

深基坑混凝土支撑轴力监测与分析

陈文华^{1,2}, 张玉山^{1,2*}, 刘际付^{1,2}, 曾维楚^{1,2}

(1. 武汉地质勘察基础工程有限公司, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北省城市地质工程院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了研究桩撑支护的深基坑在开挖过程中混凝土支撑的轴力特性, 本文以珠海地区深基坑为典型案例, 分析了基坑开挖过程中支撑轴力监测值的时序特征, 研究了计算值与监测值之间的关系。针对轴力现场监测值超过警戒值、基坑未开挖时轴力持续增加等情况, 从荷载、温度、徐变和收缩 4 个方面进行了分析, 揭示了基坑在开挖过程中支撑轴力的演化机制。研究表明: (1) 随着基坑开挖深度的增加, 支撑轴力均表现出增大的趋势; 基坑开挖到底后, 第 1、2 层支撑轴力现场监测值是理论计算值的 1.67~3.52 倍。(2) 温度对轴力有明显的影响, 达 68 kN/°C; 收缩及徐变的影响更大, 约为轴力现场监测值的 1/3。(3) 根据拆撑前后的实测数据, 切断支撑消除外荷载后, 应力计仍能测到轴力, 约为未切断前轴力的 60%。本文研究结果可为深基坑支撑设计、施工和监测提供参考。

关键词: 混凝土支撑; 深基坑; 支撑轴力; 温度; 徐变; 收缩

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)04-0404-09

Monitoring and analysis on axial force of concrete support in a deep foundation pit

CHEN Wenhua^{1,2}, ZHANG Yushan^{1,2*}, LIU Jifu^{1,2}, ZENG Weichu^{1,2}

(1. Wuhan Geological Prospecting Foundation Engineering Co., Ltd., Wuhan 430072, Hubei, China;

2. Hubei Institute of Urban Geological Engineering, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: In order to study the axial force characteristics of concrete support in deep foundation pits with pile-supported structures during excavation process, this paper takes a deep foundation pit in Zhuhai area as a typical case. This paper analyzes the time series characteristics of in-situ monitoring values of axial force during excavation and studies the relationship between calculated values and the monitoring values. In view of the situation that the axial force monitoring values exceed the warning value and the axial force continues to increase when the foundation pit is not excavated. The paper discusses four aspects of load, temperature, creep and shrinkage, thereby further revealing the evolution mechanism of axial force during the excavation. The results show that: (1) With the increase of excavation depth, the supporting axial force increases. After the foundation pit fully excavated, the field monitoring values of the first and second floor support axial force are 1.67 to 3.52 times the theoretical calculation values. (2) The temperature has a significant effect on the axial force, up to 68 kN/°C. The impact of shrinkage and creep is greater, about 1/3 of the monitoring value of axial force. (3) According to the measured data before and after the removal of the brace, the axial force can still be measured by the stress meter after the removal of the external load, which is about 60% of the value before the removal. The research results can provide reference for the design, construction, and monitoring of deep foundation pit support.

Key words: concrete support; deep foundation pit; axial force; temperature; creep; shrinkage

0 引言

近年来, 随着我国城市建设的快速发展, 地下空间得到大规模开发利用, 周边环境条件愈加复杂

的深基坑工程不断涌现^[1-3]。围护桩结合混凝土支撑的支护结构具有适应性强、施工工艺成熟、位移控制较好等特点^[4], 广泛应用于深基坑工程中。大量工程实践表明, 深基坑工程在开挖过程中存在支撑

收稿日期: 2024-01-30

基金项目: 湖北省地质局科技项目 (KJ2023-46)。

作者简介: 陈文华 (1968—), 男, 湖北宜昌人, 高级工程师, 主要从事岩土工程设计方面的工作。E-mail: 550785064@qq.com。

*通信作者: 张玉山 (1995—), 男, 甘肃会宁人, 工程师, 主要从事深基坑设计方面的工作。E-mail: 1948280894@qq.com。

轴力波动明显、监测数据和理论计算数据吻合性差等现象,所以研究支撑轴力的变化特性,对基坑的安全和稳定性判别具有重要的意义。

目前,钢筋混凝土支撑梁轴力监测普遍采用钢弦式钢筋应力计^[5]。众多监测实践表明,实测轴力值往往大于理论计算值,可能造成施工阶段对基坑安全性的误判。不少专家及学者对此进行过大量的研究,张光建等^[6]通过分析杭州地铁某超深基坑监测数据发现,1~4层混凝土支撑轴力实测值大于理论计算值,第5层钢管支撑与计算值相近。针对地铁狭长基坑采用钢管支撑的研究,李宇杰等^[7]通过分析兰州特殊红砂岩地层某地铁深基坑监测数据,发现3层支撑中第1层混凝土支撑轴力实测值大于设计值,第2、3层钢管支撑略小于设计值。叶真华等^[8]通过分析上海惠扬大厦深基坑监测数据,得出混凝土支撑轴力实测值比理论计算值普遍偏大的结论。基于上述实践和研究可见,钢管支撑实测轴力与理论计算值相近,混凝土支撑轴力较实际受力偏大。

许多专家及学者进一步研究了在基坑开挖过程中影响混凝土支撑轴力变化的因素。罗忠贵^[9]对石家庄市地铁车站基坑工程进行混凝土支撑轴力监测,发现同一天温差 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时轴力值变化达到 800 kN 以上,变化幅度约为 $57\text{ kN}/^{\circ}\text{C}$ 。鲁智明等^[10]根据钢筋与混凝土温度膨胀系数的差值,计算得出截面为 1 m^2 支撑梁的轴力温度影响系数为 $60\text{ kN}/^{\circ}\text{C}$ 。潘华^[11]以轴向受压的钢筋混凝土支撑(截面尺寸为 $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$)为试验对象,连续采集加、卸载过程中的轴力和温度变化数据,研究后认为温度影响轴力变化的幅度约为 $146.6\text{ kN}/^{\circ}\text{C}$ 。武鹏^[12]通过对基坑混凝土支撑轴力实测数据的分析,得出大气温度每上升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,支撑轴力测量数据约上升 77.5 kN 的结论。张启辉等^[13]对实测结果进行分析,得出收缩引起的轴力相当于整个支撑轴力的 $1/3$,因温度变化引起的轴力最大变化幅度约为 20% ,平均约为 8% 左右。叶真华等^[8]认为施工周期较长基坑的钢筋混凝土徐变对轴力影响较大,两年后轴力几乎增加一倍。章丹峰等^[14]考虑了混凝土徐变特性,采用变弹性模量计算得出支撑轴力值仅为监测值的 $50\%\sim 60\%$ 。肖振焯等^[15]综合考虑混凝土的弹性模量随时间变化以及混凝土收缩和徐变的影响,利用理论公式计算,对漕河泾商业服务区基坑混凝土支撑轴力进行修正,修正后的轴力值为修正前的 $1/3$ 左右。张桢树等^[16]通过分析土岩组合地质条件下的基坑监测数据,探讨了混凝土支撑设计与施工进行合理

