

Využití matematického modelování k dimenzování dynamicky zatěžovaných důlních uzavíracích hrází

Utilization of mathematical modelling for the design of mining emergency dam subjected to dynamic loading

EVA HRUBEŠOVÁ¹, JOSEF ALDORF², PETR JANAS³

^{1,2} *Department of Geotechnics and Underground Structures, VSB-Technical University Ostrava*

³ *Department of Structural Mechanics, VSB-Technical University Ostrava*

Abstract

The paper deals with the dynamic response of the emergency dam located in the drift obtained on the basis of 3D-mathematical modelling. For the modelling there was used the dynamic modulus DYNI integrated into the software CESAR LCPC (France) based on finite element method. On the basis of the realized analysis there were formulated recommendations for the thickness of the dam with respect to the construction material (Tekblend, Jb, Izolitex), the shape of the dam (conical, non-conical shape) and external stabilization of the dam in the rock mass.

Úvod

Metody matematického modelování jsou v současné době stále více rozšířeným nástrojem používaným pro návrh a posouzení různých typů konstrukcí, charakterizovaných jak tvarem a materiálovými vlastnostmi, tak i charakterem zatížení. V rámci řešení úkolu ČBÚ č. 48-06., Navrzení nového typu uzavíracích hrází z hlediska konstrukce a použitých materiálů, bezpečnosti pracovníků v hlubinných dolech a v podmínkách podzemního stavitelství, na němž se fakulta stavební v současné době podílí, byla provedena prostorová modelová dynamická analýza napětíodeformačního stavu bezpečnostní hráze pomocí dynamického modulu programového systému CESAR-LCPC (Francie). Cílem této numerické analýzy, založené na metodě konečných prvků, bylo stanovení minimální mocnosti výbuchovzdorné hráze používané v podzemí dolů při likvidaci požárů uzavíráním oblastí. Hráz musí být konstruována tak, aby zabránila potenciálnímu nebezpečí šíření rázové vzdušné vlny do důlních prostor. Z této základní funkce hráze plynou požadavky nejen na její tvar a rozměry, ale samozřejmě i na materiály, z nichž je hráz budována. Použité materiály musí umožňovat rychlé postavení hráze i v obtížných podmínkách a musí garantovat odolnost hráze vůči potenciálnímu výbuchu již po 8 hodinách od jejího vybudování. Obecně je tedy napětíodeformační stav hráze závislý na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou materiál hráze, tvar hráze, velikost příčného průřezu hráze, mocnost hráze, pevnostní a přetvárné vlastnosti okolního prostředí hráze, způsob uchycení hráze v okolním horninovém

prostředí, charakter a velikost dynamického zatížení. Doposud nebylo možno z časového hlediska v rámci tohoto výzkumného úkolu modelově analyzovat vliv všech těchto faktorů, v této fázi řešení byl vyhodnocen vliv materiálu hráze (tři typy materiálu), tvaru hráze (kónický nebo nekónický podélný tvar, tvar příčného průřezu obloukový), způsobu uchycení hráze v okolním prostředí (se zářezem a bez zářezu) a tuhosti okolního prostředí hráze (vápenec, uhlí). Velikost maximální amplitudy dynamického zatížení byla uvažována konstantní (1.1 MPa), modelově byly analyzovány dvě varianty časového průběhu dynamického zatížení. První z nich odpovídala experimentálně naměřeným hodnotám velikostí zatížení v čase, druhá varianta odpovídala „trojúhelníkové“ aproximaci tohoto časového záznamu skutečného naměřeného průběhu dynamického zatížení. V další fázi řešení projektu se v návrhu mocnosti hráze předpokládá i zhodnocení vlivu nejčastěji používaných velikostí příčných průřezů hráze.

