

文章编号:1673-2049(2017)02-0119-08

支护桩与地下主体结构相结合的永久支护结构

李连祥^{1,2}, 刘 兵^{1,2}, 李先军^{1,2}

(1. 山东大学 基坑与深基础工程技术研究中心, 山东 济南 250061;

2. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要:为研究基坑支护桩在永久工况下的使用价值,对济南市某基坑桩锚支护结构进行永久化设计,通过设置支撑构件将支护桩与地下主体结构相连,形成共同抵抗坑外侧向土压力的永久支护结构体系,借助 PLAXIS-3D 有限元软件对该结构进行全工况模拟。结果表明:永久支护结构可有效减小地下室外墙土压力,基坑外侧土压力主要由支护桩承担,地下室外墙只承担少量回填土体的侧土压力,只需按构造要求设计;换撑之后,桩身弯矩和基坑外地表沉降均有明显增加,对支护桩受力和周边建筑环境均产生不利的影响,对支护桩设计提出更高要求;裂缝计算结果显示支护桩满足现有规范对混凝土结构耐久性的要求,为永久支护结构的推广奠定基础。

关键词:基坑;桩锚支护结构;永久支护结构;耐久性

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Permanent Supporting Structure Combined with Supporting Piles and Underground Structure

LI Lian-xiang^{1,2}, LIU Bing^{1,2}, LI Xian-jun^{1,2}

(1. Foundation Pit and Deep Foundation Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In order to study the application value of foundation pit support piles under permanent working conditions, a permanent design was made for a pile-anchor retaining structure in Jinan. The permanent supporting structure system was formed by the connection of supporting piles and the underground structure through the supporting members, which resisted the lateral pressure of foundation pit. Finite element simulation software PLAXIS-3D was carried out for each working condition of the structure. The results show that the permanent supporting structure can effectively reduce the stress on the basement exterior wall. Most of the soil pressure is born by the supporting piles. The basement walls only burden earth lateral pressure produced by backfill soil, so its design just needs to meet the construction requirement. After changing the support, the bending moment of the piles and the ground settlement around foundation pit are largely increased, thus the supporting piles and surrounding are adversely affected and supporting piles design needs to meet higher requirements. Crack calculation results show that the permanent supporting structure meets the existing specifications for durability of concrete structure, and affords the foundation of the extension of permanent supporting structure.

Key words: foundation pit; pile-anchor retaining structure; permanent supporting structure; du-

收稿日期:2016-09-07

基金项目:济南市科技发展计划项目(2012011145)

作者简介:李连祥(1967-),男,河北唐山人,教授,工学博士,E-mail:jk_doctor@163.com。

rability

0 引言

基坑支护工程是为保证地下结构顺利施工和保证周边环境安全而建造,随着城市的发展,地下结构层数不断增加,与之相对应的基坑深度也不断增大,挡墙式基坑支护结构得到大量应用。现阶段基坑支护结构一般视为临时性施工措施,包括地下室、地下车库在内的主体结构地下部分为永久结构,在主体施工完毕基坑回填后,基坑临时支护结构被遗弃地下,造成资源浪费和环境污染,不利于城市地下空间的可持续发展^[1-3]。

将基坑支护结构应用于建筑地下主体结构建设的研究较少,王卫东等^[4-5]提出主体结构与支护结构相结合的基坑支护技术,并借助工程对软土地区的“两墙合一”和“桩墙合一”支护做法做了相应的理论研究和技术应用,对于充分发挥支护结构的永久价值和实现工程的可持续发展具有重要意义。在非软土地区,桩锚支护结构在基坑支护工程中应用广泛,基于桩锚支护结构的永久支护结构是借助地下梁板构件的水平刚度无限大,通过梁板的水平延伸实现支护桩与地下主体结构相连,形成支护桩、支撑、地下结构相结合,为支护结构永久化提供一种简单可行的方法。

对济南市西客站片区某基坑工程进行桩锚支护结构的永久化设计,通过全工况的 PLAXIS-3D 有限元模拟和数值计算,对永久支护结构在临时支护工况和正常使用工况下的内力和变形做了分析,对支护结构永久化过程中遇到的问题做了探讨。

1 永久支护结构

1.1 永久支护结构简介

永久支护结构是基坑支护工程发展的重要方向,它在传统支护结构的基础上,通过改变地下结构,转变支护结构在工程中的“临时性施工措施”角色,让支护结构作为地下主体结构一部分永久发挥作用。永久支护结构包含多种形式,基于桩锚支护的永久支护结构是通过支撑构件将支护桩和地下室水平结构连接而成。

