

Marina Šimunić-BuršićSVEUČILIŠTE U ZAGREBU, ARHITEKTONSKI FAKULTET
HR - 10000 Zagreb, Kačićeva 26Izvorni znanstveni članak • Original Scientific Paper
UDK • UDC 726.6:72.034:624.04(497.5 Šibenik)Primljeno • Received: 22. 12. 1995.
Prihvaćeno • Accepted: 26. 01. 1996.

RAČUNALNA ANALIZA STRUKTURE ŠIBENSKE KATEDRALE

Prilog istraživanju klasičnih zidanih konstrukcija

COMPUTER ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF ŠIBENIK CATHEDRAL

A Contribution to Research into Classical Masonry Structures

Ključne riječi • Key words

šibenska katedrala	Šibenik Cathedral
zidane konstrukcije	masonry structures
računalna analiza	computer analysis
program CALPA	CALPA Programme
svodovi	vaults
vertikalna supstrukcija	vertical substructure
zatega	iron ties

Sažetak • Abstract

Na primjeru strukture šibenske katedrale, analizirane računalnim programom CALPA, razvijanim posebno za proračun zidanih konstrukcija, dokazuje se da su te strukture vrlo logične i racionalne. Strukturna analiza primarne nosive konstrukcije jednog polja uzdužnih lađa katedrale razjašnjava jedinstveni strukturalni sustav svodova šibenske stolnice i utjecaj toga sustava na vertikalnu supstrukturu.

The CALPA computer programme, specially developed for calculating masonry structures, was used to analyze Šibenik Cathedral. It showed that masonry structures are very logical and rational. Analysis of the primary bearing structure of one bay of the cathedral section solved the unique structural system of the cathedral vaults and the repercussions the system had on the vertical substructure.

1 Opća teorija mehanike zidanih konstrukcija iznesena je u: Di Pasquale, 1984.

2 Odnosno, zasada samojedan analizirani poprečni presjek uzdužne lađe katedrale.

3 Računalne programe za proračun zidanih konstrukcija koje je razvio pri *Dipartimento di Costruzioni, Facoltà di Architettura, Università di Firenze* Pierre Smars je opisao u svojoj magistarskoj tezi (Smars, 1992).

4 Šibenska je katedrala svojom iznimnom vrijednošću privukla brojne istraživače i znanstvenike koji su pisali o njoj. Od Šibenčani na to su F. Vrančić i A. G. Fosca do stranih istraživača R. Eitelberga von Edelberga, J. Grausa, D. Freya te brojnih kasnijih znanstvenika (v. Šimunić, 1989:24.25).

5 Tako, primjerice, trolisno pročelje, prema R. Ivančeviću prvo i jedino funkcionalno i organskičok-rješenje ranorenesansne "trolisne" fasade (Ivančević, 1982:48) neopredno proizlazi iz izvornog rješenja svodova.

6 Fosco, 1891:4-8.

7 Frey, 1913:5.

8 Fosco, 1893:61.

9 Stošić, 1950:130.

A. G. Meyer prvi je uočio stilsku srodnost figura zapadnog portala šibenske katedrale s kapelom sv. Duje u Splitu, atribuiravši i šibenske skulpture majstoru Boninu (Meyer, 1894:34-36). Njegovu su tezu o Boninu iz Milana kao autoru dijela figuralnog ukrasa portala šibenske katedrale prihvatili i drugi autori (Frey, 1913:13-14 i Folnesics, 1914:44).

10 Kolendić, 1924:467.

11 Čini se da je protomajstor Franjo Jakovljević vodio gradnju crkve samo u prvoj godini gradnje (Kolendić, 1924:173,174).

12 Frey, 1913:129,130.

13 Fosco, 1891:9.

14 Juraj sebe naziva *Dalmatinцем* u svom jedinom potpisu u kamenu za koji znamo: na podnožju renesansne skupine putta koji nose spomen-natpis o početku gradnje apsida na sjevernom pročelju šibenske katedrale (Frey, 1913:19 i Fosco 1893:22).

15 R. Ivančević svrstava ga uz bok "firentinskih problematičara" rane renesanse, poput Paola Uccella. ... Prvom fazom svoga rada koja obuhvaća peto desetljeće petnaestog stoljeća (1441-1452), Juraj zauzima ravnopravno mjesto među problematičarima *quattrocenta*, kao izrazito individualni stvaralac rane renesanse (Ivančević, 1982:55).

Uvod

Računalna analiza šibenske katedrale trebala bi biti prilog boljem razumijevanju mehaničkih karakteristika i ponašanja klasičnih zidanih konstrukcija. Ispitujući zakonitosti njihova strukturnog ponašanja na konkretnim primjerima, verificiramo u praksi teorijske postavke razmjerno recentnih cjelovitih teorija mehanike zidanih konstrukcija.¹

Težnja je bila shvatiti konstrukciju² kao cjelinu, razumjeti uzroke ustanovljenog toka sila i stanja naprezanja, a ne samo iznijeti numeričke rezultate koje računalo izbacuje u količinama što ih možemo povećavati gotovo do beskonačnosti.

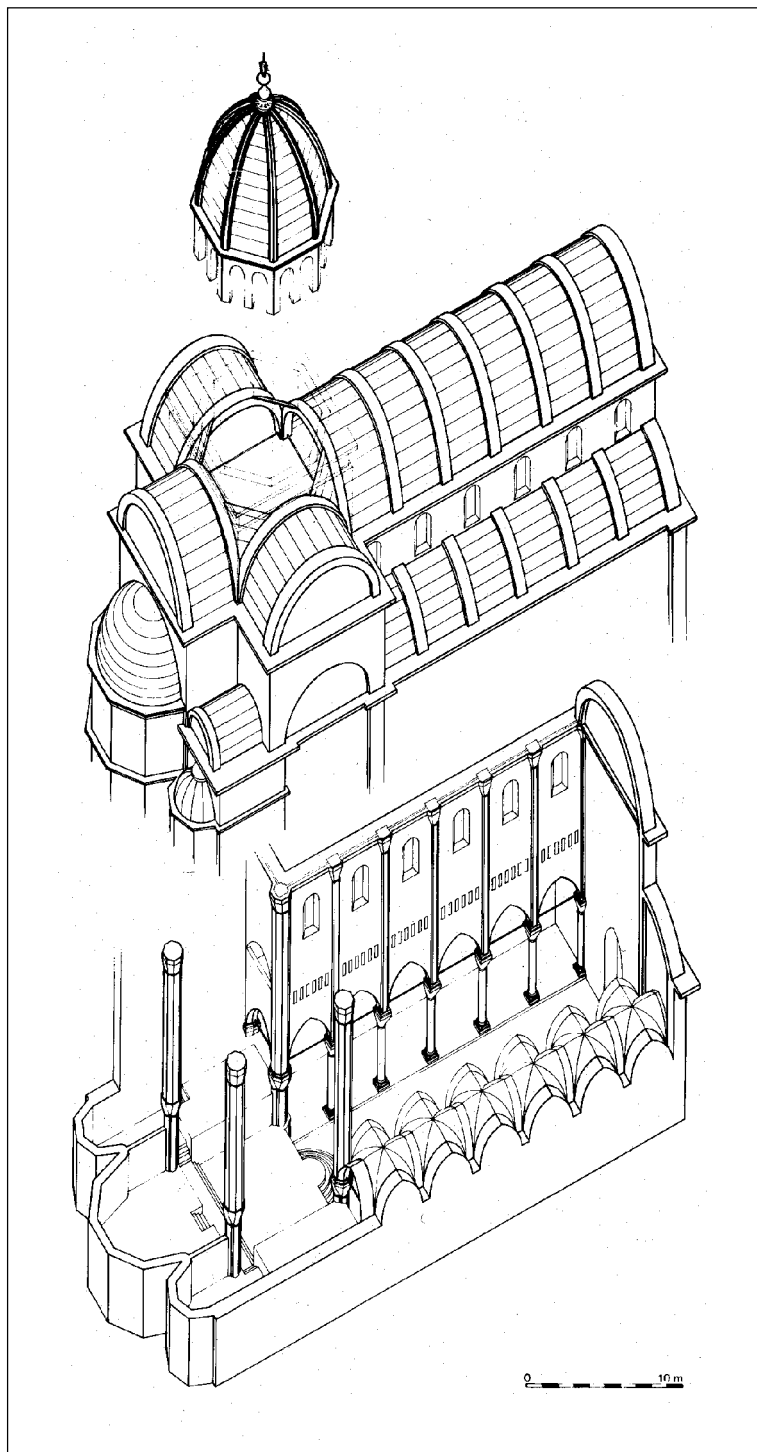
Istodobno, to je još jedan primjer za provjeru novoga računalnog programa CALPA, razvijenoga pri Università di Firenze,³ prema našim spoznajama prvoga koji pokušava ugraditi postavke konzistentne suvremene teorije zidanih konstrukcija u samu osnovu računalnog programa.

Za istraživanje strukturnog ponašanja zidanih konstrukcija izabrana je šibenska katedrala,⁴ jer je najveća vrijednost tog remek-djela hrvatskoga graditeljstva upravo njegova smjela i originalna struktura, iz koje logično proizlaze i izvorna oblikovna rješenja.⁵

Gradnja i autori šibenske katedrale (sažeta kronologija gradnje katedrale)

Odluka o gradnji šibenske stolnice donesena je 1402. godine.⁶ Pripreme za gradnju počele su već krajem iste godine,⁷ no sama je gradnja započeta tek 1431,⁸ vjerojatno prema projektu Bonina iz Milana.⁹ No kako je taj majstor umro 1429,¹⁰ gradnju su, nakon protomagistra Franje Jakovljevića iz Venecije,¹¹ vodila dvojica manje vještih majstora, Antonio Busato i Lorenzo Pincino,¹² te su se pri gradnji potkrale "mnoge pogreške i propusti".¹³ Šibenčani su stoga 1441. godine iz Venecije, jakoga umjetničkog središta kasne gotike, pozvali majstora Jurja Matejevića, koji sebe ponosno naziva Dalmatincem.¹⁴ Taj vrsni graditelj i kipar, rodnom iz Zadra, razvio se u najjaču umjetničku ličnost *quattrocenta* u Dalmaciji.¹⁵ On je unio znatne promjene u projekt bazilike: produljio joj je tlocrt i uveo transept nad čijim je križištem s glavnom lađom očito bila predviđena kupola.¹⁶ Sagradio je apsidni dio crkve (sa svetištem i pjevnicom) do svodova, započeo križište¹⁷ te dovršio postrane lađe,¹⁸ kolonadu i stijenu glavne lađe, do friza lišća (ispod triforija)¹⁹, kao i krstionicu²⁰ i sakristiju.²¹

Nakon smrti Jurja Dalmatinca²² protomajstorom katedrale imenovan je Nikola Firentinac,²³ umjetnik koji je iz svoje postojbine donio Dalmaciji čisti renesansni stil.²⁴ U graditeljstvu, međutim, on je Jurjev sljedbenik. Preuzevši njegovu strukturnu koncepciju,²⁵ dovršio je katedralu točno prema njegovoj zamisli i u njegovu duhu.²⁶ Sagradio je polukupolu glavne apsida,²⁷ dovršio transept, započeo svodnje



SL. 1. AKSONOMETRIJSKI PRIKAZ NOSIVE STRUKTURE ŠIBENSKE KATEDRALE

Izvor • Source
Šimunić, 1989:205

FG. 1. AXONOMETRIC PROJECTION OF THE BEARING STRUCTURE OF ŠIBENIK CATHEDRAL

16 Frey, 1913:18.

17 Montani, 1967:16-17.

18 Fosco, 1891:14-16.

19 Frey, 1913:23; Karaman, 1933:53.

20 Fosco, 1891:21.

21 Fosco, 1891:20-23.

22 Vjerojatno 1473. godine. Ugovor iz 1472. g. posljednji je akt koji spominje Jurja Dalmatinca kao živa, a iz notarskog akta iz 1476. g. razabire se da je mrtav (Grubišić, 1974:57).

23 Sačuvan je ugovor o gradnji katedrale iz g. 1477 (Fosco, 1891:25-26). No Nikola Fiorentinac navodi se kao protomajstor katedrale već u jednom ugovoru iz g. 1475. (Kolendić, 1922:94).

24 Ivančević, 1987:461-465.

25 Glede autorstva svodova R. Ivančević ističe da su svi analitičari koji su šibenskoj katedrali prišli kao arhitekturi, od Fausta Vrančića 1616. do Dagoberta Freya 1913, tvrdili da je ona od Jurjeva dolaska 1441. do dovršenja građena po jedinstvenom načelu (Ivančević, 1980:376).

26 Od brunelleschijevskog firentinskog umjetnika rane renesanse moglo se očekivati drukčije rješenje svodova. Naime, gornji svodovi šibenske katedrale, premda renesansnih oblića (polukružni lukovi), strukturnom su koncepcijom gotički: ogoljeli nosivi kostur i hijerarhijski strukturirani nosivi elementi bitne su odlike gotičke strukturalne misli (Šimunić, 1993:489).

27 Frey, 1913:40.

28 Frey, 1913:40.

29 Kupola je završena 1499. (Frey, 1913:40).

30 Protomajstor šibenske katedrale od 1517. (Frey, 1913:166).

31 Frey, 1913:166.

32 Fosco, 1893:61; Frey, 1913:44-45.

33 Frey, 1913:44.

34 Kronika Vrančić-Draganić navodi da je katedrala završena 3. prosinca 1536. (Fosco, 1893:61).

35 Faust Vrančić uvrstio je šibensku katedralu u svoje djelo *Machinae novae* (Venecija, 1615-1616):

"Crkva ne pripada među moje pronalaskе, jer je njezina gradnja započeta prije 150 godina. Ali zato što je vrlo lijepa i neobična oblika, odlučio sam da je na ovom mjestu uvrstim među svoje pronalaskе kao ukras svojeg zavičaja. Ta, osim toga što u njoj nema nikakve drvene građe, i samu kupolu nema, poput ostalih hramova, zasvođenu opekama, već je čitava pokrivena golemim isječenim kamenim pločama koje su smještene po duljini. One su vidljive iznutra i izvana."

