Návrh, realizace a podmínky provádění nevyztuženého definitivního ostění konvenčně ražených tunelů, I. část

První díl článku popisuje základní rozdíly v přístupu k navrhování a provádění železobetonového a nevyztuženého betonového ostění. Okrajově se zabývá problematikou životnosti a funkce primárního ostění jako nosného prvku dvouplášťového systému primární-definitivní ostění. Upozorňuje na skutečnost, že vzhledem k rozdílným materiálovým vlastnostem prostého betonu a železobetonu musí být rozdílný i pohled na vznik, rozvoj a případné negativní účinky trhlin na ostění. V závěru první části se autoři věnují možnostem omezení vzniku trhlin vhodným návrhem betonové směsi a odbedňovací pevností. Hlavním tématem druhého dílu článku, který vyjde v dalším čísle časopisu, budou smluvní kriteria pro posuzování kvality povrchu nevyztuženého ostění včetně jejich porovnání se zahraničními předpisy. V závěru textu autoři seznámí s možnostmi omezení povrchových vad ostění a vývoje trhlin z hlediska konstrukčních zásad, technologického postupu betonáže i způsobu ošetřování ostění po odbednění.

Cestou k ekonomickému návrhu definitivního ostění konvenčně ražených tunelů je jeho dimenzování na základě skutečně zastižených geotechnických podmínek. Pro železobetonové konstrukce existuje v České republice řada norem a předpisů, které slouží jak pro návrh a provádění konstrukce, tak pro její převzetí objednatelem před uvedením do provozu a před koncem záruční doby. V případě, že to místní poměry dovolují, je možné definitivní ostění navrhnout jako nevyztužené. V takovém případě je třeba zohlednit odlišnosti ve statickém návrhu i možnosti chování ostění a nastavit kritéria pro přejímku ostění tak, aby jeho použití bylo možné. Nastavení příliš přísných kritérií vzniku trhlin může vést k nárůstu ceny díla buď z důvodu nutného vyztužení ostění, nebo z důvodu snížení rizika zhotovitele započtením předpokládaných sanací do celkové ceny.

Konvenčně ražené tunely a optimalizace řešení

Používání nevyztuženého definitivního ostění je v současné době zpravidla spojeno s konvenčně raženými tunely, u kterých tvoří primární ostění stříkaný beton a definitivní ostění je prováděno jako monolitické. V České republice převládá v oblasti konvenčně ražených tunelů NRTM, na jejichž principech byly s výjimkou Březenského tunelu raženého metodou obvodového vrubu vyraženy všechny tunely novodobé tunelářské historie. Její nasazení umožnil až převrat v roce 1989, který otevřel hranice a dal zelenou technologiím, které doposud nebyly používány. Projektanti postupně získali přístup k výkonné výpočetní technice a programovému vybavení, stavební firmy ke strojnímu vybavení a stavebním materiálům a obě skupiny společně získaly možnost čerpat ze zahraničních zkušeností. V souvislosti s NRTM často slýcháme, že se jedná o tunelovací metodu, která umožňuje operativně reagovat na skutečně zastižené geotechnické podmínky a vynakládat jen takové finanční prostředky, které jsou nezbytné z hlediska dodržení požadavků na kvalitu díla a bezpečnost jeho provádění. Aby tomu tak mohlo být, je třeba nejen vytvořit prostor pro zmiňované vybavení moderní technikou a získávání potřebných znalostí i zkušeností, ale vytvořit také technický a právní rámec, který by bez velkých překážek umožnil oběma smluvním stranám legálně a operativně provádět změny během výstavby. Pod pojmem „optimalizace technického řešení s ohledem na složitost geotechnických podmínek" je většinou myšlena ražba tunelu a způsob zajištění stability výrubu. Neméně významnou roli v oblasti pracnosti, minimalizace rizik při provádění a konečné výše investičních nákladů hraje technické řešení definitivního ostění. I v tomto případě lze mluvit o NRTM jako o observační metodě. Na základě výsledků geotechnických měření prováděných v průběhu ražby, pasportizace čeleb jednotlivých záběrů a odpovědného stanovení geotechnických parametrů horninového masivu lze vytvořit matematický model blížící se reálným podmínkám a získat tak vnitřní síly potřebné pro návrh nutného množství výztuže, případně provedení ostění bez výztuže.



