

文章编号: 1001-1986(2014)05-0061-06

# 三峡库区侏罗系不同类型结构面抗剪强度对比

王 姣, 李长冬, 雍 睿, 梁德明

(中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 三峡库区侏罗系是典型的软硬相间地层, 其软弱层具有亲水性强、透水性弱等特殊的工程地质特性, 是库区常见的易滑地层。选取三峡库区秭归县马家沟滑坡所处地层岩体结构面为研究对象, 采用室内岩体结构面直剪试验, 对 4 种不同类型结构面的力学特性进行了研究。通过对试验数据的统计分析, 绘制了各种结构面的剪应力-正应力关系曲线图及剪应力-剪切位移关系曲线图, 从而获得了形成于同一地层中的 4 种不同结构面的抗剪强度参数, 并对其剪切特性进行对比分析与研究。以结构面直剪试验结果为依据, 初步分析了该地区某一典型边坡的稳定性及潜在滑动层面, 为后期边坡的稳定性评价提供可靠性基础参数。

**关键词:** 侏罗系; 结构面; 直剪试验; 抗剪强度; 稳定性

**中图分类号:** TU452 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.05.012

## Comparison study on shear strength parameters of Jurassic different rock discontinuities in Three Gorges Reservoir region

WANG Jiao, LI Changdong, YONG Rui, LIANG Deming

(China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The Jurassic formation in Three Gorges Reservoir is typical of soft-hard alternating strata, which has its special engineering geological characteristics such as strong hydrophilicity, weak permeability. This paper selects four different kinds of structural plane for the study, and has carried out the basic research on its mechanical properties by different normal stress indoor direct shear test. Through statistical analysis of test data, shear-normal relationship graph and stress-shear displacement relationship curves of various kinds of structural plane under the effect of different normal stress were drawn, four different shear strength parameters of the structure were obtained. shear characteristics were studied, Then we can give the preliminary judgment about instability plane in slope, and provide reliable reference for the later slope stability evaluation.

**Key words:** Jurassic formation; different discontinuity; laboratory direct shear test; shear strength; stability

结构面的力学特性是影响岩体力学行为的主要因素, 也是影响岩体工程如地下洞室和边坡在外荷载作用下变形和破坏特征的控制因素。从工程力学参数上, 结构面的存在与扩展导致岩体力学性质产生了显著“弱化”和强烈的各向异性。因而, 岩体的结构面, 在很大程度上影响了岩体的变形、破坏及应力传递等力学作用, 其对岩体的变形和破坏起着控制作用<sup>[1]</sup>。因此对岩体结构面的力学性质研究, 明确岩体在各种荷载作用下结构面变形与强度所产生的力学效应, 具有重要意义。

近年来, 许多学者已经对岩体结构面的剪切特性做了较深入的研究, 其中, 结构面的抗剪切强度

是结构面力学特性最重要的力学指标, 是国内外众多学者所研究结构面力学最主要的课题之一。在结构面强度参数研究方面, Patton<sup>[2]</sup>在考虑到锯齿状节理的剪胀作用后, 推出了该种节理的剪切强度公式; 但当法向应力逐渐增大到可以将微凸体剪断时, Patton 又相应推出了节理双曲线剪切强度公式; 当考虑到节理面上各种大小微凸体是随法向应力的增大而累进剪断的; Ladanyi 等<sup>[3]</sup>将摩擦力、剪胀力、黏结力和岩桥的强度对峰值剪切强度的影响综合起来, 推出了考虑岩桥的节理峰值剪切强度公式; 孙广忠<sup>[4-5]</sup>认为, 台阶形、锯齿形和波浪形是 3 种常见的节理起伏度形态, 并将相应的节理面分为 4 种破

收稿日期: 2013-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202198); 中央高校基本科研业务费专项资金“摇篮计划”资助(CUG130409);

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB710604); 中国地质大学(武汉)试验室开放基金(SKJ2012141)

