

黑河黄藏寺水利枢纽工程坝前 H8 堆积体稳定性分析研究

罗延婷 刘振红 魏杰 刘建磊

(岩土工程事业部地质工程院)

〔摘要〕 基于前期工程地质勘察,通过现场地质调查分析、变形监测分析和数值模拟计算分析,对黄藏寺水利枢纽工程坝前 H8 堆积体进行稳定性研究,查明 H8 堆积体的 I 区发生滑坡的动态过程和成因,为 H8 堆积体后期的综合治理提供地质技术支持,为类似大型水利枢纽工程坝前堆积体的防治提供重要的施工经验。

〔关键词〕 黑河 黄藏寺水利枢纽 堆积体 变形监测 稳定性分析

1 前言

堆积体系指的是第四纪堆积作用形成的地质体,是基岩、古垮塌体、古崩滑体、现代崩滑体和第四系沉积体等几种或全部的组合体,属于斜坡变形破坏后的产物^[1]。随着我国西部大开发及“一带一路”战略的实施,工程建设不可避免地会遇到越来越多这类堆积体,对坝址选择、枢纽布置及库岸稳定和移民安置带来重大影响,成为高山峡谷区修建水电工程必须面对的主要工程地质问题之一^[2]。

对于大规模堆积体,无论从防护治理的策略还是施工技术上都有较大的难度^[3]。查明堆积体规模、形态特征及成因,正确认识堆积体的物质组成、结构特征及物理力学性质,客观评价堆积体的变形特征及其稳定状态,采取有针对性的预防治理措施,是水利工程建设中大型堆积体地质灾害防治的关键^[4]。

2 工程概况

黄藏寺水利枢纽工程位于青海省祁连县黄藏寺村下游约 11 km 的黑河干流上,坝址控制流域面积 7648 km²,多年平均天然径流量 12.59 亿 m³。黄藏寺水利枢纽工程正常蓄水位 2628 m,水库总库容 4.03 亿 m³,电站装机容量 49 MW,属于大(2)型、工程等别为 II 等的综合利用水利枢纽工程,被列入国家 172 项重大水利工程。

工程区属青藏高原气候区的祁连山—青海湖气候亚区,为高寒半干旱气候,多年平均降水量 406.8 mm,其中 6—9 月降水量占全年降水量的 78%。H8 堆积体位于黄藏寺坝址右岸上游,距坝线 100 ~ 550 m。

3 区域地质概况

工程区大地构造单元属祁连山地槽褶皱系,近场区的新构造运动表现以垂直升降运动为主;肃南—祁连断裂带中段距离坝址约 30 km,属于全新世活动断裂,存在发生中强以上地震的可能。近场区和场区内属于肃南—祁连断裂的东段,距离坝址(H8)最近约 1 km,未发现全新世活动证据,其最新活动时代可能为晚更新世。

工程场址位于六盘山—祁连山地震带,区域历史地震对场地的影响烈度均小于 V 度。根据地震危险性分析结果,场区地震动峰值加速度为 190 gal (0.19 g)、地震动反应谱特征周期 0.45 s,相应地震基本烈度为 VIII 度。场址区区域构造稳定性较差。

4 H8 堆积体地质条件

堆积体前缘已深入黑河中,高程 2527 ~ 2531 m,后缘高程 2710 m,高差 170 多 m;前缘宽约 400 m,后缘宽约 90 m,沿冲沟长约 500 m (见图 1)。堆积体呈前宽后窄,似“喇叭”形,分为三大区: I、II、III 区。I 区(I₁ + I₂)约 80 万 m³, II 区约 57.6 万 m³,

作者简介:罗延婷(1987),男,河南省信阳人,工程师,硕士,从事水利水电工程地质勘察工作。

Ⅲ区约 37.4 万 m^3 。



图 1 H8 堆积体原始地貌

按组成物质、结构等不同,将堆积体分为 4 层:坡积碎石类土(Q_4^{dl})、滑坡堆积物(Q_4^{sd})、坡积洪积碎石土(Q_4^{pl})、冲洪积砂砾石土层(Q_3^{sl})。下伏基岩为寒武系绿泥石英角闪石英片岩(ϵsc)。

