

Design and Construction for Foundation Excavation of **Beijing** Metro Engineering

北京地铁基坑工程 设计与施工

刘 军 丁振明 章良兵 编著

中国建筑工业出版社

北京地铁基坑工程设计与施工

Design and Construction for Foundation Excavation of
Beijing Metro Engineering

刘 军 丁振明 章良兵 编著

北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目 (The Project of Construction of Innovative Teams and Teacher Career Development for Universities and Colleges Under Beijing Municipality: IDHT20130512)、
北京节能减排关键技术协同创新中心资助

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

北京地铁基坑工程设计与施工/刘军, 丁振明, 章良兵编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-112-19388-2

I. ①北… II. ①刘… ②丁… ③章… III. ①地铁
隧道-基坑工程-设计-北京市 ②地铁隧道-基坑工程-工
程施工-北京市 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 087061 号

责任编辑: 田启铭 李玲洁
责任设计: 李志立
责任校对: 陈晶晶 张 颖

北京地铁基坑工程设计与施工

刘 军 丁振明 章良兵 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17³/₄ 字数: 441 千字

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-19388-2

(28610)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

基坑工程是土木工程领域中一个古老的传统课题，同时又是一个综合性的岩土工程问题，既涉及土力学中典型的强度、稳定与变形问题，又涉及土与支护结构的共同作用问题。地铁基坑工程一般位于城市中，地质条件和周边环境条件复杂，有密集的建筑物、构筑物、管线等，且人口众多、交通拥挤，施工场地狭小，因此对基坑稳定和位移控制的要求很严，一旦失事就会造成生命和财产的重大损失。笔者在地铁工程领域做了大量研究与工程实践，本书依据近期颁布的国家标准和北京市地方标准，介绍了常用的支护形式的设计、施工与监测，如土钉墙、悬臂结构、排桩式、地下连续墙以及地下水的控制，具有较强的理论性、实践性以及较高的参考价值。

限于编者水平，书中难免存在一定的疏漏和错误，敬请广大读者和同行批评指正。

目 录

第 1 章 基坑工程概述	1
1.1 北京地区工程条件	2
1.2 地铁基坑支护结构特点	5
1.3 工程建设环境	7
第 2 章 基坑支护结构设计要点	9
2.1 基坑支护结构分类	9
2.2 基坑支护结构安全等级	10
2.3 基坑支护结构选型	12
2.4 水平荷载计算	14
2.5 支护结构计算	18
2.6 内支撑设计	27
2.7 双排桩设计	42
2.8 稳定性验算	45
第 3 章 土钉墙支护施工技术	51
3.1 概述	51
3.2 土钉墙特点与应用	53
3.3 土钉墙作用机理与工作性能	55
3.4 土钉墙支护设计	57
3.5 土钉墙支护施工	62
第 4 章 拉锚施工技术	70
4.1 概述	70
4.2 锚杆围护体系的设计	75
4.3 锚杆的施工	78
第 5 章 排桩及内支撑施工	90
5.1 概述	90
5.2 灌注桩施工	92
5.3 SMW 工法施工	116
5.4 内支撑施工要点	125
第 6 章 地下连续墙施工	134
6.1 施工设备	134
6.2 施工工艺	143
6.3 复合墙及双层墙施工	154
6.4 墙底灌浆与墙后接缝压浆	155

6.5	质量控制	158
6.6	事故处理及预防	159
第7章	土方工程	161
7.1	概述	161
7.2	土方量计算	163
7.3	土方开挖工艺与方式	167
7.4	人工开挖	172
7.5	土方机械开挖	173
7.6	基地处理与封底	190
7.7	土方开挖中应注意的问题	190
第8章	地下水控制	194
8.1	概述	194
8.2	水文地质勘察	196
8.3	降水	200
8.4	截水	218
8.5	地下水回灌	228
第9章	监控量测	232
9.1	监控量测重要性	232
9.2	监控量测内容	233
9.3	监控量测标准	238
9.4	变形监控量测	244
9.5	受力监控量测	255
9.6	地下水监测	263
9.7	测点布置与监测频率	267
9.8	监控量测信息处理与反馈	275
参考文献		278

第 1 章 基坑工程概述

基坑工程是土力学基础工程中一个古老而又传统的课题，同时又是一个综合性很强的岩土工程问题，既涉及土力学中典型的强度、稳定与变形问题，同时还涉及土与支护结构的共同作用问题。

随着基坑的开挖越来越深、面积越来越大，基坑围护结构的设计和施工越来越复杂，所需要的理论和技术越来越高，需要解决一些理论计算和设计问题，由此逐步形成了一门独立的学科分支——基坑工程。基坑工程是随着我国建设事业的发展而出现的一种较新类型的岩土工程，发展至今，量多面广的基坑工程已经成为城市岩土工程的主要内容之一。

