

VYŠETROVANIE BETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÍ PORUŠENÝCH TRHLINAMI

INVESTIGATION OF CONCRETE STRUCTURES DAMAGED BY CRACKS

JURAJ BILČÍK, IGOR HUĐOBA

Trhlinka v betónovom prvku alebo konštrukcii predstavuje slabé miesto, ktoré môže spôsobiť redukcii pevnosti a tuhosti (ohrozenie bezpečnosti), zvýšenie priepustnosti (obmedzenie použiteľnosti) a uľahčiť prístup vody a agresívnych iónov do betónu (zmenšenie trvanlivosti). Za účelom zistenia potreby a metódy opravy je potrebné zistiť typ trhliny a príčinu jej vzniku. Článok sa pokúša zhodnotiť súčasný stav problematiky a predstavuje systém na podporu „manažovania“ životnosti betónových konštrukcií.

A concrete component or structure marked by cracks represents a weak spot which could result in strength and stiffness reduction (safety reduction), per-

meation increase (serviceability reduction) and faster penetration of water and aggressive ions into the concrete (durability reduction). In order to assess the need for repair and method a good understanding of the type of crack and causes is required. The paper reviews the present situation and the use of the Expert System in managing the service life of concrete structures.

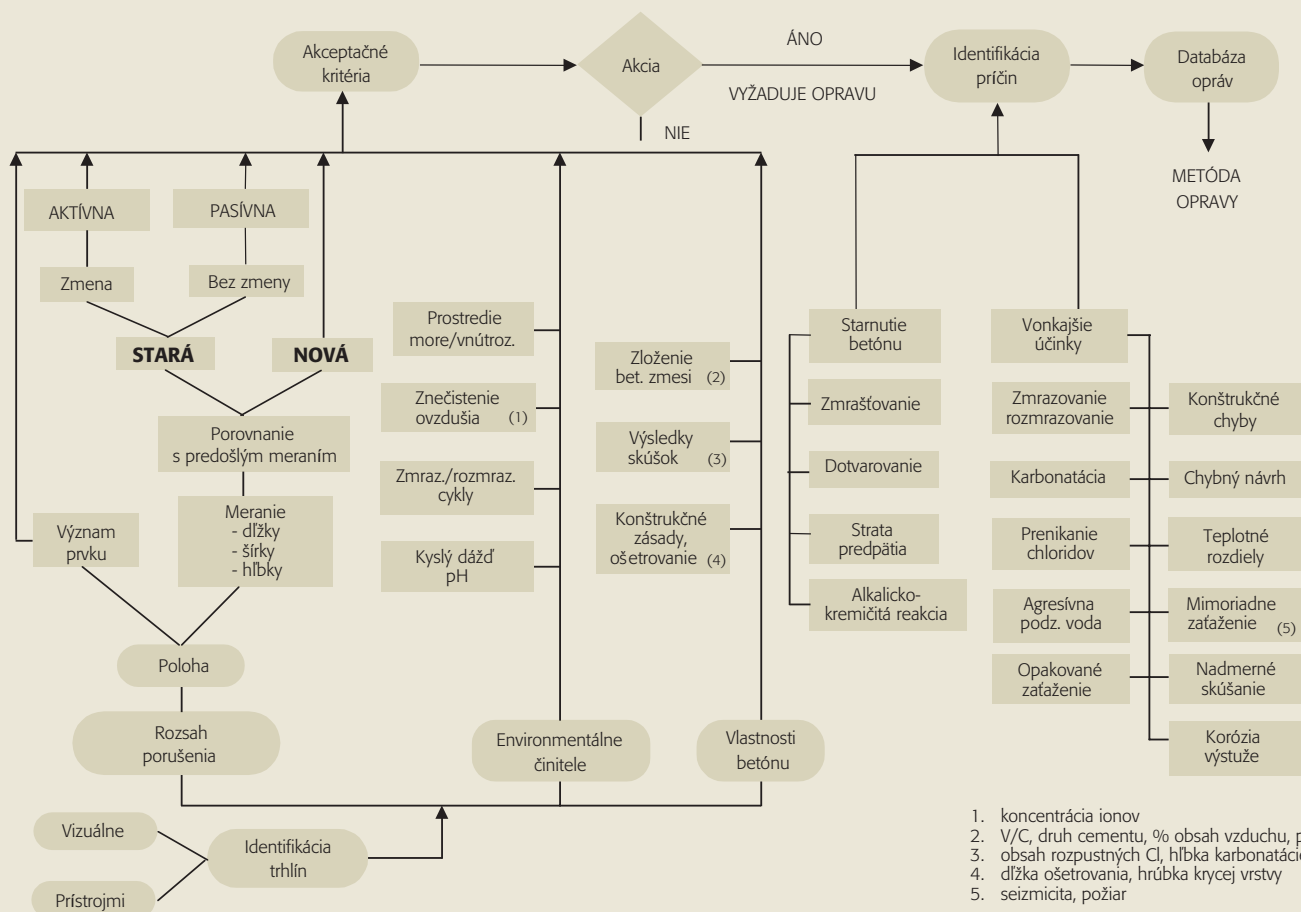
Stavebníctvo je postavené pred dve hlavné úlohy – výstavbu nových a sanáciu existujúcich stavebných objektov. Vzhľadom na zanedbanie údržby v uplynulých desaťročiach a veľké množstvo jestvujúcich objektov sa pomer medzi týmito dvomi oblasťami presúva v prospech sanácií. Táto situácia nie je špecifickou iba pre Česko a Slovensko, jedná sa o trend

