

网络出版时间:2015-04-13 12:59

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.016

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150413.1259.016.html>

膨胀土强度特性的试验研究

贾文聪^a, 李永红^b, 党进谦^a, 王 飞^a, 张伟利^a

(西北农林科技大学 a 水利与建筑工程学院, b 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 【目的】研究膨胀潜势、含水率对膨胀土抗剪强度的影响,为膨胀土强度理论研究及其工程应用提供参考。【方法】采用固结不排水试验方法,通过 TFB-1 型非饱和土应力应变控制式三轴仪,分别测定取自陕西汉中、安康的 2 种膨胀土样及 2 种土样 1:1(质量比)混合土(简称汉中土、安康土、混合土)3 种不同膨胀潜势的膨胀土在不同含水率下的抗剪强度指标,应用 Microsoft Excel 软件,绘制 3 种膨胀土的抗剪强度指标与含水率、自由膨胀率的关系曲线,探讨膨胀土抗剪强度与含水率、膨胀潜势的关系及变化趋势。【结果】3 种膨胀土的含水率与非饱和膨胀土的抗剪强度指标呈负相关关系,当含水率由 12% 增大到 24% 时,汉中土、混合土、安康土 3 种膨胀土的黏聚力分别降低 56.83, 53.74 和 61.61 kPa,三者的内摩擦角分别降低 7.87°, 9.12° 和 9.58°; 3 种膨胀土的膨胀潜势与非饱和膨胀土的抗剪强度指标呈正相关关系,汉中土、混合土、安康土的膨胀潜势依次减弱,当三者分别处于同一含水率(12%, 15%, 18%, 21% 和 24%)时,汉中土、混合土、安康土的抗剪强度指标依次减小。【结论】非饱和膨胀土的抗剪强度与含水率、膨胀潜势密切相关。

[关键词] 膨胀土; 膨胀潜势; 自由膨胀率; 抗剪强度

[中图分类号] TU411.7; TU443

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2015)05-0217-05

Strength characteristics of expansive soil

JIA Wen-cong^a, LI Yong-hong^b, DANG Jin-qian^a, WANG Fei^a, ZHANG Wei-li^a

(a College of Water Resources and Architectural Engineering, b Institute of Soil and Water Conservation,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The paper studied the influences of expansion potential and water content on shear strength of expansive soil to provide reference for strength theory and engineering application. 【Method】Shear strength indexes of three expansive soils with different expansion potentials obtained from Ankang, Hanzhong and their 1:1 mixed soils (Hereafter referred as Hanzhong soil, Ankang soil and Composite soil) under different water contents were determined using consolidated undrained method and TFB-1 stress-strain triaxial apparatus of unsaturated soil. Then, the relationship between shear strength and water content and expansion potential was discussed and the variation was analyzed. 【Result】Negative correlations existed between water contents and the shear strength indexes of the unsaturated expansive soils. When the water contents increased from 12% to 24%, the cohesive forces of Hanzhong soil, Composite soil and Ankang soil decreased by 56.83, 53.74 and 61.61 kPa and the angle of frictions decreased by 7.87°, 9.12° and 9.58°, respectively. Positive correlation existed between expansion potentials and shear strength indexes of the unsaturated expansive soils. The expansion potentials of Hanzhong soil, Composite soil and Ankang soil decreased successively. When the water contents were same (12%, 15%, 18%, 21% and 24%), the shear strength indexes of Hanzhong soil, Composite soil and Ankang soil also decreased succes-

[收稿日期] 2013-12-13

[作者简介] 贾文聪(1989-),男,山西临汾人,在读硕士,主要从事岩土工程理论与计算研究。E-mail:jiawencong@163.com

[通信作者] 党进谦(1964-),男,陕西澄城人,教授,博士生导师,主要从事土力学研究。E-mail:dangjinqian@163.com

sively. 【Conclusion】 The shear strength of unsaturated expansive soil closely related to water content and expansion potential.

