

文章编号: 1000-4750(2015)Suppl-0215-06

CFRP 加固青白石梁受弯性能试验研究

武晓敏¹, 谢 剑¹, 徐福泉², 齐 文¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘 要: 对 4 个未加固石梁及 4 个碳纤维布(CFRP)加固石梁进行了受弯性能试验研究, 主要分析了未加固石梁与加固石梁在破坏形态、承载能力及变形能力方面的差异。试验结果表明: 未加固石梁为典型的脆性破坏, 加固石梁则表现出了非完全脆性破坏特征; 加固后石梁的极限承载力有所提高, 变形能力有所改善。对加固石梁的受弯承载力进行了理论分析, 提出了极限受弯承载力的简化计算公式; 达到极限荷载后, 由于 CFRP 的作用, 石梁仍有一定的承载能力, 即承载力裕量, 可避免石梁发生突然塌落的严重后果。

关键词: 碳纤维布; 青白石梁; 加固; 非完全脆性破坏; 受弯承载力; 承载力裕量

中图分类号: TU363 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.04.S057

EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURAL BEHAVIORS OF STONE BEAMS STRENGTHENED BY CFRP

WU Xiao-min¹, XIE Jian¹, XU Fu-quan², QI Wen¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The experimental study on flexural behaviors of eight full-scale stone beams (including four beams unstrengthened and four beams strengthened by CFRP) was carried out. The failure modes, flexural capacity and deformability were analyzed. The experimental results show that the unstrengthened stone beams exhibit a typical brittle failure mode while the strengthened stone beams demonstrate a partially brittle failure mode when they are damaged. Furthermore, the flexural capacity and deformation capacity of the strengthened stone beams are improved to some extent. The theoretical analysis of the flexural capacity of the strengthened stone beams was conducted, and a simplified calculation formula of the ultimate flexural capacity was proposed. After reaching the ultimate load, the strengthened stone beams still had certain flexural capacity, namely flexural capacity margin, because of the action of CFRP; this characteristic could avoid the serious consequences of sudden collapse of stone beams.

Key words: CFRP; stone beams; strengthening; non-fully brittle failure; flexural capacity; flexural capacity margin

CFRP 加固技术在混凝土结构中的研究与应用已较为成熟, 但在石结构尤其是古建筑石结构中的研究相对较少。已有研究的试件尺寸偏小, 而实际古建筑石构件的尺寸较大, 尺寸效应可能对加固效果产生影响。此外, 已有试验的加固对象多为花岗

岩, 也有部分砂岩, 针对北京市古建筑中常见的青白石的相关研究还未见报道^[1-8]。本文将针对 CFRP 加固大型青白石梁的受弯性能进行试验研究, 旨在为实际加固修复工程的设计提供理论依据。

收稿日期: 2014-05-12; 修改日期: 2014-12-16

基金项目: 北京市科技计划项目: 北京市古建筑石质结构安全状况无损检测技术研究与应用项目(Z121100000312002)

通讯作者: 谢 剑(1974—), 男, 河北人, 副教授, 博士, 主要从事结构加固研究(E-mail: xiejian@tju.edu.cn)。

作者简介: 武晓敏(1988—), 女, 河北人, 硕士生, 主要从事结构加固研究(E-mail: wuxiaomin0314@163.com);

徐福泉(1973—), 男, 辽宁人, 研究员, 博士, 主要从事结构加固改造研究(E-mail: xufuquan@cabrttech.com);

齐 文(1989—), 女, 河北人, 硕士生, 主要从事结构加固研究(E-mail: qwhappyangle@163.com)。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本次试验选用北京市房山区大石窝开采的青白石,试件切割平整,表明光滑,无明显初始缺陷。试件尺寸主要参考“明十三陵石牌坊”的实际尺寸。碳纤维布生产厂家为英国 SIGMATEX 有限公司,配套粘结材料生产厂家为天地金草田(北京)科技有

