

文章编号:1003-4722(2015)01-0039-06

设置延性系梁的桥梁双柱墩抗震能力研究

孙治国¹, 华承俊¹, 司炳君², 王东升¹

(1. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026;

2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究设置延性系梁对减少桥梁双柱墩横桥向地震损伤的效果, 基于 OpenSees 数值分析平台, 建立了无系梁和设置延性系梁的双柱墩抗震数值分析模型, 通过拟静力和增量动力分析手段对 2 种双柱墩在地震作用下的反应进行研究, 讨论了延性系梁设置对双柱墩地震反应的影响。结果表明: 延性系梁提高了桥梁双柱墩横桥向的强度和刚度, 地震作用下, 系梁先于桥墩发生屈服, 形成塑性铰并耗散地震能量, 延缓了桥墩的损伤破坏过程, 并减少了桥墩的曲率延性系数和墩顶的最大位移角。

关键词: 桥梁抗震; 双柱墩; 延性系梁; 地震损伤控制; 增量动力分析

中图分类号: U448.21; U442.55 **文献标志码:** A

Study of Seismic Resistance Capacity of Double-Column Bridge Pier Arranged with Ductile Tie Beam

SUN Zhi-guo¹, HUA Cheng-jun¹, SI Bing-jun², WANG Dong-sheng¹

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To study the effect of the ductile tie beam arranged for double-column bridge pier on reducing the transverse seismic damage to the pier, the numerical analysis models for the seismic resistance of the double-column bridge piers without and arranged with the ductile tie beam were built based on the OpenSees analysis platform. By means of the quasi-static and incremental dynamic analysis, the responses of the two kinds of the piers under the seismic action were studied and the effect of the tie beam on the seismic response of the pier was discussed. The results of the study show that the ductile tie beam can increase the transverse strength and rigidity of the double-column bridge pier. Under the seismic action, the tie beam yields before the pier will do and the tie beam acts as a kind of the plastic hinge and dissipates the seismic energy, which in turn retards the damage process of the pier and also decreases the curvature ductility factor of the pier and the maximum drift ratio of the top of the pier.

Key words: bridge seismic resistance; double-column bridge pier; ductile tie beam; seismic damage control; incremental dynamic analysis

1 引言

近年来,通过牺牲次要构件耗散地震能量,最终

达到保护主要构件的损伤控制设计概念受到了青睐^[1]。在桥梁抗震领域, El-Bahey 等^[2,3]提出了在

收稿日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008041, 51178071); 中国博士后科学基金项目(2013M540226); 中央高校基本科研业务费资助项目(3132015092, 3132014326)

Project of National Natural Science Foundation of China (51008041, 51178071); Project of China Postdoctoral Science Foundation (2013M540226); Project Supported by Fundamental Research Funds for the Central-Level Universities and Institutes (3132015092, 3132014326)

作者简介: 孙治国, 讲师, E-mail: szg_1999_1999@163.com。研究方向: 桥梁抗震。

双柱式桥墩之间设置可更换耗能装置(剪切钢板或防屈曲支撑等)以保护桥墩本身免于地震损伤的设计概念。谢文等^[4]提出了设置耗能型辅助墩,将墩间的剪切型连杆或防屈曲支撑等耗能构件设计为“保险丝”,以达到保护斜拉桥桥塔的目的。系梁是桥梁双柱或多柱墩设计中为桥墩提供侧向约束的必要构件,将系梁设计为延性耗能构件,利用其地震下的屈服形成耗能机制,可达到保护桥墩等主要构件免于地震损伤的目的。Pantelides等^[5]提出了在墩底承台间增设基础梁以提高桥墩横桥向抗震能力的设想,并通过现场加载试验对其有效性进行了验证。兰峰^[6]、沈星^[7]等关于双柱式桥墩抗震问题的研究中都注意到了系梁设置对改善桥梁桥墩横桥向抗震能力的有利作用。

为有效提高桥梁双柱墩横桥向抗震能力,达到保护桥墩、盖梁等主要构件的目的,并进一步推动桥梁地震损伤控制设计理论的发展,提出在桥梁双柱墩中设置延性系梁,通过系梁屈服消耗地震能量的设计方法。基于 OpenSees 平台建立双柱墩抗震数值分析模型,并结合试验结果进行验证,在此基础上采用拟静力和增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)手段,对无系梁和设置延性系梁的2种双柱墩在地震作用下的地震反应进行研究,讨论系梁设置对提高双柱墩横桥向抗震能力的效果。

