

文章编号: 1673 - 9469(2014) 04 - 0025 - 06

doi: 10. 3969/j. issn. 1673 - 9469. 2014. 04. 007

锈蚀对外包钢板加固钢筋混凝土桥墩的影响

倪捷¹, 高圣彬¹, 葛汉彬²

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 名城大学 土木工程科, 日本 名古屋 468 - 8502)

摘要: 建立二维弹塑性有限元模型研究外包钢板加固钢筋混凝土桥墩在底部附近钢板发生锈蚀情况下的极限承载力变化规律。首先通过与试验结果比较, 验证本文所采用的有限元分析方法的准确性与有效性。然后以实际桥墩 P2 柱的底部附近钢板锈蚀率、锈蚀模式为变化参数, 研究不同翼缘和腹板锈蚀率下桥墩的极限承载力、混凝土裂缝开展范围、钢板的屈服区域特点等。研究表明, 桥墩的极限承载力随底部附近钢板的锈蚀率增大而减小, 均匀锈蚀模式下的钢板锈蚀率与桥墩极限承载力之间呈现明显的线性相关关系, 而腹板的不均匀锈蚀模式引起的极限承载力劣化远大于均匀锈蚀模式。

关键词: 桥梁工程; 钢筋混凝土桥墩; 外包钢板; 钢板锈蚀率; 锈蚀模式; 极限承载力

中图分类号: U443. 22

文献标识码: A

Corrosion effect of reinforced concrete bridge piers wrapped by steel plates

NI Jie¹, GAO Sheng - bin¹, GE Han - bin²

(1. Department of Civil Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Department of Civil Engineering, Meijo University, Nagoya 468 - 8502, Japan)

Abstract: Two - dimensional elasto - plastic finite element formulation is employed to investigate the load - carrying capacity of reinforced concrete piers wrapped by steel plates which are corroded at the pier base. By comparing with experimental results, the employed finite element analysis method is verified to be accurate and effective. After that, a series of parametric studies are carried out to investigate the effect of corrosion rate and corrosion mode of steel plates near the base of in - service pier P2 on load - carrying capacity, concrete cracking scope, yield range of wrapped steel plates. It is concluded that the load - carrying capacity decreases with the increase of steel plates' corrosion rate. There is an obvious linear relationship between the load - carrying capacity and the corrosion rate in the case of even corrosion mode. The deterioration of load - carrying capacity resulted from the web plates' uneven corrosion mode is more serious than that under even corrosion mode.

Key words: bridge engineering; reinforced concrete piers; wrapped steel plate; corrosion rate of steel plate; corrosion mode; load - carrying capacity

由于钢筋混凝土桥墩在地震作用下容易在柱脚附近造成损伤, 通常采用外包钢板加固法对该类桥墩进行补强加固^[1-2]。目前关于钢筋混凝土桥墩加固后的受力性能研究已经较为成熟。国内外学者通过大量的试验以及数值分析^[3-5]发现, 局部钢板约束钢筋混凝土桥墩较无钢板加固钢筋混凝土桥墩具有更好的承载能力以及延性性能。然而实际使用中发现, 由于积水、腐蚀环境等的影

响, 外包钢板出现了不同程度的锈蚀现象, 从而导致钢板的有效厚度减小。国际上通常认为钢材锈蚀引起的结构损伤是钢筋混凝土结构最为突出的灾害之一^[6]。国内外学者对钢材锈蚀的研究主要分为两类。首先是钢筋锈蚀后, 对其本构关系以及力学性能的影响, 张伟平^[7]等人建立了不同环境条件下锈蚀钢筋的应力 - 应变关系数学模型, 吴庆与袁迎曙^[8]在此基础上建立了与锈蚀率相

收稿日期: 2013 - 10 - 12

基金项目: 上海市科学技术委员会浦江人才计划(08PJ1406400)。

作者简介: 倪捷(1990 -) 男, 浙江温州人, 硕士, 从事结构工程方面的研究。

关的锈蚀钢筋本构模型。而对于构件锈蚀后对整体结构的承载能力、延性性能等力学性能退化方面的研究也有大量的学者对其做了研究分析^[9-14]。本文通过建立精确有限元分析模型,对实际桥墩 P2 进行参数分析,研究不同翼缘和腹板锈蚀率情况下桥墩的极限承载力退化规律、破坏机理,以及均匀锈蚀和不均匀锈蚀模式对桥墩极限承载力的影响规律。

