

文章编号:1673-2049(2010)02-0096-06

部分填充混凝土钢管结构桥梁研究

叶卓棋¹, 杨 健², 刘永健², 李运喜³

(1. 东莞市公路桥梁开发建设总公司, 广东 东莞 523120; 2. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 江苏 南京 210017)

摘要:在总结各国钢管结构研究现状的基础上,分析了部分填充混凝土钢管结构的类型及工程应用,探讨了部分填充混凝土钢管桁架结构桥梁的形式,展望了部分填充混凝土钢管桁架新型结构桥梁的优势和应用前景,最后以一座刚性悬索加劲的三跨连续钢桁梁桥为例进行了部分填充混凝土前后的静动力特性对比分析。结果表明:在钢桁梁桥弦杆内填混凝土能降低杆件的应力水平,提高桥梁的整体刚度。

关键词:部分填充混凝土钢管结构;钢管桁架结构桥梁;静动力特性;弦杆

中图分类号:U448.38 **文献标志码:**A

Research on Partially Concrete-filled Steel Tubular Bridges

YE Zhuo-qi¹, YANG Jian², LIU Yong-jian², LI Yun-xi³

(1. Dongguan Road & Bridge Development Construction Corporation, Dongguan 523120, Guangdong, China;
2. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Jiangsu Transportation Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210017, Jiangsu, China)

Abstract: A summary of existing researches on steel tubular structures was presented. Structural styles and engineering applications for partially concrete-filled steel tubular bridges were analyzed based on the above researches. Structural styles of partially concrete-filled steel tubular truss bridges were also analyzed. The prospects for the development on this novel kind of steel tubular truss bridges and their advantages were discussed. At last, static and dynamic characteristics of a continuous steel bridge stiffened with rigid cables were compared with that of the partially concrete-filled truss bridge. The results show that the stresses of chord members of partially concrete-filled steel truss bridge are decreased, while its integral stiffness is increased.

Key words: partially concrete-filled steel tubular structure; steel tubular truss bridge; static and dynamic characteristic; chord

0 引言

桥梁结构总是伴随着新型结构形式和新材料的产生而不断发展进步的。从 1889 年建成的 Forth 铁路桥算起,钢管结构桥梁经历了空钢管结构、钢管

混凝土结构的发展历程。

近年来,国外一些学者提出了部分填充混凝土钢管结构桥梁的理念,使用填充混凝土的钢管和钢筋混凝土桥面组合作斜拉桥的主梁,在桥跨不同位置的钢管中采用不同的混凝土填充方式,以适应斜

收稿日期:2010-04-22

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2006 318 812 112);交通部应用基础研究计划项目(2006 319 812 130)

作者简介:叶卓棋(1967-),男,广东东莞人,工程师,E-mail:yzq863@163.com。

拉桥主梁的受力特点^[1]。在桥塔到跨中的过渡段部分填充轻质混凝土,可以采用 2 层钢管相套且在中间环形填充混凝土的形式^[2]。

在中国,陈宝春提出的钢管-钢管混凝土组合拱桥即为部分填充混凝土钢管结构形式,并在实际桥梁中得到了应用。林英^[3]对部分填充混凝土钢管拱桥的受力性能进行了研究;潘桥文^[4]分析了不同混凝土填充长度对桥梁结构动力特性的影响;张贝^[5]采用有限元软件分析了传统全部填充混凝土钢管拱桥和部分填充混凝土钢管拱桥的面内稳定性和使用阶段的位移变形,并通过实桥算例说明了部分填充混凝土钢管拱桥具有自重轻、稳定性好等优点。钢管桁架结构的主管内填充混凝土有助于提高主管轴向刚度,提高节点强度、刚度及桁架整体承载力^[6-8]。

