

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.008

混合梁结合部受力机理模型试验研究

江祥林^{1,3}, 刘玉擎², 孙璇²

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
3. 江西省交通科学研究所, 南昌 330038)

摘要:为揭示混合梁结合部的承载性能、破坏形态和受力机理,以主跨为 818 m 的九江长江公路大桥为研究背景,选取混合梁压剪式结合部典型格室,并设计进行比较的承剪式结合部格室,开展了两个缩尺比为 1:2 的结合部局部模型承载性能试验,测试了钢与混凝土的应变及相对滑移。研究结果表明:压剪式结合部承载能力是承剪式的两倍;压剪式结合部承压板传力约占总轴力的 62.5%,承压板传力减小了钢格室应力,限制了钢-混凝土间相对滑移,降低了连接件传力比例,使结合部受力更合理。
关键词:斜拉桥;混合梁;结合部;模型试验;受力机理

中图分类号:U443.35 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)06-0048-06

Model Test and Mechanical Behavior Analysis of Steel-concrete Joint of Hybrid Girder

Jiang Xianglin^{1,3}, Liu Yuqing², Sun Xuan²

(1. School of Highway Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China;
2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;
3. Traffic Science Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330038, P. R. China)

Abstract: To study the bearing behavior, failure mode and mechanical behavior of different structural forms of steel-concrete joint of hybrid girder, based on the hybrid girder of Jiujiang Yangtze River Highway Bridge with 818-metre main span, select a pressure-resistant shear-transferred steel-concrete joint, redesign a shear-transferred only joint for contrast, carry out two scale 1:2 model specimens bearing behavior experiment, measure the strain and relative slip of steel and concrete. The results show that: the bearing capacity of the pressure-resistant shear-transferred specimen is twice than the other; the bearing plate carries about 62.5% of the axial load, the force transmission of the bearing plate reduces the steel stress, steel-concrete relative slip and the force transmission ratio of connectors, makes the load transferred more effectively.

Key words: cable-stayed bridge; hybrid girder; steel-concrete joint; model test; mechanical behavior

斜拉桥的主跨用钢梁、边跨用混凝土梁,形成混合梁组合体系,性能上将大幅度得以提高,并且具有跨越能力大的优点^[1-2]。混合梁结合部是钢梁与混凝土梁间的过渡段,也是两种不同材料结合处。结合部两侧主梁的刚度相差大,格室内构造复杂,材料的差异性使得应力集中现象极易产生,是结构的薄弱部位^[3-4]。格室中钢与混凝土的受力性能、两者间

作用力的传递情况、结合面间的协同工作性,连接件的受力性能是影响混合梁结合段可靠性的重要因素^[5-6]。过去的研究主要集中在结合段刚度过渡平稳性、钢梁加劲过渡段承载能力及稳定性、混凝土加强过渡段抗裂性等方面,针对结合部承载性能及受力机理的研究较少^[7-9]。

本文结合九江长江大桥工程实例^[10],对采用钢

收稿日期:2014-05-25

基金项目:江西省交通厅科技项目(2010C00002)

作者简介:江祥林(1975-),男,研究员,主要从事桥梁结构、安全评估研究,(E-mail)350315033@qq.com。

格室承压传剪式结合部,设计制作了缩尺试验模型,并与承剪式结合部进行了对比试验分析。分析不同传力类型结合部中钢构件与混凝土构件的受力性能及两者间作用力的传递特点,验证了混合梁结合部构造的合理性。

1 混合梁结合部的构造特点

混合梁中钢梁加劲过渡段和混凝土梁加强过渡段间的结合部是混合梁斜拉桥受力的关键部分。结合段将钢梁所受轴力、剪力、弯矩通过钢梁加劲段加以分散,再通过结合部钢格室的承压板、抗剪连接件的作用传递到格室填充混凝土中,再过渡到混凝土梁加强过渡段。

