

分散性粘土判别试验研究

樊恒辉^{1,2}, 吴普特¹, 李鹏², 贾莉³, 张松³

(1. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 国家电力公司 西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要:应用碎块、针孔、双比重计、孔隙水可溶盐和交换性钠百分比等五种试验方法, 结合物理化学性质和矿物成分分析, 对西郊、三坪两水库大坝心墙土样进行了多种方案的分散性试验及长期渗流条件下的渗透变形试验和盐分运移试验。认为三坪土样中钠离子的分散作用小于西郊土样, 钙镁离子的抑制分散作用大于西郊土样, 并且三坪土样中的蒙脱石含量低于西郊土样, 因此三坪土样属于非分散性土, 西郊土样属于过渡型土。土样施工用水对土样的分散性鉴定结果影响较小, 而冲刷用水对土样的分散性鉴定结果产生大的影响。在长期的渗流条件下土样中钠离子随水流易迁移, 河水中的钙离子含量大, 进入土体后能抑制土样的分散性, 促使土体向非散性的方向发展。结果表明土样中钠离子和钙镁离子含量多寡和相对含量对粘土分散性具有重要的作用, 蒙脱石的存在是粘土分散性的重要因素, 河水对粘土分散性能将产生显著影响。

关键词:分散性粘土; 物理化学性质; 粘土矿物; 长期渗流; 盐分运移; 判别

中图分类号: TU 411.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)11-1310-07

作者简介:樊恒辉(1973-), 男, 山西夏县人, 博士研究生, 工程师, 主要从事岩土工程试验研究和新材料研究工作。

Study on identification of dispersive clay soils

FAN Heng-hui^{1,2}, WU Pu-te¹, LI Peng², JIA Li³, ZHANG Song³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2.

College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100,

China; 3. Northwest Investigation Design and Research Institute, State Power Corporation, Xi'an 710001, China)

Abstract: The dispersibility as well as seepage distortion and salt transference under long-term seepage condition of soil samples obtained from the clay core wall in Xijiao and Sanping reservoirs were studied by physical and chemical properties of soil and composition of clay mineral and the tests for identification of dispersive clay soils which included double-hydrometer test, pinhole test, crumb test, tests to determine salt content of pore water and percentage of exchangeable sodium. It was shown that the soil samples from Sanping reservoir were non-dispersive clays but the soil samples from Xijiao reservoir were of transitional clay. The effect water of used in construction on dispersive clay was very little, but the effect of scouring water was obvious. Under long-term seepage condition the soil could be improved and became non-dispersive because the sodium-ion in soil could be moved away and the calcium-ion in river water could enter into the soil. The results indicate that the absolute and relative contents of sodium-ion and calcium-magnesium-ion in soil are important to identify dispersive clay soils, while the content of montmorillonoid is one of key factors and the river water affects the dispersibility of clay greatly.

Key words: dispersive soil; physical and chemical character; clay mineral; long-term seepage; salt transference; identification

0 前言

新疆引额济克(引额尔齐斯河水到克拉玛依市)风克干渠新建工程由风克干渠、三坪水库、西郊水库组成。西郊、三坪两水库大坝分别位于克拉玛依市西郊及三坪镇西北5 km处, 大坝均为粘土心墙土石坝, 心墙填筑土料取自两坝附近的料场, 距坝址距离分别为8~10 km和7~8 km。

粘性土有分散性和非分散性两大类^[1]。分散性

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, 导致事故的发生。本文应用碎块、

基金项目: 国家“863”节水重大专项新型高效雨水集蓄与利用技术研究资助项目(2002AA2Z4051-02)

收稿日期: 2005-01-27

针孔、双比重计、孔隙水可溶盐和交换性钠百分比等 5 种试验方法, 结合物理化学性质和矿物成分分析, 对西郊、三坪两水库大坝心墙土样进行了多种方案的分散性试验及长期渗流条件下的渗透变形试验和盐分运移试验, 以研究土样的分散性能^[3]。

1 土样的基本物理化学性质和水样的化学性质

1.1 土样的基本物理性质

土样的基本物理性质列于表 1。从表 1 中可以看出 8 组土样的比重为 2.67 ~ 2.70。颗粒组成均以粘粒 (<0.005 mm) 为主, 其含量为 48.0% ~ 65.5%。从界限含水率来看, 液限含水率为 33.0% ~ 43.8%, 塑限含水率为 18.8% ~ 21.0%, 塑性指数为 14.2 ~ 22.8, 均为低液限粘土 (CL)。

