

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.16>

Procjena ponašanja tipske Krupno-panelne zgrade iz 1960-ih pod potresnim opterećenjem

Analysis of a typical 1960s Large panel building seismic resistance

Romano Jevtić Rundek¹, Mario Uroš¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, romano.jevtic.rundek@grad.unizg.hr, mario.uros@grad.unizg.hr

Sažetak

Izgradnja standardiziranih krupno-panelnih zgrada se intenzivirala 1960-ih na području Zagreba. Veliki broj je izgrađen prije prvog ozbiljnijeg seizmičkog propisa (1964). Moderna saznanja pokazuju da su netipični i potencijalno opasni mehanizmi otkazivanja mogući u navedenim krupno-panelnim zgradama. U ovom radu, neke metode za analizu ovakvih građevina su prikazane, uz korištenje programskih paketa ETABS i Abaqus. Detaljni model konstrukcijskih detalja u Abaqusu je korišten za proračun krivulja kapaciteta. Navedene krivulje kapaciteta se onda koriste za kalibraciju jednostavnijeg modela sa plastičnim ponašanjem koncentriranim u čvorovima u ETABS-u. Proces kalibracije je završen usporedbom ponašanja sastavljenih zidova u oba programska paketa radi potvrde točnosti interakcije između krivulja kapaciteta u pojednostavljenom modelu. Rezultat je pojednostavljen numerički model koji može rekreirati relevantne mehanizme loma dovoljno točno.

Ključne riječi: seizmička analiza, krupno panelne zgrade, mehanizam loma, kalibracija numeričkog modela

Abstract

Construction of standardised large panel buildings intensified during the 1960s in the city of Zagreb. Many were built before the first serious seismic code was introduced (1964). Modern understanding shows that non typical and potentially dangerous failure modes are possible in these large panel buildings. In this article, some methods for analysis are presented, using software ETABS and Abaqus. A detailed model of structural details is used to extract their capacity curves in Abaqus. These curves are then used to calibrate a simpler lumped plasticity model in ETABS. And the calibration process is completed by comparative analysis between wall assemblies to confirm appropriate interaction between structural elements. As a result, a numerical model is provided capable of estimating complex failure mechanisms associated with large panel buildings to a reasonable degree.

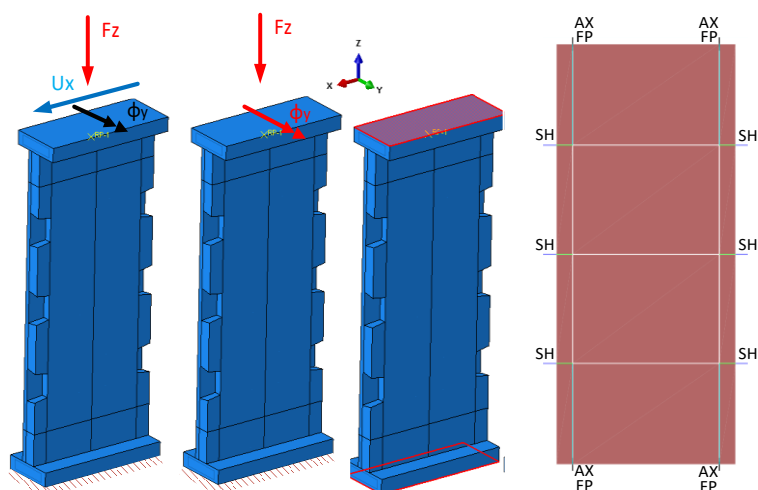
Keywords: seismic analysis, Large panel buildings, Failure mechanism, Numerical model calibration

