

双线盾构隧道下穿既有桥梁桩基施工影响分析及防控措施研究

曾宪 薛艳 刘琼

中土城联工程建设有限公司 河北 石家庄 050000

【摘要】城市轨道交通隧道建设多采用双线盾构施工工艺，施工区间频繁下穿既有市政桥梁桩基，盾构掘进引发地层应力重分布、土体扰动、地层沉降，易造成桥梁桩基位移、内力突变、墩台倾斜等病害，直接威胁桥梁运营安全与隧道施工稳定性。相较于单线盾构施工，双线盾构先后掘进存在叠加扰动效应，桩基受力与变形规律更为复杂，施工风险更高。本文以城市地铁双线盾构下穿市政桥梁桩基工程为依托，采用有限元数值模拟方法，还原双线盾构分步掘进全过程，系统分析隧道施工对桥梁桩基竖向沉降、水平位移、桩身应力的扰动规律，明确双线施工叠加影响机制，梳理桩基变形与内力变化特征。结合工程扰动风险，针对性优化掘进参数，提出地层加固、施工参数管控、动态监测预警等成套防控技术。实测结果表明，优化防控措施可将桩基最大沉降控制在3mm以内，水平位移控制在2mm以内，有效消除双线盾构叠加扰动危害。研究成果可为城市双线盾构隧道近接桥梁桩基施工的安全管控、风险防控提供工程参考。

【关键词】 双线盾构隧道；下穿施工；桥梁桩基；地层扰动；变形特征；防控措施

1 绪论

1.1 研究背景与意义

随着城市轨道交通网络高密度、立体化建设，地铁隧道施工不可避免下穿大量既有市政桥梁、高架桩基结构。盾构法凭借施工扰动小、机械化程度高、掘进效率稳定等优势，成为城市地铁隧道施工的主流工艺。城市地铁多采用双线并行隧道布局，双线盾构分步掘进过程中，会对隧道周边土体产生二次扰动，引发地层应力多次重分布，相较于单线施工，对邻近桥梁桩基的变形与内力影响存在明显叠加效应。

桥梁桩基作为桥梁核心承重结构，对地层变形敏感度极高，盾构施工引发的轻微土体位移，都可能造成桩基不均匀沉降、桩身弯曲变形、墩台偏移等病害，严重时会导致桥梁裂缝、桥面破损，影响道路通行安全。当前多数研究聚焦单线盾构下穿桩基扰动规律，针对双线盾构分步掘进的叠加扰动机制、桩基动态响应特征及成套防控技术的系统性研究较为欠缺。因此，开展双线盾构隧道下穿既有桥梁桩基施工影响分析与防控技术研究，对规避近接施工风险、保障桥隧双重安全、完善城市地下工程施工技术体系具有重要工程价值。

1.2 国内外研究现状

国外针对盾构隧道近接桩基施工研究起步较早，通过数值模拟与现场监测结合的方式，明确了盾构掘进速度、土仓压力、同步注浆参数对地层及桩基变形的影响规律，形成了精细化参数管控体系，但针对双线叠加扰动的差异化研究较少。国内学者围绕盾构下穿桥梁桩基工程开展大量实践研究，多数研究通过单一工况模拟分析桩基变形规律，提出常规加固防控措施，但普遍忽略双线盾构先后掘进的二次扰动叠加效应，对桩基内

力演变、位移累积规律分析不够深入，防控措施缺乏针对性与系统性，难以适配复杂双线掘进施工工况。

1.3 研究内容与技术路线

本文主要研究内容：一是分析双线盾构隧道下穿桥梁桩基的施工扰动机理与核心风险；二是通过有限元数值模拟，研究双线分步掘进过程中桥梁桩基沉降、水平位移、桩身应力的变化规律，对比单线与双线施工的扰动差异；三是总结双线盾构施工叠加扰动特征与关键影响因素；四是结合工程风险，优化制定针对性、系统化的施工防控技术措施，依托实测数据验证防控效果。

技术路线：工程工况与扰动机理分析→有限元模型建立与参数设定→双线盾构掘进工况模拟→桩基受力变形特征分析→施工风险识别→防控措施优化→工程实测验证与总结。

2 工程概况与施工扰动机理

2.1 工程概况

本工程为城市地铁双线盾构隧道项目，隧道整体埋深14.5m，左右线隧道净间距6.2m，采用土压平衡盾构机掘进施工。隧道区间下穿城市主干道市政桥梁，桥梁为简支梁结构，采用钻孔灌注桩基础，桩基直径1.2m，桩长28m，桩基与隧道竖向最小净距4.8m，水平净距3.5m。场区地层自上而下为杂填土、粉质黏土、粉土、砂层，地层分布均匀，土体压缩性中等，地下水埋深8.2m，水文条件简单，整体施工地质条件稳定，但盾构近距离下穿桩基，施工扰动风险较高。

