

塌陷区填充石渣注浆胶结体试验与分析

穆夕广¹ 曹二浩¹ 王金龙¹ 冯强¹ 王勇强¹ 李义焕¹ 孟冠廷² 李朱莲¹ 张启军^{1, 2, 3}, 通讯作者

1. 青岛业高建设工程有限公司; 2. 青岛慧睿科技有限公司; 3. 青岛理工大学土木工程学院

摘要: 对塌陷区回填的石渣现场取样, 制作注浆容器, 根据拟定的配比进行注浆试验, 经过多次试验记录相应配比下的注浆量、注浆压力等试验数据, 统计分析回填石渣的空隙率、注浆填充率、最佳注浆配合比、单位体积注浆量、注浆压力和扩散半径, 为注浆充填方案的实施提供基础设计参数。

关键词: 塌陷区; 注浆充填; 全尾沙

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.14.119

市政给水排水、供热、燃气等顶管暗挖工程, 轨道交通隧道暗挖工程, 经常遇到不良地质, 流失沙土较多, 造成塌陷区, 需要对其进行回填。

根据当地地材资源情况, 计划利用水泥、粉煤灰、全尾沙、水按一定比例形成注浆胶结材料将塌陷区废石进行注浆胶结, 掺加一定比例的加筋材料, 形成整体稳定的胶结体。不仅有效利用了附近矿区产生的全尾沙, 并兼顾了矿区废弃石渣的处置难题, 相较于塌陷区采用常规混凝土或水泥浆充填方法, 大大提高了塌陷区处置的经济性。

借鉴类似工程施工经验, 成孔、注浆方案, 注浆配合比及胶结强度为方案实施前需要解决的三个主要问题, 为此利用项目临近矿区的石渣及选矿过程中产生的全尾沙进行注浆固结试验, 以获取塌陷区注浆填充方案的相关参数。

一、注浆试验

(一) 试验目的

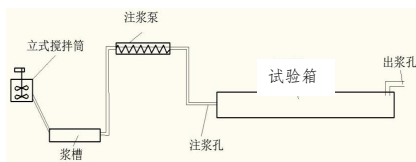
根据前期初步确定的注浆填充方案, 经过井下现场勘察及沟通, 确定本次试验目的如下:

- (1) 石渣的空隙率和注浆填充率;
- (2) 性价比最优的注浆充填材料配比;
- (3) 扩散半径和注浆压力;
- (4) 单位体积注浆材料使用量。

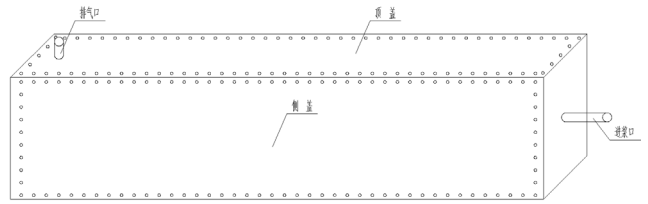
(二) 试验装置制作

本次试验为室外模拟试验, 采用试验箱进行, 该试验箱内部净尺寸为0.62*0.58*3.6m, 有效容积为1.29m³, 试验箱端头中部设置进料孔, 进料孔对面的顶面安装排气孔, 进行试验时, 从端头侧边进料孔进料, 从另一端的顶面排气孔将箱体内部的气体排出。为了便于观察箱体内注浆的情况, 或排料出渣及试验观察、清渣, 该试验箱可拆卸顶盖及侧盖。

制浆采用搅拌机的桶直径0.9m, 底面积0.64m²; 过滤桶长1m, 宽0.68m, 注浆试验箱体积1.26m³。试验装置见图1



(a) 试验系统



(b) 试验箱

图1 试验装置示意图

(三) 试验材料及配比

本次试验采用充填材料为32.5级复合硅酸盐水泥, II级以上粉煤灰, 金鼎全尾沙(实测含水率为16%), 试验拟定采用如下两种用料比:

- (1) 0.5: 0.25: 0.25
- (2) 0.6: 0.0: 0.4

基准水灰比取0.8: 1, 根据试验结果, 调整水灰比, 计划每种充填料计划做三个水灰比, 共计6个试验。

(四) 试验器具

试验器具见表1

表1 试验器具汇总表

设备、材料名称	数量	设备、材料名称	数量
注浆箱3.5*0.6*0.6	1个	海绵厚度(厚度2cm)	100平方米
150型注浆泵	1台套	密封胶	1桶
压力表	4个	电子称	1台
注浆管(20m长)	2根	水桶	4个
搅拌机	1台	二级配电箱	1个
储浆桶	1个	三级配电箱	2个
水管50m	1根	电缆6mm ² 以上	50-100m
2.0t手动葫芦	1个	安全帽	10顶
3.5m高三脚架	1个	帆布10*12m	1块
风炮扳手	1套	黄胶带	10卷
套筒扳手, 活扳手	2对	绝缘胶带	10卷
铁锹、镐头	4对	双面胶	60卷
常用五金工具	1套	勺子	1把
撬棍	2个	胶板	150kg
相机、带充电器	1个	20铜球阀	1个
高强度螺栓12*80	125个	钢刺轮	2个
高强度螺栓12*70	45个		

(五) 试验流程

1. 渣料装箱

试验选择的石渣, 要将粒径大于20cm石块的清除。装填采用人工, 装填时, 要注意级配良好, 以免充填试验时注浆通道不畅。石渣装满试验箱后, 在顶部覆一层粗砂, 再铺一层细砂, 人工整平后, 铺上一层海绵, 最后合上试验箱的盖板, 四周将螺栓拧紧固定。

- A. 将注浆试验箱底板水平放置，安装四面侧板，将各螺帽拧紧固定；
- B. 在箱体侧壁，用双面胶带粘一层2.0cm厚的海绵层；
- C. 人工将准备好的石渣材料装入箱体，初次装填的厚度约20cm；
- D. 采用撬棍、钢筋棍等将石渣振捣基本密实，块石与侧壁之间的空隙用砂子填充，使料渣与侧壁的海绵接触紧密；
- E. 第二次再装填石渣材料厚度20cm，同前次一样振捣石渣，用砂子填充空隙；
- F. 填满试验箱后，在顶部覆一层粗砂，再铺一层细砂，人工整平后，铺上一层海绵；
- G. 最后合上试验箱的盖板，四周将螺栓拧紧固定。

2. 注浆流程

通过压力胶管将注浆泵与箱体进浆钢管相连，保持排气孔畅通，开泵注浆，注意观察压力表变化，当注浆压力明显升高时，记录注浆压力表度数，并记录注浆量，当排气孔停止排气，并溢出水泥浆时，记录注浆压力表度数，关停注浆泵。

在水泥初凝后，将试验箱的顶盖打开，观察注浆扩散效果，清理顶盖上的排气孔，养护时间大于2小时后，打开侧盖，观察侧面注浆的扩散效果，将固结体取出，人工将注浆孔清理干净。

二、试验成果

(一) 配合比

根据现场试验情况，总计进行了5组试验，相关试验情况如下，试验成果见表2：

表2 注浆试验成果表

序号	水灰比	浓度 (%)	试验用料配比				注浆压力		注浆量			注浆率 (%)	备注	
			用料比： 水泥：粉煤灰： 尾砂	初始用料含量			开始出 水压力 (MPa)	最大注 浆压力 (MPa)	总搅 拌料 (m ³)	实际注 入量 (m ³)	总剩 余量 (m ³)			
				水泥	粉煤灰	全尾沙(含 水率16%)								水
1	1: 1	50	0.5: 0.25: 0.25	156.71	78.36	93.65	328.17	0	0	0.455	0.425	0.03	33.7	
2	0.85: 1	54	0.5: 0.25: 0.25	213.7	106.86	127.22	344	0.1	0.25	0.557	0.485	0.072	38.5	
3	0.8: 1	55.6	0.6: 0: 0.4	278.5	0	221	335.9	0.25	0.5	0.604	0.522	0.082	41.4	
4	0.85: 1	54	0.6: 0: 0.4	295.3	0	234.4	380.9	0.2	0.5	0.55	0.463	0.087	36.7	
5	0.8: 1	55.6	0.6: 0: 0.4	278.5	0	221	335.9	0.25	1.5	0.55	0.517	0.033	41	

