

文章编号:1673-2049(2007)02-0054-05

采用碳纤维布加固预应力混凝土 吊车梁的设计方法

钟 龙,郑山锁,王 斌,曾 磊,查春光

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要:分析了预应力混凝土吊车梁存在的问题,并结合实际情况,对其提出了初步可行的处理方案。通过对初选方案的对比与优选,结合使用要求,确定采用黏贴碳纤维布(CFRP)方案对吊车梁实施加固。详细介绍了用碳纤维布加固鱼腹式T形截面预应力混凝土吊车梁的设计方案,给出了正截面受弯和斜截面受剪补强加固的计算方法,并提出了相应的施工方法及具体的构造措施。研究结果表明,加固处理后吊车梁的各项技术指标均达到了设计要求,效果良好。

关键词:吊车梁;预应力混凝土;加固;碳纤维布;设计方法

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A

Design Method of Strengthening Prestressed Concrete Crane Girder Using CFRP

ZHONG Long, ZHENG Shan-suo, WANG Bin, ZENG Lei, ZHA Chun-guang

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: The tentative treatment schemes were put forward to solve the existing problems in prestressed concrete crane girders. Through comparing and analyzing the initial treatment schemes, and combining the demands of use, the sticking carbon fiber reinforced polymer (CFRP) was chosen to strengthen crane girders. Authors introduced the design schemes to strengthen fish-bellied T-section prestressed concrete crane girders by CFRP, including the computing methods of bending and shear carrying capacity, as well as the corresponding construction methods and strengthening measures were presented. The research result shows that all kinds of technical indexes of crane girder can meet the demands of design after strengthening.

Key words: crane girder; prestressed concrete; strengthening; carbon fiber reinforced polymer; design method

0 引 言

吊车梁是工业厂房的重要构件之一,其设计规定和施工操作均较为严格,构件质量较佳,应用效果良好。预应力混凝土吊车梁由于受力性能好、经济效益显著,已得到广泛应用^[1],但由于吊车梁承受质

量较大,运输频繁,使用年久会产生疲劳或工业发展中工艺和使用功能的改变常遇到结构改造及加固的问题,导致厂房吊车升级改造是很常见的现象,这就涉及到升级后吊车梁加固等一系列问题,本文中介绍了一种采用碳纤维布加固预应力混凝土吊车梁的设计方法。

收稿日期:2007-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(50378080);陕西省教育厅专项科研计划项目(06JK263)

作者简介:钟 龙(1960-),男,陕西户县人,高级工程师,E-mail:zhonglong07@263.net。

1 工程概况

某轧钢厂酸洗车间结构为单层单跨钢筋混凝土排架结构。吊车梁采用鱼腹式 T 形截面后张法预应力混凝土吊车梁,跨度为 9 m,原设计混凝土为 C400,上、下翼缘预应力钢筋分别采用冷拉 45Mn₂SiV 钢、25MnSi 钢,非预应力钢筋采用 16MnSi 钢,箍筋采用 A₃ 钢。经现场检测,吊车梁的截面和配筋与原设计基本相符。吊车梁平面布置如图 1 所示。

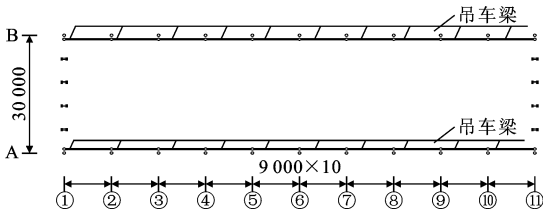


图 1 吊车梁平面布置(单位:mm)

Fig. 1 Plane Layout of Crane Girder(Unit:mm)

该厂因卷重改造要求,拟将厂房现有 2 台 20 t/5 t 桥式吊车更换为 25 t/5 t 桥式吊车,即对厂房结构

进行可靠性检测鉴定。鉴定结果表明,该厂房现有预应力混凝土吊车梁存在以下问题。

(1)A、B 列①~⑩轴线范围内吊车梁的表面(厚度为 8~15 mm)严重腐蚀,局部酥碎剥落,钢筋外露并严重锈蚀,主筋截面削弱 1/8~1/6,箍筋截面面积剩余 1/2~2/3。

