

文章编号: 1007-6492(2002)01-0025-03

饱和-非饱和渗流作用下边坡稳定分析的混合法

汪自力¹, 朱明霞², 高青伟³, 岳瑜素¹

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 郑州大学工程力学系, 河南 郑州 450002; 3. 河南建筑工程公司, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对边坡稳定分析条分法存在的问题, 在饱和-非饱和渗流不动网格有限元计算的基础上, 用土体单元所受的渗透力代替其周边的孔隙水压力, 达到利用渗流计算时的剖分网格和计算结果, 直接连续进行渗流作用下的边坡稳定分析的目的, 并采用数学规划中的单纯形法自动寻找最小安全系数。算例表明, 该方法具有一定的实用性, 并为考虑降雨等引起的饱和-非饱和和不稳定渗流作用下的边坡稳定问题的分析提供了实用的工具。

关键词: 边坡稳定; 条分法; 饱和-非饱和渗流; 有限元; 等参元; 单纯形法

中图分类号: TV 314 **文献标识码:** A

边坡稳定问题分析方法大致可分为两大类: 滑动面法和单位应力法。滑动面法中, 以毕肖普为代表的将滑动体分为条块的方法由于可近似地应用于非均质土的计算, 故在实际中经常应用。但由于该法在结合渗流场计算时不够方便且误差较大, 近年来对此改进的方法也在进行研究。文献[1]用土体单元所受的渗透力代替土条周边孔隙水压力的有限单元法, 避免了一般条分法计算略去土条侧边水压力产生的误差; 同时也不需要考虑边坡的外水压力, 简化了力的计算过程; 并结合饱和渗流分析的渗流场计算结果用三角形单元予以实现, 验证计算了几个实际工程。

由于降雨等引起的饱和-非饱和渗流作用下的边坡稳定问题时常发生, 而目前这方面的研究报道还不是很多, 因此有必要开展有关问题的研究。本文在文献[1]分析的基础上, 对饱和-非饱和渗流^[2]作用下的边坡稳定问题进行了研究, 利用渗流计算时的剖分网格(四边形等参元)和计算结果, 直接连续进行渗流作用下的边坡稳定分析。在寻找最小安全系数及其相应滑弧位置时, 采用数学规划中的单纯形法, 实现了自动查找的目的。计算结果表明, 该法为饱和-非饱和和不稳定渗流作用下的边坡稳定分析问题提供了一个实用的工具。

1 基本假定

(1) 对于粘粒含量较大的土, 浸润线以上的毛细管水可以加速土的固结, 增加安全性, 本文通过计算非饱和区渗透力的大小和方向来考虑。

(2) 土坡的稳定分析中, 假设一个破坏面, 在破坏面上的极限平衡状态, 其抗剪强度 s 与导致滑动的剪应力 τ 相等, 并定义 s 与实际产生的 τ 的比值为安全系数 η , 即

$$\eta = s / \tau \quad (1)$$

上式既适用于整个滑动面, 也适用于任何一个单元体。

(3) 作用在单元土体之间的土压力大小相等、方向相反, 从滑动体整体来看, 可认为相互抵消, 对单元体分析时也不予考虑。

2 滑坡计算的有限元法

2.1 方法简述

传统条分法在考虑渗流作用时, 必须先把流网的水头化成压力水头作用到各垂直条块的底部滑动面。而滑坡稳定计算的有限元法可直接应用渗流场计算划分的有限元网格和节点水头值连续进行滑坡稳定计算。本文结合饱和-非饱和渗流场, 采用四节点等参单元, 且在渗流场计算中采用

收稿日期: 2001-09-10; 修订日期: 2001-11-06

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(004052300)

作者简介: 汪自力(1965-), 男, 河南省荥阳市人, 黄河水利委员会高级工程师, 硕士, 主要从事非饱和渗流应用方面的研究。

不动网格—高斯点有限元方法^[3]. 根据渗流作用的概念, 将作用在滑动面上和划分土体的表面水压力转换为等价的体积力, 即把各节点的水头值换算成各单元渗透力^[3]. 在一个单元内, 根据不同高斯积分点所处的位置, 选取不同的计算参数, 以处理穿过零压力线或滑弧的单元.

