

Quasi-Static Test Study on Assembled Concrete Pier Connected by Grouting Sleeves

Zeyu Wang¹, Guangtao Xin¹, Yanjiang Chen¹, Weibing Xu¹, Bo Xiao²

¹College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²Changchun Municipal Engineering Design Research Institute, Changchun Jilin

Email: 732119070@qq.com

Received: Apr. 24th, 2019; accepted: May 9th, 2019; published: May 16th, 2019

Abstract

In view of the fact that the research on seismic performance of assembled piers under strong earthquake is still in the exploratory stage, this paper designs integral cast-*in-situ* reinforced concrete pier and assembled concrete pier connected by grouting sleeves respectively, based on the application background of 8-degree fortification area, and studies their seismic performance through quasi-static test. The results show that compared with cast-*in-situ* piers, the damage of assembled piers connected by grouting sleeves is mainly concentrated at the joint, and the overall damage height is smaller. Both of them are similar in horizontal bearing capacity and stiffness. The assembled piers connected by grouting sleeves are slightly stronger than the whole cast-in-place reinforced concrete piers in displacement ductility, residual displacement and total energy dissipation. They have good seismic performance and can be applied in 8-degree earthquake area.

Keywords

Assembled Pier, Grouting Sleeve, Pseudo-Static Test, Seismic Performance, 8-Degree Earthquake Area

灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩拟静力试验研究

王泽雨¹, 辛光涛¹, 陈彦江¹, 许维炳¹, 肖波²

¹北京工业大学, 建筑工程学院, 北京

²长春市市政工程设计研究院, 吉林 长春

Email: 732119070@qq.com

收稿日期: 2019年4月24日; 录用日期: 2019年5月9日; 发布日期: 2019年5月16日

文章引用: 王泽雨, 辛光涛, 陈彦江, 许维炳, 肖波. 灌浆套筒连接装配式混凝土桥墩拟静力试验研究[J]. 土木工程, 2019, 8(3): 617-625. DOI: 10.12677/hjce.2019.83073

摘要

鉴于装配式桥墩在强震作用下的抗震性能研究仍处于探索阶段, 本文以8度设防地区为应用背景, 分别设计了整体现浇钢筋混凝土桥墩和采用灌浆套筒连接的装配式混凝土桥墩, 通过拟静力试验研究其抗震性能。结果表明: 与现浇桥墩相比, 采用灌浆套筒连接的装配式桥墩的破坏主要集中于接缝处, 整体损伤高度较小。两者在水平承载力、刚度上接近, 采用灌浆套筒连接的装配式桥墩在位移延性、残余位移、总的耗能能力上稍强于整体现浇钢筋混凝土桥墩, 具备良好的抗震性能, 能够在8度地震区应用推广。

关键词

装配式桥墩, 灌浆套筒, 拟静力试验, 抗震性能, 8度地震区

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国城镇化水平的不断提高, 交通量日益增长, 人们对生活环境的要求也越来越高, 而桥梁建设若采用传统的现浇施工方法会对交通和环境造成较大影响, 并严重影响人们的生活, 因此采用施工周期短、对环境污染小的装配式施工方法逐渐成为最佳选择。目前装配式桥墩在我国桥梁建设中的应用正逐渐增多, 如东海大桥、杭州湾跨海大桥、上海长江大桥、港珠澳大桥、北京积水潭桥、上海 S3、S7 公路桥梁等都采用了装配式桥墩[1] [2], 但总体上来看, 装配式桥墩在我国的应用仍然较少, 特别是在强震地区的应用更是少有。关于装配式桥墩抗震性能的理论 and 试验研究仍有待加强。

国外针对装配式桥墩较早展开了试验研究。1997年, Mander 和 Cheng [3]对采用无粘结预应力筋连接的装配式桥墩进行了拟静力试验, 墩身为整体预制, 墩底截面纵筋断开。结果表明这种桥墩具有很强自复位能力。Hewes 和 Priestley [4]在无粘结预应力节段拼装桥墩最底部节段采用钢套筒约束内部素混凝土, 其他节段为普通钢筋混凝土构件。通过拟静力试验研究发现节段拼装桥墩底部接缝处混凝土仅出现轻微的开裂剥落现象, 具有较小的残余变形, 但耗能较弱。

