

RAZVOJ PREDPISOV O POTRESNO VARNI GRADNJI V KALIFORNIJI

Matjaž Godec*

Kalifornija je potresno zelo ogroženo območje. Tamkajšnji strokovnjaki so zato zmeraj v ospredju pri razvoju metod za potresno varno gradnjo. Inženirji z drugih območij se zgledujejo po kalifornijskih, zato je zelo primerno opisati razvoj predpisov o gradnji objektov prav na tem območju. Potresi, ki so vplivali na razvoj teh predpisov, so bili vsi v Kaliforniji. Občutili so jih mnogi prebivalci, vključno z inženirji, državnimi in mestnimi uradi, ki so vsi neposredno povezani z gradbenimi predpisi in škodo na objektih.

Prvi koraki pri razvoju predpisov

Najmočnejši potres v Kaliforniji, vsaj na gosto naseljenem območju, je bil verjetno v San Franciscu leta 1906. Nenavadno je to, da ta potres ni povzročil nobenih sprememb opredeljenih vrednosti horizontalnih sil v kalifornijskih gradbenih predpisih. Tudi po tem dogodku so bili objekti projektirani le na silo vetra, če je bila predvidena obremenitev s horizontalnimi silami, nobenih zahtev pa ni bilo za potresne sile. V gradbenih predpisih Los Angelesa ni bilo zahteve po projektiranju na silo vetra ali potresa vse do leta 1924, ko je bil predpis spremenjen. To je verjetno pogojila predpostavka, da je objekt, dimenzioniran na ustrezno silo vetra, tudi ustrezno potresno odporen.

V letu 1925 je hud potres prizadel Santa Barbaro v Kaliforniji. To je pospešilo projektiranje potresno odpornih zgradb, v strokovnih revijah so se začeli pojavljati prvi članki s tega področja. Kalifornijski predpisi še niso vključevali zahtev po potresno varnem projektiranju v večjem obsegu. Po potresu leta 1933 v Long Beachu v Kaliforniji pa so bili v Združenih državah prvič sprejeti začasni seizmični predpisi.

Leta 1933 je državna zakonodaja izdala Rileyjev zakon, ki je zahteval, da morajo biti vsi objekti, z nekaterimi izjemami, projektirani tako, da prenesejo minimalno potresno silo. Leta 1933 je bil sprejet tudi zakon, ki je državnemu oddelku za arhitekturo dajal sodno pristojnost za konstrukcijsko zasnovo šolskih objektov. Sprejeti so bili napotki in predpisi za vodenje takšnega projektiranja, ki so bili v zahtevah mnogo bolj strogi kot Rileyjev zakon in so bili prvi vsestranski predpisi za potresno varno projektiranje. Vsebovali so ostre zahteve za preizkušanje materialov za šolske objekte in terenske preiskave izgradnje objektov. Leta 1933 so krajevne in občinske oblasti na tem območju spremenile svoje gradbene predpise tako, da so vključile zahteve po potresno varnem projektiranju.

Prvi gradbeni predpisi za potresno varno projektiranje so predpisovali en sam seizmični koeficient za določanje potresnih

sil. Koeficient je bil enak ne glede na tip konstrukcije ali višino objekta. Splošno višji koeficienti so bili določeni za nekatere posamezne dele zgradb, npr. za parapetne zidove, dimnike, rezervoarje in zunanjo ornametiko. Izkušnje so pokazale, da so ti deli objektov posebno občutljivi.

Prvi seizmični predpisi Los Angelesa

Leta 1933 so bili potresni predpisi vključeni v gradbeni predpis Los Angelesa. Bili so takšnega tipa kot predhodno opisani, z osnovnim seizmičnim koeficientom 0,08, za šole pa 0,10. Leta 1932 je v Kaliforniji Japonec dr. Kyoji Suyehiro v seriji predavanj poročal, da na Japonskem uporabljajo seizmični koeficient 0,10. Poudarjal je tudi, da so objekti, projektirani na tak način, »precej dobro« prestali zelo močan potres na območju Kanto leta 1923. Japonci so imeli potresne zahteve vgrajene v gradbene predpise kakih 10 let prej kot v Kaliforniji. Metoda tega izračuna potresnih sil na gradbeni objekt je lahko izražena kot:

$$F = C \cdot W$$

F predstavlja potresno silo, delujočo na vsak del objekta, W je teža istega dela in C je seizmični koeficient.

