

DOI: 10.11779/CJGE2015S1003

膨胀土的强度及其测试方法

程展林, 龚壁卫, 胡波

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 膨胀土的强度参数是膨胀土边坡稳定分析的基础。膨胀土的特殊性以及膨胀土边坡失稳机理的复杂性使得膨胀土强度指标的获取和取值十分困难。以往对于膨胀土的强度曾开展过大量的研究工作, 但无论是研究体系, 还是试验方法以及强度取值原则都存在一定的差异。人们关注到膨胀土裂隙的存在, 却又难以实测到裂隙面上真实的强度指标; 关注到膨胀土的非饱和特性, 并试图用含水率变化引起的强度衰减来解释边坡的失稳机理; 然而, 无论采用何种理论, 都难以将膨胀土的强度与边坡的失稳机理有机的联系在一起, 造成在实际工程中数值分析与边坡实际稳定状态不符的现象。仅从强度理论上讲, 膨胀土仍然是一种黏性土, 仍然应符合莫尔-库仑强度准则。所不同的是, 由于裂隙的存在, 使得膨胀土的强度时而显示出均匀介质的特性, 时而显示出非均匀介质的特性。因此, 研究膨胀土的强度特性, 不可避免的要研究裂隙以及裂隙对强度的影响问题。在大量现场工作和室内试验研究的基础上, 重点探讨了裂隙对膨胀土强度的影响, 提出对于膨胀土的强度应以土块强度和裂隙面强度两套指标进行描述, 而土块强度又应区分为有胀缩裂隙和无胀缩裂隙两类, 并进一步提出了不同强度的测试方法。

关键词: 膨胀土; 抗剪强度; 裂隙面强度; 干湿循环强度; 南水北调中线工程

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0011-05

作者简介: 程展林(1963-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事土力学及岩土工程研究工作。E-mail: chengzl@mail.crsri.cn。

Shear strength of expansive soil and its test method

CHENG Zhan-lin, GONG Bi-wei, HU Bo

(Changjiang River Scientific Research Institute, Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: Shear strength parameters are necessary for slope stability analysis of expansive soil. It is difficult to obtain the shear strength parameters of expansive soil because of particularity of expansive soil and complexity of failure mechanism of expansive soil slopes. The researches on the shear strength of expansive soil are available, including research system, test methods and valuing principle of shear strength parameters. Focusing on the existence of fissures, it is difficult to measure the shear strength of fissure-plane. At the same time, researchers attempt to reveal the failure mechanism of expansive soil slopes through reduction of shear strength resulted from decrease of water content based on unsaturated soil mechanism. However, the previous records have failed to provide reasonable relationship between slope failure mechanism and shear strength of expansive soil, which leads to failure of numerical analysis in modelling the stability of slope stability in the engineering practice. In the view of shear strength theory, expansive soil is clay and follows the Mohr-Coulomb criterion. Owing to the existence of fissures, expansive soil has the characteristics of both homogeneous and heterogeneous media. So the effect of fissures on the shear strength of expansive soil should be studied in the researches on shear strength behaviour. Based on the in-situ and laboratory tests, it is suggested that the shear strength of expansive soil should be described by the strength of soil block without fissure plane and strength of fissure-plane, and the strength of soil block should be divided into strength with shrinkage crack and without shrinkage crack. Finally, the test method for the shear strength of expansive soil is proposed.

Key words: expansive soil; shear strength; shear strength of fissure-plane; shear strength of wetting and drying cycle; Middle Route Project of South-to-North Water Division

0 引言

膨胀土的强度参数是膨胀土边坡稳定分析的基础, 膨胀土的特殊性以及膨胀土边坡失稳机理的复杂

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAB04A10); 国家“十二五”科技支撑计划项目(编号 2011BAB10B05); 国家自然科学基金项目(51279015)

收稿日期: 2015-03-26

性使膨胀土强度指标的获取和取值十分困难,具体体现在:①膨胀土强度试验的规范化方法与试样的特殊性质,使得难以一套指标对土体的强度特性加以描述;②膨胀土裂隙的存在,导致按照常规试验方法得到的强度指标离散性极大;③膨胀土边坡的失稳往往不是简单的强度问题,因而稳定分析成果难以反映的边坡的实际稳定状态,导致人们对膨胀土的强度取值更加迷茫。由于土的强度对边坡稳定分析尤为重要,对膨胀土,岩土工程师曾进行了大量的研究工作。从现有的资料不难看出,无论是研究体系,还是试验方法以及强度取值原则都存在一定的差异。

