

考虑孔隙水压力的土坡稳定性的有限元上限分析

第六图书馆

基于塑性极限分析的上限定理, 考虑孔隙水压力的影响, 以结点速度为未知量, 根据塑性流动约束条件、速度间断约束条件、速度边界约束条件以及由外功功率与内功功率相等条件得到的目标函数, 建立了求解孔隙水压力条件下土坡稳定性的有限元塑性极限分析线性规划数学模型; 可求得边坡安全系数的上限值及相应的机动容许位移场; 最后对2个经典算例进行了分析, 验证了提出方法和程序是正确可行的。基于塑性极限分析的上限定理, 考虑孔隙水压力的影响, 以结点速度为未知量, 根据塑性流动约束条件、速度间断约束条件、速度边界约束条件以及由外功功率与内功功率相等条件得到的目标函数, 建立了求解孔隙水压力条件下土坡稳定性的有限元塑性极限分析线性规划数学模型; 可求得边坡安全系数的上限值及相应的机动容许位移场; 最后对2个经典算例进行了分析, 验证了提出方法和程序是正确可行的。塑性极限分析 上限法 孔隙水压力 边坡稳定 线性规划岩土力学王均星 李泽武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉4300722007第六图书馆

第六图书馆

www.6lib.com

考虑孔隙水压力的土坡稳定性的有限元上限分析

王均星, 李 泽

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 基于塑性极限分析的上限定理, 考虑孔隙水压力的影响, 以结点速度为未知量, 根据塑性流动约束条件、速度间断约束条件、速度边界约束条件以及由外功功率与内功功率相等条件得到的目标函数, 建立了求解孔隙水压力条件下土坡稳定性的有限元塑性极限分析线性规划数学模型; 可求得边坡安全系数的上限值及相应的机动容许位移场; 最后对 2 个经典算例进行了分析, 验证了提出方法和程序是正确可行的。

关 键 词: 塑性极限分析; 上限法; 孔隙水压力; 边坡稳定; 线性规划

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

Upper bound analysis of stability of soil slope subjected to pore water pressure using finite elements

WANG Jun-xing, LI Ze

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the theory of upper bound limit analysis, the velocities of the nodes are regarded as unknown quantity, with the conditions of flow rule, velocity discontinuity, velocity boundary, the energy-work balance equation, the linear programming model of stability of slope subjected to pore water pressure are established. The pore water pressure is considered as an external force. Then the upper limit value of the safety coefficients of slopes, and the corresponding kinematically admissible velocity fields are obtained. Finally, using the proposed method, the stability of two classical soil slopes are calculated; and the results demonstrate the correctness of the method.

Key words: plastic limit analysis; upper bound; pore water pressure; slope stability; linear programming

1 前 言

上限法又称为机构法, 如果在受力物体中存在某一个速度场, 它同时满足: 几何相容性条件、速度边界条件、外力功率大于等于零的条件, 则这样的速度场称为机动许可速度场。在一个变形体内, 可以构造出无数个符合上述条件的机动许可速度场, 并且可一一寻求其对应的荷载, 根据上限定理, 其中最小的荷载必然最接近真实的极限荷载。

Sloan 提出了有限元塑性极限分析上限法的基本数学模型^[1], 这为极限分析的发展开辟了新的道路。此后, 许多学者致力于此领域的研究工作, 如 J.kim^[2,3], 殷建华^[4]等在有限元塑性极限分析的理论及应用方面做出了重要贡献。笔者等也一直从事塑性极限分析理论与应用的研究工作, 已将有限元塑性极限分析应用于边坡^[5,6]、重力坝^[7]的稳定性分

析。在以往的研究工作中对于坡体内地下水的影响未能很好地模拟, 然而影响边坡工程稳定性的各种因素中地下水的作用是不可忽视的, 它的影响往往是许多工程失事的直接原因。本文基于已有的工作, 在有限元塑性极限分析上限法中考虑孔隙水压力的作用, 这对有限元塑性极限分析法在岩土领域的应用有着重要的理论意义。

2 考虑孔隙水压力的上限法数学模型

在考虑孔隙水压力条件下, 应用塑性极限分析上限定理可以建立边坡稳定的有限元塑性极限分析上限法数学规划模型。

2.1 孔隙水压力

由于研究处于初步阶段, 本文中对孔隙水压力作如下简化: (1) 简化孔隙水压力的影响, 不考虑动水作用, 只考虑静水压力对边坡稳定性的影响;

