

基础工程技术的发展及面临的新课题

滕延京, 宫剑飞, 李建民

(中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京, 100013)

摘要: 城市化进程和地下空间开发的需求, 给我国基础工程技术提出了新的研究方向和课题。在对国内外基础工程技术分析总结的基础上, 重点对我国在同一大面积整体基础上建有多栋高层建筑或多层建筑的地基基础设计方法、基础变刚度调平设计方法、深大基础回弹以及再压缩变形特征及计算方法、基础结构抗浮设计、桩基工程新技术、既有建筑地基基础的工作性状及工程应用方法、地铁交通枢纽工程的地基基础加固改造等技术成果进行了介绍。这些成果体现出我国基础工程技术的特点和技术先进性。结合国外技术的发展, 提出我国基础工程技术应在大跨地下结构的设计理论、方法和按变形控制设计、深基坑施工引起环境影响评价方法及工程措施、深大地下建筑建设对已有周边建筑设计条件以及使用条件改变引起的基础设计评价方法及加固技术、基础工程的抗浮稳定性的设防水平及抗浮构件设计、地下交通线路施工或穿越工程以及地下使用功能实现引起的有关基础工程技术研究、基础耐久性问题的研究、新材料、新工艺、新设备的使用以及绿色施工技术的研发、基础工程技术发展应进行的试验研究工作等方面的研究方向和课题。

关键词: 基础工程; 变刚度调平设计; 回弹以及再压缩变形; 基础结构抗浮设计; 既有建筑地基基础的工作性状; 地基基础加固改造; 按变形控制设计; 基础耐久性; 绿色施工技术

中图分类号: O xxx.xx

文献标识码: A

文章编号: xxxx - xxxx(xxxx)xx - xxxx - xx

THE DEVELOPMENT AND THE NEW ISSUES ENCOUNTERED OF FOUNDATION ENGINEERING TECHNOLOGY

TENG Yan-jing, GONG Jian-fei, LI Jian-min

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing, 100013, China)

Abstract: The requirements of urbanization and underground space developing propose new researching points and issues for foundation engineering technology in China. After analyzing and summarizing the technology of foundation engineering at home and abroad, some methods are emphatically introduced in the country such as: i) The design method of foundation which is large thick raft foundation under high-rise buildings or multi-story buildings, ii) The design method by adjusting foundation rigidity to reduce difference settlement, iii) the calculating method of rebound deformation or recompression deformation in the excavation of deep and large foundation pit, iv) The anti-floating design of foundation structure, v) The new technology of pile engineering, vi) The working properties and the engineering applying method of foundation of existing buildings, vii) The reinforcement and transformation methods of foundation of metro transportation hub. Combining with the development of technology abroad, the new researching points and issues are proposed in several aspects of foundation engineering in the country such as: i) The design theory and method of large span underground structures, ii) the design method based on deformation control, iii) The evaluating method and controlling measures of impact on environment induced by constructing of deep foundation pit, iv) The evaluating method and the reinforcement technology of foundation in which the existing surrounding design and utilizing condition change for the construction of large and deep underground buildings, v) the fortification level and the anti-floating component design of anti-floating stability in foundation engineering, vi) The related technology research of foundation engineering induced by the construction of underground transportation or crossing engineering or the using function realizing of underground buildings, vii) the durability research of foundation engineering, viii) The

收稿日期: 2011 - xx - xx; **修回日期:** 2011 - xx - xx

作者简介: 滕延京, 男, 1949 年生, 研究员, 硕士, 主要从事地基基础工程技术研究工作。E-mail: tyjcabr@sina.com。

applications of new materials, new technology, new equipments and the research of the green construction technology, ix) the test study on foundation engineering, etc.

Key words: Foundation engineering; The design method by adjusting foundation rigidity; Rebound and recompression deformation Anti-floating design of foundation structure; Foundation working properties of existing building; Reinforcement and transformation of foundation; Design based on deformation control; Foundation durability; Green construction technology.

1 我国基础工程技术面临的新形势

1.1 城市化进程带来新的需求

随着人们生活水平的提高,对物质文化的需求日益增长,城市建设的压力不仅是人口增加、住房需求、城市交通等需求的压力。近十年来日益增长的私家车用量、大都市建设需要的大型公共设施、文化休闲场所、商场、车库等需求的压力也越来越大。增加城市容量和人类的活动空间,缓解交通堵塞,不占或少占土地的目的,开发利用地下空间将成为必然的选择。解决大城市住房用地紧张的措施之一是建造高层、超高层建筑。

中国的主要城市已经进入地下空间高速开发的时期。我国地下空间资源丰富,开发地下空间是节省土地资源,提高利用率,缓解城市压力,减少环境污染,改善生态环境的有效途径。

1.2 城市化进程带来新的需求

1) 深、大基础带来的地基基础设计问题

为了满足使用功能的需求,地下结构的层数由一~二层发展到四~五层,基础埋深已达 20m 以上;基础的面积已达数万平米,同时基础结构的开间由以 6~8m 为主发展为更大开间(9~12m)。在同一大面积整体基础上建有多栋高层建筑或多层建筑已成为大城市建设的主要基础形式。其带来的新问题包括地基反力和地基变形特征、回弹以及再压缩变形特征、深大基础的地基承载力和变形控制设计方法等。基础工程的抗浮稳定性的重要性引起人们的重视。

2) 深基坑施工带来的环境安全问题

由于基坑开挖深度大,深基坑开挖对周边环境的影响范围加大,其引起后果也越来越严重。其主要问题包括周边已有建筑由于基坑开挖变形引起的差异沉降、周边管线变形引起的上下水渗漏、燃气爆炸危险、道路交通安全等。深基坑施工降水引起的地下水资源保护问题也应引起重视。

3) 深、大地下建筑建设对已有周边建筑设计条件以及使用条件改变引起的基础设计评价问题

新建地下建筑的基础埋深比既有建筑基础埋深大,且体量较大,对既有建筑整体稳定以及地基承载力的评价已是基础工程应该解决的新问题。其评价方法应考虑既有建筑地基的受力历史,对既有建筑不同的地基基础形式的评价方法亦有不同。

4) 地下交通线路施工或穿越工程以及地下使用功能实现引起的有关基础工程问题

城市地下交通的线路建设一般埋深较大,施工引起的地应力损失造成地面沉降,对周边环境的影响范围内的建筑物影响较大;穿越工程改变了原有建筑物的地基基础受力条件,需进行评价,进行结构或地基托换加固;为实现地下交通与地下空间的人流、商业及综合使用功能,需进行既有建筑地下结构改造等。

1.3 建设节约型和环境友好型社会对基础工程的要求

建设节约型和环境友好型社会是人类对保障其自身生存环境的共同认识。我国由于人口众多,资源相对匮乏,对这个问题更有深刻的认识。“节能、节地、节水、节材、保护环境”,是我国的长期国策。在保证安全的基础上,追求基础工程的技术经济的统一,也是我们应该追求的目标。因此在基础工程中研究新的设计方法,新材料、新工艺、新设备的使用、以及绿色施工技术的研发等仍是基础工程技术的重要内容。

1.4 基础工程的耐久性

新的《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153-2008 规定:工程结构设计时,应规定结构的设计使用年限。基础工程结构应满足建筑物结构设计使用年限的要求。基础工程结构中,其地下水和土壤环境与上部结构使用环境不同,应根据其特点进行耐久性设计和维护。建国 60 年来的情况调查,位于地下水位以上或完全位于地下水位以下、地下水和土壤无腐蚀性,基础工程结构的耐久性有

保障,但对位于雨水渗透区、地下水位变化范围内的砌体结构、混凝土结构,有一定损坏。近年来我国主要大城市地下水位均在下降阶段,雨水渗透区、地下水位变化范围也在变化。对于这些情况以及腐蚀性环境的基础工程结构耐久性设计以及维护仍应加以重视和研究。

2 基础工程技术的国外动态

近年来,国外基础工程技术的研究方向主要集中在高层及超高层建筑的需求、建筑物基础的多种利用、基坑工程的新技术、基础工程节材以及提升持久性等方面。

2.1 高层及超高层建筑的需求

进入 21 世纪以来,随着城市土地资源的紧张和科技的进步,超高层建筑的建设呈爆发式增长,建设重心已经由北美转向东亚和中东,建筑有效高度超过 600 米,并有突破 1000 米的趋势。截止 2010 年底,已经建成并投入使用的全球 10 个超高层建筑中的 9 座分布在以中国为代表的东亚地区和以迪拜为代表的中东地区,其中中国两岸三地占据 7 座;中东地区以迪拜为代表,目前全球最高的高层建筑迪拜塔 160 层,高度达到 828m,高度超过 1000 米的 Nakheel Tower 也在设计中,即将开始建设。目前相当一批有效高度超过 600 米甚至超过 1000 米的高层建筑也在规划设计中,全球各地正在掀起超高层建设的热潮。

