

小波变换在强度折减法判识隧道稳定性中的应用

肖依桃, 文新华

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要: 为克服传统强度折减法在隧道稳定性评价中因人为判定失稳临界点而存在的主观性与模糊性, 将小波变换引入 UDEC 离散元数值分析, 提出一种基于时频分析的失稳判识新方法。通过建立隧道数值模型, 对比分析了两种工况下, 围岩位移随折减系数演化的规律。结果表明: 基于 Morlet 小波对关键监测点位移序列进行变换, 能够清晰、客观地识别出位移发展过程中的突变点, 精确确定安全系数。该方法给出的主安全系数与数值模拟揭示的失稳过程高度吻合, 且有效揭示了非对称破坏导致的局部安全系数差异。研究证实, 小波变换与强度折减法相结合, 能够实现围岩失稳临界状态的量化与精准判识, 为隧道工程稳定性评价提供了一种客观、可靠的分析手段。

关键词: 隧道工程; 小波变换; UDEC 离散元; 强度折减法

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0132-04

Application of Wavelet Transform in Identification of Tunnel Stability by Intensity Reduction Method

XIAO Yitao, WEN Xinhua

(Sichuan Transportation Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: To overcome the subjectivity and ambiguity of the traditional strength reduction method in the evaluation of tunnel stability due to the artificial determination of the instability critical point, the wavelet transform is introduced into UDEC discrete element numerical analysis, and a new instability identification method based on time-frequency analysis is proposed. A tunnel numerical model is established to comparatively analyze the evolution of surrounding rock displacement with the reduction factors under two different working conditions. Results indicate that based on the Morlet wavelet to transform the displacement sequence of key monitoring points, the sudden change points during the displacement development process can be clearly and objectively identified to accurately determining the safety factors. The principal safety factor derived from this method closely aligns with the instability process revealed by numerical simulation, which effectively highlights the differences in local safety factors caused by asymmetric failure. The research result verifies that the combination of wavelet transform with the strength reduction method can achieve the quantification and precise identification of the critical state of surrounding rock instability, offering an objective and reliable analytical approach for stability assessment of tunnel engineering.

Keywords: tunnel engineering; wavelet transform; UDEC discrete element; strength reduction method

0 引言

隧道工程作为现代交通、水利及资源开发等基础设施的关键节点,其长期稳定性直接关系到工程安全与运营效益^[1-2]。隧道围岩作为一种复杂的地质材料,其稳定性受到岩体结构、力学参数及地应力环境等多重因素的综合影响。强度折减法作为一种

广泛应用于岩土工程稳定性评价的数值分析方法,通过系统性地降低岩土体强度参数来模拟其渐进破坏过程,并据此确定安全系数^[3-5]。然而,传统的强度折减法在应用中,通常依赖人为观察位移-折减系数曲线的“拐点”或设定统一的位移阈值来判定失稳临界状态,该方法不仅存在较强的主观性,且难以精确区分围岩稳定状态、塑性发展阶段与整体失稳之间的临界过渡期,尤其对于具有非线性、时变特性的节理岩体而言,判识误差可能被放大^[6-9]。

近年来,信号处理领域的时频分析技术为工程数据的精细化解析提供了新的途径。小波变换

收稿日期: 2025-12-17

作者简介: 肖依桃(1976—),女,学士,高级工程师,从事公路、桥梁、隧道施工管理工作。

通信作者: 文新华(1982—),女,学士,高级工程师,从事公路、桥梁、隧道施工管理工作。电子信箱: 82517723@qq.com

(wavelet transform)作为一种强大的时频局部化分析工具,能够同时在时间和频率域内表征信号的非平稳特征,特别适合于捕捉信号中的突变点与奇异点^[10-11]。在岩土工程领域,已有学者尝试将小波变换应用于边坡位移监测数据分析、结构损伤识别以及岩石破裂声发射信号处理,并取得了良好效果,显示出其在揭示岩土体失稳前兆信息方面的潜力^[12]。然而,将小波变换与强度折减法有机结合,用于精准判识隧道围岩失稳临界点并量化安全系数的系统性研究尚不多见。

