

SEGMENTOVÉ OSTĚNÍ TUNELŮ METRA



Dr. Ing. Petr Vitek¹
Hlavní autor



**Doc. Ing. Matouš
Hilar, PhD²**

¹ **Metrostav a.s.**, Na Zatlance 13, 150 00 Praha 5, Czech Republic, www.metrostav.cz
Tel: +420 251 015 552, Fax: +420 251 015 575, Email: petr.vitek@metrostav.cz

² **ČVUT v Praze, Fakulta stavební**, Katedra geotechniky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6,
www.fsv.cvut.cz, Tel: +420 224 354 909, Fax: +420 233 334 557, Email: matous.hilar@fsv.cvut.cz

Abstrakt

Pro výstavbu traťových tunelů metra byl poprvé v ČR využit plnoprofilový tunelovací štít (technologie TBM) a přesné betonové prefabrikované segmentové ostění. Použité segmenty jsou vyrobeny ze železobetonu.

V průběhu stavební činnosti byl vyvinut a testován nový materiál - konstrukční beton vyztužený výhradně rozptýlenou ocelovou výztuží. Materiál byl vyroben v podmínkách běžné výroby, následně testován na vzorcích skutečné velikosti a v závěru byl úspěšně vybudován zkušební úsek ostění.

Nyní je k dispozici materiál, který je plně odzkoušen, k němuž je k dispozici plně funkční výpočetní model, a proto je možné jeho praktické využití.

Klíčová slova: beton s rozptýlenou výztuží, ocelové drátky, tunelové ostění, segment

1 Úvod

Před dvěma lety byly v ČR poprvé nasazeny moderní plnoprofilové tunelovací štíty (technologie TBM) pro ražbu tunelu. Součástí této technologie je výstavba tunelového ostění z přesných betonových prefabrikovaných segmentů. Železobetonové segmenty jsou úspěšně využity pro výstavbu traťových tunelů pražského metra v úseku od stanice Dejvická až po křižovatku Vypich. Ve snaze zjednodušit proces výroby a zlepšit některé parametry prvků byl zahájen vývoj segmentového ostění z drátkobetonu.

2 Filozofie návrhu

Segmenty jsou vystaveny řadě zatěžovacích stavů. Počínaje odformováním, přes manipulace, dopravu, osazování, včetně významného stavu, kdy je smontovaný prstenec zatížený účinky stroje během ražby, až po zatížení horninovým prostředím, které přenáší dlouhodobě. Významným požadavkem na ostění je kritérium odolnosti proti pronikání tlakové vody. Lze tedy říci, že pro návrh jsou rozhodující kritéria 2. skupiny mezních stavů, zejména omezení šířky trhlin.

Železobeton lze považovat za vynikající materiál zejména s ohledem na vysokou únosnost, kdy lze prvek poměrně snadno nadimenzovat uložením potřebného (i většího) množství výztuže. Beton však zůstává dále materiálem křehkým, který se již při relativně nízkých úrovních zatížení porušuje trhlinami, které výrazně snižují vodotěsnost prvku. Zejména problematické jsou trhliny procházející celou tloušťkou ostění.

Naopak beton s ocelovou rozptýlenou výztuží (drátkobeton) má limitovanou únosnost, kdy do betonové směsi lze zamíchat jen určité množství drátků. Při správném promísení se drátky rozmístí rovnoměrně všesměrně. Tento materiál je tedy izotropní a oproti prostému betonu vykazuje větší duktilitu.

Ukazuje se, že v mnohých případech návrhu segmentového ostění jsou uvedené vlastnosti velmi přínosné a drátkobeton je vhodné použít i přes to, že s ním nelze dosáhnout tak vysoké mezní únosnosti.

