

DOI: 10.11779/CJGE2015S2038

# “桩墙合一”结构体系的受力实测与分析

胡 耘<sup>1, 2</sup>, 王卫东<sup>1, 2</sup>, 沈 健<sup>1, 2</sup>

(1. 华东建筑设计研究总院地基基础与地下工程设计研究中心, 上海 200002; 2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心, 上海 200002)

**摘 要:** “桩墙合一”结构体系考虑将常规的临时围护排桩作为正常使用阶段地下结构的一部分, 目前已有相关的工程实践, 其受力模式与荷载分担特性也已进行了相关的理论研究, 但尚缺乏实测数据的支撑。以上海虹桥商务区某基坑工程为背景, 开展了从基坑开挖至上部结构施工的“桩墙合一”结构体系应力实测, 实测数据在分布规律上与理论计算结果具有较好的一致性, 结果显示在地下结构施工完成至上部结构施工过程中, 围护排桩承担了主要的土水压力, 表明简化设计计算中所考虑的荷载分担模式是安全可靠的。研究成果加深了对“桩墙合一”结构体系受力特性的认识, 为推动了该技术的推广应用奠定了基础。

**关键词:** 深基坑; 桩墙合一; 监测; 数值计算

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S2-0197-05

**作者简介:** 胡 耘(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地基基础及地下工程设计和研究。E-mail: yun\_hu@ecadi.com。

## Field monitoring and analysis of stresses for dual-purpose pile wall

HU Yun<sup>1, 2</sup>, WANG Wei-dong<sup>1, 2</sup>, SHEN Jian<sup>1, 2</sup>

(1. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations, Shanghai 200002, China)

**Abstract:** The dual-purpose bored pile wall, which serves as a retaining wall in the construction period and the outside wall of the permanent underground structures, has been used in some projects. The stresses and load sharing features for this type of wall have been investigated, but field monitoring data are limited. The stresses in the dual-purpose bored pile wall for an excavation in Hongqiao District of Shanghai are monitored from the commencement of excavation to the completion of underground structures. The measured stresses agrees fairly well with the calculated results by the simplified method. In addition, most of the pore water pressures and earth pressures are undertaken by the bored piles during the entire monitoring period. Therefore, the load sharing assumption taken in the simplified method is considered to be reasonable. The dual-purpose bored pile wall has been proved to be feasible and can be widely used in similar excavations.

**Key words:** deep excavation; dual-purpose pile wall; monitoring; numerical analysis

## 0 引 言

基坑围护排桩与主体地下结构外墙相结合的“桩墙合一”技术是将基坑围护排桩作为正常使用阶段主体地下结构的一部分, 与地下结构共同承担正常使用阶段荷载, 可以有效提高材料利用率, 减少相应主体地下结构投入, 节约社会资源。该基坑支护结构与主体地下结构相结合的“桩墙合一”技术已经在工程上得到了初步的应用并获得了良好的效果<sup>[1]</sup>。

“桩墙合一”结构体系根据受力特点, 可将其全生命周期分为两个阶段: 基坑实施阶段和正常使用阶段。基坑实施阶段从基坑开挖开始到地下结构完成, 正常使用阶段从地下结构完成至建筑物生命周期结束。“桩墙合一”结构根据围护排桩在正常使用阶段所

分担的荷载类型, 又可以分为只分担水平向荷载的桩墙“水平向结合”和同时分担水平和竖向荷载的桩墙水平和竖向“双向结合”。本文研究重点为“水平向结合”的受力和荷载分担特性。

虽然在理论上对于“桩墙合一”结构体系的受力模式已经有了研究和认识, 也有了不少的工程实践, 但目前尚缺少实测数据对桩墙荷载分担和受力特性进行验证。本文以采用“桩墙合一”设计的上海虹桥商务区核心一期 08 地块工程为依托, 开展了现场实测, 验证了设计所采用的荷载分担模式的可靠性。

