

STANOVENÍ MÍRY ZAINJEKTOVÁNÍ KABELOVÝCH KANÁLKŮ POMOCÍ MODERNÍCH DIAGNOSTICKÝCH PŘÍSTROJŮ

DETERMINATION OF THE DEGREE OF FILLING OF CABLE DUCTS USING MODERN DIAGNOSTIC DEVICES

Jaroslav Šnédar, Vojtěch Bartoň, Petr Cíkrle

Článek se zabývá ověřením míry zainjektování kabelových kanálků předpínací výztuže injektážní maltou v mostních nosnících. Měření bylo provedeno na experimentálních modelech, které vycházely z nosníků KA-61, za pomoci nejmodernějších přístrojů – radarů GPR Live (8000) a PS 1000 X-scan a ultrazvukového pulzního echa Pundit 250 Array.

This article deals with the verification of the degree of filling of cable ducts of prestressing reinforcement with grouting mortar in bridge girders. The measurements were performed on experimental models based on KA-61 beams, using state-of-the-art instruments: GPR Live (8000) and PS 1000 X-scan radars and the Pundit 250 Array ultrasonic pulse echo.

Životnost dodatečně předpjatých konstrukcí závisí do značné míry na životnosti předpínacích kabelů. Jedním z hlavních faktorů ochrany předpínací výztuže je správně provedená injektáž, tedy ideálně dokonalé vyplnění kabelových kanálků maltou. Injektáž zabraňuje vodě, kyslíku a rovněž látkám přispívajícím ke korozi dostat se k předpínací výztuži.

Stanovení míry zainjektování kabelových kanálků je tedy základem hodnocení předpjatých konstrukcí. Zvláště palčivý je tento problém v případě mostních nosníků typu KA-61, KA-73, I-62, I-73 (ale i ostatních typů), přičemž pravděpodobnost výskytu výrazných dutin v kabelových kanálcích bývá vyšší u starších typů nosníků. Při plánování experimentu jsme proto vycházeli z uspořádání kabelových kanálků mostního nosníku KA-61, neboť ten je jedním z nejrozšířenějších a je z uvedených typů nejstarší.

Při stanovení míry vyplnění kanálků maltou jsou v České republice využívány téměř výhradně invazivní metody – návrt ke kanálku a následné obnažení výztuže, v lepším případě malopřůměrový vrt do kanálku nebo

do injektážního otvoru v kotevní desce a prohlídka dutiny pomocí endoskopu nebo videoskopu. Ještě v nedávné minulosti byla k dispozici nedestruktivní radiografická metoda – prozařování kobaltem Co 60 –, v současnosti však již tuto metodu z legislativních a finančních důvodů prakticky nelze použít. Teoreticky je možné využít prozařování pomocí rentgenů, zde jsme však kromě obtížného přístupu ke konstrukci limitováni rovněž tloušťkou prozařovaného betonu, neboť rentgeny jsou schopny efektivně prozářit pouze cca 100 až 120 mm betonu (lze prozářit např. tenké stojiny nosníků přístupné z obou stran).

Zejména v Německu, ale i v dalších zemích již od 90. let 20. století testují další nedestruktivní metody, jako např. impact-echo, ultrazvuk nebo radar, s cílem alespoň zmapovat místa s větším rizikem výskytu dutin [2], [3], [4]. Pravdou je, že publikace svědčí spíše o výzkumném charakteru této diagnostiky, většímu rozšíření do praxe zpočátku bránila nedokonalá nebo příliš složitá přístrojová technika. To se však začíná měnit s vývojem nových moderních měřicích přístrojů, z nichž některé

byly využity ke zde prezentovanému experimentu.

Využité metody a přístroje

V rámci experimentu byly testovány dvě nedestruktivní metody:

- metoda georadaru (GPR),
- metoda ultrazvuková odrazová (pulse echo).

