VÝVOJ METODY PRO NEDESTRUKTIVNÍ STANOVENÍ TLOUŠŤKY VNITŘNÍ STĚNY TUNELU ▮ DEVELOPMENT OF METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE DETERMINATION OF THICKNESS OF THE INNER WALLS OF A TUNNEL

Jaroslav Mikula, Leonard Hobst

Kontrola ostění budovaných i stávajících tunelů je důležitá pro jejich další bezpečný provoz. Jsou vyvíjeny různé nedestruktivní metody, které jsou uzpůsobeny pro kontrolu konstrukce pouze z jedné strany. Článek se zabývá zkušenostmi, které byly získány při použití nového přístroje, založeného na ultrazvukové impulzní odrazové metodě. ▮ Checking the inner shell of tunnels during the construction phase as well as of existing tunnels is important for their safe operation. Various non-destructive methods have been developed for this, which allow the control check to be carried out with access from one side only. This article deals with experiences which were obtained using the new device, based on an ultrasonic pulse echo method.

Po haváriích, které v posledních letech postihly dopravní tunely (statistika Havárie ražených silničních a železničních tunelů v ČR v letech 1990 až 2010 uvádí dvanáct případů zaviněných konstrukčními nebo technologickými vadami při celkové délce těchto tunelů 34 740 m; pro srovnání ve stejném období v Rakousku je registrováno osm havárií dopravních tunelů při celkové délce 314 841 m; v roce 2012 se v Japonsku za plného provozu zřítila cca stometrová sekce dálničního tunelu Sasago apod.), se klade stále větší důraz na zvýšenou bezpečnost jejich provozu. Zvláště nové tunely jsou vybavovány stále modernější a dokonalejší zabezpečovací technikou pro monitorování a zabezpečení plynulého a bezpečného provozu v tomto prostředí, kde je zpravidla velmi problematický rychlý přístup záchranné techniky v případě vzniku havarijní situace. Na jejím vzniku však nemusí být na vině vždy jen neopatrní řidiči, ale může být zapříčiněna i skrytými vadami ve vlastní konstrukci tunelu – může to být nenadálá vodní překážka vzniklá průsakem vody v konstrukčním spoji, nebo i defekty vzniklé nedostatečnou tloušťkou vnitřní vrstvy konstrukce.

Kontrola dodržení předepsaných parametrů konstrukce – počínaje vrchní vrstvou konstrukce, přes řádné uložení izolační vrstvy, po tloušťku vlastní nosné vnitřní vrstvy betonu s výztuží je velice problematická. V ražených tunelech není přístupná vnější strana konstrukce stěny, což většina nedestruktivních metod kontroly vyžaduje.

Použití destruktivních metod, jako je např. provádění kontrolních vývrtů, je velmi obtížné, neboť hrozí nebezpečí jak porušení kompaktnosti výztuže, tak porušení izolací. Z tohoto důvodu byla snaha vyvinout metodu, kterou by bylo možno provádět kontrolu správného dodržení předepsaných parametrů konstrukce bez jejího porušení z vnitřního povrchu tunelu.

Na vývoji a vhodné aplikaci takovéto metody pracovali výzkumní pracovníci několika firem po řadu let. Na základě mnoha porovnávacích měření vyplynulo jako optimální použití přístrojů pracujících na principu ultrazvukové impulzní odrazové metody (ultrasonic puls echo), případně bylo odzkoušeno měření odrazu tlakových vln vyvolaných nárazem (impact echo).

UPLATNĚNÍ NEDESTRUKTIVNÍCH METOD

Při použití Nové rakouské tunelovací metody (NRTM) je ostění dopravních tunelů konstruováno ve dvou vrstvách. Po dobu konstrukční fáze slouží vnější vrstva torkretového betonu k zajištění efektivního zatížení z okolní horniny. Ve finálním kroku je zhotoveno vnitřní ostění z vyztuženého betonu, které přebírá hlavní nosnou funkci. Mezi oběma vrstvami bývá zpravidla vložená plastická izolační a těsnící vrstva, aby se zabránilo průniku podzemní vody.

Je snahou, aby pomocí nedestruktivní zkušební metody bylo možno detekovat defekty ve vnitřním ostění konstrukce tunelu. Může se jednat např. o plochu nedostatečného krytí, nebo odhalenou výztuž v důsledku chybné betonáže (obr. 1a, b). Pokud by se dostala výztuž mimo beton na straně výrubu, nebo by byla zmenšená tloušťka vnitřní vrstvy nosného betonu, mohl by nárůst tlaku vody způsobit proniknutí vody izolační vrstvou (obr. 2) a následným přímým působením na betonovou konstrukci by mohlo dojít k jejímu porušení. Nedostatečná tloušťka vnitřní vrstvy snižuje předepsanou celkovou nosnost konstrukce.