1.2 土样的基本化学性质

土样的基本化学性质列于表 2。从表 2 中可以看出这 8 组土样的易溶盐含量大, 为 21.3 ~ 26.9 g/kg。按含盐性质分类, 均属于亚硫酸盐或硫酸盐盐渍土; 按含盐量分类, 均属于强盐渍土^[4]。pH 值为 8.47 ~ 8.63, 呈碱性或强碱性。中溶盐含量为 3.12 ~ 38.32 g/kg, 难溶盐含量为 15.77 ~ 34.64 g/kg, 三坪土样的

中溶盐、难溶盐含量均大于西郊土样。有机质含量为 3.4 ~ 6.3 g/kg。

1.3 水质分析

按照试验方案要求, 对试样制备用水和水库蓄水, 即三坪水库施工用水、西郊水库施工用水、额尔齐斯河水进行水化学成分分析。水化学成分分析列于表 3。三坪水库施工用水和额尔齐斯河水属于 $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ 型, 西郊水库施工用水属于 $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ 型。

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, 同时也决定其具有不同的性质。高岭石类属于 1 1 型粘土矿物, 两片间的离子靠氢键结合在一起, 电荷基本上是平衡的, 高岭石晶层牢固, 晶格无扩展性, 无分散性和胀缩性。伊利石类粘土矿物属于 2 1 型矿物, 上下两个面上的离子虽然没有形成氢键, 但是, K^+ 使得片与片之间获得很好的结合, 故伊利石晶层牢固, 晶格无扩展性, 其分散性和胀缩性较蒙脱石小。蒙脱石类粘土矿物也属于 2 1 型矿物, 既没有氢键也无 K^+ 联结, 水可以进入片层之间, 使晶体产生很大的体积改变。同时蒙脱石同晶置换较多, 产生的负电也较多, 需吸附较多的阳离子来平衡多余的负电。吸附

表 1 土样物理性质

Table 1 Physical properties of soil samples

土样编号	比重 /Gs*	颗粒组成/%			液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性 指数Ip	土壤分类	
		>0.075 mm	0.075 ~ 0.005 mm	<0.005 mm				按三角图	按塑性图
X ₁	2.69	7.0	35.0	58.0	40.8	20.0	20.8	粘土	CL
X ₂	2.69	6.0	37.5	56.5	38.8	20.6	18.2	粘土	CL
X ₃	2.70	11.2	36.3	52.5	37.9	19.9	18.0	粘土	CL
X ₄	2.69	8.5	26.0	65.5	43.8	21.0	22.8	粘土	CL
S ₁	2.67	7.5	43.5	49.0	43.5	21.0	22.5	粘土	CL
S ₂	2.69	9.8	42.2	48.0	33.0	18.8	14.2	粘土	CL
S ₃	2.69	10.0	36.5	53.5	35.8	19.6	16.2	粘土	CL
S ₄	2.67	9.0	40.5	50.5	41.8	21.0	20.8	粘土	CL

注: 比重(Gs)试验采用煤油测定。

表 2 土样化学性质

Table 2 Chemical properties of soil samples

土样 编号	化学成分含量/(g · kg ⁻¹)													pH
	易溶盐	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	中溶盐	CaCO ₃	有机质	
X ₁	20.1	0.000	0.160	2.918	1.029	9.665	1.964	0.320	4.085	0.024	9.66	21.55	3.8	8.47
X ₂	26.9	0.000	0.159	2.991	1.000	13.775	2.592	0.290	5.422	0.030	9.79	20.65	4.6	8.63
X ₃	24.5	0.000	0.158	1.531	1.414	13.723	2.349	0.262	4.936	0.030	8.31	15.77	3.4	8.57
X ₄	21.3	0.000	0.159	2.894	1.060	10.385	1.631	0.467	4.524	0.034	3.12	18.35	4.5	8.59
S ₁	22.9	0.000	0.129	1.884	1.505	12.402	2.989	0.517	3.327	0.045	38.32	28.26	3.6	8.58
S ₂	24.7	0.000	0.130	2.981	1.178	12.688	3.032	0.286	4.447	0.036	38.06	28.28	5.5	8.59
S ₃	21.7	0.000	0.127	1.928	0.968	11.932	2.851	0.333	3.433	0.052	28.27	23.93	5.7	8.50
S ₄	27.0	0.000	0.163	3.088	1.334	13.618	2.421	0.565	5.179	0.086	25.19	34.64	6.3	8.54

表 3 水化学成分分析

Table 3 Chemical composition of water

水样编号	化学成分含量/(g·L ⁻¹)									pH
	矿化度	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
三坪水库施工用水	201.4	0.0	128.7	0.0	12.5	31.6	5.2	9.2	0.4	8.23
西郊水库施工用水	186.9	0.0	103.7	7.1	18.2	23.4	8.0	10.4	0.2	7.78
额尔齐斯河水	80.0	0.0	47.6	0.0	8.6	17.0	0.0	1.7	0.4	8.02

