



深厚覆盖层防渗技术

杨晓东 覃新闻 郑亚平 黄小宁 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

深厚覆盖层防渗技术

杨晓东 覃新闻 郑亚平 黄小宁 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

深厚覆盖层防渗技术在工程中的成功应用,需要针对其地质条件采取适宜的防渗型式。本书列举了国内外具有代表性的工程实例,论述了不同地质条件的深厚覆盖层采取的各种防渗结构形式,防渗墙和帷幕灌浆是垂直防渗的主要技术手段。结合新疆下坂地水利枢纽坝基防渗工程的设计和施工,详细探讨了防渗墙和帷幕灌浆的施工技术,并对坝基防渗效果的监测和观测设计,及对施工和施工质量检查、评价等,均进行了介绍。

本书可供从事工程防渗设计和施工的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

深厚覆盖层防渗技术 / 杨晓东等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.12
ISBN 978-7-5084-9378-7

I. ①深… II. ①杨… III. ①覆盖层技术—防渗工程
IV. ①TV64

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281471号

书 名	深厚覆盖层防渗技术
作 者	杨晓东 覃新闻 郑亚平 黄小宁 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 (发行部)
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	贵艺图文设计中心
印 刷	小森印刷(北京)有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10印张 237千字
版 次	2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

下坂地水利枢纽工程位于新疆昆仑山南麓帕米尔高原，新疆塔里木河源流叶尔羌河主要支流的塔什库尔干河中下游，坝址区河床高程 2950.00~2900.00m，两岸山峰高程 4000.00~5000.00m，相对高差 2000.00m 左右，山势险峻，无植被覆盖。水利枢纽工程坝址覆盖层深达 150m，主要是由古冰川的推进和后退及“堰塞湖”的形成与溃决等因素形成的第四系冰碛、冰水堆积物，岩性成分杂乱，粒径大小悬殊，均一性差，存在块石架空和砂层透镜体，渗透系数大，坝基防渗难度国内外罕见，设计及施工国内没有先例。通过对类似工程的资料收集和综合分析，对水平铺盖防渗、上墙下幕、全墙全幕等防渗方案进行了渗流计算和技术经济比较，确定坝基防渗采取“上墙下幕”垂直防渗方案。通过现场试验和室内试验，对设计方案存在的问题进行了试验论证，完成了复杂地质条件下深 102m 防渗墙和深 160m 的覆盖层帷幕灌浆现场试验，提出了一套针对复杂地质条件的深厚覆盖层防渗设计、施工技术。现在工程已经完工，并经过了近 2 年的蓄水，通过对安全监测资料进行分析，防渗效果良好。本书对国内外典型工程实例进行了分析，结合下坂地水利枢纽坝基防渗工程的设计和施工，对深厚覆盖层防渗技术进行了总结，希望能为从事类似工程设计及施工人员提供参考。

本书编写过程中得到新疆下坂地水利枢纽工程建设管理局王廷勇、哈德尔，陕西省水利电力勘测设计研究院杨西林，中国水电基础局有限公司龚木金、夏可风、金益刚，葛洲坝集团基础工程有限公司王继柏、陈斌，中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院王波，新疆水利水电科学研究院戴灿伟等的支持，提供了部分资料，在此深表感谢。

由于水平所限，书中言之欠详、甚至欠妥误谬之处，敬请读者指教，谨致谢忱。

作者

2011 年 11 月 2 日

目 录

前言

1 概述	1
2 深厚覆盖层地质特征	4
2.1 东部缓丘平原区冲积沉积型深厚覆盖层	5
2.2 中部高原山区冲洪积、崩积混杂型深厚覆盖层	6
2.3 西南高山峡谷区冲洪积、崩积、冰水堆积混杂性深厚覆盖层	6
2.4 高寒高原区冰积、冲洪积混杂型深厚覆盖层	8
2.5 深厚覆盖层工程地质问题及处理	11
3 深厚覆盖层坝基渗流控制	13
3.1 水平铺盖防渗	16
3.2 垂直防渗技术	19
3.3 下坂地水利枢纽坝基防渗工程设计	22
4 混凝土防渗墙施工	48
4.1 地质复勘	48
4.2 槽段划分	48
4.3 施工平台高程确定和导墙施工	49
4.4 护壁泥浆	51
4.5 成槽工艺	52
4.6 清孔换浆	67
4.7 预埋件下设	68
4.8 下设接头管和浇筑导管	70
4.9 混凝土浇筑	71
4.10 拔管	71
4.11 质量检查	75
5 深厚覆盖层帷幕灌浆施工工艺及技术	77
5.1 帷幕灌浆施工设备	80
5.2 钻孔泥浆	82
5.3 深厚覆盖层可灌性及灌浆材料选择	89

