

STANOVENIE VZŤAHU MEDZI MERNÝM ODPOROM A PEVNOS- ŤOU BETÓNU ■ DETERMINATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN RESISTIVITY AND STRENGTH OF CONCRETE

Ivana Lusová, Peter Briatka,
Eva Králiková, Mikuláš Bittera

Mnohé technologické fázy výroby monolitických a prefabrikovaných prvkov sú závislé na stanovení aktuálnej pevnosti betónu. Pre vysokú variabilitu okrajových podmienok je najspoľahlivejšie vychádzať z výsledkov experimentálnej činnosti a zo skúsenosti z praxe. V prípade niektorých okrajových podmienok nie je možné stanoviť aktuálnu pevnosť betónu podľa nedeštruktívnej skúšky (Schmidtov tvrdomer), ktorá je najpoužívanejšia. V týchto prípadoch je možné použiť iné metódy vhodnejšie na stanovenie aktuálnej pevnosti betónu, napr. výpočtovo-laboratórnu metódu pomocou elektrického odporu betónu. Tento príspevok stanovuje závislosti medzi pevnosťou betónu a merným odporom betónu vychádzajúc z experimentálnej činnosti. ■ Some technological phases of production of monolithic and prefabricated elements are dependent on the determination of the actual strength of concrete. Due to high variability of boundary conditions the most reliable way is based on results of experimental works and field experience. There are some boundary conditions for which it is not possible to determine the actual strength of the concrete under non-destructive test (Schmidt hardness tester), which is the most common. In these cases it may be more appropriate to use other methods to determine the actual strength of the concrete, and the computationally-laboratory method using the electrical resistance of the concrete. This paper sets down relation of the strength of concrete and concrete resistivity based on experimental works.

Pre väčšinu činností, ktoré sú súčasťou výrobného procesu, sa v praxi zaužívali štandardné osvedčené postupy vedúce k efektívnej výrobe. Mnohé z nich sú spracované v súlade s teoretickými poznatkami aj v technických normách. Napriek tomu je možné identifikovať niekoľko „súčasť“ výrobného procesu, pre ktoré nie sú stanovené žiadne jednoznačné postupy alebo pravidlá na ich voľbu. V praxi sa potom často riešia tak, že majú nepriaznivý dopad na efektívnosť výroby konštrukcie alebo na jej kvalitu.

Jednou súčasťou zhotovovania monolitických konštrukcií, pre ktorú nie sú spracované komplexné pravidlá, je stanovovanie optimálneho času oddebne-
nia betónovej konštrukcie.

Aktuálnu pevnosť betónu, ktorá je

dôležitou podmienkou pre určenie správneho času oddebne-
nia, možno stanoviť viacerými spôsobmi, ktoré sa líšia presnosťou, nárokmi na vybavenie, požiadavkami na kvalitu obsluhy, prístupnosťou apod. Každá metóda stanovenia pevnosti je teda optimálna iba v konkrétnych podmienkach. V súčasnosti však nie sú známe žiadne pravidlá – metodiky pre výber optimálnej metódy určovania pevnosti. Ak by takáto metóda bola vypracovaná (a používaná v praxi), mohla by prispieť k presnejšiemu stanoveniu času oddebňovania, a tým k zvýšeniu efektívnosti (zvýšeniu kvality, zníženiu nákladov) výroby betónových konštrukcií.

Na stanovenie aktuálnej pevnosti betónu sú známe rôzne metódy, či už deštruktívna, nedeštruktívna, výpočtová, výpočtovo-laboratórna metóda pomocou zrelosti betónu a výpočtovo-laboratórna metóda pomocou elektrického odporu. Tento príspevok popisuje poslednú z týchto metód, a to výpočtovo-laboratórnu metódu pomocou elektrického odporu.

PRIEBEH ELEKTRICKÉHO ODPORU V BETÓNE

Predpokladaný priebeh meraných elektrických charakteristík je zachytený na obr. 1.

