

攀枝花尾矿制备透水混凝土的实验研究

毛雨琴¹, 沈新颖¹, 朱路平¹, 崔 晏²

(1. 上海第二工业大学 环境与材料工程学院, 上海 201209;

2. 攀枝花学院材料工程学院, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 以攀枝花尾矿为原料制备透水混凝土, 采用填充体积法进行配合比设计, 通过投料法和插捣法进行透水混凝土的搅拌成型, 考察了水灰比 (W/C)、设计孔隙率等对试块性能的影响。结果表明, 当设计孔隙率 P 为 15%, 水灰比为 0.30 时试块抗压强度达到最大值 29.2 MPa, 并且透水系数 > 2 mm/s, 能达到一般轻型抗压透水施工要求。

关键词: 攀枝花尾矿; 透水混凝土; 配合比设计; 透水系数

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Experimental Study on Preparation of Pervious Concrete from Panzhihua Tailings

MAO Yuqin¹, SHEN Xinying², ZHU Luping¹, CUI Yan²

(1. School of Environmental and Materials Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China;

2. School of Materials Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China)

Abstract: The pervious concrete was prepared by using Panzhihua tailings as raw material. The mix ratio design was carried out by filling volume method. The mixing and forming of pervious concrete was carried out by feeding method and tamping method. The effect of water/cement ratio (W/C) and design porosity on the performance of the experimental block were investigated. The results show that when the design porosity P is 15%, W/C is 0.30, the compressive strength of the test block reaches its maximum of 29.2 MPa, and the water permeability coefficient is above 2 mm/s, which can meet the general requirements of lightweight compressive pervious construction.

Keywords: Panzhihua tailings; pervious concrete; mix ratio design; permeability coefficient

0 引言

透水混凝土又称多孔混凝土, 是一种无砂大孔混凝土, 一般由水泥、粗骨料、水和外加剂等拌制而成。它以单粒级骨料为骨架, 骨料表面包裹一层较薄的胶凝材料, 周围形成具有连续贯穿孔隙的蜂窝状结构, 具有良好的透水、透气性^[1]。美国在 1972

年出于对城市水资源的保护而出台了清洁水资源法案, 政府规定了各州需要收集一定量的清洁降雨^[2], 透水混凝土因其净化、吸声、渗透作用而被各州广泛使用。其中, 佛罗里达州处于美国的东南部, 周围临海, 由于其特殊的地理位置经常降暴雨而导致城市出现洪涝现象。因此, 当地政府积极推进透水路面建设, 缓解了较大的地表径流量。将透水混凝土

收稿日期: 2017-09-25

通信作者: 朱路平 (1976-), 男, 湖北咸宁人, 副教授, 博士, 主要研究方向为环境友好功能材料。E-mail: lpzhu@sspu.edu.cn

基金项目: 上海电子废弃物资源化协同创新中心开放课题 (B50ZS120003B-10), 上海第二工业大学研究生基金 (A01GY16F030) 上海市联盟计划项目 (LM201462), 上海自然科学基金资助项目 (14ZR1417100) 资助

材料应用在公园、广场、轻便型道路等场所具有良好的生态效应^[3]和经济效益。上世纪 70 年代初期, 欧洲许多发达国家也投入大量财力进行透水混凝土的研究与应用。我国在透水混凝土方面的起步较晚, 在 1993 年, 我国开始着手研究透水混凝土^[4]。本世纪初, 我国才逐渐开始在城市园林道路、运动场馆等地铺装透水混凝土材料^[5]。近年来, 随着国家对环境问题的日益重视以及固体废弃物资源化处置的迫切需求, 以废弃尾矿来进行透水混凝土的制备和应用引起了人们的极大关注。攀枝花钒钛磁铁矿是我国较大的金属矿床之一, 攀钢公司每年生产 500 万 t 左右的铁精矿, 与此同时产生 750 万 t 左右的尾矿^[6]。废弃尾矿的堆积与处理严重危害当地的环境, 因此利用攀枝花尾矿进行回收再利用具有较高的社会价值和经济意义。攀枝花尾矿可应用于建筑用砂、生产微晶玻璃、混凝土骨料等方面, 具有较高的资源回收利用价值^[7]。本文以攀枝花尾矿为基本原料制备了透水混凝土, 采用填充体积法进行配合比设计, 通过投料法和插捣法进行透水混凝土的搅拌成型, 测定了试样的抗压强度和透水系数等性能, 探讨了影响其性能的主要因素。

