

Primjena 2D digitalne analize slike za mjerenje pomaka i širina pukotina na AB elementima

Frančić Smrkić, Marina; Koščak, Janko; Damjanović, Domagoj

Source / Izvornik: **Građevinar, 2018, 70, 771 - 781**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

<https://doi.org/10.14256/JCE.2407.2018>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:040421>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-22**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 6.4.2018.
Ispravljen / Corrected: 23.7.2018.
Prihvaćen / Accepted: 26.7.2018.

Dostupno online / Available online: 10.10.2018.

Primjena 2D digitalne analize slike za mjerenje pomaka i širina pukotina na AB elementima

Autori:



Dr.sc. **Marina Frančić Smrkić**, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
mfrancic@grad.hr



Janko Koščak, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
jkoscak@grad.hr



Izv.prof.dr.sc. **Domagoj Damjanović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
ddomagoj@grad.hr

Prethodno priopćenje

Marina Frančić Smrkić, Janko Koščak, Domagoj Damjanović

Primjena 2D digitalne analize slike za mjerenje pomaka i širina pukotina na AB elementima

Digitalna analiza slike predstavlja alternativu konvencionalnim metodama mjerenja budući da se radi o jednostavnoj i ekonomski prihvatljivoj metodi. U radu su prikazani i analizirani rezultati ispitivanja pomaka i širina pukotina na armiranobetonskim uzorcima koji su dobiveni 2D digitalnom analizom slike i LVDT osjetilima. Za digitalnu analizu slike korišten je obični digitalni fotoaparatus, osobno računalo i besplatna verzija komercijalnog programa za analizu slike. Uspoređeni su rezultati tijekom statičkog ispitivanja u laboratoriju na tri uzorka te je provedena validacija primjene 2D digitalne analize slike.

Ključne riječi:

digitalna analiza slike, pomaci, širina pukotine, eksperimentalno istraživanje

Preliminary report

Marina Frančić Smrkić, Janko Koščak, Domagoj Damjanović

Application of 2D digital image correlation for displacement and crack width measurement on RC elements

The digital image correlation offers an alternative to the conventional measurement techniques, as it is simple to use and cost effective. The paper presents and analyses displacement and crack width results for reinforced concrete samples, obtained by means of the 2D digital image correlation and LVDT sensors. The equipment used for digital image correlation includes a plain digital camera, personal computer, and a free version of a commercial photo processing program. Laboratory static test results for three specimens are compared and the 2D digital image correlation method is validated.

Key words:

digital image correlation, displacements, crack width, experimental research

Vorherige Mitteilung

Marina Frančić Smrkić, Janko Koščak, Domagoj Damjanović

Anwendung der digitalen 2-D-Bildanalyse zur Messung von Verschiebungen und der Rissbreite an Stahlbetonelementen

Die digitale Bildanalyse stellt eine alternative konventionelle Messmethode dar, da es sich um eine einfache und wirtschaftliche Methode handelt. In der Abhandlung werden die Untersuchungsergebnisse der Verschiebung und der Rissbreite an Stahlbetonproben dargestellt und analysiert, die durch eine digitale 2-D-Bildanalyse und die LVDT-Sensoren erhalten wurden. Für die digitale Bildanalyse wurden ein einfacher digitaler Fotoapparat, ein Computer und eine kostenfreie Version des kommerziellen Bildanalyseprogramms verwendet. Verglichen wurden die Ergebnisse während der statischen Untersuchung im Labor an drei Proben und es wurde eine Validierung der Anwendung der digitalen 2-D-Bildanalyse durchgeführt.

Schlüsselwörter:

digitale Bildanalyse, Verschiebungen, Rissbreite, experimentelle Untersuchung

1. Uvod

Pri mjerenju pomaka i deformacija na konstrukcijama i konstrukcijskim elementima treba voditi računa o točnosti, jednostavnosti izvedbe, ali i ekonomičnosti. Digitalna analiza slike (eng. *Digital Image Correlation* - DIC) predstavlja alternativu, ili moguću nadopunu, konvencionalnim metodama mjerenja budući da se radi o jednostavnoj i ekonomski prihvatljivoj metodi. Digitalna analiza slike (u nastavku DIC) relativno je nova, beskontaktna optička metoda za mjerenje pomaka i deformacija u 2D ili 3D koja se temelji na principu usporedbe digitalnih fotografija mjernog područja pri različitim fazama opterećenja [1]. Sustav radi na principu praćenja blokova piksela koji moraju biti nasumični, jedinstveni i s dobrim kontrastom. Iz tog razloga površina se najčešće priprema za mjerenje na način da se laganim prskanjem boje iz spreja nanosi nasumični točkasti uzorak [2], a ponekad je i sama prirodna površina dovoljno dobre teksture da osigura optimalne uvjete za DIC.

DIC metoda se pokazala vrlo uspješnom pri mjerenju širina pukotina u betonu jer omogućuje kontinuirano praćenje širenja pukotine, pogotovo u početnoj fazi kada pukotine nisu vidljive okom, mikroskopom ili upotrebom penetracijske boje [3]. Pri korištenju LVDT (eng. *Linear Variable Differential Transformer* - LVDT) osjetila za mjerenje deformacija, preko kojih se mogu izraziti širine pukotina nakon njihovog otvaranja, uvijek postoji opasnost da se pukotina možda neće otvoriti unutar mjernog područja ili da će se pojaviti više pukotina čime je otežana interpretacija rezultata. DIC u tom smislu nudi veliku prednost omogućujući kontinuirano praćenje neograničenog broja pukotina unutar mjernog područja tijekom ispitivanja. Osim toga, mjerenja izvan laboratorijskih uvjeta predstavljaju dodatni izazov. U radu [4] pokazano je kako se DIC može koristiti za praćenje pukotina te horizontalnih i vertikalnih pomaka *in situ* na većim objektima kao što su mostovi. Osnovni cilj ispitivanja prikazanog u ovom radu jest ocijeniti točnost rezultata dobivenih 2D digitalnom analizom slike u odnosu na rezultate mjerenja LVDT osjetilima. Jedna od prednosti 2D digitalne analize slike u odnosu na konvencionalne metode mjerenja je trošak opreme potrebne za provođenje mjerenja. Oprema korištena u okviru ovog istraživanja uključuje osobno računalo, digitalni fotoaparati i besplatnu verziju komercijalnog programa za analizu slike GOM Correlate. Uspoređeni su rezultati u vezi s pomakom i širinom pukotina tijekom statičkog ispitivanja u laboratoriju na tri uzorka te je provedena validacija primjene 2D digitalne analize slike.

2. Prednosti i ograničenja 2D digitalne analize slike

Kao što je prethodno napomenuto, DIC metoda nudi nekoliko prednosti kod mjerenja pomaka i širina pukotina u odnosu na klasične metode mjerenja LVDT osjetilima. Velika prednost ove metode kod praćenja širine pukotine jest u tome što možemo pratiti svaku pukotinu zasebno bez obzira gdje će se ona otvoriti. Nadalje, prednost je metode i u tome što je beskontaktna, tj. ne

postoje mjerna osjetila u dodiru s uzorkom koja mogu utjecati na rezultate ispitivanja. Velik broj konvencionalnih mjernih osjetila također predstavlja problem zbog vođenja kabela, ali i cijene ispitivanja budući da svakom osjetilu pripada jedan kanal na uređaju za prikupljanje podataka. Osim toga, LVDT osjetila imaju ograničeni mjerni raspon, pa se često događa da se osjetila odlepljuju od ispitnog uzorka pri većim pomacima i deformacijama. Primjenom DIC metode taj problem je izbjegnuto i moguće je mjeriti deformacije i širine pukotina i pri velikim pomacima.

