

文章编号:1672-9331(2018)04-0023-09

多孔水泥混凝土力学性能试验研究

李蒙强, 靳 斌, 喻 敏, 曹 毅, 肖 丹, 李 曦

(中建西部建设湖南有限公司, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为研究多孔水泥混凝土的力学性能, 考虑了玄武岩碎石与河卵石的 2 种单一粒级 9.5~13.2 mm 和 13.2~16.0 mm 以及孔隙率分别为 18%、22% 和 26% 的情况, 运用 CT 扫描和万能试验机等技术手段, 获得了多孔水泥混凝土内部孔径大小分布规律及其弹性模量等。研究表明, 水灰比过大、过小均会造成孔隙与浆体分布不均匀, 水泥的最佳用量以刚好能够完全包裹粗骨料的表面为适度; 孔隙率受骨料类型、骨料粒径以及骨料体积比影响较大; 与碎石相比, 卵石制备多孔水泥混凝土弹性模量与抗压强度之间离散性较大; 在不同应力条件下, 受压 8, 24 h 后, 多孔水泥混凝土抗压强度明显不同。

关键词: 水灰比; 孔隙率; 抗压强度; 弹性模量; 应力历史

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

LI Meng-qiang, JIN Bin, YU Min, CAO Yi, XIAO Dan, LI Xi

(China Construction West Construction Hunan Co. Ltd., Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of porous cement concrete, two kinds of single-grain grades of basalt gravel and river pebbles are considered to be 9.5 to 13.2 mm, 13.2 to 16.0 mm, and the porosity is 18%, 22%, and 26%, respectively. Using CT scanning, universal testing machine and other technical means, the pore size distribution of porous cement concrete and its elastic modulus are obtained. The research shows that the water-cement ratio is too small, the cement inside the porous cement concrete can not be fully hydrated, and the uniform and continuous cementation layer can not be formed between the aggregate particles; the water-cement ratio is too large, the cement slurry is easy to flow and segregate, resulting in uneven distribution of pores and slurry. The optimum amount of cement is moderately just enough to completely wrap the surface of the coarse aggregate; the porosity is greatly affected by the type of aggregate, aggregate size and aggregate volume ratio, and the porosity is larger, porous cement. The cement slurry in the concrete is relatively reduced, the slurry coating on the aggregate surface is thinned, the bond strength is reduced, and the compressive strength is reduced. Compared with the crushed stone, the dispersion between the elastic modulus and the compressive strength of the porous cement concrete prepared by the pebble is compared. Under different stress conditions, the compres-

收稿日期:2018-10-08

通讯作者:李蒙强(1991—),男,河南洛宁人,中建西部建设湖南有限公司助理工程师,主要从事先进混凝土技术及硅酸盐工业固体废物再生循环利用等方面的研究。E-mail: invisible_pain@163.com

sive strength of porous cement concrete is significantly different after 8h and 24h pressure.

Key words: water-cement ratio; porosity; compressive strength; elastic modulus; stress history

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^[1,2],它具有连续孔隙和高透水性等优点,可以广泛应用于路面^[3]、绿化^[4]、污水净化^[5]及吸声材料^[6]等领域。多孔混凝土一般不含或少含细集料^[7],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,具有良好的渗透性。

同普通水泥混凝土一样,强度是多孔水泥混凝土硬化后的主要力学性能,只有在保证强度的基础上才有可能继续研究其他的物理性能。多孔水泥混凝土强度形成的内因是其组成材料,即多孔水泥混凝土的强度取决于其内部起胶结作用的水泥浆体性质、骨料特性及孔隙率等。水泥浆体的性质则取决于水泥性质、水泥用量和孔隙率。袁剑波等^[8]利用正交试验分别测试了有效孔隙率、水泥用量、水灰比三者之间的关系,发现在多孔水泥混凝土中,随着水泥用量的增加,水泥浆体在结构中开始流动,骨料之间由原本的点接触改为面接触,使得骨架间的孔隙变小甚至堵塞。此外,骨料性质、骨料级配以及骨料用量对多孔水泥混凝土强度的影响也十分显著^[9-12]。良好的骨料级配可以使骨料相互之间形成较好的搭配,其嵌挤作用能够提供很高的强度,可以大幅度提高多孔水泥混凝土的整体强度。杨加等^[13]通过研究级配对多孔混凝土连通孔隙率的影响发现,骨料粒径的增大使得多孔水泥混凝土内骨料间形成的连通孔隙增多,连通孔隙率也增大,从而导致其抗压强度显著下降。杨婷惠等^[14]研究表明,在振实状态下,由16~19 mm的大粒径骨料和4.75~9.5 mm的小粒径骨料组成的级配,可以形成相对

