

Primljen / Received: 19.2.2013.

Ispravljen / Corrected: 11.5.2013.

Prihvaćen / Accepted: 22.5.2013.

Dostupno online / Available online: 10.6.2013.

Ponašanje zgrada temeljenih na toplinskoj izolaciji pri potresu

Autori:



Prof.dr.sc. **Vojko Kilar**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Ljubljani
Arhitektonski fakultet
vojko.kilar@fa.uni-lj.si



Doc.dr.sc. **David Koren**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Ljubljani
Arhitektonski fakultet
david.koren@fa.uni-lj.si



Prof.dr.sc. **Martina Zbašnik-Senegačnik**, dia
Sveučilište u Ljubljani
Arhitektonski fakultet
martina.zbasnik@fa.uni-lj.si

Prethodno priopćenje

Vojko Kilar, David Koren, Martina Zbašnik-Senegačnik

Ponašanje zgrada temeljenih na toplinskoj izolaciji pri potresu

Termoizolacija postavljena ispod temeljne ploče građevine ili ispod trakastog temelja sprečava pojavu toplinskog mosta na kontaktu između građevine i temeljnog tla te smanjuje potrošnju energije kod modernih pasivnih i niskoenergetskih kuća. U ovom se radu analizira seizmičko ponašanje građevina raznih visina i tlocrtnih katnih dimenzija, za razne uvjete tla i za razne vrste termoizolacijskih slojeva. Rezultati pojednostavljenih seizmičkih analiza pokazuju da se potencijalno negativni utjecaji postavljanja izolacije ispod temeljne ploče mogu očekivati samo kod građevina koje se sastoje od više od dva ili tri kata.

Ključne riječi:

pasivna kuća, zemljotres, seizmičko ponašanje, temelji na termoizolaciji

Preliminary note

Vojko Kilar, David Koren, Martina Zbašnik-Senegačnik

Seismic behaviour of buildings founded on thermal insulation layer

Thermal insulation under the building foundation plate or under the strip foundations prevents the thermal bridge on the contact between the building and supporting terrain and reduces the energy consumption in modern passive and low energy houses. In the paper the seismic behaviour of buildings with different heights, floor plan dimensions, on different soil conditions and on different thermal insulation layers have been analysed. The results of simplified seismic analyses have shown, that the potentially negative influences of inserting the insulation under the foundation plate could be expected only for buildings with more than two or three storeys.

Key words:

passive house, earthquake, seismic behaviour, foundations on thermal insulation

Vorherige Mitteilung

Vojko Kilar, David Koren, Martina Zbašnik-Senegačnik

Seismisches Verhalten auf Wärmedämungsschichten fundierter Gebäude

Unter Fundationsplatten oder Streifenfundamenten angelegte Wärmedämmung verhindert thermische Brücken am Kontakt zwischen Gebäude und Unterboden und senkt den Energieverbrauch in modernen Passiv- und Niedrigenergiehäusern. In dieser Arbeit ist das seismische Verhalten von Gebäuden verschiedener Bauhöhen und Abmessungen im Grundriss, für unterschiedliche Bodenverhältnisse, auf verschiedenen Wärmedämungsschichten untersucht worden. Die Resultate der vereinfachten seismischen Analysen haben gezeigt, dass potenzielle, durch die Anwendung der Isolationsschichten unter den Fundamenten bedingte, negative Einflüsse nur für Gebäude mit mehr als zwei oder drei Stockwerken erwartet werden können.

Schlüsselwörter:

Passivhaus, Erdbeben, seismisches Verhalten, Wärmedämmung unter Fundamenten

1. Uvod

Toplinska zaštita zgrade najučinkovitiji je dio rješenja pri smanjivanju potrošnje energije za njezino grijanje. Zahtjevi energijske učinkovitosti sve se više pooštravaju, od pojave prve energijske krize 1973. kada je prvi put ograničena toplinska prolaznost obodnih elemenata zgrade. Kako se snižavala toplinska prolaznost, povećavala se minimalna toplinska zaštita zgrade. Energijskoj učinkovitosti građevina pomogli su energijsko učinkoviti uređaji za grijanje i prozračivanje, prozori i vrata s toplinskoizolacijskim okvirima i staklom, toplinske izolacije većih debljina i s poboljšanim karakteristikama itd.

[1]. Razvio se standard pasivne kuće, trenutačno optimalna energijski učinkovita kuća [2]. U Europi je do kraja 2011. izgrađeno 39.390 pasivnih kuća [3], a njihov se broj naglo povećava. Tijekom protekla dva desetljeća mnoga su istraživanja, analize, simulacije, mjerenja i slično bili usmjereni na pasivne kuće s različitim gledišta. Brojni se autori bave energijskom učinkovitosti te utjecajem sastava plašta zgrade na toplinske gubitke [4], vrstom toplinskih mostova i njihovim utjecajem na energijsku učinkovitost [5], uključivanjem unutarnjih izvora topline u energijsku bilancu [6], optimizacijom grijanja i prozračivanja [7]. Stambena je ugodnost dodatna vrijednost pasivnih kuća koju potvrđuju brojna istraživanja na osnovi iskustava stanara s boravkom u prostoru [4, 8, 9, 10].

Većinu je odgovora na pitanja o pasivnoj kući, dakle, moguće naći u znanstvenoj literaturi. Trenutačno se još ne mogu pronaći istraživanja koja se bave područjem toplinske izolacije ispod temeljne ploče na potresno ugroženim područjima, a to struka predlaže za sprječavanje toplinskih mostova na spoju zgrade s terenom. Pretpostavljamo da rješenja koja su primjerena u potresno neaktivnim područjima [4, 5] nije moguće prenijeti drugdje, a da se prethodno ne provjere i utemelje. Razorni potresi su inače rijetki, no i kod njih se često pokaže da katastrofalne posljedice na zgradama nastaju upravo zbog pogrešaka pri projektiranju i gradnji.

Glavna je namjera rada identificirati negativne utjecaje već razvijenih tehničkih rješenja za sprječavanje toplinskoga mosta s toplinskom izolacijom ispod temeljne ploče ili trakastih temelja i predložiti odgovarajuća konstrukcijska rješenja za njihovu uporabu na potresnim područjima.

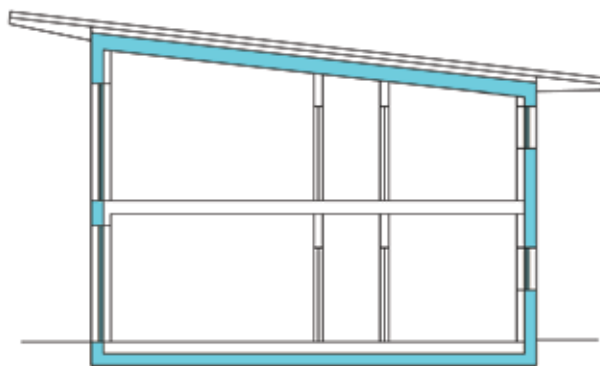
2. Pasivna kuća

Pasivna kuća [11] za grijanje treba najviše 15 kWh/(m²a). Da bi se postigla tako niska potrošnja, zgrada mora imati dobro toplinski izoliran i zrakonepropustan plašt bez toplinskih mostova. Na taj se način postižu izuzetno niski transmisivni toplinski gubici. Zgrada mora imati ugrađen sustav kontroliranog prozračivanja s vraćanjem topline otpadnoga zraka, što smanjuje i gubitke prozračivanja. Toplinski gubici uz odgovarajuću osnovu ne prelaze 10 W/m² i mogu se pokriti takozvanim toplozračnim grijanjem. Klasičan sustav grijanja više nije potreban [4].

