

# 煤矸石基透水混凝土的制备与性能研究

穆明浩 张亚勤 李召峰

山东高速集团有限公司；济南市公路管理局；山东大学岩土与结构工程研究中心

**摘要：**为提升海绵城市建设中建材性能要求，本文以煤矸石为主要原料，制备高砂胶比常温养护透水混凝土。从抗压强度、密度、总孔隙率、透水性等方面研究了浆液包裹厚度和水胶比对透水混凝土性能的影响。结果发现，包浆厚度为0.35mm，水胶比为0.28时，制备的煤矸石基透水混凝土综合性能最优，7d抗压强度可达19.4MPa。

**关键词：**透水混凝土；煤矸石；碱激发

## 一、引言

我国城市多处于季风气候带，高温多雨，随着城市开发建设的提速，地区生态环境和水循环受到影响<sup>[1]</sup>，然而各地路面多采用普通混凝土铺设，透水性差，雨水无法快速下渗，容易引发洪涝灾害。在海绵城市建设中，提升地面透水率是一个重点，海绵城市建材相较于普通建筑材料，借助其高空隙率和透水速率的特点，可满足城区雨水快速下渗需求，不仅可以减少地表径流，缓解洪涝压力缓解城市热岛效应<sup>[2]</sup>，实现水资源循环利用。还能满足抗压、耐磨、环保美观的要求。

目前国内主要采用硅酸盐水泥制备透水混凝土。水泥生产不仅成本高，而且也会对环境造成污染，而利用工业固废代替水泥来制备透水混凝土，不仅生产成本低，经济环保，而且解决固废堆存问题。国内外学者在固废基透水混凝土的颗粒级配、原料配合比设计上进行了诸多研究。王瑞燕等<sup>[3]</sup>通过对连

续级配和单一粒径级配骨料进行对比试验，得出采用单一粒径骨料可以更好地满足混凝土力学性能和透水性能。李子成等<sup>[4]</sup>发现胶凝材料中掺入矿渣和粉煤灰时，两者产生了协同效应，大大提高了透水混凝土的强度。陈培莉等<sup>[5]</sup>考虑到孔隙率、骨料级配、水胶比等参数的影响，利用体积法制备出了满足设计要求的透水混凝土。张骏等<sup>[6]</sup>假设浆体均匀地包裹在粗骨料表面，设计了包浆厚度的测试方法，最后通过计算粗骨料的比表面积来确定胶凝材料的用量。

胶凝材料的组成及配比对透水混凝土的力学特性影响较大<sup>[7]</sup>。胶凝材料过少，浆体无法在骨料表面形成均匀薄层，使得抗压强度降低；用量过多，多余的浆体又会填充骨料间的空隙，从而影响透水性能。本文以矿粉和煤矸石为原材料，研究包浆厚度和水灰比对矿渣-煤矸石基透水混凝土的力学特性的影响，具有实际工程应用价值。

## 二、实验

### (一) 原材料

试验中透水混凝土以磨细高炉矿渣、煤矸石为胶凝材料，以石灰岩碎石为粗骨料，以硅酸钠溶液为碱性激发剂制备而成。磨细高炉矿渣购于济南鲁信有限公司；煤矸石取自邱集煤矿；碎石为市售石灰岩碎石；硅酸钠模数为1.4，购于国药控股天津有限公司。胶凝材料的化学成分如表1所示，石灰岩碎石粗骨料的物理性质如表2所示。

表1 原材料的主要化学组成

原材料	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Ti <sub>2</sub> O (%)	LOI (%)
矿渣	20.50	12.10	0.55	57.20	5.05	0.83	0.36	0.58	1.62	1.23
煤矸石	52.90	22.70	8.20	7.71	2.08	2.13	0.578	2.13	0.953	2.30

表2 石灰岩碎石粗骨料物理性质

粒径(mm)	表观密度(kg/m <sup>3</sup> )	紧密堆积密(kg/m <sup>3</sup> )	比表面积(cm <sup>2</sup> /g)
5-10	2680	1590	1.74

### (二) 实验方法

抗压强度测试参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[8]</sup>操作，制作150mm×150mm×150mm的立方体试件，试件养护7d后，采用WDW电子万能试验机测试其抗压强度。

透水系数采用常水头法进行测试，透水系数按式1计算：  
 $k = (QL) / (Aht)$  (1)

