

NÁVRH A REALIZACE DEFINITIVNÍHO OSTĚNÍ ZE STŘÍKANÉHO BETONU S ROZPTÝLENOU VÝZTUŽÍ

DESIGN AND REALIZATION OF FINAL SHOTCRETE LINING WITH FIBRE REINFORCEMENT

Filip Jiříčný¹, Petr Svoboda²

ABSTRAKT

Definitivní ostění ze stříkaného betonu s rozptýlenou výztuží představuje ekonomicky výhodnou alternativu k definitivnímu ostění prováděnému tradičním způsobem ukládáním do bednění. Použití definitivního ostění ze stříkaného betonu se nabízí zejména v případech kdy je tvar ostění komplikovaný nebo se povede jeho použitím vyeliminovat pořízení bednicího vozu /systémového bednění. Na druhou stranu definitivní ostění ze stříkaného betonu vyztuženého rozptýlenou výztuží není možné použít všude. Například v úsecích, kde je ze statických důvodů potřebná prutová výztuž, není možné.

V příspěvku je představen návrh a realizace definitivního ostění ze stříkaného betonu s rozptýlenou výztuží v kombinaci s mezilehlou bezešvou izolací propojky č. 8 tunelu Ejpovice. Cílem návrhu a následné realizace je ověřit funkčnost návrhu, možnosti realizace a chování definitivního ostění ze stříkaného betonu na relativně malém profilu, tak aby bylo možné v budoucnu realizovat definitivní ostění ze stříkaného betonu i na větších profilech.

ABSTRACT

Final shotcrete lining with a fibre reinforcement is a vital option to a traditional cast in place final lining. Final shotcrete lining is a preferable option in case of cross sections with a complex shape or if using of the shotcrete lining eliminates purchasing of a vault formwork for given tunnel cross section. However, it must be said that it isn't possible use the shotcrete final lining in all geotechnical condition and cross sections. In general, if bar reinforcement is required for static reasons it isn't possible to substitute it by a fibre reinforcement.

This article describes a design and a realisation of the final shotcrete lining with fibre reinforcement in a combination with a sprayed waterproofing membrane at cross passage No. 8 of Ejpovice tunnel. Goal of the design and consequent realisation is to verify a correctness of the design, a realisation method and a behaviour of the shotcrete final lining on a relatively small cross section in order to gather experiences for a future application of a shotcrete final lining with a fibre reinforcement at standard tunnel cross sections.

1 Úvod

Součástí stavby Modernizace trati Rokycany - Plzeň je Ejpovický tunel, který byl původně navržen jako dva samostatné tunely (Homolka a Chlum) oddělené krátkým zářezem mezi stejnojmennými vrchy. V průběhu vývoje projektu byl tento přepracován, niveleta kolejí byla posunuta hlouběji a tunely Homolka a Chlum spojeny do dvou jednokolejných trub, což z Ejpovického tunelu činní nejdělsí tunel v České republice.

¹Ing. Filip Jiříčný, Metrostav a.s., Koželužská 2450/4, 180 00Praha 8, tel.: +420 266 018 592, e-mail: filip.jiricny@metrostav.cz

²Ing. Petr Svoboda, Metrostav a.s., Koželužská 2450/4, 180 00Praha 8, tel.: +420 266 018 565, e-mail: petr.svoboda@metrostav.cz

Geologické prostředí obou dříve navržených tunelů je velmi odlišné. Vrch Homolka je tvořen měkkými prachovitými, grafitickými a jílovitými břidlicemi různého stupně zvětrání, zatímco vrch Chlum je tvořen zdravými, místy navětralými, spility vysoké pevnosti.

