

Integrované železniční mosty

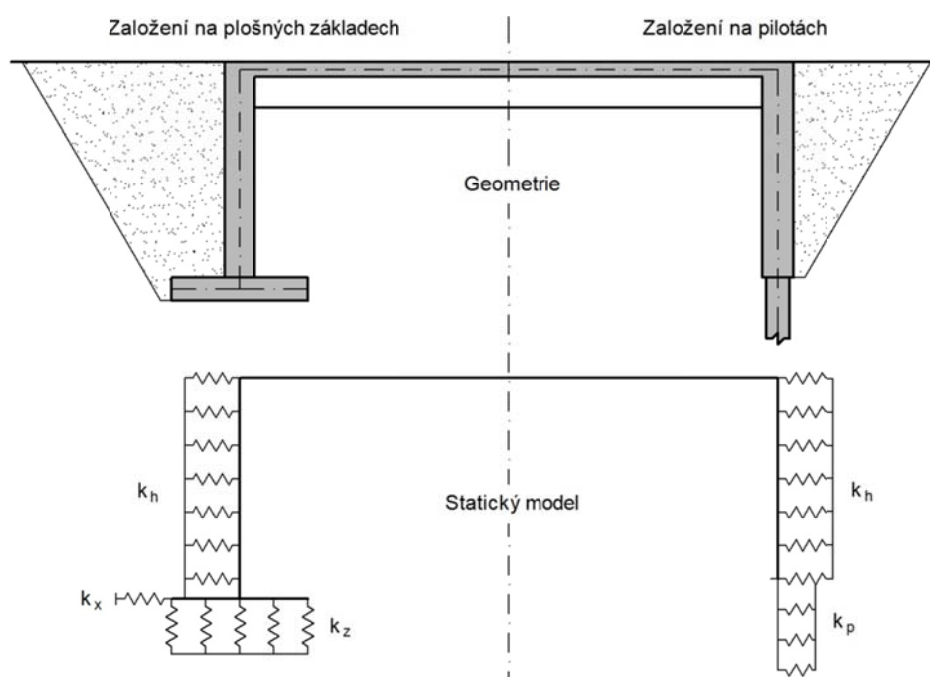
Ing. Jaromír Křížek, Ph.D., Ing. Software Dlubal, s.r.o.

Příspěvek se zabývá problematikou integrovaných mostů, které v řadě zemí nacházejí široké uplatnění jako železniční mosty krátkých a středních rozpětí. Integrované mosty jsou konstrukce bez ložisek, přičemž napojení nosné konstrukce na opěry je obvykle rámové. Toto konstrukční uspořádání vede k výraznému spolupůsobení mezi nosnou konstrukcí, spodní stavbou a přilehlou zemínou. Hlavním problémem při praktickém navrhování integrovaných mostů je správné zohlednění vlivu zeminy. V příspěvku je popsána metoda, která se touto problematikou podrobně zabývá. Metoda je zpracována ve formě příručky [1], která je vhodná pro použití v inženýrské praxi.

Úvod

Integrované železniční mosty se v řadě zemí stávají stále obvyklejším typem mostní konstrukce. Uplatňují se jako krátké železniční nadjezdy o jednom poli, ale i jako dlouhé údolní estakády s větším množstvím polí [2]. Hlavním specifickým je vyloučení ložisek a použití rámového napojení nosné konstrukce na spodní stavbu. Toto konstrukční uspořádání přináší oproti tradičním mostům následující výhody: zjednodušení a zrychlení výstavby (díky rámovému působení může být spodní stavba výrazně subtilnější, navíc, jsou-li opěry založeny na pilotách, stačí obvykle jedna řada pilot místo dvou), vyšší životnost mostní konstrukce bez nutnosti pravidelné údržby a výměny ložisek, větší robustnost díky vícenásobné statické neurčitosti.

Použití integrovaných mostů přináší zvláštnosti z hlediska návrhu. Dochází k výraznému spolupůsobení mezi nosnou konstrukcí, spodní stavbou a přilehlou zemínou. Vliv zeminy je patrný zvláště při teplotní expanzi mostu, kdy jsou opěry zatlačovány do tělesa zásypu. Díky vzájemné interakci je nutné nosnou konstrukci, spodní stavbu a zeminu zahrnout do společného statického modelu, přičemž vliv zeminy se modeluje pružným podepřením spodní stavby, viz obr. 1. Hlavním problémem při praktickém navrhování integrovaných mostů je stanovení odpovídajících tuhostí pružného podepření. Metoda popsaná v článku slouží k výpočtu těchto tuhostí.



