

文章编号: 1000-7598 (2014) 02-0435-06

分散性土的抗剪强度特性试验研究

唐自强, 党进谦, 樊恒辉, 李凌芸

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 分散性土是一种具有特殊工程性质的土, 其典型的性质为抗渗性能差, 耐冲蚀能力低, 在纯水中具有很高的分散性。目前, 人们对于分散性土的研究主要集中在鉴定、抗渗和改良等方面, 而对其抗剪强度特性的研究很少。采用三轴 CU 试验研究不同初始条件下分散性土的抗剪强度特性。结果表明: 分散性土的应力-应变曲线在小围压、低含水率和高干密度的状态下呈应变软化型, 在围压较大、含水率较高的情况下呈弱硬化型或硬化型; 黏聚力和内摩擦角均随含水率的增大而减小, 并且干密度越大受水分影响越强烈; 黏聚力随干密度的增大而增大, 在低含水条件下, 黏聚力的增幅较大, 而在高含水条件下, 黏聚力的增幅则较小; 内摩擦角随干密度的增大有少量增大。

关 键 词: 分散性土; 抗剪强度; 含水率; 干密度

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental research on shear strength characteristics of dispersive clay

TANG Zi-qiang, DANG Jin-qian, FAN Heng-hui, LI Ling-yun

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Dispersive clay is a kind of soil with special engineering properties, and with typical features of poor impermeability, low erosion resistance ability, very high dispersiveness when it is in pure water. In recent years, the study of dispersive clay in the field mainly focuses on identification, penetrability, betterment and other aspects; however, the studies of shear strength properties are rare. In this paper, the conventional triaxial compression consolidated undrained (CU) test is adopted to study the dispersive clay's shear strength characteristics under different initial conditions. The results show that: dispersive clay's stress-strain curves present the softening type when it is under the conditions of small confining pressure, low moisture content and high dry density; but it changes into the weak hardening type or hardening type when it is under the conditions of large confining pressure and high moisture content. Dispersive clay's cohesion and internal frictional angle all decrease while the moisture content increases. In addition, the higher the dry density is, the stronger influence of moisture has on the clay's cohesion and internal frictional angle; its cohesion increases with the increase of dry density; and it has a larger increment under the low moisture content condition compared to that under the high moisture content conditions; internal frictional angle has a small increment with the increasing of dry density.

Key words: dispersive clay; shear strength; moisture content; dry density

1 引 言

分散性土的形成是气候、生物、地形、母质、时间以及在土壤发生发育过程中的各种物理、化学、生物等因素综合作用的结果^[1], 其分布规律具有分布广、不连续的特征。20 世纪 50 年代首次在澳大利亚发现后, 美国、泰国、加拿大等国也陆续发现, 在我国最早发现是在 20 世纪 80 年代初的黑龙江引嫩工程中, 随后在山东、海南、新疆、青海、山西

等工程实践中也有发现^[2]。分散性土中含有大量的交换性 Na 离子, 在低含盐量水中或者纯净水中细颗粒之间的黏聚力大部分甚至全部丧失, 呈团聚体存在的颗粒体自行分散成原级的黏土颗粒^[3], 在实际工程中表现为耐冲蚀能力低, 抗渗性能差, 给工程带来了严重的危害^[4], 分散性土也因其特殊的性质在近年来受到岩土工程界的广泛关注。国内对于分散性土的研究起步较晚, 且研究内容主要集中在分散性土的分散机制、鉴定方法、改良以及抗渗性

收稿日期: 2012-09-28

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50979094); 西北农林科技大学青年学术骨干项目 (No. 08); 西北农林科技大学基本科研业务费 (No. QN2009089)。

第一作者简介: 唐自强, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要从事特殊土基本性质研究。E-mail: show-19870629@163.com

通讯作者: 党进谦, 男, 1964 年生, 硕士, 教授, 研究生导师, 主要从事岩土工程理论与计算研究。E-mail: dangjinqian@163.com

