

一类含裂隙岩质边坡的滑动弱化逐步破坏机理*

张均锋 丁 桦 徐永君 孟祥跃

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 含裂隙的岩土材料在剪切作用下,随着剪应变的增加,裂纹端部一定区域内的强度会表现出滑动弱化的现象。岩土材料这种性质的变化不同于粘性土结构性破坏,也不同于剪胀。在一定的载荷作用下,坡体内裂隙端部的滑动弱化使坡体内的应力重新分配,从而使得应力集中加剧,裂隙尖端进一步扩展,造成岩体结构性的破坏,乃至整个滑面的贯通直至发生滑坡。因此,滑动弱化是一类含裂隙岩质边坡滑坡的机理。

关键词 岩石力学, 岩质边坡, 滑动弱化, 逐步破坏

分类号 TU 457

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)21-3679-05

MECHANISM OF PROGRESSIVE FAILURE OF A KIND OF FAULTED ROCK SLOPE DUE TO SLIP-WEAKENING

Zhang Junfeng, Ding Hua, Xu Yongjun, Meng Xiangyue

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

Abstract Slip-weakening is one of the characteristics of faulted rock material under a certain loading condition. Non-uniform rock structure may exist in the vicinity of the slip surface in a rock slope. Some portions of the slip surface may be mutually penetrated but the others may not. For the latter case, the cracks or the fault surfaces will undergo shear deformation before a successive surface forms under certain loadings. As the slipped portion advances, slip-weakening occurs over a distance behind the crack tip. In the weakening zone, the shear strength will decrease from its peak value to residual friction level. The stress will redistribute along the crack surface. Therefore the changed local stress concentration will cause the crack to extend and the ratio of penetration of the slip surface will increase. From the large-scale view of the whole slip surface, the shear strength will decrease due to the damage of the interior rock structure, and the faulted rock behaves as a softening material. Such a kind of mechanism happens in many practical landslides subjected to strong earthquakes. It should be noted that this mechanism is different from that of the breakage of structural clay, in which the geological material is regarded as a medium containing structural lumps and structural bands. The strain-softening property exhibited in the structural clay is the result of structure damage (i.e. the disintegration of the soil structure). The softening behavior of faulted rock should be regarded as a comprehensive result of the whole complicated process including slip-weakening, stress redistribution, crack tip extension and the penetration of slip surfaces. This process is accompanied by progressive failure and abrupt structural damage. The size of slip-weakening zone is related to the undergoing strain. Therefore, once a landslide is initiated (local or integrated), the effect of slip-weakening will exist in a certain length behind the crack tips until the formation of the whole slip surface even without dynamic loading.

2003年12月8日收到初稿,2004年1月17日收到修改稿。

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412706)和国家自然科学基金(10372104)资助课题。

作者 张均锋 简介:男,37岁,博士,1987年毕业于复旦大学应用力学系,现任高级工程师,主要从事滑坡机理和边坡稳定分析方面的研究工作。

E-mail: zhangjf@imech.ac.cn.

Key words rock mechanics, faulted rock slope, slip-weakening, progressive failure

1 引言

长期以来，含裂隙岩质边坡的破坏问题一直是岩土工程与工程地质工作者关注的重点和研究的难题。边坡中裂隙的破坏绝大多数为剪切破坏，而这一破坏过程包括单个微裂纹的萌生、扩展及连通，甚至更大尺度的剪切破坏，通常这种破坏伴随有一条碎裂带^[1]。在静载荷下，坡体中的裂隙在应力腐蚀、化学腐蚀的作用下，裂隙端部呈现应变软化特性；在地震载荷下，裂隙端部一定区域内发生疲劳或滑动时，在裂隙端部附近呈现滑动弱化的性质。

从微观角度来看，对于岩土材料中裂隙端部区域内的滑动弱化特性可以探讨微裂纹的生成和扩展方向等问题，而从裂纹端部的局部区域来看，应视为局部的应变软化。当该局部破坏后(可能为主裂纹的扩展)，应力的重新分配进一步引起相邻区域的弱化(该相邻区域应为新的裂纹端部附近的区域，或应变较大的区域)。这样的破坏模式表现为逐步推进的方式，最后可得到整个过程中剪切滑移最大的带状区域，也就是该坡体滑动的滑面。