一般来讲，基坑工程是指由地面向下开挖的一个地下空间（基坑），开挖中应保证基坑施工和主体地下结构的安全以及周围环境不受损害，包括土方开挖、支护结构、降水和回填等。基坑工程涉及岩土工程、结构工程、环境工程以及施工技术等众多学科领域，影响因素多，设计计算理论还不成熟，在一定程度上仍然依赖工程实践经验。

基坑土方开挖的施工工艺一般有两种：放坡开挖（无支护开挖）和在支护体系保护下的开挖（有支护开挖）。前者既简单又经济，但需具备放坡开挖的条件，即基坑不太深而且基坑平面之外有足够的空间供放坡使用。因此，在空旷地区或周围环境允许放坡而又能保证边坡稳定条件下应优先选用。

基坑工程一般具有如下特点：

（1）基坑支护是临时性工程，造价较高，一般不愿投入较多资金；可是，一旦出现事故，处理十分困难，造成的经济损失和社会影响往往十分严重。

（2）基坑工程技术复杂，涉及范围广，与岩土性质密切相关，变化因素多，事故频繁，是建筑工程中最具有挑战性的技术难点。岩土性质千变万化，地质埋藏条件和水文地质条件的复杂性、不均匀性，往往造成勘察所得的数据离散性很大，难以代表土层的总体情况，并且精确度较低，给基坑支护工程的设计和施工增加了难度。如在软土、高地下水位及其他复杂场地条件下开挖基坑，很容易产生土体滑坡、基坑失稳、桩体变位、坑底隆起、支挡结构严重漏水、流土以致破损等病害，对周边建筑物、地下构筑物及管线的安全造成很大威胁。

（3）基坑工程正向大深度、大面积方向发展，有的长度和宽度均超过百余米，深度超过 20 余米，工程规模日益增大。

（4）基坑工程施工周期长，从开挖到完成地面以下的全部隐蔽工程，常需经历多次降雨、周边堆载、振动、施工不当等许多不利条件，其安全度的随机性较大，事故的发生往往具有突发性。

基坑工程包含挡土、挖土、支护、防水、降水等许多紧密联系的环节，其中的某一环节失效将会导致整个工程的失败。工程实践证明，要做好基坑支护工程，必须包括整个开挖支护的全过程，它包括勘察、设计、施工和监测工作等整个系列，因而强调要精心做好

每个环节的工作。

1.1 北京地区工程条件

1.1.1 地貌成因特征

北京位于华北平原西北缘，西侧以西山与山西高原相连，北侧以燕山与内蒙古高原相连，东南面向开阔的华北平原区，距离渤海西岸约 150km，可以划分为以下几个地貌带：山区、丘陵、盆地和平原区。北京山地一般海拔 1000~1500m，与河北交界的东灵山海拔 2303m，为北京市最高峰，两山在南口关沟相交，形成一个向东南展开的半圆形大山弯，人们称之为“北京弯”，它所围绕的小平原即为北京小平原。东南方向是缓缓向渤海倾斜的大平原，境内贯穿五大河，主要是东部的潮白河、北运河，西部的永定河和拒马河。

从地质构造上讲，北京位于新华夏系构造带、阴山纬向构造带及贺兰山字形构造东翼反射弧三者交会部位，为华北地台中部—燕山沉降带的西段。在漫长的地质构造运动发展中形成复杂的地质格局，褶皱构造比较发育，断裂构造也相当发育，通过北京市区的主要断裂有三组：北北东、北东向张性断裂和北西向断裂。后者活动性更强，使得地震分布、地貌格局、河流流向及演变等都受其控制。其中北北东、北东向张性断裂有：八宝山断裂、黄庄—高丽营断裂、良乡—顺义断裂（通过市区丰台、朝阳、仙桥一带），南苑—通县断裂。北西向断裂有：南口—孙河断裂以及推测的永定河断裂。

北京地区除震旦系、奥陶系上统至石炭系下统及白垩系上统、古新统地层外，从太古界古老变质岩系至第四纪都有出露。出露最古老的地层——太古界，主要分布于密云、怀柔两地区。新生界广泛分布于北京平原和大水系河谷地带及山间盆地之中。

北京的地势是西北高、东南低。北京平原的海拔高度为 20~60m，也就是人类工程建设活动的主要场所。北京市区主要由第四系更新统和全新统地层组成，第四纪地层总趋势从西向东由薄变厚、至建国门附近厚达 100m。

北京市区除石景山、海淀一带为京西北隆起带外，整个市区都处于北京凹陷带之中。在凹陷带中沉积的第四纪沉积物的物质组成和地貌形态，就是第四纪地貌环境综合体中起决定性作用的构造运动的具体体现。北京平原按地貌单位、形态、成因和物质组成可划分四种类型：

