

OBLIQUE INCLINED SURFACE VOIDS OF THICK-WALLED CONCRETE STRUCTURES OF NUCLEAR POWER PLANTS - - NUMERICAL SIMULATION OF IMPACT-ECHO DIAGNOSTIC METHOD.

Š. Morávka*

Summary: *Nuclear power plants safety can be significantly affected by defects of ageing concrete structures. To extend lifetime it is necessary to do their inspection by various methods. The ways, how to do it more quickly, cheaply and reliably, are still looking for. Advanced Impact-Echo method seems to be very hopeful. It is based on the reflection of elastic waves from discontinuities and inhomogeneities. The paper continues previous works. The numerical simulations of the fast transient processes around of inclined voids with the various angles to the surface are presented here. The main goals are detection and localization of voids and evaluation of the variable inclinations effects. The experimental verification at the true size reinforced concrete will follows.*

1. Úvod

Řízení stárnutí a prodlužování provozních licencí jaderných elektráren je jedním z nejvýznamnějších problémů současně jaderné energetiky. Pro řízení stárnutí betonových konstrukcí vyhlásila Komise pro jadernou energii OECD-NEA (Nuclear Energy Agency), CSNI (Commission on Safety of Nuclear Installation) tři úrovně priorit. Provozní prohlídky tlustostěnných armovaných betonových konstrukcí, které nejsou přímo přístupné, patří do první skupiny.

Železobetonové konstrukce vzhledem ke svému množství významně ovlivňují bezpečnost celé JE. Aby mohla být životnost JE prodlužována, je nutné tyto konstrukce různými metodami kontrolovat. Hledají se způsoby, jak to dělat levně, rychle a spolehlivě. Do moderní nedestruktivní metody „Impact-Echo“, ASTM (1998) založené na odrazu akustických vln od nespojitostí a nehomogenit, jsou proto vkládány velké naděje.

Tento příspěvek navazuje na předchozí studii možností detekce armování, Morávka, Voldřich (2003) a na práce o diagnostice vad tlustostěnných železobetonových konstrukcí (lokalizace kolmých trhlin na obou površích, Morávka, Voldřich (2004a, 2004b), Pečinka, Morávka, Voldřich (2004) vliv hloubky trhlin a lokalizace plochých uzavřených dutin, Pečinka, Morávka, Voldřich (2005a, 2005b)). Nyní zde navazují simulace různě skloněných povrchových trhlin, částečně také v Pečinka, Morávka, Voldřich (2005c) a v Morávka (2005).

Norma ASTM citovaná v literatuře popisuje dva postupy- první je postup stanovení rychlosti dilatační vlny v betonu pomocí dvou snímačů o známé vzdálenosti. V druhém postupu je popsáno měření hloubky vady (nebo tloušťky desky), spočívající v nalezení

* Dr. Ing. Štefan Morávka: Nové technologie - Výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni; Univerzitní 8; 306 14 Plzeň; tel.: +420 377 634 708; e-mail: moravka@ntc.zcu.cz

dominantní frekvence, která odpovídá opakovaným odrazům dilatační vlny mezi vadou a povrchem. Takto, ve frekvenční oblasti, lze nalézt např. ploché dutiny nebo kanály pro napínací lana. Uvedený přístup aplikují např. kolegové v IZFP (Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren) v Saarbrücken a v pobočce ústavu v Drážďanech. Uvedeným postupem ale nelze detekovat trhliny jdoucí k povrchu. V naší práci se pokoušíme o jiný přístup, vycházející z první části uvedené ASTM. Budeme pracovat v časové oblasti, tj. měřit časy příchodů vlnových čel, která obcházejí různě hluboké a různě skloněné trhliny a podle nich a podle předpočítaných modelových simulací budeme usuzovat na charakter defektu.

Hlavní cíle numerických simulací rychlých přechodových dějů v této části práce jsou:

- možnosti detekce a lokalizace povrchové trhliny různě ukloněné k povrchu při buzení i snímání z jedné strany trhliny (odraz vln od trhliny)
- možnosti detekce a lokalizace povrchové trhliny různě ukloněné k povrchu, kdy buzení a snímač jsou na opačných stranách trhliny (přechod vln přes trhlínu)
- ocenění vlivu velikosti úhlu úklonu trhliny k povrchu

Práce probíhají ve spolupráci s Ústavem stavebního zkušebnictví v na VUT Brno a s Ústavem jaderného výzkumu v Řeži.

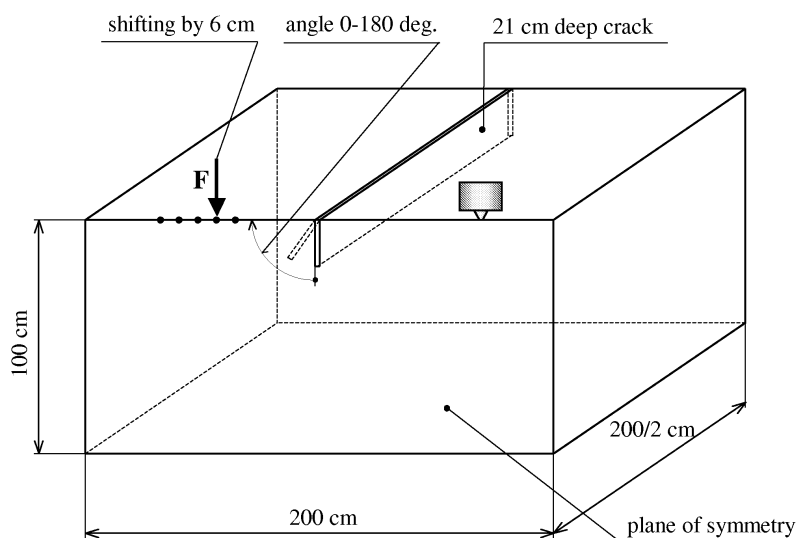
2. Popis úlohy a numerického modelu.