膨胀土是一类物理和力学性质都极为特殊的黏性土,而在膨胀土的强度测试时,却仍然按照一般黏性土的试验方法。从20世纪80年代开始,关注到膨胀土在水分变化时强度的剧烈波动,人们开始将非饱和土理论引入膨胀土研究,并将膨胀土视为一种典型的非饱和土。诚然,膨胀土对湿度的敏感使其表现出明显的非饱和土特征,然而,在同等条件下一般黏性土为什么并没有如此强烈的力学响应?看来,仅仅单纯从水份变化这一点,似乎并不足以解释。从强度理论角度来讲,膨胀土仍然是一种黏性土,仍然应符合莫尔-库仑强度准则。所不同的是,由于裂隙的存在,使得膨胀土的强度时而显示出均匀介质的特性,时而显示出非均匀介质的特性。因此,研究膨胀土的强度特性,不可避免的要研究裂隙以及裂隙对强度的影响问题。

本文将从膨胀土的特殊性出发,以膨胀土的裂隙为主线,探讨膨胀土的强度及其试验方法,试图从一种全新的角度去诠释膨胀土的强度问题。

1 膨胀土强度的特殊性

大多数膨胀土的成因是冲积、洪积或湖积,在土体的生成过程中受到各种地质作用的影响,使膨胀土地层具有明显的结构性,部分地区土层中还有大量“原生裂隙”存在,影响着土体的整体稳定,同时,也使膨胀土的强度测试更为复杂。太沙基(Terzaghi, K)很早就注意到裂隙对土体强度的重要影响,认为裂隙的分布范围、间距、倾斜度、排列方向、形状以及裂隙面的粗糙程度、起伏程度、裂隙间完整土块的性质等因素都对土的强度产生影响。裂隙的存在,不仅影响土的强度大小,更为重要的是,因裂隙面强度与土块强度不同,使裂隙土体的抗剪强度表现为各向异性,难以采用单一强度指标进行描述。虽然,很早就有人从膨胀土强度试验的尺寸效应出发,提出膨胀土的强度应有土块强度、裂隙面强度和土体强度之分,但基

于建立“土体的综合强度”的目的,其定义也不尽合理。所谓的土块强度是指实验室内小试件所测的强度,土体强度是指现场大剪试验的强度,而对于裂隙面强度如何获得并没有进一步论述。往往将裂隙面强度、含裂隙的土体强度和干湿循环后的土体强度混为一谈,其参数的力学意义和工程意义难以明确,如果再结合饱和和非饱和土理论,现场直剪、室内直剪、室内三轴剪切等不同的试验方法,以及不固结不排水、固结不排水、固结排水等不同的试验条件,膨胀土的强度研究则变得千头万绪。

自然界中,膨胀土不仅存在裂隙,而且存在两类不同成因、形态的裂隙,其对膨胀土强度的影响也不同。文献[1]对裂隙性黏土裂隙的形态也进行了精辟的诠释:“在自然界中,出露在地表的黏土,因受气候条件的强烈影响,在干、湿反复变化过程中,其表层一般都发育大量短小而随机的裂隙,它们分布的深度范围多不超过1.5 m,……,在本著作中所讨论的‘裂隙性黏土’,主要指分布在深度1.5 m以下,常作为建筑物地基持力层或边坡主要组成物的、裂隙发育的黏土”。可见,膨胀土作为典型的裂隙性黏土,按其裂隙的成因可划分为两类:第一类为分布在大气影响深度以上区域,因胀缩变形引起的裂隙,本文将其定义为胀缩裂隙。这类裂隙往往无规则分布,裂隙数量多、裂隙面粗糙、长度短小;第二类裂隙为分布在大气影响深度以下区域,自然形成的裂隙,本文将其定义为非胀缩裂隙。这类裂隙多呈闭合状,部分有灰白、灰绿色黏土充填,裂隙面光滑且具有一定优势倾向。

