

节理化岩体复合式滑移破坏的模型试验研究

余子华¹, 晏鄂川¹, 杨昌斌¹, 王国斌^{1,2}

(1. 中国地质大学, 武汉 430074; 2. 湖北省交通规划设计院, 武汉 430051)

摘 要: 针对节理化岩体的自身特点, 提出沿岩体层面产生的应力集中以及层面与节理之间的残余完整岩桥破坏, 将可能导致岩体产生复合式滑移破坏。在室内利用岩石三轴刚性伺服机, 通过模型试验对岩体的层面和一组与层面正交的节理的情况进行模拟研究, 分析了结构面性状和围压对复合式滑移破坏的影响, 给出了在贯通性结构面(层面)倾角、非贯通性结构面的以及围压等因素共同作用下, 节理化岩体发生复合式滑移破坏的条件以及破坏面特征。最后在与前人的试验资料进行对比分析的基础上得到可靠的结论, 期望为在将来的实践工作中正确评估节理化岩体的破坏模式提供指导性意见。

关 键 词: 节理化岩体; 复合式滑移破坏; 模型试验; 贯通性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Model test research on multiple sliding failure of a jointed rock mass

YU Zi-hua¹, YAN E-chuan¹, YANG Chang-bin¹, WANG Guo-bin

(1. Faculty of Engineering China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Provincial Planning and Design Institute of Communications, Wuhan 430051, China)

Abstract: According to specificities for jointed rock mass, multiple sliding failure of a jointed rock mass is presented, due to accumulation of stress along bedded plane of rock mass and destruction of remnant intact rock bridges between bedded planes and joints. And rock triaxial serve testing system is used, through model test involving bedded planes and a set of joint normal to the bedded planes in rock mass, effects of properties of joints and confining pressure on multiple sliding failure are analyzed; the condition triggered multiple sliding failure and characteristic of failure plane is given, under the co-action of inclination of connective joints (bedded planes), interlocking conditions of critical joints, and confining pressure. At last, data are compared with predecessors' ones, and on the basis of it reliable results are given; and the results are hoped to supply guidelines for assessing probable modes of failure of a jointed rock mass for future practice.

Key words: jointed rock mass; multiple sliding failure; model test; connectivity

1 前 言

在岩质边坡的稳定性评价与支护设计中, 恰当地评估节理化岩体的破坏模式是必需的, 因此对节理化岩体破坏模式的研究一直倍受关注, 如孙广忠(1988 年)提出“岩体结构控制论”^[1], 认为岩体是完整岩块和结构面的共同体, 并且部分岩体的破坏很大程度上受控于结构面的性状和方位; 张倬元(1992 年)提出了层状岩体平推式破坏模式^[2]; 刘佑荣(1998 年)提出多平面滑动破坏模式^[3]等等。Jaeger (1960 年)发展的裂隙岩体单结构面理论认为, 含单组贯通性结构面的方位影响岩体的破坏机制^[4];

K.W.John(1969 年)利用石膏模型很好地研究了在不同围压下, 含单组和两组贯通性结构面的岩体, 随结构面产状的变化, 强度和变形破坏模式的变化规律^[5]。研究表明, 结构面贯通性的好坏对岩体变形破坏机制影响甚大, 且在实际工作中, 节理化岩质边坡的最终破坏面经常由贯通性好的层面和一组或多组贯通性差的节理面构成, 对于顺向岩质边坡, 在某些情况下多出现复合式滑移破坏模式, 即滑移体的滑动面以层面、节理面为主, 还包括部分对岩体剪切的破坏面。

本文首先通过模拟材料, 对存在有层面和与层面垂直的一组节理的岩体, 在不同围压下进行对节

理岩体模型试验,得到复合式滑移破坏模式的破坏面特征以及产生条件,再对复合式滑移破坏机制进行理论分析,在与前人的成果进行对比的基础上,拟确定复合式滑移破坏可能发生的倾角区间及破坏特征。

2 概念的提出

岩体是完整岩块与各类结构面的复合体,其变形破坏机制很大程度上受控于各类预先存在的结构面的力学性状和几何条件。以顺向岩坡为例,在外

因和内因共同作用下其内部应力状态发生改变,导致结构面端部或内部产生应力集中,引起层面粗糙处的咬合部位损伤破碎以及层面与节理之间的残余完整岩桥以连贯的方式破坏,该过程持续发生直到破坏面扩张至边坡可能产生运动释放为止。当坡内层面和与之正交或近于正交的结构面之间配置达到某一特定情况时,边坡岩体将发生追踪连贯的复合式滑移破坏现象(图1)。

