

“635”水利枢纽大坝心墙防渗土料分散性 鉴定及改性试验研究*

Dispersion appraisal and modification analyses of the impervious soil materials
for the core wall of the dam of “635” water control project

邓铭江¹, 周小兵¹, 万金平¹, 罗伟林¹, 董安建²

(1. 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100011)

摘要: 通过大量试验分析, 鉴定“635”大坝心墙防渗土料分别为非分散性土和过渡性土, 并针对其存在的潜在分散性进行了多方案的改性试验研究, 为认识和解决土料分散性工程问题提供了全面、可靠的科学依据。

关键词: 心墙防渗土料; 分散性; 鉴定; 改性试验

中图分类号: TU 442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2000)06-0673-05

作者简介: 邓铭江, 男, 1960年生, 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局总工程师, 教授级高工。

DENG Ming-jiang¹, ZHOU Xiao-bing¹, WAN Jin-ping¹, LUO Wei-lin¹, DONG An-jian²

(1. Xinjiang Construction & Management Bureau of Ertix River Basin Development Project, Urumqi 830000, China; 2. General Institute of the Ministry of Water Resources for Planning & Design of Water Resources and Hydropower, Beijing 100011, China)

Abstract: This paper presents the results of a great deal of tests, which show that the impervious soil materials for the core wall of the dam of “635” water control project are either non-dispersive soil or transitional soil. The paper also includes analytical results of the potential dispersive property of the soil materials of the dam through multiple optional modification tests, these analytical results provide comprehensive and reliable references for use of dispersive soil materials in construction of water control project.

Key words: impervious soil materials for the core wall; dispersive property; appraisal; modification tests

1 前言*

“635”水利枢纽位于新疆北部额尔齐斯河中游, 水库最大坝高 70.6 m, 为粘土心墙砂砾石坝。施工中选用的 I 和 VI 粘土料场, 距坝址下游左侧 4~9 km。料场土料均系第三系泥岩、砂质泥岩、砂岩风化后, 经雨水和雪水搬运沉积于洼地之内的粘性土。在料场调查阶段, 通过初步试验发现, 两个料场土料的粘粒含量普遍偏高, 为 50% 左右, 粘土矿物成分中蒙脱石和高岭石的含量较高, 全土中蒙脱石所占比例为 9.6%~10.4%, 高岭石为 4.5%~7.8%, 而且蒙脱石主要以钠蒙脱石为主, 这些指标都呈现出分散性土的物理化学特征。因此, 在勘测设计阶段和心墙防渗土料的制备、填筑过程中, 对土料的分散性问题以及改性方案进行了全面深入的分析研究和多次的复核试验, 为料场的选择、大坝心墙体加强性防护处理设计方案的拟定和施工组织设计等提供了科学决策依据。

2 土料的基本物理力学性质

土料颗粒级配比较均匀, 不均匀系数 7.08~8.05, 曲率系数 0.73~0.77, 而且主要由粉粒和粘粒组成。级配曲线见图 1, 主要工程性质见表 1。小于 0.05 mm

粒径的颗粒占 76.4%~96.7%, 其中粘粒含量占 43%~59%。最优含水率 16.6%~25.5%, 最大干密度 1.50~1.78 g/cm³, 变化范围均较大。

土料粘粒含量高, 胀缩性和压缩性较大。I 料场土料: 液限含水率 38.1%, 塑性指数 14.3, 粘粒含量 50.8%, 自由膨胀率为 34.8%, 属于中等胀缩性土; 压缩系数 0.11~0.34, 属于中等压缩性土。VI 料场土料: 液限含水率 43.2%, 塑性指数 17.4, 粘粒含量 49.0%, 自由膨胀率为 58.8%, 属高胀缩性土; 土料浸水后变形较大, 在垂直压力为 0.8 MPa 时, 单位压缩量为 100 mm/m, 压缩系数 0.35~0.73, 有近 20% 土料压缩系数大于 0.5, 属于高压缩性土。

