

采用支撑后拆法的上海某超深基坑围护结构设计与分析

唐 军

(上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

摘 要: 以上海地区某超深基坑工程为背景, 介绍了基坑围护设计中支撑后拆法的应用。对设计及施工中存在的难点进行了分析, 并针对性的给出处理、解决方案。对比分析了数值模拟、理论计算结果与工程实测数据, 结果较为接近, 监测数据无超过报警值情况发生, 基坑开挖对周边环境的影响满足规范要求。采用支撑后拆法的基坑围护设计在本基坑工程实践中取得了良好的实施效果, 值得在同类工程设计、施工中借鉴和参考。

关键词: 后拆支撑; 深基坑; 围护结构; 设计与分析

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0451-05

作者简介: 唐 军(1971-), 男, 上海人, 高级工程师, 从事岩土工程设计、管理工作。E-mail: xj_zhu0801@163.com。

Design and analysis of retaining structures for a super-deep excavation in Shanghai using late-dismantling support

TANG Jun

(Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200011, China)

Abstract: For a super-deep excavation in Shanghai, the application of late-dismantling support in the design of retaining structures is introduced. The difficulties of the design and construction are analyzed, and the relevant solutions are given. A comparison among numerical simulations, theoretical results and engineering data shows that the results are close, and the monitoring data do not exceed the warning values. The influences of pit excavation on the surrounding environment can meet the requirements of specification. The design method is successfully used in this project and achieves satisfactory effects. It will provide some reference for the design and construction of similar projects.

Key words: late-dismantling support; deep excavation; retaining structure; design and analysis

1 概 况

1.1 工程概况

拟建建筑物位于上海市浦东新区小陆家嘴核心区内, 由一栋 22 层高层办公楼及 4 层裙房、4 层地下车库组成, 主体结构采用框架-核心筒结合桩筏基础形式。基坑短边宽约 55 m, 长边长约 105 m, 基坑总面积约 5000 m², 围护总长度约 295 m。基坑挖深主楼区域为 20.9 m, 车库区域为 19.9 m, 局部电梯井等落深区最深为 23.75 m。基坑鸟瞰照片如图 1 所示。



图 1 基坑鸟瞰照片

Fig. 1 Bird's view of excavation

1.2 周边环境

拟建场地位于陆家嘴金融贸易区核心地段, 东北侧临东园路, 路下分布有煤气、污水等较多市政地下管线, 最近管线距离地下室外墙约 3.5 m; 东南侧临近上海海洋水族馆, 距离地下室外墙约 31.5 m; 西南侧接浦东公园, 公园内临近基坑侧为运营中陆家嘴雨水泵站(混合结构, 地上 2 层, 浅基础), 泵站下沿基坑平行方向分布有直径 1600 mm 的玻璃钢夹砂管, 距离地下室外墙约 12.0 m; 东北侧临滨江大道及滨江公园绿化带, 黄浦江距离地下室外墙距离约 45.0 m。工程位于市中心, 开挖较深, 且周边临近河道、市政道路及已建建筑物, 环境保护要求相对较高。场地周边环境如图 2 所示。

2 工程地质条件

2.1 工程地质

收稿日期: 2012-08-23

本工程场地内 19.0 m 以上分布以粉质黏土为主的多个软土层,具有高含水率、大孔隙比、低强度、高压缩性等不良地质特点。第②₀层江滩土(黏质粉土)为上海邻近黄浦江区域常见分布土层,该土层为新近沉积,固结历史不长,土质不均匀;第④层淤泥质黏土为上海地区典型的最软弱、压缩性最大的土层^[1],以上土性较差土层均处于基坑开挖范围之内。19.0~40.5 m 深度主要分布有工程性质稍好的第⑤层粉质黏土;40.5~60.5 m 为土体力学性质较好,常作为持力层的第⑦层粉(细)砂。场地土的物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 场地土的物理力学性质参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of field soils						
土层编号	土层名称	埋深/m	重度/(kN·m ⁻³)	φ/(°)	c/kPa	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
① ₁	填土	4.0	18.0	10.0	10	—
① ₃	江滩土	13.5	18.2	28.0	5	1.0×10 ⁻⁴
④	淤泥质黏土	19.0	16.7	10.5	13	1.0×10 ⁻⁶
⑤ ₁	粉质黏土	31.5	18.1	13.4	14	8.0×10 ⁻⁶
⑤ ₃	粉质黏土	37.5	18.4	18.0	18	1.0×10 ⁻⁵
⑤ ₄	粉质黏土	40.5	19.8	16.0	37	5.0×10 ⁻⁶
⑦ ₂₋₁	粉砂	47.0	18.8	32.5	2	—