部分填充混凝土钢管桥梁结构是一种新型桥梁结构形式,目前研究和应用都相对较少,因此探讨和总结部分填充混凝土钢管结构桥梁具有重要的理论意义和实用价值。

1 分类与应用

部分填充混凝土钢管结构可分为部分填充混凝土单管结构和部分填充混凝土钢管桁架结构。对于部分填充混凝土单管结构,按截面形式可分为圆形截面和矩形截面,矩形截面一般称为钢箱截面;圆形截面杆件的部分填充混凝土钢管桁架一般称为钢管桁架,矩形截面杆件桁架截面较小的可以称为钢管桁架,截面较大的习惯称为钢箱桁架。

部分填充混凝土钢管结构在各国桥梁中已有应用,只是由于数量较少,尚没有形成独立的结构概念。早期有的桥梁采用了部分填充理念,但不一定是出于对结构受力的考虑,如法国的 Antrenas 桥(图 1),该桥跨径 56 m,桥面宽 11 m,是一空间桁式组合结构,为提高钢管拱的抗冲击能力,在其两端拱脚部分填充了混凝土^[9]。

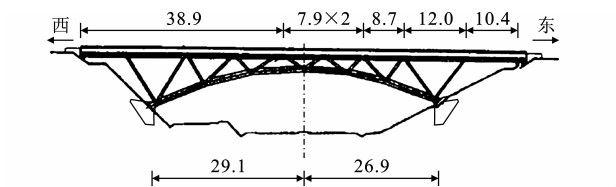


图 1 法国 Antrenas 桥 (单位: m)

Fig. 1 Antrenas Bridge in France (Unit: m)

文献^[1]中提出的斜拉桥型,使用部分填充混凝土的钢管和钢筋混凝土桥面组合作斜拉桥的主梁,以适应斜拉桥主梁的受力特点。笔者通过对设计的

一座 900 m 斜拉桥的分析与试验,说明这种新结构是可行并具有竞争力的,提出的填充思路为:在边跨端部支座处(区域 A1)可能会产生支座负反力,可以在此区域全部填充混凝土,以减少可能产生的负反力;桥塔附近主梁内(区域 A2 和 B)存在巨大轴压力,在此区域内全部填充混凝土,可以有效增加抗压能力;而在跨中部位(区域 C)压力很小,在此区域可不填混凝土,以避免跨中质量对边跨的不利影响,如图 2 所示。

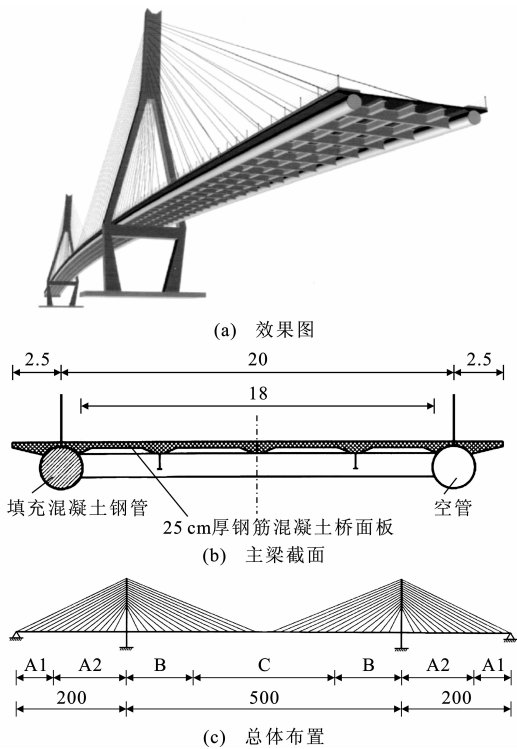


图 2 部分填充混凝土钢管斜拉桥 (单位: m)

Fig. 2 Cable-stayed Bridges with Partially Concrete-filled Steel Tubular Girders (Unit: m)