5 施工中 H8 堆积体的变形监测

在 H8 堆积体上共设置了 22 个变形监测点。X 值“+”是向下游偏移,“-”是向上游偏移;Y 值“+”是向山体偏移,“-”是向河边偏移;Z 值为高程;单位均为“m”(见图 2)。

结合监测数据和现场变形迹象分析:I 区发生较大变形,II 区和 III 区暂未发生变形。



图 2 H8 堆积体的变形监测点分布图

5.1 I₁ 区的变形监测分析

在 I₁ 区设置了 16 个变形监测点,各监测点的累计变形曲线见图 3。

I₁ 区发生了两次加速变形:

第一次加速变形始于 2017 年 5 月 20 日,监测点向下游的变形速率为 11~28 mm/d,向河边的变形速率为 4~6 mm/d,高程每天下降 2~4 mm。至 5 月 28 日,监测点向下游累计的最大变形为 151 mm,

向河边累计最大变形为 62 mm,在高程方向累计最大变形为 23 mm。之后,为防止 I₁ 区产生滑塌,建设单位对 I₁ 区采取削坡减载、加强观测等应急处理措施,使其变形速率明显降低,使 I₁ 区正在发生的加速变形恢复至蠕变变形阶段。

第二次加速变形始于 2017 年 6 月 10 日,监测点向下游的变形速率为 45~65 cm/d,向河边的变形速率为 15~25 cm/d,高程每天下降 1~4 cm。至 6 月 18 日,监测点向下游累计的最大变形为 1.822 m,向河边累计最大变形为 0.656 m,在高程方向累计最大变形为 0.069 m。之后,建设单位对整个 I 区采取削坡减载、加强观测、截排水等应急处理措施,使其变形速率再次明显降低,使 I₁ 区正在发生的加速变形再次恢复至蠕变变形阶段。

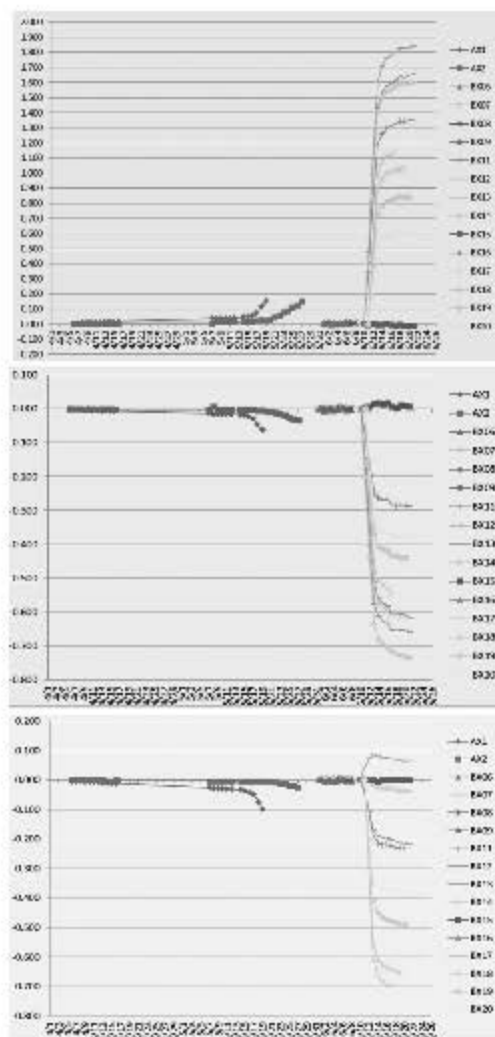


图 3 I₁ 区监测点 X、Y、Z 方向的累计变形曲线

5.2 I₂ 区的变形监测分析

2017 年 5 月 31 日,在 I₂ 区首次发现了变形裂缝,立即在 I₂ 区设置了 3 个变形监测点。各监测

点的累计变形曲线见图4。

I₂区在6月9日开始加速变形,6月10—11日产生滑动。监测点BX4的变形最大,6月10日监测点BX4向下游的变形速率为3.2 m/d,向河边的变形速率为2.9 m/d,高程下降速率为1.1 m/d;6月11日监测点BX4向下游的变形速率为9.9 m/d,向河边的变形速率为8.9 m/d,高程下降速率为2.8 m/d。至6月11日,各监测点向下游累计的最大变形为14.2 m,向河边累计最大变形为12.7 m,在高程方向累计最大变形为4.3 m。

