

# 节理围岩隧道稳定性及可靠度研究综述

宋振胜

中铁十六局集团第三工程有限公司, 浙江 湖州

收稿日期: 2025年9月30日; 录用日期: 2025年10月20日; 发布日期: 2025年10月31日

## 摘要

本文综述节理围岩隧道稳定性及可靠度研究现状。在稳定性分析方面, 模型试验探究了节理倾角、密度等参数对围岩破裂、承载能力的影响; 数值模拟借助多种软件, 揭示了节理对隧道应力、变形及破坏形态的作用, 但存在对复杂节理网络考虑不足等问题。可靠度分析应用了多种方法, 实现对隧道安全系数等的量化评估, 却面临理论假设与实际不符等挑战。最后指出研究局限, 展望多学科交叉等发展方向, 为隧道安全建设提供参考。

## 关键词

结构可靠度, 节理围岩, 直接积分法

# Review of Research on Stability and Reliability of Jointed Rock Mass Tunnels

Zhensheng Song

Third Engineering Co., Ltd., China Railway 16th Bureau Group, Huzhou Zhejiang

Received: September 30, 2025; accepted: October 20, 2025; published: October 31, 2025

## Abstract

This paper reviews the current status of research on the stability and reliability of tunnels in jointed rock mass. Regarding stability analysis, model tests have investigated the effects of joint dip angle, density, and other parameters on rock mass fracturing and bearing capacity. Numerical simulations using various software have revealed the role of joints in tunnel stress, deformation, and failure patterns, though issues such as insufficient consideration of complex joint networks remain. Reliability analysis employs diverse methodologies to quantify tunnel safety factors, yet faces challenges such as discrepancies between theoretical assumptions and practical conditions. Concluding with research limitations, the paper outlines interdisciplinary development directions to inform tunnel safety construction.

## Keywords

### Structural Reliability, Jointed Rock Mass, Direct Integration Method

Copyright © 2025 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

随着我国经济的快速发展和基础设施建设的不断推进，公路、铁路建设取得了举世瞩目的成就，其中高速公路里程位居世界第一[1]。国务院在《关于新时代推动中部地区高质量发展的意见》[2]中指出要加快内陆的通道建设，推进高速铁路和公路的联通建设，促进区域协调发展。党的二十大报告[3]中也提到了促进中部和西部地区打破交通运输屏障、建立新发展格局目前来说仍是全面建设社会主义现代化国家的重要任务。由于这些地区地理条件的限制和山地、丘陵地形的存在，传统的道路和铁路建设面临很大的挑战，在这种情况下，我国的公路建设在今后很长时间内仍处于高速发展阶段，而隧道工程作为现代交通基础设施建设的关键环节，其施工安全水平直接影响着国家路网建设的可持续发展。

然而在一些节理围岩隧道施工过程中，由于地质条件复杂、岩体力学参数不明确等因素，隧道围岩塌方，突水突泥等事故时有发生，给施工人员的生命安全带来严重威胁。例如 2020 年 09 月，某隧道施工时突发洞顶岩石塌方，造成 9 名施工人员遇难，见图 1；2019 年 11 月 26 日，某隧道发生重大突水涌泥事故，共造成 12 人死亡、10 人受伤，直接经济损失 2525.01 万元，见图 2。下图为隧道灾害事故。



