

( 翻译件仅供参考，请以原文为准！ )

## 根据“新意法” ( 岩土控制变形分析成果 )

### 指导隧道设计及施工

#### 1.0 简介

任何一名从事地下工程施工人员都会感慨：与从事地面工程施工相比，他们势必遇到并解决诸多的土木工程难题。事先要确定地下未知的 basic 设计参数十分不易。

首先，就地面工程施工而言，按照既定或已知的强度和变形特性对构造物循序渐进地进行材料(钢材、钢筋混凝土等等)安装或施工，最终满足预期的构造参数和构造物的稳定和平衡，这并不十分困难；但是假如要在一个前期已经平衡的构造物上，通过某种方法往里掘进，同时对其地质条件只能进行粗略估计或对预期干扰不能充分估计的前提下，这便显得不那么容易了。

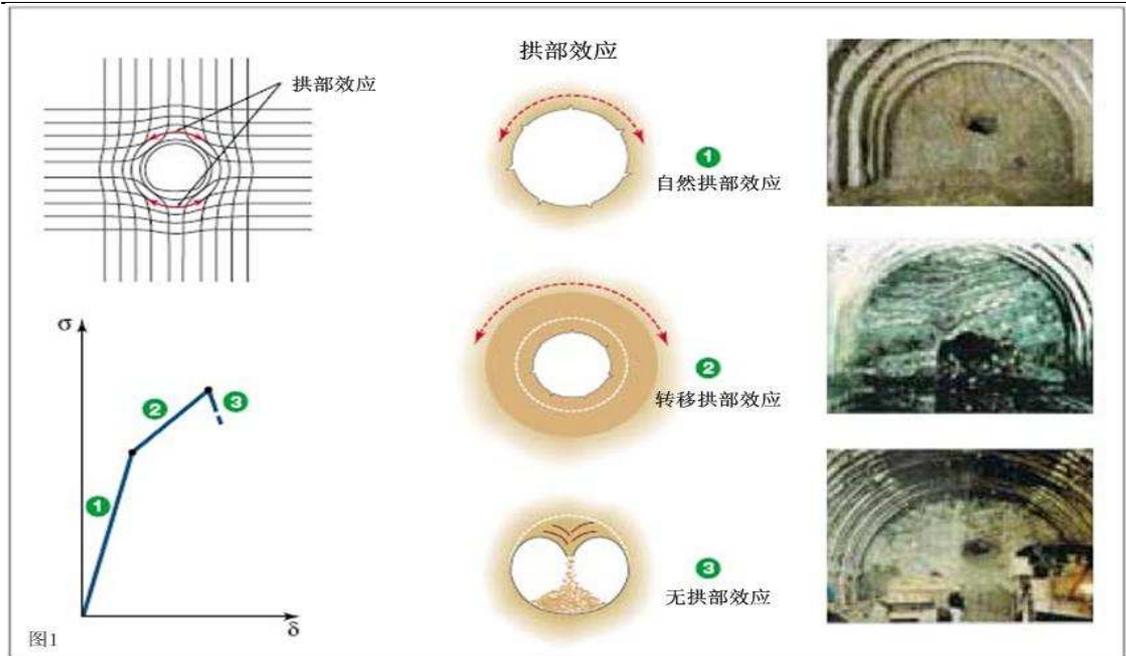
地下工程另一个特点，也是为设计或施工工程师熟知但又没有引起足够重视的一点是隧道结构承受最大应力的阶段并不是隧道施工完成并且根据设计对隧道结构加载的阶段，而是在隧道开挖施工阶段，因为在此阶段由于隧道开挖引起的地质扰动带来的影响还未通过二次衬砌进行限制。在此阶段，围岩预存应力在原来基础上沿着隧道开挖轮廓线偏离(称为“拱部效应”)，并沿着隧道开挖轮廓线形成应力增加带。

假设应力路径沿着隧道开挖轮廓发展，开挖施工阶段的隧道强度大小将决定隧道结构整体性以及寿命。根据实际应力的的大小以及地表的强度和变形特性，可以得到应力路径如下所示(图1)：

- 1) 接近隧道开挖轮廓面；
- 2) 远离隧道开挖轮廓面；
- 3) 不存在。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



当隧道周围地表能很好地抵消由于开挖引起的偏移应力，并且根据其强度和变形做出弹性应答，便出现第一种情形；

当开挖隧道周围地表不能很好地抵消偏移应力，并根据周边增塑性地表体积做出非弹性、塑性和变形回应时，便出现第二种情形；此种情形也导致隧道周围地表受到影响的面积增加并且应力径向扩散导致应力路径从隧道开挖轮廓面向围岩内部偏离，直至三角应力形态与地表强度特性保持平衡。在此种情形下，“拱部效应”在隧道开挖轮廓线外较远地带形成，而通过隧道开挖扰动的隧道轮廓周边土体只能通过自身的残余应力保持最终结构稳定，这将导致结构变形增大。

当开挖隧道周围地表根本不能抵消偏移应力流并做出能引起隧道塌方的滑动回应时，便发现第三种情形。

接着分析这三种情形后得到：

- 拱部效应只在第一种情形下自然形成；
- 第二种情形下，只有借助适当的围岩稳定性处理措施才能形成自然拱部效应；
- 对于第三种情形，由于拱部效应不可能自然产生，在开挖前应通过对围岩采取相应措施产生人工拱部效应。

对于隧道设计工程师来讲，第一要务也是最重要的一点是要研究在隧道开挖时是否存在拱部效应以及如何形成拱部效应，下一步才是选用适当的隧道开挖和支护措施。

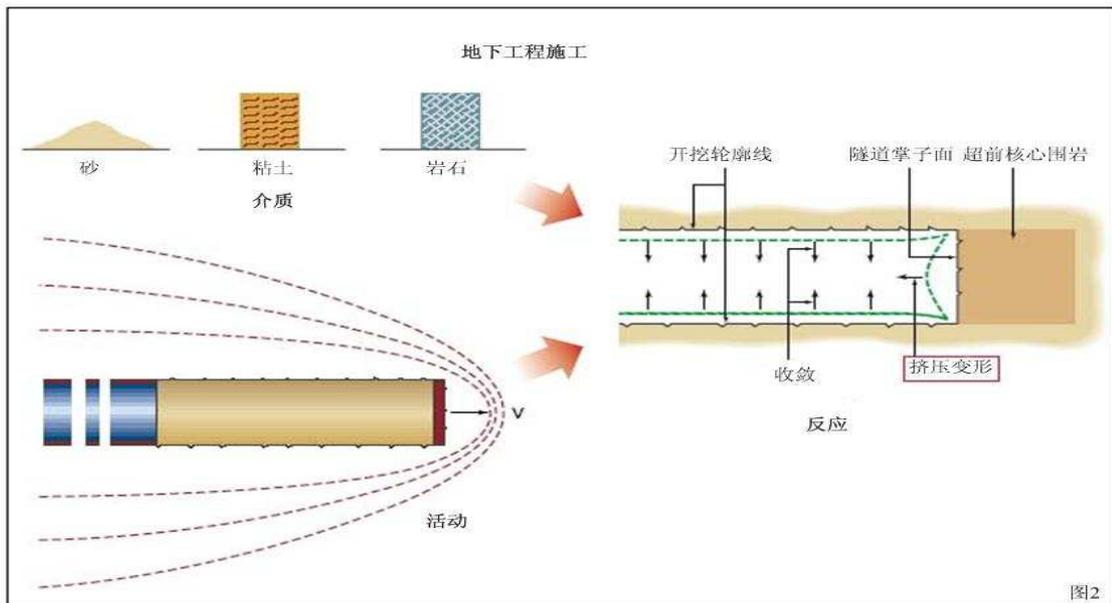
基于此目的，以下项目研究必不可少：

- 隧道施工介质（围岩）；

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

- 采取的隧道开挖措施;
- 预计开挖后的围岩反应。



隧道开挖介质（围岩）与传统土木工程施工相比显示了极其不规则的特性：不连续性、不均匀性以及各向异性。隧道围岩在地球外壳形态作用下其内在形态（自然形态）表现出截然不同的特性。进一步讲，围岩特性将根据应力状态改变而改变，并对隧道开挖做出回应。

当隧道通过介质时开挖发生。因此这显然是一个动态影像：隧道掘进可以被形象比喻为一张光盘不停地以V级速率向前转动，并在其后形成净空。掘进同时在纵向与横向对开挖介质产生扰动，最终改变原始应力状态。

在扰动区域，原始应力场通过隧道开挖发生偏移并且在其附近产生应力增加。增加的应力大小决定了每层介质受扰动范围（开挖介质中围岩遭遇岩土力学特性损失体积不断增大），因此，隧道变形特性与围岩强度 $\sigma_{gd}$ 相关。

靠近隧道掌子面的扰动区域范围由掌子面影响半径 $R_f$ 决定，设计工程师必须高度重视隧道开挖掌子面开挖影响范围，在此范围内三轴应力转变为平面应力状态（掌子面或过渡区域）；隧道研究要求用三维法进行计算而不是只考虑二维空间。

反应是指开挖介质对隧道开挖行为的变形回应。变形在开挖面前方扰动区域内随着围岩四周应力的增加提前发生，变形大小决定于开挖介质强度以及隧道掌子面开挖的影响范围。变形大小决定了围岩是否侵入隧道设计理论开挖断面。发生隧道开挖设计净空侵限也标志着隧道掌子面的失稳。

三种基本情形可能发生：

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

---

假如隧道掘进过程中从三轴应力状态转变为平面应力状态，隧道开挖面应力递减（ $\sigma_3=0$ ）并使隧道掌子面前方弹性范围内产生应力，从而使得未开挖的隧道截面（或掌子面）由于变形受到限制或变形可以忽略而保持稳定；在此情形下，在开挖轮廓线较近的位置产生围绕隧道开挖轮廓面的自然应力路径（或称“拱部效应”）。

同时，假如隧道开挖面应力状态递减（ $\sigma_3=0$ ）使得掌子面前方弹性-塑性范围内产生应力，那么此时未开挖围岩产生的反作用力便变得比较重要，隧道掌子面将朝隧道内产生弹性-塑性方式的变形，并且维持短期稳定状态。这意味着在不采取任何措施的情形下，开挖轮廓四周应力径向以及纵向放散将引起增塑并且使“拱部效应”从开挖轮廓线周围转移到围岩地层中。此类“转移”只能通过采取足够的稳定及支护措施来进行控制。

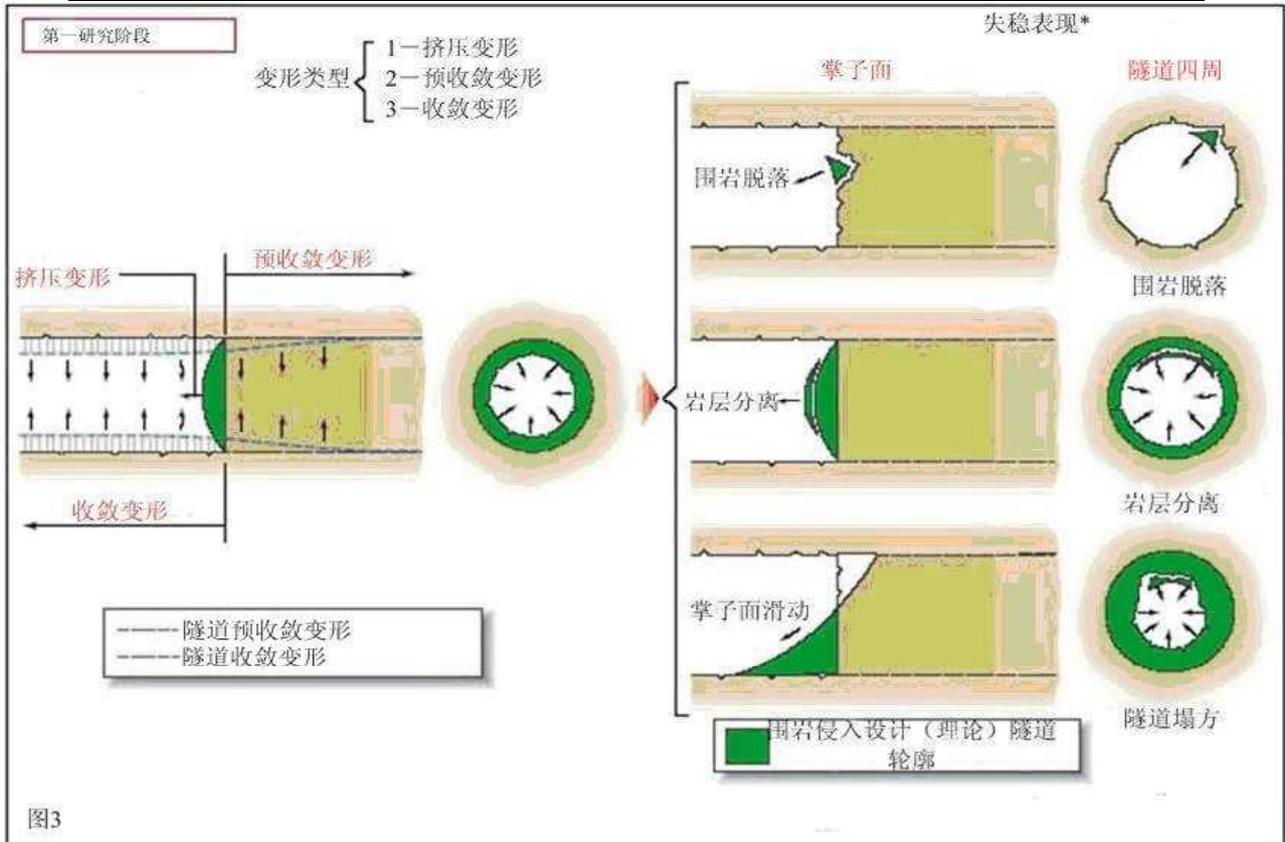
最后，假如隧道开挖面应力状态递减（ $\sigma_3=0$ ）使得掌子面前方产生破坏/滑动范围内的应力，那么变形反应随之产生而且隧道掌子面前方围岩变得极不稳定，进而使得形成“拱部效应”已不可能：这种情况经常发生在粘结力差以及黄土地层中，这种情况下，由于不能自然形成“拱部效应”，那么必须采用人工形成。

因此，隧道“拱部效应”的形成及其位置（通过此项我们可以了解隧道结构是长期还是短期稳定）取决于隧道开挖介质对开挖施工“变形应答”的特性以及大小。

在此起点基础上，早在二十五年前，我们便开始着手研究由于隧道掘进/开挖导致的应力状态改变与相应的隧道变形应答之间的关系。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



## 2.0 开挖介质的变形应答研究

围岩变形应答分析在研究过程中经历了试验研究与理论研究阶段，从二十五年前开始，至今仍在继续。

“第一阶段研究”致力于对施工过程中隧道宏观范围内的应力—应变行为系统研究。最初研究只是着眼于隧道掌子面，而不是现在通常关注的整个隧道。当时研究的难点在于变形应答（效应）出现太快，我们需要寻找新的依据以便进行全面、深入研究（图4）。

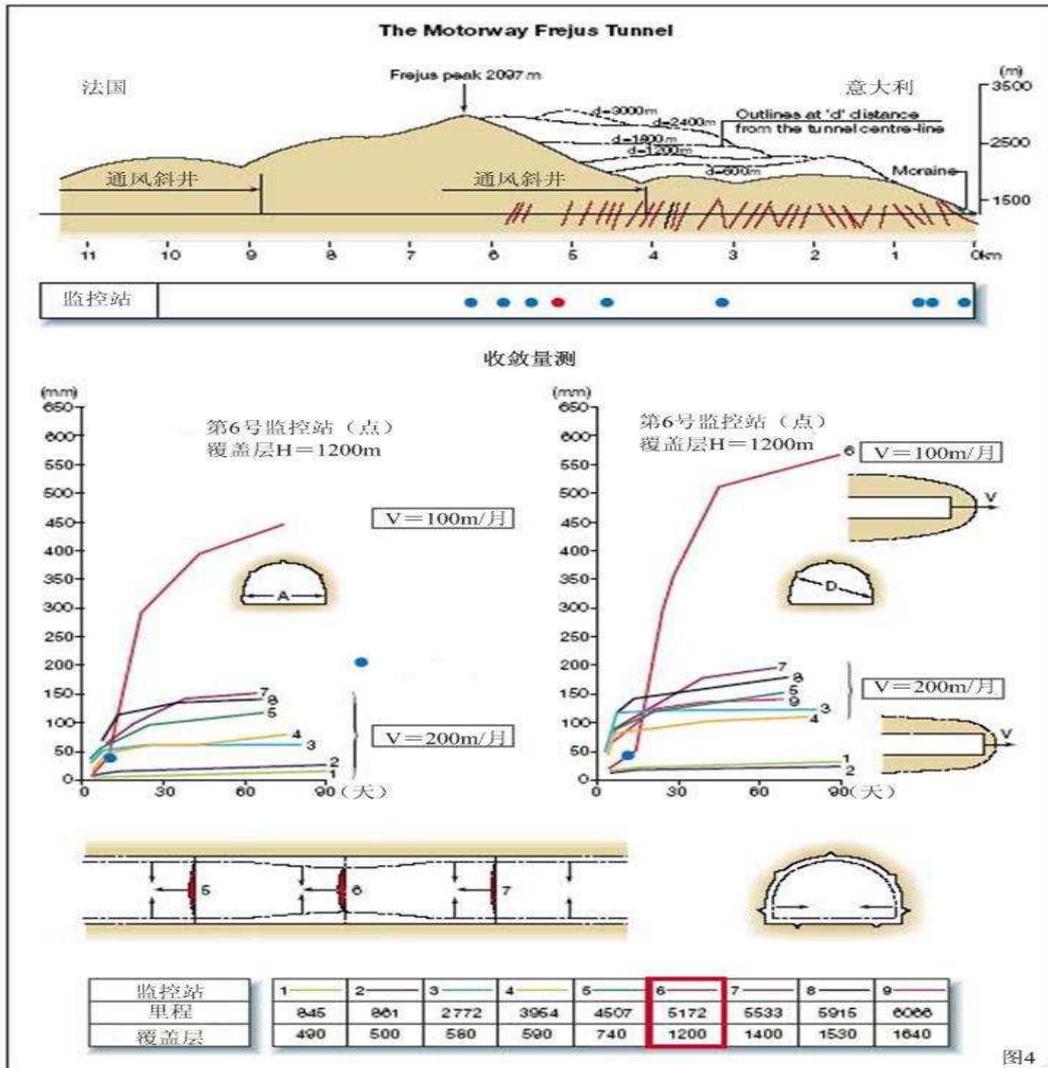
- 超前核心围岩：隧道开挖掌子面前方一定体积的土体，呈圆柱形，圆柱高度和直径均基本与隧道设计直径与尺寸保持一致；
- 掌子面挤压变形：开挖介质对开挖产生变形应答的初期构成，在超前核心围岩里大量发展；挤压变形大小取决于核心围岩的强度以及变形特性，以及据其产生的初始应力场；挤压变形发生在隧道开挖掌子面水平轴线方向，其几何形状要么大概轴向对称（开挖面鼓出），要么在开挖面形成螺旋状突出。
- 隧道预收敛：隧道掌子面前方理论轮廓的收敛变形严格取决于超前核心围岩的强度及变形特性与其原始应力状态之间的关系。

接下来，在“第二阶段研究”过程中，我们选取不同地质类型以及应力—应变条件下不少

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

于400 公里的隧道进行了研究，详细观察和分析了隧道施工过程中随着时程进度隧道失稳现象。目的在于探寻开挖面——超前核心围岩体系发生的挤压变形及预收敛与隧道自身收敛之间的联系。



在了解隧道整体变形应答（挤压变形、预收敛以及收敛变形）体系取决于掌子面前方超前核心土的强度（变形应答的真正诱因）后，我们开始进行“第三阶段研究”，以期发现在超前核心围岩上采取何种措施能将隧道变形应答控制在何种程度。介于此，我们在选取采取和不采取相应超前核心围岩防护及加固措施两种情形下，对超前核心围岩应力——应变形态与隧道本身应力——应变形态进行了系统对比。

## 2.1 第一阶段研究

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

第一阶段研究（对隧道开挖掌子面—超前核心围岩体系变形特征进行系统观察）主要使用仪器及肉眼对超前核心土以及隧道开挖轮廓稳定性以及变形特性进行监控，特别注意以下几方面（图3）：

- a) 掌子面挤压变形；
- b) 隧道预收敛；
  
- c) 隧道收敛（在隧道掌子面通过后沿着隧道开挖理论断面逐渐减小）。

在隧道内进行的系统视觉观察发现下列隧道掌子面及其周围的失稳现象（任何时候发生围岩侵入设计隧道轮廓线均称为隧道失稳）与上述变形情况相关：

- a) 由掌子面挤压变形以及预收敛导致的开挖面—超前核心土体系土体脱落、剥落和滑动；
- b) 由隧道自身收敛变形导致的隧道拱顶以及边墙部位土体脱落、剥落和隧道塌方。

## 2.2 第二阶段研究

在证实了隧道掌子面、拱顶以及边墙变形以及失稳类型后，我们便产生这样的疑问，是否能够通过观察隧道掌子面变形特征来引导我们发现隧道拱顶以及边墙变形或失稳的类型和范围。因此，我们开始了第二阶段的研究，尽可能地找到隧道开挖掌子面—超前核心围岩体系变形（挤压变形与预收敛）与隧道结构自身变形（收敛变形）之间的联系。我们按照时间年代顺序，对不同类型的隧道根据其不同的施工阶段和掘进速度进行了隧道掌子面以及隧道结构本身的变形研究、观察和监控。

在得出此阶段研究结论前，列举以下实例进行佐证。

### 2.2.1 Frejus公路隧道 (1975)

Frejus 公路隧道（隧道全长13 公里，最大覆盖层厚度为1700 米）95%的隧道线路穿过片状晶体变质石灰岩层，也是整条线路长度范围内常见岩性特征。

此公路隧道设计以附近的铁路隧道（于1860年完工）及其辅助坑道地质及地质力学勘测数据为基础。对片状晶体石灰岩取样进行强度及变形测试后得到以下平均地质参数：

- 内摩擦角：35°
- 黏聚力（内聚力）：30 Kg/cm<sup>2</sup> (=3 MPa)
- 弹性模量：100,000 Kg/cm<sup>2</sup> (=10,000 MPa)

因为当时标准并未规定，所以在原始设计中（1975年）并未对变形进行预测。

当时只能从一个多世纪以前修建的铁路隧道中吸取相关经验。该隧道采用全断面开挖，并且立即沿开挖面环向打入4.5米长锚杆稳定隧道掌子面，喷射混凝土紧跟防护，二次衬砌平均厚度为70厘米，二衬完成后隧道结构完工。

通过对围岩的观测进而进行变形特性分析成为了隧道施工期间的重中之重。其目的在于通

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

过首次对隧道始终穿过晶状变质石灰岩这一特殊地质条件，而且隧道应力场随着覆盖层（0-1,700m）厚度改变而增加或改变的条件下进行研究，监控围岩对采取的稳定及支护措施的变形反应。

