

某大型水电站高位边坡开挖的变形响应研究

朱继良^{1, 2, 3}, 黄润秋¹, 张诗媛³, 徐德敏¹

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 广西电力工业勘察设计研究院, 广西 南宁 530023; 3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘 要: 针对西南某大型水电站高达近 700 m 的人工高边坡, 通过大量现场跟踪施工的地质调查工作, 系统研究了复杂地质条件和高地应力环境下, 岩石高边坡大坡比、强开挖所表现的变形响应, 揭示了此类边坡变形响应的基本规律及特殊表现。研究表明: 高边坡开挖过程中, 边坡的变形与开挖过程有较强的同步性。变形主要受开挖卸荷影响, 随开挖的进行, 坡体的变形随开挖面的远离表现出总体衰减, 最终稳定的响应特征。

关键词: 水电站; 高边坡; 开挖; 变形响应

中图分类号: TV223

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2010)05 - 0784 - 08

作者简介: 朱继良(1976 -), 男, 高级工程师, 在站博士后, 主要从事地质工程、岩土工程和环境工程方面的科研与生产工作。E-mail: zjll6@163.com。

Deformation response of high-order slope excavation of a large hydroelectric station in China

ZHU Ji-liang^{1, 2, 3}, HUANG Run-qiu¹, ZHANG Shi-yuan³, XU De-min¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Guangxi Electric Power Industry Investigation Design and Research Institute, Nanning 530023, China; 3. Center for Hydrogeology and Environment Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

Abstract: Through abundant geological investigation of in-situ construction tracing of the 700-meter-long slope of a large hydroelectric station in the southwest of China, the deformation response of high rock slope with large sloping ratio is studied under complex geological and high in-situ stress. Through systematical studies, the basic laws and special characteristics of its deformation responses are acquired and classified as follows: (1) During the slope excavation, the slope deformation and its excavation process exhibit strong synchronism. (2) The slope deformation is mainly influenced by the excavation. (3) The slope deformation generally decreases with the distance between the excavation face and the monitoring position, whose responding features of the ultimate stability have three stages, that is, rapid increase stage of deformation, slow enhancement stage and stable stage.

Key words: hydroelectric station; high slope; excavation; deformation response

0 前 言

在建的西南某大型水电站工程天然高边坡高达 1000 余米, 开挖边坡高约 700 m。复杂的地形地貌和地质条件, 高地应力、陡坡角、强开挖及工期短等特点, 决定了边坡开挖过程中必将会出现一系列复杂的地质问题, 尤其是卸荷变形等由开挖所引起的地质 - 力学响应。这些问题的深入分析评价对边坡稳定性的控制具有重要的现实意义。

国内外学者对开挖高边坡的变形研究较多, 不过大多数研究集中在灰色理论、仿生群体算法、数值模拟和物理模拟计算等方面^[1-9], 对开挖边坡进行监测和变形分析的相对较少, 且研究往往只针对高边坡的某

一部位或某一时段进行^[10-15]。本文对我国西南某大型水电站右岸边坡开挖进行实时跟踪监测, 用完整、系统的监测资料对近 700 m 的岩石高边坡开挖进行分析, 得到了一系列边坡变形响应特征和变化规律。

1 开挖边坡概况

枢纽区开挖段的河谷呈近 SN 向。右岸边坡开口线最高高程为 1540 m, 其开挖平均坡度 54.2°。工程

基金项目: 广西电力工业勘察设计研究院博士后基金项目

收稿日期: 2008 - 06 - 11

修改稿返回日期: 2009 - 12 - 22

高边坡于 2002 年 3 月开挖, 开挖至拱肩槽河谷底部建基面的时间为 2005 年 8 月底。右岸开挖边坡从上游至下游, 主要包括 III 区边坡、进水口边坡、拱肩槽边坡、水垫塘边坡和尾水边坡等。下面重点介绍 III 区边坡。

III 区边坡位于#3 山梁的 1245 m 高程以上(实际上 1365 m 高程以上为 I 区, 1245~1365 m 高程之间为 II 和 III 区, 为了叙述方便统称为 III 区, 或高位边坡)。开挖边坡呈上缓下陡的凸形坡, 开口线位于 1530 m, 最低为 1245 m 高程, 最大高差达 280 m。开挖边坡平面形态呈上窄下宽的凸形坡, 开口线位于 1530 m(开口线 1510 m 高程附近)至 200 m(1245 m 高程)。边坡总体走向 N22°~28°W。马道间高差一般为 15 m, 局部为 20 m。山脊北坡较缓, 南坡较陡。

值得说明的是, 进水口边坡主要指进水口 1245~1139 m 高程之间的边坡, 包括进水口正面直立坡和 1139 m 高程平台(见图 1)。其中, 1230 m 和 1220 m 高程各有一马道, 1220~1139 m 高程为一直立坡。进水口边坡退坡的最大深度超过 150 m。