Jedan je od osnovnih zahtjeva za postizanje standarda pasivne kuće "konstruiranje bez toplinskih mostova". Zgrada je bez toplinskih mostova kada je linijska toplinska vodljivost $\psi \leq 0,01$ W/(mK) i kada su unutarnje površinske temperature (pri najnižoj temperaturi vanjskoga zraka -10°C i zemlje +10°C te temperaturi zraka 20°C) uvijek iznad 13°C [5]. Zbog toplinskih se mostova u zgradi javljaju razne poteškoće [12]:

- povećava se trošenje energije za grijanje
- smanjuje se toplinska udobnost (hladne površine na plaštu uzrokuju brže gibanje zraka što se osjeća kao propuh) i
- nastaje kondenzacija vlage na području toplinskih mostova i nastanak plijesni.

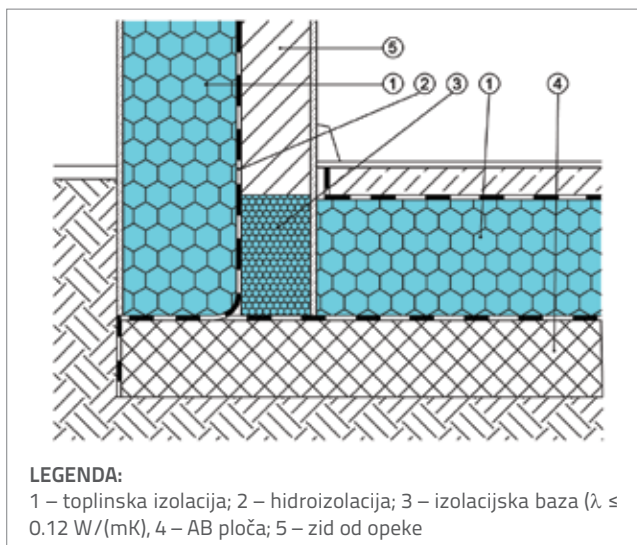
Ključna su mjesta, gdje obično nastaju toplinski mostovi, balkoni i nadstrešnice koji su dijelovi međukatne konstrukcije, spojevi krova sa zidom, ugradnja prozora i ulaznih vrata te spoj zgrade s terenom, tj. negrijanim dijelom (npr. prema hladnom podrumu). Kod pasivnih kuća ti spojevi moraju biti izvedeni bez toplinskih mostova. Toplinski plašt mora, naime, biti neprekinut (slika 1.).



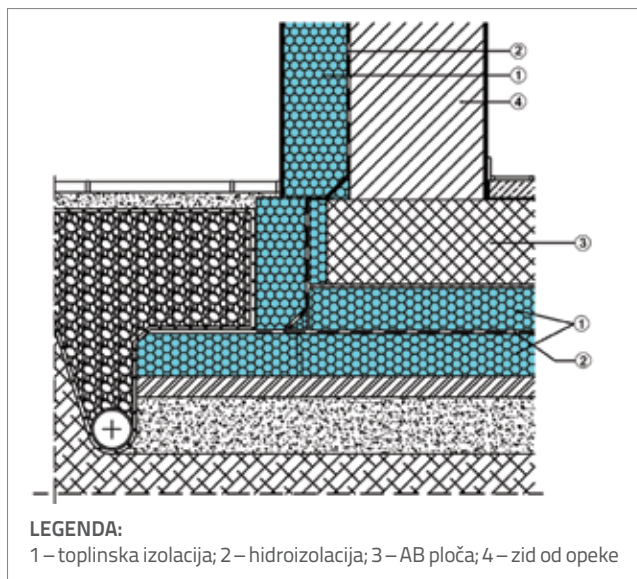
Slika 1. Toplinski plašt zgrade mora biti neprekinut

Većinu problematičnih spojeva moguće je riješiti tako da se prekine toplinski most ugradnjom toplinske izolacije između elemenata nosive konstrukcije. Mnogo je zahtjevnije spriječiti toplinski most na spoju zgrade s terenom [13]. Struka predlaže dva rješenja [5]:

- Prekidanje toplinskoga mosta na spoju vanjskoga zida s trakastim temeljem ili temeljnom pločom pomoću tzv. izolacijske baze (u debljini toplinske izolacije – slika 2.) od materijala odgovarajuće tlačne čvrstoće i toplinske vodljivosti ($\lambda \leq 0,12$ W/(mK)). Primjereni materijali za izolacijsku bazu su porobeton, lagani beton, staklena pjena i ekstrudirani polistiren (XPS).
- Ugradnja toplinske izolacije s odgovarajućom tlačnom čvrstoćom ispod temeljne ploče ili trakastog temelja (slika 3.). Za tu se namjenu najčešće upotrebljava XPS, granulat staklene pjene, EPS (često samo za obiteljske kuće s kvalitetnom hidroizolacijom, maksimalna tlačna čvrstoća 300 kPa).



Slika 2. Spoj vanjskoga zida i podne ploče – prekid toplinskoga mosta izolacijskom bazom



Slika 3. Spoj vanjskoga zida i podne ploče temeljene na toplinskoj izolaciji – spoj je bez toplinskoga mosta

U europskome prostoru, gdje su pasivne kuće već postale ustaljena praksa, većinom ne poznaju potrese, stoga su ta rješenja odgovarajuća. Posljednjih se godina standard pasivne kuće polako uvodi i na područja gdje su često i jaki potresi, između ostalog u Španjolsku, Portugal, Italiju, Grčku, Hrvatsku i Sloveniju. Pogodnost takvih detalja na potresnim područjima treba provjeriti i pronaći primjerena rješenja. U nastavku su rada opisani upotrijebljeni modeli i metode izvedenih numeričkih simulacija koji, uz određene pretpostavke, omogućavaju promatranje naprezanja i deformacija u toplinskoj izolaciji ispod temeljne ploče ili trakastog temelja. Izvedena je i parametarska studija kojom je utvrđeno za koje je visine, težine i vitkosti zgrade s različitim izolacijama ispod temelja moguća sigurna primjena i u seizmički aktivnim područjima.

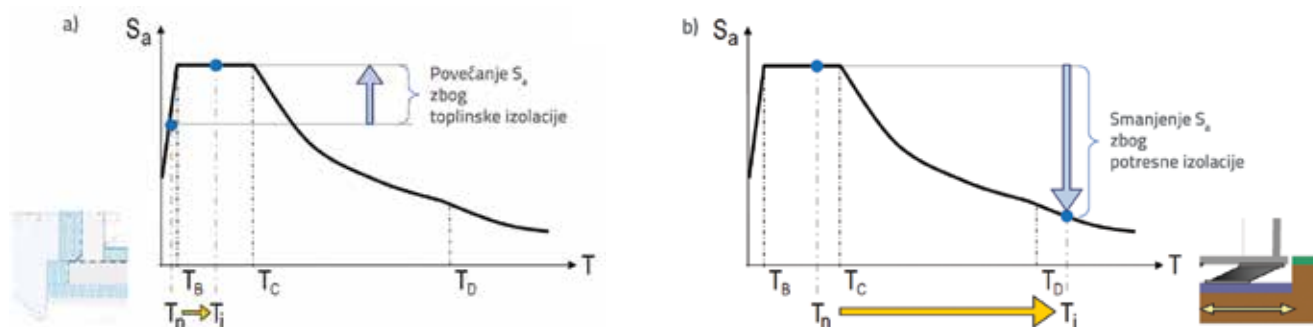
3. Odaziv zgrada temeljenih na toplinskoj izolaciji na potres