(2)吊车梁的混凝土强度(与原设计值比较)均有不同程度的降低:A 列①~⑩轴线混凝土强度降低 15.79%;B 列①~④、⑧~⑩轴线混凝土强度降低 13.16%;B 列④~⑧轴线混凝土强度降低 26.32%。

(3)吊车梁的混凝土碳化现象较严重,碳化深度一般为 10 mm,局部最大碳化深度为 25 mm(已经达到或超过主筋位置)。

(4)吊车梁的正截面抗弯、斜截面抗剪、正截面抗裂及疲劳强度的抗力与荷载效应之比均不满足或严重不满足工业厂房可靠性鉴定标准(GBJ 144—90),其计算结果见表 1^[2]。按照现行有关规程对承载力进行评定,其可靠等级为 d 级^[3]。

表 1 预应力混凝土吊车梁承载能力验算结果

Tab. 1 Bearing Capacity Checking Results of Prestressed Concrete Crane Girder

构件类别及位置	正截面抗弯	斜截面抗弯		正截面抗裂		疲劳强度验算		
		支座截面	离支座 1 400 mm 截面	短期荷载效应	长期荷载效应	混凝土受拉区	混凝土受压区	受拉区底层钢筋
A 列①~⑩轴线吊车梁	0.90	0.50	0.48	严重不满足	基本满足	0.94	1.04	基本满足
B 列①~④、⑧~⑩轴线吊车梁	0.90	0.50	0.48	严重不满足	基本满足	0.94	1.04	基本满足
B 列④~⑧轴线吊车梁	0.81	0.45	0.43	严重不满足	基本满足	0.85	0.93	不满足

注:表中数值为 $R/(\gamma_0 S)$, R 、 S 、 γ_0 分别为吊车梁的抗力、荷载效应和结构系数。

2 加固方案选择

针对上述吊车梁存在的问题及现场实际工作条件与环境,对其初步提出 3 种可行的处理方案:①更换吊车梁;②采用外包钢法对吊车梁进行补强补缺加固;③采用黏贴碳纤维布法对吊车梁进行正截面抗弯、斜截面抗剪、正截面抗裂和抗疲劳补强与补缺加固。

从受力性能、经济性和适用性等方面对上述 3 种方案进行综合分析,结果表明:第 1 种方案费用高、工期长,且需要停产施工;第 2 种方案虽然对吊车梁有良好的补强补缺效果,且费用不高,但考虑到该厂房为酸洗车间,大量的腐蚀性气体会对钢材产生腐蚀,因此第 1、2 种方案均不宜采用。由于碳纤维布具有较好的耐腐蚀性和耐久性,且便于施工,故选择第 3 种方案对吊车梁进行补强补缺加固处理。

3 抗弯设计计算

3.1 基本假定

用碳纤维布加固鱼腹式 T 形截面预应力混凝土吊车梁的抗弯承载力计算应符合下述假定^[4-10]。

- (1)加固后的梁截面变形仍符合平截面假定。
- (2)混凝土的应力-应变关系为
$$\sigma_c = \begin{cases} 1\,000\epsilon_c(1 - 250\epsilon_c)f_{cm} & 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_0 \\ f_{cm} & \epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϵ_c 为混凝土的应变; $\epsilon_0=0.002$; $\epsilon_u=0.003\,3$ 。

- (3)钢筋的应力-应变关系为
$$\sigma_s = \begin{cases} \epsilon_s E_s & 0 \leq \epsilon_s < \epsilon_{sy} \\ f_y & \epsilon_{sy} \leq \epsilon_s < \epsilon_{su} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ϵ_s 为钢筋的应变; ϵ_{sy} 为钢筋屈服时的应变, $\epsilon_{sy}=f_y/E_s$; $\epsilon_{su}=0.01$ 。

