

SAVREMENE METODE I TEHNIKE ISPITIVANJA BETONA I BETONSKIH KONSTRUKCIJA

MIHAILO MURAVLJOV
SEKULA ŽIVKOVIĆ
DIMITRIJE ZAKIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 666.981.1/.4:624.012.3/.4:620.179=861

1. UVOD

Savremene metode ispitivanja materijala ugrađenih u armiranobetonske konstrukcije, koje najčešće pripadaju tzv. nedestruktivnim metodama, karakteriše s jedne strane sve veća preciznost merenja i tačnost dobijenih rezultata, a sa druge strane jednostavnost primene. Klasična kombinacija nedestruktivnih i destruktivnih metoda, koja podrazumeva uzimanje određenog broja uzoraka (kernova) iz gotovih konstrukcija i njihovo laboratorijsko ispitivanje, korišćenjem ovih savremenih metoda se ni u kom slučaju ne odbacuje, već se samo dopunjuje.

Ove metode omogućavaju vrlo brzo i jednostavno ispitivanje pojedinih karakteristika svežeg i/ili očvrslog betona "in situ", na velikom broju po želji odabranih merenih mesta. Rezultate koje tom prilikom dobijamo možemo, sa sve većom sigurnošću, da koristimo kao dopunski dokaz o kvalitetu betona (uz ispitivanja probnih tela u laboratoriji), za praćenje stanja armiranobetonskih konstrukcija (tzv. "monitoring"), ili za utvrđivanje uzroka degradacije materijala ugrađenih u ove konstrukcije. Prednost ovakvih metoda ispitivanja koja se obavljaju na terenu ogleda se i u znatno nižem ukupnom iznosu troškova, koji predstavlja samo manji deo cene standardnih testova.

Osim već tradicionalnih i široko korišćenih metoda, kao što su određivanje brzine ultrazvuka ili merenje površinske tvrdoće betona (na primer, pomoću sklerometra), danas nam na raspolaganju stoje najrazličitije metode i oprema, čije pravilno korišćenje podrazumeva i obuku tehničkog osoblja, kao i održavanje i kalibraciju instrumenta. Neke od njih biće prikazane u ovom radu, uz poseban akcenat na ispitivanjima koja ne podrazumevaju nikakvo (pa ni lokalno) razaranje materijala u konstrukciji.

Adrese autora: Prof. dr Mihailo Muravljev, dipl. građ. inž., Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar Revolucije 73, Beograd;
Vanr. prof. dr Sekula Živković, dipl. građ. inž., Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar Revolucije 73, Beograd;
Dimitrije Zakić, dipl. građ. inž., Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar Revolucije 73, Beograd.

Prema karakteristikama svežeg ili očvrslog betona koje se ispituju, predmetne metode mogu da se podele u nekoliko grupa:

- metode za utvrđivanje različitih fizičkih karakteristika betona u svežem ili očvrslom stanju,
- metode za detekciju defekata u betonu,
- metode za određivanje stepena korozije betona i armature.

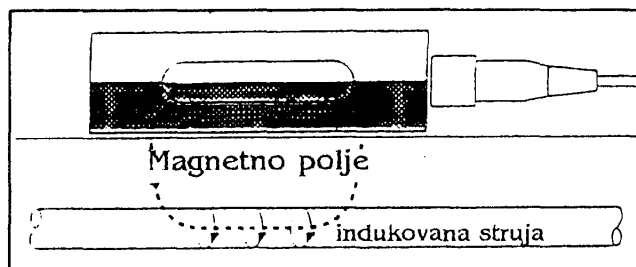
U skladu sa usvojenom podelom, u daljem tekstu biće pojedinačno obrađene neke od savremenih metoda ispitivanja materijala armiranobetonskih konstrukcija.

2. METODE ZA UTVRĐIVANJE RAZLIČITIH FIZIČKIH KARAKTERISTIKA BETONA

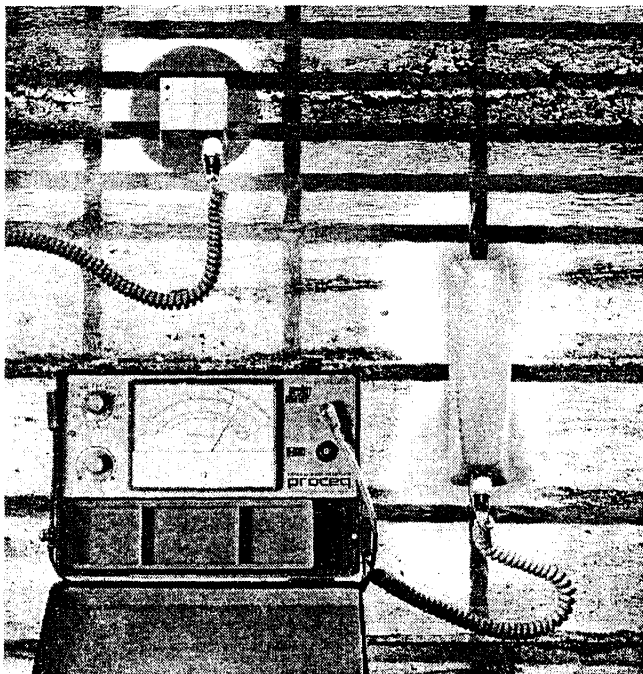
2.1. Utvrđivanje debljine zaštitnog sloja betona, kao i položaja i prečnika šipki armature pomoću pahometra

Pahometri su uređaji koji stvaraju magnetno polje, usled koga se u šipkama armature indukuje struja. Po prestanku emitovanja signala iz aparature ova struja postepeno slabi prouzrokujući istovremeno slabljenje indukovano magnetnog polja, što se registruje kao eho inicijalnog signala. Princip rada predmetnog uređaja prikazan je na slici 2.1.1. Pahometar je baždaren tako da meri jačinu indukovano elektromagnetnog polja i na osnovu nje determiniše debljinu zaštitnog betonskog sloja do armature.

