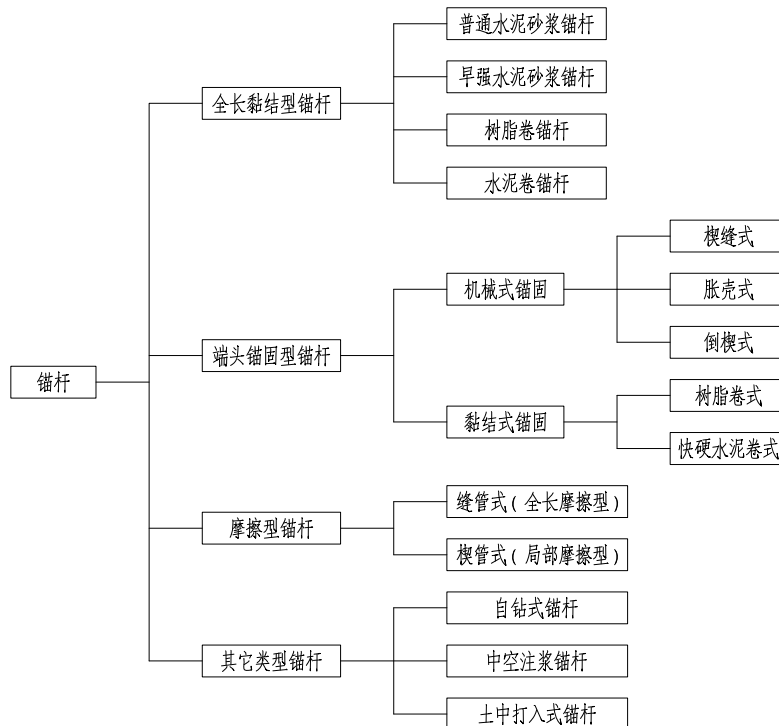


第 17 章 锚杆设计与施工

17.1 概述

锚杆支护作为一种支护方式，与传统的支护方式有着根本的区别，传统的支护方式常常是被动地承受坍塌岩体土体产生的荷载，而锚杆可以主动地加固岩土体，有效地控制其变形，防止坍塌的发生。

由于锚杆支护技术的优越性，我国自 1950 年代开始在煤炭系统使用锚杆以来，目前已在矿山、水电、建筑等工程领域中广泛使用了该项技术。**错误！文档中没有指定样式的文字。**为常见锚杆的类型。



错误！文档中没有指定样式的文字。 锚杆分类

楔缝锚杆、倒楔锚杆是早期发展的锚杆，现应用较少；胀壳锚杆则因结构复杂，成本较高，应用也较少。

17.1.1 锚杆支护的作用原理

锚杆是将受拉杆件的一端（锚固段）固定在稳定地层中，另一端与工程构筑物相联结，用以承受由于土压力、水压力等施加于构筑物的推力，从而利用地层的锚固力以维持构筑物（或岩土层）的稳定。

锚杆外露于地面的一端用锚头固定。一种情况是锚头直接附着结构上并满足结构的稳定；另一种情况通过梁板、格构或其他部件将锚头施加的应力传递于更为宽广的岩土体表面。对于锚固作用原理的认识，可归纳为两种不同的理论。

一种是建立在结构工程概念上，其基本特征是“荷载—结构”模式。把岩土体中可能破坏坍塌部分的重量作为荷载由锚喷支护承担。其中锚杆支护的悬吊理论最具有代表性，该理论要求锚杆长度穿越塌落高度，把坍塌的岩石悬吊起来。这一类型理论是 1970 年代以前发展形成的，是沿着结构工程的概念，采用结构力学的方法来论述的。土层锚杆设计主要还是应用这类理论。

对于岩层锚杆则是建立在岩体工程概念上,充分发挥围岩的自稳能力,防围岩破坏于未然。支护与适时、合理的施工步骤相结合,主要作用在于控制岩体变形和位移,改善岩体应力状态,提高岩体强度,使岩体与支护共同达到新的平衡稳定。这一类型的理论,按照岩体工程概念,采用岩体力学、岩体工程地质学的方法,对岩体进行稳定性分析及锚固支护加固效果分析。该类型理论从 1980 年代初逐步发展完善,更能发挥岩体自身强度高、自稳能力好的优点。

17.1.2 锚杆支护的特点

岩土锚固通过埋设在地层中的锚杆,将结构物与地层紧紧地联系在一起,依赖锚杆与周围地层的抗剪强度传递结构物的拉力或使地层自身得到加固,以保持结构物和岩土体稳定。

与其它支护形式相比,锚杆支护具有以下特点:

1. 提供开阔的施工空间,极大方便土方开挖和主体结构施工。锚杆施工机械及设备的作业空间不大,适合各种地形及场地。

2. 对岩土体的扰动小;在地层开挖后,能立即提供抗力,且可施加预应力,控制变形发展。

3. 锚杆的作用部位、方向、间距、密度和施工时间可以根据需要灵活调整。

4. 用锚杆代替钢或钢筋混凝土支撑,可以节省大量钢材,减少土方开挖量,改善施工条件,尤其对于面积很大、支撑布置困难的基坑。

5. 锚杆的抗拔力可通过试验来确定,可保证设计有足够的安度。

17.1.3 锚杆支护的发展与现状

锚杆支护于 19 世纪末 20 世纪初初现雏形,1950 年代以前,锚杆只是作为施工过程中的一种临时性措施。1950 年代中期,在国外的隧道中开始广泛使用小型永久性的灌浆锚杆喷射混凝土代替以往的隧道衬砌结构。1970 年代开始,国外许多大城市修建地下车站或地下建筑物时,大量采用锚杆与地下连续墙联合支护。锚杆支护技术于 1960 年代引进我国,经过 40 多年的研究与实践,我国锚固技术获得长足的进步,近些年来,发展尤快。近 20 多年来岩土锚固的主要成就和最新发展集中表现在以下几个方面。

1. 应用领域和规模不断扩大

岩土锚固技术除了在地下工程、边坡工程、结构抗浮工程中快速发展外,在重力坝加固工程、桥梁工程中的地层锚固也得到了广泛应用。在三峡水利枢纽工程中,长度 1607m 的船闸边坡处于风化程度不等的闪云斜长花岗岩中,采用 4000 余根长度为 25~61m 设计承载力为 3000kN (部分为 10000kN) 的预应力锚杆和近 10 万根长 8~14m 的高强度锚杆作系统加固或局部加固,对阻止不稳定块体的坍塌,改善边坡的应力状态,控制塑性区的扩展,提高边坡的整体稳定发挥了重要作用。

2. 相关规范标准逐渐完善

1970 年代后,由于岩土锚杆的迅速发展和广泛应用,德国、英国、美国、中国、日本、澳大利亚、国际预应力混凝土协会等许多国家、地区或机构先后制定了锚杆规范与标准,使岩土锚固的应用更规范、安全可靠。

3. 对岩土锚固效应与荷载传递方式的研究取得了很多有价值的成果

中科院岩土所朱维申等人曾进行了不同锚固方案的模型试验,并对岩石锚固效应的非线性进行了有限元分析。冶金部建筑研究总院程良奎、庄秉文等人于 1979 年完成了锚杆加固拱的试验。近年来,冶金部建筑研究总院与长江科学院紧密结合三峡永久船闸高边坡预应力锚固工程,采用多点位移计、声波、钻孔弹模等综合测试方法,研究了高承载力预应力锚索对中微风化花岗岩边坡的开挖损伤区的锚固效应。

在锚杆的荷载传递及分布性态方面,英国的 R.B.Weerasighe、G.S.Littlejohn、R.I.Woods,我国冶金部建设研究总院的程良奎、胡建林,89002 部队的顾金才、明治清等人先后采用模

型试验和现场试验等方法，论证了在张拉荷载作用下，锚杆锚固段长度内的轴力及杆体与注浆体或注浆体与孔壁间的黏结应力分布是极不均匀的。

4. 各种新型锚杆在工程实践中得到大量开发、应用

传统的岩土锚固方法会产生严重的应力集中现象。为了从根本上解决这个问题，国内外对单孔复合锚固方法进行了研究应用。该方法是在同一个钻孔中安装几个单元锚杆，而每个单元锚杆有自己的杆体、自由长度和固定长度，而且承受的荷载也是通过各自的张拉千斤顶施加，并通过预先的位移补偿张拉，而使所有单元锚杆始终承受相同的荷载。使集中荷载分散为几个较小的荷载作用于固定段的不同部位，使黏结应力峰值大大降低，因单元锚固长度很小，不会发生黏结效应逐步弱化，能使黏结应力均匀的分布于整个固定长度上，最大限度的调用整个锚杆固定长度范围内的地层强度，锚杆长度可随固定长度的增加而成比例提高。

为了解决在松软破碎地层中成孔困难、杆体无法安装的难题，自钻式锚杆得到了很大发展。自钻式锚杆杆体是由中空的管材构成，杆体与钻进的钻杆及注浆管合为一体。

为避免锚杆留在土层中成为障碍物，开发了可拆芯式锚杆。当锚杆使用完成后可以拆除杆体，使锚杆的使用不影响周边地块的开发利用。高强玻璃纤维具有轻质、高强、耐腐蚀的特点，因此近年来大量用于制作锚杆杆体。为提高土层锚杆的承载力，各种类型的扩孔锚杆也得到了大量应用。

5. 锚杆的承载力水平大幅度提高

加固和加高混凝土重力坝最适用和经济的方法是采用后张的岩石锚杆。近些年来，用于加固重力坝的锚杆的极限承载力、长度和锚固力的集中度稳步增长。

在三峡水利枢纽工程和李家峡水电站中应用了承载力达 10000kN 的预应力锚杆^[2,11]。在锦屏水电站工程中锚杆的成孔深度达 120m^[11]。

6. 施工机械、施工工艺不断发展

高压气动钻机、扩孔钻头、自锁式锚具、高承载力张拉千斤顶等得到了开发应用。套管跟进解决了松散地层及高水位下砂土中的成孔难题。采用二次或多次灌浆可提高土层与注浆体的黏结强度，提高锚杆的抗拔承载力。

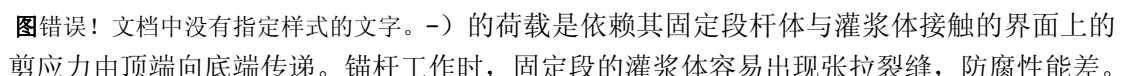
我国沿海经济发达地区大面积分布着深厚淤泥质土，含水量高、孔隙比大、强度低、灵敏度高，成孔较困难。技术人员通过改造施工工艺，取得了成功：采用液压钻机慢转速钻进，尽可能减少钻进过程对锚固地层的扰动；用泥浆循环冲洗，排除孔内残土；设土工布注浆袋、采用二次注浆；一般 18m 长锚杆的抗拔力大于 120kN，使得锚杆在淤泥质土中也极具应用价值。

17.2 常用锚杆类型

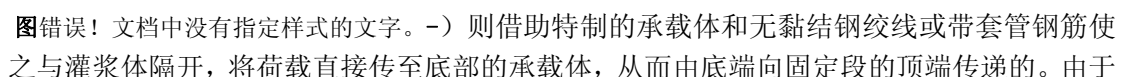
17.2.1 拉力型锚杆与压力型锚杆

锚杆受荷后，杆体总是处于受拉状态。拉力型与压力型锚杆的主要区别在于锚杆受荷后其固定段内的灌浆体分别处于受拉或者受压状态。

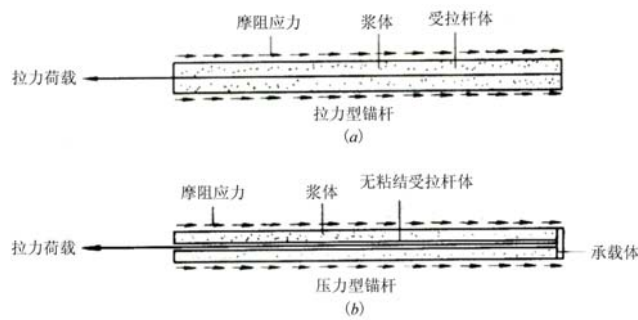
拉力型锚杆（如（a）拉力型锚杆；（b）压力型锚杆

图错误！文档中没有指定样式的文字。-) 的荷载是依赖其固定段杆体与灌浆体接触的界面上的剪应力由顶端向底端传递。锚杆工作时，固定段的灌浆体容易出现张拉裂缝，防腐性能差。

压力型锚杆（如（a）拉力型锚杆；（b）压力型锚杆

图错误！文档中没有指定样式的文字。-) 则借助特制的承载体和无黏结钢绞线或带套管钢筋使之与灌浆体隔开，将荷载直接传至底部的承载体，从而由底端向固定段的顶端传递的。由于

其受荷时固定段的灌浆体受压，不宜开裂，防腐性能好，适用于永久性锚固工程。



(a) 拉力型锚杆；(b) 压力型锚杆

图错误！文档中没有指定样式的文字。-2 拉力型和压力型锚杆示意图

在同等荷载条件下，拉力型锚杆固定段上的应变值要比压力型锚杆的大。但是，压力型锚杆的承载力受到灌浆体抗压强度的限制，如仅采用一个承载体，则承载力不太高。

17.2.2 单孔单一锚固与单孔复合锚固

1. 单孔单一锚固

传统的拉力型与压力型锚杆均属于单孔单一锚固体系。在一个钻孔中只安装一根独立的锚杆，尽管可由多根钢绞线或钢筋构成锚杆杆体，但只有一个统一的自由长度和锚固长度。由于灌浆体与岩土体的弹性特征很难协调一致，因此不能将荷载均匀传递到锚固长度上，会出现严重的应力集中现象。随着锚杆荷载增大，在荷载传至锚固段末端之前，在杆体与灌浆体或灌浆体与地层界面上就会发生黏结效应逐渐弱化或脱开的现象，大大降低地层强度的利用率。

目前工程中采用的单孔单一锚固型锚杆大多为拉力集中型锚杆，其锚固体在工作时受拉，易开裂，为地下水的渗入提供通道，对防腐极其不利，严重影响锚杆的使用寿命。

2. 单孔复合锚固

单孔复合锚固体系是在同一钻孔中安装几个单元锚杆，而每个单元锚杆均有自己的杆体、自由长度和锚固长度，而且承受的荷载也是通过各自的张拉千斤顶施加，并通过预先的补偿张拉（补偿每个单元在同等荷载下因自由长度不等而引起的位移差）而使所有单元锚杆始终承受相同的荷载。由于将集中力分散为若干个较小的力分别作用于长度较小的锚固段上，使得锚固段上的黏结应力峰值大大减小且分布均匀，能最大限度的调用锚杆整个范围内的地层强度。此锚固系统的锚固长度理论上是没有限制的，锚杆承载力可随锚固长度的增加而增加。

单孔复合锚固体系中最具有使用价值的是压力分散型锚杆。它最早由英国人研究成功。近 10 多年来，这种锚杆在日本得到很大发展，被命名为 KTB 工法，主要用于永久边坡工程。我国冶金部建筑研究总院、长江科学院等单位于 1997 年在国内首次开发了这种压力分散型锚杆，并对其工作特性进行了较系统深入的研究，取得了满意的效果。单孔复合锚固压力分散型锚杆的灌浆体分段受压，对孔壁产生均匀径向力，使黏结强度增大；受荷时，灌浆体受压，不易开裂，预应力钢筋外有防腐层，耐久性好；能拆除锚杆芯体，不影响锚杆所处地层的后期开发。

