

杭州某国道明挖下穿对既有市政高架桥桥墩影响分析

陈建军¹, 刘延昭¹, 吴高创¹, 李俊^{2,3}, 徐超^{2,3}, 王金昌^{2,3}

(1. 浙江交工地下工程有限公司, 浙江 杭州 310005; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江大学 平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 为研究 235 国道明挖下穿对留祥路西延互通主线桥桥墩的影响, 本文结合现场监测和有限元模拟对其展开了分析。基于依托工程, 采用 Plaxis 3D 数值分析软件建立了地层与结构的三维计算模型, 其中土体采用 HSS 本构模型模拟, 对下穿段明挖隧道施工的全过程进行仿真模拟, 分析了 235 国道隧道段明挖下穿施工对两侧桥墩的变形和受力的影响。隧道段基坑开挖施工过程中, 围护结构水平位移的有限元计算结果与实测结果吻合较好, 验证了计算模型的有效性, 并说明了 HSS 本构模型能较好地模拟下穿段的明挖施工。有限元计算结果表明, 在 235 国道隧道段的明挖施工、隧道建造等整个建造过程中, 两侧高架桥桥墩均受到一定影响, 主线桥桥墩的最大水平位移、竖向位移均满足变形控制要求, 结构处于安全状态。

关键词: 明挖; 下穿; 现场实测; 数值模拟; HSS 本构; 变形控制

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)06-0527-07

Analysis of the influence of open-cut undercrossing of a national highway in Hangzhou on the existing municipal viaduct piers

CHEN Jian-jun¹, LIU Yan-zhao¹, WU Gao-chuang¹, LI Jun^{2,3}, XU Chao^{2,3}, WANG Jin-chang^{2,3}

(1. Zhejiang Jiaogong Underground Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310005, Zhejiang, China;

2. Department of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

3. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: To investigate the influence of open-cut undercrossing of national highway 235 on the main bridge piers of Liuxiang Road west extension interchange, this work employed a combination of field monitoring and finite element simulation. Based on the supporting project, the three-dimensional computational model for both stratum and structure established using Plaxis 3D numerical analysis software, incorporated the HSS constitutive model to simulate the soil behavior. The entire process of open-cut tunnel construction in the undercrossing section was simulated. This analysis delved into the influence of the open-cut tunnel section of national highway 235 on the deformation and stress of piers on both sides of the main bridge of Liuxiang Road west extension interchange. Throughout the excavation of the foundation pit in the tunnel section, the finite calculation results for the horizontal displacement of the bracing structure closely aligned with the measured results, validating the calculation model. This affirmed the efficacy of the HSS constitutive model in simulating the open-cut construction of the undercrossing section. Finite element calculations revealed that, over the entire construction process of the open-cut construction and tunnel construction of the national highway 235 tunnel section, the viaduct piers on both sides experienced a certain degree of impact. The maximum horizontal and vertical displacements of the main bridge pier conformed to the deformation control requirements, ensuring the structural integrity and safety.

Key words: open-cut; undercrossing; field test; numerical simulation; HSS constitutive model; deformation control

0 引言

为缓解城市与城市之间日益增长的交通压

力, 国道线路网、高架桥梁系统等发展迅速。两者之间的交叉节点工程案例也不断涌现, 交叉节点段多采用隔离桩等措施以减小下穿施工对邻近高架

收稿日期: 2023-10-23

基金项目: 浙江省建设厅项目(2022K073); 浙江交工协同创新联合研究中心项目(ZDJG2021001)。

作者简介: 陈建军(1984—), 男, 浙江武义人, 本科, 高级工程师, 主要从事交通工程研究工作。E-mail: 262378994@qq.com。

桥墩的影响^[1-2]。由于桥梁的位移控制标准较其他类型建筑更加严格,近接基坑施工造成的卸载效应势必会对邻近桥墩和桩基的结构安全产生不利影响,桥梁结构的附加位移过大,一旦出现工程事故,后果将不堪设想^[3]。因此,为确保邻近高架桥的结构安全,研究明挖下穿对高架桥桥墩和桩基的不利影响就显得尤为重要。

