

膨胀土边坡稳定分析方法研究

刘华强¹, 殷宗泽²

(1.江苏省水利科学研究院, 江苏 扬州 225002; 2.河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098)

摘 要: Bishop 法等边坡稳定分析的经典方法用于分析膨胀土边坡时本身并无问题, 只是由于计算条件的考虑不足, 使得计算结果不能反映出膨胀土上的滑坡特点。在 Bishop 法的基础上, 通过完善其计算条件, 考虑了裂缝开展导致的土体强度降低、裂缝开展的深度、降雨时裂缝群中形成的渗流, 以及可能的裂缝侧壁静水压力的作用等影响因素, 完成了对膨胀土边坡稳定分析方法的改进。改进后的方法反映出裂缝对膨胀土边坡稳定性的影响, 计算结果真实再现了浅层性、牵引性、长期性、平缓性和季节性等膨胀土边坡的滑坡特点。

关 键 词: 膨胀土; 边坡稳定; 裂缝; 浅层性; 牵引性

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Research on analytical method of stability of expansive soil slope

LIU Hua-qiang¹, YIN Zong-ze²

(1. Jiangsu Provincial Hydraulic Research Institute, Yangzhou Jiangsu, 225002, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: It is pointed out that the conventional method such as Bishop method is not incorrect itself for the stability analysis of expansive soil slope, and only related conditions being short so as to cause the stability analysis cannot reflect the actual landslide characteristics. Based on the Bishop method, the factors are considered with introducing of the related conditions, which include the strength attenuation due to the cracking evolution, the depth of cracking, water pressure in cracks and the seepage force caused by rainfall. Thus the analytical method of slope stability in expansive soil areas is advanced so as to reflect the effect of cracking on the stability of expansive soil slope and the collapse features of expansive soil slope such as shallow layer, gradual traction, long-term, gentle and seasonal characteristics have been reproduced actually by the computed results.

Key words: expansive soil; slope stability; crack; shallow layer; gradual traction

1 引 言

在膨胀土的边坡工程中, 素有“逢堑必崩, 无堤不塌”之说, 而南水北调中线工程输水总干渠将通过南阳、沙河及邯郸等地 300 余公里的膨胀土地区, 膨胀土渠坡的稳定性严重影响着工程建设和输水的安全。由于膨胀土具有胀缩性、超固结性和裂隙性, 相比一般的黏性土坡, 膨胀土滑坡具有特殊性。膨胀土边坡的失稳破坏具有以下特点^[1]: 浅层性、牵引式、长期性、平缓性和季节性, 其滑动破坏的典型断面如图 1 所示。

截至目前为止, 对膨胀土边坡稳定性的研究, 更多的只是定性地分析^[2-6], 工程上对膨胀土边坡

到底该如何进行定量分析还处在一个摸索的阶段, 尚未给出合理有效的分析方法。因此, 开展膨胀土边坡稳定分析方法的研究具有重要的现实意义。

2 膨胀土边坡中裂缝的开展

裂隙性是膨胀土区别于一般黏性土最主要的特点之一。膨胀土强烈的胀缩性, 导致膨胀土边坡表层大量裂缝的出现。干旱季节, 水分蒸发, 此时的膨胀土处于非饱和状态, 收缩显著。由于膨胀土的渗透性很低, 当表面土体蒸发收缩以后, 紧邻的下层土体水分尚未减少, 从而造成土体收缩变形的不均匀, 收缩不均, 产生裂缝。裂缝开展面又进一步促进了蒸发作用, 裂缝向深部发展。相反, 降雨

会使土体膨胀,堵塞裂缝,增加了继续蒸发的难度,延缓了裂缝的开展,但当雨后再蒸发时,原来的裂缝位置是薄弱地带,会再次开裂,并可能继续向深处开展,可见裂缝是伴随着干湿循环过程而逐步开展的。如图 2 所示,为某膨胀土滑坡的现场实拍照片,照片真实的反映了膨胀土的裂隙性给边坡带来的显著影响。