基坑永久支护结构体系包括临时支护结构、地下主体结构和连接构件三部分(图 1),临时支护结构采用桩锚支护,桩为混凝土灌注桩,主体结构地下部分至少包含 1 层完整地下室,连接构件包括基础

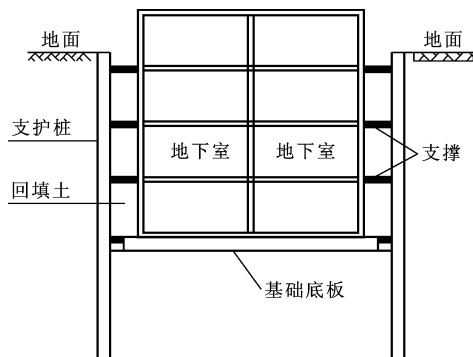


图 1 永久支护结构示意图

Fig. 1 Schematic of Permanent Supporting Structure

底板外伸支撑和梁板外伸支撑,基础底板外伸支撑为素混凝土支撑,两端分别连接基础底板和基坑支护桩;主体结构梁板外伸支撑为钢筋混凝土支撑,两端分别连接地下室外墙与支护桩,借助地下室水平结构为基坑支护桩提供约束力,使基坑支护桩与地下主体结构共同抵抗基坑外岩土侧压力。

1.2 工程实例

某超高层项目位于济南市西客站 CBD 核心区,基坑挖深为-17.1 m,设有 4 层地下室。工程拟建场地内土层主要为第四系覆盖层,上部土层以黄河、小清河冲积成因的黏性土、粉土为主,下部为山前洪积成因的黏性土夹砂土,底部为残坡积的粉质黏土夹碎石及风化岩层,水位埋深约-4.0 m。

基坑采用桩锚支护,支护桩为 $\phi 900@1600$ 的混凝土灌注桩,桩长 25.1 m,桩顶标高-2 m,嵌固深度 8 m,C30 混凝土浇筑,桩内纵向布置 16 根 $\phi 25$ 的 HRB400 型钢筋,保护层厚度取 50 mm,横向布置 $\phi 12@150$ 的 HRB400 型螺旋箍筋,桩顶冠梁宽 900 mm,高 800 mm,顶部埋深-2 m 范围土体采用砌体支护。桩间设置直径 1 100 mm 的高压旋喷止水帷幕,锚索采用旋喷扩大头设计,锚固段直径 500 mm,支护结构剖面见图 2。

工程中支护排桩可按下面公式等效为相同抗弯刚度的地下连续墙,即

$$\frac{1}{12}(d+t)h^3 = \frac{1}{64}\pi d^4 \quad (1)$$

式中: d 为灌注桩直径; h 为地下连续墙厚度; t 为桩间距。

该基坑工程支护排桩可等效为约 600 mm 厚的地下连续墙,其抗弯刚度较大,可通过换撑施工转变为永久支护结构。基坑边缘离市政道路较近,换撑

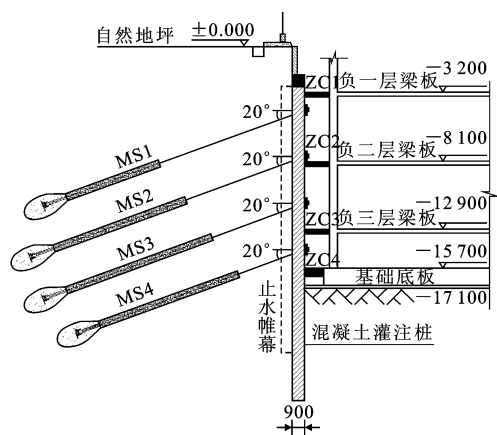


图 2 支护结构剖面(单位:mm)

Fig. 2 Profile of Supporting Structure (Unit:mm)

过程伴随锚索回收施工,消除锚索对地下空间再次开发的影响。基坑永久支护结构的施工过程为:桩锚支护结构施工→换撑施工(锚索回收)→土体回填分层夯实。

1.2.1 桩锚支护结构施工

基坑桩锚支护结构施工过程遵循传统施工方法,支护桩和地下室外墙之间设置外伸支撑,支撑通过腰梁与支护桩相连,支护桩在腰梁作用位置埋设钢板预埋件,腰梁内配筋通过钢板预埋件与支护桩焊接为一体^[6](图 3)。永久支护结构中,支护桩将作为地下主体结构的一部分永久发挥作用,所以对支护桩的施工质量要求更加严格。