(二) 注浆体胶结强度

为检测注浆胶结体强度是否满足稳定性要求，对注浆试验取样并进行强度检测，其中第5组养护

28天后，固结体试块的强度检测结果见表3，注浆后箱体拆开实景图见图2。

表3 固结体试块强度检测表

序号	长度 (cm)	宽度 (cm)	高度 (cm)	龄期 (d)	破坏荷载 (KN)	抗压强度 (MPa)
1	29	22	30	64	313	4.91
2	30	20	30	62	105	1.75
3	28	21	30	62	110	1.87
4	27	27	30	60	320	4.39
5	26	28	30	64	155	2.05



图2 注浆后箱体拆开实景图

三、注浆试验分析及结论

(一) 空隙率

经试验室测定，从现场带回的充填石渣样品的空

隙率为24%。根据注浆试验实测数据，料渣填充率为33.7%-41.4%，根据现场试验相关情况分析，试验注浆填充率比测定的样品石渣空隙率要大，分析如下：

(1) 试验装填料由于空间小，密实度不如现场大厚度沉积的密实；

(2) 注浆料泌水排除的数量较大，注浆试验泌水率达到20%左右；

(3) 试验箱体的膨胀变形，试验箱原设计1.0MPa的承载力，但每次试验箱体都有一定的变形累计变形约4cm，使充填料首先要占据因鼓胀变形产生的空间，从而增加注浆量；

岩石破碎系数约1.5，未考虑较长时间的自然沉积。

综合试验室测定的孔隙率、试验注浆填充率、矿区提供的破碎系数等情况，考虑各影响因素，拟选用岩石破碎系数为1.45，现场石渣空隙率为31%。

(二) 注浆填充率

当水料比为0.8:1时, 试验注浆料的泌水率约18%。不考虑泌水率, 系数取0.75, 注浆填充率计算为 $31\% \times 0.75 / 0.82 = 28.4\%$ 。

(三) 注浆配比

根据注浆体强度检测试验, 注浆胶结体抗压强度约3MPa, 基本满足胶结体稳定性要求, 选取材料配合比为:

水泥: 粉煤灰: 全尾沙=0.4: 0.15: 0.45

水料比: (0.8~0.85): 1.0

根据模拟试验有关结论, 设计注浆料浆的60天固化强度8.0MPa左右, 注浆固结体的抗压强度不低于2.0MPa。

该试验水泥浆的浓度54%, 经测定, 每立方米注浆量配比含量: 水泥: 320公斤; 全尾沙: 360公斤; 粉煤灰: 120公斤; 水: 681公斤。

(四) 注浆压力及扩散半径

石渣固结体的注浆填充率及注浆密实度是填充效果优劣的关键, 根据试验箱模拟注浆试验的观察与强度检验结果, 在0.5~0.7MPa的压力下, 试验配比的浆液扩散半径不少于3米。为保证实施过程的填充质量, 浅部石渣的扩散半径可以取值2~2.5米, 注浆压力可取0.5~1.0MPa; 在深部注浆段, 扩散半径可以取值2.8~3.2米, 工程实施注浆压力一般可考虑1.5~2.0MPa。

填充体的表面, 应考虑先做一固结层, 这样有利于注浆泵能上来压力, 也有利于注浆体的整体性, 同时也利于注浆的施工工作。

(五) 注浆材料的用量

根据试验测算, 每立方米石渣需要注入约 0.284m^3 的浆液, 每立方米拟充填石渣的浆液消耗材料量:

水泥: 90.9公斤; 全尾沙: 102.2公斤; 粉煤灰: 34.1公斤; 水: 193.4公斤。

(六) 注浆体胶结稳定性分析

为检测注浆胶结体强度是否满足能够满足稳定性要求, 对第2组、第5组固结体制作试块并进行抗压强度检验, 第2组试验在结束后现场制作试块4块, 将第5组试验箱整体带回试验室养护28天后, 进行水钻取芯及切割加工制作试块, 分别制作试块5件, 水钻取芯试样和切割制作的试块见图3, 试块抗压强度的检测结果见表4~表6。



图3 固结体取芯试块和切割制作试块图

表4 第2组试块抗压强度检测

序号	尺寸 (cm)	养护龄期 (d)	破坏荷载 (KN)	抗压强度 (MPa)
1	10.5*10.5	65	46	4.17
2	12*12	65	50	3.47
3	12*12	65	110	7.64
4	11.5*11.5	42	39	2.95

表5 第5组试块抗压强度检测

试块序号	尺寸 (cm)		养护龄期 (d)	破坏荷载 (KN)	抗压强度 (MPa)
	直径	高度			
1	11.0	11.0	64	37.5	3.95
2	11.0	10.0	64	75.5	7.95
3	11.0	13.5	64	22.5	2.37
4	11.0	15.0	64	32.5	3.42
5	11.0	13.0	41	27	2.84

表6 第5组试块强度检测

序号	长度 (cm)	宽度 (cm)	高度 (cm)	养护龄期 (d)	破坏荷载 (KN)	抗压强度
1	29	22	30	64	313	4.91
2	30	20	30	62	105	1.75
3	28	21	30	62	110	1.87
4	27	27	30	60	320	4.39
5	26	28	30	64	155	2.05

根据模拟试验, 固结体60天养护龄期的抗压强度8.0MPa左右, 固结体的整体抗压强度不低于2.0MPa。本次注浆体强度检测试验, 第2组养护龄期65天的试块抗压强度为3.5~7.6MPa, 平均抗压强度为5.1MPa; 第5组养护64天的取芯试块抗压强度为2.4~8.0MPa, 平均抗压强度为4.4MPa; 第5组养护龄期60~64天的切割试块抗压强度在1.75~4.91MPa之间, 平均抗压强度为3MPa, 第5组切割试块在加工过程中由于受水力切割、搬运及运输等因素的影响, 对试件强度可能造成了一定的影响, 分析可能造成该组试块抗压强度降低。综合分析, 3组试块平均的抗压强度在3~5.1MPa之间, 满足了试验拟达到的整体抗压强度不低于2.0MPa的要求, 基本满足了填充固结体的整体稳定性要求。

结论

本次试验验证了拟回填石渣的可注性, 石渣注浆固结体的整体强度能够达到工程整体稳定性的要求, 同时也证明了该石渣采用注浆固结方案的可行性。通过本次试验箱注浆的试验, 取得了石渣填充率、浆液材料的配合比、设计注浆压力与浆液扩散半径等基本参数, 为后期注浆固结方案的实施提供了理论依据。由于该固结填充方案采用临近矿区生产产生的废弃石渣及全尾沙, 进行了固体废弃物资源利用, 体现了绿色低碳环保的优点。

参考文献

[1] 杨铭竹, 王海龙, 郑宇炜, 等. 某铁矿采掘石渣注浆胶结充填试验[J]. 现代矿业, 2016 (2): 176-178, 188.

作者简介: 翟夕广 (1991年12月2日), 男, 汉族, 山东省青岛市, 工程师, 从事轨道交通、市政工程。

通讯作者简介: 张启军 (1974年10月25日), 男, 汉族, 山东省青岛市, 正高级工程师, 主要从事水文地质与工程地质研究与应用。