

山岭隧道围岩参数获取方法研究现状及趋势分析

杜玉龙¹, 仲俊善², 李美锋³

¹中铁十六局集团第三工程有限公司, 浙江 湖州

²中国铁路上海局集团有限公司阜阳工务段, 安徽 阜阳

³中国铁路上海局集团有限公司合肥铁路枢纽工程建设指挥部, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月12日; 发布日期: 2025年10月27日

摘要

随着山岭隧道建设规模越来越大, 地下工程事故发生概率也逐步上升, 这对快速获取现场围岩参数了解地质环境确保施工安全性提出挑战。本文系统地梳理了山岭隧道围岩参数的获取方法, 以及相应方法的优势和局限性, 同时探讨了对隧道围岩参数不确定性理论的相关研究, 并据此提出了未来可能的发展趋势, 旨在降低隧道施工安全风险, 确保地下工程安全建设。

关键词

山岭隧道, 围岩参数, 获取方法

Research Status and Trend Analysis of Methods for Obtaining Surrounding Rock Parameters in Mountain Tunnels

Yulong Du¹, Junshan Zhong², Meifeng Li³

¹China Railway 16th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Huzhou Zhejiang

²Fuyang Engineering Section, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Fuyang Anhui

³Hefei Railway Hub Construction Command, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Hefei Anhui

Received: September 22, 2025; accepted: October 12, 2025; published: October 27, 2025

Abstract

As the scale of mountain tunnel construction continues to expand, the probability of underground engineering accidents is gradually increasing. This poses challenges for rapidly obtaining on-site

文章引用: 杜玉龙, 仲俊善, 李美锋. 山岭隧道围岩参数获取方法研究现状及趋势分析[J]. 土木工程, 2025, 14(10): 2489-2494. DOI: 10.12677/hjce.2025.1410268

rock mass parameters to understand the geological environment and ensure construction safety. This paper systematically reviews methods for obtaining rock mass parameters in mountain tunnels, along with their respective advantages and limitations. It also explores relevant research on the theory of uncertainty in tunnel rock mass parameters and proposes potential future development trends based on this analysis. The aim is to reduce safety risks in tunnel construction and ensure the secure development of underground engineering projects.

Keywords

Mountain Tunnel, Rock Mass Parameters, Acquisition Methods

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

在山区和丘陵地带，复杂的地形条件给传统公路和铁路的修建带来了巨大困难。为此，开凿山岭隧道成为克服自然阻隔、实现山脉贯通和改善山区交通的最有效解决方案。受岩块力学参数、地下水等多重不确定因素影响，实验室获取的参数结果若直接应用于实际施工会有引发坍塌、开裂等地质灾害的风险，造成人员伤亡和经济损失。有科研人员总结了 20 年间地下工程事故及其发生原因，主要集中在地层边界不清和参数不明两个方面。具体数据如图 1 所示。

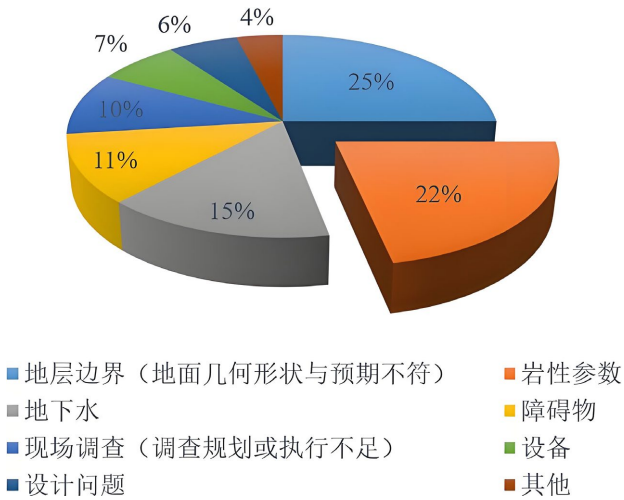


Figure 1. Distribution of factors influencing underground engineering accidents

图 1. 地下工程事故影响因素分布[1]

