



NEDESTRUKTIVNÍ DIAGNOSTICKÉ METODY FORTIFIKAČNÍCH STAVEB PŘED A PO ZATÍŽENÍ VÝBUCHEM

Jiří ŠTOLLER¹, Petr DVOŘÁK²

ABSTRAKT

Článek pojednává o výzkumu v oblasti fortifikačních staveb na Katedře ženijních technologií Univerzity obrany v Brně. Výzkum je zaměřen na navrhování a testování fortifikačních staveb používaných na základnách Armády České republiky v zahraničních operacích. Nedestruktivní diagnostické metody jsou důležité pro zjišťování kvality konstrukčních materiálů fortifikačních staveb před a po zatížení stavby výbuchem. Poznatky zjištěné z výzkumu fortifikačních staveb je možno použít i při návrhu prvků ochrany kritické infrastruktury, jako například k ochraně důležitých silničních uzlů nebo k ochraně energetických zařízení.

Klíčová slova:

Fortifikační stavby, nedestruktivní metody, ultrazvuková metoda, rezonanční metoda, tvrdoměrné metody.

ABSTRACT

The article deals with research in the field of fortifications at the Department of Engineer Technology of the University of Defence in Brno. The research is focused on the design and testing of fortification buildings used in the Czech Armed Forces deployed in foreign operations. Non-destructive diagnostic methods are important for determining the quality of building materials of fortification structures before and after an explosion. The findings from the research of fortification structures can also be used in the design of critical infrastructure protection elements such as the protection of important transport junctions or the protection of energy facilities.

¹ Jiří Štoller, Faculty of Military Technology, University of Defence, Kounicova 65, 662 10 Brno, Czech Republic, email: jiri.stoller@unob.cz

² Petr Dvořák, Faculty of Military Technology, University of Defence, Kounicova 65, 662 10 Brno, Czech Republic, email: petr.dvorak@unob.cz

Key words:

Fortifications, non-destructive methods, ultrasound method, resonance method, hardness methods.

1 ÚVOD

V České republice se výzkumem nových materiálů zabývá Univerzita obrany v Brně (Katedra ženijních technologií a Katedra strojírenství), Vojenský výzkumný ústav Brno, Výzkumný ústav stavebních hmot Brno, dále pak řada civilních vysokých škol jako například ČVUT v Praze, VUT v Brně a další soukromé firmy. Ve spolupráci Univerzity obrany v Brně a ČVUT v Praze byl odzkoušen nový materiál na cementové bázi. Ultra vysokohodnotný drátkobeton (UHPFRC – Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete) se vyznačuje vysokou pevností v tlaku (ultra vysokohodnotný = válcová pevnost v tlaku větší než 150 MPa) a relativně nízkým modulem pružnosti. Jedná se o materiál, který je svými parametry vhodný pro fortifikaci základen, ale i pro zvyšování odolnosti kritické infrastruktury státu. Základní výzkum UHPFRC probíhal na pracovišti Katedry betonových a zděných konstrukcí ČVUT, kde byly popsány jeho základní vlastnosti [1], [2], [3], [4].

S novým materiálem je spojena také otázka testování nových konstrukcí a diagnostiky konstrukcí před a po výbuchovém, balistickém a průrazovém zatížení. Na Katedře ženijních technologií je tato problematika řešena přes deset let [5]. V rámci řešení disertační práce s názvem „Využití drátkobetonu pro ochranné stavby“ [6] bylo započato s testováním nových ochranných konstrukcí. Dále bylo pokračováno v rámci řady projektů, například v projektu DZRO K-203 (Dlouhodobý záměr rozvoje pracoviště katedry ženijních technologií) byl v letech 2014-2015 řešen projekt s názvem „Rozvoj expertního pracoviště zaměřeného na oblast verifikace materiálových modelů pro ochranné stavby“. V současné době je dále pokračováno v rámci projektu DZRO K-201 (Dlouhodobý záměr rozvoje pracoviště katedry zbraní a munice) s názvem „Rozvoj technologií o oblasti konstrukce zbraní, střeliva, přístrojového vybavení výzbroje, materiálového inženýrství a vojenské infrastruktury“, řešeném v letech 2017-2020. Související problematika je řešena také v rámci projektu Ministerstva vnitra s názvem „Výzkum, vývoj, testování a hodnocení prvků kritické infrastruktury“. V článku je popsána ultrazvuková impulsní metoda, která se používá pro detekci diskontinuit a ke zjištění kvality vyrobeného betonu. Dále je popsána rezonanční metoda, která se používá pro zjištění vlastních frekvencí materiálu. Z těchto frekvencí lze stanovit dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku a ve smyku.

