

水利大坝渗流机理与模拟分析

邓卓然 唐 尧

中水珠江规划勘测设计有限公司 广东 广州 510610

摘要: 水利大坝作为重要水利工程设施,其安全性关乎国计民生。渗流问题是影响大坝安全稳定运行的关键因素之一。本文深入探讨水利大坝渗流机理,详细阐述孔隙性、裂隙性、管道式渗漏三种主要渗漏类型及管涌、流土等渗透破坏形式。全面介绍有限元法、离散裂隙网络法、有限差分法等渗流模拟方法,分析其原理、应用及优缺点。通过实际工程案例,展示模拟分析在大坝渗流研究中的重要作用,为大坝安全运行和维护提供理论与技术支持。

关键词: 水利大坝; 渗流机理; 模拟分析

引言: 水利大坝作为重要的水利基础设施,在防洪、发电、灌溉、供水等方面发挥着关键作用。然而,大坝渗流问题一直是影响其安全稳定运行的重要因素。渗流可能导致大坝的渗漏量增加,造成水资源浪费,还可能引发渗透变形,如管涌、流土等,严重时甚至会导致大坝的溃决,给下游人民的生命财产安全带来巨大威胁。因此,深入研究水利大坝的渗流机理,并通过有效的模拟分析手段对渗流情况进行预测和评估,对于保障大坝的安全运行具有重要意义。

1 水利大坝渗流机理

1.1 渗流的基本概念

在大坝上下游水位差的作用下,库水会通过坝基岩土中的孔隙、裂隙或溶洞等通道向下游渗漏,这种现象被称为坝基渗漏。而沿大坝两侧岸坡岩土中的渗漏则称为绕坝渗漏。当坝基渗漏或绕坝渗漏的水量较大时,不仅会造成库水的流失,还会对坝基产生渗透压力,或对岩土中的微细颗粒产生冲刷,或对岩土中的可溶部分产生化学溶解等不良作用。

1.2 坝基渗漏的类型

1.2.1 孔隙性渗漏

孔隙性渗漏是通过砂砾石孔隙产生的渗漏,一般呈现均匀流的状态。其渗漏量的大小主要取决于土的粒度成分及其渗透系数。土的粒度越粗、渗透系数越大,渗漏量往往就越大。在一些以砂砾石为坝基的大坝中,孔隙性渗漏较为常见。如果坝基的防渗处理不当,库水就容易通过砂砾石的孔隙向下游渗漏。

1.2.2 裂隙性渗漏

裂隙性渗漏是通过岩石中节理裂隙产生的渗漏。当裂隙数量众多且相互切割时,渗流近似均匀流;而当裂隙发育不均一或不规则时,渗流常呈脉状流。岩石的裂隙发育情况对渗流的路径和流量有着重要影响。在一些

山区的大坝中,坝基岩石存在大量的节理裂隙,库水可能会沿着这些裂隙渗漏,给大坝的安全带来隐患。

1.2.3 管道式渗漏

管道式渗漏是通过石灰岩、白云岩等可溶岩中的溶洞产生的渗漏,渗漏量的大小取决于溶洞的大小和数量。在喀斯特地貌地区,由于岩石的可溶性,容易形成溶洞等地下管道系统。如果大坝建在这样的地区,库水可能会通过溶洞迅速渗漏,导致大坝的渗漏问题变得极为严重。

1.3 渗透破坏的形式

1.3.1 管涌

管涌现象在水利工程中较为常见,多发生于坝体内部或坝基。在由粗细颗粒混合构成的土体中,渗流犹如一只无形的手,当水力梯度攀升至特定阈值,这只手便开始施展力量,将细颗粒从粗颗粒的孔隙间一点点“抽离”。例如,在某土质堤坝工程中,因坝基土料级配不良,细颗粒含量较多。汛期高水位运行时,渗流作用加剧,坝基内细颗粒不断被带出,起初在坝体下游坡脚处出现少量浑浊渗水,随着时间推移,这些被带出的细颗粒逐渐在土体内部形成隐蔽的管状通道。

1.3.2 流土

流土主要出现在坝体下游或坝基的渗流出逸部位。当渗流出逸坡降超越土体自身所能承受的允许坡降时,渗流会如同一股强大的顶托力,直接作用于土体表层。以某平原地区的水库大坝为例,其下游坝坡为黏土,在长期高水位运行下,坝基渗流使得下游坝脚处渗流出逸坡降增大。起初,下游坝脚处土体表面出现轻微隆起现象,随后,土体表层逐渐松动、颗粒翻滚,仿佛被“连根拔起”。流土一旦发生,会迅速破坏土体的整体性和稳定性,大坝局部结构遭受严重破坏,极有可能引发大坝整体失稳,使大坝抵御洪水的能力大幅下降,对周边地区的防洪安全构成重大威胁^[1]。