由于无法直接观测隧道内部岩土体状态，施工过程中存在较高的安全隐患。为此，迫切需要解决的关键问题是如何减少地下工程事故发生率。掌握山岭隧道的围岩参数获取办法，能够在施工过程中快速掌握地质条件变化，及时评估围岩稳定状态，并优化支护设计。这种基于地质环境信息的动态管控模式，可显著提升施工风险预警能力，确保地下工程的安全顺利推进。基于此，本文通过整理归纳相关文献，总结了近年来隧道围岩参数获取方法的发展历程以及不同的获取方法，系统梳理了山岭隧道围岩参数不同获取方法的优势与不足，最后整理了隧道围岩参数的不确定性理论研究，并据此提出未来可能的发展趋势[2]。

2. 隧道围岩参数获取方法研究现状

目前围岩参数的精确测定面临多重挑战：一方面，岩体中的结构面分布、多相介质组成及不良地质条件等因素增加了参数获取的复杂性；另一方面，开挖扰动引发的岩体弱化效应和尺寸效应进一步影响参数准确性。现有围岩参数获取方法难以全面反映岩体真实特性，加之理论本构模型与实际岩体模型存在偏差，致使数值分析结果可靠性不足，因此，提高岩体参数精度对确保岩土工程设计合理性和风险评估准确性具有决定性意义。本节主要从岩土工程室内试验、岩土工程原位试验和基于机器学习的围岩强度预测三个方面进行综述。

2.1. 岩土工程室内试验研究现状

室内试验涵盖了抗拉、抗剪、抗压和流变等多种试验类型。室内试验最早开始于 1900 年，Casagrand [3]根据黏土变形机制与结构特征的研究表明，使用未扰动土样进行室内试验是确保土体参数可靠性的必要前提。室内试验通常因安全考虑而采用偏保守的参数，过多考虑极端因素可能造成不必要的经济投入，故应在试验方案和结果解读中取得平衡，从而提高岩体强度预测的准确性。

当前岩土工程领域对材料力学特性的精确评估需求日益突出，而试验仪器作为数据获取的关键工具，其发展趋势成为了关注重点。为提升试验数据的全面性、准确性以及工程适用性，现代室内试验设备正不断向更大规格、更高压力及更复杂加载机制的方向升级。具有代表性的试验如表 1 所示。

Table 1. Geotechnical laboratory tests
表 1. 岩土工程室内试验

序号	作者	年份	试验仪器/技术	试验内容
1	张成良[4]	2008	MTS815 电液伺服岩石力学试验系统	岩体开挖卸荷后力学参数的变化
2	郭小红[5]	2010	MTS815.03 型压力试验机	研究风化槽花岗岩的力学行为
3	罗维[6]	2019	压缩伺服试验机 TOP INDUSTER	喷射混凝土硬化过程中的力学特性变化规律
4	高敏[7]	2020	RMT-301 岩石力学试验系统	角层状页岩试样单轴压缩下破坏模式和力学性质
5	赵煜[8]	2021	三轴实验系统(MTS815.03)	板岩和页岩强度和变形特性研究
6	Liu [9]	2022	三轴拉伸试验装置	岩石混合裂缝的形成机理
7	张涛[10]	2022	CSS-3940YJ 岩石双轴流变试验机	节理岩体试样在不同受力条件下的变形特性以及强度特征
8	杨宇[11]	2023	ZTRS-210 岩石直剪仪	岩石结构面抗剪切性能试验
9	邹德高[12]	2024	超大型三轴仪及大型三轴仪	高土石坝筑坝堆石料力学特性缩尺效应试验

图 2 展示了广泛应用的室内大型试验装置。随着岩石力学的进步，研究人员逐渐认识到实验室获取的岩性参数仅反映了试样的岩块参数，不能准确表征真实岩体的整体强度和力学特性。因此，他们开始采用原位试验和数值模拟方法，以更准确、全面地了解岩体的力学行为。

2.2. 岩土工程原位试验研究现状

原位试验是在实际环境中进行工程结构试验，能够真实反映实际地质情况，提供岩土体性质、地下水流动、土壤变形和地震波传播等方面的实际数据和信息。通常包括现场勘探、监测和实地测试等步骤。常见的原位试验包括钻孔取样[13]、地质探测[14]、地震勘探[15]、荷载试验等。



Figure 2. Large-scale indoor testing apparatus: (a) Rock triaxial testing machine (b) Rock direct shear testing system
图 2. 室内大型试验装置：(a) 岩石三轴试验仪(b) 岩石直剪试验系统

