

外加剂对低温水泥浆性能的影响试验研究

向浩天^{1,2}, 蒋 炳^{1,2}, 李之军^{1,2}, 陈礼仪^{1,2}

(1.成都理工大学环境与土木工程学院,四川 成都 610059;

2.成都理工大学环境与土木工程学院地质灾害及防治国家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要:为解决在普通硅酸盐水泥(P.O42.5)或混凝土施工中遭遇低温环境而不能顺利凝固的问题。对普遍使用的硅酸盐水泥进行了基础性能测试试验,使用早强剂与高效减水剂对水泥进行调整性能,寻找出最佳的调整方案,对比调整前后水泥浆及水泥石强度等各项数据。结果表明 10%早强剂、2%JSS 高效减水剂的调整方案较好地改善了水泥浆的流动性、凝结时间、水化热放热速率、结石率及水泥石的早期强度等问题。研究成果对低温条件下的混凝土施工有一定的参考价值。

关键词:低温;水泥浆;水泥浆流动性;凝结时间;水泥强度;水化热

中图分类号:TU528 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)01-0036-07

Study on effect of additives on cement slurry at low temperature

XIANG Haotian^{1,2}, JIANG Bing^{1,2}, LI Zhijun^{1,2}, CHENG Liyi^{1,2}

(1.College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;

2.College of Environmental and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, State Key Laboratory of Geological Hazards and Prevention and Control, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: In order to solve the problem that common Portland cement (P. O42.5) or concrete can not cure smoothly in low temperature environment, the basic performance test of Portland cement is carried out, and the curing accelerator and the superplasticizer are used to adjust the performance of cement to find out the proper adjustment plan. The strength data of cement slurry and cement paste before and after adjustment are compared, and the results show that the adjustment make-up of 10% LC curing accelerator and 2% JSS super plasticizer can improve the fluidity, setting time, release rate of hydration heat, calculus rate and early strength of cement paste. The research results can provide some reference for concrete construction under low temperature conditions.

Key words: low temperature; cement slurry; cement slurry fluidity; setting time; cement strength; hydration heat

0 引言

在高原环境下,低温环境是影响施工的重要因素。如今在国内外大大小小的工程项目以及各个相关领域的试验研究中,徐秀香等^[1]对土层锚杆水泥浆液进行改性试验研究,目的是提高锚固结石体的早期强度,及时控制边坡的变形,加快基坑支护与开挖工作施工速度,确保支护体系的安全性;陈泮等^[2]主要研究了钢渣掺量、单浆液水胶比等对钢渣调整硅酸盐水泥-水玻璃双液注浆复合材料工作性能影

响规律;代国忠等^[3]对锚固工程中早强型水泥浆液材料进行了试验研究,具体研究了早强水泥的配制与应用。具体施工方面,王培铭等^[4]利用丁苯乳液对砂浆进行了调整,提高了抗折强度和粘结抗拉强度;田伟等^[5]分析了低温条件下利用水泥混凝土施工的可行性和质量控制技术。王天亮等^[6]对不同冻融次数、冷却温度和围压下水泥及石灰改良土的应力、应变关系、静强度参数和破坏图像进行了研究。许雷等^[7]探究了冻融循环作用对水泥调整膨胀土物

收稿日期:2019-03-21; 修回日期:2019-08-01 DOI:10.12143/j.tkge.2020.01.007

作者简介:向浩天,男,汉族,1996年生,硕士研究生在读,地质工程专业,主要从事岩土钻掘技术研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,469246042@qq.com。

通信作者:陈礼仪,男,汉族,1957年生,教授,地质工程专业,博士,主要从事岩土钻掘技术研究及教学工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,1806527558@qq.com。

引用格式:向浩天,蒋炳,李之军,等.外加剂对低温水泥浆性能的影响试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):36-42.

XIANG Haotian, JIANG Bing, LI Zhijun, et al. Study on effect of additives on cement slurry at low temperature[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(1):36-42.

