

我国深基础工程技术发展现状与展望： 21 世纪头 10 a 情况综述

史佩栋^{1, 2}

(1. 浙江省建筑科学设计研究院, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 对我国深基础工程技术发展现状进行了初步总结, 并对其未来发展方针提出了展望。共含 8 个部份: (1) 大规模的经济建设促进了深基础工程大发展; (2) 深基础工程应对巨大挑战的主要技术措施; (3) 大吨位桩的承载力问题; (4) 与深基础工程相关联的特殊技术; (5) 技术学术交流频繁: 会议交流与平面媒体; (6) 深基础工程图书出版物; (7) 施工安全与工程质量; (8) 展望未来: 10 点思路与建议。

关键词: 深基础工程; 桩基础; 深基坑; 高速铁路; 城市轨道交通; 桥梁工程; 高层多层建筑; 地下空间建设; 地下热能利用; 学术交流; 施工安全; 质量控制

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0001-14

作者简介: 史佩栋(1927-), 男, 教授, 长期从事岩土工程科学研究与工程实践。E-mail: dyp5188@163.com。

Status quo and perspective of deep foundation technology in China: a summary of the first decade of 21st century

SHI Pei-dong^{1, 2}

(1. Zhejiang Research and Design Institute of Building Science, Hangzhou 310012, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The status quo of deep foundation technology in China is preliminarily summarized, and policies for its future development are prospected. It mainly contains 8 parts: (1) China's super-large scale economic advances promote rapid development of deep foundation works; (2) Major technical measures for deep foundation engineering to deal with serious and massive challenges; (3) Load tests on large-capacity piles; (4) Special techniques related to deep foundation engineering; (5) More frequent technical exchanges through symposiums and conferences as well as magazines and journals; (6) Academic books and publications; (7) Construction safety and quality; (8) Perspectives and suggestions.

Key words: deep foundation; pile foundation; deep excavation; urban rapid rail transit; large and super-large bridge; tall building; underground construction; underground thermal energy utilization; academic exchange; construction safety; quality control

1 大规模的经济建设促进了深基础工程大发展

深基础工程, 按照中外工程界学术界的共识, 主要是指桩基及基坑工程两大范畴。前者为上部结构提供可靠的支承, 后者为开发利用地下空间提供安全的保障。进入 21 世纪 10 a 来, 我国深基础工程的巨大成就突显在以下 4 大领域^[1-4]。

1.1 高速铁路建设

截至 2010 年末, 我国高铁运营里程已达到 8358 km, 在建高铁约 17000 km, 路网规模和速度等级均

已居世界第一。根据规划, 至 2011 年, 高铁将新增 4715 km, 总运营里程将达到 13073 km, 至 2020 年将达到 16000 km, 从而将构成全球遥遥领先的最高高铁网络。京沪高铁全长 1318 km, 耗资 2209 亿元人民币, 是当今世界一次建成线路最长、技术标准最高的高速铁路。

高铁均采用无碴道床, 并有高架封闭。我国高铁的最高试验时速达到 486.1 km, 充分证明了所采用桩基础的安全性、稳定性和可靠性, 其地基沉降和工后

沉降均符合严格要求。

我国已建在建的高铁路基、桥梁、站房等设施,所应用的基桩数量估计已达 1000 万根以上,它们分布于各种复杂的地质条件和环境条件。其中部分采用钢管桩,大部分采用各种类型的混凝土灌注桩及扩底桩,桩身混凝土的体积达数亿立方米之多(图 1, 2)。



图 1 高铁列车在运行

Fig. 1 High-speed train in running



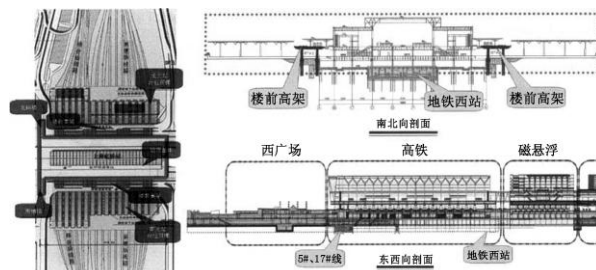
图 2 高铁桥墩施工

Fig. 2 Railway piers under construction

在高铁建设中,新建和改造了一大批支承于桩基础并有一至数层地下室的现代化客站。至 2010 年底已有北京南、天津、上海南、上海虹桥、武汉等多座大型新客站投入使用。这些新客站均与城市轨道交通、公交、民航等其它交通方式紧密衔接,功能完善,换乘便捷,均形成了所在城市的现代化综合交通枢纽。为了满足其复杂的功能要求,基坑开挖的深度、难度和复杂性不断增加。上海虹桥综合交通枢纽站,开挖面积达 35 万 m^2 ,深度达 34 m,不论其汇集交通方式的数量,或其建筑规模和设计施工难度在国际上都属于空前未有,参见图 3。



(a) 鸟瞰



(b) 剖面示意

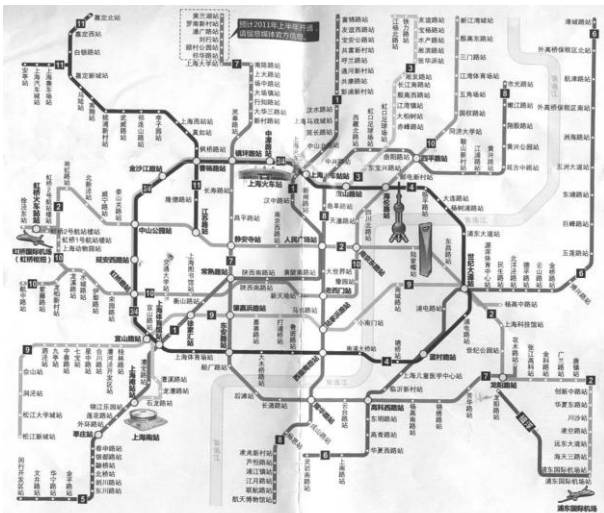
图 3 上海虹桥综合交通枢纽站

Fig. 3 Shanghai Hongqiao comprehensive transit center

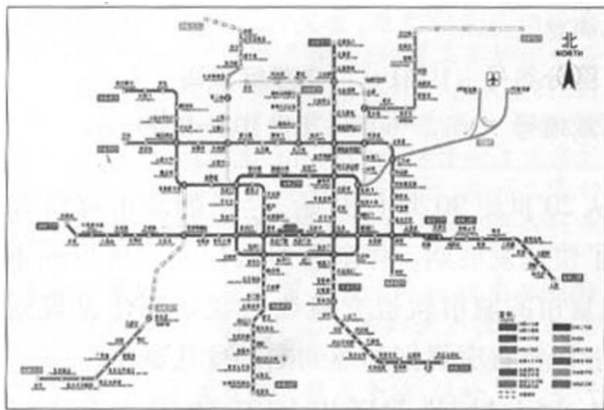
10 a 来,我国“八纵八横”普速铁路网的建设也应用了大量深基础工程。建于青藏高原的铁路桥梁墩台大量采用了大直径挖孔桩,破解了在冻土层、砾石、漂石和基岩中成孔灌桩的难题。贯通我国东西部的关键瓶颈,建于崇山峻岭、悬崖削壁、溶洞暗河之间、穿越古蜀道的宜(昌)万(州)铁路是我国乃至世界铁路建设中最困难最复杂的线路之一。它全线长仅 377 km,总投资高达 226 亿元,动员了 5 万筑路大军,工期长达 7 a(2003 年 12 月~2010 年 12 月)。它全线有桥梁 253 座,桥高超过 100 m 的有 23 座,最高桥墩高达 128 m,基础深入溶洞数十米,基础横截面甚至达数百至一千平方米,堪称罕见的深基础。

