

砂卵石层地下连续墙成槽护壁泥浆的研制

周昌军¹, 何 焯¹, 解程超², 王 胜^{*2}, 何 鑫², 唐庆东¹, 李守信¹

(1. 中国水利水电第七工程局成都水电建设有限公司, 四川 成都 611130;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:在砂卵石层进行地下连续墙施工时浆液漏失严重、槽壁垮塌频发、工程成本陡增,传统膨润土泥浆已很难满足工程要求。在理论分析的基础上进行试验研究,对天然粘土泥浆进行综合改性以研制新型护壁泥浆解决砂卵石层地连墙槽壁坍塌问题。通过优选试验确定基础改性剂CN-1以改善其悬浮稳定性问题,在此基础上进一步筛选得到提粘护胶剂(CG-14S)、协同封堵剂(DFD-2)对其综合性能指标进行改进,通过正交试验确定优化配方并进行性能与成本评价,同时分析了其改性过程与护壁机理,并进行了现场试验,最终研制出一种可应用于砂卵石层地连墙施工的改性粘土护壁泥浆,即15%天然粘土+0.2%CN-1+0.4%CG-14S+0.5%DFD-2。研究成果为解决复杂地层地连墙施工槽壁垮塌问题提供了新的选择。

关键词:砂卵石层;地下连续墙;成槽泥浆;改性粘土泥浆;护壁泥浆

中图分类号:TU473 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2023)02-0091-08

Development of trench side protection slurry for diaphragm walls in sandy gravel and boulder layers

ZHOU Changjun¹, HE Ye¹, XIE Chengchao², WANG Sheng^{*2}, HE Xin², TANG Qingdong¹, LI Shouxin¹

(1. Chengdu Hydroelectricity Construction Engineering Co., Ltd of Sinohydro Bureau No.7 Company,
Chengdu Shichun 611130, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu Shichun 610059, China)

Abstract: The traditional bentonite mud can hardly meet the engineering requirements because of serious slurry leakage, frequent trench side collapse, and highly increased construction cost. On the basis of theoretical analysis, experimental research was carried out to develop a new type of trench side protection mud by comprehensive modification of natural clay mud to solve the problem of trench side collapse in sand, gravel, and boulder layers. The basic modifier CN-1 was determined through the optimization test to improve its suspension stability. On this basis, the adhesive lifting agent (CG-14S) and the cooperative plugging agent (DFD-2) were further obtained through optimization to improve its comprehensive performance index. The optimized formula was determined by orthogonal test, and the performance and cost evaluation was carried out. Field tests were conducted, and a modified clay mud for trench side protection was finally developed. It is made up of 15% natural clay+0.2%CN-1+0.4%CG-14S+0.5%DFD-2, and can be used in the construction of the diaphragm wall in gravel and boulder layers. The research results provide an option for solving the problem of trench side collapse in the construction of the diaphragm wall in

收稿日期:2022-06-28; 修回日期:2022-10-20 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.013

基金项目:中国水利水电第七工程局有限公司科技项目“富水砂卵石层防渗墙垮塌机制与泥水平衡稳壁技术研究”(编号:2021-749-59-53)

第一作者:周昌军,男,汉族,1982年生,项目总工,工程师,土木工程专业,从事地下连续墙项目施工生产与管理工作,四川省成都市温江区融信智慧广场A座16楼,112012609@qq.com。

通信作者:王胜,男,土家族,1982年生,教授,地质工程专业,博士,从事钻探新工艺与新材料的科研与教学工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,yongyuandewangsheng@sina.com。

引用格式:周昌军,何焯,解程超,等.砂卵石层地下连续墙成槽护壁泥浆的研制[J].钻探工程,2023,50(2):91-98.

ZHOU Changjun, HE Ye, XIE Chengchao, et al. Development of trench side protection slurry for diaphragm walls in sandy gravel and boulder layers[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2):91-98.

complex strata.

Key words: sand gravel layer; diaphragm wall; trenching mud; modified clay mud; side protection mud

0 引言

随着我国城市化进程与基础设施建设的不断推进,深基坑工程已被广泛应用于各类工程施工中。地下连续墙因为其施工快捷、墙体刚度大、防渗性能好、质量可靠,已成为基坑工程中一种重要的工程手段^[1-3]。然而,我国地层复杂多样,在一些复杂地层进行地下连续墙施工时槽壁垮塌问题频发,施工难以顺利进行。防止槽壁垮塌、维持槽壁稳定是保证地下连续墙施工顺利进行的必要条件,探讨维持槽壁稳定的手段与方法已成为工程建设领域研究的热点与难点^[4-10]。采用泥浆护壁成槽由于其工艺简单、效果明显,被广泛应用于各类地下连续墙的成槽施工中,是地连墙施工中维持槽壁稳定的一种关键手段^[11-17]。因此,对成槽护壁泥浆开展优化配比研究,是解决地下连续墙乃至基坑工程槽壁稳定问题的有效突破口。

