



## PRAKTIČNO RJEŠAVANJE DJELOVANJA VELIKIH POMAKA NA KAMENU KONSTRUKCIJU

*Rukopis primljen za tisak 12. IV. 2017.*

*Klesarstvo i graditeljstvo, Pučišća, 2017., br. 1-2*

Kamene konstrukcije izrazito su krute. Njihovo se popuštanje manifestira kao krti lom na lokalnoj, a najčešće i na globalnoj razini. Kod izuzetno malih relativnih pomaka mogu se pojaviti ekstremno velika naprezanja, poznata pod nazivom koncentracija naprezanja na lokalnom (najčešće rubnom) kontaktu dvaju kamenih blokova. U ovom radu istraženi su uzroci pojave koncentracije naprezanja s različitih aspekata i predložen je način eliminiranja tih uzroka. Rezultati istraživanja i njihova praktična primjena ilustrirani su na jednom, izuzetno vrijednom povijesnom objektu graditeljske kulturne baštine.

*Ključne riječi:* kamen; olovo; zglob; veliki pomaci; naprezanja

Postoji velik broj kamenih zidanih objekata iz daleke prošlosti za koje još uvijek nije poznato kada, tko i na koji način ih je sagradio. Dakle, graditeljska tradicija kamenih nosivih sklopova postoji od pamtivijeka. Ipak, još uvijek ima velik broj otvorenih pitanja, kao što je i pitanje praćenja, prognoze i preventivnog onemogućavanja oštećenja nosive kamene konstrukcije izložene djelovanju velikih pomaka.

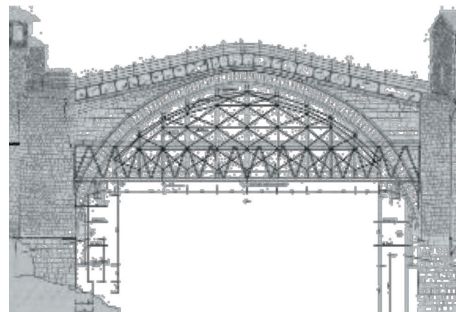
Uobičajene veličine relativnih pomaka i deformacija u kamenoj strukturi redovito su male u odnosu na suvremene konstrukcije poput armiranog betona i, posebno, od lameliranog drva ili čelika. Kao primjer navodimo kameni lučni most u Mostaru neposredno nakon demontaže skele (sl. 1).

Na sl. 2. prikazan je trenutak otpuštanja skele<sup>1</sup> ispod lučne konstrukcije, raspona skoro 30 metara. Masa konstrukcije iznosi oko 600 tona, a vertikalno spu-

<sup>1</sup> B. Gotovac, „Ponovna izgradnja Starog mosta“, *Ceste i mostovi* (204), 7-9, str. 23-33.



Sl.1. Mostarski most neposredno nakon uklanjanja skele



Sl.2. Crtež mosta na skeli

štanje tjemena luka nakon otpuštanja skele iznosilo je svega nekoliko desetinki milimetra. Prve četiri godine nakon izgradnje mosta nigdje nije uočena niti jedna pukotina. Nakon toga uslijedilo je nekoliko potresa, snage 4-5 stupnjeva po Richteru, koji su izazvali prve pukotine. Naprezanja u luku od vlastite težine i korisnog opterećenja veličine su oko 1.0 MPa što je daleko ispod čvrstoće kamena i morta u konkretnoj strukturi. Spomenute pukotine nastale su od pomaka okomitih na srednju vertikalnu ravninu mosta. Ti pomaci doveli su do preraspodjele naprezanja uzduž mosta i u poprečnim presjecima do raspodjele naprezanja (slično kosom savijanju), koje proizvodi efekt koncentracije naprezanja i neminovnog pucanja pojedinih kamenih blokova. Takva je konstrukcija i dalje nosiva, s nešto manjim kapacitetom nego prije djelovanja potresa.

