

SHRNUTÍ EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ BEZSTYKOVÉ KOLEJE

Filip Bláha, *

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

ABSTRAKT

Tento článek je shrnutím dosavadních provedených experimentů na modelu bezстыkové koleje na mostech, případně na jeho dílčích částech, a stručným shrnutím vyhodnocených výsledků těchto experimentů.

Z hlediska parametrů důležitých pro posouzení příčné stability bezстыkové koleje na mostech se jedná o měření podélného a příčného odporu koleje. Celkový podélný odpor bezстыkové koleje má zásadní vliv na přenos přídatných podélných sil do kolejnicových pásů a s tím spojeným rizikem ztráty stability a vybočení koleje. Právě proti příčnému vybočení bezстыkové koleje přímo působí příčný odpor koleje. Na tento důležitý parametr bylo proto zaměřeno druhé experimentální měření příčného odporu koleje. V rámci vyhodnocení tohoto experimentu bylo zjištěno, že dílčí roli ve výsledném příčném odporu koleje hraje i parametr torzní tuhosti použitých kolejnicových upevňovačů. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k třetímu a zároveň poslednímu provedenému experimentu, a to sice k měření závislosti krouticího momentu a natočení kolejnice v upevňovači. Toto měření bylo provedeno již jen na dílčí části modelu bezстыkové koleje.

Výše popsané parametry získané na základě vyhodnocení experimentálních měření bezстыkové koleje na mostech jsou dle autora dostačující pro vstup do výpočetních modelů bezстыkové koleje na mostech. Cílem celé práce ohledně bezстыkové koleje je pomocí těchto modelů popsat chování bezстыkové koleje z hlediska vnášení přídatných sil od silového i nesilového zatížení a stanovit vliv těchto sil na příčnou stabilitu koleje na mostech.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezстыková • Kolej • Odpor • Experiment • Vyhodnocení

ABSTRACT

Important parameters for the assessment of the continuously welded rail on the bridges is the longitudinal and lateral resistance. The first performed experiment was the measurement of the longitudinal resistance. The longitudinal resistance of the continuously welded rail has a primary impact at the transfer of additional longitudinal forces to the rails and is also associated with risk of losing rail stability. The lateral resistance of the continuously welded rail is important against the lateral

rail buckling. It was found that the parameter of torsional stiffness of the used rail fasteners also affects the lateral resistance of the rail partially. The dependence of the torque and the rotation of the rail in the fastener was measured and evaluated for this purpose.

The above-described parameters obtained from the evaluation of experimental measurements of continuously welded rail on the bridges are sufficient to use into the computational models of continuously welded rail on the bridges. The aim of the whole work regarding continuously welded rail is to use these models to describe the behaviour of continuously welded rail in terms of transfer additional forces from different loads and to determine the effect of these forces on the lateral stability of the continuously welded rail on the bridges.

KEYWORDS

Continuously • Rail • CWR • Experiment • Evaluation

1. ÚVOD

Vzhledem k rozvoji železniční dopravy po celém světě a zároveň k celkovým snahám stavět větší a složitější konstrukce překračující stále větší a delší překážky je nesporně důležité pro návrh bezстыkové koleje na takovýchto konstrukcích znát přesně její parametry chování.

V současných normách a předpisech je použití bezстыkové koleje omezeno buď maximální délkou dilatačních celků vycházející z dosavadních zkušeností, nebo musí být použít na daném mostě ověřeno statickým výpočtem. Kritérii pro posouzení je jednak napětí v kolejnicových pásech, jednak maximální horizontální a vertikální posuny horního lince nosné konstrukce.

Z chování bezстыkové koleje však vyplývá, že tyto požadavky jdou vzájemně proti sobě. Při větší tuhosti, tzn. větším podélném odporu, jsou posuny nosné konstrukce logicky menší, avšak zároveň se v kolejnicových pásech generuje větší normálové napětí. Naopak při nižším odporu koleje je situace analogicky opačná.

Další neznámou v této problematice je limitní velikost výše zmíněných kritérií. Omezení napětí vychází z materiálových vlastností kolejnicové oceli a jeho maximální či minimální velikost je tak jednoduše opodstatnitelná. Omezení po-

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

sunů nosné konstrukce však pravděpodobně vychází z jakéhosi historického požadavku a v současné době není zřejmé, z čeho dané limity posunů vychází.

