

基于正交试验设计的再生骨料透水混凝土力学性能研究

尹志刚, 范巍, 董思健, 赵越

(长春工程学院 吉林省水工程安全与灾害防治工程实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 利用正交试验方法对再生骨料透水混凝土的力学性能和抗冻耐久性进行了研究。研究了微硅粉、增强剂等外掺料和水胶比对再生骨料透水混凝土 28 d 立方体抗压强度、透水系数和连续孔隙率的影响。采用快冻法, 分析了冻融作用下再生骨料透水混凝土质量损失、动弹性模量、抗压强度、CT 扫描断面平均孔隙率的变化规律。试验结果表明: 设计孔隙率和水胶比对透水系数、连续孔隙率和 28 d 抗压强度的影响最大, 微硅粉与增强剂的影响次之。再生骨料透水混凝土的质量损失率、相对动弹性模量、平均抗压强度与 CT 扫描断面平均孔隙率的劣化程度均随冻融循环次数增加而逐渐增大。再生骨料透水混凝土的孔隙率与抗压强度呈负相关, 二者具有良好的相关性。

关键词: 再生骨料; 透水混凝土; 正交试验; 耐久性

中图分类号: TU528.59; TU502⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672—1144(2019)04—0021—05

Experimental Study on the Mechanical Property of Recycled Aggregate Pervious Concrete Based on Orthogonal Design

YIN Zhigang, FAN Wei, DONG Sijian, ZHAO Yue

(Laboratory of Applied Disaster Prevention in Water Conservation Engineering of Jilin Province, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: Orthogonal experiment method was applied to analyze the mechanical properties and frost resistance durability of recycled aggregate pervious concrete. The effects of water-binder ratio, design porosity, micro-silica powder content (mass fraction) and reinforcing agent content (mass fraction) on the 28-day cubic compressive strength, permeability coefficient and continuous porosity of recycled aggregate permeable concrete were investigated. The range analysis of the test results is carried out and the optimal mix ratio is obtained. 120 times of rapid freeze-thaw cycles were carried out with optimum mix design. The variation of mass loss, dynamic modulus of elasticity, compressive strength and average porosity of CT scanning images with freeze-thaw cycles was studied. The experimental results show that the design porosity and water-binder ratio have the greatest influence on permeability coefficient, continuous porosity and 28 d compressive strength, followed by micro-silica powder and reinforcing agent. The deterioration degree of mass loss rate, relative dynamic modulus of elasticity, average compressive strength and average porosity of CT scanning images of recycled aggregate pervious concrete increases with the increase of freeze-thaw cycles; the porosity and compressive strength of recycled aggregate pervious concrete are negatively correlated, and they have a good correlation.

Keywords: recycled aggregate; pervious concrete; orthogonal design; frost resistance durability

透水混凝土是一种具有高孔隙率、良好透水性能的多孔材料, 目前常被用于城市公园道路、停车

场、住宅小区、人行道等轻型荷载路面^[1],但由于其强度较低、易堵塞、长期耐久性较差等特性,也限制了其在更广范围内的应用。据《中国建筑垃圾资源化产业发展报告(2014 年度)》报道我国建筑垃圾总排放量约 15.5 亿 t/a ~ 24.0 亿 t/a,其中建筑垃圾废弃物中废弃混凝土的含量已达 40% 以上,然而这些废弃建筑垃圾资源利用率却不足 5%,除极少数被再生用于非承重结构外,其余大量的建筑垃圾直接用于粗放性工程回填或直接露天堆放,不仅对生态环境带来影响,也极大地造成了资源浪费^[2-3]。因此,如何合理解决废弃混凝土再利用问题逐渐成为工程界和学术界讨论的热点之一。

