

基于数字图像技术的结构裂缝参数分析

朱耀耀¹, 徐金明¹, 鲁辰达²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘 要: 基于数字图像处理技术, 提取并分析了含结构裂缝照片中与裂缝分布有关的数字特征参数。首先考虑拍摄环境条件(如光线强度等), 通过对灰度图像设定适当阈值来区分图像中的裂缝与图像背景, 获得了相应二值图像; 然后结合形态学膨胀与腐蚀技术, 消除二值图像中的噪点, 使用边缘检测技术提取裂缝的边缘图像; 进而得到裂缝的面积、长度、平均宽度、宽度最大值、宽度最小值以及记盒维数等数字特征参数。这一方法为已有建筑物结构裂缝的确认与分析提供了一条新的途径。

关键词: 图像处理; 裂缝; 分形维数; 多元线性回归

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A 文章编号: 1002-3550(2008)07-0022-04

Analysis of parameters for structural cracks using digital image technique

ZHU Yao-yao¹, XU Jin-ming¹, LU Chen-da²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the technique of digital image processing, the crack digital parameters were obtained from the images with structural cracks. First, considering the requirements(such as light intensity) in taking images, an appropriate threshold was determined to distinguish between cracks and the background in a gray-scale image. Then, an edge-detection method and morphological techniques of dilation and erosion were used respectively to eliminate noise in the corresponding binary images and to obtain crack boundaries. Finally, the detail parameters (such as the area, length, average width, maximum width and minimum width of cracks) , were thereafter investigated. The development presented may provide a new technique for the determination and analysis of structural cracks.

Key words: image processing; crack; fractal dimension; multiple linear regression

0 引言

混凝土结构和构件, 因其耐久性好、造价低廉、易于施工、维修便捷, 在工业和民用建筑中得到了广泛应用。由于混凝土材料配合比的复杂性以及建筑施工、结构设计、环境条件等方面的不利影响, 混凝土构件中常常会出现不同程度的裂缝。这些裂缝不仅对结构造成一定损伤, 影响建筑物的耐久性和正常使用, 还对结构可靠性产生潜在威胁, 已成为亟待解决的重要问题。本文根据现场拍摄得到的含有结构裂缝的照片, 使用数字图像分析技术提取裂缝参数, 这将为混凝土裂缝的研究和防治提供一条新的途径。

数字图像分析技术在模式识别、信号处理、遥感图片解译、医学图像分析等领域得到了广泛应用, 在土木工程领域中也进行了初步研究。Ammouche 等^[1-2]使用图像分割技术、阈值处理方法和边缘检测技术, 得到了混凝土中微裂缝骨架图像与微裂缝走向。Oushian 等^[3]通过数字图像分析实现了自动判别混凝土中微裂缝和微孔域。泊绍波等^[4]使用 Sobel 算子检测了沥青路面中的裂缝。耿飞与钱春香^[5-7]对图像采集、处理和分析进行了试验和理论研究并应用自行编写的处理软件计算了混凝土裂缝的表征参数。周健等^[8]基于形态学分水岭分割技术与图像平滑、

收稿日期: 2008-02-27

基金项目: 国家自然科学基金 40572162

区域标记、区域融合等方面的处理, 获得了砂土的微观结构参数。徐金明和赵晓波^[4]使用不同边缘检测技术确定了岩石中的流体包裹体分布。

本文以上海某高校一教室地面裂缝照片为例, 将彩色图像转化为灰度图像, 使用阈值处理、消除噪点、边缘检测等数字图像处理技术, 获得了裂缝的面积、长度、平均宽度、最大宽度、最小宽度、记盒维数等数字特征参数。

1 理论基础

1.1 数字图像表示

原始图像为现场拍摄得到的 RGB 格式的裂缝彩色图像 (R、G、B 分别表示红色、绿色、蓝色), 是一个 $M \times N \times 3$ 的三维数组 (M 和 N 均为整数)。为了后续处理方便, 将这一彩色图像转化为用二维数组表示的灰度图像, 相应灰度函数 $f(x, y)$ 为^[9]:

$$f(x, y) = \begin{pmatrix} f(1, 1) & f(1, 2) & \dots & f(1, n) \\ f(2, 1) & f(2, 2) & \dots & f(2, n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(m, 1) & f(m, 2) & \dots & f(m, n) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: x, y ——图像中像素点的直角坐标值;