土料含水率对抗剪强度的影响较大。 c_{cu}' 值为 10~37 kPa, φ_{cu}' 为 16°~25°。内摩擦角随含水率逐渐增大而连续降低, 接近饱和状态后则变化趋缓, 约为 12°。

3 土料的化学性质及粘土矿物成分

3.1 化学性质

I 料场和 VI 料场土料的化学性质: pH 值在 7.7~

* 收稿日期: 2000-04-06

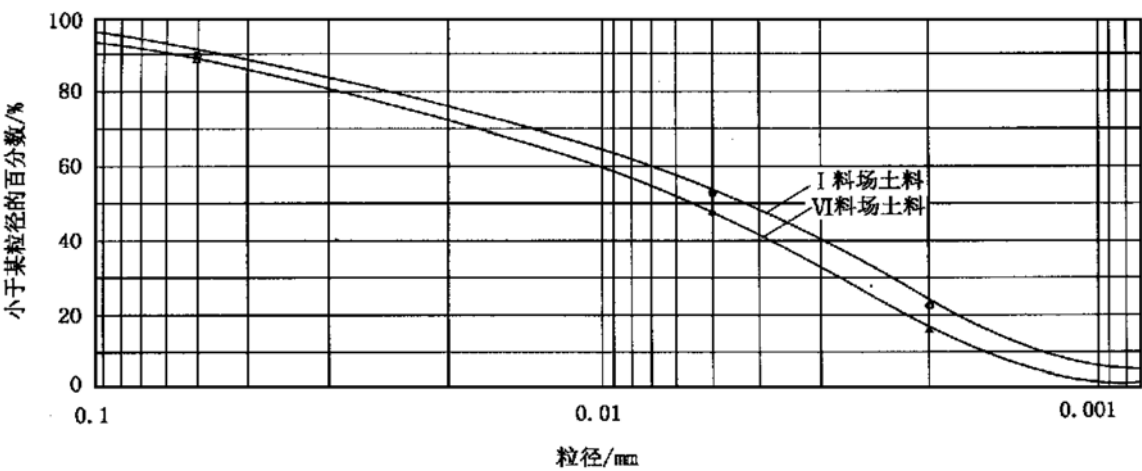


图 1 I、VI料场土料平均级配曲线

Fig. 1 Grain size curves of the soil materials in yards I and VI

表 1 I、VI料场土料的主要工程性质

料场 编号	颗粒组成/ %				G_s	w_L / %	w_P / %	I_P	w_{OP} / %	V_{dmax} / (g·cm ⁻³)	pH
	> 0.05 mm	0.05~ 0.005 mm	0.005~ 0.002 mm	< 0.002 mm							
I	9.0	40.1	26.4	24.4	2.75	38.1	23.8	14.3	20.78	1.66	7.9
VI	11.2	39.8	32.2	16.8	2.74	43.2	25.8	17.4	22.99	1.59	7.7

表 2 土料和成土母岩中粘土矿物成分含量对比

料场 编号		胶粒(< 0.002 mm) 中粘土矿物含量/ %					胶粒占全土 百分数/ %	全土中粘土矿物成分含量/ %				
		伊利石	高岭石	蒙脱石	绿泥石	石英		伊利石	高岭石	蒙脱石	绿泥石	石英
I	成土母岩	5.0	15.0	66.0	10.0	4.0	9.4	0.5	1.4	6.2	0.9	0.4
	土料	17.5	31.0	38.5	6.3	6.5	25.0	4.4	7.8	9.6	1.6	1.6
VI	成土母岩	2.5	42.5	42.0	5.0	8.0	20.6	0.52	8.8	8.7	1.0	1.6
	土料	2.5	25.5	59.5	5.0	7.5	17.5	0.4	4.5	10.4	0.9	1.3

