

Ispitivanje mehaničkih svojstava gradiva zidanih građevina

Joško Krolo, Mladenko Rak

Ključne riječi

zidane građevine,
projekt sanacije,
mehanička svojstva,
mort,
opeka,
kamen

J. Krolo, M. Rak

Stručni rad

Ispitivanje mehaničkih svojstava gradiva zidanih građevina

U radu su opisani postupci i prikazani rezultati ispitivanja najvažnijih mehaničkih svojstava gradiva građevina zidanih od opeka i kamena. Ispitivane su posmične, tlačne i vlačne čvrstoće morta, opeke i kamena te moduli elastičnosti i Poissonovi koeficijenti morta i kamena. Najveći dio ispitivanja proveden je na građevinama koje su zaštićeni spomenici kulture u Vukovaru i Dubrovniku. Istaknuta je važnost tih ispitivanja za izradu kvalitetnoga projekta sanacija zidanih građevina.

Key words

masonry buildings,
structural rehabilitation
design,
mechanical properties,
mortar,
brick, stone

J. Krolo, M. Rak

Professional paper

Analysis of mechanical properties of materials used in masonry buildings

Procedures and results obtained by testing principal mechanical properties of materials for masonry buildings made of brick and stone, are presented in the paper. The testing includes determination of shear strength, compressive strength and tensile strength for mortar, brick and stone, as well as determination of the modulus of elasticity and Poisson's ratio for mortar and stone. Most of these investigations were conducted on structures categorized as protected cultural monuments, in the cities of Vukovar and Dubrovnik. The significance of these analyses for the preparation of appropriate rehabilitation design documents for masonry buildings is emphasized.

Mots clés

maçonneries,
projet de réfection,
propriétés mécaniques,
mortier,
brique,
pierre

J. Krolo, M. Rak

Ouvrage professionnel

Essais des propriétés mécaniques des matériaux de construction des maçonneries

Cet article décrit les procédés et présente les résultats des essais des propriétés mécaniques essentielles des matériaux de construction des maçonneries en briques et en pierres. Les essais ont porté sur la résistance au cisaillement, à la compression et à la traction du mortier, de la brique et de la pierre, ainsi que sur les modules d'élasticité et des coefficients de Poisson du mortier et de la pierre. La plupart des essais ont été effectués sur les bâtiments classés monuments historiques de la culture à Vukovar et à Dubrovnik. On souligne l'importance de ces essais pour la mise en place d'un bon projet de réfection des maçonneries.

Schlüsselworte:

gemauerte Bauwerke,
Sanierungsentwurf,
mechanische
Eigenschaften,
Mörtel
Ziegel,
Stein

J. Krolo, M. Rak

Fachbericht

Untersuchung der mechanischen Baustoffeigenschaften für gemauerte Bauwerke

Im Artikel sind die Verfahren beschrieben und die Ergebnisse der Untersuchung der wichtigsten mechanischen Eigenschaften der Baustoffe für gemauerte Bauwerke aus Ziegel und Stein dargestellt. Untersucht wurden Schub-, Zug- und Druckfestigkeiten von Mörtel, Ziegel und Stein, sowie Elastizitätsmoduli und Poisson's Beiwerte von Mörtel und Stein. der Grossteil der Untersuchungen wurde an Bauwerken durchgeführt die geschützte Kulturdenkmäler in Vukovar und Dubrovnik sind. Hervorgehoben ist die Wichtigkeit dieser Untersuchungen für die Abfassung eines entsprechend guten Sanierungsentwurfs für gemauerte Bauwerke.

Autori: Mr. sc. **Joško Krolo**, dipl. ing. građ.; dr. sc. **Mladenko Rak**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, Kačićeva 26

1 Uvod

U novije vrijeme je sve češća potreba za sanacijom, rekonstrukcijom ili ojačanjem starih zidanih građevina. Do toga ih je dovelo sustavno neodržavanje, nesancija ranijih oštećenja (npr. od potresa manje jačine), nekontrolirani zahvati zbog prenamjene prostora (pregrađivanja, probijanje ili zazidavanje otvora i sl.), oštećenja od ratnih razaranja i dr. Osim togate građevine, sa više aspekata, ne zadovoljavaju suvremene zahtjeve u pogledu mehaničke otpornosti i stabilnosti u prvom redu na seizmička opterećenja.



