

Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima

Lukasz J. Bednarz

Građevinski fakultet, Sveučilište za znanost i tehnologiju u Wrocławu, dr. sc.
lukasz.bednarz@pwr.edu.pl

Jerzy Jasienko

Građevinski fakultet, Sveučilište za znanost i tehnologiju u Wrocławu, prof. dr. sc.
jerzy.jasienko@pwr.edu.pl

Andrzej Kadluczka

Arhitektonski fakultet, Tehnološko sveučilište u Krakovu, prof. dr. sc.
andrzej.kadluczka@gmail.com

Sažetak: U radu je prikazan pokušaj opisivanja i prilagodbe modela rada zidanih konstrukcija podvrgnutih postupcima ojačanja kompozitnim materijalima. Formiranje određenog modela sloma je povezano s vrstom ojačanja i njegovim položajem (ekstradosi, intradosi). Dani modeli nisu predviđeni da se koriste za proračune, već da pokažu ponašanje konstrukcije, i mogu činiti osnovu za procjenu djelovanja ojačanja primijenjenog u drugim slučajevima.

Ključne riječi: zide, svod, luk, analiza, model, ojačanje, kompoziti

Analytical model of the behaviour a masonry structure reinforced with composite materials

Abstract: The paper presents an attempt to describe and adapt models of work of masonry structures subjected to reinforcement treatments with composite materials. The formation of a particular failure model is related to the type of reinforcement and its location (extrados, intrados). The models given are not intended to be used for calculations but to illustrate the behaviour of the structure, and may form the basis for assessing the effects of reinforcement applied in other cases.

Key words: masonry, vault, arch, analysis, model, strengthening, composites

1. UVOD

U posljednjih nekoliko godina postoji sve veće zanimanje za nove tehnologije i tehnike korisne u popravcima građevina, uključujući zidane građevine. Suvremene metode sanacije i ojačanja zidanih građevina ili njihovih pojedinih, osobito zahtjevnih elemenata (npr. lukova, svodova, kupola, zidova) nude potencijal za značajne uštede, a često i očuvanje zgrada kulturne baštine.

Kada se klasične metode pokažu nedovoljnima, dopušteno je ojačanje povijesnih zgrada modernim konzervatorskim, građevinskim i inženjerskim tehnikama, pod uvjetom da se primjenjuju načela konzervatorske doktrine i da su moderne tehnike temeljene na istraživanjima i iskustvu. Tako uz uobičajene popravke pomoću čeličnih mosnica, ljuski od armiranog betona, lijepljenih i vijcima pričvršćenih čeličnih elemenata, kompozitni materijali zasnovani na raznim vrstama vlakana, super-jake i ultra tanke čelične natege ugrađene u nereaktivne mortove zasnovane na vezivima za trase ili deformabilni polimeri se sve više koriste za popravak i stabilizaciju.

Elemente konstruktivnog zida potrebno je popraviti i ojačati iz različitih razloga, kao što su: pomicanje temelja, promjene stanja tla i vode, promjene sadržaja vlage, atmosferski utjecaji, neprikladna geometrija i presjek elemenata, starenje materijala, reološke pojave ili utjecaj situacija izvanrednog opterećenja. Sanacija i ojačanje oštećenih konstruktivnih elemenata dio su cjelokupnog programa sanacije i usko su povezani s pitanjima stabilizacije i konsolidacije građevine. Ojačanje i stabilizacija imaju za cilj obnavljanje sposobnosti konstruktivnih sustava da ispunjavaju određene korisne funkcije, povećavaju njihova svojstva statičke čvrstoće i čine ih otpornima na destruktivne procese, primjerice, učvršćivanjem strukture konstruktivnog materijala ili dodavanjem novih elemenata.

Ojačanje i popravak građevina od opeke je težak zadatak koji obično zahtijeva drugačiji pristup u svakom slučaju. Iz tog razloga su potrebna daljnja istraživanja, posebno ona koja se provode na modelima tehničkih razmjera i u kojima se koriste inovativne tehnologije.

