

不良地质路堑高边坡的施工模拟与监测分析

贾娟¹, 汪益敏², 林叔忠³

(1. 广州市市政园林局, 广东 广州 510060; 2. 华南理工大学 交通学院, 广东 广州 510640; 3. 广东省水利厅, 广东 广州 510650)

摘要: 不良地质路堑高边坡的性态受降雨、开挖等因素的显著影响, 需要对施工过程进行模拟计算并及时分析现场监测数据, 掌握边坡的动态。以京珠高速公路粤境段 K108+208~+466 路堑高边坡为背景, 采用有限元方法模拟计算边坡开挖到半坡桩平台和二级平台时的应力变化和位移分布, 并与监测资料对照分析, 二者结论一致, 均表明边坡有深层滑动的趋势。通过深部位移资料得出边坡的滑动面位置; 同时监测结果表明, 降雨和开挖使边坡位移速率显著增大。将模拟计算结果与监测数据分析相结合, 进行反馈分析和动态设计, 可以有效地指导施工和保证安全。

关键词: 边坡工程; 施工模拟; 监测分析; 有限元方法

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)22 - 4106 - 05

CONSTRUCTION SIMULATION AND MONITORING DATA ANALYSIS OF HIGH CUT SLOPE WITH FAULTY GEOLOGY

JIA Juan¹, WANG Yi-min², LIN Shu-zhong³

(1. Bureau of City Engineering and Gardening of Guangzhou Municipality, Guangzhou 510060, China;

2. College of Traffic and Communications, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Water Conservancy Department, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Stability of high cut slope is influenced significantly by many factors such as rainfall and excavation, especially with faulty geology. Therefore, it is necessary to simulate excavation operation and analyze monitoring data in time for dynamic construction design. As a typical example, K108+208~+466 high cut slope in Beijing—Zhuhai Expressway with coal geology is calculated with finite element method (FEM) and monitored during excavation. FEM stress and displacement results are in good agreement with in-situ monitoring data, both indicating the trend of deep landslide. Further, potential sliding surfaces are determined by slope internal displacement and sliding rate. The influence of rainfall and excavation on slope displacement is proven immediately by increasing slope deformation rate. Finally, combining FEM computation with monitoring analysis is the main process of dynamic design which guides construction and assures safety.

Key words: slope engineering; construction simulation; monitoring data analysis; finite element method

1 引言

京珠高速公路粤境段 K108+208~+466 工点的路堑高边坡位于广东省韶关市, 长约 256 m, 路面标高距自然坡顶最大相对高差约 58 m。受劣质煤层影响, 自 1998 年开工以来, 在施工过程中发生了多次滑塌。K108+208~+466 高边坡历时 5 a 的施工、整治, 不但影响了正常通车, 而且带来了巨大的经

济损失, 施工治理费用接近 5 000 万元。高边坡问题已成为该高速公路建设的瓶颈和关键技术问题。

路堑高边坡稳定的影响因素复杂, 边坡岩土体的力学参数和稳定状态不仅难以确定, 而且也不是一成不变的, 受到降水、开挖等因素的影响, 不良地质边坡更是如此。因此, 需要在施工过程中实时监测, 及时反馈分析。但出于经济及工程条件等因素的限制, 在监测过程中测点的数量是有限的, 并且监测数据只能反映边坡表面或内部某些部位的变

收稿日期: 2004 - 06 - 15; **修回日期:** 2004 - 09 - 15

作者简介: 贾娟(1979 -), 女, 博士, 2000 年毕业于华南理工大学建筑工程专业, 主要从事土木工程方面的研究工作。E-mail: jjmeme@163.com。

形、应力和应变等情况，而不能表征整个边坡的状态^[1]。因此，需要将监测数据的分析与模拟计算相结合，相互印证和补充，获取更多的边坡状态信息，为修改、优化施工设计提供依据。本文对京珠高速公路粤境段 K108+208~+466 工点的路堑高边坡的施工进行了有限元模拟计算和监测资料分析，以掌握开挖过程中边坡的稳定状态和影响因素，指导边坡施工。