Obr. 1 Geometrie a statický model integrovaného mostu

Metoda výpočtu modulů reakce podloží

Metoda se zabývá výpočtem tuhostí pružného podepření jednotlivých částí spodní stavby integrovaných mostů, které se nacházejí v kontaktu se zemínou. Tuhosti pružného podepření jsou vyjádřeny pomocí modulů reakce podloží k_h , k_z , k_x a k_p , kde:

- k_h je modul reakce na opěrách ve vodorovném směru, vyjadřující odpor zeminy zásypového klínu při zatlačování opěr do zeminy,
- k_z je modul reakce pod plošným základem ve svislém směru, vycházející ze stlačitelnosti zeminy v podloží,
- k_x je modul reakce pod plošným základem ve vodorovném směru, vyjadřující odpor základové spáry proti vodorovným posunům,
- k_p je modul reakce na pilotách ve vodorovném směru, vyjadřující příčné podepření piloty přilehlou zemínou.

Metoda obsahuje obecné vzorce, tabulky a grafy, pomocí kterých lze jednotlivé moduly reakce vypočítat. Výpočet modulů reakce k_h je možné použít pro železobetonové opěry, u kterých nenastávají výrazné ohybové deformace vlivem vodorovných zemních tlaků. Vypočtené hodnoty modulů reakce k_h lze aplikovat na opěry založené na plošných základech nebo pilotách. Moduly reakce k_h se vypočítají v závislosti na těchto parametrech:

- výška opěry,
- vodorovný posun horního a dolního konce opěry směrem do zásypu,
- typ zeminy v zásypu.

Moduly reakce k_z a k_x se vypočítají v závislosti na těchto parametrech:

- rozměry plošných základů,
- svislé a vodorovné zatížení plošného základu,
- typ a třída zeminy v podloží pod plošným základem.

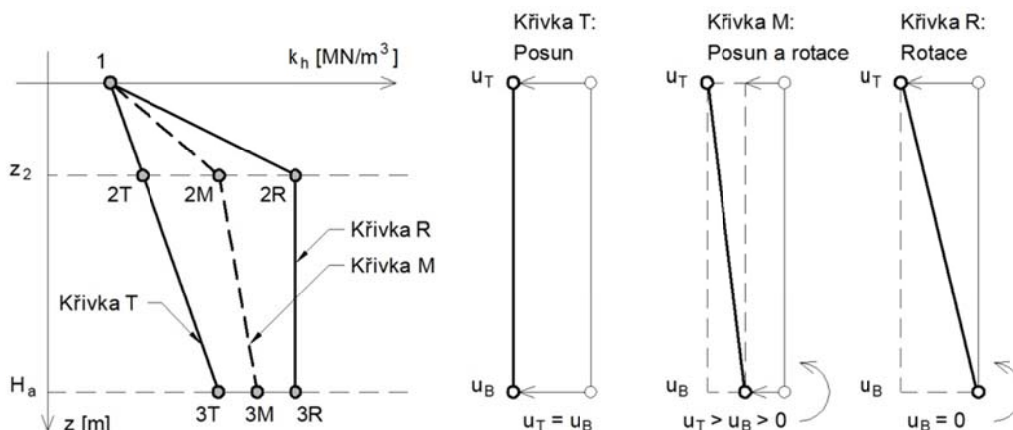
Výpočtem modulů reakce k_p se metoda nezabývá. K jejich stanovení je třeba použít jinou odbornou literaturu [3]. Metoda je použitelná zcela obecně pro široké spektrum integrovaných mostů. Lze jí aplikovat na integrované mosty o jednom či více polích s libovolným typem nosné konstrukce, tj. na mosty ocelobetonové, železobetonové, případně prefabrikované skládající se z předpjatých či jiných prefabrikátů.

