

含倾斜软弱夹层砂岩力学特性试验

焦兵¹, 万文^{1*}, 赵延林¹, 张为芳², 易帅¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为研究不同倾角软弱夹层对砂岩强度和变形的影响, 预制含有不同倾角(15°, 30°, 45°, 60°)软弱夹层的砂岩试件及完整砂岩试件进行单轴压缩试验. 试验研究发现, 软弱夹层对砂岩的强度具有明显的削弱效果, 在0°~60°的倾角范围, 随着软弱夹层倾角的增加, 这种削弱效果更加显著; 弹性模量和泊松比随着软弱夹层倾角的增大而减小, 当软弱夹层倾角达到45°时, 弹性模量和泊松比出现“跳跃式”减小; 完整试件的破坏形式是常见的压-剪破坏, 含软弱夹层的试件, 随着软弱夹层倾角的增加, 试件的破坏形式由拉-剪复合破坏向沿着软弱夹层面剪切破坏转变, 在45°~60°范围内, 软弱夹层倾角越大, 沿软弱夹层面发生剪切破坏越明显.

关键词:单轴压缩; 软弱夹层; 剪切破坏

中图分类号:TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)04-0001-06

Experimental Study on Mechanical Properties of Sandstone with Inclined Soft Intercalation

Jiao Bing¹, Wan Wen¹, Zhao Yanlin¹, Zhang Weifang², Yi Shuai¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the influence of different dip angle weak intercalation on sandstone strength and deformation, uniaxial compression tests are carried out on sandstone specimens with different dip angles (15, 30, 45 and 60 degrees) weak interlayer and intact sandstone specimens. Experimental research finds that the strength of sandstone is weakened obviously by weak interlayer, and the weakening effect is more remarkable with the increase of dip angle of weak interlayer in the range of 0 to 60 degrees. Modulus of elasticity and Poisson ratio decrease with increasing dip of soft sandwich, they appear to "jump" reduction when the soft sandwich dip reaches 45 degrees; the failure form of intact specimen is pressure-shear failure, with the increase of the dip angle of the specimen with weak intercalation, the failure mode changes from the pull-shear composite failure to the shear failure along the weak clip layer, the greater the dip angle of the weak intercalation, the more obvious the shear failure along the soft sandwich layer in the range of 45 to 60 degrees.

Keywords: uniaxial compression; soft intercalation; shear failure

层状结构是岩体工程中最普遍的类型, 自然界中具有层状结构的沉积岩占陆地面积的2/3(我国占77.3%, 其中分布最广的是砂岩、粘土岩类和石灰岩类, 它们约占沉积岩的98%~99%), 甚至, 许多变质岩也具有层状结构特征^[1,2]. 由于分层现象的存在, 特别是软弱夹层的存在, 使得岩体与完整岩石的力学性质存在巨大差异, 而不同倾斜程度的软弱夹层对岩体强度和变形的影响也不尽相同.

收稿日期: 2018-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51472097; 51774132); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2067); 湖南省教育厅资助项目(13A020)

*通信作者, E-mail: wanwen68@163.com

岩体的单轴压缩试验是研究岩体的强度和变形特性的有效试验手段^[3],也是获取岩体力学基本参数的主要方法.关于层状岩体的研究,许多学者做了大量的单轴压缩试验,张波、李术才等^[4]用相似材料试件研究了裂隙不同充填物对节理岩体单轴压缩力学性能及锚固效应的影响;何忠明、曹平等^[5]通过室内试验和数值模拟研究,分析了层状岩体单轴压缩情况下的应力-应变响应以及强度特征;罗金泽等^[6]针对层状岩体的破损特征开展了一系列的物理模拟试验,分析了单一层状岩体和软硬复合岩体在单轴压缩情况下的破损特征;李银平^[7]等对含泥岩夹层盐岩、纯泥岩和纯盐岩3种岩芯试样进行单轴压缩和不同围压下三轴压缩试验研究,发现泥岩夹层对盐岩体的变形和破坏特性有明显的影响,强度高于盐岩的泥岩夹层先于盐岩出现横向拉伸破坏.目前针对夹层对岩体力学特性和破坏机制影响的研究较多,但大多对夹层的强度没有明确说明和要求,也没有考虑到夹层倾角对各岩体力学特性和破坏机制的影响.

