

文章编号: 1001-5485(2006)01-0057-04

考虑渗流和膨胀变形的强度折减三维有限元法

韦立德¹, 高长胜², 杨春和¹

(1. 中科院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 武汉 430071; 2. 南京水利科学院 土工所, 南京 210098)

摘要: 在探索多场耦合理论基础上, 研制出了一个考虑渗流场和膨胀变形对应力场作用的三维强度折减有限元程序。通过与传统极限平衡法分析结果进行对比研究, 对抗剪强度折减有限元法分析边坡稳定问题的适用性进行了评价, 得出采用三维强度折减有限元法确定考虑渗流场和膨胀变形的边坡稳定性安全系数是可行的结论。

关键词: 边坡稳定性; 渗流; 膨胀; 强度折减; 弹性有限元

中图分类号: O319.56 文献标识码: A

在影响岩土工程稳定性的各种因素中, 地下水的的作用不容忽视。根据我国和其它国家的调查资料表明, 由于渗流冲刷破坏失事的土石坝高达40%, 与渗流密切相关的滑坡破坏也占15%左右。另外, 膨胀土的膨胀变形对岩土工程稳定性的影响也开始得到重视。因此, 当前考虑膨胀变形的渗流场和应力场耦合是岩土工程灾害学科的一个重大研究课题之一。对于均质土坡, 分析土坡稳定的传统方法主要有: 极限平衡法、极限分析法和滑移线场法等。就目前工程应用而言, 主要还是极限平衡法, 但需要事先知道滑动面位置和形状。对于均质土坡, 可以通过各种优化方法来搜索危险滑动面。但是, 边坡稳定性分析问题经常是三维问题, 不能应用于三维边坡分析是传统极限平衡法的致命弱点。为此岩土界研究和开发了能够应用于三维边坡分析的新方法——强度折减有限元法^[1~3]。考虑膨胀变形和渗流的强度折减三维有限元法在国内还没见文字报告。

本文主要探索考虑膨胀变形的渗流场和应力场耦合的强度折减三维有限元技术, 并研制了考虑膨胀变形的渗流场和应力场耦合的强度折减三维有限元程序, 以期能更好地解决考虑渗流和膨胀变形的边坡工程稳定性评估问题。

1 对膨胀特性的假设和耦合原理

这里不考虑弹模、泊松比和强度因含水量变化

引起的变化。这里假设在不受限制时膨胀岩土体充水饱和后的最大膨胀应变由最大膨胀应力 σ_0 确定, 对一种岩土体 σ_0 是常数, 即

$$\sigma_0 = \text{const.}, \quad (1)$$

由试验确定。而膨胀岩土体饱和区域假设为饱和渗流区域, 由三维渗流有限元计算确定。

由最大膨胀应力 σ_0 引起的应变

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^{\sigma} + \delta_{ij} \frac{\sigma_0(1-2\mu)}{E} = \epsilon_{ij}^{\sigma} + \delta_{ij}\alpha\Delta T, \quad (2)$$

式中: E 是弹模; μ 是泊松比; ϵ_{ij}^{σ} 是由于应力引起的应变张量分量; α 是热胀系数; ΔT 是温度改变量; $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$, $\delta_{ij} = 1 (i = j)$ 。从上式可以看出膨胀应变和温度应变等效, 可以把膨胀应变当作温度应变耦合到应力场有限元计算过程中。在有限元程序设计中, 把膨胀引起的应变当作一种初始应变, 对应的初始应力为0, 按照这个过程把膨胀引起的应变设计到有限元程序中, 在膨胀应变作用下岩土体因受限制而产生应力场。

2 饱和渗流计算基本方程和耦合原理

2.1 基本方程

假设地下水渗流在微段压力梯度上遵从达西定律。对于稳定渗流场(无内源时)的计算归结为求解满足边界条件的拟调和方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial H}{\partial z}) = 0,$$

$$H(x, y, z) | \Gamma_1 = H_1(x, y, z),$$

收稿日期: 2005-04-05

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(973项目)(2002CB412704); 国家自然科学基金项目(50374064, 50334060)

作者简介: 韦立德(1973-), 男, 广西来宾人, 博士, 在站博士后, 主要从事岩土力学和考虑渗流的边坡稳定性分析方面的研究。(电话) 027-87199295(电子信箱) weilide@TOM.COM.