地下连续墙护壁泥浆的发展依托于钻井防塌泥浆的发展,成槽护壁泥浆经历了从采用清水自然造浆到膨润土造浆再到聚合物复合造浆的过程。相比而言,膨润土护壁泥浆由于其配制简单、经济适用,在成槽泥浆中的应用则最为广泛,研究者们因此对膨润土泥浆改性做了大量研究,也相应取得了很多成果。卢伟^[18]针对在“上软下硬”复合地层的地下连续墙施工情况,优化膨润土泥浆配比,提高了成槽护壁效果;胡新贵^[19]为提高传统成槽护壁泥浆在富水粉砂层的携砂护壁能力,优选处理剂来改性膨润土泥浆并在现场进行了成功应用;刘国山等^[20]结合实际工程施工条件,导出相应泥浆重度公式,总结出淤泥质地层成槽固壁泥浆的配合比例,顺利解决淤泥质地层的成槽问题;与此同时,研究者们也尝试将聚合物处理剂引入到成槽护壁泥浆体系研究中,通过聚合物复合造浆来解决某些复杂地层的槽壁垮塌问题。陈先智等^[21]依托昆明轨道交通4号火车北站工程,将聚丙烯酸钠引入成槽护壁泥浆体系中并优化配比,在富水圆砾层地连墙施工中取得了良好的成槽护壁效果;卞书军等^[22]将聚合物复合泥浆与传统膨润土泥浆进行施工对比,得出聚合物复合泥浆在旋挖钻孔桩中护壁作用效果更佳。

研究者们对成槽护壁泥浆的优化研制做了大量工作并取得了一些成果,但人们研究的主体仍更多关注于对传统膨润土泥浆进行配方优化或添加聚合物改性,主要作用对象为膨润土。上述手段的确能够解决许多地层地连墙施工槽壁坍塌的问题。但在某些如砂卵石层类的复杂地层,由于其地层稳定性差、开挖对地层影响大、地层孔隙明显、漏失通道突出,无论对传统膨润土泥浆进行优化配制还是添加聚合物改性往往同样会遭遇浆液漏失严重、原料成本激增的情况,甚至槽壁垮塌的问题依然频发。如此,即便原本经济适用的膨润土泥浆用量也会急剧增大,工程成本随之陡增。

有鉴于此,开展成槽护壁泥浆体系的系统性研究,研制出一种性能良好且更为经济适用的成槽护壁泥浆,能够较大地提升工程效益,具有更为广泛的应用价值。以砂卵石层地下连续墙施工为工程背景,在理论分析的基础上结合试验研究并考虑成本控制原则,对成槽护壁泥浆进行优化研制,提出一种适用于砂卵石层地下连续墙施工优化改性粘土泥浆配方。选取天然粘土造浆,首先通过单因素试验筛选确定基础改性剂以解决其分层严重问题,而后继续筛选确定提粘护胶剂、协同封堵剂,最后通过正交试验确定优化配方并进行了性能与成本评价,同时分析了其改性作用过程与护壁机理,并进行了现场试验。研究成果为成槽护壁泥浆的改性研究提供了新的思路,同时对类似工程泥浆的使用具有一定的参考价值。

1 试验材料、仪器与方法

1.1 试验材料与仪器

基础改性剂从CN-1、GN-1、硅酸钠($\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$)中筛选,购自上海国药试剂有限公司;提粘护胶剂从羟乙基纤维素(HEC)、聚丙烯酸钠(Na-PAM)、羧甲基纤维素钠(CMC-Na)、瓜尔胶(CG-14S)中筛选,购自深圳西陇化工有限公司;协同封堵剂从羟丙基淀粉(HPS)、改性淀粉(DFD-2)、腐殖酸钠(NaHm)中筛选,购自成都泉龙化工有限公司。主要选用ZLN-1A型苏式漏斗粘度计测试其

漏斗粘度;SD6型六联API滤失量测定仪测定其中压滤失量;YMS0.01-7.0型数显式液体密度计测定其密度;100 mL量筒表征其稳定性。

1.2 试验方法

首先通过单因素试验筛选基础改性剂并初步确定其最佳加量,主要关注指标为胶体率。其次在上述基础上通过单因素试验继续筛选提粘护胶剂、协同封堵剂,并初步确定其最佳加量。最后,确定因素及水平并利用正交试验优化配方,并对最优配方进行相应性能与成本评价。

