

文章编号: 1000-7598(2010)11-3627-08

层状岩体边坡动态稳定性拟静力上限分析

赵炼恒, 罗强, 李亮, 杨峰, 但汉成

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘要: 将强度折减技术与极限分析上限定理结合, 利用安全系数 F_s 评定指标对层状岩体边坡进行稳定性上限分析, 与已有研究成果进行了对比分析, 并较为详细地分析了相关参数对层状岩体坡体安全系数和潜在破裂面的影响。分析结果表明, 与同类计算方法的对比可以证明表明文中方法的正确性; 边坡安全系数和破坏范围受边坡坡度、岩体重度、边坡高度、动载效应系数和岩层倾角的控制; 当岩层倾角处于一定范围时, 层状岩体边坡发生顺层失稳的可能性最大, 工程中需特别注意。

关键词: 层状岩体边坡; 动态稳定性分析; 拟静力方法; 安全系数; 强度折减法; 极限分析上限定理

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Upper bound quasi-static analysis of dynamic stability of layered rock slopes

ZHAO Lian-heng, LUO Qiang, LI Liang, YANG Feng, DAN Han-cheng

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the upper bound limit analysis theorem and the shear strength reduction technique, the equation for expressing the critical limit-equilibrium state was employed to define the safety factor and its corresponding critical failure mechanism for a given layered soft-rock slope by means of the kinematical approach of limit analysis theory. The definition of safety factor was adopted in the present method so that the results from the limit analysis can be applied to engineering practices directly. The case study and comparative analysis show that the solutions presented agree well with available predictions; and the validity of the analysis method could be illuminated. From the numerical results, it is also shown that the safety factor and the instability failure range of layered soft-rock slope are controlled by slope angle, bulk density, slope height, seismic effect coefficients and strata inclination; and when the strata inclination within a certain range, the instability probability of layered soft-rock slope reaches its maximum.

Key words: layered soft-rock slope; dynamic stability analysis; quasi-static analysis; safety factor; strength reduction method; upper-bound theorem of limit analysis

1 引言

边坡稳定性分析一直是土木工程中的重要研究课题, 在岩土工程或土木工程领域占据相当重要的地位。工程领域中, 边坡设计和稳定性评价一般是基于各向同性介质理论, 但山区公路修筑过程中, 经常会遇到层状岩体开挖形成的边坡。由于在生成时的地质沉积作用和环境条件, 这类岩体的变形和强度特性具有明显的各向异性, 对山区公路工程的施工及边坡的稳定会产生某些特殊的影响。边坡稳定性主要受层理和弱面所控制, 与均质岩体相比其

稳定性和破坏条件表现较为复杂^[1-9]。同时, 爆破动力和地震作用对山区公路层状边坡稳定性的影响直接关系到工程边坡的修建和使用安全^[10-11]。

不少学者对静态条件下层状岩体边坡的稳定性问题采用不同方法进行了探讨^[12-18], 但对动态条件下该类边坡的稳定性分析较少。同时, 层状岩体具有明显的横观各向同性, 岩体强度不仅与岩石本身的性质有关, 还与层理面产状、性质有很大的关系。在不同的应力作用下, 受主应力方向与层理面夹角的影响, 破坏将会在层面或完整岩石中发生, 从而表现出不同的力学特性。由于此类边坡问题的复杂

收稿日期: 2008-06-25

基金项目: 西部交通建设科技项目 (No. 2006318802111); 中南大学自由探索计划资助项目 (No. 201012200197); 中南大学优秀博士学位论文扶植项目 (No. 2008yb004); 铁道部科技研究开发计划重点资助项目 (No. 2008G032-3)。

第一作者简介: 赵炼恒, 男, 1980年生, 博士, 讲师, 主要从事道路与铁道工程, 地基处理方面的研究。E-mail: zlh8076@163.com

性,边坡稳定性评价的准确性与实际情况仍有差距,此类边坡动态稳定性问题值得深入研究。

在已有研究成果的基础上^[1, 12],结合常用的动态分析拟静力方法并运用强度折减上限分析方法,获得了边坡稳定性评定指标安全系数(F_s)的上限解,其基本思路是根据层状岩体的抗剪强度特性,把层状岩体视为横观各向同性材料,采用抗剪强度随所求方向与层面之间的夹角线性变化的关系,引入抗剪强度变量到层状岩体动态稳定性上限方法中。对边坡建立含有变量的简单机动容许速度场,根据外力功率与内部耗能相等原理获得安全系数 F_s 的上限解的目标函数,再对该问题进行优化计算。通过与现有计算方法的对比,表明本文方法的正确性,并较为详细地分析了相关参数对层状岩体坡体安全系数和潜在破裂面的影响。