prejavujúci sa vo väčšine rozvojových, ale aj priemyselne vyspelých krajín.

Najčastejšie a najnápadnejšie sa poruchy betónových konštrukcií prejavujú trhlinkami. Tie môžu spôsobiť stratu alebo obmedzenie spoľahlivosti (bezpečnosti, použiteľnosti a trvanlivosti) konštrukcie. Nie všetky trhliny však znamenajú automaticky poruchu. Trhliny v ťahaných oblastiach s menšou ako prípustnou šírkou neohrozujú spoľahlivosť konštrukcie a nevyžadujú sanáciu. Vzhľadom na závažnosť výskytu trhlín, v súvislosti so stanovením skutkového stavu konštrukcie,

Obr. 1 Schéma vyšetrovania trhlín v betónových konštrukciách

Fig. 1 Flow sheet for the investigation of cracks in concrete structures



sa v ďalšom rozoberajú príčiny a následky ich vzniku.

VIŠETROVANIE TRHLÍN

Rozlišujú sa dve hlavné príčiny vzniku a rozvoja trhlín v betónových konštrukciách:

- pretvárne účinky objemových zmien (technologické trhliny),
 - silové účinky zaťaženia (statické trhliny).
- Technologické trhliny vznikajú najmä v dôsledku zmršťovania betónu, teplotných rozdielov a korózie výstuže. Väčšina príčin vzniku statických trhlín vyvoláva typický obraz ich rozvoja. Charakteristické tvary statických trhlín uvádza, napr. Leonhardt [1]. Zvláštnymi príčinami vzniku statických trhlín sú účinky mimoriadneho zaťaženia dynamického alebo rázového charakteru. Medzi mimoriadne zaťaženia sa zaraďuje aj nerovnomerné sadanie podložia.

Expertný systém na opravu trhlín v prostredí atómových elektrární uvádza Seni [2]. Systém (obr. 1) je po malých úpravách vhodný pre všeobecné vyšetrovanie a hodnotenie trhlín v betónových konštrukciách. Postupujú od ľavého spodného okraja schéma začína blokom **Identifikácia trhlín**.

Vetva predstavujúca **Rozsah porušenia** sa zakladá na údajoch o mieste výskytu, veľkosti a histórii trhlín. **Environmentálne činitele** obsahujú informácie potrebné na definíciu úrovne agresivity, ako sú geografická poloha (prímorská/vnútrozemská), počet zmrazovacích a rozmrazovacích cyklov, obsah agresívnych oxidov v ovzduší, prítomnosť kyslých dažďov (hodnota pH) atď. **Vlastnosti betónu** zahrňajú fakty o zložení betónovej zmesi a výsledky skúšok vykonané počas životnosti betónového prvku.

