

制备参数对矿渣矿物聚合物透水混凝土性能的影响

宋学锋, 王琨铭

(西安建筑科技大学材料与矿资学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 采用矿渣矿物聚合物代替传统硅酸盐水泥, 通过正交试验研究了液胶比、骨胶比及成型压力三因素对所制备透水混凝土抗压强度、空隙率及透水系数等主要性能的影响, 利用极差法分析了三个因素及不同水平对透水混凝土综合性能影响的显著性关系; 在此基础上, 利用单因素试验进一步测试了骨胶比、骨料粒径对所制备透水混凝土强度、空隙率及透水系数的影响规律。研究表明: 骨胶比对透水混凝土主要性能影响最为显著, 当骨胶比为 4:1~7:1 时, 随骨胶比增大, 抗压、抗折强度减小, 空隙率增大, 透水系数增大; 当骨胶比较大时, 采用 5~10 mm 骨料制备的透水混凝土其综合性能优于 3~5 mm 骨料制备的透水混凝土。

关键词: 矿渣; 矿物聚合物; 透水混凝土; 透水系数; 力学性能

中图分类号: TU-528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0284-05

Influence of preparation parameter on properties of slag-geopolymer pervious concrete

SONG Xuefeng, WANG Kunming

(School of Materials & Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The pervious concrete was made by using blast furnace slag geopolymer instead of traditional Portland cement. The effect of water-binder ratio, aggregate-binder ratio and molding pressure on compressive strength, porosity and permeability of pervious concrete by orthogonal experimental design were studied, and the effect of three factors and different levels on combination property of pervious concretes was analyzed by Range method. On this basis, the influence of water-binder ratio and aggregate size on intensity, porosity and permeability coefficient of the concrete by single factor variable test were further researched. The result showed that the bone-binder ratio has more obvious influence, and the compressive strength and flexural strength decreases with the bone-binder ratio increasing. The porosity and permeability coefficient increase at the bone-binder ratio of 4:1 to 7:1. The pervious concrete made of 5~10 mm particle size aggregate has better performance than that of 3~5 mm particle size aggregate.

Key words: slag; geopolymer; pervious concrete; permeability coefficient; mechanical property

透水混凝土是一种具有连续空隙结构的生态混凝土, 具有优异的透水、透气、降噪等功能^[1]。铺设透水混凝土路面或地面, 对缓解城市内涝、保护地下水资源、降低热岛效应、改善土壤生态环境具有重要意义, 是建设“海绵城市”的基本措施之一^[2-4]。

国内外学者就提高透水混凝土的性能进行了大量而富有成效的研究工作(配合比设计理论^[5]、性能测试与评价方法^[6]、堵塞机理^[7]等), 既有研究成果对透水混凝土的技术进步及应用起到了积极推进作用。但也必须指出, 目前制备透水混凝土

的胶凝材料多以通用硅酸盐水泥为主, 该胶凝体系存在凝结硬化慢、绝对强度低、耐磨性差等缺陷, 难以协调强度与透水系数二者间的矛盾关系, 大大限制了透水混凝土在重载路面或地面中的推广应用。

鉴于矿渣矿物聚合物具有早强、高强、耐磨性高等性能特点^[8], 本研究提出了以矿渣矿物聚合物代替传统硅酸盐水泥制备透水混凝土的技术思路。结合透水混凝土的力学性能、透水系数、空隙率三个主要性能指标, 通过正交试验及单因素试验分析了骨胶比、液胶比、成型压力及骨料粒

径对所制备透水混凝土性能的影响规律。

1 试验

1.1 原材料

矿渣：韩城德龙 S95 级水淬粒化高炉矿渣，质量系数为 2.01，碱度系数为 0.95，活性系数为 0.56，化学组成如表 1 所示。

表 1 粒化高炉矿渣的化学组成/%
Tab. 1 The chemical composition of granulated blast-furnace slag /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
27.85	15.68	0.37	0.88	33.02	0.28	0.47	0.53

水玻璃：波美度为 40.7，模数为 2.8，SiO₂ 含量 24.9wt%，NaO 含量 9.3wt%。不同模数水玻璃通过加入分析纯固体氢氧化钠进行调制。

骨料：石灰质天然碎石，其中 I 型骨料粒径为 5~10 mm，表观密度为 2 700 kg/m³，紧密堆积密度为 1 495 kg/m³；II 骨料粒径为 3~5 mm，表观密度为 2 761 kg/m³，紧密堆积密度为 1 535 kg/m³。

