

# 深基坑开挖对近接高速公路安全影响评估

张亮<sup>1</sup>, 高娅娟<sup>1</sup>, 王甫友<sup>2</sup>, 石海洋<sup>2</sup>

(1. 天津市公路事业发展服务中心, 天津市 300182; 2. 天津市交通科学研究院, 天津市 300060)

**摘要:** 天津集疏货运通道部分墩台深基坑紧邻在运营的长深高速, 加之滨海软土地质条件, 深基坑施工作业导致的既有道路开裂风险极高。为评估基坑开挖对道路安全的影响, 采用有限元数值方法, 分析了施工过程中支护受力、路基变形等规律。结果表明: 在当前施工和支护设计方案下, 路基边坡坡脚1 m范围内的土体水平变形超标, 基坑开挖导致的既有道路开裂风险较高。建议适当提高承台底标高以降低基坑开挖深度, 或对内支撑施加预轴力, 以提高支护结构强度; 同时施工过程中要加强基坑和路堤变形监测工作, 合理确定路基水平变形监控限值和预警值, 并做好应急预案。

**关键词:** 深基坑; 近接施工; 道路开裂; 数值模拟; 风险评估

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0196-06

## Assessment on Impact of Deep Foundation Pit Excavation on Safety of Adjacent Expressways

ZHANG Liang<sup>1</sup>, GAO Yajuan<sup>1</sup>, WANG Fuyou<sup>2</sup>, SHI Haiyang<sup>2</sup>

(1. Tianjin Highway Development Service Center, Tianjin 300182, China; 2. Tianjin Academy of Transportation Sciences, Tianjin 300060, China)

**Abstract:** Due to the deep foundation pits of some piers in Tianjin Freight Transportation Channel adjacent to the Changshen Expressway in operation, coupled with the coastal soft soil geological conditions, the risk of existing road cracking caused by deep foundation pit construction is very high. In order to assess the impact of foundation pit excavation on the road safety, the finite element numerical simulation method is used to analyze the laws of supporting force and roadbed deformation in the process of construction. The results show that under the current construction and supporting design scheme, the horizontal deformation of soil within 1 m of the slope foot of the roadbed side exceeds the standard, and the risk of existing road cracking caused by foundation pit excavation is higher. It is recommended to appropriately raise the elevation of the base slab bottom to reduce the depth of pit excavation, or apply the pre-axial force to the internal support to improve the strength of the supporting structure. At the same time, it is necessary to strengthen the deformation monitoring of the foundation pit and embankment in the process of construction, to reasonably determine the horizontal deformation of the roadbed to monitor the limit value and the early warning value and to make emergency plans.

**Keywords:** deep foundation pit; adjacent construction; road cracking; numerical simulation; risk assessment

## 0 引言

随着城市化进程的不断推进和基础设施的大力兴建, 临近路基的基坑开挖工程不断涌现, 而此类工程导致的安全事故层出不穷。2018年, 广东某临近既有高速公路电缆隧道基坑支护失效, 导致紧邻基坑长约100 m的公路路堤发生不均匀下沉, 并在路堤

坡脚和坡面产生多道裂缝<sup>[1-2]</sup>。近些年基坑开挖对路基变形的影响已成为工程研究人员的关注重点。

王立新等<sup>[3]</sup>为解决黄土地区基坑开挖对近接地铁隧道运营安全带来的影响, 通过开展室内正交试验, 分析了基坑开挖对既有隧道影响的受力变形规律。张晓荣等<sup>[4]</sup>为了确保临近城市高层建筑隧道基坑围护结构的安全, 采用数值计算与现场实测相结合的方式, 结合新苔井山隧道右线明挖段近接小区高层建(构)筑的实际工程背景, 分析了临近高层建筑隧道基坑围护结构的变形特征。高玉峰等<sup>[5]</sup>针对沪宁高速公路, 采用拟静力法研究了3种荷载分布形式下车辆动荷载对高速公路软土地基沉降的影

收稿日期: 2024-03-15

作者简介: 张亮(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 从事涉路施工安全技术与管理工。

通信作者: 石海洋(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事基础工程、岩土工程领域的相关科研与技术咨询工作。电子邮箱: 215460706@qq.com

