

滨海软土地区邻近高速铁路河道开挖、道路拆改建工程技术方案研究

卢亮

台州市路桥区飞龙湖生态区建设发展中心, 浙江 台州

收稿日期: 2023年12月27日; 录用日期: 2024年3月26日; 发布日期: 2024年4月3日

摘要

高速铁路运营时, 要求轨道结构具有既持久又稳定的平顺性, 这就对线下结构的工后沉降提出了非常苛刻的要求。文章结合某滨海软土地区下穿铁路的道路拆改建、并行铁路的河道开挖, 对工程实施方案进行了探讨, 提出对地基、坑底采用水泥搅拌桩加固, 台后采用轻质泡沫混凝土回填的方案, 结合有限元分析、现场实测数据, 说明本工程方案的可行性, 较密打隔离桩可以节约造价、缩短工期。文章的研究成果, 可以为同类条件下的工程设计、施工提供借鉴。

关键词

高速铁路, 滨海软土地区, 河道开挖, 道路拆改建, 水泥搅拌桩, 轻质填料

Research on the Technical Scheme of River Excavation and Road Demolition and Reconstruction of High-Speed Railway Adjacent to the Coastal Soft Soil Area

Liang Lu

Feilong Lake Ecological Zone Development Center in Luqiao District of Taizhou, Taizhou Zhejiang

Received: Dec. 27th, 2023; accepted: Mar. 26th, 2024; published: Apr. 3rd, 2024

Abstract

The operation of a high-speed railway requires the track structure to have both durable and stable

smoothness, which puts forward very demanding requirements for the post-construction settlement of the off-line structure. This paper discusses the implementation plan of the project based on the demolition and reconstruction of the road passing through the railway in a coastal soft soil area and the excavation of the river channel of the parallel railway. The scheme of cement mixing piles for the foundation and pit bottom is proposed, and the backfilling of lightweight foam concrete behind the platform is proposed. Combined with finite element analysis and on-site measurement data, the feasibility of this engineering scheme is verified, and the dense boring of isolation piles can save costs and shorten the construction period. The research results of this paper can provide a reference for engineering design and construction under similar conditions.

Keywords

High-Speed Railway, Coastal Soft Soil Area, River Excavation, Road Demolition and Reconstruction, Cement Mixing Pile, Lightweight Filler

Copyright © 2024 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. 引言

随着高速铁路建设的全面发展,高速铁路在中国已发展成为世界上运营里程最长、在建规模最大的轨道交通系统。高速铁路运营时,要求轨道结构具有既持久又稳定的平顺性,这就对线下结构的工后沉降提出了非常苛刻的要求[1] [2] [3]。

随着建设发展,越来越多的市政道路、河流、公路需要穿越高速铁路,道路穿越、河道开挖对周围土层产生扰动,引起地层变形和附加应力,进而引起桥梁多向变形,过大的变形,尤其是横向变形,给铁路安全运营管理带来了新的挑战,因此,道路、河道下穿高速铁路工程时,如何保证既有桥梁的安全和正常使用是一个十分重要的课题[4] [5]。

我国技术工作者对软土地区的高速铁路路基沉降变形控制、邻近施工对铁路位移的影响进行了深入研究[6] [7]。对于滨海软土地区,下穿铁路的道路建设往往采用桥梁结构以桥梁代替路基,避免道路荷载的侧压导致高铁桥墩偏位。而对于并行铁路的河道,往往采用隔离桩,以减小对铁路的影响[8] [9] [10]。但对于同时有道路下穿、并行河道开挖的情况相对较少,文章结合浙江某滨海地区一个既有道路下穿、又有河道并行铁路的工点,对于河道开挖、道路施工的方案进行研究。

2. 工程背景

台州市栅岭汪排涝调蓄工程的新开挖下分水河道并行于在建高铁,河道规划宽度 40 m,是今后路桥城区防洪排涝的关键性河道。因下分水河的实施,需要对原路桥大道的路基改为桥梁,桥梁跨径布置为:(16 + 20 + 16) m 三跨预应力混凝土矮 T 梁桥。工程区域路桥大道需要穿越高铁,穿越处铁路桥梁上部结构为(40 + 64 + 40) m 连续梁的主跨,高铁设计时速 350 km/h、无砟轨道。

工程实施中,因高铁建设速度较快,在高铁即将联调联试时,下分水河与路桥大道桥梁仍未完工,且桥梁与高铁桥墩位置存在冲突,导致工程陷于停工状态。方案调整前的现场图片见图 1 所示。

