

THE USE OF DUCTILITY RESERVES OF STRUCTURE BEARING CAPACITY IN SEISMIC ANALYSIS

D. Makovička^{*}, D. Makovička^{**}

Summary: *The new seismic standards permit the analysis of structure in the elastic-plastic region of its material behaviour. The plastic reserves of structural elements may be implemented in the linear elastic analysis by the ductility factor. This implementation is given by reduction of seismicity load or by reduction of individual components of structural response. The second case of ductility implementation is more exact approach. The purpose of the paper is on the example of RC cooling towers to show the importance of the realistic using of ductility factor.*

1. Úvod

Seismické zatížení se na konstrukci projevuje dynamickými účinky, tedy zakmitáním na nejnižších vlastních frekvencích přibližně v pásmu do 33 Hz. Dynamicky zatížené konstrukce je vhodné navrhnout tak, aby byly schopné přenést zatížení i za mezí pružnosti materiálu a aby zároveň při jejich plastickém přetváření nevznikaly křehké poruchy, vedoucí k náhlým lomům konstrukce. Jestliže je konstrukce navržena tak, aby bezpečně přenesla deformace v pružné i plastické oblasti, s vytvořením plastických kloubů ale bez křehkých poruch, pak takovéto chování konstrukce označujeme jako duktilitní. Místa na konstrukci, ve kterých mohou vzniknout plastické klouby, označujeme jako disipativní zóny (oblasti).

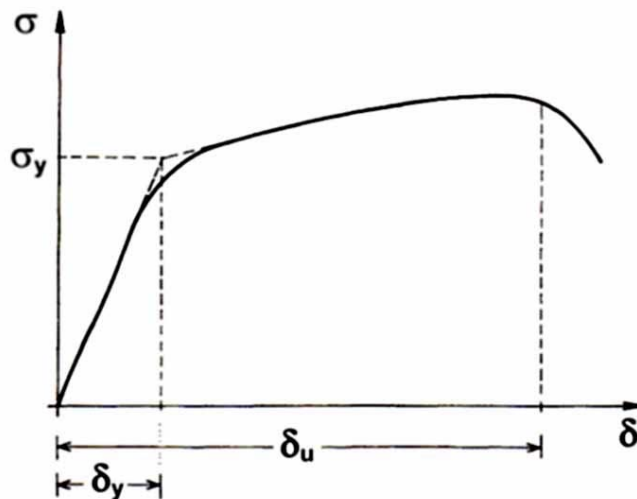
V normách pro navrhování jsou duktilitní vlastnosti konstrukce stanoveny součinitelem duktility μ . V Eurocodu, případně v některých dalších národních normách, je tento součinitel také nazýván součinitelem chování konstrukce q . Součinitel je definován jako poměr (obr.1):

$$\mu = \delta_u / \delta_y \quad (1)$$

kde δ_u je mezní přípustná deformace konstrukce při jejím porušení a δ_y je deformace konstrukce na mezi kluzu.

^{*} Doc. Ing. Daniel Makovička, DrSc.: České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav; Šolínova 7, 166 08 Praha 6; tel.: +420 224 353 856, fax: +420 224 353 511; e-mail: makovic@klok.cvut.cz

^{**} Ing. Daniel Makovička, Statika a dynamika konstrukcí; Šultysova 170, 284 01 Kutná Hora; tel.: +420 608 029 251; e-mail: d.makovicka@worldonline.cz



Obr.1 Definice duktility v závislosti na pracovním diagramu napětí / přetvoření

Mezní deformace δ_u je vzhledem k bezpečnosti navrhovaných konstrukcí zpravidla definována nikoliv jako deformace na mezi pevnosti, ale deformace, při které je napětí v materiálu konstrukce nižší o 15% ve srovnání s mezí pevnosti. Tato přípustná mezní deformace je tedy závislá jak na požadované bezpečnosti konstrukce podle její významnosti, tak také na způsobu namáhání konstrukce, na vlastnostech materiálu a prostorovém uspořádání konstrukce. V případě železobetonu záleží rovněž na způsobu vyztužení ohybovou a smykovou výztuží, pevnostní třídě betonu apod. Čím větší je schopnost přetváření konstrukce za mezí pružnosti bez vzniku křehkého porušení, tím větší je bezpečnost přenesení seismického zatížení. Normy při seismickém zatížení předpokládají, že se v konstrukci vytvoří plastické klouby, které konstrukci umožní předem definovanou mezní deformaci.

