

地铁出入口顶管下穿运营高架桥桩基变形与受力特性研究

杜龙才

云南省交通运输综合行政执法局工程质量监督支队, 云南 昆明

收稿日期: 2025年7月20日; 录用日期: 2025年8月10日; 发布日期: 2025年8月22日

摘要

本文依托实际工程, 采用通用岩土有限元软件建立三维有限元模型, 模拟顶管下穿运营高架桥梁桩基的全过程。依托工程中地下通道段长81.21 m, 地下埋深约10.5 m, 采用顶管法施工, 距离最近桥墩仅5.4 m。模型考虑地层与结构相互作用, 采用修正摩尔-库伦弹塑性本构模型模拟土层, 弹性模型模拟桥梁桩基及管片衬砌, 施加自重、上部结构恒载及掌子面压力, 约束模型侧面水平位移和底面全部位移, 地表自由。本文分析了顶管施工引起的地层变形、桥梁基础位移及桩基受力变化, 并与安全控制标准对比, 核对了桥梁桩基的安全性, 对类似工程的安全性评价具有一定借鉴性。

关键词

顶管下穿, 运营桥梁, 桩基变形, 数值模拟, 安全性评价

Study on Deformation and Mechanics of Operational Viaduct Piles under Metro Entrance Pipe Jacking

Longcai Du

Engineering Quality Supervision Detachment, Yunnan Provincial Transportation Integrated Law Enforcement Bureau, Kunming Yunnan

Received: Jul. 20th, 2025; accepted: Aug. 10th, 2025; published: Aug. 22nd, 2025

Abstract

Based on an actual project, this paper uses general geotechnical FEM software to establish a 3D FEM

文章引用: 杜龙才. 地铁出入口顶管下穿运营高架桥桩基变形与受力特性研究[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 2004-2017.
DOI: 10.12677/hjce.2025.148219

model, simulating the full process of pipe jacking underpassing operational viaduct piles. The project's underground passage is 81.21 m long, buried ~10.5 m deep, constructed by pipe jacking, and only 5.4 m from the nearest pier. Considering soil-structure interaction, the model adopts modified Mohr-Coulomb elastoplastic model for soil, elastic model for bridge piles and segment linings, applies self-weight, superstructure dead load, and face pressure, with constrained lateral displacement of sides, full displacement of bottom, and free ground surface. It analyzes stratum deformation, bridge foundation displacement, and pile force changes induced by pipe jacking, compares with safety criteria to verify pile safety, providing reference for similar projects' safety evaluation.

Keywords

Pipe Jacking Underpassing, Operational Bridge, Pile Foundation Deformation, Numerical Simulation, Safety Evaluation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 工程概况

1.1. 地铁站概况

某地铁站 A 主体沿某快速干线方向呈南北向布置。车站西、北侧有某国际酒店用品城及城中村, 南侧为市政大道, 东侧有市政大桥及其收费站, 车站周边规划以金融商业用地、居住用地、教育用地及防护绿地为主。

地铁 A 站为地下四线越行车站, 车站主体总长 465.35 m, 标准段宽为 34.1 m, 覆土厚度约 3 m, 为地下三层现浇钢筋混凝土框架结构; 停车线主体总长 414.7 m, 标准段宽为 13.2 m, 覆土厚度约 18.7 m, 主体结构为地下一层现浇混凝土结构; 车站及停车线主体均采用明挖法施工, 围护结构采用 1.2 m 宽连续墙。车站共设 5 个通道 7 个出入口、5 个安全出入口及 5 组风亭, 其中通道出入口、3、4 号安全出入口及 3 号风亭为外挂设置, 其它均为顶出设置。

拟建场地在市政大道与快速高架干线交叉口东、南象限的地块内, 规划地面高程约为 6.65 m~7.68 m, 地势较为平坦。

1.2. 顶管概况

拟建 I 号出入口外挂于车站东侧, 分设 Ia、Ib 号出入口, Ia 号口靠近车站主体东侧设置, Ib 号口往东跨过快速干线(高架桥)在桥东路路边设置, 均为地下一层箱型结构, 采用明挖法施工, Ia~Ib 通道段总长 81.21 m, 为地下一层箱型结构, 宽 7.7 m, 高 5.1 m, 地下埋深约 10.5 m, 采用顶管法施工。

1.3. 顶管周边环境及建构物概况

Ia~Ib 通道下穿快速干线高架桥, 高架桥为地面板梁结构, 钻孔灌注桩基础, 桩长约 21~43 m, 桩径 1.2、1.5、1.8 米, 桩端进入中、微风化岩层, 墩柱 0.75 米 × 1.3 米, 为单桩单柱, 桩基距离通道约为 5.4 m; 通道的东端为南方五金酒店用品城, 距离通道约 8.7 m, 为地面 2 层砼框架结构, 预应力管桩基础, 桩长约 15~18 m, 桩径 0.3、0.4 m。

2. 数值分析模型

2.1. 建模思路

地下通道的开挖支护、衬砌等施工打破了原有的地层平衡,使得地层内的原始地应力场发生了改变,并逐渐向一个新的平衡过渡[1]。在这个过程中,失衡的地应力由上往下从地表传递到了通道结构,相反整个地层的变形则从通道的顶面延伸至地表,进而引起地表及地表上既有建筑物产生位移和变形[2]。在施工过程中,开挖卸载会导致开挖面土体向顶管内移动、管片衬砌背后的空隙闭合也会对地层造成扰动[3]。

地铁 A 站 I 号顶管通道下穿快速路高架桥,其中距离隧道最近的桥墩仅 5.4 m,顶管施工难免会对桥梁造成影响,为此建立模型用于模拟顶管下穿高速桥梁的全过程,数值分析顶管施工对地层及地表既有桥梁的扰动情况,并通过后期施工阶段对桥梁的变形监测数据验证模型的合理性和准确度[4]。

2.2. 计算模型

采用通用有限元数值分析软件建立尺寸为 50 m×80 m×60 m 的整体模型,见图 1,采用计算精度较高的六面体单元进行网格划分,模型单元数量约 12.5 万个。顶管通道顶部埋深 5.2 m,为模拟施工过程,顶管按 2 m 一个节段进行均分,采用生死单元技术模拟顶进过程,见图 2。地层厚度根据地质纵断面进行模拟,桥墩及顶管混凝土结构变形处于弹性范围之内。

