

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202212002



装配式张弦梁钢支撑结构力学性能分析

林雨浓¹, 孙德畅², 张朝慧³, 郑金伙⁴,
饶武斌², 李欣⁴, 李海锋¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 上海宝冶集团有限公司, 上海 201941;

3. 厦门安捷建筑工程有限公司, 福建 厦门 361100;

4. 福建省建筑设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

摘要: 为明晰装配式张弦梁钢支撑系统中预应力张弦梁结构的力学性能,采用 ABAQUS 有限元软件对张弦梁结构进行数值模拟分析.通过张弦梁撑杆预应力、撑杆截面尺寸、冠梁截面尺寸和桩基侧向刚度等影响因素分析张弦梁钢支撑的受力性能.利用 MIDAS 有限元软件对张弦梁钢支撑进行整体建模分析.结果表明:张弦梁靠近对撑部分的拉杆的承载能力对整个张弦梁的承载力起决定作用;增大撑杆预应力和桩基侧向刚度对张弦梁钢支撑承载能力有明显增强;增大撑杆截面和冠梁截面对张弦梁系统的承载能力提高不明显;张弦梁钢支撑系统的基坑位移处于预警值范围内,支撑系统对基坑位移有较好的控制作用.

关键词: 预应力张弦梁; 基坑支护; 承载能力; 位移

中图分类号: TU 391

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)03-0309-10

Mechanical Property Analysis of Fabricated Beam String Steel Support Structure

LIN Yunong¹, SUN Dechang², ZHANG Chaohui³,
ZHENG Jinhua⁴, RAO Wubin², LI Xin⁴, LI Haifeng¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Shanghai Baoye Group Limited Company, Shanghai 201941, China;

3. Xiamen Anjie Construction Engineering Limited Company, Xiamen 361100, China;

4. Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Limited Company, Fuzhou 350001, China)

Abstract: In order to clarify the mechanical property of prestressed beam string structure in fabricated beam string steel support system, ABAQUS finite element software is used to conduct numerical simulation analysis of beam string structure. The mechanical property of beam string steel support is analyzed through the influence factors such as prestress of struts, size of struts section, size of crown beam section and the lateral stiffness of pile foundation. MIDAS finite element software is used to conduct overall model analysis of beam string steel support. The results show that the bearing capacity of the tension rod near the counter brace part of the beam string determines the bearing capacity of the whole beam string. The increase of the prestress of the struts and the lateral stiffness of the pile foundation significantly enhances the bearing capacity of the beam

收稿日期: 2022-12-02

通信作者: 李海锋(1983-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事钢结构力学性能的研究. E-mail: lihai_feng@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778248);福建省自然科学基金资助项目(2018J01075)

string steel support. The increase of the section of struts and the size of crown beam section does not significantly improve the bearing capacity of the beam string system. The beam string steel support system foundation displacement is within the warning value, the support system has a better control of foundation displacement.

Keywords: prestressed beam string; foundation pit support; bearing capacity; displacement

兼顾安全、绿色经济及施工进度三方面的考虑,装配式张弦梁钢支撑具有较大的社会效益和良好的应用前景^[1-3]. 预应力张弦梁是装配式张弦梁钢支撑结构的关键组成部分,包含钢拉杆、钢撑杆等,与混凝土冠梁形成自平衡的受力体系. 张弦梁结构是由刚性构件上弦、柔性拉索、中间连以撑杆形成的新型自平衡体系,最早由日本 Nihon 大学的 Saitoh 教授^[4]于 1984 年提出. Saitoh^[4]基于线性理论对预应力张弦梁的受力性能进行了研究. Kato 等^[5]研究了预应力对张弦梁结构内力的控制作用. 马美玲^[6]指出单樑张弦梁结构的撑杆数目、垂夸比、高跨比和梁的惯性矩、截面面积及截面特性都会影响结构的静力性能. 刘锡良等^[7]指出张弦梁结构对非对称荷载反应敏感. 刘晟等^[8]在对上海源深体育馆预应力张弦梁的计算中指出,张弦梁结构变形与荷载基本呈线性关系,且对矢跨比、上弦截面尺寸和下弦钢索面积等参数进行结构方案对比^[9]. 王彦宏^[10]对甘肃体育馆项目张弦梁屋架进行有限元分析,验证了有限元模拟的有效性.

预应力张弦梁钢支撑在国内外的应用尚处于起步阶段,将其作为基坑支护结构的受力性能分析较少. Kim 等^[11]提出一种由钢绞线、H 型钢撑杆和腰梁等构成的预应力鱼腹梁内支撑体系. Mana 等^[12]通过数值模拟,探讨支撑预应力对基坑变形的影响规律,研究表明,当对支撑施加的预应力控制在合理范围时,可以有效减小基坑变形. O'Rourke 等^[13]对比模型的计算结果与现场实测的结果,分析研究发现,钢支撑施加预应轴力可以有效控制基坑变形. 曹进等^[14]利用 Midas 分析张弦梁支撑的变形及其影响. 曾红生^[15]对某公共基坑项目的张弦梁支撑进行受力性能分析,分析得到张弦梁钢支撑整体受力水平均匀,可以很好地限制基坑变形.

基坑土体受力是一个立体的三维受力过程,而大部分学者的数值模拟仅通过单元选取不利截面,将单元计算支撑力结构引用到二维平面计算中,与实际存在偏差. 因此,本文对实际工程基坑内支撑中装配式张弦梁钢支撑的张弦梁结构进行数值模拟,分析装配式张弦梁钢支撑的结构力学性能.

1 工程概况

基坑项目位于厦门思明区,场地四周环境较复杂. 场地西北侧为填海湖;中间为公园景观绿化;南侧约 6 m 处为围墙,围墙外为道路;西侧约 20 米处为围墙;东侧为内部道路,路宽约 4 m;隔路为办公楼.

基坑开挖支护的构筑物为调蓄池,构筑物基底标高为 -8.85 ~ -12.05 m,基坑深度为 9.75 ~ 12.95 m. 拟建基坑侧壁为杂填土、素填土、淤泥层、中砂层等;基坑支护结构失效、土体过大变形对主体结构施工安全的影响严重,根据相关规范综合判定,拟建项目基坑工程侧壁安全等级为一级. 基坑钢支撑布置平面,如图 1 所示.

