

VYUŽITÍ 3D NUMERICKÝCH SIMULACÍ PŘI STANOVENÍ HYDRODYNAMICKÉHO ZATÍŽENÍ PŘELÉVANÉ MOSTOVKY

USE OF 3D NUMERICAL SIMULATION IN THE PROCESS OF QUANTIFICATION OF HYDRODYNAMIC LOAD ON OVERFLOWED BRIDGE DECK

Ing. Michal Pavlíček, doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.

ABSTRAKT

Článek se zabývá možnostmi stanovení hydrodynamického zatížení obtékané mostovky s využitím 3D numerických simulací. Při povodňových průtocích, kdy může docházet k zaplavení a přelití mostovky, dochází vlivem proudění okolo konstrukce mostovky ke vzniku hydrodynamického zatížení. Kvantifikace tohoto typu zatížení je nezbytným vstupem pro statické posouzení mostní konstrukce. Za tímto účelem byl vytvořen 3D numerický model proudění vody o volné hladině v programu Flow 3D. Pro konkrétní tvary příčných řezů mostovkou byl s použitím tohoto modelu ověřen vliv tvaru mostovky na velikost hydrodynamického zatížení při různé úrovni zaplavení a různých hodnotách přítokové rychlosti. Na základě zjištěných hodnot byly vyhodnoceny hodnoty tvarového součinitele horizontální složky hydrodynamického zatížení. Dosažené výsledky z programu Flow 3D byly porovnány s již realizovanými měřeními na fyzikálním modelu a s výsledky z 2D numerického modelu v programu ANSYS Fluent.

Klíčová slova: Flow 3D, 3D numerická simulace, hydrodynamické zatížení, přelévaná mostovka, tvarový součinitel.

ABSTRACT

The article describes quantification of hydrodynamic load on overflowed bridge deck using 3D numerical simulation. During floods water level in a river channel can reach a lower edge of a bridge deck and bridge deck can be overflowed. Hydrodynamic load is caused by water flow around a bridge deck. Quantification of the load is an important input to assessment of a bridge deck stability. Solution was pursued by using 3D numerical simulation of open channel flow in Flow 3D software. Influence of shape of bridge deck on value of hydrodynamic load was verified for different shapes of bridge deck and different values of inundation ratio and flow velocity. Values of drag coefficient is result of computation. The article provides comparison of 3D numerical simulation with physical experimental testing in Flow 3D and result of 2D numerical simulation in ANSYS Fluent.

Key words: Flow 3D, 3D numerical simulation, hydrodynamic load, overflowed bridge deck, drag coefficient

1 ÚVOD

Při povodňových průtocích, kdy dochází k částečnému nebo úplnému zaplavení mostovky, je nutné kvantifikovat hydrodynamické zatížení působící na konstrukci mostovky. Hodnoty tohoto zatížení lze snížit např. zvýšením úrovně mostovky nebo úpravou tvaru mostovky do hydraulicky vhodnějšího tvaru. Úprava tvaru mostovky je možná při relativně nízkých investičních nákladech oproti zvýšení úrovně mostovky, které vyvolává související náklady na úpravu nivelety dráhy či pozemní komunikace.

Hydrodynamické zatížení obtékaných těles je obecně vyjádřeno v podobě odporové síly působící proti směru proudění. Ta je závislá na hodnotě odporového součinitele stanovené za předpokladu, že přítomnost stěn koryta ani volná hladina neovlivňují proudění v okolí obtékaného tělesa [1].

V normě ČSN 75 0250 [2] a odborné literatuře [1] lze nalézt doporučené hodnoty odporových součinitelů pro běžné tvary obtékaných těles. Pro tělesa složitějšího tvaru se dle [2] doporučuje stanovit tyto hodnoty experimentálně.

V odborné literatuře lze také nalézt řadu prací zaměřených na stanovení hydrodynamického zatížení přelévané mostovky [3], [4], [5]. Předmětem těchto prací je zpravidla fyzikální i numerické modelování proudění vody přes různé tvary mostovek. Přínos předkládaného článku spočívá především v ověření výše uvedených publikovaných konvenčních přístupů na atypických tvarech mostovky.