1.2 城市轨道交通建设^[2]

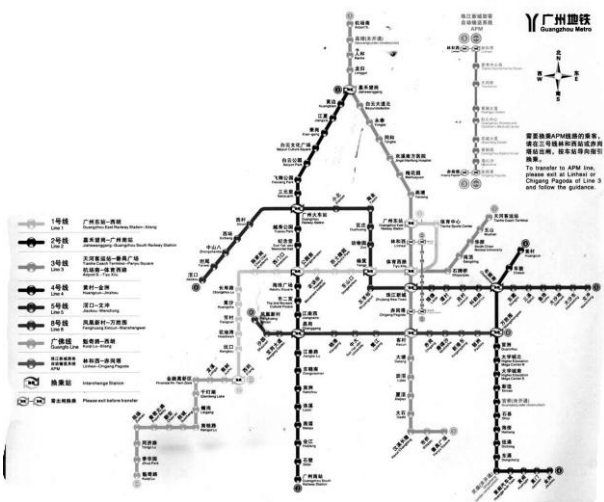
10 a 来,我国城市轨道交通建设快速发展。北京、上海、广州、深圳、南京、天津、重庆、武汉、长春、大连、成都、沈阳等 12 个城市的轨道交通,至 2010 年底运营里程总长已达 1270 km,其中上海市已运营 420 公里,北京市 336 km,广州市 236 km,3 大城市相继步入网络化和运营的阶段(图 4)。至 2010 年底,已获国家批准建设轨道交通的 29 个城市在建总里程约 1800 km。预计至 2020 年,我国城市轨道交通总里程将达 6000 km,而位居世界各国之首。



(a) 上海市11条线420 km



(b) 北京市8条线336 km



(c) 广州市8条线236 km

图 4 3 大城市 2010 年底的轨道交通运营网络图

Fig. 4 Metro nets of Shanghai, Beijing and Guangzhou by the end of 2010

城市轨道交通大部分在地下运行,通常称为地铁;一部份在地面和高架上运行,称为轻轨(图 5, 6)。据估计,我国轨道交通包括地铁和轻轨线路上已建成的车站约 2000 座,若加上各条线路终端的相关的维修

保养车库车辆段和控制调度等场所,深基坑工程规模巨大,而且为了方便乘客可以在多条线路之间做到同站“无缝对接”或“零换乘”、以及在车站等处开发上盖物业等等,均使得其基坑工程设计施工的难度越来越大。



图 5 城市地铁在运行

Fig. 5 Urban metro in running



图 6 上海明珠线轻轨越过内环线高架桥

Fig. 6 Shanghai Pearl light-rails running over elevated road

1.3 各类桥梁和港口码头建设^[3]

除铁路桥梁已在上文有所提及外,10 a 来,我国普通公路和高速公路均迅速发展,已形成了“五纵七横”共 3.5 万 km 的国道主干线网络,促进了跨江跨河跨海的大桥特大桥大量兴建。加之数百座城市道路网的发展,造就了高架路与立交桥星罗棋布,逶迤曲折。公路和城市各类桥梁主要也采用各种混凝土灌注桩和扩底桩;近年钢管桩的用量有所增加。许多港口码头因有水上运输之便,采用大直径后张法预应力大管桩,减少了桩身成桩质量的风险。

10 a 来,在我国已建成和在建中的数百座大桥特大桥中,有数座桥梁尤为令人瞩目,即:

○ 在新世纪之初开工,至 2008 年 5 月建成通车,而荣列世界最长的跨海大桥—杭州湾大桥,全长 36 km,桥宽 33 m,双向 6 车道,采用了钻孔灌注桩(3400 根)和钢管桩(5474 根,桩长 71~89 m,直径 ϕ 1.5~1.6 m,钢管壁厚 20/22 mm,见图 7);



(a) 总平面呈S形的大桥鸟瞰图



(b) 桥旁支承于桩基的海上观景平台, 面积达1万 m^2 , 并可供船舶停靠、加油补给及海上救援之用

图7 杭州湾跨海大桥

Fig. 7 Hangzhou Bay Cross-sea Bridge

○ 我国首座外海大桥—上海南汇芦潮港至宁波大小洋山港的东海大桥, 2005 年建成, 全长 32.5 km, 双向 6 车道, 采用 $\phi 2.5 \text{ m}$ 嵌岩钻孔灌注桩, 长 110 m, 以及 $\phi 1.5 \text{ m}$ 钢管桩, 长 60 m; 并大规模成功应用了海上砂桩技术 (图 8);

○ 我国首座海上桥梁集群工程—胶州湾海湾大桥 (图 9), 也称青岛海湾大桥, 跨胶州湾海域而建, 将青岛市与近海岛屿黄岛相连接, 全长 36.48 km, 宽 35 m, 采用大直径钻孔灌注桩, 自 2007 年 5 月开工, 至 2010 年末已接近施工后期, 建成后将超过杭州湾大桥而成为新的世界最长跨海大桥;



图8 东海大桥鸟瞰图

Fig. 8 China East Sea Bridge



图9 胶州湾跨海大桥鸟瞰图

Fig. 9 Jiaozhou Bay Bridge

○ 嘉 (兴) 绍 (兴) 跨江大桥, 采用 $\phi 3.8 \text{ m} \times 110 \text{ m}$ (长) 的特大直径钻孔灌注桩, 单根桩混凝土灌注量达 1300 m^3 ; 施工用的钢管护筒重达 40 t;

○ 江苏镇江至扬州的润扬长江大桥, 2005 年 5 月建成通车, 全长 35.66 km, 南汊为悬索桥, 北汊为斜拉桥, 南北塔基均采用 $\phi 2.8 \text{ m}$ 钻孔灌注桩, 南北锚碇基础分别采用冻融排桩法和地下连续墙方案 (图 10);



图10 江苏润扬大桥

Fig. 10 Zhenjiang-Yangzhou Yangtze River Bridge, Jiangsu

○ 江苏苏通长江大桥 (自苏州常熟至南通) 是世界最长的斜拉桥, 全长 8146 m, 支承于 $\phi 2.5 \sim \phi 2.8 \text{ m} \times 101 \text{ m}$ 至 119 m 长的钻孔桩, 于 2009 年建成, 获国际 George Richardson 奖, 是我国迄今获此殊荣的首座桥梁工程 (图 11);

○ 南京大胜关铁路桥, 全长 14.78 km, 是我国第一座高速铁路过江桥, 也是世界最大可同时行车三种速度的大桥, 即京沪高铁双线 (300 km/h), 沪汉蓉普铁双线 (200 km/h) 及南京城市地铁双线 (80 km/h); 采用 $\phi 2.8 \text{ m} \times$ 长 112 m 钻孔灌注桩, 支承于泥岩土; 2006 年 9 月开工, 2009 年建成;



图 11 江苏苏通大桥

Fig. 11 Suzhou-Nantong Yangtze River Bridge, Jiangsu

○ 浙江台州椒江二桥, 桥宽 39.5 m, 总长 3.7 km, 采用了 $\phi 2.5 \text{ m} \times 139 \text{ m}$ (长) 的钻孔灌注桩, 进入凝灰岩深度大于 3.5 m, 是我国当今最长钻孔灌注桩;

○ 在十二五规划中已被列为“舟山群岛新经济区”的连岛大桥 (图 12), 全长 50 km, 海域含西堠门大桥等 5 座大桥, 自 1999 年开工至 2008 年建成贯通, 是我国规模最大的桥路连接工程, 采用大直径钻孔灌注桩和钢管桩;



图 12 舟山群岛连岛大桥平面图

Fig. 12 Layout of Zhoushan Bridges connecting islands

○ 连接香港、珠海、澳门的港珠澳大桥和沉管隧道, 全长 29.6 km, 涉及诸多深基础工程技术, 正在施工中 (图 13)。

1.4 高层多层建筑及地下空间开发建设^[4]

