

文章编号:1007-9629(2022)03-0235-07

基于骨料球形度的透水混凝土配合比设计方法

汪超¹, 张同生^{1,2,*}, 谢晓庚¹, 李彬³, 杨东来³

(1. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东广州 510640; 2. 华南理工大学广东省建筑材料低碳技术工程技术研究中心, 广东广州 510640; 3. 保利长大工程有限公司, 广东广州 511430)

摘要:为提高设计精度并制备具有目标性能的透水混凝土,选择实际工程中的 2 种典型骨料,用 Image Pro-Plus 图像表征了骨料球形度,同时测试并计算了透水混凝土骨架结构参数;基于骨料球形度对透水混凝土配合比设计方法进行了修正.结果表明,基于骨料球形度的透水混凝土配合比设计方法可适用于粒形较差的宽级配骨料,能显著提升透水混凝土配合比设计方法的精确性和可靠性,对透水混凝土实际工程应用具有重要指导意义.

关键词:透水混凝土;配合比设计;骨架结构参数;骨料球形度

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.003

Mix Proportion Design Method of Pervious Concrete Based on Aggregate Sphericity

WANG Chao¹, ZHANG Tongsheng^{1,2,*}, XIE Xiaogeng¹, LI Bin³, YANG Donglai³

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Low Carbon Technology Engineering Center for Building, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511430, China)

Abstract: To improve the design accuracy and prepare pervious concrete with target performance, two typical aggregates from practical engineering were selected. The sphericity of aggregates were characterized by Image Pro-Plus, and the skeleton structure parameters of pervious concrete were measured and calculated. Based on the sphericity of the aggregate, the mix proportion design method of pervious concrete was modified. The results show that the mix proportion design method of pervious concrete based on aggregate sphericity can be applied to aggregates with low sphericity and broaden size range, and can significantly improve the accuracy and reliability of the mix proportion design method of pervious concrete, which has important guiding significance for the practical engineering application of pervious concrete.

Key words: pervious concrete; mix proportion design; skeleton structure parameter; aggregate sphericity

透水混凝土具有良好的透气、透水性能^[1-2],是“海绵城市”建设的关键材料.透水混凝土配合比设计方法可分为“绝对体积”法^[3-4]和“比表面积”法^[5-6],这 2 种方法均旨在设计透水混凝土的孔隙,难以直接设计透水混凝土的力学性能.基于“组成-结构-性能”分析理念,Xie 等^[7]提出采用接触点数目(N)、接触区宽度(W)和骨料间浆体厚度(d_r)来表征透水混凝土的骨架结

构,建立了骨架结构参数与透水混凝土抗压强度(F_c)和透水系数(k_{15})的关系^[8],最终提出了基于骨架结构的透水混凝土配合比设计方法,实现了透水混凝土力学与透水性能的可控设计.但该研究采用单一粒径、球形度较好的骨料,可视为等径刚性球体,其骨架结构与理论值相似^[8].实际工程中骨料粒形较差、粒径范围较宽,导致透水混凝土骨架结构偏离理论值,进而

收稿日期:2020-11-11; 修订日期:2021-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52122201)

第一作者:汪超(1994—),男,湖北黄冈人,华南理工大学硕士生.E-mail:chaowangscut2018@163.com

通讯作者:张同生(1983—),男,山东章丘人,华南理工大学研究员,博士生导师,博士.E-mail:mstszhang@scut.edu.cn

影响透水混凝土配合比设计的准确性和实用性.因此,必须根据骨料粒形对骨架结构进行修正,从而确保设计的透水混凝土达到目标性能.

本文表征了实际工程中常用骨料的球形度,系统研究了其对透水混凝土骨架结构的影响,并对透水混凝土配合比设计方法进行修正和验证,提高其适用性和准确性,为其工程应用奠定理论与技术支撑.

1 试验

1.1 原材料

海螺P·O 42.5水泥,其化学组成¹⁾见表1.骨料为广东长大某施工单位提供的粒径(d_a)分别为5~10、10~20 mm的2种花岗岩碎石,分别记为S、L,其级配见表2,相关物理性能见表3.外加剂为市售高性能聚羧酸减水剂(SP),固含量为20.0%.