36 Šimunić, 1991:26.

37 Šimunić, 1994:161.

38 *Inter arma silent leges* (latinska izreka).

39 *Inter arma non silent artes* (Šimunić, 1991:26).

40 Primjerice, u razornom potresu koji je 1976. srušio Tangshan (Kina) sa zemljom, uništivši i mnoge nove armiranobetonske zgrade u nedalekom Jixianu, Guanying - dvorana hrama Dulesi (sagrađena 984. g.), smještena u samom gradu Jixianu, ostala je potpuno neoštećena zahvaljujući specifičnoj drvenoj konstrukciji, čiji vezni detalji omogućuju pomake među strukturnim elementima, čime se disipira znatan dio seizmičke energije (Zhi-hua, 1985).

41 Di Pasquale, 1984:2.

42 O važnosti empirijskih spoznaja u graditeljstvu svjedoči i sam Leon Battista Alberti, jedan od otaca renesansne teorije arhitekture:

"Si potra apprendere dall'osservazione degli antichi edifici, quali siano le caratteristiche e i pregi di questa o quella pietra molto meglio che dagli scritti o dalle memorie dei filosofi" (cit. iz *Albertijeve De re aedificatoria*, prema modernom izdanju; Alberti 1966:136).

43 Mark, 1982:9.

44 Di Pasquale, 1984:2,3.

glavnog broda²⁸ i okrunio križište kupolom.²⁹

Novi protomajstor Bartolomeo de Mestre³⁰ izveo je svodove postranih lađa iznad triforija,³¹ a njegov je sin Jakov dovršio svod glavne lađe³² i zapadno pročelje.³³

Tijekom stoljeća Šibenčani su postupno dovršavali katedralu (kao datum dovršenja spominje se 3. prosinca 1936),³⁴ urešavali je, popravljali i prepravljali njezinu unutrašnjost. Pobuđivala je divljenje i žitelja grada, i putnika namjernika, i umjetnika, i znanstvenika.³⁵

I sam barbarski pokušaj jugoslavenske vojske u rujnu 1991. da uništi taj simbol Šibenika pokazao je da su čak i novovjekci vandali osjetili vrijednost toga spomenika i njegovo značenje za hrvatski kulturni identitet.

Istodobno je projektil što je ranio katedralu na bolan način dokazao ono što smo naslućivali: da elegantna, naizgled krhka struktura šibenske stolnice posjeduje otpornost žilavog raslinstva dalmatinskog krša.³⁶

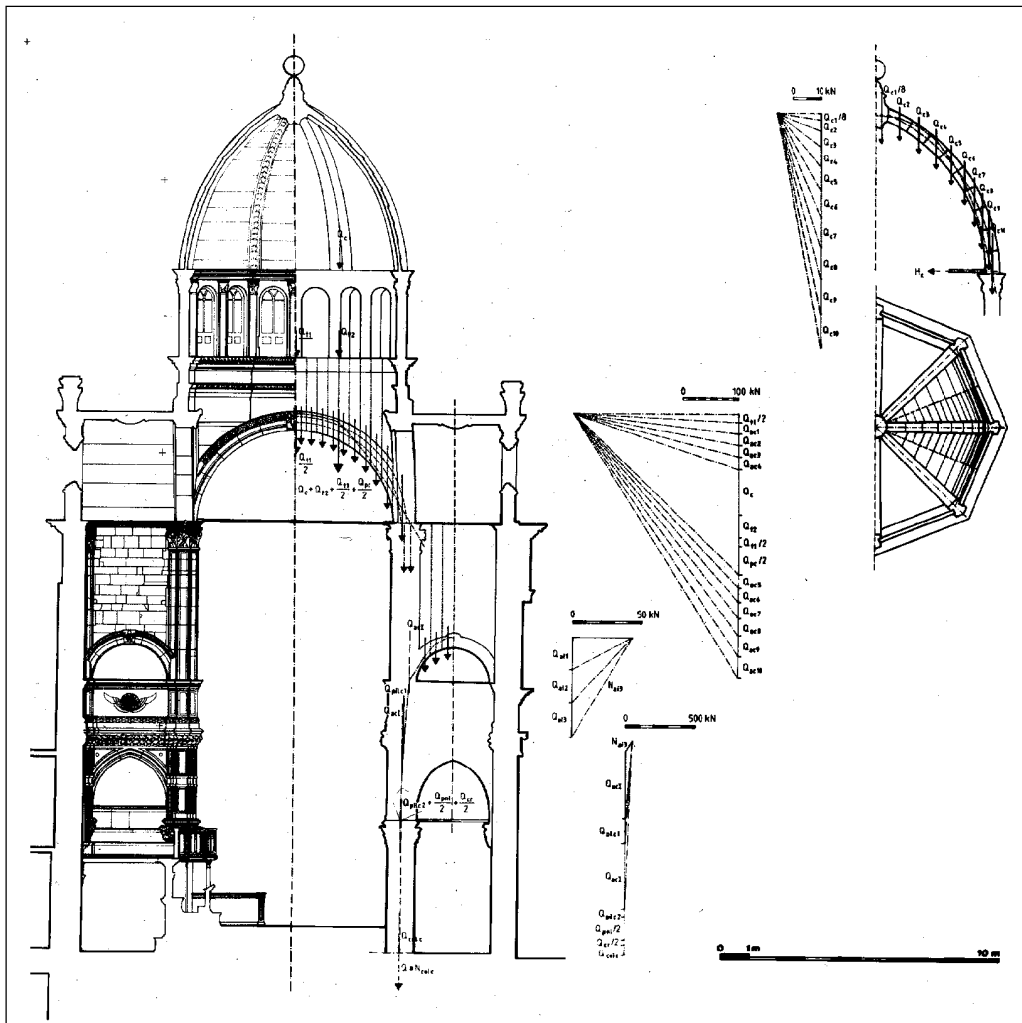
Doista, najvrjedniji arhitektonski spomenici ujedno su i remek-djela graditeljstva, čija je strukturna koncepcija logično i elegantno rješenje konstrukcijskih problema što ih postavljaju univerzalni zakoni mehanike.³⁷

Ta istina postaje bjelodana u kriznim situacijama, poput potresa ili ratova, kada su ta zdanja izložena neuobičajeno velikim silama, kritičnim opterećenjima. Čak i kada zakoni šute, kako su govorili Latini,³⁸ graditeljska baština svojom otpornošću i postojanošću jasno svjedoči o znanju i vještini svojih tvoraca.³⁹

Zidane konstrukcije

Tradicionalne konstrukcije, koje su suvremeni graditelji napustili i potisnuli na marginu strukovnog interesa poneseni mogućnostima modernih materijala (čelika i armiranog betona), često su iznenadile svojim dobrim svojstvima i otpornošću u izvanrednim situacijama, nerijetko se pokazavši superiornima u usporedbi s modernim konstrukcijama.⁴⁰

Nezainteresiranost suvremenih graditelja za zidane konstrukcije potječe dijelom i od nepoznavanja i nerazumijevanja njihova strukturnog ponašanja. Naime, razumijevanje mehaničkih svojstava i djelovanja zidanih struktura, koje je graditeljima prošlosti bilo tako blisko, gotovo urođeno poput intuicije, golemo područje ljudske spoznaje koje je činilo "umijeće građenja" (*res aedificatoria*) kao da je nedostupno našem načinu razmišljanja.⁴¹ Empirijske spoznaje⁴² što su ih drevni graditelji stjecali i proširivali tijekom dugih stoljeća gradnje istim materijalima i tehnikama te prema oblikovnim predlošcima, što su se vrlo sporo mijenjali⁴³ prenosile su se uglavnom usmenom predajom, te su za nas izgubljene u znanstvenoj revoluciji 19. st., koja je prekinula taj kontinuitet.⁴⁴



Budući da je strukturno djelovanje tradicionalnih zidanih konstrukcija neusporedivo složenije od rada modernih konstrukcija, izvedenih modernim materijalima (armiranim betonom i čelikom), suvremeni su inženjeri bili skloni smatrati ga nepravilnim, nepredvidivim. No recentna istraživanja pokazuju da je i ponašanje zidanih konstrukcija logično i pravilno i da se njegove zakonitosti, premda složenije od zakonitosti modernih materijala, ipak mogu opisati prikladnim matematičkim aparatom.⁴⁵

Suvremeni se materijali, osobito čelik, ponašaju gotovo kao idealni materijal, materijal model na kojemu su izvedeni brojni zakoni nauke o čvrstoći i teorije elastičnosti. Ti su suvremeni materijali "standardni", tj. njihovo je ponašanje istovjetno u tlačnom i vlačnom polju naprezanja.

SL. 2. STATIČKA ANALIZA KUPOLE ŠIBENSKKE KATEDRALE I NJEZINE VERTIKALNE SUPSTRUKTURE GRAFIČKOM METODOM

Izvor • Source
Šimunić, 1989:155

FIG. 2. STATICAL ANALYSIS OF THE DOME OF ŠIBENIK CATHEDRAL AND ITS VERTICAL SUBSTRUCTURE USING THE GRAPHICAL METHOD

Ponašanje zidanih konstrukcija - konstrukcija građenih od sitnih elemenata povezanih mortom - bitno se razlikuje od tog predloška, premda sami građevni elementi (kamen ili cigla) mogu podnijeti određeno vlačno naprezanje (doduše, mnogo manje od tlačne čvrstoće tih materijala), veza među tim elementima, ostvarena mortom, ima vrlo nisku vlačnu čvrstoću, toliko nisku da se može zanemariti.⁴⁶

Na hipotezi potpune neotpornosti zidanih konstrukcija na vlak (hipotezi koja je nesumnjivo na strani sigurnosti) saznao je prof. dr. Salvatore Di Pasquale prvu opću teoriju zidanih struktura 20. stoljeća.⁴⁷ Teoreme te mehanike formilirali su E. Giusti i M. Giaquinta,⁴⁸ dajući joj strogu formu.

Najvažnija osobitost zidanih konstrukcija, koja proizlazi iz njihovih specifičnih "jednosmjernih" veza,⁴⁹ jest nepodudaranje "otporne strukture", strukture koja reagira, s "konstrukcijom", fizičkom strukturom zgrade - njezinim geometrijskim obličjem.⁵⁰

Aktivna struktura nekog članka zidane konstrukcije mijenja se ovisno o načinu opterećenja.⁵¹ Iz toga proizlazi da ne vrijedi načelo superpozicije opterećenja-osnovno načelo linearne teorije elastičnosti.⁵²

U nekom polju sila koje djeluju na određeno područje (regiju R) zidane konstrukcije, stvaraju se, ovisno o opterećenju, subregije u kojima se materijal ponaša:

1. na standardan način (subregija R2),
2. na nenormalan, nestandardan način (subregija R1),
3. kao da ne postoji (subregija R0).

U subregiji R2 ponašanje materijala određeno je klasičnom teorijom elastičnosti, u subregiji R0 nema nikakvih naprezanja, ona ne sudjeluje u preuzimanju vanjskih opterećenja, a u subregiji R1 očituju se zakonitosti specifične za zidane konstrukcije: npr., u zidanim konstrukcijama ne nastaje disipacija naprezanja što ih uzrokuju vanjske sile.⁵³

Osnovna je nepoznanica statike zidanih konstrukcija "otporna struktura", "aktivna struktura", koja ne koincidira s "konstrukcijom".⁵⁴

Računalni programi za proračun zidanih konstrukcija

Specifično ponašanje zidanih konstrukcija ne uzima se u obzir ni kod jednoga od velikih komercijalnih računalnih sustava za proračun arhitektonskih struktura.⁵⁵

Stoga je pri *Dipartimento di Costruzioni, Facoltà di Architettura, Università di Firenze*, razvijen poseban računalni program za proračun zidanih konstrukcija, utemeljen na teoriji materijala s jednostranim vezama.⁵⁶ Istraživač Pierre Smars razvio je nekoliko verzija računalnog programa za analizu NTM konstrukcija.⁵⁷

Kao potku svih tih programa, koji za sada služe za proračun ravninskih struktura, tj. pojedinih presjeka prostornih konstrukcija,⁵⁸ uzео je metodu konačnih elemenata,⁵⁹ dakle jednu od metoda diskre-

Empirijske spoznaje naraštaja graditelja, kumulirane stoljećima, pa čak i neka teorijska razmatranja znanstvenika 17. i 18. st. (Di Pasquale, 1992:175) preko noći su se učinila "nepotrebnima" i pala u zaborav kad su se pojavili novi građevni materijali i nove teorije utemeljene na njima. Hrabri novi vijek jednostavno je "zbrisao" stoljeća ljudskog znanja da bi "okrenuo novi list" (upravo dobio "čistu pločicu" - *tabula rasu*) za novi zamah znanosti i tehnike.

45 Opća teorija mehanike zidanih konstrukcija, utemeljena na promatranju slika pukotina postojećih zgrada i na laboratorijskim pokusima izložena je u: Di Pasquale, 1984.

46 Di Pasquale, 1984:3.

47 Di Pasquale, 1984:3.5.

48 Di Pasquale, 1984:5.

49 Jednosmjerne veze (vincoli unilateri) zidanih konstrukcija prenose samo tlačna, a ne i vlačna naprezanja (Di Pasquale, 1984:8).

50 Di Pasquale, 1992:174.

51 Di Pasquale, 1992:175.

52 Di Pasquale, 1992:175.

53 Di Pasquale, 1992:177.

54 Di Pasquale, 1992:174.

55 Svi se ti računalni sustavi temelje na zakonitostima koje vrijede za strukture od tzv. standardnih materijala, koji jednako podnose i tlak i vlak.

