文家沟水库筑坝土料分散性和抗渗性能试验

樊恒辉[1,2]，孔令伟[1]，郭敏霞[2]，李 鹏[2]，刘惹梅[2]
（1.中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100）

摘 要：遇水分散并流失破坏是分散性土的重要特征，对工程的安全性造成严重威胁，但是由于分散性土发现较晚，工程实例较少，因而对分散性土的判别方法、分散机理及其应用等研究不够深入。在分析土样物理化学性质和矿物成分的基础上，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试验方法，对文家沟水库筑坝土料的分散性和分散机理进行了研究，并探讨了土样自身抗渗和在反滤料保护条件下的抗渗性能。研究认为，文家沟水库筑坝土料属于过渡性土和分散性土；土样中含有较多的蒙脱石和钠离子以及酸碱度较高是土样产生分散性的主要原因；土样的自身抗渗较差，但是在有反滤料保护条件下具有良好的抗渗性能。结果表明：黏土产生分散性的条件是土样中含有较多的蒙脱石和钠离子以及酸碱度呈强碱性，分散性土在合适的反滤料条件下具有较强的抗渗性。

关键词：水工材料；分散性土；物理化学性质；分散机理；抗渗性能
中图分类号：TV443 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2009)03－0458－06

作者简介：樊恒辉(1973－)，男，山西夏县人，博士，工程师，主要从事特殊性土的工程性质及改良技术研究。E-mail: ssxxfhh@hotmail.com。

Dispersivity and impermeability of dam soil in Wenjiagou Reservoir

FAN Heng-hui[1,2], KONG Ling-wei[1], GUO Min-xia[2], LI Peng[2], LIU Re-mei[2]
(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The key character of dispersive clay is to be dispersed and wrecked by water flows, causing serious threats to engineering safety. But those studies on dispersive clay, such as the methods of identification, dispersive mechanism and their applications, are still not deep enough and satisfactory due to their trivial discovery and few engineering practices. Based on the analysis of physical and chemical characters and mineralogical composition, the dispersivity and dispersive mechanism of the dam soil samples in Wenjiagou Reservoir are studied by double-hydrometer tests, pore water salts tests, pinhole tests, crumb tests and exchangeable sodium percentage tests, and further investigations on the impermeability of soil samples are also carried out by itself and under the protection of inverted filter materials. The results show that soil samples are transitional and dispersive soil because of rich montmorillonoid, plenty of sodium-ion and strong alkalescence. The soil samples have weak self-impermeability, but favorable impermeability under the protection of the inverted filter materials. The studies indicate that soil becomes dispersive clay only under the conditions of rich montmorillonoid contents, more sodium-ion and strong alkalescence, and the dispersive clay presents a better seepage prevention under the protection of appropriate inverted filter materials.

Key words: hydraulic material; dispersive soil; physical and chemical property; dispersive mechanism; impermeability

0 引 言

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[1]。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年代在澳大利亚首先发现分散性土，并认识到它对水利工程的破坏作用后，引起工程界的关注，许多国家对分散性土的成因、性质、判别方法和危害以及改性等进行研究[2-4]。20世纪70年代在我国的黑龙江引嫩工程中首次

基金项目：科技支撑计划“坡面降雨径流调控与高效利用技术”（2006BAD09B01）
收稿日期：2008－01－23

发现分散性土[5]，随后在新疆[6]、山东[7]、河南[8]、青海[9]等省的水利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。

文家沟水库位于宁夏回族自治区吴忠市，大坝为碾压式均质土坝，最大坝高 26.5 m，坝顶长 1017.0 m，顶宽 7.0 m，总库容 1040 万 m^3，调节库容 956.8 万 m^3。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交换性钠百分比试验等 5 种试验方法，结合物理化学性质和矿物成分分析，对文家沟水库大坝防渗土料进行了分散性试验与分散机理的探讨，并对土样的自身抗渗以及在保护条件下的抗渗性能进行了试验，为工程设计和施工提供科学依据。

