

土木地下结构工程围岩变形规律及支护优化

李 明 张建龙

陕西煤业化工建设（集团）有限公司路桥分公司 陕西 西安 710021

摘 要：依据土木地下结构工程围岩变形易引发安全隐患、支护方案不合理等问题，结合工程实际开展系统研究。通过相似模拟试验、MidasGTSNX 数值模拟，分析围岩变形的时间演化、空间分布规律及影响因素，明确地质、设计、施工三类因素对变形的作用特征。基于变形规律，从原则前提、参数设计、时机工艺三方面提出支护优化策略，实现支护参数与围岩变形的精准匹配。研究验证了数值模拟模型的合理性，优化后的支护方案可有效控制围岩变形，为同类地下结构工程的围岩管控与支护设计提供实用参考。

关键词：土木地下结构工程；围岩变形；影响因素；变形规律试验；支护优化策略

引言：随着土木地下结构工程建设规模扩大，围岩变形问题日益突出，易导致结构失稳、施工事故，严重影响工程安全性与经济性。当前部分工程支护方案缺乏针对性，未能结合围岩变形规律进行优化，存在过度支护或支护不足的问题。基于此，本文以陕西煤业化工建设相关地下工程为工程背景，通过试验、数值模拟相结合的方法，研究围岩变形规律及影响因素，提出科学可行的支护优化策略，解决实际工程中围岩变形控制难题，推动地下结构工程施工技术的优化升级。

1 土木地下结构工程围岩相关基础理论

1.1 围岩的基本概念与分类

在土木地下结构工程中，围岩是指地下结构周围一定范围内，受施工扰动影响而发生应力状态改变、产生变形或破坏的岩体或土体，是地下工程施工与支护的核心作用对象。其工程特性（岩体强度、完整性、渗透性、风化程度等）直接决定施工难度、支护设计及工程安全性。实际工程中，围岩分类是支护设计的重要依据，目前应用较广的有《公路隧道设计规范》围岩分级、RMR 岩体质量分级等，通过综合评价岩性、岩体结构、地下水条件等，将围岩划分为不同等级，为支护参数选择和施工工艺确定提供科学参考。

1.2 围岩变形的力学基础

围岩变形的本质是岩体在应力作用下的物理形态改变，其力学基础源于地下结构开挖后围岩应力的重新分布。开挖前岩体处于原始应力平衡状态，开挖后原有平衡被破坏，应力向开挖空间周边转移集中，形成二次应力场。当二次应力超过岩体抗剪或抗拉强度时，围岩会发生弹性、塑性变形甚至脆性破坏，其力学机制包括拉

伸、压缩、剪切及弯曲变形，变形程度与围岩自身力学性质、初始应力状态、开挖扰动程度密切相关，掌握这一规律是支护优化的前提。

1.3 支护结构的作用原理

支护结构是控制围岩变形、保障地下工程稳定的关键，核心是平衡围岩应力、限制过度变形，防止坍塌破坏。支护结构与围岩协同工作，传递、分散围岩应力，充分利用围岩自身承载能力，形成“围岩-支护”共同承载体系。具体而言，支护可约束围岩塑性变形、阻止岩体裂隙扩展，同时承受围岩松动压力、形变压力并传递至稳定岩体，避免局部应力集中导致支护破坏，保障地下结构施工及运营安全稳定^[1]。

2 土木地下结构工程围岩变形影响因素

土木地下结构工程中，围岩变形受以下多种因素综合影响：（1）地质因素。这是围岩变形的核心内在因素，首先是岩体自身特性，岩体强度越高、完整性越好，抗变形能力越强，反之，岩体风化严重、裂隙发育，易发生塑性变形；其次是地下水条件，地下水会软化岩体、降低岩体强度，同时产生孔隙水压力，加剧围岩应力失衡，诱发变形加剧；此外，地质构造如断层、节理等，会破坏岩体连续性，形成应力集中区，导致局部围岩变形量显著增大。（2）工程设计因素。地下结构设计参数直接影响围岩受力状态，一是断面形式与尺寸，断面越不规则、尺寸越大，围岩应力集中越明显，变形量越大；二是施工埋深，埋深越大，围岩初始应力越高，开挖后二次应力场分布越复杂，变形风险越高；三是结构布置，地下结构转折、交叉部位易形成应力叠加，诱发局部围岩变形超标。（3）施工因素。施工扰动

是诱发围岩变形的直接外部因素，一是施工工法，粗放式开挖、爆破扰动过大，会破坏岩体结构，加剧变形；二是施工进度，开挖速度过快、支护不及时，会导致围岩应力无法及时释放与平衡，引发过度变形；三是施工质量，支护结构施工偏差、灌浆不密实等，会降低支护约束效果，间接放大围岩变形^[2]。