1 有限元分析方法的试验验证

1.1 试件基本参数

基于受损钢筋混凝土桥墩补强加固试验报告^[15]选取图 1 所示的 3 个正方形截面钢筋混凝土桥墩为研究对象,施加恒定竖向轴力后,在桥墩顶端施加渐增水平荷载。图 2(a) 为试件尺寸示意图,外包钢板厚度为 1.6 mm,沿整个桥墩高度包裹试件。3 个试件的加固方法以及与基础的连接方式分别为:(1) Case A 为未加固的钢筋混凝土桥墩(参见图 1(a));(2) Case B 为经外包钢板

加固后的桥墩,其中外包钢板与基础完全固接(参见图 1(b)),该试件用于模拟钢板未锈蚀状态;(3) Case C 为经外包钢板加固后的桥墩,其中外包钢板与基础间留有 50 mm 空隙(参见图 1(c)),该试件用于模拟桥墩底部附近钢板完全锈蚀状态。

1.2 有限元分析模型

采用 ABAQUS 有限元分析软件^[15]建立二维平面模型,进行三种不同工况下钢筋混凝土桥墩的极限承载力分析。建模时,混凝土采用二维平面应力单元,钢筋采用二维杆单元,侧面外包钢板(即翼缘)采用二维梁单元,正面外包钢板(即腹板)采用二维平面应力单元。纵筋与箍筋通过埋入命令嵌入混凝土,与混凝土协同工作,而外包钢板单元与混凝土单元之间采用绑定命令共同工作,不考虑两者之间的剥离、滑移效应。钢筋混凝土桥墩与基础之间采用完全固接方式。

在有限元分析中,钢筋采用理想弹塑性模型,具体材料参数见表 1 中的“试验”列。钢板采用具

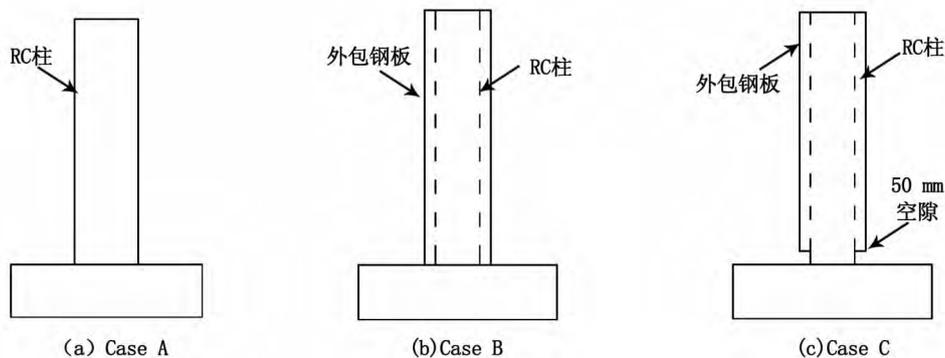


图1 试件示意图

Fig.1 Sketch of tested specimens

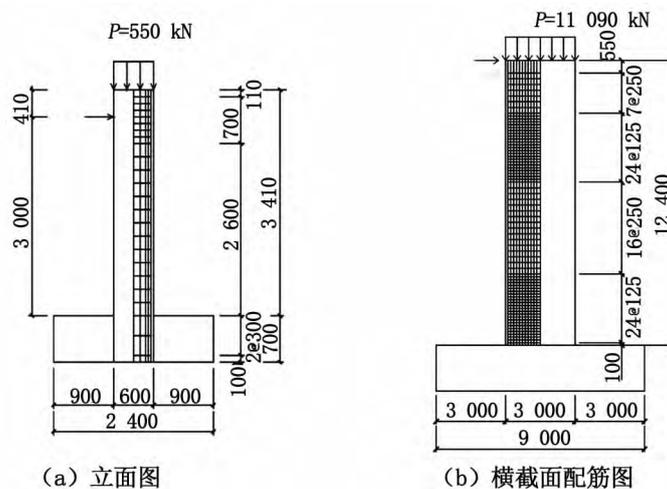


图2 试件与P2柱立面示意图

Fig.2 Elevation of specimen and P2 pier

表1 材料特性一览表

Tab. 1 List of material properties

	纵筋		箍筋		钢板		混凝土	
	试验	P2 柱						
弹性模量/MPa	2.06×10^5	2.78×10^4	2.78×10^4					
屈服强度/MPa	381	180	328	180	235	235	—	—
抗拉强度/MPa	—	—	—	—	—	—	3.0	3.0
抗压强度/MPa	—	—	—	—	—	—	38.3	30.8

