

SHENJIKENG YU BIANPOZHIHUGONGCHENG SHEJISHIGONG JINGYANLU

深基坑与边坡支护工程

设计施工经验录

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

徐至钧 主编 王曙光 陈静 等编著



深基坑与边坡支护工程 设计施工经验录

徐至钧 主 编
王曙光 陈 静 等编著



 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要内容有:绪论、造成基坑与边坡工程失事的实例、深基坑支护事故分析及处理对策、深基坑支护设计与计算、边坡挡墙支护设计与计算、逆作法设计与施工、网格梁边坡支护结构、复合土钉支护与预应力锚杆柔性支护、深基坑与边坡支护事故处理经验录、工程应用实例等。

本书主要供土木工程、交通工程和港口工程的工程技术人员参考,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深基坑与边坡支护工程设计施工经验录/徐至钧主编;王曙光,陈静等编著. --上海:同济大学出版社,2011.5

ISBN 978-7-5608-4492-3

I. ①深… II. ①徐…②王…③陈… III. ①深基础—坑壁支撑—建筑设计②深基础—坑壁支撑—工程施工 IV. ①TU473.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 011417 号

深基坑与边坡支护工程设计施工经验录

徐至钧 主编 王曙光 陈静 等编著
责任编辑 解明芳 责任校对 杨江淮 封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
印 刷 常熟市大宏印刷有限公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 26.5
印 数 1—2 100
字 数 661 000
版 次 2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-4492-3

定 价 47.00 元

前 言

基坑与边坡支护是建筑工程中经常遇到的一类工程结构。为了确保岩土开挖、地下结构施工的安全,常常需要设置基坑支护与边坡的支挡结构。

随着我国经济建设的迅猛发展,各个城市的高层建筑大量涌现。目前,我国高层建筑发展的趋势和特点是层数增多,高度增高,并积极参与国际高层建筑的竞争。迄今为止,我国已建成高层建筑累计超过4.8亿 m^2 。高度超过100m的超高层建筑已超过300多幢,高度超过200m的超高层建筑已达70余幢。随着高层建筑的发展,伴随出现了深基础。基坑深度一般是2层地下室,基坑深度为 $-(8\sim 10)\text{m}$,3层地下室的基坑深度为 $-(12\sim 15)\text{m}$,4层地下室的基坑深度为 $-(15\sim 18)\text{m}$,目前国内高层建筑地下室最深为6层,基坑深度为 -26.2m 。首都国家大剧院的地下室为3层,基坑深度达 -32.5m 。另外,基坑的规模也越来越大。以往,高层建筑是一个单体的基坑,面积不到5000 m^2 ;现在,几幢高层建筑连同裙房,形成高层建筑的大底盘,基坑面积往往超过1万多 m^2 ,最大的是北京东方广场,达9万多 m^2 。

而基坑支护是一项临时性工程,认为地下室完工,基坑支护的任务就宣告结束,所以,往往不被人们重视,因而基坑事故频频发生。

本书主要介绍深基坑支护与边坡事故正面经验和反面教训,根据522项基坑与边坡支护事故的统计分析发现,造成事故的原因是多方面的,其中,主要的原因有以下几方面:

第一类,基坑与边坡勘察资料不详细或土的物理力学指标取值偏高,使计算失误造成基坑与边坡事故。

第二类,基坑与边坡设计方案考虑不周,基坑与边坡支护设计不合理造成基坑与边坡事故。

第三类,基坑与边坡支护的施工质量有问题,有的施工部门因偷工减料造成基坑与边坡事故。

第四类,属于地下水或水患处理不当或对水患认识不足导致基坑与边坡事故。

第五类,基坑与边坡支护工程中由于管理不善,或甲方不合理的压价造成基坑与边坡事故。

第六类,其他综合原因如冻土、自然滑坡、膨胀土等原因造成基坑与边坡事故。

经综合统计分析,第二类和第三类事故为总数的80.4%,占绝大多数。

书中经过统计分析,还提出了减少基坑事故的一系列措施,作为支护设计考虑的经验录提出来,以便今后减少基坑与边坡支护事故的频频发生,为基坑与边坡支护的设计与施工提供经验和措施。

书中还强调了基坑与边坡支护按照《建筑地基基础设计规范》(GB 50027—2010)提出的逆作法施工可大大减少事故和基础支护工程的风险性,值得今后在深基坑支护工程上推广使用。

