

水泥基透水混凝土的配合比优化设计研究

黄国阳, 许浩锋, 黄樊峰, 孙彬峰, 巴明芳*

(宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了优化通用硅酸盐水泥基透水混凝土的配合比设计, 研究了水灰比、浆骨比、矿物掺合料、外加剂对普通硅酸盐水泥基透水混凝土性能的影响规律. 结果表明: 水灰比在 0.20~0.25, 浆骨比为 0.43~0.45 时, 透水混凝土的各项性能最优. 研究结果还表明, II 级粉煤灰和 S95 矿粉单掺掺量分别为胶凝材料总量的 30%~40%和 10%~20%时, 可以有效提高透水混凝土的后期强度, 并且单掺粉煤灰的效果好于单掺矿粉, 而单掺矿粉的透水混凝土透水性能好于单掺粉煤灰; 透水混凝土胶结剂对透水混凝土性能提高的效果优于聚羧酸外加剂, 并存在适宜掺量范围.

关键词: 透水混凝土; 水灰比; 浆骨比; 矿物掺合料; 化学外加剂

中图分类号: TQ52

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 05-0059-06

近年来城市内涝严重, 大多数城市迫切需要
对下水道进行扩建^[1]. 随着城镇化步伐的加快, 绝
大多数的城镇道路被普通硅酸盐混凝土所覆盖,
使雨水等形成的地面水流只能通过城市地下排水
系统排除, 时常就有城市道路大面积积水给居民
出行带来不便的报道^[2-3]. 而透水混凝土通过胶结
浆体薄层包裹在粗骨料颗粒表面, 作为骨料颗粒
间的胶结层, 形成骨架-孔隙结构^[4], 具有透气、透
水、吸声降噪、净化水体、改善地表土壤的生态环
境、缓解地表径流和城市热岛效应等优良的使用性
能^[5]. 与普通混凝土相比, 透水混凝土在强度及其
他性能方面有着明显差异, 因此透水混凝土在性
能改善方面的研究具有非常重要的意义.

Ghafoori 等^[6]首先阐述了不含细骨料混凝土的
概要, 分析了其物理力学性质及状态. Ibrahim 等^[7]
对不同配合比的透水混凝土进行了抗压和冻融试
验, 提出了混凝土的配合比对透水混凝土力学性
能产生直接的影响. Sonebi 等^[8]采用两水平(最大
值和最小值)析因试验设计研究了水灰比大小、骨
料数量及水泥用量对透水混凝土各种性能的影响.
Zaetang 等^[9]研究发现, 浆体骨料的比例均可以使

混凝土的强度和透水系数发生变化, 轻质骨料的
使用会使混凝土的强度下降, 而透水系数则会增
大. Lian 等^[10]研究了孔隙率和骨料强度对透水混
凝土强度的影响. 刘叶峰等^[11]针对混凝土强度进
行了改变配合比、粗骨料和掺合料的实验, 得到
了适宜提高透水性混凝土抗压强度的最佳配合比.
杨静等^[12]在试验中通过掺入矿物细掺料和外加
剂, 改进了透水混凝土的微观结构, 提高了水泥
黏结剂的黏结强度. 王艳艳等^[13]研究了掺入不
同种类掺合料对透水混凝土强度和透水性能的
影响, 证明了双掺粉煤灰与 EVA 聚合物乳液或
玄武岩纤维与 EVA 聚合物乳液在保证透水混
凝土的透水性基本不变下, 其强度均提高. 徐仁
崇等^[14]研究了以设计孔隙率、水胶比、骨料粒
径与级配、体积砂率为参数的透水混凝土配合
比设计方法. 陈瑜^[15]和郑木莲等^[16]分别从外
加剂和矿物掺合料的作用效果、透水混凝土的
强度发展关系、弹性模量的测试方法、透水混
凝土最佳配制的条件等方面进行了大量深入的
研究.

