

新建铁路基坑开挖稳定性分析及对既有铁路影响

蒋成强

(中国铁路设计集团有限公司, 天津市 300308)

摘要: 以通苏嘉甬铁路跨宁波绕城高速特大桥为背景, 采用 PLAXIS3D 软件进行数值分析, 并与理论计算相结合的方法研究跨铁路线路的基坑开挖的稳定性及对既有铁路的影响。结果表明: 新建桥梁 95#、103# 承台基坑采用钻孔灌注桩+内支撑+坑底加固的支护体系, 其整体稳定性、抗渗流、抗倾覆、坑底抗隆起、墙底抗隆起安全系数均能满足基坑安全等级一级要求; 对不同工况下的数值分析结果表明桥墩和承台变形均满足要求, 基坑防护体系合理, 开挖过程可确保既有铁路的安全; 全程监测既有铁路桥墩的变形, 并与理论值进行对比, 判断既有桥墩的变形, 并对铁路运营安全进行预警。

关键词: 基坑开挖; 稳定性分析; 既有铁路; 变形监测

中图分类号: U24

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0217-06

Analysis on Stability of Foundation Pit Excavation for New Railways and Its Impact on Existing Railways

JIANG Chengqiang

(China Railway Design Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: Based on the special bridge of the Tongzhou-Suzhou-Jiaxing-Ningbo Railway crossing the Ningbo Ring Expressway, the PLAXIS3D software is used for numerical analysis, and the method combined with theoretical calculation is adopted to study the stability of foundation pit excavation across railway lines and its impact on the existing railway. The results show that the supporting system of cast-in-place bored piles, internal bracing and pit bottom reinforcement is used for 95# and 103# base slab foundation pits of the new bridge, and the safety factors of overall stability, anti-overturning, anti-seepage, anti-heave at the pit bottom, and anti-heave at the wall bottom all meet the requirements for Safety Grade Level 1 of foundation pit. The numerical analysis results under different working conditions show that the deformations of both the bridge piers and the base slabs all meet the requirements. The foundation pit protection system is reasonable, and the excavation process can ensure the safety of existing railways. The deformation of existing railway bridge piers is monitored throughout the process. Compared with the theoretical values, the deformation of existing bridge piers is judged, and the early warnings for railway operation safety is issued.

Keywords: foundation pit excavation; stability analysis; existing railways; deformation monitoring

0 引言

随着铁路建设的快速发展, 铁路基坑工程数量日益增多, 规模也不断扩大。铁路基坑工程的稳定性对周边铁路线路的正常运营以及邻近建筑物的安全产生至关重要的影响。贾晓龙^[1]通过 ABAQUS 软件从基坑开挖到回填对铁路基坑工程进行数值模拟, 同时将周边建筑物也加入到了基坑模拟中, 为施工提供了更加可靠的依据和理论指导。也有一些学

者通过有限元分析等手段研究了深基坑对周边建筑物的影响^[2-3]。康志军^[4]以围护结构最大侧移为研究指标提出了最大侧移深度 H_m 的方法具有良好的效果。国内学者对不同的围护结构进行实测, 对结构侧向位移、非对称开挖以及支护的变形形状进行了大量研究^[5-8]。目前铁路建设快速发展, 新的铁路线路通常要跨越既有的线路, 铁路线路荷载也会对基坑造成不利影响。一些学者进行了实测得出了围护结构的变形与内力规律, 同时基坑工程地进行在一定程度上也会使邻近铁路产生几何不平顺即水平或竖向的变形^[9-10]。秦开颜^[11]通过理论计算和数值计算得出相关数据并且与实测数据进行对比分析, 验证了理论分析的准确性。张新东^[12]则在列车动荷载

收稿日期: 2025-04-11

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题 (2020YY24608)

作者简介: 蒋成强(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计及相关研究工作。

与基坑安全上进行研究。Shahin^[13]等采用数值模拟和试验相结合的方法探究了基坑开挖对建筑的影响规律。

由于各铁路线路所在地质条件各有差别,基坑开挖及对既有线路的影响各不相同。因此,本文将以通苏嘉甬铁路跨宁波绕城高速特大桥为工程背景,对跨铁路线路的基坑开挖稳定性及对既有线路的影响进行研究,为保障基坑开挖的安全及既有线路的安全提供技术支持。