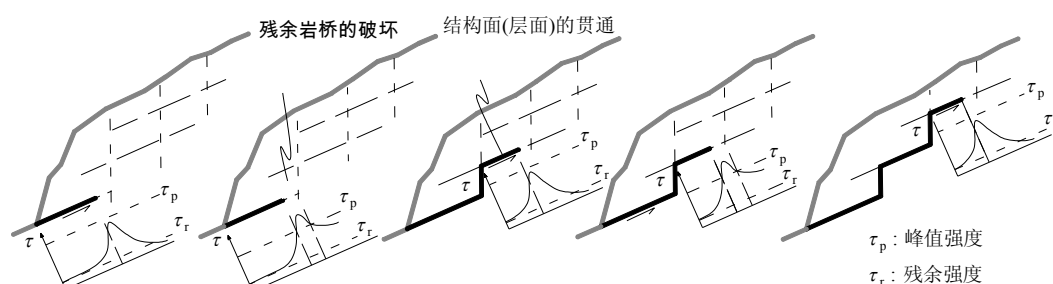


图1 节理化岩体复合式滑移破坏的演化过程

Fig.1 Evolutionary process of multiple sliding failure of a jointed rock mass

3 模型试验

3.1 试验配置与方法

试验装置为岩石三轴刚性伺服机(图2)。模型材料是用水泥、石灰、粘土和水按适当配比掺合模拟白云质灰岩,试验过程中层面上加适量固体石蜡和砂。单个试块是通过制模、焙烧、养护等工序制成的砖块,具体物理力学性质如下:饱和单轴抗压强度 $\sigma_c=29.2$ MPa,干重度 $\gamma_d=26.5$ kN/m³,泊松比 $\nu=0.31$,抗拉强度 $\sigma_t=1.3$ MPa,凝聚力 $c=5.1$ MPa,内摩擦角 $\varphi=41^\circ$,砖块层间摩擦角 $\varphi_{\text{砖}}=35^\circ$ 。试块长 $l=5$ cm,宽 $b=2.5$ cm,高 h 为1.25 cm和2.5 cm两种。

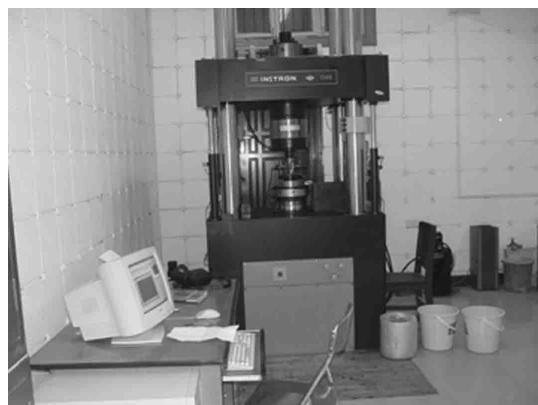


图2 岩石三轴刚性伺服机

Fig.2 Rock triaxial serve testing system

试验所用试件是由单个试块按一定几何关系配置后切割而成,后用橡皮膜和橡皮圈套牢,保证其整体稳定性,试件两端涂上润滑油以消除摩擦约束效应。据野外调查资料,试件含有一组贯通性结构面,而另一组结构面与前者正交。试件尺寸为 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$,并且针对两者咬合程度的不同,取 $\delta=0, 1/4b, 1/2b$ 三种情况,贯通性结构面的倾角 $\beta=0, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 八种情况,围压 $\sigma_3=0.01, 0.02, 0.03$ MPa三种情况。

3.2 试验结果及其分析

为了模拟结构面的几何方位、密度以及贯通性对节理岩体破坏机制的影响,实验配置了I~III三类试件样品,示意图见图3。在围压 $\sigma_3=0.01$ MPa的条件下,随贯通性结构面倾角从 0° 变化至 90° ,做了6组试验,共计48件样品。为了了解围压对节理岩体破坏模式的影响,对I类试样进行了围压0.01, 0.02, 0.03 MPa三种情况的试验,共计16件样品。

3.2.1 结构面特性对破坏模式的影响

对于结构面的几何方位、间距以及贯通性对节理岩体破坏机制的影响,试验成果见图4。由图可知,发生复合滑移破坏的区域主要有2个。在 $5^\circ \leq \beta$