响,计算了由超重车辆引起的地基沉降量和车辆荷载的影响深度。陈晓斌等<sup>[6-7]</sup>基于随机介质理论,建立了高速公路地下采空区地面变形计算模型,并对未宜高速公路下覆典型的2种因采煤形成的采空区坍塌后地面变形进行了计算分析。华良山<sup>[8]</sup>采用有限元MIDAS GTS-NX,建立了基坑开挖对路基受力及变形影响的计算模型,分析了不同开挖深度对基坑土体和路基应力变形影响,对后续基坑开挖施工提供了指导。王培鑫等<sup>[9-13]</sup>对紧邻既有铁路线的基坑工程变形监测数据进行分析,发现在路基处沉降较大且超标,提出在坡顶进行双液注浆以控制地表与路基沉降,从而减少后续开挖施工对路基的影响。周赫宸等<sup>[14]</sup>采用有限元数值方法,基于小应变硬化土模型(HSS模型),分析了新建大桥桥墩深基坑开挖对邻近既有桥梁桩基础的影响,并对支撑预应力和隔离桩的变形控制作用进行了参数分析。

目前基坑设计多采用规范方法来计算支护结构内力,以及抗倾覆、抗滑移和抗隆起安全性,无法对基坑周边环境及近接结构进行定量评估,行业多采用数值分析方法来评估基坑开挖对周边环境的影响。本文借鉴前人研究结论并结合项目支护方案、地质条件,评估当前设计和施工方案对既有道路的影响,并提出相应的保护措施。

## 1 工程概况与施工方案

### 1.1 工程概况

天津集疏运货运通道四标Y38#~Y73#墩台深基坑与在运营状态下的长深高速存在并行段近接施工,钢板桩支护结构与路基坡脚的距离不足5 m,加之属于软土地质条件,近接施工导致的既有高速公路路面开裂风险极高。为此,基于文献调研、数值分析等手段,对近接深基坑开挖过程进行计算,以评估不同基坑开挖工况对运营状态下长深高速路基和路面的影响。基坑与近接道路相对平面位置如图1所示。

软土条件下近接深基坑开挖和钢板桩支护方式导致的既有高速路基路面开裂风险极高,项目业主对工程安全管理非常重视,提出的变形控制标准如下:路基水平变形不大于2.0 mm/m,路基沉降不大于30 mm,支护结构受力不超过210 MPa。由于常规规范算法很难定量评估近接施工对周边环境的影响,因此,本文采用数值分析手段,对基坑开挖过程中支护结构、路基变形等进行分析,以评估基坑不同开挖工况对运营状态下公路的影响程度。

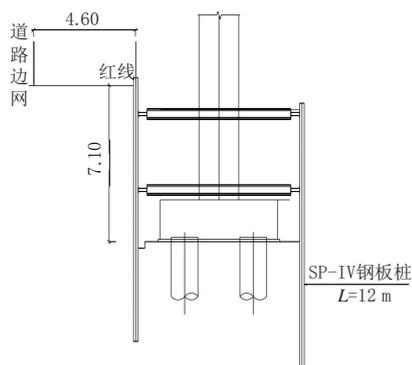
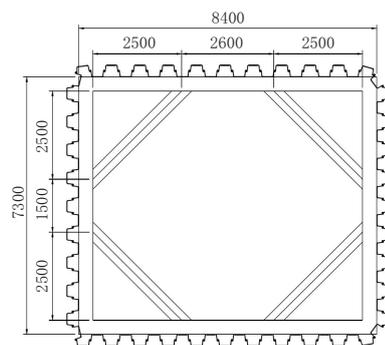


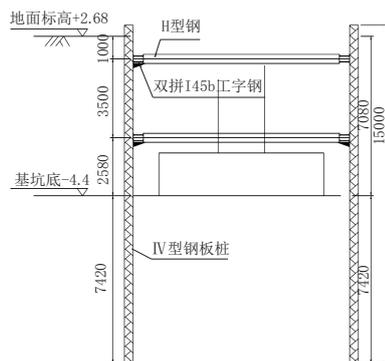
图1 集疏运四标Y38#~Y73#西侧承台墩柱施工剖面图(单位:m)