### 三、结果与讨论

#### (一) 基于包浆厚度的透水混凝土性能分析

##### 1. 胶凝材料用量

以包浆厚度为自变量，进行配合比设计，研究透水混凝土力学性能的变化。胶凝材料的用量计算如式(2)，

$$VB = d \cdot MC \cdot SC \quad (2)$$

式中，VB为单位体积胶凝材料的总体积，m<sup>3</sup>；d为粗骨料表面浆体包裹厚度，m；MC为单位体积粗骨料用量，kg；SC为粗骨料比表面积，m<sup>2</sup>/kg。

单位体积粗骨料用量用式3计算：

$$MC = \alpha \cdot \rho C \quad (3)$$

式中，ρC为粗骨料紧密堆积密度，kg/m<sup>3</sup>；α为粗骨料用

表3 煤矸石基透水混凝土配合比

组号	设计浆体包裹厚度(mm)	粗骨料(kg)	水(kg)	煤矸石(kg)	矿渣(kg)
A	0.20	1558.2	22.6	46.1	29.3
B	0.25	1558.2	28.3	57.6	36.6
C	0.30	1558.2	33.9	69.1	44.0
D	0.35	1558.2	39.6	80.6	51.3
E	0.40	1558.2	45.2	92.1	58.6
F	0.45	1558.2	50.9	103.6	65.9

表4 不同浆体包裹厚度的性能试验结果

设计浆体包裹层厚度 (mm)	7d抗压强度 (MPa)	透水系数 (mm/s)
0.20	6.7	3.9
0.25	10.5	3.3
0.30	15.6	2.1
0.35	18.9	1.4
0.40	21.1	1.1
0.45	22.3	0.9

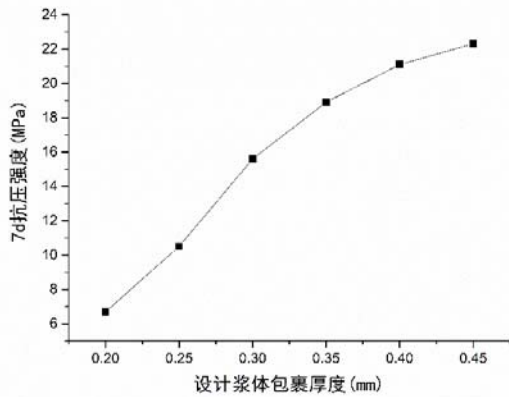


图1 设计浆体包裹厚度与7d抗压强度的关系

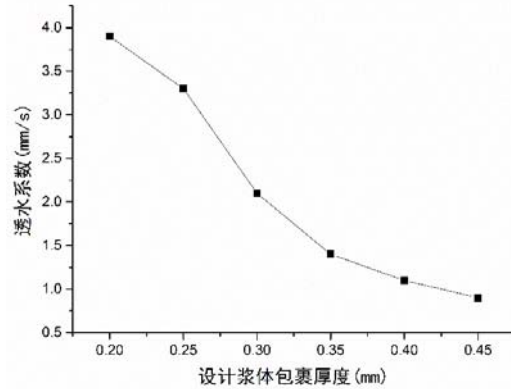


图2 设计浆体包裹厚度与透水系数的关系

量修正系数, 取0.98。

水胶比选择0.27时, 实测浆体密度为 $1.96\text{g}/\text{cm}^3$ 。计算得到的每组煤矸石基透水混凝土配比见表3。

2. 包浆厚度对强度和透水系数的影响

根据6组不同的浆体设计包裹厚度制备煤矸石基透水混凝土, 测得7d抗压强度和透水系数, 试验结果见表4。

由图1可知, 随着浆体包裹厚度的增加, 透水混凝土的7d抗压强度逐渐增大, 这是因为厚度的增加代表胶凝材料总量的增加, 浆体与骨料的接触面积增大, 多余的胶凝材料填充了骨料间的部分空隙, 因此强度逐渐增加。

由图2可知, 随着浆体包裹厚度的增加, 透水混凝土的透水系数逐渐减小。过量的胶凝材料填充了骨料之间的空隙, 透水混凝土的空隙率和透水系数因此降低。

(二) 水胶比对透水混凝土力学性能的影响

根据规程<sup>[9]</sup>, 水胶比选择范围为0.25-0.35, 在此范围内, 保持包浆厚度不变, 以水胶比为自变量, 研究其对透水混凝土性能的影响。试验设计0.26、0.28、0.30、0.32、0.34五组水胶比制备透水混凝土, 浆体包裹厚度选择0.35mm, 7d抗压强度和透水系数数据见表5。

