

SEIZMICKÁ ODOLNOST STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Jiří Máca, Karel Pohl

The objective of this paper describe a basic principles applied to the design and construction of buildings and civil engineering structures in seismic regions. General rules, seismic actions and rules for design of buildings for earthquake resistance are described.

1. Úvod

Zemětřesení je živel, se kterým lidstvo žije od nepaměti a musí s ním nějak vycházet. Dochází k němu tak, že tuhá část naší Zeměkoule, která zdaleka není homogenní, je namáhána a deformována, a občas někde vznikne trhлина, doprovázená uvolněním energie a otřesem. Ten se šíří různými směry a způsoby, na styku odlišných materiálů se lomí a odráží a na zemském povrchu se projeví pohybem, jehož charakter závisí na množství energie uvolněné v trhlíně, na vzdálenosti, materiálu jímž prochází i na vlastnostech povrchových vrstev podloží staveb.

S pokračujícím zkoumáním zemské kůry probíhá intenzivní geofyzikální výzkum a mapování zlomů jako potenciálních možných oblastí poruch, přesto se zatím stále spolehlivě nedaří předpovídat, kdy a kde dojde k otřesu a jaký bude. Při jeho popisu se zpravidla uvažují pouze translační pohyby (především zrychlení, svislá složka a dvě vodorovné). Jeho určujícími veličinami je především intenzita (často udávaná jako násobek gravitačního zrychlení g), a dále frekvenční složení, případně doba trvání.

Eurokód 8 (EC8) shrnuje hlavní principy a zásady navrhování stavebních konstrukcí v oblastech ohrožených zemětřesením. Je završením zhruba dvacetiletého úsilí Evropské komise pro normalizaci (CEN) vypracovat jednotný předpis pro celé evropské území. Je pravdou, že většina Evropy (zejména její severní část) patří k oblastem s nízkou nebo prakticky žádnou seizmicitou. Do této kategorie patří pochopitelně i území České republiky, proto se EC8 uplatní při projektování běžných staveb zcela výjimečně a pro stavby mimořádného významu (např. jaderné elektrárny) je třeba volit postupy, které přesahují rámec EC8.

To by ovšem nemělo znamenat, že znalost EC8 je pro české statiky a projektanty

zbytečná. Jeho znalost se jistě uplatní při zpracování zakázek pro evropskou cizinu, zejména se nabízí nám historicky a jazykové blízké země Balkánského poloostrova. Mnoho firem (projekčních, konzultantských, dodavatelských) má také jistě zájem získávat zakázky na světovém trhu. Bez znalosti navrhování konstrukcí na účinky zemětřesení se jen těžko lze uplatnit např. v Číně, Taiwanu, Indonésii, Íránu, v oblasti Kavkazu apod. I proto byl od počátku kladem důraz na to, aby EC8 byl svou úrovní plně srovnatelný s normami zemí, které mají se seizmickými předpisy dlouholeté zkušenosti, jako např. USA, Nový Zéland nebo Japonsko.

2. Základní požadavky EC 8

EC8 se používá pro návrh a realizaci budov a inženýrských konstrukcí v seizmických oblastech. Hlavním účelem je zajistit, aby v případě zemětřesení:

- lidské životy byly uchráněny,
- škody byly pouze omezené,

konstrukce důležité z hlediska ochrany obyvatelstva zůstaly provozuschopné.

Ustanovení EC8 nelze použít pro konstrukce mimořádného významu, jako jsou jaderné elektrárny, těžební plošiny, velké přehrady apod.

Konstrukce v seizmických oblastech musí být navrženy a provedeny tak, aby splňovaly tyto požadavky, každý s určitým stupněm spolehlivosti:

- požadavek vyloučení kolapsu – konstrukce musí být navržena a provedena tak, aby vzdorovala návrhovému seizmickému zatížení bez lokálního nebo globálního kolapsu, se zachováním integrity a zbytkové únosnosti konstrukce po seizmické události (mezní stav únosnosti),
- požadavek omezení poškození – konstrukce musí být navržena a provedena tak, aby vzdorovala zatížení s vyšší pravděpodobností výskytu než návrhové seizmické zatížení s vyloučením takových poškození a s tím spojených omezení použití, kdy finanční důsledky by byly nepřiměřeně vysoké ve srovnání s cenou konstrukce (mezní stav použitelnosti).

