

COMPARISON OF NUCLEAR AND CONVENTIONAL SEISMIC STANDARDS

L. Pečínka**

Summary: *There is a perception mainly in some European countries that nuclear seismic hazards determination and design standards may be lagging behind developments in similar standards for conventional facilities.*

Adequate answer to such perception, need the examination of the following aspects and their significance on the seismic assessment of structures and components:

- i) The safety philosophy behind the seismic nuclear and conventional standards,*
- ii) the differences in approach regarding the seismic hazard definition,*
- iii) the differences in approach regarding the design and the methods of analysis*

These topics and the conclusions of the study are reported here unter.

Úvod

V některých evropských zemích je rozšířen názor, že určení seismického rizika (hazardu) a projektové normy v jaderném průmyslu zaostávají za obdobnými přístupy a normami u konvenčních staveb.

S tímto lze polemizovat, ale pouze na základě rozboru následujících přístupů a jejich hodnocení z hlediska bezpečnosti obyvatelstva:

- i) jaké principy ovlivňuje tvorbu jaderných a konvenčních staveb
- ii) rozdíly v definování seismického rizika
- iii) rozdíly ve výpočtových metodách používaných při projektování

1. Stanovené bezpečnostní cíle jaderných a konvenčních norem

- 1.1 Konvenční seismické normy obsahují minimální požadavky týkající se bezpečnosti z hlediska větších poškození stavby a ztráty života, tj. nelimitují poškození na určitou

* Ing. Ladislav Pečínka, CSc., Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., Husinec-Řež, čp. 130, 250 68 Řež, tel.: 266 172 610, fax: 220 940 519, e-mail: pel@ujv.cz

přijatelnou úroveň či na udržení požadovaných funkcí. Toto je jasné deklarováno v UBC Code [1] a nová verze IBC Code [2] v tomto smyslu pokračuje. Eurocode 8 [3] představuje značný pokrok, neboť jasné postuluje: Ochrana života obyvatelstva a omezení škod.

Konvenční seismické normy se obvykle týkají budov a jistých staveb, např. mosty, nádrže, komíny apod. Pro další komponenty některé normy požadavky buď neuvádí, nebo je omezují pouze na definování zatížení, přičemž funkční aspekty nejsou specifikovány.

- 1.2 Jaderné seismické normy požadují, aby stavby, systémy a komponenty důležité pro bezpečnost odolávaly účinkům zemětřesení, tj. jak integrita, tak i funkční schopnost musí být zajištěny.

Přístup všech jaderně vyspělých států je téměř shodný, existují ale určité nuance. Appendix S to Part 50 of the US Code of Federal Regulation [4] definuje dvě úrovně zemětřesení – Provozní zemětřesení (PZ) – Operating Basis Earthquake (OBE) a Maximální výpočtové zemětřesení (MVZ) – Safe Shutdown Earthquake (SSE) s rozdílnými bezpečnostními požadavky, které jsou definovány takto:

- i) maximální výpočtové zemětřesení je takový vibrační pohyb podloží při kterém všechny stavby, systémy a komponenty, důležité pro bezpečnost, musí být navrženy tak, aby byly funkceschopné,
- ii) provozní zemětřesení je takový vibrační pohyb podloží při kterém všechna zařízení JE nutná pro další pokračování provozu musí zůstat funkceschopná bez zvýšení rizika pro zdraví a bezpečnost obyvatelstva.

Většina evropských a asijských zemí svoji legislativu tomuto přizpůsobila.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) zavádí dvě úrovně – SL2 a SL1, které jsou srovnatelné s MVZ/SSE a PZ/OBE [5].

Francouzská legislativa zavádí rovněž dvě úrovně se specifickými bezpečnostními požadavky:

- i) SMS – Seisme Majore de Sécurité [6], které je srovnatelné s MVZ/SSE
- ii) $\frac{1}{2}$ SDD (Demi Seisme de Dimensionnement), které je srovnatelné s PZ/OBE.

