

岩质边坡开挖效应的有限元仿真分析

张贯峰¹, 谢永利¹, 张连成²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2 广东省路桥建设发展有限公司, 广东 广州 510635)

摘要: 边坡开挖会影响自然斜坡内部应力场的原始状态. 论文基于大型有限元软件, 对具有代表性物理力学特征的岩质边坡进行了开挖效应的有限元仿真. 通过对比开挖前后边坡内部的应力场特征, 发现: 在影响边坡稳定的指标性应力中, 边坡上部的水平应力受开挖影响较大; 在成坡坡脚附近, 指向坡体外的剪应力显著增加. 通过对水平和倾斜路径的应力追踪, 提出了开挖效应对边坡内部应力场的影响程度和范围.

关键词: 岩质边坡; 有限元仿真; 应力场; 开挖效应

中图分类号: P632.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2006)03-0005-04

Finite Element Simulation Analysis of Excavation Effect on Rock Slope

ZHANG Guan-feng¹, XIE Yong-li¹, ZHANG Lian-cheng²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Road and Bridge Development Corporation of Guangdong Province, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Slope excavation will influence the original stress field inside the natural slope. Based on the large finite element software, the excavation effect on rock slope with the representative physical and mechanical characteristic is analyzed in this paper. Through contrasting the characteristics of stress field inside the slope before and after the excavation, the results show that the horizontal stress upside the slope and the shear stress pointing to the outside slope near the foot change clearly. Through tracing the change of the stress on the horizontal and slantwise paths, the influence and scopes of the excavation effect on the inside stress field of the slope are put forward.

Key words: rock slope; finite element simulation; stress field; excavation effect

0 引言

边坡是在内外地质营力作用下形成和发展的, 自然边坡在与内外地质营力的长期抗争中, 通常都会放弃对构造应力场的保留, 通过应力释放和本身坡率的调整来换取边坡的稳定. 由于公路工程建设, 路堑边坡在形成的过程中, 会不同程度地改变自然边坡的稳定应力状态, 重新启动或加速自然边坡的应力调整进程, 而这种应力的变化也是边坡变形最原始的根源^[1-2]. 因此, 探讨人工岩质边坡形成前后的应力场变化特点, 了解开挖效应对边坡内部应力场的影响, 对于认识边坡的变形破坏特征, 制定合理的坡形和坡率都有着重要的指导意义.

笔者基于大型有限元软件, 将边坡岩体概化和抽象为均质连续介质, 同时在开挖前后只考虑岩体的自重应力场作用, 对公路岩质边坡形成过程中的应力变化特征进行研究. 这种研究思路, 对于了解边坡应力分布及变化的一般规律, 具有相当的代表性和适用性.

收稿日期: 2005-07-06

第一作者简介: 张贯峰 (1971~), 男, 博士, 工程师. 主要研究方向: 路基工程与边坡工程.

E-mail: agzhang1971@sohu.com

1 计算模式

1.1 计算模型

建模过程中,假定边坡沿走向有足够长度,从而可将复杂的三维问题简化为平面应变问题.分析中采用 Drucker - Prager材料强度准则,用理想弹塑性模型来考虑由于边坡开挖引起的大变形效应.考虑人工边坡是对自然斜坡的部分开挖,在成坡坡顶以上仍保留高度为 H (H 为人工边坡高度)的自然斜坡.为了克服“边界效应”的影响,在自然斜坡顶部沿 x 轴正方向延伸 $2H$ 的距离,整个模型计算范围如图 1 所示.同时为了观察边坡开挖前后的应力场变化,计算中,结合单元“生死”技术^[3],将边坡挖方岩体的单元(图中的阴影部分)杀死,以此模拟边坡的开挖.

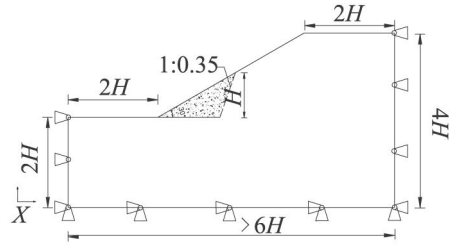


图1 有限元计算模型

Fig.1 The finite element model for calculation

1.2 边界条件

边界条件为:模型采用位移边界条件,即在数值分析中,给模型左右两条边加上水平 x 方向的位移约束,对模型底边给予水平 x 方向和竖直 y 方向的位移约束如图 1 所示.