Velký součinitel duktility lze očekávat u konstrukcí, jejichž dominantní namáhání je způsobeno ohybem; např. při vodorovném zatížení sloupů rámových konstrukcí nebo při svislém zatížení stropních konstrukcí. Při tahových, tlakových a smykových namáháních zpravidla nedochází k vytvoření plastického kloubu; při zplastizování průřezu dojde rychle k jeho přetržení, vybočení nebo usmyknutí, bez významnějšího nárůstu přetvoření konstrukce od pružné do plastické fáze přetvoření ukončené porušením konstrukce. Proto duktilita takovýchto typů konstrukcí je velmi nízká, typickým představitelem jsou sloupy s dominantním osovým zatížením.

Duktilitní vlastnosti stejné konstrukce jsou tedy odlišné při namáhání konstrukce ohybem než při namáhání tahem, tlakem nebo smykem. Jestliže lze předpokládat, že konstrukce bude především namáhána ohybem, pak bude duktilita takové konstrukce značně větší než při pouze osově zatížených sloupech, jejichž duktilita je malá ($\mu \approx 1$).

2. Normový přístup k zavedení duktility

Přístup jednotlivých norem k řešení duktility se různí v pojetí seismického zatížení a hodnocení odezvy konstrukce. Původní a v ČR dosud platná ČSN 73 0036 (1973)

předpokládá navrhování konstrukcí pouze v pružné oblasti působení zatížení a tedy duktilitu do výpočtu konstrukce nezavádí.

Eurocode 8 (2003) ve svém posledním znění z prosince 2003 připouští navrhovat konstrukce s uvažováním jejich duktility. Pro vybrané typy konstrukce jsou součinitelé chování konstrukce q , což je ekvivalent pro součinitel duktility uvedeny v tab.1. Podrobné znění normy Eurocode 8 (2003) pak pro jednotlivé konstrukce, s přihlédnutím k “materiálovým normám” Eurocode 2 (2004), uvádí požadavky na provedení konstrukce, např. prostorové uspořádání konstrukce, typ nosného schématu, provedení vyztužení ztužujících prvků, minimální vyztužení ŽB průřezů, skladbu ohybové a smykové výztuže. Podle těchto podmínek rozdělují konstrukce do tříd s vysokou (DCH) či střední (DCM) nebo nízkou (DCL) duktilitou, případně neduktilitní konstrukce.

Tab. 1 Součinitel chování konstrukce q při horizontálním seismickém zatížení podle čl. 5.2.2.2 v Eurocode 8 (2003)

Typ konstrukce	DCM	DCH
Rámové a kombinované systémy	$3,0 \cdot \alpha_u / \alpha_1$	$4,5 \cdot \alpha_u / \alpha_1$
Stěnové systémy	3,0	$4,0 \cdot \alpha_u / \alpha_1$
Torzně poddajné systémy	2,0	3,0
Poměr α_u / α_1 se stanoví: – pro rámové soustavy podle počtu podlaží 1,1~1,3 – pro stěnové soustavy podle způsobu zpřažení 1,0~1,2 – pro nesymetrické konstrukce v půdoryse 1,0 – při provedení stabilitního výpočtu maximálně 1,5		

V ČR platný národní aplikační dokument ČSN P ENV 1998-1-1 (1998) rozděluje konstrukce podle duktilitních vlastností pouze do tří tříd (viz tab. 2), bez podrobnějšího upřesnění konstrukčního a materiálového zajištění duktilitních vlastností konstrukce. Metodika použitá v Eurocode zavádí duktilitní chování konstrukce tím, že součinitelem duktility μ , respektive součinitelem chování konstrukce q , se redukuje zatížení konstrukce, nikoliv až její odezva. Jestliže tedy podle národního aplikačního dokumentu ČSN P ENV 1998-1-1 (1998) můžeme redukovat seismické zatížení až na čtvrtinu ($q = 4$), pak to je pro snížení významnosti seismického zatížení ve srovnání s ostatními typy zatížení nezanedbatelná skutečnost.