Metoda georadaru (známá jako GPR – Ground Penetrating Radar) je založena na principu vysílání vysokofrekvenčních elektromagnetických pulzů do zkoumaného prostředí a následné registraci jejich odrazů od překážek. Volba vysílací frekvence úzce souvisí s hloubkovým dosahem přístroje a typem očekávaného objektu [5].

Měření bylo provedeno pomocí dvou různých radarových přístrojů, které jsou v současnosti v Evropě pro lokalizaci výztuže zřejmě nejrozšířenější. Jedná se o Hilti PS 1000 X-scan s trojicí orientovaných antén o frekvenci cca 1,5 GHz a dále o Proceq GPR Live sice s jedinou anténou, která však postupně mění frekvence od 1,0 GHz až do 2,6 GHz z důvodu lokalizace odlišných typů objektů v různých hloubkách.

Při použití ultrazvukové metody odrazové (pulse echo) se doba průchodu signálu zkoumaným prvkem zjišťuje jako čas, který uplyne mezi vysláním ultrazvukové vlny do prostředí, následným odrazem vlny od vzdáleného povrchu (příp. vady) a zaznamenaním odraženého echa v místě vyslání signálu. Na trhu se objevuje stále více přístrojů pro tuto metodu, mezi nejznámější patří např. systém MIRA [6]. My jsme měli k dispozici přístroje Pundit PL 200 PE a Pundit 250 Array. Odrazové sondy jsou z důvodu lepších možností analýzy odražených signálů konstruovány jako maticové, tedy s větším počtem budičů a snímačů uspořádaných do matice (obr. 1). Používají se nízkofrekvenční ultrazvukové snímače krátkých pulzů s kontaktem suchého bodu – ve světě je tento princip známý jako tzv. dry point contact (DPC) [7].

Tvorba experimentálních modelů

Nosníky typu KA jsou prefabrikované předpjaté mostní nosníky jednokomorového průřezu jednotné šířky 980 mm, jejich výška se liší podle délky a typu. Nosníky KA se vyskytují ve variantách KA-61 a KA-67.

Pro tvorbu experimentálních modelů byl vybrán nosník KA-61 pro světlost 9 m. Tento nosník je vyztužen měkkou (betonářskou) výztuží v podélném směru $4 \times \text{Ø} 10 \text{ mm}$ a v příčném směru smykovou výztuží $\text{Ø} 6 \text{ mm}$

200 mm. V polovině rozpětí nosníku se nachází osm kanálků předpínací výztuže v dolní desce, dva kabelové kanálky ve stojínách a dva kabelové kanálky v horní desce. Celkem je tedy v nosníku umístěno 12 kabelových kanálků. Chráničky kabelových kanálků byly tvořené ocelovými tenkostěnnými trubkami typu „sandrik“ $\text{Ø} 32 \text{ mm}$, v praxi se však setkáme i s kabelovými kanálky, které jsou bez ochranné trubky. Beton nosníků byl předepsán dle tehdejší klasifikace značky 500 [8].

