

# 土料分散性判别试验研究

## Study on the Dispersive Identification of Soil

樊恒辉<sup>1</sup> 李振<sup>1</sup> 周俊<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. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 西安, 710065)

**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5种试验方法,结合野外调查、土样物理化学性质和矿物成分分析,对班多水电站大坝防渗土料分散性进行了研究分析,认为该防渗土料属于分散性黏土,土样呈强碱性和含有大量的钠离子是导致土样产生分散性的主要原因。

**关键词:**分散性黏土 野外调查 物理化学性质 黏土矿物 酸碱度 钠离子

### 1 前言

班多一级水电站位于青海省同德县和兴海县交界处的班多峡谷内,距峡谷出口约6.5 km,是龙羊峡上游茨哈—羊曲河段海拔3000 m以下最大的一个梯级。枢纽工程主要建筑物为心墙堆石坝(或面板堆石坝)、泄水溢洪道及泄洪洞、引水发电系统。最大坝高251~255 m。该工程所用的防渗土料为第四纪上更新统(Q<sub>3</sub>)冲洪积粉质壤土,料场位于坝址左岸平台上。

黏性土有分散性和非分散性两大类<sup>[1]</sup>。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黏性土<sup>[2]</sup>。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。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的破坏作用后,引起工程界的注意,许多国家对其进行研究。我国分散性黏土分布较普遍,20世纪70年代首先在黑龙江引嫩工程中发现,随后在新疆、江苏、陕西、山西等省的工程实践中都曾遇到。因此,在工程设计和施工中应对其予以重视。本文应用双比重计试验、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等5种试验方法,结合野外调查、物理化学性质和矿物成分分析,对班多水电站大坝防渗土料进行了分散性试验研究,以研究土样的分散性能,为工程设计和施工提供科学依据<sup>[3]</sup>。

### 2 土样的物理化学性质

#### 2.1 土样的物理性质

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2.71~2.72。颗粒组成均以粉粒(0.075~0.005 mm)为主,其含量为64.5%~69.0%。从界限含水率来看,液限含水率为28.0%~29.6%,塑限含水率为14.1%~17.6%,塑性指数为12.0~15.0,均为低液限黏土(CL)。

#### 2.2 土样的物理性质

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低,为1.768~2.574 g/kg。pH呈强碱性,为8.62~9.43。中溶盐含量为0.08~4.84 g/kg,难溶盐含量为135.11~167.00 g/kg,有机质含量为1.95~3.95 g/kg。

表 1 土样物理性质

土样编号	比重/G <sub>s</sub>	颗粒组成/%			液限 W <sub>L</sub> /%	塑限 W <sub>p</sub> /%	塑性指 数 I <sub>p</sub>	土壤分类	
		>0.075 mm	0.075 ~0.005 mm	<0.005 mm				按三角图	按塑性图
1	2.72	21.0	66.0	13.0	28.4	14.1	14.3	轻壤土	低液限黏土
5	2.72	17.5	64.5	18.0	29.0	16.8	12.2	中粉质壤土	低液限黏土
8	2.72	9.0	66.0	25.0	29.6	17.6	12.0	重粉质壤土	低液限黏土
10	2.71	8.0	65.0	27.0	28.0	15.4	12.6	重粉质壤土	低液限黏土
11	2.71	20.0	65.0	15.0	28.5	14.8	13.7	轻壤土	低液限黏土
15	2.71	20.0	69.0	11.0	28.8	14.6	14.2	轻壤土	低液限黏土
22	2.71	22.0	68.4	9.6	28.0	14.6	13.4	重砂壤土	低液限黏土
24	2.72	12.0	67.5	20.5	29.5	14.5	15.0	重粉质壤土	低液限黏土