优化的可能性,提出了对监测数据进行安全评估后,能更好地指导现场施工。综上所述,钢筋混凝土支撑梁轴力监测值较理论值偏大一般是由非荷载因素引起的,这些因素主要包括温度变化、混凝土收缩及徐变等。基坑工程具有明显的区域性特征,受地质、气候等因素影响较大,本文以珠海市某深基坑工程为例,对钢筋混凝土支撑的全过程受力特征展开研究。

本文基坑案例挖深较大,实施过程中因多处轴力超警戒值,建设单位多次组织专家对基坑安全性进行论证,并拟定了加固方案,甚至一度要求回填后作加固处理,为此投入了大量的时间和费用。尽管最终综合考虑多种因素后没有采取加固措施,基坑按原施工图顺利施工完成,支撑也没有出现与轴力监测值相应的裂缝和破坏征兆,但直至拆撑前,轴力监测值偏大或超警戒值的情况仍没得到改善。鉴于此,本文对轴力监测数据进行了分析,并与计算值进行对比,研究基坑开挖过程中支撑的全过程受力特征;从荷载、温度、徐变和收缩4个方面进行了讨论,进一步揭示了基坑在开挖过程中支撑的受力机制。研究结果可为类似深基坑的设计、施工和监测提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

该项目位于珠海市香洲区粤海西路西侧,拟建1栋高 150 m 的高层建筑,设4层地下室,基坑面积约为 $8\,920\text{ m}^2$,支护周长约为 368 m ,基坑开挖深度为 20.5 m ,坑中坑处基坑开挖深度为 24.5 m 。

场地北侧为住宅小区,建筑物为桩基础,地下室外墙距建筑最近约 29.5 m ,距东侧道路约 6 m ,南侧及西侧为空场地,基坑周边环境图如图1所示。



图1 基坑周边环境图

Fig. 1 Surrounding environment of the foundation pit

1.2 工程地质条件

场地较平坦，地面标高约为 5.0 m，场地地层特征及岩土物理力学参数见表 1~2。

表 1 场地地层特征

Table 1 Site stratigraphic characteristics

土层名称	层厚/m	土层特征
① ₁ 素填土	2.7~6.9	主要成分为黏性土，局部夹碎石、混凝土块
② ₁ 淤泥质黏土	0.7~4.2	深灰，含少量有机质及腐殖质，呈饱和、流塑状态，见于部分钻孔
② ₂ 粉质黏土	1.2~3.6	主要成分为黏粒及粉粒，局部含约 20%的粗砂，呈饱和、可塑状态
③砂质黏性土	2.2~29.9	由花岗岩原地风化残积而成，呈饱和、硬塑状态
④ ₁ 全风化花岗岩	5.0~32.8	属极软岩，岩芯呈土柱状
④ ₂ 强风化花岗岩	0.3~36.1	属极软岩，岩芯呈坚硬密实土柱状、碎块状

表 2 场地岩土物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of strata

土层名称	天然重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 c_{cq}/kPa	内摩擦角 $\varphi_{cq}/(^{\circ})$	压缩模量 E_s/MPa
① ₁ 素填土	17.0	12.0	6.7	3.0
② ₁ 淤泥质黏土	17.4	7.0	4.3	2.4
② ₂ 粉质黏土	19.4	27.0	13.0	4.9
③砂质黏性土	18.9	25.0	20.0	5.5
④ ₁ 全风化花岗岩	18.8	26.0	23.0	7.0
④ ₂ 强风化花岗岩	20.0	35.0	28.0	12.0

注：土层硬化参数取值 $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = E_s$ ， $E_{ur}^{ref} = 5 \sim 7 E_s$ （淤泥质黏土取 7，其他取 5）^[17]，泊松比 $\nu = 0.30 \sim 0.35$ （淤泥质黏土取 0.35，其他取 0.30）。

1.3 基坑支护方案

整个基坑采用支护桩+3层钢筋混凝土支撑支护结构，三轴水泥搅拌桩+桩间二重管高压旋喷桩止水，内支撑采用角撑+对撑的布设形式（支撑的布设形式见图 1）。支护桩为直径 1.2 m 的钻孔灌注桩，桩间距为 1.4 m，典型支护剖面图如图 2 所示。基坑土方开挖分 4 层，第 1 层开挖到第 1 层支撑底，第 2 层开挖到第 2 层支撑底，第 3 层开挖到第 3 层支撑底，第 4 层开挖到基坑底。

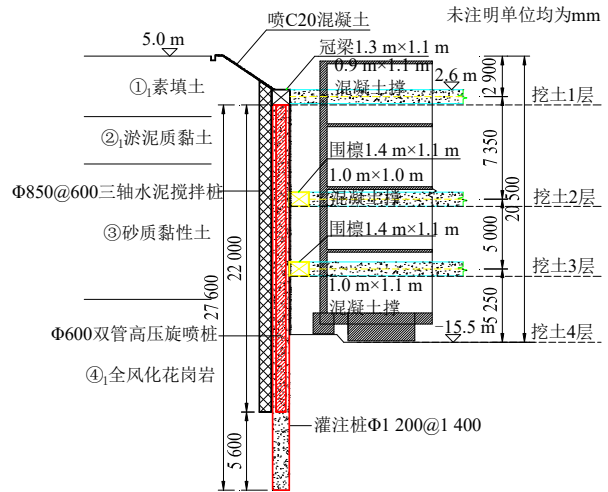


图 2 典型支护剖面图

Fig. 2 Typical support profile

1.4 围护结构的轴力计算

为了提高支撑轴力理论计算值的可信度，本文采用理正深基坑和 Midas 岩土有限元分析两种计算软件对基坑结构进行计算。理正计算是结构-荷载法，基于弹性地基梁法中的“m”法，将地基土考虑成坑内的土弹簧单元和坑外的水土压力，并建立支护结构和土弹簧的三维杆系有限元模型来分析支护结构的整体内力与变形^[18]，是基坑规范建议的计算方法^[19]。Midas GTS 是一款大型岩土有限元数值分析软件，将土作为介质进行计算分析，它提供了多种岩土体材料模型，其中修正摩尔-库伦模型（Modified Mohr-Coulomb）在大量的实际工程中得到应用，能够较好地模拟本工程残积土这种较硬土的应力-应变关系，对支护结构受力及变形的计算结果相对比较可靠，本数值模拟计算选用此本构模型，岩土参数取值见表 2。围护桩及内支撑选用线弹性模型。