3.1. Opis problematike

Pasivne kuće mogu biti izgrađene od masivnih materijala (npr. opeka, beton) ili lakših ploča od drva ili sustava od drvenih okvira koji su prihvatljiviji za okoliš pomoću kojih se brže gradi [14, 15]. Za sve različite tehnologije gradnje tehnička rješenja prenesena sa sjeverne ili srednje Europe također predlažu temelje na sloju toplinske izolacije. Numerički proračuni pokazuju da pri manjim (npr. obiteljskim) kućama temeljenje na toplinskoj izolaciji ispod ploče ili trakastog temelja nije niti konstrukcijski niti seizmički upitno, posebno ako zgrada ima podrum ili je zasuta zemljom. Na više / teže / vitkije zgrade bez podruma, međutim, jaka bi potresna opterećenja mogla imati mnogo veći utjecaj. U seizmički neaktivnim je područjima česta uporaba izolacijskih baza koje sprječavaju toplinski most na spoju između zgrade i temeljnoga tla. S gledišta djelovanja potresa, svaki prekid nosivoga zida ili stupa toplinskom izolacijom znači veliko smanjenje horizontalne krutosti i nosivosti konstrukcije što može ugroziti njezinu potresnu sigurnost. Iz toga razloga prekid toplinskih mostova izolacijskom bazom (Slika 2.) nisu dopušteni bez uporabe odgovarajućih nadomjesnih baza, uz odgovarajuće provjere za slučajeve opterećenja koji uključuju djelovanje potresa. Pri ugradnji toplinske izolacije ispod temeljne ploče (Slika 3.) potrebo je upozoriti na sljedeće:

- uslijed djelovanja potresa ne smiju biti prekoračena projektirana posmična i projektirana tlačna naprezanja i / ili deformacije u izolaciji ispod temeljne ploče
- uslijed promjena oblika titranja zgrade uzrokovanih mekanom toplinskoizolacijskom podlogom ne smije doći do nekontroliranoga povećanja učinaka potresnog djelovanja na gornju konstrukciju.

Treba istaknuti da se postavljanjem mekših slojeva, kao što je npr. ekstrudirani polistiren (XPS), između temeljne ploče i podložnog betona produljuje osnovni period titranja zgrade jer konstrukcija na sloju toplinske izolacije titra sporije nego na krutom tlu ($T_{n(\text{izolirane})} > T_{n(\text{neizolirane})}$). Do produljenja dolazi zbog veće fleksibilnosti izolacije XPS u horizontalnom smjeru i zbog deformabilnosti izolacije u vertikalnom smjeru koja pojačava efekt titranja zgrade kao krutog tijela oko svoje osi. Obično su takve pasivne zgrade jednokatne ili dvokatne i imaju veći postotak zidova te stoga, bez izolacije, imaju i kraće periode titranja ($T_n < 0,1 \text{ s}$). Postavljanjem izolacije osnovni se period titranja produljuje ($T_n \rightarrow T_l$), što znači pomak u spektru ubrzanja udesno (Slika 4.). Iz slike 4.a vidljivo je da se zbog toga sile na gornju konstrukciju mogu dosta povećati, posebno ako je posrijedi pomak u rezonantni plato spektra (područje konstantnih ubrzanja) gdje na slabijim tlama sile na građevinu mogu biti nekoliko puta veće. Takvo povećanje sila može značiti oštećenja gornje konstrukcije ili ugrađene opreme, što ovisi o horizontalnoj ili vertikalnoj krutosti izolacije kao i o krutosti gornje konstrukcije.



Slika 4. Ubrzanje na vrhu gornje konstrukcije: a) na toplinskoj izolaciji (XPS); b) na klasičnoj potresnoj izolaciji (elastomerni ležajevi) ispod temeljne ploče

Pasivne kuće mogu biti građene masivnim materijalima (opeka, beton), no češća je primjena drvenih laganih konstrukcija jer je taj materijal ugodan za okoliš, a ujedno nudi i kvalitetnu stambenu ugodnost te osigurava brzu gradnju [14, 15]. Za sve se tehnologije gradnje predviđa temeljenje na toplinskoj izolaciji. Problem je takvog rješenja izraziti pri masivnim pasivnim kućama (od opeke, armiranoga betona i sl.) koje imaju veću masu, a nije zanemariv niti kod montažnih drvenih kuća koje imaju pri manjoj masi i većoj krutosti izrazito povećane sile na spojevima montažnih elemenata. Ako je gornja konstrukcija fleksibilnija (npr. T_n pada u plato spektra, slika 4.b), može se ugradnjom mekših elemenata ispod temelja postići značajnije smanjenje nepovoljnih učinaka potresnog djelovanja na gornju konstrukciju. To predstavlja osnovni princip djelovanja klasične potresne izolacije gdje se pomoću različitih uređaja (elastomerni ležajevi, izolatori trenja i titranja) produljuje period titranja bar za dva puta i time se u spektru pomakne jako udesno [16-19]. Jednako bi se tako i kod zgrada građenih u standardu pasivne kuće [20] pojavilo smanjenje sila samo kod konstrukcija s duljim osnovnim periodom titranja (to je kraće od T_c iz spektra, ovisno o vrsti tla od 0,4 – 0,8 s), koje uobičajene pasivne obiteljske kuće u pravilu ne postižu. Iz toga se razloga kod uobičajenih pasivnih kuća, koje imaju manje periode titranja, najčešće očekuje povećanje potresnih sila. U tom slučaju ugradnja toplinskoizolacijske podloge s gledišta potresne sigurnosti djeluje nepovoljno. Problematika se eksponencijalno povećava s povećanjem visine građevine, odnosno dubine njihova temeljenja.

3.2. Pojednostavljeni proračun posmičnih i rubnih tlačnih naprezanja u sloju toplinske izolacije

Pri istodobnom djelovanju vertikalnoga i potresnog opterećenja u sloju toplinske izolacije ispod temeljne ploče dolazi do horizontalnih posmičnih i vertikalnih tlačnih naprezanja. U slučaju potresa može stoga doći, zbog velikih tlačnih opterećenja na rubovima, do slijeganja (na tlačnom rubu), odnosno odizanja temeljne ploče od XPS podloge na suprotnoj strani (slika 5.) – u literaturi je ta pojava poznata kao tzv. "rocking" efekt [21-23]. Da bi se omogućilo sigurno ponašanje pasivne kuće na sloju izolacije za vrijeme potresa, potrebno je osigurati da ta naprezanja ostanu unutar određenih projektiranih vrijednosti

određenih eksperimentima. Pri povećavanju naprezanja opasno je i naglo povećanje deformacija i posljedično tome izrazito smanjivanje debljine sloja toplinske izolacije, što predstavlja nepovratnu deformaciju koja bi na građevini ostala vidljiva i nakon potresa.

U radu su analizirane mogućnosti uporabe toplinske izolacije od ekstrudiranog polistirena (XPS) ispod temeljne ploče. Upotrijebljen je XPS proizvođača Fibran Nord. Karakteristike materijala određene ispitivanjima prikazane su u poglavlju 4.1. Dobiveni će zaključci općenito vrijediti za temeljenje kuća na bilo kakvoj izolaciji sa sličnim karakteristikama. Kontrola rubnih naprezanja u XPS-u ispod temeljne ploče izvedena je pojednostavljenom seizmičkom analizom pomoću metode ekvivalentnih horizontalnih sila. Pri tome se pretpostavilo da je zgrada pravokutnog tlocrta dimenzija a/b , s masama koncentriranim na razini pojedinih katova i temeljena na fleksibilnoj podlozi (pretpostavke su navedene u nastavku). Najveća rubna tlačna (σ_{rub}) naprezanja i posmična (τ) naprezanja (slika 5.) izračunavaju se poznatim jednadžbama iz statike (pogledati primjer [26, 27]):

$$\begin{aligned} \sigma_{rub} &= \frac{N}{A} && \text{centrična sila (slika 5.a)} \\ \sigma_{rub} &= \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} && \text{eskcentrična sila u jezgri presjeka (j)} \\ &&& \text{(slika 5.b)} \\ \sigma_{rub} &= \frac{2 \cdot F}{3 \cdot c \cdot B} && \text{eskcentrična sila izvan jezgre presjeka (j)} \\ &&& \text{(slika 5.c)} \\ \tau &= \frac{F_h}{A_s} && \end{aligned} \quad (1)$$

gdje su:

