

非饱和土边坡稳定分析中强度折减法与条分法的比较

李荣建¹, 郑文¹, 邵生俊¹, 常体鹏²

(1 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2 中铁十七局集团 第二工程有限公司, 陕西 西安 710043)

【摘要】 **【目的】**对比分析不同基质吸力分布条件下, Bishop 条分法和强度折减有限元法计算结果的异同。**【方法】**在考虑非饱和基质吸力条件下, 基于 Bishop 条分法和强度折减有限元法的计算原理和实现方法, 开发了可考虑基质吸力的 Bishop 条分法和强度折减有限元法的相关程序, 并且针对某边坡工程进行了计算分析。**【结果】**在基质吸力逐步减弱直至丧失的过程中, 2 种方法均在一定程度上反映了非饱和土边坡安全系数降低的现象, 但二者确定的安全系数大小有一定差异, 且二者确定的潜在滑动面形状和位置差异较大。**【结论】**相比而言, 在较复杂基质吸力分布条件下, 强度折减有限元法适用性较好、计算结果较合理, 有较大的发展前景。

【关键词】 边坡; 稳定性; 基质吸力; 条分法; 强度折减有限元法

【中图分类号】 TU432

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)09-0207-08

Comparison analyses on stability of unsaturated soil slopes by strength reduction FEM and slice method

LI Rong-jian¹, ZHENG Wen¹, SHAO Sheng-jun¹, CHANG Ti-peng²

(1 Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 The 2nd Engineering Co, Ltd of China Railway 17 Bureau Group Corporation, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: **【Objective】** The characteristic and difference of the results of the slice method and strength reduction FEM are compared under the cases of different distributions of matric suction. **【Method】** Based on discussion of the computational principle and method of Bishop's slice method and the strength reduction FEM, the program codes of the slice method and strength reduction FEM which can consider matric suction are developed individually. **【Result】** The results show that the slope safety factor reduces to some extent but different in value with the matric suction gradually weakening using the two methods. In addition, the shape and position of potential sliding surface determined by the two methods have a great difference. **【Conclusion】** The strength reduction FEM which can consider more complicated distribution of matric suction can provide a more feasible and precise method for the stability analyses of unsaturated soil slope.

Key words: slope; stability; matric suction; slice method; strength reduction FEM

非饱和土边坡稳定性的影响因素众多, 其中非均匀分布的基质吸力是影响非饱和土边坡稳定性的主要因素之一; 此外, 非饱和土边坡的基质吸力在空间上的非均匀分布, 往往会导致边坡土体强度的非

均匀性。因此, 在非饱和土边坡稳定分析中, 如何合理地考虑非均匀分布基质吸力的影响, 一直是土质边坡工程研究中的热点与难点问题之一。

郭璇等^[1]认为, 基质吸力是影响非饱和土边坡

* [收稿日期] 2010-05-21

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (10872161)

[作者简介] 李荣建(1969—), 男, 河南南阳人, 副教授, 博士, 主要从事黄土地力学、土动力学与土工抗震及边坡工程研究。

E-mail: lirjian2008@gmail.com; lrj03@mails.tsinghua.edu.cn

稳定的重要因素之一。Fredlund 等^[2]利用条分法分析非饱和土边坡的稳定性,并指出了 3 种不收敛的情况;李兆平等^[3]、龚壁卫等^[4]、吴俊杰等^[5]用 Janbu 法和瑞典圆弧法等方法,分析了降雨过程对非饱和土边坡稳定性的影响程度。

这些成果推动了非饱和土边坡稳定性的研究,但条分法只是在假定滑动面上考虑基质吸力,而不能考虑和评价滑动面以外非饱和土体的基质吸力对边坡稳定性的影响;同时,条分法在确定最危险滑面时必须搜索到全局极值才能使计算结果较为可靠,而非均匀分布基质吸力导致了边坡土体的非均匀强度特性,使得搜索合理的全局极值变得异常困难。

强度折减有限元法的概念最早由 Zienkiewicz 等^[6](1975 年)提出,Ugai^[7](1989 年)和 Griffiths 等^[8](1999 年)推动了该方法的发展及应用。由于强度折减有限元法考虑了土体的应力应变关系及变形协调条件,且可应用于具有复杂几何条件的边坡稳定性分析,同时根据计算结果可以合理地确定潜在滑动面。因此,强度折减有限元法逐渐成为边坡稳定分析的有力工具之一。

考虑到非均匀分布的基质吸力对非饱和土边坡稳定性的影响较大,在强度折减有限元法研究的基础上,文献[9]对考虑基质吸力的非饱和土边坡稳定性分析的理论和数值实现方法进行了初步探讨,将强度折减有限元法推广到了非饱和土边坡稳定性的分析中,并已有一些初步的应用^[10-11]。