孙宏友等^[4]通过正交试验研究了目标孔隙率、骨料种类、水胶比、粉煤灰、硅灰掺量、搅拌方式对透水混凝土强度的影响,结果表明目标孔隙率的影响程度最大。姜骞等^[5]研究得出增强剂能够有效改善新拌透水混凝土浆体易剥落沉底的现象,并提高硬化透水混凝土的力学与抗冻融性能。杨小龙等^[6]通过进行重量法的对比试验,得出采用 CT 扫描技术计算透水混凝土堵塞程度是可行的结论。王永海等^[7]对再生骨料透水混凝土掺入无机增强料并发现实验试块的 28 d 抗压强度和弯拉强度提高了 20% 左右。薛冬杰等^[8]通过实验发现再生透水混凝土的 90 d 抗压强度要高于采用普通骨料的透水混凝土。张浩博等^[9]探讨了掺 30% 再生骨料、水灰比、骨料粒径、砂率等因素对透水混凝土物理及力学性能的影响。Wu 等^[10]开展了不同掺合料对普通波特兰透水混凝土的力学性能及冻融耐久性方面的试验研究。解伟等^[11]研究了不同再生骨料和橡胶颗粒掺量对 C20 强度透水混凝土物理性能和力学性能的影响。余乃宗等^[12]研究了再生细骨料混凝土的抗冻性,为再生细骨料在混凝土耐久性方面的应用提供了一定的试验借鉴。

目前关于再生骨料混凝土性能的研究主要集中在普通再生骨料混凝土方面,有关再生骨料透水混凝土力学及冻融耐久性方面的研究还鲜有报道。鉴于此,本文利用正交试验方法对掺加微硅粉、增加剂的再生骨料透水混凝土的力学性能和抗冻耐久性能进行了试验,考察了外掺料、设计孔隙率、水胶比等对再生骨料透水混凝土 28 d 立方体抗压强度、透水系数和连续孔隙率的影响,以期寻求最优配合比,并以最优配合比开展快速冻融循环试验,对冻融后的再生骨料透水混凝土质量损失、动弹性模量、剩余抗压强度、CT 扫描断面平均孔隙率随冻融循环次数的变化规律开展研究,以期对再生骨料透水混凝土在

寒区的工程应用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试验原材料性能

试验选用吉林亚泰鼎鹿牌 P. O42.5 级普通硅酸盐水泥;天然粗骨料(Natural Coarse Aggregate, NCA)选用粒径 4.75 mm ~ 9.50 mm 的瓜子石;再生粗骨料(Recycled Coarse Aggregate, RCA)选用实验室自制 C30 钢筋混凝土梁经机械破碎后人工筛分获得,试验选用骨料基本物理指标见表 1;细骨料选用细度模数为 2.66 的 ISO 标准砂,用量为粗骨料的 8%;矿物掺合料选用 SiO₂ 含量为 94.33% 的微硅粉;选用南京某公司生产的增强剂,其主要成分见表 2;减水剂选用 FDN 萘系高效减水剂,减水率为 21%,含固量 91.51%;试验用水为普通自来水。

表 1 试验选用粗骨料基本物理指标

骨料种类	表观密度 /(kg · m ⁻³)	紧密堆积 密度 /(kg · m ⁻³)	吸水率 /%	压碎指标 /%
NCA	2710	1625	0.8	5.4
RCA	2650	1580	5.3	16.8

表 2 透水混凝土增强剂主要物理性能

SiO ₂ /%	CaO /%	含水率 /%	细度 /%	总碱量 /%	Na ₂ SO ₄ /%	pH
64.68	0.92	3.17	16.87	6.46	4.83	10.26

1.2 正交试验方案设计

为减少试验工作量,利用正交试验设计的原理来设计试验方案,每一因素各取 3 个水平,采用正交表 L₉(3⁴),开展再生骨料透水混凝土力学性能正交试验,基于极差分析和层次分析来处理试验结果,找出满足规程^[8]要求的最优配合比。试验因素与水平见表 3。

表 3 再生骨料透水混凝土正交试验表

水平	水胶比 FA	设计孔隙率 FB/%	微硅粉掺量 FC/%	增强剂掺量 FD/%
1	0.28	15	0	0
2	0.31	18	4	2
3	0.34	21	8	4

