

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221700

复杂地质条件下智能灌浆技术研究和应用

肖 碧¹, 李书友², 傅兴安¹, 蒋小春³, 李 果³

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 南水北调中线实业发展有限公司, 北京 100176; 3. 成都中中华瑞科技有限公司, 四川 成都 610031)

摘要: 目前对水电站智能灌浆技术已进行了较多研究和探索, 研发了智能灌浆设备, 针对常规地质条件开发了智能工艺控制策略。但现有智能灌浆技术缺乏压力敏感、破碎地层的智能控制策略, 不适用于复杂地质条件下灌浆施工。对此, 依托雄安调蓄库工程, 采用实证研究法, 针对易抬动、易劈裂等薄弱地层开展了智能灌浆及压水工艺策略研究。现场试验结果表明, 该智能灌浆技术适应现场施工需要, 能智能完成压水和灌浆施工过程, 较好地处理施工过程中的抬动和劈裂情况, 有利于保障灌浆工程质量、提高智慧施工水平。

关键词: 智能工艺控制策略; 智能灌浆; 一键灌浆; 智慧施工; 雄安调蓄库

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0129-04

1 引言

灌浆是水利水电工程形成良好坝基和地下防渗帷幕的基础, 亦是工程管理的重点和难点, 一直是水利水电工程界关注的热点。1980年代中水基础局等研制出第一台灌浆自动记录装置^[1], 实现了灌浆数据自动记录。1990年代中南大学基于智能灌浆压水监测系统提出了压力控制模型^[2], 但产品未实际应用。2015年, 中国三峡建设管理有限公司研发了水泥灌浆智能控制方法与系统^[3], 以规范化的机器指令替代人工随意操作, 实现了灌浆过程的智能控制, 该系统在乌东德^[4]、白鹤滩^[5]、乌弄龙^[6]等水电站进行了规模应用, 取得较好的应用效果。肖铎等^[7]基于杨房沟水电站对智能灌浆系统开展研究, 对灌浆压力控制、输浆调度进行了设计与工程实践。然而, 现有智能灌浆技术仅能针对常规地质条件处理一般情况的灌浆和压水, 在压力精准控制、抬动处理等方面有待完善, 缺乏小压力下破碎地层的智能控制策略。鉴此, 本文依托南水北调中线雄安调蓄库工程, 针对岩体压力敏感、易抬动、易劈裂等复杂地质条件, 开展了智能工艺控制策略研究和应用, 以实现复杂条件下一键智能灌浆, 保障灌浆施工质量。

2 研究方法

针对复杂地质条件下智能工艺控制策略的研究, 主要采用实证研究法。根据现有的灌浆规范^[8]和工程实践经验, 提出工艺策略设计, 利用智能灌浆系统设备按照设定策略进行试验, 观察、记录试验过程, 根据试验情况反馈改进工艺策略设计, 直至其适应当前灌浆实际需要, 最终实现无须人工操作、一键启动智能完成灌浆全过程。

3 复杂条件下智能灌浆工艺控制策略

针对雄安调蓄库复杂地层情况, 特别是压水、灌浆过程中易出现抬动、劈裂等异常灌浆情况, 提出以“精准调压稳压、重点防抬防劈”为特征的智能灌浆/压水工艺策略。在策略设计时主要围绕以下关键点: ①小压力下必须对压力进行精准控制, 升压幅度要控制在 0.02 MPa; ②预警后能快速降压, 防止抬动、劈裂情况进一步恶化; ③针对抬动、劈裂易发生在浅层的特点, 分别对第 1、2、3 段制定不同的工艺策略。

3.1 压水智能控制策略研究

根据智能灌浆工艺控制策略设计关键点和工程实践经验, 提出了简易压水初始智能控制策略。具体如下。

步骤 1 启动配浆系统, 以最小管路压力起泵, 达到设计压力时开始记录。

步骤 2 第 1、2 段灌前压水压力取灌浆压力(上限)的 60%(0.6P); 其余段压水压力取灌浆压

收稿日期: 2022-07-22, 修回日期: 2022-09-08

基金项目: 长江勘测规划设计研究有限责任公司自主科研项目(CX2020Z08)

