

文章编号:1001-1986(2008)01-0037-04

岩土体物理力学参数对岩质滑坡稳定性的影响

刘红帅¹, 杨俊波³, 薄景山^{1,2}, 刘德东¹

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 3. 中南电力设计院勘测分公司, 湖北 武汉 430071)

摘要:采用有限元-极限平衡法研究了含软弱滑动带的岩质滑坡滑动体、滑动带和滑床的密度、弹性模量和泊松比及滑动带的抗剪强度对滑坡稳定性的影响。结果表明:滑床密度、滑体及滑动带的弹性模量、滑动带及滑床的泊松比和滑动的抗剪强度指标与滑坡稳定性系数呈正相关关系,而滑体及滑动带土体密度、滑床的弹性模量和滑体的泊松比与滑坡稳定性系数呈负相关关系;软弱滑动带的抗剪强度对滑坡稳定性的影响最显著,其次为软弱滑动带的泊松比和滑床的弹性模量,其他参数的影响相对较小。

关键词:岩质滑坡;有限元-极限平衡法;软弱滑动带;物理力学参数;稳定性系数
中图分类号:P642.22 **文献标识码:**A

Influences of physical and mechanical parameters of geo-material on stability of rock landslide

LIU Hong-shuai¹, YANG Jun-bo³, BO Jing-shan^{1,2}, LIU De-dong¹

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;
2. Institute of Disaster-prevention Science and Technology, Sanhe 065201, China;
3. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China)

Abstract: The influences of density, elastic modulus and Poisson's ratio of landslide mass, weak slip zone and landslide bed, and shear strength of weak slip zone on landslide stability are studied using the method combining finite element method with limit equilibrium method. The results show that there are positive relationships between the density of landslide bed, elastic modulus of landslide mass and weak slip zone, Poisson's ratio of landslide bed, shear strength index of weak slip zone and factor of stability of landslide, while there are negative relationships between the density of landslide mass and weak slip zone, elastic modulus of landslide bed, Poisson's ratio of landslide mass and factor of stability of landslide, and that the most important factors affecting landslide stability are shear strength index, the Poisson's ratio of weak slip zone and elastic modulus of landslide bed are in second order, and other parameters are non-sensitive to landslide stability.

Key words: rock landslide; the method combing finite element with limit equilibrium method; weak slip zone; physical and mechanical parameters; factor of stability

目前,国内外滑坡稳定性分析大多采用极限平衡法,但由于极限平衡法自身的局限性,近年来有限元在滑坡稳定性分析中应用越来越广泛^[1]。有限元分析通常分为有限元强度折减法和有限元-极限平衡法。有限元强度折减法在有限元法分析前对土的强度参数进行了折减,所取得的应力与变形结果无法反映边坡实际受力状态,因此该方法只限于边坡最小安全系数的评价。有限元法-极限平衡法源于极限平衡法的临界滑动面搜索,它是充分利用有限元法的优势对边坡的稳定与变形进行分析评

价^[2]。由于取样制样、试验仪器、试验方法与过程、试验人员操作熟练程度、整理分析资料等诸多因素,使岩土体物理力学参数的离散范围很大,用于计算岩质滑坡稳定性的结果差别也较大。关于岩土体物理力学参数对岩质滑坡稳定性的影响,采用极限平衡法的研究成果比较多,已经取得许多有价值的成果^[3-4],而采用有限元法的成果尚不多见。本文采用有限元-极限平衡法研究了含软弱滑动带的岩质滑坡滑动体、滑动带和滑床的密度、弹性模量和泊松比及滑动带的抗剪强度对滑坡稳定性的影响,从而

收稿日期:2007-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(40702055);中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2006B10)

作者简介:刘红帅(1975—),男,河北饶阳人,副研究员,博士,主要从事岩土工程和工程地震研究工作。

寻找影响岩质滑坡稳定性的关键因素。

1 滑坡稳定性系数计算方法及模型

1.1 滑坡稳定性系数计算方法

采用有限元法分析有明显软弱滑动带的岩质滑坡稳定性。其步骤为：根据滑坡地质特征建立物理力学模型，结合滑坡岩土体类型及软弱滑动带特征进行分区，并对其进行离散化；选择合适的岩体本构关系，确定相应的力学参数；施加约束条件和荷载进行有限元分析，得到滑坡的应力场；利用有限元所得的应力场进行滑坡稳定性计算。