$$(K_x \frac{\partial H}{\partial x} l_x + K_y \frac{\partial H}{\partial y} l_y + K_z \frac{\partial H}{\partial z} l_z) | \Gamma_2 = q, \quad (3)$$

式中: H 和 H_1 分别是渗流场水头和 Γ_1 类边界条件上的已知水头; K_x , K_y 和 K_z 分别是 x , y 和 z 方向的渗透系数; q 是 Γ_2 类边界条件上单位面积流量。把整个计算空间域离散成有限元的实体单元, 应用 Galerkin 有限元法求解方程(3), 得到各节点的水头和流体流速等信息。

2.2 耦合原理

假定岩土体在孔隙流体作用下遵循太沙基有效应力原理, 即

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} p, \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 是总应力张量分量; σ'_{ij} 是有效应力张量分量; p 是压力水头。

3 计算原理

3.1 抗剪强度折减有限元法

所谓抗剪强度折减技术就是将抗剪强度指标 c 和 φ , 用一个折减系数 F_s (如式(5)和(6)所示的形式)进行折减, 然后用折减后的虚拟抗剪强度指标 c_F 和 φ_F , 取代原来的抗剪强度指标 c 和 φ , 在有限元分析中使用。

$$c_F = c / F_s, \quad (5)$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}(\tan \varphi / F_s), \quad (6)$$

式中: c 是粘聚力; φ 是内摩擦角。在弹塑性有限元数值分析中, 折减系数 F_s 的初始值取得足够小, 以保证开始时是一个近乎弹性的问题。然后不断增加 F_s 的值, 折减后的抗剪强度指标逐步减小, 反复对边坡进行分析, 首先部分单元开始屈服, 应力在单元之间重新分配, 局部失稳逐渐发展; 直到某一个临界状态, 在虚拟的折减抗剪强度下整个边坡发生失稳。那么在发生整体失稳之前的那个折减系数值, 即实际抗剪强度指标与发生虚拟破坏时折减强度指标的比值, 就是这个边坡的稳定安全系数。这种稳定分析方法称为抗剪强度折减有限元法(SSRFEM)^[5]。使用抗剪强度折减有限元法不仅可以直接得出边坡的稳定安全系数, 不需要事先假设滑裂面的形状和位置, 还可以得到边坡内各单元的应力和变形情况, 给出破坏区域, 从而大致给出破坏面的位置。这里定义的抗剪强度折减系数, 与极限平衡分析中所定义的边坡稳定安全系数在本质上是一致的, 证明可见参考文献[5]。本文的程序自动完成强度折减系数的计算。

用强度折减有限元法分析边坡的稳定性, 采用解的不收敛作为破坏标准。在指定的收敛准则下算法不能收敛, 即表示应力分布不能满足土体的破坏准则和总体平衡要求, 意味着出现破坏。

3.2 岩土体的本构模型

这里岩土体采用实体单元模拟, 本构模型采用非关联准则的弹塑性本构模型。使用 Mohr-Coulomb 准则作为屈服函数, 如下式所示

$$f = \sqrt{J_2} (\cos \Theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \Theta \sin \varphi) - 3 I_1 \sin \varphi - \cos \varphi, \quad (7)$$

式中: f 为屈服函数; $\Theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} (-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}})$, $(-\frac{\pi}{6} \leq \Theta \leq \frac{\pi}{6})$; I_1 , J_2 和 J_3 分别是有效应力张量的第一不变量、有效应力偏量的第二不变量和有效应力偏量的第三不变量。并且用 Drucker-Prager 方程作为塑性势函数, 如下式所示

$$g = -\alpha I_1 + J_2^{1/2} - k, \quad (8)$$

式中: g 是塑性势函数; $\alpha = \frac{\tan \Psi}{\sqrt{9+12 \tan^2 \Psi}}$; $k = \frac{3c}{\sqrt{9+12 \tan^2 \Psi}}$; Ψ 是剪胀角。

4 考虑膨胀应变和渗流场的堤坝稳定性安全系数计算

按照上述原理研制了强度折减三维有限元程序 m r w m. f 90。该程序考虑渗流场、温度场和应力场耦合的有限元程序在文献[6]已经验证, 鉴于膨胀应变和温度应变等效性和篇幅限制, 在此验证过程省略。