注：三角图分类按照 SD126—84；塑性图分类按照 SL 237—1999。

表 2 土样化学性质

土样 编号	化学成分含量/(g · kg <sup>-1</sup> )												pH
	易溶盐	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	中溶盐	难溶盐	有机质	
1	1.768	0.059	0.149	0.246	0.738	0.044	0.037	0.469	0.027	1.54	148.40	3.00	8.62
5	2.289	0.029	0.179	0.920	0.379	0.093	0.057	0.607	0.025	4.84	167.00	2.92	8.99
8	2.056	0.029	0.209	0.152	1.019	0.044	0.044	0.532	0.027	1.67	165.86	1.95	9.17
10	1.990	0.029	0.209	0.568	0.520	0.057	0.039	0.545	0.024	2.86	157.89	3.95	9.15
11	2.574	0.000	0.194	0.786	0.773	0.065	0.120	0.610	0.027	2.15	135.11	2.07	8.79
15	1.819	0.059	0.178	0.435	0.531	0.032	0.023	0.539	0.022	0.54	165.10	2.39	9.43
22	1.981	0.029	0.223	0.369	0.716	0.058	0.038	0.523	0.024	0.08	140.43	3.75	9.25
24	1.862	0.029	0.179	0.529	0.496	0.040	0.028	0.541	0.020	1.12	149.92	2.51	9.32

### 3 分散性黏土判别试验方法

#### 3.1 野外观察判别方法

分散性黏土的鉴定应当从野外调查开始。有分散性黏土分布的地区，下雨后路旁的水沟、水坑和河道里流的水都是浑浊的，水流过后水坑里的水仍然是浑的，长久不会澄清。水坑干涸后坑底会留下很细的黏土沉积，干后出现龟裂。在有坡度的地方会出现冲沟和孔洞等异常冲蚀形式的表面迹象。

#### 3.2 室内试验判别方法

分散性黏土的性质是与黏土的物理化学状态和土颗粒表面的电化学性质直接相关的，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化学性质，所以无法鉴定。鉴于目前国内仍没有鉴定分散性黏土的规程，本次试验主要参照《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》(SL251—2000)中介绍的双比重计试验、针孔试验、碎块试验、孔隙水可溶盐阳离子试验等 4 种试验方法和美国材料与试验协会制定的双比重计法(ASTM D4221—99)<sup>[4]</sup>、针孔试验(ASTM D4647—93(1998))<sup>[5]</sup>、碎块试验(ASTM D6572—00)<sup>[6]</sup> 3 种试验规程，采用双比重计法、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 5 种试验方法来综合判别土样的分散性。5 种试验的方法，可参考文献 4~7。

#### 4 土样的黏土矿物成分

黏土矿物主要富集于 $<2\mu\text{m}$  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 $<2\mu\text{m}$  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。土样黏土矿物分析结果列于表 3。

表 3 土样黏土矿物分析结果

土样 编号	黏土矿物		全土中各种矿物含量/%														全土中伊利石、蒙脱石的估算值/%	
	总量	伊-蒙混层(I/S)	非黏土矿物含量											黏土矿物含量			伊利石(I)	蒙脱石(S)
			伊利石(I)	高岭石(K)	绿泥石(C)	混层比(S)/I/S	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	其他	伊-蒙混层(I/S)	伊利石(I)	高岭石(K)	绿泥石(C)		
1	19.8	6.7	69.3	10.0	14.0	35.0	35.1	8.0	16.7	15.4	2.2	2.8	1.3	13.7	2.0	2.8	14.1	1.0
5	26.9	9.3	60.7	13.0	17.0	35.0	32.6	3.1	17.3	15.4	2.8	1.9	2.5	16.3	3.5	4.6	17.0	1.8
8	21.4	7.0	69.0	9.7	14.3	40.0	28.0	5.5	25.8	13.7	2.5	3.1	1.5	14.8	2.1	3.1	15.2	1.1
10	9.9	6.0	69.0	10.1	14.9	35.0	43.7	6.2	18.5	15.8	2.5	3.4	0.6	6.8	1.0	1.5	7.0	0.4
11	22.4	7.7	66.3	10.8	15.2	35.0	41.8	3.2	15.9	10.5	2.2	4.0	1.7	14.8	2.4	3.4	15.3	1.3
15	20.4	5.6	69.4	10.7	14.3	35.0	33.0	9.0	17.5	13.7	2.8	3.6	1.1	14.2	2.2	2.9	14.5	0.8
22	21.7	7.4	69.6	9.5	13.5	40.0	37.4	4.1	19.1	12.2	3.6	1.9	1.6	15.1	2.1	2.9	15.6	1.1
24	25.0	8.3	66.7	10.6	14.4	35.0	33.3	6.1	16.0	13.1	4.1	2.4	2.1	16.7	2.6	3.6	17.2	1.5