有限元分析过程已有很多专著进行了详细的介绍^[4]。针对岩质滑坡存在明显的软弱滑动带的特点，刘红帅等^[1]提出了有限元计算过程中不同滑动带的处理方法。这里仅介绍稳定性系数的定义。

工程实践中，一般采用极限平衡法来定义滑坡稳定性系数。将有限元与极限平衡法相结合，既能反映滑坡的稳定与变形之间的密切关系，又能用工程界所熟悉的稳定系数来评价滑坡的整体稳定性。对于给定的滑动面，滑坡的稳定性系数可定义为沿滑动面的抗滑力之和与下滑力之和的比值，即：

$$F_s = \frac{\int_{\Gamma} (c_i + \sigma_{n,i} \tan \varphi_i) d\Gamma}{\int_{\Gamma} \tau_{s,i} d\Gamma}, \quad (1)$$

式中 $\sigma_{n,i}$ 和 $\tau_{s,i}$ 分别为第 i 单元滑动面上的法向应力和剪应力； Γ 为滑动面； c_i 、 φ_i 为滑动面第 i 单元的抗剪强度指标。需要指出的是，对于圆弧滑动面，上式即为沿滑动面的抗滑力矩之和与滑动力矩之和的比。关于 $\sigma_{n,i}$ 和 $\tau_{s,i}$ 的计算方法，详见文献^[1,5]。

1.2 计算模型

选取一个具有代表性的含软弱夹层的岩质滑坡作为本文的计算模型。计算过程中将岩土体假定为弹性材料，其模型如图 1 所示。

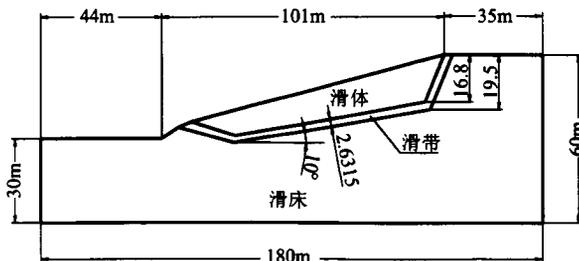


图 1 滑坡地质模型示意图

Fig.1 Sketch map of geological model of landslide

在模型中只考虑重力作用，将模型简化为平面应变问题。材料假设为各向同性材料，计算模型采

用位移边界条件：左右边界为水平向约束，竖向自由，底边界两向约束。根据文献^[1]，本文将软弱滑动带作为软弱夹层处理。按照有限元网格剖分标准对模型进行了剖分，共划分了 3 578 个四边形单元，3 726 个节点，滑坡岩土体物理力学参数参考了文献^[6]的经验值确定，取值如表 1。

表 1 模型物理力学参数取值

Table 1 Physical and mechanical parameters of model

岩土类型	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	泊松比 μ	弹性模量 E_s/GPa	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
滑体	2.10	0.24	2.6	100	35
滑动带	1.95	0.30	0.6	10	15
滑床	2.20	0.26	4.0	130	40

2 岩土体物理力学参数对岩质滑坡稳定性的影响

滑坡的稳定性通常用稳定性系数来描述。本文重点研究了某一参数变化对滑坡稳定性系数的影响。具体做法是：当某一参数发生变化时，其他参数均保持表 1 中所给定的参数值不变，得出这一参数与滑坡稳定性系数之间的关系曲线。

2.1 岩土体密度对滑坡稳定性的影响

图 2 给出了岩土体密度对滑坡稳定性系数的影响曲线，可以看出，滑体密度和滑动带土体密度与滑坡稳定性系数之间呈负相关关系，而滑床密度与滑坡稳定性系数呈正相关关系。当密度从 1 800 kg/m³ 增加到 2 700 kg/m³ 时，滑体密度的增加使滑坡稳定性系数降低了 0.13，滑动带土体密度的增加仅使滑坡稳定性系数降低了 0.008，而滑床密度的增加使滑坡稳定性系数增加了 0.038；当密度每增加 100 kg/m³ 时，滑体密度使滑坡稳定性系数平均降低了 0.014，滑动带土体密度使滑坡稳定性系数仅平均降低了 0.000 8，而滑床密度使滑坡稳定性系数平均增加了 0.004 2。由以上分析可知，滑体密度对滑坡稳定性系数的影响明显大于其他两者。