1 工程背景

1.1 工程概况

通苏嘉甬铁路为南北铁路,该桥主要为跨越萧甬铁路、杭深铁路(杭甬段)、S319省道、宁波绕城高速、机场北路、慈江等而设。新建通苏嘉甬铁路桥梁桩基包括 $\phi 2.0$ m、 $\phi 1.5$ m、 $\phi 1.25$ m三类。其中95#墩桩基($\phi 2.0$ m)距杭深铁路619#墩既有桩基距离最近,桩间距为29.8 m;102#墩桩基($\phi 1.5$ m)距杭深铁路626#墩既有桩基距离最近,桩间距为10.9 m;99#墩桩基($\phi 1.25$ m)距杭深铁路623#墩既有桩基距离最近,桩间距为7.5 m,均大于/等于6倍新建桩桩径,满足桩间距要求,具体布置见图1。

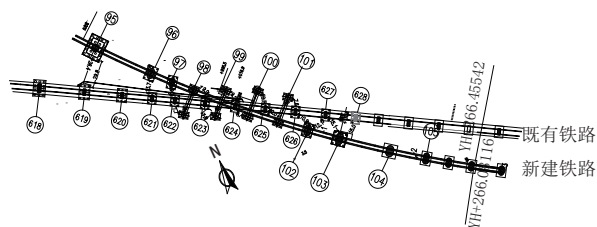


图1 上跨节点平面图

1.2 工程地质及水文条件

经地质调查及勘探揭示,桥址区勘探范围内表覆填筑土:海积层淤泥、淤泥质黏土,粗角砾土;砾砂,冲洪积层(Q3al+pl)粉质黏土、含砾粉质黏土、细圆砾土;下伏白垩系下统馆头组(K1g)凝灰岩及侏罗系上统c-2段(J3c-2)凝灰质砂岩。根据调查,桥址区主要地表水为DK264+038.41处湖心村水渠及DK265+759.71~DK265+819.30段慈江。

2 基坑开挖方案

新建通苏嘉甬铁路95#桥墩承台基坑开挖13 m,采用直径1.2 m间距1.4 m桩长40 m的钻孔桩防护开挖,桩底承载力为 $\sigma_0=100$ kPa。除第1道为1.0 m $\times$ 0.8 m混凝土支撑外,2、3道为钢支撑,第一层混凝土

支撑位于基坑顶部,第二层距离第一层的竖向距离是4.5 m,第三层距离第二层的竖向距离是4 m,距离基坑底部是4.5 m。承台底以下设置0.5 m厚素混凝土封底,坑底采用直径0.6 m间距1.0 m桩长7 m的深搅桩加固。围护结构外采用直径0.7 m、间距0.5 m桩长20 m的双头搅拌桩止水,见图2(a)。

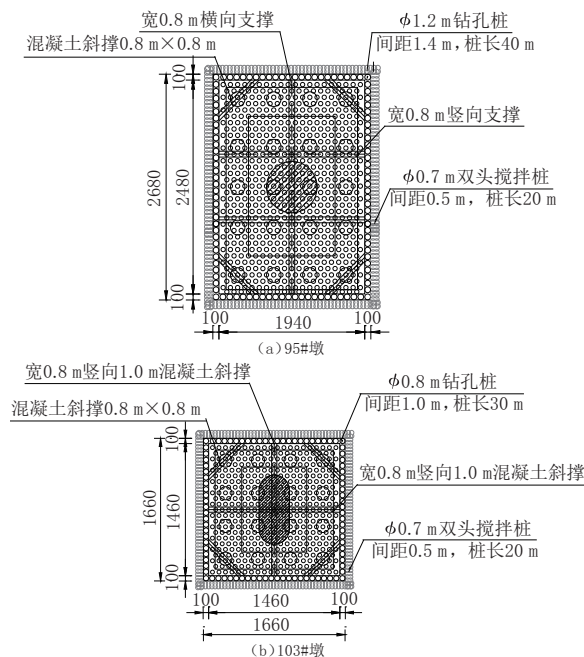


图2 承台开挖支护平面布置图(单位:cm)

