

ZJEDNODUŠENÁ ANALÝZA KOLAPSU MOSTNÍ KONSTRUKCE ZATÍŽENÉ NÁHODNÝM VÝBUchem

František Köhler, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
frantisek.kohler@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

První část tohoto příspěvku obsahuje rešerši na téma analýzy kolapsu mostní konstrukce zatížené náhodným výbuchem založené na skutečné události. Byla prezentována struktura postupu při forenzním ohledání místa nehody zasaženého výbuchem. Způsob určení ekvivalentní hmotnosti nálože TNT a následná analýza příčin vzniku exploze, jejího průběhu a konečných důsledků. Bylo provedeno šetření k určení zdali mostní konstrukce byla vůbec schopna odolat specifickému dynamickému zatížení.

V druhé části se příspěvek zaměřuje na zhodnocení odolnosti mostní konstrukce proti výbuchu explozivní nálože nad povrchem pojižděné plochy mostu pomocí autorova výpočetního algoritmu. Konstrukce byla zatížena blízkým výbuchem. Zdroj výbuštiny v podobě TNT reprezentuje možný teroristický čin nebo neúmyslnou explozi. Cílem práce bylo prozkoumání možnosti skutečného použití zjednodušené metody k řešení odezvy konstrukce a stanovení rozsahu poškození konstrukce od zatížení výbuchem. V rámci tohoto příspěvku jsou prezentovány výsledky a závěry získané z výsledných přetvoření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výbuch • Dynamická analýza • Plastické přetvoření • Kolaps mostní konstrukce

ABSTRACT

The first part of this paper contains researchers on the topic of analysis of the collapse of a bridge structure loaded by an accidental explosion based on real events. The structure of the procedure for forensic examination of the site of an accident affected by an explosion was presented. Method for determining the equivalent weight of a TNT charge and subsequent analysis of the causes of the explosion, its course and final consequences. An investigation was carried out to determine whether the bridge structure was at all able to withstand specific dynamic loads.

In the second part, the paper focuses on the evaluation of the resistance of the bridge structure to the explosion of an explosive charge over the surface of the running surface of the bridge using the author's computational

algorithm. The structure was loaded with a nearby explosion. The source of the explosive in the form of TNT represents a possible terrorist act or an unintentional explosion. The aim of the work was to investigate the possibility of actually using a simplified method to solve the response of the structure and determine the extent of damage to the structure from the explosion load. Within this paper, the results and conclusions obtained from the resulting transformations are presented.

KEYWORDS

Explosion • Dynamic analysis • Plastic strain • Bridge collapse

1. ÚVOD

Vojenské, respektive teroristické útoky nebo náhodné výbuchy mohou způsobit vážné škody na infrastruktuře kolem nás. Tyto extrémní situace mohou zapříčinit kolaps konstrukce ještě před vyčerpáním její návrhové životnosti. Po veřejných budovách jsou mosty nejběžnější infrastrukturou, která se vyskytuje kolem nás. [1]

Přesto, že na civilní konstrukce jako jsou budovy občanského vybavení jsou kladeny poměrně vysoké nároky, mostní konstrukce jsou relativně opomíjené konstrukce. [1]

Neúmyslné výbuchy jsou vysoce nežádoucí. V průmyslu se podnikají kroky pro minimalizaci příčin a dopady zatížení náhodným výbuchem. [3] Práci forenzního inženýra je zjistit, zda výsledná škoda na konstrukci lze přisoudit osobám odpovědným za projekt konstrukce, údržbě nebo jde pouze o nešťastnou náhodu pro konstrukci, která nebyla na enormní zatížení navržena. [1]

Cílem práce bylo provést rešeršní výzkum reálného postupu při forenzním vyšetřování události způsobené náhodným výbuchem. Popis strukturních poškození mostní konstrukce od explozivního zatížení a stanovení příčin nehod na základě využití numerických simulací a inženýrského výpočtu. V návaznosti na předchozí příspěvek z roku 2020, kde byl řešen zjednodušený odhad následků dopadu výbuchu na mostní konstrukci, byl proveden srovnávací výpočet pro ověření metody v praxi a porovnání výsledků.

* Školitel: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.