针对这一问题,相关学者开展了大量研究^[4-9]:张爱军等^[5]、江杰等^[6]提出了两阶段分析方法,通过解析解得到了基坑施工下桩基的变形响应结果。陈福全等^[7]通过 Plaxis 软件对排桩加内撑支护体系的基坑开挖全过程进行了有限元分析,讨论了基坑开挖深度、支护刚度、基坑净距、桩身刚度、桩身长度等对桩身水平位移和弯矩的影响。木林隆等^[8]基于土体小应变特性,提出了基坑开挖卸载引起周围土体位移变化的经验计算公式,得到了邻近桩基的变形结果,并通过有限元验证了该经验公式的有效性。唐德琪等^[9]通过模型试验分析了明挖施工对邻近桩基的侧向变形、弯矩与剪力的不利影响。

但由于岩土具有典型的区域特点和加载应力依赖性,因此需要对具体岩土工程相关问题开展针对性研究。本文首先基于现场实测和有限元模拟得到了隧道段明挖施工过程中围护结构的变形,并进行对比分析,验证了计算模型的有效性。进而展开 235 国道下穿留祥路西延互通主线桥的隧道段建造全过程模拟分析,研究隧道明挖下穿施工对邻近桥墩及桩基变形的影响。

1 依托工程

235 国道杭州老余杭至五常段改建工程,起于科技大道与 235 国道交叉口,路线由西向东经过东西大道(320 国道)、良睦路(规划)、良祥路(规划)、振华西路,高架桥终点与杭州绕城高速公路三墩互通改建工程高架桥相接,地面道路接至余杭塘路与良祥路(规划)交叉口。路线全长约 11.26 km,其中地面道路长度为 7.9 km,高架和隧道(快速通道部分)总长度为 9.9 km,其中高架桥梁长度共 4.9 km,隧道(不含 U 型槽)长度为 2.976 km,依托工程位于杭州城西以软土为主的区域。

隧道于 K4+195~K4+235 下穿在建留祥路西延互通主线桥高架桥,两侧既有 W27、W28 桥墩现场照片如图 1 所示。隧道与高架桥的平、立面位置如图 2~3 所示。

高架桥为双向六车道,桥梁标准宽 26.5 m。W26~W29 桥墩跨径布置“45 m+60 m+35.5 m”组合钢梁,下部结构采用柱式墩、承台+钻孔灌注桩基础。W27 与 W28 桥墩下部结构为 2.3 m×2.3 m 柱式墩,高 21.0 m,承台尺寸为 8.1 m×12.6 m,高 3.5 m,各承台累计 6 根钻孔灌注桩基础,桩径为 1.8 m,顺桥向与横桥向桩间距为 4.5 m,桩长为 55 m。