具有胀缩裂隙的膨胀土体,因其裂隙分布随机,裂隙短小、数量众多,其强度试验方法与一般黏性土并无差异,只是在强度测试中应考虑裂隙数量对强度的影响。对于非胀缩裂隙膨胀土,其裂隙往往长度长达数米乃至百米,如何表达其强度是一个值得深入研究的问题。以往人们总希望找到“土体的综合强度”指标,认为室内试验试样的体积相对较小,希望试样尺寸更大的试验能够包含更多裂隙,其成果将具合理性。于是,极力推荐现场大剪试验,但试验强度离散性往往极大,这并不是试验误差。不难想象,当剪切面与裂隙面一致时,试验强度反映的是裂隙面强度;当剪切面部分或没有通过裂隙面时,试验强度反映的则是土块强度;因此,试验强度往往是介于裂隙面强度与土块强度之间的一个量。室内的三轴试验成果也是这样,试验成果也因试样中裂隙大小、方向不同而不同。由此可见,对于非膨胀裂隙膨胀土不是试样尺寸问题,而应该改变其强度表达方式。为此,重新定义土块强度和裂隙面强度。土块强度是指土中不含裂隙面时的土体强度;裂隙面强度是指膨胀土中“非膨

胀裂隙面”或地层结构面的强度。值得强调的是,对于胀缩裂隙不谈裂隙面强度;当土体不存在裂隙时,土块强度也就是土体强度,也无所谓土块强度。只对于非膨胀裂隙膨胀土的原状土才谈土块强度和裂隙面强度。

2 膨胀土的强度试验方法

基于膨胀土的裂隙性以及裂隙形态的差异,笼统的讲,膨胀土应包含有 4 种强度(饱和和非饱和):填筑膨胀土土体强度、胀缩裂隙膨胀土土体强度、非膨胀裂隙膨胀土土块强度和裂隙面强度。从试验方法而言,填筑膨胀土土体强度和非膨胀裂隙膨胀土的土块强度与一般黏性土的强度试验方法相同,仅在试样的饱和过程中应注意试样吸水膨胀对试样密度的影响,试验控制条件应根据实际工况选定,试验方法可参照相应的规程规范。

下面将重点针对胀缩裂隙膨胀土的土体强度和非膨胀裂隙膨胀土的裂隙面强度的室内测试方法分别进行论述。

2.1 胀缩裂隙膨胀土土体强度试验

胀缩裂隙将土体切割成尺寸较小的块体,宏观上土体的力学性质在不同方向上基本相同,因此,可采取常规的三轴试验方法测定土的抗剪强度,同时要求试样中应分布一定数量的裂隙,也意味着对于不同的膨胀土,试样尺寸要与裂隙的分布密度相适应。试样制备可直接取含有胀缩裂隙的原状样,也可用膨胀土土块经干湿循环制备,后者往往用于研究裂隙数量或不同干湿循环次数对膨胀土强度的影响。

三轴试验的具体试验方法可参照相应规程规范,室内干湿循环方法,可参考(ASTM) D4843-88 推荐的方法,限于篇幅此处不再赘述。

2.2 非膨胀裂隙膨胀土裂隙面强度试验

对于具有非胀缩裂隙的膨胀土,必须采用土块强度和裂隙面强度两组强度指标来表征。土块强度的测试可以采用常规的室内试验方法进行。对于裂隙面强度则建议尽可能采用本文提出的三轴试验方法,在条件不允许或对试验成果要求不高的情况下,也可以考虑采用直剪试验。下面重点论述裂隙面强度的三轴试验方法。

对于非胀缩裂隙膨胀土,如何准确找到裂隙并测定裂隙面强度是一个较为困难的问题。由于裂隙通常闭合且宽度细小,有些甚至无充填黏性土,因此,通过肉眼很难判别裂隙面在试样中的走向。采用常规三轴或直剪试验,其最大的问题是如何保证试验过程中的剪切面与试样的裂隙面一致。为此,有人提出采用现场大型直剪试验,而现场试验同样也存在类似的问

题,并且,由于试样受剪面积更大,裂隙面高低起伏,要使得受剪面与裂隙面重合将更为困难。近年来,随着 CT (computerized tomography) 技术在岩土测试领域的发展,使岩土力学指标测试的可视化成为可能。也使膨胀土强度精确试验成为可能^[2-4]。

CT 技术利用 X 射线穿透物体断面进行三维扫描,通过收集和分析 X 射线穿透物体衰减后的信息,得出物体空间分布的 CT 数,形成一幅物体层面数字图像(见图 1)。物质的密度越大,CT 数越大,CT 图像即代表了被测物体某层面的密度图。根据这一原理,只要具备与 CT 机配套的岩土试验设备,可以无损、动态、定量和实时地量测岩土材料在受力过程中内部结构的变化过程。对于膨胀土,借助 CT 技术,可以将膨胀土的裂隙进行描述和量化,并用于膨胀土裂隙面的强度测试。具体试验方法参见文献[5]。

