

目录

32.1 如何准确理解、正确使用标准规范.....	1
32.1.1 标准规范的作用.....	1
32.1.2 准确理解、正确使用标准规范.....	1
32.1.3 全面、系统掌握基坑工程相关标准规范各自特点、体系.....	1
32.2 基坑支护结构设计应注意的一些问题.....	4
32.2.1 基坑支护安全等级划分.....	4
32.2.2 有限宽度土压力的计算 ^[10]	5
32.2.3 基坑上部采用放坡或土钉墙，下部采用排桩或地下连续墙时的土压力计算 ^[10]	6
32.2.4 勘察报告的使用与参数选取.....	7
32.2.5 基坑支护结构计算软件的应用.....	8
32.2.6 双排桩支护结构的构件设计.....	9
32.2.7 内支撑结构的概念设计及荷载组合问题.....	10
32.2.8 设计文件编制中的一些问题.....	10
32.2.9 支护设计与基坑周边使用条件.....	11
32.2.10 设计应考虑正常施工偏差对工程质量的影响.....	11
32.2.11 局部预应力锚杆与土钉联合支护的构造技术措施.....	12
32.2.12 基坑开挖方案设计.....	12
32.2.13 设计应提出监测与质量检测要求.....	12
32.3 基坑工程施工应注意的问题.....	13
32.3.1 技术交底.....	13
32.3.2 土方开挖.....	13
32.3.3 支护结构施工.....	13
32.3.4 基坑保护.....	13
32.3.5 信息化施工.....	13
32.3.6 施工过程中对地质条件的验证及处理.....	13
32.3.7 施工过程中的地下水处理.....	14
32.3.8 锚杆施工.....	14
32.4 基坑工程地下水勘察、设计与施工应注意的问题.....	15
32.4.1 基坑工程地下水勘察应注意的问题.....	15
32.4.2 基坑工程中地下水控制方案设计应注意的问题.....	19
32.4.3 基坑工程降水施工应注意的问题.....	22
32.5 基坑工程应注意的其它问题.....	24
32.5.1 监测方案与应急预案.....	24
32.5.2 基坑截水结构的选型、质量控制及事故预防.....	24
32.5.3 冻胀与冻融对基坑的影响.....	25
32.5.4 锚杆、土钉的抗拔试验问题.....	26
32.5.5 考虑可持续发展的基坑方案选型.....	27
参考文献.....	28

第 32 基坑工程应注意的一些问题

编写人：张雁 杨生贵 孙保卫 周与诚

32.1 如何准确理解、正确使用标准规范

32.1.1 标准规范的作用

工程建设技术标准规范是规范、约束工程建设技术行为、具有法律性质的技术性文件。目前我国国家的工程建设技术标准分为四级，即：国家标准（GB****）、行业标准（如建工 JG****）、地方标准（DB****）及企业标准（QB****）。其中依据是否必须遵守、执行又分为强制性与推荐性标准（标准号前有“T”字），当推荐性标准一旦被明确约定为建设过程必须执行的技术文件，即带有强制性。我国标准编制管理原则是行业标准、地方标准及企业标准必须遵守、满足国标的基本要求并严于、高于国标，除非是地方标准中针对地方气候、地域等特点制定的特有的条文除外。规范条文主要是明确、规定、强调必须要遵守、执行的一般、基本要求，即为体现技术先进，经济合理，保护环境、安全适用原则下的“最低”要求。技术标准规范的另一个作用就是引领技术进步，即要及时将保证工程建设安全、经济合理，保护环境、成熟的技术纳入规范，同时限制、淘汰落后技术。

32.1.2 准确理解、正确使用标准规范

标准规范应该在掌握编制原则的前提下，才能做到准确理解、正确使用。一般编制均应体现“技术先进、经济合理，保护环境，安全适用”原则。对基坑支护标准规范而言，就是要在基坑支护的勘察、设计、施工和监控工作中，做到“技术先进、经济合理，保护环境，确保基坑边坡稳定，并保证基坑周边环境安全”。所谓“技术先进”，就是要求基坑支护工程的设计、施工和监控要采用先进的技术、设计方法、施工工艺与监控方法；“经济合理”，就是指在保障基坑工程安全可靠和适用的条件下，做到造价低廉、省工省时，综合经济效益（包括环境效益）最好；“保护环境”，就是要求基坑支护工程的设计和施工要注意环境保护，包括工程建设期间的环境、水资源环境等；基坑工程的“安全性”，就是不仅要保障基坑边坡的稳定，不影响基坑工程及地下结构的施工，同时要保证基坑周围建筑物、道路及地下设施的安全。

标准规范条文的制订一般都有技术依据及背景，对应的是条文说明，这些不仅是条文制定的依据，同时也是解读、正确、准确理解条文的依据。因此，要正确、准确用好标准规范的前提是正确、准确、全面理解条文说明。

32.1.3 全面、系统掌握基坑工程相关标准规范各自特点、体系

目前我国的岩土工程技术标准种类繁多、各自为政。据初步统计，不包括各省市的地方标准，岩土工程方面的国家、行业标准就有 200 多种，其中各行业规范自成体系，形成了名词术语、岩土分类、参数、公式、设计理论的高度不一致^[13]。基坑工程是岩土工程的一个分支，毫无例外。目前涉及基坑工程内容的比较常用的一部分全国性标准有：国家行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ120-99、国家行业标准《建筑基坑工程技术规范》YB9258-97、国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2002、中国工程建设标准化协会标准《基坑土钉支护技术规程》CECS96：97、中国工程建设标准化协会标准《岩土锚杆（索）技术规程》CESC 22：2005、国家军用标准《土钉支护技术规程》GJB5055-2006、国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007-2002、国家标准《岩土工程勘察规范》GB50021-2001、国家

标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》GB50086-2001、国家行业标准《高层建筑岩土工程勘察规程》JGJ72-2004 等等。地方上，北京、上海、天津、广东、深圳、浙江、湖北等地，均编制了具有当地特色的方标准。

这些技术标准存在的诸多不一致，给工程技术人员应用规范带来困惑，甚至因理解错误导致事故。技术标准的一致和协调是建设行业管理部门及编制部门的事，姑且不论。现只探讨工程技术人员如何在如此纷繁的技术标准中保持清醒的头脑，合理应用、不犯错误。

基坑支护的设计计算，应使用同一本标准的体系，最好不要几本标准体系混用。在参考多本规范时，不能只看术语、符号的外表，而必须掌握其实质的含义和准确的概念。有的术语或符号字面相同，但在不同的标准中概念和意义不同；有的同一个概念和意义，在不同的标准中采用了不同的术语或符号。

下面以预应力锚杆设计、基坑稳定性验算为例，进一步说明以上问题。

1. 预应力锚杆设计中各个参数的内涵（表 32.1.3-1）。

锚杆参数在不同标准中的含义

表 32.1.3-1

技术标准	术语	符号	含义
《建筑基坑支护技术规范》 JGJ120-99	锚杆极限承载力	Q	破坏荷载的前一级荷载
	锚杆水平拉力设计值	T_d	$T_d = 1.25 \gamma_0 T_c$, T_c 为支点力计算值
	锚杆预加力值(锁定值)		轴向受拉承载力设计值的 0.5~0.65 倍 = $(0.5 \sim 0.65) \times$ 锚杆极限承载力/1.3 = $(0.385 \sim 0.5)$ 锚杆极限承载力
《建筑边坡工程技术规范》 GB50330-2002	锚杆极限承载力基本值	Q	破坏荷载的前一级荷载
	锚杆轴向拉力设计值	N_a	$N_a = \gamma_q N_{ak}$, N_{ak} 为锚杆轴向拉力标准值，荷载分项系数，取 1.30
《建筑地基基础设计规范》 GB50007-2002	锚杆极限承载力	Q	终止试验荷载的前一级荷载的 95%
		N_t	效应标准组合下，单根锚杆所承受的拉力值
	锚杆锁定拉力		锚杆最大轴向拉力值的 0.7~0.85 倍
《建筑基坑工程技术规范》 YB9258-97	锚杆极限承载力	Q	锚杆破坏前一级荷载的 95%
	锚杆设计轴向拉力值	N_t	$N_t \leq$ 锚杆极限承载力/K, K 为抗力分项系数，1.8、1.6、1.4(一、二、三级)
	锚杆锁定拉力		设计轴向拉力的 0.7~0.85 倍 $\leq (0.7 \sim 0.85) \times$ 锚杆极限承载力/1.6 = $(0.438 \sim 0.53)$ 锚杆极限承载力
《岩土锚杆(索)技术规程》 CECS 22:2005	锚杆极限承载力	P	破坏荷载的前一级荷载
	锚杆的轴向拉力设计值	N_t	锚杆在设计使用期内可能出现的最大拉力值； $N_t \leq$ 锚杆极限承载力/K, K 为锚固体抗拔安全系数，1.8、1.6、1.4(临时锚杆，I、II、III级)
	锚杆初始预应力(锁定拉力)		锚杆拉力设计值的 0.75~0.90 倍

从上表看出，“锚杆极限承载力”无论术语还是含义，几本标准基本一致。但是在反映荷载效应的锚杆拉力上，术语相近，但含义不同。JGJ120-99、GB50330-2002 中，“拉力设计值”的符合不同(T_d 、 N_a)，但概念相同，相当于与现行荷载规范配套的承载能力极限状态

下荷载效应的基本组合设计值，只不过二者的荷载分项系数取值略有不同，前者为 1.25，后者为 1.30。GB50007-2002 中， N_t 为正常使用极限状态荷载效应标准组合下，单根锚杆所承受的拉力值。YB9258-97 中的“设计轴向拉力值”、CESC 22: 2005 中的“轴向拉力设计值”，从字面上看，似乎与 JGJ120-99、GB50330-2002 差别不大，但其概念完全不同。此两者的概念应为正常使用极限状态荷载效应标准组合下，锚杆所承受的拉力值。

以上术语在概念上的相互关系为：

$$\begin{aligned} & T_d / \cos \theta \text{ (JGJ120-99) / 荷载分项系数} \\ & = N_a \text{ (GB50330-2002) / 荷载分项系数} \\ & = N_t \text{ (GB50007-2002、YB9258-97、CESC 22: 2005)} \end{aligned}$$

但是以上标准的荷载分项系数(或者称相当于荷载分项系数的系数)取值不同，如下表 32.1.3-2。

不同标准中的荷载分项系数取值 表 32.1.3-2

技术标准	系数名称	数值
《建筑基坑支护技术规程》JGJ120-99	荷载综合分项系数	1.25
《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2002	荷载分项系数	1.30
《建筑地基基础设计规范》GB50007-2002	荷载分项系数	1.35
《建筑基坑工程技术规范》YB9258-97	荷载综合分项系数	1.2

关于锚杆的设计，套用荷载规范分项系数表达式的概率极限状态设计法，对岩土工程技术人员真乃阳春白雪，倒不如下里巴人的安全系数来的简洁明了。锚杆安全系数是锚杆极限承载力与正常使用时锚杆容许拉力值的比值。设计时不管采用什么规范、什么术语、什么公式，设计人员自己必须清楚，安全系数到底是多少。把以上各标准中锚杆的安全度用安全系数表示，其数值如下表 32.1.3-3。

不同标准中的锚杆安全系数取值 表 32.1.3-3

技术标准	锚杆安全系数	备注
《建筑基坑支护技术规程》JGJ120-99	1.7875(一级)、1.625(二级)、1.4625(三级)	临时性锚杆
《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2002	2.2~2.7	规范未区分临时性、永久性锚杆
《建筑地基基础设计规范》GB50007-2002	2.0	规范未区分临时性、永久性锚杆
《建筑基坑工程技术规范》YB9258-97	1.8(一级)、1.6(二级)、1.4(三级)	临时性锚杆

2. 基坑稳定性验算中计算方法、土工参数、安全系数的配套

国内各级别的基坑工程技术标准中，均有基坑稳定性验算的规定。但是，对于同一种稳定问题，各本标准要求的安全系数不尽相同，有的甚至差别巨大。究其原因，第一是稳定性验算方法、土工参数、安全系数之间需要配套，第二大概是因各本标准所依据的资料来源、工程经验的差异。例如，同样是以 Prandtl 经典地基极限承载力公式为基础的抗隆起验算，国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007-2002 规定，土的抗剪强度采用十字板试验或三轴不固结不排水试验确定，安全系数不小于 1.6，而上海市地方标准《基坑工程设计规程》DBJ08-61-97 规定，土的抗剪强度采用采用直剪固结快剪参数，安全系数为 2.5、2.0、1.7(一

级、二级、三级)。因此,在岩土工程中要重视各种分析方法的适用条件。在稳定分析中,强调所采用的稳定分析方法、分析中所采用的土工参数、土工参数的测定方法、分析中采用的安全系数是相互配套的。若采用的稳定分析方法不同,则采用的安全系数值不同;在应用同一稳定分析方法时,采用不同的方法测定的土工参数,采用的安全系数亦不同。岩土工程的许多分析方法都是来自工程经验的积累和案例分析,而不是来自精确的理论推导^[22]。