层状岩体的力学特性不仅与岩体中存在的夹层有关,夹层的倾斜程度也对其力学特性和破坏机制有着巨大影响^[8-10],当夹层较弱,产状倾斜时,会对岩体的整体力学性能形成削弱,进而对以其为围岩的岩体工程稳定性产生不利影响^[11].虽然宋彦琦等^[12]对含不同倾角天然软弱夹层的大理岩进行了单轴和三轴压缩试验,发现了单轴压缩下含不同倾角天然软弱夹层的大理岩均发生劈裂拉伸破坏,天然软弱夹层附近出现岩片折断现象.蒋昱州等^[13]基于FLAC^{3D},采用黏弹性流变本构模型,模拟了非贯通断续软弱夹层在不同间距、长度及倾角等因素影响下岩石的弹塑性变形与流变变形情况,但前者在单轴压缩下软弱夹层倾角对大理岩破坏形式的影响没有作足够的解释,大理岩也不能代表其他含软弱夹层岩体,不同的岩体应有不同的试验结果,后者采用数值模拟的研究方法,虽然考虑了很多因素,但不能准确反映实际工程中的岩体性质.

笔者在总结前人有关层状岩体研究的基础上,以含有不同倾角的软弱夹层砂岩试件和完整砂岩试件为研究对象,以水泥砂浆作为岩体中类软弱夹层材料,对2种试件进行单轴压缩试验,通过含不同倾角的软弱夹层试件和完整试件试验结果的对比,探讨单轴压缩下软弱夹层和软弱夹层倾角对砂岩强度、变形特性和破坏形式的影响规律.

1 试验材料与试验方案

1.1 试件制备

本试验所用2类试件:完整砂岩试件和以完整砂岩试件按不同切割角度切割成的岩块均在工厂加工制作,为便于叙述,定义切割角(也即软弱夹层倾角) α 为切割面与试件端面夹角.为研究不同倾斜程度的软弱夹层对砂岩力学特性的影响,设切割角 α 为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$,完整砂岩试件和以其切割成的岩块如图1所示.

含不同倾角软弱夹层的试件是通过水泥砂浆(水泥、砂子和水的体积比为 $1:2:0.8$,水泥采用的是42.5#硅酸盐水泥,砂子用的是粒径在 0.08 mm 以下的河砂)将两切割角相同的岩块粘连而成,最终成品如图2所示,试件尺寸:高 $h=100\text{ mm}$,直径 $d=50\text{ mm}$,软弱夹层厚度 $b=4\text{ mm}$,试件两端表层平滑度控制在 0.05 mm 以内,端面和试件轴线保持垂直关系,其偏差控制在 0.25° 以内.完整砂岩试件和含不同倾角软弱夹层砂岩试件各加工制作4个.软弱夹层倾角示意图如图3所示.



图1 完整试件和以其切割成的岩块



图2 完整试件和含软弱夹层试件

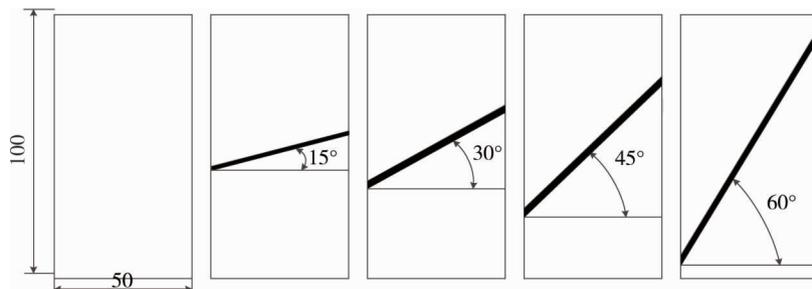


图3 软弱夹层设置

1.2 试验设备及试验方法

含不同倾角软弱夹层砂岩及完整砂岩试件的单轴压缩试验在湖南科技大学岩石力学试验室的长春朝阳公司生产的 RYL600 微机控制岩石伺服剪切流变仪上进行.试验机采用 DOLI 全数字交流伺服测试系统,压力长时间稳定度 $\leq \pm 2\%$,变形测量精度在 $\pm 0.5\%$ 以内^[14],RYL600 微机控制岩石伺服剪切流变仪的加载框架采用高刚度设计,竖向加载框架刚度 >10 G/m,可进行岩体的全过程单轴压缩试验^[15].