理学特性的影响。赵安平^[8]以剪切强度为主,对冻融作用下水泥改良进行了试验研究。此外涉及到低温条件下水泥的研究,戈雪良^[9]探究了低温条件下水泥的基础性能变化;马芹永^[10]主要探究了水泥对膨润土在低温条件下的强度改变;谢松^[11]、张文平^[12]、樊海军^[13]对低温环境下水泥的凝结时间和早期强度进行了研究,探究控制凝结时间以及增强早期强度的方法。马士宾^[14]探究了低温条件下水泥稳定碎石的无侧限抗压强度和冻融循环后质量损失率和抗冻系数的变化规律;陈莉^[15]研究了低温条件下含气量对水泥砂浆抗压强度的影响;张丰^[16]研究了低温条件下溴化锂对砂浆强度、净浆凝结以及水泥早期强度水化特性的影响;许刚刚^[17]分析了在低温条件下不同添加剂对水泥浆液凝结时间的影响;王云天^[18]以抗折强度为评价指标分析了不同低温条件下水泥浆液中硫酸盐的侵蚀速率;王海^[19]探究了低温条件下水玻璃对水泥浆液凝结特性的影响。L. Soriano^[20]、王云天^[21]分别探究了低温条件下火山灰对水泥浆液固化过程和砂浆体强度的影响;WANG Sheng^[22]研究了在低温条件下纳米复合水泥的水化过程;BU Yuhuan^[23]探究了低温对掺有纳米胶凝材料的水泥石早期抗压强度的影响。

此次试验目的是在混凝土工程中使水泥能在不影响其流动度的前提下,提高结石率,缩短凝结时间,发挥出应有的早期强度,以及增加水泥的抗冻性,同时了解外加剂的选择和掺量。

试验通过对水泥浆液在冻融作用下的性能测试以及调整试验来得出在高原或者极寒条件下水泥或混凝土施工时应使用的调整方法,以此改善实际施工进度,使其更好地达到施工要求。

1 试验器材及试验方案

1.1 试验器材

试验主要材料为普通硅酸盐水泥(P.O42.5)、LC早强剂以及JSS高效减水剂。

试验主要仪器为DD型减速增力电动搅拌机, YT12959-8全自动水化热测定仪, FYL-YS-128L数控低温保存箱, WHY-1000型微机液压力测试机, MP1100B电子天平。

1.2 试验方案

试验主要分为两大部分,为调整前后水泥浆性能

试验。调整前试样为水灰比0.5、0.8、1.0三组水泥浆液,每组各制备水泥块试样6个,共18个。在25℃条件下湿水养护7d,每组提取3个试样用于低温影响试验。对性能进行调整后试样为水灰比0.5的试样数量为6个,其中3个凝结养护完成后用于-10℃低温影响试验,另外3个在常温下凝结养护。

为了掌握水泥的基础性能,首先通过对调整前的水泥试样进行基础浆液性能试验来了解水泥的凝结时间、泌水率、流动度、水化热以及拌合水低温对水泥浆液性能的影响。之后对水泥进行调整试验,选择LC早强剂和JSS高效减水剂作为水泥浆液的外加剂,以水灰比为0.5的水泥浆液作为主要研究对象,设置外加剂掺量方案,并对上述加入外加剂的水泥浆液进行性能测定。

在水泥试样调整试验后对试样进行强度试验,对调整前的水泥块试样,通过对水灰比0.5、0.8、1.0的水泥块试样的强度对比,25℃常温下和-10℃低温下两组水泥块试样的强度对比,得到相应结论。对调整后的水泥块试样,选取调整效果最好的水泥块试样6个,养护14d后,取其中3个置于常温下继续养护,另外3个用于低温养护,周期7d。逐一测试水泥块抗压强度,对比分析,验证调整后方案是否提升了强度、是否具有抗冻性。

2 试验结果与讨论

2.1 基础性能试验

2.1.1 凝结时间、泌水率、流动度

水泥浆液的水灰比越大,流动度越好,但凝结时间会越长,泌水率也越大。所以水灰比越大的水泥浆液,凝结时的早期强度往往很低,或者说迟迟不能到达预期强度,同时,泌水率越大的水泥浆液,结石率越小,不能满足施工中对水泥的要求^[24]。具体数据见表1。

表1 不同水灰比水泥基础性能数据
Table 1 Basic performance data of cement at different water-cement ratio

水灰比	凝结时间/h	流动度/cm	泌水率/%	结石率/%
0.5	7.0	17.0	7.4	99
0.8	9.6	30.0	25.0	97
1.0	12.0	42.0	33.6	85

2.1.2 水化热

水泥在水化时会发生温度变化,这主要源于几

种熟料矿物组分的水化物在溶液中的水化,即水化热^[25]。水泥水化热大小与水泥内部矿物质成分有一定的关系,在同等量的水泥情况下,具有 C_3A 的水泥水化热最大,其次是 C_3S ,最后是 C_4AF 。水化热越大,水泥浆液单位时间内放出热量也将会越多^[26]。基础性能具体数据见图 1。

