

琴键型大跨度基坑栈桥体系设计关键技术研究

李忻轶

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 依托深圳市宝鹏通道工程(简上路—龙景立交)工程,提出一种新型基坑栈桥体系并进行设计关键技术研究。建立不含栈桥体系的基准模型以及加入栈桥体系的完整模型。对基准模型进行建模计算,并通过与FRWS9.0的计算结果进行对比,得到无栈桥情况的基准结果的同时,验证其准确性。再对完整模型进行计算,并与基准模型进行对比,结果表明:加入栈桥体系后,基坑表现出明显的非对称受力特点,根据栈桥板、第一道栈桥梁/支撑、立柱和地连墙等关键构件的计算结果提出针对性的设计建议。

关键词: 明挖隧道;基坑;大跨度栈桥;数值分析

中图分类号: U452.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0101-07

Research on Key Design Technology of Keyboard-type Long-span Foundation Pit Trestle System

LI Xinyi

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Relying on the Shenzhen Baopeng Channel Project (Jianshang Road to Longjing Interchange), a new type of foundation pit trestle system is proposed and its key design technologies are studied. A benchmark model without trestle system and a complete model with trestle system are established for the foundation pit of this project. The benchmark model is modeled and calculated, and comparing with the calculation results of FRWS9.0, the benchmark results without trestle are obtained, and its accuracy is verified. Then the complete model is calculated, and its result is compared with the benchmark model. The results show that the foundation pit shows obvious asymmetric stress characteristics after adding the trestle system. According to the calculation results of key components such as trestle slab, first trestle beam / support, column and diaphragm wall, the targeted design suggestions are put forward.

Keywords: excavation of tunnel; foundation pit; long-span trestle; numerical analysis

0 引言

随着城市化的加速发展,大量地下室、市政地道、铁路隧道及各类管线等使得城市地下空间的拥挤问题变得日益严重,同时随着城市发展需求,施工导致的交通中断愈发难以接受。因此当城市中采用明挖法进行工程建设时,栈桥体系的运用越来越广泛。其中,最主要的功能有施工场地及交通导改两个方面:作为施工场地时,栈桥可以满足基坑工程在建设场地受限的情况下物料堆放、土方外运等功能^[1-2];作为交通导改时,可以在施工期间保证原状交通,并同时在栈桥下方进行后续基坑开挖与结构施工^[3-4];部分工程中的栈桥结构满足上述两个功能

需求的同时,本身可以作为后期永久结构的顶板^[5-7],使工程达到“逆作”的效果。

本工程建设时为满足现状道路不阻断且不减少车道规模的交通导改要求,基于隧道结构及周边环境条件,提出一种新型的琴键型基坑栈桥体系,对其进行计算并给出针对性的设计建议。

1 工程概况

如图1所示,深圳市宝鹏通道工程(简上路至龙景立交)主线隧道总长约8.4 km,车道规模为双向6车道,其中明挖隧道约4.3 km,盾构隧道约4.1 km,隧道工程穿越深圳市龙华区与龙岗区城市建成区,存在大量既有或者规划的房屋建筑、铁路设施、市政设施等。

