

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.231122

钢管混凝土格构式桥塔塔台结合部受力分析

王 戈,田 波,文 凯,周 霆
(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,四川 成都 610000)

摘 要: 为得到钢管混凝土格构式桥塔塔台结合部真实受力情况,考虑相对滑移、承压接触和连接件作用,建立了结合部实体有限元模型,分析了结合部混凝土、钢结构、连接键的受力情况,同时对结合部关键构造进行了参数化分析。结果表明:桥塔塔台结合部各部件受力良好,其构造形式和构造长度对结构力学行为影响明显。
关键词: 斜拉桥;组合结构;钢管混凝土;索塔;钢混结合部;构造参数
中图分类号: U448.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2025)05-0096-05

Force analysis on Junction of Concrete-filled Steel Tube Lattice Bridge Pylon

WANG Ge, TIAN Bo, WEN Kai, ZHOU Ting
(Sichuan Provincial Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to obtain the true force situation at the junction of concrete-filled steel tube lattice bridge pylon, and considering the relative slip, pressure bearing contact and the action of connectors, a solid finite element model of the junction is established to analyze the force situation of the junction concrete, steel structure and connection keys. And the parameterized analysis is carried out on the key structures of the junction. The results show that the force of each component at the junction of bridge pylon is good. Its structural form and length have a significant impact on the mechanical behavior of the structures.
Keywords: cable stayed bridge; composite structure; concrete-filled steel tube; cable pylon; steel-concrete junction; construction parameters

0 引 言

桥梁是土木工程领域中技术含量最高、技术要求最复杂的工程项目之一。合理利用各种建筑材料的组合性能,提高抵御自然灾害的综合能力,确保寿命期中的费用最低是桥梁结构设计的发展趋势^[1]。钢管混凝土作为一种典型的钢混组合结构,因具有自重轻、强度高、耐久性好、施工便捷等优点而受到工程师的青睐^[2]。特别是随着交通路线向西部山区延伸,我国桥梁建设面临着地形起伏大、地震烈度高、材料运输困难、施工作业平台狭小等诸多难题。在此背景下,越来越多的桥梁主要承重构件采用了钢管混凝土结构^[3]。钢管混凝土在桥梁承重结

收稿日期: 2023-09-13
基金项目: 四川省交通运输科技项目,西部山区大跨径组合梁斜拉桥关键技术研究(2020-A-04)
作者简介: 王戈(1985—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

构中的应用见表 1。

表 1 钢管混凝土在桥梁承重结构中的应用

编号	桥名	结构类型	地震 烈度	应用 部位
1	雅西高速—腊八斤大桥	连续刚构桥	Ⅷ	主墩
2	雅西高速—黑石沟大桥	连续刚构桥	Ⅷ	主墩
3	沿江高速—卡哈洛大桥	悬索桥	Ⅷ	主塔
4	沿江高速—火烧棚大桥	连续刚构桥	Ⅷ	主墩
5	金阳河—特大桥	连续刚构桥	Ⅷ	主墩
6	盐米路—黄泥梁子大桥	悬索桥	Ⅶ	主墩
7	汶马高速—克枯大桥	多跨简支桁架梁桥	Ⅷ	主墩
8	雅西高速—干海子大桥	多跨简支桁架梁桥	Ⅷ	主墩

目前,该类结构的研究重点主要集中在钢和混凝土协同工作机制,塔或墩的整体构造形式、抗震性能和总体构造等方面^[4-6],而对其与基础连接构造的研究相对较少。本文通过建立考虑开孔板连接作用的钢管混凝土格构式桥塔和承台结合部有限元模型,分析了各部件的受力情况,并对一些关键构造参数进行了对比分析,可供钢管混凝土柱和承台连接的设计参考。

1 工程概况

1.1 设计概况

某斜拉桥桥位抗震烈度为 9 度,为减轻桥塔自重,提高其抗压弯承载能力,采用了钢管混凝土格构式桥塔(桥塔标准横断面见图 1),塔高 156 m。墩底处纵桥向钢管中心间距 10 m,横桥向钢管中心间距 7 m,钢管混凝土立柱直径 $d=150\text{ cm}$,壁厚 22~36 mm,管内灌注 C80 混凝土。钢管混凝土立柱外包 20 cm C30 混凝土。格构墩腹板厚度为 50 cm,采用 C30 混凝土。

