

Prožni kolosi

- Spoznanje, da lahko zgradbe prenesejo potresne sile tako, da se gibljejo hkrati z njimi in ne proti njim, je vgrajeno tako v japonske pagode kot v kitajske palače
- Rešitev je kombinacija starodavne modrosti in izkušenj ter sodobnih inovacij z nenehnim posodabljanjem gradbenih predpisov
- Japonski seizmologi napovedujejo Tokiu kar 70-odstotno možnost velikega rušilnega potresa v prihajajočih 30 letih

Tekst: **Brane Maselj**



Foto: Filip Šturm

V zlato barvo pobarvana jeklena krogla, obešena na 92 debelih kablov med 87. in 92. nadstropjem Taipei 101, lahko zaniha približno poldrugi meter v katerokoli smer. Masni blažilnik je mogoče opazovati s posebne razgledne ploščadi in je priljubljena atrakcija za obiskovalce, še posebej, ko med močnim vetrom niha sem in tja.

Vhudem potresu z magnitudo 7,4, ki je v začetku aprila letos prizadel Tajvan, je izgubilo življenje vsaj 18 ljudi, poškodovanih pa je bilo kar 1100 zgradb. V glavnem mestu Tapeju, le 150 kilometrov oddaljenem od središča potresa, so tako močno tresenje tal doživeli nazadnje pred četrto stoletja. Kljub temu je leta 2004 zgrajeni in v tistem času najvišji nebotičnik na svetu slovi Taipei 101 ta rušilni potres prestal nepoškodovan. Sodobna protipotresna tehnologija je slavila veliko zmago.

Posnetki kamer, ki so snemale med potresom, kažejo, kako se 508 metrov visoki stolp v obliki bambusa rahlo pozibava, njegova strukturna prožnost pa pomaga preprečevati močna nihanja, ki jih sprožajo potresni sunki. To nihanje je nazorno pokazalo, da je najpomembnejša obramba nebotičnika pred potresi sam material, iz katerega je zgrajen, to je armirani beton. Ta združuje tlačno trdnost betona z natezno trdnostjo jekla in zaradi teh lastnosti osnovnega gradbenega materiala je zgradba dovolj prožna, da niha, in dovolj trdna, da se upira močnim vetrovom in tajfunom, ki so na Tajvanu pogost rušilni pojav.

Tudi modrost, da je upiranje proti močni sili v nasprotju z naravo, v kateri se vse giblje s tokom in ne proti njemu, s katero so prepojene vzhodnoazijske filozofije, je že stoletja odlično vodilo tradicionalni arhitekturi v teh državah. Spoznanje, da lahko zgradbe prenesejo potresne sile tako, da se gibljejo hkrati z njimi in ne proti njim, je vgrajeno tako v japonske pagode kot v kitajske palače. Pri sodobnem 101-nadstropnem nebotičniku pa je visoko v stolpu skrita še ena tehnološka inovacija, ki pomaga ščititi ta tehnološki čudež 21. stoletja, ki je do odprtja Burj Khalifa v Dubaju leta 2010 držal višinski

rekord. To je ogromna in težka, pravilni krogli podobna naprava, natančno umerjena, da blaži prevelike nihaje.

Velikanska protiutež

V zlato barvo pobarvana jeklena krogla, obešena na 92 debelih kablov med 87. in 92. nadstropjem, lahko zaniha približno poldrugi meter v katerokoli smer. »Ker deluje kot nihalo, ki preprečuje oziroma blaži nihanje, je to v bistvu zelo velika protiutež,« pojasnjuje **Stefan Al** v svoji knjigi *Supervišina: Kako najvišje stavbe na svetu preoblikujejo naša mesta in naša življenja*.

