

ISMET V. TAHIROVIĆ\*

## OTPORNOST ZIDANE KUPOLE NA DJELOVANJE ZEMLJOTRE- SA, UZROCI ZA POJAVU PUKOTINA, NJIHOV PRAVAC I POD- RUČJE RASPROSTIRANJA

### 1. OPTEREĆENJE I MEHANIČKE OSOBINE MATERIJALA OD KOJIH ZAVISI NOSIVOST ZIDANE KUPOLE

Zidane kupole susrećemo danas, uglavnom, na objektima koji su građeni u ranijim istorijskim epohama. Takvi objekti, koji su preživjeli do naših dana, smatraju se kulturno-istorijskim spomenicima. Zbog raznih uticaja kojima su bili izloženi u toku svog dugogodišnjeg postojanja (stalna opterećenja, opterećenje od vjetra, opterećenja od zemljotresa, atmosferski uticaji i dr.), ovi objekti su pretrpjeli oštećenja koja mogu biti različitog karaktera, intenziteta i značaja po objektu. U cilju zaštite, korišćenja i očuvanja za budućnost, na ovim objektima se preduzimaju radovi saniranja čiji obim i karakter zavise od vrste i obima oštećenja. U krajnjim slučajevima potrebno je izvršiti potpunu rekonstrukciju. Iz ovih razloga je poznavanje konstrukcija ove vrste i praktična potreba savremenog graditeljstva.

Osnovni materijal od koga se zida kupola (kameni blokovi, opečni blokovi, opeke i sl.) spada u tzv. »kompresivne materijale«, tj. materijale kod kojih je karakteristična (dominantna) čvrstoća na pritisak. Ali, iako je čvrstoća ovih materijala na zatezanje, u odnosu na čvrstoću na pritisak, višestruko manja, ona ima značaja na ukupno ponašanje zidne kupole i njenu nosivost. Zato će se u ovom radu pri analiziranju nosivosti kupole ova čvrstoća uzimati u razmatranje.

Malter za zidanje kupole, poslije izvršenog otvrdnjavanja i vezivanja, ima određenu čvrstoću na pritisak, na smicanje, ali prak-

---

\* Prof. dr Ismet V. Tahirović, Arhitektonski fakultet, Sarajevo.

tično nikakvu čvrstoću na zatezanje, naročito ako je u pitanju napon zatezanja u pravcu paralele kupole, (tj. veza između čeonih površina blokova za zidanje i maltera). Sa čvrstoćom maltera na zatezanje se, zbog toga, ne može računati.

Usljed raznih uticaja (naročito atmosferskih, a i drugih uticaja fizikalnog ili kemijskog karaktera) kohezija maltera koja je postojala poslije izvršenog otvrdnjavanja, može nakon određenog vremena da bude izgubljena. U takvom slučaju vezivna sposobnost maltera zasniva se uglavnom samo na postojanju trenja između spojnih površina.

Zidane kupole su redovito rotaciono simetrične, a najčešće sfernog oblika. Oblik sferične kupole određuje njen raspon i strijela, odnosno poluprečnik sfere i centralni kut koji zatvaraju spojnice centra sfere i oslonaca. Debljina kupole je, u najvećem broju slučajeva (za kupole uobičajenih raspona), konstantna. Prema tome, naponi u materijalu kupole zavise od veličine unutrašnje sile. Karakter unutrašnjih sila (pritisak, zatezanje, smicanje) i njihova veličina zavise, pored oblika kupole (raspona i strijele) i od vrste opterećenja. Najvažnija opterećenja koja djeluju na kupolu su: vlastita težina kupole (u koju se uključuje i težina pokrova koja je, međutim, kod zidanih kupola, u odnosu na vlastitu težinu kupole relativno male vrijednosti), snijeg, vjetar i zemljotres.

Vertikalna opterećenja od vlastite težine i snijega po cijeloj površini su centralno simetrična i izazivaju meridijalne i ekvatorijalne sile. Sile smicanja za ova opterećenja ne postoje. Za ova opterećenja meridijalne sile su pritiskujuće. Ekvatorijalne sile, za ova vertikalna opterećenja su pritiskujuće od određene zone (počev od vrha kupole), a zatim zatežujuće.

