

深基坑新型钢斜撑接头承载力试验研究

郭海柱^{1,2}, 张庆贺^{1,2}, 任小峰^{1,2}, 杨俊龙³, 杨光辉³, 徐智华³

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海市第二市政工程有限公司, 上海 200232)

摘要: 提出一种深基坑新型钢斜撑接头形式, 它可以即插即用, 允许有一定的转动角度, 可施加预应力, 克服原有斜撑接头焊接施工增加基坑暴露时间、倾斜角度固定给斜撑安装带来不便、焊接后无法施加预应力等缺点, 可使软土地区深基坑施工受时空效应影响明显减小。配合接头试验制作自平衡式试验架。按照实际尺寸, 对该新型支撑接头进行承载力试验, 加载到设计轴力 2 500 kN 时, 接头承载力满足设计要求, 加载到 3 000 kN 时接头局部达到屈服状态, 预埋钢匣子前方混凝土局部出现压碎现象, 但结构整体稳定。用有限元法进行加载过程数值模拟计算, 计算曲线与实测吻合较好, 这种新型斜撑接头可以进一步推广应用。

关键词: 土力学; 深基坑; 斜撑; 接头; 现场试验

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 3007 - 08

EXPERIMENTAL STUDY OF A NEW WELDED JOINT OF STEEL DIAGONAL BRACING IN DEEP PIT EXCAVATION

GUO Haizhu^{1,2}, ZHANG Qinghe^{1,2}, REN Xiaofeng^{1,2}, YANG Junlong³, YANG Guanghui³, XU Zhihua³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. The Second Municipal Engineering Corporation, Shanghai 200232, China)

Abstract: A new welded joint of steel bracing is proposed. This new joint can be fixed soon after excavation without second welding, which can be rotated in some degree and can be prestressed. These measures can overcome the disadvantages of traditional welded joint, i.e. time increase of deep foundation exposure when using welding joints of diagonal bracing, inconvenient fixation of the slant angle immobility of diagonal bracing, and the prestress not being born on diagonal bracing after welding. It makes the time-space effects on deep foundation excavation obviously being reduced in soft clay areas. The bearing capacity of welded joints is studied by static load test on a welded steel rack with the same size. The test results reveal that the bearing capacity of the welded joint satisfies the requirements of design with a load of 2 500 kN. The whole structure remains stable only with some parts of the welded joint being yielded when load reaches 3 000 kN, and local concrete ahead of the embedded steel plate is crushed. The performance of the welded joint in the process of loading is simulated by finite element method(FEM). The calculation loading curve is consistent well with the test. The new welded joint of diagonal bracing can be used widely in deep foundation excavation with further processing.

Key words: soil mechanics; deep foundation pit; diagonal bracing; welded joint; field test

收稿日期: 2009 - 01 - 04; 修回日期: 2009 - 05 - 17

作者简介: 郭海柱(1980 -), 男, 2003 年毕业于河南大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事隧道及地下建筑工程方面的研究工作。
E-mail: guohaizhu@126.com

1 引言

目前,深基坑钢支撑多采用单点支撑接头,其伸缩杆断面比钢支撑断面强度相差甚远;单支点头受压部位宽度较小且有间隙,易产生失稳扭曲变形;消除支撑轴力拆除钢支撑要反复焊割,伸缩杆的强度和刚度都降低,致使接头更容易扭曲变形。焊接加固接头导致无法施加预应力,三支点简易接头虽可施加轴力但远远达不到设计要求。传统斜撑接头(见图 1)与地连墙连接时多采用在预埋钢板上焊接牛腿,作业条件差,时间长,焊接质量难保证,且经反复焊接损伤后,难以满足正反方向受力要求^[1~3]。因此,为满足快速安全施工,减少基坑时空效应要求^[4, 5],急需一种能快速装卸、便于施加预应力的新型接头。



图 1 传统斜撑接头示意图

Fig.1 Sketch of welded joint of traditional diagonal bracing

林航^[6]对格构式钢结构支撑进行了技术可行性研究,开发了可以多次重复利用的格构式钢结构基坑内支撑做支护体系,解决了基坑跨度大时少设立柱和便于机械土方开挖的难题。针对支撑轴力衰减二次复加困难等技术不足,忘佩明等^[7]研究开发了可控式液压支撑和基坑可视化监控管理软件系统,可实现支撑轴力和位移自动采集数据、调节补偿、故障报警及三维立体显示支撑群轴力等功能。林鹏等^[8]运用所研制的深基坑开挖室内试验模型,模拟开挖板桩墙支护深基坑在无支撑悬臂式支护、单支撑和双支撑支护等 3 种形式,为基坑变形机制的研究及预测提供依据。张泰安^[9]结合杭州地铁 1 号线试验段秋涛路车站基坑围护结构,在基坑开挖