Referenční seizmické zatížení je definováno jako návrhové seizmické zatížení dané pro skalní podloží a konstrukce běžného významu. Jedná se jediný parametr – špičkové zrychlení skalního podloží a_{gR} (tzv. *peak ground acceleration* PGA) – definovaný národními úřady pro každou seizmickou oblast. Referenční špičkové zrychlení a_{gR} odpovídá pravděpodobnosti výskytu 10% během 50 let, tj. době návratu 475 let, pro stavby běžného významu.

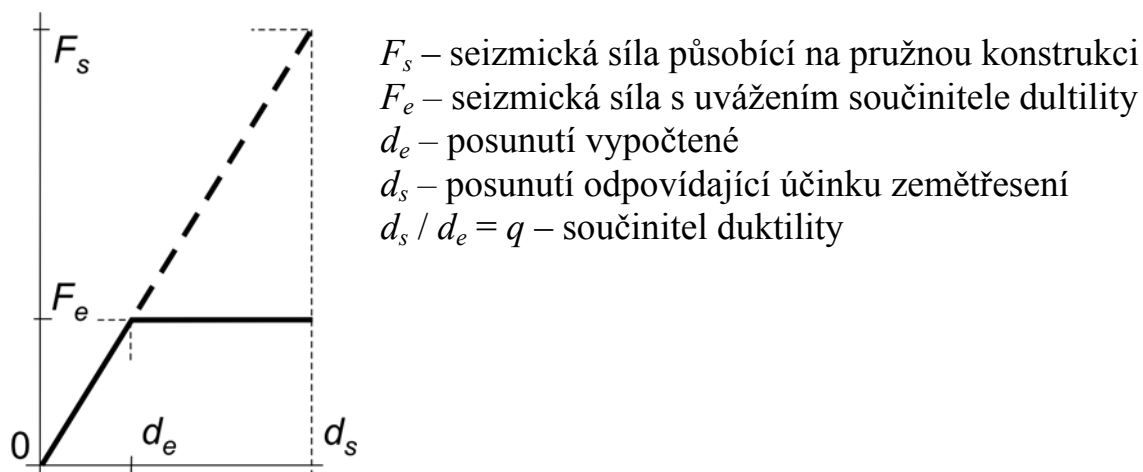
Pro některé významné konstrukce je nutné zvýšit návrhové zatížení pomocí tzv. součinitele významu γ_I . Výsledné návrhové seizmické zatížení a_g je pak dáno

jako součin součinitele významu a špičkového zrychlení skalního podloží ($a_g = \gamma_I \cdot a_{gR}$). Pro konstrukce běžného významu je součinitel významu roven jedné. Pro budovy se zavádí 4 třídy podle jejich významu a doporučují se hodnoty součinitele významu v rozmezí 0.8 (budovy malého významu) až 1.4 (budovy, jejichž integrita během zemětřesení životně důležitá z hlediska ochrany obyvatel).

Zatížení spojené s požadavkem omezení poškození bude mít vyšší pravděpodobnost výskytu než návrhové seizmické zatížení, bude se tedy jednat o nižší velikost zatížení. Předpokládá se pravděpodobnost výskytu 10% během 10 let, tj. doba návratu 95 let. Proto se zavádí redukční součinitel ν , který se doporučuje 0.5 pro budovy třídy I a II, pro budovy třídy III a IV se doporučuje hodnota 0.4.

3. Duktilita

Zatížení zemětřesení bude prakticky vždy patřit k zatížením mimořádným, takže by bylo nevhodné trvat na udržení konstrukce v pružném stavu a nevyužít jejich plastických rezerv. Tím, že dochází v některých místech konstrukce k plastickým přetvořením, pohlcuje se účinkem hystereze pohybová energie vnášená do konstrukce z pohybujícího se podloží a její pohyb se tlumí. Lze říci, že již po mnoho let je dostatečná tažnost – duktilita, důsledně dodržovaná v celé konstrukci (včetně spojů a detailů), považována za hlavní podmínku seizmické odolnosti staveb; teprve od nedávné doby se pro získání seizmické odolnosti uplatňuje další metoda – seizmická izolace budov.