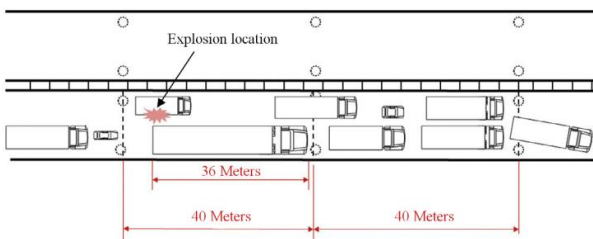


Obrázek 1: Poškozený příčný řez mostu [1]

2. POPIS NEHODY

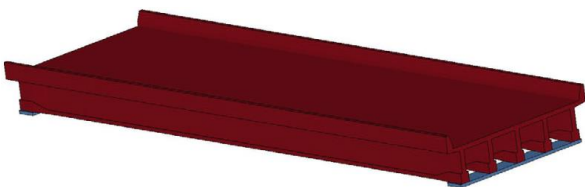
V Číně v blízkosti Hong Kongu počátkem roku 2013 došlo k explozi naloženého kamionu pyrotechnickými materiály pro ohňostroj. Tato nehoda způsobila náhlý kolaps nosné konstrukce. Podle tehdejší zprávy to byl šestý hlavní most, na kterém od července 2011 došlo ke kolapsu konstrukce. [1]

Na Obrázku 1 je vidět poškozený příčný řez mostu složený z předpjatých betonových nosníků sprážených s železobetonovou deskou. Ze zprávy o nehodě je patrné, že k výbuchu došlo ve třetím poli mostu, jak je znázorněno na Obrázku 2. [1]

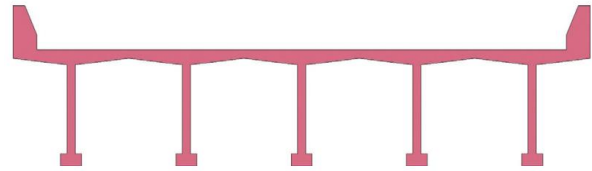


Obrázek 2: Poloha nálože na mostě [1]

Délka rozpětí jednoho pole je 40 m, šířka nosné konstrukce 11 m, nejmenší tloušťka mostovky je 177 mm a největší tloušťka mostovky je 310 mm. Výpočetní model jednoho pole mostu je znázorněn na Obrázku 3. Příčný řez se skládal z 5 nosníků viz Obrázek 4. Po obou krajích mostu byla provedena silniční betonová svodidla pevně spojená s železobetonovou deskou. [1]



Obrázek 3: Model jednoho pole mostu [1]



Obrázek 4: Příčný řez mostu [1]

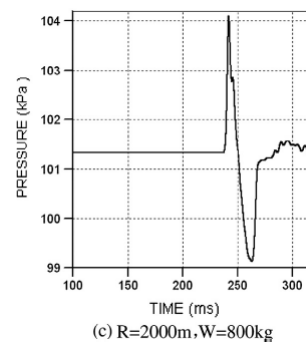
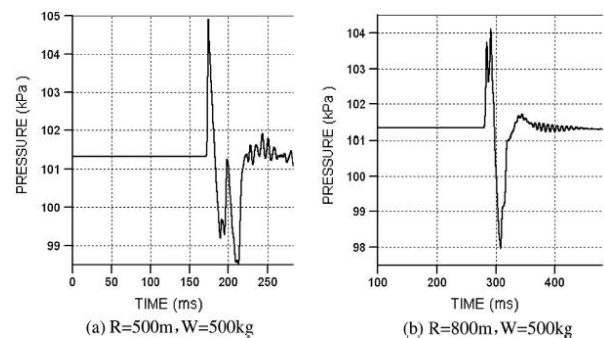
3. ROZLIŠOVÁNÍ PŘÍČIN NEHODY

3.1. Analýza numerickou situací

Pomocí numerické simulace [2,4] byly reprodukovány 3 typické poškození. Bylo potřeba určit minimální ekvivalentní hmotnost nálože TNT odpovídající poškození na konstrukci. [1]

Prvním předmětem řešení byl motor automobilu o hmotnosti 380 kg odhozený do vzdálenosti 75 m s vypočtenou počáteční rychlostí 35 m/s. Zjednodušením motoru a jeho příslušenství vznikl výpočetní model. Když byla hmotnost TNT větší nebo rovna 500 kg, rychlost letícího motoru odpovídala požadavkům, respektive počáteční rychlosti. [1]