能等方面^[5-10],而对于分散性土在动、静荷载作用下的强度及变形等特性研究的很少。因此,研究分散性土在静荷载下的强度问题,对于分散性土地基以及分散性土构筑物的长期稳定性具有重要的意义。本文通过常规三轴试验研究分散性土在不同含水率和不同干密度下的强度特性,并探讨不同指标对分散性土强度特性的影响规律,为工程设计和施工提供一些理论依据。

2 试验方法

2.1 试验土料的基本性质

试验所用的分散性土土样取自宁夏某碾压均质土坝,土样的天然含水率为13%~17%,干密度

为1.65 g/cm³,通过试验测定试验土样的基本物理化学指标及主要矿物成分见表1、2。采用针孔试验、碎块试验、双比重计试验、孔隙水可溶盐阳离子试验以及交换性钠百分比试验等5种方法进行综合判定,试验用土具有分散性土的典型特征,属分散性土。

本文主要探讨不同初始含水率和干密度对分散性土强度特性的影响规律。因此,将试验土样进行风干、碾碎、过2 mm筛,然后按照试验所需含水率加入一定量的蒸馏水,静置待水分分布均匀后,采用静压法分四层压制成要求干密度的试样,放入密闭养护缸养护备用。试验前称量试样质量,反算试样含水率,以反算含水率为准。

表1 试验土样的基本物理指标
Table 1 Basic physical indexes of soil samples

液限 w_L	塑限 w_P	塑性指数	土粒相对	最大干密度 ρ_{dmax}	最优含水率 w_{OP}	颗粒组成/%		
/ %	/ %	I_p	密度 G_s	/ (g/cm ³)	/ %	>0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm
27.4	12.6	14.8	2.72	1.67	16.8	10.5	68	21.5

表2 试验土样的基本化学指标及主要矿物成分
Table 2 Basic chemical indexes and main mineral components of soil samples

易溶盐	中溶盐	有机质	Na ⁺ (阳离子中含量最高)	伊-蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石
/ (g/kg)	/ (g/kg)	/ (g/kg)	/ (g/kg)	/ %	/ %	/ %	/ %
1.088	0.67	2.10	0.86	13.8	8.6	2.6	3.7

2.2 方案设计

试验设置了1.45、1.55和1.65 g/cm³ 3个干密度和11%、14%、17%和20% 4个含水率状态,分别在100、200和300 kPa围压下进行固结不排水剪,试验在常规三轴仪上进行,试样直径为39.1 mm,高为80.0 mm。试验过程中,针对不同的破坏形式选择不同的破坏标准:当有峰值出现时,取峰值的主应力差作为破坏标准;无峰值出现时,取轴向应变15%时的主应力差值作为破坏标准。

3 试验成果分析

3.1 分散性土的应力-应变性状

对比分析36个试样的应力-应变曲线,结果表明:在小围压、低含水和高密度状态下,分散性土的应力-应变曲线有明显的峰值出现,呈应变软化型;当围压、含水率逐渐增大,干密度逐渐减小时,应力-应变曲线则逐渐转化为弱硬化型或硬化型。不同的初始含水率和初始干密度对应力-应变曲线有着不同程度的影响。

图1为不同初始含水率的分散性土样在相同围

压、相同初始干密度下的典型应力-应变曲线,图2为不同初始干密度的分散性土样在相同围压、相同初始含水率下的典型应力-应变曲线。由图1、2知,初始含水率与初始干密度对分散性土的应力-应变性状有显著影响。如图1(a)所示,在围压 σ_3 为100 kPa时,干密度为1.45 g/cm³时,不同初始含水率的分散性土的应力-应变曲线均呈硬化型。干密度为1.65 g/cm³时,在低含水(11%)条件下,应力-应变曲线有明显的峰值,且出现峰值时的轴向应变很小,试样的破坏面十分明显,呈脆性破坏,应力-应变曲线呈软化型,随着含水率 w 的增加,应力-应变曲线逐渐由软化型向硬化型过渡,不再出现明显的峰值,破坏类型也由脆性破坏转变为塑性破坏,如图1(b)所示。在低围压、小干密度情况下,不同初始含水率的分散性土孔隙比较大,颗粒排列疏松,在剪切过程中土体逐渐被压实,土体强度也随之提高,主应力差随轴向变形迅速增大,达到屈服极限后曲线增长越来越缓慢,也越来越平缓,整体表现为弱硬化型;随着干密度的增大,当分散性土的干密度较大时(1.65 g/cm³),土颗粒排列紧密,在低含水(11%)