本书由徐至钧教授级高级工程师主编,王曙光、陈静等参编。参加本书编写的还有张亦农、王海啸、国振喜、代远东、宋宏伟、张勇、付细泉、罗利君、赵尧钟、韩新涛、林婷、全科政等同志。

在本书编写中,还得到《建筑结构》、《工业建筑》、《建筑技术》等杂志的支持和帮助,在此加以感谢。由于作者的水平有限,不妥之处也请批评指正。

编著者

2010年8月,深圳

目 录

前 言

1 绪 论	1
1.1 深基坑工程设计与施工的基本要求	1
1.2 基坑支护工程的特点	3
1.3 基坑工程技术的发展	3
1.4 边坡的治理刻不容缓	17
1.5 人工边坡失稳类型及主要控制因素	20
2 造成基坑与边坡工程失事的实例	25
2.1 勘察因素造成工程失事的实例	25
2.2 基坑设计方案考虑不周引起的工程事故实例	59
2.3 施工质量问题引发的工程事故实例	83
2.4 基坑中地下水及其他水患导致的工程事故实例	113
2.5 基坑施工管理不善造成的工程事故实例	138
2.6 综合因素影响造成工程事故的实例	150
3 深基坑支护事故分析及处理对策	172
3.1 支护事故分析及处理对策	172
3.2 深基坑支护事故原因的统计分析	182
4 深基坑支护设计与计算	185
4.1 基坑设计等级划分	186
4.2 基坑工程的勘察与环境调查	188
4.3 土压力与水压力	189
4.4 设计计算	191
4.5 支护结构稳定性验算	196
4.6 基坑抗渗流稳定性计算	198
4.7 支护与地层的变形特征	204
4.8 现场监测与信息化施工	220
5 边坡挡墙支护设计与计算	225
5.1 放坡开挖	226
5.2 挡土墙支护结构类型	230

5.3	土压力与挡土墙	232
5.4	土压力计算	234
5.5	挡土墙设计规定与构造	247
5.6	黏性土挡墙土压力试验与实测	259
6	逆作法设计与施工	278
6.1	概述	278
6.2	技术特点	280
6.3	逆作法施工原理与施工程序	284
6.4	逆作方法选择	290
6.5	逆作法施工技术	291
6.6	工程应用实例	310
7	网格式梁支护技术	317
7.1	网格式梁支护简述	317
7.2	深圳某工业区西侧网格式梁支护	318
8	复合土钉支护与预应力锚杆柔性支护	328
8.1	复合土钉支护法	328
8.2	预应力锚杆柔性支护法	342
9	深基坑与边坡支护事故处理经验录	350
9.1	岩土勘察要细要准	351
9.2	土的物理力学参数的测定要全、取值要合理	351
9.3	水土分算还是水土合算	352
9.4	土的强度参数取值与试验方法	358
9.5	对重大工程勘察范围要扩大	359
9.6	水的患害必须调查清楚	360
9.7	支护桩插在流塑状的淤泥质土中被动土压力不足,造成基坑失稳	360
9.8	深基坑支护空间效应的利用	360
9.9	深基坑支护方案的选型	361
9.10	采用信息化监测施工	361
10	工程应用实例	363
	【工程实例 1】深圳文锦广场大厦——国内首例基坑采用喷锚网支护	363
	【工程实例 2】国家大剧院特大特深基坑支护技术	369
	【工程实例 3】上海金茂大厦基坑工程的设计与施工	387
	【工程实例 4】基坑围护工程采用逆作施工法	392
	【工程实例 5】锦州凯旋广场综合楼深基坑边坡支护施工	397

【工程实例 6】高水位砂质土地区基坑降水及支护技术	400
【工程实例 7】复合土钉支护工作性能的现场测试研究	402
【工程实例 8】北京城市地铁东直门车站土压力现场监测	405
【工程实例 9】采用土钉墙支护的深基坑险情原因及加固施工	408
【工程实例 10】基坑工程周边地面沉降的监测与分析	412
参考文献	415

1 绪 论

1.1 深基坑工程设计与施工的基本要求

目前,高层建筑基础埋置很深,地下室一般是2~3层,有的地下室为4~6层,所以,基坑支护工程庞大。基坑支护工程是一门系统工程,又是一门风险工程,工程技术人员应充分认识基坑支护工程的特点,在设计和施工时,既要保证整个支护结构在施工过程中的安全,又要控制结构的变形及其周围土体的变形,以保证周围建筑和地下管线的安全。在安全前提下,设计要合理,又能节省造价、方便施工、缩短工期。因此,基坑设计和施工技术人员要不断地努力提高设计和施工水平,包括吸取失败教训。