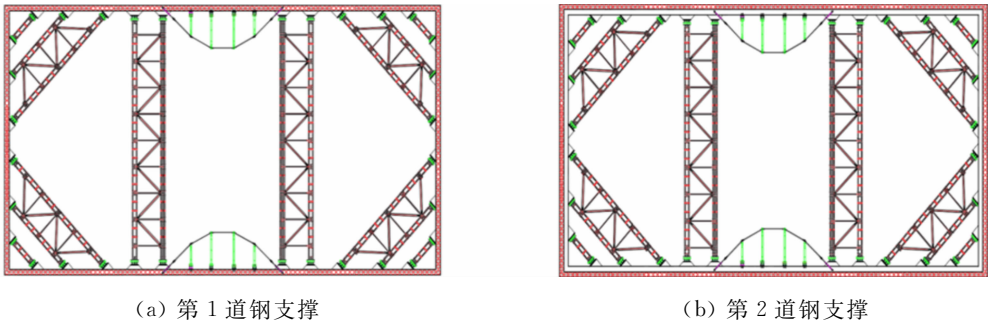


图 1 基坑钢支撑布置平面

Fig. 1 Layout plan of foundation pit steel support

综合考虑地质、环境、挖深等因素,本着安全可靠、经济合理、技术可行、方便施工的原则,基坑采用

的支护方案为钻孔灌注桩+2 道张弦梁钢结构内支撑. 每一道钢结构内支撑包括 2 套张弦梁,2 个桁架对撑和 4 个桁架角撑.

2 张弦梁有限元建模分析

2.1 有限元建模

结合实际的工程尺寸,在 CAD 软件中取第 1 道钢支撑张弦梁部分按照 1:1 建模后,导入 ABAQUS 中进行有限元数值模拟. 数值模拟以实际工程的预应力张弦梁钢支撑体系为对象,建立三维实体-梁-桁架混合有限元模型,考虑材料与几何非线性,模拟冠梁底部桩基弹性支承作用,进行预应力张弦梁的受力性能研究.

2.1.1 有限元模型 采用杆系-实体单元建立预应力张弦梁有限元模型,如图 2 所示. 选取冠梁两牛腿间部分结构进行建模,冠梁宽 1 200 mm,高 1 000 mm,建模考虑冠梁配筋. 冠梁、垫块采用 ABAQUS 程序单元库中的 8 节点六面体单元 C3D8R. C3D8R 单元每个节点均有 3 个平动自由度(U_x, U_y, U_z);拉杆、钢筋采用 ABAQUS 程序单元库中的桁架单元 T3D2,仅考虑其轴向力,箍筋区分加密区和非加密区;钢撑杆采用 B31 单元,考虑其弯曲和轴向力.

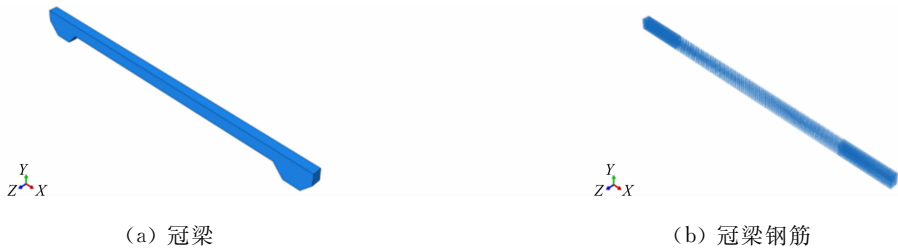


图 2 预应力张弦梁有限元模型

Fig. 2 Finite element model of prestressed beam string

2.1.2 材料特性及截面信息 材料特性及截面信息,如表 1,2 所示. 表 1 中: E 为弹性模量; ρ 为密度.

表 1 材料特性

Tab. 1 Material properties

构件	材质	E/GPa	$\rho/\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$
混凝土	C30	26.5	2.4
拉杆	Q550	210.0	7.8
撑杆	Q355B	210.0	7.8
冠梁钢筋	HRB400	200.0	7.8

表 2 材料截面信息

Tab. 2 Section information

编号	规格	材质	构件
ST4	BH400 mm×400 mm×22 mm×22 mm	Q355B	钢撑杆
2PSR15	Φ150 mm×2 mm	Q550	高强拉杆
SB8c	3HN800 mm×300 mm×14 mm×26 mm	Q355B	钢梁
GL	1 200 mm×1 000 mm	C30	混凝土冠梁

2.1.3 边界条件 建模分析采用笛卡尔直角坐标系, X 轴位于冠梁长边方向, Y 轴位于冠梁垂直向内基坑方向, Z 轴竖直向上于冠梁平面. 杆件之间的连接按铰接计算,撑杆按轴压构件计算. 分析选取包含所有两牛腿之间的冠梁及张弦梁部分进行建模,边界条件为对撑牛腿处铰接,拉杆和撑杆连接处设置竖向(Z 向)约束. 张弦梁模型边界条件,如图 3 所示. 在考虑桩基支承时,在冠梁底面设置竖向(Z 向)约束和 Y 向的弹簧连接,其节点弹簧布置,如图 4 所示. 将土压力等效为面荷载施加在冠梁上,并对撑杆施加预应力. 冠梁底面采用钻孔灌注桩进行支护,其中,钻孔灌注桩直径为 1 000 mm,桩间距 200 mm,桩的计算长度取 10 000 mm,冠梁的建模长度为 35 843 mm,故冠梁底部约布置 30 根钻孔灌注桩.

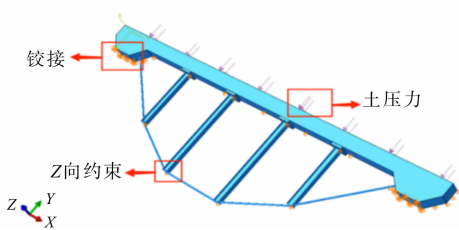


图 3 张弦梁模型边界条件

Fig. 3 Boundary conditions of beam string model

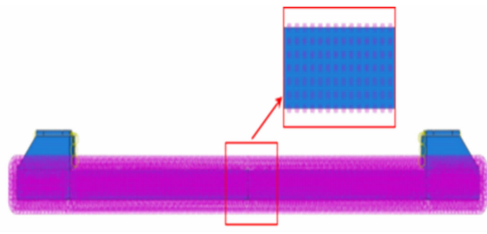


图 4 节点弹簧布置

Fig. 4 Node spring arrangement

根据 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[16]中桩身抗弯刚度的设计规范,假设单根桩的端部约束为固定端约束,进而得到单根桩的抗侧刚度.将冠梁底部所有桩的抗侧刚度之和平均分配到冠梁底部节点上,得到各个节点的弹簧刚度.