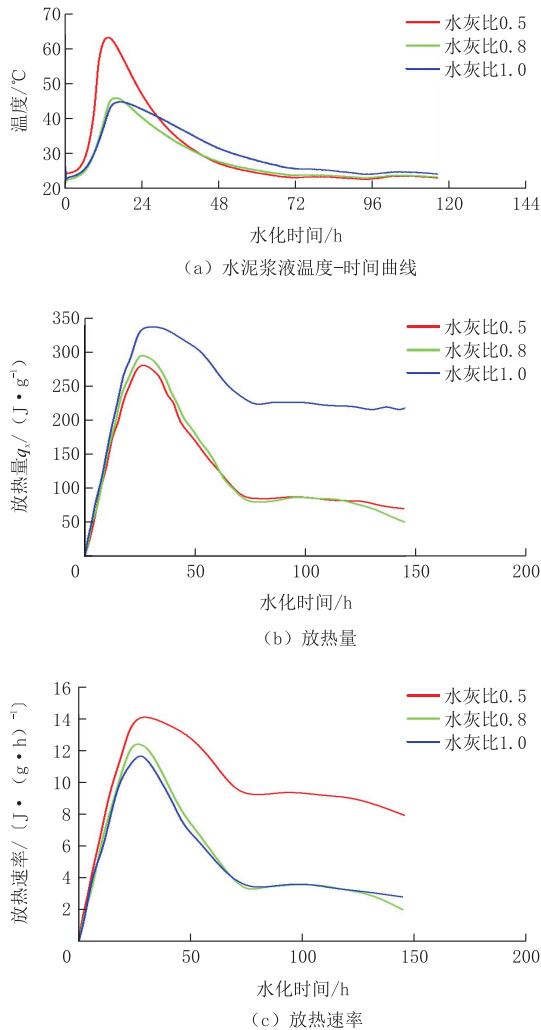


图 1 普通水泥浆液基础性能

Fig.1 Basic performance charts of common cement slurry

水灰比为 0.5 的水泥浆液于配制完成后 30 h 左右放热速率达到最大,30 h 左右放热逐渐减小,14 h 左右温度达到最高为 63.07 °C,72 h 左右恢复常温。水灰比为 0.8 的水泥浆液于配制完成后 26 h 放热速率达到最大,30 h 放热逐渐减小,16 h 左右温度达到最高为 45.8 °C,72 h 左右恢复常温。水灰比为 1.0 的水泥浆液于配制完成后 27 h 放热速率达到最大,35 h 放热逐渐减小,20 h 左右温度达到最高为 44.6 °C。

对比发现,水泥浆液放热速率最大时间段正好对应其初凝时间,可以说明水泥浆液在凝固阶段水化反应最为剧烈。水泥浆液水灰比越高,水化放热量越小,进行速率也越低。

2.1.3 拌合水低温对水泥浆液的影响

将水泥块试样分别降温至 0、5、10 °C 3 个温度。每个温度分别拌合 0.5、0.8、1.0 三种水灰比的水泥浆液后测出各项性能参数(见表 2)。

表 2 冻水拌合水泥浆液性能参数
Table 2 Performance parameters of cement slurry mixed with frozen water

温度/ °C	水灰 比	凝结时间/min		泌水率/ %	流动度/ cm	结石率/ %
		初凝	终凝			
0	0.5	445	817	8.5	18.0	92
	0.8	802	1320	25.0	28.5	89
	1.0	876	1528	37.5	45.5	80
5	0.5	418	697	7.0	18.0	94
	0.8	662	1231	22.5	28.0	91
	1.0	836	1441	35.0	42.0	81
10	0.5	380	573	7.0	18.0	96
	0.8	656	1295	25.0	30.0	95
	1.0	792	1402	33.3	42.0	83

温度越低,水泥凝结时间越长,泌水率越大,流动度越大。低温水降低了水化反应的速率,尤其是在初凝阶段,影响结合水的生成,从而使得水泥浆液的凝结时间增加改变。因此在实际工程应用中,必须依据现场温度和用水温度选定材料的配合比。

2.2 水泥调整试验

对于 LC 早强剂和 JSS 高效减水剂的掺入量的设计,以水灰比 0.5 的水泥浆液为主要研究对象,设计如下方案:先加入 LC 早强剂,对加入后的水泥浆液进行性能测试,再加入 JSS 高效减水剂进行性能测试,优选 LC 早强剂和 JSS 高效减水剂的最优方案。具体数据见表 3。