56 Teorija jednostranih veza, koju je razvio prof. dr. Salvatore Di Pasquale, mehanička je teorija materijala koji ne podnose vlak nego samo tlak - Di Pasquale, 1984.

57 NTM (*no-tension material*) - materijal potpuno nesposoban da preuzme vlačna naprezanja (Smars, 1992:6,32).

58 Program za analizu prostornih struktura kao neusporedivo složenije zadaje razvijat će se kasnije.

59 Smars, 1992:7, 143-149.

tizacije kojom se često koriste i veliki komercijalni sustavi za proračun konstrukcija.⁶⁰ Struktura se diskretizira na određen broj konačnih elemenata.⁶¹ Odabrani su trokutni elementi,⁶² koji se najlakše prilagođavaju raznolikim oblicima tradicionalnih konstrukcija.

Za određivanje rješenja primjenjuje se metoda pomaka: nepoznanice su pomaci određenog broja točaka - pomaci čvorova konačnih elemenata. Pomaci unutar svakog elementa određuju se interpolacijom čvornih pomaka.⁶³

Pierre Smars razvio je nekoliko programa: CALIPOUS, BLOC, CALPA.⁶⁴ Rad na svim tim programima provodi se u nekoliko faza.

Prva je faza unošenje podataka (*pre-processing*)⁶⁵, i to podataka o strukturi (tj. o njezinoj geometriji), o opterećenju, o vezama (tj. o učvršćenjima strukture-ležajima), o početnim deformacijama, te o mehaničkim karakteristikama materijala (Youngov modul, Poissonov koeficijent, specifična masa). U toj se fazi struktura diskretizira.⁶⁶

Druga je faza proračun (*processing*), koji se sastoji od linearnoga i nelinearnog proračuna.⁶⁷

Program *CALPA-raideur*

Za strukturnu analizu šibenske katedrale koristila sam se programom *CALPA-raideur*, koji omogućuje analizu linearnih problema (standardni materijali) i nelinearnih problema (NTM-materijali neotporni na vlak).

Proračun se sastoji od linearnoga i nelinearnog dijela. Prva faza proračuna - linearni proračun, koji bi dao konačno rješenje za konstrukciju od standardnog materijala, samo je prvi korak u proračunu zidanih konstrukcija. U nelinearnom dijelu proračuna rješenje se iteracijama približava posebnim uvjetima koji vrijede za strukture s jednostranim vezama. Primjenjuje se Newton-Raphsonova modificirana metoda. U svakoj se iteraciji nanovo proračunava matrica krutosti.⁶⁸

U proračunu je uzeto u obzir specifično ponašanje zidanih struktura koje, ovisno o opterećenju, reagiraju na jedan od tri moguća načina:

- bidirekcijsko djelovanje (naprezanja u oba smjera - zona R2)⁶⁹
- unidirekcijsko djelovanje (jednosmjerno napon. stanje - zona R1)
- neaktivna zona (zona bez naprezanja i bez krutosti - zona R0).⁷⁰

Tip reakcije određuje se ovisno o pomacima tijekom iteracije.

Osim toga, određuje se tenzor deformacija, vrijednost naprezanja u materijalu tipa NTM (po Giusti-Giaquintovim formulama), kao i tenzor zona (R1, R2 ili R3). Ako je naponsko stanje jednosmjerno, određuje se kut reakcije elementa.⁷¹

Zatim se rekonstruira globalna matrica krutosti. Izračuna se neuravnoteženi dio sila⁷² te prirast (inkrement) pomaka.

Pukotine se modeliraju početnim deformacijama. Stoga se ne smiju rabiti vrlo mali elementi: oni moraju ostati veliki u odnosu prema promatranom fenomenu (frakturaciji).⁷³

60 Poput sustava COSMOS, ANSYS i brojnih drugih.

61 Smars,1992:167,154.

62 Smars,1992:143.

63 Smars,1992:143.

64 Smars,1992:150.

65 Smars,1992:153.

66 Programi razvijeni pri Arhitektonskom fakultetu u Firenci ne sadrže procese automatske generacije mreže konačnih elemenata: naime, da bi kasnija obrada podataka bila djelotvorna, treba unijeti i postupke optimizacije širine dijagonale matrice pomoću automatske renumeracije čvorova, a ti se postupci tek razvijaju (Smars,1992:154).

Stoga korisnik u sadašnjoj fazi razvoja programamorasamnačiniti mrežu konačnih elemenata, pazeci na numeraciju čvorova. Naime, što je veći "korak" (razlika u rednom broju) između čvorova pojedinog elementa, to je šira dijagonala matrice, a time proračun postaje znatno opsežniji.

67 Smars,1992:150,153.

68 Smars,1992:167.

69 Smars,1992:167.

70 Smars, 1992:168. U neaktivnoj zoni matrica krutosti jednaka je ničiji, što znači da materijal nema nikakvu krutost, kao da ne postoji (Di Pasquale, 1984:12).

71 Smars,1992:168.

72 Out-of-balance force (R(u)-F) (Smars, 1992:168).

73 Smars,1992:168.

Analiza šibenske katedrale računalnim programom CALPA-raideur

Program CALPA tek se razvija, te za sada ne omogućuje prostornu nego samo ravninsku analizu zidanih konstrukcija.

Analiziran je stoga karakteristični poprečni presjek kroz uzdužne lađe šibenske katedrale, i to presjek kroz primarne nosive konstrukcijske elemente (presjek kroz pojasne lukove glavnoga i pobočnih svodova, kroz pilastar pročelja, te kroz polustupac i stup glavne lađe). Sva opterećenja izvan ravnine presjeka određena su prije toga, te nadomještena silama koje djeluju u ravnini presjeka, silama hvatišta kojih su u čvorovima konačnih elemenata.⁷⁴ Naime, poput drugih programa utemeljenih na metodi konačnih elemenata, CALPA zahtijeva da sile djeluju isključivo u čvorovima mreže konačnih elemenata.

Za potrebe strukturne analize šibenske katedrale, koja je pretežno izgrađena od bračkog vapnenca⁷⁵, uzete su mehaničke karakteristike kamena *Kupinovo fiorito*, čija je prosječna tlačna čvrstoća -118,5 MPa (nakon ciklusa smrzavanja -74,5 MPa).⁷⁶ Za modul elastičnosti uvrštena je vrijednost $E=2 \cdot 10^4$ MPa, koja se primjenjivala u mehaničkoj analizi strukture katedrale u Parmi.⁷⁷

Utjecaj zatege

Budući da program CALPA ne omogućuje modeliranje konstrukcije sa zategama,⁷⁸ one su u proračunu simulirane svojim djelovanjem, odnosno horizontalnim silama kojima djeluju na kamenu konstrukciju. Dio horizontalnog potiska što ga preuzima zatega određen je unaprijed pomoću načela virtualnih radova,⁷⁹ i kao vanjska sila primijenjen na konstrukciju. Djelovanje zatege tako je, dakako, aproksimirano - no nije li proračun konstrukcija uopće, a napose proračun zidanih konstrukcija, uvijek umijeće aproksimacije?

Promatrane veličine (parametri)

Analizirani su rezultati računalnog proračuna konstrukcije opterećene stalnim opterećenjem, i to vrijednosti glavnih naprezanja⁸⁰ i njihov smjer⁸¹ u središtu svakoga pojedinog elementa.

Osobita je pozornost pridana određivanju prave, aktivne strukture, što je, kako je već navedeno, osnovna nepoznanica mehaničke analize zidanih konstrukcija. Navedeni su elementi koji pripadaju zoni R1 (području jednoosnog naponskog stanja) i zoni R0 (inaktivnom području).⁸²

Kako je u konkretnom slučaju analize, zbog ograničenih vremenskih mogućnosti uporabe računala, proveden samo određeni broj iteracija, ponegdje se još pojavljuju rezidualna vlačna naprezanja, no njihova je vrijednost posvuda vrlo malena (niža od 10^{-13} MPa). Elementi u kojima je kao aproksimativan rezultat dobiveno jedno minimalno vlačno naprezanje (uz jedno tlačno) pripadaju zapravo zoni R1.

74 Dakako, pritom su poštovani zakoni statike o ekvivalenciji sila koje djeluju na različitim pravcima.

75 Mineraloško-petrografsku analizu vodio je dr. Branko Crnković iz Zavoda za mineralogiju, petrologiju i geologiju Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u Zagrebu.

76 Uvjerjenje o kvaliteti kamena *Kupinovo fiorito*, br. Kam 390/85, od 3.3.1986, Građevinski institut, Zagreb.

77 Tonietti, 1986:109.

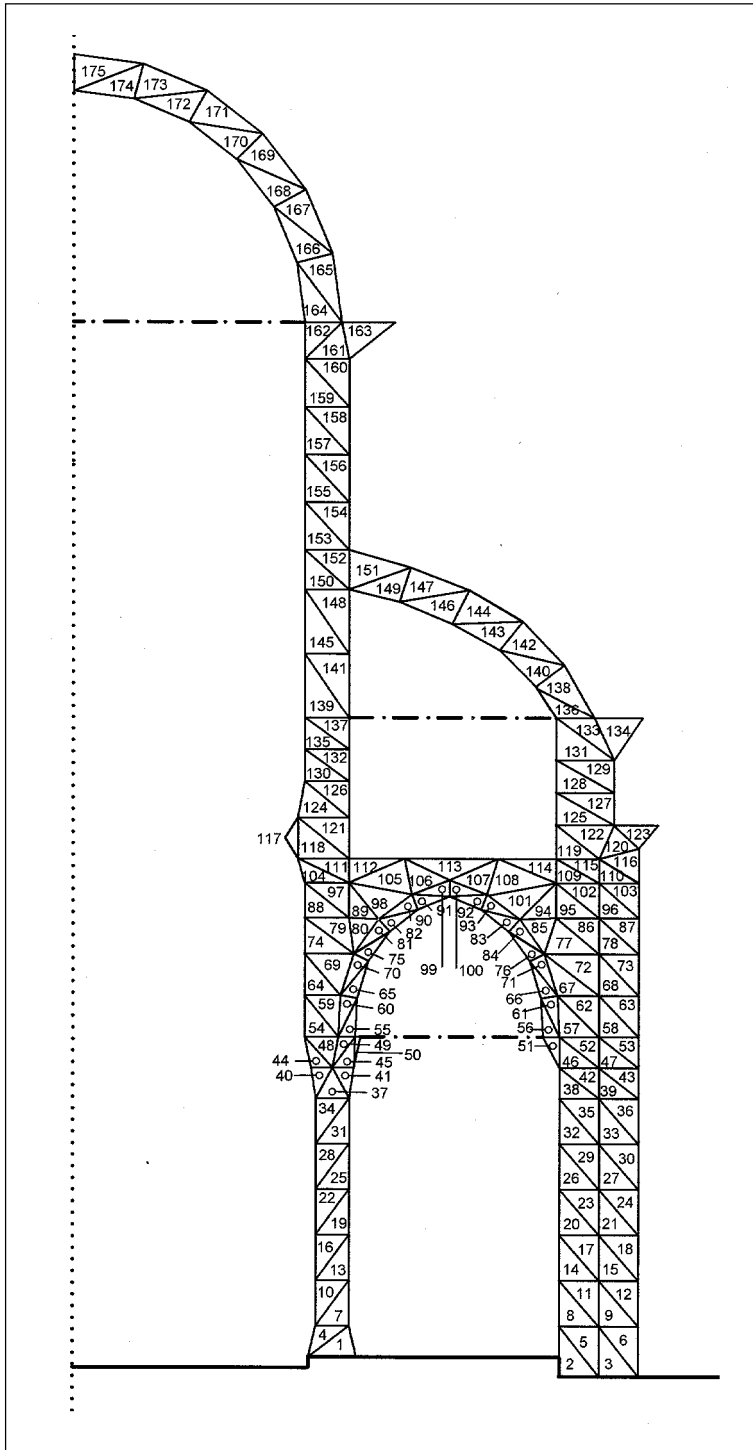
78 Program CALPA raden je za materijale koji ne mogu preuzeti vlak dok su zatege od standardnog materijala - čelika. Premda u programu CALPA svakoj analizi NTM konstrukcije prethodi linearna analiza (za standardne materijale poput čelika), u istoj se analizi neki elementi ne mogu modelirati od standardnoga, a drugi od NT materijala.

79 Šimunić, 1994:96-99.

80 Glavna naprezanja su ekstremna - najveća i najmanja - normalna naprezanja u određenoj točki konstrukcije. Program CALPA određuje glavna naprezanja u središtu svakoga konačnog elementa.

81 Smjer glavnih naprezanja je važan jer pruža sliku o smjeru rasprostiranja sila. U zoni R1 pukotine prate smjer trajektorija glavnog naprezanja.