中对钻孔咬合桩围护结构成功地实施钢支撑架设和置换,采用斜支撑支座代替钢支撑斜头。朱雁飞和杨树祥^[10]将逆作楼板与型钢短支撑有机地结合,在逆筑楼板的梁柱节点上“寄生”一道或多道型钢短支撑,替代常规的一道满堂支撑,提出“逆作法空间斜撑”技术,具有降低造价、节约工期、环保三个方面的优势。J. F. Richard 和 B. Sebastian^[11]结合芝加哥地铁车站改建工程,研究了第一道为钢支撑、下设两道锚杆、900 mm 厚咬合桩做围护结构的地铁车站新型基坑支护体系。M. L. Yang 等^[12]提出一种中心为正多边形四周为直支撑的深基坑支护体系,按真实尺寸对中心支撑与边支撑节点的极限强度进行了试验,采用 ABAQUS 有限元程序对各施工阶段进行了计算分析。可见针对支护体系整体研究的较多,对支撑接头方便快捷装卸,减少时空效应的研究成果并不多见。

2 试验方案

2.1 试件、试验设备及目的

试件设计:按照 1:1 尺寸加工制作钢支撑接头、预埋钢匣子和地下连续墙。地下连续墙为现浇钢筋混凝土,尺寸为 3 000 mm×3 000 mm×800 mm,内部配有受力钢筋^[13]。钢匣子现场嵌入连续墙钢筋笼,并与受力钢筋焊接定位,便于预先制作的支撑接头插入钢匣子(见图 2)。



图 2 预埋钢匣子定位及钢筋绑扎

Fig.2 Positioning of the embedded steel plate and steel bar lashing

在实验室没有针对该斜撑接头加载的试验设备,需按实际受力设计制作试验加载台架^[14],设计最大承载力 2 500 kN。用全自动液压千斤顶施加荷载,模拟支撑轴力,在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行荷载标定,以便轴力的实时采集。

试验目的: (1) 检验新型接头的强度、刚度、稳定性; (2) 通过试验测试分析, 对接头提出优化建议; (3) 测试预埋支座周围墙体的受力和变形。

2.2 测点布置

试验加载架及位移计、上下排钢筋、预埋钢匣子、接头等应变片的黏贴位置如图 3 所示。本次试验共计安装 28 个应变片, 4 个位移计, 1 个千斤顶轴力。监测在各级加载作用下, 支撑接头及与其接触的预埋钢匣子、接头附近上下排钢筋的受力变形情况, 为设计施工提供参考^[13]。

2.3 加卸载方案

在加载或持载过程中出现下列标志之一即认为该结构构件已达到或超过承载能力极限状态:

- (1) 受拉主钢筋应力达到屈服强度;
- (2) 混凝土滑移破坏;
- (3) 混凝土压碎破坏较多;
- (4) 在试验荷载值不变的条件下, 接头应变不停的增加表示已经屈服。

根据斜撑安装施工过程, 并考虑试验安全, 先分 2 级预加载至 1 000 kN, 稳定一段时间后卸载,

再开始正式加载^[13]。先逐步加载至 2 500 kN, 持续稳定后再加载至 3 000 kN, 稳定后再分级卸载, 每次卸载 500 kN, 图 4 为试验加卸载时程曲线。