$\leq 15^\circ$ 的区域内，各种情况下的试件均可产生复合滑移破坏，且破坏面主要受控于 A 结构面，但破

$$h=2.5 \text{ cm} \quad b=2.5 \text{ cm} \quad \delta=0.1/4b, 1/2b;$$

$$\beta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$$

$$h=2.5 \text{ cm}$$

$$\beta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$$

$$h=2.5 \text{ cm} \quad b=2.5 \text{ cm} \quad \delta=0.1/4b, 1/2b$$

$$\beta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$$

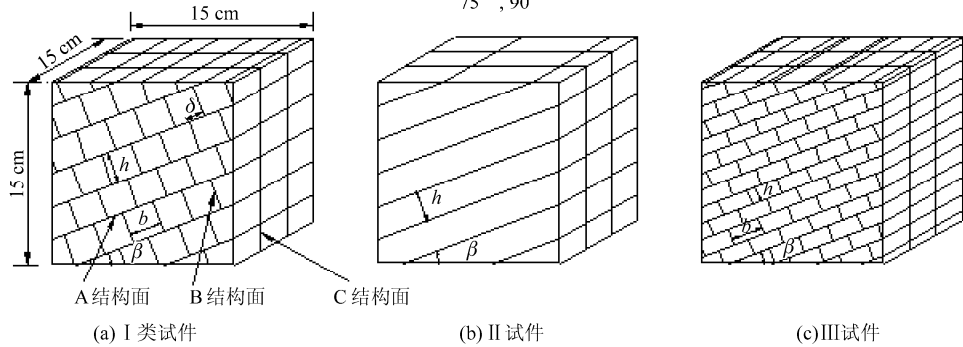


图3 模型试验的三类试件规格

Fig.3 Configuration of three kinds of specimen of joints tested

坏方式与 B 结构面的咬合程度、贯通性以及间距有关。当结构面咬合程度高、间距大时，破坏主要沿 A 结构面和岩体拉裂破坏面发生；随着结构面咬合程度的降低以及间距的减小，破坏面转化为 A、B 结构面的组合面或 A 结构面和岩体剪切面的组合面。

在 $30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ 的区域内，情况稍有不同。当 B 结构面为贯通性结构面时，强度曲线中存在一明显的峰值（图 4），随着 A 结构面间距 h 的减小，峰值逐渐消失，曲线趋于平缓形成一平台区。发生复合滑移破坏的 β 范围为 $30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ ，并且随着 β 的增加，破坏形式由沿 A 结构面、B 结构面复合滑动转变为沿 A 结构面、B 结构面以及岩体剪切破坏面复合滑动；当 B 结构面为非贯通性结构面时，随着 B 结构面的咬合程度 δ 以及 A 结构面间距 h 的增大，曲线亦趋于平缓并且平台区长度缩短，此时发生复合滑移破坏的 β 范围为 $35^\circ \leq \beta \leq 58^\circ$ ，破坏面主要受控于 A 结构面，具体破坏形式由沿 A 结构面、B 结构面复合滑动转变为沿 A 结构面和岩体剪切面复合滑动；当节理岩体中无 B 结构面时，与有 B 结构面存在时相比，平台区长度将变得更短，发生复合滑移破坏的 β 范围为 $40^\circ \leq \beta \leq 55^\circ$ ，破坏形式的转变过程为：由沿 A、B 结构面复合滑动→沿 A 结构面和岩体剪切面复合滑动→岩体的剪切破坏。

3.2.2 围压对破坏模式的影响

本次选取 I ~ III 三类试件样品进行试验，在围压分别为 0.01, 0.02, 0.03 MPa 三种情况下，试验结果见图 5。由图可知，随着 β 角的增大，当围压 0.01 MPa 时，发生复合滑移破坏的 β 角范围 $6^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$ 和 $30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ 。在 β 角的范围在 $6^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$ 之间，破坏模式为 A 结构面和岩体拉裂面的复合破坏；在

β 角的范围为 $30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ 之间，破坏面主要为 A 结构面滑移或 A 结构面、B 结构面的复合。当围压为 0.02 MPa 时，发生复合滑移破坏的 β 在角范围为 $5^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$ 和 $35^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ 。 β 角的范围为 $5^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$ 内，破坏模式为 A 结构面滑动破坏； β 角在 $35^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ 内，破坏模式主要为 A 结构面滑移或 A 结构面和岩体剪切面的复合滑移。当围压为 0.03 MPa 时发生复合滑移破坏的 β 角范围为 $5^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$ 和 $40^\circ \leq \beta \leq 55^\circ$ 。 β 角在 $5^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$ 内时，破坏模式为岩体剪切破坏；在 β 角 $40^\circ \leq \beta \leq 55^\circ$ 内时，破坏模式主要为 A 结构面和岩体剪切面的复合滑移。由此可知，随围压的增大，发生复合滑移破坏的范围逐渐减小，且破坏模式的转变过程为：A 结构面滑移→A 结构面和岩体拉裂面的复合滑移→A 结构面、B 结构面复合滑移→A 结构面和岩体剪切面的复合滑移。图 6 ~ 9 列出了本次模型试验的 4 种典型复合式滑移破坏模式。