Dalším parametrem, s kterým přímo souvisí příčná stabilita (odolnost proti vybočení) kolejového roštu, je příčný odpor. Příčný odpor se skládá z odporu vlivem třením mezi pražci a kamenivem šterkového lože, odporem šterkového lože před čely pražců a dále z ohybové tuhosti kolejnic a torzní tuhosti kolejnicových upevňovadel. Ani jeden ze výše uvedených parametrů součástí celkového příčného odporu mezinárodní norma UIC vůbec nespecifikuje.

Cílem mé disertační práce je experimentálně stanovit a komplexně popsat chování bezстыkové koleje na mostech. Získané parametry chci porovnat s aktuálně používanými normovými parametry pro návrh bezстыkové koleje a snahou celé disertační práce a souvisejících publikací bude používané parametry aktualizovat či doplnit, aby bylo možné při návrhu železničního mostu využít plného potenciálu bezстыkové koleje.

2. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

2.1. Experimentální model bezстыkové koleje

V rámci několikaletého výzkumu bezстыkové koleje na mostech bylo v rámci diplomové práce a během doktorského studia provedeno množství experimentálních měření na modelu bezстыkové koleje.

Pro potřeby experimentální měření byl zhotoven model bezстыkové koleje v reálném měřítku, který se skládal z železobetonové vany, jejíž povrchová úprava byla provedena tak, aby co nejvíce korespondovala s reálnou mostní konstrukcí. V této vaně bylo zřízeno šterkové kolejové lože s celkem 8 betonovými pražci. Lože bylo řádně upraveno dle standardů používaných na železničních tratích. Pražce byly osazeny běžně používanými upevňovadly Vossloh, v nichž byly upevněny dvě kolejnice UIC60. Pohled na celý experimentální model včetně umístěných zatěžovacích lisů a používaných snímačů je na Obrázku 1.



Obrázek 1: Model bezстыkové koleje při měření kolejového roštu v příčném směru

2.2. Měření podélného odporu bezстыkové koleje

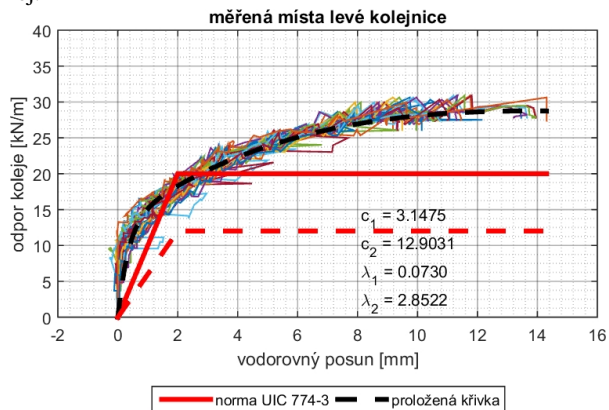
Jako první experiment bylo zvoleno, dle autora nejdůležitější parametr bezстыkové koleje, měření podélného odporu bezстыkové koleje. Zmiňovaná norma UIC rozlišuje podélný odpor nezátížené a vertikálně zatížené koleje, tj. včetně uvážení přítížení železniční dopravou. Z tohoto důvodu bylo měření rozděleno do dvou částí.

2.2.1. Měření podélného odporu vertikálně nezátížené koleje

Nejprve bylo přistoupeno k snazší části, tj. měření podélného odporu nezátížené koleje. Do čela obou kolejnic byly umístěny hydraulické lisy. Tato pozice umožňovala podélné zatěžování obou kolejnic. Nad kolej byly instalovány ocelové trubky, na nichž byly připevněny snímače pohybu, které snímaly podélné posuny kolejnic. Na 1., 2., 3., 5. a 8. pražec byly umístěny stejné snímače monitorující posun kolejnic vůči hornímu lici pražce. Na stojiny obou kolejnic byly z levé i z pravé strany mezi 1.-2., 2.-3., 3.-4., 5.-6. a za posledním pražcem nalepeny tenzometry. Poslední tenzometr byl zapojen jako kompenzační a eliminoval tak účinky teploty.

Všechny osazené snímače byly na začátku měření připojeny k měřicí ústředně a bylo prověřeno jejich správné zapojení a zaznamenávání. Velikost vnášené podélné síly pomocí osazených hydraulických lisů byla ovládána manuálně. Byla přidávána v krocích přibližně 10 kN. Po navýšení síly bylo vyčkáno na ustálení tlaku hydraulického oleje a tím i k posunům kolejnic. Následně byla působící síla opět zvýšena o zmiňovaných 10 kN. Poté, co bylo předpokládáno, že je dosaženo plastické části pracovního diagramu, byla kolej odtížena a několik minut bylo vyčkáno několik minut na ustálení deformace koleje. Poté byl započat nový zatěžovací cyklus.