综合以上分析可以看出, 目前针对水灰比、
浆骨比、掺合料等单材料因素对透水混凝土性
能的影

收稿日期: 2018-11-02.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51478227, 51778302); 浙江省自然科学基金(LY17E080009); 宁波市自然科学基金(2017A610311); 宁波大
学校级一般项目(2019SRIP1425).

第一作者: 黄国阳(1995-), 男, 浙江东阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 高性能绿色建筑材料. E-mail: 724169602@qq.com

*通信作者: 巴明芳(1975-), 女, 山东滨州人, 博士/副教授, 主要研究方向: 高性能绿色建筑材料. E-mail: bamingfang@nbu.edu.cn

响研究已经有所开展,但针对以上多个材料因素对透水混凝土的各项性能的综合影响研究还十分有限。本文基于以上问题,为了改善透水混凝土的各项性能,分别研究了水灰比、浆骨比、矿物掺合料、化学外加剂种类和掺量等多个因素作用下对透水混凝土的影响,并通过研究得到各个材料的最优配制参数范围,从而为透水混凝土的工程应用提供一定的理论和技术参数。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用海螺牌 P·O42.5 级,矿物掺合料为 II 级粉煤灰和 S95 磨细高炉矿渣粉,相应化学组成见表 1。化学外加剂分别为透水混凝土胶结剂(TJJ)和聚羧酸高效减水剂(TJS),骨料选用单粒级配碎石(5~10 mm),表观密度 2 670 kg·m⁻³,堆积密度 1 425 kg·m⁻³,且含泥量<0.5%,针片颗粒含量<10%。

表 1 胶凝材料的化学组成(质量分数) %

胶凝材料	主要组分					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
P·O42.5	24.5	4.5	3.5	55.2	4.0	2.9
矿粉	32.95	13.99	2.91	34.5	7.66	-
粉煤灰	57.2	20.0	9.1	5.1	1.8	1.7

1.2 试验配合比

固定浆骨比(浆体体积/骨料体积)为 0.43,按照体积法设计水灰比(水质量/水泥质量)分别为 0.20、0.25、0.30 的透水混凝土配合比,具体见表 2。

表 2 不同水灰比透水混凝土的配合比

编号	P·O42.5/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	TJJ/ (kg·m ⁻³)	骨料/ (kg·m ⁻³)	目标孔 隙率/%
T20	429	86	10.73	1 400	25
T25	392	98	9.80	1 400	25
T30	361	108	9.03	1 400	25

固定水灰比为 0.25,按照体积法设计了浆骨比分别为 0.35、0.40、0.43、0.45 的透水混凝土配合比,具体见表 3。其中,化学外加剂为透水混凝土胶结剂,掺量为水泥质量的 2.5%。

矿物掺合料对透水混凝土的影响试验采用水灰比 0.36,浆骨比(体积比)为 0.43 的配合比作为标准组 T0。掺入其中的粉煤灰和矿粉试件编号分别以 TF 和 TS 标示,掺量分别以 10%、20%、30%、

表 3 不同浆骨比透水混凝土的配合比

编号	P·O42.5/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	TJJ/ (kg·m ⁻³)	骨料/ (kg·m ⁻³)	目标孔 隙率/%
TG35	315	79	7.88	1 400	25
TG40	360	90	9.00	1 400	25
T25	392	98	9.80	1 400	25
TG45	405	101	10.13	1 400	25

表 4 单掺粉煤灰和矿渣粉的透水混凝土配比 kg·m⁻³

编号	P·O42.5	粉煤灰	矿渣粉	水	TJJ	骨料
T0	346	-	-	125	13.80	1 500
TF10	311	35	-	125	13.80	1 500
TF20	277	69	-	125	13.80	1 500
TF30	242	104	-	125	13.80	1 500
TF40	208	138	-	125	13.80	1 500
TS10	311	-	35	125	13.80	1 500
TS20	277	-	69	125	13.80	1 500
TS30	242	-	104	125	13.80	1 500
TS40	208	-	138	125	13.80	1 500

