

# 高层建筑深基坑工程在中国的发展\*

刘泉声 吴玉山

刘祖德

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

(武汉水利电力大学 武汉 430072)

## 1 引言

80年代中期,随着中国改革开放的逐步深入,经济建设迅猛发展,高层建筑象雨后春笋一样,相继矗立在中国各主要城市里。尤其是90年代以来,这一发展热头愈来愈猛,房地产业和建筑业已成为中国的最大支柱产业之一。随着建筑高度和层数的增加,基础的埋深也随之而不断增加,施工难度也愈来愈大。工程实践的需求推动了中国高层建筑深基坑工程设计与施工技术的进步,发展了众多先进的基坑支护治水的类型,设计计算方法不断革新,施工工艺也日益改善。中国在这一领域内通过对大量成功的施工实例的总结,积累了丰富的经验。许多科研单位和大学的科技工作者也直接参与了这些实践,并将实践经验上升到理论的高度来再认识。

## 2 中国城市市区工程地质的特点及深基坑工程的关键技术问题

中国幅员辽阔,大江大河和湖泊遍布,海岸线也特别长。而近期加紧开发的主要中心城市又大多集中地分布在沿海一带和江河湖泊之滨。因此,高层建筑深基坑工程所涉及的地层主要是第四系沉积层,其中有陆相的,以河流冲洪积为主;也有海相的,一般以粘土、粉质粘土、粉土、砂为主。但是,不少地区人工填土及新近沉积层发育,杂填土、素填土、泥砂冲填土分布范围很广,甚至有的是为了开发地产而近几年特意吹填或堆填起来的土。不但河漫滩、古河道地区土层变化大,而且原来的湖区深厚有机质淤泥和淤泥质土暗藏在填土或硬壳层下面,形成大量暗浜、谷、沟、塘。土质松软、强度很低。

从水文地质条件来看,中国的北方,一般地下水位相当低,基坑开挖深度以内,较少遇到流土管涌和基坑底部突涌的现象。有些沿海城市(如天津),基坑受全新统土层控制,不但土的强度指标低,而且粉土及粉砂类层多,地下水位高,加之旧城区的地下供水排水管网密布,泄漏点多,上层滞水对基坑的威胁很大。在中国的南方,地下水位普遍较高,而上层埋藏的规律很复杂。最危险是所谓的“二元”结构,即上层除了人工填土层属较透水层以外,下面一般有隔水层粘性土。约在基坑底部附近,土的颗粒组成随着深度逐渐变粗,

1996年9月5日收到来稿。

\* 本文是第一、第二作者1996年5月在日本大成技术研究所等单位作学术交流时的报告内容。

渗透系数愈来愈大, 呈渐变的规律, 一直到 50~ 60m 深度处风化岩面附近, 存在有砾卵石层, 厚度不等。在这种特定的地质条件下, 深基坑的开挖常常遇到坑壁土的冒砂漏水和坑底土的突涌等难题, 例如武汉的汉口地区就是其中的一个典型。而上海、天津、福州等城市, 土质虽软, 但数十米厚的砂层却少见, 基坑治水相对较简单些。坑底以下往往不远处即有相对隔水层, 无论采用降水还是隔封的措施, 都比较容易。与汉口地区相似的地质条件在长江中游是普遍存在的。因此, 深基坑工程的主要关键问题是:

(1) 超深厚的软土地基内如何选择深基坑支护结构的类型;

(2) 深基坑支护结构在基坑开挖和地下室结构建造的全过程中, 如何防止其产生过量的水平变位以确保邻近建(构)筑物及地下设施的完好和正常使用, 如何做好环境保护工作;

(3) 在“二元结构”地质埋藏条件下如何防止坑壁和坑底的渗透破坏(流土、管涌、坑底突涌);

(4) 特大型基坑的超深大面积降水对周边环境的影响如何定量评估? 采取何种对策?