Údaje z troch vyššie uvedených oblastí umožňujú identifikáciu trhlín a ich vyhodnotenie na základe porovnania **Akceptačných kritérií**. To je prvý krok pri rozhodovaní o potrebe a naliehavosti opravy. Nevyhnutným predpokladom úspešnej opravy trhlín je zistenie príčin ich vzniku a rozvoja. Tomuto účelu slúži vyšetrovanie podľa vetvy **Identifikácia príčin**. V nasledujúcich riadkoch sa podrobnejšie analyzujú jednotlivé časti vetiev schémy.

IDENTIFIKÁCIA TRHLÍN

Každá posudzovaná betónová konštrukcia sa podrobí najprv dôkladnej vizuálnej prehliadke. Táto umožňuje zistenie a loka-

lizovanie tých porúch, ktoré vznikajú alebo sa prejavujú na jej povrchu. Vznik a rozvoj povrchových trhlín sa môže sledovať voľným okom, lupou, mikroskopom alebo videotechnikou. Vnútorne trhliny možno vyšetrovať ultrazvukom, meraním akustických emisií alebo na jadrových vývrtoch. Okrem opisu rozvoja, resp. obrazu trhlín je dôležité zaznamenať najmä ich šírku a hĺbku.

ROZSAH PORUŠENIA

Pre hodnotenie závažnosti porušenia trhlínami z hľadiska bezpečnosti konštrukcie sú dôležité: význam prvku v konštrukcii, veľkosť a poloha trhliny a jej história. U nosných konštrukcií sa rozlišujú poruchy zo statického hľadiska nevýznamné, významné a veľmi významné (havarijné). Pri posudzovaní trhlín z hľadiska použiteľnosti a trvanlivosti sú dôležité najmä dĺžka, šírka a hĺbka trhliny.

Vzhľadom na zmeny šírky sa rozlišujú pasívne a aktívne trhliny. Pasívne trhliny (jednorázové preťaženie, ukončené zmršťovanie apod.) majú stálu, nemenú šírku, kým u aktívnych trhlín dochádza k periodickým zmenám alebo postupnému narastaniu šírky. Periodické zmeny trhlín môžu byť zapríčinené zmenami zaťaženia alebo teploty v dennom alebo ročnom cykle. Narastanie šírky trhliny je často spôsobené plastickým pretváraním výstuže v trhline (poddimenzovanie alebo preťaženie). Často sa uvedené príčiny zmien širok trhlín prekrývajú a pri vyšetrovaní konštrukcie je potrebné ich separovať.

ENVIRONMENTÁLNE ČINITELE

Stupeň agresivnosti vo vzťahu k podmienkam prostredia udáva ČSN P ENV 206. Stupeň agresivnosti kvapalného prostredia (vodných roztokov) vzhľadom na koncentráciu agresívnych zložiek uvádza ČSN 73 1210. Prostredím sa v tejto súvislosti rozumie chemické a fyzikálne pôsobenie, ktorému je betón vystavený a ktoré nie je zahrnuté v návrhu konštrukcie ako jeden z druhov zaťaženia.

VLASTNOSTI BETÓNU

Dôležitosť jednotlivých vlastností betónu, z hľadiska posúdenia potreby opravy trhlín, posudzujeme podľa toho, ktorú zložku spoľahlivosti vyšetrojeme. Ak sa jedná o bezpečnosť a použiteľnosť konštrukcie, sú to najmä pevnosť a modul pružnosti betónu. Pri posudzovaní trvanlivosti sú dôležité vlastnosti priepustnosť,

obsah rozpustných chloridových iónov, hĺbka karbonatácie betónu apod. Na uvedené vlastnosti má vplyv zloženie betónovej zmesi (v/c, množstvo a druh cementu atď.), dĺžka ošetrovania a prostredie, ktorému je betón vystavený.