40%的质量百分数等量取代水泥,具体配比见表 4。

研究了 TJJ 和 TJS 两种化学外加剂对透水混凝土性能的影响,其中,TJJ2.5、TJJ4、TJJ5 表示 TJJ 掺量分别为胶凝材料总质量 2.5%、4%、5%时的透水混凝土;TJS1、TJS4 表示 TJS 掺量分别为胶凝材料总质量 1%和 4%的透水混凝土,具体见表 5。

表 5 掺加不同外加剂的透水混凝土配合比 kg·m⁻³

编号	P·O42.5	水	化学外加剂	骨料
T31	431	134	-	1 810
TJJ2.5	431	134	10.78	1 810
TJJ4	431	134	17.20	1 810
TJJ5	431	134	21.50	1 810
TJS1	431	134	4.30	1 810
TJS4	431	134	17.20	1 810

1.3 实验方案

1.3.1 试件制作和养护

按照上文 1.2 节中系列配合比分别成型尺寸为 100mm×100 mm×100 mm 立方体试件 5 组和尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm 的抗折强度试件 2 组,成型过程中按表 6 插捣次数对试件进行插捣,成型完成后用塑料膜覆盖成型面,并放置在温度为(20±3)℃,相对湿度为(70±5)%的室内,养护 24 h 后拆模,拆模后用塑料膜包裹,继续养护至 7 d 和 28 d 龄期,

进行力学性能和透水性能试验,其中矿物掺合料影响试件分别养护至7 d和14 d进行各项性能试验。

表6 试件分层插捣次数分布

试件尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	四角/ 次	侧面/ 次	平面底部/ 次
100×100×100	1	3	9
100×100×300	1	3	9

1.3.2 对力学性能的影响试验

透水混凝土抗压、抗折强度的测定按照普通混凝土抗压强度测定方法,参照规范 GB/T 50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,试验仪器采用万能试验机。

1.3.3 透水系数试验测定

透水系数是透水混凝土透水性能的重要指标,本试验采用定水头法测透水系数,参照标准 JC/T 945-2005。测量的透水系数按照下式进行计算。

$$K_T = (L/H) \times (Q/t) \times A,$$

式中, K_T 为透水系数, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; L 为试样厚度, $L=5 \text{ cm}$; H 为透水圆筒水位与溢流水槽水位之差, $H=30 \text{ cm}$; Q/t 为单位时间内流出的水量, $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; A 为试样上表面面积, $A=78.54 \text{ cm}^2$ 。

2 试验结果与分析

2.1 水灰比和浆骨比对透水混凝土力学性能和透水性能的影响

2.1.1 水灰比的影响

图1是不同水灰比对透水混凝土力学性能的影响结果。从图1(a)可见,在固定浆骨比条件下,随着水灰比的降低,透水混凝土的抗折强度没有呈现出增加趋势,当水灰比为0.25时,其抗折强度最大。这是因为水灰比太低时,浆体中水泥体积含量增大,水化反应不够充分,从而导致水灰比为0.20的试件抗折强度明显低于水灰比为0.25的试件。当水灰比增加至0.3时,相同体积的浆体中水量增大,骨料跟浆体粘结力降低,导致其强度降低。从图1(b)中可清楚地看到,水灰比为0.20和0.25的试件抗压强度变化不大,但水灰比超过0.25后,抗压强度明显降低,这与抗折强度的变化规律基本一致。