Key words: expansive soil; expansion potential; free expansion rate; shear strength

膨胀土在我国分布十分广泛,约有 1/4 的人口生活在膨胀土地区,由于膨胀土具有特殊的性质,如反复胀缩性、裂隙性和超固结性等,因此其破坏形式具有多发性、反复性和长期潜在性,对各类浅表层轻型工程如公路、铁路、房建和水利水电工程建设及维护具有较大的危害作用^[1],我国每年因膨胀土造成的经济损失估计达 150 亿美元以上^[2]。土的抗剪强度指标是研究土体破坏最重要的基本力学参数^[3],然而非饱和膨胀土的强度特性较普通黏性土复杂得多^[4]。虽然前人已在膨胀土的强度特性方面做了很多研究,但主要成果集中在膨胀土的初始含水率、压实度对其抗剪强度的影响等方面^[5-11],而关于膨胀潜势强弱对其抗剪强度影响的研究较少。基于此,本研究通过 TFB-1 型非饱和土三轴仪,测定不同膨胀潜势的膨胀土在不同含水率条件下的应力应变关系,研究膨胀土的抗剪强度随膨胀潜势的变化规律,分析含水率对不同膨胀潜势膨胀土抗剪强度的影

响,以期为膨胀土强度理论发展和工程应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

安康、汉中均位于陕西南部,地处汉江流域,此区域的膨胀土是各种变质岩和岩浆岩的风化物在汉江流水的搬运堆积作用下形成的^[12]。本试验用土有 3 种:①安康土。取自安康市南部育才路附近一地基施工现场,为粒径小于 40 mm 的扰动膨胀土(取土深度 1 m);②汉中土。取自汉中市洋县,为用于工业加工的原始膨润土;③混合土。将以上 2 种土样按 1:1 干土质量比拌合均匀得到。按照《土工试验规程》(SL 237—1999)^[13],分别测定上述 3 种供试膨胀土土样的最大干密度、相对体积质量、界限含水率以及自由膨胀率等,得到 3 种供试土样的基本物理性质见表 1。

表 1 供试膨胀土土样的物理性质

Table 1 Physical indicators of the tested expansive soil samples

土样 Soil sample	最大干密度 ($\rho_{d \max}$)/(g·cm ⁻³) Maximum dry density	相对体积 质量(Gs) Relative volume quality	液限(w_L)/% Liquid limit	塑限(w_p)/% Plastic limit	自由膨胀率(δ_{ef})/% Free expansion rate	膨胀潜势 Expansion potential
汉中土 Hanzhong soil	1.50	2.73	110.70	24.03	110	强 Powerful
混合土 Composite soil	1.53	2.72	61.68	24.97	75	中 Medium
安康土 Ankang soil	1.61	2.70	45.27	26.17	50	弱 Feeble

1.2 试验方法

将汉中土、混合土、安康土 3 种土样按照《土工试验规程》(SL 237—1999)^[13]分别制备成同一压实度(95%)、不同初始含水率(12%,15%,18%,21%,24%)的三轴试样,通过 TFB-1 型非饱和土应力应变控制式三轴仪进行固结围压为 50,100,200 和 300 kPa 的固结不排水试验,测定每个土样的应力应变关系。然后通过应力应变关系曲线上的峰值或最大值(最大主应力差)以及固结围压,借助 Microsoft Excel 软件,在二维坐标下绘制土样处在同一初始含水率且对应 4 个围压下的 4 个应力圆及这 4 个应力圆的公切线,所得公切线的斜率即为土样在此含水率下内摩擦角(φ)的正切值,公切线与纵轴的交点即为土样在此含水率下的黏聚力(c)。

按照以上方法,可以得到汉中土、混合土、安康土 3 种膨胀土在不同含水率下的抗剪强度指标,即

黏聚力和内摩擦角。对这些数据进行统计分析,应用 Microsoft Excel 软件建立回归方程,计算相关系数,分析含水率与 3 种膨胀土抗剪强度指标(黏聚力、内摩擦角)的关系及变化趋势,揭示 3 种膨胀土抗剪强度对含水率变化的响应。

