

浙江沿海软土地基深基坑支护新技术应用和发展

杨学林

(浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 浙江沿海大多为典型的深厚淤泥质软弱土地基。随着城市建设的发展, 地下空间开发和利用得到快速发展, 地下空间建造规模越来越大, 基坑工程设计和施工面临“越挖越深、越挖越大、周边环境越挖越复杂”的发展趋势, 在这超深超大基坑工程的背后, 离不开基坑支护新技术的应用和发展。归纳列举了近年来浙江沿海软土地基设计建造的3~5层地下室的典型案例; 介绍了地下连续墙“二墙合一”、超深止水帷幕防渗墙、地下障碍物处理、新型锚杆(锚索)、深层承压水处理、“逆作法”等基坑支护新技术的应用和最新进展。

关键词: 超深基坑; 地下连续墙; 超深防渗墙; 新型锚杆; 深层承压水; 突涌; 逆作法

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0033-07

作者简介: 杨学林(1966-), 男, 浙江湖州人, 岩土工程博士, 教授级高级工程师, 总工程师, 主要从事结构工程与岩土工程的设计和科研工作。E-mail: yangxuelin@ziad.cn。

Application and development of new technology for support of deep excavations in coastal areas of Zhejiang

YANG Xue-lin

(Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: The coastal areas of Zhejiang are mostly occupied by typical thick silt soft subsoil. The underground space has been rapidly developed and maximized in use as the development of urban construction. The scale of underground structure becomes larger than ever. The design and construction of excavations are facing the issues such as deeper and deeper excavation, more and more massive excavation and more and more complicated surroundings. The construction of super-deep and super-massive excavations needs the application and development of new technology for their support. The author lists 3~5-floor basement structures which are recently designed and constructed in the coastal areas of Zhejiang and also introduces the application and progress of new technology for support of deep excavation, including “two walls into one” diaphragm wall, ultra-deep waterproofing curtain and cut-off wall, underground obstacle disposal, new anchor and cable, deep confined water treatment and top-down construction method, etc.

Key words: ultra-deep excavation; diaphragm wall; ultra-deep waterproofing wall; new anchor; deep confined water; intruding; top-down construction method

0 引言

浙江沿海大多为典型的深厚淤泥质软土地基。20世纪80年代开始, 城市地下空间开发和利用得到快速发展, 地下空间结构层数和基坑开挖深度不断增加。2000年以前, 浙江省内建筑地下室层数大多为1~2层, 基坑开挖深度一般在10 m以内。90年代末期建造了为数不多的3层地下室, 基坑开挖深度达到15 m以上, 如1997年开始建造的杭州第二长途通信枢纽大楼, 地下3层, 开挖深度15~18 m, 是杭州钱江新城第一个深基坑工程, 也是当时杭州市区开挖深度最深的基坑之一。90年代末期建造的3层地下室还有杭州西湖凯悦大酒店(采用全逆作法施工)、浙江省国际金

融大厦等。进入2000年以后, 地下空间开发力度进一步加大, 地下室层数和开挖深度不断增加, 建造了不少4~5层地下室基坑, 典型项目见表1。

在基坑“越挖越深”的同时, 随着城市综合体项目的开发建设, 地下空间开发面积也越来越大, 基坑工程呈现“越挖越大”的趋势, 单个基坑土方量超过了100万m³, 有的甚至超过了300万m³。代表性的项目如: 杭州钱江新城华润综合体项目, 地下3层, 平面尺寸220×290 m; 杭州地铁滨康综合体项目, 上部建筑功能集车站、商业、酒店、办公、超高层住宅

于一体,下部为 2 层整体地下室,平面尺寸为 $420 \times 270 \text{ m}$; 杭州国际金融会展中心,3 层整体地下室的平面尺寸达到 $650 \times 250 \text{ m}$,单个基坑土方工程量超过 300 万 m^3 。为体现城市中心区域的商业价值,超深基坑大多位于繁华的商业闹市区,周边环境异常复杂,基坑设计均以变形控制为主。如国大·雷迪森城市广场地处杭州武林广场商业中心区,基坑东侧和北侧紧贴城市主干道延安路和体育场路,西侧紧邻长江实验小学,南侧与保留的雷迪森酒店地下室相接(见图 6)。

