

反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析

殷宗泽^{1,2}, 徐彬^{1,2}

(1. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 膨胀土是多裂隙土, 其边坡的稳定性在很大程度上受裂隙影响。裂隙开展后抗剪强度显著降低, 裂隙开展深度将本来均一的土层划分为强度差异显著的不同土层, 雨水进入裂隙中形成渗流增加了滑动力矩, 裂隙还随时间而发展。这些都显著影响膨胀土边坡的稳定性。本文提出了一种以条分法为基础的近似反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析方法。将膨胀土坡划分成 3 个亚层, 即裂隙充分发展层、裂隙发育不充分层和无裂隙层, 分别取用不同的强度指标; 给出了裂隙深度、各亚层界面、各层强度指标以及裂隙渗流浸润线的近似确定方法。所提出的方法反映了膨胀土边坡失稳机理, 可体现其平缓性、浅层性、牵引性、长期性、季节性、方向性等特点。算例分析表明了它的合理性和实用性。

关键词: 膨胀土; 边坡; 稳定性; 裂隙

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)03-0454-06

作者简介: 殷宗泽(1937-), 男, 江苏海安人, 教授, 博士生导师, 主要从事土石坝应力变形、土本构关系以及膨胀土问题等方面的研究。E-mail: yinzongze@126.com。

Slope stability of expansive soil under fissure influence

YIN Zong-ze^{1,2}, XU Bin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Expansive soil is a kind of fissured soil. The slope stability of the expansive soil is strongly influenced by fissures. The fissures cause remarkable decrease of the soil strength. The uniform layer of the expansive soil is divided into layers with different strength properties due to depth of the fissures. Rain water in the fissures forms seepage, which increases the sliding moment of the slope. The fissures develop with time. All these factors obviously influence the slope stability. A method for slope stability of the expansive soil based on the conventional slice method is developed. The slope of the expansive soil is divided into 3 sub-layers, the layer with fully developed fissures, the layer with partially developed fissures, and the layer without fissures. The approximate determination methods for fissure depth, surface of sub-layers and phreatic line of seepage in fissures are given. The proposed method reflects the mechanism of slope failure of the expansive soil and can simulate many characteristics of slope failure of the expansive soil, such as that the sliding mass body is shallow, gentle and drawing-shaped, and that the sliding happens seasonally, directionally and after long time. The computed results of an example show that the developed method is reasonable and practical.

Key words: expansive soil; slope; stability; fissure

0 引言

有些膨胀土边坡存在深层的结构性裂缝, 会发生深层滑坡, 但多数膨胀土滑坡是浅层的。本文主要讨论后者。膨胀土边坡的稳定性似乎是一个很难捉摸的问题。许多边坡相当平缓, 如 1:6 的坡比, 仍然会发生滑坡^[1]; 也有一些膨胀土边坡, 高 15~30 m, 坡比 1:2 到 1:2.5, 却又在历经数十年的风风雨雨后仍岿然不动^[2]。究竟如何估算膨胀土边坡的稳定性, 使设计者犯难。目前膨胀土坡的设计除了使用常规的条分

法而外, 相当重要的是靠工程师的经验。应该说, 工程师的经验是很重要的, 正是这种经验使已建的大多数膨胀土边坡的设计基本上是合理的, 失稳者毕竟是少数。但工程师们也苦于至今尚无一个可靠的适合于膨胀土的边坡稳定分析方法, 究竟如何评价一个膨胀土边坡的稳定性, 尚无把握。

有些边坡作了有效处理, 现有计算方法却不能说

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大项目 (2006BA04A10)

收稿日期: 2010-01-19

明安全系数是如何提高的。譬如坡面换填厚度 2 m 的非膨胀土, 一般来说是相当有效处理方法, 如图 1 所示。但加固后计算的危险滑动面的大部分, 仍处于膨胀土内, 切割的好土部分较小, 且在低应力区, 用通常的方法计算, 安全系数并无显著提高。这些问题都表明, 常用的黏性土坡稳定分析方法难以解决膨胀土边坡稳定性问题。