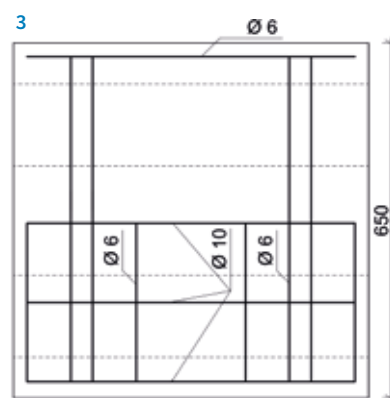
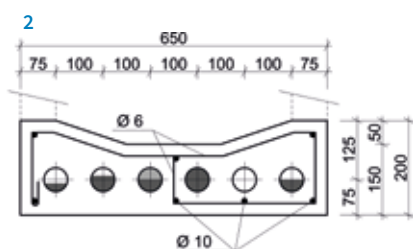
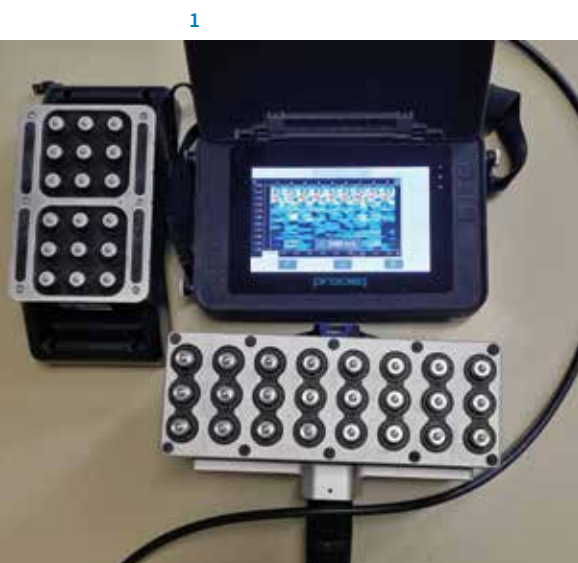
Při tvorbě experimentálních modelů byly provedeny určité změny především z důvodu lepší manipulace s modely. Tyto změny byly provedeny tak, aby byly minimalizovány odlišnosti výsledků experimentálního měření a měření na reálné konstrukci. Hlavním rozdílem oproti nosníkům KA-61 je použití trubek $\text{Ø} 50 \text{ mm}$ pro ochranu kabelových kanálků. Tato změna byla nutná z důvodu nedostupnosti původního průměru trubek na současném trhu. Dalším podstatným rozdílem je zmenšení šířky nosníku na 650 mm a snížení počtu kabelů ve spodní desce z původních osmi na šest (odstranění krajních kabelů), což je pro účely tohoto výzkumu dostatečné. I přes veškeré výše zmíněné změny byly zachovány poměry základních rozměrů, jako je osová vzdálenost kabelových kanálků, úhel náběhů vnitřní komory nosníku apod. Experimentální modely jsou tvořené pouze spodní deskou komorového nosníku. Vytvoření

stojin a horní desky komorového průřezu nebylo účelné, protože i při měření na reálné konstrukci je zpravidla přístupný pouze pohled nosníků.

Aby byly postiženy všechny možnosti ochrany kabelových kanálků, byly vytvořeny tři experimentální modely. Kabelové kanálky v modelu č. 1 jsou ponechány bez ochranné trubky, v modelu č. 2 jsou vytvořeny polyetylenovými chráničkami a v modelu č. 3 ocelovými tenkostěnnými trubkami typu „sandrik“. V každém modelu se nachází celkem šest kabelových kanálků, v každém z nich je umístěno lano předpínací výztuže. Kabelové kanálky jsou vyplněny vysokopevnostní injektáží maltou Groutex 603, přičemž každý kanálek je pro účely výzkumu vyplněn jinak. Míra vyplnění jednotlivých kabelových kanálků je znázorněna na obr. 2 a uvedena v tab. 1.

Vyztužení modelů měkkou výztuží odpovídá nosníkům KA-61 pouze v první polovině šířky, kde podélnou výztuž nosníku tvoří $3 \times \text{Ø} 10 \text{ mm}$ a příčnou (smykovou) výztuž $\text{Ø} 6 \text{ mm}$ po 200 mm. Druhá polovina experimentálních modelů byla vyztužena pouze konstrukčně, a to při vnitřním okraji komory tak, aby bylo možné sledovat vliv betonářské výztuže při měření. Způsob vyztužení experimentálních modelů je zjevný z obr. 2 a 3.

