

# 基于监测与数值模拟的岩质边坡稳定性分析

赵志峰, 徐卫亚

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:**以某工程 K32 + 565 ~ K32 + 760 标段的重点岩质高边坡为例, 对边坡表面变形及深部变形等位移监测资料进行了分析, 并数值模拟了边坡 5 级开挖的施工过程。结果表明: 降雨和开挖卸荷对边坡变形有较大影响, 雨季后边坡表面和深部的位移观测数据均不同程度地出现异常, 边坡浅层的变形比较明显, 其中 1 级坡和 2 级坡位移量较大, 应采取加固手段进行控制, 边坡深部没有发生大的异常变形。根据监测数据判断出的滑动面位置和形状与强度折减法得出的滑动面位置和形状基本一致, 说明将安全监测与数值计算相结合, 可以更好地指导施工和了解边坡的安全动态。

**关键词:** 边坡稳定; 监测分析; 数值模拟

中图分类号: TU457      文献标识码: A      文章编号: 1000-198X(2007)04-0398-06

岩质边坡工程的失稳破坏, 一般都有一个从渐变到突变的发展过程。由于影响高边坡稳定的因素比较复杂, 边坡岩土体的力学参数和稳定状态难以确定, 因此, 单凭人们的直觉和经验难以发现边坡状态的发展过程。安全监测是判断坡体长期稳定状态的一种重要手段<sup>[1]</sup>, 根据安全监测资料可以进行边坡安全评价、滑坡灾害的预报和评价<sup>[2-3]</sup>、边坡施工和运行过程的稳定分析<sup>[4-6]</sup>。

目前, 数值模拟方法已成为发展岩土工程理论、解决岩土工程实际问题不可或缺的基本手段<sup>[7]</sup>。特别是有限元、边界元和有限差分等方法, 不但可以用于任何复杂形状的几何体和多介质的较复杂材料的力学行为分析<sup>[8]</sup>, 还能够用于施工、降雨等过程的模拟计算。因此, 将监测数据分析与数值模拟计算相结合, 不仅可以从不同角度对边坡状态进行研究, 还可以更系统地了解 and 判定边坡状态及其变化规律<sup>[9-10]</sup>。

本文首先通过对某工程 K32 + 565 ~ K32 + 760 标段重点岩质高边坡监测数据的分析和数值模拟, 得到了位移等物理量的变化趋势, 然后根据此变化趋势分析了影响边坡稳定的主要因素。

## 1 工程概况及监测仪器布置

### 1.1 工程概况

某工程 K32 + 565 ~ K32 + 760 标段重点岩质高边坡:

a. 上部岩层主要为全风化变质砂岩, 厚度为 12 m 左右; 中部岩层为强风化变质砂岩, 厚度为 40 m 左右; 路基下部岩层为弱风化变质砂岩。强风化变质砂岩层对该边坡稳定影响最大, 其岩层分布广, 风化程度高, 遇水易软化, 岩石强度低。

b. 地下水位埋藏较深, 钻孔未见地下水。

c. 未见明显断层, 但顺层结构面发育, 且结构面出现斜交情况。

d. 分 5 级开挖, 每级边坡高 10 m 左右, 平台宽度为 2 m。1 级和 2 级边坡坡率为 1:0.75, 3 级 ~ 5 级边坡坡率为 1:1。1 级边坡采用锚杆框架梁护坡, 2 级边坡采用锚索框架梁护坡, 3 级边坡采用锚索框架梁护坡, 4 级边坡采用拱形骨架护坡, 5 级边坡采用三维网喷播植草护坡。典型设计断面如图 1 所示。

### 1.2 监测内容及仪器布置

该边坡采用的主要监测方法是地表位移监测(外观位移标墩)、多点位移计监测、单点位移计监测和深部钻孔测斜仪监测等。这种将地表位移和深部位移监测相结合的监测体系, 具有监测精度高、状态反映综合直

观等优点<sup>[11]</sup>.