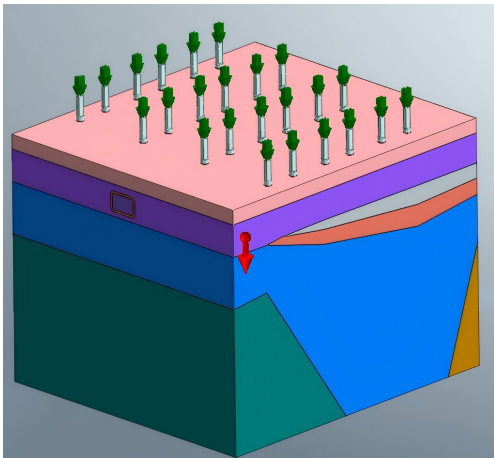


Figure 1. Overall model schematic
图 1. 整体模型示意图

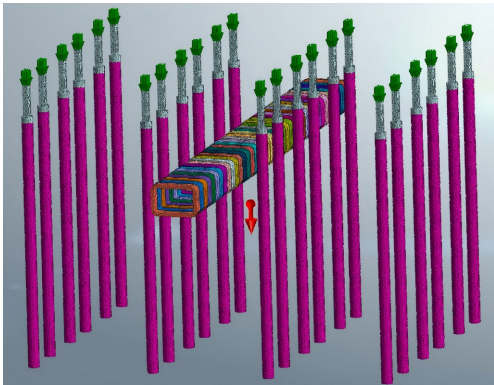


Figure 2. The spatial relationship between piers and pipe jacking tunnels
图 2. 桥墩与顶管通道空间关系示意图

2.3. 模型参数及荷载

(1) 材料本构关系

各土层采用修正摩尔 - 库伦本构模型，以准确分析土体的弹塑性力学行为，而桥墩和桩基、管片衬砌均为混凝土材料，采用弹性本构即可，结合勘察成果中的地质类型、地层参数、土工试验报告等，各类材料的具体参数见表 1：

Table 1. Material parameters table
表 1. 材料参数表

材料	密度/ $\text{KN}\cdot\text{m}^{-3}$	压缩模量/Mpa	泊松比	粘聚力/Kpa	内摩擦角/ $^{\circ}$	孔隙比
素填土	18.5	1.5	0.35	12	7	0.468
淤泥质粉细砂	18.0	2.5	0.32	3	22	
粉质黏土	19.4	4.8	0.3	30	24	0.452
全风化泥质粉砂岩	21.5	6	0.3	35	25	0.375
强风化泥质粉砂岩	21.5	8	0.3	28	39	0.351
中风化泥质粉砂岩	25	30	0.28	200	39	
桥墩桩基	25.5	31,500	0.2			
管片	25.5	32,500	0.2			

(2) 计算荷载

① 自重

根据不同材料的质量密度对整个模型施加自重，计算分析过程中程序自动考虑。

② 上部结构恒载

顶管所下穿的某快速路高架桥采用连续板结构，桥面全宽 51.5 m，对桥梁上部结构荷载统计分析，上部结构传至桥墩顶部的集中力取 5000 KN。

③ 掌子面压力

顶进过程中掌子面土体将受到一定的压力，结合类似项目计算分析经验，土仓压力取 150 Kpa。

(3) 边界条件

模型侧面和底面为位移边界，模型两侧的位移边界条件只约束水平移动，模型底部位移边界为固定边界，约束其水平移动和垂直移动。地表作为模型上边界，为自由边界[5]。

桥梁桩基采用 Pile 单元，桩土界面参数见表 2：

Table 2. Pile-soil section parameter table
表 2. 桩土界面参数表

部位	Kt/Gpa	Kn/Mpa	c/Kpa	σ /Kpa
桩侧界面	0.03	1.0	60	70
桩端界面	1.0	1.0	500	700

3. 有限元分析结果

3.1. 安全控制标准

根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3362-2019) [5]，墩台的沉降应符合下列规定：

- (1) 相邻墩台间不均匀沉降差值(不包括施工中的沉降), 不应使桥面形成大于 0.2%的附加纵坡(折角)。
- (2) 超静定结构桥梁墩台间不均匀沉降差值, 还应满足结构的受力要求。

针对地铁下穿公路桥梁时桥梁容许变形, 目前的公路行研的相关规范中, 没有相关的规定可以参考, 本文结合类似工程经验, 拟定地铁下穿高速桥梁段的安全控制标准如下:

- (1) 因纵向相邻桥墩基础不均匀沉降产生的纵坡不大于 0.2%, 且沉降量不大于 40 mm;
- (2) 桥梁基础的横向不均匀沉降差值不大于 5 mm, 且盖梁的受力应满足要求。

3.2. 地层、地表竖向变形分析

根据建立的顶管与桩基的模型和计算结果, 分析顶管推进下穿某快速路桥桩基时地表的竖向变形特征。顶管至桥墩附近的地面及桩顶竖向位移见图 3、图 4, 顶管顶进约 40 m 地面及桩顶竖向位移见图 5、图 6, 顶管穿过桥梁范围后地面及桩顶竖向位移见图 7、图 8。

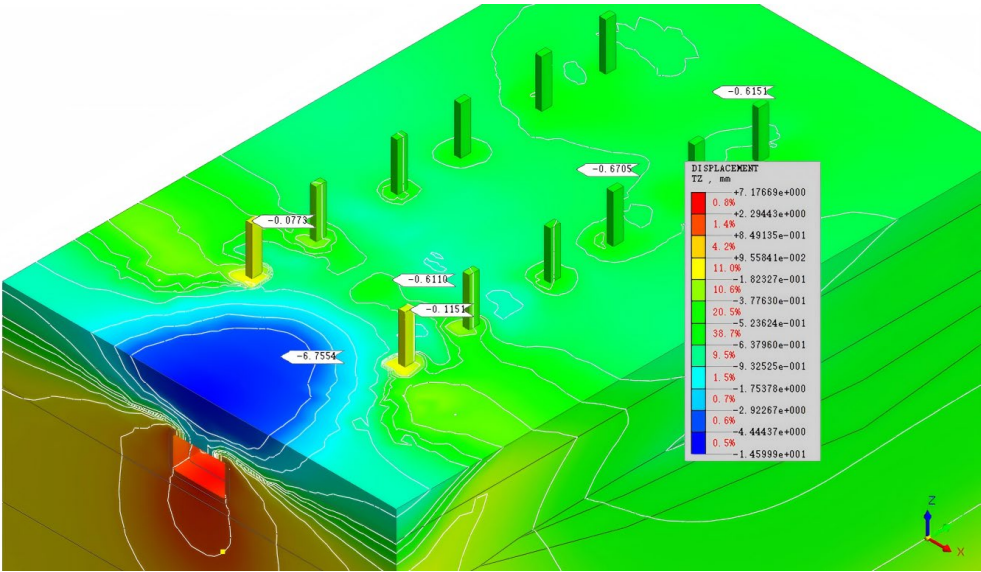


Figure 3. Ground and pile top vertical displacement on starting to pass under bridge piles (mm)
图 3. 开始从桥梁桩基下穿过时地面及桩顶竖向位移(mm)