虽然目前在非饱和土的边坡稳定分析中,条分法和强度折减有限元法都可采用,但是将条分法和强度折减有限元法进行定性、定量对比和评价的研究相对较少,因此有必要开展相应方法的比较研究。本研究通过对比 Bishop 条分法、强度折减有限元法在非饱和土边坡稳定性分析中的差异,分析了二者计算的不同特点及计算的合理性,并提出在非饱和土边坡稳定性分析中基质吸力分布简化的处理措施,以期在实际工程中非饱和土边坡稳定分析方法的选择和在简化基质吸力分布方面提供相应的参考依据。

1 非饱和土边坡稳定性分析实施的要 点

1.1 Bishop 条分法的实现特点

Fredlund(1978 年)提出了非饱和土抗剪强度的表达式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi'' \quad (1)$$

式中: τ_f 表示土的抗剪强度, c' 表示有效粘聚力, u_a

表示孔隙气压力, u_w 表示孔隙水压力, $(\sigma - u_a)$ 表示净法向应力, $(u_a - u_w)$ 表示基质吸力, φ' 表示与净法向应力 $(\sigma - u_a)$ 有关的内摩擦角, φ'' 表示吸力摩擦角。该式实际上将基质吸力 s 产生的吸力强度纳入到总粘聚力 c'' 中:

$$c'' = c' + (u_a - u_w) \tan \varphi'' = c' + s \tan \varphi'' \quad (2)$$

式(2)可以直接应用于条分法计算二维非饱和土边坡稳定的分析中。取某土条底部滑动面上基质吸力,通过式(2)将边坡稳定分析中简化 Bishop 条分法^[12]的计算公式引入总粘聚力 c'' 并进行改造,可得:

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{\theta_i}} [c''_i b_i + W_i \tan \varphi'_i]}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (3)$$

式中: F_s 表示迭代试算安全系数, θ_i 表示 i 土条底部滑动面的法向力与重力矢量之间的夹角, c''_i 表示 i 土条底部总粘聚力, b_i 表示 i 土条底部的弧长, W_i 表示 i 土条的重力, φ'_i 表示 i 土条底部的内摩擦角。式(3)中,

$$m_{\theta_i} = \cos \theta_i + \frac{\sin \theta_i \tan \varphi'_i}{F_s} \quad (4)$$

本研究根据公式(3)编制了 Bishop 条分法相应的非饱和土边坡稳定计算程序,计算中将有效粘聚力 c' 转换为考虑基质吸力的总粘聚力 c'' ,从而可以考虑均匀分布或在不同高度条件下不同基质吸力的分布。同时在边坡稳定计算中,通过采用二分法原理来搜索确定边坡最危险滑动面。Bishop 条分法计算程序的流程详见图 1。

1.2 强度折减有限元法的实现特点

在强度折减有限元法的计算原理中,首先选择初始强度折减系数 F ,土坡中每一个单元的强度按这一折减系数降低,然后进行有限元计算。若程序计算收敛,则土坡仍处于稳定状态,然后再增加折减系数,直至不收敛为止,此时前一步的折减系数即为边坡的安全系数,相应的计算滑动面即为潜在滑动面,破坏时的滑动面用最大剪应变增量的等值线或位移增量等值线分布来确定。

对于每一折减步,以折减后的 (c'_F, φ'_F) (公式(5)、公式(6))为参数的强度屈服准则(公式(7))进行有限元计算。

$$c'_F = c' / F, \quad (5)$$

$$\varphi'_F = \tan^{-1} (\tan \varphi' / F), \quad (6)$$

$$\tau_f = c'_F + \sigma' \tan \varphi'_F / F. \quad (7)$$

式中: c'_F 表示折减后的有效粘聚力, φ'_F 表示折减后的有效内摩擦角, F 表示强度折减系数, σ' 为有效应

力。
基于 Fredlund(1978 年)的非饱和土抗剪强度理论,文献[9]根据 Fredlund 引伸的莫尔-库仑强度破坏面,将其改造为在三维有效应力空间中的一系

列三维强度破坏面(图 2),不同基质吸力 s 对应不同的强度面,以适应由于边坡土体中各点基质吸力不同而导致的土体强度不均匀性,从而在强度折减有限元中实现了考虑非饱和因素的目的。

