38th International Conference
Experimental Stress Analysis
Třešť, Czech Republic, 6 - 8 June 2000
Main page
pp. 349/356

NUMERICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ ŘEŠENÍ NAPJATOSTI MODELU KONTEJNERU PŘI PÁDOVÉ ZKOUŠCE.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL SOLVING STATE OF STRESS OF CONTAINER MODEL AT FALL EXAM.

František Valeš, Bohuslav Tikal, Eduard Veselý, Pavel Nonner,
Jan Červ, Jiří Michálek, Vladislav Laš, Vítězslav Adámek[1]

Abstract:

This report presents the results of the experimental and numerical analysis of the stress state of a container . The stress state was caused by a perpendicular fall and a projectile hitting in high speed its front, with which the container falls onto the ground. The numerical analysis was performed using the FEM. The experiment was based on the use of semiconductor tensometers in connection with a measuring device with the frequency limit up to 2MHz. Very good correspondence between the experimental and numerical results proved that the adopted approach was right and that both the methods can substitute one another. One case, when cavity was present in the front of the container, was solved only numerically and on the other hand, a case, when the container was filled with water, was carried out only as an experiment.

Klíčová slova: ráz, kontejner, nestacionární napjatost, poměrné přetvoření, napětí, odporový tenzometr, integrální transformace, metoda konečných prvků

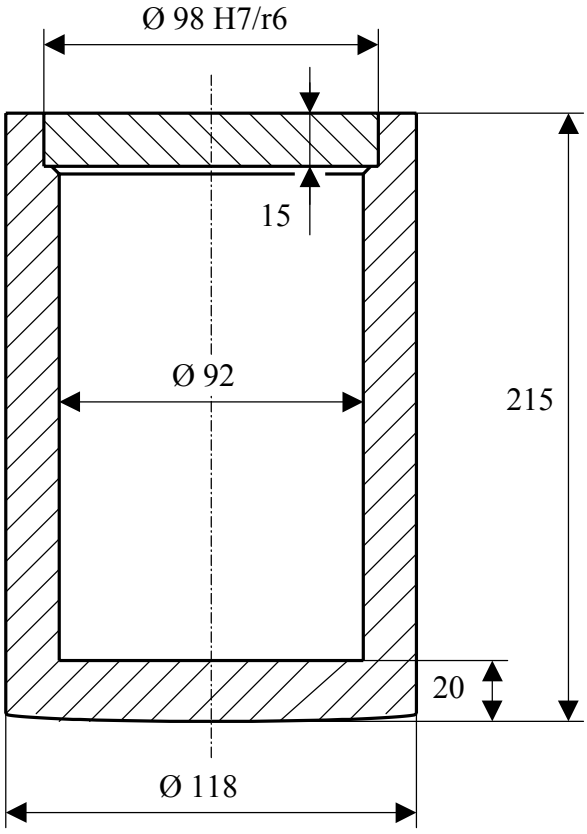
1. Úvod

Vyšetření nestacionární napjatosti vyvolané rychle se měnícími silovými zatěžovacími účinky nebo rázem je velmi náročné. Přesné analytické řešení (vycházející z pohybových rovnic kontinua) je možné pouze pro tělesa jednoduchých tvarů – tyče, stěny, desky, kotouče a pod. Přitom tato tělesa musí mít zpravidla jeden rozměr neomezený, aby bylo možno exaktně splnit okrajové podmínky. Proto pro tělesa složitějších tvarů je nutné použít buď metody přibližné (např. jednorozměrové), numerické (MKP) a nebo experimentální (AE, odporová tenzometrie aj.). Výsledky získané analytickými metodami mohou sloužit jako testovací metody, především pro MKP. Užití výše zmíněných postupů vyžaduje uplatnění velmi vyspělých výpočetních prostředků a záznamových vysokofrekvenčních elektronických zařízení.

