

四、隧道变形的控制技术

前面已经说明隧道开挖后是如何变形的以及变形的形态、影响变形的因素等，我们初步认识到隧道施工实际上是一个应力释放和应力控制的过程。这个过程通常是通过开挖、支护两个步骤实现的。即：**围岩原始状态—开挖—支护—形成长期稳定的结构物。**

因此，这里所谓的控制技术，就是开挖和支护中如何把变形控制在容许范围之内，并确保隧道结构体系的长期稳定性的技术。开挖是释放应力的方法，不同的开挖方法，应力释放的过程及程度也是不同的，支护则是应力控制的方法，同样地，不同的支护方法应力控制的过程和程度也是不同的。除开挖、支护作业外，其他作业都是辅助性的，如运输、排水、通风、量测、地质超前预报等。但这些作业也是左右开挖、支护成败的关键，也不能忽视。

因此作为控制技术主要指：**开挖、支护以及不可缺少的辅助作业**三大方面。

4—1 开挖、支护的相互关系

在矿山法施工中，开挖和支护是密切相关的。根据地质情况，其关系大致可分为以下几类：

1) 只挖不支的场合：在无需支护的整体状的或大块状的硬质围岩中采用的方法。

这种围岩的自支护能力比较高的，应力释放后能够自行控制而自稳。例如：铁路隧道的Ⅰ、Ⅱ级围岩。应该指出：在这种围岩中，基本上不存在变形控制问题，因为在这种围岩中隧道开挖后的变形，基本上都是弹性变形，开挖后的弹性变形是瞬时发生的，而且量值很小。但在大块状围岩中，块体移动也能够产生位移，但是局部的。通常用喷混凝土和局部锚杆就可以解决。

2) 先挖后支的场合：开挖后进行支护的一般围岩、地形条件下采用的方法。

在一般围岩、地形条件下，基本上都采取“先挖后支”或“边挖边支”的施工方法，例如铁路隧道的Ⅲ、Ⅳ级围岩。这是应力释放与控制相结合的方法，即边开挖、边控制，最终形成稳定的隧道结构。实质上这是在开挖后以**控制掌子面后方的变形**为主要目的的一种施工方法，即**先释放、后控制**的方法。

在“先挖后支”的场合，用**一般的初期支护**方法，完全可以满足安全、快速施工的要求。一般说，在这样的围岩条件下，隧道的变形通过初期支护，都可以收敛到变形容许值范围之内，而无需采用特殊的，或辅助的施工措施。这是与“先支后挖”的围岩条件的一个分界点。

3) 先支后挖的场合：开挖前进行支护的土砂或特殊围岩、地形条件下采用的方法。

在特殊围岩、地形条件下要先对围岩进行支护，才能顺利进行开挖的方法。实质上这是**先用超前支护控制先行位移和掌子面位移而后进行开挖**的一种方法。即：**先控制、后释放，再控制的开挖支护方法。**

根据隧道变形状态采取加强初期支护、并用超前支护的综合措施控制隧道变形。例如在先行位移和掌子面围岩比较大的场合，必须采用各种超前支护抑制先行位移和掌子面位移，在此前提下，再用初期支护抑制掌子面后方的位移。这是“先支后挖”场合控制位移的基本方法。下面仅就“先挖后支”及“先支后挖”两种情况的控制技术加以说明。

4—2 一般围岩、地形条件下深埋隧道变形的控制技术（“先挖后支”场合）

如前所述，在这种场合用**一般的初期支护**方法，完全可以满足安全、快速施工的要求。一般说，在这样的围岩条件下，隧道的变形通过初期支护，都可以收敛到变形容许值范围之内，而无需采用特殊的，或辅助的施工措施。