Figure 1. Collapse of the arch crown at the tunnel

图 1. 某隧道拱顶坍塌



Figure 2. Water and mud inflow at the tunnel

图 2. 某隧道突水突泥

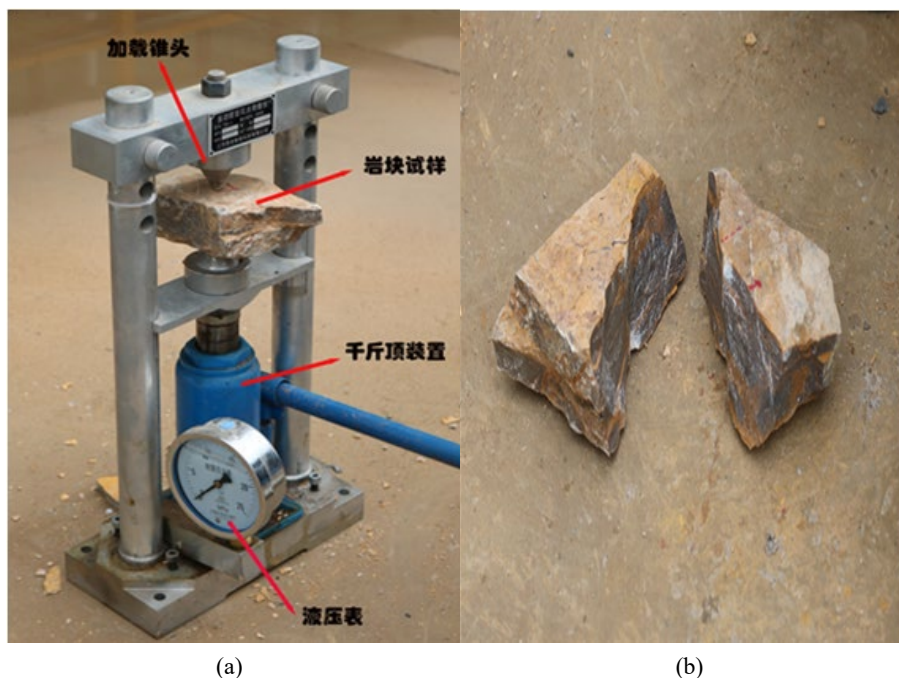
由此可见，研究节理围岩隧道稳定性，评估隧道可靠度，并制定合理的支护方案，对减少隧道灾害发生具有重要意义。

## 2. 节理围岩隧道稳定性分析研究

在地下工程领域，节理岩体的隧道稳定性分析研究始终占据着至关重要的地位。众所周知，隧道依靠支护与围岩共同作用来维持结构的稳定，但实际地质环境复杂多变使得节理岩体的稳定性问题充满了挑战。

### 1) 模型试验：

目前针对节理围岩隧道的物理模拟试验方面，已经有一些学者进行了研究。如刘刚等[4]用真三轴巷道平面应变模型试验，定量定性研究节理倾角和密度对围岩破裂区形成和扩展的影响，发现节理密度直接决定了围岩整体承载能力，并且得出巷道收敛率为 22.8%是节理围岩锚固极限。衣永亮等[5]利用物理模型试验，研究了裂缝倾角和岩桥倾角在单轴加载系统下对双贯通节理类岩石材料岩桥贯通模式影响，并通过 FLAC3D 软件进行数值模拟与物理模型试验结果对比发现：次生倾斜裂纹、共面裂纹和翼状裂纹是预制闭合贯通裂纹端部分支裂纹的主要组成部分。张元超[6]改变圆形孔洞节理围岩模型的不同节理几何参数如节理倾角、密度和间距等，通过单轴压缩试验从宏观角度探究几何参数的改变对模型灾变演化及力学承载特性的影响；陈斌[7]通过理论推导、试验探究和数值模拟相结合的方法，以深埋高温高压隧道节理围岩卸荷效应和变形破坏机制研究为主线，围绕高温高压节理岩体加卸载力学特性、高温高压隧道开挖围岩多场演化和成灾机制、深埋隧道开挖围岩稳定性判断开展了研究。图 3 为隧道模型试验所需要的仪器和试样。



**Figure 3.** *In-situ* point load test: (a) DH-3 Multifunctional point load tester; (b) Rock specimen specimen fractured after loading