Najveća prednost ove metode ispitivanja jest cijena samog ispitivanja. Naime, za provedbu ispitivanja DIC metodom potreban je samo digitalni fotoaparati, osobno računalo i besplatni program za obradu fotografija (u ovom slučaju GOM Correlate). Mjerenje pomaka i širina pukotina LVDT osjetilima znatno je skuplje zbog cijena osjetila, ali i uređaja za prikupljanje podataka.

Međutim, 2D metoda digitalne analize slike ima nekoliko izvora potencijalnih pogrešaka koje moramo imati na umu prilikom provođenja ispitivanja. Nadalje, moramo biti svjesni i ograničenja metode u vezi s točnosti podataka, posebno ako zanemarimo neke od izvora pogrešaka navedenih u nastavku [5]. Valja napomenuti da većine tih pogrešaka nema tijekom primjene 3D digitalne analize slike, ali je i takvo mjerenje mnogo složenije i zahtijeva skupu opremu (više fotoaparata, programi za obradu fotografija i sl.).

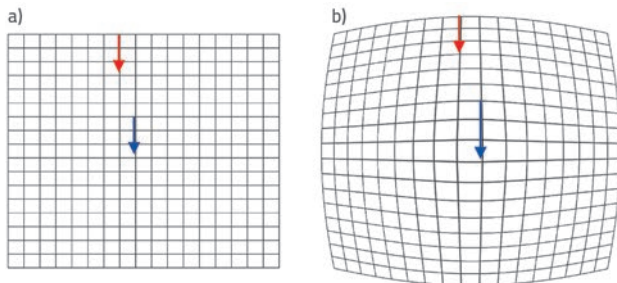
2.1. Usporedba rezultata u odnosu na referentnu fotografiju

Svi rezultati mjerenja, koji proizlaze iz 2D digitalne analize slike, predstavljaju relativan odnos stanja ispitnog uzorka u nekom trenutku u odnosu na početno stanje. Zbog toga je vrlo važno da je referentna fotografija snimljena na početku ispitivanja te da se položaj fotoaparata ne mijenja od trenutka kada je snimljena referentna fotografija. Svaki pomak fotoaparata prilikom snimanja unosi pogrešku koju u 2D tehnici snimanja nije moguće ukloniti. Kako bi se pomak fotoaparata sveo na minimum, za vrijeme ispitivanja fotoaparatom se upravljalo preko osobnog računala koji je od računala udaljen nekoliko metara. Nadalje, potrebno je osigurati da u krugu fotoaparata nema kretnji, vibracija ili strujanja zraka što bi prouzročilo njegovo pomicanje.

2.2. Distorzija leće fotoaparata

Na slici 1. prikazan je objekt (1.a) i fotografija istog objekta snimljenog objektivom s izraženom distorzijom (1.b). Zamislimo da na objektu pratimo pomake dviju točaka, jedne točke na rubu kadra (crvena strelica) i druge u sredini kadra (plava strelica). Nadalje, uzmimo primjer kada se cijeli objekt pomakne u translaciji vertikalno prema dolje, tj. stvarni su pomaci točaka (crvene i plave strelice) jednaki. Vidimo da mjereni pomaci (1.b) nisu jednaki nego je pomak točke na rubu manji od realnog,

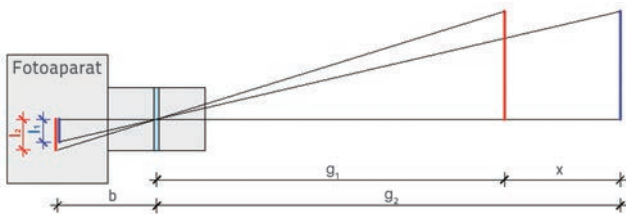
a pomak točke u sredini kadra je veći od realnog. Ovaj izvor pogreške možemo izbjeći pozicioniranjem uzorka u sredinu kadra gdje je efekt distorzije manji, ali i upotrebom fokalnih duljina na kojima je distorzija najmanje izražena. Za komercijalne leće fotoaparata postoje brojni testovi koji pokazuju na kojim fokalnim duljinama leća ima najmanju distorziju.



Slika 1. Distorzija leće fotoaparata

2.3. Promjena udaljenosti od uzorka do fotoaparata

Pretpostavimo da snimamo, tj. mjerimo neku fizikalnu veličinu na uzorku koji je od fotoaparata udaljen za g_1 (slika 2.).



Slika 2. Promjena udaljenosti od ispitnog uzorka do fotoaparata

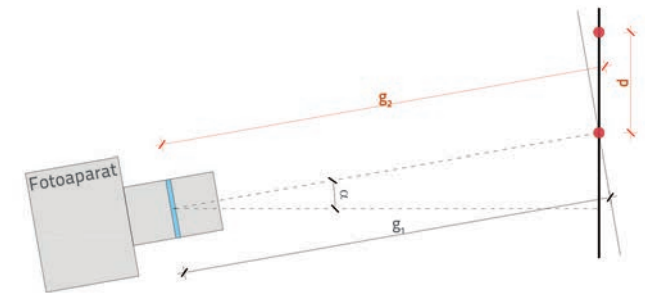
Projekcija neke proizvoljne dimenzije uzorka na senzor fotoaparata ima duljinu l_2 . Ako se ispitni uzorak približi fotoaparatu ili udalji za neki x , tada projekcija iste duljine na uzorku iznosi $l_1 \neq l_2$. Pogrešku koja nastaje kao posljedica promjene udaljenosti ispitnog uzorka od leće fotoaparata možemo izraziti pomoću izraza (1):

$$\varepsilon = \left(\frac{g_1}{g_1 - x} \right) \cdot 100 \% = \frac{g_1}{g_2} \cdot 100 \% \quad (1)$$

2.4. Odstupanje od pravog kuta uzorka od optičke osi fotoaparata

Pretpostavimo da ispitni uzorak nije postavljen u položaj okomit na optičku os fotoaparata ili da je fotoaparat zarotiran u odnosu na ispitni uzorak. Na slici 3. vidimo kako vertikalni pomak točke na uzorku uzrokuje promjenu udaljenosti

promatrane točke od leće fotoaparata, tj. točka se pomakla izvan ispitne ravnine fotoaparata, dakle $g_2 > g_1$. Takvu pogrešku ispitivanja također možemo izračunati pomoću izraza (1), gdje g_2 ovisi o odstupanju optičke osi fotoaparata od ispitnog uzorka i o vertikalnom pomaku promatrane točke d.

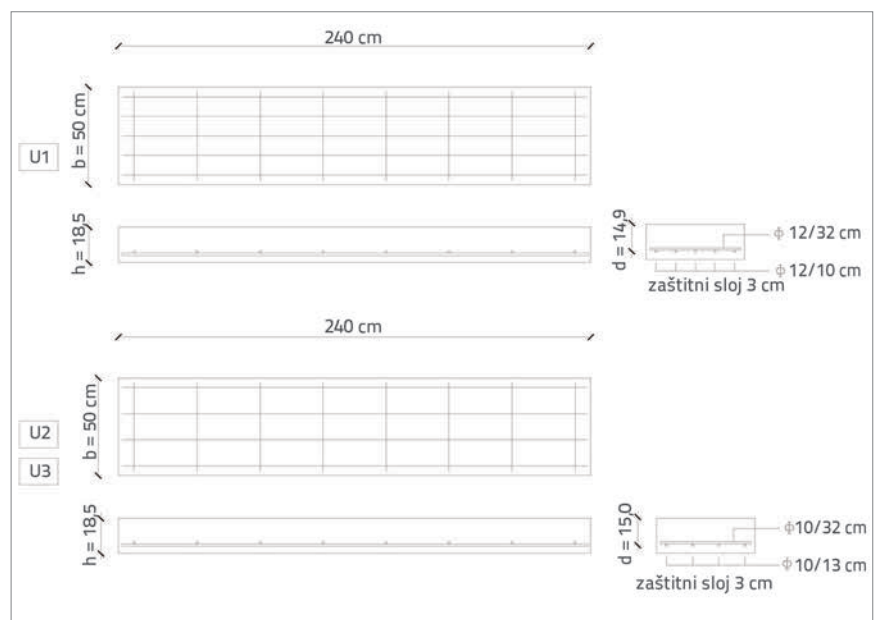


Slika 3. Shematski prikaz ispitivanja kada optička os fotoaparata nije okomita na ispitni uzorak