Tehnično ime tovrstnega blažilnika sunkov vetra ali potresa je uglaseni masni blažilnik (Tuned Mass Damper oziroma TMD) in v nebotičniku Taipei 101 ta tehta neverjetnih 660 ton. »To se zdi res velikanska teža, a če jo primerjate s celotno težo zgradbe, je skoraj zanemarljiva. Ko se stavba začne tresti, se ta protiutež, dobro umerjen in ustrezno nastavljen dušilnik mase, premakne v nasprotno smer. Zato malce zaostaja, ko se stolp zaziblje, in nato celo zaniha v nasprotno smer ter pri tem gibanju v nasprotno smer absorbira kinetično energijo,« pojasnjuje arhitekt in urbanistični planer Al. Pri tem »hidravlični cilindri med kroglo in zgradbo to energijo pretvorijo v toploto, ki se nato porazgubi.«

Takšni blažilniki nihanja se pravzaprav uporabljajo v nebotičnikih po vsem svetu, vključno s super ozkim, najtanjšim na svetu, nebotičnikom Steinway v New Yorku, dokončanem leta 2022. Zgradba, visoka 435 metrov, stoji na mestu, kjer je nekoč delovalo zgodovinsko klavirsko podjetje Steinway & Sons, in je po njem tudi dobila svoje ime. Kolosalni Burj al-Arab v obliki jadra v Dubaju pa ima takšnih blažilnikov pravzaprav kar enajst. Tovrstne naprave, skrite očem za nosilnimi stenami visokih stavb, ščitijo pred gibanji, ki jih med potresi povzročajo vibracije in lahko povzročijo okvaro strukture. V potresu začnejo objekti namreč vibrirati zaradi lastne resonance, še dodaja Al, ki pojav primerja z vibriranjem glasbenih vilic.

»To lahko privede do zrušitve, saj se bo stavba začela tresti vse hitreje in hitreje.« Uglaseni blažilniki, znani tudi kot harmonični absorberji, so nastavljeni tako, da resonirajo na isti frekvenci kot zgradba – vendar z valovno dolžino, ki se sproži z rahlim zamikom, malo prej ali pozneje kot stavba sama, kar pomaga razpršiti potencialno katastrofalno energijo. Stabilnost, ki jo zagotavljajo, lahko tudi zmanjša neprijetne ali celo negativne učinke zibanja, ki jih lahko stanovalci takšnih stavb začutijo ob močnem vetru.

Strukturna podpora

V nebotičniku Taipei 101, zasnovalo ga je tajvansko podjetje C.Y. Lee & Partners, je pred 20 leti revolucionarni uglaseni masni blažilnik mogoče opazovati s posebne razgledne ploščadi in je priljubljena atrakcija za obiskovalce, še posebej, ko med močnim vetrom niha sem in tja. Običajno si tovrstnih skritih sistemov blaženja ni mogoče ogledovati, v tajpejskem Bambusu, kot domačini ljubkovalno imenujejo svojo najvišjo stavbo, pa je TMD funkcionalna in estetska privlačnost. Obiskovalci na razgledni ploščadi lahko dobijo vpogled v celotno delovanje blažilnega sistema. Blažilnik s premerom približno 5,5 metra je sestavljen iz 41 plasti 12,5 centimetra debelih trdnih jeklenih prevlek, zvarjenih v ogromno kroglo, ki tehta 660 ton.



Leta 2004 zgrajeni Taipei 101 je aprila letos rušilni potres z magnitudo 7,4 prestal nepoškodovan.

Modrost, da je upiranje močnim silam v nasprotju z naravo, v kateri se vse giblje s tokom in ne proti njemu, s katero so prepojene vzhodnoazijske filozofije, je že stoletja odlično vodilo tradicionalni arhitekturi v teh državah.



Kolosalni Burj al-Arab ima kar enajst blažilnikov, ki ga ščitijo pred nihanjem, ki jih med potresi povzročajo vibracije in lahko povzročijo okvaro strukture.