在试件中部安装环向应变引伸计,在试件两端压头上安装轴向应变引伸计以获取试件在压缩过程中轴向应变和侧向应变,单轴压缩试验过程先通过操作计算机给试件施加 1 kN 的接触荷载,使试件上下两端面与承压板水平接触,试件两端面均匀受载,然后以 0.2 kN/s 的加载速率对岩样施加荷载直至试件破坏.用数码相机对试件单轴压缩全过程实时观测并视频输出,记录并保存相关试验曲线.图 4 为正在 RYL-600 微机控制岩石伺服剪切流变仪上进行含不同倾角软弱夹层岩体的单轴压缩试验.



图4 含倾斜软弱夹层砂岩单轴压缩试验

2 试验结果及分析

对完整砂岩试件和含有不同倾角软弱夹层的砂岩试件进行了完全相同的单轴压缩试验,在同种试件的试验结果中,选择试验效果最好的 1 条应力-应变曲线作为该类试件的代表曲线,选择计算结果的平均值作为该类试件强度、弹性模量及泊松比的代表值.

2.1 应力-应变全曲线特征对比

单轴压缩状态下,完整砂岩试件和含倾角 15°,30°,45°,60°软弱夹层的砂岩试件轴向和侧向应力-应变全曲线见图 5.由图 5 可以看出,完整及含软弱夹层的砂岩在单轴压缩条件下的轴向和侧向应力-应变全曲线可分为 4 个阶段:(1)裂隙压密阶段;(2)弹性变形阶段;(3)塑性变形阶段;(4)应变软化阶段.

