

ISPITIVANJE POSTOJEĆEG STANJA NAPONA U KONSTRUKCIJI METODOM BUŠENJA OTVORA

Nebojša Đuranović¹

1. UVOD

Postojeći naponi u konstrukciji i način njihovog određivanja i danas predstavljaju izazov prilikom ispitivanja konstrukcija. Oni su po svojoj prirodi slični tzv. zaostalim naponima. Termin "*zaostali naponi*" najviše se koristi u mašinstvu, gdje se tehnika određivanja zaostalih napona inicijalno i razvila. Međutim, ista tehnika se može primjenjivati i u građevinarstvu - i to ne samo za određivanje zaostalih napona (koji u građevinskim konstrukcijama obično nemaju taj značaj kao u mašinskim), već i za određivanje postojećeg, tj. trenutnog stanje napona u konstrukciji - za koju nemamo poznatu ni istoriju, ni veličinu nanijetog opterećenja - a ponekad čak ni jasno definisan konstruktivni sistem. Direktna primjena tehnike, onako kako je razvijena u mašinstvu, ostvaruje se kod metalnih konstrukcija, dok kod betonskih konstrukcija imamo njenu implementaciju - uz određene napomene, povezano sa nehomogenošću i ostalim karakteristikama tipičnim za materijal poput betona.

Zaostali naponi u konstrukcijama su oni naponi koji postoje u elementu konstrukcije prije nanošenja bilo kakvog opterećenja. Glavni izvor zaostalih napona obično je sam proces proizvodnje.

U principu, izlivanja, varenja, mašinske obrade, toplotni tretmani, druge temperaturne obrade i tome slično predstavljaju glavne izvore zaostalih napona u čeličnim konstrukcijama. U pojedinim situacijama ovakvi naponi mogu biti unijeti u konstrukciju i kroz montažu ili instalacione procedure, kroz dodatna opterećenja, slijeganja zemlje u podzemnim konstrukcijama ili kroz nepokretna opterećenja koja su vremenom postala sastavni dio konstrukcije i tome slično.

Efekti zaostalih napona obično su štetni po konstrukciju, u većoj ili manjoj mjeri - zavisno od njihove veličine, znaka, raspodjele napona u odnosu na napone koji su izazvani samim opterećenjem, itd. Postoje

¹ Dr, vanredni profesor, Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, Cetinjski put bb, 81.000 Podgorica, nebojsadj@hotmail.com

mnogi dokumentovani slučajevi kada su ovi naponi bili glavni faktor koji je doveo do loma konstrukcije.

Postojeći, kao i zaostali naponi, vezani su sa istorijom prethodnog opterećenja - tokom izrade konstrukcije (npr. temperaturni naponi u masivnom betonu, uslijed tehnoloških postupaka izgradnje itd.) i tokom korišćenja konstrukcije – od eksploatacionih opterećenja. Znači, za razliku od efekata zaostalih napona, ukupno stanje postojećih napona u konstrukciji je posljedica ukupnog dejstva stalnog tereta, faktora poput načina montaže i izvođenja, kao i eksploatacionog (korisnog i ostalog) opterećenja.

Mjerenje postojećeg stanja napona u ispitivanim konstrukcijama ne može se sprovesti konvencionalnim procedurama eksperimentalne analize napona, budući da su klasični ekstenzometri i ekstenzometarske metode u potpunosti neosetljivi na predhodnu istoriju opterećenja nanijetog na samu konstrukciju, tj. mogu da mjere samo promjenu deformacija koja se desila poslije postavljanja mjernih senzora. Jedan od mogućih načina rješavanja problema je put suprotan klasičnom načinu ispitivanja konstrukcija - umjesto da se dodatno opterećuje, konstrukcija (ili njen manji ili veći dio) se rasterećuje.