3 Testování betonu s rozptýlenou výztuží

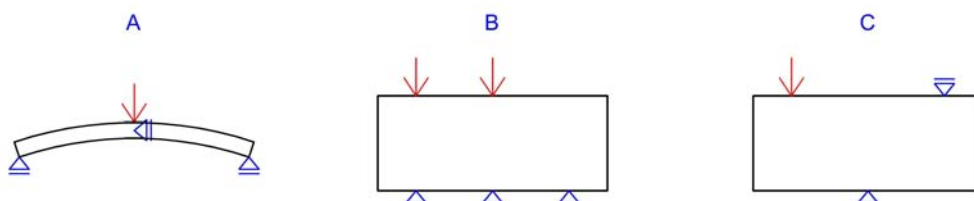
Běžně a dlouhodobě se testují vzorky drátkobetonu na malých trémkách, kdy se zjišťuje zejména pevnost v tahu za ohybu. Uvedené zkoušky rovněž proběhly a byly zjištěny veškeré důležité materiálové charakteristiky včetně lomové energie. Tyto hodnoty se staly pokladem pro sofistikovaný materiálový model, kde je vystiženo nelineární chování materiálů včetně šíření trhlin (software ATENA firmy Červenka Consulting).

Jelikož zejména u drátkobetonu je odezva konstrukce na zatížení závislá na velikosti prvku, byly dále testovány vzorky skutečné velikosti na základní způsoby namáhání, které charakterem odpovídají reálnému zatížení. Výsledky testů byly úspěšně predikovány numerickým modelem.

Přestože jsou segmenty tunelového ostění vystaveny účinkům řady zatěžovacích stavů (např. manipulace, skladování, doprava, instalace, definitivní zatížení, atd.), jsou v praxi zaváděna opatření, aby rozhodující pro dimenzování prefabrikátů byly jen některé z nich. Zásadním návrhovým zatížením je přirozeně zatížení horninovým masivem, které působí po celou dobu životnosti konstrukce. Dalším významným zatěžovacím faktorem je přítlak tunelovacího štítu, který je zatlačován do horninového masivu pomocí hydraulických lisů zapřených o smontované prstence ostění. Jedná se sice o dočasný stavební stav a krátkodobé zatížení, které by z hlediska co nejúspornějšího návrhu nemělo být podstatné. Vzhledem k požadovaným vysokým hodnotám přítlačné síly stroje (závisí na očekávané geologii) hraje daný zatěžovací stav často rozhodující roli při návrhu segmentů. V dané souvislosti je však třeba posuzovat technologii TBM jako celek, kdy potřebná vyšší únosnost ostění je kompenzována řadou výhod razicí technologie.

Pro simulaci rozhodujících návrhových stavů byly navrženy 3 typy zkoušek (označené A, B, C - obr. 1). Podružná návrhová zatížení, která lze mnohdy jen obtížně definovat a tedy modelovat, byla ověřena reálným odzkoušením na zkušebním úseku délky 15 m, který byl

na trase V.A realizován. V testu se podrobně popisují postupy jednotlivých experimentů. Je na místě připomenout, že srovnatelné výsledky byly dosaženy i numerickou analýzou, čímž byly výsledky numerické analýzy úspěšně potvrzeny.

