

软土隧道异常沉降原因分析及处置措施

谢发全, 李甲森

(佛山市地铁运营有限公司, 广东 佛山 528051)

摘要 软土具有高压缩性和低承载能力的特点, 软弱地层中的隧道极易发生异常沉降和管片病害, 对隧道的安全性和运营稳定产生不利影响。基于此, 本文以某地铁出入场线隧道工程为研究对象, 该出入场线隧道 CDK1+200 ~ CDK1+230 段在运营过程中出现明显异常沉降, 管片出现裂缝、错台、掉块、渗水和椭圆度超限等病害。在此基础上, 结合工程地质条件、周边环境和监测资料, 揭示了 MJS 桩基荷载集中效应、路面车辆荷载和突发性异常荷载等因素造成的异常沉降。基于成因分析, 提出隧道管片裂纹修复、椭圆度超限钢环加固和地表桩—板结构加固等针对性处理措施, 并结合结构计算, 对加装钢环、桩—板结构等进行受力分析, 验证其承载力。工程实践证明, 采取的处置措施能较好地控制隧道的沉降, 保证了隧道的安全运行, 对同类软弱地层的处理具有一定的借鉴意义。

关键词 软土隧道; 异常沉降; MJS 桩; 洞内加固; 桩—板结构加固

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.014

0 引言

随着城市轨道交通建设的快速发展, 在软土地基上施工的隧道越来越多。软粘土天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度差, 在隧道建设和运营期间极易发生隧道沉降、管片开裂等病害, 严重威胁隧道的安全与服役寿命。某地铁出入场线隧道持力层位于珠江三角洲软粘土地层, 在运营过程中隧道出现了异常沉降、椭圆超限和管片开裂等问题, 严重影响了地铁的正常运行。本文以该工程为例, 对软弱地层中出现的异常沉降原因进行了深入分析, 并提出相应的处理措施, 进行相关受力验算, 以证明其可行性, 以期对类似工程具有参考价值。

1 工程概况

某地铁出入场线为盾构隧道, 呈东西走向, 出场线全长 1 299.218 m, 入场线全长 1 305.546 m。该区间以一环高速和 10 kV 高压线塔为控制性建筑, 沿线 2 条 508 mm 高压燃气管道, 距现状地面埋深约 4 m, 与隧道斜交且位于隧道上方。出入场线始发段上为河口三角洲平原地貌, 地势低平, 原多为河涌、鱼塘, 现已填平为建设用地, 地面标高一般为 2 ~ 4 m, 河涌底部最低约为 -1.0 m。出入场线于 2022 年 12 月投入使用, 整体结构基本位于 <2-1B> 淤泥质土中, 隧道覆土厚度 4 ~ 10 m。截至 2023 年 6 月 14 日, 该隧道管片突发裂缝、渗漏水、

掉块等病害问题, 具体为出场线 17 环管片椭圆度超 20%, 8 环有 3 条及以上 ≥ 0.3 mm 纵向贯穿裂缝, 85 环有破损掉块; 入场线 1 环有同类纵向贯穿裂缝, 74 环有破损掉块, 其中 CDK1+200 ~ CDK1+230 区段沉降最大, 达 14.3 ~ 19.8 mm, 较其他区段数据高约 10 mm。

2 软土隧道异常沉降原因分析

2.1 MJS 桩荷载集中作用

出场线异常沉降段, 与建设期 MJS 桩地基加固的范围大致相同。在施工阶段, 因隧道下穿燃气管道, 为保护燃气管道, 采用 MJS 桩对此范围区域地基进行了加固处理, 并在其上浇注了混凝土面板, 以减少隧道施工对燃气管道带来的影响。隧道运营后 MJS 竖桩将上部燃气管道、土体等荷载集中传递到隧道, 造成隧道管片应力集中, 从而引起了隧道的不正常沉降和管片的损伤。现场勘查发现出场线 737 环 (CDK1+207) 的病害最为严重, 而 MJS 补强区域内的竖向桩正好位于此范围, 进一步证实了 MJS 桩的承载力集中是诱发隧道病害的一个主要因素^[1]。

2.2 地面车辆荷载作用

一环辅道是收费站入口的匝道, 坡度为 2.5%, 汽车行驶至该路段开始减速制动, 产生了较大竖、纵向荷载。荷载经道路结构传导到土体中, 改变了周围土体的受力状态, 造成了土体的压缩变形, 从而导致了

作者简介: 谢发全 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 城市轨道交通工程建设、维护维修。

隧道沉降、水平收敛异常^[2]。另外,重型车辆在下坡急停过程中所产生的瞬间纵向制动荷载,会对隧道结构造成多次冲击,长此以往,管片的疲劳破坏将进一步加重,进而引起裂纹的扩展和破坏范围的扩大^[3]。