Slika 1. U domovinskom ratu oštećena kapela Sv. Roka u Vukovaru

Za potrebe izrade kvalitetnog projekta sanacije nužno je sagledati niz čimbenika koje stara građevina krije u sebi, a najvažniji su mehanička svojstva gradiva od kojih je sazidana. Ti podaci će projektantu sanacije biti od neprocjenjive koristi.

Kako se najčešće radi o građevinama povijesnog značenja, postavlja se zahtjev da se radovi na određivanju tih karakteristika izvedu uz minimalno oštećenje postojeće strukture nosivog zida.

U ovom radu će se prikazati dio metoda i rezultata eksperimentalnih određivanja najvažnijih mehaničkih svojstava gradiva kod građevina zidanih kamenom i punom opekom koje je Zavod za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu realizirao u novije vrijeme.

2 Opis istraživanja

2.1 Ispitivanje posmične i tlačne čvrstoće morta

Ispitivanje se obavlja na građevini s pomoću male hidraulične preše čime je minimalno oštećena struktura postojećeg nosivog zida, a ovaj postupak omogućava relativno brzu kontrolu morta na više lokacija.

Za određivanje posmične čvrstoće morta (τ_{mu}) horizontalno se pomiče opeka kojoj je uklonjen mort i sa druge strane. Posmična čvrstoća morta dobije se na temelju

registrirane granične horizontalne sile (H_u) koja djeluje na opeku u trenutku posmičnog loma, te odgovarajuće površine (A_h) na koju se prenosi posmik. Pri tome je potrebno točno locirati položaj mjernog mjesta radi izračuna vertikalnog opterećenja (G_o), odnosno naprezanja (σ_o).

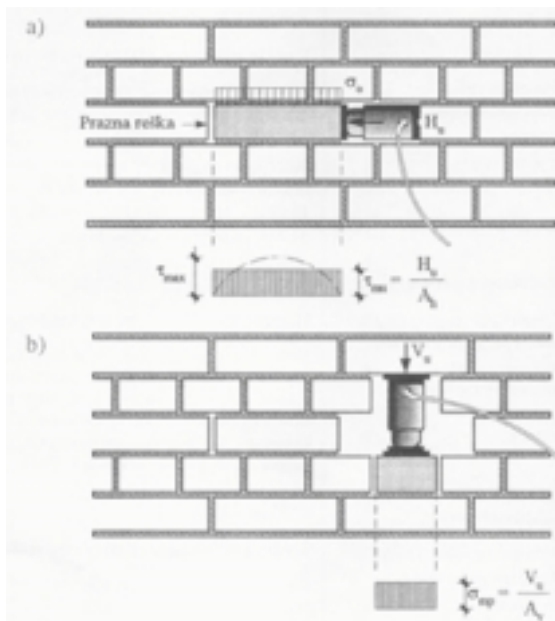
Iz tih veličina mogu se približno izračunati granična glavna vlačna naprezanja u pojedinim zidovima prema izrazu:

$$\sigma_{vu} = -\frac{\sigma_o}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{2}\right)^2 + (b \cdot \tau_{mu})^2} \tag{1}$$

gdje je:

- $\tau_{mu} = \frac{H_u}{A_h}$ - prosječno granično posmično naprezanje
- σ_o - prosječno tlačno naprezanje od vertikalnog opterećenja
- b - faktor koji predstavlja omjer maksimalne i prosječne veličine posmičnog naprezanja u horizontalnom presjeku zida

Način ispitivanja posmične čvrstoće morta prikazan je na slikama 2. a. i 3.



