

文章编号: 1000-7598-(2008)02-557-05

全站仪和滑动测微计在水布垭 地下厂房监测中的应用

覃卫民¹, 孙 役², 陈润发², 王 浩¹, 葛修润¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071 2. 湖北清江水电开发有限责任公司, 湖北 宜昌 443000)

摘 要:首次在国内大型水电工程地下厂房采用高精度全站仪和滑动测微, 计分别对施工期围岩表面和深部的变形进行监测。近 30 个月的监测资料表明, 围岩表面监测中变形较大的沉降和收敛测点集中在地下厂房开挖中的第 5, 6 层的岩体上, 围岩深部变形主要由岩体结构面或软弱面的张开引起的, 地下厂房在监测期间处于稳定状态。通过施工开挖变形快速监测与预报, 实时指导施工, 保证了工程的安全施工。

关 键 词: 三维非接触变形监测; 线法监测; 地下厂房

中图分类号: TU 454 **文献标识码:** A

Application of total station instrument and sliding micrometer to monitoring Shuibuya Underground Powerhouse

QIN Wei-min¹, SUN Yi², CHEN Run-fa², WANG Hao¹, GE Xiu-run¹

(1 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2 Qingjiang Hydropower Development Co. Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: The first monitoring for surface and deep of surrounding rock was used by high-precision total station instrument and sliding micrometer in large-scale underground caverns in China. According to thirty months monitoring data, the measuring points on rockmass surface of which the displacement are larger distributed on the 5 th and 6 th layers excavation rockmass, the deformations of deep rockmass is mainly caused by the opened structural plane; and the rockmass of underground caverns is stable during monitoring period. Through monitoring and rapid forecasting, which guide the construction works immediately provide security for the project.

Key words: 3D non-contact deformation monitoring; linear monitoring; underground power house

1 引 言

在水电站地下厂房围岩表面变形监测中, 拱顶及边墙沉降通常悬挂钢尺用水准仪进行测量, 围岩收敛则是用收敛计进行量测^[1,2]。随着地下厂房的下挖, 以上监测手段对上部测点不再适用, 为了使上部测点保持监测数据的连续性, 必须找到可行的监测方法, 于是出现了三维非接触变形测量方法^[3,4]。

三维非接触变形监测的基本思想是通过对比测点在不同时刻的三维坐标(X, Y, Z), 得到该测点在该时段内的位移(相对某一初始状态)。采用快速、

高精度的电子全站仪, 以光学方式远距离确定测点的三维坐标, 能获取测点的三维数据, 具有快速、省力、数据处理自动化程度高和无需接近测点等优点。

岩体内部变形监测按原理分点法和线法两种。点法监测只能提供有限的监测数据, 难以准确刻划出岩体内部变形, 水电站地下厂房岩体内部变形通常钻孔埋设多点位移计进行量测; 线法监测是沿一条相当长的测线进行近乎连续的测量, 因此获取的信息量大, 可以比较准确地描述岩体内部变形, 划分岩体边坡松动区^[5], 这一优点为现有的一些监测

收稿日期: 2007-06-18

作者简介: 覃卫民, 男, 1973 年生, 助理研究员, 主要从事岩土工程安全监测、信息化施工和岩土试验等工作。E-mail: qwm1973@sohu.com

方法所不及。线法变形监测在欧美各国已得到了广泛应用，其典型设备有滑动测微计^[6]、三向钻孔变形计及测斜仪等。水布垭水利枢纽地下厂房布置在清江右岸，位于坝子沟、张性大断层 F2、马崖高边坡以及清江右岸岸坡所围成的四边形山体之内，规模较大的 F3 贯穿其间。厂房区地层产状平缓，地层结构软硬相间，软岩岩组所占比例高，且岩体中层间剪切带广泛发育，厂房区内中、小断层发育，在水轮机层以上为软硬相间的栖霞组灰岩，以下由栖霞组第一段(P₁q₁)、马鞍组(P₁ma)、黄龙组(C2h)及写经寺组(D3x)等软弱岩体组成，尾水洞大部分在写经寺组软岩中通过。这种复杂地质条件对厂房洞室群开挖、支护及围岩稳定十分不利。厂房洞室群中的软岩成洞、主厂房顶拱与边墙稳定、岩壁吊车梁持力层稳定、主厂房内主要交叉洞口处岩体稳定、主厂房机窝围岩稳定等均是设计与施工中的主要工程地质问题。