边坡岩性主要为不明时代的中—深度变质岩系(M, 见图 1)。其类型主要有黑云花岗片麻岩(M^{4-1} : 厚度 330~460 m, 其中片岩夹层平均每间隔 6.2 m 分布一层, 平均厚 0.35 m)和角闪斜长片麻岩(M^{4-2} : 厚度 100~120 m, 其中片岩夹层平均每间隔 20 m 分布一层, 平均厚 0.20 m。岩层完整性最好)。新鲜完整的黑云花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩和片岩均属坚硬~极坚硬的块状岩石。片岩抗风化能力弱, 风化后易软化和泥化成为软弱夹层。枢纽区变质岩层呈单斜构造横河分布, 陡倾上游, 总体产状为 N80°W, NE \angle 75°~80°。开挖后的边坡岩体整体为弱风化的角闪斜长片麻岩。

高位边坡主要发育 3 条 III 级结构面 F_3 (NWW/NE \angle 70°~80°, 破碎带宽 0.5~4 m)、 F_{11} (N85°~90°W/NE \angle 75°~90°, 呈舒缓波状, 破碎带宽 0.16~6 m)、 F_5 (位于高位边坡下游, N60°~85°W/NE \angle 72°~90°, 破碎带宽 0.6~8 m, 由两个以上的裂面组成, 沿裂面一般有厚 10~30 cm 厚的泥化糜棱岩、角砾岩和碎裂岩及碎块岩。裂面之间主要为碎块岩)和多条 IV 级结构面(破碎带宽 0.1~0.5 m, 以陡倾角为主, 如 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_5 和 f_{12} 等)。上游侧有 1 条 II 级结构面 F_7 (位于高位边坡上游, 与坝基最近距离约 50 m, EW/N \angle 74°~90°, 破碎带总宽 18~37 m, 其中泥化物质总宽度约 1.5~2.5 m)。此外, 还有位置不确定的随机性 V 级结构面等。

工程建筑物地区的地震基本烈度为 VII 度, 50 a 超越概率 10% 的基岩峰值水平加速度为 0.134g, 600 a 超越概率 10% 的为 0.308g。

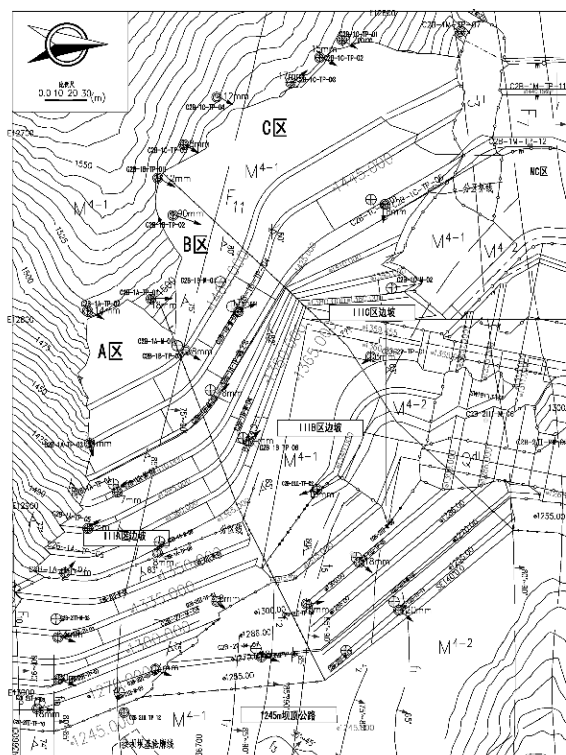


图 1 高位边坡监测仪器布置及变形矢量图

Fig. 1 Layout of monitoring instruments and deformation vectogram of high slope

2 边坡开挖变形响应分析

右岸边坡开口线高程为 1540 m, 至河床部位高程约为 890 m, 边坡开挖高度 650 m, 开挖边坡主体部位从上至下依次包括了 III 区边坡、拱肩槽边坡和进水口边坡。边坡总体开挖进度如图 2 所示。

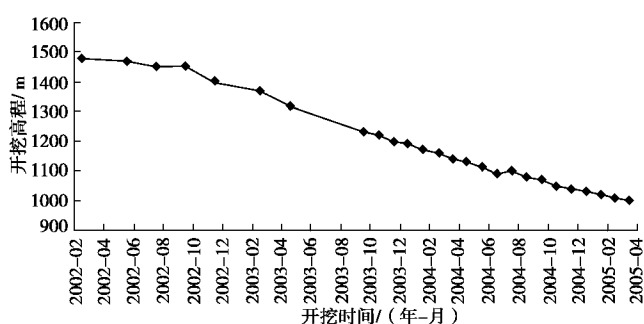


图 2 边坡开挖进度图

Fig. 2 Excavation progress of slope

边坡开挖过程中, 随着开挖的进程, 在不同高程布置了适量的地表和地下位移观测仪器, 监测仪器布置如图 1 所示, 对应各点的高程位置如表 1 所列。这些监测点积累了丰富的变形资料, 为高位边坡开挖过程中的变形响应分析提供了扎实的依据。