原位试验发展始于荷兰工程师 Peter Barentsen [16]于 1932 年开发的静力触探装置。静力触探试验能获取土层分层、土壤物理特性、地下障碍物、基础承载力和地下水位等信息，为工程设计和土壤力学分析提供帮助。但该方法依赖人工现场操作，使用简单设备进行力学测试，结果准确性和重复性较低。

20 世纪中期以后，实验设备和仪器的改进极大促进了原位试验的发展，例如，引入了液压设备、测力传感器和应变计等，使得试验能够更加精确地进行，近年来，多种新型原位测试手段不断涌现。具有代表性的如表 2 所示：

Table 2. *In-situ* geotechnical testing
表 2. 岩土工程原位试验

序号	作者	年份	试验仪器/技术	研究内容
1	王伟[17]	2008	微痕试验	提出新的快速测量岩石弹性模量的试验方法并成功运用
2	郑晓鹏[18]	2016	扁铲侧胀、静力触探、十字板剪切	综合多种测试方法进行耦合分析以提高参数获取精度的理论
3	张少科[19]	2020	针贯入仪	对白石头隧道软岩单轴抗压强度进行测试研究
4	侯刚栋[20]	2021	三维激光扫描技术	测量隧道掌子面的变形
5	张庆同[21]	2021	便携式野外试验仪	研发便携式野外试验仪，便于野外条件下小尺寸试样的取样制样
6	吴占廷[22]	2023	SR-RCT 松动圈检测仪	地质强度指标和真实现场的地质赋存特征
7	王磊[23]	2023	MTS816 岩石力学测试系统	深部围岩的强度特征

原位试验在地质工程领域经过长期的发展和创新，研究人员已能够通过将多种原位测试方法进行整合来获取更多维数的信息并综合分析其关系和相互作用，为工程建设提供更准确、全面的信息和数据支持。随着传感器和自动化技术的不断进步，非接触式测量技术、超声波传播技术、红外热像技术等相继涌现，可以更准确地获取岩石的物理性质和变形信息，从而提高围岩参数估计的精度和可靠性。

2.3. 基于机器学习的围岩强度预测

近年来，随着机器学习技术的快速发展，其在围岩参数预测中的应用受到广泛关注。利用机器学习

算法可以充分挖掘大量工程数据中的潜在信息，建立围岩参数与各种影响因素之间的非线性映射关系，为围岩参数的快速、准确预测提供了新的途径。具有代表性的如表 3 所示：

Table 3. Machine learning-based experiments
表 3. 基于机器学习的试验

序号	作者	年份	算法	研究内容
1	孙泽[24]	2023	基于 SGD 算法改进了传统 BP 神经网络模型	可以高效地获取围岩的强度参数
2	Shi [25]	2024	引入了概率基线建模方法研究施工环境下围岩物理和力学参数的反演	改进了不确定性反演方法计算效率低下的问题
3	丁自伟[26]	2025	基于 Stacking 集成算法的围岩强度预测模型	应用于盾构掘进中的岩石强度实时预测
4	马喜峰[27]	2025	融合了 SSA-BP 神经网络与 Abaqus 有限元分析模型进行开挖过程中的围岩参数反演分析	实现对围岩参数的反演优化以及有效预测开挖变形

由此可见，在地质工程领域，随着机器学习技术的快速发展，使岩石物理性质和变形信息的获取更为准确，提高了围岩参数估计的精度和可靠性。借助自动化技术快速获取和整理原位试验数据，并结合统计建模与智能算法进行深度解析，能够获得更精准的岩土参数评估。

3. 结论与展望

本文通过系统梳理现有数据文献，对目前常用的山岭隧道围岩获取方法进行了汇总，并将其分成了岩土工程室内试验、岩土工程原位试验和基于机器学习的围岩强度预测三个方面，并分别总结了这三种试验类型的优缺点。发现岩土工程室内试验操作便捷，成本较低但是其获取的岩性参数仅能代表试样的岩块参数，无法准确反映真实岩体的整体强度和力学特性。岩土工程原位试验能够真实反映实际地质情况，并且提供关于岩土体性质、地下水流动、土壤变形、地震波传播等方面的实际数据和信息但是其周期长，程序还十分复杂，很难适应现场隧道快速掘进的现实要求。此外，尺寸效应的存在会导致数据的离散性增大，使得隧道施工面临参数获取有限、稳定性评估不精准的难题。基于机器学习的围岩强度预测不仅解决了程序复杂的缺点，操作十分便捷，而且发展可解释性强的物理信息神经网络(PINN)，在保证预测精度的同时揭示参数间的内在物理联系。