将总刚度平均分配到底面各节点(底面节点数为 1 091),计算得到每个节点分配到的刚度值约为 2 947 N·mm⁻¹.取桩的计算长度分别为 5 000,6 000,8 000,10 000,12 000 mm,求得其对应的节点侧向刚度,如表 3 所示.表 3 中: L 为桩的计算长度; K_0 为单桩抗侧刚度; K_s 为抗侧刚度之和; K_t 为节点弹簧刚度.

表 3 不同桩计算长度下的节点侧向刚度
Tab. 3 Lateral stiffness of joints under different pile calculation lengths

L/mm	$K_0/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$K_s/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$K_t/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$
5 000	857 280	25 718 400	23 573
6 000	496 111	14 883 330	13 657
8 000	209 297	6 278 910	5 755
10 000	107 160	3 214 800	2 947
12 000	62 013	1 860 390	1 705

2.2 数值模拟结果分析

为了分析张弦梁钢支撑的受力机理,探讨有限元模拟的准确性,取桩的计算长度为 10 000 mm,对预应力张弦梁结构的应力和位移进行数值模拟,其有限元计算云图,如图 5 所示.图 5 中: σ_c 为撑杆最大 Mises 应力; σ_l 为拉杆最大 Mises 应力; Δ 为冠梁跨中向坑内位移.

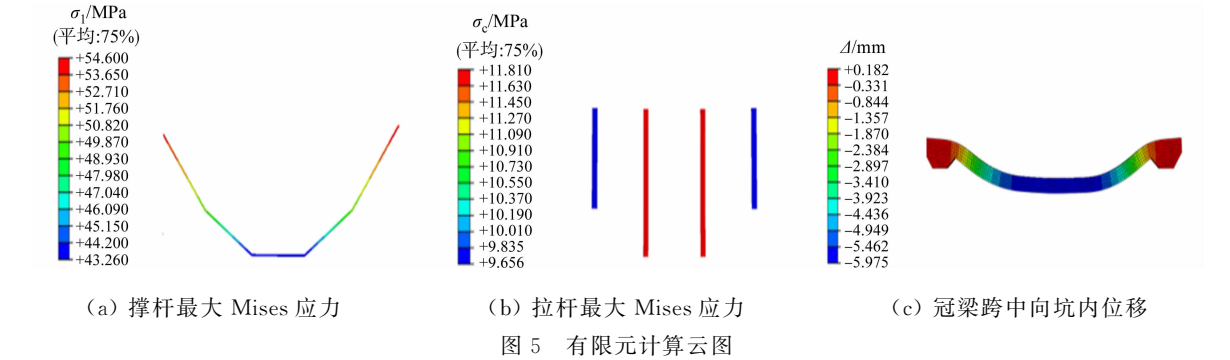


Fig. 5 Finite element calculation cloud charts

由图 5 可知:张弦梁的总体最大位移在上弦冠梁跨中部分,冠梁向坑内最大位移为 5.975 mm;由于张弦梁下弦的形状为类抛物线,从中跨到边跨的钢拉杆与上弦杆的角度越来越大,张弦梁边跨所受的拉力也会最大;施加预应力后,基坑土压力通过冠梁传递给撑杆,撑杆再将压力传给高强钢拉杆,高强钢拉杆受拉,最终将拉力传递给对撑支座;冠梁牛腿部位由于对撑作用,位移变形小;撑杆的最大 Mises 应力在中部撑杆处为 11.81 MPa;拉杆的中跨应力较小,其最大 Mises 应力在张弦梁拉杆边跨处为 54.60 MPa.

张弦梁冠梁跨中结构处基坑水平位移监测点布置图,如图 6 所示.监测点 SJ14 在第 93~96 次监测到的基坑水平位移累计变化值分别为 6.59,6.71,6.83,6.85 mm.由图 5 可知:监测结果和模拟结果比较接近,变化曲线和云图较吻合,因此,模拟结果对实际的工程具有指导意义.

2.3 张弦梁承载能力影响分析

2.3.1 撑杆预应力 张弦梁是一种刚柔杂交的自平衡体系^[17],在承受荷载之前,预应力的施加会使结构产生一定的起拱值^[18],从而减少其在荷载作用下结构的挠度.张弦梁钢支撑中,在基坑外部的水土压力影响下,基坑的支护结构会产生一个向基坑内的位移,待支撑设置完毕后,对张弦梁的撑杆、对撑、角撑施加预应力以控制基坑位移,随着预应力的增大,张弦梁的撑杆将力传至冠梁或围檩处,使支护结构

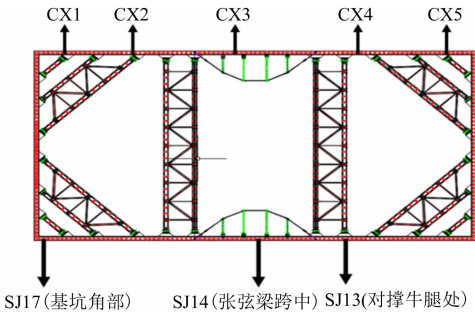


图 6 监测点布置图
Fig. 6 Layout of monitoring points

向基坑外产生预先位移;当基坑开挖深度增大时,产生的预先位移可以减小为由主动土压力产生向基坑内部的位移,从而对基坑变形产生有效干预. 预应力的数值不能太小,如果太小,下弦拉杆可能会因为失去拉力而退出工作,破坏了其自平衡体系;反之,如果太大,会使部分杆件轴力加大,用钢量增大. 因此,撑杆预应力的对结构的协同工作至关重要.