除了上述一些问题外, 中国的不同地区还有其特殊的地质问题, 干扰着深基坑工程的实施。例如厦门的华南花岗岩残积土和巨大漂石; 海口的玄武岩覆盖层, 武昌的 $Q_3$ 老粘土和破碎软岩; 西北和华北地区的黄土, 东北的季节性冻土, 四川成都地区的丹棱粘土下大漂石开挖; 广西的红土, 云南的膨胀土等, 本文不拟一一列举详述。

### 3 中国高层建筑深基坑工程的发展概况

通过实践的总结, 中国岩土工程师逐渐懂得: 深基坑工程一定要做专项的岩土工程勘察。一般要求在场址工程地质详勘阶段与建筑物地基的勘察一气呵成, 即: 勘探范围要扩大到基坑边线以外 2 倍坑深以上的距离, 并且要详细查明环境地质情况。尤其是邻近建(构)筑物的相对位置、基础类型及其几何要素、各种地下设施、人防通道和管线的埋深、相对距离、结构类型、规模和材料等, 必须充分掌握。

为了探明环境地质和基础工程质量, 波动法、超声法、电法、瑞利波法、地质雷达等现代物理勘探方法, 目前已在中国日益推广, 应用范围也不断扩大。如地层特性, 基岩破碎带的埋藏和性质、地裂缝的埋藏、桩基质量和几何外形及倾斜度、地下管线走向和埋深等的探测方面, 都获得了大量有价值的成果。与此同时, 从事物理勘探的专业队伍也日益壮大, 技术水平得到很大提高。

在“二元结构”的水文地质条件下, 勘探中必不可少地, 一定要做好水文地质的钻探和水文试验, 要获得分层的渗透系数和测定分层的承压水头, 孔隙压力静力触探试验、应力铲试验等现代测试手段也在普及。

从土试验的角度看, 中国有些学者认为: 深基坑工程实际上是一种开挖卸载过程。因此, 必须规定用卸载路径的各种土工试验方法来测定有关介质的岩土工程性质(物理、力学)指标, 而不能沿用常规试验所得的成果。例如直接剪切试验应考虑原位土的天然固结状态, 它的固结应力为 $\alpha$ 。故试样应统一恢复到 $\alpha$ 下固结, 然后模拟卸载路径过程, 以取得相应的强度参数 $c$ 、 $\varphi$ 。又如三轴试验, 对于坑壁周围的基土, 应该进行减少 $\sigma_3$ 而维持 $\sigma_1$ 不变的三轴压缩试验, 而坑底的基土, 则应该进行减少 $\sigma_1$ 而维持 $\sigma_3$ 不为的三轴伸长试验。

在用邓肯-张弹性增量模型的有限元分析计算中,几个主要力学参数都需用特定应力路径试验。在一个船厂的滑道开挖工程中,用此法完全成功,能真实反映客观,计算的位移与实测吻合很好。

中国岩土工程师们对于深基坑工程支护结构上的土压力计算方法的研究作了巨大努力。首先探讨了土强度指标的选取问题,认为无论是直剪和三轴剪切,排水固结的条件必须充分反映基土的实际工程状态,不能千篇一律地取用快剪(或不排水剪),也不能把固结快剪成果套用到开挖施工迅速的软粘土地区支护结构设计中去。分清土类,摸准工作条件,区别对待。中国各主要城市,市政府城建管理部门动员和组织当地的工程勘察专家通过调查研究和工程实例反分析与专项试验等形式,提供该地区主要代表地层的物理力学参数经验值。但是,这些表格数据只能给出其大致的变化范围,图表能起到指导作用就不错了,警告使用者不要生搬硬套。在特殊情况下,出现例外也是常有的,需要岩土工程师本人的正确判断。

土压力计算方法除了传统的朗肯、库伦土压力理论,太沙基-派克(Terazghi-Peck)包络线法,布鲁姆(Brum)法等用得也很普遍。中国工程师十分重视日本同行们在这方面所作的贡献,并作为借鉴和参考。与此同时,各城市也组织科研单位和高等学校的科技人员在许多工程中对支护工程进行监测。在土压力测试方面就获得了一些有价值的成果(如天津和上海)。