Znači, kada se mjerenje postojećeg stanja napona sprovodi korišćenjem standardnih ekstenzometara, mjereni naponi moraju biti na neki način relaksirani, tj. "oslobođeni" - pri čemu ekstenzometri moraju biti unaprijed postavljeni, kako bi registrovali promjenu deformacije koja je prouzrokovana uklanjanjem postojećih (zaostalih) napona. Drugim riječima, ako su, prije uklanjanja dijela ispitivanog elementa, ekstenzometri pravilno postavljeni, oni će biti u mogućnosti da zabilježe (povratne) deformacije koje je prouzrokovalo uklanjanje tog dijela elementa, jer u tom novonastalom stanju uklonjeni dio elementa neće biti opterećen. Početno (nulto) stanje napona i deformacija može se zatim uporediti sa stanjem izmjenjenim nakon vađenja ili uklanjanja dijela posmatranog elementa iz konstrukcije - a njihova razlika će predstavljati stanje koje je vladalo u konstrukciji prije početka ispitivanja, tj. stanje napona pod postojećim opterećenjem. Pri tome, analizu je neophodno izvršiti koristeći postulate elastičnog ponašanja materijala u konstrukcije.

Jedan logičan pristup rješavanju takvog problema je naknadno formiranje otvora u ispitivanoj konstrukciji. Bušenje otvora, čak i veoma malog prečnika u elementu koji je napregnut dovodi do relaksacije napona na posmatranom mjestu. Eliminacija napona koji

su postojali na mjestu formiranog otvora mijenja stanje napona i u njegovom neposrednom okruženju, prouzrokujući da se i lokalne deformacije na površini ispitivanog elementa promjene u skladu sa tim. Mjerenjem ovih promjena moguće je definisati postojeće naponsko stanje u čeličnim, betonskim, armiranobetonskim i ostalim konstrukcijama.

U tekstu koji slijedi, kada se koristi termin *zaostali naponi*, govori se, u stvari, o principima koji se direktno koriste kod ispitivanja čeličnih konstrukcija (pri čemu se podrazumjeva da se ne govori samo o zaostalim naponima, već se izlaganje odnosi i na određivanje postojećeg stanja napona od bilo kog postojećeg opterećenja - uključujući i eventualne zaostale napone), tj. o principima koji se implementiraju i na betonskim i AB konstrukcijama - prvenstveno za definisanje postojećeg stanja napona u konstrukciji.

2. METODA ODREĐIVANJA ZAOSTALIH NAPONA FORMIRANJEM OTVORA

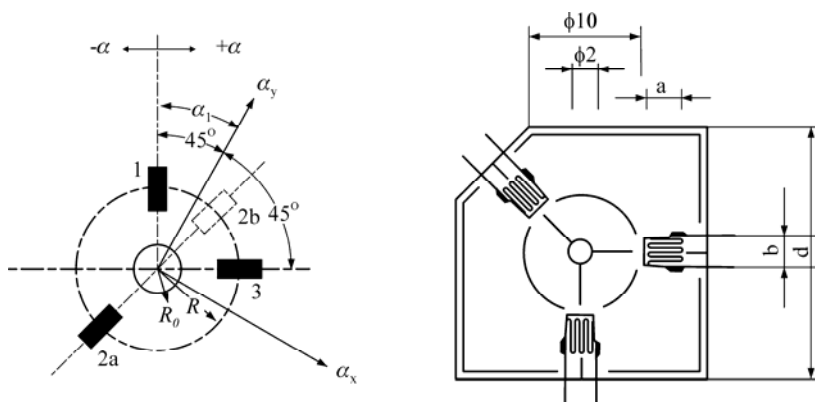
Najprimjenjivija tehnika za određivanje zaostalih napona u čeličnim konstrukcijama je pomoću mjernih traka postavljenih u okolini naknadno izbušenog otvora na konstrukciji. Metoda se bazira, kako je predhodno i rečeno, na relaksaciji napona na mjestu samog novoformiranog otvora, tj. u njegovoj neposrednoj okolini.

Procedura utvrđivanja trenutnog stanja napona (tj. "zaostalih" napona) na ovaj način, onako kako je formulisana u oblasti mašinskih konstrukcija [1], sastoji se od opremanja mjernog mjesta potrebnom mjernom opremom (ekstenzometrima), na kome se, nakon očitavanja nultog stanja sprovodi bušenje ispitivanog elementa. Na taj način sprovedeno formiranje otvora praćeno je novim setom mjerenja "oslobođenih" dilatacija i potom korišćenjem pogodnih izraza za vezu napona i deformacija - u cilju sračunavanja glavnih napona i ugla njihovog djelovanja. Tako sračunate naponsko deformacione karakteristike ispitivanog elementa odgovaraju stanju napona u konstrukciji prije nego je formiran otvor.