如图1所示,依据传力机理不同可将混合梁结合段分为承压式、承剪式以及承压传剪式(以下简称“压剪式”)3种类型。承压式主要依靠钢梁与混凝土梁之间的承压板传递轴力,传力直接,但需要较厚的承压板,且结合段刚度突变较大。承剪式主要依靠结合部钢格室内顺桥向布置的抗剪连接件传递轴力,刚度过渡平稳,但传递轴力的能力有限,适用于小跨径斜拉桥。压剪式综合了承压式、承剪式的构造特征,以承压板承压作用和抗剪连接件传剪作用共同传递轴力,刚度过渡均匀,应力扩散好,构造相对复杂。

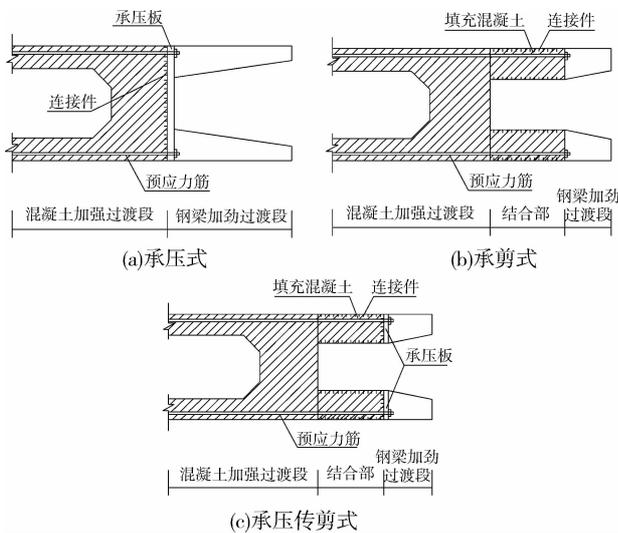


图1 混合梁传力形式

九江长江公路大桥混合梁结合段构造如图2所示,结合段长度为8.15 m,其中混凝土梁加强过渡段2 m,结合部2 m,钢梁加劲过渡段4.15 m。钢梁加劲过渡段采用U肋内插变高度T肋,同时在T肋端部延伸0.7 m的板肋进行刚度过渡。混凝土梁加强过渡段采用变化顶、底、腹板的厚度进行过渡。

结合部在顶、底板及腹板上均设置钢格室,钢格室腹板上的抗剪连接件是钢截面上的轴力及弯矩荷载分配到混凝土中的主要构件。为此,在腹板上开

设圆孔并贯穿钢筋,与进入圆孔的混凝土形成开孔板连接件。贯穿钢筋后,圆孔中的混凝土处于三向约束状态,形成销栓作用,将钢截面上的轴力分配到混凝土,使钢截面应力得到分散,平顺地向混凝土传递,并较好地限制钢与混凝土之间的滑移^[11-12]。为使混凝土与钢格室紧密结合,在钢格室与混凝土相贴的顶板、底板及承压板上设置焊钉^[13-14]。

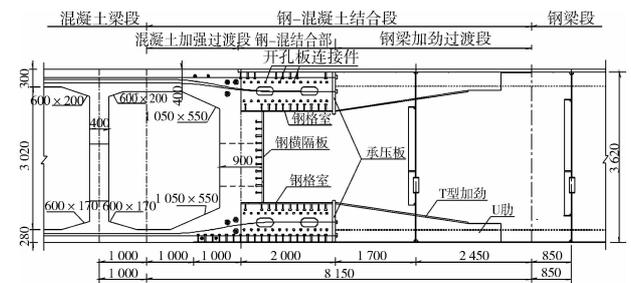


图2 结合段构造(单位:mm)