在开挖到隧道覆盖层500米的区域，围岩所受的应力仍然控制在弹性范围内，隧道掌子面表现出稳定状态，隧道洞身及掌子面变形及失稳可以忽略不计。

随着隧道覆盖层厚度增加从而导致应力状态增加，进入弹—塑性区域，隧道开挖掌子面保持短期稳定，隧道收敛变形以厘米计（径向收敛10-20厘米）。围岩加固对隧道稳定起到了非常积极的作用，从而限制了收敛的增加并阻止了围岩进一步失稳。

由于围岩质量及稳定性良好，在施工达到5173米、覆盖层厚度大约为1200米时，因为夏季工人休假导致施工临时中断，之前一直保持着月进尺200米的良好态势。

在暑期停工期间，在距隧道开挖掌子面后方1米处（5172米）设置了第6号收敛观测站，在停止开挖10天后，发现最大收敛变形为10厘米（图4）。由于隧道当时已经停止掘进，可以确信这仅是由于结构恒载引起的徐变变形；当隧道恢复掘进时，原先测定断面的径向收敛出现了原先从来没有遇到过的猛增，在停工三个月后达到60厘米。当恢复开挖20-30米后，收敛值又回归正常（径向收敛20厘米）。

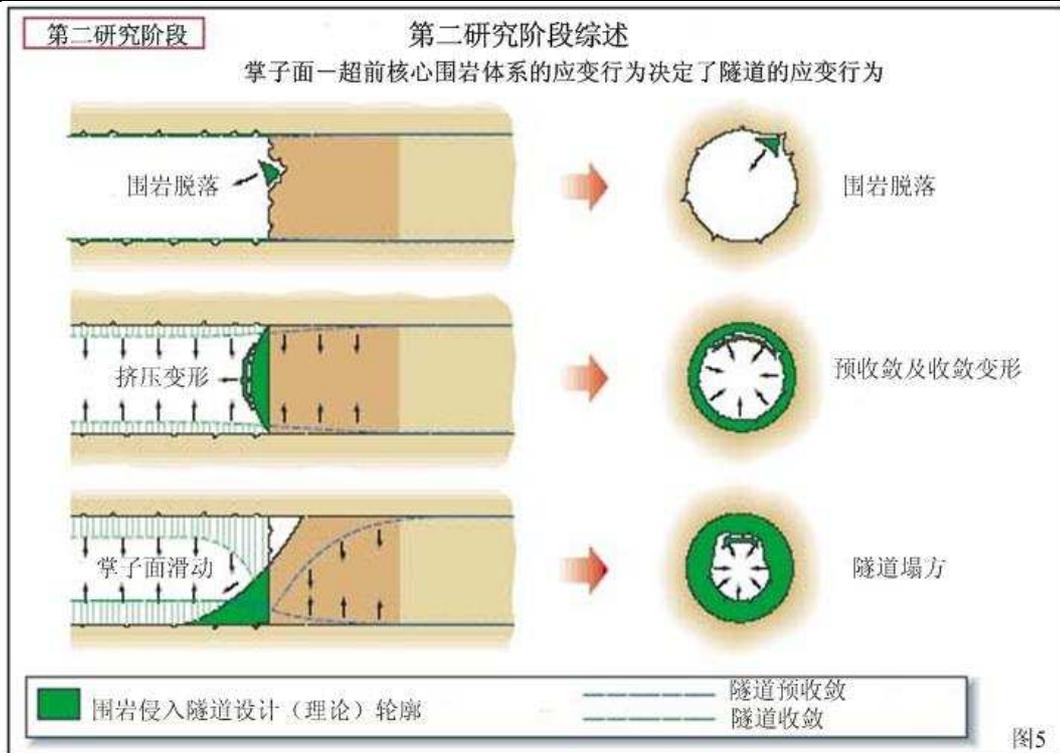
还有一点不得不指出，在隧道完全停工前，在开挖面上用了每延米范围内不少于30根1米长的径向岩石锚杆进行加固，但是并没有对掌子面前方的核心围岩进行土壤改良。

在恢复开挖后，稳定及支护参数与以前相同并且按照同样的施工步骤施工。

得到的结论如下：当隧道开挖停止时，未对隧道掌子面前方核心围岩实施任何加固和防护措施，导致应力有足够时间侵入弹性—塑性范围，最终通过其四周围岩徐变（预收敛）引发应力释放效应。反过来，这也导致了隧道开挖洞身收敛变形较通常情况下有了显著增加。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



## 2.2.2 “Santo Stefano” 隧道(1984年)

“Santo Stefano” 隧道工程是从S.Lorenzo到 Ospedaletti之间的铁路复线隧道工程。

该隧道穿过西利古里亚区显著的蠕状厚砂页岩夹层。地质构成情况为：带有薄褶皱层以及强破碎砂岩以及泥灰质石灰岩的粘性及粘砂性片岩地质；其中粘性片岩为厚层积岩。此段为从H1 构造带到更具泥灰质石灰岩特性的H2 构造带的过渡带。

通过取样进行试验得到内摩擦角在 $20\sim 24^\circ$  间变化，黏聚力从 $15\text{ Kg/cm}^2 (=1.5\text{MPa})$ 到0。

和上一个例子一样，该隧道在1982年开工，所以没有进行隧道超前变形预测。

初步设计为全断面开挖，外加钢拱架以及喷混凝土作初期支护，二次衬砌混凝土厚度达到110厘米。

在开挖过程中，发现只要围岩保持弹性，掌子面及隧道洞身的变形均可以忽略并且没有局部失稳现象发生（掌子面稳定）。当隧道进入地质构造变化转换区域时，由于受残余应力影响以及处于弹性—塑性区域，导致变形开始增大；另外导致变形增大的原因为刚性质量矩阵分散到塑性矩阵中导致相当大的结构侧压力。此时，掌子面围岩土体开始脱落，挤压变形现象突现，使得掌子面呈现出短期稳定状态；围岩收敛达到数厘米。

一段时间以后，围岩应力状态明显发展到滑动范围内并导致整个掌子面滑塌（掌子面失稳情形），紧接着几个小时后隧道也发生塌方，此时径向收敛已超过2米，而且塌方面积延伸到了隧道开挖掌子面后方大于30米的范围，其中也包括已经施作钢拱架和喷混作为初期支护的一段。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

(图片1)



图片1

从这点可以得出：例子中涉及的三种应力—应变形态所遇到的地质条件基本相同，隧道塌方时收敛值均达到数米，即使在施作初期支护部分也发生了塌方；可见隧道塌方总是在掌子面前方核心土体（围岩）不具刚性以及不能保证隧道结构稳定性的情况下发生。

### 2.2.3 “Tasso” 隧道（1988年）

“Tasso” 隧道为20 世纪80 年代末期意大利修建罗马到佛罗伦萨“高速”铁路隧道中的一条。该隧道坐落于湖泊盆地地带，地质情况为粉砂土以及砂土层，夹层为粉粘土层且富水。

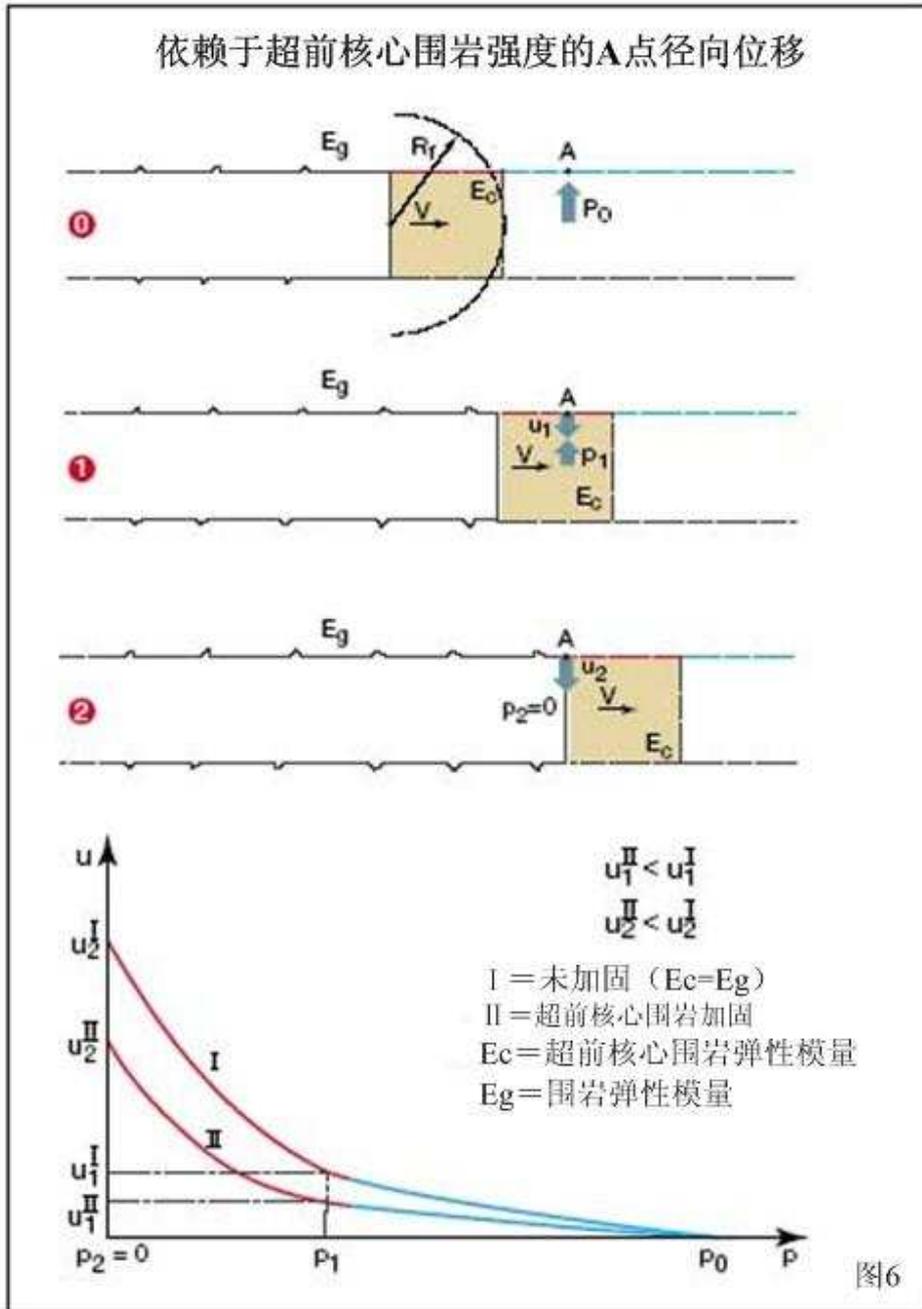
设计为半断面开挖，初期支护措施为钢拱架以及喷混防护。钢架在拱脚部位用半水平连接杆件锚固，通过在地基打小型桩或柱并注浆来进行隧道地基加固。

初始开挖阶段，开挖面在短时期内保持稳定，并且在开挖掌子面以及隧道洞身结构中看不出有变形的迹象。

随着覆盖层厚度以及开挖介质应力状态的增加，以及随着隧道地层地质力学特性的降低，隧道开挖掌子面的短期稳定形态迅速转变为失稳状态。即使使用半断面掘进，也发生了隧道掌子面滑塌，并且在一夜之间波及到已经开挖并且经过拱架及喷射混凝土初期支护的隧道距离为30-40米，围岩收敛变形为3-4米（图26）。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



## 2.2.4 第二阶段研究结果

通过插图来研究和分析这些案例以及类似案例（假如一一列举，将十分冗长）可以给我们提供很多有用的观点及信息。从Frejus 隧道研究中可以清楚地发现以下几点：

- 当在弹性—塑性围岩条件下进行隧道开挖时，很重要的一点是要保持隧道开挖的连续性以及不间断性，从而避免给掌子面前方核心土体预留变形时间；进而使预防挤压变形以及预

收敛现象发生成为可能，而一旦发生核心土体挤压变形及预收敛，便预示着隧道洞身收敛变形即将发生。

另一方面，从其他隧道和案例研究可以得到：

- 核心土体滑动以及隧道塌方绝不可能单独发生，而且严格地讲，隧道塌方应该总是发生在核心土体滑动之后。

从第二阶段研究中明显发现下列几点（图5）：

- 1) 隧道开挖面核心土体挤压变形与预收敛及隧道洞身收敛之间存在着紧密联系；
- 2) 掌子面前方超前核心围岩的滑动与隧道塌方之间存在着紧密联系，即使塌方段已经通过初期支护加固；
- 3) 隧道变形现象的发生总是与隧道开挖掌子面地层核心土体（围岩）相关。

同时，也非常必要在隧道掌子面前方在隧道开挖到达前形成拱部效应（正如前面所讲的，拱部效应决定隧道稳定性），该拱部效应在隧道掌子面超过效应断面后仍然能起作用。

### 2.3 第三阶段研究

经过第二阶段研究使我们更加坚定地认为隧道超前核心土体变形其实是整个变形过程（挤压突出变形、预收敛以及收敛变形）的真正诱因；因此，核心土体强度或刚度对隧道长期及短期稳定性起着决定性作用。

假设将A点布置于还未开挖的设计隧道轮廓拱顶部位，实际上其径向位移 $u$ （预收敛）毫无疑问是取决于即将开挖的隧道围岩的强度以及变形特性。

如果将A点的径向位移用图表 $p-u$ 绘制（其中 $P$ 代表作用于A点上的径向变形约束压力），通过图6可以发现，当隧道开挖掌子面距A点仍有一定距离时（该距离大于掌子面开挖影响半径 $R_f$ ），A点的应力状态保持不变（径向变形约束压力 $P_0$ =原始压力）。当隧道开挖接近A点时，径向变形约束压力 $P$ 也随之减小并且导致：A点将开始径向朝即将开挖的隧道轮廓内移动。到底移动多少距离？正如我们先前提到的，不仅仅取决于周围围岩的岩土地质力学特性，同时也取决于现场围岩应力及核心土体的变形特性（决定围岩平衡能力）。

当掌子面通过A点后，A点的径向位移将在弹性或弹性—塑性范围内继续发生，位移大小将取决于A点对支护后方围岩预存应力以及支护措施（初期支护及二次衬砌）作用于A点上的径向变形约束压力的平衡能力。

图6中的定性分析图表分别显示A点在柔性超前核心围岩情形下（曲线I）以及刚性超前核心围岩上（曲线II）不同的变形趋势（在其他条件保持不变的前提下）：显然，随着掌子面的向前推进，与柔性超前核心围岩相比，在刚性核心围岩环境中，A点的径向变形随着径向变形约束压力减小显得更小。即便隧道开挖掌子面超过A点后，A点不再受到超前核心土体变形约束压力作用，曲线I与II也永远不可能重合，A点的位移仍将由原来的应力—应变作用决定。更进一步讲，超前核心土体的变形特性成为了隧道开挖周围地层围岩对隧道开挖变形反应的决定条件，这才是导致变形发生的真正原因。

如今，既然超前核心土体的变形特性构成了隧道围岩对开挖变形反应的真正原因，那么假

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

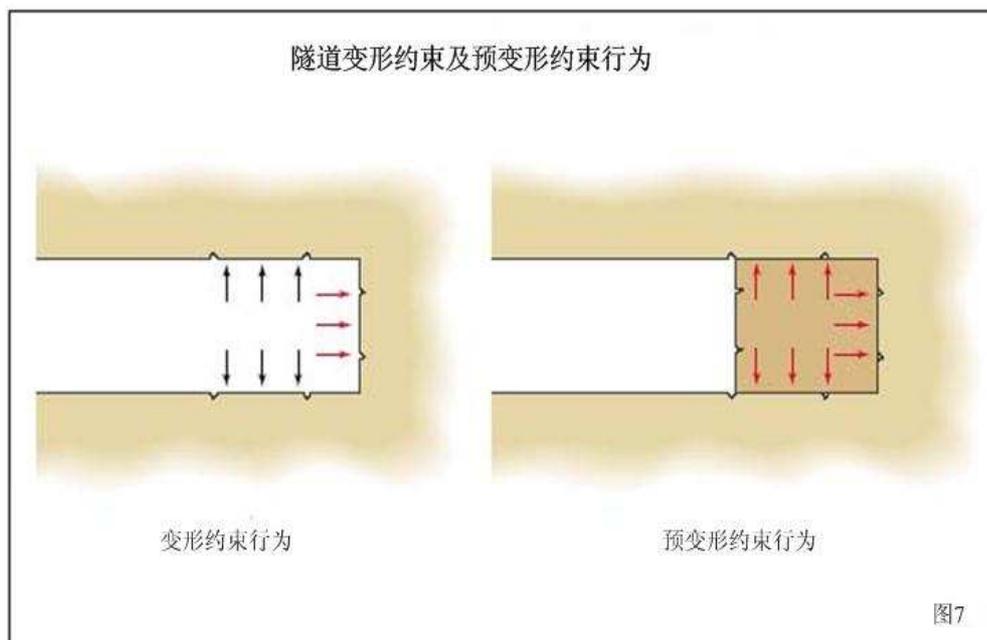
设我们通过采取相应措施适当增加超前核心土体强度以控制变形反应便显得顺理成章。

因此，我们通过调节超前核心土体的强度来确定其可能对隧道变形反应的影响程度。

要达到此目的，就必须对相关的新技术以及措施进行研究和开发，以使超前核心土体既不会受到过大的应力（防护技术），同时也/ 或保留或改善其强度以及变形特性（加固技术）；

这些特殊的措施在学术上被称为“守恒工艺”，或者换句话讲叫做“隧道预变形约束工艺”，之所以用“预变形约束”旨在区别常规的只对已经开挖的隧道周边为围岩进行变形约束的方法（图7）。

于是此新工艺/观念便在接下来许多隧道施工中广泛采用，其中许多隧道的应力—应变状态十分复杂。这里列举其中一个极具代表性，同时施工十分困难的隧道作为例证。



## 2.3.1 “Vasto” 隧道

该隧道为意大利新建铁路安科纳到巴里的组成部分，线路大约有6200米穿过坐落有村庄的丘陵地带。

从地质方面看（图8），山体的底部以及中部地质构造比较复杂，主要包括粉砂以及粘土层，呈灰色，中间夹薄砂层；而山体上部多为松散土粘结堆积层，其粘结范围各异，其最上部为砂泥层，呈浅黄褐色状。

该隧道除了靠近洞口段外均穿过粘土地层。在隧道穿过的地层含水量较大而且断层现象严重。

### 2.3.1.1 隧道开挖简单介绍

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

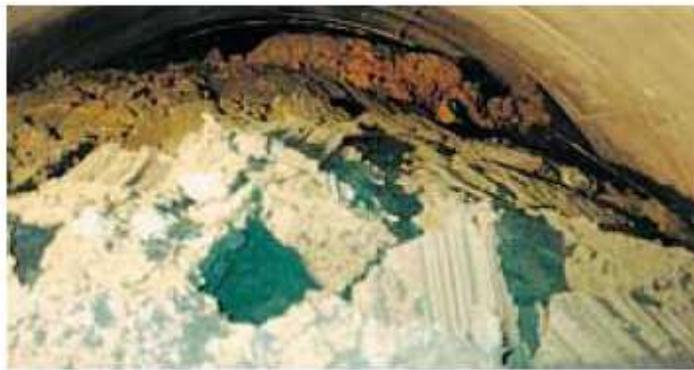
该隧道开挖于1984年从北边洞门开始，由于期间不断重复出现严重事故中断，直到1990年才完成。

该隧道设计情况为：半断面开挖并且立即初喷混凝土进行防护，然后利用钢拱架和焊接钢筋网作为初期支护。二次衬砌采用1米厚钢筋混凝土直接于初期支护后浇筑并且紧跟隧道掌子面。在浇筑完隧道边墙以稳定隧道基础和施作完仰拱浇注后完成一环施工。

当第一次隧道严重变形发生时，大家想了很多办法使隧道能继续掘进，但是最终都显得不是特别有效而且在里程号为Km. 38+075，覆盖层厚度为38米的地方发生了严重塌方，该塌方波及

范围包括隧道掌子面以及其后方大约40米的范围（图片2）。同时在隧道衬砌结构上产生了严重变形（大于1米），使得当时施工根本无法继续进行。

在出现该问题时，我也应邀去到现场以期寻找到能使隧道复工以及完成隧道施工的解决方案。当时我便提出了使用新型的开挖方法来解决剩余的隧道施工难题，此开挖方法的基本依据是对掌子面前方核心土进行加固并控制其变形，于是便有了预变形约束技术。



图片2

### 2.3.1.2 “Vasto” 隧道勘测阶段

在一项新设计开始前，应尽可能详尽地了解开挖地层或围岩的岩土知识或参数。

该隧道围岩位于粘土地层，分为粘质粉土或粉质粘土，中塑~强塑，不具透水性，遇水浸泡会发生显著膨胀。

通过三轴直剪测试得到黏聚力以及内摩擦角的一个范围值，通过其平均值推论该地质条件下围岩强度很低。

根据隧道现场开挖实际应力形态进行了模拟隧道施工现场的“三轴单元挤压试验”，这些试验结论与有限元数学模型一起为下一步隧道“诊断”及“处治”阶段相关岩土参数的调整（ $c$ ， $\Phi$ ， $E$ ）提供了可能。利用三轴单元挤压测试直接仿真（在超前加固和未进行超前加固情形下进行的三轴单元剪切测试一起）确定了下列主要岩土参数的波动范围：

$$C_u = \text{无水内聚力} = 0.15 - 0.4 \text{Mpa} (=1.5 - 4 \text{Kg/cm}^2)$$

$$C' = \text{含水内聚力} = 0 - 0.2 \text{Mpa} (=0 - 2 \text{Kg/cm}^2)$$

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

$\Phi_u$ =无水内摩擦角=0-10°

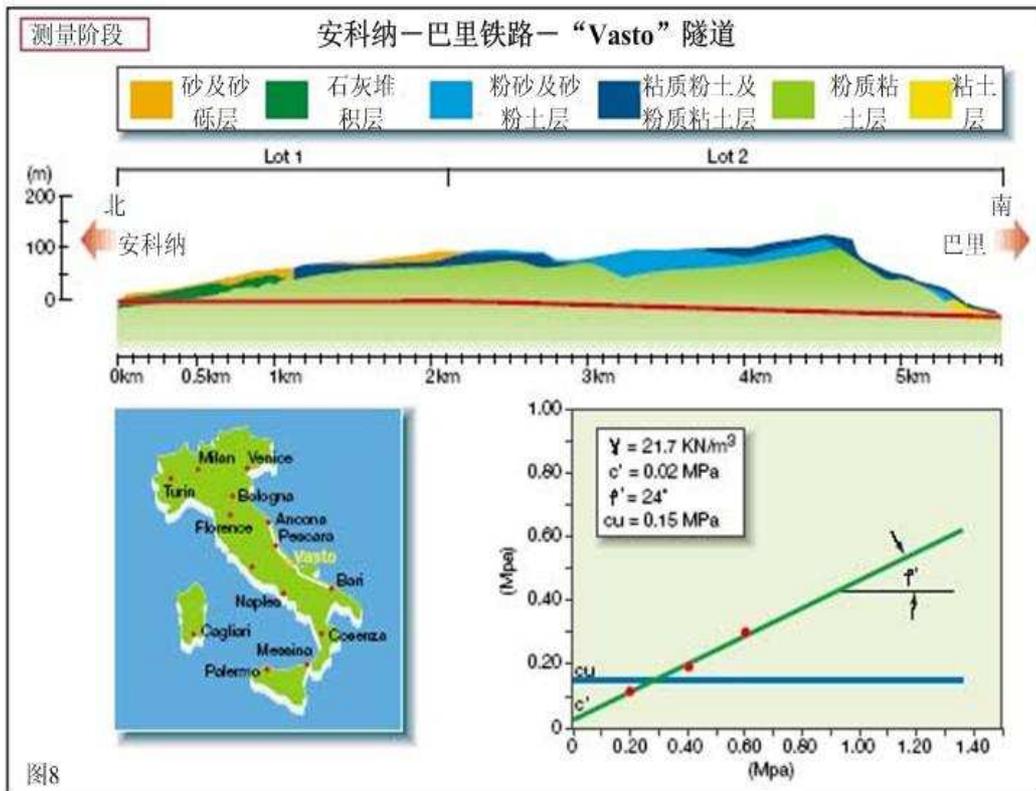
$\Phi'$  =含水内摩擦角=18-24°

E=弹性模量=500-5000Mpa (=5,000-50,000 Kg/cm<sup>2</sup>)