82 Di Pasquale, 1992:175.



SL. 3. PRIKAZ DISKRETIZACIJSKE MREŽE KONAČNIH ELEMENATA ZA ANALIZU POPREČNOG PRESJEKA UZDUŽNE LADE ŠIBENSKE KATEDRALE RAČUNALNIM PROGRAMOM CALPA

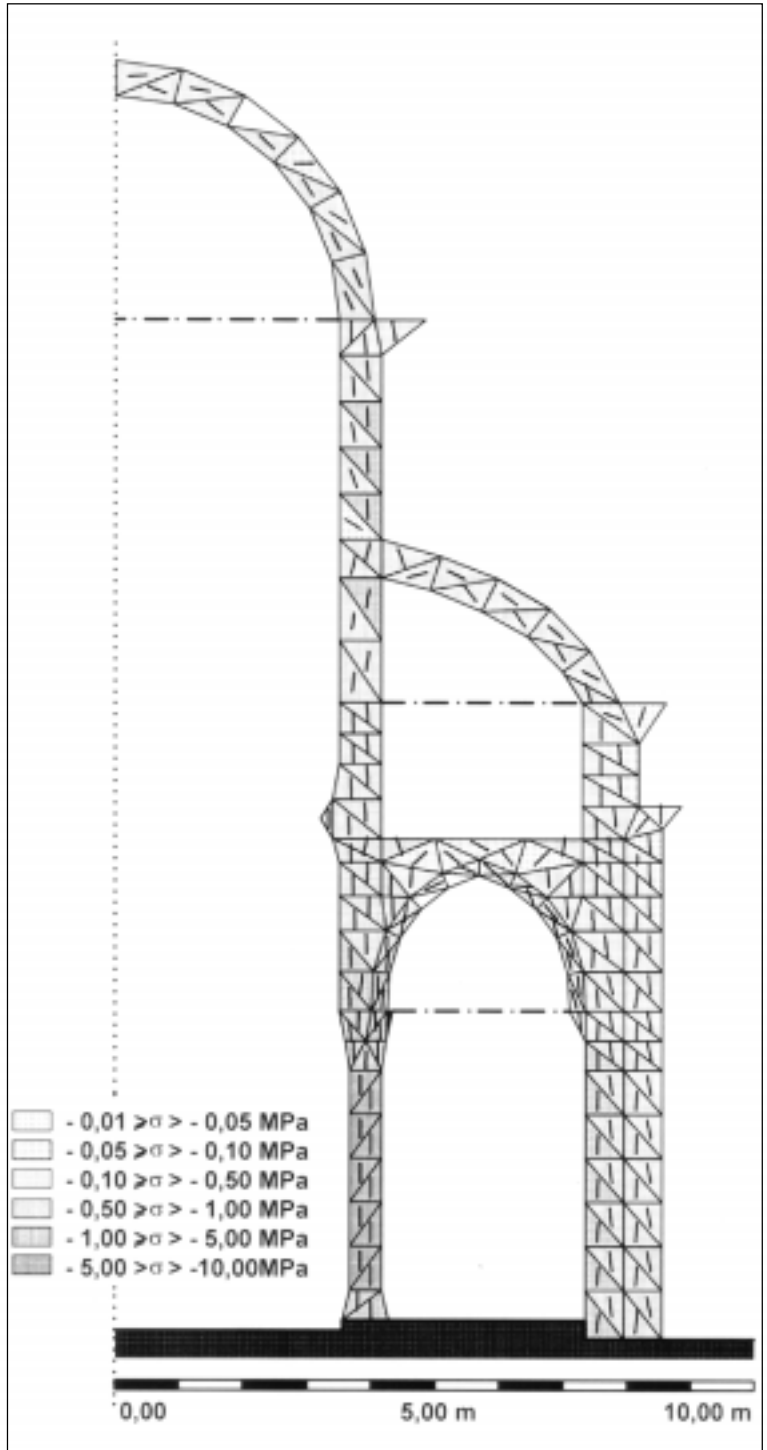
Izradila • Made by
M. Šimunić-Buršić

FIG. 3. DISCRETIZATION NETWORK OF THE FINAL ELEMENTS USED IN THE ANALYSIS OF THE TRANSVERSAL SECTION THROUGH THE AISLES OF ŠIBENIK CATHEDRAL USING THE CALPA COMPUTER PROGRAMME

SL. 4. VRIJEDNOSTI I SMJEROVI GLAVNIH NAPREZANJA U TEŽIŠTIMA KONACNIH ELEMENATA

Izradila • Made by
M. Šimunić-Buršić

FIG. 4. VALUES AND DIRECTIONS OF THE PRINCIPAL STRESSES IN THE CENTRES OF GRAVITY OF THE FINITE ELEMENTS



Svodovi šibenske katedrale

Svodovi šibenske katedrale jedinstveni su po načinu gradnje i strukturnom djelovanju koje iz njega proizlazi: tanke monolitne kamene ploče, uzlijebljene u vitke pojasne lukove, tvore plašt gornjih svodova crkve - bačvastog svoda glavne lađe i segmentnih svodova postranih lađa.⁸³ Taj iznenađujuće "moderan", "montažni" sustav gradnje,⁸⁴ nastao na prijelazu iz 15. u 16. stoljeće,⁸⁵ srodan je načinu gradnje apsidnog dijela katedrale,⁸⁶ signiranom djelu Jurja Dalmatina,⁸⁷ pa je dopušteno pretpostaviti da je i njih koncipirao taj veliki majstor, a da je njegov dostojni nasljednik Nikola Firentinac samo proveo u djelo njegovu originalnu zamisao.⁸⁸

Premda nam izvorni detalji povezivanja ploča svoda nisu poznati,⁸⁹ logika gradnje govori da vrlo duge sljubnice dviju ploča nisu mogle biti izvedene tako precizno da bi omogućile prijenos opterećenja cijelom dužinom pojedinog polja svoda. Uostalom, čak i kad bi bio monolitan, plašt svoda je pretanak da se u njega upiše ijedan verižni poligon koji odgovara opterećenju svoda,⁹⁰ što je nuždan uvjet stabilnosti konstrukcija s jednosmjernim vezama, poput zidanih konstrukcija.

Očito je, dakle, da svodne ploče prenose opterećenje u uzdužnom smjeru, na pojasne lukove svoda, koji tako preuzimaju cjelokupnu težinu svoda. Po toj jasnoj strukturnoj hijerarhiji nosivih elemenata ta je specifična kamena struktura, premda renesansnih oblička, strukturno ipak gotička. Njezin osebusan svod jedinstven je primjer koji potkrepljuje tvrdnje velikog teoretičara 19. stoljeća Viollet-le-Duca o strukturnoj hijerarhiji gotičkih svodova, o primarnoj nosivoj ulozi njihovih rebara.⁹¹

Opisana koncepcija omogućuje krajnje olakšanje plašta svoda, pri čemu se opterećenje svoda (i unutarnje sile koje ono izaziva) koncentrira u samo nekoliko točaka svoda - uporišta pojasnih lukova. Time se i horizontalni potisak svoda - horizontalne sile kojima svod djeluje na svoju vertikalnu supstrukciju i koje često stvaraju znatne probleme pri rješavanju supstrukcije svoda⁹² - koncentrira u samo nekoliko točaka, što omogućuje vrlo jednostavno, ekonomično i elegantno rješenje toga inače neugodnog problema: željezne zatege preuzimaju velik dio horizontalnog potiska⁹³ u stopi lukova, omogućujući vitku, laganu vertikalnu konstrukciju.

S obzirom na koncepciju i način rješenja konstrukcije, i u grafičkom i u računalnom proračunu pretpostavljeno je da se ukupno opterećenje plašta svoda prenosi na pojasne lukove. Težina pojedinih ploča svoda simulirana je silama koje djeluju u ravnini osi luka. Dok je u klasičnoj analizi ta težina bila primijenjena na konstrukciju kao kontinuirano opterećenje, u računalnom proračunu ona je simulirana koncentriranim silama čija su hvatišta u točkama koje u računalnoj analizi odgovaraju čvorovima mreže konačnih elemenata.

⁸³ Šimunić, 1989:77-93.

⁸⁴ Ivančević, 1985:25; Ivančević, 1986:116.

⁸⁵ Gradnju svoda glavne lađe započeo je Nikola Firentinac, protomajstor katedrale, vjerojatno već od 1475. (Kolendić, 1922:94), koji je do 1499. podigao i kupolu nad križištem (Frey, 1913:40). Firentinac je vjerojatno započeo i gornje, segmentne svodove postranih lađa (Frey, 1913:40), koje je završio Bartolomeo de Mestre, prema ugovoru iz 1517. (Frey, 1913:166). Posljednje polje glavne lađe dovršio je 1536. njegov sin Jakov (Frey, 1913:44).

⁸⁶ Karaman, 1931:21.

⁸⁷ Ispod spomen-natpisa o početku gradnje apsidnog dijela šibenske stolnice, u podnožju renesansne skupine putta, uklesao je majstor Juraj svoj jedini potpis u kamenu:

**HOC OPUS CUVARUM FECIT
MAGISTER GEORGIUS
MATHEI DALMATIUS**
(Fosco, 1893:22).

⁸⁸ Ivančević, 1985:36.

⁸⁹ Sredinom 19. st., prilikom sanacije koju je započeo inženjer P. Bioni, a nastavili W. Pakler i P. Zen, svodovi su demontirani, a zatim rekonstruirani, uglavnom pomoću originalnih komada (Frey, 1913:48-49).

⁹⁰ Šimunić, 1989:83.

⁹¹ Viollet-le-Ducova teza o strukturnoj ulozi rebara križno rebrastih svodova pokazala se pogrešnom u nekim primjerima belgijskih i sjevernofrancuskih katedrala oštećenih u Drugome svjetskom ratu. Njihovi svodovi nisu srušeni premda su im rebra otpala. (Viollet-le-Duc, 1858-1868).

⁹² Da bi se riješio problem horizontalnog potiska svodova, razvijena je koncepcija kontrafora i lebdećih kontrafora velikih gotičkih crkava (Viollet-le-Duc, 1868:64,65).

⁹³ Zatega zbog deformabilnosti ne preuzima ukupan horizontalni potisak, nego samo njegov veći dio. Autorica je u prethodnoj studiji primjenom načela virtualnih radova odredila koji dio horizontalnog potiska svoda otpada na zategu, a koji na vertikalnu supstrukciju svoda (Šimunić, 1994:96-99).

94 U elementu 169 - elementu pri ekstradosu boka luka, otprilike u polovici visine luka.

95 U elementu 166 - elementu donjeg dijela intradosa.

96 Ako je tlačna linija unutar jezgre luka, cijeli je presjek napregnuta tlak, što je povoljno za zidane konstrukcije. Ako je središte pritiska izvan jezgre presjeka, u dijelu presjeka napretnom na vlak pojavljuju se pukotine, on prestaje biti dijelom aktivne strukture, pa se tlačna napreznja preraspodjeljuje: budući da dio presjeka postaje neaktivan, aktivni dio presjeka mora preuzeti ukupnu uzdužnu silu i fleksijska napreznja zbog njezine ekscentričnosti (Di Pasquale, 1975:255).

97 U elementu 174.

98 U elementu 166 - elementu blizu ležaja luka.

99 U elementu 164 - neposredno uz uporište luka.

100 U elementu 175.

101 U elementu 169.

102 U elementu 165.

103 Ekscentričnost se znatno smanjuje pri stopi luka.

104 Oblik verižnog poligona u slučaju vlastitog opterećenja te konstrukcije odgovara paraboli.

105 Vlačna napreznja u luku bačvastog svoda, dobivena programom CALPA, iterativnim postupkom koji je prekinut prije nego je završen, vrlo su malena (reda veličine 10^{-14} MPa do 10^{-13} MPa). Da je iterativni postupak proveden do kraja, ta bi se minimalna vlačna napreznja anulirala.

106 Otprilike u donjim šestinama luka, simetrično s obzirom na uzdužnu os svoda.

107 Zatega djeluje u čvoru 132.

108 Presjek diskretiziran elementima 170-171.

109 U elementu 171 (elementu gornjeg dijela boka luka, blizu ekstradosa) oba su glavna napreznja jednaka ništici - u njemu, dakle, nema nikakvih napreznja. Taj konačni element pripada području R0 - neaktivnoj zoni konstrukcije, tj. ne sudjeluje u prijenosu sila (za taj slučaj opterećenja).

110 Velik ekscentricitet "dezaktivira" velik dio presjeka uzrokujući povlačenje aktivne zone presjeka prema rubu strukture tako da preostala tlačna napreznja, zbog ekscentričnog pritiska, ne mogu uravnotežiti svijanje. Može biti nesposobljen i cijeli presjek, što je neoprostiva pogreška u koncepciji zidanih konstrukcija. No to se u ovom slučaju nije dogodilo.

Luk bačvastog svoda glavne lađe

Vrijednosti glavnih tlačnih napreznja u središtima konačnih elemenata pojasnog luka glavnog svoda kreću se od $-0,10$ MPa (na vanjskoj strani boka luka, otprilike na polovici visine luka)⁹⁴ do $-0,87$ MPa (na unutarnjoj strani donjeg dijela luka, no ne sasvim uz njegovu stopu).⁹⁵

Iz omjera veličina glavnih napreznja u elementima unutarnje i vanjske strane luka (intradosa i ekstradosa luka) može se odrediti položaj tlačne linije u luku - elementa bitnog za stupanj racionalnosti i sigurnosti zidanih konstrukcija.⁹⁶ Po intradosu tlak monotono raste od $-0,30$ MPa pri vrhu luka⁹⁷ do $-0,865$ MPa u donjem dijelu luka,⁹⁸ a zatim lagano pada do $-0,63$ MPa uz uporište luka.⁹⁹ Po ekstradosu pak pada od $-0,18$ MPa pri vrhu¹⁰⁰ do $-0,10$ MPa na boku luka,¹⁰¹ a zatim raste do $-0,52$ MPa neposredno uz uporište luka.¹⁰² Iz toga proizlazi da se potporna linija, koja je u gornjem dijelu, pri vrhu polukružnog luka, bliža intradosu, na boku još više približava intradosu (ekscentricitet se povećava i doseže maksimum otprilike na polovici visine luka, odnosno otprilike na četvrtinama njegova raspona), a zatim se približava osi luka.¹⁰³

To variranje ekscentriciteta posljedica je nepodudaranja oblika luka bačvastog svoda koji slijedi klasični renesansni predložak "savršene krivulje" - kružnice, i oblika tlačne linije u njemu.¹⁰⁴

Vrlo mala vlačna napreznja, koja se prema računalnom proračunu pojavljuju u nekim elementima donjeg i srednjeg dijela luka, rezidualna su napreznja zaostaci koje računalo zbog nedovoljnog broja iteracija još nije anuliralo.¹⁰⁵

Konačni elementi u kojima je jedno glavno napreznje tlačno, a drugo nominalno vrlo malo vlačno napreznje pripadaju zoni R1 - području jednosmjernog napreznja u kojemu vrijede zakonitosti specifične za NTM konstrukcije i u kojemu se mogu pojaviti pukotine. Važno je stoga razmotriti u kojim dijelovima strukture nastaje takvo stanje napreznja.