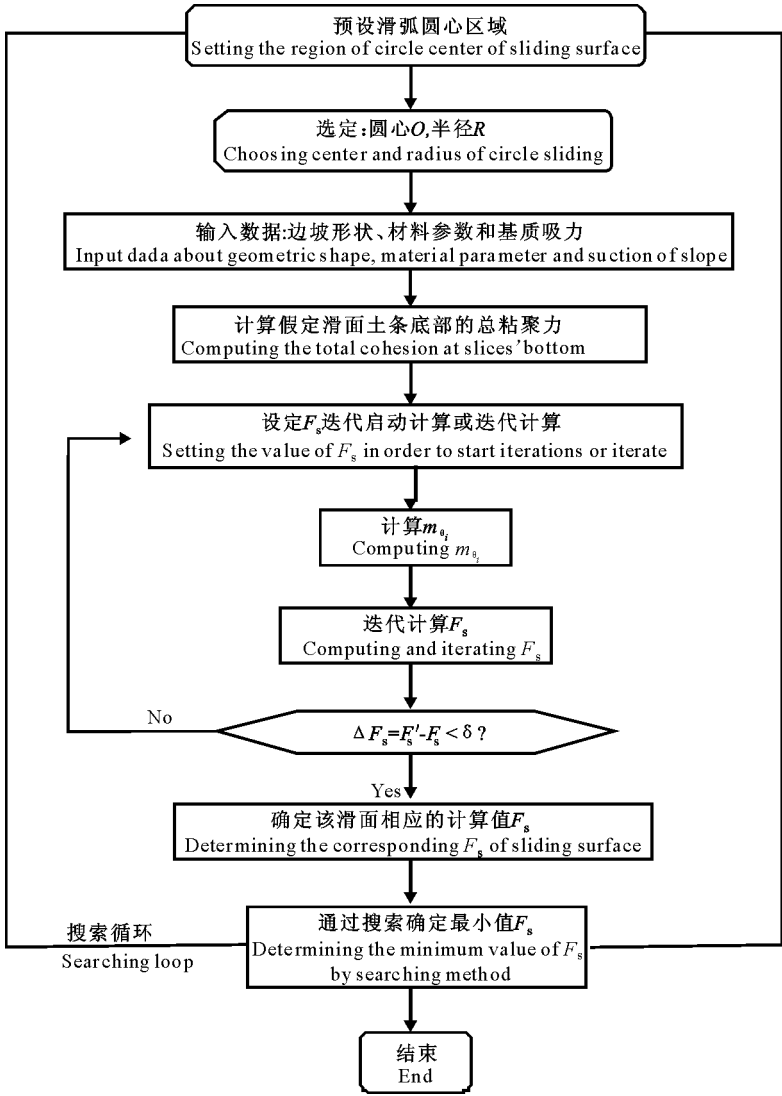


图 1 非饱和土 Bishop 条分法的计算程序流程图

Fig.1 Flow chart of Bishop slice method

本研究给土坡中各单元赋一个基质吸力值来模拟基质吸力的非均匀分布。在应用强度折减有限元法计算时,对具有不同基质吸力的土体单元,需先计算考虑基质吸力的强度参数总粘聚力 c'' ,然后以 (c'', φ') 为参数来表示莫尔-库仑强度准则,再进行强度折减有限元法计算。本研究开发的非饱和土边坡强度折减有限元程序中,利用相邻折减系数间的位移增量等值线来描述边坡的内在特性,等间距值位移增量等值线分布相对最密处(位移增量梯度最大)即为潜在滑动面的位置。强度折减有限元法计算程序的流程详见图 3。

1.3 2 种方法的合理性与区别

从方法原理上讲,Bishop 条分法将滑动土体与土体的破坏作为刚体,滑动土体沿滑面做刚体滑动运动,其虽在一定程度上考虑了土条侧面的作用力,但却不得不人为地假定若干滑动面,并假定各土条底部滑动面上的抗滑安全系数均相同,即等于整个滑动面的平均安全系数,而不考虑土体的应力应变关系及边坡的实际变位情况,且对边界的适应性较差。基于以上缺点,在开发实现的、考虑非饱和和吸力的 Bishop 条分法程序中,也只能对不同深度条件下不同基质吸力的分布进行简化分析,因而与实际情

况相差较大。同时,由于非均匀分布基质吸力导致土体强度的非均匀性,所以 Bishop 条分法在确定最危险滑动面时,搜索边坡合理的全局极值非常困难。

强度折减有限元法则克服了 Bishop 条分法的上述缺点,引入了变形协调的本构关系,不必引入以上假定条件,对复杂边界的适应性较好,可以对具有复杂地貌、地质的边坡进行稳定性分析,从而得到较

为真实的应力应变分布情况,通过计算能够合理地确定出滑动面的位置,并根据分析出的边坡薄弱部位有效地指导加固设计,因此从方法原理上分析可知,强度折减有限元法相对 Bishop 条分法较为完善。

总之,在边坡稳定分析中,由于强度折减有限元法考虑了较为复杂的因素,所以其具有明显的优点。

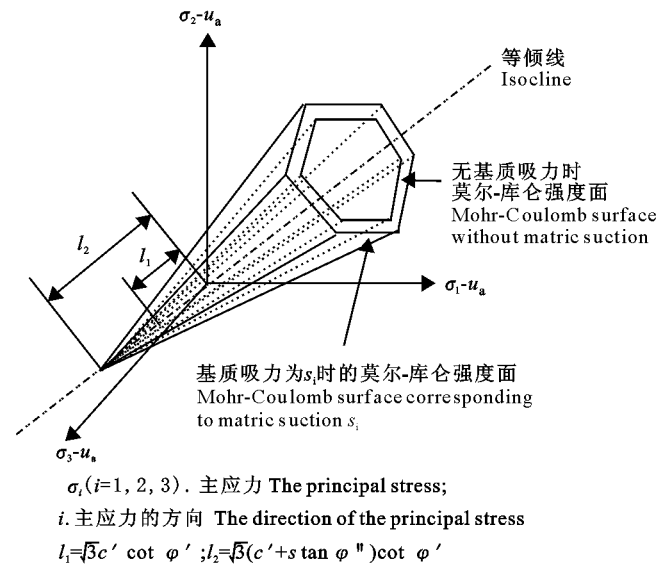


图 2 三维有效应力空间中莫尔-库仑强度面^[9]