因此，从控制变形的角度出发，目前提高初期支护的功能和质量是关键。

一般说，初期支护是由喷混凝土、锚杆、钢支撑等支护构件单独或组合构成的，它与围岩共同成为一体的承载的支护体系。可以说大多数山岭隧道是用这种方式修建的。由于围

岩条件的不同,作为承载主体的围岩负担不了的部分,将由有不同承载能力的支护构件负担。这就是我们设计的基本原则。

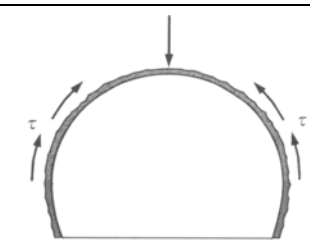
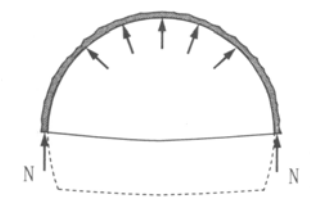
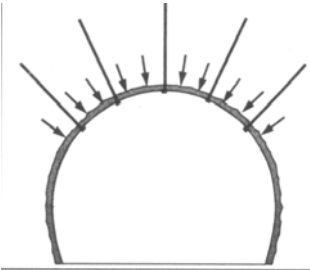
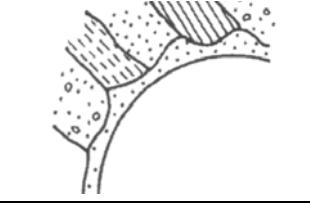
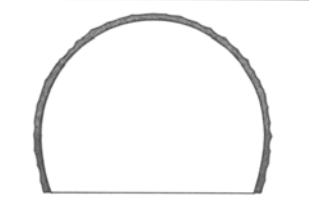
视围岩条件的不同,可能有多种支护模式予以对应,如: **喷混凝土、喷混凝土+锚杆、喷混凝土+钢架、喷混凝土+锚杆+钢架**等。但不管那种模式,喷混凝土是不可缺少的。因此在加强控制变形的技术中,喷混凝土是一个关键。

1) 喷混凝土

首先应该认识到喷混凝土是如何发挥支护作用的。

喷混凝土能够在开挖后立即与围岩密着地施工,不受开挖断面的大小和形状左右的,施工容易,是最一般的支护构件(包括开挖时、断面临时闭合时、反工时)。喷混凝土的支护功能有抑制开挖后的变形和抵抗外力的压缩和剪切、弯曲等。根据围岩条件,一般有表 4—1 所示的作用效果。

表 4—1 喷混凝土的作用效果

喷混凝土的作用效果	概念图
<p>1) 与围岩的附着力、抗剪的支护效果</p> <p>由于喷混凝土和围岩的附着力,可分散作用在喷混凝土上的外力,同时加强隧道周边的裂隙的抗剪能力,并可在壁面形成承载拱。在裂隙发育的硬岩等作用效果大。</p>	
<p>2) 内压、闭合效果</p> <p>因喷混凝土作为一个连续的构件支持围岩,可约束围岩的变形,给围岩以支护力(内压),使围岩保持三轴的应力状态。此外早期采用仰拱使断面临时闭合,也发挥了支护效果。此效果在软岩和土砂围岩中大。</p>	
<p>3) 外力分配效果</p> <p>作为传递土压到钢支撑、锚杆等上的构件而发挥作用。</p>	
<p>4) 软弱层补强效果</p> <p>填平凹凸不平处、跨越软弱层,而防止应力集中,补强软弱层等的效果。</p>	
<p>5) 被覆效果</p> <p>开挖后,因及早被覆壁面,可防止围岩风化、止水、微粒子流失等的效果。</p>	

在硬岩、中硬岩中围岩的层理、节理等不连续面发育的场合，主要期待发挥防止局部掉块和补强软弱层、被覆等效果，即表 4—1 中所示的①、④、⑤的效果。在软岩围岩，呈塑性动态的场合，主要期待发挥内压的约束效果、闭合效果等。即表中的②、③、⑤等的效果。

在土砂围岩那种围岩强度、变形特性支配隧道动态的场合，可并用钢支撑和锚杆等支护，加上⑤主要发挥表中②、③的效果。在这种场合时，应考虑支护构件各自的特性及相互间的作用进行设计。

开挖过后掌子面不稳定的场合，可向掌子面喷射厚 3~5cm 的混凝土，此时可期待表 4—1 中①、④、⑤的效果。

从理论上讲，必须具有一定强度和刚性之后，才能发挥其支护作用。但喷混凝土与混凝土一样，其强度出现需要一定的时间，刚刚喷射到壁面的混凝土是没有支护作用的，只有其强度达到一定值之后，才开始发挥支护作用。为此，为了让喷混凝土及早发挥支护作用，不得不在喷混凝土中掺入速凝剂。用以控制喷混凝土早期强度的出现。这个时间可长可短，是可以控制的。