基坑围护桩与既有铁路桩基中心间距为26.3 m,基坑边与既有铁路承台最小净距约25.3 m。

新建通苏嘉甬铁路103#桥墩承台基坑开挖5 m,采用直径0.8 m间距1.0 m桩长30 m的钻孔桩防护开挖,桩底承载力为 $\sigma_0=50$ kPa。仅设置1道1.0 m $\times$ 0.8 m混凝土支撑,距离基顶1 m基坑底4 m的位置。承台底以下设置0.5 m厚素混凝土封底,坑底采用直径0.6 m间距1.0 m桩长7 m的深搅桩加固。围护结构外采用直径0.7 m间距0.5 m桩长20 m的双头搅拌桩止水,见图2(b)。

基坑围护桩与杭深铁路既有桩基最小桩中心间距为11.3 m,基坑边与杭深铁路承台最小净距约10.2 m。

3 基坑开挖稳定性分析

以开挖最深的95#墩和103#墩为例进行验算。

新建通苏嘉甬铁路95#桥墩承台基坑开挖13 m,见图3(a)。其103#桥墩承台基坑开挖5 m,见图3(b)。

限于篇幅,仅给出95#的计算过程。

(1)围护结构内力与变形

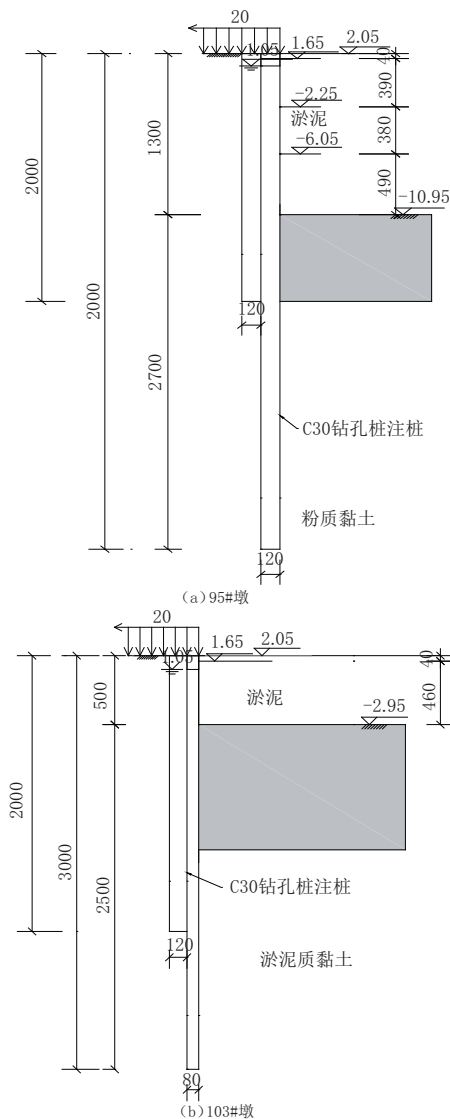


图3 承台基坑稳定性验算断面(单位:cm)

95#墩围护结构抗力包络图见图4(a),弯矩包络图见图4(c),剪力包络图见图4(d),变形包络图见图4(b)。

(2)整体稳定性

滑弧:圆心(2.55 m, -3.12 m),半径:43.28 m,起点(-40.62 m, 0.00 m),终点(42.71 m, 13.00 m),拱高比为0.795,下滑力为4 557.98 kN/m,土体抗滑力为7 353.81 kN/m。