### 1.2 支护施工方案

基坑支护设计如图2所示。已知临近长深高速路堤边坡坡率1:1.5,路面宽度37.5 m,边坡高度4~5 m,支护结构距离坡脚最近为4.6 m。Y38#~Y73#基坑顶/底标高分别为+2.68 m/-4.4 m,基坑深度7.1 m,长×宽尺寸为8.4 m×7.3 m,采用12~15 m拉森IV型钢板桩作支护。桩顶高出原地面0.5 m,钢板桩嵌固深度5.7 m,设置2道围圈支撑,竖向间距3.45 m,围圈采用双拼145b工字钢;四角设置斜撑,斜撑采用400 mm×400 mm H型钢。根据地勘报告,基坑开挖完成后设置20 cm×20 cm排水沟,拐角处设置50 cm×50 cm集水坑,使积水汇集于集水坑内,然后用水泵排水至基坑外。基坑边缘外侧1.5 m处设置30 cm×30 cm截水沟,防止雨水等进入基坑。



(a) 基坑支护平面布置图



(b) 基坑支护立面布置图

图2 基坑支护设计图(单位:mm)

项目地层主要以②淤泥、③<sub>1</sub>粉质黏土、③<sub>2</sub>粉土、③<sub>3</sub>淤泥质土等为主,土质一般,压缩性高,部分土层含有机质、贝壳、云母等;浅层地下水类型主要为第四系孔隙潜水,勘察期间测得静止地下水水位埋深0.30~3.50 m,标高-3.61~1.85 m。

## 2 数值模型建立

### 2.1 模型概况

采用有限元软件建立三维数值模型,模型尺寸为60 m × 60 m × 18 m(长×宽×高)。模型边界到基坑外边缘的距离在X方向和Y方向均不小于5倍开挖深度。为了尽可能真实地模拟实际工程,模型底部采用固定边界,顶部采用自由边界,前、后、左、右四面边界限制各自水平方向变位,而竖向位移不加约束。综合考虑数值模拟中计算精度与网格数量、计算时间的矛盾后,将网格粗细程度设置为“极细”,并对基坑附近土体和结构进行局部加密,生成的单元数和节点数分别为87 217个和148 162个。基坑与道路三维有限元数值模型如图3所示。

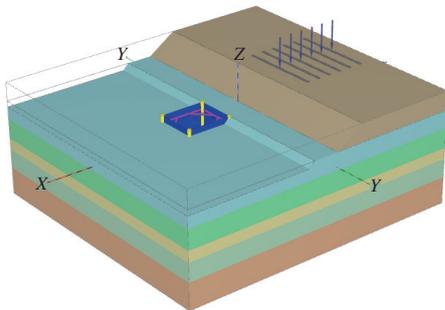


图3 基坑与道路三维有限元数值模型

项目水位地表埋深为1.5~2.0 m,水位标高为+0.68 m。土方开挖先至第1层围圈以下50 cm左右后,安装第1层围圈;然后分层开挖至第2层围圈位置,安装第2层围圈;再分层向下开挖至-4.4 m基坑设计标高。施工之前进行坑内降水,最终水位降至坑底以下0.5 m。根据施工方案确定基坑开挖数值模拟工序,见表1。

### 2.2 材料参数

基坑围护结构中的SP-IV型钢板桩采用板单元模拟,钢板桩之间锁扣采用铰接连接,板桩与土体之间设置接触面,围圈I45b工字钢和斜撑400 mm × 400 mm H型钢采用梁单元模拟;板单元和梁单元均为弹性本构模型。土体物理力学参数依据工程地质勘察报告取值,采用土体硬化HS本构模型。数值模拟所用结构参数和土体物理力学参数见表2~4。

表1 数值模拟计算工序

计算工序	工序内容	坑内水位设置
1	初始自重平衡	全局水位
2	路基填筑	全局水位
3	地表开挖	全局水位,位移清零
4	钢板桩支护	全局水位
5	开挖至+0.9 m	降水至+0.4 m
6	第1层支护	降水至+0.4 m
7	开挖至-0.62 m	降水至-1.12 m
8	开挖至-2.55 m	降水至-3.05 m
9	第2层支护	降水至-3.05 m
10	开挖至-4.4 m	降水至-4.9 m

表2 型钢计算参数

规格	截面面积/cm <sup>2</sup>	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	惯性矩/cm <sup>4</sup>		弹性模量/GPa
			I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	
围圈I45b工字钢	111.446	78.5	33 800	894	206
斜撑400 mm × 400 mm H型钢	179.2	78.5	49 200	16 300	206