1.2 试验设计

表 2 正交试验设计
Tab. 2 The orthogonal design of experiment table

水平	液胶比 A	骨胶比 B	成型压力 C
1	0.35	3 : 1	1.0
2	0.40	4 : 1	2.0
3	0.45	5 : 1	3.0

表 3 单因素变量试验
Tab. 3 Single factor variable test

试验编号	10	11	12	13	14	15	16	17
液胶比	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
成型压力 /MPa	2	2	2	2	2	2	2	2
骨料	I	I	I	I	II	II	II	II
骨胶比	4 : 1	5 : 1	6 : 1	7 : 1	4 : 1	5 : 1	6 : 1	7 : 1

表 5 试验结果极差分析
Tab. 5 The variance analysis of experiment results

因子 计算值	空隙率/%			透水系数/mm·s ⁻¹			14 d 抗压强度/MPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K ₁	56.84	31.54	51.74	12.30	5.68	11.49	56.24	103.76	73.02
K ₂	55.00	43.28	53.74	14.67	7.71	13.99	61.64	78.39	59.52
K ₃	27.47	64.49	33.83	4.55	18.13	6.04	111.73	47.46	97.07
k ₁	18.95	10.51	17.25	4.10	1.89	3.83	18.75	34.59	24.34
k ₂	18.33	14.43	17.91	4.89	2.57	4.66	20.55	26.13	19.84
k ₃	9.16	21.50	11.28	1.52	6.04	2.01	37.24	15.82	32.36
Δ _R	9.79	10.98	6.64	3.37	4.15	2.65	18.50	18.77	12.52

注：K_i、k_i 分别表示第 i(i=1, 2, 3))水平，每个因素的试验结果总和及平均值，ΔR 表示极差

以液胶比、骨胶比、成型压力作为透水混凝土主要制备参数，通过三因素三水平正交试验分析各参数对所制备透水混凝土空隙率、14 d 抗压强度及透水系数影响显著性水平；以骨胶比为单因素变量，采用两种粒径骨料，分析骨胶比及骨料粒径对所制备透水混凝土 14 d 抗折、14 d 抗压强度、透水系数及空隙率的影响规律。正交试验因素及水平设计如表 2 所示，单因素变量试验设计如表 3 所示。

1.3 透水混凝土主要性能测试

透水系数、抗折强度、抗压强度根据《透水水泥混凝土路面技术规程》CJJ/T 135-2009 进行测试。空隙率按公式(1)进行测量与计算。

$$V = \left[1 - \frac{(W_2 - W_1)}{\rho_w Vol} \right] \times 100\% \tag{1}$$

式中：V 为空隙率(%)；W₂ 为湿重(g)；W₁ 为浮重(g)；ρ_w 为水的密度 g/cm³；Vol 为试块的体积(cm³)。

2 结果与分析

2.1 成型参数对透水混凝土性能影响的显著性分析

表 4 成型参数对透水混凝土主要性能的影响
Tab. 4 Influence of forming parameter on main properties of permeable concrete

编号	试验方案	空隙率/%	透水系数 /mm·s ⁻¹	14 d 抗压强度/MPa
1	A1B1C1	13.89	1.47	28.32
2	A1B2C2	21.39	5.91	15.01
3	A1B3C3	21.56	4.92	12.91
4	A2B1C2	16.60	4.21	20.96
5	A2B2C3	11.22	1.12	29.68
6	A2B3C1	27.18	9.34	11.00
7	A3B1C3	1.05	0.00	54.48
8	A3B2C1	10.67	0.68	33.70
9	A3B3C2	15.75	3.87	23.55

试验以水玻璃为激发剂(模数为1.2,固含量为25%),I型骨料为集料,按照表2正交因素水平表制备透水混凝土,标准养护至14 d,分别测试透水混凝土的空隙率、透水系数及抗压强度,试验结果如表4所示,所示。由图1(a)可知,随液胶比增大,透水混凝土空隙率降低;随骨胶比增大,透水混凝土空隙率增大;随成型压力增大,空隙率先增大后降低。由表5极差计算结果可知,对透水混凝土空隙率影响显著性水平由大到小排列为 $B>A>C$ 。

