

Primljen / Received: 26.2.2018.

Ispravljen / Corrected: 21.8.2018.

Prihvaćen / Accepted: 3.9.2018.

Dostupno online / Available online: 10.10.2018.

Sanacija tradicijskih kamenih stupova olovnim umetkom

Autori:



Doc.dr.sc. **Josip Atalić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
atalic@grad.hr



Doc.dr.sc. **Mario Uroš**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
uros@grad.hr



Doc.dr.sc. **Marta Šavor Novak**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
msavor@grad.hr

Izvorni znanstveni rad

Josip Atalić, Mario Uroš, Marta Šavor Novak

Sanacija tradicijskih kamenih stupova olovnim umetkom

Na tradicijskim kamenim stupovima često se mogu uočiti karakteristične pukotine u području spojeva, ali i različite načine sanacija kojima se pokušavalo zaustaviti njihovo kontinuirano širenje. Sustavnim je numeričkim i laboratorijskim analizama na gotovo realnim dimenzijama uzoraka kao temeljni uzrok raspucavanja orkrivena koncentracija naprezanja na kontaktnim ploham. U radu je prikazan dio rezultata laboratorijskih ispitivanja i numeričkih analiza tradicijskoga oblika sanacije s olovnim umetkom postavljenim između dijelova stupa.

Ključne riječi:

kameni stup, kontaktno naprezanje, neravna ploha, koncentracija naprezanja, olovni umetak, laboratorijska ispitivanja, numerička analiza

Original scientific paper

Josip Atalić, Mario Uroš, Marta Šavor Novak

Remediation of traditional stone columns by lead inlays

Typical cracks often occur on traditional stone columns at the position of joints. In addition, such columns bear witness of various repair methods that have been used over time to stop continuous spreading of cracks. Systematic numerical and laboratory analyses conducted on almost real size samples have revealed that the basic cause of cracking is the concentration of stress at contact surfaces. Some laboratory testing and numerical analysis results, relating to the traditional form of repair with lead inlay placed between column parts, are presented in the paper.

Key words:

stone column, contact stress, uneven surface, stress concentration, lead inlay, laboratory testing, numerical analysis

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Josip Atalić, Mario Uroš, Marta Šavor Novak

Sanierung von traditionellen Steinsäulen durch Bleieinsätze

An traditionellen Steinsäulen sind häufig charakteristische Risse im Fugenbereich zu erkennen, aber auch unterschiedliche Arten der Sanierung, mit denen man deren kontinuierliche Ausdehnung aufzuhalten versuchte. Durch systematische numerische und labortechnische Analysen an nahezu realistischen Probeabmessungen entdeckte man als grundlegende Ursache für das Absplittern die Spannungskonzentration an den Kontaktflächen. In der Abhandlung wird ein Teil der Ergebnisse der Laboruntersuchungen und der numerischen Analysen der traditionellen Form der Sanierung mit Bleieinsätzen dargelegt, die zwischen den Säulenteilen eingesetzt werden.

Schlüsselwörter:

Steinsäule, Kontaktspannung, unebene Fläche, Spannungskonzentration, Bleieinsatz, Laboruntersuchungen, numerische Analyse

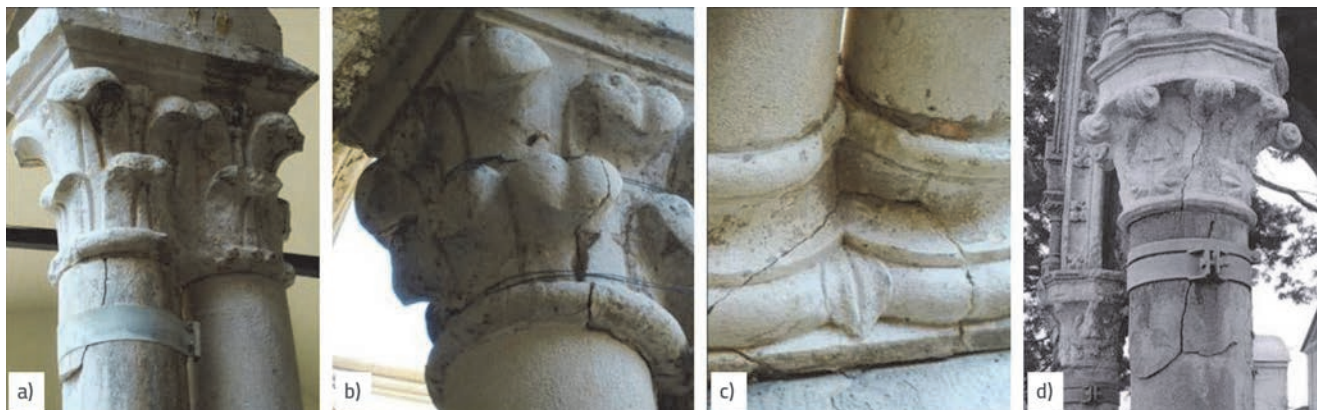
1. Uvod

Početni su motiv za opsežno istraživanje tradicijskih kamenih stupova kontinuirani problemi sa stupovima u atriju Kneževa dvora u Dubrovniku, gdje nakon brojnih sanacija tijekom povijesti nije otkriven osnovni uzrok problema niti je zaustavljeno raspucavanje. Štoviše, često su povijesni izvještaji isticali mogućnost nekoga konstrukcijskog nedostatka odnosno "trajne pojave koja oštećuje stupove" [1]. Problematika raspucavanja tradicijskih stupova prisutna je diljem Hrvatske [2], ali i svijeta [3], na različitim tradicijskim stupovima [4]. Tijekom povijesti na razne se načine pokušavalo sanirati pukotine, pa na stupovima često možemo uočiti zahvate poput postavljanja različitih obruča, umetaka, povezivanja elemenata stupa, zapunjavanja pukotina, pojedinačne zamjene elemenata i slično (slika 1.). Osnovna je zamisao intervencija spriječiti daljnje raspucavanje koje bi ugrozilo sigurnost (odlamanje elemenata) i u konačnici rezultiralo urušavanjem. Ovim se istraživanjem pokušava ući u srž problema, odnosno ublažiti sam konstrukcijski nedostatak (početne koncepcije konstrukcije iz povijesnih izvještaja) te na taj način spriječiti ili barem na dulje vrijeme odgoditi kontinuirano raspucavanje stupova.

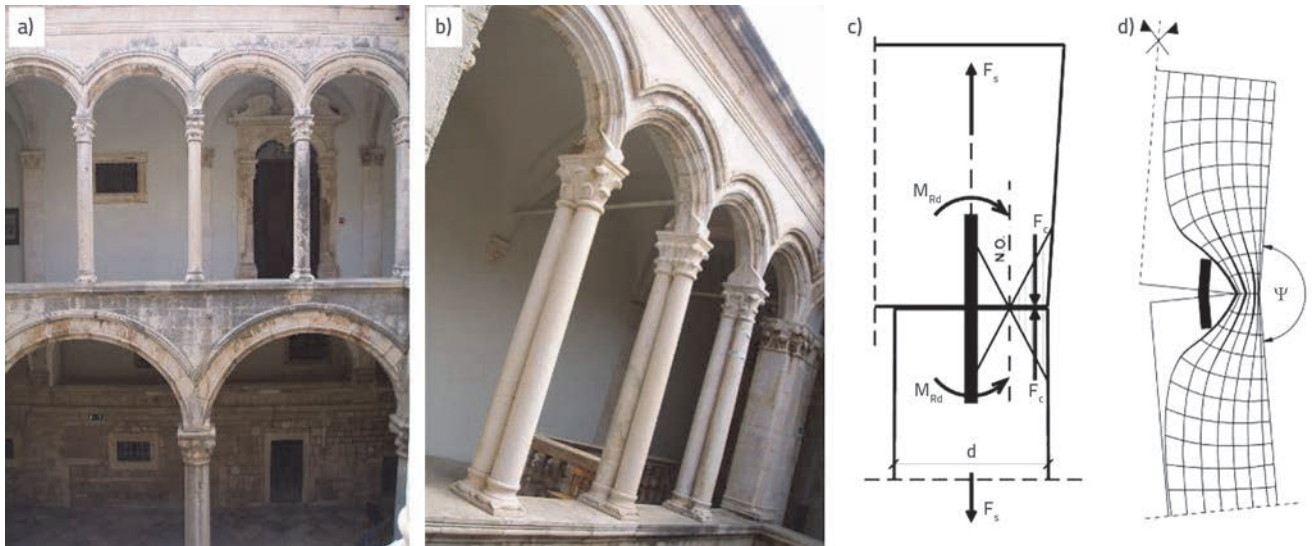
Postoje različiti tradicijski kameni stupovi i graditelji su ih vrlo često i na različite načine rabili u svome izričaju, posebice zbog njihove vitkosti. U radu su istraživani tradicijski stupovi (slika 2.a) sastavljeni od tijela, baze i kapitela koji su najčešće međusobno povezani željeznom trnom (položenim u otvore nešto većega promjera koji se naknadno ispune olovom), dok su spojne (kontaktne) plohe brižljivo poravnane i sljubljene (slika 1.). Očigledno je ovakav spoj pretežito namijenjen za preuzimanje centričnih opterećenja, odnosno nije u mogućnosti preuzeti značajnije ekscentrično opterećenje, što i odgovara uobičajenoj koncepciji nosivosti u povijesnim građevinama. Povrh toga, treba imati na umu da su stupovi, iako najčešće najvitkiji elementi, vrlo rijetko značajnije iskorišteni pri vertikalnim opterećenjima, dok horizontalna opterećenja (primjerice potres) najčešće preuzimaju zidovi. Ipak, pri djelovanju potresa stupovi "moraju pratiti pomake" konstrukcije, što uzrokuje poremećaj toka tlačnih sila u presjecima stupa, a posebice na spojnim

plohama (odvajaju se). Poremećaj ili ekscentričnost tlačne linije mogu prouzročiti i druga opterećenja, poput imperfekcija prilikom izvedbe, slijeganja temelja, preraspodjela naprezanja u svodovima, temperature, promjena kroz povijest i slično. Postojeća istraživanja [6] upućuju na to da i manje ekscentričnosti tlačne linije uzrokuju relativni zaokret dijelova stupa, odnosno otvaranje spoja s jedne i nalijeganje spojnih (kontaktne) ploha na drugoj strani presjeka (slika 2.c), što uzrokuje izrazite koncentracije naprezanja (slika 2.d), drobljenje materijala i otvaranje karakterističnih pukotina u blizini kontakata. Štoviše, pokazalo se da je raspucalo stanje vrlo osjetljivo na promjene djelovanja poput temperature ili pokretnoga opterećenja, što doprinosi progresivnom rastu pukotina [7]. Zaključno, stupovi u većini slučajeva ne bi trebali biti značajnije iskorišteni pri vertikalnim i horizontalnim opterećenjima, ali pokazalo se da su lokalne koncentracije naprezanja na kontaktnim plohama dovoljne da uzrokuju raspucavanje velikoga broja stupova. Koncentracije su ponajprije prouzročene poremećajima tlačne linije, ali postojeća su istraživanja pokazala da moramo uzeti u obzir i neizbježne neravnine (nesavršenosti) na kontaktnim plohama koje onemogućuju jednoliko nalijeganje po plohi spoja [5].

Nužno je istaknuti da problem koncentracija naprezanja na kontaktnim plohama vrlo često ostaje neprimijećen ili se ne uzima u obzir. Tradicijskim je proračunima, poput približnih grafičkih metoda, izborom uvriježenih odnosa među konstrukcijskim elementima [8] ili tlačno-vlačno analogijom, taj problem teško obuhvatiti, jer su pomaci neznatni. S druge strane, u suvremenim se numeričkim proračunima najčešće rade globalni modeli konstrukcije [9] kojima je teško obuhvatiti složeno ponašanje detalja, posebice u poslijekritičnom području (potrebno je mnogo specifičnih podataka). Nadalje, uobičajena eksperimentalna ispitivanja razine uzdužne sile u stupovima povijesnih građevina obično se ne rade u blizini kontakata, pa mogu istraživače u potpunosti navesti na krive zaključke, jer se koncentracije naprezanja već raspodijele (slika 2.d). Stoga analize povijesnih građevina koje ne sadrže detaljniji pristup spojevima mogu jako podcijeniti iskorištenje stupova, pa i cijele konstrukcije, što su i potvrdila postojeća istraživanja [5].