Metoda najbolje rezultate daje ako su naponi isti po cijeloj dubini otvora, ili ako su, u najgorem slučaju, približno ravnomjerno raspoređeni po njoj. Zbog toga se pri primjeni metode zahtijeva pažljiv, inženjerski pristup, kako bi se potvrdila pretpostavka o

ovakvoj raspodjeli napona po visini otvora - ali i zbog zadovoljavanja ostalih uslova koji su preduslov kvalitetnog mjerenja. Pri tome, sama procedura prikupljanja i analize podataka je prilično precizna i direktna.

Kod čeličnih konstrukcija najjednostavnija procedura za mjerenje postojećeg stanja napona i dilatacija je da se koristi rozeta od obično tri mjerne trake. Takva rozeta je šematski prikazana na slici 1., na kojoj se vidi da su tri radikalno postavljene mjerne trake locirane tako da im se centri poklapaju sa tačkom za koju se vrše mjerenja, i da su sve tri postavljene na udaljenju R mjereno od centra otvora koji treba formirati.



Slika 1. Rozeta mjernih traka za određivanje postojećih (zaostalih) napona u konstrukciji [2]

Glavni naponi koji su vladali prije formiranja otvora (postojeći naponi u konstrukciji) i njihovo pravac, mogu se odrediti koristeći izraze [3]:

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (2)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (3)$$

gdje je α ugao između glavne ose i mjerne trake br. 1 (u pravcu označavanja mjerne trake 1, ako je pozitivan, ili u suprotnom - ako je negativan), a ε_1 , ε_2 i ε_3 su dilatacije izmjerene mjernim trakama 1 do 3.

Koeficijenti A i B zavise od mehaničkih karakteristika materijala od koga je napravljena konstrukcija koja se ispituje i od udaljenosti mjernih instrumenata za određivanje dilatacija, od mjesta otvora koji se formira - tj. od geometrije mjernog aranžmana.

Umjesto upotrebe mjernih traka kod ispitivanja na betonskim i AB konstrukcijama za ove potrebe moguće je koristiti i druga mjerna sredstva koja se koriste kod ekstenzometrijskih metoda, recimo deformetar PFENDER, dilatometre direktno zasnovane na mjerenju pomjeranja mjernim satovima (ugibomjerima) i t.sl (slika 2.), o čemu će više riječi biti kasnije.



Slika 2. Upotreba dilatometara i mjernih satovi (ugibomjera) kod utvrđivanja postojećeg stanja napona na AB konstrukciji [4]

Prethodno izloženi izrazi zasnovani su na pretpostavci da je (mali) otvor formiran po cijeloj debljini ispitivane konstrukcije - tanke i široke ravne ploče - uz dodatnu pretpostavku da na posmatranom mjestu konstrukcije imamo konstantno (u prostornom smislu) dvoaksijalno stanje napona.

Sem kod pojedinih betonskih i čeličnih konstrukcija - recimo kod tankih ploča, visokih rebara, zidnih platana i sl., ove pretpostavke veoma grubo idealizuju situaciju koja se sreće u većini stvarnih ispitivanja, budući da konstruktivni elementi koji se ispituju u cilju

određivanja postojećih napona mogu da budu proizvoljnog oblika i dimenzija, proizvoljnog mjesta i funkcije u konstruktivnom (statičkom) sistemu i, svakako, u principu ne moraju biti ni tanki ni ravni.

Usljed toga, u većini aplikacija pomenute metode, koristi se druga vrsta pristupa problemu - metoda formiranja plitkog, "slijepog" otvora, koji ne izlazi na drugu stranu ispitivanog elementa, ali, iako su uslovi primjene ove metode veoma slični, [5], o njoj ovog puta neće biti više riječi. Samo kao napomena - njena primjena posebno je odomaćena i efikasna kod ispitivanja čeličnih konstrukcija i kablova prethodno napregnutih konstrukcija.

2.1 Određivanje koeficijenata "A" i "B" eksperimentalnim baždarenjem

Pomenuti koeficijenti "A" i "B", bez obzira po kojoj se metodi vrši određivanje postojećih napona u konstrukciji (da li metodom bušenja otvora po cijeloj debljini elementa ili bušenjem slijepog otvora), mogu se odrediti i analitičkim i eksperimentalnim putem..

