Tomografické zjištění anomálního rozdělení drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu

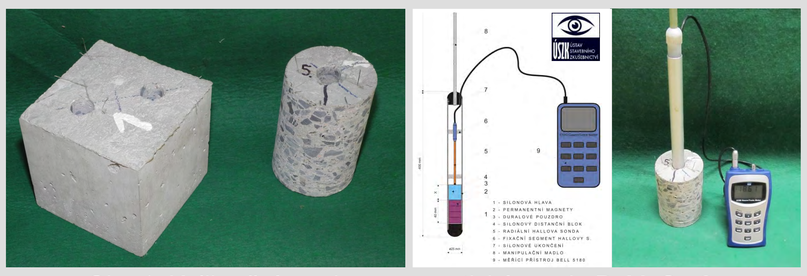
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Prof. Ing. Leonard Hobst, Csc. / Ing. et Ing. Petr Bílek / Ing. Ondřej Anton, Ph.D. / Ing. Tomáš Zikmund

Abstrakt

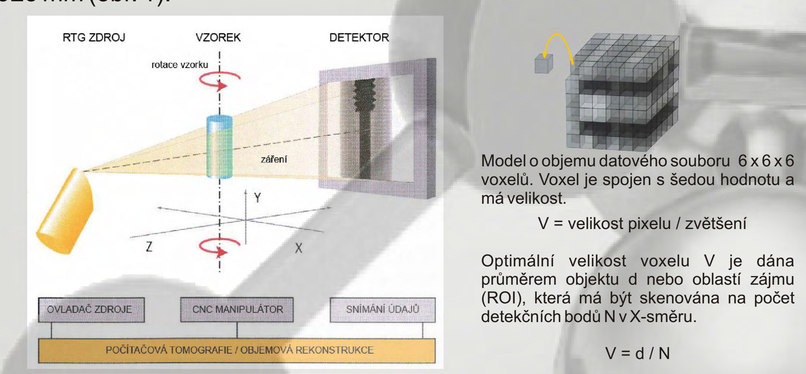
Vyvíjené metody na kontrolu koncentrace drátků v drátkobetonových konstrukcích jsou založeny většinou na magnetických nebo elektromagnetických vlastnostech drátků. Nezbytnou podmínkou pro kalibraci vyvíjených zkušebních sond je sada kalibračních vzorků (nejčastěji kostek), které obsahují předem definované množství drátků, rovnoměrně rozptýlených po celém objemu vzorku. Při kalibraci vyvíjených sond však bylo zjištěné, že některé vzorky drátkobetonu s vyšší koncentrací drátků vykazují anomální údaje (nižší koncentraci drátků nežli je stanoveno). Pokud vzorky nechceme porušit, jeví se jako jediný prostředek pro zjištění rozptylu drátků ve vzorku průmyslová tomografie.



Obr. 1: Kalibrační vzorky a magnetická sonda PeMaSo-2.

Problematika kalibračních vzorků

Právě jednou z možnosti kontroly koncentrace drátků v drátkobetonových konstrukcích je vyvíjena hloubková magnetická sonda (PeMaSo-2), založená na měření změny magnetického pole v okolí permanentních magnetů, která je vyvolána přítomností drátků (obr. 1). Pro přesnou kalibraci této sondy byla zhotovena celá řada kalibračních vzorků s různou koncentrací drátků. Některé kalibrační vzorky však vykazovaly při měření výchylky, které vedly k přesvědčení, že homogenita kalibračního vzorku vykazuje anomálie. Proto byly dva kalibrační vzorky podrobeny vyšetření počítačovou tomografií, které mělo prokázat, jak jsou kovová vlákna ve vzorku skutečně rozložena. Jedná se o válcový vývrt ø100 mm a výšce 150 mm, se středovým vývrtem ø25 mm pro umístění měřící magnetické sondy a dále krychle 150 x 150 x 150 mm se dvěma rovnoběžnými vývrty ø25 mm (obr. 1).



Obr. 2: Schéma průmyslového tomografu a co určuje rozlišení voxelu.