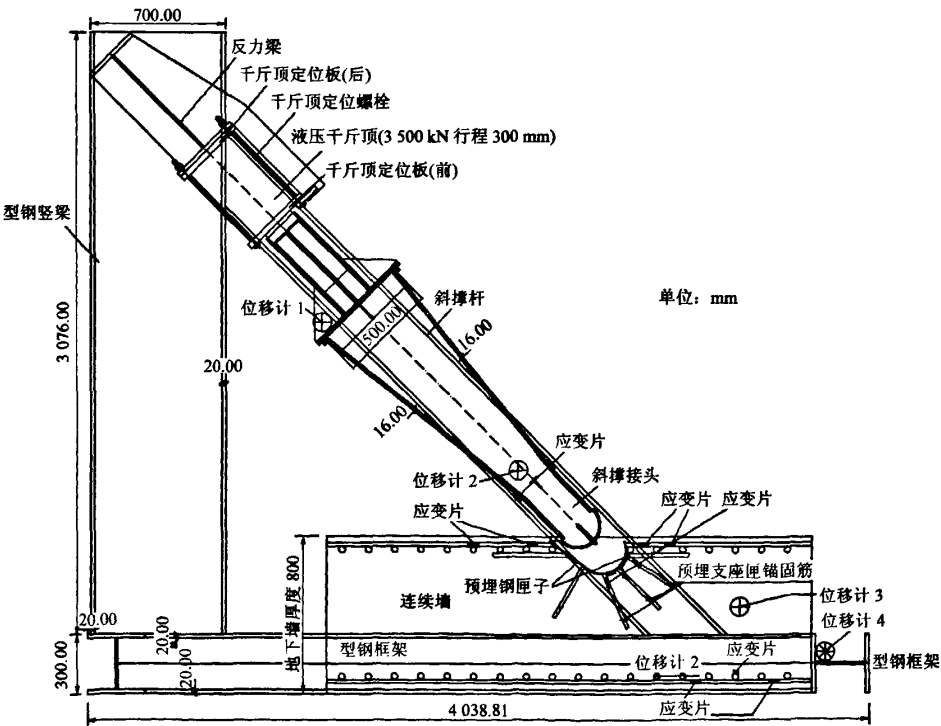
3 现场试验及分析

3.1 试验情况

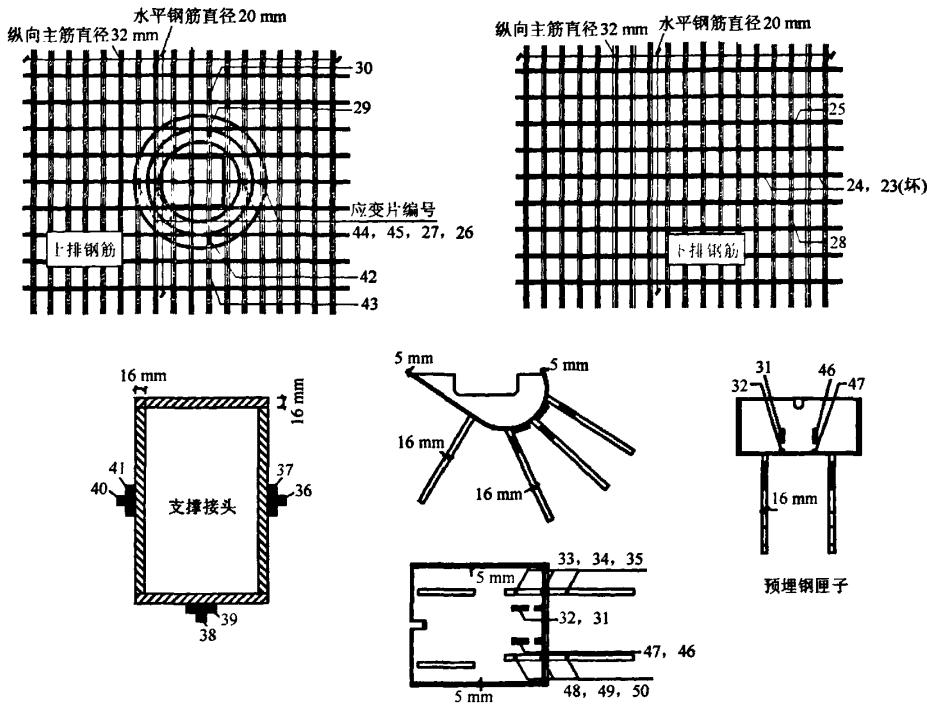
现场浇筑钢筋混凝土连续墙, 经 28 d 养护达到设计强度后, 将模拟斜支撑插入预埋钢匣子, 形成可伸缩转动的接头。安装调试监测仪器仪表, 进行试验(见图 5(a))。加载到 2 500 kN, 预埋钢匣子完好, 周围并未观察到明显的裂纹, 其他区域混凝土完好(见图 5(b)), 加载台架斜拉杆与竖杆间焊缝增大, 加载稳定时不变化。