2 水利大坝渗流模拟方法

2.1 有限元法

2.1.1 基本原理

有限元法在水利大坝渗流模拟中应用广泛。它首先把求解区域精细离散成有限个单元，这些单元形态多样，如三角形、四边形等。对每个单元而言，基于变分原理或加权余量法，结合渗流的基本物理定律，推导出单元方程，方程里涵盖单元节点的渗流参数。之后，运用特定的组装规则，将所有单元方程整合为总体方程。在面对形状不规则的大坝，像拱坝复杂的曲线轮廓，或坝基地质条件复杂，存在断层、破碎带等情况时，有限元法可依据实际地形和地质特征，灵活调整单元划分，精准捕捉渗流在复杂环境中的分布规律，为渗流分析提供可靠数值解。

2.1.2 应用实例

在某大型土石坝渗流模拟工作中，研究团队借助专业有限元软件建立三维渗流模型。模拟过程中，全面考量多种工况，除正常蓄水位、设计洪水位外，还模拟了校核洪水位以及不同降雨条件下坝体的渗流状况。经模拟发现，在正常蓄水位时，坝体下游坡脚部分区域渗流坡降显著超出安全阈值，存在渗透破坏风险；而在设计洪水位工况下，坝基局部区域出现较高渗流流速。

2.1.3 优缺点分析

优点：有限元法具有较高的精度，能够处理复杂的边界条件和几何形状，对各种类型的渗流问题都有较好的适应性。可以方便地考虑材料的非均质性和各向异性等因素。

缺点：计算过程较为复杂，需要较大的计算资源和时间。对模型的网格划分要求较高，网格质量会影响计算结果的准确性。在处理大规模问题时，计算成本可能较高。

2.2 离散裂隙网络法

2.2.1 基本原理

离散裂隙网络法是将岩体中的裂隙视为离散的网格，通过对裂隙的几何特征、水力参数等进行描述，建立渗流模型。该方法能够直接模拟裂隙中的渗流过程，考虑裂隙的开度、间距、方向等因素对渗流的影响。对于裂隙性渗漏问题，离散裂隙网络法具有独特的优势。

2.2.2 应用实例

在某山区大坝的坝基渗流模拟中，针对坝基岩石裂隙发育的特点，采用离散裂隙网络法进行模拟。通过对坝基岩体裂隙的调查和分析，建立了离散裂隙网络模型。模拟结果清晰地展示了库水在裂隙网络中的渗流路径和流量分布，为制定针对性的防渗方案提供了详细的信息。

2.2.3 优缺点分析

优点：能够准确地模拟裂隙中的渗流，考虑裂隙的具体特征，对于裂隙性渗流问题的模拟精度较高。可以直观地展示渗流在裂隙网络中的流动情况。

缺点：需要准确获取裂隙的几何和水力参数，而这些参数的测量和确定往往具有一定的难度。模型的建立和计算过程较为复杂，对数据的要求较高。在处理大规模裂隙网络时，计算量会迅速增加。

2.3 有限差分法

2.3.1 基本原理

有限差分法作为一种经典数值解法，在水利大坝渗流模拟领域占据重要地位。其核心操作是对渗流控制方程开展空间与时间维度的离散化处理。具体而言，在空间上，将计算区域切割为众多微小网格，每个网格节点成为关键计算点；时间上也按一定步长进行分割。通过巧妙运用差商来近似替代导数，原本复杂难解的偏微分方程，就此转化为便于处理的代数方程组。例如在二维渗流问题中，针对拉普拉斯渗流方程，在每个网格节点处，依据相邻节点的水头值构建差分方程，这些方程联立起来，全面反映了整个计算区域内渗流参数的变化关系，借助成熟的代数求解算法，即可高效算出渗流场中各节点的水头、流速等关键参数，为分析渗流状况提供数据支撑。

2.3.2 应用实例

在某小型水库大坝的渗流模拟项目中，有限差分法展现出独特优势。该水库大坝为土石结构，坝体规模较小，但因年久失修，存在渗流隐患。鉴于坝体结构相对简单，渗流情况近似一维特性，研究团队选用有限差分法求解。在建模时，沿坝体纵向均匀布置一系列网格节点，通过对各节点处水头的迭代计算，逐步勾勒出坝体的渗流浸润线。为验证模拟结果准确性，工作人员在坝体不同位置设置了多个观测点，长期监测实际水头值。经对比发现，模拟所得浸润线与实际观测数据高度契合，误差控制在极小范围内。这一成果充分彰显了有限差分法在处理此类简单渗流问题时的高效性与可靠性，为后续制定大坝防渗加固方案提供了有力依据。

2.3.3 优缺点分析

优点：计算方法相对简单，易于理解和实现。对于一些规则的计算区域和简单的渗流问题，计算效率较高。

缺点：在处理复杂边界条件和几何形状时，不如有限元法灵活。对网格的依赖性较强，网格划分不合理可能会导致较大的误差。在模拟三维复杂渗流问题时，计算精度可能受到限制^[2]。