Cílem měření bylo dosáhnout plastických posunů koleje. Z hlediska použité měřicí aparatury bylo tento jev poměrně obtížné in-situ vyhodnotit. V rámci prvního měření nebylo plastických posunů vždy dosaženo, proto bylo měření opakováno. V rámci přehlednosti článku je na Obrázku 2 znázorněno až konečné vyhodnocení podélného odporu. Na zmíněném grafu je proložena křivka množstvím zaznamenaných dat včetně uvedených parametrů příslušné křivky. Červenou čarou je pro srovnání uveden normový průběh podélného odporu dle UIC pro standardně (20 kN/m) a dobře (12 kN/m) udržovanou kolej.



Obrázek 2: Výsledný podélný odpor koleje z 2. měření

2.2.2. Měření podélného odporu vertikálně zatížené koleje

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, ve výpočetních modelech pro návrh a posouzení bezстыkové koleje na mostě se používá nejen odpor nezátížené koleje, ale též i vertikálně zatížené koleje. Z tohoto důvodu bylo nutné provést i takovéto uspořádání experimentu.

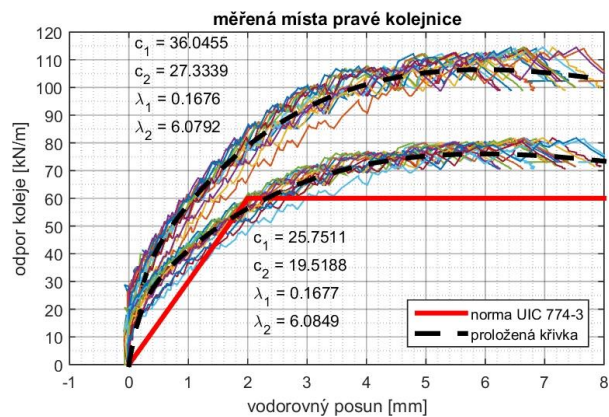
Cílem bylo simulovat zatížení ze zatěžovacího modelu LM71. Vzhledem k tomu, že nad kolejí se nacházeli ocelové trubky, jejichž použití pro uchycení snímačů se osvědčilo, bylo upuštěno od myšlenky simulace spojitého zatížení. Byla tedy zvolena varianta simulace 4 osamělých sil na koleji, tzn. nahrazení 2 náprav modelu LM71.

Jako náhrada dvojkolí železničního vozidla byly použity ocelové válcované nosníky osazené napříč přes obě kolejnice. Nahrazení značné hmotnosti železničního vozidla bylo provedeno pomocí naskládání železobetonových silničních panelů. Vzhledem k podjezdné výšce portálového jeřábu bylo navrstveno 10 panelů nad sebe, což je v daných podmínkách Kloknernova ústavu ČVUT maximální dosažitelné množství. Toto zatížení odpovídalo cca 92 % procentům účinnosti dvou osamělých náprav modelu LM71. To lze z hlediska provedení a vyhodnocení daného experimentu považovat za dostatečnou účinnost. Pohled na celé umístění břemeno je na Obrázku 3.



Obrázek 3: Pohled na vertikálně zatížený model koleje

V rámci měření vertikálně zatížené koleje bylo provedeno několik měřicích cyklů. Vzhledem k uspořádání experimentu bylo cíleno na vyvození větších posunů, aby bylo s jistotou dosaženo plastických posunů a nemuselo tak dojít k opakování měření. Opět pro přehlednost článku je uveden až výsledný stanovený odpor koleje. Vzhledem k tomu, že v rámci experimentu bylo při uvažování podélného roznosu zatížení 25/50/25 zatíženo jen několik pražců, jsou na výsledném grafu na Obrázku 4 znázorněny 2 proložené křivky. Horní z nich odpovídá podélnému odporu vztaženému pouze na vertikálně zatížené pražce, dolní křivka je pak vztažena na podélný odpor všech 8 pražců, tj. celé délky koleje modelu. U obou křivek jsou opět uvedeny jejich parametry. Z hlediska působení zatížených i nezatížených pražců lze očekávat, že obě křivky vymezují prostor grafu, kde bude ležet výsledná křivka částečně vertikálně zatížené koleje. Pro srovnání je uvedena křivka odporu dle UIC (60 kN/m), která v rámci svislého zatížení nerolizuje kvalitu údržby koleje.