Slika 1. Pukotine na tradicijskim kamenim stupovima s ostacima prethodnih sanacija [5]



Slika 2. a) Tradicijski kameni stupovi; b) Udvojeni stupovi na katu Kneževa dvora u Dubrovniku; c) Model ponašanja spoja s unutarnjim silama i napreznjima [7]; d) Razdioba trajektorija napreznja [6]

Pukotine su u povijesnim građevinama dosta česte, ali najčešće nisu kritične, jer su dobrim oblikovanjem konstrukcija omogućene brojne preraspodjele napreznja. Međutim, kod stupova je ta preraspodjela ograničena (mali poprečni presjek), pa se raspucavanjem dijelova stupa vrlo brzo može formirati mehanizam odnosno lokalna nestabilnost [10]. Sanacijama se može spriječiti potpuno raspucavanje stupova (primjer Kneževa dvora), ali problem (konstrukcijski nedostatak) ostaje pa sanirani stupovi opet prolaze isti proces raspucavanja.

Istraživanje uzroka problema s tradicijskim stupovima napravljeno je u nekoliko faza i ovaj se rad izravno nastavlja na postojeća istraživanja, a posebice na rad [5] u kojemu je opisana detaljna numerička i eksperimentalna analiza utjecaja kontaktnih napreznja na nosivost stupova, što je i definirano kao jedan od osnovnih uzroka raspucavanja. Primjenjujući pretpostavke iz prethodno navedenih istraživanja i postavke laboratorijskoga ispitivanja iz rada [5] u ovom će se radu prikazati rezultati jednoga načina sanacije koji predviđa postavljanje olovnoga umetka između dijelova stupa.

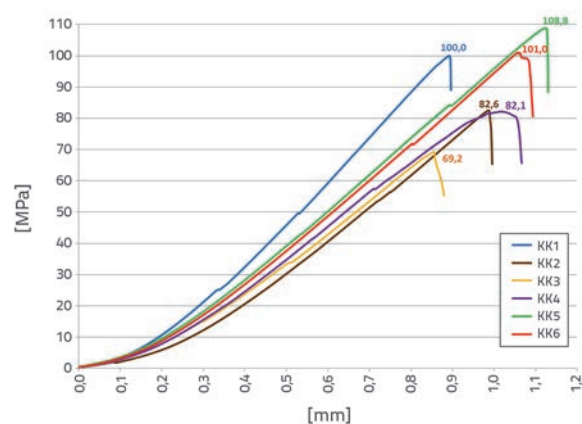
Olovni umetak svojim svojstvima može kompenzirati opisane probleme na kontaktnim ploham, odnosno spriječiti koncentracije napreznja. Opisani je način sanacije prihvatljiv multidisciplinarnom timu stručnjaka koji obično surađuje na radu na povijesnim konstrukcijama, a ako dodamo da je olovni umetak gotovo neprimjetan (između elemenata stupa) i da je zahvat reverzibilan, takva sanacija odgovara i suvremenim preporukama [11]. Osnovna je motivacija zadržati izvornu koncepciju konstrukcije (uključujući sve nosive elemente) i tradicijskim materijalima umanjiti teškoće vezane za koncentracije kontaktnih napreznja. Ipak, treba istaknuti da je sanacija olovnom umetkom samo jedna od mogućnosti jer nam danas suvremeni postupci omogućuju bolju razradu detalja. Posebno treba istaknuti eksperimentalna istraživanja [12] u kojima su analizirane razne mogućnosti povezivanja kontaktnih

ploha. Vjerujemo da će se istraživanja raznih inačica kamenih stupova nastaviti, jer su povijesne građevine od neprocjenjive vrijednosti.

2. Laboratorijska ispitivanja

2.1. Postavka laboratorijskih ispitivanja

Laboratorijska su ispitivanja ključna za interpretaciju ponašanja spojeva s obzirom na brojne slabo pouzdane ulazne parametre koje srećemo u analizama povijesnih konstrukcija. Problem je izražen jer destruktivne metode ispitivanja unutar povijesnih građevina nisu prihvatljive [10]. Za ispitivanja olovnoga umetka preuzete su postavke iz prethodne faze istraživanja u kojoj je analiziran utjecaj centričnoga i ekscentričnog opterećenja na kontaktna napreznja [5]. Postavka ispitivanja detaljno je opisana u [5], a ovdje će se za potrebe analiza i prikaza rezultata samo kratko opisati.



Slika 3. Dijagram ispitivanja tlačne čvrstoće

Uzorci su napravljeni od kamena tipa Korunito iz kamenoloma Piske na otoku Korčuli, pri čemu se posebna pažnja obratila na vađenje uzoraka (dubini i orijentaciji slojeva, tragovima vode, oštećenjima i slično) i na završnu obradu. Mehanička svojstva kamena određena su eksperimentalnim ispitivanjima tlačne čvrstoće, čvrstoće pri savijanju, modula elastičnosti te ispitivanjima parametara mehanike loma. Na slici 3. prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na uzorcima $5,0 \times 5,0 \times 5,0$ cm, a detaljni se prikaz eksperimentalnih rezultata može pronaći u radu [13].

Osmišljen je postupak ispitivanja (slika 4.) u kojemu se opterećenja unose preko čelične grede, jer se na temelju numeričkih provjera i usporedbe rezultata trodimenzijskoga numeričkog modela konstrukcije (slika 16.a) i modela ispitivanja (slika 16.b) pokazao najprihvatljivijim. Osnovna motivacija bila je vjerno simulirati ponašanje postojećih konstrukcija, odnosno osigurati što realističniju raspodjelu naprezanja na stupu. Također, trebalo je izmaknuti unos opterećenja (isključiti utjecaj) od kontaktnih ploha, a istodobno uzeti u obzir sigurnost pri ispitivanju, kontrolirani unos sile, jednostavnu montažu, ograničenja u laboratoriju i slično. Čelična greda (slika 4.) posebno je prilagođena za unos opterećenja univerzalnom tlačno-vlačnom prešom Zwick/Roell s dva hidraulična cilindra (*pistona*) pri čemu je jedan (kapaciteta ± 600 kN) postavljen na gredu iznad stupa (centrično), a drugi (kapaciteta oko 250 kN) u sredini raspona čelične grede (ekscentrično). Tijekom ispitivanja unos sile kontroliran je prirastom pomaka od 0,01 mm/s što je bitno za praćenje poslijekritičnoga ponašanja spoja, odnosno određivanja rezervi nosivosti pri raspucavanju.

Savijanjem čelične grede i upetim spojem grede s kapitelom (ostvarenim primjenom četiri vijka u epoksidnoj smoli) dobivamo rotaciju kapitela prema tijelu stupa, odnosno nalijeganje kapitela na jednu stranu presjeka (slika 2.c i slika 16.b). Dimenzije uzorka odabrane su prema udvojenim stupovima na katu Kneževa dvora u Dubrovniku (slika 2.b). Kapitel (promjera $d = 300$ mm, visine $h = 500$ mm) položen je na stup ($d = 250$ mm, $h = 1500$ mm), a međusobno su povezani čeličnim trnom ($d = 16$ mm, $h = 150$ mm) postavljenim

u otvore ($d = 19$ mm, $h = 100$ mm) u težištu poprečnih presjeka. Na isti je način stup povezan s bazom ($d = 300$ mm, $h = 200$ mm) koja leži na čeličnomu postolju [5]. Visina tijela stupa (od 1,5 m) oko pola je visine postojećih stupova, ali i to je bilo dovoljno da utjecaj rubnih uvjeta ne poremeti razdiobu naprezanja u području spoja, što je dokazano numeričkim proračunima.

Postavka ispitivanja uključuje mjerna mjesta (MM) za mjerenje pomaka i relativnih deformacija određena prema rezultatima numeričkih proračuna (slika 16.b). Induktivna osjetila LVDT (*engl. Linear Variable Differential Transformers*) različite baze upotrijebljena su za praćenje pomaka, a u prosjeku ih je bilo 15 (slika 4.). Raspodjela naprezanja u stupu dobivena je mjerenjem relativnih deformacija primjenom tenzometara postavljenih po plaštu stupa (slika 4.), a u proračunu je upotrijebljen sekantni modul elastičnosti ($E_0 = 62900$ MPa) dobiven iz eksperimentalnih mjerenja [13] prema normi HRN EN 14580:2008.

Mjerna su mjesta raspoređena u tri skupine (u prosjeku 20 tenzometara) po visini stupa: vrh stupa (VS), sredina stupa (SS) i dno stupa (DS), uz napomenu da su MM odmaknuta 10 cm od kontaktnih ploha. Takva je raspodjela bila dovoljna za interpretaciju raspodjele naprezanja uz dodatnu primjenu numeričkih modela, a pritom su izbjegnuta izravna mjerenja na kontaktnim plohamo koja bi mogla remetiti lokalno stanje naprezanja. Treba istaknuti da se postavka ispitivanja unaprijedivala [14] tijekom ispitivanja, a posebice poslije preliminarnih ispitivanja na istovjetnim betonskim uzorcima. U konačnici je postignuta zadovoljavajuća postavka ispitivanja koja je zajedno s pratećim numeričkim modelima dovoljna za aproksimaciju ponašanja stupa, što će biti prikazano u nastavku na odabranim primjerima ispitivanja.

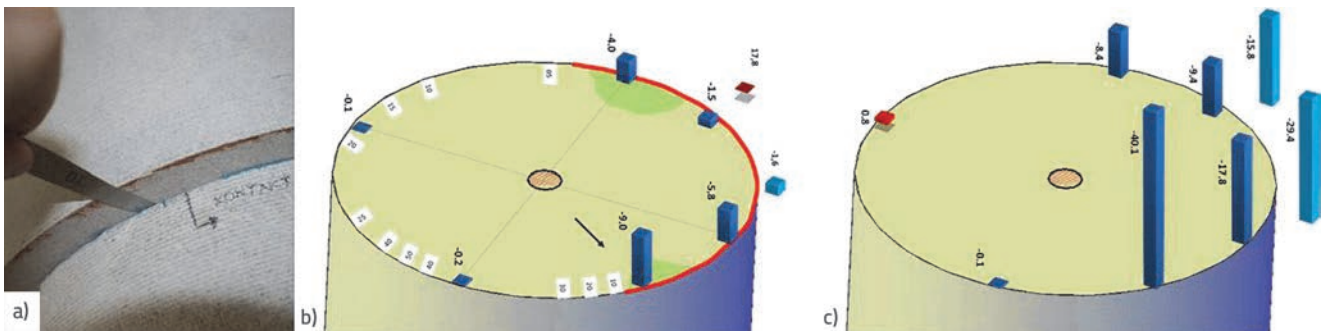
2.2. Postojeća laboratorijska ispitivanja bez olovnoga umetka

Prethodno provedena centrična i ekscentrična ispitivanja bez olovnoga umetka opisana su radu [5]. U ovom će se

odjeljku istaknuti neke posebitosti (na primjeru uzorka K3) nužne za analizu uloge olovnoga umetka, a pritom će se prikazati i neke dodatno provedene analize. Ispitivanja svih uzoraka započeta su unosom sile od 100 kN s centrično postavljenim hidrauličnim cilindrom iznad stupa, što je nazvano testnom fazom. Za tu se fazu očekivala barem približno jednolika raspodjela naprezanja po presjeku (oko 2,0 MPa), no nasuprot tome, unatoč strogim laboratorijskim uvjetima, pažljivim vađenjem i preciznom obradom uzoraka, dobivena je izrazito nejednolika raspodjela naprezanja (slika 5.b) što je bilo karakteristično i za sve ostale uzorke [13].



