

# 岩土材料损伤机理与裂隙扩展的数值建模研究

马晓钢 410401199109160012

**摘要:** 岩土材料作为非均质多相复合材料，内部原生孔隙、微裂隙分布具有随机性，在外荷载作用下微裂隙持续萌生、扩展、贯通最终导致宏观破坏，深入探究其损伤演化与裂隙扩展规律对岩土工程稳定性评价具有核心指导意义。本文从岩土材料损伤的物理本质出发，分析了细观尺度下损伤萌生与发展的作用机理，总结了当前主流的损伤与裂隙扩展数值建模方法，对比了连续介质方法与离散介质方法的适用场景与局限性，探讨了数值建模发展中面临的多尺度耦合、随机缺陷表征等关键问题，为岩土工程破坏分析提供理论参考。

**关键词:** 岩土材料；损伤机理；裂隙扩展；数值建模

## 一、引言

岩土工程领域中，岩体、土体等岩土材料的失稳破坏是工程实践中最为常见的安全风险来源，从边坡滑坡到隧道塌方，从坝体失稳到地基沉降，绝大多数破坏过程都与岩土材料内部裂隙的萌生、扩展与贯通直接相关。与均质人工材料不同，岩土材料是经过长期地质作用形成的天然复合材料，内部包含大量原生孔隙、节理、裂隙与颗粒界面缺陷，这些缺陷在外部荷载与环境因素的共同作用下会不断演化，产生不可逆的性能劣化，也就是损伤过程，损伤累积到临界值后就会形成宏观裂隙，最终导致岩土结构发生整体失稳。

传统的岩土破坏研究多基于宏观试验与连续介质力学理论，难以从细观层面揭示损伤萌生与裂隙扩展的内在机制，而室内试验受试样尺寸、观测精度与试验成本限制，也很难完整捕捉裂隙从微观到宏观的动态演化过程。随着计算力学与计算机技术的快速发展，数值建模方法已经成为研究岩土材料损伤与裂隙扩展问题的重要手段，通过建立能够反映岩土材料非均质性与缺陷特征的数值模型，可以直观再现损伤演化与裂隙扩展的全过程，分析不同因素对破坏过程的影响，为岩土工程的稳定性设计与灾害防控提供支撑。本文针对岩土材料的损伤机理与裂隙扩展的数值建模方法开展梳理与研究，明确当前研究进展与存在的问题，为相关研究提供参考。

## 二、岩土材料损伤机理分析

### 2.1 损伤的物理本质与分类

岩土材料的损伤本质上是材料内部微观结构在外因作用下发生的不可逆劣化，具体表现为细观层面颗粒间黏结失效、微裂隙萌生扩展、孔隙压缩或扩张、界面脱粘等过程，这些过程会导致材料的有效承载面积减小、弹性模量降低、强度下降，最终引发宏观破坏。根据损伤产生的原因，可以将岩土材料的损伤分为荷载型损伤与环境型损伤两类：荷载型损伤是指由外荷载作用引发的损伤，在压缩、剪切、拉伸等不同应力状态下，损伤的萌生位置与扩展方向存在明显差异，例如剪切荷载下损伤更容易沿最大剪应力方向定向发育，而拉荷载下损伤更容易垂直于拉应力方向扩展；环境型损伤则是由温度变化、水化学侵蚀、冻融循环等环境因素引发的损伤，比如水渗入裂隙后产生的冻胀力会撑开裂隙，长期的水化学作用会溶解颗粒间胶结物，弱化颗粒界面强度，这些都会逐步引发材料损伤累积。

### 2.2 损伤演化与裂隙扩展的过程

岩土材料内部裂隙扩展是一个从量变到质变的过程，通常可以分为三个阶段：第一阶段是初始损伤压密阶段，岩土材料内部原生的微裂隙与孔隙在荷载作用下发生闭合，材料表观模量会略有提升，这一阶段的损伤主要表现为原生缺陷的调整，没有新的损伤产生；第二阶段是损伤稳定萌生扩展阶段，随着荷载持续增加，材料内部应力集中出现在缺陷尖端，当应力强度超过局部强度阈值后，微裂隙开始在缺陷位置萌生，并且随着荷载增加逐步扩展，这一阶段的损伤发展速度相对稳定，卸载后损伤不会完全恢复，属于不可逆的劣化过程；第三阶段是损伤加速演化与宏观破坏阶段，当损伤累积到临界程度后，相邻的微裂隙之间发生相互作用，逐步贯通形成宏观主裂隙，此时裂隙扩展速度迅速增加，材料承载能力快速下降，最终发生整体失稳破坏。