在支护结构的设计计算方面,除了传统的解析法(手算)外,杆件有限元和块体有限元的应用也日益普及。尤其在桩-锚支护结构方面,考虑到施工过程的多样复杂性,分阶段动态地掌握锚杆力和桩身弯矩的变化过程,反分析研究也得到工程界的重视。深基坑工程与其说是一个稳定性问题,还不如说它更重要的是一个变形控制的严重问题。支护桩顶的水平变位的精确预测只能求助于现代的数值计算分析方法。在基坑工程的渗流计算方面,逐渐开展了二维和三维的渗流有限元分析,考虑土的各向异性、非均质性、成层性。非稳定流的动态过程也可用数值模拟求得,应用Biot渗透固结理论求解基坑内外土体的运动与渗流的耦合解。

支护结构多种多样,有的是空间结构,例如内支撑系统的稳定性必须用空间桁架或刚架的有限元来分析。土体的蠕变、触变性质也应在分析中得到反映。

中国各大城市近几年来相继组织当地专家编制深基坑工程的地区性规范或技术指南,不少城市已有出版发行。规范中,把主要内容放在设计上,但对勘察、施工、监测、环境保护等方面也予以应有的重视。

鉴于前几年基坑工程的事故发生频繁,后果严重,所以城市建设部门的决策者逐渐重视专家系统的作用。集中本地区勘察、设计、施工、监理、科研、高等学校各部门中长期从事岩土工程和结构工程工作的有经验专家,组成相对较固定的专家组。规定有地下室的或具有一定挖深的基坑必须经过专家组审查通过后,报请职能部门审批,之后才能付之实施。这逐渐已成为具有法律性的制度。专家组实际上也就是技术规范编制的核心组织和指导机构。

中国近几年来,逐渐认识到基坑工程并非一般意义上的临时性结构或措施,应该看到深基坑工程万一失事,其直接后果可能招致数倍或十余倍基坑工程造价的损失,而间接后果更难估计(如交通瘫痪、人身事故、社会影响等)。因此设计者十分重视工程的安全等级

和风险分析。签订施工合同时考虑设立风险基金, 将其作为应急措施的专项基金。在工程竣工并完成其历史使命之后, 甲乙双方分成得益。任何设计方案、施工组织方案中都必须把加强监测和应急措施这两点放在重要地位。正确动用信息化施工的方法, 关键也就是抓住这两点, 以做到情况明、对策多、处理及时。

中国的岩土工程界面临着新的机遇和挑战。城市建设中高层建筑的崛起给岩土工作者带来了许多新的课题。工程迫使他们去创造, 克服困难、积累经验。建设吸引着各行各业的土木、水利专家, 既竞争又合作, 普遍迫切要求同行的技术交流。因此, 几乎每年举行一至两次全国性的深基坑工程技术交流会。虽然不都是全国性学术组织发起的, 但总是吸引着全国的同行聚首切磋。

## 4 中国高层建筑深基坑支护结构常用的一些类型

基坑支护型式主要分两大类, 即支挡型和加固型, 下面分别加以介绍。

### 4.1 支挡型

中国建筑材料价格的结构框架决定了支护结构选型的主要倾向。一般钢材消耗量(尤其是特殊型材)不能过大。同时, 中国的劳动力资源丰富, 因此, 能放坡开挖的就放坡, 能因陋就简的就因陋就简, 例如用水泥土挡墙, 码砌块石, 堆叠土工织物砂包, 打小型封土桩, 用脚手架的构件建筑轻型支挡结构等。

随着开挖深度的增加, 上述简易支护结构已不适用。随之而重点发展的是桩排支挡结构, 而且主要是钻孔灌注桩和人工挖孔灌注桩排。尤以后者以其低廉而质量易于保证而取胜。它们又分稀疏桩排和紧密桩排两种。前者构成骨干支挡物, 桩间可砌砖拱, 喷射混凝土(或挂钢筋网喷锚), 或水泥土成拱圈与骨架桩构成整体。紧密桩排则桩间要用各种止水措施, 防止坑壁外侧水土的流失。但经验证明, 桩身凝固之后, 桩间企图用素混凝土细桩堵缝效果不太好, 已有多起失败的事例发生。也有发展用长螺旋钻成孔的压浆成桩法施工, 其特点是桩身是无砂混凝土, 由水泥浆孔中插筋后抛入碎石而成, 因其侧壁和桩端土都是经过高压注浆处理过的, 所以桩的性能比较好。