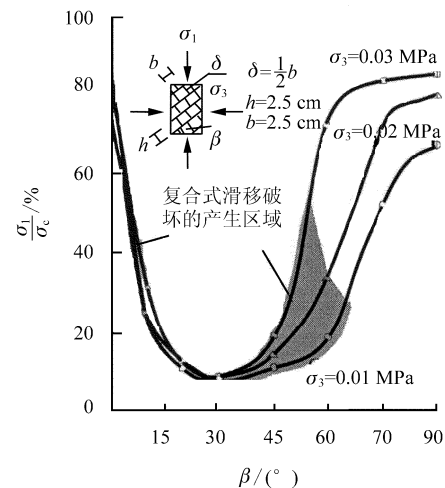


图 4 围压对破坏模式的影响

Fig.4 The influence of confining pressure on failure model

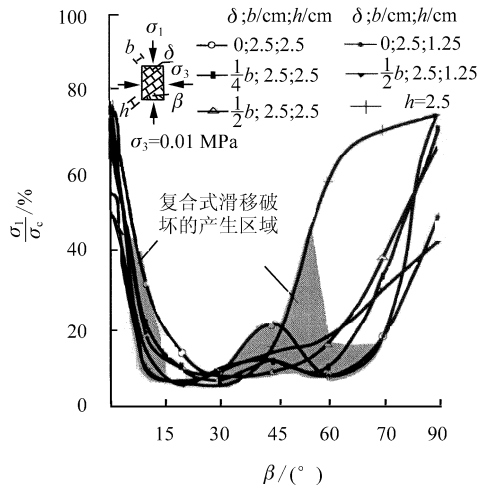


图 5 结构面特性对破坏模式的影响

Fig.5 The influence of properties of joints on failure model

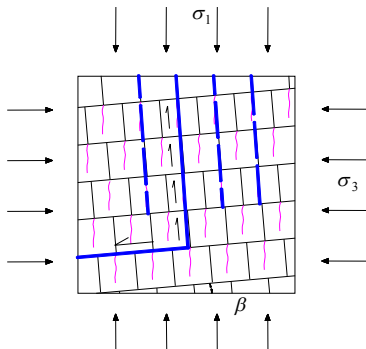


图 6 A 结构面与岩体拉裂面的复合破坏

Fig.6 Multiple failure between joint set-A and tensile failure surface in rock mass

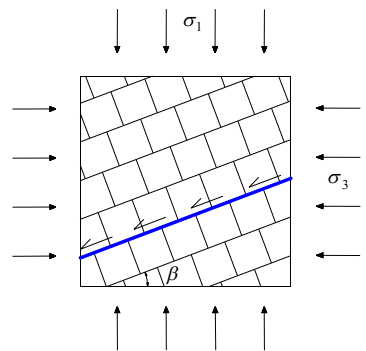


图 7 沿 A 结构面滑移破坏

Fig.7 Multiple sliding failure along joint set-A

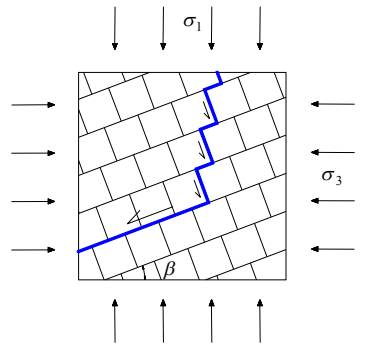


图 8 A 结构面与 B 结构面的复合滑移破坏

Fig.8 Multiple sliding failure between joint set-A and joint set-B

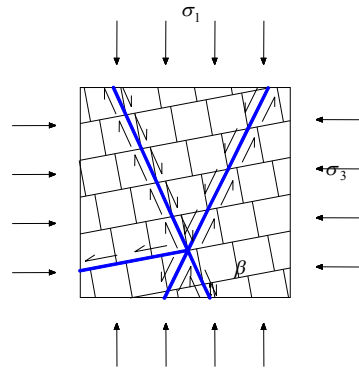


图 9 A 结构面与岩体剪切面的复合破坏

Fig.9 Multiple failure between joint set-A and shear failure surface in rock mass