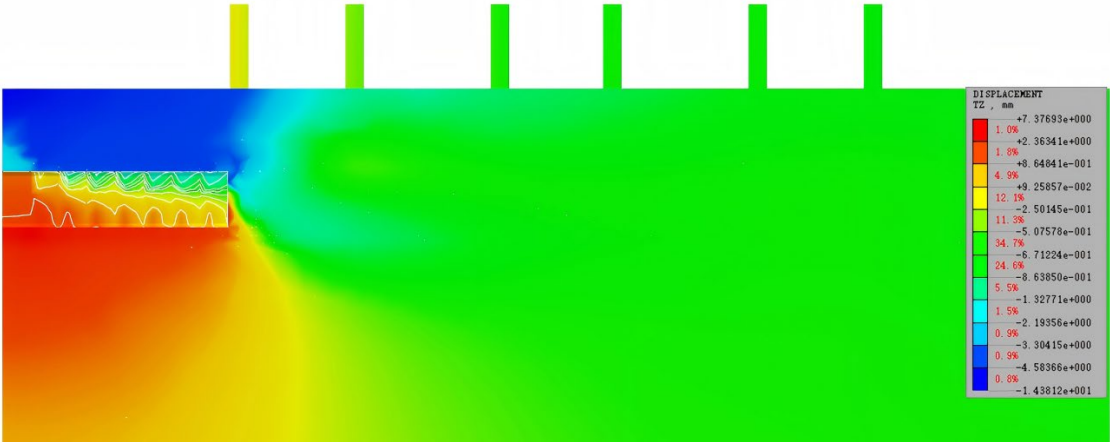


Figure 4. Longitudinal section of vertical displacement on starting to pass under bridge piles (mm)
图 4. 开始从桥梁桩基下穿过时竖向位移纵断面图(mm)

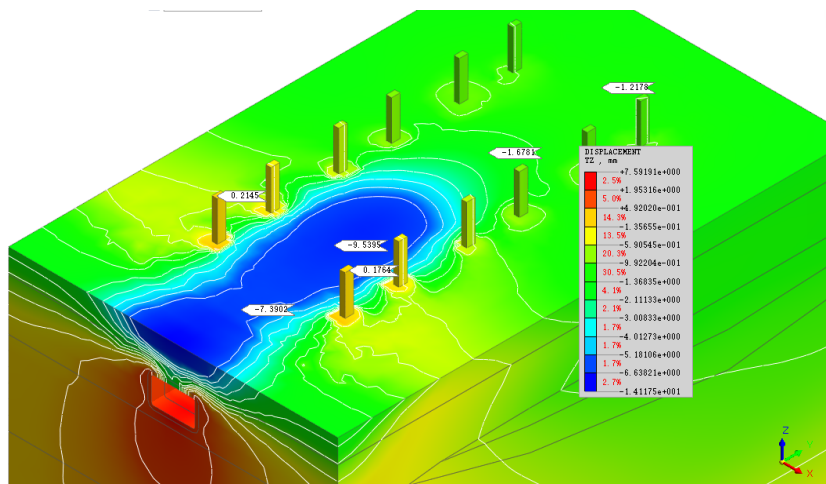


Figure 5. Vertical displacements at ground surface and pile head when the pipe jacking reached approx. 40 m (mm)

图 5. 顶进约 40 m 时地面及桩顶竖向位移(mm)

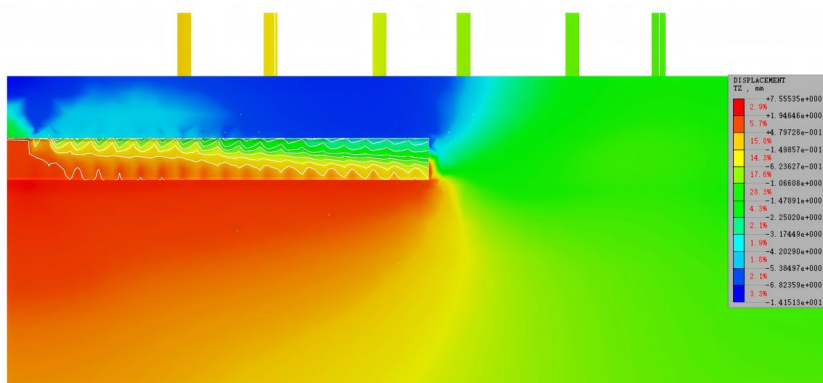


Figure 6. Profile diagram of vertical displacement when pipe jacking reached approx. 40 m (mm)

图 6. 顶进约 40 m 时竖向位移纵断面图(mm)

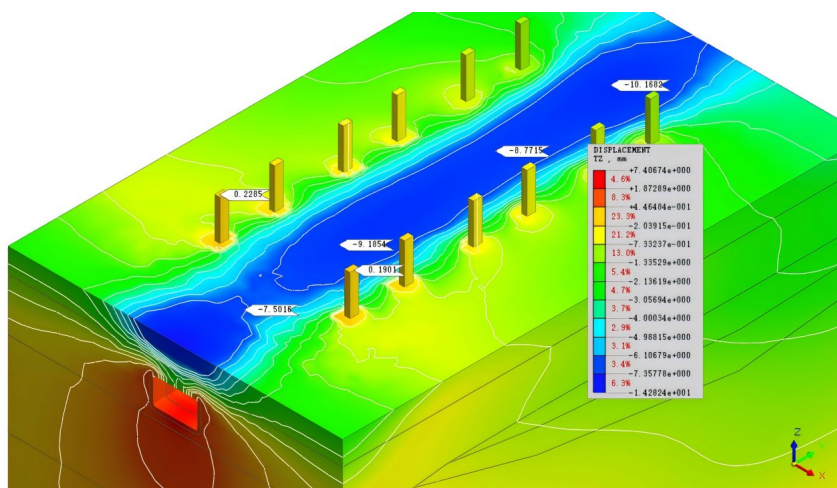


Figure 7. Ground and pile top vertical displacement after fully passing under bridge piles (mm)

图 7. 全部穿过桥梁后桥梁桩基下方时地面及桩顶竖向位移(mm)

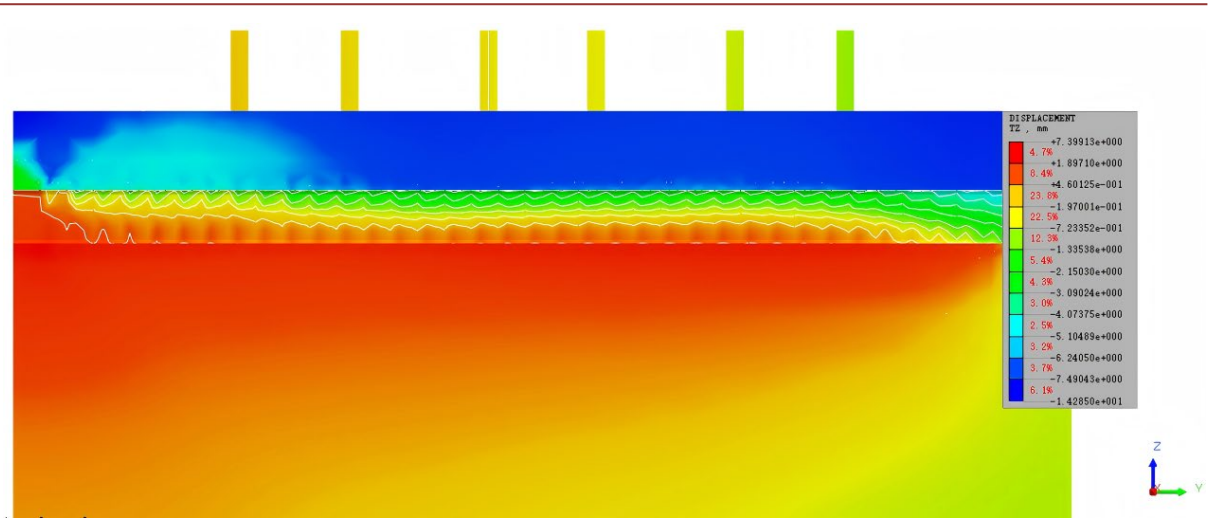


Figure 8. Longitudinal section of vertical displacement after full passage under bridge piles (mm)
图 8. 全部穿过桥梁后桥梁桩基下方时竖向位移纵断面图(mm)