17.2.3 扩张锚根固定的锚杆

采用扩张锚根的方法来提高锚杆承载力是十分有效的。其摩阻面积的增大对提高承载力有一定作用，但更主要的是突出部分的地层对锚杆拔出的抗力。

扩张锚根固定的锚杆主要有两种形式，一种是仅在锚根底端扩张成一个大的扩体，称为底端扩体型锚杆；另一种是在锚根（锚固体）上扩成多个扩体，称为多段扩体型锚杆。

底端扩体型锚杆主要用于黏性土中，因为黏性土中形成的孔穴不易坍塌。钻孔底端的孔

穴，可用配有绞刀的专用钻机或在钻孔内放置少量炸药爆破形成。用钻机钻孔的主要问题是清除孔穴内的松散物料；而用爆破方法来扩张钻孔又只能适应埋置较深的锚杆，因为接近地面（深度小于5m）会加大周围土体的破坏区，影响锚杆的固定强度。

多段扩体型锚杆是采用特制的扩孔器在锚固段上扩成多个圆锥形扩体，每个圆锥体的承载力可达200~300kN。

17.2.4 可回收（可拆芯）锚杆

可回收锚杆是指用于临时性工程加固的锚杆，在工程完成后可回收预应力钢筋。可回收锚杆施工使用经过特殊加工的张拉材料、注浆材料和承载体，可分为以下三类：

1. 机械式可回收锚杆：将锚杆体与机械的联结器联结起来，回收时施加与紧固方向相反力矩，使杆体与机械联结器脱离后取出。如采用全长带有螺纹的预应力钢筋作为拉杆，拆除时，先用空心千斤顶卸荷，然后再旋转钢筋，使其撤出。其构造如图 错误！文档中没有指定样式的文字。所示，它由三部分组成：锚固体、带套管全长有螺纹的预应力钢筋、传荷板。

2. 化学式可回收锚杆：

如用高热燃烧剂将拉杆熔化切断法，在锚杆的锚固段与自由段的连接处先设置有高热燃烧剂的容器，拆除时，通过引燃导线点火，将锚杆在该处熔化切割拔出，见图 错误！文档中没有指定样式的文字。，为用高热燃烧剂将拉杆的一部分熔化。也有采用燃烧剂将拉杆全长去除。

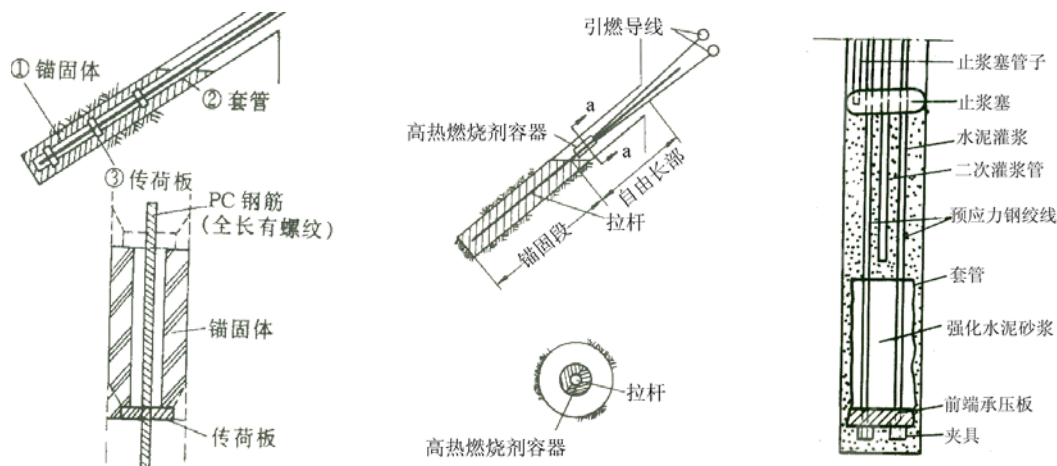


图 错误！文档中没有指定样式的文字。-3 利用螺纹拆除拉杆构造图 图 错误！文档中没有指定样式的文字。
图 错误！文档中没有指定样式的文字。-4 燃烧剂设置 图 错误！文档中没有指定样式的文字。-5 使夹具滑落拆除法构造断面图

3. 力学式可回收锚杆：

如使夹具滑落拆除锚杆法，采用预应力钢绞线作为拉杆，靠前在前端的夹具，将荷载传递给锚固体。见 图 错误！文档中没有指定样式的文字。-，设计时，保证在外力 A 作用下，夹具绝对不会脱落。拆除时，可施加远远大于 A 的外力 B （但此力必须在PC钢绞线极限荷载85%以内），使夹具脱落，从而拔出拉杆。

图 错误！文档中没有指定样式的文字。-为一种采用U型承载体的压力分散型锚杆，采用无黏结钢绞线，使钢绞线与注浆体隔离，将无黏结钢绞线绕过U型承载体弯曲成U型固定在承载体上。回收时分别对每一承载体的钢绞线进行回收，先卸除锚具内同一钢绞线两端头的夹片，对钢绞线的一端用小型千斤顶施加拉力，在钢绞线一端被拉出的同时，另一端的钢绞线被拉入孔内、绕过U型承载体后再被拉出孔外。

另有一种装置是对锚杆施加超限应力使锚杆破损而清除，或在锚固体中心处设置一个用合成树脂制成的芯子，用专门拆除用的高速千斤顶，可快速地抽芯并隔离PC钢筋的黏着力。



图错误！文档中没有指定样式的文字。-6 U型载体可拆芯锚杆端部构造图

17.2.5 其它锚杆

1. 自钻式（自进式）锚杆

自钻式锚杆由中空螺纹杆体、钻头、垫板螺母、连接套和定位套组成。钻杆即锚杆杆体，在强度很低和松散地层中钻进不需退出，并可利用中空杆体注浆，避免普通锚杆钻孔后坍塌卡钎及插不进杆体的缺点，先锚后注浆，可提高注浆效果。自钻式锚杆价格较高，限制了它的推广。

2. 中空注浆锚杆

中空注浆锚杆是自钻式锚杆的简化和改型，在钻孔完成后安设，取消了钻头，并将杆体材料由合金钢改为碳素钢，保留了杆体是全螺纹无缝钢管以及有连接套、金属垫板、止浆塞等特点，使其仍可先锚后注浆，继承了注浆压力高、加固效果好等优点，而价格约比自钻式锚杆低 1/2~2/3。

3. 土中打入式锚杆

土中打入式锚杆也是一种将钻孔、锚杆安装、注浆、锚固合而为一的锚杆，锚杆体使用等截面的钢管取代钢筋。该锚杆的锚固力主要由钢管表面与地层之间的摩擦力提供，钢管一定长度的范围内按一定的密度布置透浆孔，透浆孔的直径一般为 6~8mm，通过钢管杆体进行压力注浆可提高锚固力。该锚杆施工速度快、能及时提供锚固力，可用于各类土层，特别适用于如卵石层、砂砾层、杂填土和淤泥等难以成孔的地层。

17.3 锚杆内的荷载传递

17.3.1 从杆体到灌浆体的荷载传递

由于岩体与杆体（钢绞线、钢丝、钢筋）的强度特性较容易掌握，因而杆体与灌浆体、灌浆体与地层间的结合就成为主要研究内容。况且，灌浆体与岩层间的黏结是岩层锚固中最薄弱的环节，这种黏结包括以下三个因素：

（1）黏着力。即杆体钢材表面与灌浆体间的物理黏结。当锚固段发生位移时，这种抗力会消失。

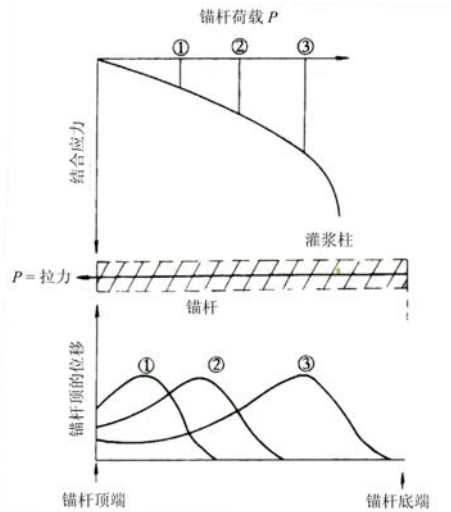
（2）机械连锁。由于钢筋有螺纹、凹凸等存在，故在灌浆体中形成机械连锁，同黏着力一起发生作用。

（3）摩擦力。这种摩擦力的形成与夹紧力及钢材表面的粗糙度成函数关系。摩擦力系数的量值取决于摩擦力是否发生在沿接触面位移之前或位移过程中。

大量试验证实，随着对锚杆施加荷载的增加，杆体与灌浆体结合应力的最大值移向固定段的下端，并以渐进的方式发生滑动并改变结合应力的分布。图错误！文档中没有指定样式的文字。-表明，随着杆内荷载的增加，沿锚固长度以类似于摩擦桩的方式转移结合应力。黏着力并不作用在整个锚固长度段上，黏着力最初仅在锚固段的近端发生作用；当近端的黏

着力被克服时就会产生滑动，大部分结合应力逐渐传入锚固段远端，而锚固段近端的摩擦力只起很小的作用。

锚杆杆体的锚固长度越短，越能发挥杆体与灌浆体的结合力。但锚杆的锚固长度必须使杆体与灌浆体间的结合应力发挥有足够的储备，以保证杆体与灌浆体界面上不发生破坏。



图错误！文档中没有指定样式的文字。-7 加荷过程中沿锚杆长度结合应力的变化

17.3.2 各类岩土层中锚杆的荷载传递特点

1. 岩石中的锚杆

锚杆灌浆体与锚杆孔壁岩石间的黏结力取决于岩石与灌浆体的强度、孔壁的粗糙度及清孔质量。随着锚固长度的增大，所要求的黏结强度就会按比例降低。

一般认为，可按岩石无侧限抗压强度的 10%来粗略估计灌浆体与岩石间的极限黏结力。

实验证明拉力沿锚杆长度传递到岩层的应力分布是不均匀的。在荷载作用下，锚杆近端的黏结力先发挥作用，随着荷载的增大，锚杆近端的黏结局部破坏，并随着荷载进一步增大，黏结破坏逐渐向锚杆根部发展。

2. 砂性土中的锚杆

砂性土的锚杆，灌浆体与土体的黏结强度通常大于土体的抗剪强度。这是由于水泥浆的渗透，使实际的锚固体直径大于钻孔的直径；同时，由于水泥浆的高压渗透的使得锚固体表面产生横向压力，提高了土体与锚固体间的摩擦力。德国 Ostermayer 证实锚固体表面的法向应力可以增大到上覆盖土层所产生应力的 2~10 倍。

Ostermayer 指出，当锚固长度超过 7m 后，锚杆的极限抗拔力增长较小，在砂性土中锚杆的最佳长度为 6~7m。并提出在砂性土中临界锚固长度为 6m，超过这一长度极限抗拔力增加有限（错误！未找到引用源。）。

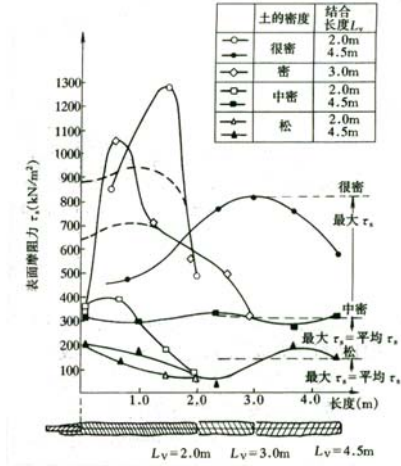
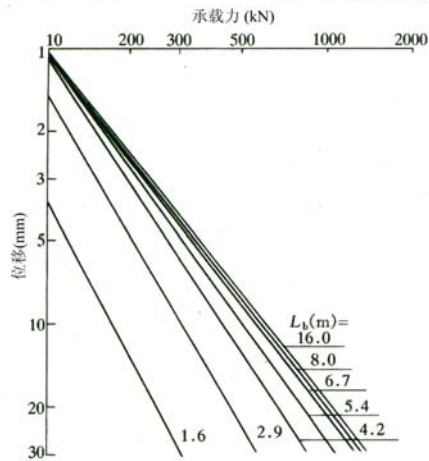
从 Ostermayer 和 Scheele 得到的试验曲线（错误！未找到引用源。、错误！未找到引用源。）可得到如下结论：

(1) 很密的砂的最大表面摩擦力值分布在很短的锚杆长度范围内；但在松砂和中密砂中，摩擦力的分布接近于理论假定的均匀分布的情况。

(2) 随着荷载的增加，摩擦力峰值向锚杆根部转移。

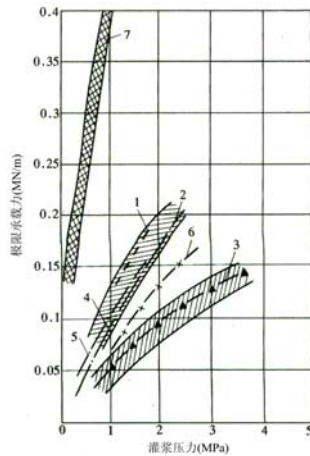
(3) 较短锚杆的摩擦力平均值大于较长锚杆表面的平均值。

(4) 砂的密实度对锚杆承载力关系极大，从松砂到密实的砂，其表面摩擦力值要增加 5 倍。



图错误！文档中没有指定样式的文字。-8 砂土中锚杆长度对锚杆的承载力及位移的影响 图错误！文档中没有指定样式的文字。-9 在极限状态下量测的表面摩阻力分布 (Lb—锚固长度)

注浆压力对砂土中锚杆承载力的影响很大。试验表明，当注浆压力不超过 4MPa 时，锚杆承载力随着灌浆压力的增大而增大（错误！未找到引用源。）。



1—比利时布鲁塞尔地区的中砂；2—泥灰质石灰岩；3—泥灰岩；4—法国塞纳河的河流沉积物；5—带黏土的砾石或砂子；6—软质白垩沉积物；7—硬石灰岩

图错误！文档中没有指定样式的文字。-10 锚杆承载力与注浆压力的关系

3. 黏性土中的锚杆

黏性土中锚杆锚固体与黏土的平均摩阻力随土的强度增加和塑性减小而增加，随锚固长度增加而减小。在进行二次或多次灌浆后，水泥浆液在锚固段周边土体中渗透、扩散，形成水泥石，提高了土体的抗剪强度和锚固体与土的摩阻力。灌浆压力越高、灌浆量越大，则锚固体与土之间的摩阻力增加幅度越大。

17.3.3 群锚效应

群锚中锚杆的间距较小，锚杆之间要发生相互影响。岩石的力学性质与土体相差很大，在两者中产生的群锚效应结果有较大区别。基坑工程用到的主要是土层锚杆，故以下讨论土层锚杆的群锚效应。

Hanna.T.H 认为，锚杆群的数学问题跟群桩基本相同。Yilmaz.M 及 Larnach.W.J 及 McMullan.D.J 的室内试验表明，锚杆簇中各锚杆的荷载分布是不均匀的，锚杆群的承载效率低于单根锚杆的承载效率。这是由于锚杆群中任一根锚杆的工作性状都明显不同于孤立锚杆，通过群锚传到土层中的张拉力，在土层中会产生应力重叠，互相干涉，从而降低了孔壁