从表 3 可以看出, 这 8 组土样的黏土矿物的类型是没有多大区别的, 主要成分均是伊利石, 其含量占全土的 7.0%~17.2%, 少量伊利石以伊利石-蒙脱石混层矿物形式存在。其次含有少量的绿泥石、高岭石。蒙脱石含量少, 其含量占全土的 0.4%~1.8%。非黏土矿物主要以石英、斜长石、方解石为主。

#### 5 试验结果与分析

土料场自然断面见图 1。对 8 组土样进行了双比重计试验、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 5 种试验, 试验结果见表 4。针孔试验、碎块试验现象如图 2 和图 3 所示。

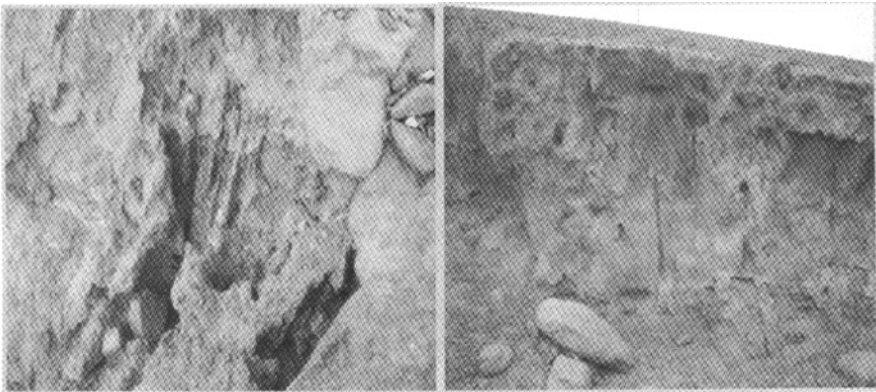


图 1 土料场断面照片

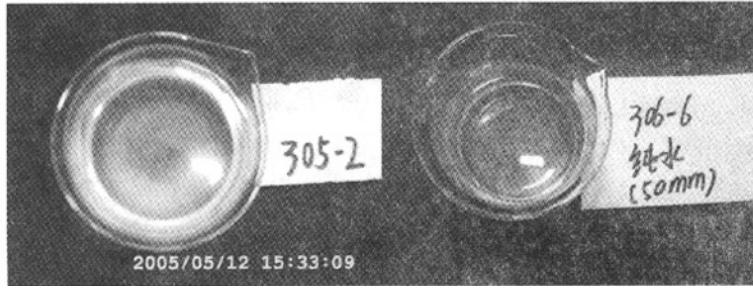


图2 碎块试验照片

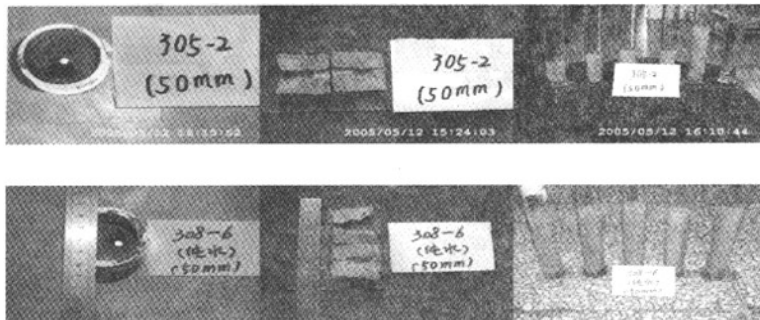


图3 针孔试验照片

从图1可以发现,料场土层断面在雨水的作用下冲蚀形成冲沟、孔洞等异常的冲蚀现象,这说明料场的土料可能具有分散性。从表4中可以看出,5种试验方法的判断结果具有一定的离散性。双比重计试验结果为过渡性土或非分散性土,其他4种试验结果均为过渡性土或分散性土。考虑到针孔试验由于模拟土体在水流作用下的实际冲刷状况而具有较高的可靠性和工程的安全系数,综合鉴定认为这8组土样所代表的料场土料为分散性黏土。