- N - osna opterećenja temeljne ploče,
- M - moment prevrtanja (na spoju temelja i XPS podloge) zbog potresnoga opterećenja,
- A - površina temeljne ploče,
- W - moment otpornosti temeljne ploče,
- F - ekscentrična tlačna sila,
- c - udaljenost ekscentrične sile F od ruba,
- B - dimenzija temeljne ploče u smjeru osi oko koje djeluje moment M ,



Slika 5. Ponašanje (krute) zgrade na fleksibilnoj podlozi (npr. toplinskoj izolaciji) ispod temeljne ploče

F_h - ukupna potresna sila izračunata temeljem elastičnog spektra odziva iz ubrzanja pri vrhu i ukupne mase građevine za potresno proračunsko granično stanje

A_s - posmični presjek (za pravokutni tlocrt $A_s = 1,5 A$).

Osnovne pretpostavke pojednostavljenoga proračuna navode se kako slijedi:

- krutost gornje konstrukcije nije uzeta u obzir, već je gornja konstrukcija zajedno s temeljnom pločom ispod nje modelirana kao elastično upeto kruto tijelo
- konstrukcija je pravilna (bez većih konstrukcijskih nepravilnosti kao što su veliki prepusti (konzole, balkoni), s jednakomjernim rasporedom nosivih elemenata po tlocrtu i s tlocrtom pravilnoga oblika)
- za površinu temeljne ploče i podloge (XPS) pretpostavlja se površina, jednaka tlocrtnim površinama etaža gornje konstrukcije (a/b)
- u tlocrtu, djelomično pokrivenom XPS-om (kao na primjer kod građevina s trakastim temeljima), u jednadžbi se za naprezanja u obzir uzima s faktorom reducirane pokrivenosti A_w i dimenzija a odnosno b
- mase po etažama u potresnom projektnom stanju izračunaju se na osnovi danih jednolikih kontinuiranih površinskih opterećenja, uzetih u obzir po čitavom tlocrtu
- u obzir se uzima elastični spektar odziva po EC8 [29] s preporukama za Sloveniju (faktori tla i karakteristični period titranja prema Nacionalnom dodatku [30])
- za proračun perioda titranja, proračun potresne sile (momenta) odnosno kontrolu rubnih tlačnih naprezanja u XPS-u se u obzir uzima čitava masa titranja (i masa etaže 0)
- vertikalna se krutost XPS-a uzima u obzir preko danog modula elastičnosti u tlaku i njegove debljine. Konstrukciju

tretiramo kao elastično upetu krutu konzolnu konstrukciju, njezin period titranja proračunamo na osnovi izraza [31]:

$$T^2 = T_x^2 + T_\phi^2 \text{ odnosno } \frac{1}{\omega^2} = \frac{1}{\omega_x^2} + \frac{1}{\omega_\phi^2} \quad (3)$$

gdje je sa ω_x označena vlastita frekvencija pri horizontalnom pomaku temelja i sa ω_ϕ vlastita frekvencija pri zaokretu temelja na XPS sloju i proračunati su kao:

$$\omega_x^2 = \frac{k_x}{M}, \quad \omega_\phi^2 = \frac{k_\phi}{J} \quad (4)$$

gdje je k_x krutost translacijske opruge, k_ϕ krutost rotacijske opruge, M masa čitave konstrukcije i J moment tromosti s obzirom na točku upetosti. Pri njegovom proračunu u obzir uzimamo koncentrirane mase etaža (m) po etažama na izabranim visinama (h):

$$J = \sum_i m_i h_i \quad (5)$$

- Posmično naprezanje u XPS-u određeno je kao produkt posmičnoga modula (G) i posmične deformacije (γ) sloja XPS.
- Spriječeno je klizanje između XPS-a i hidroizolacije.
- Utjecaj dvosmjernoga djelovanja potresne pobude uzet je u obzir po EC8 [29], članak 4.3.3.5.1(3).

Za izbrani pokusni model tipičnih pasivnih kuća različitih masa, visina i tlocrtnih dimenzija u parametarskoj studiji su promatrali sljedeće parametre:

- period titranja konstrukcije u pojedinom smjeru
- postignutu ekscentričnost (M/N) u pojedinom smjeru

Tablica 1. Pretpostavljene vrijednosti [kN/m²] vertikalnih opterećenja u potresnom projektiranom stanju za različite materijale nosive konstrukcije

Konstrukcija	Prizemlje (bez vlastite težine AB temeljne ploče)	Katovi
AB ploče + AB zidovi	7	16
Zidovi od opeke + lagane stropne ploče	5	10
Drvo (KLH ploče i zidovi)	3.5	6

Tablica 2. Karakteristike XPS-a prema podacima proizvođača Fibran Nord

Tip XPS-a	XPS 300-L	XPS 400-L	XPS 500-L	XPS 600-L	XPS 700-L
Deklarirana tlačna čvrstoća σ_{nom} [kPa] pri 10 % deformacija	300	400 (469)	500	600	700 (753)
Modul elastičnosti E [MPa]	20	25 (23.4)	30	35	40 (34.9)
Posmična čvrstoća τ_{nom} [kPa]	150	150 (136)	150	150	150 (209)
Posmični modul G [MPa]	2.6	2.6 (4.5)	2.6	2.6	2.6 (7.4)

Napomena: u tablici su za XPS 400-L i 700-L navedene prosječne vrijednosti karakteristika izmjerene monotonim ispitivanjima [28]

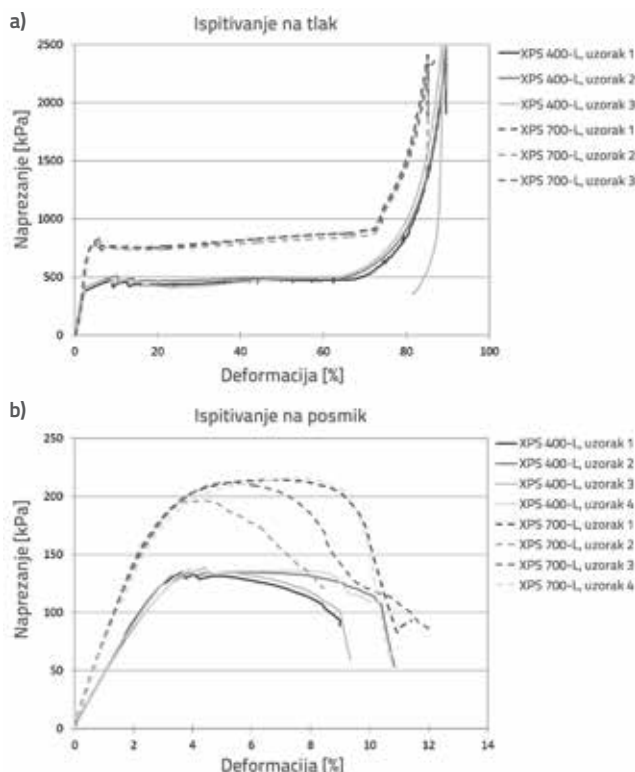
- najveća tlačna rubna naprezanja u XPS-u: ako je računski postignuto najveće σ_{rub} negativnoga predznaka, mjerodavna je stabilnost građevine, jer rezultanta pada izvan tlocrta ($\varepsilon > 50\%$)
- najveća posmična naprezanja u XPS-u
- najveći horizontalni pomak XPS-a (dopušteni horizontalni pomak određen kao 2 % debljine XPS-a, što odgovara posmičnoj deformaciji XPS-a na granici elastičnosti)
- najveći horizontalni pomak vrha zgrade (dopušteno je 0,2 % visine zgrade [30]).

