

AKTUELNE METODE ISPITIVANJA MOSTOVSKIH KONSTRUKCIJA – dio 1

Asis. mr Jovo POPOVIĆ, dipl. inž. građ.¹
V. prof. dr Nebojša ĐURANOVIĆ, dipl. inž. građ.



REZIME:

U ovom radu se daje pregled i analiziraju mogući postupci prilikom ispitivanja mostovskih konstrukcija. Nakon kratkog uvoda, u članku se posebno razmatraju metode za kontrolu ugrađenih materijala (kako uzoraka izvađenih iz konstrukcije, tako i in-situ ispitivanja), a posebno metode ispitivanja koje karakterišu odgovor konstrukcije kao cjeline (naročito mjerenje sila i definisanje dinamičkih karakteristika ponašanja mosta). U tom smislu, posebno su tretirani armiranobetonski, prethodno napregnuti i čelični mostovi.

KLJUČNE RIJEČI: *ispitivanje materijala, kern, in-situ, globalni odgovor, dinamičke karakteristike*

1. UVOD

Prilikom ispitivanja mostovskih konstrukcija, vodeći računa o racionalnosti po pitanju izbora odgovarajućih metoda i njihove cijene koštanja, izdvajaju su tri glavne faze ispitivanja:

- ispitivanje stanja i kvaliteta ugrađenih materijala mostovske konstrukcije, i
- ispitivanje odgovora ispitivane konstrukcije na opterećenje, i
- upoređivanje rezultate prve dvije faze sa analitički definisanim karakteristikama i ponašanjem mosta.

Naravno, sve tri faze podrazumijevaju usaglašenost njihovog sprovođenja sa aktuelnim standardima i propisima.

Iako one imaju svoju nezavisnu metodologiju sprovođenja, preporučljivo je, a najčešće i potrebno, da se sve faze koriste istovremeno, tj. uporedo. Pri tome, jasno je da same metode za ocjenu stanja materijala u konstrukciji obuhvataju laboratorijsku analizu i eksperimente, kako na uzorcima tako i na realnoj konstrukciji - «in situ».

Opšti preduslovi za uspješno sprovođenje ispitivanja mostovskih konstrukcija su:

- široko teorijsko i praktično znanje vodećih eksperimentatora o konstrukcijama i materijalima koji ih čine;
- detaljno poznavanje metoda i sredstava eksperimentalnog istraživanja;
- neophodna znanja iz ostalih fundamentalnih naučnih disciplina povezanih sa predmetnim ispitivanjima;
- dobra materijalna baza, laboratorijski uslovi i kvalitetna mjerna oprema;
- kvalitetno laboratorijsko pomoćno osoblje iz raznih oblasti (građevinci, mehaničari, električari, majstori raznih struka, itd.)
- savremeni uređaji za automatizaciju i prikupljanje podataka i rezultata ispitivanja; i
- kvalitetna hardverska i softverska rješenja za obradu dobijenih rezultata, njihovu analizu i prezentaciju.

¹Adresa oba autora: Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, Cetinjski put bb, 81.000 Podgorica

U ovom radu pored uvodnog opisa opštih razloga za ispitivanje mostovskih konstrukcija, detaljnije su prikazane aktuelne metode ispitivanja mostovskih konstrukcija, bez detaljnijih razmatranja i opisa načina rada pojedinih instrumenata koji se koriste za sprovođenje ovih ispitivanja. Pojedine od ovdje analiziranih metoda nijesu direktno povezane samo sa ispitivanjem mostovskih konstrukcija, već svoju upotrebu nalaze i u ispitivanjem drugih tipova konstrukcija. Takođe, u okviru ovog teksta, su dati i aktuelni pristupi određivanju dinamičkih karakteristika mostovskih konstrukcija.

2. OPŠTI RAZLOZI ZA ISPITIVANJE MOSTOVSKIH KONSTRUKCIJA

Osnovni cilj ispitivanja mostovskih konstrukcija je da se dobiju praktična saznanja o stvarnoj nosivosti, stabilnosti, nastajanju i veličinama deformacija i prslina, kao i ostalim parametrima ponašanja noseće konstrukcije, ili njenih djelova. U tom smislu posebno je značajno ispitivanje vršiti ako postoji nepoznanice u pogledu nosivosti ili krutosti određene mostovske konstrukcije [5].

Pored ovakvog utvrđivanja stvarnog ponašanja mostovske konstrukcije, ispitivanjem je moguće vršiti i pronalaženje defekata kod starih i korišćenih konstrukcija. U tom cilju vrši se definisanje kako onih defekata koji su nastali još prilikom građenja, tako i onih koji su posljedica eksploatacije objekta. Ispitivanjem konstrukcija obično se provjeravaju i sanacione mjere koje su primjenjene nakon otkrivanja defekata.

Ispitivanje mostova se ponekad primijenjuje i ako se vrše promjene na konstrukciji koje zahtijevaju dodatni kapacitet nosivosti, kao i u situacijama izlaganja konstrukcije projektom nepredviđenim opterećenjima (recimo u situaciji kada se pojavi potreba privremenog korišćenja mostovske konstrukcije za veća saobraćajna opterećenja) [2].

