

南坪水库筑坝土料分散机理及原因分析

高明霞¹, 李 鹏¹, 王国栋^{2*}, 樊恒辉¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 利用双比重计、针孔、碎块、孔隙水可溶盐阳离子和原土交换性钠百分比 5 种试验方法对南坪水库土样进行了分散性鉴定, 进一步结合物理化学性质和矿物成分分析, 研究了土料的分散机理及原因。试验结果表明: K16 和 K19 属于非分散性土, 而 K30 和 Z10 属于分散性土。碱性环境下, 蒙脱石和钠离子较多是土壤产生分散性的主要原因; 土壤的颗粒组成是土壤产生分散的另一个主要原因。黏粒, 尤其是胶粒的胶结作用, 对土料的结构稳定性具有重要作用。土料的易溶盐中钙离子较多和有机质含量较高能有效抑制土料的分散性, 掺入消石灰能有效改善土料的分散性。

关键词: 分散性土; 物理化学性质; 分散机理; 黏粒含量

中图分类号: TV443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)08-1303-06

作者简介: 高明霞(1969-), 女, 新疆石河子人, 博士, 工程师, 主要从事岩土化学性质及特殊性土的工程性质研究。

E-mail: gaomingxia@126.com。

Mechanism and reason of dispersivity of dam soil in Nanping Reservoir

GAO Ming-xia¹, LI Peng¹, WANG Guo-dong^{2*}, FAN Heng-hui¹

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Science, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The dispersivity of dam soil samples in Nanping Reservoir is identified by means of double-hydrometer tests, pore water salt tests, pinhole tests, crumb tests and exchangeable sodium percent tests. Furthermore, the dispersive mechanism and reasons are also studied in combination with the analysis of physicochemical properties and mineral components. The results show that K16 and K19 are nondispersive, and K30 and Z10 are dispersive. Rich montmorillonoid and sodium-ion are the main reasons to cause the dispersivity of soil under the alkalic environment, and another key reason is the granulometric composition of soil. The cementation of clay, especially colloidal particle, plays an important role in the structural stability of soil samples. Much calcium ion and high organic matter can restrain the dispersivity of soil, and adding lime can improve it effectively.

Key words: dispersive soil; physicochemical property; dispersive mechanism; clay particle content

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, 导致土体颗粒分散的黏性土^[1]。土-水体系中土粒间的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潜在条件, 因而导致水利建筑物事故的发生。20 世纪 50 年代在澳大利亚首先发现分散性土, 分散性土对水利工程的特殊破坏作用, 引起了工程界的广泛注意, 此后许多国家对分散性土进行了研究^[2-4]。我国于 20 世纪 70 年代在黑龙江引嫩工程中首次发现分散性土, 随后在新疆、山东、河南、青海等省的水利工程实践中都曾遇到分散性土^[5-9]。因此, 在工程设计和施工中对土料分散性的研究应予以重视。

南坪水库为宁夏回族自治区拟建的海原县城新区供水工程的调蓄水库, 大坝为碾压式壤土均质坝, 最

大坝高 35.0 m, 坝顶长 480.0 m。顶宽 8.0 m, 总库容 $980 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。试验土样 K16、K19、K30 为库区土料, Z10 为左岸附近山坡土。通过对土料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阳离子交换量钠百分比试验等 5 种试验, 并结合物理化学性质和矿物成分分析, 对南坪水库筑坝土料的分散性进行判定。

1 土样物理化学性质和矿物成分

1.1 土样物理性质

土样的基本物理性质见表 1。4 组供试土样的物理

基金项目: 西北农林科技大学青年学术骨干项目(08); 西北农林科技大学科研专项(06ZR41)

收稿日期: 2008-09-10

***通讯作者**

性质相近,其比重为 2.70~2.71,颗粒组成以粉粒为主,均为低液限黏土 (CL),土样的最大干密度较大,最优含水率较小。

1.2 土样化学性质

土样的化学性质见表 2。4 组土样的易溶盐含量较大,均大于 $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,易溶盐中阳离子除 Z10 外,以钠离子居多,其次为钙离子、镁离子和钾离子,均属于盐渍土^[10]。土样呈强碱性。

1.3 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了分析,结果见表 3。从表 3 中可以看出,4 组土样的黏土矿物主要成分均是伊利石,少量伊利石以伊利石—蒙脱石混层矿物形式存在。蒙脱石主要以伊利石—蒙脱石混层矿物形式存在,其含量较伊利石少。其中 Z10 中蒙脱石含量最少,仅有 0.4%;而 K30 中蒙脱石的含量最大,为 5.6%。绿泥石和高岭石