Za horizontalna opterećenja od vjetra i zemljotresa u kupoli se javljaju sile smicanja, a meridijalne i ekvatorijalne sile mogu imati alternativan predznak u zavisnosti od pravca djelovanja ovih opterećenja (u horizontalnoj ravnini) i njihovog smjera.

Kao što će se pokazati iz rezultata računске analize napona u kupoli, zatežujuće meridijalne sile koje potiču od djelovanja zemljotresa, po svojoj apsolutnoj vrijednosti, za praktično prihvatljiv intenzitet zemljotresa, nikada ne dostižu vrijednost sile pritiska u pravcu meridijana koja potiče od vlastite težine. Iz toga se zaključuje da u pravcu meridijana ne može postojati ni u kakvim okolnostima sila zatezanja, a to znači niti treba očekivati pukotine u zidanoj kupoli koje se prostiru u pravcu paralele.

Isto razmatranje vrijedi i za djelovanje opterećenja od vjetra s napomenom da je relativni uticaj vjetra, to manji što je debljina kupole, odnosno njezina vlastita težina veća.

Maksimalna pritiskujuća sila u meridijanu (od djelovanja vlastite težine, snijega i zemljotresa, ili vlastite težine, snijega i vjetra), za raspone i debljine zidanih kupola koje su uobičajene, je daleko ispod nosivosti primijenjenog kompresivnog materijala.

Može se pokazati korištenjem postupaka koji su poznati i koji su korišteni u ovom radu, da je najveća sila pritiska u pravcu paralele kupole, ispod vrijednosti najveće pritiskujuće sile u pravcu meridijana. Prema tome, nosivost zidane kupole ne određuje čvrstoća materijala na pritisak (ona je u uobičajenim kupolama uvijek veća od napona pritisaka koji vladaju).

Ekvatorijalne sile zatezanja koje vladaju u kupoli, usljed djelovanja vlastite težine i opterećenje od snijega, prostiru se na donjem dijelu kupole ispod određenog mjesta. Za horizontalno opterećenje (vjetrom, zemljotresom), horizontalne (ekvatorijalne) sile se prostiru po cijeloj kupoli.

Prema tome, ova opterećenja utiču, ne samo na povećanje intenziteta sile zatezanja, već i na područje u kupoli gdje se javljaju zatežuće sile.

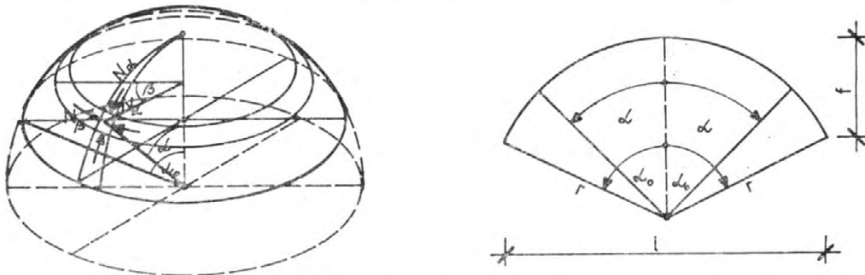
Zidana kupola je vrlo osjetljiva na djelovanje sila zatezanja. Njena nosivost na zatezanje zavisi od čvrstoće na zatezanje materijala elemenata za zidanje (u nosivosti ako je primijenjen pravilan vez opeke puno — prazno učestvuje samo 50% površine presjeka). Ova nosivost određuje krajnju moguću zatežuću silu koju materijal može preuzeti, pod uslovom da se osigura kontinuirano prenošenje zatežućih sila sa jednog bloka na drugi. Ovo se osigurava posredstvom smicanja i trenja. Zbog toga je potrebno osigurati otpor smicanja i trenja u tolikoj mjeri da se omogući iskorištenje zatežuće čvrstoće materijala. Kako ova otpornost na smicanje i trenje zavisi od odnosa dimenzija blokova za zidanje, uspostavljen je odnos dimenzija blokova za zidanje koji treba da bude zadovoljen da bi se mogla iskoristiti zatežuća čvrstoća materijala za zidanje.