Výpočet modulů reakce k_h

Metoda uvádí obecný postup, pomocí kterého lze stanovit průběh modulů reakce k_h po výšce opěry. Průběh modulů k_h závisí na způsobu přemístění opěry do zásypu vlivem teplotních a jiných účinků. Přemístění opěry do zásypu je definováno vodorovným posunem horního konce opěry u_T a vodorovným posunem dolního konce opěry u_B . Závislost průběhu modulů reakce k_h na způsobu přemístění opěry ukazuje obr. 2. Na vodorovné ose jsou vyneseny hodnoty modulů reakce k_h , na svislé hloubka pod terénem. Metoda rozlišuje tři způsoby přemístění opěry:

- přemístění opěry posunem ($u_T = u_B$): Průběh modulů reakce k_h se v tomto případě uvažuje pomocí lineární křivky T, která je definovaná bodem 1 na horním konci opěry a bodem 3T na dolním konci opěry. Mezi body 1 a 3T se v hloubce z_2 nachází mezilehlý bod 2T.
- přemístění opěry rotací ($u_B = 0$): Průběh modulů reakce k_h se v tomto případě uvažuje pomocí bilineární křivky R, která je definovaná body 1, 2R a 3R. Bod 1 je společný s křivkou T, bod 2R se nachází ve stejné hloubce pod terénem z_2 jako 2T. Bod 3R se nachází na spodním konci opěry a leží na svislici s bodem 2R.

- přemístění opěr kombinací posunu a rotace ($u_T > u_B > 0$): Průběhy modulů reakce jsou uvažovány bilineární křivkou M, která leží mezi křivkami T a R. Křivka M je definována body 1, 2M a 3M. Hloubka bodu 2M pod terénem z_2 je shodná s body 2T a 2R. Polohu bodů 2M mezi body 2T a 2R lze získat lineární interpolací dle hodnoty posunu u_B , nacházejícího se v rozmezí od nuly do u_T . Bod 3M leží na dolním konci opěry. Jeho polohu lze získat interpolací mezi body 3T a 3R.



Obr. 2 Průběhy modulů k_h po výšce opěry

Aby bylo možné křivky T, R a M pro konkrétní případ stanovit, je nutné definovat body 1, 2R a 3T. U každého z výše uvedených bodů je nutné definovat modul reakce k_h , u bodu 2R ještě jeho hloubku z_2 . K tomu slouží rovnice (1) a (2):

$$k_h = \frac{A E_{def} u_T}{10^4} + \frac{B E_{def}}{10^2} + \frac{C u_T}{10^2} + D \quad (1)$$

$$z_2 = \frac{A_z E_{def} u_T}{10^4} + \frac{B_z E_{def}}{10^2} + \frac{C_z u_T}{10^2} + D_z \quad (2)$$

kde: A až D jsou součinitele závislé na výšce opěry a typu zeminy,
 E_{def} deformační modul zeminy zásypu v MPa v suchém stavu,
 u_T vodorovný posun horního konce opěry v mm.

Řešený příklad

Stanovte průběh modulů reakce k_h po výšce opěry. Opěra je znázorněná na obr. 3. Výška opěry $H_a = 6,0$ m. Zásyp za opěrou je proveden z písčitého materiálu s deformačním modulem $E_{def} = 40$ MPa, přičemž se předpokládá jeho důkladné zhutnění. Vodorovný posun horního konce opěry $u_T = 4,0$ mm, vodorovný posun dolního konce opěry $u_B = 1,0$ mm.

Řešení: Přemístění opěry je kombinací posunu a rotace. Průběh k_h je proto definován křivkou M, která bude stanovena ve třech krocích. V prvním kroku stanovíme lineární křivku T za předpokladu $u_T = u_B = 4,0$ mm. Moduly k_h v bodech 1 a 3T se vypočítají z rovnice (1), hloubka z_2 z rovnice (2). Součinitele A , B , C , D jsou pro výšku opěry 6,0 m a písčitou zeminu v zásypu shrnuty v tab. 1. Modul k_h v bodě 2T se určí interpolací mezi body 1 a 3T.