表3 SP-IV型钢板桩数值计算参数

规格	高度/m	厚度/mm	长度/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa
SP-IV型钢板桩	15	15.5	0.4	78.5	206

表4 土体物理力学参数

层号	土类名称	层厚/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	素填土	3.30	19	3.00	0.38	16	20
2	粉土	3.60	19	3.50	0.35	16	28
3	淤泥质土	2.10	19	2.95	0.35	10	12
4	黏性土	1.00	19	3.47	0.35	18	23
5	淤泥质土	2.60	19	2.85	0.35	10	12
6	粉土	4.30	19	10.50	0.35	16	28
7	路基填土	4.00	20	50.00	0.30	70	30

根据《公路桥涵通用设计规范》(JTG D60—2004),仅采用550 kN的车辆荷载(汽车-超20级荷载)作为计算依据。考虑到高速公路上车流量大即车辆荷载作用频率高的特点,根据文献[5]研究成果,假定车辆荷载沿高速公路呈带状连续分布,作用长度取车辆长度15 m,车辆行驶荷载作用宽度取前轮着地宽度0.6 m,经荷载等效计算,取车轮荷载带状分布强度P=30 kPa。

### 2.3 计算工况

考虑车辆荷载、围圈、斜撑施工质量等影响因素,分析基坑开挖对路基稳定性的影响时,采用以下3种工况进行计算:

工况1:考虑车辆静动荷载。

工况2:考虑车辆静动荷载+围檩刚度折减50%。

工况3:考虑车辆静动荷载+斜撑刚度折减50%。

### 3 数值计算结果分析

#### 3.1 路基路面变形分析

统计了随着基坑开挖深度增加,路面路基水平变位和竖向变位规律。为便于数据分析,分别设置4个剖面:路基坡脚(A-A剖面)、坡脚内侧1.0 m(B-B剖面)、路肩(C-C剖面)、路基中部(D-D剖面)。剖面位置示意图见图4;路堤变形位移云图见图5;统计结果见表5、表6。

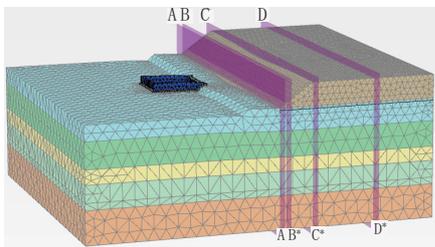
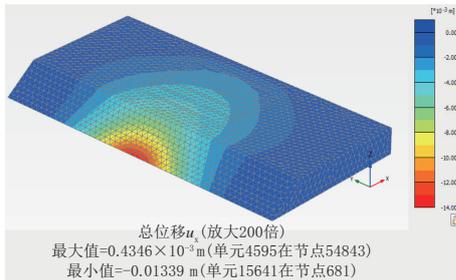
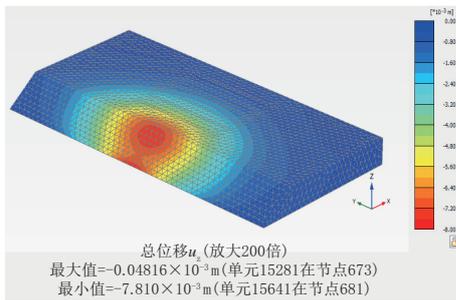


图4 剖面位置示意图



(a)水平变形云图



(b)竖向变形云图

图5 路堤变形位移云图

表5 路基水平应变数值统计 单位:mm/m

剖面位置	A-A剖面	B-B剖面	C-C剖面	D-D剖面
开挖至+0.9 m	0.78	0.37	0.26	0.24
开挖至-0.62 m	0.84	0.48	0.29	0.27
开挖至-2.55 m	1.24	1.26	0.87	0.36
开挖至-4.4 m	2.20	1.63	1.25	0.50

表6 路基和路面水平和竖向变位统计 单位:mm

工序	路面部分		路基部分	
	水平变形	竖向沉降	水平变形	竖向沉降
开挖至+0.9 m	0.9	0.4	2.3	0.4
开挖至-0.62 m	1.0	1.2	5.1	1.2
开挖至-2.55 m	2.9	4.0	12.1	4.2
开挖至-4.4 m	5.9	7.4	13.4	7.8