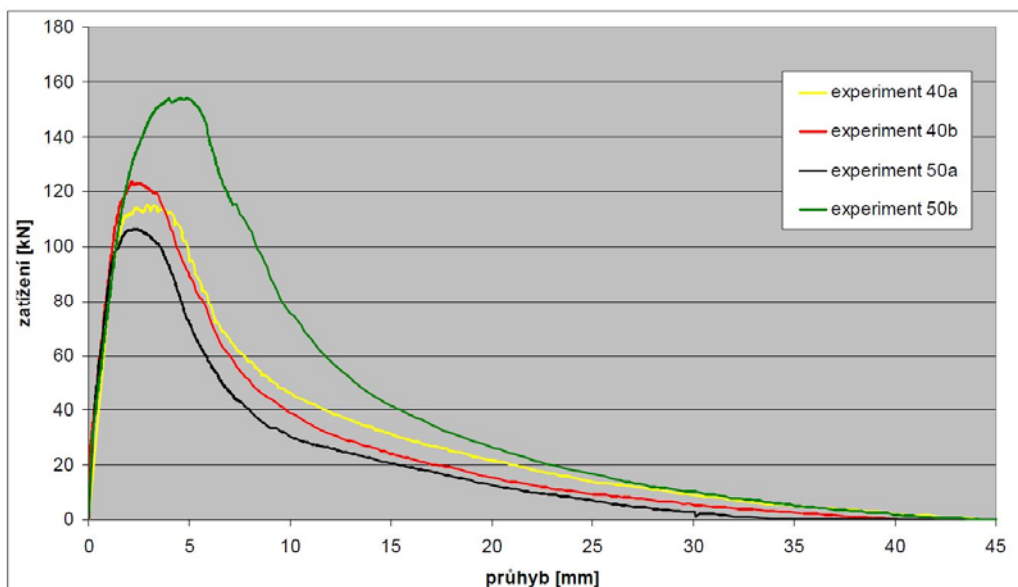


Obr. 1 Schemata uspořádání zkoušek

A. Simulace zatížení horninovým masivem:

Zatížení segmentů ohybem kolmo na rovinu segmentu

Při dané zkoušce byly segmenty zkoušeny v ohybu kolmo na rovinu segmentu, zkouška simulovala namáhání ohybovými momenty při manipulaci, dopravě, skladování a při zatížení tlakem horninového masivu. Segmenty byly položeny zakřivenou částí nahoru, spodní hrany byly podloženy kluznými podporami, které umožňovaly vodorovný pohyb a zabraňovaly svislému pohybu. Zatížení na segmenty vyvolávalo řízenou svislou deformaci po celé délce vrcholu klenby. To znamená, že zatěžovací síla vnášená hydraulickým válcem byla upravována tak, aby deformace na pístu zatěžovacího lisu byla postupně rovnoměrně zvyšována. Zatěžovací síla tedy nejprve rostla a po vzniku trhlin byla snižována až do vyčerpání kapacity tj. okamžiku rozlomení. Celý sofistikovaný systém byl řízen počítačem se speciálním softwarem. Nespornou výhodou zatěžování „řízenou deformací“ bylo získání celého pracovního diagramu včetně sestupné větve (obr. 2). K ukončení zkoušky bylo přistoupeno teprve tehdy, když prvek neunesl svoji vlastní tíhu.



Obr. 2 Pracovní diagram segmentu namáhaného ohybem

Před dosažením maximální zatěžovací síly se v pásu proměnné šířky na spodní ploše segmentu začaly objevovat drobné trhliny, které se postupně rozvíjely a následně se lokalizovaly do jediné trhliny. Ta se postupně rozevírala, čemuž odpovídal příslušný pokles zatěžovací síly. Během rozvírání trhliny bylo možné přímo v trhlíně sledovat postupné vytahování drátků. Bylo zaznamenáno typické šíření trhlín v betonu s rozptýlenou výztuží, kdy se v těsném okolí nejvíce namáhaného průřezu vytváří řada velmi tenkých trhlín, z nichž se jedna později propaguje dále.

Rovněž je zajímavé, že nevyšší a nejnižší únosnosti bylo dosaženo na vzorcích vyztužených 50 kg/m^3 , zatímco vzorky vyztužené 40 kg/m^3 vykazují podobnou únosnost. Hodnoty byly získány vždy jen na dvou vzorcích, nelze je proto považovat za statisticky významné. Přesto se nabízí vysvětlení, že beton s množstvím 50 kg/m^3 drátků je již obtížněji mísitelný, lze tedy obtížněji zajistit rovnoměrné rozptýlení drátků a proto dochází k většímu rozptylu v únosnosti. Zřejmě v případě realizovaných zkoušek byl testován jeden segment s velmi vhodným a druhý segment s velmi nevhodným rozptýlením drátků. Záměrně je použit termín vhodný místo rovnoměrný. Vysoká únosnost může být dána soustředěním drátků při dolním povrchu prvku - tedy v tažené oblasti. To může být způsobeno např. intenzivní vibrací. Nejedná se tedy o jev veskrze příznivý, neboť lze usuzovat, že naopak únosnost při opačném směru namáhání (tah v horní části prvku) bude úměrně snížena. Ve skutečnosti jsou segmenty namáhány v obou směrech.