据世界著名媒体英国《金融时报》2011 年 3 月 3 日报道, “中国已成为全球头号建筑大国”。我国建造高楼之风兴起于 20 世纪八、九十年代, 至今仍方兴未艾。继上海黄浦江畔继 420 m 高的金茂大厦、492 m 高的环球金融中心之后, 一座 632 m 高 121 层的上海中心大厦已完成深基础工程, 又将拔地而起, 成为我国第一、全球第二高楼 (见图 14)。位于广州的 71 层的珠江大厦是世界上最节能的摩天楼, 受到了国际上的广泛赞誉。在武汉, 一座 606m 的高楼 (武汉中心) 即将成为我国第二、全球第三高楼。在二、三线城市如温州、东莞、厦门、深圳, 贵阳、海口、防城港、南京, 甚至江阴等地, 也无不矗立着 200 m 以上, 300~400 m 以上的高楼。据报道, 在全球已建成的 15 座最高楼中, 我国占 6 座; 全球在建的 10 座最高楼中, 我国占 4 座。



(a) 大桥走向示意图



(b) 钻孔桩施工

图 13 港珠澳大桥

Fig. 13 Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

10 a 来, 我国上述各地高层超高层建筑, 以及著名的北京 CCTV 新大楼、北京银泰中心、北京国贸中心、天津 117 大楼、天津津塔、广州塔、沈阳恒隆市府中心、河北开元环球中心, 昆明东风广场、大连东港商务区等, 以及重大标志性工程, 如北京国家大剧院、奥运场馆、上海世博场馆、广州大剧院等大多采用大直径钻孔桩支承, 个别工程采用了钢管桩^[5-6]。

我国在多层住宅及公共建筑中广泛应用的先张法预应力管桩, 据行业综合报道, 其年产量已达 2.5 亿 m (图 15)。



图 14 上海浦东新区的 3 座超高楼鼎足而立

Fig. 14 Three Skyscrapers at Pudong New District, Shanghai



图 15 新建的现代化住宅区频频现身于各大中城市

Fig. 15 Modern highrise residential buildings in cities and towns in China

我国当今高层建筑中钻孔灌注桩用量最大的单体工程上海中心大厦，基础面积 8280 m^2 ，筏板厚 6 m ，埋深 30 m ，采用钻孔灌注桩 955 根，桩径 1 m ，桩长核心筒内 86 m ，筒外 82 m ，建筑物总重量 8000 MN (80 万 t)。桩筏基础为八角形，核心筒荷载集中区采用梅花形布桩，其他区域正交形布桩，参见图 16。

雄踞北京天安门广场东侧的中国国家博物馆是 21 世纪头 10 a 我国建成的又一重大标志性建筑物。它以中国历史博物馆、中国革命博物馆为基础，东扩 40 m ，下挖两层，上增一层（共 4 层）改造扩建而成，其体量由原 6.5 万 m^2 ，激增 3 倍而达到近 20 万 m^2 ，一跃而成为全球建筑面积最大的博物馆。它的艺术长廊净空高 28 m ，宽 30 m ，长 330 m ，面积近 1 万 m^2 ，为全球最大的展厅。其地下藏品库房面积达 3 万 m^2 。工程自 2007 年 3 月开工，仅历 3.5 a 即全面竣工，被国外媒体称为又一中国速度。

在采用深基础支承的建构物中，还需述及在内蒙古自治区沙漠边缘，距鄂尔多斯市旧城约 30 km 的康巴什新区自 2004 年以来已兴建了数百座高楼大厦，其中包括写字楼、住宅楼、高星级酒店、学校、博物馆、大剧院、市府大楼，以及汽车制造装备等工业基地，仅 6 a 时间冒出了一座近 32 km^2 ，规划居住 100 万人口的现代化城区。这一令人惊讶的“建城”速度，乃缘于当地丰富的“羊煤土气”（羊毛、煤炭、稀土、燃气）四大资源，获得了一个非常规的开发建设模式。据报道，该市 2010 年的人均 GDP 已超过香港、深圳而跃居全国城市之首位。

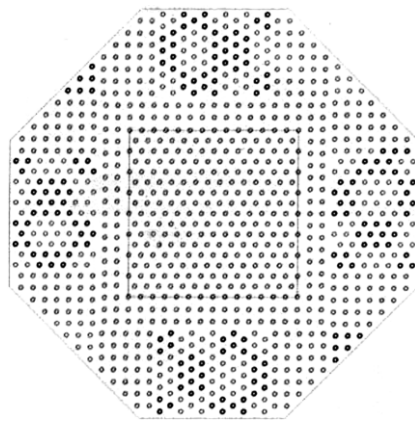
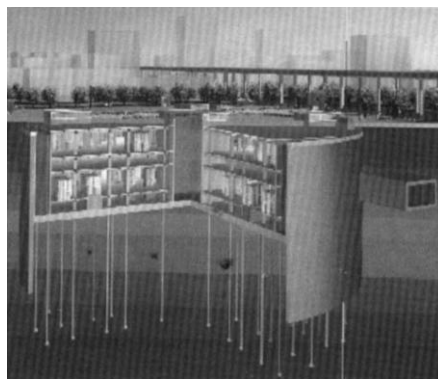


图 16 上海中心大厦布桩图

Fig. 16 Layout of pile foundation of Shanghai Center

我国各地高层多层建筑的地下空间以及城市地下车库、地下商场、地下仓库、地下街、地下变电站、地下民防工事等地下空间开发的规模越来越大。近年上海、北京单项基坑开挖面积达 10 万至 30 万 m^2 以上的地下综合体项目已达数十个。且基坑型式多变，深度越来越大。上海中心大厦地下 5 层，挖深 31 m ；北京国家大剧院基坑深 40 m ，银泰中心基坑深 27 m ，苏州中心挖深 22.5 m ；天津津塔基坑挖深 23.5 m ；上海地铁 4 号线董家渡事故修复基坑深 41 m ^[7-8]。

上海世博 500 kV 地下变电站是我国首座全埋式大型变电站，也是亚洲乃至世界最大最先进的地下变电站之一。该工程基坑直径 130 m ，开挖深 34 m 。地基土特别软弱，采用全逆作法设计施工，取得了一批原创性技术成果，参见图 17。



(a) 效果图

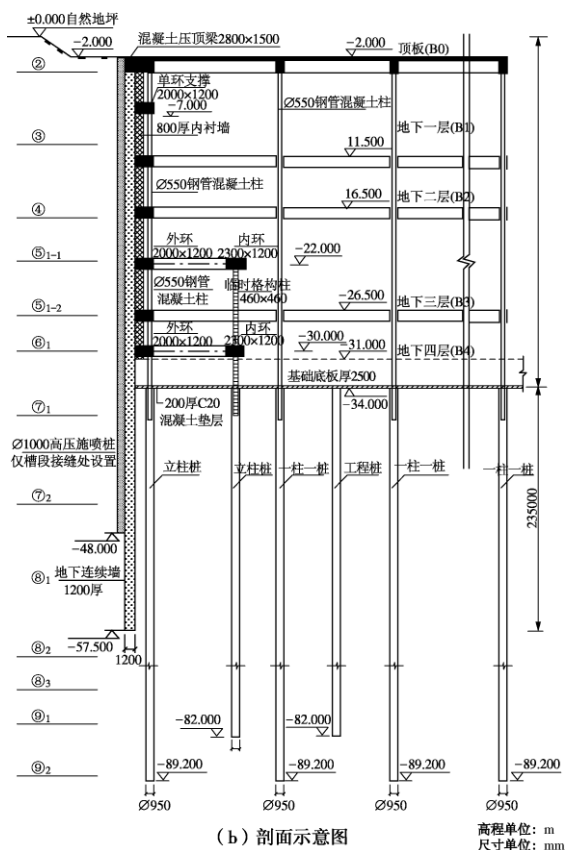


图 17 上海世博 500 kV 地下变电站

Fig. 17 Shanghai Expo 500 kV underground electricity transformer station

2 深基础工程应对巨大挑战的主要技术措施

(1) 加强设计施工技术的规范化管理^[7-8]。10 a 来, 全国各地产政学研企共同合作, 有计划地适时编制和修订了一系列的地基基础、桩基础和基坑工程的技术标准规范, 包括适用于全国的, 适用于不同部门不同专业 (如建筑、铁路、公路、桥梁、港口、城市轨道交通等), 适用于不同地质条件 (如软土、膨胀土、湿陷性黄土、红土、季节性冻土、岩溶地区等), 以及适用于不同省区市的地方性标准规范, 从而形成了全国的较完整的标准规范体系, 使勘察、设计、施工、检测、监理、验收等各项工作纳入了规范化管理范畴。

