

CONTEMPORARY APPROACHES TO SEIZMIC ANALYSIS OF TANK WITH FLUID

M. Mrózek*, A. Nevařil*, Z. Čada*, M. Brat'ka*

Summary: *Presented paper deals with a method of dynamic response solution of steel liquid storage tank. Dynamic analysis of a tank were carried on finite element computational model prepared in software ANSYS. Fluid-structure interaction is included in analysis. Fluid region is defined by finite elements determined for fluid content modeling. These elements are in conformity with Lagrange theory. Computational model was loaded by components of acceleration measured during earthquake occurrence. Dynamic response was obtained using full integration method of equation of motion. Results are shown in figures and graphs.*

1. Úvod

U celé řady inženýrských konstrukcí se setkáváme s nutností analyzovat konstrukci se zohledněním její interakce s kapalinou. Mezi tato inženýrská díla patří např. nádrže čističek odpadních vod, vodojemy, části technologických zařízení jaderných elektráren, přehrady apod. Tyto konstrukce jsou namáhány statickými, ale i dynamickými účinky, jako např. přírodní a technická seizmicita. V současné době je na území České republiky dokladována slabá přírodní seizmicita, naproti tomu technická seismicita je běžným zdrojem dynamického zatížení působícího na stavební konstrukce. Odezvu konstrukce v interakci s kapalinou na statická zatížení je možné stanovit relativně snadno, v případě dynamických (seizmických) zatížení se může jednat o náročný a komplexní interdisciplinární problém.

V poslední době byla vyvinuta celá řada postupů (klasických, ale také založených na metodě konečných prvků – MKP) řešících úlohu Fluid-Structure Interaction. Na základě míry zjednodušení úlohy můžeme v zásadě rozlišovat tři základní přístupy k řešení, a to: nahrazení tekutiny přídavnou hmotností na straně konstrukce, viz např. Jendželovský, Sumec (2008), nahrazení interakce akcí tekutiny na konstrukci viz Houser (1957), a plnou interakci viz Stuart, Shipley (1995). Každý z výše uvedených přístupů vyžaduje specifický přístup k řešení.

2. Řešení úlohy MKP

Pro řešení úlohy je sestaven konečněprvkostní výpočtový model nádrže a kapalinové oblasti. Současné softwarové aplikace dovolují modelovat kapalinovou oblast speciálními konečnými prvky. Jedním z možných přístupů jak modelovat kapalinovou oblast je využití konečných

* Ing. Michal Mrózek, Ing. Aleš Nevařil, Ing. Zdeněk Čada, Ing. Miloš Brat'ka: Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně; Veveří 331/95; 602 00 Brno; e-mail: mrozek.m@fce.vutbr.cz, nevaril.a@fce.vutbr.cz, cada.z@fce.vutbr.cz, bratka.m@fce.vutbr.cz,

prvků odvozených dle Lagrangeova přístupu.

Odpovídající konečné prvky jsou odvozeny z osmiuzlových prvků pro řešení strukturálních úloh. Jsou definovány osmi lokalizovanými uzly, každý uzel má tři translační stupně volnosti. Zásadní odlišnost spočívá ve způsobu definování fyzikálně konstitutivních vztahů (1), (2)

$$\begin{Bmatrix} \xi_{\text{bulk}} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ R_x \\ R_y \\ R_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 3\alpha\Delta T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{1}{K} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{S} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{S} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{S} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{B} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} P \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

$$\xi_{\text{bulk}} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (2)$$

kde α je koeficient tepelné roztažnosti, ΔT změna teploty vůči referenční teplotě, K modul stlačitelnosti kapaliny, P tlak (vyčíslován v těžišti prvku), S velmi malá číselná hodnota numericky zajišťující smykovou stabilitu (řádově $1 \cdot 10^{-9}$), B velmi malá číselná hodnota numericky zajišťující torzní stabilitu (řádově $1 \cdot 10^{-9}$). Takto modelovaná kapalinová oblast se chová jako těleso s velmi malým modulem pružnosti ve smyku. Matice hmotnosti konečného prvku je nekonsistentní.

