

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

技术专著系列

坝基冰水沉积物特性 与工程应用

周恒 赵志祥 狄圣杰 王有林 等著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

技术专著系列

坝基冰水沉积物特性 与工程应用

周恒 赵志祥 狄圣杰 王有林 等著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书在充分总结以往研究成果的基础上,采用地质理论分析、岩土工程试验测试、数值分析等方法和技术,分析了坝基冰水沉积物的主要工程地质问题,针对建坝方案设计 with 地基处理等工程应用进行了技术创新,取得了丰富的科研成果和良好的应用效果。所制定的地质分层方法及岩土质量工程地质分类分级方法和标准,为坝基岩土的有效利用提供了依据。采用强度指标测试新技术,确保了设计所需力学参数的真实性、安全性。所提出的软基闸坝工程渗流控制标准,为协调变形控制及止水设计提供了充分的科学依据。应用低频振动荷载对厂房软弱地基变形和应力影响的系统分析方法,为大坝设计及基础处理方案的选择和电站的安全运行奠定了基础。研究成果已成功应用于青藏高原多项大中型水利水电工程冰水沉积物勘察设计及建坝应用中,取得良好社会效益与经济效益,具有广阔的推广应用前景。

本书可供水利水电行业工程勘察、试验研究、工程设计人员研究借鉴,也可供高等院校相关专业本科生和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

坝基冰水沉积物特性与工程应用 / 周恒等著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2020.9
ISBN 978-7-5170-8837-0

I. ①坝… II. ①周… III. ①坝基—沉积物—研究
IV. ①TV64

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第171375号

书 名	坝基冰水沉积物特性与工程应用 BAJI BING-SHUI CHENJIWU TEXING YU GONGCHENG YINGYONG
作 者	周恒 赵志祥 狄圣杰 王有林 等著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	清淤永业(天津)印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17.75印张 432千字
版 次	2020年9月第1版 2020年9月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	108.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

在我国青藏高原地区的一些大江大河的河谷地带广泛分布着一套形成于第四纪的冰水沉积物，其在河床中的深度可达数十米或五六百米。如西藏境内的多布、老虎嘴、雪卡、金桥、沃卡、波堆等水电站，青海省境内的哇沿、哇洪、香日德、温泉、那棱格勒、引大济湟水利工程均遇到冰水沉积物问题。西藏雅鲁藏布江米林坝址河床冰水沉积物深达 520m、帕隆藏布流域松宗坝址冰水沉积物深 420m、尼洋河多布水电站沉积物厚达 360m、尼洋河支流老虎嘴电站沉积物厚达 180m；青海那棱格勒水库冰水沉积物厚度在 150m 以上，哇沿水电站沉积物厚度在 95m 以上，这些超深、巨厚、混杂堆积的冰水沉积物在漫长的形成演化地质历史过程中，受沉积环境变化影响，大多具有结构松散、分布不连续、成因类型复杂、物理力学性质不均匀等特征。因此，冰水沉积物是一种地质条件差且复杂的地质体。随着国民经济的持续发展，青藏高原及其梯度过渡带地区各类大型水利水电工程的规划建设，冰水沉积物常常构成了大坝地基的地质背景条件，成为制约水电勘察设计与建设运行的一个重要因素，给水利水电工程建设带来了极大的难度。因此，对该类冰水沉积物的工程特性以及工程应用中面临的突出问题开展专门深入的研究尤为迫切。

自 20 世纪 80 年代以来，根据水利水电工程筑坝技术的需要，虽然国内外许多学者、工程技术人员对第四纪一般的河流砂砾石层的勘察技术方法、筑坝适宜性等方面进行了较为深入的研究，取得了众多成功的工程经验，然而对冰水沉积物这一特殊地质体的工程特性及筑坝应用等方面还缺乏深入、系统性的研究，给水利水电工程建设的规划选址、勘察设计及安全运行等带来了诸多不利影响。因此对坝基冰水沉积物特性及工程应用关键技术进行总结提升是非常有必要的。

本书主要内容是作者 20 多年理论与工程实践经验的系统总结，依托西藏、青海等地区十余个工程、多项专题研究成果，围绕目前深（巨）厚冰水沉积物上筑坝所面临的勘察技术与筑坝应用共性和相似的技术难题，通过开展一

系列前瞻性、基础性及工程应用适宜性等科技攻关，取得了多项创新技术和研究成果，成功解决了冰水沉积物勘探、试验、测试、评价方法、工程处理措施等技术性难题。本书依托具体工程实践，对青藏高原冰水沉积物的形成演化过程及其与古气候环境的关系等进行了有益探索；对冰水沉积物的成因分类、分布韵律、岩土特性、岩组划分、物理力学特性、渗透性质、岩土体质量工程地质分级、力学参数的选取等诸多方面进行了分析研究；在坝基冰水沉积物中砂土地震液化判定及防治处理、冰水沉积物渗流场特征及防渗处理、坝基抗滑稳定性评价及加固等筑坝应用方面进行了深入分析和研究，提高了水利水电工程冰水沉积物筑坝技术水平，保证了诸多水利水电工程的施工和运行安全，社会和经济效益显著，具有良好的科研价值和推广应用意义。