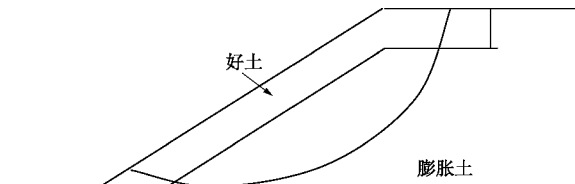


图 1 换填好土

Fig. 1 Expansive soil displaced with clay

为了改进膨胀土边坡稳定计算许多学者作了努力。

(1) 用残余强度指标^[2]

笔者所作膨胀土强度的比较试验表明, 其残余强度与裂隙充分发展状态的强度是接近的。因此残余强度可作为膨胀土在该状态下的一种近似值, 但若对于整个膨胀土坡体都采用残余强度却是欠妥的。各种超固结黏性土都存在残余强度, 在土边坡稳定分析又都用的峰值强度, 为什么只有膨胀土要用残余强度呢? 在理论上无法解释。实际上, 选用残余强度在很大程度上是为了使安全系数低些, 以模拟膨胀土边坡失稳的平缓性, 而非真正反映失稳机理。为了选用低强度指标, 也还有对开挖边坡采用快剪强度指标的, 这显然不符合总应力强度指标的选用原理。

(2) 用非饱和土强度指标^[3]

应该说, 大多数情况下膨胀土边坡是处于非饱和状态的, 在某些区域或某些状态下可以采用非饱和土强度。但对边坡整体都用非饱和土强度指标是值得商榷的。这存在两个问题: 一是其强度比饱和土高, 更无法反映膨胀土滑坡的平缓性; 二是即使在地下水很深的地区, 膨胀土长期处于非饱和状态, 其上部相当厚的土层也难保证不会饱和。膨胀土存在裂隙, 雨水将通过裂缝进入内部, 使相当深范围内的土达到饱和状态。而这个区域恰恰是滑动面通过的区域。

(3) 数值分析^[2]

数值分析方法可用于各种黏性土坡, 主要是为了提高计算精度。它还可以同时算得应力和变形, 因而可模拟膨胀变形, 乃至模拟膨胀土边坡失稳时的破坏过程。但如果不从模拟膨胀土边坡失稳机理出发, 不反映膨胀土的根本特点, 仍然是不能真正解决膨胀土

边坡稳定性问题的。

(4) 将膨胀力作用于滑动体

膨胀土遇水膨胀, 确实产生一种膨胀势。这种势是土体内部的。当容许自由膨胀时, 它完全释放, 并消失; 当变形受到部分限制时, 它释放一部分转化为膨胀应变, 而保留一部分与限制压力相抗衡; 只有当完全不容许膨胀变形发生时, 与限制压力抗衡的才是通常意义的膨胀力。膨胀力并不如重力那样由外部施加, 也不像重力那样当变形发生后仍作用于物体。它的存在还有一个作用与反作用的关系。坡体浸水膨胀时, 滑动体下部土体会产生对上部的某种膨胀势, 但它是地基土反力的一个部分, 而不是作用于滑动体上的额外的反力, 是不会影响滑动体上力平衡的。就像对置于汽车轮胎下的千斤顶加力不会改变汽车受力一样。说到底, 膨胀力是不能参加到滑动体受力平衡分析中的。

总之, 现有的膨胀土边坡稳定分析方法, 尚未针对膨胀土的主要特性。深入研究能反映膨胀土特点的稳定分析方法是十分必要的。

1 裂隙对边坡稳定性的影响

膨胀土存在裂隙, 是其重要特点。笔者曾分析膨胀土边坡失稳所表现出的平缓性、浅层性、牵引性、长期性、季节性、方向性, 都是由裂隙引起的^[4]。因此, 边坡稳定性分析方法中, 必须考虑裂隙的存在。

裂隙对边坡稳定性的影响可以归纳为以下几点:

(1) 裂隙使土的强度降低

很缓的膨胀土边坡也会产生滑坡, 这除了用土体的强度低来解释而外, 无法归结到其他原因。

试验表明, 膨胀土的强度一般情况下并不低; 但有时却又相当低, 这是由于裂隙的开展。不少学者进行了不同干湿循环次数下的膨胀土直剪试验, 发现强度指标随干湿循环次数的增加而降低^[5-6]。刘华强^[7]、徐彬在作此试验时, 还拍下了试样的照片。照片显示, 随湿循环次数的增加裂隙显著发展。其实, 干湿循环仅仅是使裂隙发展、强度降低的一种诱发因素, 如果没有干湿循环, 仅仅是干燥, 也会使裂缝发展、强度降低的。裂隙的存在和发展才是强度降低的根本原因。而强度降低是边坡失稳的关键性因素。

(2) 坡体被划分成裂隙层和无裂隙层

裂缝开展深度将均一的土坡体分成了上下两部分, 上部存在裂隙, 抗剪强度低; 下部, 无裂隙, 抗剪强度高。滑动面难以穿越强度高的下部区域, 一般处于有裂隙的浅层内。廖世文在分析了大量膨胀土滑

坡后指出,滑面深度、裂隙发育深度、风化影响深度,三者基本或接近一致^[8]。肖荣久也有类似论述^[9]。可见裂隙深度大体上就是危险滑裂面的下限。

(3) 裂隙中的积水形成渗流

降雨后,裂隙中会积水。这对边坡稳定性又有两种影响:

a) 使土由非饱和状态变为饱和状态,强度降低。不过计算通常采用饱和土强度指标,因此这一点在安全系数计算中是不反映的。

b) 裂隙水形成渗流,渗透力增加了滑动力矩,对稳定安全系数降低有显著影响。这是在稳定计算中必须考虑的。

(4) 裂隙深度将随时间而发展

裂隙开展深度在边坡形成后的长时间内是发展的,10 a、20 a,乃至更长。时间愈长,裂缝开展愈深。裂隙深度随时间的发展是导致膨胀土坡稳定性随时间而降低的根本原因。当然,裂缝开展深度是不可能无限发展的。因为深部的土体自重应力高,就抑制了裂缝的开展。

2 计算方法

提出下述膨胀土边坡稳定性分析方法,以考虑裂隙的影响。

(1) 条分法

仍然采用现有的条分法,如瑞典法、毕肖普法等。若考虑滑面是非圆弧的,也可用杨布法、摩根斯坦法。这些方法有广泛使用的经验,也有许可安全系数的确定标准。

(2) 区域的划分

前面提到,裂隙区与无裂隙区土体的强度有很大差异,因此必须分别考虑。这就须要先确定裂隙开展深度 h_c 。评价临时性的膨胀土边坡的稳定性,可用使用寿命内可能达到的裂隙深度;而对非临时性边坡,则要用裂隙最大可能达到的深度。

裂缝开展深度 h_c 可依据现场探测资料。值得注意的是,探测土层的表面形成时间须超过20~30 a。如果坡面是新开挖或新填筑的,在以后的相当长时间内裂隙还会发展,则探测的深度就没有代表性。这时,应选取附近区域历史悠久的相似的膨胀土作裂隙深度探测。

廖世文曾列出我国8个省的典型膨胀土风化作用影响深度统计资料,大多数在2~4 m之间,个别达5 m;列出7个国家典型膨胀土大气影响深度的统计资料,多数为3~4 m^[8]。肖荣久,“根据探井中裂隙的

观察和滑面位置的统计,风化带的深度至干缩裂隙消失为止,一般深度可达2~6 m。”^[9]。包承纲,“裂隙的深度不大,一般在1~2 m,少数情况下达到4 m,在特别干旱或土中的活性黏土矿物含量比较高时,个别的可达7 m。”^[1]。在没有可靠的探测资料时,根据上述统计资料,建议近似取 $h_c = 4$ m。