本文研究区域中的明挖隧道典型断面为跨度约29 m的单箱双室结构,对应基坑跨度约31 m。其建

收稿日期: 2024-04-07

作者简介: 李忻轶(1993—),男,硕士,工程师,从事隧道工程结构设计工作。

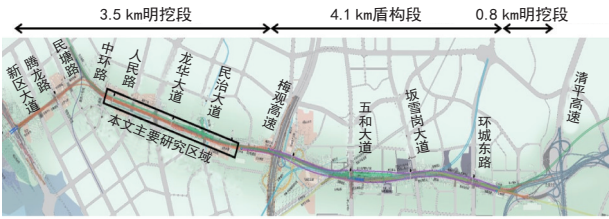


图1 工程平面总图

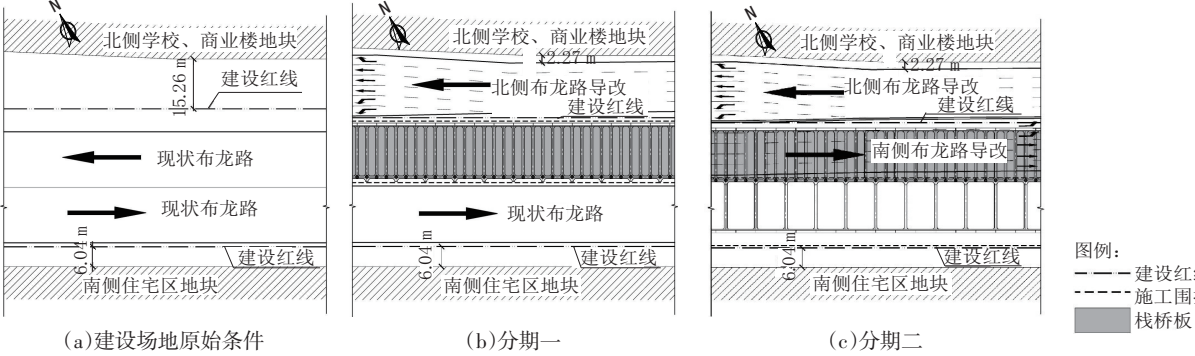


图2 交通导改示意图

(1)北半幅布龙路交通导改至北侧临时用地,原区域设置施工围挡,随后进行该区域的围护墙、立柱桩、立柱、第一道混凝土支撑、栈桥梁及栈桥板等的施作,见图2(b)。

(2)南半幅布龙路交通导改至已施作栈桥板区域,对原南半幅布龙路进行围挡,随后在该区域进行基坑剩余围护墙、混凝土支撑等的施作,见图2(c)。

(3)基坑进行开挖,期间栈桥板持续作为南半幅布龙路车行道,该区域开挖工作在栈桥板下方逆作进行。

(4)结构施工完毕、基坑回填后恢复原状交通。

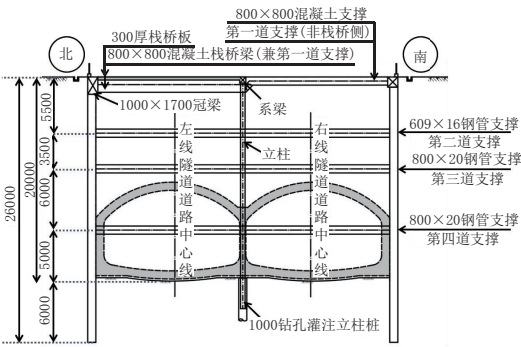
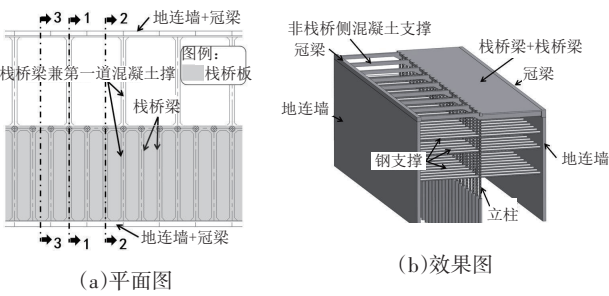
线位设计方面,常见明挖隧道覆土一般在2~5 m,但本项目受大量铁路、地铁、排水结构等基础设施空间上的影响,整条隧道埋深普遍较大,采用“平顶直墙”断面时,典型断面平均埋深将达到9 m左右,最大埋深将达到13 m,不利于结构受力,且经济性较差。对此,本项目采用拱形断面进行替代,受力形式更佳,壁厚大大减小。与常规明挖隧道基坑立柱设置不同,考虑到拱形断面施工采用筑模台车,基坑立柱统一设置于中隔墙位置以满足台车施作空间,后期浇入结构中隔墙。

基于以上两点本文提出一种特殊的新型栈桥设计方案,其平面图、效果图及剖面见图3,因其第一道混凝土撑/栈桥梁的长短相间的布置方式略像钢琴键盘,本文将命名为“琴键”型基坑栈桥体系。

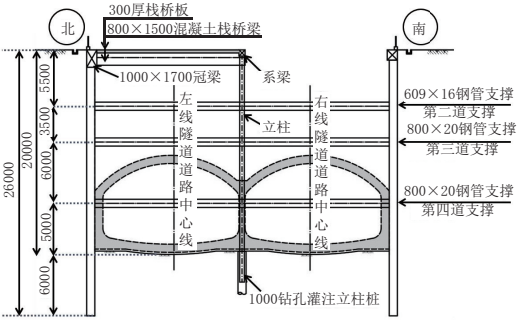
后文将对这一种新型基坑栈桥体系进行计算研究并提出针对性的设计措施。

设场地方面,宝鹏通道拟建区域上方道路为现状双向8车道地面主干道路布龙路,为保证施工期间交通的不间断,且受限于道路两侧各种建筑的限制,部分区域需设置行车栈桥,栈桥行车宽度要求较大,为至少14.5 m。