[1] Ing. Valeš František, CSc, **Ústav termomechaniky AVČR CDM, Veleslavínova 11, 301 14 Plzeň,** vales@ufy.zcu.cz, Ing. Tikal Bohuslav, CSc, **ZČU CIV, Plzeň, Univerzitní 8, 314 16 Plzeň,** tikal@civ.zcu.cz, Veselý Eduard, **Ústav termomechaniky AVČR, Dolejškova 5, 182 08 Praha 8,** eda@it.cas.cz , Nonner Pavel, **Ústav termomechaniky AVČR, Dolejškova 5, 182 08 Praha 8,** Ing. Červ Jan, CSc, **Ústav termomechaniky AVČR, Dolejškova 5, 182 08 Praha 8,** cerv@it.cas.cz, Ing. Michálek Jiří, **ZČU UFY, Plzeň, Veleslavínova 11, 301 14 Plzeň,** michalek@ufy.zcu.cz, Doc. Ing. Laš Vladislav, Csc, **ZČU KME, Plzeň, Univerzitní 8, 314 16 Plzeň,** las@kme.zcu.cz, Adámek Vítězslav, **student ZČU FAV Plzeň, Univerzitní 8, 314 16 Plzeň ,** vadamek@students.zcu.cz

Odpověď na otázku, proč a kdy je nutné toto náročné řešení použít je následující – vždy, když nejvyšší frekvenční složka buzení je podstatně větší než nejnižší vlastní frekvence tělesa. Typickým příkladem jejich použití jsou problémy rázu těles. Přitom vznikají v místech nárazu napěťové vlny, šířící se rychlostí 5000 až 6000 m/sec a vytvářející rychle se měnící velmi složitou napjatost, především interakcí primárních vln postupujících od místa buzení s vlnami odraženými od hraničních ploch. Důsledkem těchto jevů může být vznik velkých koncentrací napětí, resp. narušení celistvosti těles nebo porušení těsnosti v konstrukčních spojích. Tyto atributy jsou velmi důležité např. u přepravníků nebezpečných látek, u kterých může v průběhu dopravy dojít k haváriím.

Taková zařízení, na která jsou kladena ta nejpřísnější bezpečnostní kritéria, jsou přepravníky (kontejnery) na palivové články jaderných zařízení. Zde musí být zaručena bezpodmínečná odolnost jak proti poruše, tak především proti úniku radioaktivních látek. Pro kontrolu jejich bezpečnosti jsou předpisy Mezinárodní komise jaderné bezpečnosti stanoveny velmi přísné zkoušky, imitující pád z dopravních zařízení během přepravy např. po železnici. Je to několik typů pádových zkoušek, realizovaných na speciálních pádových pracovištích. Protože zkoušky skutečných kontejnerů o hmotnosti 100 až 200 tun jsou velmi nákladné, je snaha pracovat buď s fyzikálními nebo matematickými modely. Pro matematické modelování je výhodná metoda konečných prvků (MKP). Zde je velmi důležité ověřit základní parametry tohoto modelu – především velikost prvků. Protože není k dispozici řešení analytické, bude užito experimentu pro vzájemné srovnání výsledků obou užitých metod. Jako měrné těleso byl užit miniaturní model kontejneru ve tvaru podle obr. 1.