(2) 成功研发推广了适用于不同地质条件不同工程要求的一系列新桩型, 借以提高桩基承载能力和节约资源, 其中最常用的桩型包括钻孔扩底桩、挤扩桩、旋挖钻孔桩、长螺旋钻孔压灌桩、多支盘桩、先张法预应力管桩、后张法预应力大直径管桩、钻孔咬合桩、壁板桩、薄壁筒桩、长螺杆桩、CFG 桩等, 并在工程实践中创新了诸多实用的新工法 (图 18 和 19)^[9]。



图 18 旋挖桩施工

Fig. 18 Spiral-drilled piling



图 19 长螺杆桩施工

Fig. 19 Long spiral-drilled piling

(3) 从引进借鉴到自主创新, 成功研制了适合我国不同地质和环境条件的多种桩工机械产品, 如旋挖钻孔桩机、长螺旋钻孔桩机、全套管钻孔桩机、SMW 工法多轴搅拌机、大吨位静压桩机、连续墙挖槽机等, 机械的主要性能有的已接近或达到了国际先进水平, 市场占有率逐步提高, 2010 年仅旋挖桩机生产量即达 5000 余台, 满足了我国南北各地的施工需求; 并出口至亚、非、欧一些国家和地区。

(4) 在各类混凝土灌注桩中通过系统研究普遍推广了卓有成效的“桩身、桩端后注浆工艺”, 不仅消除了桩身泥皮和桩端沉渣之通病, 并且加固了桩周和桩底一定范围的土体, 从而使桩身质量获得更可靠的保证, 桩基沉降得以减少, 单桩承载力大幅度提高^[10]。

(5) 在桩基设计中, 通过持续研究探索根据建筑物上部结构与地基基础共同作用的理念, 因地制宜、因工程制宜, 推广了疏桩基础设计; 沉降控制复合桩基设计; 长短桩结合设计; 刚柔性桩结合设计; 端承桩复合桩基设计; CFG 桩复合桩基设计; 现浇大直径管桩复合地基设计; 变刚度调平设计 (图 20) 等一系列新的设计方法, 取得了良好的技术经济和环境效益。与此同时并推广了概念设计、动态设计、优化设计等新的设计理念, 使设计方案更为经济合理, 切实可行^[11]。10 a 中, 全国各地未发生一起因桩型选择错误或因设计方法不当而导致桩基整体失稳的事故。

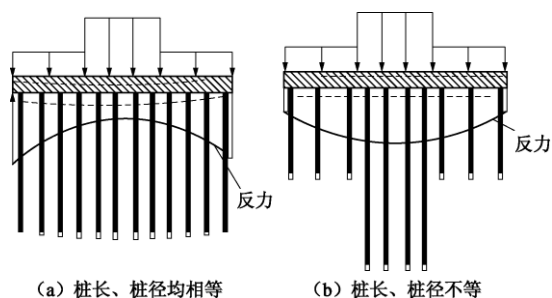


图 20 均匀布桩与变刚度布桩的变形与反力示意^[5]

Fig. 20 Deformation and reaction sketches of piles with different lengths and diameters

(6) 针对城市中建筑物、交通和人口密集地区深基坑周边地上地下的复杂环境 (图 21), 对深基坑支护结构的设计, 由强度控制转变为变形控制, 并加强施工中动态观测监控, 以确保地上地下周边环境的安全。推广应用了三维可视化控制技术, 使设计、施工和管理人员能够对施工过程实施全方位感性化的监控。

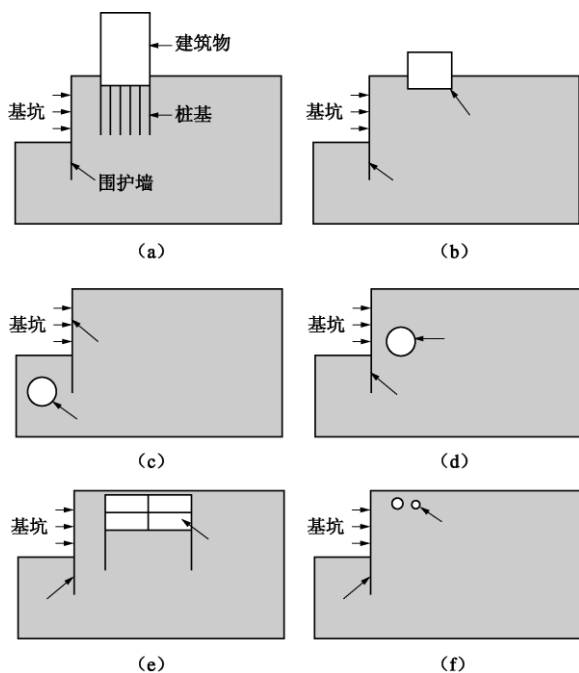


图 21 深基坑周边的几种典型环境^[8]

Fig. 21 Different environmental circumstances of deep excavations

(7) 在深基坑支护结构中, 因地制宜、因工程因环境制宜, 成功开发应用了水泥土重力式围护墙技术、地下连续墙技术、桩板墙技术、型钢水泥土搅拌墙技术等多种创新技术, 取得了良好的技术环境和经济效益; 在码头挡土墙、防洪堤、建桥围堰中, 成功应用了新型的组合式大宽度钢板桩技术^[5, 10]。

(8) 在深基坑工程长期大量的实践中, 逐步形成并成功推行了支护结构与主体结构全逆作法、半逆作法, 主楼与裙楼顺逆结合法, 中心与周边顺逆结合法等多种新的设计施工技术, 倡导和推广了考虑时空效

应的设计施工方法, 均取得了显著的技术经济和环境效益^[10]。

3 大吨位桩的承载力问题^[12-13]

由于桩的直径、长度增大, 要求单桩的承载力越来越高, 传统的单桩静载荷试验虽长期以来被世界各地公认为确定单桩承载力的最可靠方法, 但不论其采用堆载法或锚桩法试桩, 都存在费时费钱费力等缺点。而且当单桩承载力要求达到数 10 MN 甚至更高时, 以及要求进行水下试桩或在基坑底试桩时, 传统的静载试桩法常被视为畏途。

为此, 近 10 a 来我国工程界对此类承载大吨位的桩, 持审慎态度采用了美国西北大学教授 Jorj O. Osterberg 所倡导的一种完全有别于传统试桩法的新方法。Jorj O. Osterberg 试桩法的主要特点是在桩被打入或沉入设置时, 先在桩的底部或桩身中部预埋一个特制的“荷载箱”, 然后通过荷载箱对桩进行分级加压而取得向上和向下二条荷载-位移曲线 (图 22, 23)。

