

节理化软岩开挖边坡变形及稳定性分析

张莉萍¹, 邱德俊¹, 许宝田²

(1. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210000;

2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 南京秦淮东河铜家山段河道开挖后形成高度接近 50 m 的高边坡, 边坡岩体主要为黄马青组 (T_{2h}) 泥质粉砂岩, 根据其饱和单轴抗压强度确定在地层岩石为软岩, 岩体内发育多组包括层面在内的节理。边坡开挖后其稳定性受该组地层影响较大, 本文采用有限元法对该边坡的变形和稳定性进行分析, 计算时将岩体分别看作均质各向同性介质和节理化岩体两种情况来考虑。当将岩体看作均质各向同性材料时, 开挖后边坡的变形较小, 边坡稳定性系数满足安全性要求。当将岩体看作节理化岩体时, 节理化有限元计算结果表明边坡变形较大, 稳定性不满足安全性要求。分析结果表明, 该软岩边坡的变形和稳定性受节理影响较大, 考虑开挖后的加固设计时需要充分考虑岩体中节理对边坡的稳定性影响。

关键词: 节理化软岩; 开挖边坡; 变形; 稳定性

中图分类号: [TV221.2] **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2017) 03-0041-05

Deformation and stability analysis of jointed soft rock excavation slope

ZHANG Liping¹, QIU Dejun¹, XU Baotian²

(1. *Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd, Nanjing 210000, Jiangsu;*

2. *School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, Jiangsu*)

Abstract: The Tongjiashan section of Qinhuai east river would be excavated, and the height of the new slope will arrive 70m, the main stratum of in the slope is Huangmaqing group (T_{2h}), including argillaceous siltstone, which saturate uniaxial compression strength is not more than 10MPa and can be looked as the soft rock. In the rock mass, several joints were found. The stability of the excavated slope will be affected by the soft rock. In this paper, the deformation and stability of the slope are analyzed by the finite element method, during calculation, the two cases are considered: (1) the rock mass is homogeneous isotropic; (2) the rock mass is jointed rock mass. When the rock is homogeneous isotropic, the deformation of the excavated slope is very small, and the slope is stable and safe; when the rock mass is jointed, the deformation of the slope is great, and the slope is not safe. The results indicate that the deformation and stability of the soft rock slope would be affected by the joints, the affection of the joints rock mass should be considered adequately in the reinforcing design.

Key words: jointed soft rock; excavation slope; deformation; stability

收稿日期: 2017-01-05

基金项目: 江苏省水利科技项目(2016054); 江苏省社会发展面上项目(BE2015675)资助项目。

作者简介: 张莉萍(1973-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向为工程地质。

0 引言

开挖岩石边坡失稳的根本原因在于岩体中特殊的岩体结构和不利的力学性质,其中岩体结构特征是控制边坡稳定性的重要因素,边坡的变形、破坏与岩体结构面发育特征、结构面与开挖面的空间组合有密切关系^[1-3]。

对于大部分位于强风化泥岩、页岩、泥质砂岩等软弱岩层中,边坡岩体破碎,节理发育,风化严重的地质条件下,边坡一旦开挖,其边坡常常不能维持自身的稳定^[4-6]。

南京秦淮东河新开河道在铜家山地段开挖后形成的人工边坡最大高度接近 50 m,故该段边坡稳定性问题是河道工程的关键技术问题。根据野外调查结果,该段边坡内三叠系黄马青组(T_{2h})地层厚度超过 1000 m,为影响边坡稳定性最主要的岩体,岩性以紫红色泥质粉细砂岩为主,铁质、泥质胶结,节理、裂隙发育,砂粒状结构,层状、块状构造,岩体中发育包括层面在内的多组结构面。根据钻孔取芯进行室内试验结果,岩石大多数样品饱和单轴抗压强度小于 10 MPa,根据有关规范^[7]确定该类岩石为软岩到极软岩。研究边坡开挖后的变形及稳定性问题对该工程的实施具有重要的意义。根据《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386-2007)规定,该边坡安全等级为 1 级,宜采用数值分析方法对边坡的应力和变形进行计算,以确定开挖卸荷是否可能导致边坡变形破坏。

用于节理化岩质边坡稳定性分析的极限平衡法、有限元强度折减法,都是基于等效连续介质的概念。本文将从基本地质条件分析出发,以秦淮东河铜家山段软岩边坡为例,对其变形特征和稳定性问题分别对岩体为连续介质和考虑节理化条件下采用有限元数值分析法进行相关探讨。

