

澜沧江某冰水堆积体演化过程及工程地质问题探讨

涂国祥, 黄润秋, 邓辉

(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 610051)

摘要: 第四纪冰期大型山岳冰川运动遗留下的大型冰水堆积体是我国西南高山峡谷地区一类重要的第四系堆积物。本世纪以来, 随着该地区大型基础工程的陆续上马, 这种大型冰水堆积体的存在常常成为工程建设必须面临的工程地质问题, 这些冰水堆积体因其形成演化过程的特殊性, 使得其在结构、物质组成、力学特性、水理特性等诸多方面与一般松散堆积体存在显著差别, 因而研究其结构特征、形成演化过程以及带来的工程地质问题具有重要意义。以澜沧江某电站坝前冰水堆积体为例, 在调查分析其结构特征的基础上, 对冰水堆积体的形成演化过程进行分析和研究, 并对冰水堆积体的工程特性, 以及带来的工程地质问题进行了探讨, 认为该冰水堆积体的工程特性明显好于其他第四系松散堆积体, 电站蓄水后整体失稳的可能性较小, 但其前缘仍存在局部失稳的可能。

关键词: 冰水堆积体; 结构特征; 演化过程; 工程地质问题

中图分类号: P642

文献标识码: A

第四纪冰期以来, 我国西南高海拔地区, 尤其是一些大江大河上游的高山峡谷地区是大型山岳冰川主要的形成、运动和消融区域。由于这些地区山高坡陡, 再加上河流下切速度快, 因此冰川运动过程携带的物质多搬运至地形相对较缓的河流谷坡位置, 冰川消融后被保留下来形成众多大型冰碛或冰水堆积体。

这些山岳冰川消融后形成的冰水堆积体, 多处于人类工程活动或工程建设活动稀少的高海拔地区, 因而工程学术界对其结构特征和成因以及引发的工程地质问题研究较少。本世纪以来, 随着上述地区各类大型基础建设的陆续上马, 大型冰水堆积常常会给工程建设带来一系列工程地质问题, 因而研究这种冰水堆积体的形成演化过程及其对工程的影响具有较大的现实意义。本文以拟建的澜沧江某电站坝前冰水堆积体为例, 对这类山岳冰水堆积体的结构特征、形成演化过程及其存在的工程地质问题进行较为深入的探讨。

拟建的澜沧江某电站位于澜沧江上游, 是我国

西部拟建的又一大型水电站。据勘探资料, 拟建坝址上游约 500 m 的左岸凸出山脊部位分布有一大型冰水堆积体, 堆积体宽约 800 m, 纵向长约 460 m, 分布面积约 331 879 m², 平均厚度约 20 m, 最大水平厚度可达 60 余 m, 总方量约 6 637 580 m³, 主要分布于 2 150~2 500 m 高程(图 1)。

1 研究区地质背景

区内河谷总体呈北北西向展布, 江水由北向南流, 河谷深切, 两岸岸坡坡度一般为 20°~65°, 局部为悬崖峭壁, 除山间盆地及两岸的阶地部位比较平缓外, 大部分地区地形切割强烈, 相对高差一般为 1 500~3 200 m, 其中最高处为甲午雪山, 高程 5 404 m, 属典型的高山峡谷区。

区内出露的地层主要为二叠系下统吉东龙组 (P_{1j})、三叠系上统红坡组 (T_{3hn}) 及第四系 (Q) 覆盖层, 其中第四系覆盖层主要为第四系更新统以来的冰水堆积体, 岸坡表层局部覆盖有少量坡积物和河

收稿日期 (Received date): 2008-07-24; 改回日期 (Accepted): 2008-10-21.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重点项目 (50539050) 雅砻江流域高边坡发育的动力过程及其工程适宜性评价资助。[This work was supported by the National Natural Science Foundation 50539050.]

作者简介 (Biography): 涂国祥, 男 (1978-), 讲师, 博士研究生, 主要从事地质工程教学和科研工作。[Tu Guoxiang (1978-), Lecturer, doctor-graduate student major in geological engineering and geotechnical engineering] E-mail: txaxx@qq.com