**基金项目:** 国家科技支撑计划 (2012BAJ01B02); 上海市科委工程技术研发中心平台建设项目 (13DZ2251400)

**收稿日期:** 2015-03-26

1 背景工程概况

背景工程位于上海市虹桥商务区,地上为6栋6~9层主楼及2层裙楼,普遍设置3层地下室。基坑面积约41000 m<sup>2</sup>,普遍挖深约17 m,基坑平面如图1所示,典型剖面及土性参数如图2所示。在开挖深度范围的土层主要有第②层粉质黏土层、第③层淤泥质粉质黏土层、和第④层土灰色淤泥质黏土层,基底位于第④层中。

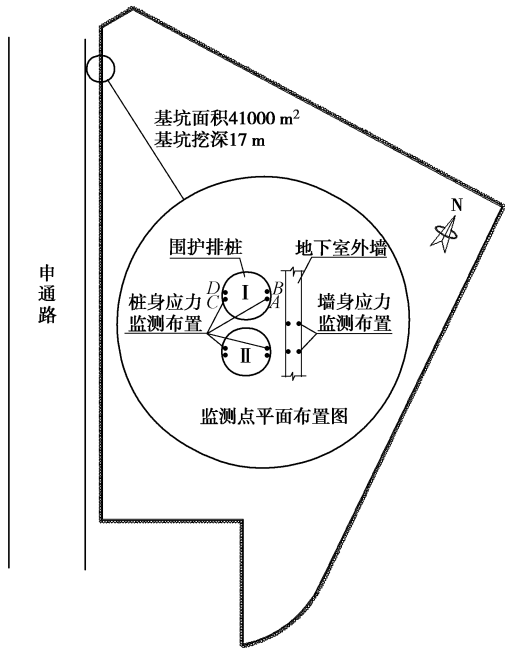


图1 基坑平面和监测点平面布置图

该工程采用主体地下结构外墙与基坑围护排桩“水平向结合”的“桩墙合一”设计,围护桩采用旋挖成孔灌注桩,普遍桩径1250 mm,桩净距200 mm,插入基底以下15 m,围护排桩外侧设置Φ1000@750 mm三轴水泥土搅拌桩止水帷幕,坑内设置三道钢筋混凝土支撑系统支护。得益于“桩墙合一”设计,地下结构外墙由常规的约800 mm减小为400~500 mm。围护排桩与地下结构外墙间净距400 mm,以供施工防水保温层及容纳施工偏差。两者间通过地下室底板和设置于结构楼板同标高的300 mm厚传力板带实现荷载传递和相互作用(图3)。

对于“水平向结合”,在基坑实施阶段,与常规围护桩受力工况相同,主动土压力和水压力均直接作用于围护桩,其中开挖过程由围护桩独立承担,地下结构施工过程由围护桩和逐渐浇筑完成的地下结构共同承担。正常使用阶段,围护桩和地下结构作为一个共同受力体系,当止水帷幕有效时,静止土压力和水压力直接作用于围护桩;当止水帷幕彻底失效后,水压

力全部作用于地下室外墙,静止土压力依旧直接作用于围护桩,并通过“桩墙”共同作用体系小部分传递于地下室外墙。

目前设计计算中正常使用阶段桩、墙所考虑的荷载如下:“桩”考虑止水帷幕有效时,静止土压力与水压力全部作用于围护桩上。“墙”考虑止水帷幕失效时,作用全部的水压力与按桩墙抗弯刚度分配后的静止土压力。