为了明晰预应力对张弦梁结构受力性能的影响,在其他参数相同的情况下,分析不同撑杆预应力对撑杆、拉杆最大 Mises 应力和冠梁跨中向坑内位移的影响,结果如图 7 所示. 图 7 中: P 为撑杆预应力.

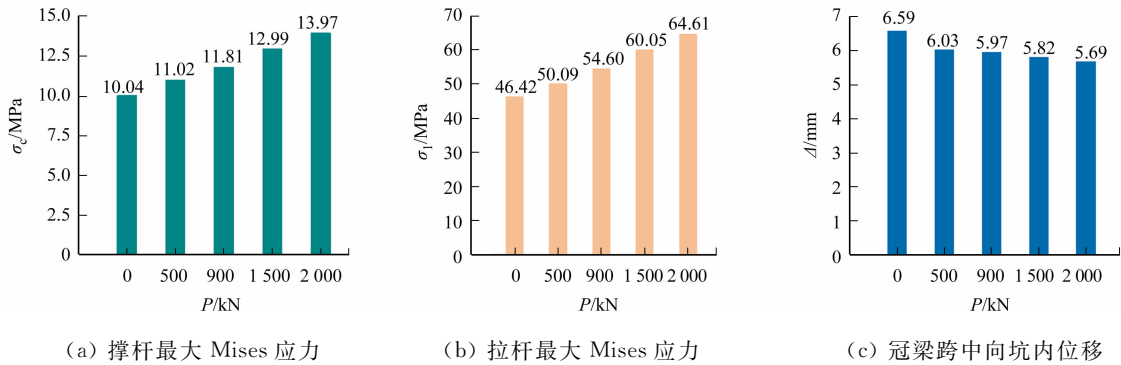


图 7 不同撑杆预应力对撑杆、拉杆最大 Mises 应力和冠梁跨中向坑内位移的影响

Fig. 7 Effects of different struts prestress on maximum Mises stress of struts and tension rod and midspan displacement of crown beam in pit

由图 7 可知:随着撑杆预应力的增大,张弦梁撑杆、拉杆最大 Mises 应力增大,冠梁跨中向坑内位移逐渐减小;当预应力从 0 kN 增大到 2 000 kN 时,撑杆最大 Mises 应力增大了 38%,拉杆最大 Mises 应力增大了 39%,冠梁跨中向坑内位移减小了 15%. 由此可见,张弦梁系统预应力的施加会使张弦梁承受更大的荷载,来换取上弦冠梁跨中向坑内变形量的减少. 当预应力增加到 900 kN 后,预应力的变化对冠梁跨中向坑内位移影响较小,但撑杆、拉杆的最大 Mises 应力仍显著变大,因此,在符合实际工程的情况下,应实时监测基坑变形,合理地分步施加预应力值,以达到基坑稳定性的要求,并减少用钢量.

2.3.2 撑杆截面 张弦梁钢支撑系统中撑杆对上弦冠梁起弹性支撑的作用,并传递土压力到高强度拉杆,形成整体协同受力的支撑体系. 由于张弦梁钢支撑是装配式构件,撑杆和拉杆为标准件,在其他参数相同的情况下,设置张弦梁撑杆截面 A1~A3 的截面尺寸分别为 BH300 mm×300 mm×16 mm×16 mm($S_{A1}=13\,888\text{ mm}^2$),BH400 mm×400 mm×22 mm×22 mm($S_{A2}=25\,432\text{ mm}^2$),BH500 mm×500 mm×25 mm×25 mm($S_{A3}=25\,900\text{ mm}^2$),研究不同撑杆截面对撑杆、拉杆最大 Mises 应力和冠梁跨中向坑内位移的影响,结果如图 8 所示.

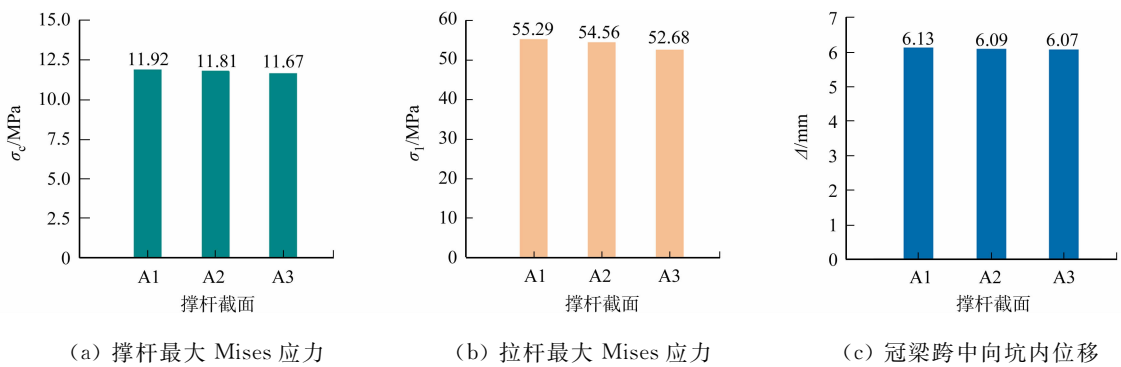


图 8 不同撑杆截面对撑杆、拉杆最大 Mises 应力和冠梁跨中向坑内位移的影响

Fig. 8 Effects of different struts sections on maximum Mises stress of struts and tension rods and midspan displacement of crown beam in pit

由图 8 可知:随着撑杆截面的增大,张弦梁的撑杆、拉杆最大 Mises 应力及冠梁跨中向坑内位移变化不明显;在撑杆截面面积增大 86%情况下,撑杆最大 Mises 应力减小了 2%,拉杆最大 Mises 应力减小了 5%,冠梁跨中向坑内位移减小了 0.9%. 因此,撑杆截面的大小对张弦梁承载能力影响很小.

2.3.3 冠梁截面尺寸 冠梁是基坑内支撑的重要组成部分,一般作为安全储备不加以计算. 在张弦梁

钢支撑体系中,冠梁作为上弦部分与支撑体系协同变形.因此,冠梁的受力及变形是支撑体系稳定变形的重要影响因素.冠梁中点的侧向刚度随截面高度的增大呈线性增大,随截面宽度的增大呈非线性增大^[19].因此,在其他参数相同的情况下,设置混凝土冠梁截面尺寸分别为 1 200 mm×1 000 mm,1 500 mm×1 000 mm,2 000 mm×1 000 mm,研究不同冠梁截面尺寸对撑杆、拉杆最大 Mises 应力和冠梁跨中向坑内位移的影响,结果如图 9 所示.