Šíření elastických vln iniciovaných úderem experimentálního kladívka v okolí otevřených trhlín skloněných k povrchu pod různými úhly numericky modelujeme MKP na výřezu rovinné betonové stěny o rozměrech 2x2 a tloušťce 1 metr. S využitím rovinné symetrie řešíme poloviční modely o cca více než 70 tisících 3D prvcích.

Průběžná přímá trhlina o hloubce 21 cm prochází středem vzorku. Její sklon se mění po 10°, od 0° do 180° (konvence: úhel se měří směrem od trhliny k povrchu na tu stranu, kde je zdroj buzení).

Pro každý sklon byly provedeny celkem 34 výpočty, kdy se místo buzení postupně posouvá po 6 cm po povrchové přímce kolmé na trhlínu, zatímco časová odezva je vždy sledována ve všech uzlech (68) této přímky, tedy před i za trhlínou. Schéma úlohy je na obrázku 1.

Trhliny modelujeme jako totální nespojitosti. Nepředpokládáme tedy, že by se jejich stěny dotýkaly. Výchytky způsobené elastickými vlnami při aplikaci metody Impact-Echo jsou řádově 10^{-7} až 10^{-8} m. Lze předpokládat, že trhliny vznikly tahovým zatížením a že jejich rozměry jsou podstatně větší, takže by ke kontaktu stěn nemělo dojít ani při přechodu vlnových čel. Správnost tohoto předpokladu ale potvrdí až experiment.



Obr.1 Uspořádání měření šikmých trhlín.

Použitý software: Pro numerické modelování metody Impact-Echo je, stejně jako v předcházejících pracích, použita metoda konečných prvků, software MARC/MENTAT firmy MSC. Tento systém byl už dříve podrobně testován na podobných úlohách a výsledky byly verifikovány reálnými experimenty, např. Morávka (1998a, 1998b, 2000 a 2001).

Parametry prostorové a časové diskretizace: Po neúspěšných pokusech se 2D modely (výsledky se příliš liší) jsou stěny modelovány osmiuzlovými izoparametrickými prvky s plnou integrací jako 3D tělesa. Velikost hrany prvků je 3 cm. Nejkratší vlna, kterou takový model může přenést teoreticky bez poklesu amplitudy, má vlnovou délku přes 2 uzly, $\lambda_{\min} = 60 \text{ mm}$ (podobně jako Nyquistův limit při digitalizaci analogového signálu). Tomu odpovídající tzv. mezná frekvence je přibližně 70 kHz. Podobně omezuje modelem přenášené frekvenční pásmo i volba velikosti časového kroku integrace. Je tedy účelné, aby obě omezení byla „podobná“ - jinak například náročný výpočet jemně prostorově diskretizovaného modelu může být znehodnocen příliš hrubou diskretizací času anebo naopak, viz např. Okrouhlík, Brepta (1976), Brepta (1982), Morávka (1999). Časový krok integrace byl s ohledem na velikost prvku a na metodu časové diskretizace zvolen $\Delta t = 7 \mu\text{s}$. Časová integrace se provádí do času $t = 1001 \mu\text{s}$ (tj. 143 časových kroků). Dále jsou již výsledky znehodnocovány odrazy od okrajů vzorku.

Metoda časové a prostorové diskretizace: Pro časovou diskretizaci byla použita implicitní Newmarkova integrační metoda. Názory autorů na vhodnost použití implicitní či explicitní formule pro přechodové děje se různí. Výpočet časového kroku explicitní metodou (např. centrální diference) je rychlejší, ale pro dosažení stejné přesnosti jako u implicitních metod je potřeba volit více časových kroků. Dále pak je třeba volit integrační metodu s ohledem na prostorovou diskretizaci. Zde použitá prostorová diskretizace s plnou (konzistentní) maticí hmotnosti a časová diskretizace Newmarkovo metodou způsobí, že nežádoucí vedlejší účinky obou diskretizací se do značné míry eliminují, viz např. Morávka (1999). Související problematice frekvenčního omezení, vlnové disperze a numerické anizotropie byla věnována velká řada prací, z českých autorů např. Okrouhlík (1976 a další) a Brepta (1982 a další).

Koeficienty Newmarkovy metody volíme modifikované: $\beta = 0,275625$ a $\gamma = 0,55$. Tím, zachovávajíc bezpodmínečnou stabilitu metody, zavádíme mírné numerické tlumení, které potlačuje zejména rušivé vyšší frekvence. Uvedená volba koeficientů byla testována např. v Morávka (1998a, 1998b, 2000, 2001).

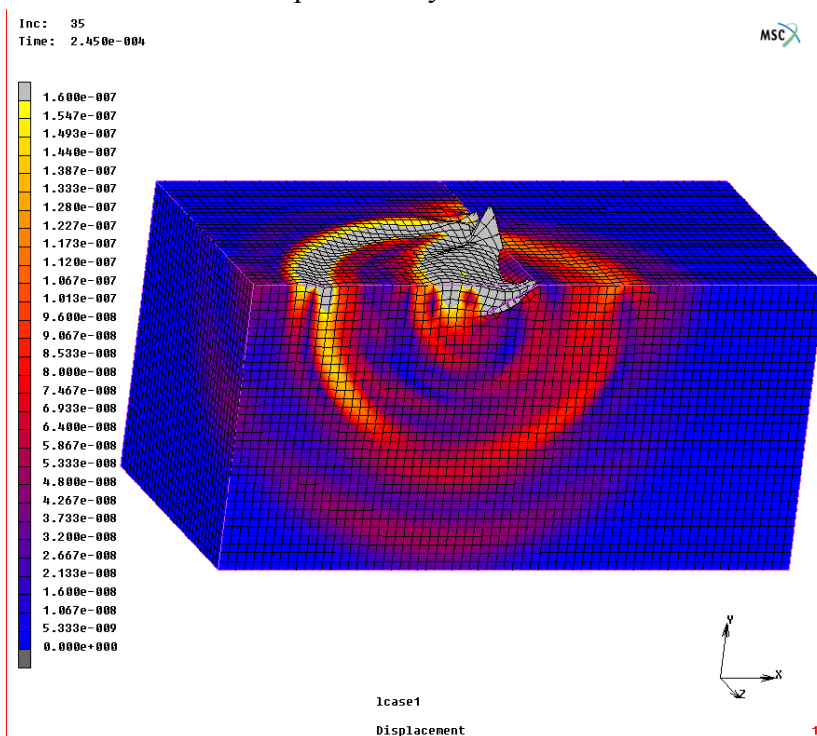
Technická náročnost simulací: Pro volbu parametrů numerických modelů byla využita řada dřívějších zkušeností autora a výsledků porovnávání se známými analytickými řešeními např. Morávka (1998) a s reálnými experimenty např. Morávka (2000a, 2000b). Volba parametrů je často kompromisem mezi přesností výsledků a náročností numerického výpočtu.

