

隧道高性能湿喷混凝土配合比设计优选

陈文渊¹, 李鑫², 何小军³, 麻骥⁴, 冀亚锋¹

(1. 中铁二十一局集团第三工程有限公司, 陕西 咸阳 712023; 2. 四川省公路院工程监理有限公司, 四川 成都 610000; 3. 冀南技师学院 城市建设工程系, 河北 邯郸 056000; 4. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要:为寻求隧道湿喷混凝土最优配合比, 依托兰州至海口国家高速公路(G75)渭源至武都段木寨岭特长隧道工程, 依据工程经验和工程类比, 确定现场混凝土配合比参数, 并设计配合比方案, 采用喷射大板取样方法制作试件, 通过抗压强度和现场回弹率的测试, 探寻既满足实际工程要求, 又能实现低碳经济目标的最优配合比。研究表明, 当水胶比为0.40、砂率为46%、胶凝材料为450 kg/m³时, 混凝土各龄期的抗压强度、流动性能达到最大值, 混凝土回弹率为最小值; 混凝土强度较最小值增大约43.4%, 坍落度和扩展度较最小值分别增大约72.2%和70%, 边墙和拱顶的回弹率相较于最大值分别降低约34.5%和28.4%。

关键词:湿喷混凝土; 配合比; 水胶比; 砂率; 回弹率

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)03-0073-06

0 引言

自1995年湿喷混凝土技术发展以来, 其粉尘低、回弹率相对较小、质量稳定等优点使其迅速成为隧道工程主要的支护手段之一^[1-2]。但由于技术水平不高, 湿喷混凝土在推广应用中出现压送过程中堵管、回弹率较高等问题, 直接延长了喷射混凝土的工作时间, 影响了施工进度, 不但造成了原材料的浪费, 提高了施工成本, 而且严重威胁到施工人员的身体健康。湿喷混凝土的配合比问题是引发上述现象的主要原因之一, 故合理设计湿喷混凝土配合比, 有效降低回弹率对于推广应用湿喷混凝土具有良好的促进作用^[3-4]。

目前, 湿喷混凝土的配合比设计仍然没有相对固定的方法, 随着地域、原材料、试验人员的变化, 湿喷混凝土配合比设计存在较大差异。现场进行配合比设计时, 也多以强度为主要目标, 从而忽略了湿喷混凝土对高工作性能的要求, 造成喷射回弹率较高, 可泵性降低等后果^[5-6]。针对湿喷混凝土因配合比造成的回弹率高、流动性不足等问题, 国内外学者进行了大量研究, 陈耀文等^[7]根据碰撞能量守恒原理, 对湿喷混凝土回弹机理进行了分析, 结果表明适当增加砂率可以有效降低湿喷混凝土的回弹率; 周梅等^[8]研究了不同纤维掺量和砂率下湿喷混凝土的回弹率, 结果表明合适的砂率和适当的纤维掺量不仅可以增大湿喷混凝土的黏聚性还能降低其回弹率; 郭永忠^[9]研究了湿喷混凝土流动性能对其回弹率的影响, 结果表明在坍落度为190 mm左右时, 对其回弹率的降低最为有利。

为了降低湿喷混凝土的回弹率, 配制出符合现场施工要求、节约成本的高性能湿喷混凝土, 以渭武高速公路木寨岭隧道为工程背景, 通过现场配合比参数的选择、配合比设计、现场回弹率测试、喷射大板试验等方法, 优化找到最符合实际工程要求以及满足节约经济成本原则的配合比, 以有效减少湿喷混凝土的回弹率。

1 实验设计

1.1 原材料

胶凝材料主要有由漳县祁连山水泥有限公司生产的P.O42.5普通硅酸盐水泥和由靖远县鑫凯新型

收稿日期: 2022-06-25 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220195

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究青年基金(QN2020427); 中铁二十一局集团第三工程有限公司科技研发项目(202140141)

作者简介: 陈文渊(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为公路铁路施工管理。E-mail: 18713506864@163.com

陈文渊, 李鑫, 何小军, 等. 隧道高性能湿喷混凝土配合比设计优选[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2022, 35(3): 73-78.

