

顺层滑坡数值模拟与监测分析

成永刚

(广东省公路勘察规划设计院 有限公司, 广东 广州 510507)

摘要: 以长晋高速公路 K31+160~K31+460 段顺层滑坡为例, 通过 Geoslope 软件数值模拟了该滑坡在初始设计状况下全断面开挖后无工程防护时的坡体状态, 以及变更设计后工程防护对坡体的加固效果。同时运用监测等手段, 对变更设计后坡体的适时状态进行监测分析, 根据两者相互综合的反馈信息, 为滑坡的“动态设计, 信息化施工”提供依据, 有效地指导设计及施工的进行。该滑坡成功治理的实践经验表明: (1) 对滑坡的治理不应只注重于单纯的支挡防护, 而应根据滑体的实际地质情况, 同时加强对滑体软弱夹层影响巨大的地下水疏排工程; (2) 反映坡体整体应力、应变的数值模拟与以坡体关键点为主的监测信息分析相结合的方法, 为复杂滑坡的合理设计与成功治理提供一种新的思路。

关键词: 边坡工程; 顺层滑坡; 数值模拟; 监测信息; 适时反馈

中图分类号: P 642; O 242

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3746 - 07

NUMERICAL SIMULATION AND MONITORING ANALYSIS OF BEDDING LANDSLIDE

CHENG Yonggang

(Guangdong Highway Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510507, China)

Abstract: A typical example argillite bedding landslide at the K31+160 - K31++460 of Changzhi to Jincheng highway is presented. By using numerical simulation software Geoslope, the states of slope under the full face excavation without engineering protection on the original design and the effectiveness of reinforced slope after design changed are simulated. The updating status of reinforced slopes after design changed is being monitored and analyzed. It provides the scientific basis for dynamic designing, information construction of landslide combing numerical simulation with monitoring analysis based on comprehensive updating recuperation. Finally the successful control practical experiences show: (1) controlling landslide does not only consider resistive engineering, but also enhance discharge underground water that influence the weak interlayer of landslide; (2) the method by controlling the landslide that combing the numerical simulation reflecting the integrality stress and strain with the monitoring information of several key points of the whole slope can propose a new method for complex landslides reasonable design and successful control.

Key words: slope engineering; bedding landslide; numerical simulation; monitoring information; updating recuperation

收稿日期: 2007 - 04 - 18; **修回日期:** 2007 - 08 - 18

作者简介: 成永刚(1972 -) 男, 硕士, 1997 年毕业于北方交通大学土木工程学院铁道工程专业, 现任高级工程师, 主要从事地质灾害勘察与防治设计方面的研究工作。E-mail: cyghome2003@yahoo.com.cn

1 引言

近年来,随着高速公路建设的迅猛发展,砂岩夹泥岩或煤层地型区的滑坡灾害频繁发生,造成的损失与危害也逐渐增加^[1]。山西省境内砂岩夹泥岩或煤层的地质相当发育,对路堑边坡的稳定性造成了极大的危害。据统计,山西省高速公路砂岩夹泥岩或煤层地型滑坡占全省滑坡的50.7%,滑坡治理的直接费达人民币5亿多元^[2],由此可见,砂岩夹泥岩或煤层地型造成山西省的巨大经济损失。

本文介绍的砂岩夹泥岩或煤层的顺层滑坡位于山西省长治市境内的长治盆地边缘,为长晋高速公路的一段。长晋高速公路全长95 km,横贯长治、晋城盆地。其中K25~K32段穿越砂岩夹泥岩或煤层的低山丘陵区,路堑边坡挖方段累计长达2 km,线路中心最大开挖高度为35.0 m。边坡在开挖过程中发生了大规模的变形、滑移,以K31+160~K31+460段最为严重,治理工程几经反复,造成了巨大的经济损失,成为该条高速公路建设的瓶颈和关键技术问题。

为了获得边坡适时状态信息,为“动态设计,信息化施工”提供合理的依据,滑坡发生后,在随后的施工中采取了坡体深部位移监测、地表位移监测及地下水位监测的立体监测方案^[3~6];同时为了获得支挡结构的受力状态信息,达到安全施工与营运的目的,建立了抗滑桩桩侧土压力及锚索预应力监测^[7~13];并通过监测与数值模拟的相互验证分析,使两者的信息相互补充,成为指导设计与施工的重要依据^[14, 15]。

