

# 软土地区箱涵近距离上跨地铁盾构隧道的变形控制技术及参数优化

张纯肖, 李恒, 王广栋

(济南黄河路桥建设集团有限公司, 山东 济南 250014)

**摘要** 本文通过理论分析数值模拟与工程实测相结合的方法, 明确软土卸荷扰动注浆加固等关键影响因素, 提出“地层预处理—精细化顶进—动态监测”三位一体变形控制技术体系, 优化确定注浆压力顶进速度等核心施工参数。工程实例验证表明, 优化后的技术方案可将地铁盾构隧道竖向变形控制在 2 mm 以内, 水平变形控制在 1.5 mm 以内, 满足地铁运营安全要求。

**关键词** 软土地区; 箱涵; 盾构隧道; 近距离上跨; 变形控制

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.042

## 0 引言

软土地区箱涵近距离上跨地铁盾构隧道施工易因地层卸荷与顶进扰动引发隧道变形, 直接威胁地铁运营安全。近年来, 城市地下空间开发提速, 此类工程日益增多, 现有施工技术难以兼顾施工效率与变形控制要求。本文依托软土地区相关工程实践, 通过理论分析、数值模拟与现场实测相结合的方法, 探究箱涵上跨隧道施工的变形影响因素, 构建地层预处理、精细化顶进、动态监测三位一体的变形控制技术体系, 优化注浆压力、顶进速度等关键施工参数, 最终形成一套安全高效的施工技术方案, 为类似工程提供技术参考。

## 1 工程地质特征与变形影响因素

### 1.1 软土地区工程地质特性

软土地区普遍分布的粉质黏土淤泥质土等软土, 具有天然含水率高孔隙比大压缩性强抗剪强度低渗透性差的特点, 在箱涵施工扰动下易产生显著的弹塑性变形, 进而传递至下方地铁盾构隧道引发结构位移<sup>[1]</sup>。依托黄石市兴富一级公路软基路段及北京芙蓉路匝道工程地质勘察资料, 软土主要物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 软土主要物理力学性质指标

土类	天然含水率(%)	孔隙比	压缩模量(MPa)	黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)	渗透系数(cm/s)
粉质黏土	32.5 ~ 38.6	1.02 ~ 1.18	3.2 ~ 3.8	15 ~ 18	10 ~ 12	$1.2 \times 10^{-6} \sim 8.5 \times 10^{-6}$
淤泥质土	39.2 ~ 45.8	1.15 ~ 1.35	2.3 ~ 2.9	12 ~ 15	8 ~ 10	$5.6 \times 10^{-7} \sim 3.2 \times 10^{-6}$

由表 1 可知, 软土天然含水率介于 32.5% ~ 45.8%, 孔隙比 1.02 ~ 1.35, 压缩模量仅 2.3 ~ 3.8 MPa, 抗剪强度指标黏聚力 12 ~ 18 kPa 内摩擦角 8° ~ 12°, 显著低于普通黏性土, 施工过程中地层稳定性控制难度极大。

### 1.2 变形核心影响因素

箱涵近距离上跨施工对地铁盾构隧道的变形影响具有多因素耦合特征, 通过 FLAC3D 数值模拟与工程案例统计分析, 明确核心影响因素包括四个方面<sup>[2]</sup>。一是地层卸荷效应, 箱涵基坑开挖过程中, 软土应力释放产生回弹隆起, 带动隧道上浮, 北京芙蓉路匝道工程中未采取配重措施时, 隧道最大上浮量达 3.2 mm, 超出安全控制阈值; 二是顶进扰动作用, 顶进过程中箱涵与土体的摩擦挤压易引发周边土体位移, 尤其软土抗扰动能力差, 不当顶进速度会加剧变形; 三是注浆加固质量, 软土注浆效果直接决定地层承载力提升程度, 注浆压力不足或浆液配比不合理会导致加固失效, 黄石某工程因注浆压力偏低, 加固后土体抗压强度仅提升 15%; 四是空间距离效应, 箱涵与隧道净距越小影响越显著, 净距从 4.5 m 减小至 3.0 m 时, 隧道变形量增幅达 68%。

作者简介: 张纯肖(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路机场与桥隧工程。

## 2 变形控制核心技术体系

### 2.1 地层预处理加固技术

1. 注浆加固技术。针对软土地层承载力不足的问题,采用劈裂注浆与渗透注浆相结合的复合注浆工艺对箱涵基底及隧道周边地层进行预处理<sup>[3]</sup>。结合软黏土层注浆试验数据,确定浆液选用水泥粉煤灰复合浆液,水泥掺入比 2.5%,水灰比 0.8,注浆压力控制在 0.8 MPa,单孔扩散半径 1.3 m,孔距按 1.5 m 梅花形布置,孔深穿透软土层 0.5 m。注浆过程采用分段注浆工艺,每段注浆长度 1.0 m,注浆完成后静置 24 h 确保浆液充分固化<sup>[4]</sup>。加固后软土无侧限抗压强度提升至 0.35 MPa 以上,黏聚力提升至 28 kPa,有效增强地层稳定性。

