

有机改性水泥基透水混凝土的性能研究

张巨松,王 华

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究骨料级配、骨胶比、矿物掺合料、树脂对透水混凝土性能的影响,解决其高强与多孔的矛盾和易开裂不耐久的问题. 方法 通过粗骨料的空隙率找出最佳级配,利用减水剂与矿物掺合料的双掺技术,掺加一定量的砂,采用水泥与水性环氧树脂复配的技术来提高透水混凝土的性能. 结果 两种骨料质量比 $m(A):m(B) = 1.5:1$ 时,骨料的紧密堆积空隙率最小;骨胶比为 3.9 时透水混凝土的性能较好;0.8% 的减水剂与三种矿物掺合料的双掺技术可有效提高透水混凝土的抗压强度,且硅灰掺量为 6% 时效果最佳;加砂 10% 和掺入 5% 的水性环氧树脂能有效地解决透水混凝土的开裂,提高透水混凝土耐久性. 结论 骨料级配决定透水混凝土的强度;减水剂与适量的矿物掺合料进行双掺能显著提高透水混凝土的性能;掺加适量的砂和水性环氧树脂可略微提升强度,并能有效减少裂纹的出现,提升透水混凝土的耐久性.

关键词 骨料级配;骨胶比;矿物掺合料;环氧树脂

中图分类号 TU502

文献标志码 A

Study on Performance of Organic Modified Cement Pervious Concrete

ZHANG Jusong, WANG Hua

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To solve the trade-off between high strength and porosity contradiction, the effects of aggregate gradation, bone glue ratio, mineral admixtures and resin was investigated. Initially, the coarse aggregate porosity was used to study the best mass ratio, and then the technology of double mixture with water reducing agent and mineral admixtures, mixture with sand and the method of mixture with cement and water-soluble epoxy resin were used to improve the performance of pervious concrete. When the mass ratio of the two kinds of aggregates is $m(A):m(B) = 1.5:1$, the close-packed porosity of the aggregate is the smallest. When the bone glue ratio is 3.9, the performance of pervious concrete is better. The technology of double mixture with 0.8 percent of water reducing agent and three kinds of mineral admixtures can effectively improve the compressive strength of pervious concrete, and the best effect is when the content of silica fume is added to

收稿日期:2017-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(50479059)

作者简介:张巨松(1962—),男,教授,博士,主要从事生态建筑材料方面研究.

6%。Adding 10 percent of sand and 5 percent of water-soluble epoxy resin can effectively solve the cracking problem of pervious concrete and improve the durability of pervious concrete. aggregate gradation determines the strength of pervious concrete. The performance of pervious concrete can be significantly improved by the technology of double mixture with water reducing agent and an appropriate amount of mineral admixtures, Adding an appropriate amount of water-soluble epoxy resin can slightly improve the strength and reduce the occurrence of cracks which improve the durability of pervious concrete.

Key words: bone glue ratio; aggregate gradation; mineral admixtures; epoxy resin

透水混凝土是一种由粗骨料、水泥、矿物掺合料及少量外加剂和水拌制而成的具有多孔结构的绿色环保建筑材料^[1-4]。由于透水混凝土具有良好的透水、透气性能,所以能够有效地缓解城市“热岛效应”,减轻城市排水负担,并能解决普通密实混凝土带来的一些生态问题。

国外对透水混凝土的研究起步比较早,以日本、美国和德国为代表的国家是世界上透水混凝土路面材料研究与应用较为先进的国家和地区。德国从上世纪60年代起,就努力开发各种雨水渗透装置,并制订了一系列规章制度^[5-7];日本在20世纪80年代初,就提出了“雨水地下还原战略”^[8];美国在1972年通过了《清洁水资源法案》,法案中规定各州和各大城市需要确保被收集的雨水的干净度^[9]。透水混凝土在国外的应用实例比较多,广泛的应用于人行道、公园及停车场等路面。虽然我国对透水混凝土的研究起步比较晚,但也取得了一定的成果。2008年在首都的北京奥林匹克森林公园使用了大面积的透水铺装,国家体育馆“鸟巢”的湖边西路道路工程铺设了多于9 700 m²透水混凝土;2009年透水混凝土在上海世博会园区应用于透水人行道试验段^[10-12]。

