

文章编号:1672-9331(2017)03-0001-06

骨料类型与级配对多孔水泥混凝土性能的影响

陈 瑜, 李蒙强, 刘 洋

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 为了研究骨料因素对多孔水泥混凝土性能的影响, 考虑了玄武岩碎石与河卵石的3种单一粒径9.5~13.2 mm, 13.2~19.0 mm, 19.0~26.5 mm, 以及这3种粒径骨料各自不同用量的情况, 运用CT扫描、自制透水仪等技术手段, 获得多孔水泥混凝土内部孔径大小分布以及其透水能力等。研究结果表明, 在相同条件下, 碎石多孔混凝土的有效孔隙率比卵石多孔混凝土的大3%~4%; 在不同粒径骨料用量相同的条件下, 碎石与卵石多孔混凝土28 d抗压强度相比, 最低强度碎石较卵石高7%, 最高强度碎石较卵石高9%; 与卵石相比, 碎石表面粗糙, 微观纹理丰富, 与水泥浆体包裹层之间的粘结能力更强, 所得的混凝土抗压强度较高。

关键词: 骨料类型; 级配; 粒径; 孔隙率; 渗透系数; 抗压强度

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Effect of aggregate type and gradation on the performance of porous cement concrete

CHEN Yu, LI Meng-qiang, LIU Yang

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to study the effect of aggregate factors on the performance of porous cement concrete, three kinds of single diameter of basalt rock and pebbles, 9.5~13.2 mm, 13.2~19.0 mm, 19.0~26.5 mm, as well as three kinds of particle size aggregate in different dosage conditions were studied. The CT scanning, simple water permeable instrument and other technical means were also used to obtain the porous pore size and pore distribution of porous concrete, and its permeability. The results show that under same conditions, the effective porosity of the gravel porous concrete is 3%~4% higher than that of the pebble porous concrete. With different particle size, the lowest compressive strength of gravel porous concrete is 7% higher than the pebble and the highest compressive strength of gravel porous concrete is 9% higher than that of the pebble. Compared with pebbles, gravel surface is rough, rich of micro-texture, and the capacity of bonding cement paste is stronger, so the gravel porous concrete compressive strength is higher.

Key words: aggregate type; gradation; size; porosity; permeability coefficient; compressive strength

收稿日期: 2017-06-26

作者简介: 陈 瑜(1975-), 女 贵州安顺人, 长沙理工大学教授, 主要从事先进混凝土技术和硅酸盐工业固体废渣再生循环利用等方面的研究。

多孔水泥混凝土是目前国内外开发应用的生态功能混凝土的重要品种之一^[1-3],它具有连续孔隙及高透水性,可广泛应用于路面、绿化、污水净化及吸声材料等领域。与普通混凝土不同,多孔混凝土一般不含或少含细集料,由粗骨料表面包裹一薄层水泥浆体相互胶结成为整体,形成孔穴均匀分布的蜂窝状结构,因此它具有良好的渗透性。

粗骨料品种选择、粒径组成与级配、骨料性能、单位体积混凝土用量等直接控制着孔隙率大小、孔隙尺寸、孔隙状态和混凝土表面构造状况,是影响多孔水泥混凝土各种性能的关键因素之一^[4-7]。刑振贤等^[8]通过试验建立了水灰比与混凝土强度之间的关系,并计算出骨料类型对多孔混凝土强度影响的回归系数:碎石 $\alpha_a = 0.04$, $\alpha_b = 0.04$;卵石 $\alpha_a = 0.36$, $\alpha_b = 0.19$ 。李婉琳等^[9]在研究骨料类型对多孔水泥混凝土有效孔隙率与强度影响时发现,卵石配置的多孔混凝土有较高的强度,但其有效孔隙率小,不宜用来制备多孔混凝土。Kim等^[10]指出,碎石多孔混凝土比用卵石抗压强度高,这种情况在水灰比较小(<0.40)时最为明显;但随着水灰比的增大,二者强度差值逐渐减小,当水灰比达0.65后,二者的强度差异就不显著了。何锐等^[11]利用数字图像处理技术对碎石、卵石粗集料在混凝土中的分布形态进行了分析,发现碎石的分布挤嵌程度相对最紧密,抗压强度较高,但是波动比较大;而卵石的分布相对更趋分散,抗压强度偏低,但都没有综合分析骨料因素对多孔水泥混凝土性能的影响。鉴于此,作者通过对玄武岩碎石、河卵石的3种单一粒径9.5~13.2 mm, 13.2~19.0 mm, 19.0~26.5 mm粗骨料进行试验,以期得出骨料类型、粒径、级配等因素对多孔水泥混凝土抗压强度与透水性能的影响。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