本书共 12 章。第 1 章主要叙述了冰水沉积物的理论研究现状和筑坝应用现状。第 2 章主要归纳总结了我国冰水沉积物的分布、成因类型和堆积特征。第 3 章对冰水沉积物勘察要点、勘察技术难题及对策、地层序列建立方法、地层分层方法及要求等方面开展了研究。第 4 章系统总结了冰水沉积物地球物探勘探方法的选择、适宜性，并以依托工程为例，开展了综合物探测试方法的研究。第 5 章分析了冰水沉积物物理力学性质试验方法的适宜性和优缺点，并采用原位大型剪切试验、载荷试验、钻孔旁压试验和界面接触及软弱土强度等方法研究了冰水沉积物的强度特性。第 6 章主要依托实际工程，开展了注水试验、钻孔注水试验和同位素示踪法测试等渗透试验，并通过对比试验，分析了不同测试方法的适宜性。第 7 章主要论述了深厚冰水沉积物的参数取值要求和方法，以依托工程为例，研究了冰水沉积物的渗透规律、变形强度特性，尝试提出了适合于冰水沉积物的工程地质分级方法。第 8 章在分析砂层地震液化影响因素的基础上，对砂层液化的不同判别方法进行了论述。第 9 章论述了冰水沉积物渗流场、渗漏损失及模拟计算方法，分析了冰水沉积物的渗透破坏类型，对坝基渗漏数值模拟方法进行了研究，对不同冰水沉积物地层结构防渗墙的适宜性以及深度和范围进行比选，在此基础上总结得到了防渗体系设计原则、安全标准及安全评价方法。第 10 章依托实际工程，采用三维有效应力有限元法计算冰水沉积物坝基及坝坡在静动力条件下的抗滑稳定性。第 11 章论述了冰水沉积物坝基的变形破坏类型和稳定性评价方法，并以依托工程为例，开展了坝基抗滑稳定性、坝基应力变形特征等的研究。第 12 章论述了建在冰水沉积物上的厂房机组动荷载及脉动水压力对厂房与地基基础结构振动作用的分析方法，以及低频振动荷载对基础变形和应力影响的分析方法，并以依托工程为例，给出了合理的厂房地基处理措施。

本书是集体智慧的结晶，凝聚了中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司水利水电建设一线行业专家和技术人员的汗水和心血。值此西北院建院七十周年之际，期望本书的出版能为水利水电工程建设者提供便利和帮助。另外，青海省水利水电勘测设计研究院、成都理工大学等单位众多的专家、学者和工程技术人员参加了本书内相关成果的研究工作，也付出了辛勤的劳动，贡献了聪敏才智，在此表示诚挚的谢意。在撰写过程中，中国科学院赖远明院士、国家勘察大师徐张建、陕西省勘察大师谭新平悉心指导了本书的编撰工作。本书除主要著者周恒、赵志祥、狄圣杰、王有林外，任苇、焦健、白云、何小亮、陈楠、刘潇敏、涂国祥、王文革、李积锋、李洪等同志也做了大量的现场调查、勘探试验、资料分析、成果整编等基础性工作，为本书积累了丰富的资料，并做出了卓越贡献。在此一并致谢。

由于作者的水平和时间有限，书中不妥或错误之处在所难免，恳请同行批评指正。

作者

2020年8月于西安

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 本书主要研究成果	9
2 青藏高原冰水沉积物成因类型及特征	13
2.1 冰水沉积物形成时代	13
2.2 冰水沉积物成因类型	16
2.3 冰水沉积物物质组成及结构特征	18
2.4 典型工程冰水沉积物时代及河谷发育史	22
3 冰水沉积物工程地质勘察	29
3.1 冰水沉积物勘察要点	29
3.2 冰水沉积物勘察技术	30
3.3 冰水沉积物地层序列建立方法	34
3.4 冰水沉积物地层分层与岩组划分	36
3.5 典型工程超深冰水沉积物地质勘察	38
4 冰水沉积物地层物探测试	41
4.1 冰水沉积物地球物理特征分析	41
4.2 物探测试要求及方法	44
4.3 剪切波快速测试技术及应用	48
4.4 多道瞬态瑞雷波勘探应用	52
4.5 大地电磁法地球物理探测应用	59
5 冰水沉积物物理力学性质试验	63
5.1 试验方法的适宜性	63
5.2 原位大型剪切试验	63
5.3 旁压试验	71

5.4	现场载荷试验	82
5.5	界面接触及软弱土强度参数试验方法	85
5.6	典型工程物理力学性质试验	95
6	冰水沉积物水文地质试验	111
6.1	试坑注水试验	111
6.2	钻孔注水试验	115
6.3	同位素示踪法水文地质测试	119
6.4	自由振荡法试验	126
6.5	典型工程不同方法的水文地质试验适宜性对比分析	130
7	冰水沉积物工程地质特性及建坝适宜性	133
7.1	冰水沉积物的物理力学参数	133
7.2	冰水沉积物渗流规律	138
7.3	冰水沉积物变形及强度特性	142
7.4	典型工程冰水沉积物的物理力学特性	150
7.5	冰水沉积物工程地质分级	154
7.6	冰水沉积物地基的坝型适应性	157
7.7	冰水沉积物坝基利用及处理	157
8	冰水沉积物砂层地震液化判定及防治措施	161
8.1	砂层地震液化影响因素	161
8.2	砂层液化判别方法	162
8.3	典型工程冰水沉积物砂土液化判定	166
8.4	坝基液化处理安全标准及防治措施	169
9	冰水沉积物坝基渗流特性及防渗处理	175
9.1	渗流场及渗漏损失估算	175
9.2	渗透稳定评价	185
9.3	坝基防渗方案	198
9.4	坝基防渗体系及工程措施	201
10	冰水沉积物坝基及大坝整体抗滑稳定	222
10.1	大坝稳定三维有限元计算分析	222
10.2	计算参数选取	226
10.3	单元离散、模拟方法及计算方案	228
11	冰水沉积物坝基变形稳定	233
11.1	坝基变形破坏类型及稳定评价	233
11.2	典型工程冰水沉积物坝基变形稳定评价	234