1. Uvod

Izgradnja standardiziranih krupno-panelnih zgrada se intenzivirala 1960-ih na području Zagreba i Balkana. Prvi ozbiljniji seizmički propis u regiji stupa na snagu 1964-e, nakon izgradnje velikog broja krupno-panelnih zgrada. Krupno panelni sustavi izgrađeni u Zagrebu prije 1964-e imaju karakteristično malu količinu armature, glatku armaturu, manji udio uzdužnih zidova te detalje sklone nestandardnim mehanizmima otkazivanja. Istraživanja seizmičke otpornosti ovakvih građevina su se intenzivirala 1980-ih, sa izvještajem od National Technical Information Service – NTIS (1) gdje su u jedan izvještaj objedinjeni eksperimentalni podaci, inženjerske preporuke i metode za proračun te preporuke za numeričke modele. Od istraživanja na području Balkana izdvaja se magistarski rad profesorice Zamolo (2). Krupno-panelne zgrade su pretežno građene kao polumontažne armirano betonske zgrade, sastavljene od predgotovljenih krupnih armirano betonskih panela. Tipične krupno-panelnih zgrada uključuju slabe i neduktilne veze između elemenata, malu količinu armature, korištenje glatke armature itd. Relevantni mehanizmi otkazivanja se razlikuju između pojedinih građevina, no općenito uključuju otkazivanje smicanjem po horizontalnoj ili vertikalnoj sljubnici krupnog panela, odizanje horizontalne sljubnice panela te drobljenje panela na horizontalnoj sljubnici. Kod proračuna ovakve konstrukcije potrebno je uzeti u obzir nelinearno ponašanje veza elemenata, kako bi se otkrio mjerodavni mehanizam sloma krupno-panelne zgrade. U provedenim istraživanjima, zbog u to vrijeme ograničene snage računala, analize su ograničene na manje modele te 2D analize. U moderno vrijeme postoje napredniji računalni programi kao Abaqus (3) i ETABS (4). U literaturi se mogu naći demonstracije simulacije kinematičkog i plastičnog ponašanja nosivih elemenata i njihove interakcije u Abaqusu (5,6). Također možemo naći primjere nelinearnih modela građevina uz primjenu koncentrirane plastičnosti, korištenih za modernu kvantifikaciju seizmičkog performansa građevine u obliku PSHA odnosno probabilističke analize seizmičkog hazarda (7). Iz navedenog se može zaključiti da bi kvalitetno kalibriran model sa koncentriranim plastičnostima omogućio primjenu PSHA analize na krupno-panelnu zgradu. Nadalje, može se primjetiti da postoje značajne varijacije u obliku i dimenzijama krupno-panelnih elemenata te obliku i dimenzijama samih zgrada. Posljedično, postoje značajne razlike u otpornosti detalja različitih tipova krupno-panelnih zgrada. U ovom radu se opisuje postupak kalibracije numeričkog modela jedne krupnopanelne zgrade. Primjenjuju se precizniji modeli detalja, te pojednostavljeni globalni model koji se kalibrira po preciznijem modelu. Time bi se omogućilo dovoljno točno modeliranje cijele građevine na stolnom računalu, zbog značajno manje numeričke kompleksnosti jednostavnijeg modela.

2. Definicije modela

Koriste se dva pristupa modeliranju, jedan precizan i numerički zahtjevan model od volumnih konačnih elemenata, izrađen u programu Abaqus (3), te drugi jednostavniji model baziran na elementima sa koncentriranom plastičnosti, izrađen u programu ETABS (4).



Slika 1. Model jednog panela u Abaqusu (lijevo) i ETABS-u (desno)

Model u Abaqusu (Slika 1 lijevo) izrađen je pomoću volumnih konačnih elemenata koji simuliraju beton te linearnih elemenata koji simuliraju armaturu, definirani kao „embedded elements“. Za konstitutivni model materijala je odabran Concrete Damaged Plasticity (CDP) (8) čija kalibracija je napravljena po odabranom skupu eksperimenata, odgovara tlačnoj čvrstoći betona 20MPa i nije opisana u ovom radu. Za konstitutivni model armature koristi se bilinearni model materijala, ekvivalentan čeliku S235. Interakcija između elemenata modela definirana je trenjem, ili trenjem i kohezijom ovisno o modelu. Faktor trenja je odabran kao 0.7, uz provedenu analizu osjetljivosti.