**图 3.** 现场点荷载试验：(a) DH-3 型多功能点荷载试验仪；(b) 加载后破坏的岩块试样

### 2) 数值模拟：

ShowkatiA [8]通过量化风化引起的岩体参数退化研究了隧道的长期稳定问题，通过数值模拟案例计

算衬砌的安全系数为工程设计提供参考。高亮[9]通过 3DEC 数值模拟软件进行了隧道开挖的支护系统设计,提出了综合考虑时效性的定向锚杆的优化方案。路辉[10]利用有限元软件 MIDASGTS/NX,模拟分析节理倾角对隧道围岩与支护结构应力分布、变形演化规律的影响;同时,结合现场实际条件对隧道施工与防护措施进行优化和综合分析,得出最优施工方案。李超[11]利用动态版 RFPA 数值软件,模拟了动载条件下节理岩体的破坏规律,并研究了节理的条数、贯通程度和倾角等因素对开挖稳定性的影响。梁宸[12]运用 UDEC 软件,模拟了节理特性对裂隙围岩爆破稳定性的影响,如图 4 所示,并得出节理倾角对隧道坍塌具有极大影响的结论。贺暄[13]使用 Midas 软件研究节理岩体的应力变化规律,得出节理的存在导致最大竖向位移朝节理方向集中的结论。陈锐[14]等人利用 FLAC3D 软件模拟了节理岩体中分离式隧道的施工过程,发现节理是导致应力场出现间断性和非对称性的主要原因。何泉江[15]运用 MATLAB 与 3DEC 软件开发了适应不同地质条件的三维离散元互相关随机场模拟程序,如图 5 所示,并依据相山隧道和三门峡隧道的现场监测结果,分析了不同条件下的隧道开挖可靠度与失稳概率。周雄[16]等通过采用 GDEM 数值模拟软件,开展了含不同角度闭合多节理的直墙拱形隧道在全断面开挖卸荷作用后对诱发结构面型岩爆的数值模拟研究,分析了隧道在开挖卸荷下围岩的裂纹扩展行为、应力变化、碎块体的体积与块体的弹射速度等力学特征。

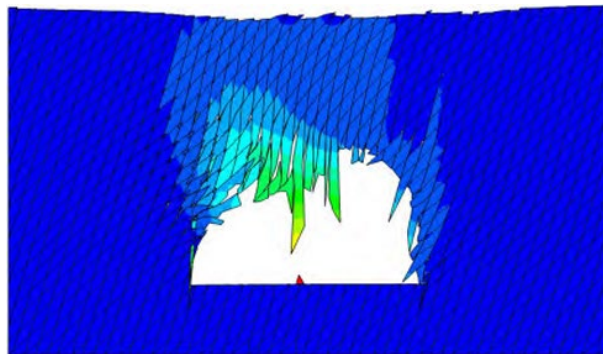


Figure 4. Tunnel collapse scenarios for 45° and 75° joints [12]  
图 4. 45°倾角与 75°倾角节理隧道塌方情况[12]

### 3) 理论研究:

在对理论研究方面,为了研究软弱结构面对岩体强度的影响,Jaeger 等[17]提出了单结构面理论;Ramamurthy 等[18]建立了新的岩石非线性破坏准则,并提出了单节理岩体强度经验公式,李术才[19]通过损伤力学方法和损伤演化方程得到的加锚节理裂隙岩体的本构关系及其损伤演化方程,来评价裂隙岩体稳定性和变形行为。

综合上面分析,现有研究以理论为基础,通过 3DEC、FLAC3D、MIDAS 等多种数值软件,从支护系统设计优化、围岩承载拱动态演变、动载作用下破坏规律及节理特性(如倾角、贯通度、迹长等)的影响等多维度开展探究,系统揭示了节理对隧道应力分布、变形演化及破坏形态的作用机制,为节理围岩隧道的设计优化与施工方案制定提供了重要理论支撑与实践参考。

但当前研究仍存在明显局限:在研究内容层面,多数成果仅针对单一或少数节理特征(如倾角、密度)展开,对多组交叉节理、非贯通节理构成的复杂节理网络的综合效应,以及节理与地下水、地应力等其他地质因素的协同作用考虑不足;在研究方法层面,数值模拟因模型简化假设与参数选取的不确定性,难以完全反映实际地质条件,而物理试验则受尺度效应与试验条件限制,难以复现工程现场的复杂环境。