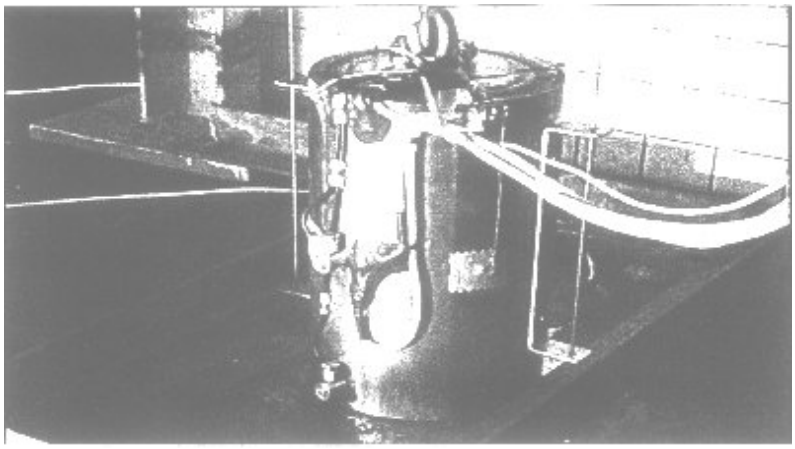


Obr. 1

Kontejner byl spouštěn z různých výšek ve směru jeho osy na tlustou ocelovou desku podepřenou masivním blokem betonu na pádovém pracovišti Škoda. Na jeho plášti byly osazeny měrné polovodičové tenzometry, jejichž signál byl srovnáván s výsledky získanými výpočtem MKP.

2. Popis zkušebního tělesa, uspořádání měřicích tenzometrů a popis modelu MKP

Rozměry a tvar zkušebního tělesa jsou patrné z obr. 1. Těleso bylo při svislém volném pádu vedeno ocelovými strunami, přičemž vedení umožňovalo realizovat pády od několika cm až do 2 m. Spodní čelo má tvar kulové plochy zajišťující jednoznačně místo kontaktu mezi kontejnerem a ocelovou deskou. Na plášti modelu byly nalepeny v polovině jeho výšky tenzometry měřící poměrné přetvoření ve směru jeho osy. Kromě našich tenzometrů byly na kontejneru osazeny další měrné systémy pracovníků Škoda. V této práci jsou uváděny pouze výsledky našich měření. Na obr. 2 je pohled na kontejner připravený k měření.



Obr. 2

Jako tenzometry byly užity polovodičové tenzometry délky 3 mm s odporem 350 Ω a deformační citlivostí 111. Pro naše měření byly zapojeny vždy dva na opačných stranách modelu pro vyloučení případného ohybového namáhání. Pro zpracování signálů tenzometrů byla užita metoda napájení stálým proudem s následným zesílením elektrického signálu, což zajistila aparatura vyvinutá pro rázová měření v Ústavu termomechaniky AVČR a zde tradičně využívaná. Pro záznam výstupního signálu aparatury byl užit dvoukanálový osciloskop TRACE nebo čtyřkanálový transient recorder MAURER – ADAM spolu s počítačem EVA. Parametry elektrické části měření jsou následující:

- polovodičový tenzometr délky 3 mm, odpor $R_t = 350\ \Omega$, def. citlivost k =111,
- napájecí proud $I_t = 5$ mA, zesílení aparatury A = 100,
- počet vzorků 1024 – 4096, časový krok 0,1 až 0,5 μs.

Při užití dvou měrných tenzometrů zapojených v serii platí

$\varepsilon = U/(2R_t \,.\, k.\, I_t.\, A) = U \,.\, 2{,}57 \,.\, 10^{-5}$, kde je

ε - měřená poměrná deformace a U - výstupní napětí aparatury.

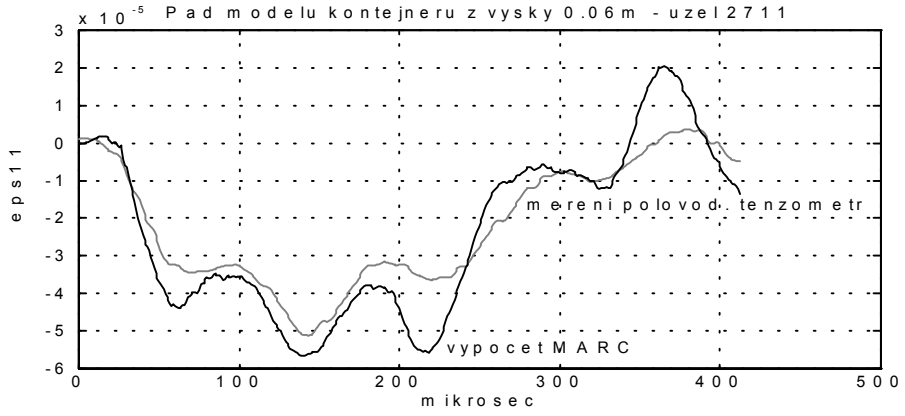
Při užití jednoho měrného tenzometru je $\varepsilon = U \,.\, 5{,}14 \,.\, 10^{-5}$.