Složení betonu bylo zvoleno tak, aby odpovídalo pevnostní třídě nosníku KA-61, tedy betonu původní



1 Ultrazvukový přístroj Pundit PL s maticovými sondami 200 PE a 250 Array 2 Řez experimentálním modelem 3 Schéma vyztužení experimentálních modelů 4 Měření ultrazvukovým přístrojem Pundit 250 Array 5 Měření radarem GPR Live – plošný sken

1 Pundit PL ultrasonic device with 200 PE and 250 Array matrix probes 2 An outline of reinforcement in the experimental models 3 Section across the experimental model 4 Ultrasonic measurement by Pundit 250 Array 5 Radar measurement by GPR Live – a scan of the area

Tab. 1 Míra vyplnění kabelových kanálků injektážní maltou (na obr. 2 zprava)
Tab. 1 Filling rate of cable ducts with grout (from right to left in the fig. 2)

Kabelový kanálek	Způsob vyplnění
1	vyplněn z ½ (rovnoměrně v podélném směru)
2	bez vyplnění
3	zcela vyplněn
4	vyplněn z ½ (diagonálně v podélném směru)
5	vyplněn ze ¾ (rovnoměrně v podélném směru)
6	vyplněn z ⅓ (rovnoměrně v podélném směru)

značky 500. Konkrétní složení betonu je uvedeno v tab. 2.

Z každé záměsi pro jednotlivé modely byly vytvořeny vždy tři zkušební krychle s hranou 150 mm. Na těchto tělesech byla destruktivně stanovena pevnost v tlaku a následně bylo z průměrných hodnot provedeno zatřídění. Beton ze všech záměsí odpovídal dle [9] pevnostní třídě C35/45, což podle v současnosti již neplatné normy [10] odpovídá zmiňovanému označení betonu 500, ze kterého se dříve nosníky KA-61 vyráběly.

Metodika a vyhodnocení měření

Z důvodu přehlednosti měření bylo zapotřebí experimentální modely označit. Na modely byl proto nanesen přehledný rastr po 50 mm (obr. 4). Linie rovnoběžné s osami kabelových kanálků byly očíslovány číslicemi 1 až 13 a linie kolmé na osy kanálků písmeny A až L. Linie byly také barevně odlišeny. Červené linie po 150 mm jsou určeny pro měření radarem Hilti PS 1000, naopak modré linie po 50 mm jsou určeny pro radar GPR Live a ultrazvukovou sondu Pundit 250 Array.

Samotné měření lze rozdělit na dvě etapy. V první byly využity radary Hilti PS 1000 a GPR Live. Ačkoliv oba přístroje umožňují provést liniové i plošné skeny, pro účely tohoto výzkumu byly provedeny především plošné skeny, neboť při jejich zpracování je možné vést liniový řez libovolnou linií z plošného skenu a získat tak podstatně více informací. Z měření provedených oběma radary se potvrdily předpoklady, že jsou radary schopné poměrně přesně identifikovat počet, umístění a krytí betonářské výztuže i kabelových

kanálků, a to i v případě, kdy ochrana kabelového kanálku není tvořena ochrannou trubkou. Obdobné výsledky jsou uvedeny v řadě prací jiných autorů, např. v [11], [12]. Co se týče schopnosti radarů Hilti PS 1000 a GPR Live stanovit míru zainjektování kabelových kanálků, zde se bohužel ukázalo, že radary nejsou pro tento účel vhodné, neboť na materiálu chráničky dochází prakticky k úplnému odrazu radarových vln.

Během měření byl však odhalen i určitý nedostatek obou radarů, a to v případě, kdy se kabelový kanálek předpínací výztuže nachází v těsné blízkosti betonářské výztuže (2. kabelový kanálek zprava na obr. 2). V tomto případě ani jeden z radarů nebyl schopen určit jeho přesnou polohu. V případě radaru Hilti PS 1000 pravděpodobně došlo ke spojení vrcholů parabol (betonářské výztuže a kabelového kanálku) a kabelový kanálek tak na plošném skenu zcela chybí. V případě radaru GPR Live sice došlo k zobrazení kabelového kanálku, avšak jeho poloha je výrazně odchýlená od polohy reálné. Tento nedostatek může být značným problémem např. v případě využití radarů k lokalizaci výztuže pro odběr jádrových vývrtů z konstrukce, neboť by mohlo dojít k narušení kabelového kanálku, příp. i předpínací výztuže v nosnících.