Druhým poškozením bylo poškození skla na stavebních konstrukcích ve vzdálenosti 500 m, 800 m, a 2000 m od epicentra výbuchu. V souladu se znalostí hodnoty kritického přetlaku na čele rázové vlny k rozbití skla lze zjistit nejmenší možný ekvivalent TNT. Dle průběhů křivek na Obrázku 5 byla určena nejmenší ekvivalentní hmotnost TNT k požadovaným účinkům na skleněné tabule jež odpovídala 800 kg. [1]



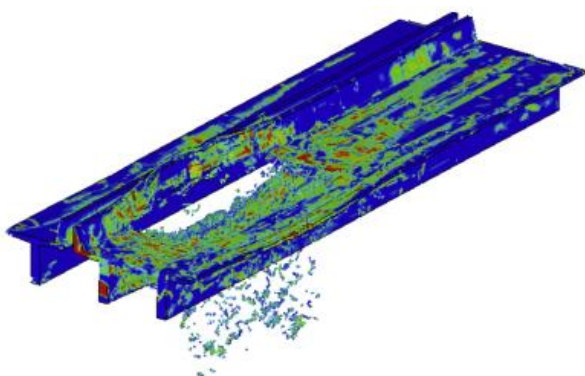
Obrázek 5: Velikost přetlaku na čele rázové vlny pro různé vzdálenosti od epicentra výbuchu [1]

Třetím aspektem poškození bylo vetknuté betonové svodidlo vedlejšího mostu poblíž centra výbuchu, na kterém bylo patrné rozsáhlé porušení na 7 m jeho délky viz Obrázek 6. Rozdrcená byla také velká část mostovky pod havarovaným nákladním vozem. [1]



Obrázek 6: Poškozené vetknuté svodidlo [1]

Byl vytvořen výpočetní model s konečnými prvky, který vypočítal poškození při různých hmotnostech nálože TNT. Z výsledků numerické simulace bylo patrné, že poškození betonového svodidla a mostovky konstrukce odpovídalo výbuchu nálože TNT o hmotnosti 800 kg, jak je patrné z Obrázku 7. [1]



Obrázek 7: Poškození mostu pro nálož $W_{TNT}=800$ kg [1]

3.2. Analýza inženýrským výpočtem

Podle zprávy o nehodě bylo ve spodní části nákladního vozidla nalezeno 350 pytlů potencionální výbušniny. Hmotnost každého pytle byla 20-30 kg. [1]

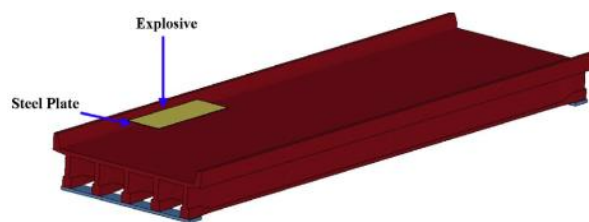
Pravděpodobnou příčinou detonace vozíku je skutečnost, že nákladní vůz jel vysokou rychlostí po dálnici a následně prudce zabrzdil na mostě. Opakované nárazy a prudké zabrzdění způsobily detonaci nálože. [1]

4. ANALÝZA PROVEDENÍ MOSTU

Na základě výpočtu ekvivalentní hmotnosti nálože TNT při výbuchu, respektive režimu poškození, byly vyšetřovány příčiny výbuchu. Na základě prověření lze určit, zdali vážné poškození mostu bylo způsobeno vadou návrhu. [1]

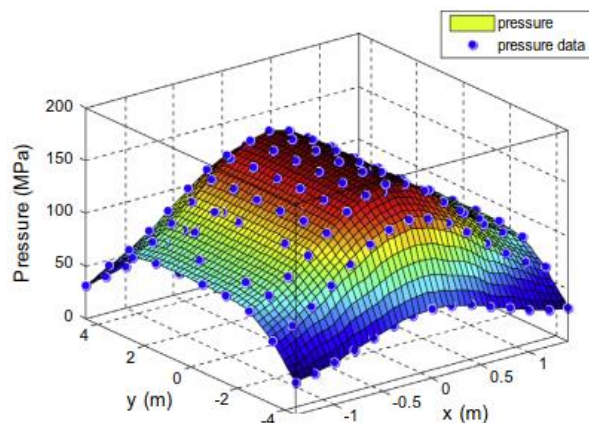
4.1. Numerická simulace charakteristiky poškození

