

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

王卫东, 沈健

(华东建筑设计研究院有限公司地基基础与地下工程设计研究所, 上海 200002)

摘要: “桩墙合一”技术考虑基坑围护桩与地下室外墙共同作用作为正常使用阶段的地下室侧壁挡土结构, 可减薄地下室外墙的厚度、减少基坑面积, 有利于节约工程造价, 节能降耗, 具有良好的社会经济效益。通过工程应用考虑了“桩墙合一”技术的防水、传力构造等, 并通过基坑开挖阶段、正常使用阶段、抗震等多工况进行“桩墙合一”的强度与耐久性设计计算, 可作为今后类似工程设计的参考。

关键词: 基坑围护桩; 地下室外墙; 桩墙合一; 地下室防水

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0303-06

作者简介: 王卫东(1969-), 男, 辽宁人, 工学博士, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, 从事高层建筑地基基础、地下工程、深基坑工程的设计与研究。E-mail: Weidong_wang@ecadi.com。

Design and analysis of unity of support piles and basement external walls

WANG Wei-dong, SHEN Jian

(Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd.,

Shanghai 200002, China)

Abstract: Used as the lateral retaining structure during the regular service stage considering the combination of support piles and basement external walls, the technique of the unity of support piles and basement external walls can reduce the thickness of basement external walls and the excavation area, so it has good economic and social performances by saving the project cost. Through project application, the waterproof design and the load transfer slab are considered, and the strength and durability design are calculated under various conditions of excavation stage, regular service stage and earthquake stage. These outcomes can be referenced in future other similar projects.

Key words: support pile; basement external wall; unity of support pile and basement external wall; basement waterproof

0 引言

当前软土地区基坑支护工程常采用大量的灌注桩排桩和水平支撑或锚杆等作为临时结构^[1]。灌注桩排桩围护体仅作为基坑临时结构在地下室施工完成后遗弃于地下, 在基坑周围地层遗留下大量固体障碍物, 存在着能耗高、资源浪费等问题。而实际上围护排桩作为受弯构件设计, 其刚度一般较大, 在基坑开挖结束后必然可以继续作为构件发挥作用。如能够将地下室外墙和基坑围护排桩相结合, 考虑围护排桩作为永久使用阶段地下室侧壁的一部分, 即“桩墙合一”技术, 可减少地下室外墙的厚度, 实现建筑节能和可持续发展的基坑支护结构设计, 具有广阔的应用前景和重大的社会经济效益。

目前地下室外墙和基坑围护排桩的设计一般分别

按照正常使用阶段和临时开挖阶段的工况进行受力计算, 不考虑基坑围护排桩在正常使用阶段的共同作用。

“桩墙合一”后, 其共同作用机理、设计计算方法、节点构造等尚无系统的研究。

“桩墙合一”技术目前在建筑基坑工程中的应用案例较少, 已有的工程项目多在围护结构空间不足的情况下被动的将围护排桩与地下室外墙紧贴, 如天津津门基坑工程、上海市胸科医院肺部肿瘤临床医学中心病房楼、漕溪路站地块公共开放空间项目等, 且未对“桩墙合一”受力体系以及相关的防水保温作法等节点进行深入的研究。本文以上海市虹桥商务区核心区一期08地块基坑工程作为背景, 研究“桩墙合一”结构体系的设计计算方法、共同作用受力模式、设计

构造等。

1 “桩墙合一”设计与计算分析

1.1 工程概况

本基坑工程位于上海市虹桥商务区核心区一期08地块，基坑面积约4.1万平方米，整体设置3层地下室，采用桩筏基础，开挖深度约17m。基坑方案考虑采用灌注桩排桩结合竖向三道混凝土支撑。