如工程继续停工,则高铁开通后,工程实施难度加大、成本剧增,并影响交通。



Figure 1. Site photos before project adjustment
图 1. 工程方案调整前的现场照片

3. 方案研究

工程所在区域为滨海软土地区，土层自上而下分别为：素填土(mlQ4)、粉质粘土(al-IQ43)、淤泥(mQ42)、粉质粘土(mQ32-2)、粉质粘土与粉土互层(al-IQ32-2)、粉质粘土(al-IQ32-1)、粉质粘土(mQ32-1)、圆砾(al-IQ32-1)、粉质粘土(mQ31)、圆砾(al-IQ31)。原设计道路下穿铁路段采用路基，河道采用直接开挖的方案。为了保证高铁的安全，对道路下穿铁路、河道开挖方案进行研究。

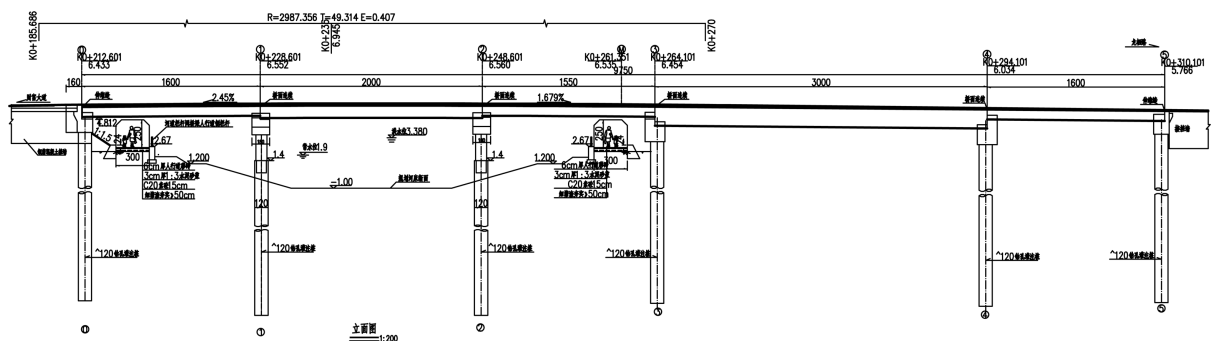
3.1. 道路下穿铁路方案研究

原设计方案高铁桥下为路基，路基及车辆荷载产生的侧压，会导致高铁桥墩产生侧向位移。同类地区因为高铁旁边堆土而引起的高铁横向位移超标、桥墩纠偏多次发生[4] [6] [9]。现高铁已形成，路基方案已不可行。

经比较，将高铁桥下路基改为桥梁，桥梁孔跨布置改为 $(16 + 20 + 15.5 + 30 + 16) \text{ m} = 97.5 \text{ m}$ ，共 5 跨。采用简支后张法预应力混凝土矮 T 梁 + 小箱梁，16 m 梁板高度为 0.9 m，30 m 梁板高度为 1.6 m。

为避开高铁桥墩(施工达到 2.5 倍桩径以上的安全距离)，将道路横断面宽度由 59m 调整为 50m，具体布置为：5.0 m 人行道 + 5.0 m 非机动车道 + 2.0 m 机非绿化带 + 12.0 m 机动车道 + 2.0 m 中央分隔带 + 12.0 m 机动车道 + 2.0 m 机非绿化带 + 5.0 m 非机动车道 + 5.0 m 人行道 = 50.0 m。调整后的桥型布置见图 2。

为避免工后沉降影响行车，将台后区域采用水泥搅拌桩进行地基处理。考虑到台后填土较高，容易导致高铁桥墩偏位，将台后填土改为轻质泡沫混凝土。水泥搅拌桩设置范围示意图见图 3。



