

湿喷混凝土的回弹机理试验研究

何 鹏,曹宇春

(浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023)

摘 要:为解决湿喷混凝土回弹率较高的问题,从混凝土中粗骨料的回弹机理角度出发研究降低湿喷混凝土回弹率的措施。通过石子贯入砂浆层试验模拟湿喷混凝土中粗骨料贯入混凝土的过程,研究石子贯入砂浆深度与石子的初速度、质量的关系,并在现场进行湿喷试验验证降低回弹率的效果。由石子贯入试验得到砂浆层的回弹阻尼平均值和初始喷砂浆层的厚度。研究发现,石子贯入砂浆深度与石子的初速度、质量均呈正相关,在岩面初喷适当厚度砂浆层再喷射混凝土的措施可以降低回弹率。因此提出,当石子较小时,可适当增加风压机风压,以得到较快喷射速度;当石子较大时,可适当降低风压机风压,以得到较慢喷射速度的措施来降低回弹率。研究结果表明,从回弹机理角度出发,先喷射砂浆再喷射混凝土的方法或调整喷射速度的措施能降低湿喷混凝土回弹率。

关键词: 湿喷混凝土;回弹率;砂浆;砂浆喷射层厚度;贯入深度;强度

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2019)03-0247-06

Experimental study on rebound mechanism of wet-sprayed concrete

HE Peng, CAO Yuchun

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of
Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In response to the problem of high rebound rate of wet-sprayed concrete, the countermeasures were explored from the perspective of the rebound mechanism of coarse aggregate in concrete. Through the experiment of stone penetration into the mortar layer, the process of penetration of coarse aggregate into the concrete was simulated in wet-sprayed concrete, probing into the relationship between the penetration depth of the stone and the initial velocity, mass of the stone, and carrying out the wet-sprayed test on site to verify the rebound rate effect. The mean value of the rebound damping of the mortar layer and the thickness of the initial mortar layer were obtained from the stone penetration test. The study has indicated that the penetration depth of the stone into the mortar is positively correlated with the initial velocity and mass of the stone. It is found that the rebound rate can be reduced by initially

收稿日期: 2018-11-21

通信作者: 曹宇春(1972—),男,山西省大同人,副教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail: shtjyc@163.com。

spraying the appropriate thickness of the mortar layer and then spraying concrete. It is also proposed that the stone being small, the wind pressure of the wind press can be appropriately increased to obtain a faster injection speed, while the stone being large, the wind pressure of the wind press can be appropriately reduced to obtain a slower injection speed to reduce the rebound rate. The research results show that from the point of view of rebound mechanism, the method of spraying mortar and then spraying concrete or adjusting the spraying speed can reduce the rebound rate of wet-sprayed concrete.

Keywords: wet-sprayed concrete; rebound rate; mortar; thickness of sprayed mortar layer; penetration depth; strength

采用湿式混凝土喷射工艺较干式工艺能有效降低粉尘浓度和回弹率,保证了混凝土质量^[1-3]。宁逢伟等和陶坤从原材料、配合比、施工工艺三方面阐述降低回弹率的方法^[4-5]。刘康引入超细矿物掺合料及回弹抑制材料来改变混凝土的黏聚性及工作性,以降低喷射混凝土回弹率^[6]。姜波对喷射混凝土回弹机理进行了分析,结合某隧道工程进行了湿喷试验,针对湿喷角度、湿喷距离和速凝剂掺入质量分数三个影响因素对湿喷混凝土回弹率的影响进行了研究^[7],Burns 的研究表明,喷射面积对回弹率几乎无影响^[8]。Armelin 认为适当地调整混凝土的配合比以及喷射技术可以降低混凝土的回弹率,骨料粒径及喷射速度是影响混凝土回弹率的最主要因素^[9]。Parker 等引入了“回弹率比”来反映回弹量的大小^[10],Melbye 等认为喷射角度是影响回弹率最重要的因素^[11]。王飞研究了工作风压、工作水压、喷射距离、喷射角度、初喷厚度等潮式喷射工艺参数对喷射过程回弹率的影响程度,最终确定施工工艺最优参数^[12]。王斌对喷射混凝土施工工艺进行了分析与探讨,使喷射混凝土回弹率有效降低^[13]。王璞东等通过对湿法喷射混凝土回弹率的试验,提出掺入适量粉煤灰和硅灰,控制速凝剂初凝时间和水泥用量以及混凝土适宜坍落度,能明显降低喷射混凝土的回弹率^[14]。李俊均依托港珠澳大桥珠海连接线就湿喷混凝土原材料、配合比、回弹率等因素对其强度的影响进行试验分析,提出机械手施工湿喷混凝土的一些技术指标要求^[15]。陈文耀等根据碰撞能量守恒原理,对喷射混凝土回弹机理进行研究^[16]。通过已有研究发现,在降低湿喷混凝土回弹率方面,人们对回弹机理的试验研究有所欠缺,因此有必要开展石子贯入砂浆的试验,以揭示湿喷混凝土的回弹机理和规律。