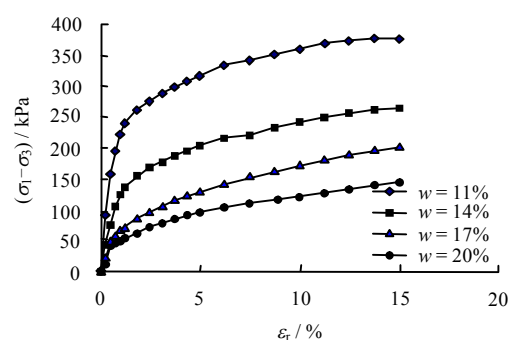
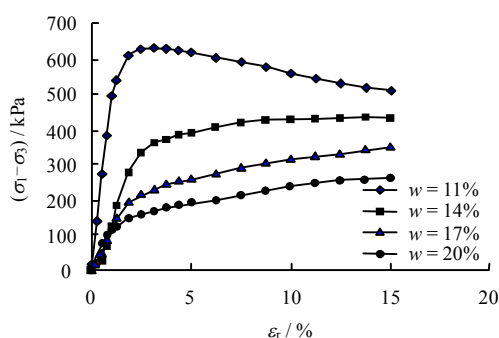
(a) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, $\rho_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ (b) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, $\rho_d = 1.65 \text{ g/cm}^3$

图1 不同条件下的应力-应变关系曲线

Fig.1 Stress-strain curves in different conditions

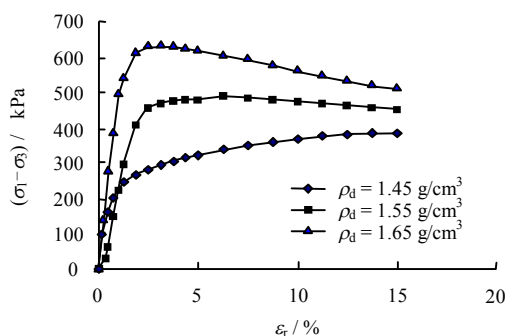
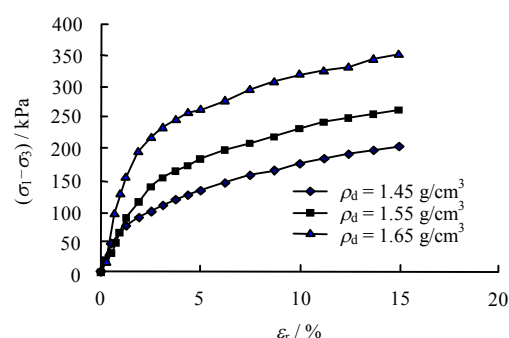
(a) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, $w = 11\%$ (b) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, $w = 17\%$

图2 不同条件下的应力-应变关系曲线

Fig.2 Stress-strain curves in different conditions

条件下, 分散性土的黏聚力大, 小应变时强度急剧增长, 达到峰值后, 黏聚力丧失, 随应变增大, 强度降低, 如图 2(a)所示; 随着初始含水率增大, 分散性土颗粒间的双电层厚度增大, 土粒间的联结力减小, 消失甚至转变为排斥力, 在剪切过程中随着剪应变的增大, 土体逐渐压密强度提高, 应力-应变曲线呈硬化型, 整个剪切过程中应力的变化梯度比较均匀, 如图 2(b)所示。