限公司,材料性能见表 1。试件基本参数及加固措施见表 2。

表 1 碳纤维布材料性能
Table 1 Material properties of CFRP

材料	规格	弹性模量/	抗拉强度/	抗压强度/	厚度/	伸长率/
		($\times 10^5$ MPa)	MPa	MPa	mm	(%)
碳纤维布	300g/m ²	2.420	3897	—	0.167	1.71
粘结材料	JCT-6	0.026	51.1	86.1	—	1.86

表 2 试件基本参数及加固措施
Table 2 Parameters and strengthening measures of specimens

试件编号	试件尺寸/mm			梁底碳纤维布		U 型箍		
	净跨 l_0	宽度 b	高度 h	层数	宽度/mm	数量	间距/mm	宽度/mm
Q-YX-L1	2700	360	400	—	—	—	—	—
Q-YX-L2	2700	360	400	—	—	—	—	—
Q-YX-L3	2700	360	400	—	—	—	—	—
Q-YX-L1-NJ	2700	360	400	—	—	—	—	—
Q-YX-L2-NJCF	2700	360	400	1	300	—	—	—
Q-CF-L1	2700	360	400	1	300	—	—	—
Q-CF-L2	2700	360	400	1	300	12	200	100
Q-CF-L3	2700	360	400	2	300	12	200	100

注: Q-YX-L1-NJ 为 Q-YX-L1 断裂后经结构胶粘结的试件, Q-YX-L2-NJCF 为 Q-YX-L2 断裂后经结构胶粘结并在梁底粘贴 CFRP 的试件。

1.2 加载方案及测点布置^[9]

试件均为两端简支,通过分配梁进行三分点加载。试验采用分级加载制度,每级持荷 2 min;加载初期,每级荷载 10 kN,接近临界荷载时,适当减小加载极差。试验测量内容主要包括石梁的承载能力、挠度、纯弯段的石材应变及沿梁全长的 CFRP 应变,试件的测点布置如图 1 所示。

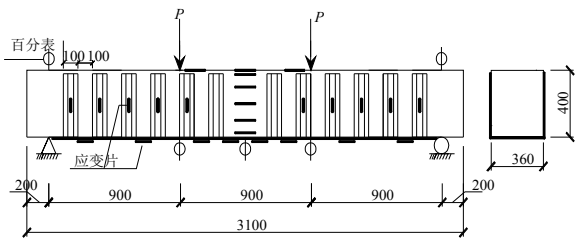


图 1 CFRP 加固石梁测点布置示意图
Fig.1 Measuring point arrangement of stone beams strengthened by CFRP

2 试验现象及结果

2.1 试验现象

断裂粘结试件: 粘结位置均未发生破坏,试件 Q-YX-L1-NJ 的破坏现象同其他未加固试件,试件 Q-YX-L2-NJCF 的破坏现象同其他加固试件。

未加固石梁: 均为典型的脆性破坏。破坏前,无任何征兆,挠度较小;达到开裂荷载时,裂缝直

接贯通全截面,石梁断裂,开裂荷载即为极限承载力;断面位于纯弯段内,较为平整,基本竖直。

CFRP 加固石梁: 加载初期与未加固梁基本一致,开裂前的挠度较小;达到开裂荷载时,裂缝未立即贯通;继续加载,裂缝不断延伸扩展,最终贯通全截面时,由于 CFRP 的作用,石梁仍有一定的承载力裕量,可避免发生突然塌落的严重后果,为非完全脆性破坏。由于 CFRP 用量及石材自身材质的不同,加固石梁破坏时,表现略有不同,主要有以下两种破坏形式。

1) 试件 Q-CF-L1、Q-CF-L2 及 Q-YX-L2-NJCF 质地较为致密,开裂瞬间,裂缝基本贯通全截面,荷载显著降低,挠度急剧增加,CFRP 在裂缝附近局部剥离,应变迅速增大,其他位置处无明显滑移剥离,开裂荷载即为极限承载力;继续加载,荷载仍有所上升,CFRP 应变有所增加;最终断裂时,挠度较大,石梁一端 CFRP 剥离。