（1）山前台地——主要如山前洪坡积台地、黄土台地。地形高差显著，坡度较大，其物质组成以黏性土、含卵砾石、碎石为主。北京市区连接石景山—海淀低山丘陵大片地区；

（2）洪冲积台地——主要由大小河流的洪冲积物堆积而成，地面坡度小于 1%，主要为原层黏性土，局部下层为卵砾石层，分布于永定河、温榆河两岸的大片地区；

（3）冲积平原——如北京地区最低处，是水流汇集场所，古河道极为发育，以结构性较差的黏性土及粉土细砂为主。分布于永定河等各大河流的中、下游；

（4）永定河决口、改道及沙丘地——北京平原地区，自全新纪以来，由于受构造运动的影响，几条规模较大的河流都曾发生过变迁和改道。

1.1.2 工程地质条件

北京位于华北地震活动区,自公元438年以来共发生有记载的地震168次。1976年7月28日发生在唐山的7.8级地震也波及北京,北京市区地震烈度达8度。地震多发生在构造线附近、构造线转折处、二条构造线交汇处。对工程有一定影响的活动断裂是贯穿市区西北部黄庄—高丽营断裂。当发生强震时,永定河以东,朝阳以西、海淀以南,南苑以北的大片市区中人工填土地基可能产生局部震害,而南苑、海淀一带松软地基可能产生震陷。

北京平原区第四系岩相分布由山地到平原具有明显的过渡现象。在平原与山地交界地带多分布有卵石、圆砾、黄土或黄土混碎石构成的洪积扇、坡积群。自山前至平原区的总岩相变化特征为:

- (1) 各大河流冲洪积扇顶部及上部以厚层砂土和卵、砾石地层为主;
- (2) 冲洪积扇中部的地层过渡为黏性土、粉土和砂土、卵砾石土互层;
- (3) 冲洪积扇中下部以及冲积平原区以厚层黏性土、粉土为主,层中分布有砂土层。

由此可见北京地区东西向工程地质特点为:西部以碎石类土为主,向东则逐渐形成黏性土、粉土与砂土、碎石类土的交互沉积,第四系覆盖层的厚度也由数米增加到数百米;北京地区南北向的工程地质特点为:北部以黏性土、粉土为主,局部会有卵石土的互层,随着向南的移动,会出现大量的卵砾石层且砾径较大。西南区域受古地形影响较为明显,以第三纪沉积的砾岩与黏土岩交互层为主的基岩顶板埋藏较浅,一般为20m以内。

与北京地铁施工相关的地层为第四系,主要物理力学指标参考值见表1-1:

1.1.3 水文地质条件

北京地区属于暖温带半湿润半干旱大陆季风气候区。春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋天秋高气爽,四季分明,热量丰富,日照充足。本地区年平均气温为 $11\sim 12^{\circ}\text{C}$,年极端最高气温为 40°C ,年极端最低气温为 -20°C 。7月气温最高,月平均温度为 26°C ;1月最冷,月平均气温为 -4°C ,冬季形成冻土深度为 $600\sim 800\text{mm}$ 。

北京多年(1991~2006年)年平均降水量约500mm,降水季节性变化很大,年降水量80%以上集中在汛期(6~9月),7~8月尤其集中,多年年平均水面蒸发量为1843.8mm。

北京市区第四系土层分布是非常复杂的,这就决定了地下水的赋存、运动的复杂性。北京平原发育五大水系:西部大清河及永定河水系、中部温榆河—北运河水系、东部潮白河水系及蓟运河水系。除中部水系发源于本市境内,其他为过境河流。北京属于永定河洪冲积扇的中上部地段,由于河流频繁改道形成多级洪冲积扇地,并且第四系土层分布复杂,因此,决定了地下水的赋存、运动的复杂性。在海淀镇—西直门—西单—沙子口—大红门一线的西南侧主要为砂卵砾石沉积,为单一含水层,深部为砂卵石与粉土、黏性土的互层沉积,形成多个含水层,甚至多层承压水。并且地层条件还受到古河道变迁控制,也形成和地貌特征密切相关的地下水,如分布于北部及东部地层中的台地潜水,分布于清河和温榆河故道中的阶地潜水。

北京影响地铁工程建设的地下水主要有上层滞水、潜水和承压水:

北京地区土层的主要物理力学指标参考值

表 1-1

土层名称	土的湿度	天然含水量 (%)	平均密度 (t/m ³)	天然密度(kN·m ⁻³)			侧压力 系数 ξ	变形模量 E_0 (MPa)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$		
				松散	中密	密实				松散	中密	密实
卵石层 (碎石土)	稍湿	<9	2.65~2.80	18~20	20~22	20.5~22.5	0.14~0.20	54~65 碎石土 29~65	—	30~33	33~37	37~40
	潮湿	9~24										
	饱和	>24										
砾石土	稍湿	<9	2.65~2.80	18~20	20~22	20.5~22.5	0.14~0.20	14~42	—	25~30	30~35	35~40
	潮湿	9~24										
	饱和	>24										
砾砂粗砂	稍湿	<9.5	2.66	18.5~19.0	19~20	20~21	0.35~0.42	36~43	—	33~36	35~38	37~42
	潮湿	9~21		19.5~20	20~21	21~21.5				28~30	30~33	33~35
	饱和	>21		20~21	21~22	22~22.5				26~28	28~30	30~33
中砂	稍湿	<9.5	2.66	16~17	17~18	18~19.5	0.35~0.42	31~42	—	30~33	33~36	36~38
	潮湿	9~21		17~18.5	18.5~19.5	19.5~20.5				28~30	30~33	33~35
	饱和	>21		19~20	20~20.5	20.5~21.5				24~26	26~28	28~30
细砂	稍湿	<9.5	2.66	15~16	16~17.5	17.5~19	0.35~0.42	25~36	—	27~30	30~34	33~36
	潮湿	9~21		16.5~17.5	17.5~19	19~20		19~31		24~26	26~28	28~30
	饱和	>21		18.5~19	19~20	20~21		17~19		22~24	24~26	26~28
粉砂土	稍湿	<9.5	2.66	15~16	16~18	18~20	0.35~0.42	17.5~21	5	27~28	30~32	32~34
	潮湿	9~24		17~18	18~20	19~20.5		14~17.5	2	21~23	24~26	26~28
	饱和	>24		18.5~19	19~20	20~21		9~14	0~1	17~19	19~21	21~23
黏砂土	半干硬	<12.5	2.70	15~16	16~18	18~20	0.5~0.7	12.5~16	10~20	22~26	24~28	26~30
	可塑	9~19.5		17~18	18~20	19~20.5		5~12.5	2~15	18~21	20~23	22~25
	流塑	>16		≤18~19	—	—		—	—	≤14	—	—
砂黏土	半干硬	<18.5	2.71	15~17	17~19	19~20	0.5~0.7	16~39	25~60	19~22	21~24	23~26
	可塑	15.5~33.5		17~18	18~20	20~21		4~16	5~40	13~18	17~20	19~22
	流塑	>32.5		<18	—	—		—	<5	≤10	—	—
黏土	半干硬	<26.5	2.74	17~18	18~20	20~21	0.7~0.75	16~59	60~100	16~19	18~21	20~23
	可塑	22.5~86.5		18~19	19~20.5	20.5~21.5		4~16	10~60	8~15	14~17	16~19
	流塑	>52.5		<18	—	—		—	<5	≤6	—	—

- (1) 上层滞水——主要分布在城区 10m 深度范围内的粉土、砂土和人工填土层中；
- (2) 潜水——呈普遍分布，根据具体地貌特征和埋藏条件可细分为：台地潜水、一级阶地潜水、层间潜水和西郊潜水；
- (3) 承压水——主要分布于北京东郊及北郊。

地下水的补给来源主要是大气降水入渗、地表水体渗漏和山前侧向径流补给，东郊和西郊部分地区有灌溉入渗补给和人工地下水补给。

具体补给方式如下：

- (1) 台地潜水、上层滞水和一级阶地潜水的补给来源为大气降水和径流；
- (2) 西郊潜水主要接收侧向径流、大气降水和地表水补给；
- (3) 层间潜水一般以越流、地下水侧向径流和“天窗”渗漏补给为主；
- (4) 潜水—承压水和深层承压水的补给方式均为侧向径流和越流。

受北京市地形地貌影响，地下水径流方向总体上为自西向东，局部地段发生一定的偏移。其中，最近发生的地下水径流的偏移主要是受人工开采的影响造成的，东郊地下水长期过量开采形成的降落漏斗，改变了地下水的天然径流流向，致使地下水向漏斗中心汇集。

随着地下水的过量开采，地下水位迅速下降，甚至部分地区潜水出现输干现象，并且承压水的过量开采，引起周边的承压水与潜水的越流补给量增大，周边的地下水位下降，由于地下水开采量远远超过地下水天然补给量，含水层的地下水静储量减少。目前，北京市地下水累计亏损达 40 亿 m^3 之多，地下水位明显下降：西郊地下水位平均下降了 14m；东郊地下水位下降了约 20m，特别在漏斗中心区，水位下降超过 30m。

根据目前的水文地质条件，北京平原的大部分地区 12m 深度范围内的地下工程应考虑上层滞水的作用，可不考虑潜水地下水的作用。但是靠近水系周边的地下工程应根据实际情况进行考虑。