Materiál: Betonová směs podle technické zprávy o betonáži na JE Dukovany (viz.lit.) obsahuje písek velikosti zrn do 4 mm a kamenivo do 16 mm. Volbou diskretizace modelu uvažujeme nejkratší vlnovou délku cca $\lambda_{\min} = 60 \text{ mm}$, takže betonový materiál zde lze považovat za *homogenní*. Dále je beton litý, je tedy předpoklad, že by měl být *izotropní*. Zatížení při testech je relativně velmi malé, takže lze uvažovat model *elastický*. Mechanické vlastnosti betonu jsou voleny pro beton B40 podle ČSN 73 12 01.

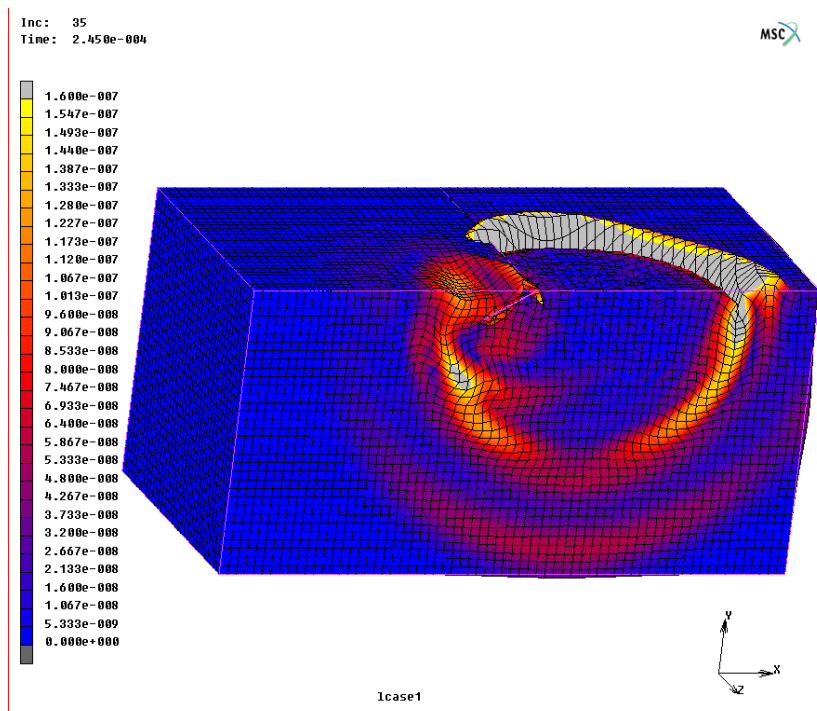
Buzení: Je realizováno úderem experimentálního kladívka. Buzení uvažujeme vzhledem k velikosti modelu jako bodové. Podle velikosti kladívka odhadujeme úder o síle 5000 N, trvající 36 μs . Zdá se ale, že pro měření bude stačit úder mnohem slabší, viz zmínka o experimentech v závěru příspěvku.

3. Odraz vln od ukloněných trhlin.

Tvary odražených vln od trhlin jsou ovlivněny nejen kolmou hloubkou trhliny, ale mění se i v závislosti na úhlu úklonu trhliny. Ukazuje se, že *odrazy vln od trhliny ostře skloněné k povrchu se podstatně liší podle směru úklonu* trhliny, tedy např. sklony 40° a 140° , přestože hloubka takového páru trhlin měřená kolmo k povrchu je shodná. Rozložení celkových posuvů v čase $245 \mu\text{s}$ pro tyto dva případy je znázorněno na obrázcích 2 a 3. Na obrázcích jsou zobrazeny symetrické poloviny vzorku, takže přední „hrana“, na níž se nachází buzení (zde 27 cm od ústí trhliny na povrch), leží v rovině symetrie vzorku. Časové animace posuvů na těchto vzorcích budou předvedeny na konferenci.

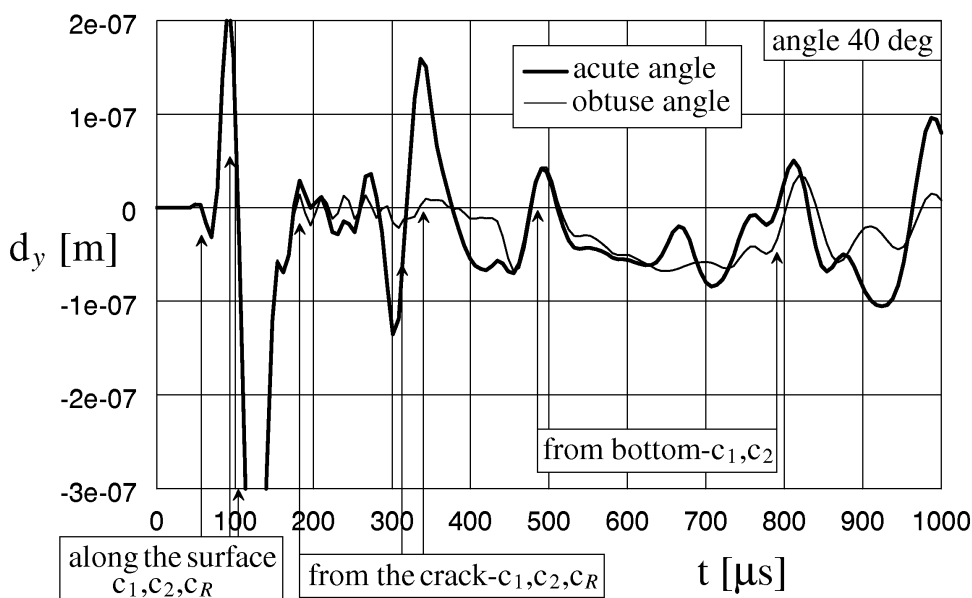


Obr.2 Rozložení posuvů v čase $254 \mu\text{s}$ pro buzení ze strany ostřího úhlu. Symetrická polovina vzorku.