本文选取了各层支撑轴力监测点位置 F1~F8（见图 3）的两种轴力计算值进行对比，如图 4 所示，位置 1~8 与各层监测点位 F1~F8 对应。从图 4 中可以看出，第 1 层除了 3 号、4 号，第 2 层除了 2 号、7 号外，其他结果均比较一致，相差均在 17%以内（以“m”法值为基准）；第 3 层支撑的数值法所得轴力值普遍偏小，相对“m”法相差约 18%~50%，两者还是有一定差距的。总体来说，两种方法的支撑轴力计算结果还是有可比性的，特别是第 1、2 层，可信度较高，可以作为与轴力实测值对比的理论值。下文主要以“m”法计算得到的轴力值作为基准，对比轴力实测值进行分析。

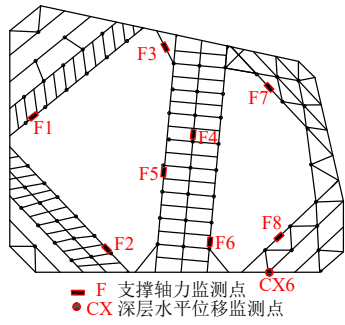


图 3 基坑轴力监测点布设图

Fig. 3 Layout of axial force monitoring points

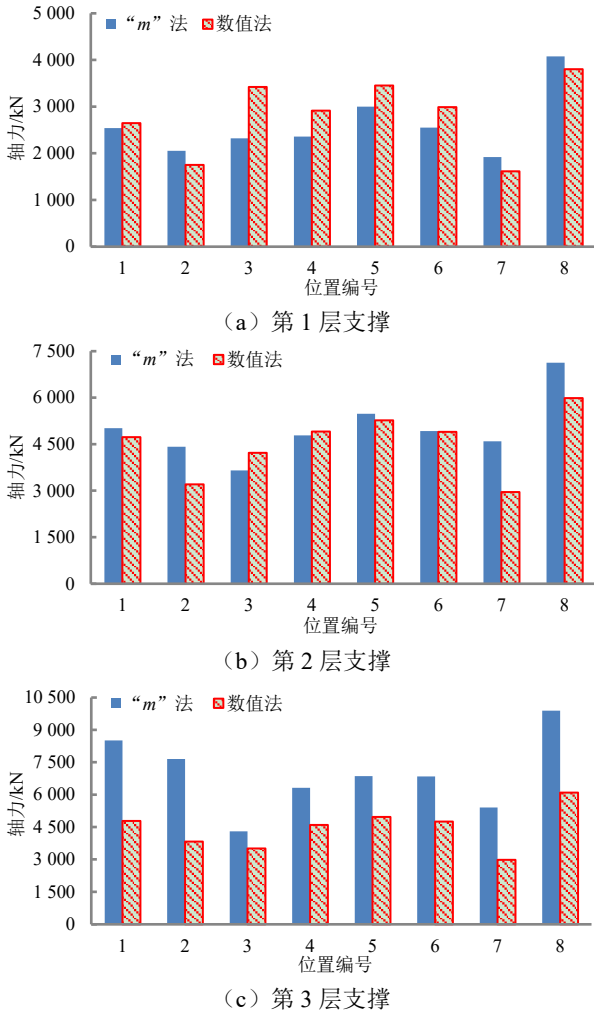


图 4 不同计算方法轴力值对比图

Fig. 4 Axial force comparison in different calculation methods

2 基坑轴力监测方案与监测结果分析

2.1 基坑轴力监测方案

本基坑混凝土支撑轴力监测是利用安装在矩形支撑截面角部的 4 个应力计获得钢筋应力,再换算得到钢筋的应变,根据钢筋和混凝土的协同变形原理,推算出混凝土的应力和支撑轴力,达到轴力监测的目的。

本基坑工程于 2021 年 11 月中旬开始挖土,

2022 年 8 月中旬基坑西侧先开挖到底,2023 年 1 月上旬剩余部分基坑才全部开挖到底,整个基坑开挖历时约 15 个月。由于时间跨度较长,应力计在使用过程中有部分失效或损坏。本文的轴力监测数据是选用监测装置正常工作时段的数据,以减少偏差。

2.2 基坑轴力现场监测值与计算值时序特征

本工程每层支撑各设置了 8 组 (F1~F8) 轴力监测点,除 F7 组监测点有较多钢筋应力计失效和损坏未予采用外,其它 7 组轴力实测值与“m”法计算值的对比如图 5~11 所示。

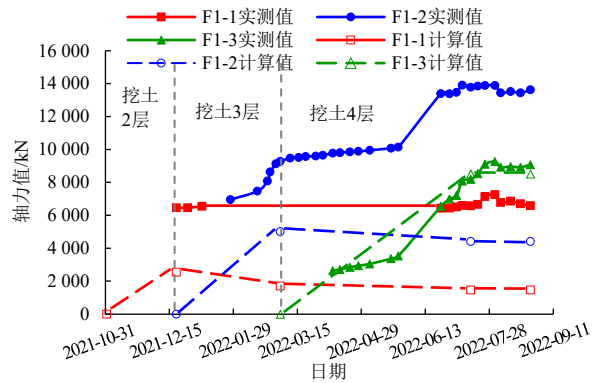


图 5 F1 组 1~3 层支撑轴力实测值与计算值对比图

Fig. 5 Measured and calculated axial force of the supports on the 1st to 3rd floors of Group F1