Stručný princip počítačové tomografie

Rentgenová počítačová tomografie je moderní zobrazovací metoda sloužící k nedestruktivní vizualizaci a analýze předmětů. Název tomografie pochází z řeckých slov tomos (řez) a grafó (kreslím), což znamená, že tomografie je technika schopná zobrazování v řezech, tedy umožňuje zobrazování vnitřní struktury bez fyzického narušení objektu. Stejně jako rentgenografie využívá při zobrazení vnitřní struktury materiálu rentgenové záření, ale na rozdíl od rentgenogramu, který je dvojrozměrný (2D), tomografie umožňuje z rentgenových snímků matematicky zrekonstruovat kontrolovaný předmět prostorově, v zobrazení 3D (obr. 3).
Výstupem této trojrozměrné zobrazovací metody je série 16 bitových obrazů, které představují virtuální řezy vzorkem (tomografické řezy). Tomografické řezy jsou matematicky počítány (tomografická rekonstrukce) z rentgenových snímků objektu vytvořených během otáčení vzorku o 360°. Otáčení vzorku je typickým znakem pro průmyslové a vědecké laboratorní CT stanice. Naopak u lékařských CT se otáčí zdroj s detektorem kvůli stabilizaci pacienta.

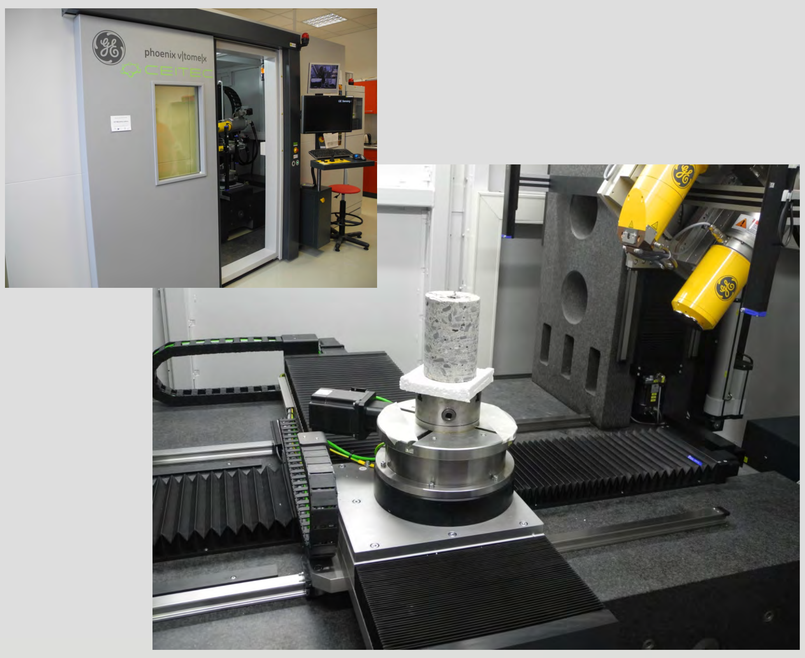
Mikrotomografie (µCT), neboli počítačová tomografie s voxelovým rozlišením na úrovni jednotek až desítek mikrometrů, dovoluje snímání vnitřní struktury trojrozměrných předmětů s vysokým prostorovým rozlišením. Pomocí µCT lze z velké škály typů materiálů získat kompletní informaci o celém objemu předmětu, což je vhodné pro zjištění tvaru vnějších a vnitřních struktur, nehomogenit, prasklin či porozity materiálu (Obr. 2). Mikrotomografie tak nachází kromě různých vědných oborů uplatnění i v celé řadě průmyslových odvětví, včetně strojírenství, elektrotechniky a stavebního průmyslu.
V tomto článku demonstrujeme možnosti µCT analýzy pro metrologii, defektoskopii, detekce vnější/vnitřní mikrostruktury a reverzní inženýrství a aplikujeme na analýzu kalibračního vzorku drátko-betonu.