2 NEDESTRUKTIVNÍ METODY – DIAGNOSTIKA MATERIÁLŮ PŘED A PO ZATÍŽENÍ VÝBUchem

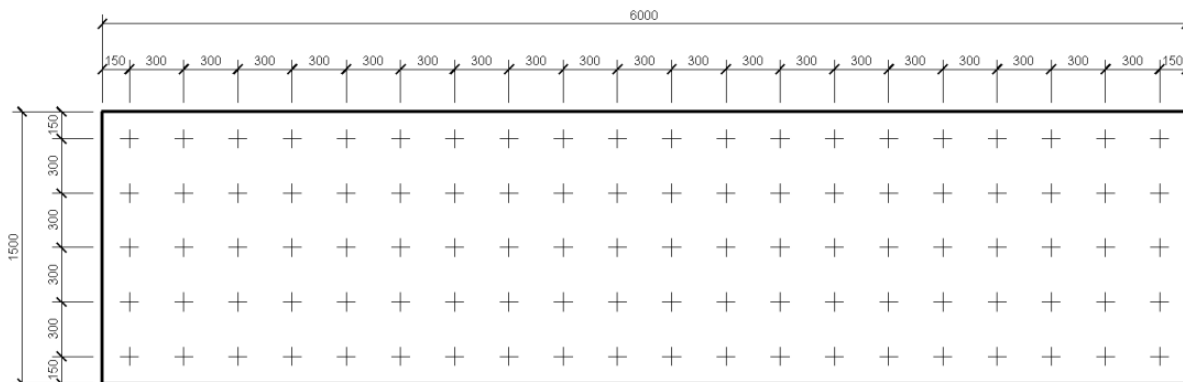
Nedestruktivní metody zkoušení (NDT) jsou v současné době ve stavební praxi využívány především při diagnostice betonových a železobetonových konstrukcí. Jsou používány pro zjišťování pevnostních charakteristik zabudovaných betonů, dále ke

zjišťování výskytu výztuže co do jejího množství, tvaru a rozmístění. V menším rozsahu jsou NDT využívány pro zjišťování defektů konstrukcí či stejnoměrnosti betonu v konstrukcích. Jejich použití pro betonové a železobetonové konstrukce je uvedeno v českých technických normách [7], [8], [9] a v evropské normě [10].

Mezi NDT používané pro diagnostiku vlastností a poruch betonu patří metody tvrdoměrné (odrazové, vtiskové), dynamické (ultrazvukové, rezonanční, impakt-echo metoda, metoda akustické emise, metoda fázových rychlostí a metoda tlumeného rázu), elektromagnetické (elektromagnetické sondy, metoda rozptylových toků indukovaných elektrickými čidly, metoda magnetická prášková, magnetická indikace výztuže, mikrovlnné metody), elektrické (odporové metody, kapacitní metody, polovodičové metody), radiační (radiometrické metody, radiografické metody, měření radonu), metody místního porušení (jádrové vývrty, odtrhové zkoušky, tvrdoměrné vnikací), chemické a další. Přehled těchto metod je uveden v [11]. Hlavní výhodou metod NDT, nikoliv však jedinou, je možnost opakování testů, protože při této metodě nedochází k porušení vzorků. Výhody ultrazvukových metod pro diagnostiku velkých staveb (mostní konstrukce) jsou prezentovány v [12]. Přehled metod použitelných pro diagnostiku betonových prvků je uveden v [13], [12], [14].