表 3 外加剂加入后水泥浆液性能参数

Table 3 Performance parameters of cement slurry after adding additives

方案	W/C	LC/ %	JSS/ %	流动 度/cm	初凝时 间/min	终凝时 间/min	结石 率/%
1	0.5	0	0	16.0	362	502	99
2	0.5	0	2	20.0	420	627	99
3	0.5	5	2	16.5	235	325	99
4	0.5	10	2	16.0	190	260	99

在水灰比相同的情况下,加入减水剂能提高水泥浆液的上述性能,将试样 2、3、4 进行比较可知加入 LC 早强剂降低了水泥浆液的初始流动度,使其流动

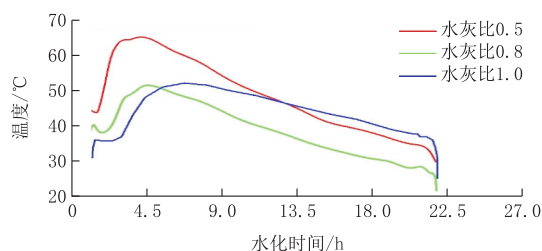
性能下降,并且在减水剂加量不变的情况下逐渐增大 LC 早强剂的加量,水泥浆液的流动性能随之变差,凝结时间逐渐减少。从试验方案得出的试验数据显示,方案 4 流动度适中,初凝时间和终凝时间较快,符合现场的施工要求。故选择 10% 的 LC 早强剂和 2% 的 JSS 高效减水剂来对水泥浆液进行性能调整。水灰比 0.8 和水灰比 1.0 的水泥浆液调整后数据见表 4。

表 4 水灰比 0.8 和 1.0 水泥浆液调整后的基础性能

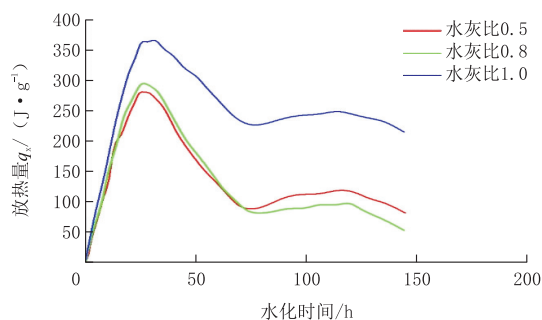
Table 4 Basic properties of cement slurry at water cement ratio of 0.8 and 1.0 after adjustment

水灰比	早强剂加量/%	JSS 高效减水剂掺入量/%	流动度/cm	初凝时间/min	终凝时间/min	结石率/%
0.8	10	2	29	215	300	99
1.0	10	2	33	265	412	97

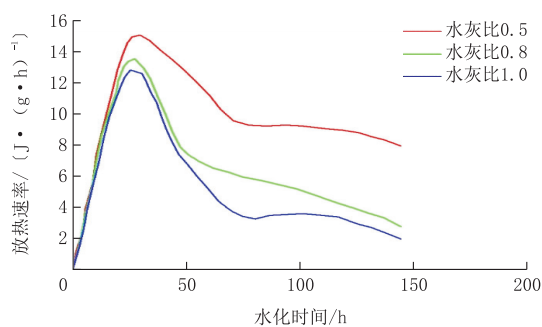
对调整后的水泥浆液进行了水化热测试,结果见图 2。



(a) 水泥浆液温度-时间曲线



(b) 放热量



(c) 放热速率

图 2 调整后水泥浆液基础性能

Fig.2 Basic performance of adjusted cement slurry

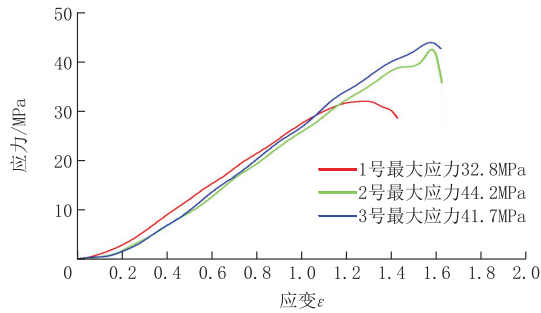
水灰比为 0.5 的调整水泥浆液于配制完成后 30 h 左右放热速率达到最大,30 h 左右放热逐渐减小,4.4 h 左右温度达到最高为 65.37 °C。水灰比为 0.8 的调整水泥浆液于配制完成后 27 h 放热速率达到最大,30 h 放热逐渐减小,4.5 h 左右温度达到最高为 51.28 °C。水灰比为 1.0 的调整水泥浆液于配制完成后 25 h 放热速率达到最大,35 h 放热逐渐减小,7 h 左右温度达到最高为 50.46 °C。对比未调整的水泥,添加了外加剂的水泥会释放出更多的热量,这是因为加入减水剂后,减水剂的憎水基团定向吸附于水泥质点表面,亲水基团指向水溶液,组成了单分子或多分子吸附膜,这使水泥的早期水化速率减慢,这就降低了某些龄期的水化热,显著推迟水化热峰值出现的时间和降低峰值的大小;其次,LC 早强剂会明显加速水泥水化反应的进行,并使得反应进行的更为彻底,这使得水泥浆液水化放热将会更多。