Byl sestaven FEM model jednoho pole mostu viz Obrázek 8. Výbušnina byla umístěna 1,2 m nad mostovkou. Explosivní nálož byla rozprostřena v rozměru 7 m x 2,5 m x 0,01 m dle schématu rozložení v nákladním automobilu. Poškození mostovky způsobené konstrukcí automobilu je znázorněno na Obrázku 9, kde rozložení tlaku po mostovku nabývá hodnot od 34 MPa po 165 MPa. Historie tlakového zatížení mostovky pod zatížení výbuchem je znázorněna na Obrázku 10. Doba trvání zátěže byla přibližně 4 ms. [1]



Obrázek 8: FEM model mostu [1]

Podle teorie dynamiky konstrukcí zatížených impulzem, explozivní zatížení vyvoluje smykové poškození, které je v souladu s místem porušení konstrukce. Mostovka utrpěla vážná poškození a oblast přímého stříhu odpovídala místu nehody. [1]

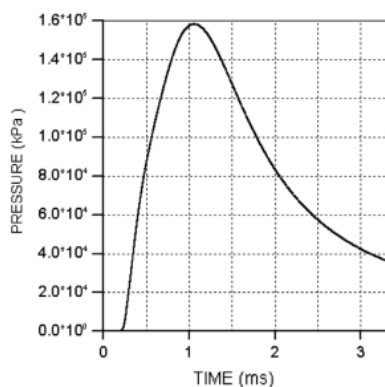


Obrázek 9: Rozložení přetlaku na desce od výbuchu [1]

4.2. Úroveň poškození vypočtena inženýrským odhadem

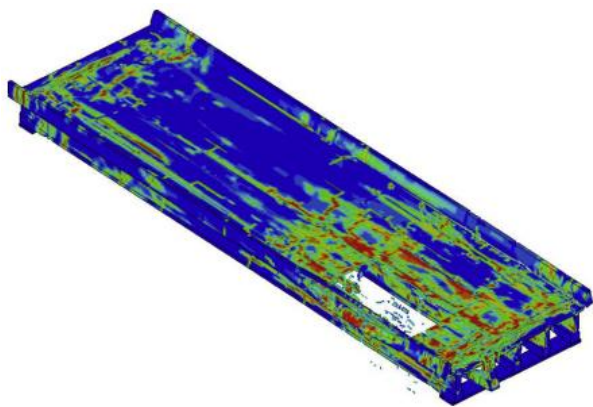
Pokud se specifikuje ekvivalentní nálož TNT na 792 kg, vzdálenost výbuchu na $r = 1,8$ m – lze na základě manuálu [5] určit velikost maximálního přetlaku na čele rázové vlny, která odpovídá hodnotě $\Delta p_m = 18,3$ MPa a tlaku na čele rázové vlny při odrazu od konstrukce na $\Delta p_r = 142$ MPa. [1]

Při takto silném impulzu se nemohl celý most v tak krátkém časovém intervalu přetvořit a tím dissipovat energii způsobenou výbuchem. Na konstrukci došlo k lokálnímu smykovému zatížení. Lokální poškození mostu bylo vypočteno pomocí jediného stupně volnosti a křivky závislosti velikosti tlaku na čase viz Obrázek 10. [1]



Obrázek 10: Křivka závislosti tlaku na čase od zatížení výbuchu na mostovce [1]

Z výsledků poškození získaných numerickou simulací a inženýrským výpočtem lze říct, že poškození mostu byla velice vážná a neslučitelná s odolností mostu viz Obrázek 11. Nehoda proto nebyla způsobena vadou konstrukce. [1]



Obrázek 11: Simulace poškození mostu v dobré kondici od zatížení výbuchem [1]

5. ZÁVĚR FORENZNÍHO VYŠETŘOVÁNÍ

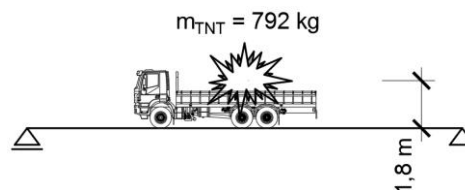
V tomto článku v rámci forenzního vyšetřování místa nehody byla odhadnuta ekvivalentní hmotnost nálože TNT při výbuchu na základě charakteristik poškození. Na základě analýzy z rešeršní části práce byly určeny velikost škod na konstrukci na základě ekvivalentní hmotnosti TNT pomocí inženýrského odhadu a numerické simulace. Bylo vypočteno dynamické zatížení na konstrukci. Výsledky ukazují, že nehoda byla způsobena neúmyslným výbuchem nákladu nákladního vozu nikoli vadou konstrukce mostu. [1]

6. POSUDEK ZJEDNODUŠENOU METODOU

6.1. Úvod

V návaznosti na autorův předchozí výzkum bylo provedeno ověření výsledků vyjadřující velikost poškození konstrukce pomocí zjednodušené metody pro výpočet odezvy konstrukce na zatížení výbuchem při využití znalosti dynamiky a mezního přetvoření průřezu.