1 实验部分

1.1 仪器与原材料

实验器材: 电子桌秤 (最大称量 5 kg, 分度 0.05 g), 搅拌机 (转速 90 r/min), 震动台 (振次 2 860 次/min), HBY-40B 混凝土标准养护箱, FSY-150A 水泥细度负压筛析仪, 压力机 (最大负荷 2 000 kN), 混凝土模具 (100 mm×100 mm×100 mm), 泥抹子, 砖刀, 毛刷等。

原材料: P·O42.5R 硅酸盐水泥 (P·O 表示普通硅酸盐水泥, 42.5 表示抗折强度为 42.5 MPa, R 表示早强型水泥), 粒径为 5~10 mm 的攀枝花尾矿 (典型高钙高镁含钛渣, 含量最高的成分是 CaO、SiO₂、TiO₂, 三者的含量之和达到 70%以上, 其次为 Al₂O₃ 和 MgO, 尾矿中 CaO 含量约为 21%~29%, TiO₂ 含量约为 21%~24%, SiO₂ 约为 20%~25%, Al₂O₃ 为 12%~15%, MgO 为 7%~10%。其实测表观密度为 2.7 g/cm³, 为避免尾矿表面的尘粒对胶凝料对骨料的粘接影响, 需要对尾矿进行清洗)^[6], 聚羧酸高性能减水剂 (粉剂) PCA-I, 自来水。

1.2 实验方案

采用填充体积法^[8]计算尾矿透水混凝土的配合比。具体设计方法如下: 根据《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T135-2009)^[9]和《混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011)^[10], 确定骨料、胶凝材料的用量, 并制定透水混凝土基准配合比设计参数为: 抗压强度 ≥20 MPa, 设计孔隙率 $P(15\% \sim 25\%)$, 骨料粒径 (5~10 mm), 减水剂 (0.5%~1.0%), 水灰比 $W/C(0.28 \sim 0.32)$ 。

由上述配合比设计方法, 分别取目标孔隙率为 15%, 20%, 25%, 水灰比为 0.28, 0.29, 0.30, 0.31, 0.32 进行配合比设计, 具体配比见表 1。

表 1 透水混凝土配合比

Tab. 1 Mix ratio of the pervious concrete						
P		W/C				
		0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
15%	编号	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
	$m_{\text{水泥}}$	509.9	506	502.1	498.3	494.5
	$m_{\text{水}}$	142.7	146.7	150.6	154.4	158.2
	$m_{\text{减水剂}}$	2.55	2.53	2.51	2.49	2.47
	$m_{\text{骨料}}$	1 315.8				
	编号	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
20%	$m_{\text{水泥}}$	439.6	436.2	432.9	429.6	426.3
	$m_{\text{水}}$	123.1	126.5	129.9	133.2	136.4
	$m_{\text{减水剂}}$	2.20	2.18	2.16	2.14	2.12
	$m_{\text{骨料}}$	1 315.8				
	编号	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
	$m_{\text{水泥}}$	369.3	366.5	363.6	360.9	358.1
25%	$m_{\text{水}}$	103.4	106.3	109.1	111.9	114.6
	$m_{\text{减水剂}}$	1.84	1.83	1.82	1.80	1.79
	$m_{\text{骨料}}$	1 315.8				

注: 表 1 中实验原料的单位为 kg/m³

透水混凝土的搅拌工艺是多次投料法。第 1 步将粗骨料投入到搅拌机中, 同时加入 200 mL 水, 搅拌 40 s 左右暂停搅拌; 第 2 步向搅拌机中投入水泥和外加剂等胶凝材料, 开机搅拌 1 min 左右; 第 3 步加入剩余的水搅拌 3 min 左右停止搅拌, 待混凝土搅拌均匀后, 开机放闸倒料。

透水混凝土试块成型方法采用插捣法, 是将拌合料分 5~6 次装填到模具中, 每次装填后需用力使用砖刀对模具中的拌合料进行 8~10 次插捣, 直至捣实为止。

本实验选用标准养护方式,标准养护箱设置的温度参数为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度在 95% 的恒温恒湿环境,养护时间为 28 d。试块的干重、湿重均使用分度为 0.05 g 的电子桌秤进行测量,且每块试样均测量 3 次取其平均值。