Pro výpočet MKP byl užit systém MARC. Úloha byla uvažována jako rotačně symetrická s velikostí prvků u kontejneru 1x1 mm a u dopadové desky 4x4 mm.Výše uvedené parametry (délka tenzometru a velikost prvků kontejneru) zaručí s přesností ~ 5% frekvenční rozsah měření a výpočtu až do řádově 400 kHz, což je dostačující pro správný popis jevů vznikajících při tomto typu rázového buzení. Nosná frekvence aparatury byla 1 MHz, vzorkovací frekvence osciloskopů 20 MHz, výpočetní čas 0 až 500 μs probíhající s krokem 0,033 μs. Tím bylo zaručeno zachycení nejdůležitějších nestacionárních jevů.

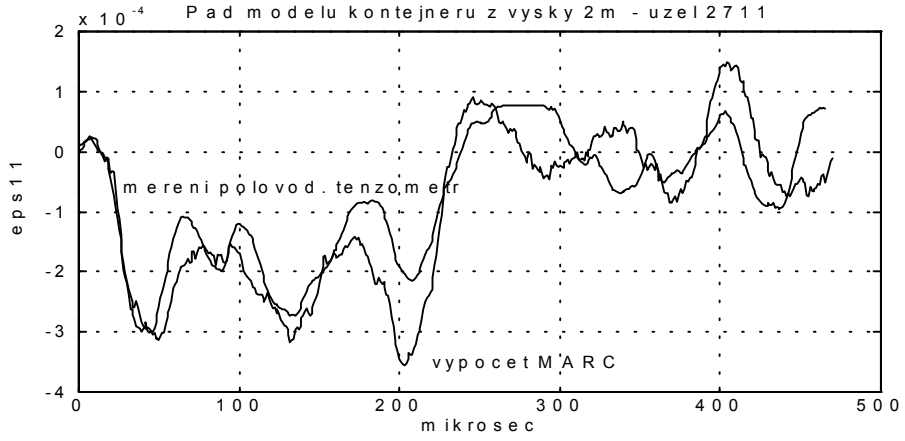
Srovnání výsledků experimentu a výpočtu a jejich popis pro tuto část řešení je uveden v další kapitole. Kromě pádové zkoušky byl proveden ještě experiment nastřelením skleněné kuličky ϕ 5mm rychlostí 55 m/sec na spodní čelo kontejneru a pro srovnání proveden výpočet jednoho případu pádu systémem MARC a systémem PAM CRASH. Dále byly provedeny výpočty pádu při uvažování kavity ve vnitřní části čela kontejneru a byl sledován vliv vodní náplně na napjatost kontejneru při pádové zkoušce. Nakonec bylo zhodnoceno užití prvků různé velikosti a vliv plné a redukované integrace.

3. Výsledky experimentů a výpočtů

V prvé řadě ukážeme srovnání experimentu a výpočtu pro různé výšky pádu – viz obr. 3 a obr. 4.