Obr.3 Rozložení posuvů v čase $254 \mu\text{s}$ pro buzení ze strany tupého úhlu. Symetrická polovina vzorku.

Ukazuje se, že pro ostré úhly (obr.2) jsou zejména odrazy čel Rayleighovy povrchové vlny a smykové vlny podstatně významnější, než při postupu vln z opačné strany trhliny, tj. ze strany tupého úhlu (obr.3). Ukázky dvou časových průběhů odezev při buzení ve vzdálenosti 51 cm a snímání ve vzdálenosti 27 cm od ústí trhliny (obě na stejnou stranu) jsou na obr.4. Je vidět, jak odrazy vlnových čel od ostrého (uzavřeného) úhlu (tlustá křivka) mají podstatně větší výchylky posuvu kolmému k povrchu, než odrazy od tupého úhlu (tenká křivka).



Obr.4 Časové průběhy posuvu kolmému k povrchu při odrazu vln od trhliny skloněné pod úhlem 40° a od trhliny skloněné 140° . Buzení 51 cm od trhliny, snímání 27 cm od trhliny na stejné straně.

Další zjištěnou zajímavou skutečností je, že *největší výchylka* odražené Rayleighovy povrchové vlny je pro trhliny skloněné pod úhlem cca 45° , *nikoliv* tedy pro 90° , jak by bylo možno očekávat. Deformační energie obtížněji překonává „past“ ostrého úhlu a většina se jí odráží zpět. Na konferenci bude předveden sled odrazů pro úhel měnící se po 10° , z něhož je tato tendence jasně patrná.

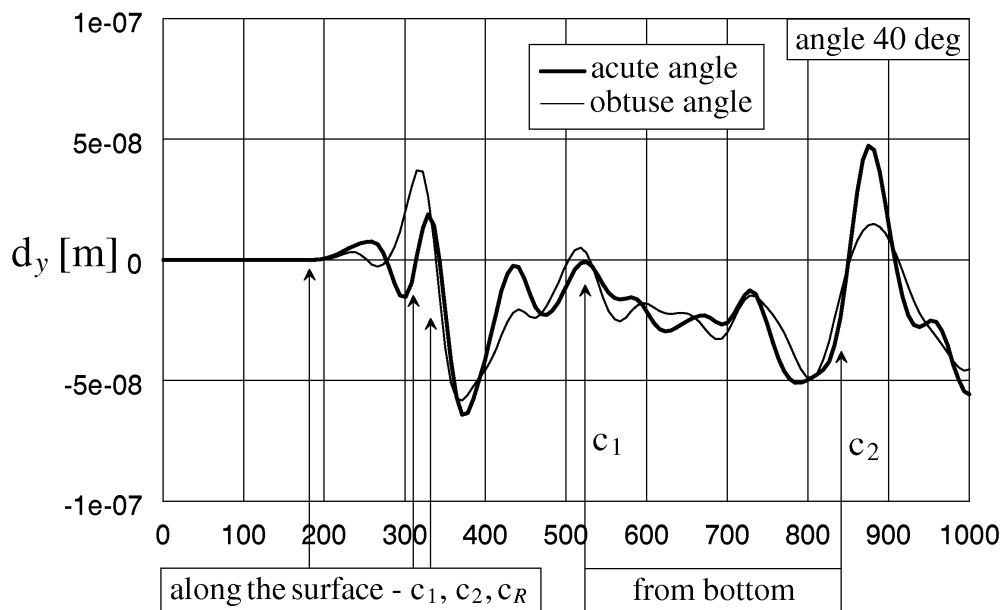
Odraz od tupé strany trhliny, tj. pro úhly cca od 135° výše je *velmi slabý*, vlnový rozruch jakoby po stěně trhliny „sklouzával“ dovnitř tělesa. Je to patrné z již citovaného obr. 4, částečně ze snímku na obr. 2 a také z porovnání rozložení časových průběhů odezev pro odraz od ostré a od tupé trhliny na obrázcích 6 a) a 7 a).

Pro relativně *ostré úhly* (cca do 45°) se podle velikosti úklonu *tvar odražených vln mění nepravidelně*, křivka časového průběhu kolmému posuvu jakoby překmitává. Zjistit sklon takové trhliny podle tvaru odezvy by proto bylo velmi obtížné. Na konferenci bude několik takových odezev předvedeno.

Nejzajímavější (a pro případnou detekci nejvíce matoucí) je ale zkracování čas příchodu odrazů od relativně ostrých trhlín. *S příkláněním* ostré trhliny *k povrchu* se totiž kromě očekávaného odrazu povrchové Rayleighovy vlny od místa, kde trhlina ústí na povrch, začíná *postupně budovat i odraz* už přibližně *od kořene* trhliny, viz obr 6 a) a 6 b), *Distance* = 0,8 m. Oba odrazy pak postupují paralelně. U tupých úhlů (skloněných také blízko k povrchu) dochází k jevu opačnému, tj. objevuje se *zpožděný odraz* od kořene trhliny a odraz od ústí trhliny na povrch postupně téměř mizí, viz obr 7 a) a 7 b).