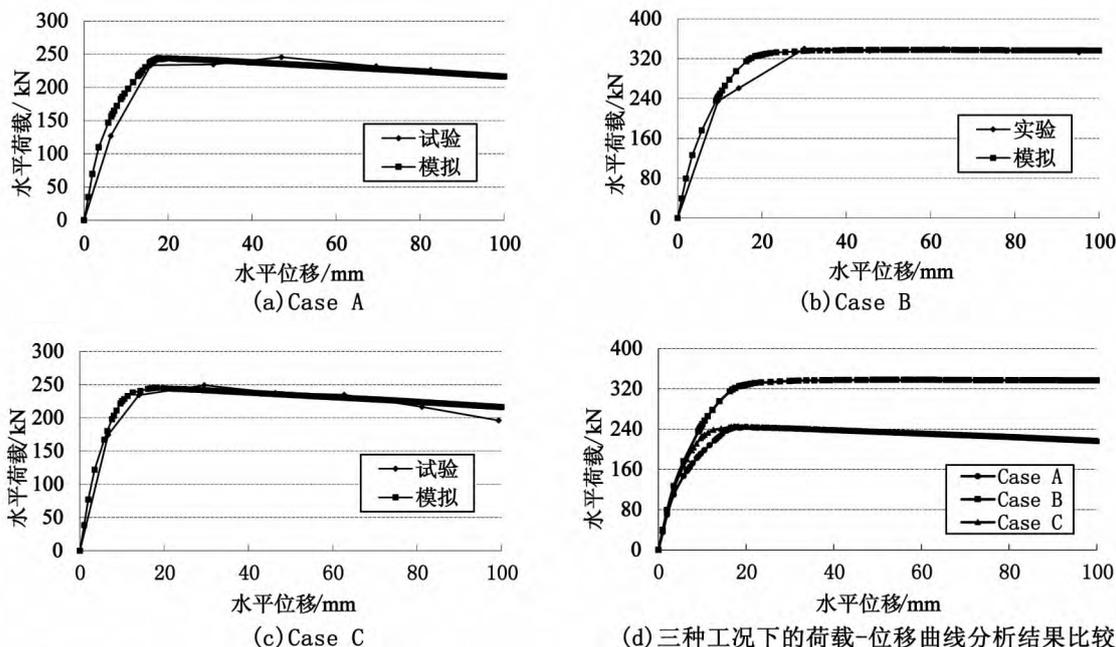


图3 试验与分析结果比较

Fig. 3 Comparison between test and analysis

有屈服平台的应变强化型的应力-应变关系^[16]。混凝土采用弹塑性损伤模型^[16],且应力达到抗压强度后考虑软化效应。边界条件为试件底部完全固定,550 kN的竖向荷载采用均布加载方式施加在桥墩顶部,而水平荷载采用位移加载方式,加载点距试件顶部410 mm,施加单调渐增荷载直至桥墩破坏,如图2(a)所示。

1.3 计算结果与试验结果比较

图3(a)~图3(c)示由数值模拟得到的水平荷载-水平位移曲线与试验结果^[15]的比较。可以看出,三种计算工况下由数值模拟得到的桥墩极限承载力与试验结果吻合良好。图3(d)示由数值模拟得到的三种工况下的荷载-位移曲线比较,可以发现经外包钢板加固后的钢筋混凝土桥墩的极限承载力可以得到提高,但提高的程度与钢板和基础间的连接方式有很大关系,其中Case B较Case A的极限承载力提高了约40%,而Case C仅比Case A提高了约2%。就锈蚀情况而言,

Case B代表外包钢板未出现锈蚀情况,而Case C表示桥墩底部附近外包钢板完全锈蚀情况。可以发现,钢板完全锈蚀后,桥墩的极限承载力与未加固桥墩相差无几,外包钢板失去了对桥墩的补强加固效果。

2 实际桥墩的锈蚀分析

本节以实际桥墩P2^[18](以下简称为P2柱)为研究对象,通过弹塑性有限元参数分析,研究底部附近加固钢板在不同锈蚀率以及不同锈蚀模式下对P2柱的极限承载力以及破坏模式的影响规律。