Tab. 2 Součinitel chování konstrukce q podle ČSN P ENV 1998-1-1 (1998)

Charakter objektu	q
Objekty se zvláštním požadavkem na lineárně pružné chování bez	1,0
Běžné objekty - pokud zadání projektu nestanoví jinak	2,0
Objekty jejichž konstrukce je zvlášť upravena pro plastické chování	4,0 (i více)

Využití této metodiky může být na straně nebezpečné u konstrukcí nebo jejich částí, kde převládá osově nebo smykové namáhání ve srovnání s ohybovým. U běžných budov, kde převládá výška objektu proti půdorysným rozměrům, je horizontální seismické zatížení zpravidla dominantní ve srovnání s vertikálním, a tedy rozhodující způsob zatížení je ohyb konstrukce jako celku. Potom je i filozofie redukce zatížení, místo odezvy konstrukce, součinitelem duktility méně nebezpečná.

Tab. 3 Doporučené hodnoty součinitelů duktility μ pro vybrané typy konstrukcí a jejich prvků pro jadernou energetiku podle Kennedy R. P. et al. (1990)

Popis konstrukce	Nebezpečnost konstrukce	
	HH	MH
Konstrukce s možností náhlého křehkého porušení – porušení ztrátou stability, porušení soudržnosti mezi betonem a výztuží.	1,0	1,0
Rámové, skeletové, nosníkové a jim podobné konstrukce s centrickým připojením prvků ve styčnicích nosného systému: – žb konstrukce s kvalitním prostorovým ztužením, – žb konstrukce s momentovým mimostyčnickovým zatížením, – běžné železobetonové prostorové konstrukce.	2,2 1,2 1,0	2,7 1,5 1,2
Stěnové betonové konstrukce.	1,4	1,7
Kombinované konstrukce (skelet s vyzdívkou nebo hrázděné stěny): – betonové s ocelovým prostorovým skeletem, – betonové s železobetonovým prostorovým skeletem, – zděné s železobetonovým prostorovým skeletem.	2,0 1,7 1,2	2,5 2,0 1,5
Samostatné prvky zavětrovaných rámových nebo příhradových konstrukcí s centricky provedenými styčníky nosného systému: – železobetonové nosníky, – železobetonové diagonální výztuhy.	1,4 1,2	1,7 1,5

Stavby jaderné energetiky, s ohledem na jejich významnost a dopad na životní prostředí člověka při nechtěné havárii, mají pro seismické zatížení staveb s využitím duktility přísnější požadavky, viz ISO/DIS 6258 (1983) nebo ASCE Standard 4-86 (1986). Obecně i pro tyto stavby lze využít duktilitních vlastností konstrukce, ovšem s tím rozdílem, že součinitelem duktility se redukuje až vypočtené vnitřní síly odezvy na seismické zatížení, nikoliv vlastní zatížení. Tento postup umožňuje redukovat momentové složky seismické odezvy odlišně od tahových, tlakových a smykových složek; zavedením odlišných součinitelů duktility pro jednotlivé typy namáhání.

