

基于FLAC^{3D}对含软硬岩互层边坡的变形分析

宋大伟¹, 张发明¹, 韩新捷², 刘志强¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100; 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002)

摘要:以南京地区采矿形成的边坡为背景, 研究含有硬岩的软硬岩互层边坡的稳定性。运用FLAC^{3D}基于有限元强度折减法, 模拟不同硬岩岩层的倾角和厚度对顺向坡和反向坡变形的影响, 分析对比上述因素对边坡变形影响的大小。研究表明, 顺向坡中硬岩的倾角越大, 厚度越大, 变形越小, 并且变形有趋于稳定的趋势; 反向坡中硬岩的倾角越大, 厚度越大, 变形先减小后增大, 说明上述因素越大, 反向坡越容易产生倾倒变形。

关键词:软硬岩互层边坡; FLAC^{3D}; 有限元; 强度折减法; 岩层厚度; 岩层倾角

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

Analysis of the deformation of the soft and hard rock interaction slope based on FLAC^{3D}

SONG Dawei¹, ZHANG Faming¹, HAN Xinjie², LIU Zhiqiang¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhejiang Hangzhou 310002, China)

Abstract: Based on the slope of mining in Nanjing area as the background to studied the stability of the soft and hard rock slope. The FLAC^{3D} with the strength reduction FEM was used to solve the different hard rock strata dip and strata thickness to influence the bedding slope and reverse slope's deformation, then the influence of the above factors on the slope deformation were analyzed and compared. The results show that the dip angle of the hard rock in the slope is bigger, the thickness is bigger, the deformation is smaller and the deformation tends to be stable; the dip angle of the reverse slope is bigger, the thickness is bigger, the deformation decreases and then increases, which shows that the reverse slope is prone to dumping deformation.

Key words: soft and hard rock slope; FLAC^{3D}; strength reduction FEM; rock thickness; dip angle of rock stratum

矿山边坡稳定问题是我国最具特色的工程地质问题之一。露天矿山边坡通常处于复杂的地质环境并具有复杂的地质机构, 因此成为矿山爆破开挖及边坡防治中一个关键性的技术难题^[1]。软硬岩互层型的边坡是其中特殊的一种, 南京地区采矿形成大量的采石宕口边坡部分就是这种类型。目前, 夏开宗等研究了在软硬岩互层边坡中层面倾角、层面内摩擦角、层面厚度等因素对边坡稳定的敏感性差别^[2]; 胡斌、杨谢晖等完成了对于软硬岩互层边坡破坏机制的研究^[3-4]; 刘才华等研究了水对顺层边坡稳定性的影响^[5-7]; 柴波等

研究了顺向坡岩层倾向与坡向夹角对边坡稳定性的影响^[8]。本文依托南京地区露天采矿形成的边坡的基本特征, 建立力学模型, 分析了形成顺向坡和反向坡中岩层厚度、岩层倾角对边坡稳定性的影响, 探索这些因素对于软岩夹硬岩的边坡稳定性影响中的一些规律。

1 计算理论

由于FLAC^{3D}具有强大的自动三维网格生成器, 含有多种计算模型, 采用混合离散方法来模拟材料的屈服或塑性流动特征, 以及显示差分法求

解微分方程等特点。通过有限差分软件FLAC^{3D}建立模型,采用强度折减法,来对模型进行计算分析,求解稳定系数,以及应力、应变、位移等云图,对模型进行综合有效的分析。

强度折减法就是通过有限元计算,降低边坡岩土体的抗剪强度参数直至达到临界状态为止,实际的抗剪强度参数与此时所得的临界抗剪强度参数的比值,即为所求的安全系数 ω ,见公式:

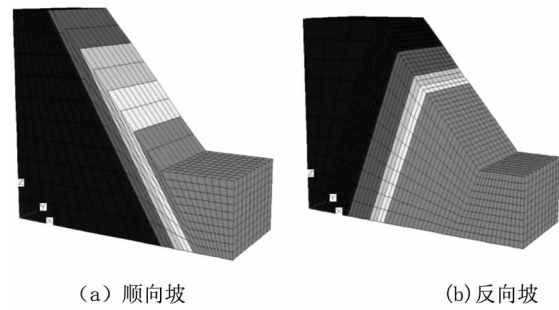
$$c = c'/\omega, \tan\psi' = \tan\psi/\omega$$