1 工程地质条件

根据现场调查,铜家山边坡岩体主要为黄马青组(T_{2h})泥质粉砂岩,岩性主要为紫红色的石英粉、细砂岩,碎屑成分主要为粉粒,含少量粗粒、细粒和泥粒,矿物成分主要为石英,含少量长石、粘土矿物和白云母,铁质、泥质胶结。近地表处受风化影响,泥质含量较高。碎屑颗粒以胶结连接为主,岩石遇水易软化,强度低;深部岩体(根据钻孔资料),岩石以铁质胶结为主,少量为钙质胶结,岩石强度较高。根据风化程度分为强风化和中风化 2 种类型,黄马青组上覆地层为厚度 0.5 ~ 1.0 m 的坡积粉质粘土。

边坡岩体中的结构面主要包括层面和节理面,露头范围内未见有断层。根据工程地质分析认为,对边坡稳定性起主要控制作用的主要有以下 3 组:
(1)层面,倾角 $28^\circ \sim 61^\circ$,倾向 $307^\circ \sim 335^\circ$;
(2)节理组 1,倾角 $72^\circ \sim 78^\circ$,倾向 $120^\circ \sim 133^\circ$;
(3)节理组 2,倾角 $85^\circ \sim 90^\circ$,倾向 $65^\circ \sim 85^\circ$ 。结构面现场调查统计结果见表 1。岩体及结构面物理、力学参数见表 2。

表 1 结构面网络统计结果

结构面	结构面间距					节理长度	发育位置	端点形式
	最大值/cm	最小值/cm	均值/cm	方差	分布形式			
层面	30	10	20	2.2	对数正态	无限长	随机	张开
节理组 1	47	25	30	11	对数正态	无限长	随机	张开
节理组 2	58	28	43	15	对数正态	无限长	随机	张开

表 2 岩体力学参数表

岩体 / 结构面	弹性模量/kPa	泊松比	重度/ $kN \cdot m^{-3}$	内聚力/kPa	摩擦角/ $^\circ$	法向刚度/ $MPa \cdot m^{-1}$	切向刚度/ $MPa \cdot m^{-1}$	抗拉强度/MPa
粉质粘土	155000	0.35	19.8	12	13			
强风化岩	1430000	0.30	25.1	140	25			0
中风化岩	2150000	0.25	26.0	200	32			0
结构面				100	24	10000	1000	0

2 边坡变形及稳定性计算模型

2.1 边坡开挖方案

根据规划设计要求, 现有河岸地表标高约 13 m 左右, 开挖后河底标高为 3.0 m, 河岸以下放坡坡比为 1 : 2.5, 在 8.0 m 标高处设置宽 2.5 m 平台, 在 13m 标高处设置宽 10.0 m 平台, 作为未来防洪通道, 在平台以上分 2 ~ 3 级放坡, 在坡面台阶高度处设置 2.0 m 宽减压平台, 平台上下坡比设计为 1 : 1。

2.2 有限元计算模型

已有的有限元、有限差分程序中对岩体结构特征考虑的较少, 难以有效模拟边坡的实际结构。Rocscience 公司于近年开发的 Phase²7.0 有限元软件有效地解决了这一问题, 该程序既可以模拟岩体中的节理网络, 模拟过程中允许沿节理产生剪切破坏。在建立节理网络有限元模型时充分考虑结构面的产状、间距、长度、位置等, 按照一定破坏准则赋予各组节理相应强度参数, 并可以采用强度折减法计算得边坡的稳定性系数。

根据边坡工程地质横剖面图, 利用 Phase²7.0 软件建立有限元模型, 见图 1, 模型高度为 2.5 倍的边坡开挖高度。岩体力学模型采用摩尔 - 库伦弹塑性本构模型, 结构面采用库伦滑动模型^[8]。采用标准边界条件, 即模型左右两侧对水平方向位移进行约束, 模型底部对水平和垂直方向同时约束。计算时先对开挖前的应力场进行模拟, 然后对开挖后的情况进行模拟, 并对边坡的稳定性系数采用强度折减法进行计算。模拟时对岩石材料分两种情况考虑: (1) 将不同地层岩体看作连

3 计算结果

3.1 均质岩体变形和稳定性分析

将岩体看成连续的均质各向同性体, 计算得边坡开挖前后的变形变化结果见图 2, 分析结果表明, 边坡开挖后坡面发生位移最大值约为 2.5 cm, 发生在 13.0m 标高平台上坡脚位置。开挖前后最大主应力差值变化结果见图 3, 结果表明在 13.0m 标高平台坡脚附近有轻微应力集中现象, 但没有单元发生破坏现象。