3 土木地下结构工程围岩变形规律试验研究

3.1 试验设计与方案布置

试验以实际地下结构围岩为原型，采用相似模拟试验方法，围绕原型还原、监测精准、工况可控设计方案：（1）相似模型构建，选取与现场岩性匹配的相似材料，按 1:50 相似比制作 1.2m×1.0m×0.8m 模型，模拟现场岩体裂隙、风化等级及初始应力状态，保证模型受力变形与原型一致。（2）监测方案布置，在模型开挖面周边、拱顶、边墙等关键部位布设位移传感器，辅以应力传感器，每 10 分钟采集一次数据，完整捕捉变形全过程。（3）工况设置，结合现场施工，设置不同开挖速度、不同断面尺寸两种核心工况，每种工况重复 3 次以减少误差，重点分析工况对围岩变形的影响。

3.2 试验过程与数据采集

试验按施工流程分步开展，严控条件确保数据可靠：（1）试验准备，将模型安装至试验台，施加初始应力模拟现场埋深受力状态，待应力稳定后启动开挖。（2）开挖与过程控制，采用分层开挖，每层厚度 10cm，避免扰动周边模型岩体，严格按预设工况控制开挖速度，防止变形异常。（3）数据采集与整理，开挖时同步启动监测设备，实时采集位移、应力数据，重点记录开挖后不同时段变形增量；开挖完成后继续监测 72 小时捕捉蠕变数据，筛选数据、剔除异常值，整理为规范数据集用于后续分析^[3]。

3.3 试验结果与变形规律分析

结合试验数据与现场实际，明确围岩变形规律：（1）时间演化规律，变形呈阶段性，开挖初期以弹性变形为主、速度较快，开挖后 12-24 小时进入蠕变阶段、速度放缓，72 小时后趋于稳定，开挖速度越快，稳定时间越长。（2）空间分布规律，拱顶变形量最大、边墙次之、底板最小，断面尺寸越大，拱顶与边墙变形差值越明显；裂隙、断层部位变形量较完整岩体高 30% 以上，易出现局部变形集中。（3）工况影响规律，相同断面下，开挖速度每提高 20%，最终变形量增加 15%-20%；相同开挖速度下，断面尺寸翻倍，变形量增加 25%-30%，不规则断面变形量较规则断面高 10%-15%。

4 土木地下结构工程围岩变形数值模拟分析

4.1 数值模拟模型构建与参数设定

结合现场地质勘察资料，采用 MidasGTSNX 软件开展围岩变形分析，确保模拟贴合实际工况，具体如下：（1）几何模型建立，依据地下结构实际断面、埋深及地质条件，构建三维模型，模型范围取开挖轮廓外 3-5 倍洞径以避免边界效应，简化次要结构，重点保留围岩、开挖轮廓及断层、裂隙等关键地质构造。（2）岩体参数选取，基于现场岩体试验数据，确定围岩弹性模量、泊松比、抗压及抗剪强度等力学参数，对裂隙、风化区域分区赋值，保证参数与现场岩体特性一致。（3）边界与初始应力设置，模型底部设固定约束、四周设水平约束，顶部施加均布荷载模拟上覆岩体自重，按现场地应力测试数据赋值初始应力场，还原围岩原始受力状态。

4.2 模拟工况设置与计算过程

模拟工况对应现场施工及试验工况，确保结果可比实用，计算过程规范可控：（1）工况设计，延续试验核心工况，设置不同开挖速度、不同断面尺寸两种工况，新增断层影响工况，共 3 类 6 组，每组独立计算，重点分析工况对围岩变形的影响。（2）开挖模拟，采用分步开挖模拟现场分层施工，每步开挖后设置合理时间步长，模拟围岩应力释放与变形发展，避免开挖模拟过快导致应力集中失真。（3）计算控制，设定收敛准则，当围岩位移变化量小于 0.01mm/步时判定为收敛，停止该步计算；计算中实时监测位移、应力数据，确保过程稳定无异常。

4.3 模拟结果分析与试验验证

系统整理各组工况结果，重点分析变形规律并与相似模拟试验对比验证：（1）变形规律分析，模拟结果与试验基本一致，围岩变形呈“初期快、后期稳”特征，拱顶变形量最大、底板最小；断层区域变形量显著大于完整岩体，易出现局部塑性区。（2）工况影响分析，相同断面下，开挖速度越快，变形量及塑性区范围越大；相同开挖速度下，断面尺寸越大，变形集中越明显，不规则断面变形量高于规则断面，与试验数据趋势一致。（3）试验验证，将模拟与试验变形量对比，误差控制在 8%-12%，验证了模型的合理性与准确性，可用于后续围岩变形规律拓展及支护参数优化参考^[4]。

