na opticko-citlivých rovinných modelech s využitím metody odstředivého modelování a zmrazování napětí - viz /1/. Modelová metoda, tak jak byla užita řeší pružnou napjatost spojitého prostředí svahů za předpokladu homogenity a izotropie materiálu svahu.

### Modelování

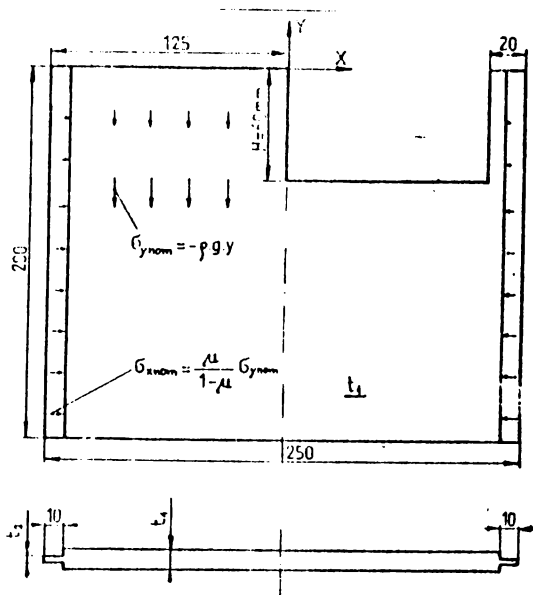
Rovinné modely modelují situaci ve svislém řezu, kolmém na podélnou osu svahu. V takovém řezu existuje stav rovinné deformace, který je experimentálně těžko proveditelný. Úlohu však lze řešit na základě analogie mezi rovinnou deformací a rovinnou napjatostí jako úlohu rovinné napjatosti, nahradíme-li Laméovu konstantu konstantou Filonovou. Z toho vyplývají vztahy pro modul pružnosti a Poissonovo číslo materiálu modelu řešeného při stavu rovinné napjatosti:

$$\bar{E} = \frac{E(1+2\mu)}{(1+\mu)^2}; \quad \bar{\mu} = \frac{\mu}{1+\mu} \quad (1)$$

Uvolníme-li ještě rovinný model na jeho okrajích (boční tlak - aplikujeme silově), je napěťový stav v daném případě nezávislý na materiálových konstantách modelu  $E$  a  $\mu$ . Vliv Poissonova čísla materiálu skutečného svahu byl však modelován nepřímo velikostí bočního tlaku  $\sigma_x = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_y$  na svislých okrajích modelu.

Pružná rovinná napjatost svahů byla analyzována jako funkce geometrického tvaru a zatížení, odvozeném od vlastní tíhy. Celkem byly řešeny tři varianty kolmých svahů stejné geometrie pro tři různá Poissonova čísla skutečného materiálu svahu ( $\mu = 0,2; 0,3; a 0,4$ ). Výkres modelů hřebovaných svahů je na obr.1.

Jednotlivé modely se liší pouze různou šířkou bočních okrajů. Tato různá šířka okrajů umožňuje po uložení do speciálního zatěžovacího zařízení, umístěného i s modelem v kabině odstředivky, modelovat požadovaný přímkově proměnný



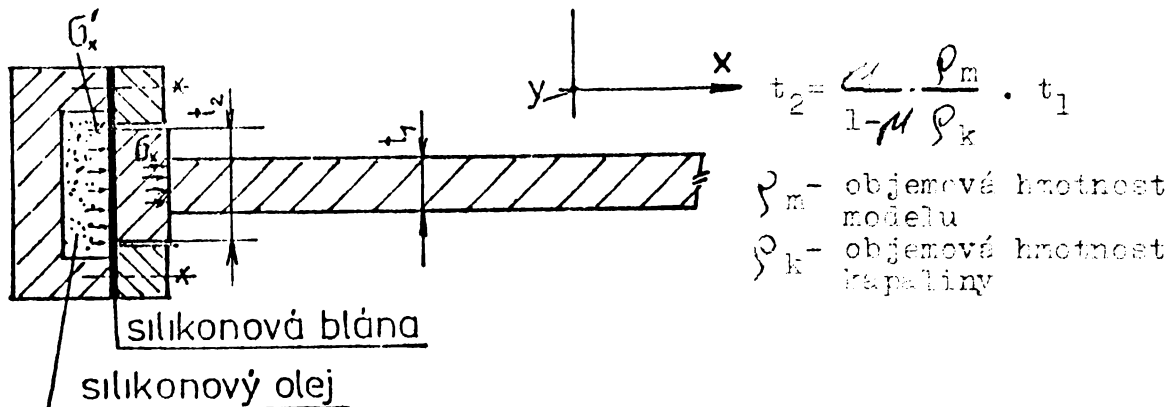
Obr.1 Optickocitlivé modely hřebovaných svahů