Ukoliko ne znamo prečnik šipki, njihov broj, položaj i orijentaciju, pahometar, uz pomoć specijalnog dodatka,



Slika 2.1.1. Princip rada pahometra



Slika 2.1.2. Pahometar – izgled aparature

može da izvrši i procenu ovih veličina sa greškom merenja manjom od 10%.

Što se tiče rezultata ispitivanja debljine zaštitnog sloja betona, pahometar omogućava merenje do dubine od 70 mm sa tačnošću ± 2 mm, a između 70–100 mm sa tačnošću ± 3 mm. Aparatura koja se koristi za predmetna ispitivanja prikazana je na slici 2.1.2.

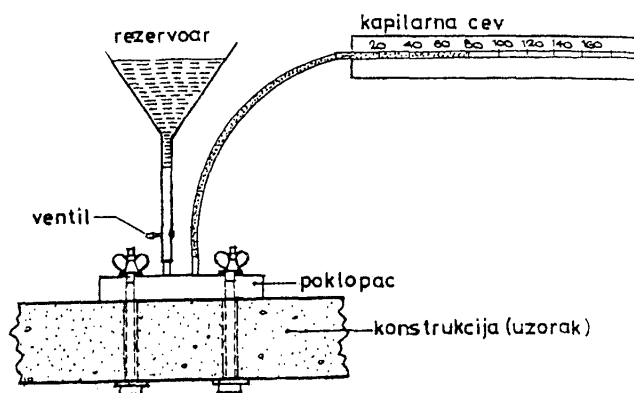
Ova metoda je naročito pogodna kod značajnijih konstrukcija od armiranog ili prethodno napregnutog betona, kod kojih validne rezultate treba dobiti bez ikakvog razaranja materijala (štemovanja).

2.2. Merenje apsorpcije vode

Princip ove i sličnih metoda zasniva se na merenju količine vode koju beton, pod određenim uslovima, može da apsorbuje, čime se posredno određuje poroznost betona, koja ima velikog uticaja na njegove fizičko-mehaničke karakteristike i trajnost. U opštem slučaju ovakav koncept se ne podudara sa određivanjem vodo-nepropustljivosti betona, već samo podrazumeva merenje penetracije vode (odnosno vlage) u površinskom sloju betona kao kombinaciju difuzije i propustljivosti.

Merenje se sprovodi na suvom betonu uz mali hidrostatički pritisak. Aparatura za ispitivanje je jednostavna i sastoji se od poklopca pričvršćenog na betonski element i povezanog, preko odgovarajućeg ventila, sa rezervoarom za vodu. S druge strane, na poklopcu se nalazi i kapilarna cev pomoću koje se registruje količina apsorbovane vode. Predmetna aparatura prikazana je na slici 2.2.

Postupak merenja sastoji se u nalivanju vode u rezervoar do konstantne visine od 200 mm, zatim u puštanju da ona u potpunosti ispunji poklopac i kapilarnu cev i, konačno, u zatvaranju dotoka vode do poklopca pomoću odgovarajućeg ventila. Nakon ovoga, vrše se očitavanja kretanja vode u kapilarnoj cevi u vremenskim intervalima od 10 minuta, 20 minuta, 1 čas i 2 časa. Apsorpcija koja praktično linearno opada sa vremenom se izražava u $\text{ml/m}^2 \cdot \text{s}$. Konačna vrednost apsorpcije predstavlja poka-



Slika 2.2. Aparatura za merenje apsorpcije vode u betonu

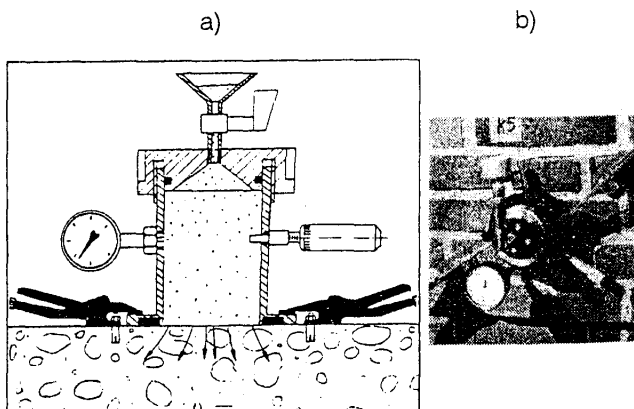
zatelj kapilarne poroznosti, a time (posredno) i kvaliteta u smislu fizičko-mehaničkih karakteristika i trajnosti betona. S tim u vezi, može se propisati određena maksimalna dozvoljena vrednost apsorpcije (u zavisnosti od konkretnih uslova eksploatacije objekta), koja će biti garancija trajnosti.

2.3. Merenje vodopropustljivosti betona

Za razliku od testa merenja apsorpcije vode, ovde se poroznost površinskog sloja betona ispituje merenjem vodopropustljivosti pri povišenom hidrostatičkom pritisku (do 6 bara). Aparatura za ispitivanje se sastoji od suda sa unutrašnjim prečnikom od 60 mm i kućišta sa poklopcem, levka za sipanje vode i manometra za merenje pritiska u sudu. Postupak merenja sastoji se od pripreme betonske površine koja mora da bude suva i ravna, pričvršćivanja suda i kućišta pomoću epoksidnog lepka i specijalnih kličesta sa ankerima, te sipanja kipuće vode kroz levak u sud. Nakon toga, zatvori se ventil na poklopcu i povećava pritisak od 0 do maksimalnih 6 bara. Željezni pritisak se u toku vremena održava konstantnim pomoću naročitog klipa sa mikrometerskom podelom, na kome se očitava količina vode koja je prodrla u betonski element.

Shematski prikaz aparature potrebne za ovo ispitivanje dat je na slici 2.3. a), dok je na slici 2.3. b) prikazana fotografija postavljene opreme.

Osim za utvrđivanje strukture, odnosno za određivanje veličine poroznosti betona, ova metoda može da se koristi i za ispitivanje prisustva prslina, kao i za testiranje spojeva i mesta na kojima su ugrađene zaštitne vodonepropusne membrane (tzv. waterstop).