7.9 之间,呈微碱性;有机质含量不大,在 0.15%~0.20% 之间;中溶盐石膏($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)含量低,在 0.033%~0.140% 之间;难溶盐碳酸钙(CaCO_3)含量与一般黄土中含量接近,在 1.38%~3.09% 之间;易溶盐含量偏低,在 0.32%~0.72% 之间;重碳酸根含量不大,在 0.015%~0.033% 之间。化学性质表明尚未发现对土的工程性质有不良影响的其它化学成分。

3.2 粘土矿物成分

土料全土中粘土矿物成分含量:蒙脱石占 9.6%~10.4%,高岭石占 4.5%~7.8%,伊利石占 0.4%~4.4%,绿泥石、石英等其它矿物成分含量均较小。土料中蒙脱石和高岭石含量较高,而且蒙脱石主要以钠蒙脱石为主(见表 2)。

4 分散性土的分散机理及试验鉴定

4.1 分散性土的分散机理^[1]

土在水中分散的实质是土粒间的连结在水的作用下破坏的过程,也是土粒间斥力超过吸引力,使得相互

排斥作用占优势的结果。由于蒙脱石粘土矿物晶格系由 SiO_2 和 Al_2O_3 晶片组成 2:1 三层定向排列结构,晶格间以氧基相连接,因而亲水性极强,层间结合力极弱,晶格间又有很大的活动性,水分子可以自由进入层间。土粒遇水后,尤其是半径小、水化力强的 Na^+ 进入层间,使土粒表面双电层厚度急剧增大,粒间排斥力超过吸引力而使土粒彼此脱离呈高度分散悬浮状态。用分散性土填筑坝体,抗冲蚀能力很低,沿渗流出口土颗粒首先被带走,逐渐形成渗流通道,危及坝体安全,这就是分散性土导致土坝失事的原因。

4.2 土料分散性的试验鉴定

粘土分散性的室内鉴定方法,可大致分为物理性试验和化学性试验两类^[2]。物理性鉴定试验包括:碎块试验、针孔试验和双比重计试验(SCS)三种;化学性鉴定试验包括:原土中交换性钠百分比(ESP)试验和孔隙水阳离子交换总量(TDS)试验两种。至于孔隙水交换性钠离子百分比(PS)和钠吸附比(SAR),均可通过 TDS 试验成果换算得到,即:

表 3 土料分散性试验成果汇总

Table 3 Analytical results of dispersive property tests of the soil materials

料场 编号	孔隙水性质							钠百分比 ESP / %	针孔 试验	碎块 试验	双比重 计试验 SCS/ %	综合 评价
	可交换阳离子浓度 / (10 ⁻³ mol•L ⁻¹)				阳离子交 换总量 TDS / (10 ⁻³ mol•L ⁻¹)	钠吸 附比 SAR	钠百分比 PS / %					
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺								
I	0.02	4.46	1.27	2.12	7.87	14.3	54.0	6.0	ND ₃	II	46.5	过渡性土
VI	0.04	4.23	3.74	3.10	11.11	9.1	29.8	5.91	ND ₂	I	49.3	非分散性土

注: 各种试验鉴定土料分散程度的界限指标: ①碎块试验: I 非分散土; II 过渡性土; III 分散性土; IV 高分散土。②针孔试验: D₁ 高分散性土; D₂ 分散性土; ND₄ ND₃ 过渡性土; ND₂ 非分散性土; ND₁ 高抗冲蚀土。③双比重计试验: 分散度 < 30% 非分散性土; 分散度 30% ~ 50% 过渡性土; 分散度 > 50% 分散性土。④孔隙水可溶盐试验: 从 TDS~ PS~ SAR 关系图上判断, A 区分散性土; B 区非分散土; C 区过渡性土。⑤交换性阳离子试验(即原土中交换性钠百分比): ESP= 7~ 10 中等分散性; ESP ≥15 高分散性

$$\text{PS} = \frac{\text{Na}^{+}}{\text{TDS}} \times 100\%$$

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^{+}}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}}$$