低的孔隙率和优良的孔结构,使得多孔水泥混凝土在保证一定孔隙率的条件下能达到较高的抗压强度。但他们的研究均未对多孔水泥混凝土弹性模量及应力历史对强度的影响进行探讨。为此,作者通过选取玄武岩碎石与河卵石的2种单一粒级9.5~13.2 mm和13.2~16.0 mm,控制孔隙率分别为18%、22%和26%,以研究多孔水泥混凝土抗压强度、弹性模量以及应力历史对其抗压强度的影响。

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. O. 42.5基准水泥,比表面积为348 m²/kg,密度为3.15 g/cm³。具体化学分析及组成见表1。

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

粗骨料选用玄武岩碎石与卵石,2种单一粒级9.5~13.2 mm和13.2~16.0 mm。骨料基本性质见表2。

水采用普通自来水。

表2 骨料基本性质

Table 2 Aggregate basic properties

	表观密度/ (g·cm ⁻³)	堆积密度/ (g·cm ⁻³)	空隙率/ %	含泥量/ %	泥块含 量/%	针片状 含量/%	压碎指 标/%	坚固性/ %
碎石	2.78	1 670	40.6	0.3	0.2	12	8.5	≤8
卵石	2.72	1 630	41.7	0.5	0.3	10	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

本研究中各组试验配合比如表 3 所示,单位

骨料体积比表示 1 m^3 多孔水泥混凝土中骨料质量 m_g 与骨料振实堆积密度 ρ_{0g} 的比。

表 3 多孔水泥混凝土试验配合比

Table 3 Porous cement concrete test mixing ratio

试验组	骨料类型	骨料粒径/ mm	骨料/ kg	体积比	水泥/ kg	水/ kg	水灰比	孔隙率/ %
W-1					325	104	0.32	
W-2	碎石	9.5~13.2	1 576	0.95	306	110	0.36	22
W-3					289	116	0.40	
K-1	碎石	9.5~13.2	1 526		391	141		
K-2		13.2~16.0	1 490	0.92	410	148		18
K-3	卵石	9.5~13.2	1 500		369	133		
K-4		13.2~16.0	1 472		384	125		
K-5	碎石	9.5~13.2	1 576		306	110		
K-6		13.2~16.0	1 539	0.95	325	117	0.36	22
K-7	卵石	9.5~13.2	1 549		284	102		
K-8		13.2~16.0	1 520		296	107		
K-9	碎石	9.5~13.2	1 626		221	80		
K-10		13.2~16.0	1 588	0.98	241	88		26
K-11	卵石	9.5~13.2	1 597		197	71		
K-12		13.2~16.0	1 568		214	77		

试验采用振动成型工艺,即将装好料的立方体抗压试模(尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$) 在振动台上振动 15 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,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。

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 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行。立方体抗压试模尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,测试龄期分别为 7,28 d。

1.4 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 1(a)所示],再通过工业 CT 扫描试块断面得到如图 1(b)所示的图像。相邻扫描断面间距为 10 mm,最后再将试块 CT 扫描图像导入软件 MagicEye-CT 中,调试软件中图像像

素等参数,获得多孔混凝土试件内部孔隙特征(孔径大小尺寸及孔隙率)。图 1(c)能够直接地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和半连通孔。

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 $0.5 \mu\text{m}$,密度分辨率 0.3%~0.5%。图像重建速度为:1 024 像素 \times 1 024 像素单层图像用时 0.2 s。

1.5 不同应力历史条件的实现

在多孔水泥混凝土试件受压过程中,试验机在加载过程中会把积攒的大量能量在试件达到峰值应力后迅速释放,对试件施加较大的附加应变会使试件急速破坏。由于加载过程中普通压力试验机无法稳定控制试件所受压力在一个定值,因此在本次应力历史试验中采用中南大学检测技术中心大型 INSTRON 液压万能试验机(如图 2 所示)。通过液压万能试验机的电脑控制系统,可以自动调控试件受压过程,使其受压应力能够较好地稳定于试验要求的定值而不出现大幅度的波动。