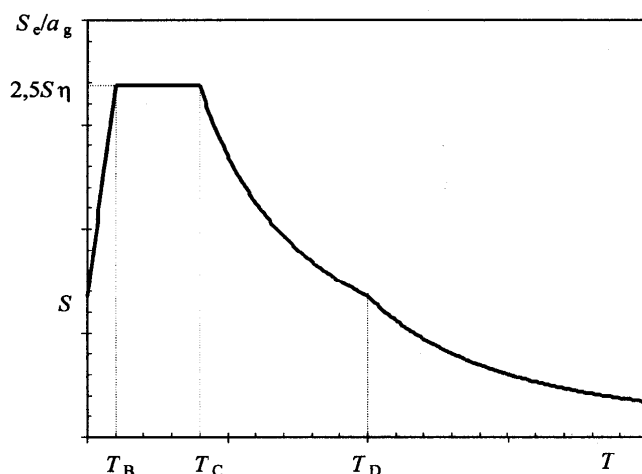
Obr. 1 Pracovní diagram pružně-plastické konstrukce:
(— stav skutečný --- stav výpočtem předpokládaný)

Pro řešení pružně-plastického chování byla před časem vyslovena (a od té doby i celkem slušně experimentálně ověřena pro různé typy reálných i umělých

zemětřesení) hypotéza, že maximální posunutí, které dosáhne konstrukce během zemětřesení, je přibližně stejné ať jde o konstrukci chovající se pružně anebo pružně-plasticky. Tato hypotéza, současně s přijetím předpokladu ideálně pružně-plastické konstrukce, vede k tomu, že konstrukce může být při výpočtu považována za pružnou bez ohledu na to, jaká napětí v ní vycházejí. Musí však být schopna plastického přetváření a při něm vydržet deformaci, jaká vyšla pro konstrukci pružnou. Prakticky to zároveň znamená (viz obr. 1), že, pokud jde o napjatost, je možno počítat konstrukci jako pružnou a její zatížení redukovat poměrem možného plastického posunutí a posunutí příslušné mezi pružnosti, tj. počítat posunutí d_e odpovídající zatížení $F_e = F_s / q$. Pokud ovšem je třeba znát skutečné posunutí konstrukce při zemětřesení d_s , pak je nutné posunutí d_e (získané elastickým řešením na zatížení F_e) zvětšit poměrem $q = d_s / d_e$. Tento poměr možného (požadovaného) plastického posunutí a posunutí na mezi pružnosti vyjadřuje duktilitu konstrukce a do výpočtu se zavádí jako součinitel duktility q . Jedná se tedy o parametr stanovený normou za předpokladu, že bude proveden průkaz dostatečné duktility

4. Metody výpočtu seizmické odezvy konstrukcí

Pro stanovení dynamického účinku seizmického otřesu na konstrukci je nutné kromě návrhového zrychlení a_g zohlednit též frekvenční složení daného otřesu – to se do výpočtu zavádí pomocí tzv. spektra odezvy (*response spectrum*). Spektrum odezvy udává závislost maximálního účinku otřesu (maximální zrychlení, rychlost nebo posunutí) na vlastní periodě a útlumu soustavy s jedním stupněm volnosti. Pro účely návrhu konstrukcí je obvyklé spočítat spektrum odezvy pro několik různých (očekávaných) časových průběhů zemětřesení (akcelerogramů), provést obalovou křivku a její vyhlazení a získat tak návrhové spektrum. Návrhové spektrum S_e pro je uváděno jako graf závislosti zrychlení na vlastní periodě pro různé typy podloží (charakterizované parametrem S), tvar spektra je uveden na obr. 2. Pro nejjednodušší model konstrukce, tj. pro soustavu s jedním stupněm volnosti, lze tak ze spektra odezvy pro danou vlastní periodu a útlum soustavy přímo odečíst velikost maximálního zrychlení a stanovit maximální hodnotu očekávané seizmické síly $F = m \cdot S_e$, kde m je hmotnost soustavy. To platí pro elastický výpočet – využijeme-li však duktilitu konstrukce, je nutné tuto sílu redukovat součinitelem duktility q .