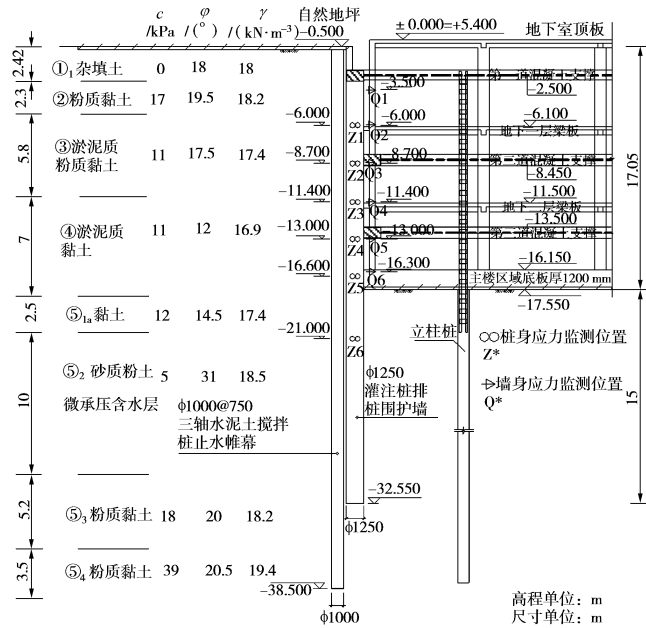


图2 典型围护结构剖面图

Fig. 2 Typical profile of retaining structures

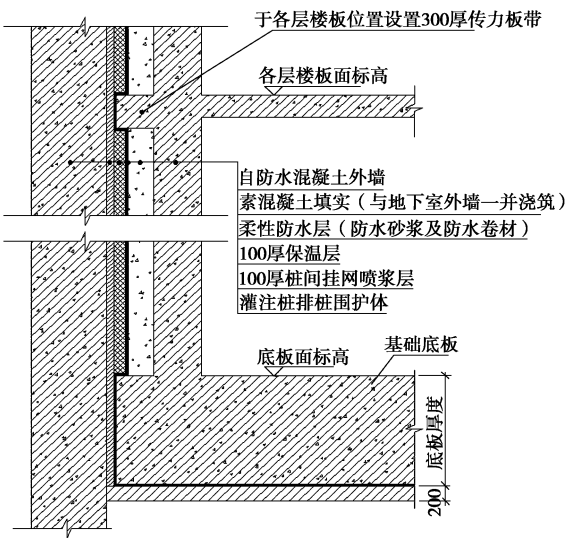


图3 围护桩与地下室外墙间传力板带示意图

Fig. 3 Load transfer slab between retaining pile and exterior wall of basement

考虑到“桩墙合一”结构体系的复杂性,在设计中开展了基于三维“m”法<sup>[2]</sup>的数值分析,建立了包括地下室外墙、围护排桩、基础底板、传力板带等在内的有限元模型(图4),对全过程进行了模拟,数值

计算结果在下文结合实测结果一并给出。

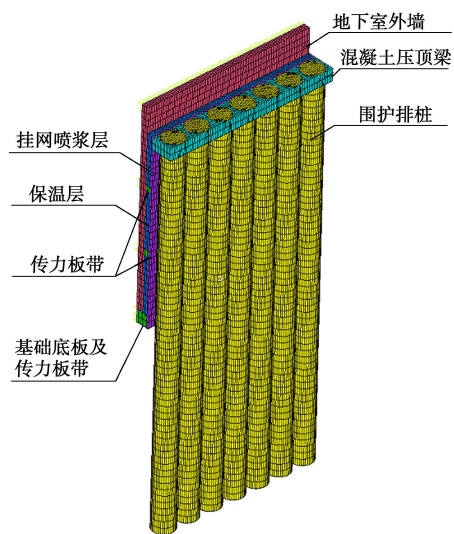


图 4 数值分析模型  
Fig. 4 Numerical analysis model

2 测试方案及结果

2.1 测试方案

选取“桩墙合一”结构单元（两根围护桩和相邻地下室外墙）在其纵向主筋布置钢筋应力传感器（图 1 中小图），竖向各布设 6 个监测断面（图 2），地下室外墙从墙顶以下 3.5 m 处布设至墙底（Q1~Q6），围护桩从桩顶以下 5.5 m 处布至开挖面以下 4 m（Z1~Z6）。应力测量采用 BGK-4911 型振弦式钢筋应力计，该振弦式钢筋应力计直径与所布置的桩或墙主筋相同，标准量程 400 MPa，灵敏度 0.07%FS，采用抗干扰四芯屏蔽电缆传输信号。每根桩和地下室外墙的每个监测断面各布设 4 个应力计，共 72 个应力计。监测期限由基坑开挖至地上 6 层结构完成。两根围护桩相邻，其监测结果可相互验证，实测结果显示两根桩结果相近，限于篇幅关系，下文重点分析 I 号桩。