表 1 浙江沿海近几年深基坑典型项目

Table 1 Typical deep excavations in Zhejiang

项目名称	地下室 层数	开挖深度 /m
杭州黄龙饭店改造扩建二期	4	19.5
温州世贸中心大厦	4	20.0
杭州香江国际大厦	4	18.0~20.0
浩然置业钱江新城 B-06-1 地块	4	19.5~21.0
温州鹿城广场	4	20.0~28.0
中国人寿大厦(钱江新城)	4	22.0
杭州地铁一号线武林广场站一期工程	4	27.0~30.0
国大·雷迪森城市广场	5	28.0~32.0
杭州钱江新城 D-09 金融地块 (金融大厦、浙商银行大楼)	4~5	25.0~28.0
荣邦水岸莲花二期地下立体车库	5	31.90
杭州武林广场上盖物业综合体	5	29.6~30.2

随着地下空间开发力度不断加大,地下室层数越多,基坑工程设计和施工面临“越挖越深、越挖越大、周边环境越挖越复杂”的发展趋势,在这超深超大基坑工程的背后,离不开基坑支护新技术的应用和发展。

1 地下连续墙“二墙合一”技术的应用与进展

地下连续墙“二墙合一”设计的关键环节是要保证先行施工的地下连续墙与后期施工的地下室主体结构之间连接构造合理可靠,确保两者共同工作^[1]。为此需重点解决好两方面的问题:①地下连续墙的竖向承重功能及与主体结构之间的差异沉降问题;②地下连续墙的渗漏水问题。减小差异沉降的现有措施有:①墙底注浆;②墙顶设置压顶梁;③加强地下连续墙与后期施工的主体结构之间的连接构造,主楼底板、基础梁、地下室各楼层框架主梁的上下纵筋与地下连续墙之间均采用预埋钢筋接驳器进行刚性连接。

但当主体及结构的工程桩以中风化或微风化基岩为持力层时,由于采用传统地下连续墙沉槽工艺时,墙底无法进入基岩、底部沉渣过厚,地下连续墙与工程桩之间的差异沉降仍无法避免,特别是当上部高层框架柱或剪力墙直接支承于地下连续墙墙顶时,差异沉降及由此产生的附加内力会更大,尤其是基础底板

与地下连续墙连接部分因应力集中导致渗漏水情况出现。采用钻孔或旋挖工艺在地下连续墙底部设置钢筋混凝土支腿,可有效解决上述问题。杭州黄龙饭店二期 4 层地下室工程和国大·雷迪森城市广场 5 层地下室工程,均采用地下连续墙“二墙合一”的支护方案,并在地下连续墙底部均设置钢筋混凝土支腿(图 1, 2),大大提高了地下连续墙的竖向承载功能,减小差异沉降,且具有施工方便、造价低等特点,值得在其它工程中推广应用。