2 K31+160~K31+460段顺层滑坡概况

2.1 地质环境概况

滑坡区位于构造剥蚀低山丘陵区,属背斜一翼,坡体相对高差67.0 m,自然坡度为15°~30°,山顶呈浑圆状,滑体两侧冲沟发育,沟谷宽缓,长年有水流出。

坡体地层主要为二叠系下石盒子组(P_{1x})和上石盒子组(P_{2s})砂岩夹泥岩或煤层组成的岩性旋回,坡体呈碎裂状,工程等级为IV级,产状主要为 $275^\circ\sim 295^\circ\angle 17^\circ\sim 25^\circ$,倾向线路,由煤层或泥化泥岩组成的软弱夹层的自由膨胀率为10%~29%。

2.2 施工方案简介

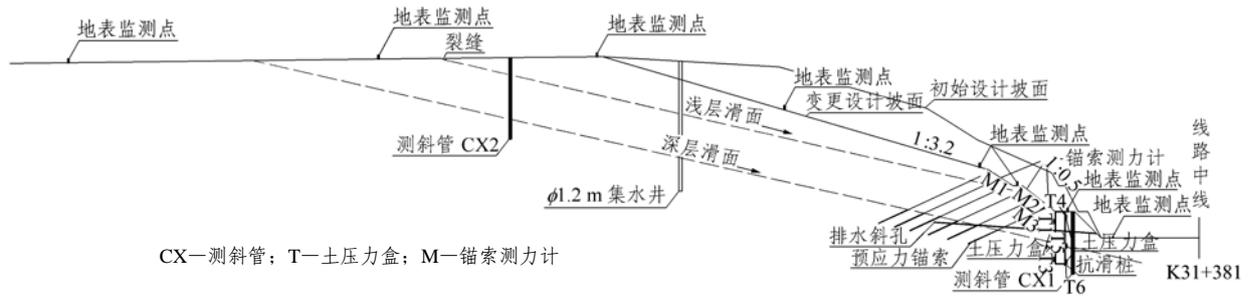
坡体在初始设计时共分为3级边坡,其中1,2级边坡高均为8.0 m,三级边坡高4.0 m,坡率均为1:0.5,一级平台宽为3.0 m,二级平台宽为2.0 m。施工时由于设计的不合理以及施工时的全断面开挖,2003年9月中旬在坡体开挖第一级边坡平台时,由于二级边坡坡脚部位软弱夹层被切断,滑坡剪出口附近发生坍塌,有大量的混浊地下水流出,裂缝迅速向后牵引发展,最终伴随着侧界羽状裂缝的逐渐贯通及出水量在2003年10月2日的突然增加,坡体发生了大面积滑移,对工程造成了极大的危害;滑坡发生后,对初始设计进行了变更,方案如下:坡体采取了紧急刷方,以减弱滑坡的下滑力,一级边坡坡率为1:1,坡高8.0 m,一级平台宽为6.0 m;二级边坡坡率为1:1.25,坡高8.0 m,二级平台宽为3.0 m;三级边坡坡率为1:1.5,坡高5.0 m,四级边坡坡率为1:3.2。在一级平台上设置截面为2.0 m×3.0 m×16.0 m的普通抗滑桩,桩间距为6.0 m,单桩设计抗滑力为4 800 kN;二、三级边坡设置截面为0.5 m×0.6 m的锚索框架,锚索孔水平间距为3.0 m,锚索设计拉力850 kN/孔。

本区滑坡的主轴K31+381断面设计见图1,该断面是数值模拟计算及监测点布设的代表性断面。

3 测点布设及监测内容

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,有助于预测边坡变形破坏趋势和评价边坡的长期稳定性^[5]。本滑坡监测系统的布设,依据突出坡体的关键部位、关键点的原则,重点布设于坡体的主控断面。

监测内容如下:(1)坡体内部变形监测:通过测斜仪对坡体内部的变形进行适时监测,以掌握坡体内部潜在滑面的位置及层数;(2)地下水位监测:利用测斜管,适时监测坡体内地下水位的变化情况,以分析研究地下水位的升降对坡体稳定性的影响;(3)土压力监测:为分析抗滑桩的受力情况,在抗滑桩靠山侧及靠路侧的不同深度各布设3处土压力盒;(4)地表位移监测:布设于滑坡的主控断面及其两侧各8处;(5)锚索预应力监测:将测力计布设于2,3级边坡预应力锚索的锚具与锚垫板之间,适时监测锚索的预应力变化情况,共7处。