Slika 4. Postavka laboratorijskog ispitivanja na primjeru uzorka K5



Slika 5. a) Mjerenje odstupanja mjernim listićima; b) Vrijednosti naprezanja u VS za testnu fazu K3 [MPa]; c) Vrijednosti naprezanja u VS pri centričnom i ekscentričnom opterećenju [5]

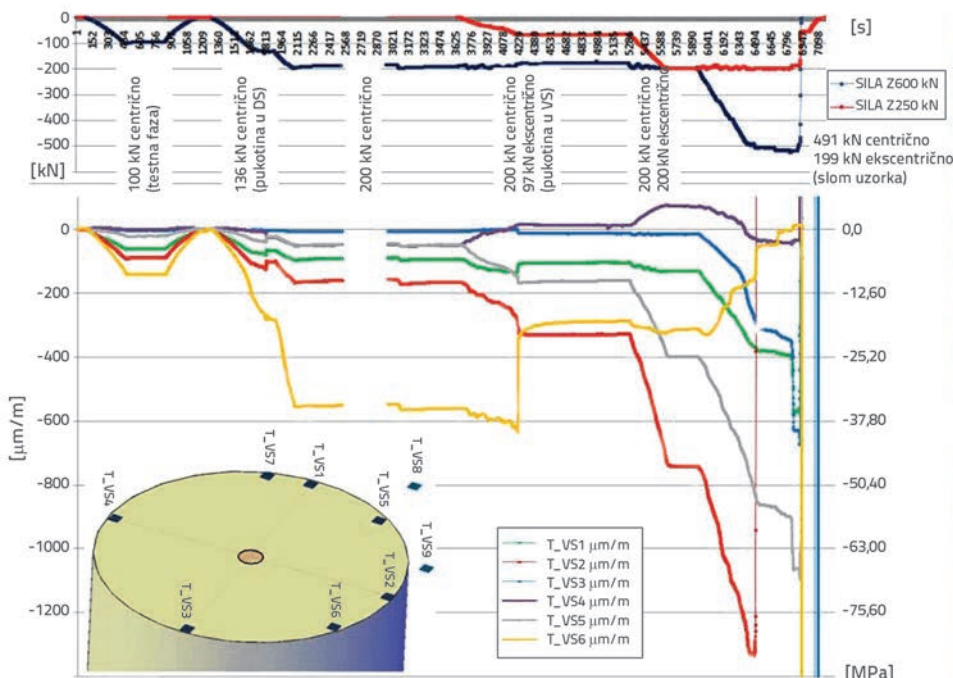
Takvo nepredviđeno ponašanje zahtijevalo je dodatna mjerenja da bismo uopće mogli interpretirati rezultate, odnosno povezati ih s rezultatima numeričkih modela. Jedno od mjerenja bila je provjera točnosti izvedbe kontaktnih ploha. Ona je provedena primjenom uređaja FaroArm [15], s kojim se ustanovilo postojanje neravnina manjih od 0,5 mm (točnost je uređaja 2/100 mm), odnosno nepravilni oblik kontaktnih ploha. Pokazalo se da su i tako male vrijednosti dovoljne da ne možemo osigurati jednoliko nalijeganje elemenata stupa, što su potvrdila i dodatna mjerenja odstupanja između kontaktnih ploha primjenom mjernih listića (slika 5.a). Vrijednosti odstupanja bila su do 1 mm (slika 5.b), ali ključno je bilo to da su se mogla jasno definirati područja ostvarenoga kontakta između elemenata stupa (označeno crvenom linijom na slici 5.b). Opisana su mjerenja pomogla interpretirati dobivene rezultate iz testne faze ispitivanja, odnosno, područja koncentracije naprezanja odgovarala su područjima utvrđenima mjernim listićima. Treba napomenuti da se uzorak ponekad dodatno "namjesti" neposredno nakon unosa sile, a površ svega treba u obzir uzeti neravnine na svim kontaktnim ploham (ukupno 6) odnosno "namještanje" uzorka u prostoru, što u konačnici uvijek rezultira određenom ekscentričnošću.

Za prikaz rezultata odabran je trodimenzijski shematski prikaz naprezanja dobivenih mjerenjem relativnih deformacija u tenzometrima 10 cm ispod ruba stupa, jer predočava i odnose naprezanja (plavom bojom su prikazana tlačna, a crvenom bojom vlačna naprezanja). Grubu procjenu utjecaja neravnina možemo dobiti ako usporedimo vršne vrijednosti koncentracije naprezanja (oko 9,0 MPa – slika 5.b) i prosječno naprezanje u slučaju kad bi razdioba naprezanja po presjeku bila jednolika (oko 2,0 MPa). Pri tome, treba uzeti u obzir da su mjerna mjesta odmaknuta za 10 cm od kontaktnih ploha, pa vrijednosti sadrže i raspodjelu naprezanja od područja koncentracije na kontaktnim ploham do mjernih mjesta (na plaštu stupa). Točniju procjenu stvarnih vrijednosti naprezanja na kontaktnim ploham možemo dobiti pomoću numeričkih modela (slika 16.c) u koje su uključene i vrijednosti mjerenih odstupanja između kontaktnih ploha. Uobičajeno je da vrijednosti koncentracije naprezanja (na kontaktnim ploham) u numeričkim modelima budu 2 do 3 puta veće od vrijednosti na mjernim mjestima (10 cm od kontaktne plohe),

što bi za primjer sa slike 5.b značilo da je najveće naprezanje na kontaktnoj plohi veće od 20,0 MPa (deset puta više od očekivanog).

Numeričkim modelima možemo dobiti dobru procjenu područja (površine) nalijeganja kontaktnih ploha poput onih na slici 5.b. (označeno zelenom bojom), ali i raspodjelu naprezanja po cijelom uzorku (slika 16.c). Nejednoliko nalijeganje, odnosno čak i neznatna odstupanja znače da se neće aktivirati cijeli presjek stupa pri prijenosu opterećenja, već će se stvarati mala područja koncentracije naprezanja. Koncentracije kontaktnih naprezanja prouzročile su pojavu prve pukotine pri sili u centrično postavljenu hidrauličnom cilindru između 136 i 297 kN za sve ispitane uzorke bez olovnoga umetka. Očito je da se početna odstupanja prilikom nalijeganja elemenata ne mogu svladati na drugi način, već da koncentracije naprezanja u konačnici dovode do stvaranja pukotina. S obzirom na rezerve nosivosti, preraspodjelom naprezanja (unutar presjeka) stup zadržava nosivost, ali i takvo pukotinsko stanje može postati opasno pri djelovanju (superpoziciji) ostalih opterećenja (poglavlje 2.) te zato što mogu otpasti raspucali dijelovi stupa.

Sve prethodno navedeno odnosi se na probleme pri djelovanju približno centričnoga opterećenja (centrično postavljen hidraulični cilindar), a na to treba superponirati i utjecaj ekscentričnoga opterećenja (ekscentrično postavljen hidraulični cilindar) koje u pravilu djeluje značajno nepovoljnije. Utjecaj ekscentričnoga opterećenja također izravno ovisi o neravninama kontaktnih ploha, jer kapitel pri djelovanju ekscentričnoga opterećenja u pravilu dodatno naliježe na jedno od početno određenih područja nalijeganja i uzrokuje izrazite koncentracije naprezanja. Ovisno o početno ostvarenim koncentracijama, ekscentrično opterećenje može rasterećivati područje koncentracije, dodatno povećavati koncentraciju naprezanja ili uzrokovati širenje već postojećih pukotina. Bitno je istaknuti da i neznatna promjena kuta od 0,03° do 0,2° uzrokuje nalijeganje na jednu stranu presjeka (slika 5.c) i stvaranje izrazitih koncentracija, što vrlo brzo rezultira otvaranjem novih pukotina i u konačnici potpunim slomom stupa (karakteristično ponašanje svih uzoraka). Ekscentrično opterećenje uzrokuje "brže" priraste naprezanja, što se može jasno vidjeti na dijagramu ispitivanja uzorka K3. Dijagram na slici 6. pokazuje vrijednosti centričnoga (SILA Z600 – označeno plavom



Slika 6. Dijagram ispitivanja uzorka K3 – relativne deformacije (naprezanja) u vremenu s prikazom tijeka unosa opterećenja za mjerno mjesto vrh stupa (VS) s fotografijama otvaranja pukotina u VS i DS

bojom) i ekscentričnog (SILA Z250 - označeno crvenom bojom) opterećenja, uključujući oznake karakterističnih faza ispitivanja. Također, prikazane su vrijednosti relativnih deformacija (niz vrijednosti lijevo) odnosno pripadnih naprezanja (niz vrijednosti desno) za mjerna mjesta u vrhu stupa (VS) koja su raspoređena prema priloženoj shemi. Na dijagramu ispitivanja (slika 6.) mogu se jasno pratiti promjene na mjernim mjestima u ovisnosti o razini opterećenja, primjerice otvaranje pukotina, karakteristična preraspodjela naprezanja po presjeku (nakon otvaranja pukotine) i u konačnici slom uzorka (slika 7.).

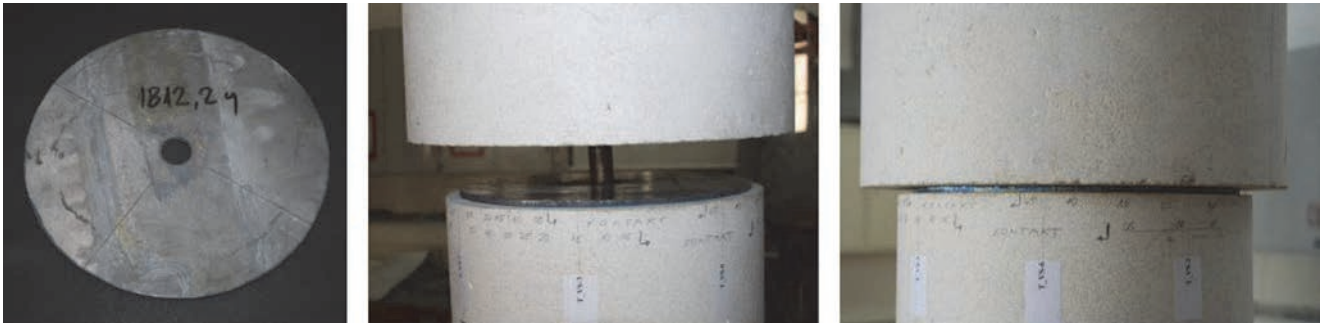
mjernoga mjesta T_VS2 (očekivano mjesto nalijeganja kapitela na rub stupa) prikazuju jasan utjecaj ekscentričnoga opterećenja i ističu područje na kojemu se stup u konačnici rascijepio. Treba istaknuti da se za primjer uzorka K3 raspored mjernih mjesta nešto razlikuje u odnosu na opisane postavke ispitivanja, jer je prilagođen mjerenjima odstupanja između kontaktnih ploha. Također, pri analizi rezultata bitno je imati na umu da je u zadnjim stadijima ispitivanja uzorak već značajno raspucan. Detaljna obrada rezultata ispitivanja uzorka K3 je opisana u radu [5].

Tijekom ispitivanja ostalih uzoraka upotrijebljeni su različiti načini opterećivanja kojima se testirao utjecaj kontaktnih naprezanja na centrično opterećenje (do 500 kN u centrično postavljenu hidrauličnom cilindru), kombinaciju centričnoga i ekscentričnoga opterećenja (200 kN u centričnom i 200 kN u ekscentrično postavljenu hidrauličnom cilindru), samo ekscentričnoga opterećenja (do 200 kN u ekscentrično postavljenu hidrauličnom cilindru) itd. Svi uzorci bez olovnoga umetka, pri vrijednostima centričnoga opterećenja od 500 kN i ekscentričnoga opterećenja od 200 kN, značajno su raspucali ili su izgubili nosivost (slika 7.). Treba istaknuti da centrična sila od 500 kN predstavlja oko 11% idealne nosivosti (nosivost idealnoga presjeka na centrični tlak uz pretpostavku jednolike razdiobe naprezanja), što otprilike odgovara pretpostavljenoj iskoristivosti tradicijskih kamenih stupova (oko 10%) [16]. Zaključno, postojeća istraživanja pokazuju da je problem s kontaktnim naprezanjima ponajprije uzrokovan nejednolikim nalijeganjem elemenata stupa, a posebice dolazi do izražaja pri djelovanju ekscentričnoga opterećenja. Može se povezati da je to "konstrukcijski nedostatak" koji su isticali stari graditelji, tako da postupak sanacije mora uključivati rješenje za ova dva istaknuta problema.