Nově navržená a odzkoušená ultrazvuková odrazová impulzní metoda měření je založena na principu přístupu pouze k jedné straně konstrukce. Sondou vysílané ultrazvukové impulzy se odrážejí od zadní (nepřístupné) stěny, odrazy přijímá speciální sonda a po zpracování signálů se na vyhod-

1a

1b

2

Obr. 1a, b Obnažené pruty ocelové výztuže v dutině ostění v důsledku nesprávné betonáže ▮ Fig. 1a, b Exposed steel reinforcement rods in lining cavity due to improper concrete placement

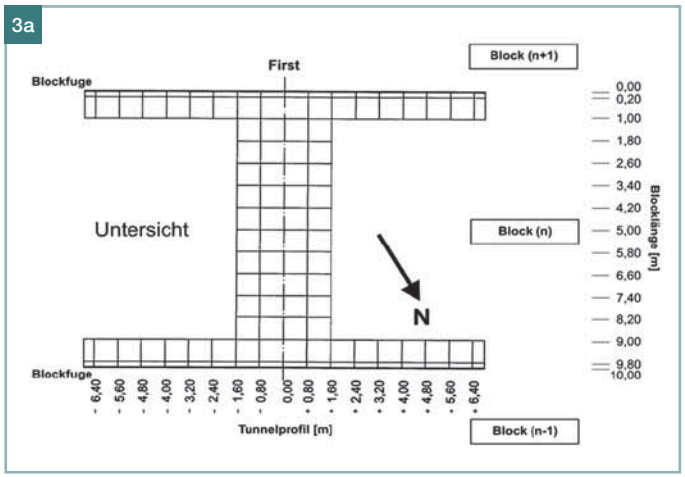
Obr. 2 Vznik trhliny v izolační vrstvě způsobuje průsak vody v konstrukčním spoji ostění ▮ Fig. 2 Cracks in the sealing layer cause water ingress at the lining construction joint

Obr. 3 Příklad měření, a) v síti, b) v praxi ▮ Fig. 3 Example of measurement grid, a) empty measurement grid, b) practical example

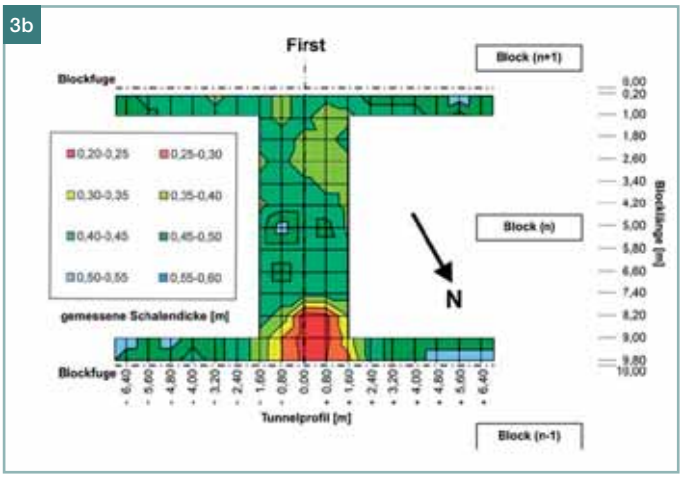
Obr. 4 Přístroje pracující na ultrazvukovém impulzním odrazovém principu měření, a) ACSYS A1220 Monolith, b) ACSYS MIRA ▮ Fig. 4 Devices employing the ultrasonic pulse echo measurement principle, a) ACSYS A1220 Monolith, b) ACSYS MIRA

Obr. 5 Přístroj pracující na principu měření impact echo – Olson Freedom Data PC ▮ Fig. 5 Device employing the impact echo principle – Olson Freedom Data PC

3a



3b



nocovací jednotce přímo zobrazují jak hodnoty tloušťky stěny, tak se i vizuálně lokalizují trhliny, dutiny atd.

VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍHO MĚŘENÍ V NĚMECKU

V ČR platí metodický pokyn – ministerstva dopravy „Provádění hlavních prohlídek tunelů podzemních komunikací“ z roku 2013. Dokument mimo jiné definuje jak rozsah prohlídek stavebně-technické části tunelu (vizuálně či poklepem kladívkem), tak i např. vybavení pro hlavní prohlídku tunelu, kde je v seznamu předepsané výbavy, co se týká měřícího a zkušebního zařízení, uveden svinovací metr (délka 5 m), posuvné měřidlo (čtení 0,1 mm) nebo trhlinová měrka a tesařské kladivo 400 až 800 g, ev. sekáč na beton. Kontrola se provádí po jednotlivých blocích betonáže a o každém bloku (pasu) se vyhotoví samostatný protokol.