2.1 P2柱概述与计算工况

图2(b)为P2柱立面示意图,受拉边钢筋为42根 $\Phi 35$ 钢筋,箍筋为 $\Phi 16$ 钢筋(纵筋配筋率=1.5%)。柱横截面尺寸为3.0 m \times 2.8 m,柱高为12.4 m,外包钢板厚度为6 mm。在柱顶施加恒定竖向轴力11 090 kN后,再施加水平渐增荷载至桥墩破坏。本文考虑的桥墩所处计算工况分别为:

无加固桥墩(参见图2(b));经外包钢板加固后的桥墩(钢板底部与基础固接);以及考虑由于底部积水等原因导致的钢板与基础固接处锈蚀的影响,该锈蚀影响通过改变桥墩底部100 mm高度范围内的加固钢板锈蚀率 k 来反映,其中均匀锈蚀模式下的钢板锈蚀率 k 定义如下:

$$k = \frac{t - t'}{t}$$

上式中 t 为锈蚀前的加固钢板厚度; t' 为锈蚀后的加固钢板厚度。试件名中,“F”表示翼缘,“W”表示腹板。采用ABAQUS有限元分析软件建立二维平面模型,单元选取以及分析方法与前述试验部分基本相同,在此不再赘述。P2柱中混凝土与钢材的材料参数如表1所示。

2.2 有限元分析结果考察

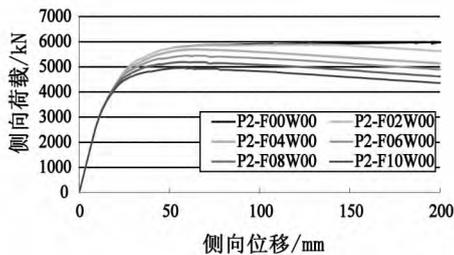
(1) 钢板锈蚀率对桥墩极限承载力的影响

图4(a)示桥墩在不同翼缘钢板锈蚀率下的荷载-位移曲线比较,可以看出随着翼缘钢板锈蚀率的不断增大,桥墩的极限承载能力依次下降。图4(b)示假定翼缘钢板完全锈蚀后,不同腹板锈蚀率下的荷载-位移曲线比较,该图中同时给出了P2柱的荷载-位移曲线。可以看出随着腹板

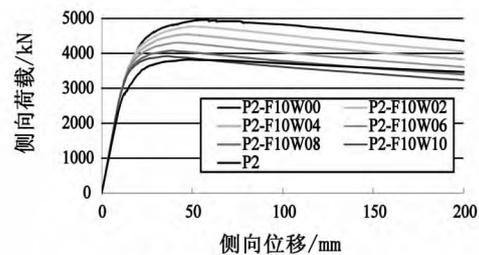
锈蚀率的增大,桥墩的极限承载能力逐步下降,当腹板锈蚀率达到100%时(试件P2-F10W10),其极限承载力与钢板加固前的P2柱基本相同。由此可见,钢板锈蚀对桥墩的极限承载力影响显著。

图5示钢板锈蚀率与极限承载力之间的关系曲线。可以看出翼缘锈蚀率以及均匀锈蚀模式下的腹板锈蚀率和桥墩极限承载力之间存在显著的线性相关关系。通过比较P2-F00W00(外包钢板未锈蚀)、P2-F10W00(外包钢板中仅翼缘完全锈蚀)、P2-F10W10(外包钢板完全锈蚀)、P2(加固前)四个试件的计算结果可知,与加固前的P2试件相比,当底部钢板与基础完全固接时,桥墩的极限承载力提高了56.9%,而当底部完全锈蚀而上部钢板完好时承载力仅提高2.5%,由此可见,加固后钢板对桥墩极限承载力的提高程度主要由底部钢板与基础连接处的锈蚀情况所决定。相对于外包钢板未锈蚀的试件P2-F00W00而言,外包钢板中仅翼缘完全锈蚀(P2-F10W00)将导致桥墩极限承载力下降到82.7%。当桥墩底部外包钢板的翼缘和腹板都完全锈蚀(P2-F10W10)时,将导致极限承载力下降到65.4%。