Slika 7. Uzorci K1, K2, K3 i K6 nakon sloma

Za ilustraciju se mogu pratiti rezultati mjernoga mjesta T_VS6 (mjesto najveće koncentracije naprezanja za testnu fazu) na kojemu je zbog nejednolikoga nalijeganja došlo do otvaranja pukotine već pri centričnom opterećenju. Također, rezultati

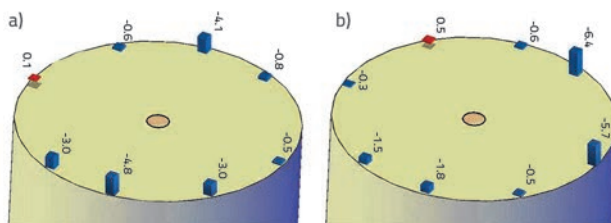


Slika 8. Olovni umetak i postavljanje umetka u vrhu stupa za uzorak K5

2.3. Laboratorijska ispitivanja uzorka s olovnim umetkom

2.3.1. Ispitivanje uzorka s olovnim umetkom

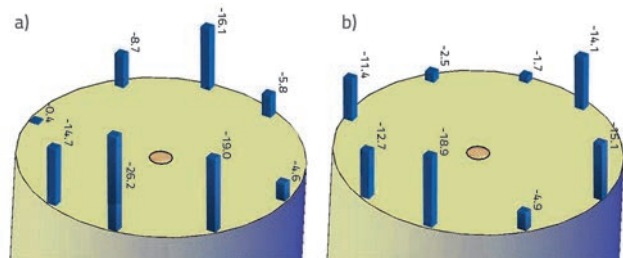
Ispitivanje uzorka s olovnim umetkom bit će opisano na primjeru uzorka K5 koje je provedeno prema prethodno opisanim postavkama ispitivanja. Olovni umetak promjera 23 cm i debljine 4 mm postavljen je između kontaktnih ploha elemenata stupa (slika 8.), odnosno kao spoj tijela stupa s kapitelom i bazom. Bitno je istaknuti da je polumjer olovnoga umetka 1 cm manji od polumjera stupa, jer je zamisao osigurati nalijeganje bliže osi stupa (odmaknuti od samog ruba) i osigurati se s obzirom na nepoznato ponašanje olova pri ovakvom specifičnom opterećenju, ali i ostalim opterećenjima poput temperature, cikličkog opterećenja i slično. Manji polumjer dopušta olovu širenje i bolju prilagodbu neravninama na kontaktnim ploham, a može se po potrebi (primjerice konzervatora) učiniti nevidljivim. Zbog olovnoga umetka nije provedeno uobičajeno mjerenje odstupanja mjernim listićima, ali nejednoliko se nalijeganje moglo uočiti i vizualnim pregledom. Uobičajenu nepravilnu raspodjelu naprezanja potvrdili su rezultati testne faze ispitivanja (slika 9.), u kojoj se za VS ističu dva izrazita područja nalijeganja na suprotnim stranama presjeka, a za DS dominantno nalijeganje na jednu stranu presjeka. Vrijednosti naprezanja manja su u odnosu na sve ostale uzorke, što se može pripisati ulozi olovnoga umetka.



Slika 9. Testna faza ispitivanja uzorka K5 s olovnim umetkom: a) vrijednosti naprezanja u VS [MPa], b) vrijednosti naprezanja u DS [MPa]

Ispitivanje je nastavljeno s unosom opterećenja do 500 kN (u centrično postavljenom hidrauličnom cilindru) radi testiranja učinka olovnoga umetka na probleme nalijeganja elemenata

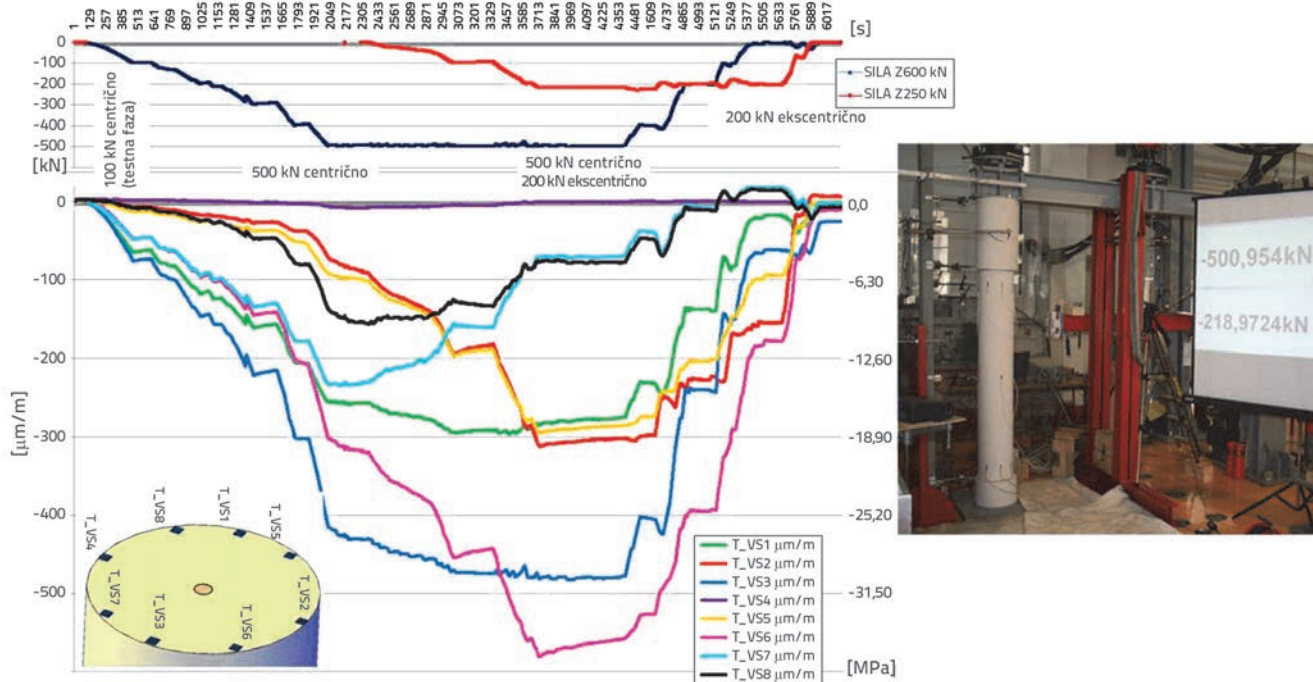
stupa (neravnine kontaktnih ploha). Prikazani rezultati ispitivanja (slika 10.) pokazuju vrlo ravnomjernu raspodjelu naprezanja u odnosu na ostale uzorke [13], odnosno ne ističe se područje izrazite koncentracije naprezanja. Štoviše, rezultati numeričkih analiza pokazali su da je prikazana raspodjela naprezanja moguća jedino uz 4 podjednaka područja oslanjanja, što nije bio slučaj za ostale uzorke.



Slika 10. Faza ispitivanja pri centričnoj sili od 500kN za uzorak K5 s olovnim umetkom: a) vrijednosti naprezanja u VS [MPa], b) vrijednosti naprezanja u DS [MPa]

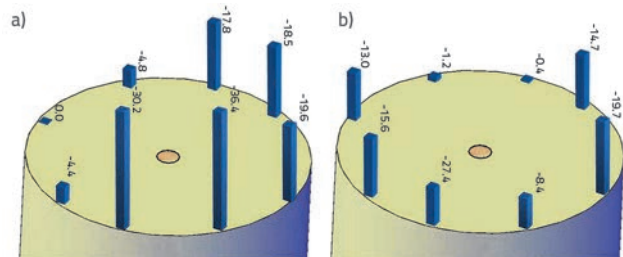
"Pravilnije" ponašanje možemo primijetiti i na dijagramu ispitivanja (slika 11.) u kojemu se ističe ravnomjerniji i blaži prirast naprezanja po mjernim mjestima. Najveći se prirast može primijetiti za mjesto T_VS3, ali bez značajnije razlike prema ostalim mjernim mjestima. Takve rezultate možemo pripisati utjecaju umetka, odnosno može se zaključiti da su svojstva olovnoga umetka omogućila uzorku da se prilagodi neravninama kontaktnih ploha, ali bez raspucavanja.

Ispitivanje je nastavljeno s unosom ekscentričnoga opterećenja (hidrauličnim cilindrom na sredini čelične grede), čime je prouzročeno nalijeganje kapitela na rub stupa. Rotacija kapitela u odnosu na os mogla se vizualno primijetiti, a i rezultati gotovo svih mjernih mjesta prikazivali su vrlo pravilnu preraspodjelu naprezanja prema rubu poprečnoga presjeka u VS (slika 12.a). To su potvrdile i promjene relativnih deformacija (naprezanja) na dijagramu ispitivanja (slika 11.), u kojemu se može uočiti razmjerno brz prirast naprezanja za mjerna mjesta u okolici očekivanoga kontakta (T_VS2, T_VS5 i T_VS6), ali i izrazita pravilnost (u odnosu na ostale uzorke) te ravnomjernija raspodjela naprezanja (na šire područje). Za mjesto T_VS3, koje je istaknuto kao kritično pri djelovanju centričnoga opterećenja, može se primijetiti određena stagnacija budući da



Slika 11. Dijagram ispitivanja uzorka K5 – relativne deformacije (naprezanja) u vremenu s prikazom tijeka unosa opterećenja za mjerno mjesto vrh stupa (VS) i slika završne faze ispitivanja

se ne nalazi blizu očekivanoga kontakta. Rezultati za dno stupa (slika 12.b), osim utjecaja ekscentričnog opterećenja, imaju i mali doprinos "namještanja" uzorka u prostoru radi neravnih ploha.



Slika 12. Faza ispitivanja pri centričnoj sili od 500kN i ekscentrilnoj sili od 200kN za uzorak K5 s olovnim umetkom: a) vrijednosti naprezanja u VS [MPa], b) vrijednosti naprezanja u DS [MPa]

Možemo zaključiti da je olovni umetkom dokazano bolje ponašanje stupa pri ekscentričnim opterećenjima zbog širega područja nalijeganja, posebice jer je umetak bio "uvučen" (manjega radijusa od radijusa stupa), čime je spriječena pojava koncentracija na rubu, odnosno područje oslanjanja "premjestilo" se prema sredini presjeka (osi presjeka) na veću površinu. Detaljnim pregledom rezultata za sva mjerna mjesta ne može se uočiti možebitno popuštanje i preraspodjela naprezanja unutar presjeka. Također, vizualnim pregledom uzorka nakon ispitivanja nije uočena niti jedna pukotina, što znači da je uzorak podnio maksimalna opterećenja u prešama (slika 11.) koja su za ostale uzorke bila kritična (slika 7.). Pregledom olovnoga umetka nakon ispitivanja

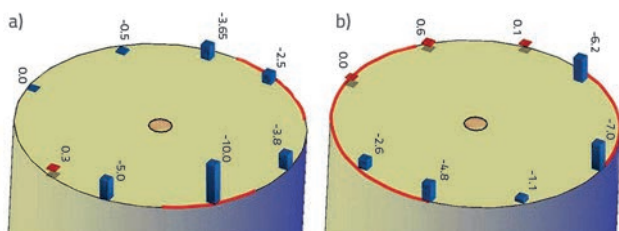
uočene su lokalne deformacije po cijeloj plohi i jedno izrazito mjesto nagnječenja koje odgovara položaju nalijeganja kapitela na rub stupa. Bitno je istaknuti da se kapitel zbog ekscentričnoga opterećenja zarotirao u odnosu na tijelo stupa za svega 0,17°, što se poklapa s vrijednostima kod ostalih uzoraka [13], a i s postojećim istraživanjima [6]. Radi dodatne analize u posljednjoj fazi ispitivanja stup se opteretio samo s ekscentričnim opterećenjem (201,9 kN) i unesenim kutom od 0,362°, ali bez ikakvih posljedica za ispitani uzorak (slika 11.). Zaključno, nedvojbeno se može potvrditi da olovni umetak svojim svojstvima (ponajprije podatljivošću) ima povoljno djelovanje (utiskuje se odnosno prilagođava se neravninama) za kompenziranje neravnina na kontaktnim ploham a odnosno nejednolikoga nalijeganja elemenata stupa omogućivši veću površinu nalijeganja. Slično se može zaključiti i za djelovanje ekscentričnoga opterećenja, jer je prilikom nalijeganja kapitela na rub stupa omogućena veća površina nalijeganja, a s obzirom na predviđene razine sila to je dovoljno da se spriječi pojava značajnijih koncentracija naprezanja koje bi uzrokovale raspucavanje.