Obdobný přístup zvolilo Japonsko, které rovněž zavedlo dvě úrovně S_1 a S_2 , přičemž:

- i) S_1 je maximální návrhové zemětřesení určené na základě historických záznamů a existujících aktivních zlomů
- ii) S_2 je extrémní návrhové zemětřesení převyšující maximální návrhové zemětřesení a je stanoveno z hlediska seismologického.

Ve srovnání s konvenčními normami je tedy zřejmé, že jaderné normy mají podstatně větší rozsah požadavků, tj. zahrnují budovy, strojní komponenty a elektromechanická aktivní nebo pasivní zařízení. Ty části jaderné elektrárny, které nejsou tzv. bezpečnostně významné, jsou mimo působnost jaderných norem.

2. Definice seismického hazardu

2.1 Pravděpodobnost výskytu – doba opakování

Obecně řečeno, seismické navrhování staveb a zařízení je založeno na stanovení pravděpodobnosti překročení / rok (doby návratu) určité úrovně zemětřesení. Zde je ovšem největší rozdíl v definování doby návratu u konvenčních a jaderných norem.

V Eurocode 8 je tato doba založena na pravděpodobnosti překročení 10% za 50 let, což odpovídá 475 letům doby návratu. V oblastech s mírnou seismicitou toto odpovídá špičkové hodnotě zrychlení provozního zemětřesení. Volba jiné doby návratu je zajištěna součinitelem γ_1 , ale není definována příslušná metodika.

V jaderných seismických normách je doba opakování maximálního výpočtového zemětřesení založena na pravděpodobnosti překročení od 0,5% do 0,05% za 50 let, což odpovídá 10 000 až 100 000 letům doby návratu.

Doby návratu zemětřesení S_1 a S_2 jsou v japonské normě JEAG definovány nepřímou a bere se zřetel na doby návratu u relevantních aktivních zlomů tak, jak se vyskytly za 10 000 let v případě S_1 a 50 000 let v případě S_2 .

2.2 Metodika definování seismického hazardu

2.2.1 Konvenční normy

U konvenčních norem je seismický hazard získán pomocí klasického pravděpodobnostního přístupu soustředěného na definování zprůměrované hodnoty zrychlení (obvykle špičková hodnota zrychlení podloží) použité pro konstrukci spektra odezvy volného (nezastavěného) povrchu. Tvar těchto spekter je volen na základě statistické analýzy akcelerogramů a modifikován na lokální kategorii podloží. Doporučení lze nalézt v normách IBC 2000 nebo Eurocode 8. V Eurocode 8 jsou pak tato spektra přepočtena na tzv. hodnotu EPA (effective peak acceleration), která je definována jako 0.75 PGA (peak ground acceleration).

2.2.2 Jaderné normy

Obecně řečeno, jaderné normy formulují ve srovnání s konvenčními podstatně detailnější postupy. V USA a v některých evropských státech se seismický hazard stanovuje deterministicky určením nejhoršího scénáře z hlediska definování MVZ/SSE.

V některých zemích byl již dříve vyvinut nový pravděpodobnostní přístup (Probabilistic Seismic Hazard Assessment – PSHA), aby se získala spektra se stejnou pravděpodobností a s cílem ověřit a garantovat stupeň konzervatismu při definování MVZ/SSE.

Pro stanovení spekter odezvy odpovídajících MVZ/SSE jsou přípustné dva postupy:

- buď použití standardních spekter odezvy na základě US NRC 1.60 [8] (v USA a některých evropských a asijských státech), nebo tzv. „Oshaki“ spekter (nyní se přehodnocují)
- vygenerování místně specifických spekter odezvy

