

新建航道下穿高铁桥梁时 加固方案的变形控制^{*}

孙 阳^{1,2}, 李怡玮¹, 顾祯雪¹, 余 杰³, 郎 纲³, 杨 攀⁴

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 河海大学淮安研究院, 江苏淮安 223001;

3. 杭州京杭运河二通道建设投资有限公司, 浙江杭州 310020;

4. 中铁十七局集团第六工程有限公司, 福建福州 350014)

摘要: 为评估航道开挖下穿高铁桥梁时加固方案的变形控制效果, 结合京杭运河二通道下穿沪昆高铁工程实例, 采用三维有限元软件模拟分析航道围护结构施工、航道开挖、航道结构浇筑、航道通航等各阶段土体和结构的位移变形, 对下穿施工过程中航道维护结构及桥墩的安全状态进行量化评价。结果表明, 坚实的支护系统、分层开挖结合多次降水, 可以避免较大土体沉陷并控制开挖引发的坑底隆起; 加固方案也对既有结构起到了良好的保护作用, 保证列车在施工期安全运行。

关键词: 航道开挖; 数值分析; 围护结构; 高铁桥墩; 变形控制

中图分类号: U 615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0091-07

Deformation control of reinforcement scheme for newly-built channel under-passing high-speed railway

SUN Yang^{1,2}, LI Yi-wei¹, GU Zhen-xue¹, YU Jie³, LI Gang³, YANG Pan⁴

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Huai'an Research Institute of Hohai University, Huai'an 223001, China;

3. Hangzhou Second Channel of Grand Canal Construction Investment Co., Ltd., Hangzhou 310020, China;

4. China Railway No.17 Bureau Group Sixth Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350014, China)

Abstract: To evaluate the deformation control effect of the reinforcement scheme for channel under-passing railway bridge during excavation, this paper takes the second channel of the Grand Canal under-passing the Shanghai-Kunming high-speed railway as an example. It carries out a three-dimensional finite element simulation to analyze the displacement deformation of the soil and structures at different stages, including the construction of enclosure structures, channel excavation, concreting of channel structures, and channel navigation. In addition, it conducts the quantitative evaluation on the safety of the enclosure structures and bridge piers during the construction. The results show that the solid support system and layered excavation combined with multiple dewatering can alleviate excessive settlement and bottom heave caused by excavation. The reinforcement scheme also protects the existing structures, ensuring the running safety of trains during the construction.

Keywords: channel excavation; numerical analysis; enclosure structure; high speed railway bridge pier; deformation control

收稿日期: 2021-08-23

*基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2020014); 南通市科技项目(JC2021009)

作者简介: 孙阳(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为港工结构及软基处理。

新开挖航道在已有建筑物结构中穿行时，开挖卸荷往往诱发周边土体产生应力释放和位移，进而使邻近既有桩体内部产生附加应力和变形，削弱桩基服役能力^[1]，造成工程灾害，因此构建合理的结构保护方案是不可忽视的。贺健军等^[2]运用 MIDAS GTS 软件建立模型，分析不同基坑开挖以及注浆加固参数下既有桥梁桩基的变形特性；李士中^[3]通过 Plaxis 3D 软件分析航道开挖过程中 10 种施工工况对邻近高速铁路桥墩的影响程度；盛军其等^[4]利用有限元分析软件，研究航道开挖过程中采用一定措施时地铁盾构隆起位移的理论值。

本文结合杭州京杭运河二通道下穿沪昆高铁工程，基于设计的下穿段加固方案建立三维有限元模型，针对不同施工阶段模拟分析土体和结构响应规律，对下穿过程中桥墩的安全状态进行评估。