2 结合部格室局部模型试验方案

2.1 模型试件设计

依据几何、物理以及边界条件相似理论对结合部格室进行设计,保证实桥和模型的应力相似^[15]。根据实桥混合梁计算结果,选取结合部顶板一个完整格室和左右两侧各半个格室,在格室一端选取一段钢梁过渡段,另一端浇筑混凝土底座分别用于加载和固定,制作缩尺比为1:2压剪式模型试件。为与压剪式对比,选取承剪式结合部作为对照组。承剪式试件紧贴承压板格室一侧放置厚度为30 mm的泡沫,用以模拟承压板和混凝土的脱空情况,即不考虑承压板的承压作用。承剪式其它构造跟压剪式完全相同。

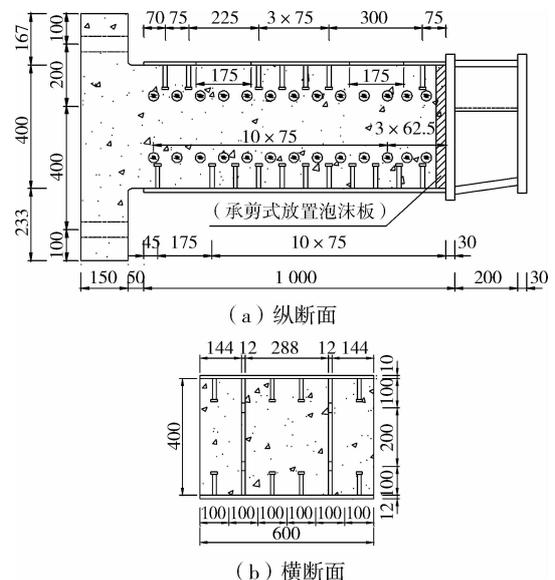


图3 模型试件构造(单位:mm)

如图3所示,模型试件长1 430 mm、宽1 000 mm、高800 mm。开孔板连接件孔径为32.5 mm,圆心距为62.5 mm和75 mm,孔中贯穿钢筋直径为10 mm,在钢腹板内共设置两排圆孔。焊钉直径13 mm、长度80 mm,顶板布置4×7根,底板布置4×11根。钢板采用Q345钢材,填充混凝土28 d实测立方体抗压强度平均值为62.3 MPa,并根据配筋率和空间几何位置进行普通钢筋配置。

2.2 加载及测试方法

模型加载如图4所示,混合梁斜拉桥主梁受力以压弯为主,截面弯矩转化为在主梁上下格室的轴力,因此格室模型主要考虑轴向荷载作用下各构件的受力状态,对两试件进行轴向加载试验。按相似比换算出模型在最不利工况组合下的轴力设计值 P_d 大小为1 050 kN。模型加载方式采用反复式加载,依次分级加载至 $1.0P_d$ 、 $1.7P_d$ 、 $2.5P_d$ 、 $3.5P_d$ 后再卸载,最后一次加载至破坏。

模型测点布置如图5所示,测试内容包括加载

端钢板布置位移计测量试件轴向变形,应变片测试格室钢板应变,振弦计测试混凝土内部应变,钢与混凝土轴向相对滑移测试采用振弦计A、应变片B进行测试。将振弦计A的一端焊接到格室内钢板上,另一端悬空,在相应位置钢板外侧布置应变片B,利用A与B应变读数差,测量钢-混结合面处的相对滑移。