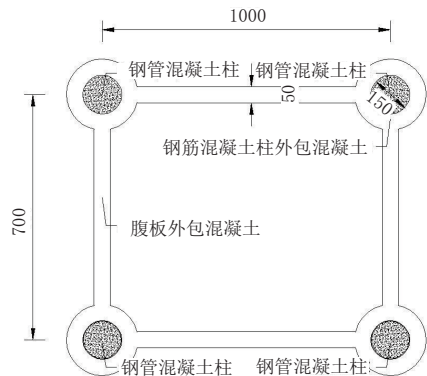


图 1 桥塔标准横断面(单位:cm)

塔台结合部构造如图 2 所示:钢管混凝土立柱伸入到承台中 3 m,单根立柱周边均匀设置 8 道板厚 25 mm 加劲板,加劲和钢管上设置多列孔径 60 mm PBL 键,结合部底部及承台顶面处各设 1 道厚 30 mm 承压板。

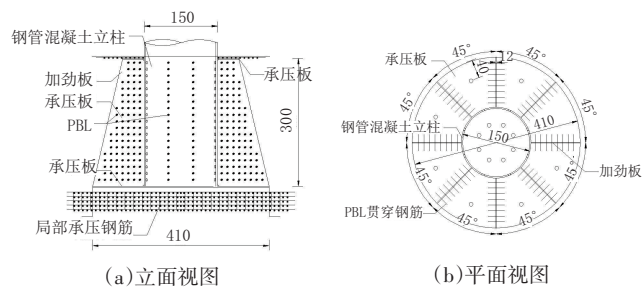


图 2 塔台结合部构造(单位:cm)

1.2 局部分析模型

采用软件 ANSYS,建立包括桩基、承台、部分桥塔、塔台结合部 PBL 键在内的有限元计算模型(见图 3)。其中:混凝土结构采用 solid65 单元模拟;钢结构采用 shell63 模拟;PBL 键采用弹簧单元 COMBIN14 模拟^[7]。混凝土、钢结构材料特性按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[8]取值;PBL 键抗剪刚度按《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)^[9]相关公式取值为 $5.0\times 10^7\text{ kN/m}$;模

型顶部施加成桥状态最不利荷载工况下的竖向偏心压力荷载。

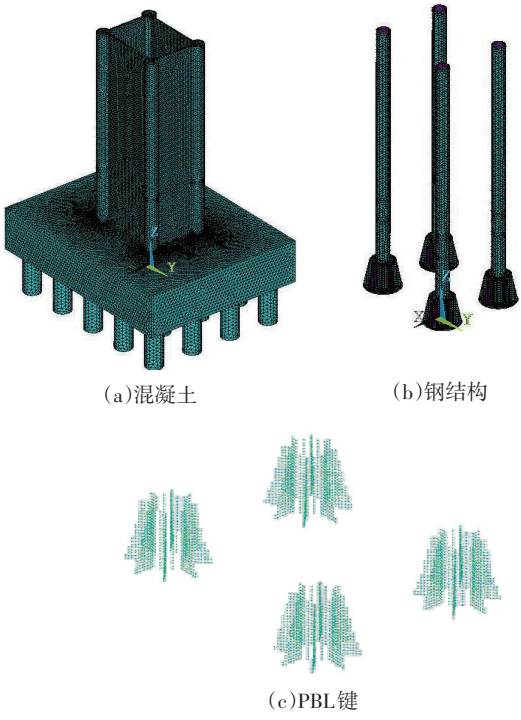


图 3 有限元计算模型

2 主要构件受力分析

2.1 钢管及加劲肋

塔台结合段钢管和加劲肋 Mises 应力云图见图 4。

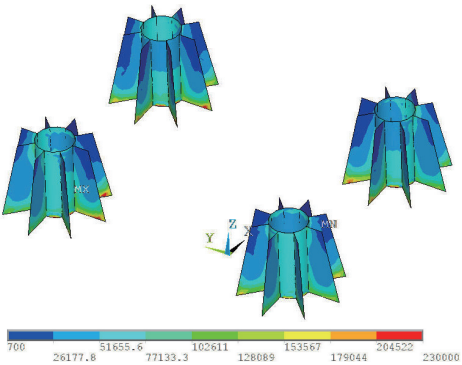


图 4 钢管及加劲肋 Mises 应力云图(单位:MPa)