- (4)碳纤维布的应力-应变关系为

$$\sigma_{cf} = \begin{cases} \epsilon_{cf} E_{cf} & 0 \leq \epsilon_{cf} < \epsilon_{cfu} \\ \sigma_{cfu} & \epsilon_{cf} = \epsilon_{cfu} \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_{cf} 、 ϵ_{cf} 、 E_{cf} 分别为碳纤维布的应力、应变、弹性模量; σ_{cfu} 、 ϵ_{cfu} 分别为碳纤维布的极限抗拉强度、极限拉应变, $\epsilon_{cfu} = \sigma_{cfu} / E_{cf}$ 。

(5) 预应力钢筋的应力-应变关系为

$$\sigma_p = \begin{cases} \epsilon_s E_s & 0 \leq \epsilon_p < \epsilon_{py} \\ f_{py} & \epsilon_{py} \leq \epsilon_p \leq \epsilon_{pu} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ϵ_{py} 为预应力钢筋屈服时的应变; 其余变量含义见文献[11]。

(6) 不考虑混凝土的抗拉作用。

3.2 计算截面的应力图形

对于翼缘位于受压区的 T 形截面受弯吊车梁, 根据截面中性轴在截面中的位置可分为 2 类情况: 第 1 类 T 形截面如图 2(a)、(b) 所示, 中性轴位于翼缘内部; 第 2 类 T 形截面如图 2(c) 所示, 中性轴位于腹板内部。

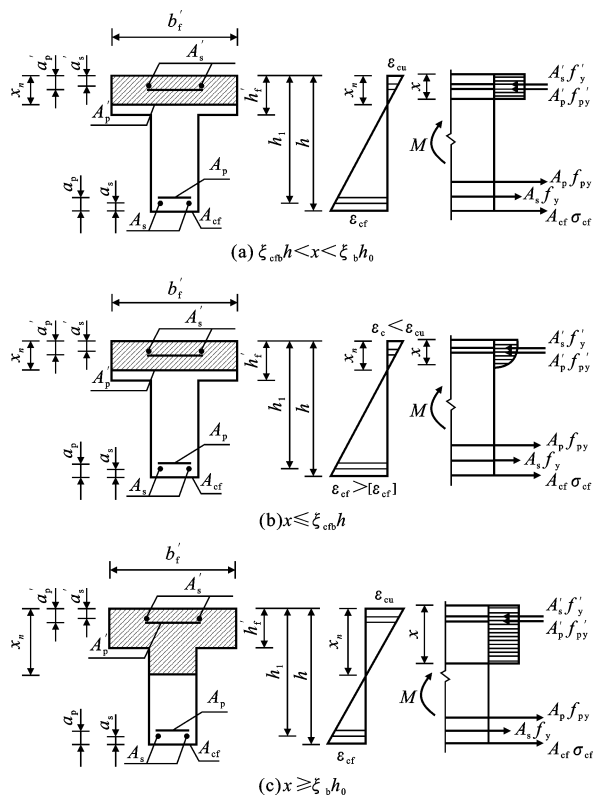


图 2 T 形截面受弯构件截面应力和应变分布

Fig. 2 Stress and Strain Distribution of T-section Bending Member

图 2 中: A_s 、 A'_s 、 A_p 、 A'_p 、 A_{cf} 分别为受拉钢筋、受压钢筋、受拉区预应力钢筋、受压区预应力钢筋、碳纤维布的截面面积; a_p 为受拉区预应力钢筋到受拉区边缘的距离; a'_p 为受压区预应力钢筋到受压区边

缘的距离。

3.3 第 1 类 T 形截面

承载力计算时的判断条件为

$$M \leq f_c b'_f h'_f (h_0 - \frac{h'_f}{2}) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - f_{py} A_p (a_p - a_s) - \sigma'_{pe} A'_p (h_0 - a'_p) + E_{cf} \epsilon_{cf} A_{cf} (h - h_0) \quad (5)$$

式中: M 为包含初始弯矩的总弯矩设计值。

承载力校核时的判断条件为

$$f_y A_s + f_{py} A_p + E_{cf} \epsilon_{cf} A_{cf} \leq f_c b'_f h'_f + f'_y A'_s - \sigma'_{pe} A'_p \quad (6)$$