某泥土堤坝工程, 泥土有膨胀性, 边坡比例为 1:1.5, 边坡高 10 m, 坝顶和坝脚水平, 坝顶宽 12 m, 坝脚宽 8 m, 坝和水库间是岩块砌体, 砌体渗透性大可认为不挡水, 但能控制坝体向水库方向发生水平位移, 坝高出水库 14 m, 坝脚以外是水沟, 沟深 4 m, 坝脚和水沟间是岩块砌体, 砌体渗透性大可认为不挡水, 但能控制坝体向水沟方向发生水平位移。坝体以下是强度很大渗透率极小的岩层。在此情况下要求评估坝的稳定性(计算坝的稳定性安全系数)。

堤坝的几何模型见图 1(因个人编写的有限元程序还没有很好的前处理功能, 因此采用 F I A C 3 D 画出有限元计算采用的网格)。计算范围为泥土堤坝体, 约束条件为坡体侧面约束相应的水平位移, 坡体底面约束 3 个方向的位移。参数见表 1。采用传

统极限平衡法和笔者研制的强度折减三维有限元程序 *mrwm.f90* 计算, 所得结果列于表 2。图 2 是水压等势线图, 图 3 是当前水位 (饱和渗流) 对应工况的水平位移等势线图。

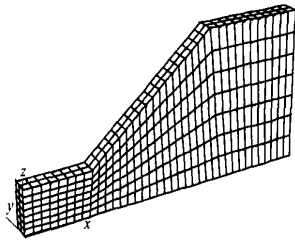


图 1 三维有限元模型

Fig. 1 3D finite element model

表 1 力学参数表

Table 1 Parameters for mechanical analysis

σ/kPa	$\varphi/(^\circ)$	$\Psi/(^\circ)$	E/MPa	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$
22.00	25.0	0.0	5 000.00	20.00
泊松比 μ	$K_x/(m \cdot s^{-1})$	$K_y/(m \cdot s^{-1})$	$K_z/(m \cdot s^{-1})$	
0.3	0.000 152 5	0.000 152 5	0.000 152 5	

表 2 各种分析方法计算的边坡稳定性安全系数

Table 2 Safety factors with different analytic methods

	极限平衡法 (slide 软件)		强度折减有限元法
	毕肖普法	简布法	
无水	1.847	1.712	1.865
当前水位 (饱和渗流)	1.594	1.479	1.505
当前水位 (饱和渗流, $\sigma_0 = 40 kPa$)			1.535
当前水位 (饱和渗流, $\sigma_0 = 200 kPa$)			1.645

效应力, 导致了抗滑力增加所致。一般膨胀土边坡泡水后稳定性下降, 是因为膨胀土的抗剪强度参数随含水量增加剧烈下降所致, 本文还没有考虑这个因素, 笔者将把考虑膨胀土的抗剪强度参数随含水量增加而下降的强度折减三维有限元法作为进一步的研究内容。边坡稳定分析经常涉及到三维受力和渗流力学问题, 能够应用于复杂的边界条件是有限元法的优点之一, 因此对边界复杂的边坡计算稳定安全系数计算采用强度折减三维有限元法远比极限平衡法优越。而且采用强度折减三维有限元法 (*mrwm.f90*) 计算还可以得到边坡各点的位移、应力分布和渗流场分布。

5 结 论

(1) 采用强度折减三维有限元法计算考虑渗流场和膨胀变形的边坡稳定性安全系数是可行的。

(2) 采用强度折减三维有限元法计算还可以得到边坡各点的位移、应力分布和渗流场分布, 这往往是传统极限平衡法办不到的。

(3) 采用有限元分析边坡稳定性, 可以模拟边坡复杂的地质、地形、地势等, 这往往是传统极限平衡法办不到的。因此, 为了能够得出更符合实际的结论, 在边坡 (尤其是大型边坡、重要工程的边坡和堤坝等) 稳定性分析中, 在有条件的前提下应进行三维有限元分析。

参考文献:

[1] 孙伟, 龚晓南. 土坡稳定分析强度折减有限元法[J]. 科技通报, 2003, 19(4): 319-322.