ROZHODNUTIE O POTREBE OPRAVY

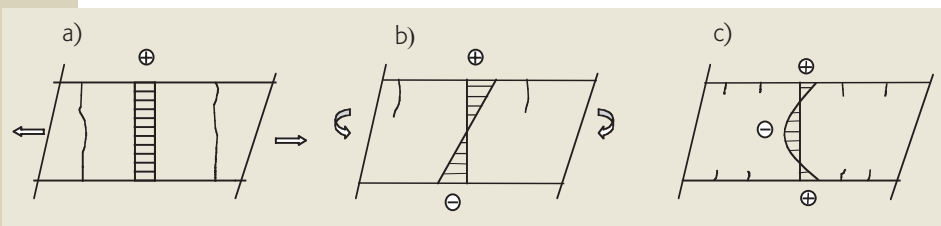
Ako už bolo konštatované, spoľahlivosť betónových prvkov a konštrukcií môže byť výrazne obmedzená trhlínami. Všeobecne nemožno síce vzniku trhlín zabrániť, no ich prítomnosť neznamená automaticky poruchu. Často postačuje ohraničiť ich šírku, prípadne trhlinu utesniť. Rozhodnutie o potrebe opravy je komplexný rozhodovací proces, pri ktorom je potrebné zohľadniť všetky vplyvy obmedzujúce spoľahlivosť.

Pri posudzovaní bezpečnosti konštrukcie rozlišujeme trhliny v tlačenej a ťahanej oblasti prvku. Trhliny signalizujú preťaženie, resp. umožňujú redistribúciu ohybových momentov v staticky neurčitých konštrukciách. V ťahanej oblasti sa trhliny vyskytujú najmä v súvislosti s využitím pevnosti výstuže (pri vzniku prvej trhliny je napätie vo výstuži približne 1/10 medze klzu) a pokiaľ ich šírka nepresiahne medznú šírku, nevyvolávajú potrebu opravy. Trhliny v tlačenej oblasti vznikajú dôsledkom priečných ťahových napätí alebo drvenia betónu (napr. v miestach sústredeného namáhania). Vyvolávajú potrebu obmedzenia zaťaženia alebo zosilnenia prvku.

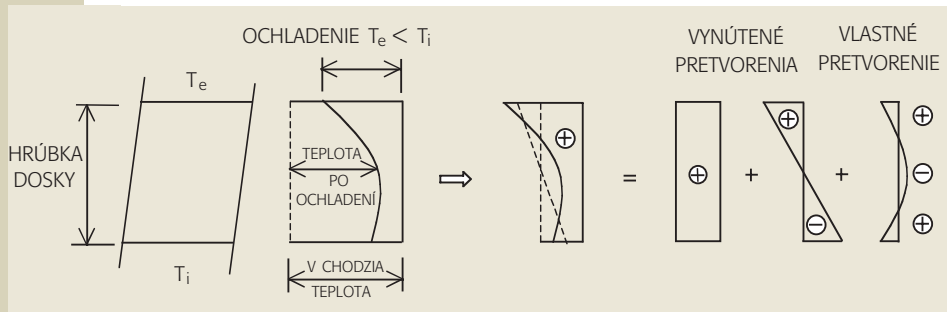
Trhliny významne znižujú tuhosť prvkov, čo výrazne zväčšuje pretvorenia (priehyb a pootočenie). Oprava trhliny po pretvorení neprináša nápravu. Zosilnenie po odľahčení prvku sa požaduje, ak pretvorenia sú väčšie ako medzné pretvorenia podľa ČSN 73 1201. Pri posúdení použiteľnosti podzemných, vodohospodárskych alebo environmentálnych stavieb sa nesleduje len pretvorenie, ale aj priepustnosť konštrukcie.

Z hľadiska priepustnosti betónu rozlišujeme tri druhy trhlín (obr. 2):

- V plne ťahanom priereze vzniknú po prekročení pevnosti betónu v ťahu **deliace trhliny** prechádzajúce cez celý prierez (obr. 2a).
- V prípade ohybom namáhaných prierezov vzniknú **častočné trhliny** v ťahanej oblasti, v tlačenej sa nevyskytujú (obr. 2b). To však platí iba v prípade, že ohybový moment nemení znamienko.



Obr. 2 Klasifikácia trhlín z hľadiska priepustnosti betónu
Fig. 2 Classification of cracks on account of permeation against liquids



Obr. 3 Rozdelenie teplôt a pomerných pretvorení po výške dosky pri jej ochladzovaní [6]
Fig. 3 The temperature and strain distribution on the cross section of a wall [6]

• **Povrchové trhliny** od vlastných pretvorení prierezu (obr. 2c).