(2) 钢板锈蚀率对桥墩极限承载力的影响



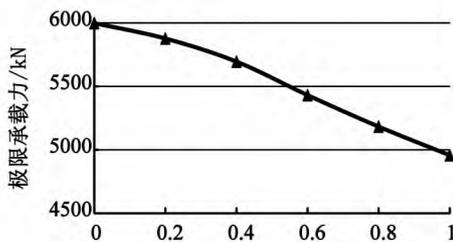
(a) 不同翼缘锈蚀率



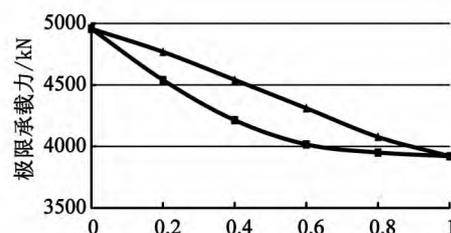
(b) 翼缘锈蚀后不同腹板锈蚀率

图4 不同锈蚀率下的荷载-位移曲线比较

Fig. 4 Comparison of lateral load - lateral displacement curves corresponding to different corrosion ratio



(a) 翼缘锈蚀率



(b) 腹板锈蚀率

图5 钢板锈蚀率对极限承载力的影响

Fig. 5 Effect of steel plate's corrosion ratio on load-carrying capacity

钢板锈蚀模式分为均匀锈蚀与不均匀锈蚀两种模式。均匀锈蚀模式假定钢板在同一平面内的锈蚀同步,通过改变钢板厚度考虑锈蚀率的影响。而不均匀锈蚀模式表示钢板锈蚀是局部的、非对称出现的,需按照实际的锈蚀情况考虑锈蚀率的影响。对于P2柱的翼缘而言,由于受拉翼缘全部参与抵抗侧向荷载引起的弯矩,在同一锈蚀率下均匀锈蚀与不均匀锈蚀模式对极限承载力的影响相同。而对腹板而言,均匀锈蚀与不均匀锈蚀模式中,同一锈蚀率下参与受拉的钢板面积以及对抗侧向荷载的贡献并不相同。

图5(b)示P2柱腹板在均匀锈蚀与不均匀锈蚀模式下锈蚀率与柱极限承载力之间的关系曲线比较。这里的不均匀锈蚀模式假设腹板锈蚀起始于受拉边,随着锈蚀率的增大,锈蚀区域逐渐向受压边扩展。由该图可以看出,不均匀锈蚀模式中,锈蚀率与柱极限承载力之间不再保持均匀锈蚀模式中的线性关系,而是呈现明显的抛物线关系。在同一锈蚀率下,不均匀锈蚀模式对柱极限承载力的降低程度远大于均匀锈蚀模式。因此,在实际桥墩的锈蚀分析中,锈蚀模式的选取对桥墩的极限承载力评估影响巨大。

(3) 不同锈蚀率下的破坏模式比较

通过比较试件P2、试件P2-F00W00、试件P2-F10W00、以及试件P2-F10W10的主拉应变云图(图6)可以看出,试件P2、试件P2-F00W00以及试件P2-F10W00的主拉应变最大处都出现在桥墩与基础连接处,随着高度上升不断减小并且沿试件高度方向在较大范围内出现裂缝。由于试件P2-F10W10上部经加固后的桥墩强度与刚度都大于下部加固钢板锈蚀处,所以主拉应变以及裂缝主要集中在桥墩下部钢板与基础之间发生锈蚀的区域。

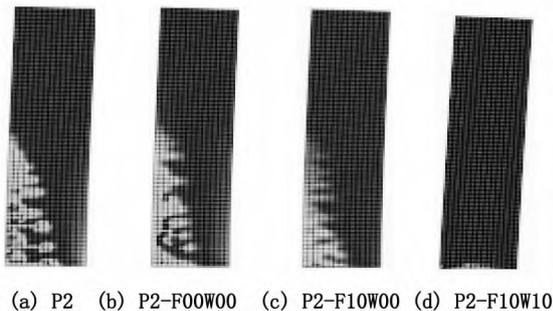


图6 主拉应变云图比较

Fig. 6 Comparison of principal tensile strain contour

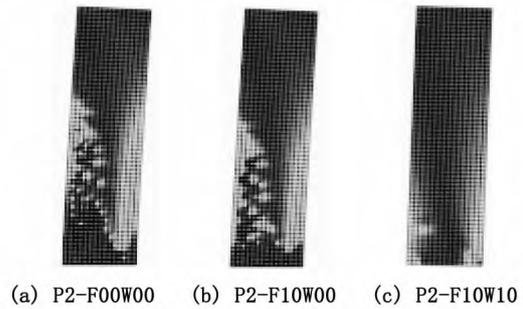


图7 钢板Mises应力云图比较

Fig. 7 Comparison of von Mises stress contour of steel plates

图7为试件P2-F00W00、试件P2-F10W00和试件P2-F10W10的加固钢板Mises应力云图比较。由于试件P2-F00W00中的加固钢板与基础连接处未受到锈蚀影响,钢板承担一部分弯矩,所以底部钢板的较大范围均进入塑性阶段;而试件P2-F10W00以及试件P2-F10W10中加固钢板与基础连接处的钢板均受到锈蚀的影响,向基础传递弯矩的能力显著减弱,故底部钢板进入塑性阶段的范围依次变小。