Ena sama vrednost seizmičnega koeficienta za izračun potresnih sil na objekt ustreza le, če sta objekt in temelj toga, tako da se vsi deli objekta premikajo s tlemi. V tem primeru je celoten objekt izpostavljen istemu pospešku, zato je za projektiranje upravičeno uporabljati en sam seizmični koeficient. Dejanski objekti pa niso togi. Med potresom nihajo z odkloni in pospeški, naraščajočimi od prve etaže do strehe. Gibkejši objekti, to so tisti z daljšim nihajnim časom, imajo manjše potresne pospeške.

Naslednji korak pri razvoju potresnega dela gradbenih predpisov naj bi z ekvivalentno statično obtežbo bolj realno prikazal dejansko dinamično obremenitev. To je bilo narejeno z uporabo spremenljivega seizmičnega koeficienta C namesto ene

same določene vrednosti. Ta sprememba je bila v Los Angelesu sprejeta leta 1943. V tem predpisu je seizmični koeficient izražen:

$$C = \frac{60}{(N + 4,5) \cdot 100}$$

V tej enačbi je N število nadstropij nad opazovanim, npr. na vrhu stavbe ali pri enonadstropni zgradbi bo N enak nič. Koeficient C pa se potem uporablja v naslednji enačbi:

$$V = C \cdot W$$

Ker je V horizontalna sila v opazovanem računanem nadstropju in W predstavlja skupno težo N nadstropij objekta nad nadstropjem, ki ga preračunavamo.

Iz tretje enačbe je razvidno, da je potresna sila V skupna sila potresa, ki deluje nad opazovanim nadstropjem. Iz navedenih enačb je lahko sila V določena za pritlični ali večnadstropni objekt. Kot potresna sila je definirana skupna potresna sila, ki deluje na objekt.

V skladu z drugo in tretjo enačbo seizmična sila narašča od prvega nadstropja do strehe. Višji kot so objekti, manjši je seizmični koeficient za osnovno strižno silo. Npr. osnovni strižni koeficient za desetnadstropni objekt je 0,041, ustrezeni pospešek pa znaša 0,041 g. Za dvajsetnadstropni objekt so odgovarjajoče vrednosti manjše, 0,024 in 0,024 g. Z drugimi besedami, sile, izračunane po drugi in tretji enačbi, bodo dale ustrežnejši odziv objekta kot po prvi enačbi.

Naslednji korak je bil narejen z novo enačbo, ki so jo v gradbene predpise Los Angelesa uvedli leta 1957. Do spremembe je prišlo z ukinitvijo prepovedi gradnje objektov, višjih od 13 nadstropij. Za te objekte je komite konstrukcijskih inženirjev Uradu za varnost objektov mesta Los Angeles l. 1956 predlagal naslednjo spremembo druge enačbe:

$$C = \frac{4,6 \cdot S}{(N + 0,9 \cdot (S - 8)) \cdot 100}$$

C in N sta bila že predhodno definirana, S pa je skupno število nadstropij, razen za objekte s 13 ali manj nadstropji.

Četrta enačba je identična z drugo za zgradbe s 13 ali manj nadstropji. Za objekte s prek 13 nadstropji, še posebej za zelo visoke, z 20 ali 30 nadstropji, pa četrta enačba da obremenitve, ki so mnogo bolj podobne obtežbam iz teorije dinamike konstrukcij. To je bil cilj komiteja – upoštevanje realnejše obtežbe, kot jo je dajala druga enačba, za objekte z več kot 13 nadstropji ali 45 m višine, kar je bila prejšnja omejitev pri gradnji objektov v Los Angelesu.

* Dipl. inž. gradb., Seizmološki zavod SR Slovenije, Kersnikova 3, Ljubljana.

Od takrat je bilo sprejeto, da je potresna obremenitev na objekt privzeta kot obrnjeno trikotna, kar pomeni, da se obtežba spreminja zvezno od nič pri tleh do največje vrednosti na strehi.

Seizmični predpis SEAOC

V letu 1957 je bil pod vodstvom Williama T. Eheelerja ustanovljen komite Združenja inženirjev konstruktorjev Kalifornije, ki si je za nalogo zadal, da bo pripravil nove seizmične predpise. Delo je trajalo dve leti. Cilj novih predpisov, označenih s kratico SEAOC, je bil razvoj metod projektiranja potresno odpornih stavb. Te temeljijo na statičnih silah, kar se je uporabljalo v vseh predhodnih predpisih, le da naj bi bile bolj skladne z razvojem teorije dinamike konstrukcij. Želja je tudi bila, da se naredi splošen seizmični predpis, ki bo zamenjal množico različnih predpisov, ki so jih uporabljali v Združenih državah in še posebej v Kaliforniji.