Základní charakteristika použitého softwaru a výpočetní metody

K modelování uvedené prostorové úlohy byl využit dynamický modul softwarového systému CESAR –LCPC, distribuovaný francouzskou firmou ITECH, pracující na základě metody konečných prvků. Výpočetní dynamický modul vychází z následující soustavy rovnic, která je rozšířením základní soustavy rovnic odpovídající řešení statických úloh metodou konečných prvků:

$$Mu'' + Cu' + Ku = F \quad (1)$$

u – vektor posunů v uzlových bodech (časově závislý)

u' – vektor rychlostí v uzlových bodech (časově závislý)

u'' – vektor zrychlení v uzlových bodech (časově závislý)

M – hmotnostní matice

C - matice tlumení

K - matice tuhosti

F - vektor známých sil a zatížení (časově závislý)

Aplikovaný dynamický výpočetní modul DYNI předpokládá, že matice M , C a K jsou konstantní v čase. Matice tlumení C je lineární kombinací matice tuhosti a hmotnostní matice a lze ji vyjádřit pomocí Rayleighových parametrů tlumení α_R , β_R následovně:

$$C = \alpha_R K + \beta_R M$$

Při řešení výchozí soustavy rovnic s časově proměnnými hodnotami posunů, rychlostí a zrychlení je aplikována tzv. Newmarkova implicitní metoda přímé integrace. Tato metoda vychází z následujících vztahů pro stanovení posunů a rychlostí v čase $t+\Delta t$:

$$u^{t+\Delta t} = u^t + u'^t \Delta t + \left(\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) u''^t + \alpha u''^{t+\Delta t} \right) \Delta t^2$$

$$u'^{t+\Delta t} = u'^t + \left((1 - \beta) u''^t + \beta u''^{t+\Delta t} \right) \Delta t$$

kde Δt je časový krok, α, β jsou integrační konstanty implicitní metody. Pro standardní volbu integračních konstant α, β platí: $\alpha=0.25, \beta=0.5$.

S využitím Newmarkova implicitního algoritmu a po úpravě lze základní soustavu rovnic (1) pro neznámé složky vektoru Δu zapsat ve tvaru:

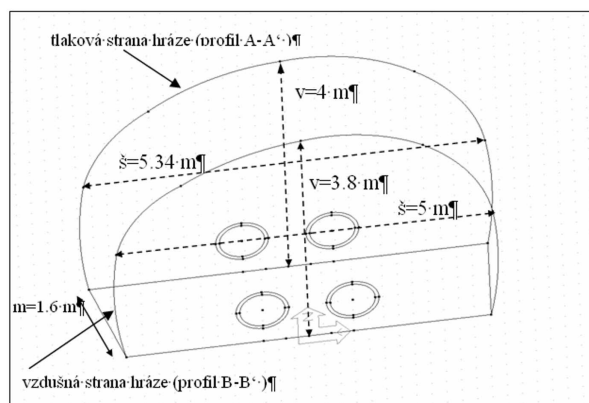
$$(c_0 M + c_1 C + K) \Delta u = F_{ext}^{t+\Delta t} + M(c_2 u'^t + c_3 u''^t) + C(c_4 u'^t + c_5 u''^t) - F_{int}^t$$

$$\Delta u = u^{t+\Delta t} - u^t$$

kde koeficienty $c_i, i=1, \dots, 5$ jsou závislé na časovém kroku Δt a na integračních konstantách Newmarkovy metody, $F_{ext}^{t+\Delta t}$ je vektor vnějších sil v časovém kroku $t+\Delta t$, F_{int}^t je vektor vnitřních sil (reakcí) v časovém kroku t .

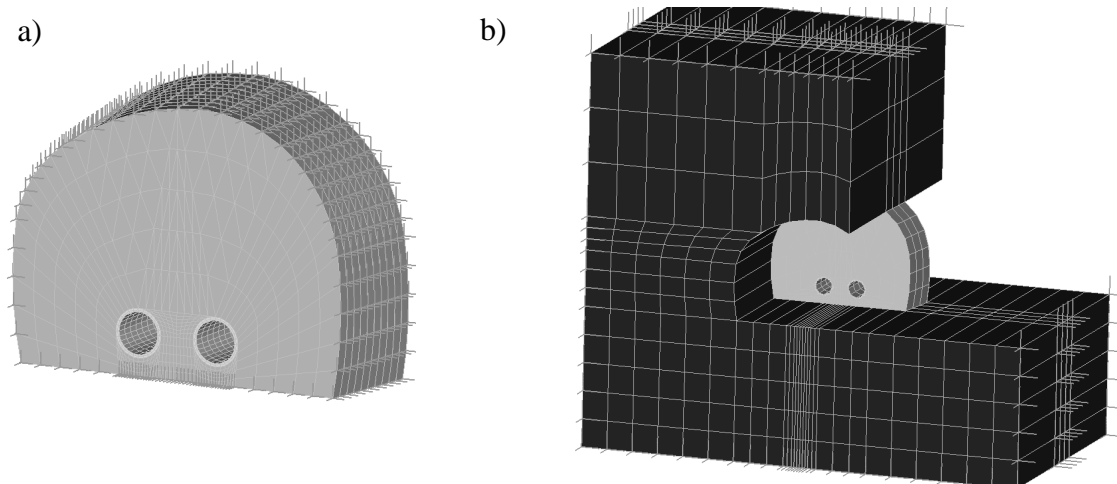
Charakteristika geometrie analyzovaných tvarů hrází