表5 不同水胶比煤矸石基透水混凝土性能

水胶比	7d抗压强度 (MPa)	透水系数 (mm/s)
0.26	17.1	1.2
0.28	19.4	1.6
0.30	17.7	1.8
0.32	16.5	2.3
0.34	13.9	2.7

由图3可知, 随着水胶比的增大, 透水混凝土的抗压强度先增后减, 当水胶比为0.28时, 抗压强度最佳。这是因为水胶比过小时, 胶凝材料搅拌不均, 浆体流动性差, 无法在粗骨料表面形成均匀的薄膜, 导致骨料接触面积小, 使得抗压强度降低。水胶比过大时, 虽然浆体的流动性好, 能够均匀附着在

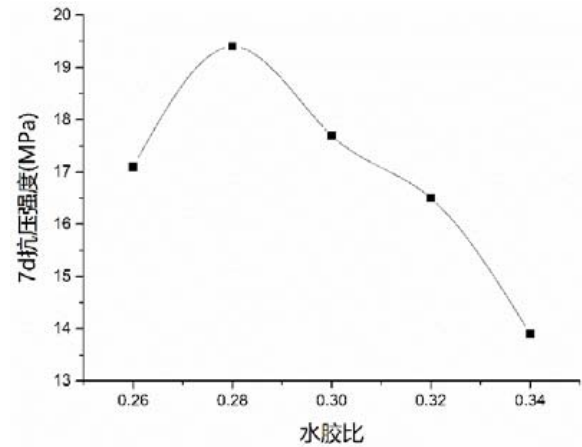


图3 水胶比与7d抗压强度的关系

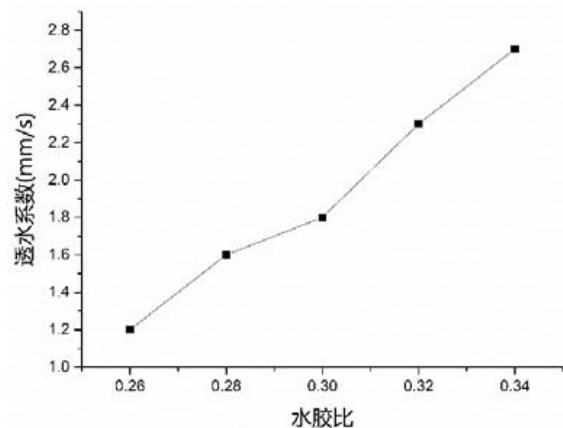


图4 水胶比与透水系数的关系

(下转第111页)

2) 地形条件

该地段属丘陵、斜坡地貌，前缘坡度45°，后部18-25°，前缘较陡，具有一定的临空面，坡高20m，为该处产生滑坡、崩塌等地质灾害提供了较为有利的地形条件。

3) 降水

大气降雨入渗土体，将增大土体容重，降低土体的抗剪强度，同时浸润软化岩土接触面，对斜坡的滑塌的形成起到了促进作用。区内降雨较丰富，降雨季节分配又极不均匀，故在此期间极易形成滑坡、崩塌等地质灾害。

4) 人类工程活动

由于怀化煤矿工程活动建设，对山坡坡脚进行了大面积开挖，使得原坡脚形成高约20m的临空面，局部陡立，坡脚的开挖破坏了边坡的结构，使斜坡临空面增大，斜坡原有的应力条件发生改变，造成斜坡坡脚支撑（抗滑力）减弱，引起边坡变形滑坡。

(二) 破坏模式分析

根据现场调查，滑坡为土质斜坡，坡面形态在纵剖面上呈圆弧型，下部坡面较陡，坡度约45°，上部坡面较缓，约为18-25°，滑面推测位于覆盖层土体与中风化粉砂岩顶面相切的圆弧滑动产生的滑坡。

五、滑坡稳定性评价及发展趋势分析

(一) 定性分析和定量分析

本次勘查对滑坡进行了现场详细调查和测绘，斜坡后缘见拉张裂缝，侧壁局部见明显剪切裂缝，局部发生垮塌现象。

斜坡体目前在天然状况下处于欠稳定状态，但在降雨的作用下，滑坡体极有可能发生大面积滑动。

根据滑坡稳定性计算结果：主剖面在自重工况下处于欠稳定，在自重+暴雨工况下处于不稳定，根据以上稳定性定性评价及定量评价综合确定，该斜坡目前处于欠稳定状态，在暴雨条件下极可能产生大范围的失稳破坏。