虽然透水混凝土的应用越来越多,但以水泥为胶凝材料的刚性透水混凝土路面存在强度较低、刚度大且干湿变形较大的问题;而以树脂为胶凝材料的柔性透水混凝土虽然强度高、韧性大,但成本较高,很难应用到实际工程中^[13-15]。基于此,笔者将水泥和水性环

氧树脂进行复配作为胶凝材料,主要针对透水混凝土路面的两个重要特性(强度和透水系数)进行研究,研究高分子树脂胶黏剂类型、骨料级配及骨胶比对有机改性水泥基透水混凝土的强度、透水性及韧性的影响,并且制备出在透水系数满足要求的情况下,强度较高、裂纹较少的透水混凝土试块。

1 试验概况

1.1 原材料和设备

水泥:冀东水泥厂生产的42.5级的普通硅酸盐水泥。

骨料:主要使用A(粒径4.75~10 mm)、B(粒径10~16 mm)两种粒径的碎石,并经过洗涤且在100℃恒温下干燥12h。

减水剂:型号为PCA-5080的粉体聚羧酸类高效减水剂。

硅灰:比表面积为20 800 m²/kg的宁夏硅灰。

粉煤灰:由沈阳红阳热电厂供应的I级粉煤灰。

矿渣粉:使用的是朝阳天源矿粉,等级为S105。

聚氨酯:由江苏靖江特种粘合剂有限公司生产的PU-50型双组份无溶剂型聚氨酯胶黏剂。

甲基丙烯酸甲酯:由天津市大茂化学试剂厂生产的分析纯AR,配合引发剂过氧化苯甲酰使用。

环氧树脂:使用上海奥电化工科技责任有限公司生产的型号为E-51(俗称618)的

环氧树脂.

水性环氧树脂:由杭州五会港胶黏剂有限公司生产的水性环氧树脂 AB 胶.

水:试验室的普通自来水.

设备:万能压力试验机、液压伺服压力试验机 YAW - 1000C、100 mm × 100 mm × 100 mm 试模.

1.2 试验方法

1.2.1 空隙率的测定

将不同级配的粗骨料混合均匀后在水中浸泡 30 min,然后捞出,用干抹布擦干石子表面的水分使石子表面无水滴形成,然后装满体积为 10 L 的圆柱形容器中,加水注满,直至水要溢出为止,记录所加水的体积并计算出各个级配粗集料的空隙率,每组级配的空隙率测量 3 次取平均值.

1.2.2 抗压强度的测定

参考《普通混凝土力学性能试验方法标准》,采用液压伺服压力试验机 YAW - 1000C 加压来测定抗压强度,试验精确度不低于 ±2%,受压面为试块侧面,载荷加载速率为 0.4 MPa/s. 在每组配比中选 3 个试块进行测试,将测试结果的算术平均值记为抗压强度.

1.2.3 透水系数的测定

试验选用非恒压(变压)的办法^[16]测量透水系数,自制的透水装置如图 1 所示.

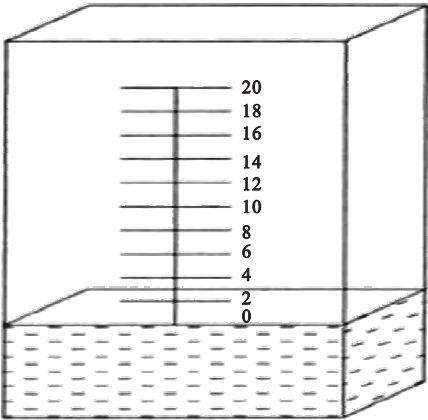


图 1 自制透水装置
Fig. 1 Handmade pervious device

先将透水混凝土试块的四周用水泥浆密封,再将上下开口、正面标有示数的透明方筒置于试块上方,并用石蜡密封透明方筒与试块间的缝隙. 试验时先向方筒中注水使试块润湿,再向方筒中注水直至液面示数超过 200 mm 时停止注水,当液面刚好下降到 200 mm 时计时开始,降到 20 mm 时计时停止,记录所用时间 $t(s)$,透水系数 $K = (200 - 20)/t$. 每个试块测量 3 次,取其平均值作为透水系数.

1.3 制备工艺

1.3.1 搅拌方式

试验使用的搅拌方式为水泥裹石法^[17],即先按事先计算好的配合比称量好各种原材料,再将骨料和 20% 的水加入到搅拌机中,搅拌 30 s 使骨料表面达到均匀湿润状态,然后把水泥和矿物掺合料倒入搅拌机中同粗骨料一起搅拌 60 s,使粗骨料表面形成一层薄薄的浆壳,最终将剩下 80% 的水和减水剂混合在一起边搅拌边倒入搅拌机,搅拌 90 s 后停止.