安全系数:7 353.81/4 557.98=1.61。

(3)抗倾覆稳定性

计算得到主动压力和被动压力,见图5。

则抗倾覆安全系数:10 032.3×22.56/8 838.4/19.47=1.32。

(4)坑底抗隆起稳定性

下滑力为3 539.0 kN/m,抗滑力为5 922.2 kN/m。

则安全系数:5 922.2/3 539.0=1.67。

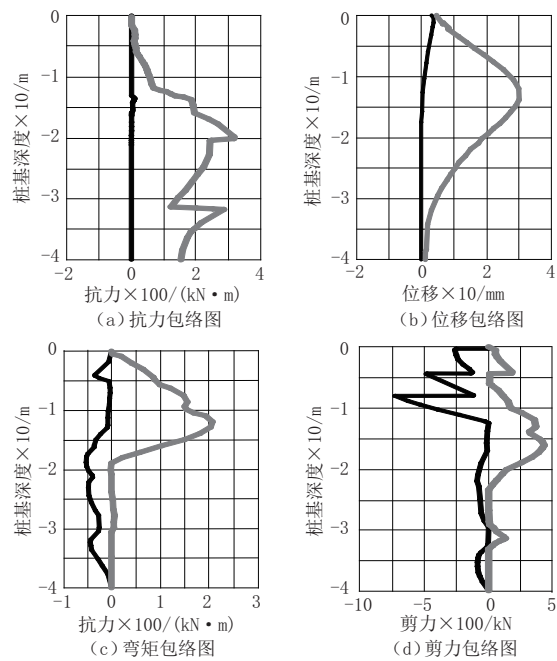


图4 95#墩围护结构内力与变形

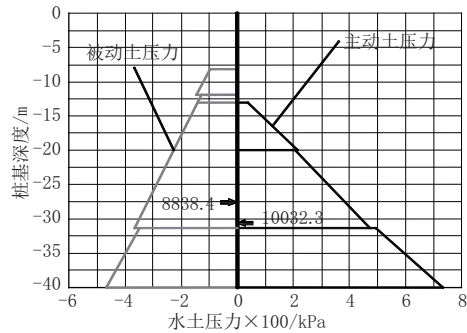


图5 95#墩围护结构主动压力和被动压力

(5)墙底抗隆起稳定性

墙底抗隆起受力示意图6。坑内侧向外13.0 m范围内总荷载为9 170.2 kN/m,验算断面处土体内聚力为18.0 kPa,内摩擦角为10°。

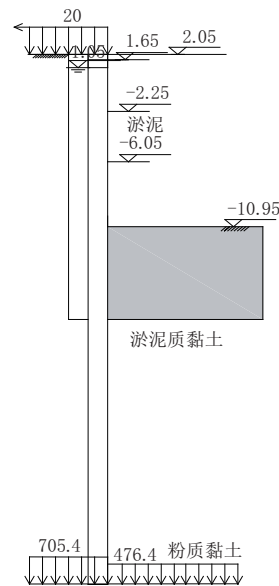


图6 95#墩围护结构墙底受力图(单位:kN)

地基承载力:
$$N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2(45 + \varphi/2)$$
$$= e^{\pi \tan 10} \tan^2(45 + 10/2) = 2.47$$
$$N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \varphi} = \frac{(2.47 - 1)}{\tan 10} = 8.34$$
$$R_u = qN_q + cN_c = 467.4 \times 2.47 + 18.0 \times 8.34 = 1\,327.6$$

安全系数: $1\,327.6 \times 13.0 / 9\,170.2 = 1.88$ 。

(6)抗渗流稳定性

抗渗流稳定安全需满足式(1)。

$$\frac{\gamma_m(t + \Delta t)}{p_w} \geq 1.1 \tag{1}$$

式中: γ_m 为透水层以上土的饱和重度, kN/m^3 , 为 18 kN/m^3 ; $t + \Delta t$ 为透水层顶面距基坑底面的深度, m , 为 10 m ; p_w 为含水层水压力, kPa , 为 99.4 kPa 。

