

磷渣粉对透水混凝土的影响试验研究

姜建新,杨建永*,张裕显,李俊,王婕,刘建

(江西理工大学 土木与测绘工程学院,江西 赣州 341000)

摘要:采用磷渣粉等量取代水泥研究磷渣粉对透水混凝土的力学性能、透水性能和路用性能的影响。结果表明:在普通透水混凝土中掺入一定量磷渣粉替代部分水泥是可行的,磷渣粉等量取代水泥在10%以内时均可提高透水混凝土强度;磷渣粉最佳掺量为8%,透水混凝土强度、空隙率和透水系数分别为24.18 MPa、15.37%和2.45 mm/s,满足全透水型路面的使用要求;磷渣粉用作掺合料取代水泥时,有效取代率不高,在10%以下。

关键词:透水混凝土;碱激发;磷渣粉;掺合料

中图分类号:U414

文献标志码:B

0 引言

透水混凝土,是用一定比例的胶结料、粗骨料、水、外加剂和掺合料混合搅拌后制成的一种多孔质材料。透水混凝土在硬化以后,结构体中存在较多的孔隙,具有很好的透水功能,能让路面上的雨水流入地下,有效补充地下水;并能减轻地面上的油类化合物等给环境污染带来的危害,使城市环境更加生态和谐;具有保护自然、维护生态平衡、缓解城市热岛效应的作用。从20世纪70年代开始,日本及欧美国家陆续开始了对透水混凝土的研究,并取得了很好的成绩,透水混凝土的应用在国外逐渐普及^[1]。中国对透水混凝土的研究始于20世纪90年代,目前也取得了一定的研究成果^[2-3],在北京奥林匹克公园、上海世博会及江苏淮安体育中心得到了很好的应用。

磷渣是磷化工企业在生产化肥的主要成分磷酸盐后,产生的一种工业固体废料,以中国黄磷的生产能力,每年排放出来的磷渣大约有500万t^[4],大量的磷渣堆积会对土壤及地下水造成严重的污染。目前,磷渣已大量应用于混凝土行业中,磷渣可以用作水泥生产原料、混凝土骨料和矿物掺合料、制备碱激发胶凝材料等^[5-8]。磷渣主要为玻璃体结构,含有较

多的二氧化硅、氧化钙及氧化铝等物质,有很好的潜在活性,用作掺合料加入水泥基材料后,可与水泥的水化产物发生反应,产生更多的胶凝材料,降低水化产物中氢氧化钙的含量。

磷渣粉是磷渣粉磨后形成的微粒,经过粉磨后比表面积增大,磷渣的活性有所增加,但仍旧不高,这主要是由磷渣粉的化学性质导致的,磷渣粉中的Si—O—Si和Al—O—Al化学键较稳定,不易断裂。将磷渣粉与氢氧化钠溶液混合后,由于氢氧化钠溶液中存在大量的OH⁻,磷渣粉在OH⁻的极化作用下释放大量能量,使得磷渣粉表面的保护膜分解,OH⁻进入磷渣粉内部玻璃体内,促使Si—O—Si和Al—O—Al键断裂,使玻璃体结构解体,从而激发出磷渣粉的活性^[9];另一方面,水泥早期水化生成的氢氧化钙溶于水,使得溶液中存在OH⁻,会进一步提高磷渣粉的活性,使其火山灰性、潜在水硬性得以发挥。磷渣粉在普通混凝土中的应用已有不少学者进行了研究,并有很好的应用前景^[10-13]。但关于其在透水混凝土中的应用鲜有报道。目前中国正在大力推进“海绵城市”建设,透水混凝土作为一种良好的透水铺装材料也正在广泛应用于城市小区、公园以及停车场等地,磷渣粉如果能在透水混凝土中得到有效利用,对于回收固体废料、保护环境将发挥重要作

收稿日期:2022-11-16(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51704128)

作者简介:姜建新,男,硕士研究生.E-mail:1731550692@qq.com

*通信作者:杨建永,男,博士,教授.E-mail:xgjx123@163.com

用。基于此,本文拟研究经碱激发的磷渣粉等量取代水泥对透水混凝土性能的影响,为推进其在透水混凝土中的应用提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

(1) 集料:5~10 mm 碎石,测得其表观密度为 2 762 kg/m³,紧密堆积密度为 1 522 kg/m³。

(2) 水泥:P.O42.5 水泥,其物理性能见表 1。

表 1 水泥物理性能

凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		比表面积/(cm ² ·g ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d		
182	245	5.6	9.5	26	47	32.1	3.1

