浅谈土质隧洞初期支护变形的处理措施

李晓辉
陕西省水利工程建设监理有限责任公司　陕西　西安　710000

摘　要：土质隧洞初期支护变形具备滞后性、持续性与不均匀性特征，受围岩力学特性、施工工艺缺陷及外部环境扰动多重因素影响。文章结合不同程度支护变形的病害特征，分级制定针对性处置方案，同步优化施工管控体系，以此有效遏制隧洞支护变形病害，保障围岩与支护结构整体稳定。

关键词：土质隧洞；初期支护；结构变形；围岩稳定；支护加固

引言：土质隧洞围岩土体稳定性差、流变特性突出，施工过程中初期支护极易出现各类变形病害，严重制约隧洞施工安全与结构质量。为有效解决土质隧洞支护变形失控难题，精准把控变形发展规律，结合土质隧洞施工实际工况，系统剖析变形诱因，分类梳理科学可行的处置与防控技术措施。

1 土质隧洞初期支护变形的基本特征

土质隧洞初期支护变形属于围岩与支护相互作用、应力逐步释放的动态变化过程，不同于岩质隧洞的脆性形变，该类变形主要包含持续发展、滞后显现、分布不均三大特点。土体自带流变属性，隧洞开挖完成后，围岩应力会随时间缓慢松弛，支护产生的沉降、断面收敛变形会长期存在，不会快速趋于稳定；土层分层条件、含水状态的差异，会造成隧洞各部位受力不均，让支护出现局部偏移、开裂、凸起等非均匀形变；土体对水体渗透较为敏感，渗水会弱化土体固结性能，加重滞后变形现象，成型后的支护结构也可能产生二次病害，因此土质隧洞支护施工需要动态管控，以此规避变形累积引发的结构失稳隐患[1]。

2 土质隧洞初期支护变形的成因分析

2.1 围岩自身力学特性缺陷

土质围岩存在的结构短板，是诱发隧洞初期支护产生变形的核心内在原因。天然状态下的土体颗粒粘结强度偏低，整体结构的完整性较差，地层可以依靠原始地应力维持相对平衡的状态，隧洞开挖带来的扰动，会直接破坏土体原有结构，弱化颗粒之间的粘结作用，让围岩自身的稳定承载能力出现快速下降。大部分土质地层都具备流变和蠕变的物理特性，恒定的支护压力作用于土体表面时，土体内部会产生持续性的缓慢形变，持续挤压外部支护结构，让整套支护体系长期承受被动挤压荷载。土质隧洞常见的粉土、粉质黏土围岩，含水率的稳定性普遍较差，细微的水分变化，就能够改变土体的抗剪强度与压缩性能，土体出现软化、固结收缩等现象后，会造成支护结构受力状态突变，进而产生沉降、断面收敛等各类变形问题，也是土质隧洞支护变形最基础的诱发条件。

2.2 初期支护施工工艺缺陷

施工工艺把控不到位是支护变形产生的人为核心因素，直接决定支护结构的承载性能与整体稳定性。喷射混凝土施工阶段，若风压、水灰比把控失衡，易出现混凝土密实度不足、回弹率过高、面层厚薄不均等问题，导致支护结构整体强度偏低、局部承载能力薄弱，无法有效抵抗围岩压力，进而产生弯曲、开裂变形。锚杆、钢拱架安装施工中，锚杆间距、锚固深度把控不精准，锚固浆液灌注不饱满，会大幅降低锚杆的锚固力与围岩拉结效果；钢拱架安装偏移、间距超标、焊接连接不牢固，会造成支护骨架整体性不足，受力后易出现扭曲、偏位变形。同时，支护施工工序衔接滞后，开挖后未及时封闭支护，会导致围岩应力提前释放、土体松散坍塌，大幅增加初期支护的变形压力，诱发各类变形病害[2]。

2.3 施工外部环境扰动

土质隧洞施工期间的外部环境变动，会间接打破支护结构的受力平衡状态，对支护变形问题起到诱发以及加剧的作用。地下水属于影响隧洞支护整体稳定性的关键环境要素，地层内部积水富集、施工环节出现渗漏水的情况，会持续浸润周边土体，软化围岩原有结构，降低土体有效承载应力，让土体对支护结构的挤压作用不断提升；渗水还会冲刷围岩与支护之间的填充垫层，造成支护局部悬空、受力分布不均的问题，最终引发结构沉降、表层开裂等病害。不合理的开挖施工方式，同样会带来环境扰动问题，过快的掘进速度、过大的单次开挖断面，会让围岩内部应力瞬间集中释放，超出初期支护的瞬时承载上限，未成型完整的受力结构就会出现形变问题。施工设备运行产生的振动、周边土体的轻微扰