2.2 主要结果

背景工程自 2011 年 12 月起开挖第一道支撑以下土方，到 2012 年 11 月地下结构完成，2013 年 2 月结构封顶，共历时 14 个月，更为细致的时间和工况对应关系见表 1。图 5 给出了 I 号围护桩和地下结构外墙迎坑侧和迎土侧钢筋轴力在不同工况下沿桩身和墙体的分布，纵坐标表示自地面的深度，并分别在左右两侧标注了支撑和结构楼板的位置，横坐标表示钢筋轴力，以受拉为正，受压为负。

由实测结果揭示，围护桩迎坑侧主筋主要受拉，迎土侧主筋主要受压，同一工况下前者峰值绝对值大于后者。在开挖过程中，桩身钢筋轴力峰值发生在开挖面附近，在开挖至基底后，峰值位置稳定在基底附

近。支撑的施加可以有效减小其位置附近围护桩钢筋轴力，支撑拆除时，围护桩相应位置钢筋轴力将有所增大。桩身钢筋轴力的最大值发生在开挖至基底后、第三道支撑拆除时刻，最大位置位于基底附近的 Z5 号测试断面。在施工上部结构期间，地下室结构外墙迎坑侧和迎土侧墙体钢筋轴力数值均较小，其峰值仅为围护桩轴力峰值的约 5%。

本文的实测数据直观、定量地记录了从基坑开挖，地下结构施工，至上部结构施工过程中围护桩和地下室外墙内钢筋轴力变化发展过程，为其受力特性分析提供了第一手资料。

表 1 工况时间对照表

| Table 1 Construction stages and dates |             |            |             |
|---------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| 时间                                    | 工况          | 时间         | 工况          |
| 2011-12-08                            | 开挖第一道支撑以下土方 | 2012-08-09 | B2 层结构完成    |
| 2012-01-05                            | 第二道支撑完成     | 2012-09-19 | B1 层结构完成    |
| 2012-04-09                            | 第三道支撑完成     | 2012-11-06 | 地下结构完成      |
| 2012-06-07                            | 开挖至基底       | 2013-01-04 | 6 层完成（测试结束） |
| 2012-06-25                            | 基础底板完成      | 2013-02-04 | 上部结构封顶      |