2 设置延性系梁的桥梁双柱墩

2.1 双柱墩弯矩分配

在横桥向地震作用下,双柱墩弯矩如图1所示。由图1可知:无系梁双柱墩的桥墩反弯点接近于墩高中心,在墩底及墩顶位置弯矩最大;设置系梁后,桥墩弯矩分配模式发生显著变化,在系梁与桥墩节

点位置,系梁承受弯矩始终为节点上、下桥墩的弯矩之和,这就造成系梁易先于桥墩屈服。考虑到实际地震动下结构失效路径的复杂性,建议设计延性系梁时应保证其抗弯强度远小于桥墩。

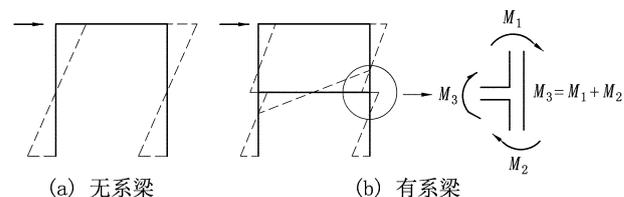


图1 横桥向地震下双柱墩弯矩图
Fig. 1 Bending Moment of Double-Column Bridge Piers under Transverse Seismic Action

2.2 设置延性系梁结构的构造措施

设置延性系梁以提高双柱墩抗震能力,其关键是保证系梁先于桥墩屈服,并保证系梁具有足够延性和耗能能力。延性系梁设置可采用以下方式:①在系梁两端加密箍筋、外包钢套管或纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP),以提高系梁抗剪强度和延性变形能力,如图2(a)所示。②在系梁两端设置延性块,利用软钢、水泥砂浆注浆钢纤维(Slurry Infiltrated Steel Fiber Concrete, SIFCON)等材料的受压延性提高系梁延性耗能能力^[8],如图2(b)所示。③借鉴剪力墙中可更换连梁的设计思路^[1,9],系梁通过两侧的钢耗能件(工字钢)与桥墩连接,在地震作用下,系梁的损伤将集中于钢耗能件,且震后损坏的钢耗能件可替换,如图2(c)所示。3种延性系梁设置方式均利用了系梁或延性块、钢耗能件的弯曲屈服消耗地震能量。3种思路实质上都是基于结构地震损伤控制的设计理念,将系梁设置为结构抗震的“保险丝”,地震作用下最先破坏并

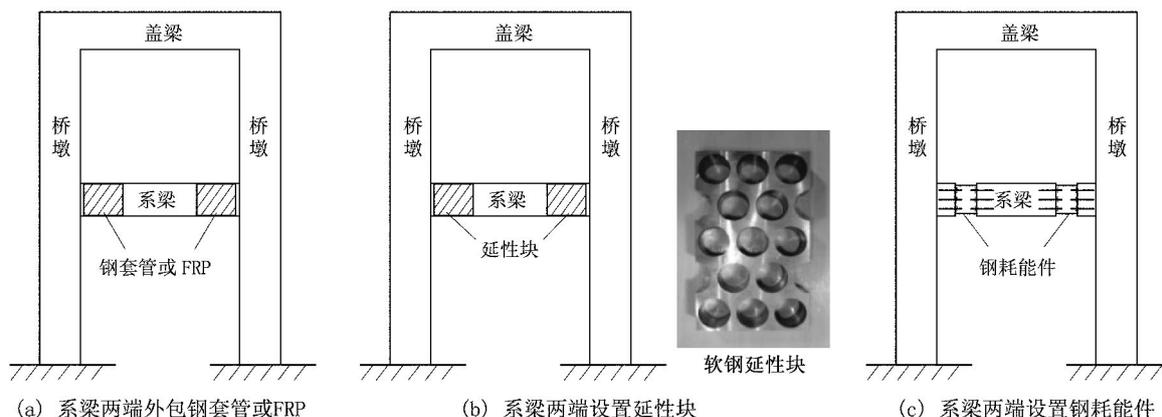


图2 延性系梁设计细节
Fig. 2 Design Details of Ductile Tie Beams

消耗能量, 达到保护桥墩、盖梁等主要构件的目的。

3 双柱墩抗震分析模型的建立及验证

以 Paolacci 等^[10] 完成的 1 座桥梁双柱墩抗震拟静力试验结果为依据, 基于 OpenSees 数值分析平台建立了双柱墩抗震数值分析模型^[11]。双柱墩总高度为 3 100 mm, 桥墩为圆形截面, 直径 300 mm; 系梁截面尺寸为 100 mm×325 mm, 位于墩高中部; 盖梁为 U 形截面, 外边缘尺寸为 300 mm×300 mm。双柱墩破坏包括墩顶和墩底的混凝土开裂以及系梁的弯剪破坏等。