4. Přechod vln přes ukloněné trhliny.

Vlnový rozruch *přecházející* přes *trhliny přikloněné k povrchu* je poněkud *více utlumen tupě skloněnými trhlínami* (140° a výše), viz obr 7 a), než trhlínami skloněnými ostře (cca do 40°), viz obr. 6 a). Opět (jako u odrazu) povrchová R-vlna jakoby „sklouzává“ po hřbetě trhliny dovnitř vzorku a nestačí se k místu snímače na povrchu dostatečně vyvinout. Rozdíly však nejsou tak veliké jako u odrazu, viz porovnání časových průběhů posuvů pro odraz a průchod na obrázcích 4 a 5, oba obrázky jsou pro trhliny stejně skloněné k povrchu. V relativně velké vzdálenosti od trhlín se pak povrchová R-vlna „dovyvine“ (jak postupně roste její čelo je vidět na obr. 7 a)) a vlny, které překonaly opačně skloněné trhliny, jsou si už více podobné.



Obr.5 Časové průběhy posuvu kolmého k povrchu při přechodu vln přes trhlínu skloněnou pod úhlem 40° a přes trhlínu skloněnou 140° . Buzení i snímání 51 cm od trhliny, na opačných stranách trhliny.

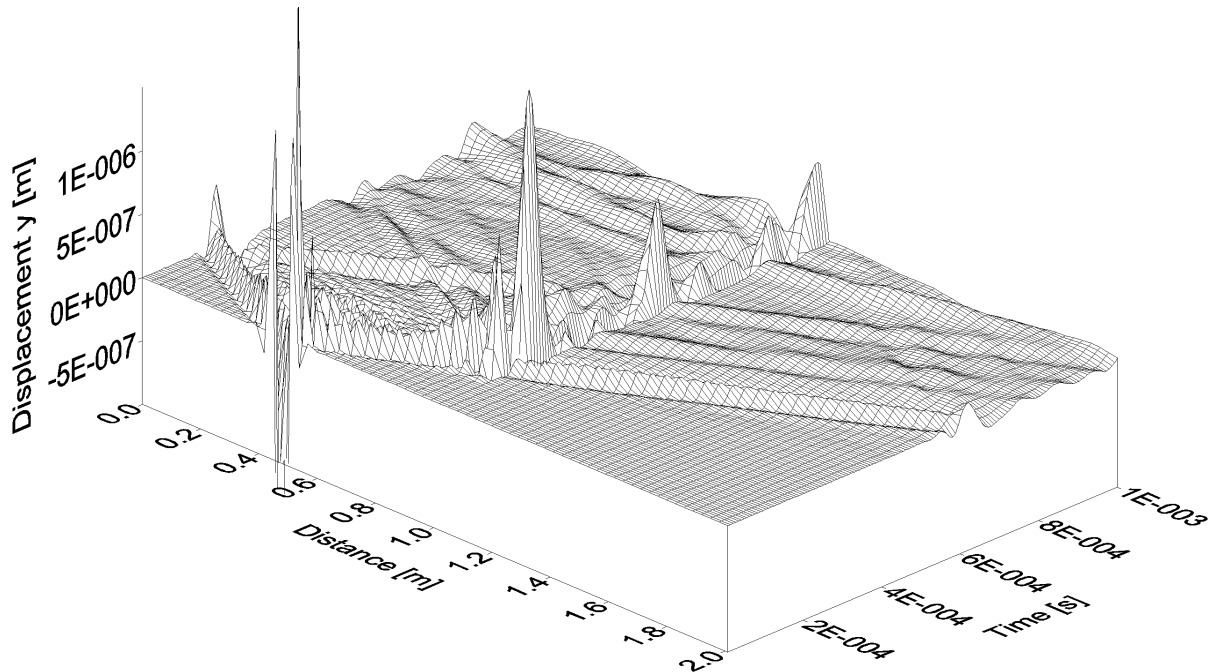
Nečekaně opačný trend je pro přechod přes *trhliny „kolmější“* k povrchu (cca $45^\circ - 135^\circ$). Zde jsou vlny *více tlumeny trhlínami ostrými* (do 90°), než trhlínami nad 90° . Opět bude předvedeno na konferenci na sledu průběhů pro měnící se úhel úklonu trhliny.

Při *přechodu vln přes velmi tupý úhel* (nad 140°) *se vlna „vynoří“ na povrch za kořenem trhliny* (který je blízko povrchu) a *šíří se pak v obou směrech**, tj. jednak pokračuje dále od budícího zdroje a od překonané trhliny a jednak se vrací zpět - k ústí trhliny na povrch, kde se dobře odráží od ostře skloněné trhliny a vytváří tak *druhý, zpožděný, odraz, který postupuje paralelně s vlnovým čelem, které trhlínu přímo překonalo*. Přechodem přes trhlínu tak vlastně dochází k rozštěpení vlnového čela na dvě, viz obr. 7 a) a 7 b), (podobně jako u odrazu od velmi ostře ukloněné trhliny).