表1 水泥的化学组成

Table 1 Chemical composition of cement

										$w/\%$	
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	IL		
58.05	21.51	7.37	4.16	2.85	1.76	0.51	0.16	1.61	1.19		

表2 骨料的级配

Table 2 Gradations of coarse aggregates

		1.18	2.36	4.75	5.6	6.7	8	9.5	11.2	13.2	16	19	22.4
Aggregate S	Sieve size/mm	1.18	2.36	4.75	5.6	6.7	8	9.5	11.2	13.2	16	19	22.4
	Passing ratio (by mass)/%	100.00	85.21	64.20	35.00	13.36	0.77	0	0	0	0	0	0
Aggregate L	Sieve size/mm	1.18	2.36	4.75	5.6	6.7	8	9.5	11.2	13.2	16	19	22.4
	Passing ratio (by mass)/%	100.00	100.00	100.00	100.00	99.70	99.30	94.30	86.42	66.60	29.26	10.10	1.61

表3 骨料的物理性能

Table 3 Physical properties of aggregates

Aggregate	Apparent density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Tap bulk density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Elongated and flaky particle content (by mass)/%	Dust content (by mass)/%	Water absorption (by mass)/%
S	2 663.2	1 673.2	5.4	0.92	0.351
L	2 646.9	1 645.6	5.6	0.80	0.336

1.2 试验设计

基于骨架结构的透水混凝土配合比设计方法^[7],配合比设计具体步骤为:首先,根据透水混凝土的目标强度 F_c 和透水系数 k_{15} ,由式(1)、(2)可计算得到基体7 d抗压强度 f_c 、接触区浆体总面积(S_{TPA});其次,由式(3)计算得到接触点数目 N ,并根据 S_{TPA} 与接触点数目(N)、接触区宽度(W)和骨料间浆体厚度(d_T)的关系^[7],联立式(4)、(5)可得浆体包裹层厚度(d_{TPT}),进而计算接触区宽度 W 和骨料间浆体厚度 d_T .透水混凝土的目标性能与骨架结构参数见表4,根据所用骨料的类型,将透水混凝土分为S、L系列透水混凝土,同时根据目标性能的不同将其命名为S1、S2、S3、L1、L2、L3.

确定骨料包裹层厚度后,再由式(6)确定浆体/骨料体积比(φ_P/φ_A).当水灰比(m_w/m_c)为0.210时, $f_c=97.3$ MPa,满足设计要求(>94.1 MPa);调控减水剂掺量,确保最大包裹层厚度 $d_{\text{MPCT}}>d_{\text{TPT}}$ ^[9],避免成型过程中淌浆堵孔现象.

$$F_c = (\varphi'_d f_c - \psi'_d) \ln(S_{\text{TPA}} - 0.0573) \quad (1)$$

$$k_{15} = 1.883 \frac{(P_0 - \alpha S_{\text{TPA}})^2}{N^{0.753}} \quad (2)$$

$$N = 8489.7(\bar{d}_a)^{-1.764} \quad (3)$$

$$W = 0.5895 d_{\text{TPT}} \cdot \bar{d}_a + 1.666 \quad (4)$$

$$d_T = 1.82 d_{\text{TPT}} \quad (5)$$

$$\frac{\varphi_P}{\varphi_A} = \frac{6d_{\text{TPT}}}{\bar{d}_a} \quad (6)$$

式中: φ'_d 、 ψ'_d 、 α 均为系数; P_0 为骨料堆积孔隙率; \bar{d}_a 为骨料的平均粒径.

1.3 透水混凝土试件的制备

按水灰比和浆体骨料比,可计算透水混凝土的配合比,结果见表5.采用分步投料法^[10],按表5中设计的6种配合比制备6组透水混凝土,采用插捣的方法成型透水混凝土试件,拆模后置于饱和石灰水中养护.