V rámci řešení projektu byla analyzována hráz s obloukovým příčným průřezem, a to ve dvou tvarových variantách v podélném směru. V prvním případě se jednalo o hráz kónického tvaru s klesající průřezovou plochou ve směru od strany tlakové (strana hráže, na níž je aktivováno dynamické zatížení) ke straně vzdušné. Druhá varianta pak uvažovala nekónický tvar hráže v podélném směru. V modelu byly zohledněny dva vyztužené průřezné otvory o průměru 600 mm, jejichž středy jsou umístěny ve vzdálenosti 600 mm od spodní hranice zátky, středová vzdálenost průřezných otvorů je 1200 mm. Výchozí modelová geometrie samotného tělesa hráže pro kónickou hráz o mocnosti 1.6 m (mocnost hráže a tvar hráže při prvním experimentálním odstřelu), včetně uvažovaných průřezných otvorů je uvedena na následujícím obrázku č.1.



Obr. 1. Výchozí geometrie kónické hráže bez záseku o mocnosti 1.6 m
Fig. 1. Basic geometry of conical dam without the cutting (thickness 1.6 m)

V modelové analýze byla mocnost hráze ve směru podélné osy štoly zvažována variabilně – mocnost 1.6 m, 1.3 m, 1.1 m, 0.9 m a 0.6 m s tím, že referenčním profilem v těchto variantách zůstává u kónických typů hrází profil A-A' (tlaková strana hráze). Celkem tedy bylo modelováno 5 variant mocností hráze. Dynamická odezva byla analyzována za předpokladů dvou typů okrajových podmínek. V prvním případě byl model řešen pouze pro samotnou hráz s podmínkami vetknutí na pomyslných kontaktech s okolním prostředím (obr. 2a), ve druhém případě byla uvažována deformační spolupráce hráze s okolním horninovým prostředím při eliminaci přetížení hráze horninovým prostředím (obr.2b). Z hlediska uchycení tělesa hráze v okolním horninovém prostředí (zajištění vnější stability hráze) byla uvažována jednak nejméně příznivá varianta uchycení – varianta bez záseku (plošný kontakt s horninovým prostředím) a dále varianty s pravoúhlým zásekem hlubokým 40 cm, a to buď po celém obvodu tělesa hráze (včetně počvy) nebo varianta bez záseku v počvě.



Obr. 2 a) model hráze s podmínkou vetknutí
 b) model hráze zohledňující deformační spolupráci s okolním prostředím

Fig. 2 a) model of the fully restrained dam
 b) model of the dam based on the deformational cooperation with the rock mass in the surroundings

Materiálové charakteristiky modelu

Modelová analýza byla provedena za předpokladu izotropního prostředí a pružného materiálového modelu. Celkově byl návrh mocnosti hráze proveden pro tři typy materiálů s tržními názvy Tekblend, Jb a Izolitex. U všech těchto typů materiálů se vycházelo při samotném modelovém výpočtu pro stanovení napěťo-převárného stavu z předpokladu přibližně identických hodnot objemové tíhy i převárných charakteristik (modulu pružnosti a Poissonova čísla), materiály se však lišily hodnotami tlakových a tahových pevností, z čehož plyne i rozdílný návrh mocnosti hráze pro různé typy testovaných stavebních materiálů. Nejproblematičtější vstupním parametrem se ukázalo stanovení modulu pružnosti materiálu hráze při dynamickém namáhání. Tento parametr nebyl laboratorně stanoven zcela jednoznačně, výsledky různých laboratorních metod se dosti podstatně lišily. Byla tedy přijata koncepce stanovení tohoto modulu pružnosti na základě kalibrace modelu, založené na srovnání posunů získaných