式中 c' 为折减后的黏结力; ψ' 为折减后的内摩擦角^[9]。

2 FLAC^{3D}数值模拟

2.1 模型建立

模型以南京地区典型的采石宕口形成的边坡为建模依据,建立包含五通组砂岩、五通组页岩、金陵组灰岩、和州组和高骊山组页岩以及黄龙组灰岩等5个地层的边坡模型,其中金陵组灰岩和黄龙组灰岩为硬岩。采用矩形网格建模,模型的整体高度为90 m,坡体高度为60 m,形成坡度为50°的边坡,坡体内部岩层倾角分别选取为60°、70°和80°,按照顺向和反向建立6组模型,模型中的金陵组灰岩厚度分别采用0、2、4、6和8 m。图1(a)为岩层倾角70°,金陵灰岩厚度为4 m的顺向坡模型,图1(b)为岩层倾角为70°,金陵灰岩厚度为4 m的反向坡模型。模型采用的约束条件是,底部边界在水平方向上进行约束,其余边界取为自由边界。



(a) 顺向坡 (b) 反向坡

图1 边坡计算模型

Fig.1 Slope calculation model

2.2 参数的选择

本文根据南京地区的实际地层岩性及地质构造条件,通过现场原位试验以及室内试验来确定各地层岩性及物理力学指标,具体参数见表1。

3 计算结果分析

3.1 顺向坡变形分析

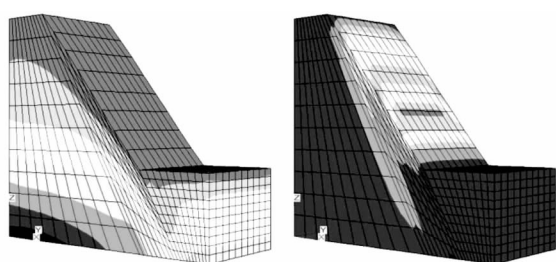
从图2(a)看,顺向坡金陵组灰岩厚度为4 m,岩层倾角为60°时,最大主应力呈层状分布,最大主应力(压应力)沿着坡面延伸至坡脚,在坡脚产生应力集中效应。说明边坡岩体主要受到垂直方向的压应力作用。从图2(b)看出,剪应变的增量主要集中在坡体的上部及中下部,位于金陵组灰岩的上下两侧,而金陵组灰岩的应变增量较小,说明灰岩对边坡稳定起到一定的作用。

从图3的位移云图及位移矢量云图可以看出,在重力作用下,边坡岩体变形主要集中在斜坡

表1 三维数值计算参数

Tab.1 Parameter list of three - dimensional numerical calculation

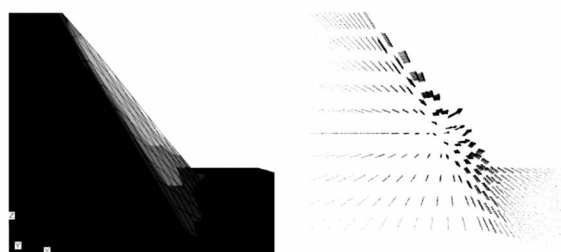
地层	重度 γ /kN · m ⁻³	抗剪强度参数		体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa
		c/kPa	Φ /°		
泥盆系上统五通组中段(D _{3w} ²)	23	150	30	13.69	9.43
泥盆系上统五通组下段(D _{3w} ¹)	23	130	28	14.44	9.51
石炭系下统金陵组(C _{1j})	25	500	34	45.00	20.77
石炭系下统高骊山组~和州组(C _{1g-h})	21	68	20	13.22	9.50
石炭系中统黄龙组(C _{2h})	23	750	50	53.70	21.97