3 结论

1) 由数值模拟得到的荷载-位移曲线与试验结果相比较,两者吻合较好。桥墩达到极限承载力后,表现出良好的延性性能。经外包钢板加固后的钢筋混凝土桥墩的极限承载力可以得到提高,但提高的程度与钢板和基础的连接方式有很大关系,其中Case B较Case A的极限承载力提高了约40%,而Case C仅比Case A提高了约2%。

2) 经外包钢板加固后的P2柱极限承载力随着底部附近钢板的锈蚀率增大而逐步减小。当底部外包钢板完全锈蚀时,其承载力与加固前的试件相比仅提高2.5%。由此可见,加固钢板对桥墩极限承载力的提高程度主要由底部钢板与基础连接处的锈蚀情况所决定。

3) 通过比较不同锈蚀率下的桥墩极限承载力,可以看出在均匀锈蚀模式下,钢板锈蚀率与桥墩极限承载力之间呈现明显的线性相关关系。而在不均匀锈蚀模式中,腹板锈蚀率与柱极限承载力之间呈现抛物线关系。在同一锈蚀率下,不均匀锈蚀模式对柱极限承载力的降低程度远大于均匀锈蚀模式。

4) 当外包钢板底部与基础连接处锈蚀时,裂缝范围主要集中在桥墩底部钢板发生锈蚀的区域。

5) 虽然同样采取外包钢板加固方式,但由于底部附近钢板锈蚀的影响,导致桥墩中钢板的受力特点也不同。由于未发生锈蚀的加固钢板与基础连接良好,钢板可以承担一部分弯矩,所以底部附近钢板的较大范围均进入屈服阶段;而当加固钢板与基础连接处出现锈蚀时,钢板向基础传递弯矩的能力受到削弱,故底部附近钢板进入屈服阶段的范围逐渐减小。

以上研究结果表明,钢板锈蚀对外包钢板加固钢筋混凝土的极限承载力影响显著,在现役桥墩的维护管理中,加强钢板锈蚀防护措施研究至关重要。

参考文献:

- [1] 万墨林, 韩继云. 混凝土加固技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [2] 唐寰澄, 王序森. 桥梁工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- [3] 张红武, 孙建鹏. 局部外包钢管钢筋混凝土桥墩力学性能分析[J]. 钢结构, 2012, 27(9): 27-29.
- [4] 卢亦焱, 陈少雄, 赵国藩. 外包钢与碳纤维布复合加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(8): 10-17.
- [5] LI YOU FENG, HUANG ZHEN XING. A Study of reinforced concrete bridge columns retrofitted by steel jackets [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2005, 28(2): 319-328.
- [6] 王增忠. 基于混凝土耐久性的建筑工程项目全寿命经济分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [7] 张伟平, 商登峰, 顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 586-592.
- [8] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 42-47.
- [9] FANG Cong - qi, KOU Xin - jian. The effect of steel corrosion on bond strength in concrete structures [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2005, 10(4): 436-440.
- [10] WANG Xiao - hui, LIU Xi - la. Effects of Length and Location of Steel Corrosion on the Behavior and Load Capacity of Reinforced Concrete Columns [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2012, 17(4): 391-400.
- [11] 张斌. 锈蚀对钢管混凝土性能的影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [12] SHARIFI Y, PAIK J K. Ultimate Strength Reliability Analysis of Corroded Steel - box Girder Bridges [J]. Thin - Walled Structures, 2011(49): 157-166.
- [13] SILBA J, GARBATOY Y. Ultimate Strength Assessment of Rectangular Steel Plates Subjected to A Random Localized Corrosion Degradation [J]. Engineering Structures, 2013(52): 295-305.
- [14] 潘典书, 徐善华. 锈蚀型钢构件抗弯承载力预测模型研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(4): 27-29.
- [15] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [16] 吉伯海, 高圣彬. 钢桥抗震与损伤控制设计指南: 基础篇[M]. 南京: 河海大学出版社, 2008.

(责任编辑 王利君)