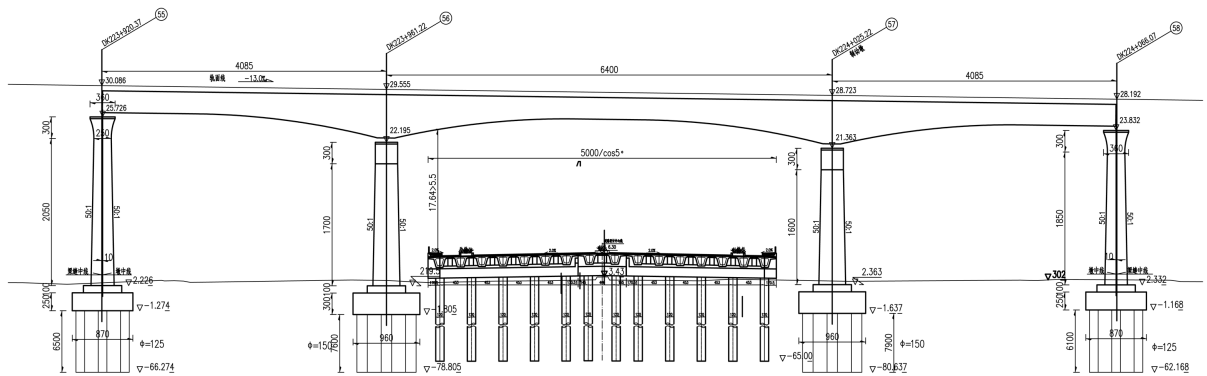


Figure 2. Adjusted bridge layout
图 2. 调整后的桥型布置图

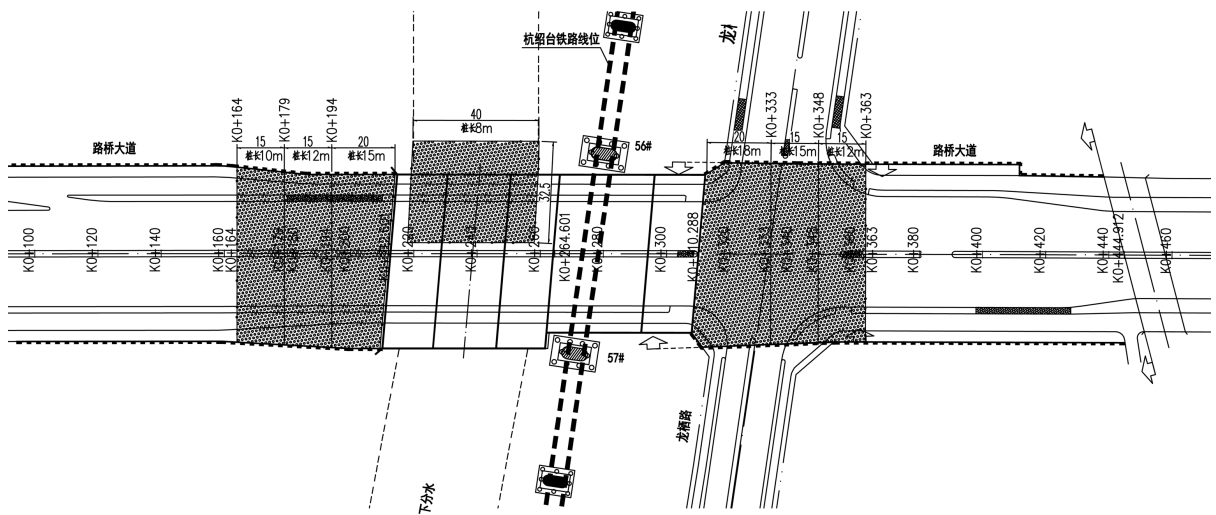


Figure 3. Schematic diagram of cement mixing pile installation area
图 3. 水泥搅拌桩设置范围示意图

3.2. 河道开挖方案研究

因河道开挖导致高铁桥墩偏位、影响铁路运营、采取措施纠偏的先例很多[5]。本工程的下分水河距离铁路桥梁边缘净距仅为 13.3 m，如此近距离的开挖河道，势必引起河底隆起、高铁桥墩偏位。现在邻近铁路开挖河道，往往采用施打隔离桩的措施[10]，为保证铁路桥墩位移小于限值，有些工点甚至施打三排隔离桩，虽然保证了铁路桥墩位移，但造价较高。

铁路桥墩倾斜、偏位主要是因为开挖卸载、基底隆起导致的，常规干土容重约为 2.0 t/m^3 ，水的容重为 1.0 t/m^3 ，二者差值为 1.0 t/m^3 ，针对卸载，采用水泥搅拌预先对河道区域开挖面以下进行处理，提高土的承载力、将所卸荷载部分预先施压，并做河床铺砌，以保证河道区域的荷载尽量平衡，从而抑制河底隆起。

同时水泥搅拌桩分片实施，河道开挖分片、分层开挖，每层开挖深度不超过 50 cm。在施工中进行动态监测，每一层土开挖后，待监测数据稳定后再进行后续开挖。

4. 数值分析

采用三维有限元软件(PLAXIS 3D)建立数值计算模型分析水桥梁施工、河道开挖对铁路的影响。

4.1. 三维有限元模型

桥梁桩基采用嵌入式梁单元进行模拟，拉森钢板桩、涵洞以及施工便道混凝土面层采用板单元。根据场地模型，建模区域选取： $x \times y \times z = 240 \text{ m} \times 250 \text{ m} \times 103 \text{ m}$ ，其中， x 方向为道路纵向， y 方向为道路横向。模型网格采用空间四面体 10 节点单元进行划分，网格划分后，共计 266,137 单元，391,414 节点。计算中考虑地基加固、河道开挖、桥梁桩基与桥墩施工、桥梁上部结构施工、道路施工以及道路与桥梁运营等工况。有限元模型图及模型结构示意图见图 4 和图 5。