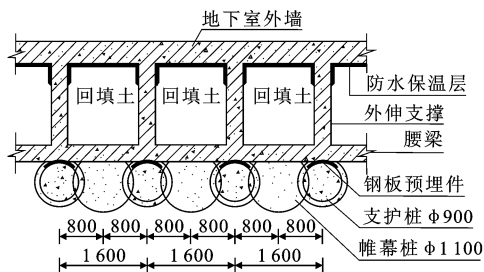


图 3 永久支护结构节点竖向剖面(单位:mm)

Fig. 3 Connection Vertical Profile of Permanent Supporting Structure (Unit:mm)

1.2.2 换撑施工

换撑过程伴随主体结构施工自下而上依次进行,支撑构件本质上是主体结构梁板体系的外伸部分,主体结构外伸支撑为钢筋混凝土支撑,支撑一端通过预留钢筋与地下室梁板构件相连,另一端通过腰梁与支护桩相连;基础底板外伸支撑为素混凝土板状支撑,埋深—17.1 m,支撑两端与基础底板和支护桩通过浇筑连接,不设特殊连接构件。换撑过程伴随锚索回收,在上部结构外伸支撑达到 80% 设

计强度之后方可进行锚索回收施工^[7],对换撑过程所涉及各工况都要进行严格计算。

1.2.3 土体回填

地下主体结构施工结束之后,要依次进行防水保温层施工和土体回填施工。永久支护结构对地下室外墙防水保温层的施工影响较小,可依照传统做法进行,防水层施工过程要加强对外伸支撑节点处的处理;土体回填依照常规做法进行,施工过程尽量减小对支撑构件的影响,回填土体要分层夯实。

1.3 支护结构受力分析

常规做法中,基坑支护结构和地下室外墙分别按临时支护工况和正常使用工况进行受力计算,不考虑支护结构在正常使用工况下的作用。永久支护结构中支护桩既是临时支护结构又是永久支护结构,需对 2 种工况下的受力分别进行分析^[8]。

1.3.1 临时支护阶段

依据支护结构的受力状态,临时支护阶段包括桩锚支护阶段和桩撑支护阶段两部分。

临时支护工况下,坑外岩土侧压力和水压力共同作用于支护桩和止水帷幕组成的挡墙,换撑前,此合力通过预应力锚索传递到坑外深层土体;换撑后,锚索回收,此合力通过腰梁、外伸支撑等构件传递给地下室主体结构,形成“支护桩→外伸支撑→地下主体结构”的传力路径。

1.3.2 正常使用阶段

正常使用阶段,回填土开始发挥作用,形成“支护桩→外伸支撑/回填土→地下主体结构”的复合传力体系。该阶段止水帷幕失效,回填土体水位与坑外保持一致,坑外岩土侧向力主要由支护桩承担,并通过外伸支撑传递给地下主体结构,回填土侧压力及水压力共同作用于地下室外墙^[9],地下室外墙的受力得到较大削弱,永久支护结构发挥作用。

2 PLAXIS-3D 模拟

2.1 永久支护结构 3D 建模

对上述基坑工程永久支护结构的施工过程进行 PLAXIS-3D 模拟,本构关系采用 Schanz 等^[10]提出的 HS(土体硬化)模型,同时考虑剪切硬化和压缩硬化。模型采用截断边界的方法,沿支护面取 8 m 宽的条状土体进行建模,模型长度取 150 m,基坑内外各 75 m,土层厚度取 60 m,土层参数采用岩土工程勘察报告中给出的相关数据,各参数取值见表 1,锚索参数见表 2。考虑地下室梁板构件水平刚度无限大,对地下室外墙与梁板连接处进行位移控制。

表 1 土层参数
Tab. 1 Parameters of Soils

土层 序号	土类名称	厚度/m	埋置深度/m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	有效黏聚力/ kPa	有效内摩 擦角/($^{\circ}$)	割线模量 E_{50}^{ref} /MPa	切线模量 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ /MPa	卸载再加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa
①	填土	3.40	0.0~−3.4	18.0	10	10.0	1.20	1.20	3.60
②	粉质黏土 1	6.20	−3.4~−9.6	19.0	12	33.0	5.52	5.52	16.56
③	粉质黏土 2	2.70	−9.6~−12.3	19.1	13	32.5	5.75	5.75	17.25
④	粉砂	9.40	−12.3~−21.7	19.9	6	31.5	10.46	10.46	31.38
⑤	粉质黏土 3	9.00	−21.7~−30.7	18.6	10	31.5	6.56	6.56	19.68
⑥	粉质黏土 4	12.80	−30.7~−43.5	18.8	8	31.5	6.92	6.92	20.76
⑦	全风化闪长岩	2.00	−43.5~−45.5	18.0	15	45.0	2×10^3	2×10^3	6×10^3
⑧	强风化闪长岩	13.50	−45.5~−59.0	18.8	25	50.0	7×10^3	7×10^3	21×10^3