2 基本理论与假设

2.1 强度折减法

强度折减法最早由Bishop于1955年提出,岩土边坡的安全系数可以这样定义^[19-21]:为了使边坡达到破坏,给原始的剪切强度参数(c 、 φ)除以一个数,这个数就是安全系数。经过折减的剪切强度参数 c_f 和 φ_f 变为

$$c_f = c/F_s; \quad \varphi_f = \arctan(\tan \varphi/F_s) \quad (1)$$

式中: F_s 定义为剪切强度折减系数。

2.2 拟静力法动态分析

由于地震和爆破作用本身的复杂性,目前进行土工结构动态稳定性分析通常采用拟静力分析法(quasi-static analysis)^[19-20]。该方法把动态影响等效为水平方向和竖直方向上的静态力作用。不同方向上的动态影响等效静态力均作用在刚体质点上,分别采用系数 k_h 和 k_v 表示,并常把竖直方向上动态影响等效静态力当作水平方向上动态影响等效静态力的一个分量,并使

$$k_v = \zeta k_h \quad (2)$$

式中: ζ 为 k_v 相对于 k_h 的比例系数, ζ 取正值表示作用力方向向下, ζ 取负值表示作用力方向向上。研究表明, k_h 一般取值范围为(0~0.3)能够满足工程实际要求,而 ζ 一般取0.5。为分析竖直方向上等效静力对分层岩石边坡动态稳定性的影响,本文 ζ 分别取为1.0、0.5、0、-0.5、-1.0。

2.3 基于强度折减技术的极限上限分析

极限分析法建立在虚功原理的基础上,虚功率原理可叙述为:任何一组与静力许可应力场 σ_{ij}^0 平衡的外荷载 F_i 与 p_i^0 ,对任何机动许可的速度场 v_i^* 所

作的虚外功率等于静力场 σ_{ij}^0 对虚应变 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 所作的虚内功率^[22],即

$$\int_V F_i v_i^* dV + \int_{S_p} p_i^0 v_i^* dS = \int_V \sigma_{ij}^0 \dot{\epsilon}_{ij} dV \quad (3)$$

根据强度折减原理,把折减后的抗剪强度指标代入式(3),遵循一定的稳定判别条件便可将极限分析方法与强度折减技术有机的结合起来^[23]。

2.4 层状岩体抗剪强度和破坏模式

由于在生成时的地质沉积作用和环境条件,层状岩体在层面各方向的力学性质大致相同,而平行和垂直层面方向的力学性质有较大的差别,这种差别使得层状岩体具有横观各向同性介质的特点^[13]。研究还表明,层状岩体的强度参数也具有明显的各向异性特点,并与层面的倾角有很大的关系。在缓倾角阶段岩体的强度较高,破坏一般不受层面倾角的影响,但随着倾角的加大岩体强度越来越低,并在 $50^\circ \sim 70^\circ$ 之间出现最低值^[4-5]。

层状岩体分为顺层边坡和反倾边坡两种,破坏方式与岩体倾向与坡向的关系有直接联系,通常对于顺倾向层状岩体,层面倾角 ρ 小于坡角 β 时($0 \leq \rho \leq \pi/2$),岩体的破坏以顺层滑动为主;岩体反倾向时($\pi/2 \leq \rho \leq \pi$),岩体的破坏以潰屈或倾倒破坏为主^[15-18]。反倾边坡的稳定性较好,且其破坏机制与顺层边坡不同,在此仅对顺层边坡进行讨论。

采用极限分析方法分析顺层岩体边坡稳定性时,如用Mohr-Coulomb准则来描述层状岩体的强度条件,则其抗剪强度指标须满足以下条件^[1-3, 6-7]:

$$\tau = c_L(\eta) + \sigma \tan \varphi_L(\eta) \quad (4)$$

式中: τ 、 σ 分别为剪切面上单位面积的剪应力和正应力; $c_L(\eta)$ 、 $\varphi_L(\eta)$ 分别为与层面夹角有关的抗剪强度参数(黏聚力和内摩擦角),即此时的黏聚力和内摩擦角都不是常数,而是破坏面相对于层面(或最大主应力方向)夹角 η 的函数^[2-3, 6-7, 12-13]。

$c_L(\eta)$ 、 $\varphi_L(\eta)$ 与 η 之间的相互关系见图2,且由下式定义:

$$\left. \begin{aligned} c_L &= c_{\min} + (c_{\max} - c_{\min}) 2\eta/\pi \\ \varphi_L &= \varphi_{\min} + (\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) 2\eta/\pi \\ \eta &= |\theta - \rho| \quad 0 \leq \rho \leq \pi/2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: c_L 、 φ_L 分别为层状岩体沿破坏面方向的剪切强度指标; $c_{\min}$ 、 $c_{\max}$ 、 $\varphi_{\min}$ 、 $\varphi_{\max}$ 分别为岩体沿层面和垂直层面方向上的黏聚力和内摩擦角; η 为滑面方向与岩层层面的夹角。

2.5 基本假设

本文在采用极限分析上限理论对分层岩石边坡进行动态稳定性拟静力分析时，应用了如下假设：①分层岩石边坡足够长，可当作平面应变问题进行分析；②分层岩石边坡岩体为理想刚塑性体，破坏时服从线性M-C破坏准则，破坏面上某一点对应的抗剪强度指标为 c_L 、 φ_L ，并遵循相关联流动法则；③实施强度折减时仅对抗剪强度指标进行折减。④采用拟静力方式分析动荷载作用，把动荷载作用等效为外力作用，不考虑岩层及岩土体内孔隙水压力作用，也不考虑由于动态荷载影响引起岩体强度减低现象。

3 层状岩石边坡破坏能耗计算

已有研究表明，通常对于层状岩体边坡，层角倾角 ρ 小于坡角 (β) 时，岩体的破坏以顺层滑动为主。构建简单的直线单刚性块破坏模式就能够较好的符合一类工程实际^[1, 8-9, 12]。