2. METODOLOGIJA OJAČANJA

Klasične metode ojačanja, poput prskanog betona ili dodatnih struktura od armiranog betona ili čelika, povećavaju nosivost i krutost konstrukcije. One također mogu prouzročiti i nepovratne promjene u estetici spomenika i neprihvatljivi su za konzervatore. Ako je potrebno značajno povećati nosivost ojačane povijesne građevine, mogu se koristiti kompozitni materijali na bazi različitih vrsta vlakana. Kompoziti na bazi ugljičnih vlakana, aramidnih vlakana, bazaltnih vlakana, poliparafenilenbenzobisoksazola (PBO), staklenih ili borovih vlakana ili čak prirodnih vlakana od konoplje, jute ili lana važna su alternativa klasičnim oblicima ojačavanja konstruktivnih elemenata. Kompoziti na bazi prirodnih vlakana prikladni su za potrebe za ekološkim materijalima. Njihovi vrlo niski troškovi proizvodnje i obrade te lakoća dobivanja osnovnih materijala govore u prilog njihovoj uporabi u slučaju mogućnosti uporabe kompozita koji ne zahtijevaju vlakna visoke čvrstoće. Problem uporabe ekološki prihvatljivih materijala proizlazi iz njihove male vlačne čvrstoće u usporedbi s drugim materijalima. Međutim, treba istaknuti pozitivne strane - bolju prikladnost za mogućnost recikliranja i smanjenu proizvodnju CO₂.

Širok raspon mogućnosti odabira odgovarajućeg oblika suvremenog kompozitnog materijala u vidu traka, šipki, obloga, tkanina ili mreža omogućuje optimizaciju odluka donesenih u vezi s određenom građevinom. Mehanička svojstva vlakana koja se koriste za ojačanje omogućuju korištenje kompozitnog ojačanja za smanjenje vlačnih i savojnih naprežanja, a time i povećanje opterećenja koje djeluje na konstrukcijski element. Vlaknasti

Bednarz, L. J., Jasienko, J., Kadluczka, A.

Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima

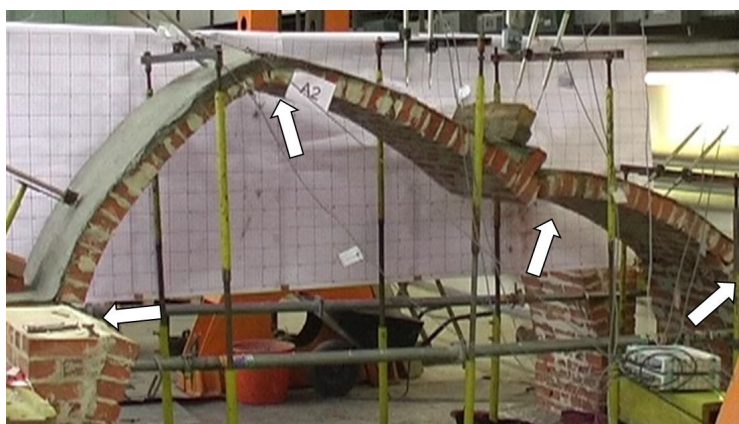
kompozitni materijali su savršeni za popravak postojećih baštinskih građevina i pružanje odgovarajuće razine sigurnosti. A u slučaju kompozita s mineralnom matricom bez epoksidne smole, oni su čak i savršeni za baštinske građevine.

3. MODEL OŠTEĆENJA TEMELJEN NA ANALIZI FORMIRANJA MEHANIZAMA SLOMA LUKOVA

Tijekom eksperimentalnih ispitivanja provedenih na modelima tehničkih razmjera poduzetim na Sveučilištu za znanost i tehnologiju Wrocław [1-3] (slike 1 - 2) i od strane drugih autora [4-6], na lukovima ojačanim raznim metodama (uglavnom na strani ekstradosa) uočeni su različiti mehanizmi sloma (slike 3- 6) . Moguće je razlikovati tri vrste veza između pojedinih segmenata u presjeku (slika 5).