Konstrukce byla zatížena blízkým výbuchem s umístěním zdroje výbuchu v konstantní vzdálenosti 1,8 m nad mostovkou. Schéma sestavy je patrné z Obrázku 12. Zdroj výbušnin byl reprezentován TNT složi. Geometrie mostu byla popsána v rešeršní části příspěvku.



Obrázek 12: Schéma sestavy na mostě

Cílem výpočtu bylo ověření použitelnosti metody při reálné situaci. V rámci tohoto výpočtu budou reprezentovány pouze výsledky z výsledných přetvoření konstrukce.

6.2. Analytický výpočet

Cílem výpočtu bylo přijít na odezvu předem dané konstrukce a určit poškození se znalostí specifických charakteristik od výbuchu jako je například přetlak na čele rázové vlny a doba trvání zatížení od exploze.

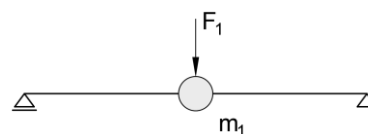
6.3. Výpočet zatížení na konstrukci

Referenční výbušninou byla zvolena slož TNT ve vzdálenosti 1,8 m nad povrchem konstrukce mostu o hmotnosti 792 kg. [5]

Vzhledem k tomu, že byla známa hodnota přetlaku na čele rázové vlny, byla eliminována chyba enormního rozptylu hodnot při určování velikosti zatížení za použití empirických rovnic. Maximální přetlak při odrazu odpovídá $\Delta p_r = 142$ MPa.

6.4. Diskretizace zatížení do hmotného bodu

Celá konstrukce byla zjednodušena na 1 hmotný bod se soustředěnou hmotou do středu rozpětí. Bod kmitá pouze v jedné rovině – Single degree of freedom model viz statické schéma na Obrázku 13.



Obrázek 13: Statické schéma

Mostovka konstrukce byla zatěžována přetlakovou vlnou ve tvaru kuloploch, kde tlaková vlna postupně zatěžovala povrch mostu.

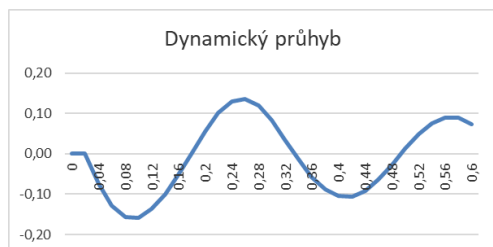
6.5. Dynamická analýza

Z podmínek rovnováhy na jednom poli mostu byla získána tuhost vyšetřovaného prvku.

Odezva konstrukce byla spočtena metodou centrálních diferencí. Časový krok pro výpočet průhybu konstrukce byl zvolen 0,001s.

Dosažením do rovnice metody centrálních diferencí se získala pro každý jednotlivý časový krok výchylka hmotného bodu (HB) v čase viz graf na Obrázku 14.

Tímto způsobem se odvodil maximální dynamický průhyb konstrukce od zatížení výbuchem s aplikací impulsu jako zatížení odpovídající hodnotě $w_{dynamic} = 158 \text{ mm}$.

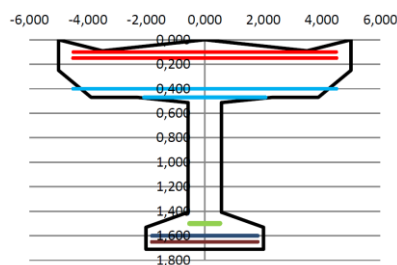


Obrázek 14: Dynamický výkmit HB

6.6. Plastická analýza

Průhyby konstrukce od výbuchu se pohybují řádově ve vyšších číslech než běžné průhyby od statického zatížení. Nehledě na fakt, že konstrukce musí odolat enormnímu přetvoření během velmi krátkého časového úseku pohybujícího se v hodnotách milisekund. Proto pro posouzení konstrukce byla zvolena analýza pomocí mezního přetvoření.