式中: σ'_{pe} 为受压区纵向预应力钢筋的应力。

当混凝土受压区高度满足 $\xi_{cfb} h < x < \xi_b h_0$ 时, 其承载力计算公式为

$$M \leq f_c b'_f x (h_0 - \frac{x}{2}) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - f_{py} A_p (a_p - a_s) - \sigma'_{pe} A'_p (h_0 - a'_p) + E_{cf} \epsilon_{cf} A_{cf} (h - h_0) \quad (7)$$

当混凝土受压区高度 $x \leq \xi_{cfb} h$ 时, 其承载力计算公式为

$$M \leq f_y A_s (h_0 - 0.5 \xi_{cfb} h) - \sigma'_{pe} A'_p (0.5 \xi_{cfb} h - a'_p) + f_{py} A_p (h - 0.5 \xi_{cfb} h - a_p) + f'_y A'_s (0.5 \xi_{cfb} h - a'_s) + E_{cf} [\epsilon_{cf}] \cdot A_{cf} h (1 - 0.5 \xi_{cfb}) \quad (8)$$

式中: ξ_{cfb} 为碳纤维片材达到其容许拉应变与混凝土压坏同时发生时的界限受压区高度, 取 $\xi_{cfb} = \frac{0.8 \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + [\epsilon_{cf}] - \epsilon_{p0}}$; $[\epsilon_{cf}]$ 为碳纤维片材的容许拉应变, 按《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》(CECS146:2003) 计算确定。

当混凝土受压区高度 $x \geq \xi_b h_0$ 时, 其承载力计算公式为

$$M \leq f_y A_s (h_0 - a'_s) + f_{py} A_p (h - a'_s - a_p) + E_{cf} [\epsilon_{cf}] A_{cf} (h - a'_s) \quad (9)$$

其中, x 和 ϵ_{cf} 按式(10)计算

$$\left. \begin{aligned} f_c b x &= f_y A_s - f'_y A'_s + f_{py} A_p + \sigma'_{pe} A'_p + E_{cf} \epsilon_{cf} A_{cf} \\ \frac{x}{h} &= \frac{0.8 \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{cf} - \epsilon_{p0}} \quad x \leq \xi_b h_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: ϵ_{p0} 为加固前受拉区混凝土的应变(压为正, 拉为负), 按《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2006) 计算。

3.4 第 2 类 T 形截面

当 T 形截面不满足式(5)或式(6)时, 为第 2 类 T 形截面。此时截面中性轴位于腹板内, 其承载力

按式(11)计算

$$M \leq f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f_c (b'_f - b) (h_0 - \frac{h'_f}{2}) h'_f - \sigma_{pe} A'_p (h_0 - a'_p) + f_y A'_s (h_0 - a'_s) + f_{py} A_p (h_0 - a_s) + E_{cf} \epsilon_{cf} A_{cf} (h - h_0) \quad (11)$$

其中,受压区高度 x 按式(12)计算

$$f_c [bx + (b'_f - b) h'_f] = f_y A'_s - f_y A'_s + f_{py} A_p + \sigma_{pe} A'_p + E_{cf} \epsilon_{cf} A_{cf} \quad (12)$$

4 抗剪设计

预应力混凝土梁加固后的抗剪承载力可取原预应力混凝土梁的抗剪承载力与加固所用横向碳纤维布引起的抗剪承载力的增量之和,即

$$V_b \leq V_{pc} + V_{cf} \quad (13)$$

式中: V_b 为梁的剪力设计值; V_{pc} 为未加固的预应力混凝土梁的抗剪承载力,按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)计算确定; V_{cf} 为横向碳纤维片材承担的承载力,按《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》(CECS146:2003)计算确定。