3.2 试验结果分析

- (1) 上下排钢筋
- 下排钢筋一共埋设 4 个应变片(见图 3(b)), 试验监测时发现应变片 23 失效, 只监测到 3 个应变片的变化情况。由图 6(a)可知, 两侧应变片 25, 28 受剪切作用, 最大拉应变分别为 70 和 90 $\mu\epsilon$ 。



(a) 加载架及位移计位置



(b) 应变片监测位置

图 3 测点布置图

Fig.3 layout of measuring points

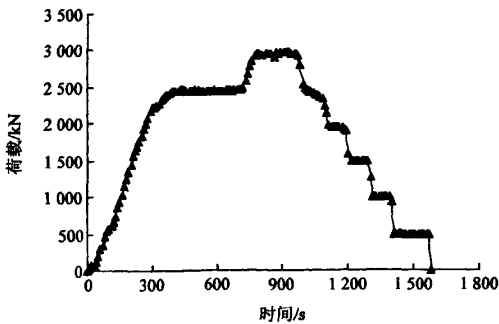
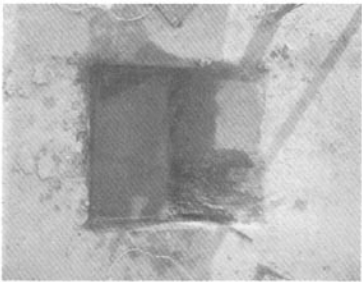