2 STANOVENÍ HYDRODYNAMICKÉHO ZATÍŽENÍ PŘELÉVANÉ MOSTOVKY

Hydrodynamické zatížení je uvažováno jako změna namáhání konstrukce oproti stavu, kdy je kapalina v klidu. Při proudění reálné kapaliny okolo konstrukce mostovky působí od vody na konstrukci tlakový odpor (výsledný silový účinek normálových napětí působících na obtékaný povrch mostovky) a třecí odpor (výsledný silový účinek tečných napětí působících na obtékaný povrch mostovky). Normálové napětí působící na obtékaný povrch mostovky je způsobeno tlakem proudící kapaliny. Tečné napětí vzniká vlivem tření proudící kapaliny o povrch tělesa. Vlivem viskozity kapaliny je u stěn obtékaného tělesa nulová rychlost (kapalina přilne k povrchu) a se vzdáleností od povrchu tělesa se rychlost zvyšuje. Dle Prandtlů [1] se v okolí povrchu tělesa vyskytuje tzv. mezní vrstva, ve které vzniká značné tečné napětí. Mimo mezní vrstvu je vliv viskozity kapaliny zanedbatelný [6].

Výsledný silový účinek hydrodynamického zatížení ve směru proudu kapaliny působícího na obtékanou mostovku lze vyjádřit pomocí bezrozměrného tvarového součinitele C_D :

$$C_D = \frac{2F_x}{\rho_w v^2 b s} \text{ pro } h^* \geq 1 \quad \text{a} \quad C_D = \frac{2F_x}{\rho_w v^2 b (h_u - h_b)} \text{ pro } h^* < 1, \quad (1)$$

$$h^* = \frac{h_u - h_b}{s}, \quad (2)$$

kde C_D je tvarový součinitel horizontální složky hydrodynamického zatížení, F_x horizontální složka hydrodynamické síly působící v těžišti mostovky, ρ_w hustota vody, v střední průřezová rychlost před mostem, b délka mostu, s výška mostovky, h^* relativní zaplavení mostovky, h_u hloubka vody před mostem, h_b výška spodní hrany mostovky nade dnem.

Ze vztahu (1) je patrné, že velikost hydrodynamického zatížení přelévané mostovky ovlivňují zejména tvar konstrukce mostovky a drsnost povrchu mostovky (vyjádřen tvarovým součinitelem C_D), úroveň zaplavení mostovky (vyjádřeno relativním zaplavením mostovky h^*), hustota kapaliny ρ_w (uvažována konstantní hodnota odpovídající hustotě vody), rychlost proudění kapaliny (vyjádřena bezrozměrným Froudovým kritériem Fr pro proudění před mostem):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh_u}}, \quad (3)$$

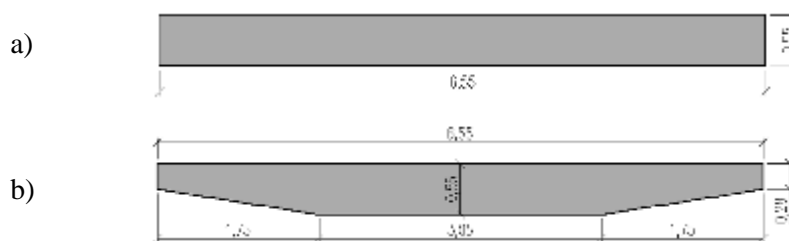
kde v je střední průřezová rychlost před mostem, g tíhové zrychlení a h_u hloubka vody před mostem.