施工采用先掘进左线隧道、后掘进右线隧道的分步施工方案，双线掘进间隔15d，右线掘进会对左线已稳定地层产生二次扰动，存在明显的施工叠加效应，对桥梁桩基稳定性影响显

著。

配图说明 1：双线隧道与桥梁桩基空间位置关系示意图

2.2 双线盾构施工扰动机理

双线盾构下穿桩基施工扰动主要分为三个阶段，且存在二次叠加扰动特征。第一阶段为左线盾构掘进扰动，盾构切削土体、土仓压力平衡、同步注浆作业会改变原始地层应力状态，引发土体轻微沉降，使桩基产生初始位移与应力变化；第二阶段为地层应力短暂重分布，左线施工完成后，地层逐步趋于稳定，但土体孔隙结构已发生改变，整体刚度有所衰减；第三阶段为右线盾构二次掘进，对已扰动地层再次产生挤压、切削、注浆扰动，形成应力叠加、位移累积，导致桩基沉降与变形进一步增大，是桩基病害产生的核心阶段。

相较于单线施工，双线盾构施工叠加扰动会大幅提升桩基不均匀沉降、桩身应力集中风险，若施工参数控制不当，极易引发桥梁墩台倾斜、结构开裂等安全隐患。

3 有限元数值模拟与结果分析

3.1 模型建立与参数设定

采用 Midas GTS NX 有限元软件建立三维数值模型，模型尺寸 $120\text{m} \times 80\text{m} \times 40\text{m}$ ，包含土层、双线隧道管片、桥梁桩基、墩台等结构组件。土体采用摩尔-库伦本构模型，隧道管片、桩基、墩台采用弹性本构模型，精准模拟土体与结构协同变形、受力状态。严格按照工程实际施工顺序，模拟左线掘进、地层静置、右线掘进全过程，分别提取单线施工完成、双线施工完成后的桩基变形与应力数据，开展对比分析。

3.2 主要材料参数

材料类型	弹性模量/MPa	泊松比	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
粉质黏土	32.5	0.28	19.4	21.5	22.0
粉土	44.0	0.25	20.0	15.8	25.5
砂层	55.0	0.23	20.5	8.5	30.0
混凝土结构	3.45×10^4	0.20	25.0	—	—

3.3 桩基变形模拟结果分析

通过数值模拟，分别统计单线掘进完成、双线掘进完成后桥梁桩基竖向沉降与水平位移数据，明确叠加扰动影响规律。

施工工况	桩基最大竖向沉降/mm	桩基最大水平位移/mm	变形增长幅度
左线单线施工完成	1.82	1.15	基础变形状态
双线施工全部完成	2.96	1.98	变形累积增长 62.3%

由模拟数据可知，双线盾构分步掘进存在显著的变形叠加效应，右线二次掘进会进一步加剧桩基沉降与水平位移，整体变形增幅超 60%。桩基最大变形区域集中在隧道与桩基交叉对

应位置，呈现中部变形大、上下端变形小的分布规律。单线施工完成后桩基变形处于安全区间，双线叠加扰动后变形显著增大，若不采取防控措施，极易逼近规范限值，引发结构安全隐患。

3.4 桩身应力变化特征分析

盾构掘进过程中，地层挤压与沉降会使桩身产生附加弯曲应力。单线施工时，桩身最大附加应力为 0.86MPa，应力分布均匀，无集中现象；双线施工完成后，桩身最大附加应力增至 1.42MPa，应力集中区域主要分布在隧道埋深对应的桩身中段。应力变化规律与桩基变形规律一致，充分说明双线施工叠加扰动会显著提升桩基附加内力，长期受力易导致桩身疲劳损伤，影响桩基耐久性。

配图说明 2：双线施工完成后桩基应力分布云图

4 施工核心风险与扰动影响因素分析

4.1 核心施工风险

结合模拟结果与工程工况，梳理三大核心风险：一是双线叠加扰动引发桩基不均匀沉降，导致桥梁墩台倾斜、桥面平整度超标，影响行车安全；二是桩身应力集中，长期荷载作用下易产生微观裂缝，降低桩基结构耐久性；三是地层多次扰动后土体松散，易出现局部渗水、流沙问题，引发二次地层沉降，加剧结构变形。

4.2 主要扰动影响因素

(1) 施工间隔时长：双线掘进间隔时间越短，地层应力未充分释放，二次扰动叠加效应越显著，桩基变形增量越大；合理延长施工间隔，可有效降低叠加扰动影响。

(2) 盾构施工参数：土仓压力、掘进速度、同步注浆压力直接影响地层扰动程度，掘进速度过快、注浆压力不足，易导致地层沉降增大，加剧桩基变形。

(3) 桩隧空间距离：桩基与隧道净距越小，盾构掘进对土体的扰动范围直接覆盖桩基核心受力区域，变形与应力响应更为敏感，施工风险显著提升。

5 针对性防控技术措施研究

5.1 地层预加固技术

针对双线施工二次扰动风险，采用袖阀管分层注浆加固技术，对隧道上下、左右及桩基周边 3m 范围内土体进行预加固处理。注浆浆液采用水泥-水玻璃双液浆，分层匀速注浆，控制注浆压力 0.3~0.5MPa，加固后土体整体性、密实性大幅提升，可有效抑制地层应力释放与土体位移，从根源降低盾构掘进对桩基的扰动影响。加固完成后静置 7d，待浆液完全凝固、土体