Harry Poulos^[1]在第十七届国际土力学及岩土工程会议(Alexandria, 2009)的 Terzaghi Oration 作了题为"Tall Buildings, Deep Foundations, Middle East Challenges"的主题报告,Poulos 通过对中东地区三个超高层建筑:Emirates Twin Towers、Burj Dubai、Nakheel Tall Tower,从地基土性状、基础设计(基础选型、筏板厚度、桩基设计)、理论分析方法、单桩静载荷试验、建筑物沉降观测等诸多方面对中东地区超高层建筑的地基基础设计要点进行了阐述。

Poulos 在报告中指出超高层建筑在地基基础设计过程中应考虑以下九个问题:(1)极限承载力和整体稳定性;(2)风、地震等循环荷载的影响;(3)沉降;(4)沉降差和倾斜;(5)基础外地基位移的影响;(6)风荷载的动力性能;(7)地震反应和液

化;(8)基础构件结构强度;(9)耐久性。

对于超高层建筑的变形控制指标,Poulos 给出如下限值:(1)沉降:100mm;(2)倾斜值:1/500~1/1000(H>100m)。

由于超高层建筑地基基础设计牵涉到的因素很多,Poulos 强调岩土工程师与结构工程师需加强合作,同时需通过大量的工程实践和原位测试分析总结来提高工程师对超高层建筑地基基础的设计能力和精确性。

事实上,Poulos 所说 9 个问题不仅是超高层建筑地基基础设计应考虑的问题,对其他建筑基础工程也是应该考虑的问题。

2.2 建筑物基础的多种利用

在桩基础内纳入建筑物的供暖和制冷系统,不仅为这些设施的施工安装提供了便利,同时提高了这些设施使用的耐久性^[2]。

2.3 桩基的设计、分析和施工技术继续向更精细、准确方向发展

设计考虑可以重复使用的基础已纳入研究计划^[3-4]。桩基的可持续发展设计不仅要充分利用现存的桩基础,而且要为以后桩基的设计重复使用现在设计的桩基础提供资料依据。

通过 P-y 曲线进行水平受荷桩的设计^[5-8]。

2.4 在气候变化和有限资源的时代,在工程设计中通过更经济的材料使用和提升持久性、可持续设计的方案

在静水压力形成了很大一部分的永久荷载的情况下,地下水位适当载重系数是设计中一个重要组成部分。

开挖临时支护结构与永久结构更广泛地融合使用有助于减少材料用量,降低对环境的影响。

土-结构相互作用模型可以证明临时支护结构在长期条件下的工作能力,以减少结构中施加的荷载,并相应减少结构尺寸和成本。

降低混凝土的实际用量,混凝土行业是天然资源的最大消耗者之一。

3 基础工程技术的国内研究成果

3.1 在同一大面积整体基础上建有多栋高层建筑或多层建筑的地基基础设计方法

文献^[10-17]通过十余组大比尺模型试验和三十余

项工程测试, 得到大底盘高层建筑地基反力、地基变形的规律, 提出该类建筑地基基础设计方法。

大底盘高层建筑由于外挑裙楼和地下结构的存在, 使高层建筑地基基础变形由刚性、半刚性向柔性转化, 基础挠曲度增加, 设计时应加以控制。

主楼外挑出的地下结构可以分担主楼的荷载, 降低了整个基础范围内的平均基底压力, 使主楼外有挑出时的平均沉降量减小。

裙房扩散主楼荷载的能力是有限的, 主楼荷载的有效传递范围是主楼外 1~2 跨。超过 3 跨, 主楼荷载将不能通过裙房有效扩散。

大底盘结构基底中点反力与单体高层建筑基底中点反力大小接近, 刚度较大的内筒使该部分基础沉降、反力趋于均匀分布。

单体高层建筑的地基承载力在基础刚度满足规范条件时可按平均基底压力验算, 角柱、边柱构件设计可按内力计算值放大 1.2 或 1.1 倍设计; 大底盘地下结构的地基反力在高层内筒部位与单体高层建筑内筒部位地基反力接近, 是平均基底压力的 0.8 倍, 且高层部位的边缘反力无单体高层建筑的放大现象, 可按此地基反力进行地基承载力验算; 角柱、边柱构件设计内力计算值无需放大, 但外挑一跨的框架梁、柱内力较不整体连接的情况要大, 设计时应予以加强。

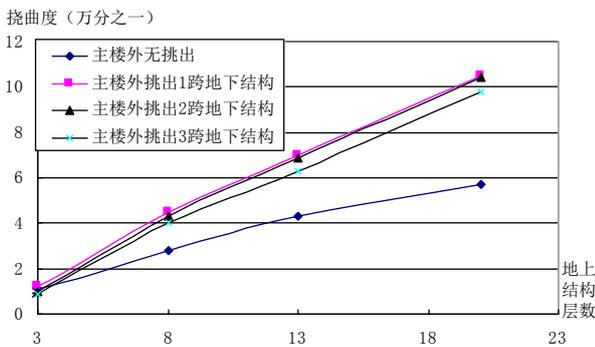


图 1 大底盘高层建筑与单体高层建筑的整体挠曲 (框架结构, 2 层地下结构)

Fig.1 Integral flexion of high-rise building with enlarged base and single high-rise building (frame structure with 2 stories underground structure)

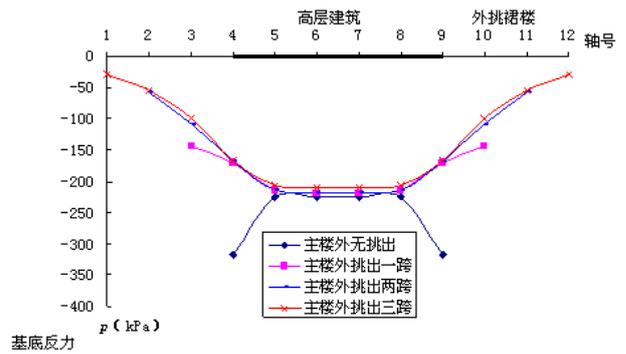


图 2 大底盘高层建筑与单体高层建筑的基底反力 (内筒外框结构 20 层, 2 层地下结构)

Fig.2 Contact pressure of high-rise building with enlarged base and single high-rise building (20 stories frame-corewall structure with 2 stories underground structures)

增加基础底板刚度、楼板厚度或地基刚度可有效减少大底盘结构基础的差异沉降。

试验证明大底盘结构基础底板出现弯曲裂缝的基础挠曲度在 0.5%~1% 之间。工程设计时, 大面积整体筏形基础主楼的整体挠度不宜大于 0.5%, 主楼与相邻的裙楼的差异沉降不大于其跨度 1% 可保证基础结构安全。

3.2 基础变刚度调平设计方法

文献^[18-21]针对传统设计理念存在的诸多问题, 通过大型现场模型试验、工程实测研究, 提出高层建筑地基基础变刚度调平设计理论与方法: 以共同作用理论为基础, 针对框筒、框剪和主裙连体结构荷载分布差异大的特点, 调整桩土支承刚度, 使之与荷载分布相匹配; 使得基础沉降趋于均匀, 基础板的冲、剪、弯内力和上部结构次应力减小; 由此既降低材料消耗, 又改善建筑物功能、延长使用寿命。通过 29 项高层建筑基础的设计应用表明: 差异沉降远小于规范允许值, 减少了传统设计出现碟形沉降和主裙差异变形。

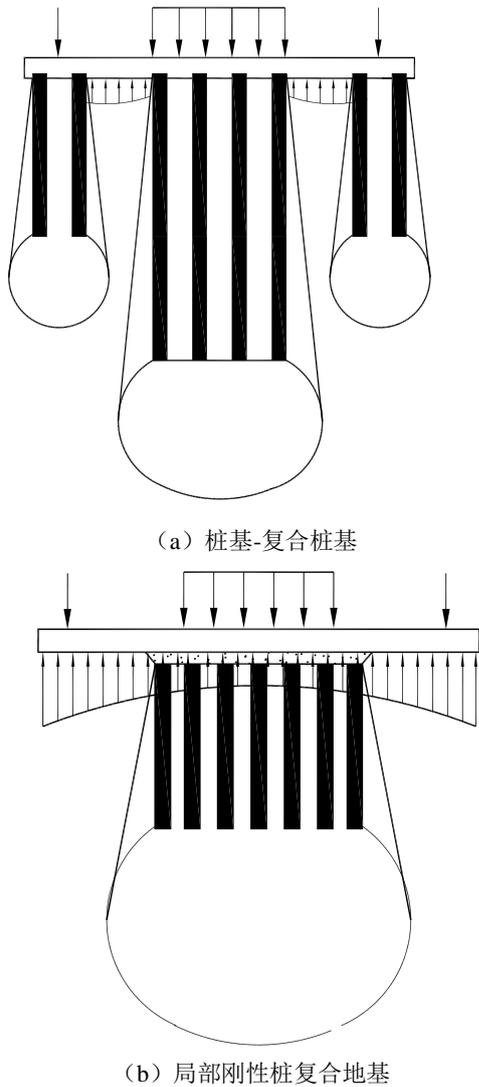


图3 框架-核心筒结构变刚度布桩

Fig.3 Piles arrangement by adjusting foundation rigidity of frame-corewall structure

