DOI:10.14188/j.1671-8844.2026.0080 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-16

抽水蓄能电站工程区渗流场全过程演变规律研究

彭湃[1,2],陈益峰[1,2*],任旺[1,2],周佳庆[1,2],胡冉[1,2],杨志兵[1,2]

(1. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:抽水蓄能电站具有水头高、埋深大、水库水位波动频繁等显著特点,工程区渗流场在洞室群开挖、充水试验以及运行全过程中将发生强烈变化,揭示其演变规律对于工程防渗优化设计与安全控制具有重要意义。依托五岳抽水蓄能电站工程,基于勘探期钻孔地下水位观测数据、施工期隧洞渗涌水观测数据以及充水试验阶段渗压/流量观测数据,采用非稳定渗流分析方法,开展了包含初始渗流场演算、施工期与充水试验期渗流场校正、运行期渗流场预测的全过程分析,系统揭示了工程区渗流场"下降—暂态平衡—回升—再平衡"的阶段性演变规律。计算结果表明:地下厂房洞室群施工开挖及排水系统实施引起地下水位显著下降,在厂区周围形成半径约750 m的降落漏斗,地下水位最大降幅达243.6 m,各洞室渗漏量先增后减,直至开挖完成后约1~1.5年内达到新的暂态平衡;在充水试验和运行阶段,厂区地下水位整体回升,降落漏斗范围收缩约41%,各洞室渗漏量在充水之后迅速增大,并在运行8~10个月后趋于动态稳定;厂区防渗排水性能良好,洞室群围岩渗压得到有效控制,且受充水和运行过程的影响较小,渗流场对上水库水位波动的响应呈现明显的"阻滞"和"滤波"效应,地下水位和渗流量的变化明显滞后且小于上水库的水位变化。研究成果对于抽水蓄能电站工程的渗流分析与防渗安全评价具有重要指导意义。

关键词:抽水蓄能电站;非稳定渗流;全过程分析;数值模拟;防渗安全

中图分类号: **文献标志码:**A

Whole-process evaluation of seepage field at the site of a pumped storage power station

PENG Pai[1,2], CHEN Yi-feng[1,2*], REN Wang[1,2], ZHOU Jia-qing[1,2], HU Ran[1,2], YANG Zhi-bing[1,2]

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering(Ministry of Education), Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Pumped storage power stations are characterized by high hydraulic heads, great burial depths, and frequent reservoir water level fluctuations. The seepage field at the site undergoes pronounced variations throughout the whole process of cavern excavation, water-filling tests, and long-term operation. Revealing its evolution pattern is of great significance for the optimization of seepage control design and safety management. Taking the Wuyue pumped storage power station as a case study, a whole-process seepage analysis was conducted using a transient seepage method, based on groundwater level observations from exploration-stage

收稿日期:XXXX-XX-XX

作者简介:彭湃,男,2001年生,硕士研究生,主要从事岩体渗流分析与控制方面的研究工作。E-mail: pengpai@whu.edu.cn

通信作者:陈益峰,男,1974年生,博士、教授,博士生导师,主要从事水工渗流与多场耦合方面的研究工作。E-mail: csyf-chen@whu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(U2340228,52494972)

本文引用格式:彭湃,陈益峰,任旺,等.抽水蓄能电站工程区渗流场全过程演变规律研究[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-16.

Citation:PENG Pai, CHEN Yi-feng, REN Wang, et al. Whole-process evaluation of seepage field at the site of a pumped storage power station[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-16.

boreholes, tunnel inflow measurements during construction, and piezometric pressure and seepage discharge monitoring data during the water-filling test. The analysis framework covered the computation of the initial seepage field, calibration of the seepage field during the construction and water-filling stages, and prediction of the seepage field during the operation stage, systematically revealing a staged evolution pattern of the seepage field characterized by "drawdown - transient equilibrium - rebound - re-equilibrium." The numerical results indicate that excavation of the underground powerhouse cavern group and the implementation of the drainage system caused a significant decline in groundwater levels, forming a depression cone with a radius of approximately 750 m around the powerhouse area, with a maximum groundwater level decrease of 243.6 m. Seepage discharges from the caverns initially increased and then gradually decreased, reaching a new transient equilibrium approximately 1 - 1.5 years after the completion of excavation. During the water-filling test and operation stages, groundwater levels in the powerhouse area generally rebounded, the drawdown cone area shrank by about 41%, and seepage discharges from the caverns increased rapidly after impoundment and gradually stabilized within 8 - 10 months of operation. The seepage control and drainage system in the powerhouse area performed effectively, maintaining seepage pressures in the surrounding rock at a low level and exhibiting limited sensitivity to water-filling and operational processes. The seepage field response to upper reservoir water level fluctuations shows pronounced lagging and filtering effects, with variations in groundwater levels and seepage discharges being significantly delayed and smaller in magnitude than the bireservoir water level changes. The findings are of great significance for seepage analysis and seepage safety evaluation of pumped storage power station projects.

Key words: pumped storage power station; transient seepage flow; whole-process analysis; numerical simulation; seepage safety

引 言

在以新能源为主体的新型电力系统加快构建的背景下,电力系统对大容量、安全可靠储能设施的需求不断提升,抽水蓄能凭借其技术成熟、调节能力强和运行稳定等优势,工程建设需求日益迫切[1-3]。在"双碳"目标的推动下,近年来我国抽水蓄能开发建设快速推进,其中不乏有扬程突破700 m级的超高水头抽水蓄能电站,如敦化、长龙山、阳江、天台等[4]。这些抽蓄工程普遍具有水头高[5]、隧洞埋深大[6]、水位波动频繁[7]等特点,其建设运行过程通常涵盖施工开挖、充水试验及运行调节等多个阶段。在复杂地质条件和周期性变化的运行工况下,输水发电系统与地下厂房洞室群围岩的渗透稳定性和防渗安全面临严峻挑战。

国内外学者针对电站建设运行的不同阶段广泛开展了渗流分析研究。在施工开挖初期,防渗排水系统尚未实施或难以充分发挥作用,洞室开挖以及断层等不良地质体的揭露会引起地下水快速向洞室内排泄,对施工安全与进度造成严重干扰[8-9],如锦屏二级水电站辅助洞长达5年的掘进过程中,先后发生7次较大规模的突涌水,最大涌水量达15.60 m^3/s[10];在充水试验阶段,隧洞内水压力在短时间内大幅升高,内外水头差剧烈变化,容易在衬砌或围岩的薄弱部位形成内水外渗的优势通道,进而引发衬砌结构破坏与异常渗漏[11-12],如广州抽水蓄能电站二期工程岔管区受透水性较强的微张节理及局部灌浆缺陷影响,在首次充水过程中出现衬砌开裂及支洞喷射状高压渗水现象,总渗水量达32 L/s[13];在运行阶段,上、下库水位的周期性频繁波动使工程区渗流场长期处于动态调整过程中,地下水位及渗流量随运行工况持续变化,进而可能对工程结构的耐久性与整体稳定性构成潜在风险[14-15],如美国Taum Sauk抽水蓄能电站上水库长期存在渗漏问题,在约40年的运行过程中坝体持续发生细颗粒流失,最终诱发溃坝事故[16]。

在抽水蓄能电站工程建设与运行过程中,地下水系统持续受到强烈的人为扰动,促使工程区渗流场不断发生变化。即使在工程建设期间布设了防渗帷幕和排水系统,异常渗漏、渗透失稳、渗流诱发变形等问题仍时有发生[17-18],对工程防渗安全与长期稳定运行构成潜在威胁。尽管工程建设运行各阶段对地质条件、岩体性质和边界条件的认识存在显著差异,工程渗流场研究大多基于特定的分析目的而侧重某一阶段或某个状态的分析和评价,如施

工完成时刻[19]或正常蓄水条件下[20]的稳定渗流场分析等。这种分析方法虽可在一定程度上反映特定工况下的工程渗流特征,但难以刻画工程建设运行全过程中渗流场的演变规律;同时,单一阶段、单一状态的稳态分析往往忽略了渗流响应的时间效应,从而制约了对工程防渗安全的全过程评价。

工程渗流场全过程分析对于工程风险的早期识别与动态评估具有重要意义[21-22],其核心思路是随着工程方案的调整、工程建设的推进、地质条件的揭露和监测数据的积累,持续修正渗流分析的模型、参数和边界条件,从而连续性地揭示工程渗流场的演变规律以及防渗安全性的变化特征。与仅针对单一阶段或单一状态的渗流分析相比,全过程分析能够连续反映工程施工运行的时效特征,避免因阶段分割而错估潜在风险,在揭示复杂工程长期性能演变规律方面具有明显优势。基于上述认识,国内学者采用全过程分析方法开展了周宁抽水蓄能电站大坝混凝土温度、变形及应力研究[23]。然而,针对深埋地下厂房洞室群施工开挖、输水发电系统充水以及运行阶段上下库水位周期性波动过程中,抽水蓄能电站工程区渗流场的演变规律尚缺乏系统性的研究框架和工程验证。

本文依托五岳抽水蓄能电站工程,基于工程勘探期、建设期和充水试验阶段的监测数据,采用非稳定渗流分析方法,开展工程区渗流场在建设运行全过程中的时空演变规律分析,揭示施工开挖、防渗排水及库水位变化等因素对渗流场演变的影响机制,评价工程建设运行不同阶段的防渗安全性。研究成果可为抽水蓄能电站工程防渗设计、评价与优化提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

五岳抽水蓄能电站工程位于淮河的一级支流寨河上游主干青龙河上,总装机规模为1000 MW。电站工程规模为Ⅱ等大(二)型,主要建筑物包括上水库混凝土面板堆石坝、输水系统、地下厂房、地面开关站及下水库等,上、下水库间直线距离为1.85 km,距高比为7.7,如图1所示。