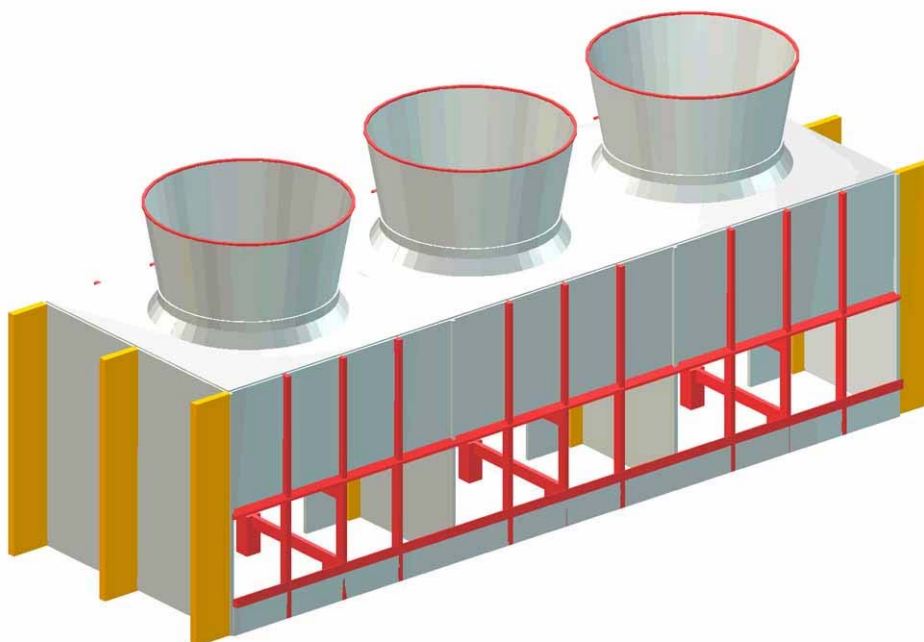
Normové a předpisové dokumenty rozlišují i pro stavby jaderné energetiky odlišnou duktilitu konstrukcí podle jejich uspořádání, nosného schématu, ztužujících prvků apod. Do stanovení velikosti součinitele duktility se promítá rovněž významnost objektu a jeho

„nebezpečnost“ pro životní prostředí, konkrétně do stanovení bezpečné rezervy mezního přetvoření od dosažení meze pevnosti a lomu konstrukce.

Významnost z hlediska nebezpečnosti havárie je ve směrnících pro energetiku v USA podle Kennedy R. P. et al. (1990) charakterizována třídami GU (General Use – zde jsou zařazeny např. obytné nebo kancelářské budovy), MH (Moderate Hazard – např. budovy s řídicími a ovládacími prvky jaderných elektráren) a HH (High Hazard – např. budovy reaktorů a skladů paliva). Pro porovnání jsou součinitelé duktility podle této americké normy pro jadernou energetiku s ohledem na nebezpečnost objektu uvedeny v tab. 3.

3. Železobetonová konstrukce trojice chladicích věží

Praktické použití duktilitních vlastností lze dokumentovat na příkladu výpočtové analýzy železobetonové monolitické konstrukce trojice chladicích věží. Výpočtový model trojice chladicích věží je uveden na obr. 2.