框-筒结构调平。通过增大桩长（当有两个以上桩端持力层）、桩数、强化核心筒的支承刚度；采用复合桩基、减小桩长、减少桩数，相对弱化外框架柱的支承刚度，并按强化指数（1.05~1.20）和弱化指数（0.95~0.75）进行调控。

局部增强调平。在天然地基承载力满足要求条件下，对框-筒结构的核心筒、框-剪结构的电梯楼梯间采用刚性桩复合地基实施局部增强。

主裙连体建筑调平。当高层主体采用桩基时，裙房采用天然地基、复合地基或疏短复合桩基；当裙房地基承载力较高时，宜对裙房采取增沉措施，包括主裙相邻跨柱基以外筏板底设松软垫层，对抗浮桩设软垫或改为抗浮锚杆等。

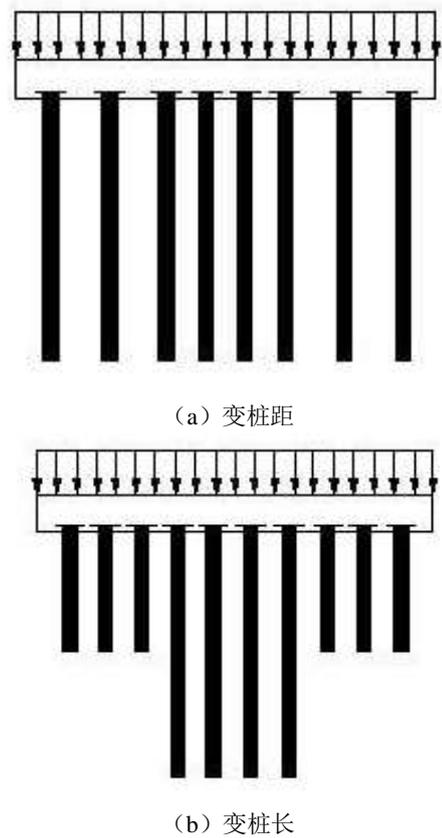


图4 大面积均布荷载桩筏变刚度布桩

Fig.4 Piles arrangement by adjusting foundation rigidity of large area uniform distributed load

大体量仓储罐桩基调平。调整桩距、桩长，按内强外弱布桩。

3.3 深、大基础回弹及再压缩变形特征及计算方法

文献^[30-34]在室内压缩回弹试验、原位载荷试验、大比尺模型试验基础上，对回弹变形随卸荷发展规律、基底以下沿深度分布规律、再压缩变形随加荷进程发展规律进行了研究，提出回弹变形、再压缩变形的计算方法。

土样卸荷回弹过程中，当卸荷比 $R < 0.4$ 时，已完成的回弹变形不到总回弹变形量的 10%；当卸荷比增大至 0.8 时，已完成的回弹变形仅约占总回弹变形量的 40%；而当卸荷比介于 0.8~1.0 之间时，发生的回弹量约占总回弹变形量的 60%。

土样再压缩过程中，当再加荷量为卸荷量的 20% 时，土样再压缩变形量已接近回弹变形量的 40%~60%；当再加荷量为卸荷量 40% 时，土样再压缩变形量为回弹变形量的 70% 左右；当再加荷量为卸荷量的 60% 时，土样产生的再压缩变形量接近回弹变形量的 90%。

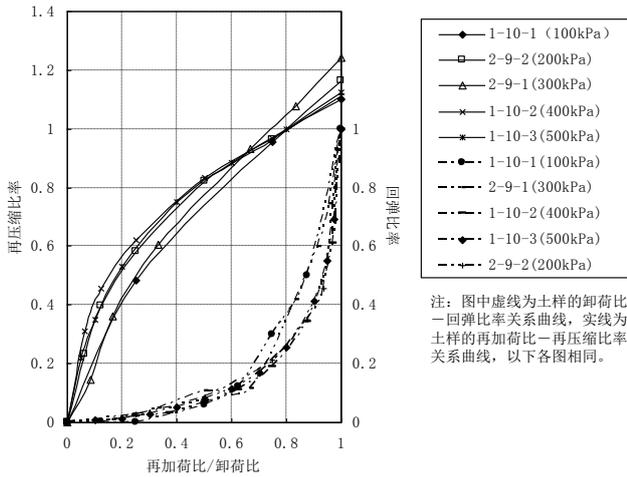


图5 土样卸荷比—回弹比率、再加荷比—再压缩比率关系曲线(粉质黏土)

Fig.5 Relation curve between unloading ratio with rebound proportion and between reloading ratio with recompression proportion of soil sample(silty clay)

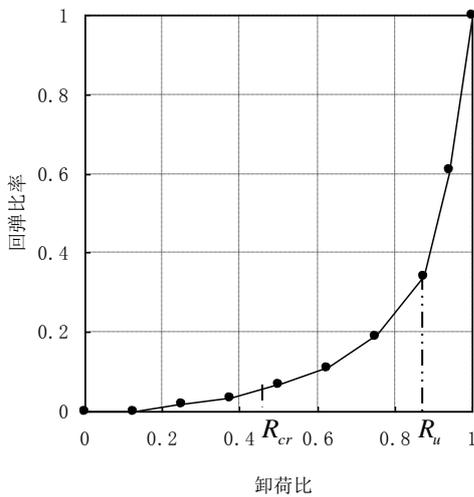


图6 土样回弹变形发展规律曲线

Fig.6 Curve of rebound deformation of soil sample

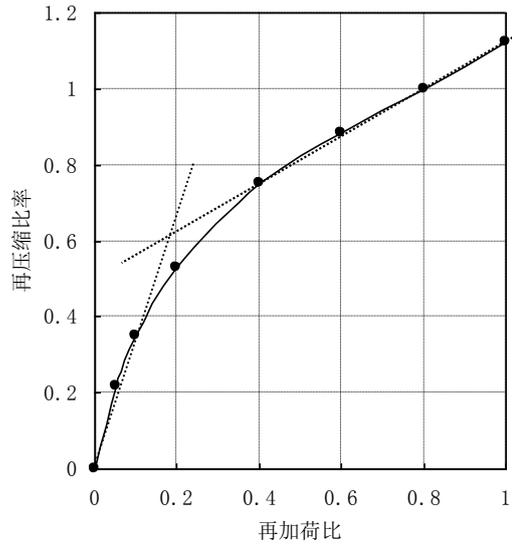


图7 载荷试验再压缩曲线规律

Fig.7 Curve of recompression deformation of loading test

在相同固结压力下，不同土性土样的回弹率存在明显差异。在相同固结压力下，淤泥及淤泥质土的最终回弹率最大，粘土和粉质粘土次之，砂土的最终回弹率最小。土体回弹变形具有一定滞后性，其滞后性与固结压力、卸荷比、土性密切相关。在相同固结压力下，随着时间的发展，淤泥及淤泥质土比粘性土、砂土表现出更为明显的回弹滞后性。土性也是影响土体回弹变形的主要因素之一。

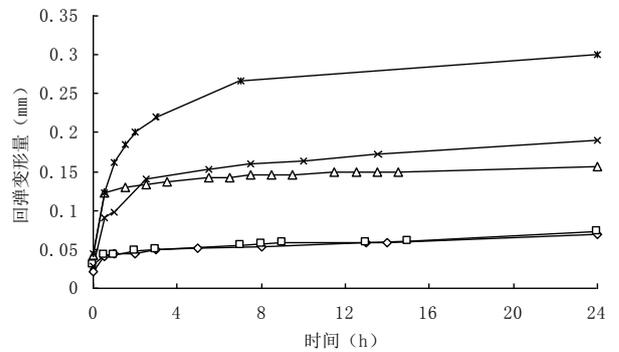


图8 固结压力300kPa时不同土性土体末级卸载回弹变形时程曲线

Fig.8 Time-history curve of final step unloading-rebound deformation of different types soils with 300kPa consolidation pressure