根据表 3 所列的五项分散性试验方法的检测成果分析, I 料场土样的各项试验指标均符合过渡性土的界定指标范围, 因此, 该土料被综合鉴定为过渡性土。V料场土样除 SCS 试验指标为 49.3% 接近分散性土指标外, 其余指标均符合非分散性土的界定指标范围。这主要是由于 VI料场土料中的 Ca^{2+} 含量是 I 号料场土料的 3 倍, 从而对其分散性有非常显著的抑制作用, 因此, VI料场土料被综合鉴定为非分散性土。

4.3 土料分散性鉴定补充试验

由于分散性土在渗透破坏和某些力学性质(如抗剪强度随含水率变化的规律等)与一般性粘性土有很大的不同, 为了从土料的工程性质方面与典型分散性土进行对照, 对 I 和 V料场土料进行不同含水率情况下的固结不排水(CU)抗剪强度试验和渗透变形试验。

(1) 土料不同含水率抗剪强度试验

分散性土的抗剪强度随土中水分的变化有特殊的变化规律, 表现为在某一含水率之前(相当于饱和度 70%左右), 随含水率的增加粘聚力 c_{CU} 有大幅度降低, 而内摩擦角 φ_{CU} 的变化较小, 超过这个含水率, c_{CU} 的变化不大, 而 φ_{CU} 则较大幅度降低^[3]。

从图 2、图 3 中可看出: I 料场 10 号试样和 V料场 12 号试样含水率在 15% ~ 19% 范围内, c_{CU} 最大, 低于或高于这个含水率范围 c_{CU} 都降低, φ_{CU} 随着含水率的增加连续降低。而 I 料场 11 号试样则具有一定的分散性土的特征。

(2) 土料渗透变形试验

I 和 V料场土料渗透变形试验成果见表 4, 土的渗透破坏临界比降为 37~ 65, 比一般粘性土的抗渗临界比降(> 100) 低, 试验过程中的破坏现象与分散性土冲蚀管涌不同, 比较接近于流土, 仍具有一定的抗渗能

力, 比分散性土的抗渗强度大。说明该种土料在渗流作用下的破坏情况及破坏时的渗透比降介于一般性粘土和分散性土之间, 属于过渡性土。

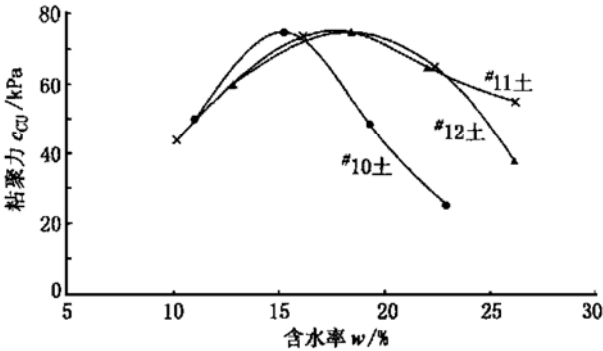


图 2 土料含水率对粘聚力的影响

Fig. 2 Influence of water content in the soil material on the cohesion

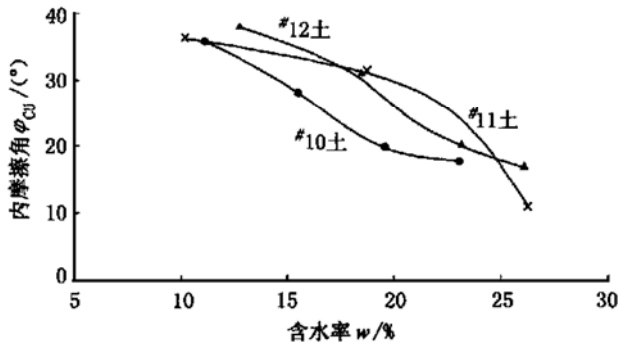


图 3 土料含水率对内摩擦角的影响

Fig. 3 Influence of water content in the soil material on the angle of internal friction