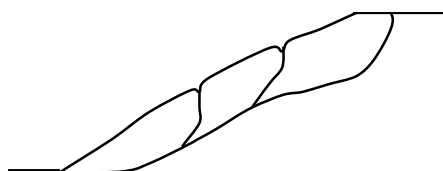


图 1 膨胀土坡滑动的典型断面

Fig.1 Common pattern of sliding in expansive soil slope



图 2 膨胀土滑坡照片

Fig.2 Photo of landslide in expansive soil area

裂缝的开展是影响膨胀土边坡稳定的根本因素,这是从经验、从观测、从机理、从分析所得出来的结论,是定性的。然而,如何定量计算,尚无办法。也就是说,还未找到相应的可用数学式子表达的具体规律。

目前膨胀土的边坡设计中仍然采用毕肖普法、瑞典法等常规分析方法,将其视为一般的黏性土边坡处理,这显然是不够合理的,其没有反映裂缝的影响;滑动面仍然是整体的滑动面,不能反映膨胀土滑坡的由局部开始渐进发展的牵引性;计算更没有反映滑动的平缓性、长期性等特点。因此须改进膨胀土边坡稳定的分析方法。

3 本文建议的方法

Bishop 法等边坡稳定分析的经典方法广泛应用于工程实践当中,方法本身并无问题,只是用于分析膨胀土边坡时由于计算条件的考虑不足,如没有考虑裂缝开展对土体强度的影响、裂缝开展的深度、降雨时裂缝群中形成的渗流,以及可能的裂缝侧壁静水压力作用等,计算结果不能反映出膨胀土上的滑坡特点。因此,本文仍以 Bishop 法为基础,

通过对上述影响因素的考虑,达到改进膨胀土边坡稳定分析方法的目的。

3.1 考虑裂缝引起的强度降低

合理的确定抗剪强度指标对于土坡的稳定评价至关重要,甚至是决定性的。笔者曾通过干湿循环试验模拟了膨胀土中裂缝开展,研究了裂缝开展对膨胀土强度的影响^[7]。结果表明,膨胀土的饱和强度指标随裂缝的开展而降低。因此,膨胀土抗剪强度指标的确定必须考虑裂缝的影响。

文献[7]指出膨胀土抗剪强度随裂缝开展的变化符合双曲线规律,并建议了拟合公式:

$$c = c_0 - \frac{n}{a_1 + b_1 n}; \quad \varphi = \varphi_0 - \frac{n}{a_2 + b_2 n} \quad (1)$$

式中: n 为干湿循环次数; c_0 、 φ_0 分别为黏聚力和内摩擦角的初值,即未经过干湿循环时土样的强度值; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为拟合参数。

通过对不同类型膨胀土作统计分析,分别得到各自的拟合参数后,只要按照常规强度试验测定 c_0 、 φ_0 ,就可以得到相应的经验公式,取 $n=6$ 或 8 时对应的强度指标进行稳定分析,因为此时的曲线已经相对平缓。在无试验资料的情况下使用残余强度作粗略的估算,但应注意,残余强度绝不等同于裂隙土体的强度,二者之间到底关系如何,还有待试验的进一步验证。

3.2 考虑裂缝深度的影响

裂缝的开展使土体结构破坏,由超固结状态变为松散状态,强度降低,但这些都只发生在膨胀土边坡一定深度以内。蒸发时裂缝开展,降雨时裂缝又部分闭合,因此裂缝深度不是无限发展的。镇江黄山滑坡,虽然在纵向延伸 100 m,但其深度却只有 3~4 m,深处膨胀土的渗透性多小于 10^{-6} cm/s,属于工程意义上的不透水层,处于恒久性的非饱和状态,其含水率基本上不随外界而变化,不会表现出胀缩性,更不会产生收缩裂缝,土质坚硬,保持着较高的强度。

使用简化 Bishop 法对一土坡分别在考虑裂缝和不考虑裂缝两种情况下进行对比计算。假定坡度为 1:4,坡高取 20 m,土体重度为 20 kN/m³。裂缝深度取 4 m,裂缝土层强度指标取自试验最后一次干湿循环,深层取未经干湿循环时的强度指标。