在工程勘察、设计中,膨胀土的判别和分类是最需要迫切解决的问题,这关系到工程的安全和工程结构的稳定。国内外提出的判别膨胀土的指标主要有土颗粒的矿物成分、黏粒含量以及水理性质指标,如自由膨胀率、液限、塑性指数、膨胀力、膨胀率等^[14]。目前,工程中大多按照《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ 112—87)的规定,用自由膨胀率这一指标判别膨胀土,并确定膨胀潜势^[15]。自由膨胀率(δ_{ef})是以人工制备的松散、干燥的试样,在纯水中膨胀稳定后的体积增量与原体积之比,用以判定无结构力的松散土粒在水中的膨胀特性,是反映膨胀

土膨胀势的重要指标^[16]。根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ 112-87)^[17]及表 1 中 3 种供试膨胀土土样自由膨胀率的大小,可知汉中膨润土、混合土和安康膨胀土分别为强膨胀潜势、中等膨胀潜势、弱膨胀潜势膨胀土。因此,可以借助上述 3 种供试膨胀土土样自由膨胀率的大小与抗剪强度指标 c 、 φ 的关系来研究膨胀潜势的强弱对膨胀土抗剪强度的影响。

表 2 不同含水率下供试 3 种土样的抗剪强度指标

Table 2 Shear strength indicators of the three tested soil samples under different water contents

含水率 (w)/% Water content	汉中土 Hanzhong soil		混合土 Composite soil		安康土 Ankang soil	
	黏聚力(c)/kPa Cohesion	内摩擦角(φ)/(°) Angle of friction	黏聚力(c)/kPa Cohesion	内摩擦角(φ)/(°) Angle of friction	黏聚力(c)/kPa Cohesion	内摩擦角(φ)/(°) Angle of friction
12	122.38	26.86	112.20	25.63	95.69	24.79
15	105.63	24.06	94.37	23.26	71.23	22.40
18	89.56	21.44	83.49	20.16	58.97	19.92
21	72.74	20.03	67.20	18.02	44.99	17.75
24	65.55	18.99	58.46	16.51	34.08	15.21

由表 2 可知,随含水率的增大,3 种土样的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 均逐渐减小;当含水率由 12% 增加到 24% 时,汉中土、混合土和安康土的黏聚力 c 分别减小 56.83、53.74 和 61.61 kPa,内摩擦角 φ 分别减小 7.87°、9.12° 和 9.58°。说明在试验含水率范围内,膨胀潜势对膨胀土抗剪强度影响不大。但在相同含水率下,汉中土的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 均最大,混合土次之,安康土最低,可见膨胀土的抗剪强度与其膨胀潜势有关,而且与膨胀潜势的强弱呈正相关。

2.2 含水率与膨胀土抗剪强度指标的相关关系

表 2 显示,3 种膨胀土的黏聚力均随含水率的增大呈逐渐减小趋势。当含水率较低时,土的饱和

2 结果与分析

2.1 含水率对膨胀土抗剪强度指标的影响

膨胀土作为一种特殊的非饱和黏性土,具有黏粒含量高及干缩湿胀的特点,因此含水率的变化会改变土颗粒之间的连接作用,影响膨胀土的抗剪强度。通过固结不排水试验得到 3 种供试土样在不同含水率下的抗剪强度指标如表 2 所示。

度小,能增强土体结构稳定性的基质吸力大,以固化黏聚力为主的黏聚力也大。随着含水率的增大,土中的水分含量增多,并且主要是弱结合水和自由水含量增多,因此土颗粒间的薄膜水变厚,土颗粒之间的胶结物质逐渐被自由水溶解破坏,削弱了颗粒间的连接作用,同时能增强土体结构稳定性的基质吸力也逐渐变小,因而黏聚力降低。