为监控顶管穿过桥梁全过程的地面位移，在地表选取了沿顶管行程方向的 P1~P10 共 10 个位移监测点，见图 9，各监测点数据表明，顶管推进过程中地表位移变化规律明显，桥梁范围内最大位移值出现在 P7 点，为 10 mm，符合安全标准，见图 10。

根据图 11 所示的竖向位移横断面云图，顶管施工完成后，地表沉降，形成沉降槽，地面产生的最大沉降为 12 mm，小于地面观测的警戒值 24 mm。

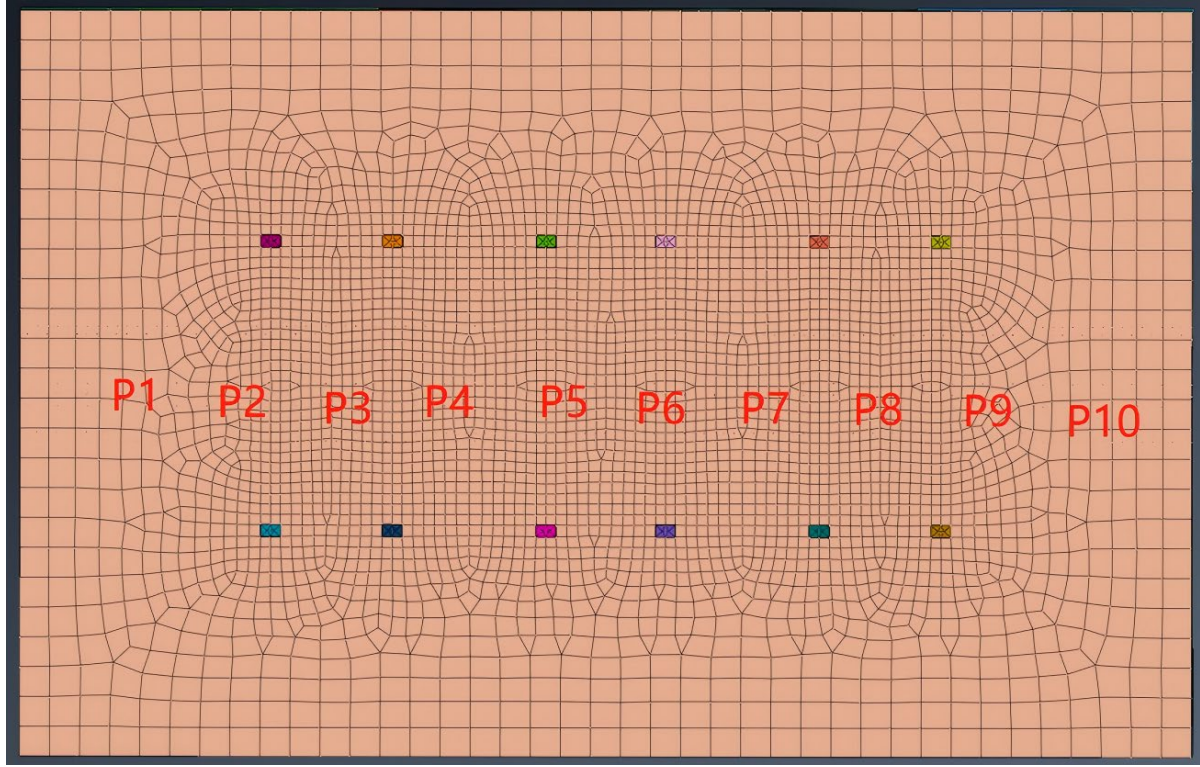


Figure 9. Plan view of selected ground surface vertical displacement points
图 9. 地表选取竖向位移测点平面示意图

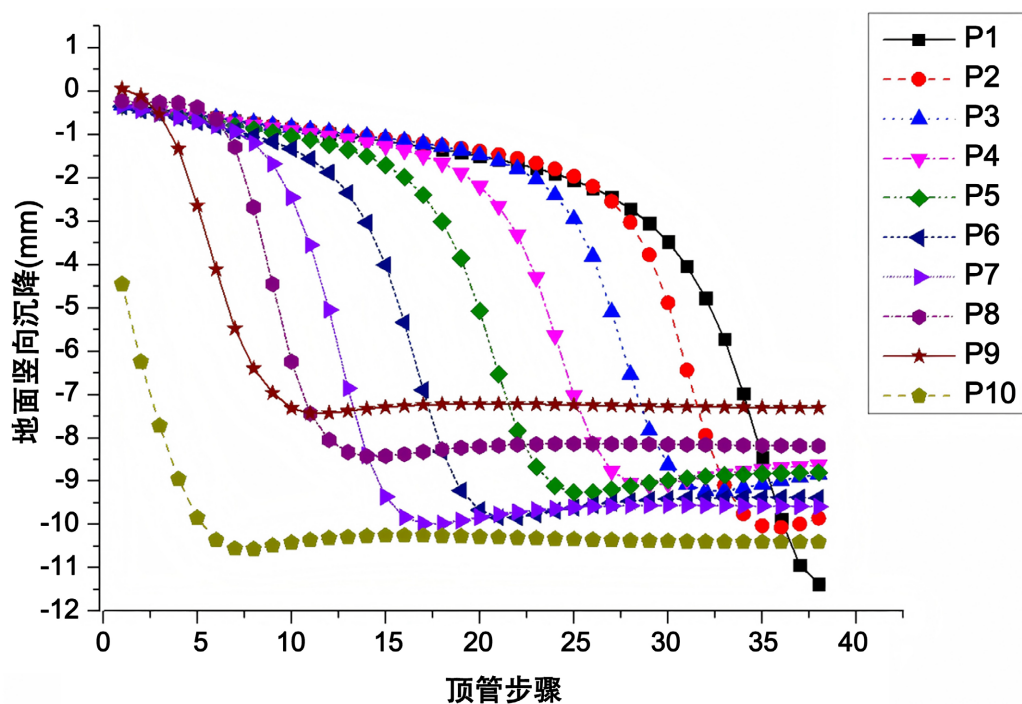


Figure 10. Vertical displacement of surface measurement points (mm)

图 10. 地表测点竖向位移(mm)