Novi predpis je uvedel »duktilnost«, pojem, ki se prej ni pojavljal v predpisih o potresni gradnji. Velika duktilnost je sposobnost objekta za prenašanje velikih deformacij brez poškodb ali porušitev. Znano je, da je v močnem potresu konstrukcija obremenjena prek t. i. elastičnih mej. Elastična meja je lahko definirana kot meja, pri kateri je konstrukcija izpostavljena stalni deformaciji. Za posamezen, npr. jeklen, element je ta meja lahko jasno določena. Za konstrukcijo, sestavljeno iz mnogo elementov, pa tega ni mogoče definirati, kajti vsi elementi ne dosežejo elastičnih mej v istem času.

Različni tipi konstrukcij imajo različen nivo duktilnosti, zato je bil v enačbo dodan faktor K:

$$V = K \cdot C \cdot W$$

V tej enačbi je V potresna sila, W je skupna teža objekta nad prvim nadstropjem in C je osnovni seizmični koeficient, za katerega velja enačba:

$$C = \frac{0,05}{T^{0,333}}$$

V tej enačbi je T nihajna doba objekta – osnovna oziroma najdaljša perioda.

V šesti enačbi je C predstavljen kot funkcija nihajne dobe objekta: krajša kot je perioda, bolj toga je konstrukcija, večji je koeficient in večje so sile, ki delujejo na objekt. V enačbah za obtežbo (druga in četrta) ni bilo nobene direktne povezave med nihajno dobo in koeficientom seizmičnosti. Stara oblika enačbe je določala le, da se koeficient spreminja s številom nadstropij. To je uveljavljalo posredno in netočno zvezo med koeficientom in nihajno dobo.

Za praktične potrebe je bila podana enostavna, a netočna enačba nihajne dobe:

$$T = \frac{0,05 \cdot H}{D^{0,5}}$$

H v enačbi predstavlja višino objekta v čevljih, D predstavlja dimenzijo objekta v smeri delujoče horizontalne sile. Za izračun koeficienta C naj T ne bo manjši od 0,10. Za potrebe projektiranja je bilo treba potresno silo porazdeliti v ustrezne statične sile, koncentrirane v vsakem nadstropju. Med potresom je pospešek v vsaki etaži proporcionalen odklonu na tistem nivoju, če odklon ne prekorači elastičnih mej. Seizmična sila v vsakem nadstropju je enaka pospešku v tem nadstropju, pomnoženem s težo nadstropja. Porazdelitev potresne sile je lahko narejena, če je znan odklon konstrukcije. Če odklon ni znan, je porazdelitev narejena na osnovi privzetega odklona. To je naredil komite. Menil je, da četudi je objekt obremenjen prek elastičnih mej, porazdelitev horizontalnih sil ni huje prizadeta. Privzeto je bilo, da se odklon objekta spreminja po premi liniji, od nič na dnu do največje vrednosti na strehi, kar je dober približek za večino objektov. Če je teža nadstropij enaka, dobimo obrnjeno trikotno porazdelitev obtežbe. Tale enačba se nanaša na to porazdelitev obtežbe:

$$F_x = \frac{V \cdot W_x \cdot H_x}{\sum (W \cdot H)}$$

F_x je horizontalna sila na določenem nivoju v smeri x, V je potresna sila, W_x je teža na nivoju projektiranja in H_x je višina v čevljih do tega nivoja. $\sum (W \cdot H)$ je seštevek vseh zmnožkov $W_x \cdot H_x$ za objekt.

Komite je izoblikoval vrednosti za koeficiente duktilnosti K za štiri različne tipe konstrukcij.

Izbor koeficientov K v glavnem temelji na opazovanju obnašanja objektov med potresi. Tipom konstrukcij, ki so se dobro obnašali, je dodeljena najnižja vrednost $K = 0,67$, tipom, ki se niso izkazali za dobre, je bila pripisana višja vrednost K (do 1,5).

Niso pa še bile razvite metode, po katerih bi se duktilnost dejansko lahko določala. Za duktilni okvir je bilo enostavno določeno, naj bo narejen iz duktilnega materiala ali kombinacije duktilnih materialov. Duktilnost enega samega elementa je lahko določljiva: je razmerje med končno deformacijo in deformacijo na meji elastičnosti.