基于水布垭水利枢纽地下厂房地质条件的复杂性，中国科学院武汉岩土力学研究所承担了清江水布垭水利枢纽地下厂房围岩施工期变形快速监测与动态反馈分析、设计优化研究工作，现场监测工作采用高精度的全站仪和滑动测微计分别对地下厂房施工期岩体表面和深部变形进行监测。

2 测试原理

2.1 三维非接触变形监测

三维坐标的计算原理如下：图 1 中，O 为全站仪的三轴交点，X 轴平行 A、B 连线的水平投影。在测站上若分别测定了 A、B 两点的水平方位角 HZ_A、HZ_B 和天顶距 V_A、V_B 和斜距 S_A、S_B，则可以算出 A、B 点在上述坐标系中的坐标：

$$\left. \begin{aligned} X_A &= S_A \sin V_A \sin \beta; \\ Y_A &= S_A \sin V_A \cos \beta; \\ Z_A &= S_A \cos V_A \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} X_B &= S_B \sin V_B \sin(\beta + H); \\ Y_B &= S_B \sin V_B \cos(\beta + H); \\ Z_B &= S_B \cos V_B \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中：H = HZ_B - HZ_A；β 为 OA 方向与 Y 轴间的夹角。

由式 (1)，(2) 可知，若 A、B 为已知点，在任意设置测站的情况下，都可以建立以 AB 的平行线为坐标轴的坐标系，只要求出 OA 与 Y 轴的夹角 β 即可。

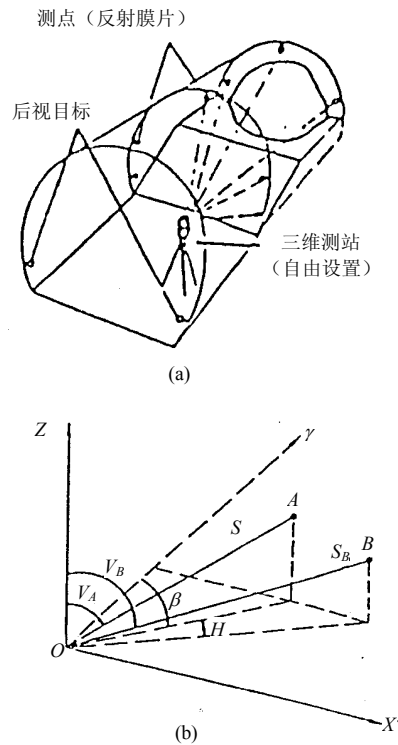


图 1 三维非接触变形监测原理示意图

Fig.1 Theory of 3D non-contact deformation monitoring

在上述坐标系中，顾及 Y_A = Y_B，则

$$S_A \sin V_A \cos \beta = S_B \sin V_B \cos(\beta + H) \quad (3)$$

由此可得

$$\tan \beta = \cot H - \frac{S_A \sin V_A}{S_B \sin V_B \sin H} \quad (4)$$

式中：β 可以根据监测数据 S、V、H 等求出，求 β 的实质在于测站坐标系的定向。

空间任意点 P，在上述坐标系中的坐标为

$$\left. \begin{aligned} X_p &= S_p \sin V_p \sin(\beta + H_p); \\ Y_p &= S_p \sin V_p \cos(\beta + H_p); \\ Z_p &= S_p \cos V_p \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中：H_p = HZ_p - HZ_A。

通过对测点在不同测试时间的坐标测值比较，可以算出测点的沉降及测线的收敛数值。

2.2 线法监测

滑动测微计用于轴向变形线法测量的原理大致如下：塑性套管上每米有一个金属测标，将测线划分成若干段，通过灌浆，测标与被测介质牢固地浇筑在一起。当被测介质发生变形时，将带动测标与之同步变形，用滑动变形计逐段测出各标距长度随时间的变化，从而得到反映被测介质沿测线的变形分布规律的数据。滑动测微计在工程上的应用如图 2 所示。