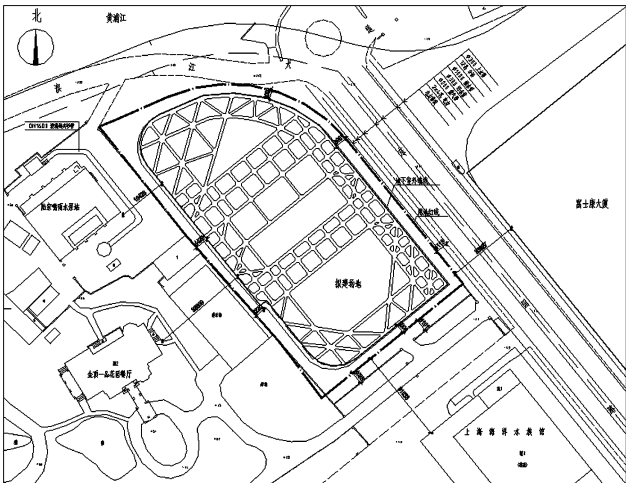


图 2 周边环境总图

Fig. 2 Sketch of surrounding environment

2.2 水文地质

本场地浅层地下水属潜水类型,主要补给来源为大气降水和地表径流,潜水位埋深一般为 0.3~1.5 m,设计计算按上海市常年平均地下水位 0.5 m 考虑。另外场地深层埋藏有承压水,对本工程有影响的主要为第一承压含水层⑦₂粉(细)砂层。根据勘察报告,场地内第⑦层含水层顶板最浅埋深为 39.80 m,抽水试验实测承压水头埋深 6.1~6.15 m。

3 围护结构设计

3.1 总体设计方案

工程地处中心城区,周边环境保护要求较高,开

挖深度较大,施工影响范围较大,且根据建设单位进度计划安排,本项目地下结构部分(含桩基)施工总工期仅为 8 个月,工期极为紧张。因此,如何在保证基坑安全的前提下,以变形控制为原则保护周边环境且满足建设单位进度计划要求成为本工程总体方案面临的主要问题。根据本基坑开挖深度,结合周边环境、地质条件等,从安全、经济的角度出发,结合施工工艺、施工周期等因素,本基坑采用板式支护结合四道临时支撑后拆的顺做法总体设计思路,即基坑围护体采用“两墙合一”地下连续墙,坑内设置四道临时钢筋混凝土水平支撑,且在完成地下室顶板结构后,同步进行上部主体结构施工的同时,后拆除地下室临时支撑系统。

3.2 围护结构设计

地下连续墙既作为基坑开挖阶段的挡土结构和止水帷幕,又作为正常使用阶段结构外墙的一部分。围护结构的尺寸需确定两个方面:墙厚和墙深。影响着墙厚和墙深的主要因素是:开挖深度、周边环境保护要求、地质情况。墙厚主要有两个控制条件:强度和变形。墙深的控制条件较多,按上海市基坑工程技术规范,需满足:整体稳定性、墙底抗隆起稳定性、坑底抗隆起稳定性、抗倾覆稳定性、抗管涌稳定性。

对于本工程,采用 1000 mm 厚地下连续墙,开挖深度 20.9 m,插入深度 21.1 m,插入比约为 1:1,有效墙深 40.0 m 可满足强度、变形及稳定性要求。围护结构剖面图如图 3 所示。