回弹变形计算可按回弹变形的三个阶段分别计算：小于临界卸荷比时，其变形很小，可按线性模量关系计算；临界卸荷比至极限卸荷比段，可按 log 曲线分布的模量计算。

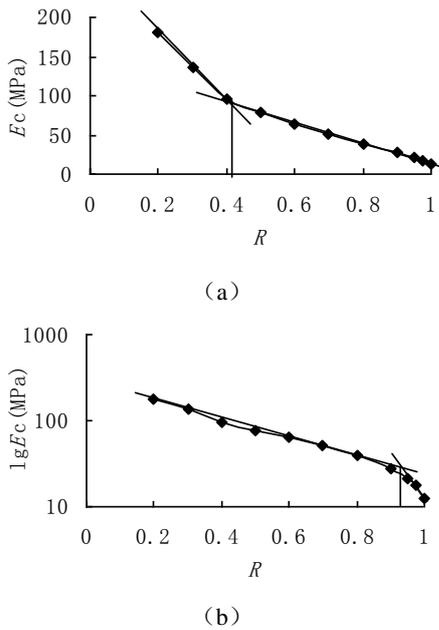


图9 粉质粘土样 1-10-3 (500kPa) R - E_c 与 R - $lg E_c$ 关系曲线
 Fig.9 Relation curves between R and E_c and between R and $lg E_c$ of silty clay soil sample 1-10-3(500kPa)

工程应用时, 回弹变形计算的深度可取至土层的临界卸荷比深度; 再压缩变形计算时初始荷载产生的变形不会产生结构内力, 应在总压缩量中扣除。

3.4 基础结构抗浮设计

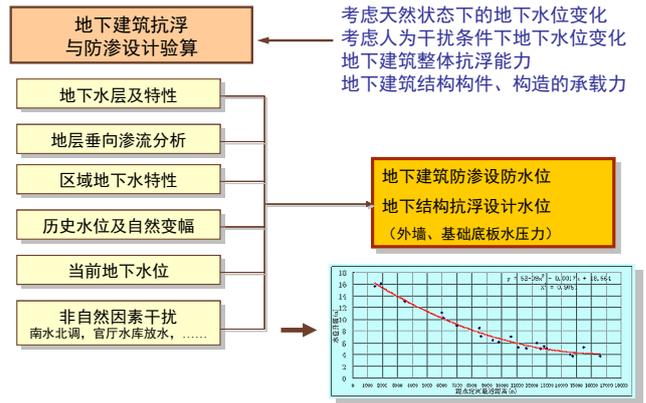


图 10 基础抗浮设计分析方法

Fig.10 Anti-floating design and analysis method of foundation structure

文献^[27-32]针对抗浮设计水位如何取值问题, 在 50 多年的地下水长期动态观测和孔隙水压力监测基础上, 经过系统深入研究, 提出了一套适用于北京地区基于单项工程场地, 基础抗浮设计水位的预测模型。

确定抗浮设计水位的分析方法及原理。

提出了区域浅层地下水三维瞬态流模型, 通过大量观测数据 (包括地下水位动态监测和水文气象数据) 对模型进行了各个角度的识别和验证, 较大程度的保证了模型的可靠性。并根据南水北调最新官方数据对区域浅层地下水远期水位进行了预测, 预测结果得到了国内外相关研究成果及经验的佐证。



图 11 不断扩建的地下水位长期动态观测网
(目前达到了 4000 平方公里, 总观测点数为 900 个)

Fig.11 Continuing expanded long term observational network of underground water level
(4000 square kilometers at the time, total 900 observation points)

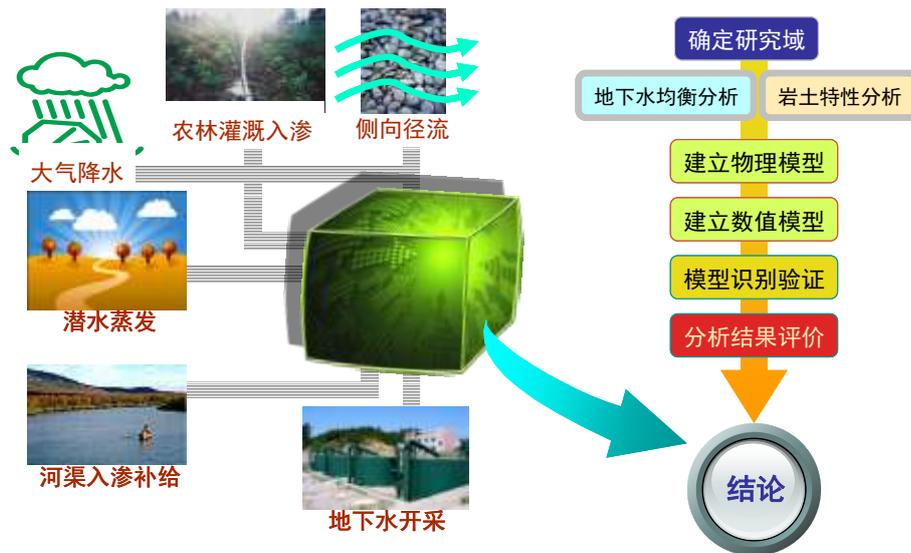


图 12 确定抗浮设计水位的第二代 BGI 法原理图

Fig.12 Schematic diagram of second cousin BGI method determining anti-floating design water level

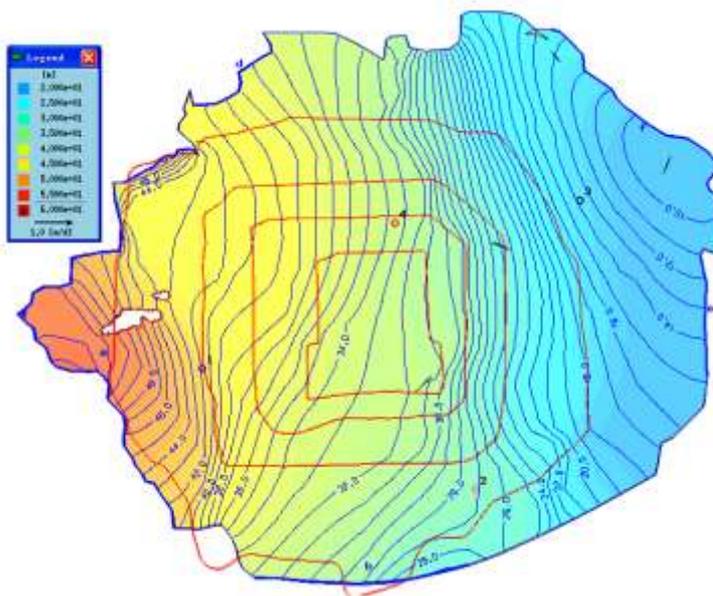


图 13 南水北调进京后 50 年的地下水水位预测成果图 (据 2009 年市水务局公布数据)

Fig.13 Diagram of water level forecasting of 50 years after South-to-North Water Diversion(According to 2009 data by Beijing Water-affair Authority)

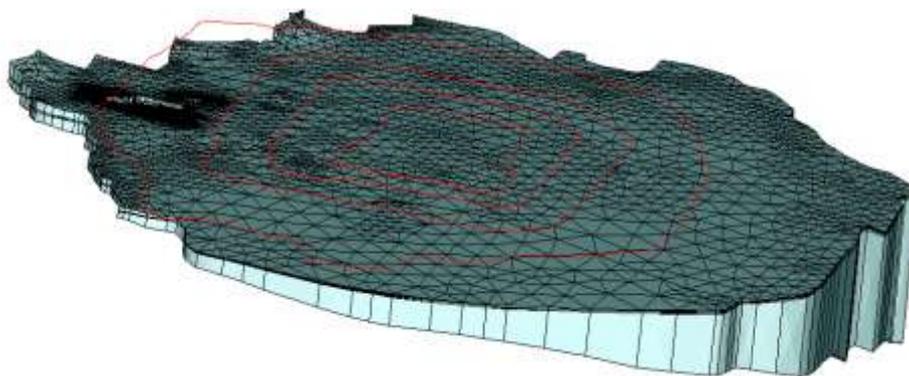


图 14 区域浅层地下水三维瞬态流模型 FEM 剖分示意图

Fig.14 Diagram of FEM model of 3D transient flow of regional shallow underground water

3.5 桩基工程新技术 (文献^[33-37])

桩基础作为重要的基础型式具有承载力高、稳定性好、沉降稳定快、抗震性能好以及能适应各种复杂地质条件等特点而得到广泛使用。桩基础除了在一般工业与民用建筑中主要用于承受竖向抗压荷载外,还在桥梁、港口、公路、船坞、近海钻采平台、高耸及高重建(构)筑物、支挡结构以及抗震工程中用于承受侧向风力、波浪力、土压力、地震力、车辆制动力等水平力及竖向抗拔荷载等。

随着经济建设与城市化的高速发展,桩基工程技术无论在桩型、施工技术、设计方法还是环境控制方面都有了长足的发展。

1) 组合桩(加劲桩)技术

所谓组合桩即是桩身由不同的材料组成。常见的组合桩的类型有以下几种:

(1) 水泥土搅拌桩(干法、湿法)-预制混凝土芯桩组合桩:构造如图 15(a)所示,在完成搅拌的水泥土搅拌桩中插入预制的小直径预制钢筋混凝土桩、管桩或钢管桩,组成复合桩体,提高桩身截面强度,提高桩身向下传递荷载的能力,有效桩长增大,从而提高承载力。