由于高位边坡(主要指 1245 m 高程以上, F_7 与 F_5 断层之间的边坡, 为重要的一级边坡, 许多重要的

建筑物均在此范围内) 开口线附近的监测仪器在开挖之前已有布置, 因此, 其表面位移观测具有监测时间长, 时间序列完整, 受施工干扰相对较小, 能较全面捕捉高边坡在开挖过程中的变形响应信息的特点。右岸开口线附近共布设了 9 个表观位移监测点, 这些点基本具有相同的变化规律, 典型监测点变形特征分析如下。

表 1 开口线以外表观点
Table 1 Surface observation points above split line

部位	高程/m
C2B-1C-TP-01	1507
C2B-1C-TP-02	1511
C2B-1C-TP-03	1511
C2B-1C-TP-04	1527
C2B-1C-TP-05	1528
C2B-1B-TP-01	1533
C2B-1A-TP-01	1501
C2B-1A-TP-02	1512
C2B-1A-TP-03	1445

2.1 III_C 区 1511 m 高程监测点 (C2B-1C-TP-02) 变形分析

该表观点布设在开口线略上方, 设置时间为 2002 年 7 月(较开挖的起点时间 2002 年 3 月晚约 4 个月), 监测一直延续至今, 除 2003 年 10 月 13 日~2004 年 2 月 10 日之间资料缺失外, 其他数据序列完整。通过对原始记录数据的整理, 得到该测点水平总位移、垂直位移、总位移及位移矢量的方位角和倾角随时间的变化, 如图 3~6 所示。边坡的变形具有下述的特点:

(1) 变形总量不大, 至 2005 年 6 月, 总位移为 18 mm, 其中, 水平位移略小于总位移, 其值接近 18 mm (见图 3 (b)), 垂直位移约为 7 mm。

(2) 变形监测曲线总体上呈现出随时间“波动式”增长的特点。位移在监测过程的前两个月内 (即至 2002 年 9 月, 约开挖到 1450 m 高程), 位移增长的速度较快, 即为快速增长期; 然后至 2003 年 9 月 (开挖至 1245 m 高程), 位移一直在 10 mm 的水平上下“稳定波动”; 这之后, 位移又出现一个“波动增长时期”

(对应于进水口和拱肩槽边坡的开挖), 直到 2004 年 6 月, 变形开始再次出现稳定。

垂直变形在 2003 年 9 月之前总体为“正值”, 即“朝下”, 而在这之后, 总体变为“负值”, 即变为“朝上”。对应的合位移矢量也以此时间为界, 分别以“俯角”和“仰角”指向坡外。值得指出的是, 垂直位移在 2003 年 9 月之前也表现出随时间呈“波动”式变化的特征。

(3) 图 4 是合位移矢量的方位角和倾角随时间的变化曲线。可见, 方位角总体变化不大, 但倾角的变化也呈现出与位移变化相仿的“波动式特征”, 以 2003 年 9~11 月为界, 之前为俯角, 在 0°~50°范围内频繁“周期变化”, 这之后表现为仰角, 虽有波动, 但幅度小, “频率”低, 似正常表现。

(4) 进一步分析发现, 2003 年 9~11 月之前, 水平位移的“波动”和垂直位移的“波动”对应性较好, 即水平位移的“波峰”基本对应了垂直位移的“波谷”, 反之亦然。而且, 这些波动与开挖过程中台阶边坡的施工正好也是对应的, 即一个周期基本对应了一次阶段边坡的形成过程。

上述现象表明, 开挖过程中, 边坡的卸荷变形响应是非常复杂的。通过仔细分析, 在边坡的开挖过程中, 对应于每一个阶段边坡的形成, 变形的响应具有以下的过程 (如图 6 所示):

(1) 首先, 由于一次阶段边坡的爆破, 边坡产生快速的卸荷, 导致垂直和水平的回弹, 位移矢量呈近水平指向坡外 (见图 6 (a) 中的 T_1), 也就是说, 此时测点变形的“动力”来自于边坡开挖引起的“卸荷”应力释放。此时, 一般情况下 (非大规模开挖), 垂直位移减小, 水平位移增大, 合位移矢量近水平, 为倾角较小的 (0°~20°) 俯角。

(2) 随着卸荷的完成 (阶段边坡的施工进入搬运弃渣), 测点的变形将逐渐转为受重力的影响和控制; 此时, 边坡的变形矢量倾角就会逐渐向下偏转, 逐渐变为大俯角, 直至接近或达到重力矢量的方向 (如图 6 (b) 所示)。

正是这样的过程导致了在一个阶段边坡的施工时间范围内, 水平和垂直位移出现了“波动”式的变化, 即 T_1 时刻, 水平位移大, 垂直位移小, 随着时间变化到 T_2 、 T_3 ... 时刻, 水平位移逐渐变小, 垂直位移逐渐变大。