在裂隙区,风化程度也有差异。上层裂隙充分发育;而下部区域裂隙发育程度低。它们的强度也有不小差异。为此,可将计算区域中本来均一膨胀土层分为3个亚层,如图2中a, b, c所示。其中a层为裂隙充分发育区,其厚度近似取为 $2h_c/3$, b层为裂隙未充分发育区,其厚度为 $h_c/3$, c层为无裂隙区。

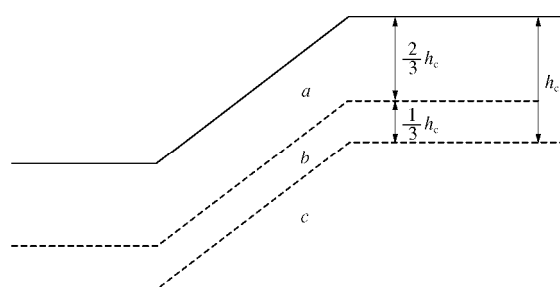


图2 区域划分

Fig. 2 Zoning of soil slope

(3) 强度指标

膨胀土边坡多数处于非饱和状态,其含水率、饱和度和吸力随天气等因素而变化。如果要分析某一特定状态下的边坡稳定性,可考虑用该状态下的非饱和强度指标。但设计都是考虑最危险的情况,不能保证雨后边坡不会达到饱和状态,尤其膨胀土是多裂隙的,故应选取饱和强度指标。其实各种黏性土坡一般也都是处于非饱和状态,但都是采用的饱和土强度指标。

强度指标的试验确定可分两类:

a) 原状的未风化的膨胀土——作饱和固结不排水剪试验确定强度参数,以 c_0 和 j_0 表示;

b) 裂隙充分发展的膨胀土——对试样作5次干湿循环后,再作饱和固结不排水剪试验确定参数,以 c_f 和 j_f 表示。一次干湿循环的方法为,室内阴干5~6 d后,连续喷水至表面积水10 min后停止。如果能取到裂隙充分发展的原状膨胀土,作饱和固结不排水剪试验也是可以的。当然取原状的裂隙土而又不破碎较难,须特别小心或有恰当的取土方法。此外,试验还表明,残余强度参数虽不同于此参数,但相差并不悬殊,故也可用残余强度指标近似地作为 c_f 和 j_f 。毕竟要做干湿循环试验费很长时间,而作残余强度试验要快得多。

坡体几个区域的抗剪强度指标以如下方法选用:

a 区裂隙发育充分,取 c_f 和 j_f 。

b 区裂隙发育不充分, 还有许多微细裂隙肉眼难以看到, 处于过渡阶段, 故可假定, $c_b = (c_0 + c_f)/2$, $j_b = (j_0 + j_f)/2$ 。

c 区为无裂隙的原状膨胀土, 取 c_0 和 j_0 。

(4) 渗透力

首先须确定浸润线的位置。雨水进入裂隙, 在裂隙中的充满程度与降雨量的大小和降雨历时有关, 因此是随机变化的, 只能作近似的假定。历时长的大雨有可能使整个裂隙区浸水饱和, 浸润线就沿着坡面, 如图 3 (a) 所示。这是最危险的情况之一。但有时雨水尚不太大, 但都汇入坡脚处的裂隙土中, 在坡脚形成渗流, 并引起局部的滑动破坏, 如图 3 (b) 所示。这也是很危险的, 而且是更常见的。这时的浸润线是一斜线, 坡度多大是无法确定的, 可如图中所示近似假定为一水平线与坡面线组成的折线。

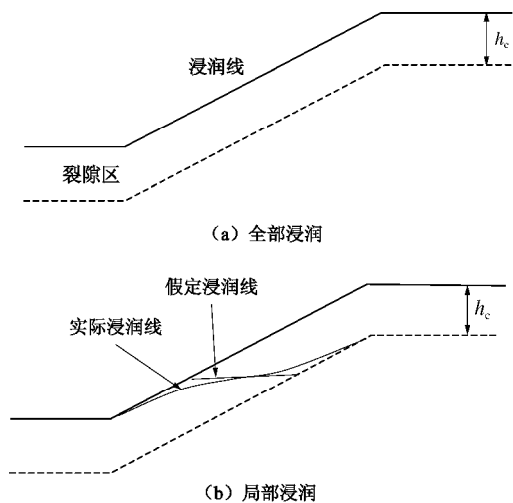


图 3 浸润线
Fig. 3 Phreatic line

渗透力的影响可用替代重度法计算。浸润线以下的裂隙区, 饱和重度计算滑动力矩, 浮重度计算抗滑力矩。

(5) 危险滑弧的优选

在各种可能的危险滑弧优选中要考虑以下因素:

a) 深层滑动与浅层滑动

这里的浅层滑动, 是指滑动面限制在裂隙开展深度以内; 深层滑动指滑动面深入到裂隙开展深度以下。由于深层滑动的滑动体体积大, 滑动力矩大, 如果裂隙区非裂隙区的强度指标差异不十分显著, 也可能是深层滑动危险的。如果下面有强度低的其他土层, 或者有明显的深层软弱带, 也可能发生深层滑动。因此, 尽管膨胀土边坡失稳一般是浅层的, 但深层滑动面仍然要验算。

b) 局部滑动与整体滑动

浅层滑动面也可能是整体的或者局部的, 如图 4 所示; 局部滑动面也有上下位置的不同, 均须验算。

c) 浸润线不同位置的验算

前面已提及有全部浸润与局部浸润之别, 故均须验算。

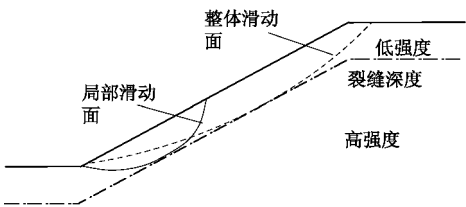


图 4 浅层滑动中的局部滑动与整体滑动
Fig. 4 Whole and local sliding in shallow sliding

3 算例分析

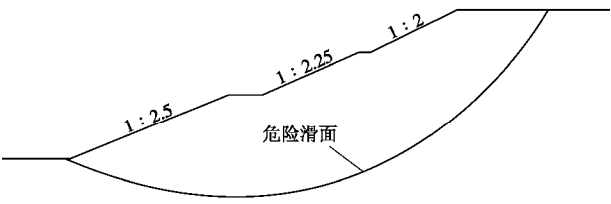
对南水北调中线新乡璐王坟现场试验第 4 区, 取土作饱和土的固结不排水直剪试验。对试样选取了无裂隙、5 次干湿循环后裂隙充分发展、无裂隙反复剪切达到残余强度 3 种状态。其中无裂隙是反映深层土体所处状态, 裂隙充分发展是表层土所处状态, 选用残余强度是膨胀土稳定性验算所用的参考计算方案之一。所得强度指标示于表 1。

表 1 抗剪强度指标

Table 1 The shear strength

土体的不同状态	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
无裂隙	63.2	17.0
裂隙充分发展	17.7	10.5
残余强度	23.8	12.5

几种计算方法计算所得的膨胀土稳定性分析安全系数示于表 2。其中工况 1 为目前工程中常用计算方法, 即不考虑裂隙作用, 将土体看作是均一的膨胀土, 用饱和无裂隙土强度指标作了计算, 相应断面及危险滑弧示于图 5 (a)。工况 2 也是作为均一的膨胀土, 但用残余强度指标。工况 3 为所提出的方法, 即裂隙深度取为 4 m, 裂隙充分发展占 2/3, 不充分者 1/3, 并假定在雨季裂隙中充满水, 有渗流。对局部滑动和整体滑动均作了计算。断面危险滑弧示于图 5 (b), 是局部滑动。



(a) 计算断面及用常规方法所得危险滑面

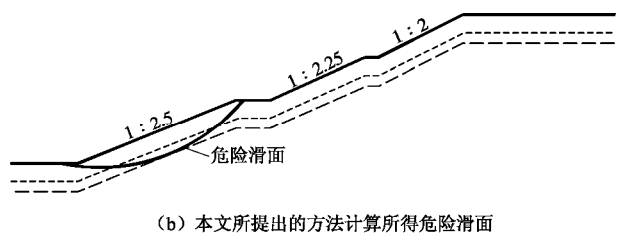


图 5 璠王坟试验第 4 区边坡稳定性计算断面及危险滑弧
Fig. 5 Computed section and precarious slip circle of case study