2) 试件 Q-CF-L3 质地较为疏松,开裂瞬间,裂缝较小,荷载未显著降低;继续加载,裂缝逐渐延伸扩展;达到极限荷载时,荷载显著降低,挠度急剧增加,极限荷载大于开裂荷载;此后继续加载,荷载仍有所上升,CFRP 应变有所增加;最终断裂时,挠度较大,石梁一端 CFRP 剥离,变形性能

较 1)略好。

2.2 试验结果

各试件的试验结果见表 3。可以看出：CFRP 加固石梁极限承载力较未加固石梁有一定提高，主要受 CFRP 用量及石材自身材质的影响；质地较为疏松的试件贴有 2 层 CFRP，但其开裂荷载却低于较为致密贴有 1 层 CFRP 的试件，说明石材自身材

质对承载力的影响很大；质地较为疏松的试件达到开裂荷载时的 CFRP 应变约为 $2000\ \mu\epsilon$ ，而较为致密的试件达到开裂荷载时的 CFRP 应变仅为 $1000\ \mu\epsilon$ 左右，说明 CFRP 加固质地疏松试件的效果更好；石梁开裂后，有 U 型箍的试件承载力裕量大于无 U 型箍的试件，说明 U 型箍可在一定程度上限制梁底 CFRP 的滑移剥离，提高石梁承载力裕量。

表 3 试验结果

Table 3 The experimental results

试件编号	开裂荷载状态				极限荷载状态				最大承载力裕量状态		
	荷载/ kN	位移/ mm	石材 压应变/ $\mu\epsilon$	石材(CFRP) 拉应变/ $\mu\epsilon$	荷载/ kN	位移/ mm	石材 压应变/ $\mu\epsilon$	石材(CFRP) 拉应变/ $\mu\epsilon$	荷载/ kN	位移/ mm	石材(CFRP) 拉应变/ $\mu\epsilon$
Q-YX-L1	55.0	0.92	162	299	55.0	0.92	162	299	—	—	—
Q-YX-L2	106.0	2.24	343	851	106.0	2.24	343	851	—	—	—
Q-YX-L3	70.0	0.97	164	275	70.0	0.97	164	275	—	—	—
Q-YX-L1-NJ	65.0	1.24	—	—	65.0	1.24	—	—	—	—	—
Q-YX-L2-NJCF	110.0	2.29	358	717	110.0	2.29	358	717	65.0	8.29	6045
Q-CF-L1	119.5	2.66	480	935	119.5	2.66	480	935	48.0	11.42	5881
Q-CF-L2	174.0	2.74	493	1257	174.0	2.74	493	1257	69.0	11.66	6974
Q-CF-L3	100.0	3.72	355	1792	124.0	7.60	504	3588	24.0	16.21	2187

3 理论分析

3.1 荷载-应变曲线

图 2 给出了未加固石梁及加固石梁开裂前纯弯段梁顶及梁底石材的荷载-应变曲线。可以看出：加固与未加固石梁荷载-压应变曲线基本为一条直线，且即将开裂时最大压应变还很小，说明开裂前，石材的受压区基本处于弹性阶段；荷载-拉应变曲线在荷载较小时近似为一条直线，随着荷载的增大，曲线开始表现出一定的非线性，加固石梁非线性较未加固石梁更明显，说明开裂前，石材的受拉区已出现一定的塑性发展，且加固后塑性发展更充分；加固后，石材底部拉应变较未加固试件有明显提高，说明 CFRP 可抑制不可见微裂缝的发展，提高石材的极限拉应变，进而提高石梁受弯承载力。