### 2.3.1.3 “Vasto” 隧道诊断阶段

在此阶段，主要是通过理论和试验方法从现场获取以及相关试验室试验中得到相关数据，并通过这些数据了解当地的地质、岩土以及水文地质情况，并将相关数据运用到诊断当中。这些数据也用于隧道掌子面以及洞身在没有采取加固或支护措施时的应力—应变形态预测。其目的是将隧道分成几个部分，而且每一部分变形在可能发生的三种基本应力—应变形态下基本保持一致。

诊断阶段接下来继续对随着变形现象发展而产生的围岩剪切体系以及失稳运动学进行分析，并最终估算到失稳区域的范围以及在此范围内要施加多大外加荷载才能保证不会脱落或塌方。



### 2.3.1.4 应力—应变形态预测

对线路进行应力—应变形态预测通常有两种方法（图28），这两种方法均适用于低级、中级或高级应力状态：第一种方法更为直接，是以特征线理论为基础（根据实际情况运用分析法

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

或数值法进行计算)；另一种方法相对耗时较长，是以先前隧道勘测阶段段落中提到的三轴单元挤压测试为基础。

在“Vasto”隧道这个例子中，除了洞口很短的一段距离外，运用上述两种方法均预测到由于相当大的挤压变形导致掌子面不稳定，并最终导致巨大的预收敛以及收敛变形（径向大于100厘米）；如此大的预测变形值导致严重失稳现象发生，掌子面滑动并最终导致隧道塌方。

### 2.3.1.5 “Vasto”隧道“处治”阶段

诊断阶段提供的种种预测为将来决定采取何种手段（预变形约束或简单的变形约束）以及措施提供了依据；并最终在预测的基础上使整个隧道趋于稳定。

首先，必须考虑到隧道开挖的围岩特性（包括即将开工位于滑坡环境的南洞门）以及从诊断阶段预测得出的整条隧道开挖面均处于不稳定形态的结论（应力处于滑动范围、无拱部效应、失稳的典型表现：掌子面滑动以及隧道塌方）。于是决定采取预变形约束措施以稳定隧道结构，而且通过对掌子面前方核心土体进行处理保证在掌子面前方形成人工拱部效应。

细言之，我们是决定在首先采用混合防护工艺并且产生预变形约束效应后进行全断面开挖，该工艺既在前方核心土四周（保护作用）也直接在核心土体上实施（加固作用）。

根据隧道开挖过程中遇到的不同地质类型，图9列出了三种不同地质条件下的隧道开挖断面。

在这三种类型中唯一不同的便是掌子面（图9）前方即将开挖土体的处理形式（预变形约束或预加固），而在这三种形式中所使用的前方核心土地层加固理念均相同。

在前方核心土体周围选取何种施工工艺严格取决于前方即将开挖围岩的特性及强度。

当围岩为颗粒状土、粘结性很差或具有弱剪切强度等特点时，应选用水平注浆法；

众所周知，在粘结力强、密实而且匀质性强的围岩中要在隧道掌子面前方形成一个高强度骨架，而且保证“拱部效应”能够得以运用，最恰当的方法便是机械预挖。

在无水剪切强度以及围岩黏聚力(内聚力)值显示使用机械预挖不可取时，掌子面前方的核心土四周的围岩以及洞身周边围岩可以使用玻璃纤维管注浆使围岩强度得到改善。

所有三种隧道断面形式均在隧道开挖面以前通过安装钢拱架以及喷射混凝土进行初步变形约束控制，而且施作仰拱使隧道封闭成环，最后施作混凝土衬砌。

一旦隧道断面类型确定，运用玻璃纤维管进行超前核心土体加固也随之通过设计实施。设计也包括了确定插入玻璃纤维管的数量、长度以及在掌子面上的几何形状。

与诊断阶段预测隧道应力—应变形态一样，这里也采取两种方法来确定玻璃纤维管的数量（图10）。

第一种方法是以特征线法为基础，通过对相关特征线的计算来简单考虑加固超前核心土体的效果。

第二种设计考虑加固超前核心土围岩是根据从三轴挤压试验得到的挤压变形曲线基础上进行的。在确定稳定隧道掌子面需要的最小变形约束压力曲线 $P_i$ 前提下（称为挤压变形曲线“弹

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

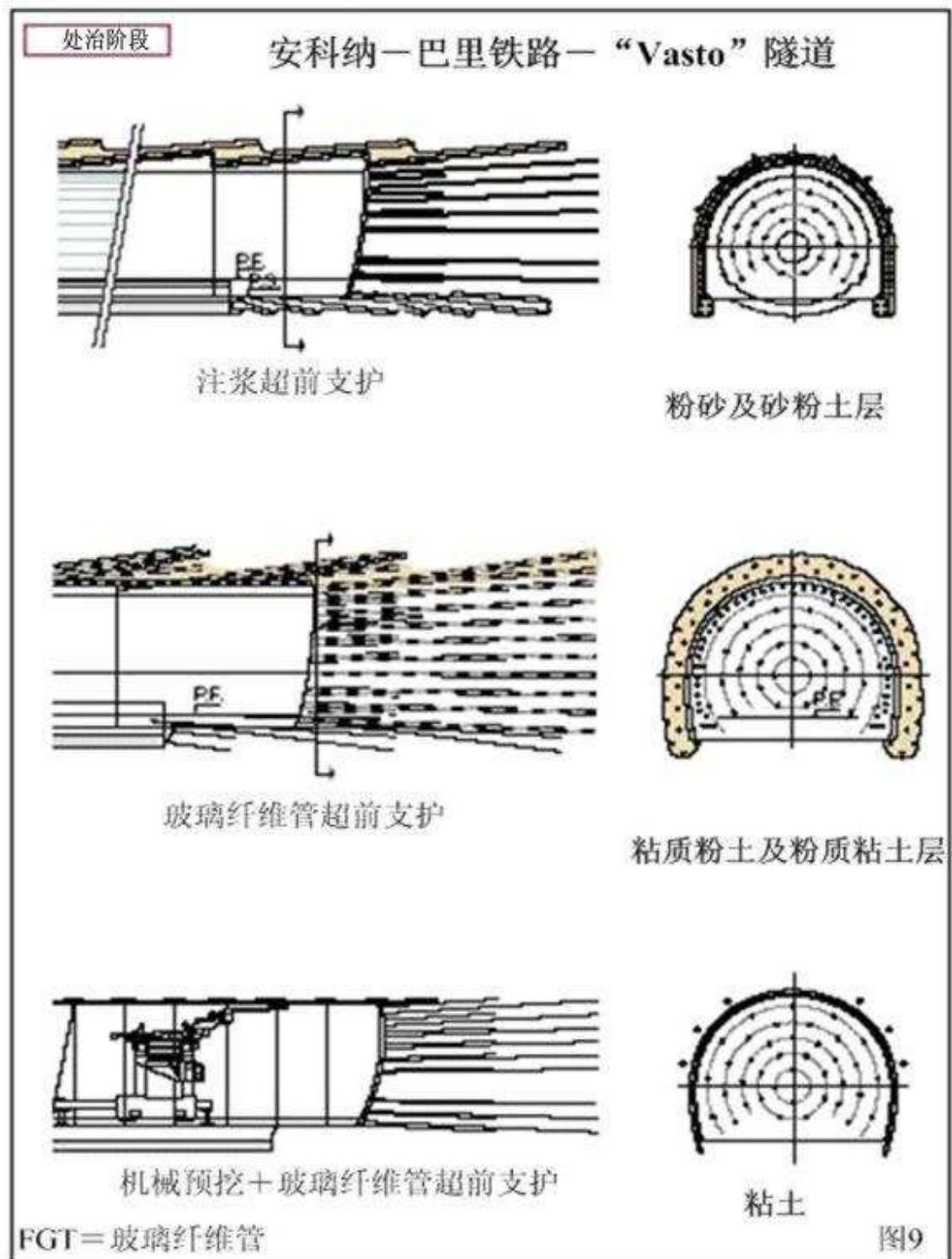
---

性”与“弹性-塑性”间的分界压力)，实验图表同样显示相同的压力值被运用来计算需要的玻璃纤维管数量，以足以保证达到设计的安全系数并保证隧道掌子面的安全。

两种方法（三轴挤压变形测试以及特性线法）得出的结论对比证实了我们的推论：两种方法得出的结论基本一致。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

## 2.3.1.6 “Vasto” 隧道实施阶段

1992年，两个洞口方向的施工同时恢复，在北边洞门处主要是对隧道塌方段进行修复，而南方洞门则开始开挖。假如每周按7个工作日计，该隧道平均每月进尺大约50米（图片3）。

图11 对平均月进尺与同期的收敛值图表进行了比较。明显发现同期收敛值与月进尺速度成反比，从而肯定了这样一个事实：留给掌子面前方核心土体变形时间越短，那么随之引发的挤压变形和预收敛便越小。因为洞身收敛变形取决于挤压变形以及预变形，所以最终围岩收敛被限制。



图片3

## 2.3.1.7 “Vasto” 隧道施工过程中的监控阶段

隧道监控与隧道开挖同时进行，通过开挖介质对开挖的变形反应不断优化并调整隧道支护工艺及参数。

除了进行普通的收敛及压力量测，在该隧道施工中系统的挤压变形以及收敛量测也在同步进行。这在当时隧道施工中尚属首次，尤其是通过对这两方面进行量测分析后得出的结论更加受用。

监控量测的结果最后反映在了曲线图上，从图12中可以看到一个完整的隧道施工循环过程中挤压变形以及收敛变形的进程。

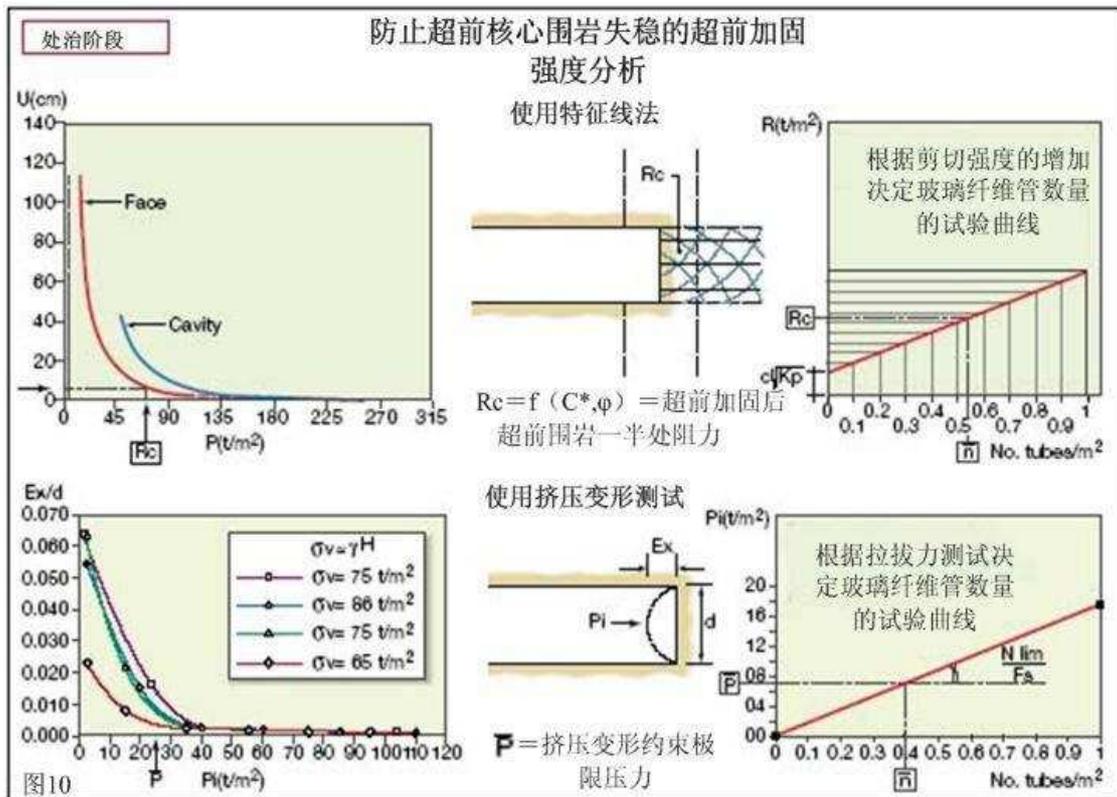
分析图表可以看出，随着隧道往前掘进，当超前核心土体加固深度从最开始的15米逐渐减少到只有5米时（平均强度递减），围岩掌子面的变形反映（挤压变形）以及掌子面后方已经开挖的围岩变形（收敛变形）逐渐增大，并且逐步从弹性范围向弹性—塑性范围发展。围岩收敛变形曲线起初是向着稳定方向快速发展（最大收敛变形值为10厘米，相应的最大挤压变形值小于2.5厘米），然后随着核心土体加固深度减少逐渐向着变形增大的进程发展。例如，当掌子面

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

前方核心土体加固长度小于5 米时,10 厘米的掌子面挤压变形导致了围岩收敛变形值为该工作循环开始时的4倍。

由此可以看出, 结合掌子面挤压变形以及围岩收敛变形的知识, 为设计师决定何时隧道开挖进应该停止而开始进行下一循环的超前加固, 从而达到超前核心土体加固的最小深度(即使该加固深度不在弹性范围内, 至少应该在滑动范围外)提供了非常大的帮助。



### 2.3.2 第三阶段研究总结

通过对Vasto隧道的研究和试验可以清楚发现(图13为第三阶段研究结果): 首先, 隧道掌子面前方核心土体的变形(挤压变形)与隧道掌子面通过此处后隧道发生的变形(收敛变形)有紧密的联系; 其次, 隧道变形可以通过人为调整掌子面前方核心土体变形特性以及强度来进行控制或使之减小(挤压变形约束)。对一定范围内的围岩进行超前支护和加固, 使掌子面前方核心土体与开挖隧道间保持平衡成为可能, 并且根据可能出现的应力形态, 可能预测出隧道开挖介质的强度以及变形特性。

从这方面讲, 假如隧道开挖介质(围岩)应力状态处于弹性—塑性范围:

- 如果相对于开挖介质特性围岩应力状态较低, 那么可能只在开挖的隧道洞身采取相关支护措施便已足够, 而不需要采取超前核心土加固;

# Rocksoil s.p.A

## specialists in Geo-engineering since 1979

---

- 如果应力状态很高，那便需要进行上述的水平方向超前核心围岩加固，当隧道掌子面通过超前加固区后其径向支护措施实际已不起多大作用。

如果介质应力处于滑动范围内，那么必须通过预变形约束措施对超前核心围岩进行加固，也可能辅之以对已开挖段采取适当变形约束措施。这种情况下，经验性的建议为（当然，前面段落描述的措施也十分重要）：

- 根据超前核心围岩的形状及体积，在超前核心围岩四周形成护拱。在Vasto隧道施工过程中，该方法在隧道穿过地质状况很差的围岩时经常使用并且效果良好。

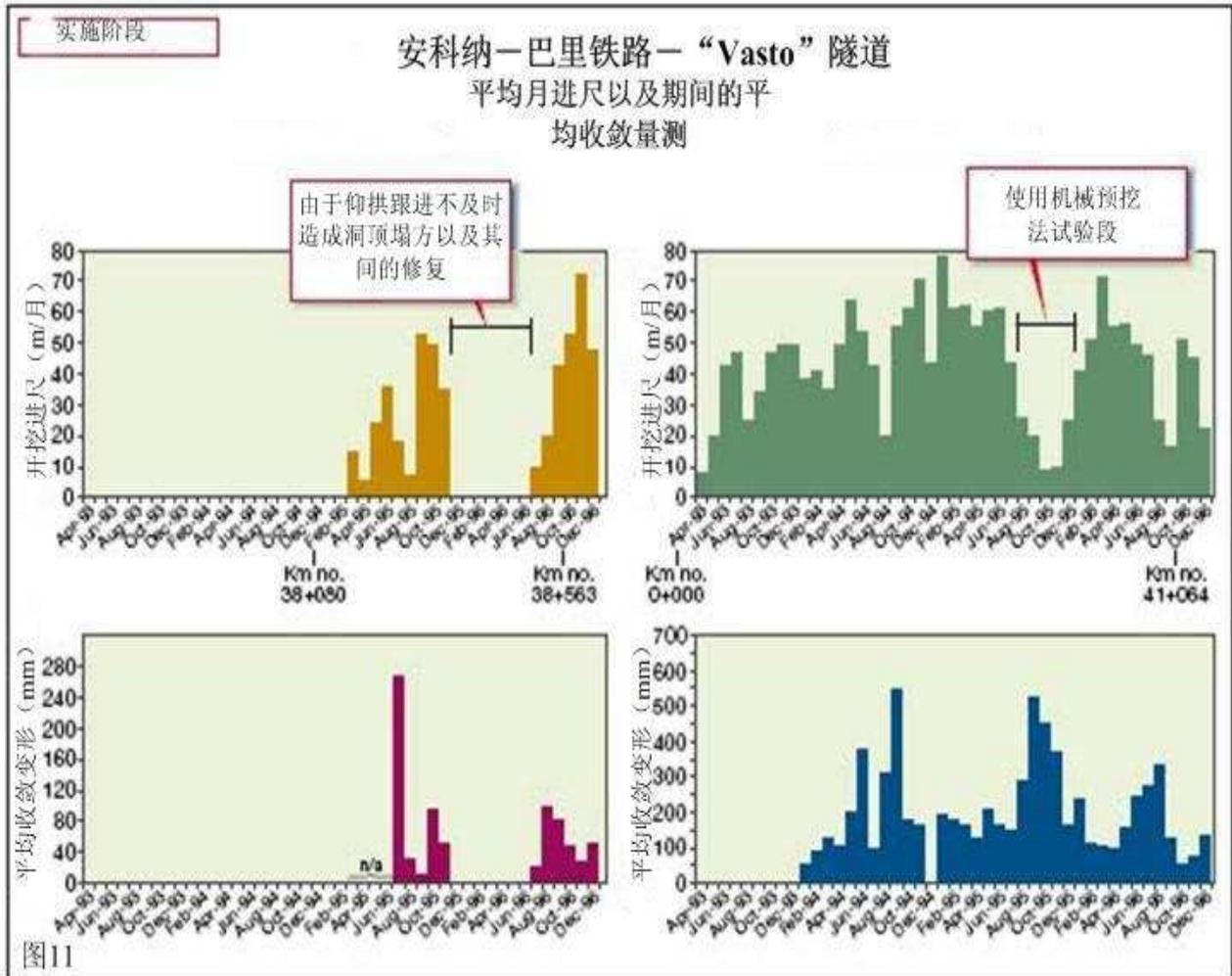
如果这还不足够，那么便需要：

- 对已开挖隧道一定范围内进行环向围岩加固，该加固范围应足以保证抵抗超前核心围岩不能独立抵抗（即便已经加固）的残余收敛变形。

在后一种情况中，设计阶段决定的超前核心围岩以及已开挖隧道的加固范围可以在实际工程施工中根据实际情况进行调整。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



## 2.4 超前核心围岩作为稳定工具

研究结论可以简单归纳总结如下：

- 在“第一阶段研究”中，证实了三种基本变形类型（掌子面挤压变形、预收敛以及收敛变形），以及随之而来的失稳表现（围岩脱落、剥落，掌子面滑动以及隧道塌方）；
- 在“第二阶段研究”中，通过试验得到所有的变形行为（掌子面挤压变形、收敛及预收敛变形），以及在隧道内可以发现的由变形引起的失稳表现（围岩脱落、剥落，掌子面滑动以及隧道塌方）均直接或间接地与掌子面前方超前核心围岩强度有关；
- 在“第三阶段研究”中，进行了人为调节或改善超前核心围岩强度以调节隧道变形的试验，试验中研究了如何将超前核心围岩当作围岩稳定工具。

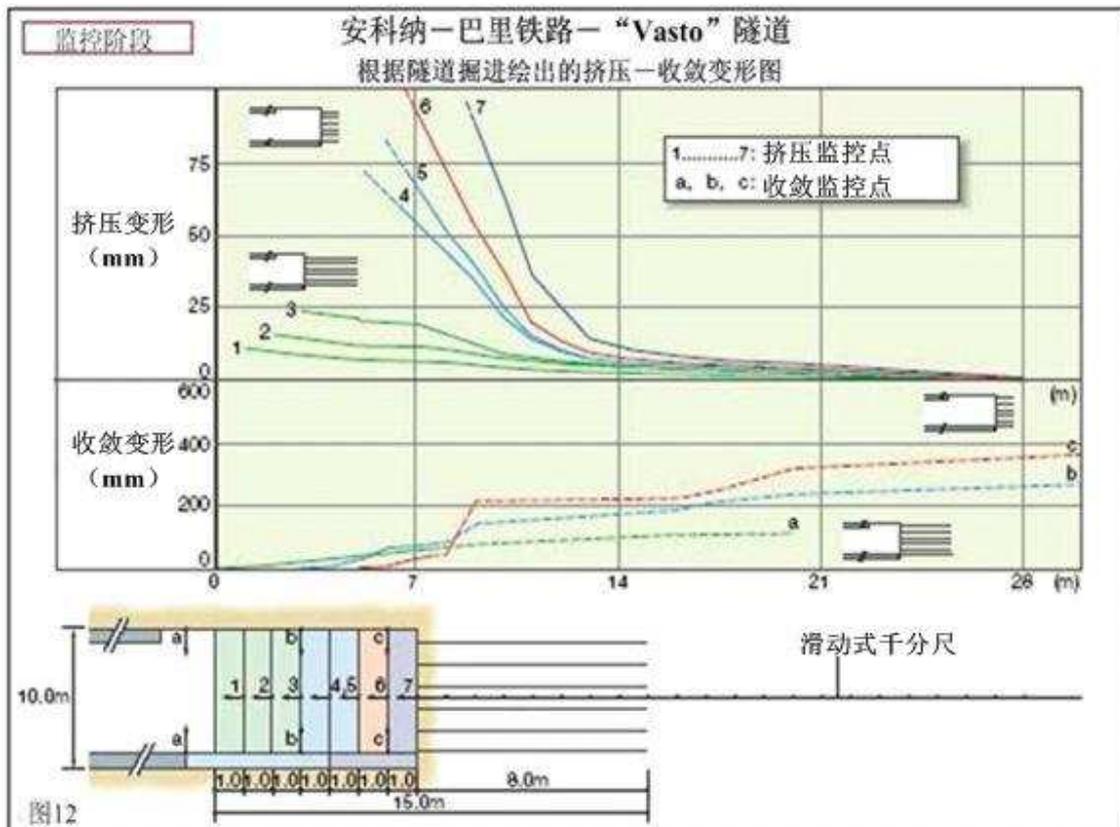
# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

