

# 某大坝心墙土料分散性试验研究

## Study on the dispersive clay of the core wall of a dam

樊恒辉<sup>1,2,3</sup>, 高明霞<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 吴普特<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100 2. 中国科学院水利部西北水土保持研究所 陕西 杨凌 712100 ;  
3. 中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 针对当前通用的分散性鉴定的 5 种试验方法,即双比重计法、针孔试验、碎块试验、孔隙水可溶盐阳离子试验和全土的交换性钠百分比试验的结果往往会出现不相吻合的情况,通过对某拟建大坝心墙土料分散性的研究,从分散性机理和判断标准来分析不相吻合的原因,并认为应当深入研究盐渍土的分散性鉴定试验的定量化判断标准,促进分散性土鉴定试验规程的制定与实施。

**关键词** 分散性土;试验;分散性机理;判断标准

中图分类号:TV 641.25;TU 411 文献标识码:A 文章编号:1000-4548(2003)05-0615-04

**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和新材料研究。

FAN Heng-hui<sup>1,2,3</sup>, GAO Ming-xia<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, WU Pu-te<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shanxi Province, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shanxi Province, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The results of normal double-hydrometer test, pinhole test, crumb test, test for anion of soluble salts of pore water and test for percentage of exchangeable sodium are always different. Through the study on the dispersive clay of the core wall of a dam, the reasons responsible for the disagreement are analyzed on basis of dispersive mechanism and standard of judgement. And, the quantitative standard of judgement must be studied especially for salinized soil in order to draft and implement the specification of dispersive clay test.

**Key words** dispersive clay; test; dispersive mechanism; standard of judgement

## 0 概述<sup>\*</sup>

20 世纪 50 年代澳大利亚发现分散性黏土,并认识到它对水利工程具有破坏作用。随后,世界上许多国家对其进行研究。我国是于 20 世纪 70 年代在黑龙江发现分散性黏土,并且对它进行了深入试验研究。分散性黏土的性质与黏土的物理化学状态和土颗粒表面的电学性质直接相关,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。

目前土工试验规程中尚无分散性试验规定<sup>[1]</sup>,对其进行鉴定国内外尚无标准规范可依,一般还是遵循第一次世界性关于分散性土鉴定学术会议建议的方法,即双比重计法、针孔试验、碎块试验、孔隙水可溶盐阳离子试验和全土的交换性钠百分比试验,但是这几种鉴定方法的结果往往由于土的特殊性而不一致。美国“关于分散性黏土有关管涌及冲蚀”的专题讨论会总结中也承认,对每一种土样都应当做美国水土保持局(SCS)现在使用的 4 个基本室内试验。虽然对大部分土样,几个试验方法都给出一致的成果,然而还有大量的例外情况<sup>[2]</sup>。本文试图通过对某拟建大坝心墙土料分散性的研究,从分散性机理和判断标准来分析这种“大量的例外情况”产生的原因。

## 1 土样的基本物理性质

试验土样选取某拟建水利工程大坝心墙土料,土样的物理性质列于表 1。由表 1 中可见 6 组土样比重在 2.70~2.74 之间。在颗粒组成上,土样 X1 以黏粒为主,属于高液限黏土(CH);土样 X2 的砂粒含量很大,属于低液限黏土(CL);土样 X3 以黏粒为主,属于中液限黏土(CI)。X4、X5 和 X6 的颗粒组成以粉粒为主,属于中液限黏土(CI)。这 6 组土样均满足分散性鉴定的前提条件,即黏性土是指塑性指数大于 7,黏粒含量大于 10% 的土,有分散性和非分散性两大类<sup>[3]</sup>。

## 2 土样的基本化学性质

土样的化学性质列于表 2。由表 2 可见,这 6 组土料的易溶盐含量大,在 5.5~12.4 g/kg 之间,易溶盐中不含碳酸根离子,在阴离子中  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  含量大,在阳离子中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$  含量大。按 GB50021—94《岩土工程勘察规范》规定,这 6 组土样由于易溶盐含量大于 5 g/kg,均属于盐渍土。pH 值在 8.20~8.44 之间,呈碱性。中溶盐含量在 1.59~30.25 g/kg 之间,难溶盐