V prvých hodinách veku, po rozpustení povrchu zrn cementu za vzniku pórového roztoku, keď dochádza k pozvoľnému vyzrážaniu CSH gélu, sa odpor betónu ustáli a zostáva po určitéu dobu (počas tuhnutia) konštantný. Postupne, ako betón tuhne a tvrdne (s klesajúcou koncentráciou vodivostných iónov v pórovom roztoku), sa elektrický odpor zvyšuje. Zvyšovanie elektrického odporu je dané vytváraním pevných väzieb, čo súvisí so zmenou stavu fyzikálne viazanej (voľnej) vody na vodu chemicky viazanú. Zmena množstva fyzikálne viazanej vody v betóne (napríklad formou vnútorného ošetrovania) sa predpokladane mala prejavovať na elektrických charakteristikách betónu, napr. elektrický odpor (rezistivita) alebo konduktivita.

Známymi elektrickými charakteristikami, ktorých vzťah k dynamickému systému cementu reagujúceho s vodou je kvalitatívne popísaný, sú merný elektric-

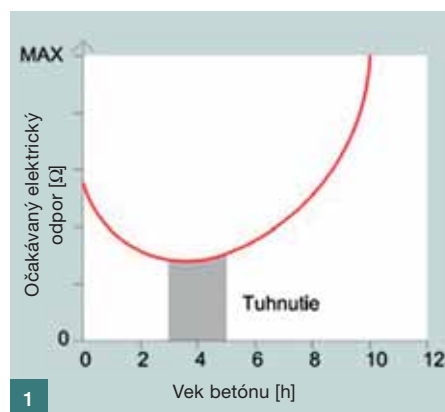
ký odpor (rezistivita) ρ [Ωm] a jeho obrátená hodnota, merná elektrická vodivosť (konduktivita) σ [S/m]. Tieto charakteristiky možno za istých okolností, ak sa dodržia presné postupy skúšok a skúšky tak budú reprodukovateľné (s postačujúcou mierou spoľahlivosti), pretransformovať do absolútneho vyjadrenia napríklad elektrického odporu R [Ω].

Elektrickou vodivosťou betónu, jej meraním a vyhodnocovaním sa v rôznych výskumných úlohách a vedeckých článkoch zaoberalo viacero autorov. Aj ich pričinením je dnes známe, že s rastúcim vekom betónu (rastúcim stupňom hydratácie α_t) dochádza ku zníženiu pórovitosti, a tým k poklesu elektrickej vodivosti [1].

Princíp merania elektrickej vodivosti spočíva v meraní prechádzajúceho prúdu I [A] cez cementový tmel, do ktorého sú umiestnené dve kovové elektródy pripojené na zdroj konštantného napätia U [V]. Dve elektródy (vždy rovnakých rozmerov) sú umiestnené na protiláhlych stranách skúšobnej nádoby. Prechádzajúci elektrický prúd sa v čase mení, čo indikuje zmenu vodivosti (konduktivity) cementového tmelu. Aktuálna konduktivita σ [S/m] cementového tmelu sa vypočíta podľa vzťahu (1), kde l [m] je vzdialenosť elektród a A [m^2] je plocha, cez ktorú medzi elektródami preteká elektrický prúd.

$$\sigma = \frac{l}{A} \cdot \frac{I}{U} \quad [\text{S/m}] \quad (1)$$

Elektrický prúd sa v betóne prenáša prostredníctvom iónov. Je preto zrejmé, že vodivosť betónu je funkciou koncentrácie iónov c , ich nábojov z a ekvivalentnej iónovej vodivosti λ , podľa vzťahu (2) [1].





2

Tab. 1 Vypočítaný merný odpor a pevnosť betónu v tlaku v čase
 Tab. 1 Calculated resistivity and strength of concrete in stress in time

Deň	10 °C		20 °C	
	Merný odpor [Ωm]	Pevnosť betónu v tlaku [MPa]	Merný odpor [Ωm]	Pevnosť betónu v tlaku [MPa]
1	-	-	58,51	15,98
2	94,62	15,61	155,51	22,96
3	186,99	18,66	363,3	24,89
4	385,26	21,09	648,94	27,57
5	507,59	22,84	974,09	29,38

Obr. 1 Predpokladaný vývoj elektrického odporu betónu v čase
 Fig. 1 Assumed development of the electrical resistance of concrete in time

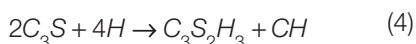
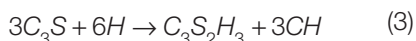
Obr. 2 Meranie nominálneho odporu betónu
 Fig. 2 Measuring the nominal resistivity of concrete