Další odlišností ve formulaci prvku je způsob definování matice útlumu (3). Jednotlivé koeficienty v matici útlumu jsou závislé na viskozitě modelované kapaliny.

$$\begin{Bmatrix} \dot{\xi}_{\text{bulk}} \\ \dot{\gamma}_{xy} \\ \dot{\gamma}_{yz} \\ \dot{\gamma}_{xz} \\ \dot{R}_x \\ \dot{R}_y \\ \dot{R}_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\eta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\eta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\eta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} P \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

kde η je viskozita a $c = \eta \cdot 10^{-5}$.

Řešení dynamické odezvy na buzení soustavy akceleroqramy zrychlení viz obr. (1) je provedeno metodou přímé integrace soustavy lineárních pohybových rovnic (4).

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\}. \quad (4)$$

Přímá integrace pohybových rovnic je řešena Newmarkovou integrační metodou. Derivace pole přemístění v (4) jsou nahrazeny konečnými diferencemi (5, 6).

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + [(1 - \delta)\ddot{u}_n + \delta\ddot{u}_{n+1}] \Delta t \quad (5)$$

$$u_{n+1} = u_n + \dot{u}_n \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\ddot{u}_n + \alpha\ddot{u}_{n+1}\right] \Delta t^2 \quad (6)$$

Po dalších úpravách lze získat integrační schéma pro numerické řešení. Metoda patří mezi implicitní integrační metody. Bathe a Zienkiewicz popsali podmínky pro integrační konstanty, za kterých je metoda nepodmíněně stabilní.

3. Popis konstrukce nádrže

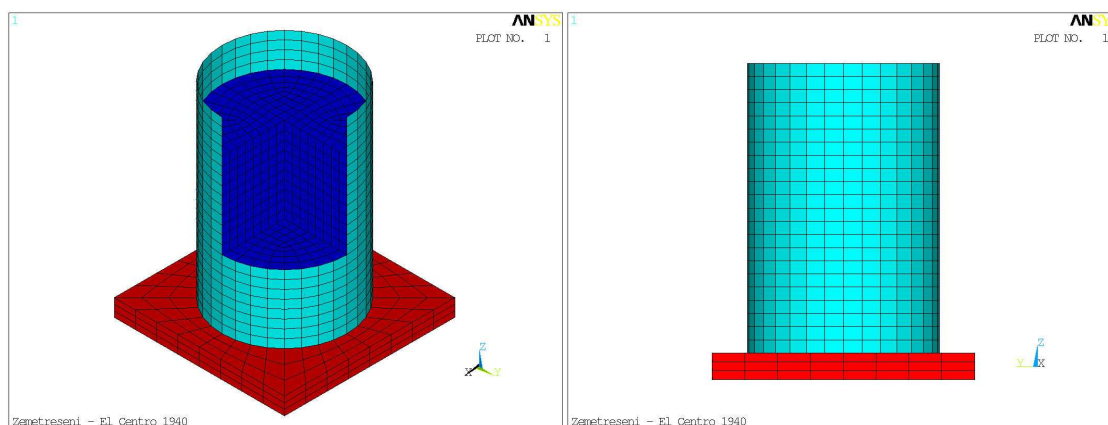
Analyzovaná konstrukce nádrže je převzata z publikace Kala, (1995). Řešena je ocelová válcová nádrž výšky 21,96 m, tloušťka stěny je 25,4 mm. Průměr nádrže je 14,64 m. V případě, že je nádrž plná, dokáže pojmout 3620 m³ kapaliny. Jsou uvažovány následující provozní stavy nádrže:

- Nádrž je z 80% naplněna vodou
- Nádrž je z 50% naplněna vodou
- Nádrž je z 20% naplněna vodou
- Nádrž je bez kapaliny

4. Popis výpočtového modelu

Pro výpočet dynamické odezvy konečněprvkového modelu na seizmické buzení je použit výpočtový systém ANSYS. Tento program umožňuje řešit dynamickou odezvu konečněprvkových modelů konstrukcí přímou integrací pohybových rovnic diskretizované soustavy v časové oblasti, což bylo ve výpočtech využito.