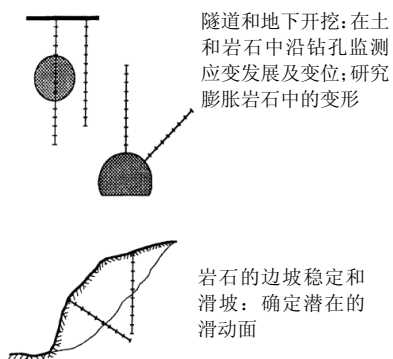


图 2 滑动测微计应用示意图
Fig.2 Application of sliding micrometers

3 监测断面布置及监测仪器

3.1 测点布置

三维收敛监测测点在地下厂房开挖断面的示意位置见图 3。测点编号 3, 7 分别为主厂房上、下游侧墙点, 4, 6 为拱肩点, 5 为拱顶点, 2 点靠上游, 距 I 层底板 1.5 m 左右, 8 点靠下游, 位置同 2 点; 1, 9 点在厂房 4 层开挖处, A、B 点分别在厂房 5 层开挖底部的上下游边墙上。X 轴正方向指向掌子面。测点编号第 1 位为洞号, 第 2, 3 位为断面号, 第 4, 5 位为点号。以下断面号简称为 Sn, n 为断面号。一般自厂房 II 层以下上、下游侧墙每断面 2 个测点, 每 10 m 左右布设 1 个断面。

滑动测微计测孔在地下厂房开挖断面的示意位置见图 3, 其中 1 层排水洞布置 3 个测孔, 目的在于监测拱顶围岩的变形情况。在 2 层排水洞布置 3 个测孔, 目的在于监测地下厂房向下开挖过程中, 厂房直立墙 (重点是下部软岩) 的变形和稳定情况, 同时有效地监测引水洞间岩体的变形情况。在 4# 施工支洞布置 5 个测孔, 目的在于监测地下厂房向下开挖过程中, 厂房边墙 (重点是下部软岩) 的变形和稳定情况, 有效地监测母线洞与尾水洞间岩体的变形情况。

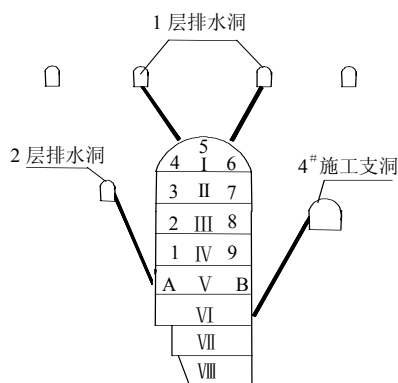


图 3 地下厂房断面监测点布置示意图
Fig.3 Strut profile of monitoring in underground caverns

3.2 监测仪器

岩体表面三维非接触变形监测采用徕卡 TCA2003A 全站仪进行, 仪器精度为 1 mm + 1 ppm 及 0.5", 附属设备包括棱镜、反光膜片、强力照射灯等。岩体深部变形监测采用瑞士 SOLEXPERS 公司生产的滑动测微计, 精度为 0.003 mm, 附属设备包括测头导向链、连接杆、绞车、二次仪表等。

4 监测成果及分析

现场监测工作自 2002 年 12 月开始, 至 2005 年 5 月结束, 历时 30 个月。

4.1 监测成果

三维非接触变形监测中典型测点 (测线) 的监测成果见图 4~6。线法监测中典型测孔的监测成果见图 7~10。

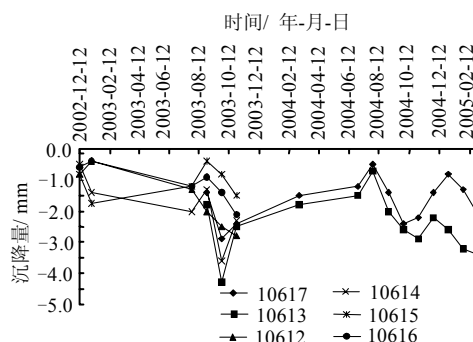


图 4 S₆ 断面测点沉降-时间曲线图
Fig.4 variation curves of settlement-time for typical point on section S₆