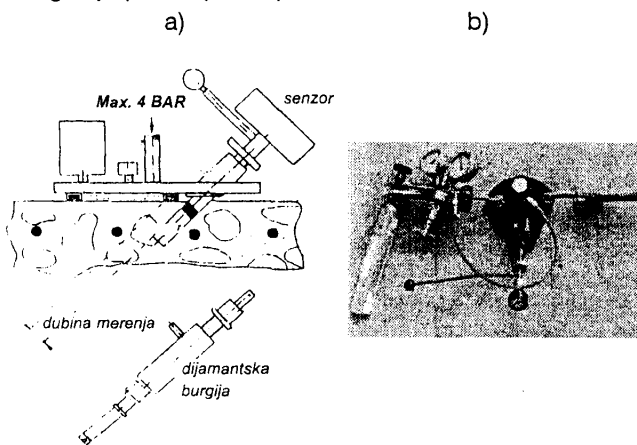


Slika 2.3. Uređaj za merenje vodopropustljivosti betona u konstrukciji

2.4. Merenje propustljivosti gasova

Metoda o kojoj je reč slična je prethodnoj, s tim što se kao penetrat ne koristi voda, nego gas CO_2 . Na željenom mernom mestu se izbuši rupa pod uglom od 45° , odgovarajućih dimenzija, u koju se zatim ubaci senzor za merenje pritiska na dubini od 15, 20 ili 25 mm. Nakon toga, na površini betona iznad ovog senzora lepljenjem pomoću epoksidne smole pričvrsti se specijalni sud prečnika 60 mm. Zatim se u sud ubacuje gas CO_2 pod pritiskom od 1, 2, 3 ili 4 bara i u trajanju od 2, 5 ili 10 minuta vrši očitavanje veličine propustljivosti betona za gasove, koja se registruje pomoću odgovarajućih senzora. Ova veličina se izražava u $\text{m}^3 \cdot \text{s}/\text{kg}$, a dobija se u zavisnosti od ostvarenog pritiska na mestu na kome je ugrađen senzor.

Shematski prikaz aparature potrebne za ovo ispitivanje dat je na slici 2.4. a), dok je na slici 2.3. b) prikazana fotografija postavljene opreme.



Slika 2.4. Uređaj za merenje propustljivosti gasova

2.5. Merenje vlažnosti površinskog sloja betona

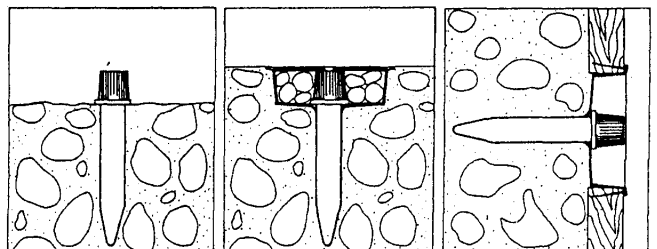
Provera sadržaja vlage u površinskom sloju betona u toku procesa očvršćavanja je naročito značajna kod košuljica podova, kod kojih se preko betona (odnosno maltera) postavlja neki drugi materijal, na primer parket, keramičke pločice, materijali na bazi polimera i sl. Ukoliko beton nije dovoljno suv, to može da prouzrokuje latentne probleme, kao što je kondenzacija vlage i/ili slaba adhezija između materijala poda i betonske podloge. Da bi se odredio najpogodniji trenutak za postavljanje podnog pokrivača, koristi se jednostavan aparat – merač vlažnosti.

Ovaj uređaj radi na principu merenja električnog otpora, tako što emituje signale niske frekvencije, pri čemu se procentualni sadržaj vlage u betonu, odnosno malteru, može meriti do dubine od oko 10 cm. Da bi se ostvario što bolji kontakt između betona i aparature, ispitivana površina mora da bude glatka, ravna i očišćena od prašine. Iz istog razloga, merne elektrode od aluminijuma su obložene specijalnom gumom visoke osetljivosti. Osim toga, uređaj neće dati tačna očitavanja ukoliko je beton već prekriven nekim drugim materijalom ili premazan bojom. Drugim rečima, to znači da elektrode moraju uvek da budu u direktnom i intimnom kontaktu sa ispitivanom betonskom površinom.

2.6. Merenje zrelosti betona

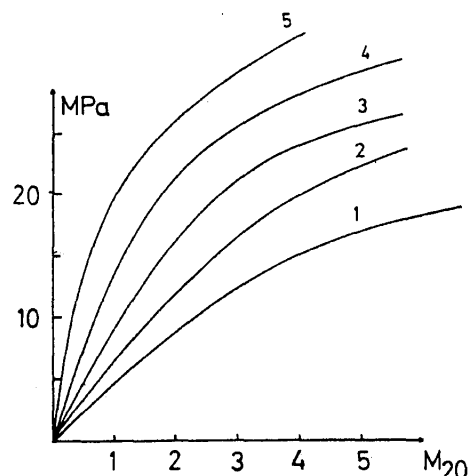
Direktno merenje veličine zrelosti, kao značajne karakteristike betona u toku njegovog očvršćavanja, može se vršiti pomoću uređaja koji se naziva COMA metar. Ovaj naziv je u stvari skraćenica koja potiče od početnih slova engleskih reči COncrete MAturity Meter, što u prevodu znači: merač zrelosti betona. Inače, zrelost betona se definiše kao proizvod vremena i temperature na kojoj se beton neguje. S obzirom da je čvrstoća istovremeno funkcija i vremena i temperature negovanja, izmerena veličina zrelosti predstavlja značajan pokazatelj brzine rasta čvrstoće ugrađenog betona. Ovo je naročito bitno u slučajevima kada je potrebno odrediti minimalnu starost pri kojoj može da se izvrši oslobađanje betona od oplate i demontaža skele, izvede prednaprezanje konstrukcije i dr.