作者简介: 王 姣(1989—), 女, 陕西大荔人, 硕士研究生, 从事岩体稳定性评价研究。

环形式：台阶状节理面平直剪切滑动、台阶状节理面压切、锯齿状和波纹状节理面爬坡滑动、锯齿状和波纹状节理面啃断，并导出了相应的抗剪强度公式；Gerrard<sup>[6]</sup>认为，滑动和啃断是节理剪切强度的主要影响因素，对于初始耦合的新鲜节理，他提出了节理剪切强度的总准则；夏才初等<sup>[7-8]</sup>考虑到节理面的起伏度和粗糙度的影响推出了节理面的剪切强度公式。

在结构面模型试验及本构模型建立方面，沈婷等<sup>[9]</sup>通过直剪模型试验和非线性有限元分析，研究了由结构面和岩桥组成的剪切面在不同法向应力、不同岩桥面积及不同岩桥分布型式等条件下的综合抗剪强度、较客观地评价了岩桥对剪切面抗剪强度指标的影响。许宏发等<sup>[10]</sup>在分析了岩体节理剪切变形常用双曲线模型和指数模型的基础上，提出了一种幂函数模型；文献<sup>[11-13]</sup>研究了节理在循环剪切荷载作用下的应力应变特征；杜守继等<sup>[14]</sup>基于不规则的人工岩石节理经历不同剪切变形历史的剪切试验，分析了岩石节理剪切变形特性及与变形历史的依存关系；李海波等<sup>[15]</sup>利用人工浇筑的表面为锯齿状的混凝土岩石节理试样，研究不同剪切速率下各种岩石节理起伏角度岩石节理的强度特征，并提出考虑不同剪切速率的岩石节理峰值强度模型；之后又进行了不同剪切变形速率、法向应力和起伏角度情况下剪切试验，研究了节理破坏模式和刚度特征及其与起伏角、剪切变形速率和法向应力之间的关系<sup>[16]</sup>；沈明荣等<sup>[17]</sup>通过进行常刚度和常应变速率下结构面的剪切试验，获取其相应的力学特性，分析了在这样的力学条件下，其强度、变形等力学特性的规律，并与常规加载条件下的结构面力学特性进行比较，提出卸载条件下结构面力学特性的主要特征，并建立评价剪切强度的拟合公式。张清照等<sup>[18]</sup>通过规则锯齿结构面在不同法向应力下的剪切试验，对其力学特性进行了基础性研究，阐述了规则锯齿形结构面在剪切条件下力学特性的主要特征及其力学特性的主要规律。

以上研究主要是侧重于同一岩性岩体中形成的结构面在宏观及微观上的某些特性，对两侧岩性不同的结构面研究涉及甚少，如贺建明等<sup>[19]</sup>对两侧不同岩性(泥岩和灰岩)组成的异性结构面进行了不同粗糙度、不同正应力下的剪切试验，并建立了抗剪强度准则。鲁祖德等<sup>[20]</sup>利用室内剪切试验装置，开展不同正应力、自然与饱水条件下岩体异性结构面的剪切试验，分析异性结构面的剪切变形和强度特性，利用 JRC-JCS 抗剪强度力学模型将试验结果与

计算结果进行对比分析，所建立的 JRC-JCS 抗剪强度力学模型为实际工程岩体的结构面强度提供较为准确的参数。

国内外大量的工程实践表明<sup>[21-25]</sup>，几乎所有的边坡失稳都不是一开始就出现的，通常是由于工程活动导致边坡体内出现应力重分布，使边坡岩体变形并在某些结构面或其中的薄弱部位得到逐渐增长发展，或者，由于地质条件的恶化，导致边坡岩体中的断续结构面不断蠕变、演化，造成岩体的宏观断裂而产生新的贯通滑移面，进而最终演变为岩石边坡的整体滑移失稳破坏。因此认识岩质边坡各种结构面的物理力学特性及其演化规律，对比分析找出最软弱结构面，并对其进行合理的利用及改造，从而达到控制边坡的变形和稳定目的，具有理论和现实意义，也正是基于岩体边坡的结构面与边坡失稳的内在关联机制，使得对结构面的研究显得尤为重要。本文通过对由不同岩性岩体组成的结构面进行不同荷载下的剪切试验，从而获取不同结构面相应的抗剪强度参数，并将试验所得数据综合分析、对比，进而得出在同种应力作用条件下典型地层中的最软弱结构面，从而为形成于这种复杂地层中边坡稳定性的评价提供可靠性依据。

