

文章编号:1671-8879(2007)02-0076-05

粘土分散性的判别试验

樊恒辉^{1,2}, 高明霞¹, 李 鹏¹, 吴普特^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 针对分散性粘土遇水分散流失的不良性质,应用碎块、针孔、双比重计、孔隙水可溶盐和交换性钠质量分数 5 种试验方法,研究了西安市黑河水利枢纽工程粘土心墙土料的分散性。研究认为,土料大部分属于非分散性粘土,少部分属于分散性粘土,分散性粘土的蒙脱石与伊利石的质量比值较高;在采用黑河水冲蚀针孔时,分散性粘土有表现为非分散性的趋势;大坝建成后的坝体原状土样属于非分散性粘土。结果表明:蒙脱石与伊利石的质量比值是判别粘土分散性的重要指标,水质对土的分散性具有显著影响;分散性粘土与非分散性粘土合理混合使用可降低粘土的分散性,满足工程要求。

关键词: 土力学; 原状土; 分散性粘土; 物理化学性质; 粘土矿物; 鉴定方法

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A

Experimental study on clay dispersibility

FAN Heng-hui^{1,2}, GAO Ming-xia¹, LI Peng¹, WU Pu-te^{1,2}

(1. School of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry

University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The dispersive clay is the clayey soil in which the clay fraction is dispersed and eroded by water so as to the projects be easily wrecked. Based on the poor engineering characteristic of the dispersive clay, this paper studied the dispersity of soil samples for the clay core wall from Heihe hydraulic development project in Xi'an by double-hydrometer test, pore water salts test, pinhole test, crumb test and exchangeable sodium percent test. It was showed that the most soil samples were dispersive soil and a few were non-dispersive soil, and the values of montmorillonoid and illite relative contents were higher of the dispersive clay than non-dispersive clay. If the river water was chosen as the scouring water in pinhole test, the dispersive clay has the tendency to the non-dispersive clay. After the dam was completed, the undisturbed soil samples from the dam were non-dispersive by some experiments. The results indicate that the value of montmorillonoid and illite relative contents is the important indices for identification, the water quality can obviously effect and improve the soil dispersity, and the dispersity of dispersive soil can be reduced if the non-dispersive soil is reasonably mixed with it, so it can satisfy the requirement of the projects by this method. 4 tabs, 11 refs.

Key words: soil mechanics; undisturbed soil; dispersive soil; physical and chemical character; clay mineral; methods of identification

收稿日期:2006-03-26

基金项目:国家 863 计划重大项目(2002AA2Z4051-2); 西北农林科技大学科研专项项目(06ZR41,05ZR42)

作者简介:樊恒辉(1973-),男,山西夏县人,西北农林科技大学工程师,博士, E-mail:ssxxfhh@hotmail.com.

0 引言

西安市黑河引水金盆水利枢纽工程位于周至县境内秦岭北麓黑峪口上游 1.5 km 处,距西安市 86 km。工程以城市供水为主,兼有灌溉、发电、防洪等功能。枢纽工程由拦河大坝、左岸泄洪洞、右岸溢洪洞、引水洞及坝后电站组成,为大中型工程。大坝采用当地材料修筑,坝型为心墙堆石坝,心墙采用粘性土料填筑,坝壳料采用河床砂砾石填筑。

粘性土有分散性和非分散性两大类^[1]。分散性粘土是一种在低含盐量水中(或纯净水中)离子相互的排斥力超过相互吸引力,导致土体的颗粒分散的粘性土^[2]。在土-水体系中土粒间排斥作用可使分散的土粒随水流动,为土体的渗透变形和破坏提供了条件,导致土体流失的发生。本文在分析土样的物理化学性质和粘土矿物成分的基础上,采用碎块、针孔、双比重计、孔隙水可溶盐和交换性钠质量分数 5 种试验方法,对该工程所用的武家庄土料场 12 组土样的分散性进行了研究分析,为工程设计施工以及运行管理提供依据^[3]。