1.4 试验方法

1.4.1 骨料球形度的测试

根据骨料三维尺寸确定其最小体积的外切长方

1) 文中涉及的组成、水灰比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

表4 透水混凝土的目标性能与骨架结构参数
Table 4 Target properties and skeleton structure parameters of pervious concretes

Specimen	Target property		f_c/MPa	$S_{\text{TFA}}/\text{cm}^2$	Skeleton structure parameter			$d_{\text{TPT}}/\mu\text{m}$
	F_c/MPa	$k_{15}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$			$N\times 10^4/(\text{point}\cdot\text{mm}^{-2})$	d_T/mm	W/mm	
S1	27.0	13.0	94.2	6.303	243	0.746	3.479	410
S2	29.0	11.0	94.1	7.270	243	0.819	3.656	450
S3	31.0	9.0	93.8	8.432	243	0.901	3.855	495
L1	25.0	41.0	96.9	5.166	72	1.056	6.795	570
L2	30.0	30.0	97.3	7.024	72	1.256	7.767	690
L3	34.0	20.0	92.1	8.958	72	1.438	8.652	790

表5 设计透水混凝土的配合比
Table 5 Mix proportions of pervious concretes designed

Specimen	Mix proportion/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$				$\frac{\varphi_P}{\varphi_A}/\%$	m_w/m_c
	Aggregate	Cement	Water	SP		
S1	1 673	401.2	82.6	3.6	32.8	0.213
S2	1 673	440.1	90.2	4.4	36.0	0.213
S3	1 673	484.3	98.4	5.3	39.6	0.212
L1	1 645	283.7	57.6	2.8	23.2	0.211
L2	1 645	337.5	68.2	3.4	27.6	0.210
L3	1 645	386.4	79.3	4.3	31.6	0.214

体,定义该长方体最大尺寸为长度 L ,最小尺寸为厚度 S ,中间尺寸为宽度 M ;通过投影面即可反映出骨料三围尺寸,见图1.球形度(S_p)是衡量颗粒长、中、短3个轴尺寸相近或等效的程度^[11],其计算式为:

$$S_p = \sqrt[3]{\frac{SM}{L^2}} \quad (7)$$

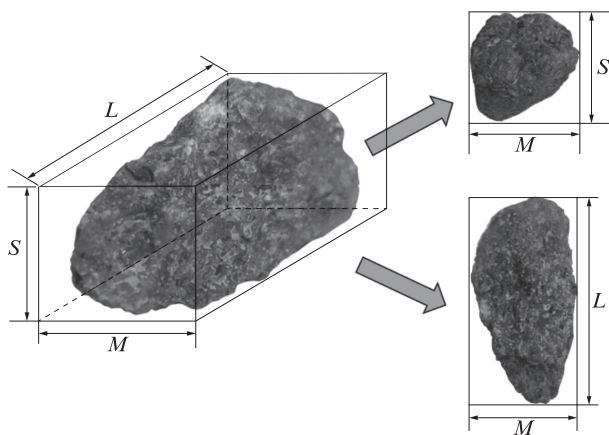


图1 骨料三维尺寸
Fig. 1 Three-dimensional sizes of aggregate

对骨料S和L,成型透水混凝土前每组取样256颗,先将骨料的二维投影面进行拍照;然后将骨料翻转90°进行拍照,再采用Image Pro-Plus(IPP)软件调整阈值分离出图像中的骨料,提取骨料颗粒尺寸

量化参数,最后由式(7)计算其球形度,结果取平均值.

1.4.2 透水混凝土性能测试

根据GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》,测试水泥净浆的抗压强度(透水混凝土基体的强度).根据GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,测试150 mm×150 mm×150 mm透水混凝土试件的强度.用恒定水位差的方式^[9]测试透水混凝土的透水系数.具体测试过程参照文献[8].根据ASTM C1754/C1754M-12《Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete》测试并计算透水混凝土有效孔隙率 P_E :

$$P_E = \left(1 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_w V_0}\right) \times 100\% \quad (8)$$

式中: m_1 为试件在水中的质量; m_2 为试件绝对干燥后的质量; ρ_w 为水的密度; V_0 为试件的外观体积.

1.4.3 透水混凝土骨架结构的表征

将透水混凝土切成厚 (20 ± 2) mm的薄片,并将其上表面磨平抛光,使用高分辨率摄像机拍照,接着通过IPP统计二维视域内 $(100\text{ mm}\times 100\text{ mm})$ 接触点数目、接触区宽度以及骨料间浆体厚度^[7].基于图像处理的透水混凝土骨架结构表征过程见图2.用每组不少于5个切片统计数据平均值来表征透水混凝土的骨架结构,以保证统计数据的准确性和代表性.