图 3 显示了是否考虑裂缝开展时滑面的差异。当考虑裂缝作用而区分内外土的强度时,最危险滑面只存在于浅部裂缝土层中,安全系数为 1.816。而不考虑裂缝时,均质土坡表现为深层滑动,安全系数也比浅层滑动的情况大,为 2.72。

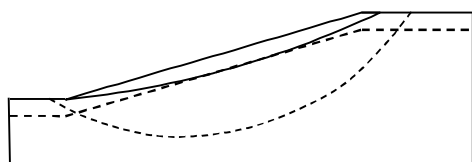


图3 裂缝深度对滑面的影响

Fig.3 Effect of cracking depth on critical slip surface

考虑土坡表面易受气候影响而出现浅表部分裂缝的作用, 滑弧不会超越硬土层。裂缝深度具有浅层性是膨胀土边坡浅层滑动的原因所在。上述分析表明, 将膨胀土边坡分成浅层裂缝土和深层完整土能较好的解释膨胀土边坡滑坡的浅层特性, 这种分层是合理的, 也是必要的。

在进行膨胀土边坡的稳定计算分析之前, 首先要对边坡裂缝开展的深度进行调查统计, 如果是新填土坡, 则可以根据地质资料和相近地区已有类似土坡进行预估。在没有任何资料的情况下, 按照经验可粗略的取 3 m 或 4 m 计算分析。

3.3 考虑降雨的影响

降雨往往是诱发土质边坡失稳的主要因素之一, 大量膨胀土边坡失稳的实例都表明膨胀土滑坡与降雨关系密切^[8-10], 大都发生在大雨期间或雨后不久。

膨胀土边坡的降雨入渗具有特殊性。在经历长期的日晒雨淋之后, 膨胀土边坡的浅层部位分布着大量裂缝, 如图 4 所示。

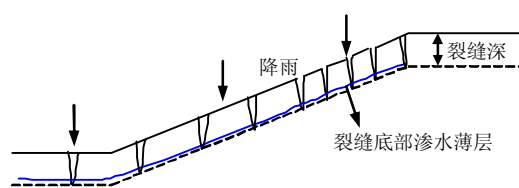


图4 膨胀土坡中降雨时的初始渗流

Fig.4 Initial seepage in expansive soil slope

降雨发生时, 由于膨胀土边坡纵向贯通裂缝的存在, 雨水很容易沿着坡面缝缝渗入到坡体内, 并到达裂缝底部。而深处土体没有裂缝, 渗透性非常低, 工程上可视为不透水层。雨水入渗至不透水层后不能继续往深处渗透, 此时雨水可能在重力作用下发生沿裂缝底部的侧向流动。膨胀土中裂缝的开展是不规则的, 并非只有纵向裂缝, 横向裂缝同样存在。横向裂缝相对较小, 坡面浅层土体的侧向渗透性相比雨水沿纵向裂缝的垂直入渗要小的多, 裂缝底部积水不能在短时间内流走; 顺坡面方向不同

位置裂缝底部的积水存在压力差, 形成一定的水力梯度, 因此, 在水力梯度的作用下, 缝中雨水沿裂缝底部发生侧向渗透, 底部积水相互连通, 从微观上形成了一个沿着裂缝底部顺斜坡方向向下的“导水通道”。此时, 位于裂缝底部的雨水对坡体稳定的影响较小, 因为雨水只是在裂缝底部很小的一个薄层内向下渗透。