Jednou z možností, jak stanovit hodnotu tvarového součinitele C_D je měření na fyzikálním modelu, kdy je pomocí silových snímačů měřena horizontální složka hydrodynamické síly F_x a dle vztahu (1) je stanovena hodnota součinitele. Dalším způsobem je výpočet pole napětí (normálového p a tečného τ) po obvodu obtékané mostovky pomocí numerických simulací. Integrací tohoto pole napětí

Ize určit hodnota horizontální složky hydrodynamického zatížení působící v těžišti mostovky F_x . S využitím vztahu (1) lze potom stanovit hodnotu tvarového součinitele C_D .

Článek navazuje na diplomovou práci zaměřenou na 2D numerické modelování [6] a výzkum zaměřený na fyzikální modelování dané problematiky [7].

V rámci [6] a [7] bylo numericky i fyzikálně modelováno 18 scénářů. Byly uvažovány 2 varianty příčných řezů mostovkou (viz Obr. 1). Pro každou variantu příčného řezu byly simulovány 3 úrovně zaplavení mostovky, (charakterizovány relativním zaplavením mostovky $h^*=0,5; 1,0; 2,0$) a 3 hodnoty přítokové rychlosti (charakterizovány Froudovým kritériem na vtoku ($Fr=0,22; 0,27; 0,32$)). Rozsah Fr byl zvolen s ohledem na situace, které mohou nastat při aplikaci v praxi a zároveň s ohledem na možnosti fyzikálního modelování a limity hydraulického okruhu laboratoře. Rozsah zvolených hodnot relativního zaplavení h^* pokrývá většinu praktických aplikací na mostech, pro které může být výhodné konstrukčně omezit účinky hydrodynamického zatížení.



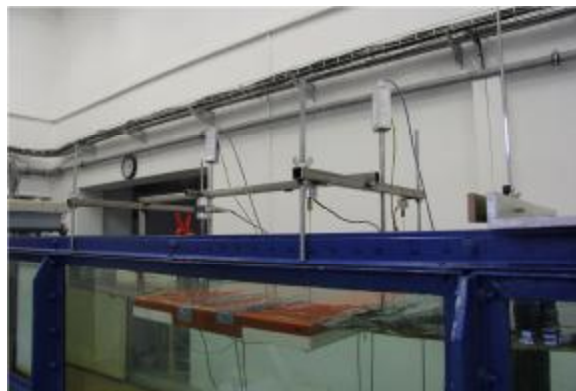
Obr. 1 Varianty uvažovaných příčných řezů mostovkou: a) varianta 1 – obdélníkový most, b) varianta 2 – kosý most

3 FYZIKÁLNÍ MODEL

Fyzikální model realizovaný v [7] byl umístěn do sklopného žlabu šířky 414 mm a výšky 430 mm s průhlednými bočními stěnami, o celkové délce 12 m a s podélným sklonem 0° . Žlab je napojen na hydraulický okruh se zásobní nádrží a čerpadlem řízeným frekvenčním měničem. Měrná trať ve žlabu sestávala z uklidňovacího úseku o délce 3,4 m se sítí a plovoucí deskou, z úseku volného kanálu před vlastním modelem mostovky o délce 5,3 m a z odtokového kanálu, do kterého vytékala voda o volné hladině [7].

Vlastní model zkoumané mostovky byl vyroben v měřítku 1:12,5 z PVC (Obr. 2). Pro měření složek hydrodynamického zatížení byly použity 4 siloměrné snímače. Pro nastavení vzdálenosti mostovky s měřícím zařízením ode dna žlabu byl vytvořen rám se závitovými tyčemi a ocelovými lanky. [7].

Siloměrné snímače byly kalibrovány tak, aby měřené silové složky ve svislém směru udávaly hodnoty po odečtení příslušné hydrostatické vztlakové síly F_{vz} pro dané relativní zaplavení mostovky h^* .



Obr. 2 Nosný rám se siloměrnými snímači a modelem obdélníkového mostu

4 NUMERICKÝ MODEL

Pro řešení dané problematiky byl nově sestaven 3D model turbulentního proudění vody s volnou hladinou. Vliv turbulencí na vlastnosti proudění byl modelován $k-\varepsilon$ modelem. Volná hladina byla trasována pomocí metody VOF (Volume of Fluid).

