

文章编号: 1000-4750(2015)10-0099-07

高强钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究与分析

戎 贤^{1,2}, 张健新^{1,2}, 李艳艳^{1,2}

(1. 河北工业大学土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘 要: 通过拟静力试验研究配置高强钢筋混凝土桥墩的抗震性能。分析桥墩试件的破坏形态, 对往复荷载作用下桥墩试件的滞回特性、承载能力、延性性能、耗能能力等抗震性能指标进行比较研究。分析轴压比、剪跨比、箍筋间距及钢筋强度等对抗震性能的影响规律。研究表明: 配置高强钢筋混凝土桥墩试件的破坏形态与配置普通钢筋的混凝土桥墩的一致, 剪跨比较小的桥墩变形能力有限, 呈弯剪破坏形态; 剪跨比较大的桥墩变形能力较大, 呈弯曲破坏形态。提高轴压比虽能提高试件的承载能力, 但使其抗震性能指标降低, 不利于桥墩抗震。提高钢筋强度和加密箍筋能提高其各方面的抗震性能指标, 有利于结构抗震。

关键词: 桥墩; 高强钢筋; 抗震性能; 影响因素; 拟静力

中图分类号: U443.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.03.0221

EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS ON ASEISMIC PERFORMANCE OF HIGH STRENGTH REINFORCEMENT CONCRETE BRIDGE PIERS

RONG Xian^{1,2}, ZHANG Jian-xin^{1,2}, LI Yan-yan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China)

Abstract: Aseismic performance of high-strength steel-bar-concrete-bridge piers designed is verified by quasi-static test. The damage characteristic of bridge piers was analyzed. The hysteretic characteristic, bearing capacity, ductility performance and energy dissipation were investigated. The effect of different improvement measures on aseismic behavior in terms of axial compression ratio, shear span ratio, stirrup space and reinforcement strength grade were analyzed. The results show that the damage behavior of concrete bridge piers with high strength reinforcement are similar to those with conventional stirrup. With a finite deformation, the small shear-span-ratio bridge-piers suffered flexural-shear failure models while the large shear-span-ratio one suffered flexural failure models and possessed large deformations. The bearing capacity of bridge piers is enhanced while the other aseismic index performance become low with the increased of axial compression ratio, which is disadvantage of aseismic performance of bridge piers. The more the reinforcement strength grade and stirrup ratio are, the better the aseismic performance is. Therefore, it is better for aseismic performance of bridge piers.

Key words: bridge piers; high strength steel bars; seismic behavior; influence factor; quasi-static

收稿日期: 2014-03-24; 修改日期: 2014-10-28

基金项目: 天津市自然科学基金项目(12JCYBJC14100); 河北省交通运输厅科技计划项目(Y-2012041); 河北省交通运输厅科技计划项目(Y-2011052)

通讯作者: 张健新(1986—), 女, 河北唐山人, 博士生, 主要从事结构抗震研究(E-mail: zhangjianxin505@126.com).

作者简介: 戎 贤(1965—), 男, 河北定州人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗震研究(E-mail: xrong@hebut.edu.cn);

李艳艳(1979—), 女, 广西上林人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: nicole_820@163.com).

作为城市生命线桥梁工程在现代化的防灾减灾机能方面作用尤为重要,作为主要抗侧力构件的桥墩在抗震中发挥着举足轻重的作用。近年来的地震调查显示桥梁发生较为严重的破坏^[1-3],为减轻地震损伤、提高桥梁的抗震能力,在桥墩中采用高强钢筋替换纵筋和箍筋,利用高强钢筋弹性模量与普通钢筋相近而强度高的材料特性来改善桥墩在地震作用下的抗震性能。HRB500级钢筋具有强度高、延性好等优点,将HRB500级钢筋应用到桥墩中,能够促进桥梁抗震新结构的应用、提高桥梁的抗震能力、充分发挥桥梁的功能。

国内外对此桥墩和配有高强钢筋的混凝土柱进行了大量的研究^[4-7],但是专门针对采用高强钢筋改善桥墩的抗震性能方面的研究却比较少^[8-9],

现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62-2004)中也未列入 HRB500 高强钢筋^[10],因此,需要进行配置 HRB500 级高强钢筋混凝土桥墩的抗震性能研究,以推广高强钢筋在桥墩结构中的应用。