1. 深基坑支护的传统方法面临严酷现实

支护深基坑的传统方法很多。目前国内常用的四种主要类型有:墙(地下连续墙)、桩(人工挖孔桩、机械钻孔桩等)、板(钢板桩)、撑(钢支撑等)。其中,桩、板、墙法居多。前几年,在北京、上海、广州、深圳也能见到基坑支撑法的应用。

随着国家经济建设的发展,城市高楼拔地而起,地皮金贵,空间狭窄,基坑愈来愈复杂,传统方法与工程的不相适应性随之愈来愈突出。

例如,基坑沿建筑红线垂直下挖时,则地面无打板桩的空间;基坑位于住宅区近旁,安置则钢板桩或机械钻孔桩的有害噪声对居民干扰严重,往往引起强烈反响;基坑过深,土层自稳时间过短,则地下连续墙或难以施作,或肥厚不经济;钢支撑则更是施作困难,开挖不便,拆除费事,少慢差费。

特别是开挖过程中构件及结构易产生较大变形,甚至失稳破坏,危及邻近建筑物稳定和施工人员安全。纵观我国各大、中城市,尤其是沿海城市,近年来,深基坑护壁工程事故频频发生。人们在分析上述工程事故的原因时,无一不是从勘察、设计、施工、监理、质检、方案选择这几方面进行的,这自然有一定道理,但忽视了这种方法本身存在着的悬臂式被动受力支挡结构的不合理性,及其与深基坑特别是不良地质条件下深基坑边壁显著的不相适应性这一重要因素。

2. 改良方法难以两全其美

改良方法是改良传统方法的简称,它是指在传统方法中墙、桩、板、支撑中引入锚固技术后而形成的一类方法,如墙锚、桩锚、板锚、撑锚等。

改良方法是现今国内外流行、安全度较高的基坑围护方法,这种方法在当代基坑围护工程中占有主导地位。其设计方法已基本形成,施工工艺亦趋完善,故近年来发展较快。以全国大城市为例,目前较重要的深基坑工程,大都是采用墙锚或桩锚法施工的。为了减少工程事故,有的城建管理部门还明确规定,如采用人工挖孔桩护壁,则须加设锚杆,即采用桩锚法。

采用改良方法的工程造价比较高,工期仍较长,噪声仍较大,综合经济效益欠佳。由此可见,改良方法难以做到既安全又经济。

综上所述,改良方法历史的和现实的作用与地位不可低估,它在人类的生产活动中,正在并将继续在主导地位上发挥巨大作用。但无须讳言,除了较好的安全性之外,它几乎保留了传统方法的全部特点,因而其局限性是显而易见的。

3. 喷锚网支护法异军突起

喷锚网支护是喷射混凝土、各类锚杆(索、栓、管)和钢筋网联合支护的简称。它在国内外岩土高边坡、地下厂房、机库和油库、铁路和公路隧道、人防与国防工程坑道工事中已获得广泛而成功的应用,但作为一种高层建筑深基坑边壁支护方法,它不要一根桩、一块板、一堵墙、一根撑,完全摒弃传统方法及其被动支挡概念,的确非常新颖。

深圳市首例喷锚网支护文锦广场大厦深基坑边壁,是在别无选择的特殊条件下建成的^①。

深基坑喷锚网支护法,以尽可能保持、显著提高并最大限度地利用边壁土体固有力学强度、变土体荷载为支护结构体系的一部分为基本出发点。喷射混凝土时,在高压空气作用下,高速喷向土层表面,在喷层与土层间产生“嵌固层效应”,同时,随开挖逐步形成全封闭支护体系;喷层与嵌固层同具有加固和保护表土层使之避免风化、雨水冲刷、浅层塌方、剥落,以及防渗诸作用。锚杆内锚固段深固于滑移面之外的土体深部,外锚固段同喷网连为一体,可把边壁不稳定体“危机”转移到内锚段及其附近;钢筋网可使喷层具有更好的整体性和柔性,能有效地调整喷层与锚杆内应力分布。喷锚网主动支护土体,并与土体共同工作,具有施工简便、快速、灵活、适用性强、随挖随支、挖完支完、安全经济等特点。其工期一般比传统方法短30%,工程造价降低50%,甚至更多(如支撑法)。支护最大坑深目前已达20m。如1995年北京第一例庄胜广场基坑支护,深14.5~16m,至今采用此类方法全国已达2000多例。