(2) 水泥土搅拌桩(干法、湿法)-现浇混凝土芯桩组合桩,如图 15(b)、(c)所示。该法是在完成搅拌的水泥土搅拌桩中心,通过沉管灌注等方式,在已施工好的搅拌桩中心成孔并灌入混凝土,形成现浇钢筋混凝土芯桩,组成复合桩体,从而提

高承载力。在沉管灌注过程中还可分段夯扩，形成扩大头，提高承载力。水泥土桩中设置现浇混凝土芯桩后的成桩情况见图 16。

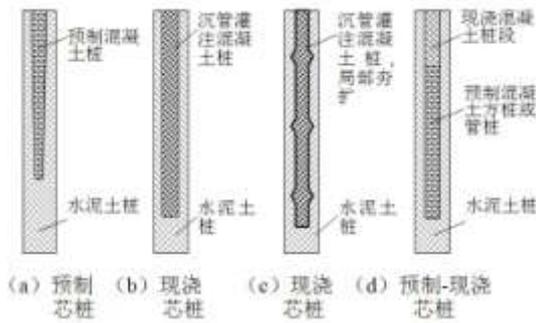


图 15 水泥土桩-混凝土芯桩组合桩形式

Fig.15 The composite pile type of cement-soil pile and concrete core pile



图 16 水泥土桩-现浇混凝土芯桩组合桩

Fig.16 The composite pile type of cement-soil pile and concrete core pile

(3) 水泥土搅拌桩（干法、湿法）-现浇预制相结合芯桩组合桩：如图 15（d）所示，在下段芯桩采用压入的预制桩，在上段压桩形成的空孔内，插入钢筋笼并灌入混凝土形成现浇段芯桩。

(4) 旋喷桩-型钢芯桩：在完成旋喷施工形成的柱状加固体中心插入型钢，形成组合桩体。

(5) 砂桩-预制桩组合桩：在砂桩中压入预制混凝土桩，既形成高强度桩体，可起到竖向排水通道的作用，有助于加速桩间土及桩端下土的固结。

组合桩具有以下几方面特点：

(1) 承载力明显提高

试验表明，组合桩其单桩承载力高于同尺寸的泥浆护壁混凝土灌注桩，其承载力可提高 30% 以上。部分组合桩和灌注桩的荷载沉降 $Q\sim s$ 曲线见图 17。

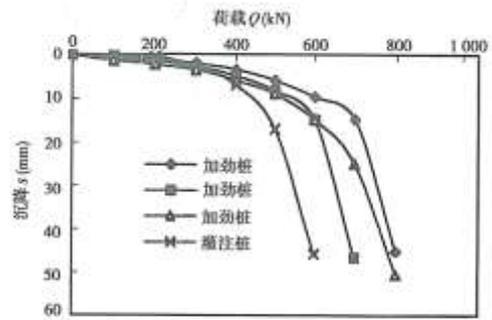


图 17 8.5m 长桩荷载试验 $Q\sim s$ 曲线

Fig.17 $Q\sim s$ curves of loading test of 8.5m long pile

(2) 保护环境

一般组合桩成桩过程没有泥浆排放，噪音低，利于环境保护。

(3) 降低造价

在提供相同承载力条件下，组合桩较普通钻孔灌注桩可降低造价 40% 左右。

2) 槽壁桩技术

采用地下连续墙成墙工艺形成矩形截面桩作为建（构）筑物的基础，承受上部结构荷载，这种基础形式一般简称为槽壁桩基础，如图 18。与常规桩基础相比，槽壁桩基础具有竖向承载力高、刚度大、可根据墙体布置灵活调整基础水平刚度、传力简单等特点而受到工程界越来越多的关注与应用。

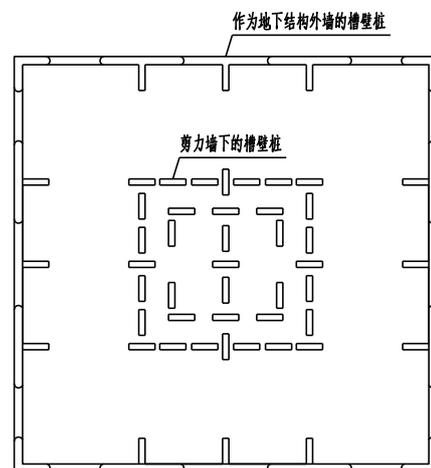


图 18 槽壁桩基础平面布置示意图

Fig.18 Diagram of plane arrangement of diaphragm trenches piles foundation

在槽壁桩设计时，应根据上部结构的形状和荷载情况及地基状态选择槽壁桩的结构形式。当荷载具有方向性时，应该按照荷载方向配置墙段，如图 19，这也是槽壁桩基础形式比其它常规桩基础优越

之处。槽壁桩作为基础结构主要承受上部结构的竖向荷载，但在实际工程中也不可避免的需承受上部结构传来的地震荷载和风荷载等水平荷载的作用，因此在进行槽壁桩布置时除满足竖向荷载要求外，还必须兼顾水平方向荷载的要求。由于受到自身截面形状的影响，槽壁桩的长短边方向的水平刚度差异较大，当水平力作用的作用方向平行于槽壁桩的

长边方向时，由于该方向的截面模量较大受力较为合理。但当水平力作用方向平行于槽壁桩的短边方向时，由于该方向的截面模量较小受力较为不利。因此在基础设计中应尽量减小水平力，同时应对槽壁桩基础平面进行合理布置，加强水平力作用方向的刚度，在整体上提高对水平力的抵抗能力。

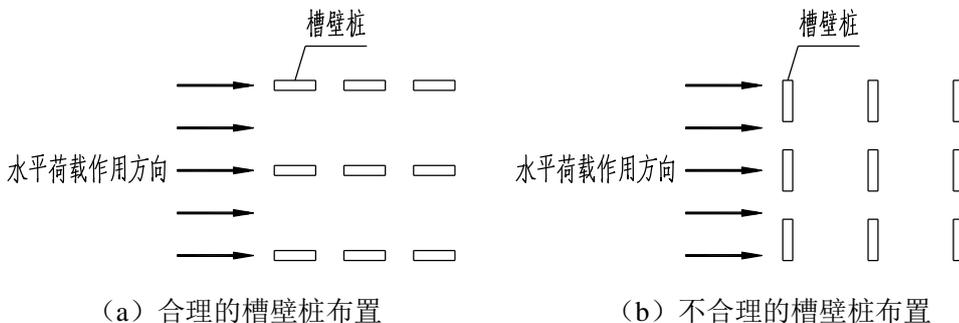


图 19 水平荷载作用下槽壁桩平面布置示意图

Fig.19 Diagram of plane arrangement of diaphragm trenches piles under horizontal loads

槽壁桩基础除了具有与常规桩基础相同的作用布置在基础承台下作为上部结构墙、柱的基础外，还有另外一种特殊的应用形式，即用作地下室外墙和墙下桩基。这种应用形式，在深基础工程中较为常见，深基础工程在基坑施工阶段常采用槽壁桩作为支护结构，而在正常使用阶段槽壁桩又作为地下室结构外墙和墙下桩基础使用。槽壁桩作为地下室外墙的应用也较为广泛，部分工程结构核心筒剪力墙和框架柱直接嵌固在槽壁桩上或紧贴槽壁桩，槽壁桩需直接承受较大的上部结构荷载。

3) 超长桩技术

超高层建筑和大跨度桥梁的建设，使得基底荷载越来越大，对基桩承载力和变形提出了更高的要求，桩基向大直径、超长桩方向发展。如杭州湾跨海大桥钢管桩的直径达 1.6m，单桩最大长度达 89 米；上海环球世贸中心、金茂大厦都采用了长度超过 80m 的钢管桩。东海大桥与苏通大桥主墩工程，则采用了桩径为 2500mm 的灌注桩，前者桩长为 112m，后者桩长达 125m；杭州钱塘江六桥采用的钻孔灌注桩更长达 130m；温州世贸中心、上海中心大厦、上海白玉兰广场、天津 117 大厦等超高层建筑采用了 80~120m 长度不等的钻孔灌注桩。

由于超长桩桩身长、长径比大导致桩土刚度相对较小，直接影响其受力特性，表现出明显不同于

常规桩的承载特性。其中超长桩最主要的特性是表现为桩身压缩量明显，占桩的沉降总量比例较大。在高应力水平下，桩身塑性压缩量较大，不能将其作为弹性杆件进行计算。超长桩的沉降计算，除要计算桩端力及桩侧摩阻力传递到桩端引起的桩端沉降外，还要充分考虑到桩身压缩变形量。由于超长桩桩身压缩量明显，导致上部土层的侧摩阻力出现侧阻软化现象，桩身下部侧阻存在不能充分发挥现象，并且超长桩的端阻力发挥有明显的滞后性。因此超长桩的设计与施工都不同于常规桩，其极限承载力往往由桩顶变形和桩身强度来控制。