2.1 ULTRAZVUKOVÁ METODA

Ve stavební praxi se pro stanovení vlastností materiálu a pro lokalizaci poruch a vad používá několik druhů ultrazvukových (UZ) metod [13]. Ultrazvuk je mechanické kmitání částic kolem rovnovážné polohy (stejně jako zvuk a hluk) šířící se v pružném prostředí. Frekvence UZ vln je mimo slyšitelné spektrum, tedy více než 20 kHz. Ve stavebnictví se používá UZ vlnění s kmitočty v rozmezí od 20 kHz do 150 kHz (výjimečně až 500 kHz). Výhodou UZ vlnění je, že se šíří i relativně silnými vrstvami materiálu, kde se například slyšitelné vlnění rychle utlumí. Z celé řady UZ metod autoři článku použili při svých reálných experimentech ultrazvukovou impulzní metodu [15]. Tato ultrazvuková impulzní metoda je založena na tom, že v nekvalitně provedeném nebo porušeném betonu se sníží jak rychlost šíření UZ impulzů, tak se značně zvýší útlum vlnění. Vhodně zvolené body měřičské sítě na testovaném vzorku (Obrázek 1), případně konstrukci, slouží k pokrytí oblastí nižších pevností betonu, oblastí špatného zhutnění betonu a míst porušení betonu trhlinami.

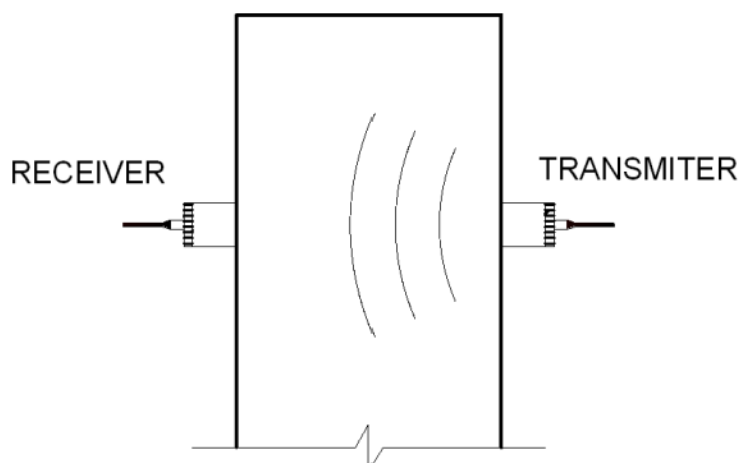


Obrázek 1 Měřičská síť na full-scale desce testované na vzdálený výbuch

Metoda je používána na stavbách ke kontrole stejnorodosti, pevnosti a defektoskopie betonových a železobetonových konstrukcí. Akustické veličiny zjištěné při postupu pružných vln zkoumaným prostředím umožňují získat nepřímou informaci o jeho fyzikálně mechanických vlastnostech a vadách. Beton se zkouší ultrazvukem se záměrem zjistit některou z jeho vlastností:

- rychlost šíření UZ vlnění [16],
- dynamický modul pružnosti [16],
- pevnost v tlaku [16],
- pevnost v tahu za ohybu [16],
- jiná vlastnost (hmotnost, vodotěsnost, mrazuvzdornost, plynotěsnost), která je v korelaci s rychlostí UZ.

Na základě vyhodnocení rychlosti podélného vlnění (Obrázek 2) je možné stanovit vlastnosti zkoumaného betonu. Vlhkost, teplota vzduchu, měřicí základna a postup měření jsou činitele, které mají vliv na měřenou rychlost šíření impulzů UZ vlnění.