动，都会破坏松散土体的临时稳定状态，进一步加快初期支护变形的发展速度。

3 土质隧洞初期支护变形的针对性处理措施

3.1 建立动态变形监测与预警体系

动态监测工作可以精准掌握支护结构的变形状态，也是提前防范支护变形失控的重要前置手段，能够实现各类变形隐患的早期识别与及时处理，让传统被动的问题处置模式转变为主动防控模式。结合土质隧洞变形持续发展、后期滞后显现的特点，施工过程中需要搭建全天候、全覆盖的现场监测体系，重点观测拱顶沉降、洞身周边收敛、支护裂缝拓展、围岩土体位移等关键施工指标。监测点位可根据隧洞断面形式、土层分层变化情况灵活布置，土质软弱夹层、地下水富集区域、断面突变位置需要增加测点数量，以此捕捉细微的局部变形问题。监测频次可随施工阶段动态调整，开挖作业及初期支护完成后的七天内，土体应力释放速度较快，变形发展较为活跃，需要开展高频监测，精准统计变形速率与变形总量；支护成型七至三十天区间，整体变形逐步趋于平稳，可适当降低监测频次，持续跟进滞后变形的发展态势；地质条件复杂、变形波动明显的段落，需要全程保持高频监测，规避隐患遗漏。现场监测需配套分级预警机制，结合土质隧洞施工特点划定变形控制标准，划分轻度、中度、超限三级变形预警标准，对应配套专项处置流程，监测数据超出限值时，及时停止掘进作业，排查变形成因并落实防控措施，同时常态化整理监测数据，归纳不同土质、不同施工阶段的变形规律，为施工参数优化和病害处置调整提供数据支撑[3]。

3.2 轻微变形的原位防控与微调处置

土质隧洞的轻微变形，一般体现为支护结构小幅收敛，结构表面不存在明显开裂问题，整体变形速度较为平稳，各项指标均处于规范允许范围之内，该类变形大多出现在支护结构成型初期，属于围岩应力自然释放产生的可控性形变，治理方式以原位防控、遏制变形发展、调整结构受力状态为主，无需开展大规模加固施工。隧洞开挖环节，可严格把控单次开挖深度，缩减单次开挖的施工长度，放缓整体开挖进度，降低施工扰动对围岩造成的二次破坏，能够为初期支护成型、围岩应力均匀释放提供充足时间，有效缓解变形累积的问题。支护施工阶段，可落实随挖随支护、及时封闭掌子面的施工原则，开挖作业结束后，快速完成锚杆安装、钢筋网铺设、混凝土喷射等工序，缩短围岩裸露的时长，保障土体原有结构强度，减轻围岩松散形变对支护体系的挤压作用；混凝土初凝阶段，可对支护局部偏位、表面不平整的位置进行精细调整，规整隧洞支护断面，规避局部应力集中的现象。施工期间的排水管控同样关键，及时排出隧洞内部积水，疏导地层渗水通道，通过铺设防水垫层、封堵渗水缝隙的方式，稳定土体含水率，削弱水体对围岩的软化作用；对变形相对显著的区段，可适当加密锚杆布置，加厚混凝土支护面层，小幅提升局部结构刚度，让支护受力与围岩应力相互适配，稳步控制变形发展态势。

3.3 中度变形的补强支护处置

隧洞支护出现中度变形时，通常会产生结构明显收缩、表层产生细微裂缝、拱顶及边墙沉降偏大的问题，整体变形速度会持续加快，这类问题并不会立刻引发结构坍塌，却已经超出常规安全管控范围，任由发展的话，很容易演变为重度结构病害，该类变形的处置重点，在于补强支护结构、完善受力体系、抑制变形持续扩张。变形治理作业开展前，应对病害段落的支护施工质量开展全面检查，核验锚杆锚固性能、钢拱架连接状态以及混凝土密实程度，精准定位结构薄弱区域，以此制定科学的补强方案，降低无序施工引发的资源浪费与受力不均问题。存在开裂、沉降问题的支护区域，可先清理裂缝表层的松散物料与浮尘，再用专用修补材料填充压实，封堵裂缝通路，避免地下水渗入结构内部，造成土体与支护结构持续受损；刚度不足的支护部位，可增设辅助锚杆、加密钢拱架布设间距，加长锚杆能够深入深层稳定土层，提升围岩与支护结构的整体性，增强整体承载性能，补强区域可重新喷射混凝土加厚面层，让新旧结构融为一体，消除局部受力缺陷。围岩流变带来的持续收缩变形，可通过分层支护、分次封闭的方式处理，初次支护可预留少量应力释放空间，待围岩应力趋于平缓后，再做二次混凝土补强，以此缓解应力堆积的情况。补强作业结束后，需持续开展变形监测工作，待监测数据长期平稳、变形完全稳定后，才可恢复隧洞掘进作业，保障病害治理成效[4]。