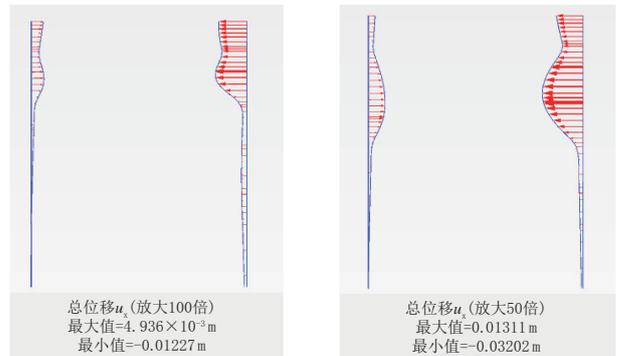
由表5可见:随着基坑开挖深度的增加,路基土体水平应变增大,当基坑开挖至-4.4 m标高时,距离基坑最近的坡脚A-A剖面路基水平应变值为0.002 2,也即2.2 mm/m,超过了2.0 mm/m变形控制标准;B-B剖面水平变形1.63 mm/m。以2.0 mm/m的80%作为水平变形预警值,也即1.6 mm/m,则坡脚以内A-A剖面与B-B剖面之间的土体水平变位均超过了预警值。

由表6可见:正常施工情况下,临近基坑侧路面水平和竖向变位较大。基坑开挖至设计标高时,路面水平变形和竖向沉降分别为5.9 mm和7.4 mm,而路基水平变形和竖向沉降分别为13.4 mm和7.8 mm。

#### 3.2 支护结构安全分析

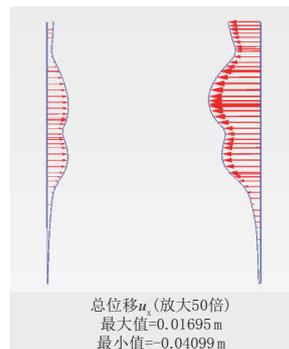
##### 3.2.1 钢板桩受力变形

不同荷载工况、不同工序下钢板桩水平变形剖面图见图6;钢板桩水平变位见表7。



(a)开挖至-0.62 m

(b)开挖至-2.55 m



(c)开挖至-4.4 m

图6 钢板桩水平变形剖面图

表7 钢板桩水平变位统计 单位:cm

开挖工序	工况1		工况2		工况3	
	近路端	远路端	近路端	远路端	近路端	远路端
开挖至+0.9 m	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4
开挖至-0.62 m	1.2	0.5	1.3	0.6	1.3	0.6
开挖至-2.55 m	3.2	1.3	4.1	1.5	5.8	1.7
开挖至-4.40 m	4.0	1.7	5.1	2.0	6.9	2.5

(1)随着基坑开挖深度增加,钢板桩水平变形逐级增大,而由于近路端受到偏压荷载作用,钢板桩呈非对称变形,近路端水平变位值要大于远路端。当开挖至-2.55 m时,两端水平变形分别为3.2、1.3 cm;当基坑开挖至设计标高-4.4 m时,两端水平变形值分别为4.0、1.7 cm。

(2)对于工况2,围檩刚度折减50%后,考虑行车荷载作用下,近路端钢板桩水平变位由4.0 cm增加至5.1 cm,远路端水平变位2.0 cm,水平变位极值点位于钢板桩上方,而设置内撑和围图标高处支护位置变形较小。

(3)对于工况3,斜撑刚度折减50%后,近路端和远路端的钢板桩水平变形均显著增大,水平变位极值分别为6.9、2.5 cm。相比工况1无折减工况,近路端和远路段的变形分别增加73%和47%。

3.2.2 围图受力变形

基坑支护水平方向设置2道围图支撑,围图采用双拼I45b工字钢。第1层围图距离基坑顶1.0 m,第2层围图距离第1层围图3.5 m,每根I45b工字钢截面弯曲系数 $W=1\ 500\text{ cm}^3$ 。由弯矩极值和截面弯曲系数计算得出不同工况下的围图结构应力,如表8所示,其中工况1弯矩内力分布如图7所示。分析得知:

3种工况下,围图结构应力均不超210 MPa屈服强度,均满足结构受力要求;对于工况2,围檩刚度折减50%后,围檩弯矩内力减小,开挖至设计标高-4.4 m时,围檩最大内力由23.5 MPa降低至20 MPa;对于工况3,斜撑刚度折减50%后,围檩弯矩内力增大,由23.5 MPa增大至31.7 MPa。