CX—测斜管；T—土压力盒；M—锚索测力计

图1 K31+160~+460段边坡代表性断面图

Fig.1 Representative cross section of slope in K31+160~K31+460

4 设计方案施工时的数值模拟分析

4.1 坡体数值模拟模型及其物理力学参数

数值模拟是获得坡体开挖及防护后直观整体应力、应变的依据，有助于坡体长期稳定性的判别。采用 Geo-slope 软件对坡体的工况进行模拟。数值模型边界后部取至坡体最大潜在滑面后 25 m 处，前部取至路基外侧 13 m 处，底部在路基面下 26 m 处，模型长 267 m，高 66 m(见图 2)。由于坡体的变形和破坏主要发生在山体浅部，构造应力在长期的地质过程中已基本松弛殆尽，因此模型边界不考虑水平构造应力作用，只考虑自重应力的作用。模拟计算时假定边界约束在坡体前后两侧没有水平位移，而坡体底部则没有任何位移，锚索与抗滑桩均在弹性状态下工作。

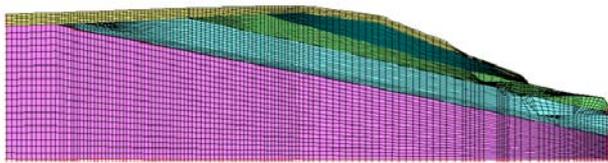


图2 自然坡体有限元单元格网图

Fig.2 Grid mesh of finite element of the natural slope

根据室内试验、工程勘察资料及专家意见，坡体模拟计算的各岩土力学参数(从上至下)如表 1 所示。

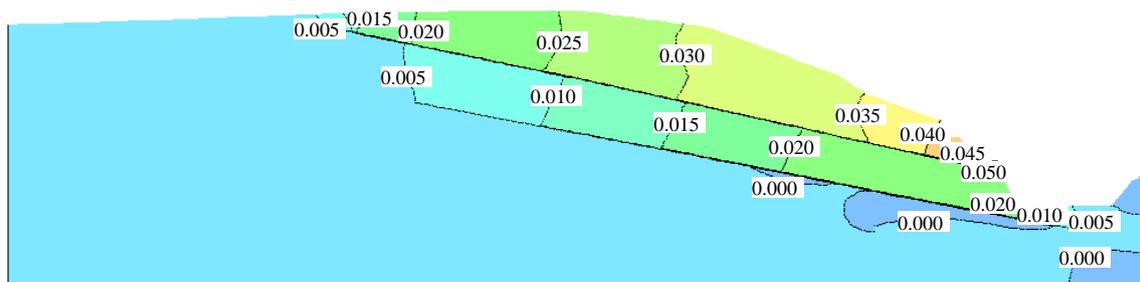
表 1 计算模型物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters for computational model

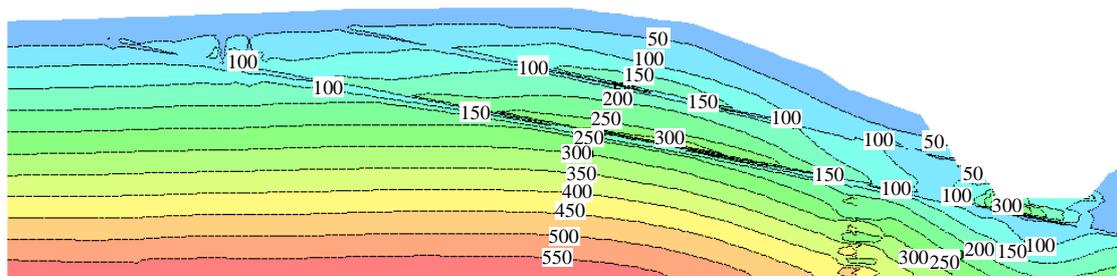
地层	地层编号	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi(^{\circ})$	重度 $\gamma(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
粉质粘土	1	30.0	0.32	20.0	15.0	19.0
全风化泥岩	2	180.0	0.30	35.0	22.0	21.0
全风化砂岩	3	200.0	0.26	160.0	27.0	23.5
软弱夹层	4	9.0	0.37	5.0	10.3	19.0
强风化砂岩	5	250.0	0.23	190.0	29.0	23.6
中风化砂岩	6	400.0	0.21	300.0	30.0	24.5
软弱夹层	7	10.0	0.35	6.0	10.4	19.3