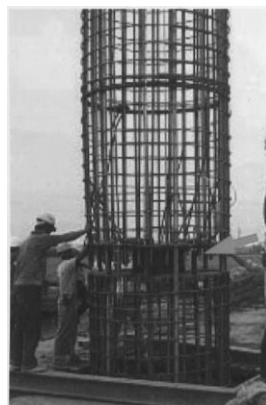


图 22 设有荷载箱的钢筋笼在下沉

Fig. 22 Reinforcement cage with Osterberg load cell lowering down into pile hole

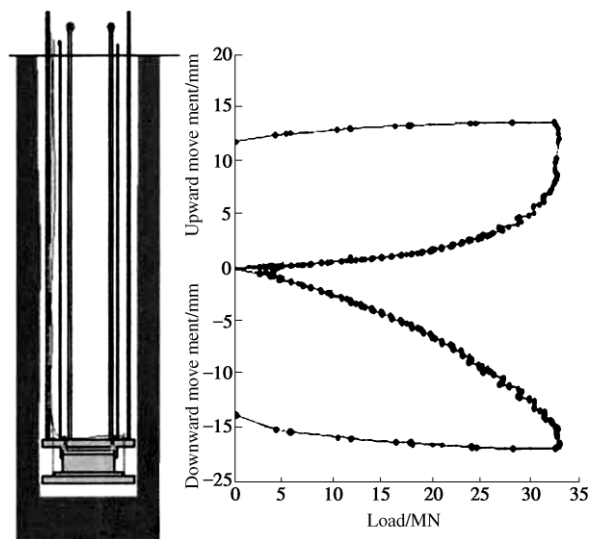


图 23 Osterberg 试桩法的试验曲线

Fig. 23 Load-movement curves of Osterberg's method

近年我国各地采用 Osterberg 试桩法的总量估计可能已在 1000 根以上, 其中包括长江苏通大桥、润杨大桥、杭州湾大桥、宁波甬江大桥等大桥特大桥的桩基及高铁桥某些梁桩基和某些高层建筑的桩基。

应当坦承指出, Osterberg 试桩法虽在我国已有较大应用, 但如何从采用该法所获得的向上和向下的两条荷载-位移曲线, 转换为一条“荷载-沉降曲线”, 并合理地求取单桩极限承载力(或容许承载力)以及相应的沉降量, 仍有待继续探讨研究完善。这是关系桩基安全和经济的一个十分重要的课题。

为此, 有的项目例如在建中的港珠澳跨海大桥等采取了在同一根桩或同类型的桩上搭建试桩平台, 仍采用传统试桩法进行平行对比试验。也有项目则进行高应变动测试验作为参考对比。我国台湾高铁等项目的桩基也曾进行此类对比试验。

Osterberg 试桩法目前另有一个问题是, 我国有试桩单位把该法称为“自平衡法”, 认为可以把“荷载箱”设置在桩身中部某一位置, 能使试桩时向上的力与向下的力取得平衡。实际上由于桩基地质条件的多元性复杂性, 在试桩之前要把“荷载箱”埋设在桩身中某一所谓的“平衡点”是有困难的。故“自平衡法”之称谓, 乃至早期某省某有关的地方标准因存在明显错误, 早已受到学术界工程界的质疑。上海市最新的地基基础设计规范(DGJ08—11—2010)中不予介绍所谓的“自平衡法”。正在建设中的上海中心大厦, 设计要求单桩极限承载力不小于 24 MN, 仍采用传统的静载荷试验锚桩法进行了 4 组 $\phi 1\text{ m} \times 88\text{ m}$ 长桩的试验, 测得最大单桩极限荷载达 30 MN, 取得了很有指导意义的成果。

4 与深基础工程相关联的特殊技术

4.1 拔桩工程^[14]

这主要是指将建设场地或道路地基中所存在的已被拆迁或报废的上部建构筑物下的旧桩残桩予以拔除或就地原位破碎。近年由于城市轨道交通建设的需要, 古旧历史文物建筑移位, 以及越江隧道通过堤岸等的需要, 拔桩工程应运而生。所需要拔除的桩已不仅是木桩、小截面桩, 而且有预制混凝土桩、高强度管桩、甚至大直径钢管桩、钻孔灌注桩等, 有的埋藏很深。此类拔桩工程施工还必须注意保护周边环境和保证相邻地下和地面市政设施等的正常安全运行, 以及居民的正常工作和生活, 乃至道路交通不受影响, 更加大了施工难度。

上海外滩综合通道改造工程是近年遇到的此类工程中规模和难度特别大的一项工程。对旧桩及各种障

碍物采用了振动拔除法、全套管回转清障法、全回转切割钻进法等多种新技术, 且整体拔除了埋深 52~55 m 的钻孔灌注桩。此类工程经过多年的历练, 已形成了一个新专业, 如今从施工机械设备到施工工艺均已较为成熟, 上海等城市已组建了专业施工队伍。

4.2 基础托换工程^[14-15]

托换工程早已有之, 近年大量增加, 且施工难度大, 风险大。托换方案常受现场条件制约, 托换方法多种多样, 完全应根据个案实际情况而制定。较常见的案例如城市高架桥下和高楼大厦下的桩基遇地铁盾构掘进, 或过街地下通道施工等等。一项托换工程往往是多种施工技术的综合应用。图 24 (a) 是上海外滩天文台基础, 遇延安中路隧道施工而采取的保护性托换; 图 24 (b) 是广州地铁一号线盾构施工通过某楼房的桩基托换工程。

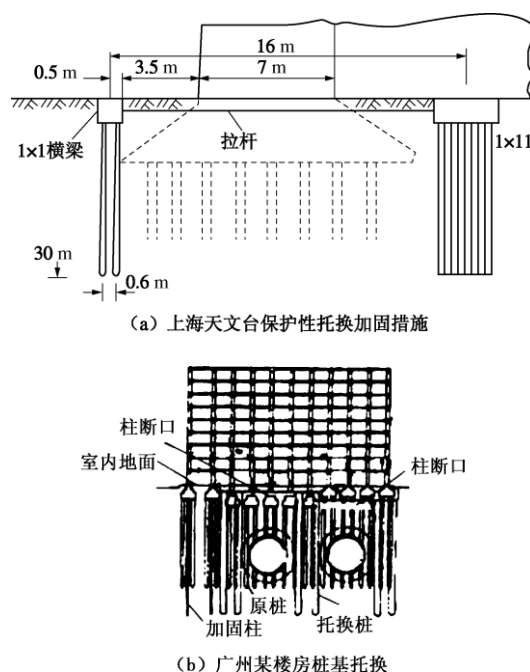


图 24 基础托换工程

Fig. 24 Under-pining sketches

4.3 地源热泵地下管铺设技术^[16]

地源热泵系统, 是在新建建筑物的基桩桩身中预埋管道与钢筋笼相绑紧而打入地基, 必要时并可在建筑物外围场地中直接埋设此种管道, 共同组成一个系统以汲取和交换地下一定深度范围内地下水和土体的热能, 来满足建筑物室内供暖和降温的需要。埋管深度一般在地表以下 60~120 m 左右, 在地质学上称为利用“浅层”地下热能。与传统空调系统相比, 地源热泵系统可节约能源 20%~40%, 具有良好的开发应用前景。此项工程主要采用桩基工程的施工机械进行, 并且在新建工程项目中与桩基施工同步进行(图 25)。



图 25 地源热泵系统施工现场

Fig. 25 Site of underground thermal energy utilization systems

地源热泵的应用国际上从 20 世纪 90 年代后期开始迅速发展。我国从 21 世纪初开始推广,也已获得较快发展。至 2010 年,我国应用地源热泵系统供暖制冷的建筑项目包括北京奥运村、上海世博会世博轴、上海虹桥交通枢纽站等重大项目,总数已达 2000 余项,建筑面积近 8000 万 m^2 ,其中多数集中在京津沪冀辽等地,均取得了良好节能效果。

