

DOI: 10.11779/CJGE2020S1024

一种低液限黏土的分散性试验研究

彭文明¹, 李 建¹, 张延亿², 罗启迅¹

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司勘测设计分公司, 四川 成都 610072; 2. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100038)

摘要: 黏粒含量降低会弱化土料的抗冲蚀能力, 给分散性试验带来一定影响。对于试验低液限黏土, 野外调查和矿物及化学成分分析均表明, 该土料不具备分散性土的特征。采用双比重计试验、土块试验、针孔试验、孔隙水溶液试验和交换性钠离子百分比试验 5 种方法进行近 100 组试验研究。其中双比重计试验结果较为分散, 难以给出鉴定结论, 仅供参考; 由于土样抗冲蚀性太差, 针孔试验难以顺利完成; 土块试验、孔隙水溶液试验均以非分散性土为主, 少量过渡型土; 交换性钠离子百分比试验均为非分散性土。土料经综合鉴定为非分散性土。还对双比重计试验和针孔试验未取得合理试验成果的原因进一步分析, 并认为这两种方法对试验土料不适宜。

关键词: 低液限黏土; 分散性; 双比重计试验; 针孔试验

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0121-06

作者简介: 彭文明(1978—), 男, 正高级工程师, 主要从事水工结构设计和计算等方面的研究工作。E-mail: pwm02@163.com。

Experimental study on dispersion of one kind of low liquid limit clay

PENG Wen-ming¹, LI Jian¹, ZHANG Yan-yi², LUO Qi-xun¹

(1. Survey and Design Corporation of PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 2. Geotechnical Engineering Institute of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The decrease of clay content will weaken the erosion resistance of the soil and bring some influences on the dispersivity tests. For the low liquid limit clay, field investigation and mineral and chemical composition analysis show that the soil material does not have the characteristics of dispersive soil. The double-hydrometer tests, crumb tests, pinhole tests, pore water solution tests and exchangeable sodium ion percentage tests are used to carry out nearly 100 groups of experimental researches. Among them, the results of the double-hydrometer tests are relatively scattered, so it is difficult to give the identification conclusions and it is for reference only. Because of the poor erosion resistance of soil samples, the pinhole tests are difficult to be successfully completed. Both the soil block tests and the pore water solution tests are mainly non-dispersive soil, and a small amount of transitional soil. The percentage of exchangeable sodium ion tests are all non-dispersive soil. The soil material is identified as non-dispersive soil. In addition, the reasons are analysed why the double-hydrometer tests and pinhole tests have not achieved reasonable results, and it is regarded out that the two methods are not suitable for this kind of soil.

Key words: low liquid limit clay; dispersivity; double hydrometer test; pinhole test

0 引言

美国的农业土壤学家 Volck^[1]最早发现有些土壤具有自行分散的特性。此后, 学者们就致力于分散性土试验研究。对美国和海外几个地区的 195 个细黏土样大量试验研究后, Sherard 等^[2]认为, 黏土的物理化学状态与土颗粒表面的电化学性质直接影响着分散性土的性质, 需通过专门的试验来鉴定分散性土。美国材料试验学会第 79 次年会(1976 年)讨论并普遍同意了 4 种试验方法^[3]: 针孔试验、孔隙水中可溶盐试验、

双比重计试验和碎块试验。这些方法一直沿用至今。

国内对分散性土的研究都是建立在国外成果资料基础上, 始于 20 世纪 70 年代, 黄委会对黄河的小浪底水库筑坝用防渗土料进行针孔试验等方法判别其分散性^[4]。80 年代初王观平等^[5]通过研究认为, 黑龙江引嫩工程输水渠道产生大量的洞穴管涌破坏原因是土料呈分散性; 同期钱家欢^[6]较为系统的整理了国外分散性土相关成果。魏迎奇等^[7]对国内外多个工程

黏性土样的分散性判别试验结果进行分析,供国内研究及工程实践参考。近些年,在大量试验研究^[8]的基础上,樊恒辉等^[9]对黏性土的分散性机理和分散性鉴定试验进行系统阐述。