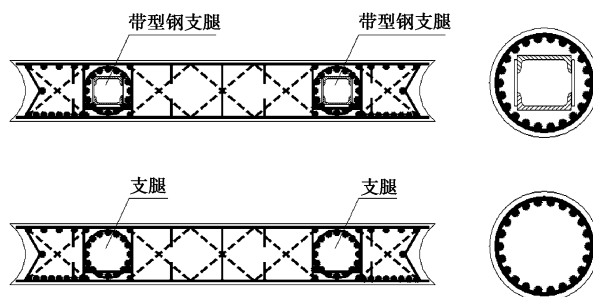


图 1 带支腿地下连续墙断面图

Fig. 1 Cross-sections of diaphragm wall with supporting legs



图 2 支腿钢筋笼制作

Fig. 2 Fabrication of supporting legs reinforcing cage

解决地下连续墙槽段接缝部位渗漏水问题的具体措施通常有:①采用十字型钢抗剪防水接头;②内支撑系统与地下连续墙之间设置围檩梁,减小水、土压力作用下相邻两幅地下连续墙的侧向变形差异;③槽段接缝位置设置钢筋混凝土壁柱,各楼层位置设置边梁,构成壁式框架,延长渗水路径;④地下连续墙内侧设置砖衬墙和导流沟。尽管工程中采取了不少措施,但槽段接缝部位的渗漏水问题依然存在。工程经验表明,泥浆质量是影响地下连续墙沉槽和墙身混凝土质量的因素之一,杭州已有多个工程开始采用新型复合钠基膨润土泥浆,其水化膨胀倍数为钙基膨润土的 10 倍以上,使膨润土的小板结构充分打开,利用其与高分子聚合物之间的桥接作用,可在槽壁形成薄、韧而致密的泥皮,从而减小沉槽对周边土层的扰动,大大提高槽壁防塌孔能力。

从多个工程地下连续墙开挖后的质量情况看,砂性土层中地下连续墙的墙身质量和接缝部位渗漏水问

题明显比软黏土地基中的地下连续墙更为严重一些,分析其中的原因,墙身水下混凝土浇筑前泥浆含砂量高是影响地下连续墙混凝土质量的重要因素之一。杭州钱江新城多个地下连续墙工程的实践经验表明,在浇筑混凝土之前对泥浆中的泥砂进行分离以降低泥浆含砂量,可有效提高墙身浇筑质量,减少槽段接缝部位的渗漏水现象。

2 超深防渗墙的工程应用

对于粉砂土地基中的基坑工程,降水和止水是关键环节。如紧邻钱塘江的杭州钱江新城,地下水位高,土层渗透性强,随着周边建筑、道路及其地下管线设施的逐步建成,基坑外侧降水的环境问题日益突出,迫使政府制定限制坑外降水或要求采取控制性降水的政策措施,从而使基坑止水显得更加重要。止水帷幕的局部失效,常导致局部管涌和水土流失,造成周边路面塌陷和建筑物倾斜。

三轴水泥搅拌桩的止水效果好于普通搅拌桩和高压旋喷桩,近几年在浙江地区得到大量运用。通过对三轴钻杆的多次加接,超过 50 m 的超深三轴搅拌桩在上海、天津等地已得到成功应用。

近年来从日本引进的 TRD 工法超深防渗墙技术,在浙江地区得到了应用(图 3)。TRD 工法又称“深层地下水水泥土连续墙工法”或“渠式切割深层搅拌地下水水泥土连续墙工法”,是一种在地面上垂直插入链锯型刀端口连接刀链锯,链锯刀钻上下运动主机沿造墙方向水平移动,切割出沟渠并注入固化液使之和原位置的土混合,构筑一道等厚的地下连续墙。TRD 工法水泥土墙既可用作基坑外侧的防渗止水帷幕,也可在墙内插入型钢形成等厚度的型钢水泥土连续挡墙(图 4)。



图 3 TRD 工法设备

Fig. 3 TRD method and equipment

TRD 工法与目前常用的三轴水泥搅拌桩所形成的柱列式 SMW 工法墙相比,具有成墙连续、表面平

整、厚度一致、墙体均匀性好、内插型钢间距任意可调等特点。由于采用液压作为动力,可在砂砾层甚至岩层中成墙施工,成墙厚度 550~850 mm,最大深度可达 60 m。图 5 为杭州某基坑开挖后的 TRD 工法水泥土墙,可见墙体厚度连续均匀、表面平整,止水效果良好。目前 TRD 工法型钢水泥土墙的造价略高于 SWM 工法墙,但大大低于钢筋混凝土地下连续墙,在高水位、强透水性地层中代替地下连续墙具有明显的造价优势。