由图1(b)可知,随液胶比增大,透水混凝土的透水系数先增大后减小降低;随骨胶比增大,透水混凝土的透水系数逐渐增大;

随成型压力增大,透水系数先增大后降低。由表5极差计算结果可知,对透水混凝土透水系数影响显著性水平由大到小排列为 $B>A>C$ 。

由图1(c)可知,随液胶比增大,透水混凝土抗压强度变大;随骨胶比增大,透水混凝土抗压

强度降低;随成型压力增大,透水混凝土抗压强度先降低后增大。由表5极差计算结果可知,对透水混凝土抗压强度影响显著性水平由大到小排列为 $B>A>C$ 。

综上所述,影响透水混凝土三个主要性能指标显著性因素由主至次的循序为B、A、C,且骨胶比为最显著性因素。骨胶比决定了透水混凝土密实堆积后的空隙率,随骨胶比增大,单位体积混凝土中骨料的空隙增加,且浆料减少,浆料对骨料的空隙填充率降低,故透水混凝土的空隙率增加;不考虑混凝土空隙结构的情况下,随空隙率增大,透水系数增加,强度降低。

2.2 骨胶比及骨料粒径对透水混凝土性能的影响

正交试验分析结果表明,骨胶比是影响透水混凝土三大性能指标的关键因素。为此,试验选用不同粒径骨料,以骨胶比为单因素变量,进一步分析了骨胶比对矿渣矿物聚合物透水混凝土的性能影响,试验结果分别如图2—图5所示。

试验结果表明:相同骨料粒径制备的透水混凝土,随骨胶比增大,透水混凝土的抗折、抗压强度明显降低(见图2—图3),而透水系数与空隙率明显提高(见图4—图5);相同骨胶比下,相比于粒径3~5 mm骨料,粒径5~10 mm骨料制备的透水混凝土其抗压、抗折强度较高,透水系数更大,空隙率更高。

文献[9]研究了若干因素对多孔透水混凝土性能的影响,其试验结果表明:相同骨料粒径及级配下,随骨胶比增大,透水混凝土抗压强度降低、空隙率增大、透水系数增高;相同骨胶比下,选用较小粒径骨料配制的透水混凝土,其抗压强度增大、空隙率降低、透水系数降低。对比发现,相同骨料粒径及级配下,随骨胶比增大,透水混凝土抗压强度降低、空隙率增大、透水系数增高,该结论与本研究结果一致;而相同骨胶比下,选用较小粒径骨料配制的透水混凝土强度增高却与本研究相反。

基于透水混凝土的骨架空隙结构(见图6),文献[10]指出透水混凝土的强度主要取决于骨料之间的机械咬合力、骨料与料浆体之间的粘结面积及骨料与浆料间的粘结强度。作者认为,上述观点对于富浆(即较小的骨胶比)下的透水混凝土是成立的,而对于骨胶比较大时,还应同时考虑空隙率及浆体包覆层厚度对强度的影响。事实上,采用较大的骨胶比是保证透水混凝土优异透水性