(a) 最大主应力分布图 (b) 剪应变增量分布图

图2 顺向坡应力和应变分布图

Fig.2 Stress and shear strain of bedding slope



(a) 位移云图 (b) 位移矢量图

图3 顺向坡位移云图和矢量图

Fig.3 Displacement contour and displacements vector map of bedding slope

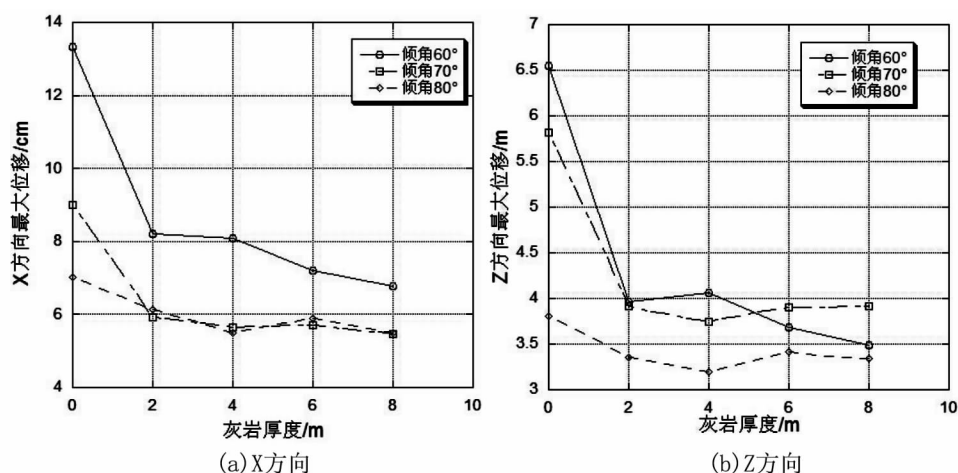


图4 顺向坡位移对比图

Fig.4 Displacement contrast diagram of bedding slope

部分。边坡的最大位移量为 9.06 cm,位于坡体表面上相对较软的和州组和高骊山组页岩部分。坡脚的位置,位移基本为 0,因为坡脚处黄龙组灰岩为硬岩,厚度较厚,可以对边坡起到很好的防护作用。

从图 4 可以看出,顺向坡中金陵组灰岩厚度为 0 m,岩层倾角为 60°时,边坡 X 方向的位移为 13.33 cm,Z 方向的位移为 6.55 cm,随着灰岩厚度的增加,岩体的位移逐渐减小,当厚度达到 8 m 的时候,边坡 X 方向的位移减小为 6.77 cm,Z 方向的位移减小为 3.49 cm。同样,岩层倾角为 70°时,岩层厚度从 0 m 增加到 8 m,X 方向上位移量从 9.01 cm 减小到 5.47 cm,Z 方向上位移量从 5.82 cm 减小到 3.92 cm;岩层倾角为 80°时,岩层厚度从 0 m 增加到 8 m,X 方向上位移量从 7.01 cm 减小到 5.49 cm,Z 方向上位移量从 3.81 cm 减小到 3.34 cm。通过对比能够发现,随着金陵组灰岩厚度的增加,位移量明显减小,坡体更加稳定。灰岩从无到有,位移量的变化更加明显。岩层倾角为 60°,灰岩厚度从 0 m 增加到 2 m,

X 方向的位移从 13.33 cm 减小到 8.22 cm,Z 方向的位移从 6.55 cm 减小到 3.57 cm;岩层倾角为 70°,X 方向的位移从 9.01 cm 减小到 5.93 cm,Z 方向的位移从 5.83 cm 减小到 3.91 cm;岩层倾角为 80°,X 方向的位移从 7.01 cm 减小到 6.13 cm,Z 方向的位移从 3.81 cm 减小到 3.35 cm,而后随厚度的增加,位移减小的趋势趋于平缓,说明边坡内部有无灰岩层对边坡稳定性影响很大。

相同的灰岩厚度的情况下,以 4 m 为例,岩层的倾角从 60°增加到 80°,X 方向的位移依次为 8.1、5.65、5.51 cm,Z 方向的位移依次为 4.06、3.75、3.19 cm,说明相同厚度的灰岩,岩层的倾角越大,越有利于边坡的稳定。岩层倾角为 60°时,在 X、Z 方向上的位移是一个持续减小的过程,而倾角增大到 70°和 80°,从 2 m 厚的金陵组灰岩开始,位移量的变化不大,在一个很小的范围内波动,说明随着岩层倾角的增大,顺向坡中作为硬岩的金陵组灰岩厚度的增加对边坡的稳定性影响在减小。

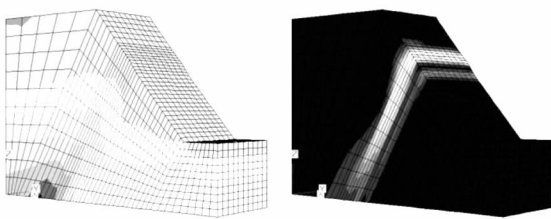
3.2 反向坡变形分析

从图5(a)可以看出,反向坡金陵组灰岩厚度为4 m,岩层倾角为60°时,最大应力分布明显与坡体中岩层的分布有关,坡体主要受到压应力的影响,边坡后缘产生拉应力集中,产生张拉破坏,可能形成张拉裂缝。图5(b)显示剪应变较为集中的部分位于金陵组灰岩上部五通组的砂页岩部分,潜在的破坏就有可能发生在该部分。