建材有限公司生产的 F 类 II 级粉煤灰, 2 种胶凝材料的化学成分、烧失量、比表面积等参数如表 1 所示; 细骨料采用天然河砂, 细度模数为 3.03, 表观密度为 $2\,604\text{ kg/m}^3$, 含泥量为 2.5%, 泥块含量为 0.75%, 含水率为 5.1%, 堆积密度为 $1\,583\text{ kg/m}^3$; 粗骨料选用 5~10 mm 碎石, 表观密度为 $2\,646\text{ kg/m}^3$, 含水率为 2.1%, 堆积密度为 $1\,505\text{ kg/m}^3$; 减水剂采用 SKD14 聚羧酸系高效减水剂, 减水率 28%; 速凝剂采用液体速凝剂, 初凝时间为 3.7 min, 终凝时间为 8.5 min; 拌合用水采用自来水。

表 1 胶凝材料化学成分和比表面积

材料	化学成分(质量分数)/%									比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	SO ₃	LOI	
水泥	54.25	18.30	5.03	2.78	2.95	0.25	0.67	3.12	3.49	332
粉煤灰	3.66	54.12	25.26	5.64	2.18	1.05	1.10	0.76	5.30	500

1.2 配合比方案设计

1.2.1 配合比参数选择

木寨岭隧道初期支护喷射混凝土设计厚度 5~23 cm, 设计强度等级为 C25, 故实验以拟配 C25 湿喷混凝土为研究对象, 在以现场配合比为基准配合比条件下, 通过研究不同胶凝材料用量、水胶比、砂率等条件下混凝土的配制强度, 并通过现场取芯强度、回弹率测试和喷射大板强度找到满足现场湿喷混凝土的最优配合比。

湿喷混凝土, 由于需要泵送, 水胶比较低时不利于混凝土的泵送, 故配合比调整时在保证混凝土强度的前提下适当增大水胶比, 初定为 0.40 和 0.42。现场虽采用河砂, 但质量较差, 粗骨料中颗粒小于 4.75 mm 的部分占比约为 46.8%, 级配较差, 配合比设计时需考虑将这部分骨料适度折算到细骨料中。过高的砂率不仅会增加胶凝材料用量, 还会降低混凝土的强度, 故砂率不宜太高, 根据现场材料物理特性初步选定砂率为 0.40~0.50 之间。规范规定喷射混凝土胶凝材料用量不应小于 400 kg/m^3 , 胶凝材料用量过少, 混凝土早期强度增长缓慢, 回弹率高; 胶凝材料用量增多, 随着喷射混凝土强度的提高, 施工过程中产生的粉尘也将增多, 造成施工环境的污染, 进而增加成本。因此, 为改善混凝土强度以及工作性能, 同时降低成本, 需掺入一定量的粉煤灰且不宜太多, 最终确定胶凝材料用量为 $450\sim 480\text{ kg/m}^3$, 粉煤灰掺量为 8%。

1.2.2 配合比设计方案

(1) 水胶比为 0.40、胶凝材为 450 kg/m^3 条件下, 不同砂率的混凝土配合比设计方案如表 2 所示。

表 2 水胶比 0.40, 不同砂率的混凝土配合比设计方案

试件编号	砂率	配合比/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$				
		粉煤灰	水泥	水	河砂	碎石
A1	0.40	36	414	180	688	1 032
A2	0.42	36	414	180	722	998
A3	0.44	36	414	180	757	963
A4	0.46	36	414	180	791	929
A5	0.48	36	414	180	826	894
A6	0.50	36	414	180	860	860

(2) 水胶比为 0.42、胶凝材为 450 kg/m^3 条件下, 不同砂率的混凝土配合比设计方案如表 3 所示。

表 3 水胶比 0.42, 不同砂率的混凝土配合比设计方案

试件编号	砂率	配合比/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$				
		粉煤灰	水泥	水	河砂	粉煤灰
B1	0.40	36	414	189	684	1 027
B2	0.42	36	414	189	719	992
B3	0.44	36	414	189	753	958
B4	0.46	36	414	189	787	924
B5	0.48	36	414	189	821	890
B6	0.50	36	414	189	856	856

(3)砂率为 0.46、水胶比为 0.40 条件下,不同胶凝材料用量的混凝土配合比设计方案如表 4 所示。

表 4 不同胶凝材用量的混凝土配合比设计方案

试件编号	胶凝材料掺量	配合比/(kg·m ⁻³)				
		粉煤灰	水泥	水	河砂	石子
A4	450	36.0	414.0	180	791	929
C1	460	36.8	423.2	184	785	921
C2	470	37.6	432.4	188	778	914
C3	480	38.4	441.6	192	772	906

