

骨料粒形粒径对骨架特性及透水混凝土性能影响研究

单景松^{1,2}, 代光伟^{1,2}, 王芳^{1,2}, 彭伟^{1,2}, 郭世腾^{1,2}

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要: 骨料形态对透水混凝土骨料骨架、强度及渗透性等方面产生影响。基于骨料颗粒粒形分级, 研究了骨料形状及粒径对透水混凝土渗透性能、抗压强度、破坏状态的影响, 同时借助计算机断层扫描技术研究了骨料形状及粒径对透水混凝土内部空隙率、空隙尺寸等空间分布特性的影响。研究表明: 以粒径为 4.75~9.5 mm 的棱角鲜明型骨料为基准, 加入不同粒径的棱角鲜明型骨料形成的骨架嵌锁能力和抗压强度较单一粒径更好, 空隙分布更均匀, 破坏形态为单个骨料散落, 颗粒破碎较少; 加入 2.36~4.75 mm 针片状细骨料或 9.5~13.2 mm 圆滑型粗骨料均导致骨架贯入强度大大降低, 降幅分别为 60.1% 和 34.4%; 加入 2.36~4.75 mm 细骨料使透水混凝土透水能力降低, 而加入 9.5~13.2 mm 针片状粗骨料后等效孔径集中在 1.5~3.0 mm, 连通空隙比重增加, 透水系数增加了 10.2%, 但抗压强度降低了 10.4%, 破坏时针片状骨料发生破碎; 加入 9.5~13.2 mm 较圆滑型粗骨料后试件中部的空隙率较低, 空隙空间分布不均匀, 透水能力最差, 破坏时骨料散落量较大。

关键词: 透水混凝土; 骨料; 骨架嵌锁能力; 计算机断层扫描; 空隙分布

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Study on influence of aggregate morphology and size on skeleton characteristics and performance of pervious concrete

SHAN Jingsong^{1,2}, DAI Guangwei^{1,2}, WANG Fang^{1,2}, PENG Wei^{1,2}, GUO Shiteng^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The aggregate morphology can affect the skeleton, strength and permeability of pervious concrete. Based on the grading of aggregate particles, this paper studies the influence of aggregate shape and size on the permeability, compressive strength and failure state of permeable concrete. With the help of computed tomography (CT), it also studies the influence of aggregate shape and particle size on the spatial distribution characteristics of void ratio and void size in permeable concrete. The results show that based on sharp angular aggregate with the particle size of 4.75~9.5 mm, the interlocking ability and compressive strength of the aggregate skeleton formed by adding sharp angular aggregate of different particle sizes are better than that of the single particle size, the void distribution is more uniform, the destruction form is a single aggregate scattering, and the particle fragmentation is less. The addition of 2.36~4.75 mm needle sheet-like fine aggregate or 9.5~13.2 mm smooth coarse aggregate results in the reduction of skeleton penetration strength, with the decline reaching 60.1% and 34.4%. The addition

收稿日期: 2024-07-11

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2021ME004); 住房和城乡建设部科技项目(2020-K-063)

作者简介: 单景松(1978—), 男, 山东东营人, 教授, 博士, 主要从事道路结构与材料研究. E-mail: skd994189@sdust.edu.cn

王芳(1998—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事道路结构与材料研究, 本文通信作者。

E-mail: wfskd136481@163.com

of 2.36~4.75 mm fine aggregate reduces the water seepage capacity of permeable concrete, while the addition of 9.5~13.2 mm needle sheet-like coarse aggregate results in the concentration of equivalent aperture at 1.5~3.0 mm, the increase of the proportion of the connecting space, the increase of the water seepage coefficient by 10.2%, the reduction of the compressive strength by 10.4%, and the break of the needle sheet aggregate when it is destroyed. The addition of 9.5~13.2 mm smooth coarse aggregate results in low void rate in the middle of the specimen, the uneven void space distribution, the worst water permeability, and the larger scattering amount of aggregate when it is destroyed.

Key words: pervious concrete; aggregate; skeleton interlock ability; CT; void distribution

透水水泥混凝土属于骨架空隙结构。骨料骨架对透水混凝土性能起着重要作用,是抵抗和传递外力的关键。骨料的骨架特性与骨料本身的颗粒形状、级配及嵌锁状态等多个因素有关^[1]。因此,有必要从骨料特性出发系统研究骨料骨架及其与透水混凝土材料整体性能的关系。

在骨料形态特征评价方面,Kusumawardani等^[2]使用形状因子和球形度指数两个参数来定义聚集体的形状属性,发现骨料形状特性对多孔混合料的整体性能有显著影响,多孔混合料的性能随着骨料球形度的增加而降低。张雪芹等^[3]基于粗骨料形状、棱角性和表面粗糙程度等形态特征,对粗骨料形态特征的表征参数及其获取方法进行了总结,提出了粗骨料形态特征表征参数和混凝土性能之间的定量关系。数字图像处理技术在骨料特征量化方面有较好的应用,刘和鑫^[4]基于数字图像处理技术,选取骨料轮廓参数和棱角性参数来定量表征骨料的形貌特征,编写骨料形貌识别与特征参数获取程序,分析了骨料对混凝土细观力学性能的影响。Masad等^[5]采取侵蚀-膨胀法对骨料图像进行处理,认为可通过低分辨率图像来获得骨料的棱角性,通过高分辨率图像来获得骨料的表面特性。在骨料特性对透水混凝土性能影响方面,Chockalingam等^[6-7]研究了骨料尺寸、类型、形状和试件尺寸等对透水混凝土渗透性能和力学性能的影响,发现骨料尺寸和试件高度增加时,抗压、劈裂、拉伸和弯曲强度均降低,骨料类型和水泥类型对渗透性影响不大。唐海钥等^[8]研究了骨料粒径对透水混凝土力学性能和透水性能的影响,发现水灰比0.25~0.30、骨料粒径9.5~16 mm的玄武岩碎石制成的透水混凝土试块综合性能相对较好。骨料级配同样会对透水混凝土性能产生影响,Zhang等^[9]选取了单粒级配、双粒级配和连续级配8个等级的骨料级配,发现连续级配的透水混凝土试件空隙率小、渗透系数小、抗压强度高。黄志伟等^[10]研究了骨料级配对透水混凝土强度和渗透性的影响,发现粒径5~10 mm与10~20 mm的骨料质量比为2:1时制备的透水混凝土能够同时保持较高强度和较好透水性。还有一些学者^[11-12]研究了空隙率与透水混凝土力学性能和透水性能的关系,指出透水性能和力学性能是一对矛盾体,如何使整体性能达到最优是关键。