笔者与合作者曾提出用土工膜在坡面和坡顶覆盖的方法加固膨胀土边坡^[4]。土工膜覆盖后下面的膨胀土蒸发受阻，裂隙不能开展，则强度不会降低，故稳定性计算时可将坡体视为均一的无裂隙膨胀土。工况 4 是这种情况，其计算结果与工况 1 相同。

表 2 稳定分析计算结果

Table 2 Computed results of slope stability			
工 况	方 法	安全系数	
		整体滑动	局部滑动
1 常用方法，无裂隙强度，无土工膜	瑞典法	2.02	
	毕肖普法	2.37	
2 常用方法，残余强度，无土工膜	瑞典法	1.19	
	毕肖普法	1.27	
3 所提出方法，无土工膜	瑞典法	1.79	1.34
	毕肖普法	1.94	1.44
4 土工膜覆盖处理	瑞典法	2.02	
	毕肖普法	2.37	

由表 2 可见：

(1) 饱和膨胀土的强度是不低的，如果没有裂缝的开展，图中所示均质边坡的安全系数超过 2.0，是相当安全的。作为均质土坡，如果用残余强度计算，整体滑动的安全系数为 1.2 左右，要小得多。但如前面所说采用残余强度并不符合边坡失稳机理，整体的深层滑动也与大多数膨胀土滑坡为浅层的不一致。

(2) 用所提出的方法，考虑裂隙发展程度，分层取用不同的强度指标，对所分析的边坡，未加固，最小安全系数 1.34，远低于作为均一膨胀土层的安全系数。可见裂隙存在对边坡稳定性影响的严重性。

(3) 所提出的膨胀土边坡稳定分析方法，考虑裂隙程度分层选用强度指标，恰当地反映了膨胀土性质，模拟了膨胀土边坡失稳的各种特征。裂隙层强度指标相当低，就能模拟平缓的边坡也失稳；由于裂隙层深度在 4 m 左右，在该范围内的滑动面最危险，就能反映滑坡的浅层性。图 5 (b) 中的计算结果也反映了这一点；表 2 中的结果还表明，局部滑动比整体更危险，坡脚处首先发生局部滑动；接着其相邻的上部

土体失去支撑又会滑动，逐步发展就表现为牵引性；至于长期性、季节性、方向性等都是与裂隙强度和裂隙深度发展有关的。所提方法也是得到反映的。

(4) 所提出分析方法还可反映加固后的稳定性。图 1 所示的换土方法之所以能提高稳定安全系数主要并不是由于换土部分的强度提高了，而是由于好土的覆保护了膨胀土，使膨胀土不致产生裂隙，因而其下膨胀土层也要用无裂隙状态的强度指标，安全系数就提高了。表 2 中的计算结果也表明，用土工膜覆盖加固使安全系数提高。

4 有待深入研究的问题

所提出的上述稳定分析方法尚存在以下问题须深入研究：

(1) 裂隙深度的确定

裂隙深度是随时间而发展的。对于新建成的边坡，无论填方还是挖方，都要估计最终裂隙深度。用钻探取样方法，挖探坑方法，或者某种物探方法，测得的是当前的裂隙深度，不能代表 30 a 后的值。如果用测得的裂隙深度去计算，10 a、8 a 也许还稳定，不能保证 30 a 后不滑坡。参照已有工程资料，近似假定裂隙开展深度为 4 m，也未必适合所分析的工程。因此如何确定裂隙深度仍然是一个值得深入研究的问题。这要研究裂隙随时间而发展的规律，要研究裂隙开展深度与膨胀性强弱（如用自由膨胀率表示）的关系等。