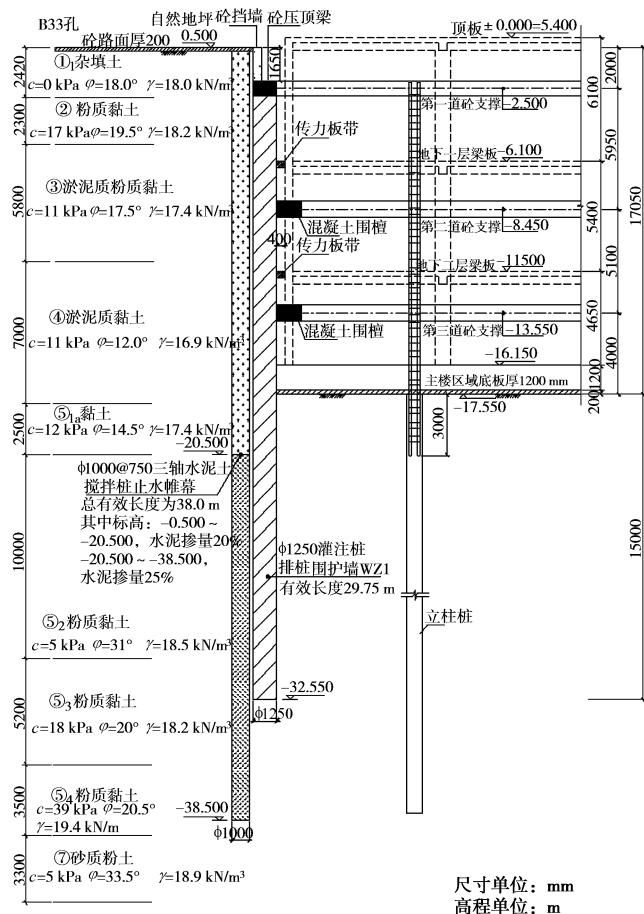


图1 基坑围护结构剖面图

Fig. 1 Sectional view of support structure

1.2 “桩墙合一”设计

如上图剖面所示，本基坑工程由于开挖深度较深，受限于主体设计提资滞后而现场又急于开始周边围护的施工，因此采用大直径的灌注桩排桩作为基坑周边围护体，根据基坑开挖需求，围护排桩直径达到Φ1250 mm，含钢率约为 160 kg/m^3 ，抗弯刚度基本可以和1000 mm厚地下连续墙匹配，如此大刚度的围护排桩在地下室结构施工完成后应可以继续发挥侧向挡土的作用，完全不考虑正常使用阶段围护排桩的刚度必然造成大量的资源浪费。

因此，本工程考虑围护排桩作为永久使用阶段地下室侧壁的一部分，即采用“桩墙合一”技术，将常

规此深度下需要考虑的800 mm厚地下室外墙减薄为400 mm厚。与常规的桩与墙之间预留1000 mm左右的空间作为地下室外墙外防水施工操作空间并于永久阶段回填土的作法不同，“桩墙合一”设计考虑将地下室外墙与围护排桩紧贴，在基坑开挖至基底后在围护桩表面施工防水及保温层后单侧支模施工地下室室外墙，形成桩与墙共同作用的挡土止水地下室侧壁。

(1) “桩墙合一”节点设计

依据《地下建筑防水构造》(2010—09—08)与《地下工程防水技术规范》(GB50108—2008)，本工程由于地下一层与地下二层主要用途均为商业，地下三层为停车库，因此地下室防水等级统一按一级防水考虑。拟采用一道拟采用一道刚性防水(自防水混凝土外墙)结合多道柔性防水(卷材、涂料或防水砂浆等)。