Fig. 2 Strength surface of Mohr-Coulomb in 3-D stress space^[9]

2 2 种方法在实际计算中的比较

2.1 计算条件与工况说明

针对某边坡工程(图 4),根据选取的不同基质吸力分布,将其分为 6 种工况(表 1),以分析不同基质吸力分布对非饱和土边坡稳定性和潜在滑动面的影响程度。

图 4 中的某土质边坡高 20.0 m,边坡坡度为 45°,天然重度 19.08 kN/m³,地下水位位于坡脚处,水下有效重度 9.84 kN/m³,内摩擦角 17°,粘聚力 32 kPa,非饱和和吸力摩擦角为 12°。

2.2 Bishop 条分法的计算分析

本研究采用基于 Bishop 条分法编制的非饱和

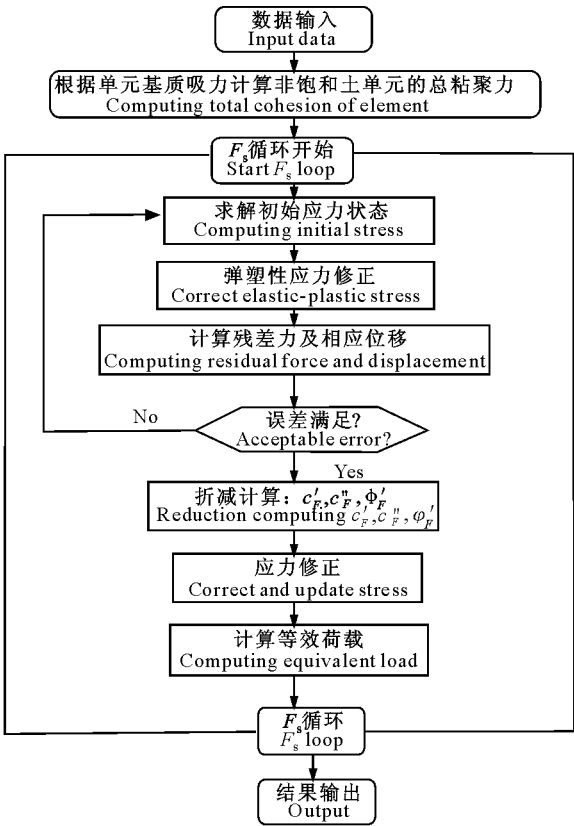


图 3 非饱和土强度折减有限元法的计算程序流程图

Fig. 3 Flow chart of strength reduction FEM for unsaturated soil slope

土边坡稳定性计算程序,对表 1 中所列的 6 个工况进行了计算分析。

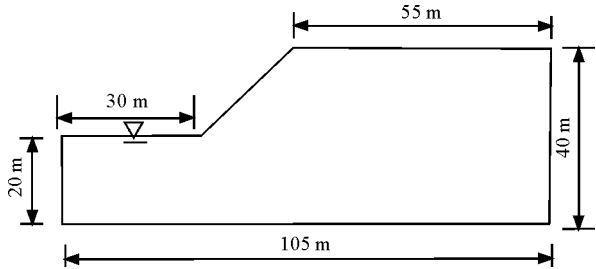


图 4 某边坡工程的边坡剖面

Fig. 4 Section of a slope engineering

工况 1 中,基质吸力为 0~100 kPa 的非均匀分布,在忽略坡面附近吸力不均匀分布的前提下,只考

考虑沿坡高不同高度条件下的不均匀分布基质吸力，所示，边坡处于稳定状态。
工况 1 的安全系数为 1.16，潜在圆弧滑动面如图 5

表 1 计算工况说明与安全系数 (F_s)
Table 1 Description of cases and safety factors (F_s)

计算工况 Computational cases	基质吸力分布情况 Distribution of matric suction	总粘聚力 c^u/kPa Total cohesion	F_s	
			Bishop 条分法 Bishop slice method	强度折减有限元法 Strength reduction method
工况 1 Case 1	0~100 kPa-非均匀分布 0—100 kPa- non-uniform distribution	—	1.16	1.30
工况 2 Case 2	200 kPa-均匀分布 200 kPa- uniform distribution	74.52	1.41	1.49
工况 3 Case 3	100 kPa-均匀分布 100 kPa- uniform distribution	53.26	1.29	1.37
工况 4 Case 4	60 kPa-均匀分布 60 kPa- uniform distribution	44.76	1.23	1.30
工况 5 Case 5	30 kPa-均匀分布 30 kPa-uniform distribution	38.38	1.16	1.25
工况 6 Case 6	吸力丧失 Loss of matric suction	32.00	1.07	1.17