图 1 W27 和 W28 桥墩现场照片
Fig. 1 Photos of W27 and W28 piers

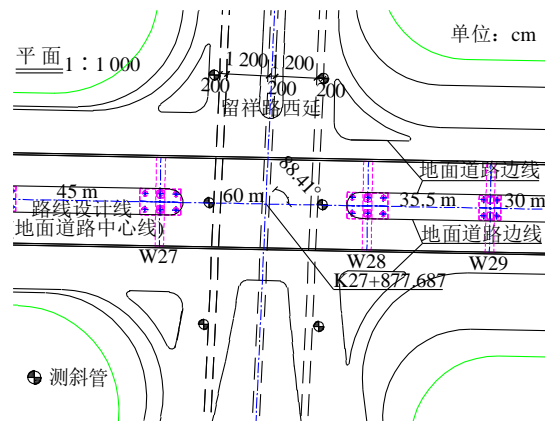


图 2 下穿段节点平面示意图
Fig. 2 Undercrossing section node plane diagram

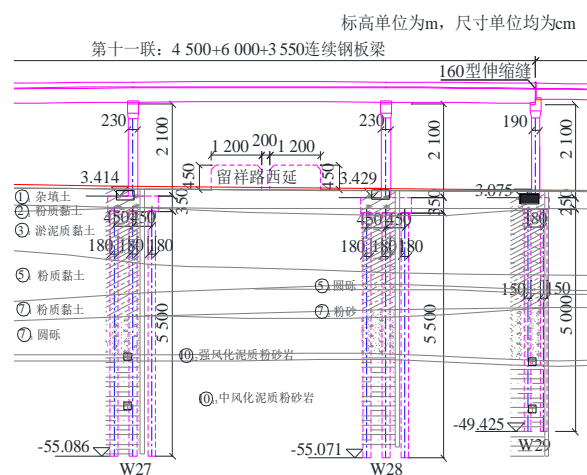


图 3 下穿段节点立面示意图
Fig. 3 Undercrossing section node facade diagram

235 国道下穿留祥路西延互通主线桥段为二期基坑,基坑总长 129.9 m,宽 35.5 m,基坑两端通过排桩+搅拌桩止水帷幕作封堵墙与一期基坑隔开。基坑支护结构采用排桩+水泥搅拌桩止水帷

幕,内支撑为一道混凝土支撑+二道钢支撑,立柱为桩径 0.9 m 钻孔灌注桩。其中排桩为 C30 混凝土,桩径 0.9 m,间距 1.05 m,桩长 26.4 m;水泥搅拌桩桩径 0.85 m,间距 0.6 m;第一道支撑为 C30 混凝土支撑,支撑截面为 0.8 m×0.9 m,水平间距为 9 m,第二、三道为 Φ609 钢支撑,水平间距 3 m,支撑竖向间距由上至下依次为 4.12 m、3.5 m。主线桥桥墩附近基坑坑底加固采用旋喷桩进行满堂加固,加固深度 4 m;主线桥桥墩较远处基坑坑底

加固采用水泥搅拌桩进行抽条加固,加固深度 3 m。高压旋喷桩与搅拌桩桩径均为 0.85 m,间距 0.6 m,水泥掺量 20%。由于二期基坑北侧距离桥墩较近,且现场原地面与整平后高差较大,冠梁处开挖采用拉森钢板桩作临时支护,同时减小冠梁开挖及施工对主线桥桥墩的不利影响。采用 6 m 长拉森 IV 钢板桩进行隔离,待冠梁施工结束土体回填后拔除拉森钢板桩。二期基坑围护结构的立面和平面示意如图 4~5 所示。