1.3 试件制作和测试方法

1.3.1 试件制作及养护

喷射混凝土试件采用钢模大板制作,脱模后用切割机加工,钢模大板尺寸为 500 mm×500 mm×120 mm。试件制作时,将试模置于隧道内喷射作业面附近,以 80°左右斜置于墙脚处,先在模具外的边墙上喷射,待操作正常后,将喷头移至模具位置,由下而上逐层向模具内喷满混凝土,如图 1 所示,试件在隧道内自然环境中养护 1 d 后脱模,移至实验室进行标准养护,3 d 后把试件切割加工成 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,如图 2 所示,然后继续放置在实验室标准养护至 7 d、28 d。



图 1 湿喷混凝土试件制作



图 2 湿喷混凝土试件切割

1.3.2 强度测试

各组试件在相同养护条件下养护 3、7、28 d 后,进行轴心抗压强度测试,加载速度严格控制在 0.4~0.5 MPa/s,每组试件测试 3 个,将测得的抗压强度值乘以换算系数 0.95 作为试件的轴心抗压强度值。需要注意的是对于切割试件抗压强度测试时,在测试前需对试件表面进行打磨抛光,避免测试中产生应力集中现象。

1.3.3 回弹率测试

隧道内喷射混凝土回弹率测试选定边墙和拱部 2 个部位,一般在隧道内随机选一段边墙和拱顶进行测试,在地下铺上帆布或彩条布,然后喷射一定体积或质量的混凝土,将弹落到地面的混凝土收集并称重,弹落到地面混凝土质量占总喷射混凝土质量的比例就是喷射混凝土回弹率。

2 结果与分析

2.1 砂率对混凝土强度和工作性能影响

(1)在水胶比为 0.40 和 0.42、胶凝材料用量为 450 kg/m³、减水剂掺量均为 1%的条件下,不同砂率的混凝土坍落度、扩展度及各龄期抗压强度测试结果如图 3 和图 4 所示。

由图 3(a)可以看出:当水胶比为 0.40 时,随着砂率的增加,混凝土 3、7、28 d 强度整体呈现先升高后降低的趋势;当砂率小于 0.46 时,混凝土各龄期强度随着砂率的增大而不断增大,这是由于当砂率较小时,砂浆不能够充分包裹粗骨料的表面或者填充骨料之间的空隙,导致混凝土的和易性较差,密实性降低,从而降低混凝土的抗压强度;在砂率为 0.46 时,各龄期强度达到最大值,这是由于当砂率适宜时,砂不

但填满骨料之间的空隙,而且还能保证骨料间有一定的砂浆层以便增强混凝土的和易性,从而使混凝土有较好的抗压强度,此时混凝土 28 d 强度较砂率为 0.40 时增大约 27.0%;砂率为 0.50 时,混凝土各龄期强度达到最小值,这是由于当砂率过大时,在相同胶凝材料用量的条件下,填充在骨料间胶砂变多了,粗骨料减少了,使粗骨料骨架作用减弱,此时的混凝土拌合物和易性也较差,从而造成混凝土抗压强度的降低,此时 28 d 强度较砂率为 0.46 时降低约 43.4%。

由图 3(b)可以看出,当水胶比为 0.42 时,混凝土 3、7、28 d 强度变化与水胶比为 0.40 时基本一致,随着砂率的增加,同样整体呈现出先升高后降低的趋势;在砂率为 0.46 时,强度达到最大值,此时混凝土 28 d 强度较砂率为 0.40 时增大约 23.4%,较砂率为 0.50 时增大约 25.8%。