2 K108+208~+466 工点的路堑高边坡概况

2.1 地质概况

K108+208~+466 工点的路堑高边坡岩性主要为第四系坡积层(Q^d)，全风化层(第四系残积层)(Q^e)，石炭系中上统壶天群(C_{2+3ht})白云岩和石炭系下统测水组(C_{1d}^c)煤系地层。其中，石炭系下统测水组 C_{1d}^c 煤系地层是边坡病害发生的主要地层。

本区断裂构造发育，包括区域性断层构造、断裂及次生断裂，共有 4 个主要断层，岩层总体走向大致为 NW，倾向 SW，倾角 20°~34°，顺向坡倾斜，受断层影响岩层产状变化较大且岩土体破碎。

2.2 施工方案简介

初始设计为 4 级放坡，第 1 级边坡坡度为 1:0.5，第 2 级坡度为 1:1，第 3、4 级坡度为 1:1.25。当施工到第 3 级边坡上半部时，在降雨和开挖影响下，坡体产生了滑动变形。于是变更设计，将坡率放缓，平台加宽，分 7 级开挖，第 5 级和第 2 级平台设抗滑桩；从排水方面考虑，在第 6 级平台挖设大

规模的泄水洞。K108+280 边坡设计断面见图 1，该断面是施工模拟计算时选用的典型煤层地质和病害严重的断面。

2.3 施工监测内容及测点布置

监测信息是评价边坡理论分析结果和经验判断成果的依据^[2]，有助于预测边坡变形破坏趋势和评价边坡的长期稳定性。根据工程的规模、阶段和目的不同，监测手段也各异，应视工程需要正确选型，合理布置，互相补充和印证^[3]。

本边坡工程采用的监测方法主要有地表位移监测、深部位移监测、裂缝监测、抗滑桩钢筋计监测、土压力监测以及孔隙水压力监测。采用地表监测和地下监测相结合的立体监测体系，并以位移监测为主，具有精度高、反映状态综合直观等优点^[4]。

测量坐标系采用独立坐标系，取平行于高速公路指向珠海的方向(大里程方向)为 X 轴正方向，其顺时针旋转 90°方向为 Y 轴正方向，沉降方向为 Z 轴方向^[5]。地表监测的观测点主要布设在第 1, 3, 5, 7 级平台、坡顶及第 2, 5 级平台的抗滑桩上。深部位移用测斜孔监测，测斜孔是监测地下岩层水平位移的主要手段^[6]，测斜孔设在地质较差、变形较大的 K108+280 断面和 K108+320 断面各 4 处，编号分别为 ZK1-1~ZK1-4 和 ZK2-1~ZK2-4。