2.3.2. Ispitivanje uzorka nakon uklanjanja olovnog umetka

Isti uzorak (K5) ponovno je ispitan nakon što je uklonjen olovni umetak koristeći se istim postavkama eksperimenta (osim manjih prilagodbi visine zbog uklanjanja olovnoga umetka). Također, ponovljena je ista procedura ispitivanja s početnim unosom sile od 500 kN preko centrično postavljenoga

hidrauličnog cilindra. Ovim se ispitivanjem tražila konačna potvrda utjecaja olovnoga umetka, ali i potvrda rezultata svih ostalih ispitivanja u kojima su istaknuti problemi koncentracija naprezanja na kontaktnim ploham.

Već za testnu fazu ispitivanja prema rezultatima za vrh stupa (VS) istaknuta su dva izrazita područja nalijeganja kapitela na tijelo stupa (slika 13.a), što je karakteristično i za ostale uzorke bez olovnoga umetka. Jedno mjesto nalijeganja na rubu je stupa (najveći prirast naprezanja), a drugo je unutar presjeka, što je potvrđeno numeričkim analizama. Dva su se područja oslanjanja istaknula i za dno stupa (DS), ali za razliku od VS bez izrazitih koncentracija naprezanja (slika 13.b). Područja oslanjanja približno odgovaraju mjerenim odstupanjima između kontaktnih ploha (mjernim listićima), uz uobičajeno manje "namještanje" uzorka nakon unosa opterećenja.

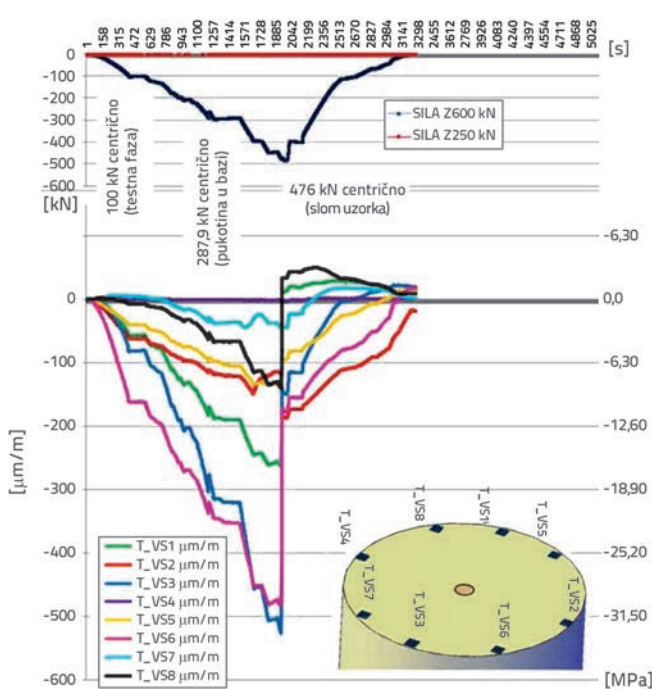


Slika 13. Testna faza ispitivanja uzorka K5 bez olovnoga umetka: a) vrijednosti naprezanja u VS [MPa], b) vrijednosti naprezanja u DS [MPa]

Prvo otvaranje vidljive pukotine (slika 14.) uočeno je na bazi za centričnu silu od 287,9 kN, a isto su registrirala gotovo

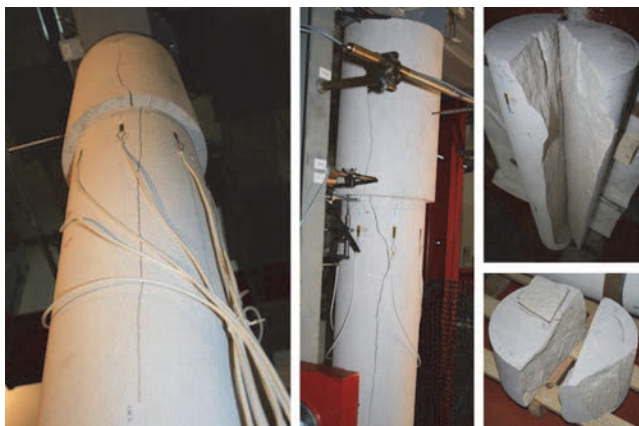
sva mjerna mjesta (posebice u DS). Detaljna analiza rezultata numeričkih modela i eksperimentalnih ispitivanja upućuje na to da je vrh pukotine nastao na kontaktu tijela stupa i baze. Nakon otvaranja pukotine nastala je uobičajena preraspodjela naprezanja [5] ponajprije na kontaktu tijela stupa i baze, ali može se primijetiti i na mjernim mjestima za VS (slika 14.), što je uobičajeno ponašanje radi "namještanja" uzorka.

Ispitivanje je nastavljeno te pri centričnoj sili od 476,2 kN dolazi do rascjepjenja uzorka (slika 14.), nakon čega je prekinuto ispitivanje. Pukotina se otvorila gotovo po sredini poprečnoga presjeka i bila je vidljiva s obje strane stupa (slika 15.), a protezala se više od polovice visine stupa. Otvaranje pukotine odgovara rezultatima mjerenja za VS (slika 14.), odnosno izravna su posljedica koncentracija naprezanja u blizini mjernih mjesta T_VS3 i T_VS6 te oslanjanja unutar presjeka stupa, što se pokazalo na MM T_VS1, a potvrdilo numeričkim proračunima. Analiza raspodjele naprezanja prije i poslije rascjepjenja stupa pokazuje preraspodjelu unutar poprečnoga presjeka i otkriva da je uzorak zadržao ravnotežu oslonivši se uglavnom na jednu stranu presjeka. Bitno je istaknuti da svaka polovica rascjepljenoga uzorka ima dovoljno površine da prihvati centrično opterećenje od 500 kN, odnosno moguće je da uzorak "pronađe" novo područje oslanjanja odnosno novo ravnotežno stanje za preuzimanje opterećenja. Preraspodjele naprezanja unutar presjeka (nakon otvaranja pukotine) kojima stup zadržava nosivost sve do potpunog gubitka stabilnosti možemo definirati kao karakteristično ponašanje, jer se može uočiti na svim ispitanim uzorcima. Prije rastavljanja uzorka napravljena su dodatna testiranja (nebitna za prikazane rezultate) pri



Slika 14. Dijagram ispitivanja uzorka K5 (bez olovnoga umetka) – relativne deformacije u vremenu s prikazom tijeka unosa opterećenja za mjerno mjesto vrh stupa (VS) i s fotografijama otvaranja pukotina u VS i bazi

kojima se tijelo stupa u konačnici potpuno rascijepilo, ali i baza stupa prema prvoj otvorenoj pukotini (slika 15.). Zaključno, uklanjanjem olovnoga umetka opet su došle do izražaja izrazite koncentracije naprezanja (uključujući brzi prirast naprezanja) na kontaktnim plohama koje uzrokuju otvaranje pukotina i u konačnici slom uzorka.



Slika 15. Pukotina s obje strane uzorka K5 bez olovnoga umetka te rascijepljanje tijela i baze stupa nakon rastavljanja

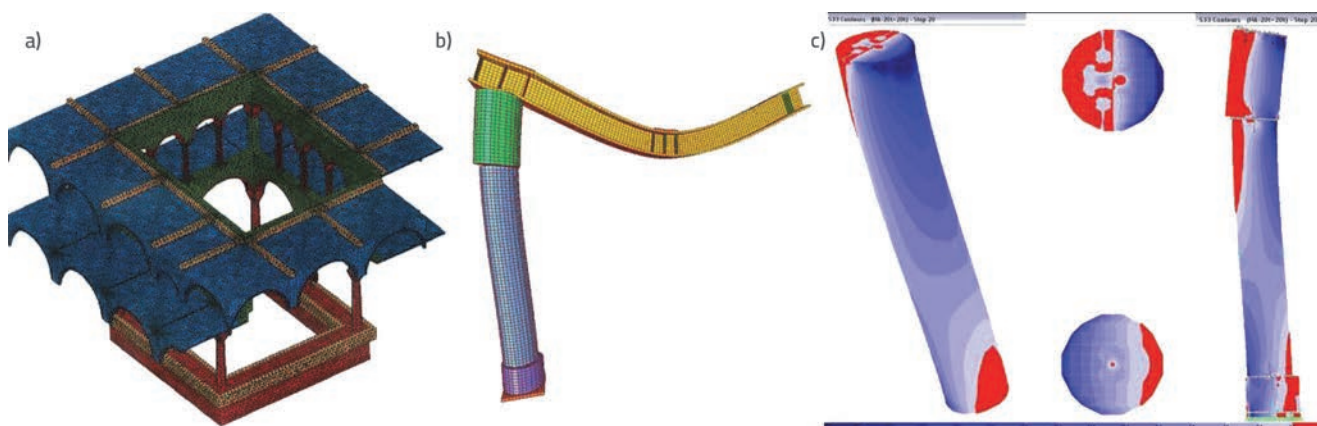
3. Numeričke analize

3.1. Numerički pristupi problemu

Numeričke su analize ključne za interpretaciju rezultata laboratorijskih ispitivanja, aproksimaciju ponašanja spojeva i pukotinskoga stanja te u konačnici za procjenu nosivosti. Štoviše, numeričke su analize odigrale glavnu ulogu u početnom otkrivanju slabosti spojeva [6] pri ekscentričnom opterećenju, što je potaklo detaljnija istraživanja. U ovom je odjeljku dan uvid u preliminarno numeričko ispitivanje utjecaja olovnoga uzorka na nosivost tradicijskoga stupa. Prikazani modeli i rezultati dio su opsežnoga istraživanja, pa će se na početku ukratko opisati dosad primijenjeni različiti numerički pristupi.

Uzroci problema s tradicijskim stupovima definirani su s pomoću numeričkoga modela atrija Kneževa dvora u Dubrovniku (slika 16.a), napravljenoga u programskim paketima FEAP 7.4 [17] i GID 6.1.2a [18], koji su bili dodatno nadopunjeni izvornim rutinama za isključenje konačnoga elementa, čime se dobio bolji opis ponašanja u blizini spojeva [6]. Novije numeričke analize bile su više usmjerene na modeliranje samoga spoja modelima različite složenosti, kojima su se povezivali rezultati istraživanja s postojećim konstrukcijama [19].