Traťové tunely byly vyraženy kontinuálně pomocí tunelovacího stroje (TBM). Definitivní ostění traťových tunelů je tvořeno tybinky. Tybinky jsou vyztuženy rozptýlenou výztuží - ocelovými drátky a polypropylénovými vlákny. Traťové tunely jsou navzájem propojeny tunelovými propojkami. V místě křížení traťových tunelů s tunelovými propojkami jsou tybinky vyztuženy prutovou výztuží. Propojky byly vyraženy cyklicky za použití tzv. Nové rakouské tunelovací metody (NRTM). Definitivní ostění propojek č. 1 až 7 je navrženo z monolitického armovaného betonu. Jako alternativní varianta k definitivnímu ostění z monolitického betonu byl definitivní ostění propojky č. 8 navrženo ze stříkaného betonu vyztuženého rozptýlenou výztuží - ocelových vláken (dále v textu jen "stříkaný drátkobeton").

2 Popis definitivního ostění ze stříkaného betonu s rozptýlenou výztuží

Stříkaný beton lze jen obtížně nanášet na fóliovou svařovanou izolaci (kvůli soudržnosti čerstvého stříkaného betonu a pohyblivosti tohoto podkladu). Z tohoto důvodu by měla být, v případě že je potřebná (navržena), jako podklad pod definitivní ostění ze stříkaného drátkobetonu použita bežešvá (stříkaná) izolace, která je pevně spojena s podkladem. Ejpvické tunely (traťové tunely i propojky) jsou navrženy jako zcela uzavřený hydroizolační systém (tankovaný). Z tohoto důvodu je navržena hydroizolace propojek i v málo zvodněném prostředí spilitů pod vrchem Chlum.

V případě velkých přítoků vody je nanášení stříkané (bežešvé) izolace problematické. V případě výskytu velkých / plošně rozsáhlých přítoků vody v propojce č. 8 by bylo definitivní ostění realizováno podle původního návrhu jako monolitické do bednění s použitím svařované fóliové izolace. Obecně, přítoky podzemní vody je nutné sanovat před nanášením stříkané izolace. Toto je možné buďto svody umístěnými na povrchu výrubu překrytými stříkaným betonem primárního ostění nebo zatečením horninového masivu injektáží puklin či převedením vody přes izolaci a ostění osazením hadiček do míst soustředěných přítoků vody s tím, že hadičky se po dokončení definitivního ostění zainjektují / uzavřou.

Skladba definitivního ostění propojky č. 8 byla navržena následovně: Dno definitivního ostění propojky včetně krčků bylo navrženo z monolitického betonu v kombinaci s fóliovou svařovanou izolací. Klenba propojky byla navržena ze stříkaného drátkobetonu s bežešovostříkanou izolací. Napojení fóliové izolace dna a stříkané izolace klenby bylo navrženo přestříkáním fóliové izolace a vnějšího spárového pásu umístěného v podélné spáře mezi dnem a klenbou propojky. Volný okraj fóliové izolace je přichycen k primárnímu ostění pomocí šroubované ocelové příruby, jejíž vzdálenost od spárového pásu nesmí být z důvodu možného nadměrného odpadávání stříkaného drátkobetonu příliš velká. Podklad pod stříkanou izolaci byl upraven nanášením zhruba 4 cm silné vrstvy stříkaného betonu s maximálním zrnem kamenivem d_{\max} 4 mm. Účelem této vrstvy je zmenšit hrubost povrchu a tím snížit spotřebu materiálu stříkané izolace. Alternativně lze jemnější povrch dosáhnout použitím stříkaného betonu s rychlým počátečním nárůstem pevnosti (pod křivkou J3) a nebo nanášením stříkaného betonu podkladní vrstvy z větší vzdálenosti (cca 2 m). Je však třeba zajistit, aby podkladní vrstva byla dostatečně pevná a hutná. V případě pórovité podkladní vrstvy by mohlo dojít k migraci podzemní vody touto vrstvou což není žádoucí.