Slika 2. Ispitivanje posmične i tlačne čvrstoće morta

Tlačna čvrstoća morta (σ_{mp}) određuje se na istom mjestu s tim da se otvor za prešu povisi. Sila se nanosi na polovini jedne opeke, a tlačna čvrstoća se dobije na temelju registrirane vertikalne sile (V_u) u trenutku dosizanja tlačne čvrstoće morta i odgovarajuće površine (A_v) na koju se prenosi tlak (slike 2. b i 4.).

$$\sigma_{mp} = \frac{V_u}{A_v} \quad (2)$$



Slika 3. Način ispitivanja posmične čvrstoće morta zida od opeke



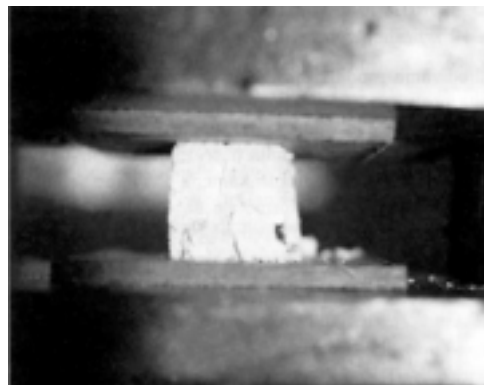
Slika 4. Način ispitivanja tlačne čvrstoće morta zida od opeke



Slika 5. Način ispitivanja posmične čvrstoće morta zida od lamena

Sličan način ispitivanja posmične čvrstoće morta primijenjen je i kod zidova zidanih od kamena. Na slici 5. prikazan je primjer tog ispitivanja.

Paralelno s ovim ispitivanjima na licu mjesta provedeno je i ispitivanje posmične i tlačne čvrstoće morta i na uzorcima uzetim iz zida. Na slici 6. prikazano je takvo ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama veličine 2 x 2 x 2 cm do 4 x 4 x 4 cm, zavisno o veličini komada morta uzetog iz zida.



Slika 6. Ispitivanje tlačne čvrstoće morta u laboratoriju

2.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće opeke i kamena

Tlačna čvrstoća opeke dobije se ispitivanjem triju uzoraka sastavljenih od po dvije opeke uzete iz nosivog zida dotične građevine. Cementni mort se spravlja od cementa i pijeska granulacije 0 do 1 mm u omjeru 1:1 i vode. Debljina cementnog morta je najviše 5 mm.

Tlačna čvrstoća se ispituje s pomoću baždarene preše koja ima uređaj za ravnomjerno povećavanje sile. Uzorak se opterećuje tako da naprezanje raste brzinom 0,5 – 0,6 MPa u sekundi, do loma i u tom se trenutku registriira sila F_{lomr} . To ispitivanje je definirano normom HRN B.D8.011.

Tlačna čvrstoća se izračuna po izrazu:

$$\sigma_{op} = \frac{F_{lomr}}{A_o} \quad (3)$$

gdje je A_o opterećena bruto površina uzorka.

Uzorci pripremljeni za ispitivanje prikazani su na slici 7.

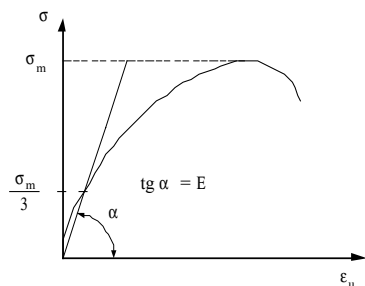


Slika 7. Uzorci pripremljeni za ispitivanje tlačne čvrstoće opeke

Tlačna čvrstoća kamena ispituje se na kockama dimenzija 50 x 50 x 50 mm ispiljenim od kamena uzetog iz nosivog zida predmetne građevine. Postupak ispitivanja je sličan postupku ispitivanja tlačne čvrstoće opeke.

2.3 Ispitivanje modula elastičnosti i Poissonova koeficijenta morta i kamena

Određivanje modula elastičnosti i Poissonova koeficijenta provedeno je u laboratoriju na prizmama izrađenim od morta ili kamena izvađenih iz nosivog zida. Prizma se opterećuje tlačnim naprezanjem do nivoa cca 1/3 tlačne čvrstoće morta ili kamena. Pri tome se mjere uzdužne i poprečne deformacije na dvjema suprotnim stranicama prizme. Ovo ispitivanje je slično ispitivanju statičkog modula elastičnosti betona propisano normom HRN U.M1.025.