在嵌岩支护桩的人工挖孔施工中发生凿孔困难时, 福建岩土工程师发展了桩底岩石锚杆技术。其作用是可减少开挖深度, 将锚杆作为围护桩长的延伸。为了提高锚杆与岩石间的胶结能力, 采用 UEA 微膨胀剂作为锚杆水泥砂浆的主要掺料。

中国采用大型钢板桩或 H 型钢桩作为支挡结构的比较少, 主要也是出于经验考虑。另外, 钢材的回收施工对环境的影响也十分严重, 钢材的折旧率很大。

双排桩支护结构在中国的推广不甚理想。本来, 设计者的意图是用双排桩通过桩顶盖板或盖梁联成门式刚架式整体, 增大支护的侧向刚度, 以限制过坡的侧向变形。但是节点处的弯矩过大, 极易产生开裂和塑性破坏, 易发展成“滑牌效应”。于是从双排桩结构逐渐发展演变成格构式挡墙, 即双排桩之间加剪力墙, 这样, 支护结构的侧向刚度大幅度地增加。

中国深层搅拌水泥土桩的施工技术发展很快, 队伍迅速扩大, 造价低廉。因此, 钻孔桩排向坑外一侧增加一垛较厚的水泥土挡墙, 使其与混凝土主桩工同作用, 组成组合式桩

排也是常见的一种支护形式。也有水泥石挡墙的内侧设置稀疏主桩的, 这些主桩在开挖施工抢险补强中作为支撑支点很起作用。

单纯采用水泥石重力式挡墙支护的, 一般应用于开挖深度小于 6 m 的基坑。挡墙的厚度一般为 0.6~0.9 倍挖深。墙体由实心的或者格构式的密集水泥石桩所构成。也有连接内外两拱的异形格构, 或在坑内用水泥石桩做成坑底暗支撑的, 也有平面上做成连拱式桥一样的布桩型式。应该因地制宜发展新型式。

地下连续墙的优点很多, 对周围环境影响小, 可将支护与止水两者融成一体, 墙体的深度大小由之, 适应性强。中国发展了多种地下连续墙施工机具, 另外还引进了外国的各种先进设备。在上海, 地连墙的应用比较广泛, 但其造价往往偏高, 今后的任务是如何使这种结构更具有技术经济的竞争力。最近, 中国还引进了日本 SMW (水泥石地连墙) 工法和全套设备, 正在某工地实施。

至于地下连续墙能否作为地下室的主体结构问题, 尚有争论。往往地连墙的防渗存在着薄弱环节, 常常在墙内侧再做一个很厚的衬套, 结构造价提高了, 有时效果还不好。可能有一个施工工艺和用材的问题, 中国的地连墙型式也已从单一的一字型发展为折板型、 $\pi$ 型、T 字型等多种形式。

桩-锚支护结构是中国又一种十分广泛应用的支护类型。凡是开挖深度大于 6~7 m 的基坑, 采用悬壁式桩排已不经济, 也不安全。在地质条件合适的情况下, 一排锚或多排锚的作用往往能节约大量的钢桩和混凝土材料。但在地下水位很高的特定条件下, 必须严格防止锚杆施式中发生承压水砂性土层中沿锚孔喷水冒砂的现象。有相当多的事故都源出于此, 常困扰着施工人员, 其环境影响也是十分深远的。中国发展了一种“一次性锚杆”的技术: 即用钻杆代替锚杆, 进入地层以后就不再拔了, 直接在其花管段二次灌浆成锚固段, 获得成功。锚杆的种类很多, 曾发展过螺旋锚、钢丝锚索、插筋锚杆、扩大头锚等。也有在地表面下 2 m 左右深度处, 沿坑壁外若干米挖一深沟, 用混凝土筑成“地龙”, 以多根钢筋与坑边圈梁连接起来, 利用“地龙”的被动土压力来发挥顶部锚拉力, 也有多项成功的经验。