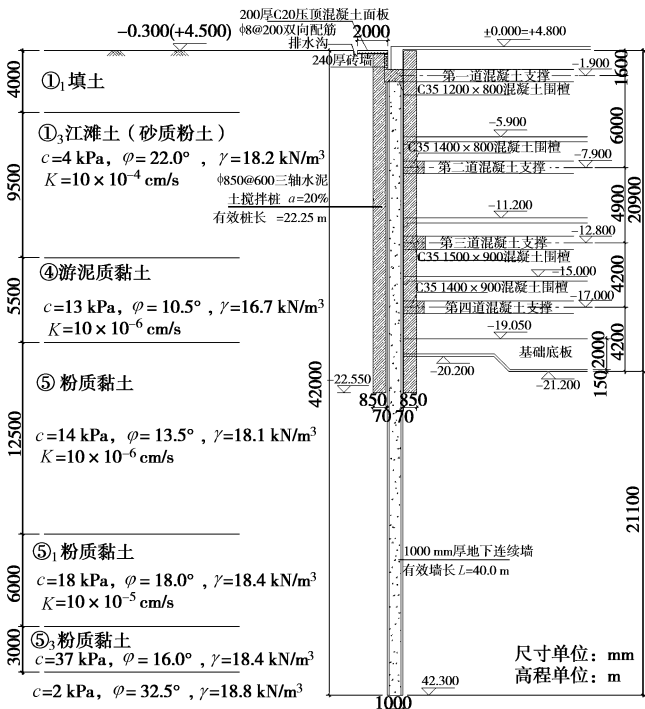


图 3 围护结构剖面图

Fig. 3 Profile of retaining structure

(1) 墙身设计

两墙合一的地下连续墙采用防水混凝土, 防水等级为 P8, 混凝土设计计算强度为水下 C35, 为提高地墙竖向承载力, 墙内预埋注浆管, 进行墙底注浆。施工时地墙内部需预埋超声波管, 以检查墙身质量。

(2) 接头设计

地下连续墙的接头可分为两大类: 施工接头和结构接头。施工接头是指地下连续墙槽段和槽段之间的接头, 施工接头连接两相邻单元槽段; 结构接头是指两墙合一地下连续墙与主体结构构件(底板、楼板、墙、梁、柱等)相连的接头, 通过结构接头的连接, 地下连续墙与主体地下结构连为一体, 共同承担上部结构的荷载。接头设计需满足主体地下结构受力及变形要求, 并设置可靠的抗渗和止水措施。

a) 施工接头

本工程中地下连续墙施工接头采用圆形锁口管柔性接头。为处理好使用柔性接头产生的接头防渗和墙体的整体性问题, 设计中采取一定的构造措施, 诸如在地下连续墙顶设置顶圈梁、施工接头处设置扶壁柱、底板内设置底环梁等措施, 以确保正常使用阶段的防水和受力性能。

b) 结构接头

本工程中结构底板和地下连续墙的连接均采用刚性连接。通常采用在地下连续墙内预埋接驳器, 底板钢筋通过钢筋接驳器全部锚入地墙作为刚性连接。地下室楼板和地墙的连接采用预埋钢筋型式。地下室楼板通过边环梁与地墙连接, 楼板钢筋进入边环梁, 边环梁通过地墙内预埋钢筋的弯出和地墙相连。另外, 地下连续墙内预留插筋与结构壁柱形成铰支连接。地下连续墙内预留剪力槽作为地墙与主体结构之间的抗剪措施。地下连续墙与基础筏板连接如图 4 所示。

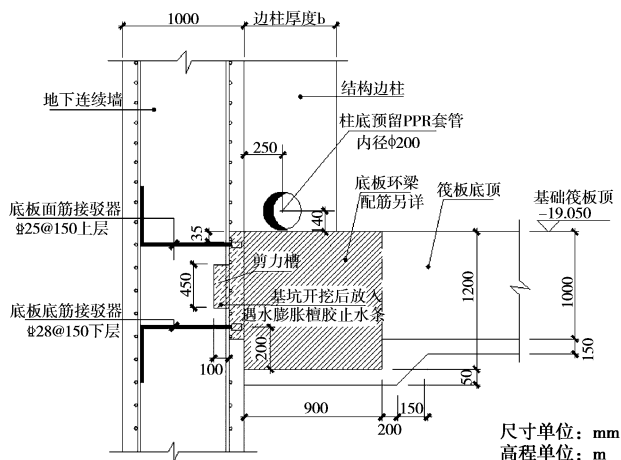


图 4 地下连续墙与基础筏板连接详图

Fig. 4 Connection details of diaphragm wall and basement

(3) 接缝防水

采用地下连续墙, 槽段接头处容易漏水, 常见的处理方法有: ①采用接头箱接头(刚性接头), 使地下连续墙形成整体接头; ②地下连续墙施工前在墙两侧设置水泥土搅拌桩, 形成保护层; ③地下连续墙施工后在接头处打设旋喷桩, 防止漏水。由于本基坑浅层砂性土较厚, 在实际施工过程中, 地下连续墙容易坍孔、“大肚皮”现象, 因此本工程采用第二种措施, 在地下连续墙两侧做三轴水泥土搅拌桩夹心护壁, 既可以防止接头处漏水, 又可以防止地墙成槽时坍孔。