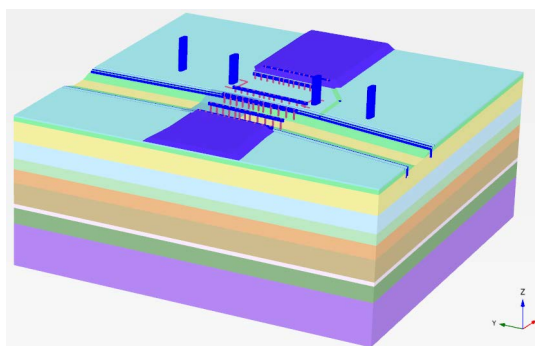


Figure 4. Finite element model diagram
图 4. 有限元模型图

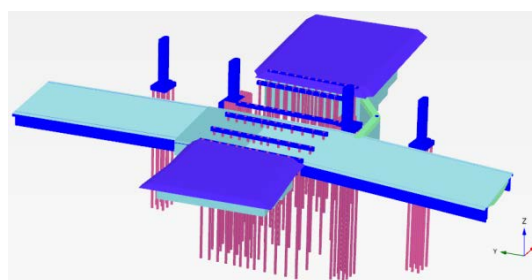


Figure 5. Schematic diagram of model structure
图 5. 模型结构示意图

模型的边界条件是：模型底部为完全固定，即土体水平向和竖向位移均约束；模型四周为法向固定，即土体水平约束，竖向自由。

土体应力应变的本构理论采用小应变土体硬化模型(HSS)模型，其余部件(如桥墩、桥梁桩基等)采用线弹性模型。

混凝土采用线弹性模型进行模拟；泡沫混凝土、路基、桥墩、铁路桥墩及挡墙采用实体单元进行模拟；桩基采用嵌入式梁单元进行模拟；松木桩采用板单元进行模拟。结构模型参数见表 1、表 2、表 3 所示：

Table 1. Entity unit parameters
表 1. 实体单元参数表

结构名称	重度(kN/m ³)	弹性模量($\times 10^4$ MPa)
泡沫混凝土	6	0.10
桥墩	25	3.45
铁路桥墩	25	3.15

Table 2. Parameters of embedded beam elements

表 2. 嵌入梁单元参数表

结构名称	桩径(m)	弹性模量($\times 10^4$ MPa)
新建桥梁桩基	1.20	3.00
铁路桥墩防护	1.00	3.00
铁路桥梁桩基	1.25/1.50	3.00

Table 3. Parameters of the board unit

表 3. 板单元参数表

结构名称	松木桩(m)	弹性模量($\times 10^4$ MPa)
松木桩	0.14	0.765

根据实际施工内容，将施工全过程模拟为八个工况。施工工况见表 4 所示。

Table 4. Construction conditions

表 4. 施工工况

工况	工况说明
阶段 1	现状模拟(位移清零)
阶段 2	地基加固、坑底加固
阶段 3	河道开挖、基坑开挖
阶段 4	桥梁桩基与桥墩施工、排水管施工与回填土
阶段 5	桥梁上部结构施工、拉森钢板桩拔除
阶段 6	道路施工
阶段 7	道路与桥梁运营

4.2. 计算结果

4.2.1. 地基加固、坑底加固阶段

铁路桥墩横桥向最大水平位移为 0.41 mm (远离河道方向变形)，顺桥向最大水平位移为-0.98 mm，出现在 57#墩墩顶位置；最大沉降变形为-0.49 mm，出现在 57#墩承台远离河道侧；最大隆起变形为 0.25 mm。不做河床底加固时的位移分别为 0.20 mm、-0.36 mm、-0.10 mm、0.29 mm。位移云图见图 6 所示。

4.2.2. 道路运营阶段

铁路桥墩横桥向最大水平位移为-1.01 mm (向河道方向变形)，顺桥向最大水平位移-1.06 mm，最大沉降变形-1.13 mm，最大隆起变形为 0.29 mm。

不做河床底加固时的位移分别为-1.79 mm、-0.79 mm、-0.83 mm、0.32 mm。

从以上计算结果可以看出：

1) 采取地基加固、坑底加固、未在河道与铁路间施打隔离桩，铁路桥墩位移满足《公路与市政工程施工下穿高速铁路技术规程》(TB10182-2017)，说明本工程采取的技术措施是可行的。