modelem a posunů na vzdušné straně hráze naměřených při experimentálních odstřelech. První kalibrace modelu byla provedena na základě naměřených posunů 2.5 mm na vzdušné straně hráze odpovídajících prvnímu zkušebnímu odstřelu hráze o mocnosti 1.6 m (materiál Tekblend) a vycházela z předpokladu, že k maximálnímu posunu ve směru podélné osy hráze dochází v čase maximálního dynamického zatížení. V průběhu dalšího upřesňování modelového řešení této úlohy se však ukázalo, že tento předpoklad nebyl správný a že maximální posuny nastávají až v čase cca 10 ms po výbuchu. Další upřesňující kalibrace, zohledňující tento poznatek, pak byla realizována po naměření posunů při třetím odstřelu hráze o mocnosti 1.2 m z téhož materiálu, kdy se použilo přesnější monitorovací zařízení pro měření posunů a bylo tedy možno předpokládat vyšší vypovídací schopnost tohoto měření. Relativně vysoká hodnota naměřených posunů 13 mm v případě hráze s nižší mocností byla pravděpodobně způsobena oslabením tělesa hráze tahovými trhlinami na vzdušné straně hráze. Tyto trhliny hloubky cca 10-15 cm byly indikovány vizuální kontrolou tělesa hráze po provedeném odstřelu a jejich lokalizace velmi dobře koresponduje s výsledky získanými numerickým modelem (Obr.5). Provedenou upřesňovací kalibrací modelu po třetím experimentálním odstřelu byl tedy stanoven modul pružnosti $E_b = 530$ MPa, který velmi dobře koresponduje s hodnotou získanou při dynamickém zatížení vzorků (Petroš 2007). Lutnové průlezy lokalizované v tělese hráze byly ocelové.

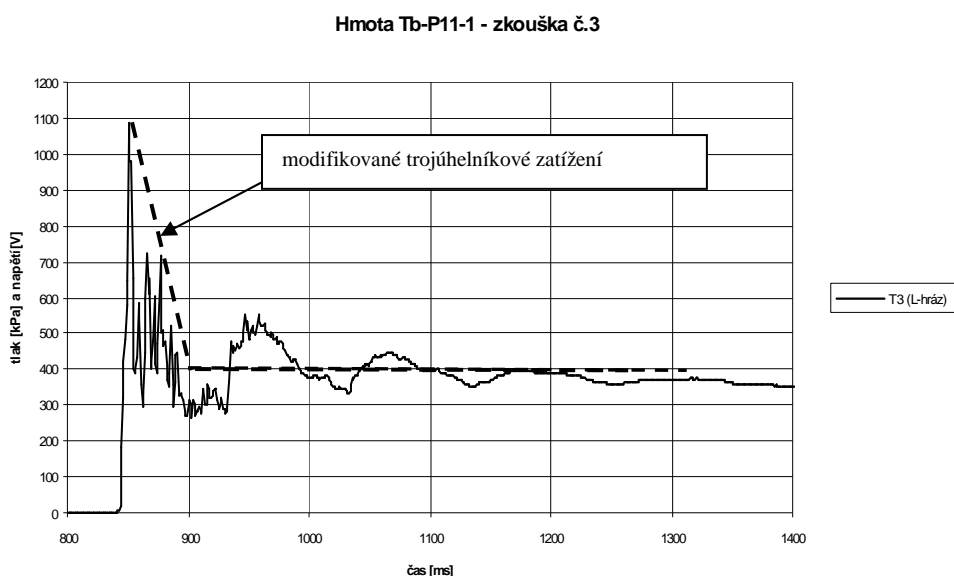
Obklopující horninové prostředí bylo uvažováno ve dvou variantách – první z nich odpovídala realizaci hráze v uhlí, druhá ve vápencovém prostředí pokusné stoly Štramberg. Parametry materiálu hráze, průlezů a okolního prostředí uvádí následující tabulka č.1:

Tab. 1. Vstupní charakteristiky materiálu hráze, průlezů a okolního prostředí
Tab. 1. Input material data of the dam and rock mass

	objemová tíha (kN/m ³)	modul pružnosti při dynamickém zatěžování (MPa)	Poissonovo číslo	tlaková pevnost po 8 hodinách tvrdnutí (MPa)	tahová pevnost po 8 hodinách tvrdnutí (MPa)
materiál hráze	16	530	0.25	Tekblend:8.9	Tekblend:2.08
				Jb: 6.56	Jb:1.65
				Izolítex 3.67	Izolítex:1.1
materiál výztuže průlezů	78	210 000	0.2	nezadáno	nezadáno
obklopující hornin. prostředí	0 (eliminace zatížení)	variantně: 1000 (uhlí) 10000(vápenec)	0.3 pro E=1000 0.2 pro E=10000	nezadáno	nezadáno

Charakteristika dynamického zatížení

Časový vývoj dynamického namáhání (monitorovaný in-situ a modifikovaný trojúhelníkový) je uveden na Obr. 3. Charakteristiky dynamického zatížení vycházejí z podkladů dodaných firmou VVUÚ a.s.. Na základě vyhodnocení monitorovaného časového záznamu dynamického zatížení bylo do výpočtu zavedeno dynamické zatížení hráze charakterizované hodnotami napětí v sedmi časových řezech 840 až 900 ms s časovým krokem 10 ms (max. hodnota napětí 1.1 MPa), což odpovídá průběhu dominantní primární dynamické vlny. Vliv dalšího průběhu dynamického zatížení, odpovídajícího odražené dynamické vlně, nebyl ve výpočtu zohledněn. V případě varianty s modifikovaným trojúhelníkovým zatížením byl vyhodnocován vliv dynamického zatížení v delším časovém úseku (840 – 1300 ms). Zatížení přírub výztuže průlezných otvorů bylo navýšeno až na maximální hodnotu 3.1 MPa, což odpovídá velikosti reakce pod přírubou, při zatížení uzávěru lutny tlakem výbuchu ve výši 1,1 MPa.



Obr. 3. Časový záznam dynamického zatížení (monitorovaný a modifikovaný trojúhelníkový)
Fig. 3. Time record of dynamic loading (monitored and modified triangular record)

Analýza výsledků modelování a formulace doporučení pro dimenzování hráze

Parametrická modelová analýza napětí-deformační situace v bezpečnostní hrázi, následné vyhodnocení parametrických modelových výsledků pro různé konstrukční typy hrází zhotovovaných z jednoho ze tří analyzovaných materiálů a stanovení doporučené mocnosti hráze probíhala v několika fázích, v jejichž průběhu byl model kalibrován a upřesňován, byla vyhodnocována citlivost odezvy hráze na vstupní parametry úlohy, formulována základní kritéria pro dimenzování hráze a provedeno jejich vyhodnocení pro tři materiály (Tekblend, Jb, Izolitex) a různé konstrukce hráze (kónický tvar, nekónický tvar, hráz s pravoúhlým zásekem, hráz bez záseku). Za určující kritéria pro stanovení dolní hranice mocnosti hráze byla přijata:

- maximální posun hráze ve směru její podélné osy je menší nebo roven maximálně přípustnému posunu hráze 8.9 mm, stanovenému laboratorně na trámci 100 x100 x 400 mm při zohlednění součinitele spolehlivosti 1.2
- maximální hodnoty tahových napětí v tělese hráze (vzdušná strana hráze) jsou menší než tahová pevnost daného materiálu stanovená laboratorně po 8 hodinách tuhnutí hmoty (doba 1 odstřelu) s respektováním součinitele spolehlivosti 1.2
- maximální hodnoty tlakových napětí v tělese hráze (tlaková strana hráze) jsou menší než tlaková pevnost daného materiálu stanovená laboratorně po 8 hodinách tuhnutí hmoty s respektováním součinitele spolehlivosti 1.2

Stanovení určujících kritériálních charakteristik pro stanovení mocnosti hráze umožnilo jednak upřesnit požadavky na typ modelových výstupů a jednak základní požadavky na typy nutných laboratorních zkoušek a přesnost a objektivitu jejich výsledků. Vyhodnocení výsledků modelování ukázalo, že rozhodujícím kritériem dimenzování mocnosti hráze z hlediska její vnitřní stability je kritérium tahových napětí na vzdušné straně hráze. Z hlediska vnější stability hráze byl pak dále posuzován způsob uchycení hráze v okolním horninovém prostředí (zásek, kotvení), a to s ohledem na velikosti smykových napětí vznikajících na kontaktu tělesa hráze s okolním prostředím.