(3) 磷渣粉:粒化电炉磷渣粉,密度为 2.90 g/cm³,灰白色或白色粉末,磷渣粉的化学组成如表 2 所示。

表 2 磷渣粉的化学组成

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	IL
44.37	30.59	10.29	4.44	9.91	0.40

(4) 减水剂:聚羧酸系高性能减水剂,减水率可达 18%~25%。

(5) 碱激发剂:0.1 mol/L 的氢氧化钠标准溶液。

1.2 试验配合比设计

本试验用体积法^[14]设计透水混凝土的配合比,选择 15% 作为透水混凝土的目标空隙率,水胶比为 0.3,减水剂掺量为 1.5%,磷渣粉分别取代水泥用量的 0、2%、4%、6%、8%、10%,透水混凝土的具体配合比见表 3。

表 3 透水混凝土配合比

磷渣粉 掺量/%	水胶比	材料用量/(kg·m ⁻³)				
		粗骨料	水泥	水	磷渣粉	减水剂
0	0.3	1 491.56	481.86	144.56	0	7.23
2	0.3	1 491.56	472.23	144.56	9.63	7.23
4	0.3	1 491.56	462.60	144.56	19.26	7.23
6	0.3	1 491.56	452.97	144.56	28.89	7.23
8	0.3	1 491.56	443.34	144.56	38.52	7.23
10	0.3	1 491.56	433.71	144.56	48.15	7.23

1.3 试样制备工艺

透水混凝土的制备有一次投料法和二次投料

法^[15],由以往研究可知,采用二次投料法制得的透水混凝土性能更好,且为了更好地提高磷渣粉活性,试验采用二次投料法制备透水混凝土。具体制备工艺如下:将称量好的磷渣粉倒入氢氧化钠溶液中,充分搅拌混合,然后将粗骨料与 30% 的拌和水投入搅拌机中,湿拌 30 s,再将水泥和碱激发混合液投入搅拌机中,搅拌 30 s,最后再将减水剂以及剩余的拌和水倒入搅拌机中,搅拌 60 s 出锅;试件采用人工插捣成型,将拌和料分两层装入模具中,每层装料厚度大致相等,每层用插捣棒顺时针插捣 30 次左右,用小铲将混凝土露出的表面抹平;随后用塑料膜遮盖防止水分蒸发,24 h 后脱模,试块从模具中取出后,按编号将其放置标准养护箱中进行养护。

1.4 试验方法

1.4.1 抗压强度测试方法

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),测试碱激发磷渣粉增强透水混凝土 28 d 的抗压强度,用压力机对试块进行加载时,采用应力加载控制,加载速度为 0.4 MPa/s,当试块破坏时,读取破坏时的峰值强度。

1.4.2 空隙率测试方法

透水混凝土的有效空隙率 P 可通过重量法^[16]测出,由式(1)计算:

$$P = \left[1 - \frac{m_2 - m_1}{V} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为试件的空隙率(%); m_1 为试件完全浸泡在水中且吸水饱和时的质量(g); m_2 为试件烘干冷却至恒重后的质量(g); V 为试件的体积(cm³)。

1.4.3 透水系数测试方法

参照现有规程中的透水系数测试方法^[17],试验采用变水头法,使用自制的透水系数测试仪进行测试。测试时,对试件的侧壁采用先用保鲜膜包裹,外面再套一层橡皮圈的处理方式,在试件与套筒的接口处,用橡皮泥进行密封,保证水流只能从上到下流出,而不会从侧面流出。在测试仪中注入一定量的水,记录水流渗流完成的时间 t ,透水系数 K 通过式(2)计算:

$$K = \frac{Q}{At} \quad (2)$$

式中: K 为试块透水系数(mm/s); Q 为出水量(mL); A 为试块透水面积(mm²); t 为时间(s)。

2 试验结果与讨论

2.1 试验结果

各组试块的抗压强度、空隙率和透水系数测试

结果如表4所示。

2.2 磷渣粉对透水混凝土强度的影响

不同磷渣粉掺量条件下改性透水混凝土的28 d强度变化规律如图1所示。

由图1可知:磷渣粉掺入透水混凝土中,可提高

表4 试件基本性能参数

磷渣粉 掺量/%	28 d强度/MPa				空隙率/%				透水系数/(mm·s ⁻¹)			
	1#	2#	3#	平均值	1#	2#	3#	平均值	1#	2#	3#	平均值
0	20.15	20.54	20.54	20.41	17.50	17.00	17.00	17.17	3.54	3.49	3.50	3.51
2	21.84	20.41	21.32	21.19	16.50	17.00	16.50	16.67	3.29	3.40	3.36	3.35
4	22.49	21.06	22.75	22.10	16.50	16.40	16.30	16.40	3.21	3.08	2.86	3.05
6	23.53	23.53	23.53	23.53	15.70	15.70	15.70	15.70	2.64	2.62	2.63	2.63
8	24.44	23.27	24.83	24.18	15.40	15.60	15.10	15.37	2.31	2.56	2.48	2.45
10	23.53	23.14	23.53	23.40	16.10	16.50	16.90	16.50	2.96	3.02	3.26	3.08

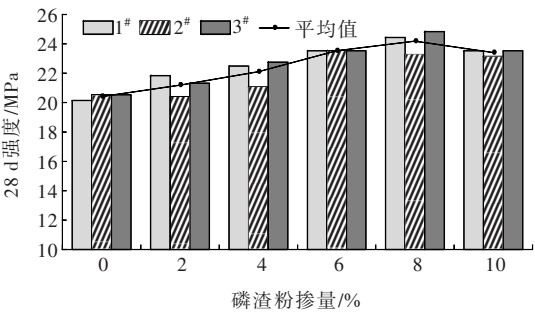


图1 透水混凝土强度变化规律

透水混凝土的强度,当磷渣粉掺量在10%以内时,透水混凝土的强度与基准组相比均有提高,且抗压强度随磷渣粉掺入比例的增加先上升后下降,磷渣粉掺量为8%时,透水混凝土平均强度从20.41 MPa提升到24.18 MPa,比未参加磷渣粉的透水混凝土试块平均强度提升了18.47%。

透水混凝土的骨料是由水泥浆包裹黏结在一起,其中骨料与水泥浆之间的界面过渡区对透水混凝土强度影响显著。拥有较高活性的磷渣粉对水泥水化的抑制作用减弱,可较快地与水泥水化生成的氢氧化钙发生反应,生成凝胶体,增强了水泥浆与骨料间的胶结力,改善了界面过渡区的微结构,加大了过渡区的密实度,持续进行的火山灰反应为抗压强度的增长做出了额外的贡献;另一方面,磷渣粉也具有微集料效应,可填充孔隙,增加透水混凝土的密度,提高土的强度。

但磷渣粉掺量过多时,占据较大空间,会对水泥

起到稀释的作用,磷渣粉与水泥黏结在一起,减小了浆体与骨料的黏结力;再者磷渣粉掺量增加时,磷元素也增多,磷元素会与Ca²⁺、OH⁻生成难溶物,覆盖在磷渣粉内部,导致水化产物难以透过该产物层到达磷渣粉中的玻璃体附近,二次水化反应受阻,影响透水混凝土强度的提高。

2.3 磷渣粉对透水混凝土透水性能的影响

不同磷渣粉掺量条件下改性透水混凝土的空隙率和透水系数变化规律如图2、3所示。

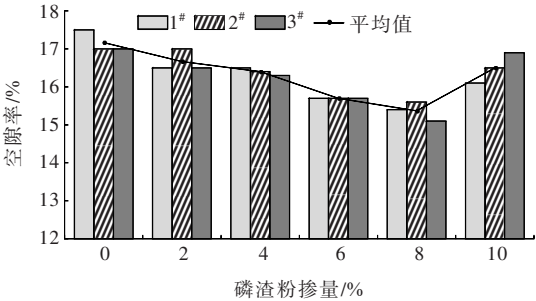


图2 透水混凝土空隙率变化规律

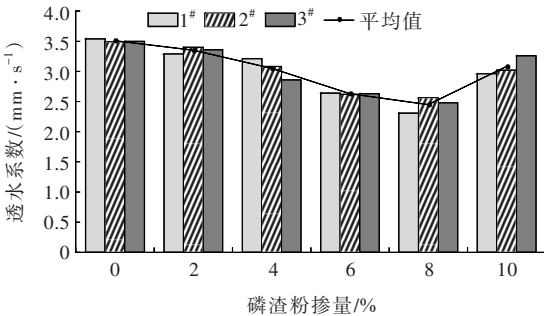


图3 透水混凝土透水系数变化规律

从图 2、3 中可以看出:透水混凝土的空隙率和透水系数具有相同的变化规律,同时上升或同时下降,有很好的正相关性。试验数据表明,当磷渣粉在透水混凝土中的掺量在 10% 以内时,透水混凝土的透水性能随磷渣粉掺量的增加呈现先降低后增加的趋势,当掺量为 8% 时,空隙率和透水系数均达到最小,分别为 15.37% 和 2.45 mm/s,相比于基准组的 17.17% 和 3.51 mm/s,空隙率下降了 1.8%,透水系数降低了 1.06 mm/s。但仍能满足文献[11]对透水性的要求(连续空隙率 $\geq 10\%$,透水系数 ≥ 0.5 mm/s)。

