

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-1141-04

基于岩体刚度的顺层岩质滑坡破坏特性研究

程圣国^{1,2}, 方坤河¹, 罗先启², 刘德富²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002;)

摘 要: 应用力学手段研究顺层岩质边坡失稳机理以及顺层岩质边坡稳定与其刚度密切相关在该领域获得了较多研究者认可, 力学分析也成为顺层岩质边坡稳定研究的重要手段之一, 在顺层岩质边坡刚度对其稳定的影响获得广泛的关注同时, 却未能有人专门研究其刚度与其破坏特性之间的关系, 为此在总结前人研究成果基础上, 采用柔度作为其刚度指标, 认为顺层岩质边坡破坏力学模型、破坏形态以及临界长度与其柔度大小密切相关, 在其柔度小于临界柔度值时, 可简化为杆模型, 在其柔度值大于其临界柔度值时, 根据其实际坡长, 可简化为梁或杆模型, 并分析了柔度大小与其破坏特征之间的关系, 指出溃屈破坏一般只在特定的情况下发生。

关 键 词: 顺层岩质边坡; 刚度; 柔度

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

Study failure character for bedding rock slope based on stiffness of rock

CHENG Sheng-guo^{1,2}, FANG Kun-he¹, LUO Xian-qi², Liu De-fu²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University Wuhan 430072, China; 2. China Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The mechanical analysis is an important means for studying failure mechanism of bedding rock slope. Stiffness is strong effects on its stability greatly. The paper brings forward some viewpoints based on summarizing the existed works. Adopting flexibility to measure stiffness of bedding rock slope, we can achieve the relation between mechanical model, failure character and critical slope length of bedding rock slope. If the value of flexibility is smaller than critical flexibility, bedding rock slope can be simplified to pole model. If the value of flexibility is greater than critical flexibility, bedding rock slope can be simplified to pole or girder model according to actual slope length; and buckling failure of bedding rock slope happens only under special condition.

Key words: bedding rock slope; Stiffness; flexibility

1 引 言

自孙广忠教授^[1] (1988) 应用力学手段和观点解释顺层岩质边坡失稳机理以来, 岩体结构力学成为顺层岩质边坡研究中的一个重要手段, 最具有代表性成果有刘钧^[2] (1997) 等人认为层状结构顺层岩质边坡失稳机理的力学模型可简化为梁模型, 其变形为纵横弯曲, 在假设其变形模态方程下根据能量原理对顺层岩体失稳破坏进行探讨, 但其未充分重视岩体刚度对破坏形态的影响、未考虑软弱夹层软化影响以及边坡屈曲隆起段的极限长度, 使其结论量化存在难度; 李云鹏^[3] (2000) 等人在假设

模态方程情况下根据对结构后屈曲形态分析确定了边坡屈曲隆起段的极限长度试算方程; 朱晗^[4]

(2004) 等人也认为其可以简化为梁模型, 并根据特殊函数法求解多层层状岩体屈曲的精确微分方程, 通过试算法确定临界坡长, 该方法是目前为止求解临界坡长最成功的手段。顺层岩质边坡失稳的力学模型可简化为梁或杆获得了研究者广泛认可的, 本文在总结前人研究成果基础上, 采用柔度作为其刚度指标, 认为顺层岩质边坡力学模型、破坏形态以及临界长度与其柔度大小密切相关, 顺层岩质边坡梁、杆力学模型有其自身的使用条件, 在其柔度小于临界柔度值时, 简化为杆模型是适宜的,

收稿日期: 2006-06-25

作者简介: 程圣国, 1972 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程力学方面研究。Email: csg@ctgu.edu.cn

在柔度值大于其临界柔度值时,根据实际坡长大小,可简化为梁或杆模型,并定性研究了柔度大小与其破坏特征之间的关系,指出溃曲破坏型一般只在柔度较大、实际坡长达到一定程度等特定的情况下才发生。