近些年, 国内针对灌浆套筒连接的装配式桥墩进行了试验研究, 2016年, 魏红一[5]等对灌浆套筒预埋位置不同的两个预制拼装桥墩试件进行了拟静力试验, 其中套筒分别预埋了承台和墩身。试验结果表明: 预制桥墩试件在残余位移、耗能能力和等效刚度上略弱于现浇桥墩试件, 套筒预埋位置的不同会造成试件的损伤形式和塑性铰形成上有所差异, 预埋在墩身的套筒顶部可能形成第二塑性铰; 两个预制桥墩试件抗震性能差距较小, 套筒预埋在墩身的试件具有相对较大的耗能能力和残余变形。黄宜[6]设计了两组分别采用灌浆套筒和灌浆金属波纹管连接的装配式桥墩试件及一组现浇式桥墩试件, 套筒预埋在承台内, 通过拟静力试验研究其抗震性能。试验结果表明: 装配式桥墩的水平承载力与整体现浇式桥墩的水平承载力相近, 极限位移更小, 残余位移偏大, 位移延性与累积耗能能力稍差; 金属波纹管连接的装配式桥墩在位移延性与累积耗能能力上稍弱于灌浆套筒连接的装配式桥墩。

与将套筒预埋于承台内相比, 套筒预埋于墩身时, 灌浆更加方便, 套筒更不易被污染, 但同时套筒对墩身截面的影响也较大; 目前关于该种装配式桥墩在高烈度区的抗震性能研究仍处于探索阶段。因此

本文依据 8 度设防地区的要求设计了该种灌浆套筒连接的装配式混凝土桥墩及一个现浇钢筋混凝土桥墩，通过拟静力试验研究其抗震性能。

2. 试验概况

2.1. 试件设计

本试验以 8 度抗震设防地区为应用背景，分别设计了整体现浇钢筋混凝土桥墩和采用灌浆套筒连接的装配式桥墩。桥墩试件原型墩高为 9.6 m，进行 1:3 缩尺后桥墩试件有效高度为 3.2 m，有效高度为水平力加载中心到墩底截面的距离，试件采用正方形截面，边长为 530 mm，有效剪跨比为 6.04，加载端尺寸为 800 mm × 800 mm × 400 mm，承台尺寸为 1500 mm × 1200 mm × 560 mm。试件采用 C40 等级混凝土，截面采用相同的配筋形式，纵筋采用直径为 16 mm 的 HRB400 螺纹钢，配筋率为 1.72%，箍筋和拉筋均采用直径为 8 mm 的 HPB300 光圆钢筋，并在墩底区域设置了加密区，加密区高度为 0.9 m，加密区体积配箍率为 2.82%，非加密区体积配箍率为 2.31%。装配式桥墩试件构造如图 1 所示，墩身为整体预制，灌浆套筒预埋在墩身底部，灌浆套筒构造如图 2 所示。

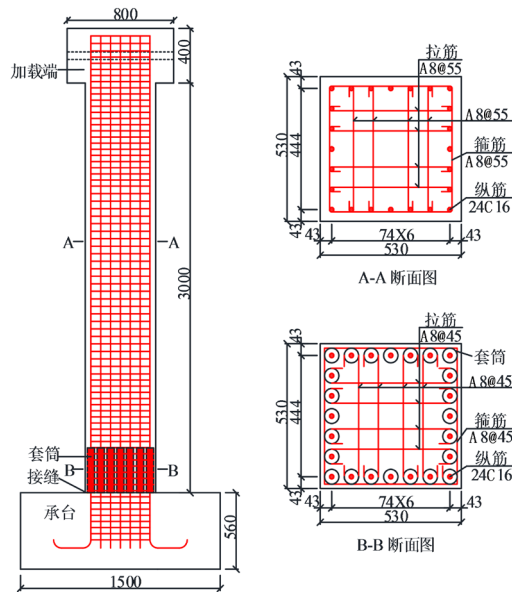


Figure 1. Schematic diagram of the structure of prefabricated bridge piers (unit: mm)
图 1. 装配式桥墩试件构造示意图(单位: mm)

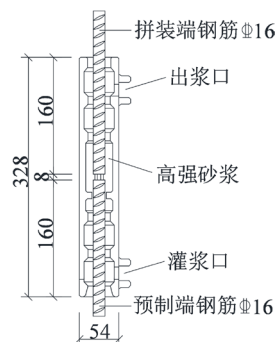


Figure 2. Detail of grouted splice sleeve (unit: mm)
图 2. 灌浆套筒构造示意图(单位: mm)