Laboratorijska su ispitivanja od početnih faza planiranja i testiranja poduprta modelima napravljenima u programskom paketu SAP2000 [15]. Model laboratorijskoga ispitivanja (slika 16.b) detaljno je opisan u radu [5], a u konačnici je upotrijebljen za kontrolu ispitivanja, interpretaciju rezultata i kalibraciju globalnih modela. Ključno je da se prilagodbom elemenata unutar programskoga paketa SAP uspješno modeliralo ponašanje spojeva odnosno relativna rotacija između elemenata stupa (modeliranih volumnim konačnim elementima) i nalijeganje na jednu stranu presjeka. Opisano nelinearno ponašanje definirano je s pomoću elemenata veze (engl. *link*) među čvorovima modela (kontaktnih ploha) prema teorijskoj podlozi koju su definirali Wen (1976.) odnosno Park, Wen i Ang (1986.) i nadopunili od Nagarajaiah, Reinhorn i Constantinou [20]. Karakteristična raspodjela naprezanja uzrokovana nalijeganjem kapitela na rub stupa prikazana je na slici 16.c. Rezultati prikazuju koncentraciju tlačnih trajektorija na rubu presjeka (nijanse plave boje) te raspodjelu naprezanja od područja koncentracija na kontaktnim plohama do mjernih mjesta. Naknadno otkriveni problem nejednolikoga nalijeganja kontaktnih ploha obuhvaćen je u modelima tako da su svojstva elemenata veze sadržavala i izmjerene vrijednosti odstupanja (razmaka između kontaktnih ploha). To je bilo ključno za točniju aproksimaciju ponašanja spoja i interpretaciju rezultata ispitivanja. Kao što je istaknuto u prethodnom odjeljku, mjerenjima relativnih deformacija ne mogu se dobiti točne vrijednosti koncentracija naprezanja na kontaktnim plohama, ali uz pomoć dobro kalibriranih numeričkih modela može se napraviti pouzdana ekstrapolacija.



Slika 16. a) Numerički model Kneževa dvora [10]; b) Numerički model ispitivanja - deformirano stanje pri ekscentričnom opterećenju [19]; c) Raspodjela naprezanja po tijelu stupa, kontaktnim plohama i u vertikalnom presjeku kroz os stupa [5]

Bitno je istaknuti da rezultati modela s volumnim konačnim elementima i elementima veze potvrđuju nužnost detaljnih modela za realni opis ponašanja stupova [5]. Ipak, opisanim je modelom zadovoljavajuće aproksimirano ponašanje stupa tijekom eksperimenta, ali samo za početne faze ispitivanja. Sljedeća faza numeričkog istraživanja obuhvaća formiranje numeričkoga modela koji je u stanju pratiti proces otvaranja i razvoja pukotina u kamenu, a u nastavku će se prikazati dio rezultata s težištem na numeričke analize kojima je potvrđeno povoljno djelovanje olovnoga umetka.

3.2. Numeričko ispitivanje utjecaja olovnoga umetka

3.2.1. Opis numeričkoga modela

U ovom su odjeljku izdvojeni numerički proračuni i rezultati koji su dio širega istraživanja. Prikazat će se razvoj pukotina na kontaktnim površinama zbog centričnoga i ekscentričnog opterećenja kamenih blokova te detaljnije analizirati povoljno djelovanje olovnoga umetka. Analize su provedene programskim paketom Abaqus Standard, a radi izrazite složenosti modela izdvojeni su rezultati ispitivanja dobiveni na testnom uzorku koji dovoljno dobro aproksimira opisano karakteristično ponašanje. Testni uzorak čine dva kamena bloka u obliku valjka, promjera 25 cm i visine 15 cm (slika 17.). Model je manjih dimenzija u odnosu na laboratorijske uzorke zbog izrazite složenosti mehanizma otkazivanja. Uostalom, osnovni je cilj kvalitativno prikazati način otkazivanja i učinak olovnoga umetka. Prema analogiji s eksperimentima, napravljene su numeričke provjere na dva osnovna tipa modela. Kod prvoga je kontakt između dva kamena ostvaren izravnim oslanjanjem jedne neravne plohe na drugu, dok je u drugomu tipu modela između neravnih ploha postavljen olovni umetak debljine 10 mm i promjera 25 cm. Nastojalo se neravnine kontaktnih ploha što vjernije opisati, pa su one umjetno definirane presijecanjem jednoga komada neravnom plohom (slika 17.a). Budući da dva presječena bloka savršeno odgovaraju jedan drugomu, neravnomjerno je nalijeganje dobiveno rotacijom gornjega kamena oko uzdužne osi za određeni kut (15°, 30°, 45°). Najveća vrijednost odstupanja između kontaktnih ploha iznosila je 2 mm, što je više od vrijednosti dobivenih u laboratoriju.

Za materijalni je model kamena upotrijebljen model CDP (*engl.* Concrete Damage Plasticity) u programskom paketu Abaqus

(utemeljen na metodi konačnih elemenata) koji dobro opisuje ponašanje kamena pri statičkom opterećenju. Odabranim se modelom mogu dovoljno dobro (s obzirom na raspoložive podatke) opisati mehanizmi otkazivanja sustava od dva kamena bloka pri složenu stanju naprezanja. U testnoj fazi izrade modela primijenjen je pristup XFEM (*engl.* Extended Finite Element Analysis), te razni materijalni modeli utemeljeni na krhkom otkazivanju elemenata (*engl.* brittle failure), ali se pokazalo da njihova primjena nije moguća kod izrazito složenoga stanja naprezanja u kojemu dominira tlak lokaliziran na malom području. Također, model CDP dobro je testiran i dokumentiran na elementima od narmiranog betona, a ponašanje ima dodirnih točaka s kamenom. Uostalom, za preliminarne su eksperimente upotrijebljeni uzorci od narmiranoga betona [13].

Materijalni model kamena (CDP) pretpostavlja dva tipa mehanizma sloma, a to su vlačno raspucavanje i drobljenje materijala u tlaku (posmično omekšavanje nije uzeto u obzir). U tlaku je veza naprezanja i deformacija linearna do naprezanja σ_{co} , koje predstavlja inicijalno popuštanje. Nakon toga slijedi očvršćenje do maksimalnoga naprezanja σ_{cu} , nakon čeka pak slijedi omekšavanje materijala. Ponašanje materijala pri jednoosnomu tlaku izvan elastičnoga područja definirano je neelastičnom deformacijom ϵ_{cin} koja se računa kao ukupna deformacija umanjena za vrijednost elastične deformacije neoštećenoga materijala $\epsilon_{cin} = \epsilon_c - \epsilon_{ocel}$, gdje je $\epsilon_{ocel} = \sigma_c / E_o$. Pri vlačnomu naprezanju model slijedi linearnu vezu do loma σ_{to} , koji odgovara pojavi pukotine u materijalu. Nakon toga dolazi do omekšavanja s lokalizacijom deformacija u elementu. Ponašanje u raspucanom stanju podrazumijeva definiranje poslijekritičnoga naprezanja kao funkcije ovisne o pukotinskim deformacijama ϵ_{tck} (*engl.* *cracking strain*). Pukotinska se deformacija definira kao ukupna deformacija umanjena za vrijednost elastične deformacije neoštećenoga materijala $\epsilon_{tck} = \epsilon_t - \epsilon_{otel}$, gdje je $\epsilon_{otel} = \sigma_t / E_o$. Ponašanje materijala u vlaku može se opisati vezom između naprezanja i deformacija ili kriterijem energije loma. Pristup preko veze naprezanja i deformacija može prouzročiti pretjeranu osjetljivost mreže kod materijala s izrazito nestabilnim poslijekritičnim ponašanjem. Ovdje je upotrijebljen pristup primjenom energije loma, a to je energija potrebna za otvaranje jediničnoga područja pukotine i predstavlja svojstvo materijala (površina poslijekritičnoga područja



Slika 17. a) Geometrija uzorka i neravnine na kontaktnim ploham, b) numerički model uzorka

$\sigma - \epsilon$ krivulje materijala). Laboratorijskim je ispitivanjem utvrđena energija loma kod kamenih uzoraka od 0,1 J. Funkcija plohe popuštanja definirana je prema Lublineru [21] i modificirana prema Leeu i Fenvesu [22] uzimajući u obzir različito ponašanje pri tlaku i vlaku. Razvoj plohe popuštanja kontroliraju varijable očvršćivanja ϵ_{tpi} i ϵ_{cpi} povezane s vlačnim odnosno tlačnim stanjem naprezanja. Osnovni podaci za model materijala dobiveni su laboratorijskim ispitivanjem na uzorcima kamena, pri čemu je određen modul elastičnosti ($E_0 = 62900$ MPa), te vlačna ($\sigma_t = 17$ MPa) i tlačna čvrstoća ($\sigma_c = 92$ MPa). Pretpostavljen je elastoplastični materijalni model olova. Do granice tečenja ponašanje je linearno elastično, određeno modulom elastičnosti $E = 16000$ MPa, Poissonovim koeficijentom $\nu = 0,44$ i granicom tečenja $f_v = 10,2$ MPa. Poslijekritično ponašanje definirano je odnosom stvarnoga naprezanja i plastičnih deformacija. Treba naglasiti da taj model ne opisuje u potpunosti ponašanje olova koje se nalazi u izrazito složenom stanju naprezanja, uz pojavu jako velikih plastičnih deformacija materijala u tlaku, pri čemu pojava puzanja olova pri dugotrajnom opterećenju nije uzeta u obzir.

Karakteristike kontakta među kamenim blokovima definirane su u tangencijalnom i normalnom smjeru. U tangencijalnom smjeru pretpostavljeno je trenje koeficijenta 0,2, a primijenjena je i Penalty (*engl.*) formulacija kinematičkog ograničenja. U smjeru normale pretpostavljen je kruti kontakt s mogućim odvajanjem ploha. Kod modela s umetcima također su definirana svojstva kontakta kamena i olovnoga umetka s mogućim odvajanjem kontaktnih ploha, bez mogućnosti prodora jednoga materijala u drugi.

Mreža konačnih elemenata formirana je heksaedrima približno jednake veličine i pravilnih oblika (slika 17.b). Duljina stranice elementa je oko 10 mm, a mreža je usklađena s ponašanjem materijala u poslijekritičnom vlačnom području u kojemu je sustav nestabilan i postaje osjetljiv na izbor mreže.

Proračun je proveden u dvije faze. U prvoj je fazi modelirano početno nalijeganje kamenih blokova u kojoj se gornji blok

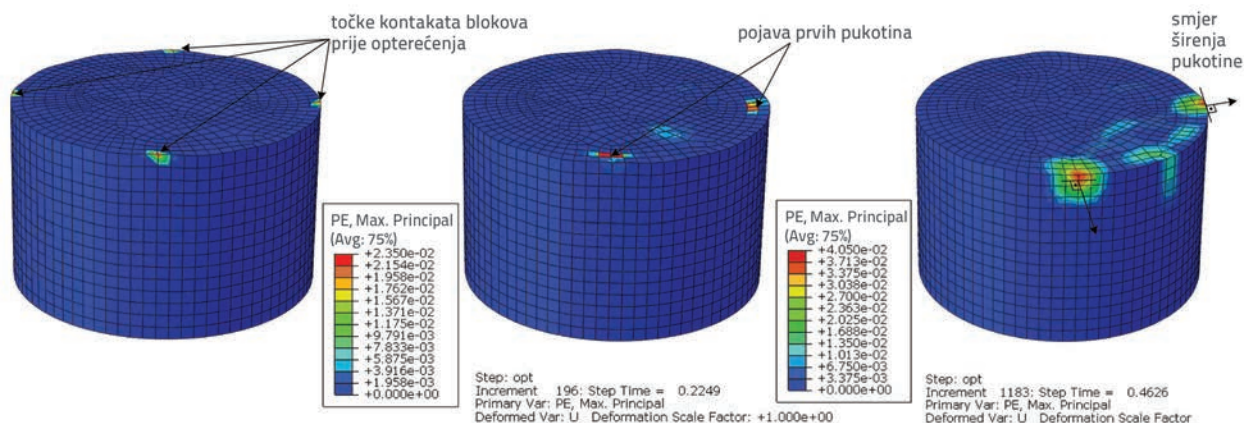
slobodno spustio na donji. Uobičajeno, kontakt između blokova ostvario se na tri do četiri mjesta, što odgovara mjerenjima, a ovisi o neravninama kontaktnih ploha. Budući da za gornji blok nije definiran nikakav rubni uvjet, može se slobodno namjestiti na donji blok i zauzeti položaj statičke ravnoteže. U drugoj se fazi nanosi prisilni pomak točke na vrhu gornjega bloka, postavljene 50 mm ekscentrično u odnosu na os bloka. Numerički je proračun proveden metodom Newton-Raphson s kontrolom pomaka, pri čemu je problem analiziran kao statički. Maksimalna je veličina koraka 0,01, a minimalna je veličina 10^{-13} , što je potrebno kod proračuna u nestabilnom (vlačnom) području nakon otvaranja pukotine.