3. Eksperimentalno istraživanje

3.1. Ispitni uzorci

Ispitivanje je provedeno na tri uzorka ploča dimenzija 240 cm x 50 cm x 18,5 cm. Uzorci su armirani u uzdužnom smjeru čeličnim armaturnim šipkama B500B promjera 10 mm i 12 mm, slika 4. Poprečna armatura izvedena je isključivo radi lakšeg rukovanja, budući da se opterećenje nanosilo samo u jednom smjeru. Betonski uzorci izrađeni su u čeličnoj oplati direktno na vibrostolu u proizvodnom pogonu. Nakon betoniranja, uzorci su prekriveni najlonom radi sprječavanja naglog gubitka vode i održavanja temperature. Nakon četiri dana uzorci su izvađeni iz kalupa i uskladišteni u prostoru temperature oko 10 °C sve do transporta u Laboratorij za ispitivanje konstrukcija Građevinskog fakulteta u Zagrebu.



Slika 4. Plan armature

3.2. Svojstva materijala

Betonski uzorci za potrebe ispitivanja izrađeni su od hibridnog mikroarmiranog betona. Radi se o betonu koji je armiran kombinacijom industrijskih i recikliranih čeličnih vlakana [6]. Za izradu betona korišten je riječni agregat, maksimalnog zrna 16 mm, i cement tipa CEM II/A-M (S-V) 42,5 N. Ciljani razred konzistencije betonske mješavine bio je S4 (slijeganje 160 mm – 210 mm). U svrhu postizanja tog cilja i poboljšanja obradivosti betona, korišten je superplastifikator na bazi karboksilnih eterpolimera s dugim bočnim lancima. Za armiranje su korištena industrijska čelična vlakna zavnutih krajeva (vlakna s kukama), duljine 35 mm i promjera 0,55 mm te reciklirana čelična vlakna prosječne duljine 20 mm i promjera 0,15 mm. Sastav mješavine prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Sastav betonske mješavine

| | |
|--|------|
| Agregat [kg/m ³] | 1794 |
| Cement [kg/m ³] | 370 |
| Voda [kg/m ³] | 170 |
| v/c omjer | 0,46 |
| Superplastifikator [kg/m ³] | 2,22 |
| Industrijska čelična vlakna [kg/m ³] | 20 |
| Reciklirana čelična vlakna [kg/m ³] | 20 |

Tablica 2. Tlačna čvrstoća ispitana na betonskim kockama

| Oznaka ploče | Oznaka uzorka | Tlačna čvrstoća uzorka [MPa] | Srednja vrijednost tlačne čvrstoće [MPa] |
|--------------|---------------|------------------------------|--|
| U1 | 1 | 51,60 | 51,63 |
| | 2 | 51,55 | |
| | 3 | 51,73 | |
| U2 U3 | 1 | 53,03 | 52,25 |
| | 2 | 51,85 | |
| | 3 | 51,87 | |

Tijekom betoniranja uzoraka izrađene su po tri kocke duljine brida 150 mm za ispitivanje tlačne čvrstoće. Tlačna čvrstoća određena je u skladu s normom HRN EN 12390-3 [7], tablica 2.

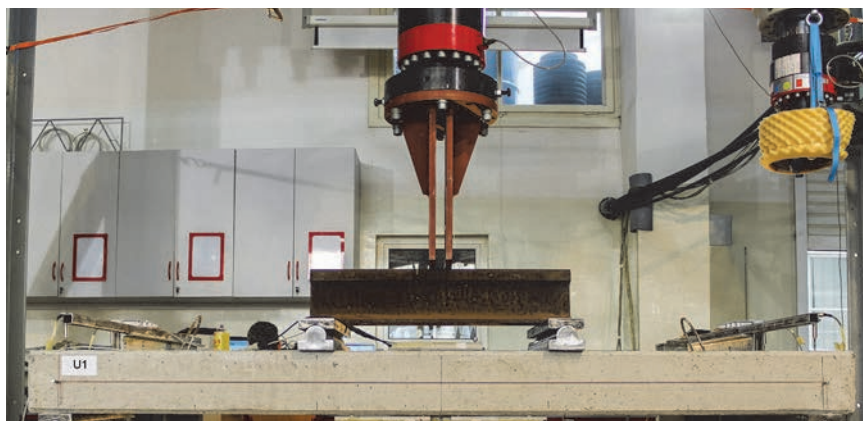
Svojstva korištene armature određena su eksperimentalno vlačnim ispitivanjem na tri uzorka za svaki promjer prema normama HRN EN ISO 15630-1:2010 [8] i HRN EN ISO 6892-1:2009 [9]. Dobiveni parametri su prikazani u tablici 3.

Tablica 3. Mehanička svojstva armaturnih šipki

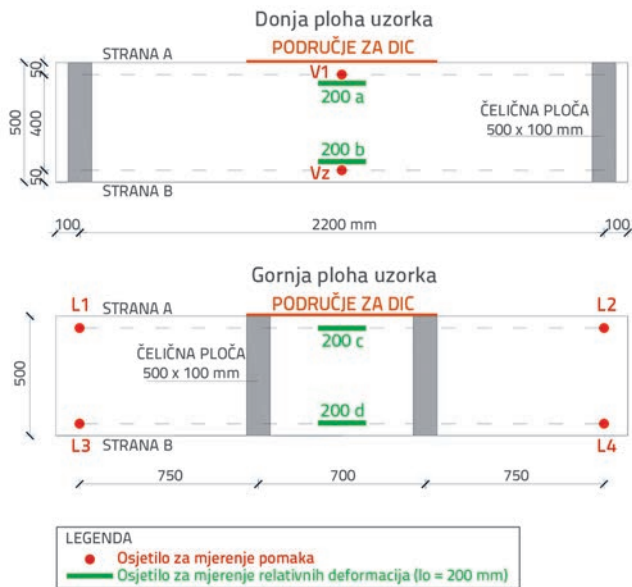
| Svojstvo | Φ12 mm | Φ10 mm |
|---|------------|------------|
| Granica popuštanja $R_{p0,2}$ [MPa] | 505 ± 2 | 540 ± 4 |
| Vlačna čvrstoća R_M [MPa] | 621 ± 1 | 624 ± 3 |
| Postotak ukupnog produljenja pri lomu A_t [%] | 14,0 ± 1,0 | 12,5 ± 1,0 |
| Modul elastičnosti E [GPa] | 182,3 | 182,7 |