强度折减法计算得不同工况下边坡稳定性系数见表 3, 在不同工况下, 当岩体为均质材料时, 边坡稳定性系数均能满足安全性要求。

表 3 强度折减法计算得不同工况下边坡稳定性系数

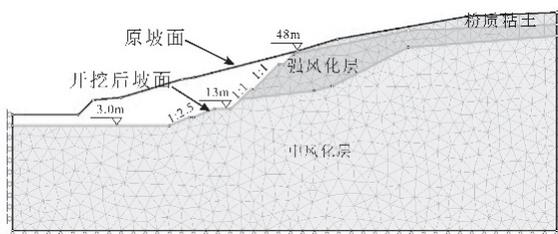
工况	正常	非常条件 I	非常条件 II
稳定性系数	2.55	2.03	1.74
安全系数	1.30	1.25	1.15

3.2 节理化岩体变形和稳定性分析

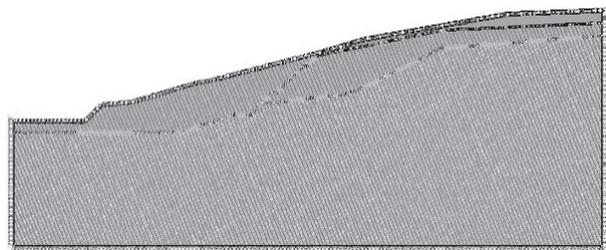
根据相关规范, 对于节理化岩体中的结构面网络进行模拟, 岩块和结构面分别采用相关力学模型进行计算, 分析边坡的整体应力和变形。

根据有限元计算结果, 节理化岩体条件下开挖前后的应力场变化导致的岩体水平位移结果见图 4, 坡面最大水平位移接近 30 cm, 远远大于均质材料条件下的坡面水平位移值, 表明结构面对边坡变形和稳定性的影响较大, 铜家山边坡的稳定性主要受岩体结构控制, 边坡开挖后加固设计也必须针对结构面采取有效的措施。