湿喷混凝土技术作为公路隧道支护应用广泛^[17],浙江绍兴某隧道施工中使用湿喷混凝土技术作为隧道支护,但是统计发现回弹率约为 26%,远高于湿喷机厂家指导水平,造成了人力、物力和财力的浪费。现场发现,在初开挖岩面上湿喷混凝土,前期石子会有较多回弹,随着混凝土厚度的增加,混凝土中的砂浆作为缓冲层,石子的回弹情况会降低。本文主要探讨在初开挖岩面先喷射适当厚度的砂浆层,再喷射混凝土的施工流程,探索石子贯入砂浆层的影响机理,并提出相关建议,从而达到降低混凝土回弹率,提高工作效率,节约成本的目的。

1 试验方案

1.1 试验材料选择及基准配比确定

根据就地取材原则,水泥选用 P·O42.5 水泥;砂为机制砂,粒径小于 4.75 mm,其性能指标符合 GB/T 14684—2011《建设用砂》^[18] 标准的要求;水为经过处理的地表水;按 M30 水泥砂浆要求设计基准配合比^[19],水泥:水:砂=1:0.75:3。

1.2 湿喷室内模拟试验

因实际回弹过程较为复杂,可以用石子贯入砂浆来模拟粗骨料贯入混凝土的过程,考虑本试验的目的是研究规律、提出建议,可利用弹弓作为发射装置,将接近圆球的石子弹射贯入砂浆,石

子的动能被砂浆吸收而停止运动。测量石子贯入砂浆层前的速度、质量和粒径,并且测量石子贯入砂浆层后的深度,得到砂浆平均阻尼值,由此提出初喷砂浆层的建议厚度。重复上述流程,通过弹射经过加工后的圆球石子贯入砂浆层,得到不同质量的石子贯入深度与初始速度之间的关系曲线。

1.2.1 公式推导

利用能量守恒定理得到石子贯入砂浆的公式:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 - w = 0, \quad (1)$$

$$w = ps. \quad (2)$$

式(1)~(2)中: m 为石子的质量; v_0 为石子贯入前的速度; v_1 为石子贯入后的剩余速度; w 为石子在贯入过程中由于砂浆层吸收所损失的能量; p 为石子在砂浆中运动所受的黏结阻力; s 为石子在砂浆层中运动的距离。因为本试验石子重力做功相比石子初始冲量过小,可忽略不计。

由式(1)~(2)可知:

$$v_1 = \sqrt{\frac{mv_0^2 - 2ps}{m}}. \quad (3)$$

假设式(3)中石子贯入后速度 v_1 等于 0, 此时砂浆喷层厚度最小理论值为:

$$s = \frac{mv_0^2}{2p}. \quad (4)$$

1.2.2 试验设计

1)所选用的石子为石料厂加工岩石而得到,料粒径为 5~10 mm,选取 32 颗接近圆球的石子作为试验材料,依次进行编号并记录其质量 m 和直径 L_0 。利用基准配比配置 M30 水泥砂浆,经过搅拌机搅拌后放入事先准备好的容器内,让砂浆表面与容器边缘齐平,在砂浆表面平均划分 16 个方形网格,利用弹弓作为发射装置,有效速度控制在 10~20 m/s,将石子依次通过弹射经过测速仪,垂直进入配置好的砂浆网格中,用游标卡尺测量石子顶部与砂浆表面的距离 L_1 ,从而得到石子贯入深度 $s = L_1 + L_0/2$ (石子贯入砂浆示意图 1)。

