文章编号:1003－4722(2017)05－0101－06

东明黄河公路大桥主梁加固关键施工技术

徐刚年[1],王有志[1],王世民[1],王来永[2]
(1. 山东大学土建与水利学院,山东 济南 250061; 2. 交通运输部公路科学研究院,北京 100088)

摘 要:东明黄河公路大桥主桥为(75＋7×120＋75) m的预应力混凝土刚构－连续组合体系梁式桥,该桥运营多年后出现了梁体开裂和跨中下挠病害。为解决桥梁抗剪承载力不足和跨中下挠问题,主梁采用斜拉体系加固方案,即在原桩基两侧增设桥塔,主梁下部横向增设托梁,托梁与主梁之间通过托架在箱梁底部连接,从桥塔至托梁锚固斜拉索。在主梁加固施工中,新增钻孔灌注桩基础采用回旋钻机钻孔,采用"U形管"法压浆;新增钢构件(托梁、托架和箱内钢支撑)施工主要包括吊装、钻孔、植筋及箱内钢支撑施工;斜拉索按照从中塔到边塔、从短索到长索的顺序分级对称张拉。加固后的荷载试验表明,斜拉体系加固施工改善了桥梁的受力,抬升了跨中截面高度,加固效果明显。

关键词:组合梁桥;连续梁桥;钢箱梁;桩基础;钢构件;斜拉索;施工技术;桥梁加固

中图分类号:U445.72;U448.216 **文献标志码**:A

Key Construction Techniques for Strengthening of Main Girder of Dongming Huanghe River Highway Bridge

XU Gang-nian[1], *WANG You-zhi*[1], *WANG Shi-min*[1], *WANG Lai-yong*[2]
(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: The main bridge of Dongming Huanghe River Highway Bridge is a hybrid system bridge of the prestressed concrete rigid frame and continuous girder with span arrangement (75＋7×120＋75) m. Over the years of operation, the deteriorations like the cracks and midspan deflection have occurred in the main girder of the bridge. To resolve the problems of the insufficient shear capacity and the midspan deflection, the main girder was strengthened by the scheme of the stay cable system. That was, the new pylons were added on the both sides of the existing pile foundations and the joists were added underneath the girder in the transverse direction. The joists and the girder were connected at the bottom of the girder via the corbels and the stay cables were anchored respectively on the pylons and at the joists. In the strengthening construction of the girder, the new bored piles were constructed, using the rotary boring machines and the bases of the piles were grouted, using the U-shape pipe method. The construction of the new steel components (e. g. the joists, corbels and steel supports in the box girder) was mainly the lifting and installation, drilling, reinforcement implanting and the steel support installation. The stay cables were tensioned symmetrically in steps in the sequences from the intermediate pylons to the side ones and from the short cables to the long ones. The load tests for the girder after it was strengthened show that the strengthening construction using the stay cable system improves the load conditions of the

收稿日期:2017－02－09
基金项目:国家自然科学基金项目(11372165);交通运输部西部交通建设科技项目(2011318223940)
Project of National Natural Science Foundation of China (11372165); Project of Science and Technology of Western Region Transportation Construction, Ministry of Transport (2011318223940)
作者简介:徐刚年,讲师,E-mail:xugangnian2007@163.com。研究方向:结构工程维修与加固。

bridge, raises up the midspan sections and the effect of the strengthening is quite sound.

Key words: hybrid system bridge; continuous girder bridge; steel box girder; pile foundation; steel component; stay cable; construction technique; bridge strengthening

1 概 述

东明黄河公路大桥位于山东省菏泽市东明县与河南省濮阳市之间的黄河上,是我国首座长联大跨径预应力混凝土刚构－连续组合体系梁式桥,于1993年10月建成,全长4 142.14 m。主桥为9孔一联,跨度为(75+7×120+75) m,全长990 m。主梁采用单箱单室三向预应力箱梁结构,箱梁顶板宽18.34 m、底板宽9 m,墩顶梁高6.5 m、跨中梁高2.6 m。

东明黄河公路大桥运营10年后,2003年对该桥检测发现,主桥腹板出现与顶板呈40°～60°夹角的斜向裂缝,多数分布在跨长$L/4$和$3L/4$附近,另外,箱梁还存在如底板横向裂缝、顶板纵向裂缝及横隔板U形裂缝等其他形式的裂缝;各跨跨中均出现不同程度的下挠(最大值为14.7 cm)。针对该桥梁体开裂和跨中下挠2种病害[1-3],2003年采用增设底板体外束、增加腹板厚度、粘贴钢板条、粘贴碳纤维布及增设横隔板等方式对主桥进行加固。加固运营10年后,2013年检测发现,部分跨又出现了新的受力裂缝和下挠(最大值为18.84 cm[4])。为了有效地改善主桥的受力状况和抬升跨中截面高度,于2014年提出采用斜拉体系加固[5]方案对该桥进行第2次加固。