Laboratoř rentgenové mikro a nano počítačové tomografie

Prvotní impulz pro započetí výzkumu a užívání µCT a podobných technik na VUT v Brně vycházel z potřeby nedestruktivně identifikovat vhodné roviny řezu pro prvkové mapování různých vzorků, především technikou LIBS (Laser-induced breakdown spectroscopy). Problematikou 3D zobrazování, se výzkumná skupina začala zabývat vývojem µCT techniky v návaznosti na spolupráci se Synchrotronem Elettra v Itálii. Spolupráce

Obr. 3: Průmyslový tomograf.

probíhá od roku 2005. Její hlavními oblastmi jsou rentgenová mikroradiografie a µCT, vývoj pokročilých nedestruktivních RTG zobrazovacích technik (dvouenergiová počítačová µCT, µCT s fázovým kontrastem) a aplikace této techniky v různých odvětvích. Také na základě této, ale i dalších spoluprací a výzkumných projektů realizovaných na dalších synchrotronech v Evropě bylo přistoupeno k vytvoření nové laboratoře v rámci struktur vědeckého centra CEITEC. Laboratoř

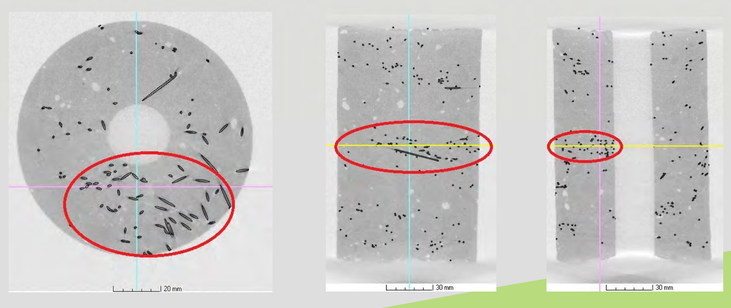


Obr. 4: GE phoenix v|tome|x L 240 a válcový vzorek upevněný v manipulátoru.

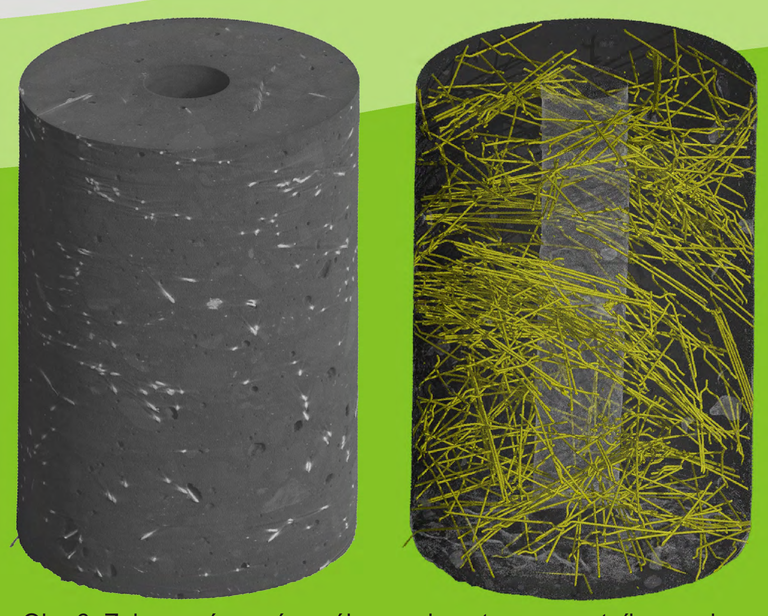
rentgenové mikro- a nanotomografie je vybavena unikátní mikrotomografickou stanicí GE v|tome|x L 240, která je v plném provozu od září 2012.
Tomografická stanice má následující základní parametry:
• maximální velikost vzorku – průměr 500 mm x výška 800 mm, (tzn. velikost opsaného válce),
• maximální váha vzorku - 50 kg,
• dosažitelné voxelové rozlišení < 2 µm pro 240kV mikrofokální RTG trubici ~1 µm pro 180 kV nanofokální RTG trubici.
Systém
• přesný granitový sedmiosý manipulační systém
• otevřené mikro- (240 kV / 320 W) a nanofokální (180 kV / 15 W) rentgenové trubice s dlouhou životností
• detektor DXR250 typu „flat-panel“, který má velký aktivní oblast (410 x 410 mm) 2048 x 2048 pixelů (rozměr pixelu 200 x 200 µm) a dynamický rozsah 10 000 : 1,
• vestavěný počítačový klastr a softwarové vybavení s moduly pro rychlou a vysoce kvalitní tomografickou rekonstrukci.
K analýze dat se využívá 3D visualizační software-u Volume Graphics Studio Max 2.2, který je vybaven metrologickým modulem pro:
• souřadnicové měření,
• měření tlouštěk stěn,
• analýzu defektů/porozit,
• porovnání nominálních a skutečných dat,
• rozšířenou analýzu pórovitosti/inkluzí.