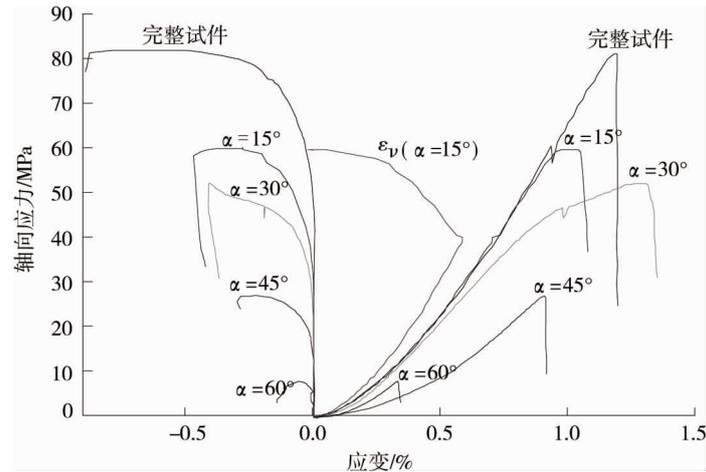


图5 单轴压缩下完整试件及软弱夹层试件应力-应变曲线

由图5中各试件的应力-应变曲线的特点可以看出砂岩在单轴压缩下呈现脆性破坏特征,各试件破坏时无显著变形,应力在峰后的跌落也比较迅速.但由于软弱夹层的存在,单轴压缩下,含软弱夹层的试件和完整试件的应力-应变曲线特点存在差异性,含不同倾角软弱夹层的试件应力-应变曲线也有各自特点.裂隙压密阶段,含软弱夹层试件应力-应变曲线上凹速率明显比完整试件应力-应变曲线上凹速率小,进入弹性阶段前岩体的变形要大,且软弱夹层倾角越大,曲线的上凹速率越小,进入弹性阶段前岩体的变形越大,这是因为软弱夹层比岩块中存在更多的裂隙,软弱夹层倾角越大,软弱夹层(等厚)体积越大,相对来说裂隙越多岩体越不密实,压密时间越长,压密变形量越大,应力随应变增大的速率越小;弹性变形阶段,含软弱夹层试件曲线斜率比完整试件曲线斜率要小,且随着软弱夹层倾角的增加,曲线斜率减小,反映了弹性模量随夹层倾角的增大有减小的趋势,也是因为随着夹层倾角的增大,岩体的软弱部分在相同的应力增量下会产生更多的变形;塑性变形阶段,完整试件和软弱夹层倾角 α 较大($\alpha = 45^\circ, 60^\circ$)的试件,塑性变形不明显,几乎是从弹性变形阶段直接到达峰值强度,对于完整试件这是脆性材料的明显体现,而对于含较大夹层的试件则是因为其将会沿夹层面发生滑移变形急剧增加的缘故,当软弱夹层倾角 α 较小($\alpha = 15^\circ, 30^\circ$)时,含软弱夹层试件的塑性变形较大,有较明显的屈服平台,塑性变形相对较为明显,因为软弱夹层倾角的存在一定程度上增加了岩样的延性和塑性;峰值强度随着软弱夹层倾角的增大逐渐减小,软弱夹层倾角 $\alpha = 45^\circ$ 时较 $\alpha = 30^\circ$ 时峰值强度下降幅度最大,达到50%;试件破坏时,软弱夹层倾角对试件破坏时的轴向变形影响较大,当软弱夹层 $\alpha = 60^\circ$ 时,试件破坏时的轴向变形仅为完整试件破坏时轴向变形的30%.

2.2 软弱夹层及其倾角对岩体力学特性的影响

结合上节完整砂岩试件和含不同倾角软弱夹层试件在单轴压缩下的应力-应变曲线特点的比较,可预测当软弱夹层倾角 α 非常小($\alpha = 0^\circ$)时,含软弱夹层试件和完整试件在单轴压缩状态下的力学特性基本相同,这在大理岩上也已得到充分证明^[12].因此可将完整砂岩试件视为含倾角为 0° 软弱夹层的砂岩试件.

2.2.1 对峰值强度的影响

完整砂岩试件($\alpha = 0^\circ$)和含不同倾角软弱夹层砂岩试件的峰值强度见表1.从表1及图5中可看出,软弱夹层的存在,岩体峰值强度显著降低,且随着软弱夹层倾角的增加,岩体峰值强度呈非线性减小.当软弱夹层倾角较小($0^\circ < \alpha \leq 15^\circ$)时,岩体峰值强度随软弱夹层倾角的增加而减小的幅度较大,减小幅度达到21.66 MPa,平均减小速率为1.44 MPa/($^\circ$),说明只要有倾斜软弱夹层的存在就会大大削弱岩体的承载能力;当软弱夹层倾角 $15^\circ < \alpha \leq 30^\circ$ 时,岩体峰值强度随软弱夹层倾角的增加而减小的幅度非常小,说明在此范围内的软弱夹层倾角对岩体的强度影响较小;当软弱夹层倾角 $30^\circ < \alpha \leq 45^\circ$ 时,岩体峰值强度随软弱夹层倾角的增加而减小的幅度突增,平均减小速率达到1.70 MPa/($^\circ$),此范围内的软弱夹层倾角对岩体强度的削弱效应最为显著;当软弱夹层倾角 $45^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ 时,岩体峰值强度随软弱倾角的增大而

减小的幅度又有所减小。

表1 峰值强度与软弱夹层倾角的关系

软弱夹层倾角/(°)	0	15	30	45	60
峰值强度/MPa	82.55	60.89	53.20	27.67	8.37
减小幅度/MPa	0.00	21.66	7.69	25.53	19.30
平均减小速率/(MPa/(°))	0.00	1.44	0.51	1.70	1.29

注:减小幅度指某一软弱夹层倾角和后一个较大的软弱夹层倾角对应峰值强度的差值

总的来说,软弱夹层的存在,削弱了岩体的强度,在某一软弱夹层倾角范围($0^\circ < \alpha \leq 60^\circ$),随着软弱夹层倾角的增大,这种削弱作用更加显著,当软弱夹层倾角 $\alpha = 60^\circ$ 时,岩体强度降低了近90%,可见当岩体中存在较大倾角的软弱夹层时,对岩体强度的影响是不可忽视的。