(3) 当下一次阶段边坡的开挖来临时, 测点的变形又会重复上述的波动过程, 从而导致位移呈现“波动”式增长的特点。

(4) 出现合位移矢量倾角为正 (俯角) 现象的原因分析如下:

由于开挖的是监测点下部的岩土体, 在重力作用下, 此部位的坡体变形方向与坡面近于平行。坡体在一定深度范围内的开挖, 造成了岩土体的侧向卸荷回弹, 从而导致位移矢量的倾角 (俯角) 减小 (见图 7 (a)), 但此时, 所产生的力还不足以使坡体产生较大的垂向位移。因此, 边坡的变形矢量角为正的俯角。

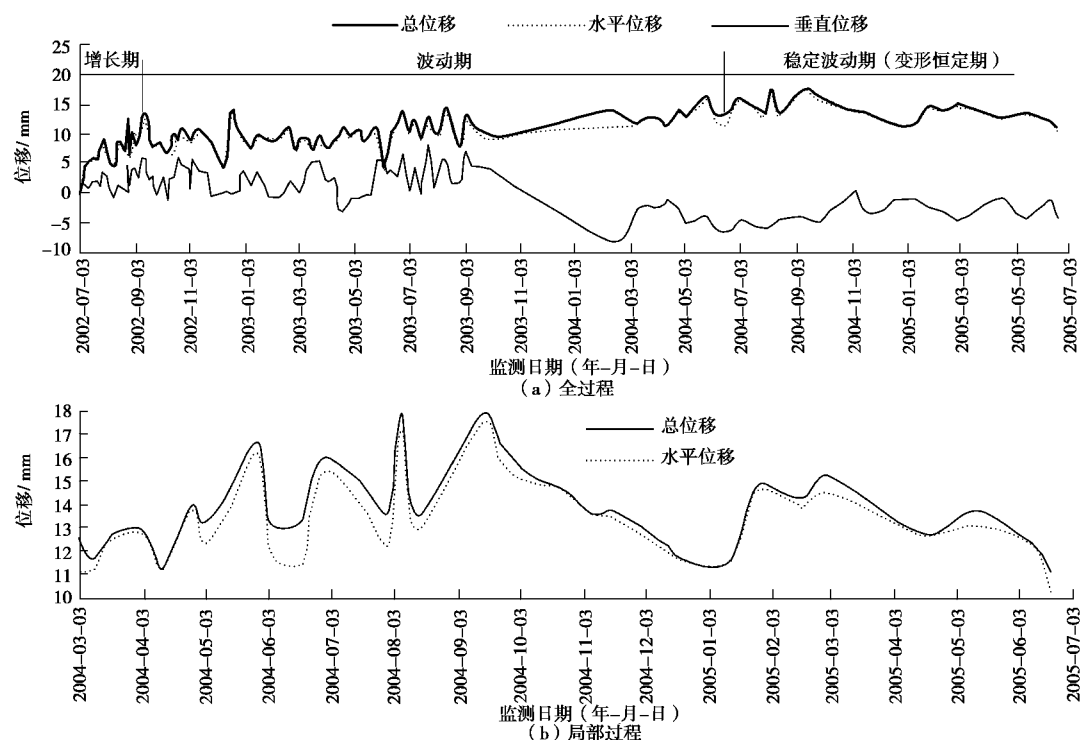


图 3 C2B-1C-TP-02 总位移(U)、水平位移(U_h)及垂直位移(U_v) - 时间曲线
Fig. 3 Curves of U , U_h and U_v with time at observation point C2B-1C-TP-02

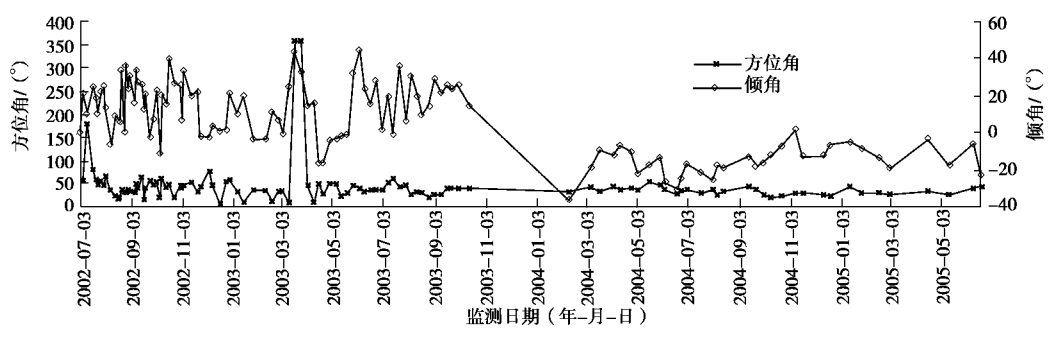


图 4 C2B-1C-TP-02 位移矢量方位角、倾角 - 时间曲线
Fig. 4 Curves of azimuth angle and dip angle of displacement vectors with time at observation point C2B-1C-TP-02

