

新老混凝土粘结面人造粗糙度表征及性能研究

张 雄^{1,2}, 张 蕾^{1,2}

(1. 同济大学 建筑材料研究所, 上海 201804; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 提出了一种改进的老混凝土表面人造粗糙度处理方法, 并进行了试验研究. 首先采用数字图像法采集粗糙表面的三维轮廓数据, 然后依据分形理论进行数据处理, 并用分形维数表征人造粗糙度; 再利用自编的 MATLAB 程序实现粗糙表面的三维重建以验证数字图像法的准确性; 最后, 研究了老混凝土表面粗糙度与新老混凝土粘结性能的相关性, 结果显示, 人造粗糙表面是一种分形结构, 可采用分形维数表征其粗糙度; 新老混凝土粘结抗折强度 f 与老混凝土表面的分形维数 D 呈正相关性, 存在近似关系 $f=kD+b$, 其中 k , b 为拟合系数; 数字图像法在试验的数据采集、处理分析以及界面形貌的三维重建阶段都具实用性.

关键词: 新老混凝土; 粗糙度; 分形理论; 三维重组; 粘结性能

中图分类号: TU528.59

文献标志码: A

Characterization and Properties of Artificial Roughness of Young on Old Concrete Bonding Interface

ZHANG Xiong^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}

(1. Institute of Building Materials, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: An approach to form a better artificial roughness of old concrete surface was proposed, and an experimental study was carried out. First, the three-dimensional contour data of the rough surface of old concrete were collected by digital image method, then the data were processed based on fractal theory, and fractal dimension was used to characterize the artificial roughness. Then three-dimensional reorganization of the rough interface was achieved by MATLAB program, so that the accuracy of the digital image method was verified; Finally, the correlation of the roughness and the bonding properties of young on old concrete was investigated. The

results show that the artificial roughness is a fractal structure, which can be characterized by fractal dimension. There was a positive correlation of fractal dimension (D) and interfacial bonding properties (f), which can approximately be formulated as $f=kD+b$; Digital image method is useful in data acquisition, processing, analysis, as well as the three-dimensional reconstruction of interface morphology.

Key words: young on old concrete; roughness; fractal theory; three-dimensional reorganization; bonding properties

混凝土作为主导结构材料用于土木工程已有百年历史. 近 50 年来兴建的许多混凝土结构工程在人为和自然环境作用下发生了不同程度的老化和损伤, 即使新建的混凝土工程也因设计、施工不当出现了蜂窝、空洞和裂缝, 各种病害与缺陷屡见不鲜^[1-2]. 对混凝土老化、损伤、病害的研究已得到高度重视^[3].

目前许多研究已转移到对老混凝土的维修加固上, 其成败关键是新老混凝土的粘结质量, 此类研究备受学术界和工程界关注. 目前对新老混凝土粘结界面的宏观力学性能进行的大量研究表明, 老混凝土表面粗糙度是影响新老混凝土粘结强度的主要因素之一^[4-5].

然而, 迄今为止国内外还没有相应的规范对新老混凝土结合面的处理方法做出规定. 美国 ACI318 规范要求叠合面混凝土浇注前把损伤、未胶结好的混凝土用铁凿或其他工具凿除, 然后用合适的工具对老混凝土表面进行凿毛、清洗; 我国混凝土结构设计规范要求叠合受弯构件的叠合面根据其受剪强度进行处理, 常用方法有人工叠合和自然粗糙^[6-7].

传统的粗糙度处理方法在耗费大量人力物力的同时无法有效地控制粗糙度大小, 并且表征方法也不够精确^[8]. 本文力图通过人工方法制造混凝土表

收稿日期: 2012-08-17

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(2007 31882229)

第一作者: 张 雄(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为建筑材料及其功能化. E-mail: xiong.zhang@vip.sina.com

通讯作者: 张 蕾(1988—), 女, 硕士生, 主要研究方向为先进土木工程材料. E-mail: 994522002@qq.com

面粗糙度,避免了传统的粗糙度处理过程中对骨料造成的松动及微裂缝的产生;在此基础上,利用计算机采集和处理数据来量化表征混凝土的粗糙度,并对其粗糙界面进行三维重建,以验证数字图像法的有效性;最后,对人工粗糙获得的具有不同形貌的粘结面进行力学性能研究,以建立粗糙度与粘结性能的关系。