B. Simulace zatížení axiálními lisy štítu - ideální stav:

Zatížení segmentů prostým tlakem

Na rozdíl od předchozí zkoušky byl segment zatěžován ve svislé poloze a proto byl dobře pozorovatelný vznik trhlín na vnitřním i vnějším líci segmentu. První trhliny se lokalizují na vnitřním povrchu nad nikou pro šroub. Dále se trhliny šíří nikou většinou podél jedné hrany. Je evidentní, že oslabení nikou působí nepříznivě a vede k lokalizaci napětí do hran. Lze tedy konstatovat, že hranatý tvar nik je nevhodný, oblý tvar by byl vhodnější. Během dalšího zatěžování se trhliny rozvíjely směrem dolů v jednom nebo více pásech pod nikou, nebo mírně stranou. Postupně se všechny trhliny rozevíraly, teprve pak se výrazně lokalizovala jedna z nich, kde následně nastalo rozštípnutí prvku příčnými tahy.

Zatížení v prostém tlaku dvěma břemeny

Uspořádání zkoušky bylo obdobné jako v předchozím případě, proto byl obdobný i charakter porušení. Zásadní výhodou této zkoušky byla možnost sledování namáhání segmentu v prostoru mezi zatěžovanými místy. Pro tento prostor byl charakteristický vznik tahových namáhání. Trhliny (nejčastěji jedna malá trhlina) se v této části objevily v raných fázích zatěžování. S rostoucím zatížením se již trhlina nerozevírala, omezovala se výhradně na okraj segmentu a rovněž nebyla významná pro snížení únosnosti prvku. Vznik trhliny mezi zatěžovacími místy byl pouze lokální záležitostí a to přesto, že tato trhlina vznikala jako jedna z prvních. Další rozvoj trhlín byl prakticky identický s případem, kdy bylo zatěžováno jen jedno místo, pouze probíhal téměř paralelně pod oběma zatěžovacími místy. Zkouška končila možnostmi zatěžovacího stroje, který vyvine celkové zatížení do 9 MN, tedy na jedno zatěžovací místo připadala maximální síla 4,5 MN, což je nižší hodnota oproti únosnosti segmentu.

Komparativní zkoušky železobetonových segmentů zatížením v prostém tlaku

Zkoušky byly uspořádány identicky jako v případech drátkobetonových segmentů.

Hodnoty zatížení při vzniku trhlin procházejících celou tloušťkou prvku jsou u železobetonových i drátkobetonových segmentů téměř shodné. Rovněž únosnost klasického železobetonového segmentu je srovnatelná s drátkobetonovým, nicméně způsob porušení je zcela odlišný (obr. 3, 4). Železobetonový segment byl ve všech dosud testovaných případech porušen v ploše rovnoběžné se střednicovou plochou. Došlo tedy k delaminaci materiálu, kdy se při vyčerpání únosnosti oddělila krycí vrstva a uvnitř prvku vzniklo jádro betonu sevřeného výztuží. Při krytí výztuže 5 cm a tloušťce segmentu 25 cm mělo jádro tloušťku pouhých 15 cm.



Obr. 3 Porušení železobetonu



Obr. 4 Porušení drátkobetonu

C. Simulace zatížení axiálními lisy štítu - nerovnoměrné uložení segmentu:

Zatížení segmentů ohybem v rovině segmentu

Tento typ zkoušek je charakteristický nízkými hodnotami sil při nichž začaly vznikat trhliny. Trhliny se lokalizovaly v prostoru nad nikou pro šroub a pak se dále šířily směrem dolů. U segmentů vyrobených z drátkobetonu bylo možné pozorovat vznik řady nepatrných trhlin z nichž se jedna postupně rozevírala a následně došlo ke ztrátě únosnosti. Železobetonové segmenty byly porušeny odlišně, vznikla jedna trhlina, která se rozevírala a začala se větvit teprve při dosažení vysokého zatížení. Meze únosnosti nebylo dosaženo, avšak takto zatížený prvek by s ohledem na rozevření trhlin byl v prstenci ostění zcela nevhovující.

