

堤防工程稳定性评估的数值模拟研究

杜 峻

北京市北运河管理处 北京 100101

摘要：本文聚焦于堤防工程稳定性评估，深入探讨了数值模拟方法在该领域的应用。通过对堤防工程地质条件、受力特性等关键因素的分析，建立合理的数值模型，运用先进的数值模拟软件进行计算分析。研究结果表明，数值模拟能够准确模拟堤防在不同工况下的应力、应变分布，有效评估其稳定性，为堤防工程的设计、施工及维护提供科学依据。同时，对数值模拟中存在的不确定性因素进行了讨论，并提出了相应的改进措施，以进一步提高堤防工程稳定性评估的准确性和可靠性。

关键词：堤防工程；稳定性评估；数值模拟；地质条件；应力应变

引言

堤防工程作为防御洪水、保护沿岸地区人民生命财产安全的重要水利设施，其稳定性直接关系到防洪安全。随着全球气候变化和城市化进程的加快，极端天气事件频发，导致洪水灾害日益严重，对堤防工程的安全性和稳定性提出了更高的要求。传统的堤防工程稳定性评估方法主要基于理论分析、模型试验和现场监测等手段，但这些方法存在一定的局限性，如理论分析往往需要进行大量简化假设，难以准确反映堤防工程的实际受力情况；模型试验成本高、周期长，且难以完全模拟实际工程的地质条件和边界条件；现场监测数据受监测点数量和位置的限制，难以全面反映堤防工程的整体稳定性。

1 堤防工程稳定性影响因素分析

1.1 地质条件

地质条件堪称影响堤防工程稳定性的基石性因素。堤防工程所处地段的地质环境复杂多样，其中地层岩性、地质构造以及土体物理力学性质等要素，均会对其稳定性产生深远且关键的影响。从地层岩性来看，不同岩性的地层具有截然不同的力学特性。例如，软土地基主要由淤泥、淤泥质土等组成，其承载能力相对较低。当堤防修建于软土地基之上时，在堤防自身荷载的持续作用下，软土地基极易产生较大的沉降和变形。这种不均匀的沉降会导致堤防结构内部产生附加应力，进而引发堤防开裂。随着裂缝的不断扩展和加深，雨水等水分更容易渗入堤防内部，进一步削弱土体的强度，最终可能诱发堤防滑坡等严重破坏。地质构造方面，岩层破碎带和断层等不良地质构造的存在，会显著降低堤防的抗滑稳定性。岩层破碎带中的岩石破碎、节理裂隙发育，使得岩体的完整性遭到破坏，其抗剪强度大幅降低。而断层则是地壳运动中产生的破裂面，两侧岩体相对位

移，导致断层带内的物质松散、破碎。在堤防荷载和水流等外力作用下，这些破碎带和断层容易成为滑动面，增加堤防失稳的风险。

1.2 水文条件

水文条件是影响堤防工程稳定性的关键因素之一，其变化对堤防的作用力复杂且多变。洪水水位的高低、涨落速度以及水流方向等因素，都会对堤防产生不同程度的影响。当洪水水位超过堤防设计水位时，堤防将承受巨大的水压力。水压力垂直作用于堤身，使得堤身内部的应力状态发生改变。随着水位的升高，水压力不断增大，可能导致堤身出现渗透破坏。这是因为过高的水头差会使水流速度加快，水流携带的泥沙颗粒在堤身内部孔隙中运动，逐渐冲刷和掏空堤身土体，形成渗透通道，最终引发堤防坍塌。同时，水压力的增大还可能使堤防产生滑坡。在水压力和堤身自重的共同作用下，堤防可能沿着某一滑动面发生整体滑动。洪水的快速涨落对堤防稳定性的影响也不容忽视^[1]。在洪水快速上涨过程中，堤防内部的水位上升相对滞后，形成较大的水头差，导致堤身内部产生较大的孔隙水压力。孔隙水压力的增加会降低堤防的有效应力，而土体的抗剪强度与有效应力密切相关。有效应力的减小使得土体的抗剪强度降低，从而影响堤防的稳定性。当洪水快速退落时，堤身内部的水位下降速度较慢，外部水压力迅速减小，而堤身内部仍存在较大的孔隙水压力，这种内外压力的不平衡也可能导致堤防失稳。

1.3 堤防结构与材料

堤防的结构形式和建筑材料对其稳定性有着直接且重要的影响。不同的堤防结构形式，如均质土堤、心墙坝、斜墙坝等，具有各自独特的受力特性和稳定性特点。均质土堤结构相对简单，由单一土料填筑而成。其

优点是施工方便、造价较低，但稳定性相对较差。在洪水等外力作用下，均质土堤容易出现渗透变形和滑坡等问题。心墙坝则是在堤身中部设置防渗心墙，心墙一般采用黏性土等防渗性能较好的材料。这种结构形式可以有效减少堤身的渗透量，提高堤防的抗渗稳定性。然而，心墙与两侧土料的变形特性可能存在差异，在荷载作用下容易产生不均匀沉降，导致心墙开裂，影响防渗效果。斜墙坝是在堤身上游侧设置斜墙，斜墙同样采用防渗材料。斜墙坝的防渗效果较好，且对地基的适应性较强，但斜墙的施工难度较大，质量要求较高。堤防所使用的建筑材料的物理力学性质，如土体的密度、含水量、抗剪强度等，也会直接影响堤防的稳定性^[2]。土体密度反映了土体的紧密程度，密度越大，土体的强度越高，稳定性越好。含水量是影响土体性质的重要因素之一，土体含水量过高会降低其抗剪强度。这是因为水分子在土体颗粒之间起到润滑作用，减少了颗粒之间的摩擦力和咬合力。当含水量超过一定限度时，土体可能呈现流塑状态，极易发生变形和破坏。抗剪强度是土体抵抗剪切破坏的能力，是评估堤防稳定性的关键指标。堤防在受到外力作用时，内部会产生剪应力，当剪应力超过土体的抗剪强度时，就会发生剪切破坏，导致堤防失稳。

1.4 人类活动

人类活动也是影响堤防工程稳定性的重要因素之一，其影响方式多样且复杂。在堤防附近进行大规模的开挖、填筑、爆破等工程活动，可能会对堤防的地质条件和受力状态产生显著改变。例如，在堤防附近进行开挖工程时，会破坏堤防周边的地质平衡，导致堤防地基的应力状态发生变化。开挖可能会使堤防地基的承载能力降低，引发堤防沉降和不均匀变形。填筑工程则会增加堤防周边的荷载，改变堤防的受力状态。如果填筑不当，可能会导致堤防边坡失稳，引发滑坡等灾害。爆破工程产生的震动会对堤防结构造成破坏，使堤防内部产生裂缝，降低堤防的整体稳定性。此外，不合理的灌溉、排水等农业活动也可能导致堤防土体含水量变化，引发渗透破坏等问题。在灌溉过程中，如果灌溉水量过大或灌溉方式不当，会使堤防土体含水量急剧增加，降低土体的抗剪强度，增加堤防滑坡的风险。排水不畅则会导致堤防土体长期处于饱和状态，同样会影响堤防的稳定性。同时，农业活动中的耕作、种植等行为也可能破坏堤防表面的植被覆盖，减少植被对土体的固结作用，加剧水土流失，进一步影响堤防的稳定性。

2 数值模拟方法在堤防工程稳定性评估中的应用

2.1 数值模拟方法概述

目前，在堤防工程稳定性评估中，常用的数值模拟方法主要包括有限元法（FEM）、有限差分法（FDM）、离散元法（DEM）等。这些方法各有其独特的原理和适用范围，为堤防工程稳定性分析提供了有力的工具。有限元法是一种将连续体离散化为有限个单元的数值分析方法。其基本思想是将复杂的连续体结构划分为有限个简单形状的单元，通过在单元节点上建立位移模式，将单元内的位移、应变和应力用节点位移表示。然后，根据变分原理或加权余量法建立单元的平衡方程，再将所有单元的平衡方程组合成整体的平衡方程组，通过求解这个方程组得到节点位移，进而得到整个连续体的应力、应变分布。有限元法适用于模拟连续介质的力学问题，能够处理复杂的几何形状和边界条件，在堤防工程稳定性分析中得到了广泛应用。有限差分法是将求解域划分为差分网格，用差分方程近似代替微分方程进行求解的方法。它将连续的求解域离散为一系列网格节点，用差商近似代替微分，将微分方程转化为差分方程，然后通过求解差分方程组得到数值解。有限差分法具有计算效率高、易于处理复杂边界条件等优点，特别适用于求解动态问题和非线性问题。在堤防工程中，可用于模拟洪水涨落等动态过程对堤防稳定性的影响。离散元法则是将研究对象离散为一个个独立的颗粒单元，通过分析颗粒之间的相互作用来模拟材料的力学行为。该方法认为材料是由大量颗粒组成的，颗粒之间通过接触力相互作用。离散元法适用于模拟非连续介质的力学问题，如岩土体的破碎、滑坡等。在堤防工程中，可用于分析堤防在地震等动力作用下的颗粒运动和破坏过程，为评估堤防的抗震稳定性提供依据。

2.2 数值模型的建立

建立合理的数值模型是进行堤防工程稳定性数值模拟的关键环节，其准确性直接影响到模拟结果的可靠性。在建立数值模型时，需要综合考虑堤防工程的实际情况，合理确定模型的几何尺寸、边界条件、材料参数等关键要素。首先，要根据堤防的实地地形和结构形式，准确绘制模型的几何图形。这需要详细测量堤防的长度、高度、坡度等几何参数，以及堤防周边的地形地貌特征。对于复杂的堤防结构，如心墙坝、斜墙坝等，要精确模拟其内部结构，确保模型的几何形状与实际堤防相符。其次，要根据堤防所处地段的地质条件和水文条件，合理确定模型的边界条件。边界条件包括水位边界、位移边界、应力边界等。水位边界应根据不同工况下的洪水水位进行设置，准确反映洪水对堤防的作用。位移边界要合理约束模型的边界位移，以模拟实际工程

中的约束条件^[3]。应力边界则用于考虑堤防周边的地应力等因素。最后，要通过室内试验和现场监测等手段，获取堤防材料的物理力学参数，如土体的密度、弹性模量、泊松比、抗剪强度等，并将其准确输入到数值模型中。室内试验可以获取土体的基本物理力学性质指标，而现场监测则可以提供更真实的地质条件和应力应变信息。通过综合分析室内试验和现场监测数据，确定合适的材料参数，确保数值模型能够准确反映堤防材料的力学特性。

2.3 数值模拟计算与分析

在建立好数值模型后，运用相应的数值模拟软件进行计算分析。通过设置不同的工况，如正常水位工况、洪水水位工况、地震工况等，模拟堤防工程在不同工况下的应力、应变分布情况。在计算过程中，数值模拟软件会根据设定的边界条件和材料参数，运用相应的数值算法求解平衡方程，得到堤防内部各节点的位移、应力和应变等物理量。计算完成后，需要对计算结果进行深入分析，提取关键信息，如堤防的最大应力、最大位移、塑性区分布等。根据这些关键信息，评估堤防工程在不同工况下的稳定性，预测其可能的破坏模式和失稳机制。例如，如果堤防内部出现较大的塑性区，且塑性区有不断扩展的趋势，则表明堤防可能存在滑坡的风险。塑性区的出现意味着土体已经进入了塑性变形阶段，其抗剪强度降低，当塑性区发展到一定程度时，堤防就会发生整体滑动^[4]。如果堤防的渗流场出现异常，如渗透坡降过大、渗流出口处出现流土等现象，则表明堤防可能存在渗透破坏的风险。渗透坡降过大时，水流对土体的冲刷作用增强，容易导致土体颗粒被水流带走，形成渗透通道，引发堤防坍塌。

3 数值模拟的不确定性分析及改进措施

3.1 不确定性因素分析

数值模拟虽然具有诸多优点，但在实际应用中也存在一定的不确定性。主要的不确定性因素包括模型简化不确定性、材料参数不确定性、边界条件不确定性等。模型简化不确定性是由于在建立数值模型时，往往需要对实际工程进行一定的简化假设，如将三维问题简化为二维问题、忽略某些次要因素等，这些简化假设可能会导致模拟结果与实际情况存在一定的偏差；材料参数不

确定性是由于土体等材料的物理力学性质具有明显的离散性和不确定性，通过室内试验和现场监测获取的材料参数往往存在一定的误差，这些误差会影响数值模拟结果的准确性；边界条件不确定性是由于实际工程中的边界条件往往比较复杂，难以准确确定，在数值模拟中只能进行近似处理，这也会导致模拟结果的不确定性。

3.2 改进措施

为降低数值模拟的不确定性，提高模拟结果的准确性和可靠性，可以采取以下改进措施：一是加强模型验证和校准工作，通过与现场监测数据、模型试验结果等进行对比分析，验证数值模型的合理性和准确性，对模型进行必要的调整和校准；二是采用更先进的试验技术和监测手段，获取更准确的材料参数和边界条件信息，减少参数不确定性对模拟结果的影响；三是开展不确定性分析研究，采用概率统计方法、模糊数学方法等对数值模拟中的不确定性因素进行定量分析，评估其对模拟结果的影响程度，为堤防工程稳定性评估提供更可靠的依据。

结束语

未来，随着计算机技术和数值模拟方法的不断发展，堤防工程稳定性评估的数值模拟研究将朝着更加精细化、智能化的方向发展。一方面，可以进一步优化数值模型，提高模型的精度和可靠性，更准确地模拟堤防工程的复杂力学行为；另一方面，可以结合人工智能、大数据等新技术，实现对堤防工程稳定性的实时监测和智能评估，为堤防工程的安全运行提供更有力的保障。此外，还应加强数值模拟方法与其他评估方法的有机结合，充分发挥各种方法的优势，提高堤防工程稳定性评估的全面性和准确性。

参考文献

- [1]朱伟,山村和也.堤防地基渗透破坏机制及其治理[J].水利水运科学研究,1999(4):338-347.
- [2]吴梦喜,邓琴芳,黄艳北.堤基管涌动态发展的数值模拟[J].郑州大学学报(工学版),2012,33(5):66-71,76.
- [3]胡亚元,马攀.二维堤坝管涌的数值模拟研究[J].工程力学,2015,32(3):110-118.
- [4]胡亚元,马攀.三相耦合渗流侵蚀管涌机制研究及有限元模拟[J].岩土力学,2013,34(4):913-921.