作者简介: 肖碧(1984-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水利水电工程基础处理设计, E-mail: 190205397@qq.com

力的80%(0.8P)(下限),且不大于1MPa。

步骤3 逐渐升压至设定压力,在升压过程中,第1、2段每级升压0.03MPa,其余段每级升压0.05MPa。

步骤4 记录过程中检测抬动值 $\geq 5 \mu\text{m}$,判定发生抬动,做降压处理,降至产生抬动压力减少0.05MPa;若降压后仍继续抬动,则再降0.05MPa,以此类推,直至不继续抬动。

步骤5 结束记录判断为记录总时间 $\geq 20 \text{ min}$ 。

将该初始策略应用于现场施工进行试验,对试验过程中出现的问题进行观察、记录,分析出现的原因,并进行改进。试验和改进过程见表1。表1中, Q_{max} 指灌浆或压水过程中设定的最大限流,单位为L/min。当流量达到 Q_{max} 后,智能灌浆系统会自动控制压力和流量,使其不超过 Q_{max} 。

表1 简易压水智能策略试验和改进过程

Tab.1 Test and improvement process of simple water pressure strategy

序号	初始策略	存在问题	改进后策略	改进目的
1	启泵后先升压,达到设计压力后才开始记录并检测记录过程中是否抬动。	升压过程中的抬动不会被检测,有可能在升压时出现抬动。	启泵后不升压稳定1min,开始记录并检测抬动,逐渐升压。	在升压过程中能及时检测到抬动情况,发生抬动后及时降压。
2	如果是第1或2段,将 Q_{max} 设为10L/min,否则设为20L/min。	20L/min的限流过低,影响压水效果。	除第1或2段以外的 Q_{max} 设为30L/min。	避免限流过低影响压水效果。
3	流量超限以后,降压0.05MPa直至流量小于 Q_{max} ,不再升压。	流量超限降压后,由于压力较低,流量较低,压水效果不好。	如果是第1或2段,流量超限降压后流量小于7L/min,可继续升压0.02MPa,升压后需稳定30s后继续判断是否升压;其余段,流量超限降压后流量小于24L/min后,可继续升压0.02MPa,升压后需稳定30s后才能继续判断是否升压。	避免流量超限降压后流量值过低影响压水效果。
4	首次抬动值 $\geq 5 \mu\text{m}$,判定发生抬动,做降压处理;后续抬动值高于前次最高抬动值 $5 \mu\text{m}$,才判断再次抬动,再做降压处理	后续抬动判断标准不准确,导致后续抬动时未能及时降压。	改变后续抬动判断方式,首次抬动值 $\geq 5 \mu\text{m}$ 降压,后续过程中,如果出现抬动值实时上升 $\geq 2 \mu\text{m}$,则判定为后续抬动,在当前设定压力基础上继续做降压处理。	一旦出现首次抬动,后续抬动可能性较大,因此后续抬动检测阈值应更低,严防后续抬动。
5	流量超限后降压时间间隔为2s,每2s判定一次是否超限。	流量超限后降压,流量值变化没有那么快,有可能出现流量已经在下降但是系统认为仍然超限继续降压,导致最终降压过多,流量值过低。	流量超限后降压时间间隔为7s。	经过现场反复试验,7s的间隔是比较合适的时间,能有效防止降压过多的情况。