表 2 预应力锚索参数
Tab. 2 Parameters of Prestressed Anchors

锚索编号	锚固位置/m	入射角/($^{\circ}$)	总长/m	锚固段长/m	预应力锁定值/kN	锚固体直径/mm	配筋型号
MS1	−4.50	20.00	18.00	7.00	350.00	500	3 ϕ 15.2
MS2	−7.80	20.00	19.00	10.00	400.00	500	4 ϕ 15.2
MS3	−11.10	20.00	18.00	11.00	400.00	500	4 ϕ 15.2
MS4	−14.40	20.00	15.50	10.50	400.00	500	4 ϕ 15.2

模型中,外墙厚度取 600 mm,外伸支撑截面为尺寸 300 mm×300 mm 的正方形,混凝土等级均取 C40。模型结构如图 4 所示,模拟过程按实际施工工况分步进行,暂不考虑地下水和地表荷载影响,具体模拟步骤见表 3。

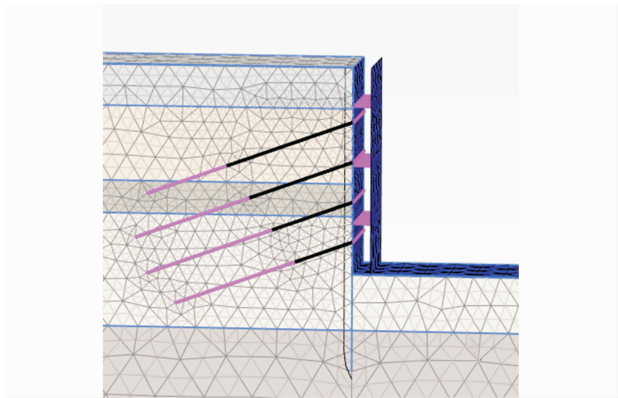


图 4 PLAXIS-3D 模型
Fig. 4 PLAXIS-3D Model

2.2 模拟结果分析

模拟过程分为基坑开挖(STEP1~9)、换撑施工(STEP10~15)及正常使用工况(STEP16)3 个部分。开挖过程即临时桩锚支护结构的施工过程;换撑过程是临时支护结构向永久支护结构的转变过程,即外伸支撑生效与锚索失效的过程,桩体受力状态的改变导致桩身弯矩和位移的变化,进而导致坑外土体状态的改变,因此,对支护结构在换撑过程的性状研究是永久支护结构设计的一个重要方面。

表 3 基坑施工步骤
Tab. 3 Construction Steps of Foundation Pit

步骤	施工项目
STEP1	激活支护桩,第 1 次土体开挖,挖深−5.000 m
STEP2	激活第 1 道预应力锚索(MS1,−4.500 m)
STEP3	第 2 次土体开挖,挖深−8.300 m
STEP4	激活第 2 道预应力锚索(MS2,−7.800 m)
STEP5	第 3 次土体开挖,挖深−11.600 m
STEP6	激活第 3 道预应力锚索(MS3,−11.100 m)
STEP7	第 4 次土体开挖,挖深−14.900 m
STEP8	激活第 4 道预应力锚索(MS4,−14.400 m)
STEP9	第 5 次土体开挖,挖深−17.100 m
STEP10	激活基础底板、三层地下室外墙以及第 3、4 道外伸支撑(ZC3,ZC4)
STEP11	冻结第 4 道预应力锚索(MS4)
STEP12	激活二层地下室外墙、第 2 道外伸支撑(ZC2)
STEP13	冻结第 3 道预应力锚索(MS3)
STEP14	激活一层地下室外墙、第 1 道外伸支撑(ZC1)
STEP15	冻结第 1、2 道预应力锚索(MS1,MS2)
STEP16	激活回填土体