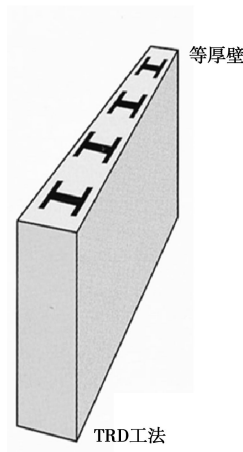


图 4 TRD 型钢水泥土连续墙

Fig. 4 Steel and cement soil diaphragm wall by TRD



图 5 某基坑开挖后的 TRD 工法型钢水泥土连续墙

Fig. 5 Steel and cement soil diaphragm wall by TRD in an excavation

3 地下障碍物处理新技术应用

城市中心地带的建设工程很多为拆除重建项目,老建筑物、构筑物的基础(大多为桩基)成了新建项目的地下障碍物,地下清障难度大、成本高。这里以国大·雷迪森城市广场改造项目为例,介绍地下障碍物处理采用的最新技术。

国大·雷迪森城市广场地块,拆除的老建筑为杭州国际大厦,原基础采用 400 mm×400 mm 的预制方桩,桩长 23 m;场地南侧的雷迪森酒店地下室施工时采用了 900 mm 直径钻孔灌注桩排桩作围护结构,桩

长 17~20 m, 新建 5 层地下室南侧地下连续墙刚好布置在原围护桩的位置 (图 6)。为此, 新建项目的地下连续墙和工程桩施工前, 需拔除场地内的大量老桩, 其中包括 900 mm 直径钻孔灌注桩 55 根。

400 mm 预制方桩的拔除, 采用 $\Phi 1000$ mm 的钢套管 (图 7, 8), 利用振动锤振动下沉钢套管至方桩桩底标高以下 50~100 cm 处, 在下沉过程中控制好垂直度, 并开启空压机和高压离心式水泵, 对套管内的桩侧土进行冲刷直至桩身被剥离, 下沉就位后移除固定在钢套管顶部的振动锤, 再单开高压将套管内的泥浆水随气流全部排出管外, 最后用钢丝绳和履带吊将套管内的方桩拔出清除。

混凝土钻孔灌注桩的清障, 采用日本原装进口设备进行分段拔桩 (图 9, 10)。先将直径 1500 mm 的钢套管置于灌注桩的正上方, 然后回旋下压套管至一定深度, 再在套管内壁与桩之间插入倒三角锤, 回转套管并切断桩的最上一段。当桩段跟钢套管同步旋转时, 表示桩段已被彻底切断, 此时可卸除倒三角锤, 用抓斗取出被切断的桩段。重复上述步骤, 直至将整根钻孔灌注桩全部取出为至, 最后, 边灌填砂石料边拔出钢套管。

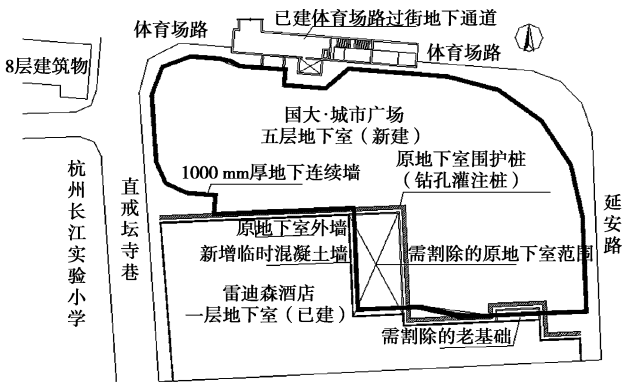


图 6 国大·雷迪森城市广场基坑周边环境示意图

Fig. 6 Diagram of surroundings around excavation of Guoda Radisson Plaza



图 7 预制方桩拔桩设备

Fig. 7 Extracting equipment for prefabricated square piles



图 8 拔出的预制方桩

Fig. 8 Extracted prefabricated square pile



图 9 $\Phi 900$ mm 钻孔桩拔桩设备

Fig. 9 Extracting equipment for 900 mm-diameter bored piles



图 10 现场拔出钻孔桩桩段

Fig. 10 In-situ extracted bored pile

4 新型锚杆 (锚索) 体系的应用

对于平面尺寸很大的基坑工程, 设置内支撑系统的成本很高, 后期拆撑工作量大, 且存在混凝土收缩徐变和温度效应的不利影响, 利用锚杆 (锚索) 代替内支撑系统, 采用“桩+锚”的支护形式具有明显优势。但在浙江沿海的深厚淤泥质软弱地基中, 由于土层的“低强度、高压缩性、高灵敏度”特性, 采用传统方法施工的锚杆 (锚索), 其抗拔承载力低, 基坑变形大, 因而锚杆 (锚索) 在此类土层中的应用受到很大限制。