3. Rozdíly v projektování

3.1 Budovy a konstrukce

3.1.1. Jaderná zařízení

Seismický návrh z hlediska PZ/OBE a MVZ/SSE je založen na metodách dynamické analýzy použitím modálních a spektrálních postupů MKP nebo na přímé integraci pohybové rovnice, přičemž se předpokládá lineární chování materiálu, tj. pohybujeme se v pružné oblasti. Rozptyl energie přechodem do plasticity není dovolen. Uvažují se hodnoty příslušné výskytu MVZ/SSE tak, jak je to definováno v podkapitole 1.2. Akceptovatelná je rovněž statická ekvivalentní metoda, ale jen tehdy, pokud chování konstrukce lze popsat systémem s jedním stupněm volnosti. Obecně lze tyto postupy pojmenovat „silově“ orientované. Provádí se rovněž citlivostní analýzy zahrnující buzení, rozšíření spekter odezvy, parametry podloží a proměnné vlastnosti betonu.

3.1.2. Konvenční zařízení

Normy a směrnice jsou rovněž „silově“ orientované, ale principiálně odlišným znakem je, že připouští dissipaci energie v plastické oblasti. Výpočty se provádějí elasticky na základě záměrně uměle sníženého seismického zatížení, čehož se dosáhne zavedením tzv. „ductility“ či součinitele „chování“ (behaviour). Je zřejmé, že toto je v souladu se stanoveným bezpečnostním cílem dle podkapitoly 1.1, kde se požaduje vyloučení kolapsu a nikoliv zajištění integrity anebo provozuschopnosti staveb a komponent. Dovedeno do konce to znamená, že při stejném spektru odezvy bude seismické zatížení větší u jaderné konstrukce, než u téže konvenční.

Zdrojem potenciálních nepřesností je, že použití součinitele „chování“ vyžaduje úplné ověření lokální i globální dissipativní kapacity konstrukce, což nelze vždy korektně ověřit. Dost často proto bývá jeho kvantifikace spíše intuitivní, než exaktní, jak ostatně potvrzují výsledky revizí konstrukcí, které byly zasaženy zemětřesením. Byla zjištěna poškození, např. smyk v kotevních šroubech, vytržení krátkých kotevních tyčí (malá délka z hlediska prodloužení), mělké adhezivní nebo expansní kotvící šrouby atd., což lze považovat za závažné nedostatky seismického návrhu.

U současných návrhů konvenčních norem lze ale pozorovat, že součinitel „chování“ je již exaktněji definován. Např. v Eurocode 8 je jeho hodnota pro velké nádrže kotvené na základ rovna 1 a plastické deformace nejsou dovoleny, zatímco v normách API nebo AWWA je pořád rovna 3 nebo 4.

3.2 Komponenty

3.2.1. Jaderné normy

Aby se dodržel přísný požadavek na zajištění dalšího provozu při nebo při a po doznění zemětřesení, musí veškeré bezpečnostně významné komponenty být kvalifikovány na seismickou událost. Pro elektrozařízení je toto publikováno v normě IEEE 344, kde jsou doporučeny vhodné postupy analytické, experimentální nebo kombinace obou. Pro mechanické aktivní komponenty jako jsou ventily nebo čerpadla lze použít předpis ASME QME. Lze konstatovat, že analýzy se používají tehdy, jestliže seismická kvalifikace musí splnit požadavky

na integritu konstrukce (např. potrubí). U aktivních a složitých komponent nebo jejich částí je vyžadována kvalifikace na vibrostendech.

3.2.2. Konvenční normy

Obecně řečeno konvenční národní normy neobsahují povinné metodiky nebo požadavky na seismické hodnocení komponent. Výjimku tvoří IBC 2000, ale metodika a kritéria se týkají pouze ocenění zrychlení a v důsledku toho působících sil, ale ty jsou současně zmenšeny zavedením součinitele „chování“. To ale negarantuje funkceschopnost nebo integritu komponent předpokládajíc, že plastické deformace jsou možné.