Posmatrajući oštećenja na zidanim kupolama koja su nastala kao posljedica zemljotresa, uočeno je da se na njima pojavljuju pukotine u pravcu meridijana i to tako da pukotina prolazi kroz vertikalne spojnice čime se potvrđuje da je do deformacije došlo usljed prekoračenja veze pojedinih blokova, a ne usljed prekoračenja čvrstoće na zatezanje materijala elemenata za zidanje. Ovo saznanje i rezultati analize koja je u ovome radu provedena omogućavaju da se sa većom tačnošću procijeni uzrok oštećenja i sa više sigurnosti pristupi odabiranju rješenja koja će doprinijeti uspješnijoj sanaciji konstrukcije.

## 2. UNUTRAŠNJE SILE U SFERNOJ KUPOLI KONSTANTNE DEBLJINE ZA POJEDINA OPTEREĆENJA

U cilju analiziranja ponašanja konstrukcije pod djelovanjem spoljnog opterećenja koriste se gotovi obrasci za unutrašnje sile u kupoli, koje su određene po membranskoj teoriji. Upotrijebljene su slijedeće oznake:

- $g$  = opterećenje od vlastite težine kupole ( $\text{KN/m}^2$ )  
 $g = d \gamma$ , gdje je:  $d$  = debljina kupole (m)  
 $\gamma$  = zapreminska težina materijala ( $\text{KN/m}^3$ )  
 $s$  = vertikalno opterećenje od snijega jednoliko raspodijeljeno po tlocrtu kupole. ( $\text{KN/m}^2$ )  
 $w$  = horizontalno opterećenje od vjetrova ( $\text{KN/m}^2$ )  
 $p_z$  = horizontalno opterećenje od zemljotresa koje djeluje na masu u kupoli (na vlastitu težinu i snijeg)  
 $p_z = c (g + s)$ ;  
 $c_i = \frac{a_i}{9,81}$  odnos ubrzanja  $i$ -te tačke mase na kupoli u horizontalnom pravcu u odnosu na ubrzanje od gravitacije.  
 Uzima se da je horizontalno ubrzanje kupole, u svim tačkama iste vrijednosti, tj.  $c_i = c$   
 $r$  = poluprečnik sistemne linije sfere  
 $\alpha_0$  = centralni kut koji zatvaraju radijusi povučeni iz oslonaca  
 $\alpha, \beta$  = kutevi koji određuju položaj tačke na kupoli  
 $N_\alpha$  = jedinična sila u pravcu meridijana ( $\text{KN/m}$ )  
 $N_\beta$  = jedinična sila u pravcu paralele ( $\text{KN/m}$ )  
 $N_{\alpha\beta}$  = jedinična sila smicanja ( $\text{KN/m}$ )



Slika 1. Geometrijski elementi sferne kupole i oznake

Za opterećenje od vlastite težine konstrukcije ( $g = \gamma d$ )<sup>1)</sup>

$$N_\alpha = -\frac{r g}{1 + \cos \alpha}; \quad N_\beta = \frac{r g}{1 + \cos \alpha} (1 - \cos \alpha - \cos^2 \alpha); \quad N_{\alpha\beta} = 0$$

Za opterećenje od snijega ( $s$ )<sup>2)</sup>

$$N = -\frac{s r}{2}; \quad N_\beta = -\frac{s r \cos 2\alpha}{2}; \quad N_{\alpha\beta} = 0$$

1)

<sup>1)</sup> [1] str. 752

<sup>2)</sup> [1] str. 753

Za opterećenje od vjetra ( $w$ )<sup>3)</sup>

$$\left. \begin{aligned} N_{\alpha} &= -\frac{w r \cos \alpha}{3 \sin^3 \alpha} (2 - 3 \cos \alpha + \cos^3 \alpha) \cos \beta \\ N_{\beta} &= -\frac{w r}{3 \sin^3 \alpha} (2 \cos \alpha - 3 \sin^2 \alpha - 2 \cos^4 \alpha) \cos \beta \\ N_{\alpha\beta} &= -\frac{w r}{3 \sin^3 \alpha} (2 - 3 \cos \alpha + \cos^3 \alpha) \sin \beta \end{aligned} \right\} (2)$$