5.4	深厚覆盖层灌浆机理	92
5.5	水泥基灌浆材料及配比	93
5.6	化学灌浆材料	99
5.7	深厚覆盖层孔口封闭灌浆法和套阀花管灌浆法	103
5.8	深厚覆盖层帷幕灌浆压水试验及质量检查	112
5.9	深厚覆盖层帷幕灌浆施工工效	125
5.10	下坂地深厚覆盖层帷幕灌浆设计及施工工艺	126
5.11	深厚覆盖层帷幕灌浆设计及施工	128
6	下坂地坝基防渗监测和观测	132
6.1	监测项目和测点仪器布置	132
6.2	监测仪器埋设	133
6.3	施工期及初蓄期监测成果分析	135
7	结语	150
	参考文献	151

概述

我国水利水电建设经历了一个漫长的过程，并于近年得到了飞速发展。以水电工程为例，1912年，云南石龙坝水电站建成，装机480kW，1949年中华人民共和国成立时，全国水电装机容量仅16.3万kW，2004年9月26日我国水电装机达到了1亿kW，至2005年装机达到11652万kW，成为世界第一水电大国^[1]，我国2009年水电装机19686万kW，至2020年水电装机将达3亿kW，水电开发达到55%。已建和在建工程其规模和建设技术代表着当前国际水平。

由于特殊的地域条件，我国西南、西北等地区的许多待建或在建的水利电力枢纽将不可避免地坐落在深厚覆盖层上，有些工程覆盖层甚至深达几百米。在如此深的覆盖层上修建高坝大库，目前尚无很多成熟的工程经验可供借鉴，许多关键性的工程技术问题需要通过深入系统的研究加以解决。

对于在覆盖层上建坝，为了使工程能充分地发挥效益并确保工程的安全，坝基防渗是一个突出的问题，采取何种方案应视具体工程情况而定。一般来说，当覆盖层厚度较小时可将其全部挖除，当覆盖层很深而不便挖除或挖除很不经济时，也可采用灌浆、防渗墙或类似于混凝土防渗墙的混凝土灌注排桩、搅拌桩、高压喷射灌浆、TRD工法等来进行处理。有的坝虽建在深覆盖层地基上，但在处理时，则采用了区别对待的办法，如果河床沉积层很密实，大坝防渗也可采用水平铺盖或水平铺盖加防渗墙、部分垂直防渗（悬挂幕）相结合的综合处理措施。无论采取何种措施，保证坝基渗流的稳定和工程的经济是必需的。

在深厚覆盖层上建坝，坝基防渗采用防渗墙是较为可靠的办法，但对于深度100m以上的覆盖层，建造防渗墙从技术上和经济上具有一定的局限性。我国冶勒水电站坝基防渗^[2]，采用地面实施的墙与廊道实施的墙上下相接、墙下设帷幕灌浆的方案，防渗深度超过200m，其中防渗墙最深达84m，帷幕灌浆最大孔深119.5m。埃及阿斯旺高坝（HAD）^[3]是修建在尼罗河干流上的粘土心墙堆石坝，坝基条件复杂，覆盖层厚度深达245m，建造帷幕时，从廊道和地面钻孔，采用15排灌浆孔，帷幕灌浆施工深度最深达到208m，采用索列旦斯（Soletanche）灌浆方法。从目前情况看，深厚覆盖层防渗深度小于80m一般首选防渗墙，大于80m，甚至达到100m以上时，则多采用防渗墙和帷幕灌浆相结合的方法。帷幕灌浆法防渗处理可以达到更深的深度，各种复杂地层均能适应，施工设备简单，施工方便。但由于覆盖层地层的复杂性，采用灌浆方法进行防渗处理时，又存在一些缺点，主要是施工材料与工艺不够成熟、施工质量不易控制、防渗体均一性较差，防

渗效果指标比不上防渗墙、搅拌桩等。因此研究一套适合于复杂地质条件下深厚覆盖层防渗的结构设计、施工工艺,解决工程中的技术难题,具有很大的经济效益和社会效益。

我国深厚覆盖层地层典型的河流有大渡河干流、金沙江上游、新疆塔里木河干流及主要支流、青藏高原诸河等。新疆下坂地水利枢纽工程,位于塔里木河源流叶尔羌河主要支流的塔什库尔干河中下游,地处高原,冬季寒冷,远离城镇,冰碛层厚度 80~148m,岩性复杂,结构极不均匀,主要以漂石、块石、砾石及砂为主,成分以花岗岩、片麻岩、片岩及灰黑色变质岩组成,结构松散,并含有易液化的砂层透镜体,局部存在大孤石及架空现象。由于工程地质条件较差,防渗帷幕施工的难度较大,在国内没有先例,具有典型的复杂地质条件深厚覆盖层代表性。本书结合下坂地水利枢纽工程,介绍了在复杂地质条件下,深厚覆盖层防渗结构设计,超深防渗墙和帷幕灌浆试验及施工,对推动我国深厚覆盖层防渗处理技术的发展,指导类似工程设计和施工,具有一定的意义,可作为类似工程的设计和施工参考。