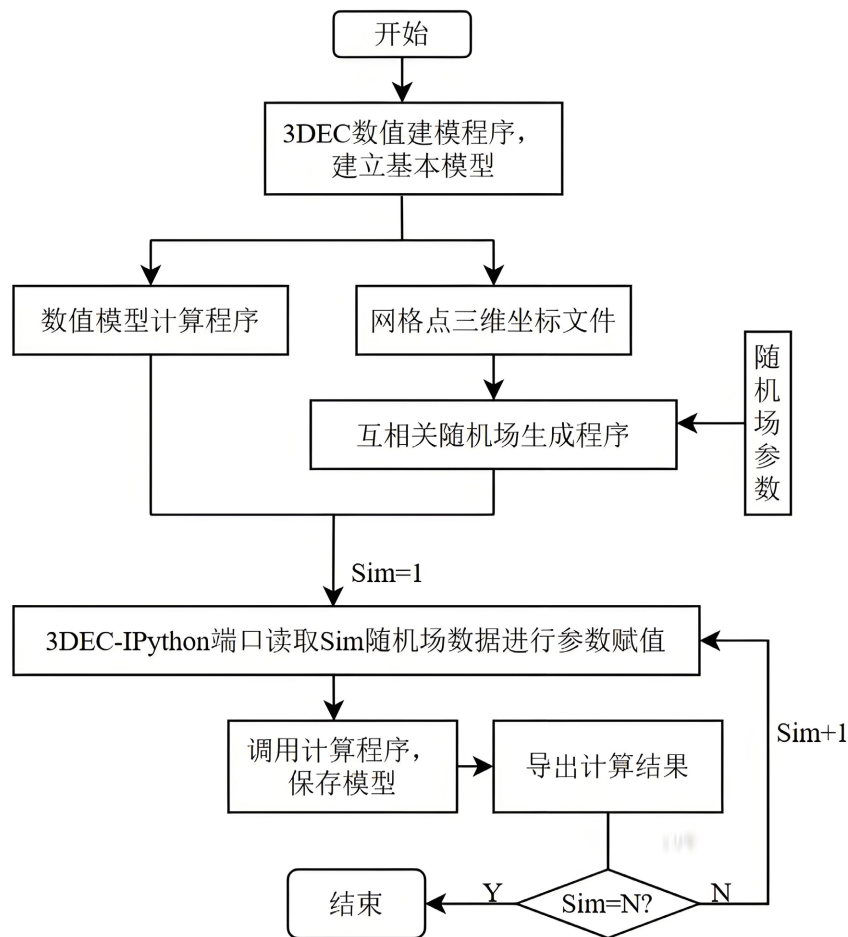


Figure 5. Flowchart of discrete element analysis for cross-correlation random fields [15]  
图 5. 互相关随机场离散元分析流程图[15]

### 3. 节理围岩隧道开挖的可靠度分析

隧道工程的可靠度分析主要借鉴了结构可靠度理论。国内外常用的分析方法有直接积分法、可靠度指标法、随机场模拟法(RFM)、响应面法(RSM) [20]、点估计法(PEM) [21]和蒙特卡罗模拟法(MCS)。