(二) 变形发展趋势分析

暴雨或强降雨时，水会沿坡体渗入土体，将进一步破坏坡体的稳定性，斜坡南东侧临空面会出现大范围的滑塌。稳定性发展趋势为不稳定。必须尽快对该边坡进行治理，避免造成人员伤亡和财产损失。

(上接第109页)

骨料表面，但过多的自由水会随着胶凝材料水化等作用而发生迁移、蒸发，在透水混凝土中产生孔隙结构，从而使得强度降低。

从图4可以看出，透水混凝土的透水系数随着水胶比的增大而增大。因为过多的自由水在混凝土中产生孔隙结构，增大了孔隙率。

四、结论

本文设计了矿渣-煤矸石基透水混凝土配合比，研究了浆体包裹厚度和水胶比对透水混凝土性能的影响，得到如下结论：

(1) 水胶比0.27时，设计的浆体包裹厚度在一定范围内，强度达到了20MPa以上，透水系数达到了0.5mm/s以上，满足了规范要求。浆体包裹厚度在0.35mm时，煤矸石基透水混凝土的综合性能最好。

(2) 水胶比为0.28时，试件抗压强度最高，达到19.4MPa，对应的透水系数为1.6mm/s，满足规范要求，综合性能最好。

(3) 基于浆体包裹厚度和不同水胶比设计试验，综合考量各项性能指标，包浆厚度0.35mm、水胶比0.28制备的煤矸石基透水混凝土性能最优。

六、防治工程评述及防治方案建议

(一) 有治理工程评述

目前滑坡局部见有滑塌现象，没有做任何防护工程。

(二) 理工程方案布置原则

一步到位，彻底消除滑坡地质灾害隐患；注重投资效果，确保实效、安全、经济；科学合理，因地制宜。

(三) 治理方案建议

根据该滑坡地质灾害活动规律、危害特征、形成条件，滑坡以工程治理为宜。

削方减载：对滑坡区进行削坡整形、减载，以减少滑体下滑力。

支护工程：对滑坡主要滑动区域修建抗滑桩或锚杆格构支护，对削坡整形后的中后部进行锚杆喷护。

截排水工程：由于区内降雨量大、坡体物质松散，拟对滑坡中部修建排水沟将坡体内地表水排出破外。

监测工程：对坡顶及前缘位移进行监测，加强雨期巡视，做好地质灾害防治的宣传工作。

建议

1. 建议在施工前，应先回填并夯实边坡上已有拉张裂缝及落水洞，防止地表水渗入滑体内，恶化滑体的稳定性。

2. 建议在施工期间及时监测滑坡变形的发展趋势，保证施工安全。

七、结束语

本文分析了滑坡的基本特征和工程地质条件。在此基础上研究了影响滑坡失稳的因素和成因机制。然后对滑坡的稳定性进行了定性分析定量评价。按照“经济合理，工期短，工程技术可行，治理效果安全可靠”的设计原则，对滑坡做了治理建议。

参考文献

[1]张顺涛. 浅谈地质工程勘察中的滑坡稳定性[J]. 文摘版: 自然科学, 2015(4): 112-113.  
 [2]黎彦廷, 董斌. 浅谈滑坡地质灾害勘查及防治治理[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2013(9).

参考文献

[1]许凡, 栾贵勤, 等. 生态文明视角下新型城镇化的挑战与未来[J]. 中国经贸导刊, 2014, 14: 21-23.  
 [2]朱玲, 由阳, 程鹏飞, 等. 海绵建设模式对城市热岛缓解效果研究[J]. 给水排水, 2018, 54(01): 65-69.  
 [3]王瑞燕, 吴国雄, 郭鹏. 路面透水水泥混凝土性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 04: 698-701.  
 [4]李子成, 张爱菊, 周敏娟, 等. 双掺废渣对透水混凝土的协同效应[J]. 公路工程, 2015, 40(4): 189-192.  
 [5]陈培莉. C30透水混凝土配合比参数选择及其设计研究[J]. 广东建材, 2016, 4: 24-26.  
 [6]张骏, 王小亮, 焦岩, 等. 基于骨料特性和浆体厚度的透水混凝土配合比设计[J]. 建筑施工, 2018, 40(09): 1606-1608.  
 [7]边伟, 马昆林, 龙广成, 等. 胶凝材料体系对透水混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(11): 3416-3423.  
 [8]GB/T 50081-2009, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2019.  
 [9]张鹏. 赤泥基碱激发胶凝材料的优化设计及性能研究[D]. 华南理工大学, 2016.