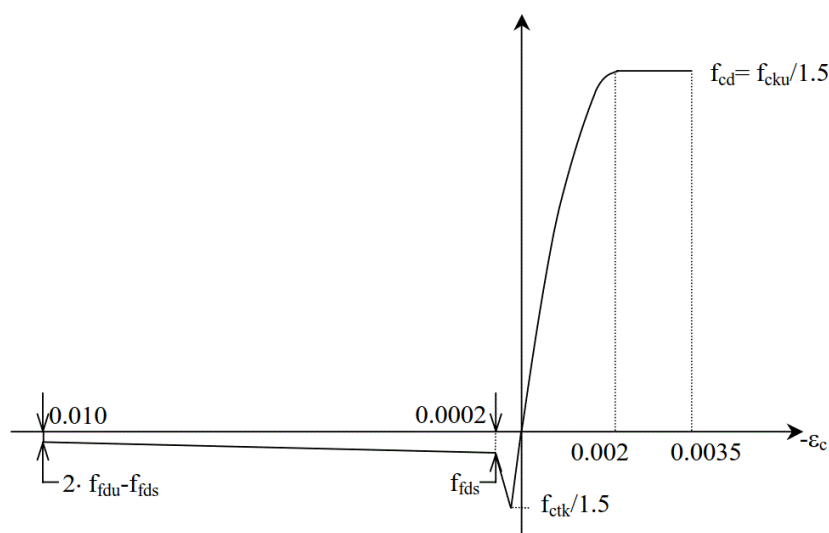
Tloušťka nosné části definitivního ostění ze stříkaného drátkobetonu 100 mm byla navržena na základě provedených výpočtů popsaných dále. Jelikož z povrchu definitivního ostění ze stříkaného drátkobetonu trčí ocelová vlákna, o která se může kdokoliv poranit, je třeba tento povrch nějak ošetřit. Norma ČSN EN 14487-2 zakazuje úpravu povrchu stříkaného betonu hlazením. Proto byla navržena dodatečná krycí vrstva ze stříkaného betonu, jejímž účelem je

zakrýt ocelová vlákna trčící z povrchu definitivního ostění. Tato 40 mm silná krycí vrstva stříkaného betonu bez vláken má pouze ochrannou funkci.

3 Návrh a posouzení definitivního ostění propojky

Návrh a posouzení definitivního ostění propojky z drátkobetonu byly provedeny podle postupu uvedeného v rakouské směrnici Richtlinie Faserbeton (alternativně je možné použít postupu popsáno v německé směrnici DAfStb Stahlfaserbeton 2012). Výpočtový postup uvažující nelineárního chování betonu (včetně zohlednění tahové pevnosti betonu) je v souladu s platnou normou pro návrh betonových konstrukcí viz ČSN EN 1992-1-1 kapitola 5.7 Nelineární analýza.

Směrnice Richtlinie Faserbeton předepisuje provedení výpočtů pro mezní stav únosnosti (dále jen MSÚ) a mezní stav použitelnosti (dále jen MSP) s rozdílnou definicí materiálového modelu vláknobetonu. Materiálový model pro výpočty MSÚ je založen na pevnostních parametrech odpovídajících návrhovým hodnotám pevnosti vláknobetonu (Obr. 1), t. j. charakteristickým pevnostem redukovanými příslušnými součiniteli spolehlivosti. Tento model je v důsledku redukce pevností "měkčí" (příslušná poměrná přetvoření nejsou modifikována) což vede k nadhodnocení deformací. Výpočtový model pro výpočty MSP je založen na charakteristických pevnostech vláknobetonu.



Obr. 1 Materiálový model pro drátkobeton dle Richtlinie Faserbeton
 Fig. 1 Material model for shotcrete with fibre reinforcement according to Richtlinie Faserbeton

Dle Richtlinie Faserbeton je odpor posuzované konstrukce proti porušení (únosnost) v případě použití nelineárních výpočtů s příslušnými pracovními diagramy betonu považován za prokázáný, jestliže:

- 1) nelineární výpočty konvergují bez chyb a
- 2) nejsou překročena mezní poměrná přetvoření.