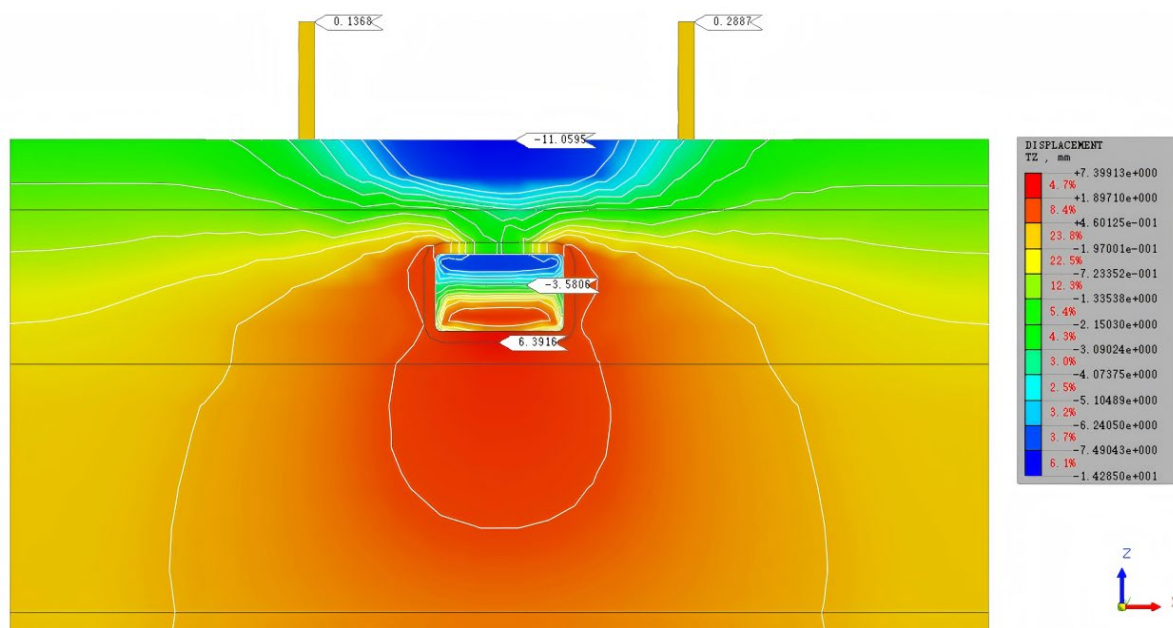


Figure 11. Section of vertical displacement after full pipe jacking under bridge piles (mm)

图 11. 顶管全部穿过桥梁桩基下方后竖向位移断面示意图(mm)

3.3. 桥梁基础变形分析

根据建立的顶管与桩基的模型和计算结果, 分析顶管推进下穿某快速路桥桩基的竖向变形特征。桩基竖向及横向的位移云图见图 12、桩基侧向的位移云图见图 13。

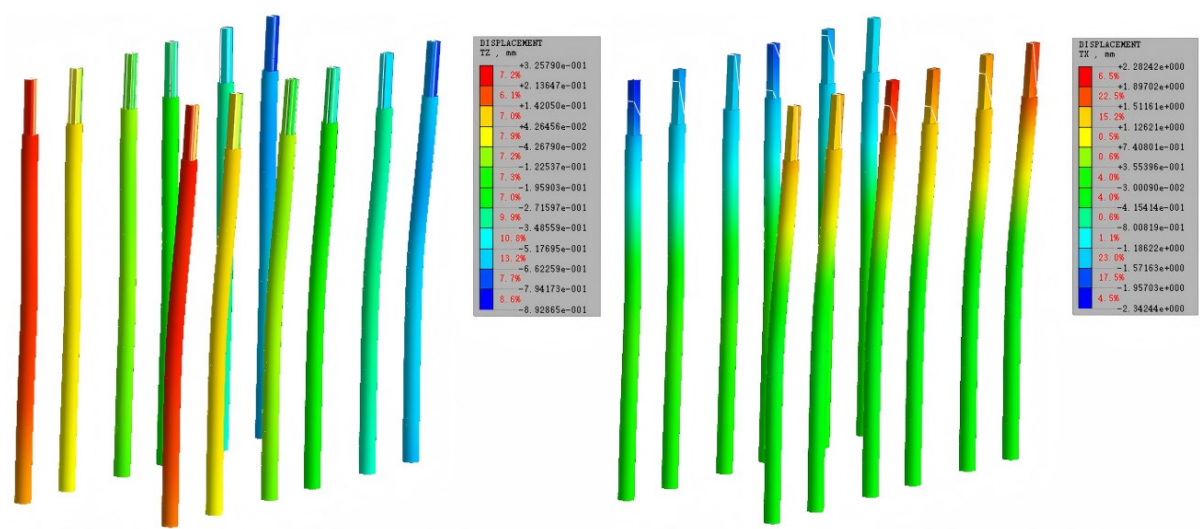


Figure 12. Section of vertical displacement after full pipe jacking under bridge piles (mm)
图 12. 顶管施工完毕后桥墩及桩基位移云图 - 竖向 + 横向(mm)

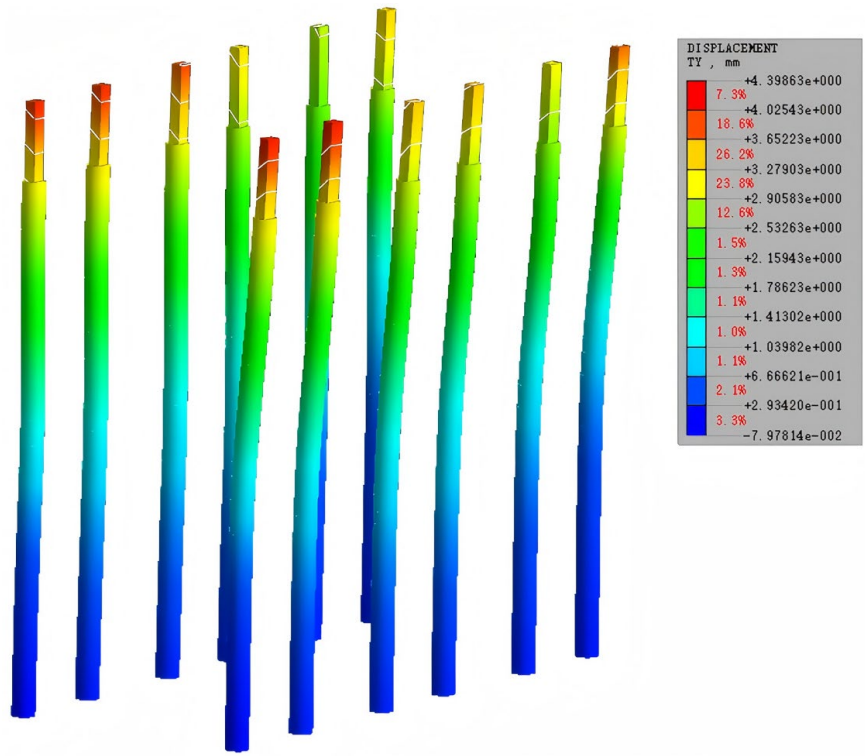


Figure 13. Nephogram of displacement at bridge piers and pile foundations along longitudinal axis after completion of pipe jacking construction (mm)
图 13. 顶管施工完毕后桥墩及桩基位移云图 - 纵轴向(mm)