结合图6,金陵组灰岩厚度为4 m,岩层倾角为60°的反向坡,金陵组灰岩上部的五通组砂页岩位移较大,从矢量图可以清楚的看出,在金陵组灰岩部分位移受到了限制,位移方向只能指向坡外,说明灰岩对边坡的稳定起到积极的作用。并且从位移矢量可以看出,边坡岩体在发生倾侧弯曲。

从图7看出,反向坡中金陵组灰岩厚度为0 m,岩层倾角为60°时,边坡X方向的位移为13.35 cm,Z方向的位移为17 cm,随着灰岩厚度的增加,岩体的位移逐渐减小。当厚度达到8 m的时候,边坡X方向的位移减小为9.76 cm,Z方

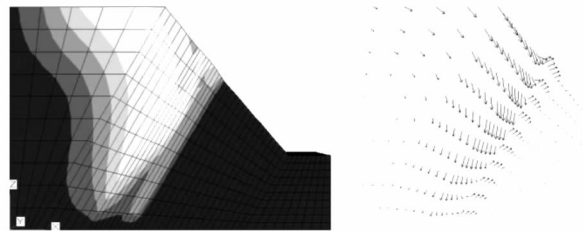
向的位移减小为3.34 cm。岩层倾角为70°时,岩层厚度从0 m增加到8 m,X方向上位移量从12.33 cm减小到2.75 cm,Z方向上位移量从10.4cm减小到5.07 cm,总体上呈减小的趋势,但是在灰岩厚度为6 m时,X和Z方向有最小的位移,分别是5.01 cm和2.47 cm,可以预想随着厚度的增加,位移增大的趋势将更加明显。岩层倾角为80°时,岩层厚度从0 m增加到8 m,X方向上位移先从9.48 cm降到2 m时的4.26 cm,后来随着灰岩厚度的增加,8 m时位移增大为5.54 cm,Z方向上位移量从8.79 cm减小到4 m时的6.19 cm后,又随厚度的增加,在8 m时增加到7.38 cm。岩层倾角增大,随岩层厚度的增大,位移有变大的趋势,故插入岩层倾角为75°的边坡模型。从折线图上可以看出,当灰岩厚度为6 m时,X方向有最小位移6.83 cm,当灰岩厚度为4 m时,Z方向有最小位移4.14 cm。通过对比能够发现,随着岩层倾角的增大,灰岩厚度的增加,位移量明显减小,但厚度增加到一定程度之后,位移开始增大。说