Pro výpočet byl zaveden předpoklad ustáleného proudění (při aplikaci metody VOF pro nalezení volné hladiny je doporučeno aplikovat model neustáleného proudění s dostatečně dlouhou dobou simulace tak, aby výpočet konvergoval do ustáleného stavu), dno náhradní oblasti a mostovka byly uvažovány v konkrétních rozměrech s hladkou stěnou a bylo uvažováno neprovzdušněné proudění nestlačitelné kapaliny s konstantní viskozitou.

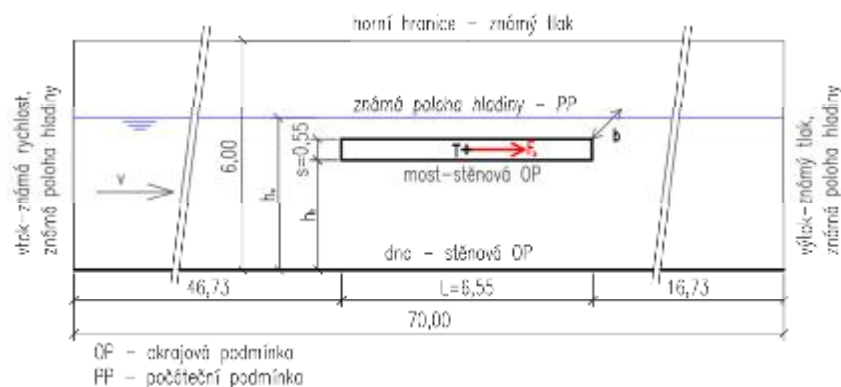
Řešení úlohy turbulentního proudění ve smyslu Reynoldsova pojetí turbulence spočívá v nalezení 6 neznámých veličin, kterými jsou střední hodnoty složek vektoru rychlosti v_x a v_y , střední hodnota tlaku p , kinetická energie turbulence k , disipace kinetické energie turbulence ε a objemová frakce F [8], [6].

Matematický model popisující řešené proudění sestává z rovnic vyjadřujících zákony zachování hmotnosti (rovnice kontinuity) a hybnosti (Navier - Stokesovy rovnice), které jsou doplněny o dvě rovnice $k-\varepsilon$ modelu turbulence, rovnici metody VOF (hledání hladiny) a konstitutivní vztahy [8], [6].

Řídící rovnice matematického modelu je nutno doplnit počátečními podmínkami (PP), které popisují stav v čase $t = 0$ a okrajovými podmínkami (OP), které udávají hodnoty neznámých veličin na hranicích náhradní oblasti (Obr. 3).

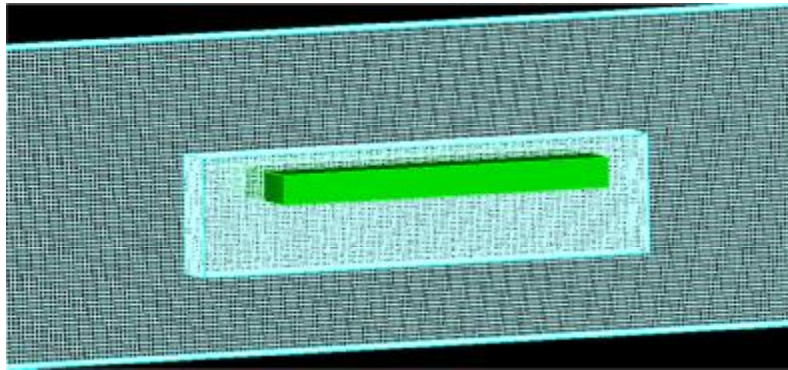
Geometrie numerického modelu a numerické simulace byly realizovány pomocí komerčně dostupného programu FLOW 3D 11.04. Pro řešení řídicích rovnic program používá metodu konečných objemů.