鉴于此,本文旨在提出一种基于小波变换的强度折减法隧道稳定性分析新方法。研究首先利用 UDEC 离散元软件,建立考虑节理分布的隧道数值模型,模拟两种工况下围岩在强度折减过程中的变形响应。进而,引入 Morlet 小波对关键监测点的位移发展序列进行时频变换,通过分析小波系数模的局部极大值,客观、精确地识别位移突变点,从而确定围岩失稳的临界折减系数(即安全系数)。

1 围岩失稳判据选取

1.1 模型概况

采用 UDEC 数值模拟软件建立隧道围岩计算模型,如图 1 所示。为有效削弱模型边界对计算结果的干扰,模型在水平方向和竖直方向上的尺寸均设定为 100 m。隧道布置于模型几何中心位置,其拱顶距离模型上边界约 45 m,以保证围岩应力场的合理展开。

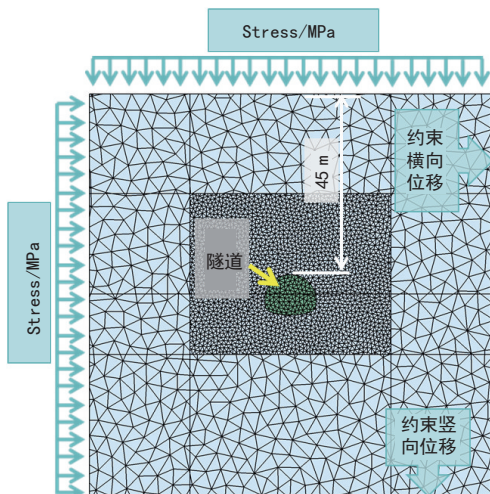


图 1 模型图

隧道围岩采用泰森多边形(voronoi)方法进行离散化处理,将围岩划分为若干相互独立的块体单元。块体本身假定为连续、均质介质,采用线弹性本构模

型描述其力学行为;块体之间的接触面则考虑结构面的非线性变形特征,选用 Mohr - Coulomb 弹塑性本构模型来模拟其剪切破坏与滑移特性,从而较为真实地反映节理化围岩的力学响应^[13-14]。

在边界条件设置方面,对模型右侧边界施加 x 方向位移约束,对底部边界施加 y 方向位移约束,以限制整体刚体位移;同时,在模型顶部施加均布竖向压应力,在左侧边界施加水平应力,以模拟原位地应力状态,确保计算过程中围岩应力分布的合理性。

为在保证计算精度的同时提高数值计算效率,对围岩区域采用内外分区的泰森多边形切割策略。其中,远离隧道的外部围岩区域泰森单元的最大特征尺寸设定为 4 m,而靠近隧道的内部围岩区域则进行加密处理,单元最大尺寸控制在 1m 以内。该分区细化方法既能准确捕捉隧道附近围岩的应力集中与变形特征,又可有效降低整体模型的计算规模。

2 小波变换基本原理

小波分析作为一种新兴的时频分析工具,其数学基础建立在函数空间的多分辨率分析(MRA)框架之上^[15-16]。定义平方可积函数空间 $L^2(R)$ 中的小波函数 $\psi(t)$ 需满足容许性条件:

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (1)$$

式中: $\psi(\omega)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。本文采用 Morlet、Db4、Haar 小波作为解析小波,结合突变点检测率、时域误差和频域分辨率择优选取。