Savremene metode ispitivanja zrelosti betona podrazumevaju upotrebu jednostavnih mernih instrumenata za jednokratnu upotrebu, kakav je i COMA metar. Ovaj uređaj se sastoji od kapilarne cevi ispunjene specijalnom tečnošću i plastičnog kućišta (kontejnera). Pre početka merenja kapilarna cevčica se polomi na označenom mestu i ubaci u kućište koje je, prethodno, umetnuto u beton. Usled povećanja temperature betona u toku procesa hidratacije cementa doći će do sve većeg isparavanja pomenute tečnosti iz kapilare. Promena nivoa ove tečnosti očitava se na posebnoj skali, koja je baždarena tako da registruje zrelost betona u danima pri temperaturi nege od 20°C (M_{20}). Mogući načini postavljanja COMA metra prikazani su na slici 2.6.1.



Slika 2.6.1. Načini postavljanja COMA metra

Na osnovu prethodno ustanovljenih dijagrama $M_{20} - f_p$ dobijenih ispitivanjem u laboratoriji, može se oceniti kolika je čvrstoća predmetnog betona u datom vremenu. Na slici 2.6.2. prikazan je jedan ovakav dijagram kod koga je, za pet različitih vrsta betona, ustanovljena funkcionalna zavisnost između zrelosti (M_{20}) i čvrstoće pri pritisku (f_p).



Slika 2.6.2. Dijagram zavisnosti $M_{20} - f_p$ za pet različitih betona

Na ispravno funkcionisanje COMA metra ne utiče promena vlažnosti, niti broj očitavanja rezultata ispitivanja, s obzirom na to da plastični kontejner ne dozvoljava upijanje vlage iz betona, a istovremeno sadrži uređaj koji vrši apsorpciju isparenja iz kapilarne cevčice.

Ipak, treba naglasiti da opisana metoda, sama za sebe, nije dovoljno pouzdana pa se najčešće kombinuje sa nekim od postupaka ispitivanja čvrstoće betona sa lokalnim razaranjem (LOK test i sl.). Više temperature negativno utiču na konačan kvalitet očvrstlog betona, tako da je korišćenje predmetne metode uglavnom svrshodno u uslovima zimskog betoniranja (pri temperaturama nižim od 5°C) ili, eventualno, u letnjim uslovima za ispitivanje "mladih" betona starosti do 7 dana.

3. METODE ZA DETEKCIJU DEFEKATA U BETONU

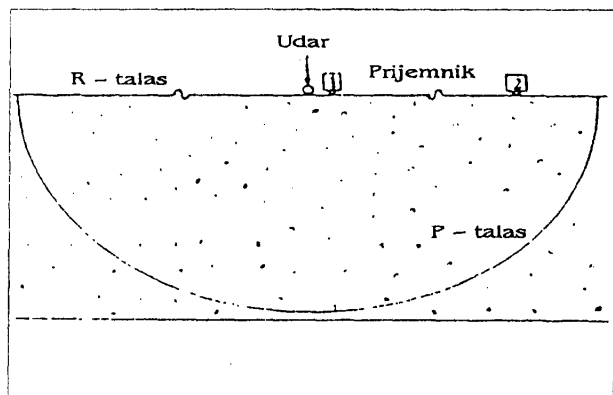
3.1. Eho-metoda na bazi udara

Princip ove metode zasniva se na merenju promene frekvencije oscilovanja zvučnog talasa proizvedenog mehaničkim udarnim opterećenjem na površini ispitivanog betonskog elementa. Ove oscilacije (tzv. P-talasi) se u toku prolaska kroz beton reflektuju od površina unutrašnjih defekata, a takođe i od spoljašnjih površina betonskog elementa, nakon čega se vraćaju do prijemnika oscilacija. Ovaj uređaj, postavljen neposredno uz mesto nanošenja mehaničkog udara, registruje automatski svaku promenu frekvencije oscilovanja (f) višestruko reflektovanog zvučnog talasa na bazi softvera koji koristi tehniku Furijeovih transformacija. S obzirom da su predmetne oscilacije periodične, sa periodom približno jednakim dužini puta koji talas pređe (tj. dvostrukoj debljini ispitivanog elementa $s=2d$), jasno je da se iz sledeće jednačine može izračunati brzina zvučnog P-talasa kroz beton, ukoliko je poznata debljina elementa:

$$d = \frac{v_b}{2 \cdot f} \quad (1)$$

Korišćene oznake u okviru jednačine (1) su sledeće: d = debljina ispitivanog betonskog elementa; v_b = brzina zvučnog P-talasa kroz beton; f = frekvencija oscilovanja zvučnog talasa.

S druge strane, ako znamo brzinu v_b možemo lako da utvrdimo nepoznatu dimenziju d predmetnog betonskog elementa, koristeći isti obrazac. Ukoliko brzina prostiranja P-talasa kroz beton nije poznata, ona može da se utvrdi merenjem brzine površinskih oscilacija (tzv. R-talasa) pomoću dva merna instrumenta-prijemnika ovih oscilacija, označenih brojevima (1) i (2) na sl. 3.1.



Slika 3.1. Dispozicija ispitivanja betona pomoću eho-metode na bazi udara

Osim za merenje nepoznatih dimenzija betonskih elemenata, ova metoda nalazi širu primenu u oblasti defektoskopije. Vrlo uspešno se primenjuje za:

- detekciju, lociranje i merenje dubine propagacije površinskih i unutrašnjih pukotina,
- rano otkrivanje slabljenja athezije između betona i šipki armature usled korozije,
- ocenu kvaliteta injektiranja kod sanacije pukotina, ankerovanja ili zaštite kablova za prednaprezanje,
- ispitivanje otpornosti betona na dejstvo mraza,
- praćenje procesa rasta čvrstoće mladih betona i dr.

Udar na eho-metoda ima dosta sličnosti sa istoimnom metodom na bazi merenja brzine ultrazvučnih talasa. Kao i ultrazvuk, koristi se kod ispitivanja različitih betonskih elemenata i konstrukcija: ploča, greda, stubova, zidova i sl. - bilo da se radi o jednoslojnim ili višeslojnim elementima. Prednosti ovih metoda leže u brzini i jednostavnosti merenja. Sam test traje između jedne i dve sekunde, a ispitivanje može da se vrši i do maksimalne dubine od preko 2 metra.