Eksperimentalnim putem oni se određuju postupcima klasičnog baždarenja. Cilj baždarenja je uspostavljanje veze između tačno definisanog, presom nanijetog opterećenja i naponsko deformacijskih karakteristika ispitivanog uzorka - kako bi se tako definisane vrijednosti koeficijenata A i B mogle iskoristiti za ispitivanje na stvarnoj konstrukciji, kada nam nivo nanijetog opterećenja (sile) nije poznat.

Proces baždarenja, po svojoj prirodi i postupcima koje treba sprovesti, gotovo je identičan postupku koji se sprovodi pri samom in-situ ispitivanju posmatranog objekta, slika 3.



Slika 3. Postupak određivanja koeficijenata baždarenja u laboratoriskim uslovima [4]

Nakon očitavanja nultog stanja postavljenih ekstenzometara (posebno dilatacija ε_1' i ε_3') - vidi sliku 1, presama se nanosi opterećenje P , koje će izazvati željene napone baždarenja σ_c . Ovi naponi trebaju da po svojoj veličini manje-više odgovaraju naponima koji se očekuju prilikom bušenja otvora na stvarnoj konstrukciji. Potom se ukloni opterećenje P sa uzorka, uzorak izvadi iz mašine za ispitivanje - ako je potrebno, pa se na njemu izbuši otvor, tačno onakav kakav će biti formiran prilikom in-situ ispitivanja na stvarnoj konstrukciji. Nakon toga uzorak se, nakon ponovnog očitavanja nule mjernih instrumenata, optereti istim onim opterećenjem P koje je bilo nanijeto prije formiranja otvora - pa se potom ponovo izmjere dilatacije - posebno ε_1'' i ε_3'' .

Jasno je da će dilatacija koje su posljedica baždarenja, a koje odgovaraju opterećenju P i naponu σ_c , biti određene kao:

$$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_1'' - \varepsilon_1' \quad (4)$$

$$\varepsilon_{c3} = \varepsilon_3'' - \varepsilon_3' \quad (5)$$

Ako se dalje izvrši upoređivanje izraza za glavne napone sračunate tokom baždarenja i onih prethodno datih za definisanje stanja napona u okolini izbušenog otvora (izrazi 1 do 3), tj. izrazi riješe po nepoznatim "A" i "B", dobiće se vrijednosti samih kalibracionih koeficijenata [6]:

$$A = \frac{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c3}}{2\sigma_c} \quad (6)$$

$$B = \frac{\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{c3}}{2\sigma_c} \quad (7)$$

čime je izvršeno baždarenje.

Treba primijetiti da vrijednosti za osnovne koeficijente "A" i "B", koje su određene prilikom baždarenja, mogu da se primjene samo za mjerenja postojećih napona stvarne konstrukcije u uslovima koji (u

potpunosti) odgovaraju uslovima ostvarenim prilikom baždarenja. U principu, ti uslovi su da materijal ima iste elastične karakteristike, da se koriste identični ekstenzometarski mjerni instrumenti ili rozeta mjernih traka (uključujući i geometriju) - pri čemu orijentacija mjernih traka u rozeti ne mora da bude identična, da se formira otvor iste veličine [5], da se koristi isti metod analize - tj. da je otvor istog oblika (otvor cijelom debljinom ispitivanog elementa ili "slijepi" otvor), da imamo ravnomjernu raspodjelu napona po dubini otvora i, konačno, da na mjestu ispitivanja imamo konstantne napone u ravni otvora - kao što je to kod stvarnog elementa koji ispitujemo in-situ.

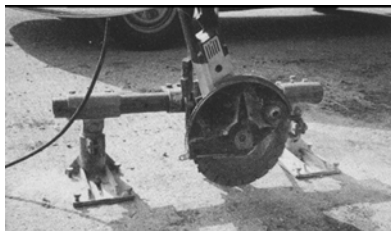
3. SPECIFIČNOSTI PRIMJENE TEHNIKE KOD BETONSKIH I ARMIRANO BETONSKIH KONSTRUKCIJA

Utvrđivanje postojećeg stanja napona u betonskoj konstrukciji, koja je, znači, već izložena opterećenju, je veoma komplikovano. Prije nego pogledamo aplikaciju prethodno opisanog metoda formiranja otvora i mjerenja "oslobođenih" dilatacija mjernim trakama ili drugim pogodnim ekstenzometriskim mjernim sredstvima, pogledajmo jednu drugu, sličnu tehniku.