Velikanska krogla pa ni edina konstrukcijska značilnost, ki pomaga stabilizirati stolp, ki stoji blizu velike tektonske prelomnice. Nebotičnik ima tudi izjemno globoke temelje, saj stoji na kar 380 armiranobetonskih in jeklenih pilotih, zabitih v podlago. Nad njimi je jedro stavbe z ogromnimi jeklenimi oporniki povezano z nizom mega stebrov okoli njenega oboda. Stolpnica je načrtovana in grajena v skladu s protipotresnimi gradbenimi predpisi, ki so tako strogi, kot je pričakovati na otoku, ki leži vzdolž tihomorskega vulkanskega obroča. Ta poteka okoli roba Tihega oceana in povzroča živahno potresno in vulkansko aktivnost od Indonezije pa vse do Čila. Toda medtem ko sta bila računalniška zasnova in maketa nebotičnika podvrženi obsežnemu digitalnemu modeliranju in testiranju tudi na stresalni mizi, napravi, ki posnema gibanje potresa, ostaja odgovor na vprašanje, kako bi se stavba, kot je Taipei 101, odzvala na močnejši ali še bližji potresni dogodek, kot je bil letos spomladi, do neke mere le teoretičen. »Čeprav imamo računalniške simulacije, še vedno obstaja nekaj fizičnega, česar ne moremo spoznati le z digitalnimi simulacijami,« pravi Stefan Al in dodaja: »Kljub velikanškemu tehnološkemu napredku še vedno preizkušamo makete na klasičen način, to je v vetrovnikih in na stresalnih mizah.«

Japonska zaščita pred potresi

Po potresu z magnitudo 7,5, ki je prvega januarja letos prizadel Japonsko in predvsem prefekturo Išikava na zahodni obali in je bil letošnji najmočnejši potres na svetu, so medije preplavile podobe zgradb, spremenjenih v ruševine. Na stotine stavb je tudi zgorelo. Toda čeprav niti dva potresna dogodka nista neposredno primerljiva, velja poudariti, da so potresi podobne moči v drugih delih sveta – kot je bil na primer potres z magnitudo 7,6, ki je leta 2005 povzročil razdejanje v Kašmirju – pogosto povzročili veliko večje uničenje. V primerjavi s tem potresom jo je Išikava še dobro odnesla, pravi **Robert Geller**, zaslužni profesor seizmologije na Univerzi v Tokiu. »Zdi se, da se sodobne zgradbe zelo dobro obnesejo pri tovrstnih naravnih nesrečah,« je dan po potresu na Japonskem povedal za CNN in opozoril, da so največ škode utrpeli starejše hiše s težkimi strehami, pokrite z glinenimi strešniki. »Večina enodružinskih hiš, tudi če so bile poškodovane, se ni popolnoma porušila,« je dejal in spomnil na krilatico arhitektov, ki se ukvarjajo s protipotresnim načrtovanjem, namreč, da niso potresi tisti, ki ubijejo ljudi – ampak zgradbe. In na Japonskem, eni najbolj potresno ogroženih držav na svetu, si arhitekti, inženirji in

urbanisti že dolgo prizadevajo zaščititi stavbe in mesta pred močnimi potresi s kombinacijo starodavne modrosti in izkušenj ter sodobnih inovacij z nenehnim posodabljanjem gradbenih predpisov. Tehnologija je močno napredovala, odkar je potres pred nekaj več kot sto leti do tal porušil številne mestne četrti v Tokiu in Jokohami. Inženirji so zasnovali številne inovacije, ki omogočajo, da se zgradbe zibljejo neodvisno od svojih temeljev, od velikih, že opisanih blažilnikov, ki nihajo kot nihala znotraj nebotičnikov, do sistemov vzmeti ali krogličnih ležajev. Inovacije večinoma temeljijo na preprosti, že dolgo sprejeti ideji, da je prožnost tista, ki daje strukturam največje možnosti za preživetje.

Po revoluciji z uporabo železne armature, ki se je začela konec 19. stoletja v Evropi in okrepila prožnost pregovorno trdnega betona, so načrtovalci visokih stavb dobili nov zalet prav z razvojem obsežnih protiuteži in novih sistemov temeljenja z gumijastimi ležaji, ki delujejo kot blažilniki udarcev.