数值模型中采用纤维梁柱单元模拟系梁、桥墩、盖梁的非线性弯曲变形。以零长度转动弹簧单元模拟桥墩纵筋在盖梁、基础、系梁—桥墩节点处及系梁在系梁—桥墩节点处的拔出变形成分。梁柱节点按刚域处理, 不考虑节点的破坏。模型中, 混凝土采用 Kent-Park 本构模型, 钢筋本构采用 Menegotto-Pinto 模型。数值分析模型如图 3 所示, 整个双柱墩模型采用了 8 个纤维梁柱单元、10 个零长度转动弹簧单元。模拟得到的双柱墩滞回曲线及试验结果如图 4 所示。由图 4 可知, 数值模拟结果与试验结果吻合较好, 表明所建模型具有足够精度。

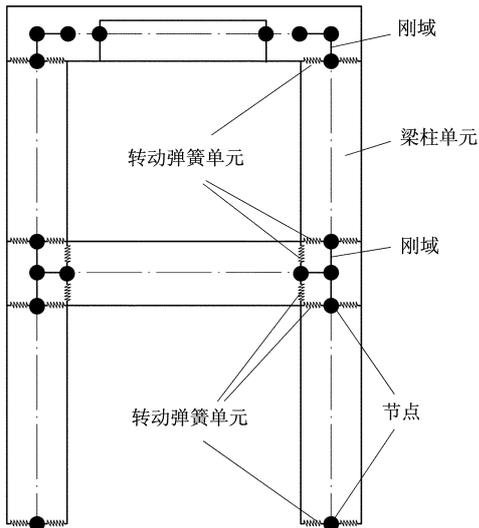


图 3 双柱墩抗震数值分析模型
Fig. 3 Numerical Analysis Model for Seismic Resistance of Double-Column Bridge Pier

4 设置延性系梁的桥梁双柱墩抗震能力研究

4.1 拟静力加载下双柱墩抗震能力

以图 3 中建立的双柱墩抗震分析模型为基础, 对比无系梁和设置延性系梁时双柱墩抗震能力的差

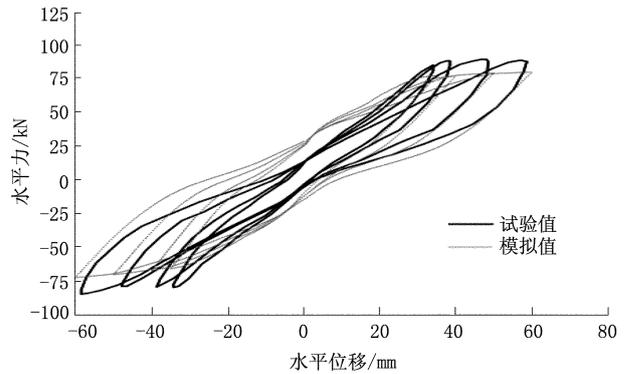


图 4 双柱墩抗震性能模拟结果及试验结果
Fig. 4 Simulation and Test Results of Seismic Behavior of Double-Column Bridge Pier

异。对延性系梁的模拟, 考虑图 3 中的第 1 种设置延性系梁的思路, 以钢套管或外包 FRP 保证系梁延性耗能能力。数值模型中将系梁混凝土抗压强度提高 15%, 且混凝土应力在达到峰值后随应变增加不再降低, 以考虑钢套管或 FRP 对混凝土的约束效应。

由于 Paolacci 等^[10] 完成的双柱墩模型比例为 1:4, 将试件尺寸放大 4 倍, 以考虑原型双柱墩抗震能力。分别对无系梁和设置延性系梁时原型双柱墩进行拟静力加载分析, 滞回曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 系梁先于桥墩屈服, 滞回曲线更加饱满, 抗震能力显著提高。