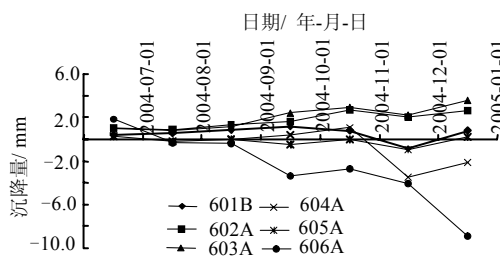


图 5 VI 层典型测点沉降-时间曲线图
Fig.5 Variation curves of convergence-time for typical point on section VI

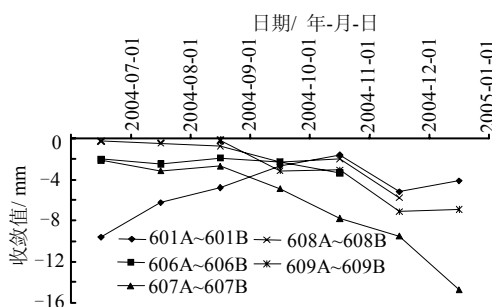


图 6 VI 层典型测点沉降-时间曲线图
Fig.6 Variation curves of convergence-time for typical point on section VI

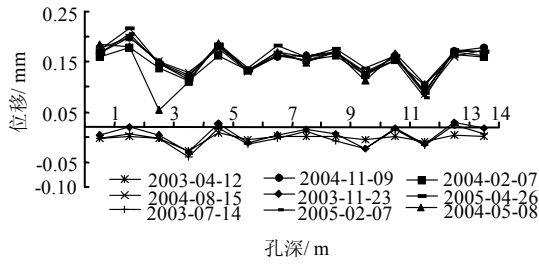


图7 S2-2 测孔孔深-位移曲线图
Fig.7 Depth-displacement of bore S2-2

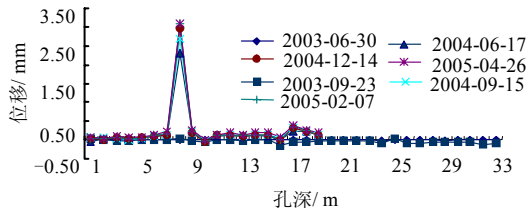


图8 S-11 测孔孔深-位移曲线图
Fig.8 Depth-displacement of bore S1-1

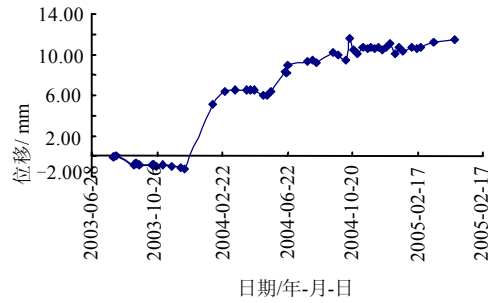


图9 S2-1 测孔累计位移-时间曲线图
Fig.9 Accumulated displacement-time of bore S2-1

从 4#施工支洞的监测数据看, S2-3A 测孔在 2004 年 7 月下旬以后的监测中, 只能测到 11 个测点, 即使对导向链的加工(宽度方向尺寸各减少 2 mm), 也没能够恢复正常监测。而 S2-1 测孔在 8 月下旬的监测中, 只能测到 5 个测点, 导向链不能进一步送入测孔里, 经过对导向链的加工(宽度方向尺寸各减少 2 mm), 该测孔恢复正常监测。由此可见, 自厂房第 VI 层开挖以来, 厂房边墙变形较大, 滑动测微计测孔里埋设的 PVC 管受到岩体的挤压产生变形, 使得导向链进出困难。

地下厂房开挖期间围岩变形是稳定的, 没有发现突变现象。但自 V、VI 层开挖以来, 无论三维收敛还是滑动测微计的监测数据都表明厂房在开挖过程中, 厂房顶拱变形处于稳定状态, 而两侧边墙的变形量都有所增加, 变形速率较以往增大, 尤其在边墙的中下部。随着厂房的深入开挖(机组蜗壳的开挖), 厂房继续产生变形, 变形的重点主要体现在两侧边墙, 尤其在边墙的中下部, 但是变形速率在减小, 至 2005 年 4 月, 地下厂房拱顶和边墙的变形处于稳定状态。