含量均较少。非黏土矿物主要是石英,其次是方解石、斜长石等其它矿物。

黏土矿物蒙脱石含量在土样的分散性中具有重要的作用。蒙脱石属于 2:1 型黏土矿物,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)。一般认为 Na 蒙脱石是土壤产生分散性的必要条件之一^[11]。

2 土样分散性判别试验

土样分散性试验主要依据美国材料与试验协会制定的双比重计法^[12]、针孔试验^[13]、碎块试验^[14]3 种试验规程,和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、交换性钠百分比试验^[15-16]5 种试验方法来进行,见表 4。

表 1 土样物理性质

Table 1 Physical properties of soil samples

土样 编号	比重	颗粒组成/%			液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P	最大干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最优含水率 $w_P/\%$
		>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm					
K16	2.70	4.2	68.2	27.6	29.0	15.2	13.8	1.85	13.6
K19	2.70	4.5	69.0	26.5	27.2	15.0	12.2	1.84	13.6
K30	2.71	5.0	61.2	33.8	28.5	15.2	13.3	1.89	13.2
Z10	2.71	3.5	76.5	20.0	30.0	17.5	12.5	1.85	13.5

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 值	
	全量	易溶盐								中溶盐		有机质
		CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺			
K16	6.123	0.000	0.309	0.418	3.362	0.570	0.148	0.875	0.014	2.7	4.3	8.67
K19	9.100	0.000	0.322	0.776	5.065	0.839	0.340	0.964	0.027	5.5	3.8	8.52
K30	8.460	0.000	0.544	1.639	3.763	0.148	0.013	2.329	0.007	6.6	1.9	9.28
Z10	3.027	0.000	0.309	0.047	1.565	0.262	0.249	0.156	0.014	1.5	3.1	8.51

表 3 土样矿物成分

Table 3 Mineralogical composition of soil samples

试样 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)	混层 比 (S) I/S	石英	钾长 石	斜长 石	方解 石	石膏	其它	伊— 蒙混 层 (I/S)	伊利 石 (I)	高岭 石 (K)	绿泥 石 (C)		
K16	29.1	24	59	6	11	45	42.2	1.0	10.3	14.4	0.3	2.7	7.0	17.2	1.7	3.2	19.3	4.8
K19	31.3	21	61	6	12	45	40.4	2.0	9.7	13.9	0.4	2.3	6.6	19.1	1.9	3.8	21.1	4.5
K30	29.9	27	59	5	9	45	43.9	2.4	8.9	10.9	0.6	3.4	8.1	17.6	1.5	2.7	20.1	5.6
Z10	29.9	2	60	13	25	45	39.8	0.9	12.9	12.4	0.3	3.8	0.6	17.9	3.9	7.5	18.1	0.4

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					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 SAR	钠百 分比 PS/ %
								Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	TDS		
K16	6.5	1.81	1020	5	1	清亮	7.5	74.69	0.23	29.87	21.20	125.98	14.8	59.3
K19	11.5	1.85	1020	5	1	清亮	6.5	92.32	0.46	30.53	27.20	150.51	17.2	61.3
K30	12.8	1.80	180	5	3	混浊	20.7	274.94	0.28	28.67	35.60	339.49	48.5	81.0
Z10	5.3	1.81	50	10	5-20	混浊	2.2	20.77	0.30	29.60	21.33	72.00	4.1	28.8

注：碎块试验结果均无分散出胶粒的反应，水色清澈。

2.1 双比重计试验

双比重计试验是对土样进行两次比重计试验来测定黏粒（<0.005 mm）含量，第一次是按常规试验方法进行，加分散剂、煮沸、搅拌；第二次不加分散剂，让黏土颗粒自行水化分散。不加分散剂试验黏粒（<0.005 mm）含量占常规试验加分散剂试验黏粒含量的百分数，即为分散度。分散度越大，表明土体趋于分散的程度越高。判断标准^[1]见表 5 中《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》标准。

表 5 双比重计法判断分散性土的标准

Table 5 Criteria of determining dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer

标准	分散度/%	判定结果	研究土壤特性
《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》	>50	分散性土	土石坝土料
	30~50	过渡性土	
	<30	非分散土	
美国水土保持局（SCS）	>25	分散性土	低塑限无机黏土和粉质黏土
	>35	分散性土	低中塑限无机黏土
	>40	分散性土	高塑限无机黏土
盛守田等	>30	分散性土	黑龙江西部黏土，大部分为中塑限无机黏土
	25~30	半分散性土	
	<25	非分散性土	
马秀媛等	>35	高度分散性土	青岛官厅水库土料黏粒含量较少，大部分土料为无机黏土和粉质黏土
	>25	分散性土	
	<17	非分散性土	

试验结果表明：这 4 组土样的分散度均小于 30%，属于非分散性土。由于这 4 组土样易溶盐含量较高，土水悬液中土颗粒在电解质凝聚作用下在很短的时间内发生凝聚沉淀，水体澄清，不能继续试验。因而需要先洗盐，再进行双比重计试验，这就影响了双比重计试验结果的准确性，因而不能真实反映土壤颗粒的分散状况。所以，如何进行盐渍土双比重计试验，在试验的具体操作过程还需要进一步研究、优化。这将是进一步探讨分散性土鉴定试验的一个重要课题。

另外，关于双比重计法判断分散性土的标准问题也是一个值得探讨的问题。双比重计法是美国水土保持局（SCS）提出的，并推荐了用于确定各类土的分散界限标准（表 5）。洪有纬等^[17]和马秀媛等^[7]根据各自研究土料特性，参照美国水土保持局（SCS）标准，分别提出双比重计法判定分散性的标准^[17]（表 5）。

由此可见，对于不同土类，双比重计法判断分散性土的标准不一样，而我们现行的《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》的双比重计法判别标准在我国广泛使用，因而缺乏一定的科学性。针对不同土类提出切实可行的双比重计法判别分散性土的判别标准已经需要提到日程上来。

2.2 针孔试验

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。

针孔试验的判别标准^[1]：①非分散土，在 380~1020 mm 水头下针孔不扩大，出流水很清；②过渡性土，在 180~380 mm 水头下针孔冲蚀较慢，出流水稍混浊；③分散性土，在 50 mm 水头下针孔迅速扩大，出流水混浊。

针孔试验结果表明，K16、K19 属于非分散性土，K30、Z10 属于分散性土（表 4）。

针孔试验虽然直观模拟了土体孔隙抗水流冲蚀的情况，但是只是各种因素条件下的综合表现。不能说明土壤分散产生的原因。因而必须辅以其它试验以研究分析土壤分散的原因，进而更科学地对分散性土进行一定的工程技术处理措施。

2.3 碎块试验

碎块试验判定标准：①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；②过渡性土，土块水解后四周有微量混浊，但扩散范围小；③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，水色是清亮，

或稍混浊后很快又变清。

从碎块试验结果来看, K16、K19、K30 和 Z10 都属于非分散性土。但是土样的抗水性很差, 遇水后很快崩解, 平摊于杯底, 水色清亮, 无胶粒出现。

2.4 交换性钠百分比试验

土壤胶体所吸着的阳离子可以分两类, 一类是致酸离子(H^+ 和 Al^{3+}), 另一类是盐基离子(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 等金属离子)。黏土的分散性主要取决于土中钠离子的相对含量。交换性钠百分比是盐基离子钠离子占阳离子交换量的百分数。

交换性钠百分比(ESP)试验的判定标准^[16]: ①ESP=7~10, 属中等分散性土; ②ESP≥15, 属高分散性土, 即有严重管涌的可能性。

原土交换性钠百分比试验的结果表明: K19、Z10 的交换性钠百分比(ESP)低于 7, 属于非分散性土; 土样 K16 略大于 7, 属于中等分散性土; K30 的交换性钠百分比(ESP)含量大于 10%, 属于分散性土。

交换性钠百分比间接反映了土粒之间凝聚力的强弱程度。如果土壤胶体上的交换性 Na 离子比例较大, 则土粒间的凝聚作用较弱, 胶粒易于分散。故交换性钠百分比真实科学地反映了土壤具有分散性的程度, 另一方面, 对于黏土矿物蒙脱石来说, 如果吸着的离子是钠离子, 则说明此时的蒙脱石为 Na-蒙脱石。

2.5 孔隙水可溶盐阳离子试验

将土样配到液限, 经离心机离心后得到孔隙水溶液, 测定其中的 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ 含量, 然后计算出孔隙水可溶盐阳离子总量(TDS)、钠吸附比(SAR)、钠百分比(PS)。有关土的分散性与 TDS, PS, SAR 间关系见图 1, 用钠吸附比(SAR)鉴定分散性经验值见表 6。