Beton sam ni duktilen material. Zato so na Združenju za portland cement opravili mnogo preizkusov, da so dokazali, da pravilno armiran beton zagotavlja ustrezno duktilnost. Narejen je bil dodatek k predpisom SEAOC, kjer je bilo podrobno opisano, kakšno armiranje je potrebno, da elementi postanejo zadosti duktilni. Vendar je še zmeraj obstajal dvom o tem, ali lahko betonski okvir zagotavlja »ekvivalentno absorpcijo energije«.

Ad hoc komite

Maja 1970 je svet direktorjev SEAOC ustanovil komite za pregled osnovnih projektnih kriterijev predpisov SEAOC. Od takrat, ko je bil predpis izdan (l. 1959), je bilo namreč veliko potresov; prinesli so nova spoznanja, ki naj bi bila upoštevana v spremembah. Vodja tega komiteja je bil H. J. Degenkolb iz San Francisca, sestavljali pa so ga člani komiteja iz leta 1957, ko so predpis pripravljali, in člani Seizmološkega komiteja SEAOC iz leta 1970. Poročilo so pripravili oktobra 1971, okoli osem mesecev po potresu v San Fernandu. Ta potres je zelo spodbudil delo komiteja, kajti bilo je jasno, da bodo lahko v predpisih uveljavili velike spremembe.

Osnovna priporočila komiteja:

1. Soglasno je bilo sprejeto, da je obstoječa oblika predpisa, in s tem »ekvivalentna statična obtežba«, primerna osnova za splošno analizo običajnih konstrukcij in tudi najbolj praktična oblika predpisa.
2. Komite je priporočal, naj se za pomembnejše in dinamično neobičajne konstrukcije zahteva dinamična analiza – za iskanje šibkih in ranljivih mest, ker drugačnih kriterijev ni.
3. Večina je glasovala za povečanje sil.
4. Če duktilnost ni zagotovljena, je povečanje sil potrebno.
5. Komite je predlagal, da se sedanj faktor K obdrži v predpisu, vendar ga je treba ponovno ovrednotiti.
6. Splošno je bila obravnavana potreba po upoštevanju vpliva temeljnih tal. Sklenili so, naj se to prenese v prihodnje predpise.
7. Pomembnost objekta mora biti navedena v predpisu. Objekti, ki sodijo v to kategorijo, pa so: bolnišnice, urgentni centri, komunikacijski in evakuacijski objekti.

Revizija predpisov SEAOC

Predpisi SEAOC iz leta 1974, imenovani Zahteve in komentar o horizontalnih silah, so bili objavljeni maja 1974. V to novo, četrto izdajo so bila vključena najpomembnejša priporočila Ad hoc komiteja.

Nova oblika enačbe za potresno silo je:

$$V = Z \cdot I \cdot K \cdot C \cdot S \cdot W$$

Opazni so trije novi členi, ki so dodani originalni peti enačbi.

Faktor Z je faktor lokacije, ki upošteva, da se zemljepisna območja med seboj razlikujejo glede na verjetnost potresov in tudi glede na verjetnost njihove pogostosti in intenzitete. Seizmičnost območja je za te potrebe določena z zgodovinskimi zapisi potresov na lokaciji ter z dolžino in

Izraz I uvaža višje projektne potresne sile za objekte, ki naj bodo uporabni tudi po hudem potresu. Med te objekte naj bi bile vključene bolnišnice, gasilske postaje in komunikacijski ter energetski objekti. Potres v San Fernando je pokazal, da takšni objekti potrebujejo posebno oceno. Štiri bolnišnice v San Fernandu so bile tako hudo poškodovane, da so jih uporabljali samo, kadar je bilo neobhodno potrebno. Predpis je za I uvedel največjo vrednost 1,5 za pomembne objekte in vrednost 1,0 za ostale konstrukcije.

Izraz S je faktor tal. Za vpliv pogojev temeljnih tal na lokaciji velja, da so v neposredni povezavi z osnovno nihajno dobo T konstrukcije na tej lokaciji, glede na naravno nihajno dobo Ts lokacije same. Dana je enačba, ki podaja S kot funkcijo tega razmerja. Če je razmerje 1,0, je vrednost S enaka 1,5. To predstavlja resonanco med konstrukcijo in tlemi in daje največjo vrednost S. Najmanjša vrednost S je enota.

Verjetno je bila najpomembnejša sprememba, ki je bila vključena v predpis SEAOC, večja vrednost koeficienta C. Nova oblika enačbe za C se glasi:

$$C = \frac{1}{15 \cdot T^{0.5}}$$

To je dalo največji porast za objekte s kratko periodo oziroma za bolj toge objekte. Povečanje C iz enačbe 10 glede na osnovno enačbo znaša 60 % za $T = 0,30$ s ter 13 % za $T = 2,50$ s. Največja vrednost za C je postavljena na 0,12.