测量坐标系以  $xOy$  平面为水平面,其中倾向公路的方向为  $x$  轴正向,从  $x$  轴正向逆时针旋转  $90^\circ$  为  $y$  轴正向,竖直方向为  $z$  轴.监测仪器主要布置在  $K32+620\sim K32+650$  的 3 个断面上,如图 2 所示.2005 年 7 月,该边坡已布置有外观位移标墩 9 个(WG1-1~WG 3-3)、测斜孔 4 个(ZSK01~ZSK 04)、多点位移计 2 支(M1 和 M2)、单点位移计 2 支(DM1 和 DM2)和锚索测力计若干支.

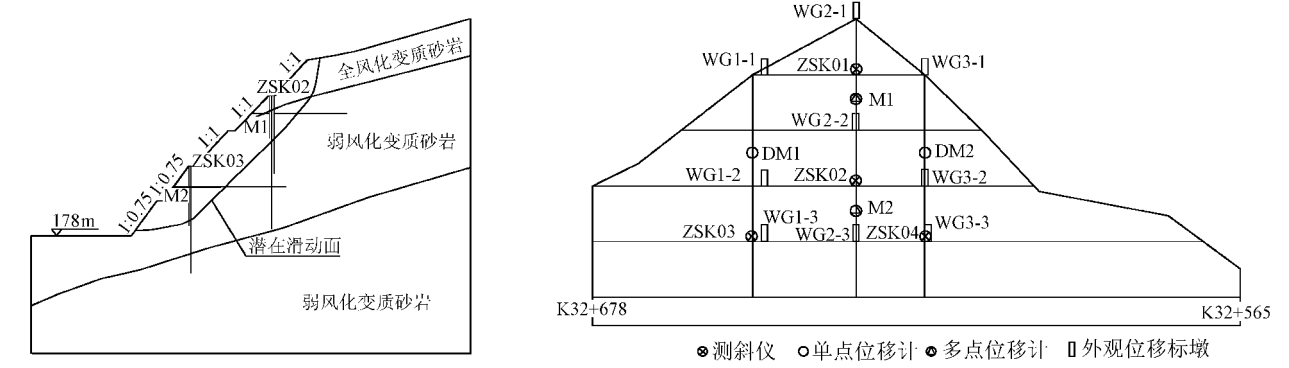


图 1 K32+630 设计断面

Fig.1 Sketch of K32+630 section

图 2 监测仪器布置

Fig.2 Layout of monitoring apparatus

2 变形监测成果分析

基于监测数据分析来描述边坡运动状态的方法有多种,其中比较常用的方法是根据位移速率和累计位移判断边坡的变化情况<sup>[1]</sup>.本文主要根据各测点的累计位移和位移速率来分析边坡的稳定性.

2.1 表面变形监测成果分析

在边坡开挖过程中,进行了长时间的外观变形监测,其中观测数据较多的测点的月最大水平位移和位移方向如表 1 所示.

