

复合微粉和聚丙烯纤维对再生混凝土抗冻性研究

王丽丹, 周志云, 叶林飞, 叶 珊

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 通过正交设计试验研究了粉煤灰掺量、矿粉掺量、聚丙烯纤维掺量以及再生粗骨料掺量这4个水平因素对再生混凝土抗冻性的影响, 对比分析其质量损失率和相对动弹性模量, 得出满足良好抗冻性的最优配合比。同时对最优配合比与普通混凝土(基准组)及全再生粗骨料混凝土(对比组)进行应力-应变曲线分析, 检验优选结果的合理性。

关键词: 再生混凝土; 正交试验; 抗冻性

中图分类号: TU 528.041 **文献标志码:** A

Experimental Study on the Effect of Composite Powder and Polypropylene Fiber on the Frost Resistance of Recycled Concrete

WANG Lidan, ZHOU Zhiyun, YE Linfei, YE Shan

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The influences of 4 factors on the frost resistance of recycled concrete, including the mix quantities of fly ash, mineral powder, polypropylene fiber, and regenerated aggregate, were studied by the orthogonal testing method. The optimal ratio which meets the demands of good frost resistance was obtained by analyzing the mass loss rate and relative dynamic elastic modulus of concrete. Meanwhile, the analysis on the stress-strain curves of concrete with optimal mixture ratio, ordinary concrete (reference group) and recycled aggregate concrete (control group) was carried out to examine the rationality of the optimized result.

Keywords: recycled concrete; orthogonal experiment; frost resistance

近年来,城镇化的不断推进使得建筑垃圾排放量和混凝土需求量快速增长^[1],面对这种情况,从资源有效利用和环境保护的角度来看,需要对废弃混凝土进行循环再利用。将废弃的混凝土经过分离、处理后得到“再生骨料”^[2],将其按一定比例或全部取代天然骨料重新配制混凝土,就生成了再生混凝土,

因而再生混凝土是一种环保、绿色的再生材料,可节省天然的矿物资源,同时减轻固体废弃物对环境的污染^[3-4]。我国北方大部分地区冬季寒冷,其环境容易使得混凝土结构开裂恶化。各国学者对再生混凝土的力学性能和耐久性进行了大量研究^[5-7],但尚不够深入。在抗冻性方面,文献^[8-10]进行过相关

收稿日期: 2016-01-04

第一作者: 王丽丹(1992-),女,硕士研究生,研究方向:混凝土结构低温耐久性。E-mail: wanglidan_119@163.com

通信作者: 周志云(1966-),女,副教授,研究方向:混凝土结构的基本理论和耐久性。E-mail: zhouzyfj@163.com

研究,指出再生混凝土进行合理配比能够满足抗冻性要求.基于上述分析,本文试验考虑粉煤灰掺量、矿粉掺量、聚丙烯纤维掺量以及再生粗骨料掺量 4 因素 3 水平,通过复合微粉和聚丙烯纤维单掺或复掺来改善再生粗骨料的天然缺陷,增强再生混凝土的抗冻性能,为再生粗骨料混凝土的应用发展作一些探索.

1 试 验

1.1 试验原材料

再生骨料采用上海欣歆实业有限公司生产的同一批再生石子,取粒径为 5~20 mm 作为试验所需天然粗骨料;细骨料取自上海复兴岛附近的普通河砂,通过试验得到细骨料的细度模数 $M_x = 2.64$,属于中砂,粒径的级配属于 II 级,平均粒径为 0.35~0.50 mm;水泥为 P·O 42.5 级硅酸盐水泥;粉煤灰采购于河南郑州巩义市晟粉煤灰加工厂生产的一级粉煤灰;矿粉采用上海影佳化工原料商城生产的影佳双飞粉 YJ-9011;纤维采购于上海影佳化工原料商城生产的 19 mm 聚丙烯纤维;减水剂为 HSN 引气高效减水剂;水为自来水.按照本文正交试验中粉煤灰和矿粉各自的 3 个水平掺量逐次掺拌得到试验

所需的复合微粉.