表4 土料分散性鉴定

土样编号	双比重计试验 %	碎块试验	针孔试验					全土中交换钠百分比 ESP/%	孔隙水可溶盐阳离子试验							
			干密度 $(g \cdot cm^{-3})$	水头 /mm	终了孔径/倍	终了流量 $(ml \cdot s^{-1})$	水色		判断	阳离子含量 $(1/mmol \cdot L^{-1})$					钠吸附比 SAR	钠百分比 PS/%
										Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	TDS		
1	38.5	分散性土	1.70	5	5-8	0.84	浑浊	分散性土	11.5	51.79	1.17	9.20	16.65	78.81	14.4	65.7
5	38.9	过渡性土	1.83	5	4-10	0.78	浑浊	分散性土	14.1	67.78	1.39	14.60	26.75	110.52	14.9	61.3
8	40.0	过渡性土	1.76	38	1	1.07	浑浊	过渡性土	15.5	58.18	1.51	9.60	16.75	86.04	16.0	67.6
10	38.9	过渡性土	1.79	18	3-8	0.67	浑浊	过渡性土	18.8	62.66	1.39	11.80	20.15	96.01	15.7	65.3
11	26.7	分散性土	1.83	5	5-12	0.42	浑浊	分散性土	9.9	63.30	1.17	21.40	23.95	109.82	13.3	57.6
15	45.5	分散性土	1.72	5	5-11	1.45	浑浊	分散性土	17.3	58.18	0.83	6.65	11.65	77.31	19.2	75.3
22	10.4	过渡性土	1.71	5	6-12	1.66	浑浊	分散性土	13.5	64.58	0.83	7.15	23.15	95.70	16.6	67.5
24	29.3	过渡性土	1.77	18	1	0.73	浑浊	过渡性土	14.3	52.43	0.83	8.65	16.70	78.61	14.7	66.7

注:图2和图3照片中的305-2、306-6和308-6分别对应土样编号1、8和22。

### 5.1 土-水-电解质系统与土的分散性

在常态下,水是土中液相物质的主要成分,溶解于水中的各种电解质以离子或化合物的形式存在于水中,它和水以及水中的黏土颗粒构成土-水-电解质系统,影响土的工程性质。在土-水-电解质系统中,土表面离子浓度很高,分子的热运动企图使离子均匀地分布于溶液中,因而产生一种扩散的趋势。然而土颗粒表面负电荷对阳离子所起的引力,使得土颗粒周围的阳离子由密而疏分布,直到阳离子的浓度和溶液中的浓度相同处,这样就形成所谓的“扩散双电层”<sup>[8]</sup>。

一般来说,双电层越厚,悬浮液中的颗粒的絮凝倾向就越小,即颗粒分散性能就越强。当黏土颗粒表面电荷恒定时,扩散层厚度  $h$  与离子价  $v$  成反比,与离子浓度  $n_0$  的平方根成反比,而与介电常数  $D$  和温度  $T$  的乘积  $DT$  的平方根成正比,即

$$h = [DKT / (8\pi n_0 e^2 v^2)]^{1/2}$$

在实际情况下,介电常数和温度的变化对双电层的厚度没有多大影响。而溶液中离子的浓度和化合价对扩散双电层的厚度具有明显的影响。因此,离子价越高,离子浓度越大,扩散层的厚度越小。

另外,由于水是极性分子,在溶液中它要被粒子吸引并使离子发生水化,使离子形成水化膜。离子水化膜的厚度与离子半径大小有关。一般而言,离子的半径越小,水化离子的半径就越大,形成的水化膜就越厚。