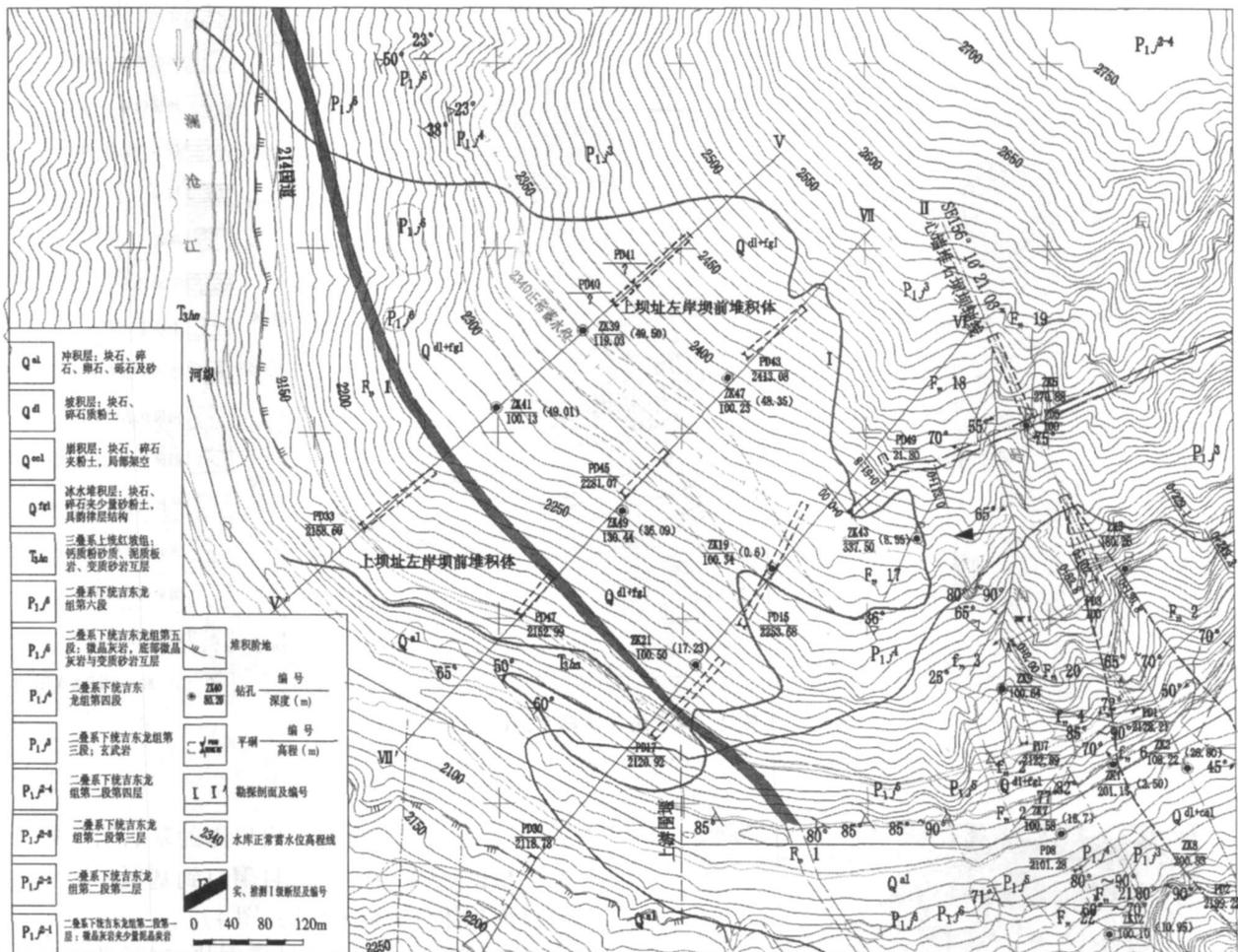


图 1 研究区工程地质平面简图 (据水电昆明院资料)

Fig 1 The geoengeining idnography of study area

流相砂卵石层 (图 2)。

研究区属青藏高原东南横断山区, 大地构造单元上, 处于唐古拉 - 兰坪 - 思茅地槽褶皱系 (I 级单元) 中兰坪 - 思茅拗陷 (II 级单元) 中部。坝址区发育的大型断裂构造主要是红山 - 古水断裂, 即区内 F1 断层, 产状直立属扭压性断裂 (图 1)。

据调查, 区内第四纪以来共经历了四次冰期, 即玉龙冰期、干海子冰期、丽江冰期和大理冰期, 其中区内冰水堆积体主要来源于第四纪晚更新世中期的冰川消融后, 伴随融水搬运堆积遗留下的产物, 其分布高程一般在 2 000~ 3 000 m。

2 堆积体结构特征

总体上冰水堆积体的物质组成以粒径 10~ 200 cm 不等的碎块石为主, 其含量占整个冰水堆积体 70%~ 80%。颗粒之间嵌合, 充填紧密, 一般呈中密

~ 密实状, 局部具弱泥质胶结, 几乎未见架空现象, 颗粒之间存在一定程度的定向排列, 宏观上具一定程度的成层特征。

从竖向来, 低高程部位的冰水堆积物无论是在密实程度, 还是在强度方面都较高高程的冰水堆积物要好。如低高程的 3[#]、4[#] (各平硐的具体位置见图 1) 等平硐开挖后基本未进行任何支护, 而平硐两壁及硐顶堆积体均能保持较好的稳定状况, 没有发生任何较大规模的塌顶和两侧硐壁坍塌的现象, 硐形完整。而 2 280 m 高程以上的平硐, 如 4[#]、4[#]、4[#]、4[#] 等平硐, 自开挖后均不同程度的出现了较大规模的塌顶及两壁坍塌现象, 有些探硐 (如 4[#]、4[#]) 上覆岩土体甚至也出现较大规模的坍塌现象, 形成明显的塌陷天窗 (图 3)。