Morlet 小波是高斯包络调制的复指数函数,其时频表达式为:

$$\psi_M(t) = \pi^{-1/4} (e^{i\eta t} - e^{-\eta^2/2}) e^{-t^2/2} \quad (2)$$

当中心频率 $\omega_0 \geq 5$ 时,第二项可忽略,简化为:

$$\psi_M(t) \approx \pi^{-1/4} e^{i\eta t} e^{-t^2/2} \quad (3)$$

其傅里叶变换为:

$$\Psi_M(\omega) = \pi^{-1/4} \sqrt{2\pi} e^{-(\omega - \eta)^2/2} \quad (4)$$

式中: η 为中心频率参数(无量纲),控制小波振荡频率,通常取 $\eta \geq 5$ 以保证解析性; t 为时间变量, s ; $\pi^{-1/4}$ 为归一化系数,保证小波能量为 1; ω 为角频率,rad/s,傅里叶变换域变量。

3 模型计算

设置不同组工况,各工况参数如表 1 所示。通过强度折减法,不断对模型的黏聚力、摩擦角以及抗拉

强度进行折减,每次折减后将模型计算至平衡,然后记录每个折减系数下监测点对应的位移,监测点位如图2所示。

表1 各工况主要参数

工况	杨氏模量/GPa	泊松比	法向刚度/GPa	刚度比
1	32.7	0.12	236.5	0.52
2	15.7	0.30	108.4	0.24

工况	摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	地应力/MPa	侧压系数
1	23	14.3	7.00	1.7
2	15	4.01	1.45	0.5

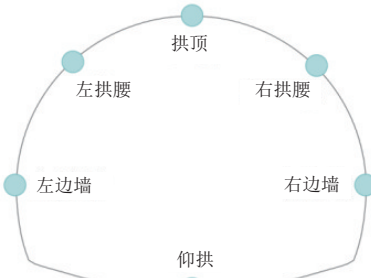


图2 位移监测点位

提取计算结果如图3、4所示,从图中可以看出,工况一突变点在位移监测时突变点位置相近,在12~17 m范围内。工况二在4~7 m范围内。

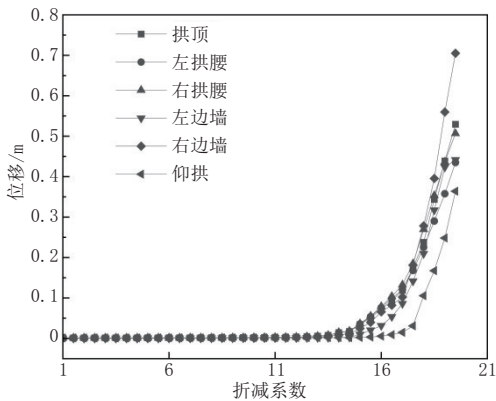


图3 工况1不同折减系数下位移

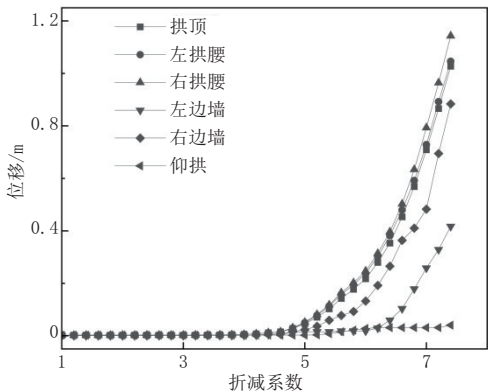


图4 工况2不同折减系数下位移

为克服传统人为观察位移-折减系数曲线拐点存在的主观性与模糊性,本研究引入小波变换对关

键监测点的位移序列进行时频分析,以精确捕捉失稳临界点。

以工况1为例,对拱顶位移和左拱腰位移序列进行小波变换分析,结果如图5、图6所示。小波系数模的等高线图在时频平面上清晰地显示出能量聚集带。随着折减系数(时间尺度类比)的增加,信号频率成分发生显著变化,小波系数模出现局部极大值点,这些点即对应于位移发展过程中的突变点。