4.2 初始设计的数值模拟分析

初始设计的数值模拟分析结果见图 3。从图 3 可知，坡体开挖至路基面时，坡体的最大位移发生在二级边坡距坡脚部位 0.051 m 处，这样大的变形极易使岩土体发生坍塌，从而加剧浅层滑体由于开挖而损失的前缘锁固作用，属于典型的牵引式滑坡。2003 年 9 月 30 日，长治地区普降大雨，降雨量达 67.4 mm，坡体浅层软弱夹层部流出大量的混浊地下水



(a) 水平位移云图(单位: m)



(b) 最大剪应力云图(单位: kPa)

图3 初始设计开挖至路基面的坡体模拟结果

Fig.3 Simulated result of primarily design when excavation reaches subgrade surface

水, 2003年10月2日, 在二级边坡坡脚发生坍塌后的第20天, 坡体发生了大面积滑移。

此外, 坡体的剪应力在软弱夹层部位明显小于两侧岩体, 说明软弱夹层处于塑性阶段。而一级边坡坡脚相当集中的剪应力, 说明边坡开挖后, 在强降雨等的不利因素下, 若没有及时的防护工程跟进, 随着坡体应力的逐渐松弛, 地下水位的上升, 在剪应力的作用下极易导致坡体的深层软弱夹层与边坡坡脚相互贯通。