计算得: $\frac{18 \times 10}{99.4} = 1.81$ 。

95#墩和 103#墩基坑开挖稳定性验算汇总, 见表 1。

表 1 基坑稳定性验算汇总					
位置	整体 稳定性	抗倾 覆稳 定性	坑底 抗隆 起	墙底 抗隆 起	抗渗 流稳 定性
浙江规范一级基坑 安全系数	1.35	1.20	1.60	1.80	1.60
95#墩基坑	1.61	1.32	1.67	1.88	1.81
103#墩基坑	2.99	1.68	3.05	2.07	5.28
钢板桩围护开挖最深处	1.57	1.24	1.62	1.54	4.56

由表 1 可知:

95#墩、103#墩基坑围护结构整体稳定性、抗倾覆稳定性、坑底抗隆起、墙底抗隆起以及抗渗流稳定性均满足“《建筑基坑工程技术规程》(DB33/T 1096—2014)”中安全等级一级要求。但是从表中数据可知建议适当优化 103#墩基坑围护桩长和止水帷幕长度。

4 新建铁路对杭深铁路的影响分析

4.1 模型建立

依据铁路周围地质实际情况,采用数值模拟方法计算通苏嘉甬铁路跨宁波绕城高速特大桥(DK266+000)基坑开挖对杭深铁路(杭甬段)宁波特大桥 618#~628#桥墩和承台的影响。建立有限元分析模型,按长 455 m,宽 220 m,深度约 100 m 建立模型,见图 7。模型中土体采用小应变土体硬化本构模拟,其余混凝土结构均采用线弹性实体单元模拟,既有高铁桥梁桩基采用 embedded 桩模拟,钢板围护桩采用板单元,支撑采用梁单元模拟,承台基坑坑底加固采用复合地基法等效模拟。底部完全约束,两侧

施加竖直滑动约束,桩基础和承台与土体之间采用共节点,网格采用 10 节点四面体单元,网格的尺寸为纵向、横向和竖向各 1 m,共划分 10 010 000 个单元网格。场地主要土层物理力学参数及其他结构的模型参数根据本工程地质勘察报告。计算分析模型共分为 5 个施工阶段具体见 4.2 节的工况分析。分析过程中的主要模拟基坑开挖过程对既有铁路的影响及既有铁路运营过程的模拟,主要荷载为结构的自重及列车自重。

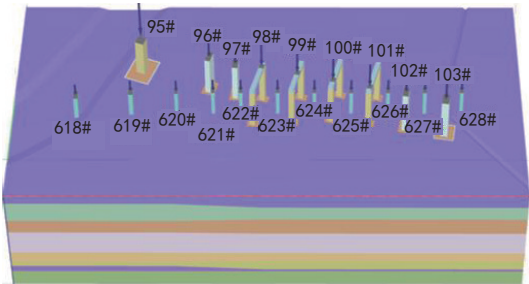


图 7 有限元结构模型示意图

4.2 分析工况

根据本项目具体情况,在有限元模拟中划分了 5 个工况。

工况 1-1:新建桥梁桩基及基坑围护桩钻孔+泥浆护壁,激活既有铁路和土体及自重;

工况 1-2:新建桥梁桩基及基坑围护桩混凝土灌注成桩,激活围护桩;

工况 2-1:架设第 1 道支撑,95#墩承台基坑开挖至第 2 道支撑底部。其余墩承台基坑开挖至坑底,钝化 95#墩上层 4.5 m 厚土体,并激活第一道支撑;

工况 2-2:架设第 2 道支撑,95#墩开挖至第 3 道支撑底,钝化 95#墩中间 4 m 厚土体,激活第二道支撑;

工况 2-3:架设第 3 道支撑,95#墩开挖至坑底,钝化 95#墩下层 4.5 m 厚土体,激活第三道支撑;

工况 3-1:新建桥梁 95#墩承台浇筑,激活承台混凝土;

工况 3-2:新建桥梁 95#墩承台成型;

工况 4-1:新建 95#~103#桥梁墩柱、横梁施作及承台覆土回填,激活新建桥梁墩柱、横梁和土体;

工况 4-2:新建 95#~103#桥梁梁体预制架设/挂篮现浇,激活新建梁体和挂篮自重;