试件设计强度为 C20,再生粗骨料掺量为天然粗骨料用量的 30%,配合比设计采用《再生骨料透水混凝土应用技术规程》^[13](CJJ/T 253—2016)的方法和步骤进行配比设计,按照正交试验表确定 9 组试验每立方米再生骨料透水混凝土各材料用量,

其中粗骨料用量为 $1\,460.6\text{ kg/m}^3$, 细骨料为 127.0 kg/m^3 , 纤维 0.6 kg/m^3 , 其它材料用量具体见表4。

表4 1 m^3 再生骨料透水混凝土各材料用量 单位: kg/m^3

试验 编号	不同材料用量				
	水泥	微硅粉	增强剂	减水剂	水
TS-1	425.3	0.0	0.0	4.25	94.09
TS-2	353.4	15.0	7.5	3.76	83.17
TS-3	287.4	26.1	13.1	3.27	72.25
TS-4	372.9	16.2	16.2	4.05	99.27
TS-5	329.6	28.7	0.0	3.58	87.75
TS-6	305.1	0.0	6.2	3.11	76.23
TS-7	348.4	31.0	7.7	3.87	103.99
TS-8	328.5	0.0	13.7	3.40	91.92
TS-9	285.4	12.0	0.0	3.00	79.85

1.3 试件制作流程与试验方法

试件按照规范^[13]要求制备9组 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的立方体试件, 每组3块, 采用插捣成型法, 试件制备后, 在室温下静置24 h后拆模, 放入标准养护室, 养护至28 d。分别测定再生骨料透水混凝土连续孔隙率、透水系数和28 d抗压强度。透水系数试验参考文献^[14]中定水头测试方法; 抗压强度测试依据普通混凝土力学性能试验标准。

2 试验结果与分析

2.1 正交试验极差分析

表5为上述9组正交试验所得的各项测试结果, 对试验结果进一步进行极差分析后, 结果见表

6。由表6可知:

(1) FB是影响试件连续孔隙率的最大因素, 其次分别为因素FC、FA、FD, 参数的最优组合是 $\text{FA}_2\text{FB}_3\text{FC}_1\text{FD}_1$ 。

(2) FB是影响试件连续孔隙率的最大因素, 其次是FA。说明设计孔隙率越大, 试件的透水性越强。参数的最优组合是 $\text{FA}_2\text{FB}_3\text{FC}_1\text{FD}_1$ 。

(3) 各因素对抗压强度影响程度的主次顺序为设计孔隙率、水胶比、增强剂掺量、微硅粉掺量。根据抗压强度的试验结果, 参数的最优组合是 $\text{FA}_2\text{FB}_1\text{FC}_2\text{FD}_3$ 。

表5 各组正交试验结果

试验 编号	连续孔隙率 /%	透水系数 / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	28 d抗压强度 /MPa
TS-1	19.8	2.8	14.5
TS-2	21.4	3.3	10.3
TS-3	23.6	3.7	12.5
TS-4	20.4	3.0	27.1
TS-5	21.5	3.4	15.6
TS-6	25.7	4.5	13.4
TS-7	18.5	2.3	24.4
TS-8	19.4	2.9	16.3
TS-9	25.8	3.5	16.0

经上述正交试验结果分析, 在满足规程中各项规定的前提下, 得到最优配合比, 见表7。实测该配合比下28 d抗压强度为 28.6 MPa , 连续孔隙率为 13.4% , 透水系数 1.6 mm/s 。