表 4 心墙防渗土料渗透变形试验成果

Table 4 Results of seepage deformation tests of the impervious core soil

料场 编号	土样 编号	初始状态 $w / \%$	初始状态 $\gamma_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	渗透破坏临 界比降 J_r	备 注
I	10	18.4	1.65	37	某典型分散性 土的 J_r 值在 1.76~ 6.74 间
	11	22.8	1.55	65	
VI	12	23.8	1.65	51	

表 5 I 号料场心墙土料与其它工程土料分散性鉴定对比

Table 5 Dispersity appraisal and comparison of the core wall soil materials in yard I and other project sites

试验指标	“635”工程 I 料场土料	黑龙江南部 引嫩工程 17 号坝	大庆地区	察尔森水库	索马里某 经援工程
土样形成条件	第三系泥岩,砂质泥 岩风化由雨雪水搬 运沉积于洼地	松嫩平原冲积形成			
现场特征	淋蚀、冲蚀 现象不明显	坝堤淋蚀冲蚀现象严重 表层土呈鸡爪状		有立陡的冲沟	
粘粒含量/ %	50.0	45.0		39	48
蒙脱石含量/ %	10	8.5			
Na ⁺ 含量/(10 ⁻³ mol·L ⁻¹)	4.46	1.78	很少		
Ca ²⁺ 含量/(10 ⁻³ mol·L ⁻¹)	1.29	0.06			
塑限/ %	23.8	20	19.8	31.6	
塑性指数	14.3	11	22.6	23.6	
土的分类	粘土	粉质粘土	粉质粘土	粘土	粘土
针孔试验	ND ₃	D ₁	D ₁	ND ₂	D ₁
碎块试验	II	III~ IV	III~ IV		III
孔隙水 TDS/(10 ⁻³ mol·L ⁻¹)	7.87	1.71			
可溶盐 PS/ %	56.4	93.8	90		76.1
试验 SAR	16.2	37.2			28.17
ESP/ %	6	38			
SCS/ %	46.5	78	80	89	64.6
综合评价	过渡性土	分散性土	分散性土	非分散性土	分散性土

4.4 工程类比分析

表 5 给出了 I 料场和几个典型工程土料分散性指标的对比资料^[4], 由此可知:

(1) 土料中 Ca²⁺ 的含量决定着 TDS 和 ESP 的数值, 它也是抑制土料分散性强弱的关键性指标, 当其含量愈低, 土的分散性表现的愈强烈, 从 I 料场与黑龙江引嫩工程土料鉴定成果对比中就能说明这一点。

(2) 结合针孔试验、碎块试验和双比重计试验成果, 又考虑到 TDS 和 ESP 的量化指标, 将 I 料场土料综合评定为过渡性土是恰当的。

5 土料分散性改性试验研究

尽管 I 料场和 V 料场土料被综合鉴定为过渡性和非分散性土料, 但其部分指标仍接近于分散性土, 为慎重起见, 从工程安全角度出发, 研究对土料分散性的改性, 防止有害事故的发生是必要的。结合“635”工程特点, 对 I 料场土料开展了三方面的改性试验研究^[5]。

5.1 额尔齐斯河水对土料分散性的影响

土料分散性的危害产生应该具备以下两个条件: 一是土料本身的物理化学特性, 即土料自身具有分散性; 二是环境水的影响, 作为心墙防渗体来说, 水库水质的化学特性, 对分散性土能否产生冲蚀破坏亦是一个十分重要的因素。额尔齐斯河水的水质为重碳酸盐钙镁水(见表 6), pH=7.2, 略偏碱性, 由于河水中含有一定数量的 Ca²⁺, 因此, 用河水制备土样时, Ca²⁺ 可将土粒双电层吸附的 Na⁺ 置换出来, 从而抑制土的分散