Za opterećenje seizmičkim silama koje djeluju na masu od vlastite težine<sup>4)</sup>

$$\left. \begin{aligned} N_{\alpha} &= c \cdot g r \frac{t_g^2}{\sin \alpha} \frac{\alpha}{2} \cos \beta; \quad N_{\beta} = -c g r \left( \sin \alpha + \frac{t_g^2}{\sin \alpha} \frac{\alpha}{2} \right) \cos \beta \\ N_{\alpha\beta} &= -\frac{c g r}{\sin^3 \alpha} (-2 + 2 \cos \alpha + \sin^2 \alpha \cos \alpha) \sin \beta \end{aligned} \right\} (3)$$

Za opterećenje seizmičkim silama koje djeluju na masu od snijega ( $s$ )<sup>5)</sup>

$$\left. \begin{aligned} N_{\alpha} &= \frac{c s r}{3 \sin^3 \alpha} (2 + \cos^3 \alpha - 3 \cos \alpha) \cos \beta \\ N_{\beta} &= -\frac{c s r}{3 \sin^3 \alpha} (3 \sin^4 \alpha - 3 \cos \alpha + \cos^3 \alpha + 2) \cos \beta \\ N_{\alpha\beta} &= -\frac{c s r}{3 \sin^3 \alpha} (2 \cos \alpha - 3 \sin^2 \alpha - 2 \cos^4 \alpha) \cos \beta \end{aligned} \right\} (4)$$

### 3. ZIDNA KUPOLA IZLOŽENA DJELOVANJU SEIZMIČKIH SILA

Uzimaju se u obzir seizmičke sile koje djeluju u horizontalnoj ravnini, ali mogu imati bilo koji pravac i smjer djelovanja. Ako se uzme pretpostavka da se za vrijeme djelovanja zemljotresa kupola samo translatorno pomjera kao cjelina (tj. da nema relativnih smicanja niti savijanja), onda se dobije da je vrijednost horizontalnog ubrzanja ( $a_i$ ) konstantna veličina, a koeficijent  $c$  je konstantna veličina po cijeloj visini kupole. Ovakav jednostavan

<sup>3)</sup> [1] str. 755

<sup>4)</sup> [2] str. 1—5

<sup>5)</sup> rješenje autora, neobjavljeno.

raspored koeficijenta  $c$ , omogućuje relativno pristupačan postupak oko izračunavanja seizmičkih sila, što je i primijenjeno kod iznalaženja obrazaca koji su ranije navedeni. Uostalom, ova pretpostavka može imati i svoga opravdanja imajući u vidu krutost kupole, kao cjeline.

Veličina koeficijenta  $c$  zavisi od mnogo faktora. Globalni koeficijent, koji se odnosi na cijeli objekat uzima se prema jugoslovenskim propisima po obrascu:

$$K \equiv K_0 K_s K_d K_p$$

Uzimajući da je  $K_0 = 1,5$  (što odgovara objektima sa sadržajima od kulturno-umjetničke vrijednosti i dr.),  $K_p = 1,30$  (za zidane konstrukcije sa vertikalnim serklažima)  $K_d = 1,0$ , onda ovaj globalni koeficijent  $K$  iznosi:

za intenzitet zemljotresa VII stepena MCS skale  $k = 0,0487$   
 za intenzitet zemljotresa VIII stepena MCS skale  $k = 0,0975$   
 za intenzitet zemljotresa IX stepena MCS skale  $k = 0,195$ .

Ekstremna vrijednost meridijalne sile u kupoli, od djelovanja vlastite težine, snijega i zemljotresa na mase od vlastite težine i snijega, na osnovu ranije navedenih obrazaca, i uzimajući kut  $\beta = 0$ ,  $\beta = \pi$  glasi:

$$\begin{aligned} \max & \\ \text{mix} & N_{\alpha} = -N_{\alpha g} \left[ 1 \pm c \frac{t_g^2 \frac{\alpha}{2}}{\sin \alpha} (1 + \cos \alpha) \right] - \\ & - N_{\alpha s} \left[ 1 \pm \frac{2}{3} c (3 \sin^4 \alpha - 3 \cos \alpha + \cos^3 \alpha + 2) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Ekstremna vrijednost meridijalne sile je za najveći kut  $\alpha$  — uzima se najveća moguća vrijednost  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  (razmatra se kupola oblika do polulopte), pa je:

$$\begin{aligned} \min & \\ \max & N_{\alpha} = -N_{\alpha g} (1 \pm c) - N_{\alpha s} \left( 1 \pm \frac{10}{3} c \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Iz obrasca (6) se vidi da bi meridijalna sila bila zatežuća za opterećenje od vlastite težine ako je  $c = 1,00$ , a za opterećenje snijegom ako je  $c = 0,30$ . Za opterećenje vlastitom težinom i snijegom granična vrijednost koeficijenta  $c$ , kod koga meridijalna sila postaje zatežuća, kreće se između 0,3 i 1,00. Pošto je, međutim, uticaj opterećenja od vlastite težine zidanih kupola (deblji-

na kupole  $d = 0,30$  m, pa je  $g = 5$  KN/m<sup>2</sup>) u odnosu na opterećenje od snijega (0,75 KN/m<sup>2</sup> osnove) relativno velik, to je granična vrijednost koeficijenta  $c$  bliža jedinici nego 0,3. Iz toga se vidi da, za praktične slučajeve, meridijalna sila u zidanoj kupoli, pri djelovanju zemljotresa ne može biti zatežuća.

Ako se, koristeći ranije navedene obrasce, uporedi maksimalna sila pritiska u pravcu meridijana i maksimalna sila pritiska koja može vladati u paralelnom pravcu, može se lako dokazati da maksimalna pritiskujuća sila u pravcu paralele ne može biti veća od maksimalne sile u meridijalnom pravcu. Iz toga proizilazi da je, u pogledu opterećenja pritiskujućim silama, za nosivost zidane kupole mjerodavna sila u meridijalnom pravcu.

Međutim, ekvatorijalne sile u kupoli mogu imati pozitivan predznak, tj. mogu biti zatežuće. Zatežuća sila u zidanoj kupoli ima značaja za njezino ponašanje i nosivost. Zato će se ovdje ispitati uslovi za nastajanje sile zatezanja i njenu veličinu i područje na kome se prostire.

Za zidanu kupolu koja je opterećena vlastitom težinom i zemljotresom koji djeluje na masu od vlastite težine, ekstremna vrijednost ekvatorijalne sile u kupoli, koristeći ranije navedene obrasce i uzimajući da je  $\beta = 0$ , odnosno  $\beta = \pi$  obuhvata slijedeći obrazac:

$$\begin{aligned} \min_{\max} N_{\beta} = N_{\beta, g} + \min_{\max} N_{\beta g z} = \frac{\gamma dr}{1 + \cos \alpha} (1 - \cos \alpha - \cos^2 \alpha) \pm c \gamma dr (\sin \alpha + \\ + \frac{\alpha}{\sin \alpha} \frac{tg^2 \frac{\alpha}{2}}{2}) \end{aligned} \quad (7)$$

označavajući sa:

$$\frac{1 - \cos \alpha - \cos^2 \alpha}{1 + \cos \alpha} = K_{\beta, g} \text{ i } (\sin \alpha + \frac{\alpha}{\sin \alpha} \frac{tg^2 \frac{\alpha}{2}}{2}) = K_{\beta, g z} \quad (8)$$

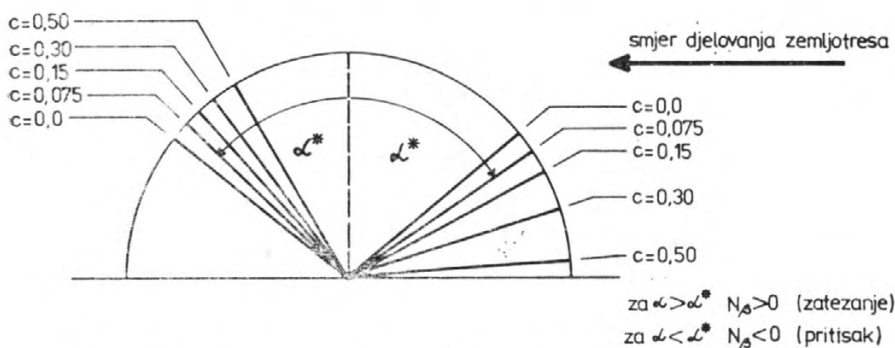
onda je:

$$\begin{aligned} \max N_{\beta} = \gamma dr (K_{\beta, g} + c K_{\beta, g z}) \text{ za } \beta = \pi \\ \min N_{\beta} = \gamma dr (K_{\beta, g} - c K_{\beta, g z}) \text{ za } \beta = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Za nekoliko odabranih vrijednosti koeficijenta  $c$  izračunati su položaji tačaka na meridijanu kupole koje razdvajaju područje pritiskujućih od područja zatežućih ekvatorijalnih sila u kupoli.