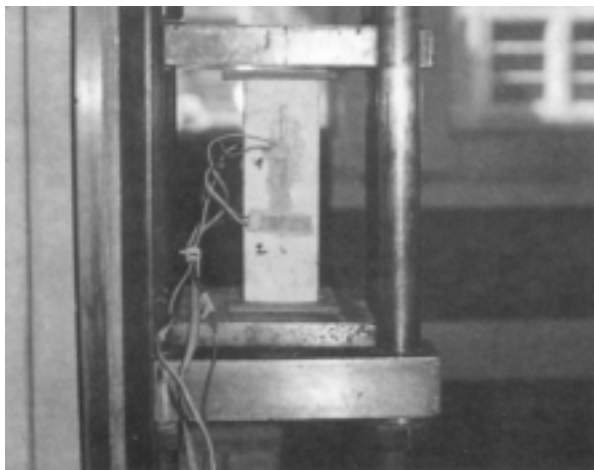


Slika 8. Dijagram naprezanje – uzdužna relativna deformacija

Ispitivanjama se dobije sekantni modul elastičnosti (4) i Poissonov koeficijent (5) (slike 8. i 9.):

$$E = \frac{|\Delta\sigma|}{|\Delta\varepsilon_u|} \quad (4) \quad \nu = \frac{|\Delta\varepsilon_p|}{|\Delta\varepsilon_u|} \quad (5)$$

U tim izrazima $\Delta\varepsilon_u$ je uzdužna, a $\Delta\varepsilon_p$ poprečna relativna deformacija.



Slika 9. Ispitivanje modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta kamena

3 Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja osnovnih svojstava gradiva građevina zidanih od pune opeke i kamena koja su provedena na građevinama za potrebe izrade projekta sanacije prikazani su u tablicama 1, 2 i 3.

3.1 Građevine zidane od pune opeke

Tablica 1. Rezultati ispitivanja čvrstoća morta i opeke

R. br.	Građevina	Posmična čvrstoća morta τ_{mu} (MPa)	Tlačna čvrstoća morta σ_{mp} (MPa)	Tlačna čvrstoća opeke σ_{op} (MPa)
1.	Zgrada Vukovar-Srijemske Županije u Vukovaru	0,456*	3,407*	12,88
2.	Ekonomska škola u Vukovaru	0,240*	2,616*	15,36
3.	Kapela Svetog Roka u Vukovaru	0,492	3,221	10,96
4.	Villa Eltz u Vukovaru	0,591	3,605	12,02
5.	Dom umirovljenika u Vukovaru	0,626	4,214	12,64
6.	Gimnazija u Vukovaru	0,501*	3,205*	9,85
7.	Centralna ljekarna u Vukovaru	0,515*	3,457*	10,62
8.	Mađarska škola u Vukovaru	0,387*	2,540*	10,13
9.	Crkva Sv. Filipa i Jakova u Vukovaru	0,587	3,355	13,95
10.	Franjevački samostan u Vukovaru	0,616	4,004	7,43
11.	“Ekonomska škola” u Vukovaru	0,240*	2,616*	15,36
12.	OŠ Borovo naselje u Borovu Naselju	0,697*	4,000	17,50
13.	Zavod za zapošljavanje u Vukovaru	0,565*	4,735*	12,50
14.	Željez. kolodvor Vukovar-Borovo u Vukovaru	0,450	3,060	11,20
15.	Zgrada mirovinskog osiguranja u Vukovaru	0,405*	3,325*	10,50
16.	Dječji dispanzer u Vukovaru	0,370*	2,885*	9,60
17.	Kapela Gospe od hrasta u Vukovaru	0,320	1,800	11,60
18.	OŠ Stjepan Supanc u Vukovaru	0,515*	3,940*	13,40
19.	Centralni vrtić Borovo u Borovu Naselju	0,460	3,980	14,20
20.	Radnički dom (Hotel Grand) u Vukovaru	0,376	2,723	10,64
20.	Hrvatski dom u Vukovaru	0,390	3,170	10,75
21.	Stamb. zgrada Podolje 34 u Zagrebu	0,410	2,380	13,60
22.	Zgrada Euroturist Grgura Ninskog 1 u Zagrebu	0,091	-	5,84