不同水灰比参数对透水混凝土的透水系数的影响如图2所示。由图可见,随着水灰比的提高,

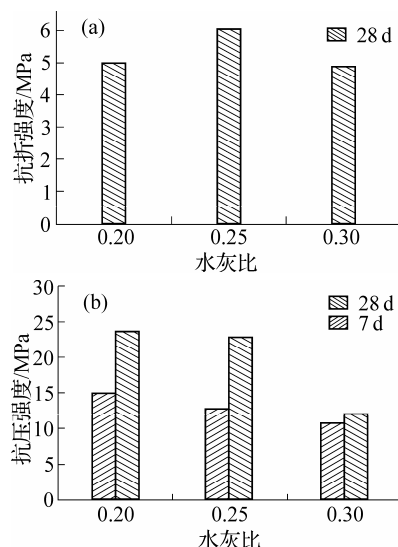


图1 水灰比参数对透水混凝土力学性能的影响

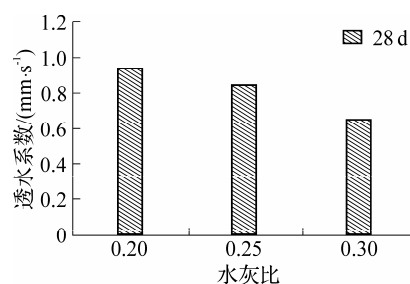


图2 水灰比参数对透水系数的影响

透水系数明显下降,尤其是在水灰比在0.25~0.30时,透水系数下降十分明显,这是因为随着水灰比的增大,浆体粘聚性降低,体系中开始出现下沉浆体,将部分连通孔隙堵塞,从而使得透水混凝土的透水能力下降,透水系数也随之出现下降。

2.1.2 浆骨比的影响

不同浆骨比对透水混凝土的力学性能的影响结果如图3所示。从图3(a)可见,随着浆骨比的增大,透水混凝土抗折强度整体呈现先增大后减小的趋势。浆骨比为0.43时,抗折强度达到最大值;随着浆骨比继续增大,抗折强度反而减小,这是因为浆骨比超过一定的数值后,多余浆体会出现沉积现象,浆体对骨料的胶结强度也会随之降低,从而降低了透水混凝土的强度。从图3(b)可见,随着浆骨比的增大,透水混凝土抗压强度也是先增大后减小,当浆骨比为0.43时,抗压强度达到最大值。这与抗折强度随着浆骨比的变化规律相一致。

不同浆骨比(浆体体积/骨料体积)对透水混凝土的透水系数影响结果如图4所示。从图4可见,

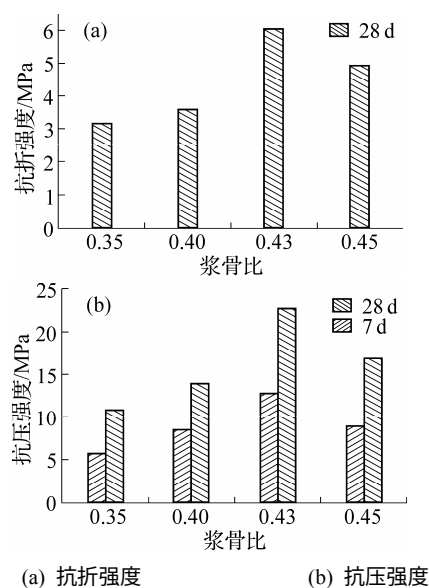


图3 浆骨比参数对透水混凝土力学性能的影响

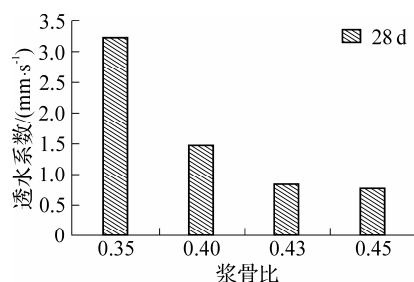


图4 浆骨比参数对透水系数的影响

随着浆骨比的上升, 透水系数明显下降, 尤其是浆骨比在 0.35~0.40 时, 透水系数下降十分明显, 这是因为随着浆骨比的增大, 骨料表面浆体包裹层厚度增加, 骨料之间的空隙减小, 随着浆骨比进一步增加, 剩余浆体出现沉浆现象, 底部部分连通孔隙出现堵塞, 透水系数随之下降。