Je logické, že vodotesnosť a plynopriepustnosť betónu je ohrozená predovšetkým trhlinami prechádzajúcimi cez celý prierez. Kým ČSN 73 1209 pripúšťa pre vodotesné betónové konštrukcie iba čiastočné trhliny, tak neskoršie vydaná ČSN 73 1201 pripúšťa aj trhliny cez celý prierez (šírky 0,05, resp. 0,1 mm). Je to dôsledok overeného samoutesňovania trhlín, ak sú preto vytvorené priaznivé podmienky. Prípustné šírky trhlín z hľadiska vodotesnosti, zistené na základe experimentálnych prác, sú uvedené v tabuľke 1.

Zmena a – 5/1991 ČSN 73 1208 zaviedla pre betónové konštrukcie vodohospodárskych objektov dimenzovanie podľa medzného stavu priepustnosti.

Povrchové a čiastočné trhliny väčšinou

Tab. 1 Prípustné šírky trhlín pre vodotesné konštrukcie [3]

Tab. 1 Admissible crack widths for watertight structures [3]

Hydraulický spád $i = \frac{\text{výška vody}}{\text{hrúbka steny}}$	Prípustná stredná šírka trhliny w_m [mm]
do 10	0,20
11 až 20	0,15
21 až 30	0,10
31 až 40	0,05

nemajú vplyv na **bezpečnosť** konštrukcie, najčastejšie obmedzujú jej **trvanlivosť** tým, že znásobujú nepriaznivý účinok zmrazovania a uľahčujú prístup agresívnych látok do vnútra betónu. Deliace trhliny často obmedzujú alebo dokonca vylučujú **použitelnosť** niektorých konštrukcií (nádrže, bazény, kanály apod.).

IDENTIFIKÁCIA PRÍČIN VZNIKU TRHLÍN

Ďalšou dôležitou oblasťou vyšetrovania je zistenie príčin vzniku trhlín. Treba rozlíšiť či sú príčinou **vnútorné** alebo **vonkajšie činitele**. Aj tieto skutočnosti ovplyvňujú spôsob opravy trhlín.

Zmrašťovanie a dotvarovanie betónu

Časť zámesovej vody, ktorá sa nespotrebuje pri hydratácii cementu, sa v závislosti na obklopujúcom prostredí skôr či neskôr vyparí čo spôsobí skrátenie betó-

Tab. 2 Maximálny obsah chloridov v betóne [5]

Tab. 2 Maximal chloride content in concrete [5]

Konštrukčný betón	Cl ⁻ z hmotnosti cementu v %
Prostý betón	1,0
Železobetón	0,4
Predpätý betón	0,2

nu. Ak je skrakovaniu betónu bránené, vznikajú v ňom ťahové napätia a keď tieto prekročia pevnosť betónu v ťahu, vznikajú trhliny. Zmrašťovacie trhliny rozlišujeme podľa toho či vznikli v plastickom štádiu betónu alebo už v zatvrdnutom betóne.

Dotvarovanie betónu znižuje veľkosť napätí vznikajúcich v dôsledku bráneného zmrašťovania, čo môže priaznivo ovplyvniť rozvoj trhlín najmä v počiatočnom období tuhnutia a tvrdnutia betónu, keď tento má ešte nízky modul pružnosti.

Strata predpätia

Strata časti predpätia môže spôsobiť, že v ťahanej časti prierezu dosiahne napätie hodnoty väčšie, ako je pevnosť betónu v ťahu, čo vedie k vzniku trhlín. V tomto prípade hovoríme o čiastočnom predpätí.

Alkalicko-kremičitá reakcia

Chemická reakcia prebieha v niektorých kamenivách. Oxid kremičitý v kamenive reaguje s prítomnými alkáliami, pričom vzniká alkalicko-kremičitý gél. Jeho bobtnanie môže vyvolať dostatočný vnútorný tlak na rozdrobenie častíc kameniva a cementového kameňa v betóne. Vizualný prejav reakcie sú mapovité sa šíriace trhliny na povrchu betónu.

Zmrazovanie a rozmrazovanie

Pri premene vody na ľad dochádza k približne 9% zväčšeniu objemu. Vo vodou naplnených póroch môžu preto vzniknúť napätia, značne prevyšujúci pevnosť betónu v ťahu. Striedavé pôsobenie zmrazovacích a rozmrazovacích cyklov spôsobuje postupný rozpad štruktúry betónu.