2.2.1 支护结构内力分析

换撑施工完成后,外伸支撑取代预应力锚索提供支护桩所需的水平约束力,此过程是桩身应力再平衡过程。桩身约束作用位置及约束力发生改变,支护桩弯矩随之发生变化。

支护桩弯矩分布受换撑施工影响较大。预应力锚索是主动受力,外伸支撑是被动受力,因此,各层锚索轴力差异较小,外伸支撑轴力差异较大。表 4

为预应力锚索内力,表 5 为外伸支撑内力。对比表 4 和表 5 中数据可知,最上层外伸支撑内力远小于锚索内力,最下层外伸支撑内力远大于锚索内力。图 5 为换撑前后桩身弯矩曲线。由图 5 可知,相对于桩锚支护状态,换撑后支护桩上部弯矩明显减小,下部弯矩明显增大,桩-撑支护状态下的最大弯矩约为桩-锚支护状态下的 1.5 倍,土体回填之后的桩身弯矩相对桩-撑支护状态略有减小,但变化并不明显。综上可知,支护桩在桩-撑临时支护工况下处于最不利受力状态,换撑施工对支护桩设计提出更高要求,桩锚支护结构永久化设计需综合考虑各工况以便对支护桩设计做出校核与改进。

表 4 预应力锚索内力

Tab. 4 Internal Forces of Prestressed Anchors

锚索编号	锚索位置/m	轴力/kN
MS1	-4.500	369.86
MS2	-7.800	447.74
MS3	-11.100	457.63
MS4	-14.400	452.73

表 5 外伸支撑内力

Tab. 5 Internal Forces of Outstretch Supports

支撑编号	支撑位置/m	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
ZC1	-3.200	-134.32	29.63
ZC2	-8.100	-582.32	23.78
ZC3	-12.900	-915.63	51.97

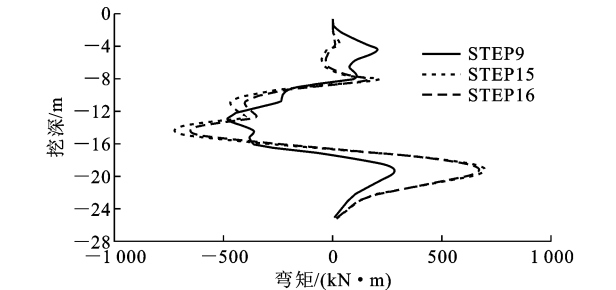


图 5 换撑前后桩身弯矩曲线

Fig. 5 Bending Moment Curves of Pile Before and After Support Replacement

2.2.2 支护结构变形分析

基坑支护工程设计过程需要做好变形控制设计,变形预测分析是基坑变形控制的核心内容之一,基坑支护方案的设计过程需要较准确地预测基坑的变形及其对周边环境的影响,其中,基坑支护结构水平位移控制和基坑外地表沉降控制对基坑支护结构设计具有重要意义^[11-12]。

永久支护结构在基坑开挖过程与临时桩锚支护结构中并无差异,主要区别在换撑过程。

桩身水平位移曲线如图 6 所示。由图 6 可知:基坑开挖结束(STEP9)时,支护桩呈现复合式变形模式^[13],支护桩的最大位移出现在挖深-13 m 处,最大位移约为 28.5 mm;换撑施工将地下室梁板构件水平刚度视为无限大,对地下室外墙与梁板结构接触位置分步进行位移固定,换撑施工是桩身应力再平衡的过程,此过程中外伸支撑作用处的桩身位移基本不再发生变化,桩顶位移和桩底位移明显减小,桩顶位移减少 0.5 mm,桩底位移减少 2.3 mm。

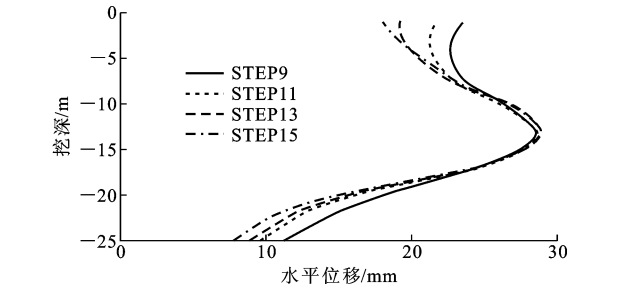


图 6 桩身水平位移曲线

Fig. 6 Horizontal Displacement Curves of Pile

基坑外地表沉降量曲线如图 7 所示。由图 7 可知:基坑开挖结束(STEP9)时,基坑外地表的沉降主要发生在坑外 2 倍挖深范围内,最大沉降量发生在坑外 17 m 位置,最大沉降量约为 13.5 mm,沉降曲线与 Hsieh 等^[14]对凹槽型的研究结果一致;换撑施工对基坑外地表沉降有明显影响,由于该过程支护桩位移变化较小,所以,是锚索回收导致土体挤压作用消失进而增加了土体沉降,其影响范围主要集中在预应力锚索锚固范围内。换撑施工过程中,预应力锚索锚固范围内土体的沉降量明显增大,且最大沉降点位置有向坑边靠近的趋势,换撑前后最大沉降量增加 3.5 mm。