Nazaj v preteklost

»Če pogledate temelje našega arhitekturnega načrtovanja, boste videli, da je veliko zgradb, zlasti bolnišnic in pomembnih kritičnih struktur, na gumijastih ležajih, tako da zgradba sama lahko zaniha,« je povedala **Miho Mazereeuw**, izredna profesorica arhitekture in urbanizma na Tehnološkem inštitutu Massachusetts (MIT). V svoji novi knjigi *Design Before Disaster* (Dizajn pred katastrofo) raziskuje japonsko kulturo pripravljenosti in ugotavlja, da se vrača k osnovnemu konceptu neupiranja silnicam Zemljine dejavnosti, kar pomeni možnost dopuščanja zgradbi, da se premika v smeri njihovega delovanja. To načelo na Japonskem uporabljajo že stoletja. Številne tradicionalne lesene pagode v državi so na primer preživele močne potrese – in je bolj verjetno, da bodo podlegle požaru ali vojni – četudi so sodobne padale kot domine. Primer takšne zgradbe je 55-metrška pagoda templja Toji, zgrajena v 17. stoletju v bližini Kjota. Ostala je nedotaknjena celo po velikem potresu v Hanšinu leta 1995, znanem tudi kot potres v Kobeju, medtem ko so se številne bližnje zgradbe zrušile. Japonska tradicionalna arhitektura ima veliko skupnega s korejsko in kitajsko arhitekturo, razlikuje se le v načinih reševanja strukturne



55-metrška pagoda templja Toji, zgrajena v 17. stoletju, je ostala nedotaknjena celo po velikem potresu v Hanšinu leta 1995, znanem tudi kot potres v Kobeju, medtem ko so se številne bližnje zgradbe zrušile.

trdnosti stavb, ki mora biti prilagojena večjemu številu potresov v državi. Izjemno odpornost pagod proti potresom, denimo, že dolgo pripisujejo osrednjim stebrom *šinbašira*, narejenim iz debel japonske ciprese, ki jih japonski gradbeniki uporabljajo že vsaj 1400 let. Ne glede na to, ali so ti stebri zasidrani v tla, naslonjeni na kaj ali obešeni, so upogljivi in elastični, medtem ko se posamezna nadstropja stavbe premikajo v nasprotnih smereh. Takšno utripajoče gibanje – ki ga pogosto primerjajo s premikanjem polzeče kače – deluje v nasprotni smeri od sile tresljajev, pri tem pa sodeluje vsa struktura od prepletanih spojev in ohlapnih nosilcev do širokih strešnih napuščev.

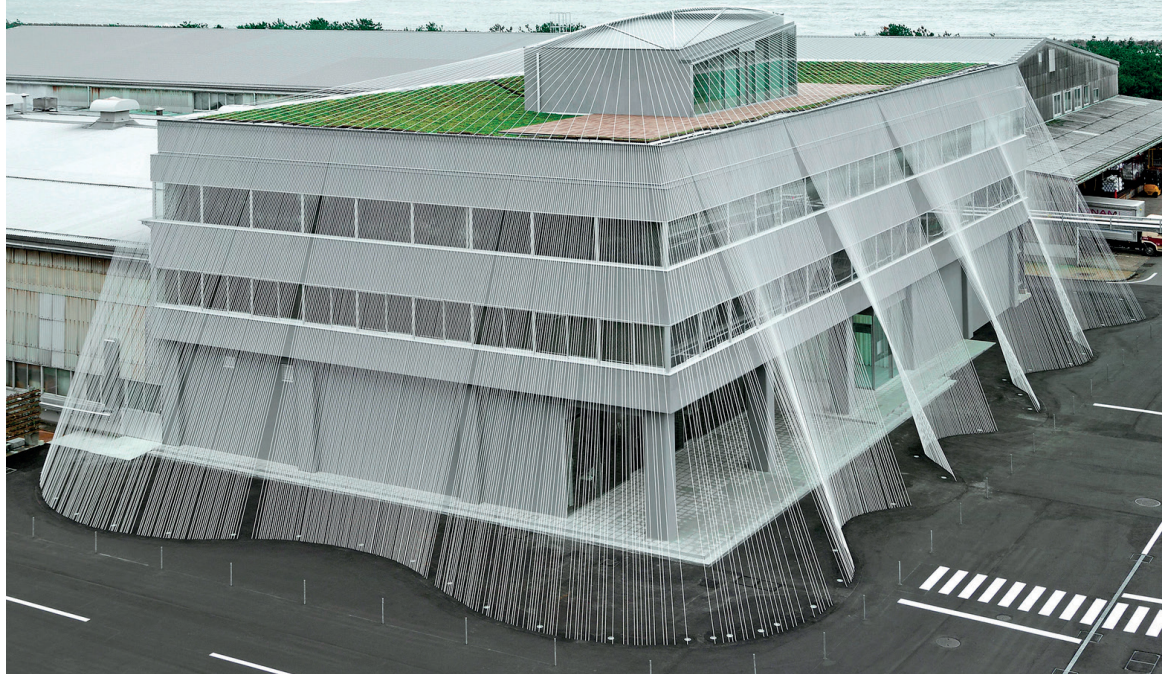
Tehnologije protipotresne gradnje ...