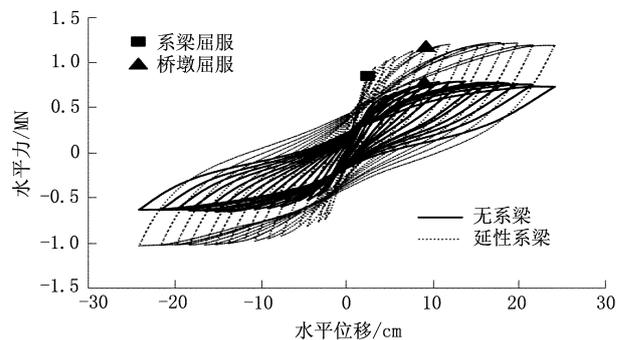


图 5 原型双柱墩有、无延性系梁时滞回曲线对比
Fig. 5 Comparison of Hysteretic Curves of Prototype Double-Column Bridge Piers with and without Ductile Tie Beam

4.2 IDA 分析

以原型双柱墩数值模型为基础, 通过 IDA 分析手段研究双柱墩的抗震能力。选取 7 条远断层地震动(无速度脉冲)和 7 条近断层地震动(含速度脉冲)记录进行 IDA 分析, 横桥向输入地震动, 阻尼比取 5%, 主梁等质量及其自重施加于盖梁中心^[12]。IDA 分析时为更准确获得系梁及桥墩屈服对应的

地震动强度,加速度峰值 PGA(Peak Ground Acceleration)增量首先取为 0.05g,待系梁和桥墩屈服后每条地震波的 PGA 增量调整为 0.1g,分别记录不同地震动强度下双柱墩的地震反应。

IDA 分析过程中,当双柱墩墩底截面的曲率延性系数超过 35 或墩顶最大位移角超过 5%时,PGA 不再继续增大。

首先讨论不同地震动作用下系梁和墩底首次屈服顺序。以设置延性系梁的双柱墩为例,不同地震动下系梁及桥墩屈服对应的 PGA 如图 6 所示。由图 6 可知,在绝大多数地震动输入下,系梁在 PGA 为 0.05g~0.15g 时开始屈服,而桥墩屈服对应的 PGA 明显增加。这说明,设置延性系梁的双柱墩遵循先系梁后桥墩的屈服顺序。屈服的系梁将消耗地震能量,从而达到保护桥墩等主要构件的目的。

在远断层和近断层地震动作用下,双柱墩左侧墩底的曲率延性系数随 PGA 变化情况(曲率延性系数为多条地震波下的平均值)如图 7 所示。由图 7 可知,无论是远断层还是近断层地震动作用下,设置延性系梁后,双柱墩墩底的曲率延性系数均有不同程度的降低,表明延性系梁可减少桥墩地震损伤破坏。在近断层地震动作用下,无系梁双柱墩墩底

的曲率延性系数远大于远断层地震动情况,显示了近断层地震动对双柱墩的强烈破坏作用,而加设延性系梁后双柱墩墩底的曲率延性反应得到有效控制。

在远断层和近断层地震动作用下,双柱墩墩顶的最大位移角平均值随 PGA 变化情况如图 8 所示。由图 8 可知,无论是远断层还是近断层地震动作用,设置延性系梁后,双柱墩墩顶的最大位移角明显减少。且近断层地震动下双柱墩的变形仍大于远断层地震动下的变形。