Tomografické vyšetření kalibračního vzorku

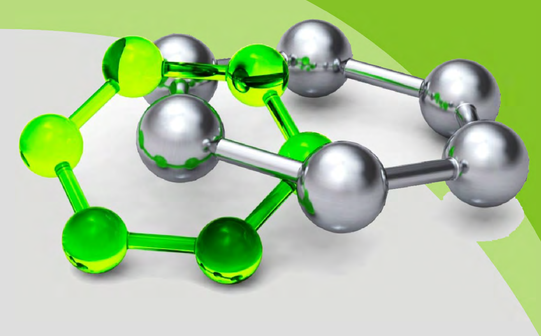
Kalibrační vzorek drátkobetonu byl pro snadnější vyhodnocování při tomografické kontrole upraven tak, že tvořil válec průměru 10 cm a délky 15 cm, jehož středem prochází otvor průměru 2,5 cm pro umístění magnetické sondy. Válec byl pevně umístěn do manipulátoru tomografu a po bezpečném uzavření stínících dveří přístroje (obr. 4) došlo k postupnému prozařování kalibračního vzorku.Následným matematickým zpracováním jsou rekonstruovány virtuální řezy vzorku. Tato data byla získána s voxelovým rozlišením 100 µm (voxel = „třírozměrný pixel“). Vhodnými počítačovými softwary lze z těchto řezů vyseparovat drátky a vytvořit 3D model vzorku. Zpracování tomografických dat trvalo 2 hod.
Výsledkem je axonometrické zobrazení kalibračního válce se zobrazením rozložení jednotlivých drátků. Toto axonometricky zobrazené těleso lze „řezat“ ve všech 3 osách (x, y a z) a je možné v tomto tělese najít „anomálie“, které způsobují odchylné výsledky při kalibraci magnetické sondy (obr. 5). Dodatečně byla odzkoušena krychle z drátkobetonu se dvěma otvory pro kalibraci. Pro zobrazení bylo nutno zvolit pracoviště s výkonějším CT přístrojem.

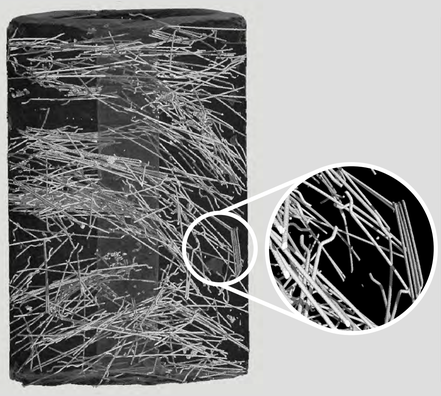


Obr. 5: Jednotlivé CT snímky s vyobrazením shluků drátků.

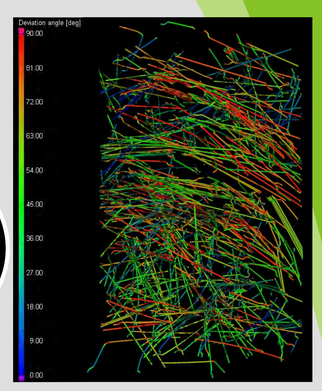


Obr. 6: Zobrazení nasnímaného vzorku a transparentního vzorku kalibračního válce s drátky.





Obr. 7: Slepené drátky z výroby, zjištěné pomocí CT v kal. vzorku.



Obr. 8: Směrová analýza drátků pomocí modulu VG Studia Max.