4 理论分析

由 Jaeger(1960 年)的单结构面理论以及库兹涅佐夫建议的图解法,当岩体含有单组贯通性结构面(即层面)时,由莫尔应力圆理论以及库伦-纳维尔判据可得到沿结构面产生剪切滑动破坏的条件:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \phi_j)}{(1 - \tan \phi_j c \tan \beta) \sin 2\beta} \quad (1)$$

式中 c_j , ϕ_j 为结构面的凝聚力和摩擦角。

由莫尔应力圆理论及相应的几何关系可知,单节理岩体沿节理面发生破坏的几何条件为

$$\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2 \quad (2)$$

式中

$$\beta_1 = \frac{\phi_j}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_j c \tan \phi_j) \sin \phi_j}{\sigma_1 + \sigma_3} \right] \quad (3)$$

$$\beta_2 = 90 + \frac{\phi_j}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_j c \tan \phi_j) \sin \phi_j}{\sigma_1 + \sigma_3} \right] \quad (4)$$

当岩体含有 2 组贯通性结构面时,假定同组的节理性质相同,① 组节理中所有节理面凝聚力 c_{j1} , 内摩擦角 ϕ_{j1} , 倾角 β_1 均相同,② 组节理中所有节理面凝聚力 c_{j2} , 内摩擦角 ϕ_{j2} , 倾角 β_2 亦相同。将①,② 组节理面的 c_j, ϕ_j 以及相应应力状态(σ_1, σ_3)代入式(3)、式(4),可得相应的 β_1^1, β_1^2 和 β_2^1, β_2^2 ,

β_2^2 。当①组节理面倾角 $\beta_1 \in [\beta_1^1, \beta_1^2]$ ，且②组节理面倾角 $\beta_2 \in [\beta_2^1, \beta_2^2]$ ，岩体将可能发生复合剪切滑移破坏，并且发生复合剪切滑移破坏的结构面倾角范围可表示在强度模量图中（图 10）。由图可知，随 β 值的增大，当 $\left| \frac{d\sigma}{d\beta} \right|$ 在某一特定范围内变化时，节理岩体将发生复合滑移破坏，然而其最终破坏面随结构面强度参数的相对高低以及贯通程度的好坏而表现较为复杂。

当岩体含有一组贯通性结构面（即层面）和一组与层面近于正交的节理，且该组节理贯通性较差时，与岩体内含有 2 组贯通性结构面相比，发生复合剪切滑移破坏时的层面倾角范围有所迁移，但无太大的变化（图 10），然而其最终破坏面表现更为复杂，应视具体工况进行具体分析。

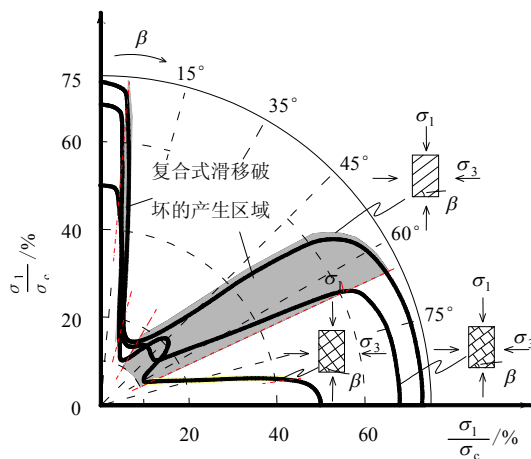


图 10 三种试验资料的对比

Fig.10 The comparison of three type of test data

5 结语

对于节理化岩体，发生复合式滑移破坏的条件

以及破坏面特征，受多种因素的影响，其中主要包括：贯通性结构面倾角 β 、凝聚力、内摩擦角、间距、非贯通性结构面的间距、咬合程度以及围压等。通过本次模型试验，节理化岩体发生复合式滑移破坏的倾角 β 范围 $5^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$ 和 $30^\circ \leq \beta \leq 65^\circ$ ，随围压、非贯通性结构面的性状的变化倾角区间有所减小；对于最终破坏形式，随贯通性结构面倾角 β 的增大、非贯通性结构面中间距的减小和咬合程度的降低以及围压的增大，破坏模式的转变过程主要为：贯通性结构面和岩体拉裂面的复合滑移→贯通性结构面的滑移→贯通性结构面与非贯通性结构面的复合滑移→贯通性结构面和岩体剪切面的复合滑移。

参 考 文 献

- [1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 326 - 327.
- [3] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998. 106 - 109.
- [4] Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of Rock Mechanics[M]. London: Chapman and Hall, 1979.
- [5] Nasser M H B, Rao K S, Ramamurthy T. Anisotropic strength and deformation behavior of Himalayan schists[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40(1): 3 - 23.
- [6] 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. 100 - 104.