5 结 论

(1) 横桥向地震作用下,延性系梁将先于桥墩屈服并消耗地震能量,达到保护桥墩等主要构件的目的。

(2) 设置延性系梁的双柱墩的曲率延性系数和墩顶的最大位移角均明显减少,延性系梁起到了保护桥墩的目的。

(3) 近断层地震动作用下桥墩的曲率延性系数和墩顶的最大位移角远大于远断层地震动下的数值,表明近断层地震动下双柱墩遭受的损伤要远大于远断层地震动下的损伤。

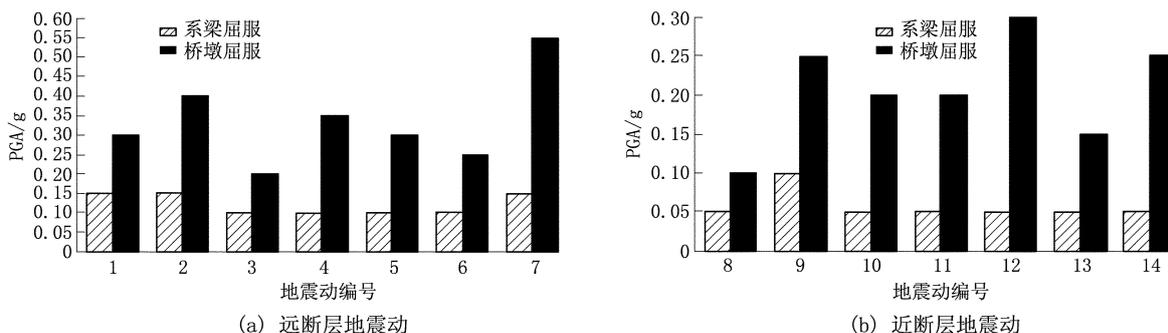


图 6 系梁及桥墩屈服对应的 PGA
Fig. 6 Corresponding Peak Ground Acceleration (PGA) of Yielding of Tie Beam and Bridge Pier

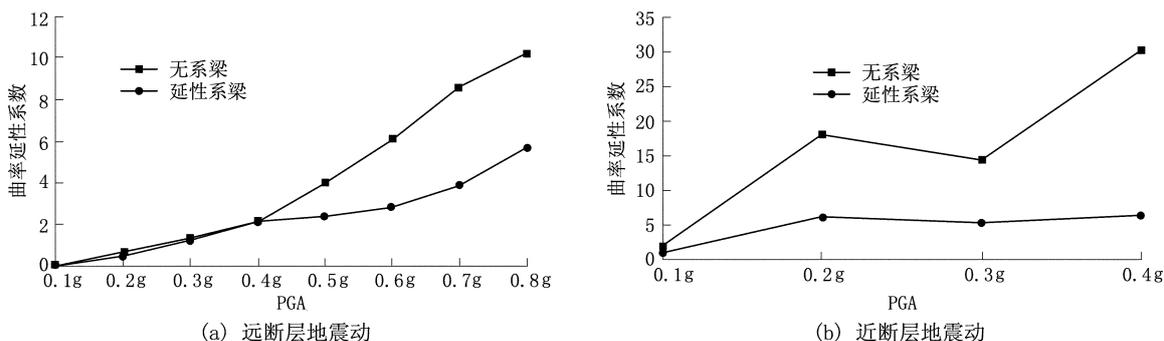


图 7 双柱墩的曲率延性系数对比
Fig. 7 Comparison of Curvature Ductility Factors of Double-Column Bridge Piers

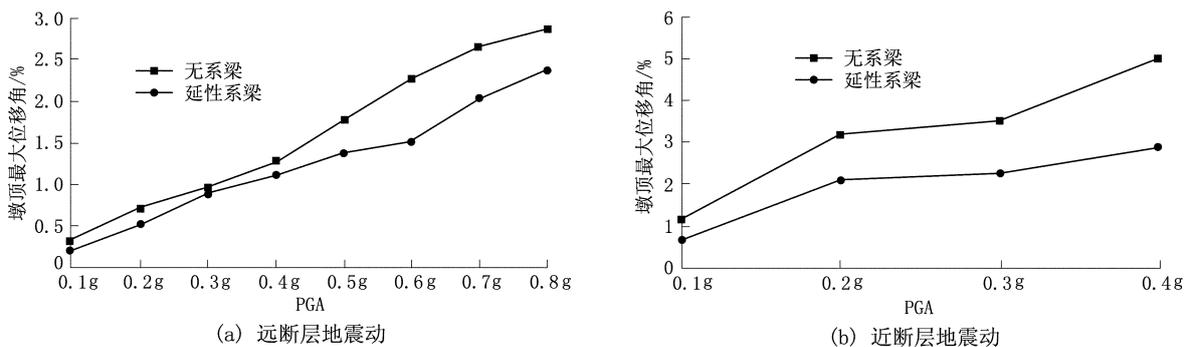


图 8 双柱墩最大位移角对比
Fig. 8 Comparison of Maximum Drift Ratios of Double-Column Bridge Piers

参考文献 (References):

[1] 吕西林,陈 云,蒋欢军. 可更换连梁保险丝抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 1 318-1 325, 1 332.
(LU Xi-lin, CHEN Yun, JIANG Huan-jun. Experimental Study on Seismic Behavior of Fuse of Replaceable Coupling Beam[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(9): 1 318 - 1 325, 1 332. in Chinese)

[2] El-Bahey S, Bruneau M. Bridge Piers with Structural Fuses and Bi-Steel Columns I: Experimental Testing [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2012, 17(1): 25-35.