工况 3 中，基质吸力为 100 kPa 的均匀分布，安全系数为 1.29，潜在圆弧滑动面如图 6 所示。由于边坡中下部基质吸力比工况 1 相应位置高，使得边坡趋于稳定，边坡的安全系数有所增大，且潜在圆弧滑动面较深。

工况 4 中，基质吸力为 60 kPa 的均匀分布，安全系数为 1.23，潜在圆弧滑动面如图 7 所示。由于工况 4 中边坡基质吸力比工况 3 低，导致边坡的安全系数有所减小，且潜在圆弧滑动面略有上移。

工况 5 中，基质吸力为 30 kPa 的均匀分布，安全系数为 1.16，潜在滑动面如图 8 所示。由于工况 5 中基质吸力较低，导致边坡的安全系数继续减小，且潜在圆弧滑动面继续上移。该工况的安全系数与工况 1 相等，且潜在滑动面位置接近，表明基质吸力为 30 kPa 的均匀分布与基质吸力为 0~100 kPa 的非均匀分布，二者的边坡稳定性在一定程度上较为

接近。该结果与 Bishop 条分法计算中只考虑滑动面上的吸力有关，因假定滑动面越深则饱和度越大，基质吸力也相对较小，故而安全系数也越小，表明该法低估了基质吸力的作用和影响。

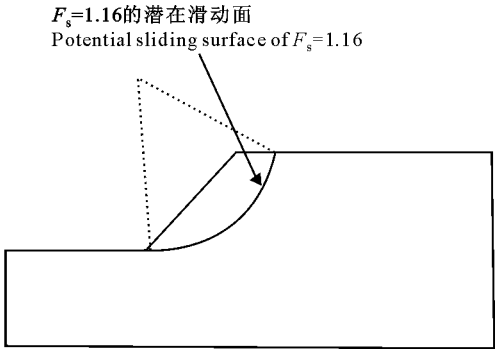


图 5 工况 1 的潜在滑动面
Fig. 5 Potential sliding surface in case 1

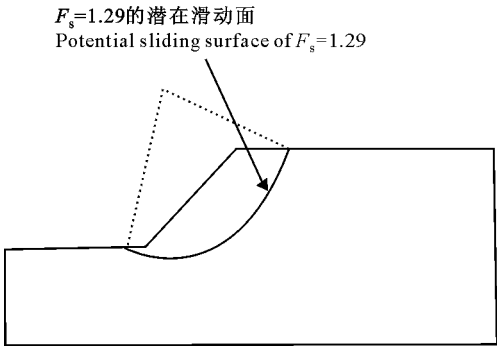
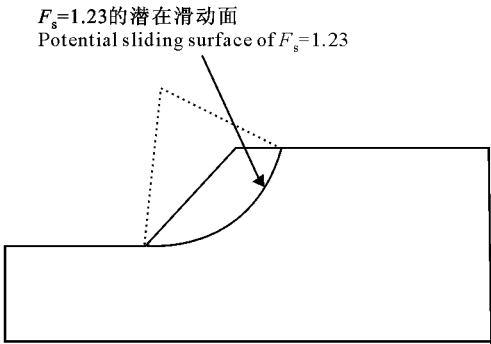


图 6 工况 3 的潜在滑动面
Fig. 6 Potential sliding surface in case 3

工况 6 中，基质吸力完全丧失，安全系数为 1.07，潜在滑动面如图 9 所示。由于基质吸力完全丧失，导致边坡的安全系数减小，且潜在圆弧滑动面



有明显上移现象。
综合分析表 1 计算结果及各工况下潜在滑动面的位置可知，随着基质吸力的减小，安全系数也逐步

减小,潜在圆弧滑动面位置有不同的上移趋势,表明基质吸力及其分布对非饱和土边坡稳定性和潜在圆

弧滑动面位置均有一定的影响。

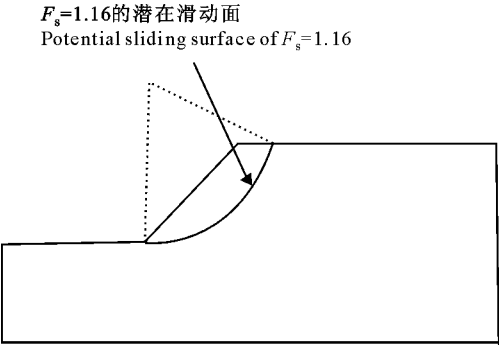


图 8 工况 5 的潜在滑动面

Fig. 8 Potential sliding surface in case 5

Bishop 条分法的计算结果在条分法分析范畴内的分析是合理的,不仅可以分析出基质吸力减小使得安全系数减小,而且可以分析出圆弧滑动面有向坡体上部发展的趋势。

Bishop 工况 1 中,基质吸力为 0~100 kPa 的非均匀分布,安全系数接近于基质吸力均匀分布且较低(30 kPa)的工况 5,这表明由于 Bishop 条分法只考虑假定滑动面上的基质吸力,在计算方法原理上简化或忽略条间内力,而无法考虑边坡上部土体条间基质吸力对稳定性影响,因此低估了基质吸力的实际作用和影响。