Charakter odezvy na zatížení byl u zkoušených materiálů zcela odlišný, ovšem z hlediska použitelnosti lze považovat materiály za srovnatelné.

Obecně lze v případě obou materiálů konstatovat, že segmenty jsou křehké a náchylné na porušení již při nízkých silách. Vznik trhlin při 300 kN a propagace trhlin na plnou tloušťku segmentu při 500 kN znamená v porovnání s návrhovým zatížením 2400 kN značné problémy použitelnosti segmentů. Tomu odpovídá deformace (průhyb ohýbaného prvku) cca 1 mm při vzniku trhlin a cca 2 mm při vzniku trhlin na plnou tloušťku prvku, což jsou hodnoty velmi nízké. Průhyb na mezi únosnosti drátkobetonových prvků se pohyboval kolem 6 mm. Tuhost ostění jako podpory pro přítlak stroje je poměrně nízká, neboť se mohou dotlačovat spoje těsněné gumovými pásky. Z výsledků experimentu

vyplývá, že rozdíl v poloze (zatlačení) dvou sousedních segmentů 1-2 mm znamená tedy značné riziko vzniku trhliny v segmentu, která při propagaci na celou tloušťku segmentu může ovlivnit vodonepropustnost ostění. Během ražby je proto nezbytné zajistit rovnoměrné podepření zatěžovaných segmentů, což znamená co nejpřesnější instalaci ostění, aby nedošlo ke vzniku trhlin. Uvedený faktor by měl být také zohledněn při návrhu uspořádání segmentů, které může být v porovnání s posuzovaným uspořádáním výhodnější.

4 Závěr

Realizace uvedených experimentů v plném rozsahu podložených numerickou analýzou přinesla první ucelený soubor experimentálních výsledků na moderních tunelových segmentech skutečné velikosti v ČR.

Ukazuje se, že odezva na zatížení segmentů má zcela jiný charakter než u malých vzorků (tj. testovací trámce délky 70 cm). Nelze tedy výsledky experimentu na malých vzorcích aplikovat na celé konstrukce jednoduchými výpočetními postupy (teorie pružnosti).

Výsledky výzkumu prokázaly, že ostění vyrobené z drátkobetonu ve specifikovaných podmínkách může nahradit ostění železobetonové. Z hlediska mezního stavu použitelnosti lze spatřovat určité výhody ve větším rozptýlení trhlin, což vede k menšímu riziku ovlivnění vodopropustnosti.

Kvalitu drátkobetonu zásadně ovlivňuje kvalita rozmíchání betonové směsi a charakter rozptýlení jednotlivých drátků. Pro výrobu je tedy potřebné užívat kvalitní zařízení pro dávkování drátků.

5 Poděkování

Výsledky byly získány za finanční podpory z prostředků GAČR v rámci projektu 104/10/2023 „Vývoj a ověření vlastností vláknobetonu splňujícího současné požadavky pro prefabrikovaná ostění dopravních tunelů“.

Dr. Ing. Petr Vitek

✉ Metrostav, a.s.
Na Zatlane 13, 150 00 Praha 5
Czech Republic
☎ +420 251 015 552
📠 +420 251 015 575
😊 petr.vitek@metrostav.cz
URL www.metrostav.cz

Doc. Ing. Matouš Hilar, PhD.

✉ FSv ČVUT v Praze
Thákurova 7, 16629, Praha 6
☎ +420 224 354 547
📠 +420 233 334 206
😊 matous.hilar@fsv.cvut.cz
URL <http://departments.fsv.cvut.cz/k135>