11.3 大坝及坝基应力变形性状分析	243
12 冰水沉积物地基在厂房动荷载作用下应力变形特性及处理措施	255
12.1 机组动荷载及脉动水压力作用下厂房与基础结构振动分析	255
12.2 低频振动荷载对基础变形和应力的影响分析	262
12.3 厂房地基处理	263
参考文献	269

1 绪 论^{*}

1.1 研究目的和意义

第四纪更新世是我国青藏高原山区地质历史上一个重要的时期，期间发生的多起地质事件至今仍对人类生产生活构成影响。该地区更新世的冰川形成、运动及其消融就是在这些众多地质事件中的一个典型事件。

已有研究成果表明，我国第四纪以来共经历了5次冰期，其时代初步定为：小冰期Ⅲ（1871±20 A. D.），小冰期Ⅱ（1777±20 A. D.），小冰期Ⅰ（1528±20 A. D.）；新冰期Ⅲ（1550±70a B. P.，1580±60a B. P.），新冰期Ⅱ（2.8—2.5ka B. P.），新冰期Ⅰ（3.1ka B. P.）；末次冰期Ⅳ（11.5—10.4ka B. P.），末次冰期Ⅲ（24—16ka B. P.），末次冰期Ⅱ（56—40ka B. P.），末次冰期Ⅰ（73—72ka B. P.）；倒数第二次冰期（相当于MIS 6—10），Ⅲ阶段（154—136ka B. P.），Ⅱ阶段（277—266ka B. P.），Ⅰ阶段（333—316ka B. P.）；倒数第三次冰期（相当于MIS 12—16），Ⅱ阶段（520—460ka B. P.），Ⅰ阶段（710—593ka B. P.）。其中发生在更新世的主要是末次冰期、倒数第二次冰期和倒数第三次冰期。这些冰期时代，在我国西部山区发育了众多山岳冰川，冰川内部携带大量地表松散物质。

我国青藏高原距今最近的三次大规模抬升运动也是发生在第四纪更新世。据彭建兵等的研究成果，在更新世期间，青藏高原发生了三次大规模的隆升运动，分别是青藏运动、昆黄运动和共和运动，如图1.1-1所示，受此影响，主要河流的现代河谷特征也大多形成于这一时期。

冰水沉积物是冰川消融时冰下径流和冰川前缘水流的沉积物，大多数是原有冰碛物经过冰融水的再搬运、再堆积而成，因此冰水沉积物的分布与冰川的分布和活动密切相关。

我国冰水沉积物主要分布于西部地区，包括天山、昆仑山、念青唐古拉山、喜马拉雅山、喀喇昆仑山、冈底斯山、祁连山、横断山、唐古拉山等山脉，同时羌塘高原、帕米尔山地、阿尔泰山、准噶尔西部山地等区域也有分布，其中在青藏高原地区分布较为集中，主要分布于藏东南，即念青唐古拉山东南段、喜马拉雅山脉东段、横断山脉的贡嘎山等冰川的前缘、沟谷和现代河床中。另外，在我国东北的长白山一带也有冰水沉积物分布。