喷混凝土的支护作用主要受到喷混凝土与围岩的附着强度和初期强度所支配。因此，提高喷混凝土与围岩的附着性和初期强度是喷混凝土施工技术的重要课题。

在一般围岩条件下，即采用“先挖后支”的场合，喷混凝土的初期强度可以采用 1 天的抗压强度达到 8~10MPa，附着强度达到 1.0MPa 即可。这也是规范对喷混凝土的基本要求。

从近期喷混凝土技术的发展看，喷混凝土中的粗骨料的直径有向小直径方向发展的趋势，美国“喷混凝土用材料规格”(ASTM C1436(2004))中，骨料的直径只有 9.5mm，取消了原来 12.5mm 的规定。

从设计角度看，喷混凝土的最大厚度应控制在 25cm 以内。如果 25cm 还不充分，最好不增加厚度而提高强度，例如改为 C30 或 C35。也可以改为纤维喷混凝土。

仅用喷混凝土保护围岩，或防止围岩风化时，其厚度可采用 5cm。但要喷混凝土起结构作用的场合其最小厚度应在 8cm 以上。

如果用喷混凝土作为永久衬砌的场合，其最小厚度应大于 10cm。

2) 锚杆

锚杆的作用效果，可用表 4—2 的作用概念表示，但根据围岩的种类，应注意以下几点：

• 硬岩及没有塑性化的软岩

围岩强度应力比大、隧道周边围岩没有塑性化的情况，不需要内压效果。同时，在硬岩中即使没有锚杆也多会形成承载拱，而用锚杆形成平衡拱的必要性不大。因此，在硬岩或围岩强度应力比大的软岩中，锚杆的目的以抵抗与裂隙面平行方向的剪力效果和抑制直角方向的剥离、移动的悬吊效果为主。

• 塑性化的围岩（相当 I_{N-1} 、 I_{N-2} 、 I_S 级）

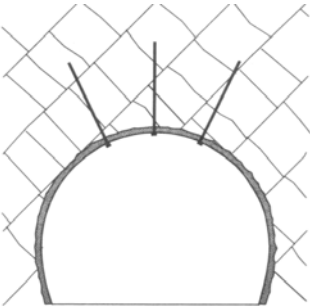
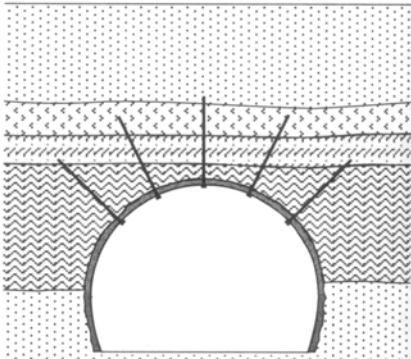
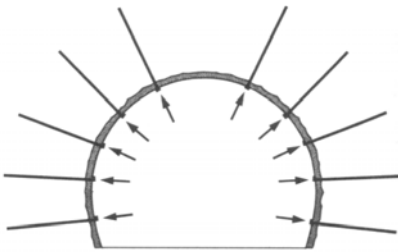
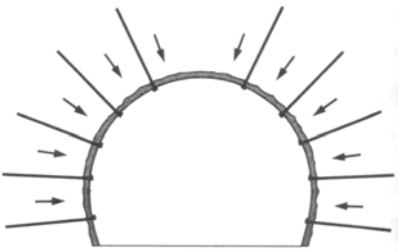
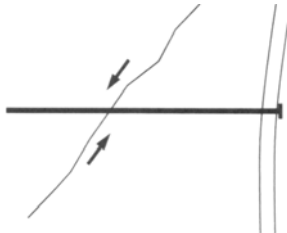
在围岩强度应力比小的软岩中，隧道周边围岩发生塑性化，是以内压效果或者承载拱效果为主。锚杆具有抑制隧道径向位移与围岩内部的相对位移的概念，围岩采用完全弹塑性体假定进行解析，因内压的存在而使塑性区域和壁面位移减少。但如要给予使塑性区不发生的内压，开挖初期就要给以强大的支护力。