U nastavku su izdvojeni karakteristični rezultati modela bez olova i s olovom te analiza rezultata za opisani testni model. Dodatni je razvoj modela planiran u sljedećim fazama istraživanja, ali treba istaknuti da unatoč navedenim ograničenjima testnoga modela rezultati odgovaraju karakterističnom ponašanju uočenom tijekom eksperimentalnih ispitivanja.

3.2.2. Rezultati - model bez olova

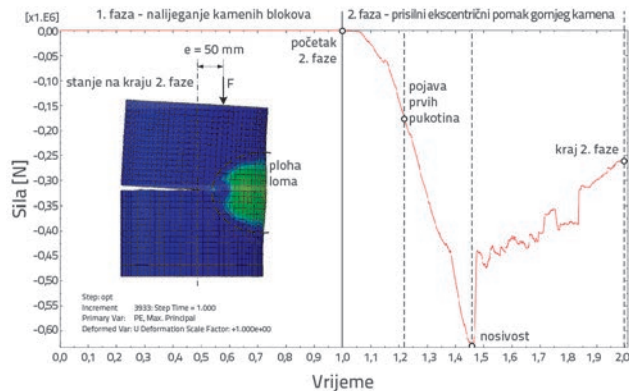
Rezultati proračuna prikazani u nastavku odnose se na karakteristične faze opterećenja. Pukotinsko stanje predočeno je maksimalnom glavnom plastičnom deformacijom (PE). Na slici 18.a prikazane su točke kontakta nakon nalijeganja gornjega kamenog bloka na donji, a može se primijetiti početno oslanjanje u četiri točke. Zbog povećanja ekscentričnoga opterećenja (druga faza) naprezanje se koncentrira na točke u području unosa sile. Slika 18.b prikazuje mjesta inicijalnih pukotina na donjem kamenom bloku koja se poklapaju s mjestima koncentracije naprezanja. Smjer otvaranja pukotina uglavnom je radijalan, a s vremenom se postupno šire i počinju povezivati. Trenutak prije otkazivanja sustava prikazan je na slici 18.c na kojoj se može primijetiti područje koje će se odlomiti. Nakon toga dolazi do otkazivanja nosivosti modela s izrazito nestabilnim poslijekritičnim ponašanjem.

Opisane se faze mogu vidjeti na slici 19. na dijagramu sila-



Slika 18. a) Točke početnoga kontakta među blokovima; b) Plastična deformacija na početku ekscentričnoga opterećenja; c) Plastična deformacija trenutak prije otkazivanja

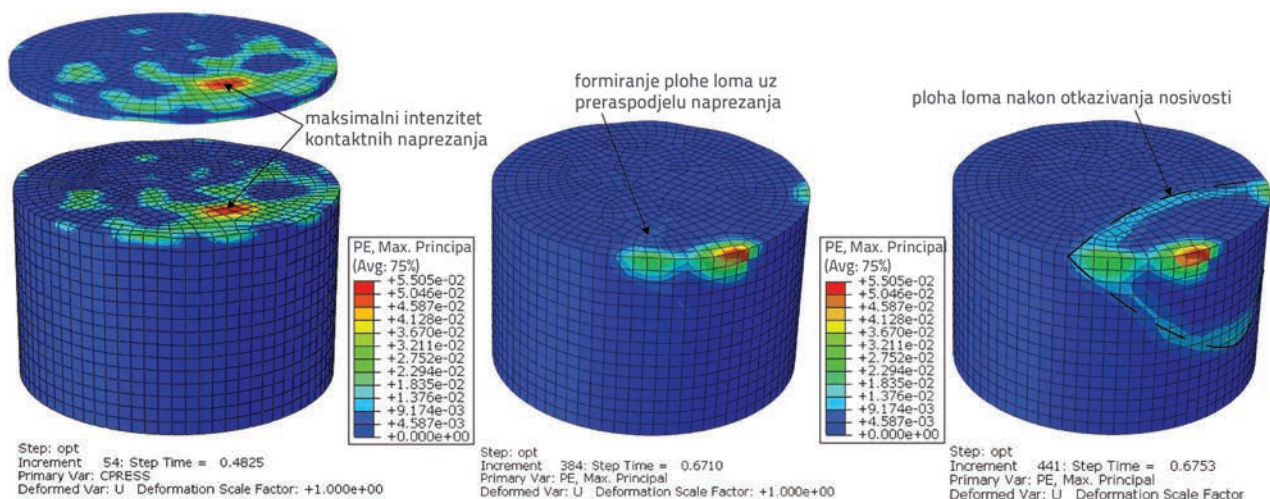
pomak za točku unosa sile koji je podijeljen u dva karakteristična područja (dvije faze opterećenja). Prvo područje predstavlja nalijeganje u kojemu se ostvario kontakt među plohami, a drugo područje predstavlja fazu ekscentričnoga opterećenja gornjega kamenog bloka. U skladu s prethodno opisanom procesom nosivost je dosegnuta u trenutku $t = 0,47$ druge faze (označeno na slici); riječ je o pseudo-vremenu koje predstavlja korak proračuna (nema fizikalno značenje). Dodatno je priložena i shema opterećenja, a skicirana je i ploha sloma kamenoga uzorka (kraj 2. faze).



Slika 19. Dijagram sile i pseudo-vremena na uzorku bez olovnoga umetka

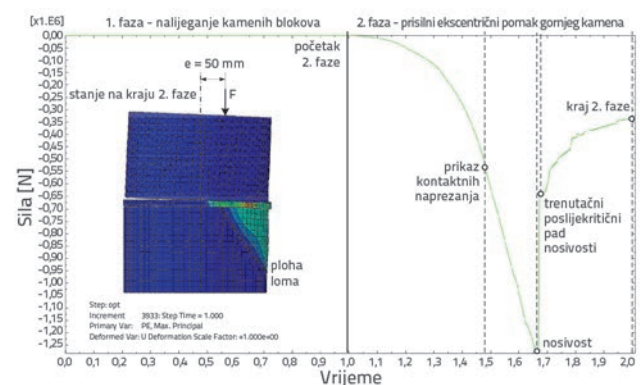
3.2.3. Rezultati - model s olovom

Prema istom režimu opterećenja analiziran je i uzorak s olovnim umetkom među kamenim blokovima. Na slici 20.a može se vidjeti područje kontakta između olova i kamena pri razini sile od približno 40% nosivosti. Može se primijetiti da nema lokalne koncentracije naprezanja na rubu već dolazi do preraspodjele na šire područje. Iako se i dalje primjećuje područje prijenosa opterećenja, ono više nije lokalizirano.



Slika 20. a) Područja kontaktnih naprezanja među kamenim ploham; b) Glavna vlačna plastična deformacija neposredno prije otkazivanja; c) Glavna vlačna plastična deformacija trenutak poslije otkazivanja

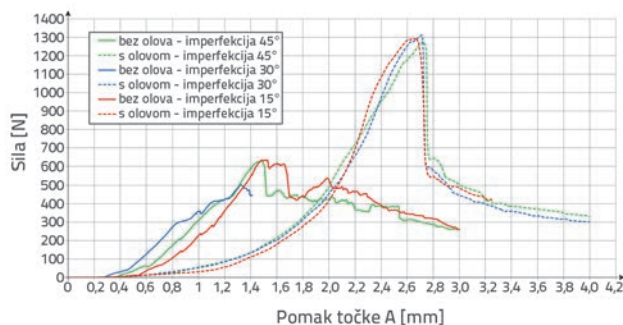
Slika 20.b prikazuje područje nastajanja i razvoja pukotina te postupno formiranje plohe loma. Pri otvaranju pukotine dolazi do relaksacije naprezanja, pa se pukotina dalje sporije širi. Na takav način omogućena je povoljnija raspodjela naprezanja u kritičnom presjeku sve dok ne nastane ploha sloma (slika 20.c), a u tom trenutku dolazi do nagloga otkazivanja kamenoga bloka. Smjer širenja pukotina (odlamanje) okomit je na plohu sloma. Relaksacija naprezanja omogućena je plastifikacijom olovnoga umetka na područjima s maksimalnim naprezanjima. Sve opisane faze opterećenja mogu se vidjeti na slici 21. Može se uočiti da je ploha sloma nesimetrična u odnosu na olovni umetak, što je uzrokovano različitim rubnim uvjetima donjega (upet) i gornjeg kamenog uzorka (slobodna rotacija oko obje horizontalne osi kroz točku unosa sile). Početna je raspodjela naprezanja slična, ali zbog nepovoljnijega položaja ploha sloma nastaje u donjem uzorku. Nosivost je dosegnuta u trenutku $t = 0,67$ (druge faze), a treba istaknuti da je oko dva puta veća od uzorka bez olova. Na dijagramima se može vidjeti izrazito nestabilno poslijekritično područje i nagli pad nosivosti nakon otkazivanja.



Slika 21. Dijagram sile i pseudo-vremena na uzorku s olovnim umetkom

3.3. Analiza rezultata

Na slici 22. prikazana je usporedba ravnotežnih krivulja numeričkih modela s olovnim umetkom i bez njega. Proračun je proveden za različita nalijeganja kontaktnih ploha, ostvarena rotacijom gornjega dijela modela oko vertikalne osi za određeni kut (15°, 30° i 45°). Svaki položaj osigurava drugačije nalijeganje kamenih blokova odnosno drugačiju raspodjelu koncentracija naprezanja. Međutim, za sve modele bez olovnoga umetka zajednička je koncentracija naprezanja na lokalnom (malom) području i brza pojava pukotine. Povećanjem opterećenja pukotine se šire i uzrokuju otkazivanje bez prirasta opterećenja, što rezultira razmjerno malom nosivošću. Za razliku od opisanoga ponašanja, uporabom olovnoga umetka (kao "tampon zone") kontaktna se naprezanja značajno smanjuju, odnosno dolazi do preraspodjele na područja koja početno nisu u kontaktu. Povećanjem opterećenja olovo se plastificira i na taj način ravnomjernije prenosi opterećenja s gornjega kamena na donji. Jedna je od posljedica relaksacija naprezanja u nastalim pukotinama i preraspodjela na ostala područja kontaktne plohe, čime se osigurava znatno veća nosivost blokova.



Slika 22. Dijagram sila – pomak modela blokova bez umetka i s njim uz ekscentrično opterećenje

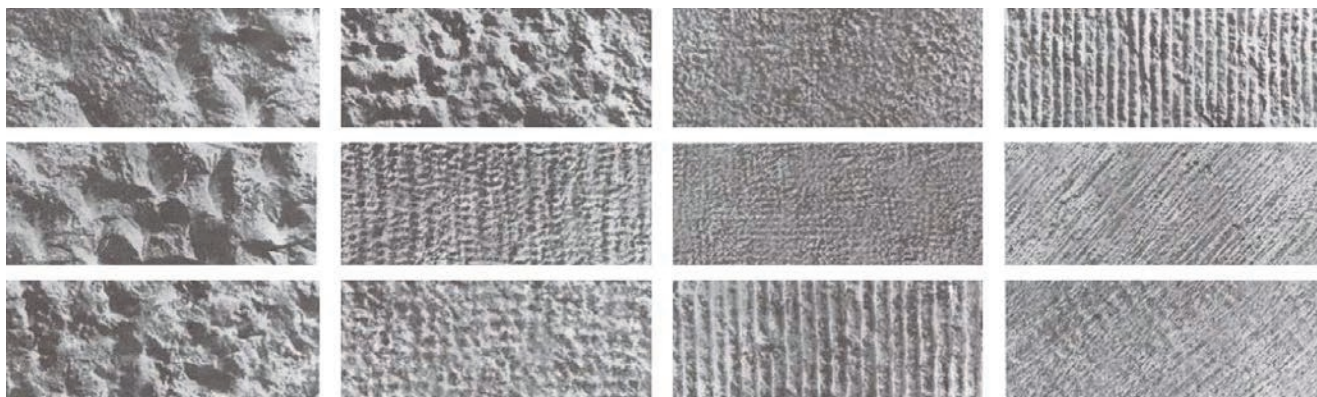
U prikazanomu je primjeru nosivost blokova s olovnim umetkom oko dva puta veća u odnosu na model bez umetka. Povrh toga, povoljno je da primjenom umetka dobivamo prilično ujednačene nosivosti za različita nalijeganja (ovisno o kutu pod kojim je

zarotiran gornji kamen), što navodi na zaključak da neravnine kontaktnih ploha (koje ionako nisu poznate) ne utječu značajno na nosivost sustava (za slučaj s olovnim umetkom). Treba istaknuti da su prikazani rezultati samo za neravnine oko 2 mm, ali i za manje neravnine može se pretpostaviti slično ponašanje.