2.3 强度试验

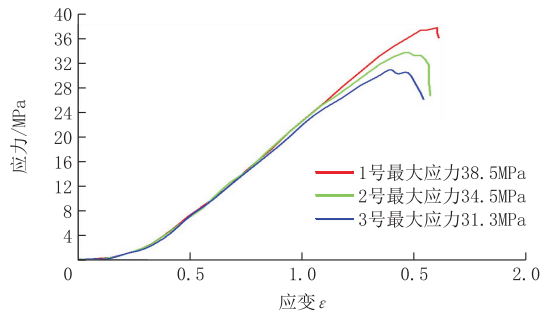
调整前水泥石的抗压强度测试,通过纵向比较 0.5、0.8、1.0 三个水灰比水泥块试样的强度和横向比较常温下与低温下两组水泥块试样的强度,得出数据。普通水泥应变见图 3,调整水泥位移见图 4。

常温养护的水泥浆液中,水灰比为 0.5 的水泥块强度最大可达 44.2 MPa,水灰比 0.8 和 1.0 的水泥块强度逐次减小,分别为 38.5 和 21.3 MPa,因此可得出水灰比越小,水泥试样的强度越大的结论;对于经过低温养护的水泥试样,可从图 4 中看到,水灰比为 0.5 的水泥试样最大应力为 40.2 MPa,前后应力差为 4 MPa,水灰比 0.8 和 1.0 的水泥试样最大应力分别为 24.1 和 16.4 MPa。前后应力差分别为 14.4、4.9 MPa。3 组水泥试样强度损失比例分别为 9.05%、37.4%、23%。由此可以确定,低温环境对水泥强度的形成和发挥有着不利影响,水灰比小,受到的影响相对较小,水灰比 0.8 的水泥试样,受到的影响是最大的,水灰比为 1.0 的水泥试样,因其本身强度不大,仅为 21.3 MPa,故受到的强度影响相对水灰比 0.8 的水泥试样要小,但相对来说,也比水灰比为 0.5 的水泥试样大得多。调整后水泥石的抗压强度测试得出的数据如图 5 所示。

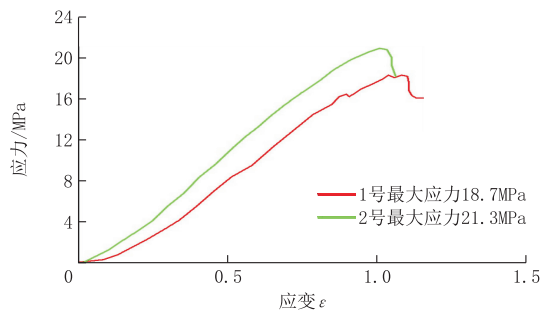
根据图 5 中数据可见,经过 LC 早强剂和 JSS 高效减水剂对水泥浆液的性能进行调整后,在常温养护的条件下,水泥试样的最大应力已从 38.5 MPa