V druhé sekci měření bylo využito ultrazvukové pulzní echo Pundit 250 Array. Před samotným měřením byl přístroj optimálně nastaven pro konkrétní modely a byla změřena rychlost šíření impulzů příčného vlnění pro jednotlivé modely (pro model č. 1 byla 2 428 m/s a pro modely č. 2 a č. 3 byla 2 500 m/s), impulzové napětí bylo

Tab. 2 Složení betonu experimentálních modelů
Tab. 2 Composition of concrete used for the experimental models

Složka	Množství [kg/m ³]
cement 42,5 R	400
písek frakce 0–4 mm	830
kamenivo frakce 4–8 mm	270
kamenivo frakce 8–16 mm	680
plastifikátor	2,4
záměsová voda	180

nastaveno na 200 V a zisk sondy pro základní měření na hodnotu 45 dB. Měření probíhala v kolmém směru na osu kanálků, tedy linie A až L a ve směru rovnoběžném s osami kanálků, tedy linie 1 až 13.

Prvním podstatným srovnáním je provedení skenů kabelového kanálku č. 4 rovnoběžně s jeho osou. Kabelový kanálek je vyplněn injektážní maltou z 50 % diagonálně. Na začátku kanálku tedy není žádná injektážní malta, naopak na jeho konci je kanálek zcela zaplněn. V tomto případě ovlivňuje rozdíly mezi skeny pouze míra vyplnění kabelového kanálku, ostatní vlivy, jako např. přítomnost betonářské výztuže, typ chráničky apod., jsou ve všech skenech totožné. Jako ilustrační příklad byl zvolen soubor skenů na modelu č. 1, tedy model



bez použití ochranných trubek kabelových kanálků. Zde jsou rozdíly mezi jednotlivými skeny nejmarkantnější.

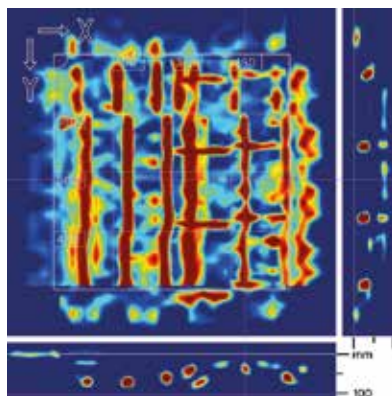
Obr. 7 se skládá z celkem 11 skenů, přičemž první sken (na obr. zcela vlevo) je na začátku kabelového kanálku (zcela bez injektážní malty) a poslední sken je proveden na konci kabelového kanálku (zcela vyplněn injektážní maltou). Je patrné, že v místech, kde je kabelový kanálek zcela bez injektážní malty, je intenzita echa nejsilnější a se vzrůstající mírou zainjektování echo postupně slábne. To je způsobené odrazem echa od vzduchové mezery, která se po délce kanálku zmenšuje.

Dalším zajímavým výsledkem je srovnání tří kabelových kanálků s různým stupněm vyplnění injektážní maltou. Na každém z obr. 8 až 10 je vidět devět skenů. První tři skeny jsou vždy provedeny na kabelovém kanálku č. 5 (vyplněn ze $\frac{3}{4}$), druhé tři skeny na kabelovém kanálku č. 3 (zcela vyplněn) a poslední skeny jsou provedeny na kabelovém kanálku č. 2 (bez injektážní malty).

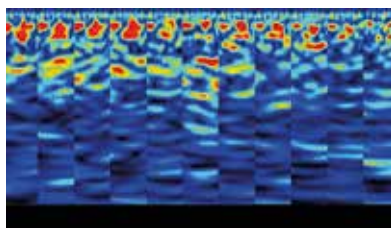
Skeny na obr. 8 byly pořízeny na modelu č. 1, u kterého není ochrana kabelových kanálků vytvořena trubkou. Ukazují se obdobné zákonitosti, které byly popsány již u obr. 7. Nejmenší intenzita echa je u kabelového kanálku č. 3, který je zcela zaplněn injektážní maltou (tři prostřední skeny). Intenzita se při snižující se míře zaplnění kabelového kanálku zvětšuje (z důvodu větší vzduchové mezery), jak můžeme vidět na třech levých skenech, které byly pořízeny na kanálku č. 5 (vyplněn ze $\frac{3}{4}$). Intenzita echa je nejvýraznější u kanálku č. 2, který je bez injektážní malty (tři pravé skeny), zde navíc došlo k deformaci echa do kapkovitého tvaru.