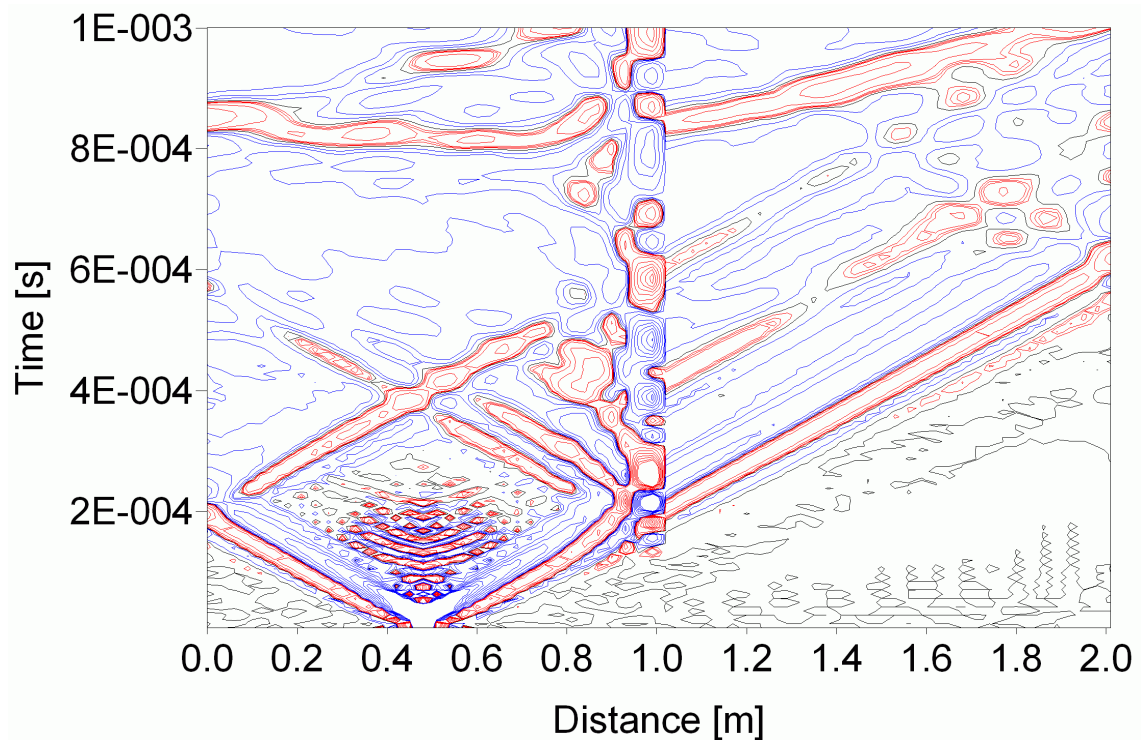
Pokud bychom nešťastně umístili snímač nad takto ostře skloněnou trhlínu (za její ústí ve směru od buzení), pak je dráha (a tím i čas příchodu) vln od budícího zdroje uměle prodloužená, a lokalizace takové trhliny tak může zcela selhat.

* sledováno na přímce, vlna se samozřejmě podle Huygensova principu šíří všemi směry.

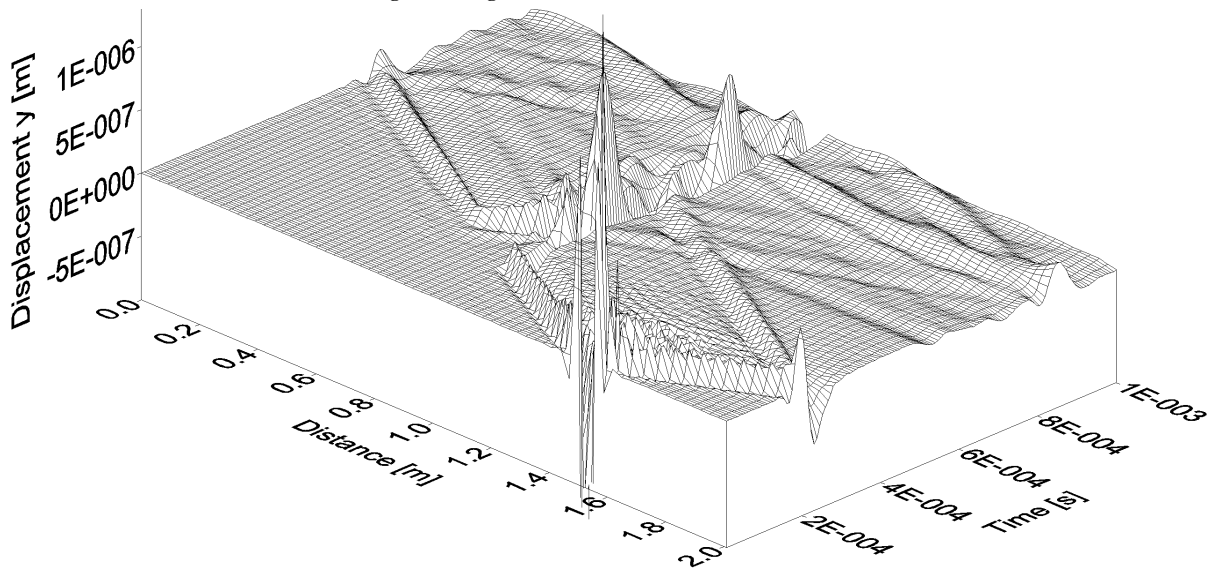
Při porovnání odrazu a přechodu vln přes různě ukloněné trhliny ale se stejnou kolmou hloubkou (tedy z různé strany trhliny) lze obecně konstatovat, že *při přechodu* vln jsou *rozdíly* mezi odezvami podstatně (!) *menší, než při odrazu* vln. Kromě jiných to jasně demonstruje obr. 5, srovnej s odrazem na obr 4.



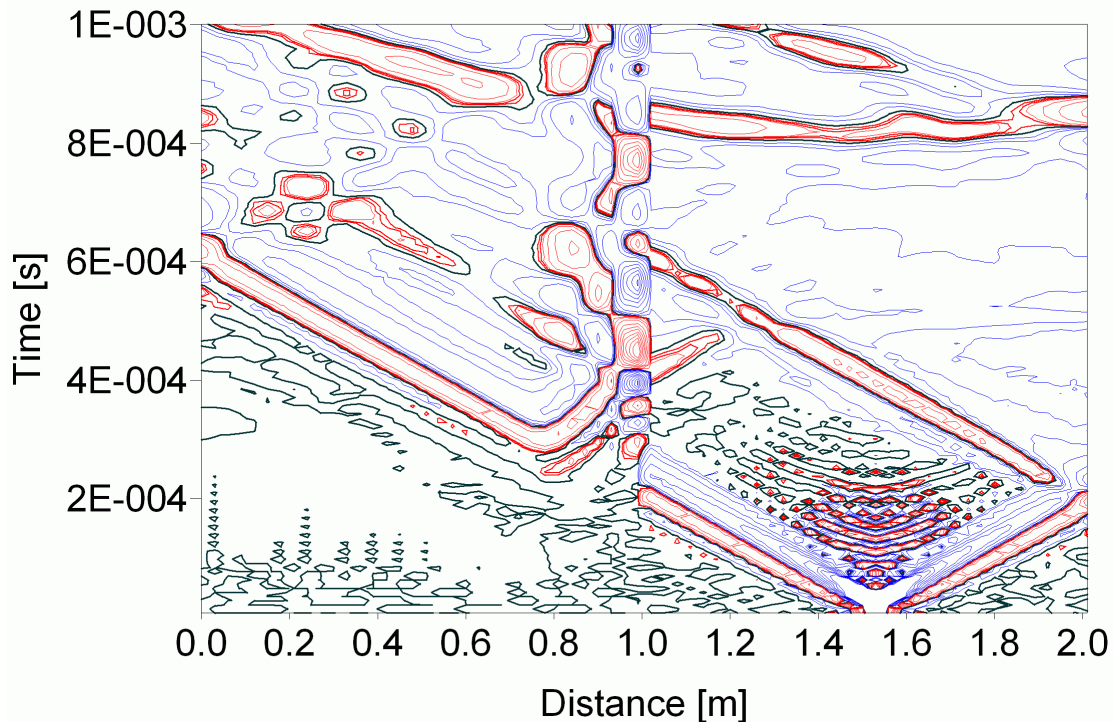
Obr.6 a) Časové průběhy posuvu kolmého k povrchu všech uzlů (68) na přímce procházející středem vzorku po povrchu kolmo k trhlíně pro buzení před ostře skloněnou trhlinou (10°).