上海世博轴工程是上海市迄今已投入使用地源热泵系统的最大项目,单项建筑面积超过 20 万 m^2 。运行能耗较传统空调系统节约 20%,且减少了二氧化碳排放量,环保效果明显。

5 技术学术交流频繁:会议交流与平面媒体

我国大规模的深基础工程实践促进了全国性和地方性的技术学术交流研讨会频繁在各地举行,此类交流大致有 3 个层面。第一、由于深基础工程是岩土工程学科的重要组成部分,因此凡是岩土工程领域的学术活动,总会将深基础工程列入其主要议题;第二、由桩基和深基坑工程等专业学术组织、行业组织为主召开的年会等;第三、根据各个时期各个阶段技术发展和生产需要,专门就某一或某些技术热点难点,由相关单位组织的专题交流研讨会。上述各层面的活动,皆深受业界欢迎,交流成果丰硕,促进了深基础工程技术学术水平和从业人员业务素质的不断提高。近 10 a,这些会议活动主要有:

(1)中国土木工程学会历届土力学及岩土工程学术会议(每 4 a 一届)常将深基础工程列为其重要议题,其论文集入选的桩基和深基坑工程论文常占了相对较大的比重,收录了较多的重大试验研究和理论研究成果。

(2)我国桩基工程学术年会已成功举办 9 届。此系列年会系由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础学术委员会与中国工程建设标准化协会地基

与基础专业委员会联合主办。年会主题覆盖桩基工程勘察、设计、施工、试验、研究、检测、监理等各个方面,并分届根据工程要求和形势发展选择其中一、二项为当年研讨重点。历届年会均有论文集出版。

(3)中国建筑业协会深基础施工分会与台湾财团法人地工技术研究发展基金会共同主办的海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会,至 20 世纪末已先后在两岸交替成功举办 3 届。进入 21 世纪以来,2002 年、2004 年、2007 年及 2009 年相继在上海、台北、天津、台中举办 4 届,已成为两岸共同交流深基础工程经验的高层次的重要例会。最近 4 届会议所出版论文集均为 2 卷集,大陆台湾各 1 卷,分别收入两地作者的论文^[16]。

鉴于两岸隔绝数十年,科技发展生态乃至规范术语均有所不同,会议曾编辑出版了《两岸存在差异的专业词汇》一书,以方便两岸业者交流沟通增进理解^[17]。

(4)中国建筑学会施工分会下设的深基坑工程专业委员会,近数年来每 2 年召开 1 次深基坑工程专题研讨会,其研讨范围不仅包括了基坑工程施工技术,也论及基坑工程勘察、设计、检测、监理等方面,甚至也涉及桩基工程,会议论文常以某一学术期刊的增刊形式发表。

(5)2006 年 6 月,由同济大学和上海市土木工程学会联合主办,美国土木工程师学会岩土分会、美国深基础协会及美、日、荷兰等国多所高校共同协办,我国国家自然科学基金会、上海市科协、上海大学等单位资助的上海国际岩土工程学术会议(Geo-Shanghai International 2006),与会专家学者达 480 人,来自 30 余个国家和地区,深基础工程为会议主要议题之一。论文集 8 卷由美国土木工程师学会出版,全球发行,其中收入我国作者的论文 200 余篇。

(6)2010 年 3 月,桩与深基础国际峰会—中国 2010 在我国上海召开。该峰会系由上海一家会展公司发起,得到了上海市土木工程学会、香港岩土工程学会、美国深基础协会、意大利土力公司、澳大利亚 Coffey 岩土公司等国际知名企业以及我国同济大学、浙江理工大学等中外共 30 余家学术组织、行业组织,高校、咨询、设计、施工承包单位和桩工机械设备制造厂商等支持和协办。出席峰会的有中外著名学者专家、政府官员、企业家等共 270 余人。

(7)由中国建筑业协会深基础施工分会主办,各地相关专业单位协办的不定期的深基础工程技术专题研讨会,常有业界约 100 余位专家学者、行业领导和企业家参加,深度畅议深基础工程领域的某些技术热

点和发展趋势, 研讨超深基坑的支护技术、复合地基技术、基础工程托换技术、深层地基加固技术、填海地基加固技术等问题。

(8) 除上述各种会议外, 中国建筑学会、中国力学学会、中国岩石力学学会、中国水利学会、中国铁道学会、中国公路学会、中国水电工程学会等或其相关的专业委员会常在其年会或其他学术会议中结合其专业特点研讨桩基和深基坑工程等问题, 其议题各有特色。同时, 我国各省市地方的相关学术团体也每年举办各具地方特色的专题会议, 促进了当地业界技术水平的不断提高。

此外, 我国有多种与深基础有关的学报期刊是开展技术学术交流的另一大重要平台。我国《岩土工程学报》、《岩土力学》、《土木工程学报》、《建筑结构学报》、《岩石力学与工程学报》、《地下空间与工程学报》、《建筑科学》、《建筑施工》、《施工技术》、《工业建筑》、《铁道建筑技术》、《岩土工程技术》等期刊以及设有相关专业的高校的学报, 近年常以较多篇幅刊载有关桩基和深基坑工程的论文、工程实录、工程动态、国内外会议书刊信息等, 起到了及时传播深基础工程成就和指导行业研发方向的作用。其中多种刊物由于稿件激增, 已分别由双月刊改为月刊, 或月刊改为半月刊。并增加了每期的篇幅, 近年还常为深基础工程出版专刊增刊。

6 深基础工程图书出版物

10 a 来, 随着深基础工程技术不断发展、科研成果和工程经验大量积累, 深基础领域图书出版物的数量大幅增长。这些出版物又进一步促进了深基础技术的进步。本文限于篇幅, 仅拟举 4 本较畅销的大型工具书和 1 本具有创新意义的专著为例, 从中可以窥见我国当前深基础工程技术总体水平和发展趋势之一斑。

(1) 《桩基工程手册 (桩和桩基础手册)》, 史佩栋主编、顾晓鲁主审; 人民交通出版社 2008 年出版, 250 余万字。

该书是国家新闻出版总署审定的“十一五国家重点图书”, 全书分 8 篇 48 章, 较全面系统地介绍了我国桩基础工程理论和实践的最新进展。

该书是由我国大陆和港台三地的 30 余位著名资深专家各抒其长、合作完成的集体成果, 并首次整合了两岸三地的桩基科技文化。据出版社收集专家读者反馈的意见, 认为: “该书虽称为《手册》, 但与一般的工具书不同, 而是一部专论桩和桩基础的经典之作。该书理论分析与性状说明并重, 分别阐明了桩基在各

大类土木工程中的设计方法、施工技术, 以及在抗震、抗滑和水平承载补强等场合的应用; 并专章讨论水上桩基、托换桩基及残桩废除技术; 特别强调不同桩基类型在不同岩土地层与环境条件下的有效应用、质量控制及检测技术; 该书对桩基事故处理及被动缺陷桩的应力变形分析等, 采用了多个案例剖析说明。”专家读者并认为, “该书对高校大专学生及研究生而言, 可帮助其了解桩基工程的实务, 可缩短学生成长为工程师之间的距离; 对在业工程师而言, 该书可增进其对桩基工程的理论知识, 更新和深化相关的各种实用技术。”