喷锚网支护法不仅能有效地用于一般岩土深基坑支护,而且能同样有效地用于流砂、淤泥、厚层杂填土、富水地层等不良工程地质条件下的深基坑,还能快速、可靠、经济地对采用传统方法施作的将要和已经失稳的工程进行抢险加固或滑塌处理,体现了优质、高效、安全和经济。目前,该方法正在国内各大城市尤其是沿海城市大力组织推广应用。

4. 深基坑支护的发展与逆作法的应用

喷锚网支护一般适用于基坑深10~18m,土质较好时,可用于基坑深13~20m,甚至更深的基坑,如采用喷锚网支护就有一定风险。而实际情况是高层建筑地下室有的达到4~6层,基坑深度超过15m,最深达到26m左右,所以,必须应用逆作法施工。

建筑深基坑支护采用逆作法,是以地面±0.0标高为分界线,地面以下结构自身的能力对基坑产生支护作用,来保证基坑土方的开挖并利用地下各层楼板的水平刚度成为基坑的水平支撑,逐层逆作向下施工,还可同时在±0.0层以上向上施工高层建筑,这种逆作法施工种类发展较多,有全逆作法、半逆作法、整体逆作法、分层逆作法、局部逆作法、盆状挖土逆作法、抽条挖土逆作法,等等。国内各大城市已有100多例工程实例,这种逆作法的优点是:可以缩短工程的总工期;基坑变形小,对相邻建筑物的影响少;可大大节省支护结构支撑的费用;简化基坑的施工工序;等等。所以,经济效益明显,施工环境优良。在高层建筑地下室深基坑中,应用已有较多工程实践和经验,所以,国标《建筑地基基础设计

^① 参见1993年1月11日《深圳特区报》载文《我市首次采用喷锚支护技术》。

规范》(GB 50007—2010)专门列入逆作法的内容。预计今后逆作法处理深基坑施工很有发展前途。

5. 不以人们意志为转移的趋势

尽管传统方法特别是改良方法在国内外深基坑的应用中仍占有主导地位,但人们对深基坑喷锚网支护法、逆作法等深基坑新支护法不甚了解而持有疑义,并在等待和观望;尽管新方法本身从理论到施工工艺,还有施工机具尚有若干需探讨、改进和完善之处,并且没有相应的可以遵循的设计规范或规定,但是,随着采用该方法所建造的工程越来越多,深基坑新支护法和逆作法将以更快速度在更大范围内逐步取代传统方法和改良传统方法。这也许是一种必然的趋势,将不以人们的主观意志为转移。

1.2 基坑支护工程的特点

1. 临时性

在一般情况下,基坑支护结构是临时性的,与永久性结构相比,安全储备要求小些,但必须保证安全。业主往往有一个思想,尽量压低基坑工程的投资,以致容易造成有多少投资就有多少安全储备。这样,可能发生事故,最终损失更大。

2. 区域性

岩土工程区域性差异很大,而基坑工程区域性更强。我国土地辽阔,各地地质条件不同,必须因地制宜,贯彻具体情况具体解决原则。外地经验仅作参考,甚至当地经验也不能简单地照搬。

3. 复杂性

影响基坑支护工程的因素很多且复杂。土与水是基坑工程设计和施工的两个关键问题。一般而言,墙后的土压力介于主动土压力和静止土压力之间,墙前的土压力则处于静止土压力和被动土压力之间;土压力还有时空效应。因此,目前的设计采用朗肯土压力理论,可能导致偏于保守或危险。

4. 风险性

多年以来,基坑事故不断地发生,技术人员要增强对基坑工程风险性的意识,不可麻痹大意和存侥幸心理。

5. 多学科性

基坑工程涉及土力学、基础工程、结构力学和原位测试技术等多学科的知识,它是一门系统工程,对工程技术人员的要求很高,要不断地提高技术水平。

6. 环境效应

基坑开挖对地下水的变化和整个基坑的应力场的改变,导致支护结构的变形、基坑和墙后土体的变形,对相邻建筑和地下管线也产生影响;同样,基坑周围的荷载和建筑物荷载或者地下水流对整个基坑工程也产生反作用的影响。