栈桥布置与交通导改方案见图2,简述如下。



(c)1-1剖面



(d)2-2剖面

图3 效果、平面及剖面图(单位:mm)

2 设计参数及模型建立

工程拟建场地为城市建成区,根据地质资料,上覆为第四系松散层,主要有人工填土(Q_4^{ml})、砾质黏性土(Q_{cl})、粉质黏土(Q_4^{al+pl})等,下伏基岩主要为燕山期($\gamma\beta^3K_1$)花岗岩。

本工程基坑支护结构嵌固段一般为砾质黏性土、全~中风化花岗岩,本文中地层取较不利情况,按深厚砾质黏性土情况进行分析,见表1,地层渗透系数较小按水土合算计算。

表1 土层信息表

土层	层厚/ m	重度/ ($kN \cdot m^{-3}$)	C / kPa	φ / ($^{\circ}$)	m / ($MPa \cdot m^{-2}$)
素填土	6	18.5	13	11	2.62
粉质黏土	3.5	19.5	23	14	4.82
砾质黏性土	至墙底	19.5	21	21	10.38

注:水位按地表/坑底0.5 m考虑

基坑深度13~20 m,所要采用琴键型基坑的区域普遍挖深较大,为整条隧道基坑埋深最大处之一,选取最不利的20 m挖深处,围护结构采用地连墙形式,墙厚0.8 m,地连墙长按26 m,即插入硬塑砾质黏性土至少6 m进行考虑,支撑道数为4道:第一道为混凝土支撑,兼作栈桥时,栈桥范围截面为800 mm $\times$ 1 500 mm,非栈桥侧为800 mm $\times$ 800 mm;第二道为 $\phi 609 \times 16$ 钢支撑;第三~四道为 $\phi 800 \times 20$ 钢支撑。栈桥主要功能为城市道路车辆通行,按30 kPa均布荷载进行考虑。

本文先完成基准模型(见图4(a))的计算,并将其与成熟的专业基坑计算软件启明星FRWS9.0的二维计算结果进行比对,以确定其准确性。而后在基准模型基础上,加入栈桥板、栈桥梁及栈桥荷载等要素,建立起包含栈桥的完整模型(见图4(b)),将其与基准模型所得结果进行对比,分析栈桥体系的对于整个基坑关键构件的影响,并提出针对性设计措施。

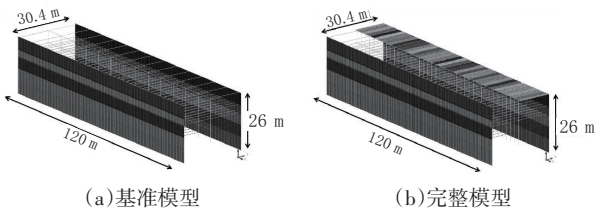


图4 MIDAS GTS模型图

MIDAS GTS建立的三维模型主要依据为工程所在地标准《深圳基坑支护技术标准》(SJG 05—2020)^[8]中基坑弹性地基梁的算法。模型长度均为120 m以消除边界影响,其中地连墙、栈桥板为2D弹

性板单元,第一道栈桥梁/混凝土支撑采用1D梁单元,第二~四道钢支撑采用1D桁架单元,地连墙外侧施加荷载模拟土体压力,而内外土体约束则采用仅受压的单向曲面弹簧进行模拟,荷载与约束根据规范进行计算并按基坑施工步骤进行施加。

3 基准模型计算及准确性验算

FRWS9.0的计算模型按设计资料在程序中输入参数进行计算,不进行赘述。

MIDAS GTS的基准模型采用分步骤计算,步骤模拟基坑的开挖、加撑、换撑及拆撑过程,并主要研究图3(a)中1-1剖面(支撑支座截面)和3-3剖面(支撑中间截面)的计算数据,将弯矩、剪力及位移包络图分别汇总进同一张曲线图进行对比,结果见图5。