Položaji ovih razdvojenih tačaka određeni su kutom  $\alpha^*$ , čije vrijednosti su grafički predstavljene na slici 2.

Kako se vidi iz slike 2, zatežuće sile u ekvatorijalnom pravcu kupole, pod djelovanjem seizmičkih sila, ne samo da povećavaju svoju veličinu, već i proširuju područje na kome se javljaju. Zbog toga je od značaja da se analizira naponsko stanje koje nastaje u zidanoj kupoli od djelovanja zatežućih (ekvatorijalnih sila).



Slika 2. Grafički prikaz graničnih kuteva  $\alpha^*$  za odabrane vrijednosti 'c'

#### 4. PRENOŠENJE EKVATORIJALNIH ZATEŽUĆIH SILA U ZIDANOJ KUPOLI

Upotrijebljene oznake:

$\beta_z$  = čvrstoća na zatezanje materijala od koga su izrađeni elementi za zidanje

$\sigma_z$  = napon zatezanja

$\nu$  = koeficijent sigurnosti

$a$  = dužina elementa za zidanje u pravcu paralele kupole

$b$  = visina elementa za zidanje (u pravcu meridijana)

$f$  = visina spojnice (maltera) u pravcu meridijana

$\tau$  = čvrstoća na smicanje maltera u spojnici

$\mu$  = koeficijent trenja na dodirnim površinama pojedinih slojeva

$t$  = otpor trenja po jedinici površine dodirnih površina slojeva

$S$  = ukupna sila smicanja i trenja kojom se jedan element za zidanje suprotstavlja pomjeranju u pravcu djelovanja zatežuće sile  $N$ .

Sila zatezanja koju može preuzeti presjek centrično opterećen iznosi:

$$Z = A_n \beta_z \quad (10)$$

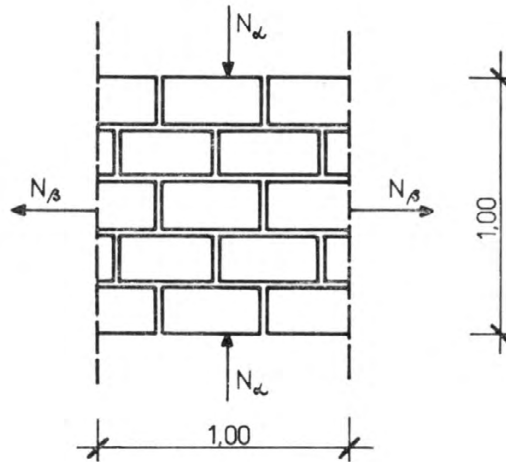


Iz slike 3 se vidi da je za zidanu kupolu, kod koje je primijenjen pravilan vez »puno prazno«, površina netto presjeka za visinu 1,00 debljinu  $d$ , visinu spojnice  $f$  i visinu bloka za zidanje  $b$ :

$$A_n = \frac{d}{2} \frac{b}{b+f} \quad (11)$$

pa je:

$$Z = \frac{d}{2} \frac{b}{b+f} \beta_z \quad (12)$$



Slika 3.

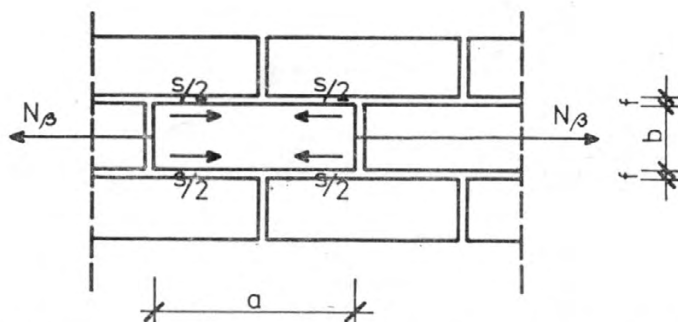
Uz koeficijent sigurnosti za zatezanje  $\gamma_z$ , dopuštena zatežuća sila u ekvatorijalnom pravcu kupole iznosi:

$$\text{dop } N_{\beta} = \frac{1}{\gamma_z} \frac{d}{2} \frac{b}{b+f} \beta_z \quad (13)$$