总体而言，山岭隧道围岩参数获取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，提高获取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，人工智能的进一步成熟，理论结合实际，机器学习结合现场试验，基于贝叶斯理论或数据同化技术，融合地质先验信息、原位测试数据与施工过程监控信息的动态反演方法研究将成为隧道工程中提高围岩参数获取准确性与高效性的重要发展方向。

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] Clayton, C.R.I. (2001) Managing Geotechnical Risk: Time for Change? *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Geotechnical Engineering*, **149**, 3-11. <https://doi.org/10.1680/geng.2001.149.1.3>

- [2] 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]. 北京: 中国矿业大学, 2025.
- [3] Casagrande, A. (1900) The Structure of Clay and Its Importance in Foundation Engineering. *Boston Society Civil Engineers Journal*, **19**, 168-209.
- [4] 张成良. 深部岩体多场耦合分析及地下空间开挖卸荷研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [5] 郭小红, 梁巍, 于洪丹, 等. 跨海峡海底隧道风化槽围岩力学特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3778-3783.
- [6] 罗维. 硫酸盐环境隧道喷射混凝土力学特性及稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [7] 高敏. 层状岩体破坏力学特性与本构模型研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [8] 赵煜. 深埋隧道层状围岩力学特性及变形防控研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [9] Liu, Z., Ma, C., Wei, X. and Xie, W. (2021) Experimental Study of Rock Subjected to Triaxial Extension. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **55**, 1069-1077. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02660-3>
- [10] 张涛, 徐卫亚, 孟庆祥, 等. 基于 3D 打印技术的柱状节理岩体试样力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 245-254, 264.
- [11] 杨宇. 考虑裂隙随机特征的断层破碎带隧道围岩变形规律研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
- [12] 邹德高, 刘京茂, 宁凡伟, 等. 基于超大型三轴试验和原型监测的堆石料模型参数缩尺效应修正[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(12): 2476-2483.
- [13] 韩靖楠. 岩土体原位钻孔剪切试验国内外现状研究综述[J]. 中国设备工程, 2023(10): 261-263.
- [14] 张春生, 褚卫江, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞大型原位试验研究 I——试验方案[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1691-1701.
- [15] 王进强, 姜福兴, 吕文生, 等. 地震波传播速度原位试验及计算[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2059-2063.
- [16] 刘松玉, 吴燕开. 我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 553-556.
- [17] 王伟, 徐伟雅. 一种新的岩石性质测试方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 538-544.
- [18] 郑晓鹏. 原位测试方法在基坑勘察中的应用[J]. 铁道勘察, 2016, 42(1): 55-58.
- [19] 张少科. 滇西绢云母片岩隧道大变形预测及施工控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [20] 侯刚栋. 基于点云数据的围岩力学参数反演方法研究[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(5): 67-71.
- [21] 张庆同. 基于便携式野外试验仪的研发与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2021.
- [22] 吴占廷, 鲁旭荣. 基于 GSI 的露天矿边坡岩体抗剪强度与原位测试抗剪强度对比研究[J]. 地下水, 2023, 45(4): 164-167.
- [23] 王磊, 邹鹏, 谢广祥, 等. 深部原位应力煤岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12): 2876-2887.
- [24] 孙泽, 宋战平, 岳波, 等. 基于 SGD 算法优化的 BP 神经网络围岩参数反演模型研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(12): 2066-2076.
- [25] Shi, C., Yan, X., Yang, J. and Liu, Y. (2024) An Inversion Method for Surrounding Rock Parameters of Tunnels Based on a Probabilistic Baseline Model under a Constructional Environment. *Geosciences*, **14**, Article 107. <https://doi.org/10.3390/geosciences14040107>
- [26] 丁自伟, 高成登, 景博宇, 等. 基于机器学习的煤系地层 TBM 掘进巷道围岩强度预测[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(1): 49-60.
- [27] 马喜峰, 李冰, 任韬哲, 等. 基于 SSA-BP 神经网络的抽蓄电站地下厂房围岩参数反演及变形预测[J]. 水电能源科学, 2025, 43(6): 198-202.