(a)

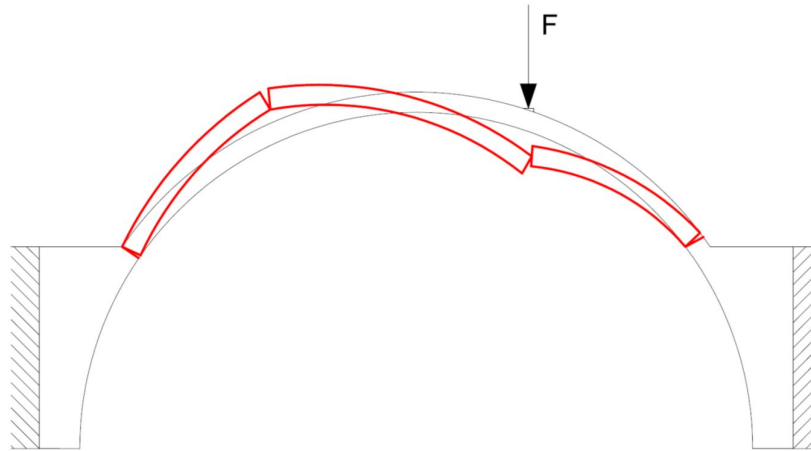


(b)

Slika 1. Luk ojačan kompozitnim materijalom FRCM, (a) prije oštećenja, opisani oslonci A i B, (b) tijekom oštećenja, fotografija Ł. Bednarz

Bednarz, L. J., Jasienko, J., Kadluczka, A.

Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima



Slika 2. Model sloma luka ojačanog kompozitnim materijalom FRCM s otvorenim zglobovima.

Različite kombinacije popuštanja veze dovode do različitih mehanizama sloma. Ako jedna od veza popusti (npr. tijekom otvaranja zgloba), broj veza između opeka (segmenata) se smanjuje ($z = -1$). Stoga se može napisati sljedeći odnos za stabilnost luka:

- slom luka $- p - z < 0$
- konstrukcija luka ostaje stabilna $- p - z \geq 0$

gdje je: p - broj izvornih veza između pojedinih opeka (segmenata), z - broj veza između pojedinih opeka (segmenata) u cijelom luku koje su popustile.

Luk se ruši samo kada je broj veza koje su popustile (z) veći ili jednak broju izvornih veza (p) (u razmatranom slučaju, $p = 3$).



Slika 3. Stvaranje pukotine sa središtem rotacije u gornjem dijelu pukotine, fotografija Ł. Bednarz



Slika 4. Stvaranje pukotine sa središtem rotacije u donjem dijelu pukotine, fotografija Ł. Bednarz

Bednarz, L. J., Jasienko, J., Kadluczka, A.

Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima



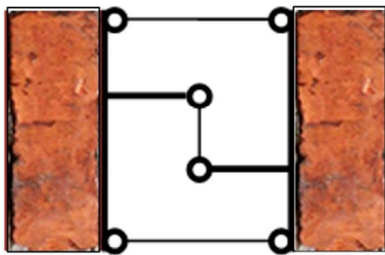
Slika 5. Smicanje spoja između cigli, fotografija Ł. Bednarz



Slika 6. Smicanje spoja između cigli u kombinaciji s rotacijom, fotografija Ł. Bednarz

Segment A

Segment B



← Savršena veza između cigli (segmenta)

Slika 7. Veza između cigli (segmenta)

4. ANALITIČKA ANALIZA

Tijekom ispitivanja uočeni su različiti mehanizmi popuštanja veza između opeka [1-6]. Moguće je razlikovati pet slučajeva mehanizma:

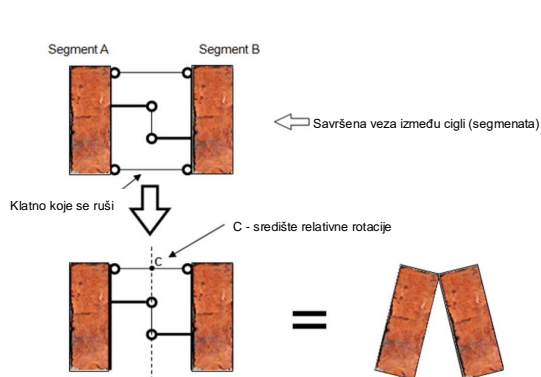
1. otvaranje zgloba koje smanjuje broj veza (z) za 1 ($z = 1$), sa središtem relativne rotacije smještenim u gornjem dijelu veze (slika 8);
2. otvaranje zgloba koje smanjuje broj veza za 1 ($z = 1$), sa središtem relativne rotacije smještenim u donjem dijelu veze (slika 9);
3. nastajanje posmika u ravnini između segmenta, koje smanjuje broj veza za 1 ($z = 1$) (slika 10);
4. nastajanje posmika u ravnini između segmenta i zgloba sa središtem relativne rotacije u gornjem dijelu veze, koji smanjuju broj veza za 2 ($z = 2$) (slika 11);
5. nastajanje posmika u ravnini između segmenta i zgloba sa središtem relativne rotacije u donjem dijelu veze, koji smanjuju broj veza za 2 ($z = 2$) (slika 12).