水泥采用湖南韶峰水泥有限公司生产的P. I 42.5基准水泥,其比表面积为 $348 \text{ m}^2/\text{kg}$,密度为 $3.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。具体化学分析及组成见表1。

粗骨料选用玄武岩碎石与卵石,3种单一粒径分别为9.5~13.2 mm、13.2~19.0 mm、19.0~26.5 mm,针片状含量少。骨料基本性质见表2。

水采用普通自来水。

表1 基准水泥熟料化学分析及矿物组成

Table 1 Chemical analysis and mineral composition of benchmark cement clinker %

成分	含量	成分	含量	成分	含量
SiO ₂	21.73	MgO	3.56	C ₃ S	56.62
Al ₂ O ₃	4.60	SO ₃	0.46	C ₂ S	19.58
Fe ₂ O ₃	3.45	NaO	0.59	C ₃ A	6.36
CaO	64.55	F-CaO	0.96	C ₄ AF	10.49

表2 骨料基本性质

Table 2 Aggregate basic properties

	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	堆积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	空隙率/ %	含泥量/ %	压碎 指标/%	坚固性/ %
碎石	2.78	1 670	40.6	0.3	8.5	≤ 8
卵石	2.72	1 630	41.7	0.5	10.5	≤ 8

注:坚固性采用硫酸钠溶液法检验,试样经5次循环后测其质量损失。

1.2 配合比及成型方法

本试验主要控制粗骨料类型与不同粒径搭配比例,配合比均相同(如表3所示)。

表3 多孔水泥混凝土试验配合比

Table 3 Porous cement concrete test mixing ratio

粗骨料/(kg · m ⁻³)		水泥/(kg · m ⁻³)	水/(kg · m ⁻³)	水灰比/ (W/C)	骨料体积 比/%
碎石	卵石				
1 536.4		219.1	76.7	0.35	0.92
	1 499.6	221.1	77.4	0.35	0.92

试验采用振动成型工艺:将装好料的立方体抗压试模(150 mm×150 mm×150 mm)在振动台上振动20 s,同时用抹刀压实并刮平试件表面。成型好的试件用塑料膜盖上,以防止水分蒸发,并在相对湿度大于90%, $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ 下的标准养护室中养护。试件成型48 h后拆模,拆模后的试件继续放进标准养护室中养护,养护时间分别为7, 28 d。碎石多孔混凝土和卵石多孔混凝土试件各12组,共24组。每组成型3个,总计72个试件。

1.3 抗压强度的测定

多孔透水混凝土抗压强度的测试按照GBJ 81—85《普通混凝土力学性能试验方法》进行,采用立方体抗压试模(150 mm×150 mm×150 mm),测试龄期分别为7, 28 d。

1.4 透水系数测试方法

本试验采用恒定水头法测定多孔水泥混凝土的透水系数。试件为 150 mm×150 mm×150 mm 立方体,试件顶部的恒定水头控制在 12 cm,通过测定单位时间内流过混凝土试件的水量计算透水系数。其计算公式为:

$$k_T = \frac{H \cdot Q}{h \cdot A \cdot \Delta t}$$

式中: k_T 为水温为 T °C 时恒定水头透水系数, cm/s; H 为试件高度, cm; h 为试件顶面恒定水头, cm; Q 为测试时间内流过试件的水量, cm³; A 为试件的横截面积, cm²; Δt 为测试的时间, s。

透水仪的设计: 自行研制简易常水头渗透仪测试多孔混凝土透水系数。透水仪装置见图 1。

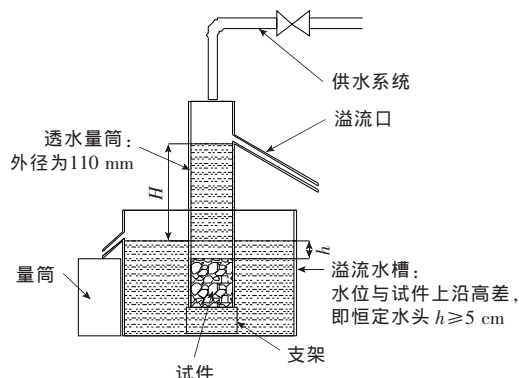


图 1 简易透水仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simple water permeable instrument