2 试验结果与讨论

2.1 基础改性剂对泥浆悬浮稳定性的影响

选取成都地区天然粘土,去除大块砾石、植物根系后,利用烘干机烘干并粉碎成粉,再利用筛网过筛(50~300目)。称量150 g加入1000 mL纯水,利用搅拌机搅拌均匀后分别加入0.1%~0.5%的CN-1、GN-1、硅酸钠($\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$),继续搅拌均匀后取100 mL至100 mL量筒中,常温静置24 h后测定其胶体率,试验结果见图1。

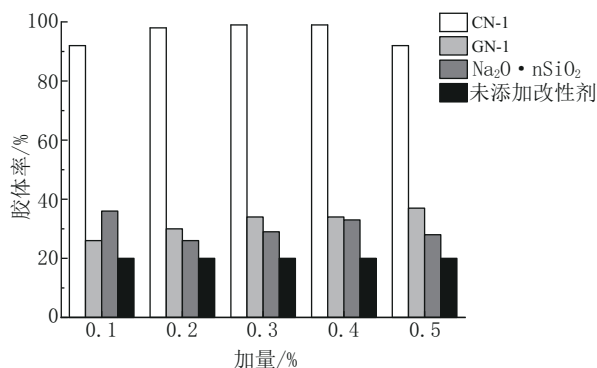


图1 基础改性剂对泥浆胶体率的影响

Fig.1 Influence of the base modifier on mud colloid rate

根据上述试验结果分析可得,除CN-1外,GN-1以及硅酸钠($\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$)均不能明显提升天然粘土泥浆的胶体率,CN-1对泥浆胶体率的提升最为明显,CN-1加入可使粘土表面负电荷增多,从而提升粘土的阳离子交换容量,使其水化分散能力得到提升。同时,CN-1提供的交换性阳离子使得晶层间的斥力大于晶层之间的静电引力,从而使粘土发生渗透膨胀,形成扩散双电层,粘土水化分散能力得到进一步加强。CN-1在加量为0.2%~0.4%的范

围中效果最佳,考虑到成本控制原则,初步确定CN-1加量为0.2%以进行后续试验。

2.2 提粘护胶剂对泥浆粘度的影响

在基础改性剂试验基础上确定基浆为:150 g天然粘土+1000 mL纯水+0.2%CN-1。在基浆中分别加入0.1%~0.5%羟乙基纤维素(HEC)、聚丙烯酸钠(Na-PAM)、羧甲基纤维素钠(CMC-Na)、瓜尔胶(CG-14S),利用搅拌机搅拌均匀后,静置24 h待其预水化完全,测定性能指标。由于天然粘土泥浆稳定性较差,提粘护胶剂的加入需要在保证提升基浆粘度的同时将其在保持一个较稳定的均匀胶体状态,因此,此次主要测定的性能指标为漏斗粘度与胶体率。试验结果如图2所示。

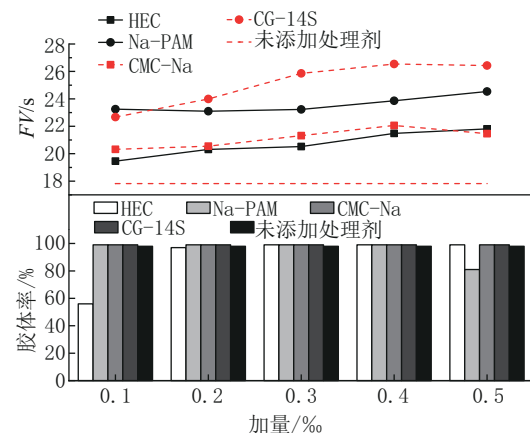


图2 提粘护胶剂对泥浆性能的影响

Fig.2 Influence of the lifting and protecting agent on mud properties

由试验结果分析可得,4种提粘护胶剂中,瓜尔胶(CG-14S)对泥浆粘度的提升最为明显,并且在所设置的加量范围中,其胶体状态均保持稳定,护胶效果良好。在瓜尔胶(CG-14S)加量为0.4%时,其提粘效果最佳,由此初步确定提粘护胶剂为瓜尔胶(CG-14S),加量为0.4%。

2.3 协同封堵剂对泥浆滤失量的影响

上述试验初步确定基础改性剂为CN-1,加量为0.2%;提粘护胶剂为瓜尔胶(CG-14S),加量为0.4%。以此为基础,分别加入0.1%~0.5%羟丙基淀粉(HPS)、改性淀粉(DFD-2)、腐殖酸钠(NaHm),搅拌均匀后预水化24 h测定其滤失量。相比地质钻探,地下连续墙施工开挖深度较浅,设置滤失压力为0.69 MPa,试验结果如图3所示。