1.2 地铁基坑支护结构特点

地铁基坑工程一般位于城市中，地质条件和周边环境条件复杂，有密集的建筑物、构筑物、管线等，且人口众多、交通拥挤，施工场地狭小，因此对基坑稳定和位移控制的要求很严，一旦失事就会造成生命和财产的重大损失。

1.2.1 支护结构时效特点

一般情况下，地铁线路的建设周期为 3~5 年，其中包括初步设计、施工图设计、施工、试运行；但不包括前期评估与论证工作。在施工阶段包含了土建施工、装饰工程、线路工程、设备工程。因此，整个土建工程占用建设周期近 2/3 的时间，基坑施工则仅占用土建工程 1/4 时间。

大多数的基坑支护结构是临时措施，地下室主体施工完成时围护体系即完成任务，一般情况下北京地区临时性基坑支护结构的设计考虑时效为 1 年。与永久性的结构相比，临时结构的安全储备要求小一些，如果出现工期上的延长，对支护结构安全与否也将存有一

定的疑问，带来一定的风险。因此，应充分考虑到建设工程的总体建设周期，分析各个节点的时间表，合理进行工期计划。

1.2.2 理论综合性强

有的基坑工程土压力引起围护结构的稳定性是主要矛盾，有的土中渗流引起流土破坏是主要矛盾，有的基坑周围地面变形量是主要矛盾。基坑工程涉及土力学中稳定、变形和渗流三个基本课题，三者混杂在一起，需要综合处理。这三个基本课题的研究本身就值得深入探讨，稳定理论常常应用理想的弹性状态下静力学理论，变形理论最近由于有限元的研究深入得到一定发展，土体的渗流研究没有形成明显成果。

针对支护结构设计中的土压力理论还很不完善，静止土压力按经验确定或按半经验公式计算；主动土压力和被动土压力按库仑（1776 年）土压力理论或朗肯（1857 年）土压力理论计算，这些都出现在 Terzaghi 有效应力原理问世之前。

在考虑地下水对土压力的影响时，是采用水土压力分算，还是水土压力合算较符合实际情况，在学术界和工程界认识还不一致，各地制定的技术标准中规定也有差异。

目前，针对基坑支护结构的理论研究较为少，大多根据以往的经验进行设计与施工，并结合现场的监测与检测进行评价与验证。

1.2.3 施工经验性高

由于理论研究的相对缺乏，20 世纪末期之前，大多对基坑支护结构的设计并不明确，主要由施工单位根据经验进行基坑支护结构组织施工，通过方案论证会的形式进行确定。

21 世纪初，设计单位开始明确对基坑支护结构进行设计。同时，设计以较为保守的理论进行验算，自然影响到实际施工过程中的操作过程。基坑支护结构施工和主体结构施工的过程不同，因为结构设计主要按照结构的强度要求进行设计，由于土体是弹塑性体，并且地质勘查工作的结果仅是以点代面，真正的工程情况是基坑开挖过程中才能体现的性质表现，并且设计大多考虑到允许变形来控制支护结构刚度的大小。因此，基坑支护结构的施工是方案优化与工程施工的同步过程。

这就需要在基坑支护结构施工过程中，必须参考大量的类似工程实例，结合类似工程的特点，在基坑支护结构施工中根据实际情况进行合理调整与优化，尤其是某些细节的施工点上。比如，复合支护结构的支护结构形式发生转换时的衔接施工工艺、地质条件改变状态下的施工调整缺乏依据等。都是需要根据以往施工经验在现场应立即解决的问题。

1.2.4 具有很强区域性

岩土工程区域性强，岩土工程中的基坑工程区域性更强。如软黏土地基、砂土地基、黄土地基等工程地质和水文地质条件不同的地基中基坑工程差异性很大。同一城市不同区域也有差异。基坑工程的支护体系设计与施工和土方开挖都要因地制宜，根据本地情况进行，外地的经验可以借鉴，但不能简单搬用。

北京地区的工程地质条件存在一定差异，这种差异构成了不同的工程地质分区，每个分区的工程经验仍存在一定的差异。因此，首先应对区域工程地质条件进行详细了解，才能在施工中真正把握关键。

基坑工程的支护结构设计与施工和土方开挖不仅与工程地质和水文地质条件有关，还与基坑相邻建筑物、构筑物、市政地下管线的位置、抵御变形的能力、重要性以及周围场地条件等有关。有时，保护相邻建（构）筑物和市政设施的安全是基坑工程设计与施工的关键。这就决定了基坑工程具有很强的区域特殊性。因此，在基坑支护结构施工中更应该重视其特殊性带来的相应问题，做到具体问题具体分析，顺利解决问题。

