
地下空洞如何“引爆”土石坝？震动台实验揭晓破坏机制

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40804.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

地下空洞如何“引爆”土石坝？震动台

实验揭晓破坏机制。原文链接：<https://www.mdpi.com/2624-795X/6/3/37>

论文标题：Experimental and Numerical Investigation of Seepage and Seismic Dynamics Behavior of Zoned Earth Dams with Subsurface Cavities

期刊名：GeoHazards

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/geohazards>

研究背景

土石坝是水利工程中不可或缺的基础设施，用于蓄水、防洪和灌溉。然而，当坝体建造在可溶岩（如石膏、石灰岩）等易形成地下空洞的地基上时，其长期安全面临严峻挑战。这些隐蔽的空洞会改变渗流路径、抬升孔隙水压力并诱发结构变形，特别是在地震荷载作用下，可能显著恶化大坝的性能，导致内部侵蚀、不均匀沉降甚至溃坝。全球范围内，如美国圣弗朗西斯坝（1928年）和摩苏尔大坝等事故，均与可溶地基中的空洞问题有关。尽管已有研究分别探讨了静态渗流或地震响应，但关于空洞的几何形态（如位置、形状、大小）如何影响分区土石坝在静-动耦合条件下的性能，相关研究仍十分有限。本研究旨在通过结合物理模型实验与数值模拟，探究地基中不同空洞配置对分区土石坝在静力渗流和地震荷载下渗流行为、变形及稳定性的综合影响。

研究内容

研究团队构建了一个1:25比例的带粘土心墙的分区土石坝物理模型，并将其置于单向振动台上进行测试。模型地基采用富含石膏的土壤模拟易溶岩条件，并人工设置了五种空洞配置方案进行研究，包括：无空洞（参考基准）、上游区空洞、粘土心墙下方空洞、下游区空洞以及上下游双空洞。实验在稳定渗流条件和不同地震烈度（峰值地面加速度PGA分别为0.1g、0.33g和0.47g）下进行，系统监测了渗流量、孔隙水压力、坝顶位移和加速度等关键响应。同时，研究利用GeoStudio软件中的SEEP/W和QUAKE/W模块进行了平行的数值模拟，以验证和补充实验结果。

研究结果表明，空洞的存在和位置对坝体行为具有决定性影响。在渗流方面，与无空洞基准相比，上游空洞导致渗流量急剧增加（例如，在水头0.30m时，渗流量从基准的 1.50×10^{-7}

m³/s增加到 6.48×10^{-7} m³/s)，并抬高了浸润线，使其在下游坡面出逸。双空洞配置则产生了最大的渗流量（ 8.12×10^{-7} m³/s），导致坝基几乎完全饱和。相反，下游空洞的影响最小。在变形和稳定性方面，上游空洞和双空洞配置导致了最严重的后果。在0.47g的地震荷载下，上游空洞模型出现了约0.30米的坝顶位移和约7厘米的上游侧沉降，动态安全系数降至0.579，远低于推荐阈值。孔隙水压力在空洞附近显著升高，上游空洞和双空洞模型在强震下的峰值孔隙压力分别达到约2.7 kPa和3.0 kPa，触发了局部液化。数值模拟结果与实验观测高度吻合，决定系数 R^2 高达0.989，验证了方法的可靠性。研究还通过参数分析发现，更大尺寸和不规则形状的空洞会进一步放大这些不利效应。