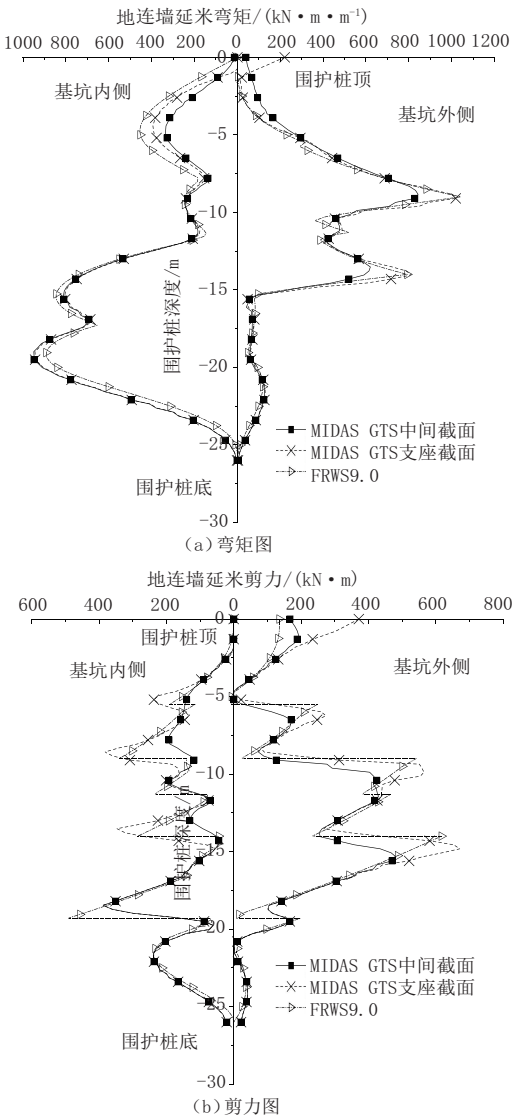


图5 基准模型与FRWS9.0地连墙内力对比图

弯矩计算结果显示,地连墙内侧弯矩包络图中,三者重合度均较高,最大值均发生于接近坑底的

19 m 深处,中间截面为 950.3 kN·m,支座截面为 944.8 kN·m,FRWS9.0 为 891.2 kN·m;地连墙外侧包络弯矩显示,GTS 支座截面计算结果 1 019 kN·m 和 FRWS9.0 计算结果 1 042.4 kN·m 较为接近,而 GTS 的中间截面外包弯矩则是整体趋势相同,但由于远离支撑支座,应力发生扩散,在接近峰值处曲线相比前两者较为缓和,峰值大小 843.4 kN·m 减小约 200 kN·m。

剪力计算方面,形态上,FRWS9.0 计算模型为二维,地连墙为梁单元,支撑为铰接支座,支撑处剪力包络图会发生直接突变,最大剪力为 542.4 kN;MIDAS GTS 计算模型中地连墙为 2D 板单元、支撑为 1D 梁或桁架单元的“点面接触”,剪力会有一些的相对平缓过渡现象,其中支撑支座截面剪力的突变程度更明显,最大剪力为 565.1 kN,中间截面则因为应力扩散,剪力变化也更加缓和,剪力最大值亦明显减小,为 430.0 kN。

显然无论是弯矩图还是剪力图,MIDAS GTS 的支座截面与 FRWS9.0 的计算结果及形态更加接近。

位移方面 MIDAS GTS 模型由于 2D 单元的连续性,支座截面和中间截面的计算结果几乎重合,见图 6。而两者与 FRWS9.0 计算结果的曲线趋势基本一致,计算结果略有误差,前两者最大变形为 11.9 mm,后者最大变形为 12.5 mm。

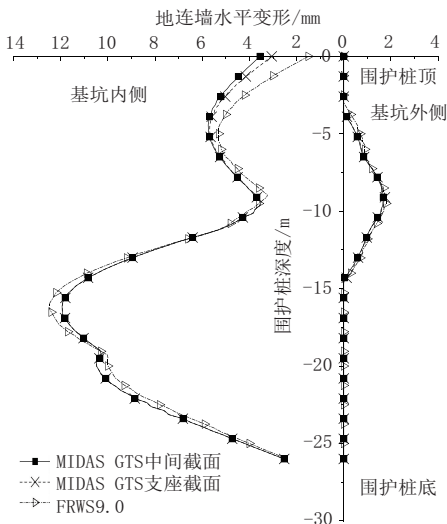


图6 基准模型与FRWS9.0地连墙位移对比图

两模型的轴力对比见表 2,两种模型所得结果较为接近,误差均在 10% 以内。经过以上分析可以看出,通用有限元软件 MIDAS GTS 建立的三维计算模型与专用商业软件 FRWS9.0 计算结果相符程度较高,本节完成基准模型计算的同时其准确性也得到了验证。