图 4 试验加卸载时程曲线

Fig.4 Time-history curve of test during loading and unloading



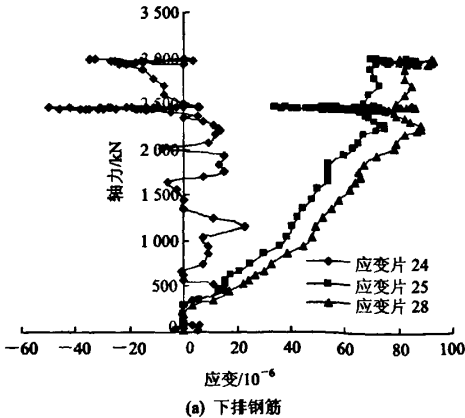
(b) 试验结束混凝土局部压碎

图 5 现场试验情况

Fig.5 Field test loading and crushed concrete after test



(a) 现场加载试验



(a) 下排钢筋

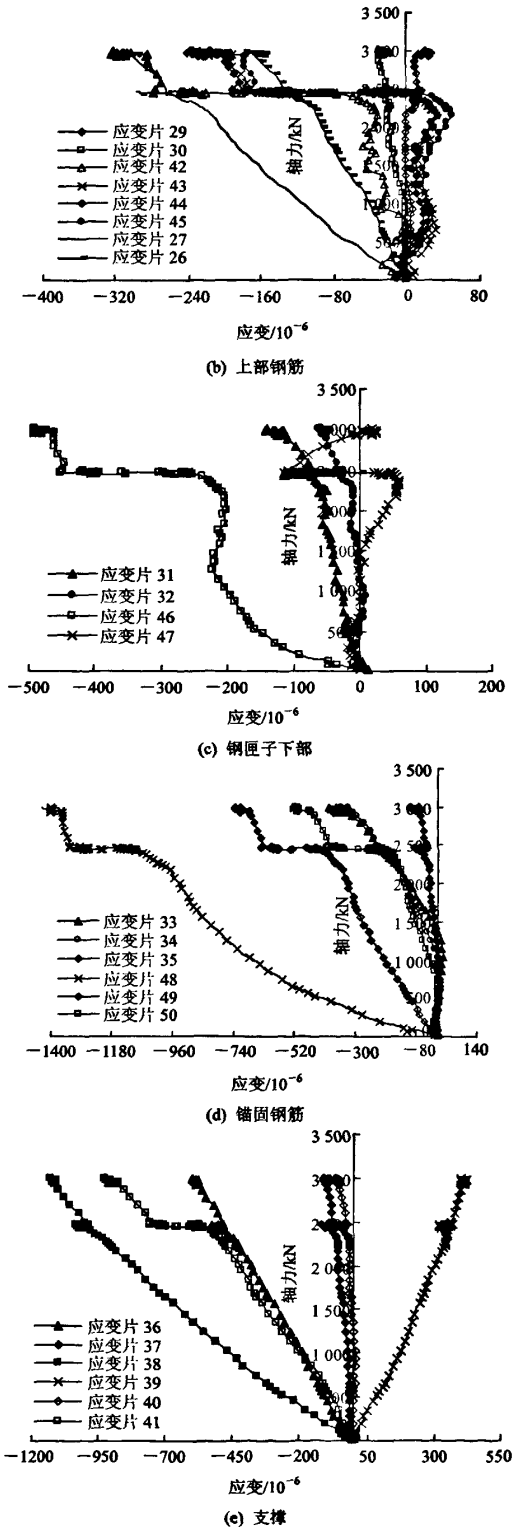


图 6 加载应变曲线

Fig.6 Strain curves in loading stages

中间应变片 24 先受拉后受压, 说明随着荷载的增大, 压力传递到下排的区域在增大。当加载到 2 500 kN 荷载稳定不变时, 两侧应变片 25, 28 应变减小, 中间应变片 24 应变增大, 说明轴力向下的传递和扩散需要一个过程。

上排钢筋一共埋设 8 个应变片(见图 3(b)), 由图 6(b)可知, 应变片 26, 27, 30, 42 受压, 应变片 29 受拉, 应变片 43, 44, 45 先受拉后受压。支撑正前方应变片 26, 27 受到的压应力最大, 产生的压应变最大, 分别为 240 和 340 $\mu\epsilon$ 。当加载到 2 500 kN 荷载稳定不变时, 应变片 42, 43, 44, 45 位置的压应变明显增大, 说明在钢匣子后边和两侧受圆形分布钢筋的影响, 对压力的感应有滞后现象。

(2) 钢匣子及锚筋

预埋钢匣子下面共埋设 4 个应变片(见图 3(b)), 由图 6(c)可知, 应变片 31, 32, 46 受压, 应变片 47 先受拉后受压。应变片 46 受到的压应力最大, 最大压应变约为 490 $\mu\epsilon$ 。应变片 31, 32 最大压应变仅为 140 和 60 $\mu\epsilon$, 说明在圆弧板下面与混凝土接触部位, 受各种因素影响(支撑头子与弧板接触不均匀、混凝土浇筑振捣不均匀、试验时荷载偏心等), 使力的传递不均匀。

预埋钢匣子下面锚固钢筋共埋设 6 个应变片(见图 3(b)), 由图 6(d)可知, 6 个应变片均受压。应变片 48, 34 和 49 受到的压应力较大, 其中应变片 48 上产生的压应变最大约为 1 430 $\mu\epsilon$, 大于 1 119 $\mu\epsilon$ (Q235 钢屈服时对应的应变^[14]), 表明此处钢筋受压超过屈服强度, 发生塑性变形。其他部位的钢筋没有屈服, 说明在圆弧板下面的锚固钢筋受力不均匀。

(3) 钢支撑接头

支撑钢板上共黏贴埋设 6 个应变片(见图 3(b)), 由图 6(c)可知, 应变片 39 受拉, 其他 5 个应变片均受压。应变片 38 最大压应变为 1 127 $\mu\epsilon$, 大于 1 119 $\mu\epsilon$, 表明钢支撑此位置超过屈服强度; 应变片 39 最大拉应变为 416 $\mu\epsilon$, 其他部位 4 个应变片均受压且钢板未达到屈服强度。观察可知, 应变片 38, 39 位于较窄一侧的钢板上, 监测值是同一位置相互垂直两个方向的应变, 当上部荷载传递下来时, 较窄一侧钢板横断面积较小, 承受应力较大, 垂直荷载方向受拉, 使另一方向受压屈服加剧; 两个较宽横断面 2 个方向均受压, 双向受压不易屈服。

试验时共设 4 个位移计(见图 3(a)), 由图 7 可见, 位移计 3 和 4 水平位移基本为 0(模拟计算时施加水平向约束合理), 位移计 1 沿加载方向位移最大值为 4.74 mm, 位移计 2 沿竖向的位移最大值为 1.84 mm。