3.3. Postavke ispitivanja

Uzorci su ispitani savijanjem u četiri točke s razmakom oslonaca od 220 cm. Ploče su bile kontinuirano oslonjene po svojoj širini na zglobne oslonce od čeličnih valjaka promjera 40 mm. Opterećenje je nanošeno na uzorak preko dvije čelične ploče dimenzija 50 cm x 10 cm x 3 cm. Prije početka ispitivanja posebno se pazilo o centriranju svakog uzorka na oslonce i simetričnom položaju sklopa za nonošenje opterećenja. Postavke ispitivanja prikazane su na slici 5. Opterećenje je nanošeno pomoću hidrauličnog dinamičkog ispitnog stroja Zwick/Roell kapaciteta 600 kN, kontrolom pomaka s brzinom od 3 mm/min i to u koracima od 25 kN s rasterećenjima. Opterećenje je mjereno dozom za mjerenje sile koja se nalazi na samom stroju. Vertikalni pomaci mjereni su pomoću LVDT osjetila proizvođača HBM, tipa WA100 mm i WA10 mm. Pomaci su mjereni s donje strane uzorka na sredini raspona duž dvije osi (V1 i V2) i s gornje strane uzorka nad osloncima (L1-L4), kako bi se kontrolirao ukupni pomak i slijeganje cijelog sustava. Relativne deformacije mjerene su na tlačnoj i vlačnoj strani uzorka LVDT osjetilima postavljenim na mjerne bazi od 200 mm u sredini raspona. Mjerna mjesta na pločama prikazana su na slici 6. Ispitivanja su provedena na sobnoj temperaturi, a starost uzorka bila je otprilike tri mjeseca. Paralelno s konvencionalnim sustavom za mjerenje pomaka i deformacija provodilo se i mjerenje pomoću 2D digitalne analize slike. Jedna bočna strana uzorka (strana A) pripremljena je za mjerenje na način da se laganim prskanjem boje iz spreja na površinu nanio nasumični točkasti uzorak, slika 7.



Slika 5. Postavke ispitivanja



Slika 6. Mjerna mjesta



Slika 7. Uzorak pripremljen za digitalnu analizu slike

Pri ispitivanju se koristio digitalni SLR fotoaparat Canon EOS 700D maksimalne rezolucije 5184 x 3456 piksela, tj. 18 megapiksela, kojom su snimane fotografije korištene za digitalnu analizu. Na fotoaparatu se prilikom ispitivanja nalazio objektiv Canon EF-S fokalne duljine od 18 mm do 55 mm, maksimalnog otvora blende F/3.5 za fokalnu duljinu 18 mm i F/5.6 za fokalnu duljinu 55 mm. Digitalni fotoaparat je prilikom ispitivanja bio pričvršćen za tronožac na koji je obješen uteg mase 10 kg radi njegove stabilizacije i smanjenja vibracija. Tronožac je bio otprilike metar udaljen od uzorka te se pazilo da je optička os fotoaparata usmjerena okomito na površinu uzorka koja se snimala. Fotoaparat je spojen na računalo i upravljan preko programa digiCam Control koji omogućuje manualno zadavanje ekspozicijskog trokuta (otvor blende, brzina okidača i osjetljivost senzora). Ekspozicijski trokut bio je isti za sve fotografije snimljene prilikom ispitivanja, a postavke istog prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Postavke fotoaparata

| | |
|----------------------|---------|
| Ekspozicija | 1/25 s |
| Otvor blende | F/5.6 |
| Osjetljivost senzora | ISO 800 |
| Fokalna duljina | 42 mm |

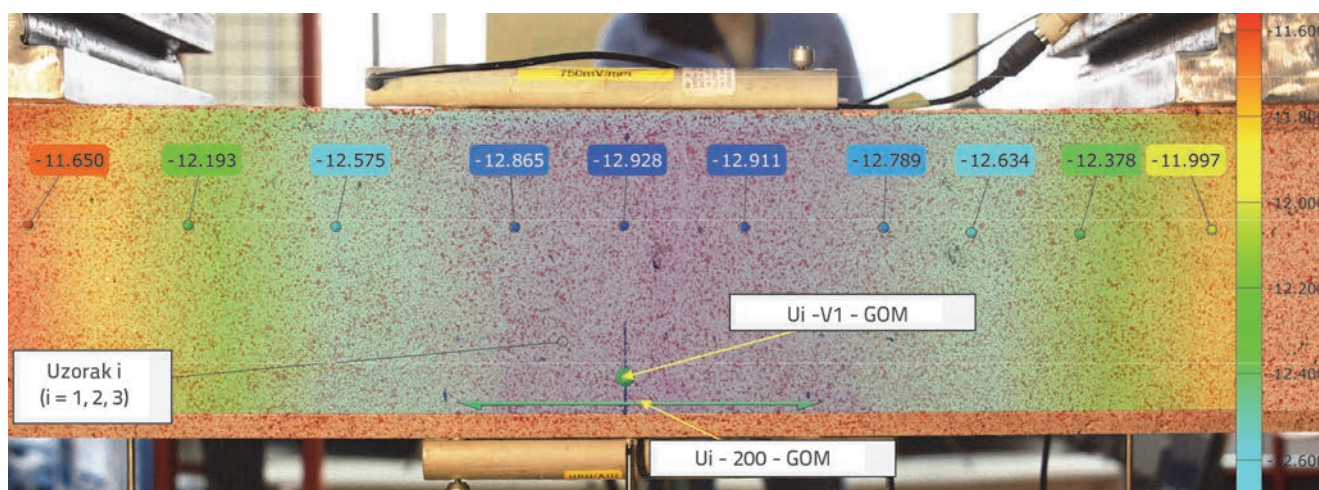
Fotografije ispitnog uzorka prikupljane su svakih 10 sekundi tijekom ispitivanja. Budući da se radi o statičkom ispitivanju, ova frekvencija uzorkovanja je dovoljna za prikupljanje podataka. Postavke fotoaparata prikazane u tablici 4 odabrane su na temelju analize oštine slike i distorzije objektiv. Na temelju rezultata prikazanih u [10] odabrana je fokalna duljina od 42 mm na kojoj korišteni objektiv ima minimalnu distorziju. Osim toga, za otvor blende odabrana je vrijednost F/5.6 koja se ubraja u područje najveće oštine objektiv. Osjetljivost senzora odabrana je tako da se osigura dostatna svjetlina fotografije uz minimalni šum koji se javlja na ISO 800. Za obradu digitalnih fotografija korištena je besplatna verzija komercijalnog programskog paketa GOM Correlate. Komercijalni program GOM Correlate daje mogućnost usporedbe fotografije snimljene u nekom trenutku ispitivanja s bilo kojom drugom fotografijom u nekom drugom trenutku ispitivanja. U okviru ovog rada sve fotografije snimljene tijekom ispitivanja uspoređivane su s referentnom fotografijom snimljenom na početku ispitivanja. Kod takvog plana eksperimenta važno je da na referentnoj fotografiji nema pomaka i deformacija, tj. da je ona snimljena neposredno prije ispitivanja, a sve naknadne fotografije predstavljaju relativno stanje uzorka u odnosu na referentnu fotografiju.

4. Rezultati ispitivanja

Kao što je navedeno, ispitivanjem su obuhvaćena tri uzorka za koje su prikazani rezultati mjerenja širina pukotina i vertikalnih pomaka. Širina pukotina na bazi od 200 mm i vertikalni pomaci sredine raspona ploče mjereni su, osim DIC metodom, LVDT osjetilima. Rezultati dobiveni digitalnom analizom slike uspoređeni su s rezultatima mjerenja vertikalnog pomaka LVDT osjetilom u točki V1 i širinom pukotina dobivenom na LVDT osjetilu 200 a, slika 6. Prije prikazivanja rezultata ispitivanja tablično su prikazane oznake svih mjernih mjesta za obje metode mjerenja: a) digitalna analiza slike - GOM i b) mjerenje LVDT osjetilima - HBM (tablica 5.). Na slici 8. prikazana su mjerna mjesta u GOM Correlate programu. Točka u kojoj se pratio vertikalni pomak smještena je iznad LVDT osjetila (oznaka Ui-V1-GOM), a virtualni ekstenzometar je postavljen tako da obuhvaća isto područje kao i LVDT osjetilo za mjerenja širine pukotina (oznaka Ui-200-GOM). Kako program nudi mogućnost praćenja neograničenog broja točaka, prikazane su i vrijednosti vertikalnih pomaka u više nasumično odabranih točaka uzorka.