Opisani primjer dobro je poznat u inženjerskoj praksi pod pojmom „mehaničkih naprezanja“. To su naprezanja koja nastaju od deformacija u konkretnom materijalu od kojega je sazidan objekt. U navedenom slučaju poželjno je da konstrukcija bude što više puta statički neodređena, jer to povećava njezin početni kapacitet. Veći broj projektanata konstrukcijskih sanacija kamenih objekata razmišlja isključivo na taj način.

Međutim, ukoliko je konstrukcija izložena djelovanju temperature, mora se rukovoditi potpuno suprotnim principom. Tu tvrdnju najjednostavnije je objasniti na primjeru štapa od čelika zagrijanog za 100°C više u odnosu na temperaturu okoline. Ako se štap može slobodno širiti, u štapu nema naprezanja! Ukoliko se onemoguću rastezanje u presjecima štapa, tlačno naprezanje iznosi  $\sigma = 252.0$  MPa. Ta veličina naprezanja znatno premašuje dozvoljenu nosivost standardne kakvoće običnog građevinskog čelika i neminovno dovodi do plastifikacije materijala. Naprezanje nastalo od opterećenja temperaturom naziva se Duhamelova<sup>2</sup> komponenta naprezanja i uz mehaničku komponentu tvori ukupno naprezanje.

Za konstrukcije izložene promjenama temperature poželjno je da budu što manji broj puta statički neodređene. Najbolje su statički određene konstrukcije jer će tada potpuno izostati Duhamelova komponenta naprezanja.

<sup>2</sup> J. Brnić, *Elastomehanika i plastomehanika* (1996.), Školska knjiga, Zagreb.



Temperatura je prethodno spomenuta samo usput, radi lakšeg razumijevanja tipa kamene strukture koja se analizira u daljnjem izlaganju.

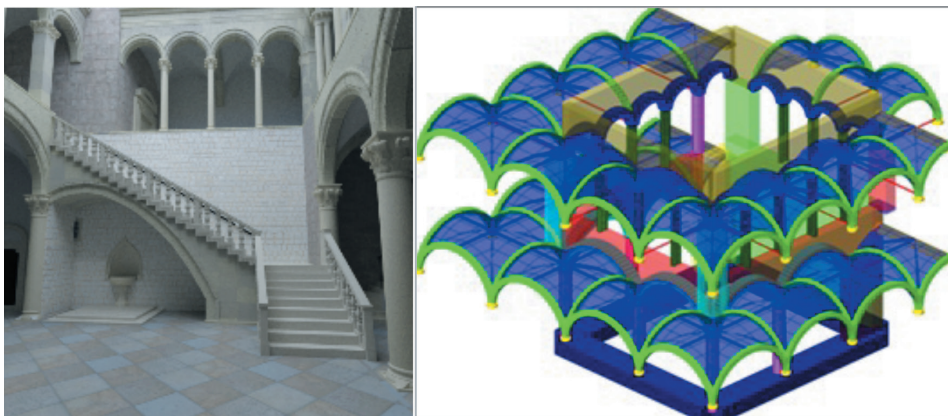
Konstrukcija atrija Kneževa dvora u Dubrovniku jest drugi primjer koji smo analizirali.



*Sl. 3. Atrij Kneževa dvora – 3D-digitalna simulacija, Danijel Pranjić 2016.*

Konstrukcija cijelog objekta sastoji se od dva konstrukcijski potpuno različita dijela. Gledano u tlocrtu, vanjski je dio izrazito masivan i krut, dok je dio oko unutrašnjeg otvora, dakle atrij, lagana i izrazito „mekana“ konstrukcija. Vlastita težina i korisno opterećenje ne predstavljaju nikakve poteškoće za nosivost i stabilnost unutrašnjeg dijela oko otvora ili konkretnije konstrukcije atrija Kneževa dvora u Dubrovniku.

Vanjski dio Kneževa dvora masivna je, kruta kamena struktura, sastavljena od zidova, sustava armiranobetonskih vertikalnih i horizontalnih serklaža i međukatnih konstrukcija. Konceptcija konstrukcije „mekanog dijela“ objekta oko atrija prikazana je na slici 4.