Výpočty jsou provedeny s použitím pružně uloženého prutovém modelu. Pružinové uložení simuluje reakci horninového masivu na deformaci ostění, t.j. běžný postup používaný pro statické výpočty definitivního ostění tunelů. Na rozdíl od běžně prováděných výpočtů tunelových ostění, kdy se tahové působení horninového masivu (+primárního ostění) z důvodu jeho oddělení fóliovou izolací nezohledňuje, jsou v případě definitivního ostění ze stříkaného betonu nanášeného na stříkanou izolaci analyzovány dvě různé situace:

- s uvažováním tahového spojení mezi definitivním ostěním a horninovým masivem - pružinové uložení působí v tlaku i v tahu (přenos napětí v je omezen napětím 100 kPa při jehož překročení dojde k porušení spolupůsobení).

- bez tahového spolupůsobení ostění s horninovým masivem (model simulující stav, kdy dojde k porušení soudržnosti mezi stříkanou izolací a horninovým masivem nebo definitivním ostěním ze stříkaného drátkobetonu) - pružinové uložení působí pouze v tlaku (při deformaci ostění do "hory", tj. běžně používaný výpočtový model).

Celkově tak jsou provedeny čtyři výpočty (pro dva různé materiálové modely betonu definitivního ostění adva různé způsoby spolupůsobení horninového masivu). Ve výpočtech jsou uvažovány standardní kombinace zatěžovacích stavů sestavené z: vlastní tíhy, zatížení horninovým tlakem, zatížení působení podzemní vody a zatížením změnou teploty.

Výsledkem výpočtů (a současně prováděných posouzení) je návrh definitivní ostění propojky č. 8 ze stříkaného drátkobetonu tloušťky 100 mm, pevnostní třídy betonu v tlaku C25/30 a tahové pevnosti po vzniku trhlin dle třídy T1/G1 (0,14/0,32 N/mm² dle Richtlinie Faserbeton). Ostění s minimálně těmito vlastnostmi je schopné přenést všechna předpokládaná zatížení s dostatečnou rezervou v únosnosti.

Příspěvek 40 mm silné ochranné vrstvy ze stříkaného betonu k celkové únosnosti definitivního ostění je ve výpočtech zanedbán.

4 Průkazní zkouška stříkaného betonu s rozptýlenou výztuží

Na základě výsledků výpočtů a se zohledněním možností dodání betonu na stavbu byl pro definitivní ostění propojky č. 8 navržen stříkaný beton SB30 (C25/30XA1, XC1) d_{\max} 8, typ III, obor nárůstu pevnosti J1 vyztužený rozptýlenou výztuží z ocelových vláken Dramix 3D 55/35BG v množství 40 kg/m³ záměsi.

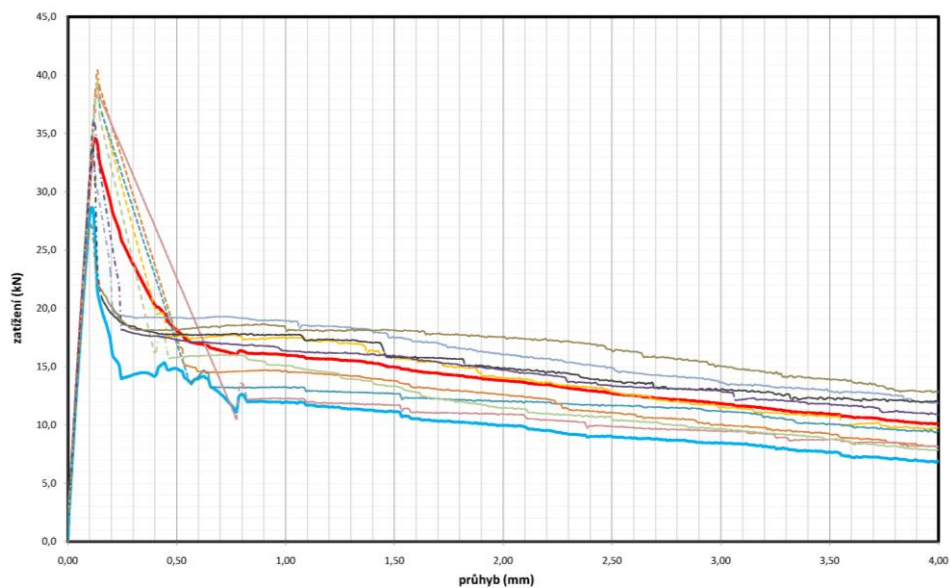
Splnění předpokladů, zejména tahové pevnosti, použitých ve výpočtech bylo třeba před provedením ostění ověřit. Pro ověření byly provedeny průkazní zkoušky navržené směsí. Detailní receptura byla navržena a drátkobeton byl připraven v betonárce TBG Plzeň Transportbeton, nástřik vzorků byl proveden v prostředí, ve kterém bude realizováno definitivní ostění - propojce č. 6. Nastříkané vzorky byly ponechány v tunelu, kde z nich byly po 28 dnech připraveny vzorky pro požadované zkoušky.

