

软土小曲率半径转弯隧道盾构施工扰动变形规律实测分析

王甲川

上海市新地海洋工程技术有限公司 200333

DOI:10.32629/ems.v8i5.20139

[摘要] 为揭示软土地区小曲率半径转弯隧道盾构施工的土体扰动变形规律,为同类工程的监测方案制定和数据分析提供参考,针对盾构施工中推进力与土仓压力不平衡、盾壳摩擦力等因素引发的土体变形问题,以曲率半径 115m 的软土盾构隧道为工程背景,采用理论计算与现场实测相结合的方法,分析小曲率转弯段的土体扰动范围及变形规律,验证土层加固对变形的控制效果。结果表明:小曲率半径转弯隧道盾构施工引发的地表沉降槽呈不对称分布,最大变形始终位于隧道内侧,MJS 加固法可有效减小土体变形量,较 Peck 理论计算值降低 28.7%;土体变形分为超前、到达、通过、盾尾过后、后期五个阶段,第二至第四阶段变形速率最大,后期土体固结周期长且内侧扰动影响范围更大;Peck 理论可解释常规盾构施工变形,但应用于小曲率转弯隧道时,需引入土层加固后的参数进行修正。研究成果可为软土地区小曲率半径转弯隧道盾构施工的监测与变形控制提供工程参考。

[关键词] 软土地区;小曲率半径转弯隧道;盾构施工;土体扰动;地表沉降;实测分析

引言

小曲率半径转弯隧道盾构施工的土体扰动变形规律研究是隧道工程领域的重要课题。城市地下工程建设受复杂地形与线路规划限制,小曲率半径转弯隧道的建设需求日益增长,盾构施工过程中的土体扰动易引发地表沉降或隆起,威胁周边环境安全,因此明确其变形规律对工程施工至关重要。

美国 R. B. Peck (1969) 通过大量地表沉降数据分析,提出了不排水条件下隧道开挖地表沉降槽与地层损失体积的关联理论,为盾构施工地表沉降预测奠定了基础。魏浩基于 Mindlin 解析解推导了小半径曲线盾构施工的扰动因素,指出土仓压力失衡会引发盾构切口前方土体隆起或沉降,盾体通过时的地层损失与盾壳摩擦会导致地表沉降,且沉降槽断面形态会随盾体通过由 W 形变为 V 形。潘泓等通过广州市 220 千伏犀牛站电缆隧道实测数据,分析了小曲率半径转弯段土体沉降、孔隙水压力的变化特征,证实了该类隧道的特殊变形规律。现有研究多通过模型、算法等方法预测盾构施工的地表变形,为监测分析提供了重要参考,但针对软土地区小曲率半径转弯隧道,考虑土层加固效应的实测变形规律研究仍较为欠缺,且 Peck 理论在该类工程中的适用性未得到系统验证。

本文以软土地区小曲率半径转弯盾构隧道为研究对象,解析施工全过程的土体变形机理,结合 Peck 理论进行地表沉降计算,依托工程实例开展现场实测,对比分析理论计算与实测数据的差异,揭示小曲率转弯段的土体扰动变形规律,提出监测工作的优化建议,以期同类工程提供技术支撑。

1 变形机理、监测难点及土体扰动理论基础

1.1 土体变形机理

根据盾构施工引起土体变形的机制差异,将变形过程划

分为 5 个阶段,各阶段变形诱因与特征明确:

1 超前变形:盾构未到达监测断面前的地表变化,主要由盾构机头推力与土仓压力失衡引发,表现为地表轻微隆起或沉降,是施工扰动的前期响应。

2 到达变形:盾构切口抵达监测断面时的变形,土仓压力较大时,切口前方土体受挤压向上移动,造成地表隆起;土仓压力较小时,土体因欠压进入盾构内部,引发地面沉降,该阶段变形与土仓压力控制直接相关。