(2) 假定土体内流场的等势线是铅直的, 某点的孔隙水压力的水头等于该点至浸润线的铅直距离; (3) 根据有效应力原理, 采用“水土分算”原则, 即把土骨架当作有限元极限分析法中的研究对象, 把孔隙水压力当作是一种外力荷载作用于土骨架上。

2.2 结构的离散

结构的离散方式与文[6]相似, 只是每个结点的变量包括速度变量与孔隙水压力变量, 如图 1 所示。

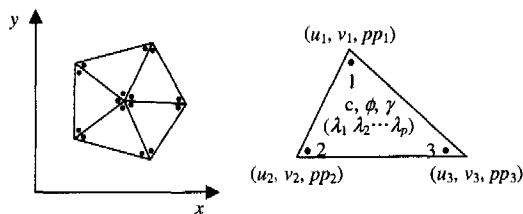


图 1 上限法单元模式

Fig.1 Triangle element of upper bound method

2.3 上限法约束条件

上限法约束条件包括^[6]塑性流动约束条件、速度间断面的约束条件、速度边界约束条件以及内功功率与外功功率相等约束条件。在考虑孔隙水压力的影响时, 孔隙水压力被看作一种外力荷载, 被记入内功功率与外功功率相等约束条件中, 因此在本文中上限法约束条件中的塑性流动约束条件、速度间断面的约束条件、速度边界约束条件, 都可以沿用文[6]的表达形式, 这里主要介绍内功功率与外功功率相等约束条件的建立方法。

2.3.1 内功功率

外功功率(耗散)是指应力分量在相应的应变率上所做的功, 因为塑性流动既发生在连续体上, 又发生在速度间断面上, 所以内功功率包括连续体的内功功率和速度间断面上的内功功率。

(1) 连续体的内功功率

对于各向同性材料, 每一个三角形单元的内功功率可按式计算:

$$W_{\text{内}}^e = \iint_{A^e} (\dot{\epsilon}_x \sigma'_x + \dot{\epsilon}_y \sigma'_y + \dot{\gamma}_{xy} \tau_{xy}) dA = \iint_{A^e} \sum_{k=1}^p \lambda_k \left(\frac{\partial F_k}{\partial \sigma'_x} \sigma'_x + \frac{\partial F_k}{\partial \sigma'_y} \sigma'_y + \frac{\partial F_k}{\partial \tau_{xy}} \tau_{xy} \right) dA = (1) \iint_{A^e} \sum_{k=1}^p [\lambda_k (A_k \sigma'_x + B_k \sigma'_y + C_k \tau_{xy})] dA$$

根据文[6], 上式可写为

$$W_{\text{内}}^e = \iint_{A^e} \sum_{k=1}^p \lambda_k (2c \cos \phi) dA = 2c^e \cos \phi^e A^e \sum_{k=1}^p \lambda_k \quad (2)$$

写成矩阵形式为

$$W_{\text{内}}^e = (c_{\text{power}}^e)^T x_2 \quad (3)$$

式中: $c_{\text{power}}^e = 2A^e c^e \cos \phi^e [1 \dots 1]^T$, $x_2 = \{\dot{\lambda}_1 \dot{\lambda}_2 \dots \dot{\lambda}_p\}^T \geq 0$ 。

(2) 速度间断面上的内功功率

对于速度间断面, 其内功功率可按式计算:

$$W_{\text{内}}^d = \lim_{z \rightarrow 0} \int_0^z \int_0^l (\sigma'_n \dot{\epsilon}_n + \tau_s \dot{\gamma}_s) ds dt = \lim_{z \rightarrow 0} \int_0^z \int_0^l \left[\sigma'_n \left(\dot{\lambda}_1 \frac{\partial f_1}{\partial \sigma'_n} + \dot{\lambda}_2 \frac{\partial f_2}{\partial \sigma'_n} \right) + \tau_s \left(\dot{\lambda}_1 \frac{\partial f_1}{\partial \tau_s} + \dot{\lambda}_2 \frac{\partial f_2}{\partial \tau_s} \right) \right] ds dt = \int_0^l \lim_{z \rightarrow 0} \int_0^z c (\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2) dt ds = \int_0^l c (\dot{k}_1 + \dot{k}_2) ds$$