笔者基于裂隙岩体滑动弱化的特性，以局部应变软化的方式分析了一类含裂隙岩质边坡的破坏机理，这将有助于高陡边坡、库岸的防护和治理。

2 边坡内裂隙的滑动弱化破坏机制

地质调查表明，大多数岩质边坡或崩塌堆积层内含有大量的裂隙或节理。这些裂隙有些已连通，而有些还相互连接。完整岩体或含裂隙的岩土材料在剪切破裂或裂纹扩展前，随剪应变的增加，裂纹尖端附近一定区域内的剪切强度会出现滑动弱化现象^[2]。这种材料的剪切强度弱化机制不同于粘性土结构性破坏，也不同于剪胀。

在粘性土结构性破坏研究方面，文[3~6]在对天然粘土的结构性进行调查和大量的试验研究的基础上，从土体本构关系入手提出了粘土结构性模型，认为天然岩土材料中胶结力的分布是不均匀的，胶结强的地方形成胶结块(结构体)，胶结弱或无胶结的地方形成软弱带(结构面)。岩土材料的破坏过程是胶结力逐步丧失而摩擦力逐步发挥作用的

过程，或者说是胶结块逐步破损而软弱带逐步扩展的过程。岩土材料在动载荷作用下的这种行为在宏观上表现为软化特性，首先是土体内自身的结构体破坏，进而软弱带以及土体宏观抗剪强度降低，最后导致滑坡发生。

对于岩土材料的剪胀特性，文[7]的研究表明，剪胀发生在摩擦滑动的过程中，但同时还指出，剪胀是沿裂隙方向微裂纹的产生、张开、扩展的直接结果。表面上看，剪胀和滑动弱化都表现为滑动后剪切强度从峰值降低到残余摩擦强度，但两者区别的核心问题是滑动弱化和剪胀软化的区域不同。剪胀引起的软化区域是指滑动的接触面，包括破坏前的裂隙和破坏后产生的新的微裂纹。而滑动弱化的区域却是指裂纹尖端后一定尺寸内的区域，该区域大小由裂隙原始尺寸、裂隙交界面性质、应力状态和局部的应力集中、滑动位移或剪切应变决定。图 1 给出了滑动弱化区域的示意图， τ 为剪应力， u 为裂纹面相对滑动位移。

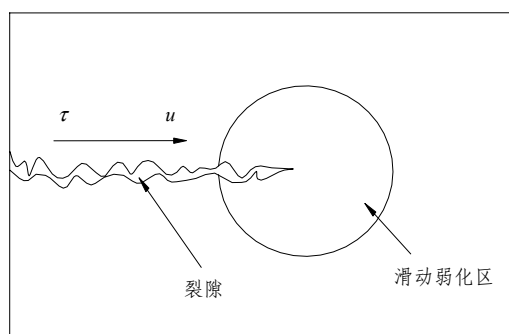


图 1 含裂隙岩体滑动弱化区域示意图
Fig.1 Schematic diagram of slip-weakening zone in faulted rock under shear force

在一定载荷作用下，坡体内裂隙端部的滑动弱化使坡体内的应力重新分配，从而使得应力集中加剧，裂隙尖端进一步扩展，造成岩体结构性的破坏，乃至整个滑面的贯通直至发生滑坡。因此，滑动弱化是一类含裂隙岩质边坡滑坡的机理。

应当注意的是，对上述类型的滑坡，滑面的产生不同于诱发地震的大范围内地质剪切断层，而是坡体内具备了整体滑动的条件，但局部的岩体尚未破坏，即整个滑面没有贯通。滑动弱化的结果是使得裂隙端部附近局部区域岩体的抗剪强度降低、应