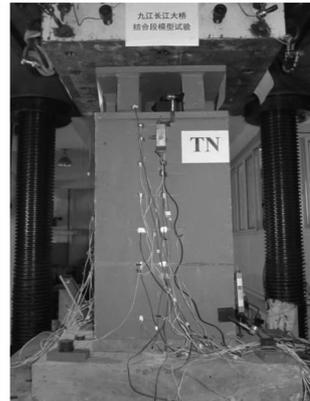


图4 模型试验加载

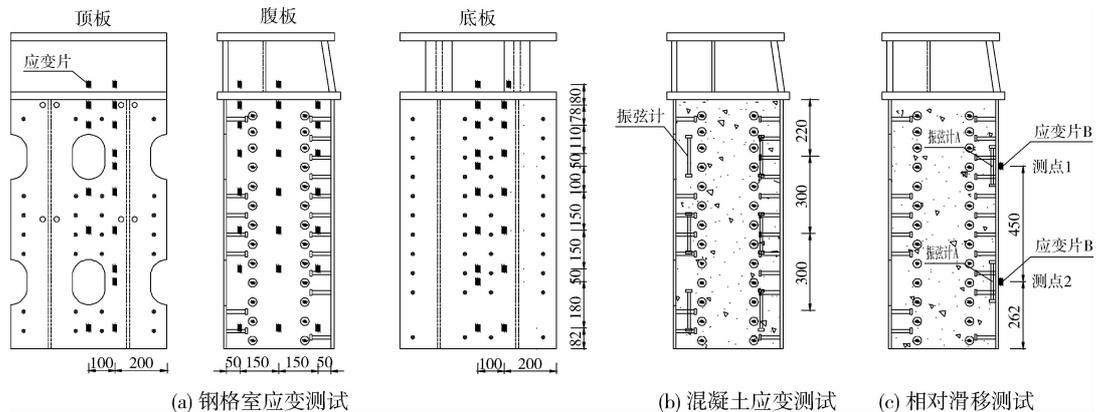


图5 模型测点布置(单位:mm)

3 模型试验结果及分析

3.1 承载性能

图6为压剪式和承剪式试件荷载-位移曲线,其中位移表示试件的整体轴向压缩量。压剪式试件最大承载力约为17 000 kN,承剪式试件最大承载力约为8 500 kN,压剪式试件承载力为承剪式试件承载力的2倍。压剪式结合部能直接将承压板轴力通过接触承压传递至混凝土,钢格室的刚度增加,提高了格室的承载能力。因此实际工程结构中较好发挥承压板传力作用是该类型结合部设计和施工的关键,在浇筑格室混凝土时,应保证混凝土浇筑质量,保证承压板与混凝土接触密实,防止混凝土承压面脱空。

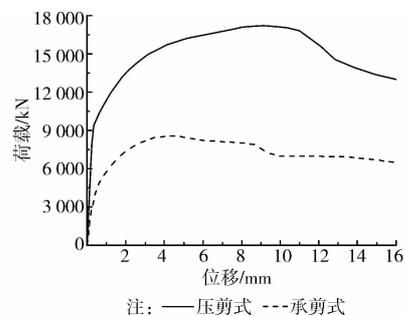


图6 荷载-位移曲线

混合梁中钢梁加劲过渡段和混凝土梁加强过渡段的承载性能容易计算,屈曲现象以及裂缝等破坏容易发现,而结合部,其破坏机理复杂,格室内的破

坏难以及时发现。压剪式试件破坏形态表现为格室下部混凝土压碎并剥落,同时伴随格室末端焊钉连接件根部剪断和纵向普通钢筋屈服。承剪式试件破坏形态表现为两列开孔板孔中混凝土发生剪切破坏,沿着上下两列开孔板方向混凝土表面产生两条比较明显的纵向裂缝,同时格室末端焊钉连接件根部剪断。

3.2 钢格室与混凝土的应力状态

图7、图8为压剪式和承剪式试件钢格室腹板和底板轴向应力的纵向分布。试件钢板在各级荷载的作用下均受压,压应力随着荷载增大不断增大。底板与腹板应力随着距承压板距离的增加逐渐减小,表明应力通过连接件有效地从钢板通过连接件传递至混凝土。