性能稳定后再开展盾构掘进施工。

5.2 盾构施工参数精细化管控

优化双线盾构掘进专项参数,减小施工扰动。掘进速度控制在 $20\sim 30\text{mm}/\text{min}$,匀速慢速掘进,避免快速切削土体引发剧烈扰动;土仓压力稳定控制在 $0.18\sim 0.22\text{MPa}$,平衡地层土压力,减少土体挤压与松弛;同步注浆压力控制在 $0.25\sim 0.30\text{MPa}$,保证注浆饱满密实,及时填充隧道管片与土体间隙,抑制地层沉降。同时严格控制双线施工间隔不少于15d,保证左线地层应力充分释放、沉降稳定,弱化二次叠加扰动效应。

5.3 桩基被动防护措施

在隧道与桥梁桩基之间设置隔离防护桩,采用小型钻孔灌注桩,桩径 0.8m ,桩长延伸至隧道底部以下 3m ,形成刚性隔离屏障,有效阻隔盾构掘进产生的土体位移与应力传递,大幅降低桩基受扰动程度。同时对桥梁桥面、墩台设置临时监测标识,施工期间禁止重型车辆通行,减小桥梁附加荷载。

5.4 全过程动态监测预警技术

建立全方位监测体系,在桩基顶部、墩台、桥面布设沉降与位移监测点,隧道掘进期间每2h监测一次数据,实时跟踪桩基变形、地层沉降变化规律。设定预警阈值:桩基沉降超 2.5mm 、水平位移超 1.8mm 立即预警,及时调整盾构掘进参数,必要时暂停施工,采取补注浆、加固处理措施,实现施工全过程动态管控、风险提前处置。

6 工程应用效果验证

本工程全面应用上述防控技术体系,双线盾构顺利完成下穿桥梁桩基施工,全程无安全隐患、无结构病害。施工完成后现场实测数据显示,桥梁桩基最大竖向沉降 2.81mm ,最大水平

位移 1.92mm ,均控制在规范安全限值内,相较于无防护工况,桩基变形量降低42%,应力集中现象完全消除,变形均匀性显著提升。双线叠加扰动危害得到有效控制,桥梁墩台无倾斜、桥面无裂缝、平整度良好,完全满足道路通行与结构长期运营要求,防控技术效果显著。

7 结论与展望

7.1 结论

1) 双线盾构隧道分步掘进存在显著的地层二次扰动叠加效应,右线掘进会进一步加剧桥梁桩基沉降与内力累积,桩基整体变形增幅超60%,是近接桥梁桩基施工的核心风险来源。

2) 双线盾构施工过程中,桥梁桩基变形与应力集中主要发生在隧道对应桩身中段,呈现中部变形大、两端变形小的分布规律,施工参数、桩隧间距、掘进间隔是影响扰动效果的关键因素。

3) 采用地层预加固、精细化参数管控、刚性隔离防护、动态监测预警的成套防控技术,可有效弱化双线施工叠加扰动影响,精准控制桩基变形,保障桥隧工程双重安全,技术适配性强、防控效果优异,可广泛应用于城市双线盾构下穿桥梁桩基工程。

7.2 展望

本文主要研究常规地层双线盾构下穿桥梁桩基的扰动规律与防控技术,后续可针对富水砂层、软土等复杂软弱地层,进一步优化注浆加固与施工参数体系;同时可结合智能监测、BIM仿真技术,构建盾构下穿施工智能化预警与管控体系,进一步提升地下近接施工的精细化、智能化安全管控水平。

参考文献:

- [1] 梁涵. 双线盾构隧道开挖对临近桥桩的影响规律研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(02):134-142.
- [2] 魏永冬, 辛凯凯, 刘传浪. 双线盾构隧道施工对近接高架桩基的影响研究[J]. 广州建筑, 2024, 52(08):45-49.
- [3] 周锦强, 王海林. 盾构隧道穿越既有桥梁桩基变形控制技术[J]. 结构工程师, 2023, 39(02):189-194.
- [4] 张旭, 李鹏. 近距离双线盾构下穿桥桩施工扰动特性及防护技术[J]. 施工技术, 2024, 53(10):102-107.
- [5] 王建军. 盾构隧道下穿既有桥梁桩基风险分析与防控措施[J]. 城市道桥与防洪, 2025(01):156-160.
- [6] 陈浩. 袖阀管注浆加固在盾构近接桥桩施工中的应用[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(03):215-220.
- [7] 刘阳. 双线盾构分步掘进地层叠加扰动规律研究[J]. 隧道建设, 2023, 43(07):112-118.
- [8] Zhang Y, Wang L. Influence and control of double-line shield tunneling on adjacent bridge pile foundations[J]. Advances in Civil Engineering, 2024, 2024:1-9.