

“一桩两用”新型支护结构在某深基坑支护中的应用分析

周 勇^{1,2}, 朱乔红^{1,2}, 朱彦鹏^{1,2}, 苏天涛^{1,2}

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 兰州地区某深基坑工程, 周边环境复杂施工空间小, 针对主楼基础桩已施工且地下车库后开挖的特殊情况下, 提出将临近已施工多排基础桩作为地下车库基坑支护桩的构想, 并建立了相关的理论计算模型。计算基坑开挖过程中这种新型支护结构的内力及变形。同时, 借助有限元验证了计算模型的可靠性并与现场实际监测数据进行对比分析。结果表明, “一桩两用”新型支护形式能极大的节约场地空间; 基础群桩作为多排支护桩时能更有效的控制土体位移及围护结构变形; 与传统的桩锚支护结构相比, 该新型支护结构更加经济节约, 避免了单纯意义上大量支护桩的施工, 有效地节约了时间和材料成本, 成功的做到了“一桩两用”, 充分体现了该新型支护结构巨大的优越性, 可为本地区同类深基坑工程支护提供一定的借鉴和参考。

关键词: 土力学; 深基坑; 复杂环境; 一桩两用; 有限元模拟; 现场监测

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2020)增1 - 3168 - 10

The application analysis of “dual-purpose pile” new support structure in a deep foundation pit

ZHOU Yong^{1,2}, ZHU Qiaohong^{1,2}, ZHU Yanpeng^{1,2}, SU Tiantao^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. The Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: This article is based on a deep foundation pit project in Lanzhou area which has complex surrounding environment and limited construction space. In the special situation that the foundation piles of the main building have been constructed and the underground garage will excavate subsequently, the article puts forward the idea that regarding the multi-row foundation piles as the support objects for the foundation pit of the underground garage. It also establishes the relevant calculation model to calculate the internal force and deformation degree of the foundation pit during excavation. At the same time, the article verifies the reliability of the model by the finite element tool, and compares the result with the actual monitoring data. The results indicate that: the new support form, “dual-purpose pile” can save space greatly, using group-pile as multi-row pile support, it can control soil displacement and the deformation of envelop enclosure effectively. Compared with the traditional pile-anchor supporting structure, the new one is more economical. It can avoid many constructions of support pile, save much

收稿日期: 2019 - 10 - 17; **修回日期:** 2019 - 12 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51568042)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51568042)

作者简介: 周 勇(1978 -), 男, 2007年于兰州理工大学结构工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事支挡结构、地基处理和工程事故分析与处理等方面的研究工作。E-mail: gsutzhoyou@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0960

time and material costs, and achieve the “dual-use pile” successfully. This article reflects the huge advantages of the new support structure. It can provide reference to similar deep foundation pit support structure in this area.

Key words: soil mechanics; deep foundation pit; complex environment; dual-purpose pile; finite element simulation; field monitoring

1 引言

随着城镇化的加快,城市地下空间的开发尤为迫切,深基坑支护形式越来越复杂。基坑设计时要考虑:基坑支护的安全等级、地质水文条件、基坑深度、主体结构及基础类型、周边环境及建筑物基础类型、现场施工条件等。为了保证复杂环境下基坑及基坑周边建筑的安全,因此对基坑支护及周边环境的要求就越来越高。目前超深基坑支护引起越来越多的关注及重视,新的技术、新的观点也随之不断涌现。深基坑支护技术一般是在原有技术上优化产生的,尤其目前在城市市区用地越来越紧张,单一支护形式已经不能满足复杂基坑的要求,故出现了一些新的理念及一个基坑会用到多种支护形式^[1-4]。下面对本基坑采用的支护形式发展现状作以简述。“两墙合一”地下连续墙^[5-6]是一种将主体结构与支护结构合二为一的新工艺,集承重、支护、防渗和地下室外墙于一体,可以很好地发挥连续墙本身的抗拔与竖向承载力,具有十分显著的技术和经济效益,在近近年来广泛应用地下结构的支护中。A. Evangelista 等^[7]针对悬臂式支护结构提出了一种塑性应力分析法,简化了计算挡墙稳定性的方法,可应用于实际支挡设计中;桩锚式因为其安全性高、经济性强、适用性强,因此被广泛地应用在深基坑支护,K. H. Paik^[8]充分考虑支护结构侧土拱效应对土压力的影响,修正后的土压力分布为非线性,处于支护结构底部的土压力很小,且支护结构的高度对土压力分布情况影响不大。支护结构用到的支护桩有钻孔灌注桩、旋喷搅拌加劲桩、钢管桩、水泥搅拌桩、预应力高强混凝土矩形支护桩^[9],其中预应力高强混凝土矩形支护桩施工周期短、绿色环保等优点有望成为常见支护类型的一种。

本文在总结目前深基坑的发展现状的基础上,以兰州某超深基坑工程设计为例,详细分析了复杂条件下的基坑支护设计,并在局部位置融入了“一桩两用”及多排桩支护的联合支护型式,将主体的基础桩与基础筏板简化成多排桩支护体系并建立模型。桩锚支护结构在兰州地区深基坑支护中经济实用,而本文中提出的“一桩两用”思想能进一步地

节约空间且降低成本,为类似工程提供参考和借鉴。

2 深基坑土压力计算模型及稳定问题

2.1 深基坑土压力变化特点

目前建筑物高度屡屡刷新人们的认知,基坑的面积、深度、复杂程度也对支护提出了更高、更新、更严的要求,施工对基坑周边影响范围不断地扩大。在新的要求下土体应力路径变化复杂,加、卸载状态时常交替出现。深基坑工况复杂、支护结构刚度大,挡墙(排桩)变形随着支撑(锚索)的施加、开挖深度的变化而变化,土压力分布形式也随之发生变化。深基坑多支撑挡土墙土压力发展过程如图 1 所示。