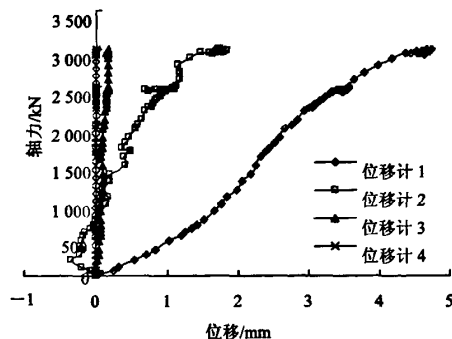


图7 支撑加载位移曲线

Fig.7 Displacement curves of structures in loading stage

图8为位移计试验时轴力-位移的全程曲线,可以看出,支撑及结构发生了1.46 mm的不可恢复的塑性变形。

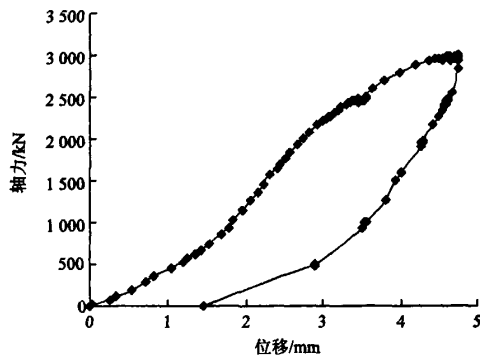


图8 试验时轴力-位移全程曲线

Fig.8 Loading-displacement curve of diagonal bracing in the whole stage

4 有限元分析

4.1 有限元模型

本计算模型共计50 241个节点,44 188个单元,钢支撑、钢匣子、混凝土都采用六面体单元进行模拟计算,有限元网格荷载及边界约束条件如图9所示。钢支撑与钢匣子采用理想弹塑性模型,混凝土采用D-P屈服破坏模型,按照相关流动法则考虑^[15]。混凝土计算参数: $E=2.0 \times 10^5$ MPa, $\mu=0.23$, $c=20$ MPa, $\varphi=30^\circ$, $\gamma=2\,500$ kN/m³;钢材参数: $E=2.1 \times 10^6$ MPa, $\mu=0.20$, $\gamma=7\,800$ kN/m³屈服应力为 $\sigma_s=260$ MPa。预埋钢匣子-混凝土之间采用共节点进行模拟,斜撑接头-预埋钢匣子之间采用库仑摩擦接触进行模拟^[16],接触面法向采用“硬接触”,切向采用库仑摩擦定律,摩擦因数取0.4。

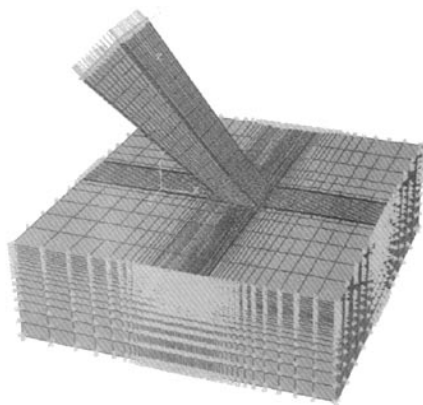


图9 有限元模型荷载及边界约束条件

Fig.9 Finite element model load and boundary conditions

4.2 计算结果分析

加载到2 000 kN时,支撑位移较为均匀,继续加载时,由于支撑局部达到屈服强度,导致受力不均匀,位移不均匀,支撑上部位移大于下部位移,如图10所示。

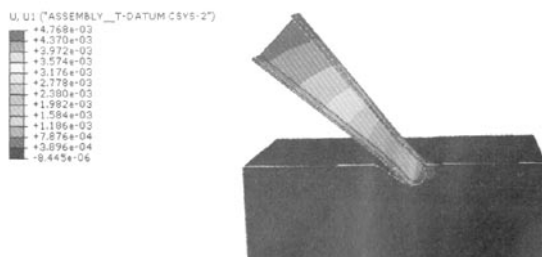


图10 加载至3 000 kN时沿支撑方向的位移云图(单位: m)

Fig.10 Displacement nephogram of diagonal bracing at load of 3 000 kN(unit: m)

随着荷载的增大,地连墙混凝土塑性区向前和向中间不断扩大,加载到3 000 kN时,塑性区最大(见图11(a)),逐步卸载时,塑性区减小。

在预埋钢匣子塑性区云图中,加载到500 kN时钢匣子没有出现塑性区,加载到1 000 kN时,在支撑下部与钢匣子接触部位只有少许塑性区,随着荷载的增大,塑性区向钢匣子上部和向中间不断扩大,加载到3 000 kN时(见图11(b)),钢匣子塑性区沿支撑边缘向上贯通,逐步卸载时,塑性区减小。

在支撑塑性区云图中(见图11(c)),加载到1 500 kN时支撑接头附近才出现塑性区,随着荷载的增大,接头塑性区向上部和向中间不断扩大,中间逐步贯通;逐步卸载时,塑性区减小。