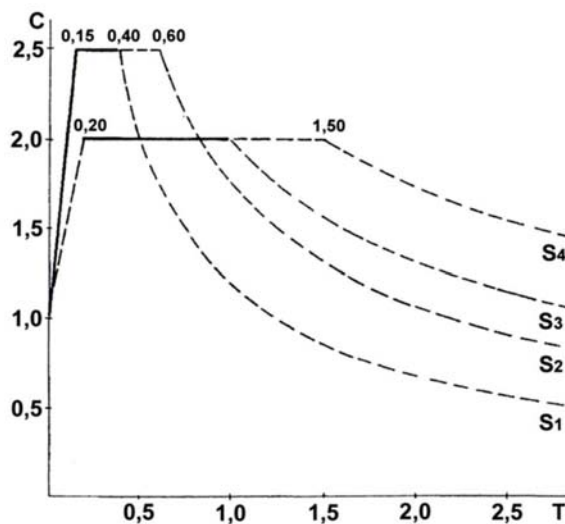


Obr. 2 Výpočtový model trojice chladicích věží

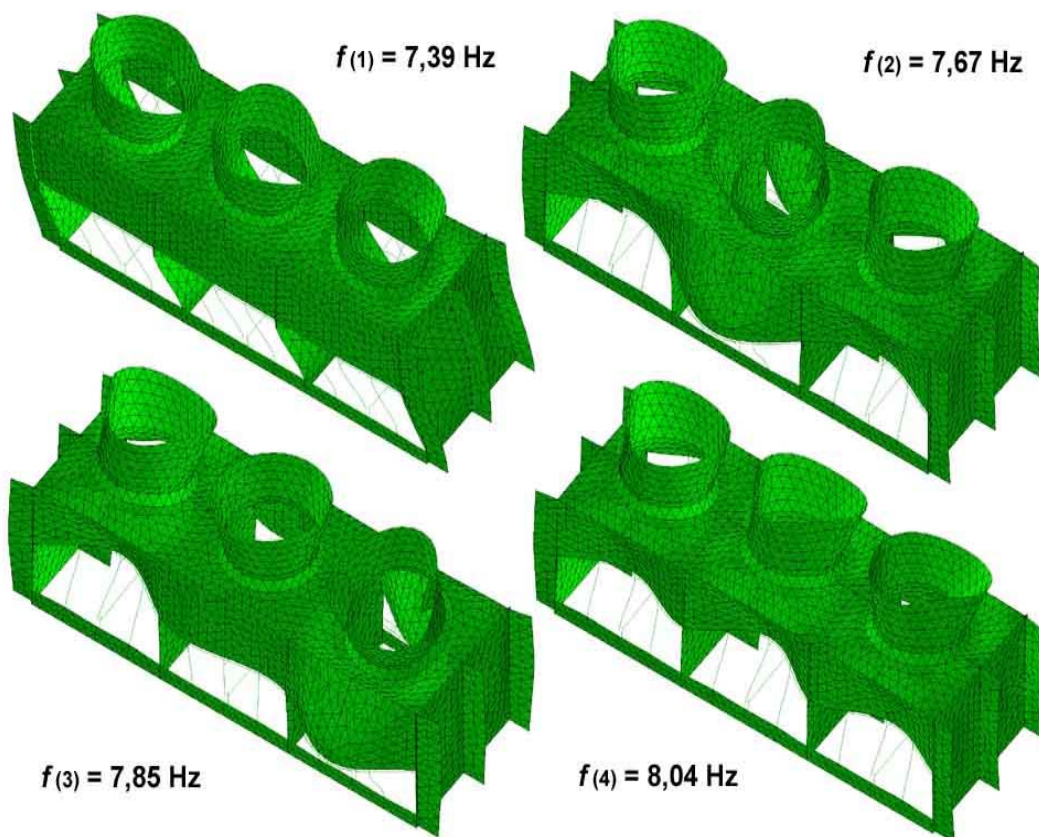
Jednotlivé věže mají obdélníkový půdorys s rozměry přibližně 13×14 m se dvěma podélnými stěnami tloušťky 250 mm a příčnými stěnami tloušťky 200 mm. Chladicí věž je shora ukončena stropní deskou o tloušťce 150 mm s kruhovým otvorem, nad kterým je umístěn difuzor ve tvaru obráceného komolého kužele. Celková výška věže je 17,8 m. Chladicí věže jsou zevnitř vyztuženy vnitřní podélnou stěnou v dolní polovině věže a podélnými žebry na celou vnitřní výšku stěn. Ve středu každé věže je umístěn sloup, na jehož vrcholu je v úrovni stropu umístěn ventilátor. V podloží věží jsou středně únosné vrstvy štěrkopískových sedimentů na mělkém skalním podloží.