1.2.5 系统工程

基坑工程是系统工程，它既是一个技术实现过程，也是一个管理目标的实现过程。它包含了区域地质工程调查、支护结构设计与论证、施工过程和优化及土方开挖等内容。涵盖了组织协调、工程技术、施工管理、风险控制和专家系统等方面要求。

技术上的环环相扣作用更加有力地证明了这一点，技术上如果存在脱节，就会发生一定问题，应重点把握关键技术的落实。例如，各方面土方开挖的施工组织是否合理将对围护体系是否成功产生重要影响，不合理的土方开挖方式、步骤和速度可能导致主体结构桩基变位，围护结构过大的变形，甚至引起围护体系失稳导致破坏。基坑开挖势必引起周围地基中地下水位的变化和应力场的改变，导致周围地基土体的变形，对相邻建筑物、构筑物及地下管线产生影响。影响严重的将危及相邻建筑物、构筑物及地下管线的安全及正常使用。

同时大量土方运输也将对生活环境、交通环境产生巨大影响，对这些问题应首先从组织协调上优先进行考虑，并且加强施工中的管理力度，应对基坑工程的环境效应给予重视。

为了有效控制基坑工程的风险，在基坑支护结构施工过程中应加强支护结构及周边环境的监测工作，及时分析监测结果，反馈信息，力求实行信息化施工，并利用专家系统进行跟踪。

1.3 工程建设环境

1.3.1 空间环境要求

按照《北京市限建区规划（2006～2020年）》，北京市市域土地将按照生态条件不同，划分为禁建区、限建区和适建区三大类。用寸土寸金来形容北京这个城市一点儿也不过分，今后更是如此。

《北京市限建区规划（2006～2020年）》将北京 16410km² 市域划分为三大类，按所有限制建设的要求分为近 30 万个“斑块”。划分建设限制分区主要是从水、绿、文、地、环五大建设限制要素，依据自然灾害易发的风险、资源环境保护的价值、污染源防护的影响等差异来划定的。五大要素分别为：“水要素”包括河湖湿地、水源保护、地下水超采、超标洪水风险；“绿要素”包括绿化保护、城镇绿化隔离、农地保护；“文要素”包括文物保护、地质遗迹保护；“地要素”包括平原区工程地质条件、地震风险、水土流失与地质灾害防治；“环要素”则包括污染物集中处理处置设施防护、电磁辐射设施（民用）防护

以及噪声污染防治。根据《北京市限建区规划（2006～2020年）》，北京 55.5km² 的绝对禁建区不允许建任何房屋，这部分面积占了全市总面积的 0.3%；相对禁建区域划了 7130.1km²，占全市总面积的 43.4%。此外，全市还有 4819.2km² 的严格限建区，占全市总面积的 29.4%以及 3878.2km² 的一般限建区，占全市总面积的 23.6%。

北京市可用于建设的面积已被严格控制，这促进了地下空间的开发和利用，加大了地铁工程建设，并且对于轨道交通的建设力度主要任务之一便是解决城区现有的交通现状，形成交通立体网络。所以，地铁建设仍是重点的基础工程之一，同时也带来客观的建设难度。尤其是城区地铁车站基本位于商业、政务与教育的中心，既有建筑物状态十分复杂，给地铁基坑的建设带来极高的空间难度，即通过十分有限的地表空间，来开发更大的地下空间，在地表平面上的限制条件，自然只能通过纵向深度的充分利用，为基坑安全开挖的设计、施工等带来难度。

1.3.2 人文环境要求

由于北京是全国的政治、经济、文化中心，是世人瞩目的焦点，并且政府提出和谐社会建设目标，将人文精神观念加入到社会主义精神文明建设中。

以人为本的社会主义，首先需要的是和谐社会的发展，保障人民井然有序的生活状态。北京地铁建设是造福于民的工程，但是，以往地铁工程中出现的工程事故，使得公共交通改线、人民财产损失等，大大地影响了首都人民的生活。

因此，保证施工过程中小范围的人文环境，就是保证整个社会的人文环境。首先，要做到少扰民，尽可能地减少拆迁工程；其次，确保工程与周边环境的安全，杜绝安全事故；进而，协调与周边居民的关系，减少噪声、垃圾等污染，必要时需要建设临时措施减少矛盾。

第 2 章 基坑支护结构设计要点

2.1 基坑支护结构分类

2.1.1 开挖方式及内容

基坑工程根据场地条件、施工、开挖方法，可以分为无支护（放坡）开挖与有支护开挖，如图 2-1 所示。

无支护开挖方式既简单又经济，适合具有较大空间的放坡空间，在空旷地区或周围环境允许时能保证边坡稳定条件下应优先选用。可以结合周边的具体工程环境，配合土体加固技术减少土方开挖量，不进行基坑侧壁的支护结构施作，直接进行基坑开挖。