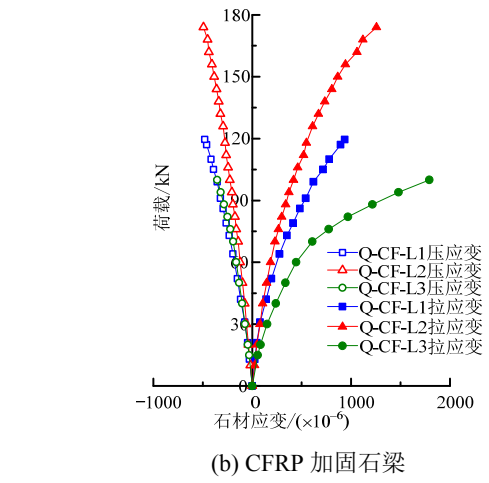
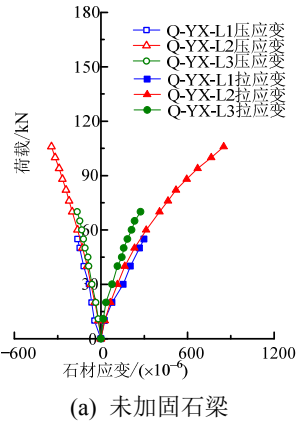


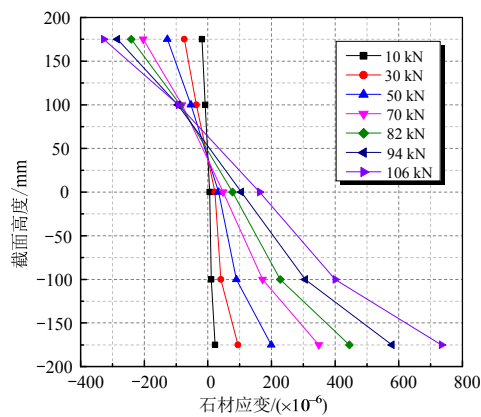
图 2 开裂前纯弯段石材荷载-应变曲线

Fig.2 Load-strain diagrams before cracking

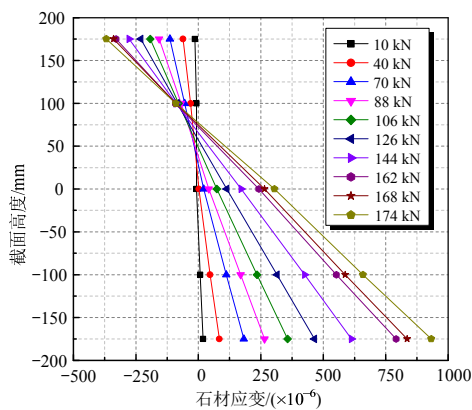
3.2 平截面假定

典型未加固石梁及加固石梁在不同荷载作用下跨中截面应变沿高度方向的变化如图 3 所示。可以看出：加固前后，石梁跨中截面均符合平截面假定；荷载较小时，加固与未加固石梁中性轴基本位于截面形心处，随着荷载的增大，受拉区进入塑性，中性轴逐渐上移，受压区高度逐渐减小；达到开裂荷载时，未加固石梁受压区高度约为截面高度的 0.38 倍，质地较为疏松的加固试件 Q-CF-L3 受压区高度约为截面高度的 0.18 倍，质地较为致密的其余加固试件的受压区高度约为截面高度的 0.31 倍。





(a) Q-YX-L2



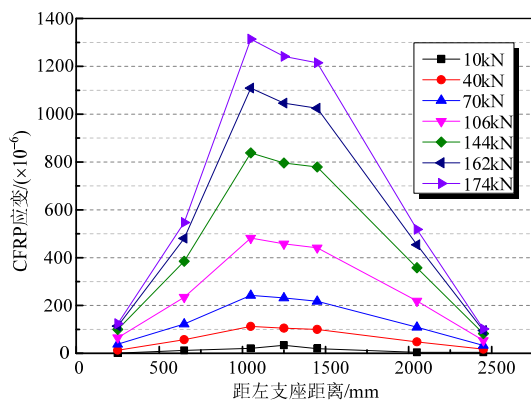
(b) Q-CF-L2

图3 石梁开裂前跨中截面应变分布

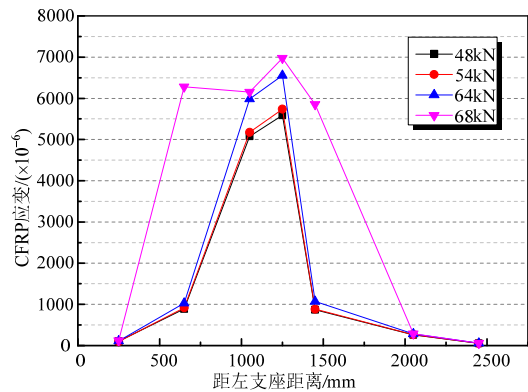
Fig.3 Distribution of strains along the central vertical section of the beams before cracking