2.2.2 对弹性模量和泊松比的影响

完整砂岩试件($\alpha = 0^\circ$)和含不同倾角软弱夹层砂岩试件的弹性模量及泊松比见表2和表3。从表2和表3可以看出,软弱夹层的存在,岩体的弹性模量和泊松比都有明显的降低,一般地,软弱夹层倾角越大,弹性模量及泊松比越小。

由表2可知,当 $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ 时,弹性模量随 α 的增加基本呈线性减小,减小的幅度较大, α 每增加 15° ,弹性模量的降低均超过1100 MPa,平均减小速率在76 MPa/(°)至118 MPa/(°)之间,此范围内,弹性模量受软弱夹层倾角的影响比较明显;其中当 $15^\circ \leq \alpha < 30^\circ$ 时,弹性模量随 α 的增加减小幅度达到最大,说明此范围内的软弱夹层倾角对弹性模量的影响最为明显;当 $45^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时,弹性模量随 α 的增加而减小的速率又变小,弹性模量受软弱夹层倾角的影响较小。由表3可知,当软弱夹层倾角非常小($0^\circ < \alpha < 15^\circ$)时,泊松比随 α 的增加迅速下降,说明岩体中只要存在软弱夹层,其泊松比就会大幅度减小;当 $15^\circ \leq \alpha < 30^\circ$ 时,泊松比随 α 的增加基本保持不变,此范围内的软弱夹层倾角对泊松比的影响不明显;当 $30^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时,泊松比随软弱夹层倾角的增加基本也呈线性减小,其平均减小速率约为0.003/(°),当软弱夹层倾角 α 达到 45° 附近时,泊松比随软弱夹层倾角增加而减小的幅度达到此范围内最大。

表2 弹性模量与软弱夹层倾角的关系

软弱夹层倾角/(°)	0	15	30	45	60
弹性模量/MPa	6 896.41	5 837.97	4 061.07	2 924.34	2 513.51
减小幅度/MPa	0.00	1 158.44	1 776.90	1 136.73	410.83
平均减小速率/(MPa/(°))	0.00	77.23	118.46	75.78	27.39

注:减小幅度指某一软弱夹层倾角和后一个较大的软弱夹层倾角对应弹性模量的差值

表3 泊松比与软弱夹层倾角的关系

软弱夹层倾角/(°)	0	15	30	45	60
泊松比	0.45	0.40	0.39	0.33	0.29
减小幅度	0.00	0.05	0.01	0.06	0.04
平均减小速率/(/(°))	0.000 00	0.003 30	0.000 67	0.004 00	0.002 70

注:减小幅度指某一软弱夹层倾角和后一个较大的软弱夹层倾角对应泊松比的差值

2.3 破坏形式分析及破坏机制探讨

单轴压缩下,完整试件和含软弱夹层试件的破坏形态见图6。从图6可以看出,单轴压缩时,完整试件主要产生单斜截面剪切破坏,局部出现岩片折断、剥落现象,软弱夹层倾角不同,岩体试件的破坏形式也有所不同:当 $\alpha = 15^\circ$ 时,岩体试件主要呈拉-剪复合破坏,试件破坏时不仅存在某一贯通的剪切面,而且沿轴向有许多较长的劈裂裂纹,试件一端出现局部圆锥破断面,软弱夹层被拉断;当 $\alpha = 30^\circ$ 时,岩体试件主要表现为沿软弱夹层面发生剪切滑移为主,但在沿轴线方向也会产生由软弱夹层面处向两端引伸的较短的劈裂裂纹,夹层附近岩片被折断,软弱夹层被剪断;当软弱夹层倾角 $\alpha \geq 45^\circ$ ($\alpha = 45^\circ, 60^\circ$)时,岩体试件基本表现为沿软弱夹层面的剪切滑移破坏,但 $\alpha = 45^\circ$ 时软弱夹层受到局部破坏, $\alpha = 60^\circ$ 时软弱夹层不破坏。



