

# Application of improved grey relational analysis method in stability evaluation of rock mass in hydraulic tunnels

Dilong Zuo<sup>1</sup> Lei Bao<sup>1</sup> Juanjuan Wu<sup>2</sup>

1. Yunnan Construction Investment First Water Conservancy and Hydropower Construction Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650599

2. Jingzhou University, Jingzhou, Hubei, 434000, China

## Abstract

The advancement of tunnel construction alters the mechanical state of the surrounding rock, particularly during excavation. The excavation surface and engineering loads cause significant stress and displacement in the surrounding rock. Construction techniques, support methods, and equipment also impact the stability of the rock mass after excavation. The effective transmission of external loads by the tunnel supports and the timely support of the surrounding rock directly influence the tunnel's stability. Conducting a comprehensive and in-depth study on this topic is crucial both theoretically and practically.

## Keywords

grey relational analysis; hydraulic tunnel; rock mass stability; application

# 改进的灰色关联分析法在水工隧洞围岩稳定性评价中的应用

左地龙<sup>1</sup> 包磊<sup>1</sup> 吴娟娟<sup>2</sup>

1. 云南建投第一水利水电建设有限公司, 中国·云南 昆明 650599

2. 荆州学院, 中国·湖北 荆州 434000

## 摘要

隧洞建设的推进, 会改变隧洞周围的岩石力学状态, 特别是在隧洞开挖时, 由于开挖表面的干扰以及工程载荷的影响, 使隧洞周围的岩石出现了较大的应力和位移。其中, 施工技术、支护方法及施工装备等因素对隧洞开挖后的岩体稳定性也有一定的影响。其中, 隧洞支架对外部荷载的有效传递能力及对围岩的及时支护效果, 直接影响隧洞稳定性。对其进行全面、深入的研究, 无论在科学理论还是工程实践中都具有重要意义。

## 关键词

灰色关联分析法; 水工隧洞; 围岩稳定性; 应用

## 1 引言

在水工隧洞施工中, 支护方案优选及工程实施后的效益是评价其稳定与否的主要指标。采用各种支护方式进行优选, 能有效地改善隧洞的安全状况, 改善隧洞的建设效果。在一座具有较强抗压能力的大型水工隧洞工程中, 针对复杂断裂带、高地下水位条件, 在前期支护的同时, 通过对其进行深度灌浆处理, 使隧洞的整体稳定得到显著改善, 从而保证了隧洞的正常运营。同时, 采用计算机仿真手段, 实时监控和分析隧洞开挖过程中的岩体稳定状态, 保证隧洞开挖过程中的支护结构最优状态。

## 2 灰色关联分析模型构建聚焦成本关键影响因素

通过对工程造价各环节影响因素进行系统性梳理, 对主要的评价指标进行筛选, 采用灰色关联分析法对各个因素与造价之间的相关性进行评价。在项目的投资决策中, 主要考虑了项目的定位、规模和选址问题<sup>[1]</sup>。施工期主要包括材料价格、人工费用、建设计划费用、机器利用率等; 运行维护期涉及设备维修费用、能耗费用和管理费用等。通过文献调研、专家访谈及实践案例研究等方法, 对材料价格指数、人工单价、工期延误天数、设备失效率等因素进行了综合评价。灰色关联度法的关键是确定各个因素与费用指数的相关程度。首先, 通过建立对照序列(各项影响因素), 对样本进行无量纲化, 以去除指数维度对其产生的影响。常用的无因次分析方法有初始化、均值化等。其次, 通过对相关系数进行分析, 得到相关系数, 从而体现出各时间点与基准

【作者简介】左地龙(1983-), 男, 中国四川安岳人, 硕士, 高级工程师, 从事工程项目管理、水利水电工程施工、建筑业产业走出去、项目投融资等研究。

序列之间的相关度。然后用平均法得出相关度，其值较大说明影响因素与经营费用的相关性较大。通过测算，得出建材价格指标与工程造价的相关系数分别为 0.85 和 0.78，表明了建材价格指标在建筑工程造价中起着重要作用。利用灰关联度法确定了各个因素对工程造价的影响程度，从而为以后的造价预报模式建立打下了坚实的理论基础。

在明确成本影响因素后，进一步构建全寿命期费用预报方法。建立工程造价的全寿命期费用预报方法，并将其运用到工程造价中，以达到对工程造价进行科学的预报的目标。首先，通过对工程建设过程中各个时期的造价和相应的主要影响因素等资料进行整理，构建相应的工程造价数据库；由于数据的准确，是否完备，将会对模型的预报结果产生很大的影响，所以需要经过严密的筛选与验证。采用灰关联分析法，对目前工程中各个因素与以往工程造价之间的相关性进行了测算，选出了具有高关联度的因素，并将其列为预报模型的输入变量。