骨料特性对透水混凝土性能有较大影响,但在骨料颗粒形态对骨架嵌锁特性的影响及其与透水混凝土性能之间的关系没有形成统一认识。本研究借助室内试验和计算机断层扫描技术(computed tomography, CT)分析了骨料形状、粒径对骨料骨架特性及透水混凝土性能的影响,旨在揭示骨料形态与透水混凝土空隙结构、性能的关联关系,为透水混凝土骨料选择和性能评估提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

采用山东某公司生产的P.O 42.5R早强型普通硅酸盐水泥,该水泥的详细性能指标见表1。试验骨料采用玄武岩,试验用水为实验室自来水、密度为997 kg/m³。

表1 水泥性能指标

Table1 Cement performance index

密度 (kg·m ⁻³)	比表面积 (m ² ·kg ⁻¹)	初凝硬化时间 /min	终凝硬化时间 /min	3天抗折强度 /MPa	28天抗折强度 /MPa	3天抗压强度 /MPa	28天抗压强度 /MPa
3 100	340	150	250	5.2	8.5	24.7	47.2

1.2 试验设计

1.2.1 骨料颗粒粒形分级

骨料颗粒的轮廓形状之间的差别是骨料颗粒形状特征最直接和最明显的差别,轮廓形状特征代表骨料的整体形态特点。由于骨料颗粒的球度指标可以较好地表示骨料的几何形状特性,以球度指标 S 作为骨料颗粒形状的分级标准^[13]。通过对骨料样本的颗粒形态数据分析,当骨料颗粒接近于立方体且棱角鲜明时, S 值普遍介于 $0.6 \sim 0.8$, S 值小于 0.6 时骨料颗粒形态可认定为针片状, S 值大于 0.8 时骨料颗粒可认定为较圆滑型。

按照研究目的,根据球度指标把骨料颗粒形态分为 A 级 ($0.3 < S < 0.6$)、B 级 ($0.6 < S < 0.8$)、C 级 ($0.8 < S < 0.95$) 3 个级别,把骨料粒径分为 G_1 ($2.36 \sim 4.75 \text{ mm}$)、 G_2 ($4.75 \sim 9.5 \text{ mm}$)、 G_3 ($9.5 \sim 13.2 \text{ mm}$) 3 个类型,后文以粒径和形状的组合表示某种骨料的颗粒形态,如 G_{1A} 表示粒径大小为 $2.36 \sim 4.75 \text{ mm}$ 、颗粒形状为 A 级的骨料。图 1 展示了不同类型骨料颗粒真实形态及对应的 CT 图像。

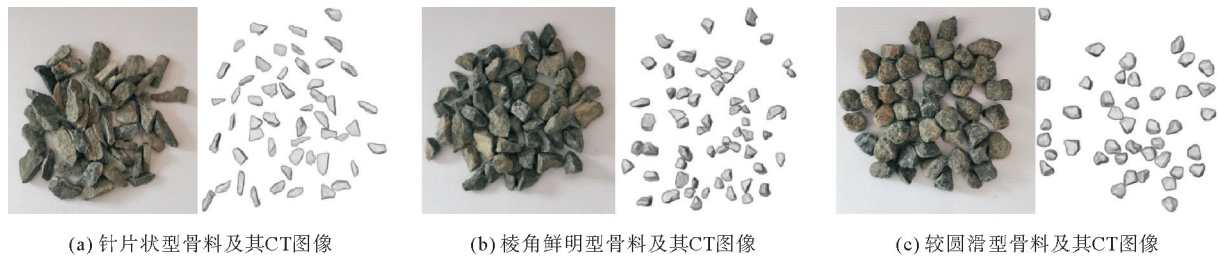


图 1 骨料颗粒真实形态及 CT 图像

Fig. 1 Real morphology of aggregate particles and CT imagery

1.2.2 配合比设计

为确定骨料形状、粒径对骨料骨架影响的对比试验方案,首先进行 G_2 、 G_3 单粒径粗骨料贯入试验,结果如图 2。可以发现,达到相同贯入位移时 G_{2B} 形状粗骨料对应施加的荷载最大,说明 G_{2B} 形状粗骨料形成的骨架最稳定、强度最高,故后续试验设计混合级配时均以占总质量 80% 的 G_{2B} 骨料为基础骨料,分别添加占总质量 20% 的 G_{1A} 、 G_{1B} 、 G_{3A} 、 G_{3B} 、 G_{3C} 型骨料颗粒,研究混合级配骨料骨架特性及其对透水混凝土性能的影响。按照 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》,采取绝对体积法进行材料配合比设计,设计水灰比(水与水泥质量之比)分别为 0.25 、 0.30 、 0.35 ,空隙率为 21% 。骨料级配组合及立方体试块的材料用量列于表 2。