对锚杆的侧阻力。因此必须限制锚杆的最小间距。

关于软土地层中土层锚杆的群锚效应研究，同济大学的侯学渊课题组曾作过一系列研究。范敬飞^[7]通过室内模型试验，在硕士论文中定性地讨论了锚固长度、锚杆间距、锚杆数目等因素对群锚效应的影响；通过简化假设，推导了群锚的效应系数，并用材料力学方法求得了群锚的位移。肖昭然等^[8]综合计算桩的剪切位移法和传递函数方法，提出了一种计算群锚荷载传递的方法：剪切位移-传递函数综合法，并研究了锚的间距、锚的数目对群锚的变形特性和侧壁摩阻力发挥的影响。戴运祥^[9]等以弹性理论为依据，在博士论文中以Mindlin解为基础，对软地层中斜拉锚杆群的受力机理进行了较为全面的理论研究，并着重讨论了锚杆长度、半径、间距、倾斜度、弹性模量、锚杆入土深度、土性、时间以及施工方法等因素对群锚效应的影响。研究表明，增加土层锚杆的长度、间距、入土深度、直径和弹性模量，可以减小群锚位移，但是这些因素的增加对减少群锚位移是有限度的。施工方法的改进，如采用二次压浆，也可以有效地减少群锚位移，提高群锚的承载力。

Murakami.H.et.al^[10]对大阪地区黏土层中一大型锚杆支护基坑（四排锚杆）进行了现场实测研究，并讨论了卸锚所产生的荷载重分布情况。他们认为，当锚杆被拉断所出现的荷载重分布情况，依赖于土质条件、墙体的截面和墙体的横向弯曲刚度。

在目前的设计规范中，由于理论还远远落后于工程实践，为了避免群锚效应的发生，只能给出如下建议性的措施：

- (1) 采用不同倾角的锚杆，使锚杆的锚固体在土层深部张开。
- (2) 采用不同的锚杆长度，使锚杆的锚固段在土层深部前后错开。
- (3) 在不同平面上布设锚杆，特别是多排锚杆，上下排锚杆宜错开布置在不同平面上，以增大锚杆锚固体之间的间距。

在条件具备时，可采用同时张拉3~5根锚杆的方法，对锚杆的承载力进行现场原型检验，并根据试验结果的数据进行整体稳定性的校核。

17.4 锚杆的设计

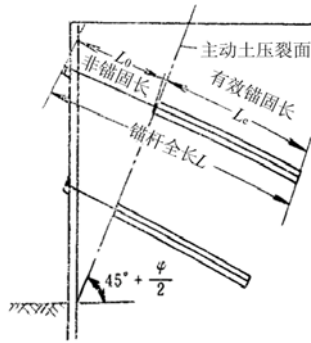
17.4.1 规划与设置

1. 单根锚杆设计拉力的确定

单根锚杆的设计拉力需根据施工技术能力、岩土层分布情况等因素来确定。过去锚杆以较大孔径、较高承载力为主，但施工机械要求高，施工难度大，可靠性差。若有施工质量问题时，补强施工难度大。故设计确定单根锚杆的设计拉力时不宜过高。设计拉力较高时宜选用单孔复合锚固型锚杆、扩孔锚杆等受力性能较好的锚杆。

2. 锚杆位置的确定

锚杆的锚固区应当设置在主动土压力楔形破裂面以外，见**错误！未找到引用源。**。要根据地层情况来确定锚杆的锚固区，以保证锚杆在设计荷载下正常工作。锚固段需设置在稳定的地层以确保有足够的锚固力。同时，如采用压力灌浆时，应使地表面在灌浆压力作用下不破坏，一般要求锚杆锚固体上覆土层厚度不宜小于4m。



错误！未找到引用源。 锚杆的长度

3. 锚固体设置间距

锚杆间距应根据地层情况、锚杆杆体所能承受的拉力等进行经济比较后确定。间距太大，将增加腰梁应力，需增加腰梁断面；缩小间距，可使腰梁尺寸减小，但锚杆会发生相互干扰，产生群锚效应，使极限抗拔力减小而造成危险。现有的工程实例有缩小锚杆间距的倾向。因在锚杆较密集时，若其中一根锚杆承载能力受影响，其所受荷载会向附近其他锚杆转移，整个锚杆系统所受影响较小，整体受力还是安全的。

锚杆的水平间距不宜小于 1.5m，上下排垂直间距不宜小于 2m。如果工程需要必须设置更近，可考虑设置不同的倾角及锚固长度以避免群锚效应的影响。

4. 锚杆的倾角

一般采用水平向下 15°-25°倾角，不应大于 45°。锚杆水平分力随锚杆倾角的增大而减小。倾角太大将降低锚固的效果，而且作用于支护结构上的垂直分力增加，可能造成挡土结构和周围地基的沉降。为有效利用锚杆抗拔力，最好使锚杆与侧压力作用方向平行。

锚杆的具体设置方向与可锚岩土层的位置、挡土结构的位置及施工条件等有关。锚杆倾角应避免与水平面的夹角为 -10°~+10°这一范围，因为倾角接近水平的锚杆注浆后灌浆体的沉淀和泌水现象会影响锚杆的承载能力。

5. 锚杆的层数

锚杆层数根据土压力分布大小、岩土层分布、锚杆最小垂直间距等而定，还应考虑基坑允许变形量和施工条件等综合因素。

当预应力锚杆结合钢筋混凝土支撑或钢支撑支护时，需考虑到预应力锚杆与钢筋混凝土支撑或钢支撑的水平刚度及承载能力的不同，尤其是锚杆与钢筋混凝土支撑的受力特性不同：锚杆可先主动施加预应力，在围护桩（墙）变形前就可提供承载力、限制变形；而钢筋混凝土支撑是被动受力，在围护桩（墙）变形使得支撑受压后支撑才会受力、阻止变形进一步发展。确定锚杆与支撑的间距时，既要控制好围护桩（墙）变形，又要充分发挥围护桩（墙）的抗弯、抗剪能力和支撑抗压承载力高的优势，合理分配锚杆和支撑承担的荷载。

6. 锚杆自由长度的确定

锚杆自由长度的确定必须使锚杆锚固于比破坏面更深的稳定地层上，以保证锚杆系统的整体稳定性；使锚杆能在张拉荷载作用下有较大的弹性伸长量，不致于在使用过程中因锚头松动而引起预应力的明显衰减。《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-99)中规定锚杆自由长度不宜小于 5m 并应超过潜在滑裂面 1.5m。

7. 锚杆的安全系数

锚杆设计中应考虑两种安全系数：对锚固体设计和对杆体筋材截面尺寸设计的安全系数。锚固体设计的安全系数需考虑锚杆设计中的不确定因素及风险程度，如岩土层分布的变化、施工技术可靠性、材料的耐久性、周边环境的要求等。锚杆安全系数的取值取决于锚杆服务年限的长短和破坏后影响程度（见错误！未找到引用源。）。

锚杆破坏后危害程度	最小安全系数	
	锚杆服务年限≤2年	锚杆服务年限>2年
危害轻微，不会构成公共安全问题	1.4	1.8
危害较大，但公共安全无问题	1.6	2.0
危害大，会出现公共安全问题	1.8	2.2

注：本表取自中华人民共和国国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001)。

我国《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086-2001)规定，锚杆杆体筋材截面尺寸设计安全系数，临时锚杆为 1.6，永久锚杆为 1.8。主要是因为锚杆张拉后预应力筋的各股钢绞线受力往往是不均匀的。另外张拉后若锚头位移继续增大，则预应力筋的拉伸量增加，相应的预应力筋受力也会增大。

8. 锚杆杆体筋材的设计

锚杆杆体筋材宜用钢绞线、高强钢丝或高强精轧螺纹钢。因其抗拉强度高，可减少钢材用量；钢绞线、钢丝运输安装方便，在狭窄空间也可施工；强度高，而钢材的弹性模量差不多，故张拉到设计值时的张拉变形大，使得因锚头松动等原因使杆体变形减小时，由于变形减小部分占已变形部分的比例小，预应力损失相对较小。

当锚杆承载力值较小或锚杆长度小于 20m 时，预应力筋也可采用 II 级、III 级钢筋。

压力分散型锚杆及对穿型锚杆的预应力筋应采用无黏结钢绞线。无黏结钢绞线是近几年开发的预应力筋材，具有优异的防腐和抗震性能，它由钢绞线、防腐油脂涂层和聚乙烯或聚丙烯包裹的外层组成，是压力分散型锚杆的必用筋材。

锚杆预应力筋的截面面积应按下式设计

$$A = \frac{K \cdot N_t}{f_{ptk}} \quad (17-1)$$

式中 N_t ——锚杆轴向拉力设计值；
 K ——安全系数；
 f_{ptk} ——钢绞线、钢丝或钢筋的抗拉强度标准值；
 A ——锚杆杆体筋材的截面积。

17.4.2 杆体材料

1. 锚杆杆体材料的基本要求

锚杆杆体可使用各种钢筋、高强钢丝、钢绞线、中空螺纹钢管等钢材来制作，岩土锚固工程对锚杆杆体有如下要求：

(1) 强度高。在锚杆的张拉和使用过程中，受多种因素影响，会产生预应力损失，而钢材强度越高，预应力损失率越小。

(2) 较好的塑性和良好的加工性能。由于锚杆要在相当长的时间内保持预加应力，最理想的是在具有高强度的同时也具有少量量的松弛损失，要求预应力筋具有足够的塑性性能。在施工过程中，预应力筋不可避免地会产生弯曲，在锚具中会受到较高的局部应力，要求钢材满足一定的拉断伸长率和弯折次数的规定。对钢筋还需有良好的焊接性能。

(3) 耐腐蚀性好，尤其是对永久性锚杆。

(4) 几何尺寸误差小，便于控制预加应力。

(5) 钢绞线要求伸直性好，便于穿索，有利施工，在不绑扎的情况下切断应不易松散。

2. 锚杆杆体材料

预应力值较低或非预应力的锚杆通常采用普通钢筋，即 II 级、III 级热轧钢筋、冷拉热

轧钢筋、热处理钢筋及冷轧带肋钢筋、中空螺纹钢材等。预应力值较大的锚杆通常采用高强钢丝和钢绞线，有时也采用精轧螺纹钢筋或中空螺纹钢材。

无黏结预应力钢丝、钢绞线采用 7 根直径 5mm 的碳素钢丝或 7 根 5mm (4mm) 的钢丝绞成的钢绞线为母材，外包挤压涂塑而成的聚乙烯或聚丙烯套管，内涂防腐建筑油脂，经挤压后，塑料包裹层一次成型在钢丝束或钢绞线上。

高强度精轧螺纹钢筋是在整根钢筋上轧有外螺纹的大直径、高强度、高尺寸精度的直条钢筋，它由 40Si₂MnV 或 45SiMnV 高强钢材轧制而成，在任意截面处都能拧上带有内螺纹的连接器或带螺纹的螺帽进行接长，连接简便，黏着力强，张拉锚固安全可靠，施工方便。

自钻式锚杆采用的中空筋材系具有国际标准螺纹的钢管，可根据需要接长锚杆，利用钢管中孔作为注浆通道，将锚杆钻孔放杆、注浆、锚固在一个过程中一次完成。

近年来还出现了用等截面钢管代替锚杆杆体，采用打入式安装，将锚杆的钻孔、放杆、注浆、锚固几个工序在一个过程中一次完成。特别适合于卵石层、砂砾层、杂填土和淤泥等难以成孔的地层。

自钻式玻璃纤维锚杆采用玻璃纤维作拉杆，具有以下特点：轻质、高强、耐腐蚀，抗震强度低，脆性，机械、爆破可断，不会成为地下障碍物。但需注意玻璃纤维的弹性模量仅为 4~5×10⁴MPa，比钢材的弹性模量小得多，比混凝土略大，故采用高强玻璃纤维锚杆的变形比采用钢材锚杆时要大。若基坑周边环境对变形要求较高，则对采用高强玻璃纤维锚杆进行支护应慎重。若必须使用高强玻璃纤维锚杆，应考虑适当增加高强玻璃纤维的截面。由于高强玻璃纤维的抗剪强度较低，在竖向变形较大的区域应慎用，以免因竖向变形过大造成杆体剪断。

3. 钢材的松弛

预应力钢材的松弛，是指钢材受到一定的张拉力以后，在长度与温度保持不变的条件下，预应力筋中的拉应力随时间而发生的降低，这种应力的降低称为松弛损失。当初始拉应力不超过 0.5f_{pu} 时，松弛损失很小，一般可忽略不计；但随着初始预应力或温度的提高，松弛损失有剧烈的增长。

错误！未找到引用源。 1000h 时预应力钢材的松弛值 (%)

σ_{pi}/f_{pu}	0.6	0.7	0.8
FIP, 普通松弛	4.5	8	12
FIP, 低松弛	1	2	4.5
ASTMA416 及 A421, 低松弛	—	2.5	3.5

钢筋的松弛，在承受初拉力的初期发展快，第一小时内松弛量最大，24h 内完成约 50% 以上，将以递减速率而延续数年，持续数十年才能完成。为此，通常以 1000h 试验确定的松弛损失，乘以放大系数作为结构使用寿命的长期松弛损失。松弛还取决于钢材的种类和等级。根据设计的需要，预应力钢材可分为普通松弛及低松弛两大类。低松弛损失值约为普通松弛的 1/4。每类钢材在各种初应力（以初始拉应力 σ_{pi} 与抗拉强度 f_{pu} 的比值表示）下，温度为 20℃ 经 1000h 的最大松弛值列于错误！未找到引用源。错误！未找到引用源。。由表可见，初应力愈高，松弛损失愈大。50 年的长期松弛损失可取用等于 1000h 的 3 倍，在预应力锚固结构中，钢材应力随时间的减小不仅因为松弛，还有岩土体徐变引起的影响。考虑钢材松弛与岩土体徐变作用的锚杆预应力损失可通过降低使用荷载或通过超张拉予以减少。

4. 杆体防腐性能

高强度预应力钢材腐蚀的程度与后果要比普通钢材严重得多。因为其直径相对较小，较小的锈蚀就能显著减小钢材的横截面积，引起应力增加。不同的钢材对腐蚀的灵敏程度是不同的，对腐蚀引起的后果应预先估计并采取相应的预防措施。

5. 自由段套管和波纹套管

自由段套管有以下两个功能：

(1) 用于杆体（钢筋、钢绞线、钢丝）的防腐，阻止地下水通过注浆体向锚杆杆体渗透；

(2) 将锚杆体与周围注浆体隔离，使锚杆杆体能自由伸缩。

自由段套管的材料常采用聚乙烯、聚丙烯或聚丙稀。套管应具有足够的厚度、柔性和抗老化性能，并能在锚杆工作期间抵抗地下水等对锚杆体的腐蚀。

波纹套管有以下两个功能：

(1) 锚杆锚固段长度内杆体的防腐，即使锚固段灌浆体出现开裂，也可阻止地下水渗入；

(2) 保证锚固段应力向地层的有效传递。波纹管可使管内的注浆体与管外的注浆体形成相互咬合的沟槽，以使杆体的应力通过注浆体有效地传入地层。

波纹套管使用具有一定韧性和硬度的塑料或金属制成。

17.4.3 锚固体设计

1. 概述

锚固设计就是针对特定的地层条件和锚杆形式，确定锚杆承载能力和锚杆长度。为了使锚杆的应力能传入稳定的地层，通常采用下列方法：

- (1) 用机械装置把锚索固定在坚硬稳定的地层中；
- (2) 用注浆体把锚固段锚杆体与孔壁黏结在一起；
- (3) 用扩大锚头钻孔等手段把锚固段固定在稳定地层中。

锚杆性能很大程度上取决于所锚固地层性质，而地层的变化极其复杂，不可能用一个简单的公式来准确计算锚固力。锚固设计仅用于设计者初步设计时估算锚杆锚固力。通常需通过现场试验来确定锚杆在特定地层中的锚固力和锚固性能。

锚杆在破坏时，常表现为以下几种破坏形式：

- (1) 沿着锚杆体与注浆体接合处破坏；
- (2) 沿着注浆体与地层接合处破坏；
- (3) 由于埋入稳定地层中的深度不够而使地层呈锥体状剪坏；
- (4) 由于锚杆体强度不足而出现断裂破坏；
- (5) 锚固段注浆体被压碎或破裂；
- (6) 整体支护力不够而出现锚杆群的破坏。