直接积分法是精确的可靠度计算方法,但在复杂的系统中难以获得准确的随机变量分布特征及概率密度函数,因此在岩土工程中应用较少。Bjureland [22]等通过理想化的单喷射混凝土破坏模式建立衬砌结构的极限状态函数计算可靠度。而可靠度指标法通过假设结构极限状态函数服从正态分布来进行近似计算,其中点估计法是一种使用样本数据来估计总体参数的方法,近似估计结构功能函数各阶的统计矩时,通常采用的是样本的均值和方差作为这些矩的近似值。何满朝[23]基于块体理论建立与稳定可靠性的结合为失稳概率建模计算提供指导。李志鹏[24]等人提出三阶矩可靠度计算方法将隧道衬砌的功能函数与随机模拟的有限元分析结合极大简化失效概率的计算过程。Park[25]等人采用的基于点估计的概率分析方法计算结构系统的可靠性,相比模拟方法显著减少了样本使用量,可为节理隧道支护设计的决策提供可靠的参考。方超,薛亚东[26]将局部平均随机场理论、有限差分法和 Monte-Carlo 模拟结合在一起得到 Monte-Carlo 随机有限差分法,基于该方法将围岩密度、弹性模量和内摩擦角等参数视为三维正态随机场,研究了围岩在竖直方向与水平方向相关距离的变化对隧道结构可靠度的影响。

在实际的隧道工程中,结构极限状态函数可能并不严格服从正态分布,这种假设可能会导致计算结

果与实际情况存在偏差,降低了可靠度评估的准确性。为了更高效准确地进行隧道结构可靠度计算,张士朝[27]等人提出了一种基于向量投影影响面法的隧道拱顶楔形体稳定性可靠度分析方法来提高可靠度分析的计算效率和精度。丁继辉[28]等人采用 Monte-Carlo 和 Rosenblueth 法研究圆形隧道可靠度指标与支护参数变化趋势。Langford [29]等人综合采用改进点估计法、FORM、Monte-Carlo 对复合衬砌的支护性能进行验证,提出了一种新的基于可靠性的隧道衬砌设计方法。魏松源[30]利用 FORM 方法计算了可靠度指标和失效概率,并分析了参数之间的相关性对可靠性分析结果的影响。

李翔[31]等人采用区间非概率方法计算隧道支护结构的可靠度,研究多参数波动耦合对支护结构可靠度影响程度。Pandit [32]等人通过结合确定性和参数变异性分析,对隧道支护系统的稳定性进行了研究,使用傅里叶离散获取二维区域的随机场,并采用 MCS 方法进行了隧道的不确定性分析。张麟浩[33]基于极限状态法使用 ANSYS 软件构建隧道结构计算模型,对其隧道支护结构进行力学特性分析,研究了隧道结构力学状态及变形。巫晨笛[34]等通过对节理岩体隧道掌子面塌方致灾因素的分析,考虑到各影响因素之间的相关性和对应指标获取的难易性,确定了掌子面塌方危险性评价指标体系。方砚兵[35]研究了围岩参数不确定性表征优化,隧道初期支护设计计算与试算,以及基于临界应变的围岩可靠性验算和基于约束位移的支护结构可靠性验算,形成了基于围岩安全性能指标的隧道初期支护设计计算方法。郭健[36]以 Mohr-Coulomb 强度理论作为围岩屈服条件求得的圆形隧道围岩位移解析解作为围岩位移函数,将圆形隧道毛洞围岩表面刚好达到剪切塑性极限时的洞顶沉降位移作为围岩变形的极限位移,建立了圆形隧道围岩变形稳定功能函数。这些基于极限分析的块体理论对于分析乐业和安石隧道这类由结构面控制的顶部塌方具有天然优势。

总体而言,隧道工程可靠度分析方法不断发展与完善,但仍面临实际环境复杂、理论假设与实际不符等挑战。未来的研究需要进一步结合工程实际,提高分析方法的准确性和适应性,为隧道工程的安全设计和可靠运营提供更坚实的理论支持。同时,随着计算机技术和数值模拟方法的不断进步,多方法融合、跨学科研究也将成为隧道工程可靠度分析的重要发展方向。