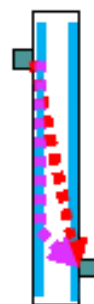
Obrázek 2 Princip měření ultrazvukovou impulzní metodou

Při vzniku trhliny na spojnici měřicích bodů se prodlužuje dráha a tím i čas průchodu v závislosti na tom, jak velkou „objížděku“ musí impulz překonat. Trhlina se chová jako fázové rozhraní, které má řádově nižší rychlosti průchodu impulzu spolu s jeho velkým útlumem [17], [18]. Trhlina je tím pádem nejlépe detekovatelná, je-li orientována kolmo ke směru měření (šíření impulzu) [17].

Z tohoto důvodu je nutné změnit postup při zjišťování diskontinuit po zatížení konstrukce výbuchem TNT. Autoři doporučují v tomto případě zvýšit počet měřicích bodů podle předpokládaných míst vzniku trhlin a diskontinuit a soustředit se na tato místa. Navíc je vhodné přímou metodu prozvučování (Obrázek 3) doplnit o polopřímou metodu (Obrázek 4).



Obrázek 3 Přímé prozvučení



Obrázek 4 Polopřímé prozvučení

Polopřímá metoda nebude dávat přesné výsledky rychlosti průchodu ultrazvukových vln, ale bude sloužit pouze pro detekci diskontinuit, které nejsou kolmé na směr šíření ultrazvukové vlny. Při přímé metodě nemusíme zjistit celkový rozsah poškození vzorku, protože trhliny, které jsou rovnoběžné se směrem šíření ultrazvukových vln nemusí být detekovány snížením rychlosti přenosu vlny.

Autoři článku mají vlastní praktické zkušenosti [17], [15], [16], [18], [19], [20], [21] a [22] s dynamickou NDT (Obrázek 5), kterou použili pro vyhodnocování experimentů v polních podmínkách. Pro validní vyhodnocení účinků výbuchů bylo prozvučeno 5500 bodů. Tuto metodu použili z důvodu jednoduchosti provedení in situ. Touto metodou byl zjištěn rozsah poškození vzorků po zatížení výbuchem. Měřeným parametrem byla rychlost šíření pružného vlnění v testovaných deskách.



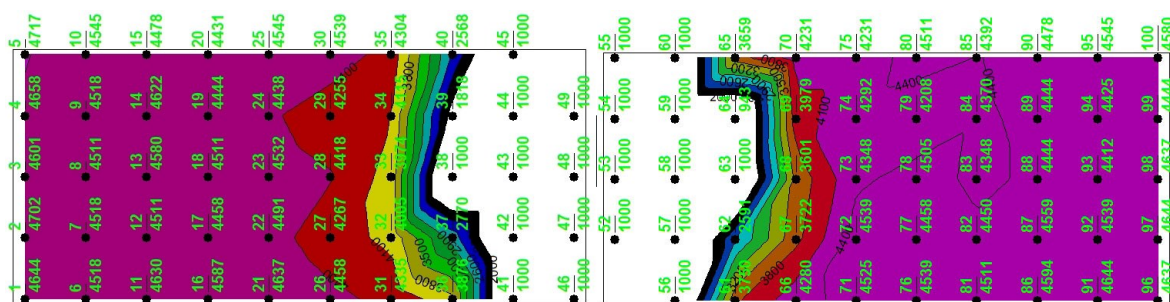
Obrázek 5 Měření full-scale desky UZ metodou před zatížením výbuchem 25 kg TNT

Pro reálné měření na zkušebních deskách v poli byla použita přenosná aparatura Pundit Lab Plus (Švýcarsko). Tato aparatura je vybavena funkcí odhadu pevnosti v tlaku, integrovaným vlnovým měřením, razítkem reálného času a rozšířenými rozsahy sond. Skládá se z vlastního indikačního přístroje, vysílače a přijímače ultrazvukových impulzů. Indikační přístroj je snadno ovladatelný, průběhový čas a další parametry jsou zobrazovány na digitálním displeji.