32.2 基坑支护结构设计应注意的一些问题

32.2.1 基坑支护安全等级划分

基坑支护设计时,首先应当依据基坑深度、工程水文地质条件、环境条件和使用条件等合理划分基坑侧壁安全等级,然后综合基坑侧壁安全等级、施工、气候条件、工期要求、造价等因素合理选择支护结构类型。同一基坑的不同侧壁可分别确定为不同的安全等级,并依据侧壁安全等级分别进行设计。但当采用内支撑支护体系时,应以支撑两侧安全等级高的控制设计。表 32.2.1 为北京地方标准《建筑基坑支护技术规程》(DB11/489-2007)有关基坑侧壁安全等级确定原则。

基坑侧壁安全等级划分

表 32.2.1

开挖深度 h (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 $\alpha = x/h_0$ 。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 32.2.1。

3. 工程地质、水文地质条件分类:

I 复杂——稍密以下碎石土、砂土和填土,软塑~流塑粘性土,地下水位在基底标高之上,且不易疏干;

II 较复杂——中密碎石土、砂土和填土,可塑粘性土,地下水位在基底标高之上,但易疏干;

III 简单——密实碎石土、砂土和填土,硬塑~坚硬粘性土,基坑深度范围内无地下水。

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 值可提高一个范围值;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、当基坑侧壁安全等级为二级或三级时,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。(当采用内支撑时,应以对应安全等级严的控制)

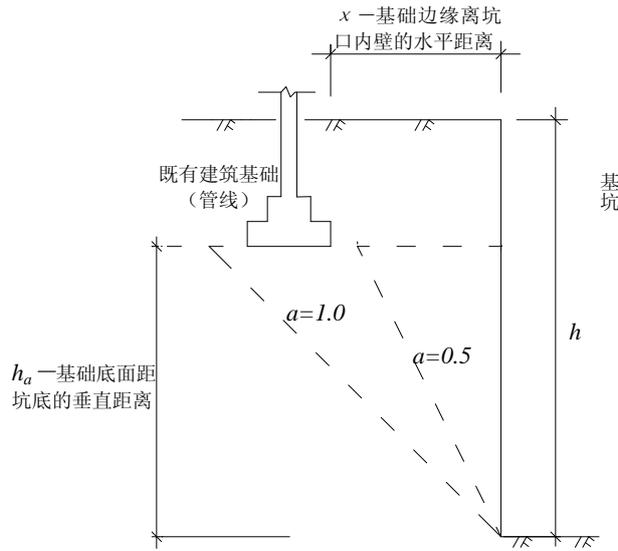


图 32.2.1 相邻建筑基础与基坑相对关系示意

32.2.2 有限宽度土压力的计算^[10]

实际工程中，常常遇到这样一种情况，拟建基坑距离既有地下结构物较近，基坑外的土体不再是连续的，由于地下结构物的存在以及它的遮拦作用，此种情况下支护结构上的土压力不同于普通半无限连续土体的情况，产生土压力的土体为支护结构与地下结构物之间的有限土条（图 32.2.2-1）。在相同的土层条件下，有限范围土体的土压力小于普通半无限连续土体的土压力。但是，需要注意的是，有限范围土体中的部分或全部可能是既有地下结构物施工时的回填土，必须引起重视。当临近基坑的建筑物基础低于基坑底面时，且外墙距支护结构净距 b 小于 $h \times \operatorname{tg}(45^\circ - \phi_k/2)$ 时，有限宽度土体作用在支护结构上任意点的水平荷载标准值 e_{ak} 可基于极限平衡原理进行计算。北京地方标准《建筑基坑支护技术规程》（DB11/489-2007）规定，当临近基坑的建筑物基础低于基坑底面时，且外墙距支护结构净距 b 小于 $h \times \operatorname{tg}(45^\circ - \phi_k/2)$ 时，可按下列方法计算作用在支护结构上任意点的有限宽度土体水平荷载标准值 e_{ak} （图 32.2.2-1）：

1. 当计算点深度 $z \leq b \times \operatorname{ctg}(45^\circ - \phi_k/2)$ ，或 $z \geq b \times \operatorname{ctg}(45^\circ - \phi_k/2) + d_b$ 时，按常规方法计算；

2. 当计算点深度 $b \times \operatorname{ctg}(45^\circ - \phi_k/2) < z < b \times \operatorname{ctg}(45^\circ - \phi_k/2) + d_b$ 时：

(1) 对于黏性土、粉土和地下水位以上的砂土、碎石土：

$$e_{ak} = (2 - n_b)n_b \sum \gamma_i h_i K_a - 2c_k n_b \sqrt{K_a} \quad (32-1)$$

(2) 对于地下水位以下的砂土、碎石土：

$$e_{ak} = (2 - n_b)n_b \sum \gamma_i h_i K_a - 2c_k n_b \sqrt{K_a} + (z - h_{wa})(1 - K_a) \gamma_w \quad (32-2)$$

式中 h ——基坑深度；
 z ——计算点深度；
 d_b ——临近建筑物基础埋置深度；
 n_b ——系数， $n_b = b / h \operatorname{tg}(45^\circ - \phi_k/2)$ 。

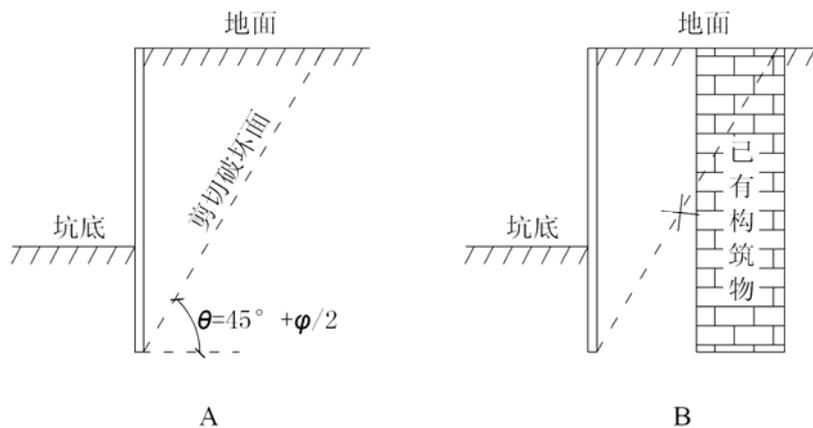


图 32.2.2-1 有限宽度土压力破坏模式分析

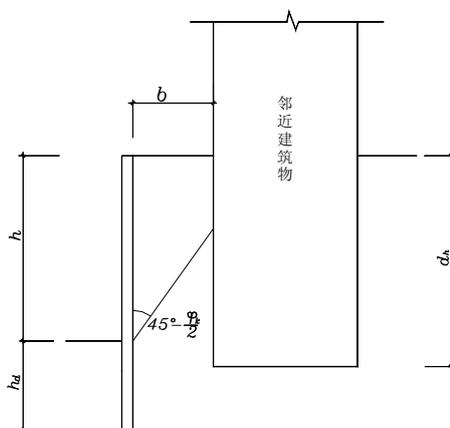


图 32.2.2-2 有限范围土体的土压力计算简图

32.2.3 基坑上部采用放坡或土钉墙，下部采用排桩或地下连续墙时的土压力计算^[10]

针对基坑上部采用放坡或土钉墙、下部采用排桩或地下连续墙的组合支护型式，在实际设计计算中往往不考虑桩(墙)顶部以上土体与桩(墙)支护结构间的相互影响而导致计算中低估上部土体对桩(墙)支护结构的作用效应、使计算结果偏于不安全。如将土钉墙部分的土层重力按作用在桩墙顶面的分布荷载考虑(常规方法)并按朗肯土压力方法计算作用在桩墙上的水平荷载实际上是将桩墙顶部以上的土压力人为的略去了一部分(见图 32.2.3cdfbf 部分)。通过不同基坑深度的实例试算，当上部土钉墙支护高度 h_1 等于 $0.5h$ 时(坡度 1: 0.2 左右)，常规计算方法的计算结果与实际相比，土压力小 5%~15%，最大弯距小 5%~20%，第一排锚杆(锚杆设置在桩顶)拉力小 20%~60%。安全储备随放坡或土钉墙支护高度(h_1)与基坑总深度的比值的增大而降低，特别当放坡或土钉墙支护的高度(h_1)大于基坑总深度的 1/2 时，其降低幅度明显。因此，北京地方标准《建筑基坑支护技术规程》(DB11/489-2007)强调当放坡或土钉墙支护的高度(h_1)大于基坑总深度的 1/2 时，应考虑桩(墙)顶部以上土体与桩(墙)支护结构间的相互影响，即计算出桩顶或墙顶平面以上的水平荷载的合力(图 32.2.3cdfbf 部分)，将该合力换算为作用在桩顶或墙顶到基底范围内的倒三角型分布荷载部分。同时应严格控制桩(墙)顶部的水平位移。

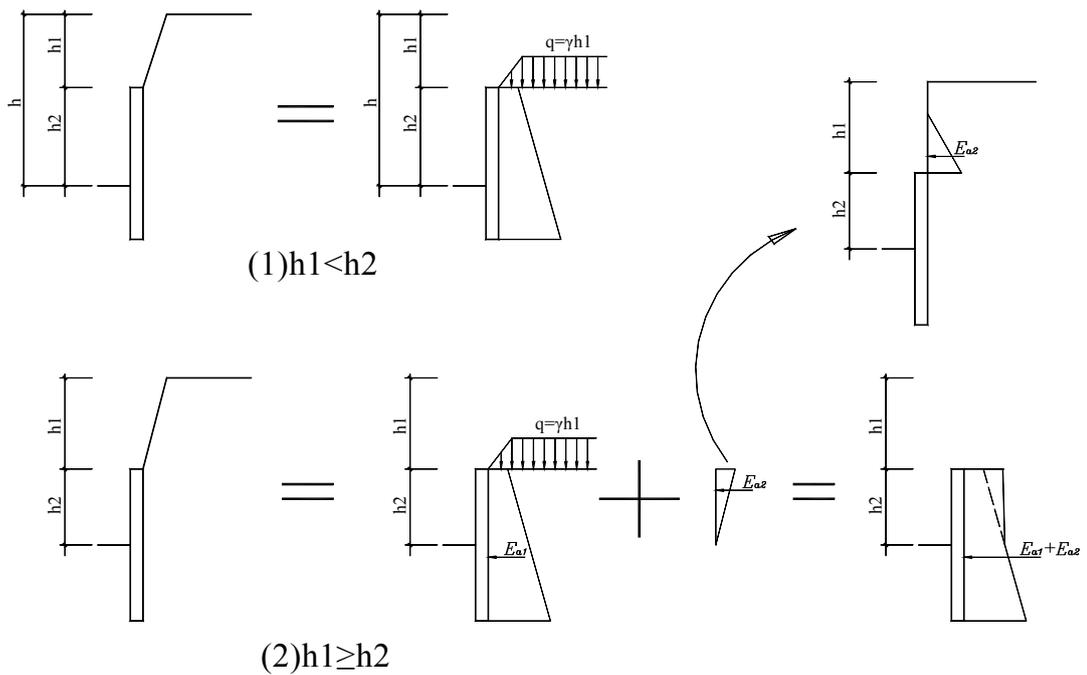
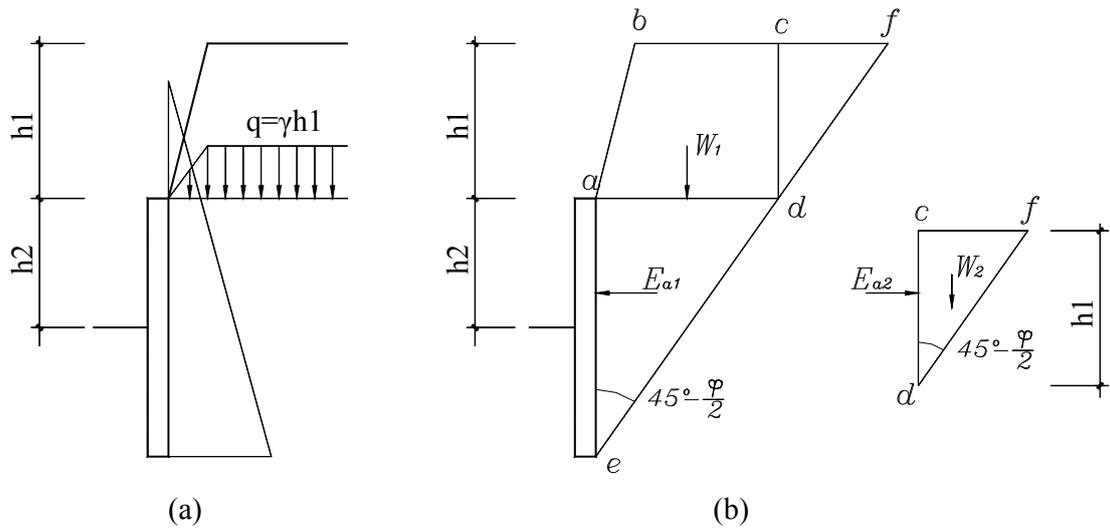


图 32.2.3 基坑上部采用土钉墙下部采用排桩或地下连续墙时的土压力计算问题

32.2.4 勘察报告的使用与参数选取

使用勘察报告时，首先查明勘察时的工程地质和水文地质条件是否与实际施工时相符，有无影响或变化因素。同时设计选取的钻孔地质柱状图或地质剖面应具有代表性，当地质条件复杂时，应当沿基坑周边划分多个有代表性的计算剖面。在设计选取力学参数指标时，一定要注意试验方法对参数以及计算结果的影响并应考虑水及工程活动（扰动）对参数的影响后合理选取。同时，应将抗剪强度指标与土的其他物理、力学参数（包括室内、原位试验）的进行对比分析，判断计算采用的抗剪强度指标的可靠性与合理性，防止误用。当抗剪强度