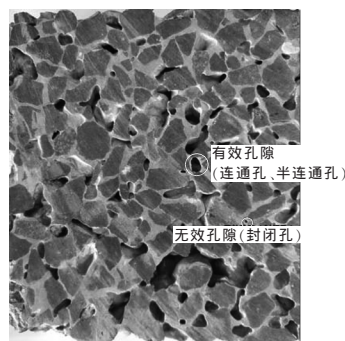
1.5 孔隙率的计算

本试验采用先科 SCQ-8 型切石机将多孔水泥混凝土试块切割成二等份,利用相机拍照获取试块切割面原图(如图 2(a)所示),再通过工业 CT 扫描试块断面得到如图 2(b)所示图像,最后再将试块 CT 扫描图像导入软件 MagicEye-CT,调试软件中图像像素等参数,获得如图 2(c)所示的多孔混凝土试件内部孔隙特征(孔径大小尺寸及孔隙率),能够直接观测到多孔水泥混凝土内部孔隙分布情况。

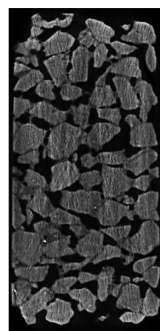
全孔隙率包含连通孔、半连通孔以及封闭孔。有效孔隙率包含连通孔、半连通孔。

工业 CT 主要技术指标参数为: 电压管 280 kV, 电流 2.25 A, 焦点尺寸 1.9 mm, 空间分辨

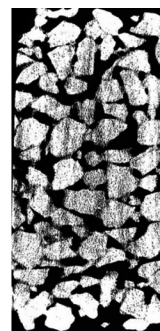
率 0.5 μm, 密度分辨率 0.3%~0.5%。图像重建速度: 1 024 像素×1 024 像素单层图像用时 0.2 s。



(a) 切块原图



(b) CT 扫描图像



(c) 软件处理后图像

图 2 试块切面图

Fig. 2 Test block profile

2 结果与分析

2.1 最大粒径的影响

采用 3 种单一粒级 9.5~13.2 mm, 13.2~19.0 mm, 19.0~26.5 mm 的粗骨料配制多孔水泥混凝土进行性能对比, 试验结果见表 4 和图 3。

表 4 骨料粒径对多孔混凝土性能的影响

Table 4 Effect of aggregate size on the properties of porous concrete

试件编号	骨料状态	骨料粒径/mm	抗压强度/MPa		渗透系数/(cm·s ⁻¹)	全孔隙率/%	有效孔隙率/%
			7 d	28 d			
1		9.5~13.2	5.40	7.46	3.42	28.95	26.53
2	碎石	13.2~19	4.93	6.19	4.11	32.28	28.17
3		19~26.5	4.14	5.87	4.55	33.15	28.64
4		9.5~13.2	4.93	6.11	3.15	29.17	25.74
5	卵石	13.2~19	4.67	5.36	3.92	31.73	27.19
6		19~26.5	4.03	4.97	4.37	32.17	27.72

由图 3(a)可以看出,随着 3 种单一粒径骨料最大粒径的增大,多孔水泥混凝土的抗压强度依次降低,7 d 抗压强度最高降低 23.3%,28 d 抗压强度最高降低 21.3%。由图 3(d)可以看出,渗透系数和孔隙率随着骨料最大粒径的增大而增大,当渗透系数达到 4.55 cm/s 时,有效孔隙率达 28.64%(如图 3(c)所示)。这是因为随着 3 组试

验中骨料最大粒径的增大,在骨料体积比不变的情况下,多孔混凝土内部需要水泥浆体更多地用来包裹骨料,致使水泥浆体包裹层更薄,孔隙率随之增大,7,28 d 强度也随之降低;同时,骨料粒径的逐渐增大,不但使多孔水泥混凝土中孔隙数量增加,也使得连通孔隙的尺寸增大,有效孔隙率也随之增大,进而显著地提高多孔水泥混凝土的透水能力。