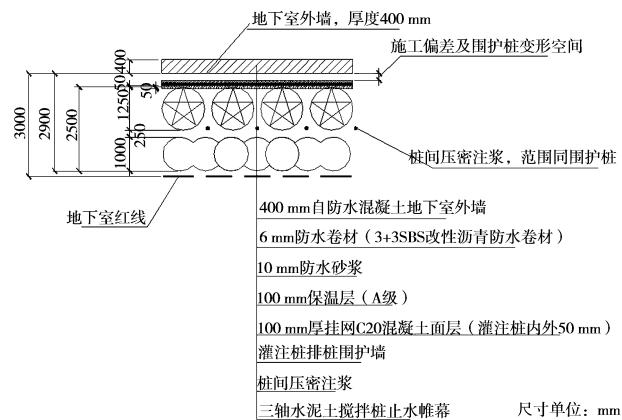


图2 “桩墙合一”构造节点

Fig. 2 Construction detail of unity of support piles and basement external walls

如图2所示，由坑外向坑内依次为：

Φ1000@750 三轴水泥土搅拌桩止水帷幕；

桩与止水帷幕之间压密注浆；

Φ1250@1450 灌注桩排桩围护墙；

100 mm 厚挂网 C20 混凝土面层（灌注桩内外各50 mm），在基坑开挖期间同步完成；

30 mm 防水砂浆找平层；

6 mm 厚防水卷材 (3+3SBS 改性沥青)；

100 mm 厚保温及保护层 (A 级)；

预留 200 mm 空间作为围护桩施工偏差以及开挖变形空间，施工期间浇筑素混凝土；

400 mm 厚自防水混凝土地下室外墙。

(2) “桩墙合一”楼板处传力带设计

由以上“桩墙合一”节点设计可知，围护桩与地下室外墙之间需设置100 mm厚的保温层，保温材料相对于钢筋混凝土围护桩与地下室外墙来说刚度较小，桩墙之间存在软夹层，若此软夹层自地下室底板至顶板通长设置，则水土压力荷载难以通过软夹层传

递至地下室外墙, 围护桩可能会发生较大的侧向位移, 且保温材料可能在水土压力荷载作用下发生破坏。因此考虑在各层地下室楼板位置(顶板除外)钢筋混凝土传力板带, 保温层于各层传力板带处断开, 保温层自底板面向上施工, 底板位置混凝土直接顶至围护桩挂网喷浆层边与柔性防水层(厚度仅6 mm)边。

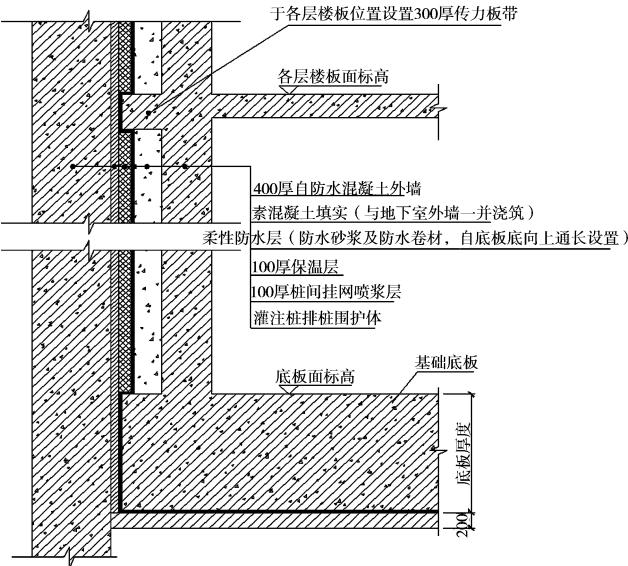


图3 楼板处传力板剖面

Fig. 3 Section of load transfer slab on floor plan

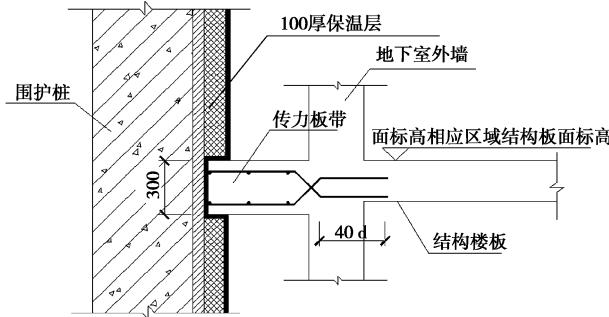


图4 传力板带配筋示意图

Fig. 4 Reinforcement of load transfer slab

1.3 “桩墙合一”计算

(1) 计算内容

“桩墙合一”计算综合基坑围护体与地下室外墙的设计方法, 总体应分基坑开挖阶段与正常使用阶段两个工况进行分析。其中基坑开挖阶段分析对象为周边灌注桩排桩围护体, 分析方法与常规的围护设计一致, 可根据相关的基坑规范进行相应的考虑。正常使用阶段, 桩墙作为一个共同作用的受力体, 应按各自较为不利的工况进行荷载的考虑, 其中围护桩由于各层楼板与底板处存在水平支座, 围护桩外侧施加的荷载可考虑止水帷幕有效的情况, 坑外水土压力均作用于围护桩进行强度、裂缝计算; 对于地下室外墙, 外侧荷载可考虑止水帷幕失效的情况下, 地下水从桩缝