Na 离子的称 Na 蒙脱石, 吸附 Ca 离子的称 Ca 蒙脱石。由于 Na 离子的半径比 Ca 离子小, Na 离子形成的水化膜比 Ca 离子形成的水化膜要厚。因此, Na 蒙脱石的层间扩散就要比 Ca 蒙脱石大得多, 层间扩散使间距加大, 总的吸引力迅速下降, 引起结构不稳定, 产生分散。故蒙脱石类晶层间联结弱, 晶格具有扩展性, 具有较大的分散性 (Na 蒙脱石) 和胀缩性 (Ca 蒙脱石)。我国研究学者通过研究认为 Na 蒙脱石是产生分散性土的必要条件之一^[5, 6]。因此, 在鉴定土的分散性时, 应分析土的矿物成分, 从微观角度来分析土的分散性产生的内在因素。

粘土矿物主要富集于 < 0.002 mm 颗粒中, 因此要鉴定土料中的粘土矿物成分必须先提取土料中 < 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 射线衍射分析及差示扫描量热法 (DSC 法) 分析, 最后根据各种试验来综合判断其矿物类型。对 X₁+X₂, X₃+X₄, S₁+S₄, S₂+S₃ 混合后进行试验。土样粘土矿物分析结果列于表 4。

从表 4 可以看出, 西郊土样以伊利石为主, 其次为蒙脱石、绿泥石、高岭石。三坪土样以伊利石为主, 其次为绿泥石、高岭石、蒙脱石。其中蒙脱石以伊利石-蒙脱石、绿泥石-蒙脱石混层矿物形式存在, 且蒙脱石为钙蒙脱石。在全土中西郊土样的蒙脱石含量明显高于三坪土样。

3 土样的分散性鉴定

分散性粘土的性质是与粘土的物理化学状态和土颗粒表面的电学性质直接相关的, 工程上常用的土工试验方法不能反映出土的化学状态和土颗粒表面的电学性质, 所以无法鉴定。目前国内土工试验规程中尚无分散性试验规定^[2], 美国材料与试验协会 (ASTM-American Society for Testing and Materials)

提出了双比重计法^[7]、针孔试验^[8]、碎块试验^[9]等 3 种试验方法。本研究按照第一次世界性关于分散性土鉴定学术会议建议的方法, 即碎块、针孔、双比重计、孔隙水可溶盐和交换性钠百分比等 5 种试验方法进行^[10], 根据试验结果综合判别粘土的分散性。

3.1 分散性试验方案说明

为了使原土样及改性后土样的分散性试验结果便于比较, 共设计 6 种试验方案 (表 5)。因为方案 1-2、2-2、3-2 除针孔试验外, 其它试验项目都分别同于试验方案 1-1、2-1、3-1, 故对这三种方案没有做其它项目试验。另外, 在分散度试验中, 由于土样含盐量大, 按照常规分散度试验方法无法进行 (土粒在土水悬液中絮凝下沉, 无法准确测定其颗粒组成), 土样必须经洗盐后才能进行试验。考虑到洗盐本身就是一个分散过程, 故只对于方案 1-1 做了分散度试验, 试验结果只作为一个参考数据。其中, 针孔试验是使水流流过经压实土样上穿的针孔时直接测定粘性土的分散性 (胶质冲蚀性), 通过分散性土样的水带着含有混浊有色的胶质颗粒悬浮液, 而通过抗冲蚀土的水是水晶般的清澈。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, 被认为是最可靠的鉴定方法。

3.2 结果与讨论

按照试验方案的安排进行了分散性鉴定的各种试验。试验结果列于表 6~表 9。

(1) 方案 1-1 是鉴定分散性粘土常用的方法。从表 6 中的针孔试验和碎块试验可以看出, 西郊的 4 组土样都是过渡型土 (ND3), 但是从孔隙水可溶盐阳离子试验及原土中交换性阳离子试验结果来分析, 却是分散性土。同时从表 6 中的碎块试验可以看出, 三坪的 4 组土样都是过渡型土。从针孔试验看, 除 S₂ 属于过渡型土以外, 其余 3 组是非分散性土 (ND2)。从原土中交换性阳离子试验来分析, S₁ 属于非分散性土、