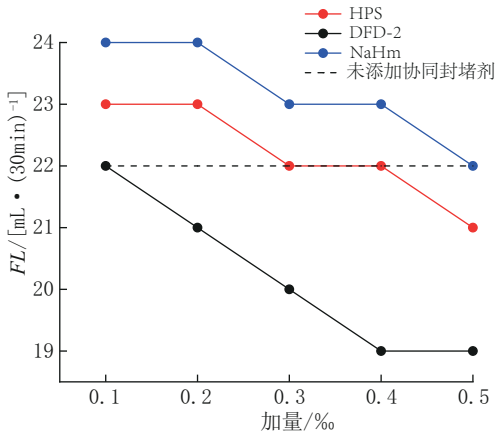


图3 协同封堵剂对滤失量的影响

Fig.3 Influence of the cooperative plugging agent on filtration loss

由图3分析可知,3种协同封堵剂在所设置的加量范围中,唯有改性淀粉(DFD-2)具有良好的降滤失作用,在天然粘土泥浆体系中,羟丙基淀粉(HPS)与腐殖酸钠(NaHm)其降滤失作用受到限制,此次试验中未能较好的体现。为进一步考察改性淀粉(DFD-2)的协同作用,对其漏斗粘度进行测定,试验结果如图4所示。

结合图3、图4分析可知,改性淀粉(DFD-2)与瓜尔胶(CG-14S)有较好的协同作用,在瓜尔胶(CG-14S)加量为0.4‰时,其协同作用最为明显,故由此初步确定协同封堵剂为改性淀粉(DFD-2),加量为0.4‰。

3 成槽护壁泥浆优化配方及性能评价

3.1 改性粘土泥浆配方研制

上述单因素试验初步确定基础改性剂为CN-1,加量为0.2%;提粘护胶剂瓜尔胶(CG-14S),加量

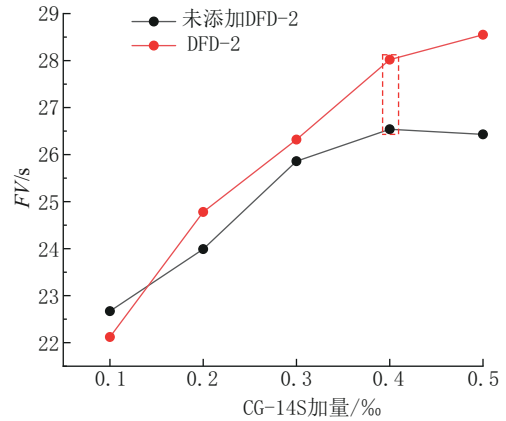


图4 DFD-2的协同作用

Fig.4 Cooperative effect of DFD-2

为0.4‰;协同封堵剂改性淀粉(DFD-2),加量为0.4‰。由此设计三因素三水平正交试验,其中水平设置为上述确定的最优加量左右各一个梯度,试验结果如表1所示。试验结果分析如图5所示。

由图5分析可得,对泥浆粘度影响程度从大至

表1 正交试验结果

Table 1 Orthogonal test results

组别	影响因素			FV/s	FL/[mL·(30 min)⁻¹]	胶体率/%
	CN-1/%	CG-14S/‰	DFD-2/‰			
1	0.1	0.3	0.3	20.07	23	92
2	0.1	0.4	0.4	23.27	21	96
3	0.1	0.5	0.5	23.12	21	92
4	0.2	0.3	0.4	24.10	19	99
5	0.2	0.4	0.5	27.58	18	99
6	0.2	0.5	0.3	25.32	22	99
7	0.3	0.3	0.5	21.62	18	93
8	0.3	0.4	0.3	24.36	23	92
9	0.3	0.5	0.4	23.54	20	91