指标与其他物理力学参数的相关性差,或岩土勘察资料缺少可靠数据时,应结合类似工程经验和相邻、相近场地的岩土勘察数据通过可靠的综合分析判断后合理取值^[5]。对于非饱和土,由于其具有不同程度的吸力及负孔隙压力,由此产生吸附强度并形成表观凝聚力,当这种土的含水量和孔隙比发生变化时,其吸力发生变化,吸附强度也随之变化。当土体饱和时,吸力及负孔隙压力消失,表观凝聚力随之丧失,土的抗剪强度急剧降低^[14]。这一特性恐怕是大雨、邻近地下水管渗漏等水患导致基坑边坡变形增加、支护结构破坏、边坡失稳等基坑事故的主要原因。目前测定抗剪强度指标的室内常规试验主要进行原状土(非饱和土)的直剪试验(不能测定非饱和土的吸力),所求得的内聚力实际包含有真凝聚力 c 和各种不同来源的表观凝聚力,其中真凝聚力 c 的数值很小,而吸附强度的数值大却是不稳定的。例如有些地区的勘察报告中,普通粘性土、粉土的内聚力值有时可高达 60~100kPa,怀疑“表观凝聚力”占有较大的份额。因此,若有十分的把握基坑不会遇到各种水的影响,则可充分利用“表观凝聚力”以节约工程费用。否则,需充分考虑“表观凝聚力”减小甚至丧失后基坑的安全,建议在此类情况下,基坑支护设计计算选用抗剪强度指标时,需对勘察报告提供的土的内聚力建议进行折减。

32.2.5 基坑支护结构计算软件的应用

目前基坑支护设计计算的商业软件众多,软件可代替传统的手算,又解决了手算无法实现的复杂计算问题,给岩土工程师设计计算提供了方便。但是,当前基坑工程领域有过分依靠软件的倾向,惟软件是从,常常会得出一些啼笑皆非、不合常理的结果来。30年前,同济大学俞调梅教授曾对电子计算机的作用提出了不要“Garbage into ,garbage out”的警世名言。俞教授认为输入计算机运算的数据是至关重要的,如果输入的数据没有工程意义,即使计算机再精确,输出的结果也是垃圾,没有任何工程意义^[15]。而输入的数据是否具有工程意义,与岩土工程师的基本理论、工程经验、综合判断有关。

此外,目前众多的基坑支护设计商业软件良莠不齐,其中有些软件还存在着错漏,设计时也常常发现不同的软件其计算结果不同,这就更加需要岩土工程师具有一双火眼金睛,而这双眼睛的炼成,大概需将岩土理论置于工程实践的八卦炉中煅烧,不过七七四十九天是远远不够的。

下面列举笔者在实际工程中遇到的一些软件应用方面的问题。

1. 支护结构明显不合常理的水平位移

锚拉式或支撑式支挡结构的设计计算书中,有时出现如下所述的水平位移明显不合常理的情况。设计采用弹性支点法计算支挡结构的内力和位移,计算结果显示,护坡桩(或墙)顶部的水平位移为向基坑外几个厘米。众所周知,当挡墙的位移方向朝向土体时,墙后土体对挡墙的作用将向被动土压力发展,不太可能发生如此之大的位移(向基坑外有微小的位移是可能的),而且大量的工程实测表明,支护结构的顶部位移一般都是朝向基坑内的。因此,上述的计算结果既与土力学的基本概念相悖,也不符合工程实际。出现这种情况,有可能是计算软件本身的缺陷,也有可能是岩土工程师的不求甚解。

2. 不合理的预应力锚杆长度

试验表明,工程中常用的拉力型锚杆受力时,锚固体与土体的粘结应力沿锚固段全长的分布是很不均匀的。能有效发挥锚固作用的粘结应力分布长度是有一定限度的,亦即平均粘结应力随着锚固长度的增加而减少。当锚固段长度超过一定值后,土体与锚固体的粘结强度将不能在锚固段长度范围内同时发挥,此时增加锚固长度对锚杆承载力的提高极为有限,甚至可以忽略不计。因此,锚杆锚固段存在一个合理、经济的长度范围。

而在一些工程中,拉力型锚杆的锚固段设计长度达到 20~30m 甚至更大,如果这些锚杆的承载仍然按照土体的粘结强度充分发挥计算,恐怕要高估承载力而使得设计偏于不安

全。

3. 钢绞线截面面积计算错误

某软件在计算 $\Phi^s15.2$ 钢绞线的抗拉承载力时，用钢绞线的公称直径(钢绞线外接圆直径)计算截面面积，进而计算钢绞线的抗拉承载力如下(以单根为例)：

$$A_p \cdot f_{py} = (\pi \cdot 15.2^2 / 4) \cdot 1320 \text{ N/mm}^2 = 181.5 \text{ mm}^2 \times 1320 \text{ N/mm}^2 = 239525 \text{ N}$$

而 $\Phi^s15.2$ 钢绞线的公称截面面积为 139 mm^2 ，实际的抗拉承载力为 183480 N ，为该软件计算值的 76.6% 。上述计算犯了照猫画虎的错误。若设计人员缺乏专业的基本概念，不假思索，未能及时发现错误，采用上述数据会导致多么严重的后果。

4. 构件的计算内力与承载力相差悬殊

挡土构件弯矩计算值很小，而实际的截面受弯承载力却很大(截面尺寸大或配筋大)；或者相反，挡土构件弯矩计算值很大，而实际的截面受弯承载力却很小。以上计算弯矩和截面承载力极不匹配的情况的出现，说明设计人员具有一定的工程经验，已经意识到了软件计算结果的问题，但未从根本上加以纠正，让人无法判断此等设计方案的安全性和合理性。

5. 土钉墙整体稳定计算时确定滑动面的错误

某基坑设计方案在计算土钉墙整体稳定时，先计算天然土坡整体稳定的滑动面及安全系数，然后将天然土坡的最危险滑动面作为计算土钉墙边坡整体稳定时的最危险滑动面，土钉墙边坡的最危险滑动面并未因土体中设置土钉(锚杆)而改变，这种以不变应万变的做法显然是错误的，设置土钉(锚杆)后，整体失稳的最危险滑动面需考虑土钉(锚杆)的作用重新进行搜索。将天然土坡的最危险滑动面作为土钉墙边坡的最危险滑动面，高估了土钉墙的整体稳定性。

32.2.6 双排桩支护结构的构件设计

双排桩支护结构是由相隔一定间距的前、后排桩及桩顶连梁构成的刚架结构。双排桩刚架支护结构中的桩与其它支挡式结构中的桩，受力特点有本质的区别。锚拉式、支撑式、悬臂式结构中的护坡桩，在水平荷载作用下只产生弯矩和剪力，且桩顶弯矩为零(或很小忽略不计)。而双排桩刚架结构，由于其刚架的受力特点，在水平荷载作用下，桩的内力除弯矩、剪力外，轴力不容小视，而且桩顶弯矩较大，其符号与桩身弯矩相反(图 32.2.6)。前排桩的轴力为压力，后排桩的轴力为拉力。此外，正如普通刚架结构对相邻柱间的沉降差非常敏感一样，双排桩刚架结构前、后排桩沉降差对结构的内力、变形影响很大。

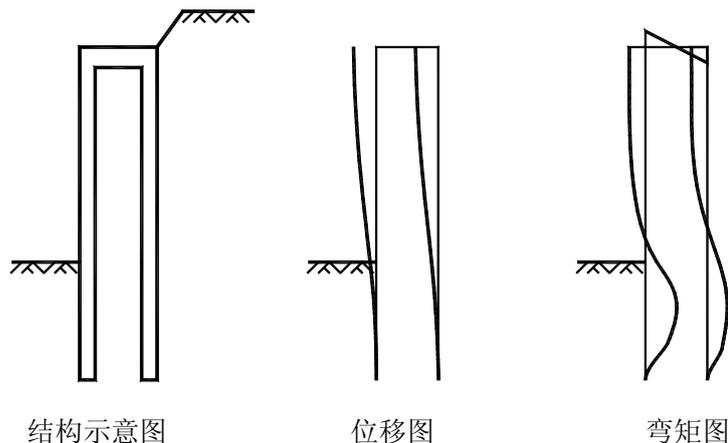


图 32.2.6 双排桩结构典型位移图、弯矩图

鉴于双排桩支护结构的上述受力特征，设计时除要建立科学合理的计算模型外，以下几方面值得注意。

1. 双排桩的桩身内力有弯矩、剪力、轴力，以受弯为主，需按偏心受压、偏心受拉构

件进行截面承载力计算，设计、构造应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010的有关规定。

2. 双排桩结构桩顶连梁的跨高比一般较小，应根据其跨高比判断属于普通受弯构件或深受弯构件。在根据《混凝土结构设计规范》GB50010 判别连梁是否属于深受弯构件时，可按照连续梁考虑。连梁的内力有轴力、弯矩、剪力，以受剪为主，其截面设计、构造应符合该规范的有关规定。

3. 双排桩结构桩顶与连梁的连接按完全刚接考虑，其受力特点类似于混凝土结构中框架顶层，因此，该处的节点构造应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 对框架顶层端节点的有关规定。尤其，桩与连梁受拉钢筋的搭接长度不应小于 $1.5l_a$ (l_a 为受拉钢筋的锚固长度)。

4. 双排桩结构的前排桩桩端宜处于桩端阻力高的土层。采用泥浆护壁灌注桩时，施工时的孔底沉渣厚度不应大于 50mm，或应采用桩底后注浆加固沉渣。

32.2.7 内支撑结构的概念设计及荷载组合问题

周边环境复杂、地质条件复杂、软土地基等条件下的基坑，内支撑结构选型时，应选用平面或空间的超静定结构。设计时需考虑地质条件的复杂性和基坑开挖步序的变化而出现的偶然状况，在设计上采取必要的防范措施。并需考虑支护结构个别构件的提前失效而导致荷载作用位置的转移，并宜设置必要的赘余支撑。支撑体系的竖向布置，需保证在任何工况下，支撑结构与挡土构件之间(如腰梁与护坡桩之间、腰梁与地下连续墙之间)不出现拉力。基坑尺寸较大或者温差较大时，内支撑结构需考虑温度应力的影响，并需加强节点强度。立柱桩的设计，需预测立柱受荷后的沉降量、基底回弹及隆起造成的上抬量，并需考虑此等立柱竖向位移对支撑结构受力、稳定的不利影响。

内支撑结构分析时需进行荷载组合，荷载组合至少需要考虑基坑挖土顺序的不同、基坑四周岩土条件差异及附件荷载差异、各个部位开挖深度的不同等因素，求得各种支撑构件的最不利内力，按最不利内力进行截面设计。

32.2.8 设计文件编制中的一些问题

基坑设计文件应注明设计使用年限。在设计文件中注明的设计依据，不能机械地照搬照抄，只需列出与本设计密切相关的资料、标准和规定，一些关系不大甚至毫无关系的标准不应罗列其中，更不应出现已过期的标准。基坑周边环境条件，应在设计文件中通过文字和绘图描述清楚，同时要明确设计时基坑周边环境条件控制的原则及设计重点。在描述地质条件时，地层简单且分布稳定时，可绘制一个地质条件概化剖面，对于地层变化较大的场地，宜沿基坑周边绘制地层展开剖面图，图中标明基坑支护设计所需的各有关地层物理力学性质参数如： γ 、 c 、 ϕ 、 k 等。在编制计算书时，要熟悉不同计算软件的适用条件及特点，检查计算工况是否与实际设计、施工工况相符，不得人为修改原始数据和计算结果，以保证计算书的完整和真实。当支护结构的锚杆或临时支撑需要在地下结构的施工过程中拆除时，地下结构应能形成可靠的替换支撑，并对锚杆或临时支撑拆除及地下结构形成支撑作用后的各工况分别进行结构计算。在绘制施工图时，应将基坑工程施工内容通过图纸及相应的文字表达，施工图应清晰、全面、正确、规范，图纸除设计者签章外，尚需至少“二审（审核、审定）一校对”并签章。

基坑工程的目的除满足基础结构安全施工外，就是要保护基坑周边环境安全和正常使用。如果环境条件不清楚，则支护结构设计既无的放矢，也缺乏可行性。基坑周边环境条件包括建（构）筑物、道路及地下管线。建（构）筑物需要注明其重要性、层数、结构型式、基础型式、基础埋深、建设及竣工时间、结构完好情况及使用状况。道路需要注明其重要性、交通负载量、道路特征、使用情况。地下管线（包括供水、排水、燃气、热力、供电、通信、消防等）需要注明其重要性、特征、埋置深度、使用情况。环境条件复杂的，应当绘制环境平面图和剖面图。

32.2.9 支护设计与基坑周边使用条件

基坑周边使用条件是指基坑周边受开挖影响较大区域内的料场、临时设施、临时施工道路、塔吊、生活用水等地表水的排泄方式等，它们直接关系到基坑安全，却容易被设计者所忽视，因而造成基坑周边使用上的不便，甚至造成基坑坍塌事故。基坑工程施工完成后，交付总承包单位使用，由于施工用地紧张，总承包单位通常都要在紧邻基坑的区域布置临时施工道路、堆料场及加工场，建设临时设施，安装塔吊等，如果基坑工程设计施工单位在编制施工方案时没有考虑这些因素，就容易造成基坑边坡超载，留下安全隐患。