Obr. 2 Návrhové spektrum EC8 pro elastický výpočet

Odezvu na seizmické zatížení je možné řešit několika způsoby. EC8 připouští tyto základní metody výpočtu:

- lineární analýza využívající pouze první tvar kmitání konstrukce (ekvivalentní statická metoda příčných sil, *lateral force method*),
- lineární analýza používající více vlastních tvarů (*multi-modal response analysis*)
- nelineární statická analýza (metoda přetěžování, *pushover method*),
- nelineární dynamická analýza (dynamická odezva na akcelerogram, *dynamic time-history analysis*).

Pravděpodobně nejrozšířenější je použití lineárních metod. Pro složitější soustavy (např. vysoké budovy) je často nezbytné použít při analýze více vlastních tvarů a řešení provést rozkladem do několika nejnižších tvarů. EC8 udává kritéria pro určení počtu vlastních tvarů, které je třeba vzít v úvahu a uvádí postupy, jak získat výslednou odezvu.

5. Závěr

Zemětřesení představuje pro stavební konstrukce opravdu nepřírozený stav – místo převážně statickému svislému zatížení je konstrukce nucena vzdorovat zatížení vodorovnému, navíc rychle vzrůstajícímu a opakovanému, střídajícímu tah-tlak. Pojetí návrhu seizmicky odolných konstrukcí založené především na koncepci pohlcování energie vnášené z podloží do konstrukce, staví projektanta před málo obvyklé úkoly. Využívání plastické rezervy, obsažené v součiniteli působení, vyžaduje, aby projektant poskytl konstrukci dostatek disipativních zón, kde bude možné tyto plastické deformace realizovat. Současně to vyžaduje

vyhýbat se materiálům a detailům náchylným k porušení křehkým lomem, analyzovat možné působení konstrukce při přetížení, určit pořadí vzniku plastických kloubů a mechanismus celkového kolapsu konstrukce včetně jejích nenosných částí, které však mohou ohrozit životy lidí.

Naši inženýři se, pravda, k těmto problémům dostanou málokdy, pokud budou projektovat pouze stavby na našem území. Jinak je však zemětřesné inženýrství obor, který je a ještě dlouho bude v mnoha zemích vysoce aktuální pro plánování, výstavbu i výzkum, především však pro život milionů lidí v málo rozvinutých zemích, kteří jsou stále ještě, přes všechn technický pokrok v zemích rozvinutých, zemětřesením ohroženi. Na druhé straně však kvalifikovaný návrh konstrukcí odolných proti zemětřesení v oblastech se silnou seismicitou je úkol proveditelný. Dokazují to četné moderní konstrukce mimořádných rozměrů (výškové stavby, mosty dlouhých rozpětí, jaderné elektrárny apod.) v Japonsku, USA i v jižní Evropě, kde problémem již nebývá bezpečnost konstrukce, ale spíše padající nábytek a jiné vnitřní vybavení.

Poděkování

Příspěvek byl vypracován s podporou VZ 04 CEZ MSM 6840770005 „Udržitelná výstavba“. Autoři též děkují za podporu Grantové agentuře ČR (projekt č. 103/04/1280 „Spolehlivost návrhu železobetonových ráků na účinky zemětřesení“).

Použitá literatura

- EUROCODE 8, 2003: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN Brussels.
- FARDIS, M.N., 2004: Context of EC8 and design actions. In: Practical seismic design, principles and application to EC8, London.
- FISCHER, O. - MÁCA, J, 2004.: Železobetonové konstrukce při seizmickém zatížení podle Eurokodu 8. In: Betonové konstrukce v extrémních podmínkách, s. 123-130, Praha.