Pohled z portálu tunelu Považský Chlmec na most přes Hričovskou vodní nádrž

Rozdíly v navrhování vyztuženého a nevyztuženého ostění

Dva přístupy k funkci primárního a definitivního ostění

Na nosnou funkci primárního a definitivního (sekundárního) ostění není v řadách technické veřejnosti jednoznačný názor.

Na jedné straně stojí stoupenci základní nosné funkce primárního ostění, kteří mu přisuzují ve spolupůsobení s prokotveným horninovým prstencem schopnost přenášet horninový tlak po celou dobu životnosti tunelu. V takovém případě plní definitivní ostění pouze úlohu obkladní a estetickou, neboť je zatíženo pouze vlastní vahou a účinky objemových změn. Pouze v případě tlakově izolovaných tunelů musí vzdorovat i hydrostatickému zatížení. Za těchto předpokladů byl u nás postaven Pisárecký tunel v Brně, kdy byly používány pro vyztužení horninového prstence sklolaminátové kotvy s vysokou životností.

Na druhé straně stojí stoupenci teorie úplné degradace primárního ostění, které dříve, než je předpokládaná životnost tunelu, zcela ztratí svou nosnou funkci a veškeré zatížení musí přenést definitivní ostění. Základní otázkou životnosti primárního ostění je vliv agresivity prostředí nejen na jednotlivé prvky primárního ostění (stříkaný beton, výztužné rámy a sítě), ale i prvky vyztužující horninový prstenec v okolí výrubu.

V České republice je při návrhu definitivního ostění postupováno zpravidla podle druhého přístupu a definitivní ostění plně přebírá zatížení z primárního ostění, které je



Bednící vůz před portálem tunelu



Vedení chrániček v nevyztužených blocích betonáže na ocelové konstrukci

považováno za dočasné. Odpověď na míru degradace primárního ostění po desítkách let od provedení mohou dát výzkumy prováděné v současné době v Rakousku, kde jsou v rámci zvýšení bezpečnosti provozu raženy druhé tunelové trouby tunelů, které byly uvedeny do provozu před více než 30 lety. Při provádění tunelových propojek, nebo při sanaci ostění stávajících tunelových trub lze odebírat vzorky primárního ostění a podrobit je analýze. Dosavadní výsledky laboratorních zkoušek ukazují, že degradace stříkaného betonu primárního ostění nepostupuje zdaleka tak rychle, jak se předpokládalo, a jak beton, tak ocel plní stále svou nosnou funkci [10]. Odpověď na životnost ostění ze stříkaného betonu lze nalézt také na řadě skandinávských tunelů, kde se monolitické sekundární ostění prakticky nepoužívá. I přes přímé vystavení vlivům prostředí jak ze strany horninového masivu, tak dopravního prostoru je primární ostění i po mnoha letech stále v požadované kvalitě. V dalším textu se však budeme zabývat nevyztuženým definitivním ostěním jako jediným nosným prvkem zajišťujícím stabilitu tunelu po dobu jeho životnosti (100 let).

Princip návrhu železobetonového ostění

Při návrhu ostění a též při určování kritérií, jimž má ostění z nevyztuženého betonu vyhovovat, je potřeba vzít do úvahy rozdíly ve statickém působení mimostředně tlačené konstrukce ze železového či nevyztuženého betonu. V případě železobetonového ostění dochází při odpovídajícím využití tažené výztuže v přilehlém betonu ke vzniku a vývoji trhlin, neboť již při malém přetvoření tažených vláken průřezu dochází k překročení tahové pevnosti betonu. Při posouzení průřezu je proto zaveden předpoklad vyloučení taženého betonu a přenos tahových napětí v průřezu pouze samotnou výztuží. K výpočtu vnitřních sil, na něž je ostění navrhováno, však v případě železobetonu postačuje lineární materiálový model, což znamená, že tuhosti průřezů ostění nejsou vznikem a vývojem trhlin ovlivněny a vstupují do výpočtu svými plnými (počátečními, neredukovanými) hodnotami. Výsledná poloha tlakové normálové síly může za těchto okolností být i mimo hranice průřezu.