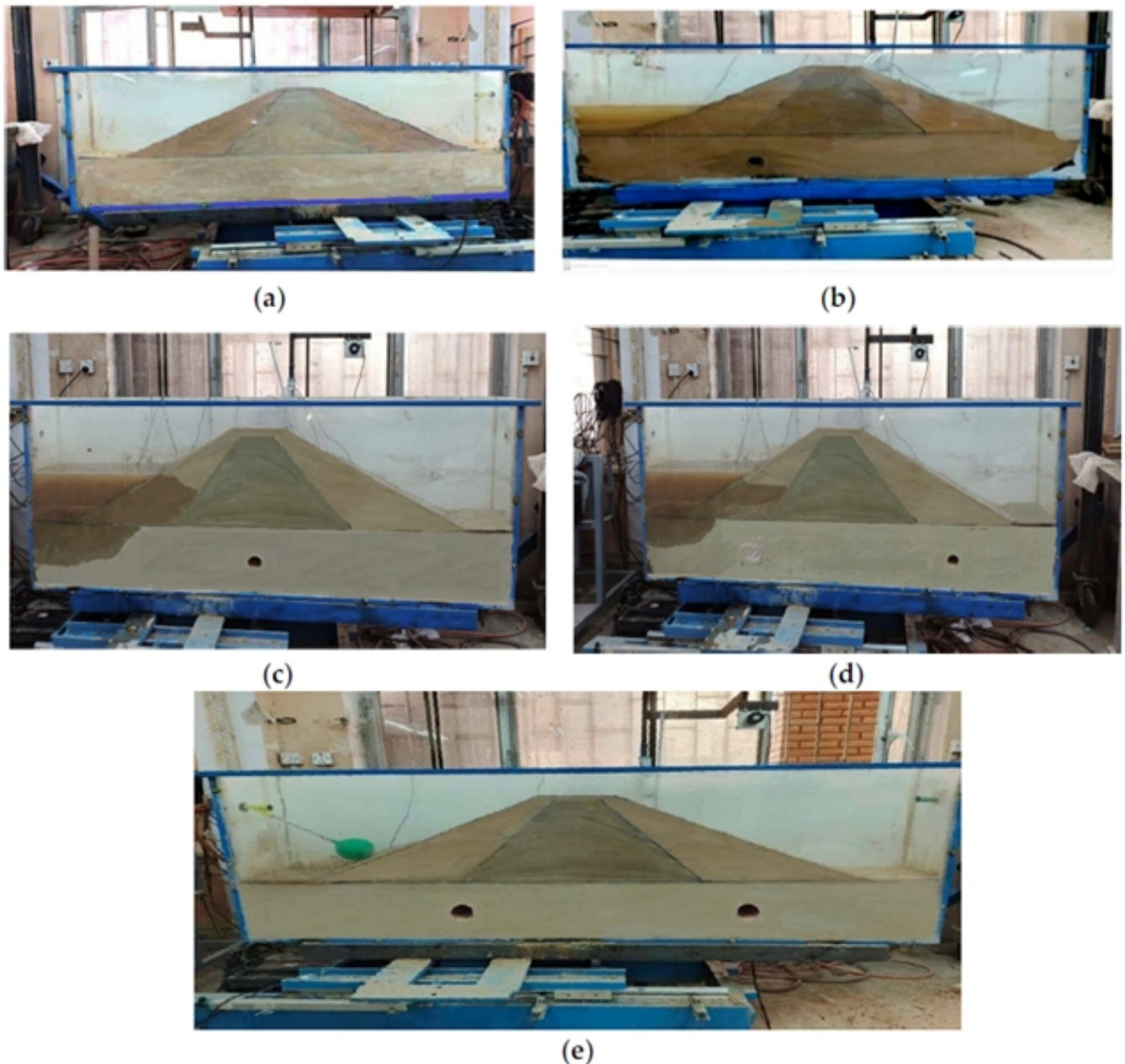


图1. 五种孔洞构型示意图：（a）无孔洞（b）上游侧孔洞（c）心墙下方孔洞（d）下游侧孔洞（e）双孔洞

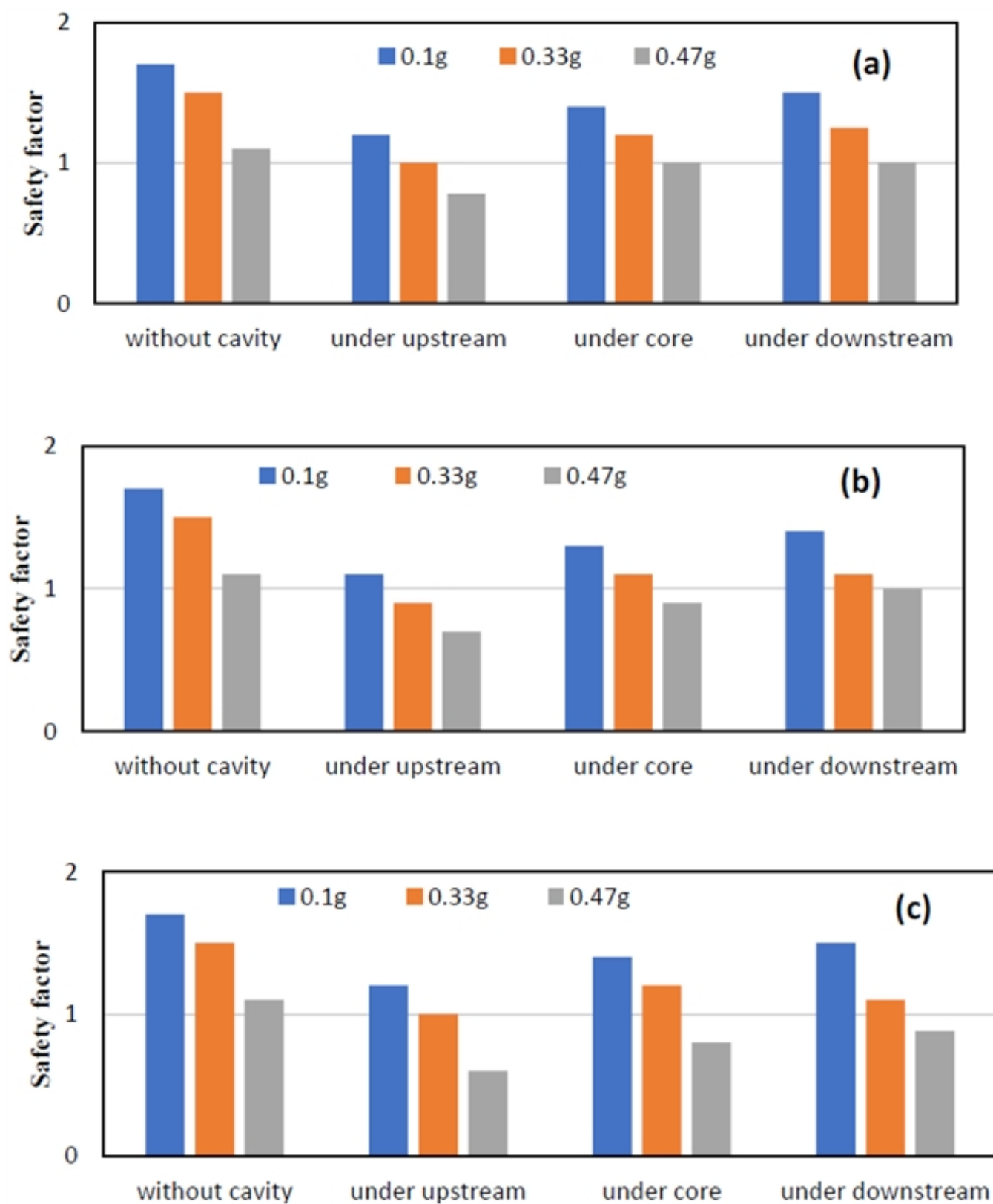


图2. 不同孔洞直径模型的安全系数：(a) 3厘米 (b) 7厘米 (c) 10厘米

研究总结

本研究通过集成物理模型实验和数值模拟，系统揭示了地基空洞对分区土石坝静动力性能的严重影响。研究证实，空洞的位置是影响坝体安全的关键因素，位于上游或同时存在于上下游的双空洞危害最大，它们会显著增加渗流、加剧变形、大幅降低抗震稳定性，并可能导致局部液化。相比之下，下游空洞的影响则有限。空洞尺寸增大和形状不规则会进一步恶化这些效应。该研究建立的实验-数值综合验证方法，为评估岩溶等复杂地基上土石坝的安全性提供了可靠的分析框架。研究成果强调了在对建在可溶岩地基上的大坝进行安全评估和加固设计时，必须充分考虑隐蔽空洞的几何特征及其空间分布，这对于预防类似摩苏尔大坝的长期风险具有重要的工程指导意义。

GeoHazards期刊介绍

主编：Prof. Dr. Zhong Lu, Roy M. Huffington Department of Earth Sciences, Southern Methodist University, Dallas, TX 75275, USA

Prof. Dr. Tiago Miguel Ferreira, Instituto Superior Técnico (IST), University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal

期刊发表范围涵地球物理/地质灾害、气候及气候变化相关灾害、气象灾害、水文灾害、块体运动灾害以及人为和技术灾害等研究领域。自2020年创刊以来，被ESCI、Scopus、GeoRef等多个权威数据库收录。

2025 Impact Factor 2.3 2025 CiteScore 2.6 Time to First Decision 18.9 Days Acceptance to Publication 4.7 Days

来源：GeoHazards

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发