V první řadě se idealizoval příčný řez nosného systému mostu viz Obrázek 15. Definováním jednotlivých poloh řad předpínací výztuže, respektive betonářské výztuže se získala představa o konkrétním přetvoření v každé výztuži.



Obrázek 15: Schéma idealizovaného průřezu

6.6.1. Určení polohy neutrální osy

Poloha neutrální osy nepoškozeného průřezu byla odvozena pomocí výpočtu rovnováhy sil na průřezu. Výpočet probíhal proužkovou metodou, kdy byl průřez rozdělen na jednotlivé dílčí proužky a pro každý proužek se spočítalo odpovídající protažení a napětí. Tak bylo odvozeno napětí v betonu i síla a moment na mezi únosnosti.

Rozšířením původního algoritmu o další iteraci se dopočetlo maximální pootočení při maximálním průhybu od zatížení výbuchem a určilo se odpovídající přetvoření. Pro dané přetvoření se provedl výpočet rovnováhy sil na průřezu. Výsledkem bylo přetvoření v kritickém místě. Z hodnoty bylo dopočteno přetvoření v celém průřezu. Výsledkem je rotační kapacita průřezu před kolapsem.

Posudek probíhal na základě zkoumání mezního protažení materiálu a zhodnocení dopadu na konstrukci.

6.6.2. Přetvoření konstrukce od výbuchu

Pomocí výpočtu mezního přetvoření nosníku bylo vypočteno mezní pootočení průřezu při porušení. Maximální hodnota odpovídá průhybu nosníku $w_{critic} = 122 \text{ mm}$.

Kritickým materiálem v posudku byla předpínací výztuž, kde díky enormnímu průhybu na nosníku dochází k přesáhnutí meze pevnosti předpínacího lana a k následnému kolapsu konstrukce bez zjevného varování konstrukce předem.

7. ZÁVĚR

Práce byla rozdělena na rešeršní a výpočetní část. Rešeršní část sloužila k pochopení zpětného získávání informací z ohledání exponovaného místa zasaženého explozí, které jsou důležité pro výpočetní analýzu.

Výpočetní část práce zkoumala použitelnost zjednodušené metody pro analýzu konstrukce bez složitých výpočetních operací. S předpokladem, že se jedná o odhad pomocí zjednodušené metody se prokázalo na modelu o jednom stupni volnosti (SDOF) použití metody pro získání kritického průhybu na konstrukci vyvolaného výbuchem bez speciálních úprav tuhosti konstrukce. Kombinace metody centrálních diferencí, analýzy průřezu pomocí metody rotačních kapacit a metody mezního přetvoření je dostatečná v případě výbuchu vzdáleného a ve střední vzdálenosti. Blízké a kontaktní výbuchy mají zcela odlišné chování, to samé platí pro odezvu konstrukce. Problematika kontaktních výbuchů a výbuchů v přechodové vzdálenosti nebyla součástí této práce.

Podle výsledku výpočtu dynamického chování mostní konstrukce, byl posouzen maximální dynamický výkmit vyvolaný explozí na mostní konstrukci v závislosti na skutečně použité hmotnosti nálože a vzdálenosti nálože od mostovky dle události v Číně 2013.

Přesto pro úplnou verifikaci zjednodušené metody je potřeba provést desítky takovýchto výpočtů, aby bylo možné výpočet optimalizovat a určit jeho okrajové podmínky v běžné praxi.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří Doc. Ing. Marku Foglarovi, Ph.D. za konzultace, užitečné rady a pomoc při vypracování této práce.

Reference

- [1] W. Wang, R.C. Liu, B. Wu, Analysis of a bridge collapsed by an accidental blast loads, Eng. Fail. Anal. 36 (2014) 353–361.
- [2] AUTODYN. Theory Manual. Century Dynamics; 2006.
- [3] Sorensen A, McGill WL. What to look for in the aftermath of an explosion? A review of blast scene damage observables. Eng Fail Anal 2011;18(3):836–45.
- [4] LS-DYNA. Version 971 Manual: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore (CA, USA); 2007.
- [5] TM5-855-1: Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons: US Department of the Army, Technical Manual; 1986.