

Deformácie povrchu pri výstavbe podzemných priestorov

Jana Chabroňová¹

A deformation of surface during the construction of underground spaces

The tunnelling in cities with a low overburden leads to a ground movement. Relations between these deformations and the operating depth are not linear and simple; they depend on a lot of factors. An important task is to identify the sources of these settlement and to understand the mechanism of their creation for the construction of underground structures. The modelling of each stress state can simplify their understanding and reduce the problems ensued from the ground movement.

Key words: tunnelling, analysis of settlement, deformation factors, rock massive

Úvod

Pri výstavbe podzemného diela razením môžu vzniknúť nežiaduce deformácie. Tieto deformácie vznikajú po otvorení výrubu zmenou pôvodného stavu napätosti. Vzťah medzi povrchovým sadnutím a pracovnou hĺbkou nie je jednoduchý, ani lineárny, pretože tam vstupujú ďalšie faktory. Inžiniersko – geologický prieskum nevystihne vždy podmienky razenia, čo prináša ďalšie problémy, z ktorých môžu vyplynúť pretvorenia. Preto je dôležité poznať zdroje deformácií a mechanizmus ich vzniku pri razení podzemných objektov. Modelovanie jednotlivých možných zaťažovacích stavov nám uľahčí ich pochopenie a tým obmedziť problémy, ktoré by tým mohli vzniknúť.

Deformácie vyplývajúce z horninového prostredia

Tunelovaním sa poruší primárny stav napätosti. Táto zmena stavu napätosti je sprevádzaná okamžitými konvergenciami čela výrubu ako aj celého prierezu. Pri špecifických prípadoch v mäkkých zeminách môže táto zmena napätia spôsobiť aj dlhodobjšie konvergence. Veľkosť, orientácia a poloha deformácií okolo tunela závisí od fyzikálno - mechanických vlastností prostredia, geostatickej napätosti, zaťaženia povrchu, hydrogeologických podmienkach, technológii razenia a od výšky nadložia. Ak výška nadložia h je menšia ako 2,5 násobok priemeru pričného rezu podzemného diela, deformácie sa s veľkou pravdepodobnosťou prejaví na povrchu (obr. 1). V niektorých oblastiach sa môže redistribúciou napätí prekročiť pevnosť prostredia (horniny, zeminy), a tým sa môžu vyskytnúť aj miestne deformácie. V týchto miestach sa vytvoria plastické zóny so zvýšenými konvergenciami. Vznik týchto zón je nebezpečný pre zabezpečenie výrubu a pre limitnú hodnotu konvergence.

Pri nedostatočne zabezpečenom výrube sa zvýšené konvergence okolo výrubu môžu rozšíriť od oblasti porušenia ďalej.

Pozorovanie čela a následne celkového výrubu nám poskytuje informácie - vstupné hodnoty pre odhad deformácií, ako aj pre určenie opatrení na ich zamedzenie.

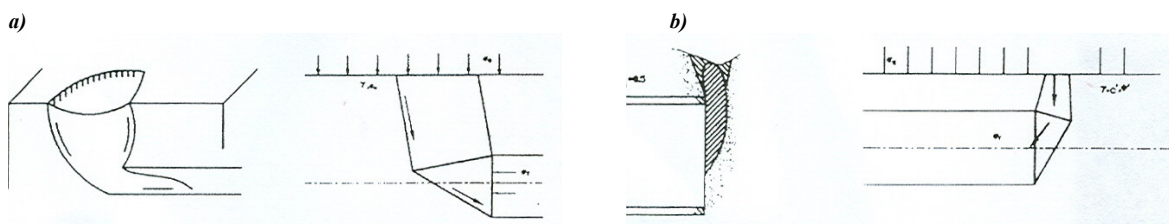
Stabilita čela výrubu

Stabilita čela výrubu môže veľa napovedať o najproblematickejších poruchových zónach. Pomocou zaznamenaných parametrov môžeme skúmať správanie sa horninového resp. zeminového prostredia. Na vznik poruchových zón je citlivejšie zeminové prostredie, ktorému sa venuje väčšia pozornosť. Zeminové prostredie sa delí na súdržné a nesúdržné a z toho nám vyplývajú pri razení podzemných priestoroch dve základné typy porúch.

Obrázok 1a zobrazuje tvar poruchovej zóny pre jemnozrnné – súdržné (ilovité) zeminy. Na povrchu vytvára porucha kráter širší, ako je priemer pričného rezu razeného prierezu. V prípade nesúdržných – sypkých zemín sa vytvorí komínový efekt (obr. 1b.) Na obrázkoch 1. a 2. sú zobrazené typické modely porúch a generálne smery deformácií horninového prostredia pre dané zeminové prostredie.