2.2. 试验方案

拟静力试验加载装置示意图如图 3 所示，竖向力加载装置为量程 3000 kN 的液压千斤顶，水平力加载装置为量程 2000 kN 的电液伺服水平作动器，水平滑板量程为±250 mm。试件轴压比为 0.06，相应竖向荷载为 322 kN，并在试验中保持基本稳定。试件水平力加载为东西方向，为对桥墩试件进行综合性的性能研究，采用位移控制的变幅、等幅混合加载制度，如图 4 所示，性能研究包括等幅部分的强度和刚度变化，以及在变幅部分特别是大变形增长情况下强度和耗能能力的变化[7]。墩顶水平位移按照漂移比为 0.125%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、1.25%、1.5%、2.0%，随后以 0.5%的漂移比为增量进行加载，每个漂移比对应的位移循环 3 次，当纵筋断裂较多或试件的承载力降低至最大值 85%以下时，结束本次试验。

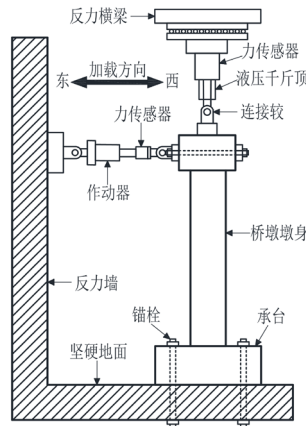


Figure 3. Schematic of test loading device
图 3. 试验加载装置示意图

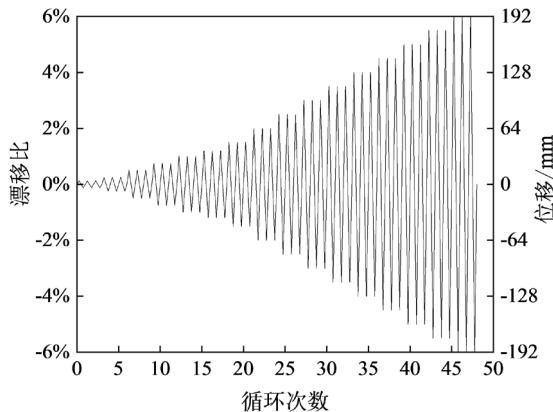


Figure 4. Schematic diagram of loading protocol
图 4. 加载制度示意图

3. 试验现象

试验中主要观察墩身表面裂缝开展，混凝土剥落、钢筋的屈曲情况等。现浇桥墩试件在墩顶水平位移为 8 mm 时(漂移比为 0.25%)，墩身表面各侧面距墩底 13 cm 以上有不少新裂缝产生；随着位移增大，墩身表面出现更多横向裂缝和少量斜向裂缝，并且扩展成多条贯穿裂缝；当墩顶水平位移为 64 mm 时(漂移比为 2.0%)，裂缝宽度明显增大，墩底出现开裂，墩角处混凝土轻微压碎剥落；当墩顶水平位移为 144

mm 时(漂移比为 4.50%), 墩身东西两侧距底 25 cm 内出现明显外鼓开裂, 随着位移继续增大, 保护层混凝土出现大面积剥落, 并露出钢筋和核心混凝土。其中墩身西侧破坏更严重, 纵筋明显屈曲, 箍筋外弯, 拉筋拉钩被拉直; 在进行墩顶水平位移为 176 mm (漂移比为 5.50%) 的第一圈循环位移加载中, 墩身西侧底部三根纵筋发生断裂, 试验结束。试件最终破坏形态如图 5 所示。