(2) 《建筑桩基技术规范应用手册》, 刘金砺、高文生、邱明兵编著, 中国建筑工业出版社 2010 年出版, 88 万字。

该书的特色是围绕《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 的内容, 针对实际应用需要, 既阐明桩基设计计算原理, 又剖析其工作机理; 既阐明设计基本规定和原则, 又论述具体技术措施; 既阐明设计先进理念, 又分析对比传统设计理念及其问题; 既阐明计算方法与公式, 又给出具体应用案例。该书对于未列入规范、尚处于发展中的新技术和某些特殊条件下的桩基设计问题, 也对其机理、设计、原理与方法作了简要介绍; 对于工程应用中提出的各种疑难问题, 也分别作了简要解释。该书是作者长期从事建筑桩基科学研究、工程实践和技术标准化工作的一个全面总结, 同时系统地反映了我国建筑桩基技术标准化工作的发展历程。

(3) 《桩基施工手册》, 徐维钧主编, 人民交通出版社 2007 年出版, 250 万字。

该书顾名思义是以介绍各类桩在各种地质和环境条件下的施工技术为主旨。40 余位作者皆是我国交通港航系统的资深总工程师和施工专家。

该书有约 30 万字篇幅介绍桩基施工准备及测量定位, 约 20 万字介绍水上沉桩施工技术, 近 10 万字介绍桩基防腐技术, 皆是该书亮点和特色所在, 应认为是不可多得的介绍桩基施工经验的好书。但需指出, 该书将传统的刚性桩与本属于地基处理技术的旋喷桩、搅拌桩、碎石桩、水上砂桩、灰土桩等柔性桩和散体桩也列入该书, 使全书的体例安排出现了一些不协调之处。

(4) 《基坑工程手册》(第二版)》, 刘国彬、王卫东主编; 中国建筑工业出版社 2009 年出版, 220 余万字。

该书是以刘建航、侯学渊主编的《基坑工程手册》(1997 年中国建筑工业出版社) 作为第一版而重新编撰的专著。第二版的作者主要是在深基坑工程领域富

有实践经验的 30 余位中青年专家。

与《基坑工程手册》(第一版)相比较,该第二版全面反映了我国基坑工程技术经过最近 10 a 的艰难历练所取得的飞跃进步。它增加了大量新的设计施工技术、经验和工程实例,并在工程地域和地质条件上覆盖了软土、硬土、岩石等各种情况,加强了该书的适用性和实用性。该书有专章深入阐述在复杂的城市环境条件下,基坑工程施工对其周边地上地下环境可能引起的各种影响的深刻分析和相应的保护措施。

(5)《刚-柔性桩复合地基》,朱奎、徐日庆著,化学工业出版社 2007 年出版,24 万余字。

刚-柔性桩复合地基是将传统的刚性桩合理布置于水泥土搅拌桩等柔性桩形成的复合地基,通过对两种桩及桩间土体的变形协调来共同承担上部荷载。它特别适用于我国沿海软土地区具有两个不同埋深持力层的地质条件,可将柔性短桩和传统的较长刚性桩共同形成一种空间变刚度复合地基。这种新型的桩基技术可更有效地发挥刚性桩、柔性桩和地基土三者的承载潜力,降低地基基础的沉降量,达到工程安全、造价经济的目的。该书通过系统的现场试验、数值分析和理论研究,对此类复合地基的特性作了较深入的分析,介绍了桩土荷载分担比的研究成果,提出了沉降计算方法和可供实用的设计与施工技术。

7 施工安全与工程质量

施工安全与工程质量是工程建设的头等大事,基础工程的施工安全与工程质量更是每一项工程的重中之重。毋庸讳言,近年我国各地在深基础工程中所发生的安全质量事故仍时有发生,有的事故性质和后果特别严重,其中不少事故是由于“抢工”、“赶工”或所谓“创造速度奇迹”等原因,违背设计施工客观科学规律,甚至缺乏基本的工程常识,而留下隐患所造成。

事故案例应视为珍贵的教材,讳莫如深或将助长新的事故。本文简述数例,可供举一反三,引以为训。

(1) 2008 年 11 月 15 日 杭州地铁湘湖站基坑坍塌事故

2008 年 11 月 15 日,正在施工中的杭州地铁一号线湘湖站约 $100\text{ m}\times 50\text{ m}$ 的北[#]2 基坑发生坍塌,邻近道路局部下陷约 6 m,基坑外东侧河沟及地下被压损的自来水管和污水管的泥水倾泻而下(图 26);事故共造成正在基坑内施工的 21 人死亡,24 人受伤,直接经济损失约人民币 5000 万元。

据调查,造成该基坑坍塌的直接原因主要是基坑严重超挖、支撑体系存在严重缺陷,且钢管支撑架设

不及时,坑底垫层未及时浇筑,以及施工监测失效等。

(2) 2009 年 6 月 27 日上海闵行区莲花河畔景苑居民楼整体倾覆事故



(a) 事故现场鸟瞰



(b) 邻房倒塌



(c) 现场一侧

图 26 杭州地铁湘湖站基坑事故

Fig. 26 Deep excavation accident site, Hangzhou Metro

2009 年 6 月 27 日,上海闵行区莲花南路在建已结顶的莲花河畔景苑一栋 13 层居民楼从桩基拔断,整体倾倒在地,而倾倒的楼身几近完好(图 27)。



(a) 7号楼整体倾覆



(b) 基桩被拔出

图 27 上海莲花河畔景苑 7 号楼事故

Fig. 27 Totally falling down of a tall building in Shanghai

据调查,大楼倾倒的直接原因,主要是在大楼一侧开挖地下车库的基坑未加支护,又在大楼相对一侧堆积 9 m 高的土方,致使大楼下土体发生平移,从而拉断了大楼的基桩。

(3) 2010 年 9 月 7 日渤海海域胜利油田作业 3 号平台首桩滑桩事故

2010 年 9 月 7 日,渤海海域山东东营胜利油田作业 3 号平台突然发生 45° 倾斜事故,平台船首进水,井架倒塌(见图 28)。平台上有 36 人遇险,其中有 4 人落海,32 人被困平台。经中国海上搜救中心“北海救 112”轮等 5 艘海上专业救助船舶和 2 艘海事执法船,及北海第一救助飞行队“B-7313”救助直升机紧急出动连夜赴现场进行救助,有 34 人获救,2 人失踪。



图 28 渤海海域桩基事故

Fig. 28 Piled-oil-platform inclined in Bohai Sea

据介绍,该 3 号平台在海域作业过程中受到当时热带风暴玛瑙的影响,发生事故时海上阵风达 9 级,浪高达 4 m。事故昭示了对于海上平台此类特殊桩基的设计,务须充分考虑其抗风暴、抗波浪、抗滑移和抗地震的性能。

8 展望未来: 10 点思路与建议

回顾过去的 10 a,我国经济实现了历史性的突破,深基础工程托起了各项工程建设的重荷,协同上部结构取得了令人瞩目的多项世界第一、国内第一,或刷新我国纪录的业绩。

展望未来,国家十二五规划纲要已展示了 2011

至 2015 年我国国民经济和社会发展的宏伟蓝图。纲要在许多篇章和专栏中列出了繁重的建设任务。深基础工程业界必将面临更为复杂的环境和地质条件,更为艰巨的超深基础设计施工任务和更大规模的地下空间基础设施的规划建设任务。为此,借鉴以往的宝贵经验,根据新形势的要求,对深基础工程领域未来 5~10 a 的发展方针,提出 10 点初步思路和建议。

(1) 深基础工程设计施工各项工作,务必自始至终要把确保施工安全和工程质量放在首要位置。要根据工程特点和环境及地质特点,加强和完善预警机制和实时监控,防范各种安全质量事故于未然;要提高应对和防治突发自然灾害的能力,切实保障施工人员的生命安全;要加强对工程风险的研究,在施工前进行风险界定、风险辨识、风险分析、风险评价;对不同等级的风险分别采取风险消除、风险降低、风险转移和风险自留等不同处置方式;并实行信息化施工,进行动态评估、动态跟踪、动态处理。对关键工程项目实施全寿命安全质量检测监控工作;要加强三维数字地下空间信息系统的研究应用和管理;加强和完善防灾系统。