3.2 分散性土的抗剪强度特性

由图 1 可知, 含水率的增加使得土体强度降低, 从而导致应力-应变曲线有不同程度的下降, 不同围压下的强度与含水率的关系如图 3 所示。由图 2 可知, 干密度越大, 分散性土抵抗破坏的能力就越强, 应力-应变曲线位置越高, 不同围压下的强度与干密度的关系如图 4 所示。

3.2.1 含水率对土体抗剪强度的影响

含水率对土体抗剪强度的影响主要是影响黏聚力和内摩擦角, 一般的土体材料对水分都具有较高的敏感性, 而分散性土具有特殊的水理性质, 因此, 含水率的变化会对土体的抗剪强度产生显著的影响。

试样在不同含水率和干密度状态下的饱和度以及通过三轴试验所得的强度参数见表 3, 经整理得

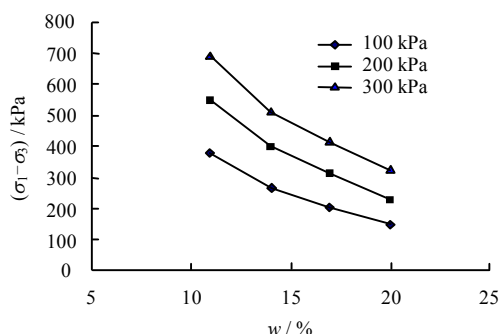
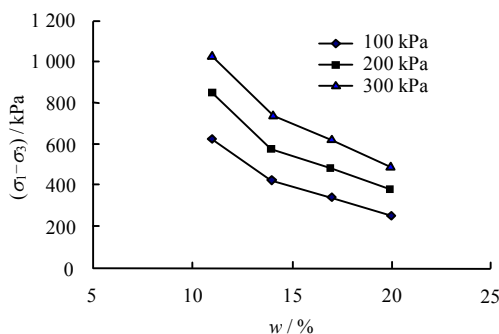
(a) $\rho_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ (b) $\rho_d = 1.65 \text{ g/cm}^3$

图3 强度与含水率关系曲线图

Fig.3 Relation curves between intensity and moisture content

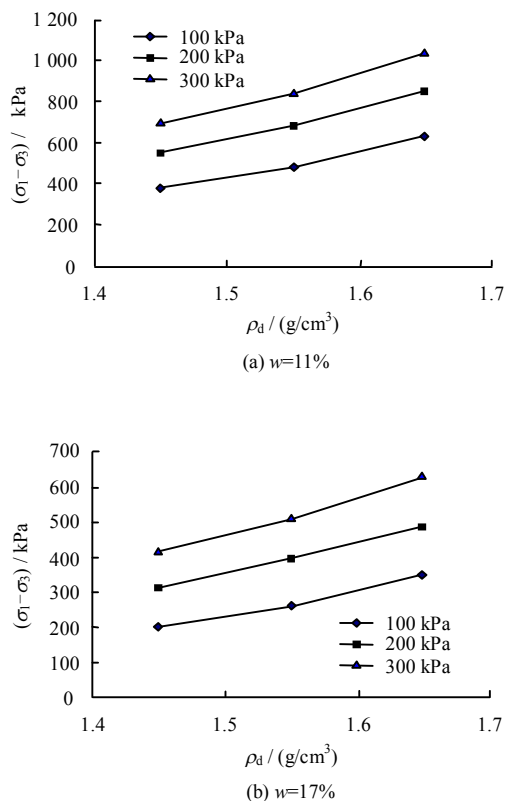


图4 强度与干密度关系曲线图
Fig.4 Relation curves between intensity and dry density

到分散性土的黏聚力和内摩擦角随含水率的变化规律,如图5所示,从图5(a)可知,黏聚力随着含水率的增大明显减小,并且干密度越大土体对水分越敏感,黏聚力下降的幅度也就越大。当含水率较低时,土体饱和度小,基质吸力大,以固化黏聚力为主的黏聚力也较大,因此,抗剪强度较高;随着水分的增加使土颗粒之间的胶结物质逐渐溶解破坏,土颗粒之间的薄膜水增厚,同时土中吸力也因饱和度的增加而减小,从而导致了黏聚力减小,土体强度降低。