Model u ETABS-u (Slika 1 desno) izrađen je od shell, frame i link elemenata. Shell i frame elementi formiraju individualne panele koji se ponašaju elastično, dok su linkovi raspoređeni kako je prikazano na ## te simuliraju ponašanje veza sa susjednim elementima. Linkovi imenovani SH simuliraju ponašanje moždanika, linkovi označeni AX simuliraju odizanje panela i drobljenje panela, a linkovi označeni FP simuliraju klizanje panela po horizontalnoj sljubnici. Linkovi AX i SH su definirani kao bilinearni (multilinear plastic) u odgovarajućim stupnjevima slobode, a link FP je definiran kao veza sa koeficijentom trenja, različitim za vlačno i tlačno stanje(T/C friction pendulum).

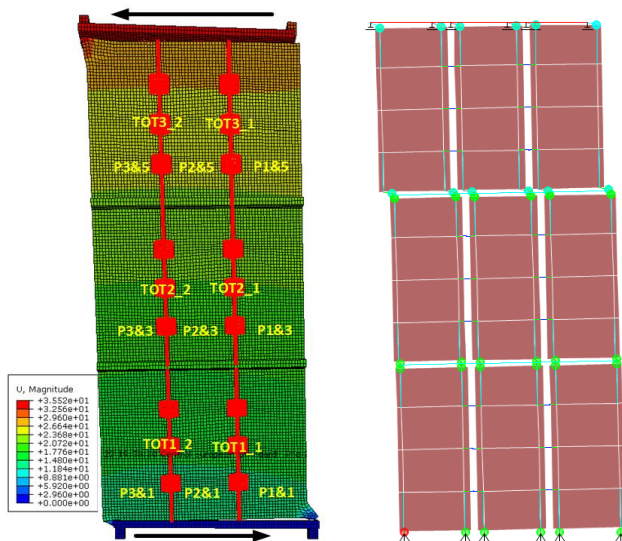
3. Analize

Provode se dvije razine analiza. Prva razina su analize na individualnim elementima, druga razina su analize sastavljenih zidova. Prva razina se koristi za inicijalnu kalibraciju plastičnog ponašanja nelinearnih veza elemenata, dok se druga razina koristi za kontrolu interakcije kalibriranih veza u sastavljenom zidu. Odnosno, prva razina analize obuhvaća analize postupnog guranja jednog AB panela, pri različitim opterećenjima uzdužne sile, te analizu smicanja jednog moždanika. Navedene analize dopuštaju simulaciju svih relevantnih mehanizama otkazivanja dovoljno međusobno neovisno. Ova se analiza provodi u Abaqusu i ETABS-u. Kada se kalibrira ETABS model tako da je ponašanje jednog panela adekvatno,

odnosno dovoljno slično ponašanju po modelu iz Abaqus-a, potrebno je još kontrolirati interakciju panela u sastavljenom zidu. Druga razina se provodi radi kontrole navedene interakcije. Provede se analize postupnog guranja nekoliko konfiguracija zidova, sa variranjem vitkosti zida, čime se izazivaju različiti mehanizmi loma (slom smicanjem, savijanjem). Promatra se usklađenost krivulja postupnog guranja, mehanizama otkazivanja te raspodjele sila u elementima, sa pretpostavkom da je kompleksniji (Abaqus) model točan, a jednostavniji model (ETABS) se kalibrira da ostvari ekvivalentne rezultate.