在中国,福建福鼎山前大桥、重庆万盛藻渡大桥、广东佛山东平大桥等采用了部分填充混凝土单管结构,其中福建福鼎山前大桥采用圆形截面,重庆万盛藻渡大桥、广东佛山东平大桥采用钢箱截面。

福建福鼎山前大桥^[10]采用下承式刚架系杆拱(图 3),拱肋采用 $\Phi 1\ 200$ 的钢管,两拱脚段的水平投影长 16.305 m 的范围内(接近 $L/4$ 处, L 为桥长)为钢管混凝土截面,拱顶段的水平投影长 42.39 m 的范围内为空管截面。空管段钢管壁厚 20 mm,钢管混凝土段钢管壁厚 16 mm。

重庆万盛藻渡大桥为钢-混凝土组合拱桥,拱肋截面为钢箱截面,拱脚区段钢箱内和跨中区段钢箱顶面浇注混凝土(图 4)。

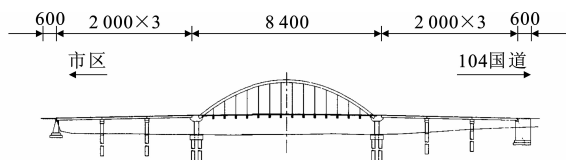


图3 山前大桥 (单位:cm)

Fig. 3 Shanqian Bridge (Unit:cm)



图4 藻渡大桥

Fig. 4 Zaodu Bridge

广东佛山东平大桥(图5)主桥的跨径组合为 $43.5\text{ m} + 95.5\text{ m} + 300\text{ m} + 95.5\text{ m} + 43.5\text{ m}$, 总长 578 m , 由3片拱肋组成。该桥为多重组合体系拱桥, 其主拱、副拱和刚性系梁均采用带加劲肋的钢箱, 而边拱采用钢箱混凝土, 从体系上来看, 属于部分填充混凝土钢箱结构。

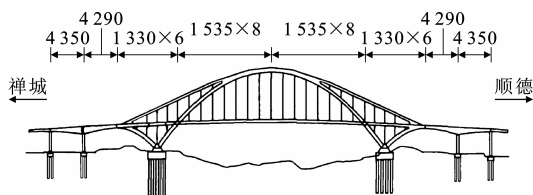


图5 东平大桥 (单位:cm)

Fig. 5 Dongping Bridge (Unit:cm)

部分填充混凝土钢管桁架结构桥梁是对部分填充混凝土单管结构桥梁的进一步发展, 湘潭四桥和衡酃路湘江特大桥均为部分填充混凝土钢管桁架结构, 桁架构件均采用圆形截面。

湘潭四桥是湖南省湘潭市二环线上跨越湘江的一座特大桥(图6), 桥型为双飞雁斜拉钢管拱混凝土桥。主桥的跨径组合为 $120\text{ m} + 400\text{ m} + 120\text{ m}$, 边跨比为0.3。大桥主拱采用中承式无铰双肋平行桁架拱, 每个肋由 $6\Phi 850$ 钢管混凝土组成, 拱顶下弦管在无斜拉索区域采用空钢管结构截面。

衡酃路湘江特大桥是湖南衡阳市的一座双层桥(图7), 主桥的跨径组合为 $60\text{ m} + 60\text{ m} + 184\text{ m} + 60\text{ m} + 60\text{ m}$, 为钢管桁梁系杆拱。边拱拱肋采用2根单管形成桁架形式, 拱肋上下杆通过腹杆或腹板形成桁架形式, 上弦杆与上层桥面以上采用桁架式

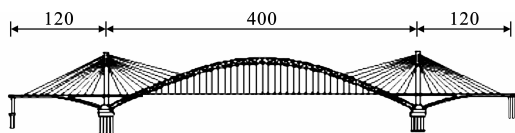


图6 湘潭四桥 (单位:m)

Fig. 6 Fourth Bridge in Xiangtan (Unit:m)