1 试验内容与方法

1.1 原材料

原材料包括:P·O 42.5R 水泥(上海海螺水泥有限责任公司),Ⅱ级粉煤灰(上海宝钢生产协力公司,比表面积 $480 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,表观密度 $2.85 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$),碎石(最大粒径 $D_{\max} = 20 \text{ mm}$);细集料(河砂,细度模数 $M_x = 2.7$,含泥量不大于 0.5% ,表观密度 $2630 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$);制作人造粗糙度所用界面剂:丁苯乳液和丙烯酸酯(质量比 $1:1$)复掺。

老混凝土试件的制作和新混凝土的浇注所用试验配合比相同,如表1所示。其中,老混凝土为浇注成型后存放6个月以上的旧混凝土,经现场测定老混凝土立方体抗压强度 $f_{cu} = 40.3 \text{ MPa}$ 。

表1 混凝土试验配合比

Tab.1 Mix proportion of experimental concrete

质量/kg					
水泥	水	砂子	石子	粉煤灰	水灰比
350	181	1 015	670	84	0.42

本试验在对混凝土试件制作人造粗糙度时使用改性高强粘结砂浆,以涂覆试件表面,所用砂浆配合比如表2所示。

表2 掺丁苯乳液和丙烯酸酯的砂浆配合比

Tab.2 Mix proportion of mortar doped with styrofan and acronal

质量/g				砂子质量/g		聚灰比
水泥	粉煤灰	丁苯乳液	丙烯酸酯	0.16 mm	0.315 mm	
150.0	20.0	22.5	22.5	40	40	0.15

1.2 样品制备

1.2.1 人造粗糙度的制作

研究采用的混凝土表面粗糙处理方法其制作过程如下:首先,将尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的老混凝土试件放在水中浸泡24 h以上,使之充分浸润;取出后晾干至表面无水光,将高粘结强度的改性砂浆涂覆于试件表面,磨平;待砂浆将硬化时,用不同规格的锯齿泥板从其表面刮过,待其干燥

硬化后人造粗糙度即制作完成。通过不同锯齿泥板的组合,可以制造出粗糙度不同的人造界面,本试验选取其中较具代表性的5种界面分别编号并加以试验研究。

1.2.2 新老混凝土粘结抗折强度试件制作

参照《水泥混凝土路面施工技术规范(JTG F30—2003)》,新老混凝土粘结抗折强度试件制作过程如下:将人工粗糙后获得的5种不同形貌的混凝土试件经数字图像采集后放入水中浸泡24 h取出晾干;待表面无水光后,放入尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的模具中,并在其待粘结面涂刷界面剂,而后浇注新混凝土;每种界面成型6组试件,标准养护7 d,28 d后用液压式万能试验机测定其粘结抗折强度。粘结抗折强度测试原理和试件制作分别如图1和图2所示,图中 F 为压力, h 为长度。

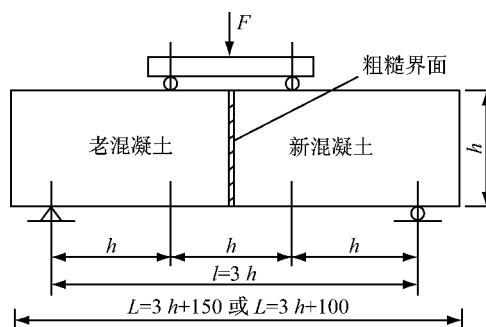


图1 新老混凝土粘结抗折试验原理

Fig.1 Diagram of young on old concrete adhesive flexural strength test



图2 新老混凝土粘结抗折强度试件制作

Fig.2 Specimens of young on old concrete adhesive flexural strength

1.3 测试方法及原理

1.3.1 人造粗糙度的表征

采用分形维数表征粗糙度。分形几何是描述自然界大量存在的不规则、不光滑且在某种统计意义上存在局部与整体相似性无序系统^[9-10]的理论,用于研究由许多零碎图形构成的图案。分形维数是分形