电站上水库利用一季节性流水冲沟开挖而成,设计正常蓄水位347.50 m、死水位311.50 m,蓄能发电调节库容946×10^4 m^3。大坝坝型为混凝土面板堆石坝,最大坝高128.20 m。下水库利用上世纪70年代初修建的五岳水库,为一多年调节水库,正常蓄水位89.18 m、死水位77.88 m。

输水发电系统呈东西走向,包括引水系统、地下厂房洞室群、尾水系统。引水和尾水系统均采用两洞四机方式布置、斜进正出厂房方案,输水隧洞最大垂直埋深约310 m,上平段至厂房上游侧的高压岔管段采用混凝土衬砌,高压岔管段末端至厂房上游侧边墙采用钢衬。主厂房采用地下首部式布置,垂直埋深为230 m~275 m,开挖尺寸为165.0 m×24.5 m×55.1 m(长×宽×高),顶拱高程为50.5 m。

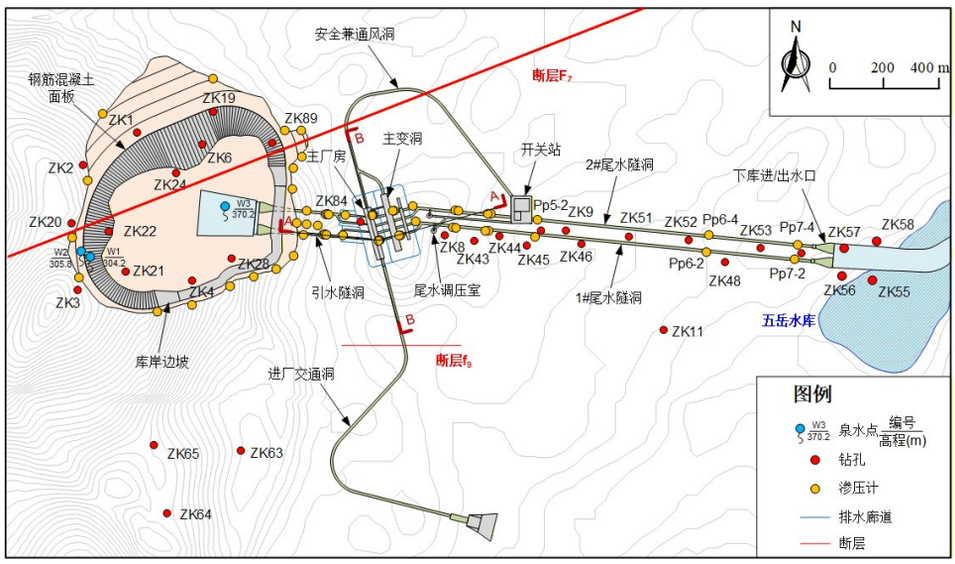
工程区地下水类型为基岩裂隙水和赋存于上覆土体中的孔隙潜水,主要接受大气降水补给。上水库集雨面积较小,库区沟谷发育,地下水多以泉点形式向库内排泄。库坝区共见3个下降泉,分布于西侧垭口及南侧分水岭,出露高程304~370 m,泉流量明显随降雨变化,丰水期流量较大,枯水期流量减小甚至干涸。输水发电系统沿线地下水埋深差异较大,上水库进/出水口段埋深较小(2.5~12.3 m),地下厂房区埋深较大(56.0~76.0 m)。下水库库坝区两岸的冲沟高程都在89 m以上,水流均汇入五岳水库,地下水位总体受水库水位控制。

根据信阳气象站2004~2025年观测资料,研究区多年平均年降雨量为1099.4 mm。降雨主要集中在5~8月,尤以7月和8月最为显著,2007年7月的降雨量甚至达752.8 mm;而11月至次年2月降雨稀少,月均值普遍小于50 mm,呈现典型的夏季多雨、冬季少雨的亚热带季风气候特征。

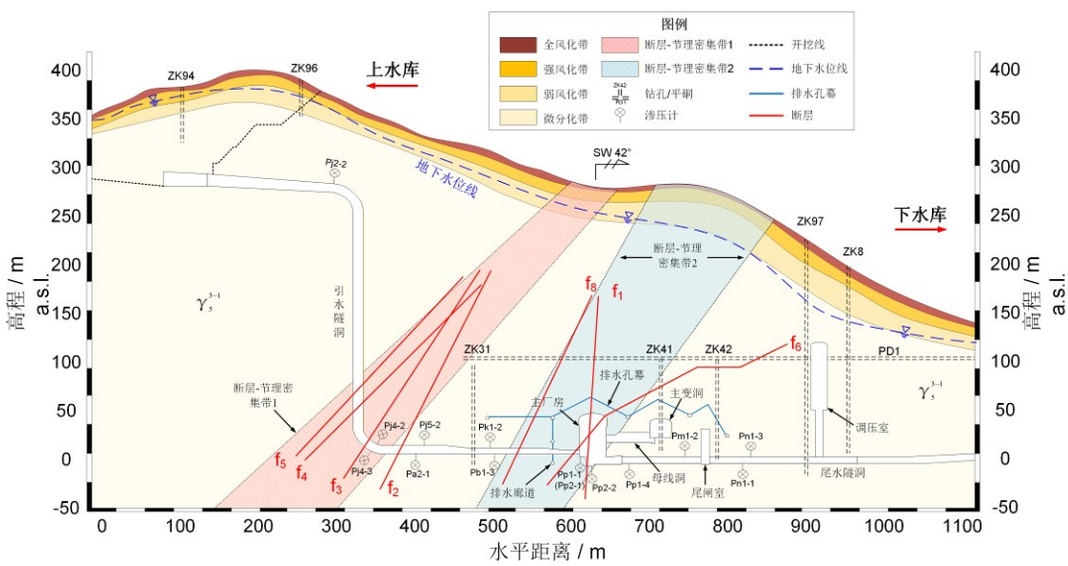
1.2 工程地质条件

工程区属豫南侵蚀低山丘陵区,地形总体呈西高东低。工程区出露的地层岩性简单,主要有燕山晚期侵入的中粒花岗岩($\gamma_5^{3\text{-}1}$)、中元古界龟山组片岩(Pt_2g)以及泥盆系南湾组变粒岩(D_n^2)。覆盖层(Q)埋深为0~3 m,其分布、组成极不均一,主要有残坡积物(Q^{edl})、冲洪积及水库淤积物(Q^{apl})、崩塌堆积物(Q^{col})等。

工程区内无区域性断裂通过,主要地质构造形迹为小规模断层和节理裂隙,如图1(b)所示。其中,上水库库区主要发育有断层F_7,斜穿东侧分水岭,走向与坝轴线近于正交,透水性较强;下水库库区断裂构造不发育,总体以小规模的节理裂隙为主。引水隧洞和地下厂房区域围岩为完整性较好的花岗岩,局部发育有小规模断层和长大节理,破碎带宽度为0.05 m~0.20 m,延伸长度数十米,走向与输水发电系统轴线方向交角多介于30°~50°之间;优势节理裂隙以NE向发育程度较高,陡倾角为



(a)工程布置图



(b)输水发电系统轴线地质剖面图(A-A剖面)

图1 五岳抽水蓄能电站总体布置及地质剖面图

Fig.1 Layout and geological cross-section of the Wuyue pumped storage power station

主,在引水隧洞竖井段以及厂房和母线洞区域发育有2个断层-节理密集带(见图1(b))。工程区岩体的透水性与岩性、埋深和节理裂隙发育程度密切相关,尤其受岩体的风化卸荷程度、节理密集带和断层破碎带的影响较大。为评估工程区岩体的渗透性,对工程区35个钻孔共计578段压水试验数据进行了统计分析,钻孔位置如图1(a)所示。统计结果表明,岩体的透水性以微透水和弱透水为主,且随着埋深的增大,岩体渗透系数的量值和变异性均明显减小,如图2所示。对每10 m埋深范围内试段的渗透系数取算术平均值,发现岩体的渗透系数与埋深之间服从如下幂函数分布:

$$K = K_0 d^{\alpha} \tag{1}$$

式中:K为渗透系数(cm/s),d为埋深(m),K_0为近地表岩体的渗透系数,α为幂指数,拟合值为$K_0 = 1.85\times10^{-6}$ cm/s和$\alpha = -1.47$,拟合决定系数R^2为0.91。

式(1)实质上反映了岩体完整性及构造发育特征对渗透性的影响,即随着埋深的增大,岩体风化卸荷程度及裂隙发育程度减弱,完整性增强。同时,地应力水平增大,节理裂隙的张开度减小,因而岩体的渗透性明显减弱。依据其风化程度,工程区岩体自地表而下可划分为全风化、强风化、弱风化以及微风化至新鲜岩体4个分带,各分带岩体渗透

系数的代表性取值如表1所示，表中还列出了给水度S_y和储水率S_s这两个重要水文地质参数的估值。

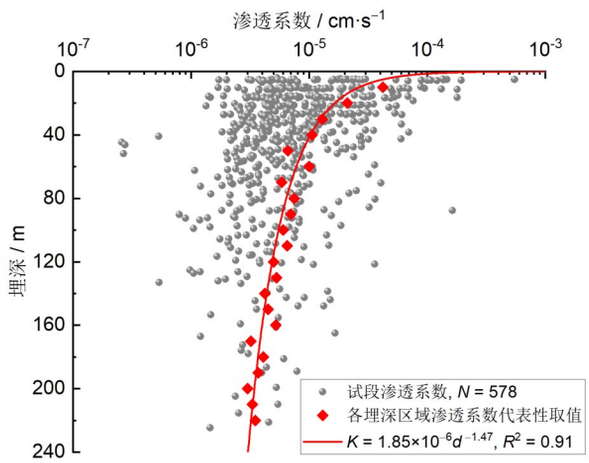


图2 工程区岩体渗透系数随埋深的变化规律

Fig. 2 Variation of the hydraulic conductivity with depth for the rock masses at the site