Tablica 5. Oznake mjernih mjesta s pripadajućim opisom

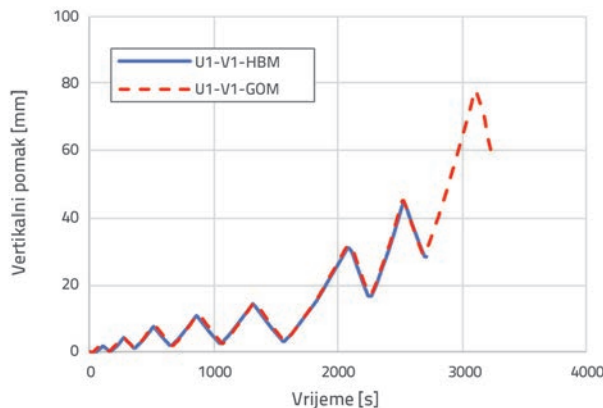
| Uzorak | Oznaka mjernog mjesta | Opis mjernog mjesta |
|---------------------------|-----------------------|---|
| Uzorak i (i = 1, 2, 3) | Ui – V1 – GOM | Vertikalni pomak u sredini raspona – digitalna analiza slike. |
| | Ui – V1 – HBM | Vertikalni pomak u sredini raspona – LVDT osjetilo. |
| | Ui – 200 – GOM | Širina pukotina na bazi od 200 mm – digitalna analiza slike. |
| | Ui – 200 – HBM | Širina pukotina na bazi od 200 mm – LVDT osjetilo. |
| | Ui – P1 | Širine odabranih pukotina – digitalna analiza slike. |
| | Ui – P2 | |
| | Ui – P3 | |
| | Ui – P4 | |
| | Ui – P5 | |
| Ui – P6 | | |



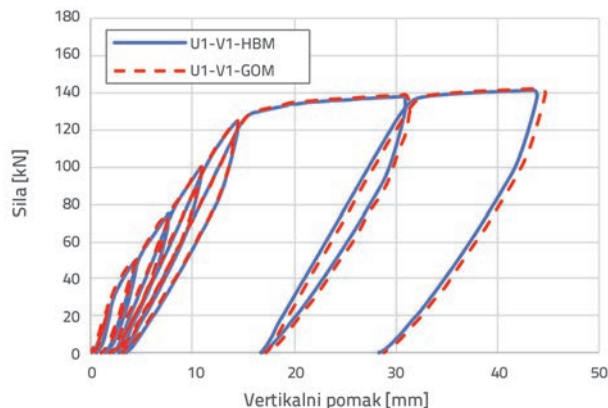
Slika 8. Prikaz mjernih mjesta i grafički prikaz vertikalnih pomaka u više točaka dobiven DIC metodom na jednom uzorku

Na slikama 9. do 14. prikazana je usporedba rezultata mjerenja vertikalnog pomaka u sredini raspona prema dvije metode za sva tri uzorka (slika 9. i 10. za uzorak U1, slike 11. i 12. za uzorak U2 i slike 13. i 14. za uzorak U3). Rezultati su prikazani u obliku dijagrama pomak u vremenu te sila-pomak. Može se uočiti da za sva tri uzorka DIC metoda pokazuje iznimno dobro poklapanje s konvencionalnom

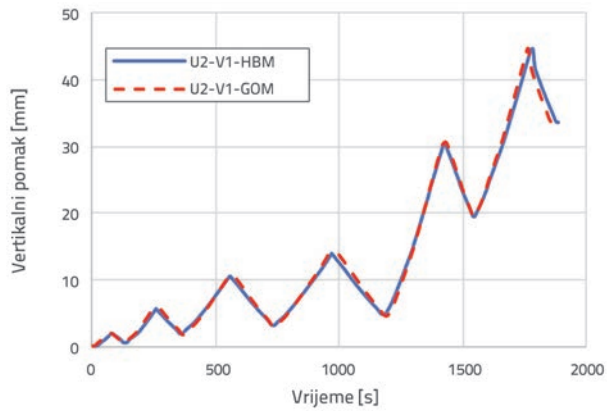
metodom mjerenja pomoću LVDT osjetila. Jedna od prednosti DIC metode jest u mogućnost praćenja širine svake pojedine pukotine na uzorku. Na slikama 15., 16. i 17. vidljiv je grafički prikaz pukotina dobiven DIC metodom za sva tri uzorka. Mjerna mjesta za mjerenje širine odabranih pukotina postavljena su kao virtualni ekstenzometri preko šest najvećih pukotina na svakom uzorku.



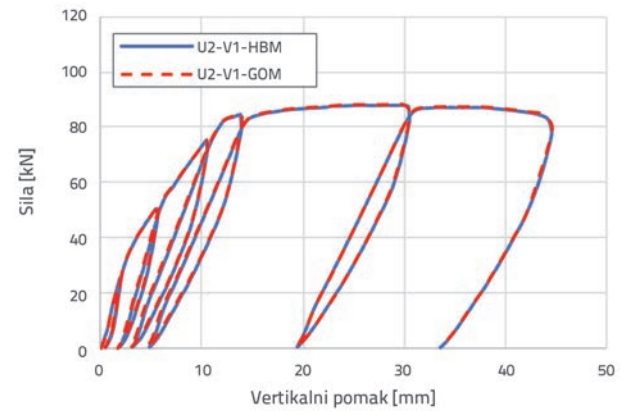
Slika 9. Usporedba mjerenja vertikalnog pomaka u vremenu za uzorak U1



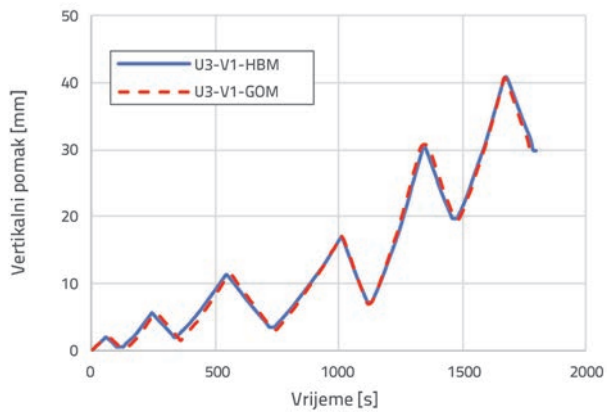
Slika 10. Usporedba dijagrama sila-pomak za uzorak U1



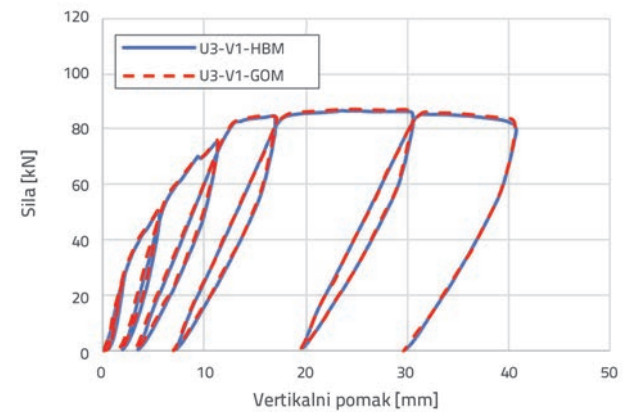
Slika 11. Usporedba mjerena vertikalnog pomaka u vremenu za uzorak U2