V rámci numerické analýzy byla vyhodnocována rovněž situace odpovídající opakovanému odstřelu hráze, který je charakterizován redukcí původní mocnosti hráze (odpovídající 1. odstřelu) v důsledku vlivu tahového porušení vzdušné strany hráze. V této souvislosti je třeba uvést, že aplikovaný prostorový software neumožňuje eliminovat z původního geometrie modelu reálný nepravidelný tvar podoblasti, která je tahově porušena při 1. odstřelu, a následně model znovu přitížit. Bylo tedy nutno přijmout zjednodušující předpoklad, že po 1. odstřelu dochází k redukci původní mocnosti hráze po celé ploše příčného průřezu hráze.

Výsledky modelování ukázaly pouze minimální vliv dvou uvažovaných tuhostí okolního horninového prostředí na maximální hodnoty tahových resp. tlakových napětí ve středové části hráze. Závěrečná doporučení mocností hrází lze tedy považovat za platná jak pro lokalizaci hráze v uhelné sloji, tak i pro hráz ve vápencovém prostředí pokusné štoly ve Štramberku.

Zajímavým zjištěním, vyplývajícím z výsledků modelování, byla ta skutečnost, že v rozporu s původními předpoklady k maximální odezvě tělesa hráze jak z hlediska deformačního, tak i napěťového nedochází v čase maximálního zatížení, ale až s odstupem cca 10 ms. Tento fakt pak následně potvrdily i výsledky měření časového vývoje posunů in situ.

Výsledky modelových výpočtů dokumentují kvantitativně i kvalitativně časový vývoj kmitání tělesa hráze v průběhu dynamického zatěžování, jehož intenzita je, v souladu s předpoklady, nepřímo úměrná mocnosti hráze. Tato skutečnost dokumentuje možnost vzniku tahových trhlin i na tlakové straně hráze, což potvrdila reálná dynamická odezva třetí experimentální hráze o mocnosti 1.2 m, kdy byly tahové trhliny na tlakové straně hráze pozorovány.

Monitorovací měření deformační odezvy hráze v čase dále rovněž dokumentovaly proces tlumení odezvy hráze. Vzhledem k tomu, že v této fázi modelového řešení nebyly známy hodnoty Rayleighových parametrů tlumení α_R, β_R , nebylo tlumení

v modelech zohledněno a výsledky modelu a monitorovacího měření se z tohoto pohledu časového vývoje tlumení odezvy liší. V další fázi upřesňování modelového řešení je tedy jedním z cílů stanovení parametrů tlumení na základě zpětné analýzy vycházející z výsledků monitorovaného časového vývoje deformační odezvy tělesa hráze.

Návrh mocnosti hráze vychází tedy jednak z provedené analýzy výsledků provedených parametrických modelových výpočtů a dále z výsledků laboratorních zkoušek, provedených pracovníky Laboratoře stavebních hmot FAST VŠB-TUO pod vedením Ing. Lukše, Ph.D.

Současná doporučení pro dimenzování bezpečnostní hráze testovaného průřezu (obr. 6):