改进后简易压水智能策略流程见图1。

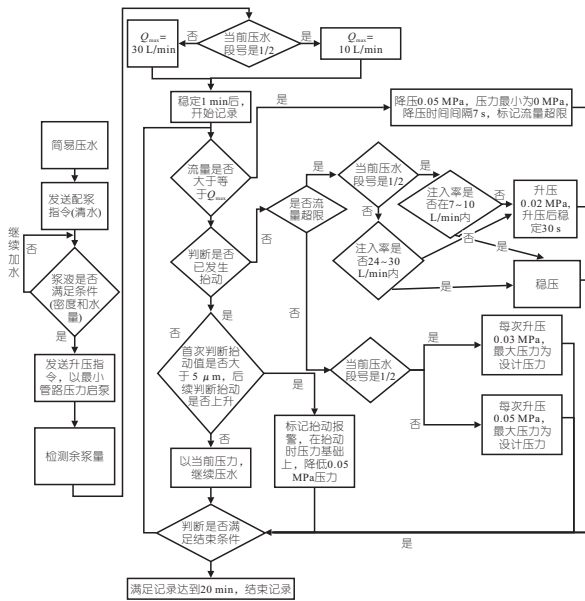


图1 简易压水智能策略流程图

Fig.1 Flow chart of simple water pressure strategy

3.2 灌浆智能控制策略研究

雄安调蓄库地质条件复杂,灌浆过程中如发生劈裂,一旦降压不及时可能发生劈裂破坏,甚至需要复灌,不仅注入量大、浆液扩散远,而且实际受灌效果不好。因此,需从防止抬动发生和发生抬动后的升压方式开展研究。特殊情况处理属于灌浆过程中的难点,灌浆过程中有时多种特殊情

况同时出现,如抬动同时发生劈裂。

3.2.1 灌浆抬动

灌浆抬动处理策略与压水时类似,根据前期压水试验过程中的经验,提出了灌浆抬动智能控制策略,流程见图2。

3.2.2 灌浆劈裂

灌浆劈裂是指灌浆过程中,压力过大或注入量过大导致地层劈裂,流量迅速增加的现象。在智能策略中,机器自动判定劈裂是一个难点。此外,劈裂后设备如何自动处理后续灌浆过程,使劈裂情况不会进一步恶化,也是智能策略实施的难点。基于规范[8]和前期经验,提出了劈裂初始智能控制策略。要点如下。

步骤1 按P-Q升压或稳压灌浆时,实时流压比(实时流量/实时压力)在5s内增大超过50%判定为劈裂。只在临近设计灌浆压力(0.8P)产生的劈裂进入策略处理,小于0.8P产生的劈裂不做处理,标记劈裂,按照P-Q关系正常灌浆。