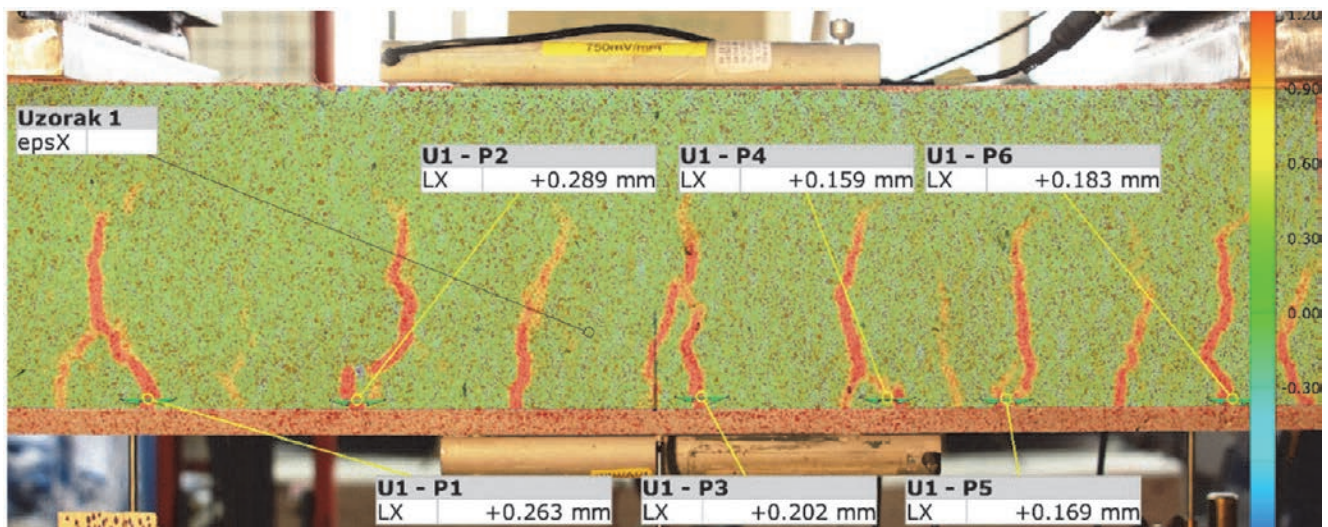
Slika 12. Usporedba dijagrama sila-pomak za uzorak U2



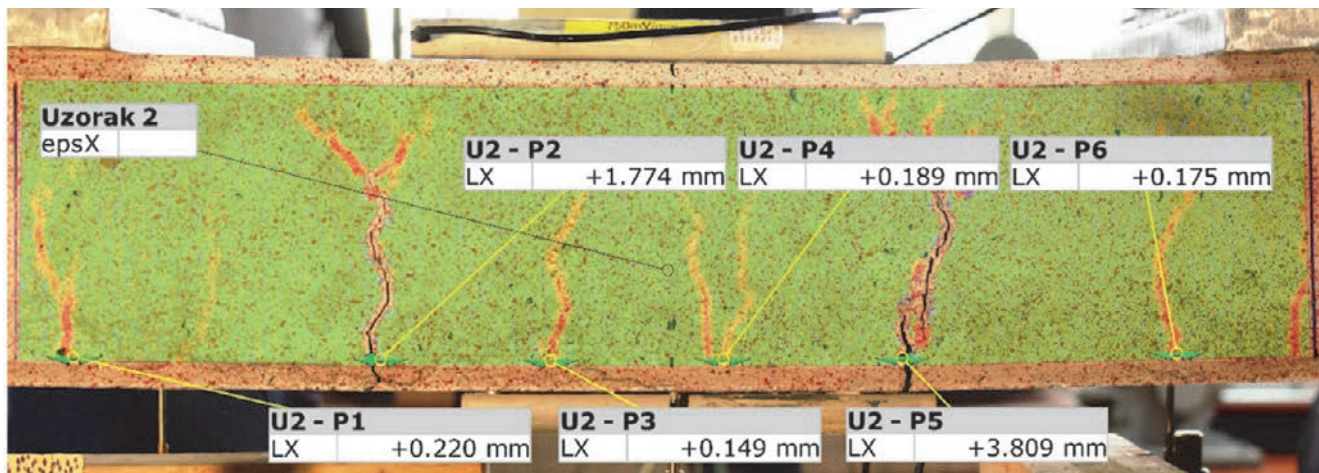
Slika 13. Usporedba mjerena vertikalnog pomaka u vremenu za uzorak U3



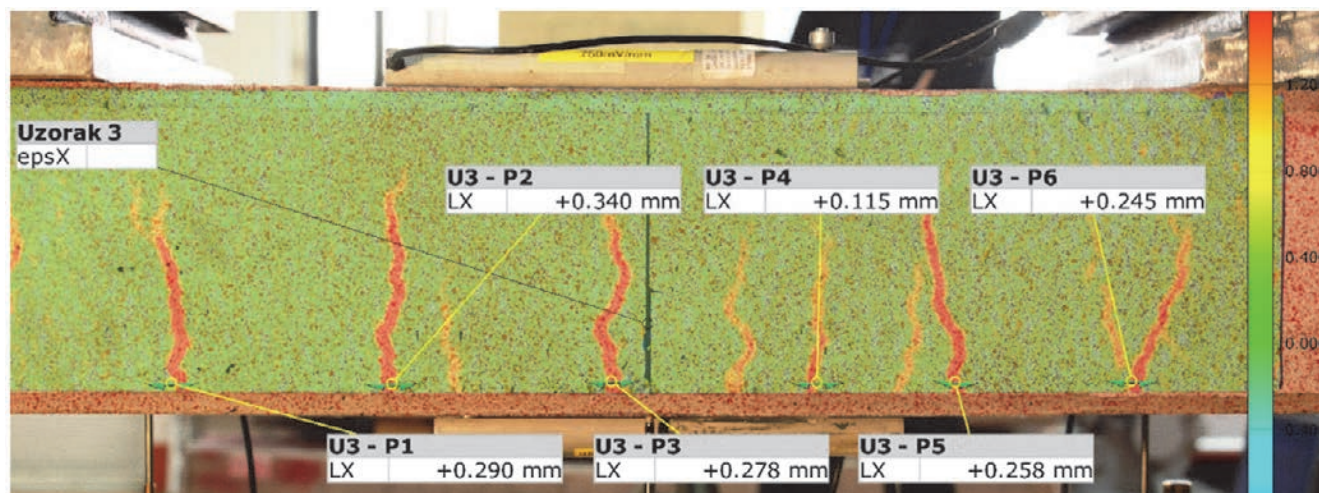
Slika 14. Usporedba dijagrama sila-pomak za uzorak U3



Slika 15. Grafički prikaz pukotina dobiven DIC metodom za uzorak U1



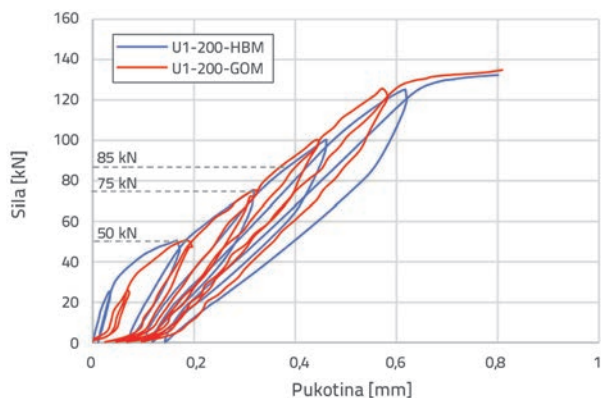
Slika 16. Grafički prikaz pukotina dobiven DIC metodom za uzorak U2