Obr 6 b) Půdorysný pohled 6 a).



Obr.7 a) Časové průběhy posuvu kolmému k povrchu všech uzlů (68) na přímce procházející středem vzorku po povrchu kolmo k trhlíně pro buzení před tupě skloněnou trhlínou (170°).



Obr.7 b) Půdorysný pohled 7 a).

5. Závěry a další postup

V této části práce jsme prováděli numerické simulace diagnostické metody Impact-Echo pro detekci a lokalizaci otevřených trhlín různě ukloněných k povrchu. Hlavní závěry jsou:

- pro odraz vln:

- *Odrazy vln od trhliny ostře skloněné k povrchu se podstatně liší podle směru úklonu trhliny (z tupé nebo ostré strany), i když jejich hloubka měřená kolmo k povrchu je shodná. Od ostrých úhlů se vlny podstatně více odrážejí než od tupých. U tupých úhlů, jakoby vlnový rozruch po stěně trhliny „sklouzával“ dovnitř tělesa.*

- *Největší výchylka* odražené Rayleighovy povrchové vlny (podle úhlu úklonu) je pro trhliny skloněné cca 45° , *nikoliv pro 90°* .
- Pro *ostré úhly* (cca 0° až 45°) se *tvár odražených vln nepravidelně mění*, což prakticky znemožňuje zjistit sklon takové trhliny podle tvaru změřeného odrazu.
- Pro relativně ostré úhly se zkracuje čas příchodu odrazů, začíná *postupně budovat odraz už od kořene* trhliny. U tupých úhlů naopak, objevuje se zpožděný odraz.

- pro přechod vln:

- Vlna *přecházející ostře skloněné trhliny* je *více utlumena při přechodu z tupé strany než z ostré*. Jako u odrazu, R-vlna jakoby „sklouzává“ po hřbetě trhliny dovnitř vzorku a nestačí se relativně blízko trhliny na povrchu dostatečně vyvinout.
- Opačný trend je pro přechod přes *trhliny „kolmější“* (cca 45° až 135°) k povrchu. Vlny *více tlumeny ostrými trhlinami do 90°* .
- Při *přechodu přes velmi tupý úhel se vlna „vynoří“* na povrch *za kořenem trhliny*, odkud jednak pokračuje dále od budícího zdroje a jednak se vrací zpět k ústí trhliny, kde tvoří *zpožděný odraz*, paralelní k pokračujícímu vlnovému čelu. Dochází tak k *rozštěpení vlnového čela* na dvě. Při umístění snímače nad ostře skloněnou trhlinu může *lokalizace* takové trhliny *zcela selhat*.
- U *opačně ukloněných trhlin* se shodnou kolmou hloubkou jsou *rozdíly* mezi odezvami podstatně (!) *menší při přechodu vln, než při jejich odrazu*.

Pro MKP výpočty transientních úloh je nutné, aby diskretizace celého modelu byla provedena co nejjemněji (podle požadované frekvence odezvy), ale především rovnoměrně v celém modelu. To vede k řešení velmi velkých soustav algebraických rovnic a k vysokým požadavkům na počítačový výkon. Výpočet každého zatěžovacího stavu na 3 GHz 32-bitovém počítači s procesorem Intel Pentium IV, 2 GB RAM a SCSI disky trval cca 25 hodin. Většina výpočtů byla ale prováděna paralelně na clusterech superpočítačové sítě METACentra. Při paralelizaci na 8 procesorů Pentium 4 Xeon, 3 GHz, 2 GB RAM, spojených sítí GigaEthernet, trvá výpočet jedné úlohy cca 30 minut. Zde děkuji za technickou pomoc ing. Kňourkovi, Centrum informatizace Zpč.univerzity.

Práce na projektu diagnostiky vad betonových konstrukcí nyní pokračují simulací detekce objemné dutiny, vzniklé přítomností cizího tělesa v betonu. Dále pak připravujeme podrobnější analýzu detekce uzavřených trhlin při korodujících tyčích vzniklých expanzí korozních produktů, viz workshop *CSNI/RILEM (2004)*, s respektováním přítomnosti jednotlivých ocelových výztuží.

Na jaře 2006 budou zahájena experimentální měření na pokusných blocích odlitých v měřítku 1:1 v ÚJV v Řeži. Nyní se řeší problematika vhodného buzení (vhodná intenzita s ohledem na citlivost snímače a rušení, vhodný vybuzený frekvenční rozsah). Například dánská firma Germann Instruments nebo americká Impact-Echo Instruments používají ve svých systémech sady malých tvrzených ocelových kuliček o velikosti zhruba 5 až 15 mm, které jsou uchycené na pružince. Opět dánská společnost Dantec Dynamic budí pro optická měření odezev na Impact-Echo miniaturním kladívkem. Uvažujeme taktéž o buzení tenkým dlouhým razníkem - tak abychom budili skokem, namísto impulsem. Nebo vyrobíme zjednodušenou verzi Schmidtova tvrdoměru, používaného ve stavebním zkušebnictví na testování tvrdosti betonu. Do problematiky buzení patří také přesné spínání záznamu měření.