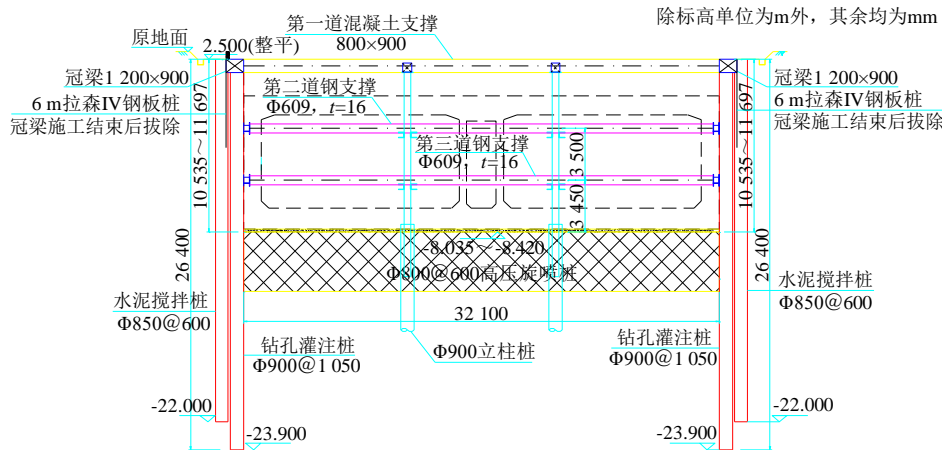


图 4 明挖段围护结构立面示意图

Fig. 4 Open-cut section bracing structure facade diagram

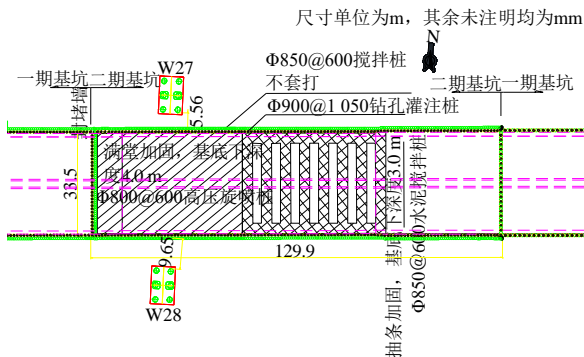


图 5 明挖段围护结构平面示意图

Fig. 5 Open-cut section bracing structure plan diagram

2 有限元数值模拟分析模型

根据 235 国道下穿留祥路西延互通主线桥工程设计图纸与地勘资料,235 国道以明挖隧道方式下穿高架桥。本文采用地层结构法建立三维数值分析模型,基坑的平面尺寸宽度 35.5 m,挖深最大 11.7 m,模型尺寸的选取为基坑两侧各外扩 5 倍基坑挖深,土层深度约为 7 倍基坑挖深,以消除边界的影响,模型尺寸取 160 m×150 m×84.35 m (X×Y×Z),其中,X 方向为横桥向,Y 方向为顺桥向,Y 正向为桥梁大桩号方向,Z 方向为竖向,如图 6 所示。模型网格采用空间四面体 10 节点单元进

行划分,累计 179 408 个单元,258 803 个单元节点。

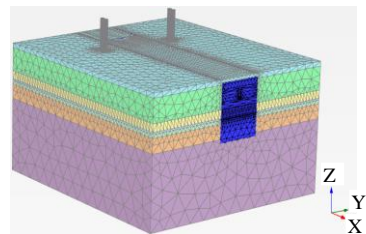


图 6 有限元模型网格

Fig. 6 Mesh of finite element model

土体均采用小应变土体硬化模型 (HSS) 进行模拟;拉森钢板桩以及钻孔灌注桩等采用板单元进行模拟;桥梁桩和立柱桩采用嵌入梁单元进行模拟;支撑采用梁单元进行模拟。模型中高压旋喷桩、水泥搅拌桩的坑底加固根据图 5 所示的加固范围通过实体单元进行模拟,水泥掺量为 20%,采用 Mohr-Coulomb 本构模型,弹性模量取为 120 MPa,黏聚力 $c'=300$ kPa, $\varphi'=30^\circ$ [10]。参考 HSS 本构模型参数确定的相关研究[11-15],确定土体及结构模型参数如表 1~3 所示。表 2 中围护结构桩的板单元厚度根据围护结构每延米的刚度等效进行确定。

有限元计算工况为:现状模拟(主线桥按运营状态考虑)→围护结构施工→清表至第一道支撑底→施工冠梁与第一道混凝土支撑及挡墙→回填土并回收拉

森钢板桩→开挖至第二道支撑底→施工第二道支撑→开挖至第三道支撑底→施工第三道支撑→开挖至坑底→施工底板及腋角上方0.3 m挡墙→拆除第三道支撑→施工侧墙至第二道支撑底→拆除第二道支撑→施工剩余侧墙及顶板→拆除第一道支撑→回填土。

根据235国道下穿明挖段的建造时序，留祥路西延互通主线桥为运营状态，在下穿段施工期

间，主线桥交通绕行至西段隧道顶板。因此在下穿段施工期间，主线桥桥墩W27、W28墩顶荷载主要为上跨梁体自重。W26~W29上跨为“45 m+60 m+35.5 m”组合钢梁，梁体自重依次为29 550 kN、39 400 kN、23 300 kN，传递到W27墩顶集中荷载为34 475 kN，传递到W28墩顶集中荷载为31 350 kN。