表 1 外观点的累计位移和方位角

Table 1 Accumulative displacement and azimuth angle of external survey points

| 观测时间<br>(年·月) | WG1-1       |                      | WG1-2       |                      | WG2-1       |                      | WG2-2       |                      | WG3-1       |                      | WG3-2       |                      |
|---------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|
|               | 累计位移/<br>mm | 方位角/<br>( $^\circ$ ) | 累计位移/<br>mm | 方位角/<br>( $^\circ$ ) | 累计位移/<br>mm | 方位角/<br>( $^\circ$ ) | 累计位移/<br>mm | 方位角/<br>( $^\circ$ ) | 累计位移/<br>mm | 方位角/<br>( $^\circ$ ) | 累计位移/<br>mm | 方位角/<br>( $^\circ$ ) |
|               |             |                      |             |                      |             |                      |             |                      |             |                      |             |                      |
| 2004-07       | 10.36       | 15.11                |             |                      | 4.59        | 16.46                |             |                      | 11.57       | 18.12                |             |                      |
| 2004-08       | 5.76        | 20.32                |             |                      | 5.04        | 39.37                |             |                      | 10.24       | 38.66                |             |                      |
| 2004-09       | 9.49        | 20.34                |             |                      | 8.82        | 35.31                |             |                      | 11.98       | 33.42                |             |                      |
| 2004-10       | 9.68        | 13.75                |             |                      | 8.71        | 31.87                |             |                      | 15.81       | 34.70                |             |                      |
| 2004-11       | 13.09       | 22.45                |             |                      | 11.65       | 32.74                |             |                      | 17.56       | 37.13                |             |                      |
| 2004-12       | 12.75       | 24.56                | 2.82        | 117.47               | 10.62       | 37.73                | 1.08        | 213.69               | 16.13       | 39.21                | 8.32        | 128.66               |
| 2005-01       | 13.87       | 21.57                | 3.08        | 103.13               | 11.51       | 32.59                | 0.22        | 333.43               | 17.26       | 37.47                | 6.75        | 129.59               |
| 2005-02       | 16.73       | 7.21                 | 3.03        | 352.41               | 14.54       | 21.80                | 4.19        | 326.69               | 19.63       | 26.30                | 3.04        | 46.33                |
| 2005-03       | 20.34       | 6.78                 | 11.65       | 15.95                | 17.81       | 17.32                | 6.99        | 340.79               | 22.50       | 25.54                | 5.45        | 44.26                |
| 2005-04       | 22.58       | 4.83                 | 14.42       | 12.01                | 21.17       | 16.47                | 9.90        | 343.58               | 25.74       | 24.08                | 8.65        | 29.83                |
| 2005-05       | 23.00       | 5.24                 | 13.26       | 11.31                | 21.66       | 14.16                | 9.28        | 348.81               | 25.97       | 23.60                | 7.92        | 27.86                |
| 2005-06       | 25.20       | 7.29                 | 16.49       | 14.04                | 25.28       | 16.79                | 12.01       | 357.61               | 29.35       | 24.99                | 12.10       | 38.29                |
| 2005-07       | 26.21       | 7.23                 | 17.71       | 18.43                | 27.16       | 16.03                | 14.08       | 6.12                 | 31.16       | 23.85                | 13.96       | 41.22                |

从表 1 可以看出 (a) 边坡上部(第 4 级平台及堑顶)的地表位移明显大于第 2 级和第 3 级平台的位移.其主要原因是上部岩层为全风化花岗岩,岩性较差且受卸荷影响较大.(b) 边坡不同高程的水平位移具有较为明显的方向性,如 WG1-1、WG2-1 和 WG3-1 测点的位移方向角位于第 1 象限,与边坡走向( $20^\circ$ )大致相同,而第 2 级平台上的位移方向随时间而变,但基本与边坡走向一致.出现这种现象的主要原因是边坡表面的顺层结构面发育且强度较低.当遇到开挖卸荷时,边坡浅层会发生比较有规律的方向性位移.

从图 3 可以看出,边坡倾向公路的累积水平位移( $x$  向位移)随时间线性增加,变化速率较小;几个测点

的  $x$  向位移变化趋势基本一致,最大位移不超过 30 mm.据监测,2005 年 6 月后位移变形仍呈现不断增大的趋势.

2.2 深部变形监测成果分析

2.2.1 测斜仪监测成果分析

由于岩石边坡中的不利断裂构造是引起边坡失稳的主要原因,岩体变形是边坡破坏的主要表现形式<sup>[12]</sup>,因此利用测斜仪和多点位移计对该边坡深部变形进行了监测.

由于从测斜仪监测数据可以得到累计位移和相对位移分布曲线,从相对位移与深度关系曲线上很容易发现滑动面<sup>[13]</sup>,本文用测斜仪数据进行边坡稳定分析时,先通过相对位移与深度关系曲线判断出相对位移较大的深度,也即可能产生滑动面的位置,再通过这些深度上监测数据的进一步分析来判断边坡的稳定变化情况.由于边坡倾向公路方向的位移与实际工程关系密切,本文主要分析  $x$  向位移的变化规律.