系统的定量描述参数,用来衡量物体的不规则和复杂程度。

测定分形维数的常用方法有:盒维数法、尺码法、轮廓均方根法、频谱法及结构函数法等^[11]。由于盒维数法用于测定具有精确自相似性的图形的分形维数,适用于表面粗糙度测定,故本试验采用此法测定分形维数,原理如下。

如图3所示,以边长为 δ 的方网格去覆盖所需测量的图形,然后计算与边界发生重叠的网格数 $N(\delta)$;不断缩小网格边长,就得到一组对应于尺度 δ 的网格数 $N(\delta)$, δ 与 $N(\delta)$ 极限关系如下:

$$\lg N = (-D) \lg \delta + \lg k \quad (1)$$

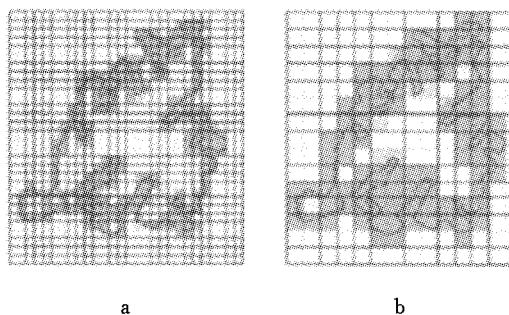


图3 盒维数法测定分形维数

Fig.3 Box counting method for the determination of fractal dimension

为确定粗糙表面的分形数维,本文将盒维数法演化为覆盖法,其原理如图4所示。取不同的投影半径 r 值得到不同的覆盖面积 $A(r)$, r 越小,投影网络

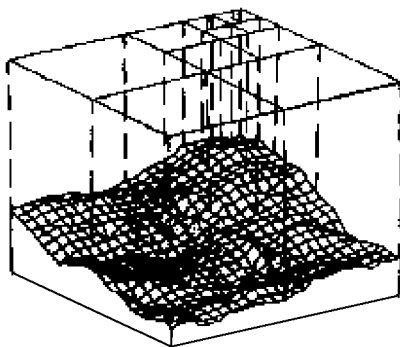


图4 投影覆盖法测定分形维数

Fig.4 Projective covering method



图5 激光三角测距装置

Fig.5 Laser triangulation distance measuring device

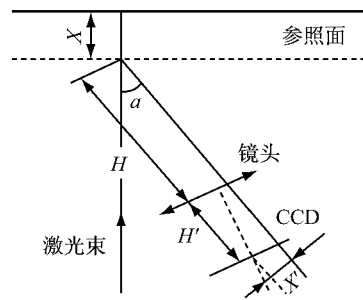


图6 激光三角测距原理

Fig.6 Schematic of laser triangulation distance measuring

测试装置工作原理:氦氖激光器发出激光束,经柱状透镜扩束并准直后成为一束很薄的片状光束(宽度0.2 mm)投射到物体上,载物平台在步进电机带动下沿给定方向以 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速率平移,完成片光在物面上的二维扫描,另一方向上用 CCD 接受该片光图像。平移过程中控制图像采集卡的采集间隔,使平移速率与图像采集速率匹配(每隔8帧图像采

对应的粗糙面积越大, $A(r)$ 越接近粗糙界面的真实面积。根据分形理论,多维分形面积为

$$A(r) = A_0 r^{2-D} \quad (2)$$

式中: A_0 为面积校正系数; D 为拟合常数。由式(2)知,变化面积微元尺寸 r ,可采集一系列数对 $(r, A(r))$,在双对数坐标中进行回归拟合,得到一条斜率为 $k=2-D$ 的直线, D 即是分形维数。

1.3.2 人造粗糙度数据采集

1.3.2.1 激光三角测距试验装置

采用激光三角测距装置采集试件粘结面的形貌数据,自行组装的测距装置(图5)由三部分构成:①光路系统。氦氖激光器、柱状透镜和空间低通滤波器。②传动系统。电机、控制电路(PLC)、载物平台、变速箱、万向联轴器以及倒顺开关。③成像系统。电荷耦合元件(CCD)数码相机、数码图像采集卡和计算机。