1.2 正交试验设计方案

试验采用 0.45 的水灰比,试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,减水剂掺量为 0.5%,减水率为 15%,根据施工要求的拌合物稠度和已知的粗骨料的种类及最大粒径,确定单位体积混凝土的用水量为 187 kg.因素水平如表 1 所示,养护方法选择标养,砂率取固定值 0.36.采用 4 因素 3 水平的 $L_9(3^4)$ 正交表^[11-12]和单位体积混凝土配合比如表 2 所示.其中,NA 为天然骨料(natural aggregate),RA 为再生粗骨料(recycled aggregate),C 为水泥,FA 为粉煤灰,MP 为矿粉,PPF 为聚丙烯纤维,S 为细骨料,W 为水,WR 为减水剂.

表 1 正交试验因素水平表

Tab.1 Orthogonal factor level table

水平	RA A/%	FA B/%	MP C/%	PPF D/(kg·m ⁻³)
1	0	0	0	0
2	50	20	5	0.6
3	100	30	10	0.9

注:再生骨料取代率为粗骨料总质量的百分率;粉煤灰、矿粉取代率为胶凝材料总质量的百分率.

表 2 混凝土配合比

Tab.2 Mix proportion of concrete

试块编号	NA	RA	C	FA	MP	PPF	S	W	WR
S1(A ₁ B ₁ C ₁ D ₁)	1 150	0	416.0	0	0	0	647	187	3.12
S2(A ₁ B ₂ C ₂ D ₂)	1 150	0	312.0	83.2	20.8	0.6	647	187	3.12
S3(A ₁ B ₃ C ₃ D ₃)	1 150	0	249.6	124.8	41.6	0.9	647	187	3.12
S4(A ₂ B ₁ C ₂ D ₃)	575	575	395.2	0	20.8	0.9	647	187	3.12
S5(A ₂ B ₂ C ₃ D ₁)	575	575	291.2	83.2	41.6	0	647	187	3.12
S6(A ₂ B ₃ C ₁ D ₂)	575	575	291.2	124.8	0	0.6	647	187	3.12
S7(A ₃ B ₁ C ₃ D ₂)	0	1 150	374.4	0	41.6	0.6	647	187	3.12
S8(A ₃ B ₂ C ₁ D ₃)	0	1 150	332.8	83.2	0	0.9	647	187	3.12
S9(A ₃ B ₃ C ₂ D ₁)	0	1 150	270.4	124.8	20.8	0	647	187	3.12

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及结果

试验的试块制作和抗压试验严格按照标准《GBT 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法》进行,试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,总共 264 个.根

据标准《GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行混凝土快冻法.试块在冻融试验过程中始终处于全浸水状态,控制每冻融循环 25 次结束后,观察试块冻融现象并记录,以 S4 组(A₂B₁C₂D₃)为例,如图 1 所示.然后清洗试件表面浮渣并擦干表面水分,开始对试件称重,测量其横向基频和抗压强度并记录.冻融试验的结果如表 3 所示.