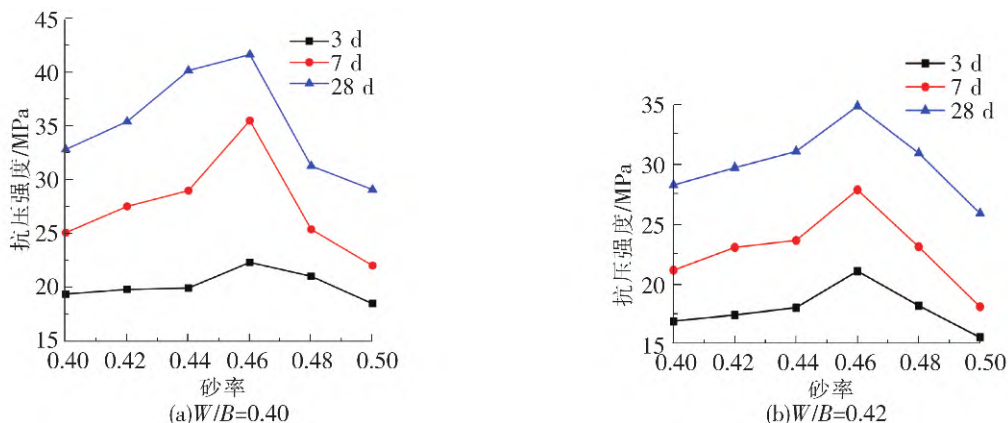


图 3 不同砂率的混凝土各龄期抗压强度

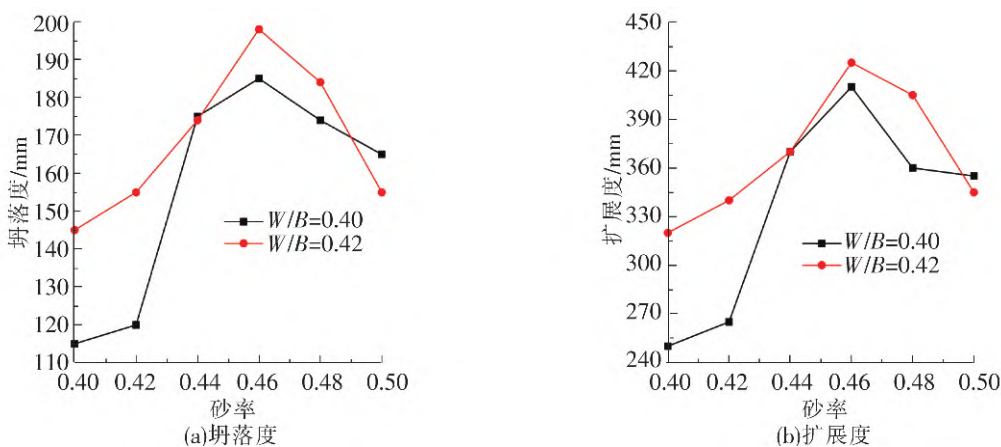


图 4 不同砂率的混凝土流动性能

由图 4 混凝土的流动性能可以看出:各组混凝土坍落度和扩展度均随着砂率的增大呈现出先增大后降低的趋势,在砂率为 0.46 时,混凝土的坍落度和扩展度均达到最大值,此时混凝土坍落度和扩展度较最小值分别增大约 72.2%和 70%。

综合以上分析,试验结果表明水胶比为 0.40、0.42,砂率为 0.46 时,混凝土的工作性能和各龄期压强度均好于其他砂率条件,由此可以确定湿喷混凝土最优砂率为 0.46。

2.2 水胶比对混凝土强度的影响

水胶比为 0.40、0.42 时,不同砂率条件下混凝土 28 d 龄期抗压强度如图 5 所示。

由图 5 可以看出:水胶比为 0.40 时,各砂率条件下混

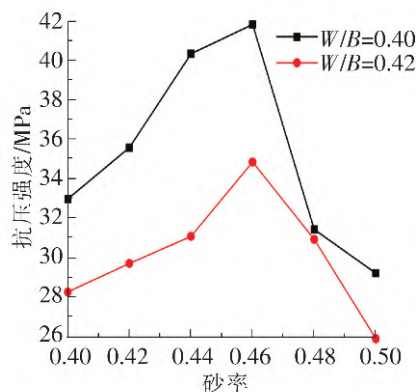


图 5 不同水胶比条件下混凝土 28 d 抗压强度

混凝土 28 d 强度均要高于水胶比为 0.42 的混凝土,说明水胶比越低混凝土强度越高;2 种水胶比条件下混凝土强度随砂率的增加变化趋势基本一致,这表明砂率对混凝土强度的影响在 0.40~0.50 之间基本呈现良好的规律性,通过调整砂率探寻湿喷混凝土最优配合比是可行的。为充分考虑现场原材料的变化性以及湿喷混凝土的强度因素,从 28 d 强度来看混凝土水胶比为 0.42 是完全满足要求的,单从强度来看,2 种水胶比具有较高的冗余度,考虑到西部高寒地区结构抗冻性问题,水胶比不宜太高,故实际混凝土水胶比选定为 0.40。