Zkouškami byly zjištěny následující parametry stříkaného betonu vyztuženého ocelovými drátky (graf s průběhy zkoušek pevnosti tahu za ohybu viz Obr. 2):

- průměrná hodnota pevnosti v tlaku po 28 dnech	57,6 MN/m ²
- průměrná hodnota modulu pružnosti po 28 dnech	25,1 GN/m ²
- charakteristická hodnota pevnosti v tahu na mezi vzniku makrotrhliny	4,6 MN/m ²
- charakteristická pevnost v tahu za ohybu při průhybu 0,5 mm	1,47 MN/m ²
- charakteristická pevnost v tahu za ohybu při průhybu 3,5 mm	0,98 MN/m ²

Výsledky provedených zkoušek byly vyhodnoceny dle Richtlinie Faserbeton. Zjištěné pevnosti v tahu za ohybu po vzniku trhliny odpovídají pevnostním třídám T4 a G5.

Statickým výpočtem byla požadována pevnost v tahu za ohybu po vzniku trhlin odpovídající třídám T1/G1. Pevnosti zjištěné zkouškami tento požadavek dalece překračují a tak je možné navržený drátkobeton použít do definitivního ostění propojky č. 8.



Obr. 2 Výsledky zkoušek pevnosti v tahu za ohybu
Fig. 2 Results of flexural strength's testing

5 Provádění definitivního ostění

Ke dni odevzdání tohoto příspěvku je propojka č. 8 vyražena, provedena izolace dna fóliovou izolací, vybetonované dno propojky a nanosená stříkaná izolace v klenbě propojky.

Bezešvá izolace byla nastříkána na regulační vrstvu stříkaného betonu ($d_{\max} = 4 \text{ mm}$). Izolace byla nastříkána ve dvou krocích. Nejdříve byla nanosená spojovací/penetrační vrstva, na kterou byla po jejím zavadnutí nanosená stříkaná izolace v tloušťce 3 mm.

Provedení stříkané izolace propojky v ploše cca 300 m^2 včetně napojení na tybinkové ostění traťových tunelů trvalo necelou jednu pracovní směnu. Spotřeba směsi MasterSeal 345 zhruba 3 kg/m^2 (včetně penetrace a zesílení v místech dilatačních spár) svědčí o dobře připraveném podkladu. Izolace byla aplikována tzv. suchou cestou tj. s přidáváním vody až na trysce.



Obr. 3 Nanášení penetrační vrstvy stříkané izolace
Fig. 3 Application of the adhesive layer of sprayed membrane

6 Definitivní ostění ze stříkaného betonu na dalších stavbách MTS

Metrostav a.s. má zkušenosti s prováděním definitivní ostění ze stříkaného betonu i na dalších stavbách:

Ražené propojky tunelu Blanka

- Izolace propojek byla navržena ze svařované membránové izolace, proto bylo nutné mezilehlou membránovou izolaci upevnit hustým rastrem upevňovacích terčů, aby nedocházelo k nadměrnému spadu stříkaného betonu v důsledku vibrací izolace,

- prutovou výztuž definitivního ostění bylo třeba osazovat po vrstvách, aby stříkaný beton nebyl nanášen přes více než jednu vrstvu výztuže.