1 土样的物理和化学性质

土样的物理和化学性质见表 1。武家庄土料场的 12 组土样相对密度为 2.72~2.75。颗粒组成基本上以粉粒(0.075~0.005 mm)为主,其质量分数为 50.0%~68.9%。粘粒(小于 0.005 mm)的质量分数为 24.0%~39.5%。液限含水量为 38.5%~45.0%,塑限含水量为 19.2%~24.4%,塑性指数为 16.0~25.0,按塑性图分类均为低液限粘土(CL)。自由膨胀率为 30.0%~50.0%,大部分低于 40%,说明土样的膨胀潜势较弱。土样的易溶盐质量分数为 0.1~0.4 g/kg。pH 值为 7.54~8.48,呈弱碱性至碱性。有机质质量分数为 1.1~8.7 g/kg。

2 土样的粘土矿物成分

不同类型的粘土矿物,具有不同的晶格结构,同时也就决定其具有不同的性质。如蒙脱石是 2-1 型矿物,晶层间联结弱,结合力小,晶格有扩展性,因而具有较大的分散性和胀缩性。伊利石也是 2-1 型矿物,但是由于伊利石层间有 K^+ 联结,晶层联结牢固,晶格无扩展性,其分散性和胀缩性较蒙脱石弱。高岭石属于 1-1 型矿物,层间结合牢固,晶格无扩展性,其分散性和胀缩性最小。所以,蒙脱石的存在是土产生分散性的前提条件之一^[4]。因此在鉴

定粘土的分散性时,应分析粘土的矿物成分,从微观角度来分析粘土的分散性产生的内在因素。

粘土矿物主要富集于小于 0.002 mm 的颗粒中,因此,要鉴定土样中的粘土矿物成分,必须先提取土样中小于 0.002 mm 的颗粒,然后对其进行全量化学分析、阳离子交换总量、X 射线衍射分析,最后根据各种试验来综合判断其矿物类型。本文对 12 组土样进行了粘土矿物成分试验,结果见表 2。

从表 2 可以看出,这 12 组土样中粘土矿物的主要成分是伊-蒙混层矿物,质量分数占小于 0.002 mm 颗粒的 83%~88%,而伊利石占 8%~11%,高岭石占 2%~6%,还有少量的其他粘土矿物。根据混层矿物的混层比可以算出在全土样中伊利石和蒙脱石的质量分数,伊利石在全土样中的质量分数为 5.7%~17.8%,蒙脱石的质量分数为 2.8%~10.4%。 W_4 和 W_5 土样中的蒙脱石较伊利石的质量分数相对要高。从粘土矿物角度分析粘土的分散性能, W_4 和 W_5 土样的分散性相对较强。

3 土样的分散性判别

粘土的分散性、物理化学状态与土颗粒表面的电学性质是直接相关的。目前,尚没有能够准确判别分散土及其分散程度的试验方法,相比之下,美国水土保持局提出的 5 项室内试验便成为基本的判别试验。这 5 项试验是:碎块试验、针孔试验、双比重计试验、孔隙水可溶盐试验和交换性钠质量分数试验。其中,针孔试验模拟了土体在集中渗透水流的作用下所承受的冲蚀条件,因而被认为是最可靠的鉴定方法。上述 5 项试验的方法可参考文献[5-7]。

3.1 土样分散性的常规判别试验

对 12 组土样进行了上述 5 项试验。试验结果见表 3。根据判定标准,将 5 种试验的判别结果和综合判别结果列于表 4。

从表 3 可以看出,这 12 组土样的分散度除 W_1 土样大于 30%属于过渡性粘土外,其余在 14.6%~29.5%之间,属非分散性粘土。在碎块试验中,这 12 组土样表现一致,土块在杯底塌散,杯水清亮,无胶体颗粒,故将土样全部定为非分散性粘土。针孔试验中 W_4 和 W_5 土样在 50 mm 水头下,水色混浊;试验结束后,孔径增大为原来的 3.5~5 倍,被判为分散性粘土。其余土样在 1020 mm 水头作用下,水色自始至终很清,孔径无任何变化,故均为非分散性粘土。孔隙水可溶盐试验表明,这 12 组土样的孔隙