Iz rezultata računalne analize vidljivo je da se jednoosno stanje napreznja pojavljuje u donjem dijelu luka,¹⁰⁶ gdje je ekscentričnost velika, ali i pri stopi luka gdje je jak lokalni utjecaj zatege.¹⁰⁷ Najkritičniji je presjek otprilike na četvrtini raspona luka (simetrično s obje strane uzdužne osi svoda),¹⁰⁸ čiji je jedan dio jednoosno napretn, a drugi čak neaktivan.¹⁰⁹

Pojava neaktivnog elementa posljedica je velike ekscentričnosti.¹¹⁰

Luk segmentnog svoda

Konstruktivni sustav segmentnog svoda - gornjeg svoda postranih lađa - identičan je načinu gradnje svoda glavne lađe, pa je i strukturno djelovanje tog svoda identično ponašanju gornjega bačvastog svoda. Dakle, može se smatrati da se opterećenje kamenih ploča plašta svoda prenosi na vertikalnu supstrukturu isključivo putem pojasnih lukova, tj. da ti lukovi preuzimaju cjelokupno opterećenje svoda.

Analiza glavnih naprezanja dobivenih računalnim programom CALPA pokazuje da su tlačna naprezanja prilično jednolično raspodijeljena (njihova se vrijednost kreće od $-0,12$ MPa do $-0,61$ MPa, dosežući maksimum u donjem elementu intradosa. Taj lokalni maksimum posljedica je najveće ekscentričnosti tlačne sile na tom dijelu konstrukcije. Naime, vrijednosti tlačnog naprezanja u elementima ekstradosa padaju od $-0,49$ MPa pri vrhu luka¹¹¹ do $-0,12$ MPa u donjem dijelu boka luka,¹¹² a zatim opet rastu u donjem elementu ekstradosa.¹¹³ Pri intradosu pak tlačna naprezanja rastu od $-0,12$ MPa pri vrhu¹¹⁴ do $-0,61$ MPa pri stopi luka.¹¹⁵

Iz toga proizlazi da se tlačna linija, koja je u gornjem dijelu luka bliža ekstradosu, negdje blizu sredine raspona približava osi luka, da bi se u donjem dijelu luka približila intradosu.

Ekscentričnost tlačne sile u luku i u tom je slučaju posljedica nepodudaranja oblika luka (segment kružnice) i oblika tlačne linije (koja je za jednolično kontinuirano opterećenje parabola), no treba istaknuti da oblik luka ipak prilično dobro aproksimira tlačnu liniju, iz čega proizlazi relativno mala ekscentričnost tlačne sile u tom luku.¹¹⁶

Najveća ekscentričnost (u donjem dijelu boka luka)¹¹⁷ stvara jedno od najvećih tlačnih naprezanja u tom dijelu konstrukcije ($-0,52$ MPa)¹¹⁸ i najmanje tlačno naprezanje ($-0,12$ MPa).¹¹⁹

U četiri konačna elementa prevladava jednoosno stanje naprezanja,¹²⁰ što je posljedica velike ekscentričnosti, odnosno lokalnog utjecaja zatege.¹²¹

Vertikalna supstrukcija svodova

Polustupac gornjeg dijela zida glavne lađe

Budući da je opterećenje svoda koncentrirano u točkama ležaja pojasnog luka, najopterećeniji dio stijene glavne lađe upravo je segment zida pod tim ležajem, koji je s unutarnje strane ojačan poligonalnim polustupcem. Taj je polustupac stvarni strukturni nastavak pojasnog luka svoda glavne lađe, poput gotičkih stupaca, čije profilacije prelaze u rebra svoda: bačvasti svod šibenske katedrale, naime, koncentrira opterećenje u kutnim točkama polja svoda, upravo kao gotički križno rebrasti svodovi. Kako se u zidanim konstrukcijama sile ne rasipaju u konstrukciji¹²² (jer subregije R2, R1 i R0 ostaju uvijek strogo odijeljene), polustupac glavne lađe preuzima cjelokupno opterećenje bačvastog svoda srednjeg broda. Iz vrijednosti glavnih tlačnih naprezanja, dobivenih računalnim programom CALPA, vidljivo je da je na cijelom tom segmentu jače napregnut vanjski dio zida:¹²³ u elementima vanjske strane zida tlačna naprezanja rastu od $-0,91$ MPa na vrhu¹²⁴ do $-1,36$ MPa na dnu tog odsječka,¹²⁵ dok su u elementima unutarnje strane polustupca te vrijednosti neusporedivo manje: padaju od $-0,25$ MPa na vrhu¹²⁶ do $-0,03$ MPa na dnu odsječka.¹²⁷

Analiza tih naprezanja pokazala je da je u gornjem dijelu polustupca

111 U elementu151.

112 Element142.

113 Dosežući vrijednost $-0,21$ MPa u elementu 138.

114 Najmanje je naprezanje u elementu 146, blizu vrha luka.

115 U elementu 136.

116 Ekscentričnost tlačne sile manja je nego u luku bačvastog svoda glavne lađe.

117 Za element142-140.

118 U elementu140.

119 U elementu142.

120 Subregija R1 prema terminologiji - Di Pasquale, 1992.

121 Zatega djeluje u čvoru 105.

122 Di Pasquale, 1992:177.

123 Zbog sažetosti izrazu u ovom se radu termini *vanjski* i *unutarnji* koriste na proizvoljan način: unutarnjom stranom nekoga strukturnog elementa smatra se njegov dio bliži interijeru crkve, odnosno njezinoj središnjoj uzdužnoj osi, a vanjskom stranom onaj bliži eksterijeru crkve.

124 Element160.

125 Element154.

126 Element159.

127 Element153.

glavne lađe (od gornjeg vijenca pročelja do uporišta segmentnog svoda) tlačna linija prilično ekscentrična (bliža vanjskoj plohi strukturnog elementa), te da se od vrha tog odsječka vertikalne konstrukcije do ležaja segmentnog svoda središte pritiska sve više odmiče od osi polustupca prema njegovoj vanjskoj plohi.

Otklon tlačne linije od vertikale prema vanjskoj plohi zida posljedica je utjecaja onog dijela horizontalnog potiska luka bačvastog svoda koji ne preuzima zatega.¹²⁸

Zbog znatne ekscentričnosti tlačne sile u većem dijelu polustupca (osobito u njegovoj vanjskoj strani) naprezanje je jednoosno. To nepovoljno stanje naprezanja bitno se mijenja pod strukturalnim utjecajem luka segmentnog svoda, tj. potiska kojim taj luk djeluje na vertikalnu strukturu glavne lađe.

Uporište segmentnog luka (ležaj segmentnog luka na polustupcu glavne lađe)

Elementi 150 i 152 uporište su segmentnog luka postrane lađe, koji na tim mjestima znatnim potiskom djeluje na polustupac stijene glavne lađe.

U presjeku iznad uporišta segmentnog luka¹²⁹ javlja se vrlo velika ekscentričnost tlačne sile: u elementu čije je težište bliže unutarnjoj plohi polustupca glavne lađe¹³⁰ tlak iznosi $-0,03$ MPa, a u elementu bliže vanjskoj plohi te stijene¹³¹ tlak doseže čak $-1,36$ MPa.

U elementima uporišta segmentnog luka ekscentričnost tlačne sile u polustupcu glavne lađe naglo se smanjuje zbog horizontalnog potiska tog luka.

Tako je i vrijednost najvećega tlačnog naprezanja u tom presjeku ($-0,57$ MPa)¹³² mnogo manja od tlaka u elementu iznad njega ($-1,36$ MPa).¹³³ Zahvaljujući povoljnom utjecaju segmentnog svoda, u elementima stijene glavne lađe, koji čine uporište segmentnog svoda, prevladava dvoosno stanje naprezanja.¹³⁴

Važno je uočiti da se mijenjaju i smjerovi glavnih naprezanja: dok su u stijeni glavne lađe iznad uporišta pojasnog luka segmentnog svoda imali otklon prema van ($4,9^0 - 3,1^0$ u vanjskim, odnosno od $5,0^0$ do čak $58,0^0$ u unutarnjim elementima), u elementima uporišta segmentnog luka¹³⁵ taj je kut otprilike 166^0 .

Jasno je, dakle, da lukovi segmentnog svoda postrane lađe imaju zadaću kontrafora.¹³⁶

Polustupac stijene triforija

Polustupac stijene triforija (tj. stijene glavne lađe između friza lišća i uporišta pojasnog luka segmentnog svoda postrane lađe), uglavnom je gotovo centrično pritisnut, zahvaljujući potisku pojasnog luka segmentnog svoda postrane lađe, koji uravnotežuje potisak bačvastog svoda glavne lađe, te zahvaljujući djelovanju zatege

128 Naime, zatega zbog deformabilnosti ne preuzima cjelokupni horizontalni potisak svoda nego samo jedan njegov dio. Proračun omjera sile koji otpada na zategu, a koji na vertikalnu zidanu strukturu, primjenom načela virtualnih radova - vidjeti u: Šimunić, 1994:96-99.

129 Konačni elementi 153-154.

130 Element 153.

131 Element 154.

132 U konačnomelementu 152.

133 U konačnomelementu 154.

134 Najpovoljnija mogućnost naponskog stanja za zidane konstrukcije.

135 U elementima 150 i 152.

136 Već je odavno objašnjena i istaknuta takva strukturna uloga svodova postranih lađa, kao i važno mjesto koje su oni imali u razvoju sustava kontrafora na prijelazu iz romanike u gotiku (v. Viollet-le-Duc, 1856:68).

segmentnog svoda, koja, usidrena na koti donjeg ležaja segmentnog luka, preuzima dio tog potiska, pridonoseći finoj ravnoteži promišljene i svrsishodne strukture šibenske katedrale.

Zahvaljujući tome, tlačna su naprezanja prilično ravnomjerno raspoređena: variraju od $-0,47 \text{ MPa}$ ¹³⁷ (u gornjem dijelu unutarnje strane tog odsječka stijene glavne lađe) do $-1,09 \text{ MPa}$ (u gornjem elementu vanjske strane tog strukturalnog članka).¹³⁸

Omjer tlačnih naprezanja u polustupcu stijene triforija¹³⁹ govori o povoljnom utjecaju potiska segmentnog svoda na vertikalnu konstrukciju pod njim. Tlačna se linija pomiče od "vanjske" plohe polustupca glavne lađe prema težišnoj osi toga strukturalnog elementa, tako da je u presjeku uz sidrište zatege približno centrična.¹⁴⁰

Preuzimajući horizontalnu komponentu unutarnje sile u konstrukciji, zatega omogućuje da u presjecima ispod njezina sidrenja tlačna linija bude približno vertikalna, s neznatnim odklonom prema van (maksimalno $3,8^\circ$), fiksirajući tako povoljan položaj što ga je tlačnoj sili dao potisak segmentnog svoda. Bez zatege bi utjecaj svoda postrane lađe bio nepovoljan, jer bi izazvao ekscentričnost na suprotnoj strani pilastra.

Jednoosno stanje naprezanja javlja se u većini konačnih elemenata na kojoj je diskretiziran taj odsječak polustupca glavne lađe.¹⁴¹ Ta naoko neobična pojava (tlačna je sila gotovo centrična) rezultat je relativno brojnih utjecaja na taj dio konstrukcije: potiska segmentnog svoda, utjecaja zatege, dodira s dijafragmom poprečnog luka križno rebrastog svoda, konzolne istake friza lišća.

Jednoosno naprezanje u velikom dijelu tog odsječka strukture nepovoljno je naponsko stanje u inače povoljno napregnutom strukturnom članku zgrade.

U svom se najnižem dijelu parapet triforija proširuje kamenim frizom lišća, karakterističnim dekorativnim elementom majstora Jurja Dalmatinca, koji svjedoči da je on vodio gradnju šibenske katedrale do te točke.¹⁴²

Vijenac, premda plitka konzolna istaka, ipak utječe na pomak središta pritiska prema "unutarnjoj" plohi pilastra (prema prostoru glavne lađe).¹⁴³

Gornji dio pročelja (dio pročelja neposredno ispod segmentnog svoda - između dvaju vijenaca)

Dio pročelja neposredno ispod segmentnog svoda - kratki segment između gornjeg vijenca pročelja¹⁴⁴ i friza gotičkih slijepih lukova¹⁴⁵ - promatra se odvojeno jer ispod donjeg vijenca pročelja dijafragma poprečnog luka križno rebrastog svoda, povezana s polustupcem glavne lađe i s vanjskim zidom katedrale, znatno mijenja strukturno ponašanje pročelja, te se pilastar tog zida ispod vijenca slijepih lukova ponaša kao sasvim drukčiji strukturni element.

137 U elementu145.

138 U elementu148.

139 Omjer tlačnih naprezanja u polustupcu stijene triforija gotovo je upola manji od omjera naprezanja u elementima 150 i 152.

140 U presjeku diskretiziranom elementima 139 i 141 tlačna su naprezanja približno jednaka.

141 Tlačna naprezanja pojavljuju se u čak devet elemenata od ukupno 13, na koliko ih je diskretiziran taj dio strukture.

142 Otvori triforija iznad tog friza pripadaju već stilskom izrazu čiste renesanse, no prema prostornoj koncepciji triforija, koji je tipično gotički element, zamisao prostora triforija može se također pripisati Dalmatincu (Frey, 1913:22-23).

143 Povoljno strukturno djelovanje tog vijenca zbog kojega se tlačna linija lagano približava osi strukturalnog elementa.