3 施工模拟计算及监测信息的反馈分析

3.1 有限元计算模型和参数

本文采用北京软脑公司开发的 2D-σ 程序进行

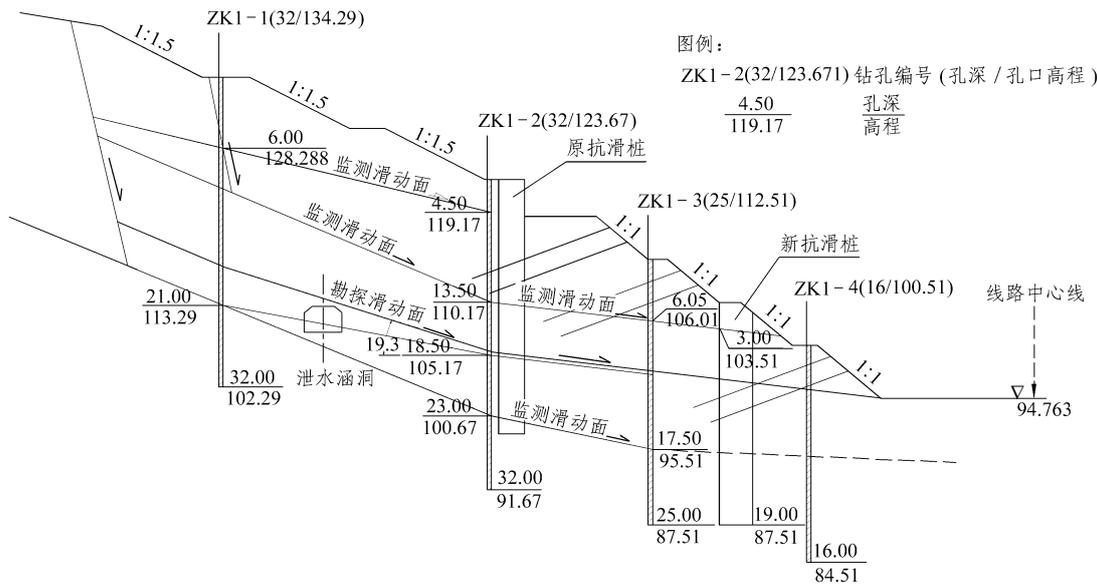


图 1 K108+280 边坡设计断面图(单位: m)
Fig.1 Sketch of K108+280 section (unit: m)

有限元计算,模拟边坡的分级开挖过程,分析边坡的整体应力变化和位移分布,结合监测数据进行反馈分析。选取 K108+280 断面进行分析,采用四边形八节点等参单元计算,有限元计算模型如图 2 所示。

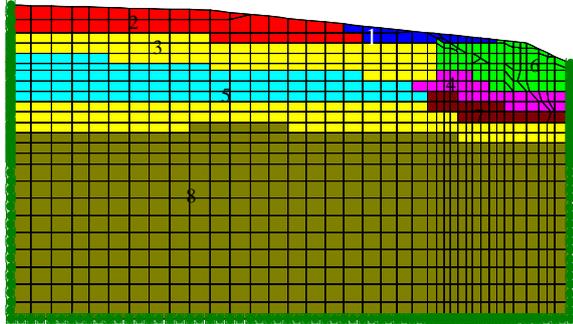


图 2 有限元计算模型
Fig.2 Finite element model

计算范围取垂直于路线方向宽 360 m(边坡宽度的 4.5 倍),高度取 182 m(边坡高度的 4 倍,向路基下延伸 120 m)。由于该工点为路堑边坡,计算模型的右边界取到公路路基中线位置。对试选的边坡尺寸进行分析^[7],边界区域已看不到应力的显著变化。计算时边界条件假设:两侧仅有垂直位移,底部不发生任何方向的位移^[7, 8]。

根据工程勘察资料,边坡各土层的计算模型力学参数见表 1。

表 1 计算模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters for computational model

地层	地层模型 编号	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
亚粘土	1	10	12	17
砂页岩	2	12	38	19
炭质灰岩	3	8	15	21
炭质泥岩	4	5	15	20
炭质灰岩夹 页岩	5	8	16	21
炭质页岩	6	6	12	20
灰岩夹炭质 泥岩	7	6	15	20
灰岩	8	10	40	21

3.2 初始设计的模拟分析

按初始设计进行有限元模拟,第 3 级边坡开挖后的剪应力如图 3 所示,剪应力在开挖坡面的坡脚附近最大,向深处和远处递减。

现场施工到第 3 级边坡的上半部时,受降雨影

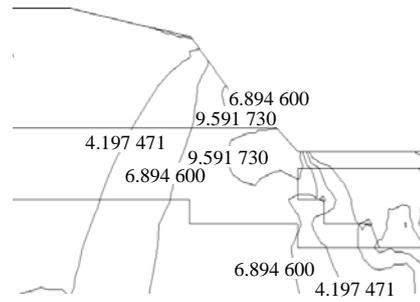


图 3 第 3 级边坡开挖后边坡的剪应力分布图(单位: 10 kPa)
Fig.3 Shear stress isoline(unit: 10 kPa)