至于内支撑的使用, 应该重点介绍混凝土内支撑的迅速发展的历史。近 3 年以来, 上海几乎普遍推广应用到了“垄断”的局面。随着静态爆破混凝土技术的成熟, 支撑内的钢筋可以不必弯曲成型, 几乎 100% 地加以回收, 降低了成本, 基本上也不影响施工进度。目前, 这一支护型式正向全国推广。支撑有对撑式的、天井式的、加强围檩式的和加强角撑式的。

## 4.2 加固型

上面已经提到的水泥搅拌桩挡墙, 实质上也可视为一种加固土体型的支护结构。它不是真正意义上的桩, 也不是真正意义上的墙。主要加固原理是利用这种格构体系使坑墙壁动体范围内的土体得到加固, 其优点是施工无环境污染(无噪声、无振动、无排污), 造价低廉及防渗性能好。目前粉喷桩也已广泛用于坑壁支护加固, 但应注意它的不均匀性和水平分层性, 一般要求复搅一次。

近年来, 陡坑壁喷锚支护结构如异军突起, 逐渐走向建筑行业。利用地下工程、人防中坑道支护技术, 加以发展, 成为当今深基坑工程中的一支生力军。它又像土锚结构, 又

像土钉结构, 但总体上来分析, 它还主要属于加固型的支护。一般锚杆不留自由段, 发展土钉加筋作用, 使加固土体成为一种特殊的加筋体。再者, 对于多孔的杂填土或砂性土, 采用脚手架钢管, 钻出花管, 打入地层后再低压 ( $0.3 \sim 0.6 \text{ MPa}$ ) 灌浆, 使受灌土体内水泥浆四处穿透, 增加土体的刚度和强度。同时还可以减少加固土体的渗透系数, 以达防渗目的, 一举两得。

注浆加固法直接使坑壁内外一定范围内土体加固往往与桩排支护配合使用, 既能降低桩侧主动土压力, 又能有效地增加被动区的土抗力。浆体材料发展得很快。

其它类型的加固型措施还很多, 不一一赘述。

#### 4.3 其它型式

中国围筒式支护结构用在深基坑工程中是近三四年才发展起来的。在此之前, 较小规模的围筒曾做过不少, 如深井泵站的施工, 边坡土边筑护圈 (即封闭式拱圈), 两者同步交叉进行, 可节省工期, 造价上也较低廉。在有渗透水作用的场地, 可在拱圈外面先做一道化学灌浆防水帷幕 (旋喷、化灌或深层搅拌), 这对施工拱圈极为有利。两个曲率半径不同的拱连接处, 考虑到推向土体的不平衡力  $F$  要由拱脚基坑的被动土压力提供, 所以设计时考虑在拱脚两侧各一定长度范围内将拱壁加厚作为拱脚基础。围筒结构稳定性关键在于做了肋梁 (腰梁)。肋梁两边都要配主要受力筋, 以抵抗意外的弯矩。拱壁内外也要有 7% 以上的配筋率。

中国的深基坑工程中采用逆作法者相对较少。主要原因是进入下层封闭式施工阶段时, 要设施工竖井, 进入顶板下面, 还要通风设施、运输带、运输通道、井口提升设备等, 较为费时费钱。还有边开挖边浇注外墙混凝土。桩间挖土也并非易事, 大直径的独桩与独柱相匹配才好, 但桩的外包加固及其与后浇的梁板之间连接等都有一定难度。运输土方、材料和仓内扎筋和灌注混凝土都较复杂。一定需事先有较适合于仓内施工的齐全的配套机械设备才有优势。不管怎样, 逆作法施工还是代表着科学的方向。

## 5 后记

本文仅仅对中国某些中心城市高层建筑深基工程的发展概况作一简单的综述, 肯定是挂一漏万的。如关于基坑治水的问题, 无论是降水还是隔封措施, 都是一门相当大的学问, 限于时间和水平, 恕不再占用篇幅了。

### THE DEVELOPMENT OF DEEP FOUNDATION PIT FOR HIGH-RISING BUILDING IN CHINA

Liu Quansheng<sup>1</sup> Wu Yushan<sup>1</sup> Liu Zude<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica, Wuhan 430071)

<sup>(2)</sup> Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan 430072)