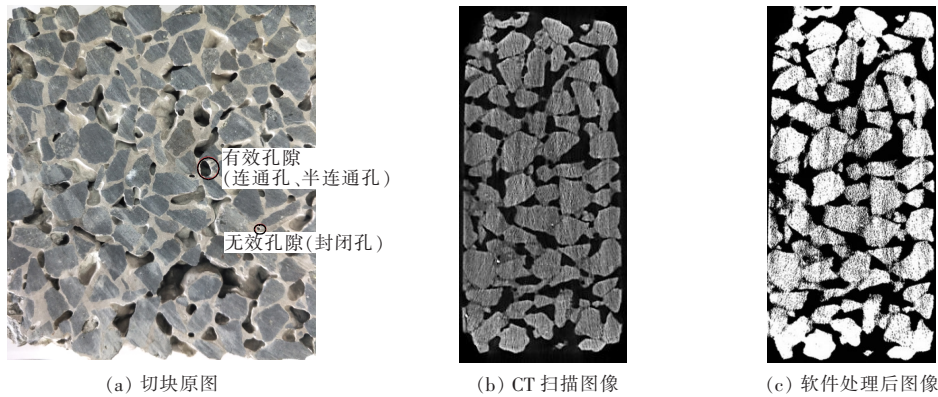


图 1 试块切面图

Fig. 1 Test block profile



图 2 液压万能试验机

Fig. 2 Hydraulic universal testing machine

每组试验试件同条件下制备 2 组,取其中一组经试压得其极限抗压强度为 $f_{c,u}$,另一组试件进行应力历史试验。不同应力历史条件分别为:①加载至 $40\% f_{c,u}$,持续稳压 8 h,然后继续加载至破坏;②加载至 $40\% f_{c,u}$,持续稳压 24 h,然后继续加载至破坏;③加载至 $70\% f_{c,u}$,持续稳压 8 h,然后继续加载至破坏;④加载至 $70\% f_{c,u}$,持续稳压 24 h,然后继续加载至破坏。通过试验分别得到不同应力历史条件下的抗压强度。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

1) 水灰比对多孔水泥混凝土抗压强度的影响。

为了研究多孔水泥混凝土力学性能,试验以 W-1、W-2、W-3 三组试验配比制备多孔水泥混凝土,振动 15 s 成型,标准环境下养护至龄期,测试其 7 d 和 28 d 的抗压强度,结果见表 4 和图 3。

表 4 不同水灰比的多孔水泥混凝土抗压强度

Table 4 Compressive strength of porous cement concrete with different water-cement ratio

试验组	实测孔隙率/ %	抗压强度/MPa	
		7 d	28 d
W-1	22.3	12.7	26.1
W-2	22.4	13.6	28.3
W-3	22.8	12.3	25.4

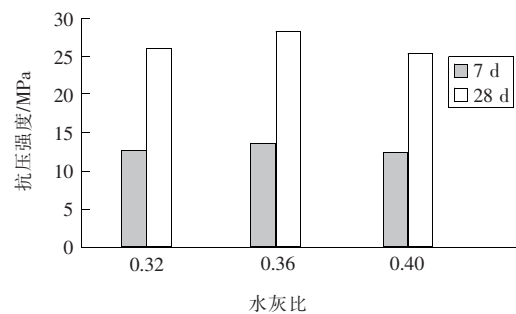


图 3 水灰比对多孔水泥混凝土抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of water-cement ratio on compressive strength of porous cement concrete

从图 3 可以看出,随着水灰比的增大,多孔水泥混凝土 7, 28 d 抗压强度先增大后减小。水灰比由 0.32 增至 0.36 和 0.40,其 7 d 抗压强度先升高 0.9 MPa,后降低 1.3 MPa,强度大小变化幅度较小;而 28 d 抗压强度则先升高 2.2 MPa,然后降低 2.9 MPa。由此可见,多孔水泥混凝土抗压强度受水灰比影响较为明显。分析其原因,是在水灰比为 0.32 的情况下,多孔水泥混凝土试件水泥成分含量较大,水含量相对较少,水泥浆体相对较为粘稠,水泥不能充分水化,骨料颗粒间无法形

成均匀连续的胶结层,所以此时的多孔水泥混凝土抗压强度较低;水灰比达到 0.36 时,二者含量均较为充足,水泥颗粒能够充分水化,骨料颗粒间能够形成稳定的胶结层结构,多孔水泥混凝土强度达到最大值;但当水灰比继续增大至 0.40 时,用水量增大,水泥浆体较稀,流动性增大,在重力作用下由上往下流淌堆聚于多孔水泥混凝土试件底部,甚至出现骨料与浆体分层现象,上部位置的骨料只是由稀薄的水泥浆包裹,此时的多孔水泥混凝土试件内部孔隙与浆体分布不均匀,受压时试件上端最早发生破坏,所以试件整体抗压强度较低。因此,多孔水泥混凝土水灰比在 0.36 左右最为适宜。