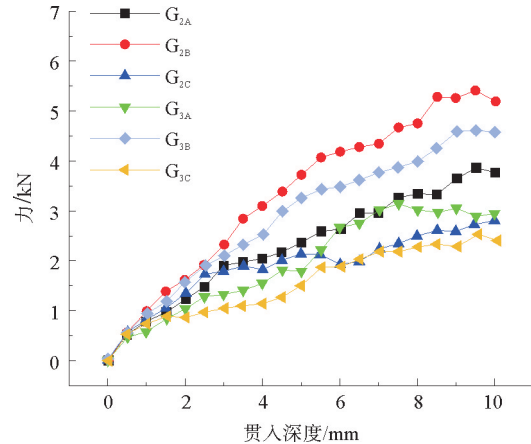


图 2 贯入强度曲线

Fig. 2 Penetration intensity curve

1.3 试验方法

1.3.1 骨料骨架嵌锁能力测试

单轴贯入试验可以记录压头贯入紧密堆积骨料的力和位移,能够反映骨料间抵抗剪切破坏的能力。根据 JTGD 50—2017《公路沥青路面设计规范》进行单轴贯入试验,压力机采用万能材料试验机,设定的贯入荷载速度为 2 mm/min 。经初步试验,当贯入深度到 10 mm 时,贯入压头下方的骨料颗粒发生明显破碎,骨料骨架原有的级配已发生改变,此时继续试验无法反映骨料本身的嵌锁状态,因此贯入试验的停止条件为贯入位移达到 10 mm 。

表 2 透水混凝土骨料配合比
Table 2 Composite ratio of pervious concrete aggregate

试验编号	各类型骨料质量占比/%						水灰比	骨料质量/kg	水泥质量/kg	水质量/kg
	G _{2B}	G _{1A}	G _{1B}	G _{3A}	G _{3B}	G _{3C}				
H1	80	20	0	0	0	0	0.25	1.683	0.334	0.084
							0.30	1.683	0.307	0.092
							0.35	1.683	0.284	0.100
H2	80	0	20	0	0	0	0.25	1.708	0.317	0.079
							0.30	1.708	0.291	0.087
							0.35	1.708	0.270	0.094
H3	80	0	0	20	0	0	0.25	1.669	0.337	0.085
							0.30	1.669	0.314	0.094
							0.35	1.669	0.287	0.100
H4	80	0	0	0	20	0	0.25	1.697	0.324	0.081
							0.30	1.697	0.301	0.090
							0.35	1.697	0.276	0.097
H5	80	0	0	0	0	20	0.25	1.733	0.302	0.075
							0.30	1.733	0.284	0.082
							0.35	1.733	0.257	0.090
H6	100	0	0	0	0	0	0.25	1.679	0.363	0.091
							0.30	1.679	0.315	0.095
							0.35	1.679	0.292	0.102

注:对于粒径小于 4.75 mm 的细骨料,由于形状差别较小且不好区分,按照球度指数只分为 A 级(0.3<S<0.6)、B 级(0.6<S<0.95); H6 为单一粒型 G_{2B} 级配对照组。

1.3.2 透水混凝土抗压强度及破坏形态监测

试块成型采用自动击实成型,击实次数为 100 次,根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行抗压强度的测定。应用数字图像相关(digital image correction, DIC)技术对试块的单轴压缩破坏过程进行图像采集,图 3 展示了试件制作、加载与数据采集过程。使用数字图像分析程序获得材料变形过程中的应变场,以研究不同骨料对透水混凝土破坏形态的影响。

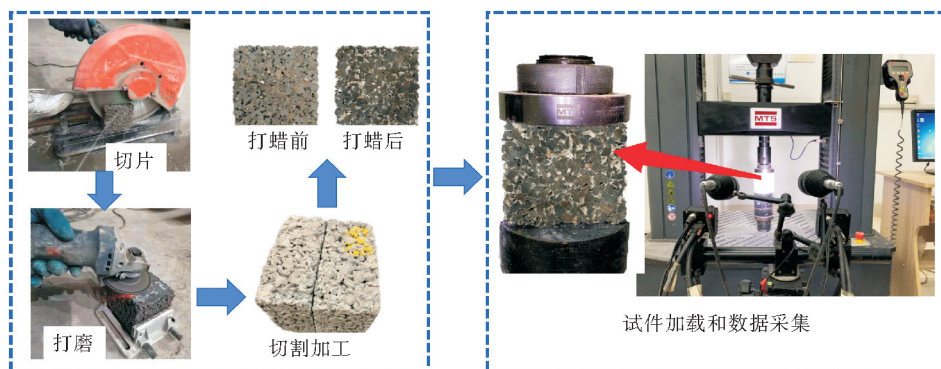


图 3 试件制作、加载与数据采集

Fig. 3 Specimen fabrication, loading and data acquisition

1.3.3 透水性能测试

透水混凝土透水性能的评价指标包括有效空隙率和透水系数,根据 DB11/T775—2010《透水混凝土路面技术规程》测得试件的有效空隙率,采用变水头试验方法测得试件的透水系数。

1.3.4 基于 CT 技术的试件内部空隙获取

以竖向空隙率为量化指标研究空隙沿试块深度的分布规律,以空隙等效孔径为评价指标探究空隙大小,进行孔隙三维重构探究透水混凝土内部空隙空间分布特征;将 CT 图像进行空隙填充和二值化处理,获得空隙面积等数据,计算空隙等效孔径和竖向空隙率^[14]。利用 CT 获取多个连续切面图像,精准获取试块内部骨料和空隙的三维空间分布,如图 4 所示。使用 Avizo 软件对多个连续切面进行三维重构,获取试块内部孔隙为 1~4.5 mm 的空隙三维分布信息^[15-16]。