Ali, s obzirom da je čvrstoća na zatezanje spojeva u vertikalnim spojnicama jednaka nuli, nosivost na zatezanje elemenata za zidanje može doći do izražaja samo ako se omogući prenošenje zatežućih sila sa jednog elementa na drugi. Ovo prenošenje omogućava otpor trenja i smicanja u spojnicama (S), što je vidljivo iz slike 4.

Ukupna otpornost na smicanje spojnica dužine »a« koja potiče od čvrstoće na smicanje maltera ( $\tau$ ) i otpora trenja (koeficijent trenja), iznosi:

$$S = a (\tau d + t) = a (\tau d + \mu N_{\alpha}) \quad (14)$$



Slika 4. Elementi za zidanje kupole i smičuće sile koje omogućavaju njihovo povezivanje

Ako postoji sila smicanja u spojnici od spoljnjeg opterećenja ( $N_{\alpha\beta}$ ), onda za povezivanje elemenata za zidanje pri prenošenju zatežuće sile preostaje otpornost na smicanje:

$$S - N_{\alpha\beta} = a (\tau d + \mu N_{\alpha} - N_{\alpha\beta}). \quad (15)$$

Da bi čvrstoća materijala na zatezanje mogla biti iskorišćena treba da bude, (i uzimajući da je  $\frac{b}{b+f} = 1$ , što je na strani sigurnosti):

$$a (\tau d + \mu N_{\alpha} - N_{\alpha\beta}) \geq N_{\beta} = \frac{d \cdot b}{2} \beta_z, \quad (16)$$

odnosno odnos dimenzija elemenata za zidanje treba da udovoljava:

$$\frac{a}{b} \geq \frac{d \beta_z}{2 (\tau d + \mu N_{\alpha} - N_{\alpha\beta})} \quad (17)$$

Ako se ne može računati sa čvrstoćom maltera na smicanje, onda je  $\tau d = 0$ , tj.

$$\frac{a}{b} \geq \frac{d \beta_z}{2 (\mu N_{\alpha} - N_{\alpha\beta})} \quad (18)$$

Za kupolu koja je opterećena vlastitom težinom i seizmičkim silama, u pogledu seizmičkih sila, karakteristična su dva položaja meridijana:

$$\gamma = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, N_{\alpha z} = 0; N_{\beta z} = 0 \quad (19)$$

$$\text{za } \beta = 0; N_{\alpha\beta} = 0; N_{\alpha z} = +cd \gamma \frac{\frac{\alpha}{\sin \alpha} \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{\sin \alpha}$$

(Indeks »z« u obrascima (19) odnosi se na opterećenje od zemljotresa), pa je, prema tome, potrebno zadovoljiti nejednačinu (18) za ova dva položaja. Ako se za meridijalne sile ( $N_{\alpha}$ ) i sile smicanja ( $N_{\alpha\beta}$ ) upotrijebe izrazi koji su ranije navedeni, te kada se isti unesu u nejednačinu (18), a koristeći (19) dobiva se:

$$\begin{aligned} \text{za } \beta = \frac{\pi}{2}; \beta = \frac{3\pi}{2}; \\ \frac{a}{b} \geq \frac{\beta_z}{2 \mu \gamma \left[ 1 + \frac{c(1 + \cos \alpha)}{\mu \sin^3 \alpha} (-2 + 2 \cos \alpha + \sin^2 \alpha \cos \alpha) (1 + \cos \alpha) \right]}{\frac{1 + \cos \alpha}{r}} \end{aligned} \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} \text{za } \beta = 0 \\ \frac{a}{b} \geq \frac{\beta_z}{2 \mu \gamma \left[ 1 - \frac{c}{\mu} \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha/2}{\sin \alpha} (1 + \cos \alpha) \right]} \frac{1 + \cos \alpha}{r} \end{aligned} \quad (20b)$$

Na analogan način, koristeći odgovarajuće izraze za sile u kupoli, može se postaviti izraz za odnos dimenzija blokova za zidanje pri drugim opterećenjima (zemljotres sa snijegom, vlastita težina sa vjetrom), koji zadovoljavaju da se iskoristi nosivost na zatezanje elemenata za zidanje i time omogući najveće preuzimane zatežujuće sile u ekvatorijalnom pravcu.