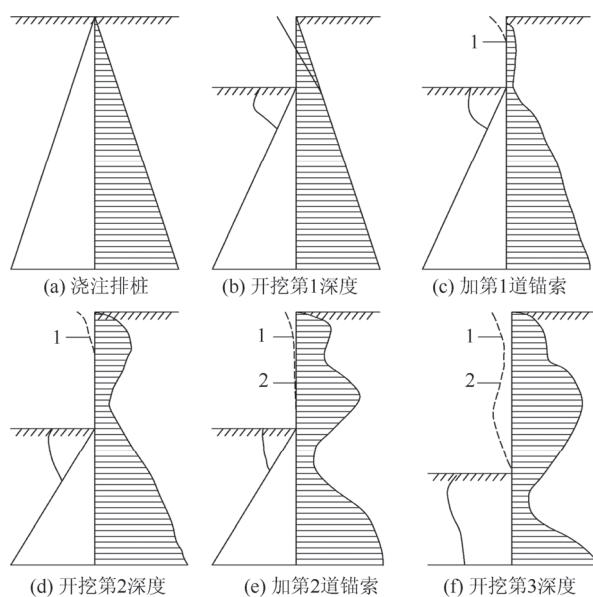


图 1 深基坑多支撑挡土墙土压力发展过程

Fig.1 The development process of soil pressure of multi-support retaining wall in deep foundation pit

2.2 “一桩两用”支护结构土压力计算模型

关于“一桩两用”支护结构可以借鉴“桩墙合一”的土压力计算模型,对于“一桩两用”及其他的基础桩与基础筏板构成的支护体系可以简化成多排桩来进行分析。多排桩支护结构作为双排桩支护结构的改进,是在双排桩的基础上增设一排或多排支护桩,其结构形式及受力规律具有一定的相似性。根据刘泉声等^[10-11]提出的双排桩支护结构计算模型为依托建立多排桩支护结构计

算模型,可分为同时考虑及不考虑桩土空间效应,在基坑底面上部土压力呈三角形分布,坑底以下至桩端部分土压力呈矩形分布,如图 2 所示。

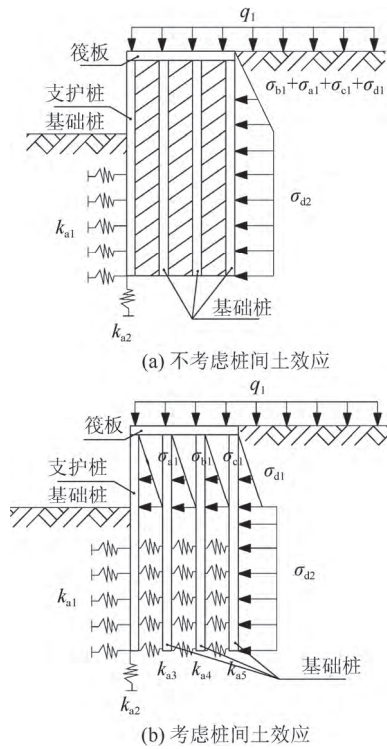


图 2 多排桩计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of multi-row piles calculation

如图 2(a)所示,当不考虑桩间土效应时,坑底以上土压力为 $\sigma_{b1} + \sigma_{a1} + \sigma_{c1} + \sigma_{d1}$, 最大值在坑底部位,坑底以下土压力为 σ_{d2} , k_{a1} 为桩前土体抗力系数, k_{a2} 为桩底土体抗力系数,并提出以下计算公式(模型扩展到基础桩 4 排):

$$\sigma_{d2} = k_1(\gamma h k_a - 2c\sqrt{k_a}) \quad (1)$$

$$\sigma_{b1} + \sigma_{a1} + \sigma_{c1} + \sigma_{d1} = k_1(\gamma z k_a - 2c\sqrt{k_a}) \quad (2)$$

式中: k_1 为主动土压力修正系数,取 1.1~1.2; k_a 为主动土压力系数; h 为基坑深度; c 为土体的黏聚力; γ 为土体重度。

如图 2(b)所示,当考虑桩土效应时, k_{a3} , k_{a4} 及 k_{a5} 为桩间土体弹性抗力系数,坑底以上区域桩间土对前排桩土压力为 σ_{a1} , σ_{b1} , σ_{c1} , 桩后土体对后排桩的土压力为 σ_{d1} , 则整体土压力 $k_1(\gamma z k_a - 2c\sqrt{k_a})$ 按照下列公式分配:

$$\sigma_{a1} = k_2 k_1(\gamma h k_a - 2c\sqrt{k_a}) \quad (3)$$

$$\sigma_{b1} = k_3 k_1(\gamma h k_a - 2c\sqrt{k_a}) \quad (4)$$

$$\sigma_{c1} = k_4 k_1(\gamma h k_a - 2c\sqrt{k_a}) \quad (5)$$

$$\sigma_{d1} = k_5 k_1(\gamma h k_a - 2c\sqrt{k_a}) \quad (6)$$

式中: k_2, k_3, k_4, k_5 为前后排桩桩背土压力分配系数,且 $k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 1$ 。

2.3 多排桩支护结构计算模型建立方法

参考熊巨华^[12]提出等效抗弯刚度法,这一计算方法依据抗弯刚度等效原理,并结合弹性支点法。如图 3 所示。

依据刚度等效的原理,将多排桩等效成厚度分别为 h_1, h_2, \dots, h_n 的地下连续墙,对于“一桩两用”及其他基础桩组成的多排桩支护结构而言,只需对桩进行刚度等效,而对于桩间土只起到传递桩间力作用所以无需等效桩间土,桩径依次为 d_1, d_2, \dots, d_n , 桩净距为 t_1, t_2, \dots, t_n , 桩间距为 $d_1 + t_1, d_2 + t_2, \dots, d_n + t_n$, 前后排桩间距为 T_1 , 则单根桩等价于 $d + (t + d)$ 长度的地下连续墙,通过抗弯刚度相等原则:

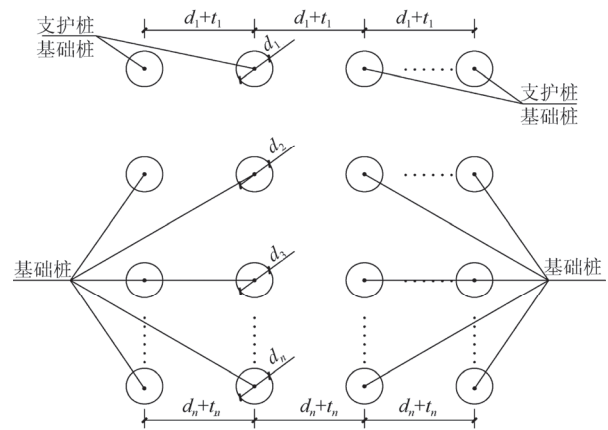


图 3 多排桩平面布置示意图

Fig.3 Layout diagram of multi-row piles

$$(d + (t + d))h^3 / 12 = \pi d^4 / 64 \quad (7)$$

可得等价后的地下连续墙的折算厚度:

$$h_1 = 0.838 d_1 \sqrt[3]{d_1 / d_1 + t_1} \quad (8)$$

$$h_2 = 0.838 d_2 \sqrt[3]{d_2 / d_2 + t_2} \quad (9)$$

$$h_n = 0.838 d_n \sqrt[3]{d_n / d_n + t_n} \quad (10)$$

则每米的整体抗弯刚度为

$$EI = E_1 I_1 + E_2 I_2 + \dots + E_n I_n \quad (11)$$

式中： EI 为整体抗弯刚度， E_1I_1 为第一排桩抗弯刚度， E_2I_2 为第二排桩抗弯刚度， E_nI_n 为第 n 排桩抗弯刚度。

简化完毕后便能对结构的内力位移进行计算，利用弹性支点法建立支护结构在基坑开挖面以下的基本挠曲方程：

$$EI d^4 y / dx^4 + m b x y - p_a b_s = 0 \quad (12)$$

式中： m 为地基侧向基床比例系数； b_s 为主动侧荷载计算宽度，地下连续墙取单位宽度(m)； p_a 为主动侧土压力计算强度； b 为围护结构计算宽度。

2.4 深基坑变形与稳定问题

在基坑工程相关规范中对于变形的控制基本都是初步先确定基坑安全等级，对于不同安全等级规定变形允许值，并没有综合考虑现场实际施工、周围环境复杂情况、水文地质条件，更没有对基坑的安全系数与位移之间建立一个线性的对应关系。因此在实际的监测中不能动态判断基坑的稳定情况，只能依据设计或第三方监测提供的基坑监测预警值来判断基坑的安全性。基坑的变形控制值应该综合考虑支护结构的允许值以及周边环境、地质条件等各种因素取其最小值作为基坑的允许变形值。研究深基坑桩锚受力特性^[13]表明，锚索位置、排桩刚度、被动区土的 m 值对桩锚支护结构的受力特性均有一定的影响，其中锚索的作用最为重要。桩锚支护结构随着嵌固段加长

可以有效减小基坑的侧移，但当嵌固长度大于 $0.6H$ (H 为基坑开挖深度) 时，增大嵌固段长度对基坑的侧移效果并不明显^[14]。

3 工程案例分析

3.1 工程概况

该工程为地下车库与住宅楼的大型建筑基坑，占地总面积约 $13\ 000\ m^2$ ，基坑东侧、西南侧分别为 8F 和 6F 住宅楼，基础形式均为浅基础，东南侧有一幢高层建筑(34F)，基础形式为桩筏联合基础，西侧为待建派出所及规划道路，北侧为城市道路。本工程为地下车库基坑支护，地下车库 3 层，基坑开挖深度为自然地面以下 $17.5\ m$ ，拟建场地内车库周边待建 B-1#，B-2#，B-3#，B-5#，B-6# 和 B-7# 住宅楼，各高层住宅楼及地下车库均为框架剪力墙结构，采用桩筏联合基础，桩基持力层为卵石层。由于甲方最早没有确定车库的深度就先对主楼位置的基坑进行开挖，造成了“先浅后深”的施工顺序。造成车库与待建楼房紧邻位置处基础桩必须代替基坑支护桩，因此基础桩必须同时满足两桩的设计要求。主体位置已经开挖施工，但在基础桩与筏板浇注完成后主体停止施工，待基坑回填之后恢复施工，所以当前基坑开挖深度为 $9.97\sim 17.50\ m$ ，拟建物平面分布及层数如图 4 所示。