1 设计概况

试验设计了 10 个配置 HRB500 高强钢筋混凝土桥墩,试件的试验轴压比为 0.07 和 0.14,纵筋强度等级为 HRB500 和 HRB335,箍筋强度等级为 HRB500 和 HPB300,箍筋间距为 80 mm 和 120 mm,试件高度为 1060 mm 和 560 mm,剪跨比分别为 1.77 和 0.93。试件设计参数如表 1 所示,试件尺寸及配筋情况如图 1 所示,试件的混凝土强度等级为 C50,

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	箍筋①	纵筋②	纵筋强度/(N/mm ²)	箍筋强度/(N/mm ²)	试件高度/mm	轴压比	箍筋间距/mm
QD1	10@80	8D16	335	300	1060	0.07	80
QD2	10@80	8D16	500	300	1060	0.07	80
QD3	10@80	8D16	335	500	1060	0.07	80
QD4	10@80	8D16	500	500	1060	0.07	80
QD5	10@120	8D16	500	500	1060	0.07	120
QD6	10@120	8D16	500	500	1060	0.14	120
QD7	10@80	8D16	335	300	560	0.07	80
QD8	10@80	8D16	500	500	560	0.07	80
QD9	10@120	8D16	500	500	560	0.07	120
QD10	10@120	8D16	500	500	560	0.14	120

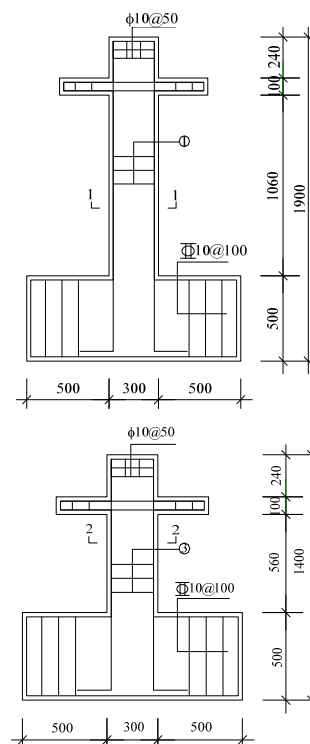
立方体抗压强度实测值为 58.1 MPa,轴心抗压强度实测值为 38.9 MPa,保护层厚度为 20 mm。试件的钢筋力学性能实测值如表 2 所示。

表 2 钢筋力学性能实测值

Table 2 The measured values of steel mechanical properties

钢筋等级	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/($\times 10^5$ MPa)
HRB300	10	352	543	1.95
HRB335	16	383	546	1.95
HRB500	10	585	750	1.92
HRB500	16	600	756	1.92

试验加载时采用拟静力加载方案,将竖向千斤顶安装在反力梁下用于施加桥墩顶部轴向力,试件试验轴压比为 0.07,设计轴力为 190 kN;试件试验压千斤顶在墩顶加载头处施加水平荷载。桥墩试件的试验加载装置见图 2。试验的加载程序为荷载-位移混合控制,如图 3 所示。屈服前以荷载控制,屈服后以位移控制,当荷载降至 85%的极限荷载时,试件破坏。