Model 8906 -  $\mu=0,2; t_1=10,45; t_2=3,4$

Model 8903 -  $\mu=0,3; t_1=9,8; t_2=5,8$

Model 8905 -  $\mu=0,4; t_1=10,45; t_2=9,1$

boční tlak  $\sigma_{\text{xpom}}$  podle Poissonova čísla masivu. Schema tohoto zařízení ve vodorovném řezu modelem je patrné z obr.2.



Obr.2 Schema zařízení pro boční tlak

K výrobě modelů bylo použito desek žloutčky 9,8 a 10,45 mm, odlité z epoxidové pryskyřice CHS 15, tužené anhydridy dikarbo-  
nových kyselin maleinové a ftalové ve standardním poměru.

K zatížení a zmrazení modelů byla použita fotoelastici-  
metrická odstředivka s poloměrem otáčení  $r_0 = 2500$  mm. Otáčky  
při zmrazování byly  $n = 220 \text{ min}^{-1}$  pro model 8905 a 8906, eventu-  
álně  $n = 205 \text{ min}^{-1}$  pro model 8903, což dává přetížení  $g_{\text{rot}}/g = 147,8$ ,  
event. 127,4.

Současně modely svahů byly v odstředivce zatěžovány a  
zmrazeny referenční modely s vodorovným povrchem, z kterých je  
včetně možné určit tzv. konstantu C, zahrnující fyzikálně mecha-  
nické a optické vlastnosti modelového materiálu a odstředivé  
rychlosti působící na model. Fyzikální význam konstanty C je  
daný vztahem [1]:

$$C [\text{m}^2] = \frac{K}{\rho_m \cdot r_0 \cdot \omega^2}, \quad (3)$$

kde  $C$  - optická citlivost  $[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$

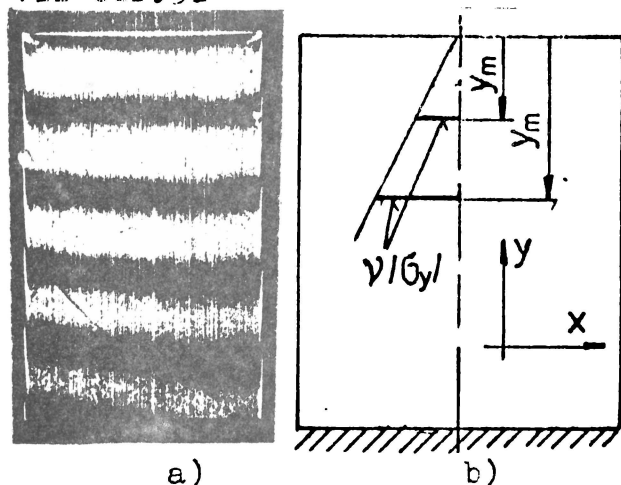
$\rho_m$  - objemová hmotnost modelového materiálu [kg.m<sup>-3</sup>]

$r_G$  - efektivní poloměr otáčení modelu [m]

Umožní dokázat - viz /1/, že z výše zmíněných referenčních modelů lze konstantu C určit přímo, aniž bychom znali hodnoty jednotlivých parametrů v rovnici (2) ze vztahu:

$$C [m^2] = \frac{y_m [m]}{\nu(\sigma_y) [m^{-1}]}, \quad (3)$$

neboli je to poměr souřadnice y referenčního modelu a změřeného dvojlomu v témže bodě, přepočteného na tloušťku 1 m - viz obr.3.



Obr.3

a) Fotografie izochromat referenčního modelu.

b) Schema pro určení konstanty C.