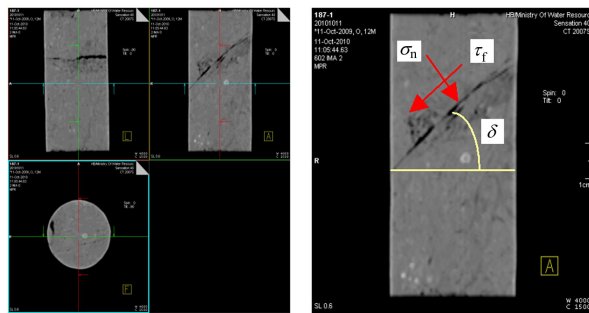


图 1 三轴试样 CT 三视图及裂隙面上应力模式

Fig. 1 CT image and stress mode on fracture plane

裂隙面强度试验从试验到成果整理有别于常规三轴试验。在试样制备过程中,强调试样中应具有一连续、较为平直的裂隙面,并尽可能使该裂隙面处于试样的中部,裂隙面与水平面具有合适的倾角以保证试验沿裂隙面剪切破坏。由于裂隙面强度远低于两侧土块强度,要达到试验沿裂隙面剪切破坏的目的是比较容易的,裂隙面倾角大小也不必十分严格,一般情况下,保持在 $45^\circ \pm 10^\circ$ 即可;剪切试验过程及控制方法与三轴试验基本一致;试验成果的整理只能采用文献[5]介绍的方式。这是因为:莫尔圆公切线的整理方法是由均匀介质“一点的应力状态”演化而来的,应力莫尔圆与公切线的切点表征的应力为剪切应力水平为最大的斜面上的应力,这种整理方法默认了试样为各向同性的均匀介质,破坏面倾角为 $45^\circ + \varphi/2$ 。这种方法显然对于具有软弱面土体试验是不适用的,因为试样的破坏面随裂隙软弱面空间分布位置的不同而变化,不再一定是倾角为 $45^\circ + \varphi/2$ 的破坏面。

3 膨胀土的强度试验成果及分析

3.1 胀缩裂隙膨胀土土体强度

前已述及, 胀缩裂隙膨胀土的土体强度试验可选用原状带胀缩裂隙的土样, 或选用原状土 (或制备样) 经一定次数的干湿循环后进行, 试验方法一般用三轴剪切试验。本文为研究土体强度随干湿循环的变化规律, 选取南水北调中线南阳段膨胀土原状样, 在室内进行干湿循环效应的模拟, 并采用三轴饱和固结慢剪进行试验。

选取干密度相近的 24 块原状土样, 每 4 块试样为一组, 共进行 6 组试验。试样尺寸为: 直径 61.8 mm, 高 125 mm。试样的自由膨胀率 69%, 天然含水率为 24.4%~26.9%, 土颗粒比重为 2.73~2.74, 干密度为 1.51~1.60 g/cm³。试样颗粒组成中粉粒含量 54%~64%, 黏粒含量 33%~46%, 胶粒含量 19%~30.1%。干湿循环按上节方法进行, 试验设备为三轴剪切仪。

图 2 为土体强度与干湿循环次数的关系。随着干湿循环次数的增加, 各级试验围压下土体的抗剪强度均呈降低趋势。其中, 第一次干湿循环后抗剪强度降低最为显著, 在第二、三次干湿循环过程中, 抗剪强度持续降低, 但是降低的幅度有所减缓, 在第三次干湿循环后, 抗剪强度基本趋于稳定。此外, 围压越大, 强度降低越显著, 强度稳定的循环次数越大。图 3 为不同循环次数下强度指标的变化规律。可以看出, 强度指标 c 值随干湿循环次数的增加而不断衰减, 初次衰减幅度较大并最终逐渐趋于稳定。经 5 次干湿循环后, c 值从 82.3 kPa 衰减至 23.3 kPa, 衰减幅度为