2) 孔隙率对多孔水泥混凝土抗压强度的影响。

多孔水泥混凝土孔隙率受到骨料类型、骨料粒径以及骨料体积比的影响。为研究骨料因素对孔隙率的影响,以试验组 K-1~K-12 制得不同孔隙率的多孔水泥混凝土,振动 15 s 成型,标准环

境下养护至龄期,测试其 7 d 以及 28 d 抗压强度,结果见表 5 和图 4。

表 5 不同孔隙率的多孔水泥混凝土抗压强度
Table 5 Compressive strength of porous cement concrete with different porosity

试验组	实测孔隙率/%	抗压强度/MPa	
		7 d	28 d
K-1	18.9	13.2	32.2
K-2	20.5	12.4	30.4
K-3	17.8	13.5	34.1
K-4	19.2	12.9	31.5
K-5	22.8	13.0	28.1
K-6	23.4	12.8	25.3
K-7	21.6	14.1	29.7
K-8	22.2	13.3	26.6
K-9	26.3	12.2	22.4
K-10	27.2	11.9	18.6
K-11	25.4	12.7	23.3
K-12	26.5	12.3	19.2

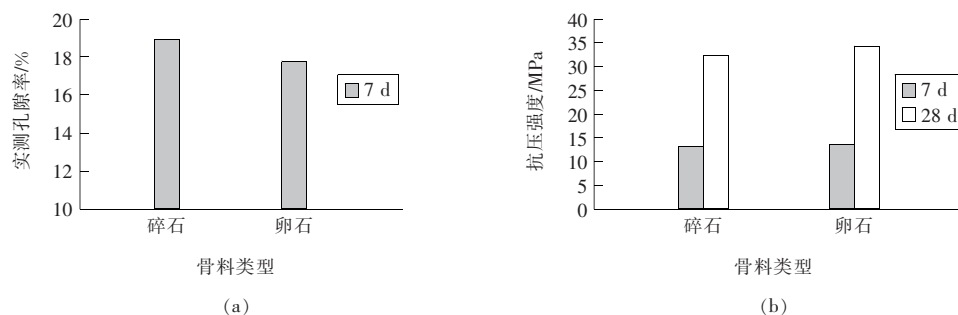


图 4 骨料类型对多孔水泥混凝土孔隙率与抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of aggregate type on porosity and compressive strength of porous cement concrete

对比 K-1 和 K-3 两组不同骨料类型多孔水泥混凝土实测孔隙率及其 7,28 d 抗压强度(见图 4)可知,卵石制得多孔水泥混凝土试件孔隙率略低于碎石试件,抗压强度也相对较高。其主要原因是,在水灰比为 0.36 的条件下,试件在成型过程中因卵石主要呈椭圆形,表面相对光滑,水泥浆体不易包裹,使得部分水泥浆体由于振动以及重力等作用下沉而填充骨料间孔隙,进而使试件内部较为密实,且水泥浆体具有足够的粘稠度使之未大量沉积于底部;同时,骨料颗粒间相互重叠、挤压,骨料接触面积增大,试件内部密实度增大,从而导致实测孔隙率小,抗压强度较高。与卵石相比,碎石表面粗糙且棱角分明,易于水泥浆体

包裹形成包裹层,所以骨料间大多呈现点接触,较少有面接触。因此,碎石骨料间的孔隙多且大,孔隙率也增大。观察试件压碎过程可以发现,其破坏处多为骨浆界面胶结处,而骨料破碎较少,故碎石制备的多孔水泥混凝土相对抗压强度较低。

图 5 显示了 K-1 和 K-2 两组不同骨料粒径试块实测孔隙率及其 7,28 d 抗压强度。从图 5 可以看出,骨料粒径越大,多孔水泥混凝土孔隙率也越大,抗压强度就随之下降。其主要原因在于,在相同水灰比条件下,骨料粒径越小,堆积密度就越大,与水泥混合搅拌成型后,多孔水泥混凝土内部骨料挤压密实,形成的孔隙较小,平均孔径在 4~6 mm 范围内,其抗压强度反之增大。13.2~