(a) 最大主应力分布图 (b) 剪应变增量分布图

图5 反向坡应力和应变分布图

Fig.5 Stress and shear strain of reverse slope



(a) 位移云图 (b) 位移矢量图

图6 反向坡位移云图和矢量图

Fig.6 Displacement contour and displacements vector map of reverse slope

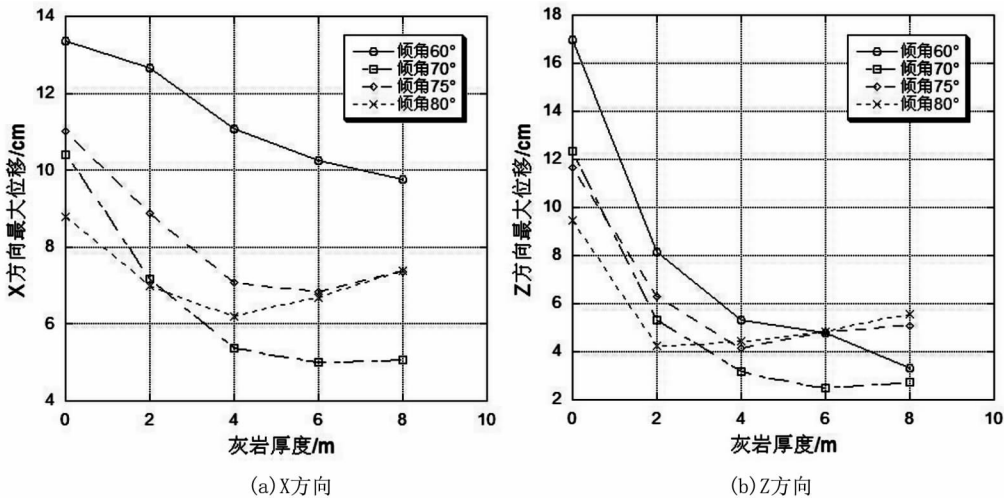


图7 反向坡位移对比图

Fig.7 Displacement contrast diagram of reverse slope

明反向坡随着岩层倾角的增大,灰岩厚度也不断增加,位移不再像顺向坡那样位移不断减小,而是先减小后增大。这可能是因为反向坡中,灰岩厚度增大,自身重力增加,在上下层软岩厚度不变的情况下,岩体更容易发生弯曲变形,这也就是折线图中表现出来的,随着灰岩厚度的增加,位移量不断增大。岩层的倾角越大,岩体越容易发生倾倒弯曲,这就是岩层倾角为 70° ,灰岩厚度为8 m,位移较6 m时增大;岩层倾角为 75° ,灰岩厚度为6~8 m,位移较4~6 m时增大;岩层倾角为 80° ,灰岩厚度为4~6 m,位移较2~4 m时增大。

同顺向坡一样,反向坡在坡体内部没有硬岩存在时,坡体的位移量很大,不利于边坡的稳定,但随着坡体内灰岩厚度的增加,位移减小明显,说明反向坡也同顺向坡一样,坡体内部有无灰岩对边坡的稳定影响也很大。

相同的灰岩厚度的情况下,也以4 m为例,岩层的倾角为 60° 、 70° 、 80° ,X方向的位移依次为11.07、5.37、6.19 cm,Z方向的位移依次为5.3、3.16、4.46 cm,说明相同厚度的灰岩,随着岩层倾角的增大,位移表现为先减小后增大,说明对于这三个倾角的灰岩形成的边坡,灰岩倾角为 70° 时最有利于边坡的稳定。

综上,对反向坡来说,岩层倾角为 60° ,位移随灰岩厚度增加也在不断的较小,位移较倾角 70° 的岩层位移要大得多;其他3种情况下,坡体内灰岩从无到有,位移减小有利于边坡稳定,但随着厚度的增加,位移却在慢慢变大,说明倾角大于 70° 的反向坡,含有灰岩的地层较不含有灰岩的地层更稳定,而灰岩厚度增加,增加边坡自重,岩层倾倒弯曲的程度增加,位移不断增大,可能形成坡表面的崩塌,不利于边坡稳定。并且岩层倾角越大,位移增大的灰岩厚度在不断减小,说明反向坡中灰岩岩层的倾角对边坡稳定影响更大。

4 结论

1)顺向坡岩层倾角相同的情况下,硬岩厚度越厚,位移量越小,边坡越稳定;岩层厚度相同的

情况下,岩层的倾角越大,位移量越小,边坡越稳定。也就是顺向坡中硬岩的厚度越厚,岩层倾角越大,边坡越稳定,但是岩层倾角增大到一定程度之后,岩层厚度的增加对边坡稳定影响减小,随厚度增大,边坡位移变化不大。

2)反向坡硬岩岩层厚度相同的情况下,岩层倾角越大,位移量越小,边坡越稳定;岩层倾角相同的情况下,随硬岩厚度的增加,反向坡位移也在不断的减小,至某个厚度位移又不断增大,这主要是由于岩层倾角和岩体自身重力的双重影响,岩层倾角越大,厚度越厚,岩层越容易发生倾倒弯曲,导致坡表岩体的崩塌,不利于边坡稳定。

3)对于相同岩层倾角和岩层厚度的顺向坡和反向坡之间由于建模的原因,模型存在较大差异,不进行相关对比。

参考文献:

- [1]高喜才.露天矿边坡开挖过程变形破坏特征及稳定性实验研究[D].西安:西安科技大学,2006.
- [2]夏开宗,陈从新,鲁祖德,等.软硬岩互层边坡稳定性的敏感性因素分析[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2013(4):729-732.
- [3]胡斌,黄润秋.软硬岩互层边坡崩塌机理及治理对策研究[J].工程地质学报,2009(2):200-205.
- [4]杨谢辉.软硬岩互层式复合岩层边坡稳定性分析及其加固技术研究[J].公路工程,2014(5):205-208.
- [5]刘才华,徐健,曹传林,等.岩质边坡水力驱动型顺层滑移破坏机制分析[J].岩石力学与工程学报,2005(19):131-135.
- [6]胡其志,周辉,肖本林,等.水力作用下顺层岩质边坡稳定性分析[J].岩土力学,2010(11):3594-3598.
- [7]舒继森,唐震,才庆祥.水力学作用下顺层岩质边坡稳定性研究[J].中国矿业大学学报,2012(4):521-525.
- [8]柴波,殷坤龙.顺向坡岩层倾向与坡向夹角对斜坡稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报,2009(3):628-634.
- [9]郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004(19):3381-3388.

(责任编辑 王利君)