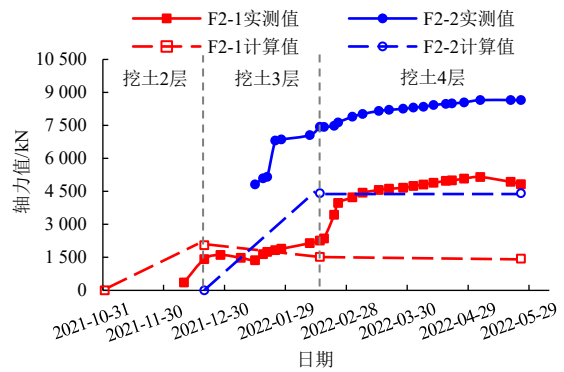


图 6 F2 组 1~2 层支撑轴力实测值与计算值对比图

Fig. 6 Measured and calculated axial force of the supports on the 1st to 2nd floors of Group F2

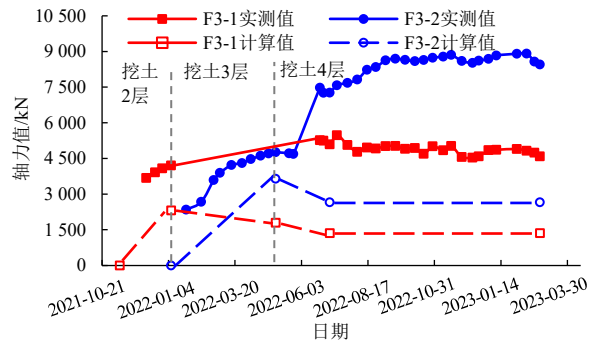


图 7 F3 组 1~2 层支撑轴力实测值与计算值对比图

Fig. 7 Measured and calculated axial force of the supports on the 1st to 2nd floors of Group F3

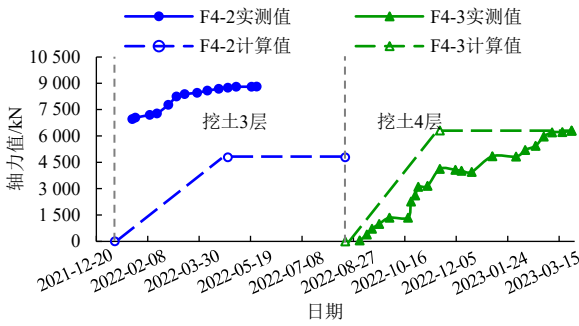


图 8 F4 组 2~3 层支撑轴力实测值与计算值对比图

Fig. 8 Measured and calculated axial force of the supports on the 2nd to 3rd floors of Group F4

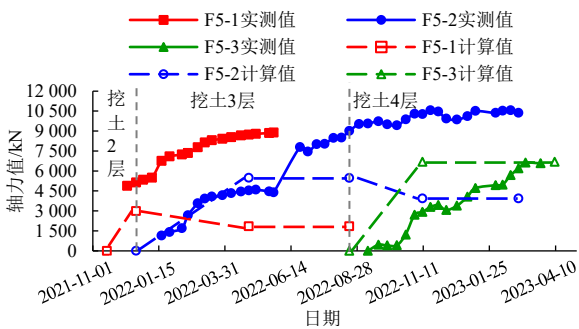


图 9 F5 组 1~3 层支撑轴力实测值与计算值对比图

Fig. 9 Measured and calculated axial force of the supports on the 1st to 3rd floors of Group F5

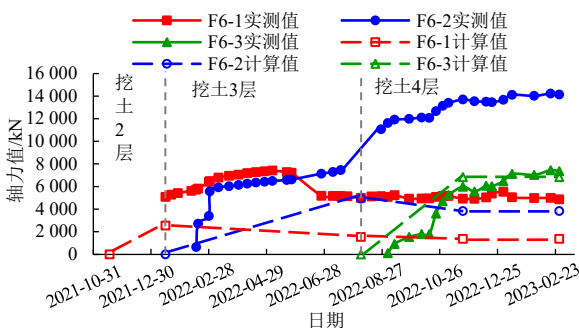


图 10 F6 组 1~3 层支撑轴力实测值与计算值对比图

Fig. 10 Measured and calculated axial force of the supports on the 1st to 3rd floors of Group F6

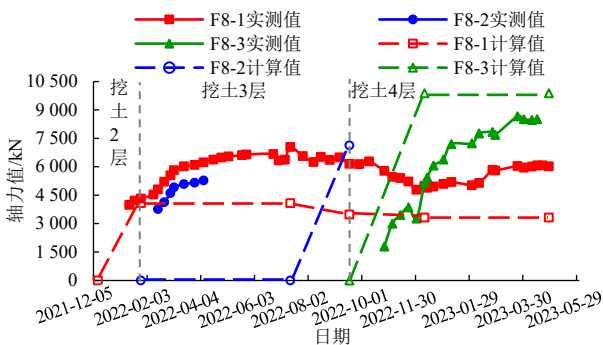


图 11 F8 组 1~3 层支撑轴力实测值与计算值对比图

Fig. 11 Measured and calculated axial force of the supports on the 1st to 3rd floors of Group F8

从图 5~11 中可以看出,随着相应支撑以下土方的开挖,该层混凝土支撑的轴力监测值迅速上

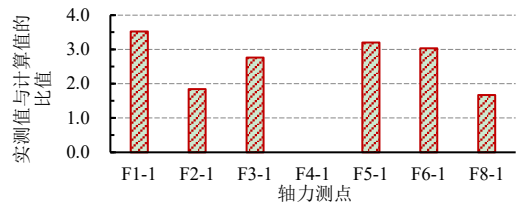
升,这与开挖后土压力增加相一致。以下针对每层土方开挖后支撑轴力的变化特征进行分析。

第 1 层支撑下土方开挖完成后,除 F2-1 之外,其它 5 组的监测值均超出计算值,随着土方开挖,支撑轴力先有一个快速上升的过程,随后逐步稳定,最终所有的第 1 层支撑监测值均超过计算值较多。结合内支撑及栈桥布设情况, F1-1、F2-1、F5-1、F6-1 测点均设置在栈桥梁上,栈桥板可分担一部分轴力,支撑梁受力应较小,但这些点的实测轴力反而更大,其中 F5-1 监测值最大达到 8 800 kN,是计算值的 4.5 倍左右。