此外，工程区断层-节理密集带主要由数组近平行展布的裂隙构成，因而平行($K_{//}$)和垂直($K_{\perp}$)于断层-节理密集带方向的岩体渗透性存在较大差异。通过对密集带区域中多段钻孔压水试验数据的统计分析，并结合各优势裂隙组的产状，确定了2个断层-节理密集带的渗流参数取值，如表2所示[24-25]。

1.3 施工过程及厂区防渗排水布置

电站施工过程如图3(a)所示，包括进厂交通洞开挖、地下厂房三大洞室(主副厂房、主变洞、尾闸室)开挖、引水隧洞施工以及输水发电系统充水试验等。地下厂房各洞室由上向下开挖，施工顺序如图3(b)所示。其中，主副厂房共分7层开挖，而主变室则分3层开挖，与主副厂房平行布置，净间距40米。电站4台机组于2025年10月全容量投产发电。

厂区防渗排水主要由防渗帷幕、排水廊道和排水孔幕组成。在主厂房上游侧25 m处设置深度65 m的防渗灌浆帷幕，主厂房、主变洞和尾闸室外围设置三层排水廊道，其底板高程分别为45 m、24 m和-4 m，廊道断面尺寸均为3 m×3 m。从顶层排水廊道向地下厂房和主变洞顶拱设置“人”字形排水孔，各层排水廊道之间以及厂房边墙和主变洞洞壁之间均设置垂直排水孔，并与斜向排水孔连通形成厂区排水系统。排水孔孔径为110 mm、间距为3 m。此外，在引水岔管上方高程44.1 m处布置与厂区相连的横纵向排水廊道，其排水自流汇入厂房集水井；同时，在岔管末端布置2排深15 m、间距1 m的环向防渗灌浆帷幕。

表1 工程区岩体及筑坝材料的渗流参数取值

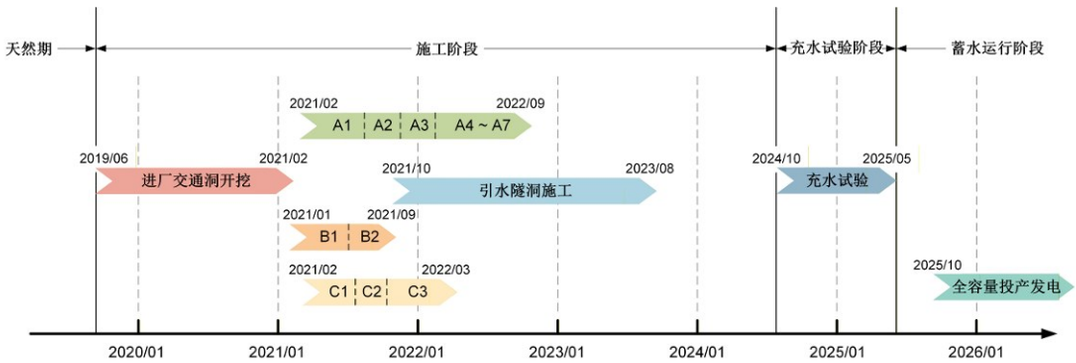
Table 1 Hydraulic parameters of rock masses and dam materials at the site

岩体及材料分区		计算渗透系数取值K(cm•s^{-1})	给水度S_y	储水率S_s(m^{-1})
岩体	全风化岩体	5.00×10^{-4}	0.110	7.26×10^{-6}
	强风化岩体	6.00×10^{-5}	0.050	2.07×10^{-6}
	弱风化岩体	3.00×10^{-5}	0.030	1.01×10^{-6}
	微分化及新鲜岩体	1.00×10^{-5}	0.015	5.73×10^{-7}
	断层F_7	2.00×10^{-4}	0.100	5.00×10^{-5}
	断层f_9	2.00×10^{-4}	0.100	5.00×10^{-5}
材料	混凝土衬砌	1.00×10^{-6}	0.003	3.00×10^{-7}
	固结灌浆	1.00×10^{-5}	0.005	5.00×10^{-7}
	防渗帷幕	5.00×10^{-6}	0.005	5.00×10^{-7}
	混凝土面板	1.00×10^{-9}	0.001	1.00×10^{-7}
	垫层区	5.00×10^{-2}	0.150	3.00×10^{-4}
	过渡区	1.00×10^{-2}	0.160	3.00×10^{-4}
	堆石区	1.00×10^{-1}	0.130	3.00×10^{-4}

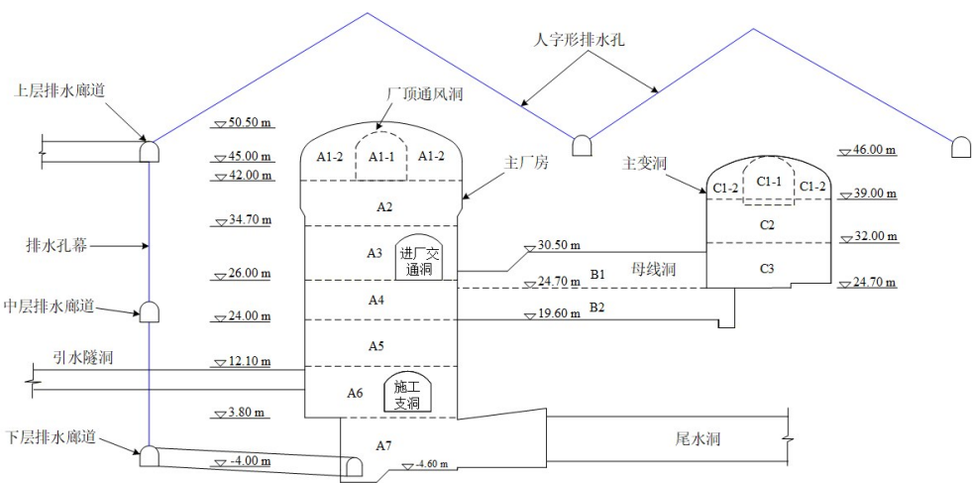
表2 节理密集带的渗流参数取值

Table 2 Hydraulic parameters of fracture zones

断层—节理密集带	产状	等效渗透系数		给水度S_y	储水率S_s(m^{-1})
		$K_{//}$/(cm•s^{-1})	$K_{\perp}$/(cm•s^{-1})		
1	N45°E, NW∠62°	4.00×10^{-5}	1.40×10^{-5}	0.085	3.11×10^{-6}
2	N35°E, NW∠71°	4.90×10^{-5}	1.60×10^{-7}	0.085	3.11×10^{-6}



(a)五岳抽水蓄能电站施工过程



(b)地下厂房洞室群开挖分层示意图

图3 五岳抽水蓄能电站施工过程与厂房开挖示意图

Fig. 3 Construction procedure of the project

1.4 地下水渗漏情况

进厂交通洞沿线地下水较丰富,开挖过程中各洞段渗涌水情况如图4(a)所示。在洞口段(0~352 m),沿节理裂隙有滴水现象,洞顶或洞壁潮湿,渗水量极小;自洞深560 m开始,开挖掌子面部位渗水量明显增大,沿隧洞两壁及拱顶部位有多处线状流水,单点最大渗水量为0.21 L/s,且在开挖期间较为稳定;在洞深944 m处揭露与洞轴线呈大角度相交的断层f_9(见图1),掌子面及两侧边墙多处出现股状涌水,涌水主要来自断层破碎带及其影响带,最大渗水量达65.97 L/s;通过该断层带之后,隧洞围岩条件逐渐改善,掌子面附近渗水量迅速减小,顶拱及边墙区域趋于干燥,未见明显滴水或渗水现象。开挖过程中进厂交通洞各处典型渗水点照片如图4(b)所示。总体而言,在交通洞开挖过程中,渗水量随着开挖推进逐渐减少,其渗水来源主要为含水层中赋存的基岩裂隙水。

2 渗流分析模型

2.1 渗流分析方法

利用非稳定渗流模型开展工程区自天然期至施工期、再到充水运行期全过程的渗流场分析,其控制方程为:

$$(1-H)S_s\frac{\partial h}{\partial t}=\nabla\cdot\left[(1-H)\boldsymbol{K}\nabla h\right] \tag{2}$$

式中:h为水头,$\boldsymbol{K}$为渗透系数张量,S_s为储水率,t为时间,H为Heaviside函数,定义为:

$$H(h-z)=\begin{cases}0, & h\geqslant z \text{ 或 } \boldsymbol{x}\in\Omega_w\\ 1, & h<z \text{ 或 } \boldsymbol{x}\in\Omega_d\end{cases} \tag{3}$$

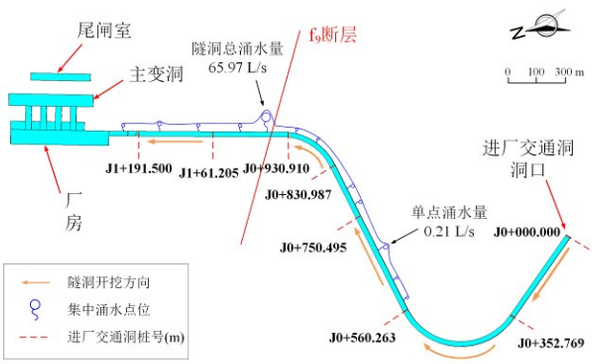
式中:z为垂直位置坐标。

式(2)通过Heaviside函数H,将渗流场的计算域从饱和区Ω_w延拓至包含干区Ω_d的全域Ω中[26]。其定解条件如下:

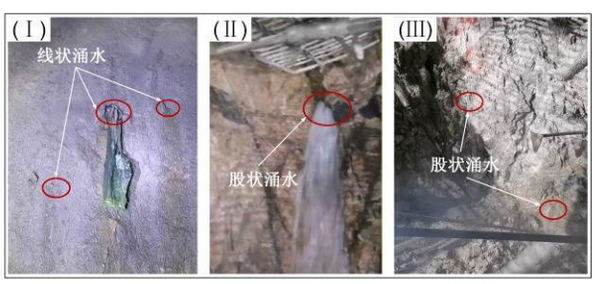
(1)初始条件

$$h(t_0)=h_0(\Omega\text{ 内}) \tag{4}$$

式中:t_0为初始时刻,h_0为初始水头分布。



(a)进厂交通洞渗水情况示意图



(Ⅰ) 洞深608 m处左侧洞壁 (Ⅱ) 洞深920.4 m处洞壁 (Ⅲ) 洞深1003.6 m处掌子面

(b)进厂交通洞典型渗水点照片

图4 进厂交通洞渗水特征及典型渗水点

Fig. 4 Leak characteristics and typical leak points of the plant access tunnel

(2) 水头边界条件

$$h=\bar{h}(\Gamma_{\mathrm{h}}上) \tag{5}$$

式中：$\bar{h}$为水头边界Γ_{h}上的已知水头。

(3) 流量边界条件

$$q_{\mathrm{n}}=\bar{q}(\Gamma_{\mathrm{q}}上) \tag{6}$$

式中：q_{n}为通过边界单位面积上的流量，以流入为正，$\bar{q}$为通过流量边界Γ_{q}上的已知流量。对于隔水或零流量边界，有$\bar{q}=0$。

(4) 潜在溢出边界条件

$$h\leqslant z,\ q_{\mathrm{n}}\leqslant 0,\ (h-z)\cdot q_{\mathrm{n}}=0(\Gamma_{\mathrm{s}}上) \tag{7}$$

式中：Γ_{s}为潜在溢出边界，其上的水头h和流量q_{n}满足互补约束条件。

(5) 自由面边界条件

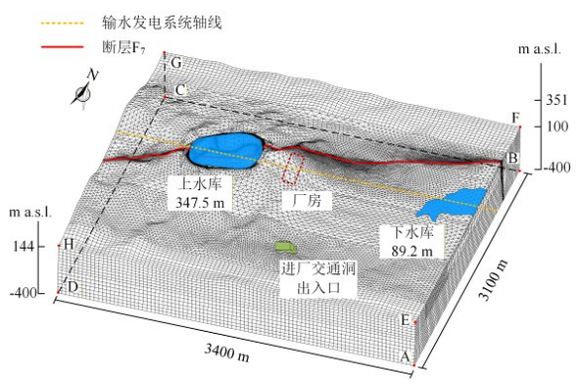
$$h=z,\ q_{\mathrm{n}}=\left(\lambda I-S_{\mathrm{y}}\frac{\partial h}{\partial t}\right)\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{e}_z\ (\Gamma_{\mathrm{f}}上) \tag{8}$$

式中：λ为降雨入渗补给系数，I为降雨强度，S_{y}为给水度，$\boldsymbol{e}_z$为垂直向上的单位矢量。式(9)通过引入S_{y}和λ两个水文地质参数，既考虑了自由面变化过程中地下水的释放和储存，又考虑了降雨入渗补给对地下水运动过程的影响。

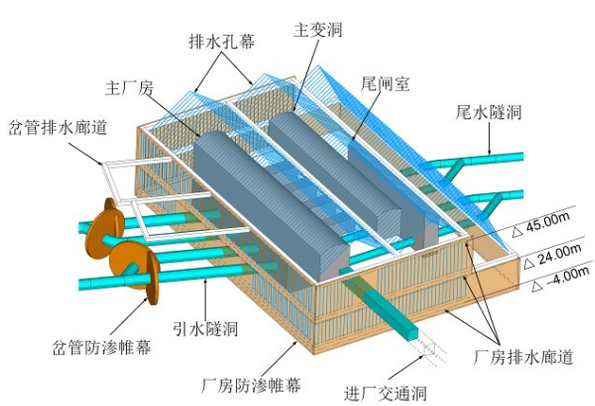
上述渗流模型尽管具有很强的非线性，但可采用抛物型变分不等式(PVI)分析方法予以高效求解[27]。该方法已实现在有限元程序THYME^{3D}中，并在重大工程实践中得到了广泛应用[28-30]。

2.2 有限元模型与计算流程设置

根据工程区水文地质条件及枢纽布置方案，确定了计算模型的范围并构建了三维有限元模型，如图5所示。模型东西向长3.4 km、南北向宽3.1 km，对工程区地形地貌、主要地质构造、枢纽建筑物(面板堆石坝、引水隧洞、地下厂房洞室群及进厂交通洞等)以及防渗排水系统进行了精细模拟，共模拟排水孔748个、上库库周防渗帷幕面积7.92万m^2、地下厂房区域防渗帷幕面积2.71万m^2。为减小结构细长、数量众多的排水孔幕的建模难度，采用子结构技术对其结构和边界条件进行准确模拟[31-32]。模型共剖分六面体/四面体单元346万个、节点95万个。



(a)五岳抽水蓄能电站三维有限元模型



(b)厂区防渗排水系统结构精细模拟

图5 五岳抽水蓄能电站三维有限元模型

Fig. 5 3D finite element model of the Wuyue pumped storage power station

工程区非稳定渗流模拟从2019年5月28日(进厂交通洞开工)开始，至2036年6月1日结束，历时204个月，包括施工阶段63个月、充水试验阶段7个

月、蓄水运行阶段134个月。从施工期到充水试验期和运行期,渗流场模拟的边界条件及其变化如下:(1)排水孔、洞室开挖面及透水衬砌表面设为潜在溢出边界;(2)模型底部及四周侧边界取为零流量边界,其合理性将在3.2节讨论;(3)降雨强度基于工程区多年降雨资料,按月平均降雨过程模拟;(4)在充水试验及运行阶段,上库及引水隧洞、下库及尾水隧洞分别按上、下库水位过程曲线施加水头边界。为了对上库的充放水过程进行准确的模拟,非稳定渗流计算的时间步长控制在2 h之内。

在全过程分析中,根据工程建设的推进及现场资料的积累,持续对渗流分析的模型、参数和边界条件进行动态修正与更新。在勘探阶段,基于工程区多年降雨与钻孔地下水位观测资料,对工程区岩体的渗透参数及降雨入渗系数进行反演或复核,获得工程区初始渗流场,为后续阶段的渗流分析提供基础参数和初始条件。在施工期,依据隧洞掘进过程中各洞段的渗涌水观测数据,对围岩渗透系数以及断层、节理密集带等强渗透性区域的渗流参数进行反演校正[33],同时检验模型边界条件设置的合理性,使模拟结果能够合理反映施工开挖期间渗流场的实际响应特征;在充水试验阶段,依据工程区渗压监测数据和洞室渗流量观测数据,进一步校正隧洞衬砌和防渗帷幕的渗流参数,确保模型能够准确刻画高水头作用下隧洞的内水外渗以及围岩的渗压响应特征。最后,利用经施工期与充水试验期监测资料验证后的渗流模型,对工程区运行期渗流场进行预测分析,评估长期运行条件下地下水位、渗流量及渗压的变化特征及其渗透稳定性。

3 计算结果分析

3.1 工程区天然渗流场分析

在开展施工期渗流场模拟之前,按照多年月平均降雨过程,对工程区天然渗流场进行了40年的降水-蒸发循环模拟,直至天然渗流场趋于动态稳定。在此过程中,采用35个钻孔地下水位观测数据,对工程区降雨入渗补给系数λ进行了率定,并对岩体的渗流参数进行了复核。结果表明:

(1)工程区的降雨入渗补给系数为$\lambda = 0.17$,总体上与相关研究结果[34]一致;

(2)表1列出的渗流参数取值合理,总体上反映了工程区岩体的渗流特性;

(3)与35个钻孔地下水位相比,工程区初始地下水位的反演误差总体在±10 m范围内,平均绝对误差为6.94 m,如图6所示。

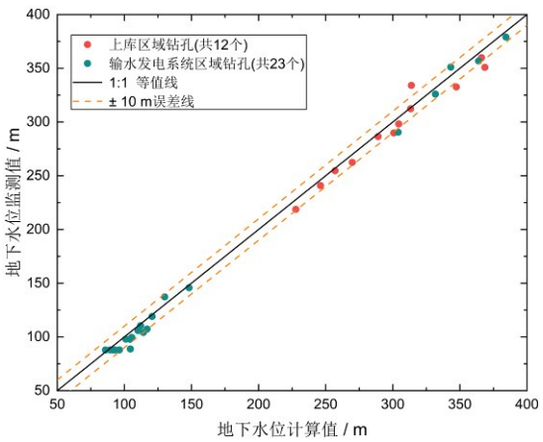


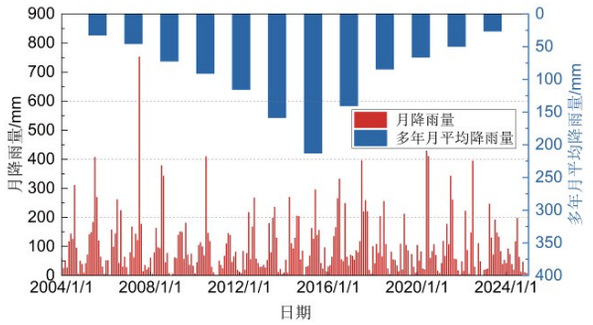
图6 工程区钻孔地下水位观测值与计算值对比

Fig. 6 Comparison of the observed and simulated borehole groundwater levels at the site