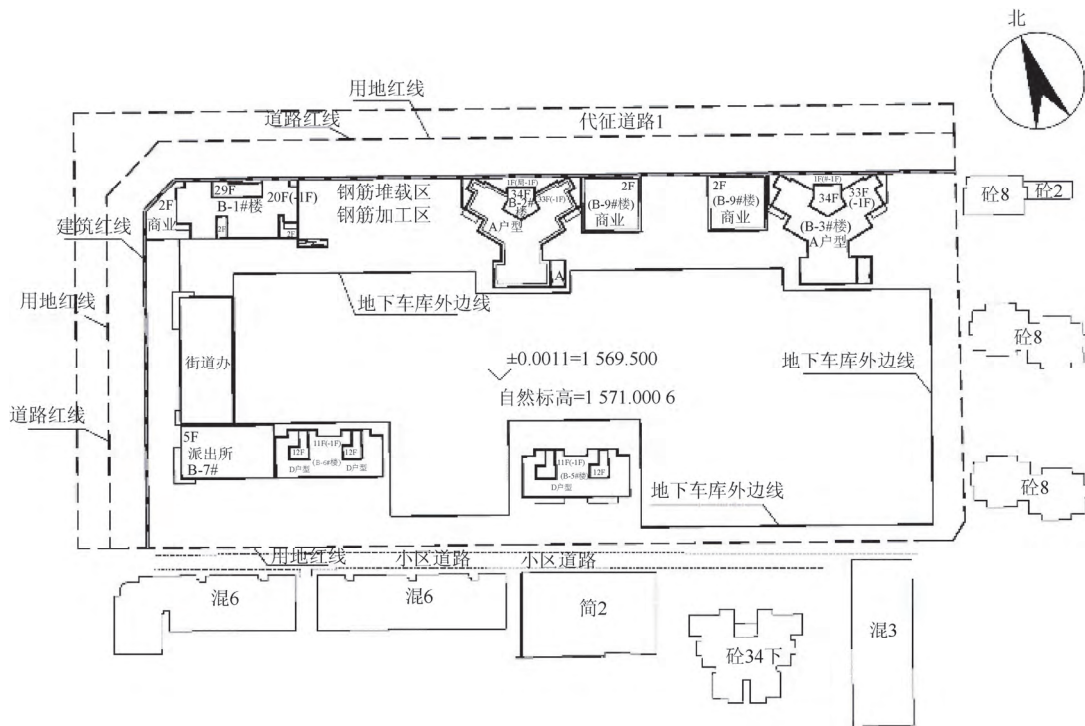


图 4 基坑平面图及周边情况示意图

Fig.4 The plan of foundation pit and the schematic diagram of surrounding

此超深基坑工程周边环境非常复杂，对基坑变形要求比较高，尤其与主楼相邻部位的变形。

3.2 岩土工程地质条件

从地貌单元上划分，场地所处地貌类型为侵蚀、堆积的黄河南岸 II 级阶地。各土层分布及特征由上至下分述如下：

(1) 杂填土(Q_4^{ml})(层序号①)：层厚 2.02~2.8 m。杂色，稍湿，松散。土质不均匀，结构疏松，以人工回填的粉土为主。

(2) 粉土(Q_4^{ml+pl})(层序号②)：层面深度 2.02~2.8 m，层面标高 1 568.14~1 569.17 m，层厚 19.7~21.5 m。褐黄色，稍湿~湿，稍密，土质不均匀，含少量云母碎屑及白色钙质菌丝，具水平层理，无光泽反应，韧性低，摇振反应迅速，干强度低。

(3) 卵石(Q_4^{ml+pl})(层序号②-1)：青灰色，稍湿，稍密。骨架颗粒成分主要为洪积而成的大块石及碎石颗粒，颗粒多呈亚圆~圆形，见漂石，以砂夹与少量粉土充填，磨圆度较好，分布不连续。

3.3 支护设计方案

(1) 基坑支护的特点与难点

该基坑设计的难点与特点有以下几点：① 基坑周边环境情况复杂，在基坑南侧、东侧有已建围墙与住宅楼(浅基础)且距离最近处仅 3.0 m，在基坑施工时不能影响围墙与住宅的正常使用；② 基坑北侧、

西侧及南侧紧邻待建主楼处“一桩两用”，由于主楼基础桩桩径为 0.8 m，桩间距为 2.4 m，增加了设计难度；③ 基坑与主楼人防紧邻处桩径为 0.9 m，最大桩间距为 7.2 m；④ 由于施工顺序的问题造成“先浅后深”的情况加大了设计难度；⑤ 开挖范围大且深，深度最大处达 17.5 m；⑥ 基坑结构、环境不对称，基坑受力复杂。

(2) 基坑选型分析

基坑支护方案要结合场地周边的建筑物、地质条件、工程造价及周边在建主楼的施工进度等影响因素。

综合本基坑特点，本次支护拟采用排桩预应力锚索支护结构，具体基坑支护方案为：① 1-1，3-3，4-4 剖面基坑深 17.5 m，采用桩径 1.0 m，桩间距 2.0 m，五排预应力锚索进行支护；② 2-2，6-6，10-10，13-13，14-14 剖面“一桩两用”桩径 0.8 m，桩间距 2.4 m；③ 7-7，9-9，12-12 剖面与主楼人防部分紧邻，由于桩径为 0.9 m，最大桩间距为 7.2 m，所以采取加桩措施将桩间距变为 1.8 m；④ 5-5，8-8，11-11 剖面为在建主楼间隔部位，因此上部采取 7 m 的 1:0.4 复合土钉墙支护下部 10 m 的排桩预应力锚索支护。基坑支护平面如图 5 所示，典型剖面如图 6 和 7 所示。