• 土砂围岩（相当 I_L ）

在埋深小的土砂围岩中，锚杆期待与塑性化围岩同样的效果。土砂围岩的围岩强度应力比比软岩更小，因为开挖后会产生很大的变形，在喷混凝土后要立即打设锚杆。在埋深小的土砂围岩中，喷混凝土是有效果的，根据过去的量测结果，拱顶附近的锚

杆几乎不受拉力，也有发生压力的情况，因此，锚杆主要是对掌子面崩塌补强（超前支护）及缝合效果为主。但在上下半断面脚部下沉量很大的场合，具有抑制支护整体下沉和脚部径向位移和位移内部的相对位移的效果。其次埋深在 $0.5D$ 以下的场合，一般说，开挖之前就要对隧道上部的地层进行改良和采用大规模的超前支护，锚杆的功能受到一定限制。

表 4—2 锚杆的作用效果

锚杆的效果	概念图
<p>• 悬吊效果</p> <p>把因爆破而松动的岩块固定在没有松动的围岩上，防止掉落。在裂隙发育的围岩中与喷混凝土并用，效果增大。</p>	
<p>• 梁效果</p> <p>对隧道周边的层状围岩，使分离的层理面叠合而形成叠合梁。因锚杆的叠合效果可使层理面传递剪力，作为组合梁而发挥效果。</p>	
<p>• 内压效果</p> <p>锚杆轴力通过喷混凝土作用在隧道壁面上，发挥了内压效果，使隧道附近保持三轴应力状态。这抑制了隧道周边围岩的塑性和扩大，同时也发挥了抑制隧道净空位移的效果。</p>	
<p>• 拱效果</p> <p>由于系统锚杆的内压效果，对一体化的围岩，形成了承载拱，提高了隧道周边围岩的承载能力，也发挥了抑制隧道净空位移的效果。</p>	
<p>• 围岩改良效果</p> <p>围岩内插入锚杆后增大了围岩自身的抗剪强度，围岩屈服后的残余强度也增大了。因此，锚杆能够改善围岩的特性。</p>	

锚杆与喷混凝土有一个共同点，就是砂浆锚杆，也是要在砂浆出现一定强度之后才能发挥其支护作用的。因此，砂浆也必须采用早强的，这一点一定要加以注意。

锚杆的支护作用主要决定于锚杆与围岩的附着强度和抗剪强度。如何提高锚杆的附着性和抗剪强度，可以采用适当增大锚杆直径（增加附着面积）、适当改变锚杆的表面形状，采用早强砂浆等措施。

锚杆因围岩变形和滑动，产生拉力和剪力而发挥其效果，但在显示连续动态的软弱围岩和节理发育的中硬岩中，因为变形模式不同，锚杆中产生的应力也不同。

所以，定量评价锚杆的支护效果和支护机理的场合，要分开连续动态的围岩（连续性围岩）还不连续面发育的围岩（不连续性围岩）考虑。

（1）不连续性围岩的场合

在裂隙发育的不连续性围岩中，沿裂隙、节理的岩块会产生剥落和移动。因此，在这种围岩中，如图 4—1 所示，锚杆应控制剥落使围岩成为一体，而发挥悬吊和组合的作用，同时 在不连续面处的锚杆呈 S 形变形而发挥抗剪的作用。

而在全长胶结型锚杆中，砂浆等会防止岩块沿节理和裂隙滑动，而显示出控制松弛的效果。

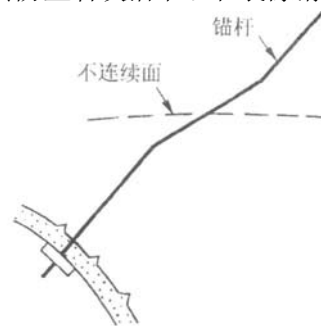


图 4—1 锚杆的阻抗

（2）连续性围岩的场合

在连续性围岩中，如图 4—2 所示，设置锚杆后，围岩沿锚杆轴向变形的场合，围岩与锚杆因变形系数的不同，两者间产生相对位移，形成图 22b 新的平衡状态。此时的围岩与锚杆的位移分布如图 22c 所示，锚杆出现没有相对位移的中性点。