2 透水混凝土的性能与骨架结构

2.1 透水混凝土的抗压强度与透水性能

透水混凝土抗压强度和透水系数的目标值与实测值见图3.由图3可见:S、L系列透水混凝土7 d抗压强度实测值均低于目标值,而透水系数实际测量值均高于目标值;实测值和目标值存在较大偏差,L系列透水混凝土的强度偏差高达42.0%~48.0%,透水系数偏差为10.0%~24.0%.由此可见,传统的配合比设计方法难以适用于实际工程中粒形较差的

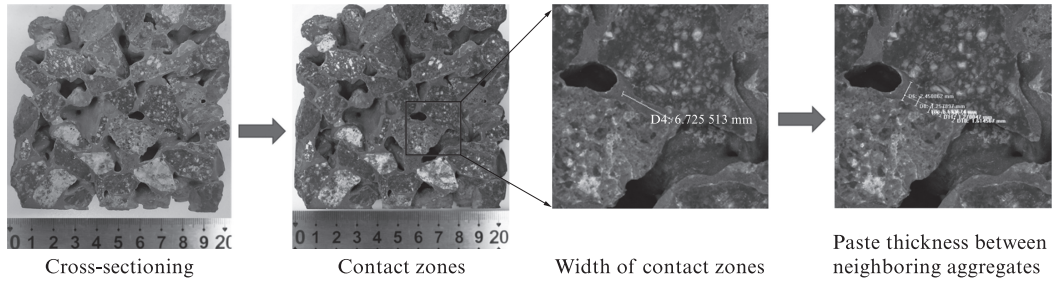


图2 基于图像处理的透水混凝土骨架结构表征过程

Fig. 2 Skeleton structure characterization of pervious concretes based on image processing

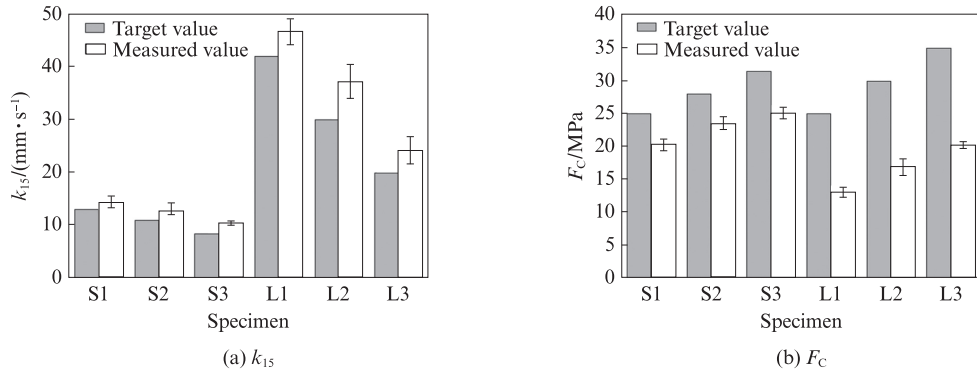


图3 透水混凝土抗压强度和透水系数的目标值与实测值

Fig. 3 Target and measured compressive strength and permeability coefficient of pervious concretes

骨料,无法按照目标性能靶向设计透水混凝土配合比.

2.2 透水混凝土的骨架结构

透水混凝土骨架结构参数实测值与目标值见图4.由图4可见:S、L系列透水混凝土实测接触点数目 N 波动不大,且均略高于其目标值,其原因为小粒径骨料相对含量较大导致其接触点数目偏大;随浆体包裹

层厚度 d_{TP} 的增加,透水混凝土的实测接触区宽度 W 逐渐增大,但均小于目标值;与S系列透水混凝土相比,L系列透水混凝土的接触区宽度较大,这归因于大粒径骨料曲率较小、具有较大的接触面^[5];随着 d_{TP} 的增大,透水混凝土的骨料间浆体厚度 d_T 逐渐增大,但其实测值均小于目标值,S、L系列透水混凝土 d_T 的实测值分别约为其目标值的60%、70%.