1　土样物理化学性质和矿物成分

1.1　土样物理化学性质

土样的基本物理化学性质见表 1、表 2。从试验结果看，6 组供试土样的比重在 2.71 或 2.72，颗粒组成以粉粒为主，其含量约 65.5%～69.5%，砂粒含量约 8.0%～17.0%，黏粒含量约 16.0%～24.0%。从界限含水率来看，液限在 26.5%～29.0%之间，塑限在 12.6%～14.4%之间，塑性指数在 13.6～15.4 之间，均为低液限黏土（CL）。土样的最大干密度在 1.75～1.78 g/cm^3 之间，最优含水率在 13.8%～15.2%之间。6 组土样的易溶盐在 0.655～3.719 g/kg 之间，阳离子主要以钠离子为主，中溶盐含量在 0.4～1.18 g/kg 之间，有机质含量在 1.71～2.41 g/kg 之间。其中，土样 W9 易溶盐含量大于 3 g/kg，属于盐渍土[10]。土样的酸碱度在 8.58～9.26 之间，呈强碱性。

1.2　土样矿物成分

采用日本理学电机公司 X 射线衍射仪对土样的矿物成分进行分析，结果列于表 3。从表 3 中可以看出，6 组土样的黏土矿物主要成分均是伊利石，其含量占全土的 11.2%～15.5%，少量伊利石以伊利石－蒙脱石混层矿物形式存在。蒙脱石的含量较伊利石的少，其含量占全土的 5.7%～9.8%，且以伊利石－蒙脱石混层矿物形式存在。绿泥石和高岭石的含量少。非黏土矿物主要以石英、斜长石为主。

表 1　土样物理性质

Table 1 Physical properties of soil samples

土样编号	比重G_s	颗粒组成/%			液限 w_L/%	塑限 w_P/%	塑性指数 I_p	最大干密度 /(g·cm^{-3})	最优含水率/%	土壤分类（按SL 237-1999）
		>0.075 mm	0.075 ～0.005 mm	<0.005 mm						
W4	2.71	17.0	67.0	16.0	26.5	12.6	13.9	1.78	15.0	低液限黏土（CL）
W6	2.72	10.5	68.0	21.5	27.4	13.8	13.6	1.75	14.8	低液限黏土（CL）
W9	2.72	10.5	65.5	24.0	29.0	14.4	14.6	1.75	14.8	低液限黏土（CL）
W10	2.71	8.0	69.5	22.5	28.2	13.6	14.6	1.75	15.2	低液限黏土（CL）
W11	2.72	14.0	68.0	18.0	27.4	13.2	14.2	1.78	13.8	低液限黏土（CL）
W17	2.72	12.0	67.5	20.5	28.2	12.8	15.4	1.78	13.9	低液限黏土（CL）

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^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	中溶盐	有机质	
W4	2.671	0.059	0.210	0.495	0.956	0.000	0.028	0.032	0.818	0.004	0.75	1.96	9.06
W6	1.088	0.148	0.210	0.095	0.244	0.000	0.012	0.005	0.386	0.004	0.67	2.10	9.16
W9	3.719	0.000	0.227	0.750	0.172	1.272	0.181	0.319	0.225	0.112	0.73	2.41	8.58
W10	0.774	0.089	0.242	0.019	0.177	0.000	0.016	0.007	0.236	0.005	0.41	2.06	9.12
W11	0.655	0.207	0.165	0.038	0.059	0.000	0.012	0.007	0.258	0.000	0.54	1.83	9.26
W17	2.831	0.030	0.195	0.277	0.929	0.765	0.045	0.057	0.834	0.003	1.18	1.71	9.21

表 3　土样矿物成分

Table 3 Minerals of soil samples

土样编号	黏土矿物总量/%	黏土矿物相对含量/%					全土中各种矿物含量/%											全土中伊利石、蒙脱石的估算值/%	
							非黏土矿物含量						黏土矿物含量						
		伊－蒙混层（I/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	其它	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）
W4	24.3	42	33	9	16	45	37.0	10.9	14.5	9.2	3.4	0.7	10.2	8.0	2.2	3.9	11.2	7.0
W6	28.8	48	30	9	13	45	33.2	2.6	18.1	13.6	2.9	0.8	13.8	8.6	2.6	3.7	12.9	9.5
W9	30.7	43	32	11	14	35	35.7	3.7	11.8	13.7	3.1	1.3	13.2	9.8	3.4	4.3	13.2	9.8
W10	27.7	31	41	10	18	50	35.0	3.4	15.8	12.5	3.9	1.7	8.6	11.4	2.8	5.0	14.2	5.7
W11	28.6	47	32	9	12	45	38.8	3.1	15.8	11.4	1.7	0.6	13.4	9.2	2.6	3.4	13.3	9.3
W17	32.2	39	36	10	15	45	37.1	2.2	13.8	11.1	1.7	1.9	12.6	11.6	3.2	4.8	15.5	8.7