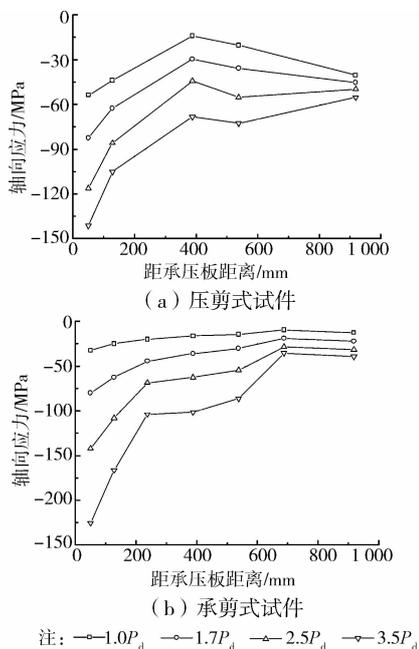


图7 钢格室腹板应力分布

承剪式试件在承压板处由于无混凝土分担轴力,轴力全部传递至格室顶底板和腹板,其应力大小约为压剪式试件的两倍。在 $3.5P_d$ 荷载作用下,在距承压板较远处,承剪试件腹板应力最大压应力约为230 MPa,底板最大压应力约为290 MPa。

图9为压剪式和承剪式试件格室内混凝土轴向压应力纵向分布。随着距承压板的距离增加,焊钉与开孔板连接件通过受剪的方式逐渐将轴力传递至混凝土,混凝土应力逐渐增大。

压剪式试件由于承压板通过承压接触的方式,已将一部分轴压力传至格室混凝土,荷载相同的情况下同位置处的混凝土应力压剪式试件比承剪式试件大。承剪式试件混凝土一开始不参与受力,轴力

必须全部通过连接件逐渐传递,因而混凝土应力沿轴向变化趋势比压剪式试件大。说明压剪式试件能使承压板后混凝土直接参与受力,充分发挥格室内混凝土承压作用。

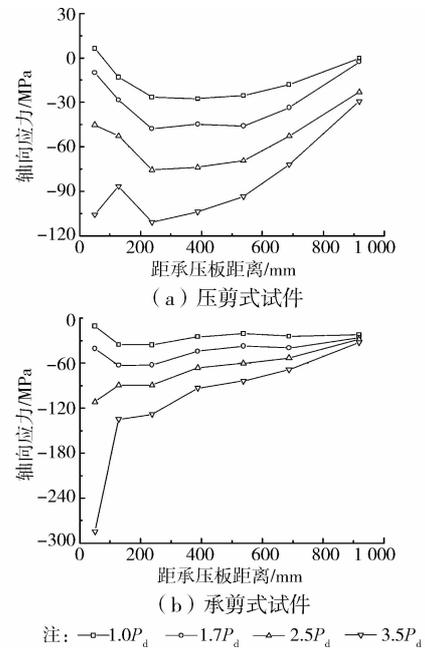


图8 钢格室底板应力分布

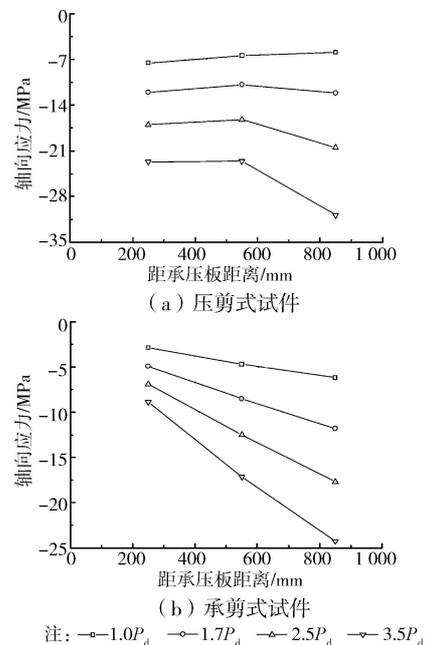


图9 格室混凝土应力分布

3.3 相对滑移变化状态

图10为测点1处压剪式和承剪式试件格室内部钢板与混凝土相对滑移量随荷载的变化。荷载由 $1.0P_d$ 增至 $3.5P_d$ 时,测点位置处钢-混凝土相对滑移逐渐增大,表示混凝土相对钢格室向承压板滑移。