## 1 地质背景概况

本次试验的结构面样均取自三峡库区秭归县马家沟滑坡附近。马家沟滑坡位于湖北省秭归县归州镇，地处长江左岸卧牛山麓，长江支流吒溪河左岸，距长江河口 2.1 km。地理位置 N31°01'08"—31°01'17"，E110°41'48"—110°42'10"，行政区划隶属湖北省秭归县归州镇(图 1)。

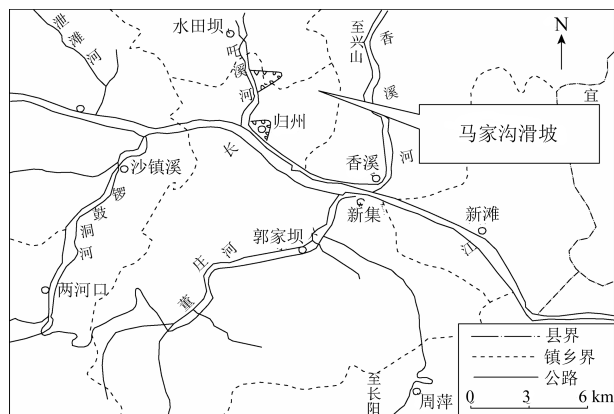


图 1 马家沟滑坡平面位置图

Fig.1 The location of Majiagou landslide

滑坡面积 9.68 km<sup>2</sup>，体积 127.8×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。滑床及其周边地层为侏罗系上统遂宁组(J<sub>3s</sub>)，主要岩性

为石英砂岩、粉砂岩和泥岩,不等厚互层,是三峡库区侏罗系非常典型的软硬相间地层,岩层倾向均为 $270^{\circ}\sim 290^{\circ}$ ,倾角 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,与滑坡主滑方向相接近(图2)。岩性为中厚层灰白色长石石英质细砂岩和褐红色薄层粉砂质泥岩互层,钻孔和探井所揭露滑床岩体都比较破碎,且裂隙非常发育(图3)。