4. Parametarska studija

4.1. Ulazni podaci

U istraživanju je primjenom predstavljene pojednostavljene statičke analize ispitivan utjecaj mase, tlocrtnih dimenzija, broja katova, vrste tla i karakteristika XPS-a na potresnu sigurnost izabranih građevina na XPS podlozi. Pretpostavljeno je da je gornja konstrukcija zajedno s temeljnom pločom ispod nje kruta, stoga su ulazni podaci o konstrukciji samo tlocrtna dimenzije, visine i mase (opterećenja) pojedinih katova. Pri proračunu mase u obzir su uzeta tri različita materijala konstrukcije (tablica 1.) po čitavoj visini građevine. Pretpostavilo se da građevine nemaju podrum. U potresnom proračunskom graničnom stanju je sukladno EC8 [29] u obzir uzeto vlastito i stalno opterećenje te 30 % korisnoga opterećenja ($q_{k,100\%} = 3,5$ kN/m²). U toj su fazi istraživanja analizirani samo modeli zidnih konstrukcija. Masa nosivih zidova bila je uključena kao jednoliko kontinuirano površinsko opterećenje. Pritom je za udio nosivih zidova uzeto u obzir $A_{zidova}/A_{tlocrt,bruto} = 10\%$, a prihvaćena visina kata je 3,0 m. Analizirane su tri različite

gornje konstrukcije pravokutnoga tlocrta ($b/a = 6/8, 8/14$ i $14/40$ m) u obzir su uzete i temeljne ploče s XPS podlogom jednake površine. Za potresno je opterećenje uzet elastični (5 % gušenje) spektar odziva prema EC8 za Sloveniju, za izabrano ubrzanje temeljnog tla (u tom doprinosu prikazani su rezultati samo za najveće ubrzanje temeljnih tala u Sloveniji, tj. $a_g = 0,25$ g), pri čemu je variran tip tla (kategorije A-E prema EC8). Debljina armiranobetonske temeljne ploče (30 cm) i debljina izolacije XPS (20 cm) ispod nje bila je u svim analiziranim primjerima jednaka. Visina kata bila je jednaka po čitavoj visini (3,0 m), a ukupna visina građevine (H) bila je mjerena od kote donjeg ruba XPS podloge do vrha zgrade. Za karakteristike materijala XPS-a preuzete su konzervativne vrijednosti prema podacima proizvođača Fibran Nord d.o.o. [32] te su analizirani proizvodi XPS za uporabu ispod temelja (tablica 2.). Proizvođač osigurava XPS ploče različitih nominalnih tlačnih čvrstoća (od 300 do 700 kPa) i posljedično različitih vertikalnih krutosti. Materijal se pri manjim deformacijama (do 1-2 % debljine) ponaša elastično, a zatim izrazito neelastično. Ponašanje na tlak u proizvodnji se redovito analizira (po EN 826 [24]), a ponašanje na posmiku (prema EN 826 [25]) gotovo je neistraženo. Slika 6. prikazuje rezultate monotonog tlačnog i posmičnog ispitivanja kocaka od ekstrudiranog polistirena sa stranicom 12 cm (XPS 400-L) odnosno 10 cm (XPS 700-L). U proračunu su bile materijalne karakteristike XPS-a uzete u obzir kao projektne (uzeti sigurnosni faktor za materijal iznosio je 1,0). Za posmičnu čvrstoću (τ) i posmični modul (G) proizvođač navodi jednake vrijednosti za sve razrede čvrstoće XPS-a i posljedično je period titranja zbog translacije (horizontalna fleksibilnost) jednako u svim primjerima. Razlika se javlja u ponašanju na tlak (elastični modul E za 300-L iznosi 20 MPa, za 700-L pak 40 MPa), što utječe na ukupni period titranja.



Slika 6. Ponašanje XPS materijala: a) na tlak; b) na posmik [28]

4.2. Rezultati analiza

Na slikama 7. do 11. prikazani su izabrani rezultati izvedenih analiza. Rezultati su prikazani kao periodi titranja u smjeru kraće tlocrtnne dimenzije (*b*), najvećeg naprezanja i pomaka u ovisnosti o broju katova za različite dimenzije i materijale gornje konstrukcije, različite kategorije temeljnih tala i različite tipove XPS podloge. Prikazani su samo relevantni primjeri, dakle oni kod kojih rezultanta pada unutar tlocrta građevine i njezina stabilnost nije ugrožena (ne dolazi do prevrtanja). Drugim riječima, prikazani su primjeri kod kojih je postignuta ekscentričnost (*e*) manja od 50 % kraće tlocrtnne dimenzije. Iz tog razloga dobivene su krivulje različitih dužina – neke se završavaju prije (kod manjeg broja katova) od drugih. Kod svih rezultata, s izuzetkom rezultata prikazanih na slici 9., u obzir je uzeto da je građevina temeljena na temeljnoj ploči položenoj na materijal XPS jednakih tlocrtnih dimenzija kao što je tlocrt same zgrade (pretpostavljeni udio XPS-a ispod tlocrtnne površine građevine je 100 %).

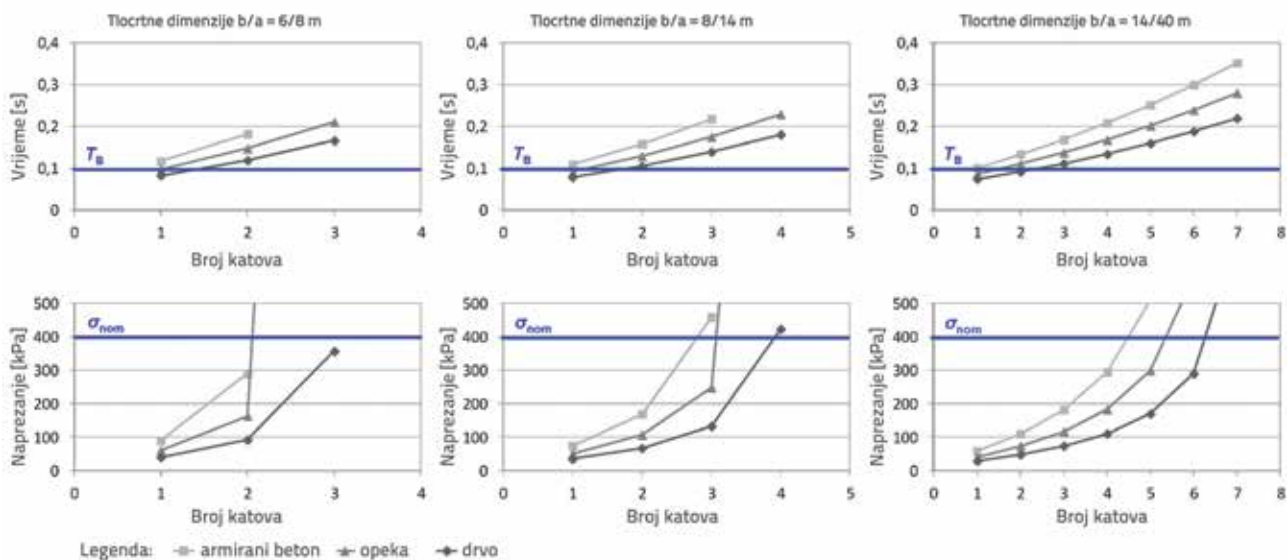
Na slikama 7. i 8. prikazan je utjecaj različitih dimenzija i materijala gornje konstrukcije na izabranim XPS podlogama (400-L) i izabranim temeljnim tlima (A). Uočava se da su proračuni perioda titranja gotovo u svim analiziranim primjerima veći od graničnog vremena titranja $T_B = 0,10$ s u spektru (tlo A), što znači da se period titranja konstrukcije ugradnjom XPS podloge ispod temeljne ploče produljio i pomaknuo prema platou ili u plato spektra, gdje su

potresne sile veće! Kako smo očekivali, problematičnije su teže (betonske) konstrukcije. Kod tlocrta s relativno malim tlocrtnim dimenzijama naspram visina građevina (vitke građevine) u nekim je primjerima mjerodavna kontrola prevrtanja (stabilnost) u odnosu na kontrolu najvećih tlačnih naprezanja u XPS-u. Kod većih tlocrta (npr. 14/40 m) gotovo je uvijek mjerodavna kontrola tlačnih naprezanja u XPS-u.