5 基于围岩变形规律的支护优化策略

5.1 支护优化的核心原则与前提条件

支护优化以围岩变形规律为核心依据，结合现场地

质、施工工艺及经济性要求,遵循“因地制宜、精准匹配、动态调整”的核心原则,确保方案可操作、实用。其前提条件与核心要求如下:(1)精准掌握围岩变形规律,基于前期试验、数值模拟及现场监测数据,明确变形的时间、空间演化特征及工况差异,确定变形控制临界值。(2)结合现场实际,充分考虑地质复杂度、结构断面、施工设备及进度,避免方案脱离实际、无法落地。(3)兼顾安全与经济性,在保障工程稳定、满足变形控制要求的基础上,优化参数、简化工艺,减少耗材与成本,杜绝过度或不足支护。(4)建立动态优化机制,结合施工中围岩变形实时监测数据,及时调整方案,适配变形动态变化,保障支护效果。

5.2 基于变形规律的支护参数优化

结合围岩变形的时间、空间分布规律,针对不同变形区域、不同变形阶段,对支护参数进行精准优化,重点围绕喷锚支护、钢支撑支护及组合支护的核心参数展开,具体如下:(1)喷锚支护参数优化,根据围岩变形量分级优化,对于变形量较小(小于5mm)的完整岩体区域,采用C20喷射混凝土,厚度控制在8-10cm,锚杆间距1.2-1.5m;对于变形量较大(5-15mm)的裂隙发育区域,采用C25喷射混凝土,厚度增加至12-15cm,锚杆间距缩小至0.8-1.0m,同时增设钢筋网片,提高支护整体性。(2)钢支撑支护参数优化,依据拱顶、边墙的变形差异优化钢支撑型号与间距,拱顶变形集中区域采用I22型钢支撑,间距0.8-1.0m;边墙变形较小区域采用I18型钢支撑,间距1.2-1.5m;断层破碎带等变形剧烈区域,在钢支撑之间增设联系筋,增强支撑稳定性,控制围岩塑性变形。(3)组合支护参数匹配优化,针对不同变形工况,优化喷锚与钢支撑的匹配关系,变形速率较快阶段,优先加强喷锚支护,缩短喷射时间,提前形成初期支护;变形趋于稳定后,根据变形量调整钢支撑间距,避免参数冗余,实现支护参数与围岩变形规律的精准匹配。

5.3 支护时机与施工工艺优化

基于围岩变形的时间演化规律,优化支护时机与施工工艺,减少施工扰动对围岩变形的影响,确保支护效果与围岩变形发展相适应,具体优化措施如下:(1)支

护时机优化,结合围岩变形阶段性特征,开挖初期(弹性变形阶段)及时施作喷射混凝土,封闭岩体表面,减少岩体风化和水分流失,控制弹性变形发展;当围岩进入蠕变阶段、变形速率趋于稳定后,施作钢支撑及二次衬砌,避免支护过早导致应力集中,或支护过晚引发围岩过度变形。(2)施工工艺优化,开挖工艺方面,采用控制爆破或机械开挖,减少对围岩的扰动,分层开挖厚度控制在0.8-1.0m,避免一次性开挖深度过大;支护施工工艺方面,喷混凝土采用分层喷射,每层厚度控制在3-5cm,确保喷射密实,锚杆施工采用机械钻孔,避免人工钻孔扰动岩体,灌浆施工确保浆液饱满,提高锚杆与岩体的粘结力。(3)动态监测与调整优化,在施工全过程布设围岩变形监测点,实时采集拱顶、边墙的位移数据,当变形量接近控制临界值时,及时加密钢支撑、增加喷层厚度;当变形量趋于稳定且小于控制值时,可适当放宽支护参数,实现支护方案的动态优化,确保支护效果与围岩变形规律高度适配,同时降低施工成本。

结束语

本文围绕土木地下结构工程围岩变形规律及支护优化展开全面研究,明确了围岩变形的阶段性、空间分布特征及主要影响因素,通过试验与数值模拟验证了变形规律的合理性,构建了贴合实际的支护优化体系。研究成果可直接应用于同类地下工程,有效控制围岩变形、降低施工成本、保障工程稳定。由于工程地质条件的复杂性,后续可针对复杂断层区域、极端工况下的围岩变形规律及新型支护材料应用展开深入研究,进一步完善支护优化理论与实践方法。

参考文献

- [1] 齐德亮. 破碎断裂带隧道围岩—支护结构变形规律与支护策略研究[J]. 资源信息与工程, 2025, 40(01): 63-66.
- [2] 付敬, 吴帆, 张雨霏, 等. 滇中芹河隧洞软岩破碎段围岩大变形与支护结构相互作用研究[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(03): 171-177.
- [3] 陈曦, 吴英姿, 张皓然, 等. 断层交会对地下支护洞室围岩变形影响研究[J]. 人民长江, 2024, 55(10): 149-156.
- [4] 冉弥, 周科. 浅埋黄土隧道超前支护数值模拟及围岩结构变形规律分析[J]. 建筑机械, 2025, 46(11): 237-241.