表2 基准模型与FRWS9.0各道支撑计算结果对比

支撑	MIDAS GTS 计算结果	FRWS9.0 计算结果		
	轴力/kN	延米轴力/ (kN·m ⁻¹)	间距/ m	等效轴力/ kN
1 _{st} 混凝土撑	1 329.8	135.6	9	1 220.4
2 _{nd} 钢支撑	1 332	426.0	3	1 278.0
3 _{rd} 钢支撑	2 505	882.5	3	2 647.5
4 _{th} 钢支撑	2 705	902.3	3	2 706.9

4 完整模型计算及结果对比

完整模型在基准模型的基础上加入了栈桥体系的各种构件,如栈桥梁、栈桥板、栈桥荷载等,对其进行计算,分析其结果并提出针对性设计措施。

(1)栈桥板

本工程栈桥板规格为 14.5 m×3 m,计算结果见图 7。栈桥板受力表现出明显的单向板受力特点,由于单向跨度仅 3 m,其受力较小,跨中弯矩约 26 kN·m,支座反弯矩约 17 kN·m,可见该结构体系下,栈桥板受力较小,栈桥板建议按常规设计即可。

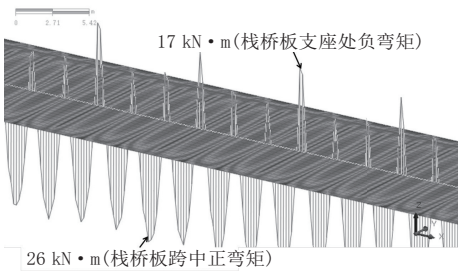


图7 栈桥板弯矩图

(2)栈桥梁

经过计算,栈桥梁和立柱的弯矩内力见图 8,其中选取仅栈桥梁(对应图 3(d)剖面)以及栈桥梁兼作第一道支撑(对应图 3(c)剖面)的两处位置。

如图 8(b)可以看出,作为承受栈桥板竖向荷载的栈桥梁构件,其弯矩最大值主要集中于跨中,跨中正弯矩为 3 415 kN·m;栈桥梁立柱处由于立柱刚度相对较小,转动约束能力弱,对于栈桥梁,其支座形式更加接近于铰接,传给立柱的支座反弯矩约 173 kN·m;栈桥梁围护墙处,围护墙转动约束能力相对较强,形成半铰接的支座形式,产生了 1 486 kN·m 的支座反弯矩,该反弯矩为传至围护墙板单元上的集中荷载,会迅速在围护墙单元上发生扩散。图 8(c)的栈桥梁兼作第一道支撑剖面,大体情况类似,主要区别在于另一侧的混凝土支撑,受到栈桥荷载影响,在立柱节点处将有一部分反弯矩传至另一侧

的混凝土支撑上,其值约 $719.2\text{ kN}\cdot\text{m}$;对于栈桥梁,由于另一侧混凝土支撑的存在,其立柱支座的转动约束变大,使得栈桥梁跨中弯矩略微减小为 $3\,383\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

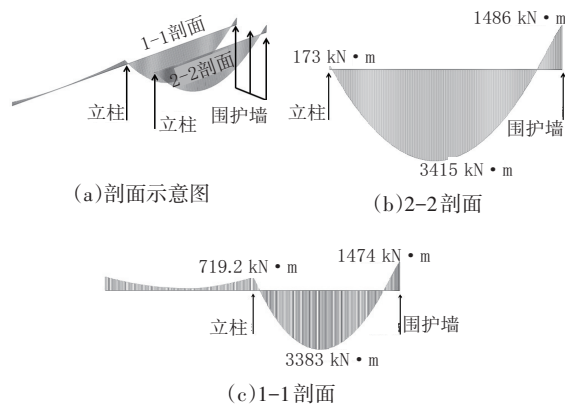


图8 栈桥梁/第一道支撑弯矩图

根据计算结果,栈桥梁/第一道撑有以下针对性设计:该栈桥结构布置体系中,栈桥梁受力很大,其 14.5 m 的跨度使得其弯矩远远超过一般栈桥梁的受力,因此方案中栈桥梁高度设计为 1.5 m 并配置合适的受弯钢筋后,可以满足受力要求。而兼作第一道撑的栈桥梁,在另一侧无栈桥板处采用 $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 的常规截面大小,同时应额外考虑栈桥荷载导致的支座反弯矩,并进行该部位配筋上的加强。