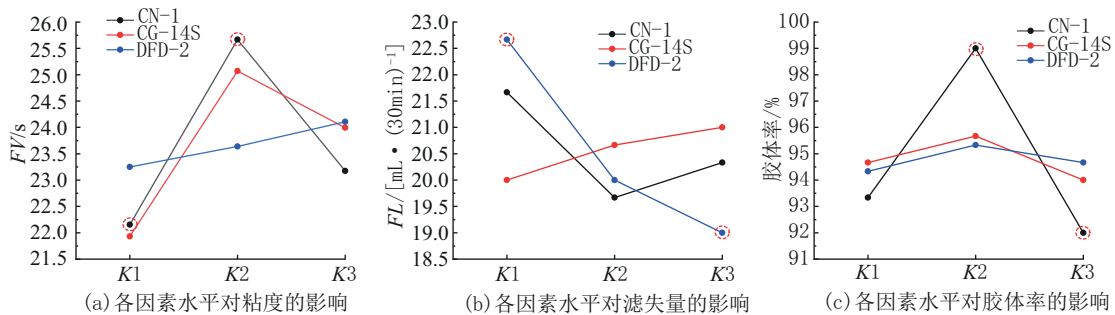


图5 各因素水平对泥浆性能指标的影响

Fig.5 Influence of each factor level on mud performance index

小分别为:基础改性剂、提粘护胶剂、协同封堵剂。其中,基础改性剂与提粘护胶剂对泥浆粘度的影响接近,基础改性剂略大于提粘护胶剂,这是由于天然粘土泥浆本身成胶情况差,成胶情况的好坏很大程度上影响提粘作用,故因素分析中表现出基础改性剂对粘度的影响甚至略大于提粘护胶剂。

对泥浆滤失的影响程度从大至小为:协同封堵剂、基础改性剂、提粘护胶剂。协同封堵剂在泥浆体系中直接发生反应,使泥饼更为致密。基础改性剂主要起到成胶作用并提供反应环境,提粘护胶剂主要起到护胶作用。

对泥浆胶体率的影响程度从大至小为:基础改性剂、提粘护胶剂、协同封堵剂。基础改进剂发挥成胶作用,效果最为直接且显著。提粘护胶剂起护胶作用,效果相对次要,协同封堵剂在此主要发挥协同提粘作用,对胶体率的影响最不明显。

综上所述,得到此次所研制的地连墙施工成槽护壁泥浆优化配方为:15%粘土+0.2%CN-1+0.4%瓜尔胶(CG-14S)+0.5%改性淀粉(DFD-2)。

3.2 优化配方性能评价

对优化配方泥浆基本性能指标进行测定,将其与类似工程砂卵石层地下连续墙施工的成槽护壁泥浆(改性膨润土泥浆)^[23]性能指标进行对比,结果见表2。对比工程中所用的改性膨润土泥浆主要配方为:12.43%钠基膨润土+3.46%玄武岩纤维+4.76%CMC。调研2种配方原材料市场价格,计算配制1 m³泥浆所需的成本,结果如表3所示。结合表2、表3可以得出,此次所研制的改性粘土泥浆性能指标满足砂卵石地层地连墙施工成槽护壁要求,同时其配制成本远低于改性膨润土泥浆,故其可以较好地提高工程效益,降低工程成本。

表2 优化配方性能指标对比评价

Table 2 Comparison and evaluation of optimized formula performance indexes

泥浆类型	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	FV/s	FL/[mL·(30min) ⁻¹]	pH值	胶体率/%	含砂率/%	泥皮厚度/mm
改性膨润土泥浆	1.12	28		10	>98	<4	2.21
改性粘土泥浆	1.1	28.52	17	9	99	<4	2

表3 优化配方泥浆成本评价

Table 3 Cost evaluation of optimized formula mud

原料	吨价/元	用量/%	总价/元	成本/元	
				改性膨润土泥浆	改性粘土泥浆
钠基膨润土	500~700	12.43	61.25~87.01		
玄武岩纤维	5000~8000	0.346	17.3~27.68		
CMC	9000~12000	4.76	42.84~57.12		
CN-1	1500~2800	0.2	3~5.6	121.39~171.81	26.1~55.6
粘土	100~200	15	15~30		
CG-14S	14000~30000	0.04	5.6~12		
DFD-2	5000~16000	0.05	2.5~8		

4 机理分析及现场应用

4.1 机理分析

基础改性剂的加入改变了溶液的酸碱性使粘土颗粒表面的羟基解离得更加充分,从而提升了粘土颗粒的阳离子交换容量。再者,粘土颗粒表面所带负电荷增加,其晶层之间斥力增大至足以破坏其晶层之间的静电引力,粘土颗粒发生渗透膨胀,形成扩散双电层,单元晶层分离,粘土水化分散能力增强。

其次,基础改性剂溶于天然粘土泥浆时可以改善粘土颗粒的湿润性和润滑性,使粘土颗粒在水溶液中的细颗粒增多,粘土颗粒的水化分散能力得到进一步提升,至此,天然粘土泥浆初步成胶。

提粘护胶剂作为一种多糖类的高分子聚合物,其溶于水后其分子链由螺旋状伸展为棒状,泥浆水相粘度得以提高。此外,其分子链可以同时吸附多个粘土颗粒,而一个粘土颗粒又可以吸附多个高分