Seismické zatížení bylo stanoveno podle národní normy NC 53-114 (1990). Maximální zrychlení na úrovni základové spáry bylo uvažováno 0,1 g. Perioda kmitání pokryvných

útvary na skalním podkladu byla odhadnuta 1,0 s, spolu s odhadem rychlosti šíření seismických vln v podloží ... $v_e = 400$ m/s. Návrhové spektrum odezvy S1 bylo převzato z národní normy (obr.3). Při výpočtu byl konzervativně použit součinitel duktility $\mu = 4,0$ (obvyklý pro běžné železobetonové stěnové konstrukce podle Eurocode 8 (2003) – viz tab.1). Národní norma NC 53-114 (1990) připouští použití většího součinitele $\mu = 4,55$.

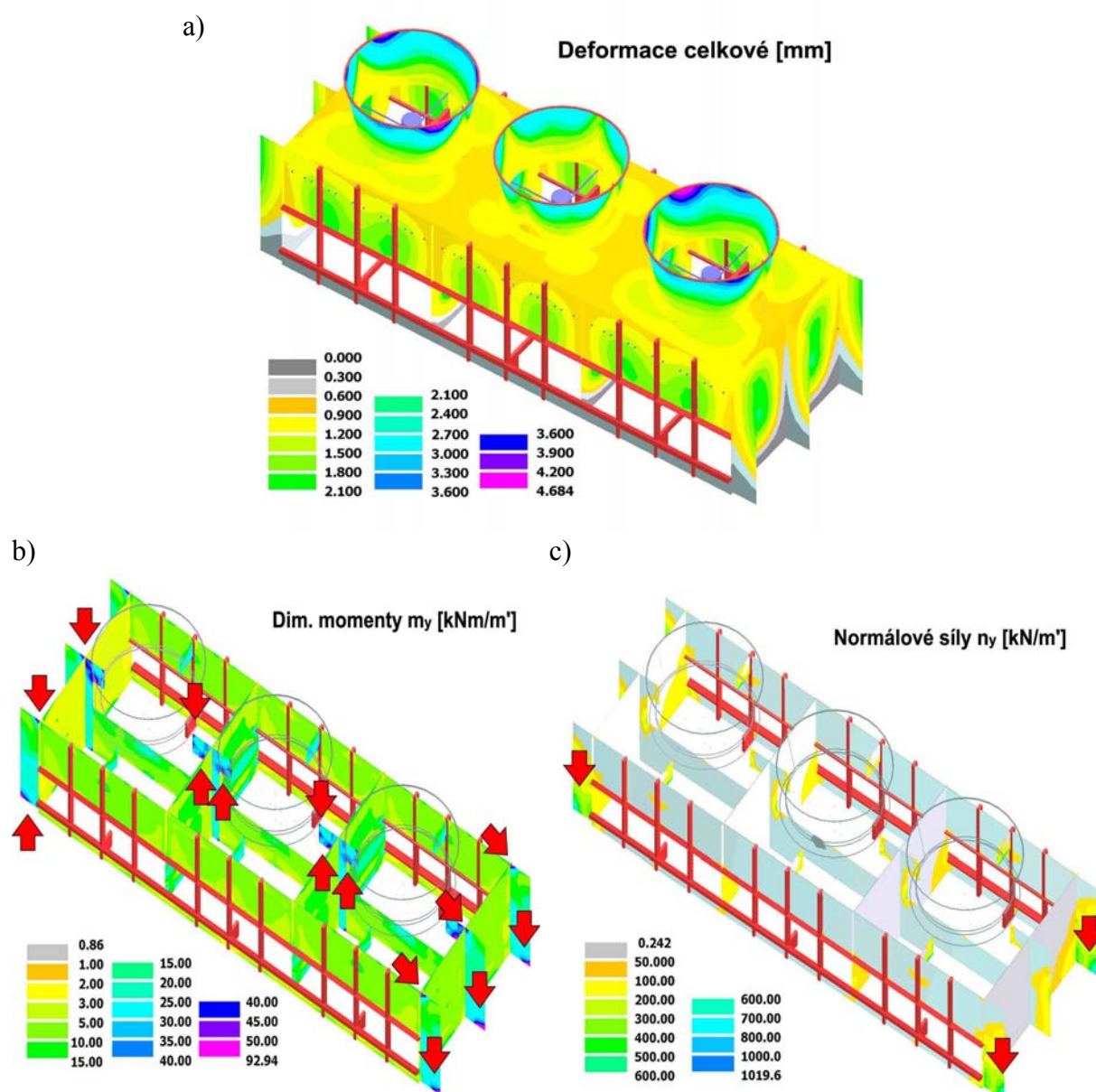


Obr. 3 Pružné spektrum odezvy podle národní normy NC 53-114 (1990)