研究结论如下：

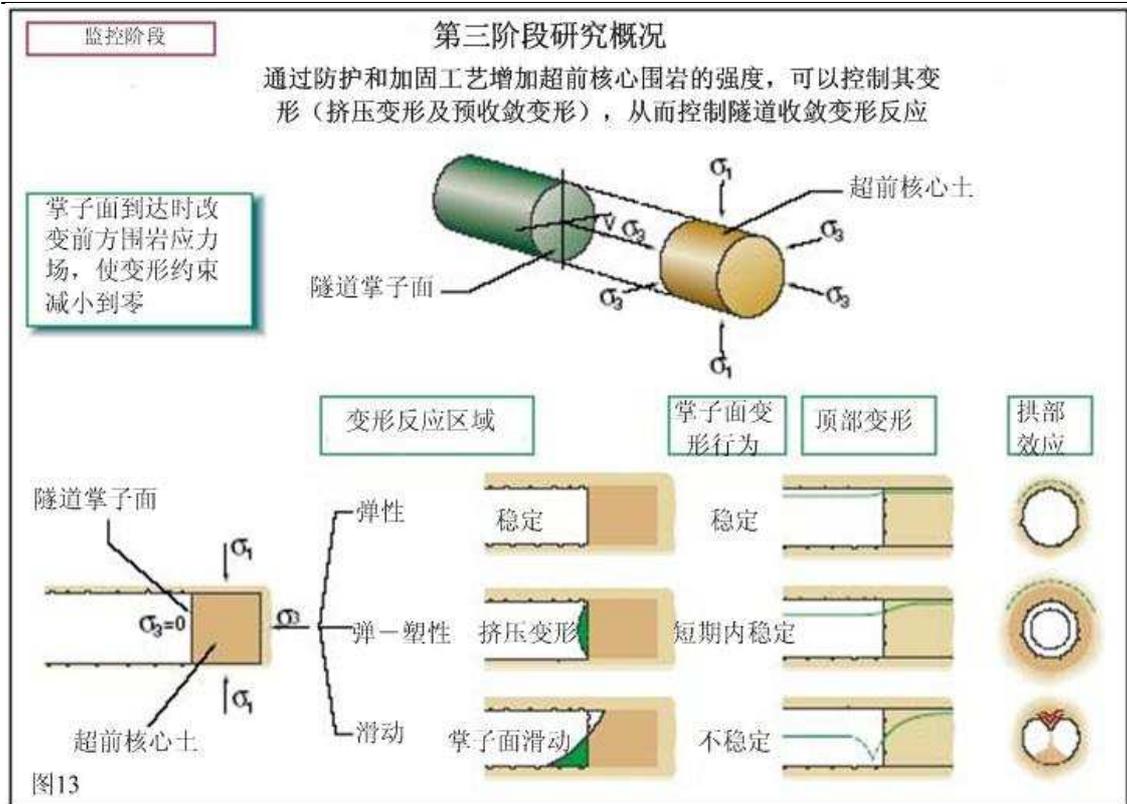
- 通过研究证实了隧道开挖介质相对于隧道开挖行为的变形应答必须是每名隧道设计人员关注的首要问题，因为和其他事项比起来，这将预示着是否能够引发“拱部效应”以及“拱部效应”的位置，换句话讲，也决定了隧道能否达到稳定水平；
- 通过研究发现变形反应从掌子面前方的核心围岩开始，随之逐步沿隧道往后发展；而且变形不只包括收敛变形，而是由挤压变形、预收敛以及收敛变形组成。收敛变形只是错综复杂应力—应变进程中的最后阶段；
- 通过研究发现隧道掌子面——超前核心围岩体系的变形反应与隧道变形之间有直接的联系，而且后者是果，前者是因。从而强调监控掌子面——超前核心围岩体系变形反应的重要性，而不是只监控隧道自身变形；
- 通过研究证明可以通过控制超前核心围岩的变形（挤压变形以及预收敛变形）来达到控制隧道收敛变形的目的，措施是采取相应防护和加固措施来增加超前核心围岩的强度。

总之，研究结论使得超前核心围岩在隧道施工中被看成是新的稳定工具：该部位的强度以及对变形的敏感性在隧道施工中起到决定性作用，同时也决定了每个隧道设计人员都十分关心的问题：**掌子面到达处的隧道变形特性。**



# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



### 3. 超前核心围岩技术为隧道规范提供参考

如果超前核心围岩技术能作为隧道长期和短期稳定的有效工具，而且能决定隧道掌子面进入超前核心围岩时的变形特性，那么完全有理由认为如果隧道设计人员想要能做出保证隧道长期和短期稳定的设计，那么他们必须将注意力直接集中在掌子面——超前核心围岩体系的应力——应变特性上。

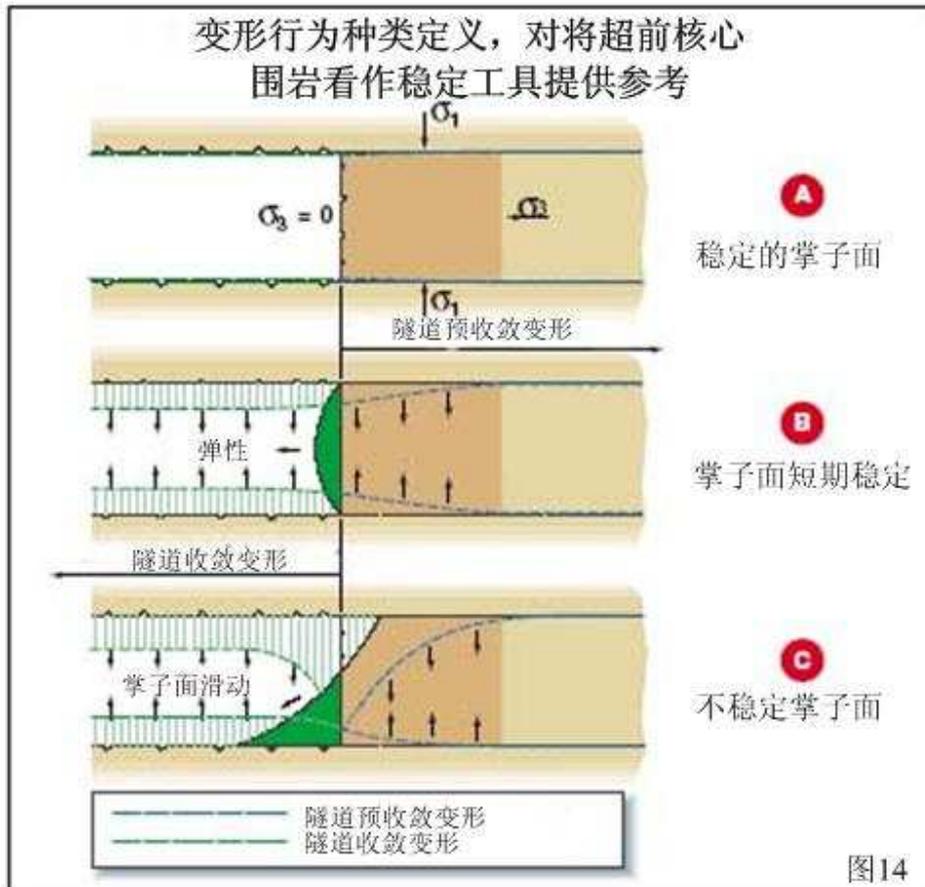
掌子面——超前核心围岩体系的稳定性可以被假定为隧道规范标准的参考点，因为这点在各种类型的围岩状态以及静力学条件下均保持有效。

本文在第一部分中已经阐述了掌子面——超前核心围岩体系的三种基本应力——应变形态（也可参见图13），同时也得出了三种可能的隧道形态（图14）：

- 掌子面稳定形态（A类形态）；
- 掌子面短期稳定形态（B类形态）；
- 掌子面不稳定形态（C类形态）。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



当隧道掌子面处于稳定形态时，即使没有初期支护稳定措施的干预，隧道也能保证全面稳定；在情形B)和C)中，研究结果显示，为了防止隧道掌子面以及隧道结构失稳，使掌子面回归到稳定形态(A)，必须采取围岩预变形约束措施以使掌子面与已开挖隧道之间达到恰当平衡，而且相对于围岩的强度和变形特性及根据实际应力状态提供足够强度。

这些理念在设计及施工中的成功运用使本人获得了许多重大成就。图15列举了近10年在意大利设计及施工，而且涵盖不同地质条件及应力状态下隧道工程的进度曲线及图表。图表反映出的并不仅仅是不同地质条件下的高平均月进尺，也从线性进度曲线上看出所有隧道施工均循序渐进，没有出现工期拖延现象。

从这点可以看出，将获得的知识进行总结并且研发出与实际情况更加紧密结合（而不是凭一般经验）的设计及施工成果显得十分必要且迫在眉睫。

沿着已经进行的各项研究的轨迹，为了达到这一目的并完成上述研发，应开始着手进行以下理论及试验研究：在提供以及不提供围岩超前防护和加固措施两种情形下，根据隧道的稳定

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

性以及变形特性，最终得到超前围岩体系的应力—应变成形态与隧道应力—应变成形态的系统对比结果。

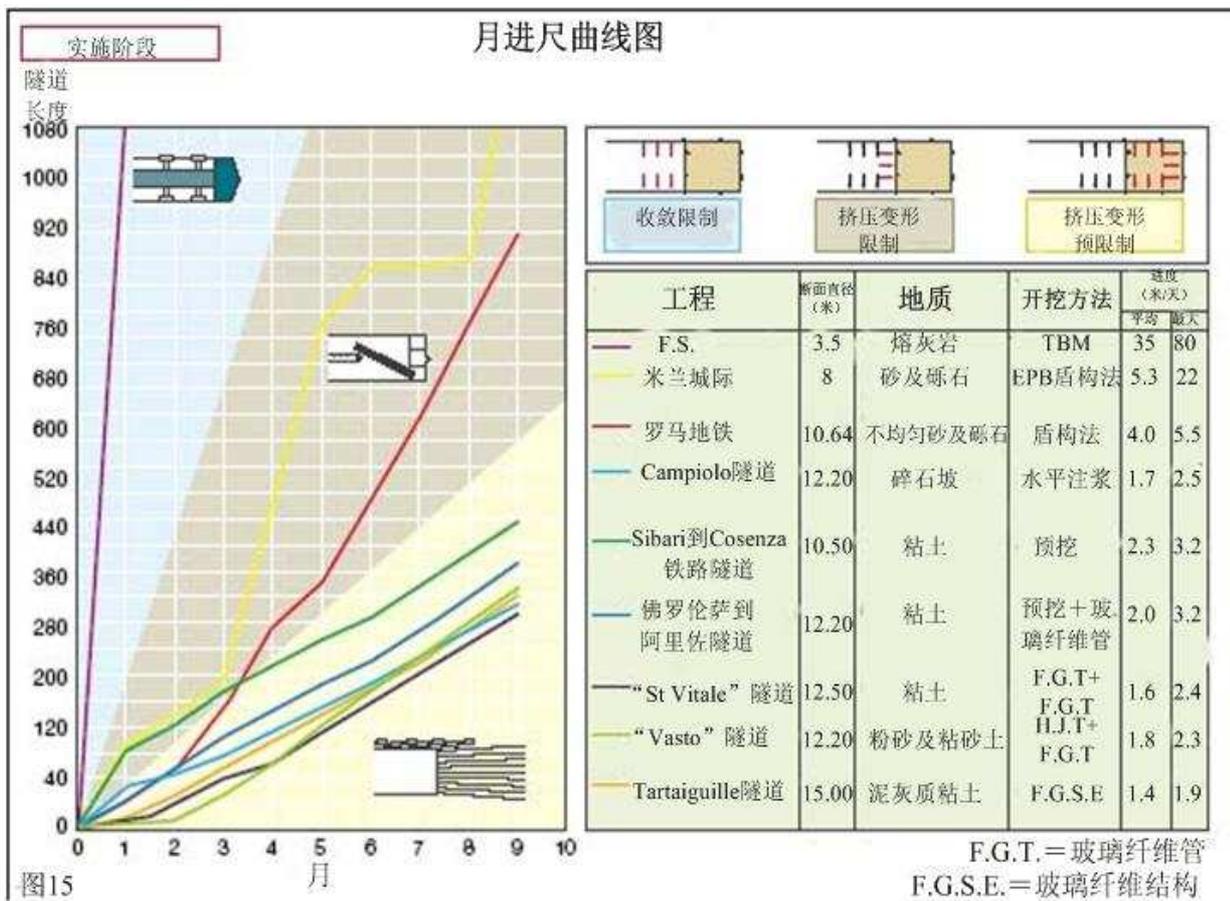


图15

“新意法”（也就是岩土控制变形分析法）（图16）贯穿于该研究的始末。该方法主要观察研究：

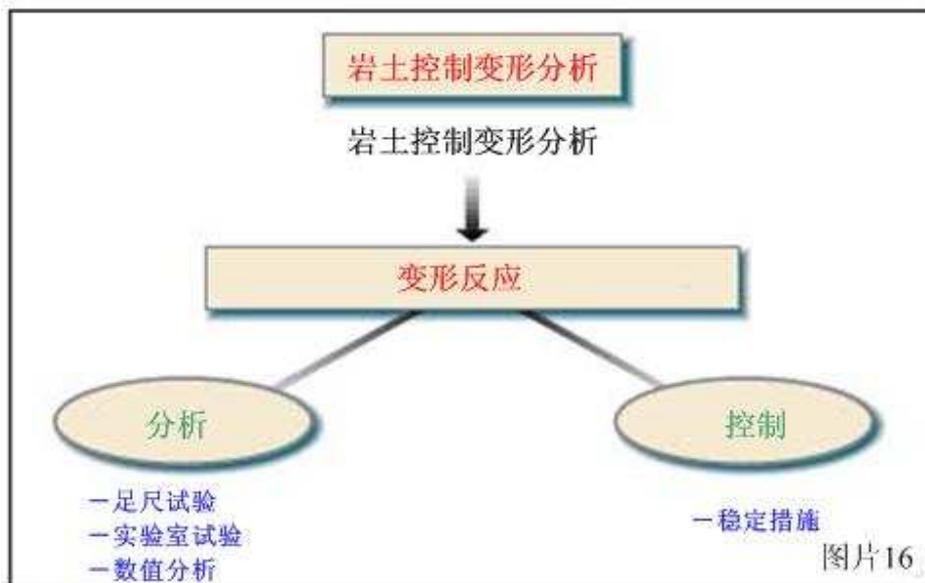
- 包含隧道开挖过程中的各种变形现象可以分解为因果关系进程（作用与反作用）；
- 通常为了有效控制各种类进程导致的结果，有必要完全找到各进程发生的原因；
- 要完全找到起因同时也必须深入细致地研究起因带来的后果/结果。

研究重点应放在结果上（掌子面前方及后方的围岩变形反应），因为要分析变形反应的真实原因及发展过程，必须通过现场以及试验室试验以及数学工具对超前核心围岩特性进行分析和计算；通过对掌子面前方围岩的变形特性分析可以得出变形原因。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

研究发现，通过运用适当的加固措施来控制掌子面前方围岩（超前核心围岩）的易感变形，从而也可能使围岩变形反应得到控制；通过调查发现，这是变形进程无可争议的诱因。



## 4. 根据岩土控制变形分析法对围岩变形反应进行分析

在采取以及不采取围岩超前支护和加固措施两种情形下，根据围岩的稳定性和变形特性，对超前核心围岩的应力—应变形态及其与隧道洞身应力—应变形态的系统对比进行了分析。为此进行了一系列的现场及试验室观察和试验。

### 4.1 全方位现场试验

根据围岩稳定性对超前核心围岩的变形特性通过观察进行了分析。观察了不下于1,000类隧道掌子面情形并在卡片上对相关数据进行了归类总结。

另一方面，在变形期间，通过系统量测对超前核心围岩进行了以下研究（图17）：

- 挤压变形，通过在超前核心围岩中安装水平挤压变形测定计（可移动千分尺）来获得相关数据，测定计长度为开挖直径的2-3倍。该测定计可以测出超前核心围岩在静止状态下（掌子面停止掘进）以及动态状况下（掌子面往前掘进）超前核心围岩的纵向挤压变形（图18）；
- 在隧道开挖掘进停止时，借助光学元件对隧道掌子面进行地形位移测绘；

# Rocksoil s.p.A

## specialists in Geo-engineering since 1979

- 从隧道上方地表进行预收敛测量，根据不同的地表形态以及覆盖层厚度，在隧道掌子面前方，从隧道上方地表直接垂直插入多功能变形测定仪，并侵入预开挖的隧道轮廓拱顶和隧道边墙内。

这些量测手段通常与传统量测手段（比如收敛测量和衬砌应力测量）同时使用。

全方位现场试验可以达到以下目的：

- 通过对挤压变形—收敛变形图表的理解确认超前核心围岩挤压变形与隧道掌子面通过此处后出现的收敛变形间存在紧密联系，以及此两种变形如何随着超前核心围岩强度的增加而减小；
- 根据不同围岩特性以及应力状态，通过隧道掌子面变形（表面挤压变形）挤压超前核心围岩形成三种变形形态（圆柱状变形、球冠状变形以及二者的结合）；
- 完全依据预收敛进行计算，即使不能从现场直接取得相关量测数据，利用图表进行简单的体积（容积）计算也不是什么难事（图19）；
- 验证随着隧道预变形约束措施的改善使得隧道四周带状增塑围岩的减少，最终导致作用于初期支护以及二次衬砌上的荷载随之减小。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

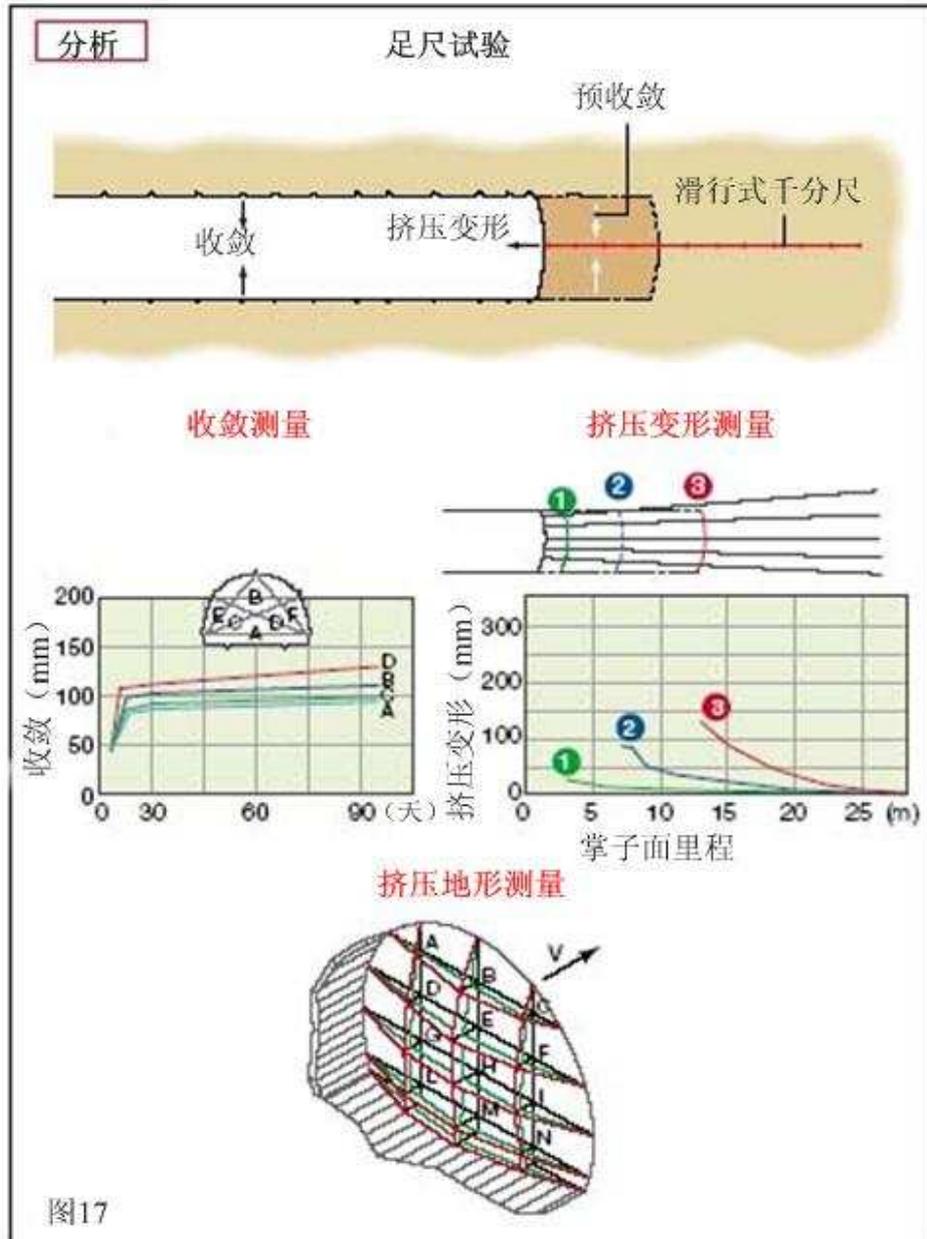


图17

## 4.2 试验室试验

# Rocksoil s.p.A

## specialists in Geo-engineering since 1979

在1967年Broms以及Bennemark发明的挤压试验基础上，随后又研发了两种新的试验方法以分析变形现象进程（图20）：

- 三轴单元挤压测试
- 离心挤压测试

在三轴单元挤压测试中，土体样本被插入一个单元容器中，同时围岩初始应力状态  $\sigma_0$  被重塑。通过流体压力在一个特殊的圆柱形容器中（称为“挤压箱”）重新产生应力状态，在试验前将试验样本从中部开始挖除；此时“挤压箱”与样本共轴，模拟了隧道开挖时掌子面四周的情形。

通过持续保持样本四周的应力状态不变并逐渐减小“挤压箱”内的流体压力  $P_i$ ，便仿真了隧道施工过程中在给定隧道断面情况下，当隧道掌子面往前掘进（推移）时隧道介质应力逐渐减小的情形。随着时间的增加以及内限流体压力  $P_i$  的减小，得到与图20类似的挤压变形预测曲线。该曲线可以随即被运用到设计阶段用于计算保持超前核心围岩强度的预变形约束压力的大小，从而达到控制预收敛变形的目的。