从 K32+620 断面上测斜仪 ZSK02 的监测数据可以看出,该测斜孔深 38 m,其中相对位移较大的深度为 12 m 和 22 m,这 2 个深度可能存在潜在滑动面.因此,对这 2 个深度处的监测数据进行分析,并绘制出这 2 个深度的累计位移随时间的变化曲线,如图 4 所示.

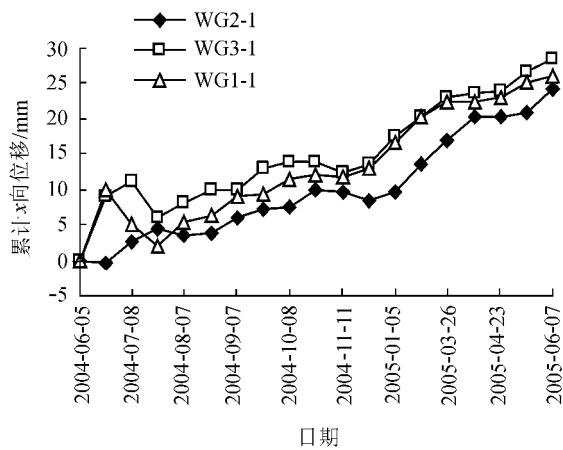


图 3  $x$  向位移变化曲线

Fig.3 Displacement variation in x-direction

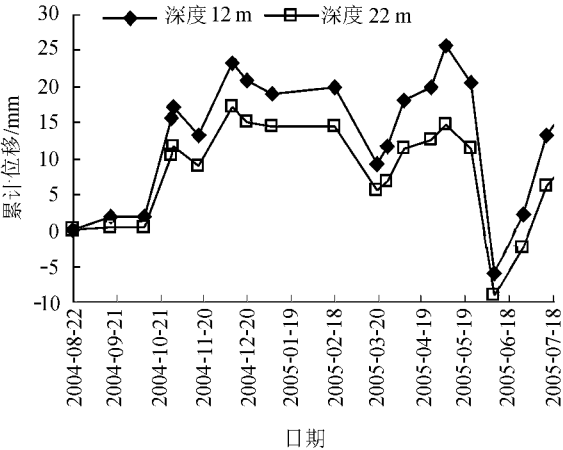


图 4 ZSK02 测点累计位移变化曲线

Fig.4 Accumulative displacement variation at monitoring point ZSK02

从图 4 可以看出,深度 12 m 和 22 m 的累计位移随时间的变化趋势基本一致,数值大小略有不同,说明边坡在 12~22 m 的深度范围内存在一个潜在的滑动区.深度 12 m 的位移比深度 22 m 的位移大,这与边坡表面风化较严重以及受到卸荷的影响有关.2004 年 10 月~2005 年 5 月,位移量虽有小的波动,但总的趋势比较稳定.2005 年 5 月底,位移发生了大的波动,位移方向发生变化,由倾向公路变为倾向山内,6 月底又恢复为正向变形.因为 5 月份该地区已进入雨季,降雨量大且时间集中,所以在边坡的不利结构面上很可能产生异常变形.这段时间监测值出现异常也说明了这一点.

为了综合判断边坡状态的变化情况,对测斜孔 ZSK03 和 ZSK04 的监测数据进行分析.同样,根据相对位移与深度的关系曲线找出潜在滑动面的位置,然后分析这些深度测点的监测数据并绘制了 ZSK03 和 ZSK04 较危险测点的位移速率过程线,如图 5 所示.

从图 5 可以看出,2 个测点的位移速率变化趋势基本一致.2005 年 3 月以前,位移速率值很小,无明显波动.2005 年 3 月,位移速率开始小幅增大,到 6 月 20 号左右,位移速率突然增大且呈直线上升趋势.

从 ZSK01、ZSK03 和 ZSK04 的监测数据分析结果可知,6 月份边坡深部位移发生了一定程度的变化,这与 5、6 月份的持续大强度降雨有很大关系.