响,第 3 级边坡平台及以上的第 4 级边坡坡面出现数条圈椅状裂缝,坡体沿第 3 级边坡中部剪出,产生了滑动变形。结合地质情况发现,第 3 级边坡中部恰好是炭质泥岩和炭质页岩的软弱界面,这表明不利组合交界处很可能成为滑移的突破点。

3.3 变更设计的施工模拟计算和监测分析

边坡变更设计分 7 级开挖,第 2, 5 级平台设抗滑桩,有限元模拟第 5 级平台抗滑桩施工后的剪应力和位移分布如图 4, 5 所示。

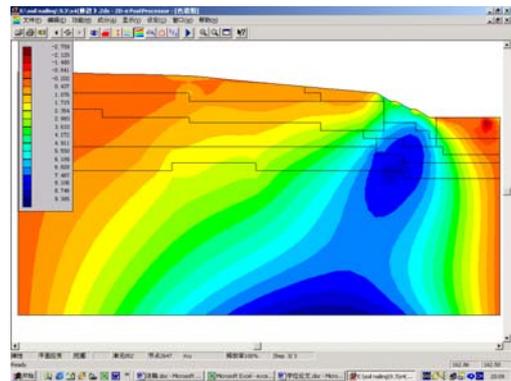


图 4 剪应力等值区(单位: 10 kPa)
Fig.4 Continuous contours of shear stress(unit: 10 kPa)

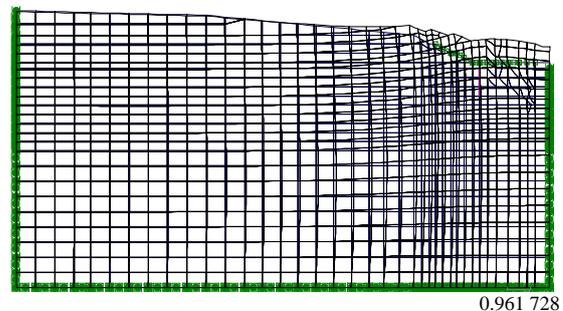


图 5 位移图
Fig.5 Sketch of displacement

从图 4, 5 可以看出,工程边坡剪应力的峰值区域由坡面转到坡脚下一定深度,深部剪应力显著增

大。边坡开挖卸载后，垂直方向有回弹变形，尤其在坡脚附近最为明显；边坡深处水平位移较大，有深层滑动的趋势。在边坡开挖过程中，考虑加固先行，即先加固后开挖。预先打设第 2 级平台抗滑桩的奇数桩，再开挖第 3, 4 级边坡，使抗滑桩在开挖过程中起到及时的支撑作用，偶数桩则按正常顺序在开挖到第 2 级平台时施工。开挖到第 2 级平台并打设抗滑桩后边坡的剪应力分布见图 6。从图 6 中可以看出，剪应力显著增大，剪应力峰值区已扩展到了第 5 级平台抗滑桩下端。

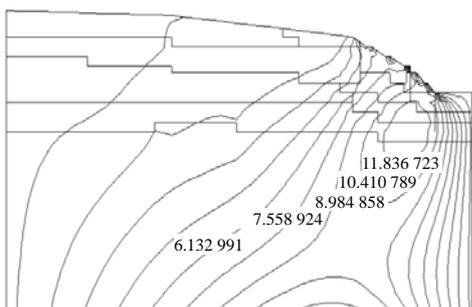


图 6 第 2 级平台打设抗滑桩后的边坡的剪应力分布图
(单位: 10 kPa)

Fig.6 Shear stress isolines(unit: 10 kPa)

边坡施工监测的沉降观测资料反映，当边坡开挖至第 5 级平台及抗滑桩施工过程中，坡脚地表沉降观测结果显示正值，即上升状态，反映深部可能存在弧形滑动面，使位于滑体前缘的部分受剪出力影响而向上隆起，这与计算结果相吻合。土压力监测结果总体变化缓慢，但在深度 12 m 处的土压力一直不断增加，反映出一种能量的积累，也是存在深部滑动面的象征。