Niso vse sodobne japonske zgradbe podobne pagodam, nebotičniki pa so. Čeprav je v državi zaradi nevarnosti naravnih nesreč do leta 1960 veljala stroga omejitev višine 31 metrov, je arhitektom od takrat dovoljeno graditi navzgor. Danes ima Japonska več kot 270 nebotičnikov, višjih od 150 metrov, kar jo uvršča med prvih pet držav na svetu po številu najvišjih zgradb. Po podatkih Sveta za visoke zgradbe in urbani habitat (CTBUH) so pred njo le Kitajska, ZDA, Združeni arabski emirati in Malezija.



Gradbeno podjetje Mori, ki je lani dokončalo 327-metrsko novo najvišjo stavbo na Japonskem, je podobno protipotresno tehnologijo uvedlo v že pred dvema desetletjema zgrajeni in kakšnih 80 metrov nižji Ropongji Hills. Že takrat so se pohvalili, da je to kraj, v katerega se je treba ob potresu zateči, ne pa iz njega bežati.

Eden najbolj znanih arhitektov na Japonskem, Kengo Kuma, je 2016. za tekstilno podjetje Komatsu Matere razvil zaščitno zaveso, sestavljeno iz tisoče pletenih palic iz ogljikovih vlaken, ki sidrajo poslovno stavbo podjetja v tla – le 150 kilometrov od epicentra letošnjega novoletnega potresa.



Nepremičninsko podjetje, ki je lani dokončalo 327-metrsko novo najvišjo stavbo na Japonskem, julija lani so jo odprli v kompleksu Azabudai Hills v Tokiu, trdi, da bodo njene proti potresu odporne konstrukcijske lastnosti – vključno z velikanskimi blažilniki – vzor drugim glede protipotresne gradnje tudi ob tako močnih potresih, kot je bil rekordni potres z magnitudo 9 v Tohokuju leta 2011. Gradnja stolpnice, ki je po velikosti ta hip na 129. mestu v svetu, je stala dobre štiri milijarde evrov.

Gradbeno podjetje Mori, ki je zgradilo Azabudai Hills, je podobno protipotresno tehnologijo uvedlo v že pred dvema desetletjema zgrajeni in kakšnih 80 metrov nižji Ropongi Hills. Že takrat so se pohvalili, da je Ropongi Hills kraj, v katerega se je treba ob potresu zateči, ne pa iz njega bežati. Pri gradnji so uporabili več različnih protipotresnih tehnologij, poleg jeklenih cevi, napolnjenih z betonom izjemno visoke trdnosti, iz katerih je sestavljeno ogrodje zgradbe, so tu tudi stene, napolnjene z lepljivo zmesjo, ki prevzamejo nase del potresnih pritiskov. V središču vsakega nadstropja je kar osem takšnih sten.

Stolpiči iz lesa postajajo iz leta v leto večji. Še leta 2017 je bil najvišji visok 53 metrov. Dve leti kasneje so v Brumunddal na Norveškem postavili nebotičnik Mjøstårnet, ki meri 85 metrov (na fotografiji).