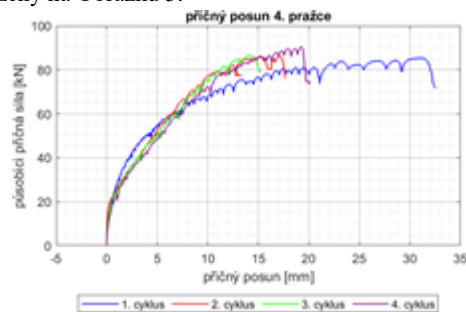
Obrázek 4: Podélný odpor svisle zatížené koleje

2.3. Měření příčného odporu bezстыkové koleje

Jak níž bylo zmíněno na začátku tohoto článku, při ztrátě stability kolejnicových pásů proti samotnému vybočení kolejnic brání příčný odpor koleje. Z tohoto důvodu bylo jako druhý experiment provedeno měření příčného odporu koleje. Samotné měření proběhlo na stejném modelu bezстыkové koleje, kde však bylo změněno uspořádání zatěžovací a měřicí soustavy.

Kolej byla zatěžována z vnějšího líce pravé kolejnice mezi 4. a 5. pražcem, tj. symetricky v 1/2 délky koleje. Na konstrukci byly měřeny posuny celkem ve 20 bodech koleje. Příčný posun byl měřen na každém z osmi pražců, dále na obou kolejnicích nad přílehlými pražci od místa zatěžování, na obou kolejnicích nad krajními pražci a poslední 4 snímače měřily podélný posun a natočení kolejnice vzhledem ke krajním pražcům.

Celkem byly provedeny 4 zatěžovací cykly. V každém cyklu byla síla přidávána v krocích cca 5-10 kN až do vizuálního dosažení plastického posunu koleje (v průběhu času mezi prvním a druhým experimentem byla změněna měřicí soustava, která již umožňovala grafický výstup závislosti posunů na působící síle v reálném čase). V této části pracovního diagramu nebylo měření ukončeno, ale hydraulický lis byl ještě mírně vysouván, aby byl plastický posun spolehlivě potvrzen. Posuny byly měřeny i během odtěžování koleje. Zatěžovací křivky ze všech 4 cyklů měřené na 4. pražci (nejbližší pražec ose symetrie) jsou zobrazeny na Obrázku 5.



Obrázek 5: Zatěžovací křivky 4. pražce ze všech zatěžovacích cyklů

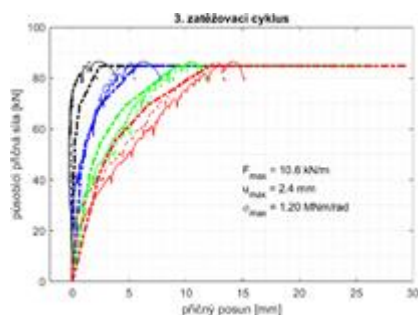
Na rozdíl od podélného odporu, kde docházíme ke stejným posunům po celé délce kolejnic a k víceméně rovnoměrnému posunu všech pražců, zde do vyhodnocení příčného odporu vstupuje ohybová tuhost kolejového roštu ve vodorovném příčném

směru. Tato ohybová tuhost se skládá jednak z ohybové tuhosti obou kolejnic, dále pak z torzní tuhosti jednotlivých upevňovačů.

Z tohoto důvodu nebylo v případě příčného odporu možné použít „obyčejné“ numerické vyhodnocení, ale bylo nutné přistoupit k vyhodnocení pomocí výpočetního modelu v softwaru Midas Civil. Jelikož na konci každého zatěžovacího cyklu docházelo k plastickým posunům a výpočet by byl singulární, byl postup obrácen – bylo zatěžováno pomocí vynucené deformace a z jednotlivých podporových reakcí byla zpětně stanovena celková působící síla.

V rámci výpočtu a vyhodnocení bylo zjištěno, že důležitým vstupním parametrem je právě torzní tuhost kolejnicového upevňovačů, která ovlivňuje celkovou ohybovou tuhost kolejnicového roštu. V rámci výpočtů byl měněn parametr příčného odporu (posun na začátku plastické větve, neboť max. odpor byl znám z celkové působící síly při plastickém posunu celého kolejnicového roštu) a zároveň byl měněn parametr torzní tuhosti upevňovačů.

