

第 26 章 岩石地区基坑设计与施工

26.1 概述

26.1.1 岩体的工程地质性质

岩体 (rock mass) 是指在地质历史过程中形成的, 由一种或多种岩石和结构面网络组成的, 具有一定的结构并赋存于一定的地质环境 (地应力、地下水、地温等) 中的地质体。岩石 (rock) 是具有一定结构构造的矿物集合体, 是天然作用的产物, 是组成岩体的最小单元。

岩石中的矿物颗粒往往具有较牢固的结晶连接或胶结连接, 故除少数岩石强度较低、抗变形和抗水性较差外, 大多数新鲜岩石质地都比较致密, 空隙少而小, 抗水性强、透水性弱、力学强度高。

岩体是在漫长的地质历史过程中形成的, 具有一定的结构和构造, 由于在其形成过程中, 长期经受复杂的建造和改造作用, 如构造变动、风化作用和卸荷作用等各种内外力地质作用和破坏改造, 生成了各种不同类型和规模的地质界面, 如断层、节理、层理、片理、接触面和软弱夹层等, 这些在地质历史过程中形成的具有一定延展方向和长度, 厚度较小的地质界面, 称为结构面 (structural plane)。岩体受结构面交切, 形成一种独特的割裂结构。因此, 岩体的力学性质及其力学作用不仅受岩体的岩石类型控制, 更主要的是受岩体中结构面以及由此形成的结构特征所控制, 往往表现出非均质、非连续、各向异性的特征。岩体的工程地质性质取决于岩石和结构面的工程地质性质, 岩质基坑的稳定性主要受岩体结构面控制。

岩块 (rock 或 rock block) 是指不含显著结构面的岩石块体, 是构成岩体的最小岩石单元体。有些学者把岩块称为结构体 (structural element)、岩石材料 (rock material)、完整岩块 (intact rock) 等等。

岩石、岩块、岩体等名词应该注意区分它们的含义。在本章节中, 岩石与岩块一般不加以区分, 而它们与岩体是严格区分的。

1. 岩石的物质组成和结构构造

(1) 岩石的物质组成

岩石是由矿物 (结晶和非结晶) 组成的, 因此新鲜岩石的力学性质主要取决于组成岩石的矿物成分及其相对含量。一般来说, 含硬度大的粒状矿物 (如石英、长石、角闪石、辉石等) 愈多时, 岩块强度越高; 反之, 含硬度小的片状矿物 (如云母、绿泥石、蒙脱石及高岭石等) 愈多时, 岩块强度越低。

自然界中的造岩矿物有含氧盐、氧化物、及氢氧化物、卤化物、硫化物和自然元素五大类; 其中, 以含氧盐中的硅酸盐、碳酸盐及氧化物类矿物最为常见。常见的硅酸盐矿物有长石、辉石、角闪石、橄榄石及云母和粘土矿物等, 这些矿物除云母和粘土矿物以外, 硬度均较大, 成柱状晶形。因此, 含这类矿物多的岩石, 如花岗岩、闪长岩及玄武岩等, 强度高, 抗变形能力强, 这些岩石组成的基坑稳定性相对较好。

粘土矿物属层状硅酸盐矿物主要有高岭石、水云母和蒙脱石三类, 具薄片状或鳞片状构造, 硬度小。因此, 含这类矿物多的岩石, 如粘土岩、粘土质岩等, 其物理力学性质差, 并具有不同程度的胀缩性, 特别是含蒙脱石多的膨胀岩, 其物理力学性质更差, 这类岩体为主的基坑边坡, 其支护设计和土体基坑边坡类似, 也要加强防水处理。

碳酸盐类矿物是石灰岩和白云岩类岩石的主要造岩矿物。岩石的物理力学性质取决于岩石中 CaCO_3 及酸不溶物的含量。 CaCO_3 含量越高, 如纯灰岩、白云岩等, 强度高, 抗变形

和风化能力都较强。泥质含量高的，如泥灰岩、泥岩等，其力学性质较差。但随岩石中硅质含量的增高，岩石性质将不断改善。另外碳酸盐类岩体中，常发育有各种岩溶现象，使岩体性质趋于复杂化。

氧化物类矿物以石英最常见，是地壳岩石的主要造岩矿物，硬度大，化学性质稳定，因此，一般随石英含量增加，岩石的强度和抗变形能力都明显增强。

岩石的矿物组成与岩石的成因及类型密切相关，岩石按成因可分为三大类：岩浆岩、沉积岩和变质岩。这三类岩石的矿物成分、结构构造差别比较大，导致其物理力学性质差别也比较大。

岩浆岩是岩浆在向地表上升的过程中，由于热量散失逐渐经过分异等作用冷凝而成。在地表以下冷凝的称侵入岩；喷出地表冷凝的称喷出岩。侵入岩根据距地表的深浅程度又分为：深成岩和浅成岩。岩浆岩的分类及相应的矿物成分见表 26-1。总体上来说，岩浆岩多以硬度大的粒柱状硅酸盐矿物（角闪石、辉石、长石）和石英等矿物为主，其物理力学性质一般都较好，这类岩浆岩为主的基坑边坡，一般稳定性较好，如果结构面不发育，可不进行支护。

岩浆岩分类及矿物成分 表 26-1

化学成分		含 Si、Al 为主			含 Fe、Mg 为主	
酸碱性		酸性	中性		基性	超基性
颜色		浅色的(浅灰、浅红、红色、黄色)			深色的(深灰、绿色、黑色)	
成因及结构		含正长石		含斜长石		不含长石
		石英、云母、角闪石	黑云母、角闪石、辉石	黑云母、角闪石、辉石	角闪石、辉石、橄榄石	角闪石、辉石、橄榄石
深成的	等粒状，有时为斑状所有矿物都能肉眼鉴别	花岗岩	正长岩	闪长岩	辉长岩	橄榄岩 辉岩
浅成的	斑状(斑晶较大且可以分辨出矿物名称)	花岗斑岩	正长斑岩	玢岩	辉绿岩	苦橄玢岩(少见)
喷出的	玻璃状，有时为细粒斑状，矿物难于肉眼鉴别	流纹岩	粗面岩	安山岩	玄武岩	苦橄玢岩(少见) 金伯利岩
	玻璃状或碎屑状	黑曜岩、浮石火山凝灰岩、火山碎屑岩、火山玻璃				

沉积岩是由岩石、矿物在内外力作用下破碎成碎屑物质后，再经水流、风吹和冰川等的搬运，堆积在大陆低洼地带或海洋，再经过胶结、压密等成岩作用而成的岩石。沉积岩的主要特征是具有层理、层面。沉积岩的分类及相应的矿物成分见表 26-2。总体上来说，沉积岩的物理力学性质取决于胶结物类型，硅质胶结的碎屑沉积岩性质较好，泥质胶结的较差，灰质胶结的居中。

沉积岩分类 表 26-2

成因	硅质的	泥质的	灰质的	其它成分
碎屑沉积	石英砾岩、石英角砾岩、燧石角砾岩、砂岩、石英岩	泥岩、页岩粘土岩	石灰砾岩、石灰角砾岩、多种石灰岩	集块岩
化学沉积	硅华，燧石、石髓岩	泥铁岩	石笋、钟乳石、石灰华、白云岩、石灰岩、泥灰岩	岩盐、石膏、硬石膏、硝石

生物沉积	硅藻土	油页岩	白垩、白云岩、珊瑚石灰岩	煤炭、油砂、某种磷酸盐岩石
------	-----	-----	--------------	---------------

变质岩是由岩浆岩和沉积岩在高温、高压或其它因素作用下，经变质所形成的岩石。B 变质岩的分类及相应的矿物成分见表 26-3。总体来说，深变质的岩石，如片岩、片麻岩、混合岩、石英岩、大理岩等，物理力学性质较好，浅变质的岩石，如千枚岩、板岩等，物理力学性质较差。

变质岩分类及矿物成分 表 26-3

岩石类别	岩石名称	主要矿物成分	鉴定特征
片状的岩石类	片麻岩	石英、长石、云母	片麻状构造，浅色长石带合深色云母带互相交替，细晶粒状或斑状结构
	云母片岩	石英、云母	具有薄片理，片理面上有强的丝绢光泽，石英评肉眼常看不到
	绿泥石片岩	绿泥石	绿色，常为鳞片状或叶片状的绿泥石块
	滑石片岩	滑石	鳞片状或叶片状的滑石石块，用指甲可刻划，有滑感
	角闪石片岩	角闪石、石英	片理常常表现不明显，坚硬
	千枚岩、板岩	云母、石英	具有片理，肉眼不易识别矿物，锤击有清脆声，并具有丝绢光泽，千枚岩表现得很明显
块状的岩石类	大理岩	方解石、少量白云石	结晶颗粒结构，遇酸起泡
	石英岩	石英	致密得、细粒得块状，坚硬，硬度近 7 ⁰ ，玻璃光泽、断口贝壳状或次贝壳状

岩石中的矿物成分在风化营力作用下会发生变化，形成一些次生矿物，导致岩体的强度不断降低，岩石的风化程度划分见表 26-4。

岩石风化程度划分 表 26-4

名称	风化特征
未风化	结构构造未变，矿物色泽成分没发生变化，岩质新鲜
微风化	结构构造，矿物色泽基本未变，部分结构面有铁锰质渲染，少量风化裂隙
中风化	结构部分破坏，岩节里面有次生矿物，风化裂隙发育，岩体被切割成块状
强风化	结构大部分破坏，矿物成分显著变化，风化裂隙很发育，岩体破碎，
全风化	结构基本全部破坏，但尚可辨认，有残余结构强度

(2) 岩石的结构构造

岩石的结构构造是指岩石中矿物（或岩屑）颗粒的大小、形状、排列、粒间连接方式及微结构面发育情况等反映在岩块构成上的特征。岩石的结构特征，尤其是粒间连接及微结构面的发育特征对岩块的力学性质影响很大，进而影响岩质基坑的稳定性。

颗粒间具有牢固的连接是岩石区别与土，并赋予岩石以优良的工程地质性质的主要原因。岩石的粒间连接分结晶连接和胶结连接两大类。

结晶连接是矿物颗粒通过原子或离子使不同晶粒紧密接触，故一般强度较高。但是不同的结晶结构对岩块的性质影响不同，一般来说，等粒结构的岩石强度比非等粒结构的高，且抗风化能力强。在等粒结构中，细粒结构岩石强度比粗粒结构的高。总之，结晶越细越均匀，非晶质成分越少，岩块强度越高，如某粗粒花岗岩的抗压强度为 120MPa，而与其成分相同的细粒花岗岩的抗压强度可达 250 MPa。

胶结连接是颗粒通过胶结物连接在一起的，如碎屑岩等具有这种连接方式。胶结连接的岩块强度取决于胶结成分及胶结类型。一般来说，硅质胶结的岩块强度最高；铁质胶结、钙质胶结的次之；泥质胶结的岩石强度最低，且抗水性最差。从胶结类型来看，常以基质式胶结的岩块强度最高，孔隙式胶结的次之，接触式胶结的岩石强度最低。

微结构面是指存在于矿物颗粒内部或颗粒间的弱面或缺陷，包括矿物解理、晶格缺陷、粒间空隙、微裂隙、微层面及片理片麻理等。它们的存在，不仅降低了岩块的强度，还导致岩块力学性质具有明显的各向异性，沿着这些微结构面产生剪切滑移，导致岩质基坑边坡失稳。

岩石的构造是指组成岩石的矿物集合体之间及其与其它组分之间的排列组合方式。如岩浆岩中的流线、流面构造，沉积岩中的微层理构造，变质岩中的片状构造及其定向构造等。这些构造都可使岩石物理力学性质复杂化。

由上述可知，岩石的结构构造不同，其力学性质及其各向异性的不连续性程度也不同。因此，在研究岩石力学性质时，也要注意对其各向异性和不连续性的研究。但是，相对岩石而言，岩体的各向异性和不连续性则更加显著，主要是岩体中的结构面的影响所致。因此，我们在研究岩体的工程地质性质时，一方面要考虑组成岩体的岩块的性质，另一方面，也要考虑岩体结构面的工程地质性质。两者都要兼顾，岩体边坡的破坏，绝大多数是沿结构面破坏的。

2. 岩体的结构特征

岩体结构(rockmass structure)是指岩体中结构面与结构体的排列组合特征。因此，岩体结构应包括两个要素或称结构单元，即结构面和结构体，也就是说，不同的结构面与结构体以不同的方式排列组合，形成了不同的岩体结构类型。大量的岩石基坑边坡失稳实例表明，边坡的失稳破坏，往往主要不是因岩石块体本身的破坏，而是因岩体结构失稳引起的。所以，不同的结构类型的岩体，其物理力学性质、力学效应及其稳定性都是不同的。因此研究岩体的结构类型、特征是岩体工程中的一个重要课题。

(1) 结构面的成因类型

根据地质成因不同，可将结构面分为原生结构面、构造结构面和次生结构面三类，各类结构面的主要特征见表 26-5。

a. 原生结构面是指岩体在成岩过程中形成的结构面，其特征与岩体成因密切相关。因此，又可将其分为沉积结构面、岩浆结构面和变质结构面三类。

沉积结构面是指沉积岩在沉积和成岩过程中形成的，包括层理面、软弱夹层面、沉积间断面和不整合面等。该结构面的特征与沉积岩的成层性有关，一般延伸性较强，常贯穿整个岩体，产状随岩层产状而变化。沉积岩为主的基坑，沿倾向坑内的层面产生滑动的可能性较大，主要取决于基坑边坡与层面的空间位置关系。

岩浆结构面是指在岩浆侵入及冷凝过程中形成的，包括岩浆岩与围岩的接触面、各期岩浆岩之间的接触面和原生冷凝节理面等。岩浆岩为主的基坑，沿着岩脉或岩墙的接触面产生的滑动可能性较大。

岩体结构面类型及特征

表 26-5

成因类型	地质类型	主要特征			基坑边坡稳定性评价
		产状	分布	性质	

原生结构面	沉积结构面	1. 层理面 2. 软弱夹层 3. 不整合面、假整合面 4. 沉积间断面	一般与岩层产状一致,为层间结构面	海相岩层中,此类结构面分布稳定,陆相岩层中呈交错状,易尖灭	层面、软弱夹层等结构面较为平整,不整合面及沉积间断面多由碎屑泥质物质构成,且不平整。	当此类结构面倾向基坑内时,有可能造成基坑失稳,尤其软弱夹层更为严重,应重点支护
	岩浆结构面	1. 侵入体与围岩接触面 2. 岩脉、岩墙的接触面 3. 原生冷凝节理	岩脉受构造结构面控制,而原生节理受岩体接触面控制	接触面延伸较远,比较稳定,而原生节理往往短小密集	与围岩接触面可具熔合及破坏两种特征,原生节理面一般为张裂面	原生节理一般不会发生较大规模破坏,但当岩脉走向与基坑边坡一致时,可能发生滑移
	变质结构面	1. 片理 2. 片岩软弱夹层	产状与岩层或构造方向一致	片理短小,分布极密,片岩软弱夹层延伸较远,具固定层次	结构面光滑平整,片理在岩层深部闭合成隐蔽结构面,片岩软弱夹层矿物成鳞片状	在浅变质的沉积岩组成的基坑常造成失稳,片岩夹层对基坑边坡也有较大危害,应重点支护,片理密集时,可参考土体基坑边坡支护设计
构造结构面		1. 节理(X型节理、张节理) 2. 断层(正断层、逆断层、走滑移断层) 3. 层间错动 4. 羽状裂隙劈理	产状与构造线呈一定的关系,层间错动与岩层一致	正断层较短小,走滑移断层延伸较远,逆断层规模较大	正断层常具充填,层锯齿状,走滑移断层平直,逆断层呈带状分布,含断层泥、糜棱岩	基坑中以节理及小断层居多,其中X型节理与基坑边坡易构成楔形滑动体,大断层都以破碎带出现,这些都是岩体基坑支护的重点
次生结构面		1. 卸荷裂隙 2. 风化裂隙 3. 风化夹层 4. 泥化夹层 5. 次生夹层	受地形及原生结构面控制	分布往往呈不连续状,透镜体,延伸性差,地表浅部发育	一般为泥质充填,水理性很差,易形成泥化夹层及软弱带	岩体基坑这种结构面较发育,但规模一般不大,支护时加强防水

变质结构面可分为残留结构面和重结晶结构面。残留结构面主要是沉积岩经变质后,绢云母、绿泥石等鳞片状矿物在层面上聚集,并定性排列而形成的结构面,如千枚岩的千枚理面和板岩中的板理面等。重结晶结构面主要有片理面和片麻理面等。它们是岩石发生深度变质和重结晶作用下,片状矿物和柱状矿物富集并成定向排列形成的,它们改变了原岩的面貌和结构,对岩体的物理力学性质常起控制作用。变质岩为主的基坑,沿残留结构面产生滑动的可能性较大,沿重结晶结构面产生滑动的可能性较小。

b. 构造结构面是指岩体形成后在构造应力作用下形成的各种破裂面,包括断层、节理、劈理和层间错动等。

构造结构面,除被胶结者外,绝大多数都是脱开的,规模大者,如断层、层间错动等,多数有厚度不等的充填物,并发与有由构造岩组成的构造破碎带,在地下水的帮助下,有的已泥化或变成软弱夹层。因此,这部分构造结构面(带)的工程地质性质很差,经常导致基坑边坡岩体的滑动破坏。规模小者,如节理、劈理等、多短小而密集,一般无充填或薄层充填,

主要产生小规模滑动。

c. 次生结构面是岩体形成后在外营力作用形成的结构面，包括卸荷裂隙、风化裂隙，次生夹泥层和泥化夹层等。

卸荷裂隙面是因表部岩体剥蚀或人工开挖卸荷造成应力释放和调整而产生的，产状与开挖临空面近于平行，并具有张性特征。

泥化夹层是原生软弱夹层在构造和地下水的作用下形成的，次生夹泥层则是地下水携带的细颗粒物质及溶解物沉淀在裂隙中形成的。它们的性质都很差，均属于软弱结构面，在岩体基坑支护设计中应引起足够的重视。

(2) 结构面的规模和分级

结构面的规模不仅影响岩体的力学性质，而且影响基坑边坡工程岩体的力学作用及其稳定性。按结构面延伸长度、切割深度、破碎带宽度及其力学效应，可将结构面划分为五级。

I级：指大断裂或区域性断层，一般延伸约数公里至数十公里以上，破碎带宽度约数米至数十米。这些区域性大断层往往具有现代活动性，工程应尽量避免，因此，一般的基坑很少遇到这样的结构面。

II级：指延伸长而宽度不大的区域性地质界面，如较大的断层、层间错动、不整合面级原生软弱夹层等。其规模贯穿整个工程岩体，长度一般为数百米至数公里，破碎带宽度数十厘米至数米，往往影响工程的局部稳定。

III级：指长度为数十米至数百米的断层、区域性节理、延伸较好的层面及层间错动等。其宽度一般为数厘米至一米左右。一般性的岩体基坑中，这种结构面经常遇到，往往控制着基坑边坡的稳定性。

IV级：至延伸较差的节理、层面、次生裂隙、小断层及较发育的片理、劈理等。其长度一般为数十厘米至三十厘米，宽度接近与零至数厘米不等，是构成岩块的边界面。它们破坏了岩体的完整性，影响岩体的物理力学性质及应力分布状态。该结构面数量多，分布具有随机性，主要影响岩体的力学性质。造成岩体力学性质的各向异性。岩体基坑工程中这样的结构面大量存在，如其多组结构面的产状与基坑边坡的产状构成最不利组合时，往往导致基坑边坡的滑动破坏，如楔形体滑动、三角形滑动、台阶状滑动等。

V级：又称微结构面，指隐节理、微层面、微裂隙及不发育的片理，劈理等，其规模小，连续性差，常包含在岩块内，主要影响岩块的物理力学性质，该结构面对基坑边坡稳定性影响较小，可以不予考虑。