本文结合工程实践,对一种黏粒含量较低的粉土进行分散性试验研究,并探讨试验方法的适宜性。

1 土样的物理和化学性质

1.1 工程地质条件

本文研究的土料以细粒土为主,料场划分为4个区,如图1所示。地质调查及勘探揭示(图2),料场上部为第③层灰黄色粉土,厚3~24 m。下部为第①层块碎石土及漂砂卵砾石。灰黄色粉土底部与其下伏粗颗粒物质之间见不连续分布的第②层褐红色黏质粉土,厚1~3 m。料场第③层和第②层拟用作大坝防渗料,由于第②层储量很少,土料研究以第③层为主。

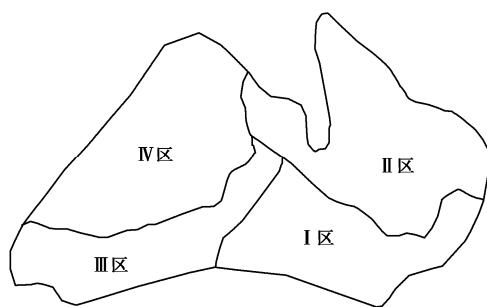


图1 土料场分区图

Fig. 1 Zoning map of soil in field

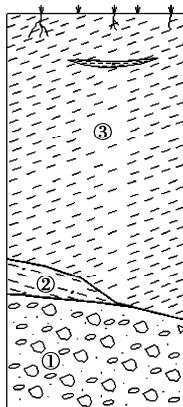


图2 地层结构示意图

Fig. 2 Sketch map of soil deposit

1.2 物理化学特性

(1) 物理特性

颗粒试验表明,土料小于5 mm平均含量为99.9%,小于0.075 mm细粒含量为95.5%,小于0.005 mm黏粒含量为10.7%,土料质量比较均匀,总体上

是以粉粒为主、黏粒含量略低的纯细料。相对密度为2.62~2.71,平均2.69。土料液限平均为30.4%,塑限平均为17.0%;塑性指数为9.1~16.8,平均13.4,按照规范分类定名为低液限黏土(CL)。

对98组土料黏粒含量进行统计,绘制概率分布图(图3)。从图3可以看出,黏粒含量呈单峰分布,峰值出现在黏粒含量为8%~12%,有44组,占44.9%。

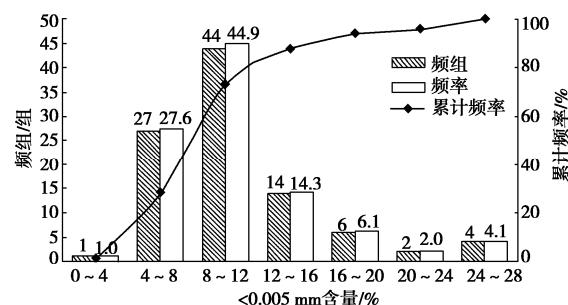


图3 土料黏粒含量概率分布直方图

Fig. 3 Probability distribution histogram of clay content rate of soil

(2) 矿物成分

选取12组试样进行矿物成分分析,蒙脱石为5.8%,伊利石为35.3%,绿泥石为9.7%,石英为34.6%,钾长石为4.3%,斜长石为8.9%,透闪石为1.1%,黄铁矿为0.3%。可见矿物成分以伊利石和石英为主。

(3) 化学成分

对15个试样进行化学成分分析, SiO_2 为55.49%, Fe_2O_3 为8.81%, Al_2O_3 为19.22%, CaO 为5.01%, MgO 为2.24%, 烧失量为4.88, 有机质为0.49, 易溶盐为0.06%, pH为7.57, 硅铝率为3.8。

2 分散性判别及试验现象分析

2.1 野外调查与识别

现场调查表明,料场地形总体完整,多为耕地。主要发育1条冲沟,为III区和IV区分界,为后缘山体流水下切形成,水量受季节影响明显,沟水较为清澈,少见有浑浊现象。降雨后沟水在短时间内恢复清澈,现场部分小水坑的积水经一段时间沉淀后逐渐变清澈。因耕作或工程开挖,料场出露大量陡坎、斜坡,剖面物质组成均为风积成因粉土。有的斜坡经多个雨季冲刷,甚至数十年日照雨淋,但坡面上未见明显冲沟、孔洞等现象。平缓地段多为耕地及道路,也未见“犁痕”等异常冲蚀现象。根据土料场野外调查初步分析,未见明显分散性土特征。