144 Gornji, renesansni vijenac zida postrane lađe dovršen je vjerojatno tek neposredno prije segmentnih svodova postrane lađe (1517-1535) pod vodstvom protomajstora Jakova, Bartolomejeva sina (Fosco, 1893:61). Grbovi kneza F. Bragadena (1553-1555) i biskupa I. L. Štafilića (1528-1557) vjerojatno su ipak naknadno dodani na sjeverno pročelje iznad friza slijepih lukova (Fosco, 1893:60-61).

145 Sjeverno je pročelje završeno do donjeg vijenca (friza slijepih lukova) do 1436. (Frey, 1913:7), dakle, u prvom razdoblju gradnje, koju su tada vodili A. Busato i L. Pincino (Kolendić, 1924:168, 173).

Tlačna naprezanja u tom dijelu konstrukcije nisu velika, jer ni opterećenje ovog odsječka nije veliko: osim vlastite težine, on nosi samo dio težine segmentnog svoda. Vrijednost tlačnog naprezanja kreće se od $-0,06$ MPa (na vrhu pročelja, blizu gornjeg vijenca¹⁴⁶) do $-0,60$ MPa (u donjem elementu unutarnje strane tog segmenta pročelja¹⁴⁷).

U elementima vijenaca¹⁴⁸ pojavljuju se minimalna tlačna naprezanja: od $-0,01$ MPa do $-0,02$ MPa.

Jače je opterećena unutarnja strana pilastra (tlačno naprezanje od $-0,49$ MPa na gotovo cijeloj visini toga odsječka¹⁴⁹ neznatno raste u donjem unutarnjem elementu, dosežući $-0,60$ MPa).¹⁵⁰ U elementima vanjske strane pilastra tlačno naprezanje raste od $-0,06$ MPa u gornjem dijelu odsječka¹⁵¹ do $-0,19$ MPa u donjem elementu.¹⁵²

Porast tlačnih naprezanja u donjem dijelu odsječka rezultat je ukupnog stalnog opterećenja što ga nosi konstrukcija.

Iz takve raspodjele naprezanja proizlazi da je tlačna sila ekscentrična, bliža unutarnjoj plohi zida, te da se tlačna linija na tom odsječku stalno polako primiče osi pilastra.

Ekscentričnost tlačne sile nastaje zbog ekscentričnog smještaja uporišta segmentnog svoda na vanjskom zidu.¹⁵³

Ta je ekscentričnost najveća na vrhu gornjeg dijela pročelja i smanjuje se prema dnu tog segmenta. Tlačna linija, dakle, ima blagi otklon prema van, zbog djelovanja onog dijela horizontalnog potiska segmentnog svoda što ga ne preuzima zatega.¹⁵⁴

Iz smjera trajektorija glavnih naprezanja, koje su u središtima svih elemenata tog odsječka zida blago nagnute prema vanjskoj plohi strukture, vidljivo je da taj strukturalni element djeluje kao blago opterećeni kontrafor.¹⁵⁵

Jednosno stanje naprezanja, koje se javlja u polovici ukupnog broja konačnih elemenata na koje je podijeljen taj dio strukture, osobito je zamjetno u donjemu i vanjskom dijelu strukture.

Donji dio strukture katedrale

Donji dio strukture - "supstrukcija" šibenske katedrale mnogo je masivnija od njezina gornjeg dijela. Dok su poprečni lukovi gornjih svodova i polustup glavne lađe vitki, gotovo linearni elementi, donji su dijelovi konstrukcije snažniji, dodatno ojačani poprečnim plošnim elementima. Razlog tome nisu samo veća opterećenja u donjem dijelu konstrukcije koja preuzima sav teret strukture iznad sebe, nego i razlika u koncepciji tih dijelova zgrade: donji, zatvoreni dio djelo je skromnih majstora poput Antonija Busata¹⁵⁶ i Lorenza Pincina,¹⁵⁷ i ta gradnja i po dekorativnim detaljima¹⁵⁸ i po strukturnim elementima¹⁵⁹ pripada standardnom gotičkom stvaralaštvu sredozemnoga kulturnog kruga, dok su autori napetih jedara gornjih svodova veliki renesansni graditelji Juraj Dalmatinac¹⁶⁰ i Nikola Firentinac.¹⁶¹

U donjem dijelu zgrade struktura nije tako genijalno jednostavna

146 Elementi 133 i 129.

147 U elementu 119.

148 U elementima 120, 123, 134.

149 U elementima 131, 128 ($-0,48$ MPa), te u elementu 125.

150 Element 119.

151 Element 133.

152 Element 122.

153 Premda se na tom dijelu konstrukcije takav smještaj stope luka čini nepovoljnim, on je vrlo prikladan za stanje naprezanja u donjem dijelu pročelja, što se i potvrdilo.

154 Primjenom načela virtualnog rada određeno je koji dio horizontalnog potiska preuzima zatega, a koji vertikalna supstrukcija (Šimunić, 1994:101-104).

155 Blago opterećeni kontrafor, jer zatega preuzima glavni dio potiska.

156 Kolendić, 1924:173.

157 Frey, 1913:129,130. Kolendić, 1924:168.

158 Poput friza slijepih lukova, koji je bio isklesan već 1436, kako svjedoči grb kneza Marca Enzija (1434-1436) (Frey, 1913:8), odnosno poput većine kapitela stupova uzdužnog broda (Frey, 1913:12).

159 Poput križno rebrastog svoda postrane lađe, od kojega su Pincino i Busato izveli samo prvo polje sjeverne lađe, a ostala su polja presvođena pod vodstvom Jurja Dalmatinca, koji ih je projektirao per analogiam s prvom "kapelom" (Frey, 1913:129,130).

160 Mišljenja stručnjaka o autorstvu svodova šibenske katedrale razilaze se. No R. Ivančević naglašava da su svi znanstvenici koji su šibenskoj katedrali prišli kao arhitekturi, od Fausta Vrančića 1616. do Dagoberta Freya 1913. g., tvrdili su da je ona od Jurjeva dolaska 1441. do dovršenja građena prema jedinstvenom načelu (Ivančević, 1980:376).

161 R. Ivančevićističe: Iako je zamisao prostora u cjelini, invencija metode konstrukcije i princip jedinstva materijala šibenske katedrale Jurjev, često je bilo zapostavljeno značenje Nikolinoga arhitektonskog projektiranja i oblikovanja kojim je kongenijalno nastavio i dovršio Jurjev projekt (Ivančević, 1985:36).

i jasna kao u gornjim dijelovima: veći broj strukturnih elemenata povezuje se u složene strukture kompleksnoga naponskog stanja, što otežava proračun.

Jedna od takvih struktura jest dijafragma - zidana stijena nad poprečnim lukom križno rebrastog svoda, koja čini strukturnu cjelinu s tim rebrom, a povezana je i s polustupcem glavne lađe te s pilastrom pročelja.

Premda se autorica članka nije imala priliku osobno uvjeriti u postojanje zidane kamene dijafragme nad poprečnim lukom križno rebrastog svoda, na temelju strukturne i konstruktivne logike te na temelju analogije sa sličnim zidanim konstrukcijama¹⁶² pretpostavila je da upravo na taj način svodovi podupiru pod triforija.

Dijafragma i poprečni luk križno rebrastog svoda, spregnuti i s polustupcem glavne lađe i s pilastrom pročelja, važan su element povezivanja i poprečne ukrute te stabilizacije katedrale. Taj strukturni članak preuzima opterećenja u svojoj ravnini, pa je, dakle, dvodimenzionalno napregnuta plošna struktura.

Srećom, računalo omogućuje proračun i takvih složenijih struktura, bez suvišnih pojednostavnjenja. I program CALPA, premda još u fazi razvoja i bez mogućnosti analize prostornih struktura, omogućuje praćenje igre sila u dvodimenzionalno napregnutim plošnim strukturama.

Poprečni luk križno rebrastog svoda i zidana dijafragma nad njim

Rezultati analize računalnim programom CALPA otkrivaju podatak da glavna tlačna naprezanja u spomenutom dijelu konstrukcije veoma variraju. To je i razumljivo, jer je zapravo riječ o dva različita konstrukcijska elementa: poprečnom luku križno rebrastog svoda postrane lađe i dijafragmi nad njim.

Osim toga, veza rubnih zona tih strukturnih elemenata s primarnom vertikalnom konstrukcijom, koja nosi svod i gornje dijelove crkve te je stoga snažno opterećena, znatno utječe na dijafragmu i poprečni luk, koji su samo neznatno opterećeni.

Naime, sam luk i dijafragma nad njim nose samo vlastitu težinu - težina križno rebrastog svoda ne prenosi se na njih, jer bi to značilo prijenos opterećenja u uzdužnom smjeru, u kojemu je zakrivljenost svoda minimalna, a izvodnice plašta svoda horizontalne.¹⁶³

Opterećenje svoda prenosi se u poprečnom smjeru (u smjeru zakrivljenosti svoda) na dijagonalna rebra svoda, koja koncentriraju opterećenje svoda prenoseći ga na vertikalnu supstrukciju u samo četiri točke polja.

Stoga poprečno rebro ne preuzima veći dio opterećenja svoda nego bilo koji poprečni pojas plašta svoda.

Dijagonala djeluje na vertikalnu konstrukciju koncentriranom

¹⁶² Primjerice, katedrala u Amiensu (Pesciullesi, 1992:29).

¹⁶³ Takav je prijenos opterećenja nemoguć u zidanim konstrukcijama koje karakteriziraju jednostrane veze, odnosno nemogućnost preuzimanja vlakna. Naime, uzdužni horizontalni elementi ponašali bi se poput greda, tj. na savijanje: u njima bi se, dakle, pojavila i tlačna i vlačna naprezanja - a to je nespojivo s prirodom zidanih konstrukcija, u kojima veze među građevnim elementima (ciglama kamenim kvadrirama) ne mogu preuzeti vlak.

silom F_{krs} , čija je horizontalna komponenta, prema proračunu klasičnom metodom,¹⁶⁴ $F_{krs} = 34,172$ kN, a vertikalna $F_{krs} = 81,8$ kN.¹⁶⁵ U modelu je djelovanje tog potiska simulirano dvjema suprotnim koncentriranim silama, F_{krs} i $-F_{krs}$, čija su hvatišta u čvorovima 51 i 56.

Među vrijednostima glavnih tlačnih naprezanja u poprečnom luku križno rebrastog svoda i u zidanoj dijafragmi nad njim, dobivenim programom CALPA, ističu se vrlo niske vrijednosti tih naprezanja u sredini raspona (kako luka, tako i dijafragme nad njim).

U tom dijelu dijafragme i poprečnog luka sva se glavna tlačna naprezanja kreću od $-0,04$ MPa do $-0,19$ MPa: mala naprezanja posljedica su neznatnog opterećenja tog dijela konstrukcije, koji nosi praktički samo vlastito opterećenje, i to na nevelikom rasponu.

Dijafragma poprečnog luka

Vrijednosti glavnih tlačnih naprezanja u sredini raspona zidane dijafragme nad poprečnim lukom križno rebrastog svoda, dobivene programom CALPA, vrlo su niske. U tom dijelu dijafragme sva se glavna tlačna naprezanja kreću od $-0,05$ MPa¹⁶⁶ do $-0,10$ MPa.¹⁶⁷ sva su, dakle, istog reda veličine. Mala naprezanja rezultat su slabog opterećenja tog dijela dijafragme.

U lateralnim elementima dijafragme pojavljuju se malo veća naprezanja: na dodiru poprečne dijafragme s polustupcem glavne lađe ta naprezanja variraju od $-0,56$ MPa u gornjem¹⁶⁸ do približno $-0,62$ MPa u donjim elementima,¹⁶⁹ a na dodiru s pilastrom pročelja rastu od $-0,35$ MPa u gornjem¹⁷⁰ do $-0,47$ MPa u donjem elementu.¹⁷¹

Veća tlačna naprezanja na dodiru s vertikalnom strukturom glavne lađe posljedica su većeg opterećenja, većih deformacija i većih naprezanja u polustupcu glavne lađe, koja je mnogo viša od sjevernog pročelja, te nosi i gornji svod crkve.

U lateralnim elementima, čija su težišta bliža sredini raspona, tlačna su naprezanja nešto manja ($-0,11$ MPa,¹⁷² $-0,17$ MPa)¹⁷³ i približavaju se vrijednostima tlaka u sredini polja.

Jednosmjerno stanje naprezanja nastaje u gotovo svim elementima koji dodiruju poprečni luk svoda. U gornjem dijelu dijafragme (neopterećenome) prevladava dvosmjerno stanje naprezanja, kao i u elementima uz polustupac glavne lađe.

Poprečni luk

Poput tlaka u središnjem dijelu dijafragme i naprezanja u sredini raspona poprečnog luka križno rebrastog svoda vrlo su malena: u lijevom¹⁷⁴ kraku kreću se od $-0,01$ MPa¹⁷⁵ do $-0,04$ MPa,¹⁷⁶ a u desnom kraku od $-0,10$ MPa¹⁷⁷ do $-0,27$ MPa.¹⁷⁸ Dva su elementa desne strane čak neaktivna.¹⁷⁹ U boku luka naprezanja rastu od $-0,18$ MPa (u gornjem dijelu lijevog boka luka)¹⁸⁰ do $-0,27$ MPa (sredina lijevog boka)¹⁸¹ na strani bližoj glavnoj lađi, te od $-0,11$ MPa (gornji dio desnog boka)¹⁸² do $-0,56$ MPa (sredina desnog boka)¹⁸³ na strani bližoj pročelju katedrale.

164 Za potrebe ovog istraživanja križno rebrasti svod analiziran je klasičnom grafičkom metodom, podjelom plašta svoda na konačne elemente - pojase okomite na os pojedinog dijela plašta svoda (Šimunić, 1994: 102-105).