2) 采用河底加固后，铁路桥墩横桥向位移由-1.79 mm 降为-1.01 mm，说明采取河底加固措施对改善桥梁横向位移是有益的。

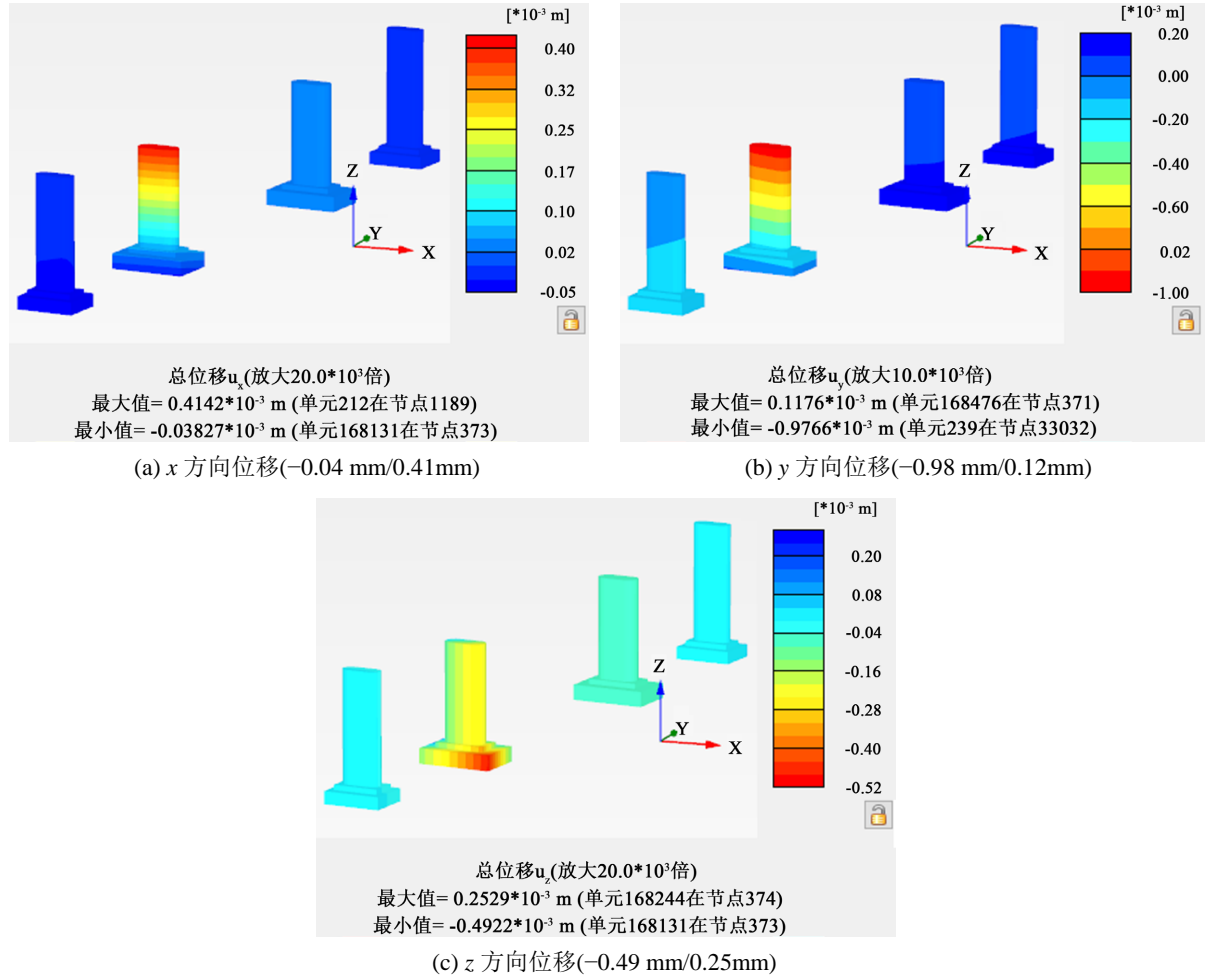


Figure 6. The displacement cloud chart of foundation reinforcement and pit bottom reinforcement
图 6. 地基加固、坑底加固阶段的位移云图

5. 现场监测

5.1. 监测点布置

为了实时监测施工过程中桥墩位移，对施工过程进行动态指导，对工程影响范围内的铁路 55#~59#桥墩进行监测。监测基准点布置见图 7 所示。

具体监测内容如表 5 所示。

5.2. 监测频率以及报警值

对铁路桥墩监测的位移监测限值采用《公路与市政工程施工下穿高速铁路技术规程》《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》(TB 10314-2021)的有关规定，具体的监测频率与预警值见表 6、表 7 所示。