该方面应当注意的问题是，基坑工程设计施工单位在编制方案之前，应当与总包单位协商，了解基坑周边的用途，合理确定基坑边坡的超载值及生活用水等地表水的排堵方式等。基坑工程交付总包时，应当提供基坑工程使用说明书。

32.2.10 设计应考虑正常施工偏差对工程质量的影响

基坑工程中，施工偏差对工程质量、安全的影响有时是致命的，如帷幕施工偏差过大导致截水帷幕搭接不好产生渗漏，护坡桩因施工偏差过大而侵占主体地下结构施工空间，锚杆施工偏差过大时不利于钢腰梁、锚具垫板受力，支撑构件施工偏差过大使得偏心弯矩增大，等等。但是，是施工就存在偏差，正常的、合理的偏差，设计阶段应该加以充分的考虑。

1. 截水结构单元的设计搭接长度

咬合式排桩、水泥土搅拌法、高压喷射注浆法施工的截水帷幕，是由先后施工的一个个截水结构单元(单根桩)相互咬合搭接形成的。每根桩施工时均存在偏差，包括桩位偏差和垂直度偏差。国家相关技术标准规定，桩位允许偏差一般为 50mm，垂直度允许偏差一般为 0.5%~1%。那么考虑施工的正常偏差以及偏差的叠加效应，截水结构单元的设计搭接长度为：

$$L_d=L_e+2 \cdot (w_1+ w_2 \cdot d_p) \quad (32-3)$$

式中 L_d ——截水结构单元设计搭接长度；

L_e ——截水结构单元有效搭接长度，一般取 100~200mm；

w_1 ——桩位允许偏差，一般为 50mm；

w_2 ——垂直度允许偏差，一般为 0.5%~1%；

d_p ——截水结构单元从施工作业面起算的深度。

按照上式确定设计搭接长度，在施工偏差符合规定的情况下，可确保截水结构任意位置处的有效搭接长度。如果设计搭接长度不够，就可能因施工偏差导致帷幕出现“开裆口”，产生渗漏。

2. 支护结构施工偏差对主体地下结构施工空间的影响

支护结构向基坑内的偏移缩小了主体地下结构的施工空间，基坑设计进行支护结构平面布置时，必须考虑正常的施工偏差，尤其当用地紧张、支护结构给地下结构预留的施工空间较小时。例如北京某工程，设计未充分考虑支护结构施工的可行性、各种正常的施工偏差及偏差带来的后果，基坑开挖后发现，虽然施工偏差在规范的允许范围内，但部分支护结构(微型桩、护坡桩)已侵占了地下结构空间。施工时强行截断微型桩、剔凿护坡桩，给基坑带来安全隐患。

3. 支撑构件的安装误差

基坑支护内支撑结构中，有大量的受压构件，这些构件在施工过程中都有偏差，这些偏差导致受压构件产生偏心，设计时必须加以考虑。

4. 锚杆上下位置偏差与钢腰梁间距、锚具垫板尺寸的关系

组合型钢腰梁中双型钢之间的净间距尺寸，必须满足锚杆杆体能够顺直穿过腰梁，因此它与锚杆孔位在垂直方向的偏差有关。国家相关技术标准规定，锚杆孔位垂直方向的允许

偏差为 50mm，考虑到孔位偏差的随机性，那么双型钢之间的净间距应不小于 $2 \times 50\text{mm} = 100\text{mm}$ 。双型钢之间的净间距又关系到锚具垫板的尺寸及厚度。双型钢之间的净间距越大，即垫板的跨度越大，为保证垫板刚度，需有较大的垫板厚度。因此，设计需充分了解施工细节，使得设计符合实际、合理可行。

32.2.11 局部预应力锚杆与土钉联合支护的构造技术措施

当基坑开挖深度较深、基坑侧壁土质较差，可在土钉支护中局部采用预应力锚杆与土钉的联合支护方法，以控制基坑侧壁水平位移，增强基坑侧壁稳定性。目前，由于预应力锚杆与土钉联合支护其作用机理较为复杂，对此认识还不十分深入，只能根据以往理论研究、工程实践与实测分析，综合在构造及定性（概念）设计角度采取技术措施。由于土钉墙支护侧壁变形一般均为中部鼓出型（支护深度较大时），因此预应力锚杆建议宜设置在加固侧壁的中部，同时为了充分发挥预应力锚杆限制侧壁水平变形的作用，减少预应力锚杆与邻近土钉的相互削弱影响，建议锚杆间距宜保证一定的间距，其竖向间距宜为原土钉间距的 2~3 倍，并应比常规设计相应位置处土钉长度长 0.35 倍以上。

32.2.12 基坑开挖方案设计

基坑开挖前，应根据工程的结构形式、基础设计深度、地质条件、气候条件、周围环境、施工方法、施工工期和地面附加荷载等有关资料，进行基坑开挖方案设计。基坑开挖方案设计是基坑支护工程设计的重要组成部分。基坑开挖方案内容主要应包括开挖方法、开挖时间、土方开挖顺序、坡道位置设定、运输车辆行走路线、开挖监测方案，以及对支护结构及周边环境需采取的保护措施等。尤其对于软土地层中基坑开挖，需充分利用时空效应原理分层、分块、对称、均衡开挖，严格控制无支撑暴露时间，严格限制每层开挖厚度，并要避免土方开挖引起坑内已施工桩的偏移。

此部分应注意的问题是基坑开挖方案既是支护设计的重要依据，又是指导基坑开挖的设计文件，施工中必须严格执行。一旦实际开挖方案必须作重大调整，必须经设计人员复核计算工况、认可后方可实施。

32.2.13 设计应提出监测与质量检测要求

基坑设计应提出明确的监测要求，包括监测项目、观察周期、变形报警值、变形控制值、注意事项等。基坑侧壁变形控制值（应与设计控制条件原则一致）依据基坑周边环境、工程地质及水文地质条件及支护结构特点合理确定。基坑监测项目的监控报警值应根据监测对象的有关规范要求、设计要求和工程经验及既有监测对象现状拟定，并结合现场监测成果的分析综合判定。

质量检测是评价基坑工程施工质量的重要手段。现行的基坑工程技术标准中，对质量检测均有明确规定，但是，也许是缘于基坑工程的临时性以及监督管理人员的专业局限等因素，当前的基坑工程中，严格按照规范进行质量检测的寥寥无几，使得一些不合格的分项工程蒙混过关，这也是基坑工程事故频发的原因之一。因此，基坑设计文件应对支护结构、截水结构的质量检测提出明确的要求。现行的基坑工程技术标准对质量检测的规定是原则性的，设计需根据工程的具体特点提出有针对性的质量检测要求，以使检测能够真正起到评价工程质量、发现隐患的作用。尤其支护结构中的重要构件或易出现质量问题的构件，质量检测工作需更加重视。如锚杆、土钉等，其施工质量与土层条件、地下水条件、施工工艺、人员素质、管理水平等多种因素有关，那个环节处理不当均易导致质量缺陷，而且，当前的锚杆、土钉抗拔承载力检测，由于设计人员或检测人员未深入了解其受力机理，有时试验高估了锚杆、土钉在实际工作状态下的承载力，给基坑支护带来不安全的因素。关于锚杆、土钉承载力试验的详细探讨见 32.5.4 节。

32.3 基坑工程施工应注意的问题

32.3.1 技术交底

基坑工程施工前应组织有关单位（建设单位、总包、监理、监测等单位）进行基坑支护设计方案技术交底，明确各工序的设计要求、技术要求和质量标准。

此部分应注意的问题是要强调技术交底是基坑工程施工的重要环节，技术交底要做到建设相关各方对基坑工程设计、施工、监测等技术要求全面、正确、准确了解、掌握。

32.3.2 土方开挖

土方开挖应按照设计工况分层、分段进行，严禁超挖。发生异常情况时，应立即停止挖土，并应立即查清原因待采取相应措施后，方可继续开挖施工。土方开挖过程中，特别是在冬季、夏季施工时，应根据天气变化，及时调整开挖方案，采取必要的安全、环境保护措施。

此部分应注意的问题是开挖要严格按照土方开挖方案执行。

32.3.3 支护结构施工

桩（墙）、支撑、锚杆或土钉等支护结构以及地下水控制施工应选择适当的施工工艺和工序。当施工对周围建（构）构筑物影响敏感时，应当采用必要的技术控制措施，防止产生过大的附加沉降。

此部分应注意的问题是支护结构及地下水控制施工应选择合理、适用的工艺和工序。

32.3.4 基坑保护

基坑周围地面应采取硬化和截排水措施，防止雨水、生活用水等地面水流入坑内。坑壁如出现残留水，应采取插泄水管等措施，有组织地疏导土层中的残留水。基坑底的渗漏水应及时排出，避免在基坑内长期积聚。开挖过程中，应采取有效措施避免破坏和扰动支护（支撑）结构、工程桩（立柱）和槽底原状土。当采用机械开挖土方时，应在基坑底预留 150mm~300mm 厚的土层，由人工挖掘修整，以保持坑底土体原状结构。基坑在开挖和使用过程中，基坑周边行车和堆载应严格控制在设计荷载允许范围内，严禁超载。基坑开挖完成后，应及时清底验槽，浇注垫层封闭基坑，减少地基土暴露时间，防止暴晒或雨水浸泡而破坏地基土的原状结构。当基础结构完成后，应及时对施工肥槽进行回填，采用分层夯实，以满足设计密实度的要求。

此部分应注意的问题是要强调基坑保护是基坑工程设计、施工的重要内容。

32.3.5 信息化施工

基坑开挖过程中，应严格按监测方案中的监测项目和监测频率进行监测，并对监测数据及时进行分析，指导施工，发现异常情况及时通报相关单位，以便采取措施，防止事故发生。

此部分应注意的问题是信息化施工基坑工程设计、施工的重要内容，是保证基坑工程安全的重要手段。北京地方标准《建筑基坑支护技术规程》（DB11/489-2007）规定，土钉墙施工应包括现场测试与监控内容，无监测方案不得进行施工。

32.3.6 施工过程中对地质条件的验证及处理

岩土工程勘察报告是基坑设计施工的依据，但是基坑的设计施工也不能过分的依赖于勘察报告，因为当前的基坑工程勘察，存在这一些非常现实但又难以避免的问题，如，勘探点均按照一定的间距布置，复杂场地勘探点会密一些，但是再密，毕竟还是“一孔之见”，不可能把基坑影响范围内的土层特性、地下水情况全部反映清楚；有时勘察点的布置受现场条件所限，不能完全布置在基坑工程的关键部位；勘察报告的准确性和真实性较差等等。因此，在基坑工程设计施工过程中，尤其在老城区或建筑物密集地段的基坑工程，设计、施工必须密切配合，对以下一些情况，加以重视。

1. 基坑涉及范围内的土层是否曾经受过扰动，如，相邻建筑基础施工时的回填土，存

在相邻建筑基坑施工时的锚杆、土钉，曾经因铺设市政地下管线而进行过开挖和回填，旧房拆迁后遗留的基础等等。诸如此类的问题使拟建基坑工程涉及的土体受到过扰动，基坑设计时，对其扰动历史不容忽略，需进行调查收集资料，必要时，进行有针对性的专项勘察。

2. 基坑开挖后揭露的地层性状、地下水情况是否与勘察报告相符。若二者有差别，需根据实际情况及时进行必要的验算、设计调整及施工措施调整。

32.3.7 施工过程中的地下水处理

与基坑工程有关土中水有天然存在的地下水如潜水、承压水，尤其需要重点关注的是施工过程中出现的水，包括降雨及与人类生活有关的地下设施如供水管、污水雨水管、化粪池等的渗漏、破损带来的水，而后者十有八九要给基坑带来麻烦，轻则出现险情抢险加固，重则酿成重大基坑事故，尤以土钉墙、复合土钉墙对土中水最为敏感。因此，岩土工程专家把土中水比喻为基坑工程的“天敌”、“灾星”、“元凶”、“罪魁祸首”，那个名字都不过分。水对基坑工程的影响大致有以下几个方面：

1. 降低土体强度

土中水的增加使非饱和土的吸力减小，吸附强度降低，当土体饱和时，吸力及负孔隙压力消失，表观凝聚力随之丧失，土的抗剪强度急剧降低。土中水可使部分岩土矿物软化，土的结构破坏。土中水产生的超静孔隙水压力使土体内的有效应力减小，强度降低^[13]。因土中水引起的土体抗剪强度降低、结构破坏又导致锚杆(土钉)与土体的粘结强度降低。

2. 引起支护结构荷载变化

有地下水使得支护结构上增加了水压力。在有水从基坑外向基坑内渗流时，基坑外向内渗透力增加了主动土压力，基坑内向外的渗透力减小了被动土压力，因而渗流的影响也需加以考虑。在北方寒冷地区，冻胀力不容小视。

3. 水位降低影响周围环境的安全或正常运行

地下水水位降低，土体产生压缩变形，引起降水影响范围内的既有建(构)筑物、地下管线、道路等发生沉降。

4. 渗透破坏

渗透破坏的基本形式有流土和管涌。基坑工程中常见的渗透问题有承压水引起的坑底突涌，截水帷幕渗漏或失效引起的流砂，降水不力或外来水引起的坑壁流砂，淤泥及高灵敏性土中的流滑，管涌等。尤其基坑内的集水坑、电梯坑等局部加深部位，渗透破坏极易发生。