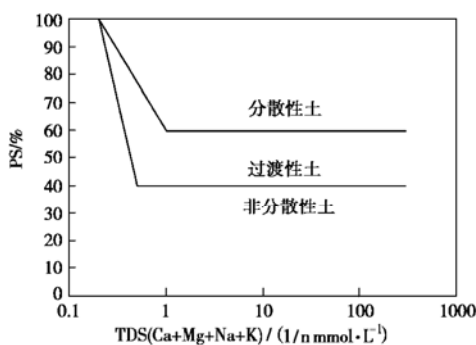


图 1 土的分散性与 TDS、PS 的关系

Fig. 1 Relationship between dispersivity and TDS/PS

孔隙水可溶盐阳离子试验结果表明, 这 4 组土样的孔隙水可溶盐阳离子总量(TDS)在 72.00~339.49 1/n mmol · L⁻¹ 之间, 钠吸附比(SAR)在 4.1~48.5 之间,

钠百分比(PS)在 28.8%~81.0%之间。根据土的分散性与 TDS、PS 的关系可看到, 这 4 组土样中 Z10 属于非分散性土, K16 属于过渡性土, K19、K30 属于分散性土。而根据钠吸附比, 除 Z10 是非分散性土, 其他三组土样均为分散性土。

表 6 用钠吸附比鉴定分散性的经验值

Table 6 Empirical values of sodium adsorption ratio for dispersivity identification of soil	
孔隙水阳离子浓度 (TDS) (1/n mmol · L ⁻¹)	分散性钠吸附比 (SAR) 近似分界线
5	>2.7
10	>4.2
100	>13

孔隙水可溶盐试验表明了土壤颗粒处于的盐分环境状态。钠离子含量较多, 土壤胶粒吸附的离子有可能与土壤溶液中钠离子进行交换吸附, 致使更多钠离子被吸附到土壤胶粒上。

2.6 分散性试验成果的综合评判

南坪水库筑坝土料 4 组土样的双比重计试验和碎块试验的判定结果均是非分散性土。土样 K30 的交换性钠百分比、孔隙水可溶盐试验和针孔试验的判定结果均为分散性土。土样 Z10, 除针孔试验的判定结论为分散性土外, 交换性钠百分比、孔隙水可溶盐试验的判定结果均为非分散性土。K16、K19 按交换性钠百分比试验结果分别属于中等分散性土、非分散性土, 按孔隙水可溶盐试验结果分别为过渡性土和分散性土, 但其针孔试验的判定结果均为非分散性土。

由此可见, 5 种分散性土鉴定试验结果并不完全相符, 以往研究也存在类似情况^[18]。由于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刷条件, 具有一定的工程现实意义和较高的可靠性。因此, 经综合判定 K16、K19 为非分散性土, K30 和 Z10 为分散性土。

3 分散性土的改性试验

通过加入 1%消石灰, 对 K30 和 Z10 进行改性试验。结果表明, 掺入 1%消石灰后, 这两个土的分散性得到显著改善, 均由分散性土转变为非分散性土。在 1020 mm 水头下, 流量稳定, 出水清亮, 针孔孔径不变, 出水口处仅有轻微冲刷现象。试验结果见表 7。掺入石灰具有良好效果的原因可能是一方面由于钙离子的大量加入, 改变了土样中盐基离子的组成, 降低了 Na^+ 所占的比例, 从而抑制了土的分散性。另一方面是因为 $CaCO_3$ 起到了良好的胶结作用。

表 7 掺 1%石灰后针孔试验结果

Table 7 Results of pinhole tests on soil samples added with 1% lime

土样 编号	ρ_d /(g · cm ⁻³)	水头 /mm	持续时间 /s	终了孔径 /倍	水色
K30	1.80	1020	5	1	清亮
Z10	1.81	1020	5	1	清亮

4 土样分散的原因及机理分析

经 5 种分散性鉴定试验综合判断, K16、K19 属于非分散性土, K30、Z10 属于分散性土。由于这几种方法判定的结果并不相符, 因此有必要从土样化学性质和黏土矿物角度分析其土壤分散抑或不分散的原因。