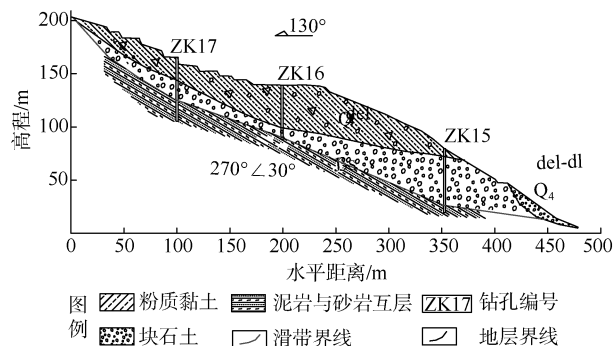


图2 马家沟滑坡工程地质剖面图

Fig.2 The engineering geological longitudinal profile of Majiagou landslide

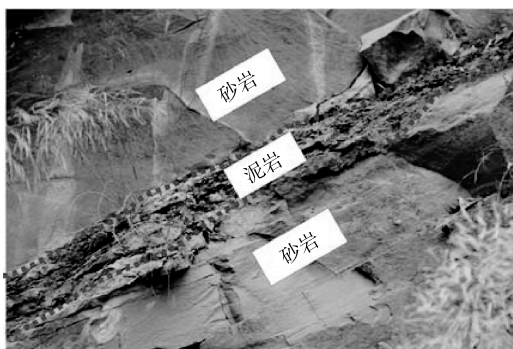


图3 马家沟滑坡软硬相间地层照片

Fig.3 Photo of alternative soft and hard formation near Majiagou landslide

## 2 直剪试验过程

### 2.1 试验仪器与样品制备

现场采取试样,将野外所取岩样带回实验室中分别制取浇注成符合要求的试验样品,所制备的岩样种类包括:泥岩与紫红色砂岩结构面,无填充砂岩结构面,泥质填充砂岩结构面以及钙质充填砂岩结构面。每种结构面每组需制备6块,加工试验样品尺寸为 $10\text{ cm}\times 8\text{ cm}\times 4\text{ cm}$ 。如图4所示为含钙质充填结构面,经过鉴定可知,该样品主要由呈细纹层状分布的次角状碎屑石英组成,并且零星分布有碳质碎片及片状黑云母,空隙式胶结,分选中等,粉砂—细砂结构。

本试验采用 XJ-1 型便携式剪切仪测定岩体结构面剪切强度参数。该仪器由上、下剪切盒、水平和垂直向千斤顶以及测微器件和钢丝绳组成。将制好的试样置于剪切仪的下剪切盒中,盖上上剪切盒;



图4 标准结构面试件示意图

Fig.4 Standard discontinuity samples

将油泵与千斤顶连接,稍加垂直和水平荷载,使钢丝绳拉直,剪断(或锯断)捆扎试样的铁丝,注意勿伤及试样,最后,安装垂向和水平百分表,并调零,即可开始进行试验。

### 2.2 剪切试验方法

为了研究结构面在加载条件下的力学特性,本文进行了不同垂直应力条件下4种不同结构面的直剪试验。用垂直加荷系统加载预定的法向荷载,在加载荷载过程中,分级记录各垂直百分表读数。采用应力控制法施加剪应力,即将正应力保持恒定,通过水平千斤顶逐级施加剪应力,每30 s加一级,直至试样剪断破坏,卸除垂直方向荷载,完成实验。

## 3 剪切试验结果及分析

### 3.1 强度特性分析

由于室内直剪试验的简易性,常被广泛的用于研究结构面的力学特性研究。从结构面的常规剪切试验结果可以得到试件发生破坏时的不同应力值。运用根据 Mohr-Coulomb 破坏准则计算出不同结构面加载时的抗剪强度参数  $c$  和  $\varphi$ 。图5—图8分别为4种不同结构面在不同垂直荷载作用下的剪切特性曲线。

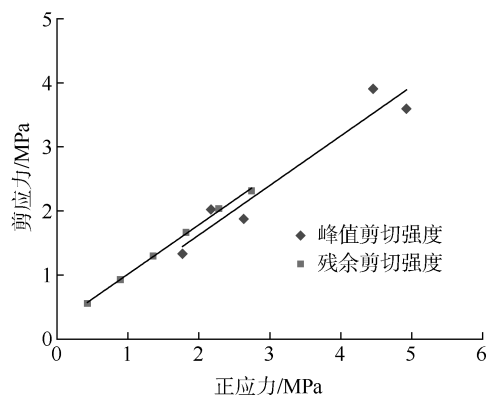


图5 泥岩与砂岩结构面正应力-剪应力关系曲线图

Fig.5 The normal stress-shear stress relationship for discontinuity between mudstone and sandstone