西北地区气候严酷、干燥、降水少，冰川物质补给少，消融作用弱。藏东南地区因受印度洋季风的影响，富有海洋性气候特征，气候湿润，降水丰富，雪线海拔低，补给物质

* 本章由赵志祥、王有林、白云执笔，狄圣杰校对。

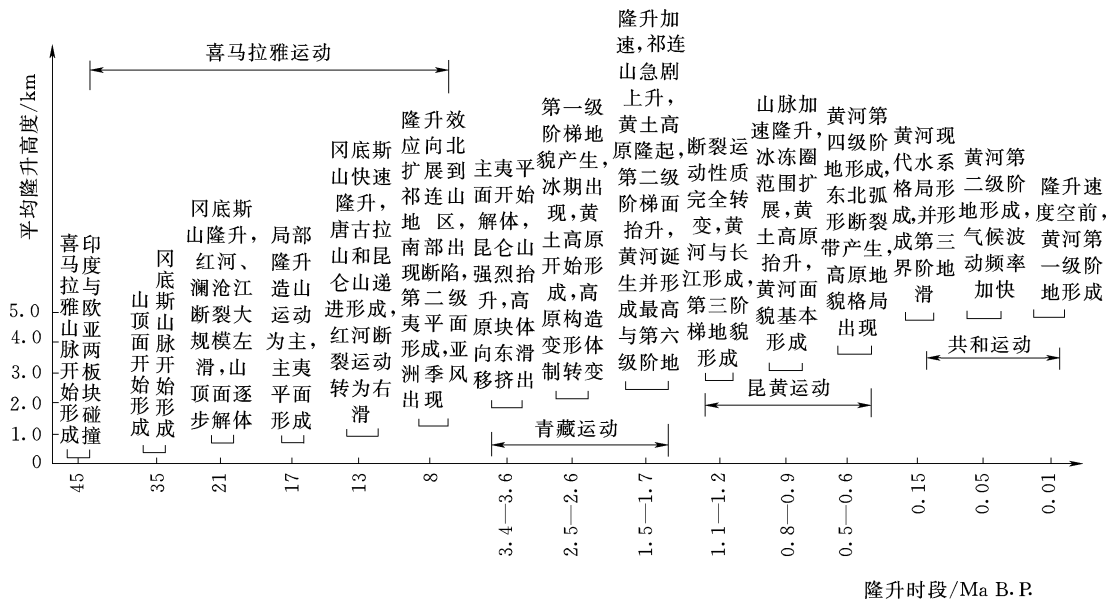


图 1.1-1 青藏高原隆升过程示意图 (据彭建兵, 2004)

丰富, 冰川活跃, 消融量大, 冰水沉积物厚度大。

冰水沉积物常见于大型水利水电工程建设中。其在工程中表现为软弱的基质松散材料中存在大颗粒物质, 表现出典型的多元介质特征, 颗粒分布具有明显的不同尺度特征、不均匀特征和随机分布特征, 是在重力堆积、水流堆积、风化残积、构造作用等综合冰川堆积作用下形成的, 具有成因、结构及工程地质特征等复杂性, 较目前传统岩土力学、岩石力学相对复杂, 严重制约和影响了我国青藏高原地区水利水电的开发。

青藏高原冰水沉积物成因类型复杂。冰水沉积物主要在第四纪冰期与间冰期形成, 具备的特征有规律可循, 主要表现为颗粒粒径分布范围广、物质成分复杂, 结构密实, 少见架空现象。其独特的沉积特征及特殊的工程特性, 给工程地质勘察带来了较大挑战。尤其是在勘察技术野外地质判定鉴别与分层、地层序列的建立尤为突出, 相应的冰水沉积物地球物理勘探测试技术、物理力学试验方法、水文地质试验方法以及冰水沉积物中砂层的地震液化判定问题也相对复杂和独特, 应采用创新手段和综合方法进行研究, 以查明冰水沉积物的工程地质特性, 详细且精确地给出其物理力学参数、水文地质参数。对青藏高原地区冰水沉积物进行工程地质特性研究, 是合理分析其坝址适宜性和应用的基础。

另外, 在冰水沉积物上建坝涉及其本身在附加压力作用下的应力变形分析, 坝基变形稳定、抗滑稳定分析, 以及坝基处理和防渗设计等方案的确定, 应在掌握详细工程地质条件的基础上进行合理判定和分析, 为水利水电工程建设提供可靠依据。

本书通过对青藏高原地区数个大型水利水电工程的冰水沉积物沉积特征、颗粒组成、结构特征的详细调查和分析, 对冰水沉积物的形成演化过程及其与古气候环境的关系等进行了探索; 在大量试验及工程分析的基础上对青藏高原典型冰水沉积物的渗流特性、强度

特性、变形特性等进行了较为深入的分析和研究；提出了坝基冰水沉积物工程地质分级方法，并对筑坝适宜性进行了研究；最后根据坝基冰水沉积物中砂土地震液化判定及防治处理措施、冰水沉积物渗流场特征及防渗处理措施、坝基抗滑稳定性等工程地质问题进行了评价；依托多布、金桥、雪卡、巴塘、哇沿、波堆、引大济湟等十余个大型水电水利工程，开展青藏高原冰水沉积物工程地质特性及建坝应用研究。目前，诸多修建在冰水沉积物上的水利水电工程已安全运行数年，其勘察设计和建设经验可为青藏高原地区同类工程提供参考。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 冰水沉积物成因及特性研究现状

1.2.1.1 第四纪冰川运动研究现状

一般来说，西方国家对于第四纪冰川的研究始于德国学者彭克（Penck）在 1885 年提出的阿尔卑斯山冰期理论，他和布吕克纳（Brückner）共同撰写的《冰期中的阿尔卑斯山》于 1909 年出版。国内对于第四纪冰期的研究始于 20 世纪 30 年代李四光先生的庐山冰期理论，其撰写的《冰期之庐山》出版于 1937 年。

近年来，国内外学者针对中国西部第四纪冰川问题开展了大量的研究，卓有成效。学者们普遍认为第四纪更新世以来，我国西部经历了多期冰川作用。但是对于我国西部第四纪以来的冰川规模、持续时间、期次仍存在诸多争论。

2002 年，施雅风总结其数十年研究成果，提出了我国第四纪冰期的划分方案。2004 年易朝路等在施雅风的基础上进一步提出了我国第四纪以来共经历了 5 次冰期。其时代初步定为：小冰期（ 1871 ± 20 A. D. — 1528 ± 20 A. D.）、新冰期（ 1550 ± 70 ka B. P. — 3.1 ka B. P.）、末次冰期（ 10.4 — 73 ka B. P.）、倒数第二冰期（ 136 — 333 ka B. P.）、倒数第三冰期（ 460 — 710 ka B. P.）。