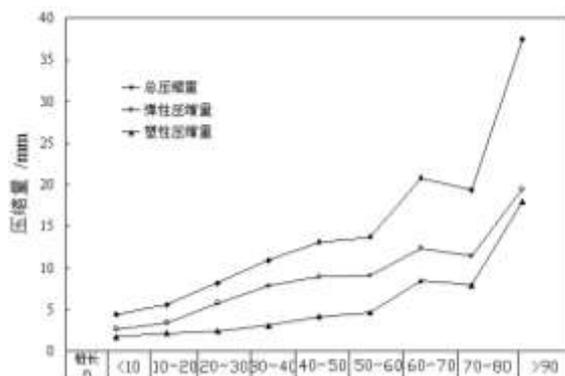


图 20 Φ 1000 钻孔灌注桩桩身压缩量与桩长关系曲线
Fig.20 Relation curves between axial compression of pile and length of pile of Φ 1000 bored piles

通过对软土中多根钻孔桩既观测桩顶沉降又观测桩端沉降及桩身应力应变的静载试验统计结果发

现:

(1) 相同桩径的桩在极限荷载作用下, 桩身混凝土的总压缩量是桩长的函数, 即桩身压缩量随桩长的增加而增加, 这可以从图 20 中看到。

(2) 相同桩径的桩在极限荷载作用下桩身混凝土不仅有弹性压缩量, 而且有塑性压缩量。桩身混凝土的弹性压缩量是桩长的函数, 即桩身弹性压缩量随桩长的增加而增加。塑性压缩量是一个宏观定义, 主要是由桩身混凝土的塑性压缩以及桩端附近混凝土压缩组成。桩身塑性压缩量随荷载的增加而增大。

3.6 既有建筑地基基础工作性状及工程应用方法

文献^[38-40]通过 3 台足尺模型试验, 模拟地基土直接加荷至破坏(试验 a)、加荷至使用荷载持载 47 天后继续加载至破坏(试验 c)和加荷至使用荷载持载 22 天后扩大 1 倍基础面积再持载 25 天后继续加载至破坏(试验 b)三种情况。试验荷载板尺寸分别为 1.6m×1.6m×0.40m, 1.6m×1.6m×0.65m (扩大后尺寸为 3.2m×1.6m×0.65m) 和 1.6m×1.6m×0.40m。地基土的地基承载力特征值通过试验 a 确定为 110kPa。试验 b、试验 c 在荷载 110kPa 持载后继续加载进行试验。

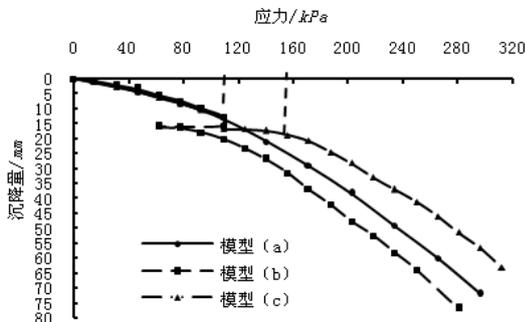


图 21 模型 a、模型 b、模型 c 直线变形阶段 p-s 曲线
Fig.21 p-s curves of linear deformation phase of model a, model b and model c

持载及持载后的试验曲线见图 21, 由图中结果可知, 曲线 (a) 为正常加载试验曲线; 曲线 (c) 为持载 47 天后继续加荷曲线。持载 47 天后, 曲线 (c) 与曲线 (a) 明显出现了"压密效应", 在 110kPa~155kPa 区间, p-s 曲线明显放缓, 且整条曲线在荷载作用下都有一个增量, 说明持载后地基土的"压密效应", 使其地基承载力提高, 在相应的应力段变形减少。

通过 1 组单桩模型试验和 1 组四桩承台模型试验, 分别模拟单桩直接加荷至破坏(试验 d)、加荷

至使用荷载持载 18 天后继续加载至破坏(试验 e); 四桩承台直接加荷至破坏(试验 f)、加荷至使用荷载持载 30 天后继续加载至破坏(试验 g)。试验桩直径 =150mm, 长 5000mm; 基础承台尺寸为 1.6m×1.6m×0.4m。本次试验单桩在荷载 60kN 持载, 四桩承台在荷载 385kN 持载。

单桩和四桩承台持载及持载后的试验曲线分别见图 22 和图 23。图 22 中模型 (d) 曲线为单桩正常加载试验曲线, 模型 (e) 为持载 18 天后继续加荷曲线, 在 60 kN 荷载作用沉降稳定后历时 18 天的持载总沉降量为 0.193 mm。在 60kN 持载前曲线斜率为 $1.47 \times 10^{-2} \text{mm/kN}$, 在 60kN~90kN 段曲线斜率为 $0.88 \times 10^{-2} \text{mm/kN}$, 在 60kN~90kN 区间, p~s 曲线明显放缓。持载 18 天后, 曲线 (e) 与曲线 (d) 相比明显出现了"压密效应"的变形减少段。模型 (d) 单桩极限承载力为 105kN, 而持载后的模型 (e) 单桩极限承载力达到了 120kN。

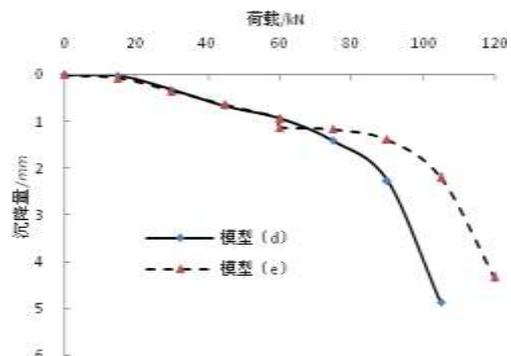


图 22 模型 (d) 和模型 (e) p-s 曲线对比
Fig.22 Comparison of p-s curves between model d and model e

图 23 中模型 (f) 曲线为四桩承台正常加载试验曲线, 模型 (g) 为持载 30 天后继续加荷曲线, 在 385kN 荷载作用下历时 30 天的持载总沉降量为 0.68 mm。在 385kN 持载前曲线斜率为 $2.93 \times 10^{-3} \text{mm/kN}$, 在 385kN~495kN 曲线斜率为 $0.27 \times 10^{-3} \text{mm/kN}$, 在 385kN~495kN 区间, p-s 曲线明显放缓。持载 30 天后, 曲线 (g) 与曲线 (f) 相比明显出现了"压密效应"的变形减少段。模型 (f) 基础的极限承载力为 605kN, 而持载后的模型 (g) 基础的极限承载力为 715kN, 这说明持载后"压密效应"使桩基础的承载力提高, 变形减少。

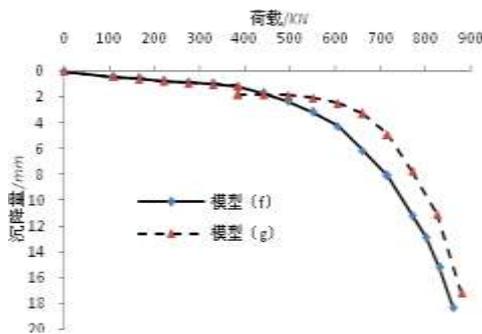


图 23 模型 (f) 和模型 (g) p~s 曲线对比

Fig.23 Comparison of p-s curves between model f and model g

上述试验现象说明:土体在荷载长期作用下充分固结后再加荷,会出现在相对应的应力段变形减小的现象,即 p~s 曲线出现相对平缓段,我们称之为"压密效应"。分析其机理,可以认为土体充分固结后,在其主压缩层内的土体刚度增加,在继续增加荷载的某一应力段内,该部分土体变形减小,传至下卧土体的应力范围增大,应力减小,使下卧土层变形减小。继续增大荷载,下卧土层的变形又按原加荷的土体变形性质变形。土体的"压密效应"是在一定压力范围内的变形减小的性质。

在既有建筑增层改造的实际工程应用中,既有建筑在长期荷载作用下,土体压缩变形基本完成。此时再增加 1~2 层房屋,原有建筑物地基不会产生破坏,可以正常使用。但其增加多大荷载(加几层)能保证既有建筑正常、安全使用,在工程实践中还是以经验为主,某些工程增加荷载 10%,某些工程增加荷载 20%,并没有确定性的试验方法。目前广泛应用的方法是在既有建筑基础下作荷载试验,但传统的试验方法一方面由于开挖老基础下主压缩土体,低估了地基承载力,另一方面又因荷载板面积小而高估了地基承载力。

"压密效应"既可解释既有建筑可以直接增层的机理,又可给出确定这种地基的承载力的直接确定性方法。实际工程应用中,可以根据地质勘察报告,在既有建筑相邻近而地质情况基本相同的场地,作与原房屋基础宽度相同的荷载板持载试验。荷载板底部标高以及地下水条件应与房屋使用期的条件相一致。静载荷试验加载到原房屋的使用荷载后持载,持载时间应根据土质情况确定。持载结束后继续加荷直至破坏,可以得到一条反映土体加荷历史的 p~s 曲线,曲线上继续加荷后相对平缓段的终点对应的荷载值即可确定为该房屋直接增层后的最大荷