3.4 重度变形的结构性修复与加固

重度变形是危害性极高的结构性病害，一般会出现支护大面积开裂、钢拱架偏移扭曲、隧洞断面大幅收缩、拱顶沉降剧烈等现象，周边土体还会出现明显松散、坍塌趋势，原有支护体系的承载性能基本失效，整体结构存在较大失稳隐患，该类病害的处置重点，集中在结构修复、整体加固与受力体系重构方面，需要开展系统性的综合治理作业。病害处置初期，掌子面掘进以及周边各类扰动施工都需要立刻停止，变形段落的上下游位置需要做好临时封闭防护，设置安全隔离区域，以

此避免施工扰动进一步加重结构失稳状态，同时精准探测变形范围、土体松散厚度以及支护破损程度，结合实际工况编制专项修复加固方案。出现钢拱架扭曲、支护骨架破损的位置，可先行拆除失效变形构件，清理表层松散土体和破损混凝土，修整规整隧洞断面，为全新支护施工创造条件；施工可采用规格更高、布设更密集的钢拱架，搭配加长加粗锚杆深入深层稳定岩土体，有效强化结构锚固效果，保障支护骨架和围岩紧密贴合受力。土体松散程度较高、自稳性能极差的段落，可配合小导管超前注浆工艺，利用浆液填充土体孔隙，固结松散土层，改善围岩力学性能，从源头降低土体形变对支护结构的挤压作用。注浆作业完成后，分层喷射高强度混凝土，重构完整密实的初期支护结构，底板隆起、边墙大幅收敛的位置，可增设横向支撑构件平衡侧向土压力。整体施工遵循分步成型、实时监测的原则，分段完成支护作业并核验结构稳定性后，再推进后续施工，彻底根除重度变形带来的安全隐患。

3.5 优化施工工艺规避变形复发

各类支护变形问题完成处置过后，可通过优化全流程施工工艺、规范现场操作标准的方式，搭建长效防控体系，从施工源头减少支护变形的复发概率，实现病害治理与前期防控的一体化施工模式。隧洞开挖作业阶段，施工断面与掘进速度需要得到严格管控，分层分段开挖、预留核心土的施工方式，能够有效限制土体蠕变形变，缓解开挖施工带来的应力集中现象，降低围岩一次性受扰动过大而产生变形的可能性；施工过程需要规避超挖、欠挖等常见问题，出现超挖的区域可以采用同级混凝土回填夯实，让支护结构和围岩紧密贴合，消除内部空隙与悬空区域，保障结构受力可以均匀传递。支护作业阶段，喷射混凝土的水灰比例、施工风压、喷射厚度都需要精准把控，标准化的分层喷射工艺，可以提升混凝土密实度与成型效果，减少面层空鼓、厚度不均、强度不达标等施工质量问题；锚杆和钢拱架的安装施工，需要严格遵循施工标准控制安装精度，保证锚固深度、构件间距及焊接质量达标，维持支护骨架的完整性与承载稳定性，固定开挖、支护、封闭的标准化施工流程，缩短围岩裸露的时间，维持土体原始稳定状态。水文治理方面，常态化的排水封堵体系需要落实到位，提前布设排水设施，及时疏导地层积水、封堵渗水通道，保持围岩土体的干燥状态，减少水体软化土体引发的次生变形。整体施工可通过细化各工序管控标准、优化特殊地质支护参数、总结病害处置经验等方式，形成适配土质隧洞的防控体系，稳步提升初期支护结构的稳定性能与耐久性能[5]。

结束语：土质隧洞初期支护变形是地质条件、施工工艺及环境因素协同作用的结果，其变形发展规律复杂且管控难度较大。通过构建动态监测体系、分级处置不同变形病害、优化全过程施工工艺，可形成系统化变形防控模式，有效规避支护失稳风险，为同类土质隧洞施工提供技术参考。

参考文献

[1]姜封国,林抒予,姜婷玉.隧洞软岩洞段大变形分析及初期支护措施[J].黑龙江科技大学学报,2026,36(1):23-28.

[2]谢红建,万力.深埋软岩隧洞变形下的初期支护初探[J].东北水利水电,2026,44(4):66-70.

[3]赵武,冯骏驰,宋泽斌.复杂地质条件下软岩隧洞变形特性及处理方法研究[J].水利与建筑工程学报,2026,24(3):177-183.

[4]冯旺.隧洞施工支护结构变形监测及控制方法[J].四川建材,2026,52(7):129-131.

[5]杨小龙,向天兵,司建强.滇中引水工程蔡家村隧洞软岩大变形处理研究[J].地下空间与工程学报,2025,21(2):629-636.