3.3 梁底 CFRP 应变分布

加固石梁在不同荷载作用下沿试件全长的 CFRP 应变分布如图 4 所示。可以看出：开裂前，跨中 CFRP 应变分布较均匀，且随着荷载的增大而增加；加载点两侧 CFRP 应变基本呈线性分布，与加载点两侧弯矩变化规律基本一致，说明开裂前 CFRP 与石材协同工作；开裂瞬间，荷载突然降低，原本由石材承担的拉力突然由梁底 CFRP 承担，



(a) 开裂前



(b) 开裂后

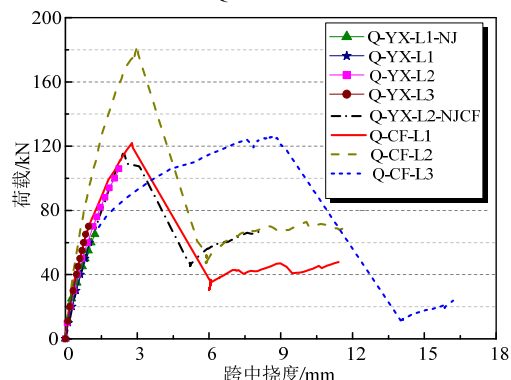
图4 Q-CF-L2 底面 CFRP 应变分布

Fig.4 CFRP strain distribution of Q-CF-L2

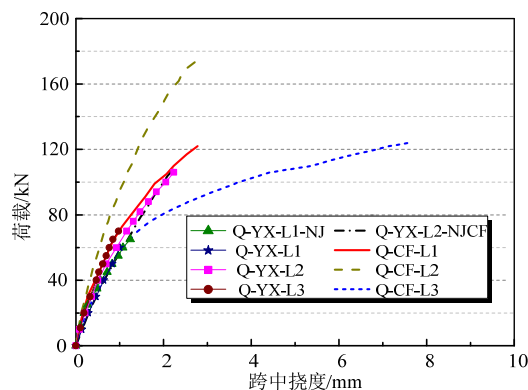
导致裂缝处 CFRP 应变突然迅速增大，远离裂缝位置的 CFRP 应变由于荷载的降低略有降低；接近最大承载力裕量时，试件端部 CFRP 应变增大，说明 CFRP 已经发生剥离。

3.4 荷载-挠度曲线

图 5 为加固石梁及未加固石梁的荷载-跨中挠度曲线。可以看出：荷载较小时，各试件的荷载-跨中挠度曲线均近似为一条直线，加固与未加固石梁刚度相差不大；试件 Q-CF-L3 自身材质较为疏松，



(a) 整个加载过程



(b) 开裂前

图5 荷载-跨中挠度曲线

Fig.5 Load-midspan deflection diagrams

荷载-跨中挠度曲线出现明显的转折, 变形性能略好; 各加固试件达到极限荷载时, 承载力显著降低, 挠度急剧增加, 但由于 CFRP 的作用, 试件仍能维持一定的承载力裕量, 继续加载, 挠度随荷载的增加仍有一定增大。

4 受弯承载力简化计算

4.1 基本假定

由试验可得: CFRP 加固石梁开裂前, 截面应变基本呈线性变化, 随着荷载的增大, 中性轴逐渐上移; 达到开裂荷载时, 受拉区石材已有一定的塑性发展, 受压区石材仍基本保持弹性。故基本假定如下:

1) 在荷载作用下, CFRP 加固石梁纯弯段截面变形符合“平截面假定”;