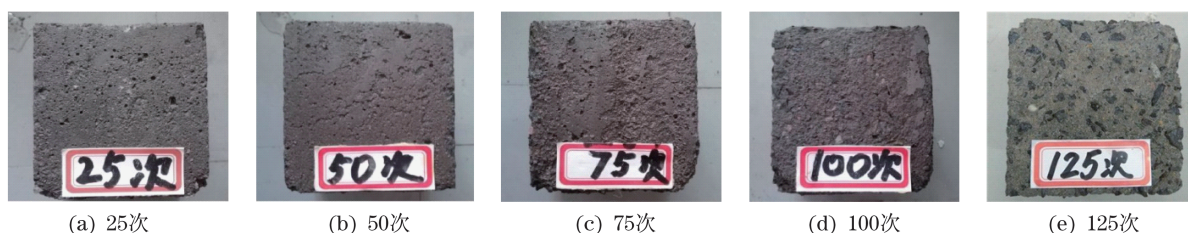


图1 不同冻融循环次数后混凝土的表现情况

Fig.1 Concrete appearance after different freeze-thaw cycles

表3 混凝土冻融试验结果

Tab.3 Results of concrete freeze-thaw test

试块编号	质量损失率 $W_n/\%$ \ 相对动弹性模量 $P_n/\%$					28 d 抗压强度/MPa
	N = 25	N = 50	N = 75	N = 100	N = 125	
S1(A ₁ B ₁ C ₁ D ₁)	-0.06 \ 93.26	0.54 \ 87.25	1.35 \ 53.30	1.80 \ 43.45	2.31 \ 36.51	39.22
S2(A ₁ B ₂ C ₂ D ₂)	0.24 \ 79.93	1.44 \ 59.60	1.64 \ 53.41	2.48 \ 50.48	3.98 \ 38.83	38.79
S3(A ₁ B ₃ C ₃ D ₃)	0.34 \ 93.07	1.20 \ 91.17	1.33 \ 70.78	1.80 \ 47.90	3.79 \ 37.23	36.19
S4(A ₂ B ₁ C ₂ D ₃)	0.03 \ 99.28	0.60 \ 84.83	2.61 \ 55.33	3.24 \ 41.78	3.66 \ 38.14	35.70
S5(A ₂ B ₂ C ₃ D ₁)	0.61 \ 71.19	2.30 \ 66.38	4.02 \ 53.22	5.18 \ 44.34	6.75 \ 39.73	29.72
S6(A ₂ B ₃ C ₁ D ₂)	0.78 \ 92.93	2.41 \ 65.97	4.17 \ 50.78	5.24 \ 44.02	6.52 \ 39.84	30.60
S7(A ₃ B ₁ C ₃ D ₂)	-0.13 \ 80.39	0.59 \ 53.28	2.05 \ 44.34	3.75 \ 40.53	4.64 \ 33.15	31.73
S8(A ₃ B ₂ C ₁ D ₃)	0.48 \ 61.76	1.06 \ 46.81	2.13 \ 43.52	3.96 \ 43.45	4.72 \ 38.52	33.46
S9(A ₃ B ₃ C ₂ D ₁)	0.22 \ 49.98	1.09 \ 45.11	1.63 \ 45.07	2.80 \ 43.52	5.26 \ 32.61	29.70

不论掺加再生粗骨料与否,混凝土外表面的剥蚀都会随着冻融循环次数 N 的增加而呈现出越来越严重的趋势.试块在冻融循环初期,试块外观变化并不显著,当冻融次数逐渐增加循环到 50 次,各组试件水泥浆包裹的小砂石脱离下来,形成了这些细小孔洞,但是,混凝土表面水泥浆的整体性还是完整的;当冻融循环次数为 75 次时,混凝土表面的孔洞貌似有所减少,其实这是由于混凝土表面水泥浆的整体性开始被破坏,失去整体性的水泥浆把部分孔洞填补了;当冻融循环次数为 100 次时,混凝土表面的水泥浆开始大范围剥落,少部分粗骨料开始暴露;当冻融循环次数为 125 次时,混凝土表面的水泥浆基本上全部脱落,粗骨料开始大面积裸露,试块四角有少量残缺.

再生混凝土的表面损伤较普通混凝土的严重,且随着再生粗骨料取代率的增多,混凝土表面剥离逐渐增加,剥蚀现象越来越严重.这与混凝土质量损失率趋势吻合,如图 2 所示.

综合表 3 中各组质量损失率和相对动弹性模量,再生混凝土掺量为 0% 的 S1 组、50% 的 S4 组、100% 的 S7 组的相对抗冻性达到最好. S4 组的相对

动弹性模量变化情况接近于 S1 组,且 S4 组 50 次后的质量损失情况与陈爱玖^[12]提出的纤维再生混凝土相对动弹性模量的变化情况保持一致.在混凝土中加入聚丙烯纤维对其表面剥落限制相对较小,但它有效地控制了混凝土内部微裂缝的生成与发展,从而提高了混凝土内部的抗渗性.

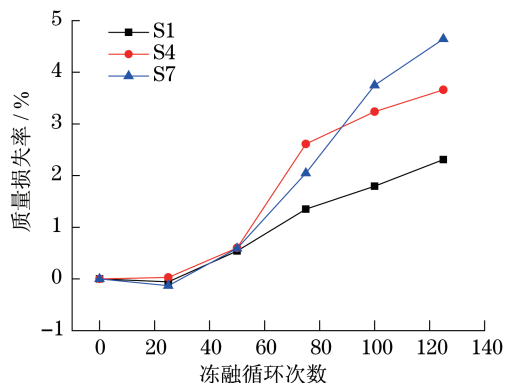


图2 质量损失率随冻融循环次数的变化曲线

Fig.2 Mass loss curve along with the change of number of freeze-thaw cycles

当冻融循环次数达到 50 次后,由于再生混凝土的天然缺陷, S1 组与 S7 组的质量损失率出现较大

的差异.表面附着有大量水泥砂浆且内部存在一定损伤的再生粗骨料由于压碎指标大,本身强度较小,与新的水泥砂浆相结合过程中存在有一些较弱的过渡区,使得全再生粗骨料混凝土的抗冻性能较差^[13].因此,再生混凝土粗骨料的掺量成为再生混凝土抗冻性的主要因素,再生混凝土与其掺量呈负相关.当冻融循环次数达到125次时,S1组、S4组、S7组相对动弹性模量分别为36.51%、36.14%、33.15%,即掺量为50%、100%的再生混凝土的相对动弹性模量相比基准组分别降低了0.37%、3.36%.