Princip návrhu nevyztuženého ostění

Odlišná situace nastává v případě nevyztuženého ostění. Pokud je ostění z nevyztuženého betonu modelováno lineárním materiálovým modelem, je nevyhnutelným výsledkem návrhu nehospodárně velká tloušťka ostění. V takové situaci je na vině neuspokojivého výsledku nedostatečný a málo sofistikovaný výpočetní model, při jehož použití je ostění navrhováno podle tahové pevnosti betonu. Ta je o řád nižší než pevnost tlaková, která ale ve skutečnosti o únosnosti rozhoduje. Proto je nutno přikročit k výpočtu s nelineárním modelem ostění, kde je zohledněn vznik trhlin a případná plastifikace průřezů. Úlohu je možno řešit např. pomocí MKP s plošnými prvky, nebo též pomocí jednoduššího prutového modelu ostění.

V modelech, v nichž se uvažuje v oblasti trhliny s úplným vyloučením přenosu tahů, leží výslednice normálových napětí vždy uvnitř průřezu, a o únosnosti ostění rozhoduje výhradně tlaková pevnost betonu. To vede k subtilnějšímu ostění a tedy i hospodárnějšímu návrhu.

V naznačeném způsobu výpočtu nevyztužených ostění se k výsledkům dochází pomocí iteračního procesu. V jeho průběhu se vypočítává stav napjatosti a deformací v průřezu za předem přijatých předpokladů. Např. na prutové soustavě s nelineárním materiálovým modelem ostění se po vzniku trhliny předpokládá lineární průběh napětí v tlačené oblasti průřezu; při dalším přitěžování je nejprve dosaženo návrhové pevnosti betonu v tlaku v krajních vláknech a poté začíná fáze postupné plastifikace materiálu, která je ukončena dosažením mezního stavu únosnosti průřezu. Pro vývoj deformací je přijat předpoklad rovinného přetváření průřezu.

Ve výše uvedeném textu je možno shledat některé rozdíly, se kterými lze přistoupit ke statickému návrhu vyztuženého či nevyztuženého ostění. Některé rozdílnosti je pak potřeba uplatnit i ve fázi posuzování a vyhodnocování úspěšnosti návrhu ostění. Důležitou oblastí, které se toto konstatování dotýká, je hodnocení trhlin v ostění.

Rozdíl v přístupu k šířce trhlin u vyztuženého a nevyztuženého ostění

Jedním z kritérií, podle nichž se posuzuje funkce či kvalita provedení ostění, je šířka trhlin, resp. jejich počet v určité oblasti tunelového profilu (např. vrchol klenby, bok tunelu). V tomto místě je nutno poznamenat, že samotný vznik trhliny způsobený přímým (statickým) zatížením není potřeba považovat za závadu či poruchu. Naopak, vznik trhlin je obvyklým jevem a vyplývá z principů a přijatých předpokladů o statickém působení železobetonové či pouze betonové konstrukce. Existují však aspekty, které je v tomto ohledu potřebné sledovat, a ty jsou pro oba typy ostění rozdílné.