式中: f_1 、 f_2 为速度间断面屈服函数; l 为速度间断边的长度; c 为速度间断面的凝聚力。式(4)写成矩阵形式为

$$W_{\text{内}}^d = (c_{\text{power}}^d)^T x_3 \quad (5)$$

式中: $c_{\text{power}}^d = \frac{1}{2} c l \{1 \ 1 \ 1\}^T$; $x_3 = \{\dot{k}_1^{(1,2)^k} \dot{k}_2^{(1,2)^k} \dots \dot{k}_2^{(3,4)^k}\}^T \geq 0$, k 为公共边的序号。

2.3.2 外功功率

外功功率包括由孔隙水压力、自重、结点荷载在结点速度上所做的功率。

(1) 孔隙水压力所做的外功功率

孔隙水压力在土体骨架上所做的外功功率可以表示为

$$W_{\text{外}}^p = W_{\text{外}}^{\text{pe}} + W_{\text{外}}^{\text{pd}} \quad (6)$$

式中: $W_{\text{外}}^{\text{pe}}$ 为孔隙水压力在连续体内所做的外功功率; $W_{\text{外}}^{\text{pd}}$ 为孔隙水压力在速度间断面上所做的外功功率。

孔隙水压力在连续体内所做的外功功率为

$$W_{\text{外}}^{\text{pe}} = \int_A \overline{pp} (\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y) dA = \int_A \overline{pp} \left[\sum_{k=1}^p \lambda_k (2 \sin \phi) \right] dA = 2 \overline{pp} A \sin \phi \sum_{k=1}^p \lambda_k \quad (7)$$

将式(7)写成矩阵形式:

$$W_{\text{外}}^{\text{pe}} = (c_{\text{work}}^{\text{pe}})^T x_2 \quad (8)$$

式中: $\overline{pp} = (pp_1 + pp_2 + pp_3)/3$; $c_{\text{work}}^{\text{pe}} = 2 \overline{pp} A \sin \phi [1, 1, \dots, 1]^T$; $x_2 = \{\dot{\lambda}_1 \dot{\lambda}_2 \dots \dot{\lambda}_k \dots \dot{\lambda}_p\}^T$, 且 $x_2 \geq 0$ 。

孔隙水压力在速度间断面上所做的外功功率为

$$W_{\text{外}}^{\text{pd}} = \int_L \left\{ pp_1^{\text{d}} + \frac{\xi}{L^d} (pp_3^{\text{d}} - pp_1^{\text{d}}) \right\} \cdot \left\{ \Delta v_{12}^{\text{d}} + \frac{\xi}{L^d} (\Delta v_{34}^{\text{d}} - \Delta v_{12}^{\text{d}}) \right\} d\xi = L^d \tan \phi \left\{ \left(\frac{pp_1^{\text{d}}}{3} + \frac{pp_3^{\text{d}}}{6} \right) (\dot{k}_1^{(1,2)^k} + \dot{k}_2^{(1,2)^k}) + \left(\frac{pp_1^{\text{d}}}{6} + \frac{pp_3^{\text{d}}}{3} \right) (\dot{k}_1^{(3,4)^k} + \dot{k}_2^{(3,4)^k}) \right\} \quad (9)$$

将式(9)写成矩阵形式:

$$W_{\text{外}}^{\text{pd}} = (c_{\text{work}}^{\text{pd}})^T x_3 \quad (10)$$

式中: $c_{\text{work}}^{\text{pd}} = \frac{L^d}{6} \tan \phi \{ 2pp_1^{\text{d}} + pp_3^{\text{d}} \quad 2pp_1^{\text{d}} + pp_3^{\text{d}} \quad pp_1^{\text{d}} + 2pp_3^{\text{d}} \quad pp_1^{\text{d}} + 2pp_3^{\text{d}} \}^T$; $x_3 = \{ \dot{k}_1^{(1,2)^k} \quad \dot{k}_2^{(1,2)^k} \quad \dot{k}_1^{(3,4)^k} \quad \dot{k}_2^{(3,4)^k} \}^T \geq 0$.