2.2 矿物掺合料对透水混凝土力学性能和透水性能的影响

2.2.1 对力学性能的影响

不同掺量粉煤灰和矿粉对透水混凝土的力学性能的影响如图 5 所示。从图 5 可见, 单掺相同掺量粉煤灰的透水混凝土抗折强度要明显高于掺加相同掺量矿粉的透水混凝土; 同时单掺粉煤灰的透水混凝土随着粉煤灰掺量的增加, 其抗折强度缓慢提升。当单掺粉煤灰掺量为 40% 时, 早期抗折强度增长明显, 而单掺矿粉的透水混凝土抗折强度变化不明显。

图 6 是粉煤灰和矿粉分别对透水混凝土抗压

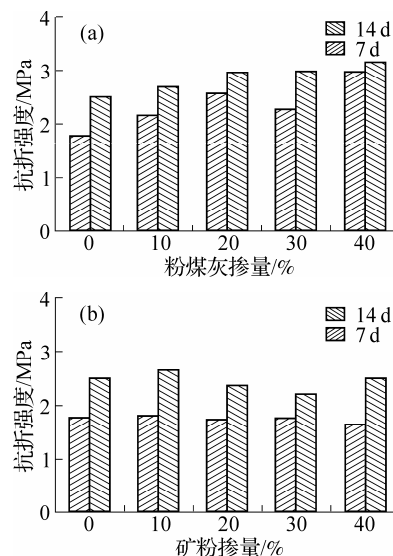


图5 粉煤灰和矿粉对混凝土抗折性能的影响

强度的影响结果。从图 6 可见, 掺加相同掺量粉煤灰的透水混凝土抗压强度整体明显高于掺加相同掺量矿粉试件, 但掺量为 10% 时, 单掺矿粉的透水混凝土抗压强度要大于相同掺量单掺粉煤灰的透水混凝土强度。同时单掺粉煤灰的透水混凝土随着粉煤灰掺量的增加, 其抗压强度呈缓慢增大趋势, 而且当单掺粉煤灰掺量为 40% 时, 其早期抗压强度增长明显; 而单掺矿粉的透水混凝土抗压强度先增大后减小, 在其掺量为 10% 时, 透水混凝土抗压强度最大。

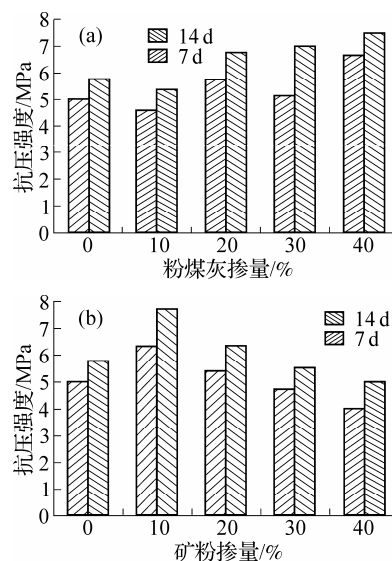


图6 粉煤灰和矿粉对透水混凝土抗压强度的影响

2.2.2 对透水性能的影响

粉煤灰和矿粉对透水混凝土透水性能的影响

如图 7 所示. 由图可见, 随着粉煤灰和矿粉单掺掺量的增加, 透水混凝土的透水系数呈现出先增大后减小的趋势. 这表明粉煤灰和矿粉单掺掺量超出一定范围后, 透水混凝土透水性能会有所降低. 粉煤灰单掺掺量范围为 30%~40% 时, 其透水系数达到最大值; 而矿粉单掺掺量为 10%~20% 时, 其透水系数达到最大值. 从图 7 还可见, 掺加相同掺量矿粉的透水混凝土透水系数要明显大于单掺粉煤灰的透水混凝土, 因此掺加矿粉的透水混凝土在透水性能方面要优于掺加粉煤灰的透水混凝土.