上述五级结构面中，III、IV级结构面在岩体基坑工程中经常遇到，而且决定着基坑边坡的稳定性，在岩体基坑设计中应重点考虑。

(3) 岩体的结构类型划分

岩体结构体是指岩体中被结构面切割围限的岩石块体。结构面级别不同所切割围限的结构体的规模也是不同的。如I级结构面所切割的I级结构体，其规模可达数平方公里，地质上称地块或断块；II、III级结构面所切割的II级结构体规模相应减小；只有IV级结构面切割的IV级结构体，才被称为岩块，它是组成岩体的基本的单元体。所以，结构体和结构面一样，也是有级序的，一般分为4级。其中以IV级结构体规模最小，其内部还包含有微裂隙、隐节理等V级结构面。

岩体结构体的形态极为复杂，常见的形状有柱状、板状、楔形状及菱形状等，在强烈的破碎部位，还有片状、鳞片状及碎屑状等形态。结构体形状不同，其稳定性也不同。一般来说，板状结构体比柱状、菱形状的更易滑动，而楔形结构体比锥形结构体的稳定性差。但是，结构体的稳定性往往还需要结合其产状及与基坑边坡的空间组合关系来综合分析。

由于结构面的切割，导致岩体结构的复杂性。为了概括反映岩体中结构面和结构体的成因、特征及其排列组合关系，将岩体结构划分为5大类。各类结构岩体的基本特征列于表

26-6。由表可知，不同结构类型的岩体，其岩石类型、结构体和结构面的特征均不同，岩体的工程地质性质与变形破坏机理也都不同。在岩体基坑支护设计时，所采用的计算模型也有显著差别。但其根本区别在于结构面的性质及其发育程度，如层状结构岩体中发育的结构面主要是层面，对岩体基坑设计来说，主要是岩层面的滑动，尤其对软弱夹层的层面更是如此；而整体状结构岩体中结构面往往呈断续分布，规模小，且稀疏；其稳定性相对较好；碎裂结构岩体中结构面常为贯通的，且发育密集，组数多，岩体基坑支护设计时应考虑最发育的一组或与基坑边坡组合最不利的一组即可；而散体状结构岩体中发育大量的随机分布的裂隙，结构体呈碎块状或碎屑状，对于该类岩体基坑支护设计，可以采用土体基坑的圆弧滑动法计算设计。

岩体结构类型及特征

表 26-6

岩体结构类型	岩体地质类型	主要结构体形状	结构面发育情况	岩土工程特征	可能发生的基坑工程问题
整体状结构	均质、巨块状岩浆岩、变质岩、巨厚层沉积岩、	巨块状	以原生构造节理为主，多为闭合型，结构面间距大于 1.5m，一般不超过 1~2 组，无危险结构面组成的滑体	整体性强度高，岩体稳定，可视为均质弹性各向同性介质	基坑边坡稳定性好，对结构面不发育的可不进行支护设计，但对发育有 2~3 组结构面，且与基坑边坡走向构成最不利组合（楔形体）时应进行重点支护
块状结构	厚层状沉积岩、变质岩、块状岩浆岩、变质岩	块状柱状	只具有少量贯穿性较好的节理、裂隙，结构面间距为 0.7~1.5m，一般为 2~3 组，有少量分离体	整体强度较高，结构面相互牵制，接近弹性各向同性介质	当层面倾向基坑内，且倾角小于坡角时，可能沿层面产生滑动，尤其以软弱泥化夹层更危险，应重点支护
层状结构	多韵律的薄层及中厚层状沉积岩、浅变质岩	层状板状透镜状	有层理。片理、节理、常有层间错动	接近均一的各向异性体，一般为正交各向异性，其变形、强度受层面及岩层组合控制，可视为弹性体，稳定性较差	易引起较大规模的岩体滑动，且基岩裂隙水发育，当结构面有泥质充填时，边坡稳定性更差，应重点支护
碎裂状结构	构造影响严重的破碎岩层	碎块状	断层、断层破碎带、片理及层间结构面胶发育，结构面间距为 0.25~0.5m，一般为 3 组以上，由许多分离体形成	岩体完整性破坏较大，整体强度很低，并受断层等软弱结构面控制，多呈弹塑性介质，稳定性很差	易引起基坑边坡失稳，支护设计可采用土体基坑的方案
散体状结构	构造影响剧烈的断层破碎带，强风化带，全风化带	碎屑状颗粒状	断层破碎带交叉，构造及风化裂隙密集，结构面及组合错综复杂，并多有粘土充填，形成大小不一的分离体	岩体完整性完全破坏，稳定性极差，岩体接近松散介质	

3. 岩体的工程地质分类

岩体的工程地质分类是岩体力学和岩体工程中的一个重要研究课题。它是工程岩体稳定性分析的基础，也是岩体工程地质条件定量化的一个重要途径。岩体工程地质分类是通过岩体的一些简单和容易实测的指标，将工程地质条件和岩体力学性质参数联系起来，并借鉴已建工程设计、施工和处理等成功与失败方面的经验教训，对岩体进行归类的一种工作方法。其目的是通过分类，概括地反映各类工程岩体的质量好坏，预测可能出现的岩体工程问题，为基坑工程的设计、支护衬砌、建筑选型和施工方法选择等提供参数和依据。

目前，国内外已有的岩体分类方案有数十种之多，有定性的，也有定量和半定量的，有单一因素分类，也有考虑多种因素的综合分类。各种方案所考虑的原则与因素虽不尽相同，但其特征都是考虑影响岩体工程地质性质的主要因素，如岩体完整性和成岩条件、岩块强度、结构面发育特征和地下水情况等因素。下面介绍几种常用的、与基坑支护设计密切相关的分类方法。

(1) 岩样完整性质量指标 RQD 分类

岩样完整性质量指标 RQD 指标是钻孔中获得的长度大于 10cm 的岩芯断块长度总和 l_p 与岩芯相应进尺长度 l_t 之比。根据 RQD 对岩体进行质量划分，具体见表 26-7。

$$RQD = \frac{l_p}{l_t} \times 100\% \quad (26-1)$$

岩体 RQD 质量分类 表 26-7

RQD	>90	75~90	50~75	25~50	<25
岩体质量	好	较好	较差	差	极差

(2) 岩体按坚硬程度的分类

《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001) 对按岩石抗压强度大于 30MPa 与小于 30MPa 划分为硬质岩与软质岩，同时按岩石坚硬程度等级的定性分类见表 26-8。同种风化程度的硬质岩与软质岩的物理力学性质差异很大，对于中风化~微风化的硬质岩体构成的基坑，若结构面不是很发育，则可以不进行支护，但对软质岩和极软岩都要进行支护。

岩体按坚硬程度等级的定性分类 表 26-8

坚硬程度等级		定性鉴定	代表性岩石
硬质岩	坚硬岩	锤击声清脆，有回弹，振手，难击碎，基本无物吸水反应	未风化~微风化的花岗岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英岩、石英砂岩、硅质砾岩、硅质石灰岩等
	较硬岩	锤击声较清脆，有轻微回弹，稍振手，较难击碎，有轻微吸水反应	1、微风化的坚硬岩 2、未风化~微风化的大理岩、板岩、石灰岩、白云岩、钙质砂岩
软质岩	较软岩	锤击声不清脆，无回弹，较易击碎，浸水后指甲可以刻出印痕	1、中等风化~强风化的坚硬岩或较硬岩； 2、未风化~微风化的凝灰岩、千枚岩、泥灰岩、砂质泥岩等
	软岩	锤击声哑，无回弹，有凹痕，易击碎，浸水后手可掰开	1、强风化的坚硬岩或较硬岩； 2、中等风化~强风化的较软岩； 3、未风化~微风化的页岩、泥岩、泥质砂岩等
极软岩		锤击声哑，无回弹，有较深凹痕，手可捏碎，浸水后可捏成团	1、全风化的各种岩石； 2、各种半成岩

(3) 岩体按工程岩体分级标准分类

国标《工程岩体分级标准》(GB50021-2001)提出采用两步分级方法。首先,按岩体基本质量指标 BQ 进行初步分级;然后,针对各类工程岩体的特点考虑其它影响因素,如天然应力、地下水及结构面方位等,对 BQ 进行修正,再按修正后的[BQ]进行详细分级,其中,岩体基本质量指标 BQ 表达式为:

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (26-2)$$

当 $R_c > 90k_v + 30$ 时,以 $R_c = 90k_v + 30$ 和 k_v 代入(26-2)式计算 BQ 值;当 $k_v > 0.04R_c + 0.4$ 时,以 $k_v = 0.04R_c + 0.4$ 和 R_c 代入(26-2)式计算 BQ 值。(26-2)式中, R_c 为岩石的饱和单轴抗压强度(MPa); k_v 为岩体的完整系数,可用声波试验资料按下式确定:

$$K_v = \left(\frac{V_{mp}}{V_{rp}} \right)^2 \quad (26-3)$$

式中, V_{mp} 为岩体的纵波速度; V_{rp} 为岩块的纵波速度。当无声波试验资料时,也可用岩体单位体积内的结构面条数,查表 26-9 求得 k_v 值。

岩体完整系数表 表 26-9

J_v (条/ m^3)	<3	3~10	10~20	20~35	>35
k_v	>0.75	0.75~0.55	0.55~0.35	0.35~0.15	<0.15

岩体的基本质量指标,主要考虑了组成岩体岩石的坚硬程度和岩体的完整性。按 BQ 值和岩体质量定性特征,将岩体划分为五级,具体见表 26-10、表 26-11、表 26-12。

岩体 BQ 质量分类 表 26-10

基本质量级别	岩体质量的定性特征	岩体基本质量指标(BQ)
I	坚硬岩,岩体完整	>550
II	坚硬岩,岩体较完整 较坚硬岩,岩体完整	550~451
III	坚硬岩,岩体较破碎 较坚硬岩或软硬岩互层,岩体较完整 较软岩,岩体完整	450~351
IV	坚硬岩,岩体破碎 较坚硬岩,岩体较破碎—破碎 较坚硬岩或软硬岩互层,且以软岩为主,岩体较完整—较破碎 软岩,岩体完整—较完整	350~251
V	较软岩,岩体破碎 软岩,岩体破碎—较破碎 全部极软岩及全部极破碎岩	<250

注:表中岩石坚硬程度按表 26-11 划分,岩体破碎程度按表 26-12 划分。

岩石坚硬程度划分

表 26-11

岩石饱和单轴抗压强度 R_C /MPa	>60	60~30	30~15	15~5	<5
坚硬程度	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩	极软岩

岩体完整程度划分

表 26-12

岩体完整系数 k_v	>0.75	0.75~0.55	0.55~0.35	0.35~0.15	<0.15
完整程度	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎

对基坑来说，一般接近地表，而不像地下洞室，埋深较大，因此，对基坑边坡岩体一般可以不进行天然应力校正($K_3=0$)，只进行软弱结构面和地下水修正。修正值[BQ]按下式计算：

$$[BQ] = BQ - 100(K_1 + K_2 + K_3) \quad (26-4)$$

式中， K_1 为地下水影响修正系数，按表 26-13 确定； K_2 为主要软弱结构面产状影响修正系数，按表 26-14 确定； K_3 为天然应力修正系数。

修正系数 K_1 表

表 26-13

地下水状态	修正系数 K_1			
	BQ>450	BQ=450~350	BQ=350~250	BQ<250
潮湿或点滴状出水	0	0.1	0.2~0.3	0.4~0.6
涌流状出水，水压 ≤ 0.1 MPa 或单位出水量<10L/min	0.1	0.2~0.3	0.4~0.6	0.7~0.9
涌流状出水，水压>0.1MPa 或单位出水量>10L/min	0.2	0.4~0.6	0.7~0.9	1.0

修正系数 K_2 表

表 26-14

结构面产状及其与基坑边坡走向的组合关系	结构面走向与基坑边坡走向夹角 $\alpha < 30^\circ$, 倾角 $\beta = 30^\circ \sim 70^\circ$	结构面走向与基坑边坡走向夹角 $\alpha > 60^\circ$, 倾角 $\beta > 70^\circ$	其他组合
K_2	0.4~0.6	0~0.2	0.2~0.4

根据修正值[BQ]的岩体分级仍按表 26-10 进行。

4. 岩体的力学性质

岩体是岩块(石)和结构面网络组成的集合体，因此，岩体的力学性质就包括岩块的力学性质和结构面的力学性质。而力学性质一般包括两个方面，一方面是变形特性，另一方面是强度特性。

(1) 岩石的力学性质

岩石在外力作用下所表现出来的性质，称为岩石的力学性质。在外力作用下，岩石首先

会产生变形,这种变形又可分为弹性变形和塑性变形。弹性变形是岩块受力后发生的全部变形,在外力解除的同时立即消失,因而是可逆变形;塑性变形是岩块受力变形后,在外力解除后,变形也不再恢复,是不可逆变形,又称永久变形或残余变形。随着力的不断增加,当达到或超过某一极限值时,岩石便产生破坏。将岩石抵抗外力破坏的能力称为强度。根据岩石破坏时的应力类型,岩石的破坏可分为拉破坏、剪破坏和流动破坏三种基本类型。岩体基坑中一般以剪切破坏为主。由于受力状态和破坏形式的不同,岩石的强度又分为单轴抗压强度、单轴抗拉强度,抗剪强度和三轴压缩强度等。

a. 岩石的变形性质

岩石在连续加载条件下的应变,可分为轴向应变 ϵ_a 、横向应变 ϵ_d 和体积应变 ϵ_v 。前两种可以用仪器进行测量,体积应变,由 $\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_d$ 计算求得。

采用含微裂隙、且不太坚硬的岩块制成岩样试块,在刚性材料机上进行试验,得到标准应力-应变全过程曲线见图 26-1。据此,可将岩石变形划分为不同阶段。

① 压密阶段(OA段):在外力作用下,试件中原有的张开型微裂隙逐渐闭合,岩石被压密,曲线呈上凹型,但对坚硬、少裂隙德岩石则不明显,甚至不显现。

② 弹性变形至微破裂稳定发展阶段(AC段):该段 $\sigma - \epsilon_a$ 曲线呈近似直线关系,可细分为弹性变形阶段(AB段)和微裂隙稳定发展阶段(BC段)。B点的应力称弹性极限。C点应力称屈服极限。

③ 非稳定破裂发展阶段(CD段):进入本阶段,微裂隙的发展出现质得变化,由于试件微裂隙造成局部应力集中效应显著,薄弱部位首先出现破坏,应力重分布,其结果又会引起次薄弱部位的破坏,依次进行下去,直至试件完全破坏。本阶段的上界应力称为峰值强度或单轴抗压强度。

④ 破坏后阶段(D点以后段):岩石承载力达到峰值后,其内部结构完全破坏,但试件仍基本保持整体状。到本阶段,裂隙快速发展,交叉相互联合,形成宏观断裂面。此后,岩石变形主要表现为沿宏观断裂面的块体滑移,试件承载力大幅度下降。

由于大多数岩石的变形都具有不同程度的弹性性质,因此在工程荷载或自重应力作用下,一定程度上可视岩石为准弹性介质。根据弹性理论,岩石的变形特征可用变形模量和泊松比等参数表示。这两个参数也是岩体基坑数值计算的必用参数。

变形模量是指单轴压缩条件下,岩石试件的轴向应力 σ 与轴向应变 ϵ_a 之比。当应力-应变曲线为直线时,岩石的变形模量 $E_0(\text{MPa})$ 为常量,数值上等于直线的斜率。由于变形为弹性变形,所以该模量又称为弹性模量 E 。

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_a} \quad (26-5)$$

泊松比 μ 是指在单轴压缩条件下,岩石试件的横向应变 ϵ_d 与轴向应变 ϵ_a 之比。

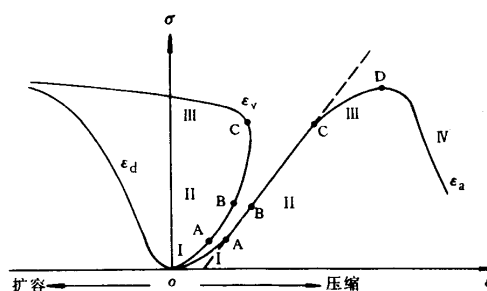


图 26-1 岩石应力-应变全过程曲线

$$\mu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_a} \quad (26-6)$$

实际工作中，常采用饱和单轴抗压强度一半($\sigma_c/2$)处的 ε_d 与 ε_a 来计算岩石的泊松比。

b. 岩石的强度性质

岩石在外力作用下，变形不断增加，当荷载达到并超过某一定值时，岩石将由变形转化为破坏。将岩石抵抗外力破坏的能力，称为强度。按外力作用方式不同，岩石强度又可分为单轴抗压强度、单轴抗拉强度，抗剪强度和三轴压缩强度等。

① 岩石的单轴抗压强度

岩石试件在单向受力破坏时所能承受的最大压应力，称为单轴抗压强度，简称抗压强度。它是反映岩石基本力学性质的重要指标，在岩体工程分类和建立岩体破坏判据中都是必不可少的。岩石的抗压强度与后面要提到的抗拉强度、抗剪强度存在一定的比例关系，据有关资料统计，抗拉强度为它的 3%~30%，抗剪强度为它的 8%~50%，据此，可推算其它强度。

岩石的抗压强度，通常是利用标准岩块试件，在材料机上轴向加压，直至试件破坏而测定的。

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (26-7)$$

式中， P 为试件的破坏荷载(kN)； A 为试件的横断面积(mm²)； R_c 为岩石的单轴抗压强度(MPa)。

目前还有采用不规则的试件的点荷载试验间接地求得岩石的单轴抗压强度，常用如下地经验公式确定：

$$R_c = 22.82I_{s(50)} \quad (26-8)$$

式中， $I_{s(50)}$ ——经修正后地岩石点荷载强度 (MPa)。

② 岩石的单轴抗拉强度

岩石试件在单向受拉条件下断裂时所承受的最大拉应力，称为岩石的单轴抗拉强度，简称抗拉强度。实际岩体工程中，通常不允许出现拉应力，因为岩石的抗拉能力最低，因此，岩石的抗拉强度是一个十分重要力学指标，岩体基坑张应力区张拉破坏主要根据该指标判断。

测定岩石的抗拉强度的方法有直接法和间接法，由于直接法岩样制样困难，目前大多采用间接法，间接法以劈裂法和点荷载试验应用最广。

劈裂法是在规则岩块试件上轴向对称施加一线性分布的荷载，此时，在试件中产生垂直与上下荷载作用方向的张应力，使试件沿竖向直径裂开破坏，据弹性理论，按下式计算岩石的抗拉强度。

$$R_t = \frac{2P_t}{\pi dh} \quad (26-9)$$

式中， R_t ——岩石的抗拉强度 (MPa)； P_t ——试件破坏荷载 (N)； d ——试件直径 (mm)； h ——试件高度 (mm)。

采用不规则的试件的点荷载试验间接地求得岩石的单轴抗拉强度，常用如下的经验公式确定：

$$R_t = (0.86 \sim 0.9)I_{s(50)} \quad (26-10)$$

③ 岩石的抗剪强度

岩石试件受剪力作用时能抵抗剪切破坏的最大剪应力称为抗剪强度。有内聚力 C 和内摩擦力 $\sigma \tan \varphi$ 两部分组成，表达式为：

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + C \quad (26-11)$$

C 和 φ 是岩体基坑支护设计的两个重要参数。

④ 岩石的三轴压缩强度

岩石试件在三向压应力作用下能承受的最大主应力，称为岩石的三轴压缩强度。在一定围压 σ_3 作用下，对试件进行三轴试验。岩石三轴压缩强度 σ_{1m} (MPa)为：

$$\sigma_{1m} = \frac{P_m}{A} \quad (26-12)$$

式中， P_m ——试件破坏时的轴向荷载 (N)； A ——试件的初始横断面积 (mm^2)。

实际工程中岩体都是处于三轴压缩状态，但基坑边坡，坡体一定范围内的岩体处于单轴压缩状态。

(2) 岩体的力学性质

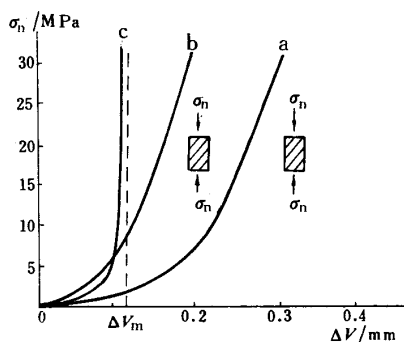
岩体的力学性质取决于组成岩体的岩块和结构面的力学性质，岩体的破坏很少遇到岩块破坏，绝大多数是沿结构面破坏，因此，岩体的力学性质很大程度上取决于结构面的力学性质。岩体的力学性质包括岩体的变形、岩体的强度及其动力性质，其中动力性质在基坑支护设计中不大涉及，这里不多论述。

a. 岩体的变形性质

由于岩体中包含有大量的结构面，结构面中常有充填物，因此，在外力作用下岩体的变形是岩石的变形、结构面闭合和充填物变形三者的总和，一般情况下，结构面和充填物的变形常起控制作用。