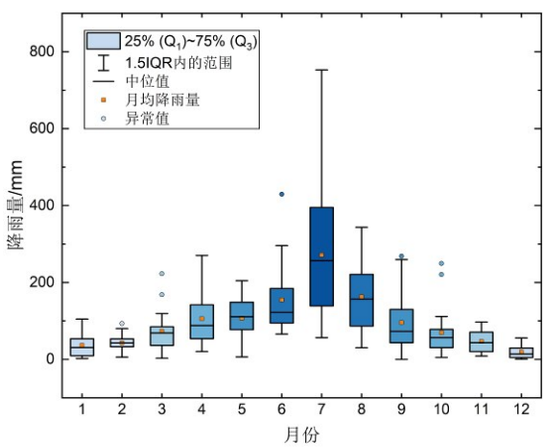
上述初始渗流场反演为后续渗流场全过程模拟提供了可靠的初始条件。但考虑到工程区地下水主要由降雨入渗补给,有必要进一步评价降雨强度及其过程对工程区地下水位分布的影响。如图7所示,工程区近20年各月降雨量在年内呈现出显著的季节性差异。其中,10月至次年3月降雨量水平较低且离散程度较小,而6~8月降雨量最为集中,箱体和极值范围明显扩展,表明夏季降雨强度大,且年际波动显著。据此,选取各月份降雨量的下四分位值Q_1、均值及上四分位值Q_3分别代表偏枯年、常年及偏丰年降雨特征,并结合钻孔地下水位揭露情况,系统评估降雨强度取值的合理性及其对工程区天然渗流场分布的影响。

基于上述三种降雨条件开展了工程区初始渗流场模拟,计算结果如图8所示。总体上看,三种降雨条件下的数值模拟结果与工程区钻孔揭露的地下水位均吻合较好,实测水位基本位于不同降雨年型模拟结果给出的水位区间内,表明降雨强度按月平均降雨量取值是合理的,且其模拟误差不超过5.46%。

不同降雨年型条件下工程区地下水位变化有显著的分区特征,形成明显的上下波动带,且水位波动整体呈现出自上库区向厂房区、再向下库区逐渐减弱的变化趋势。其中,上库区钻孔对降雨补给变化最为敏感,丰水年地下水位抬升幅度普遍为6~10 m,枯水年下降幅度为6~8 m,年际水位变化量Δh最大可达15.8 m,该特征主要与断层切割及地表风化带内节理裂隙张开、岩体完整性较差有关,地下水与大气降水入渗联系较为紧密;厂房区地下水位变化幅度相对减小,丰、枯年Δh集中在4~7



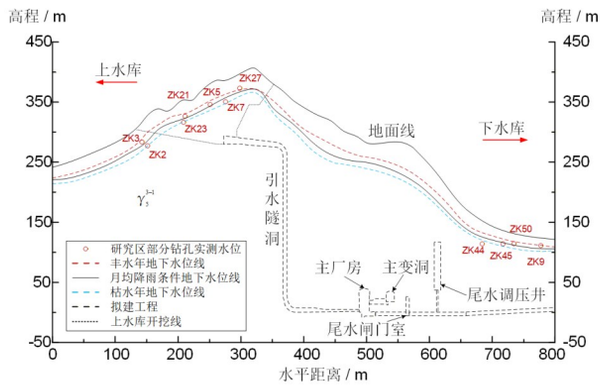
(a)近20年月降雨量和多年月平均降雨量



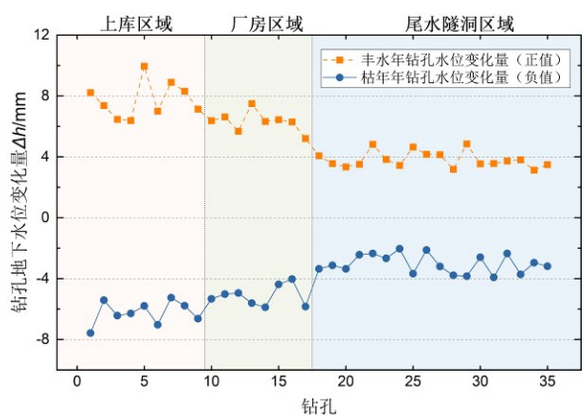
(b)月降雨量箱型图

图7 工程区近20年月降雨特征及统计分布

Fig. 7 Monthly precipitation characteristics and statistical distribution in recent 20 years at the site



(a)不同降雨条件下输水发电系统轴线剖面地下水位分布



(b)不同降雨补给条件下工程区钻孔地下水位变化量

图8 不同降雨补给条件下工程区地下水位空间分布和变化规律

Fig. 8 Distribution and changes of groundwater level in the study area under different precipitation conditions

m,反映出该区域地表覆盖层厚度小、地层岩性较好、裂隙发育程度有限,在不同降雨条件下对地下水位变化起到一定的调节作用;尾水隧洞区地下水位变化最为平缓,Δh通常不超过±5 m,表明其渗流场分布主要受下水库水位控制,降雨条件对其影响较小。上述地下水位变化量Δh的空间分布特征为后续非稳定渗流分析提供了定量依据,降低了降雨补给条件的不确定性对模拟结果的影响。

3.2 进厂交通洞施工期渗漏分析

在进厂交通洞开挖之后直至运行期,其近厂房洞段剖面地下水位变化如图9所示,剖面位置见图1中的B-B剖面。在进厂交通洞开挖初期,工程区地下水位仅略微降低,平均降幅在3 m左右,开挖洞段每米最大涌水量不超过0.07 L/(s·m),开挖对渗流场的影响仅局限于洞周局部范围。随着开挖推进并揭露f_9断层,水头等值线在掌子面附近呈环状密集分布,地下水位显著下降,如图10(a)所示。揭露断层f_9之后其地下水位下降11~19 m,最大降幅达13.91%。与此同时,隧洞总涌水量随开挖推进而逐渐增大,并在揭露f_9断层后达到峰值,数值模拟结果与流量观测值(65.97 L/s)吻合良好,相对误差仅为3.02%,如图10(b)所示。在隧洞开挖过程中,各洞段每米最大涌水量均较小,仅在揭露f_9断层时显著增大,其原因与f_9断层具有较强的富水性和渗透性有关。

此后,随着地下厂房洞室群的开挖以及排水系统的实施,厂区地下水位大幅下降,表明防渗排水体系有效削减了厂区渗透压力,表现出较好的防渗降压效果,如图9所示。与开挖前初始地下水位相比,工程区地下水位最大降幅达243.6 m,形成了一个以厂房洞室群为中心、半径约为750 m的局部降落漏斗。由于洞室群附近无地表水体作为补给源,因而其在开挖过程中的渗漏主要源自山体内赋存的基岩裂隙水。随着裂隙水的持续排泄,工程区各洞室渗流量呈现明显的阶段性衰减特征,如进厂交通洞在揭露f_9断层之后17个月内,渗流量由峰值逐渐减小,并稳定至15 L/s左右,数值模拟结果与现场观测吻合良好;地下厂房洞室群在开挖完成之后

10个月内,总渗流量由10.6 L/s逐步衰减至约1.5 L/s。

综上所述,受进厂交通洞和地下厂房洞室群开挖的影响,工程区渗流场从天然状态开始,首先经历了以开挖排泄为主的剧烈调整,进而在开挖完成后约1~1.5年内达到排泄与降雨入渗补给的暂态平衡状态。在此过程中,模型边界处的地下水位受开挖影响很小,仅下降3.8 m,最大降幅为3.39%,表明侧向补给对厂区渗流场的影响很小,侧向边界上采用零流量边界条件是合适的。