2.2 正交分析

根据表3对各组试验结果进行极差分析,结果如表4所示.

表4 极差分析表
Tab.4 Range analysis table

因素	极差	
	抗压强度	相对动弹性模量
A	6.44	2.76
B	3.39	2.75
C	2.19	1.58
D	2.23	2.01

从表4中各因素极差值的大小能够直观地判断出再生混凝土掺量是影响其抗压强度和抗冻性能的主要因素,其次是粉煤灰掺量,再者是聚丙烯纤维掺量,最后为矿粉掺量.为了更加清晰地分析各因素水平的变化对再生混凝土抗压强度以及抗冻性能的影响,绘制出正交分析点图,如图3和图4所示.

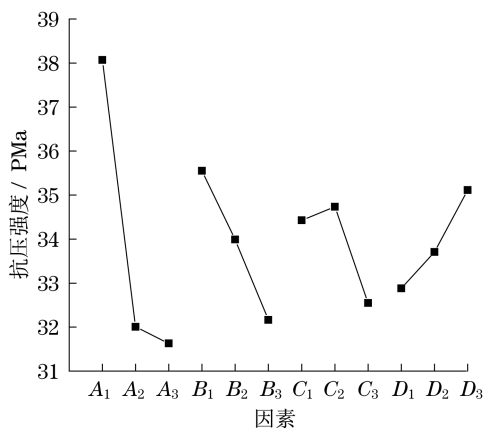


图3 抗压强度正交分析点图

Fig.3 Orthogonal analysis diagram of the compressive strength

从正交分析点图可以看出,当混凝土中掺入再生骨料后,28 d 抗压强度下降很快,这与极差分析

相吻合.掺量为50%、100%的混凝土的抗压强度较基准组分别降低15.93%、22.94%,说明再生粗骨料掺量对混凝土28 d 抗压强度不利,同时显示,随着再生粗骨料掺量的增大,抗压强度呈下降趋势.然而,由于复合微粉部分取代水泥,复掺微粉混凝土的28 d 抗压强度明显低于基准混凝土的.同时掺入纤维,使得强度有所提高,聚丙烯纤维为0.9 kg/m³掺量时抗压强度达到最大值,较基准组增大了2.23 MPa.

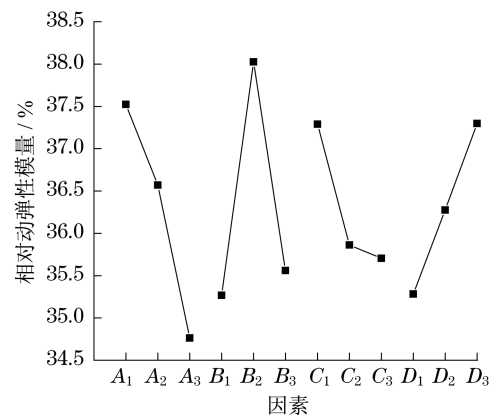


图4 相对动弹性模量正交分析点图

Fig.4 Orthogonal analysis diagram of the relative loss modulus

随着再生粗骨料的增加,相对动弹性模量逐渐下降,这主要是由于再生粗骨料自身使用多年,再次打碎时颗粒棱角增多,使其内部微裂纹增多,且表面附着原有水泥硬化砂浆和石屑,导致抗冻性能随着取代率的增大而减小.当复合微粉为20%粉煤灰加5%矿粉时,相对动弹性模量达到最大值.这也与陈改新等^[14]提出的水泥-粉煤灰-石灰石粉三元复合胶凝材料的填充效应相吻合.三者颗粒间发生“填充效应”,减小了颗粒间的空隙,自由水相对增多,则浆体的流变性能增大.当维勃稠度在18 s以内时,含气量随着维勃稠度的减小而呈增大的趋势,从而间接地增强了混凝土的抗冻性能.同时,在混凝土中加入聚丙烯纤维,纤维均匀地分布在混凝土中,与其形成良好的粘结力,在混凝土注模成型中增加了混凝土内部的约束力,抑制了成型过程中大孔隙和裂缝的产生,使得成型后的机构更加紧密,大大提高了混凝土的抗渗性和抗冻性.

