

黏性土的物理化学及矿物学性质与分散机理

樊恒辉¹, 李洪良^{1, 2}, 赵高文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. 山东昌乐县建筑工程质量监督站, 山东 昌乐 262400)

摘要: 基于土-水-电解质系统的双电层理论, 对48组土样的物理化学及矿物学性质与分散性之间的关系进行了研究, 并结合试验验证和工程实例分析, 提出黏性土的分散机理。研究表明, 黏性土产生分散性的影响因素包括黏粒含量、黏土矿物成分、有机质、钠离子和pH值; 但是, 决定土体分散性的本质因素则在于介质环境中的钠离子和pH值。土体黏土矿物不论是以蒙脱石还是以伊利石为主, 只要土体中含有较多的钠离子和酸碱度呈强碱性, 土体就会产生分散性, 而且这两个因素缺一不可。

关键词: 分散性土; 物理化学性质; 矿物成分; 分散机理

中图分类号: TV443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)09-1740-06

作者简介: 樊恒辉(1973-), 男, 山西夏县人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事特殊性土的工程性质及改良技术研究。E-mail: yt07@nwsuaf.edu.cn。

Relation among dispersive mechanism, physical-chemical and mineral properties of clayey soil

FAN Heng-hui¹, LI Hong-liang^{1, 2}, ZHAO Gao-wen¹

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

Changle Construction Engineering Quality Supervision Station, Changle 262400, China)

Abstract: Based on the double-layer theory in soil-water-electrolyte system, the relation among the dispersivity, physical, chemical and mineral properties of 48 soil samples is studied. Based on experimental researches and engineering cases, the dispersive mechanism is clarified. The results show that the influence factors of the dispersivity include clay content, clay mineral composition, organic matter, sodium ion and pH value. However, the sodium ion and pH value in the medium are the essential factors. No matter whether the clay mineral in soil is montmorillonite or illite, as long as the soil contains more sodium ions and alkaline pH, the soil will be dispersed. Both of them are indispensable.

Key words: dispersive soil; physical-chemical property; mineral composition; dispersive mechanism

0 引言

分散性土被水冲蚀破坏, 是一个复杂的物理化学和力学过程, 其破坏具有快速、隐蔽的特点, 具有潜在危险性, 常造成堤坝、渠道边坡和水工建筑物地基失稳, 日趋受到工程界关注^[1-2]。黏性土分散机理的研究对于分散性土的判别方法、工程设计、改性应用、施工管理具有重要的理论指导作用。王观平等^[3]从黏土矿物的角度对黏性土的分散性进行了分析, 认为其原因主要是土体中含有相当量的2:1型结构、具有强烈膨胀性的蒙脱石~皂石类矿物。刘杰等^[4]认为土体的分散机理主要有3个方面: ①土的黏土矿物成分主要以蒙脱石为主体; ②孔隙水易溶盐中钠离子占主体; ③水质纯净。魏迎奇等^[5]认为土的分散性与其颗粒组

成、土颗粒相对密度和界限含水率没有直接关系, 但与pH值有较密切的关系, 分散性土的pH值明显高于非分散性土, 它可作为辅助性的鉴定指标。O.G. Ingles等^[6]认为, 分散性土中的黏粒大部分由蒙脱石所组成, 并且土体中交换性钠离子含量很高。J.L. Sherard^[7]认为, 分散性土的分散机理是与土颗粒表面的电学性质有直接关系; 土中的钠离子是产生分散的主要原因; 黏土矿物中通常含有相当量的蒙脱石; 与孔隙水中的其他阳离子相比, 钠离子的数量是决定

基金项目: 国家自然科学基金项目(50979094); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD31B05); 西北农林科技大学基本科研业务费项目(QN2009089)