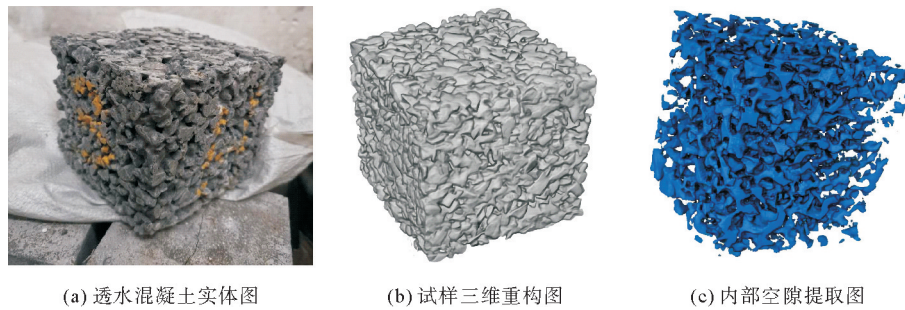


图 4 透水混凝土的 CT 三维立体图

Fig. 4 Three-dimensional stereogram of permeable concrete by CT

2 结果与讨论

2.1 骨料骨架的贯入强度

对不同形状、粒径组合的骨料在紧密堆积状态下进行单轴贯入试验,结果如图 5 所示。可以发现,骨料粒径和形状均会对骨架嵌锁能力产生较大影响。加入棱角鲜明型骨料 G_{1B} 、 G_{3B} 时,混合级配的贯入强度均大于单一粒径 G_{2B} 的贯入强度,以贯入 10 mm 时的荷载计算,添加 G_{1B} 形状骨料后贯入荷载增加 39.6%,添加 G_{3B} 形状骨料后贯入荷载增加 12.4%。分析其原因,根据粒子干涉理论,相比单一粒径骨料,不同粒径的棱角鲜明型骨料混合压实后,二级粒径的骨料会更好地填充到上级骨料之间的间隙中,接触面积、摩阻力增大,嵌锁能力增强,骨架的稳定性更好^[17]。

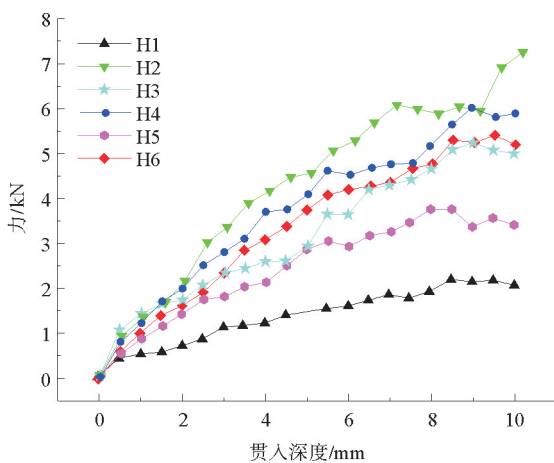


图 5 不同组合的贯入强度曲线

Fig. 5 Penetration intensity curves of different combinations

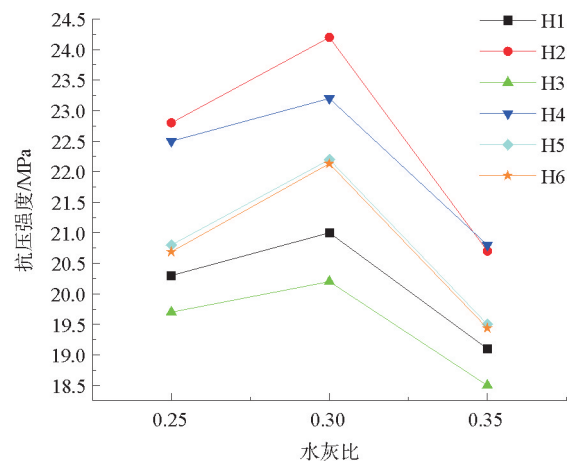


图 6 不同水灰比下不同组合的抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of different combinations under different water-concrete ratios

针片状细骨料 G_{1A} 和较圆滑型粗骨料 G_{3C} 均导致骨料骨架强度大幅度降低,贯入荷载降幅分别为 60.1%、34.4%。这是因为当加入粒径较小的针片状骨料时,在加压时骨料容易破碎,导致骨架结构发生变

形而破坏;而当加入粒径较大的较圆滑型骨料时,骨料之间容易产生滑动而发生剪切破坏。由此可知,要注意使用针片状细骨料和较圆滑型粗骨料的比例,尽量避免使用针片状细骨料 G_{1A} 。

2.2 透水混凝土抗压强度及破坏形态分析

骨料形态和不同水灰比对透水混凝土抗压强度影响如图 6 所示。可以发现,在相同的水灰比下,加入棱角鲜明型骨料颗粒的抗压强度最好。其中加入 G_{1B} 形状骨料时的抗压强度最大、为 24.3 MPa,其次是加入 G_{3B} 形状骨料的试验组的强度为 23.6 MPa,分别比完全使用 G_{2B} 形状骨料强度提高了 12.6% 和 5.8%。而加入针片状型骨料 G_{1A} 、 G_{3A} 时,试块的抗压强度分别降低了 5.4%、10.4%。究其原因,当加入棱角鲜明型骨料时,骨料之间的嵌锁力增强,骨架的稳定性更好,而加入的针片状骨料容易被挤压而发生折断破碎,导致试块强度下降。

当水灰比从 0.25 增加到 0.35 时,试块的抗压强度均呈现先增加后减小的趋势,当水灰比为 0.3 时,试块的抗压性能最佳。究其原因,水灰比太小时,水泥浆体较稠不易分散,而水灰比太大时易产生流动离析^[18]。水灰比为 0.3 时足够使水泥发生充分水化,水泥浆体具有合适的流动性,能够均匀包裹骨料颗粒,此时骨料之间的粘结最好,抗压强度达到最大。后文对渗水特性和空隙结构特性分析均采用水灰比 0.3 成型的试件。