165 Taj je vrijednost proračunana klasičnom grafičkom metodom, bez pomoći računala.

166 U elementima 105 i 108.

167 U elementu 106.

168 U elementu 112.

169 U elementima 89 i 80.

170 U elementu 114.

171 U elementu 85.

172 U elementu 98.

173 U elementu 101.

174 Radi jednostavnosti i sažetosti, u tekstu se rabe pojmovi *lijeva* i *desna* strana presjeka, premda je jasno da ti pojmovi nemaju opću važnost niti posebno znanstveno značenje, jer se, dakako, mijenjaju s promjenom motrišta. Oni se ovdje odnose samo na priložene crteže, a koriste se da bi se čitatelj lakše snašao.

175 U elementu 90.

176 U elementu 99.

177 U elementima 100 i 93.

178 U elementu 83.

179 Elementi 91 i 82 pripadaju zoni R0, prema terminologiji: Di Pasquale, 1992.

180 U elementu 81.

181 U elementu 75.

182 U elementu 84.

183 U elementu 76.

U donjem dijelu luka, na koji ne djeluje samo opterećenje konstrukcije nad njim nego i potisak križno rebrastog svoda (simuliran silom $F_{\text{krš}}$ u čvorovima 51 i 56), ta napreznja znatno rastu, dosežući vrijednost od -1,58 MPa u lijevoj stopi pojasnice svoda,¹⁸⁴ odnosno -0,86 MPa u njezinu desnom uporištu.¹⁸⁵

U elementima uz čvor 51,¹⁸⁶ odnosno uz čvor 56,¹⁸⁷ u kojima djeluje sila $F_{\text{krš}}$ (potisak križno rebrastog svoda koji se preko dijagonale prenosi na vertikalnu konstrukciju), tlak je mnogo veći od tlaka u višim elementima luka i u rubnim elementima dijafragme.

Promatramo li luk kao zasebnu supstrukturu, opažamo da su u gornjem dijelu lijevog kraka poprečnog luka napreznja veća pri ekstradosu, te da na boku luka tlačna linija prelazi na unutarnju stranu luka. U "desnom" kraku, koji dodiruje vanjski zid katedrale, tlačna je linija cijelom dužinom bliža intradosu, samo se pri ležaju sasvim približava osi luka.

Neaktivni elementi intradosa lijevog kraka luka¹⁸⁸ posljedica su velike ekscentričnosti tlačne sile u tom dijelu konstrukcije.

U približno polovici ukupnog broja konačnih elemenata na koje je podijeljen taj segment konstrukcije pojavljuje se jednoosno stanje napreznja. Područja R1 nastaju na mjestima gdje se tlačna linija najviše približava konturi konstrukcije,¹⁸⁹ te pri ležaju rebra križnog svoda,¹⁹⁰ gdje je usidrena zatega što preuzima horizontalnu komponentu potiska križno rebrastog svoda.

Vertikalna struktura uz dijafragmu

Pilastar vanjskog zida ispod vijenca slijepih lukova (uz dijafragmu poprečnog luka križno rebrastog svoda)

Tlačna napreznja, koja variraju od -0,03 MPa (u gornjem dijelu "vanjske" strane pilastra)¹⁹¹ do -0,82 MPa (uz ležaj poprečnog luka križno rebrastog svoda),¹⁹² monotono rastu od vijenca slijepih lukova prema konzolnom ležaju luka križno rebrastog svoda kako se povećava težina što je nosi pilastar pročelja. Pritom su napreznja veća u unutarnjoj strani tog elementa (-0,33 MPa na vrhu, u visini poda triforija,¹⁹³ do -0,82 MPa uz ležaj rebara križnog svoda¹⁹⁴), što govori o ekscentričnosti tlačne sile. Središte pritiska bliže je unutarnjoj konturi pilastra, jer konstrukcija čije opterećenje preuzima taj istak pročelja (tj. opterećenje gornjeg dijela pročelja i luka segmentnog svoda leži ekscentrično na njemu, točnije, pilastar se ističe iz debljine zida, odnosno njegova se os "udaljuje" od osi gornjeg dijela zida. Tlačna se linija u pilastru polako pomiče prema vanjskoj plohi tog segmenta vanjskog zida, čime se primiče njegovoj osi, pa je ekscentričnost tlačne sile u donjem dijelu tog segmenta vertikalne strukture manja nego u njegovu gornjem dijelu. Pomicanje središta pritiska uzrokuje onaj dio horizontalnog potiska segmentnog svoda što ga preuzima zatega.

Relativna neiskorištenost vanjskog dijela pilastra pročelja (u

184 U elementu 55.

185 U elementu 56.

186 Elementi 60, 65 i 70.

187 Elementi 61, 66 i 71.

188 Elementi 91 i 82.

189 U elementu 76 - elementu intradosa rebra svoda.

190 U elementima 55 i 56.

191 U elementu 116.

192 U elementu 57.

193 U elementu 109.

194 U elementu 57.

kojemu tlak raste od $-0,03$ MPa na vrhu tog odsječka pilastra pročelja)¹⁹⁵ do $-0,11$ MPa (pri dnu tog dijela pilastra)¹⁹⁶ svjedoči da su prvi graditelji šibenske katedrale¹⁹⁷ (koji su izveli sjeverno pročelje crkve do vijenca slijepih lukova),¹⁹⁸ predvidjeli drukčiju strukturu gornjeg dijela zgrade od one koja je izvedena.¹⁹⁹

Jednosmjerno naprezanje nastaje uglavnom blizu osi pilastra, malo ekscentrično prema unutarnjoj plohi²⁰⁰ te uz unutarnju plohu pilastra.²⁰¹

Polustupac glavne lađe ispod friza lišća

Polustupac glavne lađe na navedenoj je visini horizontalno ukrućen poprečnim lukom križno rebrastog svoda i dijafragmom.

Tlačna naprezanja u njemu monotono rastu od friza lišća do kapitela stupa: u elementima bližim prostoru glavne lađe tlak monotono raste od $-0,84$ MPa (u gornjem dijelu tog segmenta polustupca)²⁰² do $-1,23$ MPa (u njegovu donjem dijelu),²⁰³ a u elementima uz dijafragmu i poprečni luk križno rebrastog svoda postrane lađe varira od $-0,53$ MPa (neposredno ispod friza lišća)²⁰⁴ do $-1,17$ MPa (iznad kapitela stupa).²⁰⁵

Lijeva²⁰⁶ je strana opterećenija, premda su u polustupcu triforija u presjecima neposredno iznad promatranog odsječka polustupca jače napregnuti desni elementi. Čini se da dijafragma nad lukom rasterećuje desnu stranu polustupa glavne lađe u visini dijafragme.

Ekscentričnost tlačne sile bliže lijevoj ("unutarnjoj") konturi polustupca postupno se smanjuje, da bi se pri abaku kapitela središte pritiska sasvim primaknulo osi polustupca.

Takav tok tlačne sile, s blagim otklonom u desno, prema dijafragmi i luku križnoga svoda, posljedica je kosog smjera tlačne linije udesno (prema postranoj lađi) u polustupcu stijene triforija, zbog utjecaja zatege segmentnog svoda postrane lađe.

U većini konačnih elemenata tog segmenta polustupca glavne lađe nastaje jednoosno stanje naprezanja, što znači da je taj strukturni članak prilično nepovoljno napregnut.

Smjer glavnih naprezanja u svim je konačnim elementima blizak vertikali: maksimalno odstupanje iznosi $6,7^{\circ}$. Jedino je u elementu 111 - gornjem elementu dodira s dijafragmom - taj otklon malo veći ($12,1^{\circ}$).

Promatramo li polustupac glavne lađe i poprečni luk križno rebrastog svoda kao cjelinu, opažamo da je u donjem dijelu toga segmenta naprezanje vrlo jednolično raspodijeljeno po horizontalnom presjeku. To je odlika promišljene i uravnotežene strukture.

Najniži dijelovi vertikalne supstrukcije

Pilastar vanjskog zida ispod ležaja križno rebrastog svoda (donji dio pilastra pročelja)

Glavna tlačna naprezanja u pilastru vanjskog zida monotono rastu od ležaja križno rebrastog svoda do temelja. To je posljedica povećanja težine koju taj strukturni element preuzima i prenosi na temelje.

195 U elementu 116.

196 U elementu 63.

197 Ponekim se naznakama čini da je autor prvog projekta katedrale Bonino iz Milana (Stošić, 1950:130).

Prvi protomajstor šibenske stolnice Franjo Jakovljević iz Venecije vodio je gradnju katedrale samo u prvoj godini gradnje (Kolendić, 1924:157, 173). Kasnije su gradnju vodili Antonio Busato i Lorenzo Pincino, dvojica skromnijih mletačkih majstora, koji su izveli sjeverno pročelje do vijenca slijepih lukova (Kolendić, 1924: 171-173).

198 Do 1436. g. završeno je sjeverno pročelje do friza slijepih lukova (Frey, 1913:8).

199 Upravo su do te visine izvedeni i pilastri kao ojačanja pročelja. Iznad vijenca slijepih lukova zidna je ploha glatka, bez istaka. Očito, u strukturnom sustavu što su ga uveli kasniji graditelji ta strukturna ojačanja nisu bila potrebna. Tako i gornji dio zida glavne lađe, koji nosi bačvasti svod crkve, ima glatku plohu pročelja, bez istaka.

200 U elementima 115, 102, 86, 72, 62.

201 U elementima 77 i 67.

202 U elementu 104.

203 U elementu 54.

204 U elementu 111.

205 U elementu 59.

206 Vidjeti bilj. 163.

Zbog ekscentričnosti tlačne linije, koja je u donjem dijelu pilastra pročelja posvuda bliža unutarnjoj plohi pilastra, tlačna su naprezanja veća u "unutarnjoj", "lijevoj" strani tog strukturalnog elementa. U elementima "unutarnjeg" dijela pilastra tlačna se naprezanja smanjuju od -1,15 MPa (pod konzolnim ležajem rebara križnoga svoda)²⁰⁷ do -1,02 MPa (pri dnu pilastra).²⁰⁸ Na istom odsječku tlačna naprezanja u elementima "vanjske" strane pilastra rastu od -0,10 MPa (na vrhu tog odsjeka pilastra)²⁰⁹ do -0,62 MPa (pri dnu).²¹⁰

Ekscentričnost tlačne sile postupno se smanjuje zahvaljujući kosom toku tlačne linije, blago nagnutome prema vanjskoj konstrukcijskoj plohi. Pilastar pročelja, dakle, svojom masom, tj. debljinom većom od debljine obodnog crkvenog zida "apsorbira" horizontalnu komponentu potiska gornjega segmentnog svoda i donjega križno rebrastog svoda postrane lađe. On, dakle, djeluje kao kontrafor, a njegov *raison d'être* bio bi još jasniji da je konstrukcija izvedena bez zatega, kako su vjerojatno zamislili njezini prvobitni graditelji.²¹¹

Jednoosno stanje naprezanja u gornjem se dijelu toga pilastarskog segmenta pojavljuje u elementima bližim unutarnjoj plohi pilastra, a zatim se u nižim dijelovima postupno premješta prema njegovoj vanjskoj ("fasadnoj") plohi.

U svim konačnim elementima tog odsjeka smjer glavnih naprezanja blizak je vertikali.²¹²

Stup glavne lađe

Okrugli stupovi glavne lađe, s kapitelima koji su većinom isklesani u prvoj fazi gradnje,²¹³ ugrađeni su uglavnom kasnije.²¹⁴

Kapiteli su *per definitionem* elementi koji prenose opterećenje gornjih konstrukcijskih dijelova na vitke štapaste elemente - stupove. Njihova je uloga da "koncentriraju" opterećenja i "usmjere" ga prema osi stupa.

U kapitelu se opterećenje glavne lađe uravnotežuje s potiskom poprečnog luka križno rebrastog svoda tako da se tlačna naprezanja prilično jednolično raspodjeljuju po horizontalnim presjecima kapitela te nema velikog ekscentriciteta tlačne sile. No dakako, budući da se ukupno opterećenje tog dijela konstrukcije dijeli na manju površinu, tlačna su naprezanja veća nego u elementima nad stupom. Kreću se od približno -2,3 MPa u gornjem dijelu kapitela²¹⁵ do oko -3,4 MPa u njegovu donjem dijelu.²¹⁶ Pritom su naprezanja veća u elementima bližima osi kapitela, što je razumljivo, jer je iz oblikovnih razloga abak kapitela malo širi od debljine luka križno rebrastog svoda i zida nad sobom.²¹⁷

Dok je u gornjem dijelu kapitela središte pritiska bliže postranoj lađi, u njegovu donjem dijelu ono se premješta prema glavnoj lađi. Taj je pomak posljedica djelovanja potiska križno rebrastog svoda, tj. njegove horizontalne komponente koju zatega samo djelomično preuzima.

207 U elementu 38.

208 U elementu 8.

209 U elementu 53.

210 U elementu 6.

211 Busato i Pincino presvodili su samo prvo polje sjeverne postrane lađe (Frey, 1913:129-130). Možda je zategu uveo Juraj Dalmatinac, koji je pozvan da ispravi *defectus et errores*?

212 Pri bazi pilastra otklon se povećava jer se naprezanja usmjeruju prema čvorovima 3, 4 i 5, kojima je modeliran kontinuirani ležaj pilastra.

Tu je razlika između modela i stvarne konstrukcije očita, pa i rezultati očito odstupaju od stvarne slike naprezanja. Ta je razlika neizbježna jer je imanentna svakoj varijanti metode konačnih elemenata, koja fizički kontinuum diskretizira na konačne elemente. Odstupanje bismo mogli ublažiti, ali ne i ukloniti, proglašivanjem mreže konačnih elemenata. No u našem primjeru to nije moguće jer program CALPA, još u eksperimentalnoj fazi razvoja, ne omogućuje proračun modela većih od približno 200 elemenata (ovisno o širini dijagonale matrice).