据区内代表性平硐 (3[#] 平硐) 揭露的冰水堆积体物质成分、结构特征表明, 整个冰水堆积体的物质组成较杂, 主要由泥晶灰岩、玄武岩、板岩、变质砂岩

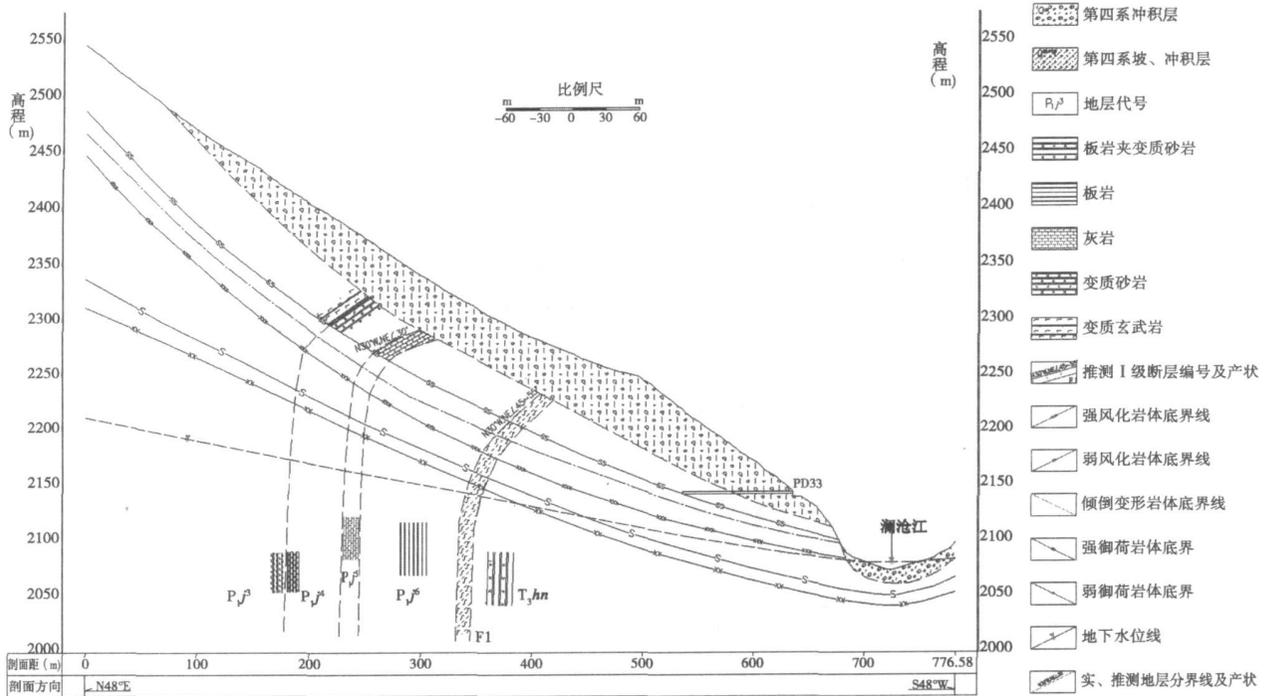


图 2 冰水堆积体典型剖面

Fig. 2 The typical cross section of the outwash deposits



图 3 4[#]平硐内 15m 硐顶上方形成的塌陷天窗

Fig. 3 The sinking pit on the top of 4[#] horizontal tunnel

等碎块石组成,其成分与区内出露的基岩岩性较为一致。根据平硐揭露情况,自硐口到基覆界限大致可将该堆积体分为以下四层(图 4):

1. 0~ 20 m, 碎石土,呈稍密状,碎石呈棱角~次棱角状,直径 > 10 cm 的约占 10%,以 10~ 30 cm 的为主,最大直径为 120 cm; 5~ 10 cm 的约占 30%,以 7~ 8 cm 的为主; 5m 以下的约占 60%,以 2~ 3 cm 的为主。

2. 20~ 43 m, 碎石土,颗粒之间大小混杂,以粗颗粒为主(约占 70% ~ 80%)没有明显的定向排列(局部位置可见不太明显的水流作用痕迹),最大颗粒粒径可达 300 cm,最小 5~ 10 cm,粗颗粒之间充

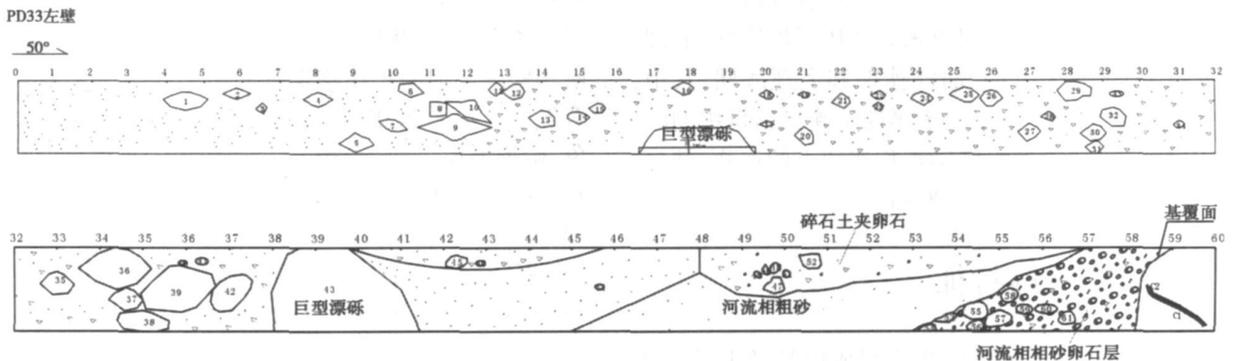


图 4 区内 33[#]平硐左壁素描图

Fig. 4. The charcoal drawing for the left wall of 33[#] horizontal tunnel

填泥质成分, 颗粒之间嵌合紧密, 一般呈中密~密实结构, 深部具有一定弱泥质胶结。

3. 43~57 m, 呈中密~密实状, 以细颗粒为主, 粒径一般在 1~5 cm, 少见粒径 > 30 cm 的漂砾, 泥粒成分少, 水流作用迹象明显, 颗粒之间存在较明显的定向排列和成层特点, 排列方向大致与坡面平行

4. 45~59 m, 稍密结构, 该层还可细分为两层, 一是 45~57 m 厚约 50~100 cm 的河流相中细砂层, 砂层内泥粒含量极少, 颗粒之间没有胶结, 呈稍密状; 另一层是下伏的河流相的卵石层, 卵石之间充填砂粒和少量泥粒, 没有胶结, 成松散状, 该砂卵石层整体上呈缓倾坡外状, 倾角约 15° ~ 20° , 具有典型的河流相二元结构特征(图 5)。



图 5 33#平硐 59 m 处出露的河流相砂卵石二元结构
Fig. 5 The dualistic structure of the sand and gravel in the 33# horizontal tunnel