2.2 分散性试验鉴定及试验现象分析

(1) 试验总体情况

本次研究参照我国的水利水电工程天然建筑材料勘察规程 (SL251—2015, DL/T 5388—2007)、美国材料与试验协会 (ASTM) 颁布的分散性试验规程以及相关文献资料, 采用双比重计试验、土块试验、针孔试验、孔隙水溶液试验和交换性钠离子百分比试验 5 种方法进行分散性试验鉴定。

试验取样兼顾了料场的平面分区和剖面深度, 样品均匀分布于平面和立面; 每个分区都同时采用 5 种方法进行试验研究, 各试验方法组数近 100 组 (表 1), 具有较好的代表性。

由于试验数据量很大, 本文仅从各区选取代表性土样的试验成果进行汇总, 如表 2 所示。

(2) 分散性试验分析

从不同方法的试验成果来看, 各方法鉴别结论不统一, 物理性试验与化学性试验差异较大。下面对每

种试验的成果进行统计分析。

表 1 分散性试验统计表

Table 1 Statistical table of dispersion tests (组)

分区	双比重计试验	土块试验	针孔试验	孔隙水溶液试验	交换性钠离子百分比试验
I 区	47	47	48	47	47
II 区	23	23	23	23	23
III 区	14	14	14	14	14
IV 区	14	14	14	14	14
合计	98	98	99	98	98

a) 双比重计试验

进行 98 组双比重计试验, 试验判别结果以过渡型土为主, 占 51 组, 非分散性和分散性组数相当, 分别为 21 组、26 组。

导致试验结果极不统一的原因, 在于土样的黏粒

表 2 部分分散性试验成果汇总

Table 2 Summary of partial dispersion test results

土样编号	双比重计试验 分散度 /%	土块试验 特征	针孔试验			孔隙水溶液试验			交换性钠离子百分比试验				
			浸水后 水头 /mm	持续 时间 /min	最终 水色 /(ml·s ⁻¹)	最终 孔径 /mm	C _{Na⁺} /(meq·L ⁻¹)	TDS /(meq·L ⁻¹)	PS /%	CEC /(meq·kg ⁻¹)	C _{Na⁺} /(meq·kg ⁻¹)	ESP /%	
SJL101-1	46.8	无分散出 胶粒, 土块	—	—	混浊	—	渗透 破坏	0.373	1.800	21.3	30.5	0.9	3
SJL101-2	42.0	水解后在 量杯底部	—	—	混浊	—	渗透 破坏	0.182	1.100	16	34.0	1.1	3.11
SJL101-3	49.3	以细颗粒	40	5	混浊	2.9	塌孔	0.212	1.000	22.2	35.7	1.1	3.18
SJL201-1	30.7	SJL201-1~ SJL201-3	60	5	混浊	1.1	塌孔	0.285	1.100	27.1	40.8	0.4	0.92
SJL201-2	47.2	平堆, 水是 清的	—	—	混浊	—	渗透 破坏	0.352	1.000	35.6	30.9	0.4	1.32
SJL201-3	54.7	—	—	—	混浊	—	渗透 破坏	0.470	1.700	27.7	26.4	0.2	0.86
SJL301-1	38.7	SJL301-1~ SJL301-3	50	5	混浊	2.5	塌孔	0.200	0.290	38.9	67.2	0.5	0.76
SJL301-2	48.2	混浊水, 但 扩散范围 小	40	5	混浊	2.1	塌孔	0.220	0.370	30.8	62.5	0.5	0.8
SJL301-3	59.0	无分散出 胶粒, 土块	—	—	—	—	渗透 破坏	0.561	0.617	57.4	52.9	0.3	0.53
SJL401-1	35.2	SJL401-1~ SJL401-3	50	5	混浊	2	塌孔	0.626	0.852	36.9	53.7	0.5	0.98
SJL401-2	28.4	量杯底部 以细颗粒	40	5	混浊	2	塌孔	0.380	0.669	26.3	42.1	0.8	1.98
SJL401-3	35.0	平堆, 水是 清的	50	5	混浊	2.3	塌孔	0.652	0.727	58.8	45.7	0.6	1.40