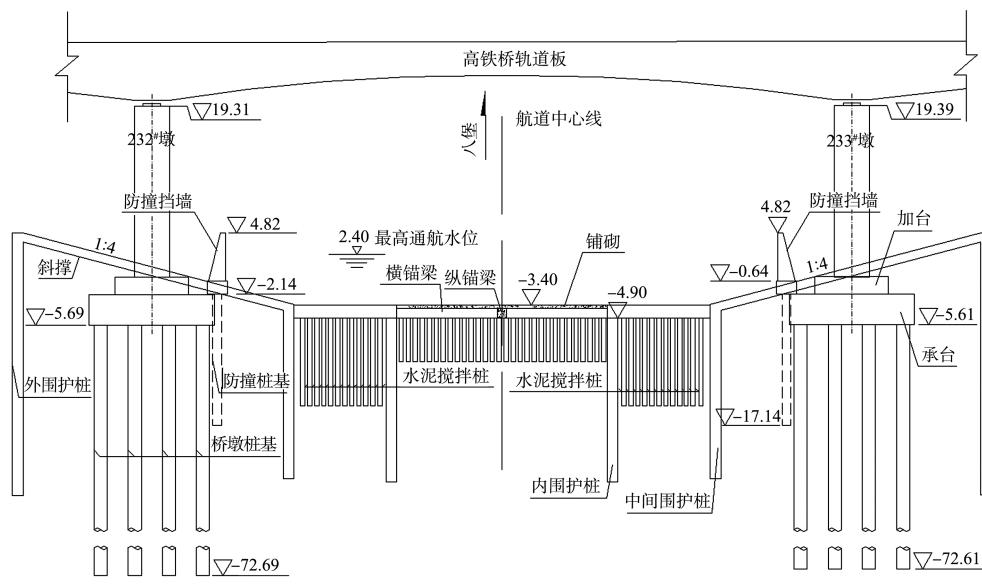
1 计算模型及参数

1.1 工程概况

工程位于京杭大运河三级航道扩建工程即京杭运河“二通道”沪昆高铁下穿段，航道顶面宽 60 m、底面宽 45 m。受航道开挖影响的桥墩为沪

昆高铁海杭特大桥京杭运河桥段连续梁 80 m 桥跨处的 232# 和 233# 中墩，桩墩尺寸 4.5 m×9.0 m×19.5 m(顺向×横向×高)，承台尺寸 14.3 m×14.3 m×3.5 m，加台尺寸 8.4 m×10.3 m×2.0 m。每个桥墩下设 16 根桩基，桩径 1.5 m，桩长 67 m。

受新建航道影响，为防止航道两侧邻近桥墩因土体开挖释放单侧约束而造成的基础与桥墩侧向偏移，对 232# 和 233# 桥墩进行保护性设计，加固设计方案如图 1 所示。先在受影响桥墩两侧设置 3 排围护桩，桩径 1.2 m，桩间距 1.4 m，外侧桩桩长 30 m，内侧桩和中间桩桩长 28 m。在内侧桩和中间桩之间设置水泥搅拌桩，桩径 0.8 m，桩间距 0.6 m，有效桩长 10 m，在桩顶设置 1.5 m 厚钢筋混凝土板；在内侧桩之间设置直径 0.8 m 水泥搅拌桩，桩间距 0.6 m，有效桩长 5 m，桩顶区域设置截面尺寸为 1.0 m×1.1 m(长×宽)的钢筋混凝土锚梁，锚梁上进行厚 0.4 m 的河底铺砌。外侧桩和中间桩采用截面边长为 1.0 m 钢筋混凝土斜撑连接，开挖过程中在围护桩之间设置双层内外钢筋混凝土横撑，横撑截面边长为 1.0 m，斜撑、横撑间距均为 6 m。紧贴航道边线设置防撞墙，墙底采用钻孔灌注桩基础，桩径 1.0 m，桩长 15 m。



a) 加固措施断面 (单位: m)