表6 连续孔隙率、透水系数和28 d抗压强度的极差分析表

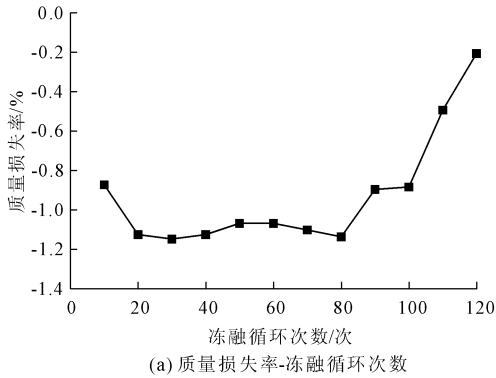
检测指标	影响因素	K_1	K_2	K_3	$k_1 = K_{1/3}$	$k_2 = K_{2/3}$	$k_3 = K_{3/3}$	极差 R	最优方案
连续 孔隙率	FA	64.80	67.6	63.70	21.60	22.53	21.23	1.30	A2
	FB	58.70	62.3	75.10	19.57	20.77	25.03	5.47	B3
	FC	67.90	67.6	63.60	22.63	22.53	21.20	1.43	C1
	FD	67.10	65.6	63.40	22.37	21.87	21.13	1.23	D1
透水 系数	FA	9.80	10.9	8.70	3.27	3.63	2.90	0.70	A2
	FB	8.10	9.6	11.70	2.70	3.20	3.90	1.20	B3
	FC	10.20	9.8	9.40	3.40	3.27	3.13	0.27	C1
	FD	10.53	10.1	9.60	3.51	3.37	3.20	0.31	D1
28 d 抗 压强度	FA	37.30	56.2	56.50	12.40	18.70	18.90	6.40	A2
	FB	66.00	42.2	41.70	22.00	14.00	13.90	7.90	B1
	FC	44.30	53.3	52.50	14.80	17.80	17.50	2.70	C2
	FD	46.00	48.1	55.90	15.40	16.00	18.60	3.30	D3

表 7 正交试验所得最优配合比

材料类别	粗骨料	砂	水泥	微硅粉	增强剂	纤维	减水剂	水
用量/(kg/m ⁻³)	1460.6	127.0	350.0	32.4	16.2	0.6	4.1	125.7

2.2 冻融耐久性分析

通过文献[15]可知,室内开展一次快速冻融循环试验,相当于外界自然环境下的 12 次~15 次冻融循环,为进一步了解再生骨料透水混凝土在冻融环境下的长期耐久性能,且考虑到东北寒冷地区已有透水混凝土路面的耐久性较低的现状(通常 3 a~5 a 就出现表面开裂现象),根据上节正交试验所



得到的再生骨料透水混凝土最优配合比制备试块,开展快速冻融循环试验。共制备 10 组 30 个 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体试块,用于测量经历不同冻融次数后的抗压强度;另制备 100 mm × 100 mm × 400 mm 棱柱体试块 3 块,用于测量经历不同冻融次数后的相对动弹性模量与质量损失。具体抗冻试验结果见图 1。

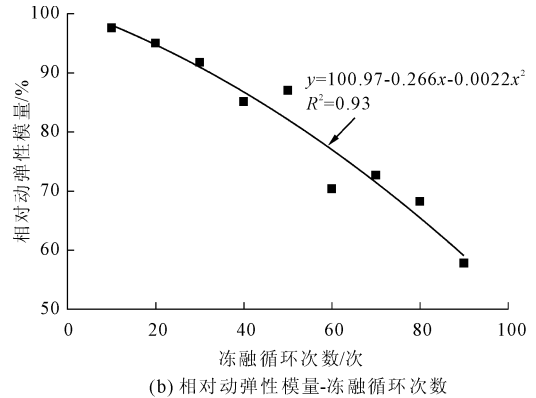


图 1 质量损失率与相对动弹性模量随冻融次数变化曲线

图 1(a)为试件的质量损失率随冻融循环次数的变化曲线。由图 1(a)可以看出,试件的质量损失在冻融过程中变化并不显著,失重率始终处于负值,从整个冻融循环过程中来看,在 80 次冻融后质量损失呈上升趋势。这是由于再生粗骨料自身含有的孔隙较多、吸水率较大;从结构组成来讲,透水混凝土本身的连通孔隙较大,内部有足够的孔隙空间可以适当延缓冻融结冰膨胀而引起的表面冻胀开裂现象。但随着冻融次数的增多,骨料之间的粘结力不足以抵抗冻融引起的周期性疲劳应力,导致再生骨料透水混凝土产生骨料剥落等现象。