步骤2 当判定为劈裂,应立即降压至劈裂压力以下0.2MPa,若降压后压力小于0.6P,则正常灌浆,若大于0.6P,采用“限流灌注、缓慢升压”方案。

应用初始策略进行现场试验,针对试验中存在的问题进行分析和改进,见表2。

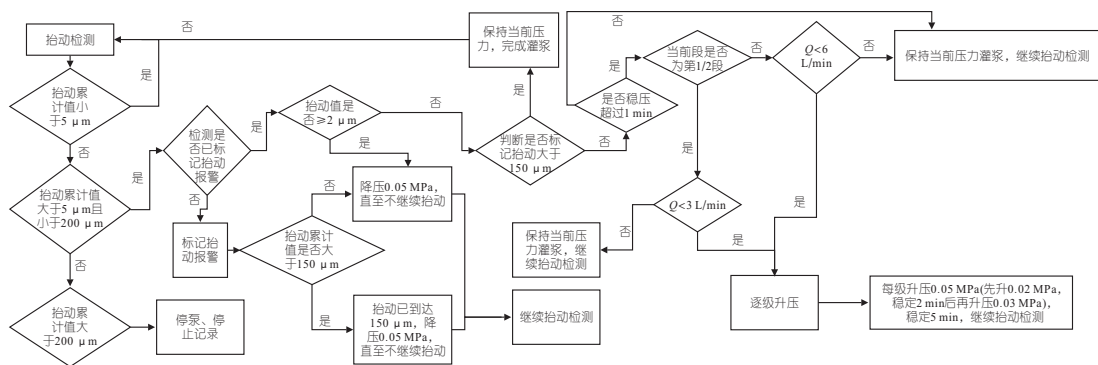


图 2 灌浆抬动智能策略流程图

Fig. 2 Flow chart of grouting strategy on lifting

表 2 劈裂智能策略试验和改进过程

Tab. 2 Test and improvement process of splitting strategy

序号	初始策略	存在问题	改进后策略	改进目的
1	劈裂判定条件: 当时流压比增大超过 5 s 内平均值流压比 50% 后, 判断发生劈裂。	以 5 s 平均值流压比判定劈裂时, 平均压力和平均流量, 均比较靠近实时的压力和流量, 造成无法准确的判定劈裂。	当时流压比增大超过 5 s 前, 实时流压比 50% 后, 判断发生劈裂。	2 s 前流压比与实时流压比, 时间太短, 系统采集的数据差别不大, 为了更容易判断劈裂, 将判断条件放松, 修改为与 5 s 前流压比做比较, 预防劈裂异常。
2	当发生劈裂时设定压力大于等于 0.8P 后, 未降压 0.2 MPa, 若降压后压力小于 0.6P, 则按 PQ 关系升压, 若降压后压力大于 0.6P, 则进入限流灌注, 缓慢升压状态。	大于 0.8P, 发生劈裂后降压, 未降压 0.2 MPa, 若降压后压力小于 0.6P, 则按 PQ 关系升压, 若降压后压力大于 0.6P, 则进入限流灌注, 缓慢升压状态。	大于 0.8P 发生劈裂后, 降压 0.2 MPa, 直至注入率降至 10 L/min 后(每 5 s 判断一次), 判断降压后压力是坏。若大于 0.6P, 若大于 0.6P, 则进入限流灌注状态, 若小于 0.6P, 则继续按照 PQ 关系进行控制。	避免劈裂降压后注入率过大对地层造成破坏。
3	判断注入率大于 10 L/min 后降压时间间隔为 5 s。	存在降压不及时的问题。	将劈裂后降压至注入率小于 10 L/min 时间间隔改为 2 s。	未及时降压, 可能会对地层造成破坏, 因此劈裂处理时, 降压时间间隔由 5 s 改成 2 s。
4	限流灌注后, 当注入率 > 15 L/min, 停泵, 结束灌浆。	这种情况下结束灌浆, 需要后续复灌。	当注入率 > 15 L/min, 停泵, 标记劈裂异常—人工接管, 由人工接管后继续灌浆。	避免后续复灌, 由人工接管进行灌浆。

改进后劈裂智能策略流程见图 3。

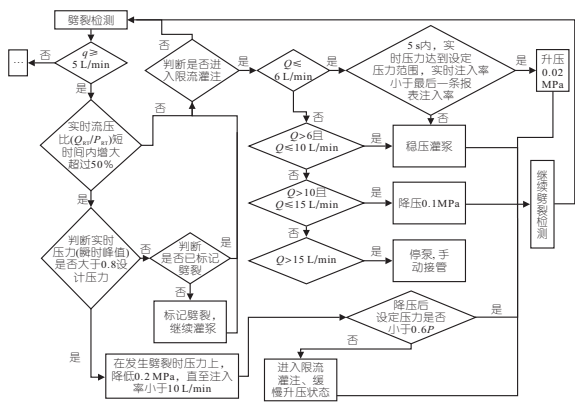


图 3 灌浆劈裂策略流程图

Fig. 3 Flow chart of grouting strategy on splitting

4 现场应用情况分析

4.1 总体分析

2021 年 4~7 月, 在南水北调中线雄安调蓄库灌浆试验工程智能灌浆试验 B1 区, 依托智能灌浆系统设备和智能灌浆工艺控制策略, 开展了现场灌浆试验, 共完成了 8 个试验孔的灌浆、压水试验和 4 个检查孔的压水试验。智能灌浆系统现场试验使用情况统计见表 3。表 3 中“智能控

表 3 雄安调蓄库智能灌浆系统现场试验使用情况统计

Tab. 3 Statistics of field test on intelligent grouting system in Xiongan regulation and storage reservoir