16.0 mm 粒径碎石试件内部骨料排列相对更加疏松,水泥浆体基本完全裹覆于骨料表面,骨料间隙明显,形成的孔隙较大,平均孔径范围为 6 ~

8 mm,抗压强度也大幅下降。

图 6 显示了 K-1、K-5 和 K-9 三组试验实测孔隙率及其 7、28 d 抗压强度。

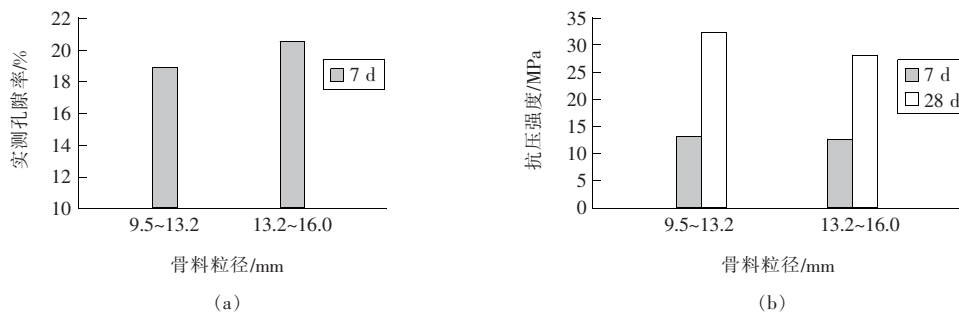


图 5 骨料粒径对多孔水泥混凝土孔隙率与抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of aggregate size on porosity and compressive strength of porous cement concrete

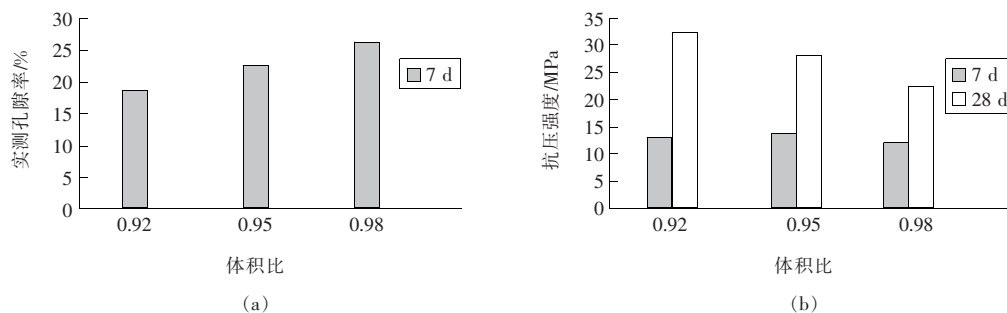


图 6 骨料体积比对多孔水泥混凝土孔隙率与抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of aggregate size on porosity and compressive strength of porous cement concrete

从图 6 可以看出,体积比由 0.92 到 0.98 不断增加时,多孔水泥混凝土孔隙率逐渐增大,且 28 d 抗压强度下降幅度随孔隙率的增大而大幅下降;而 7 d 抗压强度并未呈现出明显的变化。出现该现象的主要原因是,早期水泥浆体的强度远低于骨料强度,所以多孔水泥混凝土 7 d 总体强度主要取决于水泥浆体水化速率,因此不同骨料体积比的试件的 7 d 抗压强度差别不大;而后期当水泥浆体水化基本完成强度且稳定后,混凝土总体强度取决于水泥浆体强度和骨料强度的匹配协调程度,因而在相同的水灰比条件下,增大体积比,骨料用量相应增加,水泥用量相应减少,导致骨料表面覆盖的水泥浆体减少,粘结点减少,骨料间的粘结面积也随之下降,最终多孔水泥混凝土 28 d 强度逐渐降低。通过 CT 扫描可知,随着体积比的增大,试件内部孔隙形态也发生明显变化,当体积比为 0.92 时,试件内孔隙孔径范围为 4~6 mm,且中心区域孔隙较少,从试件中心至边缘,孔隙分布越来越明显;体积比为 0.95 时,试件内孔隙孔径范围

为 6~8 mm,中心区域孔隙逐渐增多;体积比达到 0.98 时,试件内孔隙孔径范围为 8~10 mm,此时试件内以大孔隙为主,越靠近边缘孔隙分布越多,骨料所占体积最大,而水泥浆体只占很少部分。因此在搅拌过程中,骨料表面粘结的水泥浆体量较少,骨料间隙并无过多浆体填充,形成的水泥浆体包裹层更薄,粘结能力降低,因此会出现较大、较多的孔隙,抗压强度因而大幅下降。

2.2 弹性模量

弹性模量是多孔水泥混凝土结构计算混凝土材料的重要力学性能指标,是计算多孔水泥混凝土结构变形、裂缝开展和大体积构件的应力所必须的参数之一。以 K-1、K-3、K-5、K-7、K-9 和 K-11 六组试验进行对比,结合试验结果,分析多孔水泥混凝土弹性模量与抗压强度的关系。选取多孔水泥混凝土棱柱体试样(尺寸为 150 mm×150 mm×550 mm),采用 Instron 液压万能试验机,测得棱柱体多孔水泥混凝土试样抗压强度与抗压弹性模量,试验结果如表 6 和表 7 所示。