对黏聚力和含水率的变化关系(表 2)进行分析可得,黏聚力和含水率之间的关系可用指数函数进行拟合,其拟合关系式为:

$$c = Ae^{-Bw} \quad (1)$$

式中: c 为黏聚力; w 为含水率; A 、 B 为与土样初始条件有关的系数,其计算结果见表 3。

表 3 供试土样黏聚力与含水率拟合关系式中参数的确定

Table 3 Determination of parameters for the relationship between c and w of the testing soil samples

土样 Soil sample	A	B	相关系数(R^2) Correlation coefficient
汉中土 Hanzhong soil	234.9	5.40	0.992
混合土 Composite soil	216.9	5.47	0.994
安康土 Ankang soil	260.4	8.41	0.996

土的内摩擦角反映了土的摩擦特性,主要内容包含两个部分:相邻土颗粒之间由于表面粗糙不平而产生的表面滑动摩擦力;颗粒间的嵌入和连锁作用产生的咬合摩擦力。随着含水率的增大,弱结合水所形成的薄膜水层变厚,土颗粒孔隙之间的自由水含量增多,致使土颗粒之间发生相对滑动时的滑动摩擦力减弱。另外,高含水率土样的固结过程结束后,土体原有的结构遭到破坏,致使颗粒间的嵌入

和连锁产生的咬合摩擦力下降,因此内摩擦角随着含水率的增大而降低。

分析内摩擦角与含水率的变化关系(表 2),可将内摩擦角和含水率之间的关系用线性函数进行拟合,其拟合关系式为:

$$\varphi = F - Ew \quad (2)$$

式中: φ 为内摩擦角; w 为含水率; E 、 F 为与土样初始条件有关的系数,计算结果见表 4。

表 4 供试土样内摩擦角与含水率拟合关系式中参数的确定

Table 4 Determination of parameters for the relationship between φ and w of the testing soil samples

土样 Soil sample	E	F	相关系数(R^2) Correlation coefficient
汉中土 Hanzhong soil	65.90	34.93	0.959
混合土 Composite soil	78.26	34.80	0.986
安康土 Ankang soil	79.36	34.30	0.999

综合分析可知,含水率对 3 种膨胀土的抗剪强度指标 c, φ 影响较大,并且二者均随含水率 w 的增大而显著降低,因此膨胀土的抗剪强度 τ_f 也随着土体含水率的增大而降低。将式(1)、(2)代入传统库伦强度公式 $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ 可得:

$$\tau_f = Ae^{-Bw} + \sigma \tan (F - Ew). \quad (3)$$

根据抗剪强度指标 c, φ 拟合公式以及抗剪强度 τ_f 与 w 的关系式(即式(1)、(2)、(3))分析膨胀土强

度与含水率的关系,既有理论意义,又对膨胀土边坡工程的安全设计具有实际指导作用。

2.3 膨胀潜势的强弱对抗剪强度指标的影响

自由膨胀率是表征膨胀土膨胀潜势强弱的重要指标。分别绘制不同含水率下 3 种供试土样的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 与自由膨胀率 δ_{ef} 的关系曲线,结果如图 1,2 所示。

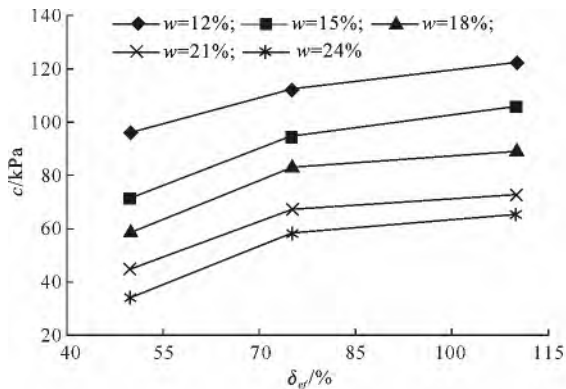


图 1 黏聚力 c 与自由膨胀率 δ_{ef} 的关系曲线

Fig. 1 Relationship between c and δ_{ef}

从图 1 可以看出,在同一含水率下,随着自由膨胀率的增大,膨胀土的黏聚力逐渐递增。3 种供试土样矿物组成的 X-衍射分析结果见表 5,由表 5 可知,土样的黏土矿物含量越高,自由膨胀率越大。由于黏土矿物(蒙脱石、伊利石)颗粒微小,约 $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}^{[18]}$,随着自由膨胀率的增大,这些微小的黏土矿物颗粒增多,它们将逐渐填充在粒径较大的非黏土矿物颗粒之间,并逐渐覆盖于非黏土矿物颗粒