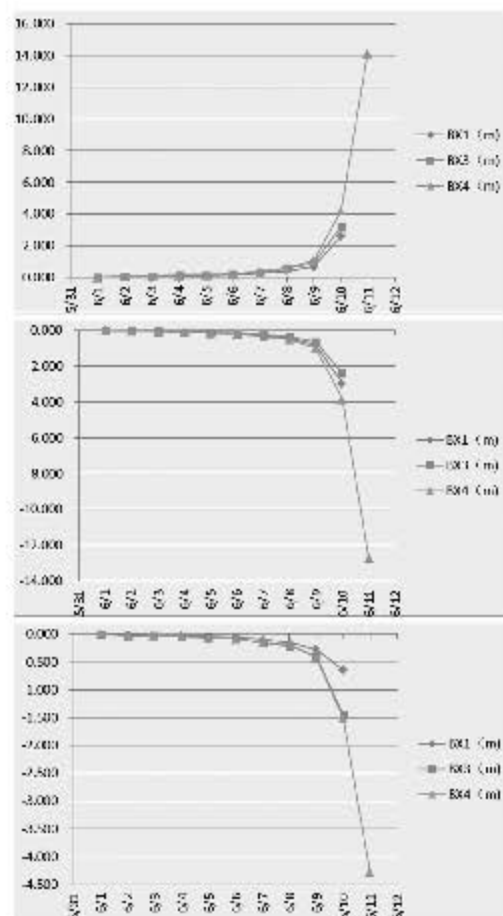


图4 I₂区监测点X、Y、Z方向的累计变形曲线

6 施工中I区的蠕动—滑动变形过程

目前,H8堆积体的变形仅发生在I区,且最终产生了滑坡,变形过程分为三个阶段:①I₁区蠕动变形;②I₁区产生滑动变形;③整个I区(I₁+I₂)产生滑动变形。

6.1 I₁区的蠕动变形阶段

前期勘察阶段,I₁区就处于蠕动变形阶段,前缘的松散物质受河水的不断冲刷淘蚀,使H8堆积体的前缘临空,并不断的向河床方向产生蠕动变形

(见图5)。



图5 前期勘察中H8堆积体前缘

2016年4月,黄藏寺水利枢纽工程开工建设,H8堆积体是通往右坝肩的必经之路,由于无法避开H8堆积体,因此,施工改变了H8堆积体的地形地貌、水文地质条件。在H8堆积体上修建了场内3号路、右岸上坝道路、施工临时拌和系统及钢筋加工场等,更加促使H8堆积体的I₁区产生蠕动变形。I₁区的前缘位于河水面之下,且不断向黑河中蠕动;I₁区的后缘产生明显的变形裂缝,裂缝不断地增多、增长,裂缝宽度一般0.5~3 cm(图6、图7)。



图6 施工中H8堆积体的地形地貌



图7 施工中I₁区后缘的变形裂缝

6.2 I₁区产生加速~滑动变形阶段

H8堆积体处于冲沟中下部,冲沟具有相对较大的汇水面积,且常年有细流。由于施工,破坏了H8堆积体原有植被,破坏了有利于排泄地表水的地形地貌条件,且未设置有效的人工防水、截水、排水措施。2017年5月,雨季开始到来,降雨不断增多,大量地表水渗入H8堆积体,使松散堆积体的抗剪强度进一步降低。

5月20—21日降雨较大,22日,I₁区产生了加速变形,平均变形速率为15~20 cm/d,后缘张裂

缝 20~40 cm, 拌合楼平台区地面下沉 30~50 cm, 前缘隆起 20~50 cm (图 8、图 9)。为防止 I₁ 区最终滑塌, 建设单位对 I₁ 区采取削坡减载、加强观测、设置截、排水等应急处理措施。