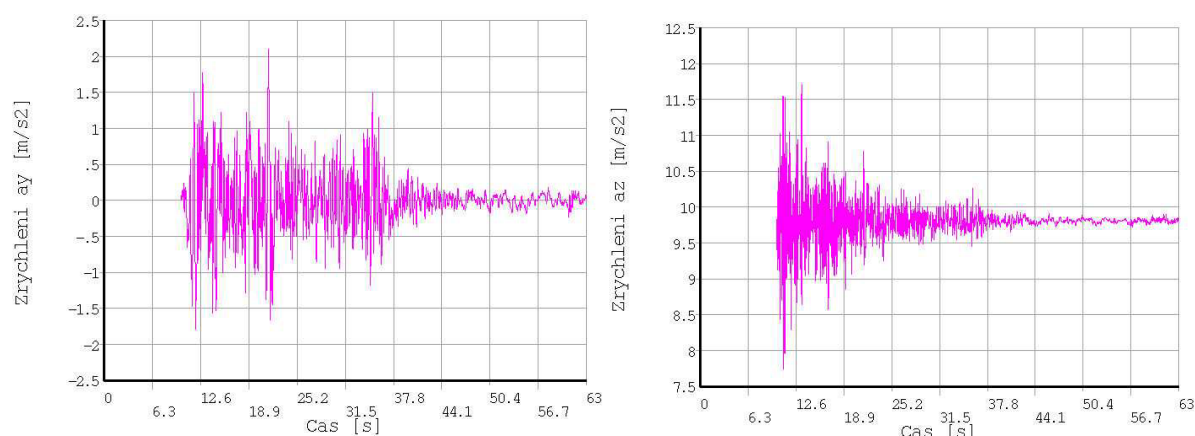
Výpočtové modely jsou koncipovány jako prostorové. Pro tvorbu modelu jsou využity různé typy vzájemně kompatibilních konečných prvků. Základem je model prázdné nádrže definovaný skořepinovými konečnými prvky SHELL 43. Model je sestaven včetně kapalinové oblasti modelované konečnými prvky FLUID 80. Těleso nádrže je uloženo na železobetonové podkladní desce. Okrajovým a spodním uzlům modelu železobetonového základu nádrže jsou předepsány nulové hodnoty posuvů pro všechny tři stupně volnosti.



Uvažované kapalinové médium je voda. Fyzikální vlastnosti vody jsou uvažovány teoretickými hodnotami převzatými z literatury. Rychlost šíření zvuku ve vodě při 20 °C je $c_w = 1438 \text{ m.s}^{-1}$, hustota chemicky čisté vody $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$.