表1 土样物理和化学性质

土样编号	相对密度 G_s	土样颗粒组成/ %			液限 W_L / %	塑限 W_P / %	塑性指数 I_p	自由膨胀率/ %	易溶盐质量分数/ ($g \cdot kg^{-1}$)	有机质质量分数/ ($g \cdot kg^{-1}$)	pH	土壤分类
		>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm								
A ₁₁	2.74	11.0	55.0	34.0	43.9	22.0	21.9	38.3	0.4	2.1	7.54	CL
B ₁₁	2.74	6.0	56.0	38.0	44.5	22.0	22.5	50.0	0.4	1.1	7.95	CL
H ₉	2.74	7.0	61.0	32.0	42.5	20.6	21.9	40.0	0.3	5.6	8.09	CL
I ₂	2.74	8.5	59.5	32.0	45.0	20.0	25.0	39.5	0.3	1.5	7.70	CL
J ₉	2.73	5.0	59.5	35.5	43.5	19.2	24.3	42.5	0.2	4.7	7.54	CL
R ₁	2.75	5.0	55.5	39.5	43.8	23.8	20.0	34.0	0.2	8.7	8.03	CL
R ₅	2.75	12.5	50.0	37.5	40.8	22.7	18.1	38.0	0.2	4.6	8.23	CL
W ₁	2.74	6.0	68.9	26.1	39.8	23.0	16.8	38.0	0.3	7.2	7.89	CL
W ₂	2.74	8.0	61.5	30.5	41.0	22.8	18.2	38.0	0.2	6.5	8.48	CL
W ₃	2.73	14.5	59.5	26.0	40.0	24.0	16.0	30.0	0.1	5.6	8.44	CL
W ₄	2.72	4.0	68.5	27.5	41.0	24.4	16.6	31.0	0.1	6.7	8.08	CL
W ₅	2.73	7.5	68.5	24.0	38.5	21.5	17.0	30.0	0.1	3.6	8.23	CL

注:CL为低液限粘土。

表2 土样粘土矿物组成和质量分数

土样编号	<0.002 mm 粘粒质量 分数/ %	<0.002 mm 土样中粘粒矿物质量分数/ %								<0.002 mm 土样中粘粒矿物在全土样中的质量分数/ %						蒙脱石质量 伊利石质量
		伊利石- 蒙脱石混层	伊利石	高岭石	蛭石	绿泥石	伊利石	蒙脱石	伊利石- 蒙脱石混层	伊利石	高岭石	蛭石	绿泥石	伊利石	蒙脱石	
A ₁₁	20.0	84	10	2	0	4	71	23	16.8	2.0	0.4	0	0.8	14.3	4.5	0.32
B ₁₁	24.0	86	8	2	0	4	74	20	20.6	1.9	0.5	0	1.0	17.8	4.7	0.27
H ₉	17.5	80	10	6	0	4	74	16	18.0	1.8	1.1	0	0.7	13.0	2.8	0.22
I ₂	18.5	83	8	4	0	5	74	17	19.4	1.5	0.7	0	0.9	13.6	3.2	0.24
J ₉	20.0	83	8	4	0	5	75	16	20.6	1.6	0.8	0	1.0	15.0	3.2	0.21
R ₁	24.0	85	10	4	1	0	57	38	25.4	2.4	1.0	0.2	0	13.6	9.2	0.67
R ₅	21.0	84	11	4	1	0	53	42	22.6	2.3	0.8	0.2	0	11.1	8.8	0.79
W ₁	16.5	87	8	4	1	0	47	48	14.4	1.3	0.7	0.2	0	7.8	7.9	1.01
W ₂	20.0	87	8	4	1	0	47	48	17.4	1.6	0.8	0.2	0	9.4	9.6	1.01
W ₃	15.5	88	8	3	1	0	52	44	13.6	1.2	0.5	0.2	0	8.1	6.8	0.85
W ₄	17.0	87	8	4	1	0	34	61	14.8	1.4	0.7	0.2	0	5.8	10.4	1.79
W ₅	13.0	87	9	4	0	0	44	52	11.3	1.2	0.5	0	0	5.7	6.8	1.19