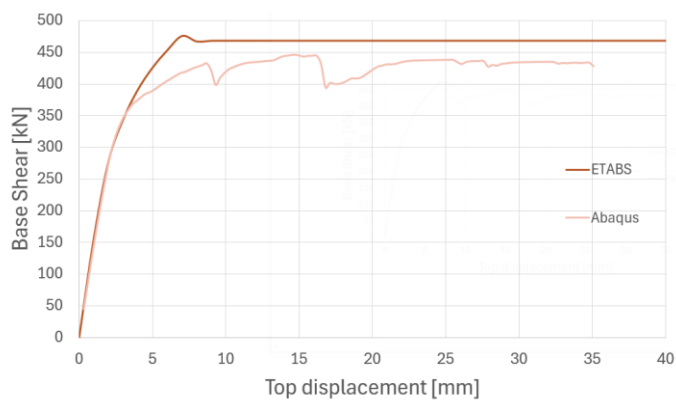
4. Rezultati analize

Prikazuju se rezultati iz analize zida širokog 3 panela i visokog 3 panela, jer se isti pokazao kao granični slučaj između dva mehanizma sloma, odnosno omogućava prikaz sloma smicanjem i savijanjem. Na slici 2 prikazani su model u Abaqusu (lijevo) i ETABS-u (desno), nakon provedene analize postupnog guranja. Na slici 3 su prikazane krivulje postupnog guranja cijelih zidova u oba modela. Nadalje na slici 4 prikazani su dijagrami horizontalnih sila u individualnim panelima tokom analize postupnog guranja za model iz Abaqus-a te na slici 5 za model iz ETABS-a.

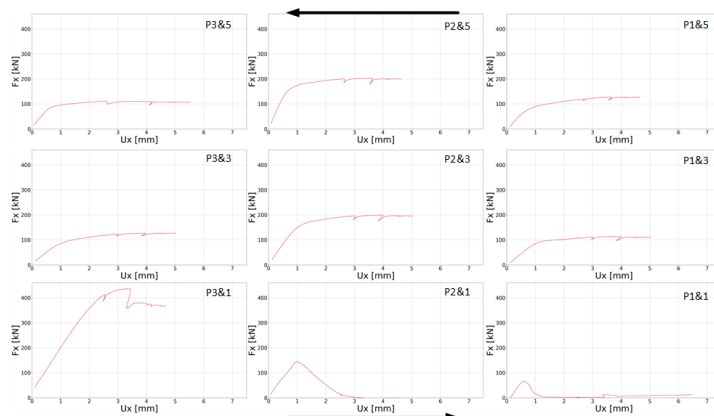


Slika 2. Mehanizam otkazivanja u Abaqusu (lijevo) i ETABS-u (desno)

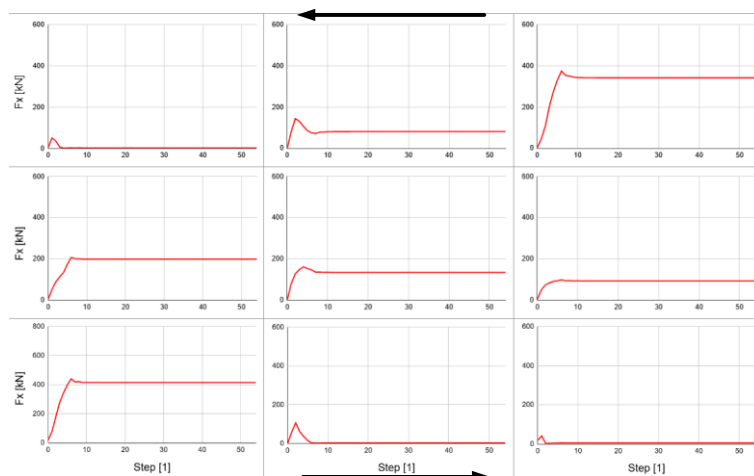
Na krivulji postupnog guranja cijelog zida može se vidjeti dobra usklađenost krutosti i čvrstoće sastavljenog zida. Dakle u najmanju ruku može se očekivati dobre rezultate pomaka katova u globalnom modelu. U nastavku se promatra distribucija sila i oštećenja u individualnim elementima sastavljenog zida. Na slici 2 mogu se primijetiti odizanje zida i smicanje serklaža na oba modela, dok se na ETABS modelu javlja drobljenje betona (dolje lijevo) kojeg u Abaqus modelu nema.