斜拉体系加固是采用增设桥塔及斜拉索对主梁提供竖向支撑的主动加固方式。与其他加固方式相比[6-10],采用斜拉体系加固后,桥梁结构体系发生改变,张拉施工引起主梁局部应力集中更为突出,可能造成桥梁结构破坏,具有无预兆性和突发性。目前,针对斜拉体系加固应用的相关研究文献并不多见。因此,结合东明黄河公路大桥主梁斜拉体系加固工程,本文主要介绍斜拉体系加固方案及施工中的新增桩基础施工技术、新增钢构件安装技术和斜拉索张拉控制技术。

2 斜拉体系加固方案及工程难点

2.1 加固方案

东明黄河公路大桥主梁采用斜拉体系加固,即在原桩基两侧增设桥塔,主梁下部横向增设托梁,托梁与主梁之间通过托架在箱梁底部连接,从桥塔至托梁方向锚固斜拉索,斜拉索索力通过托梁与托架配合传递到主梁上[11]。斜拉体系加固东明黄河公路大桥示意见图1。该斜拉体系主要由新增桩基础、桥塔、托梁、托架、箱内钢支撑及斜拉索等结构组成。

(1) 新增桩基础共32根,以承担桥塔荷载。在原桩基两侧增设同直径、等长度的钻孔灌注桩基础。上部桩径为2.4 m、下部桩径为2.0 m,桩长为84 m;桩基采用C30混凝土。新、旧钻孔灌注桩间中心距离为5.75 m,桩身净距为3.35 m。

(2) 桥塔为独柱式,桥塔与主梁无连接,以桥跨中心线对称布置(共16个,高44.53～46.78 m)。边塔(58号和65号)、次边塔(59号和64号)采用预应力混凝土结构,中塔(60～63号)采用普通钢筋混凝土结构。边塔、次边塔采用多层滑动索鞍(包括索鞍鞍体、滚轮组件、索鞍底板、鞍座底板、钢箱笼等构件)形式,索鞍鞍体承担斜拉索竖向力,鞍体通过滚轮组件与鞍体底板连接,鞍体底板与索鞍底板通过高强螺栓连接,索鞍鞍体下部为标准钢箱笼(钢箱笼之间采用连接销定位,与混凝土塔柱采用剪力钉连接);中塔采用多层钢锚箱形式,锚箱设置于桥塔上部斜拉索锚固区,与混凝土塔柱通过剪力钉连接,锚箱最上层设置备用锚箱。

(3) 托梁采用Q345D钢板加工制造,为全焊钢结构,采用变高箱形断面。托梁长23.5 m、宽0.9 m,中部梁高2 m、端部梁高1.2 m(采用直线过渡),重约39 t。

(4) 托架为托梁与主梁间的过渡连接,采用Q345D钢板加工制造,为全焊钢结构。根据斜拉索倾角的不同,托架分为短索托架和长索托架2种。为方便托架安装和定位,在托架与主梁间设置调平钢垫板,托架与主梁采用M22高强螺栓(长450 mm,性能等级为10.9S,长索109根,短索99根)连接,并灌注粘钢结构胶;在托架与托梁间通过设置25 mm厚的软钢衬垫来协调两者间的变形差异。托架与托梁采用M22的高强螺栓(长80 mm,性能等级为10.9S,长、短索均为40根)锚固。