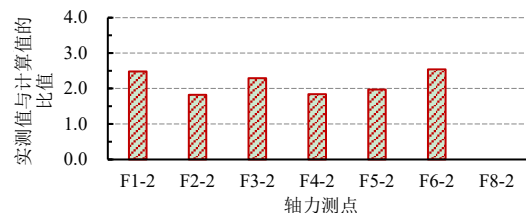
第 2 层支撑下土方开挖完成后,所有第 2 层支撑轴力监测值均超出计算值,随着土方继续向下开挖,轴力值持续加大,其中 F1-2 及 F6-2 超过设计警戒值 (9 000 kN) 较多,达到 13 900~14 100 kN。F8-2 比较特别,该处第 2 层支撑完成后长时间未向下开挖,但轴力监测值一直在增长,达到 5 277 kN。

第 3 层支撑轴力随着开挖加深均稳步上升,开挖到坑底 (2023 年 1 月上旬) 以后仍有相当长一段时间轴力值还在上升,拆撑时与“m”法计算值较接近。

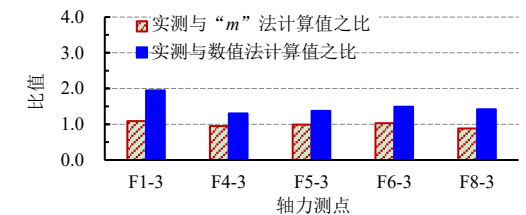
将土方开挖至第 2、3 层梁底及坑底 (深度分别为 10.8 m、15.8 m、20.5 m) 时所测得的轴力值与相应工况的计算轴力值相比较,取其比值列于图 12。



(a) 第 1 层支撑



(b) 第 2 层支撑



(c) 第 3 层支撑

图 12 轴力实测值与计算值的比值图

Fig. 12 Ratio between measured and calculated axial force

从图12中可以直观地看出,第1、2层支撑轴力比值较大,第1层支撑为1.67~3.52(2.5±1),第2层支撑为1.82~2.54(2±0.5)。由此表明,第1、2层支撑轴力实测值普遍大于计算值。第3层支撑轴力实测值与“*m*”法很接近,比值均在1左右(0.88~1.15),与数值法计算值的比值为1.30~1.94,实测值较大。

3 讨论

根据第2部分内容,在基坑开挖过程中,出现第1、2层支撑轴力监测值大于计算值,以及基坑土方在未开挖的情况下,支撑轴力仍然持续增加的现象。本节针对这些现象进行分析,以揭示基坑开挖过程中支撑的受力机制。

3.1 荷载对支撑轴力的影响

支撑轴力监测数据表明,支撑实际轴力大多都超过了理论计算值。通过分析影响土压力的因素,包括土层岩土力学指标、地下水位、各种坡顶超载及周边建筑物荷载等,均未超出计算取值范围。基坑开挖显示,土层分层情况与设计文件没有明显差别,坑内降排水设施完善,坑底土体基本保持在干燥状态,无浸水软化情况,即外部荷载、土压力变化及坑底土软化变形引起的轴力异常可能性较小。钢支撑、锚杆(索)一般采用直接法监测轴力,即在支撑或锚索端部安装轴力计直接测取,大量的工程研究表明,采用这种方法取得的轴力值往往比理论计算值小,出现异常情况远小于采用混凝土支撑的基坑工程。如果是基坑设计理论的原因造成混凝土支撑实测轴力值远大于理论值,则各种支护型式的基坑应该同样出现类似异常情况,但实际情况却并非如此。因此可以判断,岩土取值及计算理论都不是混凝土支撑轴力异常的主要原因。

3.2 温度对支撑轴力的影响

现行钢筋混凝土轴力监测大都采用钢弦式应力计,其基本原理是利用振动频率与应力之间建立联系。受力后,钢筋两端固定点的距离发生变化,钢弦的振动频率也发生变化。根据所测得的钢弦振动频率变化即可求得弦内应力的变化值。但实际量测时,温度变化会使应力计的钢弦产生一定的伸缩变形,不反映构件外部受荷情况,所以测量时要扣除温度影响的频率变化部分,下式为考虑温度影响的钢弦式应力计应力计算式:

$$\sigma = b(f^2 - f_0^2) + k(T - T_0) \quad (1)$$

式中: σ 为应力计的测量应力; b 为应力计的常数;

f_0 为应力计预设后的初始频率; f 为应力计的测量频率; k 为温度修正系数; T 为测量温度; T_0 为初始测量温度。

应力计的温度修正系数 k 在出厂时由实验室率定,是在自由状态下给出的修正系数,与支撑在受荷情况下的反映还是有所不同。根据文献[13]对上海浦东某基坑混凝土支撑轴力的测量研究,认为现场实测推算的 k 值大于实验室率定的 k 值,且差异较大。

图13表示本基坑工程第3层支撑梁3个测点(F4-3、F5-3、F6-3)的支撑轴力与温度变化关系,时间段为2022年11月1日至2022年12月19日,为开挖停歇时段,可以明显地看出轴力监测值与环境温度密切相关。经分析计算,轴力随温度变化的幅度为50~95 kN/°C,平均为68 kN/°C,与文献[9]的测量分析结果相近。本基坑的轴力监测值已按率定温度系数进行了修正,但仍然有上述差值,说明率定温度修正系数 k 值偏小。

根据以上实测计算得到的轴力-温度变化关系进一步分析温度对轴力的影响程度:F6-2轴力监测点位于第2层支撑上,于2022年2月12日安装,当天天气温为16°C,同年8月24日轴力超过警戒值,达11461 kN,气温为32°C。若按温度偏差68 kN/°C计算,得到温度影响轴力值偏差为1088 kN,约为测量值的9%,与文献[13]的分析结果相近。