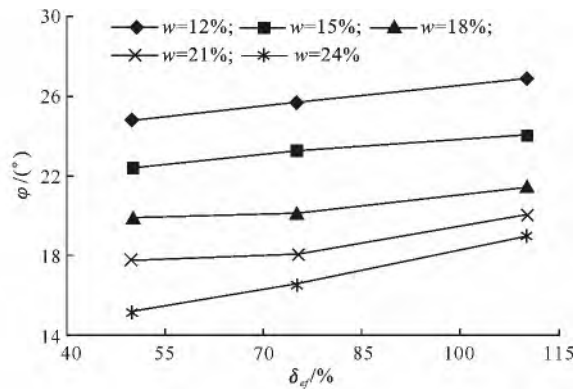


图 2 内摩擦角 φ 与自由膨胀率 δ_{ef} 的关系曲线

Fig. 2 Relationship between φ and δ_{ef}

的外部,这就导致颗粒间接触面积相应增大,土体的原始黏聚力得到提高。由于蒙脱石、伊利石类黏土矿物吸水能力强,因此对于不同自由膨胀率的膨胀土土样,即使含水率相同,水分子在土样内部的存在形式也多种多样,在自由膨胀率越大(即黏土矿物含量越高)的土样内部,较多的水分子以结合水形式受引力作用吸附在这些黏土矿物颗粒周围,增强了颗粒间的联接作用,加大了土体的固化黏聚力。

表 5 供试 3 种膨胀土土样矿物组成的 X-衍射分析

Table 5 Mineral composition of the three tested expansive soil samples with XRD

土样 Soil sample	自由膨胀率 Free expansion rate	黏土矿物总量 Clay mineral total amount	黏土矿物相对含量 Clay mineral relative amount				非黏土矿物总量 Non-clay mineral total amount
			伊利石 Illite	伊蒙混层 Mixed-layer	混层比 Ratio of mixed-layer	高岭石 Kaolinite	
安康土 Ankang soil	50	38.9	25	70	55	5	61.1
混合土 Composite soil	75	51.2	26	65	65	9	48.8
汉中土 Hanzhong soil	110	58.4	10	82	65	8	41.6

从图 2 可以看出,随着自由膨胀率的增大,内摩擦角逐渐增大。土样由黏土矿物和非黏土矿物组成:非黏土矿物颗粒镶嵌、咬合在一起;黏土矿物颗粒填充在粒径较大的非黏土矿物颗粒孔隙之间,或

者覆盖在非黏土矿物颗粒周围。黏土矿物颗粒具有一定的润滑效果,会削弱粒径较大的非黏土矿物颗粒之间的镶嵌、咬合作用。自由膨胀率小的土样,黏土矿物含量低,颗粒间接触面积小,黏土矿物起到降

低咬合摩擦力的作用,因而内摩擦角较小。自由膨胀率大的土样,黏土矿物含量高,黏土矿物颗粒不仅有一部分填充在粒径较大的非黏土矿物颗粒孔隙之间,还有一部分覆盖在非黏土矿物颗粒周围,这就造成在剪切过程中,黏土矿物的作用比非黏土矿物明显,抵抗剪切破坏的能力强,内摩擦角大。另外,由于随着自由膨胀率的增大,颗粒间接触面积增大,当含水率相同时,在自由膨胀率较大的土样内部,水分子大多以结合水形式存在,具有润滑作用的自由水所占比例低,因此其内摩擦角大。