收稿日期: 2011-09-01

Fig. 1 Relation between dispersivity of soil and relative density of grains

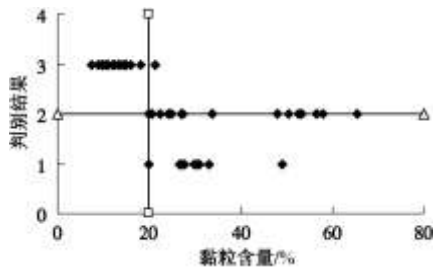


图 2 黏粒含量与土的分散性之间关系

Fig. 2 Relation between dispersivity of soil and clay content

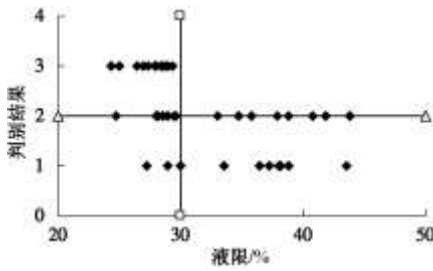


图 3 液限与土的分散性之间关系

Fig. 3 Relation between dispersivity of soil and liquid limit

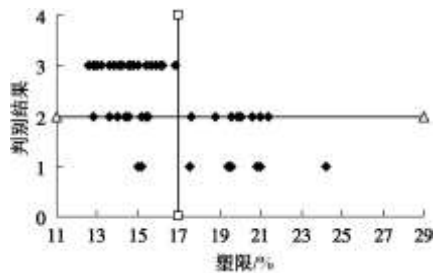


图 4 塑限与土的分散性之间关系

Fig. 4 Relation between dispersivity of soil and plastic limit

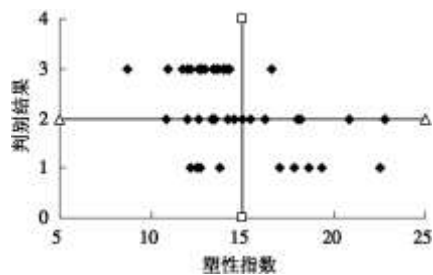


图 5 塑性指数与土的分散性之间关系

Fig. 5 Relation between dispersivity of soil and plasticity index

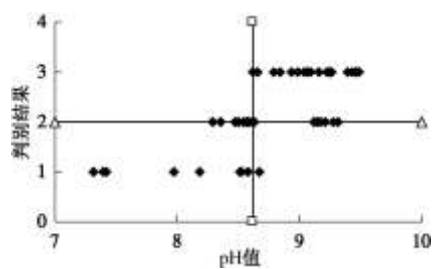


图 6 pH 值与土的分散性之间关系

Fig. 6 Relation between dispersivity of soil and pH value

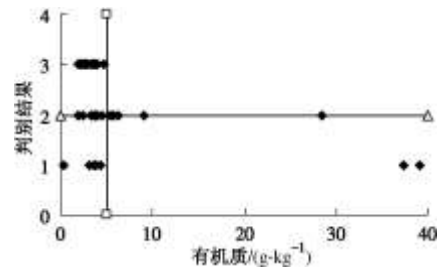


图 7 有机质与土的分散性之间关系

Fig. 7 Relation between dispersivity of soil and organic matter

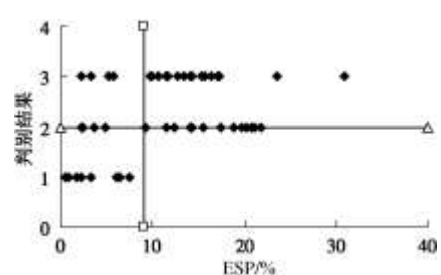


图 8 ESP 与土的分散性之间关系

Fig. 8 Relation between dispersivity of soil and ESP

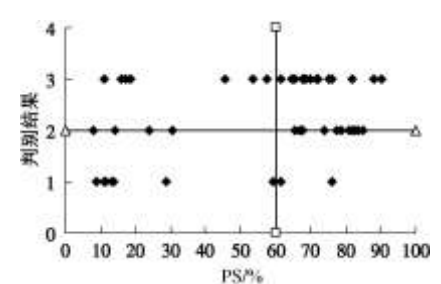


图 9 PS 与土的分散性之间关系

Fig. 9 Relation between dispersivity of soil and PS

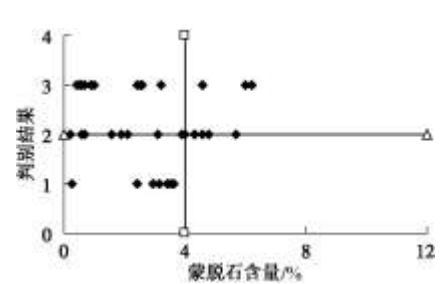


图 10 蒙脱石含量与土的分散性之间关系

Fig. 10 Relation between dispersivity of soil and montmorillonite

3 黏性土的分散机理讨论与分析

3.1 黏粒含量

黏粒颗粒细小，具有很大的表面积，黏接力很强，在土壤的团粒结构形成中起着重要的作用。团粒结构可以阻止水的侵蚀，具有较强的抵抗水力侵蚀作用。

分散性土判别方法中的双比重计试验^[14]就是借鉴农业土壤物理化学分析中的土壤团粒分析而演化来的。

表1 土样物理化学及矿物成分与分散性之间的关系

Table 1 Relation among dispersivity, physical-chemical properties and mineral composition of soil samples