Skeny na obr. 9 byly pořízeny na modelu č. 2, u kterého je ochrana kabelových kanálků vytvořena pomocí plastových trubek. V tomto případě také platí, že nejintenzivnější echo vykazuje kabelový kanálek č. 2 (bez injektážní malty). Mezi kabelovým kanálkem č. 5 (vyplněn ze $\frac{3}{4}$) a č. 3 (zcela zaplněn) nelze pozorovat výrazné rozdíly.

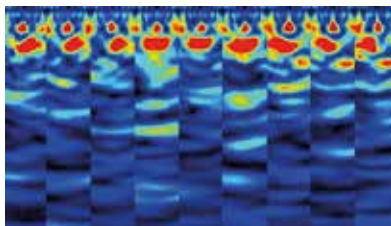
Skeny na obr. 10 byly pořízeny na modelu č. 3, u kterého je ochrana kabelových kanálků vytvořena pomocí tenkostěnných ocelových trubek typu



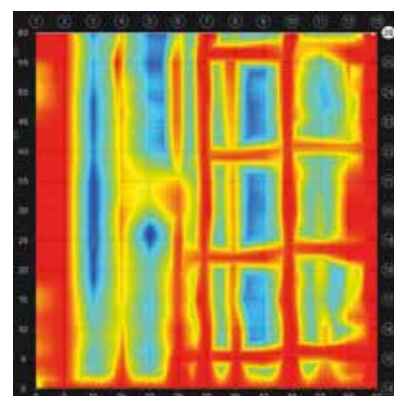
6a



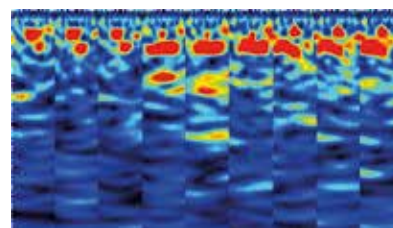
7



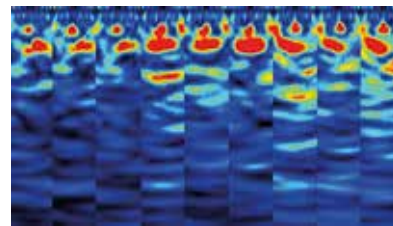
9



6b



8



10

6 Plošné skeny modelu č. 3: a) Hilti PS 1000, b) GPR Live 7 UZ měření v ose kanálku č. 4 na modelu č. 1
8 UZ měření kanálků č. 5, č. 3 a č. 2 na modelu č. 1
9 UZ měření kanálků č. 5, č. 3 a č. 2 na modelu č. 2
10 UZ měření kanálků č. 5, č. 3 a č. 2 na modelu č. 3

6 Area scans of the model No. 3: a) Hilti PS 1000, b) GPR Live 7 Ultrasonic measurement along the axis of the channel No. 4 on the model No. 1
8 Ultrasonic measurement of channels No. 5, No. 3 and No. 2 on the model No. 1
9 Ultrasonic measurement of channels No. 5, No. 3 and No. 2 on the model No. 2
10 Ultrasonic measurement of channels No. 5, No. 3 and No. 2 on the model No. 3

„sandrik“. V tomto případě dochází k atypickému chování. Neplatí zde, že čím větší vzduchová mezera (menší míra zainjektování), tím silnější echo. Kabelový kanálek č. 3, který je zcela zaplněn (tři prostřední skeny), vykazuje větší echo než kanálky č. 2 a č. 5, což je v rozporu s dosavadními měřeními. Jedním z možných vysvětlení může být způsob šíření ultrazvukových impulsů. Zatímco u kanálku č. 2 se impulzy částečně odrazí od vrchní části kovové chráničky a následně se zcela odrazí od vzduchové mezery v chráničce, tak v případě zaplněného kanálku dojde k jednomu odrazu na horní straně chráničky a druhému odrazu na zadní stěně. Jelikož přístroj registruje kromě prvního odrazu i násobné odrazy od těžce

překážky, může dojít v určitém místě k zesílení odezvy.