Navzdory těmtoopatřením byla realizace definitivního ostění propojek ze stříkaného betonu rychlejší a ekonomičtější, než kdyby byl betondefinitivního ostění propojek ukládán do bednění.

Tunely v severských zemích (Finsko, Norsko, Island)

V severských zemích kde jsou tunely raženy v pevných horninách je použití definitivního ostění ze stříkaného betonu velmi rozšířené. Vzhledem k vysokým pevnostem horninového masivu má ostění spíše funkci obkladu a ochrany horninového masivu proti zvětrávání. Přítoky vody do tunelu jsou v masivních horninách možné pouze v diskontinuitách, které mají navíc malou hustotu. Proto se v tomto prostředí nahrazuje rubová hydroizolace těsníci injektážemi diskontinuit.

V silničních tunelech kde je pohyb/pobyt osob řídký je použití stříkaného betonu pro definitivní ostění běžné. Ve Finsku se Metrostav podílí na realizaci stanice metra zajištěné definitivním ostěním ze stříkaného betonu vyztuženého polypropylénovými makrovláknami. Stříkaný beton je tak použit jako pohledový prvek v prostoru veřejností běžně užívaném. Což je řešení, které by bylo v zemích střední Evropy považováno minimálně za neobvyklé.



Obr. 4 Povrch definitivního ostění vyztuženého polypropylénovými makrovláknami
Fig. 4 Surface of final shotcrete lining with polypropylene fibre

Úniková štola tunelu Poľana

Úniková štola tunelu Poľna je zajištěna trvalým ostěním ze stříkaného betonu vyztuženého polypropylénovými makrovláknami. Konstrukce je navržena na životnost 40 let. V tunelových propojkách mezi silničním tunelem a únikovou štolou je přechod mezi membránovou izolací dopravního tunelu a únikovou štolou, která je bez rubové izolace. Tato přechodová zóna je provedena z bezešvé / stříkané izolace. V těchto přechodových zónách si Metrostav ověřoval různé metody nanášení bezešvé izolace. Nejrychleji, ale i nejkvalitněji byla provedena izolace nanášená stříkáním suché směsi, kdy se voda přidává až na trysce stříkacího zařízení.

7 Závěr

Definitivní ostění ze stříkaného betonu vyztuženého rozptýlenou výztuží je na zahraničních tunelových stavbách stále častěji používané řešení. Realizací definitivního ostění ze stříkaného betonu propojky č. 8 tunelu Ejpovice se Česká republika přiblíží k více vyspělým tunelářským zemím, kde je použití této moderní technologie již rozšířené. Věříme, že úspěšná realizace tohoto byt' rozsahem malého díla pootevře dveře pro použití této technologie i na dalších tunelových projektech.

Při navrhování definitivního ostění ze stříkaného drátkobetonu je však nutné mít na paměti, že jeho použití není možné kdekoliv. Jako naprosto bezproblémové jen například jeho použití pro tunely v relativně dobré geologii s deštníkovou rubovou izolací, kdy je funkce definitivního ostění redukována na "podpůrný prostředek hydroizolace".

Poděkování

V příspěvku jsou popsány některé výsledky výzkumného centra CESTI podporovaného TAČR, projekt č. TE01020168.

Literatura

ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, prosinec 2006

Richtlinie Faserbeton, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Juli 2008

ČSN EN 14889-1 Vlákná do betonu - Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda, červen 2007

ČSN EN 14487-2 Stříkaný beton - Část 2: Provádění, červenec 2007

ČSN EN 14488-3 Zkoušení stříkaného betonu - Část 3: Ohybová únosnost (při vzniku trhliny, mezní a zbytková) vlákno betonových trámcových zkušebních těles, prosinec 2006

ITAtch Design Guidance For Spray Applied Waterproofing Membranes, ITAtch Activity Group Lining and Waterproofing, April 2013