1.3.2.2 激光三角测距原理

如图6,光束投射到物面上一点,另一方向上该点的像被 CCD 相机接收;物面深度改变时,相应像点在 CCD 上位置也发生变化,两者关系为

$$X = \frac{X'H}{H' \sin \alpha - X' \cos \alpha} \quad (3)$$

式中: X, X' 为被测物体位移和 CCD 上像斑位移大小; H, H', α 为系统结构参数。故只需测定 X' 就可得到被测物体的位移大小 X 。

集1帧,物面行程100 mm,完成232帧图像采集)。由于物面高低不同,投影线在 CCD 光敏面上的像为曲线,计算该曲线上各像素点偏离标准像(参考平面)的位置,即可由式(3)得出物面的深度变化 X 。

1.3.3 人造粗糙度界面的三维重建

对混凝土试件的人造粗糙界面进行激光扫描并经 CCD 采集数据后,必须测定各点的像斑在 CCD

上的位移大小 X' , 然后通过式(3)计算得到界面上光斑的位移大小 X (即粗糙界面的深度变化). 由于二维坐标很容易算出, 这样就得到界面上各点的三维坐标 (x, y, z) , 从而可以利用自编的 MATLAB 程序进行人造粗糙界面的三维重建.

1.3.4 人造粗糙度的灌砂法测定

为佐证数字图像法所得分形维数数据的可靠性, 本文亦采用灌砂法表征新老混凝土粘结面粗糙度, 原理如图7所示. 用塑料板环绕着混凝土处理面, 使塑料板的顶面和处理面凸部的最高点齐平, 往其中灌入标准砂至塑料板顶面, 抹平.

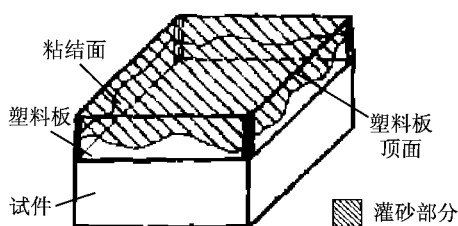


图7 灌砂法测量粘结面粗糙度示意

Fig.7 Diagram of sand replacement method to measure the roughness of bonding surface

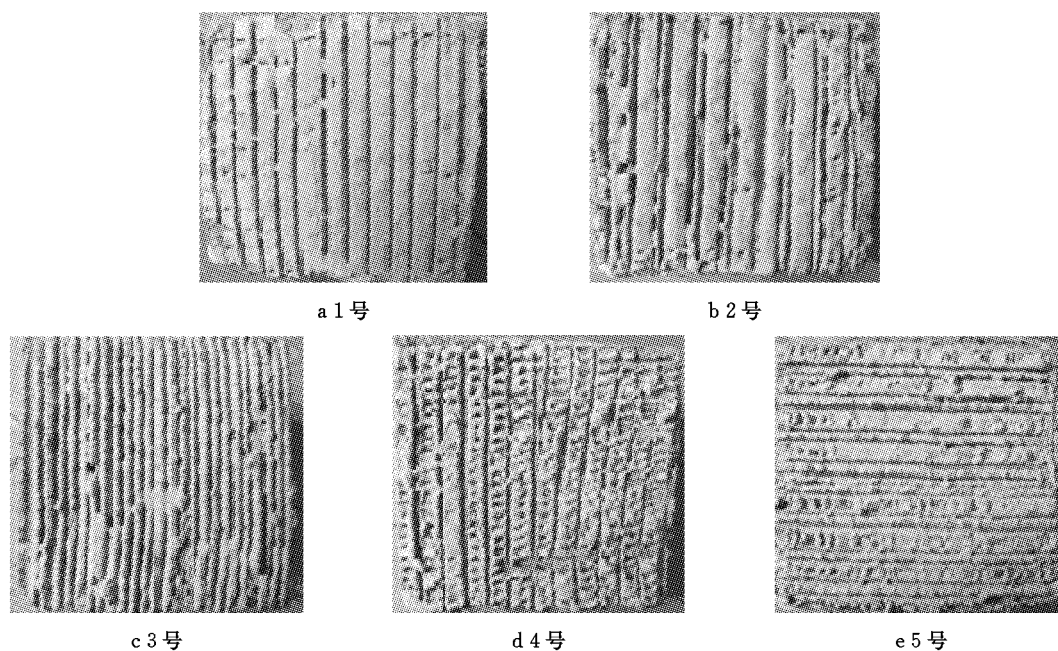


图8 试件表面粗糙度形貌及编号

Fig.8 Morphology and code of surface roughness of specimen

双对数坐标中拟合后总是存在类似的线性关系, 如图9所示, 图9为1号界面的处理结果.