2 破坏形态分析

顺层岩质滑坡是最常见、最典型的自然层面滑坡,如2003年7月三峡库区发生的千将坪特大滑坡即为典型的平面滑动前沿剪出型深层基岩顺层滑坡、雅砻江下游霸王山边坡破坏一直被认为是溃曲破坏岩质顺层滑坡的典型,这些顺层岩质滑坡的形成与其岩性、岩体刚度和坡体结构密切相关,多发生在层状结构岩体,尤其是软硬交互的沉积岩中,从构造上讲,则多出现在构造作用比较轻微或不太强烈的背斜或单斜构造地区。顺层岩质边坡其破坏模式可分为平面滑动前沿剪出型、完全平面型、溃曲破坏型和楔槽形破坏型四种类型,其中平面滑动前沿剪出型与溃曲破坏是顺层岩质滑坡破坏的主要形式。顺层岩质边坡失稳主要是自重作用下渐进破坏的结果,在自重及其它荷载作用下,边坡岩体各点的应力状态不断变化,最大主应力趋向平行于坡面,在坡脚处出现应力集中,层状岩体沿层间结合软弱处裂开并错动,在坡体后缘出现一系列拉裂缝,若坡脚附近无临空条件时,差异性层间错动受阻,在坡脚出现轻微弯曲隆起变形,局部出现微弱架空现象(图1、2),随着荷载进一步增加或岩体受水等因素软化其物理力学性能降低,导致顺层岩质边坡整体失稳破坏。基于其破坏的渐进性,有研究者^[3]认

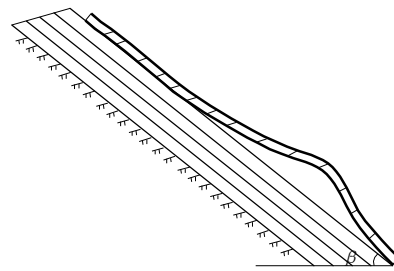


图2 顺层岩质边坡破坏示意图
Fig.2 Sketch of failure of bedding rock slope

为应考虑其后屈曲效应,认为岩体屈曲实际上并不意味着其承载能力的完全丧失,而只是岩体结构稳定性发生改变的分叉特征,仍然具有一定承载能力,随着滑动位移增加,边坡岩层渐进性脱离底层,锁固段岩体逐渐被剪断导致边坡岩体整体破坏,导致边坡整体失稳,本文不考虑其后屈曲效应。

3 岩体刚度与破坏特性

3.1 力学分析

设顺层岩质边坡坡角为 β 、坡面长为 L ,整个岩层可分为AB和BC两部分,其中AB段为屈曲隆起段,长为 l ;下滑段BC长为 $L-l$,对AB段有推动作用,推力为 P ;岩层厚度为 b ,容重为 γ_R ;沿宽度方向取单位长度,AB段简化为梁或杆模型,其两端固定,力学模型及主要参数选取如下:

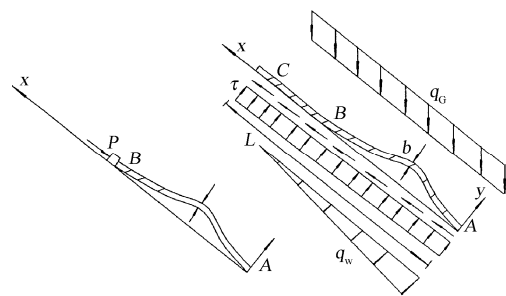
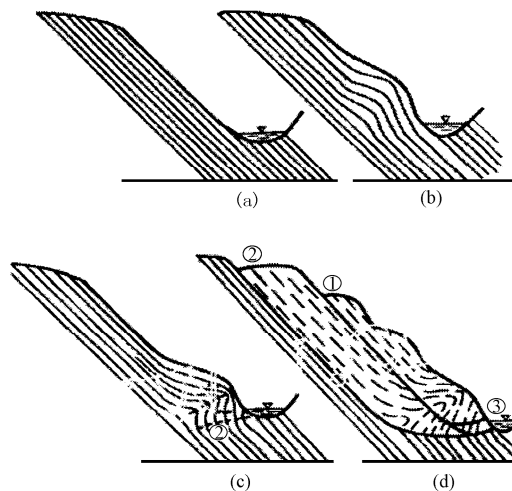


图3 顺层岩质滑坡破坏力学模型
Fig.3 Mechanical Model of failure of bedding rock slope

岩体自重分布力集度为 q_G , $q_G = \gamma_R b$;地下水浮托力分布集度为 q_w (假设地下水位达到地表), $q_w = q_0(1-x/l_0)$, q_0 为A点处静水压力值;设沿斜面岩层的剪应力 τ 均匀分布, $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$, 其中: c 为软弱面粘聚力, ϕ 为内摩擦角。分析可知: $P = \gamma_R b \sin \beta - (\gamma_R b \cos \beta \tan \phi - c)(L-l)$