表 4 土样粘土矿物分析结果

Table 4 The test results of clay mineral

土样 编号	< 0.002 mm 粘粒含量/%	在 < 0.002 mm 粘粒中含量/%					在全土中含量/%				
		伊利石	蒙脱石	绿泥石	高岭石	其它	伊利石	蒙脱石	绿泥石	高岭石	其它
X ₁ +X ₂	39.4	31.5	24.9	14.1	12.5	17.0	12.4	9.8	5.6	4.9	6.7
X ₃ +X ₄	42.6	31.7	24.3	14.5	10.5	19.0	13.5	10.3	6.2	4.5	8.1
S ₁ +S ₄	32.1	30.5	6.3	24.0	19.2	20.0	9.8	2.1	7.8	6.2	6.5
S ₂ +S ₃	32.7	31.5	3.1	23.6	21.6	23.0	10.3	1.0	7.7	7.1	7.5

表 5 分散性试验方案说明

Table 5 The illustration of testing scheme on dispersibility

试验内容	方案编号	土样制备	试验用水
双比重计试验	方案 1-1*	原土	
孔隙水可溶盐阳离子 试验和原土中交换性 阳离子试验	方案 1-1 方案 2-1 方案 3-1	原土 将原土用各水库施工用水配至最优含水率, 风干 将原土用各水库施工用水配至最优含水率, 用额尔齐斯河水加至饱和含水率, 风干	纯水
碎块试验和针孔试验	方案 1-1 方案 1-2* 方案 2-1 方案 2-2* 方案 3-1 方案 3-2*	将原土用纯水配至最优含水率, 压到最大干密度 将原土用各水库施工用水配至最优含水率, 压到最大干密度 将原土用各水库施工用水配至最优含水率, 用额尔齐斯河水加至饱和含水率, 风干至最优含水率, 压到最大干密度	纯水 额尔齐斯河水 纯水 额尔齐斯河水 纯水 额尔齐斯河水

注: 方案 2-1、3-1 没有做双比重计试验; 方案 1-2、2-2、3-2 仅做针孔试验。试验判断标准见参考文献[1]、[10]。

表 6 土料分散性鉴定 (方案 1-1)

Table 6 Results of dispersive property tests of the soil samples (scheme 1-1)

土样 编号	分散度 SCS/%	碎块试验	针孔试验					原土中交 换钠百分 比 ESP/%	孔隙水可溶盐					钠吸附比 钠百分比 SAR PS/%		
			干密度 /(g·cm ³)	水头 /mm	终了孔 径/倍	终了流量 /(ml·s ⁻¹)	水色		判断	阳离子含量/(1/n mmol·L ⁻¹)						
										Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺			TDS
X ₁	36.21	过渡型	1.66	380	2.7	3.62	混浊	ND3	26.0	318.2	0.7	48.0	32.0	398.8	50.3	79.8
X ₂	36.11	过渡型	1.66	180	3.2	2.93	混浊	ND3	22.7	420.2	0.7	30.0	51.0	501.8	66.0	83.7
X ₃	30.50	过渡型	1.66	180	1.8	1.90	混浊	ND3	25.1	398.4	0.6	46.0	17.0	462.0	71.0	86.2
X ₄	35.10	过渡型	1.66	180	1.6	0.47	混浊	ND3	17.5	332.7	0.6	47.0	43.0	423.3	49.6	78.6
S ₁	22.04	过渡型	1.68	1020	1.4	3.00	发白	ND2	4.3	267.1	0.7	40.0	46.5	354.4	40.6	75.4
S ₂	27.92	过渡型	1.68	380	2.3	1.32	发白	ND3	15.7	420.2	0.8	58.0	30.5	509.5	63.2	82.5
S ₃	37.76	过渡型	1.68	1020	2.7	3.86	发白	ND2	11.7	340.0	1.1	41.0	34.5	416.6	55.3	81.6
S ₄	50.50	过渡型	1.68	1020	2.3	4.73	混浊	ND2	9.3	456.6	2.4	47.6	80.9	587.5	57.0	77.7

表 7 土料分散性鉴定 (方案 2-1)

Table 7 Results of dispersive property tests of the soil samples (scheme 2-1)