通过试验可以确定均值 \bar{p} ,选取合理质量范围的粗骨料,可以取中间值,也就是已知 \bar{m} 和 \bar{p} ,由式(4)可以得出喷层厚度最小值。

2)利用基准配比配置 M30 水泥砂浆,放入事先准备好的 4 组容器内。让每组容器中砂浆表面与容器边缘齐平,平均划分 16 个网格,选用事先加工好的直径为 0.8 cm,大小相同密度不同的 4、5、6、7 g 各 16 颗光滑圆球石子,通过弹弓进行弹射垂直贯入足够深度的砂浆,用测速仪记录石子贯入前初速度,其有效速度控制在 10~20 m/s,用游标卡尺间接测得贯入的深度 s (深度测试方式同上)。

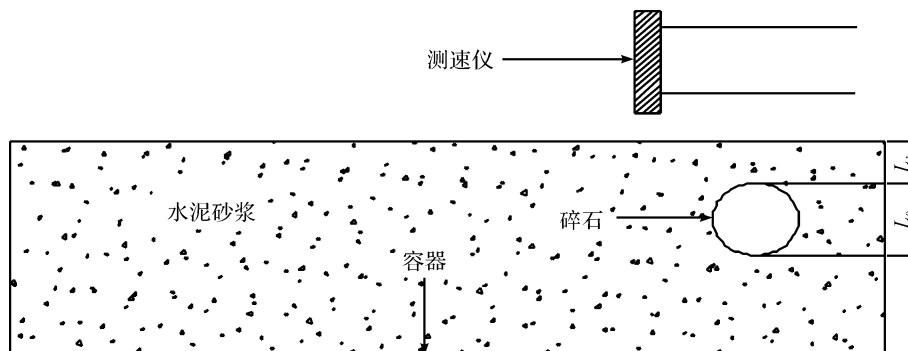


图1 试验装置

Fig. 1 Experimental device

2 试验结果分析

2.1 最优喷射厚度优化

因为石子是近似圆球的,依据其直径可以得到盲测贯入深度。记录每颗石子的质量、速度和贯入砂浆深度值,以及经过计算分析得到的数据,见表 1。

表 1 石子贯入情况统计表
Table 1 Stone penetration statistics

编号	m/g	$v_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	s/cm	$\frac{1}{2}mv_0^2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	$p/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
1	5.39	20.1	2.5	10.89	435.5
2	6.48	18.3	2.0	10.85	542.5
3	5.23	20.8	2.3	11.31	491.9
4	5.09	14.0	0.8	4.99	623.5
5	4.72	18.7	2.0	8.25	412.6
6	5.30	22.1	3.0	12.94	431.4
7	6.98	15.7	1.1	8.60	782.0
8	6.32	15.1	1.5	7.20	480.3
9	7.07	15.1	1.9	8.06	424.2
10	6.86	16.9	2.0	9.80	489.8
11	6.60	21.1	2.1	14.69	699.6
12	7.06	16.5	1.4	9.61	686.5
13	5.00	15.1	0.9	5.70	633.4
14	6.49	17.8	2.5	10.28	411.3
15	5.56	15.3	1.3	6.51	500.6
16	4.87	17.7	1.4	7.63	544.9
17	4.72	21.9	1.8	11.32	628.8
18	5.52	18.1	2.5	9.04	361.7
19	4.40	19.4	1.7	8.28	487.1
20	5.52	17.0	1.4	7.98	569.7
21	4.97	17.3	1.0	7.44	743.7
22	6.00	19.2	2.4	11.06	460.8
23	6.15	18.8	1.5	10.87	724.6
24	4.47	18.8	1.2	7.90	658.3
25	5.20	13.3	1.1	4.60	418.1
26	5.36	18.2	2.2	8.88	403.5
27	4.91	18.6	1.6	8.49	530.8
28	5.01	16.9	1.3	7.16	550.4
29	5.23	20.3	1.8	10.78	598.7
30	4.91	18.0	2.1	7.95	378.8
31	6.20	19.9	1.7	12.28	722.1
32	6.42	13.3	0.8	5.68	709.8