表1 土样物理性质

Table 1 Physical properties of soil samples

土样 编号	$G_s$	颗粒组成/%			$w_L$ /%	$w_P$ /%	$I_P$ /%	土壤分类	
		> 0.05 mm	0.05 ~ 0.005 mm	< 0.005 mm				按三角图	按塑性图
X1	2.74	10.0	29.2	60.8	46.4	25.9	20.5	黏土	CH
X2	2.72	44.0	31.0	25.0	24.0	16.0	8.0	重壤土	CL
X3	2.73	8.8	43.2	48.0	39.5	22.5	17.0	粉质黏土	CI
X4	2.71	21.8	59.2	19.0	26.1	16.3	9.8	中粉质壤土	CI
X5	2.71	26.8	57.4	15.8	26.5	15.6	10.9	中粉质壤土	CI
X6	2.70	31.4	50.1	18.5	26.2	14.2	12.0	中粉质壤土	CI

表2 土样化学性质

Table 2 Chemical properties of soil samples

土样 编号	易溶盐总量 ( $g \cdot kg^{-1}$ )	化学成分含量( $g \cdot kg^{-1}$ )											pH 值
		$CO_3^{2-}$	$HCO_3^-$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Na^+$	$K^+$	中溶盐	$CaCO_3$	有机质	
X1	8.0	0.000	0.196	4.231	0.610	0.511	0.141	2.216	0.056	1.59	142.6	23.9	8.20
X2	5.5	0.000	0.134	1.599	1.874	0.474	0.116	1.172	0.074	2.46	125.4	12.2	8.44
X3	10.4	0.000	0.151	2.903	3.856	1.339	0.285	1.622	0.131	9.96	128.4	15.1	8.20
X4	9.6	0.000	0.090	0.126	6.486	2.492	0.119	0.075	0.095	7.60	130.4	7.5	8.23
X5	12.0	0.000	0.105	0.669	7.608	3.004	0.141	0.331	0.071	30.25	116.2	8.9	8.25
X6	12.4	0.000	0.089	2.632	4.914	1.727	0.109	1.873	0.098	1.68	116.2	9.7	8.43

表3 土样黏土矿物分析结果

Table 3 The test results of clay mineral

土样 编号	小于 0.002 mm 黏粒含量/%	土样中小于 0.002 mm 黏粒矿物含量/%				土样中小于 0.002 mm 黏粒矿物含量/%							
		黏土矿物				黏土矿物							
		伊-蒙混 层(I/S)	伊利石 (I)	高岭石 (K)	绿泥石 (C)	伊利石 (I)	蒙脱石 (S)	伊-蒙混 层(I/S)	伊利石 (I)	高岭石 (K)	绿泥石 (C)	伊利石 (I)	蒙脱石 (S)
X1	33.5	36.6	5.8	3.7	6.9	18.6	23.8	12.3	2.0	1.2	2.6	6.2	8.0
X2	15.8	37.0	6.9	3.7	5.3	21.7	22.2	5.9	1.1	0.6	0.8	3.4	3.5
X3	26.5	37.7	7.4	3.2	4.8	22.5	22.6	10.0	2.0	0.8	1.3	6.0	6.0
X4	10.2	34.5	11.7	3.3	6.1	32.4	13.8	3.5	1.2	0.3	0.6	3.3	1.4
X5	8.2	37.4	9.1	3.4	6.8	29.7	16.8	3.1	0.7	0.3	0.3	2.4	1.4
X6	10.6	35.9	10.4	2.9	8.7	32.0	14.4	3.8	1.1	0.3	0.3	3.4	1.5

含量在 116.2 ~ 142.6 g/kg 之间,有机质含量在 7.5 ~ 23.9 g/kg 之间。经过化学成分换算,在易溶盐中盐分主要以  $CaSO_4$  和  $NaCl$  形式存在。

### 3 土样的黏土矿物成分

不同类型的黏土矿物,具有不同的晶格结构,同时也决定其具有不同的性质。如蒙脱石是 2:1 型矿物,晶层间联结弱,结合力小,晶格具有扩展性。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。因此,在鉴定土的分散性时,应当分析土的黏土矿物成分,从微观角度来分析土的分散性产生的内在因素。

黏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黏土矿物成分必须先提取土料中小于 0.002 mm 的颗粒,然后对其进行全量化学分析、阳