1.3 计算参数

为突出应力场变化,自然边坡角取为 30° ;开挖边坡坡率:1 0.35.根据我国《工程岩体分级标准》(GB 50218—94)条文中对岩体物

表 1 模型计算参数

Tab 1 Calculating parameters of the model

参数	边坡高度 H/m	内摩擦角 $/ (^\circ)$	粘聚力 C/MPa	弹性模量 E_0/GPa	容重 $/kN \cdot m^{-3}$	泊松比 μ
取值	60	40	0.8	10	24 000	0.27

理力学参数的说明,对岩体分级,以中等岩体的物理力学指标为基准,选取本文计算用的岩体物理力学参数,如表 1 所示.

2 求解技术

2.1 网格划分

如图 2 所示,为了克服开挖三角体的尖点引起的单元奇异现象,以开挖面为界,将开挖体和边坡体分别以三角形和四边形网格划分.为了提高分析精度,掌控边坡内部应力场的细微变化,对边坡内部可能出现由于卸荷引起变形的重点区域进行了网格细化.

2.2 分析路径

从工程角度出发,最关心的是边坡开挖对成坡坡体内的应力场分布的影响,为了深入了解开挖效应对边坡内部应力场的影响程度和范围,在边坡内部设置了纵横交错的分析路径 10 条(水平路径:6 - 7, 14 - 9, 5 - 11, 13 - 12, 4 - 10;倾斜路径:17 - 16 - 15, 21 - 20 - 19, 24 - 23 - 22, 27 - 26 - 25, 30 - 29 - 28),水平路径的垂直间距 30m,倾斜路径的水平间距 20m,如图 3 所示.

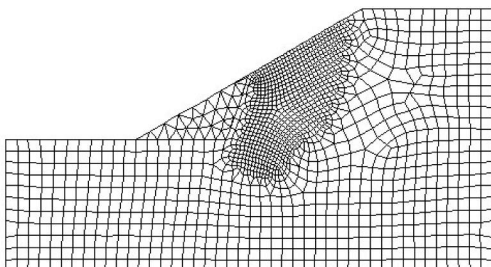


图2 有限元模型网格划分

Fig.2 The gridding partition of the FEM

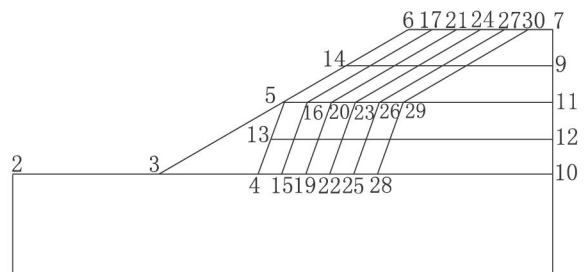


图3 有限元分析路径

Fig.3 The analysis path of the FEM

3 结果分析

3.1 应力解读

本程序对应力符号的规定与材料力学一致:主应力以拉应力为正,压应力为负;剪应力以顺时针方向为正,逆时针方向为负.

3.2 应力场特征

对比开挖前后的边坡应力场,发现:开挖对边坡内部应力场的影响主要体现在水平 x 方向的主应力和 xy 平面内剪应力的大小和方向上.在开挖边坡的中上部,开挖引起坡体内岩体侧向约束的损失,水平 x 方向的压应力明显减小,减小幅度达 50% 以上.由于边坡的开挖,在坡面的中上部甚至出现了部分水平方向的拉应力区,说明此处边坡由于卸荷产生了明显的应力回弹现象,对边坡安全尤为不利.

图 4, 5 是边坡开挖前后剪应力的等值线图.从图中可以看出,在开挖坡脚处出现了明显的应力集中现象,应力方向指向坡外.说明开挖在坡脚处会引起剪应力的显著变化.由于边坡的开挖,在坡脚处边坡最易发生的破坏方式是岩体的剪切破坏,从图 4, 5 中还可以发现,由于边坡开挖,最大剪应力的位置也从开挖前的计算区域底部转移到开挖坡脚处.