[3] El-Bahey S, Bruneau M. Bridge Piers with Structural Fuses and Bi-Steel Columns II: Analytical Investigation[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2012, 17(1): 36-46.

[4] 谢 文,孙利民,魏 俊. 附有结构“保险丝”构件的桥墩抗震性能试验研究及其应用[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 59-70.
(XIE Wen, SUN Li-min, WEI Jun. Experimental Study on Seismic Performance of Bridge Piers with Structural “Fuse” Components and Application of Such Piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3): 59-70. in Chinese)

[5] Pantelides C P, Ward J P, Reveley L D. Behavior of R/C Bridge Bent with Grade Beam Retrofit under Simulated Earthquake Loads [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(1): 91-118.

[6] 兰 峰,王克海. 中小跨径双柱式高墩桥梁横系梁对抗震性能的影响[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 92-97.
(LAN Feng, WANG Ke-hai. Influences of Cross Tie Beams of High-Rise Double-Column Piers on Seismic Performance of Medium and Short Span Bridges[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(5): 92-97. in Chinese)

[7] 沈 星,叶爱君,王晓伟. 柔性横系梁双柱墩的抗震行为分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 342-347.
(SHEN Xing, YE Ai-jun, WANG Xiao-wei. Analysis of Seismic Behavior of Double-Column Bridge Bent with Flexible Link Beam[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(3): 342 - 347. in Chinese)

[8] Wu Y F. Ductility Demand of Compression Yielding Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Beams [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(1): 104-110.

[9] 吕西林,陈 云,蒋欢军. 带可更换连梁的双肢剪力墙抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 175-182.
(LU Xi-lin, CHEN Yun, JIANG Huan-jun. Experimental Study of Seismic Performance of Coupled Shear Wall Structure with Replaceable Coupling Beams[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(2): 175-182. in Chinese)

[10] Paolacci F, Giannini R. An Experimental and Numerical Investigation on the Cyclic Response of a Portal Frame Pier Belonging to an Old Reinforced Concrete Viaduct [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(6): 1 109-1 127.

[11] 何铭华,栾雨琪,刘 晖,等. 基于 OpenSees 的 FRP 约束混凝土本构开发及墩柱性能分析[J]. 桥梁建设, 2013, 43(6): 19-26.
(HE Ming-hua, LUAN Yu-qi, LIU Hui, et al. Development of FRP Confined Concrete Constitutive Model and Analysis of Pier/Column Behavior Based on OpenSees[J]. Bridge Construction, 2013, 43(6): 19-26. in Chinese)

- [12] 石岩,王东升,孙治国. 近断层地震动下减隔震桥梁地震反应分析[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3): 19-24.

(SHI Yan, WANG Dong-sheng, SUN Zhi-guo. Analysis of Seismic Response of Seismically Mitigated and Isolated Bridge Subjected to Near-Fault Ground Motion[J]. Bridge Construction, 2014, 44(3): 19-24. in Chinese)



SUN Zhi-guo

孙治国

1980-,男,讲师

2003年毕业于青岛理工大学土木工程专业,工学学士,2006年毕业于大连理工大学结构工程专业,工学硕士,2012年毕业于中国地震局工程力学研究所结构工程专业,工学博士。研究方向:桥梁抗震

E-mail: szg_1999_1999@163.com



SI Bing-jun

司炳君

1971-,男,教授级高工

1992年毕业于南京理工大学工程力学专业,工学学士,1999年毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业,工学硕士,2008年毕业于大连理工大学结构工程专业,工学博士。研究方向:桥梁与结构抗震

E-mail: sibingjun@aliyun.com



WANG Dong-sheng

王东升

1974-,男,教授

1995年毕业于武汉水利电力大学土木工程专业,工学学士,1998年毕业于中国地震局工程力学研究所防灾减灾及防护工程专业,工学硕士,2002年毕业于中国地震局工程力学研究所防灾减灾及防护工程专业,工学博士。研究方向:桥梁抗震

E-mail: dswang@dlnu.edu.cn

(编辑:王 娣)



HUA Cheng-jun

华承俊

1989-,男,硕士生

2012年毕业于聊城大学交通运输专业,工学学士。研究方向:桥梁抗震

E-mail: 18900965108@163.com