Pro skutečnou napjatost svahů platí potom z teorie podobnosti vztah:

$$\sigma_s = \frac{1}{I_m} \cdot \rho_s \cdot g_s \cdot C \cdot \nu, \quad (4)$$

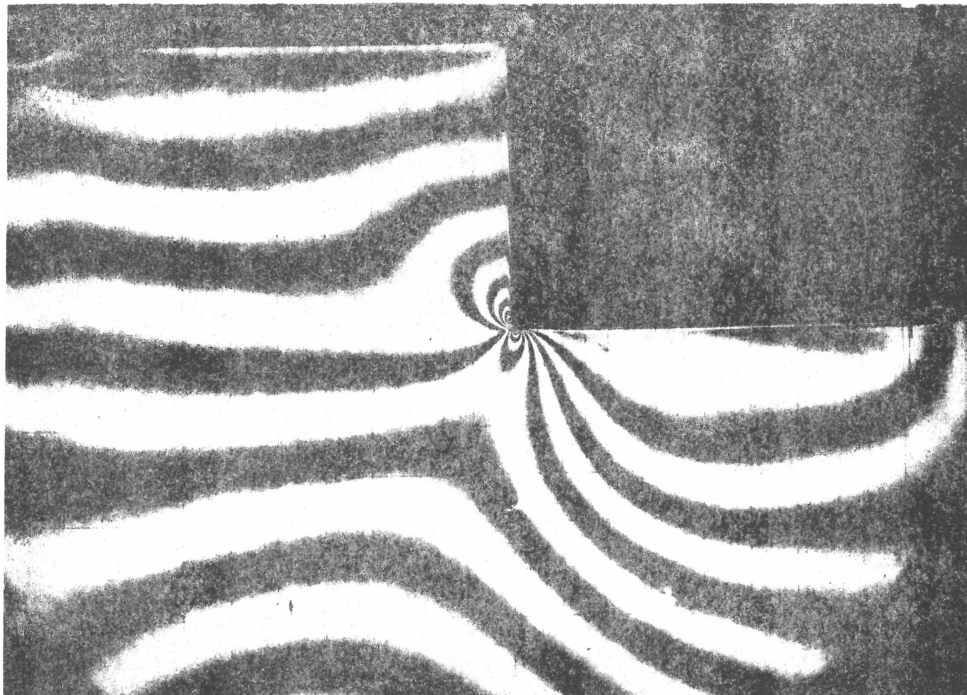
$\nu$  je modelové napětí v jednotkách dvojlomu na 1 m.

#### Výsledky měření

Zmrazené modely byly vyhodnoceny běžnými fotoelastickými metodami. Fotografie izochromat jednoho modelu jsou patrné z obr.4. Kromě obvodových napětí, izokřivek maximálních smykových napětí a izostat, zjištěných přímo měřením byla ve vnitřní oblasti svahu provedena úplná analýza napětí  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ . K tomuto účelu byla použita metoda rozdílů smykových napětí. Pro tuto metodu byl vypracován výpočetní program umožňující určovat úplnou napjatost rovinných modelů na PC v jazyku BASIC.

Potřebné informace o modelech jsou uloženy pod příslušnými názvy na disketě nebo harddisku. Po vyvolání daného souboru se na displeji zobrazí schematický tvar modelu se sítí měřených bodů. Výpočet lze provádět z libovolného bodu ve směru x resp. y. Zadájí se souřadnice výchozího a konečného bodu a počáteční hodnota  $\sigma_x$  resp.  $\sigma_y$ . Integrovaná cesta se na displeji zobrazí šipkou.

Výpočet diferencí  $\Delta \tau_{xy} / \Delta y$  resp.  $\Delta \tau_{xy} / \Delta x$  probíhá podle zobecněného vztahu eliminujícího chyby 2. řádu i pro nekonstantní vzdálenosti souměrných řezů. Metoda výpočtu napětí je volitelná-numericke integrace lichoběžníkovou



Obr.4 Izochromaty celých řádů, model 8906,  $\mu = 0,2$ .

metodou, integrace náhradní polynomické funkce. Výsledky obou fází výpočtu se zobrazí graficky na displeji. Po opravě případných chyb se vypočtou všechny potřebné veličiny a výsledky se vytisknou do tabulky. Hodnoty  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_1, \sigma_2, \tau_{xy}, \varphi$  v daném řezu je možno zobrazit i graficky.

Seznámil literatury: /1/ MÁLEK J.- Určování napjatosti skalních svahů pomocí optickocitlivých modelů, výzkumná zpráva ÚGG ČSAV Praha, 1984 /2/ MÁLEK J.- Fotoelasticimetrický výzkum napjatosti hřbetovaných svahů, zpráva ÚGG ČSAV Praha, 1989