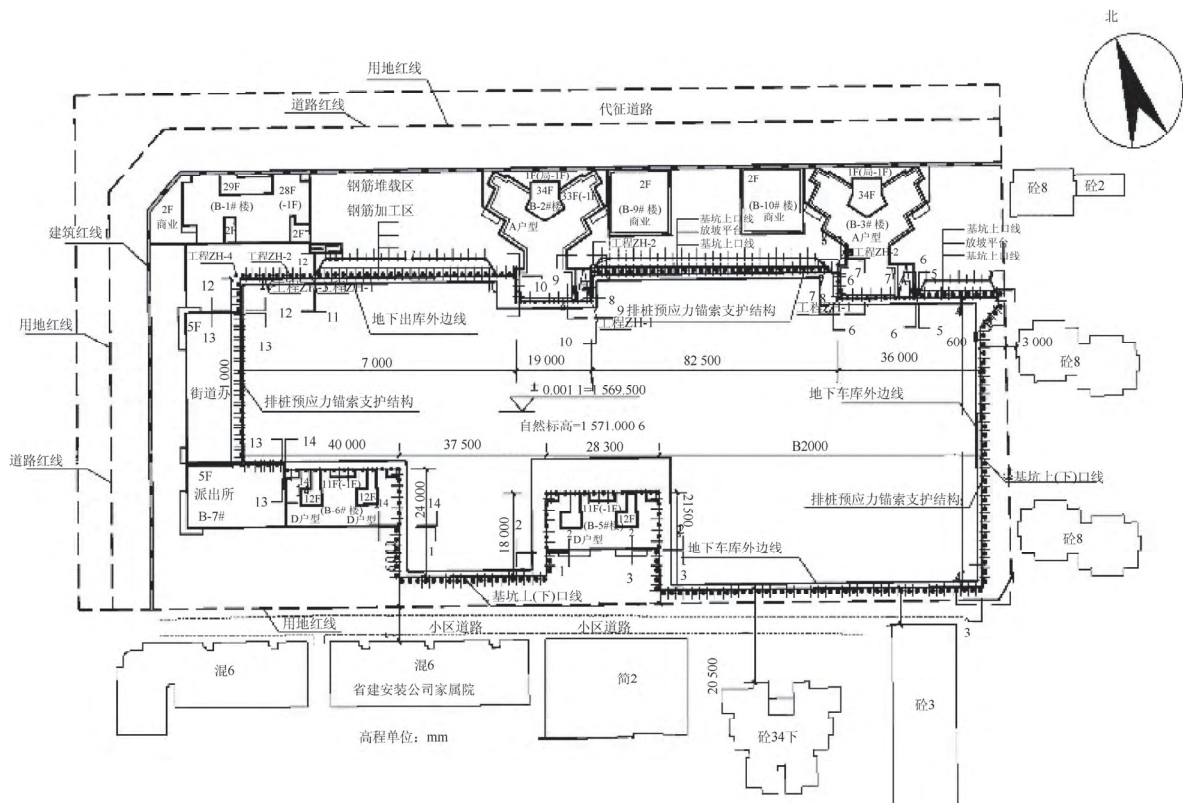


图 5 基坑支护平面布置图(单位: mm)

Fig.5 The layout of foundation pit support(unit: mm)

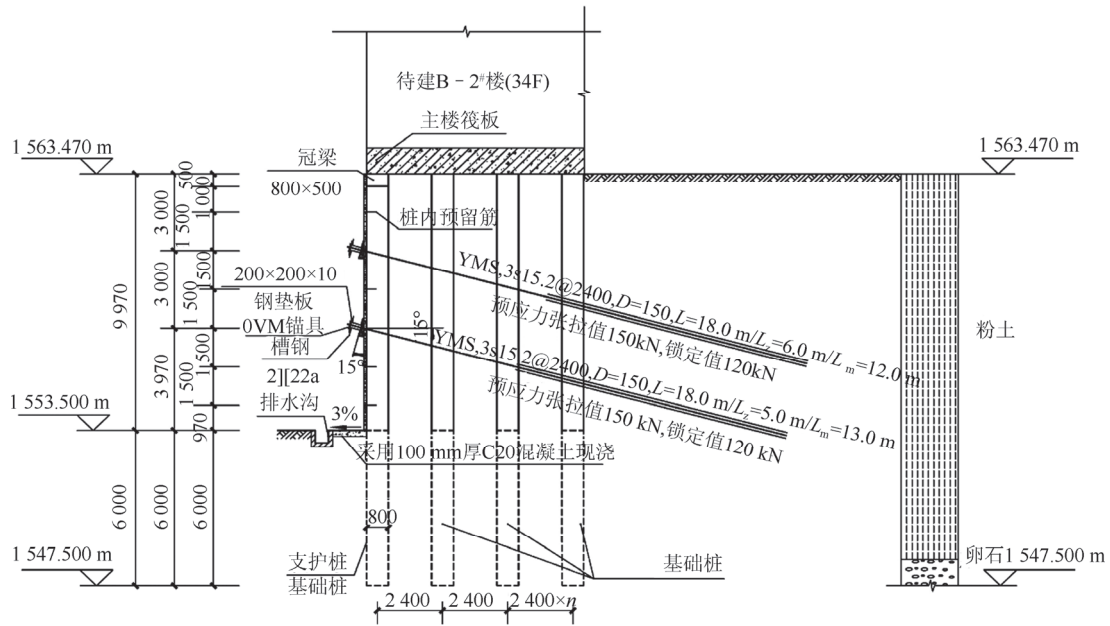


图 6 “一桩两用”处剖面图(单位: mm)

Fig.6 The profile of " dual-purpose pile "(unit: mm)

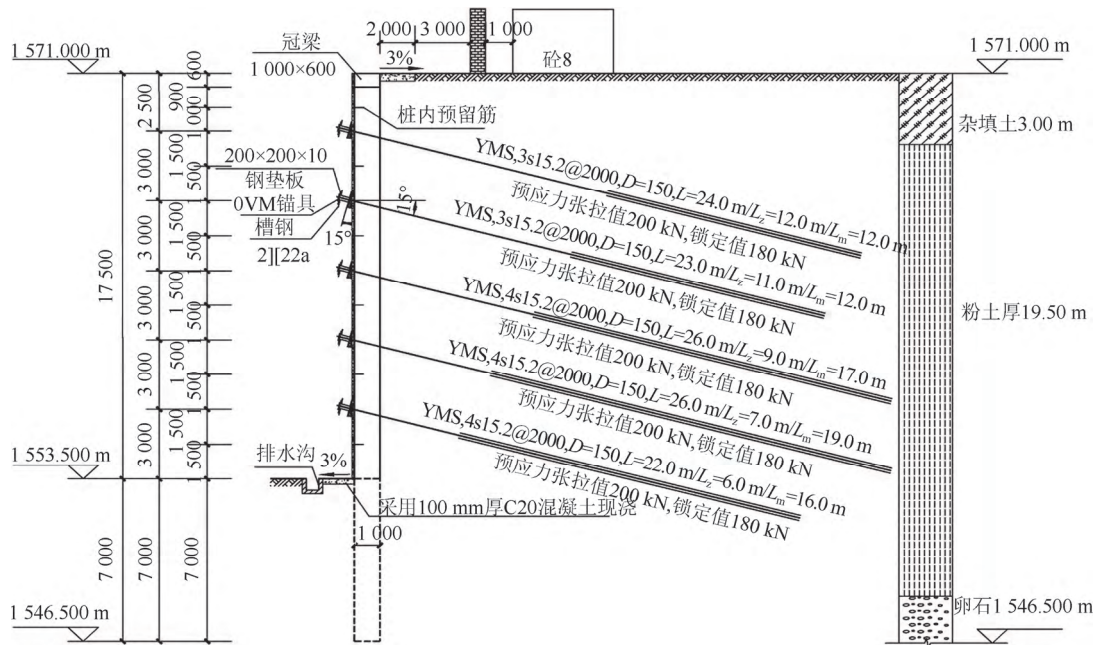


图 7 基坑 17.5 m 处剖面图(单位: mm)