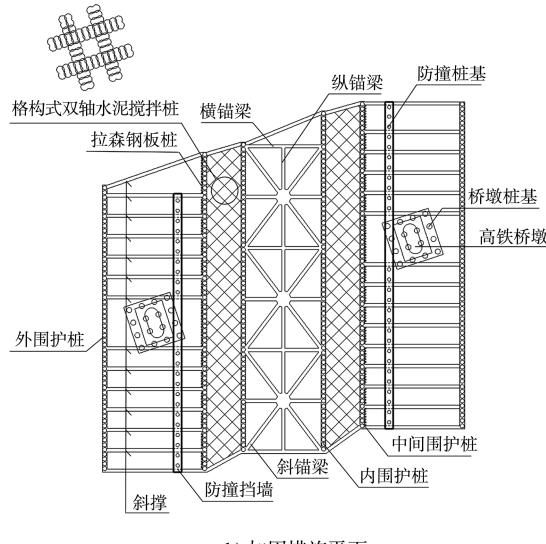


图 1 控制措施布置

1.2 模型参数

1.2.1 土体参数

工程区域位于浙江海宁市, 以软土为主, 模型中地下水位参考工程地勘报告设置在地面以下 4 m 处, 主要土层物理力学参数见表 1。

表 1 土体参数

土层名称	厚度/ m	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	弹性模 量 E/MPa	泊松 比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(^{\circ})$
杂填土	1.5	1.80	6.00	0.40	6	27.0
淤泥质黏土	11.0	1.72	3.02	0.38	12	9.1
粉质黏土	20.0	1.80	4.27	0.30	16	11.8
黏土	15.0	1.80	6.00	0.40	30	11.5
砾土	10.0	1.90	15.00	0.25	3	33.0
泥质砂岩	-	2.00	80.00	0.20	200	40.0

1.2.2 结构单元参数

围护钻孔桩、钢筋混凝土底板、防撞挡墙、河底铺砌层采用板单元模拟, 使用 C40 水下混凝土, 临时挡土墙采用 C30 混凝土。基于张建勋等^[5]、陈福全等^[6]对被动桩间的土拱效应研究, 当桩间距小于 3 倍桩径时可将单排围护桩结构按刚度等效成围护桩墙。

冠梁、横撑、斜撑和锚梁用梁单元模拟, 冠梁和横撑采用 C30 混凝土, 斜撑和锚梁采用 C40 混凝土。

高铁桥墩桩基、防撞桩基结构采用嵌固桩单元模拟, 部分参数参考《建筑桩基技术规范》^[7] 确定。桩基材料为 C40 混凝土, 其中桥墩桩基桩端

阻力标准值 2 500 kPa, 防撞桩基桩端阻力标准值 500 kPa, 桩基侧摩阻力沿土层深度呈多线性分布, 淤泥质黏土、粉质黏土、黏土、砾土、泥质砂岩的桩基侧摩阻力标准值分别为 28、53、96、150、200 kPa。

桥墩承台和搅拌桩加固区采用实体单元模拟, 选用线弹性本构模型。其中, 桥墩结构采用 C40 混凝土, 搅拌桩加固区按照桩土混合情况计算, 按《建筑地基处理技术规范》^[8]建议的面积置换计算原则, 通过计算搅拌桩在加固平面区域内面积占比作为权系数, 用搅拌桩弹性参数置换土体参数, 最终加固区密度 ρ 取 $2.50 t/m^3$, 弹性模量 E 为 $2.1 GPa$, 泊松比 ν 取 0.224。

1.2.3 设计荷载参数

按《铁路桥涵设计规范》^[9]要求, 考虑结构自身重力及列车荷载作用下最不利荷载组合, 计算得出桥墩顶面荷载约为 $880 kN/m^2$ 。水荷载考虑最高通航水位 2.4 m 时水体密度, 以面荷载形式施加在航道坑底及两侧边坡。

1.3 三维有限元模型建立

为减小边界效应, 模型尺寸应取结构尺寸的 3~5 倍, 计算模型尺寸为 $300 m \times 150 m \times 100 m$ (航道中心线方向 \times 断面方向 \times 深度)。生成网格时对航道下穿段及外侧 20 m 范围内土体和结构物进行局部加密, 结构整体共生成 15.679 4 万个单元、27.335 8 万个节点。所建三维模型如图 2 所示。