经过统计得到黏结阻力平均值 \bar{p} 约为 $548 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^{-2}$,在现场施工过程中经统计,湿喷混凝土中粗骨料石子平均质量 \bar{m} 约为 5 g ,贯入前石子速度 v_0 一般为 20 m/s 左右,通过式(4)计算得到 s 为 1.8 cm 。由于选材的特殊性以及试验的误差,综合考虑砂浆层喷射厚度可为 1.8 cm 。石子贯入砂浆层太浅、太深都不合适,按照施工中统计的粗骨料石子直径范围 $0.5 \sim 1.0 \text{ cm}$,为避免贯入过浅,在实际施工中表现为自重影响而掉落,建议贯入深度不小于 0.6 cm 。考虑到石子的选取及试验误差等因素,为避免贯入过

深,在实际施工中表现为回弹,所以建议贯入深度范围为 0.6~1.8 cm 比较合适。

2.2 石子贯入砂浆深度与粗骨料的速度、质量的关系

用表面光滑、相同体积、不同密度的 4、5、6、7 g 圆球石子分别垂直贯入 4 组砂浆容器,得到石子的质量、速度与贯入砂浆深度的关系曲线(图 2)。由图 2 可知,在石子质量相同时,随着速度的增大,贯入深度也增大,呈正相关。在速度相同时,随着质量的增大,贯入深度也增大,呈正相关。因此在湿喷初期的施工过程中,依据石子大小尽量控制好喷射速度。当石子颗粒较小时,可适当增大风压,得到较快喷射速度;当石子颗粒较大时,可适当降低风压,得到较慢喷射速度。这样可以降低湿喷混凝土的回弹率。

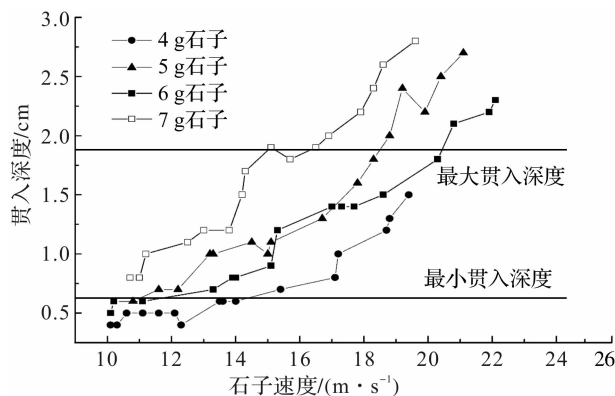


图 2 石子的速度与贯入深度的关系曲线

Fig. 2 Curve of relationship between stone speed and penetration depth

将 M30 砂浆喷射到初开挖岩面,厚度约为 1.8 cm,再喷射混凝土,通过依托工程中进行现场回弹试验结果,新的喷射混凝土回弹率为 11%,较原统计回弹率 26%降低约 15%,从而减少了回弹,降低施工成本,缩短工期。通过钻芯取样的方法,去掉端部水泥砂浆层,加工得到湿喷混凝土圆柱,并制作标准试件 6 组,记录其抗压强度值,见表 2,得到平均抗压强度 32.51 MPa,较原来施工统计的抗压强度 31.11 MPa 增加 4.5%,这说明新方法中混凝土抗压强度得到了提高。