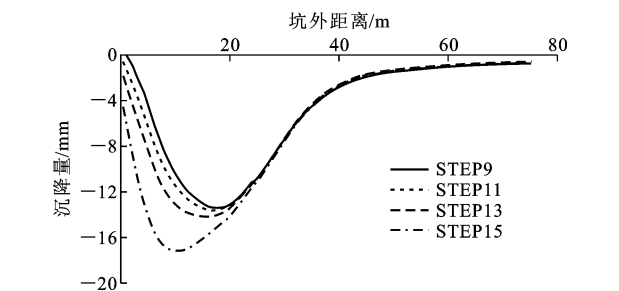


图 7 基坑外地表沉降量曲线

Fig. 7 Surface Settlement Curves Outside Foundation Pit

2.2.3 地下室外墙内力分析

对于普通地下室,正常使用工况下,作用在地下室外墙上的水平荷载包括侧向土压力、地下水压力以及地面活荷载引起的侧压力,对于人防地下室还

要考虑水平人防等效静载。该工程只对地下室外墙的侧向土压力作用进行分析。

不同工况下地下室外墙受力差异较大,如图 8 所示,其中 line1 为永久支护结构在基坑回填锚索失效后永久工况下作用在地下室外墙上的土压力; line2 为临时桩锚支护结构在基坑回填且锚索失效后作用在地下室外墙的土压力; line3 为无支护桩情况下作用在地下室外墙的土压力; line4 为静止土压力计算值。由图 8 可知,永久支护结构在基坑回填锚索失效后的永久工况下,地下室外墙受力随挖深关系不大,土压力值为 10~20 kPa,与传统基坑临时支护工程中地下室外墙的土压力分布并不相符。传统临时支护结构在基坑回填地下室外墙直接承受基坑外侧半无限土体产生的土压力,通常按静止土压力计算;永久支护结构是复合型受力形式,基坑外侧土压力由支护桩承担并通过外伸支撑传递给地下室水平结构,与地下室外墙不产生直接作用,地下室外墙只需承担支护桩和地下室外墙之间有限回填土体的侧压力^[15]。

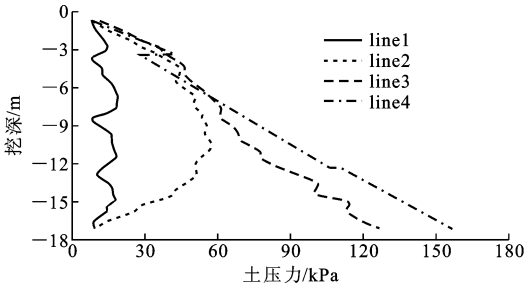


图 8 正常使用工况下地下室外墙土体压力
Fig. 8 Soil Pressures on Basement Wall During Regular Service Stage

永久支护结构中,支护桩和地下室外墙之间的有限回填土体土压力分布与传统半无限土体土压力分布并不同,可对该有限回填土体做单独分析,如图 9 所示。图 9(a)为回填土体在竖直方向上的土压力分布云图,由于外伸支撑的存在,支撑位置处回填土体在竖直方向上存在明显的土拱效应^[16] [图 9(b)],相邻支撑的肋部土压力明显减小,回填土体被外伸支撑沿着竖直方向分割为 4 层,层间作用被大大削弱,每层土体可近似视为单独存在,层内侧向土压力自上而下近似呈三角形分布(图 8),与经典土压力相符,在该土压力作用下,地下室外墙只需满足构造要求。

2.3 耐久性校核

永久支护结构作为主体结构一部分,需要满足主体结构耐久性的要求。永久支护结构的耐久性分

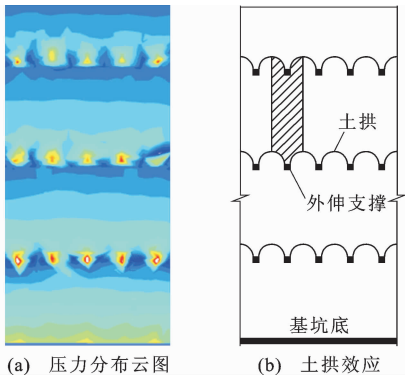


图 9 回填土体竖向土压力分布云图与土拱效应
Fig. 9 Nephogram of Backfill Soil Pressure in Vertical Direction and Soil Arching Effect