Bednarz, L. J., Jasienko, J., Kadluczka, A.

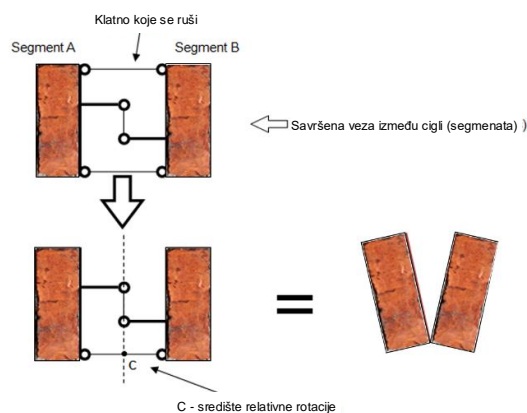
Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima

Analiza gore navedenih mehanizama sloma pokazuje da se luk ruši ne samo kada između segmenata (cigli) dođe do popuštanja u čak četiri presjeka, što predstavlja slučajeve 1-3 (npr. 3-1-1-1-1 = -1), nego i kad između segmenata dođe do popuštanja u samo dva presjeka, što predstavlja slučajeve 4-5 (npr. 3-2-2 = -1). Također se opaža slom luka uzrokovan popuštanjem jedne od međusegmentnih veza na tri mjesta, što je kombinacija gore navedenih slučajeva (npr. 3-2-1-1 = -1).

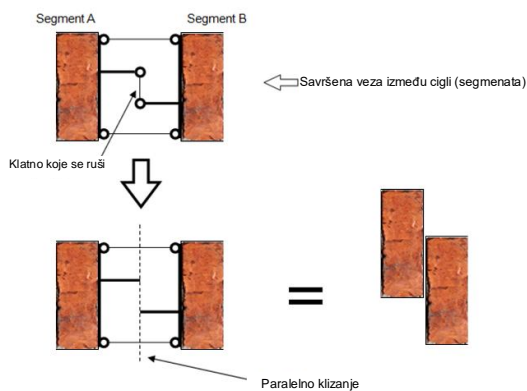
Iz analize proizlazi da je pojava određene vrste sloma povezana s vrstom ojačanja i njegovim mjestom (na ekstradosu ili intradosu).



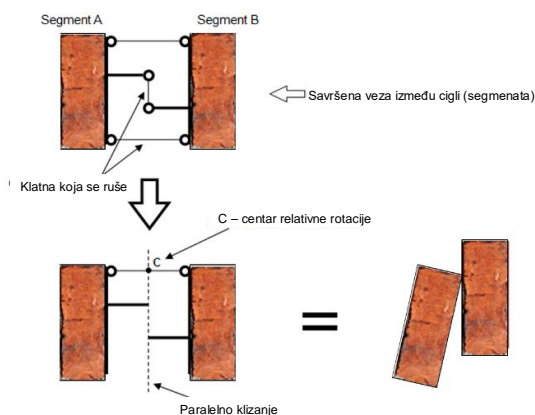
Slika 8. Mehanizam nastajanja zgloba - središte relativne rotacije smješteno u gornjem dijelu veze



Slika 9. Mehanizam nastajanja zgloba - središte relativnog kretanja u donjem dijelu veze.