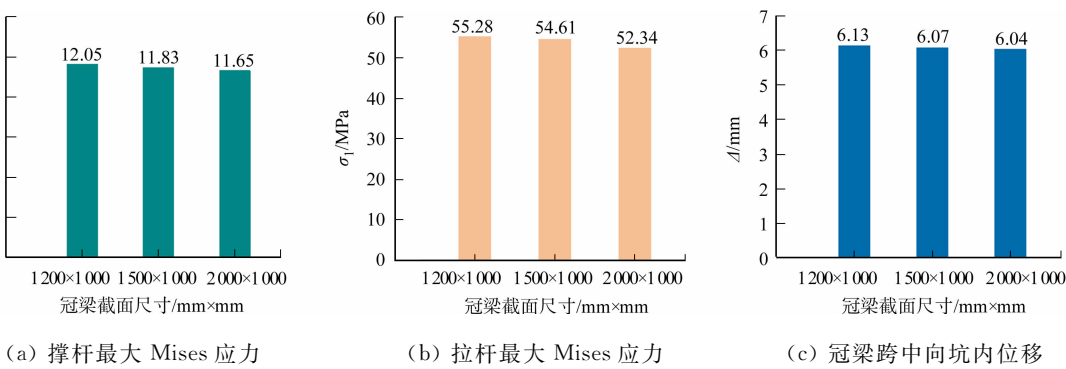


图 9 不同冠梁截面尺寸对撑杆、拉杆最大 Mises 应力和冠梁跨中向坑内位移的影响

Fig. 9 Effects of different crown beam section sizes on maximum Mises stress of struts and tension rods and midspan displacement of crown beam in pit

由图 9 可知:随着冠梁截面的增大,张弦梁撑杆、拉杆最大 Mises 应力增大不明显,冠梁跨中向坑内位移略微减小;当冠梁杆截面面积增大 66%时,撑杆最大 Mises 应力减小了 2%,拉杆最大 Mises 应力减小了 5%,冠梁跨中向坑内位移减小了 0.9%.因此,冠梁截面尺寸的增大对张弦梁承载能力影响很小.在实际工程中,无限制地增大冠梁截面尺寸来提高刚度是不现实的.对于张弦梁支撑系统来说,冠梁截面尺寸满足设计要求即可.

2.3.4 桩基侧向刚度 冠梁与排桩之间存在显著的协同作用.冠梁的作用是约束和协调各桩的受力和变形,使支护结构成为一个整体^[19].在土压力作用下,排桩和冠梁一起向坑内侧向变形.同时,冠梁对排桩的位移有约束作用,排桩和冠梁之间的约束作用通过它们之间的作用力和反作用力实现.因此,为了分析支护桩对张弦梁支撑结构的影响,根据有限元模拟中弹簧模拟桩基侧向刚度,设置桩基侧向刚度(K_z)分别为 872,1 705,2 947,5 755 N·mm⁻¹,研究不同桩基侧向刚度对撑杆、拉杆最大 Mises 应力和冠梁跨中向坑内位移的影响,结果如图 10 所示.

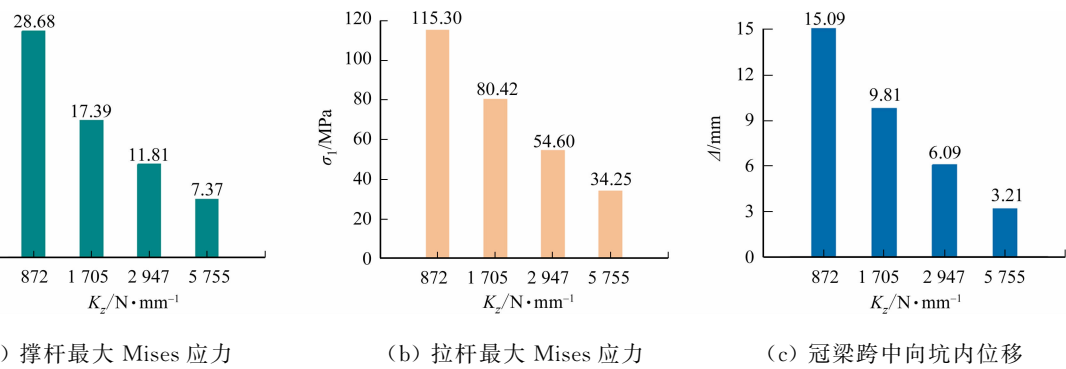


图 10 不同桩基侧向刚度对撑杆、拉杆最大 Mises 应力和冠梁跨中向坑内位移的影响

Fig. 10 Effects of different lateral stiffness of pile foundation on maximum Mises stress of struts and tension rod and midspan displacement of crown beam in pit

由图 10 可知:随着桩基侧向刚度的增大,张弦梁撑杆、拉杆最大 Mises 应力明显减小,冠梁跨中向坑内位移明显减小;当桩基侧向刚度减小 42%时,撑杆最大 Mises 应力增大了 47%,拉杆最大 Mises 应力增大了 45%,冠梁跨中向坑内位移增大了 61%.这是因为排桩对冠梁的作用力指向基坑内侧,迫使冠梁向基坑内侧位移,两者的变形一致,即冠梁的水平位移等于桩顶的水平位移.在土压力作用下,冠梁底部的桩基限制了冠梁的变形,并与冠梁协同受力,共同维护着基坑支撑系统的稳定.因此,桩基侧向刚度的大小对张弦梁承载能力起重要作用.

3 整体结构有限元建模分析

3.1 建模要点

根据实际工程情况,适度简化基础模型,利用 Midas 有限元分析软件,将装配式张弦梁钢支撑系统及周围实际情况反映到有限元分析模型中。

3.1.1 基坑外地层影响范围 在建模过程中,需要确定合适的土层分析范围.地层是连续不间断的,但施工过程中造成的基坑地层影响面积有限,因此,只需分析基坑开挖和施工期间地层可能受到影响的面积.为确保精确模拟,建模过程中尽可能消除边界效应.基坑外地层影响范围,如图 11 所示.图 11 中: H 为基坑设计深度,m; φ 为岩土体的内摩擦角, $^{\circ}$;基坑开挖范围内存在基岩时, H 为覆盖土层和基岩强风化层厚度之和;工程影响分区的划分界线取 $0.7H$ 或 $H \cdot \tan(45^{\circ}-\varphi/2)$ 的较大值.