锚杆在最大承载力范围内工作时，应避免以上破坏形式的出现。在掌握好地层的力学性质和锚杆与地层相互作用特性的前提下，合理设计锚杆类型、锚固形式。

2. 锚固设计的一般要求

(1) 锚杆设计应在调查、试验、研究的基础上，充分考虑锚固区地层的工程地质、水文地质条件和工程的重要性。

(2) 在满足工程使用功能的条件下，应确保锚固设计具有安全性和经济性。

(3) 确保锚杆施加于结构或地层上的预应力不对结构物本身和相邻结构物产生不利影响，锚固体产生的位移应控制在允许范围内。

(4) 永久锚杆的有效寿命不应小于被加固结构物的服务年限。

(5) 设计采用的锚杆均应在进行锚固性能试验后才能用于工程加固。

(6) 锚固设计结果与试验结果有较大差别时，应在调整锚固设计参数后重新进行试验。

3. 锚杆锚固体的设计^[2]

(1) 拉力型锚杆的圆柱状锚固体
锚杆的极限锚固力

$$P = K \cdot N_t = \pi \cdot D \cdot L \cdot q_t \quad (17-2)$$

$$P = K \cdot N_t = n \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot \zeta \cdot q_s \quad (17-3)$$

则锚固段长度可按下列公式计算，并取其中的较大值

$$L = \frac{K \cdot N_t}{\pi \cdot D \cdot q_r} \quad (17-4)$$

$$L = \frac{K \cdot N_t}{n \cdot \pi \cdot d \cdot \zeta \cdot q_s} \quad (17-5)$$

式中 L ——锚杆锚固段长度；

N_t ——锚杆轴向拉力设计值；

K ——安全系数，按**错误！未找到引用源。**选取；

D ——锚固体直径；

d ——单根钢筋或钢绞线直径；

n ——钢绞线或钢筋根数；

q_r ——灌浆体与地层间的黏结强度设计值，可取 0.8 倍标准值；

q_s ——灌浆体与钢绞线或钢筋间的黏结强度设计值，可取 0.8 倍标准值；

ζ ——采用 2 根或 2 根以上钢绞线或钢筋时，筋材与灌浆体间黏结强度降低系数，取 0.6~0.85。

错误！未找到引用源。、**错误！未找到引用源。**、**错误！未找到引用源。**分别为我国有关标准中建议的岩土体与灌浆体、灌浆体与钢筋间的黏结强度。

错误！未找到引用源。 岩石与水泥结石体之间的黏结强度标准值

岩石种类	岩石单轴饱和抗压强度 (MPa)	岩石与水泥石间的黏结强度标准值 (MPa)
硬岩	60	1.5~3.0
中硬岩	30~60	1.0~1.5
软岩	5~30	0.3~1.0

注：黏结长度小于 6.0m；本表取自中华人民共和国国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086-2001)。

错误！未找到引用源。 土体与锚固体极限摩阻力标准值

土的名称	土的状态	q_{sik} (kPa)
填土		16~20
淤泥		10~16
淤泥质土		16~20
黏性土	$I_L > 1$	18~30
	$0.75 < I_L \leq 1$	30~40
	$0.50 < I_L \leq 0.75$	40~53
	$0.25 < I_L \leq 0.50$	53~65
	$0.0 < I_L \leq 0.25$	65~73
	$I_L \leq 0$	73~80
粉土	$e > 0.90$	22~44
	$0.75 < e \leq 0.90$	44~64
	$e < 0.75$	64~100

粉细砂	稍密	22~42
	中密	42~63
	密实	63~85
中砂	稍实	54~74
	中实	74~90
	密实	90~120
粗砂	稍实	90~130
	中实	130~170
	密实	170~220
砾砂	中密、密实	190~260

注：1. 表中 q_{sik} 系采用直孔一次常压灌浆工艺计算值；当采用二次灌浆、扩孔工艺时可适当提高。
2. 本表取自中华人民共和国行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-99)。

错误！未找到引用源。 钢筋、钢绞线与水泥浆之间的黏结强度标准值

类型	黏结强度标准值 (MPa)
水泥结石体与螺纹钢筋之间	2.0~3.0
水泥结石体与钢绞线之间	3.0~4.0

注：1. 黏结长度小于 6.0m。

2. 水泥结石体抗压强度标准值不小于 M30。

3. 本表取自中华人民共和国国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086-2001)。

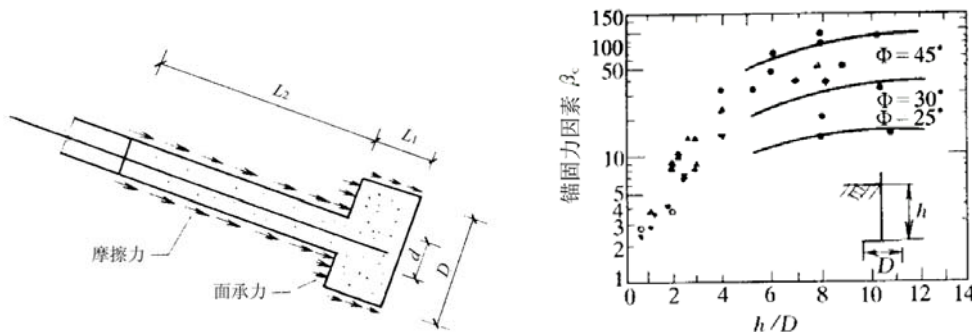
土层锚杆与锚固段长度不宜小于 4m，也不宜大于 15m。岩石锚杆的锚固段长度不应小于 3m，不宜大于 45D 和 6.5m，或 55D 和 8m（对预应力锚杆）。对软质岩石中的预应力锚杆，可根据地区经验确定最大锚固长度。

(2) 拉力型锚杆的扩体型锚固体^[2]

a 砂土中的扩体型锚固体

端部扩体型锚杆的抗拔力由摩擦力与面承力两部分组成。

砂土中端部扩体型锚固体的面承力计算可近似地借用国外砂土中锚锭板抗拔力计算成果。Mitsch 和 Clemence (1985 年) 从锚锭板的试验结果发现，埋置深度 h 与圆板直径 D 之比与锚固力因子间的线性关系只能维持到 $h/D=10$ 左右，当 h/D 继续增加时，则 β_c 即趋于定值，不再受 h/D 比值的影响。而 β_c 也随砂土摩擦角的增大而增大（**错误！未找到引用源。**）。



错误！未找到引用源。 端部扩体型锚杆

错误！未找到引用源。 砂

土中锚杆锚固力因子

砂土中锚杆扩体型锚固体的极限锚固力可按下式计算

$$P = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \beta_c \cdot \gamma \cdot h + \pi \cdot D \cdot L_1 \cdot q_r + \pi \cdot d \cdot L_2 \cdot q_r \quad (17-6)$$

则在外力作用下锚固体长度由下式求得

$$K \cdot N_t = \gamma \cdot h \cdot \beta_c \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} + \pi \cdot D \cdot L_1 \cdot q_r + \pi \cdot d \cdot L_2 \cdot q_r \quad (17-7)$$

式中

P ——锚杆极限锚固力；

N_t ——锚杆轴向拉力设计值；

D 、 d 、 L_1 、 L_2 ——锚固体结构尺寸；

q_r ——灌浆体与地层间的黏结强度；

γ ——岩土的重力密度；

h ——扩体上覆的地层厚度；

b 黏土中的扩体型锚固体

黏土中的扩体型锚固体的极限锚固力可按下式求得

$$P = \pi \cdot D \cdot L_1 \cdot c_u + \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \beta_c \cdot c_u + \pi \cdot d \cdot L_2 \cdot q_r \quad (17-8)$$

则锚固体长度可由下式求得：

$$K \cdot N_t = \pi \cdot D \cdot L_1 \cdot c_u + \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \beta_c \cdot c_u + \pi \cdot d \cdot L_2 \cdot q_r \quad (17-9)$$

式中

P ——锚杆极限锚固力；

N_t ——锚杆轴向拉力设计值；

K ——安全系数

β_c ——锚固力因子，取 9.0；

q_r ——灌浆体与地层间的黏结强度；

c_u ——地层不排水抗剪强度；

D 、 d 、 L_1 、 L_2 ——锚固体结构尺寸；

锚固力因子 β_c 取 9.0，是因为黏土中的锚锭板抗拔试验结果表明，当埋置深度 h 与锚

锭板直径 D 之比大于 6 时， β_c 趋于定值，该数值约为 9.0。

(3) 压力分散型锚杆的锚固体[2]

压力分散型锚杆由若干个单元锚杆组成。其锚固体的尺寸设计应同时满足锚固体局部抗压承载力和锚固灌浆体与周边地层间的黏结摩阻力的要求。

a 锚固体承压面积

$$P/n = 1.5 A_p \cdot \beta \cdot \zeta \cdot f_c \quad (17-10)$$

式中

P ——压力分散型锚杆的总承载力；

n ——单元锚杆数;

A_p ——单元锚杆承载体与灌浆体接触面积;

β ——锚固段灌浆体局部受压时强度提高系数。 $\beta = (A / A_p)^{0.5}$, A 为灌浆体截面
积;

ζ ——锚固段灌浆体受压时侧向地层约束力作用的抗压强度提高系数, 由试验确
定;

f_c ——灌浆体轴心抗压强度标准值。

b 锚固体长度

$$P = \pi \cdot D \cdot L_1 q_{f_1} + \pi D \cdot L_2 \cdot q_{f_2} + \pi D \cdot L_3 \cdot q_{f_3} + \dots \quad (17-11)$$

式中

P ——压力分散型锚杆的总承载力;

D ——锚固体直径;

L_1 、 L_2 、 L_3 ——各单元锚杆的锚固段长度;

q_{f_1} 、 q_{f_2} 、 q_{f_3} ——各单元锚杆锚固段灌浆体与周边地层间的黏结摩阻强度。

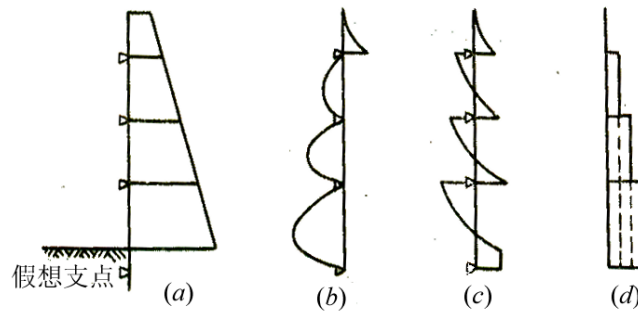
17.4.4 锚杆支护系统

1. 挡土壁应力分析

常用的有两种: 一是简支梁法, 见**错误! 未找到引用源。**, 将锚杆头部作为支点, 各支
点之间按简支梁考虑; 二是连续梁法, 见**错误! 未找到引用源。**, 将锚杆头部作为支点, 按
一根连续梁考虑。

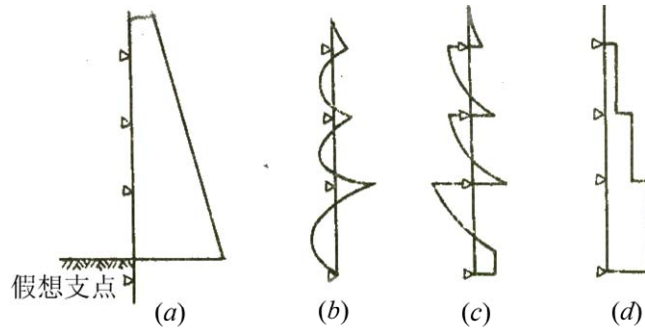
其他还有较复杂的假想支点法、弹性法、弹塑性法等。

需要指出的是, 由于锚杆不是水平的, 而有一定倾斜, 挡土壁上作用有轴力(竖向力)。
因此, 一般挡墙只要考虑弯矩、剪力, 而锚杆工程的挡土壁需要考虑弯矩、剪力和轴力。



(a) 荷重; (b) 弯矩; (c) 剪力; (d) 轴力

错误! 未找到引用源。 简支梁法



(a) 荷重; (b) 弯矩; (c) 剪力; (d) 轴力

错误! 未找到引用源。 连续梁法

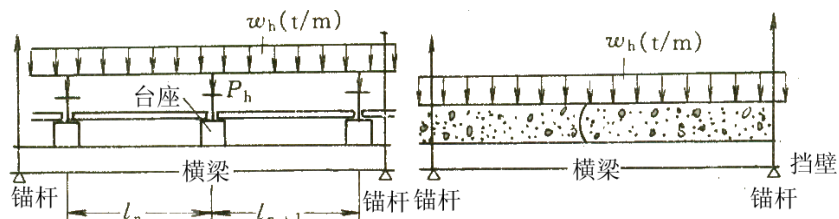
2. 挡土壁断面计算

挡土壁可以是工字钢立柱加横板、钢板桩、钢管板桩、预制钢筋混凝土桩柱、挖孔桩或地下连续墙等。设计时只要注意有轴力作用, 就可以按一般要求进行断面计算, 但允许应力值应参照有关规范中的规定采用。

3. 腰梁设计

(1) 荷载

有两种情况: 一是荷载通过台座传递给腰梁, 见错误! 未找到引用源。(a), 在台座处作用集中荷载; 二是腰梁与挡壁全面接触, 见错误! 未找到引用源。(b), 作用均布荷载。



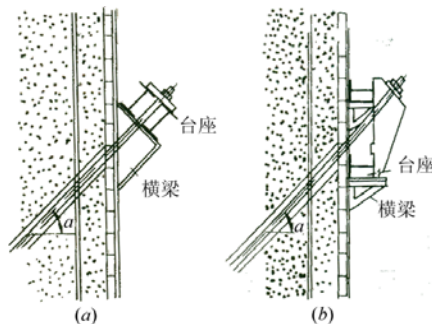
(a) 工字钢横档板; (b) 连续墙挡壁

错误! 未找到引用源。 横梁荷载

(2) 应力计算

以锚杆位置作为支点, 对上述荷载可按简支梁进行弯矩及剪力计算。

需要注意的是, 腰梁有两种设置方法, 一种是斜的, 如错误! 未找到引用源。(a) 与锚杆轴向一致; 另一种是水平的, 如错误! 未找到引用源。(b), 与锚杆轴向成 α 角; 则后一种情况的集中荷重 $P=P_h/\cos\alpha$; P_h 为前一种情况的水平方向集中荷重。



(a) 与锚杆轴向一致; (b) 与锚杆轴向成 α 角

错误! 未找到引用源。 横梁设置方式

(3) 断面计算

腰梁材料一般为型钢(工字钢)或钢筋混凝土。钢的腰梁可按承受弯矩及剪力的钢梁设

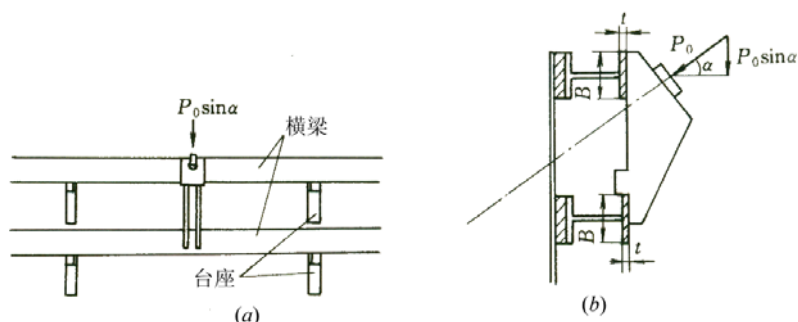
计：钢筋混凝土的腰梁，则按一般钢筋混凝土梁设计。但是，钢腰梁水平设置时，如**错误！未找到引用源。**所示，锚杆作用力的竖向分力 $P_0 \sin \alpha$ ；作用于腰梁上。以后座位置为支点，按简支梁法计算弯矩、剪力时，必须针对最大弯矩 M_v 及最大剪力 Q_v 进行以下验算：

$$\sigma_b = \frac{M_v}{z} = \frac{3M_v}{tB^2} \leq f_b \quad (17-12)$$

$$\sigma_s = \frac{Q_v}{2tB} \leq f_s \quad (17-13)$$

式中

- σ_b ——弯曲应力；
- σ_s ——剪应力；
- Z ——锚杆头部侧翼的断面系数 (mm^3)；
- t ——翼厚 (mm)；
- B ——翼宽 (mm)；
- f_b ——允许弯曲应力 (N/mm^2)；
- f_s ——允许剪应力。