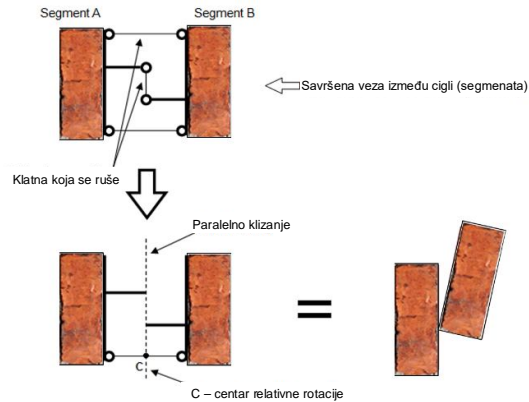
Slika 10. Mehanizam nastajanja klizanja u ravni između segmenata



Slika 11. Mehanizam nastajanja smicanja u ravni između segmenata i zglob sa središtem relativne rotacije u gornjem dijelu veze

Bednarz, L. J., Jasienko, J., Kadluczka, A.

Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima



Slika 12. Mehanizam nastajanja smicanja u ravnini između segmenata i zglob sa središtem relativne rotacije u donjem dijelu veze

U slučaju raslojavanja ojačanja s kompozitnim materijalom iz ljuske opeke, prije razaranja poprečnog presjeka stvara se mehanizam nastajanja pukotina različit je od onog predloženog na sl. 8 - 12. Stoga je moguće u ojačanoj ravnini predložiti formiranje elastične spojnice na spoju dviju cigli (dva segmenta) - kao na slici 13 - koja omogućuje rotiranje lijevog i desnog dijela modela.



Slika 13. Predloženi model spoja (veze) između opeka (segmenata)

Predloženi model spoja, uzimajući u obzir formiranje elastičnog zgloba osjetljivosti E , na mjestu ojačanja, omogućit će stvaranje rotacije. Međutim, stvaranje rotacije uzrokuje situaciju u kojoj će drugi dijelovi modela konstrukcije luka početi formirati zglobove (s krutim ili elastičnim režimom) pretvarajući cijelu konstrukciju u "mehanizam" i stoga uzrokujući slom luka. Razvijajući ovaj tok djelovanja, može se reći da ojačani zidni element funkcionira u tri faze.

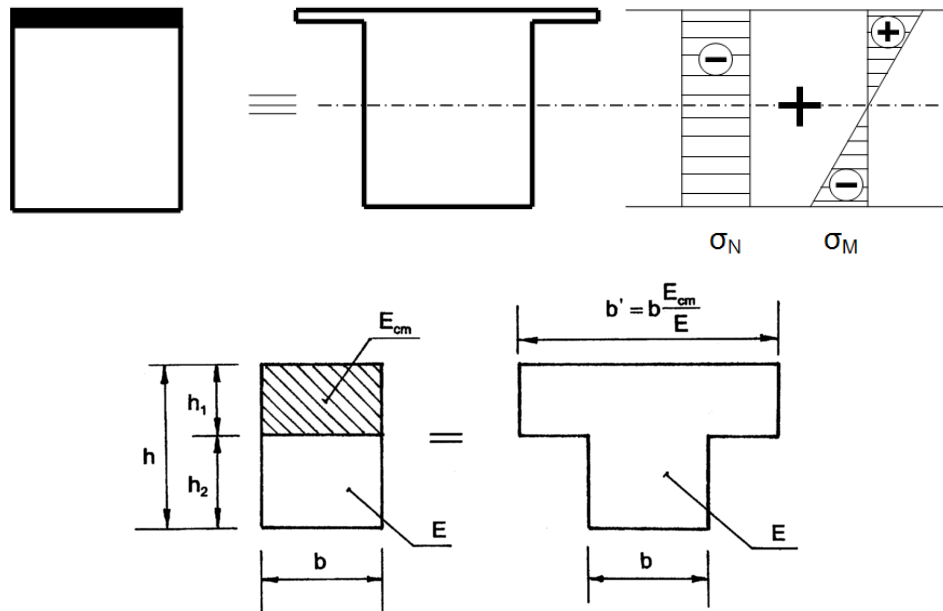
4.1 1. faza

Prije pucanja presjeka cigle može se pretpostaviti da su u cijelom presjeku prisutna linearna tlačna i vlačna naprezanja uslijed normalne sile N i momenta savijanja M . Ovdje se može

Bednarz, L. J., Jasienko, J., Kadluczka, A.

Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima

razmotriti ekvivalentni presjek, nakon što se ojačanje promijeni u ekvivalentni presjek homogenizirane opeke (slika 13) koristeći metodu sadržanu u [7] za određivanje ekvivalentnog reduciranog presjeka, (slika 14).

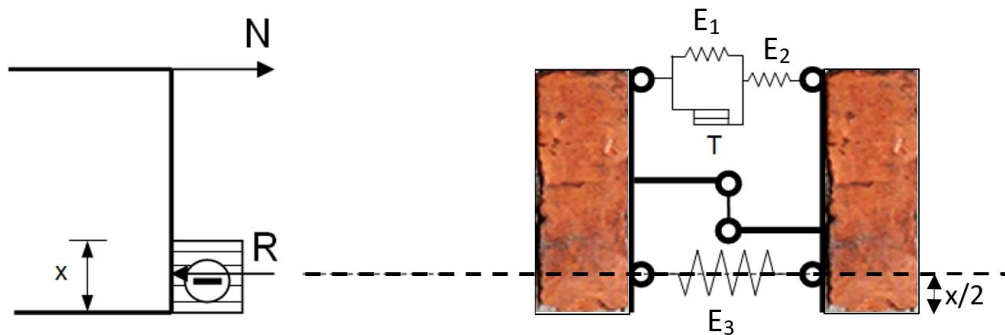


Slika 14. Ekvivalentni presjek ojačanog zida
(metoda određivanja ekvivalentnog reduciranog presjeka)

4.2 2. faza

Nakon pucanja presjeka zida u zoni vlaka, vlačna naprezanja prenose se "ojačanjem" koje se izvan napuknutog presjeka ne odvaja od zida i djeluje u rasponu elastičnosti. Zona kompresije ima promjenjivu visinu x . Model presjeka koji funkcionira u 2. fazi prikazan je na slici 15.

Opruga E_2 djeluje u 2. fazi. Sila trenja T na klizaču u modelu predstavlja posmičnu čvrstoću sljubnice morta u blizini napuknutog presjeka u zidu, (slika 15). Opruga E_3 predstavlja elastičnost zida.

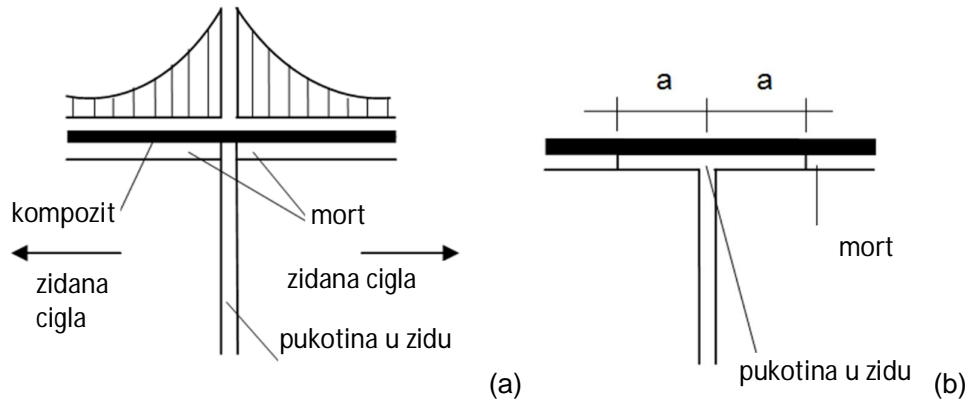


Slika 15. Model presjeka koji djeluje u 2. fazi

Bednarz, L. J., Jasienko, J., Kadluczka, A.

Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima

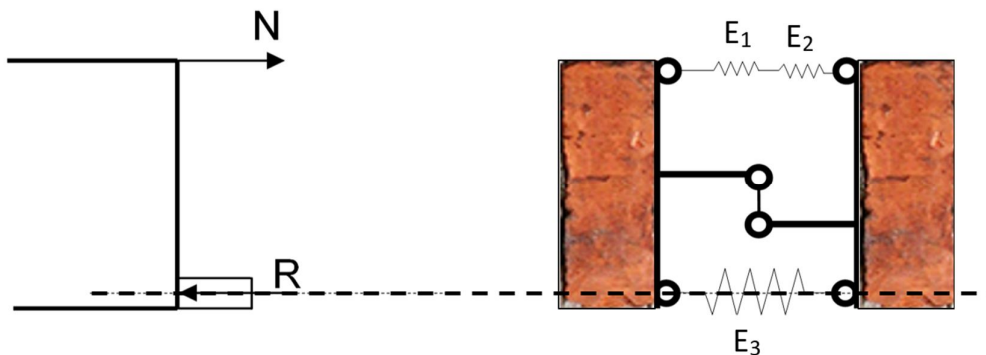
Kada se premaši čvrstoća morta između ojačanja i ziđa u području sljubnice u zidu (ocrtani presjek - slika 16), odnosno premaši nosivost T klizača u modelu (slika 15), doći će do smicanja sljubnice u presjeku a lijevo i desno od ocrtanog presjeka ziđa.



Slika 16. Detalj spoja elemenata, (a) dijagram naprezanja ojačanja, (b) uništena sljubnica u presjeku "2a"

4.3 3. faza

Pri smicanju sljubnice, doći će do klizanja na klizaču. Istodobno će doći do velike relativne rotacije presjeka, i donja veza će se kretati postupno prema dolje (do ruba presjeka – slika 16).



Slika 17. Model presjeka koji djeluje u 2. fazi

U trenutku klizanja u mortu klizača ne djeluje, ali djeluju serijski povezane opruge E_1 i E_2 . Ako je, prema slici 17:

$$F = E \cdot x \quad (1)$$

gdje je:
- F - sila,

Bednarz, L. J., Jasienko, J., Kadluczka, A.

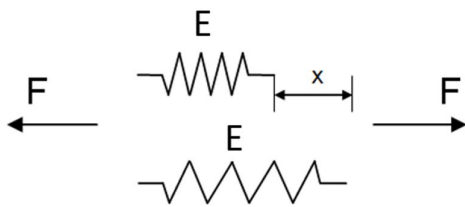
Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima

- E - osjetljivost opruge E,
 - x - produženje opruge E,
 tada se dvije serijske opruge E₁ i E₂ mogu zamijeniti jednom oprugom E (slika 18), gdje je:

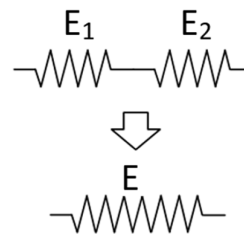
$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \quad (2)$$

gdje je:

- E - osjetljivost opruge E,
- E₁ - osjetljivost opruge E₁,
- E₂ - osjetljivost opruge E₂.



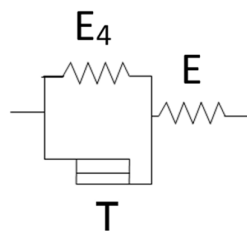
Slika 18. Funkcioniranje opruge E



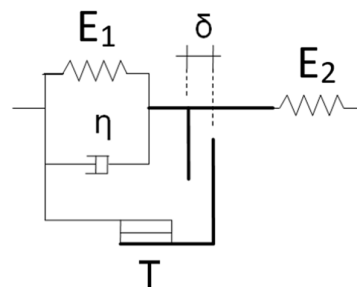
Slika 19. Niz opruga zamijenjen jednom oprugom

Ako se konstrukcija ne razori u 3. fazi, može doći do daljnjeg klizanja u mortu za još jedan presjek. U ovom slučaju, za model se mora usvojiti raspored kako je prikazano na slici 19.

U model se također može uvesti i utjecaj puzanja. Može biti slučaj da u 3. fazi ne dođe do porasta opterećenja. Mort u spoju između ojačanja i zida može biti uništen kao posljedica puzanja ojačanja. Tada se može pretpostaviti da je vlačna zona modelirana sustavom kao na slici 20, u kojem je ugrađen prigušivač η . Kad se puzanje poveća do određene vrijednosti δ , aktivirat će se klizač (slika 21). Ako je sila F dovoljno velika ili ako dođe do povećanja sile, klizač će reagirati i doći će do smicanja morta između ojačanja i zida.