1.3 基坑工程技术的发展

20世纪80年代中以来,随着我国国民经济的快速发展和人民生活水平的提高,各项

建设工程以前所未有的规模和速度发展,在很大程度上改变了我国的城乡面貌。以高层和超高层建筑为例,建造了高 383.9 m、81 层的深圳地王商业大厦,高 389.3 m、80 层的广州中天广场,高 492 m、101 层的上海环球金融中心等这些规模宏大、结构新颖、技术难度大的建筑物。仅上海的高层建筑已超过 4 600 幢,在世界大城市中屈指可数。此外,还进行了大量的市政工程建设,如大桥、地铁、隧道、高架道路等。这些大规模的工程建设和与之相应的科学研究,都有力地促进了基坑工程学科的发展。

近年来,基坑工程是土木工程领域新发展起来的一门新学科,它包括基坑支护结构的设计和施工、地下水控制、基坑土方开挖、工程监测和周围环境保护等。

基坑工程学科是一门综合学科。它涉及工程地质、土力学和基础工程、结构力学、工程结构、施工技术等等。再加上基坑工程实践性强,影响基坑工程的不确定因素多(如土工参数的准确性、气候影响、计算假定、施工条件和队伍的素质等),周围环境的多样性(如邻近建筑物的结构和基础形式、结构现状和重要程度;地下各种管线的种类、距离、埋深、材质和接头形式;周围道路情况及其重要性等),都使基坑工程成为风险性较大的一种工程。

我国地域广阔,土层变化大。如我国东南沿海一带除少数城市地质条件较好外,主要是海相沉积的软土地层,不少地区以淤泥及淤泥质土为主,土质松软、地下水位高、含水量饱和、土的渗透系数大、土壤内摩擦角和黏聚力小、具有蠕变特性。对大城市而言,建筑物密集、地下管线众多、交通网络纵横、环境保护要求较高,给基坑工程设计和施工都带来很多困难。因此,进行基坑工程的设计和施工要结合具体情况,因地制宜,不能生搬硬套,否则,会带来严重后果。虽然我国近年来在深基坑工程方面也发生过一些失效事例,但总体来说,这方面有很大的提高,已达到国际水平。

1. 基坑工程的失效模式

20 世纪 80 年代,修建的高层建筑、地下室一般是 1~2 层基坑,埋深最多 4~7 m,因此,基坑支护绝大多数采用钢板桩支护。进入 20 世纪 90 年代,高层建筑、地下室发展到 3~5 层,如用钢板桩支护,已不能满足支护工程的安全要求,所以,基坑支护频频发生失效。据统计,在软土地区,基坑支护失效每年达 1/4 左右;在其他地区,基坑失效也达 10%~15% 以上。主要原因是设计、施工都缺乏经验。以后建设部下文要求基坑深度达到 7 m 时,各地必须对基坑支护方案经过专家评审后,方能施工。

根据我们调查,基坑工程的失效模式有以下几种:

1) 整体失稳

整体失稳是指在土体中形成了滑动面,围护结构连同基坑外侧及坑底的土体一起丧失稳定性。一般的失稳形态是围护结构的上部向坑外倾倒,支护结构的底部向坑内移动,坑底土体隆起,坑外地面下陷。

2) 坑底隆起

坑底隆起是指坑底土体产生向上的塑性变形。基坑开挖以后,坑底向上位移的原因有两种:一是卸载引起的回弹,其数值较小;另一种是在开挖引起的压力差作用下,土体中产生的塑性变形,这种变形如果数量较大,表示土体中的塑流已经比较严重,如果支护结构和内支撑能形成整体性好的体系,则塑流仅引起坑外地面下沉,影响环境安全;如果是自立式结构或节点强度差的支撑体系,隆起可能是整体失稳的前兆;如果稳定性不能得到有效的控制,就会发生整体性失稳。

3) 围护结构倾覆失稳

围护结构的倾覆失稳主要发生在重力式结构或悬臂式支护结构,重力式结构在坑外主动土压力的作用下,围护结构绕其下部的某点转动,支护结构的顶部向坑内倾倒。抵抗倾覆失稳的力矩主要由围护结构自身的重力形成,坑底的被动抗力也足以构成抵抗力矩的因素。关于转动中心的位置有不同的看法,传统的方法是将转动中心放在支护结构的前趾,但也有认为绕前趾上面或下面的某一点转动比较合理,特别是软土地区,由于基底土比较软弱,在力矩作用下,前趾有下沉的可能。

4) 围护结构滑移失稳

围护结构的滑移失稳亦主要发生在重力式结构中,在坑外主动土压力的作用下,围护结构向坑内平移。抵抗滑移的阻力主要由支护体底面的摩阻力以及内侧的被动土压力构成。当坑底土软弱或围护结构底部的地基土软化时,墙体发生滑移失稳。