3.2. Metoda zvučne emisije

Primena ove metode bazirana je na pretpostavci da se i u betonu, slično homogenim materijalima kao što je čelik, javlja tzv. Kajzerov efekat. Prema ovom efektu, kada se ispitivani materijal izloži cikličnom opterećenju - pri čemu se u svakom narednom ciklusu povećava napon - materijal reaguje na svako prekoračenje prethodnog nivoa opterećenja emisijom zvučnih talasa visoke frekvencije (200kHz - 1 MHz). Nivo frekvencije emitovanih talasa značajno se menja ukoliko se u okviru predmetnog materijala javi defekat, odnosno prslina. Zbog toga se često materijali kod kojih je zabeležena ova pojava nazivaju "materijali sa memorijom".

Ova metoda ima višestruke mogućnosti primene u oblasti nedestruktivnog ispitivanja materijala. Naime, ukoliko se vrši registrovanje emitovanih zvučnih talasa pomoću specijalnih piezo-električnih senzora, moguće je vrlo precizno praćenje nastanka i propagacije prslina u konstrukcijama od armiranog ili prethodno napregnutog betona. Štaviše, ako je prethodno eksperimentalno utvrđena brzina prostiranja Reilijevih talasa kroz predmetni beton, na osnovu analize registrovanih vremena prijema ovih talasa može se odrediti i tačan položaj prslina.

Metoda zvučne emisije već je našla praktičnu primenu u mnogim oblastima ispitivanja materijala i konstrukcija. Na primer, pokazala se kao izuzetno pogodna u slučajevima nanošenja probnog opterećenja kod greda i ploča - ukoliko se u toku ispitivanja registruje neka akustička aktivnost to je siguran pokazatelj pojave mikro prslina u ispitivanom betonskom elementu.

Druga, takođe značajna primena ove metode svakako je mogućnost kontinuiranog praćenja ponašanja betonskih rezervoara i silosa kod kojih bi promene nivoa zvučne emisije bile indikatori pojave mikro prslina kao "kritičnih mesta", odnosno potencijalnih izvora iscurivanja sadržaja ovih objekata.

Metoda o kojoj je reč se pokazala i kao veoma pogodna za primenu kod elemenata sa složenim geometrijskim karakteristikama, kod kojih su mesta nastanka pukotina locirana sa velikom tačnošću i pored upotrebe svega dva prijemnika. Naravno, uz veći broj korišćenih senzora povećava se i tačnost merenja, tj. tačnost dobijenih rezultata ispitivanja.

4. METODE ZA ODREĐIVANJE STEPENA KOROZIJE BETONA I ARMATURE

4.1. Metoda korozionog mapiranja

Poznata je činjenica da alkalna sredina u betonu (pH vrednost ~ 13) onemogućava pojavu korozionog razaranja ugrađene armature. Ukoliko, međutim, dođe do karbonatizacije zaštitnog betonskog sloja ili do delovanja hlorida na beton, opasće pH vrednost, pa će na taj način biti omogućena korozija čelika po elektrohemijском mehanizmu, što je naročito izraženo pri masovnom prodoru agresivnih hloridnih jona u unutrašnjost betona. Kada ovi hloridi stignu do šipki armature počinje ubrzani proces razgradnje čelika i formiranje ekspanzivnih produkata korozije.

Ako spoljašnju površinu armiranobetonskog elementa posmatramo kao katodu (tj. negativnu elektrodu), a delove armature napadnute korozijom kao anodu (odnosno pozitivnu elektrodu), onda stepen zahvaćenosti čelika korozijom možemo da ocenimo na osnovu intenziteta prolaska jona između ove dve elektrode.

Metoda korozionog mapiranja zasniva se na prethodno izloženom principu, tj. na istovremenom merenju razlike potencijala između katode i anode i veličine električnog otpora zaštitnog površinskog sloja betona. Kao konačan rezultat ispitivanja dobijaju se dve mape posmatranog armiranobetonskog elementa: mapa gradijentna potencijala (sve površine sa istim potencijalom izražene u mV prikazane su istom bojom) i mapa električne otpornosti (na kojoj su prikazani delovi površine betona sa istim otporom izraženim u k Ω). Na ovim dvema mapama lako je uočiti kritične lokacije (izražene jarkim bojama – crvenom i žutom), odnosno mesta na kojima je proces korozije najviše napredovao. Na jednom ili dva ovakva mesta potrebno je izvršiti "otvaranje betona" – tj. skidanje zaštitnog sloja betona i merenje prečnika šipki armature, čime se utvrđuje korelacija između stvarnog stepena korozije i rezultata dobijenih merenjem.

Iz svega prethodno izloženog jasno je da veća razlika potencijala i manja vrednost otpora u određenom preseku predstavlja pokazatelj višeg stepena korozije. Ovde još treba napomenuti da se veličina električnog otpora u površinskom sloju betona menja ne samo usled karbonatizacije, već i kao posledica promene vlažnosti betona, o čemu treba voditi računa tokom ispitivanja. Naime, ukoliko vlaženjem površine betona dolazi do smanjenja veličine električnog otpora uz istovremeno povećanje razlike potencijala, onda je to pouzdan znak da je predmetni armirani beton zahvaćen procesom korozije. S druge strane, ako se kvašenjem betona smanjuje otpor, a potencijal ostaje nizak (tj. nepromenjen u odnosu na suv beton), to znači da nije nastupila korozija u ispitivanom armiranobetonskom elementu.

Ova metoda se koristi za:

- ocenu stepena oštećenja armiranobetonskih konstrukcija, najčešće u kombinaciji sa drugim in situ testovima kao što su test karbonatizacije, određivanje sadržaja hlorida, propustljivost za vodu i gasove, detekcija prslina i dr.;

- praćenje stanja (monitoring) korozije armiranobetonskih konstrukcija;

- provera efekata sanacije oštećenih delova konstrukcije.