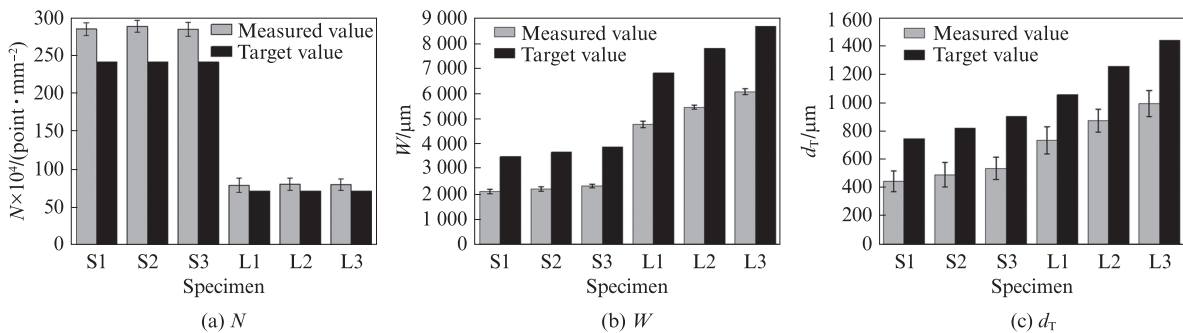


图4 透水混凝土骨架结构参数实测值与目标值

Fig. 4 Target and measured skeleton structure parameters of pervious concretes

3 基于骨料球形度的骨架结构修正

3.1 骨料粒径对骨架结构的影响

透水混凝土中接触点数目主要取决于骨料粒径,影响着透水混凝土内部的应力分布^[12],也对其透水性产生影响.单级配骨料堆积状态与等径球堆积(理论

状态)相似,用其制备的透水混凝土接触点数目波动范围很小(见图5(a)).相比之下,实际工程中骨料粒径范围略宽(如本文的5~10、10~20 mm宽级配骨料),且存在较多针片状颗粒(见图5(b)),导致骨料堆积状态严重偏离等径球堆积,使透水混凝土接触点数目增多,实测值高于理想条件下透水混凝土的目标值.

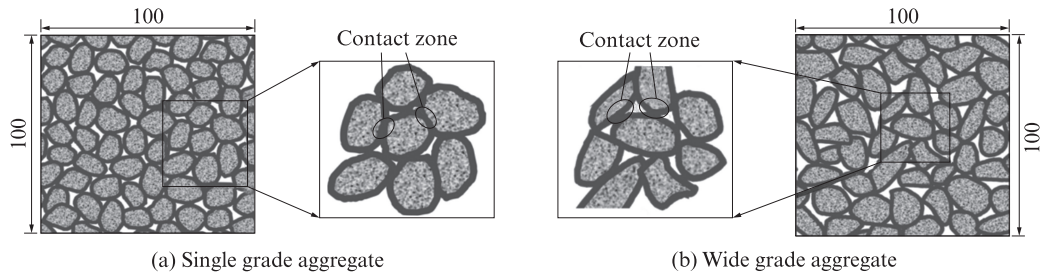


图5 透水混凝土二维视域内接触点数目示意图

Fig. 5 Schematic diagram of number of contact zones in two-dimensional cross section of pervious concretes (size:mm)

骨料粒径较小时,其曲面弯曲程度较大,即平均曲率较大,骨料间的接触面较小.小粒径骨料弯曲程度大,其浆体接触区宽度较小,而大粒径骨料曲面弯曲程度较小,其浆体接触区宽度较大(见图6).此外,骨料球形度也对浆体接触区宽度具有显著影响.所以

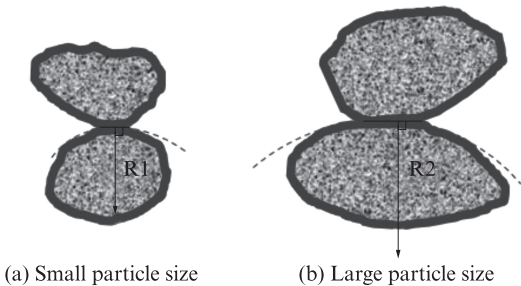


图6 骨料粒径对透水混凝土接触区宽度的影响
Fig. 6 Influence of aggregate size on the width of contact zones in pervious concrete

S、L系列透水混凝土接触区宽度实测值与目标值存在较大偏差.

通常来讲,骨料的比表面积与其粒径大小呈反比关系,骨料粒径越小则比表面积越大.由于S、L骨料粒径范围较宽,且小于平均粒径的骨料占比较大,针片状骨料含量高达5.5%,因此导致骨料间浆体厚度比目标值偏小.