Metoda prošlicavanja

Ponekad se u svrhu definisanja postojećih napona kod betonskih konstrukcija koristi tehnika takozvanog "prošlicavanja" konstrukcije. Metoda pripada grupi poludestruktivnih metoda ispitivanja.

Ova metoda koristi se uglavnom za određivanje postojećih napona pritiska, ali uz neophodne modifikacije, može se primijeniti i kod zatezanja. Postupak se sprovodi tako što se betonska konstrukcija prošlicava (slika 4.), otvorom širine oko 4 cm, pri čemu je dubina šlica u svakom inkrementu po 10mm, sve do ukupne dubine od oko 80 mm.



slika 4. - Prošlicavanje betonske konstrukcije [7]

Poslije svakog inkrementa, posebni uređaj za nanošenje sile, slika 5., postavlja se u tako formirani otvor i njime se, u prošlicano mjesto na konstrukciji, unosi bočni pritisak koji je potreban da bi se povratilo prethodno stanje deformacija na zasječenom mjestu. [8]



Slika 5. - Uređaj za nanošenje sile na prošlicano mjesto u betonskoj konstrukciji [7]

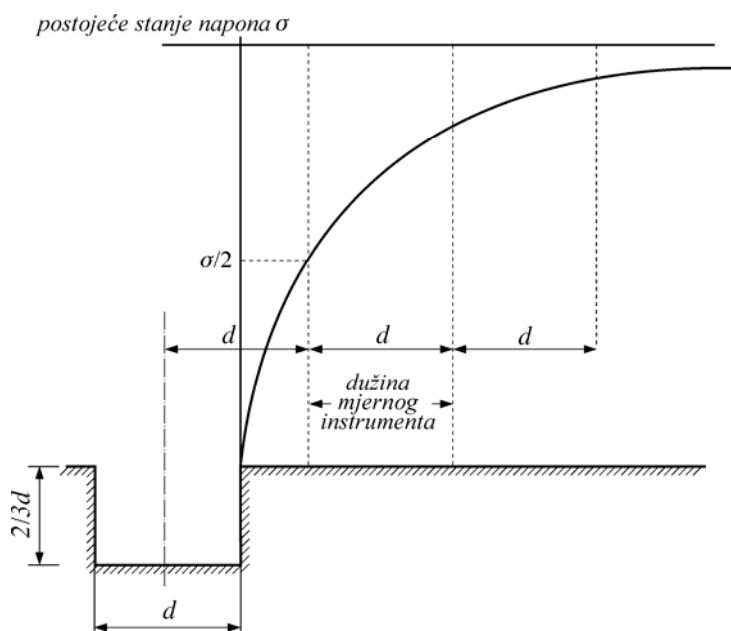
Iščitavanjem sila (napona) koji su potrebni da bi se konstrukcija dovela u naponsko stanje koje je postojalo prije nego je formiran otvor (uz korišćenje za to prikladne mjerne opreme - prvenstveno mjernih traka) praktično smo odredili postojeće stanje napona u samoj konstrukciji, na tom konkretnom mjestu.

Za niske nivoe napona u konstrukciji ova tehnika ponekad daje čak i bolje rezultate nego tehnike kod kojih se naknadno formira kružni otvor i mjere "relaksirani" naponi.

Kako smo to prethodno vidjeli, tehnika formiranja otvora zasniva se na definisanju relaksacije napona prouzrokovane bušenjem relativno malog otvora na ravnomjerno napregnutoj betonskoj

konstrukciji. Ovakva tehnika, koja se aplicira na betonskim i armirano betonskim konstrukcijama po svojoj suštini, u potpunosti odgovara tehnici objašnjenoj u prethodnom poglavlju.

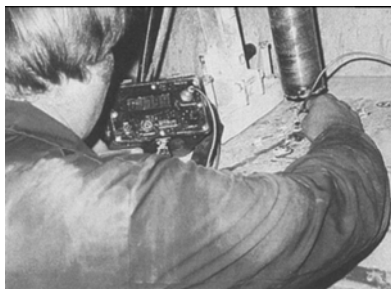
U tom smislu valja konstatovati da i će i ovdje, radijalni naponi na ivici novoformiranog otvora biti jednaki nuli, pa će i razlika napona prije bušenja otvora i onih koji postoje nakon toga biti jednaka ukupnoj relaksaciji napona - tj. naponima koji su postojali u konstrukciji prije naknadnog formiranja otvora. Kod betonskih konstrukcija ukupna relaksacija napona smanjuje se kako se odmičemo od otvora, kako je prikazano na slici 6.