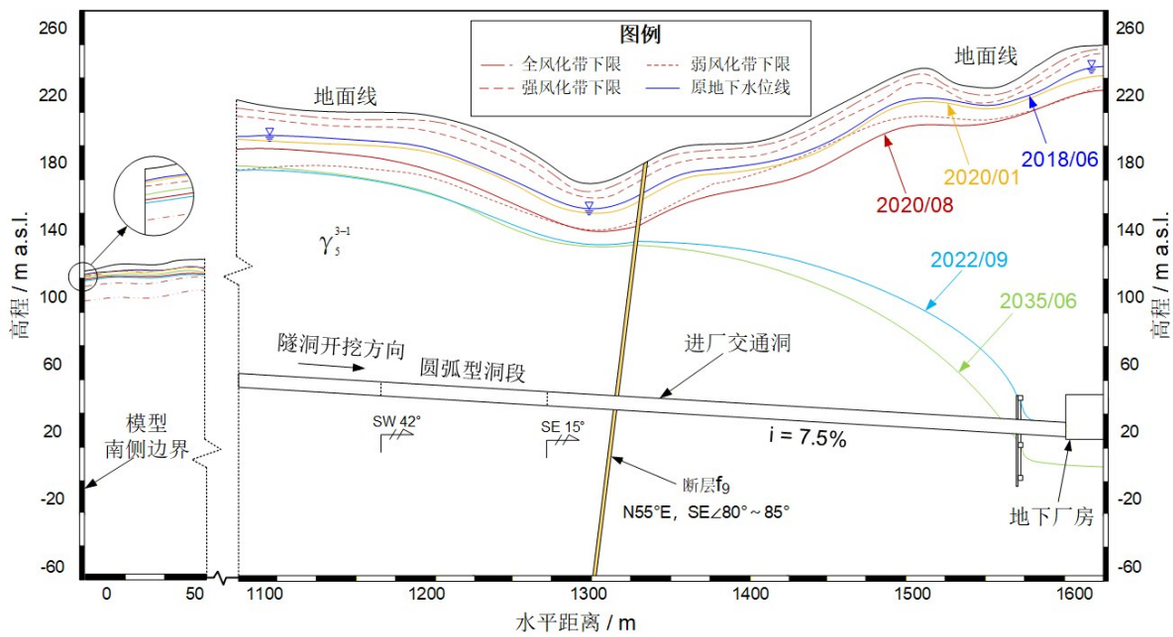


图9 进厂交通洞近厂房洞段剖面地下水位变化

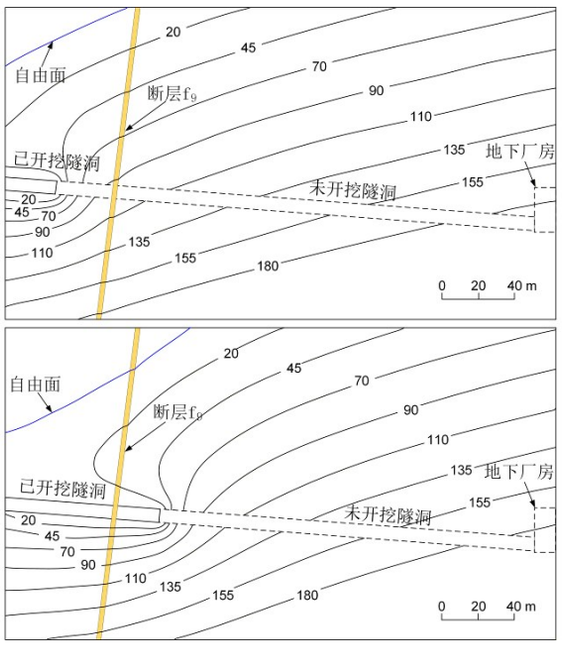
Fig. 9 Changes in groundwater level at the profile along the plant access tunnel near the powerhouse

3.3 充水试验阶段渗流场响应分析

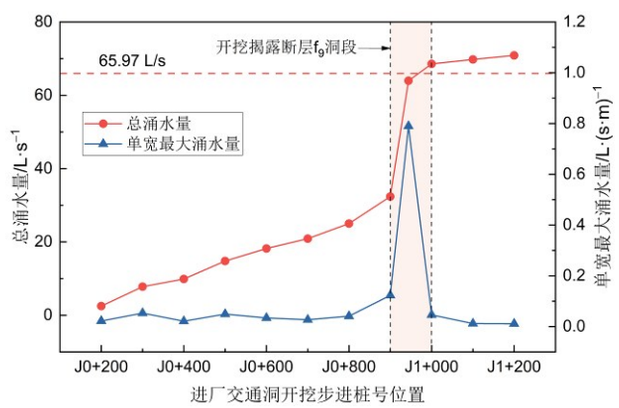
为检验工程施工质量以及地下厂房、高压岔管段的防渗排水效果,在机组投产发电之前于2024年10月开展了充水试验。整个充水试验过程分为两个阶段:第一阶段首先对尾水隧洞段及厂房机组段进行充水,水位升至下水库正常蓄水位89 m,并稳压至2024年10月26日;第二阶段对引水隧洞段至上水库进、出水口之间进行充水,水位升至并维持在325 m。本节基于上述条件,分析充水试验阶段工程区渗流场的变化规律。

采用平均绝对误差(*MAE*)、均方根误差(*RMSE*)和平均绝对百分比误差(*MAPE*)三个指标对数值模拟结果的可靠性进行定量评价。工程区不同部位12个典型渗压计测点的实测渗压曲线与计算值对比如图11所示,相应的误差指标如图12所示,渗压计的位置见图1。从图中可见,引水隧洞、厂房和尾水隧洞区域各测点的*MAE*、*RMSE*和*MAPE*误差范围分别为0.29~8.88 m,0.34~12.5 m和3.79%~25.7%,均值为2.88 m,3.67 m和11.90%。渗流场计算结果与实测数据总体吻合良好,二者之间的偏差主要受局部地质条件以及模型概化等因素的影响,表明充水试验阶段渗流场的变化特征得到了准确的模拟,同时也进一步验证了数值模型和计算条件的可靠性。

在充水试验过程中,不同部位的渗压计对充水水位变化的响应具有明显的分区性与阶段性特征。引水隧洞区域的渗压计不受第一阶段充水过程的影响(图11(a)),其读数一般低于18 m。进入第二阶段后,位于下弯段和下平段围岩中的Pj5-2和Pj4-1测点处渗压随充水水位的抬升而明显增大,其变化趋势与充水过程基本一致。这表明在高水头作用下,隧洞钢筋混凝土衬砌不可避免地发生了一定程度的开裂,导致隧洞发生内水外渗并使内水压力向围岩传递,数值模拟给出的内水外渗流量为9.43 L/s,但围岩中的渗压水平仍处于安全允许范围内。其中,Pj5-2测点渗压最大值达325.34 m,已接近隧洞内水压力,水头变幅达278 m;而Pj4-1测点渗压最大值为293.67 m,较内水压力低约25~30 m,水头变幅也相对较小,且在隧洞充水压力趋于稳定之后该测点渗压仍持续缓慢上升,其原因可能与测点埋设部位发育的断层-节理密集带有关(图1)。相比之下,位于岔管防渗帷幕下游侧钢衬段的Pk1-2



(a)进厂交通洞穿越断层f_9前后轴线剖面水头分布对比(单位:m)



(b)进厂交通洞开挖过程中总涌水量及各洞段每米最大涌水量变化曲线

图10 进厂交通洞开挖过程中渗流场分布及涌水量变化

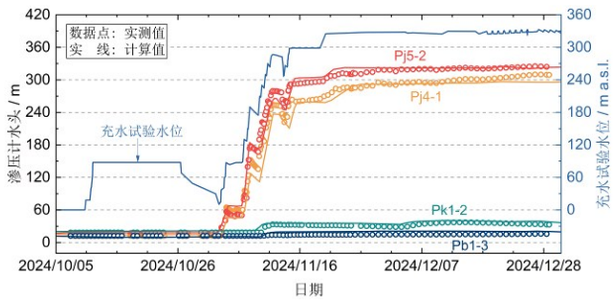
Fig. 10 Seepage field distribution and flow variation along the plant access tunnel during excavation

和Pb1-3测点,在隧洞内水压力逐步升高至325 m的过程中,其渗压增幅均小于22 m,显著低于邻近围岩测点;钢衬外水压力最大值仅为37 m,且沿隧洞轴线方向变化较为平缓。表明岔管防渗帷幕有效抑制了上水库向厂房区域的渗漏,同时排水系统有效削减了钢衬的外水压力,并被控制在合理、安全的范围内。

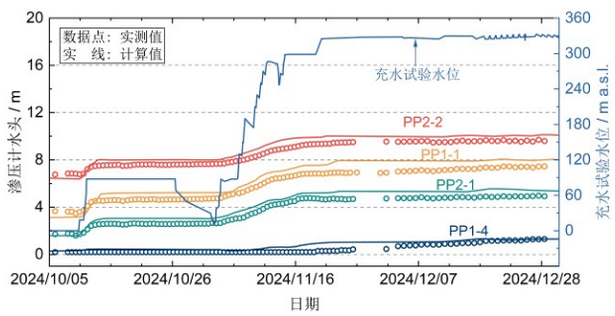
位于尾水隧洞中段的渗压计Pp6-4和Pp5-2(位置见图1)在第一阶段充水过程中压力水头迅速增大(图11(c)),增幅分别达22.05%和313.56%,且与尾水隧洞水位变化保持良好的相关性;进入第二阶段后,其水头增幅明显减缓,水头值仅增大9.67%和3.29%。这表明尾水隧洞区域渗流场主要受尾水水位控制,其对上水库水位变化的响应不仅相对滞后,而且受到了厂区防渗排水措施的阻隔作用。而位于尾水隧洞近厂区钢衬段的Pn1-3和Pm1-2测点,其渗压增幅均小于21 m;此外,厂房区域的渗压计在充水过程中的渗压变幅也均小于20 m(图11(b)),表明厂区防渗排水措施的渗控效果良好,有效抑制了输水发电系统压力变化对厂区渗流场的影响。

3.4 工程区渗流场全过程动态演变规律

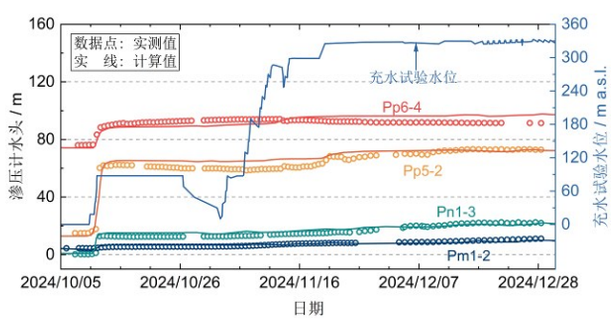
在工程建设、充水试验进而投入运行的全过程中,输水发电系统典型剖面地下水位的变化如图13所示,工程区各部位渗流量的变化如图14所示,表明工程区渗流场发生了不可逆转的变化,整个变化过程呈现出“下降—暂态平衡—回升—再平衡”的阶段性演变规律。



(a)引水隧洞区域



(b)地下厂房区域



(c)尾水隧洞区域

图 11　不同部位渗压计实测值(数据点)与计算值(实线)对比

Fig. 11　Comparison between measured (dot points) and simulated (solid lines) pressure heads at the piezometers in different areas