[2] 连锁营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407-411.

[3] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254-260.

[4] 马建勋, 赖志生, 蔡庆娥. 基于强度折减法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2690-2693.

[5] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.

[6] 韦立德, 杨春和. 考虑饱和-非饱和渗流、温度和应力耦合的三维有限元程序研制. 岩土力学, 2005, 26(6): 1000-1004.

(编辑: 刘运飞)

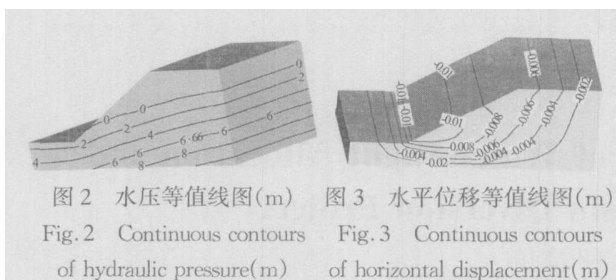


图 2 水压等值线图 (m) 图 3 水平位移等值线图 (m)

Fig. 2 Continuous contours of hydraulic pressure (m) Fig. 3 Continuous contours of horizontal displacement (m)

在无水时, 采用强度折减三维有限元法 (*mrwm.f90*) 计算的稳定性安全系数只比毕肖普法高一点点; 而有水时不考虑膨胀变形采用强度折减三维有限元法 (*mrwm.f90*) 计算的稳定性安全系数处于两种极限平衡法计算的稳定性安全系数中间。计算结果表明采用强度折减三维有限元法 (*mrwm.f90*) 计算考虑渗流场的边坡稳定性安全系数是可行的。而考虑膨胀变形时采用强度折减三维有限元法 (*mrwm.f90*) 计算的稳定性安全系数增大了, 这是因为均匀膨胀变形受限制后产生了应力从而加大了有

3D FEM of Strength Reduction Method Considering Coupling Among Seepage and Expanse and Stress

WEI Li-de¹, GAO Chang-sheng², YANG Chun-he¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Science, Wuhan, 430071, China; 2. Institute of Soil Engineering, the Academy of Science of Irrigation Works in Nanjing, Nanjing 210024, China)

Abstract: The technique of the 3D finite element method (FEM) of coupling seepage, expanse and stress was studied, and the corresponding program for the FEM of strength reduction method was developed. Through comparison the FEM calculation with limit equilibrium, the applicability of FEM to analysing the slope stability was evaluated. The comparison result shows that the FEM method is feasible to analyze the stability of the slope considering seepage and expanse.

Key words: slope stability; seepage; expanse; strength reduction; elastoplastic FEM

(上接第 49 页)

Development of Measuring Instrument for 3-D River Bed Model Topography

MA Zhi-min¹, FAN Bei-lin², XU Ming², WU Xin-sheng², ZHAO Xiao-hong¹

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Changjiang River scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: A kind of automatic measuring instrument for 3-D river bed model topography is introduced. The instrument adopts the theory of ultrasonic echo for quickly scanning river bed topography under water and employs the principle of resistance for measuring river bed topography upon water and shallow beach topography, which increases the measuring speed effectively and decreases the disturbing influence on river bed. Because of using moving framework facility and proper computer controlling method, the testing bridge can move freely lengthways. The instrument can automatically accomplish the measurement of 3-D river bed topography, the display of three dimension topography and the drawing of contour map.

Key words: river model; topography measurement; ultrasonic testing; impedance testing

(上接第 52 页)

Approach on Running Mechanisms of Water Right Allocation and Water Market in Interbasin Diversion Project

HUANG Wei, CHEN Jin

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to assure normal running of the project and to effectively increase utilization efficiency for the water transfer from south to north, it is necessary to establish water right institution and water market. Based on the theory and practice of water right management and water market at home and abroad, the initial water right allocation, the mechanism of water right trade and water market running and the institutional frame in water transfer project across river basins were studied. With water transfer project over different basins as an example the methods of first water right allocation and three classes water market in water transfer project across river basins were put forward. Moreover, water trade price, running mode of water market and some related problems were discussed.

Key words: water economics; water transfer project; water right; water market; water price