孔号	压水(段数)		灌浆(段数)		复灌(段数)	
	智能控制	人工控制	智能控制	人工控制	智能控制	人工控制
BlW-1-I-1	13	2	11	4	1	2
BlW-1-III-2	15	0	13	2	1	0
BlW-1-II-2	12	3	6	9	1	1
BlW-1-III-4	14	1	12	3	1	1
BlW-2-I-1	9	0	12	3	1	0
BlW-2-III-2	9	0	14	1	1	1
BlW-2-II-3	9	0	15	0	0	0
BlW-2-III-4	9	0	14	1	0	0
检查孔	60	0	0	0	0	0
合计	150	6	97	23	6	5

制”指设备根据智能工艺控制策略, 自动完成压水和灌浆全过程, 无须人工操作, 实现“一键灌浆”。“人工控制”指出现的情况超出智能策略处理范畴, 需要由人工输入自动控制指令来完成施工。即: ①试验孔压水 96 段中, 智能控制模式 90 段, 人工控制模式 6 段, 智能化率为 93%。检查孔压水 60 段, 全部为智能控制模式, 智能化率 100%。②灌浆 131 段中, 智能控制模式 103 段, 人工控制模式 28 段, 智能化率为 79%。③试验前期, 由于处于改进中, 智能化率相对较低, 部分孔段由人工控制模式完成, 通过总结人工控制模式下的灌浆工法, 改进智能控制策略, 到试验后期, 智能化率

有较大提升。第 2 排的 4 个孔,压水智能化率 100%,灌浆智能化率 90%,该智能控制策略能满足现场施工需要。④策略改进完成后,仍有少部分孔段智能灌浆策略难以完全适应,需由人工输入控制指令,如铸钻杆、地层严重破坏等情况。下一步可结合工程实践继续深化研究,总结经验,完善智能控制策略,进一步提高灌浆的自动化程度。

4.2 压水情况分析

智能压水情况见表 4。由表 4 可知:①智能压水策略应用效果良好。第 2 排 4 个孔简易压水全部实现了智能化,单点法压水、五点法压水全部实现智能化。②智能策略能有效处理压水过程中的抬动,防止再次抬动。在压水过程中抬动现象比较频繁,试验孔 96 段压水中有 18 段出现抬动,抬动率为 19%。18 段抬动中,智能控制模式处理 17 段,人工控制模式处理 1 段。

表 4 智能压水情况

Tab. 4 Statistics of intelligent water pressure construction

压水类型	情况类型	智能控制(段数)	人工控制(段数)	小计
简易压水	正常情况	73	5	78
	抬动情况	17	1	18
单点法压水	正常情况	30	0	30
	抬动情况	0	0	0
五点法压水	正常情况	30	0	30
	抬动情况	0	0	0
合计		150	6	156

分析现场压水情况可知,无论是在正常情况,还是在出现抬动的情况,智能灌浆系统都能根据智能工艺策略成功完成整个压水过程。

4.3 灌浆情况分析

智能灌浆情况见表 5。由表 5 可知:①智能灌浆策略应用效果良好。第 2 排的 4 个孔,灌浆智能化率达 90%。②智能策略能较好地处理灌浆过程中的抬动情况。131 段灌浆中有 18 段出现抬动,抬动率为 14%。18 段抬动中,智能控制灌浆 9 段,人工控制灌浆 9 段。后期策略改进完善后,智能策略能较好地处理灌浆过程中的抬动。③劈裂智能策略有待进一步深化研究。试验中样本数量有限,131 段灌浆中,仅出现劈裂 3 次,策略效果有待进一步试验验证。

表 5 智能灌浆情况表

Tab. 5 Statistics of intelligent grouting

情况类型	智能控制(段数)	人工控制(段数)	小计
正常情况	93	12	105
抬动情况	9	9	18
劈裂情况	1	2	3
失水回浓情况	0	2	2
合计	103	28	131