由以上分析可知,土体的自由膨胀率越大,其抗剪强度越高,即膨胀土的膨胀潜势越强,抗剪强度越高,但是这对膨胀土边坡工程、地基工程并不是一件有利的事情。因为自由膨胀率越大,膨胀土的胀缩性越好,受环境气候变化越明显,容易导致地基强度下降、不均匀变形,甚至引发建筑物的破坏以及边坡滑塌。因此,防水、保湿、防风化措施在膨胀土工程管理中显得尤为重要。

3 结 论

通过室内三轴试验,研究了含水率的大小、膨胀潜势的强弱对膨胀土抗剪强度的影响,得到以下结论:

1)非饱和膨胀土的抗剪强度随含水率的增大而明显降低。

2)非饱和膨胀土的抗剪强度指标均强烈地受到含水率的影响,黏聚力和內摩擦角均随含水率的增大而减小,并且黏聚力 c 和含水率 w 呈指数相关,內摩擦角 φ 与含水率 w 为线性相关。

3)非饱和膨胀土的抗剪强度与其膨胀潜势的强弱有关,膨胀潜势越强,抗剪强度越大。

[参考文献]

- [1] 林青芝. 简述膨胀土的危害及处理方法 [J]. 科技创新导报, 2010(10):44.
Lin Q Z. Briefly describing the harm of expansive soil and the processing methods [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2010(10):44. (in Chinese)
- [2] Fredlund D G, Chen Z Y. China-Canada cooperative research program on expansive soils [R]. Ottawa: International Development Research Centre (IDRC), 1988.
- [3] 杨庆, 贺洁, 栾茂田. 非饱和红黏土和膨胀土抗剪强度的比较研究 [J]. 岩土力学, 2003, 24(1):13-16.
Yang Q, He J, Luan M T. Comparative study on shear strength of unsaturated red clay and expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1):13-16. (in Chinese)

- [4] 施水彬. 合肥非饱和膨胀土干湿循环强度特性试验研究 [D]. 南京:东南大学, 2007.
Shi S B. Testing study on drying and watering cycle strength of unsaturated expansive soil from Hefei [D]. Nanjing: Southeast University, 2007. (in Chinese)
- [5] 卢肇钧, 吴肖茗, 孙玉珍, 等. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5):20-27.
Lu Z J, Wu X M, Sun Y J, et al. The role of expansive force in unsaturated soil strength theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(5):20-27. (in Chinese)
- [6] 刘军, 龚文慧. 膨胀土强度特性的试验研究 [J]. 土工基础, 2007, 21(3):77-79.
Liu J, Gong W H. Testing study on the strength of expansive soil [J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(3):77-79. (in Chinese)
- [7] 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3):420-425.
Yang Q, Zhang H Z, Luan M T. Testing study on shear strength of unsaturated expansive soils [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3):420-425. (in Chinese)
- [8] 刘锋. 重塑膨胀土的抗剪强度试验研究 [J]. 株洲工学院学报, 2006, 20(4):94-96.
Liu F. Testing study on shear strength of reshape expansive soil [J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2006, 20(4):94-96. (in Chinese)
- [9] 张锐. 宁明非饱和膨胀土强度特性试验研究 [D]. 长沙:长沙理工大学, 2005.
Zhang R. Testing study on the strength of unsaturated expansive soil from Ningming [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [10] 韩华强, 陈生水. 膨胀土的强度和变形特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3):422-424.
Han H Q, Chen S S. Testing study on the strength and deformation characteristics of expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3):422-424. (in Chinese)
- [11] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25(10):1555-1559.
Tan L R, Kong L W. Testing study on the expansive characteristics changing rule of expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10):1555-1559. (in Chinese)
- [12] 王强. 安康地区膨胀土物理力学性质及化学改性试验研究 [D]. 西安:长安大学, 2011.
Wang Q. The testing study on physical properties and chemical modification of expansive soil in Ankang region [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国水利部. SL 237-1999 土工试验规程 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 237-1999 Specification of soil test [S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese)