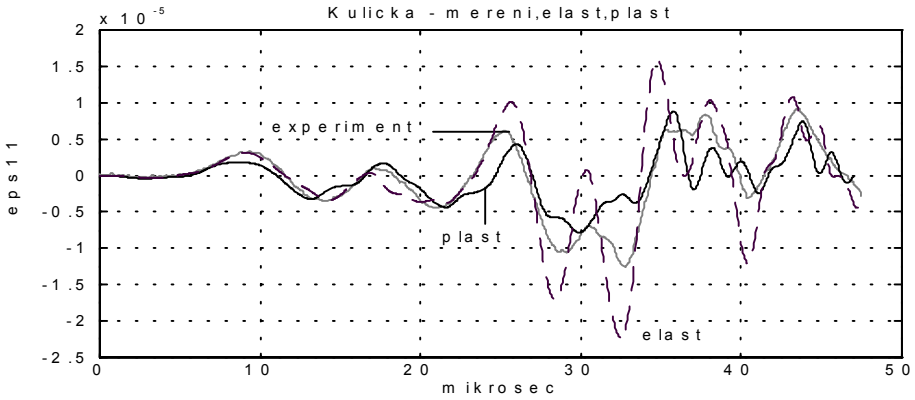
Obr. 3



Obr. 4

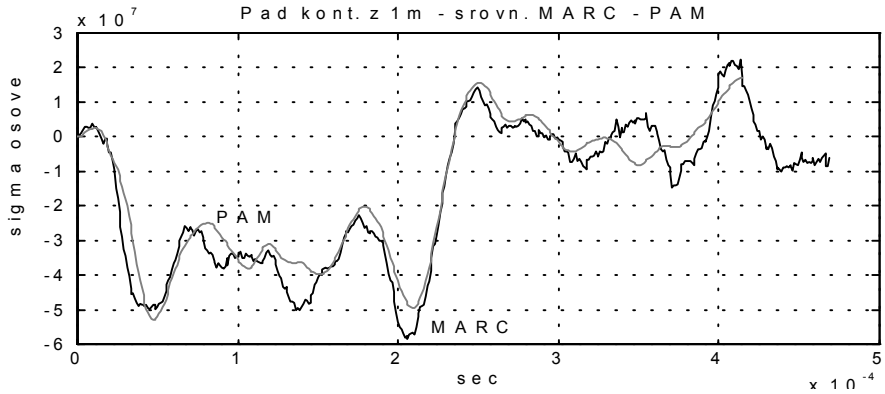
Na obr. 3 je srovnán výsledek tenzometrického měření a výpočtu v polovině délky površky kontejneru při pádu z výšky 6 cm (dopadová rychlost 1,1 m/s) a na obr. 4 totéž při pádu z výšky 2 m (dopadová rychlost 6,3 m/s). Kromě těchto výšek byly uvažovány ještě výšky 20 cm, 50 cm a 1 m. Různé výšky pádu byly užity pro zjištění vlivu dopadové rychlosti na přesnost měření. Z obrázků je vidět velmi dobrá shoda mezi měřením a výpočtem, a to především v rozmezí časů 0 až 250 μs, odpovídajících kontaktu mezi kontejnerem a základovou deskou. Hodnoty poměrného přetvoření odpovídající experimentu jsou systematicky poněkud menší než hodnoty MKP, což může být, v tomto případě, důsledkem neuvažování elastoplastických vlastností materiálu nádoby. Vliv právě těchto vlastností je uveden na dalším obrázku.

Na obr. 5 je ukázáno srovnání výsledků tenzometrického měření (čára označená "experiment") a výpočtu MKP při uvažování elastického chování materiálu (čára "elast") a chování elastoplastického materiálu (čára "plast"). Kontejner byl buzen nastřelením skleněné kuličky o průměru 5 mm rychlostí 55 m/s. Při této rychlosti vznikly v místě nárazu značné plastické deformace. Jejich uvažováním při výpočtu dostaneme velmi dobrou shodu mezi experimentem a výpočtem (křivky "experiment" a "plast").