(2) 重力所做的外功功率

平面应变条件下由自重所做的外功功率为

$$W_{\text{外}}^g = - \int_{A^e} \gamma v dA = - \gamma \int_{A^e} v dA = - \gamma \bar{v}^e A^e \quad (11)$$

式中 $\bar{v}^e = (v_1^e + v_2^e + v_3^e)/3$, 规定向上为正方向。

将式(11)写成矩阵形式为

$$W_{\text{外}}^g = (c_{\text{work}}^g)^T x_1 \quad (12)$$

式中

$$c_{\text{work}}^g = - \frac{\gamma A^e}{3} \{ 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \}^T, \quad x_1 = \{ u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3 \}^T \quad (13)$$

(3) 其他结点荷载所做的外功功率

除了孔隙水压力、重力外, 一般还有边界集中荷载、面荷载等, 这些荷载都可以通过等效移植到边界结点上, 从而可以计算出其在位移增量上所做功的功率。写成矩阵形式为

$$W_{\text{外}}^{\text{load}} = (c_{\text{work}}^{\text{load}})^T x_1 \quad (14)$$

式中: $x_1 = [u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad \dots \quad u_{np} \quad v_{np}]^T$, np 为结点总数; $c_{\text{work}}^{\text{load}} = \{ p_{x1} \quad p_{y1} \quad p_{x2} \quad p_{y2} \quad \dots \quad p_{xnp} \quad p_{ynp} \}^T$ 为等效结点荷载列向量。

2.3.3 内功功率与外功功率相等条件

总的内功功率为

$$W_{\text{内}} = W_{\text{内}}^e + W_{\text{内}}^d = (c_{\text{power}}^e)^T x_2 + (c_{\text{power}}^d)^T x_3 \quad (15)$$

总的 $\left(\frac{pp_1^{\text{d}}}{6} + \frac{pp_3^{\text{d}}}{3} \right) (\dot{k}_1^{(3,4)^k} + \dot{k}_2^{(3,4)^k})$ 外功功率为

$$W_{\text{外}} = W_{\text{外}}^{\text{p}} + W_{\text{外}}^g + W_{\text{外}}^{\text{load}} = (c_{\text{work}}^{\text{pe}})^T x_2 + (c_{\text{work}}^{\text{pd}})^T x_3 + (c_{\text{work}}^g)^T x_1 + (c_{\text{work}}^{\text{load}})^T x_1 \quad (16)$$

由虚功原理可知, $W_{\text{内}}$ 、 $W_{\text{外}}$ 必须满足以下条件:

$$W_{\text{内}} = W_{\text{外}} \quad (17)$$

2.4 上限法目标函数

根据需要, 本文建立两种目标函数, 即求解超载系数的目标函数以及求解强度储备系数的目标函数。

2.4.1 求超载系数的目标函数

将结点荷载分为超载部分和不超载部分, 外功功率可改写为

$$W_{\text{外}} = k_1 \{p\}_1^T x_1 + \{p\}_0^T x \quad (18)$$

式中: $\{p\}_1^T$ 为超载的外荷载移置到结点上的等效结点荷载; $\{p\}_0^T$ 为不超载的外荷载移置到结点上的等效结点荷载;

当以重度为超载对象求重度的最大值时, 重度为可变荷载, 外荷载不变, 此时

$$\left. \begin{aligned} \{p\}_1^T x_1 &= (c_{\text{work}}^g)^T x_1; \\ \{p\}_0^T x &= (c_{\text{work}}^{\text{load}})^T x_1 + (c_{\text{work}}^{\text{pe}})^T x_2 + (c_{\text{work}}^{\text{pd}})^T x_3 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

当以外荷载为超载对象, 求外荷载的最大值时外荷载为可变荷载, 重度不变, 此时

$$\left. \begin{aligned} \{p\}_1^T x_1 &= (c_{\text{work}}^{\text{load}})^T x_1; \\ \{p\}_0^T x &= (c_{\text{work}}^g)^T x_1 + (c_{\text{work}}^{\text{pe}})^T x_2 + (c_{\text{work}}^{\text{pd}})^T x_3 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

由 $W_{\text{内}} = W_{\text{外}}$ 得

$$W_{\text{内}} = k_1 \{p\}_1^T x_1 + \{p\}_0^T x \quad (21)$$

由于是求解破坏机构, 仅与 $\{x_1\}$ 的相对大小有关, 且由于要保证外力做正功, 则令

$$\{p\}_1^T x_1 = 1.0 \quad (22)$$

于是由式(18)可得:

$$k_1 = W_{\text{内}} - \{p\}_0^T x = (c_{\text{power}}^e)^T x_2 + (c_{\text{power}}^d)^T x_3 - \{p\}_0^T x \quad (23)$$