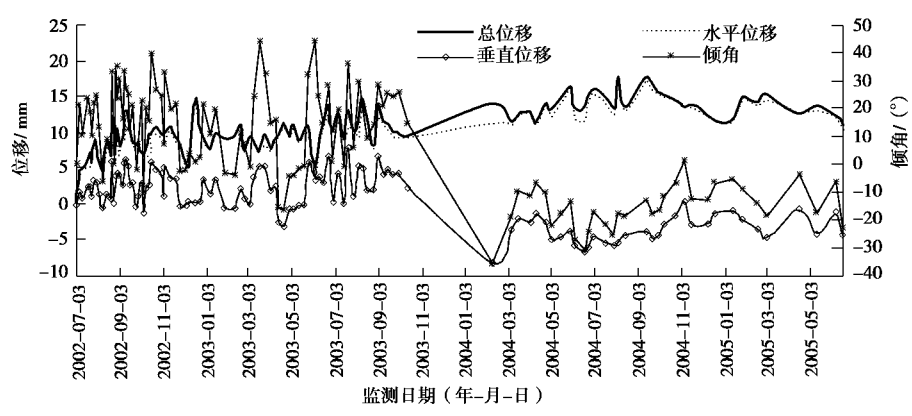


图 5 C2B-1C-TP-02 总位移、水平位移、垂直位移与倾角 - 时间曲线
Fig. 5 Curves of U , U_h and U_v with time at observation point C2B-1C-TP-02

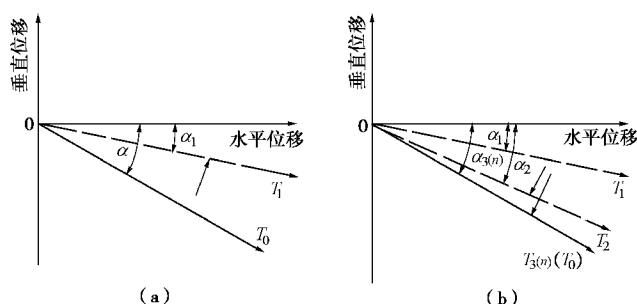


图6 开挖边坡的位移矢量倾角变化示意图

Fig. 6 Variation of dip angle of displacement vectors of excavation

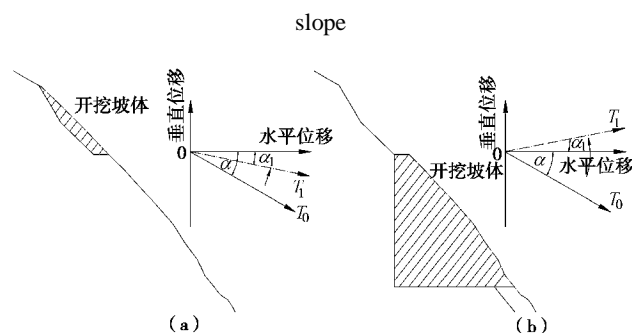


图7 开挖坡体卸荷示意图

Fig. 7 Unloading of excavation slope

(5) 尤为值得注意的一个现象是, 2003年9~11月后, 位移矢量的倾角又整体转变为仰角, 即位移矢量呈 $0^\circ \sim -30^\circ$ 的仰角指向坡外。深入研究发现, 这一现象恰好出现在进水口边坡的大规模开挖之后(水平与垂直方向上退坡深度均超过100 m, 水平向超过150 m)。由于进水口边坡的大规模开挖(见图7(b)), 引起强烈的垂直卸荷回弹, 从而将开挖水平面以上的坡体“抬起”, 致使开挖面以上的位移矢量从原来的“朝下”指向坡外的俯角, 改变为“朝上”指向坡外的仰角。由此可见, 进水口边坡大规模的开挖, 是使岩体产生整体向上卸荷回弹的主要驱动力。

(6) 值得说明的是, 上述波动的形成, 主要与开挖有关系, 波动的“频率”高, 表明阶段边坡开挖周期短, “频率”低, 表明阶段边坡开挖周期长。此外, 倾角波动大, 表明开挖扰动或开挖规模较大, 反之则较小。

以上的认识给我们一个重要的启示: 通常模拟开挖过程的有限元分析, 得到的位移均是指向上的, 实际上, 这样的结果与实际边坡的变形行为有较大的差距, 数值计算结果只反映了边坡在开挖卸荷“瞬间”的状态, 边坡受重力控制的变形行为采用一般的数值模拟分析手段还不能获得, 而后者才是边坡变形的“根本”。因此, 对开挖边坡而言, 施工期的变形监测极为重要。

根据以上的分析, 我们对开挖过程中该点的变形

响应可以得到以下的认识:

(1) 当开挖至1450 m高程前, 测点的变形随开挖增长较迅速, 表明在此以上的范围内开挖, 对这一“特定”点的变形有着较为显著的影响, 也就是说, 开挖对高边坡变形有显著影响的范围约为60~70 m的高度(该点的开口线高程为1511 m)。

(2) 远离以上的范围后, 即开挖至1450 m高程以下, 边坡的变形基本稳定在一定的水平上波动; 开挖对其方位(角)基本上没有影响, 但其合位移的矢量倾角仍然在“波动”式地变化, 直到2003年9月开挖至1245 m高程, 此时, 所对应的开挖高度约为270 m。也就是说, 在距离测点70~270 m高度范围内, 虽然开挖对测点变形的量值基本没有影响, 但它仍然会对合位移矢量倾角的变化产生影响, 可以视为开挖弱影响区。

(3) 至于在2003年9(~11)月后, 变形又呈现增长的趋势, 主要是由于进水口80 m直立坡的开挖, 并且该直立坡的水平退深很大, 使得该测点的变形被再次的“启动”。垂直位移由“+”变为“-”值, 合位移矢量也由俯角变为仰角, 表明此时的开挖对边坡有较大的影响, 它能够引起边坡向上的回弹变形。到2004年12月进水口开挖完成后, 测点的变形基本不再受影响。

2.2 开口线附近(外)其它监测点

位于右岸开口线外的表观位移监测点还有C2B-1B-TP-01、C2B-1A-TP-02等, 典型的监测曲线如图8~11所示, 尽管它们的位置与前述C2B-1C-TP-02有所不同, 但它们表现的总体特征是相似的(缺失2003年10月至2004年2月之间的位移监测数据)。具有以下的基本特点:

(1) 在整个3 a的监测时间内, 边坡开挖从1510~1530 m的开口线高程, 开挖至约960 m的高程, 这些测点总的变形量不大, 总位移为10~18 mm, 水平位移为10~18 mm, 垂直位移+5~-8 mm。

(2) 位移、位移矢量的倾角随时间仍然呈现出“波动”式变化的特点, 与开挖过程中每次阶段边坡的形成有很好的对应关系。

(3) 开挖强影响的高度范围在50~70 m之间, 在此范围内, 位移变化较大, 方位角与倾角等波动也较大, 所对应的时间一般为3~6个月; 测点以下的70~270 m左右的高差范围内, 为开挖弱影响区。在此高度范围内, 位移矢量方位角变化不明显, 倾角在一定范围内波动。同时, 位移量也在一定范围内稳定波动, 此时所对应的时间为8~10个月。

(4) 目前, 坡体变形基本上趋于稳定, 倾角波动较小, 其值一般维持在 $-20^\circ \sim 40^\circ$ 之间。

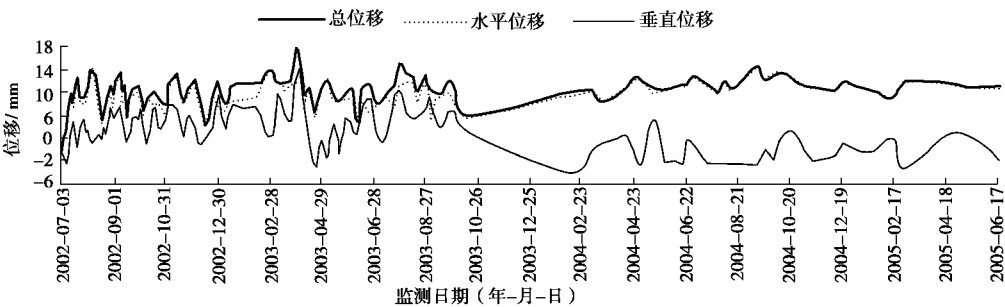


图 8 C2B-1B-TP-01 总位移、水平位移及垂直位移 - 时间曲线

Fig. 8 Curves of U , U_h and U_v with time at observation point C2B-1A-TP-02

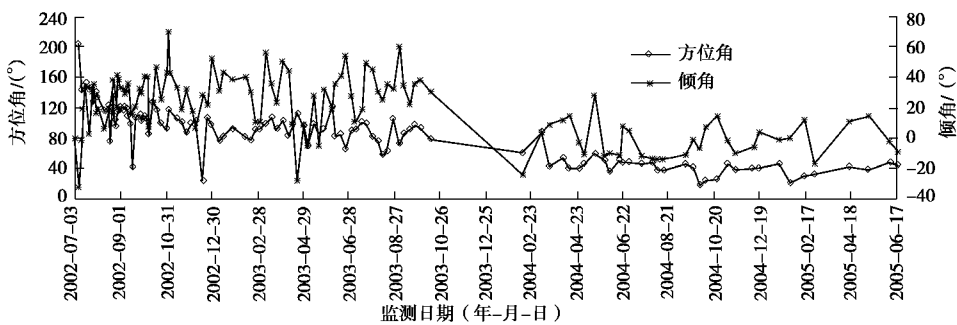


图 9 C2B-1B-TP-01 位移矢量方位角、倾角 - 时间曲线

Fig. 9 Curves of azimuth angle and dip angle of displacement vectors with time at observation point C2B-1B-TP-01