(2) 深基础工程设计施工,要遵循绿色经济、绿色建筑、绿色施工的时代要求,全方位实现节能减排和环保要求;严禁工程现场的废土、废气、废物、废水、粉尘和噪音污染环境;要淘汰柴油打桩锤;积极推广“地下热能桩”和地源热泵系统等开发利用地下水和土壤中赋存热能的新技术;在施工机械设备中不断扩大采用各种清洁能源和新能源。

(3) 为确保桩基工程安全可靠和经济合理,建议对试桩单位的资质实行分级管理,对承担大吨位桩(例如设计要求单桩承载力为 10 MN 或千吨以上)的试桩单位的资质要另行严格考核认证。对重大的试桩方法建议国家技术监督主管部门应介入论证鉴定和管理。

(4) 建议对岩土工程师的资质实行分级管理,即如建筑师、建造师、结构工程师那样,分为一级、二级岩土工程师。并规定一级岩土工程师方可承担大型复杂的高难度的深基础工程的勘察、设计、施工项目(具体要求可另议)。我国在工程勘察行业中推行岩土工程体制已逾 30 a,目前岩土工程师的资质不分等级,对于特别优秀的岩土工程师则由行业组织授予“工程勘察大师”的荣誉称号,这似乎又在鼓励向勘察发展,是一个矛盾的导向^[18]。

(5) 建议加强深基础工程高级技术人才的培养。可在有条件的高等院校开设培训班,或设立培训基地;可采用重大事故剖析以及大型复杂项目的方案为教材,更新知识,加强其对国家相关的技术政策法规标

准规范的理解和综合执行能力。鉴于深基础工程的复杂性和技术难度必将愈来愈大,应当认为培养高级技术人才是确保工程质量,消除潜在隐患和应对突发重大事故的一项长期的具有战略意义的特别重要措施。

(6)深基础工程技术标准规范的制订要有新的突破。现今,我国的技术标准规范普遍存在一个问题,即编制或修订的周期太长(常达10a),不利于科技创新成果的及时推广。因此,建议要建立一种灵活的机制,适时补充条例,使创新成果可及时纳入规范转化为生产力,也将更有利于发挥科技人员的积极性;规范要兼具指导性和引导性,避免引起对技术进步的约束。同时建议中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会要统一管理、协调和审批各行业各部门涉及地基基础的标准规范,要扭转由于历史原因造成的条块分割的现象。

(7)建议由行业/学术组织创办一份深基础工程专业杂志,并要取得正式刊号,成为深基础工程行业/专业的主流媒体。以往我国曾先后有《岩土工程师》、《地基基础工程》、《土工基础》、《岩土工程界》等杂志编辑出版,都具有一定影响力,但因种种原因未能办下去,以致近年有关深基础工程的成果、经验、信息等的报道分散刊出在许多相关的杂志上。新的一份专业杂志要求是高水平的、一流的、前沿的、综合性的,需要有热心的有影响力的编辑班子,在创办初期要有经费支持。

(8)加强和扩大两岸四地的技术学术交流。建议可在已成功举办多届的“海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会”的基础上吸纳香港特区、澳门特区相关社团乃至全球华人中的相关专家学者共同参与;与此同时,要加强国际间技术学术和管理经验的适时交流。

(9)要发扬我国专业技术和专家的优势,进一步开拓深基础工程国际承包业务;进一步研发和完善超深基坑和超深桩基础的设计施工技术成套机械设备仪器,以适应不断扩大城市地下空间建设的新需求。

(10)建议中国建筑业协会深基础施工分会应正名为深基础工程分会,扩大会员的专业、地域和人才的覆盖面,充实组织机构,增强其在行业内外影响力,引领和协调我国蓬勃发展中的深基础工程行业的各方面活动,包括评优评奖、核发资质、培育和繁荣深基础工程科技文化等。

致谢: 本文撰写承蒙上海《建筑施工》杂志曹鸿新主编、浙江理工大学俞峰博士及浙江大成建设虞兴福博士热情提供相关资料,承蒙中国建协深基础施工分会许溶烈先生、王新杰先生拨冗审阅初稿,提出了宝贵意见,核对了相关的重要统计数

字,谨此一并表示衷心谢忱。

参考文献:

- [1] 刘金砺. 桩基工程技术进展 2009 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Jin-li. Advances in pile foundation technology 2009[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 史佩栋. 海峡两岸轨道交通建设与环境工程高级技术论坛 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (SHI Pei-dong. Cross-strait advanced technical forum on rapid rail transit construction and environmental engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [3] 丁大钧. 中国桥梁建设新进展(1991—) [M]. 南京: 东南大学出版社, 2009. (DING Da-jun. New advances of bridge construction in China (1991—)[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2009. (in Chinese))
- [4] 史佩栋, 高大钊, 钱力航. 21 世纪高层建筑基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (SHI Pei-dong, GAO Da-zhao, QIAN Li-hang. Foundation engineering of tall buildings in 21st century[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [5] 史佩栋. 桩基工程手册(桩和桩基础手册) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (SHI Pei-dong. Pile and pile foundation handbook[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [6] 刘金砺, 高文生, 邱明兵. 建筑桩基技术规范应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (LIU Jin-li, GAO Wen-sheng, QIU Ming-bing. Handbook for application of technical code for building pile foundations[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [7] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (JGJ94—2008 Handbook for application of technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [8] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Manual for deep excavation engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [9] 徐维钧. 桩基施工手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (XU Wei-jun. Handbook of pile construction[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [10] 张忠苗. 灌注桩后注浆技术及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (ZHANG Zhong-miao. Post-grouting technology of cast-in-situ piles and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture &

- Building Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 秋仁东. 竖向荷载下桩身压缩和桩基沉降变形研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2011. (QIU Ren-dong. Research on behavior of pile shaft compression and settlement deformation of pile group foundation under vertical load[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2011. (in Chinese))
- [12] 史佩栋, 虞兴福, 曹建民, 等. 评 Osterberg 试桩法在我国的应用[J]. 土木工程学报, 2007(增刊 1): 472 - 476. (SHI Pei-dong, YU Xing-fu, CAO Jian-min, et al. Comments on the application of Osterberg load test method in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2007(S1): 472 - 476. (in Chinese))
- [13] 史佩栋, 虞兴福, 曹建民, 等. Osterberg 试桩法在国内外的应用及当前存在问题[J]. 建筑施工, 2007, 29(8): 573 - 576. (SHI Pei-dong, YU Xing-fu, CAO Jian-min, et al. Application of Osterberg load test method in China and abroad and relevant problems[J]. Building Construction, 2007, 29(8): 573 - 576. (in Chinese))
- [14] 史佩栋. 深基础工程特殊技术问题[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (SHI Pei-dong. Special technical problems in deep foundation engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [15] 史佩栋. 建构筑物地基基础特殊技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (SHI Pei-dong. Special foundation technology for buildings and structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [16] 王新杰, 张晋勋. 2011 海峡两岸岩土工程/地工技术交流研讨会论文集(大陆卷)[M]. 北京: 知识产权出版社, 2011. (WANG Xin-jie, ZHANG Jin-xun. Proceedings of cross-strait geotechnical engineering symposium (mainland volume)[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [17] 郑文隆, 史佩栋. 海峡两岸岩土工程/地工技术存在差异的专业名词英汉对照[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (ZHENG Wen-long, SHI Pei-dong. Cross-strait equivalent technical terminology in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese))
- [18] 高大钊. 岩土工程勘察与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (GAO Da-zhao. Geotechnical investigation and design[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)