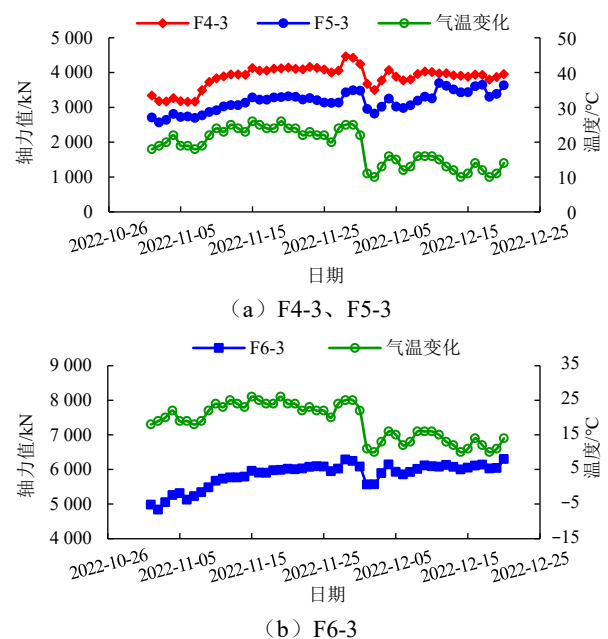


图13 支撑轴力与温度变化关系

Fig. 13 Relationship between axial force and temperature

3.3 混凝土徐变及收缩对支撑轴力的影响

(1) 混凝土徐变

根据杨震伟等^[20]对影响支撑轴力测试的混凝土特性分析,认为徐变与外力荷载及时间均有关系。在长期荷载作用下,混凝土内水泥胶体微孔隙中的游离水将从毛细管里挤出并蒸发,导致胶体体积缩小,形成徐变。混凝土轴向徐变变形速率要大于钢筋的轴向变形速率。这种变形速率上的差异就必然导致两者之间形成附加内力,因此会造成轴力测量值偏大的情况。

(2) 混凝土收缩

影响混凝土收缩的主要因素是环境的相对空气湿度和混凝土龄期,此外还有构件厚度、水灰比以及环境温度等因素^[21-22]。收缩的影响与徐变的影响相似,混凝土在收缩时会产生收缩变形,而钢筋混凝土结构中的钢筋不会收缩。收缩会对钢筋产生附加的压应力,导致支撑轴力监测值偏大。

(3) 混凝土徐变及收缩对轴力的影响

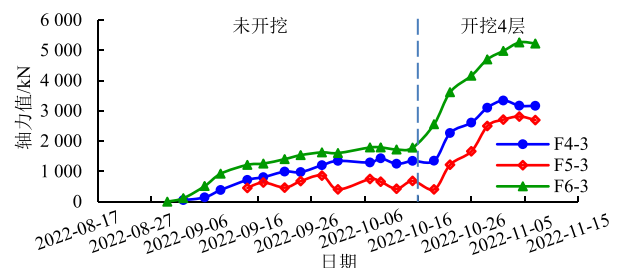
本文选择了3组典型的轴力测点数据进行分析。图14(a)为基坑中间第3层对撑的3个监测点F4-3、F5-3、F6-3的轴力变化曲线,图中第3层支撑梁施工后有接近50d(8月27日—10月16日)未开挖土方,此时段轴力测量值均有一个上升过程,最大值分别为1430kN、862kN、1792kN。由于没有开挖,可认为此时段没有土压力等外荷载的变化,气温变化区间较小。基于上述,此时段轴力主要应由混凝土收缩引起。结合图8~10,这3个测点轴力的极值分别为5436kN、6581kN、7447kN,计算得出此时段混凝土收缩影响为18%~25%的轴力值。

图14(b)为第2层支撑监测点F3-2及F5-2的轴力变化曲线,从8月5日至10月9日,约2个月时间未挖土,气温变化区间较小,但轴力却有上升,分别上升547kN及1485kN,此时段轴力主要应由混凝土徐变及收缩引起。

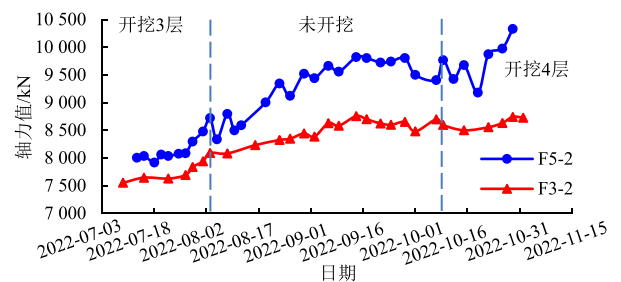
图14(c)为第一层测点F8-1及第二层测点F8-2的轴力变化曲线,从1月27日至7月25日,近6个月时间未挖土,但轴力却有较大上升,分别上升2402kN及5277kN,F8-2在4月9日以后因个别应力计数据不稳定,轴力值未采纳。因该时段与初始温度相差较大(大于15℃),故认为此时段轴力变化主要应由温度、混凝土徐变及收缩共同引起。结合图11,F8-1轴力极值为7046kN,可计算出该时段支撑的非荷载因素影响了约1/3的轴力值。由于无法获得F8-2的后续轴力,不能计算该点非荷载因素影响的相对值,但相对于其它监测点,该非荷载轴力值确实较大,同时段其他监测数据也验证了这一点:因该支撑收缩及徐变量较大,引起

支挡结构产生明显变形,该支撑对应位置支护桩深层水平位移监测点CX6在1月21日至4月11日间位移最大值由7.8mm增大至38.4mm,净增30.6mm(见图15)。可见非荷载因素对该支撑整个轴力值的影响也是比较显著的。综上,尽管上述分析只能得到支撑在特定时段非荷载因素引起的轴力变化,但足以说明本工程支撑非荷载轴力占比较大。同样,除支撑外,混凝土栈桥板(或加强板)也受徐变、收缩及温度影响,因此栈桥梁轴力偏大尤为突出(如F5-1轴力监测值达4.5倍计算值),是梁板非荷载轴力相互叠加产生的结果。

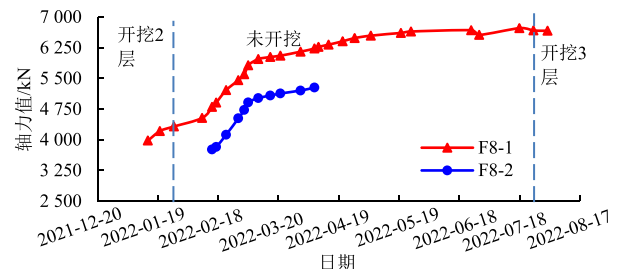
对于第1、2层支撑轴力实测值大于计算值,第3层支撑轴力实测值与计算值相当的情况,这是因为第1、2层内支撑工作时段较长,在此过程中混凝土徐变、收缩以及温度变化对支撑轴力影响程度较大。与之相反,第3层支撑的工作时段较短,在短时间内支撑受上述因素的影响程度较小,使得第3层支撑轴力实测值与计算值相当。但这并非说明第3层支撑不受非荷载因素的影响,从图4及图7~10的轴力对比图中可以看出,第3层支撑梁拆除前轴力实测值仍呈上升趋势。