含水率对分散性土内摩擦角的影响主要表现在含水率的增加不仅削弱了土颗粒之间的联结作用,并且充斥于土体孔隙中的水分又能起到一个润滑的作用,削弱了土颗粒之间产生相互滑动时需要克服由于颗粒表面粗糙不平而引起的滑动摩擦;其次,分散性土颗粒较细,黏土矿物含量丰富,以蒙脱石和伊利石为主,蒙脱石具有强亲水性,遇水之后经水化反应形成较厚的扩散层和水化膜,导致土颗粒不易聚结,并加强了颗粒间的润滑作用,导致了内摩擦角减小,内摩擦角与含水率的变化规律见图5(b)。

表3 不同含水率和干密度状态下的饱和度和抗剪强度参数

Table 3 Saturation and shear strength parameters under different moisture contents and dry density states

含水率 w / %	干密度 ρ_d / (g/cm ³)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	饱和度 S_r / %
11	1.45	70.46	26.12	34.2
	1.55	92.48	28.16	39.6
	1.65	122.70	30.39	46.1
14	1.45	47.58	22.63	43.5
	1.55	61.85	24.41	50.4
	1.65	85.11	26.14	58.7
17	1.45	34.09	20.31	52.8
	1.55	46.93	22.52	61.3
	1.65	67.16	24.37	71.3
20	1.45	19.34	18.05	62.1
	1.55	29.69	19.90	72.1
	1.65	48.08	22.06	83.9

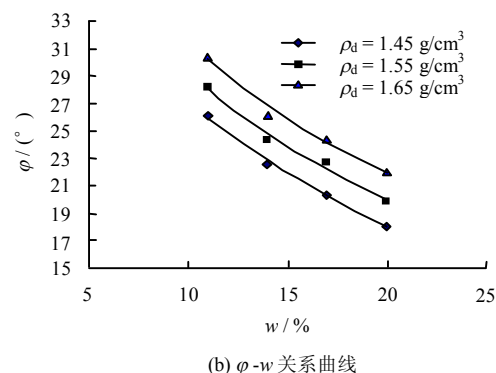
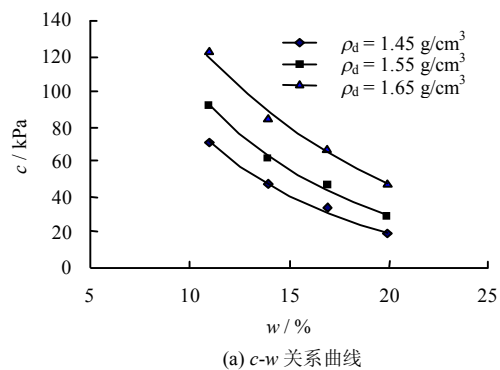


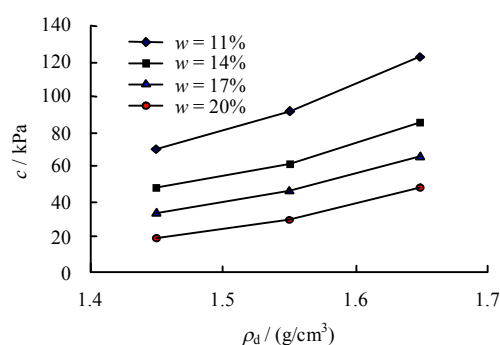
图5 黏聚力 c 、内摩擦角 φ 与含水率 w 关系曲线图
Fig.5 Relation curves among c 、 φ and w

此外,分散性土中含有大量的交换性 Na 离子,当土体处于干燥状态下时,这种交换性阳离子会紧紧地吸附在带有负电荷的土颗粒表面,然而遇水之后,由于分子热运动和浓度差,颗粒表面的高浓度阳离子会向低浓度进行扩散,但表面的静电吸引力又会约束这种扩散,黏土颗粒对阳离子的吸附和阳离子的扩散运动的共同作用结果便形成了扩散双电层^[2]。土体孔隙中的水是一种极性分子,会与阳离