注: 土样 SJL101-1~SJL101-3、SJL201-1~SJL201-3、SJL301-1~SJL301-3、SJL401-1~SJL401-3 分别取样于 I 区、II 区、III 区、IV 区。

含量不均匀。4个分区试验土样的黏粒含量为3.7%~22.9%，跨度很大，而且平均黏粒含量不高，尤其是I区，加分散剂和不加分散剂测得的黏粒含量平均值分别为9.2%和3.5%。从I区双比重计试验分散度与黏粒含量的关系图（图4）可以看出，随着黏粒含量增加，分散度降低，并且符合幂函数关系。在黏粒含量大于10%~15%时，分散度逐渐进入非分散性土的判别区域。

由此可见，双比重计试验受黏粒含量影响较大，黏粒含量较低时，试验容易误判，成果仅供参考。

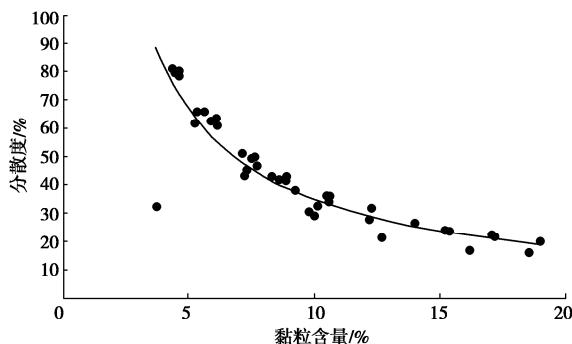


图4 分散度-黏粒含量的关系曲线（I区）

Fig. 4 Relation curve between dispersion degree versus clay content (Zone 1)

b) 土块试验

进行98组土块试验，呈现3种表现特征（表3），判别结果非分散性土为88组，过渡型土10组。

表3 土块试验成果统计表

Table 3 Statistics table of crumb test results

序号	表现特征	鉴定类别	组数
	无分散出胶粒的反应，土块水解		
1	后在量杯底部以细颗粒平堆，水是清的	非分散	79
2	土块水解后四周有混浊水，扩散范围小	过渡	10
	无分散出胶粒的反应，土块水解		
3	后在量杯底部以细颗粒平堆，混浊后很快变清	非分散	9

试验中，土样浸水后无分散胶粒的反应，土块水解后在量杯底部以细颗粒平推，水是清的，或混浊后很快变清。未出现典型分散性土的特征，试验判别为非分散性土。

c) 针孔试验

在99组土样针孔试验中，有42组在试验刚开始（1cm左右的水头）就形成渗透破坏，整体塌孔而无法完成试验；其他土样均在试验水头为20~60mm时，以塌孔而结束试验。

针孔试验从渗流理论的角度对土样进行分散性研究。本文研究的土样不仅黏粒含量较低，平均含量仅为10.7%，而且大部分为粉土，其粉粒平均含量达85%，因此其抗冲刷能力较弱。因此，进行针孔试验时，在水压力的冲刷作用下，土样很容易塌孔后整体渗透破坏，导致无法顺利完成针孔试验。

d) 孔隙水溶液试验

进行了98组孔隙水溶液阳离子试验，各区可交换性钠离子百分数PS总体较低，其中91组试验土样的PS介于20%~40%，为非分散性土；7组土样的PS大于40%，均为过渡型土。各区的试验成果统计见图5。