$f(x, y)$ ——位置 (x, y) 处的灰度值; $x=1, 2, \dots, m; y=1, 2, \dots, n$ 。

一幅彩色图像转化后的灰度图像见图 1。

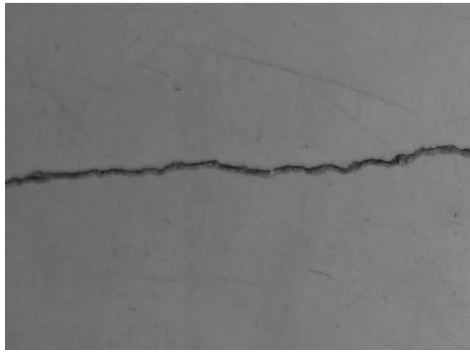


图 1 含有结构裂缝的灰度图像

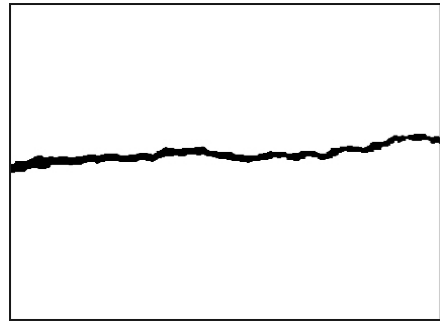


图 3 经消噪处理后的二值图像

1.2 基于阈值处理的图像分割

图像阈值处理在图像分割应用中占有重要的地位。本次研究时,根据图像中裂缝与背景的灰度值差异,把整幅图像视为包括不同灰度级的两类区域(分别为目标区域和背景区域),选取适当阈值确定各像素点属于目标区域(裂缝)还是背景区域,并据此产生相应的二值图像。二值图像对应的矩阵只含有 0 和 1 两个值,值为 0 的像素点在图像中显示为黑色(即裂缝对象),值为 1 的像素点在图像中显示为白色(即背景对象)。阈值处理函数 $g(x, y)$ 定义为式 2)。

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(x, y)$ ——二维灰度函数;

T ——阈值。

一幅含结构裂缝的灰度图像(图 1) 阈值处理后的结果图像见图 2。

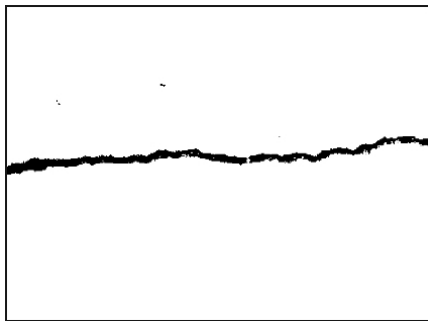


图 2 经阈值处理后的二值图像

1.3 噪声消除

使用阈值处理将灰度图像转化为二值图像时,不可避免地在裂缝区域(目标区域)出现白点,而在背景区域出现黑点。通常,这些点就是噪声(点)。本文运用形态学膨胀和腐蚀相结合的方法来消除这些噪声点。处理时依次进行开运算(先腐蚀后膨胀)和闭运算(先膨胀后腐蚀)。开运算可以去除一些孤立的小点,而闭运算则会填平一些小孔。

使用图像 B 对图像 A 进行开运算和闭运算的表达式分别见图 3) 和 4)。

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (3)$$

$$A \cdot B = A \oplus (B \ominus A) \quad (4)$$

对图 2 中的图像依次进行开闭运算的运算结果见图 3。由图 3 可以看出,二值图像(见图 2) 中的噪点被消除了。

1.4 边缘检测

图像中目标对象(裂缝)的边缘是图像的重要特征,通常对

应于灰度值出现突变的位置:沿边缘走向,像素变化比较平缓;垂直于边缘走向,像素变化较为剧烈。因此,通过分析亮度值的梯度或断点(即使分析图像矩阵的一阶或二阶导数),可以进行边缘检测。图像矩阵 $f(x, y)$ (见式 1)) 的梯度是一个向量 F ,即:

$$F = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial F / \partial x \\ \partial F / \partial y \end{bmatrix} \quad (5)$$

向量 F 的幅值是:

$$\nabla f = \text{mag}(\nabla F) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sqrt{(\partial F / \partial x)^2 + (\partial F / \partial y)^2} \quad (6)$$