Iskustvo, dopunjeno i pretočeno u zakonsku regulativu, nam ukazuje koje su to mostovske konstrukcije koje treba eksperimentalno ispitati. Svakako, na prvo mjesto dolaze one mostovske konstrukcije koje kao takve nikada prije nijesu korišćene. Kod takvih, obično komplikovanih i nedovoljno ispitanih tipova konstrukcija, analitički i računski postupci, zbog unijetih neophodnih pojednostavljenja, mogu dovesti do grešaka. Da se one ne bi pojavile i da bi smo bili sigurni u kvalitet rezultata treba primijeniti eksperimentalna sredstva. U principu, samo konstrukcije i postupci proračuna čije su teze eksperimentalno potvrđene imaju mogućnost da se primjenjuju u svakodnevnoj praksi. Zbog toga se ponekad kaže da je ispitivanje konstrukcija osnova pouzdanog konstrukterstva.

U novije vrijeme ispitivanje konstrukcija često se smatra dijelom šireg pojma – tj. ispitivanja pod uticajima dejstava iz prirodnog okruženja objekta (engleski: *environmental testing*), tj. ispitivanja u kome se mostovska konstrukcija smatra dijelom ukupnog okruženja u kome se nalazi, i u odnosu na koje se i ispituje. Ovo obuhvata i ispitivanje konstruktivnih sistema (i komponenti koje ga čine) pod potencijalno veoma različitim uticajima okoline - od mehaničkih opterećenja, do onih izazvanih promjenom temperature, vlažnosti, itd.

Prilikom izvođenja eksperimenata mogu se koristiti stvarne mostovske konstrukcije ili njihovi, obično umanjeni modeli. Ako se koriste modeli, mora se obezbijediti potreban nivo sličnosti između modela i stvarne konstrukcije i to u pogledu oblika, proporcije, materijala i slično.

Metode i postupci ispitivanja mostovskih konstrukcija često se primjenjuju i u čisto naučne svrhe – kroz naučno istraživačke projekte. U toj oblasti danas su posebno aktuelna istraživanja koja se tiču rijetkih formi opterećenja – koja mogu dobiti katastrofalne razmjere - poput zemljotresa, jakih vjetrova, velikih morskih talasa, udara vozila, eksplozije i tome slično [12].

Eurocode 1: Basis of design and actions on structures, iz 1994. godine, takođe obrađuje potrebu za ispitivanjem konstrukcija. U skladu sa njim eksperimentalna ispitivanja će se vršiti u sledećim situacijama:

- a) u cilju direktnog određivanja granične nosivosti ili stanja upotrebljivosti delova konstrukcije,
- b) u cilju boljeg definisanja opterećenja na konstrukciji ili boljeg definisanja nosećeg sistema,
- c) kao kontrolna ispitivanja, radi određivanja kvaliteta gotovih proizvoda ili kontinuiteta kvaliteta proizvodnje,
- d) kao ispitivanje u toku izvođenja, u cilju procjene uticaja stvarnih uslova ostvarenih tokom izvođenja na samu konstrukciju,
- e) kao kontrolna (probna) ispitivanja u cilju provjere ponašanja gotove konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata nakon izvođenja.

3. NEKE AKTUELNE METODE ZA ISPITIVANJE MATERIJALA UGRAĐENIH U KONSTRUKCIJU MOSTA

3.1. Ispitivanje na izvađenim uzorcima

Kod ovih ispitivanja, uzorci/kernovi (izvađeni iz AB konstrukcije mosta korišćenjem parcijalno destruktivnih metoda), su uglavnom ograničene dužine (dimenzije) i broja. Uzimaju se iz konstruktivno najznačajnijih tačaka objekta [4].

Zbog takvog načina dobijanja uzorka, ispitivanja na njima postaju mjerodavna tek poslije korekcije rezultata različitim koeficijentima koji se dobijaju upoređenjem sa postojećom bazom podataka koju čine podaci dobijeni nedestruktivnim metodama ispitivanja na reprezentativnim uzorcima.

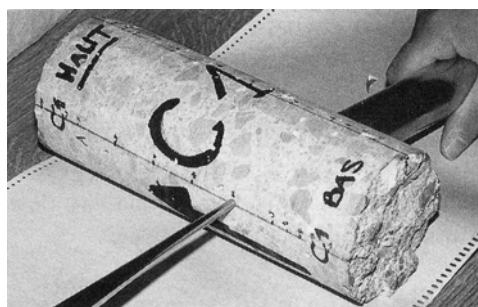
Fizičko-mehanička ispitivanja

Fizičko-mehanička ispitivanja betona na uzorcima/kernovima (sl.1), uključuju, pored utvrđivanja osnovnih mehaničkih osobina - kao što su čvrstoća, moduo elastičnosti i t. sl. - ponekad i ispitivanja drugih značajnih karakteristika kao što su:

- gustina,
- poroznost,
- sadržaj vode,
- brzina prostiranja zvuka itd.



slika 1. Betonski uzorci (kernovi)



slika 2. Mjerenje brzine zvuka na betonskom uzorku [1]

Tako dobijeni podaci mogu imati različite namjene, zavisno od iskustva ispitivača i informativnosti samih podataka. Na primjer, gustina betona u mostovskim AB pločama može nam pomoći za procjenu dubine degradacije, recimo poslije izlaganja konstrukcije ekstremnim uticajima, npr. požaru. Mjerenje poroznosti najčešće daje podatke o kvalitetu zaštitnog sloja betona, njegovoj oštećenosti itd [1].