3.1 均质岩石边坡直线破坏模式

均质岩石边坡直线破坏模式模式下的动态稳定性分析推导过程如下。

(1) 外功率

如图 1 所示，外功率做功同样包括重力、水平和竖向地震影响荷载做功 3 部分：

$$\dot{W} = \gamma \frac{H}{2 \sin \beta} L_{BC} \sin(\beta - \theta) v \cdot \left[(1 + k_v) \cos(\pi/2 - \theta + \varphi) + k_h \sin(\pi/2 - \theta + \varphi) \right] \quad (6)$$

式中： θ 为破裂面与水平方向夹角。

(2) 内能耗损率

内能耗损率为土体间断面上的能量损耗率。沿着整个破坏面的能量耗散为

$$D_L = c v \cos \varphi L_{BC} \quad (7)$$

(3) 安全系数 F_s 计算

内外能量守恒 $\dot{W} = D_L$ ，并把式(1)、(6)、(7)代入，并整理得

$$F_s = \left[2c_f \cos \varphi_f \sin \beta \right] / \left\{ \gamma H \sin(\beta - \theta) \left[(1 + k_v) \cos(\pi/2 - \theta + \varphi_f) + k_h \sin(\pi/2 - \theta + \varphi_f) \right] \right\} \quad (8)$$

式(7)给出了安全系数 F_s 的一个上限，当 θ 满足： $\partial F_s / \partial \theta = 0$ 时，即得到最小的 F_s 。

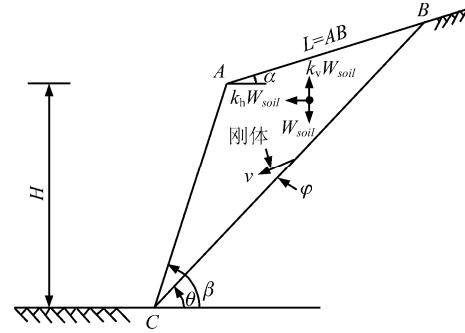


图 1 均质岩石边坡直线破坏模式

Fig.1 Translational slope failure mechanism for homogeneous rock slope

3.2 层状岩石边坡直线破坏模式

对于顺层岩石边坡，构建单刚性块破坏模式如图 2 所示。由图 2 所示，一般层状岩体层面与水平面夹角为 ρ ，可以采用同样的方法求出给定滑动面时边坡的安全系数：

$$F_s = \left[2c_{L-f} \cos \varphi_{L-f} \sin \beta \right] / \left\{ \gamma H \sin(\beta - \theta) \left[(1 + k_v) \cos(\pi/2 - \theta + \varphi_{L-f}) + k_h \sin(\pi/2 - \theta + \varphi_{L-f}) \right] \right\} \quad (9)$$

式中： c_{L-f} 、 φ_{L-f} 为初始抗剪强度参数(c_L 、 φ_L)折减后的层状岩体边坡抗剪强度参数，见式(5)。

由于直接求解的困难性，本文采用序列 2 次优化迭代方法对式(6)、(7)进行了优化迭代计算。

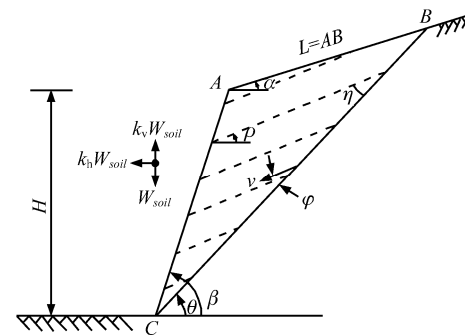


图 2 分层岩体边坡直线破坏模式

Fig.2 Translational slope failure mechanism for layered rock slope

4 静态稳定性计算与分析

4.1 静态稳定性对比计算与分析

为说明本文方法的正确性，选取文献[12]采用计算编程搜索法给出的分层岩石边坡计算实例进行临界高度和安全系数的对比计算，坡顶倾角 $\alpha = 0^\circ$ ，

坡趾倾角 $\beta = 90^\circ$, 岩层重度 $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, 岩体沿层面和垂直层面方向上的凝聚力和内摩擦角分别为: $c_{\min} = 3 \text{ kPa}$, $c_{\max} = 10 \text{ kPa}$, $\varphi_{\min} = 30^\circ$, $\varphi_{\max} = 50^\circ$, 岩层倾角 ρ 的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 其中安全系数的计算方法采用上述优化迭代计算法, 其坡高分别为同样条件下计算所得的临界高度 H_L , 理论上同样条件下该临界高度的分层岩体边坡的安全系数为 $F_s = 1.0$ 。

由表 1 可知, 静态条件下本文计算的结果与文献[12]采用同类方法的结果基本一致, 说明静态条件下本文方法具有颇好的正确性。

表 1 分层岩体边坡静态稳定性对比

Table 1 Comparisons of the present results and the approach solutions in existence for layered rock slopes