Samostatným problémem je vhodný snímač. Pokud vycházíme aplikace metody Impact-Echo v časové oblasti, musíme měřit časový průběh posuvů (nebo zrychlení) v okolí příchodů prvních vlnových čel. Na to by patrně byl vhodný nerezonanční snímač, tedy takový, jehož vlastní frekvence je velmi nízká, takže se během měření nerozkmitá. Takový jsme ale na trhu neobjevili. Pokusíme se proto modifikovat experimentální snímač navržený Proctorem (1982 a další), který byl pro účely metody akustické emise testován v ČR v 80. a 90. letech, Koberna (1992) a byl úspěšně používán pro laboratorní měření, např. Hora, Pátek (1994), Morávka (2000, 2001).

Doufáme, že budeme moci i další výsledky podobným způsobem publikovat.

6. Poděkování

Práce byla podpořena grantem GAČR *Metodika zkoušení masivních železobetonových konstrukcí* č. 103/06/0891, projektem MPO ČR v rámci projektu programu výzkumu a vývoje „Impuls“, evid.č. FI-IM/130, etapa 2.3 - „Inspekce a kontroly stavebních konstrukcí“ a MŠM ČR přístupem k clusterům projektu METACentra, který řeší sdružení CESNET v rámci výzk. záměru MSM6383917201 „Optická síť národního výzkumu a její nové aplikace“.

7. Literatura

- ASTM standard C1383-98a (1998), *Standard Test Method for Measuring the P-wave speed and the thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*, American Society for Testing and Materials Committee of Standards, PA USA.
- kopie části technické zprávy o betonáži, kapitola IX. *Výroba čerstvé betonové směsi, A – Složení směsi*, tab.str.18.
- Okrouhlík M., Brepta R. (1976): Side Effect of Finite Element Method Applied on Stress Wave Propagation in a Thin Elastic Bar, *Acta Technica ČSAV*, No.4, Praha.
- Brepta R. (1982): Modifikace metody konečných prvků pro nestacionární problémy dynamiky. *Studie ČSAV č.13*, Academia Praha.
- Proctor, Jr. Thomas M. (1982): An Improved Piezoelectric Acoustic Emission Transducer. *Journal Acoust. Soc. Am.*, vol. 71, No. 5, pp. 1163-1168.
- Koberna M. (1993): Broadband acoustic emission sensor with a conical active element in practice. *Journal of Acoustic Emission*, 11, pp. 61-63.
- Hora P., Pátek J. (1994): Měření na tlusté desce. Seminář s mezinárodní účastí *Výpočtová mechanika 94*, Západočeská univerzita Plzeň, Pernink, str.81-88.
- Morávka Š. (1998): Testování možností modelování nestacionárního šíření napětových vln metodou konečných prvků. Národní konference *Inženýrská mechanika '98*, str.489-494, Svratka.
- Morávka Š. (1998): Porovnání analytického řešení nestacionární rázové napjatosti kontinua s výpočtem pomocí MKP., *Strojnícky čas.*49, č.6, str.406-425, Bratislava.
- Morávka Š. (1999): Společné posouzení vedlejších účinků časové a prostorové diskretizace při nestacionárním zatížení. *Národní konference Inženýrská mechanika '99*, str. 391-396, Svratka.

- Morávka Š. (2000): The Elastic Wave Propagation over the Shape Transitions of Bodies. *International Conference Engineering Mechanics 2000*, Svratka, pp. 133-138, Czech Republic.
- Morávka Š. (2001): Porovnání numerického modelu šíření elastických vln v tělesech s výsledky měření piezoelektrickým snímačem. Vliv přítomnosti snímače na měření. *38th International Conference EAN 2000*, pp. 231-236, Tábor.
- Morávka Š., Voldřich J.: (2003) Příspěvek numerické simulace k detekci armování a trhlin v železobetonu. *19. konference s mezinárodní účastí Výpočtová mechanika 2003*, Nečtiny.
- Pečínka L., Morávka Š., Voldřich J. (2004): Mathematical Model of the Propagation of P, S and R-Waves in a Concrete Thick Walls with Rebars and Cracks. *CSNI/RILEM Workshop on Use and Performance of Concrete in NPP Fuel Cycle Facilities*, Madrid, Spain.
- Morávka Š., Voldřich J. (2004): Application the "Impact-Echo" Method to the Concrete Structure Diagnostic in NPP. *National Conference With International Participation Engineering Mechanics 2004*, Svratka, Czech Republic.
- Morávka Š., Voldřich J. (2004): Numerické modelování diagnostiky různě hlubokých trhlin a plochých dutin betonových konstrukcí J.E. metodou „Impact-echo“. *Computational Mechanics 2004, 20th conference with international participation*, Nečtiny, Czech Republic.
- Pečínka L., Morávka Š., Voldřich J. (2005): Lessons Learned From Mathematical Modeling of Detection o Deep Surface Cracks and Internal Voids of Thisk Walled Concrete Structures Using Impact-Echo Method. Safety Assurance of Nuclear Power Plants with WWER, *The 4th International Conference*, Podolsk, Moscow Region, Russia.
- Pečínka L., Morávka Š., Voldřich J. (2005): Numerical Simulation of the NPP's Steel-Concrete Structures Diagnostic by the Impact-Echo Method., *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18)* Beijing, China.
- Pečínka L., Morávka Š., Voldřich J. (2005): In-sevice Inspection of Thick Walled Concrete Structures. *31. MPA-seminar and symposium "Materials & Components Behaviour in Energ & Plant Technology"*, Materialprüfungsanstalt Universität Sttuttgart, Germany.
- Morávka Š. (2005): Numerická simulace diagnostiky ukloněných povrchových trhlin tlustostěnných betonových konstrukcí JE metodou „Impact-Echo“. *Computational Mechanics 2005, 21th conference with international participation*, Nečtiny, Czech Republic.