现场灌浆曲线见图 4。由图 4 可看出,智能灌浆系统能根据智能工艺策略成功完成正常灌浆、抬动情况下的灌浆和劈裂情况下的灌浆,有效避免抬动或劈裂时降压不及时而导致的地层破坏。

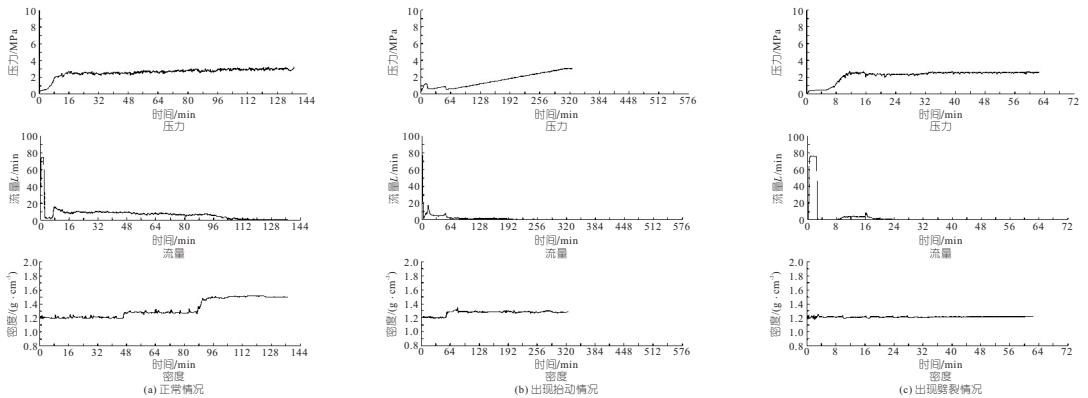


图 4 智能灌浆现场流量、压力、密度曲线

Fig. 4 Flow, pressure and density curve of grouting construction based on intelligent strategy

5 结论

依托雄安调蓄库,提出了复杂地质条件下智能灌浆工艺控制策略,并开展了实证性研究。试验表明,该策略适应实际施工需要,能处理压水和灌浆过程中的抬动和劈裂异常情况。智能灌浆系统在规范化施工、压力精准控制、预警快速降压等方面优势明显,有利于防止地层抬动或劈裂破坏、保障灌浆施工质量。

参考文献:

[1] 罗熠. 灌浆记录仪发展状况和趋势[J]. 中国水利, 2010(21):60-62,23.

[2] 徐蒙. 新型智能灌浆、压水检测系统的开发与研究[D]. 长沙:中南大学,2010.

[3] 樊启祥,黄灿新,蒋小春,等. 水电工程水泥灌浆智能控制方法与系统[J]. 水利学报,2019,50(2):165-174.

[4] 王瑞英,朱等民,郭炎椿. 智能灌浆技术在乌东德水电站帷幕灌浆中的应用[J]. 人民长江,2020,51(增刊 2):200-202,259.

动,墙后侧向土压力值与朗肯主动土压力计算值接近。这说明当面板不固定时,土工袋挡土墙由于自身的位移变形未被约束,因此可充分利用自身柔性的特点从而有效降低墙后土压力。

5 结论

固定面板和不固定面板的土工袋挡土墙在墙后土压力的作用下均表现为悬臂式变形模式,但由于固定面板约束了土工袋挡土墙底部的侧向变形,导致作用在固定面板下部的侧向土压力接近于静止土压力,而作用在不固定面板上的侧向土压力接近主动土压力,这说明不固定挡板的土工袋挡土墙能充分利用其自身柔性的特点。

参考文献:

[1] 刘斯宏,汪易森. 土工袋加固地基原理及其工程应用[J]. 岩土工程技术, 2007,21(5):221-225.