1.3.2 成型方式

试验采用插捣成型方法^[18],即人工利用捣棒插捣混凝土成型的方法,分三层进行捣实,每层插捣 20 ~ 30 次,依照从四周向中间螺旋形式进行捣实,捣实上一层时铁棒应穿透上面一层并且插入下面一层 20 mm 左右.

1.4 试验方案

在透水混凝土中粗骨料主要承担骨架支撑的作用,粗骨料的粒径与级配、表面形态等直接关系到透水混凝土的强度、透水系数等性能. 所以为了探究粗骨料的级配与透水混凝土性能的关系,试验选用 A 和 B 两种不同粒径的碎石作为粗骨料,其中 A、B 两种碎石以不同比例混合均匀后测得各级配的粗骨料的空隙率. 试验选取 9 组不同级配, $m(A):m(B)$ 分别取 0:1、1:3、1:2、1:1.5、1:1、1.5:1、2:1、3:1、1:0,测得粗骨料级配对空隙率、抗压强度和透水系数的关系.

首先由粗骨料、水泥、水混合而制成的混凝土作为基础试件,然后在混合料中加入减水剂和矿物掺合料,利用双掺技术来探究不同组分对透水混凝土的强度和透水系数的影响.再选用 3 种不同的有机材料作为胶凝材料制备透水混凝土,选出性能较好的有机材料与水泥浆进行复配,使透水混凝土的性能得到进一步的改善.

2 试验结果及分析

2.1 骨料级配对透水混凝土性能的影响

透水混凝土属于骨架空隙型结构,粗骨料是透水混凝土的主要组成材料,所以粗骨料的粒径与级配对透水混凝土的性能影响较大.图 2 所示为 A、B 两种粗骨料级配与空隙率的关系曲线,从图中可以看出随着 A 种粒径骨料所占比例的上升,空隙率呈现先减小后增大的趋势.当粗骨料为单一的 A 或 B 种粒径时,空隙率都较高,达到 44% 以上.当 $m(A):m(B) = 1.5:1$ 时,粗骨料的紧密堆积空隙率最低为 38%,此时为粗骨料的最佳级配.

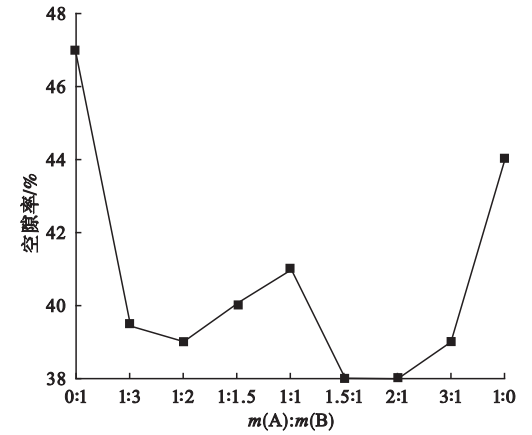


图 2 骨料级配与空隙率的关系

Fig. 2 Relationship of aggregate gradation and porosity

图 3 所示为选取的 4 组不同级配的粗集料制备的透水混凝土试块的抗压强度与透水系数的曲线.从图中可以看出,当 A 种粒径骨料用量渐渐增加,即 B 种粒径骨料用量相

应减少时,透水系数呈现先减小再变大的趋势,但透水混凝土的抗压强度变化趋势恰恰相反,呈现先逐渐增大后变小的趋势.

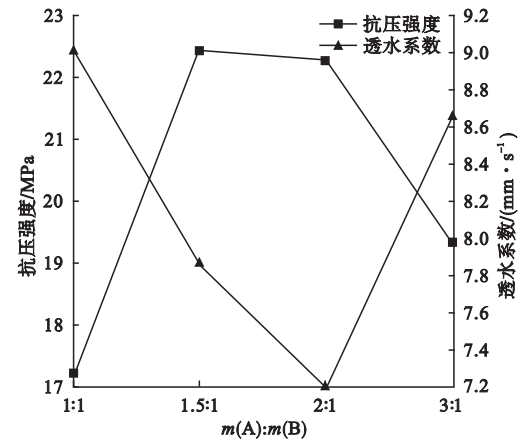


图 3 骨料级配与透水混凝土抗压强度及透水系数的关系

Fig. 3 Relationship of aggregate gradation and pervious concrete compressive strength and permeability coefficient