(5) 箱内钢支撑采用Q235B钢板加工制造,横撑截面为焊接H形,与箱梁间采用植埋螺杆锚固,并灌注粘钢结构胶。

(6) 每半跨设置短索和长索各1对(共64根斜

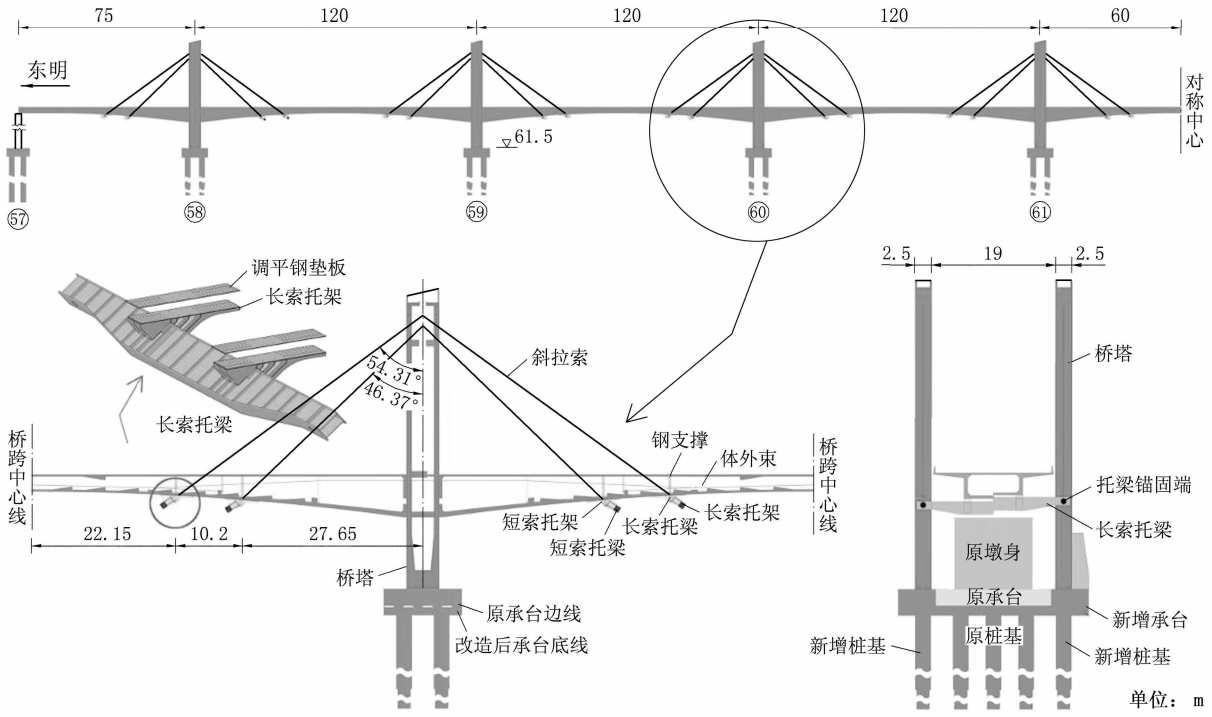

图 1　斜拉体系加固东明黄河公路大桥示意

Fig. 1　Strengthening of Dongming Huanghe River Highway Bridge, Using Stay Cable System

拉索)，长索主梁锚固端距桥跨中心线 22.15 m，长、短索间距为 10.2 m，对称布置，长、短索桥塔锚固端设置在距桥面 24 m 和 22.5 m 处，通过托梁锚固端搭设的张拉平台进行斜拉索张拉施工。

2.2　工程难点

(1) 由于水文地质条件复杂，而且遇到危险河段抛石和原桥施工遗弃的大量混凝土块、钢筋及管桩等遗留物，不可预见性因素较多，增加了新增桩基础的施工难度。

(2) 在主梁底部采用高强螺栓锚固托梁、托架，要求钢构件制造精度高，箱梁底部配筋与托架构造复杂，打孔植筋定位难度大。

(3) 托梁、托架自重大，吊装时易变形，且主梁底板和托梁具有安装倾角，现场锚固工艺复杂，吊装、对位困难，需分步锚固。

(4) 主梁箱体存在大量裂缝，且各跨跨中均出现不同程度的下挠，采用斜拉体系加固主梁时，体系转变中结构受力复杂，对斜拉索张拉顺序、索力精度控制及监测监控提出了极高的要求。

3　主梁斜拉加固关键施工技术

东明黄河公路大桥主桥主梁加固施工流程为：桩基、承台及桥塔施工→托梁、托架工厂加工制作后运送至现场→临时吊装托架、托梁→混凝土箱梁底面打孔→安装托梁、托架及箱内钢支撑→挂索→斜拉索张拉→箱内体外预应力束调整→桥面系施工→成桥索力微调→新、旧承台后浇带施工。

3.1　新增桩基础施工技术

新增桩基础施工工艺流程为：搭设钢便桥和施工平台→下放钢护筒(考虑到对原有桩基地层的保护，护筒永久性留在桩基)→使用回旋钻机钻孔→采用“U 形管”法对桩底进行压浆。