子,这样的桥联作用形成了三维网架结构,粘土颗粒被络合其中,胶体稳定性得到进一步增强,泥浆的结构粘度则进一步提升。

协同封堵剂本身具有降滤失作用,其同样可以通过吸附多个粘土颗粒形成三维网架结构,阻止粘土颗粒絮凝变大,保持较多的细颗粒从而减低滤失量。与此同时,其作为高分子又可以与提粘护胶剂中相似的链结构相互吸引、补充、缠绕,从而使三维网架结构得到进一步丰富和完善,使得泥浆粘度进一步提升。此外,协同封堵剂遇水会发生膨胀以形成大分子无规线团,这种无规线团除了对孔隙进行物理堵塞外,同时可作为三维网架的填充物以进一步增加粘度,更好地发挥了提粘护胶剂与协同封堵

剂的协同作用。

改性粘土泥浆具有适当的密度,当其进入槽内后,可以提供相应的液柱压力以平衡地层压力。同时,在冲击成槽过程中,泥浆中的自由水进入槽壁岩层内部,泥浆中的固相颗粒便逐渐附着在槽壁上形成一层薄韧且致密的泥饼,阻止或者减慢了泥浆继续侵入地层。部分渗入槽壁裂缝的泥浆还能胶结部分松散颗粒,以减缓地层内松散细碎颗粒的运移,从而降低槽壁失稳的可能性。此外,改性粘土泥浆成胶状态稳定,能够悬浮一些在冲击过程中产生的部分细小渣砾,使泥浆在冲击过程中仍能持续稳定地发挥护壁作用。其改性过程及护壁机理如图6所示。

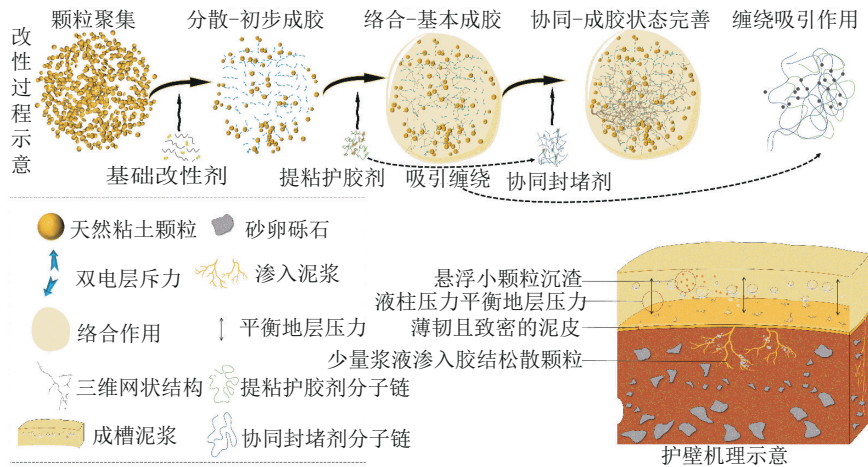


图6 天然粘土泥浆体系改性作用过程及护壁机理示意

Fig.6 Modification process and protection mechanism of the natural clay mud system

4.2 现场试验情况

对室内试验所研制的最优配方进行了现场试验,试验地位于乐山市金口河区枕头坝二级水电站基础工程施工现场,该工程为典型的砂卵砾石层,其结构松散,颗粒胶结差,渗流通道明显;漏浆、塌孔问题尤其突出,成槽难度急剧加大。配浆使用粘土为工地开挖产生的天然粘土,各处理剂由实验室提供。由于现场试验条件有限,使用泥浆测试三件套对配方进行性能指标测定,现场测试如图7所示。

工程现场使用的护壁泥浆为膨润土泥浆,根据前期施工经验显示,对膨润土泥浆进行调整,使其密度达到 1.10 g/cm^3 左右,漏斗粘度达到 30 s 左右时能够满足富水砂卵砾石层成槽护壁的需要。故以此为参考,对现场配制的改性粘土护壁泥浆进行配比

优化。

由于工地开挖产生的天然粘土与室内试验所用粘土有一定区别,并且无法进行粉碎干燥后使用。因此,首先考察处理剂是否能对该种粘土产生作用。为此,为节约考察成本,先按照粘土加量为 7% 配制基浆,测定结果为其漏斗粘度 17 s ,密度 1.04 g/cm^3 ,且泥浆分层严重。加入处理剂后初步配方为:天然粘土 7% 、基础改性剂 0.1% 、提粘护胶剂 0.02% 、协同封堵剂 0.02% 。测定结果为漏斗粘度 21 s 、密度 1.04 g/cm^3 。泥浆分层情况得到改善,整体基本成胶,说明各处理剂对工地开挖产生的天然粘土产生作用。