载设计值。土体固结时间长,固结越充分,得出的试验结果与实际越相符。根据试验结果(见图 24),对砂土地基持载 7 天、粘土地基持载 15 天的测试结果,对工程设计来说是偏于安全的。对于既有建筑桩基础的单桩承载力的确定,可以采用同样的试验方法。

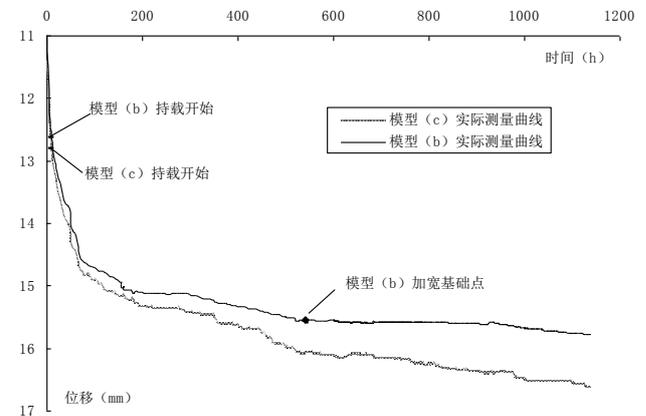


图 24 基础(b)和(c)持载时位移随时间发展情况

Fig.24 Time-history of displacement under sustained loading of foundation b and c

3.7 地铁交通枢纽工程的地基基础加固改造

上海地铁徐家汇三线换乘枢纽站是国内首个大规模利用既有地下空间改造而成的地铁车站,在国际上也极为罕见,工程实施过程中开发应用了多项新技术。

开发应用了大面积利用既有地下空间改造建设地铁车站的系列设计与施工技术^[41-42]。研究解决了结构体系的转化和系统、建筑功能的调整与补偿、改造工程的切割与加固、整体建筑的抗震减噪等技术问题,形成了成套施工技术。

开发应用了利用地下空间向下加层扩建的暗挖技术,形成了低净空条件下先插后喷型钢旋喷桩围护结构施工的 IBG 工法、全方位压力平衡高压喷射注浆工法、低净空条件下的环境微扰动静压桩施工技术^[43-44]。

9 号线换乘通道利用港汇广场地下室改建。换乘通道净尺寸长度 66.2m、宽度 16.6m,开挖深度 10.33m~12.51m,换乘大厅采用在原地铁商城地下盖挖加层施工实现。

9 号线车站工程利用原地下车库改建技术,不同建设期地下结构的变形控制技术。新建车站结构与港汇广场原结构的相接采用了原结构先托换后连接的方法,采用将既有地下空间改造成为地铁车站

的施工方法^[44]。

术。

换乘大厅利用既有地下室结构向下暗挖施工技

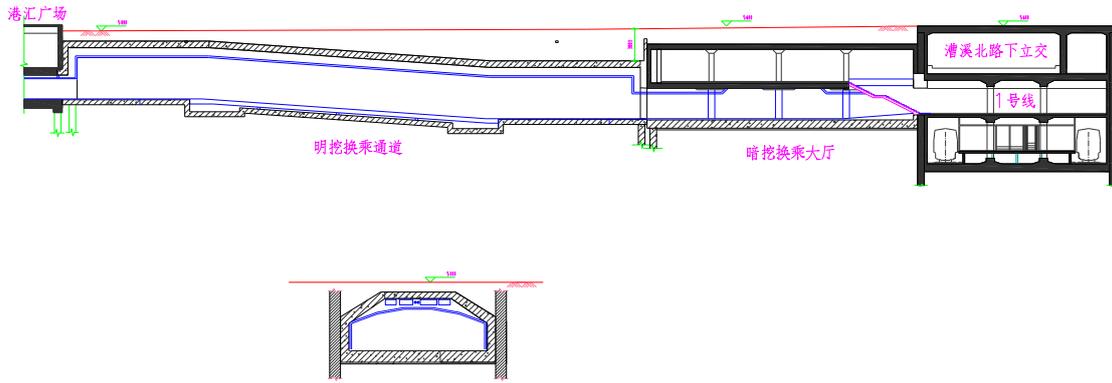


图 25 9 号线与 1 号线联络通道及换乘大厅示意图

Fig.25 Diagram of connected aisle and exchange hall between line 9 and line 1

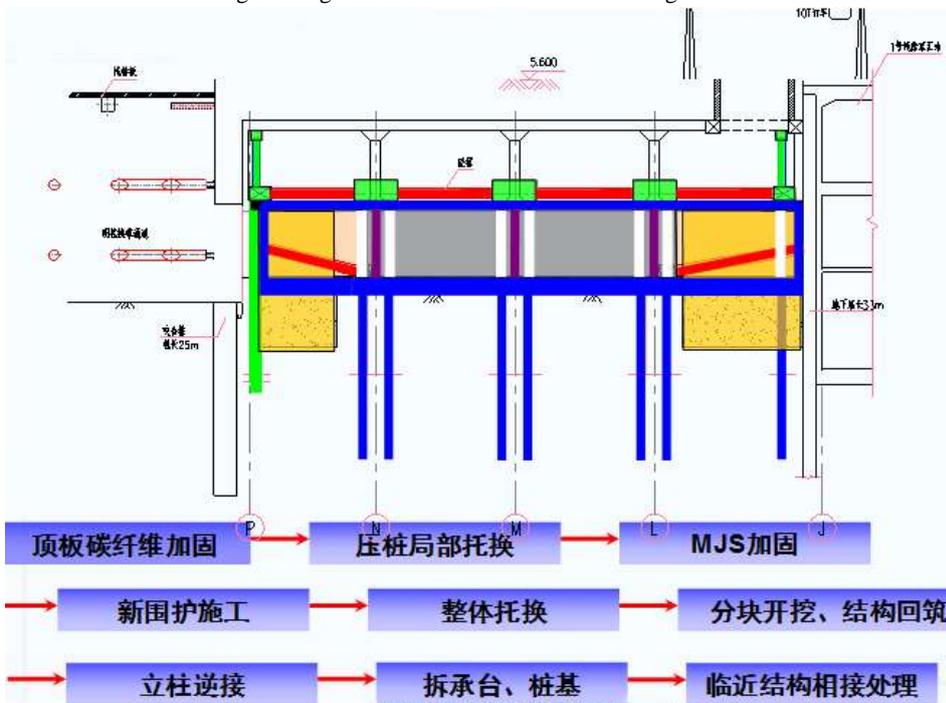


图 26 利用既有地下室结构向下暗挖施工流程

Fig.26 Construction flow of downwards under cutting utilizing existed underground buildings

4 我国基础工程技术的研究方向和课题

4.1 大跨地下结构的设计理论、方法和变形控制设计

我国地下结构基本采用混凝土结构,开间较小。国外开间较大,巴黎新地铁换乘站地下 9 层,最大跨度为 18m~24m,除基础底板和外墙的混凝土结

构外,采用钢结构或混合结构。基础结构,不单纯是钢筋混凝土结构,有采用型钢混凝土以及预应力混凝土技术的实例。因此,为减少材料用量,减少不均匀变形,有必要进一步进行大跨地下结构的设计理论和方法的研究。按变形控制设计,是减少因裂缝影响使用功能和建筑物安全的方法,各地应根据场地情况和建筑物的结构,积累变形观测资料,积极推广应用。

4.2 深基坑施工引起环境影响评价方法及工程措施

深基坑施工引起环境影响,在不同地基条件和不同环境条件下的表现不同,各地区应积累经验,探索其优化设计方法;利用地下结构兼做支护结构的设计施工技术应进一步研究发展;深基坑施工降水引起的地下水资源保护问题有待研究。

4.3 深、大地下建筑建设对已有周边建筑设计条件以及使用条件改变引起的基础设计评价方法及加固技术

深、大基础考虑基坑回弹再压缩变形特性的地基承载力和变形计算方法有待深入研究。深、大基坑开挖以及地下结构建设改变临近建筑的地基承载力设计条件,应进行复核,对既有建筑地基土已有应力历史的作用应进一步研究。新建建筑基础埋深大于既有建筑基础埋深时的地基加固技术或结构加固技术应进行研究。

4.4 基础工程的抗浮稳定性的设防水平及抗浮构件设计

汶川地震以及日本福岛核电站危机,说明人类对大自然自然灾害的认识仍有局限性;我国南方大暴雨引起的城市积水不能排除也出现部分建筑浮起或开裂事故。因此,抗浮稳定性的设防水平有待研究;抗浮构件设计的安全度有待研究;带裂缝工作的混凝土抗浮构件的耐久性有待研究。