计算参数		文献[12]			本文	
$\beta / (^\circ)$	$\rho / (^\circ)$	$(\beta - \theta) / (^\circ)$	$H_{\text{critical}} / \text{m}$	F_s	$(\beta - \theta) / (^\circ)$	F_s
90	0	27.000	5.13	1.000 0	27.291	0.999 6
90	10	29.000	4.27	1.000 0	29.462	1.000 4
90	20	32.000	3.51	1.000 0	31.867	0.999 5
90	30	35.000	2.81	1.000 0	34.748	0.999 8
90	40	38.000	2.17	1.000 0	38.420	0.999 0
90	45	40.900	1.86	1.000 0	40.856	0.999 4
90	46	41.400	1.80	1.000 0	41.408	0.999 1
90	47	42.000	1.74	1.000 0	41.993	0.998 8
90	48	42.000	1.68	1.0000	42.000	1.000 1
90	49	41.000	1.62	1.000 0	41.000	1.000 6
90	50	40.000	1.58	1.000 0	40.000	1.000 0
90	60	30.000	1.39	1.000 0	30.000	0.999 8
90	70	20.000	1.58	1.000 0	20.000	0.999 8
90	80	21.000	2.03	1.000 0	20.689	1.000 1
90	90	21.000	2.48	1.000 0	21.037	1.000 0

注: β 为边坡倾角; ρ 为岩层倾角; $(\beta - \theta)$ 为破坏角; H_{critical} 为临界高度; F_s 为理论值。

4.2 静态稳定性参数分析

不考虑动载影响, $\alpha = 0^\circ$, $c_{\min} = 50 \text{ kPa}$, $c_{\max} = 300 \text{ kPa}$, $\varphi_{\min} = 20^\circ$, $\varphi_{\max} = 40^\circ$, 岩层倾角(ρ)的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 条件下层状岩坡安全系数 F_s 和破坏面水平倾角 θ 分别随坡趾倾角 β , 岩层重度 γ 和边坡垂直高度(H)变化情况如图 3~5 所示。

由图 3 可以看出, 边坡垂直高度 $H = 10 \text{ m}$, 边坡倾斜角 $\beta = 75^\circ$, 不考虑动载影响和其他条件一致的情况下, 岩层 γ 和 ρ 均对顺层岩坡安全系数 F_s 和破坏面水平倾角 θ 影响较大; ρ 一定, γ 增大, F_s 降低而 θ 将增大, 岩层重度 γ 的增加对边坡安全存在不利影响; γ 一定, ρ 增大, F_s 先降低后增大而 θ 先减小后增大再减小。同时可见, 随着重度 γ 的减小, 边坡发生顺层滑坡的可能性增大, 破坏面水平倾角 θ 范围也逐渐扩大。

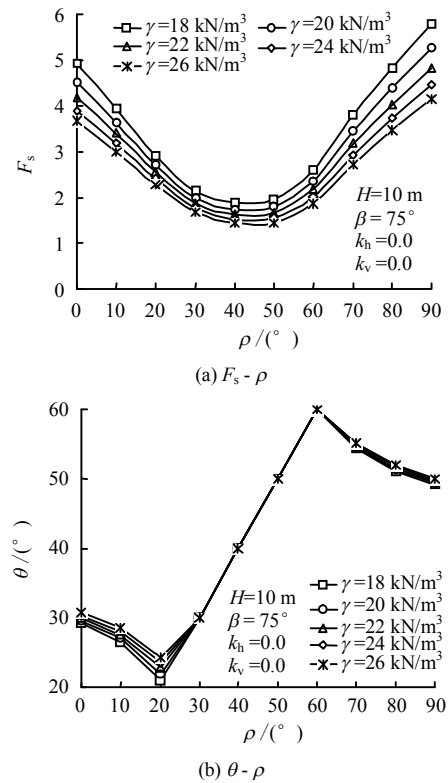


图 3 安全系数和破坏面水平倾角随岩层重度和岩层倾角变化

Fig.3 Safety factor and level inclination of failure surface versus bulk density and strata inclination

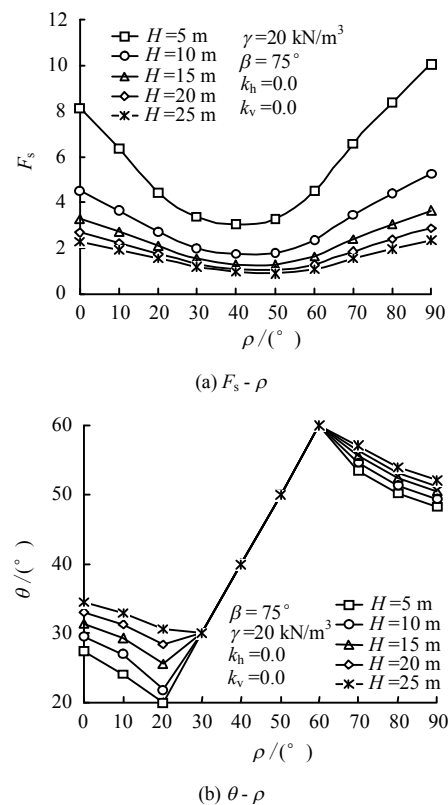


图 4 安全系数和破坏面水平倾角随岩层重度和岩层倾角变化

Fig.4 Safety factor and level inclination of failure surface versus slope height and strata inclination

由图 4 可以看出, $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$, $\beta=75^\circ$, 不考虑动载影响和其他条件一致的情况下, H 和 ρ 均对顺层岩坡 F_s 和 θ 影响较大。 ρ 一定, H 增大, F_s 减小而 θ 增大, H 的增加对边坡安全存在不利影响; H 一定, ρ 增大, F_s 先降低后增大而 θ 先减小后增大再减小。同时还可知, H 减小, θ 范围逐渐扩大, 边坡发生顺层滑坡的可能性也增大。