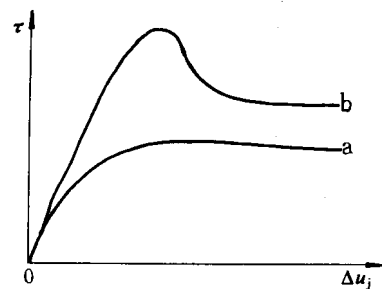
① 结构面的变形特征

结构面在外力作用下的变形包括法向变形和切向变形。在法向应力作用下，结构面闭合变形开始较快，变形量也较大，随后逐渐变慢，变形趋于常量。见图 26-3。常用法向刚度来表征法向变形特征。在法向应力作用下，结构面产生单位法向变形所需要的法向应力，称为结构面的法向刚度 K_n ，其大小等于 $\sigma_n - \Delta V_j$ 曲线上某点处切线的斜率。它是反映结构面法向变形的参数。在一定的法向应力作用下，进行沿结构面的剪切试验，可得到结构面的剪应力 τ —剪位移 Δu_j 关系曲线，见图 26-4，结构面失稳剪切变形有两种基本类型：一类为塑性变形型，如泥化夹层、光滑平直破裂面等一般具有该变形特征；另一类为脆性变形型， $\tau - \Delta u_j$ 关系曲线有峰值点和应力降，当应力降低至一定值后趋于稳定，明显的作用下，



a-含结构面岩块 b-岩块 c-结构面

图 26-3 结构面法向变形特征



a-塑性变形型 b-脆性变形型

图 26-4 结构面剪切变形特征

如粗糙结构面常具有该变形特点。常用切向刚度来表征结构面的切向变形特征。在剪应力作用下，结构面产生单位剪切位移所需要的剪应力，称为结构面的剪切刚度 K_s ，数值上等于 $\tau - \Delta u_j$ 曲线上任一点的切线斜率。它是反映结构面剪切变形特征的主要参数。结构面剪切刚度受结构面本身性质、规模及法向应力大小等的影响。结构面的法向刚度和切向刚度是岩体工程数值计算是必不可少的参数。

② 岩体的变形参数

岩体的变形参数主要是指岩体的变形模量和弹性模量，通常是采用平板载荷试验来确定。采用分级加载，同时测记各级压力下的岩体的变形值，再通过下式计算岩体的变形模量 $E_m(\text{MPa})$ 和弹性模量 $E_e(\text{MPa})$ 。

$$E_m = \frac{pd(1-\mu^2)\omega}{\omega_0} \quad (26-13)$$

$$E_{me} = \frac{pd(1-\mu^2)\omega}{\omega_e} \quad (26-14)$$

式中： p ——承压板单位面积上的压力 (MPa)；

d ——承压板的直径或边长 (cm)；

ω_0 、 ω_e ——分别为相应于 p 下，岩体的总变形和弹性变形(cm)；

ω ——与承压板形状与刚度相关的系数，刚性承压板，方形板取 0.88，圆形板取 0.78；

μ ——岩体泊松比。

b. 岩体的强度性质

在岩体的强度性质中，最重要是抗剪强度。它是影响工程安全和造价的重要因素，在岩体工程，如基坑边坡稳定性、地下洞室围岩稳定性分析与计算中，岩体的抗剪参数是必不可少的。岩体的抗剪强度包括岩石抗剪强度和结构面的抗剪强度，岩石抗剪强度前面已经讨论过，这里主要讨论结构面抗剪强度。

① 平直光滑无充填结构面抗剪强度

这类结构面以光滑破裂面（片理、节理等）为代表，一般无充填，其抗剪强度接近于人工磨光面的摩擦强度，即：

$$\tau = \sigma \tan \varphi_j \quad (26-15)$$

式中： σ ——法向应力 (kPa)； φ_j ——结构面的摩擦角(°)。

但是，大多数平直光滑结构面仍有细微的起伏和凸起，仍有一定的内聚力 C_j ，其抗剪强度仍由粘聚力和摩擦阻力两部分组成。

② 粗糙起伏无充填结构面的抗剪强度

这类结构面的特点具有起伏粗糙度，当法向力较小时，可引起剪胀效应，从而增大结构面的抗剪强度(26-16)式；当法向力较大时，可能导致结构面起伏部分剪断。从而产生内聚力，(26-17)式。

$$\tau = \sigma \tan(\varphi_j + i) \quad (26-16)$$

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi_j + C_j \quad (26-17)$$

式中, φ_j , C_j ——分别为结构面的内摩擦角($^{\circ}$)和内聚力(kPa),

i ——结构面的起伏角($^{\circ}$)。

③ 非贯通断续结构面的抗剪强度

这类结构面的抗剪强度由各段结构面的抗剪强度和非贯通段的岩石的抗剪强度两部分构成, 整个结构面的抗剪强度取决于结构面的贯通性、结构面和岩石的性质。即:

$$\tau = [K_1 C_j + (1 - K_1) C_m] + \sigma [K_1 \operatorname{tg} \varphi_j + (1 - K_1) \operatorname{tg} \varphi_m] \quad (26-18)$$

式中, C_j 、 φ_j ——分别为结构面的内聚力(kPa)和内摩擦角($^{\circ}$);

C_m 、 φ_m ——分别为岩石的内聚力(kPa)和内摩擦角($^{\circ}$);

④ 具充填的软弱结构面的抗剪强度

这类结构面的抗剪强度主要取决于充填物的成分、结构、厚度、充填度和含水状况等。

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C \quad (26-19)$$

式中, C 、 φ ——分别为软弱夹层(充填物)的内聚力(kPa)和内摩擦角($^{\circ}$)。

26.1.2 岩石地区基坑的特点

岩石地区的现代地貌轮廓是在漫长的地质历史发展中经过复杂的内外营力综合作用而成, 一般以低山、丘陵为主。地势高的地方以裸露的岩体为主或覆盖有薄层的第四系地层; 地势低洼处, 发育有较厚的第四系地层, 地下基岩面的起伏较大。地下水类型与岩性密切相关, 灰岩地区可能存在岩溶水, 水量不均匀, 而其它岩石地区一般以基岩裂隙水和第四系潜水为主, 水量较小。

由于市区土地资源渐趋紧张, 必然增加大量高层超高层建筑以及地下空间开发项目, 地下空间的开发需求不断增大, 再者超高层建筑对地基的承载力要求较高以及人防的要求, 岩石地区的基坑开挖较深, 可能进入中风化~微风化岩层, 这样就形成岩石地区基坑特有的现象, 基坑上部为第四系地层, 下部为基岩。

根据组成岩石基坑的地层情况, 将岩石基坑分为: 纯岩体基坑, 土体和岩体组合的基坑。纯岩石基坑和土岩组合基坑统称为岩质基坑。纯岩石基坑一般位于基岩出露地区, 由于地基承载力或地下空间的要求, 基坑需开挖至岩体内一定深度(中风化~微风化带); 这类基坑的特点主要包括以下几方面: 第一, 地下水主要以基岩裂隙水为主, 水量较小, 但灰岩地区可能存在岩溶水。第二, 基坑的稳定性主要受岩体的风化程度和岩体成因类型影响。风化程度方面: 当基坑岩体为强风化时, 一般接近与散体状态, 可采用土质基坑边坡稳定性分析的方法; 当基坑岩体为中风化或微风化时, 岩石强度较高, 其稳定性主要受岩体结构面控制, 岩体成因类型方面: 岩浆岩岩体构成的基坑边坡稳定性相对较好, 如: 花岗岩、闪长岩、辉长岩、辉绿岩、安山岩等; 沉积岩岩体构成基坑边坡稳定性差异较大, 硅质和灰质的碎屑沉积岩, 如石英岩、砂岩、石英角砾岩、灰岩等构成的基坑边坡稳定性较好, 而泥质的碎屑沉积岩, 如泥岩、粘土岩等构成的基坑边坡稳定性较差, 地下水的影晌较大。变质岩岩体构成基坑边坡稳定性差异也较大, 块状的深变质岩, 如大理岩、石英岩、片麻岩等构成的基坑边坡稳定性相对较好, 而片状的浅变质岩, 如千枚岩、片岩、板岩等构成的基坑边坡稳定性较

差,受地下水的软化影响较大。第三,岩体结构面对纯岩体基坑的稳定性起控制作用,一般岩体基坑的破坏很少是切割岩石破坏的,绝大多数是沿结构面破坏的,而结构面的成因类型对结构面的力学性质影响很大,如原生结构面中的软弱夹层、片岩软弱夹层等强度较低,构造结构面中的断层破碎带、断层泥等受地下水的软化比较严重,很可能导致基坑边坡失稳。结构面的产状与基坑边坡走向的空间位置关系影响其稳定性,当结构面倾向坑内,倾角小于坡角时,极易产生失稳,或两组结构面与坡面组成楔形体时也易产生失稳。这类基坑边坡支护设计主要采用一定的措施加强沿结构面的抗滑稳定性,此外,坡顶的防水措施也会起到一定的作用。第四,基坑开挖爆破方式对基坑支护结构稳定性影响较大,必须爆破控制措施。

土岩组合基坑一般位于有一定的第四系覆盖的基岩地区,基坑开挖至一定深度,基础持力层为强风化带、中风化带或微风化带岩体,这就形成基坑上半部分是土体,下半部分是岩体的土岩组合基坑类型。这类基坑的特点包括以下几个方面:第一,岩体和土体两种介质差异较大,很难用一种计算模型来解决该问题,有采用传统的方法分开计算,将上覆土层作为超载作用在岩体上,计算岩体部分的稳定性,也有直接采用有限元数值计算。第二,这种基坑支护类型比较复杂,有放坡、桩锚、锚杆肋梁等,而桩锚支护又分桩嵌入基坑底和未嵌入基坑底,对未嵌入基坑底的锚桩支护设计内容较多,包括嵌入深度、岩肩宽度,锁脚锚杆的设计等。第三,这种基坑止水帷幕施工非常关键,尤其是在第四系地层和基岩接触面位置至关重要,直接影响基坑稳定性,而一般的搅拌桩止水帷幕很难嵌入基岩,大多采用高压旋喷止水,采用预钻孔的方式进入基岩 0.5m 左右,然后再进行高压旋喷桩施工,止水效果较好。第四,岩体部分的开挖爆破方式对基坑支护结构稳定性影响较大,必须采用爆破控制措施。第五,同一个基坑中支护类型多样化的特点,由于基岩面起伏较大,甚至有的出露,基坑支护设计时分区段按不同类型的支护方式进行设计。

根据上述岩质基坑的特点,那些认为岩质基坑比土体基坑稳定性好,因此,设计时可以偏冒险的看法往往在很多情况下是错误的,主要是对岩体中的结构面、岩体介质的强度非均匀性认识不足,最终导致岩石基坑的失稳。

26.2 岩石地区的基坑支护类型

根据岩石地区的基坑工程特点、组成基坑的地层结构,将岩石地区的基坑分为纯岩石的基坑支护和土体与岩体相组合的基坑支护来论述基坑支护类型。

26.2.1 岩石基坑支护类型

适用于岩石地区的《锚杆喷射混凝土支护技术规范 GB50086-2001》和《建筑边坡工程技术规范 GB50330-2002》两本国家规范的规定中没有“土钉”的概念。而《建筑基坑支护技术规程 JGJ120-99》的“土钉”和《建筑边坡工程技术规范 GB50330-2002》中的“非预应力锚杆”、《锚杆喷射混凝土支护技术规范 GB50086-2001》中的“全长粘结型锚杆”施工工艺其实并无严格区别,故在岩石地区,“土钉墙”也称为“锚杆喷射混凝土墙”(简称“锚喷墙”)的一种。“锚喷墙”分为两种:“岩石锚喷墙”和“土层锚喷墙”,其中“土层锚喷墙”对应“土钉墙”。

岩石基坑根据组成基坑边坡的岩体的软硬程度、风化程度和结构面的发育程度,对不同类型的岩石基坑采用不同的支护方式,常用的支护方式有:锚杆(包括岩石锚杆和土层锚杆)喷射混凝土支护简称锚喷支护、复合锚喷墙支护、预应力锚杆柔性支护(含预应力锚杆肋梁支护)。对中风化~微风化、结构面不是很发育或者结构面与基坑边坡走向无不利组合、相对较完整的硬质岩体基坑边坡可以不进行支护,采用放坡开挖(坡率法),只根据整体边坡情况做面层处理。

1. 放坡开挖

放坡开挖是指为了防止坑壁塌方，保证施工安全，按一定设计坡度进行基坑开挖的施工方法。当工程条件许可时，放坡开挖应优先选用。当基坑深度超过 5m 采用放坡开挖时，应分级放坡开挖，分级处设过渡平台，平台宽度一般为 1~1.5m。岩质边坡的分级平台宽度一般不小于 0.5m。

该支护形式适用条件如下：

- (1) 基坑周边有足够放坡空间，周围无邻近建（构）筑物、地下管线等位移敏感设施；
- (2) 无地下水或地下水不发育；
- (3) 岩体质量较好的 II、III 级岩体，不存在产状与坡面不利组合的结构面；
- (4) 适应于二、三级基坑。

2. 非预应力锚喷支护

非预应力锚喷支护是岩石地区最为常见的一种支护形式，见图 26-5。它类似与土钉支护，就是在现场原位岩体中以一定间距排列的细长杆件，如钢筋或钢管，通常还外裹水泥浆体或水泥砂浆，以保证岩钉与岩体胶结在一起，在坡体表面喷射一定厚度的钢筋网混凝土面层，形成一个组合体。该支护类型适用条件如下：

- (1) 有一定放坡空间的岩体基坑边坡，对基坑变形要求控制不太严格的浅基坑；
- (2) 岩体质量较好的 II、III 级岩体，不存在产状与坡面不利组合的结构面；
- (3) 碎裂结构~散体结构的岩体，不存在已有滑动结构面；
- (4) 强风化~微风化的岩体。

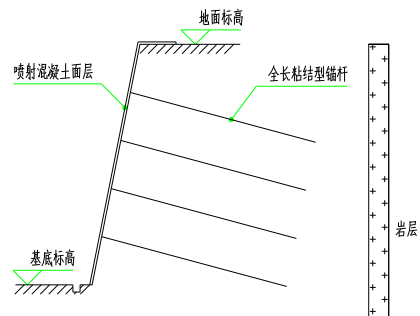


图 26-5 非预应力锚喷支护

3. 复合锚喷墙支护

复合锚喷墙支护，就是采用非预应力锚杆和预应力锚杆相结合的支护类型，见图 26-6。非预应力锚杆和土钉类似，不施加预应力或施加微弱的预应力，只有在岩土体发生变形时才被动受力，而锚杆是施加预应力的，靠锚杆固定段来提供锚固力，靠自由段的伸张来提供预应力，以控制坡体的变形，对强风化、中风化的岩体，预应力不太大时，可直接用锚定板或槽钢作为锚固体系，而当预应力比较大时，则可以采用纵横交错的混凝土肋梁作为锚固体系，锚固点设在肋梁的交叉点处。槽钢的型号和混凝土肋梁的配筋都要满足抗弯、抗剪和构造要求。

该支护类型适用条件如下：

- (1) 有一定放坡空间的岩体基坑边坡，对基坑变形要求控制较严格的基坑；
- (2) 基坑岩体质量较好的 II、III 级岩体，存在产状与坡面不利组合的结构面，如存在楔形体滑动的结构面；
- (3) 基坑浅部为全风化、强风化碎裂结构~散体结构的岩体，下部为中风化、微风化的岩体；存在可能滑动的结构面；

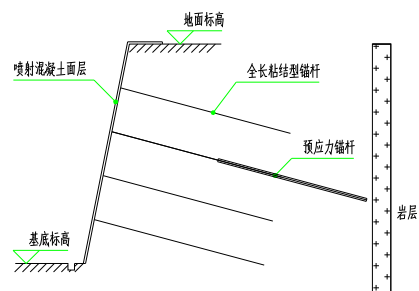


图 26-6 复合锚喷墙支护

- (4) 层面或主要结构面倾向基坑内，倾角小于坡角；
- (5) 发育有断层破碎带，或强度相对软弱的岩脉的基坑。

4. 预应力锚喷支护

预应力锚喷支护，就是采用预应力锚杆或锚索结合钢筋混凝土面层形成的支护体系见图 26-7。锚固体系一般采用预制的钢筋混凝土锚定板或特制的锚索夹具。该支护体系一般预应力较大，取决于基坑深度，锚定板的配筋都要满足抗弯、抗剪和构造要求。

该支护类型适用条件如下：

(1) 有一定放坡空间或者近似直立的岩体基坑边坡，对基坑变形要求控制严格的基坑；

(2) 基坑岩体质量较好的Ⅱ、Ⅲ级岩体，存在产状与坡面不利组合的Ⅲ、Ⅳ级结构面，如存在楔形体滑动的结构面、三角形滑体的结构面；

(3) 基坑浅部为中风化、微风化的岩体；存在可能滑动的结构面；对强风化岩体基坑不宜采用该支护类型，可能导致较大的预应力释放；

(4) 层面或主要结构面倾向基坑内，倾角小于坡角，易形成较大规模的基坑边坡失稳；

(5) 发育有与基坑边坡走向小角度相交的断层破碎带；

(6) 基坑周边环境有重要的保护建筑物或城市生命线工程。

5. 锚杆肋梁支护

锚杆肋梁支护，就是采用预应力锚杆或锚索结合纵横交错的钢筋混凝土肋梁形成的支护体系，见图 26-8。锚固点作用在肋梁的交点上，锚固体系一般采用钢筋混凝土肋梁和锚定板或特制的锚索夹具。该支护体系一般预应力较大，取决于基坑深度，肋梁的配筋要满足抗弯、抗剪和构造要求。

该支护类型适用条件如下：

(1) 有一定放坡空间或者近似直立的岩质基坑边坡，对基坑变形要求控制严格的基坑；

(2) 基坑岩体质量较好的Ⅱ、Ⅲ级岩体，存在产状与坡面不利组合的Ⅲ、Ⅳ级结构面，如存在楔形体滑动的结构面、三角形滑体的结构面；

(3) 基坑浅部为强风化、中风化、微风化的岩体；存在可能滑动的结构面；

(4) 层面或主要结构面倾向基坑内，倾角小于坡角，易形成较大规模的基坑边坡失稳；

(5) 发育有与基坑边坡走向小角度相交的断层破碎带；

(6) 基坑周边环境有重要的保护建筑物或城市生命线工程。

26.2.2 土岩组合基坑支护类型

由于土岩组合地质条件的特殊性，一些传统的支护结构常常会因为施工难度太大而无法实施。如传统的水泥土墙支护形式会因为施工设备无法入岩而导致嵌固深度不满足，无法直接应用。同样，排桩或地下连续墙在土岩组合地质条件下的应用过程中也会遇到类似情况。目前，地下连续墙结合内支撑的支护体系在土岩组合地质条件下并不多见。

根据场地的工程地质条件与水文地质条件、基坑开挖深度及环境条件的不同，土岩组合基坑常用的支护方式有：放坡开挖（坡率法）、非预应力锚杆（包括岩石锚杆和土层锚杆）喷射混凝土支护简称非预应力锚喷墙支护、复合锚喷墙支护、预应力锚喷墙支护（含预应力锚杆肋梁支护）、土岩组合地质条件下的桩锚支护。

关于土岩组合基坑的放坡开挖（坡率法）、非预应力锚杆（包括岩石锚杆和土层锚杆）喷射混凝土支护（简称锚喷支护）类型的适用条件，可以参考岩石基坑。下面主要分析复合锚喷墙支护、土岩组合地质条件下的桩锚支护类型。