通过前期的试验发现,当只采用单一粒径的 B 种粗骨料时,由于粗骨料粒径较大,堆积密度就较小,骨料之间的接触点相对较少,形成的空隙就大,胶结面积相对较小,从而使透水混凝土的框架结构疏松,故导致透水混凝土试块的强度较低,透水系数大;反之,当选用单一粒径的 A 种粗骨料制备透水混凝土试块时,骨料之间的接触点相对变多,试块的抗压强度略有提高,透水系数逐渐下降.所以为了制备出抗压强度更高的透水混凝土试块,试验将 A、B 两种粒径的粗骨料按不同比例混合均匀,粒径较大的粗骨料做框架,起到骨架支撑的作用,而小粒径的粗骨料填充其间,使粗骨料颗粒间的机械咬合点增多,所以不同级配的粗骨料混合均匀后制备的透水混凝土的结构较为密实,相应的抗压强度也较高.

2.2 骨胶比对透水混凝土性能的影响

在透水混凝土中骨胶比是指粗骨料与胶凝材料的质量之比.水泥浆将骨料相互黏聚

在一起,但一般粗骨料的抗压强度要比透水混凝土的整体强度高,因此水泥石界面的强度也是控制透水混凝土强度的一个要素. 试验选取了两种不同级配的粗骨料按照三种不同的骨胶比制作透水混凝土试件(骨胶比选用3.9、4.2、4.5三种比例). 图4所示为骨胶比对透水混凝土的抗压强度及透水系数影响曲线,从图中能够明显看出无论选用哪一种级配的粗骨料,当骨胶比逐渐增大时,抗压强度都呈现下降的趋势,但透水系数却逐渐变大.

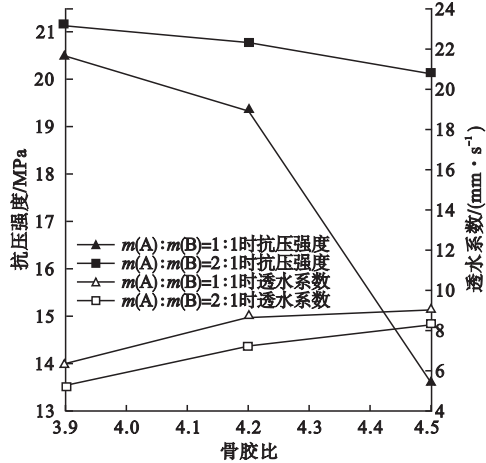


图4 骨胶比对抗压强度及透水系数的影响

Fig. 4 Effect of bone cement ratio on compressive strength and water permeability coefficient

在使用相同级配的粗骨料时,水泥石界面的强度决定透水混凝土的整体强度. 因为骨胶比太小,即使用较多水泥时,包裹在粗骨料表面的水泥浆膜层较厚,会使透水混凝土的抗压强度增加,但较厚的水泥浆也会使粗骨料之间的空隙减少,甚至会淌到试件底部造成封底的现象,导致透水混凝土的透水性降低;若骨胶比较大,则粗骨料表面的水泥浆膜层变的较薄、稠度较小,透水混凝土的透水性有一定幅度的提高,而抗压强度在不断的减小.

2.3 减水剂对透水混凝土性能的影响

试验选取了三种不同粒径的粗骨料,在不改变粗骨料级配及骨胶比的情况下,单独

掺入0.8%的减水剂,改变用水量,测试每组混合料中加入减水剂前后透水混凝土抗压强度的变化情况. 图5所示为减水剂对透水混凝土抗压强度的影响图. 从图中能够看出无论采用哪种粒径的粗骨料制作透水混凝土试块,加入减水剂的试件与基础试件相比,其抗压强度值都有不同程度的提升.