近年来在浙江杭州和宁波等地得到应用的浆囊袋注浆锚杆 (专利技术), 是一种采用注浆工艺扩大锚杆

直径、具有较高抗拔力、适用于软弱土层的锚杆。浆囊袋注浆锚杆的基本原理是在利用常规锚杆施工方法的基础上,引入浆囊袋并进行扩孔注浆的施工工艺,由于软土自身强度低,浆囊袋可以在土体中以预定的形状进行扩孔,可做成圆柱状锚杆体或数个间隔一定间距的圆柱状锚杆体(图11),其直径可达到25~30 cm,抗拔力可达到常规锚杆的一倍以上(图12)。



图11 浆囊袋注浆锚杆

Fig. 11 Syrup-bag grouting anchor

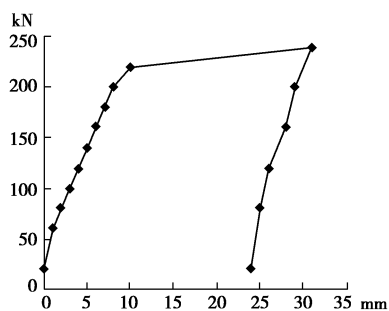


图12 浆囊袋锚杆抗拔试验曲线

Fig. 12 Tensile curve of anchor

5 深层承压水处理技术的发展

钱塘江两岸的承压含水层具有埋藏深、水量大、补给充沛的特点,承压水赋存于砂、卵、砾石层中。承压含水层顶板埋深大致为25~55 m,由上游至下游逐渐加深,至杭州钱江新城一带,承压水顶板埋深约为32~43 m,承压水头高程为-1.50~-5.0 m(埋深约8.50~12.0 m),年水位变化幅度最大约4 m。承压含水层顶板上部为淤泥质粉质黏土,厚度一般为8~15 m。基坑土体在承压水作用下的破坏形式通常有两种,当坑底为弱透水土层时,常发生渗流破坏或局部破坏,表现为流砂、流土或类似于“沸腾”的喷水冒砂现象;当承压含水层上面为不透水层时,常发生坑底土体整体顶升的“突涌”破坏。浙江地区近年来处理深层承压水的方法有以下3种:坑底设置水平止水帷幕法;竖向止水帷幕隔离法;降低承压水位法。

杭州钱江新城的深基坑工程,对挖深超过18~20

m的局部深坑,大多采用上述第一种方法,如浙江财富中心、中国移动浙江公司大楼、万银国际二期、万象城项目等,均采用三轴水泥搅拌桩或高压旋喷桩对坑底地基土进行加固,形成水平止水帷幕。采用此法时,由于水平帷幕体的重度一般为19~20 kN/m³,较之加固前的土体重度,增大极其有限,若按现行规范^[2]采用压力平衡法进行坑底抗突涌验算,低估了土体加固的作用。因此,抗突涌稳定验算应考虑坑底土体的抗剪强度,坑底土抗剪强度计算时,可采用莫尔-库仑理论,将静止侧向土压力作为破裂面上的正应力;另外还可考虑工程桩的有利作用,即考虑承压含水层顶面以上土体在承压水压力作用下受工程桩土钉效应的有利影响(见图13),按下式验算^[3]:

$$\gamma_1 h_1 + \sum T_i / A \geq \gamma_w h,$$

式中, A 为基坑底面积; γ_1 为坑底以下、含水层顶面以上土体的平均饱和重度; T_i 为工程桩的土钉效应产生的抗拔承载力,取工程桩在含水层顶面以上的桩周总摩阻力和含水层顶面以下的桩周总侧摩阻力的较小值。考虑坑底土体抗剪强度和工程桩土钉效应的计算方法,可降低深开挖过程中对深层承压水的处理费用,已在杭州钱江新城的财富中心、浙江移动大楼等深基坑工程得到应用,效果良好。