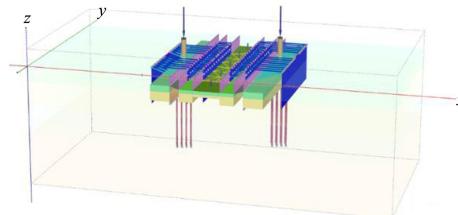


图 2 三维模型

1.4 计算阶段设置

本模型共设置 16 个分析阶段, 分别为: 1) 地应力平衡; 2) 设置既有桥墩结构; 3) 围护桩及防撞桩基施工; 4) 土体加固; 5) 开挖表层土至 1.5 m 深; 6) 冠梁施工及架设首层内、外横撑; 7) 开挖航道两侧基坑至 4 m 深(首次降水); 8) 架设第

2 层内横撑；9)开挖航道两侧基坑 4 m 深(二次降水)；10)架设斜撑；11)钢筋混凝土底板施工；12)开挖航道内基坑；13)航道底部锚梁、铺砌施工；14)开挖斜撑基坑；15)拆除横撑、冠梁和多余的围护桩并施工防撞挡墙；16)施加水荷载。

2 数值结果与分析

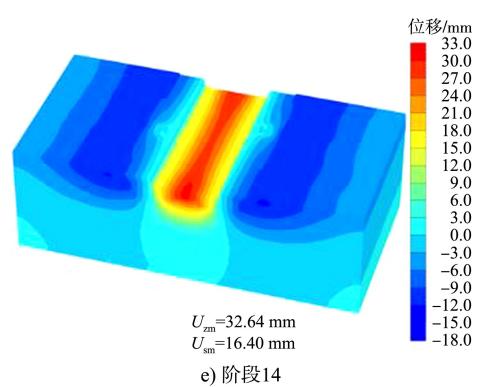
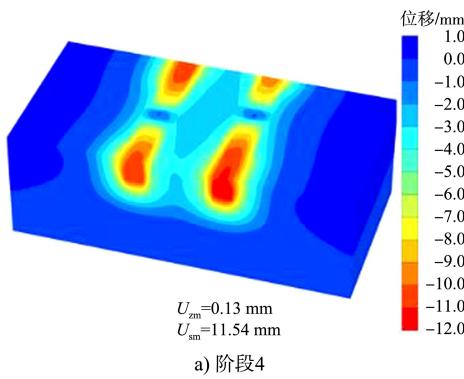
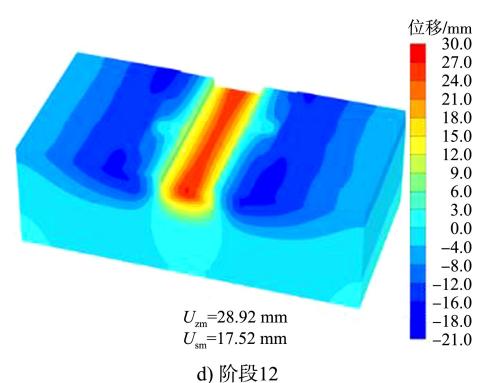
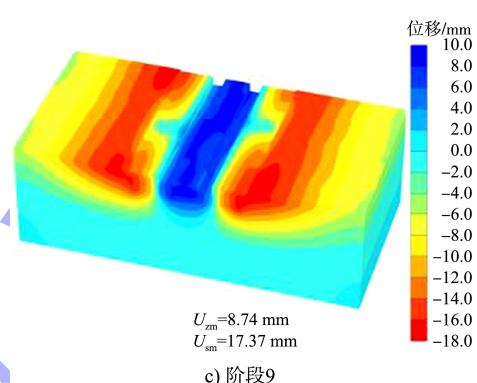
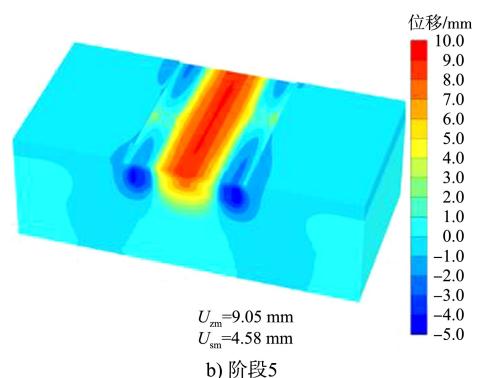
2.1 基坑维护方案评价方法