2.2 公式推导

2.2.1 力的计算

如图1所示, 对四边形单元来说, 作用在其上的渗透力可分解为两个分量:

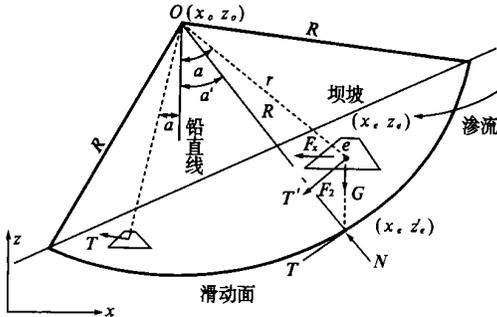


图1 单元受力分析示意图

Fig. 1 The force analysis of one element

$$F_x = \iint_A \gamma_x dx dz = - \iint_A \gamma \frac{\partial H}{\partial x} dx dz ; \quad (2)$$

$$F_z = \iint_A \gamma_z dx dz = - \iint_A \gamma \frac{\partial H}{\partial z} dx dz , \quad (3)$$

单元土体的有效自重为

$$G = \iint_A \gamma dx dz , \quad (4)$$

单元面积为

$$A = \iint_A dx dz . \quad (5)$$

式中: γ 为水的体积质量; γ_1 为土体的重度(零压线以下为饱和区, 取有效重度; 零压线以上为非饱和区, 取天然重度); A 为四边形单元面积; H 为总水头, $H = h + z = p / \gamma + z$. 此外, 还规定计算坡降 J 沿破坏力方向的取正值.

对等参元, 采用高斯数值积分, 并根据各高斯点所处的位置选取不同的计算参数. 即在计算单元对滑动体的贡献时, 先计算高斯点到滑弧圆心的距离 D , 若 $D > R$, 则说明该点不在滑动体内, 不予计算; 若 $D \leq R$, 则按该点所代表的权重接着计算其贡献. 当计算单元体的重量时, 可先计算出高斯点处的孔隙水压力 p , 若 $p > 0$, 则取有效重度, 否则取天然重度. 当计算单元位于滑动体内的面积等几何量时也作类似处理, 从而在渗流计算所用网格不变的情况下较容易地解决了穿过零压

力线或滑动面单元的计算问题.

2.2.2 滑动力矩的计算

假设各单元的渗透力与自重一样都作用在单元的重心上, 并求出沿圆弧滑动的切向分力 T' . 滑动力 T' 作用在重心上, 则相应的滑动力矩为 $M_T = T' r$.

单元重心坐标为

$$x_e = \iint_A x dx dz / A ; \quad (6)$$

$$z_e = \iint_A z dx dz / A , \quad (7)$$

滑动力为

$$T' = (F_z + G) \sin \alpha + F_x \cos \alpha , \quad (8)$$

滑动力臂及偏角分别为

$$r = \sqrt{(x_e - x_0)^2 + (z_e - z_0)^2} ; \quad (9)$$

$$\alpha = \arctg \frac{x_e - x_0}{z_0 - z_e} , \quad (10)$$

$$\alpha' = \arctg \frac{x_e - x_0}{z_0 - \sqrt{R^2 - (x_e - x_0)^2}} . \quad (11)$$

2.2.3 抗滑力矩的计算

在考虑孔隙水压力的情况下, 沿滑动破坏面的抗剪强度为

$$s = (\sigma - u) \text{tg} \phi' + c' , \quad (12)$$

式中: σ 为总的法向应力; u 为孔隙水压力, 饱和和渗流时为孔隙水压力, 非饱和渗流时为毛细管吸力; $(\sigma - u)$ 为滑动面上的有效法向应力(土粒间压力); ϕ', c' 值为以有效应力表示的土的内摩擦角和粘聚力.

抗滑力作用在滑弧上, 在极限平衡状态时所发挥的切向力为

$$T = sl / \eta = (\sigma - u) l \cdot \text{tg} \phi' / \eta + c' l / \eta = N \text{tg} \phi' / \eta + c' l / \eta , \quad (13)$$