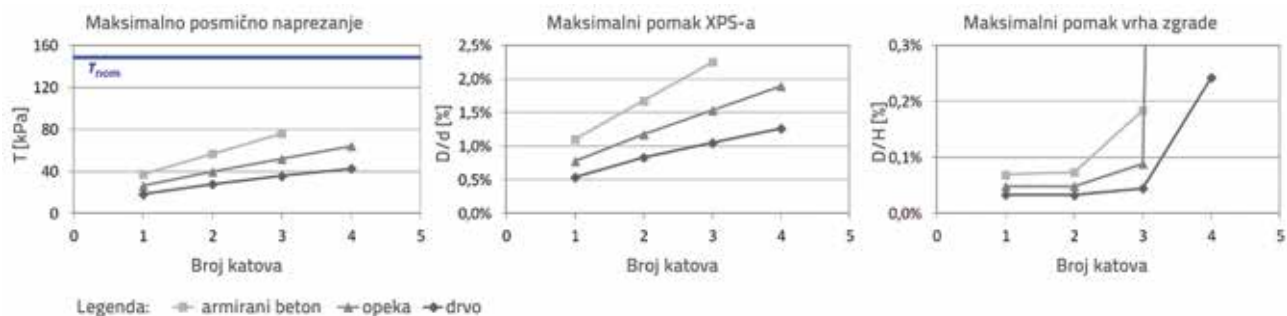
S obzirom na postignuta naprezanja u XPS-u može se zaključiti da je za tlocrt 6/8 m najveći dopušteni broj katova 2 (beton, opeka), odnosno 3 (drvo), za tlocrt 8/14 m 2 kata (beton), odnosno 3 (opeka, drvo), za tlocrt 14/40 m dopušteni je broj katova 4 (beton), 5 (opeka) odnosno 6 (drvo). Iz slijeda najvećih tlačnih naprezanja u XPS-u može se uočiti da kada je u XPS-u dostignuta viša razina rubnoga naprezanja (oko 200 kPa), oni pri povećanju visine građevina brzo rastu (veći nagibi krivulja na grafovima) i gradnja dodatnih katova zbog prekoračenja nominalnih tlačnih čvrstoća (σ_{nom}) materijala XPS nije više moguća. Ako se promatraju najveća posmična naprezanja i najveći horizontalni pomaci XPS-a i vrha zgrade (slika 8.), može se utvrditi da posmična naprezanja u XPS-u nisu kritična jer se radi o velikim površinama. U najkritičnijim primjerima dosežu oko 50 % nominalne posmične čvrstoće XPS-a ($\tau_{nom} = 150$ kPa). Problemi s posmičnim naprezanjima javljaju se samo kod težih i viših građevina (što se vidjelo npr. pri analiziranoj građevini dimenzija 14/4 m na tlima kategorije A i XPS 400-L podlogama) i u primjerima s reduciranom površinom XPS ispod temelja (npr. kod trakastih temelja, slika 9.). Najveći horizontalni pomaci vrha zgrade, koji su definirani kao suma pomaka XPS-a i pomaka vrha (na koti *H*) građevina zbog okretanja koji je posljedica vertikalne fleksibilnosti XPS-a, u većini su analiziranih primjera manji od granične vrijednosti (0,2 % čitave visine građevine *H*).

Na slici 9. prikazan je utjecaj udjela XPS-a ispod tlocrtnne površine građevine, čime se približno simulira varijanta temeljenja trakastim temeljima na XPS-u. Prikazani su rezultati izračunani uz pretpostavku da 50 % tlocrtnne površine građevine (8/14 m) leži na izabranoj XPS podlozi (400-L) i izabranim temeljnim tlima (A). Uočava se da su u usporedbi s rezultatima modela, temeljenog na XPS-u ispod čitavog tlocrta (slike 7. i 8.), periodi titranja u svim analiziranim primjerima produljena, a slično su se povećala i najveća tlačna naprezanja. Pritom valja upozoriti na to da se najveći dopušteni broj katova u primjeru konstrukcija od opeke smanjio (s 3 na 2) i da su najveća rubna tlačna naprezanja zbog približnog proračuna (pogledati pretpostavke) činjenično još veće od proračunanih. Još veće povećanje (za faktor 2) uočava se kod posmičnih naprezanja u XPS-u i pri horizontalnim pomacima.

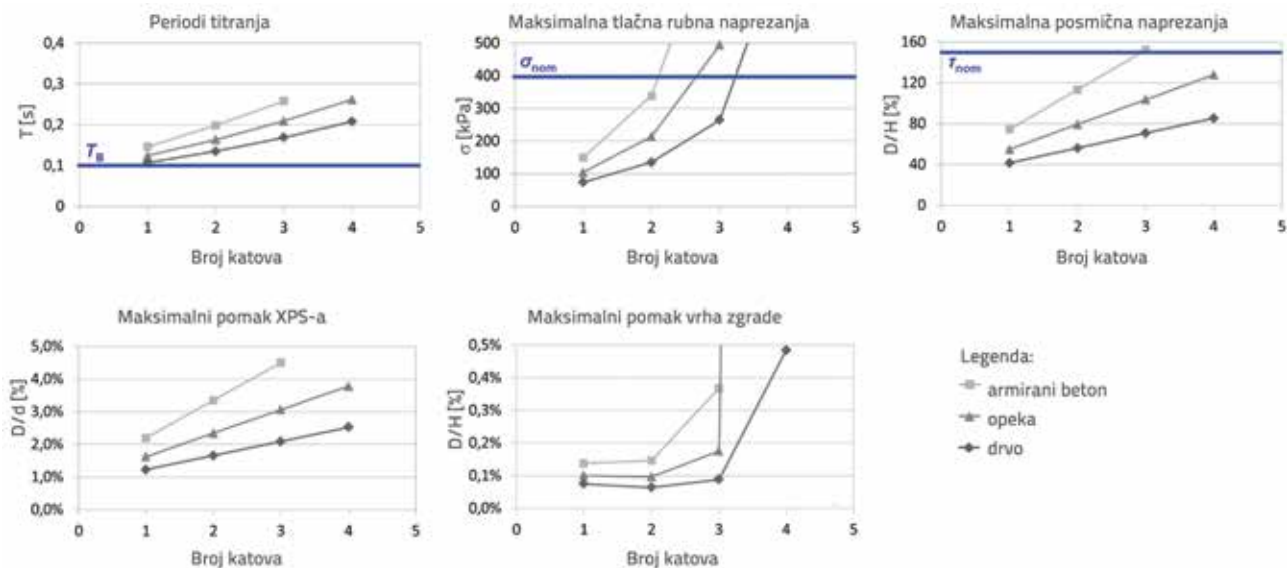
Na slici 10. prikazan je utjecaj temeljnih tala za izabrani materijal gornje konstrukcije (zidovi od opeke + lagane stropne ploče), izabrane tlocrtnne dimenzije (8/14 m) i izabrana podloga XPS (400-L). S obzirom na najveća tlačna naprezanja u XPS-u, zaključuje se da dobra tla općenito omogućuju više građevine