根据桩基位移分析结果：
顶管施工完毕后，相邻的桥梁桩基最大下沉量约为 0.9 mm，由于顶进过程中掌子面收到一定压力，桥墩顶部在横向及纵向分别出现 2.3 mm 及 4.4 mm 的最大位移。选择顶管左侧 6 根桥墩顶部的节点(见图 14，分别标注为 A、B、C、D、E、F)，桥墩竖向位移时程分析结果见图 15、水平向位移分析结果见图 16。

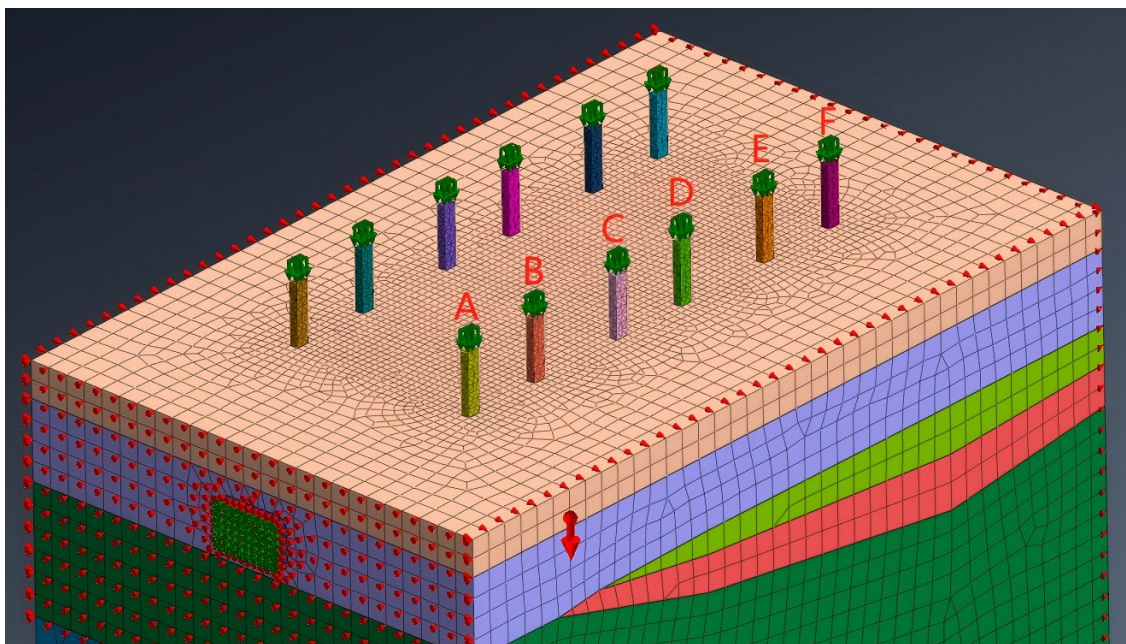


Figure 14. Pier top node distribution schematic

图 14. 桥墩顶部节点分布示意图

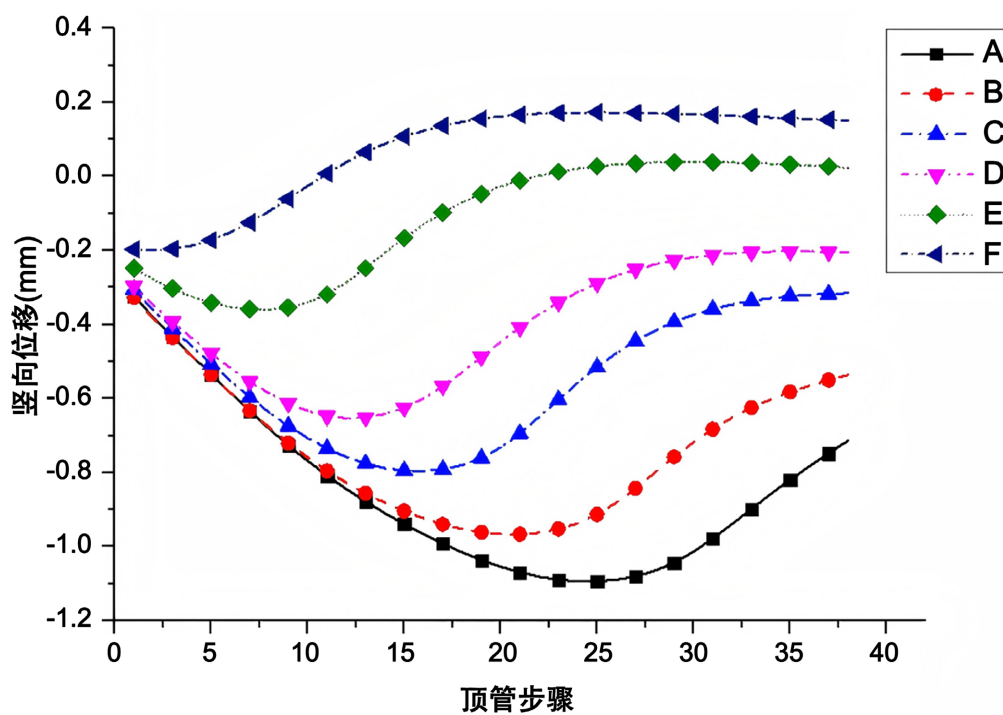


Figure 15. Pier top displacement time-history curve-vertical (mm)

图 15. 桥墩顶部位移时程曲线 - 竖向(mm)

根据桥墩基础位移时程分析结果, 桩基竖向沉降差值 $1.3 - 0.25 = 0.95$ mm, 见图 15, 远初拟的小于安全标准 40 mm, 桩基变形满足要求。桩基水平面内位移差值 $4.8 - 0.6 = 4.2$ mm, 见图 16, 位移较小, 可由支座的剪切变形予以适应。