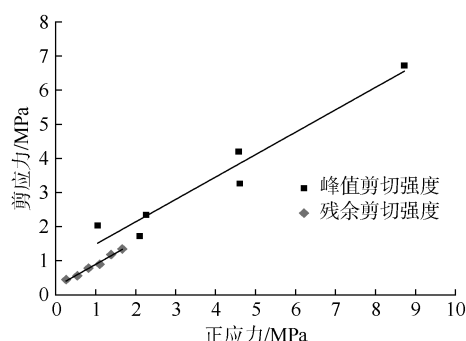


图 6 无充填砂岩结构面正应力-剪应力关系曲线图

Fig.6 Normal stress-shear stress relationship for discontinuity in sandstone

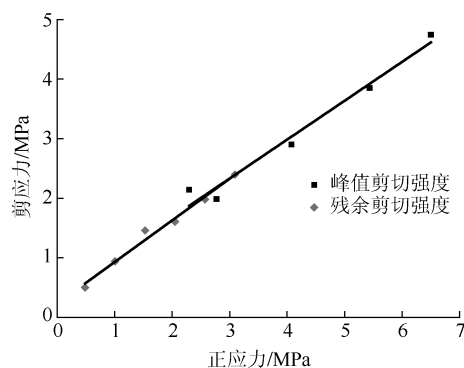


图 7 含泥质充填砂岩结构面正应力-剪应力关系曲线

Fig.7 Normal stress-shear stress relationship for discontinuity in clay-bearing sandstone

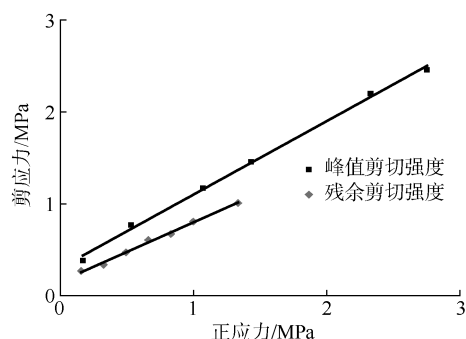


图 8 含钙质充填砂岩结构面正应力-剪应力关系曲线

Fig.8 Normal stress-shear stress relationship for discontinuity in the calcareous-bearing sandstones

将上述各类结构面的抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值整理统计,如表 1 所示(为了方便记录及书写,将 4 种结构面分别记录为 I、II、III、IV,分别代表紫红色砂岩与泥岩结构面、无填充砂岩结构面、含泥质充填砂岩结构面、含钙质充填砂岩结构面)。

从图 5—图 8 及表 1 可以得出,在加载条件下,不同类型的结构面具有以下特征:

a. 4 种结构面的峰值剪切应力和残余剪切应力随垂直应力的增加呈线性增长的趋势。

b. 在 4 种结构面中,无充填结构面的黏聚力  $c$  值最大,而由泥岩与砂岩组成的结构面的黏聚力  $c$

表 1 4 种不同类型结构面抗剪强度参数计算结果  
Table 1 The shear strength parameters of four different types of discontinuities

	峰值剪切强度参数		残余剪切强度参数		拟合系数	
	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$f_1$	$f_2$
I	0.240 6	33.8	0.075 0	33.6	0.927 7	0.998 2
II	0.827 1	36.3	0.237 7	35.3	0.942 4	0.986 6
III	0.375 2	34.1	0.229 8	34.9	0.972 6	0.984 7
IV	0.302 0	37.9	0.154 5	32.8	0.997 3	0.995 3