3.2 骨料粒径与球形度的关系

根据 ASTM E11-17《Standard specification for woven wire test sieve cloth and test sieves》将S、L骨料进行筛分,测试并计算每个粒级骨料的球形度,并得到骨料粒径与球形度的关系,结果见图7.由图7可见:S骨料的球形度在0.60~0.73,L骨料的球形度在0.66~0.85;骨料的球形度与粒径基本呈线性关系,骨料粒径越大其球形度越好.

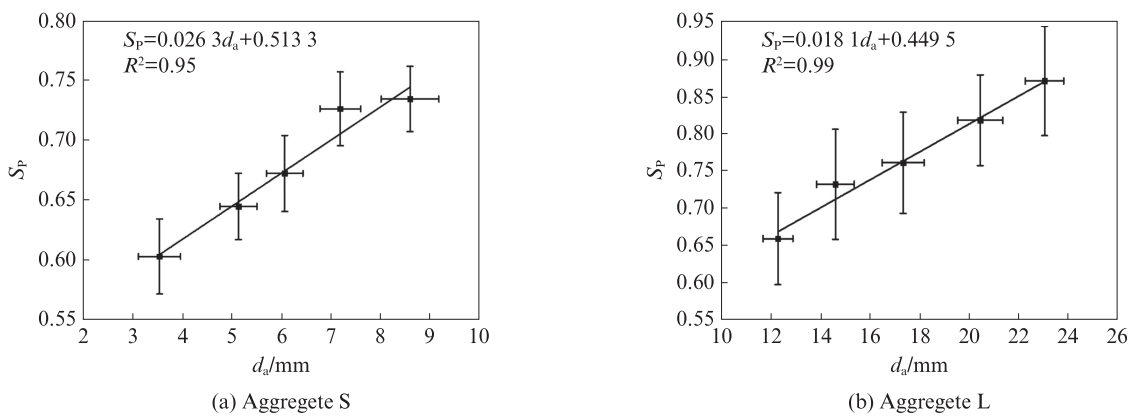


图7 骨料粒径与球形度的关系

Fig. 7 Relationship between aggregate size and sphericity

3.3 修正系数

骨料粒径较差将导致透水混凝土的骨架结构参数严重偏离其粒形理想条件下的目标值,最终使透水混凝土强度和透水系数的实测值小于目标值,无法实现透水混凝土配合比靶向设计.因此,在实际工程中要保证透水混凝土配合比设计方法的准确性和可重复性,必须根据骨料粒形对骨架结构参数设计方法进

行修正.将透水混凝土骨架结构参数实测值与理论值(用骨架结构参数设计方法得到)的比值定义为骨架结构参数的修正系数.

3.4 修正系数与骨料球形度的关系

对每组透水混凝土成型前所取骨料进行球形度统计,并通过计算各组透水混凝土骨架结构参数的修正系数,分别建立了骨料球形度与接触点数目、接触区

宽度、骨料间浆体厚度修正系数 r, s, t 的关系, 结果见图8. 由图8可见: 骨料球形度与接触点数目的修正系数服从指数函数规律, 骨料颗粒球形度越小, 接触点数目的修正系数越大; 骨料球形度与接触区宽度、骨料间浆体厚度的修正系数呈线性增大关系, 骨料球形度越

大, 接触区宽度与骨料间浆体厚度的修正系数越接近1.00. S系列透水混凝土 s, t 分别为 $0.60 \pm 0.05, 0.60 \pm 0.04$, L系列透水混凝土 s, t 分别为 $0.70 \pm 0.05, 0.70 \pm 0.06$, 这说明骨料粒形越好, 制备出的透水混凝土骨架结构越接近透水混凝土的目标值.