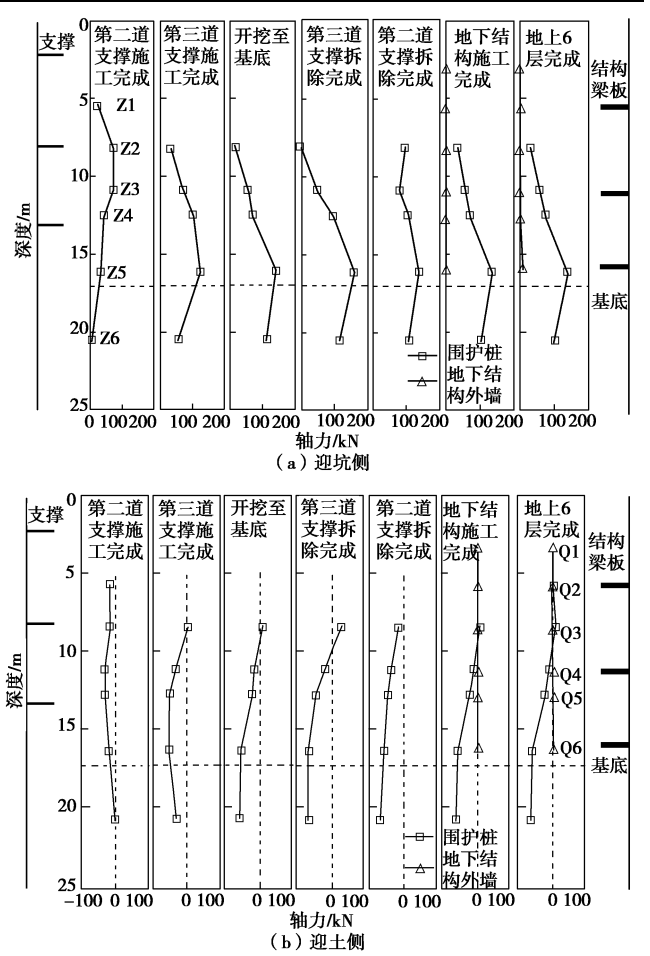


图 5 围护桩和地下结构外墙纵向钢筋轴力监测结果  
Fig. 5 Axial forces of the steel bars

### 3 受力特性分析

为更为直观地研究“桩墙合一”结构体系受力特性, 文本将直接测量得到的钢筋应力转化为桩、墙截面弯矩。

#### 3.1 圆截面受弯构件受力分析方法

对于圆形截面, 目前尚无完善的理论方法可将钢筋轴力转化为截面弯矩, 本文基于如下假设: ①假设受压区圆心角不变; ②假设围护桩截面受压区混凝土应力-应变曲线为二次抛物线; ③在钢筋较多的情况下, 环向均匀布置的钢筋可等效为沿圆周均匀分布的钢环; ④假设围护桩截面应变沿截面呈线性分布; ⑤忽略混凝土的抗拉强度; ⑥采用平截面假定, 并假设受压区钢筋和周围混凝土未发生相对位移<sup>[3-4]</sup>。由实测钢筋应力计算围护桩截面弯矩<sup>[5]</sup>

$$M = f_c r^3 \frac{1}{\lambda + \cos \varphi} \frac{W}{24} \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} - f_c r^3 \frac{1}{(\lambda + \cos \varphi)^2} 2T \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} \right)^2 + \frac{1}{2} E_s \varepsilon_s \rho r_s r \frac{\lambda \pi}{\lambda + \cos \varphi}, \quad (1)$$

式中,  $r$  为桩半径,  $r_s$  为围护桩主筋至截面圆心距离,  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度,  $\varepsilon_0$  为混凝土相应于峰值应力时的应变,  $\varepsilon_s$  为任意时刻应变,  $\varphi$  为受压区界限角,  $E_s$  为钢材的弹性模量,  $\lambda$  为混凝土的实际受压区高度和界限受压区高度的比值。

#### 3.2 桩墙受力特性对比分析

图 6, 7 分别给出了开挖至基底和地下结构施工完成后地上施工至 6 层两个工况下, 实测和有限元分析的围护桩、地下室外墙弯矩沿深度的分布。其中左侧为计算结果, 右侧为实测结果。如图 8 所示, 开挖至基底, 实测和计算结果两者的围护桩受力模式曲线具有较好的一致性。从弯矩数值上看, 实测围护桩弯矩最大值位于测点 Z5 (开挖面以上 0.95 m), 为 1300 kN·m, 相应位置围护桩弯矩的计算值为 2773 kN·m, 实测值约为计算值的 47%。

从地下结构施工完成至上部结构施工到 6 层过程中, 围护桩和地下室外墙受力无明显变化, 此处取上部结构施工到 6 层时的结果 (图 7)。围护桩受力的实测和计算结果在模式分布上同样吻合度较好, 实测围护桩弯矩最大值依旧位于测点 Z5。从弯矩数值上, 实测最大值相比开挖至基底工况略有减小, 为 1298 kN·m, 相应位置围护桩弯矩的计算值为 2562 kN·m, 实测值约为计算值的 51%。

地下结构施工完成后地上施工至 6 层时墙身弯矩相对于围护桩数值较小, 图 7 中无法清晰表示其分布特性, 图 8 单独取出该工况下墙身弯矩的计算和实测

结果, 两者在受力模式上具有较好的一致性。从弯矩数值上看, 实测最大负弯矩发生在墙底附近的 Q6 测点, 为 -1.3 kN·m, 对应位置的计算结果为 -12.4 kN·m, 实测值约为计算值的 10%; 实测最大正弯矩发生在中部 Q3 测点, 为 0.7 kN·m, 对应位置的计算结果为 5.8 kN·m, 实测值约为计算值的 8%。