(a) 水灰比0.5



(b) 水灰比0.8

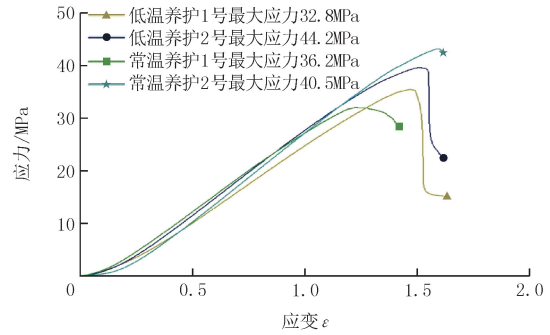


(c) 水灰比1.0

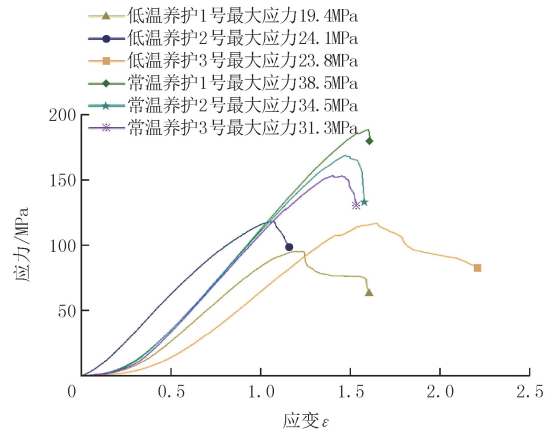
图3 普通水泥石应力-应变曲线

Fig.3 Stress vs strain displacement curve of common cement paste

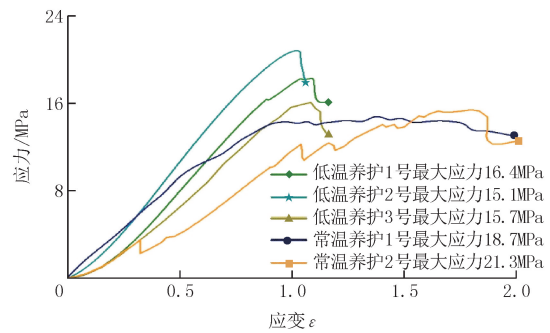
升至 58 MPa。低温养护的条件下,水泥试样最大应力从 40.5 MPa 升至 57.6 MPa,说明 LC 早强剂和 JSS 减水剂对水泥试样的强度性能有一定改善作用,并且能够很好地降低温度对水泥试样强度的影响。在调整后低温养护与常温养护试样的应力应变曲线中可以看到,常温条件下最大应力为 58 MPa,而低温条件下最大应力可达到 57.6 MPa,其强度损失比例为 0.69%,说明外加剂有效减少了水泥试样的强度损失。低温养护下的水泥试样应力曲线和常温养护下的水泥试样应力曲线基本相同,说明其强度差距不大。经过外加剂调整,水泥试样强度损失降低,相对未加外加剂的水泥试样的强度增大。



(a) 水灰比0.5



(b) 水灰比0.8



(c) 水灰比1.0

图4 普通水泥石与调整后水泥石应力-应变曲线对比

Fig.4 Comparison of stress vs strain curves between common cement paste and adjusted cement paste

3 结论

(1)普通硅酸盐水泥浆液(P.O42.5)在低温环境的影响下,会出现流动性降低,凝结时间变长,结实率下降等问题。同时低温条件下水泥浆液的早期强度往往不能达到水泥浆液本身应该具有的最大早期强度,这给高原或低温条件地区的施工会带来一定影响。