Veľa prác sa zaoberá modelovaním stability čela. Aj keď sa snažia robiť analýzu extrémnych prípadov, parametre vstupujúce do výpočtov musia byť pre daný model overované.

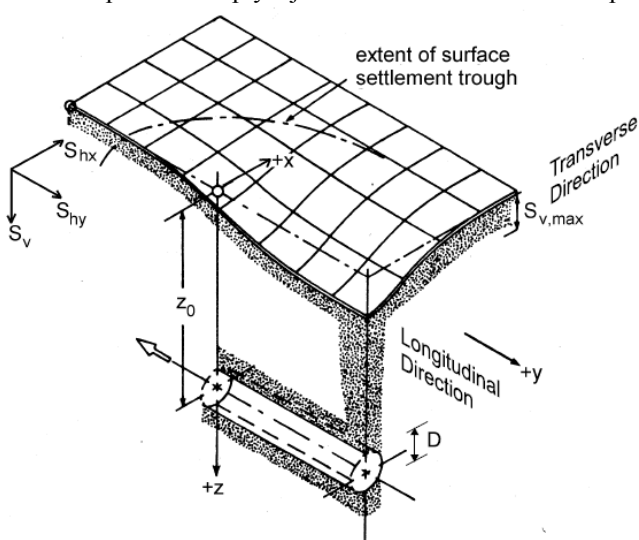
¹ Ing. Jana Chabroňová, PhD., STU Bratislava, Stavebná fakulta, Katedra geotechniky, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, Slovenská Republika, jana.chabronova@stuba.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 8. 1. 2007)



Obr. 1. Tvar poruchovej zóny pre jemnozrnné (a) a sypké zeminy (b).
Fig. 1. Face collapse for clayish (a) and granular (b) soils.

Dôležité parametre pre hodnotenie stability horninového prostredia podzemných priestorov

Veľkosť a rozloženie deformácií (obr. 2) vytvorených na povrchu razením závisia okrem iných na horninovom (zeminovom) prostredí (nehomogenita, pretvárnosť, anizotropia, hydrogeologické podmienky). Dôležité parametre vplyvajúce na stabilitu horninového prostredia počas razenia sú:



- geometria prierehového rezu,
- výška nadložia,
- dĺžka záberu,
- primárna napätosť,
- fyzikálne parametre zeminy,
- zaťaženie nadložia,
- hladina podzemnej vody.

Základný parameter, ktorý sa hodnotí pri určovaní rizík stability čela výrubu, je faktor zaťaženia N , ktorý je definovaný pre každé horninové (zemínové) prostredie.

Obr. 2. Tvar poklesového koryta.
Fig. 2. Settlement trough face.

Jemnozrnné zeminy – íly

Pre čisté íly faktor zaťaženia N je definovaný ako:

$$N = \frac{\gamma H}{c_u}$$

H – hĺbka osi podzemného diela,
 γ – objemová hmotnosť zeminy,
 c_u – totálna súdržnosť.

Ďalšie parametre, ktoré môžu byť zvažované pri stabilitných úvahách sú:

$\frac{h}{D}$ vyjadruje vplyv podmienok stability alebo $\frac{\gamma D}{c_u}$ - pravdepodobnosti porúch v čelbe.

h – výška nadložia nad korunou klenby,
 D – priemer výrubu.

Vo všeobecnosti faktor zaťaženia N môžeme napísať ako:

$$N = \frac{\gamma H + \sigma_S - \sigma_T}{c_u}$$

σ_S – zaťaženie povrchu,
 σ_T – tlak vyvinutý na podoprenie čela výrubu.

Takýto tvar faktoru zaťaženia N použijeme v prípade, že povrch je zaťažený a čelo výrubu je podopreté tlakom σ_T . Zo skúseností sa ukazuje, že ak sa faktor N nachádza v intervale od 5 – 7 je veľká pravdepodobnosť výskytu porúch pri tunelovaní.