4.2. Test karbonatizacije

Ovo je veoma jednostavna kolorimetrijska metoda za utvrđivanje profila pH vrednosti po dubini preseka očvrslog betona. Kao što je već pomenuto, pH indikator je bitna karakteristika koja ukazuje na nivo karbonatizacije u zaštitnom sloju betona.

Kao uzorak za ispitivanje uzima se cilindar manjeg prečnika isečen iz konstrukcije (kern), uzorak betonskog praha izvađen u toku bušenja ili komad betona odlomljen sa predmetne armiranobetonske konstrukcije. Nakon kratkotrajnog sušenja uzorak je potrebno poprskati specijalnim sprejom – tzv. indikatorom karbonatizacije. Pokazatelj nivoa pH vrednosti ispitivanog betona je boja uzorka, koja može da se kreće od tamno ljubičaste (pH 13 – alkalna sredina), preko zelene (pH 9 – granična, tj. kritična vrednost karbonatizacije), do narandžaste (pH 5 – kisela sredina). Sve nijanse boja od ljubičaste do zelene ukazuju na činjenicu da ispitivani beton nije zahvaćen korozijom, dok tonovi od zelene, preko crvene do narandžaste boje predstavljaju pokazatelj, respektivno, sve višeg nivoa karbonatizacije.

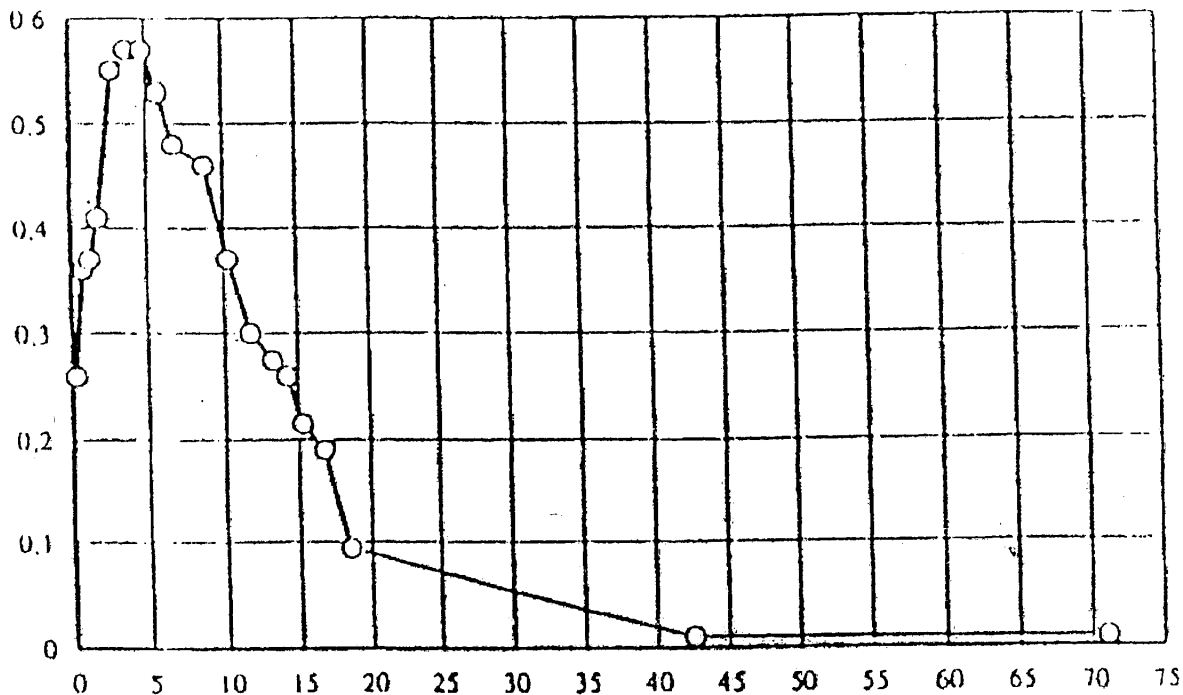
Osim jednostavnosti primene, dodatni kvalitet ove metode leži u činjenici da ona po svojoj preciznosti ne zaostaje za standardnim hemijskim testovima koji se vrše u laboratoriji. Ono o čemu ipak treba voditi računa je uslov da se sprej nanese neposredno nakon uzimanja uzorka iz ispitivane armiranobetonske konstrukcije. Ukoliko se to ne učini odmah ili barem dovoljno brzo, spoljašnji sloj betona-uzorka biva "napadnut" od strane molekula CO₂ iz vazduha, što rezultira smanjenjem njegove pH vrednosti, a samim tim i dobijanjem netačnih rezultata ispitivanja.

4.3. Hloridni test

Ova metoda se obično koristi u kombinaciji sa prethodno opisanim testom karbonatizacije i korozionim mapiranjem. Samo ispitivanje je jednostavno i kratkotrajno, a dobijeni rezultati – koji predstavljaju sadržaj hloridnih jona u svežem ili očvrslog betonu – su veoma pouzdani. Kao najbolja ilustracija ostvarenog stepena pouzdanosti može da posluži poređenje sa standardnim laboratorijskim testovima, kao što je, na primer, jonohromatografija, pri čemu rezultati dobijeni pomoću hloridnog testa odstupaju za najviše 5%.

Postupak ispitivanja podrazumeva uzimanje uzorka svežeg ili očvrslog betona, zatim njegovo potapanje u specijalni rastvor za ekstrakciju hlorida u koji se, nakon kratkotrajnog potresanja suda, potapa hloridna elektroda. Ova elektroda je kalibrisana tako da se na odgovarajućem displeju trenutno prikazuje očitavanje sadržaja hloridnih jona u rastvoru, tj. količina ovih jona izražena u procentima u odnosu na masu betona.