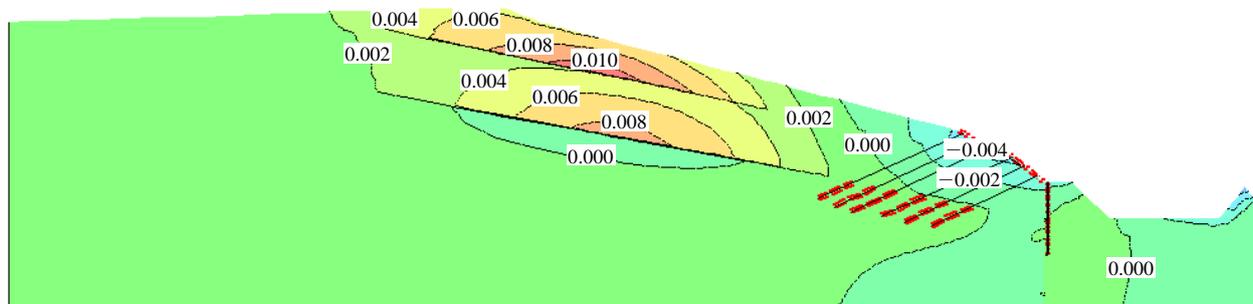
4.3 变更设计的数值模拟分析

由于 K31+160~K31+460 段坡体是在大体积刷方及全断面开挖后才进行工程加固的, 现根据工程

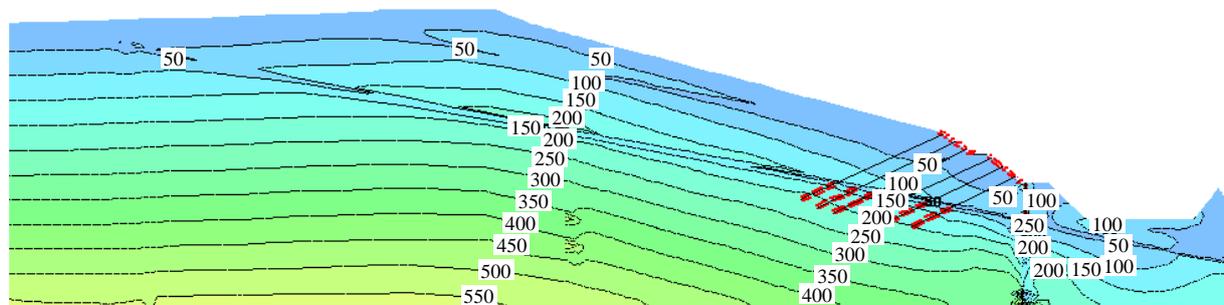
的实际施工情况进行分析。

坡体刷方减载及工程加固后的数值模拟图见图4。由图4可知, 浅层及深层滑体的最大水平位移分别为0.010及0.008 m, 出现在坡体中后部的软弱夹层部位, 坡体中出现较大水平位移的范围较初始设计时大幅减小。这说明坡体刷方减载及锚索框架与抗滑桩工程的实施, 大大提高了坡体前缘的抗滑作用, 有效地补偿了坡体因开挖造成的自身锁固作用的减弱, 使坡体的稳定性得到了较大的提高。

从最大剪应力云图4(b)中可以明显地看出, 抗滑桩桩身附近岩土体剪应力集中现象相当明显, 坡



(a) 水平位移云图(单位: m)



(b) 最大剪应力云图(单位: kPa)

图4 变更设计坡体加固模拟

Fig.4 Simulated results of modified slope design

体软弱夹层仍处于塑性状态，而塑性区是水岩土物理化学作用的活跃带，在坡体地下水持续抬升的影响下，水岩土的物理化学综合作用加剧了软弱夹层的裂隙聚集效应及潜蚀作用的发生，使得软弱夹层的强度不断降低，随着时间的推移，坡体仍存在蠕滑变形的可能，这在坡体以后的监测信息中得到了反映。

5 变更设计施工时的监测信息反馈

5.1 深部位移及地表位移监测信息分析

2003年12月锚索框架工程已完成，抗滑桩正在施工时，CX2测斜管监测深度位移曲线(见图5)显示，坡体浅层(4.5m处)以及深层(16.0m处)部位变形较快。坡体后缘出现了宽10~20mm、长约100.0m的拉张裂缝，坡脚附近路基面出现隆起。至2004年4月，初锚索框架与抗滑桩工程先后完成时，山体裂缝仍未闭合。根据深部位移监测及地表监测数据反馈，坡体位移速率虽然在抗滑桩工程完工后有所减缓，但位移量仍在持续增加，表明坡体处于蠕滑状态，这与数值模拟是相吻合的。

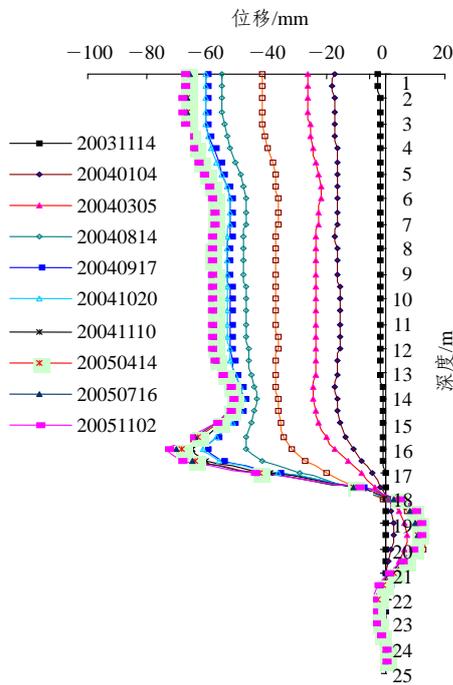


图5 CX2测斜管监测位移曲线
Fig.5 Monitoring displacement curves of CX2

5.2 锚索预应力监测信息分析

图6所示为M2预应力锚索监测变化曲线。2003年12月~2004年4月，由于坡体全断面开挖后，

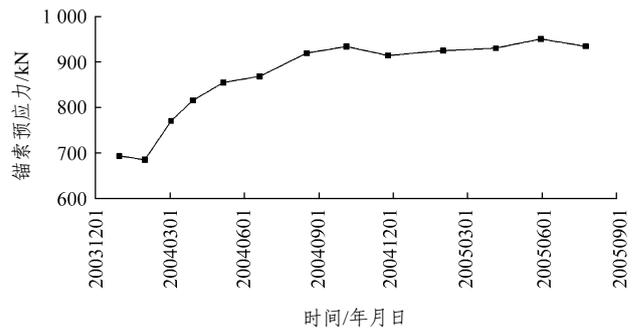


图6 M2锚索预应力监测变化曲线
Fig.6 Fluctuation curve of stress of the pre-stressed cable M2

当时坡体只有锚索工程的加固作用，而一级平台处的抗滑桩正在开挖施工时，坡体深层滑面因抗滑桩坑的开挖受到明显扰动，变形加剧，因此，锚索应力增长相当明显。到2004年5月，在抗滑桩完工后的一个月，锚索应力增长的趋势才大幅减缓。这说明作为被动受力的普通抗滑桩承受滑体的下滑力需要一个较长的时间。因此，本工程若采用主动受力的预应力锚索抗滑桩，则坡体的变形会提前减缓。