图 1(b)为试件的相对动弹性模量随冻融循环次数关系图。从图 1(b)中可以看出,在冻融循环作用下,试件的相对动弹性模量变化规律与普通混凝土试件相似,即随着冻融次数的增加而呈下降趋势。90 次冻融循环后试件的相对动弹性模量降到 60% 以下。利用二次多项式对上述变化关系进行拟合,从图 1(b)中可以看出,拟合得到的相对动弹模随冻融次数的变化规律具有较高的拟合精度和相关性,相关系数在 0.93 以上。

2.3 CT 扫描结果分析

近年来,CT 扫描成为分析混凝土内部孔隙结构

的一种新方法。每间隔 20 次冻融循环后利用医用螺旋 CT 机对经历不同次数冻融循环后的透水混凝土试件(100 mm × 100 mm × 100 mm)进行 CT 扫描,设定 CT 扫描断面间距为 2.5 mm,这样就得到透水混凝土试件内部不同扫描间距下孔隙分布的真实图像,见图 2,对 CT 扫描断面经 MATLAB 数字图像处理技术后可获得试件在冻融前后的孔隙劣化情况。

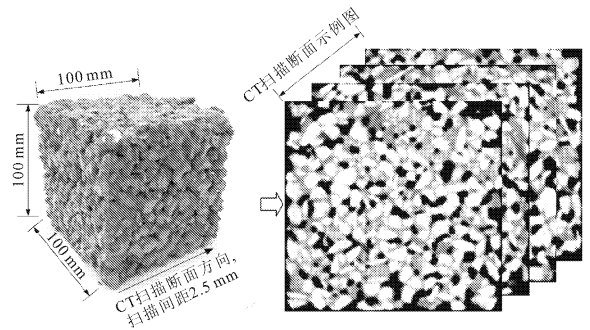


图 2 再生骨料透水混凝土断面 CT 扫描断面切片图

图 3 为再生骨料透水混凝土孔隙率分布与冻融循环次数的关系。其中,横轴表示不同 CT 扫描断面距离,纵轴为不同冻融次数下的 CT 扫描图像各断面的孔隙率。由图 3 可以看出,随着冻融循环次数的增多,透水混凝土试件的 CT 扫描断面平均孔

隙率逐渐增大。20 次冻融循环后 CT 扫描断面平均孔隙率为 15.4%,随着冻融次数的不断增加,40 次、60 次、80 次、100 次冻融循环后,CT 扫描断面平均孔隙率较 20 次分别增大了 1.19 倍、1.33 倍、1.53 倍、1.89 倍。

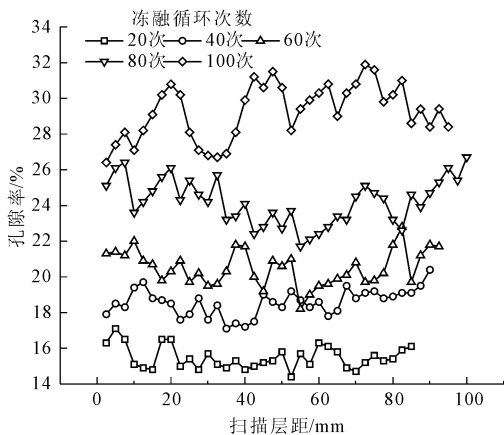


图 3 再生骨料透水混凝土孔隙率分布与冻融循环次数的关系

2.4 冻融后抗压强度与孔隙率分析

抗压强度是检验混凝土力学性能的一项重要指标。图 4 为再生骨料透水混凝土试件抗压强度与冻融循环次数的关系。由图 4 可知,在冻融循环作用下,试件的抗压强度变化规律与普通混凝土试件相似,即随着冻融次数的增加而呈下降趋势。在 70 次冻融循环之前,试件的抗压强度下降速率较为缓慢;70 次冻融循环之后,抗压强度的下降速率明显变大。