防渗墙(地下连续墙)技术起源于欧洲,是根据打井和石油钻井使用泥浆护壁和水下浇筑混凝土的方法而发展起来的^[4]。1920 年德国首先提出了地下连续墙专利,1950 年前后开始在意大利和法国等国家应用。由于防渗墙技术在地基防渗方面具有可靠、效果好、多用途等特点,60 年来,防渗墙施工技术发展很快,在施工机具、施工工艺、墙体材料、检测手段等方面都有很大的进步。1992 年,日本横跨东京湾的高速公路使用 EM-320 型液压铣槽机建成了深 136m、厚 2.8m 的防渗墙^[5]。我国黄河小浪底水利枢纽主坝混凝土防渗墙深 81.9m。三峡工程二期上游围堰塑性混凝土防渗墙深度 73.5m,该墙建设在含有大块球体(最大直径 5~7m)的覆盖层中,防渗墙内预埋灌浆管(最大埋管深度 70m),采用塑性混凝土材料。河北黄壁庄水库副坝混凝土防渗墙长度 4860m,防渗面积 271481m²,浇筑混凝土 283822m³,工程量为世界之最。四川冶勒水电站坝基和岸坡混凝土防渗墙分上下 2 段施工,上段在地面,下段在开挖的隧洞中施工,连接处进行水泥灌浆,防渗墙总深度 140m,防渗面积 55000m²,其中下墙深度达 84.85m、墙厚 1.0m。金沙江向家坝水电站一期围堰混凝土防渗墙防渗面积 51788m²,墙厚 0.8m,最大深度 81.8m,工期 5 个月,采用 137 台冲击钻、6 台抓斗、1 台液压铣槽机同时施工,最大施工强度达到钻孔 15661m²/月,成墙 23820m²/月,超过尼尔基水库 14000m²/月和三峡二期下游围堰 8103m²/月的强度^[1]。2003 年,新疆下坂地防渗墙试验深度达到 102m,最近进行的大渡河泸定水电站防渗墙试验槽孔深度达到了 154.8m,旁多水电站防渗墙试验槽孔深度更是达到了 201m。所有这些,标志着我国防渗墙施工技术的飞跃发展,代表了当今世界防渗墙建设的水平。加上防渗墙较灌浆体体型规则,便于设计实施,往往成为坝基防渗方案的首选,设计人员在许多工程就很少推荐采用灌浆方式进行深厚覆盖层的防渗处理^[6]。但是,防渗墙存在与地基变形协调问题;建造受地质条件影响较大,当遇到复杂地质条件时,施工机械将面临很大的局限性;当防渗墙很深时,其工效、造价值得研究;防渗墙接头技术也是需要解决的主要问题,100m 以上的防渗墙浇筑效果有待检验。

帷幕灌浆相比防渗墙,具有施工易于实施,地层适应性强等特点。由于覆盖层地层孔隙大、均一性差,地下水丰富和可能存在地下流水等状况,需要采取有针对性的不同灌浆工艺和材料。我国在砂砾石地层中做灌浆帷幕,除许多围堰外,1958 年以来代表性的主

体工程有密云、下马岭和岳城水库，近年来除重庆小南海水库、下坂地水利枢纽工程已建成外，还在泸定、瀑布沟、旁多等工程进行了灌浆试验。重庆小南海水库地震堆积体天然坝体的大坝及坝基防渗，考虑到地震遗址保护，采用了帷幕灌浆方案，灌浆布置3排灌浆孔，最大灌浆深度80m，采用孔口封闭循环灌浆法施工，灌注水泥粘土浆，共完成钻灌工程量48124m，注入干料2.2万t，帷幕最大透水率11.2Lu，该帷幕2001年完工，效果良好。国外覆盖层采用帷幕灌浆工程进行防渗处理较多，技术上多采用索列旦斯（Soletanche）灌浆方法（套阀花管法），其优点在于一次成孔，提高工效，可针对不同地层分别灌浆，重复灌浆等。但其套管、套壳料等施工工序较为复杂，深厚覆盖层处理难度较大。我国采用套阀花管法灌浆主要应用于较浅的覆盖层地层，而较深地层和大量采用的为孔口封闭，循环钻灌、孔内循环灌浆法，此种工艺对钻孔灌浆机具要求不高，工艺较为简洁，可使用于深厚覆盖层处理，适合我国水利水电工程施工习惯，值得进一步研究和推广。

深厚覆盖层灌浆材料应用于永久工程，满足防渗、加固、耐久性是其必备的条件，目前较常用的灌浆材料根据地层可灌比，采用水泥粘土浆、水泥浆等粒状材料，也可在粒状材料灌浆后，再灌化学灌浆材料^[7]，所采用的化学灌浆材料大多为耐久性能较好的改性水玻璃浆液^[8]。虽然国内覆盖层灌浆技术应用在永久性工程较少，但其独特的技术性能上需要进一步挖掘，特别是复杂地质条件下深厚覆盖层钻孔灌浆技术，也有必要进一步研究完善。本书结合新疆下坂地水利枢纽坝基防渗工程，对深厚覆盖层灌浆试验研究取得的成果进行了总结，可供在类似工程应用中参考。