Karbonatácia betónu

Protikoróznou ochranu výstuže v betóne vytvára vysoká alkalita betónu (pH = 12,5 až 13,5) tým, že sa na jej povrchu vytvorí stabilný pasivujúci povlak. K zníženiu alkality betónu pod hranicu pasivity (pH < 9) najčastejšie dochádza v dôsledku pôsobenia mäkkej alebo kyslej vody, zvýšeného obsahu CO₂ (karbonatácia), SO₂ (sulfatácia) alebo NO_x vo vzduchu. Táto neutralizácia je významná pre vytvorenie podmienok pre koróziu výstuže. V trhlín postupuje rýchlejšie ako v nepotrhanom betóne. Schiessl [4] zistil, že po dvoj- až trojročnej expozícii betónu možno predpokladať, že karbonatácia betónu v mieste trhlín dosiahne povrch výstuže, čo má za následok lokálne ukončenie pasívneho štádia ocele v betóne.

Prenikanie chloridov

Difúzia chloridov smerom od povrchu betónu do jeho vnútra ohrozuje najmä výstuž. Prítomnosť chloridových iónov umožňuje koróziu výstuže aj v alkalickom betóne, teda nezávisle od neutralizácie betónu. Z uvedeného dôvodu ČSN P ENV 206 limituje obsah chloridových iónov v betóne podľa tabuľky 2.

Agresívna podzemná voda

Podzemná voda môže obsahovať látky ako sú napr. uhličitaný a sulfáty, ktoré rozpúšťajú a vylúhujú hydratačné produkty, predovšetkým hydroxid vápenatý. Koncentrácia väčšiny ostatných agresívnych látok nedosahuje hodnoty ohrozujúce betón. Koncentrácia agresívnych látok v podzemnej vode sa však môže výrazne zvýšiť, ak sa táto dostane do kontaktu s odpadovými priemyselnými vodami.

Mnohokrát opakované zaťaženie

V železobetónových konštrukciách vystavených periodicky sa opakujúcemu zaťaženiu a odľahčeniu pevnosť betónu aj ocele klesá. Veľkosť poklesu závisí najmä od počtu cyklov a charakteristiky cyklov ($\sigma_{b,min}/\sigma_{b,max}$). Betón sa stáva krehkým a rozpadáva sa. Príčinou tohto javu je vznik mikrotrhlín v cementovom kameni.

Konštrukčné chyby

Spôľahlivosť konštrukcie sa zabezpečuje aj konštrukčnými opatreniami, a to ako pre definitívne štádium, tak aj pre štádium výstavby. Z hľadiska vyšetrovania trhlín sa môže pre definitívne štádium uviesť napr. požiadavka na maximálnu vzdialenosť dilatčných škár, priemer a osovú vzdialenosť výstuže. Pre štádium výstavby sú to napr. spôsob a dĺžka ošetrovania, vzdialenosť a usporiadanie pracovných škár, vytvorenie zmršťovacích a teplotných polí. Konštrukčné opatrenia na zabezpečenie vodotesnosti stavebných objektov, ktorú zaisťujú vlastnosti betónovej konštrukcie bez náterov a izolácií, tzv. biele vane, ako sú podzemné časti objektov, podzemné garáže, tunely a vodohospodárske stavby uvádza smernica.

Chybný návrh

Navrhovanie konštrukcií je proces, ktorý má zabezpečiť, aby konštrukcia bola schopná prenášať všetky zaťaženia pôsobiace počas celej životnosti. V súvislosti s chybným návrhom treba uvažovať s chybami pri určení výpočtového mode-

lu, výpočte silových účinkov zaťaženia, neuvažovaní niektorých typov zaťaženia a s chybami pri dimenzovaní prierezov. Často sa zanedbávajú účinky nepriamych zaťažení (napr. objemových zmien), ktoré u niektorých konštrukcií vyvolávajú väčšie prierezové sily ako priame zaťaženie.