5. 土中水对锚杆(土钉)施工质量的影响，见第 32.3.8 节“锚杆施工”。

因此，在基坑开挖过程中，要时刻注意地下水的动向。若发现土体中有水，需要立即判断水害的来源：降水不力、土体本身的滞水、地下设施漏水、雨水或者施工用水等等。治理水害，必须查清水源，具体原因具体对待。一般有截断、排泄、疏导等措施。所谓截断，就是对地下设施的漏水，找到源头，堵死封住截断水源，使之不再流入边坡土体内。所谓排泄，就是设置排水沟，把地面积水排走使之不渗透到边坡土体中，把基坑内的积水及时排走。所谓疏导，就是在支护过程中，在坑壁设置滤水管，使边坡土体中的水沿滤水管流出。这些措施简单易行，针对不同的情况可采取一种或者同时采取几种。

32.3.8 锚杆施工

1. 锚杆成孔

目前国内钻孔式锚杆的成孔工艺主要有套管跟进成孔、螺旋钻机成孔、泥浆护壁成孔。套管跟进成孔工艺锚杆孔壁松弛小、对土体扰动小、对周边环境的影响最小。螺旋钻机成孔、泥浆护壁成孔工艺由于泥皮的润滑作用，导致水泥浆固结体与钢绞线的握裹力、锚固体与周围土体的粘结强度大大降低，严重降低锚杆的承载力，而且螺旋钻机成孔、泥浆护壁成孔成

孔施工易引起上部地基变形，导致周边环境受损。因此，应优先选用较为先进的套管跟进成孔工艺，尤其当锚杆位于地下水位以下时。

2. 锚杆注浆

目前常用的锚杆注浆工艺有一次常压注浆和二次压力注浆。一次常压注浆是浆液在自重压力作用下充填锚杆孔，有的在浆液渗入土体液面下降后再进行二次补浆，均属于一次常压注浆。二次压力注浆需满足二个指标，一是第二次注浆时的注浆压力，一般需不小于 1.5MPa，二是第二次注浆时的注浆量。满足这二个指标的关键是控制浆液不从孔口流失。一般的做法是，或者在锚杆锚固段起点处设置止浆装置，或者是在一次注浆锚固体达到一定强度后进行第二次注浆。尤其当锚杆位于地下水位以下时，二次高压注浆是确保锚杆质量的重要措施。试验表明，二次高压注浆可使土体的粘结强度提高 20%~200%(表 32.3.8)，提高幅度与土层特性、二次高压注浆量、注浆压力等有关。

二次高压注浆粘结强度提高系数^[6] 表 32.3.8

土层名称	淤泥 淤泥质土	黏性土 粉土	粉砂 细砂	中砂	粗砂 砾砂	砾石 卵石	全风化岩 强风化岩
提高系数	1.2~1.3	1.4~1.8	1.6~2.0	1.7~2.1	2.0~2.5	2.4~3.0	1.4~1.8

3. 帷幕截水条件下锚杆的施工

(1) 粉土、砂土层中锚杆施工

水在粉土、砂土中形成渗流后，粉土、砂土瞬间发生结构破坏，出现流砂、坍塌现象。在截水的基坑中，若锚杆孔口位于水位以下一定深度，锚杆孔口处水压力较大(特别当位于承压水水位以下时)，锚杆施工钻穿帷幕时，在强大的水压力作用下，粉土、砂土颗粒从锚杆孔口涌出，导致锚杆无法施工。水土流失严重时将导致地面下沉、塌陷、周边环境受损。因此，这种情况下锚杆施工需非常慎重。最好将锚杆孔口选在稳定地下水位以上，否则，锚杆施工时必须采取防止锚杆孔内流砂、堵漏等措施，并需通过试验确定施工工艺。

螺旋锚杆钻机在水位以下的砂性土中成孔易塌孔，锚杆难以实施，塌孔严重时导致基坑周边环境受损。

(2) 粘性土中锚杆施工

螺旋锚杆钻机(俗称“土锚”)在水位以下的粘性土中成孔易产生“和泥”现象，锚杆孔中充满软泥，锚杆孔壁稀软。放置钢绞线后，钢绞线外裹满泥浆。导致锚固体与钢绞线的握裹力、锚固体与周围土体的粘结强度大大降低，严重降低锚杆的承载力。

(3) 截水条件下锚杆施工的建议

粉土、砂土层中，锚杆孔口宜选在稳定地下水位以上；锚杆位于地下水位以下时，不论粘性土、粉土、砂土，均宜采用套管跟进成孔工艺；锚杆宜采用二次高压注浆工艺；锚杆施工钻穿帷幕，需及时进行堵漏、修补帷幕。

32.4 基坑工程地下水勘察、设计与施工应注意的问题

32.4.1 基坑工程地下水勘察应注意的问题

有许多基坑工程施工中的事故都直接或间接地与地下水有关，地下水对基坑工程施工的影响是不容忽视的。对场地地下水赋存状态的了解程度和地下水的存在对基坑工程的影响方式，决定了基坑工程施工能否顺利的重要前提。因此，在基坑工程施工前查清和了解场地的水文地质条件是非常重要的。场地水文地质勘察主要查清场地及其周边区域的水文地质条件，获取与施工降水有关的各含水层的水文地质参数，了解地表水体与地下水之间的关系等，

为施工降水方案设计提供准确的水文地质资料。在基坑工程中，地下水勘察主要应注意以下几个方面。

1. 地下水勘察的工作内容和要求

在基坑工程中，了解场地的地下水主要通过岩土工程勘察或专门的水文地质勘察，这两种途径分别适用于不同的场地、不同的工程，对于基坑深度不大、水文地质条件简单、场地及其周边地区有较丰富的资料，则采用岩土工程勘察资料基本可以满足基坑工程的需要。当基坑深度较深、水文地质条件复杂、当地已有资料不很丰富时，岩土工程勘察资料不能满足基坑工程需要，就应进行专门的水文地质勘察。

基坑工程中对地下水的控制可以分三类情况，一是施工降水，降低基坑内的地下水位至基底以下 0.5m~1.5m，满足基坑工程施工需要；二是进行施工降水，在降低基坑内的地下水位至基底以下 0.5m~1.5m，满足基坑工程施工需要的同时，通过回灌等措施，控制周边的地下水位和地面沉降，达到施工期间周边环境的安全；三是进行施工降水和帷幕隔水的技术和经济选择，以较合理的经济投入，尽最大程度减少抽取地下水，以保护地下水资源和地下水环境。针对这三类情况，地下水勘察内容和要求也存在一定的差异。

对于纯粹施工降水的基坑工程地下水勘察，其工作内容和要求主要包括：

- (1) 区域性气候资料，如年降水量、蒸发量及其变化规律和对地下水的影响；
- (2) 主要含水层的分布规律、岩性特征。查明含水层和隔水层的埋藏条件，地下水类型、流向、水位及其变化幅度，当场地有多层对基坑工程有影响的地下水时，应分层量测地下水位，并查明各含水层之间的补排关系；
- (3) 地下水的补给排泄条件、基坑与附近大型地表水源的距离关系及其水力联系；
- (4) 通过现场试验，量测各含水层的渗透系数等水文地质参数；
- (5) 当地下水可能对基坑开挖造成影响时，应对地下水控制措施提出建议。

对于保护周边环境安全的施工降水（地下水控制），则除了上述的工作内容和要求外，还应包括：

- (1) 场地周边环境条件；
- (2) 场地周边一定范围内（基坑工程施工降水影响的范围）的地层分布；
- (3) 根据岩土工程勘察资料或专门的水文地质勘察，提供与降水方案设计有关的工程地质参数；
- (4) 评价降水对基坑周边环境的影响。

对于以保护地下水资源和地下水环境为目的的地下水控制，除了以上的工作内容和要求外，还应包括：

- (1) 查明场区是否存在对地下水和地表水的污染源及其可能的污染程度，提出相应的工程措施的建议；
- (2) 查明与基坑工程有关的各层地下水的水质，并评价施工降水方法对地下水环境的长期影响和对策；
- (3) 提出适宜的最大程度减少抽取地下水资源和避免地下水污染的地下水控制方法。

2. 地下水勘察工作量的布置

工程场地地下水勘察主要通过水文地质勘察孔、地下水位监测井、含水层的抽水试验及已有资料的整理分析完成。现场工作量与已有资料的丰富程度、场地水文地质条件的复杂程度、场地大小等有关。

(1) 水文地质勘察孔的布置

1) 工程场地已完成或同期进行岩土工程勘察工作，则应在岩土工程勘察资料的基础上布置水文地质勘察孔，用最少的工作量控制降水范围内的水文地质条件。

2) 水文地质勘察孔的数量可以参照表表 32.4.1-1 的规定布置。一个工程场地具体的水

文地质勘察孔数量可在此基础上根据场地面积适当增减。

水文地质勘探孔的数量

表 32.4.1-1

已有资料丰富程度 水文地质条件	好	中等	差
	简单	0	2
中等	2	4	6
复杂	4	6	8

3) 线状工程的水文地质勘察孔的数量应在已进行的岩土工程勘察工作的基础上满足每 500m 布置一个孔。

4) 水文地质勘察孔的深度应大于 2 倍基坑深度，且满足穿过所揭露的含水层底板。

5) 场地邻近地表水体时，应布置适量勘察孔确定地表水体与地下水的关系。

(2) 地下水位监测井的布置

1) 地下水位监测井的布置应满足水文地质勘察期间和工程施工期间对与基坑工程施工有影响的含水层的地下水的监测。即主要设置于降水含水层中和可能对基坑开挖有影响的基底以下的其它含水层中。

2) 在平面上，地下水位观测孔宜布置在基坑开挖范围外 8m 以内的区域，且在施工降水时水位较低最不利的位置。

3) 地下水监测井的数量按表 32.4.1-2 的规定布置。

地下水监测井的数量

表 32.4.1-2

已有资料丰富程度 水文地质条件	好	中等	差
	简单	1	2
中等	2	3	3
复杂	3	4	5

4) 线状工程的地下水位观测孔的数量宜为每 1000m 一组，且可与水文地质勘察孔结合。

5) 地下水位监测井应分层进行设置，分别对各含水层水位进行量测。

6) 在已确定地表水体与地下水存在关系时，应布置适量地下水位监测井监测地下水位随着地表水体的变化关系。

7) 地下水位监测井孔径应不小于 50mm。一个工程场地中有不少于 1 组观测孔的管材为 PVC 管，以便于地下水样的采集。

8) 地下水位监测井可结合水文地质勘察孔，达到一孔多用的目的。

(3) 抽水试验的布置

1) 抽水试验应针对降水工程的需要布置。对于工程场地存在多个影响基坑工程的含水层，应分别进行抽水试验。

2) 抽水试验的数量按表 32.4.1-3 的规定布置。

抽水试验的数量

表 32.4.1-3

周边 100m 范围内抽水试验资料 水文地质条件	有	无
	简单	0
中等	1	1~2
复杂	1~2	2

3) 线状工程每 1000m 应进行一组抽水试验。

4) 抽水试验应为群孔抽水，水位观测孔应不少于 2 个。第一个观测孔离抽水井的距离应不小于 1.1 倍的含水层厚度，若进行大降深抽水井试验，第一个观测孔离抽水井的距离应不小于 2 倍的含水层厚度。

5) 抽水试验方法可按表 32.4.1-4 确定。当含水层岩性为粉砂、粉土、粘性土，且含水层厚度不大，单孔或多孔抽水试验不可行时，可采用提水试验或注水试验；

当含水层埋深小于 8m，且水量不大时，可采用真空泵抽水试验。

当含水层岩性为细砂及其以上，且含水层有一定厚度时可进行潜水泵抽水试验。

抽水试验方法和应用范围

表 32.4.1-4

试验方法	应用范围
钻孔或探井简易抽水	粗略估算弱透水层的渗透系数
不带观测孔抽水	初步测定含水层的渗透性参数
带观测孔抽水	较准确测定含水层的各种参数

6) 进行潜水泵抽水试验时，抽水井的直径应不小于 200mm，抽水井管材应为铸铁管、钢板卷管等，以满足对抽水井洗井的要求。

7) 过滤器的结构应符合《供水水文地质勘察规范》(GB50027-2001) 的有关要求。

8) 应进行不少于 1 个水位降深的抽水试验，当含水层厚度较大或承压水头较高，可进行 3 个水位降深的抽水试验，其中的一个水位降深应大于基坑降水设计水位降深。

9) 抽水井宜为完整井，当含水层厚度很大时（如大于 30m），可以采用非完整井。

3. 含水层的确定和划分

工程建设中的含水层和供水水文地质的含水层是有很大的区别，在供水水文地质勘察中含水层是指能够给出并透过相当数量水的岩体，含水层往往是有一定厚度和较好的渗透性，对供水有实际意义。而在工程建设中，含水层是指能够给出并透过水的岩体，这类岩体不管多厚，渗透性不管多低，都需要确定为含水层。

在实际工程中，含水层的划分仍需要注意几种特殊情况：

(1) 含水层与隔水层互层：有些场地，含水层和隔水层都较薄，呈互层状，而各个深度处的地下水位相差不大，但施工降水时，各深度处的水位降深则差异很大，有可能出现疏不干问题，对基坑侧壁安全产生影响。勘察时需要对这类含水层和隔水层进行划分和描述清楚。