现场调查期间还发现, 33#平硐下游侧, 公路上方约 20~50 m, 离现今河面约 30~80 m 范围内(高程约 2150~2180 m)于冰水堆积体前缘广泛分布有一层厚 3~8 m 厚的河流相砂卵石层, 如图 6。该砂卵石层结构松散, 具有较好的成层特点, 可进一步细分为 7 层, 每层粗细相间, 单层厚度在 20~150 cm 间, 总厚度可达 6~8 m。该砂卵石层整体上呈缓倾坡外, 倾角约 20° ~ 25° 。

另外, 据 41#、49# 钻孔(钻孔位置见图 1)揭示, 下伏于冰水堆积体, 高程约 2230 m 左右, 分布有一层厚约 3~8 m, 呈稍密状的河流相砂卵石层。

综上所述, 整个堆积体从物质成分上可分为两类, 一类是冰水堆积物, 这是整个堆积体的主体, 另一类是河流相砂卵石层, 当然还包括表层少量的崩塌积物。

其中冰水堆积物可分为三层, 即表层厚约 20

m, 以 10~30 cm 粗颗粒为主的稍密碎石土; 中部厚约 20~30 m, 以 30~200 cm 巨粒为主的中密~密实碎石土; 以及深部厚约 5~10 m, 以 1~5 cm 颗粒为主, 成层性好, 水流作用迹象明显的中密~密实的碎石土。



图 6 冰水堆积体前缘河流相覆盖层
Fig. 6 The river facies riverbed deposits in the front of the outwash deposits

而河流相砂卵石主要出露在三个部位, 一是分布于堆积体前缘高程约 2150~2180 m 范围内, 厚约 3~8 m, 结构松散, 二元结构明显的砂卵石层; 二是分布于 33#平硐内 45~59 m, 高程约 2150~2160 m 范围内, 稍密结构, 二元结构明显的砂卵石层; 三是 41#、49# 钻孔揭露的分布于 2230 m 高程左右, 厚约 3~8 m 的砂卵石层。冰水堆积体与各砂卵石层之间的接触关系如图 2 所示。

通过上述分析表明, 该冰水堆积体与其他松散堆积体在物质成分、结构特征等方面的主要有以下几点区别:

1. 组成冰水堆积体的固体颗粒, 其粒径分布范围较广, 既有粒径超过 3 m 以上的巨大漂砾, 也有一定含量的粘粒成分。但主要仍以 10~200 cm 的粗颗粒为主。

2. 组成冰水堆积体的粗颗粒之间嵌合紧密, 组成冰水堆积体的主要骨架, 其他细颗粒物紧密充填其中, 颗粒之间几乎没有架空现象, 密实程度较高, 一般呈中密~密实状, 局部具有一定程度的胶结。

3. 冰水堆积体的固体颗粒大多遭受过水流作用, 因此其固体颗粒大多具有一定程度的定向排列和成层特点, 但由于水流作用强度较低, 搬运距离较短, 其颗粒磨圆一般较差, 大多呈次棱角状。

3 冰水堆积体形成演化过程

据现场调查以及前人研究成果,区内沿澜沧江一些地段发育 5~6 级阶地,如图 7 所示。其中, T_1 多为堆积阶地, T_2 以上的阶地类型以基座阶地为主,但在局部河段也有堆积阶地出现。 T_1 为全新世阶地; $T_2 \sim T_3$ 为晚更新世阶地; $T_4 \sim T_5$ 为中更新世阶地, T_6 阶地可能为早更新世阶地。图中所见的古水村位于研究区下游约 800 m。

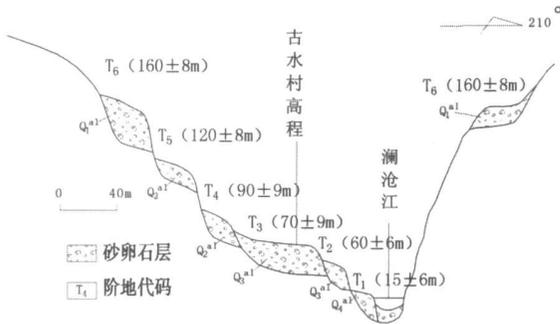


图 7 澜沧江阶地剖面示意图 (据水电昆明院资料)

Fig 7 The cross section of terrace Lancang

根据坝前堆积体中出露的砂卵石层的结构特征、分布高程等特点,可以推测 3[#]平硐底部揭露的砂卵石层应属澜沧江三级阶地的产物,而 4[#]、4⁹钻孔揭露的砂卵石层应属澜沧江五级阶地的产物,至于中间的四级阶地,由于缺乏相应的勘探资料,目前还无法判断是否在冰水堆积体底部存在残留物。

根据堆积体中各阶地遗留砂卵石层与冰水堆积体的接触关系,以及澜沧江各级阶地的形成时期,可以对冰水堆积体的形成时期得出如下判断,即冰水堆积体的形成时期应晚于澜沧江三级阶地,大概形成于晚更新世中期。而覆盖于堆积体前缘的砂卵石层,应晚于冰水堆积体,即大概形成于晚更新世中晚期。

依据冰水堆积体、各砂卵石层的形成先后关系,以及接触关系,可以对坝前堆积体的形成演化过程得出以下推断:

1. 冰水堆积体形成前,处于澜沧江宽谷期,河流下切作用较缓,以堆积作用为主。第四纪以来,随着该地区地壳间歇式抬升运动,在其左岸形成现今的澜沧江三级以上各级阶地,而后河流进一步下切形成如图 8-I 所示的河谷底貌,该时期该段澜沧江水面高程应在高于 2 080 m,而低于 2 150 m。