性。从表 7 TDS 试验可以看出, 原来用蒸馏水配制的 I 料场试样中的 Na⁺ 和 K⁺ 含量为 $1.76 \times 10^{-3} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 改用额尔齐斯河水配制试样后其含量降低为 $0.24 \times 10^{-3} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 降低了约 7.3 倍; PS 降低了 2.5 倍。TDS 试验、针孔试验和碎块试验都验证了采用额尔齐斯河水配制试样, 可以使过渡性土改性变为非分散性土。

5.2 用额河水掺入 1% 石灰粉对土料分散性的改性试验

为了增加额河水中钙离子含量, 使用 1% 的石灰粉溶于河水中, 再均匀地掺入土料, 以达到提高土料改性效果的目的。通过改性试验表明(见表 7): 用掺入 1% 石灰粉的额河水拌和土样, 试样中 Na⁺ 和 K⁺ 含量进一步降低到 $0.15 \times 10^{-3} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 降低了约 12 倍; PS 降低了 4.6 倍。使土料的分散性得到明显改善, 由过渡性土变为非分散性土。针孔试验和碎块试验也进一步表明, 采用此法对土料分散性有突出改性的效果。

5.3 掺洒石灰粉对土料分散性的改性试验

试验分别采用 0.5%, 1%, 2%, 3%, 6% 不同石灰粉掺量进行对比研究。从表 7 可以看出:

(1) 石灰粉掺入 0.5% ~ 1.0% 时, TDS 试验、针孔试验和碎块试验都表明 I 料场土料已由过渡性土改变为非分散性土, 改性效果显著。

(2) 石灰粉掺入 2% 时, 土样改性作用不明显, 仍为过渡性土。当石灰粉掺入 3% 和 6% 时, 随着掺量的增加土样碱性逐渐增强, 土样中的重碳酸根与氢氧根作用, 产生的不溶盐增加, 提高了土体中 Na⁺ 含量, 土

表 6 额尔齐斯河水质分析成果

Table 6 Results of water quality analysis for Ertix River

阳离子含量/(10 ⁻³ mol·L ⁻¹)			阴离子含量/(10 ⁻³ mol·L ⁻¹)			总碱度	总硬度	全固形物	pH 值
Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ + Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	德国度	德国度	/(mg·L ⁻¹)	
0.35	0.20	0.29	0.30	0.18	1.22	3.42	3.06	102.0	7.2

表 7 I 料场过渡性土料改性试验对比成果

Table 7 Results of the modification tests for the transitional soil materials in Yard I

试验项目		蒸馏水	额河水	I 料场堆土	额河水中加 1%	分散性土中不同比例石灰粉掺量/%				
		制 样	制 样	料土样	石灰粉制样	0.5	1.0	2.0	3.0	6.0
孔隙水可溶盐试验	K ⁺ + Na ⁺ /(10 ⁻³ mol·L ⁻¹)	1.76	0.24	0.38	0.15	0.15	0.16	0.46	0.66	1.32
	Mg ²⁺ /(10 ⁻³ mol·L ⁻¹)	1.56	0.91	0.64	1.03	0.51	0.33	0.21	0.17	0.00
	Ca ²⁺ /(10 ⁻³ mol·L ⁻¹)	1.62	1.14	1.07	1.00	1.12	0.87	0.64	0.33	0.75
	TDS/(10 ⁻³ mol·L ⁻¹)	4.94	2.29	2.09	2.18	1.78	1.36	1.31	1.16	2.07
	PS/%	58.5	12.5	28.5	12.7	14	22.6	48.3	65.0	73.2
	SAR	16.5	2.0	4.3	1.6	1.7	3.9	7.7	13.2	20.2
针孔试验		ND ₃	ND ₂	ND ₂	ND ₂	ND ₂	ND ₂	ND ₂ ~ ND ₃	ND ₃	ND ₃
碎块试验		II	I	I	I	I	I	I ~ II	II	II
综合评价		过渡性	非分散性	非分散性	非分散性	非分散性	非分散性	过渡性	分散性	分散性