表 6 碎石多孔水泥混凝土抗压弹性模量试验结果

Table 6 Test results of compressive elastic modulus of gravel porous cement concrete GPa

	抗压强度/MPa									
	32.2	32.5	31.8	28.4	27.6	28.3	21.5	22.8	22.9	
弹性模量	25.8	28.4	24.1	22.6	18.4	21.0	16.7	17.2	18.8	

表 7 卵石多孔水泥混凝土抗压弹性模量试验结果

Table 7 Test results of compressive elastic modulus of pebble porous cement concrete GPa

	抗压强度/MPa									
	34.1	35.2	34.8	28.8	29.6	28.5	22.5	24.2	23.8	
弹性模量	25.2	30.1	25.5	19.5	24.7	23.7	15.4	20.6	19.1	

根据表 6 数据,可以得出碎石多孔水泥混凝土弹性模量和抗压强度的关系图(见图 7)以及相关幂指数关系式:

$$y = 0.612x^{1.0712}, R^2 = 0.8424. \quad (1)$$

R^2 越接近于 1,说明相关性越好。

分析试验数据和拟合函数可知,碎石多孔水泥混凝土的抗压弹性模量会随着抗压强度的变化而呈现出同步升高或降低的趋势。

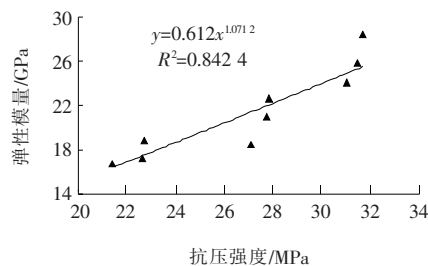


图 7 碎石多孔水泥混凝土抗压强度与弹性模量的关系

Fig. 7 Relationship between compressive strength and elastic modulus of gravel porous cement concrete

根据表 7 数据可以得出卵石多孔水泥混凝土弹性模量和抗压强度的关系图(见图 8)以及相关幂指数关系式:

$$y = 0.6705x^{1.0434}, R^2 = 0.7867. \quad (2)$$

分析图 7 和图 8 可知,骨料类型不同,多孔水泥混凝土抗压强度、弹性模量均大不相同;两种不同类型骨料的多孔水泥混凝土弹性模量数据离散性均较大,相关系数分别为 0.8424 和 0.7867。分析试验过程与数据发现,造成如此显著离散性的主要原因是,混凝土本身为复杂多相的材料,内部存在许多孔洞及细小微裂缝,而多孔水泥混凝土

土内部随机分布的孔隙更多,使得试验结果数据具有一定的离散性;且试件在成型过程中因卵石呈椭圆形,表面相对光滑,水泥浆体更容易填充骨料间孔隙,使水泥浆体整体分布不均,试件内部更加密实;同时颗粒间相互重叠、挤压,骨料接触面积增大,试件内部骨料密实度增大,从而导致强度提高,刚度变大。与卵石相比,碎石表面粗糙且棱角分明,易于水泥浆体包裹形成包裹层,所以骨料间大多呈现点接触,较少有面接触,因此碎石骨料间的孔隙多且大,孔隙率增大,碎石制备的多孔水泥混凝土相对抗压强度就减小,同时刚度相对较低,离散性也较小。

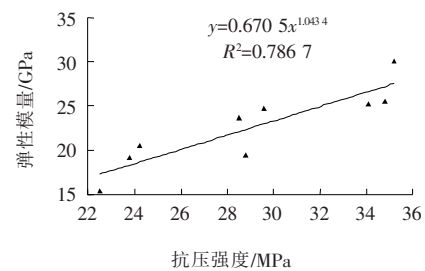


图 8 卵石多孔水泥混凝土抗压强度与弹性模量的关系

Fig. 8 Relationship between compressive strength and elastic modulus of pebble porous cement concrete

2.3 不同应力历史下的抗压强度

目前的相关研究中,主要以原材料、骨料级配和配合比等因素对多孔水泥混凝土抗压强度影响的研究成果居多,较少有文献探讨应力历史对其抗压强度的影响。故选用 K-1、K-5 和 K-9 三个试验组,制得标准立方体试件,研究不同时间、不同应力条件对多孔水泥混凝土抗压强度的影响。由表 5 可知,3 种不同孔隙率试件极限抗压强度 $f_{c,u}$ 分别为 32.2、28.1、22.4 MPa,可得各组所需施加的不同应力,试验结果见表 8 和图 9~11。