对于第四纪冰期划分一直以来都是争论的热点。2000 年郑本兴在《云南玉龙雪山第四纪冰期与冰川演化模式》中通过大量对比研究的基础上，总结了国内外学者对玉龙雪山第四纪冰期的划分成果，进而提出了整个第四纪冰期划分标准及冰川类型。

1.2.1.2 冰水沉积物形成时期及演化过程研究现状

郑本兴是国内较早对冰水沉积物开展深入研究的学者之一，2001 年在对磨西台地成因进行研究时指出，磨西台地的主体为倒数第二次冰期的冰川沉积物，其中也包括有冰水砂砾层透镜体和冰湖相等沉积。磨西台地出露地表的巨大砾石，直径在 $10 \sim 20$ m 之间，多数为冰川表面的消融碛，也可能有冰水泥石流夹带的大岩块。磨西台地两侧断续分布有 4 级冰水阶地及尾部均为末次冰期后期至全新世的冰水沉积。

2007 年，赵希涛通过对金沙江河谷冰水沉积物的研究，认为金沙江河谷地带分布的冰水沉积物主要来源中更新世中晚期的干海子冰期和丽江冰期冰川消融的产物，并且指出在干海子—丽江间冰期和丽江—大理间冰期期间，金沙江石鼓镇段曾出现冰川快速消融，大量冰水搬运的物质快速运动至金沙江河谷地带，导致金沙江被堵，形成著名的金沙江石鼓古湖。

赵希涛、郑绵平等于 2007 年通过研究金沙江云南迪庆小中甸古湖的形成演化，揭示

在金沙江迪庆段分布一套形成于距今约 $147.2 \pm 13.9 - 67.57 \pm 5.30$ ka B. P. 中更新世中晚期的湖相沉积物, 该沉积物年龄大致与下游石鼓段冰水沉积物相当, 据此推断第四纪中更新世中晚期金沙江与石鼓段曾有被冰水沉积物堵塞的可能。

2008年, 张明、胡瑞林在研究金沙江梨园水电站的下咱日沉积物成因和演化过程时指出: 下咱日沉积物应是中更新世的金江冰期和晚更新世的丽江冰期两次冰期的作用结果, 结合到该堆积前缘的湖相沉积物, 进一步推测金沙江在中更新世时期曾经被大量冰川、冰水沉积物所堵塞, 形成古堰塞湖。

2008年, 张永双、赵希涛在云南省西北部德钦县古水一带深切的澜沧江河谷中发现了一套第四纪湖相沉积物, 以纹层状黏土、粉砂质黏土和粉砂的互层组合为特征, 构成了第三级和第四级阶地的基座。剖面顶部、中部和中下部黏土的U系法年龄测定结果分别为 (52.3 ± 3.4) ka、 (64.2 ± 5.6) ka 和 (81.9 ± 6.5) ka, 认为古水古湖形成于晚更新世早中期的末次间冰期晚期和末次冰期的早冰阶与间冰阶早期, 很可能是大型冰川(如下游的明永冰川等)或巨量的冰水沉积物堰塞了澜沧江河谷而造成的结果。

2008年, 涂国祥、黄润秋在《澜沧江某冰水堆积体演化过程及工程地质问题探讨》一文中指出, 澜沧江上游古水水电站坝前堆积体, 固体颗粒大多遭受过水流作用, 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~亚磨圆状, 冰水堆积体与阶地存在复杂的接触关系, 先是冰水堆积体上覆于三级、五级阶地之上, 在冰水堆积体前缘又出现三级阶地反覆盖于冰水堆积体之上的现象, 因此推测该冰水堆积体形成时代应与澜沧江三级阶地形成时期相当, 其形成过程中曾导致澜沧江堵塞。

成都理工大学王运生、黄润秋在研究我国一些大江大河河谷深厚覆盖层的成因时指出: “在中国西部末次冰期, 存在一次强烈的侵蚀事件” “近年来中国西部主要江河的水电梯级开发过程中, 大量的河床钻孔资料揭示, 西部与末次冰川有联系的江河具有深厚覆盖层现象, 河床覆盖层厚一般为 $40 \sim 70$ m, 最厚处超过 500 m。年龄测定资料揭示, 谷底沉积物年龄一般都在 $20 \sim 25$ ka; 也就是说, 现在西部一些河床的基覆界面在距今 25 ka 前就已形成, 这一年龄刚好相当于末次间冰段结束。作者认为, 由于距今 $40 \sim 25$ ka 西部地壳快速抬升, 气候变暖, 末次间冰段冰川快速消融, 江河水量迅速增加所具有的巨大侵蚀力是造成中国西部晚更新世晚期强烈侵蚀事件的主要原因。这次事件发生于三级阶地形成之后的末次间冰段, 当时河流强烈侵蚀至现今谷底的基覆面, 在末次冰盛期堆积回填, 并在后期重新下切形成二级、一级及正常的河床相堆积。”

综合国内外研究成果, 一般认为第四纪更新世中晚期我国曾出现气温明显升高、冰川快速消融的地质现象, 冰川融水携带大量松散物质堆积于河谷地带, 曾导致主要河流出现多处堰塞。