粒间的吸引力减弱,特别是 PS 由原土料的 58.5% 增加到 73.2%,反而使过渡性土变为分散性土。

试验结果表明,对 I 料场过渡性土料,石灰粉掺量控制在 1.0% 左右,土料的改性效果比较稳定。

6 结 论

(1) 对于“635”水利枢纽 70.6 m 的高坝,科学鉴定并妥善解决好其心墙防渗土料的分散性问题是十分重要的。在分析研究土料物理化学特性、粘土矿物成分的前提下,通过碎块试验、针孔试验、SCS 试验、TDS 试验和 ESP 试验等五项对土料分散性的鉴定试验,针对分散性土的抗剪强度、受含水率的影响以及分散性土渗透变形与一般粘性土的变化规律有很大不同这一特点,并与国内外有关工程分散性土的鉴定做对比分析,对“635”工程心墙防渗土料的分散性进行了全面科学、深入细致的分析研究,综合鉴定 V 料场土料为非分散性土、I 料场土料为过渡性土。这一结论是准确恰当的。

(2) 通过三种改性试验方案的对比分析,采用额河水制备土样和利用额河水掺加 1% 石灰粉制备土样,对土样的改性效果十分明显,且施工操作简单易行。在土料中掺洒 1% 左右石灰粉对土料改性也比较明显,但当掺量超过 3% 时,不溶盐含量增加,不但没有改性作用,反而增加了土料的分散程度。因此,施工中要严格控制掺量,掺洒搅拌要均匀,防止石灰粉聚集。“635”工程实际运用过程中,在土料二次制备(堆土牛)和上坝填筑过程中,掺洒额河水调整施工填筑含水率,经取样试验分析,改性效果十分明显。加之在水库蓄水运行当中,心墙防渗土料在额河水的长期渗流作用

下,完全可以彻底解决筑坝土料的分散性问题,建议工程实际运用中直接采用掺洒额河水的改性方案。

(3) I 料场被鉴定为过渡性土料,VI 料场虽被鉴定为非分散性土料,但其抗渗比降较一般粘性土为低。因此,对心墙防渗体要特别强化其防止渗透破坏的能力,本工程采用了以下 4 项措施^[6]:①根据国内外的成功试验,针对分散性土采用了 d_{20} 小于 0.5 mm 的反滤料,加强反滤层结构,保护渗流出口;②采用大心墙防渗结构,降低了防渗体水平平均渗透比降,适应了心墙土料抗渗能力低的性能;③结合坝体结构,根据 I、VI 料场土料的物理力学特性,进行分区布料填筑,适应了土料的工程性能;④结合河谷形状特征,调整各填筑坝段的施工进度,以防止产生过大的不均匀沉降而导致有害裂缝的发生。

参考文献:

[1] 王观平. 粘土矿物与分散性粘土[J]. 黑龙江水专学报, 1994, 21(3): 21~ 25.

[2] 李兴国, 许仲生. 分散性土的试验鉴别和改良[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(1): 62~ 66.

[3] 岳宝蓉, 唐 化, 等. 新疆引额供水工程“635”枢纽筑坝土料与成土母岩的基本性质和分散性的试验研究[R]. 杨陵: 水利部西北水利科学研究所, 1995.

[4] 王观平. 黑龙江南部引嫩工程分散性粘土的研究与处理措施[R]. 哈尔滨: 黑龙江省水利勘测设计院, 1992. 18~ 22.

[5] 缪元勋, 席福来, 等. 岩土试验工作汇总报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆水利水电勘测设计研究院, 1998.

[6] 毕运三, 王新社, 等. 新疆引额济克工程“635”水利枢纽大坝修改设计报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆水利水电勘测设计研究院, 1998.