离子交换总量和 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。对这 6 组土样进行黏土矿物成分试验,结果见表 3。

由表 3 可见,6 组土料小于 0.002 mm 的黏粒中黏土矿物的类型没有多大区别,都是以伊利石-蒙脱石混层矿物为主,其含量占小于 0.002 mm 颗粒的 34.5% ~ 37.7%,其他黏土矿物按含量大小依次为伊利石、绿泥石和高岭石。但是若按照伊利石-蒙脱石混层矿物的混层比计算出伊利石、蒙脱石含量,则有差别。土样 X1、X2 和 X3 在小于 0.002 mm 的黏粒中伊利石含量少,蒙脱石含量大;X4、X5 和 X6 则正好相反,伊利石含量大,蒙脱石含量少。由于小于 0.002 mm 的黏粒在全土中所占百分数不同,各种矿物在全土中的含量也就有明显差别。在 X1、X3 中伊利石含量分别是 6.2% 和 6.0%,蒙脱石含量分别是 8.0% 和 6.0%。X2、X4、X5、X6 中伊利石和蒙脱石含量少,分别为 2.4% ~ 3.4% 和 1.4% ~ 3.5%。土中蒙脱石的存在是产生分散性的前

表 4 土样分散性鉴定试验汇总表

Table 4 Test results of dispersive property of the soil samples

土样 编号	(1)	(2)	(3)				(4)	(5)							
	分散度 SCS/%	碎块试验现象描述	$\rho_d$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	水头 (mm)	终了孔 径/倍	终了流量 ( $mL \cdot s^{-1}$ )	水色 判断	ESP /%	阳离子含量/( $\frac{1}{n} mmol \cdot L^{-1}$ )						
								Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	TDS	SAR	PS /%	
X1	64.1	无分散出胶粒的反应 水色清澈	1.54	1020	1.0	1.95	透明	14.1	192.6	2.0	117.6	49.4	361.7	21.1	53.3
X2	20.0	无分散出胶粒的反应 水色清澈	1.78	50	1.5	0.40	混浊	10.7	164.6	3.4	74.0	33.4	275.4	22.5	59.8
X3	19.8	无分散出胶粒的反应 水色清澈	1.59	1020	1.0	1.37	稍透明	9.5	141.2	3.6	81.2	43.6	269.6	17.9	52.4
X4	32.3	土块水解后有少量混浊 范围很小	1.76	50	3.0	1.07	混浊	1.1	8.9	2.2	30.8	15.4	57.4	1.9	15.6
X5	20.5	土块水解后有少量混浊 范围很小	1.76	50	2.5	1.60	混浊	5.1	52.4	2.2	40.6	23.0	118.2	9.3	44.4
X6	34.6	土块水解后有少量混浊 范围很小	1.76	50	4.0	1.17	混浊	12.7	216.6	4.2	58.4	28.0	307.3	33.0	70.5

附土样分散性判断标准。(1)双比重计试验:非分散土 SCS < 30% 过渡性土 SCS = 30% ~ 50% 分散性土 SCS > 50%。(2)碎块试验:分散性土,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;过渡性土,土块水解后四周有微量混浊,但扩散范围小;非分散性土,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。(3)针孔试验:非分散土,在 380 ~ 1020 mm 水头下针孔不扩大,出水流很清;过渡性土,在 180 ~ 380 mm 水头下针孔冲蚀较慢,出水流稍混浊;分散性土,在 50 mm 水头下针孔迅速扩大,出水流混浊。(4)交换性钠百分比(ESP)试验:ESP = 7 ~ 10 属中等分散性土;ESP ≥ 15 属高分散性土,即有严重管涌的可能性。(5)孔隙水阳离子试验:①钠百分比 PS,当总量 TDS > 1 时,非分散性土 PS < 40% 过渡性土 PS = 40% ~ 60% 分散性土 PS > 60%。②钠吸附比 SAR,分散性土若 TDS > 5 则需 SAR > 2.7,若 TDS > 10 则需 SAR > 4.2,若 TDS > 100 则需 SAR > 13。