* - srednja vrijednost u prizemlju i na katu

3.2 Građevine zidane od kamena

Tablica 2. Rezultati ispitivanja čvrstoća morta i kamena

R. br.	Građevina	τ_{mu} (MPa)	σ_{mp} (MPa)	σ_{mv} (MPa)	σ_{kp} (MPa)	σ_{kv} (MPa)
1.	Palača Đorđić u Ulici od puča 17 u Dubrovniku	1,540	10,91	1,460	121,75	
2.	Palača u Ulici od puča 11 u Dubrovniku	1,910	10,33	2,540	69,61	13,13
3.	Palača Martinušić u Ulici Sv. Josipa u Dubrovniku	0,984	9,00	2,210	84,57	-
4.	Palača Sorkočević u Dubrovniku	1,180	11,61	2,095	-	-
5.	Franjevački samostan Mala braća u Dubrovniku	1,073*	11,79*	1,995*	-	-
6.	Hvarski arsenal u gradu Hvaru	0,913	13,53	2,240	49,10	-

* - srednja vrijednost u prizemlju i na katu
 τ_{mu} – posmična čvrstoća morta
 σ_{mp} i σ_{kp} – tlačna čvrstoća morta i kamena
 σ_{mv} i σ_{kv} – vlačna čvrstoća morta i kamena

Tablica 3. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta morta i kamena

Građevine	E_m (MPa)	ν_m	E_k (MPa)	ν_k
Palača Đorđić u Ulici od puča 17, Palača u Ulici od puča 11 i Palača Martinušić u Ulici Sv. Josipa u Dubrovniku	$2,31 \cdot 10^3$	0,108	$4,65 \cdot 10^4$	0,335

m – mort
k – kamen

4 Zaključak

U radu su opisani postupci i prikazani rezultati ispitivanja nekih najvažnijih mehaničkih svojstava građiva zidanih građevina koja su od velike važnosti za izradu

kvalitetnog projekta sanacije. Osim toga koriste se i druge bezrazorne (nedestruktivne) metode ispitivanja koje se provode na samom objektu i s kojima se još kvalitetnije ocjenjuje stanje postojećeg zida. To su: ispitivanje tlačne čvrstoće morta, opeke i kamena *sklerometrom* i *mjerjenje brzine prolaska ultrazvuka* (kroz cijelu širinu zida). Ta ispitivanja se provode relativno brzo i može se obuhvatiti velik broj elemenata na građevini. Tako se uspostavlja korelacija između ispitivanja građiva s razaranjem prema onima bez razaranja i dobivaju se podaci za cijelu građevinu.

Iz rezultata ispitivanja vidi se velika razlika od građevine do građevine, tako da se rezultati ispitivanja jedne građevine ne mogu primijeniti na drugu. To upozorava na potrebu ovih ispitivanja kao prethodnicu prije izrade statičkog proračuna, odnosno projekta sanacije, za svaku građevinu posebno.

LITERATURA

- [1] Rač, M.; Krolo, J.: *Izvjješća o ispitivanju mehaničkih svojstava građiva na građevinama u Dubrovniku*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za tehničku mehaniku, 1997.
- [2] Rač, M.; Krolo, J.: *Izvjješća o ispitivanju mehaničkih svojstava građiva na oštećenim građevinama u Vukovaru*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za tehničku mehaniku, 1998.
- [3] Dvornik, J.; Rač, M.; Krolo, J.; Lazarević, D.: *Idejna razrada sanacije konstrukcije triju palača u Dubrovniku (Palača od Puča 11, Palača Martinušić i Palača Đorđić)*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za tehničku mehaniku, 1998.
- [4] Sorić, Z.: *Zidane konstrukcije I*, Hrvatski savez građevinskih inženjera, Zagreb, 1999.
- [5] Aničić, D.; Morić, D.; Zaninović, V.: *Granični glavni vlačni napon zidova*, Zbornik radova I kongresa DGKH, Plitvička jezera, 1984.
- [6] Borković, A.: *Primjeri seizmičkog ojačanja spomenika kulture u Dubrovniku*, Zbornik radova I kongresa DGKH, Plitvička jezera, 1984.