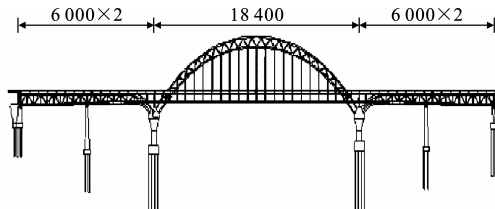


图7 衡酃路湘江特大桥 (单位:cm)

Fig. 7 Xiang River Bridge at Hengling Road (Unit:cm)

钢管混凝土拱肋, 以下采用哑铃型实腹式拱肋, 拱肋在拱脚一定长度范围内填充 C50 混凝土, 其余部位为空钢管段。主拱为中承式无铰双肋形式, 上层桥面以上拱肋采用全桁架式, 以下部位至拱脚段拱肋采用双哑铃型实腹式, 拱肋在拱脚的一定范围内灌注 C50 的混凝土, 其余部分为空钢管段, 空钢管内设环形横向加劲肋以及4道厚 10 mm 、高 100 mm 的纵向加劲肋, 灌注混凝土段和空钢管段以钢板隔开, 并采取一定的加劲措施^[11]。

2 填充混凝土的方法及优势

在钢管桁架的弦管中填充混凝土就形成了钢管混凝土桁架结构。近年来, 钢管混凝土桁架是 100 m 以上跨径钢管混凝土拱桥拱肋的主要结构形式; 同时, 钢管桁架、钢管混凝土桁架在梁式桥中也采用较多, 从已经建成的桥梁来看, 钢管桁架结构在桥梁中具有显著的技术经济效益和推广应用的價值。在广东南海市紫洞大桥、湖北秭归县向家坝大桥和四川万州大桥等工程中, 钢管混凝土桁架结构首次被应用于连续刚构和斜拉桥, 技术经济效益十分显著。

对于大跨桥梁结构, 将弯矩转换成轴力无疑是有利的^[12-19]。桁架构件以轴心受力为主, 材料的力学性能能够得到最有效的利用, 是抵抗横向荷载最有效的结构形式之一。特别是在公路铁路两用桥、双层公路桥梁中, 桁架结构更是具有先天的结构优势^[20]。由于混凝土有很好的抗压性能, 在实际应用过程中, 根据实际受力特性, 可以采用部分填充混凝土钢管桁架结构, 灵活选择填充混凝土的部位和填充数量:

(1)在桁架压力较大的弦管中填充混凝土。由于混凝土有很好的抗压性能,可分担大部分的压力,从而减小弦杆截面面积,防止管壁局部屈曲,减少用钢量,防止钢管内部锈蚀,增强耐久性,并具有较好的延性。

(2)在桁架的受拉弦管中填充混凝土,对受拉弦管施加预应力,提高桁架的整体刚度和强度,降低桁架的高度,从而减少腹杆的用钢量,并满足建筑净空的使用要求。

(3)在钢管桁架节点区域弦杆中填充混凝土,可以提高节点刚度和承载力,避免一般桁架节点构造过于复杂的缺点,同时由于弦管中填充了混凝土,降低了节点应力集中程度,提高了桁架的抗疲劳性能。

(4)在桁架支座、较大集中荷载作用等剪力较大的区域和管壁受侧向力区域的管内填充混凝土,可以避免钢管管壁局部屈曲破坏的产生。

(5)在连续体系桁架支点区域填充混凝土,尽量避免在跨中区域填充混凝土。连续体系桁架一般在支点处弯矩较大,跨中弯矩较小。在支点较大弯矩段填充混凝土可以提高桁架支点段的抗弯强度,填充混凝土的自重对整体桁架弯矩的影响较小。