此外，从图6锚索预应力监测变化曲线可知，2004年5月后，锚索的应力增长虽然随着抗滑桩的逐渐受力而有所减缓，但仍持续增长，尤其是7月份随着该区降雨量的增加，锚索应力的增长有加快的趋势，说明了坡体的稳定性正在逐渐降低。

5.3 土压力监测信息分析

图7为抗滑桩靠路侧、滑面附近土压力盒T5的土压力监测曲线，从图中可以看出，在2004年4月支挡工程完工后到2004年9月，抗滑桩桩侧的土压力持续增加明显，显示坡体的能量仍在不断积累，已有的加固工程不足以完全稳定滑坡，这与区内2004年的降雨量为常年降雨量的156%，造成坡体地下水位持续上升有直接关系。

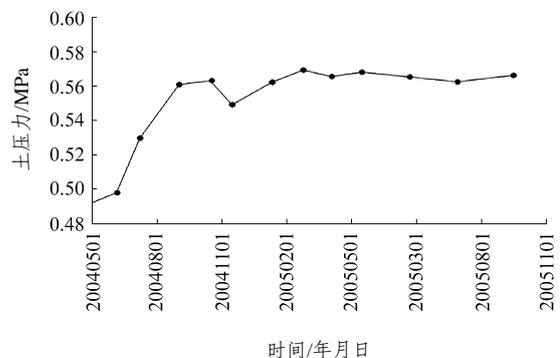


图7 抗滑桩T5土压力监测曲线
Fig.7 Monitoring curve of soil pressure near the anti-slide pile T5

5.4 坡体地下水位的监测信息分析

根据图 8 可知, 坡体地下水位的监测信息分析结果, 坡体位移与地下水位的变化有着良好的对应关系。2004 年 5~8 月, 随着该区降雨量的增大, 由于坡体地下水的疏排不畅, 造成了坡体地下水位的快速抬升。在地下水的作用下, 坡体地表相对位移变化速率达 7 mm/月, 深层滑面位移变化速率达 5~10 mm/月。鉴于此, 在 2004 年 8 月, 决定增加地下排水工程, 降低坡体地下水位来提高滑坡的稳定性。具体措施为: 在边坡中部增设 10 个直径为 $\phi 1.2$ m 的集水井, 在一级边坡脚增设 8 个长 45.0 m 的排水斜孔。据观测, 8 个排水斜孔排水量初期每孔约为 $11 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (年平均值为每孔 $2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)。排水措施实施后, 坡体地下水位下降了 10~15 m。随着地下水位的下降, 坡体位移从 2004 年 9 月以后逐渐停止, 这充分表明了地下水的疏排对该坡体的治理工程起到了极为重要作用。

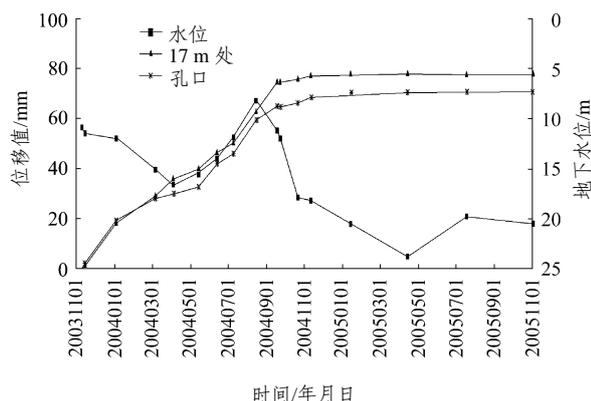


图 8 CX2 监测孔位移 - 地下水位曲线

Fig.8 Displacement and ground water level curves of monitoring hole CX2

6 结 论

(1) 通过对坡体的数值模拟及现场的监测信息综合分析可知, 砂岩夹泥岩或煤层坡体受开挖及地下水的影响十分显著, 坡体的开挖使坡体获得了大量的势能, 改变了坡体的平衡应力场, 加之坡体在降雨的作用下, 地下水渗流场的加大进一步破坏了坡体应力场的平衡关系, 因此, 坡体很容易发生顺层滑坡。