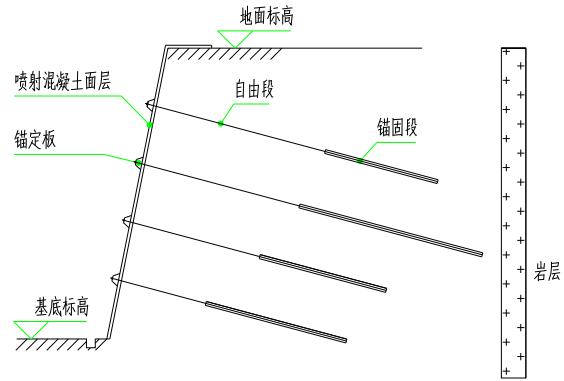


图 26-7 预应力锚喷支护

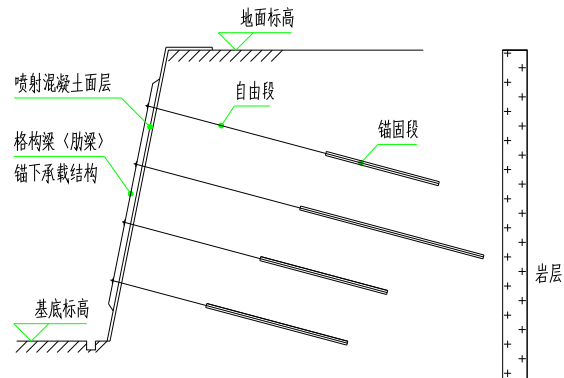


图 26-8 锚杆肋梁支护

1. 复合锚喷墙支护

锚喷支护在岩石地区边坡工程中得到了广泛应用。在土岩组合基坑中，由于锚喷支护自身具有的局限性，该支护形式无法在上部土层为松散砂土、软土、流塑黏性土以及有丰富地下水的情况下单独使用。为了扩大锚喷支护的应用范围，人们对常规的锚喷支护进行了改造，提出了广义复合锚喷墙支护的概念。广义复合锚喷墙支护就是由土层（岩石）锚杆、喷射混凝土与预应力锚杆或超前支护微型桩或水泥土桩组合，以解决基坑变形问题、土体自立问题、隔水问题而形成的支护形式。

常用的复合锚喷墙支护主要有以下几种组合形式：①非预应力锚杆+预应力锚杆+喷射混凝土；②非预应力锚杆+预支护微型桩+喷射混凝土；③非预应力锚杆+预支护微型桩+预应力锚杆+喷射混凝土；④非预应力锚杆+水泥土桩+喷射混凝土；⑤非预应力锚杆+预应力锚杆+水泥土桩+喷射混凝土。⑥非预应力锚杆+预应力锚杆+加筋水泥土+喷射混凝土。为充

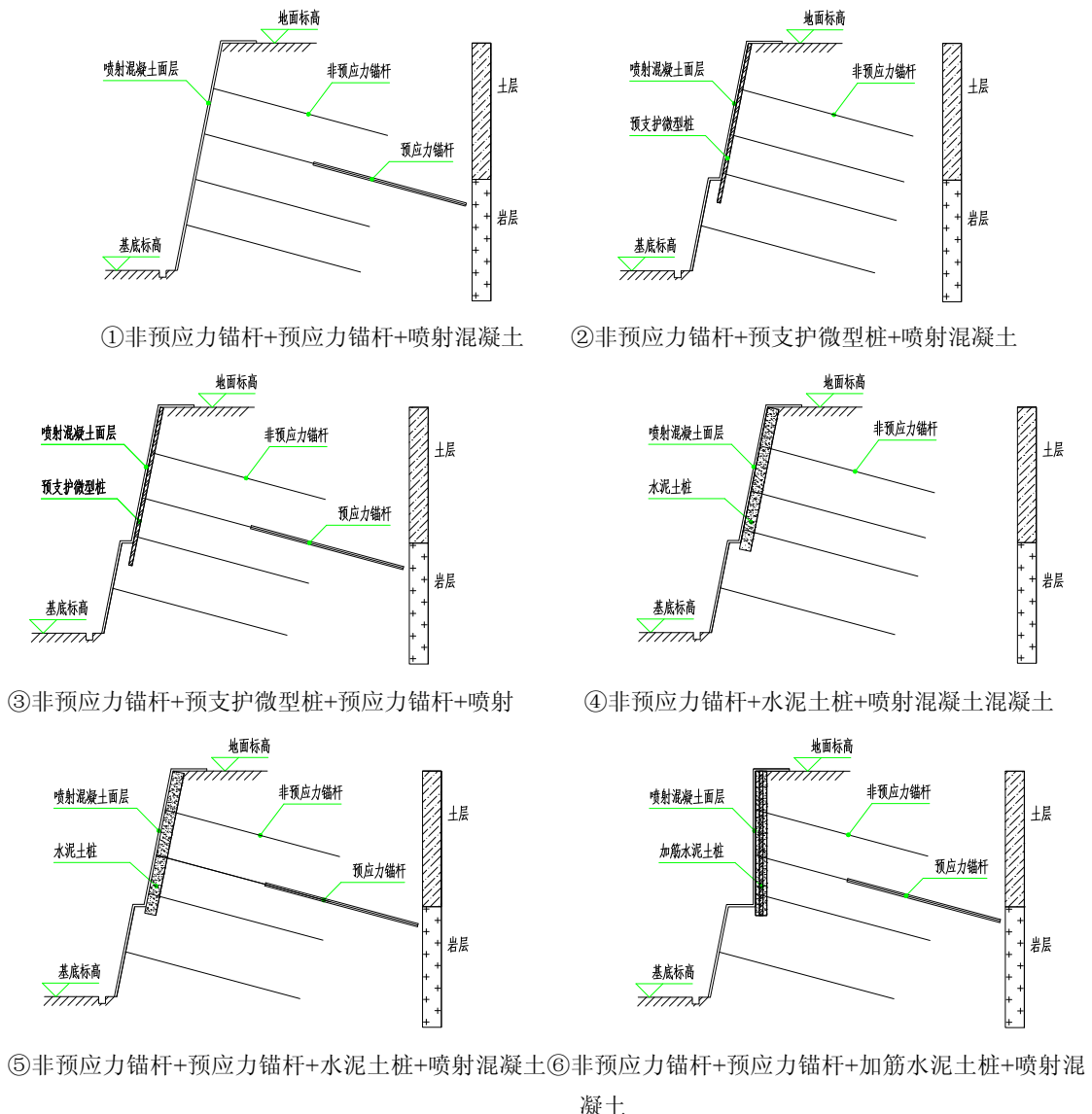


图 26-9 复合锚喷支护类型示意图

分利用放坡空间，减小作用在支护结构上的水土压力，水泥土桩和微型桩常设计成小角度仰斜式。复合锚喷墙支护类型见图 26-9。

下面分别对上述六种复合锚喷墙的特点和使用条件进行讨论。

(1) 非预应力锚杆+预应力锚杆+喷射混凝土

当对基坑的水平位移和沉降有严格要求时,可在锚喷支护中配合使用预应力锚杆。主要通过一定密度的非预应力锚杆和预应力锚杆以及钢筋混凝土面层对基坑土体构成立体的综合约束体系。锚杆的预应力增加了基坑土体潜在的滑动面上的正应力从而提高了其抗剪阻力,大大降低了滑动土体的下滑力,可以有效地控制基坑变形,故该支护形式可应用于深度较大、土层厚度相对较小,地下水不丰富、岩体稳定性相对较好的基坑。

(2) 非预应力锚杆+预支护微型桩+喷射混凝土

微型桩设置在喷射混凝土面层的背部,一般由超前垂直或倾斜设置的注浆钢管构成,钢管直径较小,施工方便、速度快。微型桩的作用是解决基坑分层开挖后支护实施前分层岩土体的自立问题。大面积分布的微型桩可以支撑上部已经完成的喷射混凝土面层的重量。这种支护形式主要适用于放坡较陡而土质松散或岩石破碎、地下水不丰富、自立性较差的基坑。

(3) 非预应力锚杆+预支护微型桩+预应力锚杆+喷射混凝土

在上述第2种支护类型的基础上,增加预应力锚杆。大面积分布的微型桩不但可以支撑上部已经完成的喷射混凝土面层的重量,而且加强了面层的刚度,有利于非预应力或预应力锚杆反力作用在面层上的进一步扩散,为预应力的施加奠定了基础。这种支护形式主要适用于开挖深度较大、放坡较陡且位移控制要求较高而土质松散或岩石破碎、地下水不丰富、自立性较差的基坑。

(4) 非预应力锚杆+水泥土桩+喷射混凝土

该种支护形式在基坑开挖前首先进行水泥土桩截水帷幕施工,截水帷幕施工完成后再沿帷幕进行土方开挖。主要利用水泥土桩截水并兼作超前支护结构,水泥土桩可以起到上述微型桩的作用。该种支护方式很好地解决了基坑分层开挖后支护实施前分层岩土体的自立问题和防渗问题。该支护方式主要适用于上部为含水软弱土层的情况,截水帷幕可只设置在上部土层中,要求截水帷幕进入相对隔水层一定深度。若采用搅拌桩无法实现则采用旋喷桩。若水泥土未嵌入基坑底则应在桩脚处留设过渡平台,下部再放坡开挖支护至基坑底。

(5) 非预应力锚杆+预应力锚杆+水泥土桩+喷射混凝土

在第4种支护类型的基础上,增加预应力锚杆可有效地控制基坑变形。同样,相互搭接的水泥土帷幕不但可以支撑上部已经完成的喷射混凝土面层的重量,而且加强了面层的刚度,有利于岩石(土层)锚杆或预应力锚杆反力作用在面层上后的进一步扩散,为预应力的施加奠定了基础。这种支护形式主要适用于上部为含水软弱土层、开挖深度较大、放坡较陡且位移控制要求较高而土质松散自立性较差的情况。

(6) 非预应力锚杆+预应力锚杆+加筋水泥土+喷射混凝土

在第5种支护类型的基础上,将工字钢等芯材插入水泥土桩中以提高预应力锚杆后的面板刚度,防止预应力过大损失,进一步减小位移。这种支护形式主要适用于锚杆预应力值较大,上部为含水软弱土层、开挖深度较大、放坡较陡且位移控制要求较高而土质松散自立性较差的情况。

上述几种复合锚喷支护形式是广义复合锚喷墙的概念。狭义上讲,复合锚喷墙是由非预应力锚杆和预应力锚杆共同工作的支护形式。预支护微型桩或水泥土桩的存在解决了基坑分步开挖过程中分层土体的自立问题和隔水问题,而预应力锚杆的存在改变了锚喷支护的受力状态,减小了基坑变形。当然,预应力锚杆对复合锚喷支护产生多大的影响取决于预应力锚杆数量的多少及预应力值的大小。

2. 预应力锚喷墙支护

预应力锚喷墙支护是由预应力锚杆、面层、锚下承载结构(肋梁)和排水系统组成的一种基坑支护方法,见如图26-10。

该支护形式适用条件如下:

- (1) 有一定放坡空间,上覆土层为非软土的基坑,对基坑变形要求较严格;

(2) 特别适用于无不良方向性和低强度结构的残积土和风化岩及粉质黏土和不易产生蠕变的低塑性黏土等硬黏土；

(3) 特别适用于上覆土层为天然胶结砂或密实砂和具有一定粘聚力的砾石及天然含水量至少为 5% 的均匀中、细砂；

(4) 适应于一、二、三级基坑。

3. 土岩组合地质条件下的桩锚支护

土岩组合地质条件下的桩锚支护可分为嵌入基底的嵌岩桩锚支护和未嵌入基底的嵌岩桩锚支护两种形式。

(1) 嵌入基底的桩锚支护

嵌入基底的桩锚支护是指支护桩嵌入基底下一定深度的桩锚支护形式。在土岩组合地质

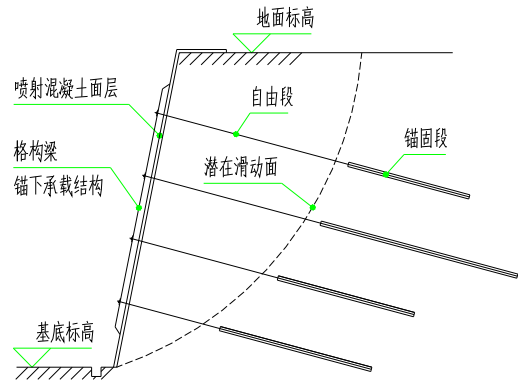


图 26-10 预应力锚喷墙支护

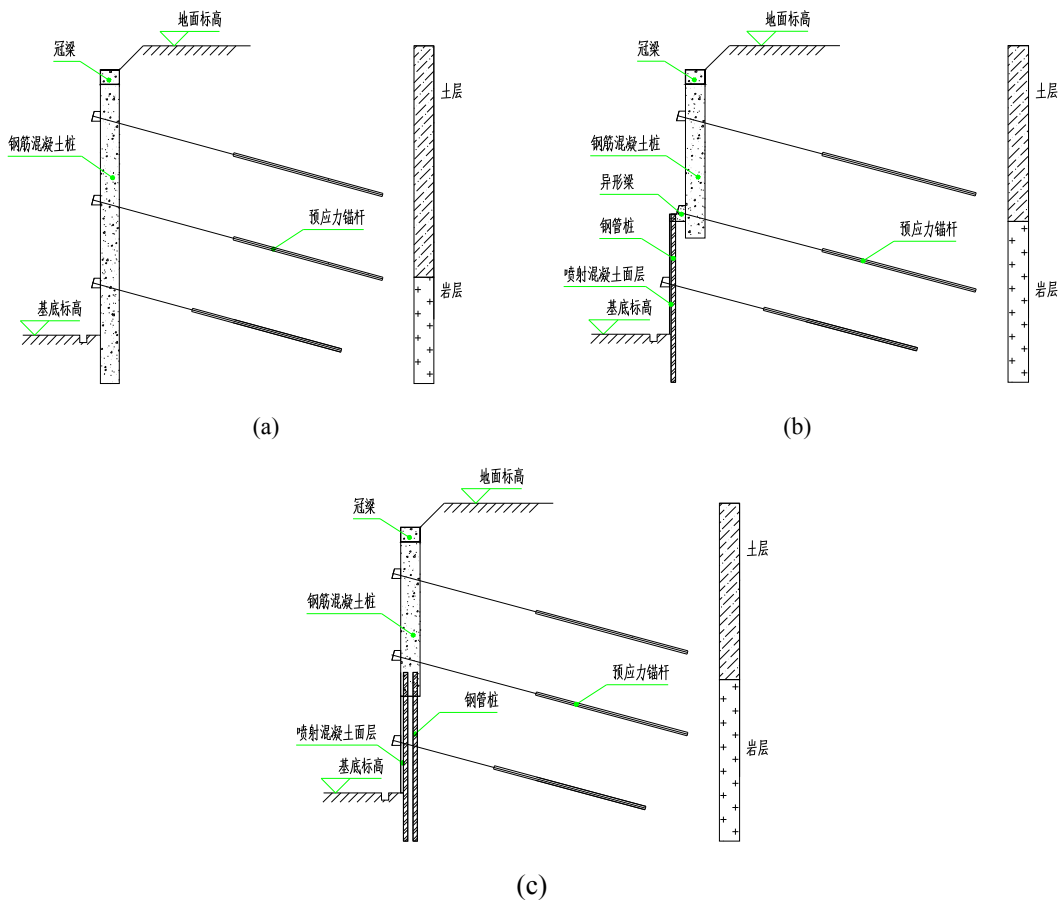


图 26-11 嵌入基坑底的桩锚支护

(a) 直接嵌入式 (b) 灌注桩外间接嵌入式 (c) 灌注桩内间接嵌入式

条件下基本无放坡空间的位移严格限制区较为常用。嵌入基底的桩锚支护又可分为直接嵌入基底的桩锚支护和间接嵌入基底的桩锚支护，见图 26-11。间接嵌入也分两种情况，一种采用护脚钢管桩嵌入基坑底，在土岩结合面设加强措施，在微型钢管桩和灌注桩之间设置 L 型刚性梁(异形梁)，将灌注桩和钢管桩做成刚性连接，见图 26-11b；另外一种在灌注桩孔内打钢管桩，将钢管桩和灌注桩钢筋笼浇筑在一起，形成刚性连接，见图 26-11c。

该支护类型的适用条件如下：

a. 直接嵌入基底的桩锚支护适用于土岩组合的二元结构中土层占大部分，满足嵌固要求的灌注桩桩长范围内的岩层为较容易钻进的中风化软质岩和极软岩以及强风化、全风化的硬质岩。

b. 间接嵌入基底的桩锚支护适用于土岩组合的二元结构中土层占大部分，满足嵌固要求的灌注桩桩长范围内的岩层存在不容易钻进的中风化、微风化等硬质岩的情况。

c. 锚杆的施工范围内无障碍物，周围环境允许布设锚杆，锚杆锚固段可以锚固在适宜的地层中。

d. 当地下水高于基坑底面时，常采用灌注桩结合预应力锚杆加水泥土帷幕（或降水）共同组成支护体系来止水挡土。

e. 适用于一、二、三级基坑，悬臂式支护结构基坑深度一般不超过 6m。

(2) 未嵌入基底的桩锚支护结构

未嵌入基底的桩锚支护是指支护桩未嵌入基底的桩锚支护形式。在土岩组合地质条件下有一定放坡空间的位移严格限制区较为常用，见图 26-12。

该支护类型的适用条件如下：

a. 未嵌入基底的桩锚支护适用于土岩组合的二元结构中岩层占大部分，满足嵌固要求的灌注桩桩长范围内的岩层存在深度较大的不容易钻进的中风化、微风化等硬质岩的情况。

b. 锚杆的施工范围内无障碍物，周围环境允许打设锚杆，锚杆锚固段可以锚固在适宜的地层中。

c. 当地下水高于基坑底面时，常采用灌注桩结合预应力锚杆加水泥土帷幕（或降水）共同组成支护体系来止水挡土。

d. 适用于一、二、三级基坑。

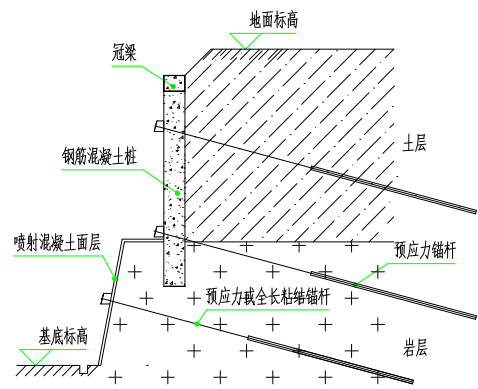


图 26-12 未嵌入基底的桩锚支护

26.3 岩石地区的基坑支护设计与计算

26.3.1 岩石基坑支护设计

岩石基坑的稳定性主要取决于组成基坑的岩体结构面的发育情况及其产状与基坑边坡的空间位置关系，当结构面非常发育导致岩体成碎裂结构时，一般可以将其视为散体介质，采用土质边坡的圆弧滑动法进行分析，当采用非预应力锚杆支护时，可采用常规的土钉墙设计。但当组成基坑边坡的岩体中发育一组或几组结构面时，边坡岩体常沿着某个软弱结构面或某几个软弱结构面的组合面滑动，根据软弱结构面的发育情况，一般分以下几种情况：沿单一软弱结构面滑动、沿两个倾向相同或相近但倾角不同的结构面组成的滑面滑动、沿交错节理构成的阶梯状滑动，楔形体滑动等，见图 26-13。

1. 沿单一平面滑动的基坑支护设计

该滑动类型是岩体基坑中最为常见的滑动方式，是指基坑边坡岩体可能沿单一软弱结构面产生平面滑动的设计方法，其力学模型见图 26-14 所示，稳定性分析计算公式：

$$K = \frac{(W \sin 2\beta + T) \tan \phi_j + 2c_j H}{2W \sin^2 \beta} \quad (26-20)$$

式中， H ——边坡高度 (m)；

$$W \text{——滑体重量(kN), } W = \frac{\gamma H^2}{2} \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha \sin \beta};$$