3.3 Příklad

Důsledky rozdílných přístupů v projektování budou dokladovány na následujícím jednoduchém příkladu vztaženém na legislativu ČR:

- zvolíme dvě fiktivní budovy reprezentované systémem s jedním stupněm volnosti
- délka konsoly je 12 m, připevněná hmota $m=10^3$ kg
- vlastní frekvence jsou 1.5 (budova 1) a 7 Hz (budova 2)
- předpokládáme skalní podloží
- součinitel „chování“ se neuvažuje (není definován v ČSN 70 0036).

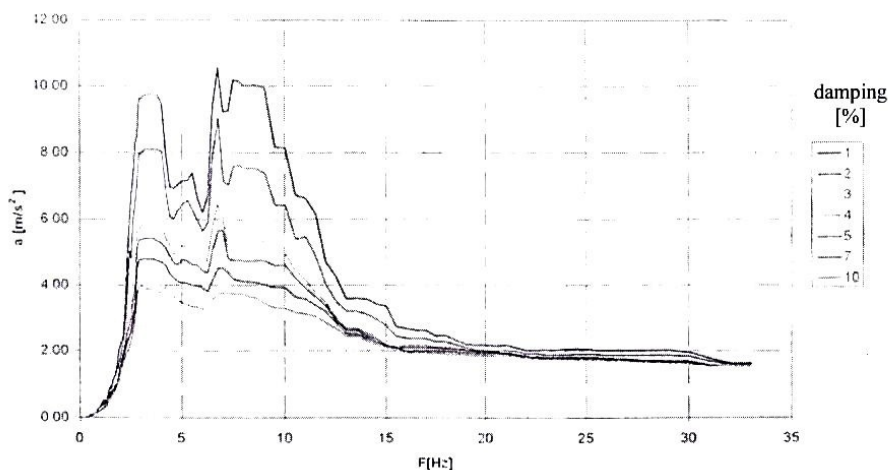
Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách T1 a T2.

T1: Návrh dle ČSN 70 0036, špičková hodnota zrychlení podloží 0.1g

	uvažovaná frekvence [Hz]	koeficient			tlumení Ψ	výsledný seismický koef. K	seismická síla [kN]
		K_z	δ	η_k			
budova 1	1.5	0.03	1.125	1	1	0.03375	337.5
budova 2	7	0.03	2.25	1	1	0.0375	675

T2: Návrh dle metodiky pro JE Temelín, špičková hodnota zrychlení podloží v horizontálním směru 0.1g

	uvažovaná frekvence [Hz]	spektrální zrychlení dle obr. 1	seismická síla [kN]
budova 1	1.5	0.5	500
budova 2	7	4.2	4200



Obr. 1: horizontální spektrum odezvy JE Temelín, podlaží +12 m

Je zřejmé, že návrh dle ČSN 70 0036 dává nižší hodnoty zatížení.

Obdobné výsledky lze doložit i na příkladu, který prezentovala Jižní Korea. Opět zvolili dvě fiktivní budovy:

- relativně tuhá stavba, kde příčné síly jsou zadržovány smykovými stěnami
- rámová betonová budova s vnitřními zděnými stěnami

Tabulka T3: návrh dle Korean Building Code-Standard, podlaží třídy 3

	uvažovaná frekvence [Hz]	modifikační koeficient odezvy (R)	spektrální zrychlení (g)	elasticky vypočtený smyk v základu (bez aplikace q faktoru)	návrhový smyk v základu
budova 1	1.5	4.5	0.329	0.329 W	0.073 W
budova 2	7	3	0.549	0.549 W	0.183 W

Tabulka T4: aplikace RG 1.60, tlumení 7%

	uvažovaná frekvence [Hz]	spektrální zrychlení [g]	návrhový smyk v základu pro MVZ/SSE
budova 1	1.5	0.326	0.326 W
budova 2	7	0.471	0.471 W

4. Perspektivy

4.1 Konvenční zařízení

Jak již bylo konstatováno, současné normy se snaží mnohem exaktněji definovat součinitel „chování“. Lze pozorovat i nové přístupy. V říjnu 1997 Federal Emergency