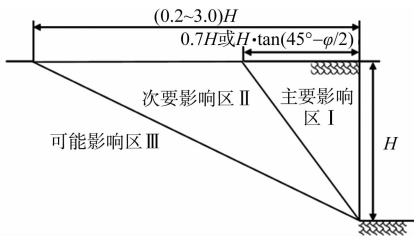


图 11 基坑外地层影响范围
Fig. 11 Influence scope of outer layer of foundation pit

3.1.2 构件的模拟单元 在装配式张弦梁钢支撑有限元分析过程中,张弦梁上弦梁即冠(腰)梁和张弦梁撑杆采用梁单元,张弦梁拉杆采用桁架单元,对撑和角撑及其腹杆采用杆单元.围护结构采用板单元进行模拟;地下连续墙的厚度为模拟单元板的厚度;支护桩转化为地下连续墙进行模拟,其等效刚度公式为

$$\frac{(D+d)h^3}{12}=\frac{\pi d^4}{64}.$$

式中: D 为支护桩间净距,m; d 为支护桩直径,m; h 为等效转换后的地下连续墙厚度,m.

3.1.3 材料属性选择 选择“修正莫尔-库仑”作为土体的材料模型,“弹性”作为钢材的材料模型.修正莫尔-库仑模型是一种改进的莫尔-库仑模型,适用于各种类型的地基模型,包括软土和硬土,尤其是具有摩擦特性的材料,如沙子.土体材料特性包括弹性模量、泊松比、黏聚力、摩擦角等.

3.1.4 几何网格划分 在基坑内对单元进行网格划分.为了确保立柱与基坑内部的节点耦合,基坑的 3D 单元可以与立柱的 1D 单元同时生成,立柱通过自动印刻到基坑.生成网格后,可以通过析取功能从冠梁生成围檩的 1D 元素和围护桩的 2D 元素,而张弦梁系统的其他单元可以通过尺寸划分生成 1D 元素.基坑围护结构模型示意图,如图 12 所示.

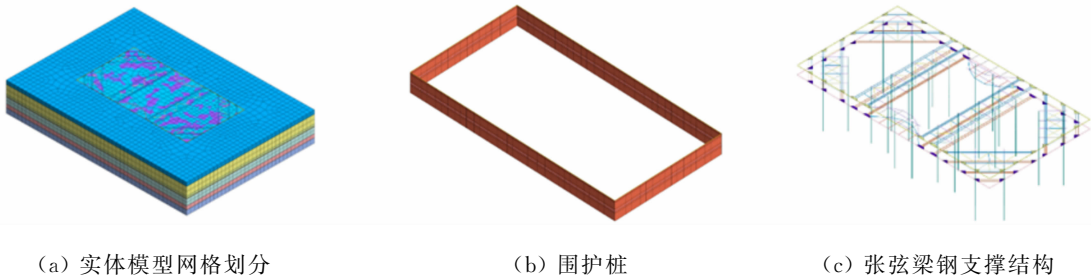


图 12 基坑围护结构模型示意图

Fig. 12 Model of foundation pit retaining structure

3.1.5 荷载和边界条件设置 模型边界条件和荷载示意图,如图 13 所示.基础底板与围护系统间的节点耦合通过印刻连接功能实现.为了模拟相对刚度差异较大的基础和结构之间的问题,在基础底板与灌注桩中加入刚性连接.同时,注意在灌注桩施工过程中断开刚性连接.当加固基础底板或桩身时,可在施工阶段分析中添加材料特性变化的工况,且材料特性变化不会影响前一施工阶段的分析结果.

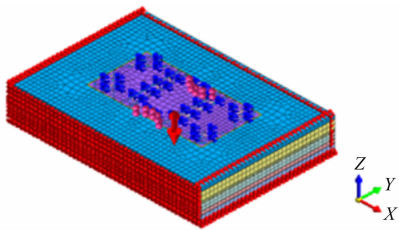


图 13 模型边界条件和荷载示意图

3.1.6 施工阶段 施工阶段主要有以下 7 个步骤:1) 初始应力场分析;2) 围护桩支护;3) 开挖到冠梁底标高下 0.5 m(开挖阶段 1);4) 安装第 1 道张弦梁钢支撑并

施加预应力(开挖阶段 2);5) 开挖到第 1 道支撑下 0.5 m(开挖阶段 3);6) 安装第 2 道张弦梁钢支撑并施加预应力(开挖阶段 4);7) 开挖到基坑底部(开挖阶段 5). 模拟分析将模型分为 5 个开挖阶段,模型施工中的开挖阶段模型图,如图 14 所示.