2.3 胶凝材料用量对混凝土强度的影响

砂率为 0.46、水胶比为 0.40 条件下,不同胶凝材料用量混凝土各龄期抗压强度如图 6 所示。

由图 6 可以看出:在砂率为 0.46,水胶比为 0.40 时,混凝土各龄期强度随着胶凝材料用量的增加而缓慢降低,这是由于随着胶凝材料用量的增加,相应的石子和砂子等骨料用量减小,在保证混凝土流动性、黏聚性和强度的前提下,骨料含量越高,则混凝土强度越大,其中胶凝材料用量为 450 kg/m^3 混凝土各龄期强度最高。胶凝材料用量为 450 kg/m^3 和 460 kg/m^3 的 2 组配合比混凝土强度差别较小,但胶凝材料用量增加必然会使工程造价增大,既不经济也不环保。因此,基于强度和成本的综合考虑,最终确定胶凝材料最佳掺量为 450 kg/m^3 ,不仅确保了混凝土的强度,还节约了胶凝材料用量,降低了工程成本。

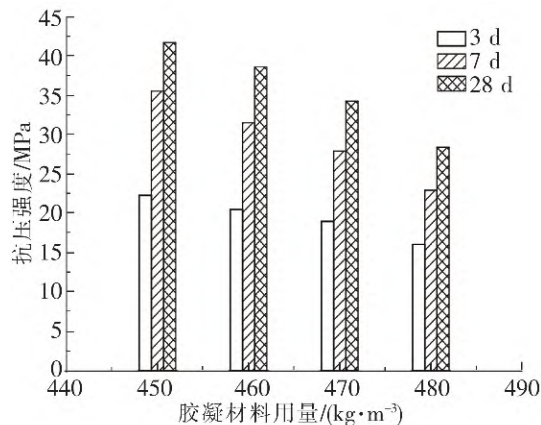


图6 不同胶凝材料用量的混凝土各龄期抗压强度

2.4 砂率对混凝土回弹率的影响

试验在木寨岭隧道右洞 YK222+745~YK222+829 区间段(长度为 84 m),开展回弹率测试,总共分为 36 个试验段,其中每个试验段长度为 2 m,每个配合比在 3 个试验段开展试验,按照边墙和拱顶 2 个部位分别统计回弹率,并计算出不同配合比条件下不同部位回弹率的平均值。试验结果如图 7 和图 8 所示。

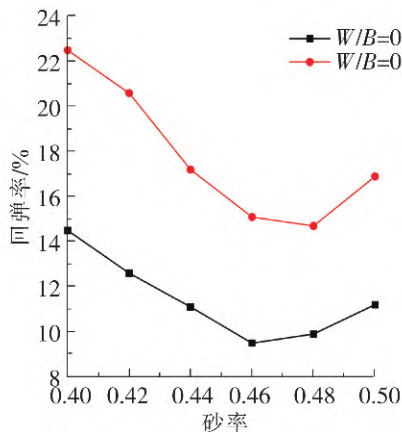


图7 混凝土边墙回弹率

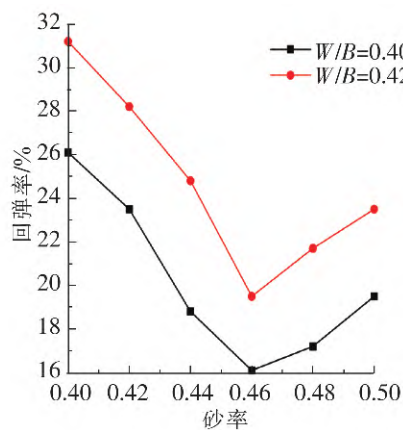


图8 混凝土拱顶回弹率

综合分析图 7 和图 8 可知,混凝土回弹率随着砂率的增加呈现先降低后升高的趋势,在砂率为 0.46 时,边墙和拱顶的回弹率均达到最小值,此时 2 组水胶比条件下边墙和拱顶混凝土回弹率相较于砂率为 0.40 时分别降低约 34.5%、28.4%和 32.9%、37.5%;水胶比为 0.42 时,各砂率条件下混凝土回弹率要明显大于水胶比为 0.40 的混凝土,这表明混凝土回弹率会随着水胶比的增大而增大。综合考虑在水胶比为 0.40、砂率为 0.46 时,混凝土的回弹率最低。