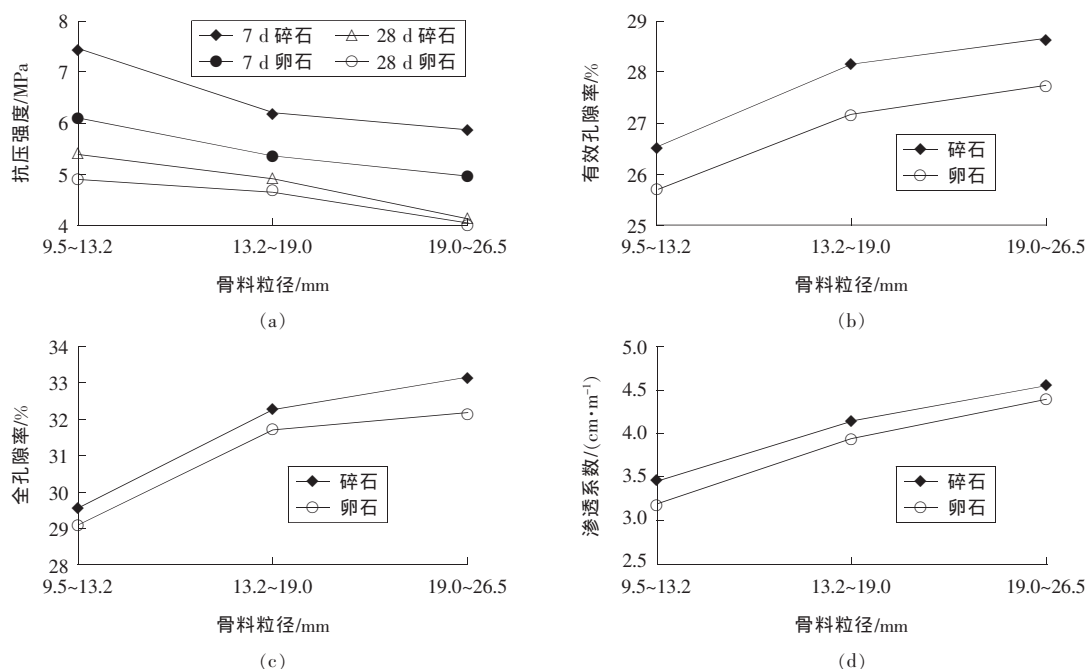


图 3 骨料粒径对多孔混凝土性能的影响

Fig. 3 Effect of aggregate size on the properties of porous concrete

2.2 不同粒径骨料用量的影响

从图 4 给出的数据看,多孔水泥混凝土的各项性能指标与骨料粒径有着密切的关系:随着较大粒径骨料用量的增加,抗压强度下降得较多,孔隙率、透水系数也随之明显增大。多孔混凝土孔隙的尺寸大小与骨料粒径有着必然的联系,它随骨料粒径的逐渐增大而明显变大。试验观察到,上述 6 组试件的实际孔隙直径从 3 mm 增加到了 6 mm,试件整体结构从密实结构变成了空旷的骨架结构。多孔水泥混凝土的强度主要由骨料以及骨料与水泥浆体之间的粘结强度决定。随着较大粒径骨料用量的增加,骨料之间接触点逐步减少,骨料之间咬合点减少,骨料间摩擦力降低,强度因此随之降低。同时,由于较大粒径骨料用量的增加,骨灰比不变,骨料与水泥浆体之间的粘结层厚度降低,强度进一步降低。因此,对有一定性能要

求的多孔水泥混凝土,应选择合适的骨料粒径与级配。

2.3 不同类型骨料的影响

由图 3(a)可以看出,在相同条件下,碎石多孔混凝土较卵石多孔混凝土 7,28 d 抗压强度更高。同时由图 3(b)可得,碎石多孔水泥混凝土的有效孔隙率比卵石多孔水泥混凝土的大 3%~4%。观察表 5 数据可得,在不同粒径骨料用量相同的条件下,碎石与卵石多孔混凝土 28 d 抗压强度相比,最低强度碎石较卵石高 7%,最高强度碎石较卵石高 9%。分析试件受压破坏试件形态,多孔水泥混凝土破坏时,由于骨料具有止裂作用,裂缝总是沿着混凝土中强度相对最薄弱的位置开裂,当裂缝遇到粗骨料时就会优先绕过粗骨料,沿着强度薄弱的过渡层发展。仔细观察发现,在碎石多孔混凝土开裂面有少量碎石断裂,大部分开裂面沿着过渡