表1 HSS土体本构模型参数表
Table 1 Parameter table of HSS soil constitutive model

土层	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$	$\Phi(^{\circ})$	G_0/MPa	$\gamma_{0.7}$	m
① ₁ 杂填土	17.5	3.00	3.00	12.00	2.0	26.0	0	24.00	0.2×10^{-3}	0.5
② ₁ 粉质黏土	19.5	9.84	9.84	68.88	10.0	29.0	0	137.76	0.2×10^{-3}	0.8
③ ₁ 淤泥质黏土	17.1	2.10	2.10	18.90	3.0	24.0	0	37.80	0.2×10^{-3}	0.8
⑤ ₁ 粉质黏土	19.5	8.71	8.71	60.97	9.0	28.0	0	121.94	0.2×10^{-3}	0.8
⑦ ₁ 粉质黏土	19.1	6.03	6.03	42.21	7.0	26.0	0	84.42	0.2×10^{-3}	0.8
⑦ ₃ 圆砾	21.0	18.00	18.00	54.00	2.0	33.0	3	—	—	0.5

注： γ 为场地土的重度； $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 为场地土的主固结加载切线刚度； E_{50}^{ref} 为场地土的标准三轴排水试验割线刚度； $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为场地土的卸载重加载刚度； c' 为场地土的有效黏聚力； ϕ' 为场地土的有效内摩擦角； Φ 为场地土的膨胀角（ $\phi'-30^{\circ}$ ）； G_0 为小应变剪切模量； $\gamma_{0.7}$ 为剪切应变阈值； m 为场地土的刚度应力水平相关幂值。

表2 板单元模型参数表

Table 2 Parameter table of plate element model

结构名称	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa	等效厚度/m
Φ900@1 050 钻孔灌注桩	26.0	30.0	0.72
拉森钢板桩	78.5	210.0	0.20

表3 嵌入梁单元模型参数表

Table 3 Parameter table of embedded beam element

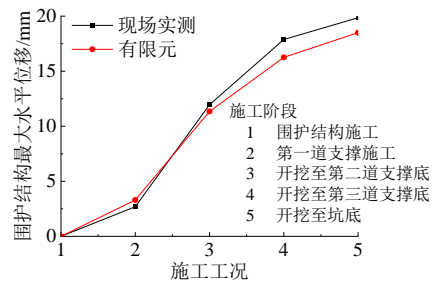
结构名称	直径/m	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa
桥梁桩基	1.8	26.0	30.0
立柱桩	0.9	26.0	30.0

3 有限元结果与现场实测对比

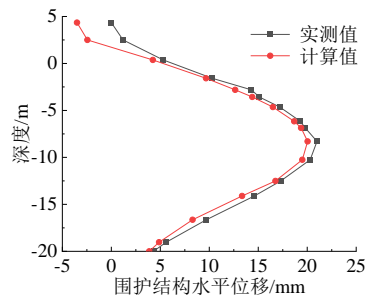
3.1 有限元与现场实测对比分析

235国道下穿留祥路西延互通主线桥节点工程在下穿明挖段基坑开挖施工过程中，对围护结构的深层水平位移展开了监测。基于现场监测数据以及有限元结果，整理了围护结构施工、第一道支撑施工、开挖至第二道支撑底、开挖至第三道支撑底、开挖至坑底的关键施工节点的基坑围护结构最大水平位移结果，以及基坑开挖至坑底工况时围护结构沿深度分布的水平位移，如图7所示。从图7中可以看出，下穿段明挖隧道基坑开挖的不同工况下，围护结构最大水平位移的有限元计算结果与现

场实测吻合较好，反映出由于基坑开挖卸载引起围护结构侧向位移内凹形变形规律；根据基坑开挖至坑底工况下围护结构水平位移沿深度分布情况，现场实测值与计算值吻合较好。因此说明了HSS本构模型能较为准确地模拟基坑开挖。但由于现场施工较为复杂，还存在现场施工车辆等外部偶然荷载，现场实测数据较有限元结果稍大。



(a) 开挖阶段围护结构最大水平位移



(b) 开挖至坑底工况时围护结构沿深度分布的水平位移

图7 围护结构水平位移实测值与计算值

Fig. 7 Measured value and calculated value of horizontal displacement of bracing structure