3.2.3 斜撑受力分析

围图四角采用400 mm × 400 mm H型钢施做斜撑,斜撑刚度及可靠性对于基坑支护结构稳定性至关重要。为此统计不同工况下斜撑受力(见表9),分析得知:

(1)随着基坑开挖深度的增加,斜撑轴力和应力逐级增大;由斜撑轴力分布云图(见图8)可知,由于

表8 围图支护结构内力值统计

开挖工序	工况1		工况2		工况3	
	弯矩极值/ (kN·m)	应力/ MPa	弯矩极值/ (kN·m)	应力/ MPa	弯矩极值/ (kN·m)	应力/ MPa
开挖至+0.9 m	15	5.0	13	4.3	17	5.7
开挖至-0.62 m	22	7.3	18	6.0	25	8.3
开挖至-2.55 m	58	19.3	45	15.0	70	23.3
开挖至-4.40 m	71	23.5	60	20.0	95	31.7

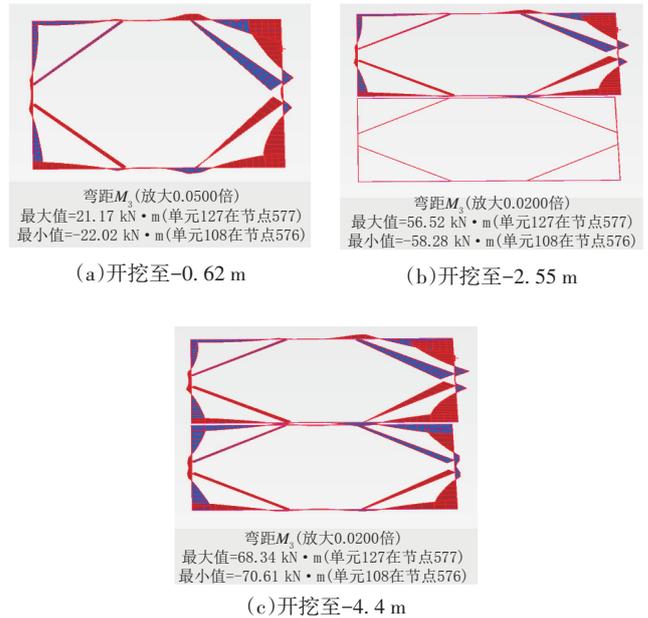


图7 工况1双层围图弯矩分布云图

表9 基坑支护斜撑内力统计

开挖工序	工况1		工况2		工况3	
	轴力/ kN	应力/ MPa	轴力/ kN	应力/ MPa	轴力/ kN	应力/ MPa
开挖至+0.9 m	20	1.1	21	1.2	19	1.1
开挖至-0.62 m	40	2.2	46	2.6	37	2.1
开挖至-2.55 m	89	5.0	93	5.2	72	4.0
开挖至-4.40 m	113	6.3	132	7.4	93	5.2

受到路堤填土不均匀荷载作用,近路端斜撑轴力要大于远路端斜撑轴力,近路端斜撑轴力约为远路端斜撑轴力的1.5~2.0倍。

(2)对于工况2,围图刚度折减50%后,会导致斜撑轴力增加。当开挖至-4.4 m设计标高时,斜撑应力由6.3 MPa增加至7.4 MPa,提高了17.5%。根据斜撑轴力和截面面积计算,不同工况下结构应力均不超210 MPa屈服强度,满足结构受力要求。