V Německu bylo použito první systematické měření tloušťky tunelové konstrukce použitím nedestruktivní metody v roce 1996. Poznatky z tohoto měření vedly ke zpracování a v roce 2001 vydání směrnice pro používání nedestruktivních zkušebních metod pro tunelové konstrukce s označením RI-ZPF-TU [2], která byla následně revidována v roce 2007. Od této doby jsou tato měření pro všechny dopravní tunely v Německu povinná.

Tloušťka ostění tunelové konstrukce speciálně v horní části a v oblastech spojů se sousedními konstrukčními prvky (obr. 3a, kde je uvedena síť měření po celé ploše stropu a obou stranách spojů se sousedními bloky) se musí měřit dvojdimenzionálně, aby se lokalizovaly případné defekty a plochy s nedostatečnou tloušťkou stěny. Doba pro měření a posouzení jednoho

4a

4b

5

Literatura:

[1] *Mähner D., Rath E., Willmes M.*: Zerstörungsfreie Dickenbestimmung von Tunnellinnenschalen, Tunel 8/2007

[2] Bundesanstalt für Strassenwesen: Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU), Ausgabe 2007

[3] Metodický pokyn MD „Provádění hlavních prohlídek tunelů podzemních komunikací“

[4] *Srb M.:* Průzkumné štoly a havárie tunelů, Havárie podzemních staveb Ostrava 2010

[5] Technická dokumentace výrobce PROCEQ SA, Švýcarsko

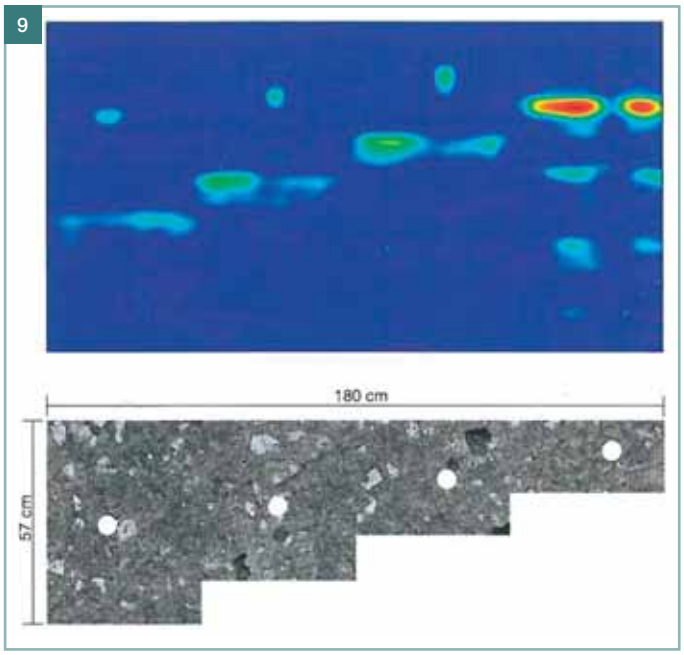
[6] Základní přehled přístrojů ultrasonic puls echo a impact echo – internetový zdroj

Obr. 6 PUNDIT kompletní jednotka PL ▮ Fig. 6 PUNDIT complete set of PL-200 PE

Obr. 7 Vysílač i snímač odrazu UZ impulzů ▮ Fig. 7 Pulse echo transducer

Obr. 8 PUNDIT PL-200PE, a) měření tloušťky desky, b) měření tloušťky stěny ▮ Fig. 8 PUNDIT PL-200 PE, a) measuring the thickness of a plate element, b) measuring wall thickness

Obr. 9 Průřezový pohled kolmý na povrch skenování ▮ Fig. 9 B-scan – sectional view perpendicular to the surface scanned



tunelového bloku (délka 10 m, obr. 3b) je cca 5 h.