3.3 支撑系统

基坑开挖较深, 对支撑的安全性、稳定性提出了较高的要求。结合基坑形状, 支撑体系采用“角撑+对撑+边桁架”的平面布置形式。该形式安全可靠, 且较经济, 有较大的出土空间, 有利于施工。由于本工程采用支撑后拆法, 地下主体结构施工时, 水平砼支撑需保留, 支撑体系布置在平面上需避开结构梁、劲性柱、结构柱及剪力墙等主体结构构件; 在空间体系中需考虑与地下室楼板的相对位置关系, 以保证地下室结构楼板形成的可能性及支模的便宜性。支撑平面布置形式如图 5 所示(阴影区域为施工栈桥), 支撑后拆现场结构施工照片如图 6 所示。

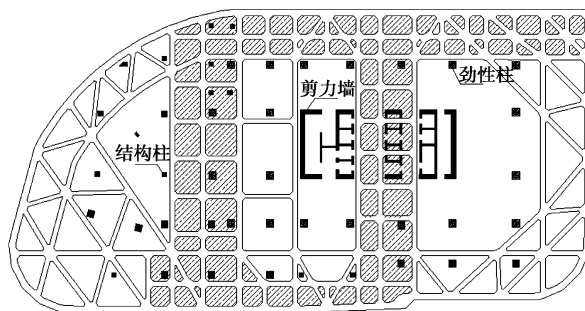


图 5 支撑平面布置图

Fig. 5 Plan view of RC strut system



图 6 支撑后拆现场结构施工照片

Fig. 6 Photo of construction site for late-dismantling support

3.4 降水设计

通过抽水试验及数值模分析, 本基坑共布置 10 口深度为 54 m, 虑管长度为 12 m 的第⑦层降压井(含

观测井)。降水 30 d 后水位稳定, 基坑各部承压水水头下降到安全水位高度。降水引起的最终地面沉降值约为 4 mm, 与数值模拟结果基本吻合。

3.5 节点处理

采用支撑后拆法相对于常规顺做法基坑, 因其所受限制较多, 局部节点需采用非常规形式处理。具体为: 第 2~4 道外挂圈梁, 因主体结构楼板在支撑保留的情况下形成, 常规采用吊筋外挂式做法对本工程不适用, 采用地墙内预留钢筋接驳器与外挂圈梁连接; 为保证主体结构楼板受力可靠, 地墙内侧结构梁的扶壁柱需与结构一起施工, 扶壁柱施工与围檩相碰处采取在支撑上留洞形式, 在支撑高度段地墙锚筋不锚入扶壁柱, 留洞节点方式及现场实拍照片如图 7 所示。