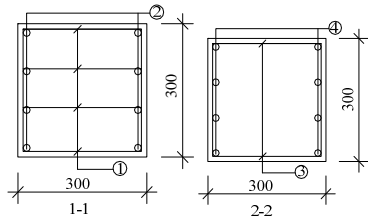


图 1 试件配筋图 /mm

Fig.1 Reinforcements of specimen

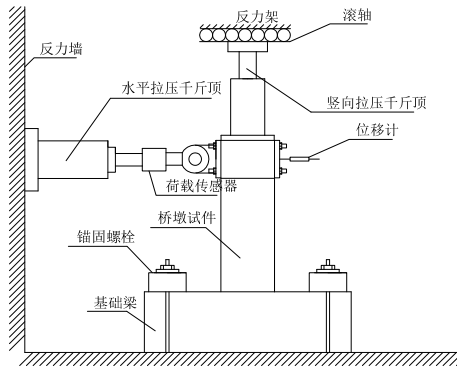


图 2 试验装置

Fig.2 Test setup

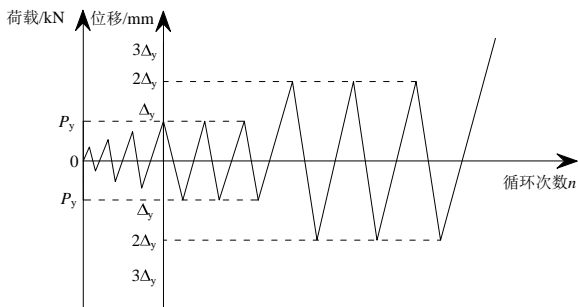


图 3 加载程序

Fig.3 Program of test loading

2 破坏特征

高强钢筋混凝土桥墩试件的破坏特征见图 4。

从图 4 可以发现，剪跨比较大的试件 QD1、QD4、QD6 的墩底混凝土被压溃，桥墩试件发生弯曲破坏。剪跨比较小的试件 QD8、QD9、QD10 的 X 形交叉斜裂缝的延伸扩展导致桥墩试件发生弯剪破坏。与配置普通钢筋的桥墩试件 QD1 相比，配置高强钢筋的桥墩试件 QD4 的破坏过程基本一致，但其混凝土剥落程度较轻，裂缝数量多但宽度小，可见提高桥墩试件钢筋强度能够改善其破坏特征。对比轴压比不同的试件 QD9 和 QD10 发现，增加试件的轴压比使 QD10 的斜裂缝宽度增加，混凝土的剥落程度加重，可见增加轴压比对桥墩破坏形态不利。对比箍筋间距不同的桥墩试件 QD8 和 QD9 发现，加密箍筋能使试件 QD8 的裂缝宽度较小，裂

缝发展速度减缓，能够减轻高强钢筋混凝土桥墩的破坏形态。



(a) QD1



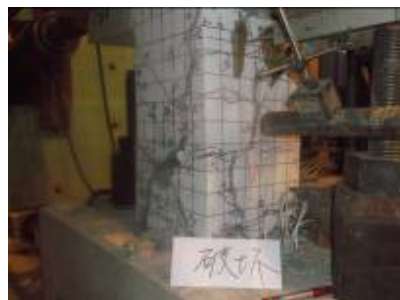
(b) QD4



(c) QD6



(d) QD8



(e) QD9



(f) QD10

图4 破坏形态

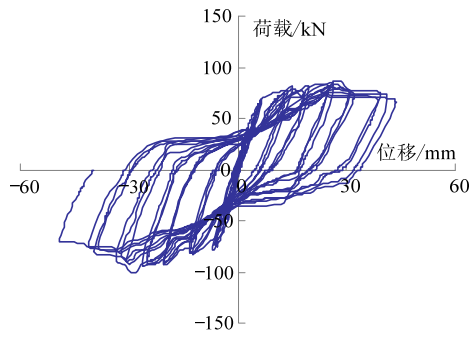
Fig.4 Failure pattern

3 试验结果分析

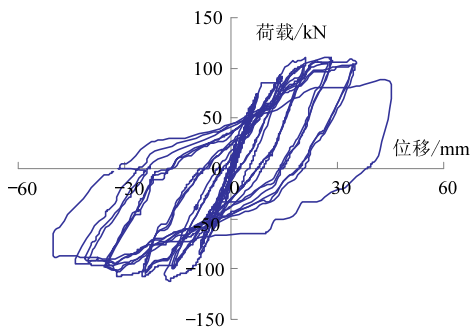
3.1 桥墩滞回曲线分析

高强钢筋混凝土桥墩试件的滞回曲线见图5。

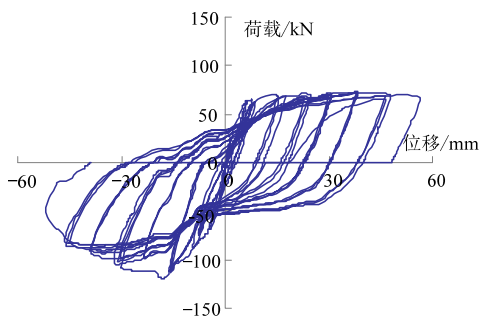
从图5可以看出，剪跨比、轴压比、钢筋强度及箍筋间距对混凝土桥墩的滞回特性影响较大。