根据《建筑地基基础工程施工质量验收标准》^[10]规定,本工程航道基坑作为重要工程或支护结构作主体结构的一部分,为一级基坑。加固方案评价标准参考《建筑基坑工程监测技术规范》^[11]一级基坑变形控制标准和《公路与市政工程下穿高速铁路技术规程》^[12]中桥墩结构变形控制标准。

2.2 土体响应规律

2.2.1 航道坑底隆起

部分施工过程土体的竖向位移见图 3, 其中 U_{zm} 表示最大土体隆起, U_{sm} 表示最大土体沉降, 正值表示隆起, 负值表示沉降。可以看出, 航道中心坑底绝对沉降值比绝对隆起值小很多, 坑底总体呈隆起趋势。随航道开挖, 部分土体向上隆起, 隆起最大位置集中在航道内部, 航道两侧斜坡处土体隆起值较小。航道土方开挖完成后, 铁路桥下穿处隆起范围较小, 向两端隆起范围逐渐变宽, 呈中间窄、两端宽的双曲线型, 底部隆起值为 32.64 mm。拆除围护和支撑后, 坑底隆起略有增大, 达到整个施工过程的峰值, 为 34.63 mm, 满足基坑变形控制标准中坑底隆起 35 mm 的限值。



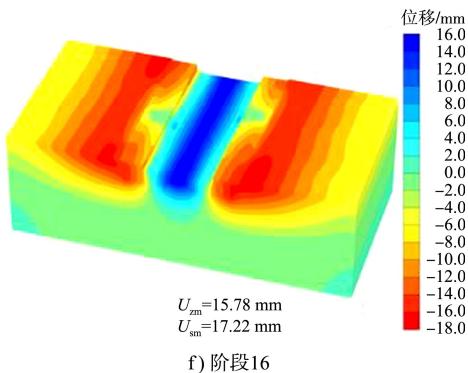


图 3 各阶段土体竖向位移分布

为进一步观察控制措施对坑底土体变形的影响,选取航道坑底中心一点 L_1 , 计算各加荷和卸荷阶段土体绝对隆起与绝对沉降值分别在总隆起和总沉降中的占比,见图 4。可以看出,开挖航道内基坑(阶段 12)时,土体大量开挖卸荷引起的坑底隆起最为明显,约占土体总隆起的 48.8%;开挖表层土(阶段 5)时坑底绝对隆起仅次于阶段 12,此时虽然基坑开挖深度较小,但土体表层土开挖范围大,两侧外围护桩之间的土方均需开挖且未设置支撑系统,因而造成较大的坑底隆起;与此相对,开挖斜撑基坑时(阶段 14)虽然土方开挖量较大,但土体隆起绝对值仅为 5.40 mm,可见支护系统有效地限制了土体向上移动。