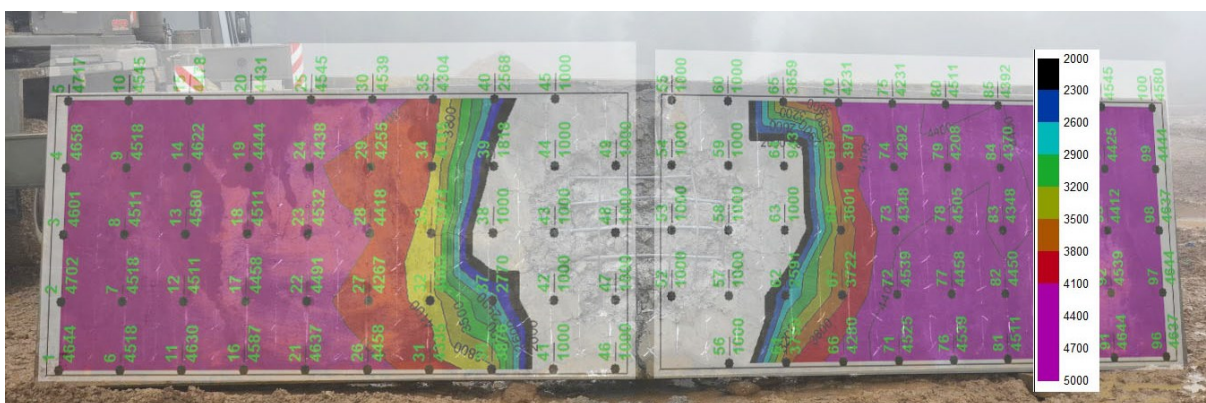
Cílem experimentálního měření v poli pomocí tohoto přístroje bylo diagnostikovat prvky a konstrukce, které byly vystaveny mimořádnému zatížení (vzdálený výbuch), před a po zatížení výbuchem trhavin. Vyhodnocování účinků tohoto typu zatížení je využitelné jak v civilním stavitelství například při vyhodnocení stavu mostovky po teroristickém útoku, tak i ve vojenském stavitelství při posuzování fortifikačních staveb (Obrázek 6, 7, 8).



Obrázek 6 Vzorek č. 1 po zatížení výbuchem 25 kg TNT



Obrázek 7 Vzorek č. 1 po zatížení 25 kg TNT – vyhodnocení dat měření pomocí software 3DFieldPro



Obrázek 8 Vzorek č. 1 po zatížení 25 kg TNT – rozsah poškození je větší než udává viditelná porucha

2.2 REZONANČNÍ METODA

Rezonanční metoda se řadí k dynamickým nedestruktivním zkušebním metodám. Tato metoda slouží ke zjišťování dynamických hodnot materiálu, jako jsou dynamický modul pružnosti v tahu/tlaku, dynamický modul pružnosti ve smyku a dynamické hodnoty Poissonova koeficientu. Nedestruktivnost této metody spočívá v tom, že při provádění zkoušek rezonančním přístrojem nedochází k odběru materiálu a napětí generována při zkoušení jsou malá a nedochází k poškození zkušebních těles [23], [24].

Princip zkoušky spočívá ve zjišťování vlastní frekvence zkoušeného tělesa. Při měření jako vlastní frekvenci označujeme vrůst amplitudy vynucených kmitů zkoušeného tělesa na maximum. Maximální amplitudu naměříme tehdy, když se vnější

budicí frekvence rovná vlastní frekvenci zkoušeného tělesa. Pokud vnější budicí frekvence je menší nebo větší než vlastní frekvence zkoušeného tělesa, naměřená amplituda je menší než maximální [23].