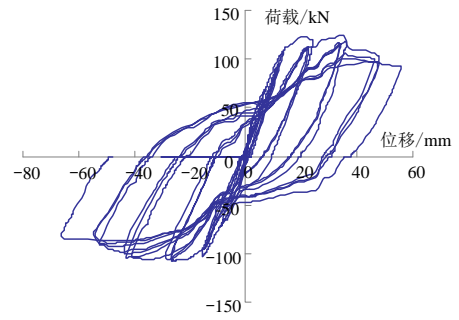
(a) QD1



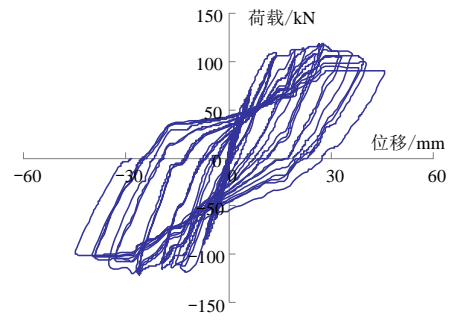
(b) QD2



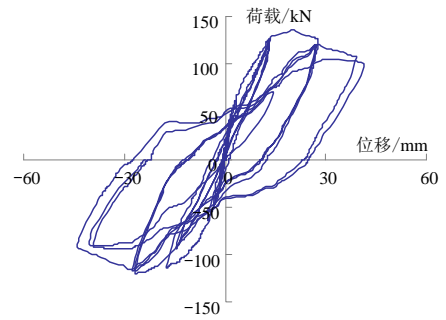
(c) QD3



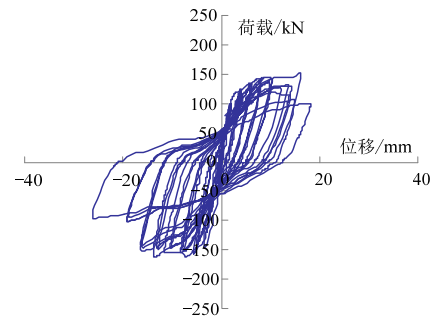
(d) QD4



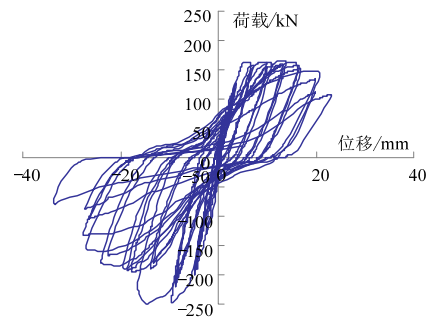
(e) QD5



(f) QD6



(g) QD7



(h) 3QD8

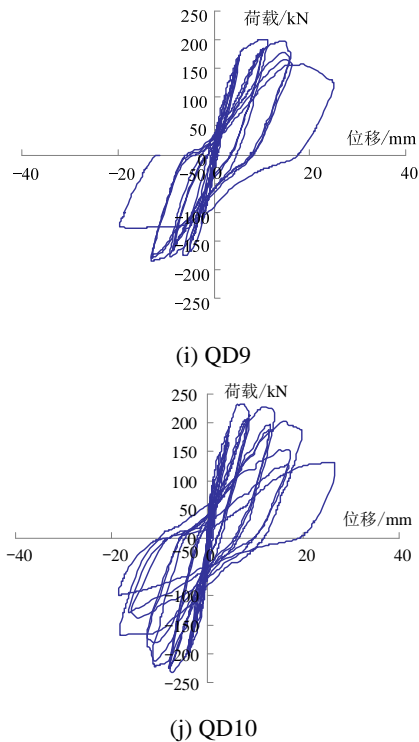


图 5 滞回曲线

Fig.5 Hysteretic curves

1) 剪跨比的影响：与剪跨比较大的桥墩试件 QD1、QD4、QD5 和 QD6 相比，剪跨比较小的桥墩试件 QD7、QD8、QD9 和 QD10 的滞回环的面积较小，中部捏拢现象较严重，最后滞回环向反 S 形或 Z 形发展，表现了较为明显的弯剪破坏的滞回曲线特征。