其中法向力为

$$N = (\sigma - u) l = (F_z + G) \cos \alpha' - F_x \sin \alpha' . \quad (14)$$

对圆心的抗滑力矩为

$$M_s = (\sum N \text{tg} \phi' + \sum c' l) R / \eta . \quad (15)$$

2.2.4 安全系数的计算

注意到在计算抗滑力矩时, 将作用在单元重心的力垂直下移到相应的滑弧位置, 力矩的效果有所变化, 其中垂直分力 $(F_z + G)$ 力矩效果不变, 而水平分力 F_x 则人为增加了滑动力矩 $\Delta M = F_x \cdot (R \cos \alpha' - r \cos \alpha)$, 故在围绕圆心列力矩平衡方程 $\sum M_0 = 0$ 时应予考虑(传统条分法未考虑):

$$M_s - M_r + \Delta M = 0 .$$

则可得出安全系数为

$$\eta = R \left\{ \sum [(F_z + G) \cdot \cos \alpha' - F_x \cdot \sin \alpha] \cdot \right. \\ \left. \operatorname{tg} \phi' + \sum c \right\} / \left\{ \sum [(F_z + G) \cdot \sin \alpha + \right. \\ \left. F_x \cos \alpha] - \sum F_x (R \cos \alpha' - r \cos \alpha) \right\} . \quad (16)$$

2.2.5 最危险滑弧的寻找

采用数学规划中的单纯形法,即给定圆心的初始值,并给定滑弧通过的点(如坡脚),则对每次给定的圆心即可确定相应的滑弧位置,从而算出其安全系数,再由程序根据计算的结果自动生成新的安全系数更小的圆心位置,重新计算,逐步寻找到最小安全系数³.

3 算例分析

根据以上理论和公式,用 FORTRAN 77 编制了相应的边坡稳定分析程序 STSSP,并对如图 2 所示的模型坝进行了计算.其坝高为 15 m,在 0.1d 内上游水位从 112.0 m 骤降到 104.0 m,均质土坝的饱和渗透系数 $k_s = 0.432 \text{ m/d}$,已固结不可压缩 $S_s = 0$,土体的天然重度为 17.35 kN/m^3 ,有效重度为 8.624 kN/m^3 ,有效应力指标 $c' = 14.945 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 21.2^\circ$.根据黄河大堤有关试验资料整理得到的有关非饱和和渗流计算参数如表 1 所示.其中, θ 为土体体积含水量; h 为压力水头(吸力); $k_r = k/k_s$ 为相对非饱和渗透系数 ($0 < k_r \leq 1.0$); $c = d \theta/dh$,为容水度.

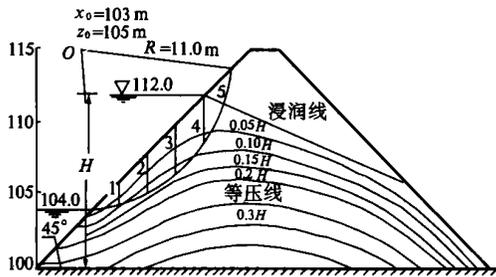


图 2 模型坝示意图

Fig. 2 Model dam

根据饱和-非饱和和不稳定渗流分析程序及以上计算参数,计算出渗流场分布,再根据上述边坡稳定分析方法计算相应的安全系数.当圆心初始值选在(103, 115),相应滑弧半径 $R = 11 \text{ m}$ 时,计算安全系数为 1.116.文献^[1]采用饱和和渗流分析并用三角形单元离散的计算结果为 1.049;而用毕肖普条分法算得的安全系数为 1.345,若考虑土条两边水压力形成的力矩对滑动面的破坏作用

的修正,则其结果为 $1.052^{[1]}$.故本文方法与上述两种方法的计算结果接近,且比饱和和渗流分析的结果略大,这反映了非饱和区毛细管吸力的影响对边坡稳定的有利一面.

表 1 非饱和和渗流计算参数一览表

Tab. 1 Unsaturated seepage calculating parameters

序号	θ	h/m	k_r	c/m^{-1}
1	0.20	-19.6	8.37×10^{-4}	3.28×10^{-3}
2	0.22	-13.5	1.79×10^{-3}	3.28×10^{-3}
3	0.24	-9.0	3.60×10^{-3}	4.44×10^{-3}
4	0.27	-5.0	8.19×10^{-3}	6.50×10^{-3}
5	0.30	-2.3	2.14×10^{-2}	1.26×10^{-2}
6	0.32	-1.6	3.58×10^{-2}	2.86×10^{-2}
7	0.35	-1.0	8.05×10^{-2}	5.67×10^{-2}
8	0.42	-0.41	3.16×10^{-1}	1.12×10^{-1}
9	0.48	0.0	1.0	1.59×10^{-1}

假定最危险滑弧经过上游坝坡与水面交界点(104, 104),则相应最小滑动安全系数的计算结果如表 2 所示.表中 n 为迭代序号,从表中可看出,通过 104, 104 滑弧的最小安全系数为 0.919.

