

深厚覆盖层上土石坝防渗技术研究进展

沈振中¹, 邱莉婷², 周华雷²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:从垂直防渗、水平防渗和联合防渗的角度,总结了深厚覆盖层上土石坝防渗的关键技术。阐述了混凝土防渗墙、灌浆帷幕、墙幕结合、水平铺盖等防渗措施在深厚覆盖层地基渗流控制上的创新和突破,并介绍了有限单元法、边界元法等数值模拟技术在土石坝渗流控制领域中的应用。结合 3 个代表性工程实例分析了深厚覆盖层上土石坝合理的防渗措施的选择及其优化方法,给出了深厚覆盖层上土石坝防渗的建议,并指出尚待深入研究的几个问题。

关键词:土石坝;深厚覆盖层;坝基渗流;防渗措施;综述

中图分类号:TV641;TV640.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)05-0027-09

Review of seepage control of earth-rockfill dams on thick overburden layer//SHEN Zhenzhong¹, QIU Liting², ZHOU Hualei²(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Seepage control techniques for earth-rockfill dams built on a thick overburden layer are reviewed from the perspectives of the vertical cutoff technique, horizontal anti-seepage technique, and joint seepage control. Innovations and breakthroughs in the seepage control of earth-rockfill dams on a deep alluvion foundation using the concrete anti-seepage wall, the grout curtain, a wall and curtain combination, and horizontal coverage techniques are described. And the applications of the FEM and BEM methods in numerical simulation of seepage control for earth dams are introduced. As applied to three typical engineering projects, reasonable seepage control measures and their optimization for earth-rockfill dams on a thick overburden layer were studied. Some suggestions and key issues for seepage control of earth-rockfill dams on a thick overburden layer are described.

Key words: earth and rockfill dam; thick overburden layer; dam foundation seepage; anti-seepage measure; review

国际大坝委员会 ICOLD 最新注册大坝数据库统计显示,全球已注册大坝有 58 266 座,其中土坝 36 986 座,堆石坝 7 621 座^[1];据第一次全国水利普查公报,截至 2011 年底,我国已建成水库 98 002 座^[2],其中 90% 以上为土石坝。随着我国西部水电工程建设的进一步深入,尤其是新疆和西藏地区水电资源的开发,高土石坝工程将越来越多。高土石坝(含面板堆石坝)在大规模水利水电工程建设中具有很强的竞争力,其中土质心墙堆石坝、混凝土面板堆石坝将是今后土石坝的主导坝型。我国西南地区的云、贵、川、渝、藏的水力资源约占全国总量的 66.70%,而西南地区河谷深切和深厚覆盖层现象十分普遍。各主要河流覆盖层普遍呈现分布厚度变化大、结构差异显著、组成成分复杂且堆积序列异常等特点^[3]。在深厚覆盖层上建设水利水电工程往往

存在渗流稳定、渗漏损失、不均匀沉陷和砂土液化等问题,给土石坝工程的建设带来了困难。相关统计显示,由渗透破坏直接导致的土石坝工程失事概率,中国是 29% (2 391 座失事),西班牙是 40% (117 座失事),美国是 39% (206 座失事),日本是 44% (119 座失事)。因此,研究深厚覆盖层上土石坝工程的渗流控制问题意义重大。

1 深厚覆盖层上土石坝建设概况

深厚覆盖层是指堆积在河谷中厚度大于 30 m 的第四纪松散沉积物。深厚覆盖层的岩层不连续,结构偏松散,水平、垂直两个方向的岩性均变化显著,且成因类型较复杂,物理力学性质不均匀,工程地质条件差^[4]。深厚覆盖层在全球范围的河流中都有分布,如法国迪朗斯河上的 Serre Poncon 心墙

基金项目:国家自然科学基金(51179062)

作者简介:沈振中(1968—),男,江苏吴江人,教授,博士,主要从事水工结构与岩土工程研究。E-mail:zhzshen@hhu.edu.cn

堆石坝,坝基覆盖层深 120 m;意大利瓦尔苏拉河上的 Zoccolo 坝,坝址区覆盖层深 100 m;瑞士萨斯菲斯普河上的 Mattmark 心墙堆石坝,坝基最大覆盖层深 80 m。全球部分河流上部分坝址覆盖层深度统计见表 1^[5-6]。

表 1 全球部分河流上部分坝址覆盖层深度统计

序号	坝名	国家	所在河流	覆盖层深度/m
1	冶勒	中国	大渡河	>420
2	Aswan	埃及	Nile River	250
3	虎跳峡	中国	金沙江	250
4	Tarbela	巴基斯坦	Indus	230
5	黄金坪	中国	大渡河	130
6	Serre Poncon	法国	Durance	120
7	王家滩	中国	黄河	110
8	钟坝	中国	岷江	104
9	Zoccolo	意大利	Valsura River	100
10	向家坝	中国	金沙江	81.8
11	Mattmark	瑞士	Saaser Visp	80
12	小浪底	中国	黄河	50~80
13	险崖坝	中国	白龙江	73
14	Talegan	伊朗	Talegan	65
15	米鱗沱	中国	雅砻江	50.7

欧洲和美洲在深厚覆盖层上建坝较集中的时期是 20 世纪的 60 年代和 70 年代,如法国的 Mont-Cenis 心墙堆石坝、加拿大的 Manic-III 黏土心墙堆石坝、意大利的 Zoccolo 沥青斜墙堆石坝等。20 世纪 80 年代后,随着我国深厚覆盖层上建坝技术的提高,许多高土石坝先后建成。国内外覆盖层深度超过 120 m 的部分土石坝工程见表 2。

表 2 国内外覆盖层深度超过 120 m 的部分土石坝工程

序号	坝名	国家	建成年份	坝型	最大坝高/m	覆盖层深度/m
1	Serre Poncon	法国	1966	心墙堆石坝	122	120
2	Aswan	埃及	1967	黏土心墙堆石坝	122	250
3	Tarbela	巴基斯坦	1975	斜墙堆石坝	147	230
4	Manic-III	加拿大	1975	黏土心墙堆石坝	108	130
5	冶勒	中国	2005	沥青混凝土心墙堆石坝	125	>420
6	仁宗海	中国	2008	土工膜斜墙堆石坝	56	>150
7	旁多	中国	2011	沥青混凝土心墙砂砾石坝	72.3	150
8	下坂地	中国	2011	沥青混凝土心墙堆石坝	78	148
9	泸定	中国	2011	心墙堆石坝	79.5	148
10	黄金坪	中国	在建	沥青混凝土心墙堆石坝	95.5	130

2 深厚覆盖层坝基的防渗技术

深厚覆盖层上土石坝的坝基渗透稳定和渗漏损

失是防渗控制的主要问题。不合理的防渗体系设计,例如将土石坝的混凝土防渗墙设于斜墙短铺盖上游端底部就容易导致防渗墙顶部黏土产生放射状贯穿裂缝,以及铺盖裂缝渗漏,使得防渗墙无法发挥防渗作用。建于 48 m 深厚覆盖层地基上的北京西斋堂黏土斜墙砂砾石坝,坝高 58 m,采用混凝土防渗墙防渗。大坝于 1974 年建成蓄水,1978 年汛前在土坝上游坝坡发现两处塌坑。其中,1 号塌坑为椭圆形,沿坝轴线方向长 9.5 m,垂直坝轴线方向长 7.0 m,深 3.0 m;2 号塌坑呈圆形,直径 2.5 m,深 0.3 m。1978 年 10 月,通过开挖检查,发现 1 号塌坑洞穴已穿透防渗墙下游到达斜墙底部的砂卵石层,2 号塌坑洞穴与防渗墙水平漏洞(直径 4~6 cm)连通,塌坑洞穴内充满砂卵石和软泥。此外,黏土斜墙底部的反滤过渡层在防渗墙附近被渗流破坏,防渗墙分段接头处夹泥皮最厚为 4 cm,部分夹泥已被渗流冲刷流失,接缝漏水严重。后经防渗墙钻孔、浇筑混凝土堵塞漏洞、墙体缝隙连接加固和开挖部位重新回填黏土、铺设反滤料等工程措施,渗漏破坏问题方得以解决。因此,需要设计科学的防渗体系,防止坝基水力坡降过大导致渗透变形和渗透破坏,避免过大渗透流量引发下游浸没和库水损失。目前,深厚覆盖层上土石坝的防渗控制措施主要有垂直防渗、水平防渗和联合防渗。

2.1 垂直防渗措施

土石坝垂直防渗措施通过截断渗流通道或延长渗径,以降低渗透坡降和浸润面高度,从而减小渗漏量。垂直防渗技术已较为成熟,对深厚覆盖层坝基的渗流控制十分有效,主要包括混凝土防渗墙、灌浆帷幕、高压喷射灌浆连续墙和土工合成材料防渗墙等。其中,混凝土防渗墙具有渗透稳定性可靠、渗漏量控制效果明显、墙体槽孔连接稳固、检验技术相对成熟、对地层颗粒组成要求低、成墙深度较大等优点,故在深厚覆盖层坝基的渗流控制中广泛应用。灌浆帷幕作为岩基防渗的主要手段,也是深覆盖层上地基渗流控制的重要措施之一,其处理深度更大。目前大多数工程均全部或者部分采用灌浆帷幕作为主要防渗措施或补充防渗措施,即通过在坝基中形成一道弱透水幕来达到防渗目的。国外,已有许多采用水泥黏土灌浆修建帷幕的成功经验,如法国的 Serre Poncon 坝有 12 排灌浆孔,最大灌浆孔深 100 m,有效解决了 120 m 深夹杂大砾石、细砂的深厚覆盖层上坝基的渗漏控制难题;埃及的 Aswan 坝有 15 排灌浆孔,最大孔深 250 m 且穿透冲积层,坝基经处理后渗透系数降低至原来的 1/1 000 左右;加拿大的 Mission Terzaghi 坝有 5 排灌浆孔,各灌浆

孔深均为 150 m; 德国的 Sylvenstein 坝有 6 排灌浆孔, 最大灌浆孔深 100 m; 瑞士的 Mattmark 坝有 10 排灌浆孔, 最大灌浆孔深 100 m 等。但国内较少单独采用帷幕灌浆作为深覆盖层主要渗控措施, 而是将其与防渗墙联合使用, 形成墙幕结合防渗方案。国内外深厚覆盖层上采用超过 80 m 深混凝土防渗墙的部分土石坝工程见表 3。

表 3 国内外深覆盖层上的部分混凝土防渗墙工程(防渗墙深度大于 80 m)

序号	工程名称	国家	坝型	最大坝高/m	最大覆盖层深/m	最大防渗墙深度/m	建成年份
1	Morelos	墨西哥	心墙土坝	60	80	91.4	1966
2	Keban	土耳其	心墙土石坝	212	40	100.6	1974
3	Wolf Creek	美国	均质土坝	79	54.7	84.7	1979
4	小浪底	中国	斜心墙堆石坝	154	>70	80	2000
5	仁宗海	中国	土工膜斜墙堆石坝	56	>150	80.5	2008
6	狮子坪	中国	心墙堆石坝	136	110	90	2010
7	旁多	中国	沥青混凝土心墙砂砾石坝	72.3	150	158	2011
8	黄金坪	中国	沥青混凝土心墙堆石坝	95.5	130	101	在建
9	巴底	中国	沥青混凝土心墙堆石坝	97	120	105	在建
10	安宁	中国	沥青混凝土心墙堆石坝	66	约 100	87	在建
11	大河沿	中国	沥青混凝土心墙砂砾石坝	74.7	150	150	在建

目前国内超过 100 m 深的混凝土防渗墙施工技术趋于成熟。西藏旁多沥青混凝土心墙砂砾石坝, 经过封闭式防渗墙、悬挂式防渗墙、灌浆帷幕以及墙幕结合等防渗方案比较, 最终选定混凝土防渗墙全封闭方案。施工采用 CZ-9 型重型冲击钻和利勃海尔 HS885 钢丝绳抓斗配套冲击钻等设备创造了成墙深度 158 m 的纪录, 并选用新型 JCJ/MMH 正电胶泥浆显著提高了泥浆固壁效果^[7-8]。同时, 也有不少工程采用 2 道防渗墙防渗, 如长河砾石土心墙堆石坝(坝高 240 m, 墙深为 50 m), 加拿大 Manic-III 黏土心墙堆石坝(坝高 108 m, 墙深为 130 m), 瀑布沟砾石土心墙堆石坝(坝高 186 m, 墙深为 70 m), 九甸峡混凝土面板堆石坝(坝高 136.5 m, 墙深约为 30 m), 碧口水心墙土石坝(坝高 102 m, 2 道防渗墙分别深 41 m、68.5 m), 铜子街面板堆石坝(坝高 48 m, 墙深为 70 m), 但仍缺乏专门的理论研究来解答怎样的坝高和覆盖层结构应该设置 2 道混凝土防渗墙, 今后有待开展这方面的研究工作。此外, 高压喷射灌浆建造防渗墙的技术, 目前大多应用于砂卵砾石深厚覆盖层上的围堰工程防渗, 如小浪底上游围堰的左河床覆盖层采用了高压旋喷灌浆防渗墙方案, 单排桩成墙, 最大深度 50.3 m; 察汗乌苏水电站的上游

围堰采用了厚度为 0.8 m 的高压旋喷灌浆防渗墙^[9]。深覆盖层上的混凝土面板堆石坝多采用连接板来连接防渗墙与趾板, 以适应不同结构间的变形协调。国内最早建于深覆盖层上的新疆柯柯亚混凝土面板砂砾石坝^[10], 坝基为 37.5 m 深的冲积砂砾层, 槽孔混凝土防渗墙与面板间填筑圆弧形的砂砾料连接段, 连接段表面铺设分离式拱形连接板且拱形面板间采用柔性止水, 有效地协调了面板与防渗墙间的不均匀沉降。察汗乌苏水电站^[11]坝址河床覆盖层深度约为 47.6 m, 槽孔混凝土防渗墙与覆盖层上 4 m 宽的趾板由 2 块 3 m 宽的连接板连接, 接缝采用柔性连接以协调地基的不均匀变形。新疆阿尔塔什水利枢纽^[12]河床段覆盖层最大深度约为 100 m, 采用 2 道间隔为 5 m 的混凝土防渗墙, 河床段趾板宽 4 m, 通过 2 块宽度为 3 m 的连接板与防渗墙相连, 连接板厚 1 m。

2.2 水平防渗措施

水平防渗措施(水平铺盖)指采用混凝土、黏土和复合土工膜等弱透水性材料, 在大坝的上游进行分层填筑和碾压, 与坝体防渗连接而形成的联合防渗体, 其可有效加大渗径, 控制渗流量, 但无法彻底截断渗流。深厚覆盖层上的水平防渗措施一般适用于以下情况^[6]: 覆盖层地基过深无法采用垂直防渗措施, 或垂直防渗措施效果不明显时; 开阔河谷上因垂直防渗措施投资过大或者地基的可灌性不佳时。水平防渗措施的防渗效果一般较垂直防渗效果差, 但因其具有造价较低、施工快捷、方便取材的特点, 在深覆盖层地基上的坝基渗流控制中也有不少案例。比如巴基斯坦的 Tarbela 坝, 河床覆盖层达 230 余 m, 坝前采用了长度为 17~20 倍水头的水平铺盖防渗, 并利用声纳、海洋研究设备对水下塌坑进行检测, 采用驳料船在水上进行定位和投放, 修补蓄水运行后铺盖出现的裂缝和沉陷坑, 较好地发挥了防渗作用^[13]。再如, 建于 147.95 m 深覆盖层上的下坂地心墙堆石坝^[14], 软黏土库区存在大量影响防渗效果的天窗, 在初步设计阶段, 推荐将天然的软土夹层和人工填土铺盖结合, 并用围堰防渗墙连接; 填土铺盖的下部另设 1 层复合土工膜作为第 2 道防线, 同时沿下游坝坡脚设置排水减压井以减小剩余水头。新疆恰拉水库采用了长度为 140 m 的水平铺盖防渗措施, 材料为 0.5 mm 塑料薄膜, 其渗透坡降、渗流量均满足设计要求。工程实践表明^[15], 水平铺盖长度与大坝上游水头之比大于 5 时, 水平铺盖能发挥最佳防渗效果。

2.3 联合防渗措施

对于百米及以上深度的超深覆盖层而言, 单一

的防渗墙防渗在施工技术、建造成本和工期上容易受到制约,而帷幕灌浆也常因上部漏浆问题难以形成连续防渗体。联合防渗措施(墙幕结合防渗、水平防渗与垂直防渗相结合的联合防渗等)在超深厚覆盖层上坝基的渗流控制效果显著。其中,墙幕结合防渗方案综合防渗墙与灌浆帷幕的优点,在嵌入弱风化层一定深度的防渗墙下再进行帷幕灌浆,从而形成上部防渗墙、下部灌浆帷幕的联合防渗体系,可有效降低超深防渗墙的造孔难度,解决基础上部帷幕排数过多、投资较大以及工期较长的不足。同时,上部的混凝土防渗墙可保证坝基防渗关键部位的防渗效果,提高基础防渗的可靠性。水平铺盖联合垂直截渗则可为大坝的渗流控制提供双重保障。表4为深厚覆盖层上采用联合防渗措施的部分典型土石坝工程。

表4 深厚覆盖层上采用联合防渗措施的部分土石坝工程

序号	工程名称	国家	坝型	最大坝高/m	覆盖层深/m	防渗墙深度/m	建成年份
1	尼山	中国	均质土坝	22	22	52	1958
2	Aswan	埃及	黏土心墙堆石坝	111	250	170	1967
3	Manic-III	加拿大	黏土心墙土石坝	108	130	131	1975
4	小浪底	中国	斜心墙堆石坝	160	>80	82	2001
5	冶勒	中国	沥青混凝土心墙堆石坝	125	>420	140	2005
6	泸定	中国	心墙堆石坝	79.5	148	110	2011
7	瀑布沟	中国	砾石土心墙堆石坝	186	75	70	2010
8	下坂地	中国	沥青混凝土心墙堆石坝	78	148	85	2011
9	斜卡	中国	混凝土面板堆石坝	106	45~100	73	2014
10	黄金坪	中国	沥青混凝土心墙坝	83	130	90	在建

联合防渗措施在深厚覆盖层上的土石坝渗流控制中已卓有成效。埃及 Aswan 黏土心墙堆石坝建于 250 m 深河床覆盖层上,大坝采用由黏土心墙、上游铺盖以及 8 排最大深度为 170 m 的墙下帷幕构成的复合防渗体系^[16];加拿大的 Manic-III 黏土心墙土石坝,河床冲积层主要由细砂、卵石、块石构成,最深处达 130 m,河床的坝基防渗系统由混凝土防渗墙、上游水平铺盖、上游围堰混凝土防渗墙构成。国内,建于 420 余 m 深覆盖层上的冶勒水电站,坝基左岸采用墙幕联合防渗,河床坝段采用封闭式混凝土防渗墙,右坝肩在 2 层共 140 m 深的混凝土防渗墙下再设置 60 m 深的灌浆帷幕,墙幕搭接处长 25 m,总防渗深度约为 200 m,创造性地采用双层接力措施保证了防渗墙的施工质量^[17]。泸定水电站坝基覆盖层厚达 148 m,地层为砂卵石层,粒径较大,含有

大的孤石、漂石以及胶结地层,主河床段采用“110 m 深悬挂式防渗墙+墙下 2 排帷幕灌浆”的基础渗控措施,且下游设有反滤层以确保大坝的运行安全,其防渗墙施工过程采用了如接头孔技术、黏土泥浆结合 NMH 正电胶泥浆的固壁技术、排渣管技术等诸多新技术和工艺^[18-19]。新疆下坂地沥青混凝土心墙堆石坝坝基覆盖层厚度达 148 m,透水性强,极易坍塌和漏浆且块石坚硬,防渗处理难度大。该工程采用了大深度混凝土防渗墙下接帷幕灌浆的墙幕结合防渗形式,即在大坝心墙下设置深 85 m 的混凝土防渗墙,墙底部再接 4 排 66 m 深的灌浆帷幕直达基岩彻底截断覆盖层,墙幕搭接长度为 10 m^[14]。坝基覆盖层厚达 80 余 m 的小浪底工程,坝基采用 80 m 混凝土防渗墙联合水库淤沙形成的天然水平铺盖,构成水平防渗与垂直防渗相结合的联合防渗体系,防渗墙与岩体接触的部位以及倒悬的陡壁处均进行了高喷连接。同时,采用了两钻一抓、平板式接头、夹砂层特殊处理工艺、GIN 灌浆法和稳定浆液法等多项基础处理新技术^[20]。瀑布沟砾石土心墙堆石坝坐落在深覆盖层上^[21],覆盖层深近 80 m,孤石量超过 70%,架空现象明显,防渗处理采用 2 道间隔 12 m 的高强度、低弹模防渗墙,下接帷幕灌浆,心墙与坝基混凝土防渗墙采用“单墙廊道式+单墙插入式”连接,并采用定向聚能爆破,用钻头重砸法处理孤、漂石。尼山水库大坝采用刚、塑性混凝土防渗墙与水泥灌浆帷幕联合方案处理强透水层砾质粗砂和岩溶型灰岩,解决了坝基渗透变形、坝前阶地塌坑和坝后沼泽化等难题^[22]。小湾水电站的上游围堰工程,选用了混凝土防渗墙和 5 排帷幕灌浆的组合形式进行防渗^[23]。随着反滤层保护渗流出口理念的逐步受重视,深覆盖层地基的渗流控制也有了一些新尝试。有许多工程防渗处理后下部基岩不再进行灌浆处理,如地基砂砾石厚 44 m 的密云水库白河主坝、地基砂砾石厚 34 m 的碧口土石坝和地基砂砾石层厚 80 m 的黄河小浪底堆石坝,在用防渗墙防渗后下部基岩均未作灌浆防渗,运行情况良好^[24]。

3 数值计算分析

电网络模拟等技术是 20 世纪 50 年代和 60 年代前期分析地下水渗流问题的主要手段,在 60 年代后期,计算机技术的引入使得有限差分法、有限单元法、边界元法、有限积分法等数值模拟技术在渗流控制领域得到了快速发展。

垂直防渗方面,许多学者从防渗墙深度、铺盖长度和覆盖层渗透性等角度开展了深厚覆盖层上土石坝的渗流控制优化研究。白勇等^[6,25-27]指出:渗透

系数较大的坝基覆盖层是大坝渗流的主要通道;封闭式防渗墙最能取得有效的防渗效果;悬挂式防渗墙的深度取覆盖层厚度的70%较为合理;仅凭铺盖无法有效控制坝基渗流,覆盖层的渗透系数和渗透各向异性对坝基和大坝渗流场均有一定影响。蔡元奇等^[28]对采用倒悬挂式防渗墙的堆石坝进行渗流场分析,指出渗流及渗流量主要由未封闭的覆盖层控制,下游坝底的反滤层和排水很重要,增大防渗墙的深度可减小其底部局部区域的水力坡降,且覆盖层的渗透系数对坝基渗流影响显著。孙明权等^[29]对巴底水电站坝址区深覆盖层的渗透稳定性进行了分析,指出在覆盖层地基内采用混凝土防渗墙应尽量增大防渗墙深度,并结合帷幕灌浆封堵防渗墙不能达到的深度,最大坡降和渗流量均随防渗墙深度和厚度的增大而降低。沈振中等^[30]针对建于47 m深覆盖层上的察汗乌苏混凝土面板砂砾石坝,建立了模拟其防渗墙、帷幕、不同排水布置方案下的三维有限元模型,论证了所设计防渗排水系统的有效性,分析稳定渗流期坝区渗流场,研究其周边缝和面板缝部分止水失效后渗漏水对大坝渗流场的影响,优化了防渗体系。Xu等^[31]针对斜卡混凝土面板堆石坝,建立了三维有限元模型,计算分析了坝体、坝基和两岸岩体的渗流特性,指出由防渗帷幕、防渗墙、连接板、趾板和面板等构成的防渗体系可以显著改善坝体和坝基的渗流特性,再结合两岸向山体延伸约100 m的防渗帷幕,可与大坝防渗体形成一套完整的防渗体系。

水平防渗方面,袁莹等^[32]基于边界元法分析土石坝的铺盖长度对无限深透水地基渗流的影响,指出坝基渗漏量呈抛物线分布且与铺盖长度成反比,当铺盖长度超过最优值后不再显著影响坝基渗流特性;无限深透水地基上的低、中、高土石坝的铺盖长度可分别取25~28倍的上游水头、28~30倍的上游水头及30倍的上游水头。陈亮亮^[33]针对难以确定无限深地基上水平铺盖防渗计算边界的问题,基于直接边界元法的基本原理,通过假设某一深度的边界确定计算模型,若计算值与真实值相符则假定边界即为实际边界;并且用直接边界元法得到了无限深透水地基上土石坝水平铺盖长度与坝基渗流特性的相互关系。徐毅^[34]用液限红黏土模拟实际工程中的微透水土工膜进行模型试验,并与基于geoslope软件的数值计算结果进行对比分析,得出水平铺盖的最优长度是坝前水深的26~30倍。沈振中等^[35]采用非稳定饱和-非饱和渗流理论和 Galerkin 有限元法建立三维有限元模型,对复合土工膜缺陷渗漏量室内物理模型试验进行了数值模拟,验证了

饱和-非饱和渗流方法可以有效模拟复合土工膜缺陷渗流场和计算缺陷渗流量。

近年来,防渗墙应力变形等方面的研究也颇见成效。温立峰等^[36]采用三维有限元方法研究深厚覆盖层上面板坝防渗墙应力变形性状,指出防渗墙的应力与变形不易受分期筑坝影响,而竣工期的防渗墙受筑坝速度影响较大;且施工顺序对防渗墙应力变形有明显影响,较晚施工防渗墙可以改善其应力变形状态。崔娟等^[37]分析了深厚覆盖层上采用2道混凝土防渗墙的坝体和防渗墙的应力及变形,指出防渗墙和坝体接触区应力复杂,应采用弹性模量较低的填料,在满足防渗要求前提下,防渗墙插入心墙的深度应尽量小。庞琼等^[38]指出深覆盖层中的垂直防渗体相当于弹性地基上的薄板,降低墙体的弹性模量和强度比值可改善墙体的应力状态,且防渗体上部与坝体的接缝质量对墙体质量影响显著。温续余等^[39]通过数值计算分析了坝基防渗墙与趾板的不同连接方式,指出柔性连接形式较好,同时应注意防渗墙与连接板之间的沉降差异处理及连接板长度的优化设计。邱乾勇等^[40]针对某深厚覆盖层上的高混凝土面板堆石坝工程,采用非线性有限元方法比较分析了趾板分别置于基岩上和覆盖层上面板的变形、应力分布以及各个接缝的变形,指出将趾板建于挖除覆盖层后的基岩上有利于面板结构的稳定和减小各个接缝的变形。

目前,帷幕结合防渗技术尚无规范可循,仍依靠常规防渗墙与帷幕灌浆各自的技术规范来设计和施工。但已有学者就防渗墙最优深度及帷幕搭接技术等问题进行了探索。燕乔等^[23]对帷幕结合技术中如帷幕深度与经济性的组合、帷幕搭接技术、墙内预埋管及墙下帷幕灌浆等关键问题进行了分析;指出帷幕深度与经济性的组合需综合技术、进度与投资等因素,且应尽量加大上部防渗墙深度以保证防渗效果,帷幕搭接长度推荐取10 m。付巍^[41]基于新疆下坂地水库工程,分析了深厚砂砾石地基上帷幕结合防渗体的深度变化对坝基渗流的影响,指出帷幕结合方案中防渗墙存在一个最优深度值。吴洪波^[42]通过泸定水电站的现场试验研究了帷幕联合防渗方案的关键问题,总结出防渗性能优越且与地层条件相适应的防渗技术及相关的施工工艺,突破传统采用了2 m幕墙搭接长度,并给出了幕墙搭接长度与帷幕厚度、帷幕垂直和水平方向水头损失比之间的关系式。许小东^[43]基于加权重多目标函数法进行了防渗体结构尺寸的优化研究,并对不同搭接长度下防渗体系的受力和位移进行有限元数值模拟以及敏感性分析,得到了优化搭接长度的变化规律。

4 工程实例

4.1 斯木塔斯水电站工程

斯木塔斯水电站工程位于阿克牙孜河出口口的峡谷河段,主坝和副坝均为混凝土面板砂砾石坝,主坝最大坝高 106.00 m,副坝最大坝高 14.10 m。坝址上游沿河发育基座阶地,左岸 V 级阶地以下分布有 3 条古河槽,由上游至下游分别为 3 号、2 号和 1 号古河槽。3 号古河槽距峡谷进口 1.5 km,进口宽约 250 m;2 号古河槽进口距峡谷进口约 700 m,进口宽约 200 m;1 号古河槽进口在峡谷进口上游 80 m 处,进口宽约 250 m。1 号古河槽地形较平缓,覆盖层厚度为 35~70 m,表层为厚 3~8 m 的风积黄土层。峡谷段出口两岸为 II 级阶地,河谷较开阔,高程较低。

根据地形和工程地质条件,建立了工程左岸(包括古河槽、副坝)的三维有限元模型,进行稳定渗流计算分析,研究在正常蓄水工况下左岸的渗流场特性,分析古河槽、副坝渗流场的渗透稳定性以及渗流量。副坝前 1 号古河槽进口处增设黏土铺盖或混凝土面板等防渗设施,对降低副坝下游地下水位、改善坝体和坝基的渗透稳定性、减少渗流量有明显作用,副坝及坝基浸润面示意图见图 1。2 号和 3 号古河槽最大渗透坡降出现在古河槽进口、水库上游坡表层黄土铺盖内的浸润面附近,1 号古河槽进口不同处理方式对 2 号、3 号古河槽黄土层最大渗透坡降以及出口渗透坡降有影响,但影响不大。3 号古河槽渗径较长,其出口渗透坡降小于 2 号古河槽出口渗透坡降;在正常蓄水工况下,2 号、3 号古河槽最大渗透坡降和出口渗透坡降均小于其相应土体的允许渗透坡降,满足古河槽渗透稳定的要求。考虑坝基黄土的强湿陷性,处理后可以改善副坝坝基的渗透稳定性,减少渗流量;仅采用天然表层黄土进行防渗的方案,不能满足古河槽砂卵砾石层渗透稳定的要求,需要增设黏土铺盖或混凝土面板。综合分析,副坝前 1 号古河槽进口处采用混凝土面板方案。此时,1 号古河槽砂卵砾石层的最大渗透坡降为 0.1012,2 号和 3 号古河槽出口的最大渗透坡降分别为 0.0389 和 0.0321,3 条古河槽总渗透流量为 670 万 m^3/a ,可以满足要求。

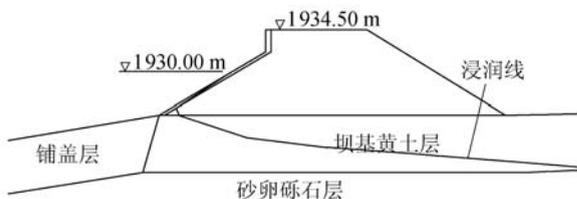


图 1 斯木塔斯水电站工程副坝及坝基浸润面示意图

4.2 多布水电站工程

多布水电站位于西藏林芝地区的尼洋河干流上,枢纽从右至左依次布置有拦河坝、泄洪闸、发电厂房、左岸副坝等建筑物。拦河坝采用土工膜防渗砂砾石坝,与上游围堰结合,最大坝高 28.00 m。左岸台地覆盖层厚 180~360 m;河床覆盖层左深右浅,厚度一般为 60~180 m,左岸最厚 200 m 左右。坝址区覆盖层主要以中等透水土体为主,表部第 2 层($Q_4^{\text{al}}\text{-sgr2}$)含漂石砂卵砾石层为强透水土体,中下部的第 8 层($Q_3^{\text{al}}\text{-II}$)、第 12 层($Q_2^{\text{al}}\text{-III}$)及以下土体为弱透水土体。砂砾石坝采用土工膜防渗,坝基采用混凝土防渗墙防渗(防渗墙深入覆盖层的底高程为 3022.00 m),左岸防渗墙延伸长度 130 m,右岸防渗帷幕延伸长度 175 m。该工程防渗方案示意图见图 2。

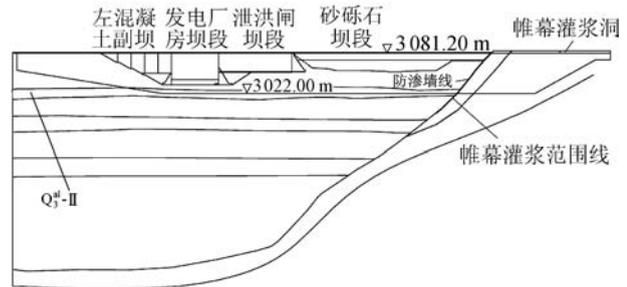


图 2 多布水电站工程防渗方案示意图

采用三维有限元方法,建立了枢纽区的三维有限元模型,计算分析了左岸防渗墙、右岸防渗帷幕以及坝基防渗墙不同布置方案的渗流场,分析坝体和坝基主要分区的渗透坡降,评价坝址区防渗系统布置方案的合理性,提出防渗系统优化布置方案。计算结果表明:防渗墙底高程在覆盖层 $Q_3^{\text{al}}\text{-II}$ 层顶面以下时,其深度对坝体和坝基渗流场性态影响不大,考虑到此时防渗墙底端与土体的接触渗透坡降会较大,建议坝基防渗墙深入至 $Q_3^{\text{al}}\text{-II}$ 地层顶面以下 3~5 m。随着左岸防渗墙延伸长度的增加,各部分的渗透流量和总渗透流量均减小,但减小的幅度不大。随着右岸防渗帷幕布置长度的减小,右岸山体的渗透流量增加较明显,水平布置长度为 115 m 时右岸山体渗透流量与河流径流量相比所占比例很小。综合分析得出,建议混凝土防渗墙深入 $Q_3^{\text{al}}\text{-II}$ 地层顶面以下 3~5 m;左岸混凝土防渗墙延伸长度可缩短至 60 m(左岸混凝土防渗墙底部不进行削坡处理);右岸防渗帷幕向右坝肩布置长度取 115 m,其垂直深度布置在右岸山体弱卸荷带以下 15 m 左右。

4.3 老虎嘴水电站工程

老虎嘴水电站工程位于西藏东南部的巴河干流上,枢纽从右岸到左岸依次为引水发电系统、右岸副坝、溢流坝段、泄洪洞、左岸副坝等建筑物。坝址左岸基岩孤岛左侧分布有古河槽,且基岩孤岛的 upstream

和下游均存在较大规模的冲沟,覆盖层深度为 60 ~ 140 m,最深处为 206 m。覆盖层由三大岩组构成, I 岩组为含漂块石砂卵砾石层, II 岩组为块碎石土, III 岩组为含粉土中细砂层。所以,左岸坝基及绕坝渗漏问题是该工程的重点问题,渗流控制方案采用悬挂式混凝土防渗墙,其设计长度为 300 m,最大深度为 80 m,采用连接板柔性接头与左岸混凝土副坝连接。左坝段基岩设置防渗帷幕,与防渗墙构成左岸坝基和坝肩的完整防渗系统。左岸坝基和坝肩防渗方案见图 3。

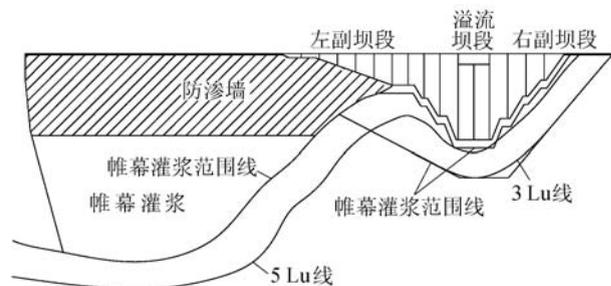


图3 老虎嘴水电站工程左岸坝基和坝肩防渗方案示意图

根据左岸地质条件,建立了能够反映左岸主要地质构造和坝基面几何形状的三维有限元模型,分析左岸坝基和坝肩的渗流特性,对悬挂式混凝土防渗墙的长度、左端深度进行优化,选择满足渗流控制要求且面积最小的防渗墙布置方案^[44]。计算分析表明,由于左下部防渗墙的作用较弱且离河床较远,因此,部分取消左下部防渗墙对地下水位、渗透流量的影响较小; II 岩组砂卵砾石的最大渗透坡降出现在离防渗墙较远的沿河谷岸坡内。下游出逸面离防渗墙较远,最大渗透坡降基本上只与河谷岸坡的材料特性和几何特性有关;防渗墙底部起坡点位置对渗透坡降的影响较大,大于防渗墙左端部深度对渗透坡降的影响,防渗墙起坡点位置不宜小于坝左 0+240 m;防渗墙的长度不宜减小,即取设计长度 300 m。不同的防渗墙左端部深度(20 m 与 40 m)对渗透坡降影响较小,由于地质、水文等资料可能不完整,所建立的数值分析模型与实际物理模型存在偏差,因此,为安全考虑,建议防渗墙左端部深度取 40 m。混凝土防渗墙建议布置方案示意图见图 4。

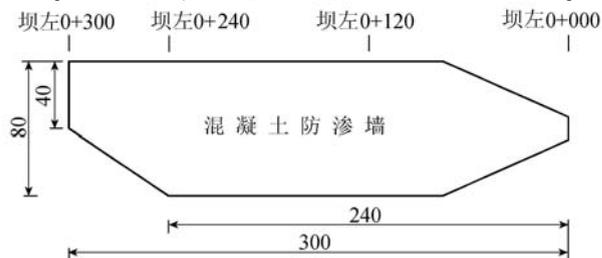


图4 老虎嘴水电站工程混凝土防渗墙建议布置方案示意图(单位:m)

5 结语及展望

深厚覆盖层坝基的防渗控制方案,应根据具体工程的地形地质条件、工程施工难度、环境影响以及投资造价等因素综合决定。以往较侧重于施工技术方面的研究,今后的工作重点应是运用理论分析、数值模拟和试验研究等手段深入分析各个典型工程的防渗机制,探索成熟的深厚覆盖层地基渗流控制措施和指导性规范。

a. 深覆盖层在 80 m 内可选择混凝土防渗墙,大于 80 m 时可考虑采用墙幕结合方案。防渗墙的造价与功效仍受深度的影响显著,超大深度防渗墙的施工技术和管理水平还不能完全满足深厚覆盖层上工程建设的需求。何种条件下可以采用低弹性模量塑性混凝土防渗墙,防渗墙底部存渣厚度对其应力的影响程度,不同连接形式防渗墙的顶部结构性态以及防渗墙是否需要配筋等问题均有待进一步研究。

b. 水平防渗措施运行维护难度大,运行后因基础变形易引起裂缝、塌坑、不均匀沉降等问题,在应用于复杂地层上的高坝工程时,应该慎重考虑。但当库区地形有利,存在较厚坝前淤积物的天然铺盖时可予以考虑。

c. 墙幕结合的防渗技术还存在诸多不足,如作为防渗薄弱环节的墙幕搭接长度问题,防渗墙合理深度的确定问题均没有统一的解决办法,缺乏针对性的计算分析,此外,复杂地基的墙外钻孔仍存在困难。

d. 在深覆盖层上混凝土面板堆石坝的整个防渗体系设计中,防渗墙和趾板的结构、材料以及各个接缝的结构、止水材料均十分关键。高性能接缝止水材料和高性能、低弹模混凝土材料的采用将是今后研究的热点。

参考文献:

- [1] International commission on large dams. The World register of dams [EB/OL]. [2015-05-06]. [http://www. icold-cigb. org/GB/World_register/general_synthesis. asp](http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp).
- [2] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查公报 [EB/OL]. [2013-03-26]. [http://www. mwr. gov. cn/2013pcgb/merge1. pdf](http://www.mwr.gov.cn/2013pcgb/merge1.pdf).
- [3] 许强,陈伟,张倬元. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因机理的新认识[J]. 地球科学进展,2008,23(5): 448-456. (XU Qiang, CHEN Wei, ZHANG Zhuoyuan. New views on forming mechanism of deep over burden on river bed in southwest of China [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 448-456. (in Chinese))
- [4] 陈海军,任光明,聂德新,等. 河谷深厚覆盖层工程地质特性及其评价方法[J]. 地质灾害与环境保护,1996,7

- (4): 54-60. (CHEN Haijun, REN Guangmin, NIE Dexing, et al. Study on engineering geologic characteristic of the deep alluvium in valleys and its evaluation methods [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(4): 54-60. (in Chinese))
- [5] 罗守成. 对深厚覆盖层地质问题的认识[J]. 水力发电, 1995(4): 21-24. (LUO Shoucheng. Cognition of geological problems of thick overburden layer [J]. Water Power, 1995 (4): 21-24. (in Chinese))
- [6] 白勇. 深厚覆盖层地基防渗排水设施对渗流场影响的数值分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [7] 孔祥生, 黄扬一. 西藏旁多水利枢纽坝基超深防渗墙施工技术[J]. 人民长江, 2012, 43(11): 34-39. (KONG Xiangsheng, HUANG Yangyi. Technology of extra-deep cutoff wall construction of dam foundation of Pangduo Hydropower Station in Tibet [J]. Yangtze River, 2012, 43(11): 34-39. (in Chinese))
- [8] 史光宇, 刘牧冲, 刘清利, 等. 西藏旁多水利枢纽坝基深厚覆盖层防渗分析论证[J]. 东北水利水电, 2010, 28(7): 4-6. (SHI Guangyu, LIU Muchong, LIU Qingli, et al. Analysis and demonstration of deep overburden seepage for dam foundation of Pangduo Hydro Project in Tibet [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2010, 28(7): 4-6. (in Chinese))
- [9] 罗玉龙, 罗谷怀, 彭华. 往复式高喷技术在砂卵石堤基防渗中的应用[J]. 人民长江, 2007, 38(8): 103-105. (LUO Yulong, LUO Guhuai, PENG Hua. The application of reciprocating high-injection technique of the anti-seepage at sandy pebble embankment [J]. Yangtze River, 2007, 38(8): 103-105. (in Chinese))
- [10] 凤家骥, 张国安. 柯柯亚面板坝的防渗设计与原型观测[J]. 水力发电, 1989(3): 17-20. (FENG Jiayi, ZHANG Guoan. The anti-seepage design and the prototype measurement of Keke Xiya Concrete Face Rockfill Dam [J]. Water Power, 1989(3): 17-20. (in Chinese))
- [11] 韦春侠, 陈洪武, 王占巨. 察汗乌苏水电站混凝土面板砂砾石坝关键技术[J]. 葛洲坝集团科技, 2009(2): 15-18. (WEI Chunxia, CHEN Hongwu, WANG Zhanju. The key technology of the face sand-gravel dam of Chahan Wusu Hydropower Station [J]. GeZhouBa Group Science & Technology, 2009(2): 15-18. (in Chinese))
- [12] 邓铭江. 严寒、高震、深覆盖层混凝土面板坝关键技术研究综述[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 985-996. (DENG Mingjiang. Advances in key technology for concrete face dams with deep overburden layers under cold and seismic conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 985-996. (in Chinese))
- [13] 司洪洋. 塔贝拉高土石坝超长不透水铺盖简介[J]. 水利水电技术, 1986(10): 54-58. (SI Hongyang. The introduction of the overlength impervious blanket at Tabeila Earth-Rockfill Dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1986(10): 54-58. (in Chinese))
- [14] 王根龙, 崔拥军, 寿立勇, 等. 新疆下坂地水利枢纽坝基垂直防渗试验研究[J]. 人民长江, 2006, 37(6): 59-61. (WANG Genlong, CUI Yongjun, SHOU Liyong, et al. The vertical seepage control experiment of dam foundation of Xinjiang Xiabandi Hydro-Junction [J]. Yangtze River, 2006, 37(6): 59-61. (in Chinese))
- [15] 冯新权. 牟山水库防渗墙的研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [16] 赵纯厚, 朱振宏, 周端庄. 世界江河与大坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 1000-1019.
- [17] 余学明. 冶勒水电站坝基防渗处理设计[J]. 水力发电, 2004, 30(11): 46-49. (YU Xueming. Design of seepage control in dam foundation of the Yele Hydropower Station [J]. Water Power, 2004, 30(11): 46-49. (in Chinese))
- [18] 姜媛媛, 晏国顺, 金伟, 等. 泸定水电站黏土心墙堆石坝基础渗控方案研究[J]. 水力发电, 2011, 37(5): 17-19. (JIANG Yuanyuan, YAN Guoshun, JIN Wei, et al. Research on foundation seepage control of Luding Rockfill Dam with clay core wall [J]. Water Power, 2011, 37(5): 17-19. (in Chinese))
- [19] 李振学, 李明辉. 泸定水电站深厚覆盖层防渗墙施工技术[J]. 水力发电, 2012, 38(1): 50-53. (LI Zhenxue, LI Minghui. Construction of cut-off wall in deep overburden for Luding Hydropower Station [J]. Water Power, 2012, 38(1): 50-53. (in Chinese))
- [20] 段世超, 王素静. 小浪底大坝防渗墙设计[J]. 人民黄河, 1996, 18(7): 55-58. (DUAN Shichao, WANG Shuijing. Design of infiltration protection wall at Xiaolangdi Dam [J]. Yellow River, 1996, 18(7): 55-58. (in Chinese))
- [21] 吕洪旭, 陈科文, 邓建辉, 等. 瀑布沟大坝防渗墙应力分布特性及机理探讨[J]. 人民长江, 2011, 42(10): 39-43. (LÜ Hongxu, CHEN Kewen, DENG Jianhui, et al. Discussion on mechanism and stress distribution features of diaphragm walls of Pubugou Hydropower Station during construction period [J]. Yangtze River, 2011, 42(10): 39-43. (in Chinese))
- [22] 杜青, 高峰, 刘希成, 等. 墙幕连体防渗技术在尼山水库的实践[J]. 水利规划与设计, 2007(2): 34-36. (DU Qing, GAO Feng, LIU Xicheng, et al. The application of wall and curtain combination on the anti-seepage of Nishan Reservoir [J]. Water Resources Planning and Design, 2007(2): 34-36. (in Chinese))
- [23] 燕乔, 王立彬, 毕明亮, 等. 深厚覆盖层墙幕结合技术关键问题研究[J]. 人民长江, 2009, 40(16): 34-36. (YAN Qiao, WANG Libin, BI Mingliang, et al. The key technique of wall and curtain combination on thick overburden layer [J]. Yangtze River, 2009, 40(16): 34-36. (in Chinese))
- [24] 刘杰, 谢定松. 我国土石坝渗流控制理论发展现状[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 714-718. (LIU Jie, XIE Dingsong. Advances of earth-rock dam seepage control

- theory in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 714-718. (in Chinese))
- [25] 张文捷,魏迎奇,蔡红. 深厚覆盖层垂直防渗措施效果分析[J]. 水利水电技术, 2009, 40(7): 90-93. (ZHANG Wenjie, WEI Yingqi, CAI Hong. Analysis on effect of vertical seepage control measure for deep overburden [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(7): 90-93. (in Chinese))
- [26] 温立峰,范亦农,柴军瑞,等. 深厚覆盖层地基渗流控制措施效果数值分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 127-132. (WEN Lifeng, FAN Yinong, CHAI Junrui, et al. Numerical analysis on effect of seepage control measure for deep overburden foundation [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 25(1): 127-132. (in Chinese))
- [27] 谢兴华,王国庆. 深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2708-2712. (XIE Xinghua, WANG Guoqing. A study of anti-seepage wall depth in thick overburden dam base [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2708-2712. (in Chinese))
- [28] 蔡元奇,朱以文,唐红,等. 在深厚覆盖层坝基上建堆石坝的防渗研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2005, 38(1): 18-22. (CAI Yuanqi, ZHU Yiwen, TANG Hong, et al. Research on anti-seepage for rockfill dam on deep overburden [J]. Engineering Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2005, 38(1): 18-22. (in Chinese))
- [29] 孙明权,樊静. 深覆盖层土石坝渗流性能分析[J]. 山西建筑, 2012, 38(3): 234-236. (SUN Mingquan, FAN Jing. Analysis on seepage flow performance of soil-rock dam with deep overburden [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(3): 234-236. (in Chinese))
- [30] 沈振中,甘磊,苗喆. 深覆盖层上坝区防渗系统优化 [C]//鲜学福. 渗流力学与工程的创新与实践: 第十一届全国渗流力学学术大会论文集. 重庆: 重庆大学出版社, 2011: 351-355.
- [31] XU Liquan, SHEN Zhenzhong, TANG Yong. The seepage characteristics analysis for Xieka Concrete Face Rockfill Dam [C]//Flow in Porous Media-from Phenomena to Engineering and Beyond. Marrickville, Australia: Orient Acad Forum, 2009: 868-871.
- [32] 袁莹,侍克斌,李玉建,等. 无限深透水地基上土石坝铺盖长度对坝基渗流的影响[J]. 水力发电, 2007, 33(1): 34-36. (YUAN Ying, SHI Kebin, LI Yujian, et al. The influence of impervious blanket length for earth-rock foundation seepage on infinite deep pervious foundation [J]. Water Power, 2007, 33(1): 34-36. (in Chinese))
- [33] 陈亮亮. 无限深透水地基上土石坝水平铺盖防渗体渗流的数值解[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008.
- [34] 徐毅. 非均质无限深地基上带有微透水水平铺盖的土石坝渗流研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [35] 沈振中,江沅,沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1091-1095. (SHEN Zhenzhong, JIANG Hang, SHEN Changsong. Numerical simulation of composite geomembrane defect leakage experiment based on saturated-unsaturated seepage theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1091-1095. (in Chinese))
- [36] 温立峰,柴军瑞,王晓,等. 深覆盖层上面板堆石坝防渗墙应力变形分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 84-91. (WEN Lifeng, CHAI Junrui, WANG Xiao, et al. Stress and deformation of cut-off wall of concrete faced rockfill dam built on deep overburden foundation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(2): 84-91. (in Chinese))
- [37] 崔娟,沈振中,翟迎春,等. 深覆盖层上壤土心墙土石混合坝三维有限元应力变形分析[J]. 大坝与安全, 2009(6): 26-31. (CUI Juan, SHEN Zhenzhong, ZHAI Yingchun, et al. 3D FEM analysis of deformation and stress for a high earth-rockfill dam with core wall on deep overburden [J]. Dam and Safety, 2009(6): 26-31. (in Chinese))
- [38] 庞琼,王士军,谷艳昌,等. 土石坝垂直防渗加固措施综述[J]. 水利水运工程学报, 2014(4): 28-37. (PANG Qiong, WANG Shijun, GU Yanchang, et al. A review of vertical anti-seepage reinforcement measures for earth and rockfilled dam [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 28-37. (in Chinese))
- [39] 温续余,徐泽平,邵宇,等. 深覆盖层上面板堆石坝的防渗结构形式及其应力变形特性[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 211-216. (WEN Xuyu, XU Zeping, SHAO Yu, et al. Study on seepage blocking structure in CFRD built on deep alluvium foundation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 211-216. (in Chinese))
- [40] 邱乾勇,沈振中,王伟. 深覆盖层对面板堆石坝面板变形和应力的影响[J]. 水力发电, 2008, 34(1): 38-41. (QIU Qianyong, SHEN Zhenzhong, WANG Wei. Influence on deep overburden on deformation and stress of concrete face of CFRD [J]. Water Power, 2008, 34(1): 38-41. (in Chinese))
- [41] 付巍. 帷幕结合防渗体系对深厚砂砾石坝基渗流影响分析[J]. 大坝与安全, 2011(4): 15-18. (FU Wei. Effect of combination of wall and curtain on seepage at deep and thick sand-gravel foundation [J]. Dam and Safety, 2011(4): 15-18. (in Chinese))
- [42] 吴洪波. 帷幕结合在深厚覆盖层中的应用[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [43] 许小东. 深厚砂砾石地基帷幕结合防渗体系结构优化研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2011.
- [44] 沈振中,张鑫,陆希,等. 西藏老虎嘴水电站左岸渗流控制优化[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1230-1234. (SHEN Zhenzhong, ZHANG Xin, LU Xi, et al. Seepage control optimization of left bank of Laohuzui Hydropower Station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1230-1234. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-05-28 编辑: 骆超)