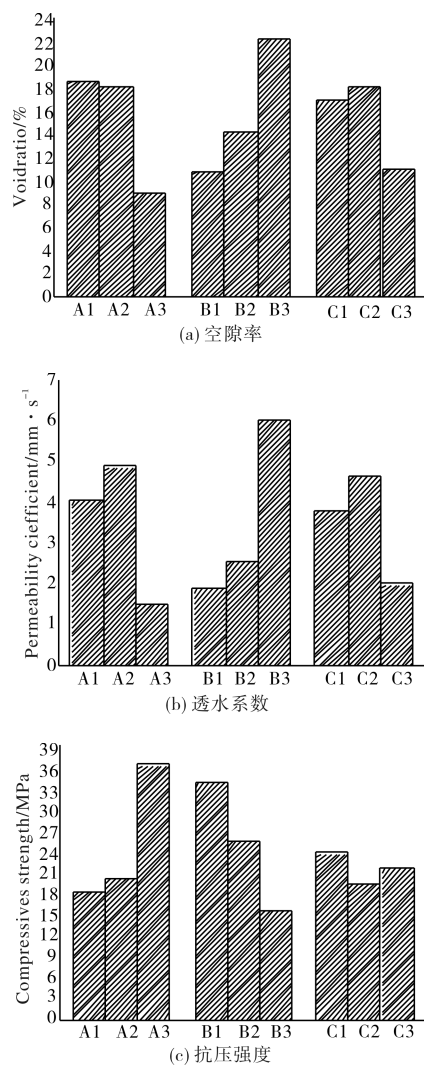


图1 因素与指标趋势图

Fig. 1 The chart of factors and indexes trend

能的必要条件. 随骨胶比增大, 单位体积内浆体数量减少, 浆体对骨料空隙的填充程度降低, 表现为硬化透水混凝土空隙增大, 强度降低, 而透水系数增大, 符合一般的科学规律. 在相同骨胶比下, 利用较小粒径的骨料时, 尽管骨料与浆体的粘结面增加, 但由于浆体包覆层厚度过小, 界面过渡层在整个包覆层厚度中所占比例增加, 界面过渡层固有的原始缺陷(如收缩裂缝)对混凝土强度的负面影响增大, 故在较大骨胶比下采用小粒径骨料配制的透水混凝土强度反而降低, 这正是本研究与文献[9]有关强度测试结果矛盾的根本原因.

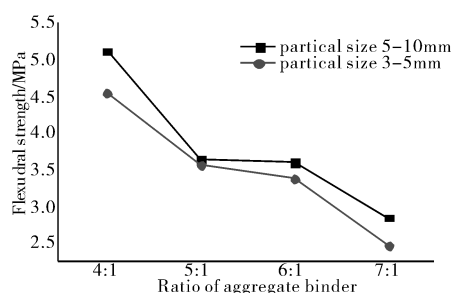


图2 骨胶比及骨料粒径对抗折强度的影响

Fig. 2 Influence of ratio of bone-binder ratio and partial size on compressive strength

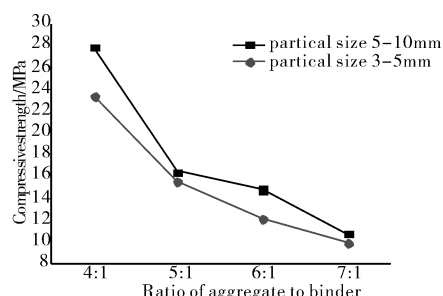


图3 骨胶比及骨料粒径对抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of rate of aggregate to cement and partial size on flexural strength

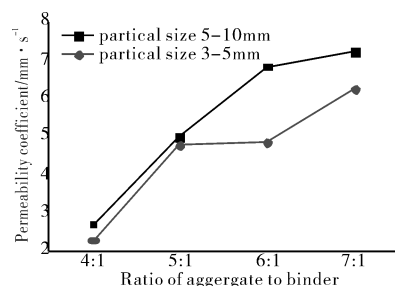


图4 骨胶比及骨料粒径对透水系数的影响

Fig. 4 Influence of rate of bone-binder ratio and particle size on permeability coefficient

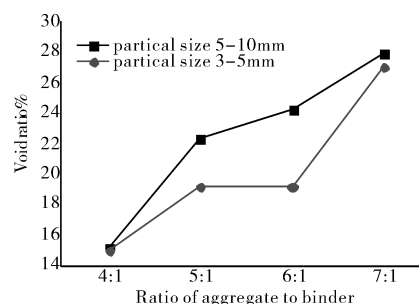


图5 不同骨料粒径对孔隙率的影响

Fig. 5 Influence of different particle size of the aggergates on porosity

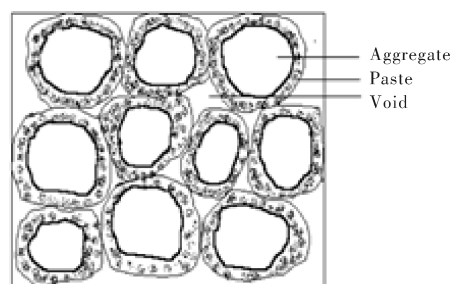


图6 透水混凝土的空隙骨架结构示意图

Fig. 6 A schematic model of pervious concrete

3 结论

(1)液胶比、骨胶比、成型压力作为透水混凝土的三个制备参数, 骨胶比对矿渣矿物聚合物透水混凝土综合性能影响最为显著.

(2)当骨胶比为4:1~7:1时, 随骨胶比增大, 透水混凝土的空隙率增加、抗压与抗折强度降低、透水系数增大.