U slučaju uzimanja uzoraka očvrslog betona za hemijsku analizu potrebno je izvaditi betonski prah sa većeg broja mernih mesta na konstrukciji. U tu svrhu koristi se specijalna bušilica koja se pozicionira i pričvrsti tako da stoji upravno u odnosu na površinu ispitivanog betonskog elementa. Aparatura je podešena tako da se u toku bušenja na jednom mernom mestu burgija zaustavlja na svakih 0,5 mm dubina nakon čega se, pomoću specijalnog usisivača sa filterom, uzima uzorak od približno 5 g očvrslog betona. Maksimalna dubina bušenja je 50 mm, što odgovara broju od 100 uzoraka za hemijsku analizu. Nakon sprovođenja hloridnog testa na napred opisani



Slika 4.3.1. Profil sadržaja Cl^- jona po dubini zaštitnog sloja betona

način dobijamo profil sadržaja Cl^- jona po dubini zaštitnog sloja ispitivanog armiranobetonskog elementa, kako je to prikazano na slici 4.3.1. (na apscisci se nalaze vrednosti dubine zaštitnog sloja betona izražene u mm, a na ordinati količine hloridnih jona izražene u %).

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja možemo da utvrdimo koliki je stepen agresivnosti betona kao sredine u kojoj se nalaze šipke armature izrazito podložne koroziji usled delovanja hlorida.

Način uzimanja uzoraka betonskog praha za ispitivanje putem hloridnog testa, kao i skica aparature koja se koristi dati su na slici 4.3.2.

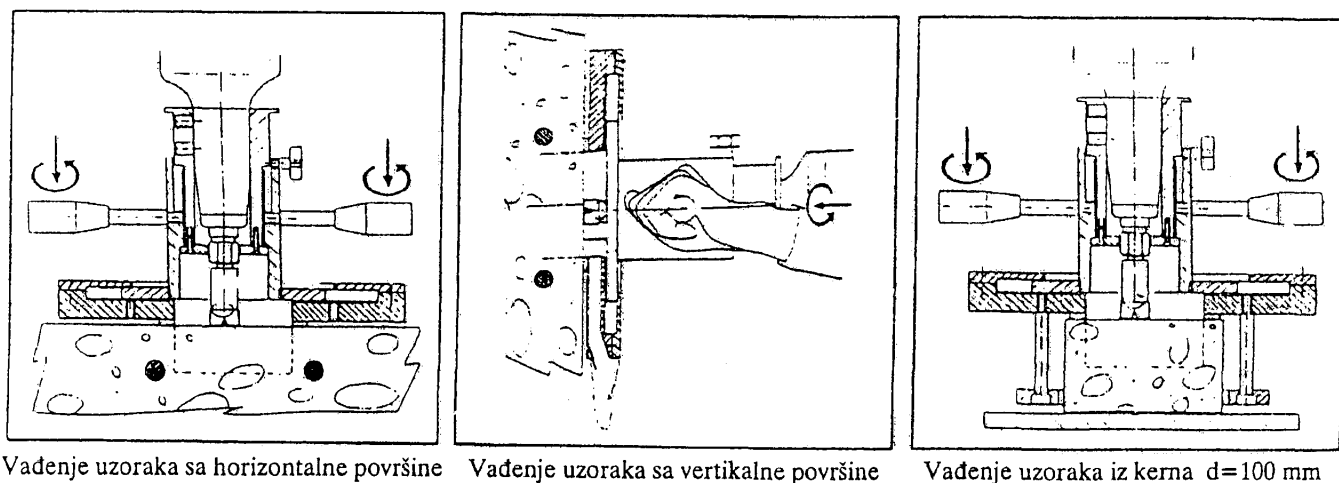
4.4. Alkalni test

Slično kao i hloridni test i alkalni test se koristi kao jednostavna i efikasna metoda za hemijsku analizu svežeg ili očvrslog betona. Količina alkalijskih jona (Na^+ i K^+) se utvrđuje na osnovu rezultata dobijenih potapanjem uzoraka u sud sa specijalnom tečnošću za ekstrakciju. Kada se tako pripremljen rastvor ohladi, u njega se stavljaju

dve kalbrisane elektrode (po jedna za Na^+ i K^+ jone) i vrši se očitavanje na aparaturi izraženo u mV. Ovako dobijene veličine napona se, pomoću unapred utvrđenih kalibracionih krivih, transformišu u vrednosti sadržaja baznih oksida natrijuma (Na_2O) i kalijuma (K_2O) izražene u kg/m^3 svežeg, odnosno očvrslog betona.

Sam način uzimanja uzoraka očvrslog betona je identičan postupku opisanom u okviru prethodne tačke, sa istom aparaturom koja se koristi i za obavljanje hloridnog testa (slika 4.3.). Uobičajeno vreme potrebno za predmetno ispitivanje je 5–8 minuta.

Uporedne analize alkalnog testa i standardne metode fotometrije pokazuju da rezultati dobijeni putem ovog testa odstupaju za manje od 5% u odnosu na znatno skuplji i kompleksniji laboratorijski postupak. Ostvarena tačnost i kod alkalnog, a takođe i kod hloridnog testa, je više nego dovoljna da bi ove metode mogle da budu preporučene kao veoma pouzdane za ocenu kvaliteta kako svežeg, tako i očvrslog betona.



Vađenje uzoraka sa horizontalne površine

Vađenje uzoraka sa vertikalne površine

Vađenje uzoraka iz kerna $d=100$ mm

Slika 4.3.2. Način uzimanja uzoraka betonskog praha za ispitivanje

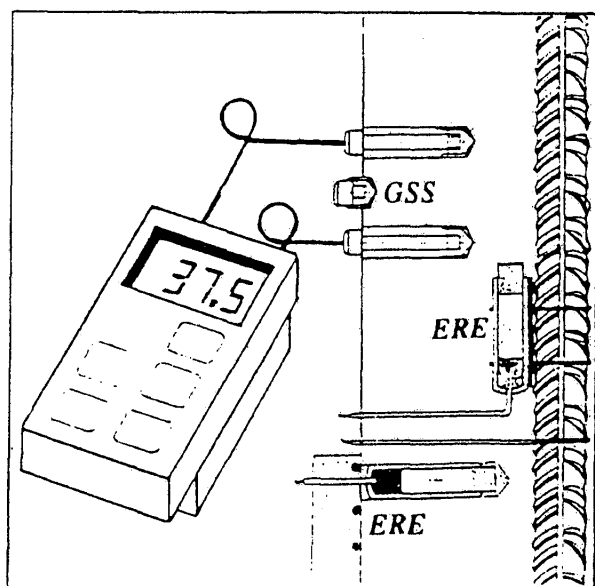
4.5. Hum metar – aparat za praćenje stanja korozije kod šipki armature