2.3 混凝土冻融后的应力-应变曲线

综合分析以上结论,并兼顾经济效益,最后确定本试验最优配合比为: $A_2B_2C_1D_3$ (优先组),得到工作性能良好、抗压强度和抗冻性较高的再生混凝土.

为了进一步研究再生骨料混凝土的耐久性能,取优先组的水灰比,以未加掺合料和纤维的天然混凝土和全再生粗骨料混凝土分别作为基准组 and 对比组,对正交试验结果中优选出的最优配合比的混凝土与天然混凝土(基准组)以及全再生粗骨料混凝土(对比组)进行对比试验,考察优选结果的合理性。

从图5中可以看出,3组混凝土冻融循环后的轴向应力-应变曲线均由上升段和下降段组成。优先组峰值抗压强度虽未达到基准组的,但相比对比

组的提高了4.6~6.0 MPa。优先组曲线上升段的斜率相比基准组的略小,但相差不大,说明优先组的弹性模量降低不明显。复合微粉颗粒直径细小,颗粒之间相互填充,使其内部更加密实,有效提高了再生混凝土的抗渗性。

此外,相比基准组,优先组的轴向应力-应变曲线下下降段相对较平缓。在同一轴向应力下,优先组的应变能较大,说明优先组混凝土的应变能力增强。这主要是由于聚丙烯纤维在拌合过程中均匀分散在内部并形成密布的三维网络结构,可抵抗由于水结冰引起的膨胀力,降低混凝土在冻融循环条件下的微裂缝的扩展;同时,在砂浆中挤压或阻塞其毛细管,以减少水分损失面积,水分迁移困难,使得毛细管失水收缩形成的毛细张力降低,间接增大了砂浆收缩变形和开裂的阻力,综合增强了混凝土对环境的应变能力。因此,优先组无论在抗压强度还是抗冻性上都具有较好的应变能力。

3 结 论

a. 在冻融过程中,同等条件下掺有再生骨料的混凝土整体外观变化较普通混凝土显著,表面水泥砂浆剥落较严重。

b. 在相同条件下,随着再生骨料掺量的增加,混凝土抗压强度和抗冻性整体呈下降趋势。

c. 结合正交试验分析结论,从资源再利用和经济的角度出发,当采用50%再生混凝土骨料时, $A_2B_2C_1D_3$ 为最优配比组合。

d. 优选组的应变能力大于对比组(全再生混凝土),接近基准组(天然混凝土),优选结果较为合理。再生混凝土掺量为50%,复掺粉煤灰和聚丙烯纤维可以明显改善混凝土的抗压强度和抗冻性。

参考文献:

- [1] 李秋义,高嵩,薛山. 绿色混凝土技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社,2014.
- [2] 李秋义,全洪珠,秦原. 混凝土再生骨料[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.
- [3] 魏应乐. 再生混凝土的耐久性控制措施研究[J]. 混凝土,2010(1):81-85.
- [4] 周宇,郑秀梅,李广军,等. 再生骨料混凝土抗冻性能试验研究[J]. 低温建筑技术,2013(12):14-16.
- [5] 陈宗平,徐金俊,郑华海,等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力-应变本构关系[J]. 建筑材料学报,2013,16(1):24-32.