5) 围护结构底部地基承载力失稳

重力式围护结构的底面压力过大,地基承载力不足引起失稳。由于在围护结构的外侧还作用着土压力,因此,其合力是倾斜的。在倾斜荷载作用下,地基土发生向坑内的挤出,围护结构产生不均匀的沉降,可能导致部分围护结构的开裂损坏。

6) “踢脚”失稳

在单支撑的基坑中,可能发生绕支撑点转动,围护结构上部向坑外倾倒,支护结构的下部向上翻的失稳模式,故形象地称为“踢脚”失稳。在多支撑的围护结构中一般不会产生踢脚失稳,除非其他支撑都已失效,只有一道支撑起作用的情况。

7) 止水帷幕功能失效和坑底渗透变形破坏

止水帷幕丧失挡水功能,产生渗漏、涌水、流土或流砂。由于水土流失使基坑外地面下沉、塌陷,导致邻近建筑物的开裂和损坏。引起围护结构止水帷幕功能失效的主要原因是施工因素,其次是设计因素和材料因素。由于施工质量低劣,止水帷幕有空洞或裂缝,成为漏水的通道,这是最普遍的现象;止水帷幕设计过短,没有全部切断透水层也是漏水的可能原因。

由于止水帷幕失效产生过大的水力坡降引起坑底渗透变形破坏。坑内采用排水或降水措施后,造成了坑内外的水头差,地下水在水头差的作用下向坑内渗流,在渗流出口处土的细颗粒被带出,或土颗粒处于悬浮状态涌出。这种由渗透引起的破坏,因破坏机理不同而有不同的名称,如管涌、流砂或流土。如不及时制止,由渗透变形引起的坑外土体的位移和陷落是严重的。

8) 围护结构的结构性破坏

围护结构的结构性破坏是指围护体本身发生开裂、折断、剪断或压屈,致使结构失去了承载能力的破坏模式。

结构性损坏的原因可能是方案性的错误:如支撑体系不当或围护结构不闭合;设计计算时,荷载估计不足或结构材料强度估计过高;支撑或围檩截面不足导致破坏。此外,结构节点处理不当,也会因局部失稳而引起整体破坏;特别在钢支撑体系中,节点多,加工与安装质量不易控制,节点处理中包括支撑和墙体的连接处,如不设置围檩或连接强度不够等都会引起结构破坏。

9) 支撑和锚杆、锚体系失稳破坏

支、锚体系的失稳破坏包括两种不同的模式。锚杆的破坏主要表现为锚杆的拔出、断裂或预应力松弛；土锚的破坏大多是局部的，群锚的破坏实际上是土体的失稳而并非是锚杆的结构性破坏；支撑的失稳很可能是整体性的，其形态因体系不同而不同，支撑体系大多是超静定的，局部的破坏会造成整体的失稳，尤其是钢支撑体系，局部节点的失效概率比较大。基坑工程失效实景见图 1-1。



(a) 支护桩位移



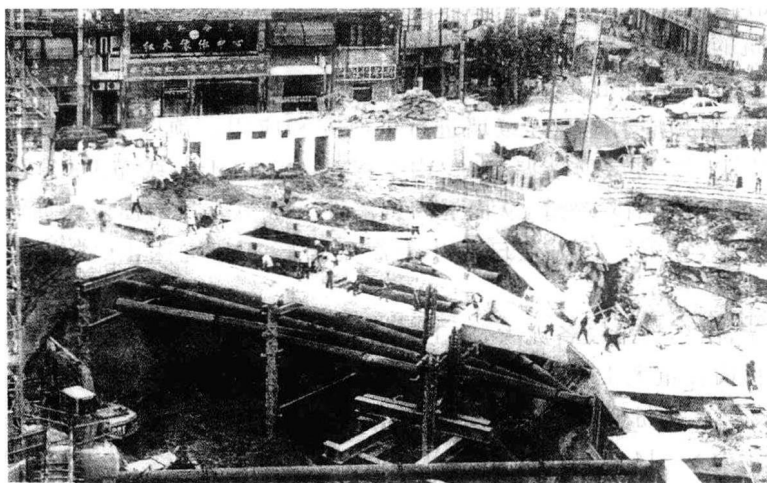
(b) 支护工程坍塌



(c) 支护桩滑断



(d) 支护结构大量坍塌



(e) 支撑结构断裂土体坍塌

图 1-1 基坑工程失效实景图

2. 支护结构选型

1) 围护墙选型

围护墙的选型主要根据基坑周围环境、开挖深度、土质情况、地下水位高低以及基坑侧壁安全等级(基坑类别)进行。关于基坑侧壁安全等级(基坑类别)的划分,我国行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—1999)与国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB 50202—2002)采用了不同的划分标准。前者不太具体,后者与上海市标准《基坑工程设计规程》(DBJ 08—61—1997)相似,给设计支护结构时重要性系数的采用带来不便。