渗入水压力直接作用于地下室外墙, 另外施加部分静止土压力(按桩墙的抗弯刚度进行分配)进行强度、裂缝计算。另外, 尚应进行偶遇地震荷载作用下的强度计算, 抗震工况可进行地震水土压力等荷载作用下的简化分析与三维有限元分析, 计算内容如图5所示。

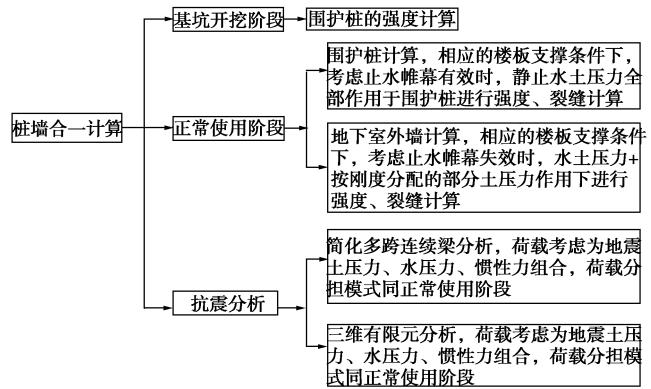


图5 “桩墙合一”计算内容框图

Fig. 5 Calculation content of unity of support piles and basement external walls

(2) 基坑开挖阶段计算

基坑开挖阶段的分析可根据相应的地方规范或国家规范进行计算。本工程围护桩基坑开挖阶段根据上海市基坑工程技术规范^[2]采用“m”法计算, 计算结果如图6所示。

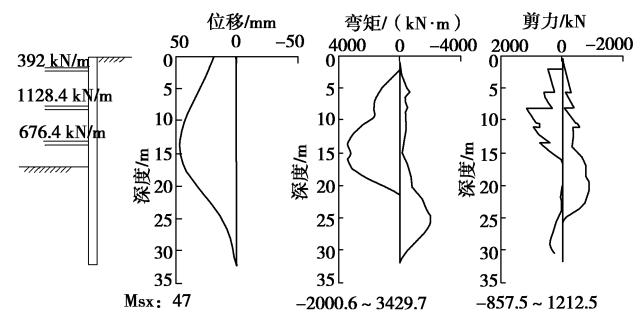


图6 基坑开挖阶段围护桩计算结果

Fig. 6 Calculated results of piles during excavation stage

(3) 正常使用阶段计算

a) 围护桩正常使用阶段计算

围护桩正常使用阶段计算根据相应的楼板支撑条件, 按多跨连续梁分析, 如图1所示, 本工程围护桩正常使用阶段考虑为三跨连续梁, 地下室顶板由于与围护桩无直接连接, 可考虑为顶端自由, 其余各层楼板与底板处按现有的连接关系简化为简支支座。围护桩外侧的荷载考虑止水帷幕有效时, 坑外的全部静止水土压力仍全部作用于围护桩, 以此验算围护桩在正常使用阶段的强度与耐久性计算。