$$k_{h,1} = \frac{-8,5 \cdot 40 \cdot 4,0}{10^4} + \frac{5,5 \cdot 40}{10^2} + \frac{0,0 \cdot 4,0}{10^2} + 0,0 = 2,1 \text{ MN/m}^3$$

$$k_{h,3T} = \frac{-21,6 \cdot 40 \cdot 4,0}{10^4} + \frac{18,7 \cdot 40}{10^2} + \frac{1,2 \cdot 4,0}{10^2} + 0,7 = 7,9 \text{ MN/m}^3$$

$$z_2 = \frac{0,8 \cdot 40 \cdot 4,0}{10^4} + \frac{0,3 \cdot 40}{10^2} + \frac{1,8 \cdot 4,0}{10^2} + 0,5 = 0,7 \text{ m}$$

$$k_{h,2T} = k_{h,1} + \frac{(k_{h,3T} - k_{h,1}) z_2}{H_a} = 2,1 + \frac{(7,9 - 2,1) \cdot 0,7}{6,0} = 2,8 \text{ MN/m}^3$$

Ve druhém kroku stanovíme křivku R. Předpokládáme $u_T = 4,0 \text{ mm}$ a $u_B = 0,0 \text{ mm}$. K výpočtu bodů modulů k_h v bodech 2R a 3R použijme rovnici (1) a tabulku 1:

$$k_{h,2R} = k_{h,3R} = \frac{-14,6 \cdot 40 \cdot 4,0}{10^4} + \frac{19,0 \cdot 40}{10^2} + \frac{0,0 \cdot 4,0}{10^2} + 0,9 = 8,3 \text{ MN/m}^3$$

Ve třetím kroku stanovíme výslednou křivku M. Moduly reakce k_h v bodech 2M a 3M získáme interpolací mezi křivkami T a R:

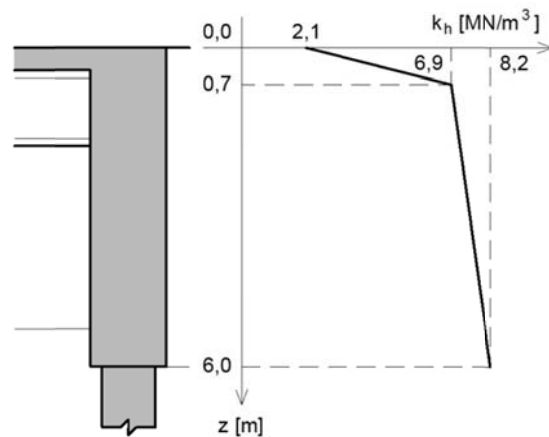
$$k_{h,2M} = k_{h,2R} - \frac{(k_{h,2R} - k_{h,2T}) u_B}{u_T} = 8,3 - \frac{(8,3 - 2,8) \cdot 1,0}{4,0} = 6,9 \text{ MN/m}^3$$

$$k_{h,3M} = k_{h,3R} - \frac{(k_{h,3R} - k_{h,3T}) u_B}{u_T} = 8,3 - \frac{(8,3 - 7,9) \cdot 1,0}{4,0} = 8,2 \text{ MN/m}^3$$

Výsledný průběh modulů k_h po výšce opěry je vykreslen na obr. 3.

Bod	Součinitel			
	A	B	C	D
1	-8,5	5,5	0,0	0,0
2R	-14,6	19,0	0,0	0,9
3T	-21,6	18,7	1,2	0,7
z_2	0,8	0,3	1,8	0,5

Tab. 1 Součinitele A, B, C, D pro $H_a = 6,0 \text{ m}$



Obr. 3 Geometrie opěry a průběh modulů k_h

Výpočet modulů reakce k_z a k_x

Při výpočtu modulů reakce k_z a k_x se vychází z předpokladu, že jejich rozložení je po celé ploše základu konstantní. Je-li podloží pod plošným základem tvořeno zeminou pouze jedné třídy, vypočítají se moduly reakce k_z a k_x dle rovnic (3) a (4):

$$k_z = \left(\frac{K}{L + f_z} + M \right) \frac{E_{def}}{N} W_z \quad (3)$$

$$k_x = \left(\frac{P f_x f_z - Q f_x}{R} - S f_z + T \right) \frac{G_{def}}{U} W_x \quad (4)$$

kde: K až U jsou součinitele závislé na rozměrech základu a třídě zeminy,
 W_z, W_x součinitele závislé na úrovni podzemní vody,
 E_{def}, G_{def} deformační a smykový modul zemin v MPa v suchém stavu,
 f_z, f_x svislé a vodorovné napětí v základové spáře v kN/m^2 .