Postup měření podle směrnice RI-ZFP-TU

- Pro měření lze použít přístroje na principu metody ultrazvukové impulzní odrazové, nebo impact echo.
- Přístroj ultrazvukový impulzní odrazový má mít frekvenci > 20 kHz.
- Měření má být provedené pokud možno předtím, než je vyplněna stropní vrstva, aby v případě potřeby bylo možno provést doplňující práce – nápravná opatření.
- Přístroj před použitím má být zkalibrován na prvku známé tloušťky. Přístroj lze např. zkalibrovat na testovacím vzorku vyrobeném ze stejného betonu jako je vnitřní ostění tunelu a uskladněném v tunelu do doby kalibrování.
- Základní měřící síť (obr. 3a, b) se doporučuje v definovaném rozměru 800 × 800 mm mezi body měření. V místech, kde je zjištěna nedostatečná tloušťka, se měřící síť zmenšuje na 400 × 400 mm a v místech zjištěných jiných anomálií pak až na 100 × 100 mm.
- Místo měření je definováno ve vrcholu konstrukce a v místech konstrukčních spojů.

V SOUČASNOSTI POUŽÍVANÉ PŘÍSTROJE

V současné době jsou na trhu nejvíce rozšířeny ruské přístroje ACSYS A1220 Monolith (obr. 4a) a příp. ACSYS MIRA (obr. 4b) pracující na principu měření ultrazvukovém impulzním odrazovém a případně přístroje Olson Freedom Data PC (obr. 5), resp. Olson NDE 360 od australského výrobce, pracující na principu měření impact echo. Tyto přístroje jsou vzájemně obdobné, co se týká základních parametrů – barevný displej, rozlišení apod., ale výrazně se liší např. mobilitou (hmotnost 1,5 až 10,5 kg), obsluhou sondy aj.

V poslední době přichází na trh švýcarská firma PROCEQ SA se zcela novými výrobkem – přístrojem PUNDIT PL-200PE. Nově vyvinutý přístroj pro měření odrazu ultrazvukového impulzu (ultrasonic puls echo) vychází z mnohaleté tradice ultrazvukového přístroje této značky. Základem je robustní indikační přístroj s dotykovým barevným displejem nové generace chráněný průmyslovým vzorem, konstruovaný pro použití v náročném prostředí v terénu. K indikačnímu přístroji jsou dodávány buď ultrazvukové sondy pro snímání podélných vln (od 24 do 500 kHz), nebo pro snímání příčných vln (250 kHz) – ozn. PUNDIT PL-200 (obr. 6), nebo lehký a ergonomicky tvarovaný snímač odrazu ultrazvukových impulzů – ozn. PUNDIT PL-200PE (obr. 7).

Přístroj PUNDIT PL-200PE svými parametry plně vyhovuje požadavkům směrnice RI-ZPF-TU, lze jím měřit tloušťku stěny konstrukce z jedné strany (obr. 8a, b) a nabízí mnoho dalších speciálních funkcí, jako je pokročilá technologie pro sledování bočních (parazitních) odrazů impulzu, pomáhajících při identifikaci hlavního odrazu. Dalšími funkcemi jsou automatický odhad rychlosti impulzu, optická zpětná vazba přímo na snímači zvyšující účinnost měření, možnost nastavení jak napětí impulzů, tak zisk přijímače včetně možnosti regionálního nastavení jednotek i více než deseti jazykových mutací.

Porovnáním s výše uvedenými přístroji je nutno konstatovat, že jak parametry, tak nabízeným komfortem obsluhy včetně snímače vážícího pouhý 1 kg lze v současné době tento přístroj hodnotit jako špičkový. Přístroj je možné využít jak pro režimy skenování A-sken (A-sken umožňuje přímou analýzu původního signálu, digitální filtry pro lepší viditelnost odrazu a potlačení šumu, automatické měření tloušťky konstrukce – sledování odrazu) i B-sken (průřezový pohled kolmý na povrch skenování, usnadnění tak hledání trhlin, dutin, apod., moderní zpracování obrazu pro jeho lepší kvalitu, umístění kurzoru umožňuje přímé změření tloušťky konstrukce a lokalizaci skrytých objektů či vad; snadné měření B-skenu pomocí středové značky a měřítek přímo na snímači obr. 9) s přímým zobrazením na displeji indikačního přístroje. Přístroj je specialisty na celém světě za podpory výrobce (který má své filiálky např. v USA, Anglii, Brazílii, Singapuru, Rusku, Číně, Arabských Emirátech) podrobně testován v různých pracovních podmínkách i prostředích, aby uživatelům mohla být poskytnuta co nejvyšší podpora z hlediska aplikace a správného vyhodnocování. Z tohoto důvodu nabízí výrobce uživatelům i odborné školení.