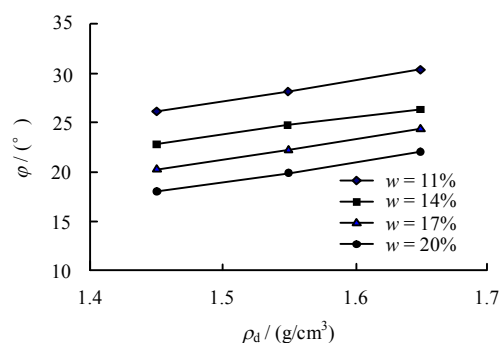
子发生水化反应,在颗粒表面形成一层水化膜,而一价的 Na 离子带电量低,水化能力强,离子半径小,层间扩散作用强烈,从而形成的扩散层和水化膜厚,并且扩散层和水化膜越厚,颗粒间的吸引力就越小,导致黏土颗粒不易聚结,在宏观上表现为土体强度减小。

3.2.2 干密度对土体抗剪强度的影响

通过对试验结果分析,干密度的变化对土体的抗剪强度指标也有着显著影响,如图6所示。



(a) c - ρ_d 关系曲线



(b) ϕ - ρ_d 关系曲线

图6 黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ 与干密度 ρ_d 关系曲线图

Fig.6 Relation curves between c 、 ϕ and ρ_d

由图6(a)知,黏聚力随干密度的增大呈指数增长,并且含水率越低,黏聚力的增长幅度也就越大,干密度对黏聚力的影响随着含水率的增大而减小;由图6(b)中可见,内摩擦角随干密度的增大少量的增加,增长幅度约为 $3^\circ \sim 5^\circ$,近似呈线性变化。产生这两种结果的主要原因有二:一是干密度的增大,土粒之间的联结点数目也相应增加,使得土体的孔隙比减小,土体颗粒的接触更加紧密,土颗粒之间以及土颗粒与水之间的相互作用加强,从而使黏聚力和内摩擦角增大,综合表现为土体抗剪强度的提高。二是当土体处于松散状态时孔隙比较大,颗粒间的水分多以自由水的状态存在,自由水的存在对颗粒之间的相互摩擦会起到一个润滑的作用,

然而随着干密度的增大,孔隙比逐渐减小,部分自由水会逐渐转化为弱结合水^[11],这种转化正好减弱了这种润滑作用,使得内摩擦角有所增大。

4 结 论

(1) 不同的初始含水率和干密度对分散性土的应力-应变曲线有着不同程度的影响,含水率对应力-应变曲线形态的影响与干密度有着一定的关系。在小围压、低含水率和高干密度的情况下呈应变软化型,在围压较大、含水率较高的情况下呈弱硬化型或硬化型。

(2) 分散性土体内含有大量的交换性钠离子及蒙脱石类亲水性矿物,因此,对水分特别敏感,黏聚力和内摩擦角均随含水率的增大而减小,并且干密度越大受水分影响越强烈。

参 考 文 献

- [1] 朱祖祥. 土壤学(下册)[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [2] 王观平. 分散性黏土与水利工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 7-24
- [3] MCELORY C H. The use chemical additives to control the erosive behavior of dispersed clays[C]//Engineering Aspects of Soil Erosion, Dispersive Clays and Loess. New York: ASCE, 1987: 1-16.
- [4] 刘越, 许明显, 周志星. 分散性土对水利工程的危害及防治[J]. 山西建筑, 2009, 35(3): 367-369.
LIU Yue, XU Ming-xian, ZHOU Zh-i xing. Harms of dispersive clay to hydraulic works and preventive measures[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(3): 367-369.
- [5] 巨娟丽. 黏土分散性鉴定试验研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [6] 樊恒辉, 赵高文, 李洪良. 分散性黏土研究现状与展望[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 108-114.
FAN Heng-hui, ZHAO Gao-wen, LI Hong-liang. Current researches and prospects of dispersive clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 108-114.
- [7] 樊恒辉, 吴普特, 李鹏, 等. 分散性黏土判别试验研究[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.
- [8] 李兴国, 许仲生. 分散性黏土试验鉴别和改良[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(1): 62-66.
- [9] 樊恒辉, 孔令伟, 李洪良, 等. 马家树水库大坝防渗土