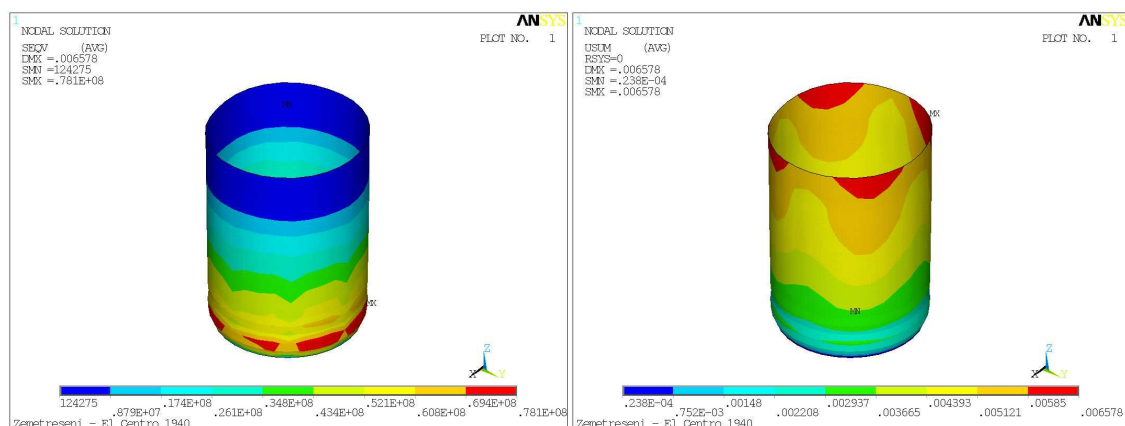
5. Řešení seizmické odezvy

Nestacionárním dynamickým zatížením použitým pro výpočet je soubor reálných seizmologických dat seizmického jevu El Centro. Jedná se o reálný záznam velmi silného zemětřesení ze dne 18.5.1940 v Imperial Valley v Kalifornii. Během tohoto zemětřesení zahynulo 9 lidí a kolem 80 % budov bylo zničeno nebo poškozeno. Magnitudo zemětřesení je odhadováno o velikosti 7,1 dle Richterovi stupnice. Seizmologická data tohoto zemětřesení byla získána z USGS ve formě záznamu zrychlení o délce 53 sekund se vzorkovací frekvencí 50 Hz. Zemětřesení bylo zaznamenáno v nádražní ŽB budově v podlaží. Záznam může obsahovat nedostatečně zastoupené vysoké frekvence pohybu půdy. Pro výpočet odezvy nádrže je použito pouze prvních 8s záznamu události. Akceleroagramy buzení na obr. 1, pro jednotlivé směry $a(x)$, $a(y)$, $a(z)$ jsou převedeny do absolutních souřadnic a dynamická odezva je řešena včetně pole přemístění a napětí od vlastní tíhy nádrže s kapalinou.



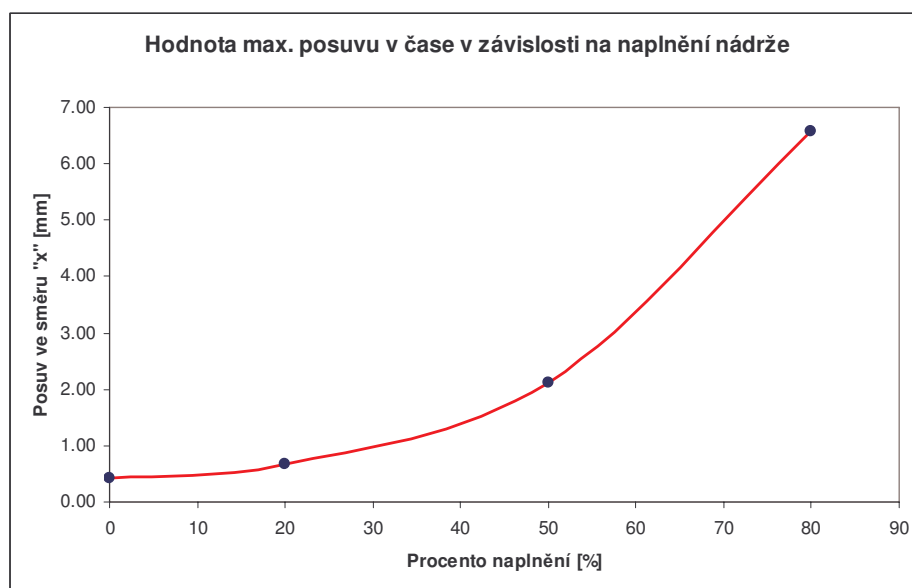
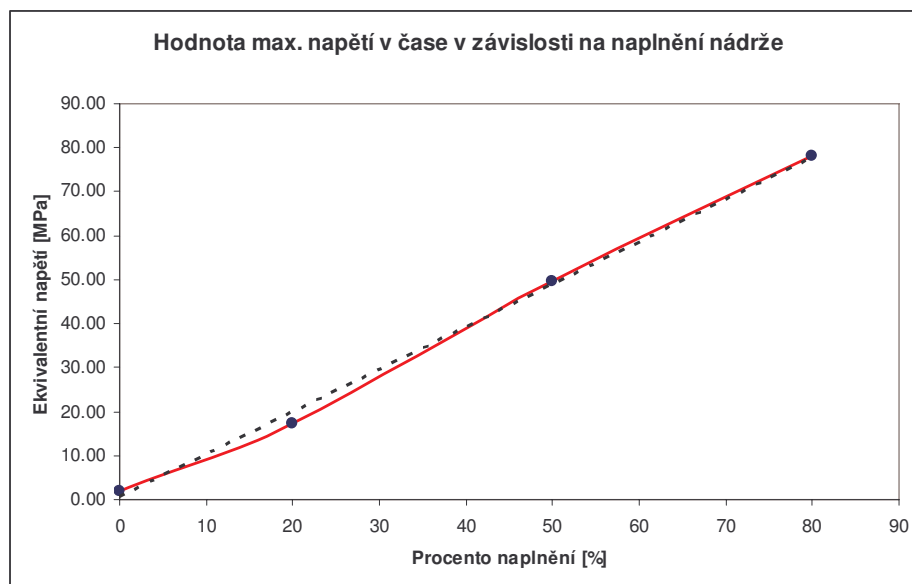
Obr. 1 Akceleroagramy buzení