Slika 3. Krivulja postupnog guranja sastavljenog zida



Slika 4. Horizontalne komponente sila u individualnim panelima Abaqus modela



Slika 5. Horizontalne komponente sila u individualnim panelima ETABS modela

Tok unutarnjih sila prikazan je dijagramima horizontalne komponente sile u zidu, sa dijagramima raspoređenim jednako kao i elementi u zidu. Strelice na vrhu i dnu slike naznačuju smjer smicanja.

Usporedbom toka sila u Abaqus i ETABS modelu može se primijetiti da je tok sila u donjem redu panela gotovo identičan, no postoji razlika u gornjim slojevima zida. Glavni uzrok razlike proizlazi iz simulacije kohezije u Abaqus modelu, koju ETABS model ne simulira, već se oslanja samo na trenje. Ova razlika nije jako značajna, pošto se očekuje i u Abaqus modelu vidi pucanje veza elemenata prije pucanja elemenata. Dakle glavna odstupanja u modelu se javljaju na lokacijama konstrukcije koja ne sudjeluju u mehanizmu otkazivanja. Sličnost mehanizama otkazivanja podržava ovakav zaključak, no ipak postoje razlike, kao klizanje u ETABS modelu na gornjoj trećini zida koje se ne javlja u Abaqus modelu te drobljenje materijala u ETABS modelu koje se ne javlja u Abaqus modelu.

5. Zaključak

Proveden je set analiza postupnog guranja za razne konfiguracije zidova te je prikazana analiza sa rezultatima na granici između dva mehanizma loma. Može se primijetiti da postoje određene razlike u distribuciji sila i oštećenja između modela, no te razlike su prihvatljive obzirom na pojednostavljenu prirodu ETABS modela. Unatoč simulaciji samo pomoću koeficijenta trenja i bilinearnog ponašanja ETABS modela, može se dovoljno dobro rekreirati kompleksno ponašanje zidova krupnopanelnih zgrada, za PSHA ili sličnu analizu.

Literatura

- [1] Schriker, V., Powell, GH.: INELASTIC SEISMIC ANALYSIS OF LARGE PANEL BUILDINGS. 1980.
- [2] Mihaela, Zamolo.: Ponašanje spojeva krupnopanelnih konstrukcija u seizmičkim područjima [Magistarski rad]. [Zagreb]: Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu; 1988.
- [3] Abaqus 2016 Documentation, link (<http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html>), pristupljeno 2025 May 12
- [4] Users Guide ETABS 2016, link (<https://ottegroup.com/wp-content/uploads/2021/02/ETABS2016-Users-Guide.pdf>), pristupljeno 2025 May 12
- [5] She, J., Zou, Y., Liu, Y., Li, ZH., Li, KW.: Nonlinear Numerical Analysis of Precast Concrete Shear Wall, Applied Mechanics and Materials, 1192–6, 2014, 651–653, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.1192
- [6] Henry, RS., Sritharan, S., Ingham, JM.: Finite element analysis of the PreWEC self-centering concrete wall system, Eng Struct., 115:28–41, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.029>
- [7] Paudel, S., Ilham, Maulana, TliM., Prayuda, H.: Seismic Vulnerability Assessment of Regular and Vertically Irregular Residential Buildings in Nepal, Journal of the Civil Engineering Forum, 20;199–208,2024, DOI: 10.22146/jcef.10316
- [8] Michał, S., Andrzej, W.: Calibration of the CDP model parameters in Abaqus, Advances in Structural Engineering and Mechanics, Incheon, Korea, 25-29.8. 2015