(2) 二（多）元结构含水层：在较粗颗粒含水层（主含水层）上或下存在相对较细颗粒的含水且透水的土层（副含水层），在这些土层不同深度处地下水位相差不大，当降低地下水位时，主含水层水位降低较快，而副含水层降低较慢，甚至在基坑工程施工期间，都不能疏干副含水层中的水，这有可能造成基坑侧壁流砂等现象。

(3) 含水透镜体：由于勘察孔数量限制，不可能对含水透镜体查明清楚，也有可能存在勘察时没有遇到含水透镜体，而开挖时存在局部含水的情况，其对基坑工程的影响是不能忽视的，因此，需要对场地及周边地区的地下水赋存状态进行分析，重视含水透镜体对工程的影响。

4. 地下水位的量测和动态分析

地下水位的量测是了解各地下水赋存状态的重要依据，确定不同深度处含水层的类型和相互关系，是不能没有各含水层的水位。地下水位最好是通过地下水位分层观测孔量测，若通过岩土工程勘察孔或水文地质勘察孔了解各含水层的地下水位，则应做到：

(1) 遇地下水时应量测水位；

(2) 稳定水位应在初见水位后经一定的稳定时间后量测。稳定水位距初见水位量测的时间间隔按地层的渗透性确定，对砂土和碎石土不得少于 0.5h，对粉土和粘性土不得少于 8h。

(3) 对多层含水层的水位量测,应采取止水措施,将被测含水层与其他含水层隔开。

为了确保基坑工程施工期间不至应区域地下水位突然升高造成基坑工程施工降水工作失败,有必要根据地下水位多年观测成果提供地下水位动态规律,并分析场地地下水位升高的可能影响因素,以便施工降水时提前准备针对性的措施。当无地下水位长期观测资料,应在可行性研究阶段设立地下水位观测孔观测不少于一年的水位动态资料。而对位于地表水体附近的工程,必须确定地下水位动态与地表水体动态的关系。

5. 水文地质条件的分析。

有两种情况需要说明。

(1) 根据岩土工程勘察资料进行水文地质条件的分析

岩土工程勘察对水文地质条件的论述是不能完全满足基坑工程施工降水设计的需要,当必须采用岩土工程勘察资料进行地下水控制设计时,则必须利用岩土工程勘察资料重新对场地的水文地质条件进行分析,尤其是含水层的分布、地下水类型、地下水埋深(或标高)、含水层的水文地质参数、地下水对基坑工程的影响等方面进行分析和确定。

(2) 专项水文地质勘察时的水文地质条件分析

专项水文地质勘察的水文地质条件论述应能满足基坑工程的需要,但在分析水文地质条件时,应能够充分利用抽水试验资料,通过分析抽水试验资料反映的一些规律,推断场地及周边的水文地质条件以及与各含水层之间的关系、与地表水体的关系、隔水边界和补给边界的位置等,并与实际调查资料对照,确保水文地质条件分析的正确和全面。

6. 勘察工作中注意事项

(1) 水文地质勘察孔应与岩土工程勘察孔一样,统一对地层划分及地层岩性、成因年代、颜色、湿度、含有物等项目的描述,划分地下水层位,分析地层特性,划分地质单元。

(2) 水文地质勘察孔钻探在穿过第一层地下水后宜先跟进套管,后进行取土,以保证闭水效果。

(3) 为保证水文地质勘察孔质量,钻孔的垂直度为每百米小于 1° 。

(4) 钻探完成后,应进行回填。当钻孔穿越多个含水层,回填要保证上下层水不会连通。回填材料应保证没有污染。

(5) 在实时掌握钻探、测试揭露的地层和地下水位的条件下,与预测条件进行对比分析,判断是否需要及如何进行水文地质勘察方案的调整与补充。

(6) 若需要进行室内渗透系数试验时,除方案中确定取土要求外,在现场应根据实际地层情况进行必要调整。

(7) 应对每一完成的钻孔深度进行校验,并确定是否满足对基坑工程地下水控制方案设计的要求。

32.4.2 基坑工程中地下水控制方案设计应注意的问题

地下水控制方案是基坑工程方案设计的重要组成部分,需要统一考虑。根据不同地区的政策和技术标准,选择施工降水方案、帷幕隔水方案、施工降水+回灌的地面沉降控制方案等。不论什么样的地下水控制方案,都需要满足技术可行和经济合理,并能满足基坑工程施工对周边环境安全的要求。

1. 地下水控制方案的选择

地下水控制方案的选择必须符合当地的政策和要求,同时符合技术的可行性和经济的合理性。

保护周边环境的地下水控制方案选择应根据地下水位降低后对周边环境的影响程度和可能采取的措施综合考虑,本着基坑工程安全和周边环境安全至上的原则选择施工降水、施工降水+回灌、帷幕隔水等地下水控制方案。

从保护地下水资源和地下水环境角度，以最大程度减少地下水抽排量为前提，同时兼顾经济效益、环境效益，使基坑工程地下水控制符合“保护优先、合理抽取、抽水有偿、综合利用”的原则，在地下水控制方案中应优先选择帷幕隔水，其次选择施工降水+帷幕隔水，再次选择施工降水。

(1) 帷幕隔水

有几种原因需选择帷幕隔水方案。一是工程地质条件较差，采用工程施工降水方案后，基坑工程仍存在边坡失稳等较大的安全风险；二是基坑周边环境复杂，建（构）筑物对地面沉降较敏感，采用工程施工降水易引起建（构）筑物损坏等，并可能进一步引发其它灾害；三是周边临近建（构）筑物离基坑较近，不具备施工降水条件；四是地下水资源和水环境保护需要，不允许工程施工降水；五是经济对比后，帷幕隔水方案较施工降水方案有明显的优势。等等。

是否选择帷幕隔水方案是由各种因素综合决定的，但基坑工程安全、地区政策和周边环境条件是主要的因素。

(2) 施工降水+帷幕隔水

存在多层水影响基坑工程的场地，根据基坑工程施工需要，也可以采用施工降水+帷幕隔水方案。例如直接影响基坑开挖的含水层，根据各种因素综合分析后，需要采用帷幕隔水，但间接影响基坑工程的含水层（承压水含水层）需要必要的降低水位，以避免承压水突涌对基坑的影响，则可以采用施工降水+帷幕隔水方案。灵活合理的采用施工降水+帷幕隔水方案，可有效地降低基坑工程安全风险，减少抽取地下水量，同时也能够降低基坑工程造价。

(3) 施工降水

施工降水方法主要分为集水明排、井点降水、管井降水、辐射井降水等类型，适用于各类含水层。施工降水主要的控制要求是基坑内的地下水位降低至基底以下不小于 0.5m。

为避免施工降水过量抽取地下水资源或影响地下水环境，施工降水应遵循以下原则：

1) 分层抽水的原则：其重要前提是必须查清场地的水文地质条件，查清影响基坑工程的场地各层地下水的分布和影响程度，有针对性的布置降水井，控制各层地下水的水位。当能够保证施工结束后有有效措施使上下层不连通，才可以考虑混层抽水。

2) 回灌补偿原则：对于基坑排水量仍较大的情况，且具备地下水回灌条件，应制定地下水回灌计划。

3) 有条件使用渗井降水原则：在上层水水质较好或施工结束后能够有有效措施保证上下层不连通，则可以使用渗井降水。

4) 抽排水综合利用的原则：对抽排的地下水应进行综合利用，可以利用施工降水进行工地车辆的洗刷、冲厕、降尘、钢筋混凝土的养护等，也可以利用施工降水用于绿地、环境卫生以及排入地下雨水管道等。

5) 动态管理的原则：根据基坑开挖的需要和基坑降水的水位情况，对降水设施进行动态管理，达到按需降水，减少基坑抽排水量。

(4) 施工降水+回灌

当地下水位降低引起的地面沉降对周边黄金安全产生影响时，可以考虑采用回灌的方法，控制对地面沉降敏感的建（构）筑物附近含水层的地下水位，避免施工降水对周边敏感的建（构）筑物的影响。需要注意的是，一是敏感建（构）筑物附近含水层的地下水位应保持在一定高度（最好处于施工降水前的状态），不能是含水层的水位过高；二是施工降水井停抽后，对回灌井的水位控制仍能保持一定时间，避免基坑周边地下水位恢复时，被保护敏感建（构）筑物附近含水层的地下水位降低。

2. 降水设计有关参数的取值

降水方案设计中用到的参数主要包括含水层的厚度（对承压水含水层为 M ，对潜水含

水层为 H)，水位降深 s，影响半径 R，大井等代半径 r_0 ，渗透系数 K 等。

(1) 含水层厚度

当含水层的顶底板标高相差不大，含水层厚度则取场地范围内钻孔揭露的含水层厚度的平均值。

当含水层顶底板标高差异较大时，应分析所有勘探资料，用有代表性的含水层厚度平均值为工程场地的含水层厚度。

(2) 水位降深

设计降水深度在基坑范围内不宜小于基坑底面以下 0.5m。当施工降水涉及多层地下水时，方案设计不能为了安全而各层地下水统一取水水位降深值为第一层地下水降低至基底以下的水位降低值。应根据各含水层的地下水位确定水位降深值；当采用大井法计算水量时，可以根据各含水层的设计水位降深值计算流量；对于降水管井的井内水位则为基坑中心点的水位降深与管井至中心点的距离与水力坡度乘积之和，同时应考虑井损和水跃值。

(3) 大井等效半径

一般的降水井群在基坑外缘采用封闭式的布置，为了计算简单，将井点系统看成一口大井，以便引用已有的公式计算这个等效大井。等效半径即指大井的半径 r_0 ，通常按照降水范围和基坑形状确定。

(4) 影响半径

井点系统的影响半径可以表示为

$$R_0 = R + r_0 \quad (32-4)$$

对于 R 的取值可以采用两种方法获得。若有抽水试验资料时，应按照观测孔的试验资料求得 R；若没有抽水试验资料时，应用比拟法选用当地类似的水文地质条件下其它地段的参数值或当地经验值；当基坑安全级别比较低的情况下，可以采用经验公式。

(5) 渗透系数

在目前的施工降水方案设计中，渗透系数取值大小不仅对降水工程实施可行性有直接影响，而且对降水方案合理性至关重要。原则上应用场地各含水层的渗透系数应根据抽水试验求得。当邻近本工程 100m 范围内存在抽水试验资料，且水文地质单元类似，则可以借用邻近工程的渗透参数。对于基坑安全级别比较低的情况，可以采用当地的渗透系数经验值。

3. 施工降水的风险控制；

施工降水设计人员应有工程风险意识，以保证基坑工程的施工安全。在设计阶段的风险控制主要注意以下几个方面。

(1) 设计人员应全面了解、掌握基坑降水区域的地质及水文地质条件。在此基础上，对深基坑工程而言，应尽可能进行三维地下水渗流计算。

(2) 在进行地下水渗流分析时，应正确把握水文地质概念模型、渗流数值模型的可靠性。

(3) 设计人员应充分了解基坑围护结构特点及各工况条件，在此基础上确定降水方案并进行降水设计。

(4) 应选取满足基坑开挖、施工安全与周边环境和地下水环境保护要求的最佳方案。

(5) 考虑到计算参数的可靠性以及地质条件的变异性，降水井施工质量及成井后的保护程度、设备运行异常等，降水设计计算要留有一定的安全系数。

(6) 设计前应掌握充分的设计依据，应准确掌握场地的水文地质资料，从源头开始控制基坑降水设计的可靠性。

考虑到施工降水过程中存在的风险因素，在设计阶段应编制有针对性的应急预案。

(1) 应编制施工降水工程专项应急预案，也可与基坑工程应急预案一并编制。

(2) 施工降水应急预案应主要包括以下内容:

涉及消防、医疗急救、防汛防风、用电安全等常规预案;

深基坑工程可能发生的基坑突涌、围护渗漏涌水涌砂等险情编制具有针对性、可操作性的应急抢险预案;

应急物资、设备的堆放、保管的日常检查措施;

因停电、潜水泵损坏等造成地下水位升高应编制应急预案, 并确定应急生效时间。

4. 帷幕隔水的要求。

竖向截水帷幕的形式有两种: 一种是插入隔水层, 另一种是含水层相对较厚, 帷幕悬吊在透水层中。前者须进行基底渗流稳定、隆起验算, 必要时可加深竖向截水帷幕深度或采用基坑内设降压井保证施工安全。后者需要考虑绕过帷幕涌入基坑的水量, 评价基坑内降水井数量和布置及其可能造成的周边环境问题, 必要时进行封底或采用其它方法。

(1) 纵向截水帷幕

1) 同一工程可采用多种止水帷幕方式, 根据地层特点、基坑开挖深度、支护型式、周边环境条件等, 在不同的部位选用适合的止水帷幕。

2) 落底式竖向截水帷幕应插入下卧不透水层, 其插入深度宜不小于 2~3m 或按下式计算:

$$l=0.2h_w-0.5b \quad (32-5)$$

式中 l ——帷幕插入不透水层的深度, m;

h_w ——作用水头, m;

b ——帷幕厚度, m。

3) 当地下含水层渗透性较强, 厚度较大时, 可采用悬挂式竖向截水与坑内井点降水相结合或采用悬挂式竖向截水与水平封底相结合的方案, 以减少抽取地下水量和基坑周边地下水位的降低值, 降低地面沉降对基坑周边环境安全的影响。