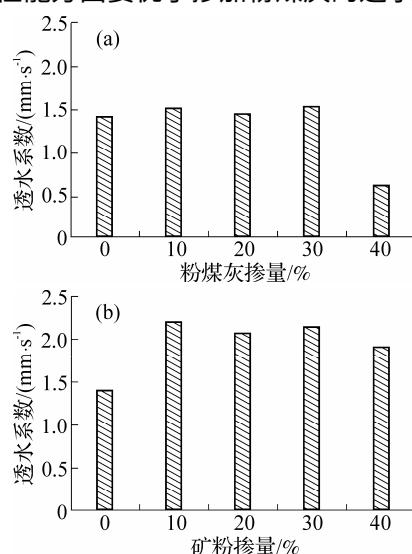


图 7 不同掺量粉煤灰和矿粉对透水系数的影响

2.3 化学外加剂对透水混凝土力学性能和透水性能的影响

2.3.1 对力学性能的影响

图 8 是不同化学外加剂及其掺量对透水混凝土力学性能的影响结果. 从图 8 可见, 加入外加剂的透水混凝土抗折、抗压强度均比对照组明显提高, 其中透水混凝土胶结剂的提高效果要优于聚羧酸. 还可以看出, 随着外加剂掺量增加透水混凝土力学性能都明显下降, 但掺入透水混凝土胶结剂的更为明显. 当透水混凝土胶结剂掺量为 2.5% 时强度最高, 这是因为随着外加剂掺量增加导致浆体粘聚性下降, 从而降低了整体强度.

2.3.2 对透水性能的影响

从图 9 可见, 与对照组相比, 适量的化学外加剂可以改善透水混凝土的粘聚性, 使得沉积浆体减少, 从而增强了其透水能力; 但随着外加剂的掺量增加, 透水混凝土的透水系数呈现出大幅下降

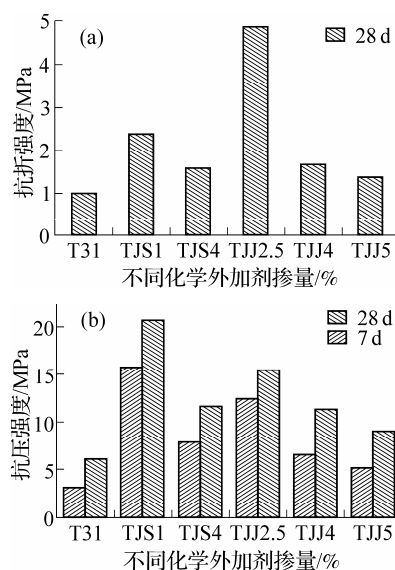


图 8 化学外加剂对透水混凝土力学性能的影响

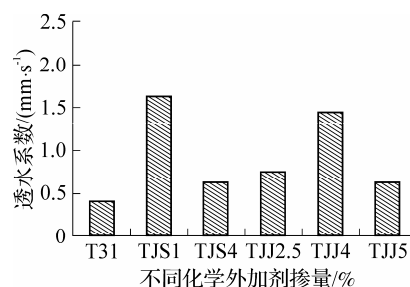


图 9 化学外加剂对透水混凝土透水性能的影响

趋势. 因此透水混凝土外加剂品种和掺量要进行适当的选择.

3 结论

(1) 水灰比在 0.20~0.25 时透水混凝土的抗折强度、抗压强度及透水性能最优. 固定水灰比, 当浆骨比(浆体体积/骨料体积)参数在 0.43~0.45 范围时, 透水混凝土的力学性能和透水性能最优.

(2) 矿物掺合料能显著提高透水混凝土后期强度, 而单掺粉煤灰的透水混凝土后期强度比相同掺量矿粉的透水混凝土后期强度高. 单掺矿粉的透水混凝土透水性能要优于单掺粉煤灰的透水混凝土. 其中, II 级粉煤灰适宜掺量为胶凝材料总量的 30%~40%(质量百分数), 矿粉最佳单掺掺量范围是 10%~20%.