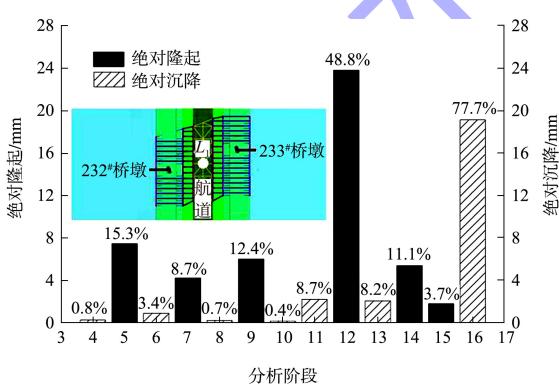


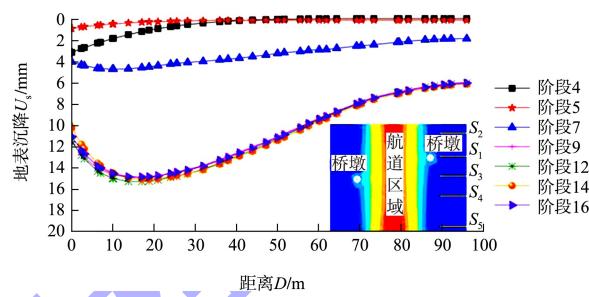
图 4 航道中心坑底绝对隆起值和绝对沉降值

值得注意的是,开挖航道两侧基坑(阶段 7 与 9)时,支护系统尚未完善,土方开挖量大,但引发的土体坑底位移较小,分别为 4.24 和 6.02 mm。结合施工工序,阶段 7 与 9 时分别进行了两次基坑降水,降水会引起明显的土体沉降,一定程度上抵消了土体隆起。因此,在基坑开挖过程中,应分层进行多次降水,既可避免一次降水造成过

大土体沉陷,也能有效控制土体开挖引发的隆起。

2.2.2 地表沉降

土体地表沉降的发展规律见图 5。开挖表层土时,土体隆起一定程度上抵消了沉降,沉降区域集中在桥墩结构的南北两侧。随着航道基坑不断开挖,地表沉降最大处逐渐向加固范围外侧移动,至外围护桩外侧时,地表沉降出现明显的沉降槽。最大地表沉降发生在施加水荷载阶段后,为 17.22 mm。

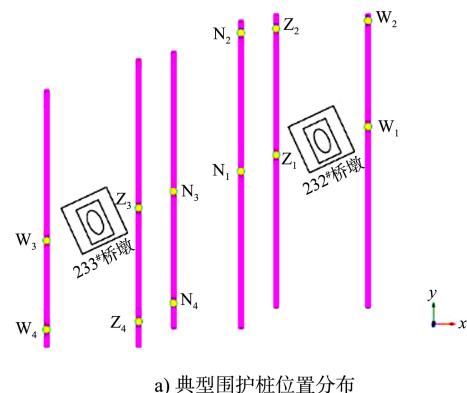
图 5 S_1 处地表沉降

选取外围护桩外侧 5 处不同地表的沉降路径分析,其区域位置如图 5 所示,不难发现 5 处地表沉降发展规律非常类似,以 S_1 处地表为例,加固范围内及邻近区域的地表沉降均维持在较低水平,表明微扰动控制方案效果良好。

2.3 结构响应规律

2.3.1 围护墙位移

本工程设置 3 排围护桩,复杂的开挖顺序使桩在航道开挖过程中呈现不同的变形状态。选取围护桩上的典型位置进行航道开挖过程中桩的变形分析,并选取一组绘制在图 6 中,其中横轴 δ_h 为围护桩垂直于航道方向水平位移。可以看出,开挖深度、开挖位置、支护系统等因素对桩的变形都会产生影响。