三轴单元挤压试验应注意以下几点：

1. 围岩样本尺寸必须适中，该试验主要适用于主要地质构成为粘性土质的围岩矩阵分析；
2. 相对于取样来说，如果现场围岩特性不是十分均匀（例如夹有片岩或鳞状土），当片岩或鳞状土大小可以忽略时，现场挤压变形要比样本试验得到的挤压变形要小；
3. 施工现场围岩质地越均匀，那么样品试验结论越有可能充分运用于实际施工中。

离心挤压试验适用于挤压变形受重力影响较大的情形。由于其高额的成本以及复杂操作步骤，使得该试验仅在少数特殊情况下使用。

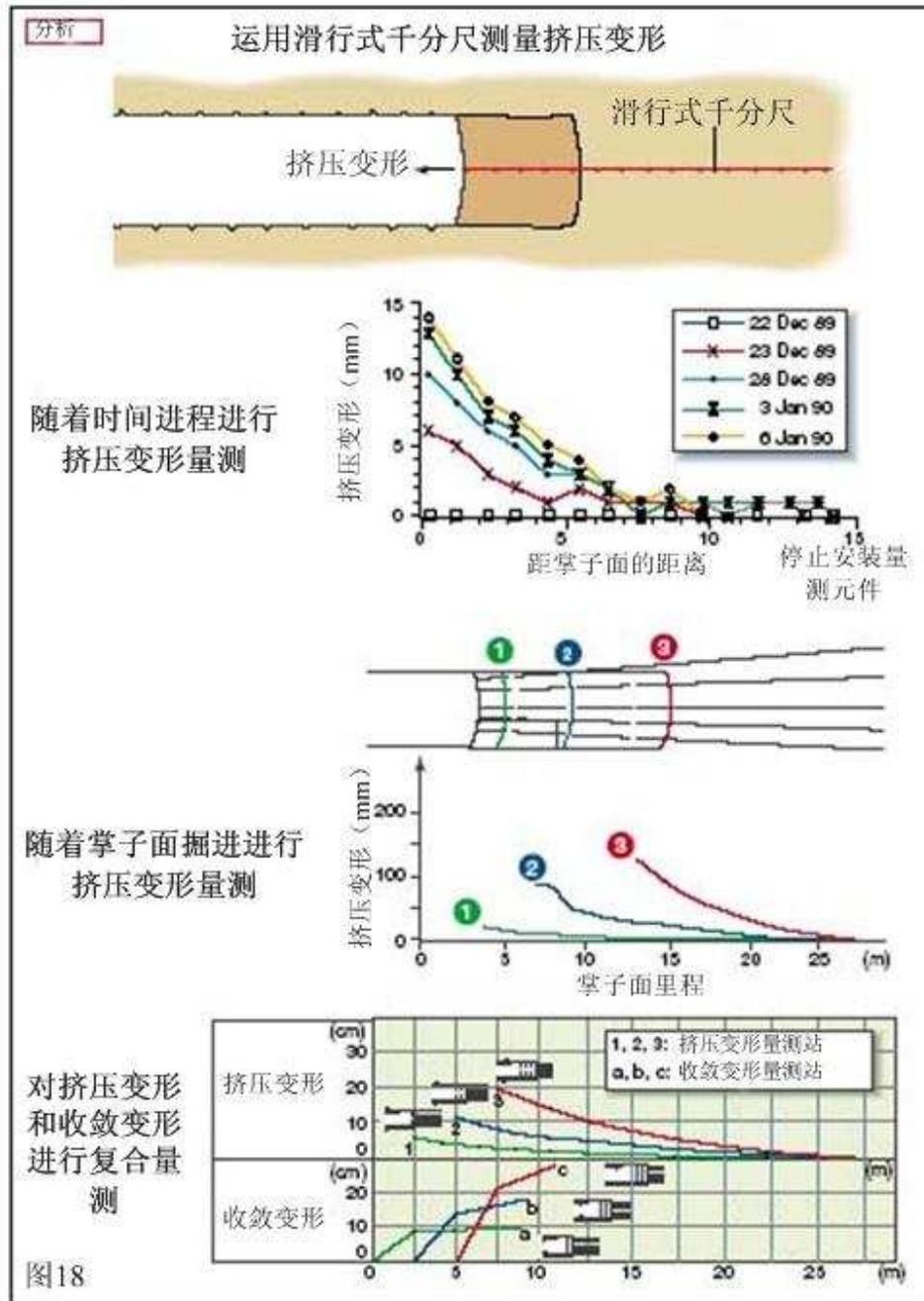
首先将用于测量变形以及孔隙压力的特殊标尺和传感器插入围岩样本中，然后将其放入四周透明的特制容器中。在容器挖除围岩样本一段后，插入类似于代表隧道初期支护、二次衬砌和仰拱的钢管。并将容器置于充满流体压力的环境下。自然地压力便这样在离心状态下被重新塑造，通过减小容器压力来模拟隧道掌子面开挖。

结果显示挤压变形在压力释放一刻瞬间迅速出现，并且随着超前核心土体压力释放进程逐渐发展且速度加快。图表分别反映了在每一步压力释放时的瞬时变形以及滞后变形。图表清楚显示滞后变形在测试结束后大约占总变形量的50%。

试验得出的超前核心围岩变形规律，与全方位现场试验结果一道为正确衡量围岩地质力学强度以及变形参数（ $C, \Phi, E$ ）以控制变形反应提供了基本理论依据。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



## 4.3 数值分析

由掌子面前方核心围岩引起的错综复杂的变形体系，由于是初次进行研究，没有关于超前

# Rocksoil s.p.A

## specialists in Geo-engineering since 1979

核心围岩应力—应变行为客观标准作为参考，而且其变形规律超出了一般的直觉想象和现阶段试验验证范畴，所以变得比较棘手；我们将着力对调查研究的众多方面作一个有机统一的说明，并且希望所作的这些说明能形成一个基本的理论框架，可以克服当前理论的局限性。

为了达到这一目的，我们继续运用理论工具对变形反应展开分析。主要经历了以下三个阶段：

- 最初，我们试图利用现行的计算理论，并在可能时随时对其进行更新；
- 然后，我们寻求使用有限元法和有限差轴向对称数学模型来解决问题；
- 最后，我们仍然使用三维数学模型来进行分析。

### 4.3.1 运用分析法进行研究

首先，我们试图通过修改和运用现行的最新的分析计算方法来解决问题。特别是我们寻求将超前核心围岩以及超前核心围岩加固理念融入一些典型计算公式中，并为隧道设计所用。例如，在收敛—约束变形法以及特征线法中均可明显看出超前核心围岩理念。

运用这两种方法均可以使我们模拟超前核心围岩土改良效果并从中得到新的塑性半径 $R_p$ 以及掌子面周围围岩带变形减小的结论。

由于都只能分别单独计算隧道掌子面应力—应变形态以及掌子面后方一定距离的应力—应变形态，因此这两种方法均不能在计算掌子面前方的变形效应的同时将相关数据记忆性地有效转换到掌子面后方变形效应计算方程式中；因此他们都不能完整地说明和代表整个现象。

这里的“现象”是指塑性半径 $R_p$ 的减小、隧道变形（收敛）以及作用于初期支护和二次衬砌上的荷载随之减小。这些“现象”不能在运用分析法所得出的结论中找到，而采用试验测量却能系统观察到。

因此，我们不得不做出这样的结论：分析法虽然可用于“诊断”阶段当开挖没有采取约束变形措施的情形下确定围岩变形特性，但是在“处治”（实施）阶段（使用预变形约束措施）却不适用。因为运用分析法不能对围岩变形做出足够准确的预计，同样地，他们也不能通过对初期支护和二次衬砌的计算来预计整个围岩变形。

因此，最终决定摒弃这些分析计算法，转而到运用数值模型的轨道上（有限元或有限差），因为数值模型能充分涵盖隧道开挖掌子面前方以及后方介质整个应力—应变过程。

### 4.3.2 运用轴向对称数值模型法进行研究

掌子面前方核心土加固效果运用有限元以及有限差模型进行研究。我们之所以开始使用轴向对称模型，是因为他们和三维模型比较起来更易操作。

尽管我们也不能克服上述分析法中的某些内在局限性（隧道轮廓要求十分规则、掌子面周围应力状态均匀分布、只可能考虑环状支护和衬砌封闭情形而不能考虑其他类型，因此不能对隧道真实施工情况进行模拟），但是通过这些数值模型却能从中发现超前加固围岩导致的掌子

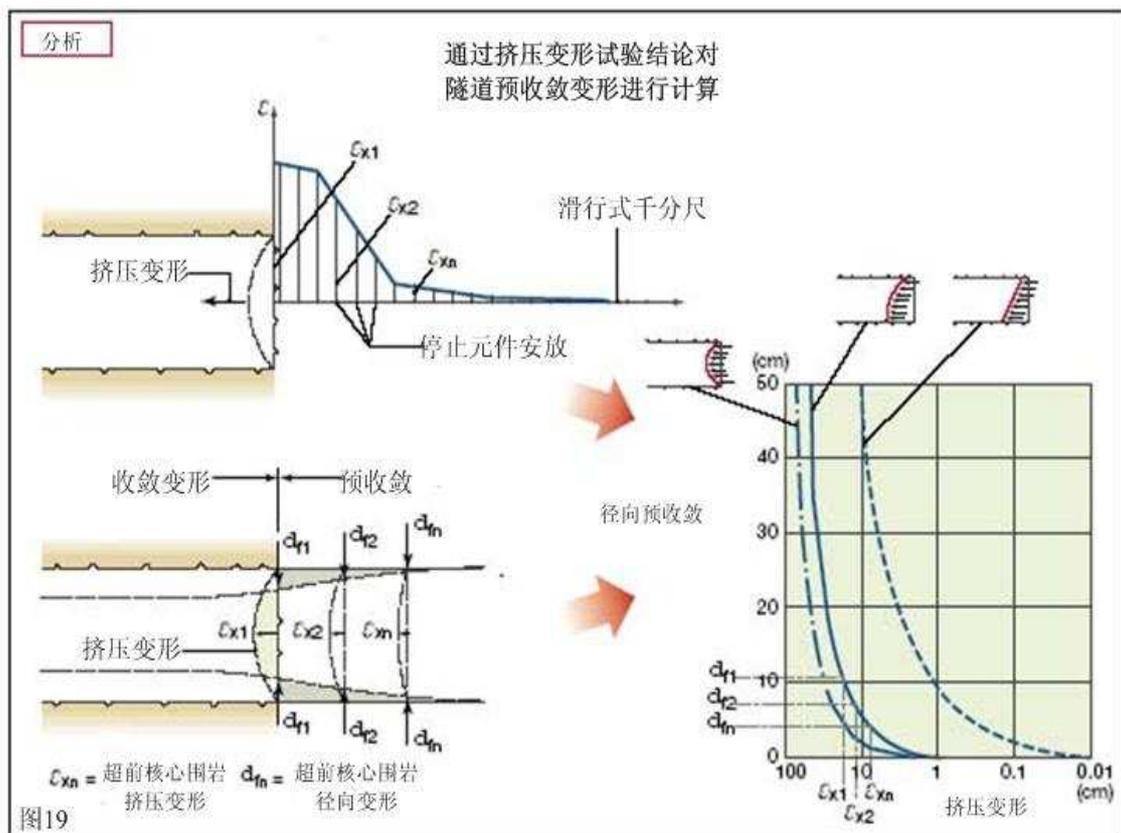
# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

面前方和隧道四周应力不同分布情况，最终通过计算确定通过超前围岩加固，导致掌子面前方超前核心土体以及后方隧道塑性围岩带范围以及隧道四周变形（既包括挤压变形和预收敛变形，也包括收敛变形）均减小。另外，通过轴向对称模型分析发现，可以通过改变隧道衬砌强度和/或调节衬砌离隧道掌子面距离可以对挤压变形和预收敛变形进行控制。换句话说，轴向对称模型反映出假如只采取变形约束措施不可能补救掌子面前方已经发生的变形。

尽管轴向对称模型能够模拟提供在实施超前围岩加固措施时的隧道掘进情况，以及根据试验研究结论得到围岩应力及变形结论，但是却不能预测作用于初期支护和二次衬砌上的荷载，通过使用这种模型，在其他条件保持不变的情形下，便或多或少可能导致最终错误决定不使用超前围岩加固。

上面所述的情况，通过在试验研究过程中对比观察，以及在实际施工过程中已经多次得到了验证。但是轴向对称模型不能将隧道四周塑性围岩产生的重力效应以及实际施工过程中的初期支护及二次衬砌考虑在内。



### 4.3.3 运用三维数值模型法进行研究

为了克服使用轴向对称数值模型遇到的问题，使用三维数值模型。通过三维数值模型法实际上可以将实际的几何尺寸运用于相关计算中，以至于不会出现使用收敛—约束变形法、特性

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

线性法和（有限元或有限差）轴向对称分析法中遇到的这样那样的问题。

运用三维数值模型使除了静水压力环境外的围岩应力状态分析成为可能，而且可以考虑重力荷载以及通过模拟实际衬砌的几何结构及其距隧道掌子面的距离来计算不同施工阶段隧道静力学效应。另外，正如下面阐述的一样，三维数值模型使通过数值计算研究掌子面挤压变形运动分布，以及随着隧道仰拱距隧道掌子面距离的改变产生的不同的掌子面滑动原理成为可能。

从三维数值模型得到的结论与试验研究得到的结论基本一致，两种分析方法均着眼于隧道变形上（挤压变形、预收敛及收敛变形）以及衬砌上的应力，变形和应力在超前核心围岩得到加固时更小，这与试验研究得出的结论一致。

#### 4.3.4 变形反应试验和理论研究结论

变形反应试验及理论分析将超前核心围岩看作隧道长期和短期变形现象的重要依据，并且使我们确信超前核心围岩的强度以及变形特性是整个变形进程（挤压变形、预收敛以及收敛变形）的真正原因。同时也让我们坚信可以通过超前核心围岩防护及加固工艺增加其强度以达到控制超前核心围岩的变形（挤压变形以及预收敛变形），并最终达到控制隧道变形（收敛变形）以及隧道衬砌长期和短期荷载大小的目的。

因此，假如超前核心围岩的强度以及变形特性构成围岩对隧道开挖变形反应的真正原因，那么可以将它看成是一个新的工具来控制变形反应：它的强度以及变形特性将对隧道长期及短期稳定起到决定性的作用。

## 5. 运用岩土变形控制分析法控制变形反应

对于岩土变形反应，理论和实验上研究表明：隧道开挖时整个应力-应变过程（挤压，预收敛和收敛）产生的真正原因是前方岩心土易变形。为此，为了在各种应力-应变情况下，但是首要重要的是在困难岩层条件下有所成效，而且为了适当地调节它的刚性首先得对前方岩心土产生作用。就受力而言，意味着使用预变形约束，而不仅仅是帮助掌子面前方形成拱部效应的岩土约束措施。

接下来要做的是必须完成岩土变形反应的完全控制，见图21。

1. 开挖面前方岩盘，用适当的预围束技术调节前方岩心土的刚性；
2. 开挖面后方岩盘，在隧道中采用围束技术控制前方岩心土挤压，这种做法也能对靠近开挖面的隧洞起着连续的积极的围束作用。

### 5.1 开挖面前方岩盘控制

为了调节前方岩心土刚性及为完全控制岩土变形反应创立正确的条件，进而达到隧道长期和短期的完全稳定，岩土变形控制分析法建议查看已在众多文章中充分阐明的众多干预措施，一部分在参考文献七中可以找到。

所有的这些干预措施可以分成两大独立的范畴。见图22：

- 保护性干扰，在前方岩心土周围的干预路径内应力起着一定的保护作用，这种作用可以

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

---

保证岩心土的自然强度和变形特性能够受到保护。（例如：半水平注浆改良围岩，喷射纤维加固混凝土或者通过机械预开挖时往开挖面前方岩盘浇筑混凝土）；

● 加固干扰，为了采用适当的岩土改良技术提高前方岩心土的自然强度和变形性能而直接对岩心土的硬度起作用。（例如：用玻璃纤维结构改造岩心土壤）；

虽然这些干预措施为了控制变形反应，在关系到土壤的自然环境时受到了相当大的运用围束，但是总的来讲，它们能够保证解决所有可能的地质条件下出现的问题。当然，在极度应力-应变的情况下，毫无疑问可以同时采取保护和加固干预措施并使他们同时起作用，见图23。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

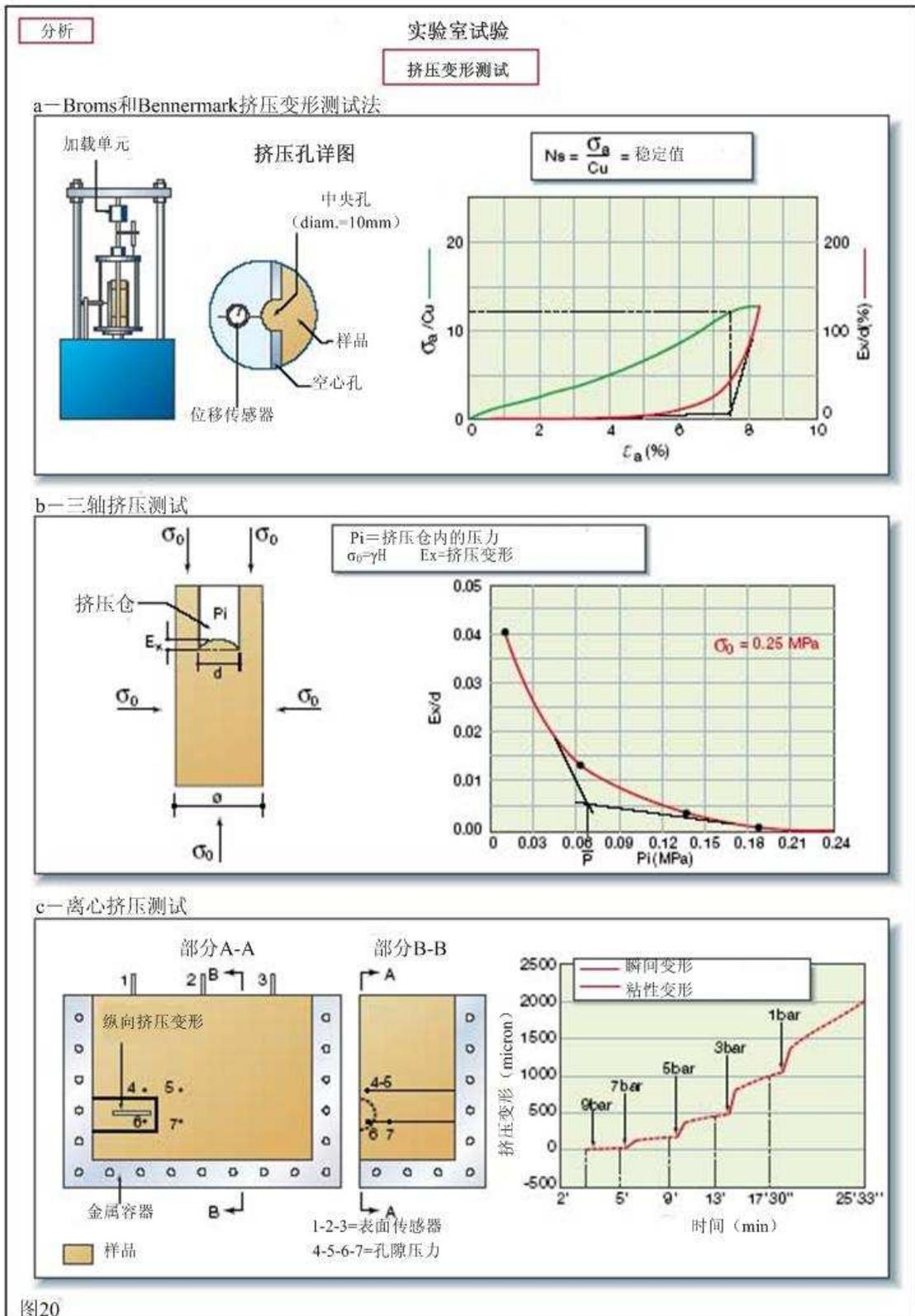


图20

### 5.2 开挖面后方岩盘控制

同传统的忽视允许岩心土变形的原因，而要求运用柔性衬砌的隧道前方岩盘原则（在真正困难的应力-应变条件下，实践结果证明有所不足）相反，隧道前方岩盘的这些新概念的运用，在岩土变形控制分析工法的刚性岩心土特点面前，要求等同的刚性衬砌在作为绝对必要的条件下使用，如果用加固开挖面前方岩心土时获得的优点不至于落后。重要的是，为了保证从预围束到围束过程中作用的连续性尽可能逐渐地和一致地发生，需要保持极大的关心和注意，决不要忽视受控制的整个变形过程的原因是在于前方岩心土的强度和变形特性。

另一方面，电脑数字分析清晰的显示如下：

1. 当产生挤压时，挤压通过被称为挤压表面的理想表面发生，挤压表面位于从岩层和初期衬砌的前缘之间接触点，以及同样的岩层和隧道仰拱前缘之间的接触点（见图24）；
2. 浇筑靠近断面的隧道仰拱逐步地会使表面挤压降低，从而会产生一个相等的累计挤压降值（在断面上部更会显得均衡）收敛也是如此（见图25）。

同样的数值分析结果也表明了：

- 关于在离断面的相同距离处的隧道仰拱浇筑，对于半断面前方岩盘计算出的变形量和全断面前方岩盘计算出的是可比较的（换句话说，从断面浇筑仰拱就象在掘进阶段时的前方岩盘一样）；
- 半断面开挖总是产生比全断面开挖更大的总变形量。

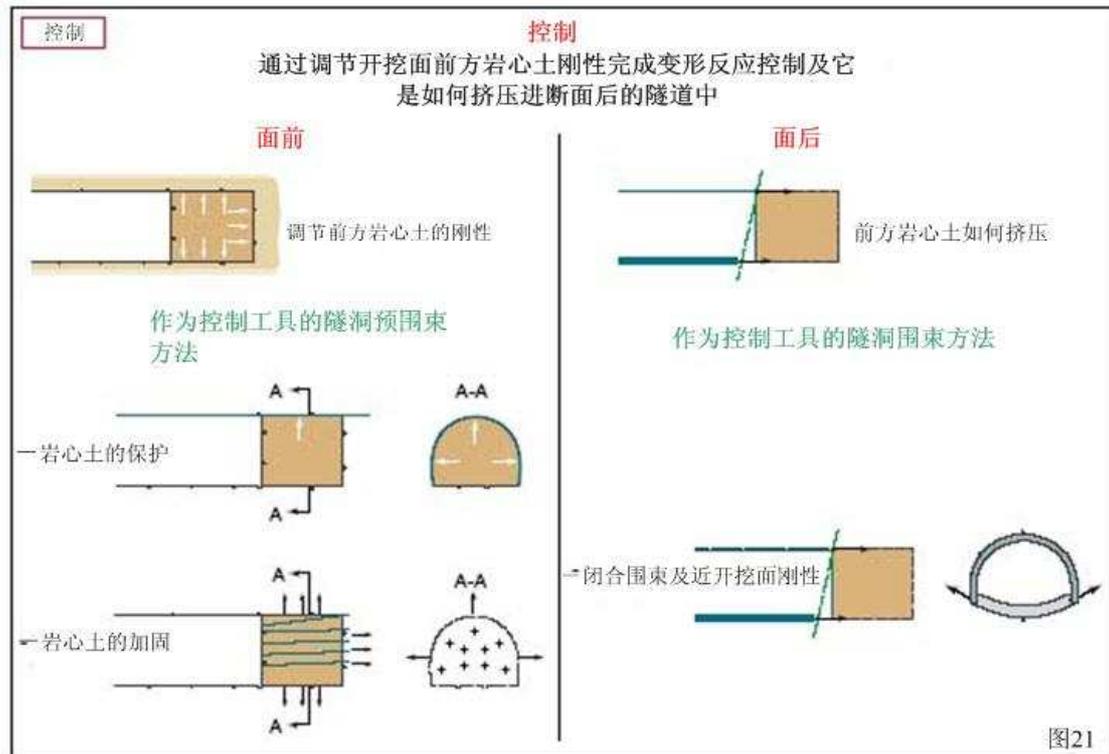
接下来要说的是，隧道设计工程师有这样的机会（在极端应力-应变情况下变得基本重要），通过调节前方岩心土的刚性，控制已经出现在开挖面前方岩盘的变形反应，以及通过浇筑踢板以及尽可能接近断面的仰拱，控制此连续变形。不要使仰拱浇筑离隧道掌子面太远，意味着大挤压表面、不对称性挤压以及较大尺寸前方岩心土更难于应付，所有的先决条件将会导致隧道不稳定，见图26。