表 2 试件抗压强度值

Table 2 Compressive strength values of test piece

组号	抗压强度值/MPa
1	32.42
2	35.01
3	31.69
4	33.10
5	32.14
6	30.70

3 结 论

通过对湿喷混凝土回弹率的试验研究可得出如下结论:

- 1) 在开挖围岩上初喷适当厚度的砂浆薄层,可以降低后续湿喷混凝土回弹率和增强混凝土抗压强度。
- 2) 石子贯入深度随着其质量或贯入前速度的增大而增大。
- 3) 在湿喷初期的施工过程中,当整体石子颗粒较小时,可适当增大风压,当整体石子颗粒较大时,可适当降低风压,这样可以降低湿喷混凝土的回弹率,并且保证了湿喷混凝土质量。

参考文献:

- [1] 李艾民. 煤矿巷道湿式混凝土喷射系统关键技术研究[D]. 北京:中国矿业大学,2015.
- [2] 关宝树. 隧道及地下工程喷混凝土支护技术[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [3] 杜扬柱. 湿喷工艺在新安煤矿的应用技术实践[J]. 煤矿现代化,2014(4):21.
- [4] 宁逢伟,丁建形,白银,等. 湿喷混凝土回弹率影响因素的研究进展[J]. 水利水电技术,2018,49(1):149.
- [5] 陶坤. 长深高速公路承德段长逢沟隧道初期支护湿喷混凝土施工关键技术研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [6] 刘康. 低回弹喷射混凝土技术研究[D]. 天津:河北工业大学,2015.

- [7] 姜波. 湿喷混凝土回弹率影响因素[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 270.
- [8] BURNS D. Characterization of wet-mix shotcrete for small line pumping[D]. Quebec: University of Laval, 2008.
- [9] ARMELIN H S. Rebound and toughening mechanisms in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1997.
- [10] PARKER H W, FERNANDEZ-DELGADO G, LORIG L J. A practical new approach to shotcrete rebound losses [C]//Shotcrete for Ground Support. New York: American Society of Civil Engineers, 1977: 149.
- [11] MELBYE T, DIMMOCK R, GARSHOL K F. Sprayed concrete for rock support[M]. 9th ed. Zurich: MBT International Underground Construction Group, Division of MBT, 2001: 183.
- [12] 王飞. 巷道支护混凝土潮式喷射喷头优化设计及实验研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2017.
- [13] 王斌. 降低锚喷巷道喷射混凝土回弹率技术探究[J]. 山东工业技术, 2015(20): 37.
- [14] 王璞东, 李远, 邵大明, 等. 湿法喷射混凝土回弹率控制技术[J]. 东北水利水电, 2018, 36(2): 18.
- [15] 李俊均. 基于机械手施工的隧道湿喷混凝土质量主要影响因素研究[J]. 公路交通技术, 2017, 33(3): 82.
- [16] 陈文耀, 李文伟. 湿喷混凝土速凝剂选择及配合比设计方法探讨[J]. 水利水电技术, 2006, 37(12): 33.
- [17] 张雪刚. 湿喷混凝土在市政硬岩隧道中的应用[J]. 建筑技术开发, 2018, 45(14): 83.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 建设用砂 GB/T 14684—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌筑砂浆配合比设计规程 JGJ 98—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

~~~~~  
(上接第 246 页)

- [10] 吴健瑜. 大学生方程式赛车悬架设计及优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 17.
- [11] 于海峰, 于学兵. 基于 ADAMS 的双横臂独立悬架优化仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2007(10): 56.
- [12] 陈刚, 曹永青. 基于 ADAMS 的大学生方程式赛车前悬架设计与优化[J]. 三明学院学报, 2017, 34(6): 33.
- [13] 张学萍, 王娜. 基于 ADAMS 的麦弗逊式悬架的仿真与优化[J]. 国防制造技术, 2017(3): 22.
- [14] 李中好. 双横臂独立悬架前轮摆振与陀螺效应的动力学研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(6): 698.
- [15] 王乐, 朱建军, 田宇, 等. 大学生方程式赛车多连杆悬架设计及优化[J]. 机械设计与制造, 2018(2): 8.