力重新分配，从而造成应力集中并使原有裂隙扩展或产生新的微裂隙，整个滑面连通最后导致滑坡。

3 滑动弱化区域及应力状态

3.1 滑动弱化区域的确定

文[8]假定裂隙面剪切强度与滑动位移成线性关系，给出了裂隙尖端后的弱化区尺寸：

$$R = \frac{\pi G \delta^*}{4(1-\nu)(\tau_c - \tau_f)} \quad (1)$$

式中： G 为剪切模量； ν 为泊松比； δ^* 为弱化滑动的距离； τ_c ， τ_f 分别为峰值抗剪强度和残余抗剪强度。

文[2]给出的关于弱化区域尺寸的相似结果为

$$R = \frac{3\zeta G \delta^*}{4(1-\nu)(\tau_c - \tau_f)} \quad (2)$$

在绝大多数情况下取 $\zeta = 1 \pm 0.11$ 。

3.2 滑动弱化区域内强度的变化

滑动区域内强度同滑动位移的关系一般由试验得到，也可用一些简化的关系来描述。

文[2]假定裂隙面剪切强度与滑动位移成线性关系，即

$$\frac{\tau - \tau_f}{\tau_c - \tau_f} = 1 - \frac{w}{w_c} \quad (3)$$

式中： τ 为滑动位移为 u 时的抗剪强度； $w_c = \delta^* / 2$ 为破坏前最大弱化滑动位移； w 为弱化位移， w 的级数形式为

$$w_n(u) = a_n R^{n+3/2} u^{n+3/2} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (4)$$

式中： a_n 为具有量纲 $[L]^{1-n-3/2}$ 的常数。

根据花岗岩试样的三轴试验结果，文[2]得到的强度-弱化位移关系曲线见图 2。

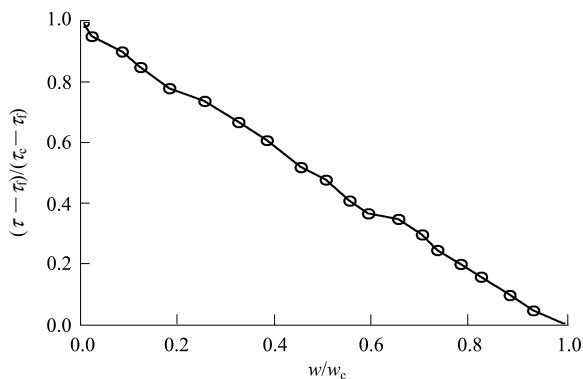


图 2 花岗岩材料的强度-弱化位移关系

Fig.2 Shear strength τ versus slip-weakening displacement w of a triaxially tested granite specimen

4 含裂隙坡体的逐步破坏数值模拟

根据上述分析，作者通过有限差分方法对含裂隙岩质边坡的破坏过程进行了模拟(FLAC^{3D}程序)。图 3 为一含裂隙坡体的示意图，坡体坡度为 2:1，岩土体重度为 26 kN/m³，采用理想弹塑性模型，弹性模量为 2.57 GPa，泊松比为 0.28。除滑动弱化区外，岩体材料的破坏准则为 Mohr-Coulomb 准则，其中粘聚力 $c = 140$ kPa，内摩擦角 $\varphi = 45^\circ$ 。图 4 为计算采用的有限差分网格，其中底部基岩材料采用模量较高的理想弹性模型。