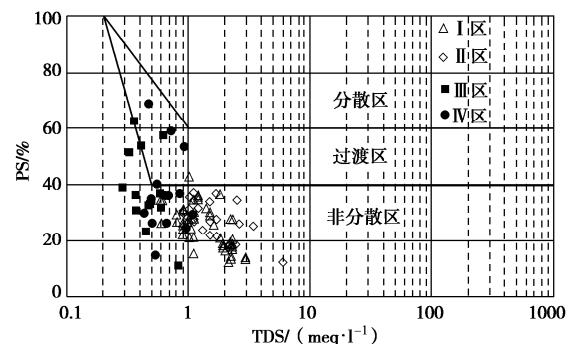


图5 孔隙水溶液试验的PS-TDS关系图

Fig. 5 Relation map between PS and TDS of pore water solution tests

e) 交换性钠离子百分比试验

进行了98组交换性钠离子百分比试验，各区交换性钠离子百分数ESP总体较低，均低于7%，试验判别均为非分散性土。

2.3 分散性综合鉴定

（1）野外调查与识别

对料场进行现场调查，未见明显冲沟、孔洞及“犁痕”现象，冲沟、沟水较为清澈，少见浑浊现象。野外调查表明，土料场无明显分散性土特征。

（2）矿物及化学成分

土料中黏土矿物占50.8%，其中蒙脱石平均含量仅为5.8%，以伊利石为主，不具有分散性土的矿物物质条件。主要化学成分以SiO₂为主，平均含量55.49%，有机质含量0.49%。硅铝率为3.50~3.96，平均3.79，主要为2:1型黏土矿物。

酸碱度pH值对黏土悬液性状具有重要的影响。低pH值条件下，黏粒颗粒表面的氧化铝表现为正电性，与由于同晶置换而带负电荷的土颗粒相互作用，导致颗粒从悬液中絮凝；高pH值条件下，黏土颗粒表面的负电荷量增多，易于形成扩散双电层使悬液稳定或黏土颗粒分散。已有研究认为^[9]，pH值小于8.6

的土样属于过渡型或非分散性土。本文试验土样的 pH 值为 7.1~8.2, 平均 7.57, 呈弱碱性, 不具备分散性土的酸碱度环境。

(3) 试验鉴定

双比重计试验、土块试验、针孔试验、孔隙水溶液试验和交换性钠离子百分比试验等 5 种方法分别从土力学、胶体化学、渗流理论、分析化学等不同角度对土样的分散性进行研究。这些试验方法的鉴定标准是从大量试验统计分析或经验得来的, 针对一般的黏性土能够互相印证, 但对本文土料差异较大。

分析不同试验方法的鉴定结果, 其中双比重计试验判别为分散性土、过渡型土、非分散性土的比例分别为 26.5%, 52.0%, 21.5%, 试验结果过于分散, 难以给出鉴定结论, 仅供参考; 土块试验以非分散性为主 (88 组, 占 89.8%), 很少量过渡型土 (10 组, 占 10.2%); 针孔试验受土样黏粒较低、粉粒含量较高的影响, 土样抗冲蚀性太差, 试验难以顺利完成; 孔隙水溶液试验以非分散性为主 (91 组, 占 92.9%), 很少量过渡型土 (7 组, 占 7.1%); 交换性钠离子百分比试验均为非分散性土。

(4) 综合评价

根据野外调查、矿物及化学成分分析, 本文土样不具备分散性土的现场特征、矿物及化学条件; 结合 5 种试验方法的成果, 双比重计试验和针孔试验没有获得合理的试验结果, 土块试验、孔隙水溶液试验和交换性钠离子百分比试验均判别为非分散性土。因此, 本文土料应为非分散性土。

3 试验方法的适宜性分析

对未能获得合理试验结果的双比重计试验和针孔试验两种方法, 进一步分析其适宜性。

(1) 双比重计试验

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而设计的试验方法。美国双比重计试验规程规定, 适用于塑性指数大于 4, 并且小于 0.005 mm 颗粒含量超过 12% 的土壤, 且该方法不能识别所有的分散性黏土。由于本文试验研究土料的黏粒含量为 3.7%~22.9%, 平均含量 10.7%, 其中 98 组土样中黏粒含量大于 12% 的有 38 组, 仅占 38.8%, 这极大影响试验成果的可靠性。

图 4 也揭示了随着土样黏粒含量增大, 试验结果从分散性—过渡型—非分散性变化的趋势, 表明当土料黏粒含量在 12% 左右甚至更低时, 双比重计试验受黏粒含量的影响很大。