函数 ∇f 可以通过式 7) 或式 8) 来近似:

$$\nabla f \approx G_x^2 + G_y^2 \quad (7)$$

$$\nabla f \approx |G_x| + |G_y| \quad (8)$$

由于这些近似值在亮度不变区为零、在亮度变化区与亮度变化程度成正比,因而可以用于裂缝边缘。二值图像(见图 3) 的边缘检测结果见图 4。由图 4 可以看出,边缘检测以后,原始图像中结构裂缝的上下边缘已经明显显示出来了。

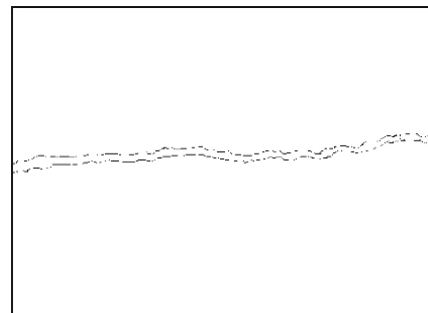


图 4 经边缘检测后的裂缝边缘图像

2 裂缝特征参数的确定

图像分割、去噪处理和边缘检测以后,可以计算出裂缝特征参数(主要包括面积、长度、平均宽度、最大宽度)和裂缝分形维数。本次研究中,图像分析过程及裂缝特征参数的确定均在 MATLAB2007a 平台下通过编制应用程序来实现。作者编制的应用程序窗口见图 5。

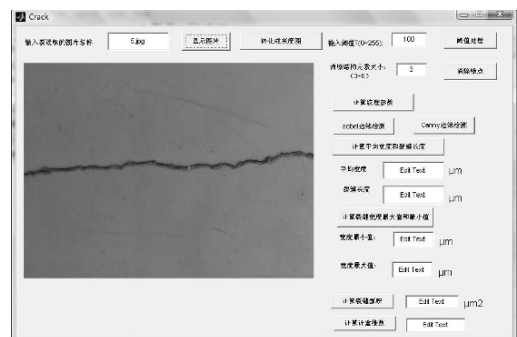


图 5 应用程序操作窗口

2.1 裂缝面积

为计算表征裂缝特征的真实参数,在拍摄裂缝图像时使用已知长度的参照线。设参照线实际长度为 c 、图像中像素点个数为 n ,则一个像素点对应的实际长度即为 c/n 。由于图像中像素点是正方形;一个像素点的实际面积可表示为 $(c/n)^2$,所以,二值图像矩阵中值为 0 的个数即为裂缝对象的总像素个数 N_1 ,而裂缝的实际面积为 $N_1 (c/n)^2$ 。

2.2 裂缝的长度、最大宽度、平均宽度

如果裂缝两条边缘的像素个数为 N_2 ,则裂缝的实际长度为 $N_2(c/2n)$ 、裂缝的平均宽度为 $2N_1(c/2N_2n)$ 。

为了计算裂缝最大宽度和平均宽度,必须先找出裂缝上下边缘每个像素点的坐标位置。若裂缝长度方向像素点个数为 m ,则裂缝距离为上下边缘像素点的纵向坐标差值 Δ_i (像素) ($i=1,2,\dots,m$),裂缝实际宽度为 $\Delta_i c/n$,而裂缝最大宽度和平均宽度为数列 $\{\Delta_i\}$ 的最大值和平均值。

2.3 裂缝分形维数

由于可以用分形维数来定量表述复杂对象的主要属性,分形理论在许多学科得到了广泛应用。由于自然界的物理分形往往表现出一定的随机性和尺度性,因此分形维数有不同的定义^[9]。这些定义包括 Hausdorff 维数 D_H 、信息维数 D_I 、相似维数 D_S 、关联维数 D_G 、Lyapunov 维数 D_L 、容量维数 D_C 等。分形维数的具体计算方法取决于对象特征与研究目的,而应用最广的计算方法是记盒维数法或盒维数法。本文使用记盒维数法来计算裂缝分布的分形维数。记盒维数的定义是:设 F 是 R^n 上的任意非空的有界子集, $N(\epsilon)$ 是直径最大为 ϵ ,可以覆盖若干 F 的集的最少个数,则 F 的盒维数可定义为:

$$\text{Dim}_b F = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{-\log \epsilon} \quad (9)$$