3 算例分析

某刚性悬索加劲三跨连续钢桁梁桥采用双层车道布置,上层为 6 车道高速公路,下层为 8 车道城市交通^[21-22]。主桥全长 432 m,跨径组合为 112 m+208 m+112 m,有限元模型如图 8 所示。主桁立面采用有竖杆的华伦式桁架,加劲弦采用二次抛物线形式,上弦与加劲弦之间用吊杆连接。主桁横向采用三桁结构,桁高 10 m,桁间距 2×18 m,中间支点处加劲弦中心到上弦中心高度 28 m,加劲弦与上弦在跨中合成上弦;节间长度 8 m。

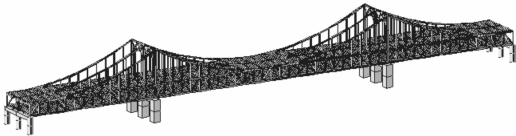


图 8 有限元模型
Fig. 8 Finite Element Model

该桥为钢箱桁架结构,在 FG 段、HK 段、CD 段钢箱内填充混凝土后(图 9),边桁下弦杆轴力都有所增加,增加的幅度约在 12%左右;对于填充混凝土的杆件,中支座附近下弦杆应力下降 16%,其他杆件应力下降幅度为 22%~51%;对于没有填充混凝土的弦杆,由于填充混凝土后整体自重的增大,应

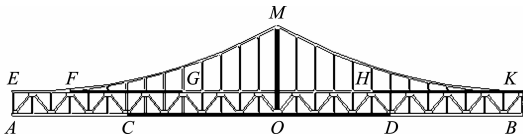


图 9 混凝土填充部位
Fig. 9 Sites of Concrete Filling

力随之有所增大,增大的幅度为 11%~13%。

对于上弦杆,填充混凝土后,中支座上方未填充混凝土的 GH 段轴力增加幅度为 5%~8%,而在填充混凝土的 FG 和 HK 段,轴力增大 12%~27%,而应力水平降低了 29%~44%,未填充混凝土部位应力水平有一定幅度增大,而填充混凝土的部位的应力水平下降幅度比较大。可见,混凝土对分担压应力的贡献大于其自重增加的效应。斜杆没有填充混凝土,应力变化较均匀。由于填充混凝土后自重的增大,轴力和应力变化幅度基本同步。应力增加幅度基本上在 6%~13%之间。填充混凝土前后,加劲弦应力增长幅度都为 5%,变化均匀同步。

从以上分析可以看出,混凝土分担构件压力的贡献大于其自重作用的效应,对整体结构来说,利大于弊。在实际应用中,合理地进行结构的布置,扬长避短,会起到更好的作用。

表 1 为 2 种方案下全桥前 10 阶振型的自振频率^[23]。从表 1 可以看出,采取部分填充混凝土方案的桥梁频率提高 40%左右。这说明填充混凝土后,桥梁自重作用增加所引起频率的减小效应小于刚度增加引起的频率增大效应,桥梁整体刚度有所提高。

表 1 2 种方案自振频率的比较

阶次	自振频率/Hz	
	原方案	部分填充混凝土方案
1	0.580 730	0.801 034
2	0.716 404	0.955 667
3	0.941 308	1.334 259
4	0.964 652	1.356 553
5	1.094 817	1.542 677
6	1.154 140	1.609 070
7	1.212 368	1.705 830
8	1.290 248	1.968 264
9	1.442 240	2.004 585
10	1.472 060	2.124 684

4 结 语

(1)对各国部分填充混凝土钢管结构桥梁的种

类、工程应用及优势进行了总结。部分内填混凝土有助于提高节点及桁架的刚度和强度,降低桁架的高度,从而减少腹杆的用钢量;同时,弦杆中填混凝土可以防止钢管内部锈蚀,增强耐久性,并降低了节点应力集中程度,提高了桁架的抗疲劳性能。

(2)在桁架支座、较大集中荷载作用等剪力较大的区域和管壁受侧向力区域的管内填充混凝土,可以避免钢管管壁局部屈曲破坏的产生。

(3)在连续体系桁架支点区域填充混凝土,尽量避免在跨中区域填充混凝土。在支点较大弯矩段填充混凝土可以提高桁架支点段的抗弯强度,填充混凝土的自重对整体桁架弯矩的影响较小。