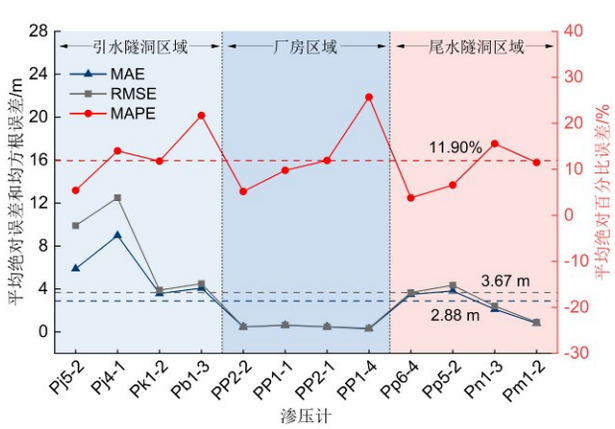


图 12　渗压计测点处压力水头的计算误差

Fig. 12　Errors of simulated hydraulic head at the piezometers

在天然状态下,工程区地下水类型以基岩裂隙水为主,地下水位整体埋藏较浅,且与地形保持较好的一致性;随着进厂交通洞、地下厂房洞室群的开挖以及排水系统的实施,山体中赋存的地下水迅速向进厂交通洞、排水廊道和厂房洞室群排泄,厂区地下水位大幅下降,如图 13 所示。随着地下洞室群开挖的推进,各类洞室的渗漏量首先逐渐增大并达到峰值,而后随着地下水位的下降以及衬砌、灌浆的实施而逐渐减小,直至与降雨入渗补给形成新的平衡,如图 14 所示。数值模拟结果表明,进厂交通洞在开挖过程中,渗漏量最大值达 68.82 L/s,而后迅速衰减,并趋于稳定值 14.73 L/s;与之类似,排水廊道和厂房洞室群的渗漏量也分别经历了先增大后衰减再趋于稳定的阶段性变化特征。从图中还可以看出,在施工阶段的后期,工程区地下水位的下降趋缓,渗漏量趋于稳定,表明地下水的排泄与降雨入渗补给逐渐达到了一种暂态平衡关系。

在充水试验阶段,随着输水发电系统的充水以及上水库的蓄水,工程区地下水位大幅回升,尤其在引水隧洞区域和尾水隧洞区域,地下水位显著抬升,其中引水隧洞测点在第二阶段充水过程中水头变幅最大达 278 m,表明上水库蓄水和水道充水产生了一定的渗漏,并对工程区地下水起到了回补作用;但在厂房区域,由于防渗排水系统的调控作用,洞室群围岩渗压均处于较低水平,受充水过程的影响较小(图 13)。在充水试验过程中,进厂交通洞与排水廊道的渗漏量均明显增大,如排水廊道的渗漏量从 8.94 L/s 增大至 14.72 L/s,增幅达 64.65%,数值模拟结果与渗流监测数据吻合良好(图 14)。与之相比,厂房洞室群的渗漏量仅增大 1.56 L/s。

2025 年 5 月之后,工程进入运行阶段,上、下水库水位均在电站调峰运行状态下发生周期性波动,工程区渗流场进一步发生动态变化,如图 13 和图 14 所示。与开挖完成阶段相比,厂区地下水位进一步回升,地下水的降落漏斗范围明显收缩,面积减少约 41%,其中上水库侧回升幅度达 206 m。受厂区地形条件(东侧与南侧地势相对较低)以及进厂交通洞渗漏的影响,东、南侧地下水位整体偏低,导致降落漏斗在该区域展布范围相对较大,但水位降幅相对较小,呈现出明显的非对称分布特征。与地下水位的回升相对应,工程区各部位的渗漏量在运行初期出现一定幅度的缓慢增大,并在随后的 8 ~ 10 个月内逐步趋于动态稳定。此时,引水隧洞的内水外渗量约为 11.67 L/s,进厂交通洞、排水廊道和厂

房洞室群的渗漏量分别为23.31 L/s、15.79 L/s和3.21 L/s,厂区渗流控制效果良好。

计算结果还表明,在长期运行过程中,厂区地下水位和渗流量的变化明显滞后且小于上水库的水位变化,渗流场响应呈现出“迟滞”和“滤波”特征。与施工期和充水试验阶段相比,尽管在运行过程中厂区外围的地下水位显著抬升,但在防渗排水作用下,洞室群围岩渗压较小,地下水位远低于天然地下水位,为洞室群安全运行营造了有利环境。

4 结论

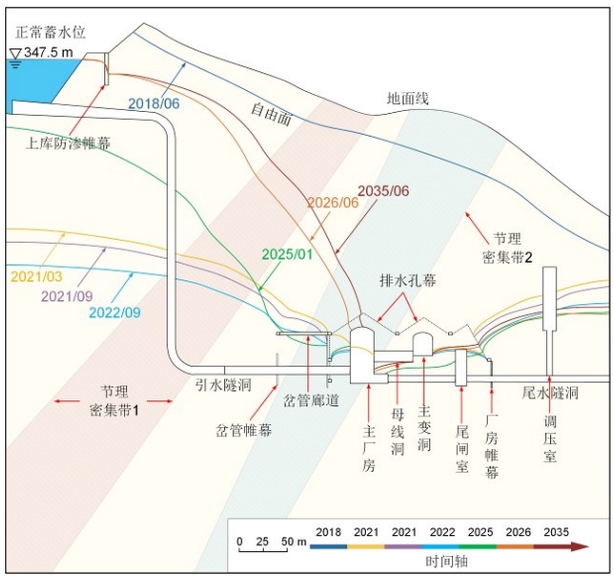
依托五岳抽水蓄能电站工程,采用非稳定渗流分析方法,开展了工程区渗流场自天然期到施工期,再到充水试验期和运行期的全过程分析,系统阐明了工程区渗流场施工期陡降、充水试验阶段快速回升、运行期趋于动态稳定全过程的演变规律。主要结论如下:

(1) 基于勘探期钻孔地下水位观测数据、施工期隧洞渗涌水观测数据以及充水试验阶段渗压/流量观测数据,采用初始渗流场演算、施工-充水试验期渗流场校正、运行期渗流场预测的全过程分析方法是合理的,也是必要的,为地下厂房洞室群和输水发电系统防渗排水的设计优化及安全评价提供了可靠的分析手段。

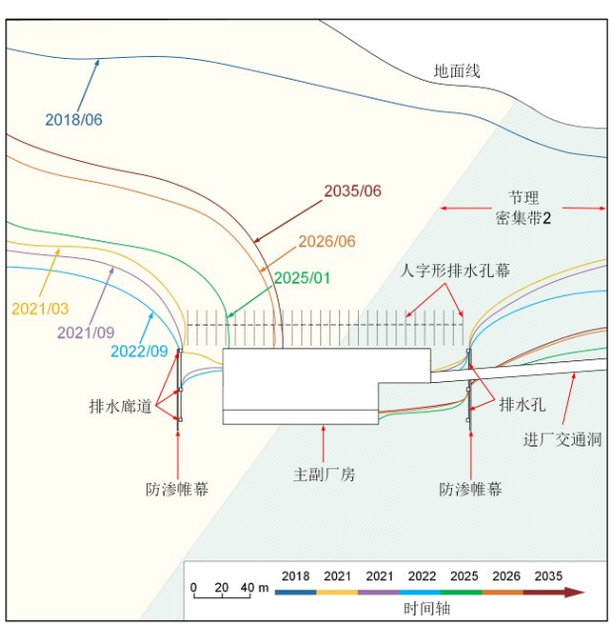
(2) 地下厂房洞室群施工开挖以及排水系统实施引起工程区地下水持续排泄和渗流场的剧烈调整,厂区周围形成半径约750 m的降落漏斗,地下水位最大降幅达243.6 m,各洞室渗漏量首先随着开挖推进而增大,达到峰值后随着地下水位下降而衰减,在开挖完成后约1~1.5年内,地下水排泄与降雨入渗补给之间逐步达到新的暂态平衡。

(3) 在充水试验和运行阶段,厂区地下水位显著回升,降落漏斗范围收缩约41%,并受地形和进厂交通洞渗水影响呈现非对称分布特征;厂区各类洞室的渗漏量在充水之后迅速增大,并在运行8~10个月后逐步趋于动态稳定;厂区防渗排水性能良好,洞室群围岩渗压得到有效控制,且受充水和运行过程的影响很小,渗流场对上水库频繁的水位波动的响应表现出明显的“阻滞”和“滤波”特征。

本文研究成果对于高水头抽水蓄能电站工程建设运行全过程渗流场模拟分析与防渗安全评价具有重要参考价值。后续研究可进一步探讨水文地质条件的不确定性、气候及运行环境变化等因素对渗流场的影响,以提升全过程渗流分析的精度及工程适应性。



(a)输水发电系统轴线纵剖面(图1中A-A剖面)



(b)主厂房中心线剖面(图1中B-B剖面)

图13 施工期至运行期输水发电系统典型剖面地下水位变化特征

Fig. 13 Variation of groundwater level at typical profiles along the water diversion system during construction and operation

参考文献:

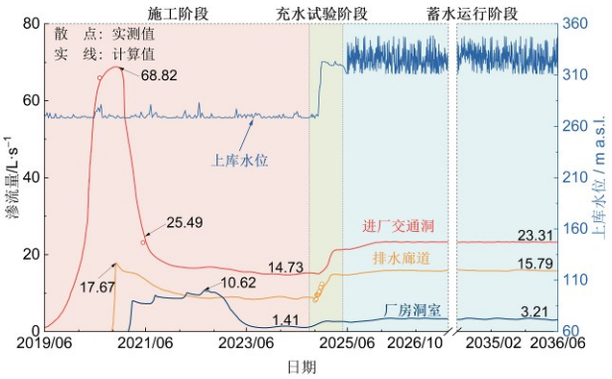


图14 施工期至运行期工程区各部位渗流量变化过程曲线

Fig. 14 Variation of discharge in different areas at the site during construction and operation

[1] HE Y X, LIU Y, LI M X, et al. Benefit evaluation and mechanism design of pumped storage plants under the background of power market reform - A case study of China[J]. Renew Energy, 2022, 191: 796-806.