①次滑面②主滑面③沿“X”节理形成的滑面

图1 顺层岩质滑坡滑移形成过程^[5]
Fig.1 Formation process of slip of bedding rock landslide

3.2 岩体刚度分析

众多研究者十分关心岩体刚度对顺层边坡岩体破坏极限长度的影响, 一般而言, 岩体刚度越大, 其破坏临界长度也越大, 岩体厚度越大, 破坏临界长度越小, 但目前还没有岩体刚度对顺层岩质边坡破坏形态影响研究的成果, 岩体刚度对顺层岩质边坡破坏形态的影响是存在的, 若用岩体柔度表征其刚度大小, 根据欧拉压杆稳定理论可知, 若压杆为小柔度杆时, 即 $\lambda < \lambda_p$, 压杆破坏受杆的破坏强度控制; 若压杆为大柔度杆时, 即 $\lambda \geq \lambda_p$, 其极限荷载按压杆失稳理论计算即根据欧拉公式确定, 其中: λ 为压杆的柔度, λ_p 为压杆柔度临界值。

顺层岩质边坡破坏形式与其柔度密切相关, 一般而言, 其柔度(刚度)越大, 其柔度大小决定其破坏的力学模型类型和最终破坏形式, 若其 $\lambda < \lambda_p$, 则顺层岩质边坡破坏为其岩土体自身强度所控制, 其破坏可简化为欧拉压杆模型, 其破坏强度受岩体主拉应力或软弱夹层剪切强度控制; 若岩体柔度大于其压杆柔度临界值时 $\lambda \geq \lambda_p$, 其破坏力学模型为纵横弯曲梁模型或杆模型, 其破坏形态受岩土体力学特性等因素影响。

3.3 顺层岩质边坡破坏形态研究

3.3.1 小柔度失稳

当 $\lambda < \lambda_p$ 时: 即 $\frac{\mu l}{i} < \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_p}}$

其中 $\mu = 0.5$; σ_p 为岩体的抗压弹性极限强度;

$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$, I 为横截面对中性轴的惯性距, A 为横截面

面积

即 $\frac{l}{\sqrt{Eb}} < \pi \sqrt{\frac{1}{3\sigma_p}}$ 时, 顺层岩质边坡小柔度情况下

失稳判据为:

(1) 当坡脚临空条件好, 顺层岩体沿软弱夹层发生完全平面滑动破坏时:

$$(\gamma_R bl \sin \beta - \gamma_R bl \cos \beta \tan \phi - cl) / b > [\tau]$$

临界坡长为:

$$L_{cr1} = \frac{[\tau]}{\gamma_R \sin \beta - \gamma_R \cos \beta \tan \phi - c / b}$$

式中 $[\tau]$ 为软弱夹层抗剪强度。

(2) 当坡脚无临空条件时, 顺层岩体发生平面滑动前沿剪出型破坏, 最危险部位为岩体最下端的外表面:

$$\frac{\gamma_R l \sin \beta}{2} > [\tau_R]$$

$$\text{临界坡长为: } L_{cr2} = \frac{2[\tau_R]}{\gamma_R l \sin \beta}$$

其中 $[\tau_R]$ 为岩体抗剪强度。

3.3.2 大柔度失稳

若 $\lambda \geq \lambda_p$, 其破坏力学模型可为纵横弯曲梁模型或杆模型, 其破坏形态与受力状态、岩土体力学特性等因素影响, 我们不妨设 $\lambda = \lambda_p$ 时岩体长度为发生屈曲的第一临界长度: 即 $l_{k1} = \pi \sqrt{Eb / 3\sigma_p}$, 仅当坡体长度大于该数值时才有发生溃曲破坏的可能。

当 $L \geq l_{k1}$ 时, 若坡脚无临空条件, 顺层岩质边坡必然发生屈曲, 根据欧拉压杆理论, 此时其控制条件为稳定条件或弯曲破坏条件, 并首先受稳定条件控制, 随着坡体长度的增加, 岩体同样分为失稳破坏段和推力提供段两部分, 而且随着失稳破坏段增加, 其极限荷载减小, 提供下滑力岩体长度也可相应减小, 我们可以设发生失稳破坏状态下的坡体最小长度为 l_{k2} , 其确定由下式联合求解确定。

$$\text{Min}\{L=l_1+l_2\}$$

$$\text{受约束: } P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l_1)^2} = \frac{4\pi^2 EI}{l_1^2},$$

$$P_{cr} = P + \frac{1}{2} p_x l_1, \quad l_1 > 0, \quad l_2 > 0$$

$$\text{其中 } P = (\gamma_R b l_2 \sin \beta - \gamma_R b l_2 \cos \beta \tan \phi - c l_2), \\ p_x = \gamma_R b \cos \beta$$