Obr. 3 Závislosť merný odpor – pevnosť betónu v tlaku uskladneného pri teplote 10 a 20 °C
 Fig. 3 Dependency of the concrete's resistivity and strength in stress, stored in 10 and 20 °C

Obr. 4 Priebeh merného odporu betónu triedy C40/50 pri teplote 10 °C
 Fig. 4 Development of resistivity of class C40/50 concrete in 10 °C

$$\sigma = f \sum_j (c_j, z_j, \lambda_j) \quad (2)$$

Ekvivalentná iónová vodivosť λ je funkciou teploty a narastá o cca 1,5 až 2,5% s každým kladným °C teploty pórového roztoku, čo s najväčšou pravdepodobnosťou súvisí s klesajúcou viskozitou. Ióny prítomné v pórovom roztoku sa dajú predpokladať z chemického zloženia portlandského cementu (6 C₃S, 2 C₂S, 2 C₃A a C₄AF) a reakcií prebiehajúcich počas hydratácie – vzniku CSH gélu (vzťah 3 a 4), kde H označuje H₂O a CH značí Ca(OH)₂, C₃S značí alit CaO.SiO₂



Meranie nominálneho odporu betónu a zistenie možnosti stanovenia vzťahu medzi merným odporom a pevnosťou betónu

Na stanovenie vzťahu medzi merným odporom a pevnosťou betónu boli vykonané laboratórne skúšky. Priebeh merného odporu v čase a pevnosť

ti nedeštruktívnu skúškou boli namerané pre betón triedy C40/50, ktorý bol uskladnený pri rôznych teplotných podmienkach 10 ± 2 a 20 ± 2 °C. Na výrobu betónových kociek a kvádrov sa použil cement CEM I 42,5 N (portlandský).

Na meranie odporu bol čerstvý betón plnený do foriem tvaru kvádra s rozmermi cca 20 × 20 × 100 mm. Formy boli vyrobené z troch strán z plexiskla a z dvoch protilahlých strán z medeneho plechu. Odpor sa zaznamenával v časových intervaloch, v prvej hodine každých 5 min a v ďalších hodinách každých 15 min (obr. 2).

Na meranie pevnosti v tlaku bol čerstvý betón plnený do pripravených plastových foriem v tvaru kocky o hrane 150 mm. Zatvrdnuté betónové kocky uložené pri teplote 20 °C boli na druhý deň odformované. Betónové kocky uložené pri teplote 10 °C boli odformované až na tretí deň (z dôvodu nedostatočnej pevnosti na druhý deň).

Závislosť medzi pevnosťou betónu v tlaku a jeho merným odporom (obr. 3) bola vypočítaná pomocou metódy najmenších štvorcov a korelačného koeficientu, keďže predpokla-

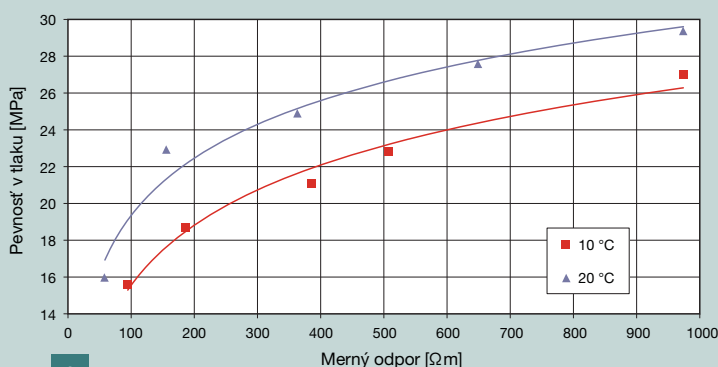
dom je, že funkcia je logaritmická:

- pri teplote 10 °C: $f_c = 4,5 \ln(\rho) - 3$
- pri teplote 20 °C: $f_c = 4,5 \ln(\rho) - 1,5$