层断裂,说明过渡层浆强度是碎石混凝土中强度的薄弱位置;卵石混凝土断面有个别卵石断裂,但比碎石混凝土要少,主要集中在浆体与石子的过渡层断裂。多孔水泥混凝土的开裂处既有骨料断裂,也有骨料与浆体粘结处的过渡层破坏。碎石多孔混凝土骨料断裂较多,因此骨料的强度是影响碎石多孔混凝土强度的主要因素。卵石混凝土的断面中过渡层破坏比例要明显高于碎石多孔混凝土,所以卵石与砂浆接触的过渡层强度是影响卵石混凝土强度的关键。结合试验数据,通过比较 2 种不同骨料多孔混凝土的强度发现,在相同条件下,卵石多

孔混凝土流动性较好,卵石表面光滑,自身表层微观纹理不够丰富,同稠度、同用量水泥浆配制的卵石多孔混凝土产生流浆现象的可能性较大,包裹骨料的胶结层较薄,浆体堵塞骨料间孔隙,致使有效孔隙减少,且浆体过渡层较石子强度低,故开裂处以浆体过渡层破坏居多;而碎石粗糙且多棱角的表面更有利于将水泥浆更加牢固地粘结在其表面周围,骨料间孔隙明显,有效孔隙较多,且浆体硬化后形成一层紧密包裹粗骨料的胶结层,强度较高,因而虽仍以浆体过渡层开裂为主,但也有部分碎石断裂,骨料断裂比例较卵石多孔混凝土的大。

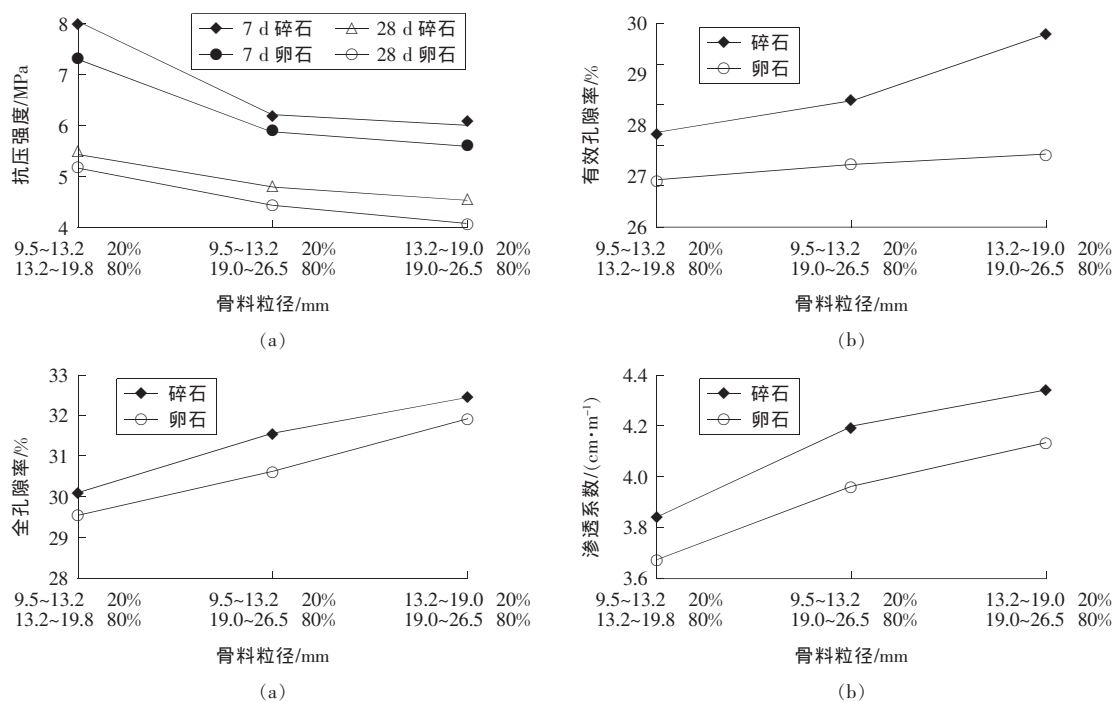


图 4 骨料类型与级配对多孔混凝土性能的影响

Fig. 4 Effect of aggregate type and gradation on the performance of porous concrete

表 5 骨料类型与级配对多孔混凝土性能的影响

Table 5 Effect of aggregate type and gradation on the performance of porous concrete