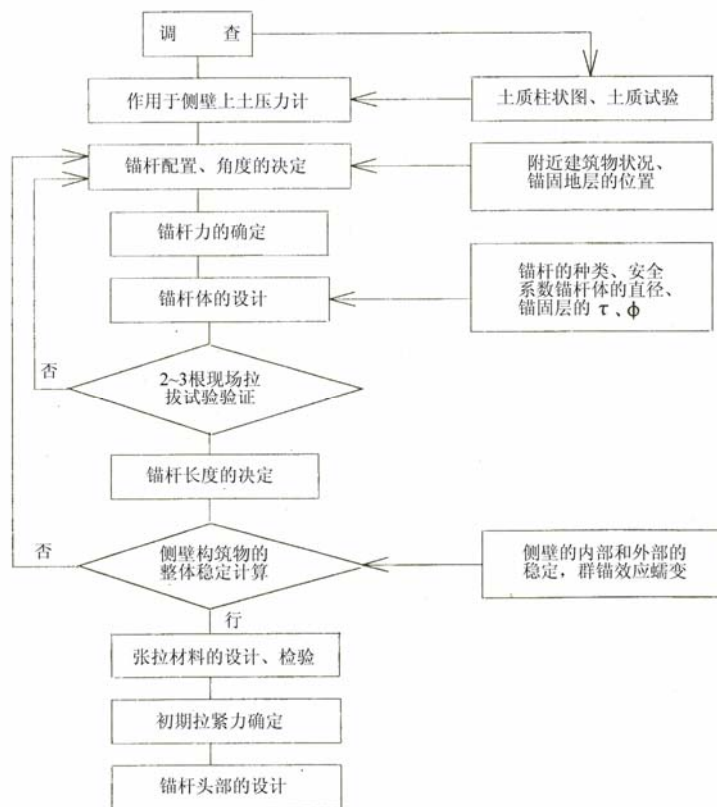


错误！未找到引用源。 横梁水平设置情况

(4) 台座式混凝土支座

台座是腰梁与挡壁的连接部件。台座承受很大的竖向力，设计时特别要对焊接长度进行仔细验算。如采用地下连续墙作为挡土壁时，也可以不设置腰梁，用混凝土支座将锚杆直接固定在墙上。对这种情况，应根据承压程度决定支座底面积大小，并校核支座在竖向作用下的抗下滑稳定。

综上所述，以基坑支护为例，锚杆的设计程序如下框图所示：



17.5 锚杆的施工

锚杆的施工质量是决定锚杆承载力能否达到设计要求的关键。应根据工程的交通运输条件、周边环境情况、施工进度要求、地质条件等，选用合适的施工机械、施工工艺，组织好人员、材料，高效、安全、高质量地完成施工任务。

17.5.1 施工组织设计

为满足设计要求做成可靠的锚杆，必须综合对锚杆使用的目的、环境状况、施工条件等详细制订施工组织设计。锚杆是在复杂的条件下，而且又在不能直接观察的状况下进行，属隐蔽工程，应根据设计书的要求和调查试验资料，制订切实可行的施工组织设计。锚固工程的施工组织设计一般应包括以下项目：

1. 工程概况：工程名称、地点、工期、工程量、工程地质和水文地质情况等；现场供水、供电、施工场地条件、施工空间等；
2. 设计对锚固工程的要求；
3. 锚固工程材料；
4. 施工机械；
5. 施工组织；
6. 施工平面布置及临时设施；
7. 施工程序及各工种人员的配备；
8. 工程进度计划；
9. 施工管理及质量控制计划；
10. 安全、卫生管理计划；
11. 应交付工程验收的各种技术资料；

12. 编制施工管理程序示意图。

17.5.2 钻孔

锚杆孔的钻凿是锚固工程质量控制的关键工序。应根据地层类型和钻孔直径、长度以及锚杆的类型来选择合适的钻机和钻孔方法。

在黏性土钻孔最合适的是带十字钻头和螺旋钻杆的回转钻机。在松散土和软弱岩层中，最合适的是带球形合金钻头的旋转钻机。在坚硬岩层中的直径较小钻孔，适合用空气冲洗的冲击钻机。钻直径较大钻孔，需使用带金刚石钻头和潜水冲击器的旋转钻机，并采用水洗。

在填土、砂砾层等塌孔的地层中，可采用套管护壁、跟管钻进。也可采用自钻式锚杆或打入式锚杆。

跟管钻进工艺主要用于钻孔穿越填土、砂卵石、碎石、粉砂等松散破碎地层。通常用锚杆钻机钻进，采用冲击器、钻头冲击回转全断面造孔钻进，在破碎地层、造孔的同时，冲击套管管靴使得套管与钻头同步进入地层，从而用套管隔离破碎、松散易坍塌的地层，使得造孔施工得以顺利进行（**错误！未找到引用源。**）。跟管钻具按结构型式分为两种类型：偏心式跟管钻具和同心跟管钻具。同心跟管钻具使用套管钻头，壁厚较厚，钻孔的终孔直径比偏心式跟管钻具的终孔直径小 10mm 左右。偏心式跟管钻具的终孔直径大（大于套管直径），结构简单、成本低、使用较方便。

17.5.3 锚杆杆体的制作与安装

1. 锚杆杆体的制作

钢筋锚杆（包括各种钢筋、精轧螺纹钢、中空螺纹钢管）的制作相对比较简单，按设计预应力筋长度切割钢筋，按有关规范要求对焊或绑条焊或用连接器接长钢筋和用于张拉的螺丝杆。预应力筋的前部常焊有导向帽以便于预应力筋的插入，在预应力筋长度方向每隔 1~2m 焊有对中支架，支架的高度不应小于 25mm，必须满足钢筋保护层厚度的要求。自由段需外套塑料管隔离，对防腐有特殊要求的锚固段钢筋提供双重防腐作用的波形管并注入灰浆或树脂。



错误！未找到引用源。 锚杆钻机进行跟管钻进施工

错误！未找到引用源。

源。 U 型承载体构造

钢绞线通常为一整盘方式包装，宜使用机械切割，不得使用电弧切割。杆体内的绑扎材料不宜采用镀锌材料。钢绞线分为有黏结钢绞线和无黏结钢绞线，有黏结钢绞线锚杆制作时应在锚杆自由段的每根钢绞线上施作防腐层和隔离层。

压力分散型锚杆采用无黏结钢绞线、特殊部件和工艺加工制作。**错误！未找到引用源。**为一种钢制 U 型承载体构造，将无黏结钢绞线绕过承载体弯曲成 U 型固定在承载体上，制成压力分散型锚杆。也可采用挤压锚头作为承载体形成压力分散型锚杆。

可重复高压灌浆锚杆采用环轴管原理设置注浆套管和特殊的密封及注浆装置，可重复实现对锚固段的高压灌浆处理，大大提高锚杆的承载力。注浆套管是一根直径较大的塑料管，

其侧壁每隔 1m 开有环向小孔，孔外用橡胶环圈盖住，使浆液只能从该管内流入钻孔，但不能反向流动，一根小直径的注浆钢管插入注浆套管，注浆钢管前后装有限定注浆段的密封装置，当其位于一定位置的注浆套管的橡胶圈处，在压力作用下即可向钻孔内注入浆液。

2. 锚杆的安装

锚杆安装前应检查钻孔孔距及钻孔轴线是否符合规范及设计要求。

锚杆一般由人工安装，对于大型锚杆有时采用吊装。在进行锚杆安装前应对钻孔重新检查，发现塌孔、掉块时应进行清理。锚杆安装前应对锚杆体进行详细检查，对损坏的防护层、配件、螺纹应进行修复。在推送过程中用力要均匀，以免在推送时损坏锚杆配件和防护层。当锚杆设置有排气管、注浆管和注浆袋时，推送时不要使锚杆体转动，并不断检查排气管和注浆管，以免管子折死、压扁和磨坏，并确保锚杆在就位后排气管和注浆管畅通。在遇到锚索推送困难时，宜将锚索抽出查明原因后再推送。必要时应对钻孔重新进行清洗。

3. 锚头的施工

锚具、垫板应与锚杆体同轴安装，对于钢绞线或高强钢丝锚杆，锚杆体锁定后其偏差应不超过 $\pm 5^\circ$ 。垫板应安装平整、牢固，垫板与垫墩接触面无空隙。

切割锚头多余的锚杆体宜采用冷切割的方法，锚具外保留长度不应小于 100mm。当需要补偿张拉时，应考虑保留张拉长度。

打筑垫墩用的混凝土标号一般大于 C30，有时锚头处地层不太规则，在这种情况下，为了保证垫墩混凝土的质量，应确保垫墩最薄处的厚度大于 10cm，对于锚固力较高的锚杆，垫墩内应配置环形钢筋。

17.5.4 注浆体材料及注浆工艺

注浆是为了形成锚固段和为锚杆提供防腐保护层，一定压力的注浆还可以使注浆体渗入地层的裂隙和缝隙中，从而起到固结地层、提高地基承载力的作用。水泥砂浆的成分及拌制和注入方法决定了灌浆体与周围岩土体的黏结强度和防腐效果。

1. 水泥浆的成分

灌注锚杆的水泥浆通常采用质量良好新鲜的普通硅酸盐水泥和干净水掺入细沙配制搅拌而成的，必要时可采用抗硫酸盐水泥。水泥龄期不应超过一个月，强度应大于 32.5MPa。压力型锚杆最好采用更高强度的水泥。

水中不应含有影响水泥正常凝结和硬化的有害物质，不得使用污水。砂的含泥量按重量计不得大于 3%，砂中云母、有机物、硫酸物和硫酸盐等有害物质的含量按重量计不得大于 1%。灰砂比宜为 0.8~1.5，水灰比宜为 0.38~0.5。也可采用水灰比 0.4~0.5 的纯水泥浆。水泥砂浆只能用于一次注浆。

水灰比对水泥浆的质量有着特别重要的作用，过量的水会使浆液产生泌水，降低强度并产生较大收缩，降低浆液硬化后的耐久性，灌注锚杆的水泥浆最适宜的水灰比为 0.4~0.45，采用这种水灰比的灰浆具有泵送所要求的流动度，收缩也小。为了加速或延缓凝固，防止在凝固过程中的收缩和诱发膨胀，当水灰比较小时增加浆液的流动度及预防浆液的泌水等，可在浆液中加入外加剂，如三乙醇胺（早强剂，掺量为水泥重量的 0.05%）、木质磺酸钙（缓凝剂，水泥重量的 0.2%~0.5%）、铝粉（膨胀剂，水泥重量的 0.005%~0.02%）、UNF-5（减水剂，水泥重量的 0.6%）、纤维素醚（抗泌剂，水泥重量的 0.2%~0.3%）。因使用外加剂的经验有限，不要同时使用数种外加剂以获得水泥浆的综合效应。向搅拌机加入任何一种外加剂，均须在搅拌时间过半后送入；拌好的浆液存放时间不得超过 120min。浆液拌好后应存放于特制的容器内，并使其缓慢搅动。

浆体的强度一般 7d 不应低于 20MPa，28d 不应低于 30MPa；压力型锚杆浆体强度 7d 不应低于 25MPa，28d 不应低于 35MPa。

2. 注浆工艺

水泥浆采用注浆泵通过高压胶管和注浆管注入锚杆孔，注浆泵的操作压力范围为 0.1~12MPa，通常采用挤压式或活塞式两种注浆泵，挤压式注浆泵可注入水泥砂浆，但压力较小，仅适用于一次注浆或封闭自由段的注浆。注浆管一般是直径 12~25mm 的 PVC 软塑料管，管底离钻孔底部的距离通常为 100~250mm，并每隔 2m 左右就用胶带将注浆管与锚杆预应力筋相连。在插入预应力筋时，在注浆管端部临时包裹密封材料以免堵塞，注浆时浆液在压力作用下冲破密封材料注入孔内。

注浆常分为一次注浆和二次高压注浆两种注浆方式。一次注浆是浆液通过插到孔底的注浆管、从孔底一次将钻孔注满直至从孔口流出的注浆方法。这种方法要求锚杆预应力筋的自由段预先进行处理，采取有效措施确保预应力筋不与浆液接触。

二次高压注浆是在一次注浆形成注浆体的基础上，对锚杆锚固段进行二次（或多次）高压劈裂注浆，使浆液向周围地层挤压渗透，形成直径较大的锚固体并提高锚杆周围地层的力学性能，大大提高锚杆承载能力。通常在一次注浆后 4~24h 进行，具体间隔时间由浆体强度达到 5MPa 左右而加以控制。该注浆方法需随预应力筋绑扎二次注浆管和密封袋或密封卷，注浆完成后不拔出二次注浆管。二次高压注浆非常适用于承载力低的软弱土层中的锚杆。

注浆压力取决于注浆的目的和方法、注浆部位的上覆地层厚度等因素，通常锚杆的注浆压力不超过 2MPa。

锚杆注浆的质量决定着锚杆的承载力，必须做好注浆记录。采用二次注浆时，尤其需做好二次注浆时的注浆压力、持续时间、二次注浆量等记录。

17.5.5 张拉锁定

1. 锚具

锚杆的锚头用锚具通过张拉锁定，锚具的类型与预应力筋的品种相适应，主要有以下几种类型：用于锁定预应力钢丝的墩头锚具、锥形锚具；用于锁定预应力钢绞线的挤压锚具，如：JM 锚具、XM 锚具、QM 锚具和 OVM 锚具；用于锁定精轧螺纹钢的精轧螺纹钢锚具；用于锁定中空锚杆的螺纹锚具；用于锁定钢筋的螺丝杆锚具。

锚具应满足分级张拉、补偿张拉等张拉工艺要求，并具有能放松预应力筋的性能。

2. 垫板

锚杆用垫板的材料一般为普通钢板，外形为方形，其尺寸大小和厚度应由锚固力的大小确定，为了确保垫板平面与锚杆的轴线垂直和提高垫墩的承载力，可使用与钻孔直径相匹配的钢管焊接成套筒垫板。

3. 张拉

当注浆体达到设计强度的 80%后可进行张拉。一次性张拉较方便，但是这种张拉方法存在着许多不可靠性。因为高应力锚杆有许多根钢绞线组成，要保证每一根钢绞线受力的一致性是不可能的，特别是很短的锚杆，其微小的变形可能会出现很大的应力变化，需采用有效施工措施以减小锚杆整体的受力不均匀性。

采用单根预张拉后再整体张拉的施工方法，可以大大减小应力不均匀现象。另外，使用小型千斤顶进行单根对称和分级循环的张拉方法同样有效，但这种方法在张拉某一根钢绞线时会对其他的钢绞线产生影响。分级循环次数越多，其相互影响和应力不均匀性越小。在实际工程中，根据锚杆承载力的大小一般分为 3~5 级。

考虑到张拉时应力向远端分布的时效性，以及施工的安全性，加载速率不宜太快，并且在达到每一级张拉应力的预定值后，应使张拉设备稳压一定时间，在张拉系统出力值不变时，确信油压表无压力向下漂移后再进行锁定。