围护墙的主要功能是承受土压力、水压力、地面荷载等产生的侧向力,且不超过允许的变形。在地下水位较高的地区,围护墙还必须同时具备止水的功能。

大量的深基坑的出现,钢板桩支护已不能满足支护工程的要求,所以,在 20 世纪 80

年代末,开始引进了国外的地下连续墙设备和施工技术。目前,我国常用的支护结构围护墙有下述几种。

(1) 地下连续墙。地下连续墙刚度大、止水效果好,在基坑深($-h > 10\text{ m}$)、周围环境保护要求高的工程中,经过比较后,多采用该技术。以上海为例,基坑深 19.65 m、88 层的金茂大厦,基坑深 18.95 m,66 层的恒隆大厦,坑深 16.865 m、面积达 15 294 m^2 、44 层的上海外滩金融中心等超高层建筑,以及沿淮海路走向的地铁线、沿南京路走向的地铁 2 号线的一些地铁车站,施工期间均采用地下连续墙作为支护结构。除建筑外,润扬长江公路大桥南汉悬索桥北锚碇,基坑深达 50 m,平面尺寸 69 m \times 50 m,亦采用了 1 200 mm 厚地下连续墙和 11 道钢筋混凝土支撑,效果良好。

地下连续墙用作支护结构的围护墙,效果较好,就是费用较高。若能做到两墙合一,即施工时用作支护结构的围护墙,同时,又是地下结构的外墙,则较为合理,经济效益亦好,是发展方向。两墙合一多采用逆作法施工,可省去内部支撑体系,减少围护墙变形和缩短总工期,是推广应用的新技术之一。至今,国内已有十多个省市的 200 多项工程采用逆作法和半逆作法施工,已有较成熟的经验。

除现场浇筑的地下连续墙外,我国还进行了预制装配式地下连续墙的研究和试用,预制装配式地下连续墙墙面光滑,由于配筋合理,可使墙厚减薄并加快施工速度。

此外,我国还对预应力地下连续墙进行了研究和应用。预应力地下连续墙可提高围护墙的刚度 30% 以上,可减薄墙厚、减少内支撑数量。由于曲线布筋张拉后产生反拱作用,可减少围护墙变形,消除裂缝,从而提高抗渗性。若用无黏结预应力筋,预应力筋用后还可以回收,经济效益好。该方法已用于上海闹市区某基坑深 10.4 m 的工程中,效果良好。

地下连续墙,由于施工设备庞大,施工时泥浆污染环境,连续墙墙身厚度较大,工程造价昂贵,所以,目前在重大工程中才采用地下连续墙。

(2) 排桩支护。排桩支护应用最广泛的是钻孔灌注桩。一、二、三级基坑皆可应用。一般当基坑深 h 为 8~14 m、周围环境要求不十分严格时,多考虑采用钻孔灌注桩。在地下水位较高的地区,为挡水需要而采用的施工机械又无法使桩相互咬合时,则多采用钻孔灌注桩排桩和水泥土墙的复合结构,排桩承受侧向力,水泥土墙起挡水作用,计算中不考虑其参与受力。钻孔灌注桩的嵌固深度、桩径和配筋,根据坑深、支撑布置和周围环境要求等计算确定。

排桩不相互咬合时,桩间有 100~150 mm 的间隙,为挡水起见,多在其后隔开 100~150 mm 施工 1 200 mm 厚的水泥土墙。在砂土或含砂多的黏性土中,为确保围护墙不漏水,有时在灌注桩与水泥土墙的间隙中进行注浆。若采用全套管施工法(贝诺特灌注桩)施工,可使排桩相互咬合,中铁二局工程有限公司等单位已有成功应用的经验,该技术咬合质量较好,能满足挡水要求。青岛深基加固工程有限公司采用长螺旋钻孔压灌超流态混凝土成桩技术,亦可使钢筋混凝土灌注桩与素混凝土桩咬合 50 mm,形成防水帷幕。