工况 5:新建 95#~103#铁路铺设轨道结构及列车运营,激活新铺轨道结构和列车自重。

4.3 分析结果

对于通苏嘉甬铁路跨宁波绕城高速特大桥(DK266+000)上跨杭深铁路工程,主要分析新建铁

路桥梁承台基坑开挖和桩基施工、承台-墩柱-梁体施工、铁路铺轨及通车运营对杭深铁路(杭甬段)宁波特大桥 618#~628#桥墩和承台的影响,主要包括顺桥向位移(模型 x 方向)、横桥向位移(模型 y 方向)以及竖向位移(模型 z 方向)。桥墩墩顶和承台顶计算结果分别见表 2 和表 3。

表 2 各工况铁路桥墩墩顶累计位移汇总 单位:mm

墩号	方向	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
618#	x /顺桥向	0.02	0.58	0.60	0.62	0.63
	y /横桥向	0.01	0.26	0.27	0.28	0.29
	z /竖向	-0.01	-0.13	-0.14	-0.16	-0.17
619#	x /顺桥向	0.03	0.16	0.18	0.22	0.25
	y /横桥向	0.06	1.66	1.76	1.82	1.87
	z /竖向	-0.04	-0.58	-0.61	-0.66	-0.71
620#	x /顺桥向	0.01	0.39	-0.40	-0.43	-0.45
	y /横桥向	0.03	0.77	0.83	0.88	0.93
	z /竖向	-0.03	-0.36	-0.39	-0.43	-0.46
621#	x /顺桥向	0.07	0.13	0.18	0.26	0.33
	y /横桥向	0.12	0.40	0.52	0.68	0.80
	z /竖向	-0.08	-0.18	-0.26	-0.41	-0.53
622#	x /顺桥向	0.07	0.19	0.27	0.33	0.37
	y /横桥向	0.10	0.48	0.64	0.83	0.98
	z /竖向	-0.12	-0.27	-0.39	-0.58	-0.74
623#	x /顺桥向	0.01	0.06	0.07	0.06	0.06
	y /横桥向	-0.02	-0.09	-0.11	-0.03	0.06
	z /竖向	-0.12	-0.26	-0.37	-0.57	-0.74
624#	x /顺桥向	0.00	0.08	0.08	0.09	0.10
	y /横桥向	0.00	-0.07	-0.08	-0.11	-0.12
	z /竖向	-0.12	-0.25	-0.36	-0.56	-0.71
625#	x /顺桥向	0.00	-0.06	-0.07	-0.11	-0.14
	y /横桥向	-0.04	-0.19	-0.20	-0.31	-0.41
	z /竖向	-0.12	-0.25	-0.36	-0.54	-0.69
626#	x /顺桥向	-0.11	0.13	0.20	0.27	0.32
	y /横桥向	-0.08	-0.45	-0.58	-0.72	-0.85
	z /竖向	-0.12	-0.25	-0.36	-0.51	-0.64
627#	x /顺桥向	0.11	0.43	0.38	0.30	0.22
	y /横桥向	-0.21	-1.16	-1.29	-1.42	-1.54
	z /竖向	-0.12	-0.35	-0.44	-0.58	-0.69
628#	x /顺桥向	-0.17	-0.67	-0.75	-0.83	-0.90
	y /横桥向	-0.18	-1.39	-1.49	-1.57	-1.63
	z /竖向	-0.10	-0.35	-0.40	-0.50	-0.57

注:表中工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 分别代表每个分工况下的累计值。

由汇总表 2 可知:工况 5 作用下顺桥向和横桥向桥墩墩顶累计位移最大,分别位于 628# 桥墩,为 -0.9 mm,619# 桥墩,为 1.87 mm,顺桥向和横桥向的水平位移均满足规范小于 5 mm 的要求且满足相邻桥墩相对位移小于 5 mm 的要求;工况 5 作用下墩顶竖向累计位移最大(新建铁路铺设轨道结构及通车