Kako izvađeni betonski uzorci rijetko imaju kvalitet i dimenzije standardnih cilindara, dobijene rezultate treba uvijek pažljivo analizirati. Stoga, prilikom tumačenja ostvarenih rezultata, svi defekti uzorka, efekti veličine uzorka i sva odstupanja od standardnih dimenzija moraju biti uzeti u obzir.

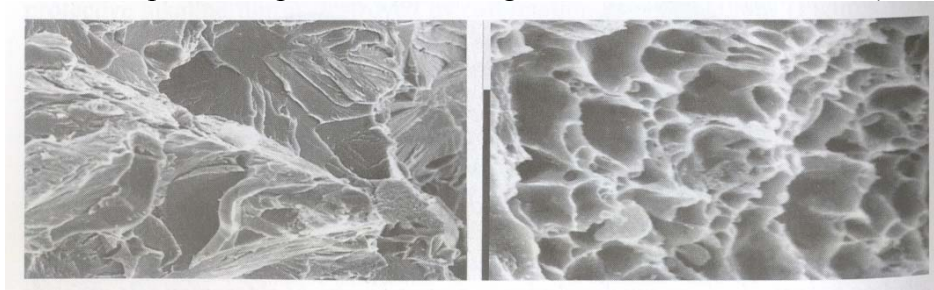
Prije nego uzorke izvađene iz mostovske konstrukcije izložimo destruktivnom ispitivanju (do loma) korisno je mjeriti brzinu zvučnih talasa u longitudinalnom i radijalnom pravcu (sl. 2), koristeći metode ultrazvučne defektoskopije - o čemu će više riječi biti kasnije

Kada se ispituju elementi izrađeni od čelika, uzorci se, ako je to moguće, uzimaju iz već oštećenih elemenata konstrukcije, npr. žica od kablova (lančanica, kosih kablova, užadi za prethodno naprezanje) ili armature. Ako to nije slučaj, uzorci se uzimaju iz neoštećenog dijela konstrukcije, koristeći destruktivne i/ili poludestruktivne metode.

Pored klasičnih ispitivanja koja se sprovedu na tako uzetim uzorcima, ponekad se rade i veoma specifične analize.

Na primjer, površinu po kojoj je ostvaren lom elementa konstrukcije moguće je ispitivati kako bi se odredio sami uzrok loma. Može se reći da su, recimo, lom uslijed udarnog opterećenja, lom uslijed korozije, zamora materijala i tome slično, karakterisani međusobno veoma različitim izgledom površine po kojoj je lom ostvaren.

Poslije registrovanog loma čeličnih uzoraka, mikroskopskim posmatranjem površine loma mogu se eventualno odrediti čak i pojedine mehaničke karakteristike ispitivanih uzoraka, pa i sama priroda ostvarenog loma - duktilni ili krto lom (slika 3).



Slika 3. Lom čeličnih žica (mikroskopski pogled): krto (lijevo), duktilni (desno) [2]

Na kraju, poslije sprovedenih specifičnih ispitivanja ovog tipa, uzeti betonski i/ili čelični uzorci se izlažu klasičnim ispitivanjima do loma (destrukcije), kako na pritisak tako i na zatezanje – prvenstveno radi određivanja granične čvrstoće materijala i/ili veza napon – deformacija (radnog dijagrama) – ali i radi određivanja i ostalih bitnih karakteristika.

Fizičko-hemijska ispitivanja

Za ovu grupu ispitivanja je tipično da čak i izdvojeni uzorci veoma malih dimenzija mogu biti uspješno korišćeni kao reprezentativni, čak i za mostovske konstrukcije značajnih dimenzija. Međutim, prednosti metoda koje analiziraju uzorke malih dimenzija su ponekad limitirane visokom cijenom njihove primjene, kao i samim odabirom metode koja je za predmetno ispitivanje najcjelishodnija.

Kod metalnih konstrukcija, hemijskom analizom uzoraka se u principu teži prepoznavanju elementarnih čestica. Kaže se da hemijske metode primjenjene na čeličnim

uzorcima predstavljaju sastavni dio **metalografije**, koja obično daje kompletne podatke o prirodi, strukturi, obliku i veličini zrna (teksturi), prisustvo nečistoća i slično – a na osnovu ovoga i karakteristike materijala. Mikroskopska posmatranja se upotrebljavaju za određivanje i distribuciju metalnih ili nemetalnih sastojaka.

Petrografska ispitivanja, koja se obično sprovode pod elektronskim ili optičkim mikroskopima, mogu da daju mineralošku konstrukciju sastojaka betonskih ili čeličnih elemenata i njihov stepen degradacije.

Hemijsko-fizička ispitivanja betona uključuju i:

- elementarnu hemijsku analizu sastojaka betona,
- defraktometriju X-zracima na uzorcima od betonskog praha, recimo u cilju određivanja površinskih sastojaka smjese, i t.sl.,
- diferencijalnu termičku analizu i termo-gravimetrijsku analizu,
- analizu fizičko-hemijskih izmjena na betonu i eventualnog gubitka težine uzoraka,
- detaljno posmatranje pod elektronskim mikroskopom – recimo u cilju proučavanja reakcija betona na ekstremne uticaje okruženja.