其他内力计算结果中,轴力方面,当栈桥梁兼作第一道混凝土撑时,由基准工况的 $1\,329.8\text{ kN}$ 增大为 $1\,629.9\text{ kN}$,轴力增大约 300.1 kN 。剪力方面,基准模型中最大剪力为 136 kN ;完整模型中,栈桥侧 $800\text{ mm}\times 1\,500\text{ mm}$ 栈桥梁剪力增大为 961 kN ,非栈桥侧 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ 支撑截面的最大剪力为 142 kN 。可见受到栈桥荷载的影响,栈桥梁的剪力增大较多,但由于截面进行了增大加强,经过计算按构造即可满足要求。

其他二~四道钢支撑轴力计算方面,对应工况及最大轴力的大小差异在 5% 以内,说明栈桥体系的加入对第二道及以下支撑的影响很小,可按常规设计。

(3)立柱

格构柱的设置常规基坑设计中很多时候是为了减小跨度较大基坑支撑的长细比,一般计算内力较小,采用经验设计规格(如本工程非栈桥时格构柱采用 $4\text{ L}160\times 16$ 规格)往往即可满足且有较大冗余量。但本工程栈桥跨度大、面积大,结构形式复杂,立柱也应进行针对性设计,格构柱的轴力与弯矩计算结果见表3。

结果表明,相比基准工况,格构柱立柱有较大的

表3 第一道栈桥梁/混凝土支撑计算结果

工况	轴力/kN	附加弯矩/(kN·m)
栈桥梁兼第一道混凝土撑剖面 [图3(a)中1-1]	1 252	162
栈桥梁剖面[图3(a)中2-2]	1 142	173
基准工况	380	0

轴力与弯矩增量,其中轴力增量主要为栈桥板上荷载向下传递的结果,弯矩则是因为栈桥基坑这一不对称受力体系,由栈桥梁传递过来后弯矩产生分配导致。经计算,前述经验设计规格无法满足规范上的格构柱验算,立柱规格需进行加大,采用角钢 $4\text{ L}180\times 16$,且应采用 Q345 钢材时可满足要求,且经济性较好。

立柱灌注桩设计方面,该工程所处区域下卧层为风化花岗岩岩层,一般坑底以下 10 m 范围内即可进入中风化层,利于桩身设计,常规直径 800 mm 灌注桩的桩身强度与地层承载力均能满足要求,但构造方面,由于栈桥立柱格构柱的规格加大,栈桥立柱的格构柱采用直径 $1\,000\text{ mm}$ 的灌注桩进行适配。

(4)地连墙位移、内力

琴键型栈桥为非对称受力结构,因此不同于常规基坑对称受力情况,栈桥侧与非栈桥侧的围护结构变形与内力会有所不同。

首先分析有栈桥体系时的位移情况,根据前文,位移由于围护墙 2D 单元连续性,支座截面与中间截面结果几乎无差异,选取中间截面进行研究。如图9所示,由于一侧栈桥荷载的加入,基坑成为不对称受力的体系,基坑顶部发生了一定程度的整体侧移,其中栈桥侧将发生朝向基坑内的变形,顶部最大变形约 23.7 mm ,另一侧受其影响发生朝向基坑外的变形,最大变形 19.7 mm 。而随着深度逐渐增大,各种工况的位移曲线逐渐接近,当深度接近坑底时,位移差值已减小至 2 mm 以内。

根据深圳地标《深圳基坑支护技术标准》(SJG 05—2020)的 3.1.6 条,上述变形计算结果仍能满足安全一级基坑的支护结构顶变形要求(0.002 倍坑深和 30 mm 的较小值)。但与基准模型的变形模式有很大不同,该处栈桥基坑会发生朝向无栈桥板一侧整体位移的情况,基坑顶部地表处也成为变形较大的区域,因此该区域的应在常规监测方案的基础上重点加强地表附近的变形监测。