Závěr

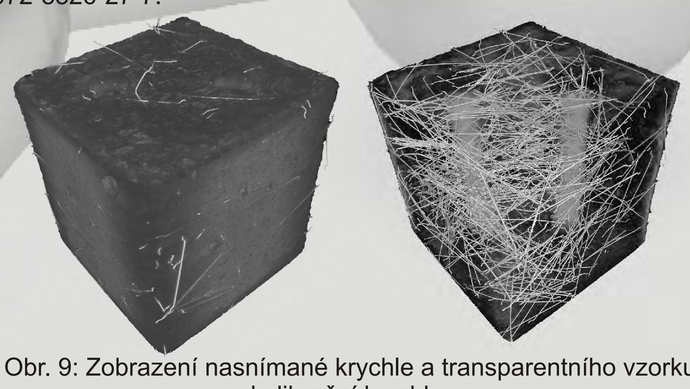
Kontrola počítačovým tomografem potvrdila předpoklad, že v kalibračním vzorku došlo k nepravidelnému rozmísení drátků (obr. 5,6,7), které při kalibraci vzorku vykazovalo anomálie ve výsledných údajích. Počítačová tomografie prokázala, že v oblasti kontroly vnitřní struktury stavebních materiálů má velkou vypovídací schopnost. Řadí se k nejpřesnějším nedestruktivním metodám, používaným v technice. Jak však bylo dále ověřeno, má tato metoda i své omezení. I když drátkobetonový válec o průměru 100 mm nebyl pro počítačový tomograf problém, drátkobetonové kostky 150 x 150 x 150 mm je již nad možnosti tomografu s rentgenkou 240 kV a bylo nutno použít tomograf s rentgenem o napětí 300 kV (obr. 9,10).

Literatura:

[1] BÍLEK, P.; HOBST, L. Ověřování homogenity drátkobetonu na kalibračních vzorcích vyvíjenou magnetickou metodou. Sanace betonových konstrukcí, 2012, roč. 2012, č. 1, s. 278-284. ISSN: 1211-3700.

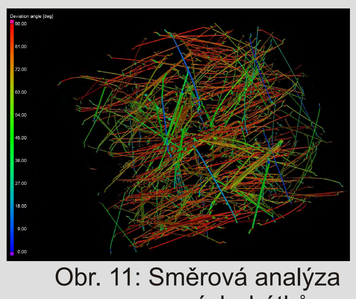
[2] HOBST, L.; BÍLEK, P.; ANTON, O.; VALA, J. Další vývoj magnetické metody pro testování homogenity drátkobetonové konstrukce. In 19. BETONÁŘSKÉ DNY 2012. Sborník ke konferenci. Hradec Králové, ČBS Servis, s. r. o. 2012. p. 479 - 482. ISBN 978-80-87158-32-6.

[3] HOBST, L.; BÍLEK, P. Various control methods developed for fibre-concrete structures. In Recent advances in integrity-reliability-failure. IRF. Funchal, Madeira, Portugal, INEGI. 2013. p. 721 - 730. ISBN 978-972-8826-27-7.



Obr. 9: Zobrazení nasnímané krychle a transparentního vzorku kalibrační krychle.

Obr. 10: Separované drátky z krychle.



Obr. 11: Směrová analýza separovaných drátků.

Autoři:

Prof. Ing. Leonard Hobst, Csc.
Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební
Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, Brno
Hobst.l@fce.vutbr.cz

Ing. et Ing. Petr Bílek
Ústav soudního inženýrství, Fakulta stavební
Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, Brno
Petr.bilek@usi.vutbr.cz

Ing. Ondřej Anton, Ph.D.
Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební
Vysoké učení technické v Brně, Veveří 95, Brno
anton.o@fce.vutbr.cz

Ing. Tomáš Zikmund
CEITEC VUT v Brně,
Technická 3058/10, 616 00 Brno
tomas.zikmund@ceitec.vutbr.cz

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu **FAST/ÚSI-S-12-1** a v rámci CEITEC - Středoevropského technologického institutu s pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem **CZ.1.05/1.1.00/02.0068** z Evropského fondu regionálního rozvoje.