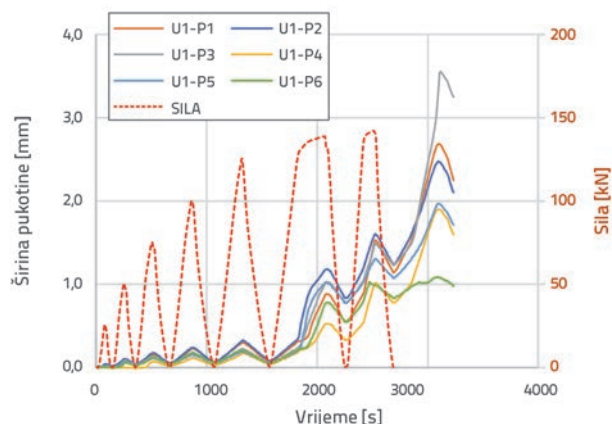
Slika 17. Grafički prikaz pukotina dobiven DIC metodom za uzorak U3

Na slikama 18, 20. i 22 prikazana je usporedba širina pukotina na mjernoj bazi od 200 mm dobivena pomoću dvije metode do trenutka odljepljivanja LVDT osjetila s površine uzorka. Može se primijetiti relativno dobro podudaranje

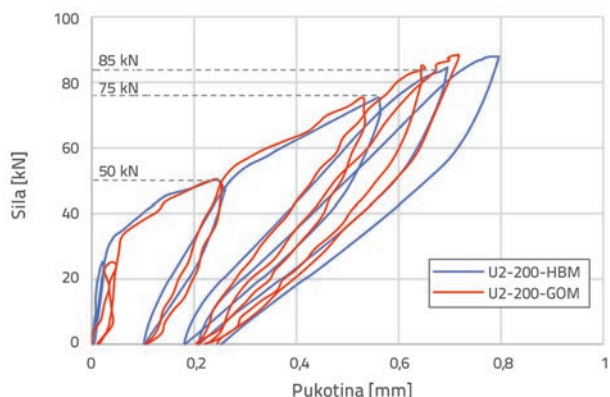
rezultata. Treba napomenuti da su vrijednosti s LVDT osjetila dobivene na donjoj plohi ploče, gdje je osjetilo bilo postavljeno. Rezultati dobiveni DIC metodom odnose se na bočnu stranicu ploče, čime se može objasniti manje



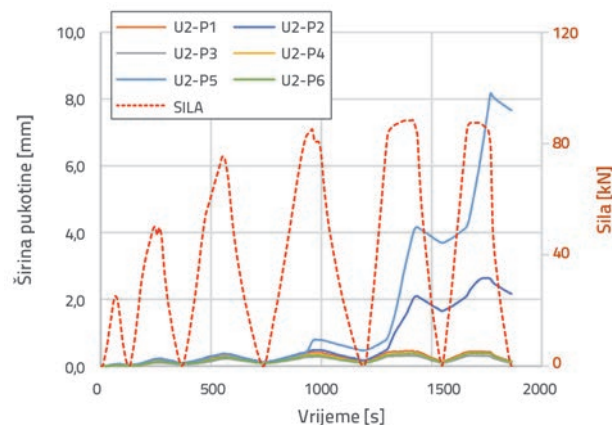
Slika 18. Usporedba dijagrama širina pukotina za uzorak U1 (do odljepljivanja LVDT-a)



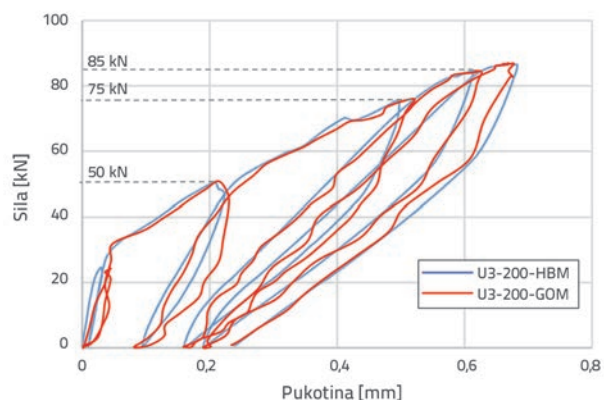
Slika 19. Širine odabranih pukotina u vremenu za uzorak U1 (DIC metoda)



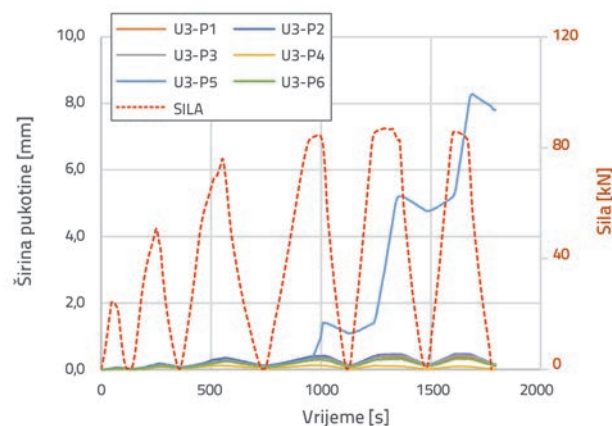
Slika 20. Usporedba dijagrama širina pukotina za uzorak U2 (do odljepljivanja LVDT-a)



Slika 21. Širine odabranih pukotina u vremenu za uzorak U2 (DIC metoda)



Slika 22. Usporedba dijagrama širina pukotina za uzorak U3 (do odljepljivanja LVDT-a)



Slika 23. Širine odabranih pukotina u vremenu za uzorak U3 (DIC metoda)

odstupanje u rezultatima. Ovi rezultati odnose se na ukupnu širinu pukotina koja se otvorila na toj mjernezi bazi, tj. radi se o ukupnoj širini nekoliko nastalih pukotina u toj zoni. Pri širini pukotina od oko 0,8 mm dolazi do odljepljivanja LVDT osjetila pa je daljnje mjerenje nakon te vrijednosti nastavljeno pomoću DIC metode. Širine šest najvećih pukotina na pojedinom uzorku i njihovo širenje u vremenu prikazani su na slikama 19, 21 i 23. Može se uočiti da se na uzorku U1 otvaralo više pukotina manjih širina, a na uzorku U2 i U3 otvorile su se dvije, tj. jedna dominantna pukotina. Razlog je tomu manja količina armature kod uzoraka U2 i U3, vidi sliku 4.

5. Analiza rezultata

Rezultati ispitivanja dviju korištenih metoda uspoređeni su na nekoliko različitih razina opterećenja za sve uzorke. U tablici 6. prikazana je usporedba rezultata vertikalnih pomaka

u sredini raspona. Rezultati dobiveni digitalnom analizom slike odstupaju od rezultata dobivenih LVDT osjetilima za samo $\pm 1\%$, osim na niskim razinama opterećenja gdje su ta odstupanja maksimalno 3,3%. U tablici 7. prikazana je usporedba širine pukotine na mjernezi bazi od 200 mm. Može se uočiti da rezultati dobiveni digitalnom analizom slike odstupaju od onih dobivenih LVDT osjetilom do 7%. Nešto veća odstupanja uočena su na nižim razinama opterećenja, pri vrlo malim deformacijama, gdje maksimalno odstupanje iznosi 15%.

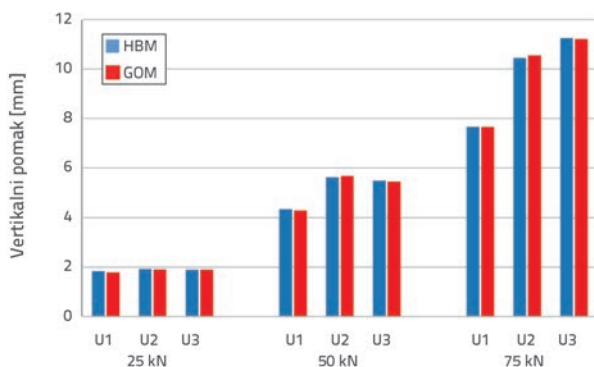
Treba naglasiti da ove vrijednosti nisu bile mjerene na potpuno identičnim točkama uzorka, jer je LVDT osjetilo bilo postavljeno na donjoj plohi uzorka, a digitalna se analiza slike provodila s bočne strane uzorka. Nije bilo moguće postaviti LVDT osjetilo u zonu digitalne analize slike jer bi on svojom površinom zaklanjao plohu koja se analizira. Ipak, rezultati upućuju na prilično dobro podudaranje rezultata. Grafički prikaz uspoređivanih vrijednosti dan je na slikama 24. i 25.