由图 4 可见:钢管及加劲肋最大应力出现在靠近前承压板的位置,应力水平在 160 MPa 左右,满足上述规范要求。

2.2 承台

在桥墩竖向荷载作用下,承台各平面混凝土主压应力分布见图 5。

由图 5 可见:随着钢管混凝土立柱逐渐深入到承台中发生力的传递,从承台顶面到以下 2 m 位置,最大应力水平从 20 MPa 左右降低至 8 MPa 左右,应力

峰值明显下降,承台各处受力趋于均匀。

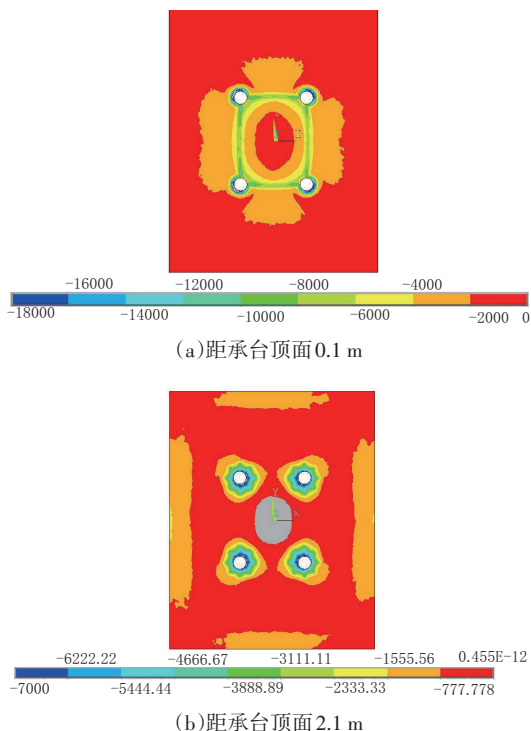


图5 承台各平面混凝土主压应力分布(单位:MPa)

2.3 加劲肋 PBL 键

选取受力较大的一侧中加劲板,对 PBL 键竖向剪力进行分析。加劲肋各列 PBL 键竖向剪力分布如图 6 所示。

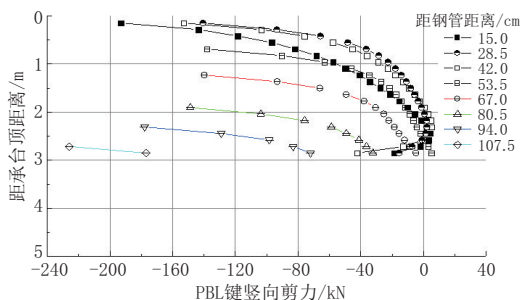


图6 加劲肋各列 PBL 键竖向剪力分布

(1) 各列 PBL 键的竖向剪力最大值分别为-192.9、-152.9、-140.6、-138.2、-140.0、-148.7、-177.8、-225.9 kN, 根据《公路钢混组合梁桥设计与施工规范》第 9.3.4 条, 计算得到 PBL 键抗剪承载力为 263.2 kN, 安全系数最小为 1.165, 满足该规范要求。

(2) 同一列的各排 PBL 键受力差别较大, 从承台顶向前承压板方向逐渐减小。

综上所述, 考虑到远离钢管的 2 列 PBL 键数量少, 达到设计承载力上限后, 会把作用力传递到同排其他列受力较小的 PBL 键上; 而靠近钢管的几列 PBL 键, 当剪力达到其承载力上限而破坏时, 会发生

“多米诺骨牌”效应, 从上至下的各排 PBL 键先后达到极限承载力而破坏。为避免这一情况发生, 需要对最靠近钢管几列 PBL 键中的顶上 1 排剪力做控制性设计。该排焊钉剪力最大值为-192.9 kN, 是加劲肋所有 PBL 键剪力平均值-40.4 kN 的 5 倍, 因此在进行加劲肋 PBL 键设计时, 应至少考虑 PBL 键剪力平均值 5.0 倍的安全系数。