U AB i prethodno napregnutim mostovima, uzorci mogu biti ispitivani i pomoću hlora. Tada se uzorkovanja sprovode, eventualno, i iz cijevi i betona devijatora i oko kotvi primjenjenih kod prethodnog naprezanja. Pomoću hlorne analize dobijaju se i podaci o hemijski zarobljenoj vodi, korozivnim jonima i pH nivou, koji mogu pouzdano ukazivati na potencijalnu opasnost od korozije .

Kombinovanjem ovakvih i sličnih metoda obično je zadovoljena i potreba za eventualni ostalim potrebnim informacijama o betonskim kompozitima, prvenstveno stvarnom cementnom sastavu i njegovoj prirodi [3].

Ovako dobijene informacije se upoređuju sa postojećim podacima, koji su obično prikupljeni tokom same izrade mostovske konstrukcije. Oako prikupljene informacije mogu efikasno poslužiti za detektovanja ili objašnjenje eventualne degradacije, ili drugih nepovoljnih procesa na samom mostu.

Ovim postupcima mogu, ako je potrebno, naknadno biti određeni i sastojci inicijalne suve betonske smješe, prisustvo hemijski vezane vode i slično, što sve zajedno ponekad pomaže da se shvate mehanizmi degradacije i propadanja konstrukcije mosta.

3.2. Ispitivanje ugrađenih materijala “in situ”

Uprkos veoma korisnim podacima koji se dobijaju iz uzoraka izvađenih iz same konstrukcije (destruktivne i polu-destruktivne metode), nedestruktivna ispitivanja (NDI) i neke druge komplementarne metode se obično pokazuju kao neophodne za detaljnija ispitivanja na istim materijalima, ali sada bez njihovog uklanjanja iz konstrukcije. Zato se kaže da se laboratorijska i istraživanja na samoj konstrukciji (in situ) međusobno dopunjuju.

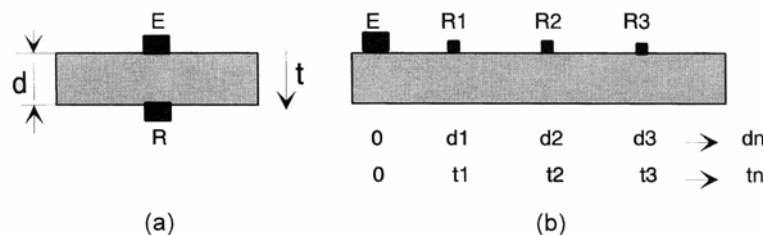
3.2.1. Ispitivanja na elementima od betona

Ispitivanje ultrazvukom

Mjerenje impulsne brzine ultrazvučnih talasa je jedna od najbolje teoretski i praktično obrazloženih metoda iz ove kategorije ispitivanja mostovskih konstrukcija [5].

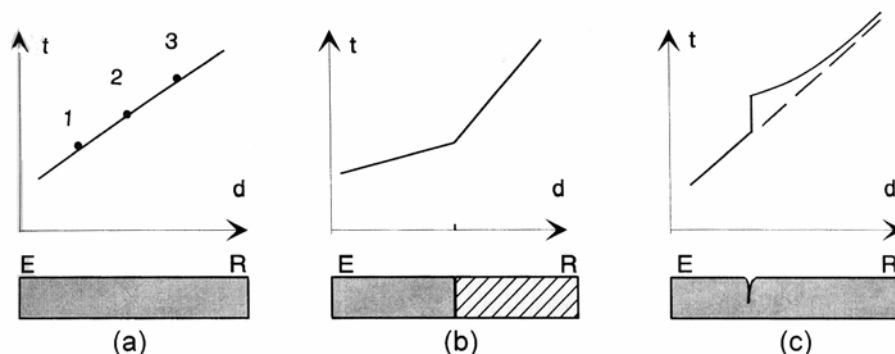
Teoretski uzeto, brzina prolaska ultrazvučnih talasa u homogenoj sredini je jednostavna funkcija modula elastičnosti (E), Poasonovog koeficijenta (ν) i gustine ρ . U betonu i drugim heterogenim materijama ova veza nije toliko jednostavna i konzistentna,

ali već sama distribucija i rasipanje relativnih izmjerenih brzina obično reflektuje kvalitet i kontinuitet posmatranog medijuma.



Slika 4. Mjerenje brzine zvuka. (a) Kroz debljinu ravnog betonskog elementa; (b) na površini elementa