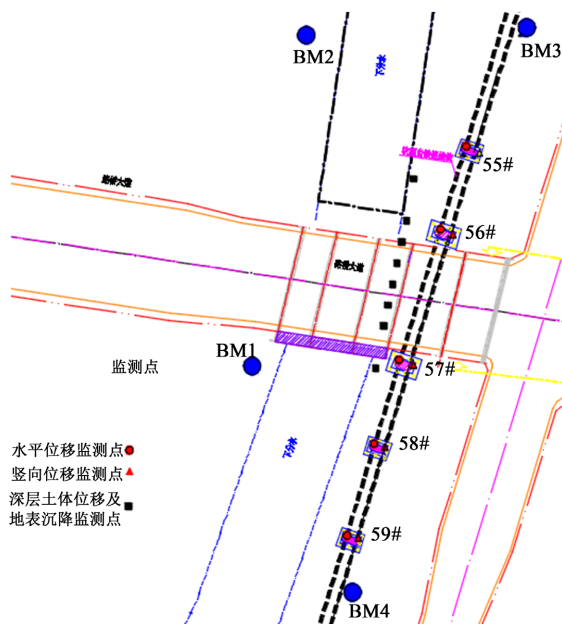


Figure 7. A sketch of the layout of monitoring points
图 7. 监测点布置平面示意图

Table 5. Monitoring content
表 5. 监测内容

监测项目	数量	备注
桥墩竖向位移	5 个	水平位移测量包含沉降测量, 同时桥墩下部布 4 个沉降观测点, 对沉降进行人工复核(按照二等水准测量规范执行)
桥墩水平位移	5 个	
地表沉降	8 组	垂直开挖河道, 延伸铁路下方, 每组 4 个监测点
深层土体水平位移	8 个	沿开挖下水河河道方向间隔 10 m 米布设一组

Table 6. Monitoring frequency and early warning value of pier displacement
表 6. 桥墩位移监测频率与预警值

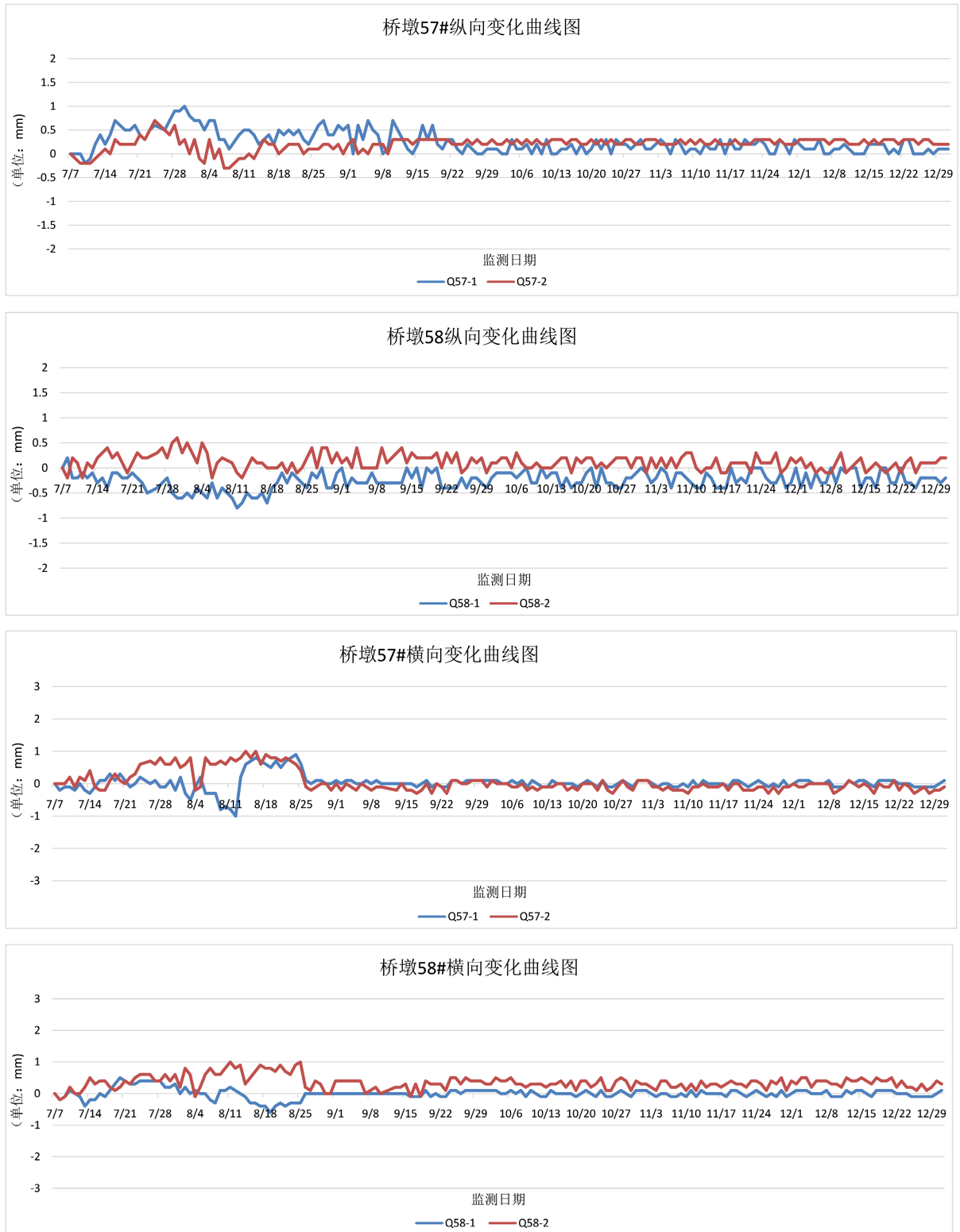
监测项目	监测频率(次/d)				预警值(mm)	报警值(mm)
	施工前一周	施工关键期	施工非关键期	施工后 1 个月		
沉降监测	1	12	4	2	1.6	2
水平监测	1	12	4	2	1.6	2