[2] 刘德旭，杨迎，黄宏旭，等. 新型电力系统大规模抽水蓄能调度运行与控制综述及展望[J]. 中国电机工程学报，2025，45(1): 80-98.
LIU De-xu, YANG Ying, HUANG Hong-xu, et al. An overview and outlook of the operation and control of large-scale pumped hydro storages in modern power systems[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2025, 45(1): 80-98.

[3] 聂子攀，肖立业，邱清泉，等. 地下抽水蓄能发展综述[J]. 储能科学与技术，2024，13(05): 1606-1619.
NIE Zi-pan, XIAO Li-ye, QIU Qing-quan, et al. Overview of the development of underground pumped hydro storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(05): 1606-1619.

[4] 王贵，高洪军，李德友，等. 大型抽水蓄能电站关键技术研究现状及发展趋势[J]. 电工电能新技术，2025，44 (10): 3-13.
WANG Gui, GAO Hong-jun, LI De-you, et al. Research status and development trends of key technologies for large-scale pumped storage power stations[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44 (10): 3-13.

[5] 蒋中明，冯树荣，傅胜，等. 某水工隧洞裂隙岩体高水头作用下的渗透性试验研究[J]. 岩土力学，2010，31 (03): 673-676.
JIANG Zhong-ming, FENG Shu-rong, FU Sheng, et al. Test study of osmotic behavior of fractured rock mass of water tunnel under high water pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (03): 673-676.

[6] 尹健民，郭喜峰，艾凯，等. 清远抽水蓄能电站地应力测试分析与高压隧洞设计验证[J]. 长江科学院院报，2008，(05): 43-45+83.
YI Jian-min, GUO Xi-feng, AI Kai, et al. Analysis of in-situ stress measurement and high pressure tunnel's design verification for Qingyuan pumped storage plant [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research, 2008, (05): 43-45+83.

[7] 胡锦方，马刚，杨启贵，等. 水位变幅对抽水蓄能面板堆石坝应力变形的影响[J]. 水力发电学报，2025，44 (12): 84-99.
HU Jin-fang, MA Gang , YANG Qi-gui, et al. Effect of water level variation on stress-deformation behavior of CFRD for pumped storage stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2025, 44 (12): 84-99.

[8] CAO C, XU Z G, CHAI J R, et al. Determination method for influence zone of pumped storage underground cavern and drainage system[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 126018.

[9] XU Q, CHEN J T, XIAO M. Analysis of unsteady seepage field and surrounding rock stability of underground cavern excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103239.

[10] 吴世勇，王鸽. 锦屏二级水电站深埋长隧洞群的建设和工程中的挑战性问题[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29 (11): 2161-2171.
WU Shi-yong, WANG Ge. Challenge issues in construction and project of large-scale deep-buried tunnel group of JingPing Ⅱ hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (11): 2161-2171.

[11] 侯靖. 天荒坪抽水蓄能电站高压隧洞充水试验实测资料分析[J]. 水利水电科技进展，2009，29(2): 27-31.
HOU Jing. Observed data analysis of water filling test of the high-pressure tunnel in Tianhuangping pumped-storage power station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(2): 27-31.

[12] 吴维江，汪小刚，刘学山，等. 含诱导缝钢筋混凝土衬砌压力隧洞物理模型试验研究[J]. 水利学报，2025，56 (11): 1469-1479.
WU Wei-jian, WANG Xiao-gang, LIU Xue-shan, et al. Experimental study on physical model of reinforced concrete lined pressure tunnel with inducing joints[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56 (11): 1469-1479.

[13] 刘学山. 广州抽水蓄能电站二期工程钢筋混凝土岔管高压渗水的处理及有关问题探讨[J]. 广东电力，2006，(06): 39-42.
LIU Xue-shan. Study on treatment and relevant problems of HP leakage in reinforced conerete manifold of Guangzhou pumped storage power station Phase- Ⅱ

project[J]. Guangdong Electric Power, 2006, (06): 39-42.

[14] YANG W J, HUANG Y, DONG X S, et al. A novel approach for quantifying upper reservoir leakage[J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(4): 397-405.

[15] 谢定松, 蔡红, 李维朝, 等. 库水位快速变动条件下心墙坝上游坝壳自由水面线变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1568-1573.
XIE Ding-song, CAI Hong, LI Wei-chao, et al. Variation laws of seepage lines in upstream shell of core dams under rapid drawdown of reservoir level[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1568-1573.

[16] MEI S Y, ZHONG Q M, YANG M, et al. Overtopping-Induced breaching process of concrete-faced rockfill dam: A case study of Upper Taum Sauk dam[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 144: 106982.

[17] 张春生. 混凝土衬砌高压水道的设计准则与岩体高压渗透试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (07): 1305-1311.
ZHANG Chun-sheng. Design criteria for concrete-lining high pressure hydropower tunnel and high pressure permeability test on rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (07): 1305-1311.

[18] 祁生文, 伍法权, 庄华泽, 等. 小湾水电站坝基开挖岩体卸荷裂隙发育特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2008 (S1): 2907-2912.
QI Sheng-wen, WU Fa-quan, ZHUANG Hua-ze, et al. Characteristic of unloading fissures in dam's base of Xiaowan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(S1): 2907-2912.

[19] 赵倩, 孙清钟, 王丽娟, 等. 基于矿坑开发的抽水蓄能电站下水库围岩稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2025, 50 (05): 2423-2436.
ZHAO Qian, SUN Qing-zhong, WANG Li-juan, et al. Stability analysis of surrounding rock of underground reservoir of pumped-storage hrdropower based on mine pit development[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50 (05): 2423-2436.

[20] 胡林江, 冯树荣, 胡育林, 等. 溧阳抽水蓄能电站地下厂房洞室群防渗排水设计[J]. 水力发电, 2017, 43 (11): 39-42+90.
HU Lin-jiang, FENG Shu-rong, HU Yu-lin, et al. Seepage prevention and drainage design for the underground powerhouse of Liyang pumped-storage power station[J]. Water Power, 2017, 43 (11): 39-42+90.

[21] 龚涛, 何荣昊, 何川, 等. 降雨诱发滑坡全过程流固耦合模拟与滑坡时机研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44 (10): 2608-2621.
GONG Tao, HE Rong-hao, HE Chuan, et al. Fluid-solid coupled modeling of the entire process of rainfall-induced landslides and study of landslide timing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44 (10): 2608-2621.

[22] 周创兵, 姚池. 水工岩石力学研究进展和展望[J]. 人民长江, 2025, 56 (11): 1-9.
ZHOU Chuang-bing, YAO Chi, Advances and prospects in research on hydraulic rock mechanics[J]. Yangtze River, 2025, 56 (11): 1-9.

[23] 李龙龙, 何嘉琦, 苏博文, 等. 基于监测数据的重力坝施工期-蓄水期-运行期工作性态仿真分析[J]. 水力发电, 2024, 50 (11): 34-39+92.
LI Long-long, HE Jia-qi, SU Bo-wen, et al. Simulation analysis of working behavior of gravity dam during construction storage and operation periods based on monitoring data[J]. Water Power, 2024, 50 (11): 34-39+92.

[24] SNOW D T. Anisotropie permeability of fractured media[J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273-1289.

[25] LI P, LU W X, LONG Y Q, et al. Seepage analysis in a fractured rock mass: The upper reservoir of Pushihe pumped-storage power station in China[J]. Engineering Geology, 2008, 97(1-2): 53-62.

[26] ZHENG H, LIU D F, LEE C F, et al. A new formulation of Signorini's type for seepage problems with free surfaces[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 64(1): 1-16.

[27] CHEN Y F, HU R, ZHOU C B, et al. A new parabolic variational inequality formulation of Signorini's condition for non‐steady seepage problems with complex seepage control systems[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(9): 1034-1058.

[28] CHEN Y F, HONG J M, ZHENG H K, et al. Evaluation of groundwater leakage into a drainage tunnel in Jinping-I arch dam foundation in Southwestern China: A case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 961-979.

[29] CHEN Y F, ZENG J, SHI H T, et al. Variation in hydraulic conductivity of fractured rocks at a dam foundation during operation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(2): 351-367.

[30] CHEN Y F, WANG S, REN W, et al. Detection of

leakage in the plunge pool area at Xiluodu arch dam with an integrated approach[J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129135.

[31] 任旺, 苗君, 雷万钧, 等. 混凝土坝坝基立体排水的数值模拟与优化设计[J]. 岩土力学, 2025, 46(7): 2281-2295+2307.
REN Wang, MIAO Jun, LEI Wan-jun, et al. Numerical modeling and design optimization of a 3D cross-connected drain system in a concrete dam foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(7): 2281-2295+2307.

[32] 陈益峰. 水利工程渗流分析理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
CHEN Yi-feng. Modeling of groundwater flow in hydraulic engineering: Theories and practices[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2022.

[33] 刘武, 陈益峰, 胡冉, 等. 基于非稳定渗流过程的岩体渗透特性反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (02): 362-373.
LIU Wu, CHEN Yi-feng, HU Ran, et al. Back analysis of rock permeability with consideration of transient flow process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (02): 362-373.

[34] 李金柱. 降水入渗补给系数综合分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 29-33.
LI Jin-zhu. An analysis of the coefficient of replenishment from infiltration of precipitation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(2): 29-33.