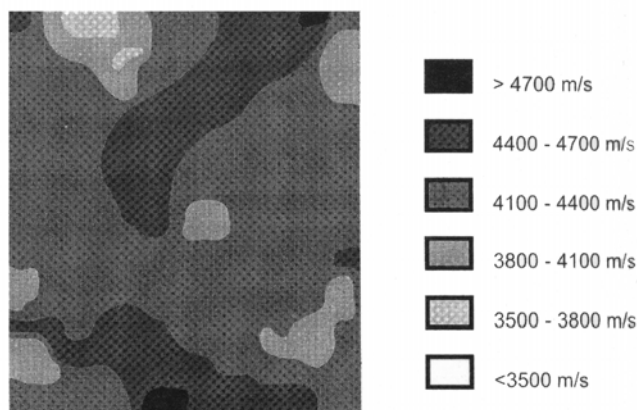
Upotrebljavajući specifičnu opremu, brzina se dobija mjerenjem vremena prolaska talasa između izvora emitovanja E i prijemnika zvuka (risivera) R. Ova dva uređaja, koja rade u piezo-električnom režimu, se obično postavljaju na suprotnim, a poneka i na istoj površini ispitivanog elementa mostovske konstrukcije. Slika 4a grafički prikazuje poželjni položaj sonde ultrazvučnog aparata kod direktne primjene metode mjerenja brzine prostiranja ultrazvuka. Na slici 4b izvor emitovanja je fiksiran na izabranoj startnoj tački, dok se risiver pomjera duž prave linije, u jednakim intervalima.



Slika 5. Različite vrijeme-rastojanje krive, dobijene metodom ultrazvuka
(a) Linearna veza vrijeme-rastojanje (homogeni kontinuum); (b) Diskontinuitet u konstruktivnom spoju (vezi); (c) Efekat pukotine [5]

Dužina područja ispitivanja može biti reda veličine 1 do 2 metra, sa korakom pomjeranja sonde od po 10-20 cm. Vrijeme prostiranja talasa obično se mjeri automatski, korišćenjem elektronskog mjerača vremena, tačnosti i do mikro sekunde. U homogenom kontinuumu dijagram vrijeme-dužina je prava linija (slika 5.a). Mjerenjem duž nekoliko paralelnih linija, formira se cijela mreža linija ("data grid"), koja daje mapu (sliku, šemu) unutrašnjosti konstrukcije na posmatranoj površini. Iz tih razloga, metoda ultrazvuka se veoma efikasno upotrebljava u ispitivanjima betonskih i zidanih konstrukcija mostova, i to prvenstveno za:

- određivanje mjesta diskontinuiteta i lokalnih defekata (slika 5b,c)
- ocjenu kvalitativne promjene materijala na površini – koristeći šeme koje smo dobili mjerenjem različitih nivoa ostvarene brzine ultrazvuka (slika 6)



Slika 6. Različiti nivoi brzina ultrazvučnog talasa koji odslikavaju promjenu kvaliteta ispitivanog materijala u predmetnoj mostovskoj konstrukciji [4]

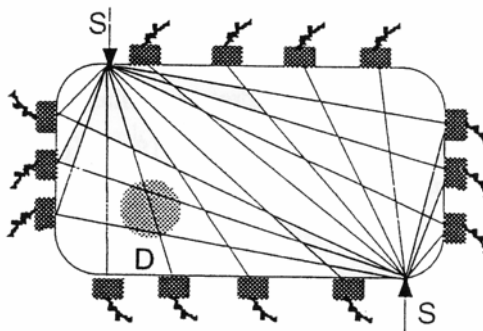
Udarne eho metoda

Ovo je još jedan vid ispitivanja konstrukcija koji je, takođe, u suštini zasnovan na istom fenomenu kao prethodno opisan postupak ispitivanja ultrazvukom. Elastični talasi, indukovani mehaničkim udarom, se prostiru unutar betonske konstrukcije, pri tome se odbijajući o površine sa unutrašnjim diskontinuitetima, kao i o spoljne ivice samog ispitivanog elementa. Pri tome prijemnik koji je postavljen blizu izvora talasa bilježi višestruko odbijene vremenske signale, koji se u njemu pretvaraju u zapise frekvencija. Analizirajući detektovane pikove frekvencija na amplitudnom spektru, lociraju se i karakterišu postojeći diskontinuiteti u betonu mostovske konstrukcije.

Metoda ima brojne aplikacije, ali se pokazala veoma efikasnom i kod veoma specifičnih ispitivanja - recimo za određivanje grešaka u kontinuitetu injekcione smješe ugrađene u zaštitnim cijevima kablova za prethodno naprezanje, i tome slično.

Seizmička tomografija

Ova metoda je zasnovana na tomografskom principu, koji je značajnu primjenu, mnogo ranije, našao i na polju medicine. Po svojoj prirodi je veoma slična prethodno opisanim metodama. U primjeni koja je od interesa za oblast ispitivanja mostovskih konstrukcija, seizmički talasi se generišu u elementu konstrukcije i dalje prostiru od (grupe) izvora do (grupe) fiksiranih prijemnika, koji su postavljeni na ispitivanoj površini mosta, po unaprijed definisanim kordinatama (lokacijama) (slika 7).