由下图围护桩正常使用阶段每延米的弯矩计算结果可知, 单根围护桩正常使用阶段弯矩值约为603

$kN\cdot m$, 剪力值 $790 kN\cdot m$, 均小于围护开挖阶段的弯矩值, 因此强度设计可由围护开挖阶段控制。

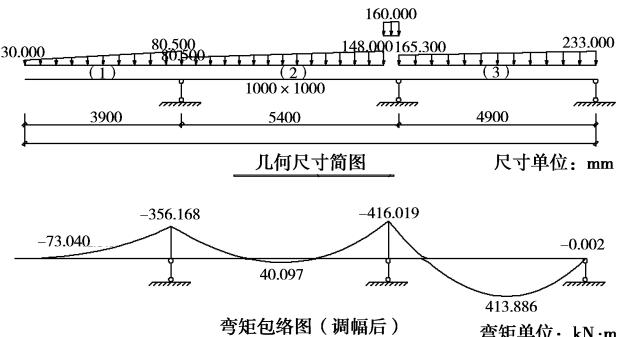


图 7 围护桩正常使用阶段计算结果

Fig. 7 Calculated results of support piles during regular service stage

圆形受弯构件截面抗裂计算, 目前的混凝土规范尚无明确的计算公式, 因此考虑参考上海市地基规范^[3](条文说明 7.2.11 条) 考虑抗拔桩钢筋锈蚀后计算强度的方法进行桩墙合一围护桩在使用阶段的耐久性计算。考虑钢筋单面锈蚀速度 $0.03 mm/a$ (参考 7.1.4 条钢管桩锈蚀速度上限), 并按设计使用年限 100 年考虑, 即考虑钢筋单面锈蚀为 $3 mm$, 双面锈蚀 $6 mm$, 进行钢筋截面折减后的强度计算。经验算在以上弯矩、剪力计算值下, 考虑钢筋锈蚀后的截面面积完全满足结构正常使用的要求。

b) 地下室外墙正常使用阶段计算

地下室外墙按多跨连续梁分析, 主要技术难点在于如何考虑地下室外墙承担的荷载, 目前考虑为止水帷幕失效时, 地下水通过桩缝渗入直接作用于地下室外墙, 而土体仍作用于围护桩外侧, 因此考虑地下室外墙的正常使用阶段作用荷载为全部水压力与部分静止土压力 (按桩墙刚度分配)。

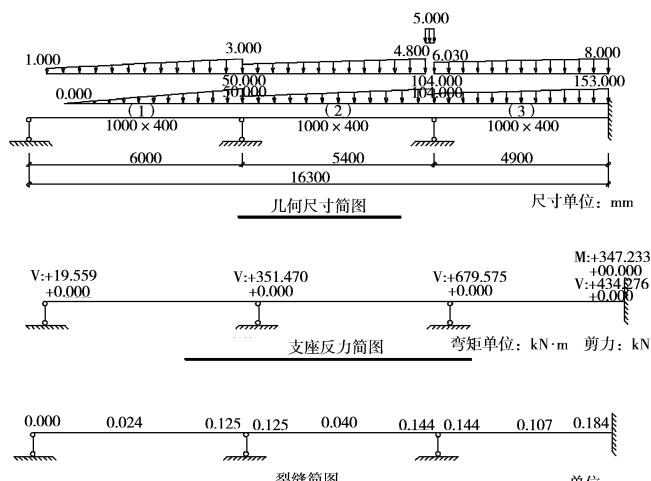


图 8 地下室外墙正常使用阶段荷载计算结果

Fig. 8 Calculated results of basement external walls during regular service stage

(4) 抗震工况计算

综合国内外抗震研究方法及相关规范对地震作用的计算方法, 并参考相关的地下结构抗震设计方法, 拟采用简化的拟静力法进行抗震设计。拟静力法将随时间变化的地震作用或者地层位移用等效静荷载或者静地层位移代替, 并采用静力计算模型分析地震作用下结构内力。

根据各类规范的综合比较, 包括适用条件、计算假定和公式的取值, 在地下结构抗震设计中, 地震作用主要考虑为结构的水平惯性力和地震时的动土压力两个方面, 其中水平惯性力的分布模式以及计算方法参考日本规范《地震力に対する建築物の基礎の設計指針》, 地震时的动土压力则采用国家规范《水运工程抗震设计规范》(JTJ—225—98), 这两本规范考虑的地震作用因素、使用条件以及计算假定等内容相对其他规范, 更适用于地下结构的抗震设计。地震土压力计算公式如下:

$$E_{an} = (e_{an1} + e_{an2}) h_n / 2 \quad , \quad (1)$$

$$e_{an1} = \left(q + \sum_{i=0}^{n-1} \gamma_i h_i \right) K_{an} - 2c_n K_{acn} \quad , \quad (2)$$

$$e_{an2} = \left(K_q q + \sum_{i=0}^n \gamma_i h_i \right) K_{an} - 2c_n K_{acn} \quad . \quad (3)$$