深厚覆盖层地质特征

地壳表层存在着各种各样的松散层,坚硬岩石表面的松散堆积物统称为覆盖层,包括各类土层、砂卵砾石、淤泥等。深厚覆盖层从工程意义上看,一般存在于建筑物下部,有足够深度,不能清除或清除代价相当大的覆盖层可统称为深厚覆盖层,如果从数值上划分,一般是指厚度大于 $30\text{m}^{[9-10]}$ 的覆盖层。覆盖层的成因是多种多样的,从沉积环境看,有海相和陆相沉积,陆相沉积又分为河相、湖相、河湖混合相等。从搬运沉积物的地质力分,有风积、冲积、洪积、冰积等。因沉积环境、沉积方式、沉积地点的不同,其粒径大小、颗粒级配、松散程度、物理力学性质差别很大。

我国幅员辽阔,气候条件、气象条件、地形地质条件差别十分巨大,不同地区。其覆盖层的厚度、颗粒组成、工程地质性质不同。冲积砂卵砾石是常见的覆盖层类型,分布非常广泛,在大江大河普遍存在,其主要差别在于厚度和粒径大小不同。由于松散程度和颗粒级配不同,渗透系数差别很大,大者渗透系数可达 10^{-1}cm/s ,小者可能仅 10^{-3}cm/s 左右^[10]。

根据勘查资料,我国各主要河流河床覆盖层厚度一般为数十米至百余米,局部地段可达数百米,尤其是在西南地区,河谷深切和上覆深厚覆盖层现象更为显著。如金沙江下游新市镇至宜宾河段,覆盖层厚度超过 100m ;大渡河支流南桷河冶勒水电站坝址区覆盖层最大厚度达 420m 以上,在长江三峡河段,分布着深约 $35\sim 40\text{m}$ 的近 90 个深槽,累计长度占该河段总长的 45% 左右。在长江下游河段,古深槽更是明显,镇江河段和江阴河段南支古深槽深度为 $80\sim 90\text{m}$,南通河段为 $70\sim 80\text{m}$ 。在黄河下游河段,其沉积物厚度也达到 $20\sim 60\text{m}$,甚至 80m ,如小浪底水电站坝址区覆盖层厚度一般为 $40\sim 50\text{m}$,最厚达 $70\sim 80\text{m}^{[11]}$ 。叶尔羌河河谷内覆盖层深度 93.9m ,其支流塔什库尔干河流上的下坂地覆盖层深度 150m 。雅鲁藏布江覆盖层厚达 $300\sim 400\text{m}$,最大达 600m ,现行的研究认为,产生河谷深厚覆盖层的原因主要有以下几方面^[11]。

(1) 构造成因。如果河流跨越不同的构造单元,构造单元之间的差异运动(尤其是升降运动)将会导致河流在纵剖面上的差异运动,从而影响河流侵蚀和堆积特征,形成“构造型”的加积层。如大渡河支流南桷河冶勒水电站坝区河谷厚达 $420\sim 500\text{m}$ 的覆盖层主要与安宁河活动断裂活动形成的第四纪构造断陷盆地有关;金沙江虎跳峡 250m 的巨厚覆盖层也主要与断陷盆地有关。

(2) 崩滑流堆积成因。大型崩塌滑坡堵江事件在堵断江河后,也可能形成局部地段的河流深厚堆积。例如,大渡河大岗山电站上游库区加郡滑坡形成的巨厚堰塞湖相沉积,岷

江流域存在数个因滑坡堵江形成的堰塞湖，而 1933 年叠溪地震形成的滑坡堵江坝和堰塞湖（大小海子）至今还完好地保存着。

（3）气候成因。罗守成^[12]认为，冰川对高原河谷的剧烈刨蚀作用，产生大量的碎屑物质，被流水搬运到河谷中堆积，会形成“气候型”加积层。并认为岷江等河流堆积层自下游向上游增厚，有违常规河流沉积特点的原因，正是来源于冰川对上游河谷强烈的刨蚀作用。

许强^[11]等经过研究分析，将河谷深切和深厚堆积事件与全球气候、海平面升降、地壳运动等有机地联系起来，并提出冰期、间冰期全球海平面大幅度升降，是导致河流深切成谷并形成深厚堆积的主要原因；将沿河大型古滑坡的孕育和发生与河谷深切事件相联系，提出沿河大型古滑坡可能是在河谷深切期形成的新观点，据此可以很好地解释为何古滑坡的前缘剪出口高程可以低于现代河床数十米；并引入层序地层学的理论和方法，从理论上较好地解释了冰期海平面大幅下降，导致河流侵蚀基准面下降，河流溯源侵蚀和深切成谷；间冰期海平面大幅回升，导致河流侵蚀基准面上升，产生海侵和河流深厚堆积事件。