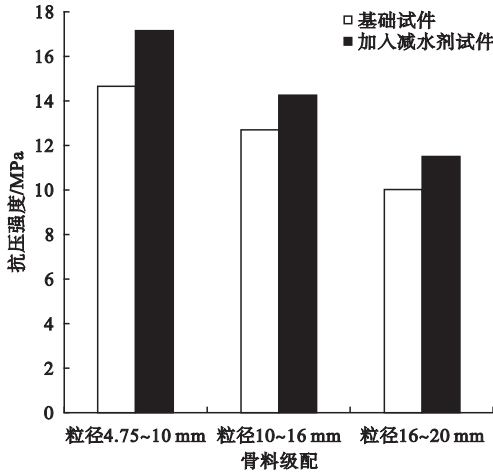


图5 减水剂对抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of water reducing agent on the compressive strength

在基础试件的混合料中加入减水剂后,改变了水泥浆的和易性,能够将水泥颗粒均匀分散,这样更容易使粗骨料的表面被均匀的包裹上一层水泥浆,增加骨料之间的粘结强度,从而提高透水混凝土的抗压强度. 同时,减水剂能够释放水泥颗粒中的水份,减少透水混凝土的拌和用水量.

2.4 矿物掺合料对透水混凝土性能的影响

2.4.1 矿物掺合料的种类对透水混凝土性能的影响

在透水混凝土的混合料中加入适量的矿物掺合料,让其等量取代水泥. 试验选用硅灰、粉煤灰和矿渣粉三种矿物掺合料,控制和基础试件相同的稠度加入适量的减水剂. 选取粗骨料级配 $m(A):m(B) = 1.5:1$ 、各矿物掺合料掺量均为6%时,测得的矿物掺合料种类对透水混凝土性能的影响结果见表1.

表1 矿物掺合料种类对透水混凝土性能的影响

Table 1 The impact of mineral admixtures on the properties of pervious concrete

矿物掺合料种类	抗压强度/MPa	透水系数/(mm·s ⁻¹)
无矿物掺合料	14.63	9.68
硅灰	20.88	9.01
粉煤灰	18.27	9.10
矿渣粉	17.90	9.13

从表中可以看出,任何一种矿物掺合料的加入对透水混凝土的抗压强度都有一定幅度的提高,相应的透水系数都有所降低,但降低幅度不是特别明显.无论是硅灰、粉煤灰还是矿渣粉,等量取代一部分水泥后,能够使透水混凝土的和易性更好,加大了集料间的摩擦,进而增加透水混凝土抗压强度,同时可填充在透水混凝土粗骨料之间的空隙,导致透水系数减小.由表1的对比可知,硅灰掺入到拌合物中,透水混凝土的抗压强度提高最明显.因为硅灰颗粒十分微小,比表面积和粒度可达水泥颗粒的100倍左右.这种微小颗粒可以填充透水混凝土粗骨料交接面间的微小孔隙,增加透水混凝土的抗压强度,而不影响透水混凝土中较大的连通孔,就不会降低透水混凝土的透水性.孔思宇等^[19]的研究也得出相应的结论,故在透水混凝土中掺入硅灰可有效地提高其综合性能.

2.4.2 矿物掺合料的掺量对透水混凝土性能的影响

表1表明,在三种矿物掺合料中,硅灰对提高透水混凝土的抗压强度效果最好,为了进一步研究硅灰对透水混凝土性能的影响,选用不同掺量的硅灰进行研究.试验选取的硅灰掺量有三种,分别为0%、6%、10%,加入适量的减水剂控制和基础试件相同的稠度.硅灰掺量对透水混凝土性能的影响曲线见图6.从图中可以看出,随着硅灰掺量的增加,透水混凝土的抗压强度也逐渐增加.硅灰掺量为6%时,与掺量0%相比,其抗压强度值提高了24.9%,增幅较大;而硅灰掺量为

10%的抗压强度较掺量为6%时也有一定的增长,但增幅不是特别的大,仅为3.2%;透水混凝土试块的透水系数随硅灰掺量的增加而减小,但都满足透水要求.

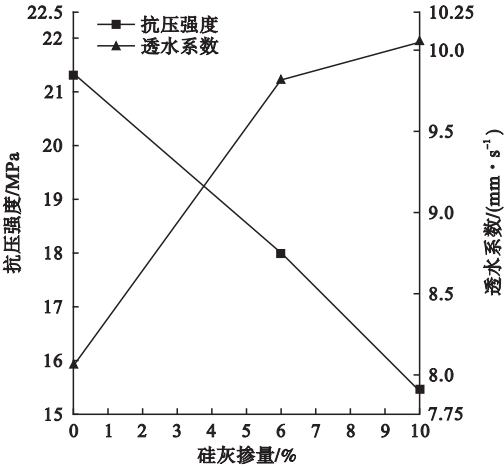


图6 硅灰掺量对透水混凝土性能的影响

Fig. 6 Effect of silica fume content on the performance of pervious concrete

文献[20]研究也得出相同的结论.当掺加少量硅灰时,硅灰填充水泥颗粒间的孔隙使其更密实,黏聚性更大,从而使得强度提高的幅度较大;但当硅灰掺量较多时,透水混凝土的流动性就会变差,如同水灰比较低时的状态一样会降低透水混凝土的强度.