式中 q 地面均布荷载标准值; γ_i 为第 i 层土的重度, 水下采用浮重度; h_i 为第 i 层土的厚度; c_n 为第 n 层土的黏聚力标准值。

水平地震惯性力 P 在 $20 m$ 以上取 $P_1=0.1W/A$, $20 m$ 以下取 $P_2=0.05W/A$ 。其中 W 为结构的自重 (单位 kN), A 为地震荷载的作用面积。

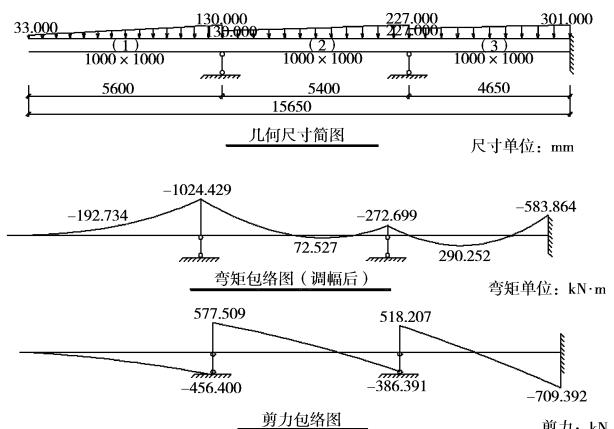


图 9 围护桩抗震工况下计算结果

Fig. 9 Calculated results of support piles under earthquake mode

抗震工况计算模型仍采用与正常使用阶段一致的多跨连续梁模型, 围护桩与地下室外墙的作用荷载仍按正常使用阶段下的分担模式, 即围护桩考虑止水帷幕有效时全部地震土压力、水压力与惯性力全部作用于围护桩; 而地下室外墙则考虑止水帷幕失效的情况。

下, 承担全部的水压力与部分土压力和部分的惯性力。在此计算模式下验算地下室外墙与围护桩的强度是否满足要求, 对抗震工况下的耐久性不作验算。

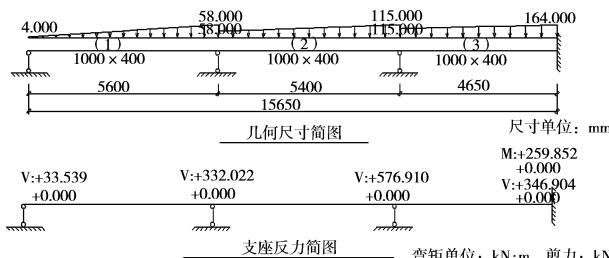


图 10 地下室外墙抗震工况下计算结果

Fig. 10 Calculated results of basement external walls under earthquake mode

抗震工况下围护桩最大弯矩值为 $1487 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 最大剪力设计值为 $1028 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 均小于围护阶段内力计算值。地下室外墙内力均满足强度要求。因此根据简化分析模型计算结果, 抗震工况不作为控制工况。

2 “桩墙合一”施工与测试

“桩墙合一”考虑围护桩除作为基坑开挖阶段的挡土结构外, 尚需在正常使用阶段继续利用作为侧向永久支撑结构的一部分, 因此除常规的灌注桩施工与检测要求外, 尚应结合作为永久结构的工程桩与地下室外墙的相关施工与检测要求进行。

2.1 “桩墙合一”围护桩施工要求

(1) 根据《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008), 围护桩混凝土强度等级不低于 C35, 最大水胶比 0.5。围护桩混凝土相关配比与参数尚应满足《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008) 的相关规定。