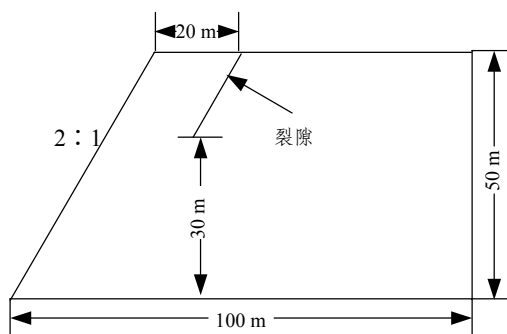


图 3 含裂隙的岩质坡体示意图

Fig.3 Schematic diagram of a faulted rock slope

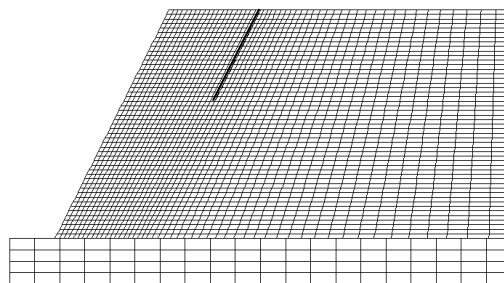


图 4 有限差分法计算网格

Fig.4 Mesh for computation with FLAC^{3D}

4.1 滑动弱化区域与方向的确定

根据以上对滑动弱化的描述和图 1 所示的弱化区域，首先，由于裂隙端部的应变和应变率都较其他区域为大，对于将裂隙端部区域(设定圆形但只能包含 4 个网格)的介质采用应变软化材料(图 5)，然后，计算应变场的分布变化，根据应变较大的部分的延伸方向，确定第 2 个弱化区域的中心。这样依此类推，直至整个弱化的区域至坡体前缘边界。该方法与应变梯度理论和应变局部化类似^[9~11]。

一般情况下，每次对滑动弱化区域的选取可能出现以下 4 种情况：2 种顺序选取(图 6(a)，(b))和 2

种错位选取(图 6(c), (d))。无论出现哪种情况, 都将以上次计算的应变分布场中的最大应变走向为依据, 以最近的网格结点为目标。

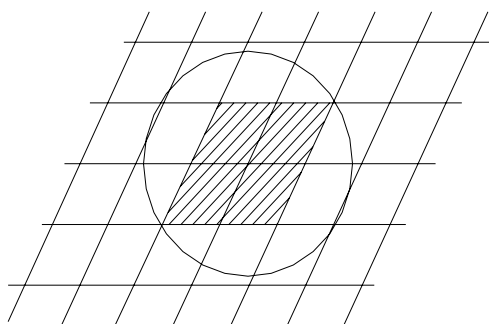


图 5 滑动弱化区域的选取模型

Fig.5 Model for determination of slip-weakening zone

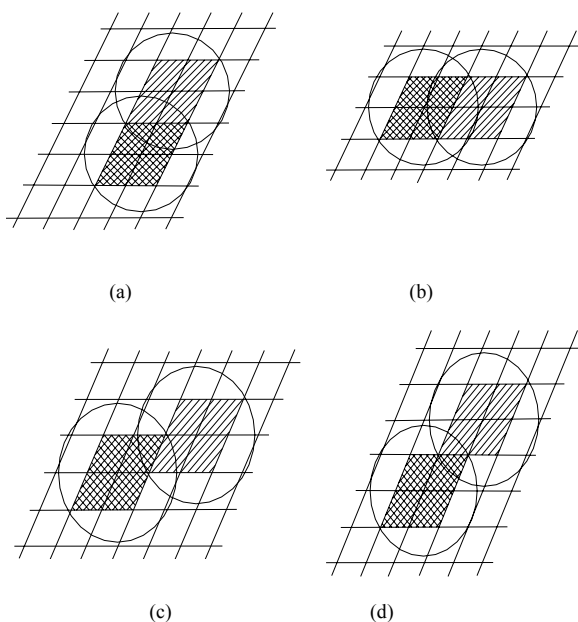


图 6 滑动弱化区域方向的选取

Fig.6 Determination for the developing trend of slip-weakening zone

4.2 含裂隙坡体逐步破坏的数值模拟结果

计算中采用的滑动弱化区域的应变软化曲线见图 7, 8。图 9 表示的是应变场分布的变化, 图 9(a) 为初始裂隙端部的弱化区域的剪应变分布, 图 9(b)~(f) 为整个破坏过程中滑面的形成过程。

由图 9 可看出坡体的破坏过程。由于裂隙端部发生应力集中(图 9(a)), 该区域弱化的结果为强度降低(应变弱化), 在该区域附近发生破坏使得滑移逐步扩展。图 9 中的破坏区域宏观上为破坏带, 这样就以带状破坏替代了微观上裂纹的扩展。图 9(f) 为裂纹贯穿(滑面形成)后进一步的滑动。