Hum metar je elektronski uređaj za kontinuirano praćenje promena izazvanih korozijom šipki armature u okviru armiranobetonskih elemenata. Sam naziv ovog aparata potiče od engleske reči hum (ham) što znači zujanje, odnosno brujanje. Pri tome, u ovom slučaju se misli na karakterističan zvuk koji nastaje kao posledica prolaska struje kroz otpornik. Pošto aparatura o kojoj je ovde reč upravo meri veličinu električnog otpora zaštitnog sloja betona, otuda dolazi i ovakav njen naziv.

Pomenuti električni otpor meri se između dve sonde od nerđajućeg čelika, odnosno između ovih sondi i šipki armature u ispitivanom armiranobetonskom elementu. Njegova veličina zavisi kako od ostvarene strukture (tj. poroznosti) betona, njegove vlažnosti i temperature, tako i od sadržaja hlorida u betonskoj masi, odnosno od stepena korozije same armature.

Generalno posmatrano, postoje dva načina ispitivanja u okviru ove metode. Prvi podrazumeva da se, prethodno, na većem broju mernih mesta u betonu izbuše odgovarajuće rupe, a zatim se instrument sa elektrodama u obliku sondi pomera od jednog mernog mesta do drugog, uz istovremeno očitavanje rezultata ispitivanja. Ovaj način ispitivanja prikazan je na slici 4.5. gde GSS predstavlja skraćenicu sa engleskog jezika koja označava elektrode od nerđajućeg čelika sa grafitom. Drugi postupak se od prvog razlikuje samo po tome što su sonde za merenje električnog otpora trajno ugrađene u elemente armiranobetonske konstrukcije. Ova varijanta je na slici 4.5. predstavljena skraćenicom ERE, što u prevodu označava ugrađene referentne elektrode. Razume se da je drugi način ispitivanja znatno skuplji od prvog postupka, tako da je njegov izbor opravdan samo u slučajevima kada postoji potreba za trajnim praćenjem stanja korozije armature u toku dužeg vremenskog perioda.

Što se tiče same aparature, sonde su konstruisane kao elektrode od mangan-dioksida postavljene u specijalna čelična kućišta ispunjena alkalnim gelom, a sve u cilju ostvarenja njihovog što dužeg radnog veka. U slučaju trajnog ugrađivanja ovih sondi na određenim mernim



Slika 4.5. Aparatura za praćenje stanja korozije šipki armature

mestima u konstrukciji, jedan broj njih se pričvršćuje za šipke armature pre betoniranja, a ostatak biva naknadno instaliran u naročito izbušene rupe, koje se nakon toga zatvaraju mikroarmiranim cementnim malterom.

5. ZAKLJUČAK

I pored nesumljivih nedostataka nedestruktivnih metoda ispitivanja materijala u odnosu na uobičajene – klasične postupke, činjenica da se uglavnom radi o jednostavnim, brzim i jeftinim metodama i uređajima, pri čijoj upotrebi ne dolazi ni do najmanjeg razaranja ili oštećivanja materijala u konstrukciji, preporučuje njihovu sve širu primenu. Osnovni nedostatak – indirektan put kojim se dolazi do željenog svojstva materijala merenjem neke druge fizičke veličine i uspostavljanjem funkcionalne relacije između ova dva parametra, pri čemu se uvek pravi veća ili manja greška, danas se može u velikoj meri izbeći. Naime, aparatura i metode ispitivanja se sve više usavršavaju, tako da se pomenute greške svode na najmanju moguću meru. Dalje, kombinacija dve ili više različitih nedestruktivnih metoda koje za cilj imaju određivanje istog svojstva ispitivanog materijala (kao što je na primer slučaj sa kombinacijom alkalnog, hloridnog i testa karbonatizacije) daće krajnje rezultate sa značajno većom pouzdanošću. I konačno, u situacijama kada je moguće uzimanje srazmerno malog broja uzoraka iz gotove konstrukcije i zatim njihovo destruktivno–nedestruktivno ispitivanje u laboratoriji, tačnost ovako dobijenih rezultata često je sasvim dovoljna i ne postoji potreba za klasičnim ispitivanjem sa razaranjem materijala. Iz svega napred navedenog neminovno se nameće sledeći zaključak: razvoj savremenih nedestruktivnih metoda, kako onih o kojima je bilo reči u ovom radu, tako i mnogih drugih koje ovde nisu pomenute, predstavlja značajan kvalitativni pomak u oblasti ispitivanja materijala i konstrukcija.

LITERATURA

- [1] M. Muravljev: Osnovi teorije i tehnologije betona, Građevinska knjiga, Beograd 1991. godina.
- [2] S. Živković: Beton u žarkim klimama – svojstva, trajnost i tehnologija, Monografija u izdanju Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd 1997. godina.
- [3] S.W. Hearn, C.K. Shield: Acoustic Emission Monitoring as a Nondestructive Testing Technique in Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 94/6, Nov.–Dec. 1997, p. 510–520.
- [4] M. Sansalone, J.M. Lin, W.B. Streett: A Procedure for Determining P-Wave Speed in Concrete for Use in Impact-Echo Testing Using a P-Wave Speed Measurement Technique, ACI Materials Journal, Vol. 94/6, Nov.–Dec. 1997.
- [5] R.P. Khatri, V. Sirivivatnanon: Methods for the Determination of Water Permeability of Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 94/3, May–June 1997.
- [6] Feldman et al. : Rapid Chloride Permeability Test, ACI Materials Journal, Vol. 91/3, May–June 1994.
- [7] Katalozi i uputstva različitih proizvođača opreme za nedestruktivno ispitivanje betona i betonskih konstrukcija.