掺加不同形状骨料的透水混凝土试块的受压开裂、破坏过程如图 7 所示。从左向右依次为试件达到强

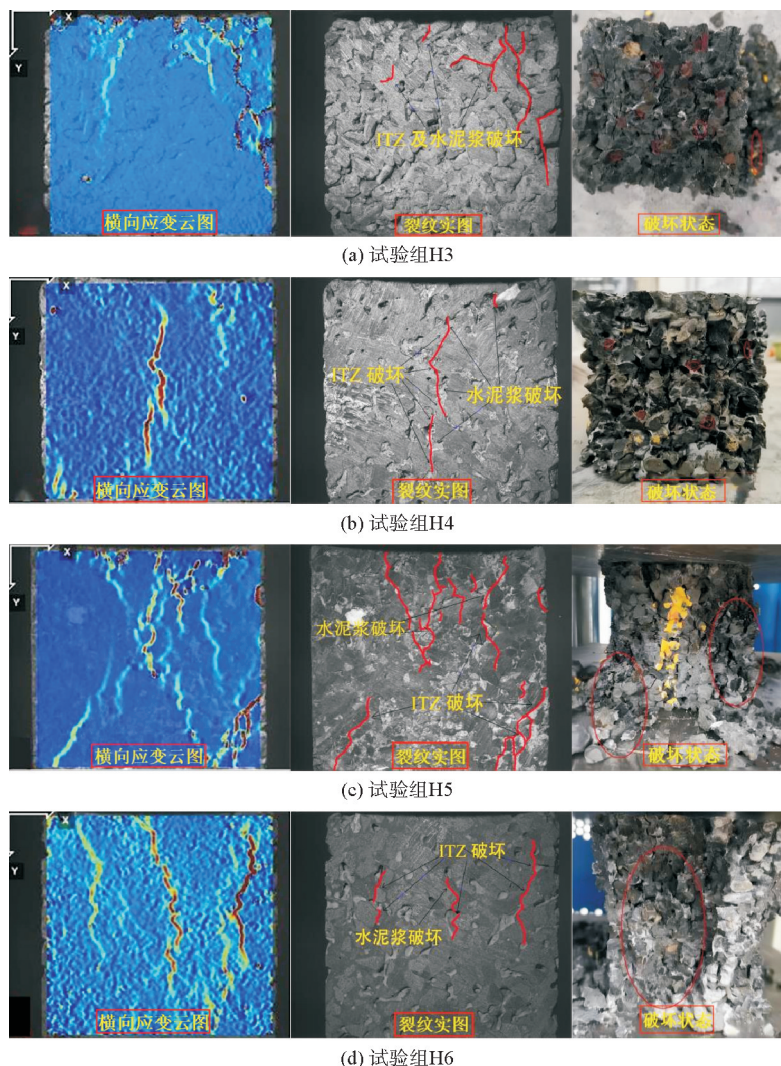


图 7 试件开裂及破坏状态

Fig. 7 Cracking and failure status of specimens

度峰值时的横向应变云图、裂纹实景图、破坏后的形态图。可以发现, H4 贯穿裂纹数量最少, 且裂纹均发生在界面过渡区和水泥浆体位置; H3 边缘位置出现应变集中现象, 破坏后的破坏面有很明显的石子破碎状况; H5 骨架破坏过程中裂纹多且分散, 在试块受到挤压时骨料间滑移量较大, 破坏后骨料颗粒散落量较大, 且表现为单个骨料散落, 很少有颗粒破碎。究其原因, H5 中含有较圆滑型粗骨料, 骨架在破坏时骨料颗粒间的粘结面首先发生破裂, 而 H3 中针片状型骨料作为薄弱部分首先发生破碎。在 H4 和 H6 骨架破碎中, 均没有出现明显的骨料破碎情况, 但 H6 贯穿裂纹和破碎散落物均较 H4 更多, 说明添加部分不同粒径的棱角鲜明型骨料较单一粒径更易形成稳定的骨架。

2.3 透水性能分析

仅以强度最大的水灰比 0.3 成型试件, 测试不同试块的透水性能, 结果如图 8 所示。可以发现, 以单一粒径 H6 组为比较对象, 添加细骨料的 H1 和 H2 有效空隙率和透水系数都有一定程度的降低, 特别是加入 G_{1A} 形状骨料的试件 H1 降低更明显, 透水系数降幅超 24%; 加入 G_{1B} 形状骨料的试件 H2 有效空隙率变化幅度不大, 透水系数稍有降低。加入 G_{3A} 形状骨料的试件 H3 有效空隙率和透水系数均有明显增加, 增幅分别为 6.9%、10.2%; 而加入 G_{3B} 、 G_{3C} 形状骨料的试件 H4 和 H5 的有效空隙率和透水系数较单一粒径试件 H6 均有一定程度下降, 透水系数降幅分别为 13.8%、17.2%。究其原因, 根据水泥基材料水渗透理论中水渗透系数与空隙之间的关系, 不同类型骨料组合影响了空隙结构的连通性和渗水孔径, 导致透水能力有所不同^[19]。从渗透性角度考虑, 加入较圆滑型粗骨料 G_{3A} 的试件透水性能最好, 但强度降低较明显, 加入 G_{1B} 形状骨料的试件透水性能较好且其抗压强度最强, 因而综合透水性能和力学性能, 加入适量 G_{1B} 形状骨料最为理想。