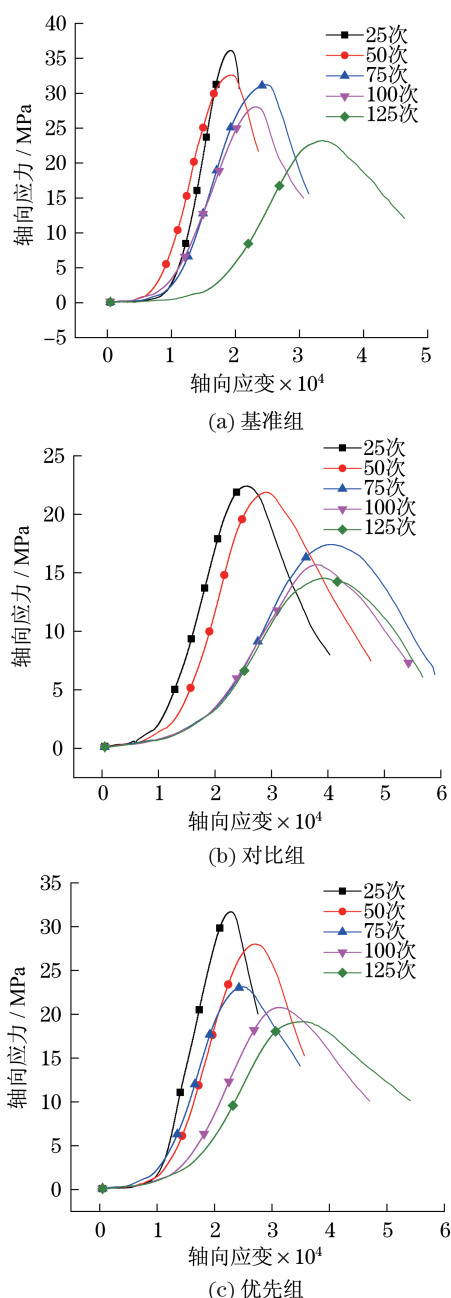


图5 混凝土冻融循环后的轴向应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of concrete after different number of freeze-thaw cycles

- [6] 赵多苍,吴相豪,胡聪.双掺粉煤灰和石灰粉对混凝土耐久性影响的试验研究[J].混凝土,2011(7):50-52.
- [7] FATHIFAZL G,ABBAS A,RAZAQPUR A G,et al. New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21 (10): 601-611.
- [8] 陈爱玖,孙晓培,张敏,等.活性掺合料再生混凝土抗冻性能试验[J].混凝土,2014(6):20-23.
- [9] 解国梁,申向东,贾尚华.纤维粉煤灰混凝土抗冻性能试验研究[J].混凝土,2011(6):102-104.
- [10] HUDA S B, ALAM M S. Mechanical and freeze-thaw durability properties of recycled aggregate concrete made with recycled coarse aggregate [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27 (10): 04015003.
- [11] 何映平.试验设计与分析[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [12] 陈爱玖,王静,杨粉,等.纤维再生混凝土的抗冻性能试验研究[J].混凝土,2013(2):1-4.
- [13] 李秋义,全洪珠,秦原.混凝土再生骨料[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [14] 陈改新,姜福田.大坝混凝土抗裂性影响因素的分析[C]//生态环境与混凝土技术国际学术研讨会论文集.乌鲁木齐:中国硅酸盐学会,2005:237-242.

(编辑:石 瑛)

(上接第281页)

参考文献:

- [1] 杜修力,何立志,侯伟.基于经验模态分解(EMD)的小波阈值降噪方法[J].北京工业大学学报,2007,33(3):265-272.
- [2] 李佳蔓,彭斌,付想平.小波阈值降噪在砌体基本频率识别中的应用[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(3):365-369.
- [3] 李洪泉,董亮,吕西林.基于小波变换的结构损伤识别与试验分析[J].土木工程学报,2003,36(5):52-57,75.
- [4] MA R P, FU H L. Smart active sensing technique using wavelet analysis method on damage detection of composite plate[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2004, 2: 773-777.
- [5] 王明,冯志刚.小波分析应用于预应力混凝土梁中的损伤诊断[J].工业建筑,2010,40(S):133-135,190.
- [6] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3):613-627.
- [7] 赵晓燕,李宏男.一种改进的小波分析消噪方法及其在健康监测中的应用[J].振动与冲击,2007,26(10):137-139.
- [8] 周祥鑫,王小敏,杨扬,等.基于小波阈值的高速道岔振动信号降噪[J].振动与冲击,2014,33(23):200-206.
- [9] 严鹏,李乔,单德山.斜拉桥健康监测信号改进小波相关降噪[J].振动、测试与诊断,2012,32(2):317-322.
- [10] 曹树谦,张文德,萧龙翔.振动结构模态分析:理论、实验与应用[M].天津:天津大学出版社,2001.
- [11] 大崎顺彦.地震动的谱分析入门[M].田琪,译.2版.北京:地震出版社,2008.
- [12] 汪澜涯,彭斌.基于正交设计的砌体墙伪静力试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(S):108-111.
- [13] MITRA S K. Digital signal processing: a computer-based approach[M]. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2005.

(编辑:石 瑛)