土样 编号	碎块试验	针孔试验					原土中交 换钠百分 比 ESP/%	孔隙水可溶盐					钠吸附比 SAR	钠百分比 PS/%	
		干密度/ (g·cm ³)	水头 /mm	终了孔 径/倍	终了流量/ (ml·s ⁻¹)	水色		判断	阳离子含量/(1/n mmol·L ⁻¹)						
									Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺			TDS
X ₁	过渡型	1.66	380	1.0	0.40	发白	ND3	12.4	332.7	0.4	40.0	37.0	410.1	53.6	81.1
X ₂	过渡型	1.66	380	1.0	0.43	发黄	ND3	21.2	420.2	0.6	34.0	46.5	501.3	66.2	83.8
X ₃	过渡型	1.66	380	1.0	0.23	发白	ND3	20.3	376.4	0.7	28.0	38.5	443.6	65.3	84.9
X ₄	过渡型	1.66	380	1.8	0.48	混浊	ND3	9.3	332.7	0.7	35.0	55.0	423.4	49.6	78.6
S ₁	非分散性	1.68	1020	1.0	2.48	发白	ND2	6.1	267.1	1.2	30.0	53.0	351.3	41.5	76.0
S ₂	过渡型	1.68	380	2.7	1.38	发白	ND3	21.8	420.2	1.0	38.0	48.0	507.2	64.1	82.9
S ₃	非分散性	1.68	1020	1.0	1.97	发白	ND2	19.8	303.6	1.1	35.6	44.4	384.6	48.0	78.9
S ₄	过渡型	1.68	180	1.0	0.28	混浊	ND3	17.5	449.2	2.1	31.6	96.9	579.9	56.0	77.5

表 8 土料分散性鉴定 (方案 3-1)

Table 8 Results of dispersive property tests of the soil samples (scheme 3-1)

土样 编号	碎块试验	针孔试验						原土中交 换钠百分 比 ESP/%	孔隙水可溶盐					钠吸附比	钠百分比
		干密度/ (g · cm ⁻³)	水头 /mm	终了孔 径/倍	终了流量/ (ml · s ⁻¹)	水色	判断		阳离子含量/(1/n mmol · L ⁻¹)						
									Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	TDS		
X ₁	过渡型	1.66	180	2.3	1.28	混浊	ND3	5.5	256.0	1.2	42.0	35.5	334.7	41.1	76.5
X ₂	过渡型	1.66	380	3.6	1.08	混浊	ND3	7.2	459.2	1.3	34.0	44.0	538.4	73.5	85.6
X ₃	过渡型	1.66	180	2.3	0.52	混浊	ND3	5.4	298.8	1.2	27.0	36.5	363.5	53.0	82.2
X ₄	过渡型	1.66	380	1.8	1.58	混浊	ND3	6.4	275.8	1.2	34.0	54.0	365.0	41.6	75.6
S ₁	过渡型	1.68	1020	2.3	3.17	微白	ND2	3.4	254.4	1.3	31.0	54.5	341.2	38.9	74.6
S ₂	非分散性	1.68	380	3.6	5.13	发白	ND3	5.7	493.6	1.4	36.0	49.0	580.1	75.7	85.1
S ₃	非分散性	1.68	1020	1.8	4.00	发白	ND2	4.4	288.7	1.6	34.0	37.0	361.3	48.5	79.9
S ₄	非分散性	1.68	1020	1.0	1.08	微白	ND2	4.7	516.5	2.7	31.0	93.0	643.3	65.6	80.3

表 9 方案 1-2、2-2、3-2 针孔试验鉴定结果

Table 9 Results of pinhole tests of the soil samples(schemes 1-1, 2-2 and 3-2)

土样 编号	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	方案 1-2						方案 2-2						方案 3-2					
		水头 /mm	终了孔 径/倍	终了流量 /($\text{ml} \cdot \text{s}^{-1}$)	水色	判断	水头 /mm	终了孔 径/倍	终了流量/ ($\text{ml} \cdot \text{s}^{-1}$)	水色	判断	水头 /mm	终了孔 径/倍	终了流量/ ($\text{ml} \cdot \text{s}^{-1}$)	水色	判断	水头 /mm	终了孔 径/倍	终了流量/ ($\text{ml} \cdot \text{s}^{-1}$)
X ₁	1.66	1020	1.8	3.17	混浊	ND2	1020	1.0	2.53	发白	ND2	1020	3.5	7.33	混浊	ND2	1020	3.5	7.33
X ₂	1.66	1020	2.3	3.98	混浊	ND2	180	1.8	0.58	发白	ND3	1020	1.0	2.50	发白	ND2	1020	1.0	2.50
X ₃	1.66	380	1.8	3.42	混浊	ND3	1020	3.6	5.33	混浊	ND2	1020	4.6	8.00	混浊	ND2	1020	4.6	8.00
X ₄	1.66	1020	1.0	1.67	混浊	ND2	1020	1.0	1.55	发白	ND2	1020	2.3	3.13	混浊	ND2	1020	2.3	3.13
S ₁	1.68	1020	1.0	2.65	清亮	ND1	1020	1.0	2.53	清亮	ND1	1020	1.0	3.47	清亮	ND1	1020	1.0	3.47
S ₂	1.68	1020	1.0	1.67	清亮	ND1	1020	1.0	1.62	发白	ND2	1020	2.3	2.87	清亮	ND1	1020	2.3	2.87
S ₃	1.68	1020	1.0	2.03	清亮	ND1	1020	1.0	3.37	清亮	ND1	1020	1.0	2.33	清亮	ND1	1020	1.0	2.33
S ₄	1.68	1020	1.0	0.71	清亮	ND1	1020	1.0	2.12	发白	ND2	1020	1.0	1.37	发白	ND2	1020	1.0	1.37