Jemnozrnné zeminy – hliny

Z analýzy podmienok stability v súdržných zeminách (šmyková pevnosť charakterizovaná uhlom vnútorného trenia a súdržnosťou) vyplynuli štyri základné hodnotiace parametre:

$$\frac{\gamma H}{\sigma_c}; \frac{\gamma D}{\sigma_c}; \frac{\sigma_T}{\sigma_c}; \phi'$$

kde
$$\sigma_c = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad \phi' - \text{uhol vnútorného trenia}$$

Sypké (nesúdržné) zeminy

Sypké zeminy nemajú trvalejšie stabilný výrub. Aj keď sa občas v týchto zeminách ukáže súdržnosť, je časovo obmedzená. V týchto zeminách je zložitejšie načrtnúť nejaké závery pre stabilitu. Rovnako ako pri ostatných zeminách deformačné parametre a anizotropia vplyvajú na veľkosť a rozšírenie poklesovej kotliny na povrch.

Skalné horniny

V skalných horninách pevnosť horninového prostredia býva málo kedy prekročená zvýšenými napätiami privedeného razenia. Stabilita výrubu je spojená s vlastnosťami horninového masívu (vrstevnatosť, charakter diskontinuit atď.).

Konvergenie výrubu

Okrem stability čela výrubu na deformácie horninového prostredia vplyvajú aj konvergenie priečného rezu výrubu, veľkosť ktorých obmedzuje primárne ostenie.

Fenner – Pacherova krivka vystihuje vplyv ostena na konvergenie (vplyv tuhosti výstroja a zabudovanie v čase).

Deformácie spôsobené raziacimi prácami

Deformácie pozdĺž razenia sa začínajú už v určitej vzdialenosti pred čelom výrubu a pokračujú do stabilizácie výrubu. Jedným zo zdrojov deformácií sú aj metódy razenia. Rozoznávame z hľadiska deformácií dve základné skupiny:

- Cyklické razenie na princípoch NRTM (konvenčné, trhavinové razenie, metóda striekaného betónu)
- Kontinuálne razenie pomocou TBM (raziace stroje, štíty)

Konvenčné razenie

Pri konvenčnej metóde razenia zdroje deformácií môžeme rozdeliť do 4 skupín:

- deformácie vyvolané správaním sa čela výrubu,
- deformácie z dočasného výstroja (povaha a podmienky zabudovania),
- deformácie spojené s pracovným postupom (členením priečného rezu),
- deformácie vyplývajúce z trvalého ostena.

Pozorovanie čela výrubu patrí medzi základné činnosti monitoringu. Správanie sa čela výrubu má priame prepojenie medzi pohybmi pred čelom razenia (začiatok, stupeň deformácie). Voľba dočasného výstroja patrí medzi najdôležitejšie úlohy projektu z hľadiska deformácií horninového prostredia. Určujú sa 2 základné parametre dočasného výstroja:

- Nominálna tuhosť výstroja, ktorá sa používa aj vo výpočte jeho únosnosti,
- Čas zabudovania výstroja od otvorenia výrubu.

Kombinácia týchto dvoch parametrov definuje celkovú schopnosť primárneho ostena odolávať konvergenciám. Teoretickú únosnosť ostena je nutné overiť v reálnych podmienkach. Z hľadiska etapovitosti prác môžeme vplyvy na deformácie horninového prostredia rozdeliť do týchto skupín:

- členenie čela výrubu,
- zabudovanie ostena (časový faktor),
- uzavretie celého priečného rezu (rýchlosť a vzdialenosť od čela výrubu).

Rýchle zabudovanie primárneho ostenia môže prispievať ku pozdĺžnemu prerozdeleniu zaťaženia a tým obmedzeniu deformácií.

Ostenie odoláva deformáciám tuhosťou výstroja a schopnosťou spolupôsobiť s horninou. Tento vplyv je dôležitý hlavne pre podzemné diela s nízkym nadložím a veľkým rozpätím.

Kontinuálne razenie

Deformácie, ktoré vznikajú pri kontinuálnom razení (pomocou raziacich strojov a štítov) môžeme rozdeliť do 4 častí:

- deformácie pred a nad čelom výrubu,
- deformácie pozdĺž stroja,
- deformácie vyvolané za strojom – pri chýbajúcej výplni,
- deformácie vzhľadom na vychýlenie ostenia.

Deformácie v čelbe sú spojené s posunmi zeminového prostredia pred (strata opory čela výrubu) a nad štítom. Tieto deformácie závisia od obmedzenia zeminového prostredia raziacim strojom resp. štítom a hydraulických pomerov prostredia v čele.