1.2.1.3 冰水沉积物结构特征研究现状

张永双在研究玉龙雪山山麓冰水沉积物时指出, 中国冰川沉积物的宏观特征现场调查结果表明, 母岩和胶结物成分的不同可以造成冰川沉积物的性质有很大的差异。根据胶结物类型和胶结作用程度, 可以把冰川沉积物分为钙质胶结和泥砾质胶结两种。在玉龙雪山山麓发育的冰川沉积物中, 玉龙冰期冰碛物胶结程度最高, 干海子冰期冰碛物胶结程度较

高, 丽江冰期、大理冰期冰碛物的胶结程度较差, 但丽江冰期和大理冰期的冰水沉积物具有较好的胶结特征。为了便于区分和工程应用, 张永双建议将胶结程度高的玉龙冰期冰碛物称为冰碛砾岩, 将丽江冰期和大理冰期的冰水沉积物称为冰水砾岩。

钟建华在研究柴达木盆地冰水沉积物时也提到, 柴西冰水沉积岩性及其岩性组合有下列几个特点: ①低能的冰水沉积—冰水纹泥和块状泥往往与高能的砾石组合在一块, 而且有时呈直接接触关系, 表明沉积环境直接由高能过渡到低能; ②柴西冰水沉积厚度不等, 厚者可达 7.89m, 表明不同部位存在着沉积沉降分异; ③砾石均松散, 未固结, 表明未经受明显的成岩作用。

谢春庆通过对川西冰水沉积物结构特征的研究也发现: 第四纪更新统以来的冰水沉积物大多具有较好的泥质胶结, 当沉积物内含钙质成分的颗粒较多时, 甚至具有一定程度的钙质胶结, 由于其形成时间较久远, 该冰水沉积物大多呈中密~密实状, 天然密度一般在 20kN/m^3 以上。

2009 年, 张永双在总结其多年对冰川、冰水沉积物研究成果的基础上, 提出冰川、冰水沉积物在沉积特征、物质组成上具有以下特点: ①颗粒组成的不均一性和多元性; ②组构单元的双元性; ③结构的无序性和胶结性。常表现为巨粒土、粗粒土和细粒土的混杂堆积, 其颗粒组成具有显著的不均一性。冰碛物中大漂石(块石)大者直径可达 10m, 而其中细粒填隙物的黏土颗粒直径可小于 $1\mu\text{m}$, 两者之比高达数百万倍。典型冰川沉积物的不均匀系数平均值达 496.3, 冰水沉积物的不均匀系数通常低于平均值, 冰碛物的不均匀系数非常之高, 有效粒径之小, 是其他第四纪沉积物无法比的。

张明、胡瑞林在研究金沙江梨园水电站的下咱日沉积物时发现, 该冰水沉积物与河流相砂卵石以及湖相沉积物存在复杂的接触关系: 第一部分为灰岩漂石、碎块石及少量粉土, 排列杂乱, 块石的粒径主要为 $10\sim 100\text{cm}$, 棱角状, 磨圆度很差, 粒径悬殊。第一部分被第二部分分为上下两层, 被分隔的下层中逐渐出现少量的卵砾石, 卵砾石磨圆度差别较大, 有的磨圆较好, 有的棱角分明, 磨圆度很差, 粒径一般为 $1\sim 5\text{cm}$ 。第二部分由粒径为 $2\sim 10\text{cm}$ 的卵砾石层、粒径为 $1\sim 2\text{cm}$ 的砾石夹黏土层互层组成, 层理清晰。第三部分为河流冲积层, 厚约 7m, 上面 3m 为粗砂及粉质黏土层, 为漫滩相沉积, 下面 4m 为卵砾石层, 卵砾石的粒径主要为 $1\sim 2\text{cm}$, 主要为长石、石英。第四部分成分与第一部分相同, 灰岩漂石、碎块石夹杂粉质黏土, 排列杂乱, 为第一部分崩塌到上台地堆积而成, 由于雨水的作用, 表面形成一定程度的胶结, 在表面形成约 $30\sim 50\text{cm}$ 的硬壳。

涂国祥、邓辉等在对河谷冰水沉积物长期研究过程中发现, 冰水沉积物颗粒粒径分布范围广、物质成分复杂, 组成冰水沉积物的颗粒大小相差悬殊, 其中主要以巨颗粒和 $60\sim 2\text{mm}$ 的粗颗粒为主, 土体不均匀系数高, 组成沉积物的物质成分复杂, 且大多属远源物质; 结构密实, 少见架空现象, 一般呈中密~密实状, 大多还具有一定程度的泥质或弱钙质胶结; 其结构上仍保留有一定程度的水流作用痕迹(如成层性), 但由于水流作用时间相对较短, 搬运距离较短, 因而其颗粒大多磨圆较差, 呈次棱角~亚磨圆状, 沉积物中往往含有呈透镜体状展布的黏土条带, 并且也揭示了冰水沉积物大多与河流覆盖层以及古土壤之间存在复杂的接触和相互掩埋关系。

1.2.1.4 冰水沉积物工程地质及力学特性研究现状

国内针对冰水沉积物工程特性的研究始于 20 世纪 90 年代,目前仅有的一些零星探索、研究工作也仅局限于某些特定的条件。

1989 年,屈智炯等较早对瀑布沟电站的冰川、冰水沉积物的力学性质进行了探索,认为其应力-应变特性属于非线性弹塑性,在 $50\sim 3500\text{kN/m}^2$ 压力范围内其破坏包线近似于直线。在低压下,呈直线变化且体积剪胀;在高压下,呈应变硬化且体积剪胀,成都科技大学建议的简化 K-G 模型比其他模型更为适用于该类沉积物。