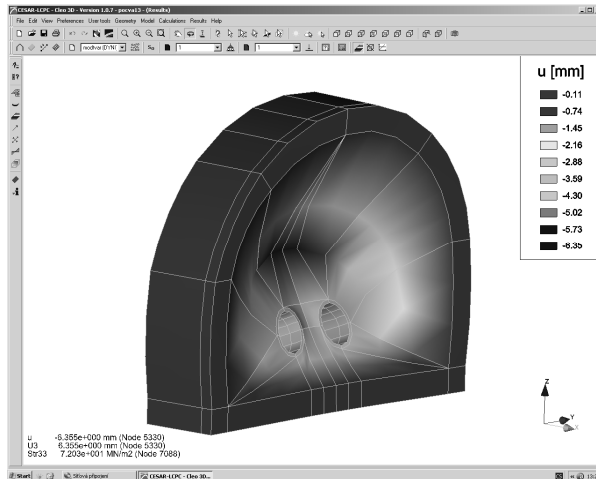
- při použití materiálu Tekblend je doporučovanou tloušťkou vyhovující kritériu tahové pevnosti hodnota 1.3 m, a to jak pro hráze kónického tvaru, tak i hráze nekónické se zářezem po celém obvodě; vzhledem k rozptylu hodnot tahové pevnosti lze připustit tuto mocnost hráze 1.3 m jako hraniční mocnost i pro hráze nekónické bez zářezu; pro hráze kónického tvaru bez zářezu jsou pak hraniční tloušťky 1.1-1.2 m
- při použití materiálu Jb vyhovují požadavku stability hráze s mocností minimálně 1.6 m (nezávisle na konstrukci hráze)
- pro všechny analyzované konstrukce hrází z materiálu Izolitex je doporučovaná minimální mocnost hráze 1.7 m
- opakované dynamické zatížení je dle modelové analýzy pro nekónický tvar hráze spolehlivě možné v případě hráze z materiálu Tekblend o minimální tloušťce 1.6 m, u ostatních materiálů je pro tuto tloušťku překročena při opakovaném dynamickém zatížení tahová pevnost na vzdušné straně hráze; hodnoty tlakových pevností se pro nekónický tvar hráze o této hraniční mocnosti 1.6 m sice zvyšují ve srovnání s jednorázovým dynamickým zatížením až o 100 %, avšak tlaková pevnost všech tří posuzovaných materiálů není překročena; deformace při druhém dynamickém zatížení je o cca 20-30 % vyšší (viz obr. č. 4).

Závěr

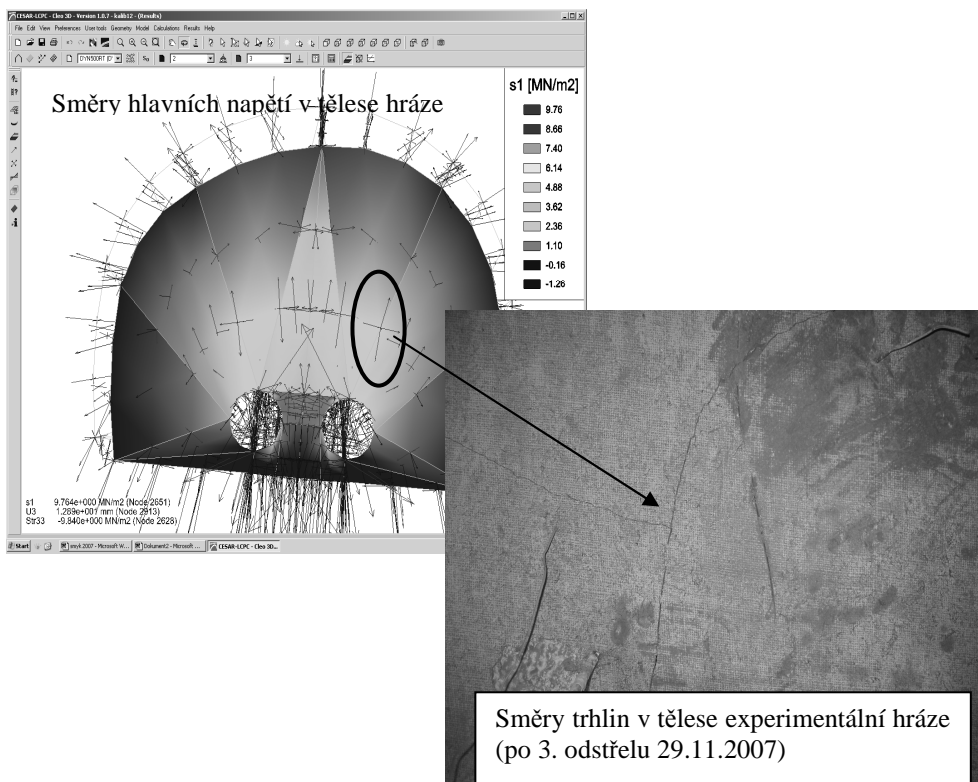
Realizovaná dynamická modelová analýza přispěla k objektivnější představě o chování tělesa bezpečnostní hráze v průběhu referenčního dynamického zatížení s maximální amplitudou 1.1 MPa. Výsledky modelování a jejich komparace s dostupnými výsledky měření a dalšími reálně pozorovanými projevy odezvy experimentálních hrází dokumentují dobrou vypovídací schopnost numerického modelu a jeho použitelnost pro následné doporučení dimenzování bezpečnostních hrází. V další etapě řešení úkolu bude analyzován především vliv velikosti příčného průřezu hráze na její dimenzi a snahou řešitelského kolektivu bude rovněž provedení inverzní analýzy pro stanovení parametrů tlumení a jejich následná implementace do numerického modelu.