采用气相排除法^[11]对试样进行孔隙率测试;在测定透水混凝土试块孔隙率前,需称量干状态下试块的质量,称量方法与原材料的称量方法相同,试块质量记为 m_1 。然后将透水混凝土试块置于盛满水的 2 L 的容器中时,水进入试块内部,此时水充满了多孔混凝土内部的孔隙,内部的气相被水排出。待混凝土试块内部被水完全填充时,取出试块并称其质量 m_2 。此时试块的质量会发生变化,由原来的试块质量变为试块和水的质量,两者的质量之差便是透水混凝土内部水填充气相的质量。测得质量 m_1 和 m_2 后,可根据下式测得透水混凝土试块的孔隙率:

$$\delta = (m_2 - m_1) / (\rho V) \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ 为透水混凝土的孔隙率; ρ 为水的密度 (g/mL); V 为容器的体积 (mL)。

采用自制透水仪,如图 1 所示,塑料套筒的规格为 100 mm×100 mm×200 mm,表面标有刻度 (100 mm)。待混凝土试块与套筒密封处理后,往塑料套筒中加满水,待水刚好到 100 mm 刻度时,开始计时 t_1 ,待水位下降到 10 mm 的刻度时,计时 t_2 。因此,透水混凝土的透水系数计算方法为^[12]:

$$T = (100 - 10) / \Delta t \quad (2)$$

式中: T 为透水混凝土的透水系数 (mm/s); Δt 为水位下降 90 mm 所用的时间 (s)。

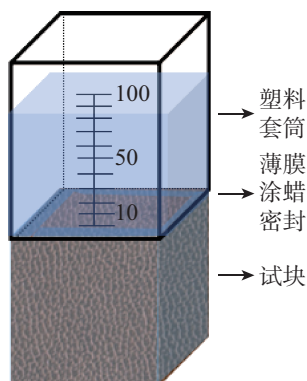


图 1 自制透水仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of homemade water permeability tester

采用 DYE-2000 型混凝土压力实验机对试样进行抗压强度测试。

2 结果与讨论

2.1 水灰比与实测孔隙率的关系

在实际实验中,由设计孔隙率计算出的理论配合比会受到搅拌方式和成型方式的影响,从而改变透水混凝土的实际孔隙。

从图 2 中可看出,实际测得的孔隙率在目标设计孔隙率附近波动,设计孔隙率在 25% 以下时,实测孔隙率基本符合设计孔隙率,15% 的设计孔隙率与实测孔隙率基本吻合。当设计孔隙率 $P = 20\%$ 、水灰比为 0.31 时,实测孔隙率的波动范围较大,存在较大的误差。这可能是由于对透水混凝土的浸泡时间不够,使称得的混凝土试块浸湿重量较小,因此实际孔隙率较小。当设计孔隙率 $P = 25\%$ 时,随着水灰比的逐渐增加实测孔隙率也逐渐增大;设计孔隙率 $P = 20\%$ 和 $P = 15\%$ 时,水灰比的增加使实测孔隙率无规律变化,拐点也不同,在水灰比为 0.30 时,实

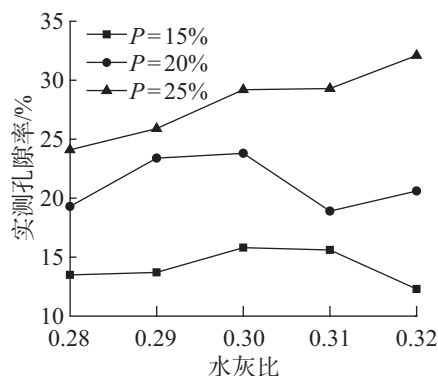


图 2 水灰比与实测孔隙率的关系

Fig. 2 Relation between water/cement ratio and the measured porosity

测孔隙率达到最大值。结果表明:当设计孔隙率较大时,水灰比逐渐增大,附着力逐渐下降,不能更好地包裹粗骨料表面,因而在试块内部形成较多的孔隙。当设计孔隙率下降到一定程度时,水灰比对实际孔隙率的影响较小,实测孔隙率在设计孔隙率附近波动。