Fig.7 The profile of the foundation pit at 17.5 m(unit: mm)

3.4 基坑支护计算及监测结果分析

基坑支护桩的位移是同时受到土反力、锚杆拉力、桩顶水平力共同作用下的位移叠加。当桩底支座情况未知时，可能处于铰支、固支或处于两者之间，所以桩的整体水平位移还应包括桩底位移及桩底转角产生的位移^[15]，如图 8 所示。

根据节 2 提出的“一桩两用”及多排桩支护结构计算模型，并利用理正深基坑计算软件建立双排桩计算模型(由于理正深基坑计算软件目前无多排

桩计算模块)及数值分析软件 PLAXIS 8.5 建立文中提出的由基础桩、基础筏板及基坑支护桩构成的多排桩模型及基坑 17.5 m 处的模型，并对 2 个剖面进行计算并现场监测来分析对比支护桩的侧移，土体参数取值如表 1 所示。

(1) 理正计算结果

应用理正对典型剖面计算结果包络图如图 9 和 10 所示。图 9 和 10 为应用理正计算出来支护结构的位移、弯矩、剪力，由图可得桩体水平位移呈两

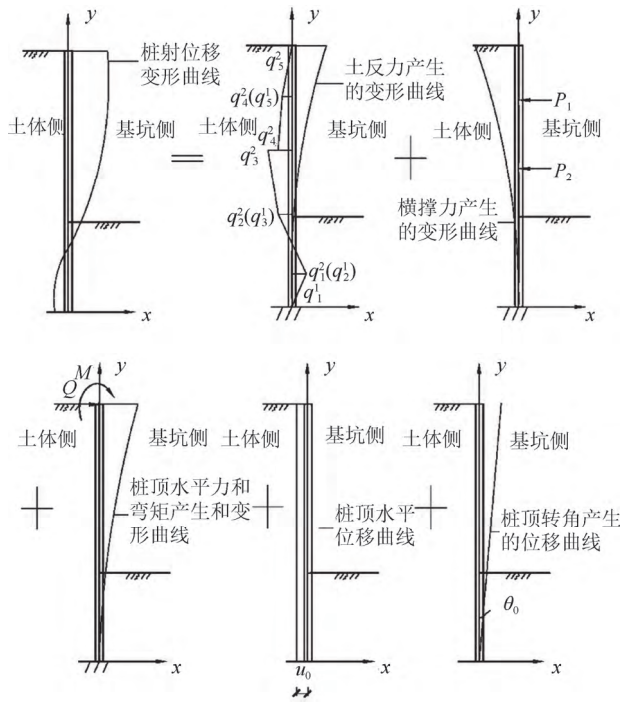


图 8 桩身水平位移的组成

Fig.8 Composition of horizontal displacement of pile

头小、中间大的鱼腹状变形。由图9可知,基坑 17.5 m 深度处最大水平位移为 48.34 mm。由图 10 可知“一

桩两用”及多排桩联合支护处最大水平位移为 19.89 mm,能较好地控制变形,受力良好并能节约空间及成本。

(2) 数值分析软件 PLAXIS 8.5 模拟结果

应用数值分析软件 PLAXIS 8.5 对典型剖面在每个开挖阶段的桩身位移进行模拟,最后一个工况的位移云图如图 11 和 12 所示。

钻孔灌注桩围护结构虽然由单根桩组成,但其受力形式与地下连续墙相近。因此可通过等效抗弯刚度的原则,将钻孔桩围护结构折算成一定厚度的地下连续墙。

由图 11 可知,基坑 17.5m 深度处累计最大水平位移为 68.35 mm。在“一桩两用”处对主体的基础群桩同样折算成一定厚度的地下连续墙。由图 12 可知“一桩两用”处累计最大水平位移为 27.38 mm。

(3) 实际监测数据

通过在现场“一桩两用”及 17.5 m 处埋设测斜管利用测斜仪对现场桩的侧移进行了监测,在每个开挖阶段都记录了桩侧向位移的数据。本文选取特殊剖面的数据与理正计算软件、数值分析软件 PLaxis 8.5 进行对比分析。现场如图 13 和 14 所示。

表 1 土体计算参数

Table 1 Soil calculation parameters

岩土名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	变形模量 E_0/MPa	泊松比 ν	与锚固体摩阻力/ kPa
杂填土	16.0	8.0	15.0	6.0	0.40	25.0
粉土	18.0	15.0	25.0	8.0	0.35	50.0
卵石	21.0	0	36.0	50.0	0.20	120.0

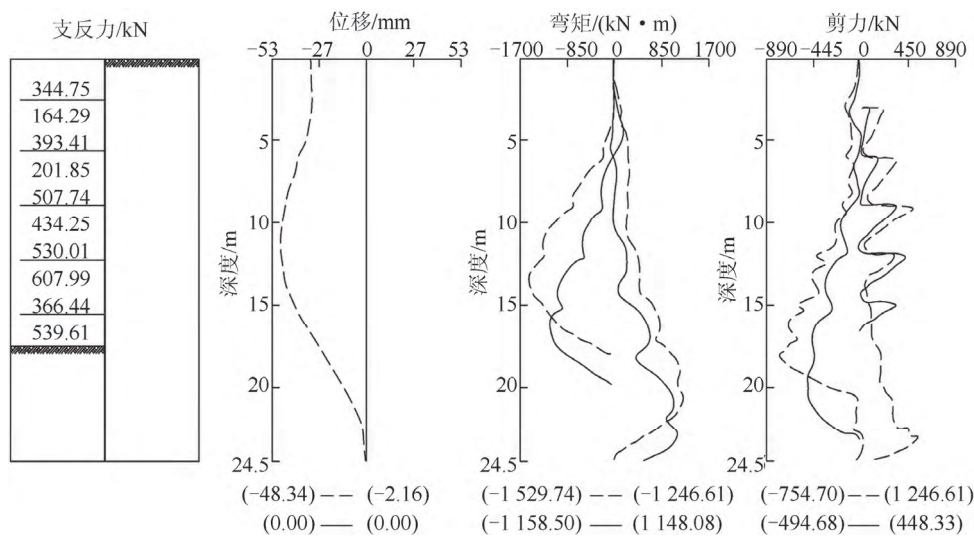


图 9 基坑 17.5 m 处剖面计算结果包络图

Fig.9 The envelope diagram of calculation results of foundation pit profile at 17.5 m