3.5 P_a 作用下, 承剪式试件测点位置相对滑移量最大约为 0.1 mm, 较压剪式试件相应位置处大。说明压剪式试件钢-混凝土间结合性能较好, 承压板承压有效地限制了钢-混凝土间相对滑移, 提高了格室钢-混凝土间结合性能。

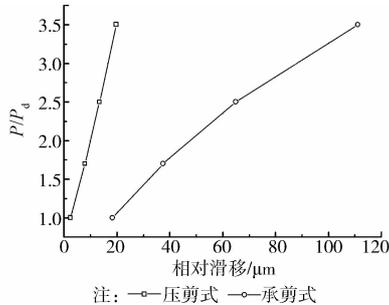


图 10 格室内相对滑移量的变化

3.4 传力机理分析

图 11 为压剪式结合部轴力作用从钢梁至混凝土梁的传力路径。轴力通过钢梁顶(底)板和 U 肋、T 肋传递至承压板和钢格室顶(底)板, 其中一部分通过承压板与格室混凝土间接触承压作用向混凝土传递, 另一部分通过格室顶(底)板上的焊钉连接件和格室腹板上的开孔板连接件, 以连接件剪切作用逐步向混凝土传力。图 11 示出 6 条传力路径, 其中 R1、R2、R5 路径为承压传力, R3、R4 和 R6 为剪切传力。承压传力的路径较短, 传力较为直接, 剪切传力延长了结合段传力路径, 增加了传力面积, 使得结合部传力更为平缓。

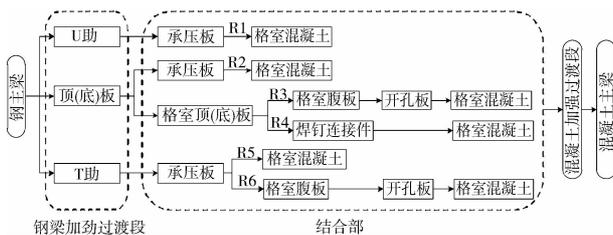


图 11 压剪式结合部传力路径

承剪式结合部无承压传力, 轴力直接通过格室中布置的抗剪连接件以剪切作用传递到混凝土。

压剪式与承剪式结合部不同构件轴力传力比例如表 1 所示, 通过近承压板断面钢格室应力得到格室腹板和顶底板承剪传递轴力, 通过总加载力和钢格室轴力差得到承压板承压传力比例。压剪式结合部承压板承压传力约占总轴力的 62.5%, 其余部分通过格室腹板和顶底板上连接件以承剪传递, 承剪式结合部轴力全部由格室腹板和顶底板上的连接件传递, 其传力比例分别约为 46.8% 和 53.2%, 对比

表明压剪式结合部能充分利用承压板和连接件的复合传力作用, 减小了连接件的传力比例, 使结合部受力更合理。

表 1 轴力传力比例

传力形式	承压板	格室腹板	格室顶底板
压剪式	62.5	16.7	20.8
承剪式	0	46.8	53.2

4 结论

以九江长江公路大桥混合梁结合部局部格室为研究对象, 进行了压剪式和承剪式结合部缩尺模型承载性能试验, 研究了不同传力类型结合部的承载性能、应力分布及受力机理, 得出以下结论。

1) 压剪式结合部承载能力是承剪式结合部的 2 倍, 表明承压板是结合部的重要传力构件, 承压板接触承压对提高格室承载能力作用明显。

2) 压剪式结合部利用钢格室中承压板和连接件共同来传递轴力, 刚度变化匀顺, 传力顺畅。在 3.5 倍设计荷载时, 结合部仍处于弹性受力状态, 各受力构件均具有较大的安全储备。