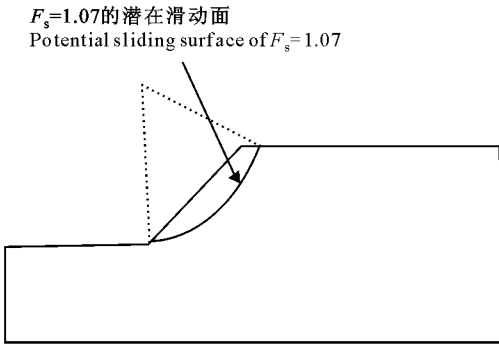


图 9 工况 6 的潜在滑动面

Fig. 9 Potential sliding surface in case 6

2.3 强度折减有限元法的计算分析

针对 2.1 节图 4 所示边坡建立了有限元模型,单元数为 526,结点数为 582,边界条件为左右两侧水平约束,下部固定,上部为自由边界(图 10)。根据土坡的经验含水量分布^[2]和地下水位线,得到了土坡的一个非均匀分布基质吸力(0~100 kPa)(图 11)。坡面和坡脚处基质吸力分布明显不均匀,这在 Bishop 条分法中是无法展开相关计算分析的。采用编制的非饱和土强度折减有限元计算程序,对表 1 中所列的 6 个工况进行了计算分析。

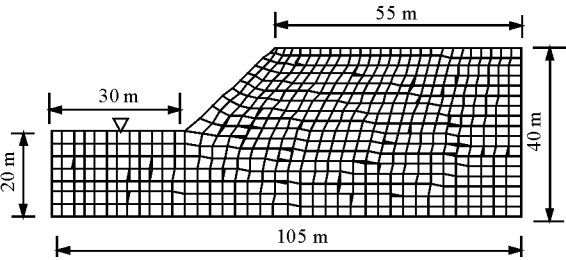


图 10 某边坡工程剖面的有限元网格

Fig. 10 Finite element mesh of section in a slope engineering

工况 1 中,基质吸力为 0~100 kPa 的非均匀分布,其安全系数与工况 4 中基质吸力为 60 kPa 均匀分布条件下的安全系数相等,均为 1.30,但在坡底的潜在滑动面的位置略有不同(图 12、图 13),且潜在滑动面并不是 Bishop 条分法中假定的圆弧状。这是由于工况 1 坡体上部基质吸力较大,使得该处土体的有效应力及非饱和土体强度均较大,从而导致相应的潜在滑动面略深且略靠后一些。与 Bishop 条分法计算结果的对比分析表明,强度折减有限元法可以考虑边坡上部土体中基质吸力对于边坡稳