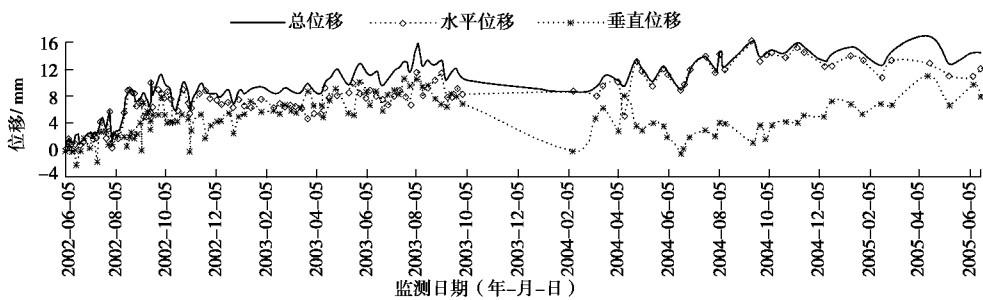


图 10 C2B-1A-TP-02 总位移(U)、水平位移(U_h)及垂直位移(U_v) - 时间曲线

Fig. 10 Curves of U , U_h and U_v with time at observation point C2B-1A-TP-02

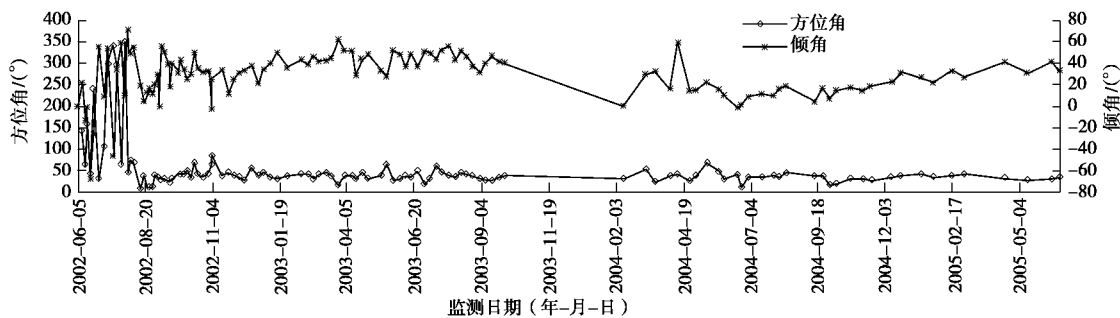


图 11 C2B-1A-TP-02 位移矢量方位角、倾角 - 时间曲线

Fig. 11 Curves of azimuth angle and dip angle of displacement vectors with time at observation point C2B-1A-TP-02

3 结 论

上述的研究表明, 边坡开挖结束后, 坡体的变形响应主要有以下规律和特点:

- (1) 边坡的变形量较小, 一般为 5~20 mm。
- (2) 研究表明: 高陡岩质边坡的开挖, 边坡的变形响应一般表现为三个阶段: 首先是“变形的快速增长阶段”, 这个阶段约为在开挖后 2~4 个月, 开挖

面至测点约 70 m 的高度范围内。第二个阶段是“变形缓慢增长阶段”，约为开挖后的 18~22 个月（由于坡体开挖的进度不同，最短可为 12 个月，最长为 22 个月均处于缓慢增长阶段），开挖面远离测点 70~270 m 之间（局部大规模开挖影响高度可达 380 m）。这之后，是变形的“稳定”阶段。

（3）边坡的变形主要受开挖的影响，宏观上表现为卸荷回弹变形。开挖结束后，变形很快稳定，“工后”剩余变形很小。这表明，岩体主要是弹性介质，变形是开挖卸荷所产生的弹性恢复，滞弹性很小。

（4）监测结果表明，对于坚硬岩体中高陡的岩质边坡开挖，边坡的变形以侧向水平卸荷回弹变形为主，垂直变形很小，约为水平变形的 9%~20%，变形矢量总体呈近水平的俯角。当边坡局部产生大规模的水平退坡开挖时，或“揭底”开挖时，将产生强烈的垂直卸荷回弹，这种回弹变形甚至可以影响到上部相当高范围的岩体（坡体）被“抬升”，导致位移矢量成“仰角”。

（5）右岸高位边坡由于受进水口边坡开挖的影响，在 2003 年 10 月之前，变形矢量为俯角（位移指向下），表明坡体的变形主要受重力控制。而此之后则变为仰角（位移指向上），表明坡体的变形主要受开挖卸荷所产生的拉张应力所控制。中低高程边坡的变形矢量一般为俯角，但局部由于受拱肩槽边坡开挖的影响而表现为仰角，这表明该部位坡体的变形同样受重力所控制。