3.2 有限元计算结果

235 国道以明挖隧道方式下穿留祥路西延互通主线桥,从主线桥 W27、W28 桥墩之间下穿。由于前述计算工况较多,此处选取最不利工况即隧道基坑开挖至坑底工况进行分析。提取该典型工况下围护结构水平位移云图,桥墩水平和竖向位移云图,桥墩桩基水平和竖向位移以及弯矩云图,如图 8~9 所示。在隧道基坑从两侧高架桥桥墩中间明挖下穿施工的影响下,两侧高架桥桥墩往基坑侧偏移,竖向位移主要表现为隆起。近高架桥桥墩基坑坑底加固采用满堂加固,而远离高架桥桥墩基坑坑底采用

抽条加固。根据围护结构位移云图,最大水平位移发生在远离桥墩处,说明了该加固方案能较好地控制高架桥桥墩水平位移。基坑开挖至坑底时,围护结构水平位移最大为 15.500 mm;桥墩最大水平位移为 1.056 mm,最大竖向位移为 0.118 mm,表现为隆起;桥墩桩基最大水平位移为 -1.856 mm,最大竖向位移为 0.247 mm,表现为隆起。桥梁桩基混凝土强度等级为 C30,桩径 1.8 m,桩身弯矩设计值为 2 214.35 kN·m。受隧道基坑开挖的影响,两侧桥梁桩基最大弯矩由 841.28 kN·m 增长至 1 152.00 kN·m,低于弯矩设计值。