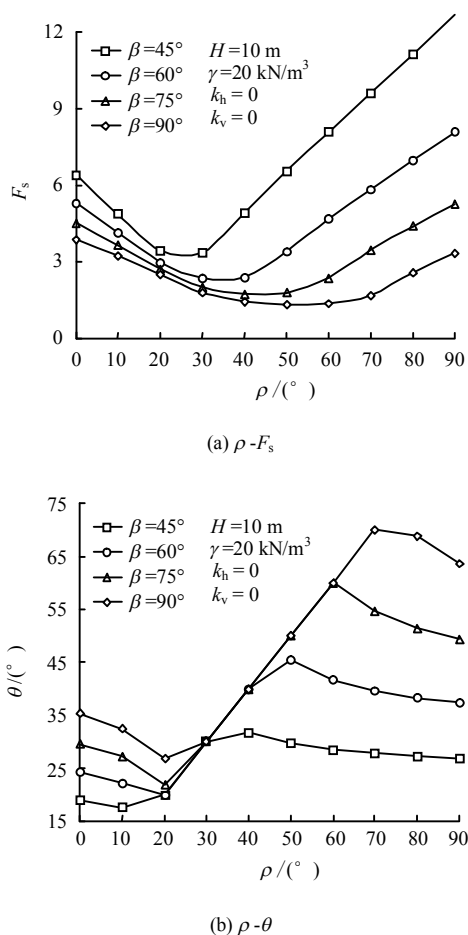


图 5 安全系数和破坏面水平倾角随边坡倾斜角和岩层倾角变化

Fig.5 Safety factor and level inclination of failure surface versus angle of slope and strata inclination

由图 5 可以看出, $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$, $H=10 \text{ m}$, 不考虑动载影响和其他条件一致的情况下, β 和 ρ 均对顺层岩坡 F_s 和 θ 影响较大。当 ρ 一定, β 增大, F_s 降低而 θ 将增大, β 的增加对边坡安全存在不利影响; 当 β 一定, ρ 增大, F_s 先降低, 后增大, 而 θ 先减小, 后增大, 再减小。同时还可知, β 增大, θ 范围逐渐扩大, 边坡发生顺层滑坡的 ρ 角度也增大, 且 ρ 范围也增加, 边坡更容易发生顺层失稳。

由图 3~5 均可知, 边坡安全系数和破坏范围受边坡坡度、岩层重度、边坡高度和岩层倾角的控

制, 当边坡顺着岩层倾角方向破坏时, 边坡安全系数最低, 层状岩坡最容易发生顺层滑坡。

5 层状岩坡动态稳定性拟静力分析

5.1 水平动效应对安全系数和破坏面的影响

仅考虑水平方向上的动载效应($k_v=0.0$), $\alpha=0^\circ$, $\beta=75^\circ$, $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$, $H=10 \text{ m}$, $c_{\min}=50 \text{ kPa}$, $c_{\max}=300 \text{ kPa}$, $\varphi_{\min}=20^\circ$, $\varphi_{\max}=40^\circ$, 岩层倾角 ρ 的变化范围为 $0^\circ\sim90^\circ$ 条件下, 层状岩坡 F_s 、 θ 随水平方向动载效应 k_h 变化情况如图 6 所示。

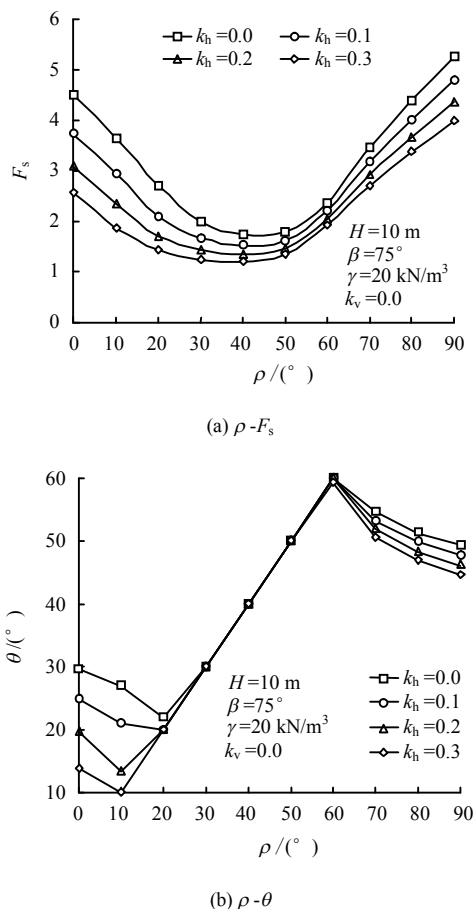


图 6 安全系数和破坏面水平倾角随水平地震效应系数和岩层倾角变化

Fig.6 Safety factor and level inclination of failure surface versus horizontal seismic coefficients and strata inclination