可见, $\ln A(r)$ 与 $\ln r$ 之间存在较高的线性相关性, 基本服从函数 $\ln A(r) = -D \ln r + \ln k$ 的规律分布, 即满足分形几何中 r 与 $A(r)$ 之间的关系, 说明人造粗糙界面是一种分形结构, 可用分形维数来

粗糙面的平均深度可用式(4)计算:

$$M_D = V/A \quad (4)$$

式中: M_D 为灌砂平均深度; V 为灌砂体积; A 为粘结面面积.

2 试验结果及分析

2.1 人造粗糙度形貌

利用不同规格的锯齿板以及改变操作方法可在老混凝土表面制造出不同的粗糙度形貌, 本试验只选取其中具有代表性的5种, 其粗糙度形貌及编号顺序如图8所示.

由图8可见, 肉眼只能辨别1~5号试件的表面形貌差别, 但界面的确切粗糙度却并不能通过简单观察知道, 这就限制了界面性能的深入研究, 故需要找出一种能够定量表征界面粗糙度的参数指标.

2.2 人造粗糙度的量化表征

采用覆盖法对所采集的人造粗糙界面三维轮廓数据进行处理, 发现研究选取的5种粗糙表面其面积微元的尺寸 r 与相应得到的界面总面积 $A(r)$ 在

表征其粗糙度.

采用分形几何理论对1~5号界面的三维轮廓数据进行处理, 结果如表3所示.

由表3数据知, 1~5号界面的粗糙度存在较显著差异, 3号试件具有最高的分形维数, 其人造粗糙度最大; 5号试件的分形维数最低, 其粗糙度最小. 为

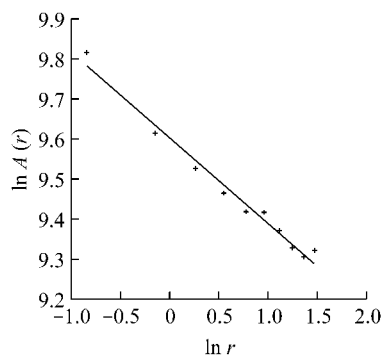


图 9 $\ln A(r)$ 与 $\ln r$ 的拟合曲线
Fig.9 Fitting curves of $\ln A(r)$ and $\ln r$

表 3 人造粗糙界面的分形维数
Tab.3 Fractal dimension of artificial rough interface

编号	D	编号	D
1	2.426 5	4	2.592 1
2	2.319 2	5	2.278 9
3	2.602 1		

验证分形维数法的可靠性,本文亦采用了灌砂法测定粘结面粗糙度,测量结果如表 4 所示。

对比表 3 和表 4 数据,发现数字图像法测得的分形维数与灌砂法测定的平均深度结果具有高度吻合性,说明了分形维数法的有效性.故采用分形维数可定量地表征老混凝土界面的人造粗糙度,便于不

表 4 灌砂法测定粘结面粗糙度结果
Tab.4 Bonding interface roughness by sand filling method

编号	长/mm	宽/mm	灌砂体积/ml			灌砂深度/mm		
			最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
1	100.1	99.9	43.5	42.0	42.3	4.4	4.2	4.2
2	99.8	100.0	40.5	38.5	39.8	4.1	3.9	4.0
3	100.1	99.9	47.5	45.0	46.8	4.8	4.5	4.7
4	99.9	100.0	47.0	45.5	46.0	4.7	4.6	4.6
5	99.9	100.0	36.0	34.5	35.3	3.6	3.4	3.5

同界面间的比较.