4) 截水帷幕插入弱透水地层中, 需进行基底渗流稳定、隆起验算。如果不符合要求, 则坑外或坑内布设降压井。

5) 基坑内需根据弱透水地层的渗透性、基坑内外水头差、基坑底面与含水层底板的关系、含水层岩性、基坑面积等确定采用明排、或布设降水井以控制地下水位在基底以下。

6) 采用止水帷幕后, 因地层中的地下水不能排出, 除了对支护结构产生水压力外, 土层的强度指标 c 、 ϕ 值与降水条件下的指标也有所不同。无相关试验数据时, 帷幕止水条件下的 c 、 ϕ 值宜适当降低。

(2) 横向截水帷幕

1) 当含水层较厚, 采用悬挂式帷幕截水和基坑内降水方案仍不能满足基坑开挖需要或采用全封闭式截水帷幕施工时, 在完成纵向截水帷幕的同时, 也应进行横向截水帷幕的实施。

2) 横向截水帷幕厚度和深度应根据含水层的水头和基坑开挖深度, 通过基底抗隆起验算确定。

3) 为了减少横向截水帷幕出现漏点数量, 降低发生涌砂等破坏地基、支护结构等事故, 旋喷桩搭接厚度不低于 10~20cm, 基坑越深, 搭接厚度越大。

32.4.3 基坑工程降水施工应注意的问题

地下水控制效果好或不好, 不仅取决于地下水控制的方案设计的合理性, 而且也取决于地下水控制施工质量和管理水平。许多基坑工程地下水位不能降低至设计要求, 有相当一部分原因是降水井结构不合理, 洗井效果不到位, 降水井的井损较大, 造成降水井内水位降低

很深，但地层水位降低较小的情况，达不到降水的设计要求。施工中由于管理不到位，出现过降低地下水位，浪费运行费用和地下水资源。因此，地下水控制施工质量和管理也必须高度重视。

1. 降水施工时应考虑的因素

(1) 钻探施工达到设计深度后，根据洗井搁置的时间的长短，宜多钻进 2~3m，避免因洗井不及时泥浆沉淀过厚，增加洗井的难度。洗井不应搁置时间过长或完成钻探后集中洗井。

(2) 水泵选择时应与井的出水能力相匹配，水泵小时达不到降深要求；水泵大时，抽水不能连续，一方面增加维护难度，另一方面对地层影响较大。一般可以准备大中小几种水泵，在现场实际调配。

(3) 降水期间应对抽水设备和运行状况进行维护检查，每天检查不应少于 3 次，并应观测记录水泵出水等情况，发现问题及时处理，使抽水设备始终处在正常运行状态。同时应有一定量的备用设备，对出问题的设备能及时更换。

(4) 抽水设备应进行定期保养，降水期间不得随意停抽。当发生停电时应及时更新电源保持正常降水。

(5) 降水施工前，应对因降水造成的地面沉降进行估算分析，如分析出沉降过大时，应采取必要措施。

(6) 降水时应对周围建筑物进行观测。首先在降水影响范围外建立水准点，降水前对建筑物进行观测，并进行记录。降水开始阶段每天观测两次，进入稳定期后，每天可以只观测一次。

2. 降水施工阶段风险控制

(1) 降水施工风险控制

1) 严格按照规范标准和设计要求控制成孔质量。根据成孔深度和含水层岩性现在适宜的钻探设备和施工程序，满足对成孔孔径与深度要求，且便于洗井。

2) 严格控制井管质量，避免井管断裂、错位、连接质量差出现的漏水现象，造成降水井的失效、上下层水混合等问题。

3) 根据含水层粒径分布，选择合适的滤料和过滤器，避免井点出砂。必要时，滤料进场应检测其颗分曲线，合格后方可使用，并保证足够的滤网强度。

4) 为确保井点涌水量满足要求，应

- ① 优选滤料级配，确保含泥量不超标。
- ② 保证清孔效果和洗井效果。
- ③ 优化施工流程，防止加固水泥浆液窜入井点。
- ④ 配备合适的水泵，且泵的位置应优化。

5) 成井质量控制

① 施工组织设计中，成井材料、规格、型号和安装方法等，均应有明确要求。施工中应严格要求，不能随意更改；

② 洗井必须采用联合洗井的方式进行。

6) 降水井最终投入抽水运行前，应对井的质量进行验收。成井质量验收指标主要为成井材料、规格、型号；单井涌水量、水的含砂量；井底沉砂厚度等。

(2) 降水运行风险控制

1) 电源保证：一般工程宜采用双电源保证，对重大工程应采用双电源保证，必要时，电源切换与水泵启动可智能控制。

2) 排水能力保证：应根据最大排水量设置专门的排水系统。

3) 降水运行管理能力保证

①降水井的开启与停止应贯彻“按需降水”的原则，根据基坑内水位降低情况，动态调整降水的开启与停止。

②对于地下水变化对工程安全具有重大影响时，宜对工程施工降水期间进行全程自动监控。

③ 在施工降水期间，应加强降水井管和降排水系统的保护，避免意外损毁，影响施工安全。

(3) 环境风险控制

1) 降水设计应选取对环境影响最小的的方案进行实施。

2) 严格按“按需降水”的原则开启/关闭井点。

3) 降水运行过程中，严格按降水设计及降水运行方案执行。

4) 降水运行中应对水位、水量加强监测和分析。

5) 降水运行过程中，必须严密监控围护结构的隔水效果、围护结构的渗漏水情况、周围环境的显著变化等。

6) 如无法避免基坑周围地下水位的巨幅下降，必要时可采用局部回灌的方法，以减少和控制降水对环境的影响。

3.降水井出水含砂量要求

由于降水井和供水井不同，降水井是短期行为，供水井是长期使用，只要降水井在降水期间不会产生不良地质现象和降水设备正常运转就行。由于辐射井的辐射管反滤层的形成和基坑开挖后土层的减薄容易造成不良地质现象，因此，对辐射井抽水半小时和运行时的含砂量要求比管井要求严格。降水初期和降水过程中，抽排水的含砂量应遵循下述要求：

(1) 管井抽水半小时内含砂量小于万分之一；

(2) 管井正常运行时含砂量小于 5 万分之一；

(3) 辐射井抽水半小时内含砂量小于 2 万分之一；

(4) 辐射井正常运行时含砂量小于 20 万分之一。

32.5 基坑工程应注意的其它问题

32.5.1 监测方案与应急预案

监测方案与应急预案是实现基坑工程信息化施工和确保安全前提基础，是基坑工程设计、施工的重要组成部分。监测方案主要内容包括监测项目、监测方法、监测精度、监测周期、变形控制值及报警值；监测仪器设备名称、型号、精度等级；中间监测成果的提交时间和主要内容；绘制基坑支护结构及周边环境监测点平面布置图等。应急预案主要内容包括根据基坑周边环境、工程地质及水文地质条件及支护结构特点，对施工中可能发生的情况逐一加以分析说明，制定具体、可行、有针对性的应急抢险方案；明确应急预案的启动条件；以锚、撑作为应急措施的，应有节点、预埋件设计图等。

此部分应注意的问题是监测项目应满足规范基本要求；合理确定监测周期，并及时分析反馈监测数据，以满足信息化施工要求；依据基坑周边环境、工程地质及水文地质条件及支护结构特点合理确定基坑侧壁变形控制值（应与设计控制条件原则一致）及报警值。基坑监测项目的监控报警值应根据监测对象的有关规范要求、设计要求和工程经验及既有监测对象现状拟定，并结合现场监测成果的分析综合判定。应急预案应具有针对性和可操作性。

32.5.2 基坑截水结构的选型、质量控制及事故预防

截水是当前基坑工程地下水控制的主要手段之一，常见的截水结构主要有混凝土、水泥土。混凝土截水结构有地下连续墙和咬合式排桩，截水结构、挡土结构合二为一。水泥土系的截水结构通常叫作截水帷幕，常用施工方法有水泥土搅拌法、高压喷射注浆法、搅拌一喷射注浆法、注浆法等。冻结法形成的冻土墙是一种特殊的截水结构，在特点的情况下亦有应用。以上截水结构，都是由先后施工的截水单元相互搭接形成的。截水单元本身的质量缺陷、

单元之间的搭接缺陷都将导致截水失败。全国各地，只要有基坑截水的，几乎都有截水失败事例的报道^{[28]~[36]}。可见，基坑截水问题的严峻性和严重性。这些事故的发生，主要有截水结构的设计选型、质量缺陷和应急预防措施不力。

1. 截水结构的选型和设计，需重点考虑漏水的后果、含水层的土性、地下水特性、支护结构形式、施工条件等因素。对于漏水后果严重（如建筑物、公共设施损坏等）的基坑，对施工质量无十分把握的截水结构，如水泥土系的截水结构，不宜少于2道防线。选择的截水结构施工工艺需适合场地的地层特性。截水的基坑，支护结构的变形控制设计尚需考虑截水结构的抗变形能力，支护结构或土体变形过大会引起截水结构开裂，导致漏水。

2. 施工阶段，严格按照相关技术标准、施工工艺、操作规程等精心施工是确保截水结构质量的必要条件，但不是充分条件。尚有诸多不确定因素会造成截水结构致命的缺陷，例如，实际地质条件与勘察资料的符合程度，包括砂卵石地层中粒径的大小、表层填土的成分、地下水的流动性等等。地下障碍物往往导致截水结构不能正常施工，出现桩体缺陷、位置偏移、桩体倾斜等质量问题。

3. 截水帷幕施工质量的评价标准是截水效果。但在帷幕施工完成后基坑开挖前，目前还没有合理可行的、行之有效的、方便快捷的手段检测帷幕的渗透性及截水效果。现有的一些检测方法，可间接反映帷幕的施工质量，也是必要的。这些检测方法有：

(1) 帷幕固结体的单轴抗压强度检测，以期通过固结体强度间接推测帷幕质量。在搅拌桩、高压喷射注浆施工完成28d后，对帷幕固结体的搭接部位钻取固结体芯样，检测帷幕深度、固结体的单轴抗压强度及完整性，检测点的数量不宜少于总注浆孔数的1%；检测点的部位应按随机方法选取，同时应选取地质情况复杂、施工中出现异常情况的部位。根据工程经验，固结体的28天无侧限抗压强度，砂土不宜小于3MPa、粘性土不宜小于1MPa时。

(2) 轻型动力触探。在搅拌桩、高压喷射注浆帷幕施工完成7d内，采用轻型动力触探方法对水泥土固结体的早期强度进行检测，检测点的数量不宜少于总桩数或总注浆孔数的10%，水泥土固结体的N10击数需大于原状土击数的二倍。

(3) 孔内压水和抽水试验。对桩体、注浆固结体采用钻孔内压水和抽水试验，检测桩体、注浆固结体的抗渗能力，检测点的数量不少于总桩数或总注浆孔数的1%。

(4) 围井压水和抽水试验。采用拟选定的设计、施工工艺参数，在正式施工前施工专门的围井，进行固结体围井内的压水或抽水试验，检测帷幕整体的渗透系数；通过观测围井内的水位及渗漏情况，检查截水效果。

以上检测方法均不能准确的评价帷幕的整体截水效果，最终的截水帷幕质量是要通过开挖后的截水效果来检验。

4. 影响截水质量的因素着实太多太复杂，技艺再高、经验再丰富的施工单位也难以一次做到天衣无缝、滴水不漏，而且现有的检测方法均不能准确的评价帷幕的整体截水效果。因而应急预防是截水基坑工程不可或缺而且是非常重要的一个环节。况且某些支护结构的选型本身注定了帷幕要渗漏，如锚拉式支挡结构，位于水位以下的锚杆，施工钻穿帷幕必然导致渗漏。应急预防讲究措施切实有力、监控及时高效、反应迅速到位。施工现场需具有充足的技术、人力、物资准备，监控、报警、反应、行动高效有序。必要时可按照事先制定的抢险应急预案进行现场演习。

总之，确保截水结构的截水效果，需要“过程控制，辅助检测，应急到位”。

32.5.3 冻胀与冻融对基坑的影响

不同的基坑支护形式，对冻胀与冻融的反映和敏感性有所不同。

对于支挡式结构，冻胀增加了支护结构的水平荷载，使得支护结构变形、内力增大；一冻一融、融化水对土体结构及强度造成破坏和削弱，又给支护结构雪上加霜。疏排桩支护

的桩间土，冻胀、冻融易引起桩间土脱落。因此，季节性冻土地区需越冬的基坑，需结合地区经验考虑冻胀影响，并且适当提高支挡式结构各个构件、连接节点的抗力及安全度，桩间土护面需与护坡桩连接可靠。

对于土钉墙，冻胀改变了土钉墙的受力特点。常规情况下，土钉钢筋的拉力沿长度方向分布呈中间大两头小，以潜在滑动面处最大，到土钉钢筋与面层连接处，因钉土之间的粘结力使得钢筋拉力大大衰减。因此常规的土钉墙设计，土钉与面层的连接节点的承载能力均小于土钉的最大拉力，土钉头节点、面层厚度及配筋均按构造设置，一般不进行受力计算。但是，当土钉墙后土体受冻膨胀后，冻胀力作用于面层增加了面层的荷载，又通过面层传递到土钉头节点，再传递到土钉，使得面层、土钉头节点、土钉荷载增加，尤其按照构造设置的面层、土钉头节点，极易在冻胀力作用下出现承载力不足而破坏。因此，在季节性冻土地区冬季进行基坑施工，最好不采用土钉墙支护，否则需充分考虑冻胀的影响，在土钉头节点强度、面层强度、土钉承载力等各个环节均需精心设计。同时，设计计算尚需考虑一冻一融对土体结构的损伤、融化水的水压力及融化水降低了土体的强度等因素。