(3)对于工况3,斜撑刚度折减50%后,其承担的轴力显著降低。由于斜撑刚度降低,支护结构所受

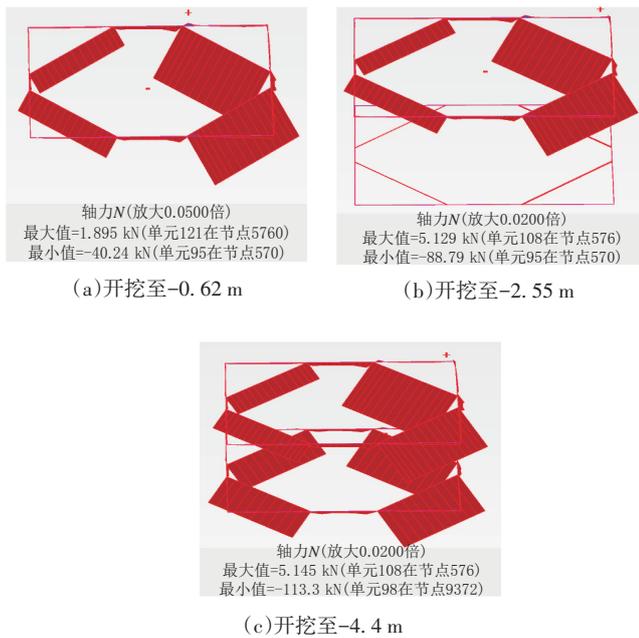


图8 工况1斜撑轴力分布云图

荷载将重新分配。结合表8数据可知,由于围檩内力增大,从而降低了斜撑荷载分担。当开挖至-4.4 m设计标高时,斜撑应力由6.3 MPa降低至5.2 MPa,减少了17.5%。

## 4 结论

(1)根据当前支护设计方案,各工况下的围图、斜撑支护结构应力均未超过钢结构最大屈服应力210 MPa,满足受力要求;近/远路端水平变位分别为4.0、1.7 cm。虽然支护结构未达到屈服应力,但由于钢板桩支护刚度较小,导致支护结构变形较大。此外,支护结构受力会随着斜撑和围檩刚度变化产生应力重分布,不同构件的荷载分担规律也发生变化,当斜撑刚度降低时,围檩受力将增大,反之则斜撑受力增加。

(2)当基坑开挖至-4.4 m设计标高时,道路路基坡脚处水平变形值为0.002 2,即2.2 mm/m,超过了2.0 mm/m规范限值。如果按照2.0 mm/m的80%作为水平变形预警值,即1.6 mm/m,则坡脚以内1 m范围

的土体水平变位均超过预警值。基坑开挖导致的路基竖向沉降极值为13.4 mm,满足路基沉降不大于20 mm控制预警值标准。

(3)为确保工程安全,建议进一步优化基坑设计方案或支护方案,如适当提高承台底标高以减小基坑深度;通过对内支撑施加预轴力,提高支护结构强度,降低基坑开挖对周边土体影响等。施工过程中,要加强基坑和路堤变形监测工作,合理确定路堤水平变形监控限值和预警值,并做好应急预案。

### 参考文献:

- [1] 张青青,杨军,赵振勇.开挖引起高速公路路基塌陷事故的原因分析[J].广东公路交通,2018(4):52-57.
- [2] 李立云,李瑞珍,雷子欣.基于统计分析的基坑事故发生规律研究[J].现代城市轨道交通,2017(12):50-55.
- [3] 王立新,徐硕硕,王俊,等.黄土地层基坑开挖对既有地铁隧道影响分析[J].科学技术与工程,2022,22(6):2468-2476.
- [4] 张晓荣,陈志敏,朱焯.临近城市高层建筑的隧道基坑围护结构变形控制[J].科学技术与工程,2019,19(32):326-331.
- [5] 高玉峰,黎冰,刘汉龙.车辆荷载作用下公路软基沉降的拟静力计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增刊2):5470-5477.
- [6] 陈晓斌,张家生,安关峰.高速公路采空区地面变形计算方法[J].岩土工程学报,2007,29(2):191-197.
- [7] 罗建敏.高速公路采空区地面的变形计算[J].路基工程,2006(3):6-8.
- [8] 华良山.基坑开挖对邻近路基应力变形的影响研究[J].水利技术监督,2022(9):186-189.
- [9] 王培鑫,周顺华,狄宏规,等.基坑开挖对邻近铁路路基变形影响与控制[J].岩土力学,2016,37(增刊1):469-476.
- [10] 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.
- [11] 李川江,董彦洪,王凤东.非对称施工下地铁深基坑支护结构受力模拟[J].天津建设科技,2023,33(4):61-63.
- [12] 刘勇.深基坑开挖对既有地铁车站结构的影响研究[J].天津建设科技,2021,31(4):40-42.
- [13] 赵伟,陈桥枫,张富国,等.近接既有结构深大基坑隆起变形控制——以天津地铁5号线思源道站接建地下空间工程为例[J].科学技术与工程,2023,23(3):1192-1198.
- [14] 周赫宸,秦朝辉,顾晓强.基于HSS模型的深基坑开挖对邻近桥桩的影响分析及变形控制研究[J].地基处理,2023,5(5):369-375.