3 软土隧道异常沉降处置措施及效果

3.1 洞内加固措施

1. 裂缝修复。按裂缝宽度、深度及渗漏情况针对性处理:缝宽 < 0.2 mm、缝深 < 3.5 cm且无渗漏者,仅持续监测; ≥ 0.2 mm或 ≥ 3.5 cm或有渗漏者,一般裂缝采用骑缝灌注刚性环氧树脂+粘贴芳纶布修复,有泥沙渗漏者先以快干水泥封堵再注亲水环氧泥浆; ≥ 0.3 mm纵向贯穿裂缝3条及以上或径向贯通裂缝 ≥ 1 条者,采用20mm厚钢环加固^[4]。

2. 椭圆度超限加固。为解决出场线椭圆度超限的问题,提出了如下处理方法:20% $<$ 椭圆度 \leq 30%时,采用20 mm厚钢环+地表微扰动灌浆;30% $<$ 椭圆度 \leq 50%时,采用20 mm厚带肋钢环+地表微扰动灌浆。钢环为Q355B钢材,5片焊接成环,锚栓用8.8级高强度钢材,管片与钢环间填充刚性环氧树脂;加劲肋布置于钢环腰部两侧,弦高 ≤ 150 mm。隧顶至隧底下6 m范围实施微扰动注浆,改善土体力学性质^[5]。

3. 钢环加固承载力计算。根据《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010-2010)裂纹验算公式,代入管片主筋 $\phi 18$ mm、屈服强度400 MPa等参数,得钢筋屈服时裂纹宽度 $W_{max}=0.36$ mm,现场9条裂纹 ≥ 0.36 mm,需补强加固。20 mm厚Q355B钢环(内径5 400 mm、宽度1 000 mm)屈服强度355 MPa,弹性模量206 GPa,经计算,钢环与管片共同承载时可承受上部荷载720 kPa,承载力提升53%,满足要求^[6]。

3.2 桩—板结构加固

1. 桩—板结构设计参数。一是桩—板结构板厚:0.6 m;二是框架主梁尺寸:KL1(型钢组合梁)BH=2.5 m \times 1.5 m(工字型钢H1150 mm \times 1 500 mm \times 30 mm \times 40 mm),KL2 BH=2.5 m \times 1.7 m(工字型钢H1400 mm \times 1 500 mm \times 40 mm \times 40 mm),其余主梁BH按2 000 mm \times 1 500 mm至3 200 mm \times 1 500 mm适配;三是次梁BH=0.8 m \times 1.5 m;四是承台尺寸:3 m(宽) \times 2.5 m(高);五是桩直径:1.6 m;桩长40 m左右,桩端以中风化泥质粉砂岩或中风化砂岩为持力层;六是搭板长度:6 m,搭板一侧搁置在桩板结构框梁牛腿上,起缓冲作用,减小桩板与道路之间的不均匀沉降。

2. 桩—板结构承载力计算。(1)荷载取值。一

是恒载:板及主要梁体自重容重 $\gamma=25.0$ kN/m³;0.1 m厚混凝土面层容重取25 kN/m³;0.1 m厚轻质混凝土容重取9 kN/m³,找坡2%;二是活载:汽车荷载按公路-I级取值;人群荷载按《公路工程技术标准(JTGB01-2014)》中取值,为3 kN/m²;三是地震作用:地震基本烈度为7度,设计地震分组为第一组,设计基本地震加速度为0.1 g。(2)桩基竖向承载力计算。根据地质勘察资料及相关规范,对桩基竖向承载力进行计算。以BK-3勘探孔为例,单桩竖向承载力特征值计算如下:单桩竖向极限承载力标准值 Q_{UK} 由侧阻力标准值 Q_{sk} 和端阻力标准值 Q_{pk} 组成,即:

$$Q_{uk}=Q_{sk}+Q_{pk} \quad (1)$$

式(1)中, Q_{sk} 为单桩总侧阻力标准值, Q_{pk} 为单桩总端阻力标准值。

侧阻力标准值 Q_{sk} 计算:

$$Q_{sk}=\sum q_{sik}l_i \quad (2)$$

式(2)中, q_{sik} 为第*i*层土的侧阻力特征值(kPa); l_i 为第*i*层土的厚度(m); u 为桩身周长(m), $u=\pi d$, d 为桩直径(m)。

根据地质资料,各土层的侧阻力特征值、厚度等参数如表1所示。

表1 各土层厚度及侧阻力特征值表

地层名称	地层厚度(m)	侧阻力特征值 q_{sik} (kPa)
粘性土	14.20	30.00
淤泥	6.20	16.00
粉土	3.30	60.00
细砂圆砾	3.50	18.00
圆砾	7.20	100.00
岩石	4.00	280.00

桩身周长 $u=\pi \times 1.6=5.024$ m。

代入数据计算各土层侧阻力:

一是粘性土: $q_{sik}l_i=30.00 \times 14.20 \times 5.024=2 138.69$ kN;二是淤泥: $16.00 \times 6.20 \times 5.024=498.38$ kN;三是粉土: $60.00 \times 3.30 \times 5.024=994.46$ kN;四是细砂圆砾: $18.00 \times 3.50 \times 5.024=316.67$ kN;五是圆砾: $100.00 \times 7.20 \times 5.024=3 617.28$ kN;六是岩石: $280.00 \times 4.00 \times 5.024=5 627.52$ kN,单桩总侧阻力标准值 $Q_{sk}=2 138.69+498.38+994.46+316.67+3 617.28+5 627.52=13 193.00$ kN。