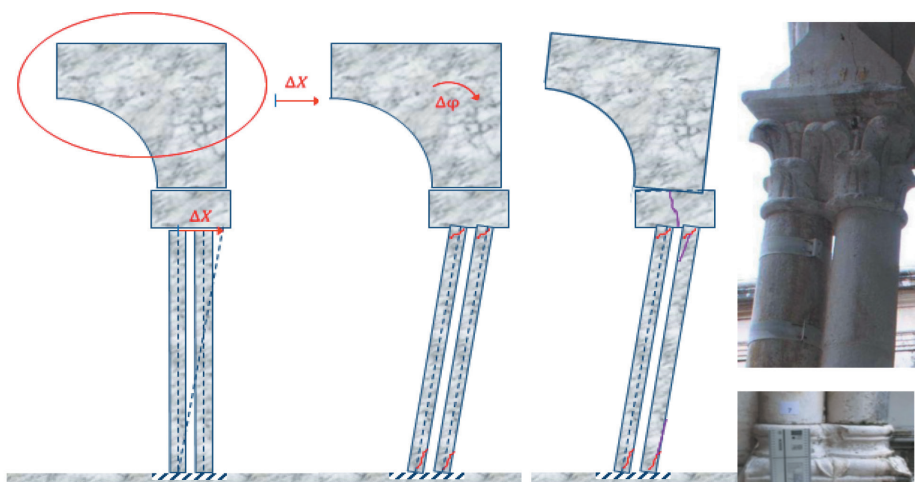
Sl. 4. 3D - vizualizacija dijela atrija Kneževa dvora i njegov proračunski model

Posebno smo analizirali funkciju pet stupova u prizemlju i dvojnih stupova na katu. Naime, međukatna i horizontalni dio krovne konstrukcije, prilikom opsežne sanacije 1981. godine, ojačane su armiranobetonskim serklažima, dok su pročelja prema atriju ostala nedirnuti. Štoviše, iz dokumenata<sup>3</sup> je poznato da su pročelja atrija u posljednjih 300 godina uglavnom imala sadašnji oblik. Također iz raspoloživih dokumenata i stanja pojedinih nosivih kamenih dijelova konstrukcije atrija, vidljivo je da su oštećenja permanentno bila prisutna i da su njihove zamjene i popravci bili česti.

Izvorni graditelj očigledno je bio dobro upućen u znanja tehničke mehanike u širem smislu. Nažalost, to nije bio slučaj s generacijama nakon njega ili, bolje rečeno, nisu pozivani stručnjaci koji će proučiti uzroke, nego samo rutinski izvršitelji koji su jednostavno zamijenili oštećene kamene elemente pa se uzrokom problema uglavnom nitko nije ni bavio.

Na sl. 5. shematski je prikazan plan pomaka stupova i kapitela prouzročenih općim pomacima nadgrađa iznad razine kapitela. Uslijed horizontalnog pomaka nadgrađa dolazi do relativnog pomaka vrha stupa u odnosu na donji rub vezan s bazom. Veličina tog pomaka nije primjerena veličini uobičajenih pomaka u kamenim konstrukcijama kao što je ona u tjemenu mosta nakon otpuštanja skele. Ovi relativni pomaci (vrha i dna stupa) mogu iznositi nekoliko milimetara, centimetar, pa i više. Kod vodoravnog pomaka kapitela, vrhovi dvojnih stupova izvode pomak, pri čemu se njihov gornji i donji poprečni presjek zaokreće. Baza ostaje nepomična, a kapitel se translatorno pomiče samo vodoravno, tako dolazi do tendencije prodiranja rubova stupa u bazu, odnosno u kapitel. Na malom području uz rub stupa gnječi se i drobi mort i dolazi do izravnog dodira kamenih ploha, do koncentracije naprezanja i, neminovno, do pucanja. Na srednjoj skici vidljiv je karakter nastalih pukotina.

<sup>3</sup> N. Grujić, „Onofrio di Giordano della Cava i Knežev dvor u Dubrovniku“, Zbornik Dana Cvita Fiskovića – II, *Renesansa i renesanse u umjetnosti Hrvatske*.