Management Agency (FEMA) ve své publikaci 273 zavedla novou metodiku, založenou na určení posuvů (Displacement Based Method), nikoliv sil. V metodách nazvaných Nonlinear Static Procedure (NSP) a Nonlinear Dynamic Procedure (NDP) je modelu s uvážením plastického chování zadán cílový posuv a pak jsou určeny výsledné deformace a síly. Zadaný posuv představuje výslednou deformaci, jíž má být dosaženo při návrhovém zemětřesení. Skutečnost, že se modeluje reálné nelineární chování konstrukce má za následek mnohem exaktnější informace o nepružné deformační kapacitě. Nejistoty dané zavedením faktoru „chování“ jsou takto redukovány a jak lokální, tak i celková odezva konstrukce je přesněji oceněna.

4.2 Jaderné normy

Vzhledem k tomu, že jaderná energetika je stále založena na dynamických analýzách a požadavku odezvy v elastické oblasti, není v současnosti důvod měnit existující legislativu.

V předpisech nižší úrovně jsou ale na základě zkušeností z nedávných zemětřesení a s nimi spojených výzkumů prováděny změny, týkající se zejména definování MVZ/SSE na volném povrchu. V komunitě US NRC je velká diskuse, zda akceptovat metodiku dle FEMA 273 a jestliže ano, pak jak specifikovat kritéria (např. interakce budov kategorií I a II). Faktem ale je, že US DoE (ministerstvo energetiky) ji používá, ale ono nespadá pod jurisdikci US NRC.

Závěry

Požadavky formulované v jaderných normách jsou mnohem více konzervativní a spolehlivější (ve smyslu definice spolehlivosti), než srovnatelné konvenční normy, i když obojí jsou založené na výpočtu zatěžujících sil. Argumenty proto lze formulovat takto:

- bezpečnostním cílem je zachování integrity a funkceschopnosti bezpečnostně významných staveb, konstrukcí a zařízení, zatímco konvenční normy požadují pouze omezení škod nebo vyloučení kolapsu
- odezva všech bezpečnostně významných konstrukcí musí být elastická, zatímco konvenční normy připouštějí zplastizování
- analýza seismického hazardu a definice MVZ/SSE má mnohem přesnější pravidla ve srovnání s konvenční normou. Důsledkem toho např. je, že téže lokalitě pak přísluší dvě rozdílná spektra odezvy
- jaderné normy definují dvě úrovně zemětřesení (PZ/OBE a MVZ/SSE), zatímco konvenční normy pouze jednu, přičemž doba návratu MVZ/SSE je o řád vyšší ve srovnání s konvenčním přístupem. Jaderné elektrárny jsou tudíž dimenzovány na vyšší úroveň seismicity
- interakce stavba-podloží a citlivostní studie parametrů podloží jsou v jaderných normách ošetřeny důkladněji.

Rozhodnutí, zda metodika dle FEMA 273 bude v jaderných normách akceptována či nikoliv má spíše střednědobý charakter. US NRC již zadalo několik srovnávacích výpočtů, avšak jejich výsledky byly spíše indiferentní. Nesporné ale je, že např. z hlediska stanovení interakcí budov by to byl přínos.

Na základě předchozího rozboru lze oprávněně tvrdit, že domněnky týkající se zaostávání jaderných seismických norem za konvenčními jsou zcela scestné a že opak je pravdou.

Literatura

- [1] International Building Code, publikace International Code Council, 4051 West Flossmoor Road, Country Club Hills, Illinois, USA 60478-5795
- [2] Uniform Building Code, publikace International Conference of Building Officials, 5360 South
- [3] Eurocode 8 – Design Provision for Earthquake Resistance of Structures
- [4] US NRC 10 CFR Part 50 – domestic Licensing of Production and Utilisation Facilities
- [5] IAEA – Safety Guide No. NS-G-3.3: Evaluation of Seismic Hazards for NPP's
- [6] Règle Fundamentale de Sureté RFS 2001-01
- [7] US NRC, Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of NPP's, Revision 1, 1973