### 3 深埋水工隧洞围岩稳定性数值模拟

#### 3.1 数值计算方法选择

当前，对于深部隧洞工程中的岩体稳定问题，采用有限单元法、离散元法和边界元法等进行了大量的数值计算。在这些方法中，由于具有建模灵活，分析全面等优点，被越来越多的隧洞采用。针对水工隧洞开挖过程中存在的主要问题，采用了弹塑性有限元方法对其进行了研究。

#### 3.2 计算模型的建立

隧洞围岩通常按非均匀、非连续介质处理，为了更好地刻画岩石的上述特性，本项目拟以莫尔-库仑本构关系为基础，将岩石作为非均匀介质来处理。隧洞的长度为  $200\text{m} \times 150\text{m} \times 80\text{m}$ （长 × 宽 × 高），开挖面的直径为  $24\text{m}$ ，洞口长度为  $100\text{m}$ 。在此基础上，以隧洞洞库的影响为例，对两个  $50\text{m}$  长的并行隧洞进行了数值模拟。选择了具有代表性的花岗岩作为岩体参数。利用静态土压力因数方法测定了原始地应力，并对其进行了垂直和水平应力测试。隧洞按分段开挖的方式进行，以仿真开挖卸载的全过程<sup>[2]</sup>。

#### 3.3 数值模拟结果分析

塑性区以拱顶、侧壁为中心，在洞顶、侧壁及洞底均有分布，其最大塑性变形区域为  $2\sim 3\text{m}$ 。这表明，隧洞施工对围岩应力的再分配和高应力区岩体产生了变形并产生了一个区域内的塑性变形。

拱顶变形是衡量隧洞工程安全的一个关键参数，在开挖面前  $5\text{m}$  处，变形量很小，在开挖面  $25\text{m}$  处快速增加，而后逐渐变得平稳。拱顶最大变位发生在距开挖面  $25\text{m}$  的位置。根据上述研究结果，认为该隧洞主要是以塑性变形为主要特征的，需要对其进行相应的加固处理，以改善其稳定性。

## 4 基于数值模拟的隧洞支护方案优化

### 4.1 初期支护参数优化

前期支护是隧洞开挖后的首层支护，对隧洞围岩的变形、阻止其膨胀、确保隧洞开挖表面稳定及工程安全具有重要意义。根据深埋水工隧洞的高应力特性，以有限元分析为基础，从支护刚度、厚度及时间三个角度出发，提出了一种新的支护方案。在支护刚性上，采用高强钢材（如 HRB500），提升初期支护混凝土强度，改善其承载力。在支护厚度上，应视巷道的实际情况及跨径情况，增加初期支护的厚度，通常是  $10\%\sim 20\%$ ，但应保证支护的厚度与巷道的变形保持一致，防止支架由于刚性太强而出现裂缝。从支护时间上看，要将成环间距控制在开挖面后  $0.5\sim 1$  倍，及早采取初期支护封闭成环，减少成环间距，以便初支早期起到支约束围岩的效果。实际应用证明，通过对初始支护的优选，可以明显地改善其施工质量，并能对其进行有效地控制。

### 4.2 二次衬砌结构设计优化

二层衬砌是隧洞的永久性支护体，除承受永久性支护外，还应考虑隧洞的长期稳定性及防渗漏问题。常规二次衬砌多为现浇全过程，施工周期长，模板工程量大，作业空间有限，影响了施工效率和经济效益。针对这一现状，本项目拟在已有“管片衬砌”技术基础上，对其在深埋水工隧洞施工中的应用进行研究，并在前期研究基础上，对其进行深入研究。该结构采用现场预制多个标准拱块，用高强度螺钉将其拼接在一起，安装简单，不需要进行大规模的模具制作。装配式衬砌相对于普通的现浇衬砌，施工效率高、运输吊装方便、防水性能好、接缝处理简单，且可利用螺栓连接形成柔性多点支护，使其与周围环境产生更大的协同变形，承载力更加均衡<sup>[3]</sup>。通过对该结构的有限元仿真研究，证明了与常规结构相比，该结构能有效地减少隧洞周围的变形及环形区域，从而提高了隧洞的整体稳定性。这种新的衬砌形式可以作为一种新的隧洞衬砌形式。