γ 、 c_j 、 ϕ_j ——分别为岩体重度(kN/m³)、结构面内聚力(kPa)、内摩擦角(°);

α 、 β ——分别为坡角(°)、结构面倾角(°);

T ——沿结构面法线方向的锚固力(kN);

K ——安全系数, 对一、二、三级基坑分别取 1.35、1.30、1.25。

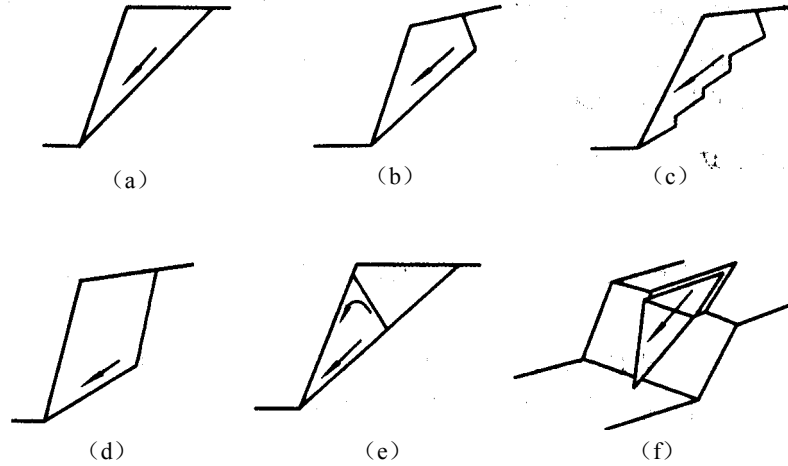


图 26-13 岩体基坑失稳的几种模式

- (a) 单一平面滑动 (b) 带张裂缝的单一平面滑动 (c) 沿贯通交错节理面的滑动
(d) 双滑面的滑动 (e) 两个滑体的滑动 (f) 楔形体滑动

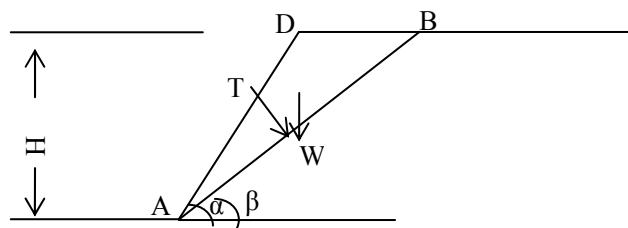


图 26-14 平面滑动基坑边坡稳定性计算

如果软弱结构面位于地下水位以下时, 还得考虑地下水的影响, 其力学模型见图 26-15 所示, 稳定性分析计算公式:

$$K = \frac{(W \cos \beta + T - U) \tan \phi_j + c_j \frac{H_w - Z_w}{\sin \beta}}{W \sin \beta + V \cos \beta} \quad (26-21)$$

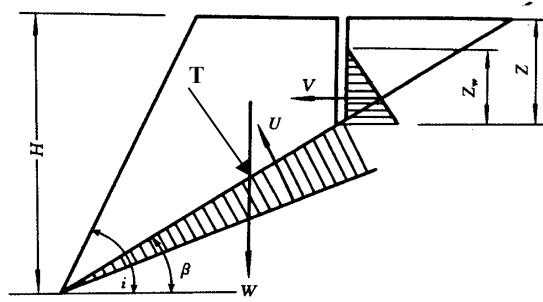


图 26-15 地下水面以下结构面平面滑动基坑边坡稳定性计算

式中， H ——边坡高度(m)；

$$W \text{——滑体重量(kN/m), } W = \frac{\gamma[H^2 \sin(\alpha - \beta) - Z^2 \sin \alpha \cos \beta]}{2 \sin \alpha \sin \beta};$$

γ 、 c_j 、 ϕ_j ——分别为岩体重度(kN/m³)、结构面内聚力(kPa)、内摩擦角(°)；

α 、 β ——分别为坡角(°)、结构面倾角(°)；

T ——沿结构面法线方向的锚固力(kN)；

U ——结构面上水的浮托力(kPa)；

V ——后缘张力隙的静水压力(kPa)；

K ——安全系数，对一、二、三级基坑分别取 1.35、1.30、1.25。

2. 沿两个滑面滑动的基坑支护设计

当基坑边坡岩体发育两组走向大致接近，倾角不同而将岩体切割成危险滑体时，滑体

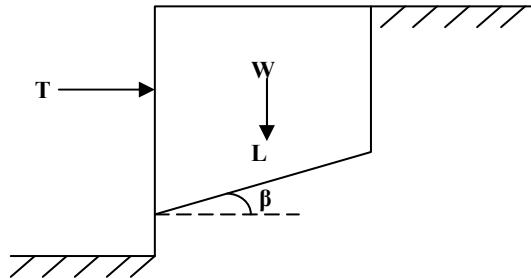


图 26-16 双滑面滑动的基坑边坡稳定性计算

可能沿一个或两个滑面滑动而产生基坑边坡失稳，图 26-13 的 (b) (d)。其力学模型见图 26-16 所示，稳定性分析计算公式：

$$K = \frac{T}{W \operatorname{tg}(\beta - \phi_j) - \frac{c_j L \cos \phi_j}{\cos(\beta - \phi_j)}} \quad (26-22)$$

式中， W ——滑体重量(kN/m)；

T ——水平向锚固力(kN)；

L 、 c_j 、 ϕ_j ——分别为结构面长度(m)、结构面内聚力(kPa)、内摩擦角(°)；

K ——安全系数，对一、二、三级基坑分别取 1.35、1.30、1.25。

3. 三维楔形体滑动的基坑支护设计

三维楔形体滑动破坏是岩石基坑边坡常见的一种破坏方式，只要两组结构面与坡面存在最不利的组合方式，切割出可能失稳的楔形体，即可产生基坑边坡失稳，一般规模较大，其力学模型见图 26-17 所示，楔形体 ABCD 破顶为一水平面，两个滑动面 ABD 和 BCD 的倾角分别为 β_1 、 β_2 ，滑动面交线 BD 的倾角为 β ，坡角为 α 。稳定性分析计算公式：

$$K = \frac{(N_1 + \frac{T \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}) \tan \phi_1 + (N_2 + \frac{T \sin \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}) \tan \phi_2 + c_1 S_1 + c_2 S_2}{W \sin \beta} \quad (26-23)$$

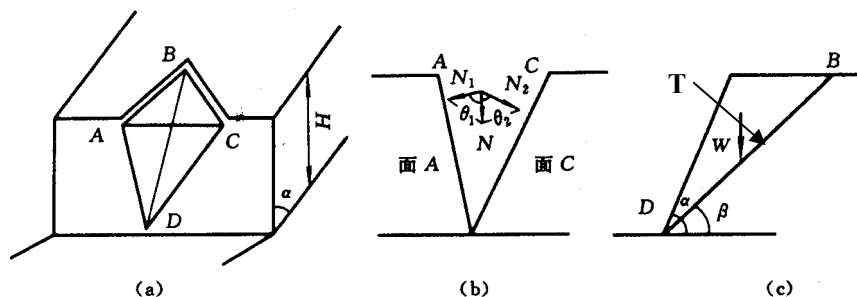


图 26-17 楔形体滑动基坑边坡稳定性计算

式中， W ——滑体重量(kN/m)；

c_1 、 c_2 、 ϕ_1 、 ϕ_2 ——分别结构面 ABD、BCD 的内聚力 (kPa)、内摩擦角($^\circ$)；

α 、 β 、 β_1 、 β_2 ——分别为坡角($^\circ$)、结构面交线倾角($^\circ$)、结构面 ABD 倾角($^\circ$)、结构面 BCD 倾角($^\circ$)；

T ——垂直结构面交线方向的锚固力(kN)；

N_1 、 N_2 ——分别为重力在结构面 ABD、BCD 法向分力；

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{W \cos \beta \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \\ N_2 &= \frac{W \cos \beta \sin \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \end{aligned} \right\} \quad (26-24)$$

K ——安全系数，对一、二、三级基坑分别取 1.35、1.30、1.25。

其他的一些分析方法，比如折线滑动法、Sarma 法等在大规模的边坡工程比较常见，但由于基坑边坡工程相对规模较小，不具备这两种算法的条件，这里就不一一叙述，如果需要可参考《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2002)等有关规范。

根据上述计算得出的锚固力大小，再进行锚杆设计，可参考本手册的锚杆设计有关章节。

26.3.2 土岩组合基坑支护设计

针对上述的土岩组合基坑支护类型，其设计计算分述如下：

1. 放坡开挖设计

当场地地层条件、水文地质条件及周边环境条件许可时，土岩组合基坑施工可采用放坡开挖的方法。放坡开挖坡度可根据基坑侧壁岩土的变化情况按不同的坡率放坡，一般是土层

中放坡较缓而岩层中放坡较陡，有条件的情况下可在土岩界面处留设过渡平台。土岩组合基坑的坡率允许值应根据经验，按工程类比的原则并结合已有稳定基坑的放坡坡率值分析确定。当无经验，且土质均匀良好、地下水贫乏、无不良地质现象和地质环境条件简单时，土层部分坡率可按表 26-15 确定。

在保持整体稳定的条件下，岩体部分在无外倾软弱结构面的情况下，可参照表 26-16 的岩质边坡坡率允许值确定。

土质边坡坡率允许值

表 26-15

边坡土体类别	状态	坡率允许值（高宽比）	
		坡高小于 5m	坡高 5~10m
碎石土	密实	1: 0.35~1: 0.50	1: 0.5~1: 0.75
	中密	1: 0.50~1: 0.75	1: 0.75~1: 1.00
	稍密	1: 0.75~1: 1.00	1: 1.00~1: 1.25
黏性土	坚硬	1: 0.75~1: 1.00	1: 1.00~1: 1.25
	硬塑	1: 1.00~1: 1.25	1: 1.25~1: 1.50

- 注：1. 表中碎石土的充填物应为坚硬和硬塑状态的黏性土；
 2. 对于砂土或充填物为砂土的碎石土，其边坡坡率允许值应按自然休止角确定；
 3. 采取坡面保护措施或破坏后果不严重时可取较大坡率值。
 4. 本表引自《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330-2002）。

岩质边坡坡率允许值

表 26-16

边坡岩体类型	风化程度	坡率允许值（高宽比）		
		H<8m	8m≤H<15m	15m≤H<25m
I 类	微风化	1: 0.00~1: 0.10	1: 0.10~1: 0.15	1: 0.15~1: 0.25
	中等风化	1: 0.10~1: 0.15	1: 0.15~1: 0.25	1: 0.25~1: 0.35
II 类	微风化	1: 0.10~1: 0.15	1: 0.15~1: 0.25	1: 0.25~1: 0.35
	中等风化	1: 0.15~1: 0.25	1: 0.25~1: 0.35	1: 0.35~1: 0.50
III 类	微风化	1: 0.25~1: 0.35	1: 0.35~1: 0.50	
	中等风化	1: 0.35~1: 0.50	1: 0.50~1: 0.75	
IV 类	中等风化	1: 0.50~1: 0.75	1: 0.75~1: 1.00	
	强风化	1: 0.75~1: 1.00		

- 注：1. 表中 H 为边坡高度；
 2. IV 类强风化包括各类风化程度的极软岩；
 3. 采取坡面保护措施或破坏后果不严重时可取较大坡率值；
 4. 本表不适合于由外倾软弱结构面控制的边坡和倾倒崩塌型破坏的边坡。
 5. 本表引自《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330-2002）。

对于开挖深度超过 25m、上部土层较软、坡顶边缘附近有较大荷载的基坑及下部岩石中存在外倾软弱结构面的土岩组合基坑放坡开挖坡率允许值应通过稳定性分析计算确定。

2. 锚喷墙与复合锚喷墙支护设计

岩石地区的锚喷墙和复合锚喷墙设计计算可参照第 9 章土钉墙与复合土钉墙的设计。

3. 预应力锚喷墙支护设计

土岩组合基坑通常是上部为第四系土层，下部依次为残积土、强风化岩、中风化岩、微风化岩等，向下风化程度依次减弱。依据不同的岩石产状、性质以及破坏程度，大致发生以下两种破坏模式。

(1) 圆弧破坏

基坑上部为第四系土层，下部岩体的状态为：a.松散碎裂岩体；b.松散页岩；c.风化严重的层状岩体在岩层倾角平缓时，例如板岩、片岩等；d.风化严重的层状岩体在岩层逆向基坑时；e.风化严重的层状岩体在岩层侧向基坑时，这几种情况下均可能发生圆弧破坏。上部土层滑动的圆弧与下部岩层滑动的圆弧不一定是同一半径的光滑圆弧，有可能会产生两个独立而又相连续的圆弧。为计算方便，可按一个圆弧滑动考虑。

圆弧破坏的稳定性分析可以参考本手册的其他章节，此处不再赘述。

(2) 圆弧—平面破坏

圆弧—平面破坏通常发生在上部为杂填土层或一般土层，下部为层状岩层的基坑地层中。圆弧—平面破坏滑移线特征为上部呈圆弧破坏，下面呈平面破坏，二者滑动方向相同。它是两条不同破坏形态的滑移线在一定工程地质条件下的组合，而下部岩层的破坏大多与地下水有关，由于地下水降低了软弱结构面的强度。

圆弧—平面破坏的破坏机理为：一方面在自重及附加荷载作用下，岩土体内产生较高的剪应力；另一方面，由于地下水的作用使剪切滑移面的抗剪强度降低，以致岩土层内剪应力超过剪切滑移面的抗剪强度导致这种类型的破坏产生。圆弧—平面破坏模式如图 26-18 所示。

为推导稳定性安全系数的计算公式，假定任一支护基坑及条分法受力分析图，如图 26-19 所示。

设基坑有 m 层预应力锚杆，对土体，将滑动土体分成 n 条，土条 i 的宽度为 Δ_i ，作用在土条 i 上的力有土体自重 W_i ，地面荷载为 Q_i ，锚杆的极限承载力 T_{Rv} 。

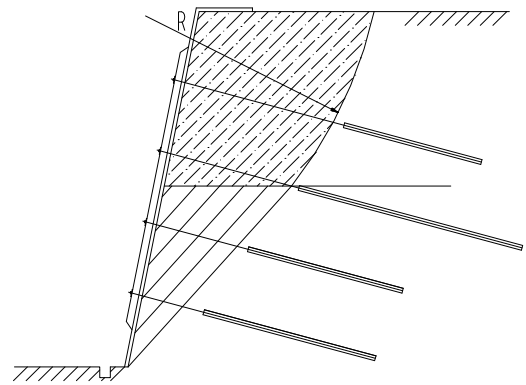


图 26-18 圆弧—平面破坏模式

根据滑动体上极限平衡条件，可得土条 i 上的抗滑力为：

$$R_i = c_i \Delta_i \sec \alpha_i + (W_i + Q_i) \cos \alpha_i \tan \phi_i + \frac{T_{Rv}}{S_H} \sin \beta_i \tan \phi_i \quad (26-25)$$

土条 i 上的滑动力为：

$$S_i = (W_i + Q_i) \sin \alpha_i \quad (26-26)$$

对岩体，将岩层分若干层，每层岩石作为一个“大土条”，作用在 j 层岩石上的岩土层自重为 W_j ，地面荷载 Q_j ，锚杆的极限承载力 T_{Rk} ，则作用在 j 层岩条上的破坏平面上引起岩土体失稳的下滑力和抗滑力分别为 S_j 和 R_j ：

$$S_j = (W_j + Q_j) \sin \alpha_j \quad (26-27)$$

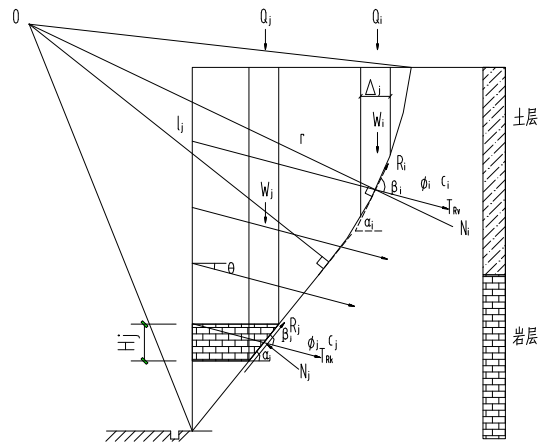


图 26-19 圆弧—平面破坏受力分析

$$R_j = \left[(W_j + Q_j) \cos \alpha_j + \frac{T_{Rk}}{S_H} \sin \beta_j \right] \tan \varphi_j + c_j H_j / \sin \alpha_j + \frac{T_{Rk}}{S_H} \cos \beta_j \quad (26-28)$$

破坏面上的抗滑力矩 M_R 与滑动力矩 M_S 之比即为稳定安全系数 K :

$$K = \frac{\sum \left[c_i \Delta_i \sec \alpha_i + (W_i + Q_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i + \frac{T_{Rv}}{S_H} \sin \beta_i \tan \varphi_i + \frac{T_{Rv}}{S_H} \cos \beta_i \right] r}{\sum [(W_i + Q_i) \sin \alpha_i] r + \sum [(W_j + Q_j) \sin \alpha_j] l_j} + \frac{\left\{ \sum \left[(W_j + Q_j) \cos \alpha_j + \frac{T_{Rk}}{S_H} \sin \beta_j \right] \tan \varphi_j + \sum \left[c_j H_j / \sin \alpha_j + \frac{T_{Rk}}{S_H} \cos \beta_j \right] \right\} l_j}{\sum [(W_i + Q_i) \sin \alpha_i] r + \sum [(W_j + Q_j) \sin \alpha_j] l_j} \quad (26-29)$$

式中, α_i —土条 i 下部圆弧破坏面切线与水平线的夹角($^\circ$);

Δ_i —土条 i 的宽度(m);

S_H —锚杆的水平间距(m);

β_i —锚杆与圆弧破坏面切线夹角($^\circ$);

φ_i —土条 i 圆弧破坏面所处第 i 层土的内摩擦角($^\circ$);

c_i —土条 i 圆弧破坏面所处第 i 层土的粘聚力(kPa);

α_j —岩层 j 下部平面破坏面与水平线的夹角($^\circ$);

H_j —岩层 j 的厚度(m);

β_j —锚杆与岩层 j 下部平面破坏面夹角($^\circ$);

φ_j —岩层 j 的内摩擦角($^\circ$);

c_j —岩层 j 的粘聚力(kPa);

r —土条 i 的圆弧破坏半径(m);

l_j —岩层 j 下部平面破坏面与到圆弧破坏圆心的法向距离(m)。

可采用式(26-29)对圆弧—平面破坏形式进行条分法稳定分析。也可采用近似简化的方法:①上部土层厚度小于下部岩层厚度时,可近似地按平面破坏进行稳定计算;②上部土层厚度大于下部岩层厚度时,可近似地按圆弧破坏进行稳定计算。这样简化会与实际情况有一定误差,但这种误差从实际工程角度是可以接受的。

4. 土岩组合的桩锚支护设计

岩土组合的多元结构基坑桩锚支护设计分为嵌入基坑底的桩锚支护设计和未嵌入基坑底的桩锚支护设计两种情况,针对嵌入基坑底的桩锚支护设计可以参考本手册的桩锚支护有关章节;而对未嵌入基坑底的桩锚支护设计,目前没有一个确定的计算模式,一般采用传统的桩锚支护与有限元相结合的设计方法,就是针对开挖到土岩交界面时,采用传统的桩锚支护设计方法,确定桩的嵌岩深度,再采用有限元计算方法,进行变形验算,在满足基坑变形的前提下,调整嵌岩深度、留台宽度以及锁脚锚杆的锚固力大小,满足桩锚支护体系的变形稳定。某上覆土层的中风化花岗岩基坑采用未嵌入基坑底的桩锚支护形式,见图26-20,开挖至土岩结合面时,通过桩锚支护设计,得桩的嵌岩深度为1.8m,采用PLAXIS有限元分析软件计算,网格剖分见图26-21,不同嵌固深度时桩身位移见图26-22,不同留台宽度时桩身位移见图26-23,可见嵌固深度对桩身位移的影响比留台宽度要小,传统桩锚支护设计的桩身嵌固深度1.8m可以采纳,锁脚锚杆轴力与桩嵌岩深度的关系见图26-24,可见随桩