2.3 人造粗糙度界面的三维重建

通过重心法提取激光线中心点,定位出粗糙面上激光入射点的二维坐标,再用 MATLAB 程序处理采集的三维轮廓数据得到混凝土表面各点相对于参考基准面的深度值,然后在 MATLAB 程序中以各点的三维坐标(x,y,z)进行界面重建.图 10 为应用 MATLAB 程序对 3 号试块重建所得的三维界面图像,其真实界面的照片即为图 8c.

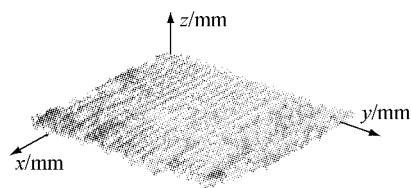


图 10 MATLAB 程序三维界面重建
Fig.10 Interface of three-dimensional reconstruction by MATLAB

对比图 8c 和图 10 可直观看出,2 种方法所得粗糙界面的形貌特征几乎一致,即三维重建所得的界面特征与真实界面几乎吻合,表明采用激光三角测距和 CCD 获取表面形貌的三维轮廓数据、再用 MATLAB 程序对人造粗糙度的数据进行处理和三维重建的技术路线具有可行性,即采用数字图像法表征混凝土的粗糙度是切实有效的。

2.4 粗糙度对新老混凝土粘结性能的影响

将未经界面粗糙的试块(编号 0)和 1~5 号试块分别浇注成型新老混凝土粘结试件,测得 7 d 和 28 d 粘结抗折强度如图 11 所示.值得强调的是,测定过程中试件破坏后,其断裂面都只出现在粘结砂浆与新混凝土的浇注界面,说明砂浆与老混凝土的粘结强度足够高,不会在人造粗糙面与新混凝土的粘结界面破坏之前断裂。

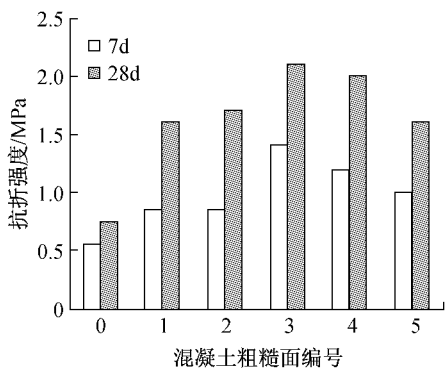


图 11 不同粗糙度界面的新老混凝土粘结抗折强度
Fig.11 Adhesive flexural strength of young on old concrete with different surfaces

由图 11 可知,1~5 号粗糙面对应的试件其新老混凝土粘结抗折强度明显不同:3 号界面制作的试件粘结抗折强度最大,4 号其次,5 号最低,但都优于未经粗糙而只涂刷界面剂的“光滑”界面.可见,界面的

粗糙度对新老混凝土粘结性能产生重要影响. 这是因为新老混凝土的微观结构决定其粘结后的宏观力学性能^[12]. 界面粘结力主要来源于机械咬合力, 它由水泥浆渗透到老混凝土表面空隙中、硬化后新老混凝土相互交错抱合形成. 即新混凝土的水化产物在老混凝土裂缝中生长, 其 C—S—H 凝胶的毛刺向外辐射进老混凝土, 且与老混凝土 C—S—H 相互交错^[13]. 故老混凝土粗糙度直接影响粘结性能.

将未经粗糙的光滑界面分形维数视为 1, 拟合得到光滑界面(0 号)和 1~5 号试件的 D 与 f 的关系曲线, 如图 12 所示. 图中, R^2 为线性拟合相关系数.

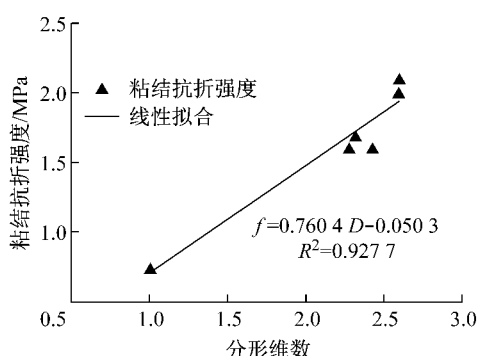


图 12 分形维数与新老混凝土粘结抗折强度拟合曲线

Fig. 12 Fitting curves of fractal dimension and flexural strength

由图 12 可知, f 与 D 呈正相关, 可近似用公式 $f=0.7604D-0.0503$ 表示, R^2 达 90% 以上. 即在一定范围内, 界面的粗糙度越大, 越有利于界面粘结. 因而, 用分形维数量化表征界面的人造粗糙度可以定量比较不同界面处理方式的优劣, 并大致判断其浇注后混凝土的粘结性能, 避免了传统界面处理、评判方式带来的偏差, 使界面处理更加准确、规范.