### 4.3 复合式支护方案设计

深部水电工程隧洞因其深度大、初始地应力高、开挖引起的应力变化大、围岩变形大，仅靠一次或二次衬砌很难彻底抑制其变形，确保隧洞稳定性。为此，本项目拟在前期研究的基础上，结合深部隧洞围岩特性，结合围岩自身稳定性，研究锚杆—喷射混凝土—钢架组合初期支护 + 装配式二次衬砌的新型组合支护新技术。采用混凝土与钢结构共同支护，其中喷射混凝土以充填闭合的裂缝为主，而钢结构则起到了显著的支护作用，二者共同发挥，使围岩的变形得到了很好的控制；装配后的二次衬砌可使隧洞的整体刚性得到增强，同时也能共同承担周围环境荷载，具有较好的防渗效果。该组合支护结构可以充分发挥锚杆、喷射混凝土、钢架、衬砌和围岩的各自优点，使得围岩与支护结构密切相连，受力与变形协同，协同分担荷载，从而大幅提升了深埋隧洞围

岩的整体稳定性能。此组合支护技术已经在我国一座深埋隧洞中得到了成功的运用,经实际观测,隧洞的施工过程中,隧洞的变形基本符合设计指标,没有出现围岩失稳、衬砌破裂、渗漏水等现象,实践证明其合理可行,值得进一步推广。

## 5 优化设计的工程应用与效果验证

结合具体的工程实例,对该方法进行了论证。在水工隧洞施工中,最优的施工方案必须与具体的地质条件、施工技术和施工目的密切相关。在支护体系中引入“协作”思想,可实现对岩体真实受力特征及动力演化的有效调控。在实际工程中,实现最优方案的实现,首要表现为准确掌握围岩与支护之间的互动关系。本项目研究成果可用于指导工程建设中,隧洞工程中围岩的变形及受力情况的研究,为合理确定隧洞工程中的支护参数和合理的支护方案奠定基础。该研究可在保证岩体稳定的前提下,降低支护的冗余度,从而达到降低工程造价的目的。采用在线监控手段,对最优方案进行检验,是进行最优方案有效性检验的有力支持。隧洞内布置了大量的传感器,可以得到隧洞内围岩的变形、应力变化以及支护的应力状态等信息。得到的参数不但可以实时地反映出地下厂房和地下厂房的真实情况,而且可以为以后的施工方案进行修正<sup>[4]</sup>。通过对实测资料进行对比,检验该方案能否实现对隧洞开挖面内的变形进行有效地控制,保证了整个工程的安全运行。研究了新的支架结构、新的支架结构,并提出了相应的改进措施。采用这种新的支护材料,可以有效改善支护体系的自适应能力,增强其耐久性能,尤其适合于复杂的地质条件、苛刻的施工工况。

工程实施后的效益检验是一项系统性的工作,必须从安全性、经济性及施工简便三方面进行。在项目执行期间,通过对各个项目的监控与分析,可以对项目的最优方案进行综合评价。在实践中,通过对其进行优化,可以实现对隧洞周围环境的控制,减小隧洞开挖时的安全性,同时也可以通过对其进行适当的支护,达到节约投资的目的。本项目的研究成果可为今后同类项目的施工管理积累可借鉴的经验与方法,促进我国水利隧洞围护结构设计的发展。

## 6 结语

在水工工程中,如何处理好各种复杂的工程环境中的岩体稳定是非常关键的问题。提出合理的支护方案及优选方案,可有效保障隧洞工程的安全建设与长期稳定运营。随着工程科技的发展,计算机仿真与现代化支护技术的成熟,隧洞岩体稳定性问题将得到更有效的解决。今后,通过对隧洞施工的深入研究,以及对隧洞施工技术的改进,将使隧洞施工向安全、高效方向发展。为保证隧洞在复杂的地质条件下的稳定和安全,必须不断加大对隧洞的研究力度,不断完善支护体系。

## 参考文献

- [1] 张松锋,古兴伟,刘皓.滇中红层软岩引水隧洞节理围岩稳定性研究[J].地质灾害与环境保护,2024,35(04):78-85.
- [2] 杨森松.榕江关埠引水工程输水隧洞围岩支护参数影响研究[J].水利科学与寒区工程,2024,7(07):24-28.
- [3] 安普太.水工隧洞内径对软岩稳定性影响分析研究[J].陕西水利,2024,(07):146-149.
- [4] 许高胜.高地温对水工隧道围岩内力及变形的影响[J].水利技术监督,2024,(05):160-161+196.