但是在北京中心城区地带、建筑物稠密地区，往往不具备放坡开挖的条件，仅在地铁出入口位置可能存在放坡开挖的条件。城区缺乏放坡开挖需要的足够空间，并且现有城市空间内存在邻近建（构）筑物基础、地下管线、运输道路等，尤其地下管线埋深较浅，在平面分布上很广，新建建筑红线范围有限。因此，基坑开挖大多数采用在支护结构保护下进行垂直开挖的施工方法。

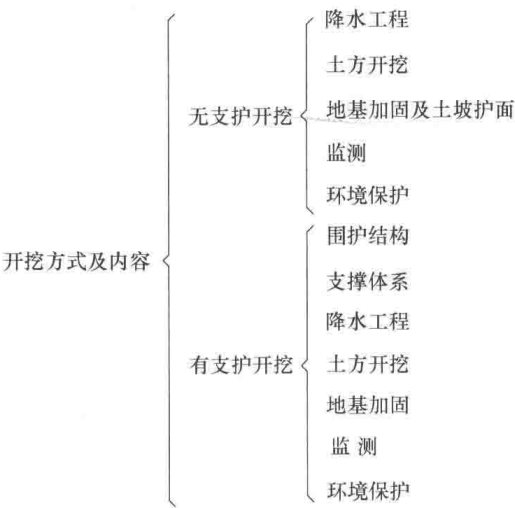


图 2-1 基坑开挖方式及内容

2.1.2 支护结构特点

根据支护结构的刚度要求进行支护的特点不同，支护结构可分为全刚性支护、刚柔性支护方式。

全刚性支护主要是依靠支护结构的绝对刚度抵抗基坑侧壁的压力，设计时是以不允许支护结构发生变形作为出发点，交通工程的边坡支护设计中经常应用全刚性支护结构，交通工程边坡首先是进行放坡，利用全刚性支护结构确保边坡稳定。在不允许放坡的城区基坑工程中全刚性支护结构造价很高，并且针对支护结构不允许变形这一点，往往需要通过 对基坑周围土体加固作用才能实现。目前，基本不应用全刚性支护结构。首先，是经济成本的增加，土体加固与结构要求都需要高成本的投入；其次，也增加了对近基坑土体的扰

动；再则，针对不变形这点难以实现。

城市基坑支护结构设计往往根据现场需要，在保证工程安全的状态下，允许支护结构周边土体发生一定变形，并通过一定的支护结构刚度来控制变形，允许支护结构通过变形进行协调，即利用支护结构自身刚度与土体自身的稳定能力来共同实现基坑侧壁的稳定，这种支护结构为刚柔性支护结构。

刚柔性支护结构设计可根据工程的特殊性选择适合的支护结构：当具有一定放坡空间或允许土体变形较大时，刚度小柔性强的支护是较为经济的选择，例如土钉墙、钢板桩、土钉墙复合预应力锚索等；当放坡空间较小和土体变形较为严格时，刚度大柔性弱的支护是较为合理的选择，例如灌注桩、SMW 桩；对于深度较深的基坑可根据需要选择复合支护结构，一般上部分用刚度小柔性强的支护，下部分用刚度大柔性弱的支护，例如土钉墙+桩+支撑（或锚固），顶部作放坡消减坡脚角度，减小顶部荷载的作用，同时减小桩的长度，节省成本。

2.1.3 施工作业特点

传统的道路边坡支护工程存在放坡空间，施工顺序：首先，将边坡开挖至底部；然后，自下而上地进行支护结构的施工。根据施工顺序称之为顺作法支护结构。

城市基坑工程由于施工空间存在限制，基坑开挖只能由上至下开挖进行，同时支护结构也要由上至下进行施作，称之为逆作法支护结构。对于悬臂结构则是在基坑开挖之前，预先将支护结构的主体施作完成，支护结构的作用是在基坑开挖中体现出来。也可称之为逆作法支护结构，最为典型的逆作法支护结构是土钉墙，随着开挖一步一步由上往下进行施作。对于大多数的复合支护结构，应先将支护桩施作完成，而后根据基坑开挖过程进行内支撑体系的施工。因此，复合支护结构也可认为是逆作法支护结构。

2.2 基坑支护结构安全等级

《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120—2012 规定，基坑侧壁的安全等级分为三级，不同等级采用相应的重要性系数 γ_0 。基坑侧壁的安全等级如表 2-1 所示。

支护结构的安全等级 表 2-1

安全等级	破坏后果
一级	支护结构失效、土体过大变形对基坑周边环境或主体结构施工安全的影响很严重
二级	支护结构失效、土体过大变形对基坑周边环境或主体结构施工安全的影响严重
三级	支护结构失效、土体过大变形对基坑周边环境或主体结构施工安全的影响不严重