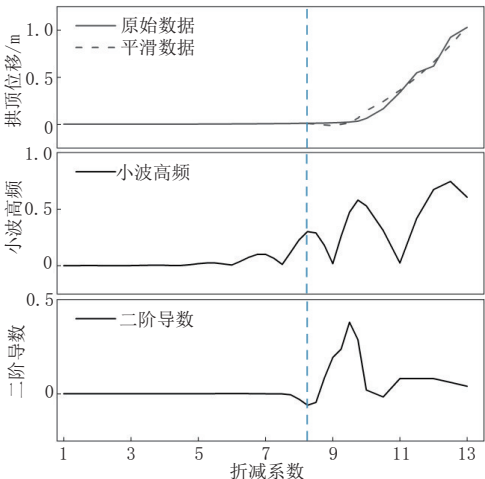


图5 拱顶位移判据小波变换分析结果

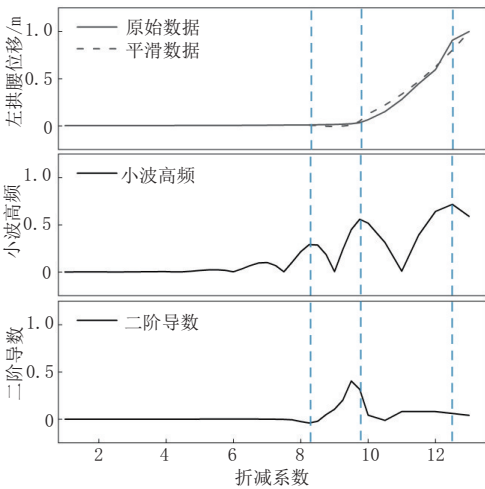


图6 左拱腰位移判据小波变换分析结果

所有计算结果汇总如表2所示。从表中可知,对于工况1,小波变换分析给出的拱顶、拱腰等关键部位位移的安全系数均为8.25,结果高度一致,证明了该判据的可靠性。对于工况2,除左边墙(6.6)和仰拱(7.6)外,其余大部分监测点给出的安全系数为5.4,反映了围岩失稳过程中破坏的非对称性与局部性。左边墙与仰拱安全系数偏高,可能与模型边界约束条件或该处特定应力路径有关,暗示潜在的危险部位可能转移。

上述方法得到的安全系数与实际计算可以相吻

表2 各指标对应的安全系数

工况	监测指标	安全系数
1	拱顶位移	8.25
	左拱腰位移	8.25
	右拱腰位移	8.25
	左边墙位移	8.25
	右边墙位移	8.25
	仰拱位移	8.25
2	拱顶位移	5.4
	左拱腰位移	5.4
	右拱腰位移	5.4
	左边墙位移	6.6
	右边墙位移	6.6
	仰拱位移	7.6

减系数为 1 的初始阶段,位移以近似线性的平缓速率增长,围岩处于稳定变形状态。当折减系数达到 5.4 时,位移曲线出现显著拐点,变形速率明显加快,表明围岩已进入塑性发展的加速阶段,结构面临失稳临界状态。继续折减至 8.0 时,位移曲线呈现近乎垂直的陡增趋势,显示出围岩承载体系已完全失效,整体失稳破坏充分形成。与工况一相比,工况二的临界折减系数更低,表明隧道稳定性更差,失稳过程更早发生、发展更为迅速;并且,在工况二中由于地应力的影响,左右边墙和仰拱的安全系数偏高,从图中可以看到,土体发生剪切破坏,其中破坏区域主要包括拱顶、左右拱腰,而下半部分土体位移相对较小,因此突变点更为靠后。

4 结 论

本文方法具有较好的普适性与工程应用价值。研究成果证实,基于小波变换的强度折减分析方法可以适用于隧道稳定性评价,有以下结论:

小波变换显著提升了失稳判识的客观性与精确性。通过将小波变换应用于强度折减过程中的位移序列分析,能够有效滤除数据波动干扰,在时频域内清晰捕捉表征围岩状态突变的能量聚集点。该方法克服了传统依靠人为观察曲线拐点或设定固定阈值的主观性,为确定隧道稳定安全系数提供了客观、量化的数学工具。