由图 6 可以看出, 不考虑竖向方向动载影响和其他条件一致的情况下, k_h 和 ρ 均对 F_s 和 θ 影响较大。 ρ 一定, k_h 增大, F_s 和 θ 同时减小, k_h 的增加对边坡安全存在较大不利影响。 k_h 一定, ρ 增大, F_s 先降低, 后增大, 而 θ 先减小, 后增大, 再减小。同时还可知, k_h 增大, θ 范围逐渐扩大。当 $k_h=0.3$ 时, 边坡发生顺层滑坡的岩层倾角 ρ 范围为 $10^\circ\sim60^\circ$, 表明边坡发生顺层滑坡的可能性明显增大。

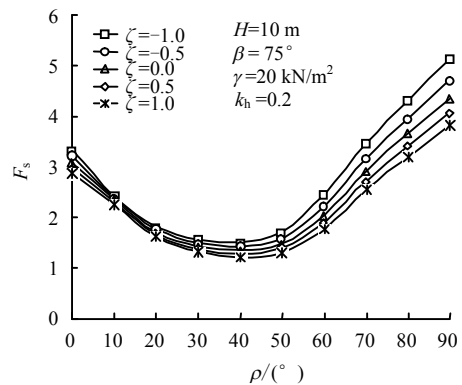
5.2 竖向动效应对安全系数和破坏面的影响

现有研究在进行土工结构动态稳定性分析时,较少考虑竖直方向上动态影响等效静态力作用,以上分析也主要针对水平地震影响荷载层状岩体边坡动态稳定性的影响。然而,现有研究表明^[1-2],当地震影响达到一定强度,忽视竖向地震影响将会导致设计保守。

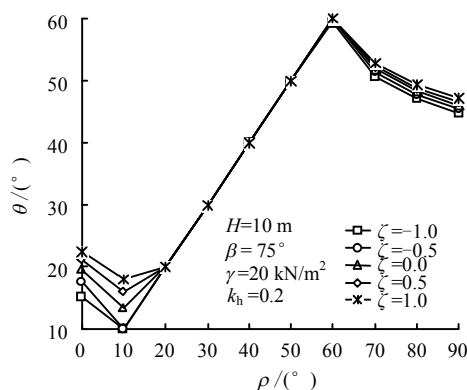
同时考虑水平方向上和竖直方向上的动载效应, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 75^\circ$, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $H = 10 \text{ m}$, $k_h = 0.2$, $c_{\min} = 50 \text{ kPa}$, $c_{\max} = 300 \text{ kPa}$, $\varphi_{\min} = 20^\circ$, $\varphi_{\max} = 40^\circ$, ρ 的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 条件下 F_s 和 θ 随竖直方向动载效应比例系数 ζ 变化情况如图 7 所示。

由图 7 可以看出,同时考虑竖向和水平方向动载影响和其他条件一致的情况下, ζ 、 ρ 均对 F_s 、 θ 影响较大; ρ 一定, ζ 增大, F_s 减小而 θ 增大, ζ 的增加对 F_s 存在较大不利影响; ζ 一定, ρ 增大, F_s 先降低后增大而 θ 先减小, 后增大, 再减小。同时还可知, ζ 减小, θ 范围逐渐扩大, 当 $\zeta = -1.0$ 时, ρ 范围为 $10^\circ \sim 60^\circ$, 表明边坡发生顺层滑坡的可能性也明显增大。

同时考虑水平方向上和竖直方向上的动载效应, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 75^\circ$, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $H = 10 \text{ m}$, $c_{\min} = 50 \text{ kPa}$, $c_{\max} = 300 \text{ kPa}$, $\varphi_{\min} = 20^\circ$, $\varphi_{\max} = 40^\circ$, ρ 分别为 10° 、 40° 和 70° 条件下, F_s 和 θ 随 k_h 和 ζ 变化情况如图 8 所示。



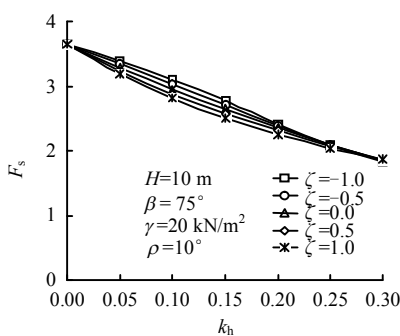
(a) $\rho - F_s$



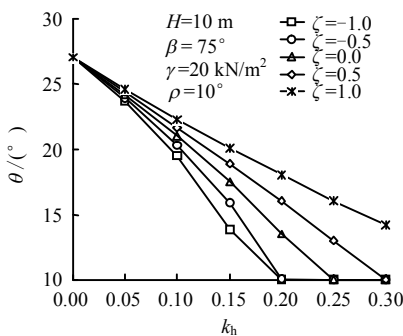
(b) $\rho - \theta$

图 7 安全系数和破坏面水平倾角随竖直地震效应比例系数和岩层倾角变化

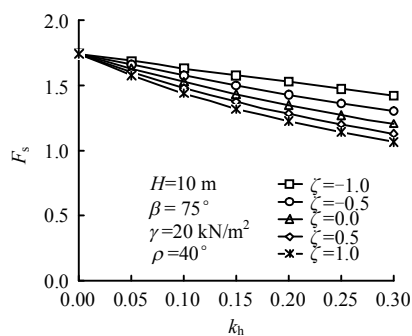
Fig.7 Safety factor and level inclination of failure surface versus the vertical seismic proportional coefficients and strata inclination