(4)对刚性悬索加劲三跨连续钢桁梁桥进行了分析,结果表明,钢桁梁桥部分填充混凝土能够改善桥梁的静力和动力性能。

(5)部分填充混凝土钢管桁架是一种新型结构形式,应用于桥梁建设中的优势比较明显,具有良好的应用前景。

参考文献:

References:

- [1] NAKAMURA S, MOMIYAMA Y, HOSAKA T, et al. New Technologies of Steel Concrete Composite Bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(1): 99-130.
- [2] 陈平, 李亮, 陈念斯. 大跨度钢管加劲梁斜拉桥的设计[J]. 世界桥梁, 2003(1): 10-13.
CHEN Ping, LI Liang, CHEN Nian-si. Design of Large Span Cable-stayed Bridges with Steel Tubular Girders[J]. World Bridges, 2003(1): 10-13.
- [3] 林英. 钢管-钢管混凝土复合拱桥面内受力性能试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2000.
LIN Ying. Experimental Research on Mechanical Behavior in the Plane of Steel Tube and Concrete Filled Steel Tube Composite Arch Bridges[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2000.
- [4] 潘桥文. 双层桥面飞雁式钢管-钢管混凝土复合拱桥动力分析[D]. 福州: 福州大学, 2006.
PAN Qiao-wen. Dynamic Analysis of Hybrid Arch Bridge of Steel Tube and Concrete Filled Steel Tube with Double Decks Flying Goose Model[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [5] 张贝. 部分灌注钢管混凝土拱桥稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2002.
ZHANG Bei. Research on Stability of Steel Tubular Arch Bridges with Partial Concrete Filling[D]. Xi'an: Chang'an University, 2002.

- [6] 刘永健, 周绪红, 刘君平. 主管内填混凝土的矩形钢管 X 型节点受拉和受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 82-86, 94.
LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Experimental Research on Rectangular Steel Tube X-joints with Chord Concrete-inside Subjected to Tension and Bending[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1): 82-86, 94.
- [7] 刘永健, 刘君平, 杨根杰, 等. 主管内填充混凝土矩形钢管桁架受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 107-112.
LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, YANG Gen-jie, et al. Experimental Research on Mechanical Behavior of RHS Trusses with Concrete-filled in Chord[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 107-112.
- [8] 刘永健, 刘君平, 张俊光. 主管内填混凝土矩形和圆形钢管桁架受弯性能对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 86-93.
LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, ZHANG Jun-guang. Experimental Research on RHS and CHS Truss with Concrete Filled Chord[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(4): 86-93.
- [9] 白宝鸿. 法国昂特那斯钢管拱桥[J]. 国外桥梁, 1998(3): 5-6.
BAI Bao-hong. Antrenas Steel Tubular Arch Bridge in France[J]. Foreign Bridges, 1998(3): 5-6.
- [10] 张联燕, 李泽生, 程慰方. 钢管混凝土空间桁架组合梁式结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
ZHANG Lian-yan, LI Ze-sheng, CHENG Mao-fang. Concrete-filled Steel Tubular Spatial Truss Structures[M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [11] 陈永健, 郑振, 潘桥文. 双层桥面飞雁式钢管-钢管混凝土复合拱桥动力分析[J]. 福建建筑, 2007(12): 98-100.
CHEN Yong-jian, ZHENG Zhen, PAN Qiao-wen. Dynamic Analysis of Fly-bird-type Hybrid Arch Bridge of Steel Tube and Concrete Filled Steel Tube with Double-decks[J]. Fujian Architecture & Construction, 2007(12): 98-100.
- [12] 许凯明, 张明中, 王 喆. 大跨度钢管混凝土拱桥施工阶段非线性稳定分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4): 556-560, 566.
XU Kai-ming, ZHANG Ming-zhong, WANG Ji. Nonlinear Stability Analysis of Long-span CFST Arch Bridge Under Construction[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 556-560, 566.