Slika 6.- Relaksacija napona prouzrokovana pravljenjem otvora u konstrukciji [9]

Mjerenjem promjene dilatacije na određenom rastojanju (u literaturi se najčešće pominje rastojanje od otprilike dva prečnika otvora - mjereno od centra otvora) moguće je, kod betonskih konstrukcija, utvrditi kolika je bila veličina deformacija, pa znači i napona, prije nego što je počelo formiranje otvora. Ova tehnika najkvalitetnije rezultate daje ako u neposrednoj blizini novoformiranog otvora nema armature.

U slučaju betonskih konstrukcija umjesto formiranja “malih” otvora u stvarnosti se vade kernovi, slika 7., i to primjenom što kvalitetnijih dijamantskih rezača. Zato se i ovdje metoda smatra poludestruktivnom.



Slika 7. - Vađenje kerna u cilju određivanja postojećeg stanja napona u betonskoj konstrukciji

Dubina i prečnik otvora koji se formira, kao i veličina i položaj mjernih traka (ili ekstenzometričkih instrumenata druge vrste) koje se koriste, određuje se na osnovu dubine na kojoj treba odrediti napone. Pri tome, ako se koristi tehnika slijepog otvora, dubina otvora ne bi trebalo da bude manja od polovine debljine ispitivanog elementa konstrukcije.

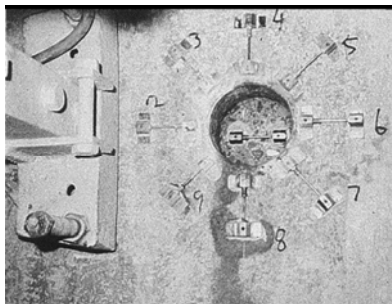
Kod određivanja prethodnih parametara u razmatranje treba uzeti i veličinu zrna agregata u ispitivanom betonu, pri čemu većem zrnu agregata odgovara i veći prečnik otvora. Prečnik novoformiranog otvora trebalo bi da bude najmanje dva puta veći nego što je veličina zrna agregata koji je korišćen za spravljanje betona. Kod betona veličine zrna agregata do 20mm najprecizniji rezultati se dobijaju ako se bušenje vrši dijamantskom bušilicom prečnika oko 65 mm, (koji za sobom ostavlja otvor veličine oko 75mm) i ako se ide do dubine od 50mm [7].

Ponekad je promjena napona po dubini elementa veoma značajna i u takvim slučajevima posebno je bitno obezbijediti da novoformirani otvor bude paralelnih stranica i konstantnog prečnika.

Eksperimentalnim provjerama došlo se do zaključka da novoformirani otvor proizvodi uticaje na naponsko stanje elementa sve do udaljenosti od oko pet prečnika otvora, mjereno od ivice

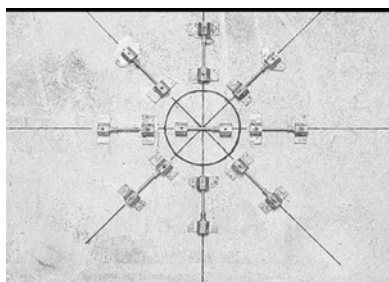
otvora. U ovom području se vrše i mjerenja. Poželjno da u njoj nema nikakvih ivica niti drugih diskontinuiteta.

Kako se obično radi o veoma malom nivou oslobođenih (zaostalih, postojećih) napona, to se obično koristi mjerni sistem koji se sastoji od 8 elemenata - mjernih traka veličine min 50 mm, slika 8.,



Slika 8. - Upotreba mjernih traka za određivanje postojećeg stanja napona u betonskim konstrukcijama

Umjesto mjernih traka moguće je primijeniti i odgovarajuće dilatometre, slika 9. Ovoliki broj dilatometara (osam, a ne neophodna tri) se postavlja, jer se obično računa na otkazivanje pojedinih od ovih instrumenata - uslijed pojave prslina, oštećenja drugog tipa, ali i drugih razloga.