#### 4. 结论与展望

本文系统梳理了节理围岩隧道稳定性及可靠度研究的现状,通过对模型试验、数值模拟及可靠度分析方法的总结,可得出以下结论。

在节理围岩隧道稳定性分析方面,模型试验与数值模拟技术的结合为揭示节理岩体力学特性提供了有效手段。物理模型试验通过控制节理倾角、密度、间距等参数,定量分析了节理特征对围岩破裂区扩展、承载能力及灾变演化的影响,如明确了节理密度与围岩整体承载能力的正相关性,以及巷道收敛率的锚固极限阈值;数值模拟则借助 3DEC、FLAC 等软件,从静态卸荷、动态荷载、爆破作用等多场景出发,揭示了节理对围岩应力分布、位移集中及破坏形态的作用机制,证实了节理倾角、贯通程度等参数对隧道坍塌风险的显著影响。在可靠度分析领域,现有研究已逐步从传统的确定性分析转向不确定性评估,直接积分法、可靠度指标法、蒙特卡罗模拟法等方法在隧道工程中得到应用。学者们通过建立极限状态函数、考虑岩体参数变异性及空间随机性,初步实现了对隧道支护结构安全系数、失稳概率的量化评估,为支护设计优化提供了概率学依据。

然而,当前研究仍存在明显局限:其一,对复杂节理网络(如多组交叉节理、非贯通节理)的综合作用机制研究不足,多数成果聚焦单一节理参数,忽略了节理与地下水、地应力等多场耦合效应;其二,数值模拟存在模型简化与参数选取的不确定性,物理试验受尺度效应限制,难以完全复现实际地质环境;其三,可靠度分析中,结构极限状态函数的正态分布假设与工程实际存在偏差,对节理岩体参数的空间变异性及各因素相关性的考虑仍需深化。

因此节理围岩隧道研究需在多学科交叉的基础上, 强化理论创新与工程应用的协同, 推动研究成果向实际工程效益转化, 为我国复杂地质条件下隧道工程的安全建设提供更坚实的理论与技术保障。

## 基金项目

中铁十六局集团有限公司科技计划项目(K2023-6B), 中国铁路上海局集团有限公司科研项目(2024141, 2024140)。

## 参考文献

- [1] 叶华政. 基于贝叶斯理论的山岭隧道施工坍塌风险评估及预警研究[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 广西大学, 2023.
- [2] 新华网. (受权发布)中共中央国务院关于新时代推动中部地区高质量发展的意见[EB/OL]. 2021-07-22. [http://www.xinhuanet.com/politics/zywj/2021-07/22/c\\_1127683597.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/zywj/2021-07/22/c_1127683597.htm), 2021-04-23.
- [3] 习近平: 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会报告[EB/OL]. 2022-10-16. [https://www.mofcom.gov.cn/dsesjsxxpt/wjhb/art/2022/art\\_38e47fd795f3490a96a7362ed21accab.html](https://www.mofcom.gov.cn/dsesjsxxpt/wjhb/art/2022/art_38e47fd795f3490a96a7362ed21accab.html), 2022-10-25.
- [4] 刘刚, 赵坚, 宋宏伟. 节理岩体中巷道稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2910-2918.
- [5] 衣永亮, 曹平, 蒲成志. 静载下预制裂隙类岩石材料断裂实验与分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2010, 25(1): 67-71.
- [6] 张元超. 含圆形孔洞节理岩体力学行为模型试验及离散元模拟[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [7] 陈斌. 高温高压隧道节理围岩卸荷效应与变形破坏机制研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [8] Showkati, A., Salari-rad, H. and Hazrati Aghchai, M. (2021) Predicting Long-Term Stability of Tunnels Considering Rock Mass Weathering and Deterioration of Primary Support. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **107**, Article ID: 103670. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103670>
- [9] 高亮, 姜维亮, 张福勇, 等. 基于 3DEC 浅埋段隧道系统锚杆与定向锚杆支护的对比研究[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(S1): 52-56.
- [10] 路辉. 不同倾角节理隧道衬砌受力特性研究及应对措施[J]. 铁道建筑技术, 2022(10): 132-137.
- [11] 李超. 动载下节理岩体破坏过程数值试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [12] 梁宸, 王迎超. 爆破荷载作用下隧道裂隙围岩塌方规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1699-1707.
- [13] 贺暄. 不同节理位置及倾角对隧道围岩稳定性的影响分析[J]. 西部交通科技, 2020(6): 108-111.
- [14] 陈锐, 陈高生, 杨静, 等. 节理岩体小净距地铁隧道暗挖施工响应数值分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(S1): 232-239.
- [15] 何泉江. 山岭隧道围岩强度快速获取与考虑参数变异性的开挖稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2025.
- [16] 周雄, 孟凡震, 修占国, 等. 隧道围岩结构面倾角对诱发岩爆的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(4): 94-100.
- [17] Jaeger, J. and Cook, N. (1969) *Fundamentals of Rock Mechanics*. Chapman and Hall Ltd., 53-108.
- [18] Ramamurthy, T. and Arora, V.K. (1994) Strength Predictions for Jointed Rocks in Confined and Unconfined States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **31**, 9-22. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)92311-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)92311-6)
- [19] 李术才, 李树忱, 朱维申, 等. 三峡右岸地下电站厂房围岩稳定性断裂损伤分析[J]. 岩土力学, 2000(3): 193-197.
- [20] 黄佳佳, 蒋明镜, 王华宁. 中国南海神狐海域水合物储层井壁稳定可靠度分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(5): 1505-1516.
- [21] 王涛, 李正良, 范文亮. 基于改进统计矩点估计法和最大熵原理的结构整体可靠度分析[J]. 工程力学, 2022, 39(3): 193-200+211.
- [22] Bjureland, W., Johansson, F., Sjölander, A., Spross, J. and Larsson, S. (2019) Probability Distributions of Shotcrete Parameters for Reliability-Based Analyses of Rock Tunnel Support. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **87**, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.002>
- [23] 何满潮, 苏永华, 景海河. 块状岩体的稳定可靠性分析模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 343-