Table 7. Monitoring frequency and early warning value of peripheral displacement during river excavation
表 7. 河道开挖期间周边位移监测频率与预警值

监测项目	监测频率	预警值(mm)	报警值(mm)
	施工周期 30 天		
地表沉降	12 次/d	20	25
深层土体水平位移	12 次/d	20	25

5.3. 监测数据分析

57#墩、58#墩的位移变化曲线图见图 8 所示:



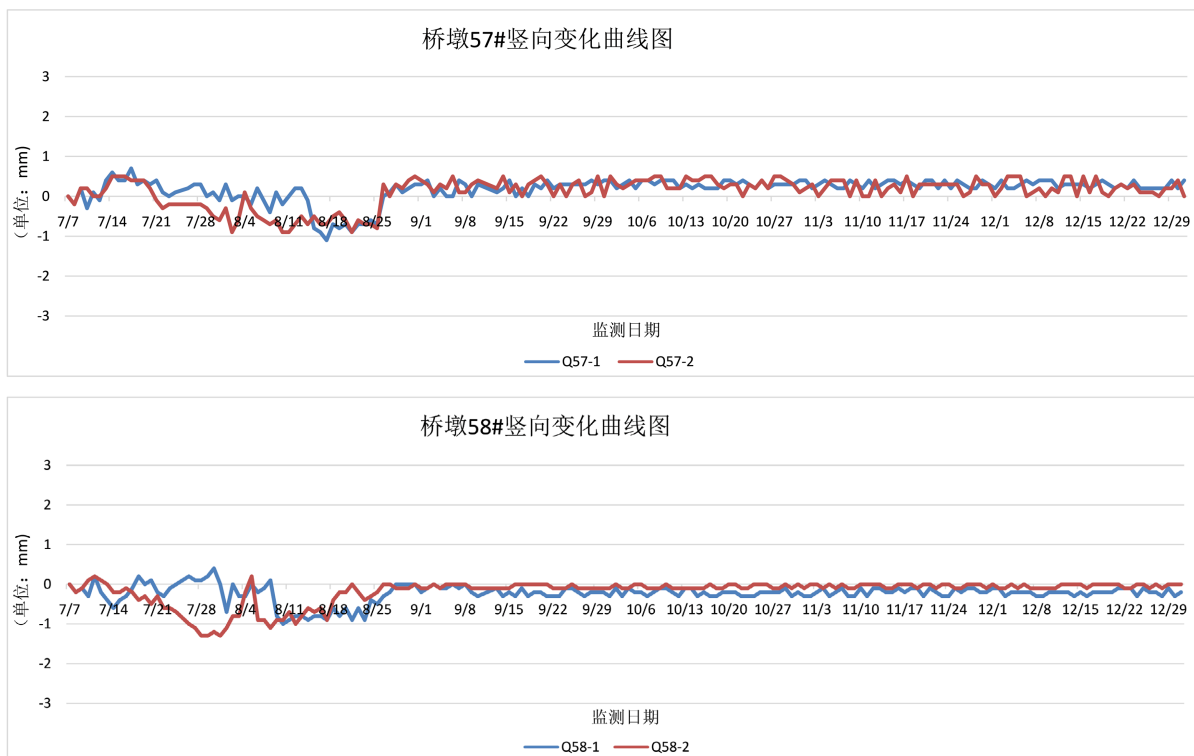


Figure 8. Displacement curve of high-speed rail pier
图 8. 高铁桥墩位移变化曲线

从各个方向监测数据累计量变化曲线图分析，可以得出以下结论：

- 1) 桥梁桩基施工阶段铁路桥墩横向变化累计最大-1.0 mm (57#)、纵向变化累计最大 1.0 mm (57#)、竖向累计最大-1.1 mm (58#)。
- 2) 水泥搅拌桩施工、初期河道开挖阶段铁路桥墩横向变化累计最大-0.6 mm (57#)、纵向变化累计最大 0.6 mm (57#)、竖向累计最大-0.3 mm(58#)。水泥搅拌桩施工、初期河道开挖期间铁路桥墩累计变形量在减小，变小的原因在于水泥搅拌桩施工、河道初期开挖对周边荷载的修正。
- 3) 河道开挖从邻近铁路侧向远离铁路侧开挖，河道开挖初期，对铁路桥墩存在较大扰动，但河道正式开挖后，地表监测点横向变化累计最大-6.8 mm (DB7)、纵向变化累计最大 5.2 mm (DB4)、竖向累计最大-6.6 mm (DB2)，同期铁路桥墩各个方向变化量均小于 0.5 mm，对比前期桥梁桩基施工监测变化，说明水泥搅拌桩对铁路桥墩变形起到很大保护作用。
- 4) 根据监测数据，施工过程中铁路桥墩位移均小于 1 mm，未出现预警报警情况，说明施工过程中铁路是安全的，本工程的技术方案是可行的。
- 5) 铁路桥墩位移实测数据小于理论计算值，说明实际施工中采取的分片、分层跳挖的施工方法是有效的。

6. 结论

通过对路桥大道的道路拆改建、下分水河的河道开挖进行有限元模拟分析，并与实测数据进行对比，可以得到如下结论：