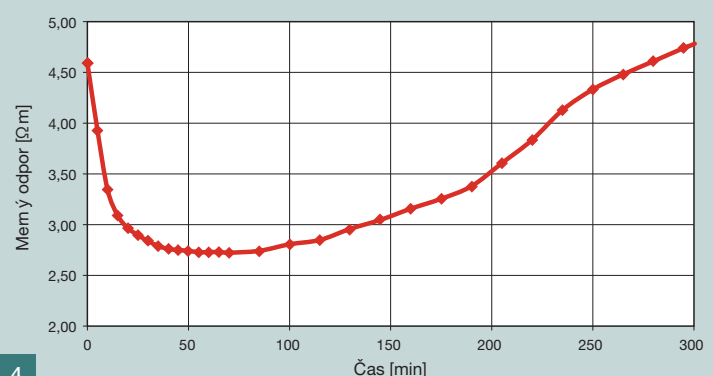
Priebeh merného odporu v prvých minútach betónu triedy C40/50 uskladneného pri teplote 10 °C je zachytený na obr. 4. Začiatok zaznamenávania odporu bol približne po 30 min od kontaktu cementu z vodou.

V prvých minútach veku betónu, po rozpustení povrchu zrn cementu za vzniku pórového roztoku, keď dochádza k pozvoľnému vyzrážaniu CSH gélu, sa odpor betónu ustáli a zostáva určitú dobu (počas tuhnutia) konštantný. Postupne, ako betón tuhne a tvrdne (s klesajúcou koncentráciou vodivostných iónov v pórovom roztoku) sa merný odpor zvyšuje. Zvyšovanie merného odporu je dané vytváraním pevných väzieb, čo súvisí so zmenou stavu fyzikálne viazanej (voľnej) vody na vodu chemicky viazanú.

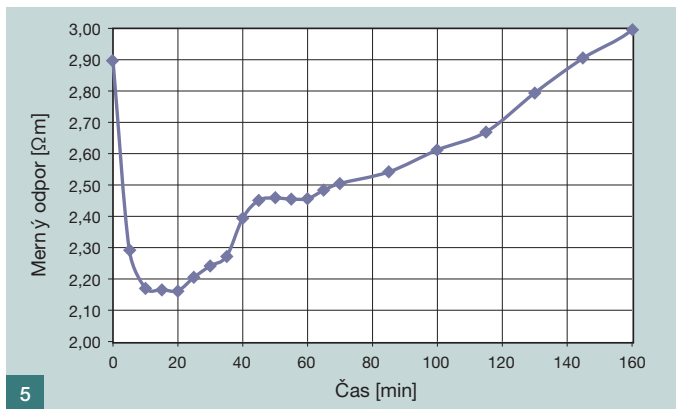
Priebeh merného odporu v prvých minútach betónu C40/50 uskladneného pri teplote 20 °C je zachytený na obr. 5. Začiatok zaznamenávania odporu bol približne po 30 min od kontaktu cementu z vodou.



3



4



Obr. 5 Priebeh merného odpor betónu triedy C40/50 pri teplote 20 °C
 Fig. 5 Development of resistivity of class C40/50 concrete in 20 °C

ZÁVER

Príspevok sa zaoberal stanovením závislosti medzi merným odporom a pevnosťou betónu v tlaku pre triedu betónu C40/50, uskladnené pri teplote 10 ± 2 a 20 ± 2 °C. Na základe stanoveného merného odporu a nameranej pevnosti betónových kociek a kvádrov bolo možné stanoviť logaritmickú závislosť medzi tými dvoma hodnotami. Logaritmická závislosť pre triedu betónu C40/50 uskladneného pri teplote 10 °C je $f_c = 4,5 \ln(\rho) - 3$. Logaritmická závislosť pre triedu betónu C 40/50 uskladneného pri teplote 20 °C je $f_c = 4,5 \ln(\rho) - 1,5$.

Literatúra:

[1] Backe K., Lile O., Lymov S.: Characterizing Curing Cement Slurries by Electrical Conductivity, Society of Petroleum Engineers, Drilling & Completion, 2001, pp. 201–207, available at www.linsa.com/uploads/.../pdfs.../42228_1236193542_673.pdf

[2] Hobbs B., Kebir M. T.: Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings, 2006, Elsevier Ireland Ltd., Forensic Science International 167, 2007, pp. 167–172

[3] Juriček I.: Technológia pozemných stavieb – Hrubá stavba, Bratislava: Jaga group, 2001, ISBN 80-88905 29-X

[4] Perez-Pena M., Roy D., Tamás F.: Influence of Chemical Composition and Inorganic Admixtures on the Electrical Conductivity of Hydrating Cement Pastes, J. of Materials Research, Vol. 4, No. 1, 1989, p. 215