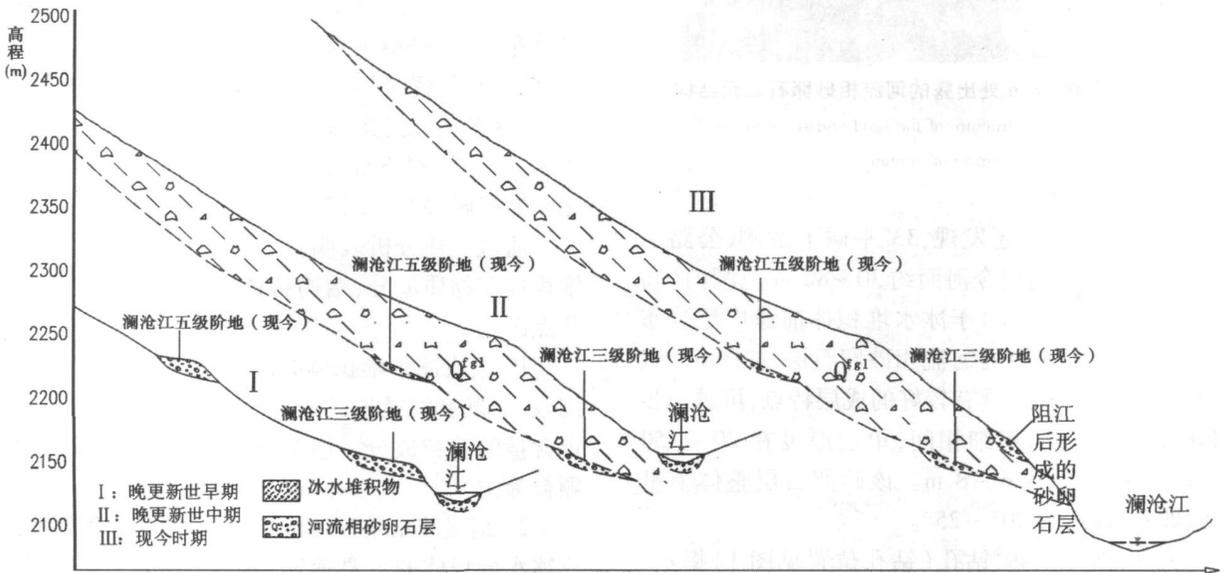


图 8 坝前堆积体形成过程

Fig 8 The evolution process of the deposits in front of dam

2. 澜沧江三级阶地形成以后,在间冰期期间,形成于研究区左岸后方甲午雪山的第四系冰川在重力和冰水压力作用下向河谷山麓运动,并在冰川融水的搬运、堆积作用下形成早期冰水堆积体。在冰

川消融期间,由于早期冰川堆积地貌地形较陡,并且冰川消融速度较快,导致冰川沉积物被快速向下搬运而覆盖于三、五级阶地之上,这一过程中一方面导致部分三、五级阶地被侵蚀破坏,另一方面造成江面

过水断面被压缩甚至被堵, 其结果导致该段江水位上升, 同时使得江面向右岸产生一定程度的改道, 由于江水位在相当长的一段时期保持在较高水位, 因此河流在该部位产生堆积, 形成河流相砂卵石层覆盖于冰水堆积体之上, 即现今所见堆积体堆积体前缘的砂卵石层, 如图 8- II。

3. 再后来在河流下切作用下, 江水位快速下降, 下降过程中使得堆积体前缘一部分砂卵石及其下伏冰水堆积体被河流冲走, 而另一部分仍保留下来, 形成现今所见河谷形态, 如图 8- III。

4 存在的工程地质问题

4.1 冰水堆积体物理力学特性

如前文所述, 由于冰水堆积体形成时期较早, 经过长期的压实作用, 堆积体内粗颗粒之间嵌合紧密, 除表层外, 一般呈中密~密实状, 局部还具有一定程度的胶结作用, 据现场试验测定其天然容重可达 23.2 kN/m^3 , 这些特点决定了冰水堆积体具有较一般第四系堆积体高的强度特性, 如堆积体内已开挖的平硐大多具有较好的自稳能力。据扰动样的抗剪强度试验结果表明, 天然状态下其 C 值可达 $107 \sim 120 \text{ kPa}$ 摩擦角 φ 可达 $35^\circ \sim 39^\circ$, 即使在饱水状态下, 其 C 值仍可达 $62 \sim 80 \text{ kPa}$ 摩擦角 φ 可达 $32^\circ \sim 34^\circ$ 。

据渗透试验, 冰水堆积体具有较好的透水特性, 其渗透系数一般在 $0.002 \sim 0.005 \text{ cm/s}$ 之间, 这决定了蓄水后在库水位变动期间难以在堆积体内产生较大的孔隙水压力。

4.2 存在的工程地质问题

由于上述冰水堆积体规模巨大, 并且紧邻初拟的坝址, 电站蓄水高程 2340 m , 蓄水后堆积体大部分位于水下, 一旦发生整体失稳破坏将会的威胁拟建坝址的安全和电站正常运行的安全。因此正确分析蓄水后堆积体的稳定性对保证电站安全施工和运行具有重要意义。

调查研究表明, 自冰水堆积体形成后, 在较长期的地质历史过程中没有出现较大规模的失稳破坏, 说明天然状态下冰水堆积体的整体稳定性良好。

从冰水堆积体形成演化过程来看, 冰水堆积体形成初期, 其前缘在较长的时期内处于澜沧江江面以下, 而这也并没有诱发冰水堆积体出现整体式的失稳破坏, 因此从这一点来看, 蓄水后冰水堆积体出现

整体式失稳破坏的可能性较小。

当然应该看到, 堆积体前缘表层的碎石土由于受到风化等因素的影响, 其结构较松散, 一般呈稍密状, 强度较低, 加上堆积体前缘临空面较陡 ($40^\circ \sim 50^\circ$), 因此蓄水后这部分岩土体可能会诱发失稳破坏。