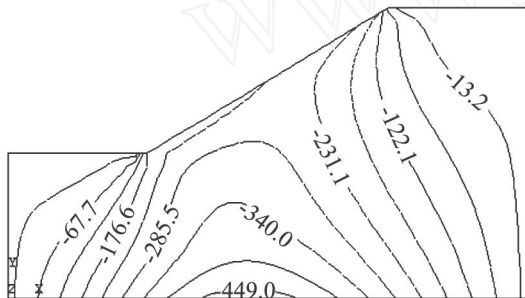


图4 边坡开挖前的剪应力等值线/kPa
Fig.4 Isoline of xy shear stress before slope excavation

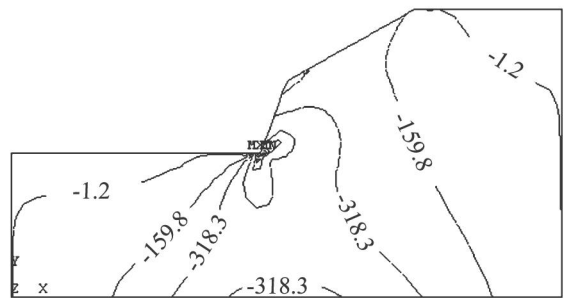


图5 边坡开挖后的剪应力等值线/kPa
Fig.5 Isoline of xy shear stress after slope excavation

3.3 路径分析

3.3.1 水平路径

图 6~8 分别为水平路径 6-7, 5-11 及 4-10 在开挖前后的应力变化.从图 6 中可以发现:边坡下部的开挖,在 1 倍于成坡高度的自然边坡顶部仅对 x 方向的应力场产生微弱影响,对 y 方向的应力场及剪应力场几乎不产生影响.在路径 5-11 上,开挖对于边坡应力场的影响,在 x 方向最大,剪应力次之;而 y 方向的应力,开挖对其影响很小.同时,由于自然斜坡底部的卸载,在坡顶后缘 20 m 左右处,水平压应力减小最为明显,出现一个 x 方向压应力的释放区,从理论上讲,此部位易出现由压应力向拉应力的转变.这种 x 方向主应力的变化趋势说明了在开挖边坡的上部,开挖引起边坡破坏的主要形式是由水平应力的变化引起的.当出现拉力区后,边坡顶面可能会出现拉裂缝.

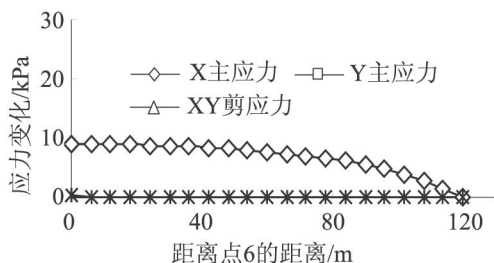


图6 路径6-7上的应力变化
Fig.6 The change of stress on path 6-7

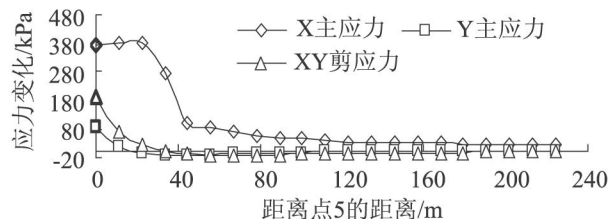


图7 路径5-11上的应力变化
Fig.7 The change of stress on path 5-11

边坡坡脚处的开挖效应体现在路径 4 - 10 中. 从图 8 中可以发现, 在坡脚处, 边坡的开挖对剪应力的分布深度和大小都产生了很大的影响, 而且, 剪应力的变化是朝着不利于边坡稳定的方向发展的, 指向坡体外的剪应力变大, 在一定范围内出现了剪应力的明显集中现象. 开挖对于水平应力和竖向应力的影响相对较弱, 边坡在坡脚处的主要破坏形式应是由于剪应力的集中引起的, 坡脚处最易发生的破坏是剪切破坏.