通过内功功率对单元和不连续面的累加及虚功率原理, 可得到整体目标函数:

$$\min: k_1 = C_1^T X_1 + C_2^T X_2 + C_3^T X_3 \quad (24)$$

式中: k_1 为超载系数; $C_1^T = -(c_{\text{work}}^g)^T$ (重度超载时), 或 $C_1^T = -(c_{\text{work}}^{\text{load}})^T$ (外力超载时), $C_2^T = (c_{\text{power}}^e)^T - (c_{\text{work}}^{\text{pe}})^T$; $C_3^T = (c_{\text{power}}^d)^T - (c_{\text{work}}^{\text{pd}})^T$ 。

2.4.2 求强度储备系数的目标函数

边坡稳定的强度储备系数为: 将土的抗剪强度指标降低 k_2 倍, 此时坡体刚好达到极限状态, 则 k_2 称为强度储备系数, 即 $k_2 = \tan \phi / \tan \phi_0 = c / c_0$ 。上述将强度储备系数作为安全系数的定义方法是经过

多年的实践被工程界广泛承认的一种做法。为了避免非线性规划问题, 本文通过迭代求解超载系数 k_1 , 使超载系数 k_1 充分接近 1 来求解强度储备系数。

2.5 线性数学规划模型及其最优化

根据前述推导, 由得到的目标函数式 (24) 以及文[6]中的上限法约束条件: 塑性流动约束条件、速度间断面约束条件、速度边界约束条件, 可以得到考虑孔隙水压力条件下的上限法数学规划模型:

$$\begin{aligned} \min: & \quad k_1 = C_1^T X_1 + C_2^T X_2 + C_3^T X_3; \\ & \quad A_{11}X_1 - A_{12}X_2 = 0; A_{21}X_1 - A_{23}X_3 = 0 \\ \text{subject to: } & \quad A_3X_1 = B_3, X_2 \geq 0, X_3 \geq 0, \{p\}_1^T X_1 = 1.0 \end{aligned} \quad (25)$$

此线性规划问题的特点是约束矩阵的列数远多于行数, 适合采用单纯形法或内点算法求解。本文中采用内点算法对上限法数学规划模型进行优化求解。因为内点算法的迭代次数几乎与线性规划问题的规模无关, 一般迭代 20~40 次均能正常收敛, 所以线性规划问题的规模越大, 其相对优势越明显。

3 程序

根据所建立的数学模型, 编制了考虑孔隙水压力的边坡稳定分析上限法程序 UBLFW.EXE, 程序框图见图 2。

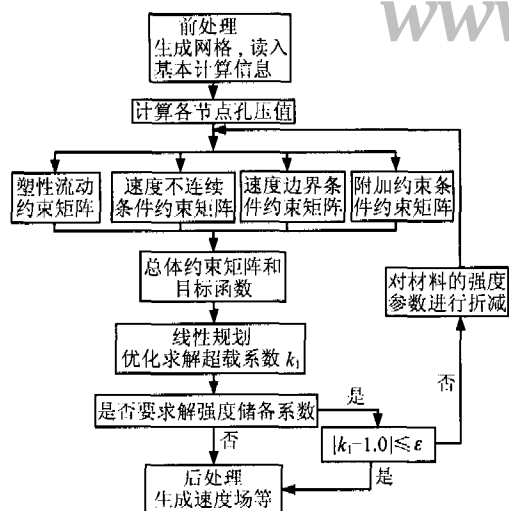


图 2 程序框图

Fig.2 Flow chart

4 算例

根据编制的程序本文对 2 个土坡算例进行了计算分析。

4.1 均质土坡算例

土坡剖面示意图见图 3。计算方案为: 深度系

数 $D=2$, $H=10$ m, $\beta=45^\circ$, 均质土体材料性质: $\gamma=18$ kN/m³, $c'=20$ kPa, $\phi'=15^\circ$ 。水头高度分别取: $H_w=2, 4, 6$ m。本文同样采用 3 种不同密度的网格进行计算, 如图 4 所示。计算得到的安全系数 (强度储备系数) 列于表 1, 其中用 Bishop 法计算时采用文[8]中介绍的原理与程序。图 5 给出了 $H_w=4$ m 时由密网格得到的速度矢量图以及由 Bishop 法计算得到的临界圆弧滑裂面。