张拉应力的大小应按设计要求进行，对于临时锚杆，预应力不宜超过锚杆材料强度标准值的 65%，由于锚具回缩等原因造成的预应力损失采用超张拉的方法克服，超张拉值一般为设计预应力的 5%~10%，其程序为

$$0 \longrightarrow m\sigma_{\text{con}} \xrightarrow{\text{稳压 } t_{\text{min}}} m\sigma_{\text{con}} \longrightarrow \sigma_{\text{con}}$$

式中 m —超张拉系数，105%~110%；

σ_{con} —设计预应力；

t_{min} —最小稳压时间，一般大于 2min。

为了能安全地将锚杆张拉到设计应力，在张拉时应遵循以下要求：

(1) 根据锚杆类型及要求，可采取整体张拉、先单根预张拉然后整体张拉或单根-对称-分级循环张拉方法；

(2) 采用先单根预张拉然后整体张拉的方法时，锚杆各单元体的预应力值应当一致，预应力总值不宜大于设计预应力的 10%，也不宜小于 5%；

(3) 采用单根-对称-分级循环张拉的方法时，不宜少于三个循环，当预应力较大时不宜少于四个循环；

(4) 张拉千斤顶的轴线必须与锚杆轴线一致，锚环、夹片和锚杆张拉部分不得有泥沙、锈蚀层或其他污物；

(5) 张拉时，加载速率要平缓，速率宜控制在设计预应力值的 0.1/min 左右，卸荷载速率宜控制在设计预应力值的 0.2/min；

(6) 在张拉时，应采用张拉系统出力与锚杆体伸长值来综合控制锚杆应力，当实际伸长值与理论值差别较大时，应暂停张拉，待查明原因并采取相应措施后方可进行张拉；

(7) 预应力筋锁定后 48h 内，若发现预应力损失大于锚杆拉力设定值的 10%，应进行补偿张拉。

(8) 锚杆的张拉顺序应避免相近锚杆相互影响。

(9) 单孔复合锚固型锚杆必须先对各单元锚杆分别张拉，当各单元锚杆在同等荷载条件下因自由长度不等引起的弹性伸长差得到补偿后，方可同时张拉各单元锚杆。先张拉最大自由长度的单元锚杆，最后张拉最小自由长度的单元锚杆，再同时张拉全部单元锚杆。

(10) 为了确保张拉系统能可靠的进行张拉、其额定出力值一般不应小于锚杆设计预应力值的 1.5 倍。张拉系统应能在额定出力范围内以任一增量对锚杆进行张拉，且可在中间相对应荷载水平上进行可靠稳压。

17.5.6 配件

锚杆配件主要为导向帽、隔离支架、对中支架和束线环。

导向帽主要用于钢绞线和高强钢丝制作的锚杆，其功能是便于锚杆推送。导向帽由于在锚固段的远端，即便腐蚀也不会影响锚杆性能，所以其材料可使用一般的金属薄板或相应的钢管制作。

隔离支架作用是使锚固段各钢绞线相互分离，以保证使锚固段钢绞线周围均有一定厚度的注浆体覆盖。

对中支架用于张拉段，其作用是使张拉段锚杆体在孔中居中，以使锚杆体被一定厚度的注浆体覆盖。隔离支架和对中支架位于锚杆体上，均属锚杆的重要配件。永久锚杆的隔离和对中装置应使用耐久性和耐腐蚀性良好、且对锚杆体无腐蚀性的材料，一般宜选用硬质材料。

17.5.7 锚杆的腐蚀与防护

锚杆防腐处理的可靠性及耐久性是影响锚杆使用寿命的重要因素之一。防腐处理应保证锚杆各段内不出现杆体材料局部腐蚀现象。

永久性锚杆的防腐处理应符合下列规定：

(1) 非预应力锚杆的自由段位于土层中时，可采用除锈、刷沥青船底漆、沥青玻纤布缠裹其层数不少于二层。

(2) 对采用钢绞线、精轧螺纹钢制作的预应力锚杆，其自由段可按上述第(1)条进行防腐处理后装入套管中；自由段套管两端 100~200mm 长度范围内用黄油填充，外绕扎工程胶布固定；

(3) 对于无腐蚀性岩土层的锚固段应除锈，砂浆保护层厚度不小于 25mm；

(4) 对位于腐蚀性岩层内的锚杆的锚固段和非锚固段，应采取特殊防腐处理；

(5) 经过防腐处理后，非预应力锚杆的自由段外端应埋入钢筋混凝土构件 50mm 以上；对预应力锚杆，其锚头的锚具经除锈、涂防腐漆后应采用钢筋网罩、现浇混凝土封闭，且混凝土强度等级不低于 C30，厚度不小于 100mm，混凝土保护层厚度不应小于 50mm。

临时性锚杆的防腐可采取下列处理措施：

(1) 非预应力锚杆的自由段，可采用除锈后刷沥青防锈漆处理；

(2) 预应力锚杆的自由段，可采用除锈后刷沥青防锈漆或加套管处理；

(3) 外锚头可采用外涂防腐材料或外包混凝土处理。

锚杆可自由拉伸部分的隔离防护层主要由塑料套管和油脂组成，油脂的作用是润滑和防腐。临时锚杆可以使用普通黄油，但用于永久性工程的锚杆，不宜使用黄油，因为黄油中还有水分和对金属腐蚀的有害元素，当油脂老化时将分离出水和皂状物质，使原来的油脂失去润滑作用，所以永久锚杆应选用无黏结预应力筋专用防腐润滑脂。

垫板下部的防腐处理不应影响锚杆的性能，对于自由段，防腐处理后的锚杆体应能自由收缩，对垫板下部注入油脂，且要求油脂充满空间。

17.6 锚杆施工对周边环境的影响及预防措施

施工前应详细调查周边建筑、关系的分布情况，锚杆布置时应留出一定距离，以免施工时破坏。

锚杆成孔过程中若施工不当易造成塌孔，甚至引起水土流失，影响周边道路管线、建筑物的正常使用。例如粉砂土地基中，在地下水位明显高于锚杆孔口时，若不采取针对措施直接钻孔，则粉砂土在水流作用下易塌孔、流砂，土颗粒大量流失造成周边地面沉陷，严重时影响基坑安全。可在孔口外接套管斜向上引至一定高度、套管内灌水保持水压平衡后再钻进；或采用全套管跟管钻进。

在软土地基中，由于土体强度较低，若上覆土层厚度较小，在注浆压力作用下，易造成土体强度破坏后隆起、开裂。故在注浆时，应合理选定注浆压力、稳压时间、注浆工艺（一次或多次注浆、间隔注浆的合理顺序等）、注浆量等。

应制定合理的锚杆张拉顺序、张拉应力，避免后张拉的锚杆影响前期已张拉的锚杆。

锚杆的防腐处理极其重要，尤其对于使用时间较长的锚杆。因腐蚀破坏不易发觉，一旦发生，往往会酿成严重事故。

17.7 锚杆的试验和预应力的变化

17.7.1 试验目的与种类

设计所采用的大多为经验参数，而岩土层的分布、钻孔、注浆等影响因素十分复杂，故各项锚杆工程在正式施工前必须进行现场拉拔试验，目的是为了判明施工的锚杆能否满足设计要求的性能，若不能满足时，应及时修改设计或采取补救措施，以保证锚杆工程的安全。

锚杆工程需要进行的试验有三种：

(1) 常规性试验：在施工情况已知的条件下，确定锚杆该如何可靠地建造且按预期的方式起作用，必须对所有的材料按国家标准进行检验。如钢材、锚头、张拉设备、防锈保护

系统、拉杆的焊接、制造、装配、灌浆、砂浆强度、现场操作、机械设备等问题。这一系列试验包括了所有施工应用的项目，通常由施工单位进行。

(2) 现场试验：选择与施工锚杆相同的地层地段进行现场拉拔试验、锚杆群锚效果试验、长期蠕变性能、抗震耐力试验等。这些试验工作一般要求在锚杆工程施工前进行。

(3) 检验试验：对已施工的锚杆进行确认检验。各国所制定的标准草案中均有明确规定，是一种常规的验收要求。

1. 基本试验

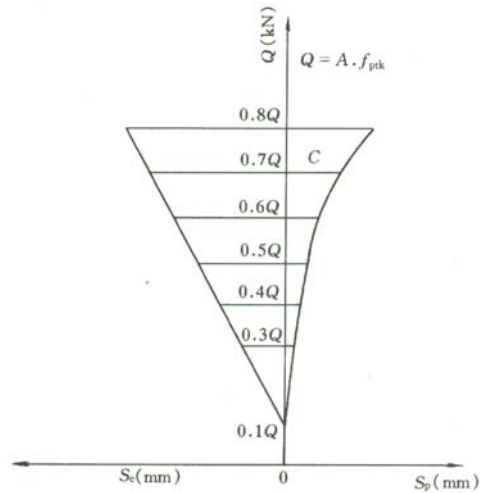
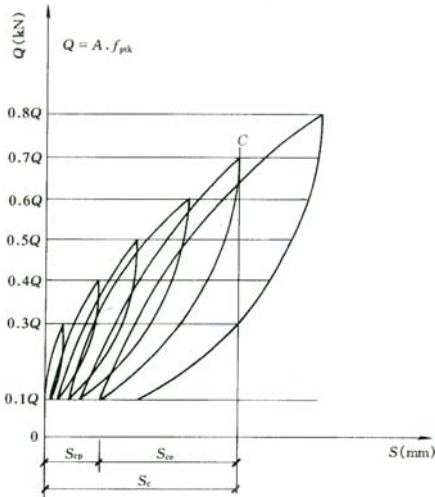
任何一种新型锚杆或已有锚杆品种用于未曾用过的地层时，均应进行基本试验。基本试验的目的是确定锚杆的极限承载力，检验锚杆的设计和施工方法能否满足工程要求，掌握锚杆抵抗破坏的安全程度，揭示锚杆在使用过程中可能影响其承载力的缺陷，以便在正式使用锚杆前调整锚杆结构参数或改进锚杆制作工艺。

预应力锚杆的基本试验应遵守下列规定：

- (1) 基本试验锚杆数量不得少于 3 根。
- (2) 基本试验所用的锚杆结构、施工工艺及所处的工程地质条件应与实际工程所采用的相同。
- (3) 基本试验最大的试验荷载不宜超过锚杆杆体承载力标准值的 0.9 倍。
- (4) 基本试验应采用分级加、卸载法。拉力型锚杆的起始荷载可为计划最大试验荷载的 10%，压力分散型或拉力分散型锚杆的起始荷载可为计划最大试验荷载的 20%。
- (5) 锚杆破坏标准：
 - a. 后一级荷载产生的锚头位移增量达到或超过前一级荷载产生位移增量的 2 倍时；
 - b. 锚头位移不稳定
 - c. 锚杆杆体拉断
- (6) 试验结果宜按循环荷载与对应的锚头位移读书列表整理，并绘制锚杆荷载—位移(Q-s)曲线，锚杆荷载—弹性位移(Q-s_e)曲线和锚杆荷载—塑性位移(Q-s_p)曲线。
- (7) 锚杆弹性变形不应小于自由长度变形计算值的 80%，且不应大于自由段长度与 1/2 锚固段长度之和的弹性变形计算值。
- (8) 锚杆极限承载力取破坏的前一级荷载，在最大试验荷载下未达到规定的破坏标准时，锚杆极限承载力取最大试验荷载值。

试验结束后，若条件允许，应挖出锚杆检查其形状和尺寸、硬化浆体的质量、预应力筋与浆体之间的结合、预应力筋在浆体中的位置、浆体包裹钢制部件的情况、浆体上裂缝的宽度和间距及预应力筋的防腐效果，永久性锚杆更应进行最后一项检查。

试验的全部结果都要列入试验报告中，报告中还应包括地层条件、锚杆参数、施工详细情况、试验方法及对试验数据与挖出锚杆进行检验所得结果之间关系的讨论。绘制锚杆荷载-位移曲线（**错误！未找到引用源。**）、锚杆荷载-弹性（塑性）位移曲线（**错误！未找到引用源。**）。



错误！未找到引用源。 锚杆基本试验荷载—位移曲线
 性位移、荷载—塑性位移曲线

错误！未找到引用源。 锚杆基本试验荷载—弹性位移、荷载—弹性位移曲线

2. 验收试验

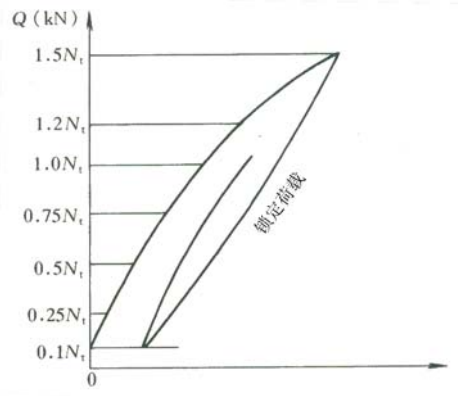
验收试验可以快速经济地确定以下事项：

- (1) 锚杆是否具有足够的承载力；
- (2) 锚杆自由段长度是否满足要求；
- (3) 锚杆蠕变在规定的范围内是否稳定。

预应力锚杆的验收试验应遵守下列规定：

- (1) 验收试验锚杆数量不少于锚杆总数的 15%，且不得少于 3 根。
- (2) 验收试验应分级加荷，起始荷载宜为锚杆拉力设计值的 30%，分级加荷值分别为拉力设计值的 0.5, 0.75, 1.0, 1.2, 1.33 和 1.5 倍，但最大试验荷载不能大于杆体承载力标准值的 0.8 倍。
- (3) 试验验收中，当荷载每增加一级，均应稳定 5~10min，记录位移读数。最后一级试验荷载应维持 10min。如果在 1~10min 内，位移量超过 1.0mm，则该级荷载应再维持 50min，并在 15、20、25、30、45 和 60min 时记录其位移量。
- (4) 在验收试验中，从 50% 拉力设计值到最大试验荷载之间所测得的总位移量，应当超过该荷载范围自由段长度预应力筋理论弹性伸长量的 80%，且小于自由段长度的 1/2 锚固段长度之和的预应力筋的理论弹性伸长量。
- (5) 最后一级荷载作用下的位移观测期内，锚头位移稳定或 2h 蠕变量不大于 2mm。

在各等级荷载作用下，记录锚头位移至稳定状态。根据试验结果绘制锚杆荷载-位移曲线（**错误！未找到引用源。**）。



错误！未找到引用源。 验收试验锚杆荷载—位移曲线

3. 特殊试验

(1) 锚杆群的张拉试验：当锚杆间距很密（小于 $10D$ 或 $1m$ ， D 为钻孔直径）时需作此试验，以判明锚杆群效果。

(2) 多循环的张拉试验：承受风力、波浪或反复式等其他振动力的锚杆，需判断由于地基在重复荷载作用下的形状变化所引起的效果。

(3) 蠕变试验：为了判明永久性锚杆预应力的下降，蠕变可能来自锚固体与地基之间的蠕变特性，也可能来自锚杆区间的压密收缩，应在设计荷载下长期量测张拉力与变位量，以便于决定什么时候需要做再张拉。

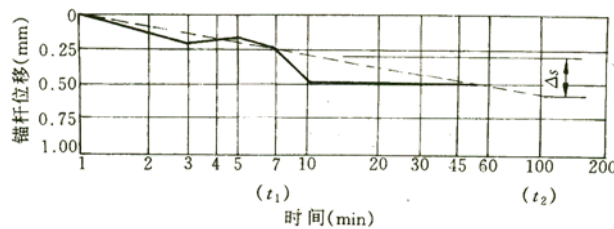
对于设置在岩层和粗粒土里的锚杆，没有蠕变问题。但对于设置在软土里的锚杆，必须作蠕变试验，判定可能发生的蠕变变形是否在容许范围内。