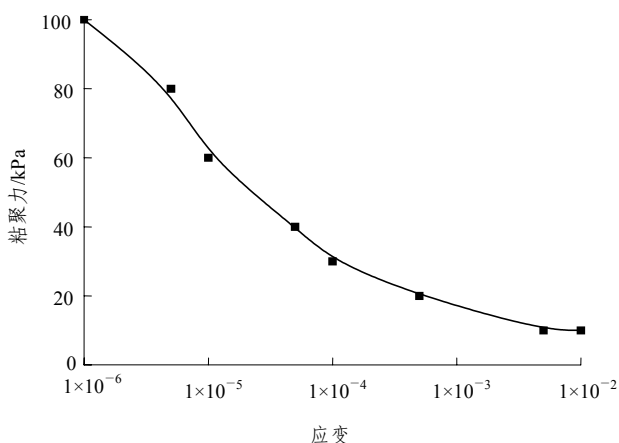


图 7 粘聚力随应变的变化

Fig.7 Cohesion versus shear strain

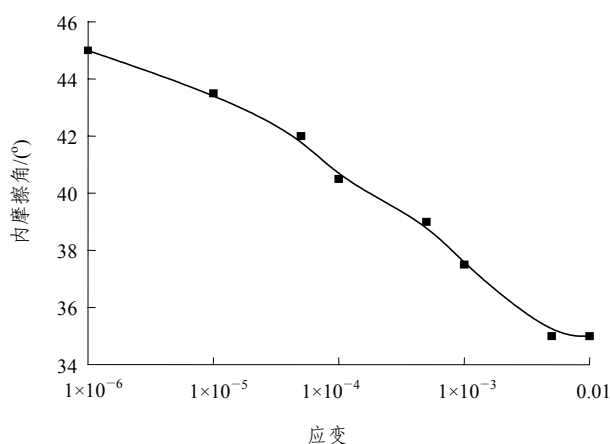
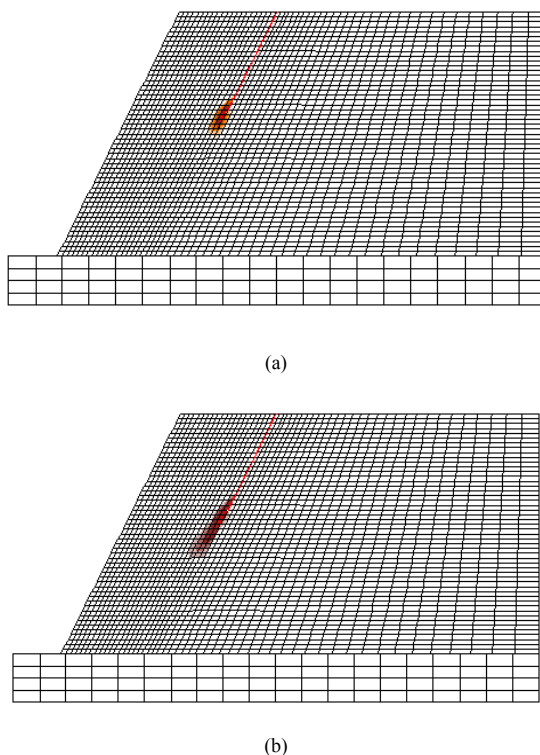