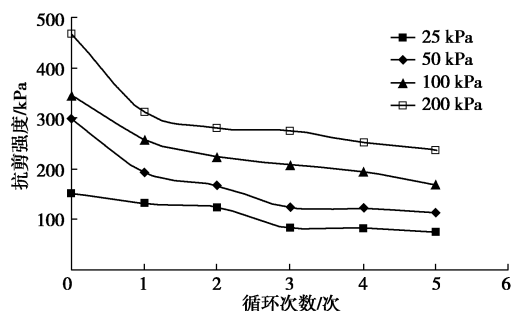


图 2 抗剪强度与干湿循环次数的关系

Fig. 2 Variation of strength with number of drying and wetting cycles

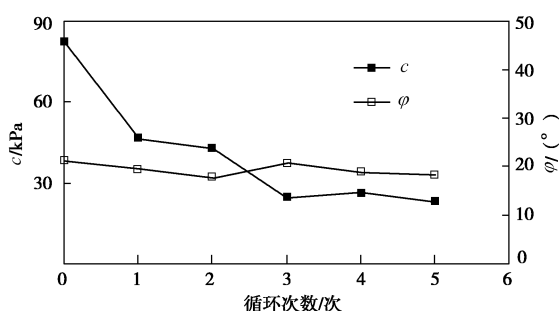


图 3 强度指标与干湿循环次数的关系

Fig. 3 Variation of strength with number of drying and wetting cycles

71.7%; 而 φ 值随干湿循环次数的增加基本不变。因为内摩擦角 φ 是反映土颗粒间摩擦特性的参数, 在膨胀土没有明显剪胀与颗粒破碎的条件下, 内摩擦角不会出现大幅度衰减。

3.2 非膨胀裂隙膨胀土土体强度

非膨胀裂隙膨胀土的土体强度应分别以土块强度和裂隙面强度加以描述。

(1) 土块强度

土块强度指不含裂隙的原状土块的抗剪强度, 可采用常规三轴或直剪试验进行强度测试, 试验条件根据实际工程选定, 此处不再赘述。

(2) 裂隙面强度

采用直径 39.1 mm, 高 80 mm 的试样进行 CT 三轴剪切。试样自由膨胀率 61%, 天然含水率 23%, 干密度 1.62 g/cm³, 剪切速率 0.015 mm/min。

将不同围压条件下裂隙面正应力 σ_n 和剪应力 τ_f 点绘如图 4 所示, 整理得到裂隙面强度指标。值得注意的是, 试样成果显示, 裂隙面强度具有明显的非线性特性, 在较低围压下, 裂隙面的内聚力更低。

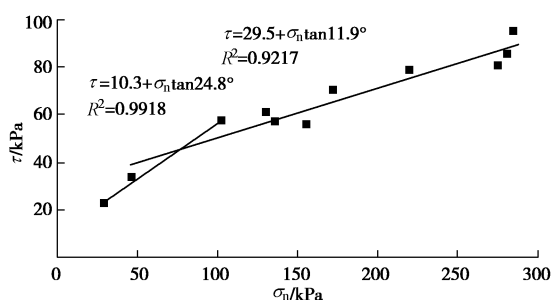


图 4 裂隙面强度试验成果

Fig. 4 Results of typical triaxial tests on strength of fracture plane

(3) 裂隙面强度特性分析

1970 年引丹灌渠陶岔渠首开挖过程中曾出现 13 处滑坡, 滑动面倾角一般为 $6^\circ \sim 10^\circ$, 且多沿裂隙面发生。为此, 长江科学院曾进行了以下两项试验^[6]: 其一, 通过选取陶岔渠首滑坡滑动面上土样进行重塑样的直剪试验, 得到滑动面的抗剪强度 (峰值) 为 $c=2$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=10^\circ$; 其二, 对蒙脱土、高岭土和伊利土以不同比例配合的混合料进行了抗剪强度试验。结果表明, 蒙脱石含量达 5% 以上时, 内摩擦角便开始降低。在蒙脱土与高岭土的混合样中, 当蒙脱土含量超过 30% 时, 其混合样的内摩擦角主要由蒙脱土决定, 高岭土的影响极微; 在蒙脱土与伊利土的混合样中, 蒙脱土含量超过 20% 后, 混合样的内摩擦角由蒙脱土起主要作用。此外, 资料显示, 襄樊三干渠、云南鸡街等地的膨胀土以及成都黏土中裂隙面的含水率明显高于两侧土体^[1, 7]。本次试验前, 曾在取原状样的同时, 进行了裂隙面充填黏土及两侧土样的含水率、