2.2 孔隙率对透水系数的影响

将透水混凝土试块在水中完全浸泡 1 d 后,使用自制透水仪测试块的透水系数。孔隙率与透水系数的关系见图 3。

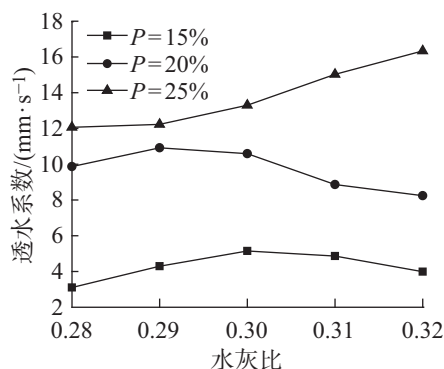


图3 孔隙率与透水系数的关系

Fig. 3 Relation between the measured porosity and permeability coefficient

由图3可看出,透水混凝土试块的透水系数与设计孔隙率的大小有关,孔隙率越大透过水的速度越快,透水系数越大。图2与图3的走势基本相同,水灰比对透水系数的影响与水灰比对实测孔隙率的影响相同,说明实测孔隙率是影响透水系数的决定性因素。

2.3 水灰比对抗压强度的影响

透水混凝土试块最主要的力学性能是试块承受的最大抗压值,即抗压强度。根据前面测量透水混凝土的方法,使用混凝土压力实验机测得28d后尾矿透水混凝土的抗压强度。由图4可看出,在水灰比保持不变的情况下,试块的抗压强度随着设计孔隙率的减小而增大。当设计孔隙率 $P=15\%$,水灰比 W/C 为0.30时,试块的抗压强度达到最大值,抗压强度能达到29.2 MPa。在水灰比为0.30的两侧抗压强度值逐渐减小。在设计孔隙率增大到25%,水灰比为0.32时抗压强度值达到最小值,此时试块的抗压强度为8.9 MPa。因此,在进行透水混凝土配比

设计时,需根据实际情况选择合适的孔隙率。需要较高的抗压强度时,设计孔隙率应较小,但透水性能较差。水灰比的大小控制在0.29~0.30附近抗压强度效果最好。

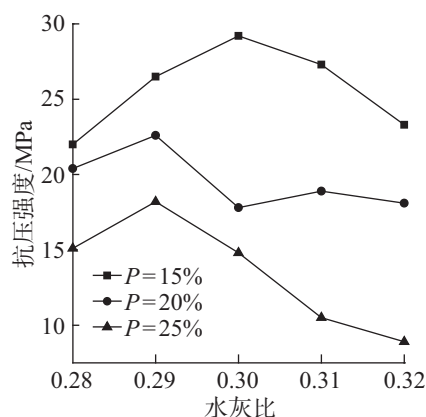


图4 水灰比与试块抗压强度的关系

Fig. 4 Relation between water/cement ratio and compressive strength of test block

2.4 试块表观密度对抗压强度的影响

表观密度是指材料在自然状态下(长期在空气中存放的干燥状态),材料的质量与表观体积之比,其中,表观体积是实体体积加闭口孔隙体积。一般直接测量体积,对于形状非规则的材料,可用蜡封法封闭孔隙,然后再用排液法测量体积。因此,表观密度为 M/V ,其中 M 表示实体的质量, V 表示实体体积+闭口空隙的体积。

本实验试块表观密度与抗压强度值如表2所示。可看出,在同样的设计孔隙率条件下,试块表观密度与抗压强度无明显规律,且离散性较大。从宏观角度看,试块的表观密度随设计孔隙率的增大而减小,抗压强度随表观密度的减小而减小。

表2 透水混凝土试块表观密度与抗压强度关系

Tab. 2 Relation between apparent density and compressive strength of pervious concrete block

P		W/C				
		0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
15%	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 181.4	2 108.6	2 078.3	2 130.0	2 056.4
	抗压强度/MPa	22.0	26.5	29.2	27.3	23.3
20%	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 979.6	2 036.5	2 078.6	2 056.4	2 056.2
	抗压强度/MPa	20.4	22.6	17.8	18.9	18.1
25%	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 038.6	1 966.7	1 914.8	1 922.5	1 915.2
	抗压强度/MPa	15.1	18.2	14.8	10.5	8.9