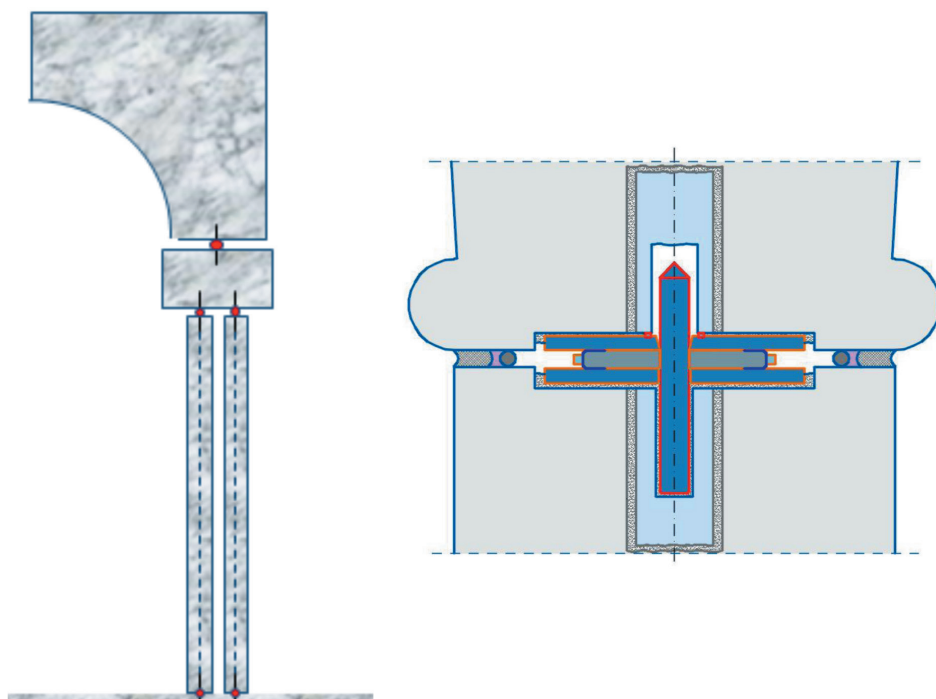


Sl. 5. Opći pomaci i posljedica neadekvatnih međusobnih veza

Osim vodoravnog pomaka, kapitel može biti „prisiljen“, od masivnijeg nadgrađa povezanog s krutim dijelom objekta Kneževa dvora, i na zaokret. Ovaj slučaj opterećenja zaokretom, nije u zatečenom stanju objekta predviđen, a upravo on neminovno dovodi do oštećenja većeg broja nosivih elemenata u nosivom kamenom sklopu. Zaokret čvorišta lukova ima tendenciju prodiranja kamenog bloka čvorišta u tijelo kapitela. Budući da je to fizički nemoguće, konstrukcija „odgovara“ lomom. Na trećoj skici (sl. 5) vidljivo je propagiranje pukotina na stupovima, a na kapitelu pojavila se pukotina koja može imati izuzetno opasan utjecaj – može dovesti do kolapsa cijelog nosivog sklopa, a u nepovoljnijem slučaju i do rušenja cijelog jednog pročelja atrija.

Sve posljedice opisanog procesa vidljive su na desnoj fotografiji (sl. 5). Baza položena na čvrsti kameni parapet prepolovila se. U jednom trenutku ukupna sila na par stupova prenesena je preko jednog stupa na bazu, i to ekscentrično, što je dovelo da savijanja u bazi i njezina loma po najslabijem presjeku, a to je srednji vertikalni presjek baze. Svi su stupovi na krajevima oštećeni, a kod stupa s obručima došlo je do uzdužnog cijepanja, kao da je stup izrađen od drva, a ne od krtoq materijala kao što je kamen. Ovaj efekt pokazuje veliki stupanj homogenosti i izotropnosti kamena, s jedne strane, i visoki stupanj koncentracije velike sile na malu kontaktnu površinu ruba stupa i kapitela s druge strane. Na fotografiji je jasno vidljiva i pukotina na donjem kamenom bloku čvorišta. Budući da se opisani i pokazani proces odvija i ponavlja kroz vremenski period od posljednjih tri stotine godina, postavlja se pitanje: Što je potrebno poduzeti da se ukloni uzrok koji vodi do opisanih posljedica?