2.2.2 多点位移计监测成果分析

从图 6 可以看出:(a)边坡表面的水平位移明显大于深部的水平位移.这进一步说明了卸荷开挖对边坡变形的影响.(b)2005 年 3 月,位移开始增大,6 月以后,位移增大幅度比较明显.这与前面的分析结果一致.

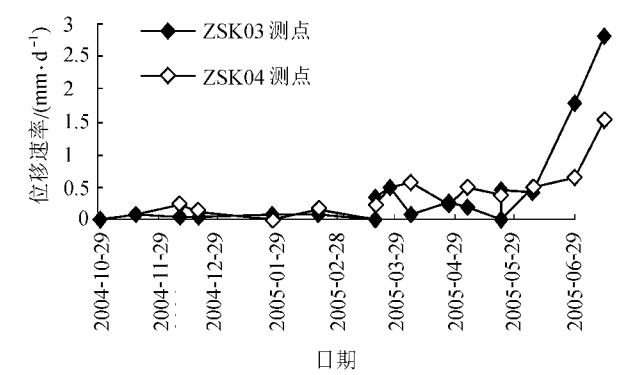


图 5 ZSK03 和 ZSK04 测点的位移速率变化曲线

Fig.5 Variation of displacement rate at monitoring points ZSK03 and ZSK04

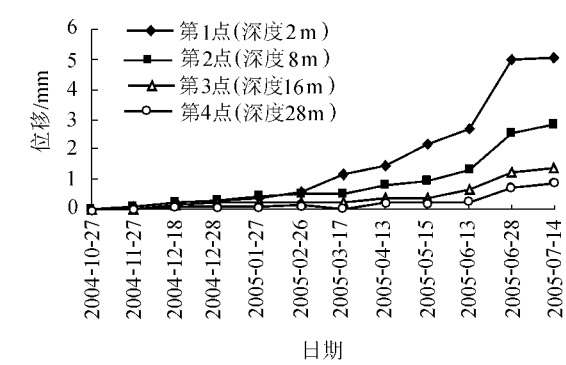


图 6 M1 的位移变化曲线

Fig.6 Displacement variation at M1

2.2.3 小结

由以上分析结果可以看出 边坡在一定深度的范围内可能存在潜在滑动面 ,开挖卸荷对边坡变形的影响十分明显 ,进入雨季后 ,降雨对边坡的安全稳定会产生很不利的影响 .根据 K32 + 630 断面上的监测数据 ,将各钻孔的急剧变形点连接后就可大致判断出边坡的可能滑动面( 图 1 ) .

3 数值模拟成果分析

3.1 数值模型和计算参数

根据边坡施工设计方案 ,对边坡进行了施工过程的数值模拟分析 .计算的典型断面为 K32 + 630 断面 ,计算模型和参数如图 7 和表 2 所示 .模拟范围为 100 m( 边坡高度方向 )× 135 m( 边坡长度方向 ) .计算时 ,对模型底面施加全约束 ,侧面施加法向约束 .

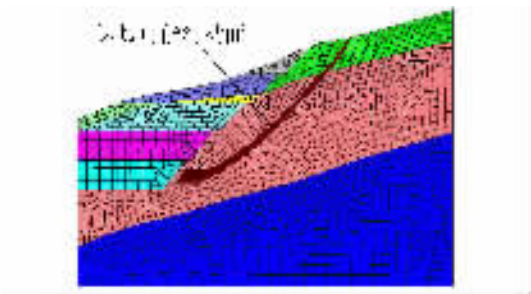


图 7 计算模型

Fig.7 Sketch of computational model

表 2 模型计算力学参数

Table 2 Mechanical parameters for computational model

| 岩土类别    | 密度/<br>( kg · m <sup>-3</sup> ) | 黏聚力<br>c/ kPa | 内摩擦<br>角/( ° ) | 变形模<br>量/MPa |
|---------|---------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| 全风化变质砂岩 | 1.89                            | 50            | 25             | 100          |
| 强风化变质砂岩 | 1.99                            | 100           | 31             | 200          |
| 弱风化变质砂岩 | 2.24                            | 200           | 40             | 250          |