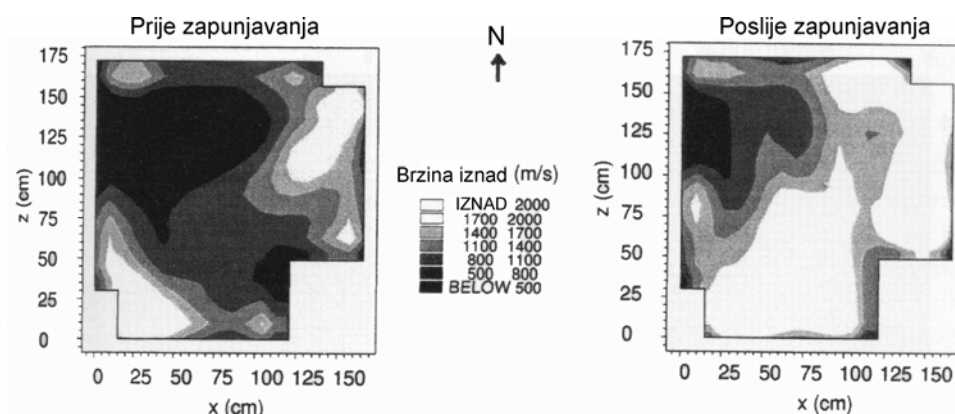


Slika 7. Princip seizmičke tomografije [3]

Pri tome, vrijeme prolaska talasa se mjeri na precizno određenim rastojanjima (zracima) između odašiljača i prijemnika. Na taj način se dobijaju podaci o odnosu vrijeme/distanca, koji se, uz pomoć dalje analize primjenom kompjutera, koristi za formiranje kontura različitih vrijednosti brzina. Jasno je da tako dobijena mapa izražava relativne varijacije u lokalnom kvalitetu betonskih i zidanih konstrukcija, tj. u posmatranim poprečnim presjecima.

Ako se traži trodimenzionalni prikaz ovih varijacija, objašnjena procedura se sprovodi u sukcesivnim paralelnim presjecima duž posmatranog elementa, ili direktno primjenom kompjuterskih tehnika prikazivanja 3D slika.

Ova metoda se pokazuje pogodnom u brojnim aplikacijama - recimo za uporednu analizu elemenata mostovskih konstrukcije prije i poslije njihovog ojačavanja (slika 8).



Slika 8. Efekat injektiranja (ojačanja) mostovskog stuba, prikazan tomografijom [3]

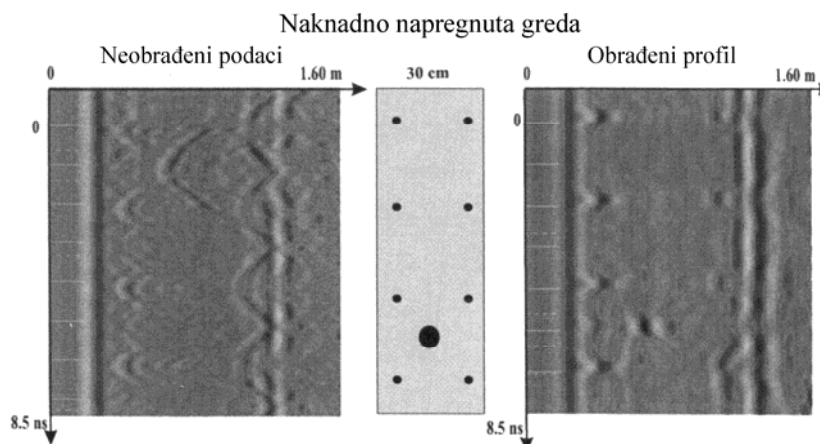
Metoda penetrirajućeg radarskog (elektro magnetnog) signala

Materijalni diskontinuiteti u mostovskoj konstrukciji mogu takođe biti detektovani od strane radara koji emituje elektromagnetni signal - analogno tehničari eho udara. Pri tome elektromagnetni talasi se emituju kroz betonsku konstrukciju, i njihov eho (talas odbijen od površine) se, upotrebljavajući specifičnu tehniku, registruje i dalje analizira. Primjenom specijalnih antena postavljenih na površini, zabilježeni, vremenski odbijeni signal formira pun radarski profil, tako iscrtavajući eventualni materijalni diskontinuitet ispitivane konstrukcije. Ako je, pri tome, brzina talasa u posmatranom medijumu precizno određena (ili korektno usvojena), mjerenjem vremena odbijanja određuje se i precizna pozicija diskontinuiteta.

Ova metoda se prvenstveno upotrebljava za određivanje debljine mostovskih ploča, ali i (relativno velikih) diskontinuiteta (praznina) u gredama - recimo kod greda koje nose instalacije ili šuplje plastične cijevi. Pri tome treba znati da su metalne cijevi netransparentne za elektromagnetne talase, te se one moraju locirati na neki drugi način.

Ovom metodom može biti definisan i nagib pukotina u ispitivanom elementu i to definisanjem nekoliko sukcesivnih, međusobno paralelnih radarskih profila po dužini elementa.

Prisustvo armature i kablova za prednaprezanje dovodi do difrakcije talasa (usled prisustva metala) što komplikuje interpretaciju. U takvim situacijama metoda se može primijeniti jedino kada je razmak između šipki armature veći od talasne dužine odaslatog signala i kada imamo dobro poznatu geometriju elementa (slika 9).



Slika 9. Radarski profil dobijen ispitivanjem predhodno napregnute grede [4]

Primjena ove metode je moguća i na zidanim konstrukcijama mostova, ali se mora koristiti sa velikom dozom opreza, posebno za slučaj kada je konstrukcija izgrađena od relativno provodljivih materijala - kao što je glina.

3.2.2. Ispitivanje na armiranobetonskim elementima

U predhodnom poglavlju je prepoznato da prisustvo armature donekle komplicuje izložene metode ispitivanja betonskih konstrukcija. Pored toga, prisustvo armature dovodi i do neophodnosti ispitivanja cijelog niza drugih fenomena koji su karakteristični za nju.