同时，因围岩与锚杆间的相对位移，锚杆的轴向产生如图 22d 所示的剪力。

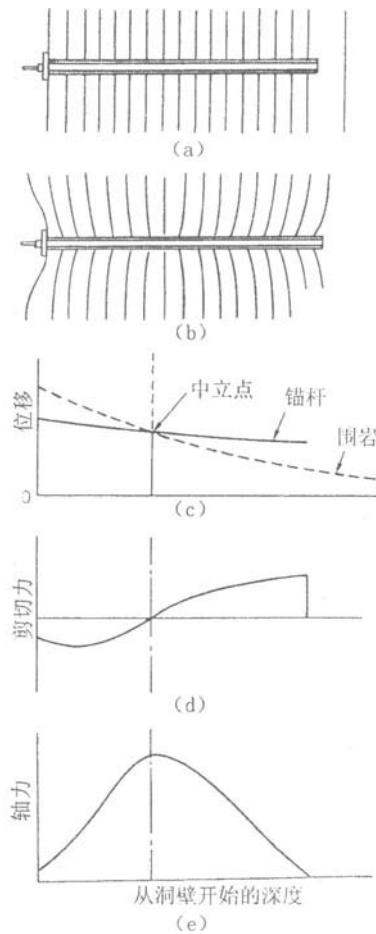


图 4-2 连续性围岩地锚杆动态

此结果，离中性点靠近壁面侧的剪力起着拉拔锚杆的作用，而围岩侧的剪力，则相反起着把锚杆固定在围岩中的作用。

这样一来，因剪力的作用，锚杆产生的轴力分布如图 4-2e 所示时，在锚杆的中性点，轴力峰值点及剪力方向反转点是一致的。加上，在软弱围岩中，周边应力超过围岩强度会出现塑性变形的情况。此时的锚杆由于其拉力而发挥阻止围岩变形的作用，显示出控制松弛区域的发生和进展的内压效果。

此外，如图 4-3 所示，由于锚杆轴力阻止围岩的变形，类似于三轴应力状态，切向应力从 σ 变到 σ' ，提高了围岩的强度，显示了改良围岩的效果。

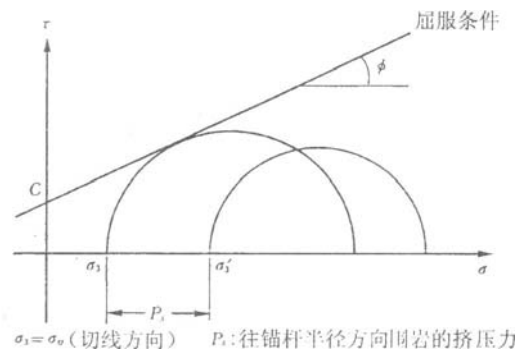


图 4-3 锚杆的内压效果

总之，在“先挖后支”的场合，锚杆的支护作用，不容忽视。

目前有一种认识：认为“锚杆受拉，才起作用”是一个误解。因为系统锚杆可以提高锚

固范围内围岩的物理力学性质，特别是抗剪强度。这也是锚杆支护的重要特性之一。

在先挖后支条件下，锚杆不宜轻易取消。

3) 钢架（钢支撑和格栅）

格栅与钢支撑，我们都归为构件支撑一类，但两者的力学作用是完全不同的。前者，只有与喷混凝土并用，才能发挥其支护作用，而且不能立即发挥承载作用。而后者可以立即地、独立地发挥承载作用。因此，需要采用钢支撑的场合，决不能用格栅代替。两者的比较列于表 4—3。

表 4—3 钢支撑与格栅的比较

支撑形式	优点	缺点
钢支撑	<ul style="list-style-type: none">• 架设后能够立即承载，充分发挥其力学作用• 加工比较容易，但需要较大的加工设备• 安装及构件连接，比较简洁、方便	<ul style="list-style-type: none">• 背后的混凝土不易填充密实，留有空隙• 重量大，架设安装困难• 钢支撑的变形与混凝土变形不协调，混凝土易开裂
格栅	<ul style="list-style-type: none">• 架设后不能立即承载，必须与喷混凝土配合，才能发挥其力学作用• 加工容易，且不需要大型加工设备• 重量小，易于架设安装• 因具有一定的柔性，能够适应围岩的变形	<ul style="list-style-type: none">• 喷混凝土完全包裹格栅，整体性好，背后不易留下空隙• 架设后不能立即承载，一次支护作用小• 在围岩变形大的场合，不能有效地控制围岩的变形