(2) 根据《地下工程防水技术规范》(GB 50108—2008), 采用防水混凝土, 并根据相应的地下室埋深选择相应的抗渗等级。

(3) 对于“桩墙合一”围护桩的施工尤为重要的是垂直度偏差控制要求, 围护桩垂直度偏差较大后可能会影响到今后地下室防水及地下室外墙等的空间。围护桩孔垂直度偏差不宜超过 $1/200$, 考虑到常规的钻孔灌注桩施工机械垂直度控制难度较高, 应采用旋挖设备进行灌注桩施工。根据目前的实施情况来看, 本工程围护桩采用 FR 福田雷沃 FR622C 旋挖钻机, 其最大扭力为 $220 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 钻孔钻速 $7\sim22 \text{ rpm}$, 最大加压 180 kN, 最大起拔力 200 kN。围护桩的垂直度根据开挖以及检测情况, 垂直度均控制在 $1/200$ 以内。

2.2 “桩墙合一”围护桩检测与监测

(1) 除采用常规制作混凝土试块方法检验混凝土

强度外, 在围护桩施工完成后, 桩身尚应采用超声波检测桩身混凝土质量, 实施超声波检测的围护桩数量不低于总桩数的 10%, 检测数量参考上海地基规范关于“两墙合一”地下连续墙的检测数量要求。

(2) 围护桩达到强度后应进行低应变动测, 检测数量 100%, 低应变检测数量参考上海市地基规范关于抗拔桩的检测数量要求(考虑围护桩作为抗弯构件更加接近于抗拔桩的构件受力状态)。

(3) 灌注桩成孔结束后灌注混凝土之前, 应对已成孔的中心位置、孔深、孔径、垂直度、孔底沉渣厚度进行检测, 检测数量 100%。其中第三方检测数量不低于总桩数的 10%。

(4) 针对桩墙合一的构造与受力模式, 对地下室外墙、围护桩的应力, 水土压力等进行一系列的监测工作, 监测周期自基坑开挖到地下结构施工完成后。

目前本基坑工程基坑开挖至基底并进行基础底板的施工, 下图为围护桩间挂网喷浆实施完成后的基坑实景。



图 11 工程实施现状

Fig. 11 Current construction situation of project

3 结 论

(1) 考虑围护桩与地下室外墙共同作用的“桩墙合一”技术可减薄地下室外墙的厚度、减少基坑的开挖面积, 相对于目前量大面广的考虑基坑围护排桩仅作为临时结构的工程, “桩墙合一”有利于建筑节能和可持续发展的基坑支护结构设计, 具有广阔的应用前景和重大的社会经济效益。

(2) “桩墙合一”设计考虑采用多道柔性防水以及一道刚性防水, 满足规范要求的建筑防水作法。由于防水保温层在地下室外墙结构之前施工, 考虑在各层地下室楼板与底板位置设置有效的传力构造, 确保桩在侧向的支座条件。

(3) “桩墙合一”的设计计算应综合考虑围护开挖阶段、正常使用与抗震三个工况的计算, 取计算的较大值进行相应的强度、裂缝验算。

(4) “桩墙合一”围护桩作为永久使用的构件提出高于常规围护桩相应的施工与检测要求, 应采用旋

挖成孔设备施工，严格控制垂直度。

(5) 通过“桩墙合一”的工程应用，针对地下室外墙、围护桩的应力，水土压力等进行一系列的监测工作，后期根据现场实测数据进一步完善“桩墙合一”技术的理论研究与设计，为形成“桩墙合一”技术整套的规范设计方法、施工与检测要求提供技术依托。

(6) 下阶段尚需结合现场实测数据对“桩墙合一”的荷载分担模式、共同作用受力机理进行深入研究，并进一步考虑利用围护桩作为主体结构工程桩使用^[4]。

参考文献：

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation

engineering manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))

- [2] DG/TJ08—61—2010 上海市工程建设规范基坑工程技术规范[S]. 上海, 2010. (DG/TJ08—61—2010 Technical Code for Excavation Engineering[S]. Shanghai, 2010. (in Chinese))
- [3] DGJ08—11—2010 上海市工程建设规范地基基础设计规范[S]. 上海, 2010. (DGJ08—11—2010 Foundation design code[S]. Shanghai, 2010. (in Chinese))
- [4] 左人宇. “一桩三用”技术与实践[D]. 杭州: 浙江大学岩土工程研究所, 2001. (ZUO Ren-yu. The art of “one pile three uses” and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)