端阻力标准值 Q_{pk} 计算:

$$Q_{pk}=q_{pk}A_p \quad (3)$$

式 (3) 中, qpk 为桩端土的端阻力特征值 (kPa); A_p 为桩端面积 (m^2), $A_p = \pi d^2/4$ 。

桩端持力层为中风化泥质粉砂岩, 其端阻力特征值 qpk 取 3 000 kPa (根据地质资料及相关规范确定)。桩端面积 $A_p = \pi \times 1.62^2/4 = 2.0106 m^2$, 端阻力标准值 $Q_{pk} = 3000 \times 2.0106 = 6031.80 kN$, 单桩竖向极限承载力标准值 $Q_{uk} = 1.3 \times 6031.80 = 7841.34 kN$, 单桩竖向承载力特征值 $R_a = Q_{uk}/k$, 其中 k 为安全系数, 取 2.0。则 $R_a = 7841.34/2.0 = 3920.67 kN$, 根据 Midascivil 软件计算结果, 各支座最大反力如表 2 所示。

表 2 各支座最大反力表

支座编号	最大支座反力 (kN)
1	12 186
2	14 992
3	13 221
4	7 638
5	9 490
6	14 497
7	10 318
8	5 871

通过分析, 得出了支座 4、8 的最大反力为 7 638 kN、5 871 kN, 比单桩极限承载力 9 612.40 kN 小, 可以采用单桩基础; 为了保证桩基的受力性能, 需要在桩基基础上增设双桩承台。

框架梁承载力计算。采用 Midascivil 软件对桩—板结构框架梁进行承载力计算, 主要框架梁弯矩计算结果如表 3 所示。

表 3 主要框架梁截面尺寸及弯矩计算结果表

梁编号	截面尺寸 (B*H, mm)	支座弯矩 (kN·m)	跨中弯矩 (kN·m)
KL1	2 500*1 500	-21 368	6 030
KL2	2 500*1 800	-30 860	12 412
KL3	2 000*1 500	-7 966	6 854
KL4	2 500*1 500	-13 819	10 972
KL5	3 000*1 500	-12 769	12 568
KL6	3 200*1 500	-13 842	13 186

框架梁采用 C40 混凝土, 其抗压强度标准值 $f_{ck} = 26.8 MPa$, 抗拉强度标准值 $f_{tk} = 2.40 MPa$, 弹性模量 $E = 3.25 \times 10^4 MPa$, 泊松比 0.2。根据混凝土结构设计规范, 对其进行了抗弯承载力和抗剪承载力分析, 并对其

极限承载力进行了校核, 得到了其极限承载力, 其最大裂缝宽度都在 0.2 mm 以内, 最大挠度为 16.1 mm, 在规范范围内。

3. 桩—板结构施工要点。施工前备案燃气管道并制定保护措施; 桩基采用钢护筒灌注法 (护筒下入 6 m, 荷载 100 kN); 加强地表沉降、隧道沉降等监控; 桩板开挖分段进行并及时回填, 避免土体卸荷过度。

3.3 处置效果监测与分析

采用洞内钢环 + 微扰动注浆 + 桩—板结构综合治理后, 连续观测 2 年, 隧道沉降速度显著降低并趋于稳定, 累计沉降约 4 mm, 水平收敛基本稳定; 管片裂纹无扩大、无新增, 椭圆及漏水病害解决, 承载能力显著提升, 处置效果良好。

4 结束语

软土隧道的异常沉降是一种较为复杂的工程地质问题, 它与地质条件、施工技术和周围环境等因素有关。本文以某地铁出入场线隧道为研究对象, 在对其异常沉降产生原因进行剖析的基础上, 提出“洞内加装钢环 + 地表微扰动注浆加固、桩—板结构”的综合治理方案, 并对钢环加固、桩—板结构承载力进行了计算验证。工程实践证明, 在 MJS 桩基集中荷载、软弱土层及地面车辆荷载作用下, 该方式取得了较好的效果, 使隧道的沉降、椭圆得以有效控制, 从而保证了隧道的安全与运营。随着我国城市轨道交通的快速发展, 软土隧道所处的环境越来越复杂, 迫切需要对其进行深入的研究, 开发出更加高效、经济的加固新方法, 从而提升我国软土隧道的设计与建造水平, 确保我国地铁的安全运营。

参考文献:

[1] 付智源. 高速公路软基处治与沉降监测分析[J]. 山西交通科技, 2020(01):43-45.
 [2] 宋学庆. 高速公路软基路段沉降处治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
 [3] 孙浩. 超高速列车荷载下软土隧道长期沉降预测与加固设计研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
 [4] 熊禹. 间断性地质差异软土中隧道不均匀沉降机理和监测研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
 [5] 赵志浩, 刘帅. 不同形式隧底加固对软土隧道长期变形的研究[J]. 水利规划与设计, 2024(10):115-119, 127.
 [6] 余君宇. 软土地区运营期盾构隧道不均匀沉降规律分析及注浆技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.