表 2 边坡稳定计算结果一览表

Tab. 2 The computation of slope stability

n	x_0	z_0	R	η
0	103.00	115.00	11.05	1.116
0	111.49	117.12	15.11	2.039
0	105.12	123.49	19.52	1.182
0	105.12	117.12	13.17	0.967
1	95.93	120.23	18.13	1.974
2	109.51	117.52	14.60	1.452
3	98.30	119.76	16.76	1.368
:	:	:	:	:
23	103.60	119.41	15.41	0.921
24	103.67	119.32	15.32	0.920
25	103.64	119.36	15.36	0.921
26	103.64	119.36	15.36	0.921
27	103.65	119.35	15.35	0.919
28	103.65	119.34	15.35	0.919
29	103.65	119.35	15.35	0.919
30	103.65	119.35	15.35	0.919
31	103.65	119.35	15.35	0.919

4 结束语

根据以上分析,在饱和-非饱和和渗流场计算的基础上,综合运用条分法、有限元法、等参元法、单纯形法能够较好地处理饱和-非饱和和不稳定渗流作用下的边坡稳定分析中存在的问题,可望在实际工程中得到应用. (下转 38 页)

tion of anisol and benzaldehyde catalyzed by chicken feather -palladium complex[J]. Polymers for Advanced Technologies, 1997, (8): 638-640.

[8] 张振权, 刘全应, 孙云鸿. 硝基化合物在钯/氰乙基化纤维素催化剂上的催化氢化[J]. 分子催化, 1990, 4(1): 60-67.

The Behavior of the Molecular Complex of Poly(4-vinylpyridine) with Acids Supported Palladium catalyst in the Hydrogenation of Nitrobenzene

XI Xiang-li, CAO Shao-kui

(College of Materials Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Palladium complex of the molecular complexes of poly(4-vinylpyridine) with HAc, HCl and PAA (abbr. as PVP/HAc-Pd, PVP/HCl-Pd, PVP/PAA-Pd) is prepared. Their catalytic activity for the hydrogenation of nitrobenzene is examined. The results show that PVP/HAc-Pd provides better catalytic activity and stability than PVP-Pd. In the presence of a strong inorganic base, especially KOH, PVP/HAc-Pd shows very high activity. The suitable hydrogenation condition for PVP/HAc-Pd is found when using 0.3 ml/L ethanol solution of potassium hydroxide as the hydrogenation media at the temperature of 45 °C. An optimum catalytic activity for PVP/HAc-Pd in the hydrogenation of nitrobenzene appears when VPy/-COOH molar ratio is 10 and VPy/Pd is 5. The results show that the coordination environment of the ligand atom with palladium is greatly affected by the introduction of acid.

Key words: molecular complex; supported palladium catalyst; catalytic hydrogenation; nitrobenzene

(上接 27 页)

参考文献:

[1] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.

[2] 汪自力, 高骥, 李信, 等. 饱和-非饱和三维瞬态渗流的高斯点有限元分析[J]. 郑州工学院学报, 1991, 12(3): 84-90.

[3] 汪自力, 杨静熙. 反求堤坝渗流计算参数的复合形法[J]. 大连理工大学学报, 1993, 33(1): 41-45.

A Composite Method to Analyse the Slop Stability under Saturated-unsaturated Seepage Flow

WANG Zi-li¹, ZHU Meng-xia², GAO Qing-wei³, YUE Yu-su¹

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 3. Henan Construction Engineering Company, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This finite element analysis is directed towards the defects of the general slice method of slop stability analysis. Based on the computation of saturated-unsaturated seepage flow, the seepage force supersedes the pore pressure around one element to analyze directly and continuously the slop stability with the mesh and results of the seepage finite element analysis. A mathematical optimization technique going by the name of the simple shape method is used to determine the minimal stability safe-coefficient. An engineering application proves its practicality and efficiency. It gives an efficient tool to analyze the slop stability problem caused by the rainfall.

Key words: slop stability; slice method; saturated-unsaturated seepage flow; finite element analysis; quadrilateral isoperimetric element; simple shape optimization