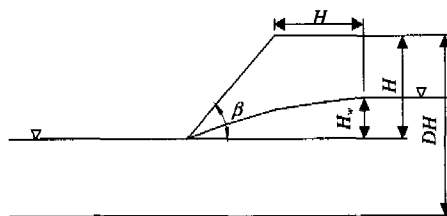


图 3 均质土坡断面示意图

Fig.3 Sketch of a simple homogeneous slope

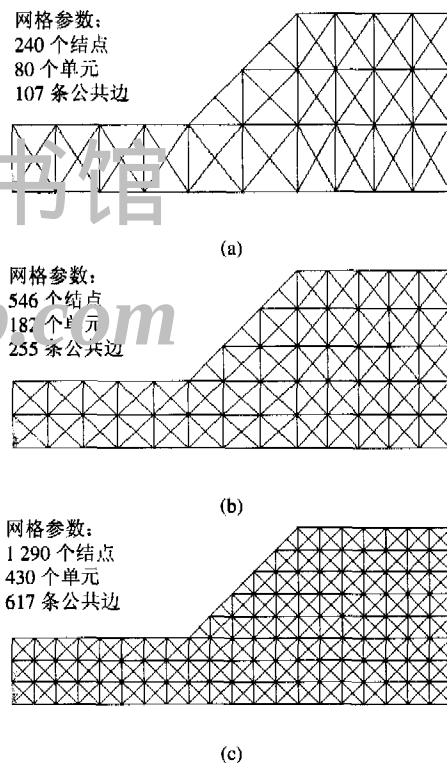


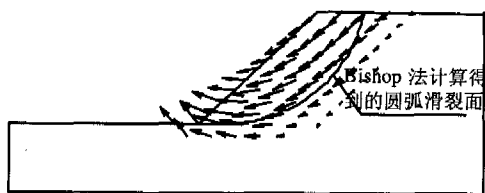
图 4 均质土坡有限元网格划分示意图

Fig.4 Grid of homogeneous slope for upper limit method

表 1 均质土坡安全系数计算结果

Table 1 Results of safety factors in example 1

H_w /m	K_{lm} 的计算结果		Bishop 法	殷建华 计算 结果	文[9] 下限法	本文方法	
	下限法	上限法				粗网格	细网格
2	1.101	1.23	1.106		1.048	1.184	1.169
4	1.036	1.166	1.078	1.202	1.001	1.072	1.061
6	0.971	1.068	1.025	1.096	0.964	1.019	1.011

图5 均质土坡极限状态速度矢量图 ($H_w = 4$ m)Fig.5 Velocity vector diagram of homogeneous slope ($H_w = 4$ m)

4.2 非均质土坡算例

图6所示边坡为一非均质边坡^[9], 边坡包含3个土层, 图中折线ABCDE为浸润线, 土体力学参数详见表2。此算例同样也采用三种不同密度的网格进行计算, 图7所示为密网格示意图, 计算得到的安全系数(强度储备系数)见表3。图8为密网格计算得到的速度矢量图, 以及由Bishop法计算得到的临界圆弧滑裂面。

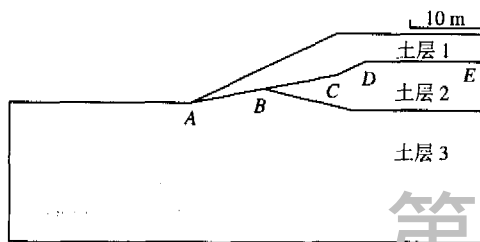


图6 非均质土坡断面示意图

Fig.6 An inhomogeneous slope

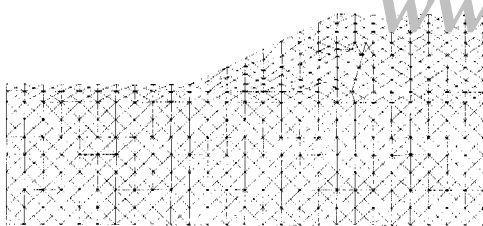


图7 非均质土坡有限元网格划分示意图(细网格)

Fig.7 Grid of inhomogeneous slope for upper limit method (fine mesh)

表2 算例2的土体材料力学参数

Table 2 Soil parameters in example 2

土层号	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 / $(^\circ)$	重度 γ /kN $\cdot$ m $^{-3}$
1	0.0	38.0	19.5
2	5.3	23.0	19.5
3	7.2	20.0	19.5