4.5 地下交通线路施工或穿越工程以及地下使用功能实现引起的有关基础工程技术研究

大都市地铁建设引起的环境问题越来越引起人们的关注,地铁隧道施工控制技术在不同周边环境下可采用不同的标准,在各地应进行研究;穿越工程对既有建筑的影响及分析方法应进一步研究;地基基础托换加固技术应进一步研究;地下交通或商业、人流的综合枢纽工程的评价技术、加固改造技术应进一步研究。

4.6 基础耐久性问题的研究

目前国内外对地下结构耐久性的研究工作虽已有所开展,但还存在明显不足和亟待深入之处:(1)缺乏对地下结构耐久性的相关基础理论的深入、系统的研究;(2)对工程结构耐久性的研究尚缺乏统一长远的规划;(3)从耐久性研究角度和方法看,目前一般采用的是单一因素分析法,不考虑各因素间的交叉影响,这与实际情况不符;(4)在耐久性研究范围和影响因素分析中,主要考虑的是环境和材料因素及部分施工因素的影响,而在结构和力学

因素方面考虑较少,对于与岩土紧密接触的地下工程结构物,荷载、裂缝、差异沉降、地下水渗流与变异、土压力变化等因素的影响也不容忽视。鉴于地下结构耐久性的研究现状,科研机构、学者要把握国内外的研究现状和动态,分析存在的问题和不足,明确重点研究方向,以便更好地推进对地下结构耐久性的研究。应重点研究地下混凝土结构耐久性评价方法及技术要求。

4.7 新材料、新工艺、新设备的使用以及绿色施工技术的研究

开发和推广桩基施工新技术、新设备、新工艺,适应高层、超高层、高耸构筑物及其它各类建筑物桩基工程的需要;发展基础工程检测、监测技术,强化施工过程检测和监测,提高基础工程安全性。研发基础施工机械,提高我国地基基础施工水平。积极研发地下管线、地下空间施工技术,减少对地面环境影响。

4.8 基础工程技术发展应进行的试验研究工作

开展对不同地基条件的建筑地基变形、地基反力、基础内力的测试研究工作,包括测试技术;开展考虑地基土应力历史的基础工程设计的试验研究;开展地基土变形参数的现场测试技术研究;开展防连续倒塌设计的地基基础设计原则的试验研究。

5 结语

我国经济的高速发展,以及人们生活水平的提高,对建筑的质量和使用环境的舒适性要求越来越高。大量建设的建筑物需求,不仅给我们提出新的研究方向和课题,也给我们提供了理论与实践相结合的实施条件,积累了大量数据。这是我国岩土工作者的优势,是国外研究人员不能相比的客观条件。让全国的岩土工作者共同努力,遵循岩土工程以及基础工程的客观规律,重视土的基本性质研究,重视实测数据分析,重视实践经验,为进一步提高我国基础工程的设计施工水平而努力。

参考文献(References):

- [1] Harry GPoulos. Tall Building and Deep foundations-Middle East Challenges[A]. In: Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C]. The Academia and

- Practice of Geotechnical Engineering Alexandria, Egypt, 2009, 5-9, October.
- [2] Brandl H. Energy Foundation and other thermo-active ground structures[J]. Geotechnique, 2006, 56(2): 81-110.
- [3] Butcher A P, Powell J J M, Skinner H D. 2006a.
- [4] Reuse of Foundations for Urban sites: A best practice handbook. IHS/BRE press.
- [5] Butcher A P, Powell J J M, Skinner H D(editors), 2006b. Proceedings of International Conference on Reuse of foundations for Urban sites. IHS/BRE press.
- [6] GEO. Foundations design and construction. Geo Publication 1/2006. The Government of Hong Kong, 2006.
- [7] Turner J. Rock-socketed shafts for Highway structure foundations-A Synthesis for Highway Practice. Transport Research Board, Washington, USA, 2006.
- [8] API RP 2A-WSD. Recommended practice for planning, designing, and construction fixed offshore platforms-working stress design. -21st edition, 2000.
- [9] Nobre,R.C.M,and Nobre,M.M.M. A soil and groundwater remediation program using risk analysis as a design tool. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering ,Alexandria, Egypt,October 5-9. 2009.
- [10] 黄熙龄, 滕延京, 王曙光等. 大底盘高层建筑基础设计施工技术 & 灾害防治[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2006.12.
- [11] 宫剑飞, 黄熙龄, 滕延京等. 多幢塔楼作用下大底盘框架厚筏基础结构分析与设计[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2004.12.
- [12] 宫剑飞, 黄熙龄, 滕延京等. 整体大面积筏板基础地基反力原位测试分析及筏板弯矩计算[R]. 建研地基基础工程有限责任公司等, 2010.
- [13] 黄熙龄. 高层建筑厚筏反力及变形特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 131-136.
- [14] Gong J F, Huang X L, Teng Y J. Rigidity characteristic and deformation calculation of large-area thick raft foundation[A]. In: 16th ICSMGE[C]. Osaka, 2005.
- [15] Gong J F, Huang X L, Teng Y J. Design for control settlement of large-area thick raft foundation[A]. In: 17th ICSMGE[C]. Alexandria, 2009, (3): 1997-2000.
- [16] Teng Yanjing, Wang Shuguang, Gong Jianfei, et al. Experimental and computational studies on contact pressure and foundation deformation of large thick raft foundation under high-rise building complex[A]. In: 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C]. India, 2007, (1): 256-261.
- [17] Teng Yanjing, Wang Shuguang, Gong Jianfei, et al. Characteristics of contact pressure and foundation deformation of large thick raft foundation under high-rise building complex[A]. In: 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering[C]. India, 2007, (2): 293-297.
- [18] 刘金砺, 迟铃泉, 张武等. 高层建筑地基基础变刚度调平设计方法与处理技术[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2008.
- [19] 刘金砺, 迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 151-157.
- [20] 刘金砺. 高层建筑地基基础概念设计的思考[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 100-105.
- [21] 王涛, 高文生, 刘金砺. 桩基变刚度调平设计的实施方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 531-537.
- [22] 滕延京, 李建民等. 超深超大基坑回弹变形计算方法的试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2010.
- [23] 李建民. 超深超大基坑回弹变形计算方法的试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2010.
- [24] 李建民, 滕延京. 基坑开挖回弹再压缩变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S 2): 81-84.
- [25] 李建民, 滕延京. 土样回弹及再压缩变形特征的试验研究[J]. 工程勘察, 2010, 38(12): 9-14.
- [26] 李建民, 滕延京. 从不同土室内压缩回弹试验看基坑开挖回弹变形的特征[J]. 建筑科学, 2011, 27(1): 72-77.
- [27] 张在明, 孙保卫, 徐宏声. 北京市区浅层地下水位动态规律研究[R]. 北京: 北京市勘察设计研究院, 1995.
- [28] 张在明. 地下水与建筑基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [29] 张在明, 孙保卫, 徐宏声. 地下水赋存状态与渗流特征对基础抗浮的影响[J]. 土木工程学报. 2001, 34(1): 73-78.
- [30] 张在明, 杜修力, 罗富荣. 北京市地下水对地铁规划、建设的影响与工程对策研究[R]. 北京: 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京工业大学, 北京市轨道交通建设管理有限公司, 2009.
- [31] 张在明, 沈小克, 王军辉等. 地下水环境变化对结构抗浮影响研究[R]. 北京: 北京市勘察设计研究院, 2009.
- [32] 北京市城市节约用水办公室. 北京实现水资源可持续利用的对策[J]. 节能与环保, 2002, 20(3): 25-27.
- [33] 张雁, 刘金波. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [34] 凌光容, 安海玉, 谢岱宗等. 劲性搅拌桩的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 92-96.
- [35] 王长科, 戴志祥, 柯文开等. 实散组合桩承载原理及应用[J]. 工程地质学报, 1999, 17(4):327-331.
- [36] 张忠苗. 桩基工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [37] 史佩栋. 深基础中的若干热点技术问题[M]. 北京: 中国交通出版社, 2004.
- [38] 滕延京, 李钦锐, 李勇等. 既有建筑地基基础改造与加固技术研究[R]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2010.12.

- [39] 李钦锐. 既有建筑增层改造时地基基础的再设计试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2008.
- [40] 李勇. 既有建筑增层改造桩基础的再设计试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2010.
- [41] 朱合华等. 城市地下空间建设工程化技术开发[R]. 上海, 同济大学, 2010.12
- [42] 周晓敏, 王梦恕, 陶龙光等. 北京地铁隧道水平冻结和暗挖施工模型试验与实测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 676-679.
- [43] 王克忠, 李仲奎, 王爱民等. 浅埋暗挖地铁站厅洞室开挖过程物理模型试验及土体变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 2715-2720.
- [44] 房倩, 张顶立. 浅埋暗挖地铁车站下穿既有有线结构施工方法研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(5): 71-77.