由于坡底较之坡面要平缓的多, 不存在类似坡面上的裂缝群当中的水压差或者水力梯度, 坡底裂缝会很快被雨水充满。随着降雨的进行, 必然导致入渗降雨在坡脚附近的暂时积聚, 边坡的坡脚部位首先饱和, 坡底水的积聚, 为坡脚处局部渗流的形成创造了条件, 来自坡脚以上位置裂缝中的雨水不断的向坡脚方向发生侧向渗透, 汇聚到坡脚, 从而使浸润线位置抬升。由于膨胀土在雨水的浸泡作用下会产生膨胀, 裂缝有闭合的可能, 因此, 需要是一定强度的降雨, 否则, 裂缝闭合后很难形成这种特殊的渗流模式。此外, 浸润线位置也不会太高, 由于侧向渗透相对较慢, 当渗流水面抬升至一定高度后, 降雨已经持续了一段时间, 此时的坡面裂缝已经部分或者全部闭合, 雨水已经无法通过裂缝渗入土体内部, 或者形成一定规模的渗流后降雨停止了, 也就没有了坡面上部裂缝底部侧向来水的补给, 浸润线自然也就无法进一步抬升, 即最后只是一种局部的渗流存在。整个过程可由水面的抬升来反映, 如图 5 中从下到上 3 条浸润线。

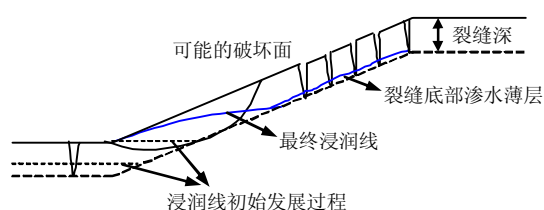


图5 膨胀土坡中的渗流

Fig.5 Seepage in expansive soil slope

膨胀土因浸泡而软化, 土体的抗剪指标大幅度降低, 随着降雨的持续, 坡脚饱和区的范围扩大, 浸润线的位置升高, 但最终也只是在坡脚处形成了小范围的局部渗流。由于土体的侧向渗透性不高, 渗透力较大, 导致在坡脚处出现“小弧”滑动的可能, 其稳定已经不是整体的稳定问题。经过重庆交通科研设计院现场对路堤边坡的开挖测试也证实了雨水在坡脚积聚的现象^[12]。当然, 形成这种渗流模式要求降雨具有一定的强度, 膨胀土边坡失稳常常

发生于大雨期间或者雨后不久,也证实了这种渗流发生的可能。

图 6 为分析边坡在浅层滑动的基础上且又考虑了降雨发生时坡内渗流的作用后得到的最危险滑动面情况,浸润线位置的假定如图中所示,其对应的安全系数 $F_s = 1.67$ 。

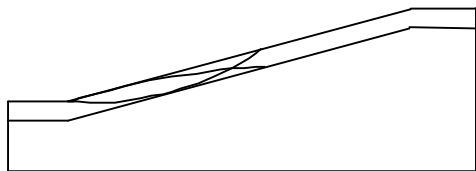


图 6 渗流作用下的临界滑面
Fig.6 The critical slip surface with seepage

考虑到工程实际当中的膨胀土滑坡面的真实形态,往往都存在陡峭的后缘段,因此在考虑渗流的基础上,计入滑面后缘裂缝中侧壁静水压力的影响。此时,边坡的最危险滑面如图 7 所示,对应的安全系数 $F_s = 1.58$ 。

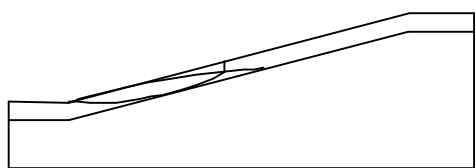


图 7 同时考虑渗流和水压力的临界滑面
Fig.7 The critical slip surface with seepage and water pressure

表 1 为边坡安全系数的变化,清晰的显示了计入各个因素后该边坡稳定性产生的影响。

表 1 各因素作用下边坡的稳定性
Table 1 Stability at different working states

因素	工况			
	初始	裂缝深度	缝深+渗流	缝深+渗流+水压力
安全系数	2.72	1.82	1.67	1.58
临界滑面	深层整体	浅层整体	浅层局部	浅层局部

从表 1 中可以看出,同一强度条件下同时考虑渗流和贯通裂缝中的静水压力后,该膨胀土边坡的安全系数从只考虑裂缝深度时的 1.82 降低至 1.58,可见对该边坡而言,二者的影响还是较大的,尤其是滑面位置,从初始状态的深层整体滑动变为后面的浅层局部滑动。