Slika 9. - Upotreba klasičnih dilatometara umjesto mjernih traka

Veličina otvora koji se formira vađenjem kerna je obično takva da je omogućeno postavljanje mjerne trake i na samom kernu, gdje se ostvaruje potpuna relaksacija napona.

Kada je otvor od 75mm prevelik, kao recimo kod prethodno napregnutih nosača gdje je rastojanje kablova i manje od toga, postoje razrađene metode pravljenjem otvora manjih prečnika. Ovakvi postupci se obično koriste u cilju određivanja jednoaksijalnog stanja napona, pri čemu se prave otvori veličine 35 do 50mm. Nekad se umjesto mjernih traka koriste vibrirajuće žice [10] veličine obično oko 50mm, koje su postavljene radijalno od centra otvora na površini betona, ali i u sredini kerna. Pri tome se, tokom formiranja otvora do dubine od oko 50mm, vrši nekoliko inkrementalnih čitanja. Nakon toga se uklanja kern, dno otvora se ravna i tu se stavlja još jedna vibro žica. Poslije toga se ponovo vrši bušenje za sljedećih 50mm. Modul elastičnosti E za ovakav materijal obično se dobija testiranjem samog kerna. Greška pri određivanju glavnih napona je reda veličine $\pm 0,3\text{MPa}$, a ide najviše do $\pm 3\%$ od ukupnog čitanja.

4. SPECIFIČNOSTI PRIMJENE TEHNIKE KOD METALNIH KONSTRUKCIJA, ARMATURE I KABLOVA ZA PRETHODNO NAPREZANJE

Čelični konstruktivni elemenat koji je izložen dejstvu stalnog opterećenja ima ukupni napon koji čine eventualni zaostali naponi iz procesa proizvodnje i naponi usled samog opterećenja. Eventualni zaostali napon se, u slučaju potrebe, može jednostavno dodati proračunatom naponu od spoljnog opterećenja, kako bi se sračunao totalni napon.

Kod primjena metode formiranja otvora pri ispitivanju metalnih građevinskih elemenata, koristi se procedura identična onoj prethodno objašnjenj u poglavlju 2. Kod njih standardna rozeta za određivanje zaostalih napona ima u sebi otvor reda veličine 1 do 5 mm i može se koristiti za analizu napona za dubine 0.5 do 3mm. Kada se želi ustanoviti stanje napona na većim dubinama, treba formirati i veći otvor. Tako, uz uslov da nema diskontinuiteta u elementu u oblasti koja trpi promjene uslijed formiranja otvora, za određivanje napona na mjestima koja se nalaze na većoj dubini u elementu (preko 30mm) koriste se otvori i veći od 50mm.

U cilju određivanja postojećeg stanja napona u čeličnoj armaturi ili kablovima za prednaprezanje, potrebno je izbušiti otvor prečnika oko

1,5mm, do dubine od 1mm pri čemu će deformacije biti mjerene minijaturalnim elektrootpornim mjernim trakama, slika 10.



Slika 10. - Postavljanje rozete za određivanje stanja postojećeg stanja napona u armaturi i kablovima za prednaprezanje [7]

I kod ovakvih primjena, bušenje malih otvora može se smatrati polu destruktivnim metodama, jer smanjenje poprečnog presjeka u ovakvim situacijama iznosi do oko 8% za žicu koja je prečnika 5mm, tj. do oko 4% za žicu koja je prečnika 7mm, [7].

Kod ovakvih ispitivanja posebno je značajno obezbijediti precizno postavljanje instrumenata - mjernih traka, kao i samo bušenje otvora. Pri tome, treba koristiti kvalitetne bušilice koje ne proizvode dodatne napone u ispitivanom uzorku. Preciznost određivanja napona u armaturi na ovaj način obično je reda veličine do $\pm 7\text{MPa}$, pri čemu greška ide do $\pm 3\%$ od ukupnog čitanja.

5. ZAKLJUČCI

Mjerenje zaostalih napona i trenutnog stanja napona u postojećim konstrukcijama i elementima ne može se sprovesti konvencionalnim procedurama eksperimentalne analize napona, budući da su klasični ekstenzometri i ekstenzometarske metode (kao što su mjerna traka, metoda foto elastičnosti i tome slično) u potpunosti neosjetljivi na prethodnu istoriju opterećenja na samoj konstrukciji, tj. mogu da mjere samo promjenu deformacija koja se desila poslije postavljanja mjernih senzora.