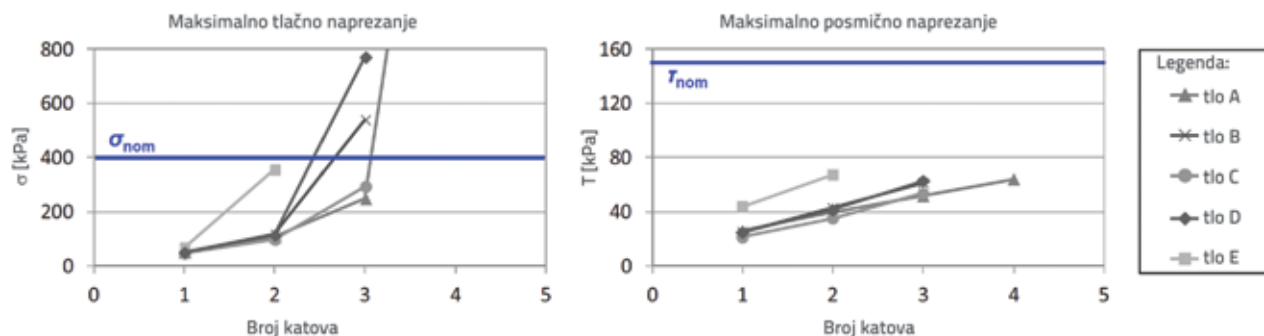
Slika 7. Vremena njihanja (a) i najveća tlačna rubna naprezanja (b) za različite dimenzije i materijale gornje konstrukcije na podlozi XPS 400-L i tlima kategorije A



Slika 8. Najveća posmična naprezanja i najveći horizontalni pomaci XPS-a (XPS 400-L) i vrha zgrade od različitih materijala i tlocrtnih dimenzija 8/14 m na tlima kategorije A



Slika 9. Periodi titranja, najveća naprezanja i najveći horizontalni pomaci za različite materijale gornje konstrukcije tlocrtnih dimenzija 8/14 m, trakasto temeljenje (50 % tlocrta) na podlozi XPS



Slika 10. Najveća tlačna i posmična naprezanja u ovisnosti o vrsti temeljnih tala za gornju konstrukciju od opeke, tlocrtnih dimenzija 8/14 m na podlozi XPS 400-L



Slika 11. Periodi titranja, najveća tlačna rubna naprezanja i najveći horizontalni pomaci vrha zgrade ovisno o tipu XPS podloge za gornju konstrukciju od opeke, tlocrtnih dimenzija 8/14 m na tlima kategorije C

od slabijih tala. U prikazanom primjeru tla E dopuštaju samo dvokatne građevine, jednako kao i tla kategorije B i D, a tla kategorije A i C kat više. Slično su i najveća posmična naprezanja u XPS-u pri jednakoj visini građevine postignuta pri temeljenju na slabijim tlima. Slika 11. prikazuje ponašanje konstrukcije od opeke tlocrtnih dimenzija 8/14 m na tlima kategorije C na XPS podlozi različitih razreda krutosti (XPS 300-L, XPS 400-L, XPS 500-L, XPS 600-L i XPS 700-L). Može se vidjeti da zgrada postavljena na kruću izolaciju ima kraće periode titranja (kod promatrane trokatne konstrukcije do 20%), manja rubna naprezanja (kod promatrane trokatne konstrukcije do 40%) i manji pomak na vrhu zgrade (kod promatrane trokatne konstrukcije za do 2,7 puta). U tom je primjeru ponašanje na krućoj izolaciji dakle mnogo bolje nego na mekšoj. Najveći horizontalni pomaci vrha zgrade u svim su analiziranim primjerima manji od granične vrijednosti (0,2% čitave visine građevine H). Najveća tlačna naprezanja u XPS-u niti kod jednog od promatranih primjera ne dosežu dopuštene projektirane čvrstoće. Iznimka je samo najmanje nosivi tip XPS-a (300-L), kod kojeg u slučaju trokatne zgrade projektiranu tlačnu čvrstoću nadmašuju za približno 13%.

5. Zaključak

Rezultati analiza i simulacija pokazuju da je pri projektiranju višekatnih kuća, građenih na toplinskoj izolaciji ispod temeljne ploče, potrebno određenu pozornost usmjeriti na

analizu ponašanja zbog potresa jer se ugradnjom mekih toplinskoizolacijskih slojeva ispod temelja mijenjaju dinamičke karakteristike konstrukcija. Rezultat rada je konstatacija da na potresno ugroženim područjima temeljenje zgrade na toplinskoj izolaciji ispod temeljne ploče nije uvijek sigurno rješenje. Pomoću analiza i simulacija za obrađivane je primjere, uzimajući u obzir navedene pretpostavke, ustanovljeno sljedeće:

- Kod zgrada na toplinskoj izolaciji ispod temeljne ploče može pri snažnijem potresnom djelovanju doći do prekoračenja tlačnih čvrstoća XPS-a već kod trokatnih zgrada (tj. P+2E ili P+E+M). Kod zgrada s dva kata do toga nije došlo niti u jednom od analiziranih primjera.
- Kontrola najvećih posmičnih naprezanja i najvećih horizontalnih pomaka XPS-a u većini primjera nije mjerodavna jer se radi o velikim površinama s velikom krutosti. Ponašanje XPS-a kod posmičnih naprezanja može postati kritično u slučaju težih i većih građevina i/ili pri temeljenju na reduciranoj površini XPS (npr. trakastim temeljima). U tom slučaju najveći se dopušteni broj katova smanjuje.
- Period titranja konstrukcije ugradnjom XPS-a ispod temeljne ploče produljuje se i može pomaknuti u plato spektra (područje konstantnih ubrzanja) gdje su potresne sile najveće i posljedično mogu postati mjerodavna kontrola bilo kojeg globalnog ili lokalnog projektiranog parametra gornje konstrukcije (npr. prekoračivanje naprezanja ili katnog pomaka gornje konstrukcije).

- U slučaju snažne potresne pobude mogu se nadmašiti i najveći horizontalni pomaci vrha zgrade koji nastaju kao posljedica okreta cjelokupne građevine na fleksibilnoj (u vertikalnom smjeru) XPS podlozi.
- Analiza utjecaja vrste temeljnih tala na najveće postignuto tlačno naprezanje u XPS-u očekivano je pokazala da dobra tla općenito omogućuju više građevine negoli slabija tla, a, slično su pokazala i najviša posmična naprezanja u XPS-u pri jednakoj visini građevine postignuta pri temeljenju na slabijim tlima.
- Ako se ograničimo na promatranje amplifikacija utjecaja zbog prijenosa na fleksibilnu podlogu, može se ustanoviti da su ona najveća u slučaju temeljenja zgrada na dobrim tlima. Kod temeljenja zgrada na vrlo slabim tlima povećanja utjecaja daleko su manja.
- Tlačna nosivost i krutost XPS podloge bitan je parametar za dimenzioniranje sloja XPS, posebno kod užih i viših građevina jer se tlačna naprezanja ispod ruba ploče brzo povećavaju. U tim slučajevima je primjerenija uporaba viših tlačnih razreda krutosti XPS, pri kojima je i modul elastičnosti veći (što smanjuje i utjecaj gibanja gornje konstrukcija na fleksibilnoj podlozi).
- Za zgrade s kraćim periodom titranja ($T < T_g$) bolje je ako su temeljene na jačem XPS-u. Zgrada postavljena na jaču izolaciju ima kraće vrijeme njihanja, manje sile na gornju konstrukciju, manja rubna naprezanja i manji pomak na vrhu zgrade.
- Kod zgrada s duljim vremenom njihanja ($T \geq T_g$), osim povećanja apsolutnih horizontalnih pomaka, ne treba

očekivati negativne utjecaje zbog ugradnje toplinske izolacije ispod temeljne ploče.