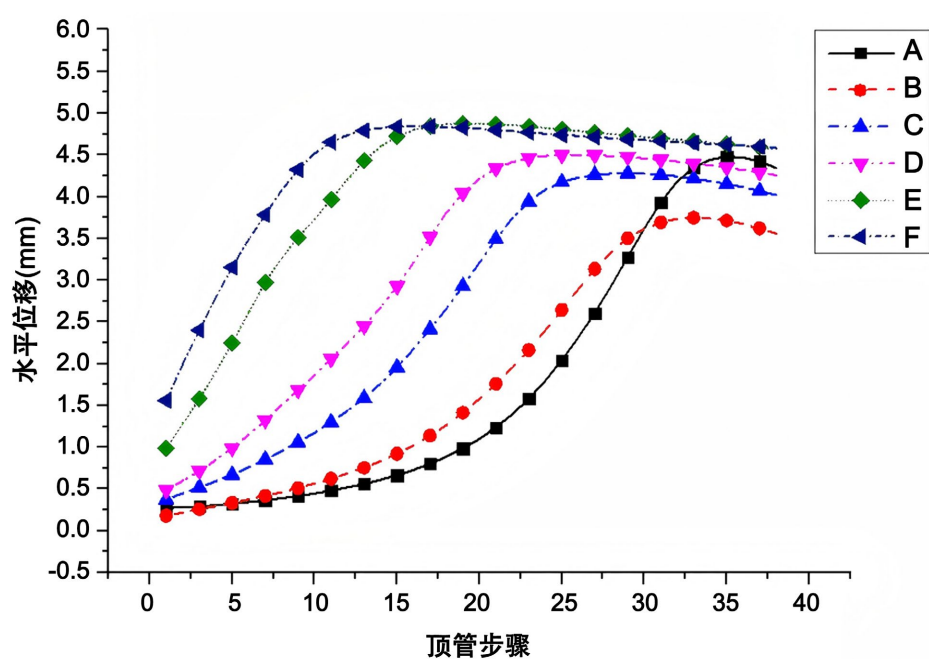


Figure 16. Pier top displacement time-history curve-horizontal (mm)
图 16. 桥墩顶部位移时程曲线 - 水平向(mm)

3.4. 桩基受力影响分析

根据建立的顶管与桩基的模型和计算结果，分析顶管推进下穿某快速路桥桩基的轴力及弯矩变化情况[2]。将顶管施工完毕后桩基的内力扣除顶管施工前的桩基内力，得到顶管施工对现有桥梁桩基的影响情况，桩基轴力分析结果见图 17、横向弯矩分析结果见图 18、纵向弯矩分析结果见图 19：

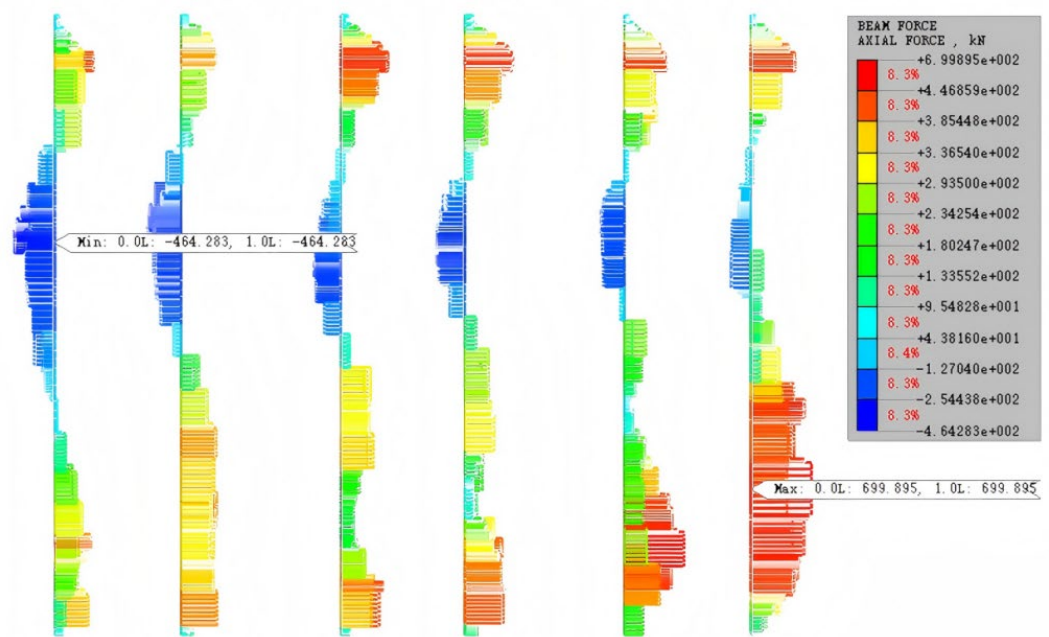


Figure 17. Pipe jacking effect on bridge pile axial force (KN)
图 17. 顶管施工对桥梁桩基轴力的影响(KN)

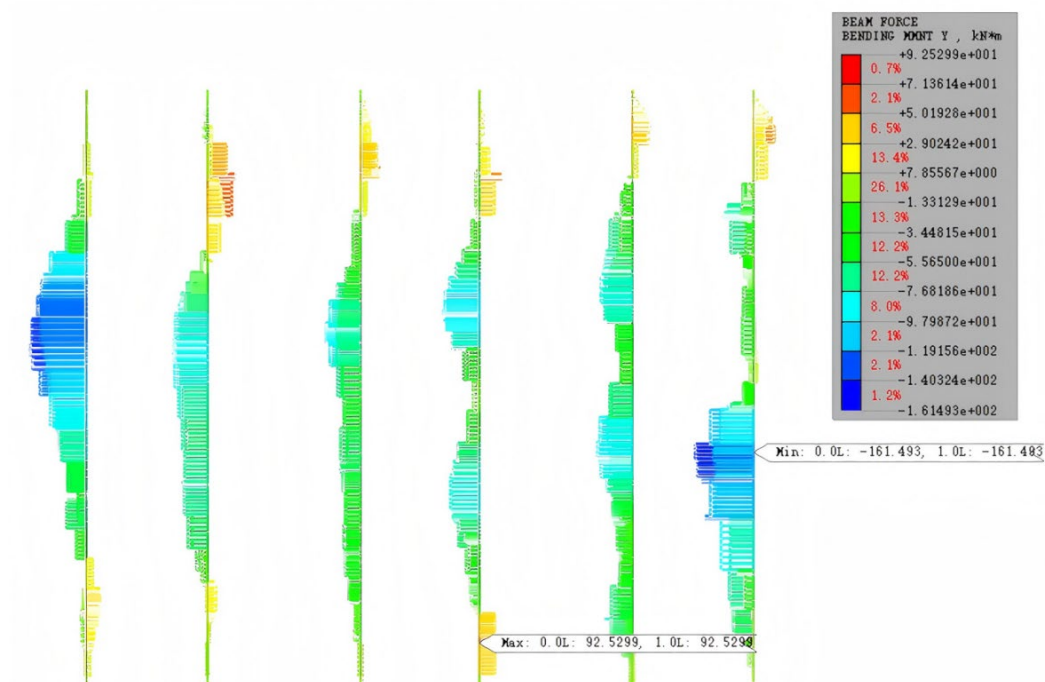


Figure 18. Pipe jacking effect on bridge piles' lateral bending moment (KN·m)
图 18. 顶管施工对桥梁桩基横向弯矩的影响(KN·m)