Teplotné rozdiely

Teplotné rozdiely v konštrukciách vznikajú počas tuhnutia a tverdnutia betónu (hydratačné teplo); počas užívania konštrukcie (prevádzkové teploty, oslnenie). Teplotné rozdiely spôsobuje vo všeobecnosti nelineárne rozdelenie teplôt po priereze (obr. 3) a s tým spojené vynútené alebo vlastné pretvorenia. Ak je týmto pretvoreniam bránené, vyvolávajú napätia, ktoré môžu viesť k vzniku trhlín (obr. 2).

Mimoriadne zaťaženie

Podľa ČSN 73 0035 za mimoriadne zaťaženia sa považujú účinky seizmicity, výbuchov, účinky spôsobené chybami alebo poruchami zariadenia (pretrhnutie lana pri zdvíhaní, náraz pri transporte, požiar apod.) a účinky nerovnomerných pretvorení základov a základovej pôdy. Všetky uvedené zaťaženie môžu byť samostatne, alebo v interakcií s inými vplyvmi, príčinou vzniku trhlín.

Nadmerné skúšanie

U niektorých konštrukcií sa pred uvedením do prevádzky požaduje experimentálne overenie spoľahlivosti (napr. zaťažovacie skúšky mostov). Pri takýchto skúškach môže dôjsť k vzniku trhlín.

Korózia výstuže

Elektrochemická korózia výstuže v betóne prebieha vtedy, ak je betón dostatočne vlhký, kyslík má prístup k výstuži a je porušená alkalická ochrana betónu. Trhliny širšie ako 0,4 mm uľahčujú súčasne pôsobenie uvedených podmienok v okolí výstuže a preto výrazne urýchľujú proces korózie výstuže [4]. Korózne produkty ocele majú až sedemnásobne väčší objem ako pôvodná oceľ, čím vyvolávajú silný expanzný tlak na okolitý betón. Nedostatočná hrúbka a kvalita betónovej krycej vrstvy akcelerujú rýchlosť korózie, vedú k vzniku trhlín v smere korodujúcej výstuže a odpadnutiu krycej vrstvy. Porušenie súdržnosti medzi betónom a výstužou v kotevnej oblasti je väčšou hrozbou pre bezpečnosť konštrukcie ako strata prierezovej plochy výstuže.

ZÁVER

Výskumu príčin vzniku trhlín a ich vplyvu na betónové konštrukcie v kontexte súvisiacich problémov sa dnes vo svete venuje zvýšená pozornosť. Súvisí to najmä s narastajúcim využívaním betónov novej kvality (vysokohodnotný betón, vláknobetón, samozhutiteľný betón), ale aj s modernými technologickými postupmi realizácie betónových konštrukcií (biele vane).

Predstavený systém vyšetrovania trhlín má za cieľ poskytnúť celkový prehľad o problematike trhlín v betónových konštrukciách. Nebolo možné podrobne analyzovať vplyv jednotlivých činiteľov a vlastností na príčiny vzniku trhlín alebo ich účinkov na spoľahlivosť konštrukcie. Odvolávky na literatúru a normy by mali uľahčiť prístup k potrebným podkladom.

Literatura

- [1] Leonhardt F.: Vorlesungen über Masivbau, Vierter Teil Nachweis der Gebrauchsfähigkeit, Springer Verlag Berlin 1977, 194 s.
- [2] Seni C.: Approach to an expert system for concrete cracks repair at nuclear power plants. Proceedings of the 8th International Expertcenterum Conference, RILEM Committee 160, Bratislava, July 1999, s. 110–115
- [3] Meichsner H.: Über die Selbstdichtung von Trennrissen in Beton, Beton und Stahlbetonbau, 1992, č. 4, s. 95–99
- [4] Schiessl P.: Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 255, Berlin 1976, 175 s.
- [5] Richtlinie Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weisse Wannen, Österreichischer Betonverein, Wien 1999, s. 56
- [6] Springenschmid R.: Die Ermittlung von Spannungen infolge von Schwinden und Hydratationswärme in Beton. Beton- und Stahlbetonbau 79, 1984, No. 10, s. 263–269

Prof. Ing. Juraj Bilčík, CSc.
Doc. Ing. Igor Hudoba, CSc.
Stavebná fakulta STU, Katedra betónových
konštrukcií a mostov
Radlinského 11, 813 68 Bratislava
tel.: +421 2 5927 4546
e-mail: bilcik@svf.stuba.sk