1997—1998 年,范适生针对冶勒水电站冰川、冰水成因半胶结型河床覆盖层的物理力学性质进行较为深入的探索,认为冶勒盆地半胶结砾石层颗粒组成级配较好,骨架孔隙填充充填密实,结构具明显的钙质胶结特征,结构强度较高。在前期固结压力作用下,土层密度值较大,孔隙比较小,孔隙连通性差,具有承载能力高、压缩性低、渗透性弱、抗渗性好、抗剪强度高、抗液化能力强的特性,作为堆石坝基础较为理想。

2004 年,金仁祥对某电站坝基下伏的冰水堆积层的渗流稳定性进行了研究,提出了冰水沉积物的渗透变形类型、临界水力梯度。2007 年,于洪翔等通过对旁多水电站冰水沉积物的研究认为:其结构表现为分选差,磨圆差,砾卵石有强风化现象,黏性土透镜体、冰漂砾及泥砾发育,局部存在粉土质砂透镜体、第四系冲积物捕虏体,连续性差,含泥量明显高于现代河床冲积物,随深度增加,孔隙变小,密度增大。渗透性具有整体上随深度增加而变小,从平面上和剖面上有不均一性,在空间各个方向上渗透性具有明显差异的特征。允许水力坡降具有明显的不均一性,破坏形式为管涌型。

2009 年,袁广祥、尚彦军、林达明对帕隆藏布流域的冰碛物、冰水沉积物进行研究,认为其具有粒度分布范围广、粗粒含量多等与其他沉积物不同的粒度特征。冰碛物粒度分布范围广的特征导致随着研究尺度的不同,其结构特征也不相同,具有明显的尺度效应。冰碛土的力学强度一般强于其他沉积物,但受不同粒径颗粒的含量及分布、形成时代的影响,其力学特征也有所差异。

涂国祥、邓辉等对大渡河中游汉源河谷地带,澜沧江古水水电站坝前的冰水沉积物渗流特性、强度特性进行了较为深入的研究,认为:冰水沉积物的透水能力较差,渗透系数一般在 $10^{-3}\sim 10^{-5}\text{cm/s}$ 之间,表现出一定程度的层流~紊流过渡状态的特点,其抗剪强度较高,在剪切破坏过程中存在较明显的应变强化和剪胀现象,其强度包络线在低应力水平下呈直线状,在高应力水平下呈非线性下凹形。

1.2.2 冰水沉积物筑坝应用研究现状

众所周知,冰水沉积物和冰水堆积体严格意义上是有区别的。本书所述及的冰水沉积物是河流的冰水沉积物的正常沉积;而冰水堆积体可定义为是冰川、冰碛物等堆积成因,多分布在现今岸坡上。

据资料检索,目前涉及冰水沉积物的系统研究尚少,主要集中在冰水堆积体方面。工程实践主要涉及以下三个领域:①影响工程设施安全的冰水堆积体稳定性评价,如王文远、李开德等依托澜沧江古水水电站坝前堆积体完成了中国水电工程顾问集团公司科技项目“冰水堆积体工程地质特性研究”;②将冰水堆积体作为路基填料、堆石坝填料的适宜性问题,主要以澜沧江古水水电站根达坎冰水堆积体和争岗冰水堆积体为例,通过试验分

析,探索其作为堆石坝心墙防渗土料的可行性;以梨园水电站为例,探索其作为堆石料的可行性;③冰水堆积体作为路基适宜性问题,成都理工大学涂国祥在其毕业论文中进行了岗子上隧道进口冰水堆积体稳定性评价及治理措施研究,以及青杠咀沿库高速公路冰水堆积体路基岸坡稳定性评价及防护措施研究。

21世纪以前,人类工程活动涉及冰水沉积物的较少,尚未形成专门针对冰水沉积物工程问题的系统研究方法和理论;21世纪以来,随着人类工程活动进一步向西部深山峡谷地带延伸,由冰水沉积物造成的工程问题日益突出,受到人们越来越多的关注,但是其研究方法多沿用针对其他岩土体的方法体系。

1.2.2.1 冰水沉积物建坝实例

深厚冰水沉积物是指厚度大于40m的第四系河床松散沉(堆)积物,这些冰水沉积物具有结构松散、分布不连续、成因类型复杂、物理力学性质不均匀性等特点,因此是一种地质条件差且复杂的地质体。

我国的冰水沉积物多分布于环青藏高原的高山峡谷河流及其第一梯度与第二梯度的过渡带上,而这些地区又是我国水能资源最为丰富的地区。已建成或在建的多布、金桥、沃卡、老虎嘴、哇沿、温泉、雪卡以及正在开工建设的巴塘、那棱格勒、引大济湟、哇洪、香日德等水利水电工程均遇到厚达数十米甚至数百米的河床冰水沉积物。如青海那棱格勒的冰水沉积物厚度均在150m以上,西藏雅鲁藏布江米林水电站沉积物厚达520m、西藏帕隆藏布松宗坝址区沉积物厚达420m,西藏尼洋河多布水电站沉积物厚达360m,西藏巴河老虎嘴左岸防渗体沉积物厚达180m。