2 试验方法

2.1 土样分散性判别方法

目前国内没有判别分散性土的试验规程，本次试验主要采用美国材料与试验协会制定的双比重计法（ASTM D4221—99）[11]、针孔试验（ASTM D4647—93(1998)）[12]、碎块试验（ASTM D6572—00）[13]等 3 种试验规程以及美国第一次关于分散性土研讨会介绍的孔隙水可溶盐阳离子试验和交换性钠百分比试验[14-15]等 5 种试验方法来进行，根据 5 种试验结果来综合判别土样的分散性。

2.2 渗透变形试验方法

（1）土样自身抗渗性试验方法

试验在内径为 10 cm 的有机玻璃管涌仪中进行，试样压实系数为 0.96。试样高为 8 cm，试样采用抽气饱和法饱和后逐级加压进行试验，水流方向自下而上。在每级压力稳定后测记三次流量，计算出渗透流速和渗透坡降，绘制渗透坡降与渗透流速关系曲线（log$i$ – log$v$ 曲线），直至试样破坏。取其破坏点的坡降与前一级坡降的平均值为破坏坡降。

（2）土样在保护条件下的抗渗性试验方法

试验在内径为 10 cm 的抗渗仪中进行。反滤料制样按相对密度为 0.7 控制，反滤料样高 10 cm。反滤料上部装土样，土样干密度按 0.96 的压实系数控制，土样高 8 cm，土料上部充填粗粒，以防冲刷。试样制成后，进行抽气饱和。试验时，下游出口位置高于整个试样，使试样处于淹没状态，水流方向从上向下，用加压装置逐级进行加压，加到渗透坡降大于 75～110 时为止。

3 试验结果与分析

3.1 土样分散性判别试验

土样分散性试验结果试验见表 4。双比重计试验表明，土样 W9、W17 的分散度小于 30%，属于非分散性土；土样 W4、W10 和 W11 的分散度在 30%～50%之间，属于过渡性土；土样 W6 的分散度大于 50%，属于分散性土。针孔试验结果表明，W9、W10、W17 属于过渡性土，W4、W6、W11 属于分散性土。从碎块试验结果来分析，W4、W6、W10 属于过渡性土，W9、W17 属于非分散性土，W11 属于分散性土。土样的针孔试验、碎块试验结果土样状况见图 1。除土样 W9 的交换性钠百分比（ESP）较低属于非分散性土以外，其余土样（ESP）含量均大于 10%，属于分

表 4 土样分散性鉴定

Table 4 Results of dispersive property tests on soil samples

土样编号	分散度/%	针孔试验					碎块试验	交换钠百分比 ESP/%	孔隙水可溶盐阳离子试验						
		ρ_d /(g·cm^{-3})	水头/mm	持续时间/s	终了孔径/倍	水色			阳离子含量/(1/n mmol·L^{-1})					钠吸附比	钠百分比
									Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	TDS	SAR	PS/%
W4	31.3	1.78	50	5	2～3	混浊	土块水解后有少量混浊，范围很小	15.4	95.36	0.08	5.80	15.40	116.64	29.3	81.8
W6	65.1	1.75	50	5	2～3	混浊	土块水解后有少量混浊，范围很小	16.4	30.36	0.08	1.60	2.40	34.44	21.5	88.2
W9	2.1	1.75	180	5	2～3	稍混浊	无分散出胶粒的反应，水色清澈	3.7	38.84	1.12	21.20	66.40	127.56	5.9	30.5
W10	35.6	1.75	180	5	2～3	稍混浊	土块水解后有少量混浊，范围很小	11.6	16.60	0.32	1.60	1.80	20.32	12.7	81.7
W11	38.9	1.78	50	5	2～3	混浊	土块水解后整个量杯底部呈现混浊	12.7	16.04	0.16	0.80	0.80	17.80	17.9	90.1
W17	4.9	1.78	180	5	2～3	稍混浊	无分散出胶粒的反应，水色清澈	14.2	117.97	0.00	10.00	31.40	159.37	25.9	74.0