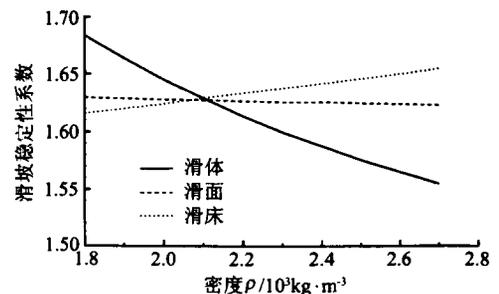


图 2 岩土体密度对滑坡稳定性的影响

Fig.2 Influences of densities of geo-material on landslide stability

2.2 岩土体弹性模量对滑坡稳定性的影响

图 3 给出了岩土体弹性模量对滑坡稳定性系数

的影响曲线,可以看出,滑体、软弱滑动带的弹性模量与滑坡稳定性系数呈正相关关系,而滑床的弹性模量与滑坡稳定性系数呈负相关关系,并且弹性模量增大到一定程度后对滑坡稳定性系数的影响明显变小。当滑体弹性模量从 1 GPa 增加到 10 GPa 时,滑坡稳定性系数升高了 0.105,即当滑体弹性模量增加 1 GPa 时,滑坡稳定性系数平均升高了 0.012;当软弱滑动带弹性模量从 100 MPa 增加到 1 000 MPa 时,滑坡稳定性系数升高了 0.037,即每增加 100 MPa,滑坡稳定性系数平均升高了 0.004 1;当滑床弹性模量从 1 GPa 增加到 10 GPa 时,滑坡稳定性系数降低了 0.173,即滑床弹性模量每增加 1 GPa 时,滑坡稳定性系数平均降低了 0.019。由以上分析可知,滑床弹性模量对滑坡稳定性系数的影响要大于其他两者。

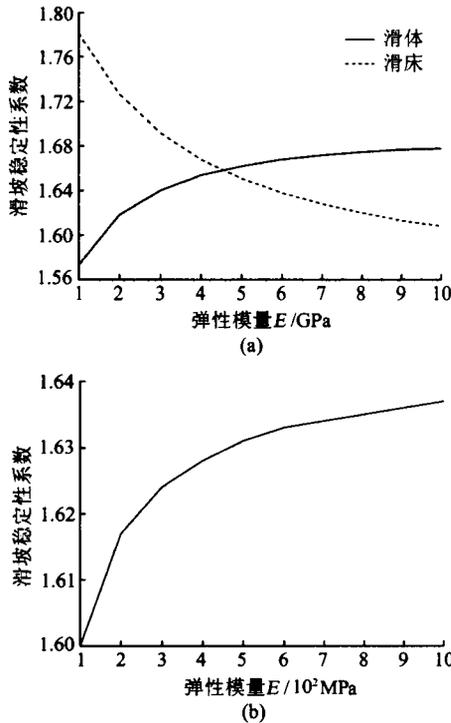


图 3 岩土体弹性模量对滑坡稳定性的影响

Fig.3 Influences of elastic modulus of geo-material on landslide stability

a——滑体和滑床;b——软弱滑动带

2.3 泊松比对滑坡稳定性的影响

图 4 给出了岩土体泊松比对滑坡稳定性系数的影响曲线,可以看出,滑体的泊松比与滑坡稳定性系数呈负相关关系,而软弱滑动带、滑床的泊松比与滑坡稳定性系数呈正相关关系。当泊松比从 0.15 增加到 0.45 时,滑体的泊松比使滑坡稳定性系数降低了 0.026,软弱滑动带的泊松比使滑坡稳定性系数升高了 0.16,滑床的泊松比使滑坡稳定性系数升高