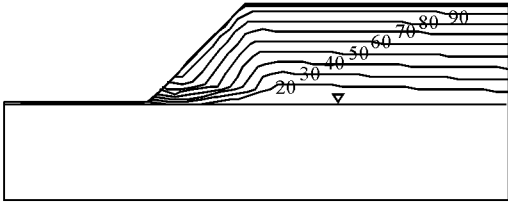


图 11 工况 1 中基质吸力(kPa)分布的等值线

Fig. 11 Contour of suction(kPa)in case 1

定性的贡献,表明边坡上部吸力对边坡稳定性具有明显的影响。

工况 5 中,基质吸力为 30 kPa,安全系数为1.25,潜在滑动面如图 14 所示。由于基质吸力较低,导致边坡的安全系数减小,潜在滑动面有较大上移。

工况 6 中,由于基质吸力完全丧失,导致边坡的安全系数减小为 1.17,潜在滑动面有明显上移现象(图 15)。

2.4 Bishop 条分法与强度折减有限元法的比较分析

对比 2 种方法的计算结果可知,二者有较大差

异。而这种差异正是由于 2 种方法的前提假设条 件、理论基础和方法不同等共同造成的。

$F_s=1.30$ 的潜在滑动面
Potential sliding surface of $F_s=1.30$

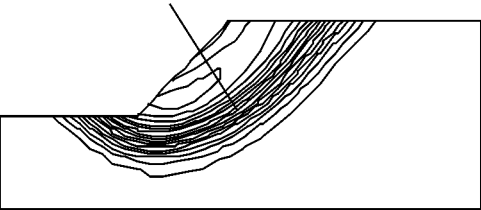


图 12 工况 1 位移增量(m)的等值线

Fig. 12 Contour of disp. increment(m)in case 1

$F_s=1.30$ 的潜在滑动面
Potential sliding surface of $F_s=1.30$

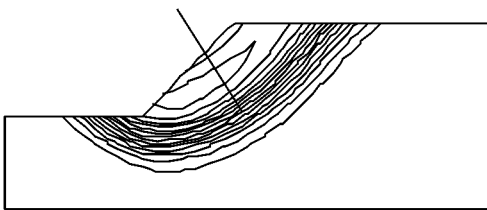


图 13 工况 4 位移增量(m)的等值线

Fig. 13 Contour of disp. increment(m)in case 4

$F_s=1.25$ 的潜在滑动面
Potential sliding surface of $F_s=1.25$

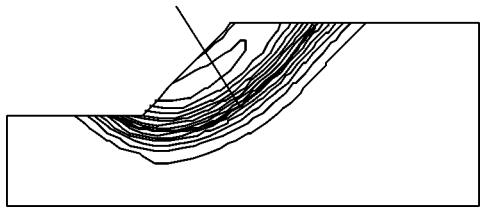


图 14 工况 5 的位移增量(m)的等值线

Fig. 14 Contour of disp. increment(m)in case 5

$F_s=1.17$ 的潜在滑动面
Potential sliding surface of $F_s=1.17$

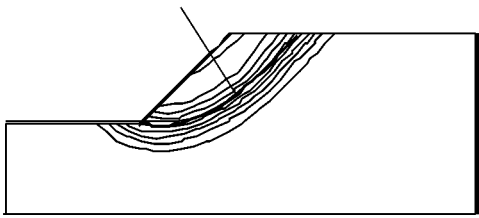


图 15 工况 6 的位移增量(m)的等值线

Fig. 15 Contour of disp. increment(m)in case 6

Bishop 条分法计算结果在条分法分析范畴内是合理的,在假定圆弧滑动面的条件下,不仅可以大致分析基质吸力减小使得安全系数减小,而且可以分析出圆弧滑动面有向坡体上部发展的趋势;而强度折减有限元法不仅可以分析基质吸力减小使得安全系数减小和滑动面出现上移趋势,并且可清楚地看出由其确定的潜在滑动面并非圆弧滑动面。

由于 Bishop 条分法在简化条间内力的基础上采用了圆弧滑动面的假设,从而无法细致、准确地考虑基质吸力导致的边坡土体强度不均匀性。因此,对于 Bishop 条分法而言,一方面,只有在土层水平分层条件下可以近似考虑基质吸力的非均匀分布,而这不仅会在计算实施中导致较大的困难,而且给边坡稳定极值搜索带来了相当大的困难;另一方面,Bishop 条分法简化或忽略条间内力,而无法考虑边坡上部土条之间基质吸力对稳定性影响的问题,从而低估了基质吸力对稳定性的实际贡献。

在 Bishop 条分法计算中,工况 1 的安全系数接近于基质吸力较小(30 kPa)且均匀分布的工况 5;在强度折减有限元法计算中,工况 1 的安全系数却与基质吸力较大(60 kPa)且均匀分布的工况 4 相等。分析这种现象的内在机理可知:一方面,这种计算差异表明 Bishop 条分法由于简化条间内力从而无法考虑边坡上部土条之间基质吸力对稳定性的影

响,而强度折减有限元法可以合理考虑坡体上部的基质吸力,且计算分析表明,坡体上部基质吸力对边坡的稳定性有明显影响,从而使得计算分析更加接近实际工程中边坡基质吸力非均匀分布的情况;另一方面,这种差异也证明了 Bishop 条分法由于简化了条间内力,从而低估了坡体上部基质吸力对边坡稳定性的影响。

在边坡工程应用中,为了使边坡稳定计算方便和快捷,在基质吸力为 0~100 kPa 非均匀分布的非饱和土边坡稳定性分析中,可以对基质吸力分布进行简化处理,因此针对 2 种方法可采取不同的简化措施:若采用 Bishop 条分法,可采用基质吸力为 30 kPa 均匀分布来简化计算边坡稳定性;而若采用强度折减有限元法,则采用基质吸力为 60 kPa 均匀分布进行边坡稳定性计算。因此,对非饱和土边坡工程稳定性分析中基质吸力计算的简化,本研究针对 2 种方法提供了不同基质吸力简化处理措施。

通过以上讨论分析可以看出,2 种方法均可以分析出,基质吸力及其分布对非饱和土边坡稳定性和潜在滑动面位置均有不同影响,但基于弹塑性理论的强度折减有限元法的分析结果更为细致而合理,明显优于 Bishop 条分法。

综上所述,条分法难以分析具有复杂基质吸力分布的非饱和边坡的稳定性,且往往会低估基质吸

力对边坡稳定性的影响;而基于弹塑性理论的强度折减有限元法在理论上较为完善,其可以考虑任意复杂条件下非饱和边坡的稳定性计算问题,并可以给出一个合理的安全系数,在潜在滑动面的确定上,更能体现出强度折减有限元法独特的优越性,因此强度折减有限元法为非饱和土边坡稳定分析提供了更合理的数值计算方法。