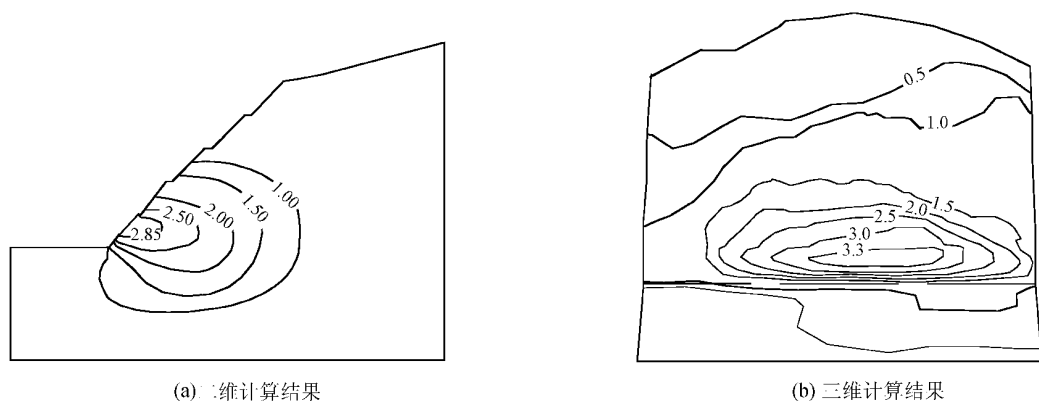
3.2 计算结果分析

按初始设计模拟了开挖过程 ,开挖完成后未考虑加固情况的倾向公路的  $x$  方向位移如图 8( a )所示 .在二维分析的基础上 ,建立了边坡的三维地质模型 ,并通过计算得到了边坡整体的  $x$  方向位移 ,如图 8( b )所示 .从图 8 可以看出 :

- a. 1 级和 2 级边坡的水平位移较大 ,而 1 级边坡的水平位移最大 .水平位移随着与 1 级边坡的距离的增加而逐渐减小 ,边坡深部的位移较小 .
- b. 边坡施加锚索后的水平位移分布形态与图 8( a )相似 ,数值上减小 20% 左右 .在长期降雨的工况下 ,最大水平位移更加集中于 1 级坡和 2 级坡的下部 .
- c. 在三维数值模型中 ,1 级坡和 2 级坡的位移较大 ,上部和深处的位移较小 .结合二维分析结果 ,可知 1 级坡较易发生大的变形破坏 .

为了求得边坡在极限状态下的滑动面 ,利用强度折减法<sup>[ 14 ]</sup>对边坡的典型断面 K32 + 630 进行分析 ,得到了边坡的可能滑动面 ,如图 7 所示 .

从图 7 可以看出 ,边坡开挖完成且降雨情况下的滑动面出口位于 1 级坡 ,此处也是剪应变增量最大的地

图8 边坡开挖后的  $x$  方向位移等值线(单位: cm)Fig.8  $x$ -displacement contour after slope excavation(unit: cm)

方.数值模拟分析得到的滑动面位置与监测数据分析得到的滑动面位置(图1)基本一致,说明数值模拟分析与监测数据分析取得了较好的一致性.1级坡是整个边坡需要重点关注的部位.而在进行该边坡的1级坡开挖时,由于没有及时地对边坡进行支护,没有采取有效的排水措施,雨水渗入坡体,1级坡发生了部分塌滑,也说明了这一点.

## 4 结 语

本文将监测数据分析方法和数值模拟方法相结合,对某工程 K32+565~K32+760 标段重点岩质高边坡的安全稳定性进行了分析,并得到如下结论:

a. 开挖引起的卸荷对边坡的影响比较明显,应尽量避免大的开挖扰动给边坡带来的不利影响.施工中应采取边开挖边支护的方式.进入雨季后,边坡变形出现异常,应完善边坡的排水措施,以避免雨水大量浸入坡体.

b. 边坡变形主要发生于边坡浅层,深部不会发生大的异常变形.1级坡的位移变形较大且位于滑动面出口处.实际情况也说明了这一点.因此,应加强1级坡和2级坡的安全监控并及时采取加固措施.