(3) 透水混凝土化学外加剂的种类和掺量对其力学性能和透水性能都有影响, 效果较佳的化学外加剂为透水混凝土胶结剂 TJJ, 其较为适宜的掺

量为 2.5%~4.0%.

参考文献:

- [1] 张国强, 赖俊. 透水混凝土的研究进展综述[J]. 广东建材, 2016, 32(8):72-75.
- [2] 魏勇, 左文奎, 张宏明, 等. 数值模拟在研究透水混凝土性能影响因素中的运用[J]. 商品混凝土, 2014(9):31-36.
- [3] Yang J, Jiang G L. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials[J]. Cement & Concrete Research, 2003, 33(3):381-386.
- [4] 许燕莲, 李荣炜, 余其俊, 等. 多孔混凝土孔隙的表征及其与渗透性的关系研究[J]. 混凝土, 2009(3):16-20.
- [5] 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.
- [6] Ghafoori N, Dutta S. Development of no-fines concrete pavement applications[J]. Journal of Transportation Engineering, 1995, 121(3):283-288.
- [7] Ibrahim A, Mahmoud E, Yamin M, et al. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties[J]. Construction & Building Materials, 2014, 50(2):524-529.
- [8] Sonebi M, Bassuoni M T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling[J]. Construction & Building Materials, 2013, 38(2):147-154.
- [9] Zaetang Y, Wongs A, Sata V, et al. Use of lightweight aggregates in pervious concrete[J]. Construction & Building Materials, 2013, 48(11):585-591.
- [10] Lian C, Zhuge Y, Beecham S. The relationship between porosity and strength for porous concrete[J]. Construction & Building Materials, 2011, 25(11):4294-4298.
- [11] 刘叶锋, 朋改非, 易全新, 等. 高强透水性混凝土材料试验研究[J]. 混凝土, 2005(3):56-58.
- [12] 杨静, 邢锋. 矿物细掺料对新拌水泥基材料工作性的影响[J]. 混凝土, 2001(2):41-44.
- [13] 王艳艳, 滕岩, 李秀梅. 掺合料增强透水混凝土的试验研究[J]. 建筑技术, 2017, 48(10):1030-1033.
- [14] 徐仁崇, 桂苗苗, 刘君秀, 等. 透水混凝土配合比参数选择及设计方法研究[J]. 混凝土, 2011(8):109-112.
- [15] 陈瑜. 公路隧道高性能透水混凝土路面研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [16] 郑木莲, 陈拴发, 王崇涛. 多孔混凝土的强度特性[J]. 长安大学学报, 2006, 26(4):20-25.

Optimization design of mixture proportion of cement-based pervious concrete

HUNAG Guoyang, XU Haofeng, HUANG Fanfeng, SUN Binfeng, BA Mingfang*

(School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to optimize the mixture proportion of cement-based pervious concrete, the influences of water-cement ratio, paste-aggregate ratio, mineral admixture and chemical admixtures on the performance of Ordinary Portland cement-based pervious concrete were studied. The results show that when the water-cement ratio is between 0.20 and 0.25, and the paste-aggregate ratio is 0.43 to 0.45, the pervious concrete obtains the optimal performance. The results also show that the Grade II fly ash and S95 slag powder can effectively increase the later strength of pervious concrete when the amount of fly ash is 30%~40% and slag is 10%~20% of the total amount of cementitious materials respectively and the effect of single fly ash is better than that of single slag. Pervious concrete mixed with only slag powder has better effect on permeability than that mixed with only fly ash. The properties of pervious concrete cementing agent are superior to those of polycarboxylic acids agent, which has an appropriate dosage range.

Key words: pervious concrete; water-cement ratio; paste-aggregate ratio; mineral admixture; chemical additives

(责任编辑 章践立)