- 料分散性判别和改性试验[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 193—198.
- FAN Heng-hui, KONG Ling-wei, LI Hong-liang, et al. Study of dispersive identification and treatment with lime of dam soil in Majiashu Reservoir[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 193—198.
- [10] 李振, 周俊. 防渗土样的分散性与渗透变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3316—3321.
- LI Zhen, ZHOU Jun. Experimental study on dispersibility and filtration erosion of soil core wall[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Suppl.1): 3316—3321.
- [11] 王硕, 刘占辉. 非饱和重塑黄土抗剪强度影响因素的试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2010, 23(3): 86—89.
- WANG Shuo, LIU Zhan-hui. Test study on influence factor of shear strength of unsaturated remolded loess[J]. **Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science)**, 2010, 23(3): 86—89.
-
- 上接第 350 页
- ZHOU Cui-ying, DENG Yi-mei, TAN Xiang-shao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rock and application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(1): 33—38.
- [4] FENG X, WU X. Experimental study of limestone micro-fracturing under a coupled stress, fluid flow and changing chemical environment[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44: 437—448.
- [5] 周翠英, 张乐民. 软岩与水相互作用的非线性动力学过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 4036—4041.
- ZHOU Cui-ying, ZHANG Le-ming. Analysis of the nonlinear dynamic process of the interaction between soft rock and water[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(11): 4036—4041.
- [6] GANESH D, TETSURO Y, MASAJI K, et al. Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks[J]. **Engineering Geology**, 2002, 65: 31—45.
- [7] GORKUM A G, MARTIN C D. The mechanical behaviour of weak mudstone (opalinus clay) at low stresses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44: 196—209.
- [8] 柴肇云, 康天合, 李义宝. 物化型软岩微结构单元特征及其胀缩性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1265—1269.
- CHAI Zhao-yun, KANG Tian-he, LI Yi-bao. Study on microstructure unit character and its swell-shrink property for physico-chemical soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1265—1269.
- [9] PEJON O J, ZUQUETTE L V. Effects of strain on the swelling pressure of mudrocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43: 817—825.
- [10] WONG R C K, WANG E Z. Three-dimensional anisotropic swelling model for clay shale—A fabric approach[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34: 187—198.
- [11] WAKIM J, HADJ H F, WINDT D L. Effect of aqueous solution chemistry on the swelling and shrinkage of the Tournemire shale[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46: 1378—1382.
- [12] 柴肇云, 康天合, 王东, 等. 电化学改变软岩膨胀性的试验装置: 中国, ZL200910073780.1[P]. 2012-07-25.
- [13] 谭罗荣. 片状颗粒定向排列研究中的若干问题[J]. 水文地质工程地质, 1985, (4): 41—44.
- TANG Luo-rong. A discussion in studies on platy shaped particle orientation[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1985, (4): 41—44.
- [14] 谭罗荣. 黏性土微观结构定向性的 X 射线衍射研究[J]. 科学通报, 1981, (4): 236—239.
- TAN Luo-rong. Study on X-ray diffraction of directionality microscopic structure of clayey soil[J]. **Chinese Science Bulletin**, 1981, (4): 236—239.
- [15] 贾景超. 膨胀土膨胀机制及细观膨胀模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [16] BARDEN L. The influence of structure on deformation and failure in clay[J]. **Geotechnique**, 1972, 22: 159—163.
- [17] AVSAR E, ULUSAY R, SONMEZ H. Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay[J]. **Engineering Geology**, 2009, 105: 24—31.