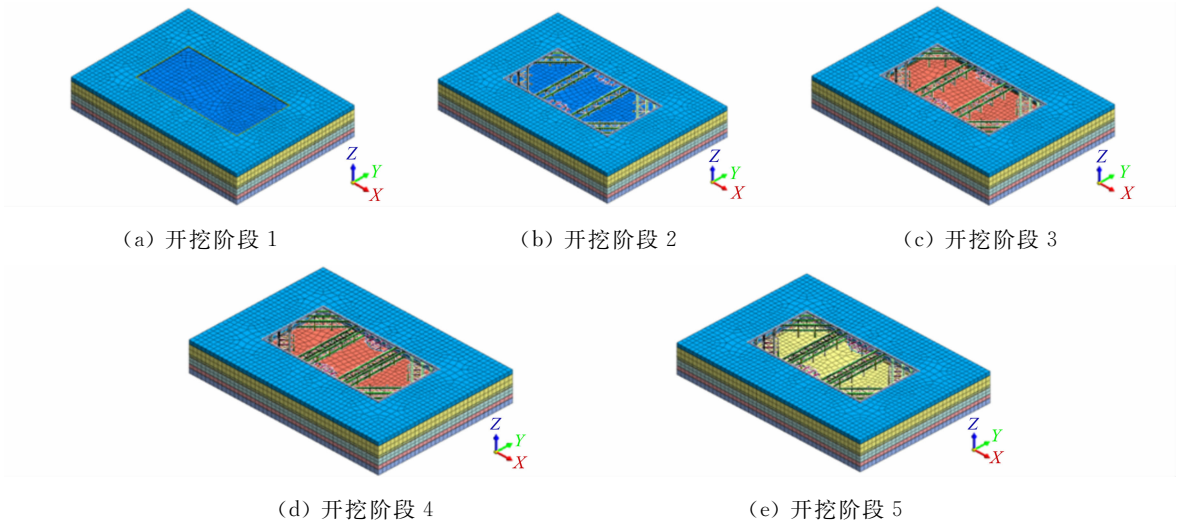


图 14 开挖阶段模型图
Fig. 14 Model of excavation stage

3.2 整体模型仿真模拟结果分析

基坑开挖至基坑底部后最大位移为 22.11 mm,位于基坑南北侧的跨中部位,基坑变形小于报警值 30 mm,满足基坑监测控制要求. 基坑附近最大水平位移为 16 mm,对周边环境影响微弱. 整体模型有限元分析位移云图,如图 15 所示.

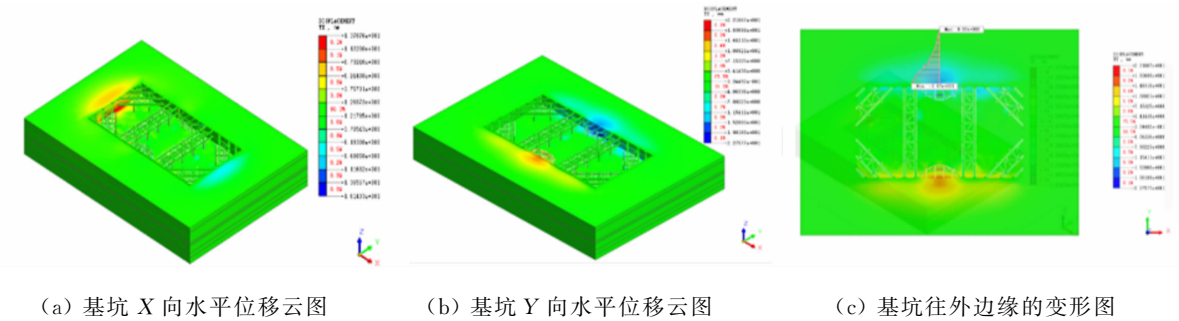


图 15 整体模型有限元分析位移云图

Fig. 15 Displacement cloud charts of finite element analysis of overall model

由图 15 可知:基坑开挖过程没有影响到基坑土体范围以外,表明建立的基坑土体范围合理,选取的基坑土体影响范围足够大;当对张弦梁钢支撑施加预应力之后,基坑土体会预先对外产生一个初始的变形,当继续向基坑底部开挖后,由于被动土压力逐渐增大,土体将会产生对基坑内的变形,与一开始的预变形相互抵消,直到开挖完成后,二者达到一个相对稳定的状态;张弦梁钢支撑满足位移变形的要求.

3.3 模拟结果和监测数据对比

选取 3 个监测点 SJ14(张弦梁跨中)、SJ13(对撑牛腿处)、SJ17(基坑角部)进行研究,桩顶围护结构竖向位移(Δ_v)和水平位移(Δ_h)的实测数据和数值模拟结果的对比,如图 16,17 所示.

由图 16 可知:监测点 SJ17 的模拟结果与实测数据的变化趋势接近,但变化幅度及最大值相差较大;监测点 SJ13,SJ14 实测数据的变化趋势与模拟结果基本相同,且竖向位移最大值接近. 由图 17 可知:监测点 SJ17 的模拟结果与实测数据变化趋势基本相同,但最大值相差较大;监测点 SJ13,SJ14 的模拟结果和实测数据变化趋势基本相同,在开挖阶段 2 中向基坑外的位移量有差距,但最大值接近.

数值模拟结果与实测数据存在一些偏差,主要有以下 3 点原因.

1) 土体模型采用修正莫尔-库伦模型,土体的实际变化复杂得多,无法做到完全准确,同时,很多土体参数应用了大量的经验值和经验参数,导致数值模拟结果和实测数据有所偏差.

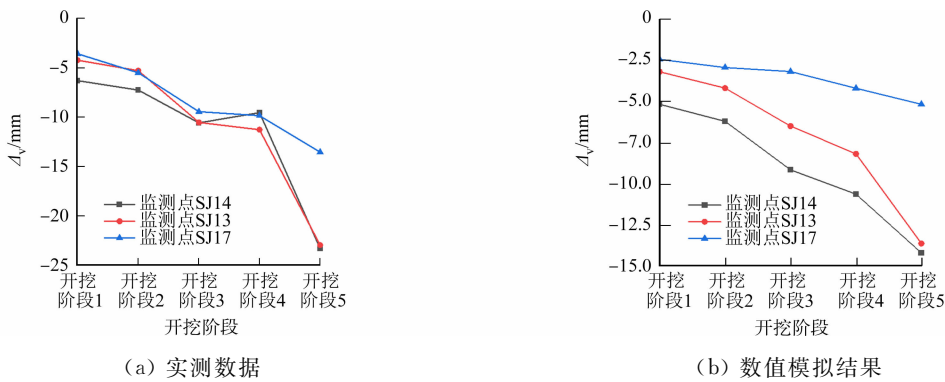


图 16 竖向位移的实测数据和数值模拟结果的对比

Fig. 16 Comparison of measured data and numerical simulation results of vertical displacement