当周围环境保护要求严格时,为减少排桩的变形在软土地区有时于基坑底沿灌注桩周边或部分区域用水泥土桩或注浆进行被动区加固(图 1-2),以提高被动区的抗力,减少围护墙的变形。

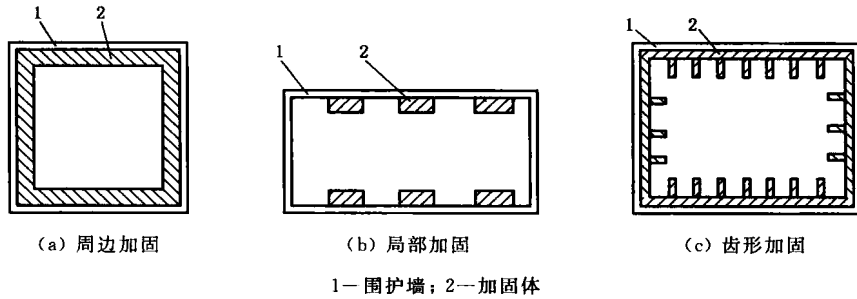


图 1-2 围护墙被动区加固

当基坑边至红线间的尺寸不足以施工灌注桩水泥土桩墙防水帷幕时,亦可在水泥土桩墙中套打灌注桩。

(3) 水泥土墙。水泥土墙属重力式围护墙,前些年,在软土地区应用广泛。当基坑属于二、三级基坑、基坑深 $h \leq 7$ m、坑边至红线间有足够的距离时,往往优先采用。由于水泥土的渗透系数 k 在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/s 范围内,属不透水结构,因此,既能挡土又能挡水。由于它属重力式结构,靠本身重量即可抵抗侧向力保持稳定,一般内部无支撑,便于基坑内机械挖土,地下结构施工简便、费用较低,已有成熟经验。在特殊情况下,受条件限制无法增大墙厚、

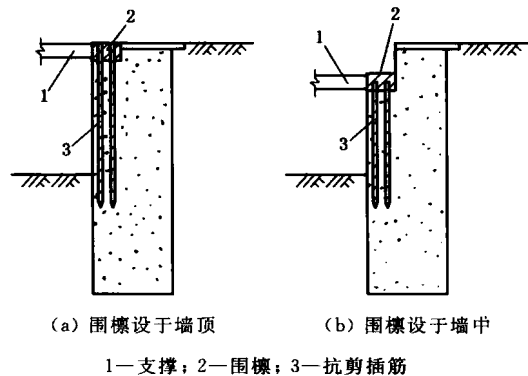


图 1-3 水泥土墙的抗剪构造

而又需较严格控制变形时,在增设围檩(腰梁、冠梁)和抗剪插筋后,亦可增设支撑(图 1-3);基坑内土体加固和加大嵌固深度,亦属限制变形的有效措施。

重力式水泥土墙多呈格栅式截面,墙厚由计算确定,不得小于 $0.4h$ (h 为坑深),以每 500 mm 进级。嵌固深度按计算确定,亦不得小于 $0.4h$ 。截面置换率为 $0.6 \sim 0.8$ 。相互搭接不宜小于 150 mm;若不考虑挡水作用,搭接不宜小于 100 mm。水泥掺入比约为 13%。

(4) 土钉墙。1972 年,法国凡尔赛地区首先应用土钉加固铁路路堑边坡,至今已有 30 多年。20 世纪 90 年代该技术开始在我国应用于基坑支护,北京、成都、武汉等地区应用较多,基坑深度亦达到 20 m。在这方面冶金部建筑研究总院、总参工程兵、清华大学等单位亦围绕土钉墙的机理、设计、施工等领域进行了大量试验研究,取得了不少成果。在大量工程实践的基础上,1997 年,我国制订了《基坑土钉支护技术规程》。

在开始阶段,土钉墙支护多应用于有一定自立能力并能提供足够抗拔阻力的较密实的砂土、粉土、素填土、坚硬或硬塑黏性土等。所以,《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—1999)也规定土钉墙适用于二、三级基坑,非软土场地,基坑深度不宜大于 12 m。后来,东南沿海一带淤泥及淤泥质土为主的软土地区亦开始应用该技术。为适应这一带软土的特性,发展了复合土钉支护技术(图 1-4)。近年来,复合土钉墙是在土钉墙基础上发展起来的新型支护结构,它是将土钉墙与深层搅拌桩、旋喷桩、各种微型桩、钢管土钉及预应力锚