- [13] 闫月梅,杜晓巍. 钢管混凝土柱加强环式节点的有限元分析[J]. 西安科技大学学报,2005,25(1):24-27.
YAN Yue-mei, DU Xiao-wei. Finite Element Analysis for Enforced Loop Joint of Concrete Filled Steel-tubular Column[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2005,25(1):24-27.
- [14] 韦建刚,陈宝春. 钢管混凝土拱桥拱肋刚度设计取值分析[J]. 交通运输工程学报,2008,8(2):34-39.
WEI Jian-gang, CHEN Bao-chun. Analysis on Rib Rigidity of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2008,8(2):34-39.
- [15] 刘永健,李运喜,刘君平,等. 受压弦管填充混凝土的矩形钢管桁架静力性能分析[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(4):65-72.
LIU Yong-jian, LI Yun-xi, LIU Jun-ping, et al. Static Behavior Analysis of RHS Trusses with Concrete-filled Compression Chord Member [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2008,25(4):65-72.
- [16] 王 达,黄平明,张光国,等. PC斜拉式桁架梁桥动力特性[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(6):39-44.
WANG Da, HUANG Ping-ming, ZHANG Guang-guo, et al. Dynamic Characteristics of PC Cable Stayed Truss Bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(6):39-44.
- [17] 许凯明,张明中. 大跨径钢管混凝土拱桥主拱混凝土灌注阶段空间稳定分析[J]. 筑路机械与施工机械化,2008,25(12):66-68,72.
XU Kai-ming, ZHANG Ming-zhong. Spatial Stability Research on Concrete Construction Stage of Long-span Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge [J]. Road Machinery & Construction Construction Mechanization,2008,25(12):66-68,72.
- [18] 卢 斌,文 锋,李世清. 大跨径钢管混凝土拱桥施工方法的风洞试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2006,23(3):41-43.
LU Bin, WEN Feng, LI Shi-qing. Study of Wind-resistant of Integral Lifting Construction for Big Solid in Long-span Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge [J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2006,23(3):41-43.
- [19] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土 T、Y 型节点受压性能试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(5):48-52.
LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Behavior of Concrete Filled Rectangular Steel Tube T-joints and Y-joints Under Compression[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2008,28(5):48-52.
- [20] 许兆军,侯文威,张玉玲. 公铁两用桥在我国的应用前景[J]. 铁道建筑,2000(12):16-19.
XU Zhao-jun, HOU Wen-wei, ZHANG Yu-ling. Application Prospects of Highway and Railway Bridges in China[J]. Railway Engineering,2000(12):16-19.
- [21] 刘永健,刘 剑,钟冠星,等. 刚性悬索加劲钢桁梁桥施工阶段力学性能[J]. 交通运输工程学报,2009,9(3):1-10.
LIU Yong-jian, LIU Jian, ZHONG Guan-xing, et al. Mechanical Behavior of Steel Truss Bridge Stiffened with Rigid Cables in Construction Stage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2009,9(3):1-10.
- [22] 刘永健,刘 剑,刘君平,等. 刚性悬索加劲钢桁梁桥施工阶段全桥模型试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(2):72-78.
LIU Yong-jian, LIU Jian, LIU Jun-ping, et al. Integral Model Test of Steel Truss Bridge Stiffened with Rigid Cables in Construction Stage[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(2):72-78.
- [23] 李运喜. 受压弦杆填充混凝土的矩形钢管(钢箱)桁架静力性能研究[D]. 西安:长安大学,2008.
LI Yun-xi. Study on the Static Behavior of Rectangular Steel Tube Truss with Concrete-filled Compression Chord[D]. Xi'an:Chang'an University,2008.