判别项目	指标	土样组数/组			土样占总土样百分数/%			土样占各类土的百分数/%		
		分散性土	过渡性土	非分散性土	分散性土	过渡性土	非分散性土	分散性土	过渡性土	非分散性土
颗粒相对密度	<2.69	0	2	3	0.0	4.2	6.3	0	12	30
	≥2.69	21	15	7	43.8	31.3	14.6	100	88	70
黏粒含量	<20%	20	0	0	41.7	0.0	0.0	95	0	0
	≥20%	1	17	10	2.1	35.4	20.8	5	100	100
液限	<30%	21	9	2	43.8	18.8	4.2	100	53	20
	≥30%	0	8	8	0.0	16.7	16.7	0	47	80
塑限	<17%	21	8	2	43.8	16.7	4.2	100	47	20
	≥17%	0	9	8	0.0	18.8	16.7	0	53	80
塑性指数	<15	20	9	5	41.7	18.8	10.4	95	53	50
	≥15	1	8	5	2.1	16.7	10.4	5	47	50
有机质	<5g/kg	18	9	8	42.9	21.4	19.0	100	64	80
	≥5g/kg	0	5	2	0.0	11.9	4.8	0	36	20
pH 值	<8.6	0	9	9	0.0	18.8	18.8	0	53	90
	≥8.6	21	8	1	43.8	16.7	2.1	100	47	10
ESP	<9%	4	4	10	8.3	8.3	20.8	19	24	100
	≥9%	17	13	0	35.4	27.1	0.0	81	76	0
PS	<60%	6	4	8	12.5	8.3	16.7	29	24	80
	≥60%	15	13	2	31.3	27.1	4.2	71	76	20
蒙脱石含量	<4%	18	8	10	37.5	16.7	20.8	86	47	100
	≥4%	3	9	0	6.3	18.8	0.0	14	53	0

通常所述的黏性土是指液限 $w_L > 25\%$, 塑性指数 $I_p > 6$ 的黏质土和粉质土, 黏粒含量一般大于 10%。若由于土样中的黏粒含量很低而导致土样出现分散现象, 就不属于黏性土的分散性研究范畴, 而是属于无凝聚性土的研究范畴了。譬如, 无黏性粉砂、细砂在水中也会分散, 但是这些土料的分散性机理与黏性土是不同的。

3.2 黏土矿物成分

常见的黏土矿物有高岭石类、蒙脱石类、伊利石类, 它们是土中物理化学性质活跃的物质, 对于黏性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, 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, 其晶层牢固, 晶格无扩展性, 无分散性和胀缩性。蒙脱石类属于 2:1 型矿物, 硅氧四面体和一个铝氧八面体之间无 K^+ 联结, 水可以进入片层之间, 使晶体产生很大的体积改变。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。伊利石类虽也属于 2:1 型矿物, 但两者的主要差别是, 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, 其分散性和胀缩性较蒙脱石小。因此, 从矿物学角度来讲, 一般认为分散性土中含有较多量的蒙脱石。但是, 如果蒙脱石吸附的阳离子不同, 其工程性质是不同的, 如钙蒙脱石只具有胀缩性, 而钠蒙脱石则具有很强的分散性。

3.3 有机质

土中有机质主要为纤维素和腐殖质。随着有机质的成因、龄期和分解程度不同, 土体的物理化学性质也有很大的不同。有机质同黏粒一样, 属于一种胶体, 也可以促进土壤团粒结构的形成。另外, 有机质中含有胡敏酸和富里酸, 一般呈酸性, 可以降低土体的酸碱性, 减少土体的分散倾向。资料表明, 如果土体中的有机质含量超过 5 g/kg, 土体就不会具有分散性。有机质对土体分散性的影响主要在于团粒结构和 pH 值, 后者的作用可能更强一些。

3.4 钠离子

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。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, 扩散层厚度与离子价成反比, 与离子浓度的平方根成反比, 而与介电常数和温度的乘积的平方根成正比。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地影响。因此, 离子价越高, 离子浓度越大, 扩散层的厚度越小。

在自然界的土体中, 阳离子一般包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ , 其中含量较多的是 Ca^{2+} 和 Na^+ , 一价 Na^+ 的双电层厚度是二价 Ca^{2+} 的 2 倍。因此, 若土样中含