注：（1）双比重计试验：非分散土，分散度 < 30%；过渡性土，分散度=30%～50%；分散性土，分散度>50%。

（2）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。

（3）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。

（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。

散性土。孔隙水可溶盐阳离子试验结果表明，这 6 组土样的孔隙水可溶盐阳离子总量（TDS）在 17.80～159.37 1/*n* mmol/L 之间，钠吸附比（SAR）在 5.9～29.3 之间，钠百分比（PS）在 30.5%～90.1%之间。根据土的分散性与 TDS、PS 的关系可看到，这 6 组土样中 W9 属于过渡性土，其它 5 组土样属于分散性土。

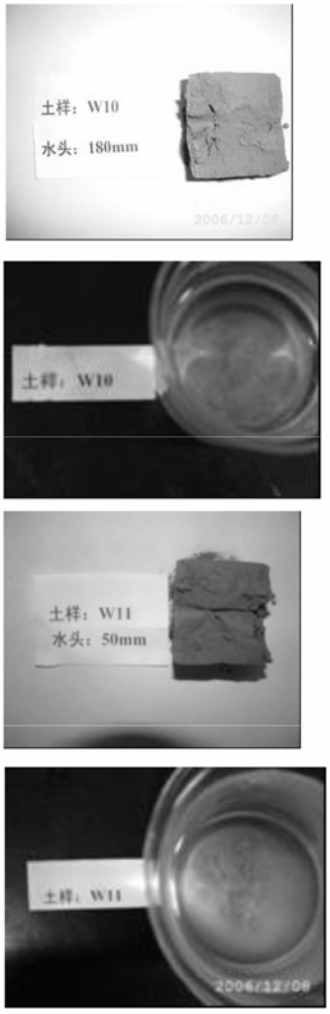

图 1 针孔试验和碎块试验照片

Fig. 1 Photos of pinhole tests and crumb tests

从以上的分析可看出，判别黏土分散性的 5 种试验方法所得的试验结果并不完全相同，相互之间有些差异。在以往的研究中也有此种情况出现[16]。这是由于这些研究方法与判别标准是从大量试验统计分析得来的，针对一般的土样 5 种试验结果能够互相印证，但是某些土类也往往出现不一致的情况。双比重计试验是借鉴农业土壤物理化学分析中的土壤团粒分析，通过计算土体中不加分散剂不煮沸所得的黏粒含量与加分散剂煮沸所得的黏粒含量的比值的百分率（分散度）来进行比较，如果分散度越大，则表明土体的分散倾向越高。但是，对于盐渍土来说，由于土体中含有大量的易溶盐，使得土水悬液中土颗粒由于电解质凝聚作用在很短的时间内凝聚沉淀，水体澄清，使得双比重计试验结果很不准确。因此，对于含盐量大的土来讲，双比重计试验的结果不可靠。此次试验研究也表明，土样 W9 属于盐渍土，双比重计试验测得的分散度较低，不能确切反映土样的分散性。针孔试验是模拟在一定的水头下，土体孔隙壁上的颗粒所具有承受一定动能的水流的冲蚀能力，当水流经过土壤孔隙时，能将其动能传输给土壤颗粒，从而使土壤胶体得到分散。针孔试验直观地模拟了土体中的孔隙在渗透水流作用下所承受的冲蚀条件，具有一定的工程现实意义，因而具有较高的可靠性。碎块试验是将土块放入纯水中，观察其在静水中的变化。它与双比重计试验共同反映土颗粒在水中的分散程度以及胶粒的析出程度。由于分散性土流失破坏过程中，水是重要的诱发因素，根据胶体化学理论可知，水中溶解的各种离子及其含量会对土体的凝聚与分散产生很大的影响，因此，对土壤中的孔隙水可溶盐含量和交换性钠百分比进行测定，可从一定程度上反映土颗粒之间双电层的相互作用。通过以上的综合分析，认为 W9、W10、W17 属于过渡性，W4、W6、W11 属于分散性土。因此，建议施工过程中在土料中添加 1%～3%的消石灰或采用 1～2 L/m^3 分散性土改性剂进行改性处理。