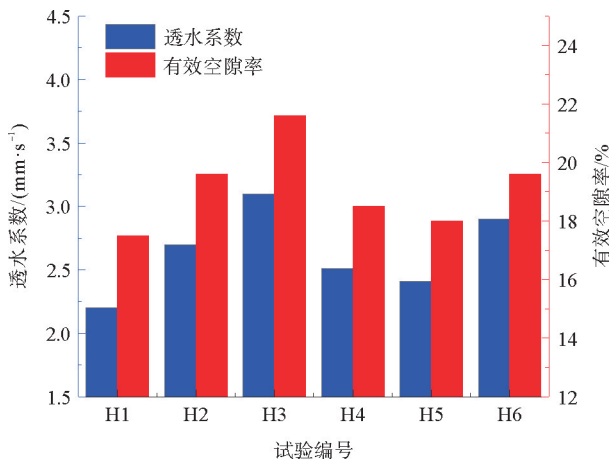


图 8 在 0.3 水灰比下试件的透水性能

Fig. 8 Permeability of specimen at 0.3 water-cement ratio

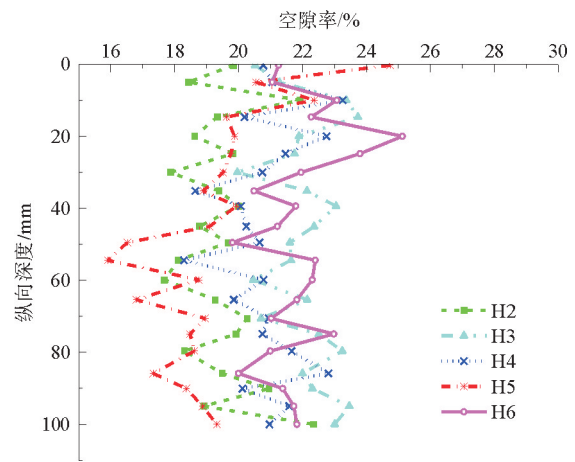


图 9 透水混凝土纵向空隙率

Fig. 9 Longitudinal void ratio of permeable concrete

2.4 三维空隙结构分布特征分析

2.4.1 不同深度空隙率特性分布

由于 H1 透水性能和强度均较低, 故以下空隙结构分析不考虑 H1。加入不同类型骨料的透水混凝土试块纵向空隙率如图 9 所示。可以发现, 透水混凝土试件空隙率沿深度有一定波动, 整体呈现上下端部附近大、中间位置小的规律。相比于单一粒径试验组 H6, 加入不同粒径的棱角鲜明型骨料 G_{1B} 、 G_{2B} 后因骨架结构更密实导致其空隙率降低; 加入较圆滑型粗骨料 G_{3C} 后因其内部骨料容易产生相对滑移, 上下端由于在成型时与模具的摩擦力制约了骨料的水平移动, 所以中部空隙率降低较明显, 空隙率波动范围较大, 且对应透水能力较弱; 加入针片状粗骨料 G_{3A} 后因试件难以被碾压密实, 各深度空隙率较大, 透水能力较强。

2.4.2 空隙尺寸分布特征

加入不同类型骨料的透水混凝土试块内部空隙等效孔径分布规律如图 10 所示。可以发现, 加入 G_{3B} 形

状骨料的试件空隙等效孔径在 1.2~1.8 mm 的占比在 60% 以上;加入 G_{1B} 形状骨料的等效孔径主要集中在 1.0~1.6 mm,占比在 61% 以上,H2 平均孔径小于 H4,主要以小空隙为主且骨架较密实,骨架稳定性较好;加入 G_{3C} 形状骨料的试件空隙等效孔径在 1.2~1.8 mm 的占比超 68%,相比单一粒径 H6 的空隙等效孔径明显减小;加入 G_{3A} 形状骨料后的试件空隙等效孔径最大,主要集中在 1.5~3.0 mm,大空隙比重增加,同时也反映了骨架所承受的荷载急剧下降,骨架稳定性也随之降低。

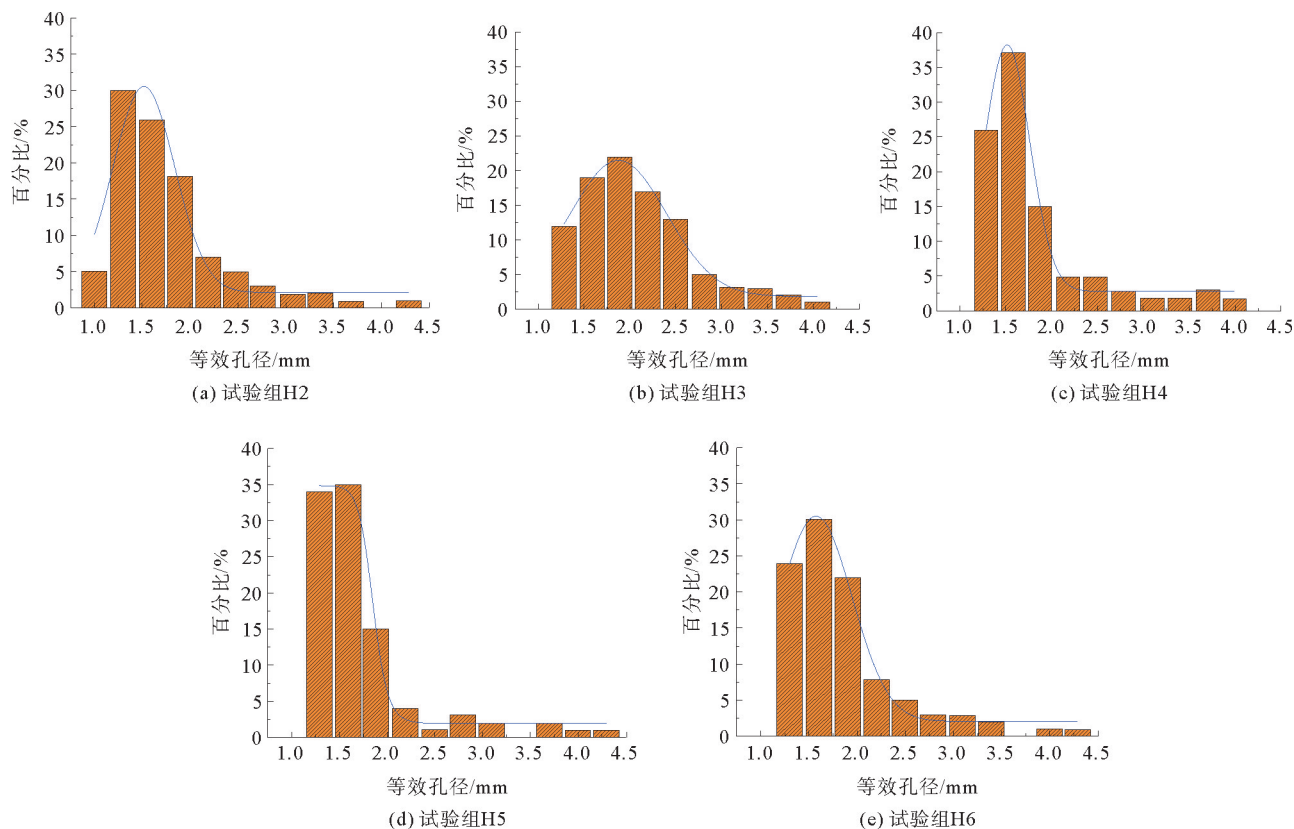


图 10 不同组合的试件等效孔径分布

Fig. 10 Equivalent pore size distribution of specimens with different combinations