Nameščenih je tudi 192 oljnih blažilnikov, ki delujejo tako, da s pretakanjem olja absorbirajo in s tem nevtralizirajo tresenje stavbe. Znotraj blažilnikov so namreč nameščeni senzorji, ki zaznavajo vsako, še tako majno tresenje in nemudoma sprožijo pretakanje olja, ki prevzame nase strižne sile, in s tem zagotovijo izjemno odpornost proti potresom. Na vrhu zgradbe pa je še tako imenovani dušilnik zelene mase, ki nevtralizira nihanja, ki stresajo ozelenelo površino na strehi. Ta je izolirana s plastmi laminirane protipotresne gume, blažilniki, nameščeni med temi plastmi, pa zmanjšujejo obremenitev stavbe, s tem ko absorbirajo del potresne energije.

... in izobrazba ...

Za številne kraje na Japonskem brez nebotičnikov je odpornost proti potresom bolj povezana z varovanjem njihovih domov, šol, knjižnic in trgovin. In prav v tem, ne glede na veličastne uspehe pri gradnji nebotičnikov, sta bili japonska politika in tehnologija zelo uspešni. Japonske gradbene in arhitekturne šole imajo zaslug, da so – morda zaradi zgodovine naravnih nesreč v državi – njihovi diplomanti dobro podkovani tako v oblikovanju kot inženiringu, pravi Miho Mazereeuw, ki tudi vodi Urban Risk Lab na MIT, raziskovalno organizacijo za preučevanje seizmičnih in podnebnih tveganj.

»V nasprotju z večino držav japonske arhitekturne šole združujejo arhitekturo s konstrukcijskim inženiringom,« je dejala in dodala, da sta na Japonskem obe disciplini »vedno povezani«. Državni uradniki so se v preteklih letih prav tako poskušali kaj naučiti iz vsakega večjega potresa v državi in so na podlagi podrobnih raziskav nenehno ustrezno posodabljali gradbene predpise.

... ter zakonodaja

Ta proces sega vsaj v 19. stoletje, pravi Miho Mazereeuw in pojasni, kako je obsežno uničenje novih opečnih in kamnitih stavb v evropskem slogu v potresu v Mino-Ovariju leta 1891 in velikem potresu v regiji Kanto leta 1923 privedlo do novih zakonov o načrtovanju mest in zgradb. Postopni razvoj gradbenih predpisov se je nadaljeval v 20. stoletju. Toda zakon, uveden leta 1981, znan tudi kot »šin-taišin« ali dopolnitev novega standarda za proti potresom odporno gradnjo

– šlo je za neposreden odziv na potres v Mijagiju na morju tri leta prej – se je izkazal za prelomen trenutek. Novi standardi so se med drugim izkazali za tako učinkovite, da je hiše, zgrajene pred letom 1981, bistveno težje prodati kot tiste po tem datumu, pa tudi zavarovalnice zanje so bistveno večje.

Prvi pravi preizkus učinkovitosti novih predpisov je prišel leta 1995, ko je veliki potres v Hanšinu povzročil obsežno uničenje v južnem delu prefekture Hjogo. Rezultati so bili osupljivi: kar 97 odstotkov porušenih stavb je bilo zgrajenih pred letom 1981. Potres je zato sprožil prizadevanje za prenovo starejših stavb po vsej Japonski v skladu s standardi, uvedenimi leta 1981, ki so jo marsikje spodbujali tudi s subvencijami.

Povečevalo pa se je tudi število inovacij in japonski arhitekti so bili med najboljšimi na svetu, ko je šlo za potresno načrtovanje. Eden najbolj znanih arhitektov v državi Kengo Kuma je na primer leta 2016 za tekstilno podjetje Komatsu Matere razvil zaščitno zaveso, sestavljeno iz tisoče pletenih palic iz ogljikovih vlaken, ki sidrajo poslovno stavbo podjetja v tla, – le 150 kilometrov od epicentra letošnjega novoletnega potresa – da je ne le videti, ampak tudi učinkuje kot šotor. Pred kratkim je sooblikoval stavbo vrtca v južni prefekturi Koči, ki ima sistem sten v stilu šahovnice, odporen proti potresu. Japonski arhitekti, kot sta Šigeru Ban in Tojo Ito, so tudi pionirji v uporabi križno laminiranega lesa (CLT), ki postaja, z uvozom iz Avstrije, dostopen tudi na našem gradbenem trgu. Gre za novo vrsto inženirskega lesa, za katerega menijo, da bi lahko celo spremenil način gradnje stolpnice.