了 0.015。由以上分析可知,软弱滑动带的泊松比对滑坡稳定性系数的影响要大于其他两者。

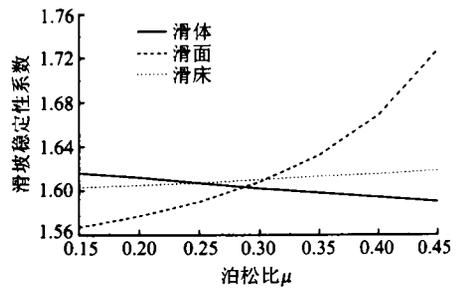


图 4 泊松比对滑坡稳定性的影响

Fig.4 Influences of Poisson's ratio of geo-material on landslide stability

2.4 软弱滑动带抗剪强度对滑坡稳定性的影响

图 5 是软弱滑动带抗剪强度对滑坡稳定性的影响曲线,可以看出,滑面内聚力、内摩擦角与滑坡稳定性系数呈正相关关系。当内聚力从 0.01 MPa 增加到 0.1 MPa 时,滑坡稳定性系数升高了 2.396,即内聚力每增加 0.01 MPa,滑坡稳定性系数升高 0.27;当内摩擦角从 10°增加到 19°时,滑坡稳定性系数升高了 0.857,即内摩擦角每增加 1°时,滑坡稳定性系数升高 0.095。由以上分析可知,滑面的内聚力和内摩擦角对滑坡稳定性系数的影响最为显著。

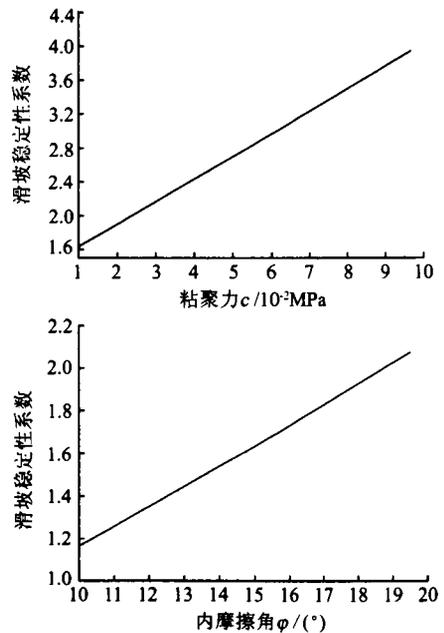


图 5 软弱滑动带抗剪强度对滑坡稳定性的影响

Fig.5 Influences of shear strength of weak slip zone on landslide stability

3 结论

a. 滑体密度和软弱滑动带土体密度与滑坡稳定性系数之间呈负相关关系,而滑床密度与滑坡稳

定性系数呈正相关关系。此外,滑体密度对滑坡稳定性系数的影响明显大于其他两者。

b. 滑体、软弱滑动带的弹性模量与滑坡稳定性系数呈正相关关系,而滑床的弹性模量与滑坡稳定性系数呈负相关关系,并且弹性模量增大到一定程度后对滑坡稳定性系数的影响明显变小。此外,滑床弹性模量对滑坡稳定性系数的影响要大于其他两者。

c. 滑体的泊松比与滑坡稳定性系数呈负相关关系,而软弱滑动带、滑床的泊松比与滑坡稳定性系数呈正相关关系。此外,软弱滑动带的泊松比对滑坡稳定性系数的影响要大于其他两者。

d. 滑面内聚力、内摩擦角与滑坡稳定性系数呈正相关关系。软弱滑动带的抗剪强度参数对滑坡稳定性系数的影响最显著;其次为软弱滑动带的泊松比和滑床的弹性模量,其他的参数影响相对较小。

(上接第 36 页)

然而,如果在岩层中接近界面处含有天然裂隙,不论这些裂隙是否与界面连通,都将使该岩层减小对裂缝延伸的阻挡作用。

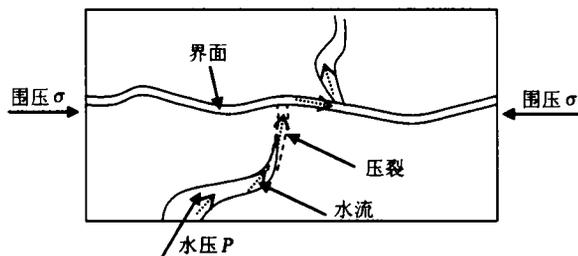


图 7 围压和水压作用下厚隔水层中承压水递进导升示意图

Fig.7 Sketch map of progressive intrusion of pressure water in thick aquiclude under stress and water pressure