身嵌固深度加大，锁脚锚杆轴力显著减小，因此实际工程中，加大锁脚锚杆的预应力可以弥补桩身嵌固深度的不足。此外，对锁脚锚杆的应力监测也显得尤为重要。

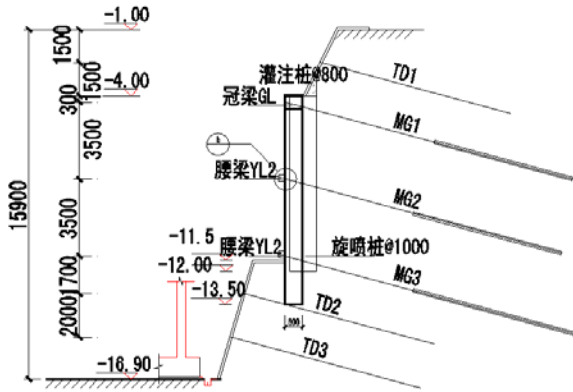


图 26-20 基坑支护剖面图

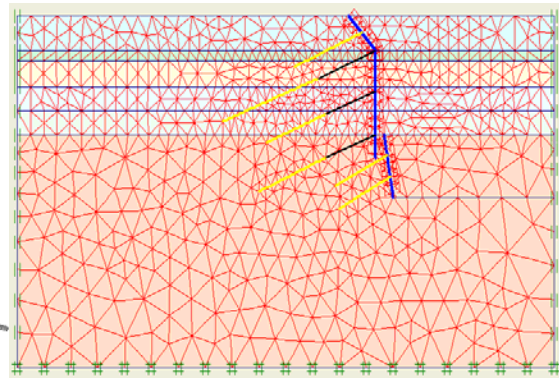


图 26-21 基坑支护设计有限元网格剖分图

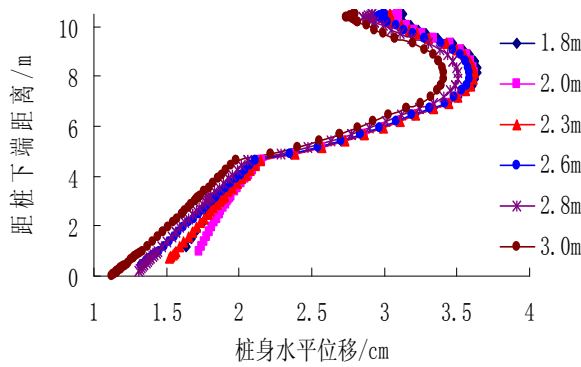


图 26-22 不同嵌固深度桩身位移

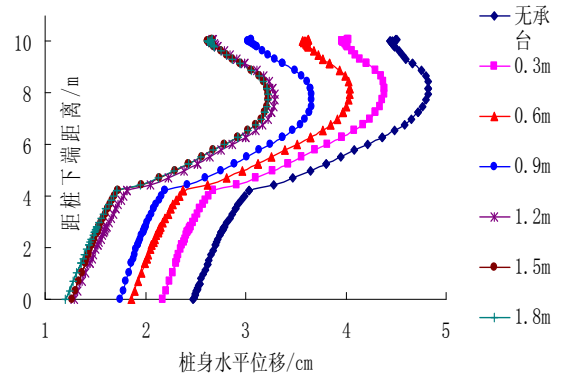


图 26-23 不同留台宽度桩身位移

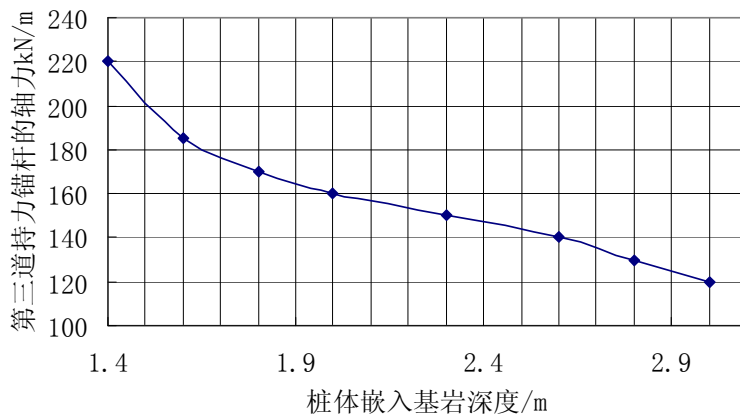


图 26-24 锁脚锚杆轴力与桩嵌固深度的关系

26.4 岩石地区的基坑施工

26.4.1 岩质基坑的施工要点

将土岩组合基坑和纯岩石基坑统称为岩质基坑，岩质基坑工程应根据其安全等级、周边环境、工程地质和水文地质等条件编制施工方案，采取合理、可行，有效的措施保证施工安全。

1. 岩质基坑施工的一般要求

(1) 开挖施工前，应收集和了解工程地质和水文地质资料，施工中做好工程地质和水文地质的编录、预测和预报工作。如工程地质和水文地质的实际情况与设计条件不符，特别是存在不良地质因素时，在设计按规定做出修正的同时，应根据实际地质条件调整施工方案，必要时应进行补充勘测工作。不良地质因素主要包括：断层破碎带，软弱夹层，溶洞，滑坡体，易风化、软化、膨胀、松动的岩体，有害矿物的岩脉，地下水活动较严重的岩体等。

(2) 应按照相关标准规定制定详细的安全技术措施，确保施工中人员、设备等的安全，并对从业人员进行安全教育和培训，认真执行安全操作规程，增强安全意识，持证上岗。严格遵守劳动保护法令和劳动卫生标准，不断改善劳动条件，防止伤亡事故和职业病发生。

(3) 根据工程需要进行安全监测和质量检测。

(4) 应采用钻孔爆破法施工，严禁在其附近部位采用洞室爆破法或药壶爆破法施工。对于距离基坑边坡较远的部位，如确需采用洞室爆破法施工，应进行专项试验和安全技术论证。

(5) 应积极推广应用安全可靠、技术先进、经济合理的新技术、新工艺、新材料和新设备。

2. 岩质基坑施工中的地质工作

(1) 基坑开挖前，应结合岩土工程勘察报告进一步收集相关的工程地质与水文地质资料。主要包括：

- a. 开挖区及附近地区的地层岩性，特别是堆积体、危岩体的分布。
- b. 地质构造条件，特别是断层、节理裂隙密集带、破碎带等的位置、产状和规模等。
- c. 地下水补给、排泄的径流条件，含水层的分布及埋藏条件，地下水位、涌水量等，特别是涌水量丰富的地下水来源，强透水带的位置和补给水源。
- d. 岩石风化条件，不同风化程度，特别是夹层风化的产状、分布及与基坑底的关系。
- e. 可溶岩区，岩溶洞穴的发育层位、规模、充填情况。
- f. 岩体应力状况。
- g. 岩石级别。
- h. 边坡的稳定条件等。

(2) 开挖过程中，应开展以下工作：

- a. 及时进行地质编录和分析工作，检验前期的地质勘察资料。
- b. 预测和预报可能出现的工程地质问题。
- c. 对不良工程地质问题开展专项研究，并提出处理措施。
- d. 进行边坡稳定性地质预报。

(3) 开挖至基坑底后，应开展以下工作：

- a. 及时进行基坑验槽工作，验证岩土工程勘察报告的准确性。
- b. 必要时绘制基底工程地质图。
- c. 进行基础验收。

3. 岩质基坑施工中的测量工作

建立平面控制和高程控制网。对平面控制桩、水准点、水准标高、基坑平面位置、边坡坡度等经常复测检查，防止超深、超宽、挖错、挖偏。开挖前，将业主提供的水准点引测到基坑外进行保护；在基坑分层开挖的过程中，逐层引至基坑侧壁，严格控制开挖标高。平面控制采用经纬仪或全站仪。开挖前，对测绘部门提供的控制点进行保护；并通过该控制点将各边轴线设置在基坑外围。每层土石方开挖施工过程中都应对基坑在该深度的平面位置进行反复复测检查。

26.4.2 岩质基坑支护结构施工

与非岩质基坑相比，岩石的存在一定程度上增加了施工难度。以下将从支护桩、锚杆、

微型桩和止水帷幕的施工等方面对岩石地区支护结构施工的一些难点问题进行了阐述。

1. 岩质基坑支护桩的施工要点

纯岩石基坑特别是以硬质岩为主的纯岩石基坑一般不采用支护灌注桩，位移严格限制区经常通过设置微型支护桩来限制位移。土岩组合基坑支护中灌注桩仍然是较为常用的支护结构组成部分。

(1) 人工挖孔工艺虽属落后工艺但在大型机械设备无法进场的场区仍有一定市场，该工艺嵌入中等以上风化岩石常常需结合爆破掘进。

(2) 在存在块石、漂石、旧基础等障碍物的复杂地质条件下或需要进入硬质岩一定深度的情况下，传统的冲击钻进成孔工艺仍然是解决问题的有效手段之一。

(3) 施工若不要求入中风化以上岩石可考虑采用长螺旋钻孔桩结合超流态混凝土灌注工艺。

(4) 虽然常规泥浆护壁灌注桩具有施工效率低、施工现场文明程度差的缺点，但在目前的支护工程中仍大量采用。该工艺适用于黏性土、粉土、砂土、填土、碎石土及风化岩。硬质岩石钻进效率较低。

(5) 旋挖钻进成孔是目前国内外较为先进的灌注桩成孔工艺之一，见图 26-25，对不同的岩层可以选择不同的钻头，见图 26-26。一般认为该工艺适用于黏性土、粉土、砂土、填土、碎石土及风化岩层。近年来，国内桩工机械生产厂家通过增加钻进加压反力机构和采用特制入岩专用旋挖钻头等措施，开发出入岩旋挖钻机，解决了旋挖钻机入硬质岩的难题，极大地拓展了旋挖钻机的施工广度和深度。该入岩旋挖钻机具有大功率、高效率、高稳定性和高可靠性的特点，采用搓碾剪切碎岩工法，能够快速入岩成孔。据有关资料，入岩钻机的核心技术即搓碾剪切碎岩工法。该工法主要由三项技术组成：一是特别设计的桁架结构，可利用频率共振技术对系统稳定性进行优化配置；二是利用多卷扬加压技术，确保岩石岩性参量能成为破碎岩石的关键要素；三是全面采用立体的点式刀具空间布局，确保了岩石的钻进效率。在采石厂进行的恶劣工况模拟实验表明，硬岩最大钻进速度为 10 分钟 320mm；210MPa 基岩最大进尺速度 5 分钟 60mm，各孔岩样和钻齿轨迹清晰。



图 26-25 国产岩层旋挖钻机

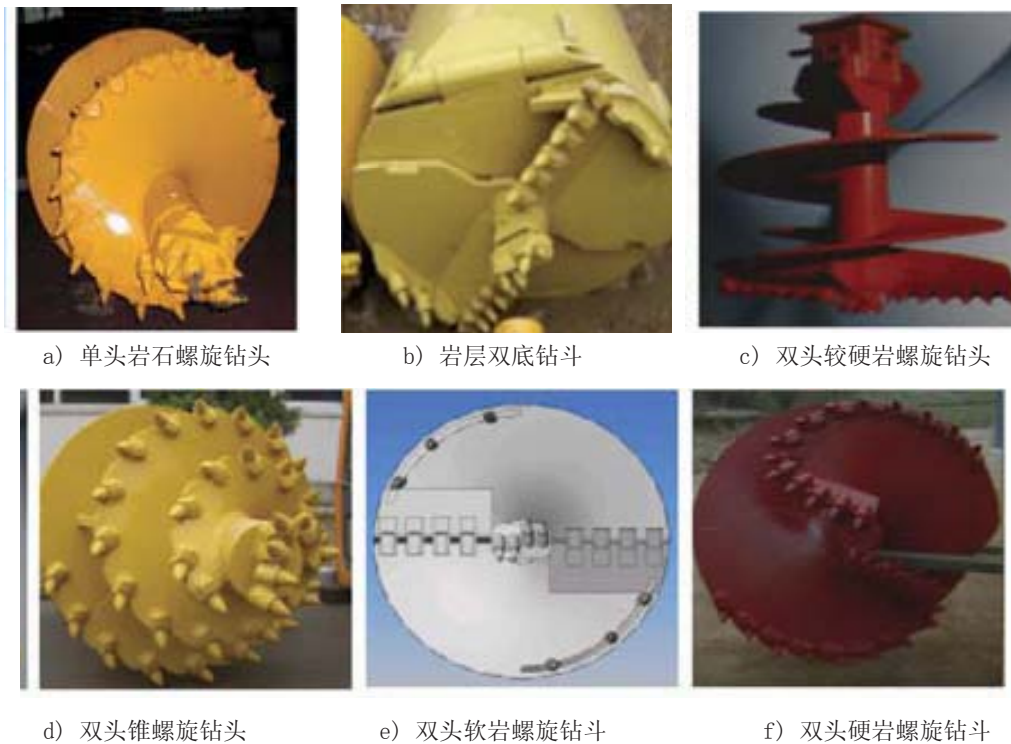


图 26-26 各种岩层旋挖钻头

2. 岩质基坑锚杆的施工要点

泥浆护壁工艺易在孔壁形成泥皮，泥皮的存在将大大降低锚杆锚固结石体与周边岩土层的粘结强度，故锚杆施工中应避免采用泥浆护壁工艺。岩质基坑锚杆中的纯土层锚杆施工与一般锚杆施工工艺相同；纯岩石锚杆施工目前常采用风动或液压潜孔锤钻进，见图 26-27。纯岩石锚杆施工根据岩石坚硬程度不同和钻孔直径不同可灵活选用低风压钻车、中风压钻车和高风压钻车。其中，高风压钻车可在大直径的硬质岩石的钻进中取得理想效果。土岩组合锚杆（即上段在土层中，下段在岩石中）的施工是岩质基坑锚杆施工的难点之一。一方面，钻进至土岩界面时由于土岩强度差异较大导致钻杆向土层方向跑偏；另一方面，土层中钻进效率较高，入岩后效率迅速降低，而常规潜孔锤无法在土层中钻进。目前已知的解决方案有以下几种：

(1) 采用刚度较大的套管钻进，一次性钻进至设计深度，遇硬质岩采用合金（或金刚石）取芯钻进；

(2) 土层中采用套管钻进并护壁，至岩层后从在护壁套管中进行岩石部分的风动或液压潜孔锤钻进；

(3) 直接采用风动或液压钻车在土层中回转钻进（适用于不宜塌孔土层），岩层中冲击钻进。

3. 岩质基坑微型桩的施工要点

在岩层中设置微型桩作为替代方案可解决常规灌注桩入岩困难的问题。岩层中设置微型



图 26-27 国产潜孔钻车

桩有以下作用：

(1) 间接嵌入基底的桩锚支护中设置的微型钢管桩可将上部桩体自重和锚杆竖向分力等竖向荷载传导至基底以下，避免出现灌注桩“吊脚”或岩土体悬空的情况。

(2) 开挖前设置完成的微型钢管桩起到“超前支护”的作用，解决了分层开挖过程中每步开挖后支护前时段内的稳定和变形问题。

(3) 微型桩的设置起到了沿桩轴线“预裂”岩石的作用，利于形成设计坡度，避免爆破后形成倒坡。

(4) 微型桩的设置一定程度上发挥了“缓冲孔”的作用，有利于减小爆破对基坑岩石和坡顶建（构）筑物的震动影响。

一般采用风动潜孔钻车进行岩层中微型桩的钻孔施工，钻孔直径一般小于 200mm。成孔后应利用高压风将孔内岩粉吹出，采用先注浆后下钢管的施工工艺，保证钢管外侧注浆饱满。

4. 小角度水泥土截水帷幕施工要点

深层搅拌法和高压喷射注浆法是土层中最为常用的两种截水帷幕施工工法。深层搅拌法具有施工速度快、造价低及环境污染小的特点，是截水帷幕的首选方案。当深层搅拌法无法实施时可考虑采用造价高但地层适应能力较强的高压喷射注浆法。

在具有一定放坡空间的条件下，复合土钉墙中的水泥土截水帷幕常常做成小角度仰斜式。同垂直水泥土帷幕相比，小角度水泥土帷幕具有明显优势：

(1) 能够充分利用放坡空间，保证放坡坡度，放坡后减小了支护结构上的水土压力，利于基坑的边坡稳定。

(2) 开挖前施工的小角度帷幕起到了“超前支护”的作用，解决了每步开挖后支护前的边坡稳定问题，为每步支护结构的施工赢得了时间。

(3) 克服了帷幕内侧放坡支护模式下帷幕内侧土体容易坍塌破坏的缺点，为锚杆的锚固作用提供了良好的锚下结构，利于预应力施加后的应力扩散，可有效控制基坑变形。

然而，小角度仰斜式水泥土帷幕对施工提出了更高的要求。一方面，要求施工工作面高度平整，钻机倾角保持一致以保证水泥土桩之间搭接良好；另一方面，要求成孔钻机的钻杆具有较大刚度，避免钻进过程中因重力和地层差异导致水泥土桩下部“开叉”的情况出现。目前，小角度仰斜式水泥土帷幕施工深度一般不超过 15m，倾角一般在 6° 左右。相关施工设备的进步是该工法进一步发展的基础。

26.4.3 岩质基坑开挖施工

1. 施工运输坡道的设置

施工运输坡道出口一般设置在规划出入口交通方便的部位，布置时需考虑以下因素：

(1) 考虑开挖到基底后坡道的坡度及土石方运输车辆的爬坡能力。

(2) 坡道应方便会车及车辆掉头并考虑基坑周边道路交通状况。

(3) 开挖深度较大后坡道自身的稳定问题，必要时需对坡道两侧进行临时支护。

(4) 坡道设置应方便土石方开挖施工和装车。

(5) 坡道对后续开挖和支护施工的影响及收坡道施工是否方便。

(6) 场地允许时可将坡道出口向基坑外侧开阔处下挖延伸，以获得较长的放坡距离并方便收坡。

(7) 坡底处修筑环行车道，无环行车道时车辆在斜坡道上退车下行，顺车上行。

坡道可紧靠基坑长边方向布置，也可沿基坑对角布置。对于长边方向满足车辆爬坡坡度的基坑，可紧靠基坑长边方向布置坡道。该布置方式会影响坡道布置侧土石方的开挖和支护，但只需考虑坡道单侧坡体的稳定性，有利于保证运输车辆的安全。对于长边方向不满足车辆爬坡坡度的小型基坑一般沿基坑对角方向布置以获得最长的放坡距离。该布置方式对支护施

工影响较小，但需考虑坡道两侧土石方开挖后的坡体稳定问题。

为减小坡道设置对工期的影响，在基坑施工后期可在已完成支护部位设置备用坡道，以解决坡道部位支护过程中的临时运输问题。

2. 开挖顺序

对第四系富含地下水的土岩组合基坑，基坑开挖前，基坑周边采用截水帷幕，基坑内设置降水井或积水坑疏排坑内地下水，以方便土石方开挖。临时性排水措施应满足地下水、暴雨和施工用水等的排放要求。

基坑开挖一般采用自上而下分层分段开挖、分层分段支护流水作业的开挖顺序。对于位移要求不严格的三级基坑，可采用一次性放坡开挖至基底后再进行简单支护的开挖方式。对于土石方开挖后不稳定或欠稳定的基坑，应根据基坑的地质特征和可能发生的破坏等情况，采取自上而下、分段跳槽、及时支护的施工方法，严禁无序大开挖、大爆破作业。

基坑周边土石方开挖分层厚度应与设计锚杆位置相适应，一般应控制在锚杆下 30~50mm 并满足锚杆施工机械对工作面的要求。根据工程进度的要求，可采用先周边后中间的开挖方式，以便为支护作业创造工作面。对于不存在软弱土层的岩质基坑，当土石方开挖进度较快时，可在基坑周边预留满足基坑边坡稳定和锚杆施工机械作业面的土石方后先行开挖基坑中间部位土石方。根据支护作业的进度再对周边土石方分层分段开挖、分层分段支护。