为进一步提升泥浆粘度及密度,采用室内试验最优配方,即: 15% 天然粘土 + 0.2% 基础改性剂



图7 现场测试

Fig.7 Field test

+0.04% 提粘护胶剂+0.05% 协同封堵剂。各组分称量完成后加入高速搅拌机搅拌5 min,待高速搅拌机完全静止后进行测定。测定结果为:漏斗粘度29 s、密度1.08 g/cm³。测定结果显示,漏斗粘度与密度有较大提升。此外,泥浆胶体状态相比初步配方更为稳定均匀。为进一步考察泥浆稳定状态。将其预水化24 h后再次测定性能指标,测定结果为:漏斗粘度32 s、密度1.09 g/cm³。此外,预水化24 h的泥浆其胶体状态更为均匀稳定,未出现明显析水现象。性能指标测试结果显示,此次所配制的泥浆能够满足富水砂卵石层地下连续墙成槽施工的需求。

5 结论

以天然粘土配置成槽护壁泥浆,通过单因素筛选试验以及正交试验得到改性粘土泥浆优化配方,并对其进行了性能与成本评价,得出了以下结论:

(1)通过筛选试验确定了基础改性剂、提粘护胶剂、协同封堵剂选取及相应加量,通过正交试验得到优化配方并分析了各因素对其主要性能指标的影响程度大小,探究了粘土改性作用过程及其护壁机理。

(2)参考类似工程实例,对研制的优化配方即:15% 粘土+0.2% CN-1+0.4% 瓜尔胶(CG-14S)+0.5% 改性淀粉(DFD-2)进行了性能评价与现场试验测试,结果显示其能够满足砂卵石层地连墙成槽施工的需要。

(3)通过对原材料市场价格的调研,对此次研制的成槽护壁泥浆进行的成本对比评价,其成本低廉,能够很好地提升工程效益,降低原材料成本。

参考文献(References):

[1] 邵晨晨. 复杂地质条件和敏感环境中基坑设计实践及关键技术

[J]. 钻探工程, 2021, 48(6): 102-108.

SHAO Chenchen. Design practice and key technology for the foundation pit in complex geology and sensitive environments [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6): 102-108.

[2] 肖冬顺, 马明, 项洋. 水利水电钻探技术进展及发展趋势[J]. 钻探工程, 2021, 48(1): 103-111.

XIAO Dongshun, MA Ming, XIANG Yang. Progress and development trend of water conservancy and hydropower drilling technology [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 103-111.

[3] 宣庐峻, 周杰鑫. 格型地连墙在超深船坞坞墙结构中的应用[J]. 水运工程, 2022(3): 177-184.

XUAN Lujun, ZHOU Jiexin. Application of lattice diaphragm wall in ultra-deep dock wall structure [J]. Port & Waterway Engineering, 2022(3): 177-184.

[4] 许有俊, 李泽升, 李文博. 深基坑多道内支撑式地连墙嵌固比分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(9): 779-786.

XU Youjun, LI Zesheng, LI Wenbo. Analysis of the insertion ratio of multichannel brace-type underground diaphragm wall in deep foundation pit [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(9): 779-786.

[5] 徐永刚, 魏子龙, 周冠南, 等. 地下连续墙成槽施工参数对槽壁稳定的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 3464-3470.

XU Yonggang, WEI Zilong, ZHOU Guannan, et al. Analysis of stability of slurry trench sides of diaphragm wall based on construction parameters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3464-3470.

[6] 马章历, 杨东河, 王国伟, 等. 地下连续墙用方形锤头的设计及应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 98-103.

MA Zhangli, YANG Donghe, WANG Guowei, et al. Design and application of the square diaphragm wall chisel [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 98-103.

[7] 夏元友, 裴尧尧, 王智德, 等. 地下连续墙泥浆槽壁稳定性评价的水平条分法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1128-1133.

XIA Yuanyou, PEI Yaoyao, WANG Zhide, et al. Horizontal slice method for stability of slurry trench [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1128-1133.