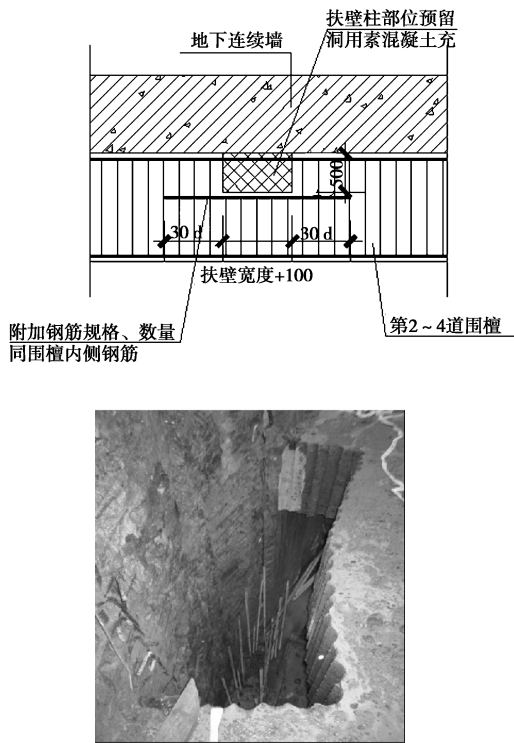


图 7 留洞节点详图及现场实拍图

Fig. 7 Sketch of hole joint details and photo of construction site

4 计算结果对比分析

4.1 规范计算结果

根据计算结果, 采用支撑后拆法基坑最大水平变形为 47.8 mm, 见图 8。采用常规顺做法支撑拆除的基坑最大水平变形为 48.9 mm, 见图 9。

对比相对于支撑拆除的常规顺做法, 多道支撑采用支撑后拆法对控制变形效果并不明显, 此处可理解为基坑挖到坑底时, 由于土体应力的逐渐释放, 围护体侧向变形已基本完成; 常规结构底(楼)板换撑后拆除支撑所产生的次生变形相对较小。

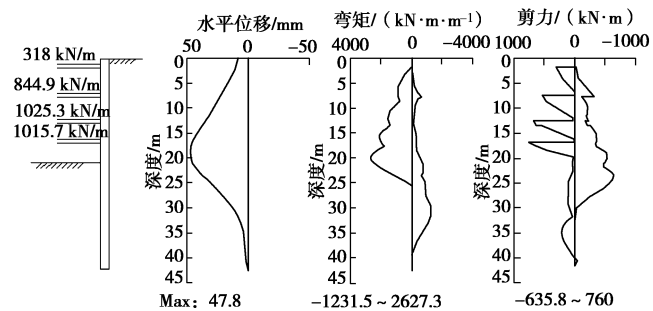


图 8 支撑后拆计算结果图

Fig. 8 Results of late-dismantling support

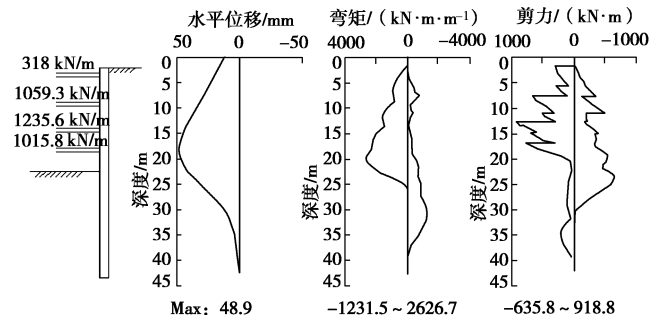


图 9 支撑拆除计算结果图

Fig. 9 Results of dismantling support

4.2 数值模拟分析

主要考虑基坑开挖对邻近陆家嘴雨水泵站及周边道路的影响, 采用 Plaxis 有限元分析程序建立二维分析模型。计算模型如图 10 所示。

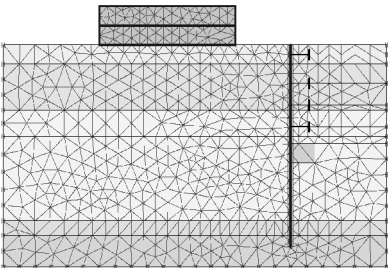


图 10 数值计算模型及网格划分图

Fig. 10 Numerical model and mesh

土体采用 Mohr-Coulomb 模型, 围护墙和支撑采用二维梁单元, 考虑围护与土体的耦合作用。计算区域为: 竖向向影响深度一般 $\geq 2H$ (H 为基坑开挖深度), 本模型取为地表以下 50 m; 水平向影响范围一般大于 $\geq 3H$, 本模型水平向距离取为距基坑边为 70 m。水平方向为 X 方向, 垂直方向为 Y 方向, 且对 X 边界施加 X 向位移约束, Y 边界施加 Y 向约束。采用等三角形六节点模拟土体、水泥土; 用梁单元模拟围护墙; 围护墙和土体之间采用接触面单元模拟。支撑模型采用点锚式杆件材料(弹性材料), 支撑间距假定为 10 m。围护体水平变形云图如图 11 所示。