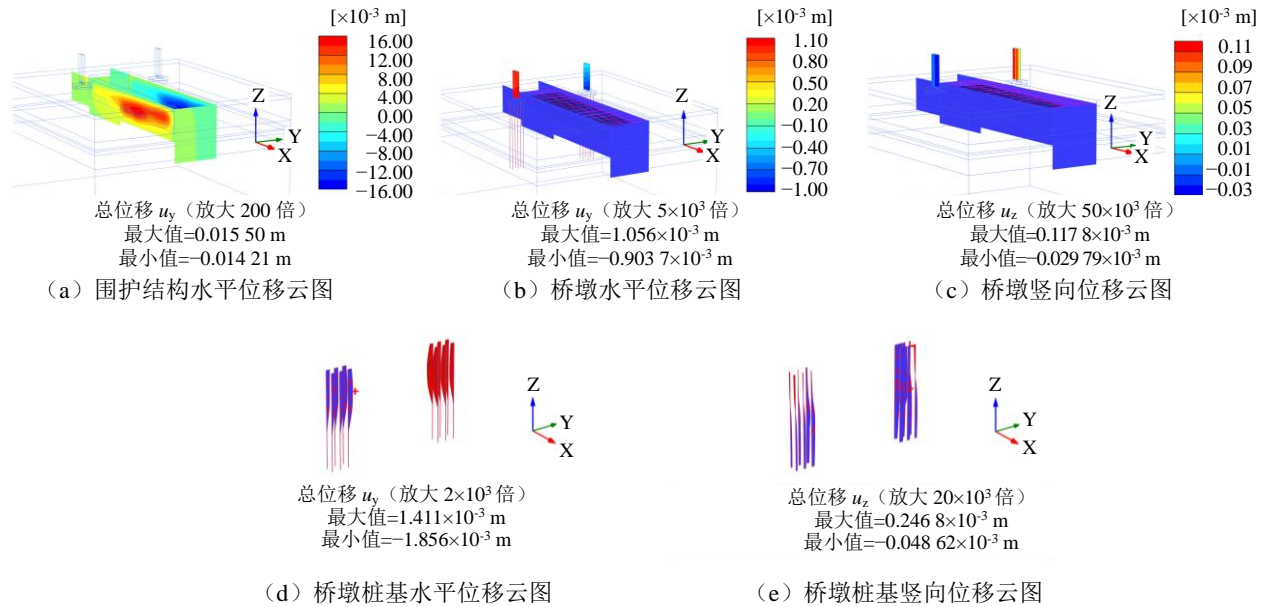


图 8 开挖至坑底工况位移云图

Fig. 8 Displacement nephogram of excavation to the bottom of the pit



图 9 桥墩桩基弯矩云图

Fig. 9 Bending moment nephogram of bridge pier pile foundation

3.3 主要施工工况下桥墩位移汇总

根据 235 国道下穿留祥路西延互通主线桥工程设计图纸与地勘资料,采用地层结构法建立三维数值分析模型,得到了各个施工工况下 W27、W28 桥墩和桥墩桩基在各个方向上的最大位移响应结果,汇总主要施工工况的计算结果如表 4 所示。在国道下穿段整个施工过程中,W27、W28

桥墩的横桥向最大水平位移为 0.883 mm,顺桥向最大水平位移为 3.061 mm,最大竖向位移为 -0.330 mm。

根据《公路桥涵养护规范》(JTG 5120—2021)^[6],参考国内类似工程经验,桥墩变形控制要求为:竖向位移不大于 10 mm,水平位移不大于 5 mm。在国道下穿段全过程施工影响下,两侧桥墩变形满足控制要求。

表4 主要工况下桥墩与桩基位移汇总表

Table 4 Summary table of pier and pile foundation displacement under main working conditions

围护结构施工 主要工况	桥墩最大位移/mm			桥墩桩基最大位移/mm		
	顺桥向水平位移	横桥向水平位移	竖向位移	顺桥向水平位移	横桥向水平位移	竖向位移
施工第一道支撑	0.326	0.080	-0.233	0.438	0.288	-0.223
开挖至第二道支撑	0.850	0.270	-0.019	0.847	0.253	-0.021/0.042
开挖至第三道支撑	0.927	0.437	-0.017/0.072	1.316	0.446	-0.026/0.167
开挖至坑底	1.056	0.622	-0.030/0.118	1.856	0.601	-0.049/0.247
拆除第三道支撑	1.132	0.562	-0.081/0.165	1.638	0.502	-0.043/0.174
拆除第二道支撑	1.541	0.587	-0.069/0.112	1.750	0.492	-0.040/0.139
拆除第一道支撑	1.828	0.657	-0.140/0.005	1.836	0.528	-0.107/0.067
回填土	3.061	0.883	-0.330	2.040	0.573	-0.462

注：竖向位移“-”表示沉降。

4 结论

本文依托 235 国道下穿留祥路西延互通主线桥节点工程，基于 HSS 本构模型开展下穿段施工全过程仿真模拟，并结合现场实测数据验证模型的有效性，最终得到了在各个施工工况下 W27、W28 桥墩及其桩基在各个方向的位移响应结果，主要结论如下：

(1) 考虑土体小刚度的土体硬化模型（HSS）能够反映土体的加载和卸载的非线性，能够反映出土体单元的应力路径，同时可以采用地质勘察报告结合已有的研究成果来标定其强度和刚度参数，为明挖基坑下穿施工对桥梁的影响分析提供可靠的评价手段。

(2) 235 国道下穿段隧道基坑开挖过程中，围护结构的有限元计算结果与现场实测吻合较好，说明分析模型能够反映实际的施工工况。

(3) 下穿段明挖施工全过程中，明挖基坑卸载引起围护结构发生侧向变形，进而影响周围土层的变形，从而对两侧主线桥墩产生了一定的影响，其中横桥向最大水平位移为 0.883 mm，顺桥向最大水平位移为 3.061 mm，最大竖向位移为 -0.330 mm。说明基坑开挖主要影响桥梁顺桥向变形，在工程实施过程中应重点关注桥梁的顺桥向变形。桥墩变形满足《公路桥涵养护规范》（JTG 5120—2021）的变形 10 mm 控制要求。

(4) 桥梁桩基弯矩发生一定增长，但低于桩基弯矩设计值，桥梁结构处于安全状态。

参考文献

[1] 李夕林, 魏祥, 梁志荣. 软土地区深基坑变形控制设计实践与分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 1):

160-164.