3 关键构造参数分析

3.1 不同的构造形式

钢管混凝土和承台的连接是沿某一轴线方向上的结合, 该构造与混合梁和混合塔的构造相似。参照混合梁结合部构造^[8], 分别建立 4 种构造形式(见图 7)的塔台连接部有限元计算模型, 计算结果对比见图 8。

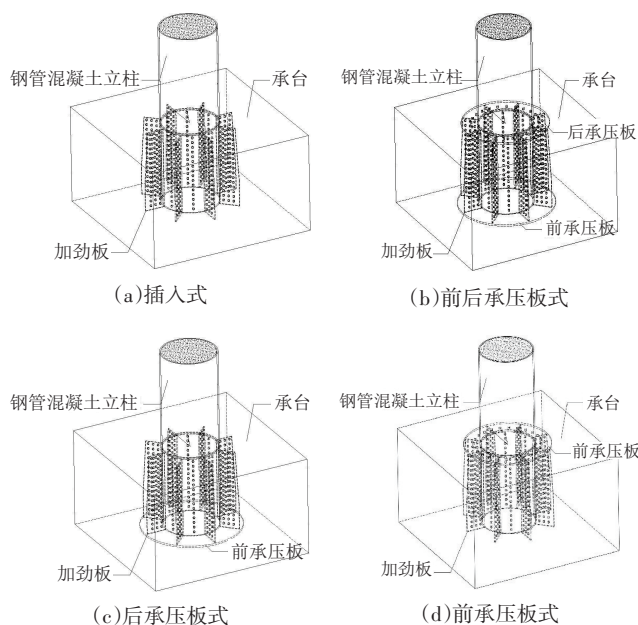


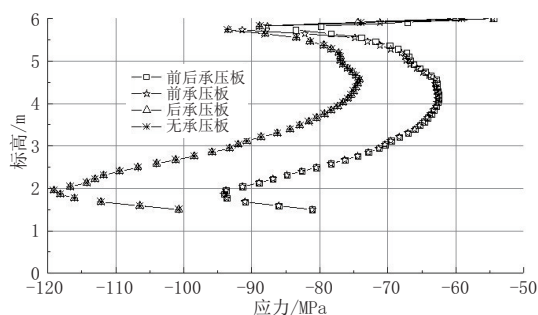
图7 墩塔和承台结合部构造

由图 8 可见: 前承压板存在时各构件受力更小, 加劲肋的竖向应力降低 20~25 MPa, PBL 键竖向剪力降低 5~50 kN, 墩底应力降低约 0.5 MPa; 而后承压板对加劲肋和 PBL 键的受力几乎没有影响, 墩底应力影响幅度仅为 0.1 MPa。

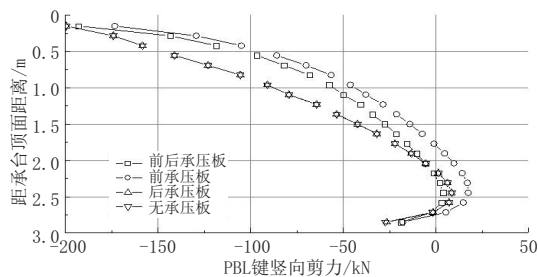
结合构造分析, 前承压板的作用实际上是增加了钢管混凝土立柱与承台的接触面, 使竖向轴力多了 1 条传力路径; 后承压板位于钢管混凝土和承台 2 个实体之间, 仅改变了极小的轴向刚度。

3.2 不同结合深度

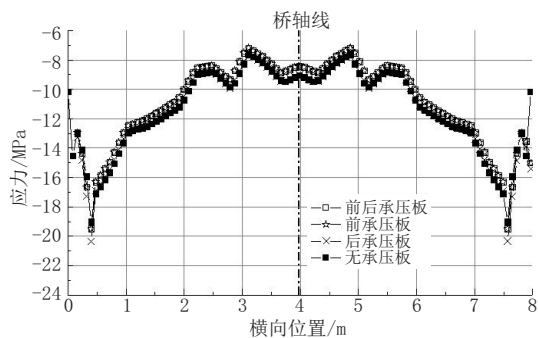
钢管混凝土立柱通过前承压板及带 PBL 键的加劲肋分别以压力和剪力的形式, 把竖向作用力传递