3 结论

(1)喷射混凝土各龄期强度及流动性基本呈现出随着砂率增大而先增大后降低的趋势,在砂率为 0.46

时强度及流动性达到最大值,此时混凝土强度较最小值增大约 43.4%,坍落度和扩展度较最小值分别增大约 72.2%和 70%。

(2)在砂率为 0.46、水胶比为 0.40 时,混凝土各龄期强度随着胶凝材料用量的增加而缓慢降低,基于强度和成本的综合考虑,最终确定胶凝材料最佳掺量为 450 kg/m^3 。

(3)混凝土回弹率随着砂率的增加呈现先降低后升高的趋势,在水胶比为 0.40、砂率为 0.46、胶凝材料用量为 450 kg/m^3 时,喷射混凝土配合比达到最优,此时边墙和拱顶混凝土回弹率相较于砂率为 0.40 时分别降低约 34.5%和 28.4%。

虽然试验结果很好指导了现场施工,取得较好的社会和经济效益,但研究成果受现场条件制约,试验方案设计无法做到量大面广,比如胶凝材料只掺入粉煤灰,水胶比参数选用较少。对于这些问题,计划在后续的研究中加以不断完善。

参 考 文 献

- [1]罗鹏,吕彩云,姜帆.巴塘水电站地下洞室湿喷混凝土配合比设计[J].四川水力发电,2021,40(S1):22-25.
- [2]孟晓燕,刘录录.湿喷混凝土配合比设计室内试验方法研究[J].水利科技与经济,2020,26(8):36-39.
- [3]张慧峰,蒋明慧,张恒,等.岩爆区与富水洞段隧道湿喷混凝土配合比设计研究[J].水利水电技术,2020,51(1):179-186.
- [4]何文敏,薛邵龙,陈拴发,等.基于工作性的湿喷射混凝土配合比设计[J].混凝土,2014(10):138-140.
- [5]刘洋,尚友磊,何奇.湿喷机制砂混凝土配合比设计[J].高速铁路技术,2012,3(1):52-56.
- [6]何文敏,陈拴发,张学钢,等.新拌湿喷混凝土的性能检测研究[J].混凝土,2013(3):92-95.
- [7]陈文耀,李文伟.湿喷射混凝土速凝剂选择与配合比设计方法探讨[J].水利水电技术,2006,37(12):32-36.
- [8]周梅,高红江,曹后坤.喷射钢纤维混凝土配合比设计及施工方法研究[J].工业建筑,2010,40(7):80-84.
- [9]郭永忠.隧道湿喷混凝土回弹率影响因素及施作工艺研究[J].铁道建筑技术,2021(3):18-21.

Mix Proportion Design of High Performance Wet Shotcrete for Tunnel

Chen Wenyuan¹, Li Xin², He Xiaojun³, Ma Ji⁴, Ji Yafeng¹

(1.No.3 Engineering Co. Ltd. of the 21st Bureau Group of China Railway, Xianyang 712023, China;

2. Sichuan Highway Engineering Supervision Co. Ltd., Chengdu 610000, China;

3. Department of Urban Construction Engineering, Jinan Technician College, Handan 056000, China;

4. School of Transportation Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to find the optimal mix proportion of tunnel wet shotcrete, relying on the Muzhailing super long tunnel project of Weiyuan-Wudu section of Lanzhou-Haikou National Expressway (G75), based on engineering experience and engineering analogy, this research determined the on-site concrete mix proportion parameters, designed the mix proportion scheme, and used the shotcrete large plate sampling method to make test pieces. Through the test of compressive strength and on-site rebound rate, the exploration was proved to meet the actual engineering requirements and also achieved the optimal mix proportion of the goal of low-carbon economy. The results show that when the water binder ratio is 0.40, the sand ratio is 46%, and the cementitious material is 450 kg/m^3 , the compressive strength and flow performance of concrete at each age reach the maximum, and the rebound rate of concrete is the minimum. The concrete strength is about 43.4% higher than the minimum value, the slump and expansion are about 72.2% and 70% higher than the minimum value respectively, and the rebound rate of side wall and vault is about 34.5% and 28.4% lower than the maximum value respectively.

Key words: wet shotcrete; mix proportion; water binder ratio; sand rate; rebound rate