3 通过变形:盾构盾体通过监测断面的沉降,核心影响因素为盾构掘进产生的土层损失,同时盾壳与土体的摩擦、剪切作用会带动周边土体扰动,加剧地表沉降。

4 盾尾过后变形:隧道管片与盾尾分离后的变形,因管片与盾壳间存在施工间隙,周边土壁向管片方向移动,导致地表出现较大沉降且沉降速率显著提升,是地表沉降的关键阶段。

5 后期变形:盾尾通过后至土体稳定的长期变形,表现特征因地质条件不同存在差异,软土地区因土体自身工程特性,该阶段会出现持续的固结沉降。

1.2 监测难点

盾构法施工引发的地层变形具有必然性,地面长期沉降受多因素影响呈现复杂性,小曲率半径转弯隧道的盾构施工监测需遵循时空效应,其监测难点主要体现在空间与时间两个维度:

1 空间效应:小曲率半径转弯隧道的土体变形从隧道内侧至外侧呈不规则分布,无明显对称规律,且变形范围随隧道转弯曲率的增大而扩大,监测点的布设需兼顾内外侧的差异,难以采用常规对称布点方式。

2 时间效应:受扰动后的土体存在缓慢的固结过程,固

结期间扰动的土体应力会逐步自适应调整, 周边环境的安全状态持续处于不稳定状态, 直至土体应力达到平衡、变形趋于稳定, 监测周期需覆盖整个固结阶段, 监测频率要求更高。

1.3 土体扰动的理论基础

美国 R. B. Peck (1969) 通过大量实测数据提出地表沉降槽理论: 在不排水条件下, 隧道开挖形成的地表沉降槽体积等于地层损失体积; 假定地层损失在隧道全长均匀分布, 推导出地表沉降横向分布的预测公式, 成为盾构施工地表沉降预测的经典理论, 公式如下:

$$S(x) = S_{max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

$$S_{max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}}$$

$$i = \frac{H}{\sqrt{2\pi t_g} \left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)} = KH$$

$$V_s = V_i \pi R^2$$

式中:

S(x) — 距离隧道中心轴线 x 处地层损失引起的地面沉降值, mm;

S_{max} — 隧道中心线处地表最大沉降量, mm, 正值为隆起、负值为沉降;

i — 沉降槽宽度系数, m;

V_s — 单位长度地层损失体积, m³/m;

V_i — 隧道开挖单位长度的地层损失率, %;

H — 隧道覆土厚度, m;

φ — 土的内摩擦角, °, 参考韩焯统计的上海市软土实测资料;

R — 盾构机外径, m;

K — 沉降槽宽度系数修正系数, 无量纲。

地层损失率 V_i 的取值对地面沉降槽预测的准确度起关键作用。本文以工程实例为研究对象, 选取盾构机外径 R=2.7m, 隧道覆土厚度 H=13.4m, 结合现场盾构出土参数确定地层损失率 V_i = 2.3%, 通过 Peck 公式计算得: 沉降槽宽度系数

i=6.97m, 单位长度地层损失体积 V_s = 0.52 m³/m, 隧道

中心线处地表最大变形量

S_{max} = ±29.76mm; 进一步推导出沉降槽分布曲线为:

$$S(x) = 21.2e^{-\frac{x^2}{2 \times 6.97^2}}$$

基于该曲线可计算隧道轴线两侧各 20m 范围内各点的沉降值, 为后续实测数据与理论计算的对比分析提供统一基准。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某隧道区间采用土压平衡盾构法施工, 隧道内径 4500mm, 选用 1 台 Ø5400mm 土压平衡盾构机, 隧道全长 1681m, 区间坡度 1.0%, 最大覆土厚度 15.3m。其中小曲率转弯段曲线半径 115m, 曲线长度 185.29m, 采用 0.8m 环宽钢管片拼装, 共计 235 环; 为控制施工扰动变形, 小曲率段施工前采用 MJS 加固法进行全断面超前加固, 加固深度为隧道底部以下 2m 至地表以下 3m, 加固桩间距 1.2m, 加固后土体无侧限抗压强度 ≥ 1.5MPa, 渗透系数 ≤ 1 × 10⁻⁶ cm/s。

隧道场区地层主要为④₁ 层灰色淤泥质粘土、⑤₁ 层灰色粘土, 局部涉及⑤_{1i} 层灰色砂质粉土; 其中④₁ 层与⑤₁ 层为典型软粘性土层, 顶进阻力较小, 但存在强度低、渗透性差、含水量高、压缩性高、灵敏度高的工程特性, 且土体具触变性和流变性, 施工过程中易受扰动, 极易引发开挖面失稳, 是盾构施工变形控制的重点地层。