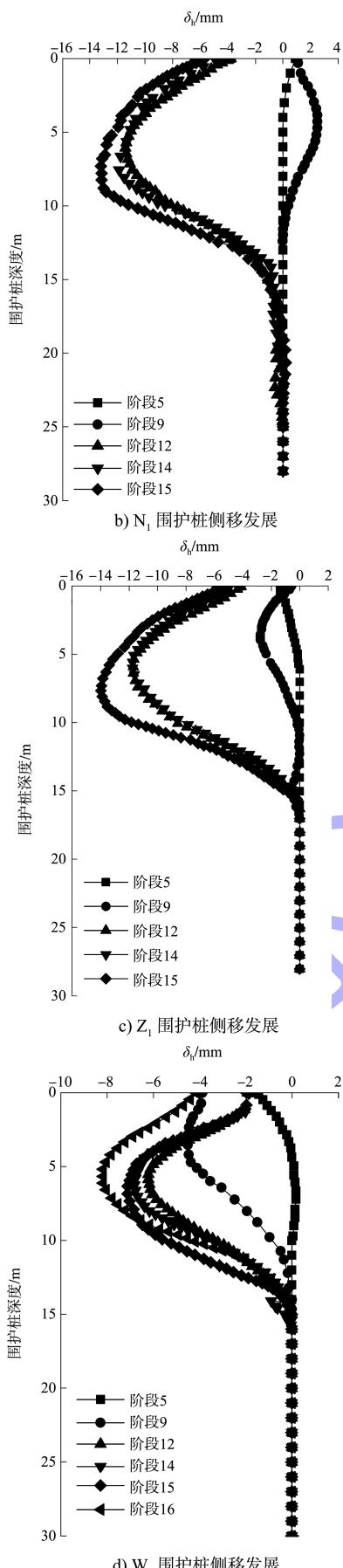


图 6 典型围护桩分布位置及阶段桩身侧移发展

施工过程中不同位置围护桩顶竖向和水平位移变化见图 7。可以看出，同一类型围护桩顶竖向位移在同一时期差异不大，其中内围护桩顶竖向位移接近变形限值 20 mm，须重点关注。桩顶水平位移以航道轴线为中心表现出明显的对称性，对比图 7a)、b)发现桩顶水平位移远小于竖向位移。

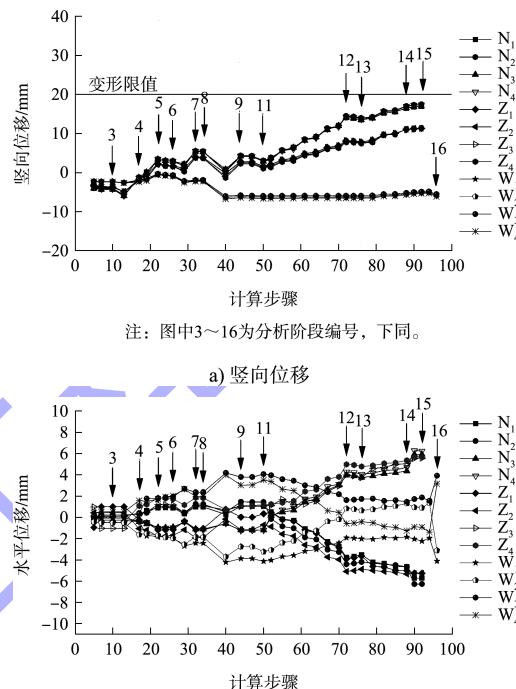
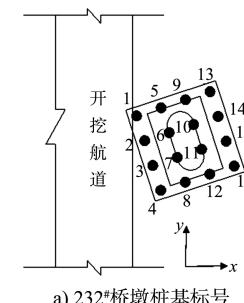


图 7 围护桩顶位移

2.3.2 桩基变化

航道基坑开挖不可避免地会引发高铁桥墩桩基变位，以航道东侧 232#桥墩桩为研究对象，对桥墩承台下的 16 根桩基进行标号，其中以 1# 桩基为例，其桩身位移分析结果见图 8，横向即 x 方向，顺向即 y 方向。可以看出，斜撑基坑开挖完成后 1# 桩基桩身顺向位移达到最大值 1.93 mm，施加水荷载后桩基顺向位移反而减小。对比图 8b)、c)可知，桩基横向位移对航道基坑施工的影响非常小。