图 8 内摩擦角随应变的变化

Fig.8 Friction angle versus shear strain



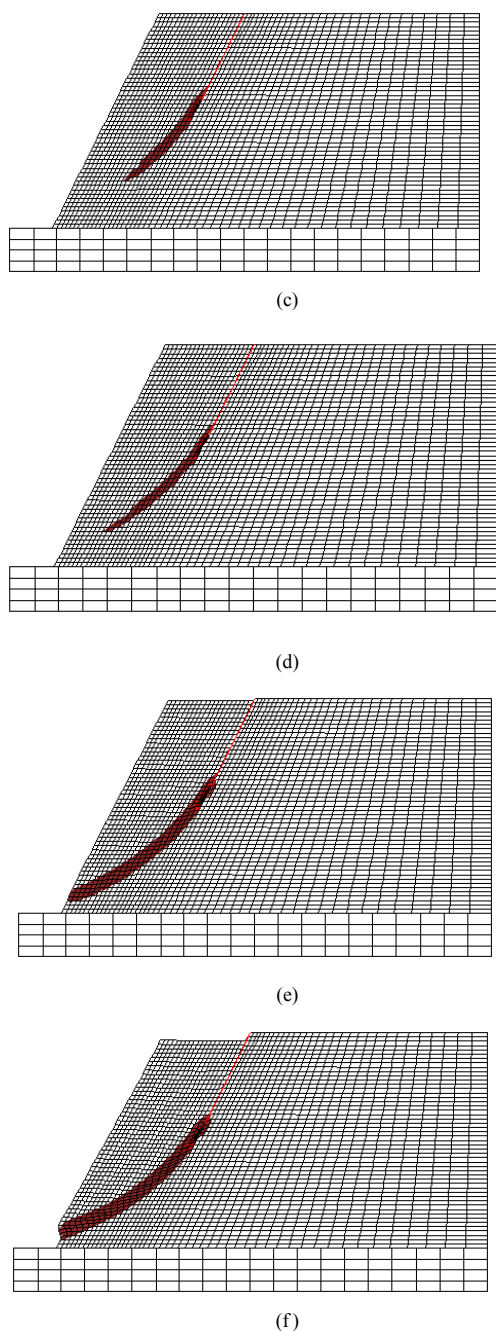


图 9 含裂隙边坡滑动弱化的逐步破坏过程
Fig.9 Progressive failure process of a faulted rock slope

5 结 语

滑动弱化是完整岩体和裂隙岩体的性质。在一

定载荷(特别是地震动载荷)作用下, 裂隙端部区域内相对的滑动使得强度降低, 应力重新分配。裂隙尖端的高应力集中使裂纹扩展, 导致坡体内滑面连通进而形成滑坡。因此, 滑动弱化是岩质边坡(尤其是含裂隙的岩质边坡)滑坡或崩塌倾倒的一种机理。同样的机理也可发生在崩塌堆积层中。因此, 对滑动弱化的研究还需进一步深入, 探讨裂隙扩展的区域与方向, 以便明确滑面上发生逐步破坏和贯通的过程。

参 考 文 献

- 1 Atkinson B K. Fracture Mechanics of Rock[M]. London: Academic Press Limited, 1987
- 2 He C R. Slip-weakening constitutive relation and the structure in the vicinity of a shear crack tip[A]. In: Wang R, Keitti A ed. Mechanics Problems in Geodynamics Part I[C]. Basel: Birkhäuser Verlag, 1995, 145(3/4): 747~757
- 3 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95~97
- 4 何开胜, 沈珠江. 结构性粘土的弹粘塑损伤模型[J]. 水利水运工程学报, 2002, (4): 7~13
- 5 沈珠江. 岩土破坏力学: 理想脆弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 253~257
- 6 何开胜, 沈珠江. 天然沉积粘土的结构性调查[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(5): 7~13
- 7 Teufel L W. Pore volume changes during frictional sliding of simulated faults[A]. In: Cater N L, Friedman M ed. Mechanical Behavior of Crustal Rocks[C]. Washington D. C.: American Geophysical Union, 1981, 135~145
- 8 Palmer A C, Rice J R. The growth of slip surface in the progressive failure of over-consolidated clay[J]. Proc. Roy. Soc. Lond., 1973, 332: 527~548
- 9 王学滨, 潘一山, 任伟杰. 基于应变梯度理论的岩石试件剪切破坏失稳判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 747~750
- 10 王学滨, 潘一山, 杨小彬. 准脆性材料试件应变软化尺度效应理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 188~191
- 11 王学滨, 潘一山, 盛 谦等. 平面应变岩样局部化变形场数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 521~524