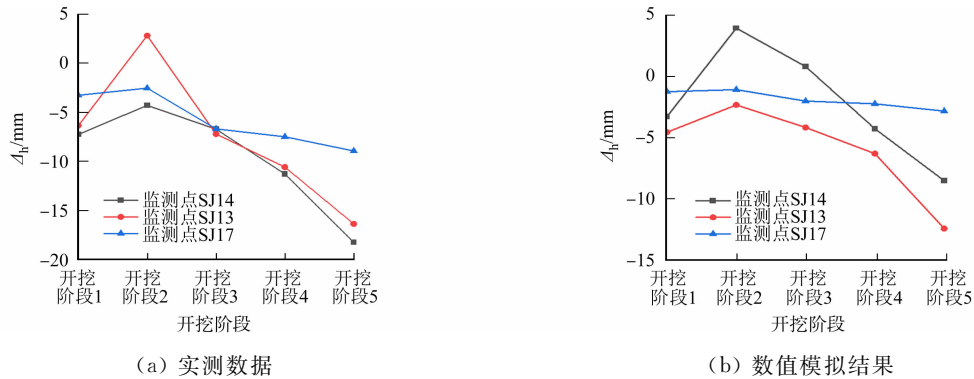


图 17 水平位移的实测数据和数值模拟结果的对比

Fig. 17 Comparison of measured data and numerical simulation results of horizontal displacement

2) 在实际施工过程中,装配式张弦梁钢支撑杆件都是由型钢组成.杆件施工和加工过程中存在一些初始缺陷和少部分应力集中,同时,杆件在连接完成后,杆件之间的连接处会继续密实,导致预应力的损失,而数值模拟过程不考虑预应力的损失.并且未考虑温度变化对杆件预应力的影响,使得模型的数值模拟结果相较于实测数据的位移和变形都较小.

3) 数值模拟分析中忽略了地下水位、施工荷载及降雨的影响,这些因素都会导致基坑产生较大变形.施工期间存在小部分雨天,对实际基坑变形也有较大的影响.

总体而言,实测数据与数值模拟结果虽然有差距,但是总体变化趋势较吻合,在基坑工程中是可以接受的,因此,数值模拟结果具有一定的参考性.

4 结论

装配式张弦梁钢支撑受力简单明确,是一种大跨度预应力空间结构体系,能够很好地满足人们对大跨度空间设计的要求.基坑内支撑中的张弦梁系统正是利用该特点,为基坑提供了超大的开挖空间,是一种经济、高效的支撑系统.

1) 张弦梁靠近对撑部分的拉杆的承载能力对整个张弦梁的承载力起决定作用,可以根据需要加强边跨钢拉杆强度,提高整体承载力.

2) 对张弦梁撑杆逐步施加预应力,冠梁跨中变形减少,张弦梁撑杆和拉杆应力增加.故可以充分利用高强拉杆的承载力,对撑杆施加预应力以达到减少基坑变形的目的.

3) 撑杆截面尺寸和冠梁截面尺寸的变化对张弦梁支撑系统中撑杆、拉杆最大 Mises 应力和冠梁跨中向坑内位移的影响均较小.

4) 桩基的侧向刚度对张弦梁支撑系统的影响较大,设计时应准确计算桩基的计算长度,合理分配桩基侧向刚度,以保证张弦梁系统的稳定性.

5) 通过有限元分析可知,张弦梁钢支撑能有效地限制基坑的变形,满足位移变形的要求.并且数值模拟结果的位移变形和变化趋势与实测数据接近,模拟结果具有一定的准确性和参考性.

参考文献：

[1] 李荷英. 装配式张弦梁钢支撑的应用与分析[J]. 散装水泥, 2021(1): 65-67, 69. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-3922. 2021. 01. 026.

[2] 周虔. 装配式预应力张弦梁钢支撑体系在深基坑支护设计及施工中的应用研究[J]. 江西建材, 2022(1): 200-202. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-2890. 2022. 01. 082.

[3] 王强, 胡晓莲. 预应力张弦梁钢支撑在深基坑中的应用研究[J]. 福建建筑, 2021, 279(9): 117-121.

[4] SAITOH M. Study on mechanical characteristics complex structure composed of a membrane and a beam of a light weight string structure[C]// IASS Symposium on Spatial, Lattice and Tension Structures. Atlanta: ASCE, 1994: 633-641.

[5] KATO S, NAKAZAWA S, YASUO M, *et al.* Active control of axial forces in beam string space frames[C]// IASS Symposium on Spatial, Lattice and Tension Structures. Atlanta: ASCE, 1994: 664-673.

[6] 马美玲. 张弦梁结构找形和受力性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

[7] 刘锡良, 白正仙. 张弦梁结构受力性能的分析[J]. 钢结构, 1998, 13(4): 4-8.

[8] 刘晟, 薛伟辰. 上海源深体育馆预应力张弦梁施工监测研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(3): 96-101. DOI: 10. 3321/j. issn: 1673-2049. 2008. 03. 018.

[9] 薛伟辰, 刘晟, 苏旭霖, 等. 上海源深体育馆预应力张弦梁优化设计与试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 16-23. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2008. 01. 004.

[10] 王彦宏. 张弦梁结构施工关键技术仿真模拟应用研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊 1): 323-327. DOI: 10. 19701/j. jzjg. 2019. S1. 067.

[11] KIM N K, PARK J S, HAN M Y, *et al.* Development of innovative prestressed support earth retention system[J]. Journal of the Korean Geotechnical Society, 2004, 20(2): 107-113.

[12] MANA I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(6): 1840-1858. DOI: 10. 1061/AJGEB6. 0001150.

[13] O'ROURKE T D. Ground movement caused by braced excavations[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(9): 1159-1178. DOI: 10. 1061/AJGEB6. 0001183.

[14] 曹进, 危斯敏. 探讨张弦梁钢支撑系统在深基坑支护中的应用[J]. 低碳世界, 2020, 10(11): 89-90. DOI: 10. 16844/j. cnki. cn10-1007/tk. 2020. 11. 042.

[15] 曾红生. 预应力张弦梁支撑的受力性能分析[J]. 山西建筑, 2021, 47(20): 118-119, 122. DOI: 10. 13719/j. cnki. 1009-6825. 2021. 20. 039.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[17] 白正仙, 刘锡良, 李义生. 单榀张弦梁结构各因数的影响分析[J]. 钢结构, 2001, 16(3): 42-46. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-9963. 2001. 03. 014.

[18] 陈汉翔, 舒宣武. 预应力值对张弦梁结构受力性能的影响分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 79-84. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-565X. 2003. 05. 018.

[19] 王建军. 基坑支护现场试验研究与数值分析[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2006.

(责任编辑：黄晓楠 英文审校：方德平)