表3 非均质土坡安全系数计算结果

Table 3 Results of safety factors in example 2

Bishop 法	殷建华的 计算结果	本文方法		
		粗网格	中等网格	细网格
1.153	1.217	1.332	1.285	1.246

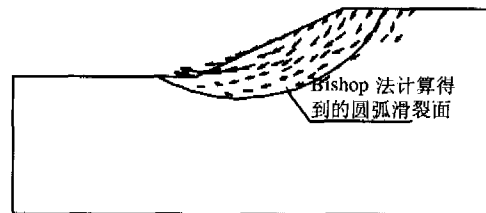


图8 非均质土坡极限状态速度矢量图

Fig.8 Velocity vector diagram of inhomogeneous slope

通过2个算例分析可知, 不同密度网格的边坡稳定安全系数计算结果随着网格的加密而逐渐减小, 但比较接近, 网格的疏密程度对计算精度的影响相对较小; 均质边坡算例中坡体的稳定安全系数随着地下水水头的升高而减小, 与实际规律吻合。2个算例计算得到的速度场反映了极限状态下各边坡体内的速度分布, 由此可以估计边坡破坏运动趋势, 其趋势与由Bishop法得到的临界圆弧滑裂面反映的运动趋势比较接近; 2个土坡运动趋势均为: 在平行于临空面方向、深度为6~8 m范围内的土体整体向临空面左下方滑动。下限法、上限法安全系数非常接近, 可以认为边坡的安全系数被界定在下限安全系数至上限安全系数这个小范围内, 这相对于刚体极限平衡法单一的安全系数来说, 能使边坡的稳定性更加明确。计算结果表明了本文方法与编制程序的正确性。

5 结 语

本文介绍了如何在有限元塑性极限分析上限法中考虑孔隙水压力的影响。由于研究处于初始阶段, 在研究过程中对孔隙水压力作了简化处理, 未能较精确地模拟土坡体内的孔隙水压力大小, 这是今后需要重点研究解决的问题。

参 考 文 献

- [1] Sloan S W. Upper bound limit analysis using discontinuous velocity fields[J]. *Computer Methods Application Mechanics Engineering*, 1995, 127: 293-314.
- [2] Kim J, Salgado R. Limit analysis of soil slopes subjected to pore-water pressures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 49: 49-57.
- [3] Jongmin Kim, Rodrigo Salgado, M ASCE, Junhwan Lee. Stability analysis of complex soil slopes using limit analysis[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, (7): 546-557.
- [4] 殷建华, 陈健, 李焯芬. 考虑孔隙水压力的土坡稳定性的刚体有限元上限分析[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(3): 273-277.

- YIN Jian-hua, CHEN Jian, LEE Chack-fan. A rigid finite element method for upper bound limit analysis of soil slopes subjected to pore water pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(3): 273—277.
- [5] 王汉辉, 王均星, 王开治. 边坡稳定的有限元塑性极限分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 733—738.
- WANG Han-hui, WANG Jun-xing, WANG Kai-zhi. Plastic limit analysis of slope stability using finite element[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 733—738.
- [6] 王均星, 王汉辉, 张优秀, 夏传星. 非均质土坡有限元塑性极限分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 415—421.
- WANG Jun-xing, WANG Han-hui, ZHANG You-xiu, et al. Plastic limit analysis of heterogeneous soil slope using finite elements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 415—421.
- [7] 王开治, 王均星. 重力坝塑性极限分析[J]. 大坝与安全, 2000, (4): 12—18.
- WANG Kai-zhi, WANG Jun-xing. Plastic limit analysis of gravity dam[J]. **Large Dam & Safety**, 2000, (4): 12—18.
- [8] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [9] 王均星, 李泽, 陈炜. 考虑孔隙水压力的土坡稳定性的有限元下限分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1 258—1 262.
- WANG Jun-xing, LI Ze, CHEN Wei. Lower bound analysis of soil slope stability using finite elements subjected to pore water pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1 258—1 262.

《岩土力学》2006 年第 9 期 (总 126) EI 收录论文 (43 篇, 收录率 99.8%)