3 结论

(1) 人造粗糙界面是一种分形结构, 可用分形维数来表征其粗糙度, 分形维数越大, 界面粗糙程度越高.

(2) 采用数字图像法获取人造粗糙界面三维轮廓数据并用 MATLAB 程序实现界面的三维重组在一定条件下具有可行性, 可为粗糙界面的定量分析提供依据.

(3) 在一定条件下, 新老混凝土粘结强度 f 与其粘结界面的分形维数 D 呈正相关性, 可近似用公式 $f=kD+b$ 表示, 因而可根据分形维数推断界面的粘结性能.

(4) 在新老混凝土粘结面制造人造粗糙度的方法是有效的, 相较于传统的界面处理方法更为规范,

处理程度更加可控.

参考文献:

- [1] Austin S, Robins P, Pan Y G. Tensile bond testing of concrete repairs[J]. Materials and Structures, 1995, 28: 249.
- [2] 胡钊芳, 师长斌. 公路旧桥加固技术与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
HU Zhao Fang, SHI Changbin. Strengthening technology and examples of highway and old bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [3] 袁群. 老化病害混凝土结构质量评估及粘结加固中的基础问题研究[D]. 大连: 大连理工大学土木水利学院, 2000.
YUAN Qun. Structure and quality assessment of aging diseases concrete and basic research on bonded reinforcement problems [D]. Dalian: School of Civil Engineering of Dalian University of Science and Technology, 2000.
- [4] 马卫红. 影响新老混凝土粘结强度的主要因素研究[J]. 科技信息, 2010, 34(33): 324.
MA Weihong. Research on main factors of young on old concrete adhesive strength [J]. Science and Technology Information, 2010, 34(33): 324.
- [5] 赵志芳, 周厚贵, 袁群, 等. 新老混凝土的粘结机理研究与工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
ZHAO Zhifang, ZHOU Hougui, YUAN Qun, et al. Bonding mechanism and engineering application of young on old concrete [M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.
- [6] Wells A J, Stark D R, Polyzois D. Getting better bond concrete overlays[J]. Concrete International, 1999, 48(4): 49.
- [7] Kal R Hindo. In-place bond testing and surface preparation of concrete[J]. Concrete International, 1990, 54(4): 46.
- [8] 廖卫东, 水中和, 秦明强, 等. 桥涵结构补强中新旧混凝土结合状态研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(12): 24.
LIAO Weidong, SHUI Zhonghe, QIN Mingqiang, et al. Research on combining state of young on old concrete in bridge and culvert structure reinforcement [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2003, 25(12): 24.
- [9] 肯尼思·法尔科内. 分形几何数学基础及其应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2001.
Kenneth Falcone. Foundation and application of fractal geometry [M]. Shenyang: Press of Northeastern University, 2001.
- [10] Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature [M]. California: Freeman, 1982.
- [11] 丁俊, 孙洪泉. 分形维数测定方法对比分析[J]. 工程建设, 2010, 42(5): 10.
DING Jun, SUN Hongquan. Comparative analysis of fractal dimensions determination methods [J]. Engineering Construction, 2010, 42(5): 10.
- [12] 何伟. 新老混凝土界面粘结材料及强度的研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2004.
HE Wei. Research on adhesive material and strength of young on old concrete interface [D]. Changsha: School of Civil Engineering of Hunan University, 2004.
- [13] 申豫斌, 熊光晶. 新老混凝土修补界面粘结质量的改善方法[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(2): 79.
SHEN Yubin, XIONG Guangjin. Improving method of bonding quality in young on old concrete interface [J]. Sichuan Building Science, 2003, 29(2): 79.