因此,根据库仑定律(即当电量一定时,库仑力  $F$  与两点电荷之间的距离的平方  $r^2$  成反比;当距离一定时,库仑力与两点电荷的电量的乘积  $Q_1 Q_2$  成正比)可知,在悬液中土壤颗粒之间的排斥力(因为土壤颗粒由于同晶置换等作用带负电荷)与距离的平方成反比。当悬液中离子为一价离子时,由于扩散双电层厚度增大,离子水化膜厚度增大,因此土壤悬液中颗粒之间的斥力大,悬液呈稳定状态;当悬液中离子为二价离子时,由于扩散双电层厚度降低,离子水化膜厚度也降低,因此土壤悬液中颗粒之间的斥力减小,悬液呈絮凝状态。

土壤颗粒间除了排斥力以外,还存在吸引力,吸引力指的是范德华力。Lifshitz 理论认为,颗粒间的吸引力与颗粒间的距离的 4 次方成反比。因此,在颗粒间的距离增大时,颗粒间的吸引力衰减得很快,颗粒间的排斥力相对来说较慢。在土壤颗粒间,双电层的排斥力和范德华力以净势能的形式体现出来。离子价、离子浓度、介电常数  $D$  和温度  $T$  对斥力的影响是很敏感的,但是范德华力仅受介电常数和温度的影响。两者相互作用的结果,当斥力能高时,悬液中的颗粒受阻不能紧密接近,悬液呈稳定状态;当引力能高时,颗粒相互紧密靠近从而产生絮凝,从悬液中沉降下来。

在自然界形成的土壤中,阳离子一般包括  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$ , 其中最重要的是  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$ 。从上面的阐述可以看出,一价  $\text{Na}^+$  的双电层厚度是二价  $\text{Ca}^{2+}$  的约 2 倍,导致双电层的厚度增大。另外,钠离子的半径小于钙离子的半径,则水化钠离子的半径大于水化钙离子的半径。因此,若土样中含有大量的钠离子,使得土壤颗粒间的排斥力大于吸引力,净势能表现为斥力,土样产生分散。

从土样的化学分析、交换性钠百分比以及孔隙水可溶盐试验中可以看出,在易溶盐中钠离子的含量占阳离子总量的 77.6%~87.4%,交换性钠占阳离子交换总量(CEC)的 9.9%~18.8%,孔隙水中钠离子占孔隙水溶液中阳离子总量(TDS)的 57.6%~75.3%,这说明土样含有大量的钠离子。因此,认为土样中钠离子含量高是土样产生分散的主要原因之一。

## 5.2 土样黏土矿物类型与土的分散性

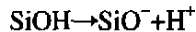
黏土矿物常见的有高岭石类、蒙脱石类、伊利石类，它们是土中物理化学性质活跃的物质，对于土特别是黏土的工程性质有着显著影响。

高岭石类属于 1:1 型黏土矿物，即由一个硅氧四面体和一个铝氧八面体叠合在一起形成双层矿物。硅氧四面体中的  $O^{2-}$  与铝氧八面体中  $OH^-$  形成氢键，使得这两片的离子正好结合在一起。在高岭石中很少遇到同晶置换，电荷基本上是平衡的，所以高岭石晶层牢固，晶格无扩展性、分散性和胀缩性，阳离子交换量也较低，在 3~15 cmol/kg。蒙脱石类黏土矿物属于 2:1 型矿物，即由两个硅氧四面体夹一个铝氧八面体形成三层矿物。但是片与片之间无  $K^+$  联结，水可以进入片层之间，使晶体产生很大的体积改变。故蒙脱石类晶层间联结弱，晶格具有扩展性，阳离子交换量较高，在 80~150 cmol/kg。伊利石类黏土矿物与蒙脱石类黏土矿物一样也属于 2:1 型矿物，即由两个硅氧四面体夹一个铝氧八面体形成三层矿物。伊利石也有同晶置换，主要发生在四面体中。伊利石与蒙脱石的主要差别是，伊利石晶胞之间结合的不是水而是  $K^+$  或  $Na^+$  所联结。故伊利石晶层间较牢固，阳离子交换量也较低，在 10~40 cmol/kg，其分散性和胀缩性较蒙脱石小。由于伊利石也有同晶置换，也会产生负电性而吸附阳离子，伊利石在大量吸附钠离子后，也会像蒙脱石那样具有强分散性。