支护结构设计，应考虑其结构水平变形、地下水的变化，对周边环境的水平与竖向变形的影响。对于安全等级为一级的和对周边环境变形有限定要求的二级建筑基坑侧壁，应根据周边环境的重要性，对变形适应能力和土的性质等因素，确定支护结构的水平变形限值。

当地下水位较高时，应根据基坑及周边区域的工程地质条件、水文地质条件、周边环境情况和支护结构形式等因素，确定地下水的控制方法。当基坑周围有地表水汇流、排泄

或地下水管渗漏时，应妥善对基坑采取保护措施。

北京市地方标准《建筑基坑支护技术规程》DB 11/489—2007 针对北京市的基坑进行了详细的基坑侧壁安全等级分级（表 2-2）。

根据基坑的开挖深度 h 、邻近建（构）筑物及管线与坑边的相对距离比 α 和工程地质、水文地质条件，按破坏后果的严重程度将基坑侧壁的安全等级细分为三级，支护结构设计中应根据不同的安全等级选用重要性系数：一级， $\gamma_0 = 1.10$ ；二级， $\gamma_0 = 1.00$ ；三级， $\gamma_0 = 0.90$ 。

基坑侧壁安全等级划分 表 2-2

开挖深度 $h(\text{m})$	环境条件与工程地质、水文地质条件								
	$\alpha < 0.5$			$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$			$\alpha > 1.0$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$h > 15$	一级			一级			一级		
$10 < h \leq 15$	一级			一级		二级	一级	二级	
$h \leq 10$	一级	二级		二级	三级		二级	三级	

- 注：1. h ——基坑开挖深度。
2. α ——相对距离比 $\alpha = x/(ha)$ 。为管线、邻近建（构）筑物基础边缘（桩基础桩端）离坑口内壁的水平距离与基础底面距基坑底垂直距离的比值，见图 2-2。
3. 工程地质、水文地质条件分类：
- I 复杂——土质差、地下水对基坑工程有重大影响；
 - II 较复杂——土质较差，基坑侧壁有易于流失的粉土、粉砂层，地下水对基坑工程有一定影响；
 - III 简单——土质好，且地下水对基坑工程影响轻微。
- 坑壁为多层土时可经过分析按不利情况考虑。
4. 如邻近建（构）筑物为价值不高的、待拆除的或临时性的，管线为非重要干线，一旦破坏没有危险且易于修复，则 α 值可提高一个范围；对变形特别敏感的邻近建（构）筑物或重点保护的古建筑物等有特殊要求的建（构）筑物时，对二级及三级基坑侧壁则应提高一级安全等级；当既有基础（或桩基础桩端）埋深大于基坑深度时，应根据基础距基坑底的相对距离、附加荷载、桩基础形式以及上部结构对变形的敏感程度等因素综合确定 α 值范围及安全等级。
5. 同一基坑周边条件不同可分别划分为不同的安全等级。

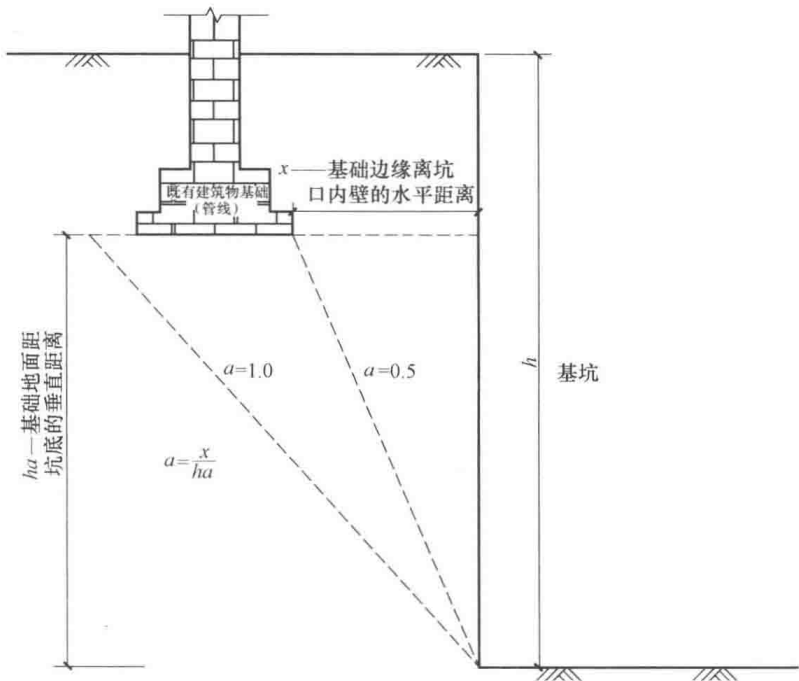


图 2-2 相对距离比示意图