No.	论文题名	作者	页 码
1	地层适应性盾构模型试验设计方法初探	朱合华, 徐前卫, 傅德明, 等	1437—1441
2	尾砂胶结充填体损伤模型及与岩体的匹配分析	刘志祥, 李夕兵, 戴塔根, 等	1442—1446
3	深部人工冻土在小应变条件下的刚度特性	王大雁, 马 巍, 常小晓, 等	1447—1451
4	昆仑山隧道冻融特征分析	王星华, 汤国璋	1452—1456
5	动载下 3 条断续裂隙岩样的裂缝贯通机制	张 平, 李 宁, 贺若兰, 等	1457—1464
6	基于 CT 数的煤岩单轴压缩破坏的分叉与混沌分析	尹光志, 黄 滚, 代高飞, 等	1465—1470
7	三维高阶数值流形方法研究	姜清辉, 邓书申, 周创兵	1471—1474
8	竖向排水井地基工后沉降预测	刘加才, 赵维炳, 施建勇, 等	1475—1479
9	混凝土重力坝多折面建基面稳定安全分析	蒋春艳, 党晓林, 周 伟, 等	1480—1484
10	基于不同客观本构关系的路基大变形固结分析	丁洲洋, 袁晓南, 谢永利, 等	1485—1489, 1500
11	基于野外水力试验的玄武岩渗透性及尺度效应	刘蓉琳, 梁 杏, 董玉贵	1490—1494
12	筒型基础负压沉流固耦合渗流分析模型	丁红岩, 张 超	1495—1500
13	地震分析中人工边界处理与地震动输入方法研究	邱流潮, 金 峰	1501—1504
14	空化射流在岩石破碎中的作用实验研究	向立英, 卢义玉, 李晓红, 等	1505—1508
15	武汉软土固结不排水应力-应变归一化特性分析	袁 强, 王 令, 王月山, 等	1509—1513, 1518
16	基于粗糙集的膨胀土分级指标重要性分析	丁加明, 王永和, 丁力行	1514—1518
17	分级施工河堤下高灵敏性黏土的强度增加	沈水龙, 余翊国, 蔡丰锡	1519—1522
18	锚索锚固力影响因素的试验分析研究	薛亚东, 黄宏伟	1523—1526
19	压实黏土的脆性断裂模型及有限元算法	李全明, 于玉贞, 张内印, 等	1527—1531, 1540
20	考虑生物降解的填埋场长期沉降研究	刘毓佩, 黄超强	1532—1534
21	边界面模型在 MARC 中的开发实现及应用	王 刚, 张建民	1535—1540
22	酸性环境下类砂岩材料物理性质的试验研究	霍润科, 李 宁, 张浩博	1541—1544
23	GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究	方祥位, 孙树国, 陈正汉, 等	1545—1548
24	降雨作用下砾石土斜坡面形态及临界特性	胡明鉴, 汪 稳, 孟庆山, 等	1549—1553
25	并行组合模拟退火算法在边坡稳定分析中的应用	吴余生, 陈胜宏	1554—1158
26	土钉支护结构的极限分析方法	屠毓敏, 王建江	1559—1562
27	高陡山区开采自然坡失稳分析的神经网络方法	李文秀, 杨少冲, 陈二忠, 等	1563—1566
28	考虑软土流变特性的沉降预测模型研究	王志亮, 黄景忠, 杨夏红	1567—1570
29	维持荷载作用下单桩沉降的时间效应	程泽海, 陈云敏, 夏建中	1571—1574
30	考虑基质吸力变化时非饱和土的一维本构模型	李顺群, 栾茂田, 杨 庆	1575—1578
31	高速公路工程中动态临界填筑高度的应用研究	邓永锋, 刘松玉, 洪振舜	1579—1582
32	基坑潜在隆起破裂面的 Dijkstra 组合优化搜索法	胡志平, 姚海明, 罗丽娟	1583—1587
33	RT 模式下刚性挡墙土压力计算方法研究	龚 慈, 魏 纲, 徐日庆	1588—1592
34	用双曲线法预测挤扩支盘桩的极限承载力	高笑娟, 朱向荣	1596—1600
35	海底缓坡场地地震侧移数值分析方法	邵广彪, 冯启民, 王华娟	1601—1606
36	运动荷载附近有限层厚软土地基的振动研究	刘干斌, 汪鹏程, 陈运平, 等	1607—1612
37	有机质含量对水泥土强度影响的室内定量研究	储诚富, 邵 俐, 刘松玉, 等	1613—1616
38	深层掏土纠偏法在桩基上多层建筑中的应用研究	朱方敏, 茜平一, 解家华, 等	1617—1621, 1627
39	中膨胀土 CMA 改性室内试验研究	余 颂, 陈善雄, 许锡昌, 等	1622—1627
40	强夯法施工参数的分析研究	吕秀杰, 龚晓南, 李建国	1628—1632
41	基于三维裂隙网络模拟的有限块体面积判断法	向晓辉, 王 俐, 葛修润, 等	1633—1636
42	不同含水条件下板岩力学实验研究与理论分析	冒海军, 杨春和, 黄小兰, 等	1637—1642
43	冲刷对桥墩稳定性影响的有限元分析	梁 错, 方理刚, 段靓靓	1643—1645