3 结 论

1) 将简化的 Bishop 条分法和强度折减有限元法应用于非饱和土边坡稳定的分析中,这在理论上、数值计算实现上都是可行的。

2) 由于基质吸力非均匀分布导致坡体土的强度非均匀分布,使得 Bishop 条分法搜索潜在滑动面的计算相当困难,即难于准确地寻找潜在滑动面;而强度折减有限元法可通过破坏时变形场的最大剪应变增量的等值线或位移增量等值线分布,确定出最危险滑动面的位置。

3) Bishop 条分法和强度折减有限元法确定的潜在滑动面的形状和位置均不同,前者假设滑动面是圆弧,而后者确定的潜在滑动面并不是圆弧。

4) 随着基质吸力的逐步丧失,非饱和土边坡的安全系数也逐渐减小,但是 Bishop 条分法中潜在滑动面的上移趋势明显小于强度折减有限元法。

5) Bishop 条分法计算中只能考虑假定滑动面上的基质吸力,且由于简化了条间内力,从而无法考虑边坡上部非饱和土体条间基质吸力对稳定性的影响;而强度折减有限元法可以合理考虑上部坡体的基质吸力,且计算分析表明,上部坡体基质吸力对边坡的稳定系数和潜在滑动面位置均有明显的影响。另外,Bishop 条分法由于简化了条间内力而低估了基质吸力对边坡稳定性的影响。

6) 在基质吸力为 0~100 kPa 非均匀分布的非饱和土边坡稳定性分析中,采用 Bishop 条分法计算的安全系数接近于基质吸力为 30 kPa 均匀分布条件下边坡的安全系数,而采用强度折减有限元法计算的安全系数却与基质吸力为 60 kPa 均匀分布条件下的安全系数相等;二者在潜在滑动面位置方面均略有差异。同时,在非饱和土边坡工程稳定性分析中简化基质吸力计算方面,本结论针对 2 种方法提出了不同的简化处理措施。总之,本研究结论不仅指出了 Bishop 条分法由于简化了条间内力从而低估了基质吸力对边坡稳定性的影响,而且通过 2 种方法对比的结论,可以为实际工程中边坡稳定分

析方法的选择提供参考依据,同时可为非饱和土边坡工程中简化基质吸力计算提供了可行的依据。

[参考文献]

- [1] 郭 璇,赵成刚,于威威.非饱和土边坡稳定的安全分析及进展[J].中国安全科学学报,2005,15(1):14-18.
Guo X,Zhao C G,Yu W W. Stability analysis of unsaturated soil slope and its progress [J]. China Safety Science Journal, 2005,15(1):14-18. (in Chinese)
- [2] Fredlund D G,Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. New York:Wiley,1993.
- [3] 李兆平,张 弥.考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J].土木工程学报,2001,34(5):57-61.
Li Z P,Zhang M. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope [J]. China Civil Engineering Journal, 2001,34(5):57-61. (in Chinese)
- [4] 龚壁卫,吴昌瑜.堤防非饱和边坡稳定分析方法探讨[J].长江科学院院报,2003,20(3):39-42.
Gong B W,Wu C Y. Probe into stability analysis of the dike slope of unsaturated soils [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2003,20(3):39-42. (in Chinese)
- [5] 吴俊杰,王成华,李广信.非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J].岩土力学,2004,25(5):732-736.
Wu J J,Wang C H,Li G X. Influence of matric suction in unsaturated soils on slope stability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(5):732-736. (in Chinese)
- [6] Zienkiewicz O C,Humpheson C,Lewis R W. Associated and nonassociated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. Geotechnique,1975,25(4):671-689.
- [7] Ugai K. A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM [J]. Soils and Foundations,1989,29(2):190-195.
- [8] Griffiths D V,Lane P A. Slope stability analysis by finite element [J]. Geotechnique,1999,49(3):387-403.
- [9] 李荣建,于玉贞,邓丽军,等.非饱和土边坡稳定分析方法探讨[J].岩土力学,2007,28(10):2060-2064.
Li R J,Yu Y Z,Deng L J,et al. Discussion on stability analysis of unsaturated soil slope [J]. Rock and soil Mechanics,2007,28(10):2060-2064. (in Chinese)
- [10] Li R J,Yu Y Z,Deng L J,et al. Stability analysis of unsaturated soil slope by 3-D strength reduction FEM [C]//Ning L,Laureano R H,Lakshmi R. Advances in Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics. Reston: ASCE, Geotechnical Special Publication,2006:62-69.
- [11] 李荣建,于玉贞,李广信.抗滑桩加固非饱和土边坡三维稳定性分析[J].岩土力学,2008,29(4):968-972.
Li R J,Yu Y Z,Li G X. 3D global stability analyses of unsaturated soil slope reinforced with piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008,29(4):968-972. (in Chinese)
- [12] Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes [J]. Geotechnique,1955,5:7-17.