Kao što slobodnoj željeznoj šipci jednoliko zagrijavanje neće promijeniti stanje naprezanja, analogno nosivi sklop pročelja atrija Kneževa dvora mora biti statički određena konstrukcija i tada, praktično, proizvoljni pomaci i zaokreti čvorišta lukova neće izazvati oštećenja na kapitelu, stupovima i bazi!



*Sl. 6. Prostorni zglobni ležajevi – veza stupova s bazom i kapitelom, linijski zglobni ležaj između kapitela i čvorišta lukova*

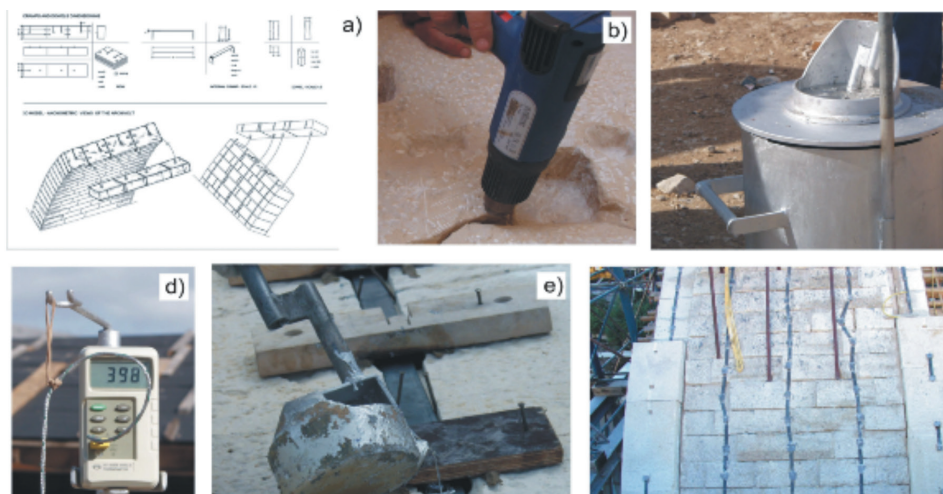
Na sl. 6. prikazana je statička shema nosivog kamenog sklopa i detalj zglobnog ležaja. Ako se realizira statički određen sustav prikazan na lijevoj skici, tada stupovi imaju mehaničku otpornost približno deset puta veću od potrebne. U usporedbi s betonom marke 30 MPa, kamen ima čvrstoću preko 200 MPa, dakle gotovo je sedam puta kvalitetniji materijal. Kada se uzme u obzir da kamen, kao prirodan materijal velike geološke starosti, nema efekte skupljanja i puzanja kao beton, tada je odnos još povoljniji za kamen.

Pravilno opterećenje kamena (bez koncentracije naprezanja) uklanja uzrok pojave oštećenja. To podrazumijeva da ugrađene zglobne veze (desna skica) moraju funkcionirati što sličnije kao idealni zglobovi (bez otpora). Moraju dopustiti relativni zaokret, a onemogućiti relativne pomake. Zglob je sastavljen od donje i gornje čelične ploče zalijepljene na kamene stupove i kapitel (bazu). Kontaktni element između čeličnih ploča jest olovni disk, koji je podatljiv na rubnu deformaciju – dopušta zaokret, ali ne smije biti stišljiv i mora onemogućiti promjenu volumena. Međutim, poznato je da olovo već kod manjih trajnih naprezanja pokazuje tendenciju puzanja. Kako bi se onemogućilo puzanje olovnog diska po njegovu opsegu, predviđena je obujmica od tankog lima osigurana čeličnim prstenom. Za prijenos eventualne poprečne sile ugrađuje se čelični trn u osi stupa.