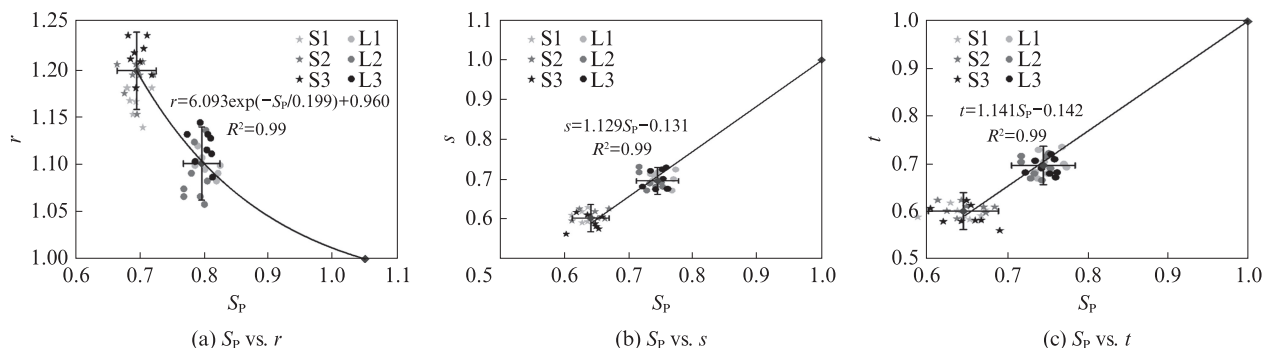


图8 骨料球形度与透水混凝土骨架结构修正系数的关系

Fig. 8 Relationship between aggregate sphericity and coefficient of skeleton structure parameters of pervious concrete

4 修正后透水混凝土配合比设计方法的准确性和适用性

针对实际工程中所用骨料, 根据1.2计算确定了透水混凝土的骨架结构参数 N, W, d_T 后, 依据骨料球形度进行修正, 得到修正后的骨架结构参数 N^*, W^*, d_T^* , 进而通过 d_T^* 确定目标包裹层厚度 d_{TPT} , 计算浆体与骨料体积比 (φ_P/φ_A). 在确保浆体最大包裹层厚度

$d_{MPCT} > d_{TPT}$ 的前提下, 确定透水混凝土的配合比.

为验证修正后配合比设计方法的准确性和适用性, 选用球形度分别为0.67、0.81的5~10、10~20 mm这2种骨料, 设计7 d抗压强度分别为26.0、27.0 MPa、透水系数分别为8.0、23.0 mm/s的透水混凝土, 并记为C1、C2. 透水混凝土的目标性能与修正前后骨架结构参数见表6. 基于骨料球形度修正设计的透水混凝土配合比见表7.

表6 透水混凝土的目标性能与修正前后骨架结构参数

Table 6 Skeleton structure parameters of pervious concretes before and after modification

Specimen	Target property		Skeleton structure parameter						$d_{TPT}/\mu\text{m}$
	F_c/MPa	$k_{15}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$N \times 10^4/(\text{point} \cdot \text{mm}^{-2})$	W/mm	d_T/mm	$N^* \times 10^4/(\text{point} \cdot \text{mm}^{-2})$	W^*/mm	d_T^*/mm	
C1	26.0	8.0	243	3.114	0.596	283	3.965	0.946	520
C2	27.0	23.0	72	7.576	1.292	76	9.713	1.656	910

表7 基于骨料球形度修正设计的透水混凝土配合比

Table 7 Mix proportion of pervious concretes in consideration of aggregate sphericity

Specimen	Mix proportion/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$				$\frac{\varphi_P}{\varphi_A}/\%$	$P_E/\%$	m_w/m_c
	Aggregate	Cement	Water	SP			
C1	1776.0	530.7	110.2	5.3	41.6	10.26	0.210
C2	1723.0	442.3	92.9	5.3	36.4	16.75	0.210

透水混凝土抗压强度和透水系数的目标值、预测值与实测值见图9. 由图9可见, 与未修正的配合比设计相比: 修正后的透水混凝土C1、C2抗压强度预测值的偏差分别由35.6%、26.4%降低至1.9%、2.4%, 且其强度目标值与实测值偏差仅为6.0%和3.8%; C1、C2透水系数预测值的偏差分别由68.9%、53.1%降低至7.8%、2.6%, C1、C2透水系数目标值与实测值

偏差均较小, 分别为5.0%、4.5%. 此外, C1、C2实测有效孔隙率分别为11.35%、17.43%, 而目标孔隙率分别为10.26%、16.75%, 修正后透水混凝土孔隙率实测值与目标值偏差也较小.