有大量的钠离子,使得土颗粒间双电层厚度增加,排斥力大于吸引力,净势能表现为斥力,土样产生分散。

3.5 酸碱度 pH

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。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。因此,酸碱度是黏性土产生分散性的本质因素之一。

如果土样中黏土矿物以伊利石为主,但是处于高 pH 值条件下,则其黏土颗粒表面的负电荷数量增大,吸附的阳离子数量也增多,使得颗粒表面的双电层厚度增加,颗粒趋于分散,其工程性质如同钠蒙脱石,具有较强的分散性。这可能就是某些伊利石土样产生分散性的原因。

3.6 分散机理分析

从上述的分析中可看出,影响土体分散性的因素有黏粒含量、黏土矿物类型、有机质、钠离子和酸碱度。然而,黏粒含量、黏土矿物类型、有机质只是黏性土分散性的影响因素,而不是其本质因素,影响黏性土分散性的本质因素在于土-水-电解质系统。在土-水-电解质系统中,决定双电层厚度的两个主要因素是土体孔隙水溶液的酸碱度和溶质类型及含量。因此,如果土体的孔隙水溶液发生变化,其分散性也随着变化。在判别黏性土的分散性研究中,一般是采用纯水来进行的,而在实际工程中,其介质环境中的水溶液是不同于纯水的,其可抑制土的分散性。这也就是某些土样在试验室内判别为分散性土,而在实际应用中却没有发现破坏的原因。

综上所述,如果土体中含有大量的钠离子,并且 pH 值比较高,则黏土颗粒带的负电荷增加,能够吸附大量的钠离子,使得土颗粒双电层厚度增加,颗粒之间的引力降低,斥力增加,促使土颗粒之间分散。这两个因素缺一不可。

4 试验验证及工程实例

4.1 试验验证

笔者曾采用陕西杨凌土样(属于非分散性土)和宁夏马家树拦沙坝土料(属于分散性土)2种土样对上

述结论进行了验证。分散性判别方法采用碎块试验^[15]。根据土体孔隙水溶液的特点以及研究目的,分别配制了 NaOH、NaCl、NaHCO₃、Na₂CO₃、Na₂SO₄、KOH、KCl、KHCO₃、K₂CO₃、K₂SO₄、CaCl₂ 和 AlCl₃ 等溶液。试验结果如下:

(1) 杨凌土样在纯水及中性的 NaCl、Na₂SO₄ 和碱性的 NaHCO₃ (pH 值较低) 溶液中没有分散性反应,但在呈强碱性的 Na₂CO₃、NaOH 溶液中有强烈的分散性反应。不论是碱性 K₂CO₃、KOH、KHCO₃, 还是中性 KCl、K₂SO₄, 杨凌土样均没有分散性反应。

(2) 马家树土样在纯水中具有明显的分散性,出现土壤胶粒,水体颜色混浊。随着 NaCl、CaCl₂、AlCl₃ 溶液浓度的增加,其分散性呈降低趋势直至最后消失;而且,随着溶液中阳离子价位的升高,其临界分散浓度越来越低。

4.2 工程实例

青海班多水电站大坝心墙土料^[9]、宁夏马家树拦沙坝坝体土料^[16]、山西上马水库防渗土料^[17]中蒙脱石含量只有 2% 左右,却属于分散性土,正是因为土体中含有大量 Na⁺ 和 pH > 8.5; 黑龙江引嫩工程^[18]土料中典型分散性土含有蒙脱石(4%~12%),但是也同时含有大量 Na⁺, 并且 pH 在 9.39~10.09。这些试验资料也都证明了 Na⁺ 和 pH 是分散性土的必须条件。此外,将迄今为止工程勘察中所遇到的分散性土分布区域与中国土壤酸碱图相对照,发现这些区域都位于 pH 大于 8.5 的强碱性土地区,两者能够很好地吻合。

5 结 论

(1) 影响黏性土分散性的物理化学因素包括黏粒含量、黏土矿物成分、有机质、钠离子和 pH 值。但是,从其分散的本质分析,钠离子和 pH 值是黏性土产生分散的两种主要因素。蒙脱石含量高低不是分散性土的必要条件;土体产生分散性的必要条件是土体中含有较多的钠离子和酸碱度呈强碱性。

(2) 动电电位(ζ -电位)可反映土-水-电解质系统中双电层的厚度。建议通过研究土体在不同的水-电解质系统中动电电位的变化来分析黏性土的分散性,藉此实现定量化判别黏性土的分散性。