2) 为便于统一计算, 加固石梁开裂前, 受压区高度取为 0.38 倍梁截面高度(Q-CF-L3 由于自身材质较为疏松, 故其受压区高度取为 0.18 倍梁截面高度);

3) 受压区石材应力分布图形近似取为三角形, 受拉区石材应力分布图形近似取为梯形^[10]。

4.2 简化计算公式

CFRP 加固试件开裂后, 大部分试件承载力显著降低, 开裂荷载即为极限承载力, 个别试件极限承载力大于开裂荷载, 但程度有限, 偏于安全考虑, 统一取试件的极限受弯承载力为其开裂弯矩。

加固后, 石梁的极限受弯承载力为石材自身承受弯矩及 CFRP 承受弯矩两部分之和, 计算简图如图 6 所示, 简化计算公式见下式:

$$M_u = TH + k_m \varepsilon_f E_f A_f z \quad (1)$$

式中: T 为石材受拉区的合拉力; H 为石材合拉力与合压力之间的距离; ε_f 、 E_f 、 A_f 分别为 CFRP 应变、弹性模量及截面面积; k_m 为 CFRP 厚度折减系数^[11],

单层时不折减, 取 $k_m=1$, 多层时, $k_m=1.16 - \frac{n_f E_f t_f}{30800} \leq 0.9$, 其中, n_f 和 t_f 分别为 CFRP 层数及单层

厚度; z 为 CFRP 到受压区合力点的距离, 此处 $z = h - \frac{1}{3} \times 0.38h$ (Q-CF-L1、Q-CF-L2 及 Q-YX-L2-

NJCF), $z = h - \frac{1}{3} \times 0.18h$ (Q-CF-L3)。

由于试件开裂时, CFRP 应变较小, 对试件极限受弯承载力所起的作用较小, 忽略 CFRP 对石材自身受弯承载力的影响, 则石材自身承受的弯矩可按式计算^[12]。

$$TH = R_b W \quad (2)$$

式中: R_b 为石材抗折强度; W 为截面受拉边缘的弹性抵抗矩, 对于矩形截面 $W = \frac{1}{6} b h^2$ 。

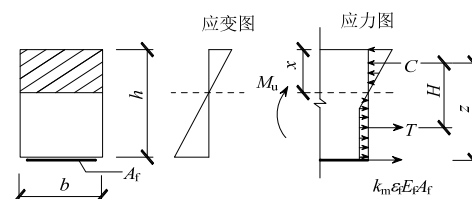


图 6 CFRP 加固石梁正截面受弯承载力计算简图

Fig.6 The normal section flexural capacity calculation

由于石材的离散性较大, 抗折强度较难统一, 故本次试验通过实测的极限荷载, 根据式(1)、式(2)对加固及未加固石梁的抗折强度进行了统计计算, 计算结果见表 4。

由表 4 可得出石材的最小抗折强度为 3.03 MPa; 由试验结果, 可偏安全地将 CFRP 应变取为 $700 \mu\varepsilon$ 。因此, 实际加固设计时, 可将 $R_b=3.03$ MPa, $\varepsilon_f=700 \mu\varepsilon$ 代入式(3)进行极限受弯承载力计算。

$$M_u = R_b W + k_m \varepsilon_f E_f A_f z \quad (3)$$

表 4 石梁抗折强度计算结果

Table 4 The calculation results of flexural strength

试件编号	净跨/m	极限荷载/kN	自重及加载设备弯矩/(kN·m)	极限总弯矩/(kN·m)	CFRP 应变/ $\mu\varepsilon$	CFRP 提供弯矩/(kN·m)	抗折强度推算值/MPa
Q-YX-L1	2.7	55.0	4.34	29.09	—	—	3.03
Q-YX-L2	2.7	106.0	4.34	52.04	—	—	5.42
Q-YX-L3	2.7	70.0	4.34	35.84	—	—	3.73
Q-YX-L1-NJ	2.7	65.0	4.34	33.59	—	—	3.50
Q-YX-L2-NJCF	2.7	110.0	4.34	53.84	717	3.03	5.29
Q-CF-L1	2.7	119.5	4.34	58.11	935	3.96	5.64
Q-CF-L2	2.7	174.0	4.34	82.64	1257	5.32	8.05
Q-CF-L3	2.7	100.0	4.34	49.34	1792	14.75	3.60