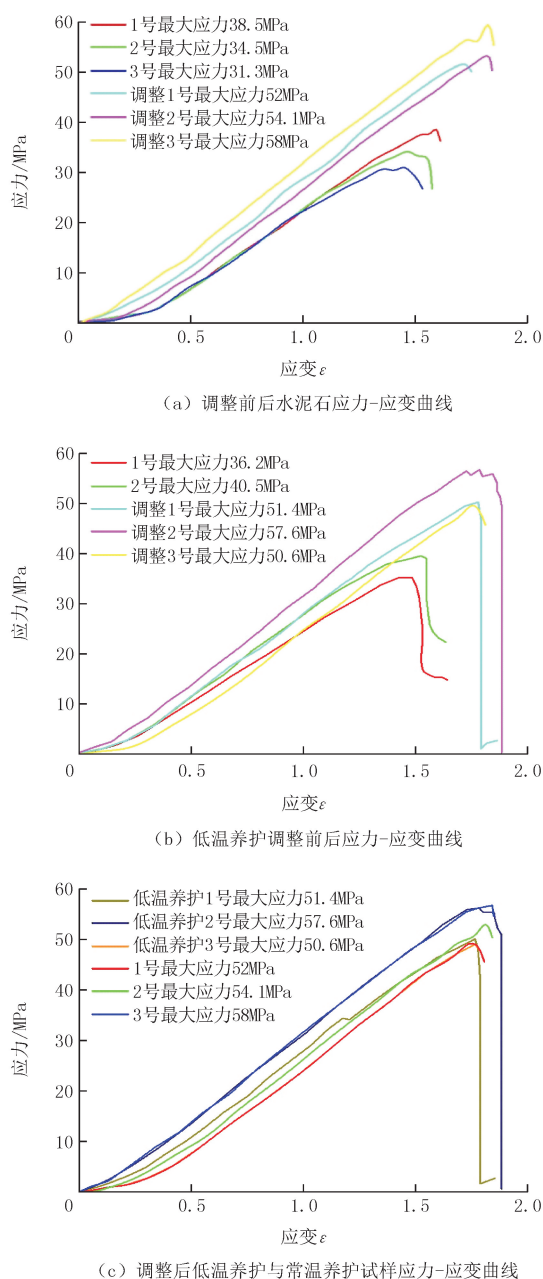


图 5 不同条件下水泥石强度对比

Fig.5 Strength comparison of cement paste under different conditions

(2) 10% 早强剂、2% JSS 高效减水剂的调整方案能在减少凝结时间的基础上, 保有了水泥浆液良好的流动度, 同时可在缩短凝结时间的基础上具有较高的早期强度, 并有效降低低温对水泥浆液的早期强度影响。

参考文献 (References):

[1] 徐秀香, 代国忠, 李卫平, 等. 土层锚杆水泥浆液改性试验与应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 10(3): 420-423.

XU Xiuxiang, DAI Guozhong, LI Weiping, et al. Application study and modification test on the cement grouting for soil anchor rod[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2008, 10(3): 420-423.

[2] 陈洋, 黄蓓丽, 巴明芳, 等. 钢渣改性硅酸盐水泥-水玻璃双液注浆复合材料的试验研究[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6): 139-145.

CHEN Feng, HUANG Beili, BA Mingfang, et al. Experimental study on dual-fluid-grout composite materials with slag steel modified Portland cement and sodium silicate[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6): 139-145.

[3] 代国忠, 徐志. 早强型水泥浆液材料的试验研究及在锚固工程中的应用[J]. 常州工学院学报, 2007, 20(1): 20-24.

DAI Guozhong, XU Zhi. Study and application of the cement grouting material of increasing primary strength for anchor engineering[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2007, 20(1): 20-24.

[4] 王培铭, 许琦, J. Stark. 桥面用丁苯乳液改性水泥砂浆的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(1): 1-6.

WANG Peiming, XU Qi, J. Stark. Mechanical properties of styrene-butadiene emulsion modified cement mortar used for repair of bridge surface[J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(1): 1-6.

[5] 田伟, 孙赞. 机场水泥混凝土道面低温施工质量控制及试验研究[J]. 江西建材, 2018, 47(3): 47-49.

TIAN Wei, SUN Zan. Construction quality control and experimental study of airport cement concrete pavement at low temperature[J]. Jiangxi Building Materials, 2018, 47(3): 47-49.

[6] 王天亮, 刘建坤, 田亚护, 等. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 193-198.

WANG Tianliang, LIU Jiankun, TIAN Yahu, et al. Static properties of cement and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 193-198.

[7] 许雷, 鲁洋, 薛洋, 等. 冻融循环下水泥改性膨胀土物理力学特性研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(4): 87-91, 103.

XU Lei, LU Yang, XUE Yang, et al. Physico-mechanical properties of cement-modified expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(4): 87-91, 103.

[8] 赵安平, 汤爱平, 孙静, 等. 冻融作用下水泥改良土剪切强度试验研究[J]. 黑龙江大学学报, 2015, 6(1): 28-31.

ZHAO Anping, TANG Aiping, SUN Jing, et al. Tests on shear strength of cement improved soil under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2015, 6(1): 28-31.

[9] 戈雪良, 刘伟宝. 极端低温对水泥基材料的影响[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(5): 319-323.

GE Xueliang, LIU Weibao. Effects of extreme low temperature on the properties of cementitious materials[J]. Climate Change Research, 2015, 11(5): 319-323.

[10] 马芹永, 钱叶宇. 低温下水泥改性弱膨胀土抗压性能试验与分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 1-6.