2) 轴压比的影响：与轴压比较小的试件 QD5 相比，轴压比较大的试件 QD6 饱满程度降低，后期，虽然承载能力得到提高，但变形能力降低，增加桥墩试件的轴压比不利于结构抗震。

3) 钢筋强度的影响：剪跨比较大的普通钢筋混凝土桥墩试件 QD1 的滞回环包围面积较小，呈弓形，极限承载能力较低，剪跨比较大的高强钢筋混凝土桥墩试件 QD2、QD3、QD4 试件滞回环较为饱满，包围面积较大，极限承载力和破坏位移都有相应提高。剪跨比较小的普通钢筋混凝土桥墩试件 QD7 的滞回曲线的饱满程度明显不如高强钢筋混凝土桥墩试件 QD8。说明在相同配筋面积的条件下，提高钢筋强度可以显著提高试件的滞回特性。

4) 箍筋间距的影响：与桥墩试件 QD5 和 QD9 相比，加密箍筋使桥墩试件 QD4 和 QD8 的滞回环面积增加，改善试件的滞回特性。

3.2 桥墩刚度退化分析

高强钢筋混凝土桥墩试件的刚度退化曲线如

图 6 所示。

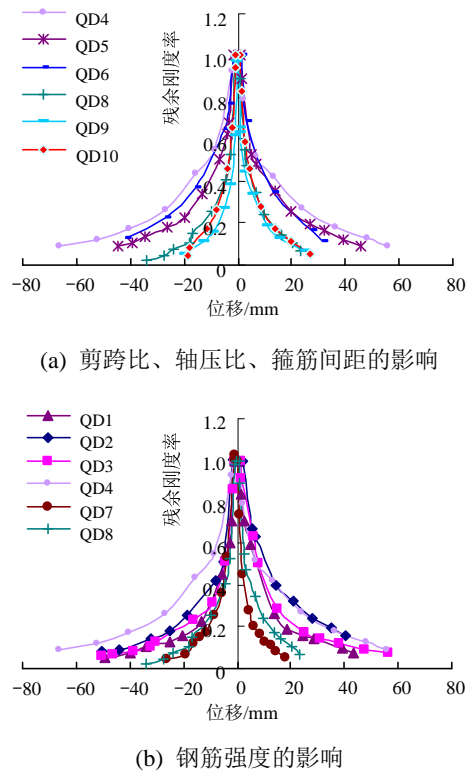


图 6 刚度退化曲线

Fig.6 Curves of stiffness degradation

从图 6(a)可以看出，剪跨比较大的试件 QD4、QD5、QD6 的刚度退化曲线分别比试件 QD8、QD9、QD10 的平缓，箍筋间距较小的试件 QD4、QD8 分别比箍筋间距较大的试件 QD5、QD9 的刚度退化曲线平缓，可见增加试件的剪跨比、减小箍筋间距能够改善高强钢筋混凝土桥墩试件的刚度退化。

不论剪跨比的大小，轴压比较小的试件 QD5、QD9 的刚度退化曲线比 QD6、QD10 的平缓，可见减小试件的轴压比能够减缓桥墩刚度退化。

从图 6(b)可以看出，不论剪跨比的大小，钢筋强度较高的试件的刚度退化曲线均得到减缓，同时配置高强纵筋箍筋的试件 QD4 的刚度退化曲线最为平缓。可见提高钢筋强度能够显著减缓桥墩刚度退化。

3.3 桥墩承载能力、变形能力及延性性能分析

高强钢筋混凝土桥墩试件的荷载、位移、延性系数及破坏位移角如表 3 所示。

从表 3 可以看出，剪跨比较小的桥墩试件的承载能力较高但变形能力较差，破坏位移角较小。提高轴压比，使剪跨比较大的桥墩试件 QD6 的屈服荷载、极限荷载比 QD5 有一定程度的提高，但破坏位移降低较多，延性系数及破坏位移角也相应降

低;使剪跨比较小的桥墩试件 QD9 的屈服荷载、极限荷载比 QD10 分别提高 17.6%和 21.1%,但破坏位移及破坏位移角相应降低;可见减小轴压比对桥墩的变形有利。配置高强钢筋的混凝土桥墩试件的荷载、位移、延性系数一般比普通钢筋的大(QD8 的延性系数除外),尤其是剪跨比较大的配置高强纵筋箍筋的试件 QD4 比 QD1 的极限荷载提高约 23.6%,极限位移提高约 62.8%,破坏位移角增大