Poděkování

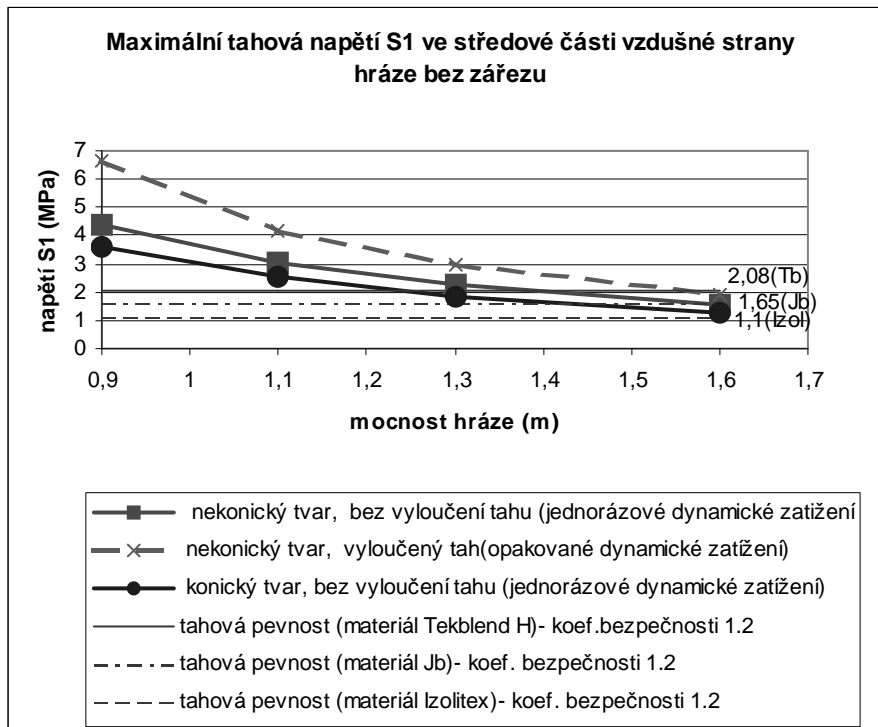
Tento příspěvek byl zpracován v rámci řešení projektu ČBÚ 48-06 „Navržení nového typu uzavíracích hrází z hlediska konstrukce a použitých materiálů, bezpečnosti pracovníků v hlubinných dolech a v podmínkách podzemního stavitelství“



Obr. 4. Průhyb hráze nekónického tvaru o mocnosti 1.3 m se zářezem po obvodu
 Fig. 4. Deflection of the non-conical dam (thickness 1.3 m) with the cutting around the dam perimeter



Obr. 5. Směry hlavních napětí na vzdušné straně tělesa 3. experimentální hráze (mocnost 1.2 m, kónický tvar bez zářezu) a porovnání s pozorovanou lokalizací a směry trhlin
 Fig. 5. Principal stress direction on the air-side of the 3-rd experimental dam (thickness 1.2 m, conical shape without cutting) and comparison with the observed localization and direction of the fissures



Obr. 6. Maximální tahová napětí ve středové části vzdušné strany hráze bez zářezu
 Fig. 6. Maximum tensile stresses in the central part of the air-side of the dam without the cutting

Literatura

PROJEKT ČBÚ č. 48-06 "Navržení nového typu uzavíracích hrází z hlediska konstrukce a použitých materiálů, bezpečnosti pracovníků v hlubinných dolech a v podmínkách podzemního stavitelství".
 Etapa "Statické a stabilitní řešení uzavíracích hrází pro jejich dynamické namáhání", dílčí zpráva pro 5. a 6. kontrolní den, VŠB-TU Ostrava, listopad 2007

MANUÁL PROGRAMOVÉHO SYSTÉMU CESAR 3D – LPCP (CLEO 3D)

Odborné posouzení Doc. Ing. Richard Šňupárek, CSc.