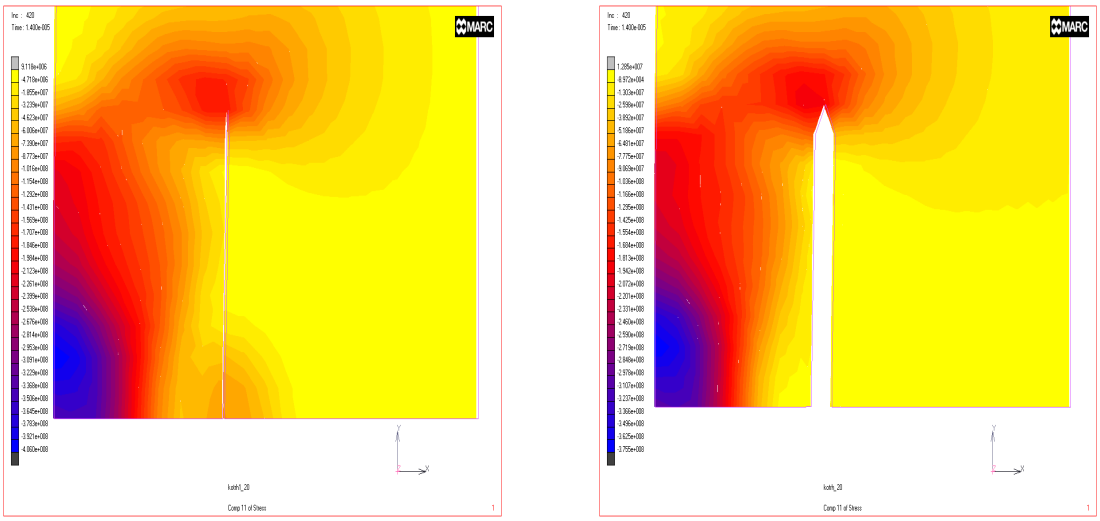
Obr. 5

Na dalším obr. 6 jsou srovnány výsledky získané systémy MARC a PAM. Protože systém PAM nemá proceduru na řešení rotační symetrie, je nutno úlohu řešit jako prostorovou a užít tudíž větší prvky. Přesto shoda obou případů (tentokrát je srovnáno osové napětí) je dobrá.

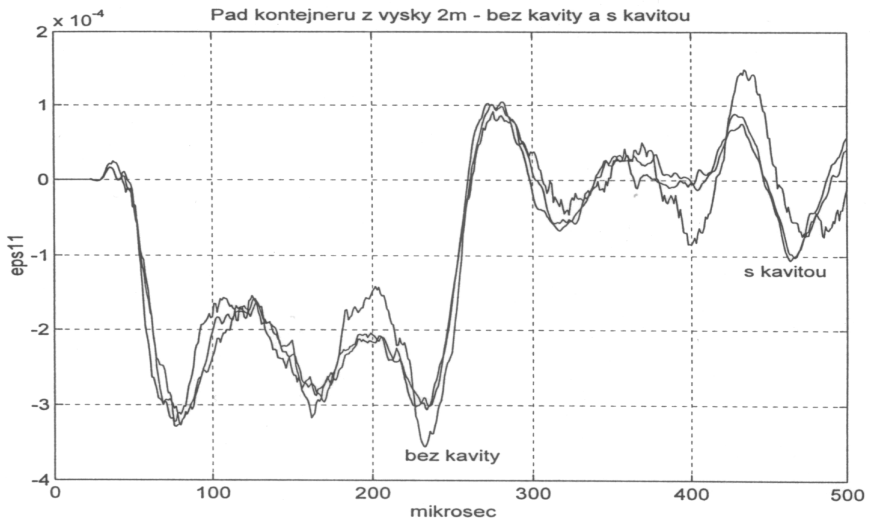


Obr. 6

Vliv vnitřní kavity modelované jenom v numerické části řešení je popsán na dalších obrázcích. Na obr. 7 je v levé části znázorněna velmi úzká kavita mající tvar kruhové štěrbiny s osou rotace totožnou s osou nádoby (vede ve spodní hraně obrázku), v pravé části je kavita podstatně širší. Místo nárazu leží v levém dolním rohu obrázků. Pruhy znázorňují napjatost (osové napětí) v relativně krátkém čase po nárazu. Na levém obrázku vidíme, že v místě blízko osy došlo u této kavity ke kontaktu jejích ploch, zatímco u široké kavity ke kontaktu nikdy nedojde. Napjatost v obou případech je zde podstatně rozdílná. V místě nalepení tenzometrů má však tato skutečnost velmi malý vliv, jak dokumentuje obr. 8.