在实际应用中,覆盖 F 的集可以是小球和立方体(三维),也可以是圆和正方形(二维)。因为所研究的对象为裂缝二值图像的矩阵,因此可以构造一些边长为 ϵ 的正方形(即盒子),然后计算不同的 ϵ 值下的“盒子”和 F 相交的个数 $N(\epsilon)$ 。

为了计算分形维数,把二值图像矩阵划分为若干块(如图 6)、每一块的行列数都设为 k 、把含有 1 的块数记作 N_k ($k=1,2,\dots,2$)。即以边长为 k 个像素点的正方形来划分二值图像对应的矩阵,从而得到 $i+1$ 个盒子数 N_k 。在双对数坐标平面内用直线来拟合数据 ($-\lg k, \lg N_k$),则直线斜率 D 就是裂缝分布的物理计盒维数^[11]。

	0,0,0,0	0,0,0,0	0,0,0,0	0,0,0,0	k=4
	0,0,0,0	0,1,0,0	0,0,0,0	0,0,0,0	
	0,0,0,0	0,0,1,0	0,0,1,0	0,0,0,0	
	0,0,0,0	0,1,0,0	0,1,0,0	0,0,0,0	
	0,0,0,0	0,0,0,0	0,0,0,0	0,0,0,0	k=2
	0,0,0,0	0,0,0,0	0,1,1,0	0,0,0,0	
	0,0,0,0	0,0,0,0	0,1,0,0	0,1,1,0	
	0,0,0,0	0,0,0,0	0,0,0,0	0,0,1,1	
不含1	0,0,0,0	0,0,0,0	0,0,0,0	0,0,0,0	k=1
	0,0,0,0	0,0,1,0	0,0,0,0	0,0,1,0	
	0,0,0,0	0,0,1,0	0,0,0,0	0,0,1,1	
	0,0,0,0	0,0,0,1	0,0,0,0	1,0,0,0	
含有1	1,0,0,0	0,0,0,0	0,0,1,0	0,0,0,1	k=1
	0,0,1,0	0,0,0,0	0,1,1,0	0,0,1,1	
	0,1,0,0	0,0,0,0	0,0,1,0	0,0,0,0	
	0,0,0,1	0,0,0,0	0,0,0,0	0,0,0,1	

图 6 二值图像的矩阵形式

3 结果与分析

含有结构裂缝的图像摄自于上海某高校教学楼的底层地

面,为了得到较好的成像效果,提高参数分析的精度,拍摄环境是阳光充足的下午(使裂缝对象和背景对象对比鲜明,在阈值处理时可以方便的将裂缝和背景分离),拍摄时相机正对地面裂缝(以免使图像中的裂缝产生畸变,保证获取裂缝的真实信息),参照物为特制的正方形标尺(大小为 5 mm x 5 mm,中心镂空)。研究时,将图像从标尺中截出,一幅典型的图像见图 7。

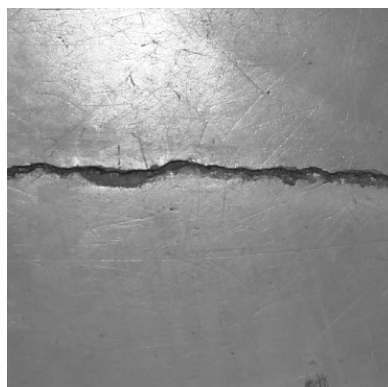


图 7 含有结构裂缝的典型图像

裂缝的记盒维数 D 、面积 S 、长度 L 、平均宽度 d_{ave} 、最大宽度 d_{max} 等特征参数计算结果见表 1。从表 1 可以看出,随着记盒维数 D 的增大,裂缝的面积 S 、长度 L 、平均宽度 d_{ave} 、最大宽度 d_{max} 都逐渐增大。

表 1 裂缝特征参数

图像编号	D	S/mm ²	L/mm	d _{ave} /mm	d _{max} /mm
1	1.75	63.57	51.57	1.23	2.62
2	1.73	59.38	60.75	0.98	2.02
3	1.85	87.35	57.88	1.51	3.63
4	1.76	60.45	54.33	1.11	1.95
5	1.86	104.05	58.76	1.71	4.88
6	1.83	76.92	54.83	1.40	2.50