表 5 土料分散性鉴定结果表

Table 5 Test results of dispersive property of the soil samples

土样编号	双比重计试验	碎块试验	针孔试验	交换性钠百分比 试验	孔隙水阳离子试验		综合判断
					钠吸附比 SAR	钠百分比 PS	
X1	分散性土	非分散性土	非分散性土	分散性土	分散性土	过渡性土	非分散性土
X2	非分散性土	非分散性土	分散性土	分散性土	分散性土	过渡性土	分散性土
X3	非分散性土	非分散性土	非分散性土	中等分散性土	分散性土	过渡性土	非分散性土
X4	过渡性土	过渡性土	分散性土	非分散性土	非分散性土	非分散性土	分散性土
X5	非分散性土	过渡性土	分散性土	非分散性土	过渡性土	过渡性土	分散性土
X6	过渡性土	过渡性土	分散性土	分散性土	分散性土	分散性土	分散性土

提条件,从矿物化学角度来说,由于在 X1、X3 中蒙脱石含量大于 X2、X4、X5、X6 中蒙脱石含量,所以 X1、X3 土样的分散性应大于 X2、X4、X5、X6 土样。

## 4 结果与讨论

根据当前通用的关于分散性黏土鉴定的 5 种方法,对 6 组土样进行试验,试验方法参见文献[2~5],试验结果见表 4。根据判定标准,将 5 种试验的判断结果列于表 5。5 种方法判定的结果不尽相同,而且与黏土矿物鉴定结果出现分歧。值得注意的是,由于这 6 组土样中含盐量很大,在做双比重计试验测定颗粒机械组成时必须洗盐,但是洗盐本身就是一个分散的过程,所以双比重计试验的结果只能作为一个参考。经过分析研究,可以从以下几方面解释。

### 4.1 从分散性土的分散性机理考虑

分散性土是一种能在低含盐量水中(或纯净水中)大部分或全部自行分散成原级颗粒的黏性土。土在水中分散的实质是颗粒间的连结在水的作用下破坏的过程,也是颗粒间斥力超过吸引力使得相互排斥作用占优势的结果。土具有分散性的 3 个条件是:

(1)含有一定量的结构不稳定的黏土矿物,即蒙脱石。蒙脱石类黏土矿物属于 2:1 型矿物,即由 2 个硅

氧四面体夹 1 个铝氧八面体形成三层矿物。但是片与片之间无 K<sup>+</sup> 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。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)。

(2)胶结物含量不足以抑制膨胀和分散作用。土壤中的胶结物质种类很多,归纳起来,大致有 3 类,即黏粒、有机物质和一些简单的无机胶体。黏粒具有很大的表面积,黏接力很强,在土壤的团粒形成中起着重要作用。有机物质同样也是一种胶体,可以促进团粒的形成。简单的无机胶体主要是氧化铁、氧化铝及其他无机物。它们成胶膜包在土粒的表面,当它们由溶胶转变为凝胶时,把土粒胶结在一起。

(3)高 pH 的碱性介质环境。酸碱度(pH 值)是土的主要环境因素之一,对土中黏土矿物的形成有一定影响,一般具碱性或微碱性的土壤环境有利于蒙脱石类黏土的形成,而酸性条件则易于生成高岭石类黏土矿物。土呈碱性时,土粒表面易于形成扩散双电层使颗粒趋于分散,这种土一般分散度较高,塑性较大,遇水易于膨胀,失水易于收缩<sup>[6]</sup>。

土样中与分散性机理有关的测定结果见表 6。由

表6可见,在X1、X3蒙脱石的含量多,分别是6.0%和8.0%,X2、X4、X5和X6中蒙脱石的含量少,在1.4%~3.5%之间。如果按照土的分散性机理的第一条件来说,蒙脱石越多,其分散性应该越大,但是由于在X1、X3中其黏粒含量、有机质含量明显高于其他4组土样。而且pH值也较其他4组土样低。这几种因素综合作用,使得X1、X3土样具有较强的团聚作用,分散性较低,可以抵抗水流的冲蚀,在碎块试验和针孔试验中显示出非分散性土的特征,而X2(碎块试验除外)、X4、X5和X6则显示分散性土或过渡性土的特征。

表6 土样中与分散性机理有关的测定结果比较表

Table 6 Comparison of some results related to dispersive mechanism

土样编号	蒙脱石/%	黏粒/%	有机质( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	pH值
X1	8.0	60.8	23.9	8.20
X2	3.5	25.0	12.2	8.44
X3	6.0	48.0	15.1	8.20
X4	3.3	19.0	7.5	8.23
X5	2.4	15.8	8.9	8.25
X6	3.4	18.5	9.7	8.43