S obzirom na najveća postignuta naprezanja u XPS-u, može se zaključiti da je najveći dopušteni broj katova kod manjih tlocrta ograničen na dva do tri kata, kod većih tlocrta na četiri kata i više, ovisno o materijalu (masi) nosive konstrukcije. Navedene tvrdnje predstavljaju preliminarne rezultate koji se temelje na pojednostavljenim seizmičkim analizama. U parametarskoj studiji nije bio obuhvaćen utjecaj fleksibilnosti gornje konstrukcije, što će biti predmet daljnjih istraživanja primjenom metoda dinamike konstrukcija. U nastavku istraživanja planira se kompleksna parametarska studija, gdje će se nelinearnim analizama vremenskoga odaziva točno utvrditi odziv različitih realnih (gore fleksibilnih) konstrukcija na XPS podlozi. Za potrebe analize najprije će se pribaviti eksperimentalni podaci o cikličkom ponašanju materijala XPS, što trenutačno u svjetskoj literaturi nije istraženo područje.

Zahvala

Predstavljeno istraživanje provodi se u okviru istraživačkog projekta ARRS (Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije) "Varnost pasivnih hiš pri potresu" (šifra L5-4319). Kao sudionik u financiranju projekta sudjeluje i tvrtka FIBRAN NORD d.o.o., kojoj zahvaljujemo za svu potporu i pomoć. Članovi projektne skupine zahvaljuju i ostalima koji novčano podupiru projekt (Gradbeni inštitut ZRMK; tvrtka DULC, strojarske instalacije i inženjering; Baza Arhitektura).

LITERATURA

- [1] Zagorec, M., Josipović, D., Majer, J.: Mjere uštede toplinske energije u zgradama, *GRAĐEVINAR* 60 (2008) 5, p.p. 411-420.
- [2] Feist W.: Life-cycle energy balances compared: low-energy house, passive house, self-sufficient house, *Proceedings of the international symposium of CIB W67*, Vienna, Austria, pp. 183-90, 1996.
- [3] Lang, G.: Study on the Development of Passive House Trends in Europe 2010 – 2021, <http://www.langconsulting.at/index.php/en/research/32-basic-research/222-trends-2010-2021>, 02.03.2013.
- [4] Schnieders, J., Hermelink, A.: CEPHEUS results: measurements and occupant's satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building, *Energy Policy*, 34, pp. 151-171, 2006.
- [5] Feist, W.: *Wärmebrücken und Tragwerksplanung – die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens*, Protokollband Nr. 35, Passivhaus Institut, 2007.
- [6] Molin, A., Rohdin, P., Moshfegh, B.: Investigation of energy performance of newly built low-energy buildings in Sweden, *Energy and Buildings*, 43, pp. 2822-2831, 2011.
- [7] Feist, W., Schnieders, J., Dorer, V., Haas, A.: Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive house concept, *Energy and Buildings*, 37, pp. 1186-1203, 2005.
- [8] Keul, A.G.: Vrednotenje večnadstropnih avstrijskih pasivnih stanovanjskih zgradb po vselitvi / Post-occupancy Evaluation of Multistorey Austrian Passive Housing Properties, *AR, Arhit. razisk.*, 2, pp. 47-52, 2010.
- [9] Mlecnik, E., Schtze, T., Jansen, S.J.T., de Vries, G., Visscher, H.J., van Hal, A.: End-user experiences in nearly zero-energy houses, *Energy and Buildings*, 49, pp. 471-478, 2012.
- [10] Hauge, Å., Thomsen, J., Berker, T.: User Evaluation of Energy Efficient Buildings – Literature Review and Further Research, *Proceedings of Renewable Energy Conference 2010*, Trondheim, Norway, 2010.
- [11] Feist, W.: *Das Passivhaus – Baustandard der Zukunft?*, Protokollband Nr. 12, Passivhaus Institut, 1998.
- [12] Schwarzmüller, E., Fuhrmann, W., et al.: *Wärmebrücken Luft- und Winddichte*, Energie Tirol, Innsbruck, 1999.

- [13] Feist, W.: *Wärmeverluste durch das Erdreich, Protokollband Nr. 27*, Passivhaus Institut, 2004.
- [14] Bosiljkov, V., Page, A. W., Bokan-Bosiljkov, V., Žarnić, R.: Evaluation of the seismic performance of brick masonry walls. *Structural Control & Health Monitoring*, 17, pp. 100–118, 2010.
- [15] Kitek Kuzman, M., Grošelj, P.: Wood as a construction material: comparison of different construction types for residential building using the analytic hierarchy process. *Wood research*, 57, pp. 591–600, 2012.
- [16] Fischinger, M., Isaković, T.: *Potresna izolacija pri novogradnjah in sanacijah AC mostov: končno poročilo*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2001.
- [17] Skinner, R. I., Robinson, W. H., McVerry, G. H.: *An introduction to seismic isolation*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 1993.
- [18] Kilar, V., Koren, D.: Potresna izolacija zgrad kao alternativa za gradnjo na potresnih območjih, *Gradbeni vestnik*, 56, pp. 307–318, 2007.
- [19] Koren D., Kilar, V.: Torzija potresno izoliranih konstrukcija nepravilnoga tlocrta, *GRAĐEVINAR* 60 (2008) 2, p.p. 99–108.
- [20] Zbašnik-Senegačnik, M., Vrančič, T.: Velike građevine građene kao pasivne kuće. *Građevinar*, 63, pp. 903–906, 2011.
- [21] Gazetas, G., Anastasopoulos I., Adamidis, O., Kontoroupi, Th.: Nonlinear rocking stiffness of foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47, pp. 83–91, 2013.
- [22] Ryan K.L., Chopra, A.K.: Estimating bearing response in symmetric and asymmetric-plan isolated buildings with rocking and torsion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, pp. 1009–1036, 2006.
- [23] Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastasopoulos, I., Gazetas, G.: Rocking isolation of low-rise frame structures founded on isolated footings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, pp. 1177–1197, 2012.
- [24] CEN, European Committee for Standardization: *European standard EN 826 : Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour*, 1996.
- [25] CEN, European Committee for Standardization: *European standard EN 12090 : Thermal insulating products for building applications - Determination of shear behaviour*, 1997.
- [26] Kilar, V.: *Statika II. z osnovami konstrukcij : učbenik za študente arhitekture*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, Ljubljana, 2013 (v tisku).
- [27] Podhorsky, I.: *Nosive konstrukcije, Udžbenik za studij arhitekture*, Golden marketing – Tehnična knjiga Zagreb, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [28] Bokan Bosiljkov, V.: *Poročilo o rezultatih preiskav ugotavljanja obnašanja proizvodov FIBRAN pri tlačni in strižni obremenitvi*, Laboratorij Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2013.
- [29] CEN, European Committee for Standardization: *European standard EN 1998-1 - Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, 2005.
- [30] SIST. *Nacionalni dodatek k SIST EN 1990 (2005): Evrokod – Osnove projektiranja – Nacionalni dodatek SIST EN 1990:2004/A101: 2005*, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005.
- [31] Fajfar, P.: *Dinamika gradbenih konstrukcij*, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1984.
- [32] Katalog proizvodov FIBRANxps, proizvajalca Fibran Nord d.o.o.: <http://www.fibran.si/frontend/articles.php?cid=121&view=0>, 05.03.2013.