当然需要说明的是,该变形为栈桥板满载时所求得数值,而实际栈桥板上的汽车荷载更加类似于

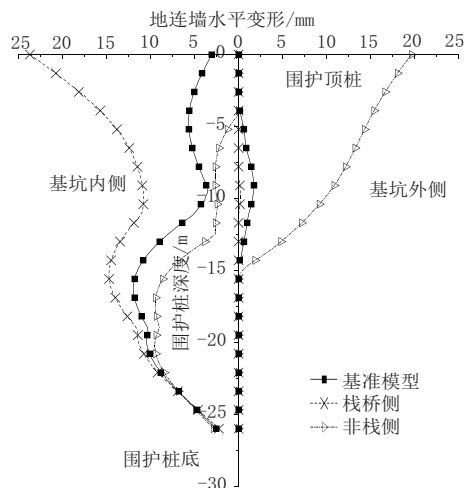


图9 栈桥情况与基准情况位移对比

其他结构设计中的频遇荷载,在计算变形时会有相对应的折减系数。一般基坑计算中主要变形由土压力这一永久荷载所导致,在变形计算中荷载系数取1,而本工程中栈桥板上的30 kPa均布荷载显然更加类似于可变荷载,变形计算中按类比可乘以频遇系数,因此实际的变形介于两者之间。不过考虑本工程所处区域为城市区域,结构形式较为新颖,且基坑相关规范未明确是否可以折减,该系数仍取1进行极限情况的变形控制。

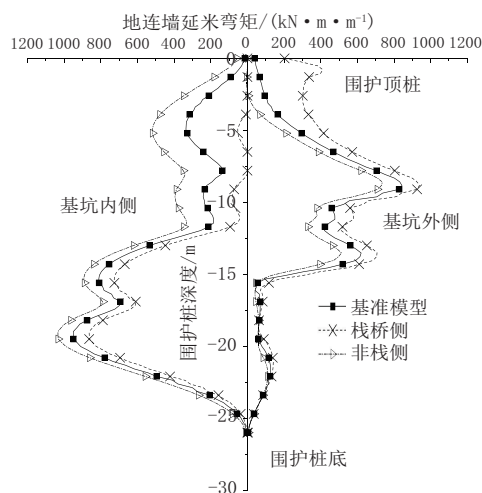
其次分析地连墙围护结构的内力情况,影响基准工况与栈桥工况地连墙受力差异的主要有栈桥体系传递的支座反弯矩以及不同于基准工况的变形下内外土体弹簧的反力的不同,选取中间截面及支座进行内力计算对比,见图10。

如图10所示,栈桥侧墙身外侧顶部将会有局部弯矩峰值产生,中间截面处为401 kN·m,产生于桩顶以下1 m位置,较基准情况增大357 kN;支座截面处为589 kN·m,产生于桩顶最上方位置,较基准情况增大368 kN,而内侧弯矩包络图则相应略微减小。

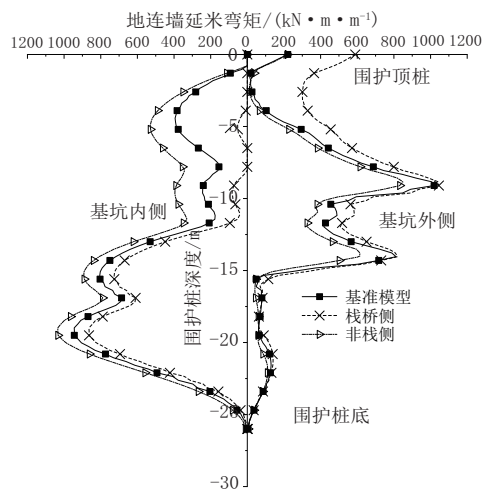
非栈桥侧,墙内侧弯矩受到栈桥体系的加入而有所增大,中间截面和支座截面最大增量分别为224、211 kN。墙外侧弯矩方面,中间截面表现为略微减小;而支座截面的墙顶的弯矩与基准情况基本一致,同样为支撑的端部反弯矩所导致。

与前文类似,实际的内力情况位于基准模型和完成模型计算结果之间,应进行两种工况的包络设计。

剪力影响方面,栈桥主要为竖向荷载受力体系,对墙身剪力的影响非常有限,根据计算,对比有无栈桥时的情况,剪力差值的峰值仅为64 kN,差异主要集中于地连墙顶部构造复杂的应力集中区域,其余