MA Qinyong, QIAN Yeyu. Experiment and analysis of compressive properties of cemented weak expansive soil at low

- temperature[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2019,39(2):1-6.
- [11] 谢松,朱清华,钱冠龙,等.利用硅酸盐水泥配制低温套筒灌浆料试验研究[J].新型建筑材料,2019,15(4):15-18.
XIE Song, ZHU Qinghua, QIAN Guanlong, et al. Experimental study on making low temperature sleeve grouting material by using Portland cement[J]. New Building Materials, 2019,15(4):15-18.
- [12] 张文平.低温环境下水泥凝结时间调控方法研究[J].四川水泥,2017,9(1):10.
ZHANG Wenping. Study on control of cement setting time in low temperature environment[J]. Sichuan Cement, 2017,9(1):10.
- [13] 樊海军,李洋波,李阳,等.低温养护下水泥砂浆早期强度增长试验研究[J].水力发电,2016,42(5):106-110.
FAN Haijun, LI Yangbo, LI Yang, et al. Experimental study on early age strength growth of low temperature curing cement mortar[J]. Hydropower, 2016,42(5):106-110.
- [14] 马士宾,高建强,魏建惠,等.低温早强水泥稳定碎石材料无侧限抗压强度和抗冻性能研究[J].硅酸盐通报,2019,38(3):756-761.
MA Shibin, GAO Jianqiang, WEI Jianhui, et al. Study on unconfined compressive strength and frost resistance of low temperature early strength cement stabilized macadam material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019,38(3):756-761.
- [15] 陈莉,陈松.低温下砂浆的抗压强度试验研究[J].科技创新与应用,2017(15):31-32.
CHEN Li, CHEN Song. Experimental study on compressive strength of mortar at low temperature[J]. Technology Innovation and Application, 2017(15):31-32.
- [16] 张丰,白银,蔡跃波,等.低温养护下溴化锂对水泥早期水化的影响[J].水利学报,2019,50(4):506-515.
ZHANG Feng, BAI Yin, CAI Yuebo, et al. Effect of lithium bromide on early hydration process of cement at low temperature[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(4):506-515.
- [17] 许刚刚.水泥浆液在低温环境下的凝结特性试验研究[J].煤矿安全,2017,48(12):44-48,52.
XU Ganggang. Experimental study on coagulation characteristics of cement slurry under low temperature environment[J]. Safety in Coal Mines, 2017,48(12):44-48,52.
- [18] 王云天,王起才,郭玉柱,等.低温对水泥砂浆硫酸盐侵蚀速率的影响试验研究[J].硅酸盐通报,2017,36(10):3368-3372.
WANG Yuntian, WANG Qicai, GUO Yuzhu, et al. Experimental study on the effect of low temperature on the rate of sulfate attack of cement mortars[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017,36(10):3368-3372.
- [19] 王海,许刚刚,王晓东,等.低温环境下添速凝剂的水泥浆凝结特性试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8):78-83.
WANG Hai, XU Ganggang, WANG Xiaodong, et al. Experimental study on coagulation characteristics of cement slurry with quick-setting agent at low temperature[J]. Coal Science and Technology, 2019,47(8):78-83.
- [20] L. Soriano, J. Monzo, M. Bonilla. Effect of pozzolans on the hydration process of Portland cement cured at low temperatures[J]. Cement & Concrete Composites, 2013,42:41-48.
- [21] 王云天,郭玉柱,王起才,等.低温环境下复合矿物掺合料火山灰效应试验研究[J].硅酸盐通报,2017,36(10):3452-3458.
WANG Yuntian, GUO Yuzhu, WANG Qicai, et al. Experimental study on the pozzolanic effect of mineral additives in low temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017,36(10):3452-3458.
- [22] WANG Sheng, JIAN Liming, SHU Zhihong, et al. Preparation, properties and hydration process of low temperature nano-composite cement slurry[J]. Construction and Building Materials, 2019,205(4):434-442.
- [23] WANG Chunyu, HOU Xianhai, BU Yuhuan, et al. Effect of colloidal nanosilica on early-age compressive strength of oil well cement stone at low temperature[J]. Construction and Building Materials, 2018,171(5):690-696.
- [24] 谢国强.北二风井平顶山砂岩注浆材料及机理研究[D].焦作:河南理工大学,2011.
XIE Guoqiang. Research on the grouting materials and mechanism of the second air crsft in Pingdingshan's sandstone formation[D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University, 2011.
- [25] 杨雷,管学茂.混凝土中未水化水泥后期水化的危害研究[J].水泥工程,2004,17(3):8-11.
YANG Lei, GUAN Xuemao. Study on harm of anaphase hydration of the unhydrated cement to high strength concrete[J]. Cement Engineering, 2004,17(3):8-11.
- [26] 何小芳,张亚爽,刘玉飞,等.水泥水化产物的热分析研究进展[J].硅酸盐通报,2012,31(5):1170-1174.
HE Xiaofang, ZHANG Yashuang, LIU Yufei, et al. Research progress of thermal analysis in cement hydration[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012,31(5):1170-1174.

(编辑 韩丽丽)