Faktor duktilnosti K je bil v enačbi za potresno silo ohranjen v obliki, kot jo je predlagal Ad hoc komite. Vrednosti K in opisi za različne kategorije objektov se niso spremenili. Faktor K je pravzaprav mera za duktilnost objekta, in tu ni bilo nobenih novih pogledov, ki bi opravičevali spremembo vrednosti K.

Ad hoc komite je priporočil, naj se dinamično analizirajo vsi pomembnejši objekti. Nova zahteva v predpisu je: »Za porazdelitev horizontalnih sil na konstrukcije, ki so zelo nepravilnih oblik ali imajo velike razlike v togosti različnih nadstropij ali druge nenavadne značilnosti, se upoštevajo dinamične značilnosti konstrukcije.« To je bolje od prejšnje zahteve, naj se dinamična analiza naredi na vseh pomembnih objektih. V praksi, pod novimi zahtevami predpisov, bo večina objektov izračunanih s klasično metodo nadomestne statične obremenitve.

Predpis ATC

Oktobra 1971 je bila ustanovljena in s pristankom SEAOC registrirana organizacija z imenom Applied Technology Council (ATC). To je bila nedobičarska družba, ki bi rezultate raziskav prenašala v prakso.

SEAOC je potresnemu inženirstvu veliko prispeval z razvojem in posodabljanjem »Priporočil in komentarja zahtev za horizontalne sile«, ki je bil predložen kot seizmični predpis SEAOC. Nova spoznanja o obnašanju objektov med potresi, do katerih so prišli strokovnjaki med potresom v San Fernandu, so še dodatno spodbudila razvoj splošnega predpisa za potresno varno projektiranje ATC 3.

Delo na projektu ATC 3 je bilo razdeljeno na pet delovnih skupin:

- prva delovna skupina – seizmološki del: ocena ogroženosti, gibanje tal in vplivi na lokacijah;
- druga delovna skupina – konstrukcijski del: konstruiranje, detajli, analiza konstrukcij, interakcija tla – konstrukcija;
- tretja delovna skupina – nekonstrukcijski del: arhitekturni strojni, električni sistemi in oprema;
- četrta delovna skupina – zveze in oblika;
- peta delovna skupina – obstoječi objekti: pregled in ocena škode, pregled in ocena ranljivosti, popravila in ojačitve.

Namesto zaključka

Novi predpis bo poudaril dejstvo, da še vedno obstaja verjetnost, da bo prišlo do potresa, ki bo močnejši od tistega, ki ga predvideva projekt, in s tem do poškodb objekta ter ogrožanja človeških življenj, čeprav je objekt projektiran in zgrajen v skladu s predpisi. Ekonomsko ni upravičeno izdelati tako konservativnih predpisov, da bi objekt, zgrajen v skladu s predpisi, bil sposoben prestat kakršnekoli hude obremenitve.

Ta filozofija ni bila nova. Komentar originalnega predpisa SEAOC navaja, naj bodo objekti, grajeni v skladu s predpisom, sposobni tudi najmočnejše potrese prestat le s konstrukcijskimi in nekonstrukcijskimi poškodbami. Treba je poudariti, da v primeru potresa v San Fernandu predpis SEAOC za sile v tistem času ni dosegel teh kriterijev. To je bil tudi razlog za spremembo predpisa.

1. Ambrose, J. in D. Vergun, 1985. Seismic Design of Buildings. John Wiley & Sons, New York.
2. ATC, 1978. Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, US Government Printing Office, Washington.
3. Dorwick, M. J., 1977. Earthquake resistant design. John Wiley & Sons, New York.
4. Green, N. B., 1978. Earthquake Resistant Building. Design and Construction. Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Matjaž Godec

Development of Regulations for Earthquake-Proof Construction in California

California is an area very much threatened by earthquakes. In the San Francisco area there were tremors many times before the earthquake of October 17, 1989, and therefore building experts had already started to take into account the principles of earthquake-resistant construction. Although the 1906 earthquake didn't give some real impetus to development in this field, all other earthquakes in California and around the world did influence the development of methods and thereby also regulations concerning earthquake-resistant construction in California.

California regulations demanded the calculation of stress due to horizontal force for the time in 1924. Later the regulations developed quickly because of new knowledge, conditioned also by bad experiences during earthquakes. The goal was and is to approach with calculation models as closely as possible the actual behaviour of buildings.