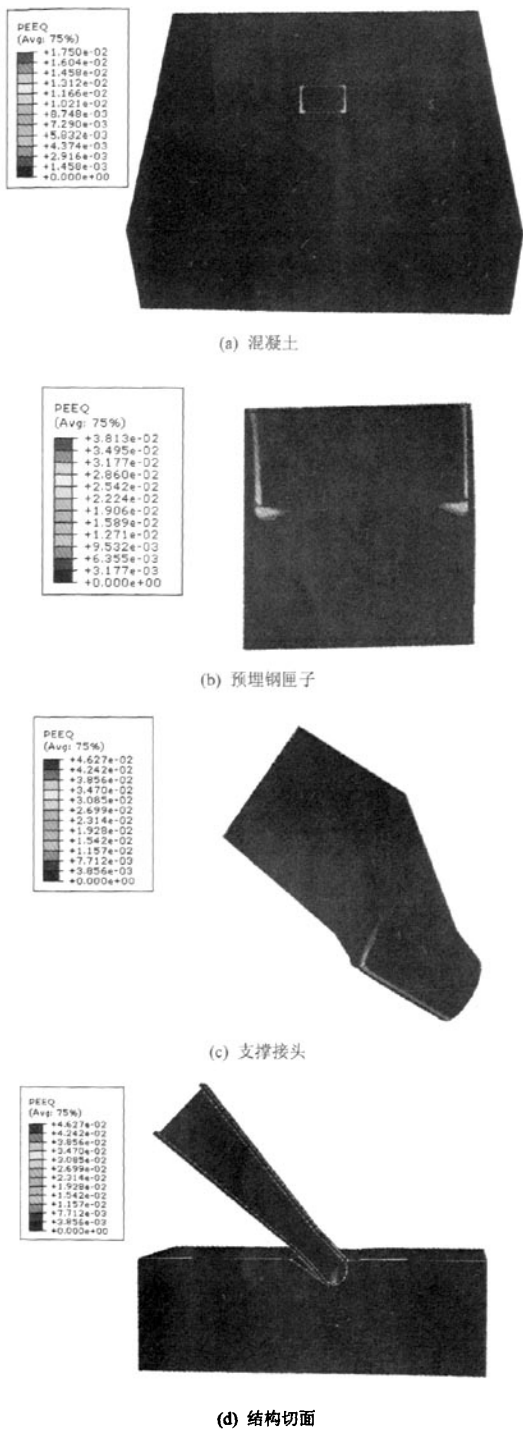


图 11 加载至 3 000 kN 时塑性区云图

Fig.11 Plastic zone nephogram of all parts at 3 000 kN

在各加卸载步结构整体塑性区云图中(见图 11(d)), 以支撑接头与钢匣子接触的下部塑性区最为明显, 逐步卸载时, 塑性区有所减小。

由图 12 可见, 采用上述计算模型得到的加载曲线与实测曲线较为吻合, 在刚开始加载时, 计算值基本成弹性增加, 试验时由于受加载控制模式(人工手动控制, 加载速率并不均匀等)的影响, 导致实测与计算值有一定误差, 加载到 2 500 kN 时, 荷载稳定持续一段时间, 导致出现一定的塑性位移, 加载到 3 000 kN 时, 塑性变形和塑性位移更为明显。