Prethodno opisana procedura je prilično jednostavna. Kvalifikovano tehničko osoblje može je rutinski upotrebljavati, pri čemu nije potrebno nikakvo posebno specijalističko znanje. Upotrebe

metoda su veoma raznovrsne i ona se može sprovoditi kako u laboratoriji, tako i in-situ, na stvarnim konstrukcijama.

Ova tehnika spada u grupu poludestruktivnih metoda ispitivanja konstrukcija, budući da otvor koji se stvara prilikom ispitivanja u većini situacija neće značajno uticati na integritet ispitivane konstrukcije. Sama veličina otvora (prečnik i dubina), kod ispitivanja čeličnih elemenata se kreće od 1 - 5mm.

6. LITERATURA

- [1] ASTM Standard E837, "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method".
- [2] Brčić, V., Rastko Čukić, "Eksperimentalne metode u projektovanju konstrukcija", Građevinska knjiga, 1988.
- [3] Measurement group, North Carolina, SAD, "Interactive Guide to Strain Gauge Technology", 2000.
- [4] Ispitivanje rashladnog tornja Termoelektrane Pljevlja, Građevinski fakultet Podgorica, 2008.
- [5] Rendler, N.J. and Vigness, I., "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses", Proceedings of SESA XXIII, No. 2, 1966.
- [6] Schajer, G.S., "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method", Journal of Engineering Materials and Technology, 110, No. 4: Part 1, Part 11, 1988.
- [7] Straininstall engineering services, Bath, England, "Prospektna dokumenta", 2000.
- [8] Abdunur, C., "Manual of bridge engineering", urednici, M.J RYall, itd., Thomas Telford, UK, 2000.
- [9] G. P. Mallett., "Repair of Concrete Bridges", Thomas Telford, 1994.
- [10] Đuranović, N., "Eksperimentalna analiza konstrukcija mjernim trakama", Građevinski fakultet Podgorica, 2008

REZIME

ISPITIVANJE POSTOJEĆEG STANJA NAPONA U KONSTRUKCIJI METODOM BUŠENJA OTVORA

Nebojša Đuranović

Mjerenje postojećeg stanja napona u ispitivanim konstrukcijama ne može se sprovesti konvencionalnim procedurama eksperimentalne analize napona, budući da su klasični ekstenzometri i ekstenzometarske metode u potpunosti neosetljivi na predhodnu istoriju opterećenja nanijetog na samu konstrukciju, jer mogu da mjere samo promjenu deformacija koja se desila poslije postavljanja mjernih senzora. Jedan od mogućih načina rješavanja problema je put suprotan klasičnom načinu ispitivanja konstrukcija - umjesto da se dodatno opterećuje, konstrukcija (ili njen manji ili veći dio) se rasterećuje.

Bušenje otvora, čak i veoma malog prečnika u elementu koji je napregnut dovodi do relaksacije napona na posmatranom mjestu. Eliminacija napona koji su postojali na mjestu formiranog otvora, mijenja stanje napona i u njegovom neposrednom okruženju, prouzrokujući da se i lokalne deformacije na površini ispitivanog elementa promjene u skladu sa tim. Mjerenjem ovih promjena moguće je definisati postojeće naponsko stanje u čeličnim, betonskim, armiranobetonskim i ostalim konstrukcijama.

Ovaj rad daje osnovne informacije o primjeni metode, uključujući i osvrt na slične postupke ispitivanja, zasnovane na istom principu.

SUMMARY

ESTABLISHING CURRENT STATE OF STRESS USING DRILLED HOLE METHOD

Nebojša Đuranović

Defining state of stress of existing structures can not be performed using well established methods of experimental stress analysis, since these methods are insensitive to the history of loading prior to the sensors being placed on the structure. One possible way to solve the problem is to go in opposite direction to classical methods of experimental testing – instead of loading the structure we should unload it, or part of it. This paper deals with that approach.

Drilling a hole in a structure that is exposed to the outside loading will lead to the relaxation of the stresses at the place of drilling. Elimination of the stresses at the removed part of the structure also causes the change of stresses in the vicinity of the drilled hole, what in return leads to the changes in the state of stress on the surface of the tested element. By measuring these changes it is possible to establish stress state of the concrete and RC elements.

This paper provides basic information regarding application of the method, and also an insight in to the similar testing procedures based on the same principle.