34%,可见配置高强纵筋箍筋的桥墩试件对于结构的承载能力、变形能力及延性性能有利。箍筋间距较小的试件 QD4 比箍筋间距较大试件 QD5 的位移有较大幅度的提高,其中极限位移和破坏位移分别提高约 45.3%和 37%,延性系数和破坏位移角提高约 14.1%和 36.7%,但对荷载影响不大,可见加密箍筋间距能够提高桥墩试件的变形能力和延性性能。

表 3 荷载、位移及延性

Table 3 Load, displacement and ductility coefficient

试件	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	屈服位移/mm	极限位移/mm	破坏位移/mm	延性系数	破坏位移角/(%)
QD1	78.35	93.84	12.08	23.68	42.38	3.52	4.00
QD2	90.56	111.34	12.88	30.36	47.62	3.74	4.49
QD3	81.94	96.50	10.38	34.31	46.04	4.74	4.34
QD4	102.08	116.00	14.16	38.56	56.87	4.04	5.36
QD5	104.42	120.17	11.81	26.53	41.51	3.54	3.92
QD6	100.65	121.89	11.15	26.91	36.08	3.22	3.40
QD7	138.09	157.00	4.40	12.09	16.23	3.75	2.90
QD8	171.39	206.84	5.46	15.22	19.28	3.61	3.44
QD9	168.60	192.17	5.32	12.07	19.31	3.61	3.45
QD10	198.26	232.67	4.41	8.35	17.41	3.93	3.11

3.4 桥墩耗能能力分析

高强钢筋混凝土桥墩试件的等效粘滞阻尼系数-位移曲线见图 7。

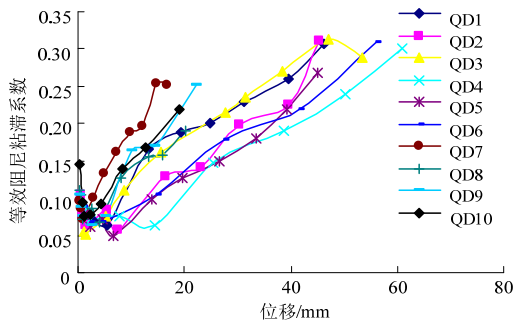


图 7 等效粘滞阻尼系数-位移曲线

Fig.7 Equivalent viscous damping coefficient-displacement curve

从图 7 可以看出,剪跨比较小的桥墩试件 QD7-QD10 的等效粘滞阻尼系数较大,位于剪跨比较大试件的上方。配置高强钢筋的桥墩试件的等效粘滞阻尼系数一般比配置普通钢筋的小,加密箍筋的试件 QD4 和 QD8 分别比试件 QD5 和 QD9 的等效粘滞阻尼系数小,尤其是同时配置纵筋箍筋的剪跨比较大、箍筋间距较小的试件 QD4 位于曲线的最下方,其等效粘滞阻尼系数最小。轴压比对试件的等效粘滞阻尼系数影响不大。由此可知,配置高强钢筋、减小箍筋间距、增加剪跨比能够降低桥

墩试件在同一位移下的等效粘滞阻尼系数,桥墩试件的破坏减轻。

4 结论

(1) 配置高强钢筋混凝土桥墩试件的破坏形态与配置普通钢筋的混凝土桥墩的一致,剪跨比较小的桥墩呈弯剪破坏形态;剪跨比较大的桥墩呈弯曲破坏形态。

(2) 减小桥墩试件的轴压比、增加其剪跨比能够改善桥墩试件的破坏形态,提高其滞回特性,有利于桥墩抗震。

(3) 在相同配筋面积的条件下提高钢筋强度和加密箍筋也能在一定程度上减小裂缝宽度,提高其延性变形能力,改善其滞回性能,对桥墩抗震有利。

参考文献:

- [1] 孙治国,王东升,郭迅,等.汶川大地震绵竹市回澜立交桥震害调查[J].地震工程与工程振动,2009,29(4):132-138
Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, Guo Xun, et al. Damage investigation of Huilan interchange in Mianzhu after Wenchuan earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 132 - 138. (in Chinese)
- [2] Chang K C, Chang D W, Tsai M H, et al. Seismic performance of highway bridges [J]. Earthquake

- Engineering and Engineering Seismology, 2000, 2(1): 85—105.
- [3] Mo Y L, Nien I C. Seismic performance of hollow high-strength concrete bridge columns [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2002, 7(6): 338—349.
- [4] Martirosyan A, Xiao Y. Flexural-shear behavior of high-strength concrete short columns [J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(4): 679—695.
- [5] 陈鑫, 阎石, 李兵, 等. 高强钢筋高强混凝土柱损伤模型试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(增 1): 154—158.
Chen Xin, Yan Shi, Li Bing, et al. Experimental study on damage model for hsc columns [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(Suppl1): 154—158. (in Chinese)
- [6] 孙治国, 司炳君, 王东升. 高强箍筋高强混凝土柱约束箍筋用量研究[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 182—190.
Sun Zhiguo, Si Bingjun, Wang Dongsheng. Research on confining reinforcement for high-strength concrete columns with high-strength stirrups [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(10): 182—190. (in Chinese)
- [7] 李永学, 刘贵位. 钢筋混凝土矩形桥墩的延性抗震分析[J]. 公路, 2010(10): 20—27.
Li Yongxue, Liu Guiwei. Anti-seismic Analysis of ductility of reinforced concrete bridge piers with rectangle section [J]. Highway, 2010(10): 20—27. (in Chinese)
- [8] 司炳君, 孙治国, 王东升, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 1—9.
Si Bingjun, Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, et al. Review of studies on the seismic behavior of high strength concrete columns with high strength transverse reinforcement [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 1—9. (in Chinese)
- [9] 司炳君, 孙治国, 王东升, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 1—9.
Si Bingjun, Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, et al. Review of studies on the seismic behavior of high strength concrete columns with high strength transverse reinforcement [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 1—9. (in Chinese)
- [10] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
JTG D62-2004, Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)

(上接第 98 页)

- [12] 王立成, 宋玉普. 一个针对轻骨料混凝土的四参数多轴强度准则[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 27—33.
Wang Licheng, Song Yupu. A four-parameter multi-axial strength criterion for lightweight aggregate (LWA) concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 27—33. (in Chinese)
- [13] 王立成, 日和田·希与志. 基于统一强度理论的轻骨料混凝土多轴强度准则[J]. 工程力学, 2006, 23(5): 125—130.
Wang Licheng, Hiwada Kiyoshi. Multi-axial strength criterion for lightweight aggregate (LWA) concrete based on the unified strength theory [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(5): 125—130. (in Chinese)
- [14] 过镇海. 混凝土的强度和变形: 试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 118—120.
Guo Zhenhai. Strength and deformation of concrete, experimental foundation and constitutive relations [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 118—120. (in Chinese)
- [15] 杨建辉, 杨正浩, 黄辉, 等. 多种混凝土材料的多轴强度模型[J]. 工程力学, 2008, 25(11): 100—110.
Yang Jianhui, Yang Zhenghao, Huang Hui, et al. Multi-axial strength model of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 100—110. (in Chinese)
- [16] 杨建辉. 广义八面体理论初步-混凝土多轴强度理论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 99—101.
Yang Jianhui. Pilot study on generalized octahedral theory-multi-axial strength theory of concrete [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009: 99—101. (in Chinese)
- [17] 宋玉普, 赵国藩, 彭放, 等. 三轴受压状态下轻骨料混凝土的强度特性[J]. 水利学报, 1993, 6(1): 10—15.
Song Yupu, Zhao Guofan, Peng Fang, et al. Behavior of lightweight concrete under triaxial compressive stress [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 6(1): 10—15. (in Chinese)
- [18] 陈惠发, 萨利普 A F. 混凝土和土的本构方程[M]. 余天庆, 王勋文, 刘西拉, 韩大建, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 198—204.
Chen Huifa, Saleeb A F. Constitutive equations for materials of concrete and soil [M]. Translated by Yu Tianqing, Wang Xunwen, Liu Xila, Han Dajian. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004: 198—204. (in Chinese)