从表 4 中可以看出，在 8 组土样中，黏土矿物主要以伊利石为主，蒙脱石的含量低，在土体中的作用非常有限，因此，认为土样的分散性不是蒙脱石引起的，但由于料场土壤中含有大量的钠离子，伊利石也会像蒙脱石那样，在大量吸附钠离子后具有强分散性。这也许是某些学者认为“伊利石也具有分散性”的原因<sup>[9]</sup>。

## 5.3 土样酸碱度(pH)与土的分散性

黏土颗粒表面和边缘有可能暴露出来的羟基具有分解的趋势：



它受到 pH 值的强烈影响，pH 值越高， $H^+$  进入溶液的趋势越大，颗粒的有效负电荷就越大。除此之外，暴露在黏土矿物边缘的  $-AlO$  是两性的，在低 pH 值下表现为正电性的  $-Al^{3+}$ ，在高 pH 值下表现为负电性的  $-AlO^{2-}$ 。因此，pH 值对黏土悬液性状具有重要的影响，低 pH 值会引起颗粒带正电荷的边缘与带负电荷的表面相互作用，导致颗粒从悬液中絮凝；高 pH 值使悬液稳定或黏土颗粒分散。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。因此，土样 pH 值高是土样产生分散性的原因之一<sup>[10]</sup>。

从表 8 可以看出，8 组土样的酸碱度(pH)高，属于强碱性土。黏土颗粒表面的羟基  $SiOH$  在强碱性条件下受到强烈的分解，生成  $SiO^-$ ；另外，颗粒表面的  $-AlO$  在强碱性条件下也生成  $-AlO^{2-}$ 。这样使得黏土颗粒本来由于同晶置换等作用带有的负电荷量增加，根据电荷的作用原理，土壤颗粒之间的排斥力增大，导致土颗粒分散性加剧。所以认为这 8 组土样的酸碱度高是土样产生分散性的原因之一。

## 6 结语

(1) 采用分散性鉴定 5 种试验方法，综合野外调查、土样的物理化学性质和矿物成分分析，认为这 8 组土样所代表的料场土料具有分散性。

(2) 土样中的黏土矿物主要以伊利石为主，蒙脱石含量较少，而且以伊-蒙混层矿物形式存在，可以认为，蒙脱石不是造成该料场土样分散性的主要原因。但由于土中含有大量的钠

离子,这使得伊利土像钠蒙脱土一样具有强分散性。

(3) 该料场土样产生分散性的主要原因包括两个方面:① 土样中含有大量的钠离子。大量钠离子的存在,使得土壤颗粒之间的净势能表现为斥力,这是土样产生分散性的最主要的原因。② 土样 pH 值高(强碱性)。pH 值越高,黏土颗粒表面和边缘有可能暴露出来的羟基分解形成的  $H^+$  进入溶液的趋势越大,颗粒的有效负电荷就越大;另外,暴露在黏土矿物边缘的氧化铝是两性的,在低 pH 值下表现为正电性,在高 pH 值下表现为负电性,这也使得土壤颗粒之间的斥力增加,促使土样分散。

(4) 建议对分散性黏土进行深入的研究,包括分散性黏土在中国的分布状况、分散性机理、完善鉴定方法和分散性的改性与工程应用等等方面。

### 参 考 文 献

- 1 王观平,张来文,阎仰中. 分散性黏土与水利工程. 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
- 3 樊恒辉,李振. 青海班多一级水电站防渗土料物理化学性质及分散性鉴定专项试验研究报告. 陕西,杨凌:水利部西北水利科学研究所,2005
- 4 ASTM D4221—99, Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer
- 5 ASTM D4647—93, Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test
- 6 ASTM D6572—00, Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test
- 7 樊恒辉. 分散性黏土鉴定方法与工程实例. 陕西,杨凌:水利部西北水利科学研究所,2005
- 8 高国瑞. 近代土质学. 南京:东南大学出版社,1990
- 9 黑龙江省水利勘测设计院. 分散性黏土译文集. 哈尔滨:1982
- 10 黄熙龄. 特殊土. 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选集. 北京:中国建筑工业出版社,1986,46-52