## 5. ZAKLJUČAK

Iz naprijed provedenih razmatranja može se zaključiti slijedeće:

- 5.1. U zidanoj kupoli uobičajenih dimenzija ne mogu se javiti zatežujuće sile u pravcu meridijana usljed djelovanja zemljotresa (a i vjetra).

- 5.2. Najveća vrijednost pritiskujuće sile u meridijanu nije, manja od najveće vrijednosti pritiskujuće sile u pravcu paralele.
- 5.3. Za određene oblike sferne kupole ekvatorijalne sile mogu biti zatežuće, a horizontalna opterećenja (vjetar i zemljotres), povećavaju veličinu zatežuće ekvatorijalne sile i proširuju područje na kupoli koja je izložena djelovanju zatežućih sila.
- 5.4. Granična otpornost zidane kupole na djelovanje prstenastih zatežućih sila zavisi od čvrstoće na zatezanje materijala od koga su izrađeni elementi za zidanje.
- 5.5. Stvarna nosivost na zatezanje u ekvatorijalnom pravcu zavisi od otpornosti veze među prstenastim slojevima zidanih elemenata. Ona je ovisna o čvrstoći na smicanje maltera i koeficijentu trenja između dodirnih spojnica u prstenastom pravcu. Za ovu otpornost od bitne važnosti je odnos dimenzija elemenata za zidanje. Povoljniji su oni elementi koji imaju veći odnos dužine prema visini.

#### LITERATURA

- [1] Bayer, K. Die Statik Im Stahlbetonbau, Zweite Auflage, Springer Verlag, Berlin 1956.
- [2] Popov, E. P. Earthquake stresses in spherical domes and cones, Journal of the Structural Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Volume 82, May 1956, Paper 974.

Ismet V. TAHIROVIĆ

#### RESISTANCE OF BRICK AND STONE DOMES AGAINST EARTHQUAKE APPEARANCE OF CRACKS, THEIR DIRECTIONS AND AREA OF SPREADING

#### Summary

In the spherical dome, exposed to a combined effect of vertical gravity load and horizontal earthquake load of expected intensity, the resulting stresses in the meridional directions are compressive, while in the equatorial directions they could be, in the certain part of the dome, tensile.

The dome is constructed of compressive material (bricks, stone blocks etc) with or without mortar. Tensile strength of brick and stone is relatively low, but not negligible. Tensile strength of mortar could be neglected. The shear strength of mortar, if originally existed, may vanish with time, but the friction between two neighbouring layers is effective in all sections where normal compressive force exists.

For dome with relatively low ratio of its span to the thickness (usual case in ancient buildings) compressive strength of the material is far over the effective stresses. Therefore, no cracks are expected in the equatorial directions of the dome, since the stresses in the meridional directions are compressive.

The upper tensile hoop that force could be resisted by the material of the dome is limited by tensile strength of bricks or stone blocks, but the lower is limited by bond resistance between layers of blocks. Cracks in the equatorial directions could appear in the part of the dome where effective tensile hoop force exceeds tensile resistance of the section. Bond resistance between two neighbouring layers of blocks, as assessed in this paper, depends on shear strength, coefficient on friction, effective normal compressive force, and also on the block dimensions. The formulae developed in this paper give minimal ratio between length and width of blocks, applied in the dome, in order to satisfy full use of tensile strength of stone blocks or bricks. Using these formulae, knowing tensile strength of blocks (or bricks), shear strength of mortar and coefficient of friction between mortar and blocks, it is possible to estimate area in the dome where cracks in the meridional direction could appear. If certain earthquake caused meridional cracks, it is possible, using same formulae, to estimate seismic coefficient (c) corresponding to the earthquake that caused cracks.

The use of these formulae could be of practical benefit for analyses of existing domes in historical buildings, to which this paper is, mainly, devoted.