4.4 围岩深部变形机制

1 层排水洞的 3 个测孔由于埋设滞后, 测点变形值较小, 岩体的变形规律未能充分体现。二层排水洞和 4#施工支洞的测孔累计变形值稍大, 岩体的变形主要由某些局部点的变形构成, 如 S1-1 测孔的 8#、17#测点, S2-1 测孔的 7#、34#测点, 以及 S1-3 测孔的 6#、10#、13#和 19#测点等等, 如图 10 和表 1 所示。

变形较大的测点均是岩体被较软弱结构面切割的部位, 因此, 地下厂房直立墙的变形主要由结构面或软弱面的张开引起的^[5]。地下厂房边墙滑动测微计测孔中, 典型测点位移值之和占相应测孔累积位移值的比例大都在 60 % 以上。

4.2 三维非接触变形监测分析

拱顶区域中沉降监测最大累积沉降为 4.5 mm (位于 0+60 桩号下游拱角线附近的 10617 测点), 收敛监测最大累积收敛为 5.8 mm (位于 0+130 桩号拱角线附近的 11317~11313 测线)。

地下厂房高边墙最大累积沉降为 8.9 mm (位于 0+96.5 桩号、高程约为 182 的 606A 测点), 收敛监测最大累积收敛为 14.7 mm (位于 0+100.5 桩号、高程约为 182 的 607A~607B 测线)。

沉降和收敛监测中变形较大的测点基本集中在地下厂房开挖中的第五、六层的岩体上。

4.3 围岩变形量与施工开挖的关系

由于滑动测微计测孔采取预埋形式, 通过对测孔的监测可以较好地掌握在地下厂房逐层下挖过程中围岩的变形情况。从 1 层排水洞的监测数据看, 地下厂房在开挖 V 层前, 拱顶的变形很小 (0.1 mm 以内); V 层开挖后, 1 层排水洞测孔的累积变形均有不同程度的小突变, S2-2 和 S3-2 测孔的当月变形量在 2 mm 左右。从 V 层支护到机组蜗壳的开挖, 1 层排水洞测孔的累计变形都很小, 基本处于稳定状态。从 2 层排水洞的监测数据看, 地下厂房在开挖 V 层前, 边墙的变形很小 (0.2 mm 以内); V 层开挖后, 2 层排水洞测孔的累计变形均有不同程度的突变, 测点保持完整的 S2-1 孔当月变形量在 6 mm 左右; VI 层开挖后, S2-1 的当月变形量在 2 mm 左右; 至机组蜗壳的开挖, S2-1 孔的当月变形量在 1 mm 左右, 2004 年 10 月后 S2-1 孔基本处于稳定状态。详见图 9。

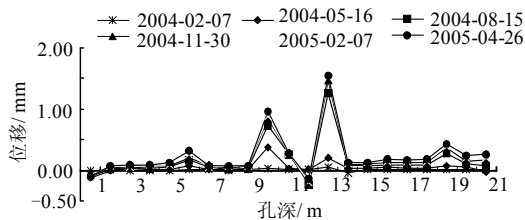


图 10 S1-3 测孔孔深-位移曲线图
Fig.10 Depth-displacement of bore S1-3

表 1 S1-3 测孔典型测点位移统计表
Table 1 Displacement statistics of typical monitoring points of bore S1-3