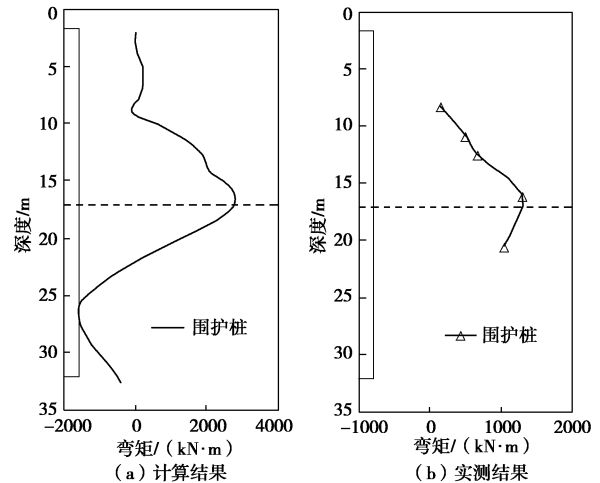


图 6 开挖至基底围护桩弯矩分布

Fig. 6 Distribution of bending moment of pile

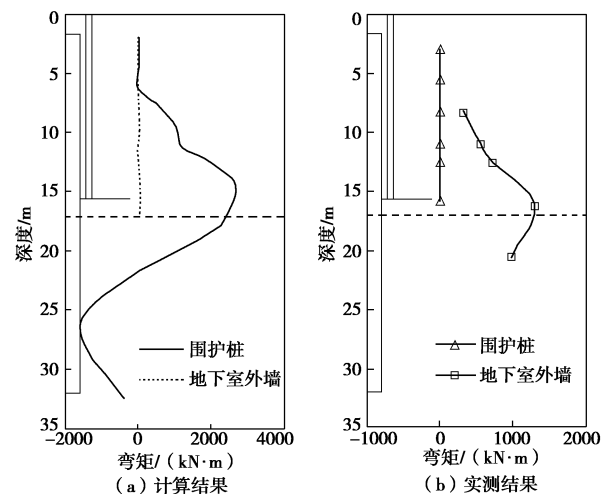


图 7 地下结构施工完成, 施工至地上 6 层桩墙弯矩分布

Fig. 7 Distribution of bending moment of pile and wall

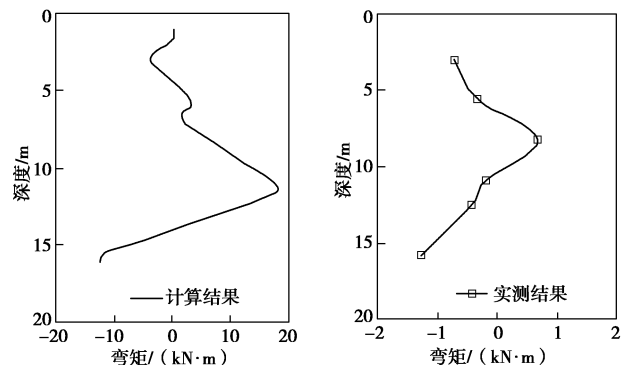


图 8 地下结构完成后施工至地上 6 层地下室外墙弯矩分布

Fig. 8 Distribution of bending moment of exterior wall of basement after completion of structures

对比围护桩和地下室外墙受力, 实测结果显示, 施工至地上 6 层时, 围护桩和地下室外墙正弯矩峰值比约为 1850:1, 数值计算该工况下桩、墙正弯矩峰值比约为 370:1, 均远大于设计计算中按桩墙抗弯刚度(约 10:1)所采用的荷载分担比例, 由此可见在地下室结构施工完成后短期内地下室外墙所受荷载很小, 从长期来看, 正常使用阶段设计中所考虑的荷载分担模式也是偏于安全的。

综上所述, 对比实测结果和计算结果, 在分布规律上, 围护桩和地下室外墙的实测结果与数值计算具有较好的一致性; 在弯矩数值上, 实测围护桩弯矩约为计算值的 50%, 实测地下室外墙弯矩约为计算结果的 10%, 也符合目前基坑工程中实测受力数据小于计算结果的经验。两者分布规律的一致性和实测数据较小的现象, 既证明了实测数据的有效性, 也说明了目前所采用的设计计算方法是安全可靠的。从桩墙荷载分担角度看, 在地下结构施工完成至上部结构施工过程中, 围护排桩承担了主要的土水压力, 表明简化设计计算中所考虑的荷载分担模式是安全可靠的。目前实测至地上 6 层结构完成, 长期使用过程中, 止水帷幕失效、水压力作用于地下室外墙, 将使得地下室外墙受力有所增长, 正常使用阶段的“桩墙合一”结构体系受力和荷载分担特性还需要开展长期实测研究。