对钢支撑来说，理论上是可以立即承载的，但实际上，由于钢支撑架设的时间和与周边围岩接触的状态，都不是很理想的。一般说，钢支撑属于点接触的构件，其受力状态主要决定于其接触状态。例如，日本在钢支撑的实验研究中，为了确保钢支撑的支护作用，按图 4—4 的接触状态进行了不同组合的试验。试验结果列于表 4—4。

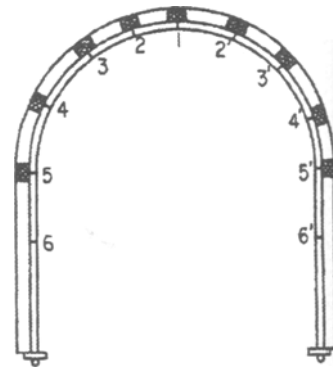


图 4—4 接触点的位置

表 4—4 接触点的状态、位置和钢支撑承载力（%）

接触点位置	F	A	B
接触点状态			

F	无荷载状态下，接触点具有300kg 反力的钢支撑	100	80	60
Fa	无荷载状态下接触点无反力的钢支撑	90	70	50
Fb	无荷载状态下接触点接触点有空隙的钢支撑	60	50	40

表 4—4 明确指出：钢支撑的接触点数量越多其承载力也越大，接触点具有一定反力，比没有反力的，承载力也大。由此可见，钢支撑架设，人为地设置若干个具有一定反力的接触点，对提高钢支撑的支护作用具有重要意义。日本的钢支撑在架设后都要用木楔，按规定位置，对称地打入钢支撑与围岩之间，并施加不小于 300kg 以上的反力，因此，钢支撑受力是均匀的，能够更好的发挥钢支撑的作用。我们在施工规范中也规定了要设置楔点，坚持这一点很重要。

钢支撑是沿隧道开挖面设置的拱形的型钢的支护构件，因为架设的同时就能够发挥其功能，作为在喷混凝土强度和锚杆的锚固材料的强度发现前之间的支护是有效的。钢支撑的功能及其效果的概念分别示于图 4—5 和表 4—5。

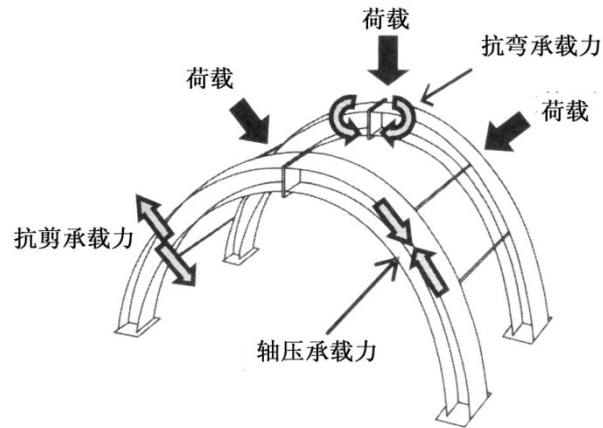
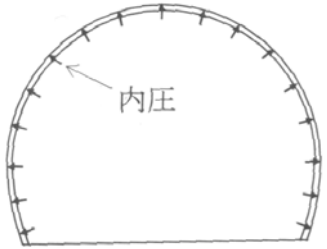
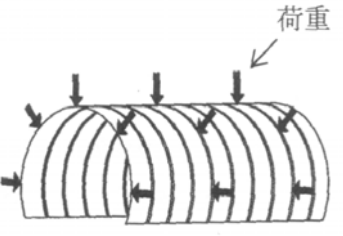
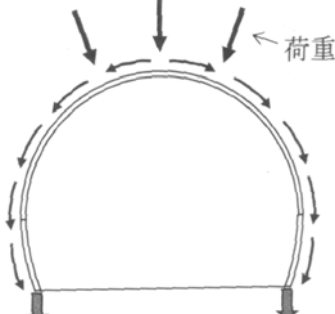
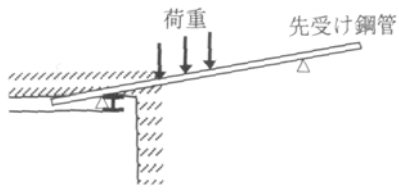