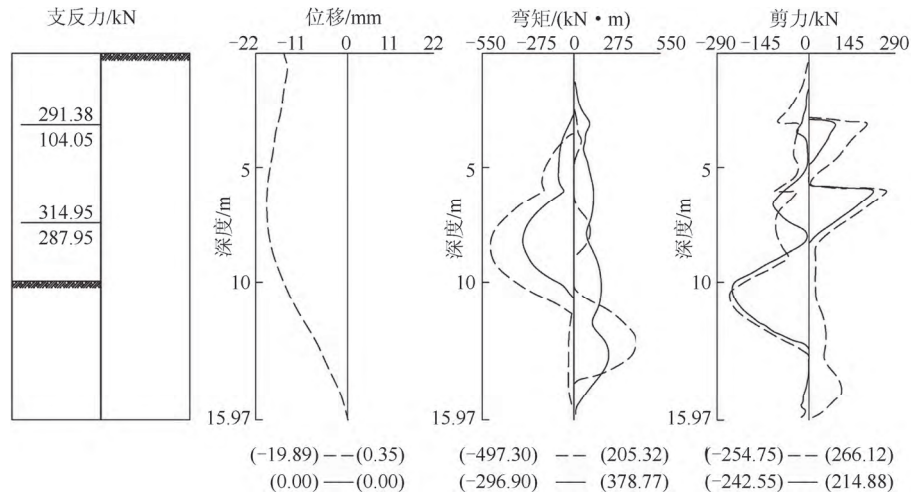


图 10 “一桩两用”处剖面计算结果包络图

Fig.10 The envelope diagram of calculation results of profile at " dual-purpose pile "

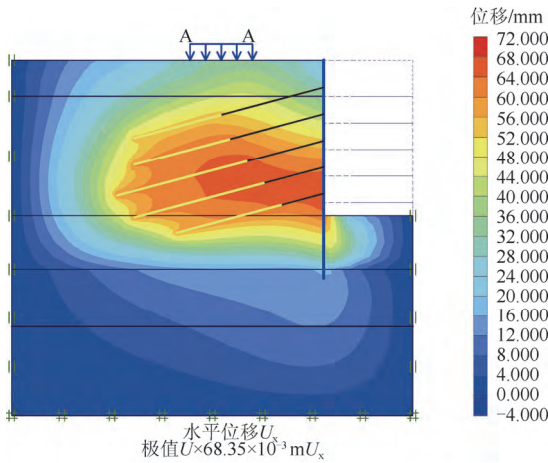


图 11 基坑 17.5 m 处剖面水平位移云图

Fig.11 Horizontal displacement nephogram of profile of foundation pit at 17.5 m

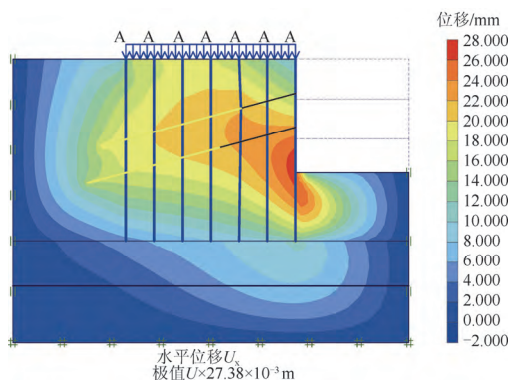


图 12 “一桩两用”处剖面水平位移云图

Fig.12 Horizontal displacement nephogram of profile at "one dual-purpose pile"

(4) 结果分析对比

对典型剖面“一桩两用”处剖面、17.5 m 深处剖面的不同开挖工况下桩身位移进行理正计算、数

值模拟软件 PLAXIS 8.5 模拟以及现场施工中的实测数据对比分析，如图 15 和 16 所示。



图 13 主楼处基础桩及“一桩两用”施工

Fig.13 The construction of foundation pile and “dual-purpose pile” in the main building



图 14 现场施工照片

Fig.14 Photos of site construction

根据三者之间的对比可以发现基坑侧壁的水平位移基本呈线性增长趋势。现场实测的位移

增长趋势基本与其他两者吻合，因为现场情况的复杂程度较高以及施工时不能完全保证和设计的一致性，导致基坑位移比计算的偏大，由图 15 和 16 可以看出由理正计算的位移最小，“一桩两用”处对比更为明显，在桩径 0.8 m、桩间距的 2.4 m 的情况下位移能保证安全，可以得出在群桩基础的情况下“一桩两用”对基坑的侧壁安全性有了一定的提升。

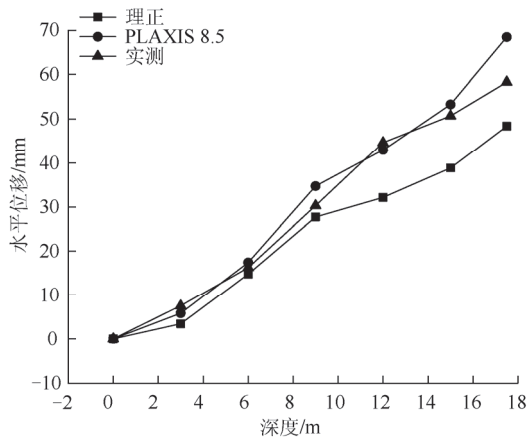


图 15 基坑 17.5 m 处剖面 3 种结果分析

Fig.15 Analysis of three results in profile of foundation pit at 17.5 m

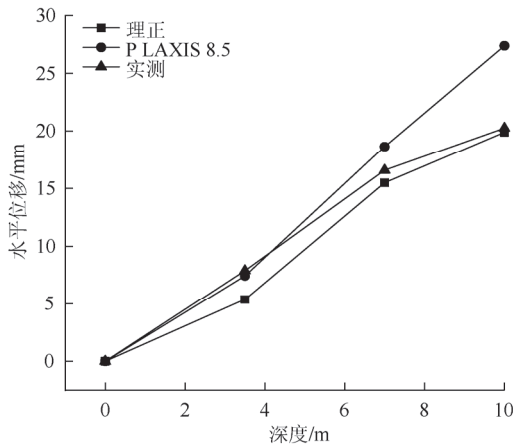


图 16 “一桩两用”处剖面 3 种结果分析

Fig.16 Analysis of three results in profile at “dual-purpose pile”