水可溶盐阳离子总量为 $1.81 \sim 4.421 \left[\frac{1}{n} (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}) \right]$ 之间,钠吸附比为 $0.18 \sim 1.50$,钠质量分数为 $6.08\% \sim 50.00\%$ 。根据粘土的分散性与孔隙水阳离子总量及钠质量分数的关系可以看出,这12组土样中除 W_2 、 W_3 在过渡区外,其余均在非分散区。根据孔隙水阳离子总量与分散土钠吸附比近似界限值,可判断武家庄土料场12组土样均为非分散性粘土。武家庄土料场的12组土样交换性钠质量分数均远小于7%,因此可判断为非分散性粘土。

粘土分散性鉴定试验和判别结果见表4。综合分析5项试验的结果,并且考虑土样的粘土矿物种类、质量分数以及土样中粘粒的质量分数,判定 W_4 和 W_5 土样为分散性粘土,其余均为非分散性粘土。

3.2 土样分散性的特殊判别试验

3.2.1 针孔试验的冲蚀用水

根据有关试验资料^[8-10],工程环境水对于粘土的分散性具有一定的影响作用。为此,采用黑河水作为冲蚀用水,对土样 R_1 、 R_5 、 W_4 和 W_5 做了针孔试验,从而掌握土料在实际情况下的分散性能^[11],结果列于表3。

从表3可以看出,在改用黑河水冲蚀针孔时,土样 R_1 、 R_5 、 W_4 在1020 mm水头作用下,水色自始至终很清,孔径无任何变化,故判断为非分散性粘土。而土样 W_5 仍表现为分散性粘土。

3.2.2 坝体压实原状粘土的分散性判别试验

由于 W_4 、 W_5 土样代表的土料储量少,在土坝的填筑过程中,与非分散性粘土拌和混用,以减弱土

表 3 土样分散性鉴定试验汇总

土样编号	分散度/ %	碎块试验	针孔试验					交换性钠质量分数/ %	孔隙水性质						
			干密度/ (g · cm ⁻³)	水头高度/ mm	终了孔径/ 倍	终了流量/ (mL · s ⁻¹)	水色判断		单个阳离子含量/ [($\frac{1}{n}$) (mmol · L ⁻¹)]				阳离子总量 [TDS]/ [($\frac{1}{n}$) (mmol · L ⁻¹)]	钠吸附比 [SAR]	钠质量 分数/ %
									Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺			
A ₁₁	22.9	无分散出胶粒,水色清澈	1.66	1020	1.0	2.39	透明	0.60	0.27	0.03	2.67	0.59	3.56	0.21	7.58
B ₁₁	27.6	无分散出胶粒,水色清澈	1.66	1020	1.0	3.72	透明	0.39	0.25	0.04	2.33	1.49	4.11	0.18	6.08
H ₉	18.8	无分散出胶粒,水色清澈	1.66	1020	1.0	1.53	透明	0.09	0.33	0.03	3.27	0.50	4.13	0.24	7.99
I ₂	22.5	无分散出胶粒,水色清澈	1.66	1020	1.0	1.02	透明	0.16	0.28	0.03	3.22	0.74	4.27	0.20	6.56
J ₉	22.5	无分散出胶粒,水色清澈	1.66	1020	1.0	1.85	透明	0.08	0.49	0.03	3.12	0.59	4.23	0.36	11.58
R ₁	22.3	无分散出胶粒,水色清澈	1.65	1020	1.0	1.42	透明	3.50	1.15	0.03	2.00	0.30	3.48	1.07	33.05
R ₅	21.3	无分散出胶粒,水色清澈	1.64	1020	1.0	1.67	透明	2.58	0.79	0.01	1.40	0.10	2.27	0.88	33.48
W ₁	32.6	无分散出胶粒,水色清澈	1.58	1020	1.0	2.03	透明	1.47	0.51	0.01	3.70	0.20	4.42	0.37	11.54
W ₂	29.5	无分散出胶粒,水色清澈	1.61	1020	1.0	1.51	透明	3.76	1.11	0.01	1.00	0.10	2.22	1.50	50.00
W ₃	18.5	无分散出胶粒,水色清澈	1.59	1020	1.0	2.11	透明	3.50	0.90	0.01	0.80	0.10	1.81	1.34	49.72
W ₄	14.6	无分散出胶粒,水色清澈	1.57	50	3.5	0.35	混浊	1.87	0.48	0.01	1.20	0.20	1.89	0.57	25.40
W ₅	16.7	无分散出胶粒,水色清澈	1.61	50	5.0	1.53	混浊	2.89	0.69	0.01	1.20	0.10	2.00	0.86	34.50
R ₁ *			1.65	102	1.0	1.29	清亮								
R ₅ *			1.64	102	1.0	1.54	清亮								
W ₄ *			1.57	102	1.0	1.72	清亮								
W ₅ *			1.61	18	7.0	0.69	混浊								
1	21.6		1.73	102	1.0	2.04	清亮								
2	27.4		1.73	102	1.0	2.55	清亮								
6	28.6		1.78	102	1.0	1.73	清亮								
18	25.0		1.82	102	1.0	3.00	清亮								
20	20.0		1.8	102	1.0	1.29	清亮								
21	24.2		1.71	102	1.0	1.13	清亮								