V případě železobetonových ostění je šířka trhliny limitována a hodnoty, jež nemají být překročeny, jsou k nalezení v příslušných normách a předpisech. Hlavním smyslem omezení šířky trhliny je v tomto případě ochrana ocelové výztuže a zabránění její koroze. Pro různé typy prostředí, v nichž se ostění může nacházet, a druhy látek, které výztuž mohou ohrozit, jsou doporučeny limitní hodnoty. Při dodržení těchto předepsaných hodnot společně s dostatečným krytím je možno předpokládat, že bude zabráněno průniku škodlivých látek do oblasti výztuže, a nedojde tak k narušení nosné funkce ani trvanlivosti konstrukce, která je v případě tunelových staveb uvažovaná 100 let. Dalším kritériem pro omezení šířky trhlin je případné nepříznivé ovlivnění vzhledu konstrukce.

K jiné situaci dochází v případě nevyztuženého ostění. Nadále sice zůstává požadavek na ničím nenarušenou nosnou funkci průřezu, tu však zajišťuje jako jediný konstrukční prvek samotný beton. Odpadá zde přenos sil pomocí ocelové výztuže, a kritéria vztahující se k trhlinám a stanovená pro železobeton ztrácejí svůj význam. Hlavním požadavkem pro funkci nevyztuženého ostění je bezpečný přenos sil v betonovém průřezu, což musí být zajištěno především dostatečnou výškou tlačené oblasti odpovídající konkrétním napjatostním poměrům v průřezu. Výsledná šířka trhliny tak může být v porovnání se železobetonovým průřezem v různých stavech napjatosti odlišná a větší. Stejně jako u železobetonu může být ale šířka trhlin omezena



Vedení chrániček v nevyztužených blocích betonáže uchycením na hydroizolaci



Vedení chrániček v nevyztužených blocích betonáže v kapse z hydroizolační fólie

požadavky na vzhled konstrukce.

Obecně je z hlediska statiky možnost řešení tunelového ostění jako nevyztuženého závislá na několika faktorech.

Především se jedná o spolehlivé ocenění geologických poměrů. I zahraniční předpisy konstatují možnost aplikace ostění z nevyztuženého betonu pouze v příznivých geologických a geotechnických poměrech. V případě geologických poruch s dopadem na velikost a rozdílnou intenzitu zatížení po obvodě tunelu či v příportálových úsecích se předpokládá použití železobetonu.

Dalším z důležitých faktorů úspěšného návrhu je geometrie tunelového profilu a tvar ostění. Na tento parametr je právě v případě nevyztuženého betonu konečný úspěch návrhu velmi citlivý. Je však zřejmé, že jen málokdy je možno přizpůsobit tvar ostění pouze a jen potřebám z hlediska statiky. Ve výpočtu ostění, jež staticky vyhovuje, je dosaženo konvergence iteračního procesu a výsledné polohy normálové síly uvnitř průřezu. Není-li výpočtem dosaženo rovnováhy (v případě železobetonu je možno řešit přidáním výztuže), je pro nápravu k dispozici pouze jiný tvar ostění, větší tloušťka průřezu, nebo přechod od nevyztuženého ostění k ostění vyztuženému.

Zejména v případě neuzavřených profilů je důležité pečlivě určit okrajové podmínky působení ostění v oblasti uložení klenby na základových pasech. Za vhodné považujeme v takovém případě řešit tunelový profil komplexně, tj. společně klenbu ostění a základový pas (patku).

Zásady při návrhu receptury betonu nevyztuženého ostění

Vznik trhlin v prostém betonu je materiálově předurčen především nízkou tahovou pevností materiálu. Jedná se o vlastnost, kterou lze bez použití výztuže jen obtížně ovlivnit. Prostředkem pro omezení vzniku trhlin způsobených objemovými změnami je vhodný návrh receptury betonu s nízkým hydratačním teplem a pomalým nárůstem pevnosti v počátečních hodinách po betonáži. Redukce velikosti hydratačního tepla lze dosáhnout dodržením několika pravidel. Na snížení hydratačního tepla má pozitivní vliv nízký obsah cementu cca v rozmezí 250–280 kg/m3, použití vhodného cementu s nízkým obsahem C3A, použití popílku jako přísady do betonu (cca 50–80 kg/m3) a návrh takové směsi, která dosahuje při zkouškách v laboratoři na izolovaných kostkách maximálního teplotního rozdílu do 15 K. Počáteční teplota směsi by měla být přiměřeně nízká (13–18 °C), neměla by být větší než max. 25 °C.