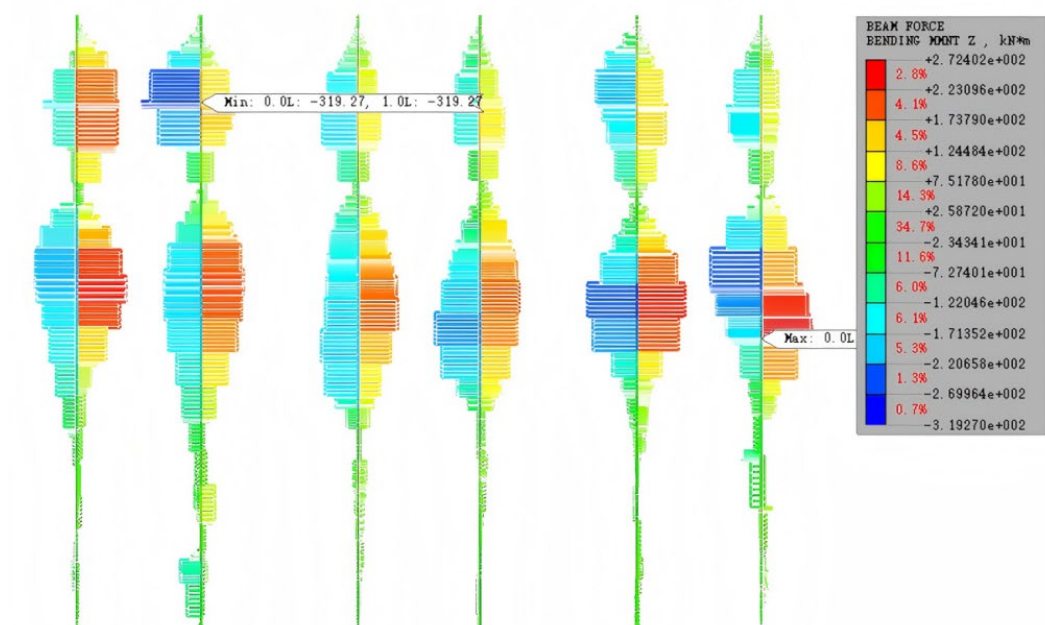


Figure 19. Pipe jacking effect on bridge piles' longitudinal bending moment (KN·m)
图 19. 顶管施工对桥梁桩基纵向弯矩的影响(KN·m)

根据有限元分析结果,选择最不利轴力及弯矩作用,拟定桥梁桩基构造,见图 20,并进行承载力分析验算,根据承载力包络图计算结果,见图 21,顶管施工产生对桩基产生的作用效应未超过桩基截面抗力,受力满足要求。

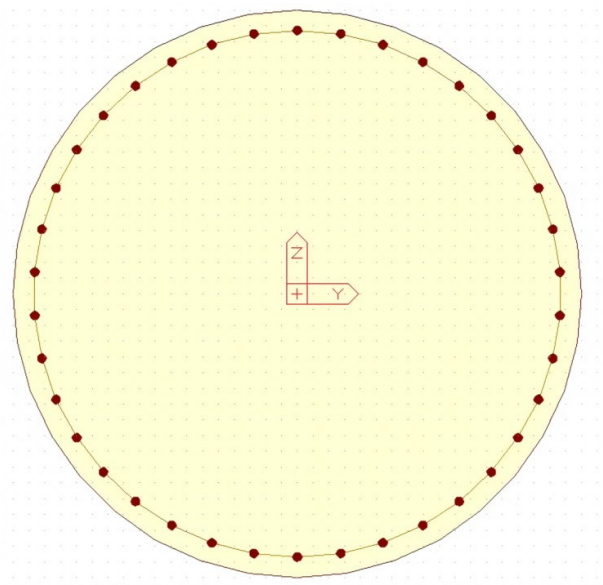


Figure 20. Pile foundation structural design schematic
图 20. 桩基构造设计示意图

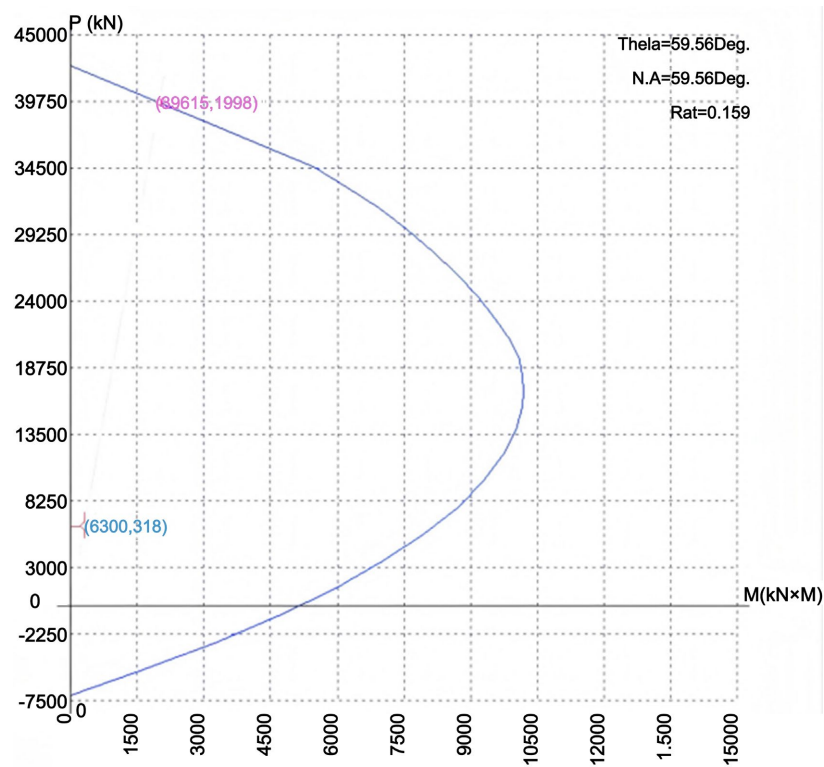


Figure 21. Pile flexural capacity check envelope
图 21. 桩基抗弯承载力验算包络图

4. 结语

本研究针对某地铁站出入口顶管通道下穿某快速干线高架桥工程，采用数值模拟方法，分析了顶管施工对地层及桥梁桩基的影响。结果表明，地表最大沉降量为 12 mm，小于警戒值 24 mm；桥梁桩基最

大竖向沉降 0.9 mm、水平位移差值 4.2 mm，均满足规范安全控制标准；桩基轴力及弯矩变化未超过设计承载力，受力性能良好。本文分析验证了顶管施工方案的合理性，其变形控制效果与受力分析结果为类似近接运营桥梁的地下工程提供了关键技术参考。

参考文献

- [1] 杜军锋, 马宪宏, 刘晓伟. 顶管施工对桥梁桩基安全的影响分析[J]. 安徽建筑, 2024, 31(9): 158-160.
- [2] 孙庆, 杨敏, 冉侠, 等. 隧道开挖对周围土体及桩基影响的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011(7): 989-993+1025.
- [3] 朱逢斌, 杨平, 林水仙. 盾构隧道施工对邻近承载桩基影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3894-3900.
- [4] 余艳华, 苏华友. 桥梁桩基施工振动对邻近埋地管道影响试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 35-39.
- [5] JTG D63-2019, 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.