5 加固设计构造要求

(1)当碳纤维布沿其纤维方向绕构件转角黏贴时,构件转角处外表面的曲率半径应不小于20 mm。

(2)碳纤维布沿其纤维受力方向的搭接长度不应小于100 mm,但采用多条或多层碳纤维布加固时,各条或各层碳纤维布之间的搭接位置要相互错开。

(3)受压区高度 x 不应大于 $0.8\xi_b h_0$,其中界限相对受压区高度 ξ_b 按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)计算确定。

(4)加固后构件受弯承载力的提高不宜超过40%。

(5)对构件实施加固前要进行卸荷,以保证加固效果。

6 加固方案

基于吊车梁承载能力计算与可靠性分析结果,提出了用碳纤维布对预应力混凝土吊车梁进行补强补缺加固,如图3、4所示。碳纤维布加固法的加固施工流程是:吊车梁表面清理、打磨、修复平整(对吊车梁表面严重腐蚀、破损、露筋处采用环氧水泥砂浆进行补缺加固)→滚涂底层胶→用整平材料进行表面找平→涂浸渍树脂→黏贴碳纤维布→表面涂浸渍树脂→外表面防护处理。

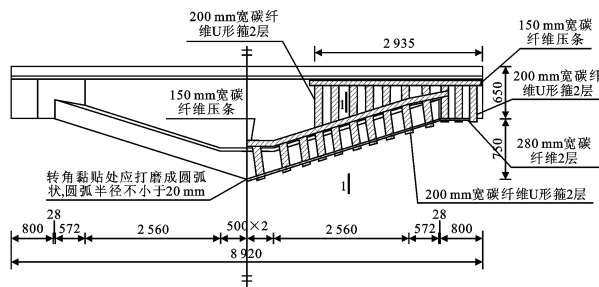


图3 预应力混凝土吊车梁的碳纤维布加固方案(单位:mm)

Fig. 3 CFRP Strengthening Scheme of Prestressed Concrete Crane Girder (Unit:mm)

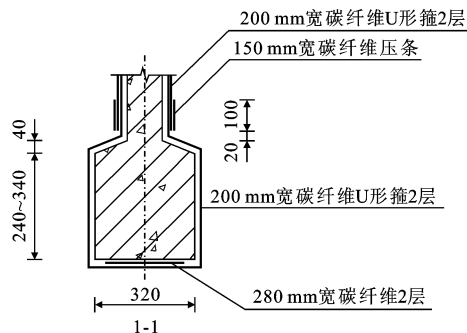


图4 吊车梁剖面(单位:mm)

Fig. 4 Cross Section of Crane Girder (Unit:mm)

加固施工流程质量控制:①表面处理。必须铲除吊车梁下表面和侧面的粉刷层、酥碎松动的混凝土及被酸雾腐蚀的部分,用高效洗涤剂刷除油污污物,对混凝土黏合面进行打磨,去除2~3 mm厚表层,直至完全露出新面层,此时用无油压缩空气吹除粉尘;对局部有混凝土脱落的部位,用环氧水泥砂浆抹平压实,保证黏结面的平整,转角黏贴处要进行导角处理并打磨成圆弧状,圆弧半径不小于20 mm。②滚涂底层胶。按产品供应商提供的工艺规定配制底层树脂;应用滚筒刷将底层树脂均匀涂抹于混凝土表面,宜在底层树脂表面指触干燥后尽快进行下一步工序。③找平处理。按产品供应商提供的工艺规定配制找平材料,并对混凝土表面凹陷部位用找平材料填补平整,且不应有棱角;转角处用找平材料修复为光滑圆弧,圆弧半径不小于20 mm,宜在找平材料表面指触干燥后尽快进行下一步工序。④黏贴碳纤维布。按设计要求的尺寸裁剪碳纤维布,碳纤维布的搭接长度不得小于100 mm,应按产品供应商提供的工艺规定配制浸渍树脂涂抹于所要黏贴的部位,并用专用的滚筒顺纤维方向多次滚压,挤出气泡,使浸渍树脂充分浸透碳纤维布,滚压时损伤碳纤维布。⑤在碳纤维布表面均匀涂抹浸渍树脂。⑥表