图6 试件破坏形态

完整试件和 $\alpha = 30^\circ$ 的试件破坏时软弱夹层附近出现岩片折断现象,单轴压缩下,大多硬脆岩石在单轴压缩下都会发生此类现象^[16],可用“压杆稳定理论”进行解释,单轴压缩下,可将岩体比作“压杆”,当轴向荷载达到临界荷载时,岩体轴线将发生弯曲,进而导致试件局部岩片被折断,这在应力-应变全曲线上反映出来,即在应变几乎不变时出现一个应力小幅度跌落(见图5); $\alpha = 15^\circ$ 和 $\alpha = 30^\circ$ 的试件不仅产生剪切破坏,在轴向方向沿软弱夹层两侧还出现张拉裂纹,尤明庆^[17]认为岩体内张拉破坏根源在于剪切滑移,由于软弱夹层处强度低,当岩体内发生剪切滑移时,软弱夹层面会产生剪应力集中(此时软弱夹层面上的剪应力还没达到软弱夹层面的抗剪强度),进而导致岩体横向产生拉应力,软弱夹层倾角越小,在软弱夹层处岩体的横向拉应力越大,这也是为什么 $\alpha = 15^\circ$ 的试件轴向拉裂纹较长,而 $\alpha = 30^\circ$ 的试件轴向拉裂纹较短; $\alpha = 45^\circ$ 和 $\alpha = 60^\circ$ 的试件发生沿软弱夹层面的剪切破坏是由于单轴压缩下软弱夹层面上的剪应力超过了软弱夹层面的抗剪强度。

由以上单轴压缩下完整砂岩和含不同倾角软弱夹层砂岩的力学特性的比较分析,可知岩体试件的强度和破坏形式受软弱夹层倾角的影响,当软弱夹层倾角适当($\alpha \leq 30^\circ$)时,岩体试件的力学特性受完整岩石和软弱夹层共同控制,此时岩体强度介于软弱夹层强度和完整岩石强度之间,破坏形式一方面受主剪切面的控制,表现为试件破坏时存在穿过软弱夹层的贯通剪切面,一方面受软弱夹层影响,软弱夹层倾角越大,其对破坏形式的影响越明显,表现为贯通的剪切面始于试件侧面终于另一侧面,劈裂裂纹随 α 增加长度减小;当软弱夹层倾角较大($\alpha \geq 45^\circ$)时,特别是 $\alpha = 60^\circ$ 时,岩体强度和破坏形式完全受软弱夹层控制,此时岩体在单轴压缩下的力学特性基本可归结于软弱夹层的力学特性。

综合来说,完整试件的破坏形式是比较常见的压-剪破坏,含软弱夹层的试件,随着软弱夹层倾角的增大(不大于 60°),试件的破坏形式由拉-剪复合破坏向沿着软弱夹层面剪切滑移破坏转变。

3 结论

1) 软弱夹层的存在明显削弱了砂岩的强度,在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内,软弱夹层倾角越大,对砂岩强度的削弱效果越显著,当软弱夹层倾角 $\alpha = 60^\circ$ 时,岩体强度降低了近 90%。弹性模量及泊松比也随软弱夹层的增加而减小,当软弱夹层倾角达到 45° 左右时,其随软弱夹层倾角增加而减小的速率急剧增大。

2) 完整试件的破坏形式是常见的压-剪破坏,含软弱夹层的试件,随着软弱夹层倾角的增加($15^\circ \leq \alpha < 60^\circ$),试件的破坏形式由拉-剪复合破坏向沿着软弱夹层面剪切破坏转变,在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 范围内,软弱夹层倾角越大,沿软弱夹层面发生剪切破坏越明显。

3) 岩体试件的强度和破坏形式受软弱夹层倾角的影响,当软弱夹层倾角适当($\alpha \leq 30^\circ$)时,岩体试件的力学特性受完整岩石和软弱夹层共同控制,此时岩体强度介于软弱夹层强度和完整岩石强度之间,当软弱夹层倾角较大($\alpha \geq 45^\circ$)时,特别是 $\alpha = 60^\circ$ 时,岩体强度和破坏形式完全受软弱夹层控制,此时岩体在单轴压缩下的力学特性基本可归结于软弱夹层的力学特性。

参考文献:

[1] 周莲君.层状岩体破坏特征的试验和数值分析及其边坡稳定性研究[D].长沙:中南大学,2009.