此时，将此岩土变形控制分析的理论方法转化为一种新的隧道设计和施工方法的时机已经成熟，此方法将会克服传统方法的限制，便于尽可能将新设计和施工运用到所有类型地质和应力-应变条件下的隧道，这是为了使隧道前方岩盘工业化及对于所有其他类型的土木工程项目正常施工时所需成本和工期预见有依赖性。

开始前，必须制定指导方针以作为建设地下工程的工作者们的参考。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



## 6. “新意法” 建议

对于我们来说，以下几点建议对正确的进行地下工程设计和施工合情合理：

设计阶段：

- 详细了解隧道开挖介质方面的知识，特别是其强度和变形性能；
- 初步研究采取隧道支护稳定措施开挖时介质应力---应变现象（变形反应）；
- 决定介质开挖时变形反应需调节控制的围束或预围束的类型；
- 基于提供的预围束或围束作用，从现存的可用的工艺中选取稳定支护措施；
- 基于介质开挖时的变形应答预测，设计出纵横断面类型。不仅决定在预期的操作中采取最充足的稳定支护措施，而且还将决定它们执行时期、步骤及时间；
- 用数学方法决定实体及测试稳定支护措施，最终达到介质开挖时期望的变形应答及安全系数。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

施工阶段:

- 证实施工中介质开挖变形反应符合设计阶段的预期研究。然后对设计进行优化调整，使隧道掌子面与洞身围岩的支护强度达到平衡。

通过这样可以保证，地下工程设计和施工按以下的时间顺序进行：

1. 测量阶段，为了获得介质的地质、地质力学和水文特性；
2. 诊断阶段，根据缺失隧道稳定支护措施情形下的变形应答，运用理论方法预测围岩变形特性；
3. 处治阶段，首先确定用来调节变形反应而采取的的稳定支护措施以及隧道开挖方法，其次是对采取的措施进行有效的理论评估；
4. 监控阶段，涉及到的是为了调整开挖和稳定方法，在变形反应方面监控和测试介质开挖的实际反应。

## 6.1 “新意法”（岩土变形控制分析法）的概念范围

“新意法”在各种重要领域，有的在此报告的前部分已经涉及到了，不同于其他用做参考构思的方法：

- 1) 隧道设计和施工就时间和实践而言，不再象过去那样表现出是有明显区别的两阶段；
- 2) 这种方法采用新型的地下工程概念范围，基于一个单一的开挖参数：断面前方岩心土系统的应力—应变方法；
- 3) 此工法基于岩体开挖的变形反应的预测、监控和阐明，此工法变成了唯一的参考参数。首先此工法理论上预测调节，其次根据施工调整设计的方法，实际测量、阐明和实验；
- 4) 预围束概念完善了已经为大众所知的围束概念；这种概念使得隧道有序的开挖掘进，即使在最困难静力条件下，且施工中不必即兴创造方法；
- 5) 此工法涉及到的保持系统的使用，目的是在于保持岩土地质和结构特性，此系统在施工材料中常见，而且它们在隧道掘进的速度和节奏中也是尽可能不变的。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

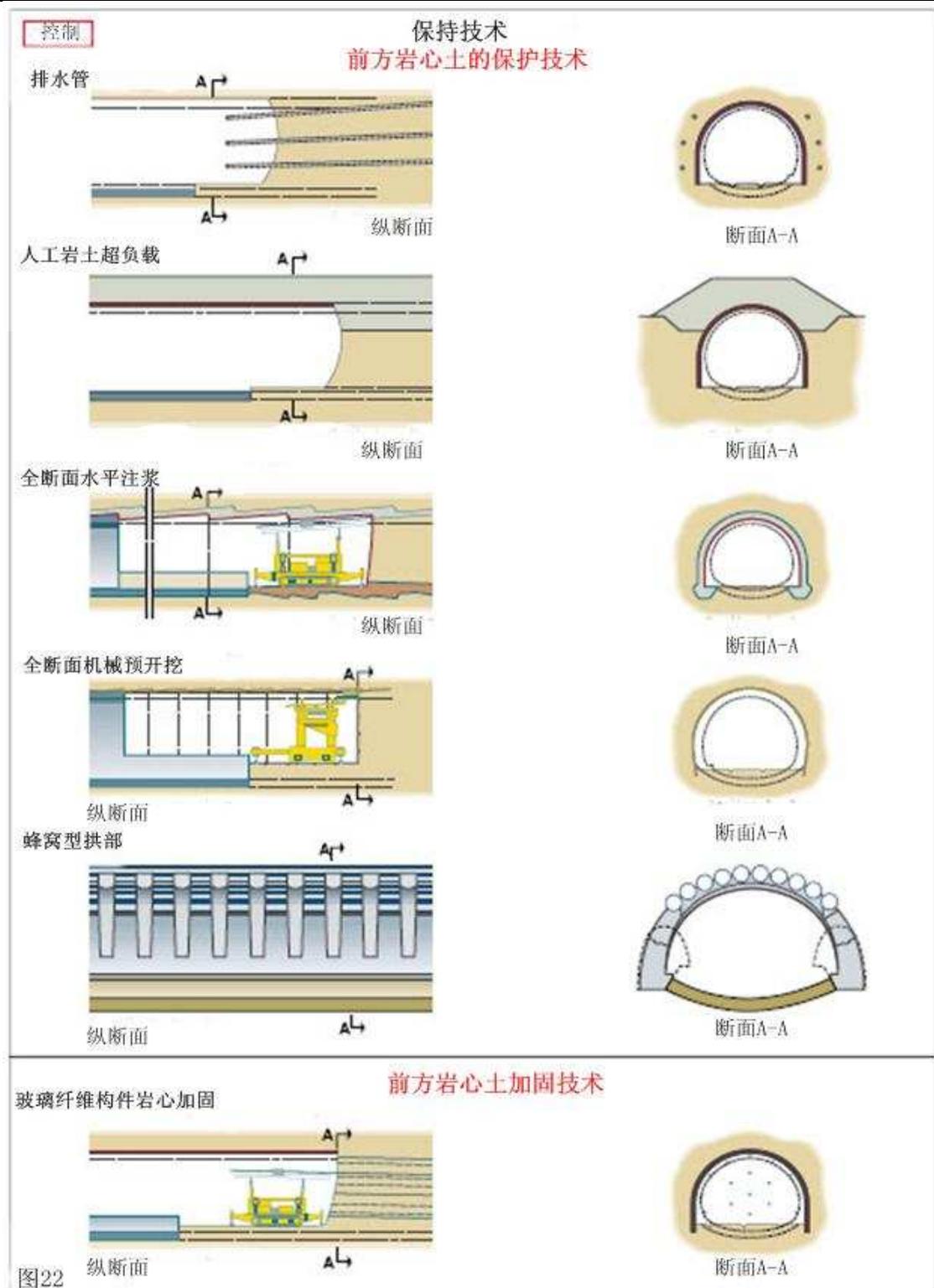


图22

已经提到，这种工法的特性是介绍了地下工程施工的新型概念范围。

已经观察到，开挖中的岩土变形及隧道的稳定取决于开挖面前方岩盘所形成的岩心的稳定。通过观察，前方岩心土的稳定是新型概念范围中基本构成因素。其结果是，各种地质有效的单一参数就是前方岩心土的变形反应，这种工法克服了至今为止传统工法的限制，尤其是对在困难条件下的岩土。

三种基本类别在图14中能够辨别表明：

A类别：稳定掌子面，岩石型；

B类别：短期掌子面稳定，粘性土型；

C类别：不稳定掌子面，松散地质型。

### A类岩层

当开挖断面及开挖周围的岩层应力状态不是充分地能够克服介质强度时A类岩层就被识别出来。隧道开挖横断面越接近理论轮廓线，拱部效应就会越接近隧道墙体。

变形现象在弹性范围内发生，大小可以厘米计。

整个断面是稳定的。局部的不稳定仅仅是由于岩体的不规则分布引起的单个石块坠落。岩层的各向异性应力—应变状态起到了一个基本作用。

隧道的稳定不会因有水流而受到影响，除非岩层的强度受到水流机械的或化学的影响，或者除非水流颗粒很强以至于冲刷物沿着滑落面削减了剪应强度。

采用稳定技术主要是为了防止岩体退化，保持开挖的棱角线。

### B类岩层

当开挖断面及隧洞周围的岩层应力状态是充分地能够克服在弹性范围内的岩层强度时B类岩层就被识别出来。

拱部效应不会在开挖周围立即形成，但是根据塑化岩层范围大小在离开挖面一定距离处形成。

以正常掘进率发生的变形在弹性—塑性范围内递延，以厘米可测。

以正常的掘进速度，隧道在短期内是稳定的，前进速度增大或减小伴随着稳定的增加或降低。因为岩层还能够聚集足够的剩余强度，所以前方岩心土以挤压的形式出现的变形不会影响到隧道的稳定。

不稳定性表现在松散材料脱落，其分布在开挖面及隧洞周围，但是在开挖面段落后，允许采用传统的径向围束措施。

在某些情况下，需要采取开挖断面预围束，以平衡开挖面和隧洞之间的稳定，为的是可接受在限制范围内的变形。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

水的出现，尤其是处于流动状态下，将会降低岩层的剪应强度，引起增塑，因而会出现更多的不稳定现象。因此，必须预防，尤其是在近开挖面处，疏导水流以远离前方岩心土。

## C类岩层

当岩层应力状态比起在开挖面周围区域内的材料强度较大时，C类岩层就别识别出来。拱部效应既不会在开挖面形成又不会在开挖周围形成，因为岩层没有充足的剩余强度。此时的变

形是不可接受的，因为变形会立即进入滑动范围，不稳定现象将会明显出现，诸如没有时间用径向围束法处治时开挖面破坏及洞身坍塌：岩层加固操作必须在开挖面前方进行，为了能创建一种人工拱部效应而形成预围束状态。

如果没有考虑到在静水压力情况下水出现的影响，这样就会进一步降低岩层强度而出现塑化现象，还会增加变形体。在水动力情况下，还会形成水夹杂材料四处流动及不可接受的倒虹吸。因此，必须预防此类岩层，尤其在近开挖面，引导水流从前方岩心土流出。

地下工程的所有情形下的岩层都归结于这三类形式，这在隧道设计和施工中已经观察了二十多年。

## 6.2 “新意法”运用的时间及阶段

岩土变形控制分析法指出，在隧道设计和施工的逻辑发展方向中，人们应该按照概括在图27 中的阶段进行隧道施工。

设计阶段或时间由以下步骤组成：

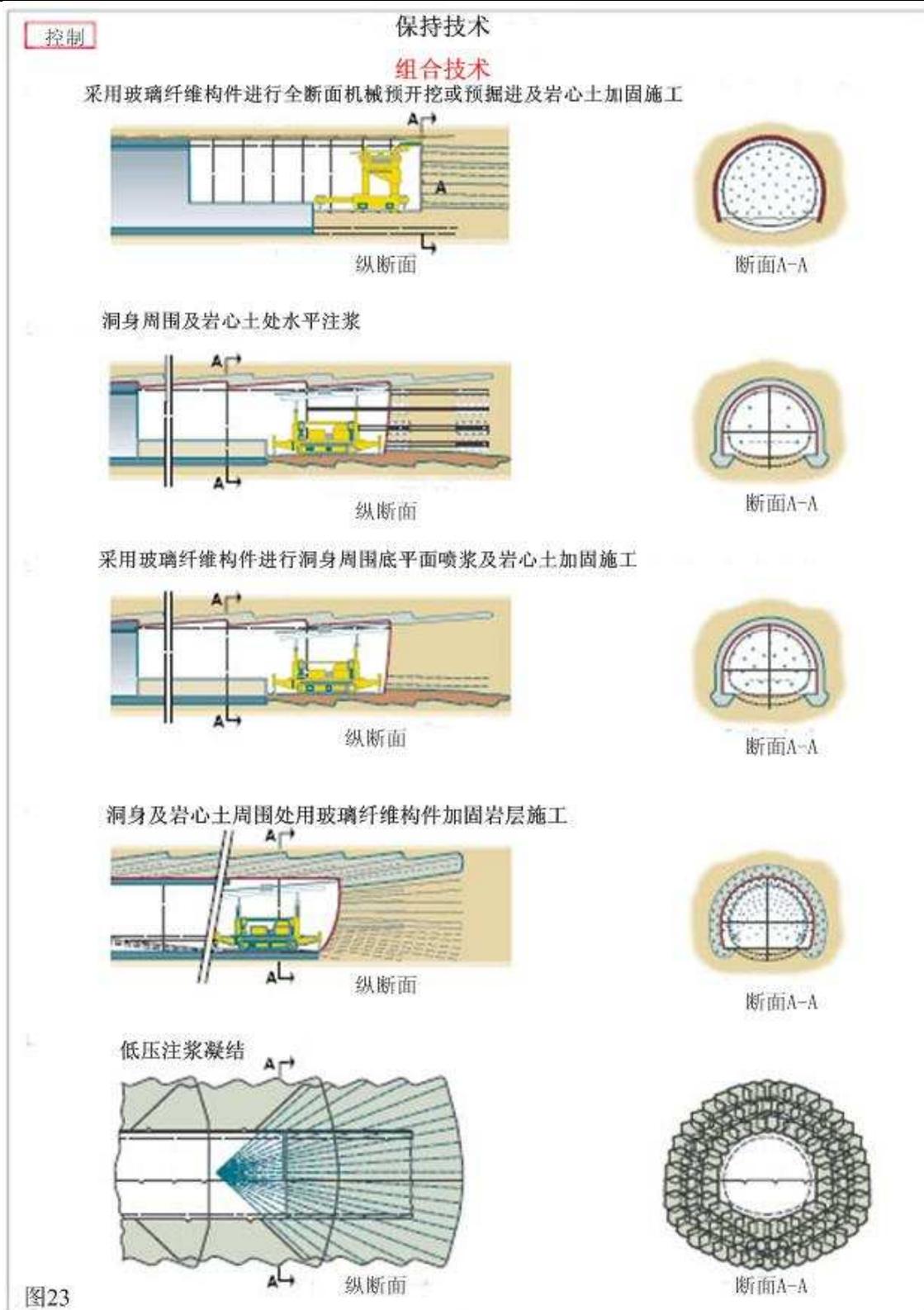
● **测量阶段**：在此阶段，设计工程师决定就岩土力学方面而言，受隧道影响的岩层性质。这在现存的自然平衡分析及下一步诊断阶段取得的成功中是不可缺少的环节。

● **诊断阶段**：在此阶段，设计工程师运用在测量阶段收集的信息，就以上所描述的情况基于预料中的应力-应变的形式，按A、B、C类岩层同样的应力-应变形式下将隧道划分成几部分。解释由开挖引起的变形发展具体细节及荷载类型；

● **处治阶段**：在此阶段，设计工程师根据在诊断阶段的预测，分别对A、B、C类岩层，决定采取哪种措施（预围束或简单围束）和哪种必要的处治手段完成隧道的完全稳定。因此，工程师要设计出典型的纵横断面的组成，而且还要采用数学的手段证实它们的有效性。

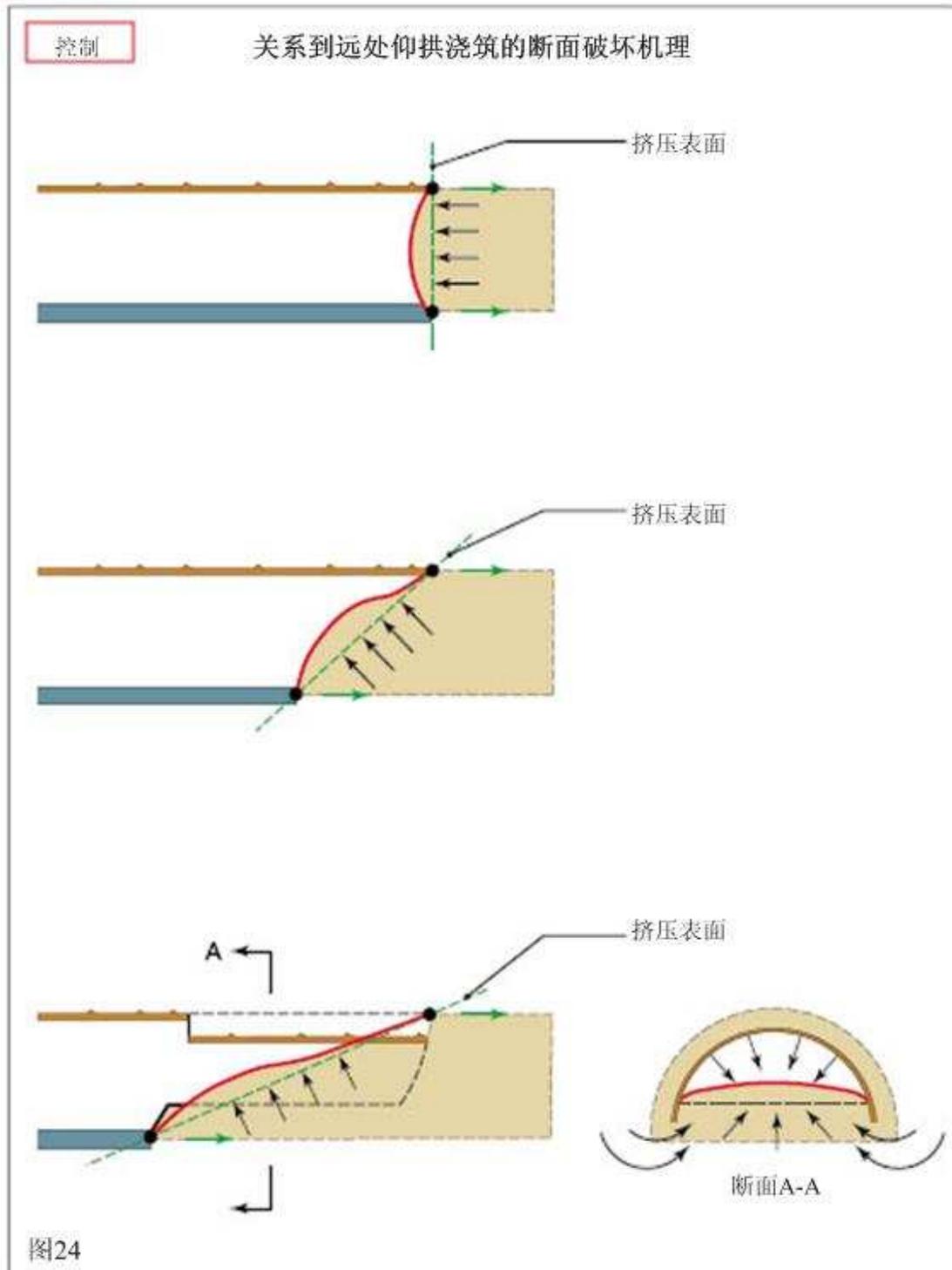
# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



施工阶段或时间由以下步骤组成:

● 操作(作业)阶段: 在此阶段根据设计预测, 执行隧道稳定支护工作。根据岩体的实际变形反应, 多种方法将被采用到围束和预围束中, 根据预先准备的质量控制方案检测它们。

● 监控阶段: 在此阶段, 施工过程中出现的变形现象(构成介质到隧道前方的反应)将首先会被测量和阐述, 为了检测诊断和处治阶段的预测的准确性, 另外其结果还为了将最终感触, 就断面和洞身之间稳定技术的平衡而言, 补充到设计中。当隧道施工停止时为了安全起见监控不能停止, 应该继续进行。

地下工程的正确设计以原始的自然平衡为基础, 就发生和发育变形现象而言如何预测开挖过程中岩层性质。此外, 通过预测, 能选择最适合的施工方法以使这些现象保持在可接受的限制范围内, 及建立隧道掘进和开挖面定点中起作用的施工工期和步骤。

另一方面, 地下工程的正确施工根据设计蓝图进行: 首先, 专心读取开挖岩层反应和稳定操作, 就在远处的隧洞和岩层表面处隧道墙体, 及开挖面的挤压和收敛方面而言; 其次, 一旦各种各样的测量结果被解释, 就决定掘进的实际长度、速度和节奏, 稳定作业的程度、定位和步骤, 以及开挖面和开挖周长之间的这些平衡。

### 6.2.1 测量阶段

开挖意即扰动自然的现存平衡。设计最小介质扰动和最小变形反应的开挖法, 意即在开挖前预先要具有最充足可能的岩层自然平衡状态知识。

因此, 测量阶段必须先于隧道设计和施工, 在测量阶段, 通过岩层受如下知识影响的信息查明介质性质: 岩性、结构、地层学、形态学、建造学、水文、地质学、地质力学和应力状态; 所有这些学科, 对于设计工程师在分析现存所处的自然平衡及正确的进入下一步骤“诊断”阶段是必不可缺少的。

测量阶段由两个连续阶段组成。

第一阶段涉及到的是, 第一, 沿着线路, 评估岩层地质纵断面图, 以大约1:1,000,000的比例勾画的地质图、现存的文献和摄影绘图测量为基础, 将这些同地表测量获得的信息相结合, 包括:

- 岩性测量, 主要单元单个测;
- 地质形态测量, 特别注意坡度的稳定性;
- 地质构造测量, 非延续性的主线辨别;
- 水文地质测量, 主水文系辨别及溪水测量。后者的流动率在施工中必须受到控制和监控以对它们建立隧洞排水效应。