由于该桥跨越黄河，黄河为地上悬河，多年对危险河段都采取抛石等防治措施，加上原桥施工时桩位处河床遗弃的大量混凝土块、管桩、螺纹钢、钢绞线等杂物，给施工带来了巨大的困难。在 59～63 号新增桩基(20 个)钻孔中，均受到不同程度的阻碍，致使钢护筒无法下放，影响了桩位的准确定位。为解决该难题，首先采用机械和人工相结合的打捞方式初步打捞出废旧钢材及混凝土块等杂物，对于一些难以打捞的遗留物，通过围堰抽水后进行清理；最后采用冲击钻对旧桩的混凝土封底进行破碎并清理。

承台施工时，设置整体钢板桩围堰，将水排出围堰，以满足施工空间要求。采用金刚石绳锯切割工艺凿除旧承台圆角，植入剪力钉。为节约成本，从施工安全方面考虑，撤掉钢围堰，采用后浇带钢护板作为临时模板，在桥塔受力沉降稳定后浇筑新、旧承台后浇带(图 2)。

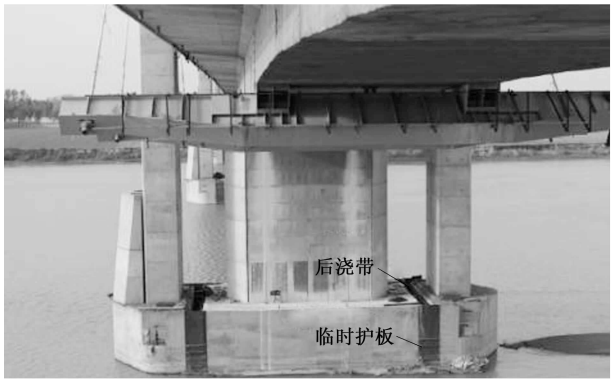

图 2 新、旧承台后浇带
Fig. 2 Post-Casting Zone of New and Old Pile Caps

3.2 新增钢构件安装技术

新增钢构件包括托梁(32 个)、托架(64 个)和箱内钢支撑(32 个)。新增钢构件施工工艺流程为：在主梁锚固区搭设施工平台→避开钢筋和托架肋板定位轴心线→粘贴调平钢垫板→采用自制的液压冲天取芯水钻钻孔→以调平钢垫板上的钻孔作为模板对托架进行开孔→龙门吊吊装托梁、托架→采用角度微调升降系统临时吊装托梁、托架→植筋→安装箱内钢支撑。新增钢构件施工主要分为吊装施工、钻孔施工、植筋施工及箱内钢支撑施工。

(1) 吊装施工。吊装施工前，首先在主梁锚固区底部搭设操作平台，按照施工设计要求确定调平钢垫板位置后，对箱梁底部清理凿毛，并采用环氧砂浆找平。利用金属探测仪探测钢筋确凿位置，再用经纬仪、水平仪绘制出纵、横轴心线(轴心线应该同时避开钢筋和托架肋板)，在箱梁底面粘贴调平钢垫板，并按照箱梁底面放线对应到调平钢垫板。托架、托梁由工厂制作和装配，整体运抵施工现场。考虑到桥面宽度和托梁、托架重量，采用 1 台双悬臂龙门起重机(跨距 17.5 m，起重量 2×50 t)，选择风力相对平稳的时间进行吊装。通过自制的角度微调升降系统将托梁、托架临时固定于主梁锚固区。

(2) 钻孔施工。采用自制的液压冲天取芯水钻钻机进行箱梁底部竖向钻孔植筋。该水钻钻机垂直于调平钢垫板和箱梁底面钻孔，再以调平钢垫板上的钻孔作为模板对托架进行开孔。植筋前，通过角度微调升降系统将托梁、托架提升至箱梁底面。箱梁底部钻孔施工见图 3。

(3) 植筋施工。受托架内角操作空间不足和植筋螺栓长度的限制，分 2 批进行植筋。第 1 批为 2 副托架内角的 50 根高强螺栓(图 4)，第 2 批为长索托架的 168 根、短索托架的 148 根高强螺栓。第 1 批植筋施工流程为：降落托梁、托架→植筋→抬升托梁、托架并对位托架植筋孔→拧紧螺母。第 1 批植筋不仅施工精度要求极高，而且需考虑植筋胶固化时间和温度变化对托梁、托架变形的影响。