Kao što je poznato, rđa na armaturi se javlja kada ona dođe u kontakt sa suviše velikim sadržajem agresivnih reagenasa iz spoljne sredine. Takvi mogu biti joni hlora, ugljendioksid, vlaga i t. sl. Za definisanje postojanja korozije armature i njenu eventualnu prevenciju danas se koriste specifične, nedestruktivne metode. Njima se ispituje kako sam čelik, tako i zaštitni sloj betona koji ga štiti. Neke od aktuelnih metoda i postupaka za ovu namjenu su analizirani i u ovom tekstu.

A. Lociranje armature

Danas su za ovu namjenu dostupni specifični uglavnom magnetni ili elektro magnetni uređaji - često nazivani pretraživači armature. Oni su izrađeni tako da nedestruktivnim metodama otkriju lokaciju (položaj) i uz to, eventualno, i indentifikuju profil armature na koji su naišli. Ovakav pretraživač se postavlja direktno na površini AB konstrukcije, prvenstveno sa ciljem da bi se odredio stvarni položaj šipki armature.

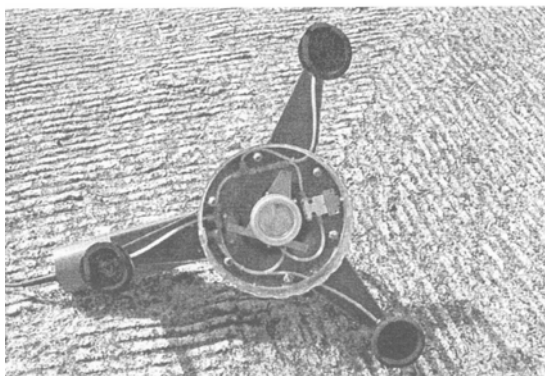
Njihova konstrukcija može biti i dosta komplikovana - posebno ako se koriste za ispitivanja na predhodno napregnutim mostovskim konstrukcijama, o čemu će biti više riječi kasnije.

B. Ispitivanje zaštitnog sloja betona

Analizom zaštitnog sloja betona dolazimo do procjene rizika od pojave korozije čelika ili čak indentifikujemo određene sastojke koji su već ušli u hemijsku reakciju koja stvar koroziju. Ova ispitivanje se zato obično sastoje i od ispitivanja propustljivosti same betonske površine mosta, njene električne otpornosti, sadržaja karbonata i hlorida itd.

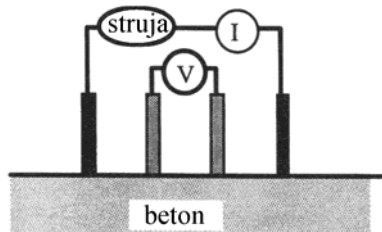
Propustljivost betonske površine mosta je direktno povezana sa njenom trajnošću. Ona se obično kvantifikuje pomoću uređaja zvonastog oblika, čvrsto postavljenog na površini betona, kojim se isisava vazduh i stvara unutrašnji vakuum (slika 10). Vrijeme

potrebno za povratak inicijalnog atmosferskog pritiska, definiše veličinu propusnosti površine. Ova nedestruktivna metoda, na taj način, omogućava određivanje stepena otpornosti spoljnog (zaštitnog) sloja betona na ulazak spoljnih agresivnih reagenasa.



Slika 10. Vakumsko zvono za mjerenje propustljivosti betonske površine [5]

Električna otpornost betonskog zaštitnog sloja je obrnuto proporcionalna sadržaju vlage i soli, odnosno riziku od korozije. U cilju njenog ispitivanja četiri metalne elektrode se postavljaju na površini betona i na taj način se ostvaruje električna indukcija I između dvije najudaljene elektrode (slika 11.). Pad potencijala V mjeri se između dvije susjedne (unutrašnje) elektrode i njegova veličina, pokazuje se, obrnuto je proporcionalna riziku od pojave korozije, tj. sadržaju vlage i soli.



Slika 11. Mjerenje $R=V/I$ - električnog otpora betona [6]

Sa druge strane, sadržaj karbonata u zaštitnom sloju betona obično se određuje hemiskim putem - jednostavnim raspršivanjem specijalnog (obojenog) indikatora na površinu betona. Ako se na površini indukuje ružičasta boja može se zaključiti da je prisustvo karbonata zanemarljivo, tj. da je pH faktor betona veći od 9.

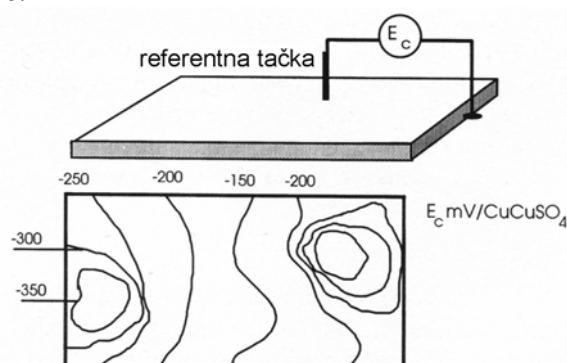
Sami sadržaj hlorida u zaštitnom sloju betona se može odrediti i hemiskim putem – uzimanjem uzoraka iz izbušenih otvora različitih dubina, i daljom analizom tako uzetog praha u laboratoriji .