2.5 砂对透水混凝土性能的影响

通过观察早期制作的透水混凝土试件,发现试件表面出现了一些微小的裂纹,这对透水混凝土后期强度的形成非常不利.试验选取3种不同级配的粗骨料,在每组混合料中分别加入占粗骨料总质量10%的砂来进行研究.图7为加砂对透水混凝土抗压强度的影响,从图中可以看出,无论哪种级配的粗骨料,加砂之后透水混凝土的抗压强度都有较大幅度的提升.并且通过观察发现加砂之后的透水混凝土试块表面的裂纹有所减少(见图8).

根据格里菲斯的微裂纹理论^[21],粗骨料界面存在的一些微小裂纹扩展后会导致脆性断裂.在透水混凝土混合料中加砂,可填充粗

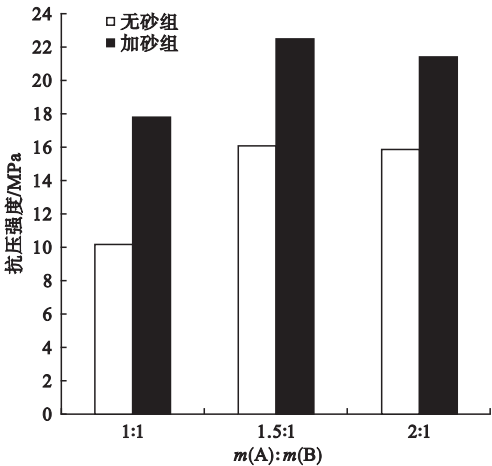


图7 加砂对透水混凝土抗压强度的影响

Fig.7 Effect of sand on the compressive strength of pervious concrete

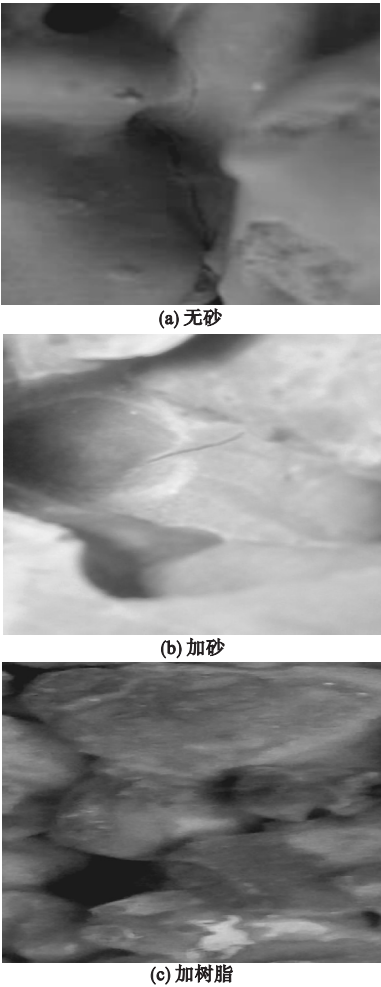


图8 裂纹对比图

Fig.8 Crack contrast diagram

骨料的空隙,增大了粗骨料间的接触点,使得透水混凝土的抗压强度变大.由于砂的骨架作用,加入少量砂后,透水混凝土的收缩变小,裂纹也减少.

2.6 树脂对透水混凝土性能的影响

2.6.1 树脂种类及掺量对透水混凝土性能的影响

树脂基透水混凝土是用树脂做胶凝材料将粗骨料相互粘结在一起.试验选取环氧树脂E-51、聚氨酯和甲基丙烯酸甲酯三种不同类型的树脂进行研究.试验使用相同级配的粗骨料,只改变树脂种类和掺量,每种树脂均选择三种不同的掺量(4%、5%、6%).图9所示为三种不同掺量的树脂对透水混凝土性能的影响曲线,其中实线代表抗压强度,虚线代表透水系数.从图中可以看出无论使用哪种树脂制备的透水混凝土试块,其抗压强度值都随树脂用量的增加而增大,而透水系数呈现相反的变化趋势逐渐减小.