图 3 箱梁底部钻孔施工
Fig. 3 Drilling in Bottom of Box Girder

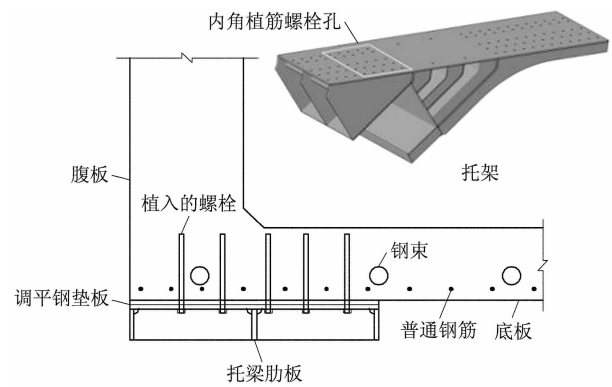

图 4 植入的螺栓示意
Fig. 4 Implanted Bolts

(4) 箱内钢支撑施工。因腹板薄，抗压性能差，为了避免主梁锚固区段局部箱梁应力集中，加强截面的横向稳定性，增设箱内钢支撑。为了降低成本和提高施工效率，通过跨中顶板开孔分块运输钢支撑至箱梁内，在箱内焊接，采用钻孔植筋的方式与混凝土箱梁连接。箱内钢支撑见图 5。

3.3 斜拉索张拉控制技术

斜拉索张拉前，为确保张拉施工时主梁的挠度和应力保持在安全控制范围之内，在全桥共布设 64 个张拉点(均布置在斜拉索的托梁锚固端)、134 个挠度测点及 445 个应力测点对其进行全程监测。为降低施工成本及减少温度变化对桥梁的影响，采用 8 台千斤顶于夜间 20：00～24：00 进行张拉作业。利用白天进行倒顶，既提供了充足的倒顶时间，也保证了每级张拉后斜拉索至少有 72 h 的持荷时间。

斜拉索张拉时，长、短索的张拉控制力分别为



图 5　箱内钢支撑
Fig. 5　Steel Supports in Box Girder

2.7 MN 和 2.1 MN，按张拉控制力的 30%、50%、65%、75%、85%、90%、95%、100%分 8 级张拉。首先将 61 号和 62 号墩长索张拉至分级控制索力，再张拉短索，完成当天既定张拉工作。第 2 天进行 60 号和 63 号墩的长、短索张拉，依次循环进行。按照由中塔到边塔、从长索到短索的张拉顺序分级对称张拉。

斜拉索索力采用频率式索力动测仪、压力传感器和千斤顶油泵读数进行实时测量控制。为满足斜拉索索力误差小于或等于±2.5%张拉控制力的要求，按设计规定的控制索力分级同步张拉，并根据实测数据动态调整张拉工序。应力控制采用双控，即控制应力的变量与应力的绝对值。

4　结　语

东明黄河公路大桥营运多年，该桥主桥存在梁体开裂和跨中下挠等病害。为解决该桥主梁抗剪承载力不足和跨中下挠问题，采用增设斜拉体系的加固方式对其进行改造。在该桥主梁加固工程中，采取了新增桩基础施工、新增钢构件安装及斜拉索张拉控制等关键技术。该桥于 2014 年 12 月 8 日开始加固，于 2016 年 12 月 8 日施工完成，历时 2 年，加固后的东明黄河公路大桥见图 6。加固改造后，该桥于 2016 年 12 月底进行荷载试验。荷载试验结果表明：桥梁受力得到改善，跨中截面高度得到抬升，结构自振频率得到极大改善，结构竖向位移响应也明显减少，加固效果明显。该桥斜拉体系加固主梁施工技术的成功应用，可为今后斜拉体系加固的设计和施工提供参考。



图 6　加固后的东明黄河公路大桥
Fig. 6　Strengthened Dongming Huanghe River Highway Bridge

参考文献(References)：

[1] 郑开启，刘　钊，张宇峰，等. 腹板斜向开裂混凝土梁桥的剪切刚度评估方法[J]. 桥梁建设，2015，45(4)：46－51.
(ZHENG Kai-qi, LIU Zhao, ZHANG Yu-feng, *et al*. Shear Stiffness Assessment Method for Concrete Girder Bridge with Web Diagonal Cracks[J]. Bridge Construction, 2015, 45(4): 46－51. in Chinese)

[2] 徐向峰，张　峰，韦成龙. 预应力混凝土箱梁开裂后的刚度损伤评估[J]. 工程力学，2015，32(7)：95－102.
(XU Xiang-feng, ZHANG Feng, WEI Cheng-long. Stiffness Damage Assessment of Prestressed Concrete Box Girder after Cracking[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 95－102. in Chinese)

[3] Guo Tong, Chen Zhe-heng, Liu Tie, *et al*. Time-Dependent Reliability of Strengthened PSC Box-Girder Bridge Using Phased and Incremental Static Analyses [J]. Engineering Structures, 2016, 117: 358－371.