Obr. 4 Nejnižší vlastní tvary kmitání konstrukce

Seismické účinky byly analyzovány rozkladem seismického zatížení do vlastních tvarů kmitání konstrukce. Výpočtem vlastního kmitání bylo stanoveno nejnižších 95 vlastních tvarů, které leží na frekvencích od 7,39 Hz do 22,93 Hz, a které jsou z hlediska odezvy ještě významné. Ze spektra vlastních tvarů jsou z hlediska odezvy dominantní ty tvary, při kterých se deformuje velká část konstrukce. Jsou to tedy především vlastní frekvence a tvary, které leží ve frekvenční oblasti přibližně od 0 Hz do 30 Hz. I v této oblasti jsou však nejvýznamnější jednak základní ohybové tvary, při kterých se konstrukce ohýbá, natáčí nebo posouvá jako celek. Vlastní tvary lokálních konstrukčních prvků jsou ve srovnání se základními tvary kmitání pro odezvu konstrukce jako celku nevýznamné.



Obr. 5 Izolinie odezvy konstrukce od seismického zatížení
a) výchylky, b) dimenzační momenty m_y , c) normálové síly n_y

Pro ilustraci jsou na obr. 5 v tomto příspěvku uvedeny jen vybrané veličiny odezvy a sice výchylek a vnitřních sil ve vybraných částech konstrukce, konkrétně ve stěnách. Protože při výpočtu seismicity byl použit součinitel duktility 4, kterým bylo seismické zatížení podle požadavku národní normy redukováno, pak by při uvažování neduktilní lineárně pružné konstrukce byly vypočtené vnitřní síly 4× větší. Výchylky konstrukce uvedené na obr. 5a byly stanoveny lineárně pružným výpočtem s uvažováním zatížení redukováného součinitelem duktility 4. To znamená, že pro části konstrukce, které se při seismickém zatížení přetvářejí pružně, odpovídají deformace vynesené na obr. 5a redukovánému pružnému zatížení. V částech konstrukce, kde však reálně dojde k překročení meze pružnosti materiálu a vytvoření plastických kloubů (viz šipky na obr. 5b a 5c), mohou deformace ve skutečnosti dosahovat až součinu pružné výchylky z obr. 5a a součinitele duktility – tedy v našem případě až čtyřnásobku vypočtených a vynesných hodnot výchylek. Veličiny vnitřních sil: dimenzační momenty m_y na obr. 5b a normálové síly n_y na obr. 5c jsou vztaženy k lokálním osám stěnodeskových prvků – ve stěnách je lokální osa y svislá a leží ve střednici plošného prvku.

Z průběhů vybraných dimenzačních momentů a normálových sil je zřejmé, kde se při duktilním přetvoření konstrukce objeví plastické klouby; tato místa jsou na obr. 5 pro svislý lokální směr y vyznačena šipkou. Jedná se především o rohy stěn a přípoje nosníkových výztuh, pro vnitřní síly ve svislém lokálním směru y jsou tato místa lokalizována na spodní okraje nároží stěn, odpovídající konzolovitému tvaru ohybu věže jako celku – při rozkladu zatížení do dominantních tvarů kmitání na obr. 4. Pro vodorovné vnitřní síly ve vodorovném směru x jsou tato místa v blízkosti horní části nároží stěn, odpovídající ohybovému zakmitání jednotlivých stěn, opět v souladu s dominantními tvary kmitání.