土体在水的作用下产生分散的机理目前仍很不清楚，一般认为①土体中含有一定量的钠蒙脱石；②胶结物质少；③具有较强的碱性[17]。土样的物理化学性质以及矿物成分试验表明，6 组土样中的蒙脱石含量较多，并且含有大量钠离子，不仅包括易溶盐中的钠离子，而且包含交换性钠离子。此外，土样的酸碱度呈强碱性。土样中的黏粒含量较多，也就是说胶结物质较多。因此，这 6 组土样呈现分散性的原因在于含有较多的蒙脱石和钠离子，酸碱度较高。

3.2　土样渗透变形试验

（1）土样自身抗渗性

自身抗渗试验的目的在于测定土料在无反滤保护条件下，自身的临界坡降及破坏坡降，判定在渗透水流作用下材料本身的渗透稳定性能。

从 6 组土样中选取 4 组进行了试验，试验结果见表 5，渗透坡降和渗透流速之间的关系曲线（log*i* - log*v* 曲线）见图 2。试验过程中发现，土样破坏形式是先有细小的管涌出现，继而出现大面积流土。试验结果表明，在试验条件下，土样的渗透系数在 10^{-5}～10^{-6} 量级之间，属于极低渗透性土。土的破坏坡降在 9.11～23.21 之间。

表 5 土样抗渗试验结果

Table 5 Results of seepage prevention tests on soil samples

土样编号	制样密度 /(g • cm^{-3})	渗透系数 /(cm •s^{-1})	自身抗渗破坏坡降 i_F	反滤抗渗试验最大坡降 i_p
W4	1.71	1.16×10^{-5}	9.11	101.28
W6	1.68	1.57×10^{-6}	17.68	75.67
W9	1.68	1.20×10^{-5}	10.66	109.65
W11	1.71	2.12×10^{-6}	23.21	110.36

（2）有保护条件下的抗渗试验

在有反滤保护条件下的抗渗试验是用来判断土样在反滤保护条件下土样的抗渗性能。反滤料的粒径值 d_{85}，d_{60}，d_{30}，d_{15} 和 d_{10} 分别是 9.08，2.84，0.42，0.24 和 0.15 mm。试验得到的结果见表 5，渗透坡降与渗透流速的关系曲线（log$i$ - log$v$ 曲线）见图 2。从表 5 中可看出，在反滤料保护条件下，试验最大坡降在 75.67～110.36 之间。从 log$i$ - log$v$ 曲线看，随着水头压力的增大，渗透流速与渗透坡降等速递增，为一接近 45°的直线，而且试验过程中，渗透系数基本不变或呈很小的变化，说明土的结构没有发生变化。土样 W6 在渗透坡降加至 50 时曲线开始转折，说明试样结构发生变化，可能是土试样中的细小孔隙相互贯通；但是其它土样在试验坡降（为 100 左右）范围内曲线均为一直线，试样结构没有遭受破坏。与土样自身抗渗相比，土样在反滤料保护条件下，抗渗性能大幅度提高，但是由于土料属于分散性土和过渡性土，在施工中一定要注意施工质量，坝体不能产生裂缝，在薄弱环节或坝肩接触地方，换填非分散性土；坝体运行过程中防止坝体产生裂缝。

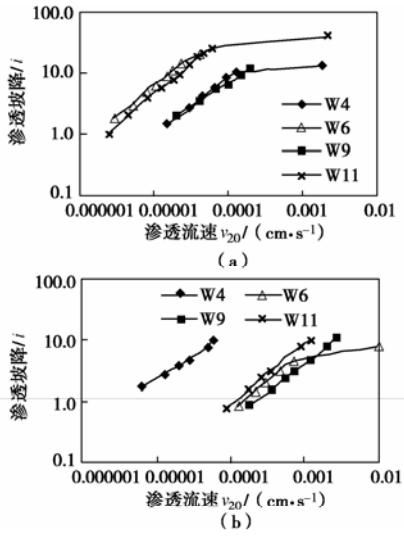

图 2 渗透变形试验 i - v 曲线图

Fig. 2 The i - v curves of seepage distortion

4 结 论

（1）文家沟水库防渗土料中由于含有较多的蒙脱石和钠离子，而且酸碱度较高，导致土料呈现分散性或过渡性。在反滤料的保护作用下，土料的抗渗性能大幅度提高。因此，建议在设计与施工工程中进行添加石灰或采用分散性土改性剂进行处理，并作好反滤措施。