Figure 5. Failure modes of cast-in-situ pier specimen
图 5. 现浇桥墩试件破坏形态

装配式桥墩试件在墩顶水平位移为 8 mm 时(漂移比为 0.25%), 距墩底 40 cm 以上出现少量细微裂缝; 当墩顶水平位移为 16 mm 时(漂移比为 0.50%), 距墩底 30 cm 左右处套筒上部出浆口以上出现大量新裂缝, 同时底部接缝处也出现轻微开裂; 随着位移增大, 裂缝不断扩展, 其中墩底接缝处与套筒顶部位置的贯穿裂缝宽度最大, 但套筒高度内裂缝较少。当墩顶水平位移为 96 mm 时(漂移比为 3.0%), 墩底接缝完全张开, 墩底角部一处出现较明显破损; 随着位移增大, 墩底接缝处混凝土逐渐压碎, 墩身侧面交接处明显剥落; 当墩顶水平位移为 176 mm 时(漂移比为 5.50%), 墩身东西两侧接缝处混凝土被严重压碎, 墩身东侧距底 10 cm 以内混凝土大面积剥落; 最终在进行墩顶位移为 192 mm (漂移比为 6.0%) 的第二圈和第三圈循环位移加载中, 套筒底部连接承台处的多根纵筋相继发生断裂, 试验结束。试件最终破坏形态如图 6 所示。



Figure 6. Failure modes of assembled pier specimen
图 6. 装配式桥墩试件破坏形态

4. 试验结果与分析

4.1. 滞回曲线

滞回曲线是进行抗震性能分析的基础, 试验测得试件的滞回曲线如图 7 所示。从图中可以看出两个

试件的滞回曲线都较为饱满，在水平位移较低时，试件刚度大，处于弹性状态，此时试件表面损伤较小，几乎无残余位移，耗能较弱；随着水平位移的增大，试件表面裂缝发展充分，钢筋屈服进入强化阶段，墩底混凝土逐渐压碎剥落，耗能增强，试件的残余位移明显变大，滞回环由梭形过渡到弓形；相对于现浇钢筋混凝土桥墩试件，装配式桥墩试件的滞回环更加饱满些，强度退化更慢。

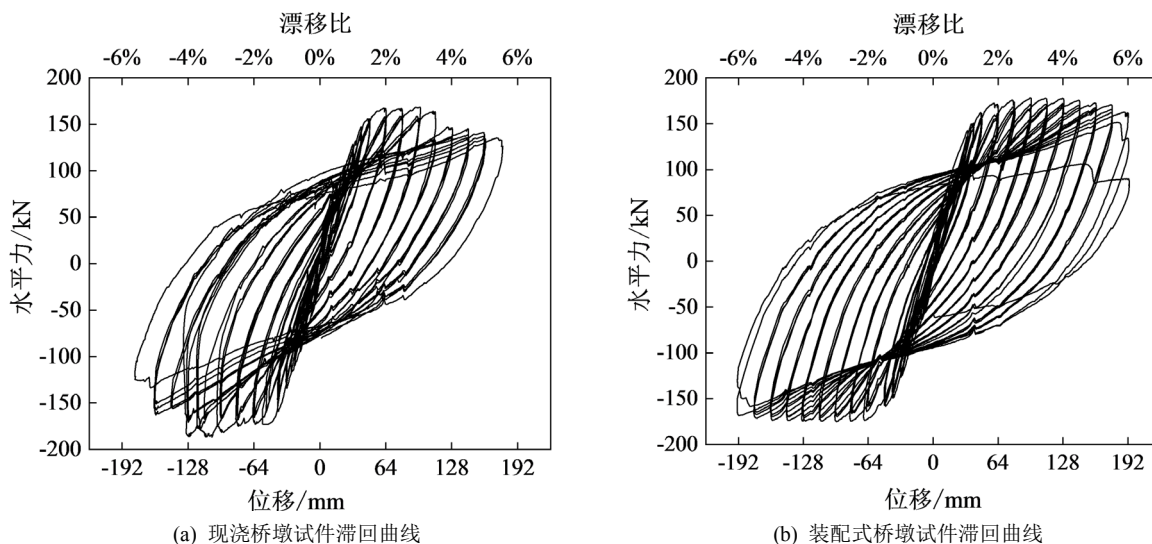


Figure 7. Hysteretic curve of pier specimens
图 7. 桥墩试件滞回曲线

4.2. 骨架曲线

试件的骨架曲线如图 8 所示，其承载力如表 1 所示。可以看出现浇桥墩试件与装配式桥墩试件的水平承载力相差很小，相对于现浇桥墩试件，装配式桥墩试件的承载力在漂移比为 5.5% 以前无明显下降，平稳段较长，而现浇桥墩试件由于混凝土的大面积剥落、钢筋屈曲等原因，承载力已下降较多，最终装配式桥墩试件在漂移比为 6% 时由于纵筋相继断裂，承载力大幅下降，下降段变的急促。