Rozměry náhradní oblasti byly převzaty z již provedených 2D numerických simulací [6], kde byly voleny tak, aby OP na hranicích neovlivňovaly proudění okolo mostovky. Délka přítokové části náhradní oblasti byla volena 46,73 m (2/3 celkové délky náhradní oblasti), aby byl eliminován vliv zadané konstantní rychlosti na vtoku a zajištěn ustálený tvar rychlostního profilu před mostní konstrukcí. Šířka náhradní oblasti b pro 3D simulaci byla uvažována 1,0 m. Geometrie náhradní oblasti, OP a PP jsou patrné z Obr. 3, navíc byla na bočních stěnách oblasti zvolena OP symetrie.



Obr. 3 Geometrie náhradní oblasti s vyznačením počátečních (PP) a okrajových (OP) podmínek a kladné konvence horizontální složky hydrodynamického zatížení F_x

Náhradní 3D oblast byla prostorově diskretizována výpočtovou sítí prvků ve tvaru kvádrů. Velikost prvků byla volena s ohledem na celkové rozměry oblasti, na přesnost výpočtu a nároky na výpočtový čas. Velikost prvků se pohybovala od 0,06 m do 0,5 m, v okolí mostovky bylo provedeno zjemnění výpočtové sítě (viz Obr. 4). Na povrchu mostovky byl zaveden předpoklad nulové rychlosti proudění čímž byla zohledněna existence mezní vrstvy [8].



Obr. 4 Prostorová diskretizace náhradní oblasti v okolí mostovky

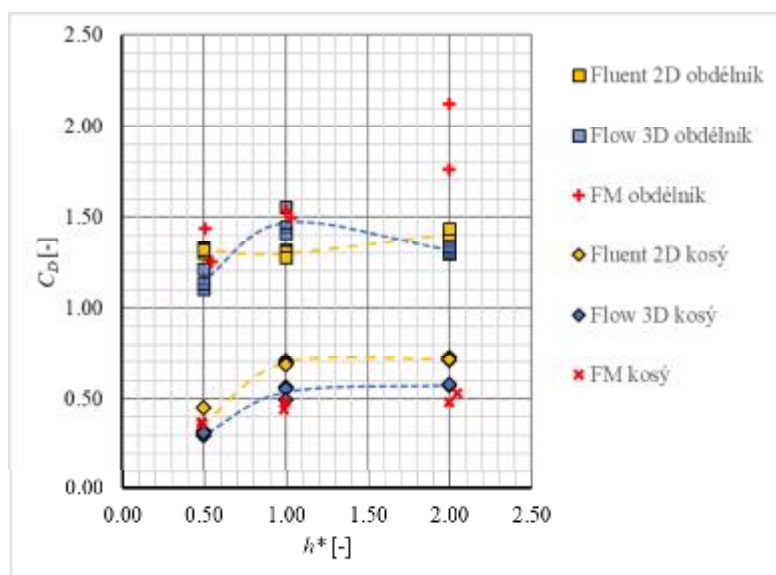
Počáteční velikost časového kroku byla volena $\Delta t = 1 \cdot 10^{-4}$ s. Pro další časové kroky je v programu Flow 3D nastavena podmínka maximální hodnoty Courantova kritéria $Cu \leq 1,0$ [8].

Na základě statistického zpracování hodnot horizontální složky hydrodynamického zatížení (síly F_x) vypočtené v každém časovém kroku simulace byla kvantifikována nejistota numerického výstupu na $\pm 4,0$ % hodnoty F_x . Maximálního poměr 5 a 95 procentního kvantilu vypočtené síly F_x je 1,15. Na základě těchto výsledků lze minimální čas simulace pro tento model doporučit 200 s a pro další zpracování použít střední hodnotu F_x z posledních 50 s simulace.

Verifikace modelu spočívala v porovnání dosažených výsledků 3D numerických simulací s daty naměřenými na fyzikálním modelu [7] v měřítku 1:12,5 a s výsledky 2D numerických simulací [6].