面防护。加固后用氯磺化聚乙烯防腐涂料对吊车梁进行防腐、防护处理,具体做法是底层漆 2 遍,每遍 $25\ \mu\text{m}$;中间漆 1 遍,厚度为 $40\ \mu\text{m}$;面层漆 3 遍,每遍 $20\ \mu\text{m}$ 。

各种胶的主剂与固化剂应严格按照比例配制,并均匀搅拌;配制好的胶剂必须严格控制使用时间;涂浸渍树脂时,在碳纤维布的端部、转角、搭接处要多涂些;每次涂胶或找平后,应使胶固化后才能进行下一步工序。

7 结 语

用碳纤维布加固预应力混凝土吊车梁不仅补强补缺效果显著,而且具有较好的耐腐蚀性和耐久性。笔者提出的用碳纤维布加固鱼腹式 T 形截面预应力混凝土吊车梁的设计方案(包括其正截面受弯和斜截面受剪补强加固的计算方法及实施加固的具体方法和措施)合理可行,已应用于诸多实际工程中,并取得了良好的效果。

参考文献:

References:

- [1] 邵扣霞,丁大钧. 中国桥梁建设新飞跃[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(2):30-40.
TAI Kou-xia, DING Da-jun. New Leaps in Construction of Bridges in China[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 30-40.
- [2] GBJ 144—90, 工业厂房可靠性鉴定标准[S].
GBJ 144—90, Standard for Inspection of Industrial Factory Building Reliability[S].
- [3] 郑山锁. 太钢(集团)公司第六轧钢厂厂房结构可靠性检测鉴定报告[R]. 西安:西安建筑科技大学,2003.
ZHENG Shan-suo. Reliability Inspection Report for No. 6 Rolling Mill Factory Building of Taiyuan Iron & Steel (Group) Company Ltd[R]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
- [4] 楼铁炯,郭乙木,王振林,等. 任意截面无粘结预应力混凝土梁的极限非线性分析[J]. 中国公路学报,2005,18(1):77-80.
LOU Tie-jiong, GUO Yi-mu, WANG Zhen-lin, et al. Nonlinear Analysis of Unbonded Prestressed Beams with Arbitrary Section at Ultimate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 77-80.
- [5] 孙晓燕,黄承逵. 外贴纤维布加固超载后钢筋混凝土

桥梁构件抗弯性能试验[J]. 中国公路学报,2006,19(4):82-87.

SUN Xiao-yan, HUANG Cheng-kui. Test on Flexural Performance of RC Bridge Member After Overload Reinforced with Externally Bonded FRP[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 82-87.

- [6] 俞茂宏, ODA Y, 盛 谦, 等. 统一强度理论的发展及其在土木水利等工程中的应用和经济意义[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 24-41.

YU Mao-hong, ODA Y, SHENG Qian, et al. Development of Unified Strength Theory and Its Applications in Civil Engineering and Its Economic Significance[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 24-41.

- [7] 徐爱敏, 陈衡治, 谢 旭. 结构极限承载力计算方法及其收敛性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 65-70.

XU Ai-min, CHEN Heng-zhi, XIE Xu. Calculation Method for Ultimate Bearing Capacity of Structure and Its Convergence[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 65-70.

- [8] 胡孔国, 陈小兵. 考虑二次受力碳纤维布加固混凝土构件正截面承载力计算[J]. 建筑结构, 2001, 31(7): 21-24.

HU Kong-guo, CHEN Xiao-bing. Calculating Method for Bending Bearing Capacity of Concrete Bending Member Strengthened with CFRP Considering the Secondary Load[J]. Building Structure, 2001, 31(7): 21-24.

- [9] 赵 彤, 谢 剑. 碳纤维布补强加固混凝土结构新技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.

ZHAO Tong, XIE Jian. A New Technique of Repairing and Strengthening Concrete Structures with Continuous Carbon Fiber Sheet[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001.

- [10] 金伟良, 朱平华. 混凝土结构耐久性的修复性等级划分[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 64-70.

JIN Wei-liang, ZHU Ping-hua. Restorability Class Partition for Durability of Concrete Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 64-70.

- [11] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures[S].