S₄属于中等分散性土，其余 2 组是分散性土。孔隙水可溶盐阳离子试验说明三坪 4 组土样都是分散性土。

这几种试验结果呈现不一致性，D. G. 库姆斯^[10]在研究希腊高钠土时也发现这一问题，王观平^[1]等人认为，有些高钠土不分散，有些低钠土却呈分散性，主要与其粘土矿物中蒙脱石种类有关，只有 Na 蒙脱石具有强分散性。这几种试验结果不一致性的原因有四：其一，是两水库筑坝土料粘土矿物中蒙脱石都为 Ca 蒙脱石，只有胀缩性，不具有分散性。第二，是土样中含有大量的易溶盐和中溶盐，由于易溶盐和中溶盐具有胶结作用，在土中可以使土颗粒胶结在一起，抵抗水流的侵蚀。第三，可能是土中虽然含有大量的钠离子，易促使土样发生分散，但土样中同时存在大量的钙镁离子（不仅包括易溶盐、中溶盐中钙镁离子，而且也包括交换性钙镁离子）抑制土样分散。两者相互对土体发生作用，当钙镁离子的抑制作用超过钠离子的分散作用时，土样呈现过渡性或非分散性。第四，就是水流在流经针孔时也会稀释针孔及其附近孔隙水中的盐分，随着孔隙水盐分的稀释溶解，石膏及其他可溶钙镁化合物也发生了溶解，产生了更多的钙镁离子抑制了土样的分散。

因为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，被认为是最可靠的鉴定方法，所以以针孔试验的结果作为最后的判定结果，即西郊 4 组土样及三坪 S₂ 土样属于过渡型土，三坪其余的 3 组土样属于非分散性土。

(2) 三坪土样的抗冲蚀能力较西郊土样强。从表 10 来分析，西郊 4 组土样原土中阳离子交换总量、原土中交换性钠及原土中交换钠百分比大于三坪的 4 组土样。易溶盐中的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 、中溶盐含量小于三坪 4 组土样。这表明在西郊 4 组土样中，Na 离子的分散作用大于三坪 4 组土样，而 Ca、Mg 离子的絮凝作用小于三坪 4 组土样，并且三坪土样中的蒙脱石含量低于西郊土样，故三坪的土样的抗冲蚀能力大于西郊土样。

(3) 从整个试验来看，方案 2-1（表 7）分析结果几乎与方案 1-1 相同。这是因为土体中含盐量很大，

而三坪水库施工用水、西郊水库施工用水及额尔齐斯河水矿化度很低，其对土体的分散性影响很小。

(4) 在方案 3-1（表 8）中，土体中加入三坪水库施工用水、西郊水库施工用水并用额尔齐斯河水配至饱和时，土样的分散性发生了微小的变化。针孔试验、孔隙水可溶盐阳离子试验基本和方案 1-1 的结果相似。从原土中交换性阳离子试验分析，由于 X₂ 的 ESP>7 所以属于中等分散性土，其余 7 组土样属于非分散性土。从碎块试验分析，S₂、S₃、S₄ 属于非分散性土。这表明，土样经处理后分散性有微小的变化。这由于当土样用额尔齐斯河水配至饱和时，额尔齐斯河水中的离子与土样中可交换性离子发生交换，抑制了土样的分散性。

(5) 从表 9 中可看出，方案 1-2、2-2、3-2 中，当冲蚀用水由纯净水改为额尔齐斯河水时，土料的分散性受到明显的抑制。从整个试验来看，土料由原来的过渡型土（ND3）转变为非分散性土（ND2）或由原来的非分散性土（ND2）转变为高抗蚀土（ND1）。这是由于在额尔齐斯河水中 $\text{Ca}^{2+}/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 在水中高达 90.5%。这表明冲蚀用水中的 Ca^{2+} 在抑制土料的分散性中起着举足轻重的作用。另外，由于孔隙水中的盐分被稀释，一般钠百分比都减少了，同时石膏及其它部分可溶性钙化合物的溶解又增加了钙离子或是钙离子保持不变。

根据胶体絮凝理论，离子化合价越高，土的絮凝力就越大。絮凝力按感胶离子序下降，即 $\text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^{+} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+} > \text{Li}^{+}$ 。因为额尔齐斯河水中钙离子占的比重非常大，并且位于感胶离子序前，絮凝力强，可以使土发生絮凝，所以用其做冲蚀用水可以抑制土料的分散性。