图 8 I₁ 区后缘变形裂缝



图 9 I₁ 区前缘隆起及裂缝

6.3 整个 I 区 (I₁ + I₂) 产生滑动变形阶段

为防止 I₁ 区产生滑塌, 紧急对 I₁ 区采取了削坡减载措施, 使 I₁ 区的变形逐渐减小, 但是, 由于对 I₁ 区进行了削坡减载, 使 I₂ 区的前部失去了支撑。2017 年 5 月 31 日, I₂ 区开始出现了变形裂缝, 根据 2017 年 6 月 1—9 日的变形监测数据 (8 日、9 日均有降中一大雨), I₂ 区的平均变形速率为 3.5~5.0 cm/d, 处于加速变形初始阶段。6 月 9—10 日的变形监测数据显示, I₂ 区的 1 d 的变形速率达 3.2 m/d, 至 6 月 11 日, 整个 I 区产生滑动, 后缘形成滑坡陡坎, 陡坎下错 8~15 m, 坡体变形剧烈, 裂缝纵多且密集 (见图 10、图 11)。



图 10 变形范围开始发展至整个 I 区

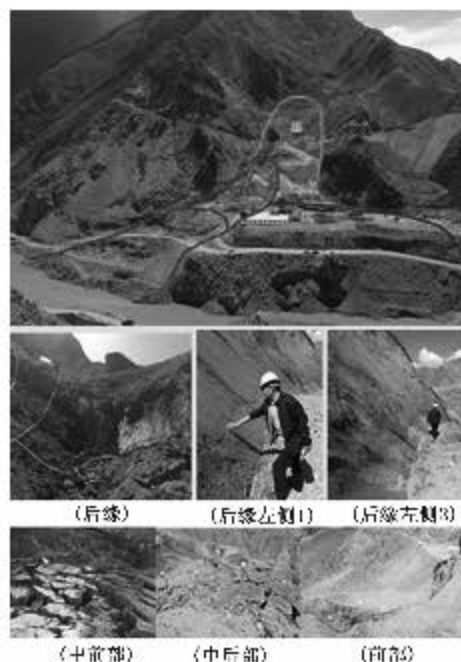


图 11 整个 I 区产生了滑动

7 H8 堆积体 I 区滑坡体的稳定性分析

7.1 I 区滑坡体的稳定性计算分析

根据 I 区的滑动变形特征, 选取主滑方向的剖面为稳定性计算分析的对象如图 12 (剖面 1-1')。综合岩土体室内物理力学试验、岩体的结构类型, 并结合相似工程的类比分析, 提出滑坡体的物理力学指标; 采用反演计算和经验值相结合的办法, 推算滑动面的物理力学指标 (表 1)。

采用摩根斯顿-普赖斯法 (M-P) 和毕肖普法 (B) 两种方法, 在天然、降雨、降雨+地震三种工况下, 稳定性计算结果见表 2。



图 12 计算剖面线平面图

由计算结果可知, 天然工况下, 原始地面线和人工改造后地面线两种计算剖面的滑坡体的稳定性系数为 1.018~1.059, 处于临界稳定状态; 在降雨的作用下, 稳定性系数下降至 0.885~0.903, 变为不稳定状态; 在降雨+地震的综合作用下, 稳定性系数下降至 0.514~0.532, 处于极不稳定状态。采用推荐削坡方案后, 天然工况下, H8 堆积体 I 区的稳定

性系数可提高至1.174,处于基本稳定状态;降雨工况,提高至1.007,处于临界稳定状态;在降雨+地震的综合作用下,稳定性系数为0.551,仍处于极不稳定状态。

表1 堆积体岩土体物理力学性质指标建议值

指标名称	容重		天然抗剪强度		饱和抗剪强度	
	天然容重 (kN/m^3)	饱和容重 (kN/m^3)	内聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ ($^\circ$)	内聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ ($^\circ$)
Q_4^{dl}	20-21	21-22	10-20	28-30	0-10	25-27
Q_4^{pat}	20-21	21-22	10-20	30-32	0-10	27-30
Q_3^{dl}	20-22	21-23	5-10	35-32	0-5	29-31
Q_4^{del}	20-22	21-23	5-8	25-28	2-5	24-26
滑带土	--	--	2-4	14-18	0-2	12-16
ϵ_{sc}	26	27	600-800	40-45	300	38-42