因此, 考虑到本文土料黏粒含量总体偏低, 认为

双比重计试验方法不适宜。

(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水流的冲蚀能力。分散性土抗冲蚀能力很差, 通过针孔试验可以很好模拟分散性土在集中渗透水流作用下的冲蚀破坏。

美国针孔试验规程规定的适用范围: 适用于塑性指数大于 4、黏粒含量超过 12% 的土壤。本文土料黏粒含量 10.7%, 粉粒含量平均 85%, 是粉粒为主的细粒土, 级配不良, 渗透稳定性很差。以至于极低水头时土样就渗透破坏造成塌孔, 影响针孔试验的顺利完成。土样抗冲蚀能力较差的主要原因是黏粒含量较少、粉粒含量较多, 并非分散性土, 但针孔试验无法区别, 因此该试验方法不适合。

4 结 论

由于土料分散性对水工建筑物的安全性影响很大, 工程防渗土料要进行分散性鉴定。本文对一种低液限黏土进行分散性研究, 得到如下结论。

(1) 野外调查表明, 土料现场未见明显冲沟、孔洞及“犁痕”现象, 冲沟、沟水较为清澈, 少见浑浊现象, 现场调查无明显分散性土特征。

(2) 对土料进行矿物和化学成分分析, 土样以伊利石为主, pH 值平均 7.57, 呈弱碱性, 不具有分散性土的矿物条件和酸碱度环境。

(3) 采用双比重计试验、土块试验、针孔试验、孔隙水溶液试验和交换性钠离子百分比试验等 5 种方法进行近 100 组试验。试验结果表明, 双比重计试验结果较分散, 仅供参考; 土块试验以非分散性为主 (占 89.8%); 针孔试验基本未能顺利完成; 孔隙水溶液试验以非分散性为主 (占 92.9%); 交换性钠离子百分比试验均为非分散性土。

经分析, 未能取得合理试验结果的双比重计试验和针孔试验, 对本文研究土样不适用。

(4) 通过综合鉴定, 本文研究土料为非分散性土。

参考文献:

- [1] VOLK G M. Method of determination of degree of dispersion of the clay fraction of soils[C]// Proceedings, Soil Science Society of American, New Mexico, 1937: 561~565.
- [2] SHERARD J L, DUNNIGAN L P, DECKER R S. Some engineering problems with dispersive clays[C]// Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, 1977, Chicago: 3~12.

- [3] J.L. 谢拉德. 美国材料试验学会第 79 次年会 (1976 年) 关于“分散性土有关管涌及冲蚀”的专题讨论会总结[C]// 分散性黏土译文集, 1982: 9 - 17. (SHERARD J L. Summary of the 79th annual meeting of the american society for testing and materials (1976) on "piping and erosion related to dispersive soils"[C]// Translation of Dispersive Clay, 1982, Chicago. (in Chinese))
- [4] 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(5): 8 - 12. (QIN Yue-zhang. Experimental study on dispersion properties of Xiaolangdi Clay in the Yellow River[J]. Yellow River, 1981(5): 8 - 12. (in Chinese))
- [5] 王观平, 张来文, 阎仰中, 等. 分散性黏土与水利工程[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 Clay and Hydraulic Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [6] 钱家欢. 分散性黏土作为坝料的一些问题[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 94 - 100. (QIAN Jia-huan. Some problems of dispersive clay as dam material[J]. Chinese Journal and Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 94 - 100. (in Chinese))
- [7] 魏迎奇, 温彦锋, 蔡 红, 等. 分散性黏土鉴定试验的可靠性分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(3): 186 - 190. (WEI Ying-qi, WEN Yan-feng, CAI Hong, et al. Reliability analysis of identification test of dispersive clay[J]. Journal of China Institute Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(3): 186 - 190. (in Chinese))
- [8] 孔令伟, 李洪良, 樊恒辉, 等. 马家树水库大坝防渗土料分散性判别和改性试验[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 193 - 198. (KONG Ling-wei, LI Hong-liang, FAN Heng-hui, et al. Study of dispersive identification and treatment with lime of dam soil in Majiashu Reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 193 - 198. (in Chinese))
- [9] 樊恒辉, 孔令伟. 分散性土研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (FAN Heng-hui, KONG Ling-wei. Dispersive Soil Research[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)