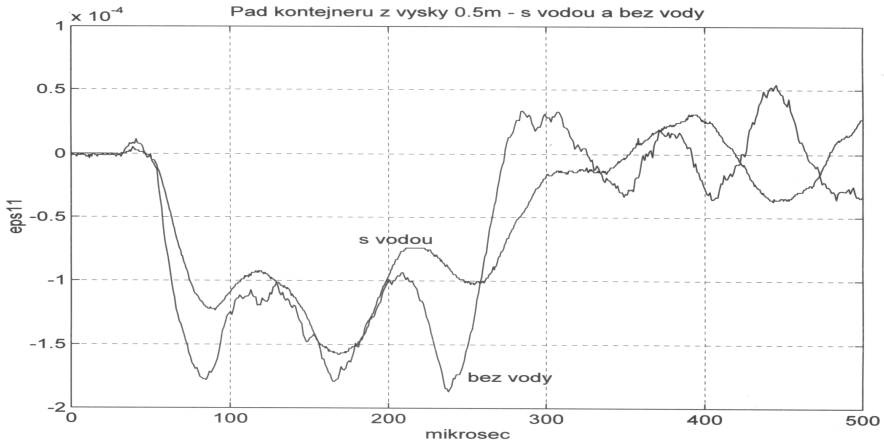


Obr. 7



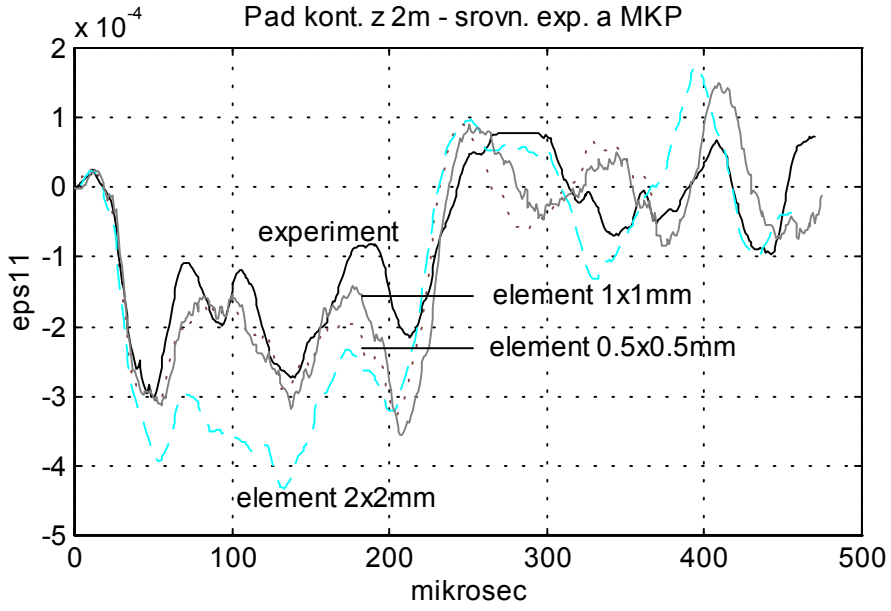
Obr. 8

Sledování vlivu možné náplně kapaliny u kontejneru je ukázáno na obr. 9. Jako náplň byla použita voda. Je vidět, že signál tenzometrů bez vodní náplně je větší, což odpovídá skutečnosti, že v případě vodní náplně určitá část energie se pohltí právě v této náplni.