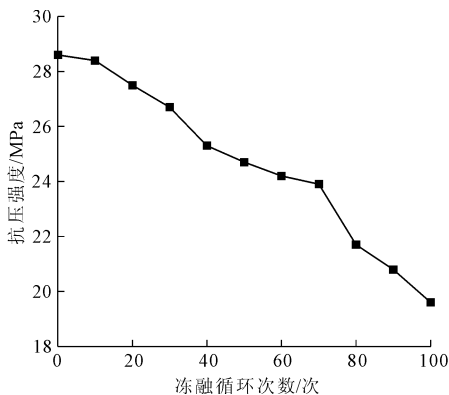


图 4 抗压强度与冻融次数关系

图 5 为再生骨料透水混凝土试件经历冻融后 CT 扫描断面平均孔隙率 p 与抗压强度的关系。由图 5 可见,试件的抗压强度随着孔隙率的增大而逐渐降低,表明在冻融循环作用下试件的孔隙率 p 与抗压强度呈负相关。在冻融循环的不断作用下,试

件内部孔隙率劣化程度逐步增大,内部密实程度和骨料胶结能力变弱,进而导致其力学性能逐步下降。利用二次多项式对再生骨料透水混凝土抗压强度与 CT 扫描断面平均孔隙率 p 的关系进行拟合,从图中可以看出,拟合得到的冻融后抗压强度与孔隙率 p 的变化规律具有较高的拟合精度和相关性,相关系数在 0.98 以上。

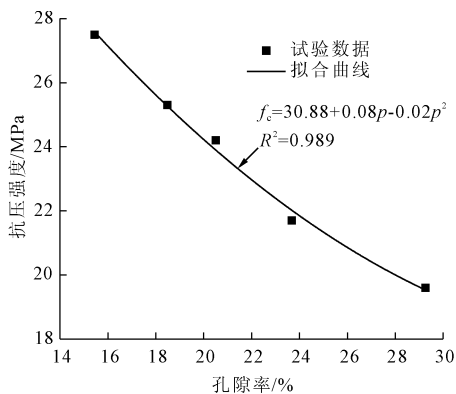


图 5 冻融后孔隙率与抗压强度的关系

3 结 论

本文主要基于正交试验设计研究了再生骨料透水混凝土力学性能与冻融耐久性,试验研究了微硅粉、增强剂等外掺料和水胶比对再生骨料透水混凝土 28 d 立方体抗压强度、透水系数和连续孔隙率的影响,并以正交试验得到的最优结果开展了快速冻融循环试验,基于以上试验数据,得出如下结论:

(1) 影响再生骨料透水混凝土连续孔隙率和透水系数的最大的因素是设计孔隙率,水胶比、微硅粉和增加剂掺量影响程度较为接近。根据抗压强度的试验结果,参数的最优组合是 $FA_2FB_1FC_2FD_3$ 。

(2) 基于正交试验得到的最优配合比开展的快速冻融循环试验结果可知,随冻融循环次数增加,再生骨料透水混凝土的质量损失率、相对动弹性模量、平均抗压强度与 CT 扫描断面平均孔隙率的劣化程度均逐渐增大。

(3) 随着冻融次数的增多,试件内部孔隙率劣化程度逐步增大,内部密实程度和骨料胶结能力变弱,进而导致其力学性能逐步下降。再生骨料透水混凝土抗压强度与 CT 扫描断面平均孔隙率 p 之间具有良好的相关性,相关系数在 0.98 以上,表明再生骨料透水混凝土的孔隙率与抗压强度呈负相关。

(下转第 44 页)