3 水利大坝渗流模拟分析实例

3.1 工程概况

某大型水利枢纽坐落于西南山区，其核心建筑为一座宏伟的混凝土重力坝。坝高150m，坝顶长度达500m，宛如一条钢铁巨龙横卧在峡谷之间，承担着防洪、发电、灌溉等多重重要使命。坝基所处地质条件复杂，主体由坚硬的花岗岩构成，然而历经漫长地质变迁，部分区域节理裂隙广泛发育。大坝建成投入运行多年来，为周边地区的经济社会发展做出了卓越贡献。但近年来，工作人员在日常巡检中发现，下游坝脚处出现了渗水现象，且随着时间推移，渗水量呈逐渐增加态势。这一异常情况引起了高度重视，为精准评估大坝当前的渗流安全状况，防止潜在安全隐患进一步恶化，决定开展全面深入的渗流模拟分析工作。

3.2 模型建立

本次模拟选用ABAQUS有限元软件，针对坝基岩石非均质性与节理裂隙对渗流的影响，将坝基划分为多个材料区域，在节理裂隙集中区域采用等效连续介质模型建模，从而确保模拟的准确性与可靠性，模型构建示意如图1。

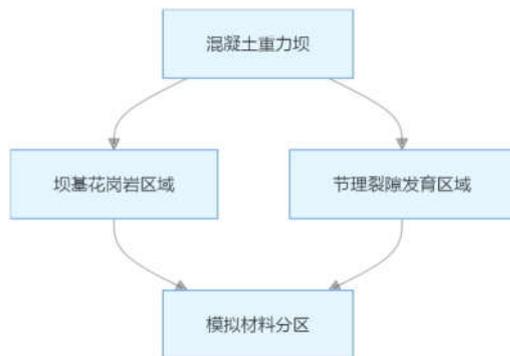


图1 大坝与坝基建模分区示意图

3.3 模拟结果分析

3.3.1 渗流场分布

在针对某混凝土重力坝的模拟分析里，当水库维持正常蓄水位运行时，坝体内部渗流状况清晰呈现。靠近上游面区域，由于巨大水头差作用，水流汇聚，成为渗流的核心区域。渗流方向并非笔直向下，而是受坝体结构及坝基岩土特性影响，逐渐向下游倾斜，形成特定流线轨迹。以坝基存在节理裂隙发育带的情况而言，此处岩石完整性被破坏，渗流阻力大幅降低，水流趋之若鹜，流速急剧增大，从而形成明显区别于周边的局部渗流通道。

3.3.2 渗透压力分布

模拟详尽揭示了坝体与坝基的渗透压力分布规律。在坝基和坝体紧密接触部位，特别是靠近上游的区域，由于直接承受上游库水强大压力，渗透压力数值显著

偏高。随着深入坝基内部，压力受岩土体层层缓冲、消散，呈现逐渐减小趋势。而在节理裂隙发育区域，情况更为复杂。裂隙的存在使得水流通道不规则，部分区域水流汇聚受阻，压力积聚，形成局部高压力区，而在裂隙畅通处，压力又快速传递消散。像华北某建于花岗岩坝基上的大坝，模拟显示节理密集区渗透压力分布呈“山峰低谷”状，部分局部区域压力值远超周边均值，这对坝基稳定性产生了极大挑战。

3.3.3 渗流量计算

依据模拟数据，精确计算出该大坝在当前运行工况下的渗流量。结果令人担忧，渗流量已远超设计允许范围。经过深入溯源分析，发现坝基节理裂隙发育区域是罪魁祸首。这些错综复杂的裂隙，犹如一条条隐蔽的输水管道，连通上下游水体。在节理裂隙密集且相互贯通区域，水流大量涌入，渗流量激增。以华东某土石坝为例，原本设计渗流量极小，但运行数年后，因坝基下伏灰岩存在岩溶裂隙，模拟表明该区域渗流量占总渗流量的80%以上，严重影响大坝安全与水资源有效利用，亟需采取针对性防渗措施。

3.4 基于模拟结果的建议

根据模拟分析结果，建议对坝基节理裂隙发育区域进行防渗处理。可以采用帷幕灌浆的方法，在坝基中形成一道防渗帷幕，降低渗流速度，减少渗流量。同时，加强对下游坝脚处的排水设施建设，及时排除渗出的水流，降低渗透压力对坝体稳定性的影响。此外，还应建立长期的渗流监测系统，实时监测大坝的渗流情况，以便及时发现问题并采取相应的措施^[3]。

结束语

综上所述，水利大坝渗流机理复杂，渗漏类型多样，渗透破坏威胁巨大。有限元法等模拟方法成为大坝渗流研究的有力工具，通过离散求解区域，能精准剖析渗流场。实际工程案例表明，模拟结果为大坝安全评估和防渗措施制定提供关键依据。未来，应持续优化模拟方法，融合多学科知识，提升模拟精度与可靠性，同时强化对大坝渗流的长期监测，确保水利大坝安全稳定运行，充分发挥其综合效益，为人类社会发展提供坚实水利支撑。

参考文献

- [1]高全,吴洁莲,施玉群.深圳水库主坝坝体渗流监控指标拟定方法[J],水电与新能源,2022(140):121-124.
- [2]于满满,谢谟文,杜岩.水库大坝渗透稳定性监控指标研究,水利与建筑工程学报,2022,12(2):126-130.
- [3]聂兵兵,赵二峰,殷洋洋.基于极值理论的大坝变形监控指标拟定[J],水电能源科学,2022,33(12):101-104.