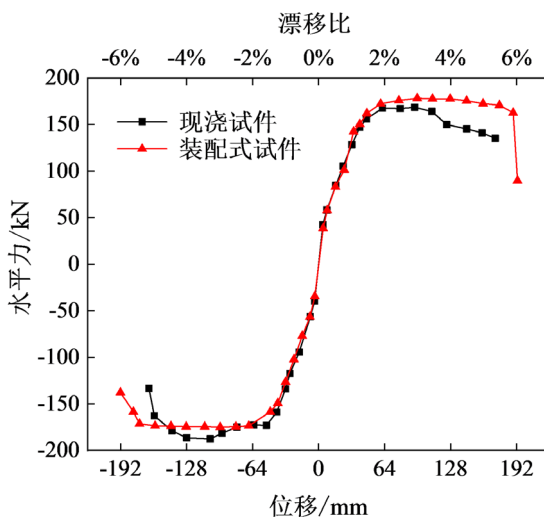


Figure 8. Skeleton curve of pier specimens
图 8. 桥墩试件骨架曲线

Table 1. Bearing capacity of pier specimens
表 1. 桥墩试件承载力

桥墩试件	屈服荷载 F_y /kN	极限荷载 F_u /kN	峰值荷载 F_{max} /kN
现浇式	136.33	151.35	178.06
装配式	147.59	150.12	176.62

4.3. 位移延性

延性是评估桥墩抗震性能的重要指标之一，若延性太差，桥墩易发生脆性破坏。试件的位移延性如表 2 所示。从表中可以看出装配式桥墩试件的屈服位移与现浇桥墩试件相近，但极限位移明显更大，位移延性稍好于现浇桥墩试件。

Table 2. Displacement ductility of pier specimens
表 2. 桥墩试件位移延性

桥墩试件	屈服位移/mm	极限位移/mm	位移延性系数
现浇式	34.87	155.13	4.45
装配式	37.93	180.47	4.76

4.4. 刚度

试件的初始刚度 K_0 如表 3 所示，其等效刚度 K_s 与 K_0 的比值随位移的变化如图 9 所示。可以看出由于接缝的影响，装配式桥墩试件的整体性稍差，其初始刚度比现浇桥墩试件的初始刚度要低，但其刚度退化速度要慢于现浇桥墩试件，在位移较大时，装配式桥墩的等效刚度比现浇桥墩试件的等效刚度略大。

Table 3. Initial stiffness of pier specimens
表 3. 桥墩试件初始刚度

桥墩试件	现浇式	装配式
初始刚度 K_0 (kN/mm)	10.21	9.37

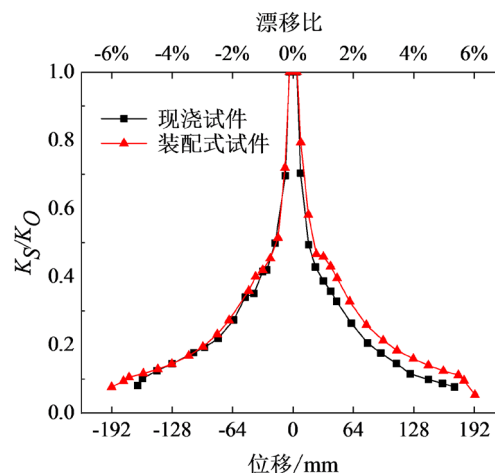


Figure 9. K_s/K_0 -displacement diagram of pier specimens
图 9. 桥墩试件 K_s/K_0 -位移图

4.5. 残余位移

桥墩试件残余位移随位移的变化如图 10 所示, 从图中可以发现, 在水平位移较小时, 两个试件的残余位移都较小, 无明显差异; 随着位移增大, 试件的残余位移明显增大, 同位移下, 装配式桥墩试件的残余位移略小于现浇桥墩试件。