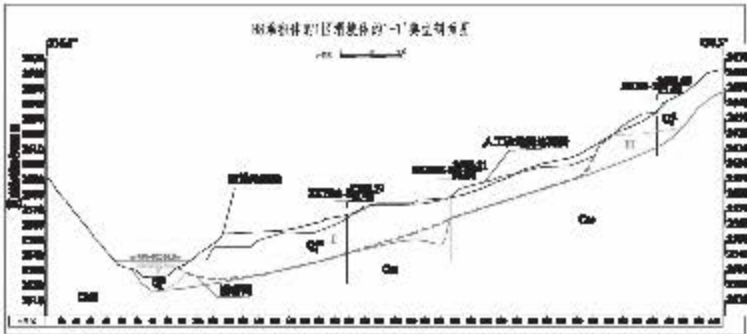


图13 计算剖面线剖面图

表2 I区滑坡体的稳定性计算结果

工况 计算剖面	天然		降雨		降雨+地震	
	M-P	B	M-P	B	M-P	B
原始地面线	1.045	1.059	0.891	0.903	0.525	0.532
人工改造后地面线	1.018	1.028	0.877	0.885	0.514	0.518
推荐削坡方案	1.174	1.181	1.007	1.017	0.551	0.555

7.2 I区产生滑坡的成因分析

I区的滑动变形为牵引式滑动;首先,I₁区发生变形;之后,变形扩展至整个I区,并最终发生滑动。初步分析导致整个I区产生滑坡的原因为:

- (1)由于雨季的到来,大量的降雨入渗至I区堆积体内;
- (2)黑河河床抬升导致滑体内地下水位抬升,弱化了滑体物质物理力学指标;
- (3)大量的降雨导致黑河水位涨幅较大,流速增加,对I₁区前缘浸泡冲刷,形成不利临空面;
- (4)H8堆积体的I区是去往右坝肩的必经之区,大量的重型清渣车及施工机械从I区高频率的经过,导致I区受到的动荷载较多;
- (5)1号道路、3号道路、左坝肩、右坝肩岩质边

坡的爆破开挖,炸药爆破产生的震动荷载对I区也有较大影响。



图14 计算模型

8 结论与建议

8.1 结论

(1) H8 堆积体呈前宽后窄,似“喇叭”形。面积约 7.7 万 m^2 ,厚度约 $10 \sim 30 \text{ m}$,总体积约 175 万 m^3 。堆积体由块碎石、块碎石土和砂砾石组成,下伏寒武系绿泥石角闪石英片岩。

(2) H8 堆积体分为三大区:Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅲ区。监测数据和现场变形迹象分析表明:Ⅰ区为不稳定区,在降雨、振动等因素的影响下产生了滑坡;Ⅱ区和Ⅲ区暂时处于稳定状态。

(3) 对 H8 堆积体的Ⅰ区的滑坡体进行稳定性计算分析,天然工况下,处于临界稳定状态;在降雨的作用下,变为不稳定状态;在降雨+地震的综合作用下,处于极不稳定状态。

(4) H8 堆积体是通往右坝肩的必经之路,正由于无法避免的人为施工扰动的影响,在降雨的诱发作用下,使本就处于不稳定状态的Ⅰ区产生了滑坡。

8.2 建议

(1) 对发生滑动变形的Ⅰ区采用削坡减载的处理措施;对整个Ⅰ区实施系统的截排水措施;

(2) 改变施工便道的线路,以避免车辆、重型机械对 H8 堆积体Ⅰ区的扰动;

(3) 加强变形观测,对整个 H8 堆积体进行变形观测,加强人工巡视,及时预警。

(4) 对类似大型水利枢纽工程坝前堆积体以绕避为先。无法避开时,在枯水期应采取有效护脚措施。禁止在堆积体上修建施工平台、施工道路等人工扰动行为。

参考文献

- [1] 简文星,殷坤龙,郑磊,等.万州安乐寺滑坡前缘松散堆积体成因与防治对策[J].地球科学,2005,30(4): 488-502.
- [2] 王自高.西南地区深切河谷大型堆积体工程地质研究[学位论文][D].成都:成都理工大学,2015.
- [3] 苏爱军,孙云志,王军怀,等.万州和平广场滑坡区堆积体物质组成特征、形成过程与防治对策[J].工程地质学报,2004,30(12): 142-146.
- [4] 张吉庆.石忠高速公路松散堆积体路堑边坡稳定性分析及处治技术研究[学位论文][D].重庆:重庆交通大学,2009.