为全面监测地表变形, 布设纵向 + 横向地表竖向位移监测点: 沿盾构推进轴线布设纵向监测点, 点间距 5m; 每隔 48m 布设横断面竖向位移监测点, 每个横断面布设 10 个监测点, 横向点间距 5m, 监测点覆盖隧道轴线两侧各 20m 范围, 实现施工全过程的地表变形动态监测。

2.2 地表沉降变形特征

以现场实测的 DG255 横断面为典型分析对象, 绘制地表断面沉降槽形态图 (图 2.2), 对比 Peck 理论计算结果, 分析小曲率半径转弯隧道盾构施工的地表沉降变形特征, 结果表明: 小曲率转弯段的地表沉降规律与常规直线隧道存在显著差异, 且 MJS 加固法对土体变形具有良好的控制效果。

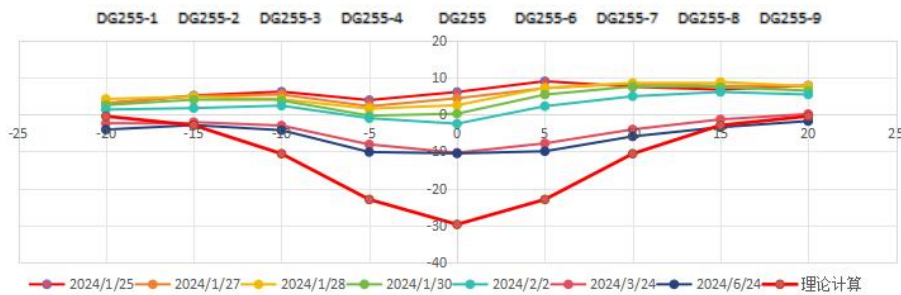


图 2.2 软土隧道小曲率段 DG255 横断面地表沉降槽形态与理论计算对比图

注: 横轴为监测点与隧道中心轴线的水平距离 (m), 纵轴为地表沉降量 (mm, 正值为隆起、负值为沉降); 曲线 1 为实测沉降曲线, 曲线 2 为 Peck 理论计算沉降曲线; DG255-1~DG255-9 为横断面横向监测点编号, 由隧道内侧至外侧依次分布。

与 Peck 理论计算结果相比, 小曲率半径转弯隧道盾构施工引发的沉降槽呈不对称分布, 最大地表变形始终位于隧

道内侧, 主要原因是小曲率转弯盾构施工中, 为保证盾构转向顺畅需进行微量超挖(本工程超挖量约 30mm), 导致隧道内侧地层损失率略高于外侧, 进而引发变形的不对称性。同时, 实测变形量较 Peck 理论计算值显著减小, 实测最大沉降量为 21.2mm, 较理论计算值 29.76mm 减小 28.7%, 主要因小曲率段施工前采用 MJS 加固法进行了全断面超前加固, 有效增强了土体结构硬度, 减小了土体的触变性与流变性, 从而降低了盾构掘进及盾尾通过后的土体变形量, 印证了 MJS 加固法在软土小曲率转弯隧道施工中的变形控制效果。

结合盾构施工的 5 个变形阶段, DG255 横断面的实测变形特征如下:

1 超前 + 到达变形阶段: 土体出现明显隆起, 且隧道曲线内侧隆起量远大于外侧, 内侧最大隆起量达 18mm, 外侧最大隆起量仅 8mm, 内侧为外侧的 2.25 倍。该现象由盾构机向前推进时土仓压力与推力失衡引发, 前期变形最大点位于隧道内侧, 反映出土体的挤压方向与盾构机的转向方向直接相关——盾构转弯时推进力主要作用于隧道内侧土体, 挤压方向与盾构转向内侧一致, 导致内侧土体受挤压程度显著大于外侧。

2 通过变形阶段: 盾构盾体通过监测断面时, 轴线位置及隧道内侧开始出现明显下沉, 沉降速率逐步提升。因盾构转弯过程中土体挤压作用, 隧道内侧土体前期积累的应力大于外侧, 盾体通过时土体应力释放, 内侧回落速率略大于外侧, 该阶段内侧平均沉降速率为 1.2mm/d, 外侧为 0.8mm/d。