（2）应当深入研究土水电解质系统中的相互关系，并对土体的微观结构深入研究，了解土体分散的微观机理，为分散性土改性应用提供理论基础。

参考文献：

[1] SL251—2000 水利水电工程天然建筑材料勘察规程[S]. (SL251—2000 Specification on investigation of natural material for water conservancy and hydropower engineering[S]. (in Chinese))

[2] SHERARD J L, DUNNIGAN L P, DECKER R S, et al. Pinhole test for identifying dispersive soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, **102**(1): 69 - 85.

[3] DEAN Jeff. Dispersive clay embankment erosion—a case history[C]// 54th Highway Geology Symposium, Burlington, VT,USA, 2003: 306 - 320.

[4] Aramsri-Phathanasabhon, Somboon-Munkuamdee, Nirun-Singhasunti. Distribution of dispersive soils in irrigation project area in Thailand[C]// 29th Kasetsart University Annual Conference, Bangkok, Thailand, 1991: 4 - 7.

[5] 洪有伟, 盛守田. 黑龙江省西部地区分散性土工程特性及处理措施[J]. 岩土工程学报, 1984, **6**(6): 42 - 52. (HONG You-wei, SHENG Shou-tian. Behavior of dispersive clay and its treatment practice in the west part of Heilongjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **6**(6): 42 - 52. (in Chinese))

[6] 杨 昭, 席福来, 陈 华. 盐渍土与分散性针孔试验影响[J]. 岩石力学, 2003, **24**(增): 253 - 254. (YANG Zhao, XI Fu-lai, CHEN Hua. Salinized soil affection of dispersibility pinhole test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S): 253 - 254. (in Chinese))

[7] 马秀媛, 徐又建. 青岛市官路水库分散性土工程特性及改性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(7): 441 - 444. (MA Xiu-yuan, XU You-jian. Behavior of dispersive clay and its lime-stabilized test in Guanlu reservoir in Qingdao[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(7): 441 - 444. (in Chinese))

[8] 秦曰章. 黄河小浪底黏性土分散性能的试验研究[J]. 人民黄河, 1981, **3**(5): 8－12. (QIN Yue-zhang. Study on the clay soil dispersity in Xiaolangdi reservoir of the Yellow River[J]. Yellow River, 1981, **3**(5): 8－12. (in Chinese))

[9] 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[R]. 杨凌: 水利部西北水利科学研究所, 2005. (FAN Heng-hui, LI Zhen. The research report on the physical-chemical and dispersive characters of soil in the Banduo Dam[R]. Yangling: Northwest Hydro-techical Research Institute of MWR, 2005. (in Chinese))

[10] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. (in Chinese))

[11] ASTM D4221—99 Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer[S].

[12] ASTM D4647—93 Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test[S].

[13] ASTM D6572—00 Standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soils by the crumb test[S].

[14] BICHARANCOU Reza. An experimental study on Sherard`s chemical criterion with regard to the role of extraction water content on identifying dispersivity of soils[J]. Civil Engineering, 2000(1): 13－19.

[15] 王观平, 张来文, 阎仰中, 等. 分散性土与水利工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (WANG Guan-ping, ZHANG Lai-wen, YAN Yang-zhong, et al. Dispersive soil and water conservancy project[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))

[16] 邓亲云, 张　健. 分散土的判别及应用于心墙堆石坝的工程措施[J]. 水利技术监督, 2000, **8**(6): 23－26. (DENG Qin-yun, ZHANG Jian. Qualification test of dispersive clay and its engineering treasures applied on the core wall type rockfill dam[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2000, **8**(6): 23－26. (in Chinese))

[17] 黄熙龄. 特殊土[C]// 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. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 46－52. (HUANG Xi-ling. Special soil[C]// The Forth Conference of Chinese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, China Civil Engineering Society. Beijing: China Architecture and Building Press, 1986: 46－52. (in Chinese))