杭州地区对于开挖深度超过25~30 m的4层或5层地下室,大多采用竖向止水帷幕隔离法,如杭州地铁一号线城站站、庆春路过江隧道江南工作井、钱江新城浙商银行(5层地下室)、中国人寿大厦4层地下室等深基坑工程,均采用地下连续墙作竖向止水帷幕对深层承压水进行截断的方法,地下连续墙深度达到60~68 m,需穿越20~25 m的圆砾层、卵石层。也有个别基坑采用降低承压水位的方法,如杭州城西的荣邦水岸莲花二期工程,3层地下室的中部布置平面尺寸为22 m×28 m的地下立体车库,深坑挖深达到31.9 m,设计采用设置减压井降低深层承压水压力,取得了较好效果。

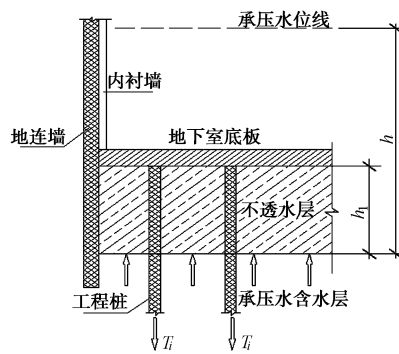


图13 工程桩的土钉效应

Fig. 13 Soil-nailing effect of engineering piles

6 逆作法技术的最新应用与发展

近十多年来,深基坑逆作法技术在我省杭州、宁波、绍兴等地多个工程中得到应用。大多数逆作法工程外围护结构采用地下连续墙“二墙合一”的形式,如杭州利星凯悦大酒店、杭州新世纪解百商城、杭州中国丝绸城、杭州地铁一号线武林广场站、杭州地铁一号线武林广场上盖物业综合体等,也有少数工程采用排桩作外围护结构,如杭州香港服装店逆作法基坑采用预制钢筋混凝土板桩作外围护结构,宁波慈溪财富中心、绍兴好望大厦等采用钻孔灌注桩排桩作外围护结构。

竖向支承体系设计是“逆作法”基坑设计的关键环节之一。在地下室逆作施工期间,基础底板、承台及墙、柱等竖向受力构件尚未形成,地下各层和地上计划施工楼层的结构自重及施工荷载均由竖向支承体系承担。省内较早的逆作法工程,如凯悦大酒店、新世纪解百商城等,均采用格构式钢立柱作竖向支承系统(如图 14),待地下室基础底板封底、地下室结构柱和墙逆作完成后再予割除(图 15)。由于格构式钢立柱为临时支承柱,其平面定位和垂直度控制的要求可相对低一些,且钢立柱避开结构主轴线,梁柱节点钢筋施工较方便,但钢立柱数量多,逆作法基坑围护造价较高。



图 14 临时钢立柱及承台

Fig. 14 Temporary steel erect columns and caps



图 15 钢立柱割除后的结构柱

Fig. 15 Structural columns after cutting temporary steel columns

最近几年省内逆作法工程大多将施工期间的竖向支承柱作为使用阶段的永久结构柱考虑,如杭州地铁一号线武林广场站采用 900 mm 直径钢管柱作为逆作阶段的支承柱,同时兼作使用阶段的结构柱(图 16);