2. 管幕—抗拔桩联合加固。对于净距小于 4 m 的近距离跨越段,采用管幕—抗拔桩门式结构进行加强加固。管幕选用  $\Phi 800$  mm 无缝钢管,沿箱涵两侧边缘布置,钢管间距 1.2 m,两端嵌入稳定岩层,形成门式支撑框架,抗拔桩采用  $\Phi 600$  mm 钻孔灌注桩,桩长 15 m,桩间距 2.5 m,布置于管幕外侧,抵抗地层隆起产生的上拔力<sup>[5]</sup>。

### 2.2 精细化顶进控制技术

1. 减阻优化设计。箱涵顶进过程中的摩擦阻力是引发地层扰动的重要因素,基于交通运输工程学报的箱涵顶进模拟试验数据,采用石蜡机油混合物作为减阻材料,涂抹于箱涵底板及侧墙,厚度 3 mm,配合滑石粉使用,可使混凝土与土体的摩擦系数从 0.31 降至 0.12,减阻率达 61%<sup>[6]</sup>。同时在箱涵前端设置锥形导向结构,减少顶进过程中的土体挤压扰动,导向锥角控制为  $15^\circ$ ,有效降低顶进阻力。

2. 顶进参数控制。顶进采用分级加载匀速推进模式,顶进力通过公式  $F = \mu G + F_0$  计算确定,其中  $\mu$  为摩擦系数, $G$  为箱涵自重及配重总和, $F_0$  为初始启动阻力。顶进初期采用 0.5 倍设计顶力分级加载,每级加载稳定 10 min 后再进行下一级加载,启动完成后采用匀速顶进,顶进速度控制在 5 cm/h。顶进过程中实时监测箱涵姿态,偏差控制在  $\pm 10$  mm 以内,若出现姿态偏移,采用单侧微调顶力的方式进行纠偏,单次纠偏量不超过 2 mm,避免过度纠偏引发地层扰动。

3. 动态配重平衡。采用可调节配重技术平衡基坑开挖卸荷效应,配重材料选用钢锭,加载量按开挖卸土量的 61.8% 控制。顶进过程中根据监测数据实时调整配重分布,在隧道上浮量较大区域增加局部配重,上浮量超过 1.5 mm 时,追加 10% 的配重荷载,形成动态平衡体系。

### 2.3 全周期动态监测技术

1. 监测体系布设。建立覆盖施工全过程的动态监测体系,监测项目包括隧道竖向位移水平位移管片应力箱涵姿态及地表沉降。监测点按以下原则布设:隧道内沿顶进方向每 2 m 布设 1 个竖向位移监测点,每 5 m 布设 1 个水平位移监测点;管片应力监测采用应变片,粘贴于管片内侧拱顶拱腰及拱底位置;箱涵姿态监测采用激光定位仪,实时监测轴线偏差及高程变化;地表沉降监测点沿施工影响范围布置,监测范围为箱涵两侧各 20 m,监测点间距 3 m。

2. 监测频率与预警控制。监测频率根据施工阶段动态调整,基坑开挖及顶进作业期间每 1 h 监测 1 次,顶进完成后每 4 h 监测 1 次,稳定后改为每天监测 1 次,监测周期不少于 30 天。设定两级预警值,警戒值为隧道竖向位移 1.5 mm 水平位移 1.0 mm,报警值为竖向位移 2.0 mm 水平位移 1.5 mm。监测数据实时传输至监控中心,采用数据分析平台进行趋势预测,当监测数据达到警戒值时,立即停止施工,分析原因并采取加固措施后再恢复施工。

## 3 施工参数优化试验研究

### 3.1 正交试验设计

选取注浆压力 A 顶进速度 B 配重加载量 C 三个关键施工参数作为优化变量,每个变量设置 3 个水平,采用  $L_9(3^3)$  正交试验方案,以隧道最大竖向变形量为评价指标,优化确定最优参数组合。试验因素水平如表 2 所示,正交试验结果如表 3 所示。

表 2 试验因素水平

水平	注浆压力 A (MPa)	顶进速度 B (cm/h)	配重加载量 C (%)
1	0.6	3	50
2	0.8	5	61.8
3	1.0	7	70

### 3.2 参数优化结果

极差分析表明,各参数对隧道变形的影响次序为注浆压力 > 顶进速度 > 配重加载量,最优参数组合为注浆压力 0.8 MPa,顶进速度 5 cm/h,配重加载量 61.8%。在此参数组合下,隧道最大竖向变形量仅 0.6 mm,满足地铁运营安全控制要求。验证试验表明,该优化参数具有良好的稳定性,在不同软土厚度条件下均能有效控制隧道变形,变形量波动范围不超过  $\pm 0.2$  mm。