[4] 交通运输部公路科学研究院. 山东东明黄河公路大桥检测与评定报告[R]. 北京：2013.
(Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Report of Testing and Evaluation of Dongming Huanghe River Highway Bridge in Shandong[R]. Beijing: 2013. in Chinese)

[5] 张劲泉，任红伟，王来永，等. 适用于大跨径箱梁桥、连续刚构桥斜拉体系加固结构：CN102286938A [P]. 2011－12－21.
(ZHANG Jin-quan, REN Hong-wei, WANG Lai-yong, *et al*. Stay Cable System Strengthened Structure Applicable to Long Span box Girder Bridges and Continuous Rigid-Frame Bridges: China, CN102286938A [P]. 2011－12－21. in Chinese)

[6] 杨永清，严　猛，李晓斌，等. 聚合物改性混凝土加固空心板桥荷载横向分布理论及试验研究[J]. 桥梁建设，2014，44(6)：63－68.
(YANG Yong-qing, YAN Meng, LI Xiao-bin, *et al*. Theoretical and Experimental Study of Load Transverse Distribution of Hollow Slab Bridge Strengthened by Modified Polymer Concrete[J]. Bridge Construction, 2014, 44(6): 63－68. in Chinese)

[7] 张 武，吴运宏. 钢管混凝土拱桥动态悬吊式主梁结构改造技术[J]. 桥梁建设，2016，46(2)：103－108.
(ZHANG Wu, WU Yun-hong. Rehabilitation Techniques for Dynamically Suspended Main Girder Structure of a CFST Arch Bridge[J]. Bridge Construction, 2016, 46(2): 103－108. in Chinese)

[8] Breveglieri M, Aprile A, Barros J A O. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Strengthened Using Embedded Through Section Steel Bars[J]. Engineering Structures, 2014(81): 76－87.

[9] 方新跃. 文物铆接钢桥——海珠桥维修加固关键施工技术[J]. 桥梁建设，2016，46(5)：110－115.
(FANG Xin-yue. Key Construction Techniques for Repairing and Strengthening of Haizhu Bridge, a Historical Riveted Steel Bridge, in Guangzhou[J]. Bridge Construction, 2016, 46(5): 110－115. in Chinese)

[10] 金 辉，徐 岳，郑求才，等. 型钢－混凝土组合加固技术在空心板桥中的应用[J]. 桥梁建设，2017，47(1)：114－118.
(JIN Hui, XU Yue, ZHENG Qiu-cai, *et al*. Application of Shaped Steel and Concrete Composite Reinforcement Technique to Hollow Slab Bridge[J]. Bridge Construction, 2017, 47(1): 114－118. in Chinese)

[11] 北京交科公路勘察设计研究院有限公司. 山东省东明黄河公路大桥改造工程施工图设计[Z]. 北京：2013.
(Beijing Jiaoke Highway Consultants Co., Ltd. Construction Drawing Design of Rehabilitation Project of Dongming Huanghe River Highway Bridge in Shandong Province[Z]. Beijing: 2013. in Chinese)


XU Gang-nian

徐刚年
1982－，男，讲师
2007年毕业于山东科技大学结构工程专业，工学学士，2010年毕业于兰州理工大学工程力学专业，工学硕士。研究方向：结构工程维修与加固
E-mail：xugangnian2007@163.com


WANG You-zhi

王有志
1964－，男，教授
1985年毕业于天津大学港口与航道工程专业，工学学士，1988年毕业于天津大学水工结构工程专业，工学硕士，2005年毕业于天津大学结构工程专业，工学博士。研究方向：结构工程评估与维修加固，新型结构材料开发
E-mail：wangyouzhi@sdu.edu.cn


WANG Shi-min

王世民
1992－，男，硕士生
2016年毕业于山东大学土木工程专业，工学学士。研究方向：结构工程评估与维修加固
E-mail：2414380833@qq.com


WANG Lai-yong

王来永
1977－，男，副研究员
1999年毕业于山东工业大学交通土建专业，工学学士，2002年毕业于福州大学结构工程专业，工学硕士。研究方向：大跨桥梁结构与桥梁预防性养护
E-mail：laiy.wang@163.com

(编辑：王 娣)