为更好地论证上述判断, 笔者还对蓄水后堆积体的稳定性状况进行了有限元数值分析, 如图 9~图 10 计算参数如表 1 所示。

表 1 各岩土体计算参数

Table 1 The calculating parameter of the rock mass and soils

岩土体名称	弹性模量 (kPa)	泊松比	内聚力 (kPa)	摩擦角 ($^\circ$)
冰水堆积体(水上)	1.00E+05	0.35	107	37.5
冰水堆积体(水下)	9.00E+04	0.36	62.9	32.4
强风化岩体(水上)	9.00E+05	0.33	320	44
强风化岩体(水下)	8.00E+05	0.34	280	38
断层(水上)	2.00E+05	0.34	90	30
断层(水下)	1.00E+05	0.35	50	28
弱卸荷岩体(水上)	7.00E+06	0.3	750	47
弱卸荷岩体(水下)	6.00E+06	0.31	720	45
新鲜岩体	2.00E+07	0.23	1300	55
砂卵石(水下)	7.00E+04	0.37	10	22

有限元数值计算结果表明, 蓄水后堆积体整体上并未形成连续贯通的塑性破坏区和剪应变集中带, 因此可以认为其整体稳定性良好, 但在堆积体前缘浅表层已经基本形成了连续贯通的塑性破坏区和剪应变集中带, 表明蓄水后将可能在这些部位形成贯通的失稳破坏面, 因而堆积体前缘存在局部失稳的可能。

采用刚体极限平衡方法计算得到蓄水后堆积体最危险破坏面如图 11 所示, 稳定性系数为 0.855 , 再次证明蓄水后堆积体前缘局部可能失稳, 因而必须采取相应的治理措施。

5 结论

综合上述分析, 可以对该坝前冰水堆积体的结构特征、演化过程和存在的工程地质问题得出以下基本认识和结论:

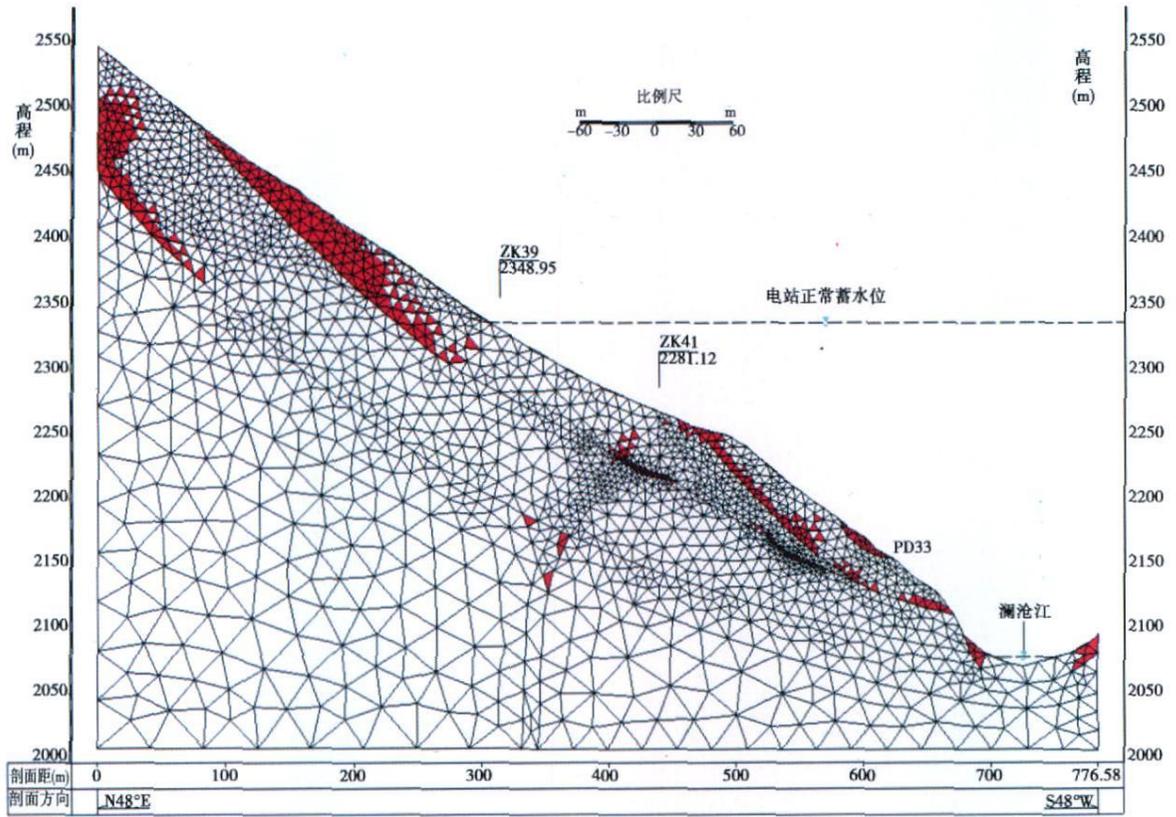


图9 蓄水后堆积体塑性区特征

Fig. 9 The character of plastic zone in the deposits after reserving

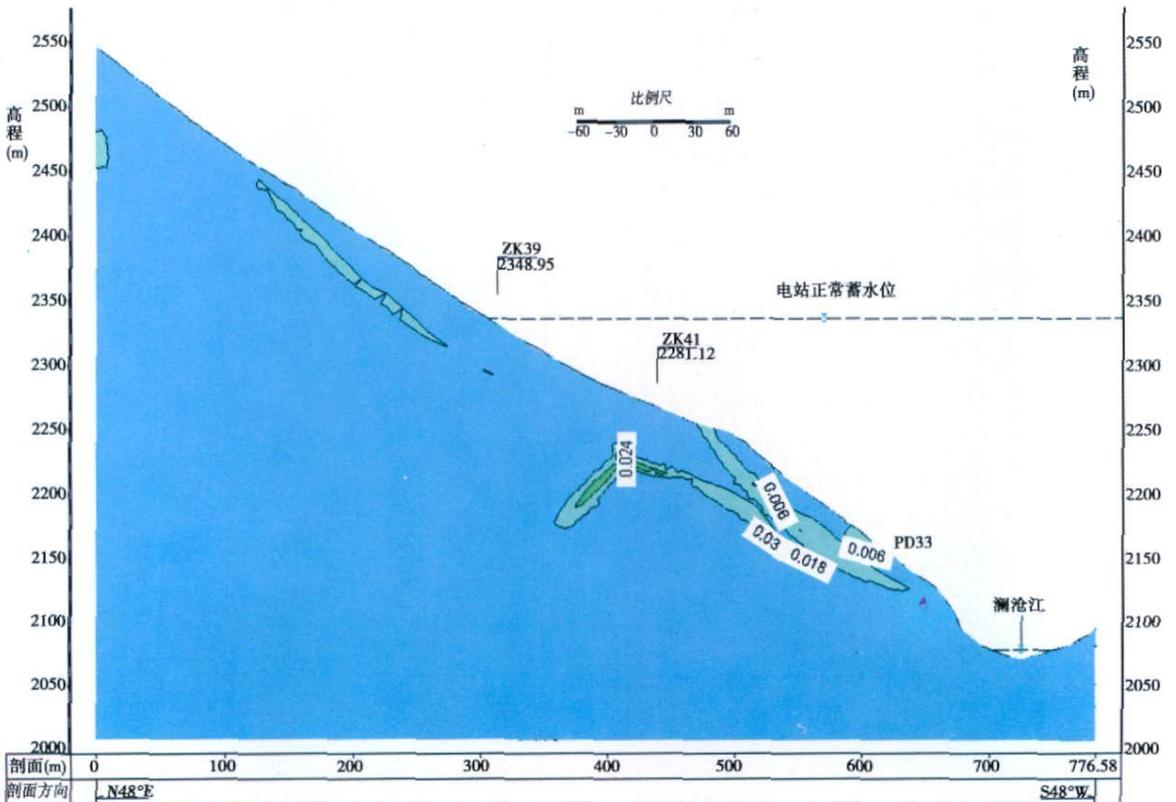


图10 蓄水后堆积体剪应变特征

Fig. 10 The character of shear strain in the deposits after reserving

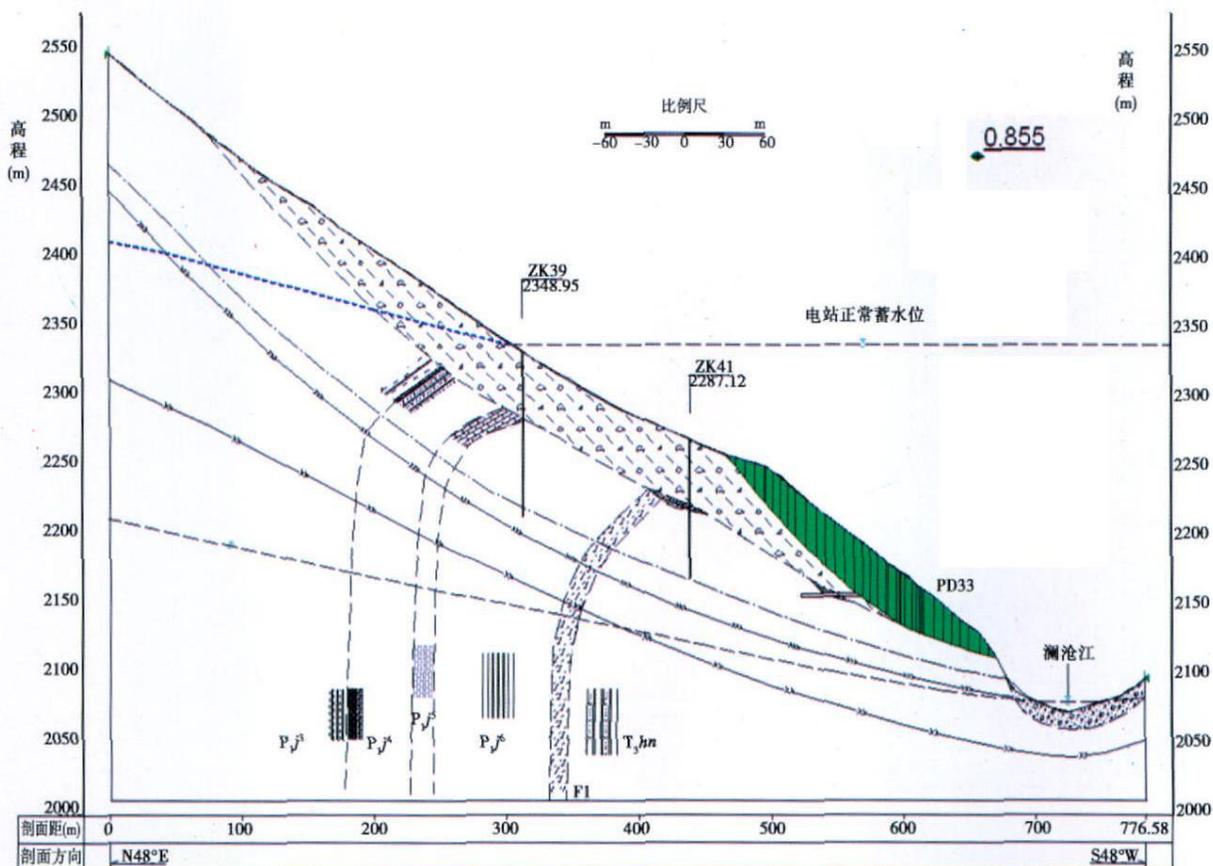


图 11 蓄水后堆积体最危险破坏面 ($F_s = 0.855$)