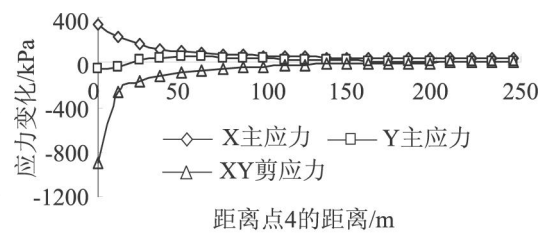


图8 路径4-10上的应力变化
Fig.8 The change of stress on path 4-10

3.3.2 倾斜路径

将边坡开挖在倾斜路径上引起的应力变化用图 9 ~ 10 反映, 可以发现: 开挖对于水平方向应力的影响, 主要集中在距坡面水平距离 40 m 的范围内, 而且变化开始于成坡高度以上 30 m 的自然斜坡中; 开挖对于剪应力的影响, 却是从边坡开挖处开始的, 同样在靠近边坡坡面的 17 - 16 - 15 路径上变化明显. 对比图 9 ~ 10, 可以看出, 路堑边坡的施工, 对边坡内部应力特征的改造, 多集中在 3/4 坡高的范围内.

从图 10 中还可以发现, 在边坡的上部, 无论是哪条倾斜路径, 开挖对剪应力的影响都不大. 随着向边坡底部的下移, 在坡脚处, 剪应力的影响最大, 在边坡后缘超过 60 m 后, 边坡开挖对剪应力的影响曲线变得非常光滑, 说明此处开挖效应的影响不大.

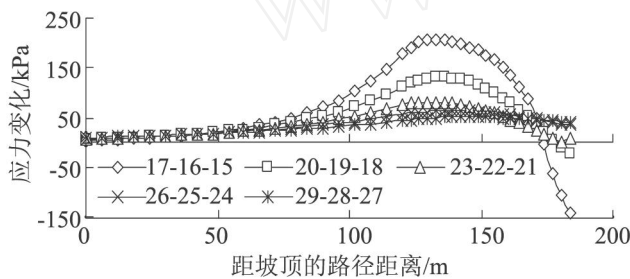


图9 倾斜路径上X方向的应力变化曲线
Fig.9 The change curves of x direction stress on slantwise path

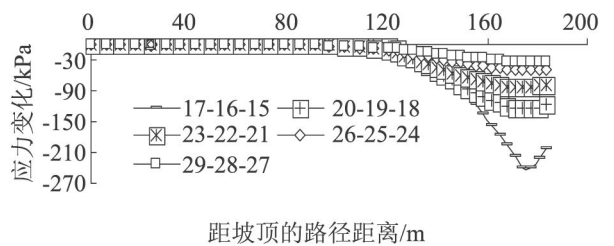


图10 倾斜路径上的剪应力变化曲线
Fig.10 The change curves of xy shear stress on slantwise path

4 结语

本文通过对岩质边坡进行开挖效应的有限元仿真, 对边坡开挖前后的应力场进行了计算和分析, 可以得出以下结论:

- 1) 对于复杂的三维边坡问题, 采用合理的分析技术进行必要的简化, 从而可以避免通用软件在专项研究中的不足, 发挥软件在分析计算方面的优势. 这种根据专业理论进行的简化并不影响正解结论的获得.
- 2) 路堑边坡的开挖, 在成坡坡面上部易出现拉力区, 从而造成边坡坡面的剥落掉块. 开挖对边坡应力场的影响, 在边坡的上部, 对水平方向的应力影响较大, 压应力明显释放, 而在坡脚附近, 剪应力集中, 从而决定了边坡不同部位的破坏方式.
- 3) 开挖效应对于边坡应力场分布的影响范围, 主要集中于边坡高度的 1/2 ~ 3/4 范围内.
- 4) 以均质岩体为对象进行研究, 可获得一般性的规律, 但对于由结构面控制的边坡岩体, 应加强数值模拟方面的工作, 采用何种理论对岩体结构面进行模拟还应进一步的研究.

参考文献:

[1] 湖南省水利水电勘测设计院. 边坡工程地质 [M]. 北京: 水利出版社, 1983: 8 - 14
 [2] HOEK E Recent Rock Slope Stability Research of the Royal School of Mines [J]. London Proc., 2nd International Conference on Stability in Open pit - Mining, Vancouver, 1971, 12: 233 - 238
 [3] 美国 ANSYS 公司北京办事处. ANSYS 非线性分析指南, 1998: 42 - 44