## 参考文献:

- [1] CHENG M Y, KO C H. Computer-aided decision support system for hillside safety monitoring[J]. Automation in Construction, 2002, 11: 453-466.
- [2] ANGELI M G, PASUTO A, SILVANO S. A critical review of landslide monitoring experiences[J]. Engineering Geology, 2000, 55: 133-147.
- [3] CORSINI A, PASUTO A, SOLDATI M, et al. Field monitoring of the Corvara landslide(Dolomites, Italy) and its relevance for hazard assessment[J]. Geomorphology, 2005, 66: 149-165.
- [4] 张雷, 沈明荣, 石振明. 岩体边坡工程中的位移监测及分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 202-205.
- [5] 张林洪, 扬柯. 边坡工程监测资料的稳定性判断和利用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 1136-1140.
- [6] 陈强, 韩军, 艾凯. 某高速公路山体边坡变形监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 299-302.
- [7] 张鲁渝, 欧阳小秀, 郑颖人. 国内岩土边坡稳定分析软件面临的问题及几点思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 166-169.
- [8] 刘立平, 姜德义, 郑硕才, 等. 边坡稳定性分析方法的最新进展[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(3): 115-118.
- [9] PETLEY D N, MANTOVANI F, BULMER M H, et al. The use of surface monitoring data for interpretation of landslide movement patterns[J]. Geomorphology, 2005, 66: 133-147.
- [10] 贾娟, 汪益敏, 林叔忠. 不良地质路堑高边坡的施工模拟与监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4106-4110.
- [11] 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): 1320-1323.
- [12] 李迪, 杨智生, 朱红五. 隔河岩电站厂房高边坡监测变形稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 1994, 11(3): 64-71.

[ 13 ] 二滩水电开发有限责任公司. 岩土工程安全监测手册[ K ]. 北京 : 中国水利水电出版社 , 1999 521-523.  
[ 14 ] 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 23( 19 ) 3381-3388.

**Rock slope stability analysis based on deformation monitoring  
and numerical simulation**

**ZHAO Zhi-feng , XU Wei-ya**

( *Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China* )

**Abstract :**With the section K32 + 565 ~ K32 + 760 of a rock slope taken as an example , the monitoring data of surface and deep-layer deformation of the slope were analyzed , and the construction process of the slope excavation in 5-stages was simulated. The result showed that precipitation and excavation were of great influences on the slope stability , and abnormal data were obtained in surface and deep-layer displacement monitoring of the slope in rainy season. According to the analysis result , the shallow-layer deformation of the slope is obvious , with the maximum displacement occurring in the slope of grade-I and grade-II , therefore , some reinforcement measures should be taken ; however , the deep layer deformation of the slope is relatively small. Moreover , the location and form of the sliding surface obtained from monitoring data are in good agreement with those obtained by the strength reduction method , and it is demonstrated that the combination of safety monitoring with numerical simulation is beneficial for supervision of construction and investigation of the safety of slopes.

**Key words :**slope stability ; monitoring and analysis ; numerical simulation

**《河海大学学报( 自然科学版 )》征订启事**

( 邮发代号 28-63 ,CN32-1117/TV ,ISSN1000-1980 ,双月刊 )

《河海大学学报( 自然科学版 )》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊 ,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章 ,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于 1957 年 ,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊 ,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中 ,有不少国家科技攻关( 重点 )项目和各种科学基金资助项目的研究成果 ,部分达到了国内领先和国际先进水平 ,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议 ,发挥了较大的社会效益和经济效益 ,深受工程界和科技界赞许 ,并获得首届中国高校优秀科技期刊奖以及中国期刊方阵“ 双效期刊 ”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

本刊每逢单月出版 ,国内外公开发行 ,每期定价 12.00 元 ,全年 6 期共 72.00 元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号《河海大学学报( 自然科学版 )》编辑部 ,联系电话 025-83786343。