承压水上升至界面后的扩展可分为两种情况:

a. 裂缝穿过界面继续向上一岩层发展,使裂缝在上一岩层也得到延伸。其条件是:水压变化不大,水量充足,界面联结强,上一岩层的弹性模量 E_2 小于下一岩层的弹性模量 E_1 ,或者是在上一岩层中接近界面处有裂缝。

b. 承压水不能继续上升。它的条件是:界面联结弱,或上一岩层的弹性模量 E_2 大于下一岩层的弹性模量 E_1 ,在界面处没有裂隙,或水头损失大,不足以克服最小主应力。在生产实际中由于在界面处不可能没有任何裂隙,所以只有水压降低到最小主应力以下,或水压原本就远小于最小主应力,才能有效地阻止承压水的上升。

建议用有限元-极限平衡法进行滑坡静力稳定性分析时,对软弱滑动带的抗剪强度参数、泊松比及滑床的弹性模量的取值,尤其是软弱滑动带抗剪强度取值,应进行专门研究,以便提高计算结果的可靠性。

参考文献

- [1] 刘红帅,薄景山,耿冬青,等.岩质滑坡稳定性有限元分析[J].岩土力学,2004,25(11):1786-1790.
- [2] 陈云敏,李育超,凌道盛.蒙特卡洛法与有限元结合搜索边坡临界滑动面[J].岩土力学,2004,25(增刊2):75-80.
- [2] 姚爱军,易武,王尚庆.杨家岭1#滑坡稳定性影响因素及敏感性分析[J].工程地质学报,2004,12(4):390-395.
- [3] 石豫川,冯文凯,刘汉超,等.特大多期复合型滑坡稳定性评价及因素敏感性分析[J].岩土力学,2004,25(6):975-980.
- [4] 朱伯芳.有限单元法原理与应用(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [5] 刘红帅.岩质边坡地震稳定性分析方法研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2006.
- [6] 刘佑荣,唐辉明.岩体力学[M].北京:中国地质大学出版社,1999.

4 结论

a. 岩层阻水性能以及导升高度的影响因素包括构造、地应力、岩层渗透性和力学特性及其物理化学性质以及水压力。

b. 承压水的导升机制有3种,即:局部关键层整体破断裂缝、欠压实带中的壳破裂裂缝和水力压裂裂缝。

c. 初始水头压力越大,水头衰减速率就越大;水头压力损耗随着介质的渗透系数增大而减小的规律可以描述为: $\eta = 0.0906 e^{-14.969 K}$ 。

d. 实际观测表明,泥岩、粉砂岩、中砂岩、灰岩阻水性能由大到小,导升高度则由小变大。

参考文献

- [1] FYFE W S. Fluids, tectonics and crustal deformation[J]. Tectonophysics, 1986, 119: 29-36.
- [2] 张小莉,冯桥,李文厚.压实盆地自然水力破裂及其动力学[J].石油与天然气地质,1998,19(2):116-123.
- [3] 王经明.承压水沿煤层底板递进导升突水机理的模拟与观测[J].岩土工程学报,1999(5):546-549.
- [4] 章小丽.高脆性材料亚临界裂纹扩展机制的细观力学分析[J].太原理工大学学报,1996(2):135-138.
- [5] 高德福.深矿井底板岩层采动变形与阻水能力分析[J].煤田地质与勘探,1990,18(4):385-389.
- [6] WU Q, WANG M, WU X. Investigations of groundwater bursting into coal mine seam floors from fault zones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 557-571.
- [7] WIDAD A, ZIMMERMAN R W. Effective stress law for the permeability of clay-rich sandstones[J]. Geophysics Res., 2004, 109: 1029-1039.
- [8] 尹尚先.煤矿区突(涌)水系统分析模拟及应用[D].北京:中国矿业大学(北京校区),2002.