(a) F4-3、F5-3、F6-3轴力变化



(b) F5-2、F3-2轴力变化



(c) F8-1、F8-2轴力变化

图14 开挖停歇期轴力变化曲线

Fig. 14 Axial force variation during non-excavation period

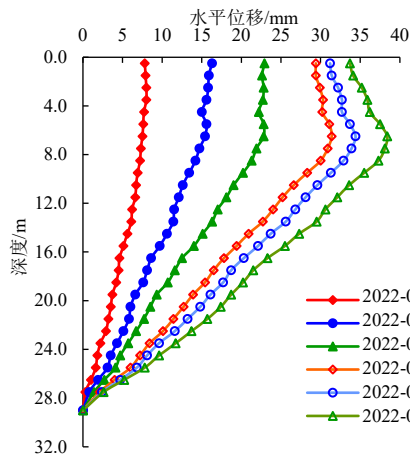


图 15 CX6 深层水平位移随深度变化图

Fig. 15 CX6 horizontal displacement variation with depth

(4) 拆撑后非荷载因素对轴力影响的验证

根据混凝土的特性,在湿度条件不变的情况下,外荷消失后,收缩变形具有不可逆性。徐变变形也有绝大部分不能恢复,即外部施加应力消失后,混凝土构件仍有残余应变,可通过钢筋应力计测得残余应力,此应力在支撑梁中形成了非荷载因素的轴力。

为了验证这种非荷载因素引起的轴力是否存在,对 F5-2 及 F8-1 测点所在的两根支撑切断前后的轴力进行了测量。拆除前,两者的轴力值分别为 12 582 kN 及 7 346 kN,当切断支撑两端,使其处于完全卸荷状态后,仍能测得轴力值,分别为 7 446 kN 及 4 137 kN,约为拆除前轴力值的 60% 及 56%。因徐变可能有部分应变恢复,引起部分轴力消失,那么拆除前非荷载因素引起的轴力应大于拆除后,支撑所受实际轴力应小于前后测值之差(分别为 5 136 kN 及 3 209 kN)。对比 F5-2、F8-1 的理论计算值 5 268 kN 及 3 810 kN,较为吻合。

通过以上研究分析,不仅验证了环境温度变化、收缩及徐变对钢筋混凝土支撑轴力的影响是实际存在的,还得出它们对轴力的影响程度。而且通过对支撑卸载后残余轴力的测量,定量证实了非荷载因素对支撑轴力的影响程度。以后遇到类似轴力超警戒值的情况时,应对轴力变化情况进行分析,剔除其中温度、收缩及徐变这些非荷载因素的影响之后,再比较剩余轴力值是否达到警戒值,以此来作为基坑安全性判定的一个依据。

4 结 论

本文对深基坑支护体系中的混凝土支撑轴力特性进行了研究,分析了基坑开挖过程中支撑轴力

监测值与理论计算值之间的关系,探讨了荷载、温度、徐变和收缩 4 个方面因素对支撑轴力的影响,揭示了基坑开挖过程中支撑轴力的受力机制。得到以下结论:

(1) 随着基坑开挖深度的增加,支撑轴力均表现出增大趋势;基坑开挖到底后,第 1、2 层支撑轴力监测值明显大于理论计算值;第 1 层支撑监测值是理论计算值的 1.67~3.52 倍,第 2 层支撑为 1.8 2~2.54 倍;第 3 层支撑拆除时计算值与监测值相当,但仍随时间呈上升趋势。

(2) 影响支撑轴力偏大的主要因素是环境温度、混凝土徐变以及收缩。温度对轴力有明显的影响,达 68 kN/°C;收缩及徐变的影响更大,约为轴力现场监测值的 1/3。支护桩深层水平位移与支撑轴力有较好的对应关系。

(3) 根据拆撑前后的实测数据,支撑切断外荷后,仍能测量到混凝土内部残余应力,约为切断前轴力的 60%,荷载引起的轴力值只占监测值的 40%,即监测值约为真实值的 2.5 倍。当钢筋混凝土支撑轴力达到基坑设计预警值时,对基坑安全性的判定应考虑非荷载因素对轴力监测值的影响。

参考文献

- [1] 陈保国,贾曾潘. 近接建筑荷载作用下阳角型深基坑最佳支撑位置[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2400-2408.
CHEN Baoguo, JIA Zengpan. Optimal strut position of deep foundation pit with convex corner under surcharge of adjacent building[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(8): 2400-2408.
- [2] 金亚兵,沈翔,劳丽燕. 温度变化对深基坑内支撑轴力和变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1417-1425.
JIN Yabing, SHEN Xiang, LAO Liyan. Influences of temperature change on axial force and deformation of inner support in deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(8): 1417-1425.
- [3] 王卫东. 软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 1-25.
WANG Weidong. Analytical methods and controlling techniques for deformation and environmental influence of deep excavations in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 1-25.
- [4] 莫品强,刘尧,黄子丰,等. 复杂支护条件下深基坑支护桩-冠梁-支撑的变形协调及空间效应研究[J]. 岩土