我国深厚覆盖层按地区及成因，可大致分为四大类型：

- （1）东部缓丘平原区冲积沉积型深厚覆盖层。
- （2）中部高原区冲洪积、崩积混杂型深厚覆盖层。
- （3）西南高山峡谷区冲洪积、崩坡积、冰水堆积混杂型深厚覆盖层。
- （4）高寒高原区冰积、冲洪积混杂型深厚覆盖层。

此外，其它如重庆小南海的地震崩塌堆积体，以及一些岩溶塌陷堆积体深厚覆盖层，由于成分独特，分布零星，不具有普遍代表性。

2.1 | 东部缓丘平原区冲积沉积型深厚覆盖层

在北方的黄河中下游、华北平原、长江干流及部分支流的中、下游，四川盆地岷江下游等地区，携带大量泥沙的河流至此地区地形愈趋平缓，河道水流流速降低，泥沙逐渐沉积，长期的冲、洪积沉积，在这些地区逐渐形成深厚覆盖层。在流水的搬运过程中，由于水的流速、流量的变化以及颗粒物本身大小、形状、比重等的差异，形成砾石、砂、粉砂、粘土等颗粒大小不同的沉积层。

典型代表工程有小浪底水利枢纽、黄壁庄水库等。小浪底水利枢纽坝基深厚覆盖层由上而下大概分为：表层砂层、上部砂砾石层、底砂层、底部砂砾石层共 4 层，其多期冲积沉积特征，也反映了该河道多次缓慢升降的特点。其级配、颗粒粒径、渗透系数等也具典型的成层性特征，空隙主要为蜂窝状，除部分粒径较粗的沉积层由于空隙高，渗透性较大外，覆盖层内少有或不发育大型集中渗流通道。黄壁庄水库坝基覆盖层由第四系冲洪积物组成，由上至下依次为壤土或砂壤土层、砂层、卵石层和断续分布于基岩顶面上的含碎石红粘土层，总厚度为 32~49m。坝基土中存在薄弱带，具有高压缩性、低强度的软塑状态的土分布普遍，而且无规律性，砂层局部疏松并夹有粉细砂，存在易失稳的地层，卵石层

平均粒径较大,卵石含量达70%~80%,集中渗漏严重,卵石层局部段直接与下部砂层接触,层间系数达80~100,为不良接触,在长期高水头作用下,砂层有向卵石层填充的可能,造成地基渗透破坏。

2.2 | 中部高原山区冲洪积、崩积混杂型深厚覆盖层

这种中部高原山区的冲洪积、崩积混杂型深厚覆盖层,主要分布在北方的秦岭、云贵高原等地区。第四纪以来,该类地区地壳多呈断块式抬升、下降,或呈掀斜式抬升。在水流冲刷和溶蚀下,河床下切,形成高山峡谷及深切河槽。后期地壳抬升变缓,或局部地壳构造性抬升,深切河道内的冲刷作用减弱或消失,沉积作用加强,两岸崩积堆积体也因为河道水流的变缓,携带能力降低而得以保留。另外,该类地区雨量较为丰沛,易发生山洪、泥石流,洪积物来源丰富,从而,在河床内形成具冲积、洪积与崩积物混杂堆积特征的复杂深厚覆盖层。

此类深厚覆盖层,常以某一成因的沉积物为主,但又夹以其它成因的堆积物,冲积物与崩积、洪积物之间的接触关系系数可以成层分布,也可以成透镜状包裹,甚至不分彼此,混杂交错,其物理力学特性、水文地质特征等也因其结构、成分的不同而有所差异。典型工程有甘肃洮河九甸峡水利枢纽和贵州索风营、格里桥等。

甘肃洮河九甸峡水利枢纽工程坝基覆盖层最深56m^[13],由上到下大致分为3层(岩组):Ⅰ岩组主要由崩坡积块石、碎石土组成,分布于左岸坡脚和河床上部,为灰岩块石、碎石,成棱角状,大小混杂,块径一般为8~20cm,大者5~8m,砂土含量较少,该层结构松散,局部架空,无胶结。Ⅱ岩组为冲积块石、砂卵砾石层,分布于河床中部,上部块碎石含量较高,向下卵石增多,局部有中粗砂、砂土透镜体分布。块碎石成分为灰岩,棱角状,块径一般为0.5~3m,大者5~8m,卵砾石成分主要为砂岩、灰岩、石英岩等,砂为中粗砂,整层结构松散,无胶结。平均现场抽水试验和室内试验的渗透系数为 $7.13 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。Ⅲ岩组为冲积砂砾卵石层,分布于河床底部,组成物主要为卵石、砾石,成分为砂岩、灰岩、石英砂岩等,磨圆度较好;砂以中粗砂为主,局部呈透镜状富集,局部有直径2~3m的孤块石分布,均一性较差,无胶结,呈中密—密实状态,现场抽水试验所得渗透系数为 $5.43 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。

2.3 | 西南高山峡谷区冲洪积、崩积、冰水堆积混杂性深厚覆盖层

川西、藏东一带,处扬子陆块和印度陆块的碰撞结合地区,是我国构造活动最为活跃的地区之一。第四纪以来,该地区强烈的地壳运动,造成地壳多次大幅度抬升或掀升,局部地带又有下降的异常区,致使该地区地形高陡、岩性岩相复杂、构造发育、地震频繁,