2.4.3 空隙三维空间分布特征

加入不同类型骨料的透水混凝土试块骨架空隙三维空间分布如图 11 所示。可以发现,在加入棱角鲜明型骨料 G_{1B} 或 G_{3B} 时,透水混凝土内部空隙空间分布均匀,不仅得到的骨架强度较高,还可以降低雨水通过空隙渗透到地下过程中局部水头损失。但加入针片状粗骨料 G_{3A} 或较圆滑型粗骨料 G_{3C} 时,空隙空间分布不均匀,如 H3 空隙比较密集且连通空隙增多,容易形成贯穿通道,使其透水能力变强,但会导致骨架承载力减弱;H5 则表现为空隙数量少,且中间位置相比上下两端更少,致使中间位置影响了其透水能力。

3 结论

以 4.75~9.5 mm 粒径的棱角鲜明型骨料为基准,加入不同形状的 2.36~4.75 mm 粒径的细骨料或 9.5~13.2 mm 粒径的粗骨料,研究了骨料形状、粒径对骨料骨架及透水混凝土性能的影响,得出以下结论:

1) 相比全部为 G_{2B} 骨料对照组,加入棱角鲜明型骨料 G_{1B} 或 G_{3B} 后骨架嵌锁能力和透水混凝土抗压能力增强,破坏时未出现明显的骨料破碎;加入针片状细骨料 G_{1A} 使骨架贯入强度大幅度降低 60.1%;加入针片状粗骨料 G_{3A} 使试件抗压强度降低 10.4%,破坏时针片状粗骨料为薄弱部分先发生破碎,而加入较圆滑型粗骨料 G_{3C} 对试件强度影响不明显,破坏时骨料间粘结面先发生破裂。

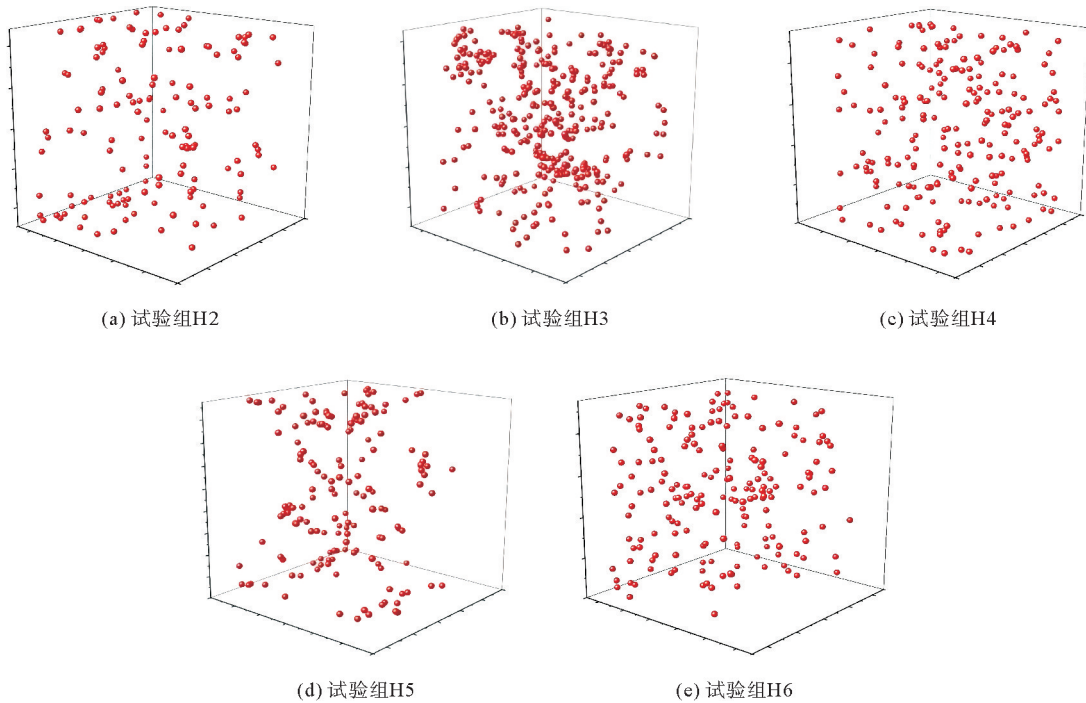


图 11 不同组合的试件骨架空隙空间分布

Fig. 11 Skeleton pore distribution of specimens with different combinations

2) 加入 20% 棱角鲜明型细骨料 G_{1B} 后, 试件骨架密实且空隙空间分布均匀, 等效孔径集中于 1.0~1.6 mm; 加入 20% 针片状粗骨料 G_{3A} 后试件整体空隙率增大, 空隙空间分布不均匀, 连通空隙比例增加, 等效孔径集中于 1.5~3.0 mm, 而加入 G_{3B} 、 G_{3C} 型粗骨料后等效孔径主要集中于 1.2~1.8 mm。