- 力学, 2022, 43(9): 2592-2601.
- MO Pinqiang, LIU Yao, HUANG Zifeng, et al. Compatibility of deformation and spatial effects for retaining pile, crown beam and braces under complex retaining conditions of deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(9): 2592-2601.
- [5] 孙亚非, 熊壮, 胡志军, 等. 某工程基坑内支撑应力监测分析[J]. 施工技术, 2013, 42(19): 48-52.
- SUN Yafei, XIONG Zhuang, HU Zhijun, et al. Monitoring analysis of inner support stress in some engineering[J]. Construction Technology, 2013, 42(19): 48-52.
- [6] 张光建, 姚小波, 胡瑾. 地铁换乘车站基坑支撑轴力监测与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 455-459.
- ZHANG Guangjian, YAO Xiaobo, HU Jin. Monitoring and numerical simulation of axial forces of struts for foundation pit of a metro transfer station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 455-459.
- [7] 李宇杰, 冯忠居, 朱彦鹏. 兰州特殊红砂岩地层深基坑支护监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 1): 236-240.
- LI Yujie, FENG Zhongju, ZHU Yanpeng. Monitoring and numerical simulation analysis of support structures of deep foundation pit in special red sandstone stratum in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1): 236-240.
- [8] 叶真华, 黄飘. 基坑支撑轴力实测值与理论计算值对比分析[J]. 岩土工程界, 2009, 12(3): 27-30.
- YE Zhenhua, HUANG Piao. Comparative analysis of measured and theoretical calculated values of axial force for foundation pit support[J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(3): 27-30.
- [9] 罗忠贵. 地铁基坑混凝土支撑轴力监测预警误判原因分析[J]. 国防交通工程与技术, 2014, 12(5): 43-46, 70.
- LUO Zhonggui. Analysis of the causes for precaution-misjudging the axial forces of concrete struts in subway foundation pits[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2014, 12(5): 43-46, 70.
- [10] 鲁智明, 和再良, 陈刚. 基坑工程监测中钢筋混凝土支撑轴力测试计算方法[J]. 上海地质, 2010(1): 46-49.
- LU Zhiming, HE Zailiang, CHEN Gang. Measurement and calculation method of steel concrete bracing axial force in foundation pit monitoring survey[J]. Shanghai Geology, 2010(1): 46-49.
- [11] 潘华. 钢筋混凝土支撑轴力监测相关问题的研究[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(2): 111-114.
- PAN Hua. Research on relevant issues of axial force monitoring for reinforced concrete supports[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014, 36(2): 111-114.
- [12] 武鹏. 深基坑钢筋混凝土支撑轴力监测值的非荷载影响因素[J]. 工业技术创新, 2018, 5(1): 54-59.
- WU Peng. Non-load influencing factors of force monitoring value of reinforced concrete support shaft in deep foundation pit[J]. Industrial Technology Innovation, 2018, 5(1): 54-59.
- [13] 张启辉, 朱荻, 赵锡宏. 考虑收缩与温度应力的钢筋混凝土支撑轴力研究[J]. 岩土工程技术, 2000, 14(1): 51-54.
- ZHANG Qihui, ZHU Hong, ZHAO Xihong. Research on axial force of reinforced concrete support considering shrinkage and temperature stress[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2000, 14(1): 51-54.
- [14] 章丹峰, 李均, 熊飞, 等. 基坑监测中混凝土支撑轴力测量影响因素与计算方法研究[J]. 建筑监督检测与造价, 2020, 13(5): 25-33.
- ZHANG Danfeng, LI Jun, XIONG Fei, et al. Research on influencing factors and calculation method of concrete support axial force measurement in foundation pit monitoring[J]. Supervision Test and Cost of Construction, 2020, 13(5): 25-33.
- [15] 肖振辉, 李素贞, 崔晓强. 基于应变监测的基坑钢筋混凝土支撑轴力修正方法[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(11): 8-18.
- XIAO Zhenye, LI Suzhen, CUI Xiaoqiang. Study on force correction method of reinforced concrete brace shaft in foundation ditch based on strain monitoring[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(11): 8-18.
- [16] 张楨树, 薛飞, 张劭, 等. 对土岩组合基坑混凝土支撑轴力监测的一点思考[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 73-80, 86.
- ZHANG Zhenshu, XUE Fei, ZHANG Mai, et al. Ideas on monitoring the axial force of concrete support in soil-rock composite foundation pit[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(1): 73-80, 86.
- [17] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.

工要点[J]. 建筑施工, 2021, 43(10): 2036-2039.

CHEN Ying, ZHANG Dongmei. Key points of design and construction of deep foundation pit adjacent to subway tunnel[J]. Building Construction, 2021, 43(10): 2036-2039.

[7] 丁智, 张霄, 金杰克, 等. 基坑全过程开挖及邻近地铁隧道变形实测分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 415-423.

DING Zhi, ZHANG Xiao, JIN Jieke, et al. Measurement analysis on whole excavation of foundation pit and deformation of adjacent metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 415-423.

[8] 赵永洪, 鲍志杰, 姬耀斌. 邻近地铁边深基坑工程设计与施工实践[J]. 浙江建筑, 2020, 37(6): 31-35.

ZHAO Yonghong, BAO Zhijie, JI Yaobin. Engineering design and construction practice of deep foundation pit

near a metro[J]. Zhejiang Construction, 2020, 37(6): 31-35.

[9] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.

WANG Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290.

[10] 林德周. 小应变土体硬化模型参数试验研究及工程应用——以杭州某基坑工程为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.

LIN Dezhou. Experimental study on parameters of small strain soil hardening model and its engineering application - a case study of a foundation pit project in Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.



(上接第 412 页)

WANG Weidong, WANG Haoran, XU Zhonghua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290.

[18] 沈健, 王建华, 高绍武. 基于“m”法的深基坑支护结构三维分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 530-533.

SHEN Jian, WANG Jianhua, GAO Shaowu. 3-D analysis method of retaining structure of deep excavation based on “m” method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 530-533.

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120 — 2012[S]. Beijing: China

Architecture & Building Press, 2012.

[20] 杨震伟, 骆介华, 魏云峰, 等. 影响支撑轴力测试的混凝土特性[J]. 浙江水利科技, 2012(4): 51-52, 55.

YANG Zhenwei, LUO Jiehua, WEI Yunfeng, et al. Concrete characteristics influencing strut axial load test[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2012(4): 51-52, 55.

[21] 林鸣, 付宏渊, 颜东煌. 考虑温度与时变因素耦合的混凝土桥梁增量分析方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(9): 2506-2512.

LIN Ming, FU Hongyuan, YAN Donghuang. Incremental analysis considering coupling temperature and time-dependent effects of concrete bridge[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(9): 2506-2512.

[22] 张超, 方胜, 黄伟, 等. 混凝土环形收缩试验的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(4): 21010051.

ZHANG Chao, FANG Sheng, HUANG Wei, et al. Ring shrinkage test of concrete: a review[J]. Materials Reports, 2023, 37(4): 21010051.