4. Diskusija

Analiza rezultata uzoraka stupa bez olovnoga umetka pokazuje da je do pojave prve pukotine dolazilo pri vrijednostima centrične sile (centrično postavljen hidraulični cilindar) od 136 do 297 kN. Za usporedbu, može se istaknuti da je prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama dimenzija 5,0 × 5,0 × 5,0 cm slom nastupio pri vrijednostima sile oko 240 kN [13]. Istaknimo da se u raspucanim stupovima Kneževa dvora u Dubrovniku (koji su bili motiv ovom istraživanju) eksperimentalnim mjerenjima i numeričkim analizama dobila razina uzdužne sile oko 200 kN. I bez neke detaljne analize dobivamo jasan dojam o problemu kontaktnih naprezanja na nosivost kamenih stupova. Očito je da problem neravnosti ploha i nejednolikoga nalijeganja uzrokuje izrazite koncentracije naprezanja koje u konačnici dovode do otvaranja pukotina.

Za laboratorijski je ispitane uzorke obrada kontaktnih ploha napravljena s točnošću oko 0,5 mm, što je potvrđeno laboratorijskim mjerenjima. Takva je točnost u skladu s uobičajenim preporukama iz normi koje se odnose na kamen, s napomenom da u normama ne postoji ograničenje za ovaj problem kontakata. Ako razinu obrade pokušamo usporediti s ručnim načinom odnosno vrijednostima koje su mogli ostvariti drevni graditelji, može se pretpostaviti da je problem još izraženiji. Ručna obrada ploha ima lokalna odstupanja (slika 23.) koja ovisе o alatu za obradu (koji se mijenjao kroz povijest), ali i školovanosti te iskustvu majstora. Treba imati na umu i utjecaje geološke starosti, mineralnog sastava, raznih fizikalnih svojstava, strukture ili teksture kamena, ali s obzirom na čestu pojavu raspucavanja tradicijskih stupova, izgrađenih od različite vrste kamena, čini se da je problem prilično općenite prirode. Navedeno potvrđuju i različiti pokušaji sanacije kroz provijest uporabom raznih vrsta morta, kamene prašine i sličnoga na različitim tipovima stupova.



Slika 23. Oblik površine pri ručnoj obradi kamena [23]

Sanacija s olovnom umetkom između kontaktnih ploha umanjuje nepovoljni utjecaj neravnina kontaktnih ploha, odnosno svojim svojstvima omogućuje bolje nalijeganje dijelova stupa i sprječava stvaranje koncentracija naprezanja, što je potvrđeno laboratorijskim i numeričkim analizama. Za laboratorijska ispitivanja odabrana je debljina umetka od 4 mm koja je dovoljna za kompenziranje neravnina i utjecaja ekscentričnoga opterećenja odnosno rotacije kapitela s obzirom na tijelo stupa. Ekscentrično opterećenje (ekscentričnost tlačne linije) u povijesnim konstrukcijama (iz brojnih razloga) dodatno nepovoljno djeluje, što je i potvrđeno ovim istraživanjem. Treba istaknuti da debljinu umetka treba odrediti ovisno o svojstvima pojedine građevine odnosno iznosima centričnoga i ekscentričnog opterećenja, svojstvima kamena, dimenzijama stupova, obliku nosive konstrukcije i slično. Također, preporučljivo je testirati djelovanja umetka na ostatak konstrukcije, jer poboljšanjem nosivosti jednoga dijela konstrukcije možemo prouzročiti teškoće drugim dijelovima.

5. Zaključak

Prema rezultatima istraživanja pretpostavlja se da problemi s tradicijskim stupovima počinju odmah nakon postavljanja, jer se stvaraju početne koncentracije naprezanja na kontaktnim plohamu budući da je teško ostvariti jednoliko nalijeganje. Pri završetku gradnje, uspostavljanjem tlačne linije, koja je uvijek barem malo ekscentrična, dolazi do relativnoga zaokreta elemenata i dodatnoga povećanja koncentracija naprezanja. Kad pridodamo brojna nepovoljna djelovanja kroz povijest (poput diferencijalnih slijeganja, potresa, promjena temperature i slično) koja mogu dodatno povećati ekscentričnost tlačne linije, te da unutar specifičnoga materijala poput kamena postoji velika mogućnost početnih pukotina, uopće ne iznenađuje raspucalo stanje velikoga broja tradicijskih stupova. Srećom, tradicijski stupovi imaju razmjerno velike rezerve nosivosti, pa se preraspodjelama naprezanja održava nosivost, ali treba imati na umu da su preraspodjele ograničene samo na poprečni presjek elementa.

Prema rezultatima ovoga istraživanja, materijal poput olovnoga umetka djeluje povoljno na probleme nejednolikoga

nalijeganja i ekscentričnoga opterećenja, odnosno svojim svojstvima ublažava konstrukcijske nedostatke tradicijskih stupova. Deformiranjem i utiskivanjem olovnoga umetka u neravnine kontaktnih ploha omogućuje se bolje nalijeganje elemenata stupa odnosno povećanje područja kontakta, a time i nosivosti sustava. Navedeni se zaključci ponajprije oslanjaju na provedena laboratorijska ispitivanja, a sve je dodatno potvrđeno numeričkim proračunima različite složenosti. Rezultati se poklapaju i s istraživanjima na postojećim konstrukcijama, što potvrđuje da taj pristup možemo razmatrati kao način sanacije u povijesnim konstrukcijama sa sličnim problemima. Ipak treba istaknuti da su ispitivanja napravljena s jednom vrstom kamena (osim betonskih uzoraka) i s istom postavkom eksperimenta. Također, olovni uzorak nije testiran za dugotrajna ili ciklička opterećenja niti za različite atmosferske uvjete (primjerice promjene temperature), što se u ovom radu pokušalo kompenzirati uporabom nešto manjega olovnog umetka u odnosu na polumjer tijela stupa.

Pristup sanaciji s postavljanjem olovnom umetkom spada u tradicijski način sanacije. Postupak je reverzibilan, a može se napraviti gotovo neprimjetnim. Ipak, to je samo jedna mogućnost sanacije koja se s obzirom na suvremene mogućnosti uvelike može usavršavati. Sanacija povijesnih građevina ima osnovni cilj očuvanja (posebice ako je moguće u izvornom obliku), ali u slučaju tradicijskih stupova imamo konstrukcijski nedostatak koji "nije vrijedan" čuvanja, jer sustavno oštećuje nosive elemente. Olovnom se umetkom ti konstrukcijski nedostaci dovoljno dobro kompenziraju, a pritom se i zadržava ideja izvorne koncepcije nosive konstrukcije.

Zahvala

Autori zahvaljuju prof. dr. sc. Damiru Lazareviću čija su nas početna zapažanja i istraživanja motivirala za ovaj rad. Za veliku pomoć u pripremi uzoraka za ispitivanje zahvaljujemo gospodinu Andri Fabresu. Za pomoć pri eksperimentalnim ispitivanjima zahvaljujemo kolegama Jošku Kroli, Domagoju Damjanoviću, braći Kelković, Bojanu Milovanoviću, Ivanu Duvnjaku, Marku Bartolcu, Miri Matuziću i Zvezdani Matuzić. Rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom IP 2014-09-2899.

LITERATURA

- [1] Steinman, V.: Istražni radovi na Kneževu dvoru u Dubrovniku s načelnim prijedlozima sanacije, Knjiga II, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 1974.
- [2] Lokošek, E., Kleiner, I.: Zamjena kamenih stupova u prizemlju dvorca Veliki Tabor, Građevinar, 56 (2004) 5, pp. 267-276.
- [3] Meli, R., Sanchez-Ramirez, A. R.: Structural aspects of the rehabilitation of the Mexico City Cathedral, International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques, Barcelona, pp. 123-140, 1997.
- [4] Drosos, V.A., Anastasopoulos, I.: Experimental investigation of the seismic response of classical temple columns, Bull Earthquake Eng, 13 (2015) 1, pp. 299-310, <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9608-y>
- [5] Atalić, J., Uroš, M., Šavor Novak, M.: Influence of contact stresses on bearing capacity of traditional stone columns, Građevinar 64, (2012) 11, pp. 891-903.
- [6] Lazarević, D., Dvornik, J., Fresl, K.: Analiza oštećenja atrija Kneževa dvora u Dubrovniku, Građevinar 56 (2004) 10, pp. 601-612.

- [7] Lazarević, D., Atalić, J., Fresl, K.: Reconstruction of Rector's Palace atrium in Dubrovnik: a key role of column connections. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XI*, eds. Brebbia, WIT Press, Southampton, pp. 289-303, 2009.
- [8] Vitruvius, P.M.: *De Architectura libri decem*, IGH, Zagreb, 1997.
- [9] Cakir, F., Kocyyigit, F.: Architectural and structural analysis of historical structures, *Građevinar*, 68 (2016) 7, pp. 571-580, <https://doi.org/10.14256/JCE.1182.2014>
- [10] Atalić, J., Lazarević, D., Fresl, K.: Influence of Rotational Stiffness between Column Elements on Global Stability of Historical Constructions, *Proc. of the 8th European Conference on Research for Protection, Conservation and Enhancement of Cultural Heritage*, Ljubljana, pp. 60-62, 2008.
- [11] Roca, P., Gonzales, J. L.: A summary of the opinions put forward during the discussions, *International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques*, Barcelona, pp. 394-407, 1997.
- [12] Buzov, A., Radnić, J., Grgić, N., Baloević, G.: Effect of the joint type on the bearing capacity of a multi-drum column under static load, *International Journal of Architectural Heritage*, 12 (2018) 1, pp. 137-152, <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1396380>.
- [13] Atalić, J.: Utjecaj kontaktnih naprezanja na nosivost tradicijskih kamenih stupova, *Doktorski rad*, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [14] Lazarević, D., Atalić, J., Krolo, J., Uroš, M., Šavor, M.: Experimental and Numerical Analysis of Traditional Column Connections with the Possible Retrofit Concept, *Advanced Materials Research*, 133-134 (2010), pp. 479-484, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.479>
- [15] FaroArm - Overview, www.faro.com, 1.6.2012.
- [16] Heyman, J.: *The Stone Skeleton*, Cambridge Univ. Press 1995.
- [17] Taylor, R.L.: FEAP – A Finite Element Analysis Program, Version 7.3, Programmer Manual, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkley, 2001.
- [18] GiD, The universal, adaptive and user friendly pre and post processing system for computer analysis in science and engineering, Version 6, Reference Manual, CIMNE, Barcelona, 2000.
- [19] Atalić, J., Lazarević, D., Šavor, M.: Traditional column connections with iron dowels - experimental and numerical analysis, *Proceedings of the International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC2012*, Wroclaw, pp. 619-627, 2012.
- [20] SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design, Analysis reference manual, CSI: Berkeley, 2002.
- [21] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Onate, E.: A Plastic-Damage Model for Concrete, *International Journal of Solids and Structures*, 25 (1989) 2, pp. 299-329, [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4).
- [22] Lee, J., Fenves, G.L.: Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 124 (1998) 8, pp. 892-900, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- [23] Crnković, B., Šarić, L.J.: Građenje prirodnim kamenom, IGH, Zagreb, 2003.