(a)加劲钢板竖向应力分布



(b)PBL键竖向剪力分布



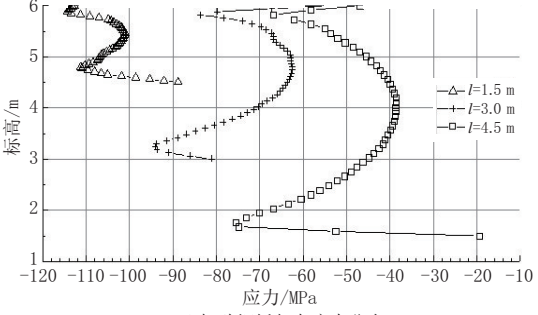
(c)桥墩墩底竖向应力分布

图8 不同构造形式下结构受力对比

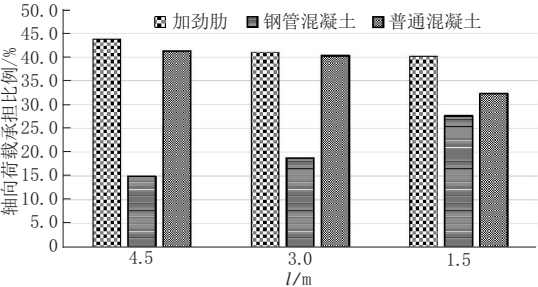
到承台中。其中压力传递接触面积固定,PBL键布设数量与立柱深入承台的长度 l 密切相关,深入承台的长度越长,PBL键的数量越多。但深入承台的长度越长,立柱底面就越接近承台底面,对承台受力越不利。为找到最佳深入长度,本文对比了钢管混凝土3种深入承台长度下结合部的受力情况,3种长度分别对应1倍、2倍和3倍立柱钢管直径。计算结果见图9。

(1)随着结合部长度(钢管混凝土立柱深入承台中的长度 l)的增加,加劲肋应力水平逐渐降低,从90~115 MPa降低到55~96 MPa,再到47~96 MPa,但下降幅度逐渐减缓。

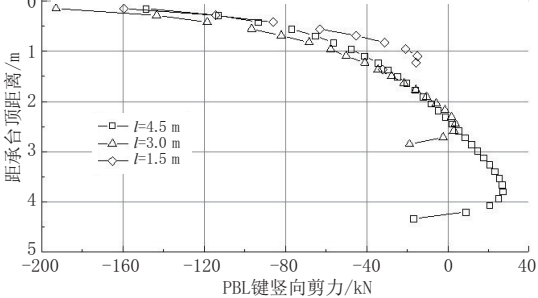
(2)随着结合部长度增加,钢管混凝土承担的比例逐渐减少,加劲肋和加劲肋周边的普通钢筋混凝土承担的比例逐渐增加,说明结合段各部分受力更加均匀。



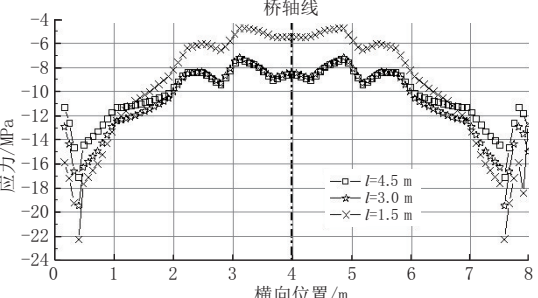
(a)加劲钢板竖向应力分布



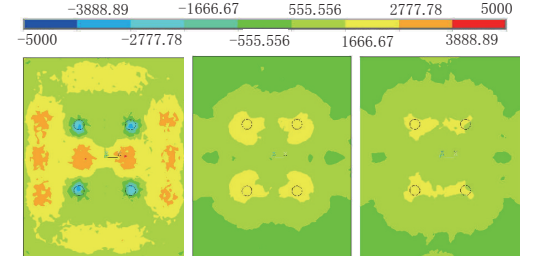
(b)各部分轴向荷载承担比例



(c)PBL键竖向剪力分布



(d)桥墩墩底竖向应力分布



(e)承台底面主拉应力分布(单位:MPa)