ZÁVĚR

V současné době jsme svědky prudkého rozvoje techniky a především mikroelektroniky, který umožňuje ze získaných výsledků „vytěžit“ daleko více údajů, než-li při použití dosud běžně používaných metod. Tento trend je zřejmý obzvláště v oblasti přístrojového vybavení pro nedestruktivní metody. Netýká se to jen ultrazvukové metody, ale i metody magnetického indikátoru výztuže, mikrovlnných metod a nových metod záznamu v radiografii. Zavádění těchto metod však vyžaduje interdisciplinární spolupráci, aby jednotlivé metody mohly být plně a hodnověrně využity, a klade zvýšené požadavky na odbornou kvalifikaci obsluhy.

prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Ústav stavebního zkušebnictví
Fakulta stavební VUT v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno
tel.: 541 147 836, 603 313 372

Ing. Jaroslav Mikula
TZÚS Praha, s. p.
Prosecká 811/76a, 190 00 Praha 9
tel.: 723 905 359
e-mail: mikula@tzus.cz
www.tzus.eu

…3. Na Rhodu totiž žil stavitel Diognétos, jemuž se zřetelem k vynikajícím výkonům jeho umu byl vyplácen každého roku z veřejných prostředků určitý čestný plat. V oné době přišel na Rhodos jakýsi stavitel z Aradu jménem Kalliás, uspořádal přednášku a předvedl model hradební zdi, v němž postavil stroj s otáčivým jeřábem, který uchvátil helépolis (obléhací věž, pozn. red.)*, přirážející k hradbám, a přenesl ji dovnitř za hradební zeď. Když Rhoďané tento model uzřeli, užasli nad tím, odňali Diognétovi jeho roční důchod a tuto poctu převedli na Kallia.*

4. Mezitím se král Démétrios, který pro nepoddajnost svého ducha byl nazván Poliorkétés (obléhatel měst), přichystal k válce proti Rhodu a přivedl s sebou znamenitého athénského stavitele Epimacha. Epimachos postavil obrovským nákladem a s vynaložením nejvyšší píle a práce helépolis, jejíž výška činila 125 a šířka 60 stop. Zabezpečil ji vycpávkami z chlupů a nevydělanými kůžemi, takže mohla vydržet ránu 360liberárního kamene, vrženého na ni balistou. Helépolis sama vážila 360 000 liber. Když však Rhoďané žádali Kallia, aby proti této helépoli zbudoval svůj válečný stroj, doznal Kalliás, že to nedokáže.

5. Všechno se totiž nedá provést podle týchž pravidel, nýbrž jsou jen některé věci, které jsou při provedení ve velkém měřítku podle malých modelů schopny práce; jiné však nemohou mít žádné modely a dají se sestrojit jenom ve skutečné velikosti. Některé pak jsou toho druhu, že se v modelech podobají skutečným, avšak rozpadávají se, když byly zvětšeny. Jak to můžeme pozorovat na tomto příkladě: nebozezem se vrtá díra půlpalcová, palcová, půldruhapalcová. Chceme-li však udělat týmž způsobem čtyřpalcovou, nevede to k úspěchu, přičemž půlstopová nebo ještě větší nám nepřipadá vůbec ani myslitelná.

6. Totéž je možno pozorovat i u některých modelů. Jak mohou být zhotoveny v rozměrech nejnepatrnějších a obdobným způsobem i v rozměrech o málo větších, tak nemohou být zhotoveny toutéž metodou ve velkých rozměrech.
A tak Rhoďané, kteří podobně nad oním zařízením upadli právě do takového omylu, Diognétovi ukřivdili a urazili ho. Když pak viděli nepřátele v útočném postavení, obléhací stroj připravený k dobytí města, hrozbu otroctví a nutně očekávané zpustošení města, padli před Diognétem na zem a úpěnlivě ho prosili, aby přispěl vlasti na pomoc.

7. Diognétos to zprvu odmítl. Když ho však přišli prosit urozené panny a jinoši s kněžími, přislíbil to pod podmínkou, že stroj bude jeho, jestliže se ho zmocní. Když to bylo ujednáno, dal prorazit hradbu v místě, kde k ní měla přirazit obléhací věž, a poručil, aby každý vyléval strouhami vybíhajícími před hradbu do tohoto průlomu všechnu vodu, výkaly a bláto, které mohl sehnat z veřejných míst nebo z vlastního domu. Poté co tam bylo v noci vylito velké množství vody, bláta a výkalů, zabořila se druhého dne přirážející helépolis, dříve než se přiblížila k hradbě, ve vlhké půdě, z níž se utvořilo bahniště, a nemohla ani kupředu, ani se potom z toho nemohla dostat ven. Proto Démétrios, když uznal, že byl chytrostí Diognétovou přemožen, se svým loďstvem odplul…

Marcus Vitruvius Pollio: Deset knih o architektuře,
Kniha desátá, XVI Obranná zařízení, odst. 3-7