表 3 各工况铁路桥墩承台累计位移汇总 单位:mm

墩号	方向	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
618#	x /顺桥向	0.01	0.39	0.41	0.42	0.43
	y /横桥向	0.01	0.17	0.18	0.19	0.20
	z /竖向	-0.01	-0.13	0.14	-0.16	-0.17
619#	x /顺桥向	0.02	0.10	-0.12	0.14	0.16
	y /横桥向	0.04	1.08	1.15	1.19	1.22
	z /竖向	-0.04	-0.57	-0.60	-0.66	-0.71
620#	x /顺桥向	0.00	-0.26	-0.27	-0.29	-0.30
	y /横桥向	0.02	0.50	0.54	0.57	0.60
	z /竖向	-0.03	-0.36	-0.39	-0.43	-0.46
621#	x /顺桥向	0.04	0.08	0.11	0.16	0.21
	y /横桥向	0.07	0.24	0.31	0.41	0.49
	z /竖向	-0.08	-0.18	-0.26	-0.41	-0.53
622#	x /顺桥向	0.04	0.12	0.17	0.21	0.23
	y /横桥向	0.06	0.31	0.41	0.52	0.61
	z /竖向	-0.12	-0.27	-0.39	-0.58	-0.74
623#	x /顺桥向	0.00	0.04	0.04	0.04	0.03
	y /横桥向	-0.01	-0.05	-0.07	-0.01	0.04
	z /竖向	-0.12	-0.26	-0.37	-0.57	-0.74
624#	x /顺桥向	0.00	0.05	0.05	0.06	0.06
	y /横桥向	0.00	-0.04	-0.05	-0.06	-0.07
	z /竖向	-0.12	-0.25	-0.36	-0.56	-0.71
625#	x /顺桥向	0.00	-0.03	-0.04	-0.07	-0.09
	y /横桥向	-0.02	-0.11	-0.12	-0.19	-0.25
	z /竖向	-0.12	-0.25	-0.36	-0.54	-0.69
626#	x /顺桥向	-0.07	0.07	0.12	0.16	0.19
	y /横桥向	-0.05	-0.29	-0.37	-0.46	-0.54
	z /竖向	-0.12	-0.25	-0.36	-0.51	-0.64
627#	x /顺桥向	0.07	0.28	0.25	0.20	0.15
	y /横桥向	-0.12	-0.72	-0.80	-0.88	-0.95
	z /竖向	-0.12	-0.35	-0.44	-0.58	-0.69
628#	x /顺桥向	-0.10	-0.41	-0.46	-0.52	-0.56
	y /横桥向	-0.12	-0.93	-0.99	-1.04	-1.08
	z /竖向	-0.10	-0.35	-0.40	-0.50	-0.56

注:表中工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4 分别代表每个分工况下的累计值。

运营),位于 622# 桥墩,为 -0.74 mm,满足竖向位移小于 20 mm 的要求,且相邻桥墩沉降差小于 10 mm 的要求。

由表 3 可知:工况 5 作用下顺桥向和横桥向承台过程累计位移最大,分别位于 628# 桥墩,为 -0.56 mm,619# 桥墩,为 1.22 mm,顺桥向和横桥向的水平位移均满足规范小于 5 mm 的要求且满足相邻桥墩相对位移小于 5 mm 的要求;工况 5 作用下竖向承台过程累计位移最大(新建铁路铺设轨道结构及通车运营),位于 622# 桥墩,为 -0.74 mm,满足竖向位移小于 20 mm 的要求,且相邻桥墩沉降差小于 10 mm 的要求。

4.4 监测测点布置

为确保模拟结果的可靠性,需进一步设计监测方案。涉铁工程施工过程中,需要进行严格的监控测量,充分重视监控量测信息化施工,做到信息化动态施工管理。同时提高人工巡视频率,及时发现问题处理问题。全过程对铁路桥墩变形的观测,依据观测资料对比分析的结果,判断铁路桥墩变形是否超限,设置预警值,确保既有铁路的安全运营。具体测点可按图8进行布置。其中监测频率在下穿施工时每天不少于4次,竣工后一个月内每天不少于2次,使用0.5"级精度的全自动全站仪进行测量,变形控制指标,三个方向的预警值为 ± 1 mm,报警值为 ± 2 mm。