Fig 11 The sliding surface in the deposits after reserving

1. 整个冰水堆积物可分为三层, 即表层厚约 20 m, 以 10~30 cm 粗颗粒为主的稍密碎石土; 中部厚约 20~30 m, 以 30~200 cm 巨粒为主的中密~密实碎石土; 以及深部厚约 5~10 m, 以 1~5 cm 颗粒为主, 成层性好, 水流作用迹象明显的中密~密实的碎石土。

2. 由于受到长期压实作用和融冰水流作用, 冰水堆积体具有较高的强度特性, 和较好的透水特性, 使得在长期的地质历史过程中冰水堆积体能保持较好的稳定性。

3. 该冰水堆积体应形成于晚更新世中期, 即澜沧江三级阶地形成后。其演化过程可分为三个阶段, 即冰水堆积体形成前, 三级以上阶地形成后的澜沧江宽谷期, 冰水堆积体向河谷运动后形造成澜沧江水位抬升时期, 以及河谷进一步下切形成现今河谷形态时期。

4. 该冰水堆积体面临的主要工程地质问题是电站蓄水后的稳定性问题, 研究表明, 蓄水后该堆积

体整体稳定性良好, 但其前缘存在局部失稳的可能, 必须采取相应的治理措施。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principles of Engineering Geology[M]. Beijing: Geologic Press, 1993 [张俅元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理 (第二版) [M]. 北京: 地质出版社, 1993]
- [2] Tu Guoxiang, Huang Runqiu. Study on the deformation and failure mechanism of consequent slopes at a dam site of a hydropower station in southwestern China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005, 32(3): 278~283 [涂国祥, 黄润秋. 某水电站坝肩顺坡向变倾岩质边坡变形破坏机制研究 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2005, 32(3): 278~283]
- [3] Zhang Yongshuang. Research on the Engineering Geological Properties of Moraine/Outwash Rocks on the West Side of the Yulong Mountains [J]. Geoscience, 2007, 21(1): 150~156 [张永双. 玉龙雪山西麓冰碛 (水) 砾岩的工程地质特性研究 [J]. 现代地质, 2007, 21(1): 150~156]
- [4] Wang Zong-tai. Geographical characteristics of the distribution of

- glaciers in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(3): 231~ 237 [王宗太. 中国冰川分布的地理特征 [J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 231~ 237]
- [5] Zhu Dagang. Quaternary glacial deposition and glacial advance and retreat in the Zanda basin and its surrounding mountains in Ngari Tibet [J]. *Geology in China*, 2006, 33(1): 86~ 97 [朱大岗. 西藏札达盆地及周缘高山区第四纪冰川堆积及冰川进退 规程讨论 [J]. 中国地质, 2006 33(1): 86~ 97]
- [6] The research center of the quaternary Glacier and Environment of China Quaternary Glacier and Environment of Western China [M]. Beijing: Science Press, 1991 [中国第四纪冰川与环境研究中心. 中国西部第四纪冰川与环境研究 [M]. 科学出版社, 1991]
- [7] Małgorzata Pisarska-Jamroy. Transitional deposits between the end moraine and outwash plain in the Pomeranian glacial marginal zone of NW Poland—a missing component of ice-contact sedimentary models [J]. *Boreas*, 2006 35(1): 126~ 141
- [8] Kurt H. K&er. Architecture and sedimentation of outwash fans in front of the Mýrdalsjökull ice cap, Iceland [J]. *Sedimentary Geology*, 2004 172 139~ 163
- [9] B. D. Smerdon. Interaction of groundwater and shallow lakes on outwash sediments in the sub-humid Boreal Plains of Canada [J]. *Journal of Hydrology*, 2005 314 246~ 262
- [10] Jasper Knight. Morphology and paleoenvironmental interpretation of deformed soft-sediment clasts—examples from within Late Pleistocene glacial outwash, Tempo Valley, Northern Ireland [J]. *Sedimentary Geology*, 1999 128 293~ 306

Discussion about the Evolution and the Geoengineering Problems of an Outwash Deposits, Lantsang

TU Guoxiang HUANG Runqiu, DENG Hui

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention And Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, Sichuan, China)

Abstract The outwash deposits which are left behind by the movement of mountain glacier is an important kind of deposits in the Quaternary Period in the southwest area of China. Since this century, a lot of large-scale projects have been continuously made. Those outwash deposits have constituted geoengineering problems of those projects. Because of the special evolution, those outwash deposits are different to some ordinary compact deposits in structure, components, mechanical characteristic, Hydrolytic Weakening Properties, and other facet. So it is very significant to research the outwash deposits' structural characteristic and origin and the geoengineering problems. In this paper, through a case study of the outwash deposits in front of a dam in Lantsang, we have investigated the outwash deposits' structural characteristic. Based on this, we have studied the evolution of the outwash, the engineering properties and the geoengineering problems of the deposits. We have drawn a conclusion that the engineering properties are better to other ordinary compact deposits, and the whole stability of the outwash deposits is good, but it's possible that the front part of the outwash deposits will fail after the power station reserving.

Key words outwash deposits; structural characteristic; evolution; geoengineering problem