Žádnou kombinací výše uvedených pametrů nebylo dosaženo spolehlivé přesnosti posunu všech 8, resp. všech 4 pražců v rámci využití symetrie. Příklad změřených a vyhodnocených posunů v závislosti na zvolených parametrech je na Obrázku 6.



Obrázek 6: Příklad průběhu změřených a vypočtených posunů v závislosti na uvedených parametrech plastického posunu a torzní tuhosti upevňovačů

2.4. Měření torzní tuhosti použitého kolejnicového upevňovačů

Z předchozí kapitole je jasné, že do výpočetního modelu vstupují 2 nezávislé parametry, jejichž kombinací je pravděpodobně možné dosáhnout více podobných výsledků. Z tohoto důvodu je nutné jeden parametr eliminovat – experimentálně stanovit.

Pro potřeby tohoto experimentu byl použit již jen samotný pražec, do jehož upevňovačů byly uchyceny kusy kolejnic. Použití tohoto dílčího modelu bylo podmíněno podmínkami měření v hale Kloknerova ústavu ČVUT, kde již nebylo možné použít kompletní model koleje. Tyto kolejnice byly z jedné strany zatěžovány pístem hydraulického lisu, čímž docházelo k natočení kolejnic.

Z hlediska měření nebylo možné měřit přímo natočení v úhlových jednotkách, proto bylo přistoupeno k měření posunů konců kolejnic. Umístění hydraulického lisu a snímačů je zobrazeno na fotografii ze samotného měření na Obrázku 7.



Obrázek 7: Schéma uspořádání experimentu na stanovení torzní tuhosti upevňovačů

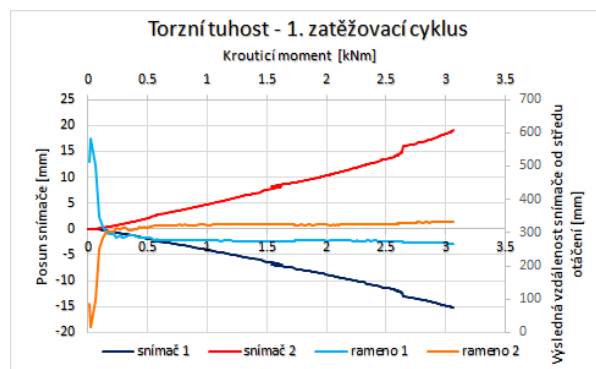
V rámci tohoto měření bylo provedeno celkem 8 zatěžovacích cyklů, tj. 4 zatěžovací cykly na každé upevňovač. Tyto 4 cykly probíhaly ve střídavém režimu, takže bylo střídáno zatěžování ve směru a proti směru hodinových ručiček.

Pro stanovení torzní tuhosti upevňovačů bylo v rámci vyhodnocení nutné převést působící sílu na krouticí moment a posuny na natočení. Během vyhodnocování dat však bylo zjištěno, že posuny z obou snímačů nejsou stejné. To je způsobeno primárně tím, že kolejnice se neotáčí kolem středu upevňovačů, ale vlivem působících sil se střed otáčení posouvá blíže ke kraji upevňovačů. Tento jev je viditelný i na Obrázku 7.

Tento problém byl jednoduše odstraněn tak, že bod otáčení byl pomyslně přesunut pod krajní snímač, hodnoty posunů byly sečteny v absolutní hodnotě a vzdálenost bodu otáčení a měření byla použita suma obou ramen snímačů. Tímto způsobem byl přesně stanoven úhel natočení kolejnice.

S posunem bodu otáčení souvisí další problém, a to sice stanovení ramena působení síly potřebného ke stanovení krouticího momentu. Zde byl použit poměr absolutních hodnot posunů z obou snímačů. Tím bylo možné stanovit velikost posunu středu otáčení od původního středu. Proměnné rameno bylo použito pro stanovení průběhu krouticího momentu.

Hodnoty posunů obou snímačů v závislosti na kroutícím momentu z 1. zatěžovacího cyklu jsou znázorněny v grafu na Obrázku 8. Ve stejném grafu jsou pro ilustraci znázorněna stanovená ramena – vzdálenosti od posunutého středu otáčení k příslušným snímačům.



Obrázek 8: *Průběh posunů jednotlivých snímačů a průběh jejich vzdáleností od posunutého středu otáčení v průběhu 1. zatěžovacího cyklu*

3. SHRUTÍ PROVEDENÝCH EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ

Pomocí zmíněných 3 experimentálních měření byly stanoveny zásadní parametry bezстыkové koleje na mostech pro vstup do statických výpočtů bezстыkové koleje na mostech.