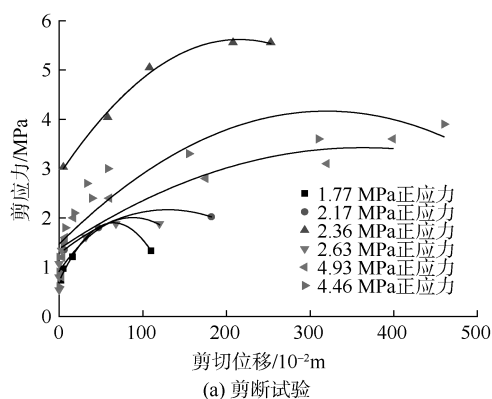
值最小,重复剪切试验结果满足这样的趋势。

c. 在 4 种结构面中,含钙质充填砂岩结构面的内摩擦角最大,含泥质充填砂岩结构面的内摩擦角最小。重复剪切试验中,此规律仍然符合。

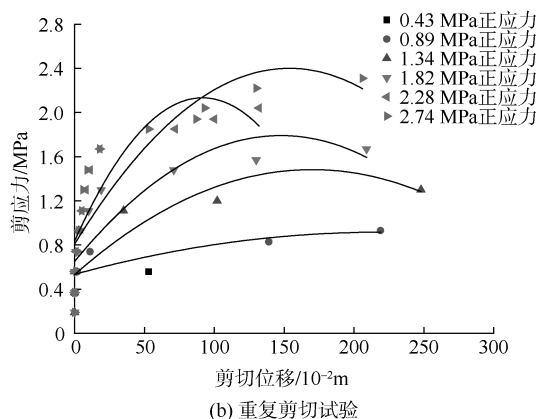
### 3.2 剪切位移曲线分析

根据室内直剪试验结果可以得到不同类型结构面在不同法向压力作用下的剪应力-剪切位移曲线,以泥岩与砂岩结构面和含泥质充填结构面为例进行分析,其剪应力-剪切位移关系如图 9、图 10 所示。

结构面的剪切位移-剪应力关系曲线一般都是非线性的。从图 9 和图 10 所示的不同类型结构面在加载条件下的剪切位移-剪应力曲线关系中,可以得出以下结论:



(a) 剪断试验



(b) 重复剪切试验

图 9 泥岩与砂岩结构面剪应力-剪切位移关系曲线图

Fig.9 The shear stress-shear displacement relationship for discontinuity between mudstone and sandstone

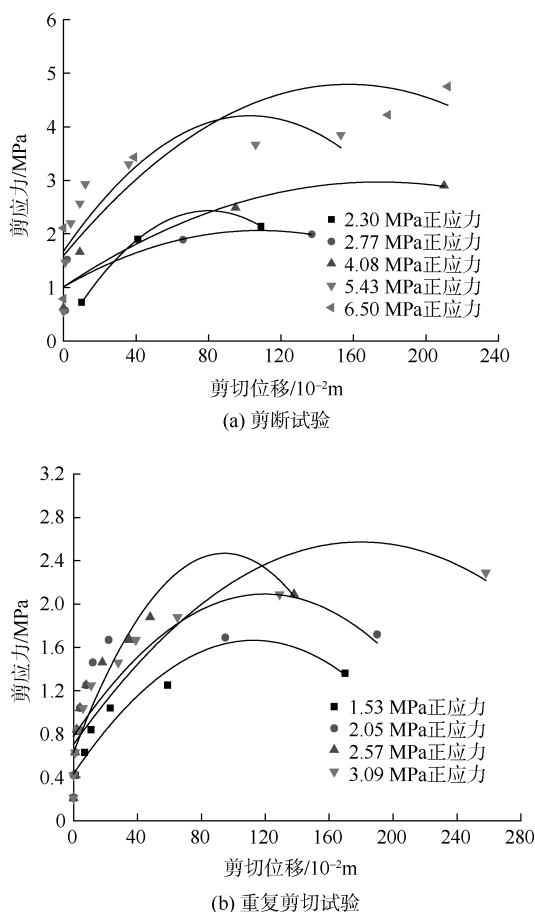


图 10 含泥质充填砂岩结构面剪应力-剪切位移关系曲线图

Fig.10 The shear stress-shear displacement relationship for discontinuity in clay-bearing sandstone

a. 最初剪切应力随着剪切位移的增加呈线性增长趋势,斜率与其刚度相关,平均刚度变化不大。达到峰值强度之后,随着剪切位移的继续增加,剪应力逐渐降低,最终趋于一定值。结构面在经历不同剪切变形历史后,剪切应力均不再出现尖峰。

b. 通常,若结构面的粗糙特性保持不变,结构面抗剪能力与其所受垂向应力成正比。显然,在经历不同剪切变形历史后,粗糙结构面变得越来越光滑,粗糙特性呈下降趋势。

c. 对于不同类型结构面在加载条件下的剪应力-剪切位移曲线来说,剪应力峰值随着正应力增加而增加,但由于试验条件的限制及某些人为原因出现一些异常,如泥岩与砂岩结构面直剪试验中 2.5 MPa 正应力作用下的剪应力峰值高于 4.46 MPa 正应力作用下的剪应力峰值。

d. 对比同一结构面的两种不同的剪应力-剪切位移关系曲线可知:在重复剪切作用下的剪应力峰值比初始剪切试验正应力作用下的峰值剪切强度小。岩体处于复杂的自然环境中,因此会不断遭受各种地质作用。