当 $l_{k1} \leq L \leq l_{k2}$ 时, 其不具备发生溃曲破坏的基本条件, 其变形与破坏受屈曲渐进破坏控制, 可简化为梁的纵横弯曲力学模型, 相应的坡体临界长度 L_{cr3} 文献[4]采用试算法获得求解, 其破坏形态一般多为屈曲渐进失稳破坏。

当坡体长度 $L \geq l_{k2}$ 时, 其具备发生失稳破坏的条件, 相应力学模型为压杆, 其破坏形式一般多为溃曲破坏。其临界坡长为 $L_{cr4} = l_{k2}$

当 $L \geq l_{k1}$ 时且坡脚临空条件好时, 一般仍多发生完全平面型破坏, 其力学模型可简化为杆, 对应临界坡长为

$$L_{cr5} = \frac{[\tau]}{\gamma_R \sin \beta - \gamma_R \cos \beta \tan \phi - c / b}$$

4 结 语

(1) 可采用柔度作为顺层岩质边坡的刚度指标, 其柔度大小与力学模型抽象、破坏形态及临界

表 1 顺层岩体刚度与破坏特性关系
Table 1 Relation between stiffness of rock and failure character of bedding rock slope

刚度条件	坡脚条件	力学模型	临界长度	破坏形态
$\lambda < \lambda_p$	临空条件好	杆	$L_{cr1} = \frac{[\tau]}{\gamma_r \sin \beta - \gamma_r \cos \beta \tan \phi - c/b}$	多为完全平面型
	无临空条件	杆	$L_{cr2} = \frac{2[\tau_k]}{\gamma_r / \sin \beta}$	多为平面滑动前沿剪出型
$\lambda \geq \lambda_p$	无临空条件	梁	L_{cr3} 采用试算法确定 ^[4]	$l_{k1} \leq L \leq l_{k2}$ 时, 多发生带有屈曲渐进破坏
		杆	$L_{cr4} = l_{k2}$	坡长 $L > L_{cr3}$ 时, 多发生溃曲破坏
	临空条件好	柱 (杆)	$L_{cr5} = \frac{[\tau]}{\gamma_r \sin \beta - \gamma_r \cos \beta \tan \phi - c/b}$	多为完全平面型

坡长均密切相关, 在柔度小于临界柔度值时, 可简化为杆模型, 在柔度值大于其临界柔度值时, 根据其实际坡长大小, 可简化为梁或杆模型。

(2)定性研究了柔度大小与其破坏特征之间的关系, 指出溃曲破坏型一般只在柔度较大、实际坡长达到一定程度等特定的情况下才发生。

(3)本课题研究从力学理论上探讨了顺层岩质边坡刚度对其破坏形态与临界坡长的影响, 需进一步研究其在边坡工程成灾机理与防护中的应用。

参 考 文 献

[1] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1988

[2] 刘钧. 顺层边坡弯曲破坏的力学分析[J]. 工程地质学报, 1997, 5(4): 335—339.

[3] 李云鹏, 杨治林, 王芝银. 顺层边坡岩体结构稳定性位移理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 747—750.

[4] 朱晗迺, 马美玲, 尚岳全. 顺倾向层状边坡库区破坏分析[J]. 浙江大学学报 (工学版), 2004, 38(9): 1 144—1 149.

[5] 李树森, 任光明, 左三胜. 层状结构岩体顺层斜坡失稳机理力学分析, 地质灾害与环境保护, 1995, 6(2): 24—29.

[6] Wang Z Y. Research displacement criterion of structural deformation and failure for bedding rock slope[J]. Scientia Geological Sinica, 1998, 7(2): 217—224.

[7] 孙训方, 胡增强, 金心全. 材料力学 (下册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.12.

[8] Fa-Wu Wang. Ye-Ming Zhang. Zhi-Tao Huo, The July 14, 2003 Qianjiangping landslide, Three Gorges Reservoir, China, Landslides 2004(1): 157 162.