密度测试。结果表明^[8], 裂隙面灰白色黏土的含水率比两侧土体的含水率高 9%, 而干密度低 0.14 g/cm^3 。对裂隙黏土与两侧土体的矿物成分分析表明, 裂隙黏土中伊蒙混层矿物含量为 27%, 而两侧土的含量为 23%, 可见, 裂隙黏土与两侧土体的矿物成分、含量不同是造成其天然状态不同和抗剪强度偏低的主要原因。

4 结 论

本文以膨胀土的裂隙为主线, 构建了膨胀土强度试验和指标选取的新体系。提出对于大气影响区内的胀缩裂隙膨胀土以及压实膨胀土, 可视为均匀介质, 可采用现场取样或室内干湿循环的方法形成胀缩裂隙土样, 强度试验方法与一般黏性土无异; 对于深部的非膨胀裂隙膨胀土应分别测定其土块强度和裂隙面强度, 采用两套强度指标加以描述。简而言之, 如果将裂隙的分布范围、分布密度、倾斜度、排列方向、形状和裂隙面的粗糙程度、起伏程度等因素都纳入土的强度问题之中, 则土的强度问题将无法解决; 如果将裂隙的分布范围、分布密度、倾斜度、排列方向等描述裂隙空间分布的因素归入边坡稳定分析考虑的范畴, 将土的强度分为土块强度和裂隙面强度, 并分别采用合适的试验方法进行测定, 该问题就变得非常简单了, 而影响裂隙面强度的裂隙形状、粗糙程度、起伏程度等其它因素, 就成为了裂隙面强度试验的试样是否具有代表性的问题。以下结论可供膨胀土强度试验及取值参考:

(1) 膨胀土的强度特性应根据实际地层条件和土体结构区别对待。对于胀缩裂隙膨胀土、压实膨胀土可采用一般黏性土的试验方法确定其土体强度; 对于非膨胀裂隙膨胀土, 应分别试验测定土块强度和裂隙面强度。

(2) 裂隙面强度试验宜采用本文推荐的三轴试验方法。试验中只要保证裂隙面倾角在 45° 左右, 试验得到的强度便是裂隙面强度。该试验方法简单, 成功率较高, 得到的强度力学意义明确, 可改变直剪试验可能造成的试验误差。

(3) 膨胀土干湿循环主要破坏土的结构性, 多次干湿循环对原状膨胀土 c 值影响较大, 而对 φ 值影响较小。

(4) 膨胀土的强度在低应力状态下具有明显的非线性特征, 对于膨胀土边坡的浅层滑动, 应采用低围

压条件下的内聚力和内摩擦角拟合值。

参考文献:

- [1] 孔德坊. 裂隙性黏土[M]. 北京: 地质出版社, 1994. (KONG de-fang. Fissured clay[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese))
- [2] JIANG H. 计算机断层成像技术: 原理、设计、伪像和进展 (美) [M]. 张朝宗, 等译. 北京: 科学出版社, 2006. (JIANG H. Computed tomography principle design, artifacts and recent advances[M]. ZHANG Chao-zong, et al trans. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [3] 葛修润. 岩土损伤力学宏观细观实验研究[M]. 科学出版社, 2004. (GE Xiu-run. Macroscopic and mesocosmic study on damage mechanics of rock and soils[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的 CT 试验研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(4): 412 - 417. (LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(4): 412 - 417. (in Chinese))
- [5] 程展林, 李青云, 郭熙灵, 等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(10): 102 - 111. (CHENG Zhan-lin, LI Qing-yun, GUO Xi-ling, et al. Study on the stability of expansive soil slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, **28**(10): 102 - 111. (in Chinese))
- [6] 冯光愈, 王湘凡. 南水北调中线工程总干渠膨胀土边坡稳定问题[J]. 人民长江, 1993, **24**(3): 9 - 14. (FENG Guang-yu, WANG Xiang-fan. Slope stability of the middle route project of South to North water transfer channels[J]. Yangtze River, 1993, **24**(3): 9 - 14. (in Chinese))
- [7] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Special soil properties of geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [8] 龚壁卫, 程展林, 胡 波, 等. 膨胀土裂隙的工程特性研究 [J]. 岩土力学, 2014, **35**(7): 1825 - 1830. (GONG Bi-wei, CHENG Zhan-lin, HU Bo, et al. Research on engineering properties of fissures in expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(7): 1825 - 1830. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)