地质纵断面的首要评估通过一系列的岩石片表达出来, 这些岩石片体现了沿路线露出地面

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

---

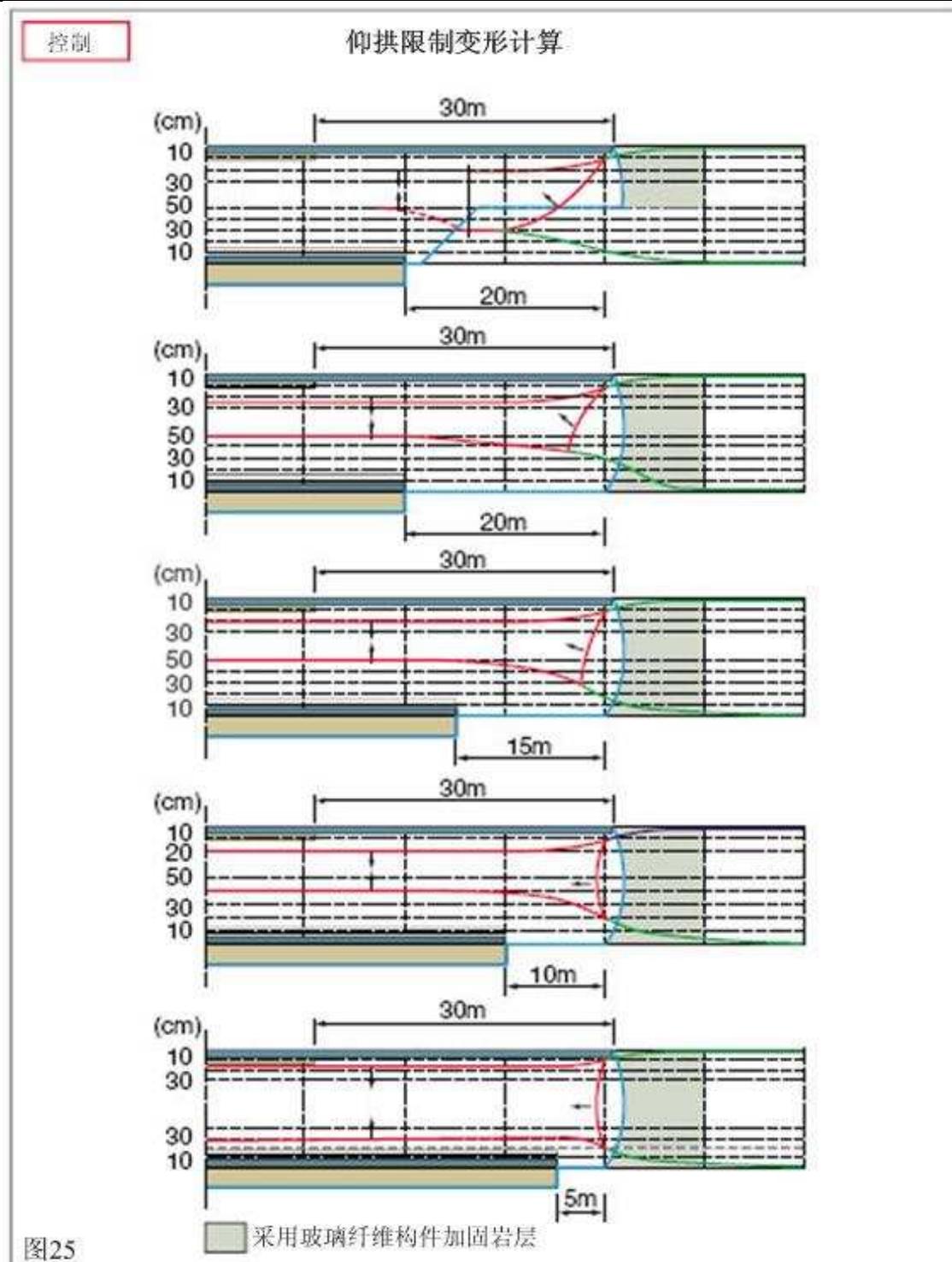
的岩层的类型及测量结果梗概。

测量阶段的第一步骤要求的是施工导洞，此外，最终设计可以很好地利用从隧道（8）、（9）中取得的地质和地质力学的测量信息，也利用了现场的设计测试以评价岩体的强度和变形性质。

第二阶段以第一阶段的结果为基础。它涉及到的是地质测量规划，包括间接地质物理学测量，现场测试及钻孔测量，这些测量包含了地质参数的高清晰度连续岩心取样，及来自隧道穿过岩层的未扰动样本的参考。

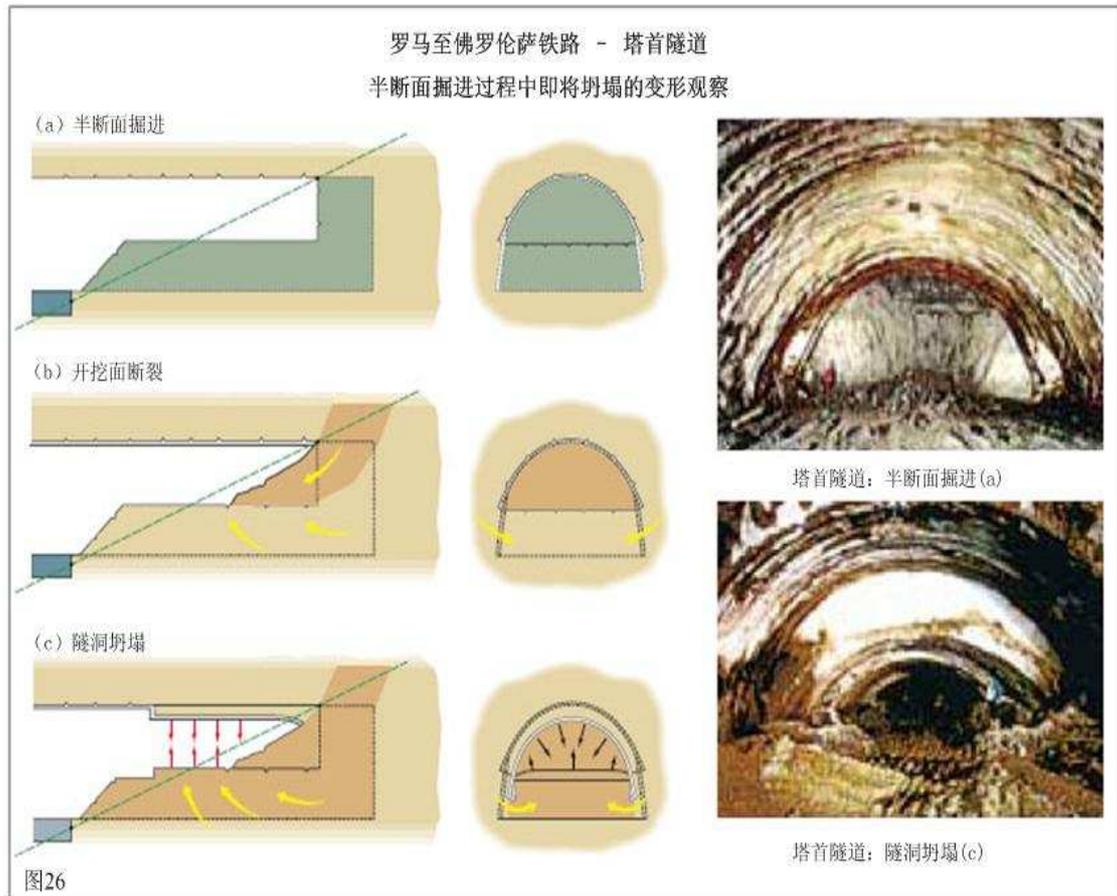
# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

---

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

时期	阶段	概述
设计	—测量 —诊断	—现存自然平衡分析 —无稳定措施时变形现象的分析与预测 (*)
	—处治	—采用稳定措施时变形现象控制 (*)
施工	—作业	—运用稳定方法控制变形现象 (*)
	—监控	—变形现象的控制和监测 (*), 此变形现象被作为隧道掘进过程中岩体的反应 (开挖处挤压及隧洞轮廓处收敛监测, 以及岩层体内部的变化监测)
	—最终设计调整	—变形现象解释 (*) —开挖面和隧洞周围之间的稳定系平衡

(\*) 变形现象指, 开挖面挤压, 及在岩层体内部, 一定的变化距离内的收敛

图27

为了获得非扰动样本，必须设计出极小扰动岩体的设备。

获得的样本用来评估岩体物理和化学特性，以及随着时间的推移而发生的改变，还可以评估其地质和地质力学参数。

如下内容需要计算：

- 样本矩阵的内在曲线；
- 样本矩阵的变形参数（初始弹性模量和总变形模量，被用来计算隧道施工中各级应力）在有可能的地方，显得比较重要的是需要计算出结构的非连续性的强度和变形性质，此外，基于具体情况考虑，来源于这些性质的内在曲线和变形参数也显得重要。

通过评估处于极限荷载下的自然应力状态及主要筑造结构，完成第二阶段。

根据在建隧道大小及涉及到的筑造结构，可能的是要在测量隧洞各级平面下的自然应力时，完成可取的测试。

### 6.2.2 诊断阶段

在诊断阶段中，设计师根据A、B、C类岩层（稳定断面、短期稳定断面、不稳定断面），运用在测量阶段收集到的数据，按相同的应力-应变条件，将整个隧道划分成若干部分。要做好这个工作，设计师需要采用隧道开挖时介质变形反应的理论方法，完成预测，且他还要特别关注在无干扰情况下，变形现象在开挖面及隧洞周围岩层帮的表现。

分析开挖面前方岩心土系及隧洞的变形反应主要是看可能发生变形现象的源头、位置、发育和尺寸。采用数学工具，诸如特征线，二维和三维有限要素模型，依靠地质技术和地质力学输入数据，确定岩层在A、B、C三类岩层中属于哪一类。

在这些工具中，特征线分析法是最能够用在大多数情况下，为了达到效果，它是被特别简易运用，见图28。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

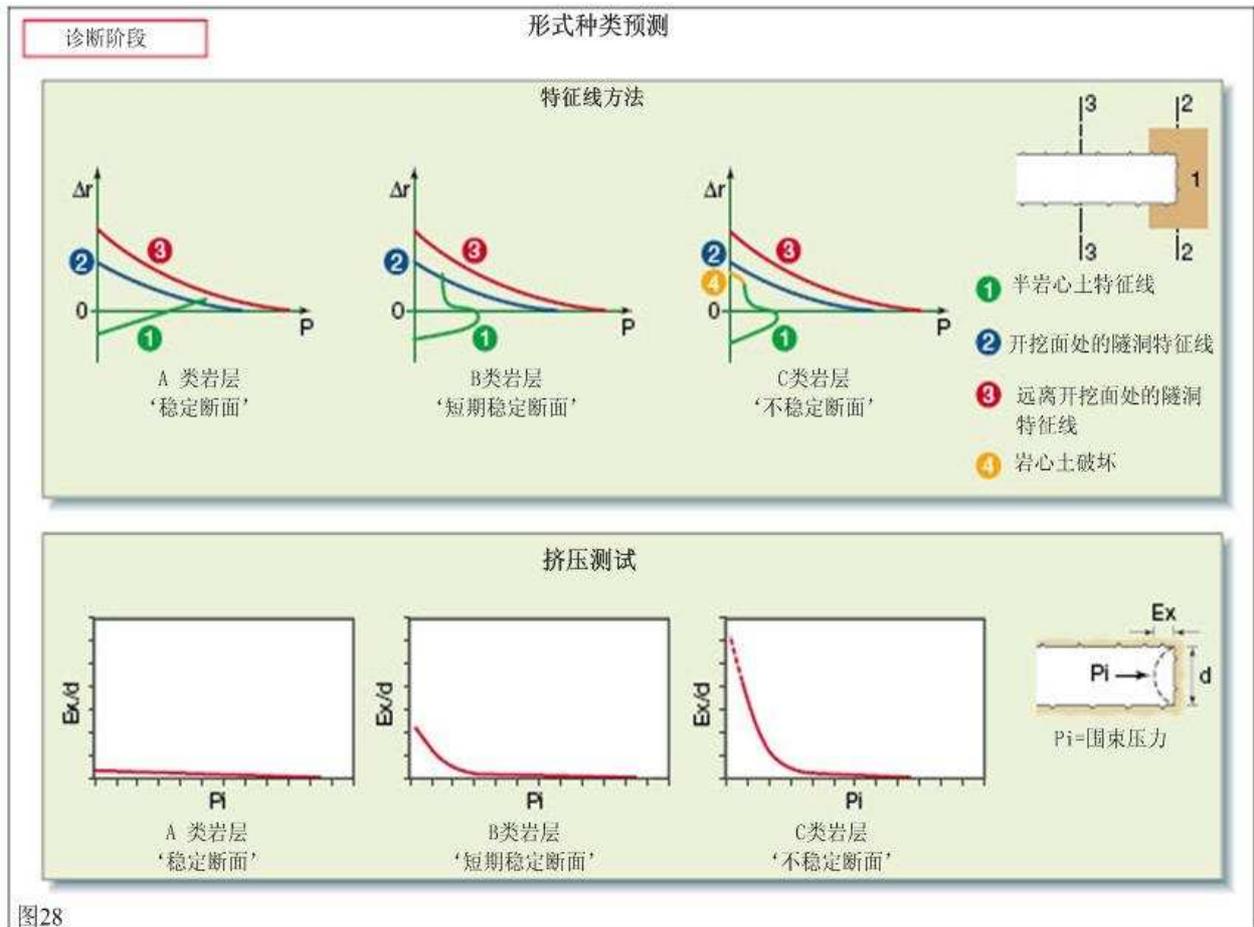


图28

在可用的实验方法中，对于某些种类的岩层，在三轴箱内进行非扰动样本挤压试验，在不同极限荷载情况下，模拟隧道掘进，观察在开挖面前方岩心土系的应力状态下由开挖引起的变化，见图28。

分析结果最终以具体的形式显示在隧道纵断面图中，以表明同样的应力-应变情况下同样的隧道分类。（按A、B、C类岩层分）

一旦决定岩层属于这三种类型岩层中的哪一种，识别每个类别时显示出的如下内容也就变成了诊断阶段的一部分：

- a) 会在隧洞周围发育的变形类型（挤压，预收敛和简单收敛）；

b) 紧接着预料中的不稳定反应，例如：

- 由前方岩心土挤压和预收敛引起的开挖断面处岩层塌落及地层破碎；
- 由隧洞收敛引起的在隧洞周围处岩层塌落及地层破碎；
- 由开挖面破裂引起的隧洞坍塌。

c) 开挖引起的顶板压力和塑化环模荷载。

### 6.2.3 处治阶段

在处治阶段，基于在诊断所划分的岩层类别，为了达到隧道的完全稳定（通过调节变形现象），设计工程师决定，在预围束、围束或预支护中，选择采用哪种合适的形式。

从先前所讲的那样，考虑到开挖面前方岩心土刚性的重要性，就关于开挖面和隧洞应力-应变形式及整个隧道的稳定来说，摆在设计者面前的有三个基本做法过程要做：

- 在稳定断面的应力-应变形式下（A 类岩层中），采用简单围束处治；

- 对于不稳定断面的应力-应变形式（C类岩层），可以考虑除围束之外采用加强预围束来处治；

- 对于断面处于短期稳定下的隧道（B类岩层），可以根据他估计的隧道所要达到的掘进速度，在预围束或隧洞简单围束之间采取选择。

一旦此种做法被决定，此做法就必须在体系、速度、开挖阶段及首先是稳定方法和工具上能熟练运用。对于后者来说，必须确定在哪些地方，就开挖面的位置，依据所说的A、B 或C类岩层如何运用它们，以达到期望的效果。

以实际行动达到预期的一种做法，设计工程师有一些工具可用来执行所有必要的稳定类型。

要牢记稳定可能是以下几种类型：

- 保持，当主要作用是控制较小主要应力时，
- 提高（改善），当主要做法是增加介质抗剪强度时；

对设计工程师来说，在那些能**在隧洞处产生预围束的工具中**（1）（见图29），能产生保持作用的如下：

- 沿着隧道轮廓线，采用机械预开挖的方法形成纤维加固喷混凝土层，利用预开挖本身所形成的框架结构（3）、（10）；

- 采用水泥砂浆将玻璃纤维或构件固定在岩层里，将开挖面前方岩心土加固到不小于隧道直径的深度；这种作业依靠的是岩心土的切变强度的大小（3）、（10）、（11）、（12）、（13）；

- 截锥形保护伞，由并排的底平面岩层柱组成，用喷浆法加以改善（10）、（14）。

主要做法作出了改进：

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

- 采用传统的喷射或固结法改善岩层截锥形保护伞；
- 截锥形排水伞，在地下水位下作业时。

对设计工程师来说，在那些能在**隧洞处产生围束的工具**中，能产生主要保持作用的如下：

- 能产生围束压力的**初期衬砌喷混凝土层**；
- 用**密闭式盾构**进行全断面机械开挖，在开挖面处及隧洞处能够产生围束压力（在预制混凝土衬砌环中）；
- **敞开式盾构**机械开挖，开挖中在岩层处产生径向围束压力；
- 用**终端锚栓法**进行径向顶部锚固，将在隧洞墙体处积极的围束压力运用到预设的螺栓张力中；
- **仰拱**，形成闭合的衬砌结构，增加初期支护和二次衬砌的强度，以在隧洞周围产生极大的围束压力。

主要做法作出了**改进**：

- 隧洞周围的岩层加固环，沿着总长锚固顶部螺栓法，这种方法能增加涉及到的岩层的切变强度，及提升内在曲线。

未被纳入这两个范畴的那些工具，根据它们是否作用于前方开挖面与否，可称为预支护或支护方法。它们没有影响到拱部效应形式，也不能以任何明显的方式控制较小主要应力或提高岩层抗剪强度。

一个预支护方法之一的例子超前支护，虽然超前支护在开挖后安装了带肋连续梁，沿着隧道线路也形成了一个圆柱式构造物，但是它还是不能产生拱部效应，由于在它们之间缺少任何相互作用。

### 6.2.3.1 典型纵横断面组成

在前几段中，我们已经看出，开挖面前方岩盘形成的岩心系的稳定，在对地下工程开挖及接下来的隧道本身长期和短期的稳定中的介质的变形反应中，起着根本的作用。我们也已经看出，这个体系的稳定用三个基本形式类别岩层描述出来，这三种岩层类别，就概念范围而言，刻画出开挖隧道特定部分的类型，同时也看出了，为了保证过程的稳定和安全，采用稳定设计方法涉及到这些岩层种类时是完全合乎逻辑的。

除要考虑到如图30所示的以上出现的问题外，还应考虑对设计工程师而言，在拟议的框架中，可用的单独的稳定工具的适用性范围。这些的集合就决定了需要设计典型的纵横断面以保证开挖的的可行性，及隧道的长短期稳定。涉及到的案例如下：

- 稳定断面的隧道片段（形式类别：A类岩层，应力：在弹性范围内，典型的不稳定症状：岩层塌落），拟议的稳定方法，首先是要有个保护作用，这些方法岩层的地质构造及可能出现

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

---

的水位所决定；

● 短期稳定断面的隧道片段（形式类别：B类岩层，应力：弹性-塑性范围，典型的不稳定症状：由于岩心土挤压、隧洞预收敛和收敛引起的地层破碎），采取的稳定方法必须保证尽可能接近开挖轮廓线以形成拱部效应。因此，拟议的方法是能够用特别的开挖面前方岩心土系，防止岩层失去强度及变形特性。展开的围束或预围束作用能够充分的抵制岩层的塑化反应，或者至少能限制塑化发育。

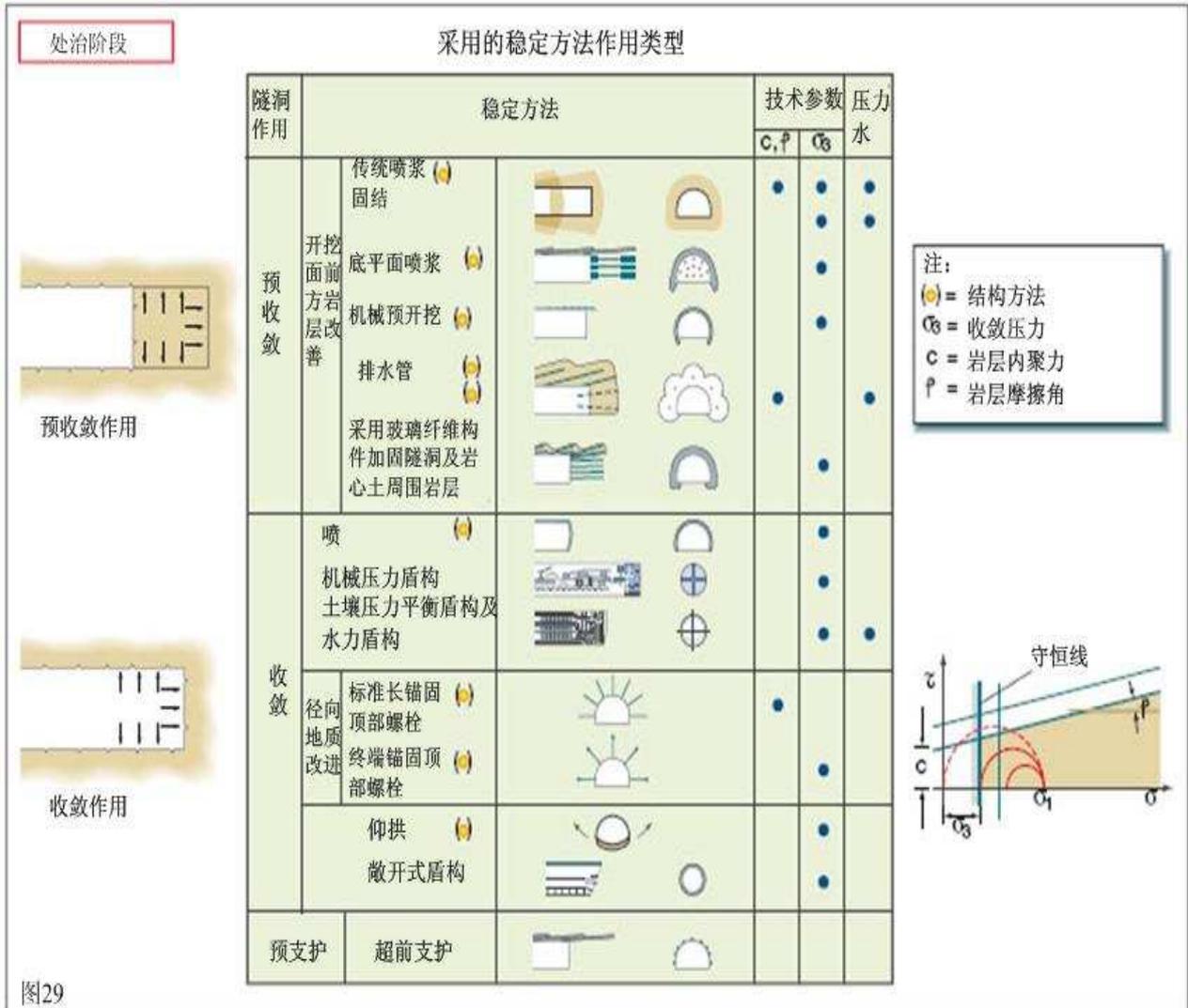
● 不稳定断面的隧道片段（形式类别：C类岩层，应力：破坏范围，典型的不稳定症状：开挖面破裂、隧洞坍塌）。采取的稳定方法必须保证在开挖面前方岩心土中形成人工拱部效应。因此，拟议采用隧洞预围束方法，保证开挖面前方岩盘形成的岩心土系的稳定，当还能够控制变形现象时，防止较小主要应力事实上降低到零。