计算结果表明: 采用此种围护结构形式, 基坑开挖至坑底时, 围护体侧向变形已基本完成, 围护桩最大水平位移为 48.31 mm, 邻近基坑泵站建筑及外侧道

路最大水平位移为：7.5 mm；最大竖向位移为：10.0 mm。数值模拟结果表明基坑开挖对周边环境的影响在规范允许的范围。

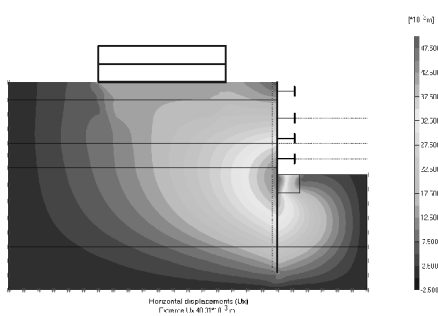


图 11 水平变形云图

Fig. 11 Clouds of horizontal displacements

4.3 工程监测结果

本基坑开挖深度较大，加之在上海这样的软弱土层中由施工引起的工程问题会更严峻，为有效防范基坑工程施工对工程周边环境及基坑围护本身的危害，采用先进、可靠的仪器及有效的监测方法，对基坑围护体系和周围环境的变形情况进行监控，为工程实行动态化设计和信息化施工提供所需的数据，从而使工程处于受控状态，确保基坑及周边环境的安全。

本文中仅对直观反映变形情况的围护墙水平位移监测指标进行描述。本次围护墙体水平位移共布置 15 个监测点，各测点最终累计最大变形量如表 2 所示。

表 2 测点最终累计最大变形量

Table 2 Maximum deformations of measuring points

测点	CX1	CX2	CX3	CX4	CX5	CX6	CX7	CX8
最大变形量/mm	47.5	47.2	47.7	48.2	48.4	48.5	48.9	42.2
测点	CX9	CX10	CX11	CX12	CX13	CX14	CX15	
最大变形量/mm	43.5	44.3	45.3	48.5	48.7	48.4	46.7	

从表 2 各墙体测斜最大累计水平位移量可知：各测点最大变形量比较接近，围护墙角点变形相对较小，符合地下连续墙墙体变形的特点；测点最大变形量为 48.9 mm，未超过监测方案设定的报警值 50 mm。从监测数据上看，各不同深度处的位移量基本上呈抛物线分布，中间大两头小。最大位移发生在 23 m 处，位于开挖面以下 2 m 左右，符合基坑开挖围护体变形的理论和实际情况。

5 结 论

本文结合上海软土地区成功实施的某超深基坑工程实例，系统介绍了采用支撑后拆法的围护结构设计

方法，对设计及施工中存在的难点进行了分析，并针对性的给出处理、解决方案。同时，结合理论计算结果及数值模拟分析，对比工程实测数据，结果表明数值模拟及理论计算结果与工程实测结果较为接近，监测数据无超过报警值情况发生，基坑开挖对周边环境的影响满足规范要求。通过本工程的顺利实施，可以得到如下结论：

- (1) 支撑后拆法在采用“两墙合一”地下连续墙围护结构形式中可灵活应用。
- (2) 采用支撑后拆法的支撑布置形式要求较高。支撑体系布置在平面上需避开结构梁、劲性柱、结构柱及剪力墙等主体结构构件；在空间体系中需考虑与地下室楼板的相对位置关系，以保证地下结构楼板形成的可能性及支模的便宜性。
- (3) 基坑挖到坑底时，由于土体应力的逐渐释放，围护体侧向变形已基本完成，支撑后拆法对控制变形效果并不明显，但对节约工期较为有利。
- (4) 采用支撑后拆法的基坑围护设计在本项目工程实践中取得了良好的实施效果，值得在同类工程设计、施工中借鉴和参考。

参考文献：

[1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))

[2] 张 冰. 后拆支撑法在超高建筑地下结构施工中的应用[J]. 施工技术, 2010, 39(12): 94 - 96. (ZHANG Bing. Application of late-dismantling support method in underground structure construction of super high-rise building[J]. Construction Technology, 2010, 39(12): 94 - 96. (in Chinese))

[3] 何 杰, 张 聪. 后拆支撑法在超深基坑及大型转换梁模板传力体系中的综合应用技术[J]. 建筑施工, 2008, 30(6): 467 - 469, 472. (HE Jie, ZHANG Cong. Comprehensively applied technology of post-dismantled shoring method for super deep foundation pit and formwork force-transmitting system for large-scale transfer beam[J]. Building Construction, 2008, 30(6): 467 - 469, 472. (in Chinese))

[4] JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (JGJ 120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)