[5] Rajabipour F., Sant G., Weiss J.: Development of Electrical conductivity – Based Sensors for Health Monitoring of Concrete Materials, in TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM, Transportation Research Board, Indianapolis, 2007, p. 16

[6] Ridha S., Irawan S., Ariwahjoedi B., Jasamai M.: Conductivity Dispersion Characteristic of Oilwell Cement Slurry during Early Hydration, Inter. J. of Engineering & technology IJET-IJENS, Vol. 10, No. 6, 2010, pp. 129–132

[7] Snyder K. A., Feng X., Keen B. D., Mason T. O.: Estimating the Electrical Conductivity of Cement Paste Pore Solutions from OH⁻, K⁺ and Na⁺ Concentrations, Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 6., 2003, pp. 793–798

Ing. Ivana Lusová
 Stavebná fakulta STU v Bratislave
 e-mail: ivana.lusova@gmail.com



Ing. Peter Briatka, PhD.
 Holcim (Slovensko), a. s.
 Prístavná 10, 821 09 Bratislava



Ing. Eva Králiková



Ing. Mikuláš Bittera, PhD.
 oba: FEI STU v Bratislave



Text článku byl posouzen odborným lektorem.

STRENGTHENING OF CONCRETE STRUCTURES WITH ADHESIVELY BONDED REINFORCEMENT

Design and Dimensioning of CFRP Laminates and Steel Plates

Konrad Zilch, Roland Niedermeier, Wolfgang Finckh

Nově vydaná kniha z oblíbené edice „BetonKalender“ německého vydavatelství Ernst & Sohn, A Wiley Brand, popisuje postup návrhu a užití lepených CFRP pásů, CF vrstev a ocelových plechů, jak je uvádí DAFStb směrnice, která doplňuje Eurokod. Kniha obsahuje příklady návrhů řešení různých situací, např. poruchy krycí vrstvy, dotvarování, analýzy mezního stavu použitelnosti nebo únosnosti betonových desek, nosníků a sloupů.

Použitá vysvětlení a základní informace vycházejí převážně z nové německé směrnice „Strengthening of Concrete Members with Adhesively Bonded Reinforcement“, kterou vydalo German Committee for Structural Concrete (DAFStb). Je to první evropská směrnice, která se zabývá touto oblastí ve formě přílohy k Eurokodu. Protože je plánováno zahrnout tuto oblast i do budoucího Eurokodu 2, slouží směrnice DAFStb jako odrazový můstek. Všichni autoři se dlouhodobě oblastí navrhování, projektování, realizací záchrany a rekonstrukcí budov a staveb a jejich následnou kontrolou a monitorováním zabývají a jsou činní i v přípravě nových evropských technických směrnic (ETAGs) a pravidel navrhování a projektování.

Vybrané kapitoly z německého vydání „BetonKalender“ jsou nyní vydávány v nové anglicky tiš-



těné edici „Beton-Kalender Series“ pro použití širší mezinárodní odborné veřejnosti.

Představená kniha obsahuje následující kapitoly:

1. Introduction
2. DAFStb guideline
3. Design of strengthening measures with externally bonded CFRP strips
4. Example 1: Strengthening a slab with externally bonded CFRP strips
5. Design of strengthening with near-surface-mounted CFRP strips
6. Example 2: Strengthening a beam with near-surface-mounted CFRP strips
7. Design of column strengthening with CF sheets
8. Example 3: Column strengthening
9. Summary and outlook
10. References

Německé vydavatelství Ernst & Sohn vydává už od roku 1906 v edici „BetonKalender“ informace o výsledcích vývoje a výzkumu a rozsáhlé zkušenosti v oblasti betonového a železobetonového stavebnictví. Každoroční svazek(y) tak odráží dosaženou úroveň tohoto rychle se rozvíjejícího oboru stavebního průmyslu. Prvním editorem „BetonKalender“ byl Fritz von Emperger (1862 až 1942).

vydavatelství Ernst & Sohn, A Wiley Brand, červen 2014
 158 stran, 171 obrázků, 8 tabulek, měkká vazba
 ISBN: 978-3-433-03086-8
 cena: 49,90 € (včetně DPH)
 dostupné také jako e-book