(2) 不同裂隙程度下的强度指标

不同的裂隙程度膨胀土的强度指标相差也是相当大的。上面所提出的强弱区的划分方法，弱裂隙区强度指标的取值，仅仅依据了少量资料，还有待改进。要研究裂隙区内土的强度指标随深度的变化规律，以及膨胀性的强弱、形成时间的长短对此规律的影响。

(3) 雨后裂隙中的浸润线的位置

上面假定的危险情况是，全裂隙区均被雨水浸没，浸润线就沿着坡顶和坡面。这虽然考虑的是最不利状态。但在干旱区域，雨量不会太大，大雨持续时间也短，浸润线难以到顶；边坡较陡的情况，最不利的浸润线可能也达不到坡面。对这些情况如何确定最不利浸润线位置也须要研究。

上述存在问题在一定程度上影响了计算精度。但工程问题在许多情况下总得作假定来近似取值。如不同土层分界面的确定依据钻探资料，而相隔几十米、几百米的两钻孔间土层界面，就得假定直线变化；强度指标的试验和确定中也存在不少假定。应该说，即使存在上述近似性，比不考虑裂隙影响方法的计算精

度是有很大提高的。

5 结 论

(1) 膨胀土是否存在裂隙, 及裂隙程度如何, 对抗剪强度影响很大。因此边坡稳定性分析方法中应加以区别, 不宜将其作为强度指标相同的同一土层。雨后, 裂隙浸水饱和, 存在裂隙渗流, 是影响边坡稳定性的另一重要因素。所提出的稳定分析方法考虑了这些影响, 因而反映了膨胀土边坡失稳的各种特征。

(2) 算例的计算结果与分析表明, 提出的方法是合理的。

(3) 裂隙开展深度的确定、裂隙强弱的划分等, 尚值得深入研究。

参考文献:

- [1] 包承纲. 岩土工程研究文集[M]. 武汉: 长江出版社, 2007. (BAO Cheng-gang. Geotechnical study series[M]. Wuhan: Chang Jiang Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996. (LIU Te-hong. The problems of expansive soils in engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996. (in Chinese))
- [3] 卫 军, 谢海洋, 李小对. 基于非饱和土理论的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 34(4): 38 - 40. (WEI Jun, XIE Hai-yang, LI Xiao-dui. Analysis of the stability of the expansive soils slope based on unsaturated soil theory[J]. J Huazhong Univ Sci & Tech (Nature Science Edition), 2004, 34(4): 38 - 40. (in Chinese))
- [4] 殷宗泽, 韦 杰, 袁俊平. 膨胀土边坡的失稳机理及其加固[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 1 - 6. (YIN Zong-ze, WEI Jie, YUAN Jun-Ping. Mechanism of slope slide of expansive soil and reinforcement for the slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 1 - 6. (in Chinese))
- [5] 杨和平, 肖 夺. 干湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2005, 2(2): 1 - 6. (YANG He-ping, XIAO Duo. The Influence of alternate dry-wet effect on the strength characteristic of expansive soils[J]. Journal of Hunan Light Industry College (Nature Science Edition), 2005, 2(2): 1 - 6. (in Chinese))
- [6] 李妥德, 赵中秀. 裂土堑坡土体抗剪强度的确定方法[J]. 路基工程, 1993(3): 19 - 28. (LI Tuo-de, ZHAO Zhong-xiu. Methods of measuring shear strength of cracks soils[J]. Subgrade Engineering, 1993(3): 19 - 28. (in Chinese))
- [7] 刘华强, 殷宗泽. 裂缝对膨胀土抗剪强度指标影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3). (LIU Hua-qiang, YIN Zong-ze. Test study of influence of crack evolution on strength parameters of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3). (in Chinese))
- [8] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984. (LIAO Shi-wen. Expansive soil and railway subgrade engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [9] 肖荣久. 陕南膨胀土及其灾害地质研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995. (XIAO Rong-jiu. Geologic hazard Study of expansive soil in South Shaanxi Province[M]. Xi'an: Shaanxi Sci and Tech Press, 1995. (in Chinese))