3. 开挖方法

对土岩组合基坑，先采用挖掘机械对表层土体进行开挖。然后进行岩石部分的开挖。对强风化的硬质岩石和中风化的软质岩石，一般采用机械开挖方式，即采用一种“凿裂法”施工。即用大功率推土机带裂土器（松土器）将岩石裂松成碎块，见图 26-28，然后用推土机集料装运。能否采用“凿裂法”开挖，要考虑岩石的风化程度、岩层的倾角和节理发育情况以及裂土器的切入力等因素，并进行现场试验后确定。松土效率和设备操作者的技术与经验密切相关。

对中风化、微风化的岩石部分，必须进行爆破开挖，一般先在基坑中央进行起槽爆破，形成一定的临空面，再向周边进行台阶式爆破开挖。在接近支护结构和坡脚附近时，必须采用控制性爆破或静力爆破。对爆破后岩石坡面或基底，常采用风镐或安装在挖掘机械上的液压破碎锤进行修整。

对于周边环境不允许使用炸药爆破的场区，也可采用无震动、无冲击波、无飞石的静力爆破方式来破碎岩石，具有非常高的安全性，但造价相对较高。



图 26-28 大功率推土机带裂土器

26.4.4 岩石基坑施工的爆破控制

岩石基坑爆破开挖施工过程中，一方面要保证建基面的质量，另一方面要保证基坑边坡的稳定。通过预留保护层可以防止上部台阶爆破对水平建基面岩体造成破坏或不利影响；通过优化爆破的可控变量，采用振动影响小的爆破技术，如微差爆破、预裂爆破、光面爆破、减振爆破技术等，合理设定爆破振动的安全判据和控制标准，可以达到很好的减振效果，最大限度地削弱和减小爆破振动对基坑边坡岩体和支护结构的影响。

1. 岩石基坑爆破设计

岩石基坑爆破设计主要是根据施工图纸和爆破试验或爆破监测成果，以及地形地质条件、爆破器材性能、施工机械等条件进行。主要包括：工程概况、工程地质及水文地质条件、爆破孔网参数、炸药品种、炸药用量及装药结构、起爆网络、爆破安全控制及监测、

爆破对环境影响的安全评价；应该绘制的图表包括爆破孔布置平面图及剖面图、爆破孔装药结构图、起爆网路设计图、爆破器材用量表。

(1) 岩石基坑爆破参数确定

岩石基坑爆破多采用松动爆破，常用的炸药主要为 2 号岩石乳化炸药和 2 号岩石硝铵炸药，起爆时常用到导爆管、导爆管雷管和电雷管。导爆管起爆系统由部分组成：起爆元件、传爆元件和末端工作元件。起爆网络的连接形式主要有：并联法、串联法和并串联法。电起爆系统是利用电雷管通电后起爆产生的爆炸能引爆炸药，由电雷管、导线和起爆电源三部分组成，电爆网络连接也有串联、并联和串并联三种方式。

岩石基坑爆破多为露天浅孔爆破，通过在岩石基坑中央起槽后往四周按台阶法拓展，爆破参数可根据施工现场的具体条件和类似的经验选取，并通过实践检验修正，以取得最佳参数值。

a. 单位体积炸药消耗量（单位耗药量） q ， q 值与岩石性质、台阶自由面数目、炸药种类和炮孔直径等因素有关，一般 $q=0.3\sim 0.8\text{kg/m}^3$ 。

b. 炮孔直径 d ，浅孔台阶爆破一般使用直径 32mm 或 35mm 的标准药卷，炮孔直径比药径大 4~7mm，故炮孔直径为 36~42mm。

c. 炮孔深度 L 与超深 h ，炮孔深度根据岩石坚硬程度、钻孔机具和施工要求确定。对于软岩， $L=H$ ；对于坚硬岩石，为了克服台阶底部岩石对爆破的阻力，使爆破后不留根底，炮孔深度要适当超出台阶高度 H ，其超出部分 h 为超深。其取值(0.1~0.15) H 。

d. 盘抵抗线 W_D 台阶爆破一般都用 W_D 代替最小抗线进行有关计算， W_D 与台阶高度有如下关系

$$W_D = (0.4 \sim 1.0)H \quad (26-36)$$

在坚硬难爆的岩体中，或台阶高度 H 较高时，计算时应取较小值，亦可按炮孔直径的 25~40 倍确定。

e. 炮孔间距 a 和排距 b ，同一排炮间的距离叫炮孔间距 a ， a 不大于 L ，不小于 W_D ，并有以下关系

$$a = (1.0 \sim 2.0)W_D \quad (26-37)$$

$$\text{或 } a = (0.5 \sim 1.0)L \quad (26-38)$$

间距、排距之间存在以下关系

$$b = (0.8 \sim 1.0)a \quad (26-39)$$

实践证明，在基坑中部台阶爆破中，采用 $2W_D < 2 < 4W_D$ 的孔距小抵抗线爆破，在不增加单位体积炸药消耗量的条件下，可降低大块，改善爆破质量。

(2) 装药结构

装药在炮孔内的安置方式称为装药结构，它是影响爆破效果的重要因素，最常采用的装药结构形式有：耦合装药（炸药直径与炮孔直径相同）、不耦合装药（炸药直径小于炮孔直径）连续装药、间隔装药。试验证明，在一定岩石和炸药条件下，采用空气柱间隔装药可以增加用于破碎或抛掷岩石的爆炸能量，提高炸药能量的有效利用率，降低装药量。

(3) 爆破参数优化

应根据不同岩体条件和爆破效果，不断优化爆破参数。开挖过程中会遇到不同的岩体条件，应针对不同的岩体条件，调整爆破参数，改善爆破效果，避免岩石出现爆破裂隙或使

原有构造裂隙的发展超过允许范围，以及岩体的自然状态产生不应有的恶化。

通过分析爆破效果，可以判断所采用的爆破参数是否合理。爆破效果调查的内容主要包括：对预裂爆破或光面爆破，其开挖轮廓面的残留爆破孔痕迹的分布和保存率、不平整度、爆破裂隙、保留岩体的破坏情况等；对台阶爆破，其爆破石渣的块度或级配、爆堆形状、爆破对保留岩体的破坏、炮根、爆破飞石等；对紧邻水平建基面的爆破，是否使水平建基面岩体产生了大量爆破裂隙，使节理裂隙面、层面等弱面明显恶化，并损害了岩体的完整性等。进行爆破振动监测时，根据爆破振动安全控制标准判断爆破是否对边坡产生危害，及时调整爆破单段药量。对爆破抛掷方向有要求时，应根据爆破效果，及时改变起爆顺序。此外，还应对每次爆破所使用的爆破器材生产厂家名称和批号进行记录，与爆破效果进行对比分析，对合理调整爆破参数具有重要意义。

(4) 爆破对环境影响的安全评价

岩石基坑开挖爆破对环境影响的安全评价，应根据爆破工程周围环境影响情况逐项进行分析核算，确定安全范围，作出综合分析评价。

- a. 应根据地面、地下建（构）筑物及重要设施的抗震性能，校核爆破振动安全允许距离。
- b. 爆破对保留岩体的影响深度，通常采用钻孔声波法测试。
- c. 应根据地质勘察资料，通过试验或数值分析来确定爆破对不良地质地段岩体的影响程度和范围，并制定相应的控制爆破措施。
- d. 确定爆破飞石、滚石、空气冲击波及有害气体、粉尘等对人员、施工机械设备和建（构）筑物的安全影响范围。

2. 岩石基坑爆破施工方法

岩石基坑爆破常用到控制爆破的方法主要有：毫秒微差爆破、预裂爆破和光面爆破、静力爆破等。

(1) 毫秒微差爆破

毫秒微差爆破是指利用毫秒雷管或其他毫秒延期引爆装置，实现装药按顺序起爆的方法。该方法能增强破碎作用，能够减小岩石爆破块度，或扩大爆破参数，降低单位体积耗药量。能减小抛掷作用和抛掷距离，能防止爆破对周围设备的损坏，而且爆堆集中，能提高装药效率。能降低爆破产生的振动作用，防止对边坡岩体或支护结构造成破坏。

微差爆破的间隔时间一般控制在 25~75 毫秒的范围内。具体可参考表 26-17。实现微差爆破的方法有：用毫秒电雷管起爆，用微差起爆器起爆，用继爆管与导爆索起爆，以及用导爆管与毫秒雷管起爆。爆破时都是采用许多的炮孔，而且要求这些炮孔必须按一定顺序起爆，否则会降低爆破效果。选择起爆顺序的原则是后期起爆的装药能充分利用先期起爆装药形成的自由面。

毫秒微差时间间隔选择参考表

表 26-17

确定方法	时间间隔 (ms)	备注
经验公式	$T = kW$ 或 $T = kW_1$	T—间隔时间 (ms)； W—最小抵抗线 (m)； W ₁ —底板抵抗线 (m)； k—系数，坚硬岩石取 k≤3ms/m；松 软岩石取 k=6ms/m
根据岩性条件确定 (间隔时间是在 W 为 6~10m 时的试验资料)	15~30ms	硬而脆的岩石：花岗岩、橄榄岩、辉长岩、石英岩、闪长岩

	20~40ms	中硬岩石：坚硬灰岩、砂岩、粉岩
	40~60ms	性韧而软的岩石：菱镁矿、石膏、泥灰岩、软石灰岩

(2) 预裂爆破和光面爆破

预裂爆破和光面爆破是针对周边炮孔与其他炮孔起爆先后而言的，预裂爆破是事先沿设计开挖轮廓线爆破轮廓炮孔，形成裂缝，再起爆轮廓范围内的炮孔爆落岩石；光面爆破则是在除光爆层外岩石爆破崩落以后形成。

预裂爆破和光面爆破设计一般应包括 6 个方面：(a) 收集基本资料包括：开挖轮廓设计的基本情况：台阶开挖深度、开挖轮廓的形态、保留面的倾斜度、钻孔深度、地下水位以及周围的建筑物状况等；爆破岩石的基本情况：岩石的种类、抗压和抗拉强度、泊松比，岩石的层理、节理裂隙、风化程度、断裂构造和软弱带的分布等；炸药性能：使用炸药的做功能力、猛度、殉爆距离、爆热、炸药密度以及临界直径等。(b) 确定钻孔直径 应当根据工地的机具条件，炮孔深度，以及地质条件等综合考虑，一方面要从技术上的可靠性方面进行论证，另一方面也应当尽量简化施工，降低成本。(c) 确定炮孔间距 根据选定的孔径，按一定的比值选取炮孔间距，一般可取 $a=(7\sim 12)d_b$ 。孔径大时取小值，孔径小时取大值；完整坚硬的岩石取大值，软弱破碎的岩石取小值。炮孔间跑多数情况采用计算或经验确定。(d) 计算药量 按理论公式或经验公式计算，求出线装药密度，同时也应参考已完成工程量的经验数据，作进一步的调整，并根据所采用的炸药品种，折算成实际的装药量。(e) 确定装药结构 首先要根据地质条件、钻孔直径、孔深、炸药品种、装药量等确定堵塞段的长度和底部的装药增量及其范围，然后根据钻孔直径和炸药直径的关系，决定是采用间隔装药还是采用细药卷连续装药。(f) 确定起爆网络 选定起爆方式并进行起爆网络的设计和计算，提出起爆网路图。

(3) 静力爆破

静力爆破是基坑特殊敏感位置所采用的一种爆破方式，对被破碎岩体，经过合理的破碎设计（孔径、孔距等的确定）及钻孔，将粉状静态破碎剂用适量水调成流动状浆体，直接注入钻孔中，一段时间以后，岩体自行胀裂，破碎。它的主要成份是生石灰(即氧化钙)，还含有一些按一定比例掺入的化合物催化剂。其破碎介质的原理就是利用装在介质钻孔中的静态破碎剂加水后发生水化反应，使破碎剂晶体变形，产生体积膨胀，从而缓慢的、静静地膨胀压力（可达 30Mpa~ 50Mpa）施加给孔壁，经过一段时间后达到最大值，将岩体破碎。它可广泛应用于混凝土构筑物的无声破碎与拆除及岩石开采，解决了爆破工程施工中遇到不允许使用炸药爆破而又必须将混凝土或岩石破碎的难题，是国际上流行的新型、环保、非爆炸施工材料。静力爆破的特点：(a) 破碎剂不属于危险品，因而在购买、运输、保管和使用上，不像使用民爆器材受到管制；(b) 破碎过程安全；(c) 施工简单；(e) 破碎时间较长。

3. 岩石基坑爆破振动控制

岩石基坑爆破施工必须严格遵守《爆破安全技术规程》(GB6722—2003)，根据基坑岩体的性质，支护结构的类型，选择合适的爆破施工方法，优化爆破材料和爆破施工参数，最大限度地减少地面振动，目前对爆破的控制一般采用工程类比或现场实测的振动参数，如位移、速度、加速度等，选其最大峰值做为安全判据。选用的判据应根据爆破产生的振动频率来选择，对振动频率为几十周的中频范围，采用临界振速作为安全判据；对于只有几周的低频振动可选用位移判据；而对上百周的高频范围，则应选用加速度作为判据。岩体基坑爆破施工的振动频率大多在几十周的中频范围内，因此采用临界振速作为安全判据，根据基坑周边影响区内的建筑物类型不同，控制的爆破最大振动速度有所不同，对土坯房、毛石房屋不应大

于10mm/s；对一般砖房、非大型砌块建筑物不应大于20mm/s~30mm/s；对钢筋混凝土结构房屋不应大于50mm/s。大量的工程经验表明，一般采用20mm/s的爆破振动速度作为现场爆破工程的控制标准比较安全。

26.5 岩石地区的基坑工程案例

26.5.1 支护桩间接嵌入基坑底的工程案例

1. 工程概况

青岛三星数码大厦工程设计3层联体地下车库，建筑设计室内坪±0.00=17.00m。基坑工程地下室周长396m，基底相对标高-17.15m，场区地面平均相对标高约-0.5m，基坑开挖支护深度约16.5m。基坑工程安全等级为一级，为典型的土岩组合基坑。岩土层物理力学性质如表26-18。地下水类型为第四系孔隙潜水—弱承压水，主要补给为大气降水，潜水稳定水位埋深0.4-1.6m，承压水稳定水位埋深1.3-1.5m，年水位变幅约2m。砂层的综合渗透系数K取9.7m/d，估算基坑涌水量为1.3万m³/d。

岩土层物理力学性质

表26-18

地层编号	地层名称	层厚(m)	重度 γ (KN/m ³)	抗剪强度指标(直剪)		摩阻力 q_{sk} (kPa)
				C(kPa)	ϕ (°)	
(1)	素填土	2.0-3.9	19	(0)	(15)	(15)
(7)	粉质粘土	1.8-6.2	19.9	14.9	8	45
(9)	粗砂	0.9-5.5	20	0	34	125
(11)	粉质粘土	0-1.3	20	35	18	55
(12)	砾砂	1.6-5.9	21	0	38	200
(16)	强风化花岗岩	0.6-5.1	23	0	50	250
(17)	中风化花岗岩	0.5-4.2	25	0	(55)	(350)

注：() 内为计算采用经验参数。

工程地处商业中心，其地下车库紧贴用地红线，用地红线周边均紧邻道路，人流车流密集，东北隔路为地下商场（一层地下室），东南隔路为多层住宅（无地下室），西侧隔路为商业建筑（部分一层地下室）。总平面图见图26-29。周边道路有煤气、雨水、污水、给水、电信等市政管线，尤其是书院路一侧煤气管线距用地红线仅2m。

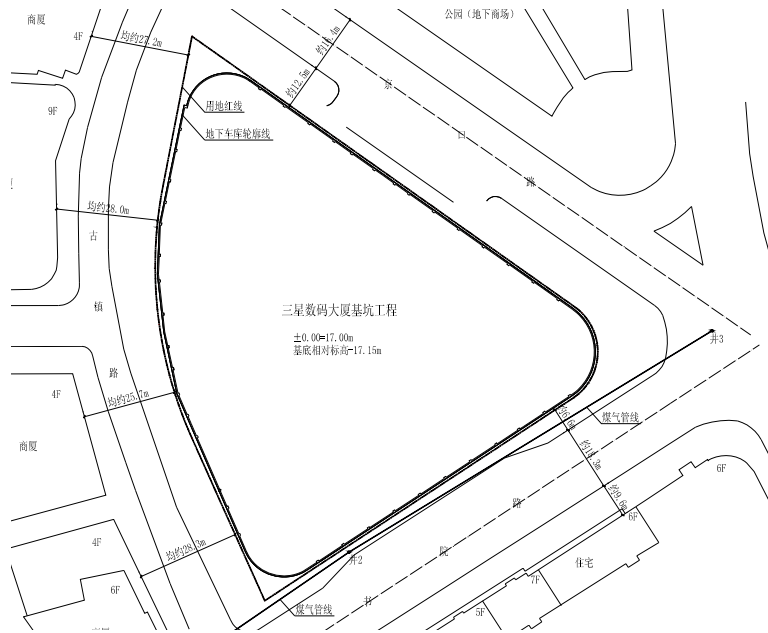


图 26-29 基坑总平面图

2. 基坑支护设计

经方案论证决定采用灌注桩外间接嵌入式桩锚支护，单排旋喷帷幕桩间止水。典型支护剖面（书院路侧）见图 26-30。

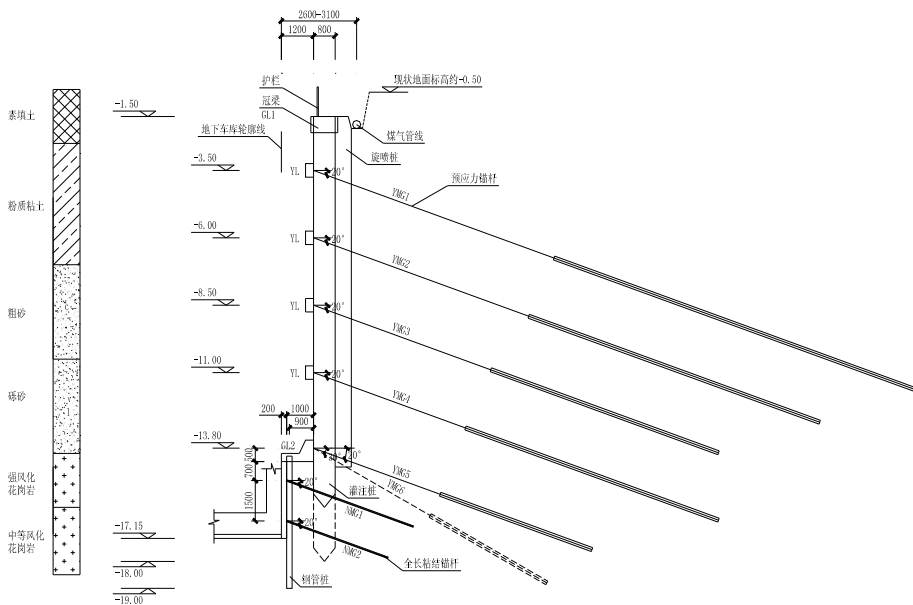


图 26-30 典型支护剖面图

施工工序要求首先进行平面支护位置的场地清理整平与表层土方运输；然后依次进行灌注桩及冠梁施工、旋喷桩施工；待支护桩体达到设计强度后，沿桩内侧壁分层进行开挖及预应力锚杆施工；开挖至坡脚平台设计标高后进行钢管桩及冠梁施工，留设岩体平台分层进行开挖及全长粘结锚杆施工至基底。

3. 监测

本工程按照安全等级 I 级工程设置监测内容, 主要包括围护结构顶部水平位移及沉降监测、地下水位监测、深层水平位移监测、环境建筑物沉降监测、煤气管线变形监测、锚杆轴力监测等项目。书院路侧水平位移历时曲线如图 26-31。坡顶沉降各测点最终位移量 5-8mm; 书院路一侧煤气管线水平及沉降位移量均为 5-8mm, 总位移量较小。由图 26-31 知, 2007 年 11 月基坑开挖至灌注桩脚平台前位移变化较小, 仅 S5 点位置由于坡顶水管破裂涌水位移动量突增。2007 年 12 月至 2008 年 1 月底开挖平台以下土石方形成“吊脚桩”后位移有明显增大趋势。其后基坑开挖至底部, 变形逐渐趋于稳定。