4. Závěr

Při seismickém zatížení se konstrukce přetváří jak v oblasti lineárně pružného chování materiálu, tak za touto mezí se vznikem trhlin a plastických kloubů. Normy připouštějí pro seismické zatížení pružně-plastické chování konstrukce a jejího materiálu; ovšem za předpokladu, že ale nedojde ke křehkému porušení. Konstrukce musí být navržena tak, aby umožnila pružně-plastická přetvoření.

Cílem příspěvku bylo porovnat přípustnou úroveň uvažování pružně-plastického chování konstrukce na základě normami stanovené duktility a nebo duktilitních vlastností konstrukce. Z příkladu výpočtu chladicích věží s uvažováním vlivu duktility je zřejmé, že připuštění duktility a její aplikace na redukcii velikosti seismického zatížení je velmi účinný nástroj pro návrh konstrukce; i za cenu, že v konstrukci při seismickém zatížení vzniknou trhliny, konstrukce se trvale deformuje, avšak nehavaruje.

Použití duktility formou redukce zatížení však skrývá úskalí, že v částech konstrukce s dominantním osovým namáháním se konstrukce duktilitně nechová; pak může být metoda redukce zatížení i výrazně na straně nebezpečné. Pokud bychom uvažovali při seismické analýze reálných konstrukcí jak nosné tak i nenosné prvky, pak je skutečná duktilita konstrukce zpravidla vyšší, než uvádí tabelované hodnoty v nejrozsáhlejších normách. Podrobnější výpověď o limitní hodnotě duktility může poskytnout analýza mezní únosnosti konstrukce - při uvážení jejího nelineárního chování v celém rozsahu působení zatížení.

Rozbor tohoto případu je však nad rámec tohoto příspěvku a nelze jej pojmut pro širokou škálu konstrukcí s různými vlastnostmi.

5. Poděkování

Práce na této problematice byla podporována grantovým projektem GAČR: 103/03/0082 „Nelineární odezva konstrukcí při mimořádných zatíženích a zatíženích způsobených pohybem člověka“ a zčásti sponzorována firmou Chladicí věže Praha. Autoři si dovoluji touto cestou vyslovit grantové agentuře i sponzorské firmě svůj dík.

6. Literatura

- ČSN 73 0036 (1973) *Seismická zatížení staveb*. ÚNM, Praha.
- ČSN P ENV 1998-1-1 (1998) Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení – Část 1-1: Obecné zásady – Seismická zatížení a obecné požadavky na konstrukce. ČNI, Praha.
- prEN 1992-1-1 Eurocode 2 (2004) *Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings*. CEN, Brussels (Final draft).
- prEN 1998-1 Eurocode 8 (2003) *Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. CEN, Brussels (Final draft).
- ISO/DIS 6258 (1983) *Nuclear power plants – Design against seismic hazards*. ISO, Brussels.
- ASCE Standard 4-86 (1986) *Seismic analysis of safety related nuclear structures*. ASCE, New York.
- NC 53-114 (1990) *Construcciones sismo resistentes – Especificaciones de proyecto y métodos de cálculo*.
- Kennedy, R. P. et al. (1990) *Design and evacuation guidelines for department of energy facilities subjected to natural phenomena hazards*. US Department of Energy, Report UCRL-15910, Washington.
- Booth, E. (1998) *Seismic design practice into the next century*. A.A.Balkema, Rotterdam.
- Makovička, D. (1999) Ductile behaviour of dynamically loaded structures. Structural Dynamics, *EURODYN '99*, pp. 1136-1140, A.A.Balkema, Rotterdam.
- Makovička, D. & Makovička, D. (2003) Seismic resistance of a ventilation stack of a reactor building – NPP Temelin – A Case Study. *International symposium on seismic evaluation of existing nuclear facilities – Invited and Contributed Papers*, pp.152-160 + 9 pages on CD, Paper No. IAEA-CN-106/14P, IAEA Vienna.
- Penelis, G. G. & Kappos, A. J. (1997) *Earthquake-resistant concrete structures*. E&FN SPON, London.