(下转第 228 页)

- seepage and stress in rock failure process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 489-493. (in Chinese)
- [6] 杨天鸿,屠晓利,於斌,等. 岩石破裂与渗流耦合过程细观力学模型 [J]. 固体力学学报, 2005, 26(3): 333-337.
Yang T H, Tu X L, Yu B, et al. A micromechanical model for simulating the coupling of fracture and flow of rock [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 26(3): 333-337. (in Chinese)
- [7] 张有天,张武功. 裂隙岩石渗透特性渗流数学模型及系数测量 [J]. 岩石力学, 1982(8): 41-52.
Zhang Y T, Zhang W G. Seepage mathematical model and coefficient measurement of fractured rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics, 1982(8): 41-52. (in Chinese)
- [8] Oda M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses [J]. Water Resources Research, 1986, 22(13): 1845-1856.
- [9] Snow D T. Anisotropic permeability of fractured media [J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273-1289.
- [10] Long J C S, Remer J S, Wilson C R, et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures [J]. Water Resources Research, 1982, 18(3): 645-658.
- [11] 李亚军,姚军,黄朝琴,等. 裂缝性油藏等效渗透率张量计算及表征单元体积研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(1): 1-7.
Li Y J, Yao J, Huang Z Q, et al. Calculation of equivalent permeability tensor and study on representative element volume for modeling fractured reservoirs [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(1): 1-7. (in Chinese)
- [12] 刘建军,刘先贵,胡雅初,等. 裂缝性砂岩油藏渗流的等效连续介质模型 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(S1): 158-160.
Liu J J, Liu X G, Hu Y R, et al. The equivalent continuum media model of fracture sandstone reservoir [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(S1): 158-160. (in Chinese)
- [13] 荣冠,周创兵,王恩志. 裂隙岩体渗透系数张量计算及其表征单元体积初步研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 740-746.
Rong G, Zhou C B, Wang E Z. Preliminary study of permeability tensor calculation of fractured rock mass and its representative elementary volume [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 740-746. (in Chinese)
- [14] 姚军,李亚军,黄朝琴,等. 裂缝性油藏等效渗透率张量的边界元求解方法 [J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(6): 80-83.
Yao J, Li Y J, Huang Z Q, et al. Calculation of equivalent permeability tensors of fractured reservoirs using boundary element method [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(6): 80-83. (in Chinese)
- [15] Bear J. Dynamics of fluids in porous media [M]. New York: Elsevier, 1972.
- [16] 田开铭,万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价 [M]. 北京: 学苑出版社, 1989.
Tian K M, Wan L. Research and evaluation of the permeability of anisotropic fractured media [M]. Beijing: Academy Press, 1989. (in Chinese)

(上接第 221 页)

- [14] 朱训国,杨庆. 膨胀岩的判别与分类标准 [J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 174-177.
Zhu X G, Yang Q. The standards on discrimination and classification of expansive rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 174-177. (in Chinese)
- [15] 崔宗婧. 工程膨胀土的判别与分类问题研究 [J]. 科技信息, 2011(27): 710, 732.
Cui Z J. Testing study on discrimination and classification of expansive soil in engineering [J]. Science & Technology Information, 2011(27): 710, 732. (in Chinese)
- [16] 杨洋. 膨胀土判别和膨胀潜势分类研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.
Yang Y. Expansive soil discrimination and classification research of expansion potential [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [17] 国家计划委员会. GBJ 112-87 膨胀土地区建筑技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1989.
State Planning Commission. GBJ 112-87 Construction technical specification of expansive soil region [S]. Beijing: China Planning Press, 1989. (in Chinese)
- [18] 徐则民,黄润秋,唐正光,等. 黏土矿物与斜坡失稳 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 729-740.
Xu Z M, Huang R Q, Tang Z G, et al. Clay mineral and failure of slopes [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 729-740. (in Chinese)