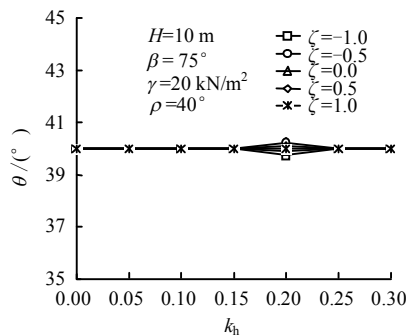
(a) $k_h - F_s$, $\rho = 10^\circ$



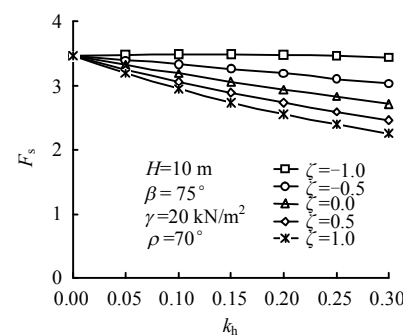
(b) $k_h - \theta$, $\rho = 10^\circ$



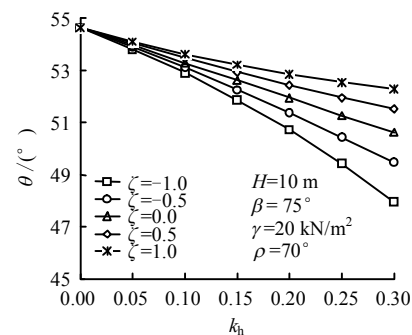
(c) $k_h - F_s$, $\rho = 40^\circ$



(d) $k_h - \theta$, $\rho = 40^\circ$



(e) $k_h - F_s$, $\rho = 70^\circ$



(f) $k_h - \theta$, $\rho = 70^\circ$

图 8 安全系数和破坏面水平倾角随水平地震效应系数、竖直地震效应比例系数和岩层倾角变化

Fig.8 Safety factor and level inclination of failure surface versus the horizontal seismic effect coefficients, the vertical seismic proportional coefficients and strata inclination

由图 8 可以看出, 同时考虑竖向和水平方向动载影响和其他条件一致的情况下, k_h 、 ζ 和 ρ 均对 F_s 和 θ 影响较大; ρ 一定, k_h 增大, F_s 减小, ζ 增大, F_s 减小, k_h 和 ζ 共同作用下, 边坡安全系数 F_s 最小, 对边坡安全不利影响达到最大。由图 8 还可看出, ρ 较小的情况下, k_h 和 ζ 对 F_s 影响也较小, 且 ρ 对 F_s 影响随着 ρ 增大而增加。同时, 当 ρ 处于一定范围时, 边坡几乎总是发生顺层失稳, 如图 8(d) 所示, 任何情况下, $\rho=40^\circ$ 的边坡总是发生顺层失稳。故实际工程中要特别注意 ρ 处于一定范围的顺层边坡, 结合本文前述分析可知, $\rho=30^\circ\sim 60^\circ$ 发生顺层失稳的概率最大, 工程中需特别注意。

6 结 论

(1) 静态和其他条件一致的情况下, 边坡安全系数和破坏范围受边坡坡度、岩层重度、边坡高度和岩层倾角的控制。边坡垂直高度增高, 岩层重度增加, 坡倾斜角增大和处于一定范围内的岩层倾角均对边坡稳定性存在不利影响; 而随着边坡垂直高度的减小, 重度的减小, 坡倾斜角的增大, 边坡失稳破坏面水平倾角范围逐渐扩大, 边坡发生顺层滑坡的可能性相应也增大。

(2) 考虑动载影响和其他条件一致的情况下, 边坡安全系数和破坏范围受水平方向动载效应系数、竖直方向动载效应比例系数和岩层倾角的控制。水平方向动载效应系数, 竖直方向动载效应比例系数和处于一定范围内的岩层倾角均对边坡稳定性存在不利影响。而随着水平方向动载效应系数增大, 竖直方向动载效应比例系数的减小, 边坡失稳破坏面水平倾角范围逐渐扩大, 边坡发生顺层滑坡的岩层倾角范围为增大, 表明边坡发生顺层滑坡的可能性也明显增大。

(3) 静态和动态条件下, 当岩层倾角(ρ)处于一定范围时, 层状岩坡几乎总是发生顺层失稳, 且这种趋势随着其他条件改变而略有变化, 通常 $\rho=30^\circ\sim 60^\circ$ 发生顺层失稳的可能性最大。