Pomocí těchto parametrů je možné porovnat normový přístup dle UIC a chování bezстыkové koleje s parametry stanovenými experimentálně.

Z dosavadních výsledků je patrné, že experimentálně stanovený podélný odpor, vertikálně nezatížené i zatížené koleje, se od normového průběhu liší. Z hlediska parametrů příčného odporu koleje v uzavřeném šterkovém loži a torzní tuhosti upevňovacího pásu nelze tyto parametry porovnat, neboť norma UIC ani jiné známé předpisy tento parametr v uzavřeném šterkovém loži nestanovují.

4. ZÁVĚR

Autor tohoto článku doufá, že provedení výše popsaných experimentálních měření, jejich vyhodnocení a následné použití stanovených parametrů ve statických výpočetních modelech přispěje k lepšímu pochopení chování bezстыkové koleje.

Cílem celé série experimentů není však jen lepší pochopení chování bezстыkové koleje na mostech, ale zejména posouzení a případný návrh úpravy limitních kritérií tak, aby byl provoz železničních vozidel z hlediska ztráty stability koleje bezpečný, zároveň však mohl být naplno využit potenciál bezстыkové koleje, zejména pak z hlediska aplikace tohoto bezdlaťového systému na větších a složitějších mostních konstrukcích.

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za finanční podpory SGS21/042/OHK1/1T/11, Českého Vysokého učení technického v Praze.

References

- VAN'T ZAND, J.; MORAAL, J. Ballast resistance under three dimensional loading. ERRI D, 1997, 202. [online]. Available from: <http://www.esveld.com/Download/TUD/Ballast%20tests.pdf>
- UIC 774–3. Track/bridge Interaction: Recommendations for Calculations. 2.vydání. Paříž: UIC, 2001.
- ČD S3/2. Bezстыková kolej. Praha: České dráhy, 2002.
- ČSN EN 1991-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- ESVELD, Coenraad. Modern railway track. 2nd ed. Zaltbommel: MRTProductions, 2001, 654 s. ISBN 90-800324-3-3.
- ESVELD, C. DESIGN OF HIGH SPEED TRACK ON LONG BRIDGES [online]. , 7 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.esveld.com/Download/TUD/bridges.pdf>
- LICHTBERGER, Bernhard. Track compendium: track system, substructure, maintenance, economics. Hamburg: DVV Media Group, 2011, 621 s. ISBN 978-3-7771-0421-8.
- HAMBLY, Edmund C. Bridge deck behaviour. 2nd ed. New York: Chapman and Hall, 1991, xx, 313 s. ISBN 0-419-17260-2.
- DAI, Gong-lian a Wen-shuo LIU. Applicability of small resistance fastener on long-span continuous bridges of high-speed railway. Journal of Central South University [online]. 2013, 20(5), 1426–1433 [cit. 2016-01-14]. DOI: 10.1007/s11771-013-1631-7. ISSN 2095-2899. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11771-013-1631-7>
- VLASÁK, Martin, FOGLAR Marek. Metodika řešení kombinované odezvy konstrukce a koleje (metodický základ mvl 150). Praha 2015. [online]. Dostupné z: http://concrete.fsv.cvut.cz/vystupy/download/TA03031099-Met_komb_od_kce_kol.pdf
- LEE, HyeYeon. Rail structure Interaction Analysis. [online]. Dostupné z: http://www.idea-rs.com/wp-content/uploads/2015/05/Czech-mbm_Rail-Structure-Interaction-Analysis.pdf
- CALÇADA Rui, DELGADO Raimundo & MATOS António Campos e, GOICOLEA José & GABALDÓN Filipe. Track-bridge interaction on high-speed railways. London: CRC Press, 2009. ISBN 978-0-415-45774-3.
- BLÁHA, Filip. Experimentální stanovení podélného odporu bezстыkové koleje na mostech. Praha, 2014. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.
- PLÁŠEK O., ZVĚŘINA P., SVOBODA R., LANGER V., ŽELEŽNIČNÍ STAVBY II, MODUL 6 BEZSTYKOVÁ KOLEJ, [online], Brno 2006, Dostupné dne 5. 4. 2015 z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/neprihlaseny/index.php?dir=Skripta/BN02-Zeleznicni%20stavby%20II/&file=M06-Bezstykova%20kolej.pdf>