安全系数受围岩力学性质与地应力场控制,且失稳模式呈现局部化特征。工况一的安全系数显著高于工况二,验证了围岩参数对稳定性的决定性影响。此外,工况二中不同监测点小波分析得出的安全系数存在差异,结合变形云图分析,表明通过监测不同部位的位移安全系数,可以反映可能失稳位置,从而进行针对性处置。

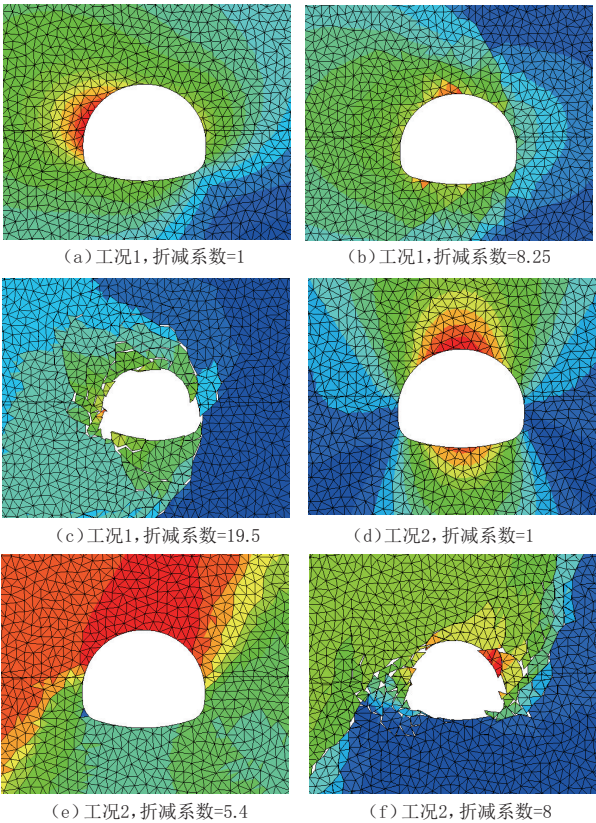


图7 变形云图

合。提取计算结果如图 7,通过分析工况一图 7(a)中位移随强度折减系数演化的特征曲线可以观察到围岩失稳的典型三阶段过程:在折减系数为 1 的初始弹性阶段,位移增长缓慢且呈线性关系,表明围岩处于稳定变形状态;当折减系数增至 8.25 时,曲线出现明显拐点,位移发展速率骤然增大,标志围岩进入塑性变形加速阶段,此时结构面临稳定性临界状态;继续折减至 19.5 时,位移曲线趋于陡直甚至呈现发散趋势,表明围岩承载机制已彻底失效,发生整体失稳破坏。

工况二(图 7(b))中同样出现这样的现象:在折

参考文献:

- [1] 贺维国,周华贵,曹威,等.中国水下隧道的最新发展与展望[J].现代隧道技术,2024,61(2):105-123.
- [2] 菲力克斯·安伯格,肖书安.隧道及地下工程掘进技术回顾与展望[J].现代隧道技术,2022,59(4):1-6.
- [3] 肖伟,王凤利.基于 UDEC 强度折减法的隧道洞周稳定性评价[J].山西建筑,2025,51(24):126-129.
- [4] 韦雨,韦耀庭.强度折减法在山区高填方路基边坡稳定性分析中的应用[J].西部交通科技,2025(11):37-39.
- [5] 刘士涛.基于张拉-剪切强度折减法的二元地层隧道开挖边坡稳定性分析[J].市政技术,2025,43(10):157-165.
- [6] 罗义,张明清,王沉,等.基于尖点突变理论的充填体下急倾斜厚大磷矿体回采方法研究[J].有色金属(中英文),2025,15(10):

(下转第 151 页)