从图 9~11 可以看出,不同应力、不同受压时间对多孔水泥混凝土抗压强度影响十分显著。多孔水泥混凝土受应力历史影响的内在原因是,在正常抗压强度试验过程中,加载速度为 0.3~0.5 MPa/s,试件内部本身存在部分微裂纹,随着应力逐渐增大,内部应力主要在微裂纹处集中,微裂纹首先发展汇合形成主裂缝,主裂缝的发展使周围的应力得到松弛,抑制了其他小裂纹的产生和发展,且由于荷载作用时间短,其他微裂纹来不及扩展形成主裂缝;又由于裂纹产生所需的能量远比

其扩展所需的能量高,因此需要产生更多的微裂纹来吸收巨大的冲击能量。

表 8 不同应力历史条件下的抗压强度试验结果

Table 8 Test results of compressive strength under different stress history conditions

试验组	实测孔隙率/%	所受应力/MPa	持续时间/h	抗压强度/MPa
K-1	18.4	12.9	8	26.5
	18.2		24	24.1
	18.5	22.5	8	27.8
	18.4		24	26.3
K-5	22.5	11.2	8	23.6
	22.7		24	20.4
	21.9	19.7	8	26.2
	22.6		24	24.0
K-9	26.1	9.0	8	17.2
	26.4		24	16.7
	26.6	15.7	8	18.3
	26.3		24	16.7

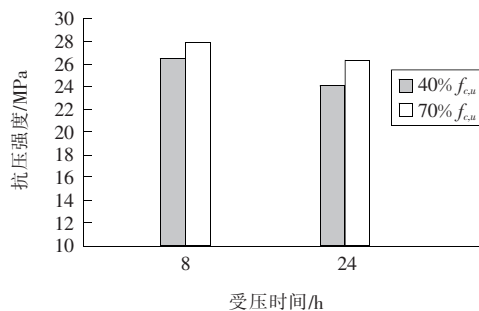


图 9 孔隙率为 18% 的多孔水泥混凝土不同应力历史条件下的抗压强度

Fig. 9 Compressive strength under different stress history conditions of porous cement concrete with porosity of 18%

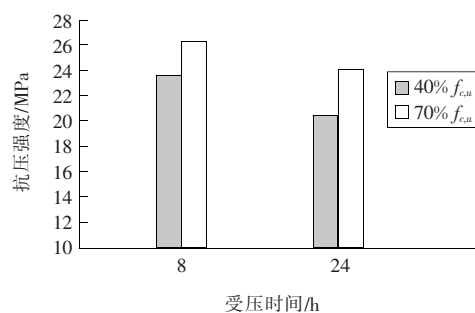


图 10 孔隙率为 22% 的多孔水泥混凝土不同应力历史条件下的抗压强度

Fig. 10 Compressive strength under different stress history conditions of porous cement concrete with porosity of 22%

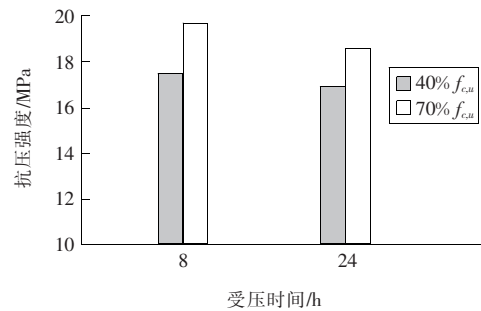


图 11 孔隙率为 26% 的多孔水泥混凝土不同应力历史条件下的抗压强度

Fig. 11 Compressive strength under different stress history conditions of porous cement concrete with porosity of 26%

当外部荷载保持 40% $f_{c,u}$ 应力大小不变时,随着在压应力的持续作用,受压时间分别为 8, 24 h, 试件内部应力随受压时间的延长有充足的时间进行分配、扩散,出现更多新的微裂缝来吸收受压产生的能量,应力集中程度大大减小;且多孔水泥混凝土自身孔隙率大,骨料与浆体界面更加薄弱,微裂缝越多,裂缝贯穿发生破坏的几率越大,故而抗压强度下降幅度十分明显。当外部荷载保持 70% $f_{c,u}$ 时,试件内部已经产生较大应力,压应力不变,持续受压 8, 24 h, 其内部应力渐渐得以释放到各处,因此抗压强度比外部荷载为 40% $f_{c,u}$ 应力时更高。