(3)当采用较大骨胶比时, 透水混凝土的强度受空隙率及浆料包覆层厚度的影响显著, 骨料粒径为5~10 mm的矿渣矿物聚合物透水混凝土性能整体优于骨料粒径为3~5 mm透水混凝土.

参考文献 References

- [1] 徐芬莲, 赵晚群, 卢佳林, 等. 不同增稠材料对C₂O卵石型透水混凝土性能的影响[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2013, 27(S2): 311-314
XU Fenlian, ZHAO Wanqun, LU Jialin, et al. Effect of different thickening materials on the properties of C₂O artificial pebble pervious concrete[J]. Materials Review: Nano and Advanced Materials Album, 2013, 27(S2): 311-314.
- [2] 张贤超, 尹健, 池漪. 透水混凝土性能研究综述[J]. 混凝土, 2010(12): 47-50.
ZHANG Xianchao, YIN Jian, CHI Yi. Summary of performance for pervious concrete[J]. Concrete, 2010

- (12): 47-50.
- [3] 张燕, 顾静忠. 浅析透水混凝土配合比设计技术[J]. 工程建设与设计, 2011(10): 152-154.
ZHANG Yan, GU Jingzhong. Analysis on mixing proportion design of pervious concrete[J]. Construction & Design for Engineering, 2011(10): 152-154.
- [4] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016(1): 79-97.
WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with chinese characteristics[J]. China Soft Science, 2016(1): 79-97.
- [4] 张朝辉, 王沁芳, 杨江金, 等. 透水混凝土配合比研究与设计[J]. 混凝土, 2008(6): 120-122.
ZHANG Chaohui, WANG Qinfang, YANG Jangjin, et al. Study and design on pervious concrete mix proportion[J]. Concrete, 2008(6): 120-122.
- [5] SATA V, WONGSA A, CHINDAPRASIRT P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates[J]. Construction & Building Materials, 2013, 42(9): 33-39.
- [6] 张娜. 透水混凝土堵塞机理试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
ZHANG Na. Experimental study on clogging mechanism of pervious concrete[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [7] 马保国, 朱平华. NaOH-nNa₂SiO₃ 激发制备碱-双渣胶凝材料研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(5): 8-10.
MA Baoguo, ZHU Pinghua. Research on producing alkali cement with double dregs by solid alkali activity[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2001, 23(5): 8-10.
- [8] 蒋正武, 孙振平, 王培铭. 若干因素对多孔透水混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 513-519.
JIANG Zhengwu, SUN Zhengping, WANG Peiming. Effects of some factors on properties of porous pervious concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 513-519.
- [9] YANG J, JIANG G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials[J]. Cement & Concrete Research, 2003, 33(3): 381-386.

(编辑 沈波)

(上接第 270 页)

- [8] 艾帅. 高大空间工业建筑采暖方式的对比研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
AI Shuai. A comparative study on heating mode of industrial buildings in high space[D]. Xi'an: Xi'an: Arch. & Tech. Univ., 2014.
- [9] 钟珂, 王新伟, 华凤皎, 亢燕铭. 高大空间风口位置高度对供暖效果的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2014, 40(3): 334-338.
ZHONG Ke, WANG Xinwei, HUA Fengjiao, KANG Yanming. Effects of the heights of air inlet and outlet on warm-air heating systems in large-height spaces[J]. J. Donghua Univ(Natural Science), 2014, 40(3): 334-338.
- [10] 林坤平, 张寅平, 狄洪发, 等. 地板下送风式相变蓄热电采暖系统[J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 820-824.
LING Kunping, ZHANG Yinping, DI Hongfa, et al. Experimental study of underfloor electric heating system with latent thermal storage a air supply[J]. ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA, 2005, 26(6): 820-824.
- [11] 张东亮, 王子介, 张旭. 干式地板辐射供暖系统实验研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 834-838.
ZHANG Dongliang, WANG Zijie, ZHANG Xu. Experimental study on dry model radiant floor heating system[J]. ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA, 2010, 31(7): 834-838.
- [12] 高志宏, 张伦, 刘晓华, 等. 高大空间末端排热方式[J]. 暖通空调, 2011, 41(3): 88-92.
GAO Zhihong, ZHANG Lun, LIU Xiaohua, et al. Terminal heat removal mode in large space buildings[J]. HV&AC, 2011, 41(3): 88-92.

(编辑 沈波)