- [8] 杨武厂. 天津地区超深地下连续墙成槽关键技术[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 291-295, 301.
YANG Wuchang. Key technologies of diaphragm wall trenching construction in Tianjin area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 291-295, 301.
- [9] 杜志云, 冯庆元. 复杂地质条件下超深地下连续墙槽壁稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 856-863.
DU Zhiyun, FENG Qingyuan. Extra-deep diaphragm wall trench stabilities analysis under multiply geological ground condition[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 856-863.
- [10] 黄茂松, 王鸿宇, 谭廷震, 等. 地下连续墙成槽整体稳定性的工程评价方法[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 795-803.
HUANG Maosong, WANG Hongyu, TAN Tingzhen, et al. Engineering evaluation method for overall stability of slurry trenches [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 795-803.
- [11] 祝强, 沈伟梁. 深层高承压水粉砂地层超深地下连续墙成槽坍塌机理分析[J]. 施工技术, 2021, 50(7): 49-53.
ZHU Qiang, SHEN Weiliang. Mechanism analysis of trench collapse of ultra-deep diaphragm wall in deep and high-pressure water silt stratum[J]. Construction Technology, 2021, 50(7): 49-53.
- [12] 欧明喜, 戴志峰, 陈颖辉, 等. 地下连续墙粘性土夹砂层槽壁稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(4): 537-542.
OU Mingxi, DAI Zhifeng, CHEN Yinghui, et al. Trench stability analysis of diaphragm wall in cohesive soil sand-wiched sand[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 537-542.
- [13] 乔亚飞, 唐洁, 顾贇, 等. 超深地连墙槽壁侧压力演变模式及其施工扰动分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1083-1092, 1102.
QIAO Yafei, TANG Jie, GU Yun, et al. Evolution mode of lateral pressure on the trench wall and disturbance analysis during construction of super-deep diaphragm wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1083-1092, 1102.
- [14] 丁勇春, 李光辉, 程泽坤, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁稳定机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2704-2709.
DING Yongchun, LI Guanghui, CHENG Zekun, et al. Analysis of trench face stability of diaphragm wall panel during slurry trenching [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2704-2709.
- [15] 何福军, 郭志明, 丁贵松. 北京地铁京顺路车站地下连续墙施工技术措施[J]. 建筑技术, 2017, 48(6): 623-625.
HE Fujun, GUO Zhiming, DING Guisong. Diaphragm wall construction techniques and measures in Beijing subway Jingshunlu station project [J]. Architecture Technology, 2017, 48(6): 623-625.
- [16] 袁浩峦, 李云涛. 海域围堰上软下硬地层中地下连续墙施工技术研究与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(S2): 254-259.
YUAN Haoluan, LI Yuntao. Study and application of construction technology of underground diaphragm wall to upper-soft lower-hard strata of sea cofferdam [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S2): 254-259.
- [17] 赵民, 乌效鸣, 吴迪, 等. 超深地下连续墙护壁泥浆优化[J]. 施工技术, 2016, 45(19): 20-22, 26.
ZHAO Min, WU Xiaoming, WU Di, et al. Cement slurry optimization of ultra-deep diaphragm wall [J]. Construction Technology, 2016, 45(19): 20-22, 26.
- [18] 卢伟. “上软下硬”复合地层地连墙快速成槽施工关键技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 174-180.
LU Wei. Study on key construction techniques of diaphragm wall in upper-soft lower-hard strata [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 174-180.
- [19] 胡新贵. 富水粉细砂地层中护壁泥浆材料配比的优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12758-12764.
HU Xingui. Optimization of slurry material for wall protection in silty fine sand with generous water [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12758-12764.
- [20] 刘国山, 朱连臣, 汪正斌, 等. 搅拌桩固壁技术在淤泥质地层地下连续墙施工中的应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 111-115.
LIU Guoshan, ZHU Lianchen, WANG Zhengbin, et al. Application of mixing pile reinforcing slot wall technology in construction of underground diaphragm wall in muddy stratum [J]. Railway Engineering, 2020, 60(10): 111-115.
- [21] 陈先智, 徐代明, 徐赞. 聚合物泥浆在超深地下连续墙施工中的应用[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(6): 86-91.
CHEN Xianzhi, XU Daiming, XU Zan. Application of polymer slurry in construction of ultra-deep underground diaphragm wall [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(6): 86-91.
- [22] 卞书军, 李明, 阳德伟. 化学聚合物泥浆与膨胀土矿物泥浆在旋挖钻孔桩施工中的应用对比[J]. 隧道建设, 2015(S1): 65-68.
BIAN Shujun, LI Ming, YANG Dewei. Application of chemical polymer slurry and bentonite slurry in construction of rotary drilling bored piles [J]. Tunnel Construction, 2015 (S1): 65-68.
- [23] 许涛, 邓利平, 冉华, 等. 一种用于地下连续墙施工的泥浆及其制备方法: CN106866056A [P]. 2017.
XU Tao, DENG Liping, RAN Hua, et al. The invention discloses mud used for underground continuous wall construction and a preparation method thereof: CN106866056A [P]. 2017.

(编辑 李艺)