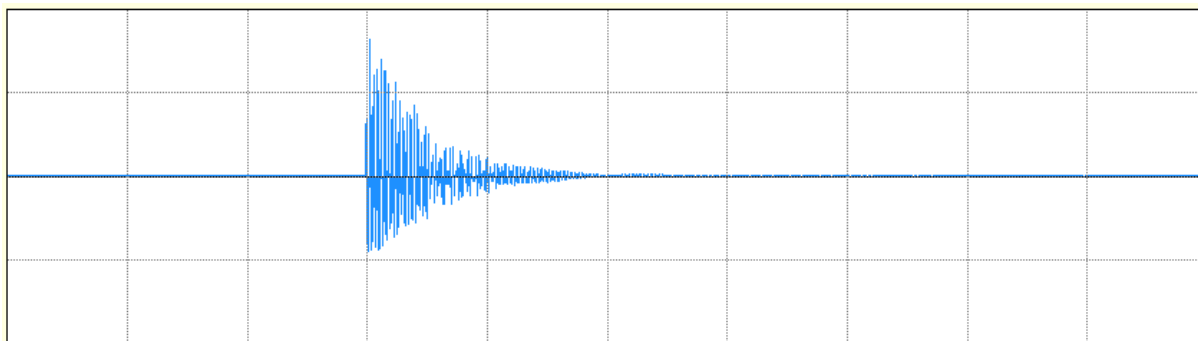
Buzení rezonančním přístrojem se může rozdělit do dvou kategorií. Jedna kategorie je spojitě buzení a druhá buzení rázem. Při spojitě buzení má přístroj dvě sondy (budič a snímač). Elektrický signál vytvořený generátorem je pomocí budiče převeden na mechanické kmitání a na základě polohy budiče a snímače se v materiálu šíří jako podélné, příčné nebo ohybové mechanické vlnění.

Přístroje se spojitým buzením mají rozsah buzení od 30 Hz do 30 kHz. Přístroj je dále vybaven osciloskopem, který slouží ke sledování amplitudy vynuceného kmitání ve zkoušeném tělese. Při měření rezonančním přístrojem se spojitým buzením se postupně zvyšuje frekvence budicího kmitání [25].

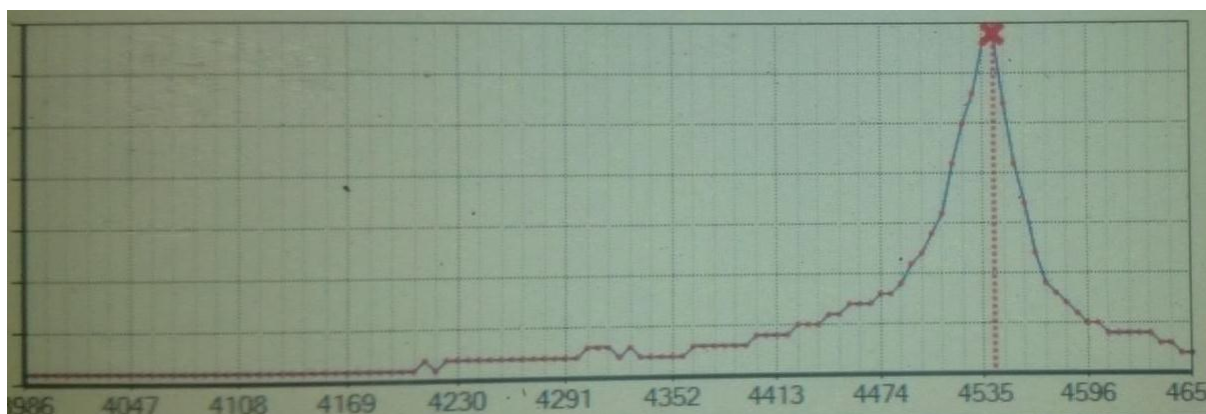
Při buzení rázem má přístroj pouze jednu sondu (snímač). Buzení se provádí pomocí ocelových kuliček, která jsou dodávány k přístroji nebo pomocí kladívka. Na základě polohy budiče a snímače se v materiálu šíří jako podélné, příčné nebo ohybové mechanické vlnění. Přístroje jsou vybaveny obrazovkou, která zobrazuje průběh vynuceného kmitání. Zobrazuje se jednak závislost amplitudy vynuceného kmitání na čase, ale také závislost amplitudy na frekvenci vynuceného kmitání. Ze závislosti amplitudy na frekvenci můžeme určit vlastní frekvenci zkušební tělesa.