各种内、外动力地质作用种类繁多,活动剧烈,冰川进退、滑坡、崩塌、泥石流、冲洪积、坡积、堰塞湖等物理地质现象极为发育。故该地区的深厚覆盖层具有成因复杂,厚度巨大,组成复杂结构多变等特征。典型工程有大渡河泸定水电站、冶勒水电站、金沙江昌波、苏洼龙、龙蟠水电站坝基覆盖层等。

大渡河泸定水电站坝基覆盖层深达 148.6m,层次结构复杂,现代河床及高漫滩主要为冲积漂卵砾石层,Ⅰ级阶地为冲洪积混合堆积之含漂(块)卵(碎)石砾石土层,Ⅱ级阶地为冰缘泥石流、冲积混合堆积之碎(卵)砾石土层,河谷底部为冰水堆积之漂(块)卵(碎)砾石层,渗透系数介于 $1.73 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

冶勒水电站^[14]坝址位于冶勒盆地的边缘,坝基覆盖层深厚,揭露最大深度超过 420m,呈左岸薄,河床及右岸厚的不对称 V 形。覆盖层岩性层次结构复杂,物理力学特性变化幅度大。根据沉积环境、岩性组合及工程地质特征,自下而上分为五大岩组,该套地层具有不同程度的泥钙质胶结和超固结压密特征,其物理力学特性和渗透性能与一般现代河床冲积层相比显示出一定的差异性。

第一岩组(Q_2^I):弱胶结卵砾石层,以厚层卵砾石层为主,偶夹薄层状粉砂层。该岩组深埋于坝基下部,最大厚度大于 100m,最小厚度仅 15~35m,具有弱透水性,并构成坝基深部承压含水层。承压水具有埋藏深、水头高、动态稳定的特点。

第二岩组(Q_3^{II}):块碎石土夹硬质粘性土,结构密实,呈超固结压密状态。该岩组在坝址河床部位顶板埋深 18~24m,厚度 31~46m,透水性微弱,既是坝址深部承压水的相对隔水层,又是坝基防渗处理的主要依托对象。

第三岩组(Q_3^{III}):卵砾石层与粉质壤土互层,分布于河床谷底上部及右岸谷坡下部,总厚度 45~154m,是坝基的主要持力层,也是坝基河床部位和右坝肩下部防渗处理的主要地层,其中具有一定分布范围的粉质壤土夹炭化植物碎屑层或含砾粉质壤土有四小层。

第四岩组(Q_3^{IV}):弱胶结卵砾石层,厚度 65~85m,夹数层透镜状粉砂层或厚 0.2~3.0m 粉质壤土;以空隙式泥钙质弱胶结为主,局部基底式钙质胶结,多呈层状或透镜状分布,存在溶蚀现象。该岩层具弱透水性,为右岸坝基上部防渗处理的主要地层。

第五岩组(Q_3^{V}):粉质壤土夹炭化植物碎屑层。厚约 90~107m,分布于右岸正常蓄水位以上谷坡地带。

坝址谷底及右岸五大岩组的含水性和透水性具有不均一性,各岩组的含水、透水性具有如下特征。

第一岩组、第四岩组以弱透水的卵砾石层为主,夹薄层微弱透水的粉细砂或粉质壤土透镜体。由于卵砾石层的充填与胶结程度不一,以及局部存在溶蚀空洞,故透水性、含水性也存在不均一性,渗透系数一般为 $(1.0 \sim 5.0) \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,小者为 $(1.58 \sim 3.16) \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,第四岩组卵砾石层局部可达 $9.86 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。

第二岩组为微弱透水的块碎石土夹硬质土,第五岩组以极弱透水的粉质壤土及粉质砂壤土为主,含水性差,渗透系数小于 $2.2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,具有相对隔水的特点。

第三岩组为弱透水卵砾石层与极弱透水粉质壤土互层,具有弱透水层与局部隔水层相间分布的特点。该岩组上部为极弱透水的粉质壤土层,具有微弱透水性。其中,卵砾石层渗透系数一般为 $(1.27\sim 5.19)\times 10^{-3}\text{cm/s}$,小者为 $4.32\times 10^{-4}\text{cm/s}$;粉质壤土渗透系数小于 $2.2\times 10^{-5}\text{cm/s}$,透水性微弱。

2.4 | 高寒高原区冰积、冲洪积混杂型深厚覆盖层

高寒高原区冰积、冲积混杂性深厚覆盖层主要分布于西藏、新疆地区及青海部分地区。以上地区海拔高,但总体上地形高差较西南横断山区缓和,河流由上游的雪山、冰川融水补给后汇流于广袤的平缓高原上,山上水流湍急,山下河道平缓弯曲。这些地区深厚覆盖层主要分布于河流的中、下游河段,河床覆盖层主要由冰川进退形成的冰碛、冰水堆积和洪积等原因堆积而成。总体特征是下部为冰碛或冰水堆积层,上部为现代冲洪积层。典型例子如新疆下坂地水利枢纽工程、阿尔塔什水利枢纽工程、西藏旁多水电站等坝基覆盖层。

新疆下坂地水利枢纽工程位于帕米尔高原,新疆塔里木河源流叶尔羌河主要支流的塔什库尔干河中下游,具有高海拔、高地震烈度、高边坡,以及古冰川和新冰川活动频繁的特点。坝址区河床高程 $2950.00\sim 2900.00\text{m}$,两岸山峰高程 $4000.00\sim 5000.00\text{m}$,相对高差 2000.00m 左右,山势险峻,无植被覆盖。地质环境复杂,地壳隆起,沟谷深切,构造发育,岩体破碎,在高寒干旱无植被的自然条件下,物理地质作用强烈。塔什库尔干河谷是在昆仑山强烈隆起背景下,冰川剥蚀作用形成的,该地区大约经历了三大冰期和间冰期,使河谷两岸广泛分布冰碛、冰水堆积台地,河流阶地不发育,河谷以垂直剥蚀为主,河谷基底形态呈U形或V形,显示冰川谷的特征。枢纽工程区内地质结构复杂,该复杂的地质结构是由于古冰川作用的产物,由于冰川进退使堰塞湖的形成与溃决,形成了崩塌、冲积与静水沉积的复杂沉积环境,后期又有新的冲洪积堆积物^[15]。下坂地坝址河床覆盖层厚达 150m ,其成因岩性复杂多样,工程地质条件复杂。工程地质特征主要是第四系冰川及河流地质作用,形成一套较为复杂的地质体,为此存在深厚覆盖层的渗漏及渗透稳定问题、砂土液化问题、软土强度及稳定问题等。地勘钻孔显示覆盖层岩性成分杂乱,粒径大小悬殊,均一性差。上部崩坡积及冲洪积层多为风化破碎岩块,右岸坡积层下部还加有湖积淤泥质粘土及软粘土层。下部主要为冰水积砂层和冰碛含漂块碎石层及冰水积含块卵砾石层。砂层透镜体分布于坝基左肩,埋深 $18\sim 35.4\text{m}$,厚度 $18\sim 30\text{m}$,其颗粒组成为级配良好的不均匀砂,属弱~中等透水地层。冰碛含漂块碎石层及冰水积含块卵砾石层为河床谷底的主要组成物,厚度 $80\sim 140\text{m}$,岩性混杂,结构极不均匀,局部存在大孤石及架空现象,该层主要以漂石、块石、砾石等粗粒径为主,结构杂乱、岩相变化大,最大粒径达 10.0m 以上,成分以花岗岩、片麻岩、片岩及灰黑色变质岩组成。具有抗剪强度高、低压缩性、强透水性的工程特性。坝址各地层的分布范围见图2-1。

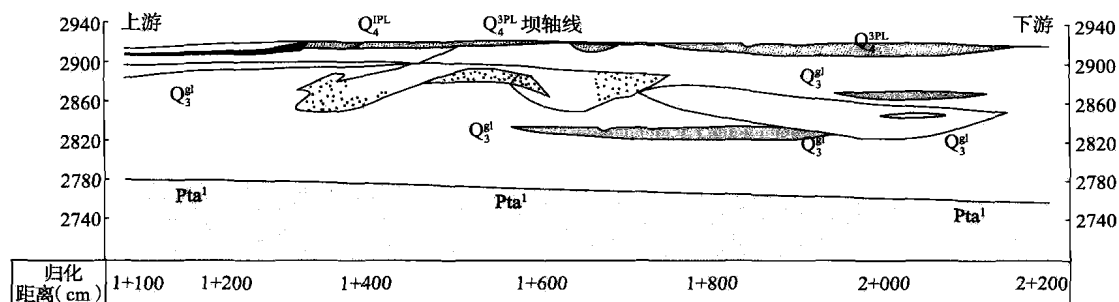


图 2-2 新疆下坂地水利枢纽坝区顺河地质剖面图

上更新统冰碛物，岩性不一致，杂乱无分选，透水性差异很大。通过浅层竖井抽水试验及 ZK₇₃、ZK₈₂ 钻孔自振法抽水试验，不同深度渗透系数见表 2-1。

表 2-1 冰碛层渗透系数 (K) 成果表

孔深 (m)	含水层	测试方法	K 选用值 (cm/s)
0~20	漂石、块石层	抽水	2.03×10^{-2}
20~44	细砂层上部	ZS-1000A (自振法)	1.25×10^{-2}
45~70	细砂层下部	ZS-1000A (自振法)	1.67×10^{-2}
71~90	漂石层	ZS-1000A (自振法)	2.36×10^{-2}
91~100	含卵块石层上部	ZS-1000A (自振法)	7.52×10^{-3}
117~125	含卵块石层下部	ZS-1000A (自振法)	1.32×10^{-2}
132.78~135.38	块石层	ZS-1000A (自振法)	2.04×10^{-2}
143.65~146.25	块石层	ZS-1000A (自振法)	1.92×10^{-2}

采用智能化地下水动参数测量，冰碛层局部渗透系数达 $1.16 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 以上，可见其渗透性极不均一。

软粘土层平均水平渗透系数 $1.36 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，垂直 $3.34 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，大值平均水平 $6.05 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，垂直 $1.27 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ，属极弱透土层。

根据野外钻孔抽水，提水试验及自振法试验砂层的渗透系数：上部 (20~50m) $K = (0.83 \sim 1.44) \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ；下部 (50~70m) $K = (1.11 \sim 1.84) \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。与野外抽水试验相比，室内试验结果渗透系数偏小。砂层透水性基本均一，属弱—中等透水性。

旁多^[16-17]水利枢纽工程位于西藏自治区林周县旁多乡下游约 1.5km 拉萨河干流上，旁多坝基为双层结构，上层为强透水的第四系冲积物，下层为中等透水的冰水堆积物。坝址上下游坝基土各层厚度变化不大。下层冰水堆积物中存在冰川漂砾、泥砾层、粘土及沙土透镜体，旁多坝地质结构见图 2-3。

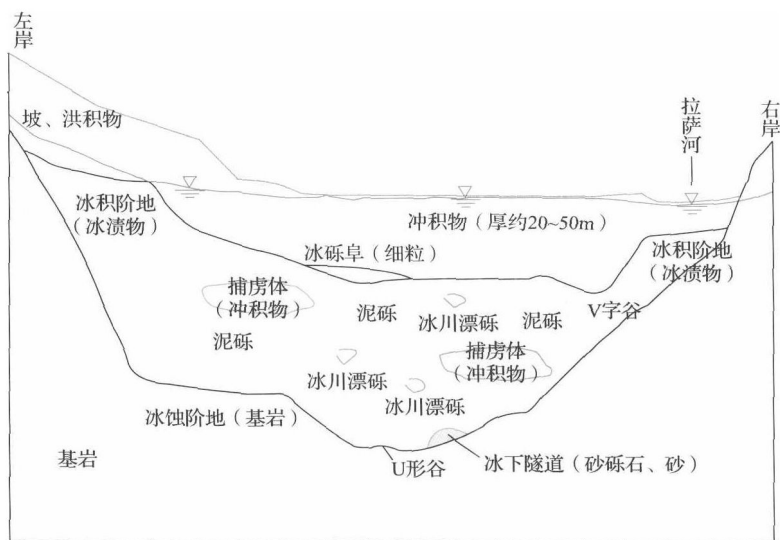


图 2-3 西藏旁多坝地质结构示意图

据地质勘察成果。坝址区出露地层主要为熔结凝灰岩、闪长玢岩及燕山晚期花岗岩。第四系由洪积物 (Q_4^{pl})、坡积物 (Q_4^{di})、冲积物 (Q_4^{al}) 及冰水堆积物 (Q_2^{gl}) 等松散堆积层构成。

上层冲积层 (Q_4^{al})，厚约 20~55m，由碎石、卵石混合土组成。砾石与砂含量约占 60%，呈中密~密实状态，磨圆较好，级配连续，透水性强，渗透系数在 $1.06 \times 10^{-1} \sim 5.26 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 之间。渗透系数平均值 $2.65 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 。渗透系数地质建议值 $5.3 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 。

下层冰水堆积层为卵石混合土 (Q_2^{gl})，为冰期、间冰期冰水堆积物，由漂石、卵石混合土组成。该层河床部位埋深 20~25m。左岸漫滩及阶地部位埋深 40~55m。层厚一般为 60~90m。最厚达 115m。由卵石混合土组成，粒径一般为 60~150mm，最大可达 200cm，呈灰—深灰色，漂、卵、砾石成分复杂，主要为强风化—微风化闪长玢岩、花岗岩、砂岩及熔结凝灰岩等。无分选。粗细混杂，颗粒组成差异性较大，蚀圆度较差。多呈次棱角状。该层由上至下，孔隙变小，密实度增大。泥含量随深度增加而增大。且明显高于现代河床冲积物。卵石中见节理锈面等现象较普遍。泥包砾、粉土夹层、细砂夹层较发育，层厚均不大，在空间分布上连续性差，局部有少量架空结构。该层饱水、密实，具弱胶结现象，透水性随深度增加和含泥量增加而变小。渗透系数在 $1.98 \times 10^{-2} \sim 2.07 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 之间，渗透系数平均值 $8.71 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ，渗透系数地质建议值 $2.1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。

2.5 深厚覆盖层工程地质问题及处理

河床深厚覆盖层引起的工程地质问题包括^[18]：①在工程荷载作用下河床深厚覆盖层差异沉降；②河床深厚覆盖层坝基渗漏；③河床深厚覆盖层渗透变形；④河床深厚覆盖层