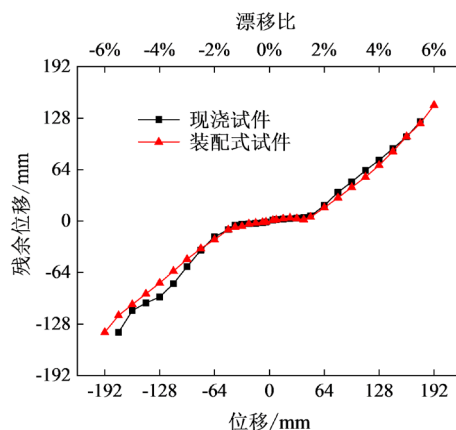


Figure 10. Residual displacement of pier specimens
图 10. 桥墩试件残余位移

4.6. 累积滞回耗能

桥墩试件累积滞回耗能随位移的变化如图 11 所示, 从图中可以发现当漂移比小于 3% 时, 两者的累积滞回耗能相差较小, 当漂移比为 3% 至 5% 时, 在同等位移下, 现浇桥墩试件的累积滞回耗能高于装配式桥墩试件, 在漂移比为 4% 时, 装配式桥墩试件的累积滞回耗能为现浇桥墩试件累积滞回耗能的 89.8%, 但随着位移继续增大, 两者的差距有所减小。由于现浇桥墩试件先于装配式桥墩试件破坏, 最后总的累积滞回耗能上, 现浇桥墩试件的累积滞回耗能明显低于装配式桥墩试件。

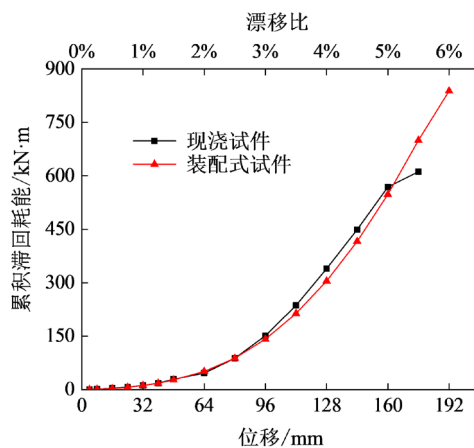


Figure 11. Cumulative hysteretic energy of pier specimens
图 11. 桥墩试件累积滞回耗能

5. 结论

- 1) 与现浇桥墩试件破坏主要集中于塑性铰区, 塑性铰区出现大面积混凝土剥落等不同, 采用灌浆套

筒连接的装配式桥墩试件由于灌浆套筒本身刚度较大，能够牢固连接纵筋和约束内部纵筋的屈曲变形，使得传统现浇墩身塑性较区的刚度增大，墩身损伤主要沿着套筒顶部和底部发展，套筒高度内损伤较小，破坏主要集中于接缝处，最终接缝处混凝土被严重压碎，套筒连接承台处纵筋被拉断。

2) 采用灌浆套筒连接的装配式桥墩试件与现浇桥墩试件的水平承载力基本相等，且装配式桥墩试件的承载力在纵筋断裂前下降更缓慢，虽然装配式桥墩试件的初始刚度小些，但刚度退化速率更慢。同位移下装配式桥墩试件的累积滞回耗能略小，但极限位移更大，破坏时总的累积滞回耗能更大。其位移延性比现浇桥墩试件略好，残余位移更小。

3) 通过与现浇桥墩试件在承载力、刚度、位移延性、累积滞回耗能等抗震性能指标的比较，可以发现采用灌浆套筒连接的装配式桥墩试件具备不弱于现浇桥墩试件的抗震性能，在抗震设防烈度为 8 度的地区同样可以应用。

参考文献

- [1] 王志强, 葛继平, 魏红一, 刘丰. 节段拼装桥墩抗震性能研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 147-154.
- [2] 王华. 预制节段拼装桥梁施工关键技术浅析[J]. 城市道桥与防洪, 2018(6): 174-177+377.
- [3] Mander, J.B. and Cheng, C.T. (1997) Seismic Resistance of Bridge Piers Based on Damage Avoidance Design. National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.
- [4] Hewes, J.T. and Priestley, M.J.N. (2002) Seismic Design and Performance of Precast Concrete Segmental Bridge Columns.
- [5] 魏红一, 肖伟, 王志强, 李田田. 采用套筒连接的预制桥墩抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报, 2016, 44(7): 1010-1016.
- [6] 黄宜, 邱文亮, 黄才良, 田甜. 单节段装配式桥墩抗震性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(5): 481-487.
- [7] 崔海军, 樊华. 结构抗震静力实验方法综述[J]. 科技经济市场, 2008(9): 27-28.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org