4 长期渗流条件下的渗透变形试验和土体中的盐分运移试验

分散性土区别于一般粘性土的一个重要特征是其抗渗强度很低，为了进一步深入研究土料的分散性和在长期渗流条件下坝体的土料中的盐分变化情况，设

计了在反滤料保护条件下的长期渗流渗透变形试验和土体中的盐分运移试验。

4.1 试验说明

西郊水库大坝反滤料采用混合反滤料, 试验仪器采用直径 $\phi 20$ cm 抗渗仪, 试样上部为土样(两水库 4 种土样均匀混合), 高 8 cm, 下部为反滤料, 高 20 cm, 土样制样时模拟工地施工实际, 用西郊水库施工用水配至控制含水率 19.7%, 干密度按设计干密度 1.66 g/cm^3 控制。反滤料按设计干密度 1.98 g/cm^3 控制, 采用真空饱和方法(饱和试样采用额尔齐斯河水), 饱和后水流(采用额尔齐斯河水)自上而下。

三坪水库大坝反滤采用无纺布, 无纺布的有效孔径 O_{95} 为 0.09 mm, 渗透系数为 $1.02 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 。按土石坝设计规范要求, 其排水性满足要求。试验方法与西郊水库土料的渗透变形试验相同。

土样起始坡降加至 50 左右, 定期测其渗流量, 分析渗流水的矿化度, 并观察试样在渗流过程中的变化。

4.2 结果与讨论

从试验过程看, 渗流量随气温升高而升高, 随气温降低而降低。三坪试样渗流量大, 随温度变化趋势较明显, 而西郊试样渗流量小, 随温度变化趋势不明显, 两试样渗流过程渗流量基本稳定, 水流清亮、无混浊迹象。三坪试样渗流量为 $7.0 \times 10^{-4} \sim 9.5 \times 10^{-4} \text{ ml/s}$, 西郊试样渗流量为 $1.6 \times 10^{-4} \sim 4.1 \times 10^{-4} \text{ ml/s}$ 。从渗流水矿化度变化结果看, 由于三坪试样的渗流量大, 渗流水矿化度变化曲线由小变大, 稳定后再下降; 西郊试样的渗流量小, 渗流水矿化度变化曲线由小变大稳定后, 经过 4 个月的渗流仍没有下降的趋势。矿化度变化过程曲线见图 1, 渗流量变化过程曲线见图 2。

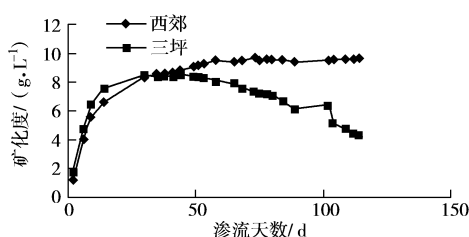


图 1 长期渗流条件下渗流水矿化度含量

Fig. 1 The degree of mineralization of seepage water under long-term seepage condition

试样经过 4 个月的渗流后最后逐级加压进行渗透变形试验, 试验结果见图 3。从试验结果看, 当渗透坡降加至 200 以后, 各试样均未破坏, 渗流水清亮, 无混浊迹象。试验结束后, 对土样进行化学分析, 结果见表 11。

从试验结果可以看出土样经长期渗流后, 土样中易溶盐减少, Na^+ 和 Cl^- 减少量最大, Ca^{2+} + Mg^{2+} 减少量较

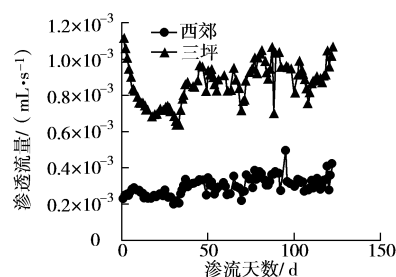


图 2 长期渗流条件下渗透变形试验渗流量

Fig. 2 The seepage in seepage distortion test under long-term seepage condition

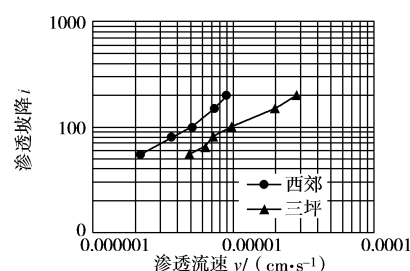


图 3 长期渗流条件下渗透变形试验 $i-v$ 曲线图

Fig. 3 The $i-v$ curves of seepage distortion test under long-term seepage condition