4 结 论

本文在总结基坑发展现状的基础上，针对一个超深基坑设计案例应用桩锚支护形式并提出了“一桩两用”的思想，可以得出如下结论及建议：

(1) 随着目前城市空间资源的不断紧缺，兰州地区桩锚支护结构在超深基坑支护中效果良好，经济性高，在本次基坑工程中 17.5 m 处桩锚支护安全

可行。

(2) “一桩两用”和多排桩联合支护型式在本次基坑支护中验证是安全可行的，且该种联合支护相比较普通的桩锚支护能更好地节约空间和成本。在目前的城市建设中，“两桩合一”与多排桩支护的情况会越来越多，本工程能为同类工程提供借鉴。

(3) 基坑近邻建筑物时，结合“一桩两用”的思想，并将剩余的基础桩与基础筏板简化成多排桩支护结构，效果比较显著，受力良好，证明多排桩支护安全可行。在本次基坑之中实测最大位移为 20.25 mm 远小于模拟的最大位移 27.38 mm。

(4) 在兰州地区由于水文地质情况较好，施工空间狭窄、毗邻建筑物等复杂情况时，排桩预应力锚索支护效果显著、成本较低、施工技术成熟，但在施工时要明确施工开挖顺序做到动态化、信息化施工。

参考文献(References):

- [1] 张玉成, 杨光华, 胡海英, 等. 多种支护型式在超大深基坑工程设计中的组合应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增 2): 198 - 204.(ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, HU Haiying, et al. Combined application of multiple support forms in design of super-large deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Supp.2): 198 - 204.(in Chinese))
- [2] 周 勇, 朱彦鹏. 兰州地区深基坑支护技术探讨[J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(5): 109 - 113.(ZHOU Yong, ZHU Yanpeng. Inquiry into supporting technique of deep excavation in Lanzhou region[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007, 33(5): 109 - 113.(in Chinese))
- [3] 孙 浩, 郭浩天. 深基坑支护新技术现状及展望[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3): 104 - 117.(SUN Hao, GUO Haotian. Present situation and prospect of new technology for deep foundation pit support[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3): 104 - 117.(in Chinese)).
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 120—2012 建筑基坑支护规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.(in Chinese))
- [5] 陈其志, 徐良英, 徐长节, 等. “两墙合一”技术在深基坑围护优

- 化设计中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增 1): 189 - 194.(CHEN Qizhi, XU Liangying, XU Changjie, et al. Optimal design in deep excavation engineering adopting Dual-purpose diaphragm walls retaining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Supp.1): 189 - 194.(in Chinese))
- [6] 孙 峰, 徐扬青, 张婧雯. “两墙合一”地下连续墙竖向承载力设计计算研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增 2): 154 - 158.(SUN Feng, XU Yangqing, ZHANG Jingwen. Design and calculation of vertical bearing capacity of diaphragm wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Supp.2): 154 - 158.(in Chinese))
- [7] EVANGELISTA A, DI SANTOLO A S, SIMONELLI A L. Evaluation of pseudostatic active earth pressure coefficient of cantilever retaining walls[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(11): 1 119 - 1 128.
- [8] PAIK K H. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effect[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 643 - 653.
- [9] 杨 波, 黄广龙, 赵升峰, 等. 预应力高强混凝土矩形支护桩在基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增 1): 371 - 376.(YANG Bo, HUANG Guanglong, ZHAO Shengfeng, et al. Application of rectangular prestressed high strength concrete supporting piles in excavation engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Supp.1): 371 - 376.(in Chinese))
- [10] 刘泉声, 付建军. 考虑桩土效应的双排桩模型及参数研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 481 - 486.(LIU Quansheng, FU Jianjun. Research on the model and parameters of double-row piles based on effect of pile-soil contact[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 481 - 486.(in Chinese))
- [11] 吴 刚, 白 冰, 聂庆科. 深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2 753 - 2 758.(WU Gang, BAI Bing, NIE Qingke. Research on calculation method of double-row piles retaining structure for deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2 753 - 2 758.(in Chinese))
- [12] 熊巨华. 一类双排桩支护结构的简化计算方法[J]. 勘察科学技术, 1999, (2): 32 - 34.(XIONG Juhua. A simplified computing method of the first kind double row pile retaining structure[J]. Reconnaissance Science and Technology, 1999, (2): 32 - 34.(in Chinese))
- [13] 吴 文, 徐松林, 周劲松, 等. 深基坑桩锚支护结构受力和变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 399 - 402.(WU Wen, XU Songlin, ZHOU Jinsong, et al. Studies of force and deformation properties considering pile-anchor-soil interaction in deep pits[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 399 - 402.(in Chinese))
- [14] 李 淑, 张顶立, 房 倩, 等. 北京地区深基坑墙体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2 344 - 2 353.(LI Shu, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Research on characteristics of retaining wall deformation due to deep excavation in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2 344 - 2 353.(in Chinese))
- [15] 温兆东. 基坑支护桩受力的水平位移反演计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(1): 133 - 138.(WEN Zhaodong. Back analysis on horizontal displacement of the force of pit support pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(1): 133 - 138.(in Chinese))