#### 4 不同类型结构面边坡实例分析

针对三峡库区侏罗系软硬相间地层的特点,根据现场调查情况,为了实现考虑不同类型结构面条件下的边坡稳定性计算,综合概化得到计算模型(图 11)。根据其结构面特征,其潜在滑动面有 4 个,从上至下依次为 I、II、III、IV(分别代表含有钙质充填砂岩结构面、泥岩与砂岩结构面、含泥质充填结构面及无充填砂岩的潜在滑动面)。

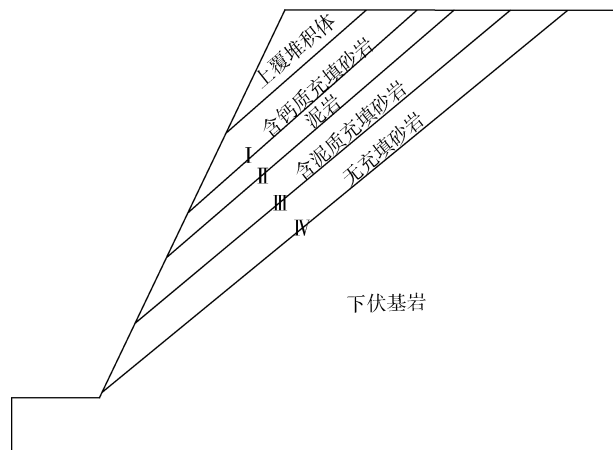


图 11 边坡地质结构示意图

Fig.11 The geologic structure of slope

对于单平面滑动的斜坡,其稳定性受倾向与坡向一致的一组软弱面控制。其稳定性系数计算公式<sup>[26]</sup>为

$$K_s = \frac{R}{T} = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} + \frac{4c}{\gamma h \sin 2\alpha}$$

式中  $\gamma$  为滑体容重;  $\alpha$  为条块底面倾角;  $c$  为滑动面上的黏聚力;  $\varphi$  为滑动面上的内摩擦角;  $h$  为坡顶至滑动面的高度。

为了便于对比分析和计算,假设各结构面的长度相同,且潜在滑动面与其保持一致。根据滑坡形态,设定结构面的长度  $L=10$  m,  $\gamma=21.14$  kN/m<sup>3</sup>,  $\alpha=35^\circ$ 。将计算所得各结构面的参数分别代入上述稳定性计算公式中,即可得到 4 种不同结构面的稳定性系数,统计结果如表 2 所示。

表 2 4 种不同类型结构面稳定性系数计算结果  
Table 2 The stability coefficients of four different types of discontinuities

潜在滑动面	稳定性系数	潜在滑动面	稳定性系数
I	1.07	III	0.98
II	0.96	IV	1.12

从表 2 可以看出,含泥岩与砂岩组成的结构面稳定性系数最小,且小于 1,处于不稳定状态。而

含泥质充填砂岩结构面的稳定性系数虽然较泥岩与砂岩组成的结构面稳定性系数大些,但仍然小于 1,同样属于欠稳定状态。因此在边坡的勘察与防治中,应该对含两种结构面的潜在滑动面引起足够的重视,进行及时防护,避免引起边坡失稳。

一般而言,按照同一类结构面进行顺层同倾向边坡稳定性分析时,其稳定性系数呈由上至下逐渐减小的趋势,而本文考虑结构面的差异性时最不稳定的层面却不一定出现在最下面,第二、第三类结构面条件下稳定性系数反而小于第四层,说明这两类结构面稳定性较差,在进行层状岩体稳定性分析时须注意考虑不同类型结构面的差异性。