蠕变试验需要能自动调整压力的油泵系统，使作用于锚杆上的荷载保持恒量，不因变形而降低，然后按一定时间间隔（1、2、3、4、5、10、15、20、25、30、45、60min）精确测读 1h 变形值，在半对数坐标纸上绘制蠕变时间关系如图所示，曲线（近似为直线）的斜率即锚杆的蠕变系数 K_s ：

$$K_s = \frac{\Delta s}{\lg \frac{t_2}{t_1}} \quad (17-14)$$

Δs 及 t_1 、 t_2 如错误！未找到引用源。所示。

一般认为， $K_s \leq 0.4mm$ ，锚杆是安全的； $K_s > 0.4mm$ 时，锚固体与土之间可能发生滑动，使锚杆丧失承载力。



错误！未找到引用源。 蠕变试验（时间与变位关系曲线）

17.7.2 锚杆预应力的变化

锚杆监测的目的是掌握锚杆预应力或位移变化规律，确认锚杆的长期工作性能。必要时，可根据监测结果，采取二次张拉锚杆或增设锚杆等措施，以确保锚固工程的可靠性。

永久性预应力锚杆及用于重要工程的临时性锚杆，应对其预应力变化进行长期监测。永久性预应力锚杆的监测数量不应少于锚杆数量 10%，临时性预应力锚杆的检测数量不应少于锚杆数量的 5%。预应力变化值不宜大于锚杆设计拉力值的 10%，必要时可采取重复张拉或适当放松的措施以控制预应力值的变化。

恒定荷载下锚头位移量和位移量的发展应符合验收试验的要求，如果位移的增加与时间对数成比例关系或位移随时间而减小，则锚杆是符合要求的。

1. 锚杆预应力变化的外部因素

温度变化、荷载变化等外部因素会使锚杆的应力变化、影响锚杆的功能。

(1) 地层受冲击荷载的影响

爆破、重型机械和地震力发生的冲击引起的锚杆预应力损失量，较之长期静荷载作用引起的预应力损失量大得多。

冲击作用会使固定在密实性差的非黏性土中锚杆的预应力和承载力发生变化，尤其对

具有触变性的不稳定黏性土产生不利影响，此外，用机械方法固定的锚杆受冲击的影响要比用水泥或合成材料固定的锚杆大得多。长锚索锚杆受冲击作用的影响比短锚杆小。

必须在受冲击范围内定期对锚杆重复施加应力。

(2) 锚杆的荷载变化

车辆荷载、地下水位变化等变异荷载，对保持锚杆预应力和锚固体的锚固力具有不利影响。国外的一些标准规定，作用于预应力锚杆上的变异荷载不能大于设计拉力值的 15%。

(3) 温度变化和锚固地层的应力状态变化

温度变化会使锚杆和锚固结构产生膨胀或收缩，由于大部分锚杆都固定在地下，故空气温度变化对锚杆的影响可忽略不计。

被锚固结构的应力状态变化对锚杆预应力产生较大影响，在基坑和边坡工程中，由于开挖卸荷可使被锚固结构产生位移，锚杆预应力明显增大，岩体内部应力增大也会使锚杆预应力增加。

2. 锚杆预应力随时间的变化

随着时间的推移，锚杆的初始预应力总是会有所变化。一般情况下，通常表现为预应力的损失。在很大程度上，这种预应力损失是由锚杆钢材的松弛和受荷地层的徐变造成的。

(1) 钢材的松弛

长期受荷的钢材预应力松弛损失量通常为 5%~10%。钢材的应力松弛与张拉荷载大小密切相关，当施加的应力大于钢材强度的 50%时，应力松弛就会明显加大，并随荷载的增大而增大，而且在 20℃ 以上的温度条件下，这种损失量更大。

钢材品种和是否采用超张拉对于应力松弛损失也有显著影响，在 20℃ 下、钢材预应力值到达 75% 保证抗拉强度的条件下，稳定化（低松弛）的钢丝和钢索应力损失为 1.5%，而普通消除应力钢材的应力损失量为 5%~10%。

(2) 地层的徐变

地层在锚杆拉力作用下的徐变，是由于岩层或土体在受荷影响区域内的应力作用下产生的塑性压缩或破坏造成的。对于预应力锚杆，徐变主要发生在应力集中区，即靠近自由段的锚固区域及锚头以下的锚固结构表面处。

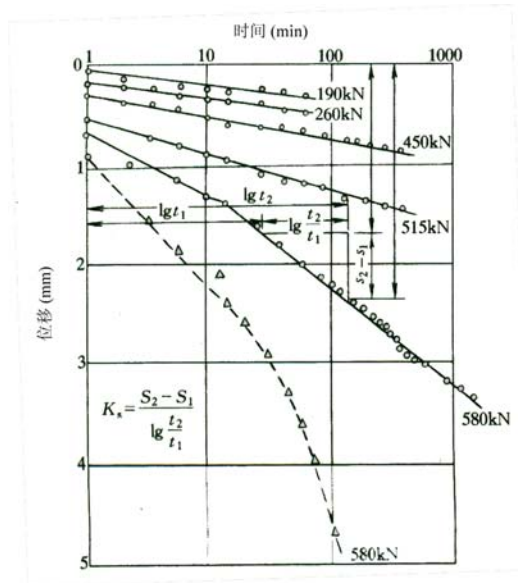
坚硬岩石产生的徐变是很小的，即使在大荷载持续作用下也如此。

在软弱岩石和土体中，由地层压缩产生的变形是相当大的，特别是在黏性土和细的、均匀粒状砂中，变形非常明显，而且持续时间很长。固定在此类土体中的锚杆在极限荷载作用下，锚固段会发生较大的徐变位移，而且锚固体周围的土体会产生流动，可能导致锚杆承载力的急剧下降，进而危及工程安全。

一般情况下，永久受荷锚杆的徐变-时间关系是指数关系。Ostermayer 对均匀粒状砂中的锚杆进行的徐变试验结果如**错误！未找到引用源。**所示。

利用锚杆徐变试验中得到的徐变系数，就可以从理论上计算出锚杆的预计长期徐变位移。Ostermayer 建议，对黏性土中的永久性锚杆进行试验时，应把 1.5 倍使用荷载下的徐变系数的容许值限定为 1.0mm。从理论上讲， k_s 值为 1.0mm 时相当于在 30min 到 50 年内发生的位移达 6mm。

试验结果表明，灌浆的长锚根锚杆（直径为 10~15cm、长度为 20~25m）由于徐变在硬黏土中的预应力损失量约为 6%；而在密实的中硬黏土中为 12%。这些预应力损失通常是在锚杆施加应力后的 2~4 个月内记录的，以后损失量不再增大。实测的损失值一般低于用初始施荷期间所得徐变系数计算的值。



错误！未找到引用源。 均匀砂层在不同荷载作用下时间—位移曲线和徐变系数

软黏土中锚杆的徐变量和变形收敛时间主要与荷载比（锁定荷载与锚杆极限承载力之比）有关，且徐变变形主要发生在加载初期。要控制锚杆的徐变变形量和徐变收敛时间，需降低锚固段的应力峰值。选择相对较小的荷载比有利于减少锚杆的徐变变形。

3. 锚杆预应力的测量仪器

对预应力锚杆荷载变化进行观测，可采用按机械、液压、振动、电气和光弹原理制作的各种不同类型的测力计。测力计通常都布置在传力板与锚具之间。必须始终保证测力计中心受荷，并定期检查测力计的完好程度。

(1) 机械测力计

该类测力计是根据各种不同钢衬垫或钢弹簧的弹性变形进行工作的。尽管这类测力计的测量范围较小，但坚固耐用。将标定的弹簧垫圈置于紧固螺母之下，就能对短锚杆的应力进行简单的监测，测得的这些垫圈的压力变化可以表示锚杆的应力变化。

(2) 液压测力计

这类测力计主要由有压力表的充油密闭压力容器组成，可直接由压力表读出压力值，体积小，重量轻，除压力表外，不容易损坏；制作较容易，只要制作一个小型压力容器，并在该容器上备有能安装压力表的出口。

(3) 弦式测力计

弦式测力计是最可靠和最精确的荷载传感器，选用钢弦作传感元件，由中孔的承载环和钢弦式压力传感器组成，是目前锚杆预应力观测使用最广泛的测力计。

(4) 引伸式测力计

采用应变计或应变片对预应力锚杆的荷载进行测试能获得满意的结果，这些应变计或应变片固定在受荷的钢制圆筒壁上，然后记录下这些应变计或应变片的变形。

(5) 光弹测力计

这类测力计装有一种会发生变形的光敏材料。在荷载作用下光敏材料图形与压力线的标准图形加以对比，即可获得锚杆的拉力值。这类测力计的精度可达 $\pm 1\%$ ，测试范围是20~6000kN，价格较便宜，应用方便，而且不受外界干扰。

4. 锚杆预应力变化的应对措施

一般锚杆预应力变化控制范围为锁定荷载的 10%，超过这一范围应查找原因，必要时可重新张拉（增加或降低预应力）或增加锚杆数量。锚杆预应力变化的控制方法主要有：

(1) 预应力筋采用低松弛钢绞线。

(2) 确定适宜的锚杆锁定荷载。

(3) 采用能缓减地层应力集中的措施。如对坚硬岩石，充满黏土的节理裂隙性岩体在荷载作用下的塑性压缩变形往往会引起明显的预应力损失，因而预先要用短锚杆加固与锚杆传力系统接触的破碎岩体；传力结构应具有足够的刚度并与地层有足够的接触面积；采用单孔复合锚固结构，使锚固体内剪应力得以均匀分布，都有助于减少地层的徐变变形及锚杆的预应力损失。

(4) 实施二次张拉。在锚杆锁定 7~10d 后对锚杆实施二次张拉可有效降低预应力损失。还可对预应力增加较大的锚杆实施放松措施，以降低其预应力值。

(5) 合适的施工工艺。对徐变变形明显的地层宜采用二次高压灌浆工艺；锚杆张拉时，先单根预张拉，再整体张拉，使各钢绞线的应力平均。

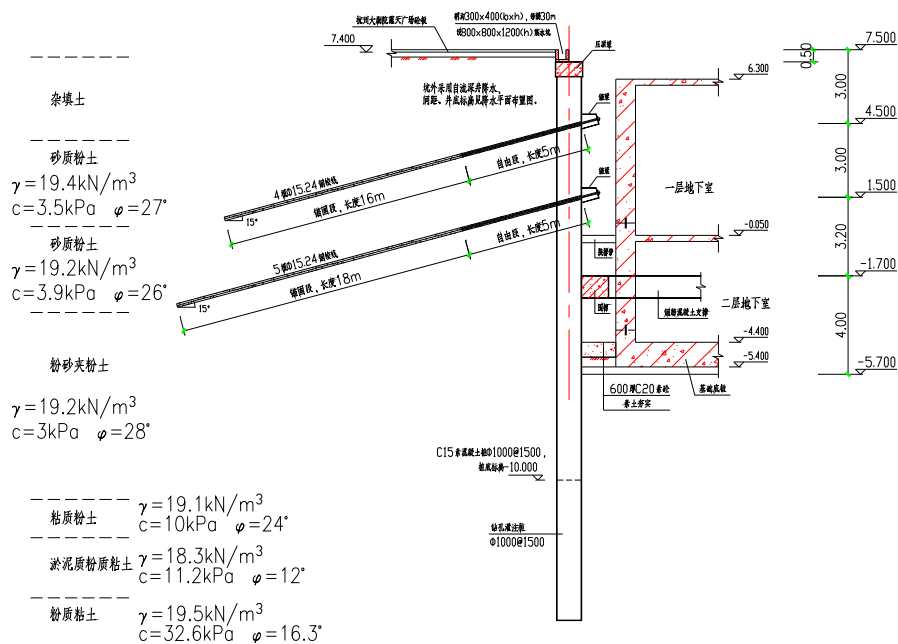
17.8 工程实例

17.8.1 杭州波浪文化城一期基坑工程

波浪文化城一期位于杭州市钱江新城核心区的主轴线上，是钱江新城核心区内主要城市公共建筑。基坑开挖面积达 73000 m²，开挖深度为 13.2~15.075 m。拟建场地的上部 19m 为稍密~中密的粉砂土，渗透性较好，且基坑距离钱塘江较近。设计根据不同的周围环境条件分别采用相应的围护，其中东北面中间紧邻杭州大剧院广场区域，采用全套管钻孔咬合桩（贝诺特工法）结合上部两道预应力锚杆、下部一道钢筋混凝土支撑支护，**错误！未找到引用源。**为该区域的围护剖面。

拉力分散型锚杆设于素砼桩位置，水平向间距 1.5m，孔径 150mm，根据受力大小采用 4 根或 5 根直径 15.24mm、f_{ptk} 为 1860Mpa 的钢绞线、锚固长度为 18m 的锚杆，其设计极限抗拔力为 630kN。

采用 YX-1 型钻机钻孔，泥浆护壁，泥浆中掺入适量膨润土。先用 150mm 合金钻头在素砼桩上开孔，打穿素砼桩后换 150mm 三翼钻头钻孔。



错误！未找到引用源。 全套管钻孔咬合桩结合上部两道预应力锚杆、下部一道钢筋混凝土支撑围护剖面其中东南面紧邻之江路地下通道区域距离钱塘江仅 85m，采用全套管钻孔咬合桩结合四

道预应力锚杆支护。施工最下一排锚杆时，正值农历八月中旬，钱塘江水位较高，坑外侧的自流深井只能将水位降至地面下 10m，最下一排锚杆位于水位下约 1.5m，需在水下成孔。素砼桩上开孔后，在桩的钻孔内下入套管，并向孔外接长套管，套管内注水，使得套管口的水位标高高于地下水水位标高后再进行钻孔施工，避免钻孔发生流砂、塌孔，见**错误！未找到引用源。**。

采用水灰比为 0.5 的纯水泥浆二次注浆，待一次注浆体的强度达到 5MPa(约需 40 小时)后二次注浆。实际施工时，二次注浆压力只能达到 1.20~1.50Mpa，远低于原设计要求的 2.5~3.0Mpa，且注浆水泥用量达 500~600kg 后仍可注入，施工难以操作。经过现场多次试注后确定注浆水泥量改为按 200kg/根控制，注浆压力作为参考。经试验极限抗拔力满足设计要求，最大位移为 35~50mm。

张拉控制荷载为 0.6 倍极限抗拔力(约为基坑围护设计计算所需提供抗拔力的 0.75 倍)，正式张拉前先用 0.5 倍张拉控制荷载预张拉二次，然后张拉至控制荷载锁定。

监测结果表明，基坑施工期间各排锚杆的拉力值变化很小。可见锁定荷载不应定得太高，宜取 0.7 倍计算值左右，以调节计算偏差及由于施工、使用过程中引起的锚杆拉力增大。