Na obrázku 9 je zobrazena závislost amplitudy na čase. Na ose X je znázorněn čas a na ose Y je znázorněna amplituda. Na obrázku 10 je zobrazena závislost amplitudy na frekvenci, kde na ose X je znázorněna frekvence a na ose Y amplituda.

Jako zkušební tělesa se dle ČSN 73 1372 [26] používají dlouhé hranoly ($L \geq 2a$), dlouhé válce ($L \geq 2D$), krátké hranoly ($L \leq 2a$) a krychle a krátké válce ($L \leq 2D$). Při zkoušení hranolů, válců a krychlí se určují první vlastní frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání. Pro zkušební tělesa jiných tvarů, které neuvádí norma ČSN 73 1372 [26] nejsou vypracovány potřebné výpočtové vztahy pro určení dynamických charakteristik materiálu [26].



Obrázek 9 Závislost amplitudy na čase



Obrázek 10 Závislost amplitudy na frekvenci

Při měření vlastních frekvencí zkušebního tělesa je důležité správné podepření tělesa a to tak, aby nedocházelo k útlumu kmitání a případné rezonanci s podpěrou. Existují dva způsoby podepření zkušebních těles. Jeden ze způsobů je podepření tělesa speciální podložkou, která je natolik měkká, že dochází k minimálnímu útlumu kmitání. Druhým způsobem je podepření zkušebního tělesa v uzlových bodech kmitání. Pro toto podepření je důležité znát průběh kmitání ve zkušebním tělese.

ZÁVĚR

Detekce poruch vzniklých od zatížení výbuchem je komplexním problémem. V případě neviditelných poruch se nemůžeme spolehnout pouze na jednu metodu detekce. Z polních testů provedených v minulých letech bylo zjištěno, že přímá metoda měření musí být doplněna o polopřímou metodu měření. Nevýhodou této metody je nízká citlivost na malé trhliny. Výhodou této metody je malý počet měření oproti přímé metodě prozvučování konstrukcí. Při měření je dále zapotřebí brát zřetel na polohu výztuže v betonovém prvku, protože rychlost šíření ultrazvukového impulsu v oceli je 1,2 až 1,9krát větší než v betonu. Mohlo by dojít k průchodu impulsu přes ocel a tudíž ke zkreslení výsledků diskontinuit v betonové konstrukci. Rezonanční metoda je jednou z mnoha metod nedestruktivního hodnocení materiálů. Hlavní nevýhodou této metody je využití pouze na zkušební vzorky. Metodu nelze použít pro hodnocení stávající konstrukce.

LITERATURA

- [1] TRTÍK, T., R. CHYLÍK, P. BÍLÝ a J. FLÁDR. Analysis of laboratory compaction methods of roller compacted concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, **236**(1), 7. ISSN 1757-899X. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/236/i=1/a=012029>
- [2] FLÁDR, J., P. BÍLÝ a J. VODIČKA. Experimental Testing of Resistance of Ultra-high Performance Concrete to Environmental Loads. *Procedia Engineering*. 2016, **151**, 170-176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.366>. ISSN 1877-7058. Dostupné také z:

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816317544>
- [3] FLÁDR, J. a P. BÍLÝ. Influence of mixing procedure on mechanical properties of high-performance concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, **246**(1), 1-5. DOI: 10.1088/1757-899X/246/1/012012. ISSN 1757-899X. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/246/i=1/a=012012>
 - [4] CHYLÍK, R., T. TRTÍK, J. FLÁDR a P. BÍLÝ. Mechanical properties and durability of crumb rubber concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, **236**(1), 7. ISSN 1757-899X. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/236/i=1/a=012093>
 - [5] ŠTOLLER, J a E ZEŽULOVÁ. Testing of critical infrastructure protection against the distant trinitrotoluene blast. In: *Proceedings of the 19th International Scientific Conference, Transport Means*. 2015, s. 505-508.
 - [6] ŠTOLLER, J. *Využití drátkobetonu pro ochranné stavby*. Brno, 2005. Disertační práce. Univerzita obrany. Vedoucí práce Doc. Ing. Věroslav Kaplan, CSc.
 - [7] ČSN 73 1370. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení*. Druhé. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2011.
 - [8] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Druhé. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2011.
 - [9] ČSN 73 2011. *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. První. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2012.
 - [10] ČSN EN 12504- 4 (73 1303). *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. První. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2005.
 - [11] BREYSSE, D. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials*. 2012, **33**, 139-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811007938>
 - [12] SACK, Dennis a Larry OLSON. Advanced NDT methods for evaluating concrete bridges and other structures. *NDT & E International*. 1995, **28**(6), 349-357. DOI: [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(95\)00045-3](https://doi.org/10.1016/0963-8695(95)00045-3). ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0963869595000453>
 - [13] BLITZ, J. a G. SIMPSON. *Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing*. First edition. London: Chapman and Hall, 1996. ISBN 0412604701.
 - [14] HOŁA, J. a K. SCHABOWICZ. State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2010, **10**(3), 5-18. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60133-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60133-2). ISSN 16449665. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1644966512601332>
 - [15] ZEŽULOVÁ, E. a J. ŠTOLLER. Non-destructive Testing of Materials Used for Protective Structures Built from High Performance Fibre Reinforced Concrete after the Contact Explosion Loading. In: *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*. Brno: Brno University of Technology FME,

- 2014, s. 1-12. ISBN 978-80-214-5018-9.
- [16] ŠTOLLER, J a P DVOŘÁK. Non-destructive testing of full-scale slabs before and after blast load. In: *Transport Means-Proceedings of the International Conference*. 2015, s. 298-301.
 - [17] ŠTOLLER, J. a P. DVOŘÁK. Ultrasound Diagnosis of Protective Structures after Contact Explosion. In: *Transport Means 2014 Proceedings of the 18th International Conference*. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, Lithuania, 2014, s. 265-267. ISSN 2351-4604.
 - [18] ŠTOLLER, Jiří, Eva ZEZULOVÁ a Marek FOGLAR. Non-Destructive Examination of Cement Based Materials before and after Explosion Tests. *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2015, **796**, 125-136. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.796.125. ISSN 1662-7482. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/AMM.796.125>
 - [19] HEJMAL, Z., P. MAŇAS a J. ŠTOLLER. Measurement and numerical simulation of the effects of an explosion on HPFRC slab. In: *Proceedings of 20th International Scientific Conference Transport Means 2016, Part III*. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2016, s. 881-884. ISSN 1822-296X.
 - [20] STOLLER, J. a E. ZEZULOVA. Use of ultrasound-The ultrasonic pulse velocity method for the diagnosis of protective structures after the load of TNT explosion. In: *ICMT 2017 - 6th International Conference on Military Technologies*. 2017, s. 230-235. DOI: 10.1109/MILTECHS.2017.7988761. Dostupné také z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029357803&doi=10.1109%2fMILTECHS.2017.7988761&partnerID=40&md5=6403b7a96529918e6dd33003fab27923>
 - [21] ŠTOLLER, Jiří a Eva ZEZULOVÁ. The Application of Fibre Reinforced Concrete for Protective Shelter from Auxiliary Material. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications, 2017, **755**, 374-381. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.374. ISSN 1662-9795. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/KEM.755.374>
 - [22] ŠTOLLER, J. a P. DVOŘÁK. Structural damage diagnostics on cement composites after blast load. In: *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. 2017, s. 211-216. DOI: 10.1109/MILTECHS.2017.7988758.
 - [23] HABARTA, J. *Nedestruktivní zkoušení ve stavebnictví*. 1. Brno: VUT Brno, 2007.
 - [24] ANTON, Ondřej. *Zkušebnictví a technologie - cvičebnice*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-846-5.
 - [25] JÍROVSKÝ, L. *Experimentální porovnání metod destruktivního a nedestruktivního zkoušení betonů a vláknobetonů*. Pardubice, 2015. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Vladimír Suchánek.
 - [26] ČSN 73 1372. *Rezonanční metoda – skúšania betónu*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2012.