(a)中间截面



(b)支座截面

图10 栈桥情况与基准情况弯矩对比

区域差异则可以忽略不计。

5 结 语

本文根据深圳市宝鹏通道工程(简上路-龙景立交)实际情况提出一种新型的琴键型基坑栈桥体系,对其进行计算并提出针对性设计措施,主要有以下结论。

(1)首先采用MIDAS GTS建立并计算了三维基准模型,并与成熟商用计算软件FRWS9.0的计算结果进行对比,两者结果有一定误差但均在合理范围内,基准模型准确性得以验证。

(2)在基准模型的基础上,对加入栈桥体系后的完整模型计算进行分析,对比两种模型计算结果,分析其异同并在设计中对各个关键构件提出针对性措施。

a. 栈桥板有跨度小、单向性等受力特点,受力较小可按常规设计。

b. 由于栈桥荷载,栈桥范围内的栈桥梁弯矩、剪力增大较多,因此采用变截面设计,栈桥侧梁高加大,非栈桥侧支撑采用常规断面,满足受力的要求的同时兼顾经济性。

c. 栈桥荷载由梁板传至坑内立柱,立柱轴力大大增加,且产生较大顶部附加弯矩,立柱格构柱规格相应需要加强。

d. 地连墙围护结构的位移与内力由于栈桥荷载,表现出明显的非对称性。栈桥侧表现出朝向基坑内的变形特点,非栈桥侧则朝向基坑外变形,变形可满足规范要求,实际施工时应应对坑顶变形加强监测;内力方面,主要表现为由于栈桥体系支座反弯矩的传入,栈桥侧墙顶外弯矩明显增大,因在设计中加以验算,必要时加强该区域配筋。

(3) 栈桥工况部分构件计算结果小于基准工况,

但其中栈桥荷载为可变荷载,因此设计中基准工况与栈桥工况不可偏废,应进行包络设计。

参考文献:

- [1] 毕成双. 基坑工程中混凝土栈桥体系计算方法研究[J]. 特种结构, 2020, 37(4): 20-24.
- [2] 任建业, 毛运超, 邢帅, 等. 深基坑栈桥出土方案设计与应用[J]. 工程与建设, 2023, 37(5): 1450-1453.
- [3] 田标. 隧道工程盖挖法施工技术[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(10): 103-106; 110.
- [4] 罗志阳. 狭长深基坑半盖挖施工技术探究[J]. 城市道桥与防洪, 2021(5): 189-191.
- [5] 彭帅, 张驰, 文彦鑫. 填海淤泥地层盖挖半逆作地铁地下停车场支护体系设计[J]. 现代城市轨道交通, 2023(1): 65-70.
- [6] 陈东, 杨学林, 刘晓燕, 等. 杭州萧山国际机场三期工程陆侧交通中心基坑逆作法设计[J]. 建筑结构, 2022, 52(15): 130-135.
- [7] 王威. 深大基坑盖挖逆作施工自动化监测研究及围护结构变形预测[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
- [8] SJG 05—2020, 基坑支护技术标准[S].

(上接第 82 页)

综上所述,通过建立“梁-实体单元”有限元模型对大挑臂钢板组合箱梁矮塔斜拉桥主梁进行了正常使用极限状态以及承载能力极限状态下的工况分析,发现其桥面板、钢箱梁、斜撑位置的应力均符合相应的受力需求。本文建模分析计算过程可为日后类似工程提供参考依据。

参考文献:

- [1] 彭定成, 杨孟刚, 孟栋梁. 三塔四跨单索面大翼缘矮塔斜拉桥塔墩梁固结区域局部应力分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(7):

- 1465-1472.
- [2] 周敏, 戴公连, 栗森. 槽型断面斜拉桥塔梁墩固结区应力的数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(4): 35-40.
- [3] 曹忠强. 矮塔斜拉桥全桥静动力计算和塔墩梁固结部位详细应力分析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [4] 安永日, 吕成林, 燕海蛟, 等. 波形钢腹板组合箱梁矮塔斜拉桥塔墩梁固结段受力分析[J]. 世界桥梁, 2012, 40(6): 38-42.
- [5] 赵晨光, 陈军锋, 刘孙文, 等. 矮塔斜拉桥 0#块应力与剪力滞效应分析[J]. 城市道桥与防洪, 2022(7): 178-180.
- [6] 卫超. 武汉市沙湖大道大挑臂钢箱梁受力分析[J]. 城市道桥与防洪, 2022(5): 78-80.