LI Xi-lin, WEI Xiang, LIANG Zhi-rong. Design practice and analysis of deformation control of deep excavations in soft soil areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S1): 160-164.

[2] 冯春蕾, 张顶立, 房倩, 等. 软土地区隔断墙控制基坑变形的作用机理及其效果研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2087-2095.

FENG Chun-lei, ZHANG Ding-li, FANG Qian, et al. Research on diaphragm wall mechanism and effect of deformation control in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2087-2095.

[3] 程鸿群, 余佳雪, 袁宁, 等. 深基坑工程施工过程风险综合评价[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(3): 491-498.

CHENG Hong-qun, SHE Jia-xue, YUAN Ning, et al. Synthetic evaluation on risk of deep excavation engineering construction process[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(3): 491-498.

[4] GOH A T C, TEH C I, WONG K S. Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(9): 792-801.

[5] 张爱军, 莫海鸿, 李爱国, 等. 基坑开挖对邻近桩基影响的两阶段分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 2746-2750.

ZHANG Ai-jun, MO Hai-hong, LI Ai-guo, et al. Two-stage analysis method for behavior of adjacent piles due to foundation pit excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2746-2750.

- [6] 江杰, 张探, 欧孝夺, 等. 软土地基基坑开挖对临近桩变形影响的时效分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2022, 49(11): 206-215.
JIANG Jie, ZHANG Tan, OU Xiao-duo, et al. Time-effect analysis on influence of excavation on adjacent pile deformation in soft soil[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2022, 49(11): 206-215.
- [7] 陈福全, 汪金卫, 刘毓毓. 基坑开挖时邻近桩基性状的数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1971-1976.
CHEN Fu-quan, WANG Jin-wei, LIU Yu-chuan. Numerical analysis of pile response due to braced excavation-induced soil lateral movement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1971-1976.
- [8] 木林隆, 黄茂松. 基于小应变特性的基坑开挖对邻近桩基影响分析方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 304-310.
MU Lin-long, HUANG Mao-song. Small-strain behavior-based method for effect of excavations on adjacent pile foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 304-310.
- [9] 唐德琪, 俞峰, 黄祥国, 等. 开挖诱发坑内既有基桩附加内力的模型试验[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2019, 53(8): 1457-1466.
TANG De-qi, YU Feng, HUANG Xiang-guo, et al. Chamber tests for investigating additional internal forces in existing foundation piles induced by excavation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2019, 53(8): 1457-1466.
- [10] 陈仁朋, 孟凡衍, 李忠超, 等. 邻近深基坑地铁隧道过大位移及保护措施[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2016, 50(5): 856-863.
CHEN Ren-peng, MENG Fan-yan, LI Zhong-chao, et al. Considerable displacement and protective measures for metro tunnels adjacent deep excavation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2016, 50(5): 856-863.
- [11] 陈赵慧, 阮永芬, 王鹏, 等. 湖相沉积典型软土 HSS 模型参数取值研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(1): 74-85, 93.
CHEN Zhao-hui, RUAN Yong-fen, WANG Peng, et al. Parameter value of HSS model for lacustrine sedimentary soft soil[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(1): 74-85, 93.
- [12] 白时雨, 王文军, 谢新宇, 等. 考虑扰动影响的土体小应变硬化模型参数试验研究及其在基坑工程中的应用[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 206-216.
BAI Shi-yu, WANG Wen-jun, XIE Xin-yu, et al. Experimental study on HS-small model parameters of soil considering disturbance and its application in foundation pit engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 206-216.
- [13] 陈赞, 罗敏敏, 夏能武, 等. 软土 HSS 模型参数现有试验成果统计分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 2): 197-201.
CHEN Yun, LUO Min-min, XIA Neng-wu, et al. Statistical analysis of existing test results of HSS model parameters for soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 197-201.
- [14] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833-845.
GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833-845.
- [15] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269-278.
LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 269-278.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵养护规范: JTG 5120—2021[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Maintenance of Highway Bridges and Culverts: JTG 5120 — 2021[S]. Beijing: China Communications Press, 2021.