V případě jemnozrnných zemin je vliv f_x na modul reakce k_x zanedbatelný. Rovnice (4) se tedy redukuje na tvar:

$$k_x = (-S f_z + T) \frac{G_{def}}{U} W_x \quad (5)$$

V praxi nastávají případy, kdy je podloží pod základem vrstevnaté, to znamená, že je tvořeno zeminami různých tříd. Při výpočtu modulů reakce k_{zs} a k_{xs} vrstevnatého podloží se vychází z obecného principu, že převrácená hodnota celkového modulu reakce vrstevnatého podloží se rovná součtu převrácených hodnot modulů jednotlivých vrstev. Skládá-li se vrstevnaté podloží z n vrstev, výsledné moduly reakce k_{zs} a k_{xs} se vypočtou dle rovnic (6) a (7):

$$k_{zs} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_{zi}} \right)^{-1}, \quad k_{xs} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_{xi}} \right)^{-1} \quad (6), (7)$$

kde: k_{zi}, k_{xi} jsou moduly reakce i -té vrstvy podloží.

Moduly reakce k_{zi} a k_{xi} se vypočtou pomocí rovnic (8) a (9):

$$k_{zi} = \frac{k_z}{u_{rTz} - u_{rBz}}, \quad k_{xi} = \frac{k_x}{u_{rTx} - u_{rBx}} \quad (8), (9)$$

kde: k_z, k_x jsou svislé a vodorovné moduly reakce určené dle vztahů (3) až (5) pro případ, kdy je celé podloží pod základem tvořeno pouze zeminou i -té vrstvy,

u_{rTz}, u_{rTx} relativní svislý a vodorovný posun na horním okraji i -té vrstvy (bod T, viz obr 4),

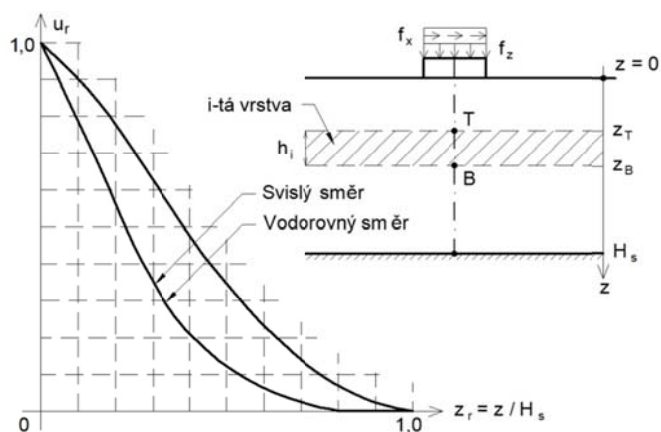
u_{rBz}, u_{rBx} relativní svislý a vodorovný posun na dolním okraji i -té vrstvy (bod B, viz obr 4).

Relativní posuny $u_{rTz}, u_{rTx}, u_{rBz}$ a u_{rBx} se stanoví z jednotkového grafu na obr. 4. Jednotkový graf zobrazuje závislost relativních posunů u_r na relativních hloubkách z_r . Je-li i -tá vrstva omezena body T a B ležících v hloubkách z_T a z_B pod terémem, lze relativní hloubky z_{rT} a z_{rB} stanovit z rovnic (10) a (11):

$$z_{rT} = \frac{z_T}{H_s}, \quad z_{rB} = \frac{z_B}{H_s} \quad (10), (11)$$

kde: z_T, z_B jsou hloubky bodů T a B vymežující i -tou vrstvou,
 H_s mocnost zemního tělesa.

Mocnosti zemních těles H_s jsou pro jednotlivé třídy zemin a hodnoty svislého zatížení základu tabulovány v [1]. Na základě relativních hloubek z_{rT} a z_{rB} i -té vrstvy lze z jednotkového grafu odečíst relativní posuny $u_{rTz}, u_{rTx}, u_{rBz}$ a u_{rBx} . Relativní posuny ve svislém směru u_{rTz} a u_{rBz} se odečítají z větve grafu pro svislý směr, relativní posuny ve vodorovném směru u_{rTx} a u_{rBx} se odečítají z větve pro vodorovný směr.