- 348.
- [24] 李志鹏, 伦培元. 隧道衬砌结构可靠度分析的三阶矩方法[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(1): 33-40.
- [25] Park, D.H., Park, E.S., Song, W.K., *et al.* (2010) Reliability Assessment of Tunnel Support Systems Using a Probability-Based Method. *Tunnel and Underground Space*, **20**, 39-48.
- [26] 方超, 薛亚东. 围岩空间变异性对隧道结构可靠度的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 41-47.
- [27] 张士朝. 考虑岩土体参数不确定性的隧道变形稳定可靠度分析方法及应用研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2024.
- [28] 丁继辉, 赵亚峰, 麻玉鹏. 非轴对称下隧道锚网喷支护结构的可靠度分析[J]. 工程力学, 2012, 29(S2): 117-121.
- [29] Connor Langford, J. and Diederichs, M.S. (2013) Reliability Based Approach to Tunnel Lining Design Using a Modified Point Estimate Method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **60**, 263-276.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.034>
- [30] 魏松源, 马景一, 彭振华, 等. 地下水封洞库围岩稳定可靠性分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2025, 7(2): 96-104.
- [31] 李翔, 魏恒, 王靖童. 深部隧道支护结构区间非概率可靠度分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 67-76.
- [32] Pandit, B. and Sivakumar Babu, G.L. (2021) Probabilistic Stability Assessment of Tunnel-Support System Considering Spatial Variability in Weak Rock Mass. *Computers and Geotechnics*, **137**, Article ID: 104242.  
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104242>
- [33] 张麒浩. 基于极限状态法的高速公路隧道结构可靠性分析研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2022.
- [34] 巫晨笛, 马士伟, 梁洪勇, 等. 节理岩体隧道掌子面塌方危险性评估模型研究[J]. 山东交通科技, 2018(4): 141-144+147.
- [35] 方砚兵. 基于可靠度的隧道围岩稳定性分析方法[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [36] 郭健, 杨治国, 康逢学. 基于向量投影影响面法的隧道围岩变形稳定可靠度分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 70-77.