杭州中国丝绸城采用 650 mm 直径钢管混凝土柱作为逆作阶段的支承柱,逆作完成后外包混凝土兼作使用阶段的结构柱(图 17);宁波慈溪财富中心采用格构式钢立柱作为逆作阶段的支承柱,外包混凝土形成钢管混凝土柱后作为使用阶段的永久结构柱(图 18)。由于逆作施工阶段的竖向支承柱兼作为使用阶段的主体结构柱,其平面定位和垂直度偏差控制需满足主体结构要求。由于竖向支承柱与下部工程桩一起施工,其垂直度控制是逆作施工的关键和难点之一,目前常用的定位调垂方法有^[3]:①气囊调节法;②地面校正架调节法;③钢护筒定位器两点调节法;④HPE 液压垂直插入钢管柱工法等。如杭州地铁一号线武林广场站逆作法基坑,作为逆作期间竖向支承结构的钢管柱直径 $\Phi 900$ mm,长度 28.5 m,采用 HPE 液压垂直插入钢管柱工法施工(图 19),可满足钢管柱垂直度偏差 $<L/500$,且不大于 25 mm 的设计要求。



图 16 钢管柱作结构柱

Fig. 16 Steel pipe column used as structural column



图 17 钢管外包混凝土作结构柱

Fig. 17 Structural column by pouring concrete outside steel tube

逆作法技术在浙江地区已成功应用于 10 多项深基坑工程,积累了不少经验,但笔者以为对下列关键问题仍需作进一步的研究:①由于不同挖土阶段、不同施工工况条件下竖向支承桩所处的侧向约束状态是不同的、变化的,其计算长度的确定和稳定承载力的计算尚需进一步研究;②立柱桩之间、围护桩(墙)与立柱桩之间的沉降差异问题,是逆作法基坑工程中的特有问

差异沉降的控制措施等,需做进一步研究,并需要积累实际监测数据进行比较分析;③当前省内采用的各种竖向支承柱平面定位和调垂方法,需要作进一步分析和总结,提出适合于浙江地区不同水文地质条件下的安全合理又便于施工操作的平面定位和调垂方法。



图 18 钢立柱外包混凝土作永久结构柱

Fig. 18 Steel erect columns used as permanent structural column by pouring concrete

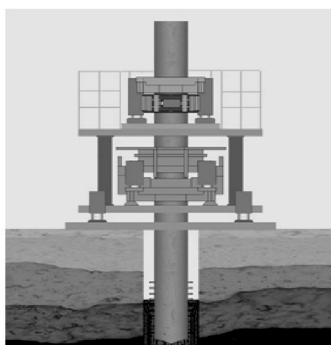


图 19 HPE 液压垂直插入钢管柱工法

Fig. 19 HPE method for inserting steel pipe column

7 结 语

近年来多个开挖深度达 25~30 m 的超深超大基坑工程在浙江沿海深厚软土地基中得到成功实施,这离不开基坑设计和施工技术的创新和支护新技术的开

发与应用。本文结合工程实例介绍了地下连续墙“二墙合一”技术和地下室“逆作法”技术的应用和最新进展;在地下连续墙底部设置支腿,较好解决了地下连续墙传统施工工艺入岩困难、墙底沉渣厚、竖向承载力不高及与主体结构之间的差异沉降等问题;TRD 超深防渗墙技术在高水位、强渗透性粉砂地基中的成功应用,大大提高了基坑周边止水帷幕的防渗可靠性,以其代替钢筋混凝土地下连续墙可大大降低围护造价;深层承压水作用下坑底土体抗突涌计算时考虑工程桩土钉效应,可降低深开挖过程中的承压水处理费用,减小深层降水的环境问题,已在杭州钱江新城的多个深基坑中得到应用。最后需要说明的是,近年来在基坑工程中应用的新技术还有很多,限于篇幅,本文介绍的仅仅是其中的一部分。

参考文献:

- [1] 杨学林,等. 地下连续墙“二墙合一”技术在粉砂土地基中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 1): 1724 - 1729. (YANG Xue-lin. Study on diaphragm wall and its application in silt and sand ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1724 - 1729. (in Chinese))
- [2] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [3] 杨学林,周平槐. 逆作地下室设计中的若干关键问题[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 238 - 244. (YANG Xue-lin, ZHOU Ping-huai. Some key problems in the design of basements using top-down method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 238 - 244. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)