Tablica 6. Usporedba pomaka na različitim razinama sila

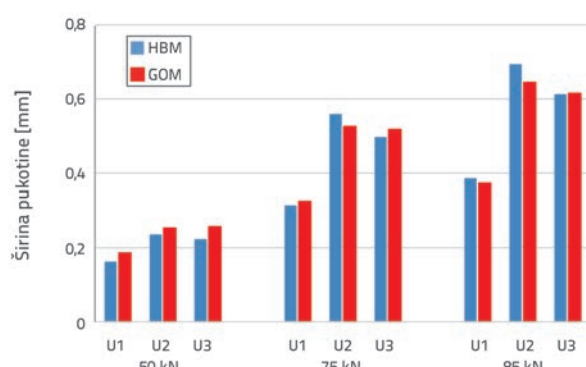
| Sila [kN] | Uzorak / mjerno mjesto | Pomak HBM [mm] | Pomak GOM [mm] | Odstupanje DIC metode [%] | Apsolutno odstupanje [mm] |
|-----------|------------------------|----------------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| 25 | U1 - V1 | 1,84 | 1,78 | -3,3 | -0,06 |
| | U2 - V1 | 1,92 | 1,90 | -1,0 | -0,02 |
| | U3 - V1 | 1,90 | 1,89 | -0,5 | -0,01 |
| 50 | U1 - V1 | 4,34 | 4,29 | -1,2 | -0,05 |
| | U2 - V1 | 5,61 | 5,67 | +1,1 | +0,06 |
| | U3 - V1 | 5,47 | 5,43 | -0,7 | -0,04 |
| 75 | U1 - V1 | 7,65 | 7,64 | -0,1 | -0,01 |
| | U2 - V1 | 10,45 | 10,55 | +1,0 | +0,10 |
| | U3 - V1 | 11,25 | 11,21 | -0,4 | -0,04 |

Tablica 7. Usporedba širina pukotina na različitim razinama sile

| Sila [kN] | Uzorak / mjerno mjesto | Širina pukotine HBM [mm] | Širina pukotine GOM [mm] | Odstupanje DIC metode [%] | Apsolutno odstupanje [mm] |
|-----------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 50 | U1 - 200 | 0,162 | 0,186 | +14,8 | +0,024 |
| | U2 - 200 | 0,236 | 0,253 | +7,2 | +0,017 |
| | U3 - 200 | 0,223 | 0,257 | +15,2 | +0,034 |
| 75 | U1 - 200 | 0,314 | 0,325 | +3,5 | +0,011 |
| | U2 - 200 | 0,559 | 0,526 | -5,9 | -0,033 |
| | U3 - 200 | 0,497 | 0,518 | +4,2 | +0,021 |
| 85 | U1 - 200 | 0,386 | 0,373 | -3,4 | -0,013 |
| | U2 - 200 | 0,694 | 0,645 | -7,1 | -0,049 |
| | U3 - 200 | 0,613 | 0,615 | +0,3 | +0,002 |



Slika 24. Usporedba vrijednosti pomaka prema dvije metode



Slika 25. Usporedba vrijednosti širine pukotine prema dvije metode

6. Zaključak

2D digitalna analiza slike (DIC) nudi nekoliko prednosti pri mjerenju pomaka i širina pukotina u odnosu na klasične metode mjerenja LVDT osjetilima. Velika prednost te metode tijekom praćenja širine pukotine jest u tome što možemo pratiti svaku pukotinu zasebno bez obzira na to gdje će se ona otvoriti.

Također, omogućuje praćenje širine pukotina i pri vrlo velikim pomacima pri kojima LVDT osjetila najčešće izgube kontakt s uzorkom, tj. dolazi do njihovog odljepljivanja. Najveća prednost ove metode ispitivanja jest cijena samog ispitivanja jer je za provedbu ispitivanja DIC metodom potreban samo digitalni fotoaparati, osobno računalo i besplatna verzija komercijalnog programa za digitalnu analizu fotografija. Mjerenje pomaka

i širina pukotina LVDT osjetilima znatno je skuplje zbog cijena osjetila, ali i uređaja za prikupljanje podataka.

Osnovni cilj ispitivanja prikazanog u ovom radu bio je ocijeniti točnost rezultata dobivenih 2D digitalnom analizom slike u odnosu na rezultate mjerenja LVDT osjetilima. Analizom rezultata vertikalnih pomaka zaključeno je da je digitalnom analizom slike dobiveno odstupanje od samo $\pm 1\%$, osim na niskim razinama opterećenja gdje je maksimalno odstupanje do 3% . Nadalje, vrijednosti širine pukotine dobivene digitalnom analizom slike odstupaju od vrijednosti dobivenih LVDT osjetilom otprilike do 7% , osim na niskim razinama opterećenja gdje odstupanje iznosi maksimalno 15% . Prikazani su i rezultati kontinuiranog praćenja više pukotina na uzorcima,

što predstavlja veliku prednost u odnosu na konvencionalne metode mjerenja. Digitalna analiza slike pokazala se vrlo jednostavnom i ekonomski prihvatljivom za upotrebu, uz zadovoljavajuću točnost dobivenih rezultata.

Zahvala

Autori zahvaljuju na financijskoj potpori iz sedmog okvirnog programa Europske unije projekta "Anagennisi - Innovative Use of All Tyre Components in Concrete". Autori zahvaljuju svim suradnicima na projektu, a posebno kolegama sa Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu i tvrtki Gradmont d.o.o. koja je izradila uzorke za ispitivanja.

LITERATURA

- [1] McCormick, N., Lord, J.: Digital Image Correlation, *Materials Today*, 13 (2010) 12, pp. 52–54, [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70235-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70235-2)
- [2] Frančić Smrkić, M.: Otpornost betonskih elemenata armiranih recikliranim čeličnim vlaknima pri zamoru, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017.
- [3] McCormick, N.: Digital image correlation for structural measurements, *Proc Inst Civ Eng*, 165 (2012) 4, pp. 185–190, <https://doi.org/10.1680/cien.11.00040>
- [4] Küntz, M., Jolin, M., Bastien, J., Perez, F., Hild, F.: Digital image correlation analysis of crack behavior in a reinforced concrete beam during a load test, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33 (2006) 11, pp. 1418–1425, <https://doi.org/10.1139/I06-106>
- [5] GOM Correlate Software, [Internet] [cited 2018 Mar 10]. Available from: <https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html>
- [6] Frančić Smrkić, M., Damjanović, D., Baričević, A.: Application of recycled steel fibres in concrete elements subjected to fatigue loading, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 10, pp. 893–905, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2059.2017>
- [7] HZN: HRN EN 12390-3:2012. Ispitivanje očvrstloga betona- 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka, 2012.
- [8] HZN: HRN EN ISO 15630-1:2010 Čelik za armiranje i prednapinjanje betona - Metode ispitivanja - 1. dio: Armaturne šipke, valjana žica i žica, 2010.
- [9] HZN: HRN EN ISO 6892-1:2016 Metalni materijali - Vlačno ispitivanje - 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi, 2016.
- [10] Canon EF-S Lens Review, [Internet] [cited 2018 Mar 10]. Available from: <https://www.imaging-resource.com/lenses/canon/ef-s-18-55mm-f3.5-5.6-is-stm/review/>