试件 编号	骨料 类型	骨料级配/%			抗压强度/MPa		渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	全孔隙率/ %	有效孔隙率/ %
		(9.5~13.2) mm	(13.2~19) mm	(19~26.5) mm	7 d	28 d			
7	碎石	20	80	0	5.47	8.07	3.84	30.12	27.86
8		20	0	80	4.78	6.20	4.20	31.55	28.46
9		0	20	80	4.53	6.04	4.34	32.43	29.78
10	卵石	20	80	0	5.23	7.33	3.67	29.57	26.88
11		20	0	80	4.48	5.89	3.96	30.62	27.21
12		0	20	80	4.10	5.61	4.13	31.92	27.40

3 结论

1) 随着较大粒径骨料用量的增多,多孔水泥混凝土孔隙率、透水系数也随之增大,而抗压强度则下降较多。最佳骨料粒径与级配应该是根据设计的透水系数和抗压强度试验来确定的。

2) 在相同条件下,碎石多孔混凝土的有效孔隙率比卵石多孔混凝土的大3%~4%。在不同粒径骨料用量相同的条件下,碎石与卵石多孔混凝土28 d抗压强度相比,最低强度碎石较卵石高7%,最高强度碎石较卵石高9%。与卵石相比,碎石表面粗糙,微观纹理丰富,与水泥浆体包裹层之间的粘结能力更强,所得的混凝土抗压强度较高。

〔参考文献〕

- [1] Yahia A, Kabagire K D. New approach to proportion pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014(62): 38-46.
- [2] Chen Yu, Wang Kejin, Wang Xuhao, et al. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013(42): 97-104.
- [3] 陈瑜, 邓怡帆, 唐旗, 等. 预湿轻骨料内养护功能及其对混凝土的影响[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2015, 12(3): 1-6.
CHEN Yu, DENG Yi-fang, TANG Qi, et al. Internal curing function of pre-wetted lightweight aggregates and its influences on concrete[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2015, 12(3): 1-6.
- [4] 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(5): 513-519.
JIANG Zheng-wu, SUN Zhen-ping, WANG Pei-ming. Effects of several factors on the properties of porous pervious concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005(5): 513-519.
- [5] 陈瑜. 公路隧道高性能多孔水泥混凝土路面研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
CHEN Yu. Highway tunnel high performance porous cement concrete pavement research[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [6] 蒋昌波, 刘易庄, 肖政. 多孔混凝土内部孔隙特征研究[J]. 硅酸盐通报, 2015(4): 1105-1110.
JIANG Chang-bo, LIU Yi-zhuang, XIAO Zheng. Study on the pore characteristics of porous concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015(4): 1105-1110.
- [7] 杨学峰, 周国妍, 彭瑞东. 基于CT扫描的孔隙材料体应变测试分析[A]. 北京力学学会第21届学术年会暨北京振动工程学会第22届学术年会[C]. 北京: 北京力学学会, 2015.
YANG Xue-feng, ZHOU Guo-yan, PENG Rui-dong. Study on strain measurement of pore materials based on ct scanning[A]. The 21nd Annual Conference of Beijing Institute of Vibration Engineering and the 22nd Annual Conference of Beijing Vibration Engineering Society[C]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [8] 邢振贤, 马荣佳, 王雅楠. 骨料品种对无砂大孔混凝土强度影响系数回归分析[J]. 混凝土, 2012(11): 73-74.
XING Zhen-xian, MA Rong-jia, WANG Ya-nan. Regression analysis of influence factors of aggregate varieties on strength of sandless macadam concrete[J]. Concrete, 2012(11): 73-74.
- [9] 李婉琳. 骨料种类对无砂大孔混凝土有效孔隙率及强度的影响[J]. 福建建设科技, 2013(4): 23-24.
LI Wan-lin. Effect of aggregate type on effective porosity and strength of sand-free macroporous concrete[J]. Fujian Construction Science and Technology, 2013(4): 23-24.
- [10] Kim H K, Lee H K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete[J]. Applied Acoustics, 2010, 71(7): 607-615.
- [11] 何锐, 王帅, 李丹, 等. 水泥混凝土粗集料类型对其空间分布特性的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2015(4): 576-581.
HE Rui, WANG Shuai, LI Dan, et al. Effects of coarse aggregate types of cement concrete on its spatial distribution characteristics[J]. Materials Science and Engineering, 2015(4): 576-581.