[2] 黄波,李博文,吴平,等. 土工袋袋内土体强度与剪胀特性研究[J]. 水电能源科学, 2021,39(11):158-162.
 [3] 樊科伟,刘斯宏,徐思远,等. 袋装淤泥质土挡墙现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2341-2348.
 [4] 陈奕柏,柯才桐,高洪波,等. 考虑变位影响的刚性挡墙非极限土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(5): 1060-1070.
 [5] 薛向华,刘斯宏,樊科伟,等. 土工袋柔性挡土墙模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014,12(3):81-84,142.
 [6] 刘斯宏,樊科伟,陈笑林,等. 土工袋层间摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016,38(10):1874-1880.
 [7] 刘斯宏,薛向华,樊科伟,等. 土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2267-2273.
 [8] 党发宁,张乐,王旭,等. 基于弹性理论的有限位移条件下挡土墙上土压力解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2094-2103.

Full Scale Experimental Study on Influence of Panels on Behavior of Soilbag-constructed Retaining Walls

LI Fan¹, LIN Guo-bing¹, WANG Ya-hua², FAN Ke-wei³

(1. Shenzhen Gongming Water Supply and Storage Engineering Management, Shenzhen 518107, China; 2. School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Setting a panel outside the soilbags-constructed retaining wall may affect the behavior of the wall. Therefore, a full-scale test of the soilbags-constructed retaining wall with fixed panels and with unfixed panels were conducted to explore the influence of the panel on the deformation mode and lateral earth pressure of the wall. The results show the walls with fixed and unfixed panels deformed laterally in a cantilever-like manner, but the lateral earth pressure acting in the fixed-panel wall is greater than that in the unfixed-panel wall. A calculation formula for calculating the earth pressure acting on the soilbags-constructed retaining wall under limited displacement was established based on the linear elastic constitution theory, and then it was used to analyze the relationship between the lateral earth pressures and lateral strain. It is found that distribution of the lateral earth pressure of the soilbags-constructed retaining wall with unfixed panel is close to the calculated active earth pressure as a result of the poor deformation constraint of the unfixed-panel, which indicates that the flexible characteristics of the soilbags-constructed retaining wall can be fully utilized by the wall with unfixed panel, so as to effectively reduce the earth pressure behind the wall.

Key words: soilbags-constructed retaining wall; panel; deformation mode; lateral earth pressure; full scale test

(上接第 132 页)

[5] 谭尧升,樊启祥,汪志林,等. 白鹤滩特高拱坝智能建造技术与应用实践[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021,61(7):694-704.
 [6] 字政明,朱宝凡,吴强,等. 乌弄龙水电站智能灌浆系统应用及探究[J]. 云南水力发电, 2021,37(5):62-66.

[7] 肖锋,宋崔蓉,水小宁. 杨房沟水电站智能灌浆控制系统的设计研究与应用[J]. 四川水力发电, 2020,39(6):16-20,64.
 [8] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范:SL 62-2014[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.

Research and Application of Intelligent Grouting Technology under Complex Geological Conditions

XIAO Bi¹, LI Shu-you², FU Xing-an¹, JIANG Xiao-chun³, LI Guo³

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. South to North Water Diversion Middle Route Industrial Development Co., Ltd., Beijing 100176, China; 3. Chengdu Spring Energy Technology Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Research and exploration on intelligent grouting technology has been conducted in some hydro-power stations in recent years. Intelligent grouting equipment has been invented and intelligent control strategies for conventional geological conditions have been developed. However, the existing technology lacks the intelligent control strategies for pressure sensitive and weak stratum, and is not suitable for grouting construction under complex geological conditions. Relying on the Xiong'an regulation and storage reservoir project and based on the empirical research method, this paper has carried out researches on new intelligent strategies for weak strata such as lift sensitive and split sensitive. The field test results show that the intelligent grouting technology meets the needs of field construction, in which the water pressure and grouting construction process can be intelligently completed, and the lifting and splitting situation can be handled. The research is conducive to ensuring the quality of grouting projects and improving the level of intelligent construction.

Key words: intelligent process control strategy; intelligent grouting; one-button grouting; intelligent construction; xiong'an regulation and storage reservoir project