表1.2-1为依托工程或据相关工程统计所得的典型河流地带发育的冰水沉积物分布情况。

表 1.2-1 典型河流地带冰水沉积物分布情况

河 流	工程名称	所属省份	最大深度/m	形成时期	备注
察汗乌苏河	哇沿水库	青海	84.4	Q ₃	正在建设
哇洪河	哇洪水库	青海	49	Q ₃	
香日德河(托索河)	盘道水库	青海		Q ₂ ~Q ₃	
	香日德水库	青海	110	Q ₂ ~Q ₃	
格尔木河支流雪水河	温泉水库	青海		Q ₂ ~Q ₃	
那棱格勒河	那棱格勒河水库	青海	140.88	Q ₁ ~Q ₄	
雅鲁藏布江	里龙水电站	西藏	260.5	Q ₂ ~Q ₃	规划阶段
	本宗水电站	西藏	115.5	Q ₂ ~Q ₃	规划阶段
	米林水电站	西藏	520	Q ₂ ~Q ₃	规划阶段
大通河	黑泉水库	青海	35	Q ₃	已运行
	引大济湟	青海	体积大于2000万m ³	Q ₃	正在建设
沃卡河	沃卡水电站	西藏	体积大于2000万m ³	Q ₂ ~Q ₃	已发电
	白堆水电站	西藏	体积大于3500万m ³	Q ₂ ~Q ₃	已发电
尼洋河	多布水电站	西藏	360	Q ₂ ~Q ₃	已发电

续表

河 流	工程名称	所属省份	最大深度/m	形成时期	备注
巴 河	老虎嘴水电站	西藏	180	Q ₂ ~Q ₃	已发电
	雪卡水电站	西藏	180	Q ₂ ~Q ₃	已发电
易贡藏布	金桥水电站	西藏	180	Q ₂ ~Q ₃	已发电
	忠玉水电站	西藏	79	Q ₂ ~Q ₃	预可研
	夏曲水电站	西藏	100	Q ₂ ~Q ₃	预可研
帕隆藏布	松宗坝址	西藏	440	Q ₂ ~Q ₃	规划
大渡河	冶勒水电站	四川	>420	Q ₂ ~Q ₃	已发电
	金川水电站	四川	63	Q ₂ ~Q ₃	正在建设
金沙江	巴塘水电站	西藏与四川	55.5	Q ₂ ~Q ₃	正在建设

由于冰水沉积物结构松散、工程地质性状差等多方面因素，在沉积物上修建大坝特别是高坝时易产生坝基承载变形、渗漏与渗透变形、沉降与差异沉降、固结、抗滑稳定、砂土液化、软土震陷等许多工程地质问题。冰水沉积物不仅严重影响和制约了水电工程坝址的选择、流域水电资源的规划与开发利用，同时也给水工设计如坝型选择、枢纽布置、防渗措施等方案的选择带来巨大的困难。因此，在冰水沉积物上筑坝的技术一直是水利水电行业研究的重点技术问题。

目前，我国已建、在建工程中，心墙或趾板直接置于冰水沉积物上的土石坝最大坝高已超过 110m。九甸峡面板堆石坝最大坝高达 133m，已建成的察汗乌苏、九甸峡冰水沉积物利用深度均超过了 40m。西藏多布水电站冰水沉积物地基上的闸坝及厂房高 55.8m，建基面埋深 53~60m，厂房基础持力层为含块石砂卵石层，以下 1~6m 为中~细砂层，属于国内外领先水平；多年与运行和监测成果资料表明，其变形和沉降等各项指标均满足设计要求。国外在冰水沉积物上建造面板堆石坝比较有代表性的是智利的 Santa Juana 坝和 Puclaro 坝，前者坝高 106m，冰水沉积物最大厚度 30m，后者坝高 83m，冰水沉积物最大厚度 113m。被誉为“西藏三峡”的旁多水利枢纽工程大坝为碾压式沥青混凝土心墙砂砾石坝，坝顶高程为 4100m，最大坝高 72.3m，坝基冰水沉积物最大厚度 150m。冶勒水电站大坝为沥青混凝土心墙堆石坝，坝高 124.5m，坝基冰水沉积物最大厚度大于 420m。

冰水沉积物上的闸坝受闸门挡水高度限制，一般小于 35m。多布水电站混凝土闸坝高达 55.8m，为目前国内外冰水沉积物上的最高闸坝。随着水利水电工程建设和筑坝技术的进一步发展，今后将对冰水沉积物勘察技术提出更高的要求。

青海省境内的黑泉水库属于高坝大库，坝体断面大，坝基范围大；坝基冰水沉积物覆盖层厚度大，成因复杂，为了查明其工程特性，前期做了大量勘探试验工作，取得了一定的成果。根据蓄水前坝体沉降观测，坝体最大沉降值为 412mm，相应的沉降率为 0.448%，与设计三维计算结果（最大沉降 653.3mm）相差较大；根据已有观测值推算工程竣工和蓄水后最大沉降值为 500mm，小于大坝最终沉降量为最大坝高 1%的预计量。该工程的建设，为高山峡谷，高寒、高海拔地区冰水沉积物上修建面板砂砾石坝积累了