- 1) 在滨海软土地区，以桥梁代替路基、桥台后用泡沫混凝土回填，对于控制高铁桥墩位移是有效的。
- 2) 采用水泥搅拌桩对河床进行基底加固、荷载置换，提高了基底承载力、河床坡面的稳定性，有效

减小了河底隆起、铁路桥墩倾斜，桥墩墩顶位移计算的最大值、实测最大值，均小于规范限值 2 mm。

3) 采用隔离桩，造价高，而且施工时存在应力释放，对铁路桥墩位移不利。采用水泥搅拌进行地基处理，可以节约造价、综合工期，为滨海软土地区河道开挖时的铁路防护提供了一种新思路。

4) 围护方案实施时，水泥搅拌桩分片施打，河道分片、分层开挖，每层开挖深度不超过 50 cm，每层间保持一定的时间间隔，让土层应力得到充分释放，对保护高铁桥梁有利。

参考文献

- [1] 储成伍. 深基坑开挖对邻近铁路路基变形的影响[J]. 铁道建筑, 2021, 61(3): 83-86, 102.
- [2] 倪恒, 刘翔宇, 刘飞成. 河道开挖和弃土堆载对邻近高速铁路桥梁的影响分析[J]. 铁道建筑, 2017, 57(8): 28-32.
- [3] 冯印. 新开河道并行沪宁城际高铁安全影响分析[J]. 铁路工程学报, 2014, 31(8): 37-43.
- [4] 刘少楠. 某河道治理工程对临近高铁桥墩的影响分析[J]. 河南科技, 2019(1): 68-70.
- [5] 顾桢雪. 新开河道基坑下穿高铁桥墩抗扰动加固方案[J]. 科技技术创新, 2022(32): 149-152.
- [6] 周平. 软土地区铁路桥梁桥下堆载安全敏感性分析[J]. 世界桥梁, 2023, 51(2): 97-103.
- [7] 宋福贵. 深基坑开挖对邻近高铁路基变形的影响及隔离桩加固效果分析[J]. 城市交通研究, 2022(6): 112-117.
- [8] 陈仕奇. 深层搅拌桩处理高速铁路软土地基施工工艺研究[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(2): 64-68.
- [9] 高宏伟, 邓会元, 程德林. 围垦填土对邻近新建桥梁的影响分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(1): 39-43.
- [10] 熊林敦. 高速铁路路基设计中有关问题的回顾与思考[J]. 铁道标准设计, 2011(8): 1-3+12.