图 4—5 钢支撑的功能

表 4—5 钢支撑的作用效果

钢支撑的效果	概念图
<p>① 块保持效果</p> <p>因钢支撑域与围岩密着设置，可因构件的弯曲承载力和抗剪承载力防止局部岩块崩落</p>	
<p>② 软弱层补强效果</p> <p>开口裂隙和规模小的软弱层等是围岩的薄弱处，因用钢支撑支持，能够降低围岩内不连续面和软弱层的影响</p>	

<p>③内压效果</p> <p>在难于形成承载拱的软岩和土砂围岩中,钢支撑的反力可以作为约束隧道径向位移、并使开挖面附近保持三轴的状态,提高了围岩的承载力</p>	
<p>④喷混凝土补强效果</p> <p>喷混凝土在初期材龄时的变形系数比较小,易于变形,同时强度也小,但与钢支撑成为一体后,支护全体的刚性、韧性都得到提高</p> <p>喷混凝土的强度发现后,与围岩成为一体,在隧道轴向形成一个连续的拱形结构,使隧道和周边围岩得以稳定</p>	
<p>⑤向围岩(脚部)传递荷载效果</p> <p>作用在支护上的荷载通过钢支撑的底板等传递到围岩上</p>	
<p>⑥超前支护支点效果</p> <p>在土砂围岩和破碎带等掌子面稳定性差的围岩采用超前支护的场合,作为超前钢管等的支点,支持掌子面前方围岩和荷载,抑制了围岩的松弛和崩塌</p>	

设计钢支撑时,应明确其功能和期待的效果,决定其种类和配置,有效的发挥喷混凝土、锚杆及围岩成为一体的支护功能。为此架设钢支撑时,与围岩间的空隙要迅速地用喷混凝土充填,与喷混凝土成为一体,充分发挥其功能。

但是,架设钢支撑时,因要凿除不平整的围岩,使循环时间增加,超挖增大,也增加了喷混凝土的喷射量,其次,在钢支撑的周边喷混凝土的施工性也差,有时钢支撑会将喷混凝土壳隔断等。因此,日本在近期隧道施工中,有采用高强喷混凝土取消钢支撑的趋势,并在一些隧道中进行了试验研究。

格栅是钢架的一种类型,起源于欧洲,但在我国得到广泛的应用,而且应用的类型比较单一,其断面基本上是由四肢钢筋构成的构造。目前在欧洲多采用类似图 4—6 的钢筋肋的结构形式,来补强喷混凝土。它的一个优点就是不会因设置格栅而谓地增加喷混凝土的厚度。

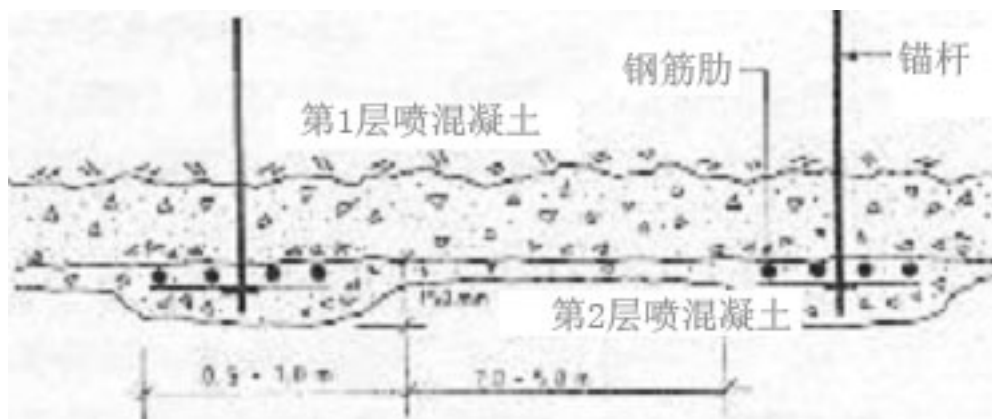


图 4—6 钢筋肋喷混凝土

4) 支护构件的组合效果及施工步骤

视围岩条件的不同，支护构件可能有多种支护模式予以对应，如：

喷混凝土

喷混凝土+锚杆

喷混凝土+钢架

喷混凝土+锚杆+钢架等。

这里存在一个问题，就是支护构件组合后的效果如何？，如何让组合后的支护体系更好地发挥支护作用。日本的一个研究结果指出：组合支护的效果比三者单独支护效果的总和要小。其次喷混凝土+锚杆与喷混凝土+钢架的组合效果也是不同的，在某些场合，喷混凝土与钢架结合后，主要承载的是钢架，喷混凝土受力不大，不能充分发挥喷混凝土的支护作用等，因此研究支护构件组合后的支护效果是一个需要关注的问题。