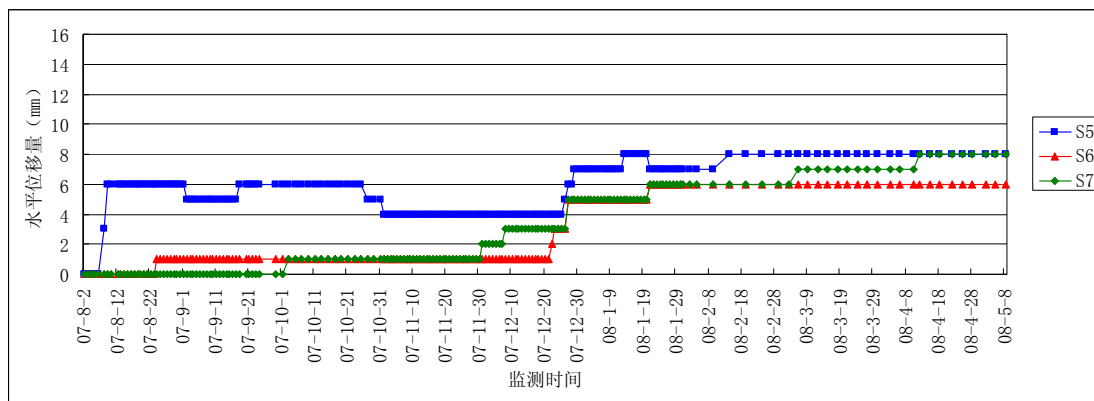


图 26-31 书院路侧监测点水平位移历时曲线

资料来源: 青岛市勘察测绘研究院 李鹏 闫强刚 张敬志

26.5.2 复合土钉墙支护基坑工程案例

1. 工程概况

拟建国华大厦地上28层, 地下四层, 拟建物室内坪±0.00=+15.70, 地下室周边基底相对标高-18.70m, -19.30m, 地下室平面尺寸近矩形, 长73.2m, 宽55.7m, 基坑实际开挖深度16.0~20.50m, 基坑侧壁安全等级一级, 为典型土岩组合基坑。

周边环境情况如图26-32所示。

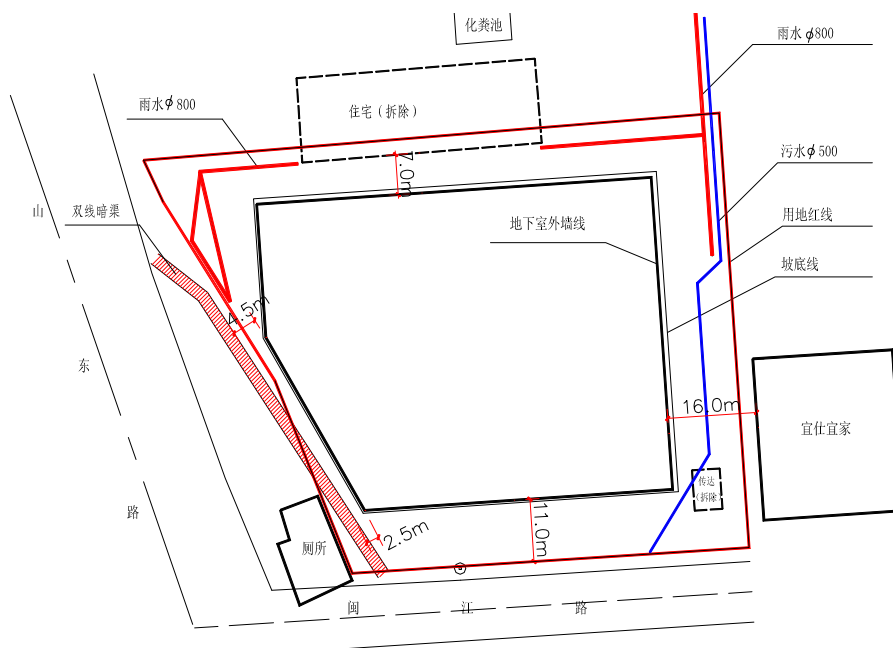


图26-32 基坑环境平面图

场区地形较为平缓，由北向南缓倾。地貌成因类型属剥蚀斜坡-侵蚀堆积缓坡，局部经人工开挖回填改造。场区第四系厚度较薄，主要由填土层及洪冲积成因的粘性土组成。场区基岩主要为燕山晚期深成相粗粒花岗岩，基岩强风化带平均厚达15m。基坑开挖涉及的主要岩土层自上而下简述如下：①杂填土：层厚约0.5~7.20m，松散，以回填杂土及砂土为主， $C_k=0$ ， $\phi_k=15^\circ$ ；②粉质粘土：层厚约0.00~4.10m，硬~可塑， $C_k=57\text{kPa}$ ， $\phi_k=21.7^\circ$ ；③花岗岩风化带：自上而下分别为强风化上亚带、中亚带、下亚带，中等风化带。地下水类型主要为第四系孔隙潜水和基岩风化裂隙水。第四系孔隙潜水主要赋存于填土和含砂粘性土层中。场区地下水主要是大气降水补给，场区内稳定水位绝对标高11.63~11.73m。

2. 基坑支护设计

根据基坑周边环境、地质状况及开挖深度，经过多个方案比较后，确定采用复合锚喷墙支护方案。其中东侧与宜仕宜家相邻部位，西侧暗渠部位作为基坑支护的重点。典型支护剖面图(西侧暗渠部位)见图26-33。本工程主要按土钉墙模型来进行计算，整体稳定性验算采用瑞典条分法，采用理正基坑支护结构设计软件辅助设计。为有效控制基坑位移，设置数道预应力锚杆。

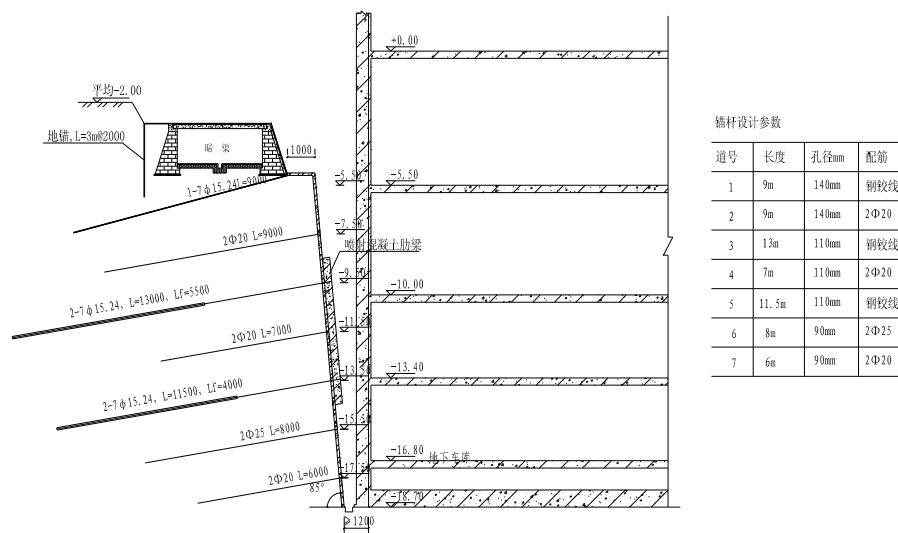


图26-33 典型支护剖面图

3. 基坑监测

根据本基坑工程特点，设定的监测项目有地表的水平位移监测、地表沉降位移监测、深层水平位移监测和水位观测，基坑监测等级一级。确定边坡岩土体变形监测及地下水位观测为重点，特别加强了场区西侧暗渠和宜仕宜家的位移监测。监测基准点设置在不受基坑开挖影响的稳定地段。

监测工作于2004年2月18日开始，2004年7月27日结束，部分监测点的位移随时间的变化情况见图26-34坡顶水平位移历时曲线。结合开挖工况分析监测数据可知，随着开挖深度加大及开挖暴露时间增加，坡顶水平位移基本呈线性增长。每层土石方爆破开挖后3天内坡顶水平位移陡增2mm~4mm，并逐渐趋于稳定。此位移主要是由于开挖后岩土体中应力重新分布及地下水位下降造成的。基坑开挖完成后一周内位移发展逐渐降低，并趋于停止。

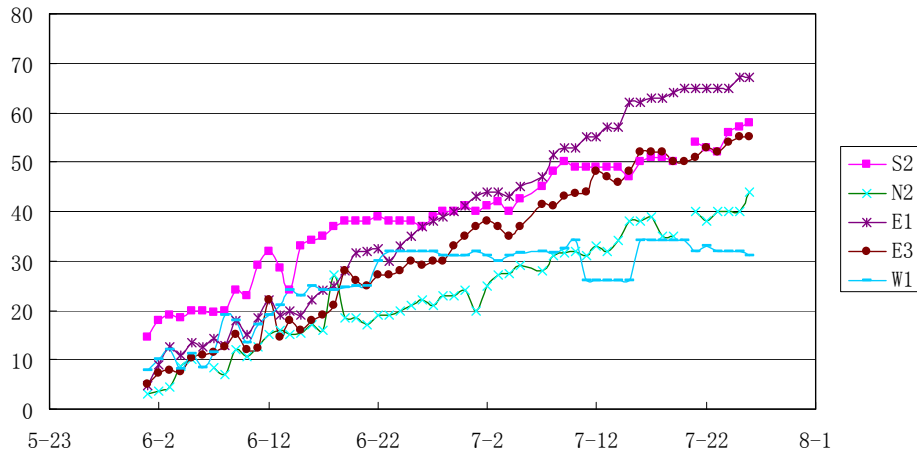


图26-34 坡顶水平位移历时曲线

国华大厦基坑工程设计、施工及监测实践表明：复合锚喷墙支护方式是一种造价低、施工便利的有效支护方式，但因其本身为柔性支护结构，基坑坡顶水平位移相对较大，在位移要求严格场区选用要慎重。

资料来源：青岛市勘察测绘研究院 孙涛 吕三和 吴刚

26.5.3 土岩结合内支撑支护基坑工程案例

1. 工程概况

设计单位提供拟建海景公寓设计室内地坪 $\pm 0.00 = 5.80m$ （黄海高程）。自然地坪约 $+5.20m$ 。基坑开挖深度（相对于自然地坪） $17.75m$ ；地下室外墙长约 $67m$ ，宽约 $45m$ ；地下室底板结构标高（相对于室内 $\pm 0.00m$ ） $-16.80m$ ；共4层地下室，第2、3、4层楼板结构标高分别为（相对于室内 $\pm 0.00m$ ） $-4.85m$ 、 $-8.75m$ 、 $-12.65m$ 。

该场地14米以上地层分布有较厚的粉细砂和粗砂地层，地下水位埋深约 $2.80\sim 3.20m$ ，此种地层条件下不适宜使用锚杆等锚固结构进行深基坑支护，同时考虑到基坑开挖深度较深，基坑平面尺寸也较大，拟采用钢筋混凝土灌注桩与钢筋混凝土内支撑相结合的基坑支护方案，同时在钻孔灌注桩外侧采用高压旋喷桩做防水帷幕。

2. 支护结构选型和结构布置

针对地下室底板、楼板位置和土层分布的不同，典型支护结构体系剖面图如图26-35所示，采用三道钢筋混凝土内支撑和钻孔灌注桩共同构成基坑围护结构受力体系，在距地表 $2m$ 深度范围内进行放坡开挖。下面对基坑支护结构的主要构件进行简单说明。

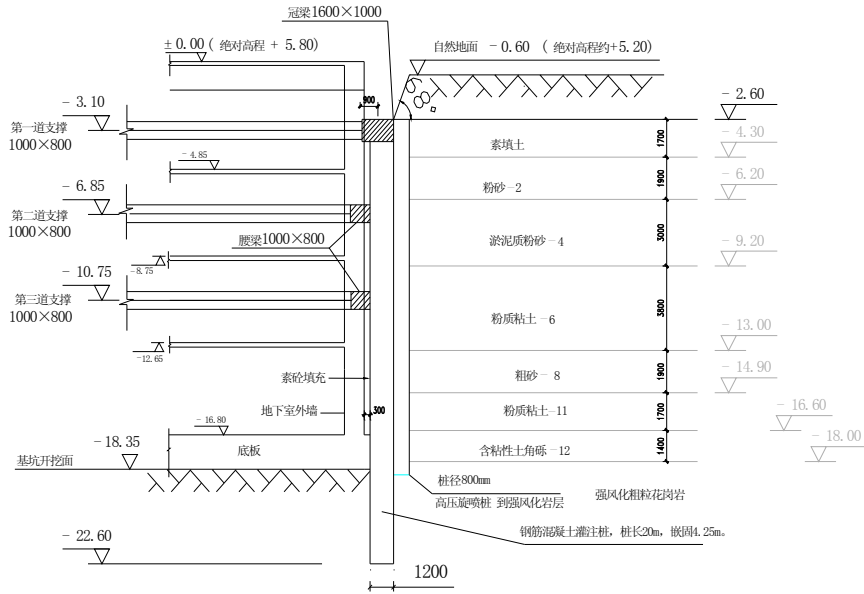


图 26-35 底板标高-15.80m 范围内的基坑支护结构剖面示意图

1) 围护桩

围护结构采用单排钢筋混凝土钻孔灌注桩和高压旋喷桩防水帷幕相结合的结构。

钻孔灌注桩是主要的受力结构，直径 1.2m，桩中心距 1.5m，桩长 20m，由于挖土时有 2.0m 的放坡，故桩长均是相对于自然地坪下 2.0m 位置而言的，即桩顶位于现场自然地坪下 2.0m 处。基坑最终开挖面以下为强风化粗粒花岗岩地层，桩的嵌固段深度为 4.25m。高压旋喷桩位于灌注桩外侧（相对基坑而言），主要用于形成防水帷幕，桩径 800mm，相互搭接 300mm，桩长至基岩面即可。

2) 钢筋混凝土内支撑体系结构布置

采用三道现浇钢筋混凝土内支撑结构；在桩顶浇筑截面为宽×高=1600×1000mm 的冠梁（导梁），与围护桩成为一个整体。第一道内支撑轴线距桩顶 0.5m，第二道内支撑轴线距桩顶 4.25m，第三道内支撑轴线距桩顶 8.15m。

钢筋混凝土内支撑结构平面示意图如图 26-36 所示，其中内环梁的直径为 38m，外环梁的直径为 54m，腰梁与环梁、内环梁与外环梁之间通过支撑连杆进行连接。在环梁与连杆的交点处均有立柱，立柱用以支撑环梁和连杆等结构自重。该种内支撑结构型式能充分利用混凝土的受压性能，其受力较为合理。

三道钢筋混凝土内支撑各主要结构构件的几何尺寸分别为：

- ① 第一道内支撑冠梁（GL）：宽×高=1600mm×1000mm；
第二道内支撑腰梁（YL）：宽×高=1000mm×800mm；
第三道内支撑腰梁（YL）：宽×高=1000mm×800mm；
- ② 环梁（HL）：宽×高=1000mm×800mm；
- ③ 支撑连杆（LG）截面：宽×高=800mm×800mm。
- ④ 支撑立柱：500×500mm 的方形钢格构柱，底部伸入钢筋混凝土立柱基础桩内 3m；立柱基础桩嵌入基岩 6.0m。

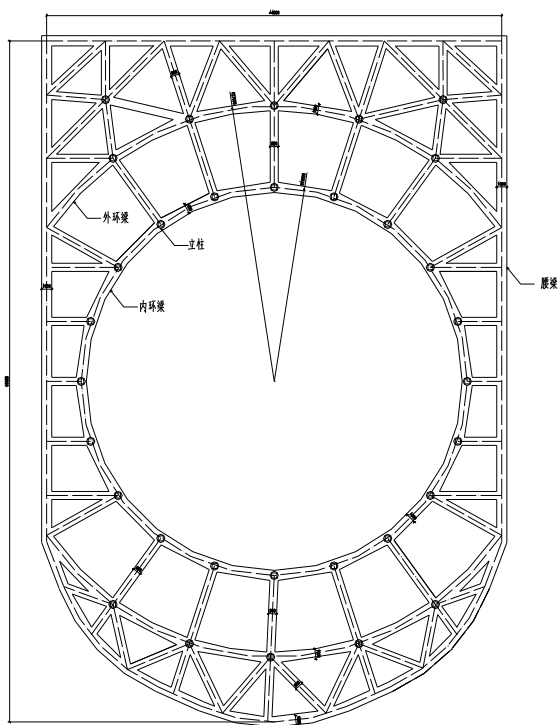


图 26-36 钢筋混凝土支撑体系平面示意图（第二道内支撑）

3. 钻孔灌注桩的内力变形计算

首先计算内支撑体系的等效刚度，利用平面框架有限元方法计算。计算的基本方法为：框架的各支撑点采用弹性支座约束，将单位均布荷载作用于冠梁或腰梁上，求出冠梁或腰梁的水平位移最大值 δ_{\max} ，为安全起见，取水平位移最大值的倒数作为该平面支撑体系的刚

度，即： $K_T = 1/\delta_{\max}$ 。

然后选取最不利的钻孔地层，利用大型通用有限元程序 ANSYS 进行支护桩的内力变形计算。计算采用弹性地基系数法，考虑支撑体系与围护桩的相互协调变形。

主动土压力均按照《建筑基坑支护技术规程》(JGJ-120-99)方法进行计算，地面超载为 20kPa 均布荷载，同时考虑 2m 高度放坡后产生的超载。

根据基坑开挖顺序、支护结构的布置同时考虑到钢筋混凝土内支撑的拆除，按照施工顺序分为 6 个计算工况，围护桩在施工各个阶段的最大变形和内力如表 26-19 所示。

基坑围护桩各工况的计算结果

表 26-19

工况 (相对桩顶深度)	最大位移 /mm	最大弯矩 / kN*m	最大剪力 / kN	支撑轴力 / (kN/m)		
				第 1 道	第 2 道	第 3 道
开挖至 4.75m	6.84	439	249	144	--	--
开挖至 8.65m	11.38	1280	753	223	115	--
开挖至 15.75m	22.48	2555	1180	238	274	286
拆除第三道支撑	24.06	2768	1127	265	312	--
拆除第二道支撑	24.83	2348	1118	342	--	--
拆除第一道支撑	24.7	2159	1128	--	--	--

资料来源：青岛市勘察测绘研究院 谭长伟 刘小丽 闫强刚

致谢：本章写作中得到了青岛市勘察测绘研究院和青岛岩土基础工程公司的大力支持。其中，吴刚工程师完成了岩石基坑施工的爆破控制一节的大部分内容；26.5.1节案例由青岛市勘察测绘研究院 李鹏工程师提供，26.5.2节案例由青岛岩土基础工程公司孙涛总工程师提供，26.5.3节案例由中国海洋大学刘小丽博士提供。在此一并表示感谢！

参考文献

- [1] 重庆市建设委员会. 建筑边坡工程技术规范 (GB 50330-2002) [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.
- [2] 中国建筑科学研究院. 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.
- [3] 贾金青. 深基坑预应力锚杆柔性支护法的理论及实践 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2006.
- [4] 戴俊主编. 爆破工程[M]. 北京：机械工业出版社，2008.
- [5] 常士彪，张苏民主编. 工程地质手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2007.
- [6] 肖树芳，杨淑碧主编. 岩体力学[M]. 北京：地质出版社，1987.
- [7] 沈明荣，陈建峰主编. 岩体力学[M]. 上海：同济大学出版社，2006.
- [8] 唐大雄，张文殊主编. 工程岩土学[M]. 北京：地质出版社，1999.
- [9] 程良魁，范景伦主编. 岩土锚固[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2003.
- [10] 张忠苗主编. 工程地质学[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2007.
- [11] 原国家冶金工业局. 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.
- [12] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范 (JGJ94—2008) [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2008.
- [13] 刘建航，侯学渊主编. 基坑工程手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1997.
- [14] 长江水利委员会长江科学院. 水工建筑岩石基础开挖工程施工技术规范 (DL/T5389—2007) [S]. 北京：中国电力出版社，2007.

第 26 章专业名称及术语

岩石

岩体

结构面

结构体

抗剪强度

抗拉强度

抗压强度

预应力锚杆

软弱结构面

泥化夹层

RQD 指标

变形模量

泊松比

锚杆

锚杆肋梁

复合土钉墙

内支撑

爆破控制