Blažilniki nihanja so vgrajeni v nebotičnike po vsem svetu, tudi v super ozki nebotičnik Steinway v New Yorku, dokončan leta 2022, ki velja za najtanjšega na svetu.



LJUBLJANSKI NEBOTIČNIK

Zelo napredno konstrukcijsko zasnovo je imel za svoje času tudi ljubljanski Nebotičnik. Protipotresna izolacija celotne stavbe na nivoju temeljev je bila pionirski dosežek gradbenega inženirja **Stanka Dimnika**, in to v svetovnem merilu. Koncept potresne izolacije stavb je bil teoretično že znan, a ni znano, da bi kje v svetu pred Nebotičnikom že uporabili podobno tehnologijo, je za Delo povedal gradbeni inženir dr. **Branko Zadnik**. »Inovativen je bil stik med zgornjo površino gred in spodnjo površino kletnega zidovja, izveden v debelini 16 mm kot dilatacija, ki naj bi omogočala relativne pomike celotnega objekta v horizontalni smeri glede na temelje. Stik je zasnovan in izveden iz več plasti jeklenih, cinkovih in svinčenih pločevin, naloženih druga nad drugo in ločenih med seboj z bitumenskimi premazi. Pri večjih potresnih obremenitvah v tem stiku bi prišlo do zdrsa stavbe nad temelji in tako do absorpcije seizmične energije.«

Lesene gradnje

Stolpiči iz lesa postajajo iz leta v leto večji. Še leta 2017 je bil najvišji bivalni nebotičnik Brock Commons Tallwood House v kampusu Univerze Britanske Kolumbije blizu Vancouvra v Kanadi in je bil visok 53 metrov. Dve leti kasneje so v Brumunddal na Norveškem postavili nebotičnik Mjøstårnet, ki meri 85 metrov. Leta 2022 je naziv najvišjega prevzel Ascent MKE v ameriškem Milwaukeeju s 86,5 metra. Dansko arhitekturno podjetje Schmidt Hammer Lassen (SHL) pa je že zasnovalo 100 metrov visok, več kot 30-nadstropni stanovanjski blok v mestu Winterthur v Švici, ki bo, ko bo dokončan, najvišja stavba iz križno lepljenega lesa na svetu. Za stolp Rocket&Tigerli, imenovan bo po lokomotivah, ki so bile proizvedene na nekoč industrijski lokaciji, so uporabil konstrukcijski sistem, ki sta ga razvila švicarska družba Implenia in Švicarski zvezni inštitut za tehnologijo v Zürichu.

Na kalifornijski univerzi v San Diegu je lani spomladi že potekal prvi test makete lesenega stolpa v potresnem simulatorju in menda ga je dobro prestala. To pa ne pomeni, da bo načrtovani 350-metrski stolp CLT v Tokiu, ki ga je že predlagalo japonsko podjetje Sumitomo Forestry, ustrezal tudi izjemno zahtevnim japonskim predpisom. Navsezadnje niti predpisi niti načrti, ki temeljijo na številnih računalniških simulacijah, ne morejo zagotoviti, do katere stopnje potresa bodo stavbe še lahko obstale. »Morda ne bomo vedeli, ali so te simulacije točne ali ne, dokler ne pride do velikega potresa. Če se samo ena od sodobnih stolpnice zruši, bi lahko nastala velika škoda, in japonski seizmologi napovedujejo Tokiu kar 70-odstotno možnost velikega rušilnega potresa v prihajajočih 30 letih,« opozarja profesor Geller in dodaja: »Šele takrat bomo dejansko vedeli, koliko smo zares varni.«