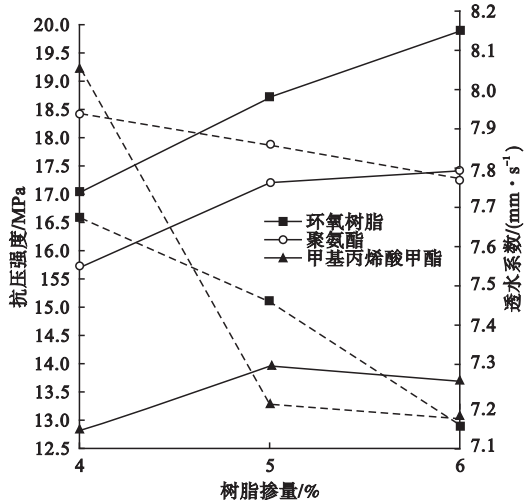


图9 树脂对透水混凝土性能的影响

Fig.9 Effect of resin on pervious concrete properties

文献[22]的研究也表明,随着树脂用量的增加,骨料与骨料之间的粘结点就相应的变大增多,粘结层也变厚,从而使粘结强度变大,故透水混凝土的抗压强度变大;同时透水混凝土试块的有效空隙降低,透水系数也就变小.

2.6.2 水泥与水性环氧树脂复合对透水混凝土性能的影响

图 10 为水泥基、水泥与 5% 的水性环氧树脂复配的应力应变曲线,试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm. 通过对比两条曲线明显可知,掺入 5% 水性环氧树脂的曲线较平缓,且应力应变曲线与坐标轴围成的面积约为水泥基面积的 3.8 倍.

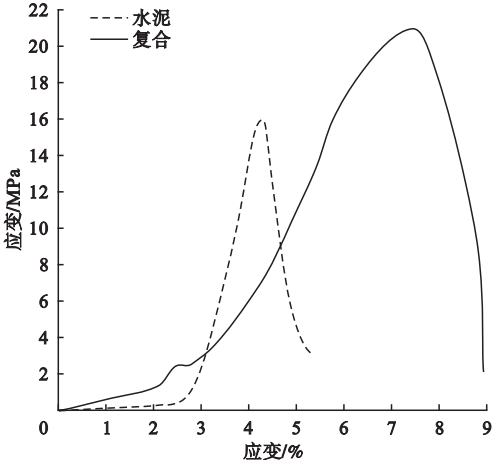


图 10 应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves

由应力-应变关系式 $\sigma = E\varepsilon$ 可知,应力与应变的比值表示弹性模量,即在弹性阶段,水泥与 5% 的水性环氧树脂复配后弹性模量较小,复配后透水混凝土的刚度较小,即在应力恒定应变变化较大时,不会导致材料被破坏.图 8(c) 为复配的透水混凝土试件,与图 8(a)、(b) 图相比基本没有裂纹.过镇海^[23]对混凝土的应力-应变全曲线进行试验分析,指出混凝土的应力应变曲线与坐标轴围成的面积表示材料的韧性,面积越大韧性越大.图 10 表明在水泥中加入 5% 的水性环氧树脂可明显地提高其韧性,可有效解决水泥基透水混凝土易开裂的问题.

3 结 论

(1) 当粗骨料级配 $m(A):m(B) = 1.5:1$ 时,粗骨料的紧密堆积空隙率最小为 37.6%,透水混凝土的抗压强度最高,相应的

透水系数较低.

(2) 骨胶比决定水泥石界面的厚度,当骨胶比为 3.9 时透水混凝土的性能最好.

(3) 减水剂与三种矿物掺合料双掺,可明显提高透水混凝土的抗压强度,且硅灰掺量为 6% 时效果最佳;同时掺入 10% 的砂,可增加骨料间的粘结点提高透水混凝土的抗压强度.

(4) 树脂基透水混凝土的抗压强度较高,但存在易老化、成本较高的问题,而将水泥与水性环氧树脂进行复配,透水混凝土的强度略有提升,大大增加了韧性,为此减小了开裂风险.

参考文献

[1] 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.
(XU Renchong, GUI Miaomiao, LIU Junxiu, et al. Study on parameters' selection and design method of pervious concrete mix proportion [J]. Concrete, 2011(8):109-112.)

[2] 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.
(ZHANG Xianchao, YIN Jian, CHI Yi. Summary of performance for pervious concrete [J]. Concrete, 2010(12):47-50.)