Během měření pomocí ultrazvuku Pundit 250 Array byly také pozorovány závislosti hloubky ech kabelových kanálků na typu chráničky (bez ochrany × plastová trubka × ocelová tenkostěnná trubka), ale také závislosti na míře vyplnění kabelových kanálků injektážní maltou.

Graf na obr. 11 znázorňuje vliv typu chráničky a míry zainjektování na hloubku ech stanovených ultrazvukovou metodou. Na vodorovné ose x je procentuální míra vyplnění kabelových kanálků injektážní maltou, na svislé ose y je hloubka ech [m]. Z grafu jsou zjevné určité zákonitosti. Hloubka ech se zvětšující se mírou zainjektování roste, zároveň ale slábne jeho intenzita

Procentuální vyplnění kabelového kanálku injektážní maltou



11 Hloubka ech v závislosti na typu chráničky a míře vyplnění
11 Depth of echoes in relation to the type of protector and the degree of filling

(obr. 8 a 9). Hloubka ech u kabelových kanálků bez ochranné trubky, kde jsou rozdíly nejmarkantnější, se pohybovala v rozmezí od 70 do 104 mm, rozdíl tedy činí až 34 mm, reálná vzdálenost os kanálků od pohledové plochy je 75 mm (krytí 50 mm). Je také zřejmé, že kabelové kanálky s ochranou z plastové trubky a z ocelové tenkostěnné trubky typu „sandrik“ se chovají obdobně, hloubka ech v závislosti na míře zainjektování se však zvětšuje méně než u modelu bez ochranných trubek. Všechny tyto výše popsané výsledky měření pomocí ultrazvuku jsou i v souladu s poznatky dalších autorů zabývajících se touto tematikou, např. [2], [4], [13].

Závěr

Na základě měření na modelech předpjatých nosníků se ukázalo, že radary Hilti PS 1000 a GPR Live jsou vhodné především pro stanovení počtu, přesné polohy a krytí betonářské výztuže i kabelových kanálků, což koresponduje s řadou výsledků jiných autorů. Byl však odhalen i určitý nedostatek těchto přístrojů, o kterém se jiní autoři obvykle nezmiňují. V případě, že je betonářská (podélná) výztuž v těsné blízkosti kabelového kanálku, nejsou přístroje kabelový kanálek schopny identifikovat buď vůbec, nebo s výraznými odchylkami od jeho reálné polohy.

Měření ultrazvukem Pundit 250 Array bylo pro tento výzkum účelnější. Z měření jsou především patrné rozdíly mezi kabelovými kanálky s různým stupněm zainjektování a současně i rozdíly mezi jednotlivými typy chrániček. Pomocí

této metody sice není možné s absolutní jistotou stanovit přesnou míru zainjektování ani typ chráničky, avšak lze důkladně a zcela nedestruktivně zmapovat odlišnosti a relativní rozdíly po celé délce konstrukce. Na základě vyhodnocení skenů pak bude možné vybrat zkušební místa pro provedení ověřovacích semidestruktivních sond, s jejichž pomocí bude možné kvantifikovat míru vyplnění kanálků injektážní maltou.

Využití ultrazvukové odrazové metody může přispět k podstatnému zlepšení efektivity diagnostiky kabelových kanálků a zvýšení pravděpodobnosti odhalení míst s poruchami injektáže. Je zřejmé, že od laboratorního výzkumu k reálné diagnostice povede ještě dlouhá cesta, avšak vzhledem k vývoji měřicí techniky lze v blízké budoucnosti očekávat zvýšení citlivosti metody.