32.5.4 锚杆、土钉的抗拔试验问题

1. 锚杆试验

一般土层中，锚杆抗拔试验有两种，一种是基本试验，其目的是确定锚杆的承载力、为设计提供依据、验证施工工艺等；另一种是验收试验，其目的是检验锚杆质量、判断锚杆承载力是否符合设计要求。但由于锚杆设计构造、施工工艺和试验方法等原因，当前基坑工程中的锚杆抗拔试验难以达到上述试验目的。

锚杆全长分为锚固段和非锚固段。锚固段为锚杆位于稳定土体中的部分，即理论滑动面以外的部分，为锚杆提供抗拔力，非锚固段为锚杆位于不稳定土体中的部分。现阶段的施工方法，锚杆注浆时浆液将整个钻孔注满，即锚杆全长范围有水泥固结体与土体接触，且锚固段和非锚固段的水泥固结体是连续的。

在进行锚杆张拉试验时，拉力通过自由段杆体传递至锚固段。由于锚固段和非锚固段的水泥固结体实际是一个整体，因此，锚杆试验的张拉力实际上传递到了包括锚固段和非锚固段的整个锚杆长度范围的土体上，亦即锚杆试验得到的抗拔力包含了非锚固段的贡献。而基坑开挖后锚杆在工作状态下的承载力由锚固段决定，因此以上试验高估了锚杆的抗拔承载力，与支护结构的设计假定是不相符的，这给基坑支护带来不安全的因素。

解决上述问题的思路大致有三种：一是将锚固段和非锚固段的水泥固结体分断，比如在锚固段和非锚固段之间用柔软材料设一个过渡段，该过渡段内没有水泥浆固结体，因而切断力的传递途径。二是取试验锚杆的总长度等于工程锚杆的锚固段长度(试验锚杆所在土层应与工程锚杆的锚固段相同)，这样试验所得的抗拔承载力可较准确的反映工程锚杆的抗拔承载力，但由于试验锚杆无自由段，试验不能反映工程锚杆的变形性能。三是控制注浆范围，即只在锚固段注浆，非锚固段不注浆（或者是在抗拔试验完成后再给非锚固段注浆）。

另外，在进行锚杆基本试验时，应控制锚杆的破坏出现在锚固体与土体之间，而不能出现预应力筋的强度不足，必要时，基本试验锚杆可适当增加预应力筋的截面面积。

2. 土钉试验

土钉墙中的土钉，其受力机制与预应力锚杆不同。土钉的主要贡献是它对天然土体的加筋作用，基坑开挖时土体和土钉协同工作，而协同工作的效果取决于土钉与土体之间的粘结性能。因此，土钉的抗拔试验目的，是确定或检验土钉与土体之间粘结性能。设计文件应对试验土钉提出明确的参数，如数量、长度、直径、配筋、施工工艺、加载值等。

土钉的基本试验：试验目的是确定土钉与土体之间极限粘结强度（或单位长度的极限抗拔力），因此试验应加载至土钉到达抗拔极限状态。根据试验得到的极限抗拔力，可求得土

钉与土体之间极限粘结强度的平均值（或单位长度的极限抗拔力）。进行基本试验的土钉，需配置足够的钢筋，必须保证极限状态出现在土钉与土体之间，不能出现土钉钢筋被拉断。

土钉的验收试验：试验目的是检验土钉与土体之间粘结强度是否满足设计要求(或土钉单位长度的抗拔力是否满足设计要求)，但当前实际工程中的做法却难以达到该目的，究其原因，是验收试验加载量不足所致。

土钉墙设计计算时，土钉的抗拔力是取位于滑动面以外的土钉所能提供的抗拔力。当前的实际工程中在进行土钉的验收试验时，加载量就取设计计算时取用的土钉抗拔力。但是，由于土钉全长注浆，抗拔试验时土钉全长发挥作用，其工作状态与设计的假定差别甚远，导致验收试验的土钉抗拔力很容易就满足设计要求，其实，试验是不真实的，有可能将实际上不满足要求土钉判定为合格的，因此是偏于不安全的。

解决以上问题的思路大致有两种，一是减小验收试验土钉的长度，即验收试验土钉的长度取设计计算时滑动面以外的土钉长度，加载量为按照该长度计算的抗拔力。二是增加验收试验的加载量，该加载量取按照土钉全长计算的抗拔力。不管那种方式，土钉的配筋必须与加载量匹配，避免试验时土钉钢筋首先拉断。

因此，土钉墙的设计文件应对土钉的验收试验提出明确要求，验收试验的加载值，需根据进行验收试验的土钉长度、直径、施工工艺、所在土层等情况确定，以使试验能够真正检验土钉与土体之间粘结强度是否满足设计要求(或土钉单位长度的抗拔力是否满足设计要求)。

32.5.5 考虑可持续发展的基坑方案选型

基坑支护方案选择时，传统的做法是，在满足安全的要求下，使基坑工程的总投资最少，即以狭义的经济指标作为方案优选的最终目标。而在倡导可持续发展、节能减排的今天，基坑方案的选择、对比似乎应改变传统观念“与时俱进”，把生态效益纳入经济效益核算。不算生态效益的恶果是，保护环境的工程受到打击，破坏环境的工程受到庇护，从而助长、掩盖了很多急功近利的短期行为。重视环保的发达国家已将工程方案论证比较的指标体系从“技术、经济比较”转变为“技术、经济、环境比较”，国家以此立法^{[16][17]}。具体到基坑工程，本文肤浅的探讨一些关于方案选型中降低材料消耗、有利于地下空间开发利用、保护地下水环境的问题。

1. 以材料消耗最小为目标的基坑方案选型

基坑工程中，用量最大的材料是硅酸盐水泥、由水泥砂石组成的混凝土、钢材。这些材料的获取均需向地球索取，使地球伤筋动骨未老先衰。再者，材料生产中的排放又对环境造成污染。例如，每生产 1t 水泥熟料，将释放出 1t 二氧化碳。全世界水泥年产量约为 14 亿 t，它所产生的二氧化碳约占全球温室气体的 7%^[18]。因此，从降低材料消耗、污染物排放的目标出发，当前的基坑方案选型中似乎应重点考虑以下一些形式。

(1) 一墙多用的地下连续墙方案。集基坑施工阶段挡土截水、建筑物使用阶段为结构外墙为一体的地下连续墙，在水泥、砂石、钢材等主要材料消耗上，优于护坡桩+截水帷幕+单独外墙的常规方案。如果再结合逆作法，则又省去临时内支撑或锚杆，材料消耗进一步降低。

(2) 型钢水泥土搅拌墙。型钢水泥土搅拌墙为集挡土、截水为一体的复合结构，型钢可回收重复使用，与钢筋混凝土灌注桩+截水帷幕相比，材料消耗小，环保性能好。

(3).钢支撑方案。钢支撑具有可多次重复使用的特点，其环保性能优越，钢筋混凝土支撑、预应力锚杆难以望其项背。

2. 基坑方案选型需有利于地下空间的开发利用

在土木工程领域，有人说十九世纪是大桥的世纪，二十世纪是大楼的世纪，二十一世纪

将是地下工程的世纪^[14]。在刚刚跨入二十一世纪的今天，我们似乎已经感触到地下空间的开发利用的热浪扑面而来。近几年，国家斥巨资开展地下空间开发利用的政策、规划、技术研究。随着城市建设理念的转变，城市将更多的利用地下空间，城市交通、公共设施、人居空间、资源存储等等将大量转入地下，各地蒸蒸日上的地铁建设可见一斑。殊不知，我们基坑工程中某些做法却与地下空间开发事业背道而驰。例如，锚杆、土钉的大量使用，使得城市地下变成“蜘蛛网”或“蜂窝窝”，变成了地下空间开发的“绊马索”。再者，锚杆、土钉视红线而不见，如入无人之境，肆无忌惮的侵占了不属于自己的土地，使得邻家主人望“锚”兴叹。此外，锚杆施工对地基土的扰动往往引起地基变形，从而影响其上既有建筑物、市政设施、道路等正常使用。因此，国内个别城市(如上海)明文规定，临时的基坑支护结构与主体结构一视同仁，必须位于自己的用地范围内。笔者认为，该项规定值得各地效法，尤其是有地下空间开发规划的大中城市。而我们岩土工程工作者所能做的，似乎应该是高抬贵手，自觉的不设或少设“绊马索”。

3. 基坑方案选型与地下水环境保护

地下水位降低引起的地面沉降，已属于地质灾害的范畴，在全世界受到了前所未有的重视。水资源的短缺和水质污染在国内诸多城市日益严重。基坑工程如何为解决这些重大问题尽一点微薄之力，似乎有两条途径。第一，不仅要采取科学合理的技术措施，更需要政府与社会各界从行政法规、法律、经济等方面给予配合与支持。如，北京市为加强地下水资源的管理和保护，减少水资源的浪费，防止相关地质灾害，出台了《北京市建设工程施工降水管理办法》限制进行施工降水，自2008年3月1日起执行。第二，基坑工程中的回灌，会造成了地下水水质污染，水质污染又加剧了水资源短缺及供需矛盾，因此在基坑工程中采用回灌需十分慎重，一方面需要岩土工程工作者提高对水资源价值的认识、具有义不容辞的责任感，同样，也更加需要政府从行政法规、法律、经济等方面给予引导与支持。

参考文献

- [1] 国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007-2002
- [2] 国家标准《建筑地基基础施工质量验收规范》GB50202-2002
- [3] 国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010-2002
- [4] 国家行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ120-99
- [5] 国家行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ120 修订送审稿（2008年12月）
- [6] 国家行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ94-2008
- [7] 国家军用标准《土钉支护技术规范》GJB5055-2006
- [8] 国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2002
- [9] 国家行业标准《建筑基坑工程技术规范》YB9258-97
- [10] 北京市地方标准《建筑基坑支护技术规程》DB11/489-2007
- [11] 上海市地方标准《基坑工程设计规程》DBJ08-61-97
- [12] 中国工程建设标准化协会标准《岩土锚杆（索）技术规程》CECS 22: 2005
- [13] 李广信，岩土工程20讲，人民交通出版社
- [14] 卢肇钧等，锚定式支护工程实践中几个问题的探讨，中国铁道科学，1995年9月
- [15] 高大钊，关于岩土力学新分析方法的回顾与思考，工业建筑，2006年第36卷第1期
- [16] 钱七虎，城市可持续发展与地下空间开发利用，地下空间，1998年6月
- [17] 钱七虎，建设特大城市地下快速路和地下物流系统，市政技术，2004年6月
- [18] 程懋堃，结构混凝土的可持续发展以及结构设计的节约，建筑结构，2006年6月
- [19] 孙钧，市区基坑开挖施工的环境土工问题，地下空间，1999年第4期

- [20] 黄熙龄, 谈基坑事故, 岩土工程界, 2004,7(4):10
- [21] 侯学渊, 刘国彬, 黄院雄, 城市基坑工程发展的几点看法, 施工技术, 2000年1月
- [22] 龚晓南, 关于基坑工程的几点思考, 土木工程学报, 2005年9月
- [23] 王卫东等, 上海地区建筑基坑工程的新进展与特点, 地下空间与工程学报, 2005年08月
- [24] 张旷成, 关于抗隆起稳定的计算公式和安全系数取值的考证和研究, 岩土工程学报增刊, 2008年10月
- [25] 郑伟龙等, 城市环境岩土工程的地下水灾害问题, 中国地质灾害与防治学报, 2005年9月
- [26] 陈树铭等, 季节性冻土影响下土钉墙支护体系作用机理探讨, 建筑施工, 2001年第23卷
- [27] 陈叶青等, 基坑土钉支护工程应用中特殊情况的处理及应注意的问题, 工程勘察, 1999年第5期
- [28] 李俊才, 殷雷, 南京地区深基坑支护设计现状及存在的问题
- [29] 范士凯, 论不同地质条件下深基坑的变形破坏类型、主要岩土工程问题及其支护设计对策, 资源环境与工程, 2006年11月
- [30] 宋榜慈等, 武汉地区工程中的地下水问题及其处理对策, 工程勘察, 2004年第5期
- [31] 安明, 太原市基坑支护工程中若干问题的探讨, 山西建筑, 2000年第5期
- [32] 方引晴等, 广州地区基坑支护结构的现状和展望, 土木工程与高新技术——中国土木工程学会第十届年会论文集, 2002年
- [33] 唐传政, 武汉地区老黏性土基坑工程事故分析与处理对策, 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集
- [34] 谢兴南, 南京地区深基坑工程止水措施和应急处理办法, 江苏建筑, 2003年第4期
- [35] 梁俊勋, 南宁市区深基坑主要的岩土工程问题及防治措施浅析, 城市勘测, 2007年第2期
- [36] 李连祥, 朱金德, 于峰, 济南市深基坑工程现状调查报告及发展建议, 西部探矿工程, 2006年第11期