析主要是针对地下室外墙、支护桩和外伸支撑三部分,其中,地下室外墙和外伸支撑为矩形截面构件,可按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[17]中关于矩形截面钢筋混凝土受弯和偏心受压构件在长期作用影响的最大裂缝宽度 ω_{\max} 计算公式进行计算,即

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \varphi \frac{\sigma_s}{E_s} (1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (2)$$

式中: α_{cr} 为构件受力特征系数; φ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; σ_s 为按标准永久组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉普通钢筋应力或按标准组合计算的预应力混凝土构件纵向受拉钢筋等效应力; E_s 为钢筋弹性模量; c_s 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离; d_{eq} 为受拉区纵向受拉钢筋的等效直径; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率。

永久工况下地下室外墙只承受有限回填土体的土压力,无地下水作用时只需要按照构造要求进行设计,有地下水作用时着重考虑地下水压力的影响;由表 5 可知,外伸支撑最大弯矩为 51.97 kN·m,最大轴力为 915.63 kN,外伸支撑内力以轴向压力为主,所以,耐久性设计的关键在于支护桩在受弯条件下的裂缝控制。

支护桩在不同工况下的受力变化较大,由图 5 可知,桩撑支护工况(STEP15)下支护桩弯矩最大。土体回填后,有限回填土体对支护桩弯矩影响较小,支护桩依旧承受较大弯矩。支护桩作为主体结构一部分,可按结构设计规范中关于裂缝的要求进行裂缝控制,《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151—2011)^[18]中第 6.4 节对圆柱形混凝土构件在受拉、受弯和偏心受压情况下的裂缝宽度计算做了明确规定,具体计算如下:

纵向钢筋配筋率 ρ 为

$$\rho=\frac{A_s}{\pi r^2}=0.012\ 3\tag{3}$$

式中: A_s 为受拉区纵向钢筋截面面积; r 为圆形截面半径。

受弯工况下,圆形截面构件受拉纵向钢筋对最大裂缝开展的贡献系数 β 为

$$\beta=0.4+2.5\rho=0.430\ 8\tag{4}$$

根据

$$\gamma_1=\gamma-2\alpha_s=325\ \text{mm}\tag{5}$$

得圆形截面纵向受拉钢筋的有效配筋率 ρ_{te} 为

$$\rho_{te}=\frac{\beta A_s}{\pi(r^2-r_1^2)}=0.011\ 1\tag{6}$$

式中: r_1 为圆形截面半径与钢筋中心到构件边缘 2 倍距离的差值; α_s 为钢筋中心到构件边缘的距离。

纵向受拉钢筋应力为

$$\sigma_s=M_y/[\pi(0.45+0.26\frac{r_s}{r})A_sr]\tag{7}$$

式中: r_s 为纵向普通钢筋中心所在圆周的半径。

表 6 给出了不同工况下支护桩的最大弯矩值 M_y ,将其分别代入公式(7),得到纵向受拉钢筋应力并将其代入公式(8),得到支护桩最大裂缝宽度。

$$\omega_{\max}=\alpha_1\alpha_2\alpha_3\frac{\sigma_s}{E_s}\frac{c+d_s}{0.28+10\rho}\tag{8}$$

式中: α_1 为构件受力特征系数,支护桩视为受弯构件,取 1.0; α_2 为钢筋表面形状的影响系数,带肋钢筋取 1.0; α_3 为准永久组合或重复荷载影响的系数,按施工期可取 1.0; c 为最外排纵向受拉钢筋保护层厚度; d_s 为钢筋直径。

支护桩裂缝计算结果见表 6。

表 6 支护桩裂缝计算结果

Tab. 6 Calculated Results of Support Piles Cracks

工况	支护桩位置/m	最大弯矩/(kN·m)	裂缝宽度/mm
桩锚临时支护(STEP9)	-12.9	488	0.074
桩撑临时支护(STEP15)	-14.4	754	0.113
基坑回填(STEP16)	-14.7	679	0.102

由表 6 可知,支护桩裂缝最大值发生在换撑结束(STEP15)时,最大裂缝宽度为 0.113 mm,基坑回填(STEP16)之后支护桩裂缝宽度略有减小。依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),支护桩所处环境类别取为二类,裂缝限值取 0.2 mm,表 6 各计算结果均满足要求。