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu juniorského specifického vysokoškolského výzkumu na VUT č. FAST-J-21-7485.

Za pomoc při měření s přístroji Proceq děkujeme Josefu Červenkově z TZÚS Praha, s. p.



Ing. Jaroslav Šnědar
jaroslav.snedar@vutbr.cz



Ing. Vojtěch Bartoň
176012@vutbr.cz



doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
petr.cikrle@vutbr.cz

všichni:
Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav stavebního zkušebnictví

Literatura:

- [1] SMÍŠEK, P. Injektáž kabelů dodatečného předpětí. *ASB-portal.cz* [online]. 22. 8. 2013. © Jaga Media, s. r. o. [cit. 15. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/mosty/injektaz-kabelu-dodatecneho-predpeti>
- [2] KRAUSE, M., MILMANN, B., MAYER, K., SCHICKERT, M. Investigation of Tendon Ducts by Means of Ultrasonic Echo Methods: A Comparative Study. In: *9th European Conference on NDT (ECNDT 2006)*, 25.–29. September 2006, Berlin, Germany. 2006.
- [3] KRAUSE, M., MILMANN, B., MIELENTZ, F., STREICHER, D., REDMER, B., MAYER, K., LANGENBERG, K.-J., SCHICKERT, M. Ultrasonic Imaging Methods for Investigation of Post-tensioned Concrete Structures: A Study of Interfaces at Artificial Grouting Faults and Its Verification. *Journal of Nondestructive Evaluation*. September 2008, Vol. 27, Issue 1–3, pp. 67–82. DOI 10.1007/s10921-008-0033-5.
- [4] KRAUSE, M., MIELENTZ, F., MILMAN, B., MÜLLER, W., SCHMITZ, V., WIGGENHAUSER, H. Ultrasonic imaging of concrete members using an array system. *NDT & E International*. September 2001, Vol. 34, Issue 6, pp. 403–408. DOI 10.1016/S0963-8695(01)00007-X.
- [5] CIKRLÉ, P., ANTON, O. Vývoj nedestruktivních metod pro zkoušení betonu za posledních 25 let. *Beton TKS*. 2015, roč. 15, č. 3, s. 3–7. ISSN 1213-3116.
- [6] MIRA – Ultrasonic Pulse Echo Imaging. Construction Testing Equipment. *pcte.com.au* [online]. © 2020 PCTE [cit. 15. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.pcte.com.au/mira-ultrasonic-pulse-echo-imaging>
- [7] SHEVALDYKIN, V. G., SAMOKRUTOV, A. A., KOZLOV, V. N. Ultrasonic Low-Frequency Short-Pulse Transducers with Dry Point Contact. Development and Application. In: *International Symposium Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*. 2003, 66, pp. 16–19.
- [8] TP. *Prefabrikované cestné mosty svetlosti 9-12-15-18-21 m montované z predpätých nosníkov KA-61: úplný typový podklad, časť A*. Bratislava: Štátny ústav dopravného projektovania – Dopravoprojekt, 1961. 27 s.
- [9] ČSN EN 206+A1. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ČNI, 2018.
- [10] ČSN 73 2001. *Projektování betonových staveb*. Praha: ČNI, 1972.
- [11] ANTON, O., KOMÁRKOVÁ, T., HEŘMÁNKOVÁ, V. An optimal method of determining the position of bends on shear reinforcement as part of the diagnosis of reinforced concrete beam structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Jun 2019, Vol. 549, 012015.
- [12] CRUZ, P. J. S., TOPCZEWSKI, L., FERNANDES, F. M., TRELA, CH., LOURENÇO, P. B. Application of radar techniques to the verification of design plans and the detection of defects in concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2010, Vol. 6, Issue 4, pp. 395–407. DOI 10.1080/15732470701778506.
- [13] LIN, S., SHAMS, S., CHOI, H., AZARI, H. Ultrasonic imaging of multi-layer concrete structures. *NDT & E International*. April 2018, Vol. 98, pp. 101–109. ISSN 0963-8695.