施工所引起的基坑及区间隧道位移变形规律,对类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [2] 曹 顺. 动载条件下地铁运行时对上跨深基坑开挖的影响研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.
- [3] 高广运,吴 勇,张先林,等. 深基坑开挖与邻近隧道相互影响的分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S2): 114-117.
- [4] 唐鹏军. 邻近地铁出入口深基坑支护方案的研究及优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 186-191.
- [5] 邹伟彪,张冬梅,蔡雄威. 基坑开挖对邻近地铁变形的实时监测与数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(S2): 1728-1731.
- [6] 唐 仁,林本海. 基坑工程施工对邻近地铁盾构隧道的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S1): 1629-1634.
- [7] 宋兆锐,王 强,徐 岩,等. 基坑开挖对邻近地铁区间隧道的影响分析[J]. 隧道建设, 2011, 31(S1): 214-219.
- [8] 陈思明,欧雪峰,韩雪峰,等. 临近既有地铁隧道新建基坑的数值计算分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1585-1592.

- [9] 戚长军,刘争宏,余武术,等. 基坑开挖对既有盾构隧道与地层的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 142-146.
- [10] 高 强,于文龙. 市政隧道基坑开挖对既有下卧地铁盾构隧道影响分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(4): 311-317.
- [11] 赵志强,张冬梅. 临近基坑开挖对地铁区间隧道影响评价[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 1040-1046.
- [12] 丁 毅,刑艳如. 超长、超大基坑开挖对临近地铁结构安全影响的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 170-175.
- [13] 丁 乐. 基坑开挖对邻近地铁车站安全影响的三维有限元分析——以西朗公交枢纽站为例[J]. 隧道建设, 2015, 35(4): 547-548.
- [14] 吕高乐,易领兵,杜明芳,等. 软土地区双侧深基坑施工对邻近地铁车站及盾构隧道变形影响的分析[J]. 地质力学学报, 2018, 24(5): 682-691.
- [15] 魏 纲,胡凌威,朱佳定. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的数值分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 46-49, 56.
- [16] 魏 纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1421-1428.
- [17] 雷裕霜. 上跨地铁基坑开挖对区间隧道变形的影响与控制研究[D]. 泉州:华侨大学, 2017.

(上接第 25 页)

参考文献:

- [1] 宋中南,石云兴. 透水混凝土及其应用技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 李秋义. 混凝土再生骨料[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [3] 彭 成,肖苗良,叶恒达,等. 再生混凝土耐久性研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 126-130.
- [4] 孙宏友. 基于正交试验法的透水混凝土配合比设计和试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [5] 姜 骞,周华新,谢德擎,等. 透水混凝土增强剂对透水混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2018(1): 64-67.
- [6] 王永海,寇卫锋,周永祥,等. 再生骨料透水混凝土力学性能的影响因素研究[J]. 工程质量, 2015, 33(5): 46-50.
- [7] 杨小龙,李 波,李艳博. 基于 CT 扫描技术的透水混凝土堵塞率无损评估方法[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 257-262.
- [8] 薛冬杰,刘荣桂,徐荣进,等. 再生骨料透水性混凝土的制备与基本性能研究[J]. 混凝土, 2013(6): 124-

127.

- [9] 张浩博,杜晓青,寇佳亮,等. 再生骨料透水混凝土抗压性能及透水性能试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(2): 247-256.
- [10] Wu H, Liu Z, Sun B, et al. Experimental investigation on freeze - thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC)[J]. Construction and Building Materials, 2016, 117: 63-71.
- [11] 解 伟,范程程,陈爱玖,等. 再生骨料和橡胶颗粒对透水混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1492-1498.
- [12] 余乃宗,刘卫东,欧阳瑞,等. 再生细骨料对混凝土力学性能及抗冻性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 117-122.
- [13] 再生骨料透水混凝土应用技术规程: CJJ/T 253—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
- [14] 郑木莲. 多孔混凝土的渗透系数及测试方法[J]. 交通运输工程学报, 2006(4): 41-46.
- [15] 李金玉,曹建国,徐文雨,等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 水利学报, 1999(1): 41-49.