对已经存在的膨胀土边坡,可以通过现场的监

测试验来确定浸润线的位置,而对于新填土坡,初设时同裂缝深度的确定一样,只能靠预估。根据对已有膨胀土坡失稳破坏的工程总结来看,一般局部滑动的范围在坡腰以下,可以通过变动浸润线的位置来给予一定的安全储备。作为近似计算,可以取坡高 1/4~1/3 位置,最多不超过一半坡高,如果坡高超过 20 m,可以近似取 5~10 m 高度范围试算。总的来看,关于膨胀土坡内浸润线位置的确定目前还没有很好的方法,尚需要作进一步研究。

3.4 考虑局部与整体滑动

膨胀土滑坡往往是从下部先滑,往上发展,因此,局部的稳定性必须验算,局部滑动的计算可按照上面建议的方法进行。但边坡整体的稳定性也不能忽视,边坡从潜在的整体滑动变为局部滑动,主要是裂缝的作用。裂缝开展不充分时,浅层土体强度降低程度不大,还不足以改变膨胀土边坡整体深层滑动的滑动形式,因此膨胀土的边坡稳定分析应当同时作局部稳定与整体稳定的验算分析。

4 本文方法的特点

本文所提的分析方法能够合理反映出膨胀土上的滑坡特点:

(1) 浅层性、牵引性 上述分析过程中已经充分体现了膨胀土滑坡的浅层性和牵引性。

(2) 平缓性、长期性 在工程实践当中 1:4、1:5,乃至更缓的膨胀土边坡都可能滑动,仅仅用非饱和土理论难以解释。就是按通常所认识的饱和土强度来计算,这样的缓坡也是足够安全的。那究竟是什么原因导致了如此平缓的土坡仍然发生滑动破坏呢?

强度始终是影响边坡稳定的一个重要因素,一般黏土的强度较高,对工程上常见的黏性土坡,1:2 就已经是相对平缓的坡度了,1:5 的黏性土坡滑动,几乎是不可思议的事情。问题就出现在这里,一般黏土的强度高,而试验表明膨胀土的强度随着裂缝开展会逐步降低,膨胀土在无裂缝的情况下强度很高,而裂缝开展后的强度却又很低。这是非常重要的一点。此外降雨时的渗透力,还有裂缝中的静水压力,这些因素作用在一起,就造成了非常平缓的膨胀土坡也可能发生滑动破坏。

裂缝是伴随干湿循环而逐步发展起来的。裂缝的开展需要时间,在干湿循环许多次以后才能使土体强度降低至足够小,裂缝开展至足够深。故滑坡常发生在边坡施工结束很长时间以后,这就是膨胀土滑坡具有长期性特征的真正原因。

由式(1)可以得到该处膨胀土强度衰减的终值:黏聚力 c 为10.4 kPa,内摩擦角 φ 为 8.6° 。使用该强度指标对前文膨胀土边坡再次进行稳定分析。图8为在此强度条件下计算得出的最危险滑面情况。此工况下对应的最小安全系数 $F_s=1.16$,按照公路规范,膨胀土边坡1.20的安全系数取值标准,表明该土坡处于不安全的状态。本次计算反映了该膨胀土边坡的首次破坏为坡脚附近的局部滑动,滑动面后缘陡峭,与现场实际滑动形式基本吻合。该土坡坡度平缓,且使用了强度拟合终值进行计算,得出的结果表明边坡处于可能失稳的状态,这恰恰说明了膨胀土滑坡具有长期性和平缓性。

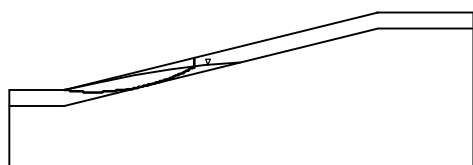


图8 最危险滑动面

Fig.8 The dangerous slip surface

(3) 季节性 该土坡坡度平缓,且使用了强度拟合终值进行计算,得出的结果表明边坡处于可能失稳的状态,说明了膨胀土滑坡具有长期性和平缓性。雨水在裂缝中的力学作用只能发生在雨季,这决定了膨胀土边坡失稳破坏具有季节性特征。