基于拟静力方法, 本文分析了层状软岩岩坡的动态稳定性, 破坏模式仅采用了简单的单滑块模式, 考虑的因素也比较有限。构建更为符合工程实际的破坏模式和考虑复杂影响因素效应的能耗计算方面还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 鲜学福, 谭学术. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [2] SERRANO A, OLALLA C. Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass, Part I: Basic modes of failure[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1998, 35(3): 301—324.
- [3] TALIERCIO A, LANDRIAN G S. A failure condition for layered rock[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1988, 25(5): 299—305.
- [4] ABBAS A A-H. Effect of planar structures on the anisotropy of Ranyah sandstone, Saudi Arabia[J]. *Saudi Arabia. Engineering Geology*, 1998, 50 (1): 49—57.
- [5] NASSERI M H B, RAO K S, RAMAMURTHY T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayanschists[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40 (1): 3—23.
- [6] 张玉军, 刘谊平. 层状岩体抗剪强度的方向性及剪切破坏面的确定[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 254—255.
ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. Anisotropy of shear strength of layered rocks and determination of shear failure plane[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(3): 254—257.
- [7] 刘卡丁, 张玉军. 层状岩体剪切破坏面方向的影响因素[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 335—339.
LIU Ka-ding, ZHANG Yu-jun. Influence factors on shear failure orientation of layered rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 335—339.
- [8] 范文, 俞茂宏, 李同录, 等. 层状岩体边坡变形破坏模式及滑坡稳定性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 983—986.
FAN Wen, YU Mao-hong, LI Tong-lu, et al. Failure pattern and numerical simulation of landslide stability of stratified rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(Supp.): 983—986.
- [9] 冯兆祥, 林闽, 陈志坚. 层状岩质边坡中最不利滑裂面迁移现象的研究[J]. 高校地质学报, 2002, 8(4): 466—472.
FENG Zhao-xiang, LIN Min, CHEN Zhi-jian. Study on the transition of the most dangerous lip surface in layered rocky slope[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(4): 466—472.
- [10] 门玉明, 彭建兵, 李寻昌, 等. 层状结构岩质边坡动力稳定性试验研究[J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 131—136.
MEN Yu-ming, PENG Jian-bing, LI Xun-chang, et al. Research on vibration testing of models for dynamic stability of rock slope with layered structures[J]. *World Earthquake Engineering*, 2004, 20(4): 131—136.

- [11] 郝建斌, 门玉明, 彭建兵, 等. 层状岩体边坡动力稳定性模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(6): 72—75.
HAO Jian-bin, MEN Yu-ming, PENG Jian-bing, et al. Research on dynamic stability of layered rocky slope with model test[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2005, 22(6): 72—75.
- [12] 李新坡, 何思明, 徐骏, 等. 层状岩质边坡临界高度极限分析上限解[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(1): 44—47.
LI Xin-po, HE Si-ming, XU Jun, et al. Critical height analysis for bedding rock slopes using upper bound method of limit analysis[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2007, 39(1): 44—47.
- [13] 王启耀, 蒋臻蔚. 层状岩体的力学特征和数值模拟方法研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(9): 10—15.
WANG Qi-yao, JIANG Zhen-wei. Study on the stress characteristic of layered rock and its numerical simulation methods[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2005, 22(9): 10—15.
- [14] 李天扶. 层状岩体边坡顺层破坏机理研究[J]. 水利发电, 1996, (6): 45—50.
LI Tian-fu. Study on bedding failure mechanism of bedded rock side slope[J]. **Water Power**, 1996, (6): 45—50.
- [15] 程东幸, 刘大安, 丁恩保, 等. 层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1362—1366.
CHENG Dong-xing, LIU Da-an, DING En-bao, et al. Analysis of influential factors and toppling conditions of toppling rock slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(11): 1362—1366.
- [16] 左保成, 陈从新, 刘小巍, 等. 反倾岩质边坡破坏机理模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 3505—3511.
ZUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Xiao-wei, et al. Modeling experiment study on failure mechanism of counter-tilt rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(9): 3505—3511.
- [17] 卢增木, 陈从新, 左保成, 等. 对影响逆倾层状边坡稳定性因素的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 629—647.
LU Zeng-mu, CHEN Cong-xin, ZUO Bao-cheng, et al. Experimentation research on factors influencing stability of anti-dip layered slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 629—647.
- [18] 蔡跃, 三谷泰浩, 江崎哲郎. 反倾层状岩体边坡稳定性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2517—2522.
CAI Yue, MITANI Yasuhiro, ESAKI Tetsuro. Numerical analysis of stability for an antidip stratified rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(12): 2517—2522.
- [19] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析、原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 87—120.
- [20] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 凌天清. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [21] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. **Geotechnique**, 1955, 5(1): 7—17.
- [22] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. New York: Elsevir Scientific Publishing Co., 1975.
- [23] MICHALOWSKI R L. Slope stability analysis: A kinematical approach[J]. **Geotechnique**, 1995, 45(2): 283—93.

上接第 3626 页

- [18] 周小平, 哈秋龄, 张永兴. 考虑裂隙间相互作用情况下围压卸荷过程应力-应变关系[J]. 力学季刊, 2002, 23(2): 227—235.
ZHOU Xiao-ping, HA Qiu-ling, ZHANG Yong-xing. Constitutive model for crack-weakened rock mass under confining pressure unloading with crack interaction effect[J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 2002, 23(2): 227—235.
- [19] 尤明庆, 苏承东, 徐涛. 岩石试样的加载卸载过程及杨氏模量[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 588—592.
YOU Ming-qing, SU Cheng-dong, XU Tao. Loading or unloading process in axial direction and Young's modulus of rock specimen[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(5): 588—592.
- [20] 卢文波, 金李, 陈明. 节理岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 1): 4653—4657.
LU Wen-bo, JIN Li, CHEN Ming. Study on the mechanism of jointed rock mass loosening induced by dynamic unloading of initial stress during rock blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 4653—4657.
- [21] 易长平, 卢文波, 许红涛, 等. 岩体开挖过程中初始应力的动态卸荷效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 1): 4750—4754.
YI Chang-ping, LU Wen-bo, XU Hong-tao, et al. Study on effects of dynamic unloading on initial stress during rock excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 4750—4754.