综合分析表明，坡体的变形量较小（一般为 5~20 mm），变形深度较浅，而且在开挖 12~18 个月后，变形均趋于稳定。

参考文献:

- [1] 赵静波, 李莉, 高谦. 边坡变形预测的灰色理论研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增 2): 5799 - 5803. (ZHAO Jing-bo, LI Li, GAO Qian. Research and application of the grey theory to slope deformation prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(S2): 5799 - 5803. (in Chinese))
- [2] 赵洪波. 边坡变形预测的群体智能模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(8): 1664 - 1669. (ZHAO Hong-bo. Swarm intelligent model for deformation predicting of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(8): 1664 - 1669. (in Chinese))
- [3] 赵志峰, 徐卫亚. 基于监测与数值模拟的岩质边坡稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, **35**(4): 398 - 403. (ZHAO Zhi-feng, XU Wei-ya. Rock slope stability analysis based on deformation monitoring and numerical simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, **35**(4): 398 - 403. (in Chinese))
- [4] 贺跃光, 刘宝琛. 开挖边坡岩土体位移及变形分析中的随机介质理论[J]. 长沙交通学院学报, 2006, **22**(3): 1 - 5. (HE Yue-guang, LIU Bao-chen. Stochastic medium theory in analyzing the displacement a deformation resulting from excavating slope groundmass[J]. Journal of Changsha Communications University, 2006, **22**(3): 1 - 5. (in Chinese))
- [5] 肖克强, 周德培, 李海波. 软岩高边坡开挖变形规律的物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(1): 111 - 116. (XIAO Ke-qiang, ZHOU De-pei, LI Hai-bo. Physical modeling of deformation properties for soft rock slope under excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(1): 111 - 116. (in Chinese))
- [6] 徐平, 周火明. 高边坡岩体开挖卸荷效应流变数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(4): 481 - 485. (XU Ping, ZHOU Huo-ming. Rheological analysis of rockmass of high slope considering effects of excavation unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(4): 481 - 485. (in Chinese))
- [7] 章根德, 剡公瑞. 岩体高边坡流变学性状有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(2): 166 - 170. (ZHANG Gen-de, YAN Gong-rui. Finite element analysis for rheological behavior of rock high slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(2): 166 - 170. (in Chinese))
- [8] 郑颖人, 赵尚毅, 邓卫东. 岩质边坡破坏机制有限元数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(12): 1943 - 1952. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, DENG Wei-dong. Numerical simulation on failure mechanism of rock slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(12): 1943 - 1952. (in Chinese))
- [9] 熊诗湖, 周火明. 三峡永久船闸边坡岩体在复杂应力路径下的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(S2): 5636 - 5638. (XIONG Shi-hu, ZHOU Huo-ming. Deformation properties of rock mass of TGP permanent shiplock slopes under complex stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 5636 - 5638. (in Chinese))
- [10] 杨杰, 胡德秀, 关文海. 李家峡拱坝左岸高边坡岩体变

- 位与安全性态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(19): 3551 - 3560. (YANG Jie, HU De-xiu, GUAN Wen-hai. Analysis of high slope rock deformation and safety performance for left bank of Lijiaxia Arch Dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(19): 3551 - 3560. (in Chinese))
- [11] 戴会超. 三峡永久船闸高边坡安全监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(17): 2907 - 2912. (DAI Hui-chao. Key technologies for safety monitoring of high-rock slope of permanent shiplock of Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(17): 2907 - 2912. (in Chinese))
- [12] 聂金生, 杨东升, 姜荣梅. 龙滩水电站高边坡施工期安全监测设计与实施[J]. 水力发电, 2004, **30**(3): 65 - 69. (NIE Jin-sheng, YANG Dong-sheng, JIANG Rong-mei. Safety monitoring design and implementment during the high-slope construction period of Longtan Hydropower Station[J]. Water Power, 2004, **30**(3): 65 - 69. (in Chinese))
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] 董泽荣, 赵华, 邱小弟, 等. 小湾水电站高边坡安全稳定监测综述[J]. 水力发电, 2004, **30**(10): 74 - 78. (DONG Ze-rong, ZHAO Hua, QIU Xiao-di, et al. Summary on the safety and stability monitoring of the high side-slope in Xiaowan Hydropower Station[J]. Water Power, 2004, **30**(10): 74 - 78. (in Chinese))
- [15] 姜晨光, 姜忠平, 王纪明, 等. 基于原位监测的边坡滑动原因初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增 2): 5360 - 5365. (JIANG Chen-guang, JIANG Zhong-ping, WANG Ji-ming, et al. Primary analysis causes of slope slip based on in-situ monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(S2): 5360 - 5365. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京金土木软件技术有限公司
封 3 北京理正软件设计研究院有限公司
封 4 国网电力科学研究院南京南瑞集团公司
前插 1 武汉中科智创岩土技术有限公司
前插 2 金源土木工程仪器厂
后插 1 广州市中海达测绘仪器有限公司
后插 2 南京土壤仪器厂有限公司