膨胀土边坡失稳破坏是多种因素综合作用的结果,但这些因素都与土坡上的裂缝有关:裂隙土的强度降低;裂缝的深度将膨胀土边坡划分成浅层低强度区和深层高强度区;裂缝影响到滑动面的形状和走势,裂缝中的雨水压力增加了滑动力矩;裂缝群中雨水因水压差而形成渗流,引起渗透力等,裂缝是影响膨胀土边坡稳定的关键因素。本文分析方法通过对上述因素的考虑,使得裂缝对膨胀土边坡稳定的影响得到了全面的反映。

计算方法是否考虑了影响边坡稳定的各种主要因素,结果是否反映了边坡滑动破坏的特点,说明了该方法是否合理。不顾及膨胀土滑坡的特殊性,而将膨胀土边坡作为一般的黏性土边坡进行分析显然是不合适的。而本文给出的分析方法充分考虑了裂缝对膨胀土边坡稳定的影响,计算结果也真实反映了膨胀土滑坡的特点,应该说较之以前将膨胀土边坡视为普通黏性土坡分析,有了一定的改进。

5 结 语

在 Bishop 方法的基础上,通过完善其计算条

件,考虑了裂缝开展导致的土体强度降低,裂缝开展的深度,降雨时裂缝群中形成的渗流以及可能的裂缝侧壁静水压力作用等影响因素,完成了对膨胀土边坡稳定分析方法的改进,改进方法的计算结果真实反映了膨胀土边坡的浅层性、牵引性、长期性、平缓性和季节性等滑坡特征。

参 考 文 献

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [2] 王文生, 谢永利, 梁军林. 膨胀土路堑边坡的破坏型式和稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1): 20—24.
WANG Wen-sheng, XIE Yong-li, LIANG Jun-lin. Classification of expansive clay slope on road cutting[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2005, 25(1): 20—24.
- [3] 秦禄生, 郑健龙. 膨胀土路基边坡雨季失稳破坏机理的应力应变分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 25—30.
QIN Lu-sheng, ZHENG Jian-long. Analysis of surficial failure mechanism of expansive soil slopes with FEM[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 25—30.
- [4] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1—15.
BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1—15.
- [5] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 151—158.
ZHAN Liang-tong, WU Hong-wei, BAO Cheng-gang. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 151—158.
- [6] 刘龙武, 郑健龙, 缪伟. 广西宁明膨胀土胀缩活动带特征及滑坡模式研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 28—33.
LIU Long-wu, ZHENG Jian-long, MIAO Wei. Researches on characteristics of swell and shrinking active zone of expansive soil and failure mechanism of landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 28—33.

- [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): 727—731.
LIU Hua-qiang, YIN Zong-ze. Test study on the influence of crack evolution on the strength parameters of expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 727—731.
- [8] 袁俊平, 殷宗泽. 考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1581—1586.
YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze. Numerical model and simulation of expansive soil slope infiltration considered fissures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1581—1586.
- [9] 谢云, 李刚, 陈正汉, 等. 复杂条件下膨胀土边坡渗流和稳定性分析[J]. 后勤工程学院学报, 2006, (2): 6—11.
XIE Yun, LI Gang, CHEN Zheng-han. The analysis of seepage and stability for expansive soils slope under complicated environments[J]. **Journal of Logistical Engineering Univerisity**, 2006, (2): 6—11.
- [10] 魏宁, 茜平一, 傅旭东. 降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 778—782.
WEI Ning, QIAN Ping-yi, FU Xu-dong. Effects of rainfall infiltration and evaluation on slope stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 778—782.
- [11] 王瑞钢, 闫澍旺, 邓卫东. 降雨作用下高填土质路堤边坡的渗流稳定分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 25—30.
WANG Rui-gang, YAN Shu-wang, DENG Wei-dong. Analysis of seepage stability of high-filled embankment slope due to rainfall infiltration[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(4): 25—30.