为了确定记盒维数与裂缝特征参数之间的定量关系,选取裂缝的面积 S 、长度 L 、平均宽度 d_{ave} 、最大宽度 d_{max} 作为自变量,选取记盒维数 D 作为因变量。对这些变量进行多元线性回归分析,可以得到式(10):

$$D = -0.0173S + 0.0250d_{max} + 1.2983d_{ave} - 0.0094d_{max} \quad (10)$$

$$R^2 = 0.9062$$

由式(10)可以看出,记盒维数 D 与裂缝的面积 S 、长度 L 、平均宽度 d_{ave} 、最大宽度 d_{max} 之间具有很好的相关性,拟合优度达到了 0.9062。

4 结语

对含有结构裂缝的数字图像,本文使用数字图像分析中的阈值处理、图像分割、形态学处理、边缘检测等数字图像处理技术,通过 MATLAB 编程平台下编制应用程序来计算裂缝的特征参数。

使用本文提出的方法,可以方便快速地显示裂缝形态、提取出裂缝特征参数(如面积、长度、平均宽度、最大宽度值)与分形维数。这一方法,为已有建筑物结构裂缝的确认与分析提供了一条新的研究途径。与传统的测量分析方法相比,此方法可以极大的降低裂缝测量的劳动时间和劳动强度,并且提高测量的准确性,从而可以使得混凝土裂缝的研究更为便捷。

参考文献:

[1] AMMOUCHE A, RISS J, BREYSSE D, et al. Image analysis for the au-

- tomated study of microcracks in concrete[J].Cement and Concrete Composites, 2001(23) : 267- 278.
- [2] AMMOUCHE A, BREYSSE D, HORNAIN H, et al.A new image analysis technique for the quantitative assessment of microcracks in cement-based materials[J].Cement and Concrete Resenach, 2000(30) : 25- 35.
- [3] SOROUSHAN P, ELZAFRANERY M, NOSSONI A.Specimen preparation and image processing and analysis techniques for automated quantification of concrete microcracks and voids[J].Cement and concrete Research, 2003(33) : 1949- 1962.
- [4] 徐金明, 赵晓波.边缘检测技术在确定流体包裹体迹线中的应用[J].岩石力学与工程学报, 2007, 26(6) : 1132- 1137.
- [5] 伯绍波, 闫茂德, 孙国军, 等.沥青路面裂缝检测图像处理算法研究[J].微型计算机信息, 2007, 23(4- 3) : 280- 282
- [6] 耿飞, 解建光, 钱春香.图像分析技术对混凝土裂缝的定量评价.混凝土[J].2005(5) : 78- 94.
- [7] 耿飞, 钱春香.图像分析技术在混凝土塑性收缩裂缝定量测试与评价中的应用研究[J].东南大学学报(自然科学版).2003, 33(6) : 773- 776.
- [8] 周健, 余荣传, 贾敏才.基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[J].岩土工程学报, 2006, 28(12) : 2047- 2052.
- [9] 冈萨雷斯著, 阮秋琦, 等译.数字图像处理[M].北京: 电子工业出版社, 2006.
- [10]张济忠.分形[M].北京: 清华大学出版社, 1997.
- [11]徐晓鹏, 彭瑞东, 谢和平, 等.基于 SEM 图像分维估算的脆性材料细观结构演化方法研究[J].岩石力学与工程学报 2004, 23(21) : 3600- 3603.
-
- 作者简介: 朱耀耀(1983-), 男, 硕士, 主要从事结构工程的科研工作。
单位地址: 上海市延长路 149 号 M2 楼 418 室 上海市上海大学土木工程系 200072
联系电话: 13917914200
-
- 上接第 21 页
- [8] TRIANTAFILLOU T C, DESKOVIC N.Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior[J].ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(1) : 1652- 1672.
- [9] YU Pi-yong, SILCV P F, NANNI A.Flexural performance of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets [J].Proceedings of Society for the Advancement of Material and Process Engineering 2004 Symposium, 2004, 9- 12.
- [10] 飞渭, 江世永, 彭飞飞, 等.预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件试验研究[J].四川建筑科学研究, 2003, 29(2) : 56- 60.
- [11] 彭飞飞, 江世永, 飞渭, 等.预应力 CFRP 布加固混凝土梁不卸载时的受弯性能试验研究[J].四川建筑科学研究, 2003, 29(2) : 39- 45.
- [12] 尚守平, 彭晖, 董桦, 等.预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J].建筑结构学报, 2003, 24(5) : 24- 30.
- [13] 董谷生, 李志虎, 朱成九, 等.预应力碳纤维布材加固混凝土梁的受弯性能研究[J].华东交通大学学报, 2005, 22(2) : 2- 5.
- [14] 叶列平, 庄江波, 曾攀, 等.预应力碳纤维布加固钢筋混凝土 T 形梁的试验研究[J].工业建筑, 2005, 35(8) : 7- 12.
- [15] HUANG Y L, WU J H, YEN T, et al.Strengthening reinforced concrete beams using prestressed glass fiber-reinforced polymer- Part I: Experimental study [J].Journal of Zhejiang University Science, 2005, 6A(3) : 166- 174.
- [16] 王兴国, 周朝阳, 曾宪桃, 等.外贴预应力 GFRP 板加固混凝土梁抗弯试验研究[J].哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(3) : 351- 354.
- [17] 岳清瑞, 李庆伟, 杨勇新.预应力碳纤维布放张时受力性能分析[J].工业建筑, 2006, 36(4) : 1- 4.
- [18] 杨勇新, 李庆伟, 岳清瑞.预应力碳纤维布加固混凝土梁预应力损失试验研究[J].工业建筑, 2006, 36(4) : 5- 8.
- [19] 李庆伟, 杨勇新, 岳清瑞, 等.预应力碳纤维布加固混凝土梁锚固方式试验研究[J].工业建筑, 2006, 36(4) : 9- 12.
- [20] 郭馨艳, 黄培彦, 郑小红.预应力 FRP 加固 RC 梁受力分析[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2005, 33(7) : 6- 10.
- [21] EL-HACHA R, WIGHT R G, GREEN M F.Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets[J].ACI Structure Journal, 2003, 100(2) : 305- 313.
- [22] GARDEN H N, HOLLOWAY L C.An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates[J].Composites Part B, 1998, 29B: 411- 424.
- [23] QUANTRILL R J, HOLLOWAY L C.The flexural rehabilitation of reinforced concrete beams by the use of prestressed, advanced composite plates[J].Composites Science and Technology, 1998, 58: 1259- 1275.
- [24] 张坦贤, 吕西林, 肖丹, 等.预应力碳纤维布加固一次二次受力梁抗弯试验研究[J].结构工程师, 2005, 21(1) : 34- 39.
- [25] 张坦贤, 吕西林, 肖丹, 等.预应力碳纤维布加固一次、二次受力梁抗弯试验全过程理论分析[J].结构工程师, 2005, 21(2) : 43- 49.
- [26] 田安国, 刘钊, 吕志涛.预应力纤维布张拉锚固技术及其设计理论研究[J].工业建筑, 2005, 35(10) : 83- 86.
- [27] 邓宗才, 张建军, 张建伟, 等.预应力芳纶纤维布加固混凝土梁的受剪承载力试验研究[J].工业建筑, 2006, 36(4) : 19- 22.
- [28] 薛伟辰, 曾磊.预应力 CFRP 板加固混凝土梁研究综述[J].工业建筑, 2006, 36(4) : 12- 15.
- [29] 卢亦焱, 吴涛, 张号军.预应力 CFRP 布加固钢梁的施工技术研究[J].铁道科学与工程学报, 2006, 3(1) : 18- 21.
- [30] 彭刚, 刘立新, 李险峰.预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J].河南科学, 2005, 23(3) : 407- 410.
- [31] 邓宗才, 张建军, 张建伟, 等.预应力芳纶纤维布加固混凝土梁的受剪承载力试验研究[J].工业建筑, 2006, 36(4) : 19- 22.
- [32] 王兴国, 周朝阳, 曾宪桃, 等.粘贴预应力 GFRP 板- 混凝土梁剪切加固试验研究[J].四川建筑科学研究, 2005, 31(5) : 46- 49.
- [33] 张轲, 叶列平, 岳清瑞.预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁弯曲疲劳性能试验研究[J].工业建筑, 2005, 35(8) : 13- 19.
- [34] WIGHT R G, ERKI M A.Prestressed CFRP sheets for strengthening concrete slabs in fatigue [J].Advances in Structural Engineering, 2003, 6(3) : 175- 182.
-
- 作者简介: 王兴国(1977-), 男, 博士, 讲师, 研究领域: 工程结构安全性评价与维修加固研究。
单位地址: 河南焦作高新区世纪大道 2001 号 河南理工大学土木工程学院 454000
联系电话: 15939117768