3) 压剪式结合部承压板传力作用明显, 降低了格室钢板应力水平, 能充分发挥格室内混凝土承压作用, 限制了钢-混凝土间相对滑移, 提高了格室钢-混凝土间结合性能。

4) 通过试验得出了压剪式和承剪式结合部不同构件轴力传力比例, 其中压剪式结合部承压板传力约占总轴力的 62.5%, 压剪式结合部能充分利用承压板和连接件复合传力作用, 减小连接件传力比例, 使结合部受力更合理。

参考文献:

- [1] 刘玉擎. 混合梁接合部设计技术的发展 [J]. 世界桥梁, 2005(4):9-12.
Liu Y Q. Development of design technique for joint parts of hybrid girder [J]. World Bridges, 2005(4):9-12.
- [2] 陈开利, 余天庆, 习刚. 混合梁斜拉桥的发展与展望 [J]. 桥梁建设, 2005(2):1-4.
Chen K L, Yu T Q, Xi G. Development and prospective of hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2005(2):1-4.
- [3] 刘荣, 余俊林, 刘玉擎, 等. 鄂东长江大桥混合梁结合段受力分析 [J]. 桥梁建设, 2010(3):33-35.
- [4] Liu R, Liu Y Q, Wu D J. Local buckling analysis on

- stiffened ribs of steel-concrete hybrid girder in cable-stayed bridges [C]// The 9th Pacific Steel Structure Conference, Beijing, China, 2010 :955-959.
- [5] 唐亮,吴文明,刘高,等.有格室-后承压板结合部构造的结构特性[J].工程力学,2010,27(11):234-243.
Tang L, Wu W M, Liu G, et al. Structural performance of rear bearing-plate connection with cells in steel-concrete hybrid girder [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11): 234-243.
- [6] 刘明虎,徐国平,刘峰.鄂东大桥混合梁钢-混凝土结合部研究与设计[J].公路交通科技,2010,27(12):78-85.
Liu M H, Xu G P, Liu F. Study and design of steel-concrete joint part of hybrid girder of Edong bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(12):78-85.
- [7] 刘荣.斜拉桥混合梁结合段合理设计研究[D].上海:同济大学,2010.
- [8] Kong X, Wu D J, Cai C S, et al. New strategy of substructure method to model long-span cable-stayed bridges under vehicle-induced vibration [J]. Engineering Structures, 2012(34):421-435.
- [9] 李小珍,肖林,苏小波,等.空间刚架结构钢-混结合段的力学性能[J].西南交通大学学报,2012,47(6):907-914.
Li X Z, Xiao L, Su X B, et al. Mechanical properties of steel-concrete composite section in space rigid frame [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(6):907-914.
- [10] 何伟兵,刘玉擎,汪蕊蕊.九江长江公路大桥混合梁结合段构造分析[J].桥梁建设,2012,42(1):30-55.
He W B, Liu Y Q, Wang R R. Analysis of joint section structure of hybrid girder of Jiujiang Changjiang river highway bridge [J]. Bridge Construction, 2012, 42(1):30-55.
- [11] 赵晨,刘玉擎.开孔板连接件抗剪承载力试验研究[J].工程力学,2012,29(12):349-354.
Zhao C, Liu Y Q. Experimental study of shear capacity of perfobond connector [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12):349-354.
- [12] Suhaib Y K, Chen A R, Liu Y Q. Finite element simulation and parametric studies of perfobond rib connector [J]. American Journal of Applied Sciences, 2007, 4(3):122-127.
- [13] Xue D Y, Liu Y Q, Yu Z, et al. Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012,(74):1-7.
- [14] Wang Q, Liu Y Q, Lebet J P. Nonlinear finite-element analysis of the shear behaviour of stud connectors [C]//Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structure Technology, Stirlingshire, Scotland, 2012 :2128-2141.
- [15] 章关永.桥梁结构试验[M].北京:人民交通出版社,2010.

(编辑 胡玲)