| 日期/ 年-月-日 | 测点位移/mm | | | | | 全孔累 积位移 U/mm | ΣU /% |
|--------------|---------|-------|-------|-------|-------|--------------------|----------|
| | 6 | 10 | 13 | 19 | 合计 | | |
| 2004-02-07 | 0.012 | 0.024 | 0.055 | 0.014 | 0.105 | 0.128 | 82.0 |
| 2004-03-08 | -0.007 | 0.040 | 0.085 | 0.019 | 0.137 | 0.254 | 53.9 |
| 2004-04-08 | -0.044 | 0.053 | 0.095 | 0.023 | 0.127 | 0.272 | 46.7 |
| 2004-05-16 | 0.076 | 0.365 | 0.197 | 0.075 | 0.713 | 0.914 | 78.0 |
| 2004-05-21 | 0.092 | 0.445 | 0.257 | 0.087 | 0.881 | 1.125 | 78.3 |
| 2004-06-27 | 0.124 | 0.496 | 0.724 | 0.14 | 1.484 | 1.913 | 77.6 |
| 2004-07-29 | 0.149 | 0.754 | 1.254 | 0.279 | 2.436 | 3.177 | 76.7 |
| 2004-08-29 | 0.148 | 0.74 | 1.461 | 0.286 | 2.635 | 3.47 | 75.9 |
| 2004-09-23 | 0.155 | 0.803 | 1.344 | 0.304 | 2.606 | 3.59 | 72.6 |
| 2004-10-23 | 0.191 | 0.768 | 1.478 | 0.345 | 2.782 | 3.777 | 73.7 |
| 2004-11-30 | 0.2 | 0.843 | 1.478 | 0.378 | 2.899 | 4.235 | 68.5 |
| 2004-12-21 | 0.261 | 0.899 | 1.539 | 0.402 | 3.101 | 4.668 | 66.4 |
| 2005-01-22 | 0.259 | 0.889 | 1.532 | 0.39 | 3.070 | 4.579 | 67.0 |
| 2005-02-22 | 0.298 | 0.887 | 1.531 | 0.388 | 3.104 | 4.594 | 67.6 |
| 2005-03-18 | 0.312 | 0.905 | 1.536 | 0.414 | 3.167 | 4.879 | 64.9 |
| 2005-04-26 | 0.316 | 0.966 | 1.540 | 0.435 | 3.257 | 5.146 | 63.3 |

4.5 科研成果

通过现场监测工作，取得如下科研成果即获得国家专利局授权实用新型专利：一项是插销式测孔保护装置（专利号 03254422.7）。获得国家专利局授权实用新型专利：一种双面测量靶标（专利号 CN200520099332.6）。获得国家版权局授权软件登记：滑动变形计数据处理系统 V1.0 版（登记号 2005SR04658）。

5 结 论

采用高精度的全站仪和滑动测微计分别对水布垭水利枢纽地下厂房施工期岩体表面和深部变形进行了监测，在国内大型水电工程地下厂房尚属首次。

针对地下厂房复杂地质条件的设计与施工方案，采用合理有效的监测手段实施了围岩表面变形监测与深部变形监测，进行施工开挖围岩变形快速监测与预报，实时指导施工，为工程安全施工提供了基础性资料。

将监测成果应用到地下厂房围岩稳定性的实

时评价多方面的综合研究中去，为建立数值模型反演地下厂房区围岩的力学参数与地应力场提供资料，从而全面系统地评价围岩稳定性，开展设计与施工方案的优化分析，寻求经济合理地加固措施，优化设计与指导施工。

致谢：本项工作得到了湖北水布垭工程建设公司的资助，现场测试工作得到了水电 14 局水布垭工程施工项目部及国电公司中南勘测设计研究院水布垭工程监理部有关同志的帮助，在此一并致谢。

参 考 文 献

[1] 二滩水电开发有限责任公司. 岩土工程安全监测手册 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 98-111.

[2] 王浩, 吴振君, 汤华, 等. 地下厂房监测信息管理、预测系统的设计与应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 163-167.

WANG Hao, WU Zhen-jun, TANG Hua. et al. Development and application of monitoring information management and prediction software system for underground powerhouse.[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 163-167.

[3] 邓念武, 朱杰兵. 全站仪在隧洞三维变形监测中的应用研究[J]. 岩土力学, 2003, (增 1):158-161.

DENG Nian-wu, ZHU Jie-bing. Study on application of total station instrument to three dimensional deformation monitoring for a constructed tunnel. [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, (Supp.1): 158-161.

[4] 王浩, 葛修润, 宋罡, 等. 全站仪在隧道开挖施工三维变形监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增): 1 217-1 219.

WANG Hao, GE Xiu-run, SONG Gang, et al. Total station is applied in 3D deformation monitoring in tunnel excavation. [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(Supp.): 1 217-1 219.

[5] 邓建辉, 王浩, 姜清辉, 等. 利用滑动变形计监测岩石边坡松动区[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 180-184.

DENG Jian-hui, WANG Hao, JIANG Qing-hui, et al. Monitoring of disturbed zone for rock slope by sliding deformer[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 180-184.

[6] 李光煜, 黄粤. 岩土工程应变监测中的线法原理及便携式仪器系列[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 99-109.

LI Guang-yu, HUANG Yue. Linear principles and portable equipment series for strain monitoring in Geotechnical engineering. [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(1): 99-109.