Kod izrade zgloba i njegove ugradnje u konstrukciju važnu ulogu igraju suvremeni alati za obradu kamena, visokovrijedna ljepila za vezu čelika i kamena,



nehrđajući čelik te korištenje olova kao ravnopravnog građevinskog materijala za što je potrebno dobro poznavati njegova svojstva i tehnologiju pripreme i ugradnje bez štetnih posljedica.<sup>4</sup>



Olovo kao nosivi dio konstrukcije: a) Spojna sredstva i shema montaže, b) Sušenje rupa prije ulijevanja olova, c) Peć za taljenje olova, d) Termometar za olovo, e) Zalijevanje olovom kontakta čelika i kamena, f) Završeno armiranje kamene konstrukcije

## ZAKLJUČAK

Koristeći suvremene alate i materijale, raspoložive proračunske i dostupne mjerne tehnike, danas postoje svi realni uvjeti sagledavanja uzroka i plansko, uspješno, najčešće trajno otklanjanje oštećenja kamenih konstrukcija. Pri tome, prvi uvjet za uspješnu sanaciju jest proniknuti u suštinu zamisli prvog graditelja objekta. Uz to, pravilna prosudba zatečenog stanja objekta otvara put prema uspješnoj i trajnoj sanaciji.

Na primjeru atrija Kneževa dvora u Dubrovniku pokazan je način otklanjanja uzroka nastanka oštećenja. Poštovala se koncepcija ponašanja konstrukcije izvornog graditelja. Proučeno je stanje objekta kroz protekla tri stoljeća (koliko je bilo moguće), a posebno zatečeno stanje. Korištena je sofisticirana numerička analiza za simulaciju ponašanja konstrukcije u različitim uvjetima (popuštanje oslonaca uslijed nejednolikog slijeganja temelja i pomicanje oslonaca uslijed seizmičkog opterećenja masivnog dijela objekta, koji tada izazivaju velike pomake na nosivim elementima pročelja atrija). Ugradnja suvremenih materijala provodi se uz striktno zadovoljavanje zahtjeva konzervatora, a proces sanacije konstrukcije objekta permanentno se prati kontrolnim mjerenjima.

Dobivena je konstrukcija pročelja atrija, koja pri uobičajenim okolnostima može trajati stoljećima, uz uvjet pravilnog gospodarenja i održavanja.

<sup>4</sup> V. Šeparović: *Tehnika zalijevanja olovom željeznih spojnih sredstava (demonstracija, instrukcija, realizacija)*, Mostar, 2003-2004.



# LARGE DISPLACEMENT EFFECTS ON STONE MASONRY STRUCTURE: A PRACTICAL SOLUTION

## *S u m m a r y*

Stone masonry structures are exceptionally rigid. Their failure is manifested as local brittle fracture, but mostly it will impact the overall structure. In the event of extremely small relative displacements extremely large stresses can occur, known as stress concentration in the local (usually along the edges) contact area of two stone blocks. Subject of this work is the analysis and research of causes and factors of the occurrence of such stress concentration from different aspects, with proposed method of their elimination.

The results of the research and their practical implementation are illustrated on one exceptionally valuable object of our historical and cultural construction heritage.

Today and with the aid of modern tools and materials, available calculation and measurement technologies, we are able to establish and assess the real causes of such damages. Based on such found results plans can be produced for successful and mostly permanent rehabilitation and remedy of damages on stone masonry structures. The first step for a successful rehabilitation is to familiarize with the initial ideas and intentions of the original builder of such structure. Once this is achieved, proper assessment of the existing state of the object will enable a proper, successful and permanent rehabilitation.

The method of elimination and rehabilitation of the cause of damages to stone masonry structures is presented in the example of the Rector's Palace in Dubrovnik. The concept of anticipated behavior of the structure by the original builder has been fully respected. A research (as much as was possible) of the state and condition of this building over the past three centuries was conducted, whereas the current state has been analyzed in detail.

Sophisticated numerical analysis has been applied to simulate the behavior of the structure under different conditions and loads. Foundation failure under the load bearing columns in the ground floor, as result of uneven settling of the building has also been simulated. A simulation of the displacement of the supports in the upper floor under seismic loads on the building that result in major displacements on load bearing elements of the atrium's facade has also been performed. Modern materials were used, but all under strict compliance with the requirements set forth by the Heritage Conservation Office. Through every phase of the rehabilitation process continuous supervision and control measurements were conducted.

We believe that the rehabilitated structure of the atrium facade will last for several centuries under normal conditions and proper management and maintenance.