边坡深孔位移观测点的相对位移 - 深度曲线

(文中未给出)表明，ZK1 - 2 和 ZK1 - 3 测斜孔沿深度方向发生了多处较大的错动。以 ZK1 - 2 测斜孔为例，其在深度为 4.5, 13.5, 18.5 和 23.0 m 处均有较大的相对错动，ZK1 - 2 测斜孔在 2002 年 3 月 28 日至 4 月 25 日期间的滑动速率见表 2。

表 2 ZK1 - 2 测斜孔滑动速率观测资料

Table 2 Sliding rate list of ZK1 - 2 monitoring hole

测点深度/m	滑动速率/(mm · d ⁻¹)
4.5	0.56
13.5	0.88
18.5	0.38
23.0	0.32

同理，可以从 ZK1 - 1, ZK1 - 3 和 ZK1 - 4 测斜孔的监测资料中找出水平位移突变的位置^[9]，结合滑动速率来分析边坡的长期稳定性^[10]，将各钻孔相应的急剧变形点连起来，得到边坡体的滑动面如图 1 所示。主滑带的滑面倾角基本一致，且沿深度方向成层出现，说明滑动带沿构造结构面发育，依附于软弱结构带生成。

有限元计算与施工监测资料分析结果表明，工程边坡出现深部多层滑动的趋势，一旦有诱发因素引起病害，原设计的抗滑桩长度将无法起到预期的抗滑和稳定边坡的作用，必须采取措施增大边坡的抗滑能力或放缓坡度，卸除荷载减小下滑力。

3.4 通过监测信息分析边坡状态影响因素

施工过程中 2002 年 6 月份降雨量较大，6 月 16 日刚刚开始进行 1 级放坡，19, 21 日就连降大雨，严重削弱了土体强度，加剧了边坡变形。降雨量和位移关系如图 7 所示。

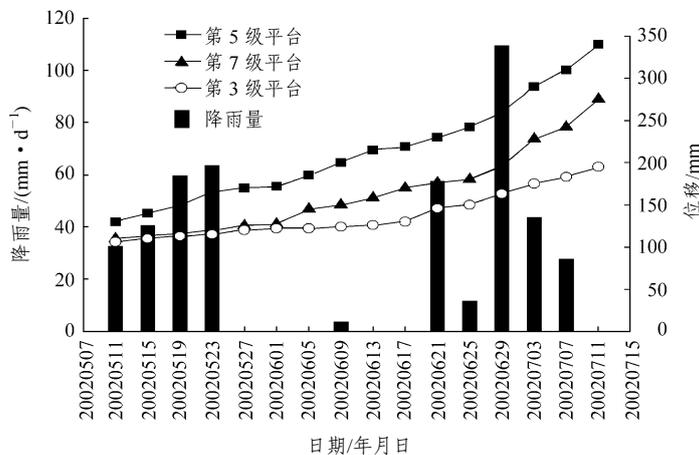


图 7 雨量 - 位移关系图

Fig.7 Relationship curves between the rainfall and displacement

从图 7 可以看出, 3 处地面观测点的变形量与降雨量密切相关, 长时间的降雨入渗使边坡产生大变形, 经过 6 月份的持续降雨, 边坡的位移速率明显增大。第 5 级平台抗滑桩桩顶位移最大, 是因为其对各层滑带的滑动比较灵敏, 迭加各层滑动的结果。同时, 从时间上可以看出, 边坡变形在很大程度上受施工过程的影响。虽然 6 月份初降雨量不大, 但因进行 2 级边坡刷方, 所以位移速率仍呈上涨趋势。6 月底停止施工, 变形主要受降雨影响, 再次出现位移剧增。