C. Detekcija korozije armature

Armatura ugrađena u veoma kvalitetan beton u principu je zaštićena visoko alkalnom pornom (vezanom) vodom, koja u prisustvu kiseonika pasivizira čelik. Gubitak alkalnosti usljed karbonatizacije betona, ili usljed penetracije jona hlorida (koji dopiru iz morske soli, soli koja se upotrebljava za odmrzavanje i zaštitu kolovoza, ili su u nekim slučajevima prisutni usljed korišćenja aditiva betona zasnovanih na prisustvu kalcijum-hlorida) može uništiti ovaj pasivni – zaštitni sloj.

Metoda polućelijskog potencijala (engleski: *Half – cell method*)

Za lociranje korodiranih profila armature mostovske konstrukcije najviše se upotrebljava procedura koja se sastoji od mjerenja polućelijskog potencijala E_c . Njom se detektuje pad potencijala između izabrane tačke na ispitivanoj armaturi (kojoj obično prilazimo kroz malu, izbušenu, rupu) i pokretne, referentne ćelije na samoj površini AB elementa. Referentne ćelija je u stvari obična električna baterija. Tokom mjerenja mjerni uređaj, voltmetar, je povezan sa oba pomenuta pola (slika 12). Optimalni razmak između mjerenih tačaka može biti od 3 cm pa do oko 1m - zavisno od potrebne preciznosti i kvaliteta samog instrumenta. Mjerna pozicija i odgovarajuća vrijednost potencijala E_c se iscrtavaju na grafičkoj šemi, pri tome formirajući linije identičnih potencijala - ekvipotencijalne konture.



Slika 12. Princip mjerenja polućelijskog potencijala [6]

Rizik od korozije raste sa većim negativnim padom potencijala.

Za određivanje nivoa rizika od pojave korozije armature, američki propisi *ASTM/C876.91*, preporučuju podjelu dobijenih E_c vrijednosti u tri “klase”. Tako, recimo, za referentnu bateriju od bakar-sulfata, važe sljedeće korelacije:

- $E_c \approx -200mV$ $\Rightarrow$ nema opasnosti od korozije
- $-350 < E_c < -200mV$ $\Rightarrow$ moguća korozija
- $E_c < -350mV$ $\Rightarrow$ velika mogućnost pojave korozije

Kao zanimljivost, u poslednje vrijeme nagli razvoj ovih uređaja omogućava njihovu primjenu čak i na podvodnim konstrukcijama.

Ovaj princip koristi se i za dugotrajna, vremenska, ispitivanja ostvarene korozije, ili njene eventualne pojave.

Metodu ne treba upotrebljavati za prednapregnute konstrukcije sa metalnim zaštitnim cijevima kablova.

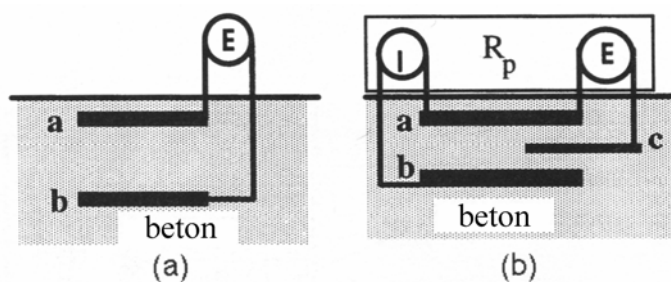
Za potrebe konstantnog vremenskog praćenje ostvarene korozije armature, senzori mogu biti i stalno ugrađeni u betonu. Jasno je da ih, za takva ispitivanja, treba postaviti na kritičnim lokacijama mostovske konstrukcije, tj. tamo gdje se očekuje pojava korozije.

Postoje dva glavna tipa ovakvih senzora:

Makro ćelijski senzor sastoji se od dva međusobno povezana prava čelična štapa, pri čemu je jedan ugrađen blizu same površine betona, a drugi na malo dubljem nivou (sl. 13a). Kako plići štap obično korodira prvi, njegov polućelijski potencijal biće različit od polućelijskog potencijala dublje postavljenog štapa, u zdravijem betonu. Mjerenjem razlike potencijala između ova dva štapa, može se detektovati otpočinjanje procesa korozije na

samoj armaturi mostovske konstrukcije, a ponekad čak i pratiti nivo ostvarenih korozivnih promjena na njoj.

Polarizaciono otporni senzor, šematski posmatrano, sastoji se od tri elementa, međusobno postavljena na malim rastojanjima. Prvi elemenat sklopa je čelični štap postavljen u blizini same armature, dok drugi predstavlja komad čelika koji je ustvari elektroda za mjerenje polarizacione otpornosti prvog čeličnog štapa. Treći element sklopa je uporedna elektroda (sl. 13b). Mjerenjem polarizacione otpornosti prvog elementa sklopa procjenjuje se veličina korozije armature mosta, na mjestu lokacije senzora.



Slika 13. Ugrađeni senzori u betonu. a. Makro-čelijski senzor za detekciju početka korozije, b. Polarizaciono otporni senzor za otkrivanje stepena korozije: (a i b su čelični štapovi, c je referentna elektroda) [6]