从土样的化学性质分析可以看出, 土样 K30 易溶盐钠离子含量最大, 为 2.329 g · kg⁻¹, 分别是 K16、K19、Z10 的 2.7 倍、2.4 倍、15.0 倍, pH 值为 9.28, 属于强碱性; 从黏土矿物分析可以看出, 土样 K30 的蒙脱石含量最大, 占全土 5.6%, 同样孔隙水可溶盐试验中钠百分比也最大, 为 81.0%, 而交换性钠百分比为 20.7%, 土壤颗粒处于高钠环境, 有利于土壤交换性钠百分比进一步增大, 增加了土壤分散的发展趋势。这说明 K30 分散的原因主要是由于碱性环境下高钠蒙脱石。

土样 K16、K19 的易溶盐含量低于 K30, 其中钠离子含量显著低于 K30, 而钙镁离子含量相对较大, 有机质含量稍大, pH 较 K30 小, 碱性弱于 K30; K16、K19 的蒙脱石含量小于 5%, 分别为 4.8%、4.5%; K16、K19 按交换性钠百分比试验结果分别属于中等分散性土、非分散性土, 但其交换性钠百分比在中等分散性土的最低界限 7%附近, 分别为 7.5%、6.5%; 而按孔隙水可溶盐试验结果分别为过渡性土和分散性土, 接近于过渡性土区和分散性土区的边界线 60%, 其钠百分比 (PS) 分别为 59.3%, 61.3%。但其针孔试验在 1020 mm 水头下, 孔径未变, 因而综合判断为非分散性土, 这说明该试验土料易溶盐中的钙镁离子和有机质能有效抑制土粒因钠离子引起的分散作用, 增强土壤对瞬时水流的抗冲刷作用。

土样 Z10 的易溶盐含量最低, 其钠离子含量比较低, pH 值最低, 从其孔隙水可溶盐试验和交换性钠百分比试验结果, 均可以将 Z10 判断为非分散性土, 但是针孔试验的结果是该土抗水流冲蚀能力很弱, 尤其是出水口处形成较大的孔洞。Z10 的黏土矿物成分主要是伊利石, 伊利石含量与其它土样相差不多, 绿泥石稍大, 而蒙脱石含量很低, 仅占全土的 0.4%。因此,

引起 Z10 分散的原因不是蒙脱石和较多的钠离子。从颗粒组成上可以看出, Z10 的黏粒含量最低, 仅有 20%。黏粒是重要的胶结物, 其中起胶结作用的主要是黏粒中 0.001~0.0001 mm 之间的胶粒。Z10 由于土壤发育程度低, 黏粒含量较少, 特别是小于 0.001 mm 胶粒的含量很少。推断 Z10 分散的原因是缺乏胶结物。

5 结 论

(1) 根据 5 种分散性鉴定试验综合判断, K16 和 K19 属于非分散性土, K30 和 Z10 属于分散性土。

(2) 土料含有较多蒙脱石和钠离子, 且酸碱度较高的碱性环境, 是导致土料产生分散性的主要原因。

(3) 土样的颗粒组成是影响土料分散性的另一个重要原因。土中黏粒, 尤其是胶粒对土粒所起的胶结作用, 对土料的结构稳定性起着重要作用。

(4) 土中易溶盐中钙离子含量较多和较高有机质可有效抑制土壤分散, 增强了土壤对瞬时水流的抗冲刷作用。

(5) 无论是含较多蒙脱石和钠离子引起的分散性土料还是因含黏粒较少造成分散的土料, 掺入消石灰都能有效改善土料分散性。

参考文献:

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

[2] SHERARD J L, DUNNIGAN L P, DECKER R S, et al. Pinhole test for identifying dispersive soils[C]// Conference on Embankment Dams, New York, 1992: 279 - 296.

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

[4] Aramsri-Phathanasabhorn, 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-technical Research Institute of Ministry of Water Resources, 2005. (in Chinese))
- [10] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2001. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2001. (in Chinese))
- [11] 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 Fourth 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))
- [12] ASTM D4221-99 Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer[S]. 1999.
- [13] ASTM D4647-93 Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test[S]. 1993.
- [14] ASTM D6572-00 Standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soils by the crumb test[S]. 2000.
- [15] 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.
- [16] 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))
- [17] 洪有伟, 盛守田. 黑龙江省西部地区分散性黏土工程特性及处理措施[J]. 岩土工程学报, 1981, **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, 1981, **6**(6): 42 - 52. (in Chinese))
- [18] 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))