#### 4.2 从判断标准来考虑

针孔试验表示分离颗粒所需的力,碎块试验和双比重计试验表示颗粒的大小和团粒的多少,土的化学试验则表示颗粒之间双电层相互作用。双电层相互作用受矿物成分和土内孔隙水的化学性质的影响,而它又影响分离颗粒所需的力及颗粒的大小。交换作用力的特性可以用孔隙水的化学指数来表示,如用钠吸附比和钠百分比表示。

这6组土样都属于盐渍土,在土体中含有大量的可溶性离子。现有的孔隙水可溶盐阳离子试验和全土的交换性钠百分比试验等化学指标的试验判断标准是否适用于盐渍土,尤其高钠土,仍需继续研究。美国学者谢拉德指出<sup>[2]</sup>:更好的了解某些例外情况是特别重要的,即有些低钠黏土处于分散性状态,而另一些高钠黏土确实是非分散性的。这可能是由于土中虽然含有大量的钠离子,促使土样发生分散,但是土样中同时存在大量的钙镁离子(包括易溶盐和中溶盐中的钙镁离子)和胶结物质,抑制土样分散,两者相互对土体发生作用,当钙镁离子和胶结物质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现象。王观平等在研究黑龙江南部的典型分散性土时<sup>[3]</sup>,委托武汉地质学院做分散性鉴定试验,武汉地质学院认为:可溶盐的测定表明,土中易溶盐及中溶盐含量极少,主要含有难溶的碳酸盐类,由于碳酸盐类往往呈单独颗粒出现,或附在其他颗粒表面上,此外如有机质含量较少,也无游离氧化铁,均表明土中胶结物质很少。这证明了黑龙江南部的典型分散性土中由于易溶盐及中溶

盐含量极少,这5种试验方法结果可以较好地相互吻合。另外,一些学者研究认为,这种现象主要与其黏土矿物中蒙脱石种类有关,只有Na蒙脱石具有强分散性,Ca蒙脱石只具有部分分散性。

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,所以用针孔试验的结果作为最后的判定结果,X1、X3为非分散性土,X2、X4、X5和X6为分散性土。

## 5 结 语

(1)由于分散土发现仅有几十年的时间,其鉴定方法尚不成熟,无一标准规范可依,尤其对盐渍土的分散性鉴定,由于含盐量大,鉴定标准中的化学指标是否适用尚待继续研究讨论。在目前的几种鉴定方法中,由于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,所以以针孔试验结果作为最后判定结果,X1、X3为非分散性土,X2、X4、X5和X6为分散性土。

(2)目前通用的5种试验鉴定结果,往往会出现不相吻合的现象,尤其是盐渍土的分散性鉴定结果。只要从分散性的机理找原因,一般可以得到完满的解释。应当加强对分散性土的研究,尤其是盐渍土的分散性判断标准的定量化研究,促进分散性土鉴定试验规程的制定与实施。

(3)我国分散性黏土分布较普遍,黑龙江、新疆、江苏、陕西、山西等省在工程实践中都曾遇到。使用分散性土作为筑坝土料不可避免,只要采取正确的保护性措施,能够确保大坝的安全运行。一般来说,保护措施有以下几种:①把大坝包起来,即把低含盐量水和分散性土隔离开来,避免水进入分散性土体内;②改性坝体土质,通过加入石灰等化学物质使得分散性土或过渡性土变为非分散性土;③在防渗体(分散性土)后设置适当级配的砂反滤,以截住坝体细颗粒,使其不流出坝体。在以后工作中,应当重视土-水系统关系的研究。

#### 参考文献:

- [1] SL251—2000, 水利水电工程天然建筑材料勘察规程[S].
- [2] 黑龙江省水利勘测设计院. 分散性黏土译文集[Z]. 1982.
- [3] 王观平, 张来文, 等. 分散性黏土与水利工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [4] 钱家欢. 分散性土作为坝料的一些问题[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 94—100.
- [5] 马秀媛, 徐又建. 青岛市官路水库分散性黏土工程特性及改性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 441—444.
- [6] 高国瑞. 近代土质学[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990.