少, 这是由于前者较后者易随水流迁移。由于三坪土样渗流量大, Na^+ 减少了 98.56%, 西郊土样渗流量小, Na^+ 减少了 81.97%。 Ca^{2+} 含量稍有增加, 可能与土样上部防冲层内石子成份和额尔齐斯河水中 Ca^{2+} 含量偏大有关。由此可以认为在长期渗流水的作用下, 坝体土料中的可溶盐 Na^+ 逐渐被水流带出, 能有效抑制土样的分散, 使坝体渗流趋于安全。

5 结 语

(1) 这 8 组土样均为低液限粘土(CL), 均属于以硫酸盐为主的强盐渍土, 中溶盐及难溶盐含量较大, 表明土样中含有较多的胶结物。西郊土样、三坪土样均以伊利石为主, 含有部分蒙脱石和绿泥石, 蒙脱石以伊利石-蒙脱石、绿泥石-蒙脱石混层矿物形式存在, 且蒙脱石为钙蒙脱石。

(2) 三坪土样抗冲蚀性较西郊土样强, 这是因为三坪土样中钠离子的分散作用小于西郊土样, 而钙镁离子的抑制分散作用大于西郊土样, 并且三坪土样中的蒙脱石含量低于西郊土样。

(3) 当冲蚀用水由纯净水改为额尔齐斯河水时, 土料的分散性受到明显的抑制。土样在长期渗流水的作用下, 其中的盐分随水流迁出土体, 由于促进分散性的钠离子易随水流迁移, 并且额尔齐斯河水中的钙离子含量大, 进入土体后会抑制土料的分散性, 促使土体向非散性的方向发展。

表 10 西郊土样与三坪土样某些性质比较

Table 10 Contrast of some characters of Xijiao soil samples with those of Sanping

土样 编号	易溶盐中 ($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$) / ($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)	中溶盐含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	原土中阳离子交换总量/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	原土中交换钠含量 ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	原土中交换 百分比/%
X ₁	0.41	9.66	20.83	5.42	26.0
X ₂	0.39	9.79	21.11	4.78	22.7
X ₃	0.39	8.31	20.22	5.08	25.1
X ₄	0.38	3.12	24.37	4.26	17.5
S ₁	0.57	38.32	15.31	0.66	4.3
S ₂	0.47	38.06	14.32	2.23	15.6
S ₃	0.53	28.27	16.70	1.95	11.7
S ₄	0.42	25.19	20.95	1.94	9.3

表 11 渗流前后土样化学成分比较表

Table 11 Contrast of chemical characters of soil samples before seepage with those after seepage ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土样编号	易溶盐总量	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	中溶盐	
X	渗流前	23.2	0.000	0.159	2.584	1.126	11.887	2.134	0.335	4.742	0.030	7.72
	渗流后	11.0	0.000	0.174	0.027	0.595	6.431	1.804	0.225	0.855	0.870	3.24
S	渗流前	24.1	0.000	0.137	2.470	1.246	12.660	2.823	0.425	4.097	0.055	32.46
	渗流后	12.5	0.000	0.198	0.000	0.132	7.907	2.950	0.171	0.059	1.050	21.31

注：“试验前”值为两水库 4 个土样试验结果平均值。

(4) 由于分散性粘土在蒸馏水中比在盐水中易于分散,所以从最安全角度来考虑国内外针孔试验方法均是以蒸馏水作为试验用水(试样制备用水和冲蚀用水)的结果来进行土样分散性的判定。而在工程实际中,经过土体的渗流水中含有各种不同的离子,其可以促进或抑制土体的分散性。所以,应当在实验室中模拟工程实际情况,通过试验研究来确定土样在实际所处状态情况下的分散性,为工程设计、施工和管理提供确切的试验依据。

参考文献:

- [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,1999:7-8.
- [2] SL251—2000,水利水电工程天然建筑材料勘察规程[S].
- [3] 樊恒辉,李 鹏.新疆引额济克风干渠工程西郊、三坪水库大坝心墙土料分散性鉴定试验报告[R].杨凌:水利部西北水利科学研究所,2000.
- [4] GB50021—94,岩土工程勘察规范[S].
- [5] 黄熙岭.特殊土[A].中国土木工程学会第4届土力学及基础工程学术会议论文选集[C].北京:中国建筑工业出版社,1986:46-52.
- [6] 王观平.粘土矿物与分散性粘土[J].黑龙江水专学报,1994,(3):21-25.
- [7] ASTM D4221-99, Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer[S].
- [8] ASTM D4647-93, Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test[S].
- [9] ASTM D6572-00, Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clay Soils by the Crumb Test[S].
- [10] 黑龙江省水利勘测设计院.分散性粘土译文集[M].哈尔滨,1982.