[3] 孟宏睿,陈丽红. 改善透水混凝土性能方法的试验研究[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2010, 26(1):32-35.
(MENG Hongrui, CHEN Lihong. Methods of improving performance on pervious concrete [J]. Journal of Shanxi university of technology (natural science edition), 2010, 26(1):32-35.)

[4] HUANG Baoshan, WU Hao, SHU Xiang, et al. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete [J]. Construction and building materials, 2010, (24):818-823.

[5] 张朝辉,王沁芳,杨娟. 透水混凝土强度和透水性影响因素研究[J]. 混凝土, 2008(3):7-9.
(ZHANG Zhaohui, WANG Qinfang, YANG Juan. Influence factors of compressive strength and permeability of pervious concrete [J]. Concrete, 2008(3):7-9.)

- [6] LOU Junjie, FENG Hongbo, JIN Qing. Experimental study on salt resistance corrosivity of permeable concrete [J]. Development guide to building materials, 2015, 13(24): 70–74.
- [7] 李鸽. 透水混凝土的试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
(LI Ge. Experimental study on permeability of concrete [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.)
- [8] 江苏省建工集团有限公司. 透水水泥混凝土路面技术规程: CJJ/T135—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
(Jiangsu Construction Engineering Group Co. Ltd. Technical specification for pervious cement concrete pavement: CJJ/T135—2009 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.)
- [9] GÜNEYISI E, GESOĞLU M, KAREEM Q, et al. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete [J]. Materials and structures, 2016, 49(1): 521–536.
- [10] 杨友祥. 透水混凝土的配合比设计及其性能分析[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(3): 38–39.
(YANG Youxiang. With pervious concrete mix design and its performance analysis [J]. Building technique development, 2016, 43(3): 38–39.)
- [11] 甘冰清. 透水混凝土的配合比设计及其性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
(GAN Bingqing. A study on mix proportions design and performance of porous concrete [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015.)
- [12] 董建忠. 透水混凝土性能的影响因素分析[J]. 公路交通科技, 2017(4): 66–69.
(DONG Jianzhong. Influential factors analysis of pervious concrete performance [J]. Road traffic technology, 2017(4): 66–69.)
- [13] ZHAO Jing, HU Liguang, ZHANG Changfu, et al. Experiment study on pervious concrete mix ratio design [J]. Journal of Dalian jiaotong university, 2014, 35(1): 57–59.
- [14] 王赞, 张波, 张科强, 等. 树脂混凝土制备及力学性能研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(10): 2079–2083.
(WANG Yun, ZHANG Bo, ZHANG Keqiang, et al. Research progress on the preparation and mechanical properties of resin concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2013, 32(10): 2079–2083.)
- [15] SHEN F, HUANG S L, SUN Z, et al. Research on hardening mechanism of cement emulsified asphalt-epoxy resin [J]. Advanced materials research, 2012, 430–432: 434–437.
- [16] SUNG-BUM P, MANG T. An experimental study on the water purification properties of porous concrete [J]. Cement and concrete research, 2004, 34: 177–184.
- [17] ERHAN G, MEHMET G, QAYS K, et al. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete [J]. Materials and structures, 2016, 49(1): 521–536.
- [18] CHINDAPRASIRT P, HATANAKA S, CHAREERAT T, et al. Cement paste characteristics and porous concrete properties [J]. Construction and building materials, 2008(22): 894–901.
- [19] 孔思宇. 透水混凝土的主要性能及其影响因素综述 [J]. 商品混凝土, 2017(1/2): 46–50.
(KONG Siyu. Summary of performance and influence factors of pervious concrete [J]. Ready-mixed concrete, 2017, (1/2): 46–50.)
- [20] 孙宏友. 基于正交试验法的透水混凝土配合比设计和试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
(SUN Hongyou. Experimental research and mix proportion design of porous concrete based on orthogonal test method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.)
- [21] YU Chen, KE Jinwang, DI Liang. Mechanical properties of pervious cement concrete [J]. Journal of central south university, 2012, 12: 317–322.
- [22] YU Weirong, QIN Weizu. Preliminary research on preparation and properties of epoxy resin micro-porous permeable material [J]. New building materials, 2008, 10: 63–66.
- [23] 过镇海. 混凝土的强度和变形: 试验基础和本构关系 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
(GUO Zhenhai. Strength and deformation of concrete: basis and constitutive relationship of test [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.)