2.5 透水系数对抗压强度的影响

由图 5 可知,随着设计孔隙率逐渐增大,透水系数也逐渐增大,平均抗压强度降低。

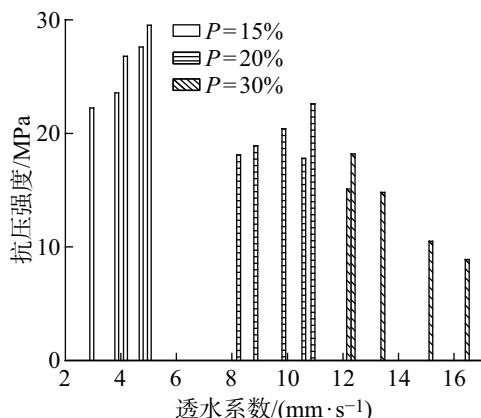


图 5 水灰比为 0.30 时试块透水系数与抗压强度的关系

Fig. 5 Relationship between permeability coefficient and compressive strength of test block when water/cement ratio is 0.30

在 $P = 15\%$ 时,试块抗压强度呈增长趋势,当透水系数为 5.15 mm/s 时,抗压强度达到最大值 29.2 MPa ;在 $P = 20\%$ 时,抗压强度有所降低,当 $P = 25\%$,抗压强度值减小的幅度较大,当透水系数在 16.34 mm/s 时,抗压强度值为 8.9 MPa 。因此,设计孔隙率越大,透水混凝土的透水性越好,但是随着孔隙率的逐渐增大,透水混凝土的抗压强度逐渐降低。这可能是由于孔隙率越大,混凝土内部的孔隙就越多,在承受压力时内部应力就越集中,从而使得透水混凝土透水性好但抗压强度低。

3 结 论

选用攀枝花尾矿为原料制备了透水混凝土,探索了影响其性能的主要因素。结果表明:

(1) 当设计孔隙率较大时,试块的实测孔隙率随水灰比的增大而逐渐增大。当设计孔隙率下降到一定程度时,水灰比对实际孔隙率的影响较小,实测孔隙率在设计孔隙率附近波动;设计孔隙率越大,透水

系数越大,混凝土的透水性也越好,但是随着透水系数的逐渐增大,透水混凝土的抗压强度逐渐降低。

(2) 在水灰比保持不变的情况下,试块的抗压强度随着设计孔隙率的减小而增大。在设计孔隙率增大到 25% ,水灰比为 0.32 时,抗压强度值最小,仅为 8.9 MPa 。当设计孔隙率为 15% ,水灰比为 0.30 时试块的抗压强度达到最大值,抗压强度能达到 29.2 MPa ,且透水系数大于 2 mm/s ,能达到一般轻型抗压透水施工要求。

参考文献:

- [1] 杨志宾. 浅谈透水混凝土 [J]. 科技资讯, 2011 (29): 73.
- [2] 汪文黔. 人与环境和谐原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 邹容, 周卫军, 李轩宇, 等. 城市热岛效应的产生及研究方法 [J]. 农村经济与科技, 2007(3): 113-114.
- [4] 刘新菊, 赵宇光, 任子明. 多孔混凝土的研究开发 [J]. 中国建材科技, 1999(4): 1-5.
- [5] 刘卫东, 冀骏, 金玉石. 北京奥林匹克森林公园透水混凝土地坪施工技术 [J]. 施工技术, 2010(12): 27-30.
- [6] 袁东. 攀枝花尾矿资源综合利用现状及发展前景浅析 [C]//第十届中国科协年会论文集. 中国河南: 郑州, 2008: 158-161.
- [7] 周永军. 攀钢尾矿用作路面沥青混合料配合比设计及施工 [J]. 西南公路, 2009(2): 11-14.
- [8] 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.
- [9] 胡伦坚. 《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T135-2009) 编制与研究 [J]. 施工技术, 2010(4): 1-3.
- [10] 丁威, 冷发光, 韦庆东, 等. 《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011) 简介 [J]. 混凝土世界, 2011(12): 76-79.
- [11] YANG Z F, SHEN W G. The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2008, 23(3): 391-394.
- [12] 霍亮, 高建明. 透水性混凝土透水系数的实验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2004(1): 44-46.