(2) 本区滑坡在前期治理工程中, 对地下水的疏排没有引起足够重视, 造成了坡体在支挡工程实

施后仍然发生持续变形, 这种情况在坡体地下水治理完成后才得以彻底改观, 由此可见, 地下水的成功治理与否对坡体的稳定性起着非常关键的作用。

(3) 滑坡治理中支挡工程的受力机制应尽量保持一致。本区滑坡治理如果以主动受力的锚索抗滑桩代替被动受力的普通抗滑桩, 与锚索框架的受力机制保持一致, 则坡体的应力松弛可大幅减小。

(4) 滑坡治理必须坚持“以防为主, 防治结合, 治早治小, 一次根治, 不留后患”的原则, 在施工过程中, 根据滑坡监测的反馈数据, 指导设计、施工, 以真正做到“动态设计, 信息化施工”。

参考文献(References):

- [1] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.(XU Bangdong. Landslide analysis and control[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.(in Chinese))
- [2] 成永刚. 长晋高速公路 K28~K32 顺层岩质滑坡研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2004.(CHENG Yonggang. Research on bedding landslide from K28 to K32 of the Changzhi to Jincheng express highway[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.(in Chinese))
- [3] 李守义, 吕生龙, 张长喜. 某工程边坡蠕滑机制与监测资料分析[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 a project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 133 - 139.(in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 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 quick feedback[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(6): 98 - 102.(in Chinese))
- [6] 孙静曦, 章光, 袁从华, 等. 顺层滑移路堑边坡的分析和治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 48 - 51.(SUN Jingxi, ZHANG Guang, YUAN Conghua, et al. Analysis and treatment of bedding-slip cut slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 48 - 51.(in Chinese))
- [7] LOLAND K E. Continuous damage model for load-response

- estimation of concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 1980, 10(3): 395 - 402.
- [8] 黄 铭, 刘 俊, 葛修润. 边坡开挖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))
- [9] 杨永红, 吕大伟. 高速公路碳质页岩高边坡加固处治研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(2): 392 - 398.(YANG Yonghong, LU Dawei. Study on treatment of high-cut carbonaceous shale slope in expressway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(2): 392 - 398.(in Chinese))
- [10] 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]. *公路*, 2003, (12): 76 - 80.(SONG Congjun, ZHOU Depei, YAN Hongqing. Study on technology of strengthening and protecting high-cut slope of soft rock[J]. *Highway*, 2003, (12): 76 - 80.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ033 - 5 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ033 - 5 Technical specification for construction of highway subgrades[S]. Beijing: China Communication Press, 1996.(in Chinese))
- [12] 应向东. 黄腊石滑坡深部位移监测分析[J]. *长江科学院院报*, 2000, 17(2): 54 - 56.(YING Xiangdong. Monitoring and analysis in deep-lying displacement of Huanglashi landslide[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2000, 17(2): 54 - 56.(in Chinese))
- [13] 叶 青, 赵全麟. 三峡工程库区滑坡监测几个问题的探讨[J]. *人民长江*, 2000, 31(6): 7 - 9.(YE Qing, ZHAO Quanlin. Problems about monitoring of landslides in TGP reservoir area[J]. *Yangtze River*, 2000, 31(6): 7 - 9.(in Chinese))
- [14] 靳晓光, 李晓红, 王兰生, 等. 滑坡深部位移曲线特征及稳定性判识[J]. *山地学报*, 2000, 18(5): 440 - 444.(JIN Xiaoguang, LI Xiaohong, WANG Lansheng, et al. Characteristics of landslide deep displacement curve and stability discriminant[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(5): 440 - 444.(in Chinese))
- [15] 马水山, 王志旺, 张 漫. 滑坡监测资料的因子分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(7): 1 003 - 1 006.(MA Shuishan, WANG Zhiwang, ZHANG Man. Analysis of monitoring data of landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 1 003 - 1 006.(in Chinese))