3 结 语

(1)基坑支护桩与地下主体结构相结合的永久

支护体系由地下室主体结构、基坑支护桩以及两者之间的支撑构件组成,支护桩作为主体结构一部分永久发挥作用,并可实现预应力锚索的回收,具有较好的经济、环境效益。

(2)PLAXIS-3D 模拟结果显示,换撑过程中支护桩水平位移变化较小,桩身弯矩明显增大,支护桩设计需满足换撑前后各工况的要求;锚索回收导致基坑外地表沉降增加,对周边建筑环境产生不利影响。

(3)永久支护结构可有效减小地下室外墙所受土压力。永久支护工况下,受竖向土拱作用影响,回填土体在外伸支撑位置出现分层,层间作用大大削弱,回填土体侧向压力明显减小,外墙设计只需满足构造要求。

(4)永久支护结构耐久性设计的关键是支护桩的裂缝控制,计算证明,各工况下支护桩裂缝宽度均小于 0.2 mm,满足现有规范对二类环境中混凝土结构耐久性的要求。

(5)永久支护结构将基坑支护结构与地下主体结构设计相联系,有助于推动城市地下空间建设朝着集约化方向发展,但相关作用机理和计算方法还有待完善,具体表现需借助工程进行检验。

参考文献:

References:

[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):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(S):303-308.

[2] 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.

[3] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].
JGJ 120—2012, Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations [S].

[4] 王卫东,翁其平. “两墙合一”设计关键技术问题研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005,1(4):574-578.
WANG Wei-dong, WENG Qi-ping. Some Key Techniques for the Design of Dual-purpose Diaphragm Wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and

- Engineering, 2005, 1(4): 574-578.
- [5] 徐中华, 邓文龙, 王卫东. 支护与主体结构相结合的深基坑工程技术实践[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 607-610.
- XU Zhong-hua, DENG Wen-long, WANG Wei-dong. Construction Technique of a Deep Excavation Supported with Substructure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 607-610.
- [6] 左人宇. “一桩三用”技术与实践[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- ZUO Ren-yu. The Art of “One Pile Three Uses” and Its Application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [7] 朱小军. 软土深基坑工程控制拆撑变形的换撑设计方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增1): 256-260.
- ZHU Xiao-jun. Design of Support Replacement for Controlling Deformation Caused by Support Dismantling of Deep Foundation Pits in Soft Ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 256-260.
- [8] 王卫东, 王建华. 深基坑工程中主体工程地下结构与支护结构相结合的研究与实践[J]. 工业建筑, 2004, 34(增): 69-79.
- WANG Wei-dong, WANG Jian-hua. Study and Practice of Deep Excavation Supported with Substructure[J]. Industrial Construction, 2004, 34(S): 69-79.
- [9] 王磊, 杨孟锋, 苏小卒. 考虑围护结构作用的地下室外墙设计[J]. 江西科学, 2010, 28(2): 229-230, 249.
- WANG Lei, YANG Meng-feng, SU Xiao-zu. Design of Basement Exterior Wall with Consideration of Enclosure Structure[J]. Jiangxi Science, 2010, 28(2): 229-230, 249.
- [10] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The Hardening Soil Model-formulation and Verification [C]//BRINKGREVE R B J. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Amsterdam: Balkema A A, 1999: 281-296.
- [11] 张钦喜, 孙家乐, 刘柯. 深基坑锚拉支护体系变形控制设计理论与应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 161-165.
- ZHANG Qin-xi, SUN Jia-le, LIU Ke. Principle and Application of Deformation Control Design for Retaining Structure in Deep Excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 161-165.
- [12] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- XU Zhong-hua. Deformation Behavior of Deep Excavations Supported by Permanent Structure in Shanghai Soft Deposit [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [13] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程施工设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- GONG Xiao-nan, GAO You-chao. Handbook for Design and Construction of Deep Excavation Pits[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.
- [14] HSIEH P G, OU C Y. Shape of Ground Surface Settlement Profiles Caused by Excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004-1017.
- [15] 马平, 秦四清, 钱海涛. 有限土体主动土压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 3070-3074.
- MA Ping, QIN Si-qing, QIAN Hai-tao. Calculation of Active Earth Pressure for Limited Soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3070-3074.
- [16] 钟小春. 基坑支护桩间土体拱效应理论及有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增): 1501-1504.
- ZHONG Xiao-chun. Soil Arching Between Protecting Piles of Foundation Pits and FEM Analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S): 1501-1504.
- [17] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [18] JTS 151—2011, 水运工程混凝土结构设计规范[S].
- JTS 151—2011, Design Code for Concrete Structures of Port and Waterway Engineering[S].