## 4 结论与建议

本文进行了围护排桩和主体地下结构外墙相结合的“桩墙合一”结构体系自基坑开挖至上部结构施工的全过程实测, 开展了“桩墙合一”结构体系的荷载分担和受力特性研究, 得到如下主要结论:

(1) “桩墙合一”结构体系受力模式可分为两个阶段: 在基坑实施阶段, 主动土压力和水压力均直接作用于围护桩, 其中开挖过程由围护桩独立承担, 地下结构施工过程部分荷载通过“桩墙”共同作用体系传递至逐渐浇筑完成的地下室外墙。在正常使用阶段, 围护桩和地下结构作为一个共同受力体系, 当止水帷幕有效时, 静止土压力和水压力直接作用于围护桩; 当止水帷幕彻底失效后, 水压力全部作用于地下室外墙, 静止土压力依旧直接作用于围护桩, 并通过“桩墙”共同作用体系小部分传递于地下室外墙。

(2) 通过实测获得了自基坑开挖、加撑、拆撑、到上部结构施工过程中围护桩和地下室外墙钢筋轴力分布, 并由钢筋轴力推导了桩墙弯矩分布。

(3) 实测围护桩和地下室外墙弯矩全过程分布和变化规律与数值计算结果均具有很好的一致性, 既说明实测结果的有效性也说明设计计算方法的合理

性。实测围护桩弯矩约为计算结果的 50%, 实测地下室外墙弯矩约为计算结果的 10%, 也符合目前基坑工程实测受力数据小于计算结果的经验, 说明目前的设计计算方法安全可靠, 且存在一定的优化空间。

(4) 从实测及数值分析的结果看, 地下结构完成至上部结构施工阶段, 围护桩承担了主要的侧向水土压力, 实测和计算的围护桩与地下室外墙正弯矩峰值比分别为 1850:1 和 370:1, 均远大于 10:1 的桩、墙抗弯刚度比, 说明简化设计计算中所考虑的荷载分担模式是安全可靠的。

(5) 本文实测数据至地上 6 层结构施工完成, 深入研究及验证“桩墙合一”结构体系在正常使用阶段的受力和荷载分担特性, 还需开展长期的实测。

## 参考文献:

- [1] 王卫东, 沈 健. 基坑围护排桩与地下室外墙相结合的“桩墙合一”的设计与分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 303 - 308. (WANG Wei-dong, SHEN Jian. Design and analysis of unity of support piles and basement external walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 303 - 308. (in Chinese))
- [2] 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 Jian-hua, GAO Shao-wu. 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. (in Chinese))
- [3] 杨生贵, 杨 斌. 圆形截面钢筋混凝土桩正截面受弯承载力计算[J]. 建筑科学, 2004, 20(1): 43 - 46. (YANG Sheng-gui, YANG Bin. Calculation on bending capacity of normal round-section in R. C. Pile[J]. Building Science, 2004, 20(1): 43 - 46. (in Chinese))
- [4] 黄太华, 谭 萍, 王原琼. 圆形截面正截面受弯承载力计算[J]. 结构工程师, 2005, 21(5): 16 - 19. (HUANG Tai-hua, TAN Ping, WANG Yuan-qiong. Calculation on flexural capacity of normal section of the circular section[J]. Structural Engineers, 2005, 21(5): 16 - 19. (in Chinese))
- [5] 魏巍巍, 贡金鑫, 李 龙. 使用荷载下圆形截面钢筋混凝土构件钢筋应力的计算[J]. 水利水运工程学报, 2008, 2: 29 - 37. (WEI Wei-wei, GONG Jin-xin, LI Long. Calculation of steel stress in reinforced concrete members with round section[J]. Hydro Science and Engineering, 2008, 2: 29 - 37. (in Chinese))