由此可见, 在骨料粒径较宽、粒形较差的情况下, 根据骨料球形度对骨架结构参数进行修正, 可提高透水混凝土配合比设计方法的准确性和适用性, 从而有

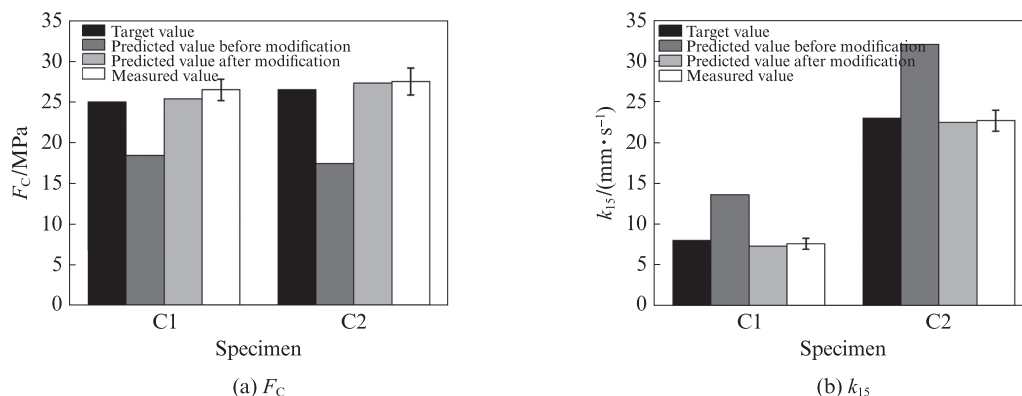


图9 透水混凝土强度和透水系数的目标值、预测值与实测值

Fig. 9 Target, measured and predicted properties of pervious concretes

助于实现实际工程中透水混凝土性能的靶向设计。

5 结论

(1)实际工程中骨料粒径范围宽、球形度差,采用基于骨架结构的透水混凝土配合比设计方法,骨料粒形对透水混凝土的性能影响较大,导致透水混凝土实际性能与目标设计性能存在较大偏差,强度偏差在40.0%以上,透水系数偏差最高达24.0%。随着骨料球形度的增大,透水混凝土骨架结构参数偏差减小。基于此,提出了基于骨料球形度的透水混凝土骨架结构参数修正系数,并建立了量化关系。

(2)基于骨料球形度修正骨架结构参数后,透水混凝土配合比设计方法的准确性和适用性得到了显著提高(强度、透水系数目标值与实测值偏差仅为3.8%和5.0%),可适用于粒形较差的宽级配骨料,为其工程应用奠定了理论与技术支撑。

参考文献:

- [1] WANG K, SCHAEFER V R, KEVERN J T, et al. Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete[C]//Proceedings of NRMCA Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete. Nashville: Iowa State University, 2006:1-12.
- [2] ZHONG R, WILE K. Compression response of normal and high strength pervious concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016,109:177-187.
- [3] YAHIA A, KABAGIRE K D. New approach to proportion pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 62:38-46.
- [4] DEO O, NEITHALATH N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities[J]. Construction and

Building Materials, 2011, 25(11):4181-4189.

- [5] 张贤超. 高性能透水混凝土配合比设计及其生命周期环境影响评价体系研究[D].长沙:中南大学, 2012.
ZHANG Xianchao. Research on mix proportion design and evaluation on life cycle environmental system of high performance pervious concrete[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [6] NGUYEN D H, SEBAIBI N, BOUTOUIL M, et al. A modified method for the design of pervious concrete mix[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73:271-282.
- [7] XIE X G, ZHANG T S, WANG C, et al. Mixture proportion design of pervious concrete based on the relationships between fundamental properties and skeleton structures[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 113(5):103693.
- [8] 谢晓庚. 基于强度和渗透性的透水混凝土组成结构设计及制备[D].广州:华南理工大学, 2018.
XIE Xiaogeng. Mixture proportioning structural design and preparation of pervious concrete based on strength and permeability [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] XIE X G, ZHANG T S, YANG Y M, et al. Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2018, 168:732-746.
- [10] 李荣炜. 植被型生态混凝土的制备及性能研究[D].广州:华南理工大学, 2009.
LI Rongwei. Preparation and performance research of ecological concrete adapt to plants-growing [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] BARRET P J. The shape of rock particles, a critical review[J]. Sedimentology, 1980, 27(3):291-303.
- [12] PIERALISI R, CAVALARO S H P, AGUADO A. Evolutionary lattice model for the compaction of pervious concrete in the fresh state[J]. Construction and Building Materials, 2015, 99:11-25.