Obr. 9

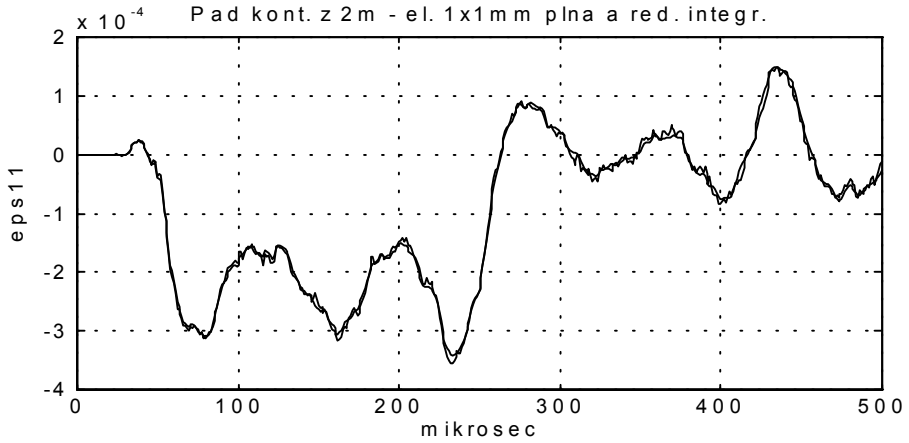
Nakonec bylo provedeno ještě zhodnocení vlivu velikosti prvků na napjatost kontejneru. Základní rozměr prvku byl 1x1 mm a s ním byla provedena většina výpočtů. Pro porovnání byly ještě zvoleny prvky 0,5x0,5 mm a 2x2 mm. Na obr. 10 vidíme, že výsledek získaný užitím prvku 0,5x0,5 mm se příliš neliší od experimentu ani od výsledku odpovídajícího prvku 1x1 mm. Výpočetní doba však byla několikanásobně větší. Můžeme tedy říci, že prvek 1x1 mm byl zvolen vhodně. Podstatný rozdíl výsledků dává však prvek 2x2 mm. Jeho velikost už není tedy pro řešení této rázové úlohy vhodná. Tato velikost prvku už znamená frekvenční filtr, který z řešení vyloučí frekvence vyšších řádů než u předchozích prvků.



Obr. 10

Na závěr byl ještě sledován vliv užití plné a redukované integrace pro zvolený typ prvků a bylo zjištěno, v tomto případě, velmi malé ovlivnění výsledku užitím redukované integrace – viz obr. 11. Přitom výpočetní doba se zkrátila na polovinu. Používat však prvek

s redukovanou integrací obecně nemusí být vždy bez rizika nesprávného výpočtu. Vždy je nutné provést podrobné zhodnocení jeho možností.



Obr. 11

4. Závěr

Předložená práce se zabývá velmi podrobně hodnocením možností experimentálního a výpočtového přístupu k řešení rázové úlohy – pádu modelu kontejneru. Srovnáním výsledků obou řešení na základě jejich velmi dobré shody, je možno říci, že obě řešení byla metodicky velmi dobře zvládnuta. Pokud budou dodrženy popsané postupy, jsou obě metody zastupitelné a o užití jedné nebo druhé rozhodne momentální výhodnost té které z nich.

V práci nebyly sledovány některé další důležité aspekty, z nichž nejdůležitější je vliv lepidla a podložky tenzometrů na jejich signál. Tato oblast by si zasloužila podrobný průzkum, protože při nevhodné volbě lepidla a celé technologie instalace tenzometrů, může dojít k selhání měření. Z výsledků uvedených výše plyne, že v tomto případě byla i tato stránka zvládnuta dobře, díky velké zkušenosti a pečlivosti našich pracovníků, a z nich především Pavla Nonnera.

Předložená práce byla podporována granty : GA ČR - 101/97/0409, 101/00/0674
GA AV ČR - A2076001