4 结 语

京珠高速公路 K108+208~466 工点的路堑高边坡地处煤层地质, 经数次变更设计仍难于治理。于是在施工现场布设监测系统, 及时获取监测信息并与有限元计算相结合进行反馈分析, 为后续施工设计提供依据。分析表明, 不良地质路堑高边坡受到开挖和水的显著影响, 开挖施工引起边坡深处应力场恶化, 加之降雨等诱发因素, 很容易发生深层滑动, 采用普通加固措施的增强和施工工艺的改进都难以满足工程要求。该工程最后采取大规模卸载, 将第 5 级平台拓宽到 15 m 并沿小里程方向侧面卸载, 同时在第 1~4 级平台和坡脚部位采用钢管注浆加固, 提高不良地质边坡的整体强度。为此花费了大量的治理费用, 施工工期也被迫拖延。该工程实践表明, 解决边坡工程问题, 首先应在选线上多下功夫, 对规模大、分布广、治理难的不良地质和特殊岩土地带, 路线应尽量绕避^[11], 细致考虑地质构造, 避免在复杂的不良地段开挖高边坡。如果受地形等因素限制无法绕避, 则应进行施工过程的模拟计算和监测信息的反馈分析, 及时调整施工方案, 进行动态设计和预测, 保证公路建设施工和运行的安全。

参考文献(References):

- [1] 贾明涛, 王李管, 潘长良. 基于监测数据的边坡位移可视化分析系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 324 - 1 328.(Jia Mingtao, Wang Liguan, Pan Changliang. Visual analysis system of slope displacement based on monitored data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 324 - 1 328.(in Chinese))
- [2] 吕建红, 袁宝远, 杨志法, 等. 边坡监测与快速反馈分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 98 - 102.(Lu Jianhong, Yuan Baoyuan,

- Yang Zhifa, et al. Study on slope monitoring and quick feedback[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(6): 98 - 102.(in Chinese))
- [3] 李 迪. 岩石边坡安全监测实践[J]. 大坝观测与土工测试, 1995, 19(6): 3 - 7.(Li Di. Practice for safety monitoring of slump and slide[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1995, 19(6): 3 - 7.(in Chinese))
- [4] 黄 铭, 刘 俊, 葛修润. 边坡开挖期实测位移的分解与合成预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 320 - 1 323.(Huang Ming, Liu Jun, Ge Xiurun. Prediction of resolution and composition of measured displacement during slope excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 320 - 1 323.(in Chinese))
- [5] 铁道第二勘察设计院. 京珠南 A 标 K108+211~K108+510 工点左侧高边坡防护工程监测报告[R]. 成都: 铁道第二勘察设计院, 2002.(The Second Railways Survey and Design Institute. High slope protection engineering monitoring report at Beijing - Zhuhai Expressway section A K108+211 - K108+510[R]. Chengdu: The Second Railways Survey and Design Institute, 2002.(in Chinese))
- [6] 李守义, 吕生龙, 张长喜. 某工程边坡蠕滑机理与监测资料分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 133 - 139.(Li Shouyi, Lu Shenglong, Zhang Changxi. Analysis of monitoring data and creeping mechanism for the hillside of a project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 133 - 139.(in Chinese))
- [7] 张起森. 道路工程有限元分析法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1983.(Zhang Qisen. Finite Element Analysis Method in Road Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 1983.(in Chinese))
- [8] Cheung Y K, Yeo M F. A Practical Introduction to Finite Element Analysis[M]. London: Pitman Publishing, 1979.
- [9] 张季如. 边坡开挖的有限元模拟和稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 843 - 847.(Zhang Jiru. Finite element simulation and stability analysis of slope excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 843 - 847.(in Chinese))
- [10] 陆晓敏, 任青文, 盛 芳. 裂隙岩质边坡的弹粘塑性变形及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 493 - 497.(Lu Xiaomin, Ren Qingwen, Sheng Fang. Study on deformation and stability for jointed rock slope with elasto-viscoplastic model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 493 - 497.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路工程地质勘察规范(JTJ064 - 98)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Survey of Highway Engineering Geology (JTJ064 - 98)[S]. Beijing: China Communications Press, 1999.(in Chinese))