5 结论

通过对各 CFRP 加固石梁受弯性能试验现象、试验结果及受弯承载力的综合分析,可得出以下结论:

1) CFRP 加固石梁极限承载力较未加固石梁有一定提高,主要受 CFRP 用量及石材自身材质的影响。

2) CFRP 加固石梁开裂时不同于未加固石梁,未加固石梁裂缝一出现则完全贯通,石梁彻底断裂,加固石梁裂缝出现时未贯通全截面,且裂缝贯通后试件仍有一定承载力裕量。

3) 梁底 CFRP 可抑制不可见微裂缝的发展,提高石梁的极限拉应变。

4) CFRP 加固石梁开裂前,CFRP 与石材协同工作,符合平截面假定,开裂时中性轴未在截面形心处。

5) 提出了 CFRP 加固石梁开裂弯矩的简化计算公式,对实际加固修复工程具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 田鹏刚, 陈平, 赵冬, 等. 乌杨汉阙加固与修复工程[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(4): 492—495.
Tian Penggang, Chen Ping, Zhao Dong, et al. Strengthening and conservation of the Wuyang watchtower of the Han dynasty [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2005, 37(4): 492—495. (in Chinese)
- [2] 毛筱霏, 赵冬, 陈平, 等. CFRP 加固石质文物抗弯性能研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(7): 113—115.
Mao Xiaofei, Zhao Dong, Chen Ping, et al. Bend-resisting behaviors of lithoid cultural relic reinforced with CFRP [J]. Industrial Construction, 2008, 38(7): 113—115. (in Chinese)
- [3] 曹书文, 赵冬, 陈平. CFRP 加固石梁的试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(5): 53—55.
Cao Shuwen, Zhao Dong, Chen Ping. Test research on stony beams strengthened by CFRP [J]. Building Structure, 2010, 40(5): 53—55. (in Chinese)
- [4] 郭子雄, 王兰, 柴振岭, 等. 钢筋网改性砂浆加固石楼板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 69—74.
Guo Zixiong, Wang Lan, Chai Zhenling, et al. Experimental study on flexural behavior of stone slabs strengthened with ferrocement mortar [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 69—74. (in Chinese)
- [5] 刘阳, 郭子雄, 刘宝成, 等. 嵌埋 CFRP 筋组合石梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 75—81.
Liu Yang, Guo Zixiong, Liu Baocheng, et al. Experimental study on flexural behavior of NSM CFRP-stone composite beams [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 75—81. (in Chinese)
- [6] 武晓敏, 徐福泉, 谢剑. 石梁加固技术[J]. 施工技术, 2014, 43(10): 66—68, 84.
Wu Xiaomin, Xu Fuquan, Xie Jian. Strengthening technology of stone beams [J]. Construction Technology, 2014, 43(10): 66—68, 84. (in Chinese)
- [7] Exadaktylos G E, Vardoulakis I, Kourkoulis S K. Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams-II. Characterization of Dionysos marble [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38: 4119—4145.
- [8] Kourkoulis S K, Ganniari-Papageorgiou E, Mentzini M. Dionysos marble beams under bending: A contribution towards understanding the fracture of the Parthenon architraves [J]. Engineering Geology, 2010, 115: 246—256.
- [9] GB/T 50152-2012, 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB/T 50152-2012, Standard for test method of concrete structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [10] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50010-2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [11] GB 50367-2013, 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
GB 50367-2013, Design code for strengthening concrete structure [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [12] JTG E41-2005, 公路工程岩石试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
JTG E41-2005, Test methods of rock for highway engineering [S]. Beijing: China Communication Press, 2005. (in Chinese)