错误！未找到引用源。 地下水水位高于孔口标高的最下一排锚杆钻孔

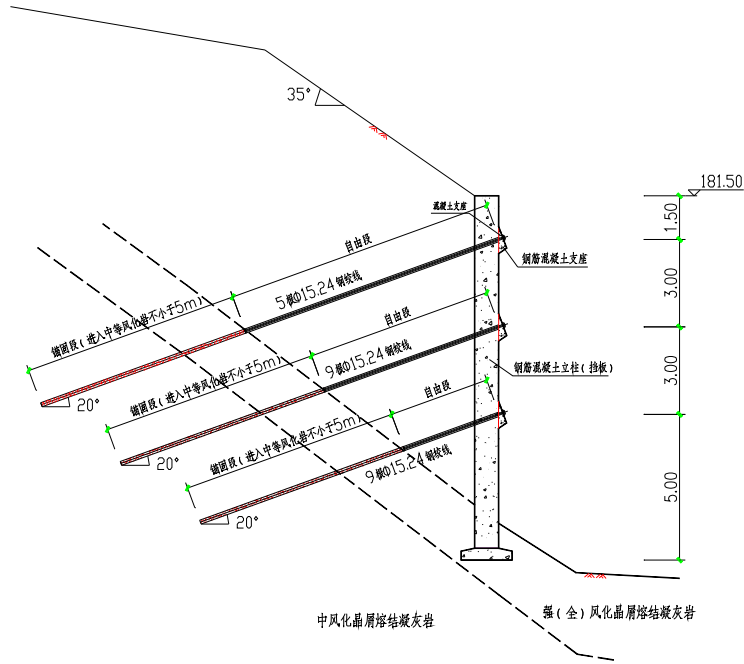
17.8.2 缙云双潭水厂东侧锚杆挡墙

缙云县双潭水厂所建场地为上部山体放炮开挖后回填至山脚所成。由于开挖产生的土石方量较大，为减少外运工程量，挡墙背后的库容应尽可能大。设计在山脚坡度较大区域采用预应力锚杆挡墙，在坡度平缓地区采用重力式挡墙。预应力锚杆挡墙需先在坡脚施工好锚杆，再分层施工立柱、挡板，分层回填土方，分层张拉锁定相应标高的锚杆。立柱、挡板基础的持力层为全风化晶屑熔结凝灰岩，地基承载力特征值 500kPa。预应力锚杆挡墙剖面见**错误！未找到引用源。**。

钻孔涉及的土层主要为：全风化晶屑熔结凝灰岩，湿，可塑状，岩石已基本风化成土状，层厚 0.60~1.10m；强风化晶屑熔结凝灰岩，硬，岩心呈碎块状，少数短柱状，裂隙发育，用手不易折断，层厚 0.65~2.40m；中风化晶屑熔结凝灰岩：岩心呈短柱状，裂隙较少发育，熔结凝灰结构，含角砾，含量大于 15%，砾径 0.1-2cm 不等，岩石坚硬，饱和单轴抗压强度 40.8~47MPa。

采用潜孔钻机造孔，压缩空气清孔排渣，钻孔直径为 130mm。

锚杆为拉力分散型，长度以进入中风化晶屑熔结凝灰岩 5m 控制。根据受力大小采用 5 根或 9 根直径 15.24mm、 f_{ptk} 为 1860Mpa 的钢绞线，用水灰比 0.5 的 M30 纯水泥浆一次注浆。最下一排锚杆的设计极限抗拔力为 1200kN。



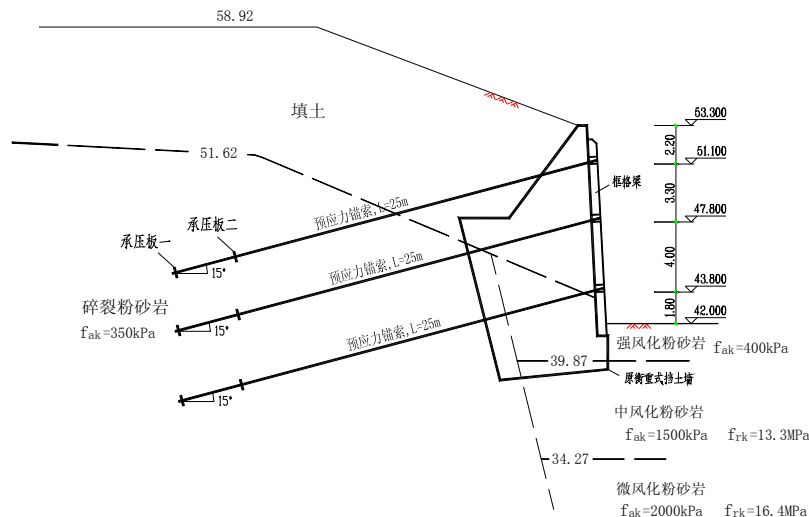
错误！未找到引用源。 预应力锚杆挡墙剖面

需在一排锚杆施工后再回填该排锚杆至上一排锚杆之间的土方。为避免上部填方造成下部已张拉锁定锚杆的拉力增加过大，采取了以下措施：预应力筋张拉控制应力设得较小，为0.1f_{ptk}；锚杆周围0.5米范围内回填中粗砂，以防破坏自由段套管和钢绞线；自挡墙外坡面向内25米范围内分层压实，施工时确保压实机械不对挡墙及相应设施造成危害。

17.8.3 新昌某重力式挡墙预应力锚杆加固

浙江省新昌县某边坡工程原采用浆砌块石衡重式挡土墙，墙高5~12m，墙顶以上按1:1.5放坡，放坡高度5~6m。距离墙顶20m将建造2~3层住宅。

工程所处场地属第四系低丘坡地，覆盖层属第四系坡残积沉积土，挡土墙一般以中风化粉砂岩作为持力层，地基承载力特征值1500kPa。

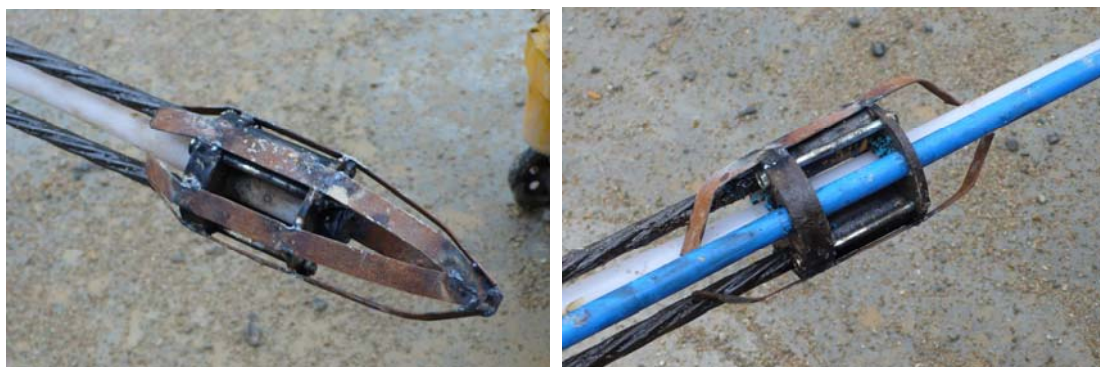


错误！未找到引用源。 12m高挡墙预应力锚杆加固剖面

由于施工过程中排水设施设置不完善，坡顶未设截水沟、坡脚未设排水沟，泄水孔位置的墙背后填土中未设反滤层；墙体的施工质量较差，墙身强度偏低；部分墙后填土质量不符合规范要求，填筑分层厚度过大。在墙后土方堆填过程中，挡土墙出现了较明显的变形，存

在严重的安全隐患：挡土墙中下部出现横向、斜向裂缝，裂缝缝宽从数毫米到数十毫米不等，裂缝的延伸长度 2~12m；伴随着裂缝的发展，挡土墙墙面出现鼓胀变形；伸缩缝两边挡土墙发生错位变形，最大错位变形差达到 75mm；局部墙顶填土出现横向延伸的拉张裂缝，裂缝宽度数厘米，延伸长度十余米。故需对挡墙采取必要的加固措施。

设计采用预应力锚杆结合混凝土框格梁加固，12m 高的挡墙采用三排预应力锚杆，如**错误！未找到引用源。**，锚杆长度 25m，水平间距为 5m。锚杆为压力分散型，采用 4 根直径 15.24mm、 f_{ptk} 为 1860Mpa 的无黏结钢绞线，两个挤压锚头承载体，如**错误！未找到引用源。**、图 17-31，每个承载体两根钢绞线，设计极限抗拔力 400kN，张拉荷载为 250kN，锁定荷载为 200kN。框格梁截面为 400×500，混凝土强度为 C30。



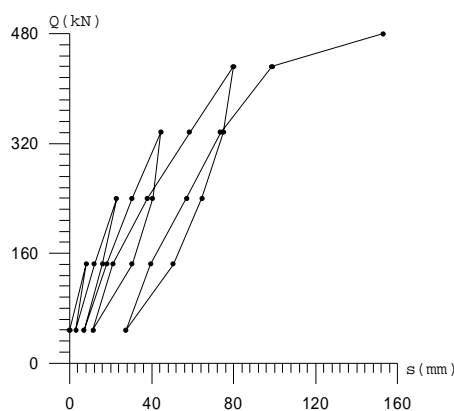
错误！未找到引用源。 第一承载体

错误！未找到引用源。 第

二承载体

由于挡墙背后回填的填土主要由大块石、碎石、岩屑、岩粉及粉土混积而成，最大块石达 1~2m，为丘陵顶部的粉砂岩、砾岩放炮开挖后运来回填，若无护孔措施必然塌孔，故对于块石挡墙墙身及填土部分地层需采用套管跟管钻进。钻孔采用无锡产 YG60 锚杆钻机施工，开孔直径为 150mm，跟管套管直径为 146mm，与水平夹角向下 15°。钻孔至碎裂粉砂岩后终止跟管，换 120mm 冲击回转钻头钻进，锚固段孔径为 120mm。钻进达到设计深度后，使用高压空气将孔中岩（土）粉及水全部清除出孔外。

采用水灰比 0.5 的纯水泥浆注浆，浆体强度为 M35。由于填土层易漏浆，故在块石挡墙及填土孔段，采用 PVC 套管保护，在 PVC 管内注浆，以保证钢绞线为水泥浆所包裹。采用孔底返浆方法，直至孔口溢出新鲜浆液。根据浆液注入情况缓慢地拔出注浆管，根据拔管手感控制拔管速率，不得将管口拔出到液面以上。如发现孔口浆面回落，及时进行补充注浆，确保孔口浆体充满。



错误！未找到引用源。 22m 长预应力锚杆的抗拔试验荷载-位移 (Q-s) 曲线

前期试验段的 22m 长锚索的抗拔试验荷载-位移 (Q-s) 曲线如**错误！未找到引用源。**，极限抗拔力为 432kN。

当注浆体强度和框格梁混凝土强度均达到设计强度 90%以上、并经验收试验合格后，方可进行张拉作业。先对长度较长的一组承载体进行补偿张拉，以补偿因自由长度不等引起的弹性伸长差，使得张拉到设计要求荷载时，各根钢绞线的应力相近。在补偿张拉后，按 20%设计荷载进行 1~2 次预张拉，然后按设计要求分级张拉及超张拉，再行锁定。在张拉锁定完成十天后再次进行补张拉，以消除因钢绞线松弛及其它因素造成的预应力损失，保证设计预应力。

锚具锁定后，对孔口段实施封闭注浆，确保锚头端孔内注浆密实。张拉完成后切割多余的钢绞线，锚头外钢绞线保留长度 100mm，用 C30 素混凝土封闭保护锚头。

17.8.4 宁波某基坑工程锚杆支护

宁波地区的淤泥质土分布较普遍，一般孔隙比 1.2~1.5，含水量 40~50%，灵敏度高，强度低，地基承载力特征值 60~70kPa。某工程位于宁波江南路南侧，基坑开挖深度 5.2m，采用三排沉管桩（或小直径钻孔桩）组成的门架结合一排锚杆支护。锚杆长度为 18m，钻孔直径 150mm，主筋为直径 $\varnothing 22$ 的 HRB335 级钢，与水平夹角 20° 向下，设计要求极限抗拔力大于 120kN。

施工时采用液压钻机慢转速钻进，尽可能减少钻进过程对锚固地层的扰动；用大泵量泥浆对钻孔充分循环冲洗，排除孔内残土。为防止钻孔缩径，应确保钻具气孔畅通，必要时采用边拔边注入泥浆的方法拔出钻具。主筋外包 $\varnothing 250$ 土工布注浆袋，长度 13m，锚杆下端部袋口用铅丝扎紧，上部袋口与注浆管及锚杆主筋分别扎紧，注浆袋中部每 2m（对中支架部位）用铅丝绑扎约束。放置三根注浆管：注浆袋内注浆管长度 18m，下端口置于距注浆袋底部 0.5m 处；注浆袋外注浆管长度 6.5m，注浆时插入孔内即可；二次注浆管，置入注浆袋内，长度 12m，下端口置于注浆袋中部。

采用水灰比 0.55 的纯水泥浆注浆，二次注浆。第一次注浆先分两步进行：先在注浆袋内注浆，水泥浆溢出孔口后停止注浆；再在注浆袋外注浆，浆液溢出孔口后终止，并拔出注浆管。在一次注浆完成十二小时以后，进行二次注浆，若浆液溢出孔口或注浆压力大于 1.5 Mpa、稳压时间大于 2 分钟（或注入浆液量大于 125L）后停止注浆。

经抗拔试验，极限抗拔力均大于 120kN。如错误！未找到引用源。，注浆体直径基本同注浆袋直径 250mm。



错误！未找到引用源。 现场开挖的注浆体

参考文献

- [1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 程良奎, 范景伦, 韩军, 许建平. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [3] 梁炯望. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [4] 中华人民共和国行业标准. 建筑基坑支护技术规程(JGJ 120-99) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [5] 中华人民共和国国家标准. 锚杆喷射混凝土支护技术规范(GB 50086-2001) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [6] 中华人民共和国国家标准. 建筑基坑支护技术规程(GB 50330-2002) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] 范敬飞. 软地层中土层锚杆的群锚效应[硕士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 1990.
- [8] 肖昭然, 李象范, 侯学渊. 岩土锚固工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996: 61-66.
- [9] 戴运祥. 斜拉土层锚杆的群锚效应[博士学位论文[D]. 上海: 同济大学, 1993.
- [10] 李寻昌, 门玉明, 王娟娟. 锚杆抗滑桩体系的群桩、群锚效应研究现状分析. 公路交通科技[J], 22(9), 2005: 52-55.
- [11] 苏自约, 陈谦, 徐祯祥, 刘璇. 锚固技术在岩土工程中的应用[C]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

专有名词和术语

锚杆
 单孔复合锚固
 可回收锚杆
 群锚效应
 设计
 施工
 跟管钻进
 试验
 预应力损失

常用符号说明

K_s	蠕变系数（徐变系数）
P	锚杆的极限锚固力
d	单根钢筋或钢绞线直径
D	锚固体直径
N_t	锚杆轴向拉力设计值
K	安全系数
f_{ptk}	钢绞线、钢丝或钢筋的抗拉强度标准值
A	预应力筋的截面积
L	锚杆锚固段长度
n	钢绞线或钢筋根数；单元锚杆数
q_r	灌浆体与地层间的黏结强度设计值
q_s	灌浆体与钢绞线或钢筋间的黏结强度设计值
ζ	采用 2 根或 2 根以上钢绞线或钢筋时，筋材与灌浆体间黏结强度降低系数；

	锚固段灌浆体受压时侧向地层约束力作用的抗压强度提高系数
P	锚杆极限锚固力
γ	岩土的重力密度
h	扩体上覆的地层厚度
β_c	锚固力因子
c_u	地层不排水抗剪强度
A_p	单元锚杆承载体与灌浆体接触面积
β	锚固段灌浆体局部受压时强度提高系数
δ_b	弯曲应力
σ_s	剪应力
z	锚杆头部侧翼的断面系数 (mm^3)
t	翼厚 (mm)
B	翼宽 (mm)
f_b	允许弯曲应力 (N/mm^2)
f_s	允许剪应力
L_1 、 L_2	各单元锚杆的锚固段长度
q_{r1} 、 q_{r2}	各单元锚杆锚固段灌浆体与周边地层间的黏结摩阻强度
f_c	灌浆体轴心抗压强度标准值