V zahraničí je zcela běžné, že pro dosažení optimálních hodnot navrhované směsi pro nevyztužená ostění se používá kombinace více různých cementů. Dále je třeba volit nízký obsah vody v intervalu cca 170–190 kg/m^3, zvýšit podíl jemných částic – cement, popílek, jemné kamenivo <0,125 mm na objem >370 kg/m^3, omezit prachové částice, zajistit kamenivo o frakci 4/8 mm v doporučeném množství cca 3–5 %, udržet poměr w/c maximálně na hodnotě 0,63 a používat pokud možno kamenivo s nízkým součinitelem tepelné vodivosti. V případě nevyztuženého ostění se doporučuje použít frakci kameniva D = 32 mm.

Z hlediska vzniku trhlin je důležitá i nízká odbedňovací pevnost. Vzhledem k tomu, že betonáž definitivního ostění probíhá zpravidla po ustálení deformací primárního ostění a definitivní ostění není zatíženo horninovým tlakem, není ze statického hlediska nutné, aby konstrukce vykazovala konečnou pevnost již po 28 dnech. Lze předpokládat, že statickým výpočtem uvažovaná hodnota zatížení na něj dolehne až po úplné degradaci primárního ostění, pokud k ní vůbec někdy dojde. Pro návrh směsi je výhodné, pokud je možné použít „pomalou" recepturu betonu s nízkým hydratačním teplem a koncovou pevností po 56, nebo dokonce 90 dnech.

V dalším dílu článku budeme mluvit o smluvních kritériích posuzování kvality povrchu nevyztuženého ostění a opatřeních pro omezení povrchových vad a vzniku trhlin v ostění.

TEXT: Ing. Jiří Hořejší, Ing. Libor Mařík, Ing. Pavel Ruzicka, Dipl.-Ing. Andreas Schaab
FOTO: Ing. Libor Mařík

Jiří Hořejší, **Libor Mařík** a **Pavel Růžička** působí ve společnosti HOCHTIEF CZ a. s. Andreas Schaab je ze společnosti HOCHTIEF Engineering GmbH, Německo.

Literatura

1. Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací, Kapitola 18 Betonové konstrukce a mosty, Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací, leden 2016.
2. Richtlinie Innenschalenbeton, Österrechische Bautechnik Vereinigung, Dezember 2012.
3. Richtlinie Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen, Österrechische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, April 2009.
4. Empfehlungen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen, Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) – Arbeitskreis „Unbewehrte Tunnelinnenschalen" – Stand: 24. April 2007.
5. Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenierbau, Heft B92, April 2013.
6. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise, Bundesanstalt für Bauwesen, Dezember 2007.
7. Richtlinie DB853 Eisenbahn Tunnel planen, bauen und instand halten, DB Netz AG, 2013.
8. Kupfer, H. B. – Kupfer, H. – Steckbaner, A.: Tragfähigkeit von schlanken Druckgliedern aus unbewehrtem Beton. Springer-Verlag, 1984.
9. Pöttler, R.: Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau – Standsicherheit und Verformung im Rissbereich Beton- und Stahlbetonbau, Juni 1993.
10. Vogel, F – Sovják, R – Holčapek, O – Mařík, L – Šach, J.: "Experimental Study of Primary Lining Tunnel Concrete after Thirty Years of Operation", Applied Mechanics and Materials, Vol. 732, pp. 403-406, Feb. 2015.

Design, construction and conditions of application of unreinforced concrete final lining in conventionally driven tunnels

The paper describes basic differences in the approach to reinforced concrete and unreinforced concrete linings, the possibilities of limiting formation of cracks by means of the concrete mix design, by selection of the technological procedure of the work and the method of curing after stripping. The text contains a comparison of criteria for assessing the surface of an unreinforced concrete lining with criteria in foreign regulations.