图9 不同结合段长度下结构受力对比

(3)随着结合部长度增加,越来越多的PBL键参与受力,作用力在结合部的分布更加均匀。但当深入承台的长度为3倍立柱直径(即 $l=4.5$ m)时,PBL键作用力方向反向,说明此时力的作用方向已转变成由普通钢筋混凝土向加劲肋传递。

(4)随着结合部长度增加,墩底竖向应力的峰值越来越小,剪力滞系数也变小,当结合部长度达到2倍立柱钢管直径(即 $l=3.0\text{ m}$)时,墩底竖向应力分布基本趋于稳定。

(5)随着结合部长度增加,钢管混凝土立柱对承台底面应力分布影响增大,当结合部长度达到3倍立柱钢管直径(即 $l=4.5\text{ m}$)时,在承台底部出现了明显应力偏大的局部区域。

综合以上分析,建议塔台结合部钢管混凝土立柱深入承台中的长度宜取2倍钢管直径。

3.3 不同加劲肋板厚

在构造形式及结合段长度确定的前提下,本文对比分析了不同加劲肋钢板厚度 t 、不同PBL键抗剪刚度(与开孔孔径、孔内贯穿钢筋直径相关)下,结合部各部分的传力比例,结果见图10、图11。

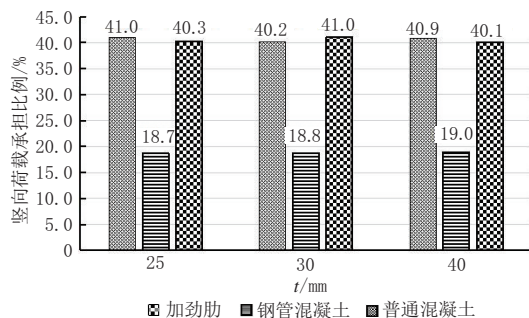


图10 不同加劲肋钢板厚度下各部分竖向荷载承担比例

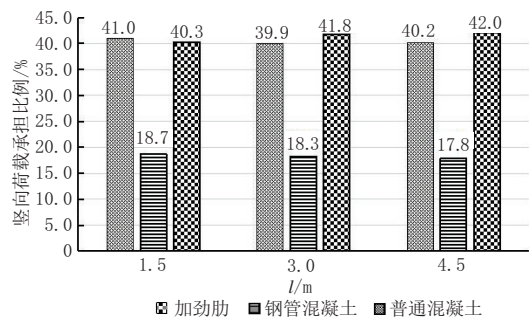


图11 不同PBL键抗剪刚度下各部分竖向荷载承担比例

由图10、图11可见:加劲肋钢板厚度和PBL键抗剪刚度对荷载的竖向分配影响很小。

4 结 语

(1)设置前后承载板,可使结合部各部件受力更加均匀;同时前承压板能方便钢管混凝土立柱定位,后承压板能方便桥墩主筋定位,因此推荐结合部采用前后承载板。

(2)综合承台底和PBL键的受力情况,结合段钢管混凝土立柱伸入承台的长度宜取2倍钢管立柱直径。

(3)PBL键竖向剪力分布不均匀,由上至下逐渐减小,建议按平均值的5倍安全系数,对最顶1排PBL键做控制性设计。

(4)加劲肋钢板厚及PBL键抗剪刚度对结合部各部分的竖向荷载承担比例影响较小,设计时加劲肋和PBL键满足自身的承载力即可。

参考文献:

- [1] 刘玉擎.组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 韩林海.钢管混凝土结构——理论与实践[M].3版.北京:科学出版社,2016:3-7.
- [3] 韩林海,牟廷敏,王法承,等.钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J].土木工程学报,2020,53(5):1-24.
- [4] 欧智菁,谢铭勤,林建茂,等.钢管混凝土高墩连续梁弹塑性抗震性能研究[J].武汉大学学报,2021,54(3):219-225.
- [5] 邱文亮,胡哈斯,田甜,等.影响钢管混凝土组合桥墩抗震性能的结构参数[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(5):1-11.
- [6] 吴庆雄,黄育凡,陈宝春,等.钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁非线性地震响应分析[J].工程力学,2015,32(12):90-98.
- [7] 刘玉擎,陈聪,郑双杰.钢锚箱嵌固型锁踏锚固结构受力机理分析[J].桥梁建设,2015,45(1):33-45.
- [8] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [9] JTG/T D64-01—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