采用强度折减法计算不同工况下的边坡稳定



(a) 均质岩体有限单元



(b) 节理化岩体有限单元

图 1 有限元模型

续的均质各向同性体; (2) 根据岩体中结构面发育情况, 在对节理化岩体结构面网络进行模拟的基础上, 再对边坡的变形和稳定性进行分析。

性系数见表 4, 除正常工况下, 边坡稳定性系数大于 1.0 外 (小于安全系数要求), 其余各工况下有限元静力计算结果均接近临界状态, 表明边坡可

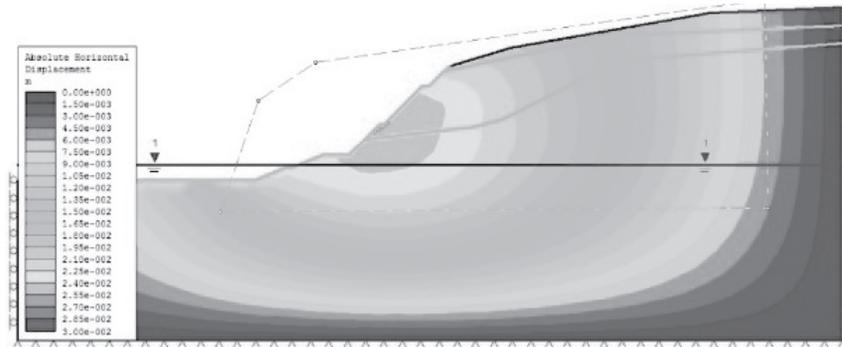


图2 边坡开挖后水平位移等值线图

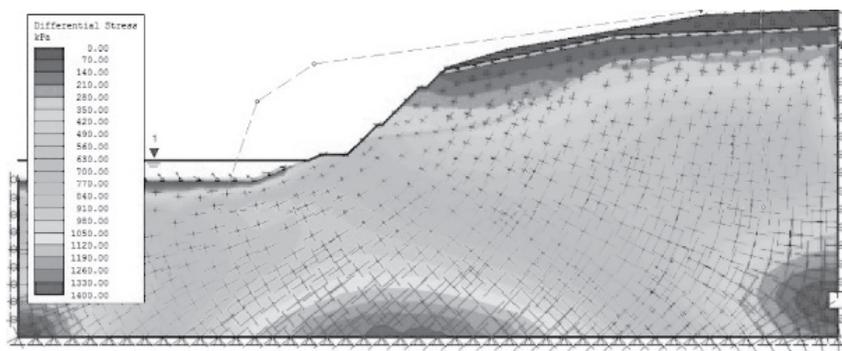


图3 开挖导致应力变化结果

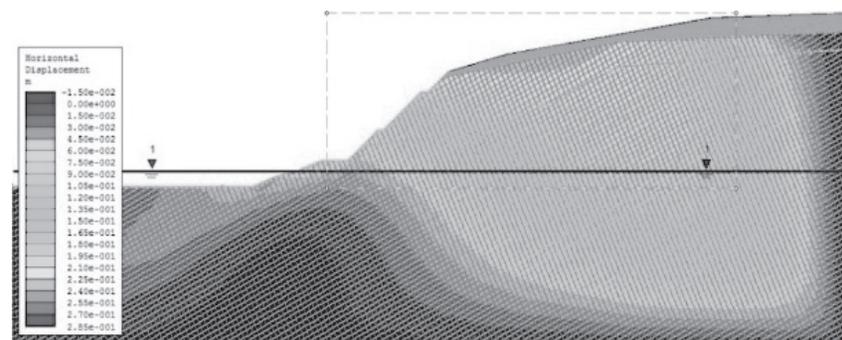


图4 岩体水平位移等值线图

能沿着节理面发生滑动。对该边坡考虑两种处理措施：(1)开挖后坡面采用锚杆框架进行加固，以控制边坡变形进一步发展，锚杆在坡面水平和垂直间距为 2.0 m，长度以穿过在坡脚出露的结构面并保证锚固力为准，单根锚杆设计拉力最大值为 100 kN；(2)放缓坡：对 13 m 标高平台以上采用 1:2 放坡。

表4 强度折减法计算得不同工况下边坡稳定性系数

工况	正常	非常条件 I	非常条件 II
稳定性系数	1.70	1.06	1.08

(1) 锚固

采取前述锚杆加固措施后，计算得边坡稳定性系数见表 5，加固后边坡在不同工况下稳定性系数满足安全性要求。节理化岩体稳定性计算结果表明，锚杆加固前后边坡稳定性变化较大，锚杆使边坡的稳定性大幅提高，表明锚杆对节理化岩体锚固效果较好。

表5 加固后节理化岩体稳定性系数

工况	正常	非常条件 I	非常条件 II
稳定性系数	2.21	1.79	1.72

(2) 放缓坡

根据上述分析, 当 13.0 m 标高平台以上采用 1:1 (坡度为 45°) 放坡时, 如不采用加固措施, 边坡失稳的可能性极大, 考虑 13.0 m 标高平台以上采用 1:2 放坡并设置 2 级平台的办法, 以提高边坡的稳定性。边坡开挖后采用强度折减法计算得稳定性系数计算结果见表 6。计算结果表明, 放缓坡条件下, 节理化岩体稳定性系数远远大于放陡坡条件下, 缓坡条件下边坡稳定性系数在不同工况下均满足规范规定的安全系数要求。

表 6 不同工况下缓坡稳定性系数

工况	正常	非常条件 I	非常条件 II
稳定性系数	2.85	2.19	2.15

4 结论

对铜家山边坡采用有限元数值法对岩体变形和稳定性进行分析得到有关结论如下:

(1) 当将岩体看作均质各向同性材料时, 在开挖后放陡坡条件下, 边坡在不同工况下稳定性系数均能满足规范规定的安全性要求, 坡面变形很小, 岩体中不会发生破坏的现象;

(2) 当将岩体看作节理化岩体时, 在放陡坡条件下, 开挖后边坡变形较大, 且岩体中沿裂隙易发生较大的错动而破坏 (接近 30 cm), 强度折减法计算得边坡正常条件下安全, 在特殊工况条件下均接近于临界状态, 不能满足安全性要求;

(3) 当将岩体看作节理化岩体时, 放缓坡条件下, 边坡变形较小, 且各种工况下稳定性均能满足安全性要求;

(4) 铜家山边坡开挖后岩体变形体边界受结构面控制, 边坡稳定性受岩体结构控制, 当采用锚杆对岩体进行加固后, 边坡在不同工况下均能满足安全性要求。

参考文献:

- [1] 程强. 红层软岩边坡岩体结构特征及边坡岩体稳定性分析 [M]. 第十次全国岩石力学与工程学术大会论文集, 2010: 57-62.
- [2] 杨国香, 叶海林, 伍法权, 等. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (11): 2214-2221.
- [3] 倪晓慧, 朱珍德, 赵杰, 等. 岩石破裂全程数字化细观损伤力学试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (11): 3283-3290.
- [4] 宋从军, 周德培, 鄢宏庆. 软质岩路堑高边坡的加固与防护技术研究 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (增): 244-248.
- [5] 宋从军, 周德培, 肖世国. 预应力锚索地梁的内力计算 [J]. 西南交通大学学报, 2001 (5): 486-490.
- [6] 夏雄, 周德培. 预应力锚索地梁在边坡加固中的应用实例 [J]. 岩土力学, 2002, 23 (2): 242-245.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水利水电工程地质勘察规范 [S]. 中国计划出版社, 2008.
- [8] 刘天革, 李世海, 刘晓宇. 节理化岩质边坡随机结构面有限元和离散元耦合计算方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (增 1): 3114-3122.

(责任编辑: 王宏伟)