磷渣粉的微集料效应可以填充透水混凝土中的有害孔,增加胶凝孔和过渡孔,使得透水混凝土中大孔有所减少、小孔增多,从而改变了透水混凝土的孔结构,降低空隙率;水泥水化生成的氢氧化钙和磷渣粉中已被激发出活性的氧化硅和氧化铝进行水化反应生成胶凝体,这些胶凝体填充在孔隙中,使得结构中部分连通孔隙变成了半连通或者封闭孔隙,有效空隙率降低,水的渗流速度变慢,因此,透水混凝土的透水系数会呈现下降趋势。

透水混凝土的水胶比较低,一般为 0.25~0.35。磷渣粉掺量过高时对水泥水化的抑制程度也加大;同时掺量过高时水泥颗粒易与磷渣粉团聚在一起,从而影响透水混凝土的透水性能。

3 结 论

(1) 磷渣粉作掺合料应用在透水混凝土中具有可行性,根据试验可得,磷渣粉掺量在 10% 以内时,可提高透水混凝土的强度并且透水性能也满足要求,随磷渣粉替代水泥比例的增加,透水混凝土的强度先升后降,空隙率和透水系数则是先降后升。

(2) 磷渣粉的最佳掺量为 8%,此时透水混凝土的强度为 24.18 MPa,提高了 18.47%,空隙率和透水系数分别为 15.37% 和 2.45 mm/s,满足相关规范要求,掺磷渣粉的透水混凝土可用于全透水型路面

铺装。

参考文献:

- [1] 张国强,赖俊.透水混凝土的研究进展综述[J].广东建材,2016,32(8):72-75.
- [2] 栗威,王兆仑.透水混凝土工作性与力学性能试验研究[J].中外公路,2022,42(5):232-236.
- [3] 谭燕,易晨光,胡安迪,等.透水混凝土路面堵塞及透水性能恢复试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2480-2490.
- [4] 刘长银,李世武,沈卫国,等.磷渣综合利用及其在路面基层稳定水泥中的应用[J].建材世界,2018,39(3):32-37.
- [5] 张敏,马倩敏,郭荣鑫,等.磷渣在水泥混凝土中的资源化利用[J].硅酸盐通报,2019,38(8):2464-2469.
- [6] 钱国平,蒋博,巨锁基.水泥稳定磷渣碎石混合料早期强度试验[J].中外公路,2016,36(1):254-257.
- [7] 陆生发.磷渣混凝土的力学和抗冻性试验研究[J].新型建筑材料,2017,44(9):26-28,32.
- [8] 甘戈金,兰聪,陈景,等.碱激发磷渣制备超轻质泡沫混凝土的试验研究[J].新型建筑材料,2017,44(2):125-129,147.
- [9] 成潇潇.碱激发制备磷渣混凝土细观力学性能的光电检测应用[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- [10] 胡鹏刚,徐德龙,宋强,等.磷渣掺合料对水泥混凝土性能的影响及机理探讨[J].混凝土,2007(5):48-49,52.
- [11] 刘秋美,曹建新,杨林.磷渣粉对高性能混凝土性能影响的研究[J].混凝土,2007(6):54-55.
- [12] 李先海,张覃,卯松,等.赤泥和磷渣调控水泥混凝土界面过渡区微结构的研究[J].硅酸盐通报,2019,38(12):3946-3951.
- [13] 谷新辉.不同掺合料对混凝土界面晶体取向和厚度的影响[J].市政技术,2020,38(1):265-266,270.
- [14] 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.
- [15] 黄涛.特定强度透水混凝土的透水性能研究[D].赣州:江西理工大学,2019.
- [16] 王军强.再生骨料透水混凝土的强度和透水性能试验研究[J].结构工程师,2015,31(4):167-171.
- [17] 江苏省建工集团有限公司,河南省第一建筑工程集团有限责任公司.透水水泥混凝土路面技术规程:CJJ/T 135—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.