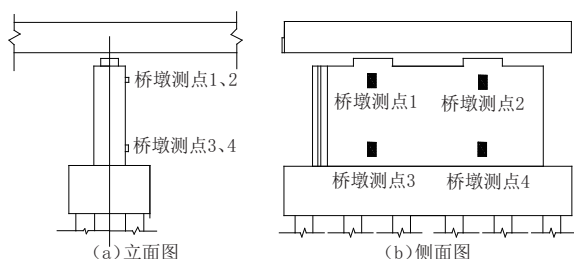


图8 桥墩全站仪棱镜布置示意图

5 结 语

以通苏嘉甬铁路跨宁波绕城高速特大桥为背景,采用理论分析和数值分析相结合的方法研究基坑开挖的稳定性及对既有铁路的影响,得到如下结论:

(1)新建桥梁95#、103#承台基坑采用钻孔灌注桩+内支撑+坑底加固的支护体系。经验算,基坑整体稳定性、抗倾覆、抗渗流、坑底抗隆起、墙底抗隆起安全系数均能满足基坑安全等级一级要求。但是建议基于安全系数冗余度对103#墩基坑围护桩长和止水帷幕长度进行优化。

(2)经数值模拟计算分析,通苏嘉甬铁路跨宁波绕城高速特大桥(DK266+000)上跨施工及运营引起

杭深铁路桥墩墩顶累计顺桥向最大位移为 -0.9 mm,位于628#桥墩;累计横桥向最大位移为 1.87 mm,位于619#桥墩;累计竖向最大位移为 -0.74 mm,位于622#桥墩。引起杭深铁路承台累计顺桥向最大位移为 -0.56 mm,位于628#桥墩;累计横桥向最大位移为 1.22 mm,位于619#桥墩;累计竖向最大位移为 -0.74 mm,位于622#桥墩。结果表明不同工况下变形均满足要求,基坑防护体系合理。

(3)为保证高铁运营安全,全程监测既有铁路桥墩的变形,并与理论值进行对比,判断既有桥墩的变形,并对铁路运营安全进行预警。

参考文献:

- [1] 贾晓龙.深基坑施工对铁路桥梁周围地基稳定性的影响研究[J].四川水泥,2024(2):127-129.
- [2] 姜忻良,宗金辉,孙良涛.天津某深基坑工程施工监测及数值模拟分析[J].土木工程学报,2007(2):79-84;103.
- [3] Zhang X, Yang J, Zhang Y, et al. Cause investigation of damages in existing building adjacent to foundation pit in construction[J]. Engineering Failure Analysis, 2018(83): 117-124.
- [4] 康志军,谭勇,李想,等.基坑围护结构最大侧移深度对周边环境的影响[J].岩土力学,2016,37(10):2909-2914;2920.
- [5] 林刚,徐长节,蔡袁强.不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J].岩土力学,2010,31(8):2592-2598.
- [6] 刘念武,龚晓南,俞峰,等.内支撑结构基坑的空间效应及影响因素分析[J].岩土力学,2014,35(8):2293-2298;2306.
- [7] 徐长节,成守泽,蔡袁强,等.非对称开挖条件下基坑变形性状分析[J].岩土力学,2014,35(7):1929-1934.
- [8] 郑刚,李志伟.不同围护结构变形形式的基坑开挖对邻近建筑物的影响对比分析[J].岩土工程学报,2012,34(6):969-977.
- [9] 石钰锋,阳军生,白伟,等.紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):826-833.
- [10] 高建敏.铁路有砟轨道下沉及高低不平顺发展预测研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [11] 秦开颜,戴嘉平.临近既有铁路基坑开挖支护技术研究[J].山西建筑,2013,39(1):123-125.
- [12] 张新东.邻近铁路深基坑支护结构及路基安全性控制研究[D].北京:北京工业大学,2012.
- [13] Shahin M H, Nakai T, Ishii K, et al. Investigation of influence of tunneling on existing building and tunnel: model tests and numerical simulations[J].Acta Geotechnica, 2016, 11(3): 679-692..