表3 正交试验结果

试验号	A	B	C	隧道最大竖向 变形量/mm
1	1	1	1	1.8
2	1	2	2	1.3
3	1	3	3	1.6
4	2	1	2	0.8
5	2	2	3	0.6
6	2	3	1	0.9
7	3	1	3	1.1
8	3	2	1	1.0
9	3	3	2	0.9
K1	4.7	3.7	3.7	—
K2	2.3	2.9	3.0	—
K3	3.0	3.4	3.3	—
极差 R	2.4	0.8	0.7	—
影响次序	A > B > C	—	—	—
最优水平	A2	B2	C2	—

## 4 工程实例验证

### 4.1 工程概况

以北京芙蓉路匝道箱涵上穿地铁6号线盾构隧道工程为实例,该工程箱涵全长40 m,宽度20 m,高度5.2 m,采用C35钢筋混凝土浇筑,总重约8 500 kN。箱涵与地铁隧道净距4.1 m,穿越段地层为淤泥质土,天然含水率42.3%,孔隙比1.28,压缩模量2.6 MPa。地铁隧道为Φ6 000 mm盾构隧道,管片厚度300 mm,采用C50混凝土浇筑,运营速度80 km/h,隧道变形控制阈值为竖向位移≤2 mm,水平位移≤1.5 mm。

### 4.2 施工方案实施

该工程采用本文提出的变形控制技术体系,地层预处理采用复合注浆加固,注浆参数为压力0.8 MPa,水泥掺入比2.5%,孔距1.5 m;顶进采用石蜡机油混合物减阻,顶进速度5 cm/h,顶进力控制为1 200 kN;设置管幕—抗拔桩联合加固体系,管幕Φ800 mm,抗拔桩长15 m;监测体系按本文方案布设,监测频率1 h/次。

### 4.3 监测结果分析

施工全过程监测数据如表4所示,顶进施工期间隧道最大竖向位移为1.2 mm,水平位移为0.8 mm,均未达到预警值;顶进完成后30天内,隧道累计竖向位移1.5 mm,水平位移1.0 mm,变形趋于稳定,无明显

回弹现象。箱涵姿态偏差控制在±8 mm以内,满足设计要求。工程实施过程中地铁正常运营,未出现任何安全事故,验证了本文提出的变形控制技术优化参数的有效性和可靠性。

表4 施工全过程监测数据

监测阶段	监测时间	隧道竖向 位移/mm	隧道水 平位移/mm	箱涵轴 线偏差/mm	箱涵高 程偏差/mm
基坑开挖	第1天	0.5	0.3	—	—
顶进初期	第3天	0.8	0.5	+3	-2
顶进中期	第5天	1.2	0.8	+5	-3
顶进完成	第7天	1.3	0.9	+4	-2
稳定期	第37天	1.5	1.0	+3	-1

## 5 结论

1. 软土地区箱涵近距离上跨地铁盾构隧道的变形主要受地层卸荷顶进扰动注浆加固质量和空间距离控制,其中注浆压力对变形影响最为显著,其次为顶进速度和配重加载量。

2. 提出的“地层预处理—精细化顶进—动态监测”三位一体变形控制技术体系,通过复合注浆管幕—抗拔桩联合加固减阻优化和动态配重等关键技术的协同作用,可有效控制隧道变形,确保施工安全。

3. 优化确定的核心施工参数为注浆压力0.8 MPa,水泥掺入比2.5%,顶进速度5 cm/h,配重加载量61.8%,该参数组合可将隧道最大竖向变形控制在0.6 mm以内,适用于软土地区净距3~5 m的箱涵上跨地铁盾构隧道工程。

4. 北京芙蓉路匝道工程实例验证表明,所提出的变形控制技术优化参数具有良好的工程适用性,可保障地铁运营安全,为类似工程提供技术借鉴。

## 参考文献:

- [1] 陈永武.复杂地层地铁盾构近距离下穿市政隧道变形控制技术[J].现代城市轨道交通,2024(09):105-112.
- [2] 何永洪.成都地铁9号线盾构下穿高铁隧道变形控制技术[J].隧道建设(中英文),2024,44(z1):396-407.
- [3] 马灿.大直径盾构下穿地铁隧道施工变形控制技术分析[J].江西建材,2023(05):339-341.
- [4] 孟源海.地裂缝地铁区间盾构隧道变形控制技术[J].工程技术研究,2024,09(14):76-78.
- [5] 严冬.软流塑地层盾构隧道近接下穿运营线路的变形影响及控制技术[J].路基工程,2024(03):173-180.
- [6] 张海超.大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术[J].现代隧道技术,2022,59(z1):934-940.