## 三、损伤与裂隙扩展的主流数值建模方法

### 3.1 基于连续介质力学的损伤建模方法

基于连续介质力学的损伤建模方法是将岩土材料视为连续介质，通过引入损伤变量来描述材料内部的损伤程度，结合连续介质本构关系建立损伤本构模型，常用的方法包括有限元法中的损伤力学模型、扩展有限元法（XFEM）以及粘聚

力模型（CZM）等。传统的连续损伤力学模型通过定义损伤变量来反映材料刚度的劣化程度，一般损伤变量取值在 0 到 1 之间，0 对应无损伤材料，1 对应完全破坏材料，将损伤变量引入本构方程后，可以描述损伤累积过程中材料力学性能的变化，该方法能够较好的模拟损伤的均匀演化过程，但是对于宏观裂隙生成后的不连续问题模拟效果较差，容易出现网格畸变问题。

### 3.2 基于离散介质力学的数值建模方法

离散介质方法从岩土材料的离散本质出发，将岩土材料分解为多个离散单元，通过单元之间的相互作用描述材料的力学行为，非常适合模拟裂隙产生后的大变形与断裂问题，常用的方法包括离散元法（DEM）、近场动力学（PD）以及颗粒流方法（PFC）等。离散元法将岩体分解为多个块体单元，通过块体之间的接触作用传递应力，当接触力超过接触强度后，接触发生断裂，就形成了裂隙，因此天然适合模拟节理岩体中裂隙沿节理面的扩展与贯通过程，能够很好的再现岩土体破裂后块体的运动与失稳过程。

## 四、数值建模研究存在的问题与发展方向

虽然当前数值建模方法已经取得了很大的进展，但是仍然存在一些关键问题需要解决：第一是非均质性与初始缺陷的随机表征问题，岩土材料内部初始裂隙与孔隙分布具有很强的随机性，如何准确表征真实岩土材料的初始损伤分布，建立符合实际地质特征的数值模型，是保证模拟结果准确的前提，目前常用的随机生成方法虽然能够反映一定的随机性，但是与真实岩土材料的细观结构仍然存在差异；第二是多尺度耦合问题，损伤是从微观尺度萌生，在细观尺度扩展，最终形成宏观破坏，不同尺度的损伤机理存在差异，如何建立微观-细观-宏观多尺度耦合的损伤与裂隙扩展模型，实现不同尺度之间力学参数与损伤信息的传递，是当前研究的难点问题；第三是多场耦合作用下的损伤模拟问题，实际岩土工程中，岩土材料的损伤演化往往受到应力场、渗流场、温度场、化学场等多场共同作用，水-力-化耦合作用下损伤机理更加复杂，开发能够考虑多场耦合作用的损伤与裂隙扩展数值模型，更符合实际工程的需求。

## 五、结论

岩土材料损伤机理与裂隙扩展是岩土工程领域的核心研究问题，直接关系到岩土工程的安全稳定性。岩土材料的损伤是一个从微观缺陷萌生到宏观裂隙贯通的渐进性劣化过程，其扩展过程受材料非均质性与应力分布的共同影响，形成不规则的破坏形态。目前连续介质方法与离散介质方法是两类主流的数值建模方法，

连续介质方法在宏观尺度模拟中计算效率更高,而离散介质方法在模拟裂隙萌生扩展与大变形破坏方面更具优势,未来研究需要围绕初始缺陷表征、多尺度耦合、多场耦合等关键问题进一步深化,提升数值模型对真实岩土破坏过程的模拟能力,为岩土工程灾害防控提供更可靠的理论支撑。

## 参考文献

- [1] 谢和平. 岩石损伤力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 冯夏庭, 张传庆, 李邵军. 岩石力学与工程研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 1-13.
- [3] 周创兵, 李典庆. 岩体损伤力学研究进展与展望[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 1-14.