3) 加入针片状粗骨料 G_{3A} 使透水混凝土透水系数增大了 6.9%, 而加入其他形状及粒径骨料使透水混凝土透水性能均有不同程度的降低, 尤其是加入针片状细骨料 G_{1A} 使透水系数降幅达 24.2%。

4) 为兼顾透水混凝土的强度和透水性能, 进行配合比设计时优选在 G_{2B} 形状骨料中加入 20% 的棱角鲜明型细骨料 G_{1B} ; 避免使用针片状细骨料 G_{1A} 而显著降低其抗压强度和透水性能。棱角鲜明型粗骨料 G_{3B} 可提升透水混凝土强度, 但对透水性能降低较明显, 对透水性能要求不高时可加入。针片状粗骨料 G_{3A} 、较圆滑型粗骨料 G_{3C} 分别会显著降低透水混凝土强度或透水性能, 应减少使用。

参考文献:

[1] 谢晓庚, 张同生, 韦江雄, 等. 透水混凝土组成结构设计研究进展[J]. 混凝土, 2020(2):165-169.
XIE Xiaogeng, ZHANG Tongsheng, WEI Jiangxiong, et al. Critical review on the mixture proportion and skeleton structure of pervious concrete[J]. Concrete, 2020(2):165-169.

[2] KUSUMAWARDANI D M, WONG Y D. Effect of aggregate shape properties on performance of porous asphalt mixture [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(8):12-18.

[3] 张雪芹, 马昆林, 龙广成, 等. 粗骨料形态特征表征参数及其与混凝土性能关系的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(2):118-129.
ZHANG Xueqin, MA Kunlin, LONG Guangcheng, et al. Research progress in characterization parameters of coarse aggregate morphology and its relationship with concrete properties[J]. Materials Reports, 2024, 38(2):118-129.

[4] 刘和鑫. 基于图像处理技术的混凝土粗骨料形貌识别与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2022:20-44.
LIU Hexin. Recognition and application of concrete coarse aggregate shape based on image processing technology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022:20-44.

[5] MASAD E, BUTTON J W. Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture[J]. Computer-Aided

- Civil and Infrastructure Engineering, 2000, 15(4): 273-280.
- [6] CHOCKALINGAM T, VIJAYAPRABHA C, LEON R J. Experimental study on size of aggregates, size and shape of specimens on strength characteristics of pervious concrete[J/OL]. Construction and Building Materials, 2023, 385. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2023. 131320.
- [7] ZHANG Y, LI H, ABDELHADY A, et al. Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete[J/OL]. Construction and Building Materials, 2021, 266. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2020. 121074.
- [8] 唐海玥, 闫纾梅. 不同骨料粒径对透水混凝土性能影响研究[J]. 公路工程, 2020, 45(4): 193-196.
TANG Haiyue, YAN Shumei. Research on the influence of different aggregate particle size on the performance of permeable concrete[J]. Highway Engineering, 2020, 45(4): 193-196.
- [9] ZHANG X Y, LIANG N. Influence on permeability and mechanical properties of pervious concrete by aggregate gradation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 438: 145-148.
- [10] 黄志伟, 薛志龙, 郭磊, 等. 骨料级配再生透水混凝土性能的影响[J]. 人民黄河, 2021, 43(4): 147-150.
HUANG Zhiwei, XUE Zhilong, GUO Lei, et al. Effect of aggregate grade on performance of recycled pervious concrete[J]. Yellow River, 2021, 43(4): 147-150.
- [11] 朱燕飞, 李就好, 黄金林, 等. 无砂透水混凝土试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4): 1006-1011.
ZHU Yanfei, LI Jiuhao, HUANG Jinlin, et al. Experimental study of sand-free pervious concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(4): 1006-1011.
- [12] 范向前, 史晨雨. 再生骨料透水混凝土研究现状[J]. 混凝土, 2023(9): 141-144.
FAN Xiangqian, SHI Chenyu. Research status of recycled aggregate pervious concrete[J]. Concrete, 2023(9): 141-144.
- [13] 李北星, 王威, 陈梦义, 等. 粗骨料的等轴率、圆度和球度及其相互关系[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4): 531-536.
LI Beixing, WANG Wei, CHEN Mengyi, et al. Isometric ratio, roundness and sphericity of coarse aggregates and their relationship[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4): 531-536.
- [14] 苗润阳, 范宏, 刘树明, 等. 基于图像分析的透水混凝土孔隙研究[J]. 混凝土, 2021(12): 40-43.
MIAO Runyang, FAN Hong, LIU Shuming, et al. Study on the pores of pervious concrete based on image analysis[J]. Concrete, 2021(12): 40-43.
- [15] 徐行军. 基于 CT 扫描试验的透水混凝土孔隙分布特征研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(11): 3670-3674.
XU Xingjun. Pore distribution characteristics of pervious concrete based on CT scanning tests[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(11): 3670-3674.
- [16] 潘刚, 李春岩, 雅各布·拉日诺夫斯基, 等. 基于 CT 技术的喷射混凝土粗骨料与孔隙分布规律研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 40-47.
PAN Gang, LI Chunkui, JAKUB Laznovsky, et al. Research on coarse aggregate and pore distribution law of shotcrete based on CT technology[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 42(5): 40-47.
- [17] 王瑞燕, 张营, 龙昊, 等. 基于粒子干涉理论的混凝土材料设计与性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(11): 99-104.
WANG Ruiyan, ZHANG Ying, LONG Hao, et al. Material design and performance study of concrete based on particle interference theory[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(11): 99-104.
- [18] 宋慧, 徐多, 向君正, 等. 骨料及水灰比对透水混凝土性能的影响[J]. 水利水电技术, 2019, 50(9): 18-25.
SONG Hui, XU Duo, XIANG Junzheng, et al. Influence of aggregate and water-cement ratio on the pervious concrete performance[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(9): 18-25.
- [19] CUI L, CAHYADI J H. Permeability and pore structure of OPC paste[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(2): 277-282.

(责任编辑:吕海亮)