Obr. 4 Jednotkový graf vrstevnatého podloží

Použití a rozsah platnosti metody

Metodu výpočtu modulů reakce k_h lze použít za těchto předpokladů:

- most má železobetonové opěry, které při zatlačování do zásypu vykazují malé ohybové deformace. Výška opěr se pohybuje v rozsahu 2-15 m,
- vodorovné posuny horního a dolního konce opěry u_T a u_B se pohybují v rozmezí 0-36 mm. Tímto kritériem je dána maximální celková délka nosné konstrukce v závislosti na jejím typu (betonová, spřažená, ocelová) a uvažovaném rovnoměrném ohřátí,
- pro zásyp se předpokládají nesoudržné, nenamrzavé písčité nebo štěrkovité materiály. Dále se předpokládá, že zásyp je odvodněný a zhutněný na hodnotu relativní hutnosti $I_D = 0,75$ a vyšší.

Metodu výpočtu modulů reakce k_z a k_x lze použít za těchto předpokladů:

- půdorysné rozměry základů jsou v rozsahu 3x6 – 8x32 m,
- pod základem jsou písčité zeminy S1-S5, štěrkovité zeminy G1-G5 a jemnozrnné zeminy F1-F6 s parametry dle klasifikace uvedené v [4],
- svislé a vodorovné napětí f_z a f_x v základové spáře se pro jednotlivé třídy zemin v podloží pohybuje v rozsahu definovaném v [1].

Veškeré součinitele použité v rovnicích (1) až (11) lze nalézt v [1]. Metoda výpočtu modulů k_h , k_z , a k_x byla odvozena na základě numerického modelování. Přitom byl použit pružnoplastický mohr-coulombův materiálův model zeminy. Z rovnic (1) až (5) je patrné, že vypočtené moduly reakce závisí na velikosti zatížení. U modulů k_h se zatížením rozumí posuny opěry u_T a u_B , u modulů k_z a k_x pak svislé a vodorovné napětí v základové spáře f_z a f_x . Tímto způsobem je ve výpočtu modulů reakce zahrnuto nelineární pružnoplastické chování zeminy. Vypočítáme-li moduly reakce pro dvě různá zatížení, lze stanovit míru zplastizování zeminy. Budou-li výsledky v obou případech přibližně stejné, převládá pružné chování zeminy. V opačném případě dochází k jejímu výraznějšímu zplastizování. To v případě zásypu za opěrami obecně není žádoucí, zvláště jedná-li se o posuny opěr v důsledku cyklických teplotních změn. Jakým způsobem se vypočítané moduly reakce použijí ve statickém modelu integrovaného mostu závisí na úvaze projektanta. Je možné vypočítat moduly reakce pro jedno či více reprezentativních zatížení a ty aplikovat jako lineárně pružná podepření spodní stavby. Alternativně lze pomocí metody definovat pružné podepření spodní stavby, jehož tuhost je proměnná.

Závěr

Článek se zabývá spolupůsobením integrovaných mostů se zeminou. Zemina je modelována jako pružné podepření spodní stavby, přičemž jeho tuhost je vyjádřena pomocí modulů reakce pružného podloží. V článku je popsána metoda, s jejíž pomocí lze moduly reakce vypočítat. Metoda je zpracována ve formě příručky [1] vhodné pro použití v inženýrské praxi. Příručka popisuje metodu v jejím plném rozsahu a obsahuje několik řešených příkladů demonstrujících její praktické použití.

Literatura:

- [1] Křížek, J.: Integrované mosty – spolupůsobení se zeminou, www.jaromirkrizek.eu
- [2] Buba, R., Stumpf, D.: Integrované železniční mosty v SRN a jejich výhody pro minimalizaci doby výluk, Železniční mosty a tunely – sborník příspěvků, 2007
- [3] Masopust, J.: Vrtané piloty, Čeněk a Ježek, 1994
- [4] ČSN 73 1001: Zakládání staveb, Vydavatelství ÚNM, 1987