Slika 20. Raspored opruga u mogućem modelu 3. faze



Slika 21. Model vlačne zone

Takvo ponašanje lukova od opeke uočeno je tijekom eksperimentalnih istraživanja. Daljnja razmatranja bi se trebala usmjeriti na određivanje duljine zona sidrišta i elastične

Bednarz, L. J., Jasienko, J., Kadluczka, A.

Analitički model ponašanja zidane konstrukcije ojačane kompozitnim materijalima

osjetljivosti pojedinih kompozitnih materijala koji se koriste kao ojačanje te na razvoj odgovarajućeg računskog modela.

5. ZAKLJUČCI

Treba napomenuti da postoji važna razlika između modela sloma za presjek s čeličnom armaturom i ojačanja od kompozita, koji imaju višestruko veću čvrstoću. U jednadžbama za armiranobetonske ili zidane presjeke ojačane čelikom, pretpostavlja se da u trenutku sloma nema klizanja između materijala i armature. Stoga u slučajevima kada do sloma presjeka dođe puknućem armature, čvrstoća čelika pri plastifikaciji se uključuje u jednadžbe i formule. Ako je armatura tako visoke čvrstoće da će naprezanja u armaturi uvijek biti značajno manja od njezine čvrstoće, a istodobno je i čvrstoća tlačne zone velika, do sloma presjeka može doći smicanjem sloja između armature i betona (ziđa). U takvim slučajevima, umjesto lomne čvrstoće armature, u jednadžbama i formulama treba koristiti naprezanje pri kojem dolazi do smicanja (klizanja) između armature i ziđa. Ovo naprezanje može biti puno manje od prekidne čvrstoće armature.

Na temelju predloženih rješenja može se zaključiti da:

- 1) Za izračunavanje sposobnosti savijanja presjeka ojačanog kompozitnim materijalima (npr. ugljičnim vlaknima) ne mogu se koristiti standardne formule iz [7], u kojima se pretpostavlja f_{yd} kao čvrstoća ojačanja vlaknima na lom. Ova čvrstoća, koja se u radu uzima kao $f_s \approx 4800$ MPa, ne može se postići jer je previsoka.
- 2) Pretpostavka f_{yd} kao ad hoc čvrstoće zahtijeva hipotezu da se armatura neće odvojiti od ziđa (čak i ako nije puknuta), kao u slučaju armiranobetonskih elemenata.
- 3) Prikazani modeli s oprugama su fenomenološki modeli i ne koriste se za proračune, nego samo kako bi se pokazalo ponašanje konstrukcije i funkcioniranje modela. Parametri ovih modela mogu se odrediti poznavanjem F_s , a , elastičnih svojstava i f_d , N , M .
- 4) Nakon određivanja posmične čvrstoće između ojačanja i ziđa za različite materijale ojačanja (npr. mreža, trake i drugo), ljepljivi mort, ziđe itd., čini se da bi predloženi analitički model bio izvediv koristeći iste proračunske formule kao i za čeličnu armaturu.

LITERATURA

1. Bednarz Ł.J., Górski A., Jasieńko J., Rusiński E.: Simulations and analyses of arched brick structures, *Automation in Construction*. 2011, No. 20 (7)
2. Bednarz Ł. J.: Statički rad povijesnih zakrivljenih zidanih konstrukcija podvrgnutih postupcima popravljivanja i ojačanja, doktorska disertacija, Knjižnica Sveučilišta za znanost i tehnologiju u Wrocławu, 2008
3. Bednarz Ł. J., Drygała I., Dulińska J., Jasieńko J.: Study of Materials Behavior in a Monumental Vault Strengthened by a Carbon Net in a Mineral Matrix Subjected to Seismic Influence, *Applied Sciences* 2021, No. 11 (3):1015
4. Krajewski P., Hojdys Ł.: Experimental studies on buried barrel vaults, *International Journal of Architectural Heritage*, 2015, Vol. 9, Iss. 7
5. Hojdys Ł., Krajewski P.: Laboratory tests on masonry vaults with backfill strengthened at the extrados, *Key Engineering Materials*, 2015, Vol. 624
6. Valluzzi M.R., Valdemarca M., Modena C.: Behaviour of bricks masonry vaults strengthened by FRP laminates, *Int. J. Composites for Construction*, 2001, 5 (3)
7. EN 1996-1-1 Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures