

基于数值模拟与多场耦合的滑坡稳定性分析方法与破坏机理研究进展

付嘉振

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年9月21日; 录用日期: 2026年10月12日; 发布日期: 2026年10月23日

摘要

滑坡稳定性分析是工程地质领域的核心科学问题。本文以2011~2026年发表的滑坡稳定性相关研究为重点, 并补充纳入与研究主题密切相关的早期工程案例、经典理论及方法文献, 从数值模拟方法、破坏机理及滑带力学特性三个维度进行综述。综述表明: (1) 数值方法已从单一极限平衡法向多平台耦合方向发展, GeoStudio-FLAC3D互馈耦合 workflow 将稳定性系数较单一平台降低10%~33%, 双折减系数法揭示了黏聚力先于内摩擦角衰减的渐进破坏规律; (2) 渗流-剪切耦合效应被识别为水库型与降雨型滑坡的共性主导机制, 渗流应力使滑带土峰值抗剪强度降低18%~35%, 且内摩擦角的渗流敏感性显著高于黏聚力; (3) 正应力依赖性摩擦弱化在约200 kPa处存在机制转换——低应力下由黏土颗粒重定向主导, 高应力下由颗粒破碎主导——这一发现为不同深度滑坡的差异化复活风险评估提供了细观力学判据。本文识别了实验-数值参数化衔接、方法基准缺失及预测验证赤字等五个关键研究空白, 并提出相应的研究议程。

关键词

滑坡稳定性, 数值模拟, 渗流-剪切耦合, 渐进破坏, 滑带力学, 多场耦合

Research Progress on Landslide Stability Analysis Methods and Failure Mechanisms Based on Numerical Simulation and Multi-Field Coupling

Jiazhen Fu

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: September 21, 2026; accepted: October 12, 2026; published: October 23, 2026

文章引用: 付嘉振. 基于数值模拟与多场耦合的滑坡稳定性分析方法与破坏机理研究进展[J]. 土木工程, 2026, 15(10): 98-108. DOI: 10.12677/hjce.2026.1510242

Abstract

Landslide stability analysis is a core scientific issue in the field of engineering geology. This review focuses on landslide stability studies published between 2011 and 2026, while also incorporating relevant earlier engineering case studies, foundational theoretical works, and methodological references. The literature is synthesized across three dimensions: numerical simulation methods, failure mechanisms, and the mechanical properties of slip-zone materials. The review shows that: (1) Numerical approaches have progressed from standalone limit-equilibrium methods to multi-platform coupling: the GeoStudio-FLAC3D mutual-feedback workflow reduces stability coefficients by 10%~33% relative to single-platform analyses, and the double reduction coefficient method reveals that cohesion degrades more rapidly than internal friction angle during progressive failure. (2) Seepage-shear coupling is the common governing process for both reservoir- and rainfall-induced landslides: seepage stress reduces peak shear strength of slide-zone soils by 18%~35%, with internal friction angle exhibiting higher seepage sensitivity than cohesion. (3) Normal-stress-dependent frictional weakening undergoes a mechanistic transition at approximately 200 kPa, shifting from clay-particle reorientation at low stress to grain crushing at high stress, which provides a meso-scale criterion for depth-differentiated reactivation risk assessment. We identify five critical research gaps, spanning the experimental-numerical parameterization disconnect, the absence of methodological benchmarks, and the deficit of prospective prediction validation, and outline a corresponding research agenda.

Keywords

Landslide Stability, Numerical Simulation, Seepage-Shear Coupling, Progressive Failure, Slide-Zone Mechanics, Multi-Field Coupling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

滑坡是全球最具破坏性的地质灾害之一，年经济损失逾 200 亿美元[1]。在中国，三峡库区滑坡灾害广泛发育，威胁库区居民和重要基础设施安全，开展库岸滑坡稳定性评价对库区地质灾害防治具有重要意义[2]，此外，古滑坡可在降雨入渗、河流侵蚀及坡脚开挖等因素作用下发生复活，因此，有必要关注其复活机理与早期识别问题[3]。近二十年来，滑坡稳定性分析方法经历了从极限平衡法到有限差分数值模拟、再到多物理场耦合与细观力学表征的范式演进[4][5]。然而，当前文献呈现明显的“案例丰富、整合薄弱”特征：不同研究各自采用独立的软件平台、本构模型和参数化协议，方法之间的横向比较与跨案例综合严重缺失。这一碎片化格局使工程实践者面对具体滑坡时难以基于证据选择分析方法，也阻碍了该领域从“经验驱动”向“物理驱动”的系统性转型。

1.2. 文献检索与筛选方法

为保证综述的系统性，避免文献选择的偏倚，本综述参照 SALSA (Search, Appraisal, Synthesis, and Analysis)四流程框架实施文献检索与评估。

检索策略：以中国知网(CNKI)、Web of Science 和 Scopus 为检索数据库，采用布尔运算符组合以下

主题词进行检索——中文主题词：“滑坡稳定性”“数值模拟”“FLAC3D”“GeoStudio”“渗流-剪切耦合”“滑带力学”“渐进破坏”；英文主题词：“landslide stability”“numerical simulation”“FLAC3D”“GeoStudio”“seepage-shear coupling”“slide zone mechanics”“progressive failure”。文献检索以 2011~2026 年为主要时间范围；对于该时段之前发表、与本文研究主题密切相关的工程案例、经典理论及方法文献，补充纳入分析。

文献纳入标准：(1) 研究对象为滑坡稳定性分析方法或破坏机理；(2) 包含明确的数值模拟、实验研究或案例分析方法论；(3) 发表于同行评议期刊或经导师审核通过的学位论文。**排除标准：**纯综述性文献、不含原始方法学贡献的工程报告、会议摘要。

文献筛选流程：经去重、标题摘要筛选和全文阅读后，最终纳入 22 条参考文献。纳入文献以近年研究为主，同时保留少量早期经典理论、方法文献和工程案例，符合文献综述的时效性标准。

1.3. 综述目的与结构

本文围绕四个递进式目标展开：(1) 梳理数值模拟方法的演进脉络与互补关系；(2) 归纳不同触发类型滑坡的破坏机理共性；(3) 整合滑带力学特性的实验与数值研究进展；(4) 识别关键研究空白并提出方向性建议。全文以“数值方法→破坏机理→滑带力学→案例综合→研究空白”为逻辑主线，案例分布于中国三峡库区、西南地区、内蒙古矿区及埃塞俄比亚裂谷边缘，旨在为该领域提供一幅结构化的方法论与认识论图谱。

2. 滑坡稳定性数值分析方法

滑坡稳定性分析的数值工具箱在过去二十年中经历了显著扩展。从经典的极限平衡法到基于连续介质力学的有限差分 and 有限元方法，再到颗粒尺度的离散元模拟，每种方法都有其独特的物理过程覆盖范围和适用边界。本章按照“从简单到复杂、从单一到耦合”的逻辑，依次评述极限平衡法、FLAC3D、GeoStudio、多平台耦合方法和 PFC 离散元方法的研究进展，并在末节给出各类方法的综合性能对比。

2.1. 极限平衡法

极限平衡法四种经典变体——瑞典条分法、Bishop 简化法、Janbu 修正法和 Morgenstern-Price 严格法——在工程设计中各有其适用范围及精度边界。卢茜等[6]利用 GeoStudio 的 SLOPE/W 模块对坝体断面进行了系统的 LEM 方法比较，发现方法选择可导致安全系数差异高达 15%。LEM 框架的根本局限性在于假定滑面全线同时达到峰值强度[4]-[7]，无法描述渐进破坏过程中强度的空间非均匀调动，且将孔隙水压力处理为静态边界条件。尽管如此，LEM 因其参数需求少、计算效率高和规范成熟度高等优势，在初步评估和设计校核中仍具有不可替代的地位。四种经典 LEM 方法在平衡条件、滑面形状及相对精度等方面的主要差异见表 1。

Table 1. Comparison of four classic LEM methods
表 1. 四种经典 LEM 方法对比

特征	瑞典条分法	Bishop 简化法	Janbu 修正法	Morgenstern-Price 法
力矩平衡	√	√	×	√
力平衡	×	×	√	√
滑面形状	圆弧	圆弧	任意	任意
相对精度	偏低 5%~20%	偏高	受修正系数影响	基准

表 1 表明, 瑞典条分法仅满足力矩平衡条件, 通常采用圆弧滑面假设, 计算过程较为简单, 但相对精度偏低, 其安全系数一般较其他严格方法存在一定偏差; Bishop 简化法在满足力矩平衡的基础上, 对条间力作了简化处理, 同样主要适用于圆弧滑面, 其计算精度相较瑞典条分法有所提高, 因此在实际边坡稳定性分析中应用较为广泛。Janbu 修正法主要满足整体力平衡条件, 对滑面形状的适应性较强, 可用于分析非圆弧滑面, 但计算结果受到修正系数的影响。Morgenstern-Price 严格法则同时满足力矩平衡和整体力平衡条件, 并可处理任意形状滑面, 在理论上具有更高的计算精度和更强的适用性, 可作为不同极限平衡方法计算结果对比的基准方法。因此, 在实际工程分析中, 应根据滑坡几何形态、潜在滑面特征及计算精度要求合理选择分析方法。

2.2. FLAC3D

FLAC3D 基于显式有限差分格式, 在大变形问题、复杂本构模型和耦合水 - 力过程方面具有独特优势[8]。Chen 等[9]以夏日滑坡为例, 建立了地质调查→滑面识别→多工况 FLAC3D 计算的工作流程, 在天然、蓄水和地震三种工况下识别出两组潜在滑动面, 为后续研究提供了可迁移的方法论参考框架。

在标准强度折减法的基础上, 李小根等[10]针对 c' 和 φ' 等比例折减的假设局限, 以四川省冯家坪滑坡为案例, 设计了双折减系数法。反演结果显示黏聚力衰减速率约为内摩擦角的 1.25 倍——在滑坡失稳早期, 黏聚力分量的退化先于摩擦分量。其建立的 GIS-Rhino-FLAC3D 耦合建模管线将地质数据→几何建模→数值计算的无缝衔接推进到了实用化水平, 为复杂地形条件下三维滑坡模型的构建提供了可复用的技术路径。

2.3. GeoStudio

GeoStudio 的模块化架构使 SEEP/W 与 SLOPE/W 的联动分析成为降雨型滑坡研究的标准方法[11]。Wen 等[12]将 TRIM 实验系统获得的实测土水特征曲线参数注入 GeoStudio 模型, 对重庆思湾村滑坡进行了渗流 - 稳定性全过程模拟。实验揭示滑体与滑带饱和和渗透系数存在显著差异(0.43 m/d vs 0.03 m/d, 相差约 14 倍), 该水力传导对比导致降雨沿高渗透性滑体快速入渗后在滑带顶面形成悬挂饱水带, 产生局部孔压积聚, 从而解释了观测到的降雨峰值 - 滑坡启动之间的滞后效应。该研究直接证明了实测 SWCC 参数化相比工程类比参数的精度优势。思湾村滑坡滑体与滑带的 TRIM 实测饱和含水率及饱和渗透系数对比见表 2。

Table 2. Comparison of TRIM-measured parameters for the Siwan Village landslide (after Wen *et al.* [12])

表 2. 思湾村滑坡 TRIM 实测参数对比(据 Wen 等[12])

参数	滑体	滑带	比值
饱和体积含水率 $\theta_s/(m^3/m^3)$	0.38	0.42	0.90
饱和渗透系数 $K_s/(m \cdot d^{-1})$	0.43	0.03	14.3

由表 2 可见, 滑带的饱和含水率(0.42 m^3/m^3)略高于滑体(0.38 m^3/m^3), 而其饱和渗透系数仅为 0.03 m/d, 显著低于滑体的 0.43 m/d, 二者相差约 14.3 倍, 表明滑带具有明显的低渗透性特征。这种显著的渗透性差异可能导致降雨入渗过程中水分在滑带上部发生滞留和积聚, 并引起局部孔隙水压力升高, 进而对滑坡稳定性产生不利影响。

Gamada 等[13]将 GeoStudio 降雨 - 稳定性工作流迁移至埃塞俄比亚 Bonga-Mizan 公路边坡, 证明了该方法在数据稀疏区域的适用性, 但其 SWCC 参数基于文献估计而非实测, 引入的不确定性尚待敏感性分析量化。

以上 GeoStudio 应用均采用二维剖面分析策略。然而，二维分析无法体现三维地形约束效应，且其力学本构为简化的极限平衡模型。这些局限自然引出了对三维力学分析工具的需求，以及二者联合使用的可能性。

2.4. GeoStudio 与 FLAC3D 互馈耦合

王艳昆等[14]提出了 GeoStudio 与 FLAC3D 互馈的多场信息模拟方法，核心是迭代交换机制：GeoStudio SEEP/W 计算孔隙水压力场→传递给 FLAC3D→FLAC3D 更新变形场和渗透系数→反馈给 GeoStudio→迭代收敛。该方法在库水位骤降物理模型试验上进行了严格验证，孔压模拟平均误差 < 10%，总应力模拟平均误差 < 33%，成功再现了牵引式多级滑面破坏模式。耦合 workflow 预测的稳定性系数较单一平台低 10%~33%，这一量级差异具有明确的工程含义——单独使用某一平台可能造成对稳定性的高估。该 workflow 代表了当前滑坡多场信息模拟的方法学前沿。

2.5. PFC 离散元方法

连续体方法在描述滑带剪切的不连续特征——颗粒重排、粗糙突起断裂和剪切带厚度演化方面存在根本性局限。Wang 等[15]将 WDJ-300 大型直剪系统改装为渗流 - 剪切耦合试验装置，对黄土坡滑坡滑带土进行了渗流与剪切同步施加的系统试验。实验揭示渗流应力使峰值抗剪强度降低 18%~35%，且 ϕ' 的渗流敏感性显著高于 c' ——这意味着渗流作用下摩擦分量的退化比黏聚分量更剧烈。PFC2D 模拟进一步揭示了剪切过程中流速矢量的大小和方向发生动态重定向，形成“剪切→裂纹扩展→渗透性增加→流速增大→进一步软化”的正反馈循环。不同渗流应力条件下黏聚力、内摩擦角及破坏模式的变化见表 3。

Table 3. Key results of seepage-shear coupling tests (after Wang *et al.* [15])
表 3. 渗流 - 剪切耦合试验关键结果(据 Wang 等[15])

渗流应力	c' 变化	ϕ' 变化	破坏模式
0 kPa	基准	基准	应变硬化
100 kPa	↓ 15%~20%	↓ 1°~3°	应变软化
200 kPa	↓ 25%~35%	↓ 2°~5°	软化加剧

由表 3 可见，随着渗流应力由 0 kPa 增加至 200 kPa，滑带土的黏聚力和内摩擦角均呈明显下降趋势。其中，渗流应力达到 100 kPa 时， c' 降低约 15%~20%， ϕ' 降低 1°~3°；当渗流应力进一步增加至 200 kPa 时， c' 降低幅度达到 25%~35%， ϕ' 降低 2°~5°。与此同时，滑带土的破坏模式由初始的应变硬化逐渐转变为应变软化，并表现出明显的软化加剧特征，说明渗流作用不仅降低滑带土的抗剪强度，而且会改变其剪切破坏特征。

2.6. 数值方法综合对比

上述五类数值方法覆盖了从工程实用到前沿研究的不同层次需求。LEM 和 GeoStudio 偏重效率与规范兼容性，FLAC3D 和耦合方法追求物理真实性，PFC 则在颗粒尺度机理揭示方面不可替代。从渗流、力学、大变形、颗粒尺度、三维分析和计算效率六个维度对上述方法进行综合对比，结果见表 4。

由表 4 可见，不同数值方法在适用范围和计算能力方面具有明显差异。LEM 主要用于边坡和滑坡整体稳定性评价，计算效率较高，但对渗流、复杂应力场及大变形过程的描述能力有限，且不适用于颗粒尺度分析和严格意义上的三维复杂模拟。FLAC3D 具有较强的渗流 - 力学耦合分析能力和三维建模能力，能够较好地描述岩土体变形与破坏过程，但计算成本相对较高。GeoStudio 在渗流分析方面具有明显优势，并可通过 SEEP/W 与 SLOPE/W 等模块实现渗流场与稳定性分析，计算效率较高，但对于大变形和

颗粒尺度破坏过程的模拟能力有限。GeoStudio-FLAC3D 耦合方法兼具渗流分析和三维力学计算优势，能够更加全面地反映水库滑坡在复杂库水位条件下的水-力耦合响应，但模型建立、参数确定及计算过程相对复杂。PFC2D/3D 则基于离散元思想，能够从颗粒尺度描述裂纹扩展、颗粒重排及宏观破坏演化过程，在大变形和细观破坏机制研究方面具有明显优势，但其计算效率较低，工程尺度应用受到一定限制。因此，实际工程中应结合研究目标、模型尺度、数据条件及计算资源合理选择数值方法；对于以工程稳定性评价为主的问题，可优先考虑 LEM 或 GeoStudio，而对于需要深入研究水-力耦合、大变形及破坏演化机制的问题，则可采用 FLAC3D、GeoStudio-FLAC3D 耦合或 PFC 方法。

Table 4. Comparison of five major numerical methods

表 4. 五大数值方法对比

方法	渗流	力学	大变形	颗粒尺度	三维	效率
LEM	弱	弱	不适用	不适用	不适用	中
FLAC3D	强	强	较强	不适用	强	中
GeoStudio	强	中等	不适用	不适用	不适用	高
GeoStudio-FLAC3D 耦合	强	较强	强	不适用	强	中
PFC2D/3D	强	较强	强	强	中等	低

3. 滑坡破坏机理

数值方法为滑坡稳定性分析提供了计算工具，但分析的可靠性最终取决于对破坏机理的理解深度。本章按触发因素分类，依次讨论降雨型、水库型和采矿型滑坡的破坏机理，随后从渐进破坏理论和细观摩擦弱化两个理论视角加以深化。这种“按现象分类→按机制统一”的叙述逻辑，旨在揭示不同触发条件下滑坡行为的共性物理过程。

3.1. 降雨型滑坡

降雨诱发滑坡的物理路径——入渗→基质吸力降低→有效应力损失→破坏——在定性层面已获共识。Wen 等[12]揭示的滑体/滑带渗透性对比机制(14 倍差异)可推广至具有类似风化剖面结构的浅层平移式滑坡。该机制解释了广泛观测到的降雨峰值与滑坡启动之间的滞后现象，并为基于 SWCC 实测数据的物理性预警指标设计提供了思路。

Gamada 等[13]证明了 GeoStudio 方法在数据稀疏区域的迁移能力，但同时也暴露了缺乏实测参数时的不确定性风险。

3.2. 水库型滑坡

水库型滑坡区别于降雨型的本质特征在于库水位边界条件的动态变化——特别是骤降过程产生的瞬态指向坡外渗流场。Wang 等[15]从实验层面证明渗流应力使峰值抗剪强度降低 18%~35%，且 ϕ' 的渗流敏感性高于 c' 。王艳昆等[14]从宏观数值模拟层面证实耦合分析的稳定性系数较单一平台低 10%~33%。两条独立证据线——细观实验与宏观数值——共同指向一个结论：渗流-剪切耦合是水库滑坡稳定性分析中不可简化的核心物理过程。水库运行过程中，库水长期浸泡、孔隙水压力变化以及库水位骤降等因素可通过不同作用路径改变滑坡体的应力状态和抗剪强度，具体表现为前缘浸泡软化、孔压升高、滑带饱和衰减以及动水压力等四种主要力学机制，其作用过程、空间范围及时间尺度见表 5。

由表 5 可见，水库滑坡的失稳并非单一因素作用的结果，而是具有明显的多机制耦合特征。其中，前缘浸泡软化主要表现为库水长期浸泡导致岩土体胶结作用逐渐减弱，进而引起黏聚力 c' 持续衰减，其

影响主要集中于滑坡前缘一定范围内，作用时间通常为数月至数年；孔压升高则通过孔隙水压力 u 增加降低有效应力 σ' ，进而削弱滑带抗剪强度，其影响范围可扩展至整个坡体；滑带饱和和衰减表现为滑带土在持续饱和条件下 c' 和 φ' 降低，并与渗流过程具有较强的同步性；动水压力则主要发生于库水位快速变化阶段，尤其是在库水位骤降过程中，由于坡体内部地下水排泄滞后于外部水位下降，形成指向坡外的瞬态渗流场，从而产生附加水动力作用，且其时间尺度主要为数天至数周。因此，不同机制在作用区域、持续时间和作用方式上存在明显差异，共同构成了库水位变化条件下水库滑坡稳定性演化的主要物理过程。

Table 5. Four mechanical mechanisms of reservoir landslides

表 5. 水库滑坡四种力学机制

机制	物理过程	空间范围	时间尺度
前缘浸泡软化	浸泡→胶结弱化→ c' 衰减	前缘 80~120 m	数月至数年
孔压升高	$u \uparrow \rightarrow \sigma' \downarrow \rightarrow \tau f \downarrow$	整个坡体	数月至数年
滑带饱和和衰减	饱和→ c' , φ' 降低	滑带饱和区	与渗流同步
动水压力	外水卸除 + 内水滞后	前缘变动带	数天至数周

张家旭等[16]研究了三峡库区三门洞滑坡的韧性变形现象——部分滑坡并非以灾难性破坏告终，而是表现为持续缓慢蠕变，在数年至数十年间对基础设施造成累积损伤。这一概念拓展了传统的滑坡风险二元分类(稳定 vs 破坏)，为“韧性变形”滑坡的长期监测和管理提供了理论依据。张琪等[17]分析了陡倾软弱顺层岩质滑坡中坡顶张裂隙静水压力的贡献——该因素在标准 LEM 计算中经常被忽略。何惠军[18]对巴东新城区库岸变形进行了早期系统性编录，为上述数值研究提供了不可或缺的现场观测约束。

3.3. 采矿型滑坡

采矿型滑坡在触发机制上与水库型和降雨型存在本质区别——核心驱动力为开挖卸荷导致的应力重分布，而非水的作用。Wei 等[19]对白云鄂博矿区高度超过 300 m 的高陡边坡进行了系统研究，识别出平台开挖→侧向约束移除→剪应力向边坡中部集中的破坏演化路径。该研究将变形监测数据整合为预测框架，代表了滑坡预警从经验判据走向物理驱动的重要尝试。

3.4. 渐进破坏理论

上述三类滑坡虽然在触发机制上各有不同，但在破坏的时空演化上共享一个共性特征——渐进性。蹇宜霖[7]发展了将滑面处理为演化实体的渐进破坏分析框架，其核心思想是抗剪强度沿滑面的调动具有空间非均匀性和时间序贯性。湖南省案例验证表明渐进破坏分析的 FOS 比 LEM 高 8%~15%——LEM 的“全线同时峰值”假设系统性地低估了已软化区域对整体稳定性的削弱效应。这一发现对工程实践的直接启示是：对于跨越应变软化材料界面的边坡，基于 LEM 的稳定性评估可能偏于不安全。传统 LEM 与渐进破坏分析在强度调动假设、应变软化处理及稳定性评价结果等方面存在明显差异，具体对比见表 6。

Table 6. Comparison between progressive failure analysis and traditional LEM (after Jian Yilin [7])

表 6. 渐进破坏分析与传统 LEM 对比(据蹇宜霖[7])

比较维度	传统 LEM	渐进破坏分析
强度调动假设	全线同时达峰值	空间非均匀、时序渐进
应变软化	不考虑	部分区域已软化至残余值
FOS 差异	基准值	较 LEM 高 8%~15%

由表 6 可见,传统 LEM 与渐进破坏分析的主要区别在于对滑面抗剪强度空间分布及演化过程的处理方式不同。传统 LEM 通常假定潜在滑面上的抗剪强度同时达到峰值,未充分考虑滑坡在实际变形过程中不同区域强度逐步调动、软化及残余强度形成的过程;而渐进破坏分析考虑了抗剪强度调动的空间非均匀性和时间序贯性,可进一步描述局部区域由峰值强度向残余强度演化的过程。因此,对于具有明显应变软化特征的滑带土或跨越不同岩土材料界面的滑坡,渐进破坏分析能够更加合理地反映局部软化对整体稳定性的影响。湖南省案例中,渐进破坏分析所得 FOS 较传统 LEM 高 8%~15%,表明两种方法在稳定性评价结果上存在一定差异。因此,在采用 LEM 进行工程稳定性评价时,对于存在明显渐进破坏和应变软化特征的滑坡,应充分认识其强度同时达峰假设所带来的局限性,并结合渐进破坏分析等方法进行必要的补充验证。

3.5. 细观尺度摩擦弱化

渐进破坏的速率和程度最终由滑带土在细观尺度的力学行为决定。Ren 等[20] [21]对贵阳红岩滑坡滑带土的环剪试验揭示了摩擦弱化机制随正应力水平发生质变:低正应力(<200 kPa)下由黏土颗粒重定向主导(可逆性组构效应),高正应力下由颗粒破碎和断层泥产生主导(不可逆过程)。这一发现为浅层与深层滑坡的差异化复活风险评估提供了基于物理机制的细观判据。Ren 等[21]进一步将该细观发现与现场运动学观测联系,识别出红岩滑坡的两阶段复活模式——雨季孔压恢复驱动的缓慢变形阶段和累积位移超过 50 mm 临界阈值后的加速阶段。

Li 等[22]从理论角度贡献了滑坡动力学的数学框架,将滑坡视为传播中的不连续面而非静态滑面——这一概念与渐进破坏理论在数学上同源,为从“应力判据”走向“能量判据”的稳定性分析方法提供了严格基础。

4. 案例研究对比

前述各章从方法和机理两个维度进行了纵向分析,本章进一步对所纳入文献中的工程案例进行横向比较,以梳理不同地质和气候背景下滑坡行为的共性与差异。三峡库区滑坡灾害广泛发育,是开展库岸滑坡形成演化与稳定性研究的重要区域,其中部分研究以三峡库区及其他库岸滑坡为直接研究对象,综合揭示了一种岩性 - 外部环境双重控制模式:岩性控制变形样式(坚硬岩质边坡→块状倾倒/平面滑动,土质/强风化边坡→分布式蠕变),水文条件控制变形速率(库水位泄降速度调节孔压滞后程度)。所纳入参考文献所涉及的三类典型滑坡在代表性区域、触发机制、主导参数及分析方法等方面的对比见表 7。

Table 7. Comparison of three major landslide types
表 7. 三大滑坡类型对比

维度	TGRA 水库型	埃塞俄比亚降雨型	白云鄂博采矿型
代表文献	[7] [10] [14] [15]	[13]	[19]
触发机制	库水位波动	降雨入渗	开挖卸荷
主导参数	滑带 c' , ϕ' , K_s	SWCC 参数	结构面强度
分析方法	GeoStudio + FLAC3D + PFC	GeoStudio	数值 + 监测

由表 7 可见,三类滑坡在触发机制、控制参数及分析方法方面具有明显差异。TGRA 水库型滑坡主要受库水位周期性波动控制,其稳定性分析重点关注滑带抗剪强度参数 c' 、 ϕ' 以及饱和渗透系数 K_s 。等水 - 力耦合参数,通常采用 GeoStudio、FLAC3D 和 PFC 等多种方法开展渗流、应力及细观破坏过程分析;埃塞俄比亚降雨型滑坡主要受降雨入渗影响,研究重点集中于土水特征曲线(SWCC)及相关水力参数

对坡体入渗和稳定性的控制作用, GeoStudio 等渗流 - 稳定性分析工具具有较好的适用性; 白云鄂博采矿型滑坡则主要受采矿开挖和卸荷作用影响, 其稳定性更大程度上取决于岩体结构面及其强度特征, 通常需要结合数值模拟与现场监测对变形响应进行综合评价。

总体而言, 三类滑坡虽然在外部触发因素上存在差异, 但其本质上均表现为外部作用改变坡体内部应力场、渗流场或材料强度状态, 并最终导致变形累积和局部破坏向整体失稳演化。其中, 水库型滑坡的突出特征在于库水位动态变化与坡体内部渗流响应之间存在明显的时滞效应; 降雨型滑坡则更加突出降雨入渗与土体水力性质之间的关系; 采矿型滑坡则主要体现工程扰动对原有应力平衡和结构面的影响。因此, 在开展滑坡稳定性评价时, 应根据不同类型滑坡的主导触发机制合理选取控制参数和数值分析方法, 而不能采用单一的分析框架进行统一处理。

Gamada 等[13]在埃塞俄比亚的工作证明了 TGRA 发展起来的 GeoStudio 工作流具有向数据稀疏区域迁移的潜力, 但参数估计引入的不确定性需要敏感性分析进行量化。Wei 等[19]的白云鄂博案例在预测框架中整合变形监测的做法, 对 TGRA 研究具有反向借鉴意义——多数 TGRA 数值研究尚未将监测数据系统地纳入预测验证流程。

5. 现存问题与未来方向

基于上述文献综合分析, 本章识别该领域当前面临的五个关键研究空白。这些空白并非孤立存在, 而是相互关联——参数化鸿沟(G1)加剧了方法比较的困难(G2), 细观 - 宏观脱节(G3)限制了本构模型的预测能力, 进而导致预测验证赤字(G4), 而上述所有问题共同构成了先进方法向工程实践转化的障碍(G5)。

5.1. 实验 - 数值参数化鸿沟

Wen 等[12]将实测土水特征曲线参数用于数值分析, 为试验参数与滑坡稳定性计算的衔接提供了案例。多数研究仍采用工程类比值、文献推荐值或反算值进行参数化。数值工具的精度提升并不自动转化为准确度提升——如果输入参数本身带有系统性偏差, 输出的“精确”结果仅仅是对偏差的更精细内插。建议建立滑坡土体标准化 SWCC/HCF 测量协议, 构建按土类和地质环境索引的实测参数开放数据库。

5.2. 方法基准缺失

缺乏同一滑坡、相同输入下多方法的系统性比较研究。王艳昆等[14]虽然证明了耦合方法较单一平台的差异, 但该差异的统计显著性和场景依赖性尚待检验。建议开展系统性基准化研究, 类似地震工程领域的盲测预测竞赛, 量化每一方法复杂度层次的边际信息增益。

5.3. 细观 - 宏观脱节

Ren 等[20]揭示的摩擦弱化正应力依赖性和 Wang 等[15]发现的渗流 - 剪切耦合效应, 目前均未进入 FLAC3D/GeoStudio 的标准本构模型。 c' 和 ϕ' 在现有模型中仍作为常数处理。建议开发以可测量细观状态变量(颗粒定向度、破碎率、渗透率各向异性比)为内变量的演化本构模型。

5.4. 预测验证赤字

几乎所有验证均为回顾性——在破坏已发生后用模型“重现”结果。严格意义上的预测技能仍处于未量化状态。建议建立记录完整破坏前变形历史的长期监测数据集, 组织前瞻性预测验证, 并倡导诚实报告失败预测。

5.5. 工程落地障碍

耦合 GeoStudio-FLAC3D、PFC2D 滑带模拟、双折减系数 FLAC3D 等先进方法几乎全部停留在学术研究层面。障碍来自技术(学习曲线陡峭)和制度(设计规范强制 LEM 的 FOS 阈值)两个层面。建议开发简化稳健版本,制定方法类型与地质场景的映射指南,并与规范制定机构沟通推动设计规范更新。综合所纳入文献的研究结果,当前水库滑坡稳定性研究仍存在参数化鸿沟、方法基准缺失、细观-宏观脱节、预测验证不足和工程落地障碍五个主要研究空白,具体表现及优先行动方向见表 8。

Table 8. Five major research gaps

表 8. 五大研究空白

编号	空白	严重程度	优先行动
G1	参数化鸿沟	极严重	标准化 + 数据库
G2	方法基准缺失	严重	基准化 + 盲测
G3	细观-宏观脱节	严重	演化本构
G4	预测验证赤字	极严重	长期监测
G5	工程落地障碍	较严重	简化 + 规范

由表 8 可见,当前水库滑坡研究的主要不足并非单一数值计算方法精度不足,而是贯穿“参数获取-方法验证-机理尺度-预测评价-工程应用”全过程的系统性问题。其中,参数化鸿沟和预测验证赤字的严重程度最高:一方面,滑带土的渗透系数、黏聚力、内摩擦角及应变软化参数等关键指标具有较强的空间非均质性,但现有研究中实测数据和标准化参数数据库仍相对不足;另一方面,许多数值模型主要通过历史案例进行事后解释,长期监测数据和前瞻性预测验证相对缺乏,导致模型预测能力尚未得到充分检验。方法基准缺失和细观-宏观脱节则限制了不同数值方法之间的横向比较以及细观破坏机制向工程尺度模型的传递。与此同时,先进耦合方法虽然能够提高水-力耦合和破坏过程模拟能力,但复杂的模型建立流程和现行规范体系的适配问题进一步限制了其工程推广。

针对上述研究空白,未来研究应重点推进五个方面:建立标准化试验体系和滑带参数数据库;通过统一基准模型和盲测案例开展不同数值方法的系统验证;发展能够描述材料强度演化的演化本构模型,实现细观破坏机制与宏观稳定性分析的有效衔接;依托长期监测数据开展数值模型的前瞻性预测与验证;针对工程实际需求简化先进耦合分析流程,并推动新型分析方法与现行设计规范之间的衔接。通过上述研究,可逐步实现水库滑坡稳定性分析由“事后解释型模拟”向“参数可靠、机制清晰、预测可验证、工程可应用”的方向转变。

6. 结论

本文围绕滑坡稳定性分析的相关研究,从数值模拟方法、破坏机理和滑带力学特性三个维度进行综述,主要认识如下。

第一,数值方法已从单一工具走向互补耦合。FLAC3D、GeoStudio 和 PFC 各自覆盖不同的物理过程,GeoStudio-FLAC3D 互馈耦合代表了当前多场融合的方法学前沿,双折减系数法和渐进破坏分析分别从参数折减策略和强度调动机制两个角度揭示了 LEM 假设的保守性边界。

第二,渗流-剪切耦合被识别为水库型与降雨型滑坡的共性主导过程。实验与数值两条独立证据线共同表明:渗流与剪切不可简化为序贯过程, φ' 比 c' 更敏感于渗流变化是当前本构模型中尚未体现的关键特征。

第三,细观尺度的正应力依赖性摩擦弱化和渐进破坏理论为从“安全系数”走向“机制理解”提供

了物理基础。这些理论进展揭示了 LEM 分析中嵌入的系统性偏差来源,但向宏观本构模型和工程实践的转化尚未完成。

第四,五个研究空白——参数化鸿沟、方法基准缺失、细观-宏观脱节、预测验证赤字和工程落地障碍——构成了一项相互关联的研究议程。弥合这些空白的核心不在于个别工具的精进,而在于建立连接实验、数值模拟、现场验证和工程实践的系统性整合框架。

参考文献

- [1] World Bank (2023) Natural Disaster Risk Assessment Report. World Bank.
- [2] 唐辉明. 三峡库区滑坡与河谷协同演化机制[J]. 科学通报, 2025, 70(21): 3505-3515.
- [3] 张永双, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 古滑坡复活问题研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 728-740.
- [4] Griffiths, D.V. and Lane, P.A. (1999) Slope Stability Analysis by Finite Elements. *Géotechnique*, **49**, 387-403. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
- [5] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
- [6] 卢茜, 刘颖. GeoStudio 软件在边坡稳定分析中的应用[J]. 萍乡学院学报, 2016, 33(3): 72-75.
- [7] 蹇宜霖. 基于渐进式破坏的滑坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [8] Itasca Consulting Group, Inc. (2012) FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 5.0, User's Guide. Itasca Consulting Group, Inc.
- [9] Chen, L., Lv, J. and Yin, F. (2018) Analysis of Stability of Xiari Landslide Based on FLAC^{3D}. *Advances in Geosciences*, **8**, 918-926. (In Chinese) <https://doi.org/10.12677/ag.2018.85101>
- [10] 李小根, 盛继明, 王静, 等. 基于双折减系数法与极限平衡法的顺层滑坡稳定性分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 81-88.
- [11] Geo-Slope International (2012) Seepage Modeling with SEEP/W; Stability Modeling with SLOPE/W. GEO-SLOPE International Ltd.
- [12] Wen, H., Xiao, J., Wang, X., Xiang, X. and Zhou, X. (2023) Analysis of Soil-Water Characteristics and Stability Evolution of Rainfall-Induced Landslide: A Case of the Siwan Village Landslide. *Forests*, **14**, Article 808. <https://doi.org/10.3390/f14040808>
- [13] Gamada, F.F., Assefa, S.M., Assefa, E., Bhagat, S.K. and Jilo, N.Z. (2026) Numerical Analysis of Rainfall-Induced Landslides and Stability Assessment along the Bonga-Mizan Road Section, Ethiopia. *Advances in Civil Engineering*, **2026**, Article No. 8007761. <https://doi.org/10.1155/adce/8007761>
- [14] 王艳昆, 温韬, 王鲁琦, 等. GeoStudio 与 FLAC3D 互馈的库岸滑坡多场信息模拟方法[J]. 土木与环境工程学报, 2026, 48(1): 36-43.
- [15] Wang, Q., Tang, H., An, P., Fang, K., Sun, S. and Lu, J. (2024) Experimental and Numerical Study of Shear Strength on the Slide Zone Soil by the Coupling of Seepage and Shear Test. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 25086. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77163-6>
- [16] 张家旭, 易庆林, 邓茂林, 等. 三峡库区三门洞滑坡复活机理及韧性变形研究[J]. 人民长江, 2024, 55(4): 160-168.
- [17] 张琪, 巨能攀, 张成强, 等. 库水位变化时陡倾软弱顺层岩质滑坡变形机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(2): 206-217.
- [18] 何惠军. 巴东新城库岸岩质滑坡变形研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2011.
- [19] Wei, Y., Lv, Z., Li, C., Yizi, H., Jin, H. and Wang, C. (2026) Mechanism and Predicting on the High and Steep Slope Landslides Formation: A Case Study of Bayan Obo Mine. *Mining, Metallurgy & Exploration*, **43**, 3477-3494. <https://doi.org/10.1007/s42461-026-01615-y>
- [20] Ren, S., Zhang, Y., Zhang, T. and Li, J. (2026) Normal Stress-Dependent Frictional Weakening Mechanism of Landslide Slip-Zone Soils Revealed by the Meso- Morphology of Shear Surface. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **85**, Article No. 425. <https://doi.org/10.1007/s10064-026-05041-8>
- [21] Ren, S., Tang, R., Gao, F., Zhao, Z., Xie, C., Fan, X., et al. (2026) Reactivation Characteristics and Failure Mechanism of the Hongyan Landslide in Guiyang City, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **85**, Article No. 381. <https://doi.org/10.1007/s10064-026-05090-z>
- [22] Li, W., Frid, V., Mishuris, G. and Movchan, A.B. (2026) Dynamics of Landslides—Mathematical Framework. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, **38**, Article No. 59. <https://doi.org/10.1007/s00161-026-01488-y>