## 5 结 论

a. 通过对比 4 种不同类型结构面试验结果可知:泥岩与砂岩组成的结构面黏聚力  $c$  值最小,但内摩擦角  $\varphi$  最大,无充填砂岩结构面黏聚力  $c$  值最大,含泥质充填砂岩结构面  $\varphi$  最小。

b. 根据不同类型结构面剪应力-剪切位移关系曲线图,剪切应力随着剪切位移的增加呈线性增长趋势,达到峰值强度之后,随着剪切位移的增加,剪应力逐渐降低,最终趋于某一定值,剪应力峰值均随着正应力增加而增加。4 种结构面峰值剪应力和残余剪应力随垂直应力的增加呈线性增长趋势,剪胀特性已不明显。

c. 通过具体算例可知,在考虑结构面的差异性时,最不稳定的层面却不一定出现在最下面,第二、第三类结构面条件下稳定性系数反而小于第四层,说明这两类结构面稳定性较差,在进行层状岩体稳定性分析时须注意考虑不同类型结构面的差异性。

## 参考文献

- [1] 孟召平,陆鹏庆,贺小黑. 沉积结构面及其对岩体力学性质的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(1): 33-37.
- [2] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[J]. Proc 1st Cong ISRM Lisbon, 1966(1): 509-517.
- [3] LADANYI B, ARCHAMBAULT G. Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass[C]//Rock Mechanics—Theory and Practice—Eleventh Symposium on Rock Mechanics, [S.l.]: [s.n.], 1970: 105-117.
- [4] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [5] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [6] GERRARD C. Shear failure of rock joints: appropriate constraints for empirical relations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1986, 23(6): 421-429.
- [7] 夏才初,孙宗硕,潘长良. 含波纹度的节理的形态特征和剪切性质研究[C]//中国岩石力学与工程学会第三次会议论文集. 北京: 中国科学出版社, 1994: 34-43.
- [8] 夏才初,孙宗硕,潘长良. 不同形貌节理的剪切强度和闭合性质研究[J]. 水利学报, 1996(11): 28-32.
- [9] 沈婷,丰定祥,任伟中,等. 由结构面和岩桥组成的剪切面强度特性研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 33-38.
- [10] 许宏发,金丰年. 岩体节理剪切变形的幂函数模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 314-317.
- [11] FOX D J, KANA D D, HSIUNG S M. Influence of interface roughness on dynamic shear behavior in jointed rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 923-940.
- [12] LEE H S, PARK Y J, CHO T F, et al. Influence of asperity degradation on the Mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 967-980.
- [13] JAFARI M K, HOSSEINI K A, PELLET F, et al. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(7): 619-630.
- [14] 杜守继,朱建栋,职洪涛. 岩石节理经历不同变形历史的剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 56-60.
- [15] 李海波,冯海鹏,刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2435-2440.
- [16] 李海波,刘博,冯海鹏,等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1741-1752.
- [17] 沈明荣,张清照. 岩体结构面的剪切试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 38-43.
- [18] 张清照,沈明荣,丁文其. 结构面在剪切状态下的力学特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 38-42.
- [19] 贺建明,吴刚. 岩体异性结构面的抗剪强度准则[J]. 重庆大学学报, 1994, 17(2): 105-110.
- [20] 鲁祖德,陈从新. 自然与饱水条件下异性结构面的剪切特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 13-18.
- [21] 刘红帅,杨俊波,薄景山,等. 岩土体物理力学参数对岩质斜坡稳定性的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(1): 37-40.
- [22] 陈凯,姜振泉,孙强. 砂与粘土接触面的力学特性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(4): 56-59.
- [23] 夏才初,孙宗硕. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [24] 张强勇,向文. 节理岩体能量损伤本构模型与工程应用[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 310-314.
- [25] 胡波,杨志荣,刘顺桂,等. 共面闭合断续节理岩体直剪强度特性研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 327-331.
- [26] 李长冬,唐辉明,胡新丽,等. 区域斜坡空间预测评价中的尺度效应规律研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(9): 56-60.