5 ZÁVĚR A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Hodnoty tvarového součinitele C_D získaného zpracováním výsledků 3D numerických simulací v programu Flow 3D byly porovnány s hodnotami získanými zpracováním měření na fyzikálním modelu zmenšeném v měřítku 1:12,5 [7] a dále s výsledky 2D numerických simulací v programu ANSYS Fluent [6]. Hodnoty tvarového součinitele C_D v závislosti na relativním zaplavení mostovky jsou vyneseny na Obr. 5.



Obr. 5 Porovnání hodnot tvarového součinitele C_D získaných vyhodnocením 3D numerických simulací s hodnotami měření na fyzikálním modelu a s výsledky 2D numerických simulací v programu ANSYS Fluent v závislosti na relativním zaplavení mostovky h^*

Na základě porovnání výsledků lze konstatovat poměrně dobrou shodu mezi výsledky 2D, 3D simulací i fyzikálního modelování v případě kosého mostu. U obdélníkového mostu je patrná odchylka 2D a 3D modelu při hodnotě relativního zaplavení mostovky $h^* = 1,0$, která může být způsobena numerickou nestabilitou výpočtu během 3D simulace.

Dále je z těchto výsledků patrný pozitivní vliv kosého tvaru mostovky, kde lze na základě hodnot C_D očekávat snížení namáhání horizontální složkou F_x o více než 50 %.

Výsledky numerických simulací jsou zatíženy nejistotami plynoucími především z přijatých zjednodušujících předpokladů, aplikace OP, volby modelu turbulence, parametrů výpočtové sítě apod. Na základě porovnání s výsledky fyzikálního modelování lze v uvedených případech tyto nejistoty odhadnout v řádu 10 až 20 %.

V případech, kdy lze zanedbat vliv proudění vody okolo pilířů nebo zavázání mostu do břehu, lze pro stanovení hydrodynamického zatížení přelévané mostovky doporučit použití 2D numerických simulací ve vertikální rovině oproti časově náročnějším 3D simulacím.

Na základě porovnání výsledků numerických simulací s fyzikálním modelem lze konstatovat, že numerickou simulaci je možno použít pro stanovení střední hodnoty hydrodynamického zatížení přelévané mostovky a pro předběžnou optimalizaci tvaru mostovky. Atypické tvary mostovek je však vhodné ověřit měřením na fyzikálním modelu.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za podpory projektu Specifického výzkumu VUT v Brně č. FAST-J-17-4434 „Porovnání 2D a 3D numerických modelů při stanovení hydrodynamického zatížení přelévané mostovky“.

Použitá literatura

- [1] Boor, B., Kunštátský J., Patočka C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby: celost. učebnice pro vys. školy*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968, 516 s.
- [2] ČSN 75 0250. *Zásady navrhování a zatížení konstrukcí vodohospodářských staveb*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [3] Jempson, M. *Flood and Debris Loads on Bridges*. The University of Queensland, Civil Engineering Department, 2000.
- [4] Kerenyi, K., Sofu, T., Guo, J., Bushra, A. *Hydrodynamic Forces on inundated bridge decks*. Report No. FHWA-HRT-09-028. 2009.
- [5] Malavasi, S., Guadagnini, A. *Interactions between a rectangular cylinder and a free-surface flow*. Journal of Fluids and Structures. November 2007.
- [6] Pavlíček, M. *Stanovení hydrodynamického zatížení přelévané mostovky s využitím 2D numerických simulací*. Dipl. práce. Ústav vodních staveb FAST VUT v Brně. Brno, 2016.
- [7] Dráb, A., Špano, M. *DC 1- Realizace hydraulického modelu mostní konstrukce – dílčí zpráva VÝVOJ HYBRIDNÍHO ŽELEZNIČNÍHO MOSTU REZISTENTNÍHO V ZÁPLAVOVÝCH ÚZEMÍCH*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2013.
- [8] *FLOW 3D v11.0.3 User Manual*. Flow Science, Inc., 2014.