3 盾尾过后变形阶段: 土体出现整体回落, 沉降量与沉降速率均达到最大值, 隧道内侧土体回落速度仍快于外侧, 但沉降槽整体呈现内外侧近似对称的姿态。该阶段内侧最大沉降量达 19.5mm, 外侧达 17.3mm, 主要因盾尾与管片间的施工间隙引发土壁向管片方向移动, 是地表沉降的关键阶段。

4 后期变形阶段: 土体表现为断面整体沉降, 沉降速率逐步放缓, 最终趋于稳定。因场区④1 层、⑤1 层软粘性土体强度低、含水量高、压缩性高的特性, 施工中被扰动的土体应力需缓慢调整至平衡状态, 固结过程引发地表持续沉降; 土体固结稳定后, 沉降槽两侧沉降量趋于对称, 内侧最终沉降量 21.2mm, 外侧 20.5mm, 二者差值较小, 但隧道内侧的扰动影响范围达隧道轴线外 25m, 远大于外侧的 18m。

整体而言, 随着盾构盾体通过监测断面, 地表沉降槽的断面形态由 W 形逐步变为 V 形, 该特征与魏浩基于 Mindlin 解析解推导出的小半径曲线隧道盾构施工变形规律高度一致。

3 结论

通过对软土地区小曲率半径转弯隧道盾构施工全过程的变形机理分析, 结合 Peck 理论计算与工程实例实测数据对比, 揭示了小曲率转弯段的土体扰动变形规律, 提出了监测

与施工的优化建议, 主要结论如下:

1 Peck 地表沉降槽理论可较好解释常规直线隧道盾构施工的变形规律, 但应用于软土地区小曲率半径转弯隧道时需加以改进, 理论预测公式中需着重考虑土层加固后的参数修正——针对 MJS 加固后的软土地层, 可引入加固后土体强度修正系数 k (本工程 $k=0.75$) 对沉降槽宽度系数 i 进行修正, 修正后 $i=k \times KH$, 能有效提高沉降预测的准确度。

2 软土地区小曲率半径转弯隧道盾构施工的土体变形速率在到达阶段至盾尾过后阶段(第二至第四阶段)最大, 是变形控制的关键阶段; 受软粘性土层触变性、流变性影响, 土体固结时间较长, 应力调整至平衡状态需经历长期过程, 因此加长后期变形阶段的监测周期尤为重要, 建议固结期监测频率不低于 1 次 / 3d, 直至地表沉降速率小于 0.1mm/d。

3 软土地区盾构开挖会改变土体原有应力状态, 导致土体渗透性与渗透系数发生变化; 土体固结稳定后, 隧道内侧与外侧的地表沉降量逐步接近, 但隧道内侧的扰动影响范围远大于外侧, 且小曲率转弯施工的超挖现象会加剧内侧变形。因此在监测过程中, 隧道内侧的环境安全应作为重点监测与巡视对象, 内侧监测点的布设范围应比外侧扩大 30% 以上, 确保及时捕捉土体变形特征。

本文仅针对曲率半径 115m 的软土盾构隧道开展实测分析, 未探究不同曲率半径(如 80m、150m)、不同加固方式对土体变形规律的影响, 研究成果的适用范围存在一定局限性。后续可开展多曲率半径、多加固方式的对比研究, 结合现场实测与数值模拟, 建立软土地区小曲率半径转弯隧道盾构施工的土体变形预测模型, 进一步完善变形控制理论与工程技术措施。

[参考文献]

[1] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]// Petrasovits G, Meesi J. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: Mexican Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1969: 225-290.

[2] 潘泓, 苏文渊, 翟国林, 等. 小曲率半径转弯隧道盾构施工扰动实测分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(04): 1024-1031. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0869.

[3] 魏浩. 小半径曲线隧道下穿建筑物引起地面沉降及对环境的影响研究 [D]. 常州: 常州大学, 2021. DOI: 10.27739/d.cnki.gjsgy.2021.000005.

[4] 韩焯. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.

作者简介: 王甲川, 1994.10.17, 男, 山西, 汉族, 大专, 助理工程师, 研究方向: 软土小曲率半径转弯隧道盾构施工扰动变形规律实测分析。