注:判断标准: 双比重计试验:非分散性粘土小于 30%;过渡性粘土为 30%~50%;分散性粘土大于 50%。碎块试验:分散性粘土在土块水解后混浊,土很快扩散到整个量杯底部,水呈雾状,经久不清;过渡性粘土在土块水解后四周有微量混浊,但扩散范围小;非分散性粘土无分散出胶粒的反应,土块水解后在量杯底部以细颗粒状平堆,水色是清的,或稍混浊后很快又变清。针孔试验:非分散性粘土在 380~1020 mm 水头下针孔不扩大,水流很清;过渡性粘土在 180~380 mm 水头下针孔冲蚀较慢,水流稍混浊;分散性粘土在 50 mm 水头下针孔迅速扩大,水流混浊。交换性钠质量分数:在 7~10 为中等分散性粘土;大于或等于 15 为高分散性粘土。钠质量分数:非分散性粘土小于 40%;过渡性粘土为 40%~60%;分散性粘土:大于 60%。钠吸附比:对于分散性粘土,若 [TDS] > 5, 则需 [SAR] > 2.7; 若 [TDS] > 10, 则需 [SAR] > 4.2; 若 [TDS] > 100, 则需 [SAR] > 13。带“*”号土样的试验用水是黑河水,其余土样试验用水都是蒸馏水。

料的分散性。为了明确武家庄料场与其他料场土料混合的土料上坝使用后是否还具有分散性,是否存在安全隐患,对使用武家庄料场土料的坝体压实原状粘土进行分散性判别试验。

对坝体压实原状粘土的 6 组土样(编号为 1、2、6、18、20 和 21)进行了分散度试验和针孔试验,试验结果列于表 4。从分散度试验结果可以看出,这 6 组土样的分散度为 20.0%~28.6%,均小于 30.0%,属于非分散性粘土;针孔试验结果亦显示为非分散性粘土,这说明坝体压实原状粘土具有良好的抗水冲蚀性能。

4 结 语

(1) 武家庄土料属于低液限粘土,易溶盐质量分

数低,pH 值呈弱碱性或碱性,有机质质量分数也较低。粘土矿物主要是以伊利石为主,其次为蒙脱石、高岭石,其中蒙脱石以伊利石-蒙脱石混层矿物形式存在,但是少数土样中蒙脱石质量分数高于伊利石。