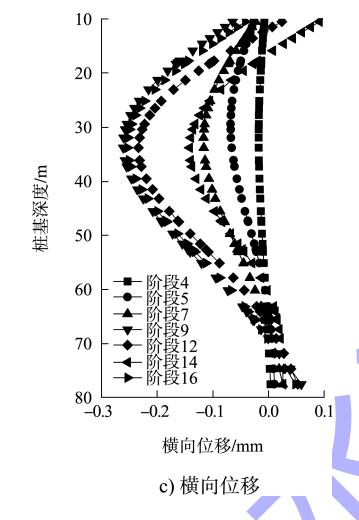
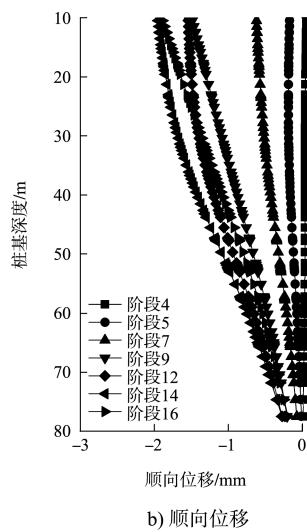


图 8 桥墩桩基编号及 1# 桩基位移

2.3.3 桥墩结构位移

桥墩顶的竖向位移发展情况见图 9。最终 232# 和 233# 桥墩分别向下沉降了 0.57 和 0.72 mm，远小于规范要求的 2 mm 限值。

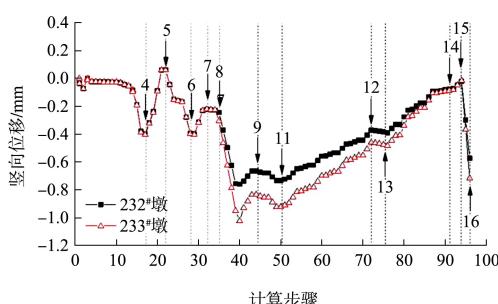


图 9 桥墩顶竖向位移

航道中心坑底土体、232# 桥墩 1# 桩顶以及 232# 桥墩顶的竖向位移发展情况对比见图 10。可

以看出，三者竖向位移变化趋势非常相似，就对航道施工的变形响应来看，土体 > 桩基 > 桥墩。

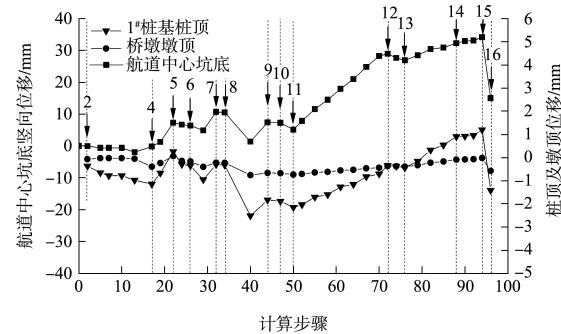


图 10 土体、桩顶和桥墩顶的竖向位移对比

3 结语

1) 航道土方完全开挖后，航道坑底隆起呈中间窄、两端宽的双曲线型。土方开挖、拆除围护和支撑等卸荷步骤时坑底土体回弹，施工支撑、混凝土板和施加水荷载等加载阶段时坑底土体沉降，此外基坑降水也是影响土体沉降的重要因素。数值计算结果表明，坚实的支护系统、分层开挖结合多次降水，可以避免较大土体沉陷，有效控制土体开挖引发的坑底隆起。

2) 围护桩桩身随开挖深度、开挖位置、支护系统等情况呈现出不同的变形特性。维护桩顶竖向位移远大于水平位移，从最终竖向位移绝对值来看，施工过程中应重点关注内围护桩的位移情况。

3) 高铁桥墩顶、桩基及航道坑底土体的竖向位移变化趋势非常相似，对航道施工的变形响应大小为：土体 > 桩基 > 桥墩。

4) 本设计加固方案下的土体位移和结构位移均符合规范限值要求，有效控制了高铁桥桩基和桥墩变形和位移，满足列车安全运行要求。

参考文献：

- [1] 刘松玉,李洪江,童立元,等.地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应物理模拟及新进展[J].岩土工程学报,2019,41(7):1329-1338.
- [2] 贺健军,建鑫龙.基坑对既有桥梁桩基变形特性影响的有限元分析[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(5):255-257.

(下转第 133 页)