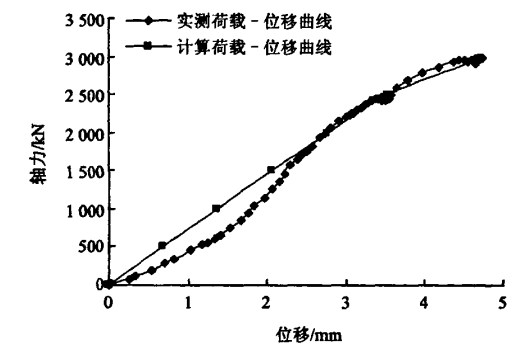


图 12 加载时试验与计算对比曲线

Fig.12 Comparison curves of calculation and test in the loading stage

5 结 论

- (1) 试验加载到 2 500 kN 未发现破损现象, 加载到 3 000 kN 在支撑和钢匣子前方的混凝土出现少量的压碎现象, 钢匣子有压曲, 但周围并未观察到明显的裂纹, 其他区域混凝土完好, 加载台架斜拉杆梁与竖梁连接焊缝增大, 说明该斜撑接头承载力满足 2 500 kN 设计轴力。
- (2) 电阻式应变片成功监测到各个主要部位的应变情况, 支撑上最大压应变发生在应变片 38, 为 1.127×10^{-3} ; 锚固钢筋发生在应变片 48, 为 1.430×10^{-3} , 这 2 个部位超过屈服强度, 出现一定塑性变形。
- (3) 采用 3D 有限元模拟计算, 较好地分析了支撑、钢匣子及混凝土的塑性区的发生和发展过程, 分析结果与试验现象基本一致。
- (4) 与传统支撑接头相比, 该新型斜撑接头具有即插即用、转动灵活、自动定心、可施加预应力、承载能力可靠、结构稳定等优点。在应用中经进一步修改完善, 形成深基坑工程施工中反复使用的定型构件, 可产生更显著的经济与社会效益。

参考文献(References):

- [1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Manual of foundation pit engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [2] 余志成, 施文华. 深基坑支护设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(YU Zhicheng, SHI Wenhua. Design and construction of a deep foundation pit[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [3] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ120 - 99 建筑基坑工程技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ120 - 99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [4] 刘建航. 软土地基工程中时空效应理论与实践[J]. 地基处理, 1999, 10(4): 3 - 14.(LIU Jianhang. Theory and application of time-space effects in excavation on soft soil[J]. Ground Improvement, 1999, 10(4): 3 - 14.(in Chinese))
- [5] 高文华, 杨林德, 沈蒲生. 软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 90 - 96.(GAO Wenhua, YANG Linde, SHEN Pusheng. Influencing factors analysis of the space-time effect on the timbering structure internal force and transmutation of soft clay deep foundation pit[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 90 - 96.(in Chinese))
- [6] 林 航. 基坑围护格构式钢结构支撑的应用研究[硕士学位论文][D]. 杭州: 浙江工业大学, 2006.(LIN Hang. Research on buett-up steel structure bracing system used in foundation pits[M. S. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2006.(in Chinese))
- [7] 忘佩明, 王鹤林, 段创峰. 基坑可控式液压支撑的研制试验[J]. 城市道桥与防洪, 2008, (2): 61 - 64.(WANG Peiming, WANG Helin, DUAN Chuangfeng. Developing experiment of controllable hydraulic bracing for pit[J]. Road Bridge and Flood Protection of City, 2008, (2): 61 - 64.(in Chinese))
- [8] 林 鹏, 郑明新, 熊孝波, 等. 基于模型试验的板桩墙支护变形机制分析[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(3): 6 - 10.(LIN Peng, ZHENG Mingxin, XIONG Xiaobo, et al. Deformation mechanism analysis of the pile wall supporting of deep excavation based on the model test[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2008, 25(3): 6 - 10.(in Chinese))
- [9] 张泰安. 地铁车站深基坑开挖钢支撑架设及置换技术[J]. 铁道标准设计, 2008, (9): 103 - 105.(ZHANG Taian. Technologies of steel braces erection and substitution on deep foundation excavation of metro station[J]. Railway Standard Design, 2008, (9): 103 - 105.(in Chinese))
- [10] 朱雁飞, 杨国祥. 上海大型轨道交通枢纽站施工中的主要技术问题与新技术应用[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(8): 1 330 - 1 335.(ZHU Yanfei, YANG Guoxiang. Primary technical problem and new technology application in Shanghai metro hub construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(8): 1 330 - 1 335.(in Chinese))
- [11] RICHARD J F, SEBASTIAN B. Performance of a stiff support system in soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(8): 660 - 671.
- [12] YANG M L, CHEN S J, CHEN S Y. Innovative central Opening strut system for foundation excavation[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2006, 132(1): 58 - 66.
- [13] 姚振纲, 刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.(YAO Zhengang, LIU Zuhua. Tests on building structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50017 - 2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50017 - 2003 Code for design of steel structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.(in Chinese))
- [15] 唱 伟. 超深基坑若干问题的研究及工程实践[博士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2004.(CHANG Wei. Research on some problems of the ultra-deep foundation pit and engineering practice[Ph. D. Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2004.(in Chinese))
- [16] 范庆来, 栾茂田, 杨 庆. 横观各向同性软基上深埋式大圆筒结构水平承载力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 95 - 101.(FAN Qinglai, LUAN Maotian, YANG Qing. Numerical analysis of ultimate bearing capacity of large-diameter cylindrical structures deeply embedded in cross-isotropic soft soil against lateral loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 95 - 101.(in Chinese))