(2) 土样的分散性判别试验结果表明,武家庄料场的土料除 W₄、W₅ 是分散性粘土外,其他都是非分散性粘土。这是因为 W₄、W₅ 土样中粘土矿物以蒙脱石为主。在改用黑河水冲蚀针孔时,W₄ 表现为非分散性;而 W₅ 的分散性能没有变化,仍为分散性粘土。其中原因尚需探讨。

(3) W₄、W₅ 土样具有分散性,在土料的二次制备和土坝填筑过程中,通过与非分散性粘土的拌和混用,可减弱土料的分散性。通过对混合后的坝体压实原状土样的分散性分析,认为这种方法切实可行。



表4 土料分散性鉴定结果

土样编号	双比重计试验	碎块试验	针孔试验	交换性钠质量分数试验	孔隙水可溶盐试验		综合判断
					钠吸附比	钠质量分数	
A ₁₁	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土
B ₁₁	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土
H ₉	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土
I ₂	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土
J ₉	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土
R ₁	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土
R ₅	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土
W ₁	过渡性土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土
W ₂	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	过渡性土	非分散性粘土
W ₃	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	过渡性土	非分散性粘土
W ₄	非分散性粘土	非分散性粘土	分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	分散性粘土
W ₅	非分散性粘土	非分散性粘土	分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	非分散性粘土	分散性粘土
R ₁ [*]		非分散性粘土	非分散性粘土				非分散性粘土
R ₅ [*]		非分散性粘土	非分散性粘土				非分散性粘土
W ₄ [*]		非分散性粘土	非分散性粘土				非分散性粘土
W ₅ [*]		非分散性粘土	分散性粘土				分散性粘土
1	非分散性粘土		非分散性粘土				非分散性粘土
2	非分散性粘土		非分散性粘土				非分散性粘土
6	非分散性粘土		非分散性粘土				非分散性粘土
18	非分散性粘土		非分散性粘土				非分散性粘土
20	非分散性粘土		非分散性粘土				非分散性粘土
21	非分散性粘土		非分散性粘土				非分散性粘土

参考文献:

References:

- [1] 王观平,张来文,阎仰中,等.分散性粘土与水利工程[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [2] SL 251-2000,水利水电工程天然建筑材料勘察规程[S].
- [3] 樊恒辉,高明霞,巨娟丽,等.西安市黑河水利枢纽工程武家庄料场土料物理化学性质、分散性鉴定和粘土矿物成分试验报告[R].杨凌:水利部西北水利科学研究所,2001.
- [4] 黄熙龄.特殊土[C]//中国土木工程学会.第四届土力学及基础工程学术会议论文集.北京:中国建筑工业出版社,1986:69~73.
- [5] ASTM D4221-99, Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer[S].
- [6] ASTM D6572-00, Standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soils by the crumb test[S].
- [7] ASTM D4647-93(1998), Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test[S].
- [8] 樊恒辉,李鹏,高明霞.水对针孔试验鉴定分散性粘土结果影响的试验研究[J].大坝观测与土工测试,2001,25(5):42~44.
- FAN Heng-hui, LI Peng, GAO Ming-xia. Effect of water on result of the pinhole test of dispersive clay [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(5):42~44.
- [9] 盛守田,庞志萍,张建平.水质对分散性粘土冲刷破坏的影响[J].黑龙江水利科技,1993,21(3):76~77.
- SHENG Shou-tian, PANG Zhi-ping, ZHANG Jian-ping. Influence of water quality to the dispersive soil erosion failure[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 1993, 21(3):76~77.
- [10] 周加林,张军丽.关于分散性粘土特性及其测试的研究[J].西安公路交通大学学报,1998,18(4B):238~240.
- ZHOU Jia-lin, ZHANG Jun-li. Study on the characteristics and tests of dispersive clay [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1998, 18(4B):238~240.
- [11] 李鹏,高明霞,樊恒辉,等.黑河水利枢纽工程心墙原状土样分散性鉴定补充试验报告[R].杨凌:水利部西北水利科学研究所,2002.