Deformácie pozdĺž raziaceho stroja resp. štítu vyplývajú z týchto štyroch zdrojov:

- Vybočenie rozpojovacích prostriedkov vŕtacej hlavy mimo obvod.
- Problémy so smerovaním stroja hlavne jeho výškové a smerové razenie.
- Priečny prierez štítu.
- Drsnosť okraja, ktorý môže spôsobiť deformácie koruny klenby a pred štítom.

Za štítom sa vytvorí medzi zeminou a segmentovým ostentím priestor, ktorý je nutné vyplniť. Je tvorený z týchto častí:

- Vonkajšia medzera na zníženie trenia pozdĺž štítu.
- Hrúbka koncovej časti plášťa štítu, ktorá závisí od typu plášťa (jednoduchý dvojité) a priemeru tunela.
- Medzera medzi vnútorným plášťom štítu a vonkajším okrajom uzavretého ostenia.

Veľkosť deformácií povrchu závisí od dôkladného vyplnenia tohto priestoru. Tento priestor vzniká ak je segmentové ostenie inštalované pod ochranou štítu. Pri montáži ostenia mimo plášť, tento priestor nemusí vzniknúť.

V prípade betónového prefabrikovaného ostenia montovaného pod plášťom štítu a jeho zatlačením hydraulickými lisami štítu radiálne sú deformácie prstenca obmedzované potrebnou hrúbkou.

V prípade pružného ostenia (liatinové segmenty) sa môžu vyskytnúť deformácie z vajcovitého tvaru prstenca, ktoré sa vytvoria dodatočné sadnutím.

Výskyt hladiny podzemnej vody

Otvorením výrubu v horninovom prostredí sa menia hydrogeologické pomery a to územie je stavebným dielom odvodňované. Jedná sa o zníženie hladiny podzemnej vody pri výstavbe a zamýšľané alebo nezamýšľané odvodnenie masívu vyrazenou tunelovou rúrou. Účinok je plošný a siaha do väčšej vzdialenosti

Vplyv pracovných podmienok

Deformácie z pracovných podmienok sa môžu objaviť počas vŕtacích prác a odvoze rúbaniny. Stratou objemu z vibrácií v rôznych typoch zeminy, alebo pri zlej kvalite výplňových vrstiev. Takéto deformácie vznikajú pri všetkých metódach razenia.

Modelovanie deformácií vyvolaných razením

Deformácie od tunelovania môžeme rozdeliť podľa dĺžky ich trvania na krátkodobé, stredné a dlhodobé pohyby. V každom z týchto režimov je vytvorený stav napätosti ako odpoveď na daný zaťažovací stav prostredia na zmeny vo vnútorných resp. vonkajších podmienkach.

Modelovanie kanalizačného zberača

V roku 1986 bol v Petržalke razený kanalizačný zberač pomocou štítovania a zároveň boli merané deformácie nadložia. Bol použitý štít priemeru DN 2,56 m. V trase sa nachádzal prachovitý piesok s prímiesou štrku s nasledovnými charakteristikami:

Objemová tiaž $\rho = 18,0 \text{ kN.m}^{-3}$; uhol vnútorného trenia $\varphi = 33^\circ$; súdržnosť $c = 0,01 \text{ MPa}$; modul deformácie $E_{\text{def}} = 5 - 15 \text{ MPa}$.

Údaje o deformáciách nadložia pri technológií razenia štítovaním boli spracované v práci Bakoš (1992).

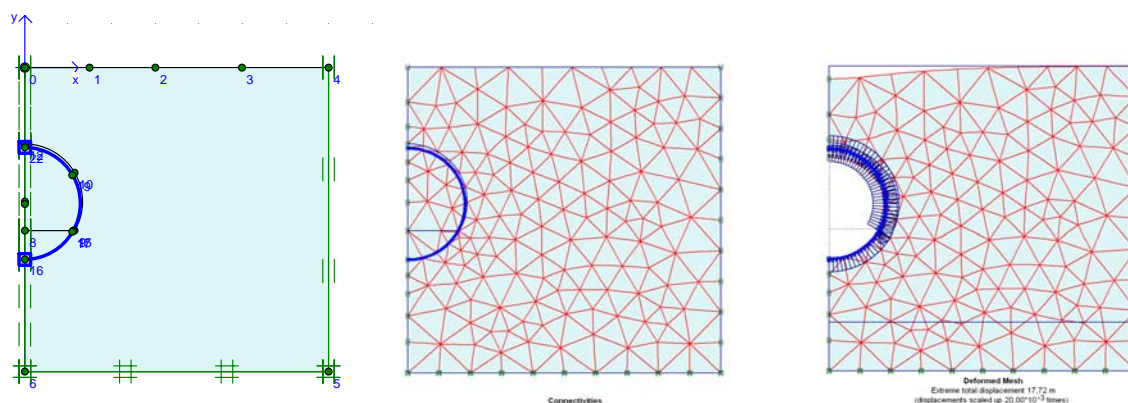
Kanalizačný zberač bol modelovaný pomocou programu PLAXIS 8 model 2D. Pre zeminové prostredie bol použitý model Mohr –Coulomb. Na obrázku 3. je zobrazený základný model, počiatkový stav a 1. zaťažovací stav. Modelovanie poklesovej krivky bolo spracované pre zaťažovací stav, pri ktorom dochádza k otvoreniu výrubu a vzniká nadvýlom z technológie. Veľkosť nadvýlomu bola čerpaná z dizertačnej práce Bakoš (1992)