Pro jednotlivé řešení alternativy byly vyčísleny obálky maxim polí přemístění a napětí. Pro sledované body na horním okraji pláště nádrže a u dna byly vyhodnoceny průběhy posuvů a napětí. Extrémní hodnoty posuvů pro jednotlivé stavy naplnění nádrže kapalinou nastávaly v blízkosti horního okraje nádrže a nejvyšších hodnot srovnávacího napětí je dosažena v oblasti okolo 1 m nad úrovní dna nádrže viz obr. 2.



Obr. 2 Obálka maxim ekvivalentního napětí a celkových posuvů pro řešenou časovou oblast

Je provedeno srovnání maximálních hodnot ekvivalentních napětí na plášti nádrže pro řešenou časovou oblast a jednotlivé úrovně naplnění nádrže (graf G1). Nárůst hodnot maximálních napětí je vůči rostoucí hodnotě úrovně naplnění nádrže téměř lineární. Z hlediska maximálních posuvů se jeví závislost mezi úrovní naplnění nádrže a maximální hodnotou posuvu (směr „x“) jako nelineární (graf G2).



Grafy G1, G2

Dynamická odezva - obálka maxim		
Zaplnění nádrže kapalinou	Maximum ekv. Napětí	Maximum celk. posuvů
[%]	[MPa]	[mm]
80	78.10	6.58
50	49.50	2.12
20	17.40	0.68
0	2.08	0.42

Tab. 1

6. Shrnutí a závěry

V programovém systému ANSYS, založeném na metodě konečných prvků, byly sestaveny prostorové výpočtové modely konstrukce nádrže s kapalinou. Byla řešena dynamická odezva na seizmické zatížení dané záznamem události El Centro. Výpočty prokázaly značný vliv na dynamickou odezvu konstrukce.

Hodnoty maximálního ekvivalentního napětí, které na plášti nádrže nastávají během dynamického buzení narůstají téměř lineárně spolu s množstvím kapaliny v nádrži. Hodnoty maximálních sledovaných posuvů (směr „x“) narůstají nelineárně v závislosti na množství kapaliny v nádrži.

Velkou výhodou metodiky výpočtu dynamické odezvy konstrukce včetně kapalinové oblasti je skutečnost, že není nutné experimenty stanovovat hodnotu přidané hmotnosti od kapaliny. Pro verifikaci vypočtených výsledků by bylo nutné provést řadu srovnávacích experimentů na odpovídajícím fyzikálním modelu.

7. Poděkování

Článek vznikl za finančního přispění Výzkumného záměru MSM 0021630519 – Progresivní spolehlivé a trvanlivé nosné stavební konstrukce a projektu GAČR 103/09/2007 - Vliv technické seismicity na statickou spolehlivost a životnost staveb.

8. References

- Inman, D.J. (1994), Engineering vibration. Virginia Polytechnic institute and State University
- Byeong Moo, J., Se Jin, J., Seong Woon, K., Young Jin, Kim., Chul Hun, Ch. (2004), Earthquake response analysis of LNG storage tank by axisymmetric finite element model and comparison to the results of the simple model, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 394
- Stuart, R., Shipley, L., Ghose, A., Hiremath, M. (1995), Dynamic analysis of high-level storage tanks. *Computers & Structures* Vol. 56, No. 2/3, pp. 415-424
- Kala, J. (1996), Kmitání nádrží v interakci s kapalinou. *Diplomová práce*, VUT v Brně.
- Jendželovský, N., Sumec, J. (2008), Seismic analysis of reinforced concrete water tank, *Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering*
- Salajka, V. (2006), Analýza konstrukcí v interakci s kapalinou. *Habilitační práce*, VUT v Brně.
- Housner, G. W. (1957), Dynamic pressures on accelerated fluid containers, *Bull. Seismolog. Soc. Am.*, 47(1)