支护构件的施工步骤也很重要，表 4—6 是日本在施工中采取的施工步骤。

表 4—6 支护构件的施工步骤

分类	标准的施工步骤
喷混凝土与锚杆施工 的场合	
钢支撑，喷混凝土和 锚杆施工的场合	
金属网，钢支撑、喷 混凝土和锚杆施工的场 合	

5) 位移控制基准

在“先挖后支”的场合，一个重要问题就是位移控制基准的确定。这是决定初期支护能力的主要依据。日本在隧道标准示范书（矿山法编），规定铁路隧道的净空位移值的大致标

准，如表 4—7 所示。

表 4—7 铁路隧道净空位移值大致标准（隧道半径 5.0m）

围岩级别	净空位移值	
	单线	双线、新干线
I _s 或特S	75mm 以上	150mm 以上
I _L	25~75mm	50~150mm
II _N ~V _N	25mm 以下	50mm 以下

公路隧道也在围岩分级中给出了位移的大致标准见表 4—8。

表 4—8 公路隧道净空位移值大致标准（隧道跨度 10m 左右）

围岩级别	净空位移值
B	15mm 以下
C I	15~20mm
C II	30mm 左右
D I	30~60mm
D II	60~200mm

我们也应该开始研究与围岩级别相对应的容许位移值，这是控制技术所要求的。

如何确定容许位移的基准，是一个亟待解决的问题。

1) 管理基准的设定方法

位移量测的管理基准的设定方法多根据周边围岩的稳定性和支护构件或者近接结构物的容许位移值等观点设定。管理基准的设定方法，一般有以下各种方法。

①参考施工实绩的方法

此方法是收集、分析地质条件和埋深、隧道开挖规模等的类似条件下的量测结果和管理基准的数据，参考这些资料反馈到该隧道进行研究，设定的方法。

②极限应变的方法

采用极限应变设定管理基准的方法，是根据隧道开挖产生的围岩位移的量测结果，计算围岩的应变，并与围岩的极限应变比较，设定管理基准的方法。

③基于确保周边结构物安全的基准值设定的方法

为确保周边结构物安全的基准值的设定方法，是根据近接施工中的管理对象设定的基准值，再考虑对象物的基准强度、承载力、周边环境等与管理者协商设定的。

④用解析方法设定的方法

在特殊围岩条件下，也有采用数值解析结果设定管理基准值的方法。其方法有：根据事前调查输入围岩物性值的正解析方法，用得到的预测位移值，一边研究一边反馈到现场和根据实际位移值反算出围岩物性值，再进行正解析，对预测位移值进行修正后设定管理基准值。基于解析结果设定管理基准值时要注意，输入物性值和解析模式及解析方法等解析条件不同得到的结果会有很大的差异，解析得到的结果不一定与实际的动态一致。因此，采用解析方法设定管理基准的场合，不能照样利用解析结果作为管理基准，要参考隧道整体的稳定性、支护构件的稳定性、对周边结构物的影响、容许位移值、类似实绩的位移动态等合理的设定管理基准。

以上各种方法都是以位移量测进行定量评价为目的而设定的，但应一边考虑基于掌子面观察的原位置的围岩状态的相关性，一边根据施工条件、围岩条件等进行修正也是很重要的。

4—3 一般围岩、地形条件下浅埋隧道变形的控制技术

如前所述，在这种条件下，主要是控制地表面下沉和可能出现的整体下沉现象。

与 4—2 节深埋隧道不同的是：浅埋隧道的围岩条件多数是比较差的；一个地表面下沉可能受到严格的限制；一个是由于埋深小可能出现整体下沉的崩塌现象。因此其控制技术与 4—2 节所述的会有所不同。这种情况下的控制技术与下节所说的基本相同，故一并列入下节说明。