213 No ugrađeni su kasnije (Frey, 1913:10-11).

214 Busato i Pincino izveli su samo prvo polje sjeverne lađe (Frey, 1913:10-11).

215 Ona iznose -2,2 MPa u elementu 48, odnosno -2,5 MPa u elementu 49.

216 Tlačna su naprezanja -3,79 MPa u elementu 40, odnosno -2,93 MPa u elementu 41.

217 Rubni dijelovi kapitela na taj način ostaju neopterećeni.

SL. 5. KRISTALIČNA STRUKTURA ŠIBENSKE KATEDRALE

FG. 5. CRYSTALLIC STRUCTURE OF ŠIBENIK CATHEDRAL



Tlačna naprezanja u donjem dijelu kapitela pritom rastu, što je, dakako, posljedica smanjenja poprečnog presjeka.

U stablu stupa, čiji je poprečni presjek još manji, tlačna su naprezanja veća. Tu nastaju apsolutno najveća tlačna naprezanja u promatranom vertikalnom presjeku katedrale.

Najveće glavno tlačno naprezanje (-5,88 MPa) u gornjem elementu "lijeve" strane stupa²¹⁸ posljedica je najveće ekscentričnosti tlačne sile u tom dijelu strukture. Ekscentričnost pritiska smanjuje se prema dnu stabla stupa, da bi se blizu baze stupa središte pritiska sasvim približilo osi stupa. Stoga se u "lijevim", napregnutijim elementima stabla stupa vrijednost tlačnih naprezanja smanjuje od -5,88 MPa na -5,70 MPa pri dnu stabla stupa,²¹⁹ a u "desnim", manje opterećenim elementima, ta naprezanja rastu od -5,04 MPa na vrhu stabla stupa²²⁰ do -5,61 MPa pri dnu stabla stupa.²²¹

Tako su tlačna naprezanja u donjem presjeku stupa gotovo jednolično raspodijeljena, što govori o racionalnosti strukture šibenske katedrale, u kojoj je tlačna sila "centrirana" upravo u presjeku u kojemu je "najskoncentriranija", tj. upravo na mjestu gdje cjelokupno opterećenje glavne lađe i dio opterećenja postrane lađe preuzima vitki stup.²²²

Graditelji šibenske katedrale odlično su poznavali djelovanje sila, što im je omogućilo stvaranje dobro odmerene, konstrukcije.

²¹⁸ U elementu 34.

²¹⁹ U elementu 10.

²²⁰ U elementu 31.

²²¹ U elementu 7.

²²² Malogapoprečnogpresjeka.

Zaključak

Rezultati računalne analize šibenske katedrale dokazuju da je njezina struktura vrlo logično i racionalno koncipirana. Iznimno malo neaktivnih elemenata i ograničen broj elemenata s jednoosnim stanjem naprezanja svjedoči da su graditelji odlično poznavali karakteristike i mogućnosti materijala kojim su gradili, te su se čak odvažili primijeniti ga na neuobičajeni način: umjesto gradnje sitnim elementima, povezanim mortom,²²³ gornji su svodovi izgrađeni svojevrsnom montažom krupnih elemenata - ploča koje tvore plašt svoda. Takav konstrukcijski sustav rezultirao je jedinstvenim strukturnim sustavom svoda, u kojemu se opterećenje plašta prenosi na pojasne lukove te se tako opterećenje, dakle i potisak svoda, koncentrira u uporištima pojasnih lukova.

Veći dio horizontalnog potiska u tim točkama preuzimaju zatege, rasterećujući vertikalnu supstrukciju. Stoga vitka vertikalna konstrukcija ostavlja dojam lakoće. Igra sila u njoj (opterećenje i potisak bačvastog svoda glavne lađe, potisak segmentnog svoda, utjecaj zatege, djelovanje dijafragme nad poprečnim lukom križno rebrastog svoda, opterećenje i potisak križno rebrastog svoda, preuzet zategom) govori o namjeni i svrsishodnosti svakoga od tih strukturnih članaka: svaki je element nuždan, i to baš na tome mjestu.

Najveća glavna tlačna naprezanja u vertikalnoj nosivoj konstrukciji dosežu oko -1,0 MPa do -1,35 MPa. Jedino u stupu kolonade koja dijeli glavnu od postranih lađa ta naprezanja rastu do približno -3,5 MPa (u kapitelu), odnosno do oko -5,9 MPa (u stablu stupa), zbog znatnog smanjenja poprečnog presjeka strukture.

Visok stupanj iskorištenosti materijala²²⁴ govori o smionosti graditelja utemeljenoj na velikom iskustvu u gradnji kamenom.

Analizirajući strukturni rad konstrukcije šibenske katedrale kao cjeline, ustanovili smo da su je i njezini graditelji promatrali upravo tako: kao nerazdvojnu cjelinu u kojoj je svaki element povezan sa svim ostalima, pa i više od toga - čak i elementi koji se nama čine dekorativnim detaljima imaju izrazitu strukturnu ulogu.²²⁵ Graditelji u prošlosti u svom duhu očito nisu odvajali namjenu od oblika, strukturu od dekoracije. Njihove spoznaje o strukturnom obilježju arhitekture temeljile su se na iskustvu, na promatranju konkretnih zgrada u njihovoj cjelovitosti. Promatrajući uvijek zgradu kao cjelinu, bez podjele na strukturne i dekorativne elemente, oni su je tako i projektirali: kao fini, složeni organizam u kojemu svaka pojedinost ima svoj *raison d'être*.

Vjerujemo da graditelji današnjice mogu mnogo naučiti iz njihove integralne metode projektiranja i iz njihovih dostignuća.

²²³ To upravo i jest definicija zidanih konstrukcija.

²²⁴ Tlačna čvrstoća upotrijebljenog kamena nakon ciklusa smrzavanja iznosi -74,5 MPa.

²²⁵ Primjerice, skulptura s masivnim postoljem na vrhu kupole ima bitno strukturno značenje: oblik lukova kupole prilagođen je upravo takvom opterećenju na vrhu i bez njega je nemoguće konstruirati verižni poligon upisan u konturu konstrukcije, što je nuždan uvjet za stabilnost zidanih struktura (Šimunić, 1989:186).

Literatura • Bibliography

1. Alberti, L. B. (1966), *De re aedificatoria*; u modernom izdanju: Alberti, L. B., *L'architettura, Trattati di architettura*, Il polifilo, Milano.
2. Di Pasquale, S. (1975), *Scienza delle costruzioni*, Tamburini, Milano.
3. Di Pasquale, S. (1984), *Statica dei solidi murari - Teoria ed esperienze*, Università di Firenze, Firenze.
4. Di Pasquale, S. (1992), *New Trends in the Analysis of Masonry Structures*, "Meccanica", 27:173-184.
5. Folnesics, H. (1914), *Studien zur Entwicklungsgeschichte der Architektur und Plastik des XV Jahrhunderts in Dalmatien*, "Jahrbuch des Kunsthistorischen Institutes der K.K. Zentralkommission für Denkmalpflege", VIII:4-196.
6. Fosco, A. G. (1891), *Documenti inediti per la storia della fabbrica della cattedrale di Sebenico e del suo architetto Giorgio Orsini detto Dalmatico*. Tipografia della Curia vescovile, Sebenico.
7. Fosco, A. G. (1893), *La cattedrale di Sebenico ed il suo architetto Giorgio Orsini detto Dalmatico*. Tipi della curia vescovile, Sebenico.
8. Frey, D. (1913), *Der Dom von Sebenico und sein Baumeister Giorgio Orsini*, "Jahrbuch des Kunsthistorischen Institutes der K.K. Zentralkommission für Denkmalpflege", VII:1-169.
9. Grubišić, S. (1974), *Šibenik kroz stoljeća*, Muzej grada Šibenika, Šibenik.
10. Ivančević, R. (1980), *Mješoviti gotičko-renesansni stil arhitekta Jurja Matejeva Dalmatinca*, "Prilozi povijesti umjetnosti u Dalmaciji", 21, 1980:355-380, Split.
11. Ivančević, R. (1979-1982), *Prilozi problemu interpretacije djela Jurja Matejeva Dalmatinca*, "Radovi Instituta za povijest umjetnosti", 3-6:25-64, Zagreb.
12. Ivančević, R. (1985), *Renesansa u Dalmaciji, Hrvatskom primorju i Istri*, u: Ivančević, R., Prijatelj, K., Horvat, A., Šumi, N., *Renesansa u Hrvatskoj i Sloveniji*, Prosveta - Jugoslavija, Beograd, Spektar, Zagreb, Prva književna komuna, Mostar.
13. Ivančević, R. (1987), *Nikola Ivanov Firentinac*, Likovna enciklopedija Jugoslavije, II, Jugoslavenski leksikografski zavod "Miroslav Krleža", 461-465, Zagreb.
14. Karaman, Lj. (1931), *O šibenskoj katedrali. Povodom 500. godišnjice početka njezine gradnje*, Općina grada Šibenika, Zagreb.
15. Kolendić, P. (1922), *Stube na crkvi sv. Ivana u Šibeniku*, Starinar, III/1:65-94.
16. Kolendić, P. (1924), *Je li Bonin iz Milana radio na šibenskoj katedrali?*, Buličev zbornik, 1924:467-470.
17. Kolendić, P. (1924), *Šibenska katedrala pre dolaska Orsinijeva (1430-1441)*, "Narodna starina", III/2.

18. Mark, R. (1982), *Experiments in Gothic Structure*, The MIT Press, Cambridge-Massachusetts, London-England.
19. Meyer, A. G. (1894), *Studien zur Geschichte der oberitalienischen Plastik im Trecento*, "Repertorium für Kunstwissenschaft", XVII:18-37.
20. Montani, M. (1967), *Juraj Dalmatinac i njegov krug*, Glijptoteka Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti, Zagreb.
21. Pesciullesi, C., Mollica, E. (1992), *La Qualità Strutturale dell'Architettura Gotica*, Università degli studi di Firenze, Firenze.
22. Smars, P. (1992), *Etudes sur les structures en maçonneries*, Leuven, Katholieke Universiteit Leuven, Centre d'Etudes pour la Conservation du Patrimoine Architectural et Urbain (magistarska teza).
23. Stošić, K. (1950), *Je li Bonin iz Milana radio na šibenskoj katedrali?* "Vjesnik za arheologiju i historiju dalmatinsku", sv. LII, god. 1935-1949:128-130, Split.
24. Šimunić, M. (1989), *Prilog istraživanju klasičnih zidanih konstrukcija na primjeru šibenske katedrale*, magistarski rad, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
25. Šimunić, M. (1991), *Inter arma non silent artes*, Šibenska katedrala Anno Domini 1991 (katalog izložbe):26-29, Muzej Mimara, Zagreb.
26. Šimunić-Buršić, M., Žagar, Z., Bjelanović, A. (1993), *Structural Analysis of the Damage at the Cathedral of Šibenik*, Structural of the Architectural Heritage (IABSE Symposium Rome 1993): 489-490, Zürich.
27. Šimunić-Buršić, M., Žagar, Z., Bjelanović, A. (1994), *Structural Analysis of Architectural Heritage - A Prerequisite for its Reconstruction*, "Kemija u industriji", 43 (3):160-162, Zagreb.
28. Šimunić-Buršić, M. (1994), *Struttura della cattedrale di Sebenico* (neobjavljeno), Firenze.
29. Tonietti, U. (1986), *Analisi del setto trasversale*, Architettura e terremoti/II caso di Parma: 9 novembre 1983, Istituto per i Beni Artistici, Culturali e Naturali della Regione Emilia-Romagna, Dipartimento di costruzioni dell'Università degli Studi di Firenze:108-114, Firenze.
30. Viollet-le Duc, E.-E. (1856-1868), *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*, Librairies-Imprimeries Réunies, Paris.
31. Vrančić, F. (1615-1616), *Machinae novae*, Venezia.
32. Zhi-hua, Ch. (1985), *The Anti-seismic Design of Guanying*, International Course on Preventive Measures for the Protection of Cultural Property in Earthquake Prone Regions, IZIIS-ICCROM, Skopje.

Summary • Sažetak

COMPUTER ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF ŠIBENIK CATHEDRAL A Contribution to Research into Classical Masonry Structures

Specific structure of Šibenik Cathedral is analyzed to research the mechanical behaviour of classical masonry structures.

The vaults of Šibenik Cathedral are unique in method of construction and its resulting structural effects. The stone slabs of the upper vaults transfer their load longitudinally to the transverse arches, which carry the whole weight of the barrel vault. Thus the load (and the thrust) is concentrated in only several points: at the arch imposts most of the thrust is taken over by iron ties, enabling a slender vertical substructure.

For the analysis of a characteristic transversal section through the nave and aisles, we used the CALPA computer programme, developed specially for masonry structure calculation. It is based on the theory of unilateral links, characteristic of structures unresistant to tension, like masonry structures.

Computer analysis of the upper vaults transverse arches shows a favourable even distribution of pressure stress. Force excentricity, due to non-coinciding of the semicircular form of the arch of the nave vault with the pressure line, is lesser in the segment aisle vaults arches, where architect was free to define a shape.

In the nave wall, freed by iron ties from the thrust of the barrel vault, the load is concentrated in slender pilasters that take over the forces of the vault. The part of the thrust not taken up by iron ties causes excentricity and outward pressure. The arch of the aisle vault acts as a flying buttress balancing that part of the nave vault's thrust, and the iron ties "stabilize" the approximately central position of the longitudinal force. The transverse ribs of the aisle groin vaults and their diaphragms act as transverse stiffenings.

The gentle excentricity of the pressure line decreases in the lower part of the nave pilaster. The centre of pressure coincides almost with the pilaster axis, and the stresses are nearly vertical. Thus the stresses in column under it are almost equally distributed, which is very important in this slender, heavily loaded element.

Obviously, the builders of the Šibenik cathedral, knowing empirically influences and forces in the structure, created a logical and purposeful construction.

Marina Šimunić-Buršić