3 结论

1) 水灰比过小,多孔水泥混凝土内部水泥不能充分水化,骨料颗粒间无法形成均匀连续的胶结层;水灰比过大,水泥浆体易流淌、离析,造成孔隙与浆体分布不均匀,水泥的最佳用量以刚好能够完全包裹粗骨料表面为宜,以最小水泥用量为原则,故多孔水泥混凝土水灰比在 0.36 左右最为适宜。孔隙率越大,多孔水泥混凝土内部水泥浆体相对减少,骨料表面浆体包裹层变薄,粘结强度降低,抗压强度降低,推荐多孔水泥混凝土最佳孔隙率范围为 18%~22%。

2) 碎石、卵石多孔水泥混凝土的弹性模量和抗压强度之间呈较好的幂指数关系,卵石多孔水泥混凝土弹性模量与抗压强度之间离散性较大。

3) 在不同应力历史条件下,多孔水泥混凝土抗压强度明显不同,维持应力越大,其抗压强度相

对越大;而应力持续时间越长,抗压强度损失越大,受压 8,24 h 其抗压强度下降幅度为 13%~30%。

〔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] 时啸林. 隧道路面高性能多孔水泥混凝土配合比设计方法的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2012.
SHI Xiao-lin. Study on mix design method of high performance porous cement concrete for tunnel pavement[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [4] 黄剑鹏, 胡勇有. 植生型多孔混凝土的制备与性能研究[J]. 混凝土, 2011(2):101-104.
HUANG Jian-peng, HU Yong-you. Preparation and properties of porous porous concrete[J]. Concrete, 2011(2):101-104.
- [5] 张兴才. 高性能多孔混凝土制备及其性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(2):16-20.
ZHANG Xing-cai. Preparation and properties of high performance porous concrete[J]. Concrete and Cement Products, 2015(2):16-20.
- [6] 徐金欣. 降噪排水多孔水泥混凝土材料性能与组成设计方法研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
XU Jin-xin. Noise reduction and drainage of porous cement concrete performance and composition design method[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [7] 全洪珠, 沈杨, 周广兴, 等. 多孔生态混凝土性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5):1750-1754.
QUAN Hong-zhu, SHEN Yang, ZHOU Guang-xing, et al. Experimental study on properties of porous ecological concrete[J]. Bulletin of Silicate, 2017, 36(5):1750-1754.
- [8] 袁剑波, 侯锋锋, 冯新军, 等. 多孔水泥混凝土有效空隙率影响因素研究[J]. 公路, 2013(3):172-175.
YUAN Jian-bo, HOU Feng-feng, FENG Xin-jun, et al. Study on factors affecting effective voidage of porous cement concrete[J]. Highway, 2013(3):172-175.
- [9] 陈瑜, 李蒙强, 刘洋. 骨料类型与级配对多孔水泥混凝土性能的影响[J]. 长沙理工大学学报, 2017, 14(3):1-6.
CHEN Yu, LI Meng-qiang, LIU Yang. Effects of aggregate type and grade on performance of porous cement concrete[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2017, 14(3):1-6.
- [10] Wang Y, Zhai A, Gao T, et al. Experimental studies on strength and water permeability of recycled brick aggregate porous concrete[J]. Concrete, 2016(40):77-84.
- [11] 王彦, 李传军, 董波, 等. 基于骨架原则的再生骨料多孔混凝土配合比设计方法探讨[J]. 中外公路, 2017(2):246-250.
WANG Yan, LI Chuan-jun, DONG Bo, et al. Discussion on design method of composite ratio of recycled aggregate porous concrete based on Skeleton principle[J]. Chinese and Foreign Highways, 2017(2):246-250.
- [12] 李祥顺. 多孔水泥混凝土配合比设计对其强度的影响[J]. 山东交通科技, 2017(3):83-85.
LI Xiang-shun. Effect of mixture ratio design of porous cement concrete on its strength[J]. Shandong Transportation Science and Technology, 2017(3):83-85.
- [13] 杨加, 周锡玲, 欧正峰. 多孔混凝土连通孔隙率与抗压强度影响因素的试验研究[J]. 粉煤灰, 2011(4):35-39.
YANG Jia, ZHOU Xi-ling, OU Zheng-feng. Experimental study on factors affecting porosity and compressive strength of porous concrete[J]. Journal of Fly Ash, 2011(4):35-39.
- [14] 杨婷惠. 骨料对透水混凝土强度和透水性影响试验研究[D]. 成都:西南科技大学, 2016.
YANG Ting-hui. Experimental study on the influence of aggregate on the strength and water permeability of permeable concrete[D]. Chengdu: Southwest University of Science and Technology, 2016.