参考文献:

- [1] 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. (QIAN Jia-huan. Problems on dispersive soil as dam materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(1): 94 - 100. (in Chinese))

- [2] 邓铭江, 周小兵, 王金平, 等. “635”水利枢纽大坝心墙防渗土料分散性判别及改性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(6): 73 - 77. (DENG Ming-jiang, ZHOU Xiao-bing, WAN Jin-ping, et al. Dispersion appraisal and modification analyses of the impervious soil materials for the core wall of the dam of “635” water control project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(6): 73 - 77. (in Chinese))
- [3] 王观平. 黏土矿物与分散性黏土[J]. 黑龙江水专学报, 1994, **21**(3): 21 - 25. (WANG Guan-ping. Clay mineral and dispersive clay[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 1994, **21**(3): 21 - 25. (in Chinese))
- [4] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LIU Jie. Seepage control of earth-rock dams theoretical basis, engineering experiences and lessons[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 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 of Water Resources and Hydropower Research, 2007, **5**(3): 186 - 190. (in Chinese))
- [6] INGLES O G, AITCHISON G D. Soil-water disequilibrium as cause of subsidence in natural soils and earth embankments[C]// Proceedings of the Tokyo Symposium on Land Subsidence, 1969, **2**: 342 - 353.
- [7] SHERARD J L, DECKER R S, RYKEN R L. Piping in earth of dispersive clay[C]// Proceedings of the ASCE Specialty Conference on the Performance of Earth-supported Structure, Purdue University, 1972: 589 - 626.
- [8] 樊恒辉, 李振. 黄河宁木特水电站土样物理化学性质及分散性试验[R]. 杨凌: 水利部西北水利科学研究所, 2006. (FAN Heng-hui, LI Zhen. The research report on the physical-chemical characters and the dispersivity of dam core soil in the Ningmute Reservoir on the Yellow River[R]. Yangling: Northwest Hydro-technical Research Institute MWR, 2006. (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试验[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 properties and dispersive identification of soil in the Banduo Dam[R]. Yangling: Northwest Hydro-technical Research Institute MWR, 2005. (in Chinese))
- [10] 樊恒辉, 孔令伟, 郭敏霞, 等. 文家沟水库筑坝土料分散性和抗渗性能试验[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 458 - 463. (FAN Heng-hui, KONG Ling-wei, GUO Min-xia, et al. Dispersivity and impermeability of dam soil in Wenjiagou Reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 458 - 463. (in Chinese))
- [11] 樊恒辉, 吴普特, 李鹏, 等. 分散性土判别试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(11): 1310 - 1316. (FAN Heng-hui, WU Pu-te, LI Peng, et al. Study on identification of dispersive clay soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(11): 1310 - 1316. (in Chinese))
- [12] 樊恒辉, 李鹏. 黑河土料物理化学性质、分散性鉴定和粘土矿物成分试验报告[R]. 杨凌: 水利部西北水利科学研究所, 2001. (FAN Heng-hui, LI Peng. The research report on the physical-chemical properties and dispersivity and clay mineral compositions of the core soil in the Heihe Dam[R]. Yangling: Northwest Hydro-technical Research Institute MWR, 2001. (in Chinese))
- [13] 高明霞, 李鹏, 王国栋, 等. 南坪水库筑坝土料分散机理及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1303 - 1308. (GAO Ming-xia, LI Peng, WANG Guo-dong, et al. Mechanism and reason of dispersivity of dam soil in Nanping Reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1303 - 1308. (in Chinese))
- [14] ASTM D4221—11 Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer[S].
- [15] ASTM D6572—06 Standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soils by the crumb test[S].
- [16] 樊恒辉, 孔令伟, 李洪良, 等. 马家树水库大坝防渗土料分散性判别及其改性试验[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 193 - 198. (FAN Heng-hui, KONG Ling-wei, LI Hong-liang, et al. Study on the dispersive identification and treatment with lime of dam soil in Majiashu's Reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 193 - 198. (in Chinese))
- [17] 岳宝蓉, 金耀华. 山西上马水库土坝裂缝原因与防治措施[J]. 防渗技术, 1998, **4**(3): 1 - 14. (YUE Bao-rong, JIN Yao-hua. Crack reasons and prevention measures of the dam in the Shangma Reservoir in Shanxi Province[J]. Technique of Seepage Prevention, 1998, **4**(3): 1 - 14. (in Chinese))
- [18] 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 soil and water conservancy project[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))