Výpočty poklesových kriviek (obr. 4) boli urobené pre rôzne hodnoty modulov deformácií E_{def} . Pre porovnanie bola vypočítaná aj poklesová krivka podľa Martosa – Pecka:

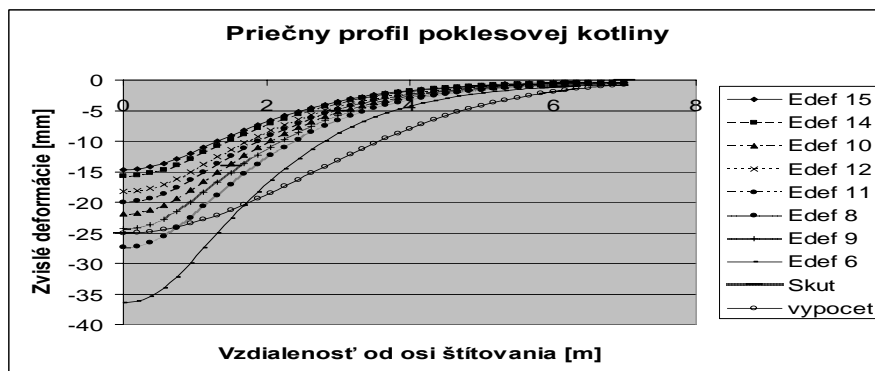
$$S_y = S_{y \max} e^{-\frac{x^2}{2I^2}}$$

kde: $S_{y \max}$ – maximálna hodnota sadnutia povrchu,
 x – vzdialenosť bodu od osi razenia,
 I – inflexný bod vypočítaný podľa Herzoga.

Po vyhodnotení daných priebehov sa najviac priblížila svojim priebehom ku skutočnej poklesová krivka pre modul deformácií $E_{def} = 9 \text{ KPa}$.



Obr. 3. Základný 2D model, počiatkový stav a 1. zaťažovací stav kanalizačného zberača.
 Fig. 3. Basic 2D models, the initial state and the first stress state of the sewerage.



Obr. 4. Priečný rez skutočnej poklesovej kotliny a určených modelovaním a pomocou Peckovej rovnice.
 Fig. 4. Cross section settlement troughs made by modelling and the Peck equation.

Záver

Problematika deformácií horninového resp. zeminového prostredia je stále aktuálnou a veľmi závažnou. Pri vytváraní hustého plošného systému štôlní a tunelov, ktoré sú blízko seba dochádza nielen k deformáciám jednotlivých diel, ale tieto plochy sadania sa môžu spojiť do celkovej deformácie územia nad podzemným úložiskom odpadu, čím sa môže poškodiť. Pri výstavbe podzemných diel je teda dôležité poznať nielen maximálne deformácie nadložia, ale aj šírku deformačnej oblasti, aby bolo možné v dostatočnom predstihu navrhnúť správne a rýchle postupy sanácie možných porúch prípadne zamedziť týmto deformáciám.

Literatúra - References

- Aftes: French tunnelling association – Workshop Nr. 16: Settlement Induced by Tunnelling, 1995.
- Wooi Leang Tan: Parameters and Consicerations in Soft Ground Tunnelling.
<http://www.ejge.com/2003/Ppr0344/Ppr0344.htm>
- Holby, G. T., Bloodworth, A. G., Augarde, C. E.: Transferring a nonlinear finite element code to the Oxford supercomputer, OSCAR. <http://www.dur.ac.uk/charles.augarde/pubs/c6.pdf>
- Bakoš, M.: Deformácie zeminového masívu v trase štítovaných štôlní v geologických podmienkach Bratislavy, *dizertacná práca, Bratislava, 1992.*