因此，设计者采用图30 中的表格作为典型纵横断面设计的参考。

C1 型纵横断面组成的例子如图31 所示。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

---

# Rocksoil s.p.A

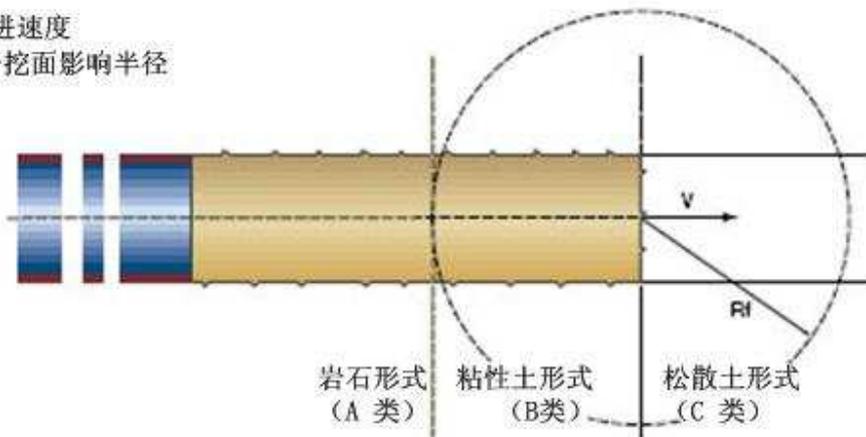
specialists in Geo-engineering since 1979

处治阶段

就横断面类型组成的稳定方法选择

V=掘进速度

Rt=开挖面影响半径



开挖断面		稳定		短期稳定			不稳定							
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>			
径向顶部螺栓		•		•										
喷射混凝土加固		••		•	•		•	•	•	•	•			
用玻璃纤维构件加固岩心土					•			•			•			
用玻璃纤维构件加固隧洞周围的岩层												•		
隧道仰拱				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
机械预开挖						•		•						
导洞径向岩层加固										•				
底平面喷浆								•						
预先注浆或固结														•
排水管		••		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
超前支护		•												
变形现象			厘米		公分									不可接受

\* 用钢筋和 / 或网片和 / 或纤维加固

图30

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

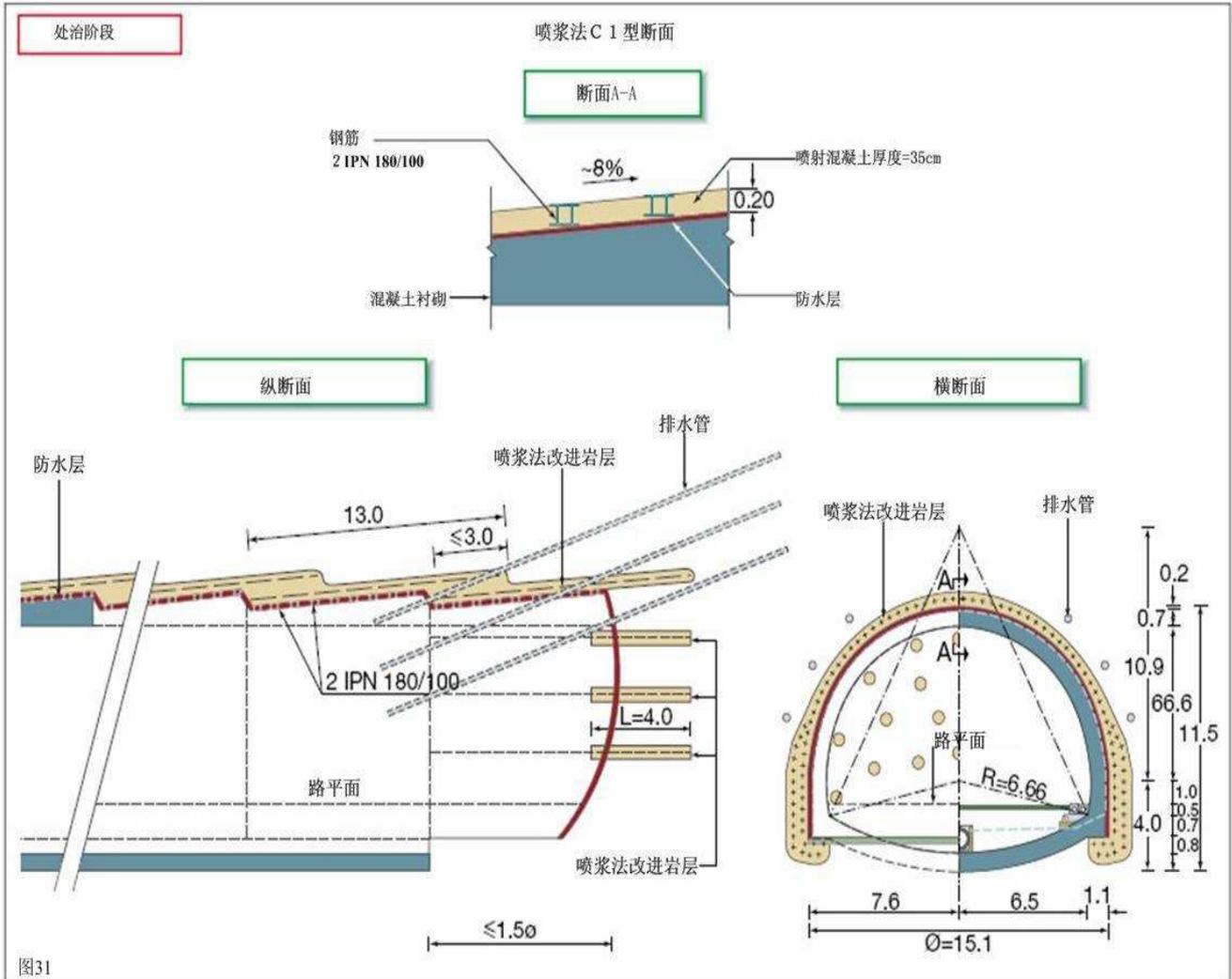
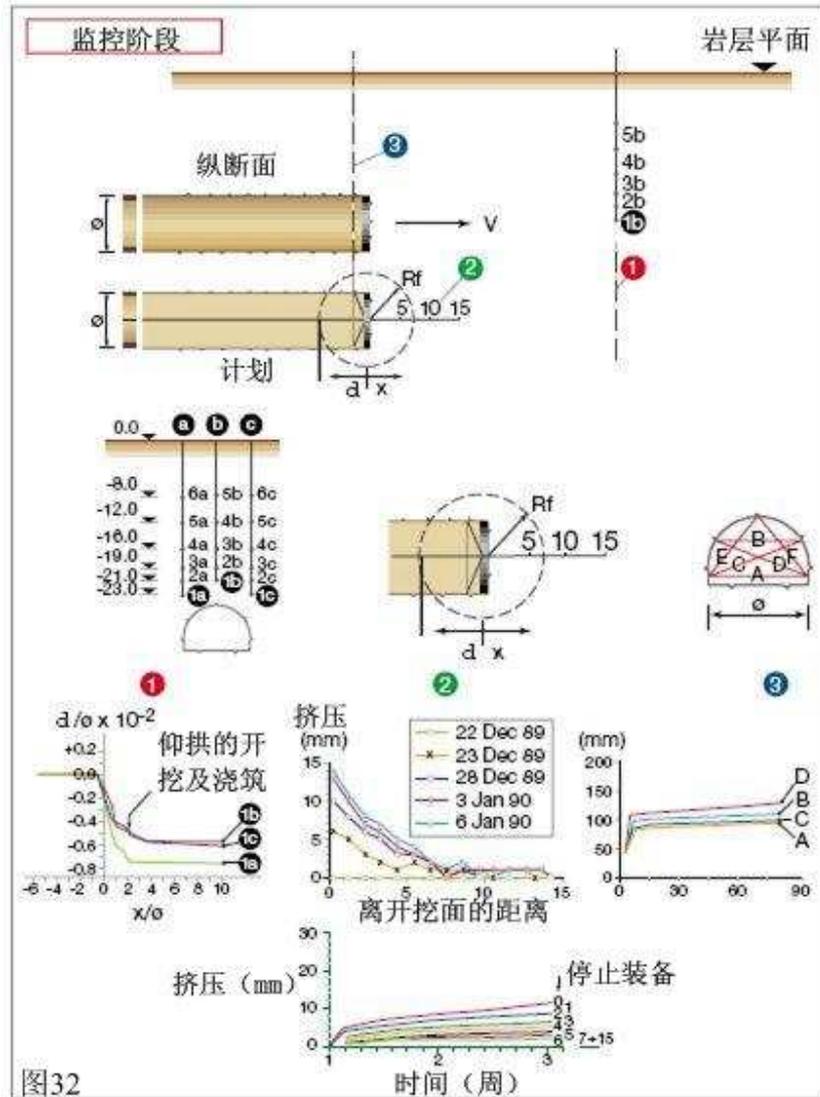


图31

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



### 6.2.3.2 典型纵横断面的设计和分析，及处治阶段概述

决定采取何种做法，何种设计的方法完成工作，及组成典型的纵横断面，设计工程师仍然有这个任务，设置后者尺寸，及采用已经在诊断阶段运用的数学方法分析它们。分析开挖面和开挖周围之间的干扰平衡是特别重要的，就是说一旦执行稳定措施，就应以预测到的隧道应力—

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

应变形式的可接受性为基础，评估它们的有效性。自然而然地，可以进行的计算，依据假定的具体情况下的应力-应变状态，依赖于简单收敛-围束模拟试验，或者说，另一方面，依赖于更为复杂的挤压-围束或挤压-预围束模拟试验。

除了主要的或普遍的断面设计类型外，一些衍生出来的断面类型也可以被设计来用在可能的统计情况中，不过，在那些情况下，不能以可利用的数据精确预测定位。

普遍的和衍生的设计断面在任何情况下明确定义，对于每种类型，不仅种类、强度、阶段及具体的施工作业顺序描述，而且设计断面必须所处的地质和地质力学条件也应明确。

实行衍生而来的设计断面现在准许在建的隧道通过ISO 9000质量保证体系（15）。

处治法研究结果归纳在隧道地质力学剖面图中，以表明在同样的应力-应变情况下对于隧道的每片段，所采取的典型的纵横断面。

## 6.2.3.3 地下水位下的前方岩心土

众所周知，水静力条件下的水流，更有甚者水动力条件下的水流将会极大的降低岩层强度及变形特性。我们也知道，地下水位下的隧道掘进要运用大型排水系统：首先要设置影响前方岩心土开挖面的滤水器。既然我们看到前方岩心土在决定隧道短期和长期稳定上起着关键性作用，防止水流在岩心土里流动就变得重要了。要完成此项工作，依靠涉及到的具体情况而定（所在的地下水位、坡度等），采用对岩心土及隧道墙体（水静力情况下的掘进）进行有系统地排水，或者在即将形成隧道的周围以伞形结构的方式布置特制排水管，截取开挖面前方三倍或更大倍数的隧道直径范围的水流（水动力条件下的掘进）。

在后者条件下，为了保证开挖面前方处理不会对预期的效果产生不好的影响，极其重要的是要尤为关心如何正确的布置排水管。这些排水管不必要从开挖面表层插入岩层。它们在截锥形构造中必须从隧道边墙一直插入到岩层里，或者从开挖面周围，为的是岩心土不至于会交叉分布。如果这种情况不被使用，那么水流就会渗透进前方岩心土，将极坏地影响到它及整个隧道的稳定。为了防止此类情况发生，重要的是确信排水管在最接近隧道末端处的几米内不至于穿孔。

同样地，对于同样的原因，须值得注意的是要保证正确地完成岩层钻孔改进处理，及加固构件插入前方岩心土处理。重要的是要采取一次一个人钻孔及这些孔要立即完全地用水泥砂浆填封。这是唯一的方法能够防止钻孔引水进入孔中毁坏前方岩心土，一旦有水淹入，前方岩心土就不能有效地保持稳定。

## 6.2.4 监控阶段

一旦设计完成，施工就开始进行，且同监控同时进行，目的是检测在诊断及处治阶段预测的就应力-应变情况下的稳定性。

监控（采取总设计作为这些预测的基础的重要性）是通过监测和检测介质对开挖的真正反应来实现的。反应以变形现象的形式表现出来：

- 在隧洞内部，开挖面处及开挖墙体上；

- 沿着隧道线路的表层上。

为此，在开挖面前方、开挖面处及后方，安装合适的监测站，如图32。

事实上，当预测到隧道掘进会出现在短期稳定或不稳定断面情况下时，当隧道极限荷载允许时，特别有兴趣地且可取地，对开挖面达到前的特定的横断面安装多基地垂直仪器，以检测先于开挖面到达的径向变形（预围束）。

对于开挖面前方岩心土系，采用纵向滑动测微计测取挤压值，及采用多基地径向杆变形测定器测取在岩体内部，隧洞表层及其在不同距离处的收敛值。采用特制的带式变形测定器检测开挖面后方周边收敛值。

监测得越系统、越彻底，对设计工程师来说，取得的信息就越可靠、越有用，设计工程师的工作据变形现象发育的范围，或多或少会变得复杂起来。

如果隧道掘进分别发生A类岩石型或C类松散土型的介质中，在此介质中，预报的变形是如此的微弱就不必引起任何担心（处于低度至中度荷载下的石质岩层情况），或者是如此难以接受的强烈，需要预围束干扰（任何荷载下的非粘性土岩层，在重荷载下的粘土和石质岩层情况），监控的重要性就会降低，因为变形现象发育得很快，在实体中受到限制。为此，一旦做出合适的决定对真正的情况有了充足的控制，设计工程师的工作就变得更容易了。

然而，另一方面，设计工程师必须更加注意和留心的是，分析开挖面前方岩心土系及其较远处的隧洞表层和岩层内部的收敛变形。紧接着，当掘进在B类粘性土岩层介质中进行时，变形就会随着时间和空间的推移而发育。

在这种情况下，变形现象将会慢慢的、逐步的、递延的发育，它也是一个不停增加的实体，设计工程师通过连续的监测结果解释，就会得到所需要的信息，借此一方面使开挖面和隧洞之间的干扰的强度和分布最优化，另一方面校核阶段、速度和开挖体系。

为此，不能只过多的强调监测结果的正确解释是如何的重要，因为施工过程中的开挖设计的细节调整也依赖于这些结果的正确解释。

施工中，监测结果将会引导设计工程师和工程主任决定是否继续规范设计断面类型，或者是否修正工程量（依据设计中规范的标准），采取衍生而来的在设计规范中可准许用在具体考虑到的隧道断面的断面设计类型，或者继续进行在测量阶段没有觉察到的及在设计中没有提到的，在特殊的情况下运用的新型断面设计类型的设计。

也需重点指出的是，监控阶段在隧道完工时不仅没有停止，而且相反的是，此阶段必须进行系统监测，其目的是保证隧道在整个服务寿命期间的安全。

## 7. 结论

如果在隧道掘进过程中，正常的观察到隧道内发生变形现象，就要对其起因和结果做出判断和解释，似乎就会合乎情理地明确对介质起作用的原因，及由此作用引起的介质变形反应结果。

# Rocksoil s.p.A

## specialists in Geo-engineering since 1979

当以此假定为基础的原因直到几年前才值得人们注意和深入研究，及保持仅有的明确决定时，其结果立即被明确作为隧洞收敛，在图33中有所研究。这些研究产生了理论和设计方法及施工体系，它们假定能通过简单的围束作用解决与隧道施工有关的所有问题。见图34。

在前面所述当中，由伦巴第提出的“特征线理论”及由帕勒特提出的“收敛-围束方法”〔4〕、〔5〕很快被大家所熟悉。虽然他们首先提及到岩心土在隧道稳定方面起着有利的作用，但是，在如何发掘它的作用及如何处理开挖面的不稳定性方面，他们没有提出任何有效的建议。

在后面所述中，像新奥法是以地质力学分类为基础（通常用于其他用途，比起有意用途来），当采用这些方法时，毫无疑问在当时就过去而言，也是一种相当大的进步。新奥法有如下主要优点：

- 首先将岩层考虑为施工材料；
- 采用简单积极的隧洞围束新技术，诸如喷射混凝土及顶部螺栓处理；
- 强调系统监测及解释岩体变形反应。

然而，今天，单独地将隧道静力学问题考虑成两维问题，将注意力单独地集中在隧洞收敛问题上，源于它的所有方法显示出了以下的重要限制：

- 它是不完整的局部的分类系统，因为它不适合用于任何类型的岩层和任何应力-应变条件；
- 它完全忽视了前方岩心土的重要性，也忽视了在不同应力—应变条件下采用前方岩心土作为稳定工具的需要；
- 它也忽视了新技术，即继续单独拟以简单的围束技术稳定隧道；
- 它没有能够在隧道设计和施工阶段之间提出明显的区别；

很愉快地将地质力学种类与岩层变形反应相比较，它也解决了监测设计解决方法的充足的和正确的尺寸问题，设计解决方法是在毫无争辩的非科学的意义上采取的。

误信在隧道开挖过程中，介质作用效果在隧洞收敛过程中是可以明确定义的，误导工程师沿着错误的线路行进。在那时流行的设计和施工方法所领悟出的知识（新奥法和衍生方法，据这种误信，现在还起着作用），引导他们集中精力处理这些影响作用（采用简单围束作用控制隧洞收敛），而不关注隧道不稳定因素〔16〕、〔17〕。

这种方法（新奥法）在处理低度至中度困难应力—强度条件下隧道开挖是成功的，但面对恶劣的地层，这种方法（新奥法）体现出它的限制，因为：

1. 在设计过程中缺少诊断的情况下，不可能在隧道掘进中对形式作出可靠的预报；
2. 需改进措施以围束预先没有预报到的变形；
3. 缺少能够处理不稳定（岩心土变形）因素的有效的稳定体系及作用效果（收敛）；
4. 就预测的风险、进度及掘进速度而言，不能做出工程的初始评估，

在假定的情况下，日益增长的需要各种类型隧道，包括处于极度应力-应变情况下的隧道类型，这就迫切地要求指定这样的理论和程序，在各种可能的应力-应变条件下控制介质的变形反

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

应，而不仅仅是在不困难的条件下。

为了摆脱这种失速状态，就需要这个问题带回现实中，把它看作是一个三维问题，要有效地考虑到隧道掘进过程中的整体动力学，而不是掘进过程的最后阶段。

理论和实验研究哲理为岩土变形控制分析法（ADEC0-RS工法）提供了基础。这种工法也成功地在极为宽广的岩层类型及应力-应变条件的范围内，运用了10-15年，包括在最为困难的条件下，这种工法用来解决众多极为困难条件下的问题（见背面的表1），在低度困难条件下运用传统的方法（新奥法及衍生方法）并没有显示出它的限制或内在缺陷，但是在处理极度困难条件下的地层时，新奥法及衍生法就会令人失望，甚至时常会带来灾难性的结果。

在这方面，也许很重要地想到，发生在法国的新建马赛至里昂高速铁路中的Tartaiguille隧道事件。

具有180平方米大的隧道横断面掘进开始于1996年2月，根据新奥法施工，隧道掘进速度继续变化加大直到同年9月，这时遭遇了重大的“argile du Stampien”形式膨胀事故（75%高岭石），如此困难的增加实际上致使工作停滞下来。为了解决这个问题，在1997年初期，法国国营铁路公司组建了一支由工程师组成的研究小组（“Comite de Pilotage”），这些工程师分别是来自法国铁路公司的工程师，G. I. E. Tartaiguille 联营体的工程师，咨询工程师Coyne et Bellier 和CETU，来自Terrasol 和Simecsol 联营体的咨询岩土工程师。这组工程师轮流咨询

欧洲主要的隧道专家，邀请他们拿出一套设计方案以按时地安全穿越粘性土地层。

检查了几个建议后，这几个建议中没有哪一个能保证当事人的要求的安全性和可靠性，首先关于竣工时间，吸引法国国营铁路公司的是由他们自己提出的建议，即含有假定的建设时间和费用的基础上保证类似事件圆满解决。在1997年3月，岩土公司(ROCKSOIL S. p. A)被授予合同以完成该隧道860米的具体设计。

根据“新意法”原则，在大幅度的修改设计后，在1997年7月重新开始隧道掘进（全断面隧道掘进，见图片4），在毫无干扰情况下隧道掘进最终能继续进行，因为这种工法在现场施工中不断地取得成功，所以操作者们逐渐地得到了运用这种技术的信心。异常守恒平均掘进速度被记录下来，见图35，这个速度比被咨询工程师保证的每天掘进1.4米的速度还要高，因为采用了新工法该隧道仅在一年后的1998年7月竣工，比预定的工期还提前了一个月（18），（19），（20）。

根据过去十余年取得的相当多的经验，可以满怀信心地说，对于隧道设计和施工采用“新意法”，将会单独地产生岩层掘进的，及偶然应力-应变条件的实际线形掘进速度。因此，虽然一度只能谈有条件下的机械化施工，能够用简单的隧洞或开挖面围束方法（盾构，TBMs）进行处理，但是现在谈的机械化施工，甚至在更为复杂困难条件下，也能用预围束方法进行处理。隧道开挖最终会独立地被工业化（守恒掘进速度，工期和费用的精确预测），就涉及到的岩层类型及极限荷载尺寸而言。

总结，充分利用最新知识，计算能力和掘进技术（见图36），“新意法”引导设计和施工工程师，将隧道按三种基本形式类别分类。要做到这一点，请参考开挖面前方岩心土系的稳定，理论上采用数学工具，深入分析应力-应变情况以预测岩心土系的稳定性。对于在同一变形形式下的每个断面，设计工程师决定采用何种作用类型（预围束或简单围束）以控制变形，为此，

# Rocksoil s.p.A

## specialists in Geo-engineering since 1979

选择最适于每个特定情况下的稳定技术类型，及隧道纵横断面类型，通过采用合适的手段开展必要的作用行为。隧道断面类型可用于各种类型的岩层，及各种应力-应变条件。各种情形下的费用和工期（每延长米计）即可自动计算出来。

采用如下方法：

- 注重稳定技术是必可少的控制和调节变形的的方法，也是为了隧道最后稳定的“结构单元”（就隧道看来，关注的是变形量的多少）。在这方面，值得注意的是，在地下工程收入报表显示的成本费用方面，稳定和岩层改进工作，在开挖中发生大幅度变化，而且极易使各种岩层保持平衡，见图37；

- 随着完整、可靠的设计，促使主要承包商在各种类型岩层、甚至最困难条件下，使隧道掘进作业工业化；

- 假如有能力计划施工工期和成本费用，最近在工程监督和承包商之间引起的纠纷就会避免；

- 对各种类型岩层（开挖面前方岩心土系的应力-应变形式），采用单个和共同参考值，在隧道掘进中可以轻易和客观地监测，在先前分类制度中出现的最明显、最清楚的缺陷问题（将地质力学类别同岩层变形反应相比较），直到今天还引起工程监督和承包商之间纠纷的这个问题才被解决。

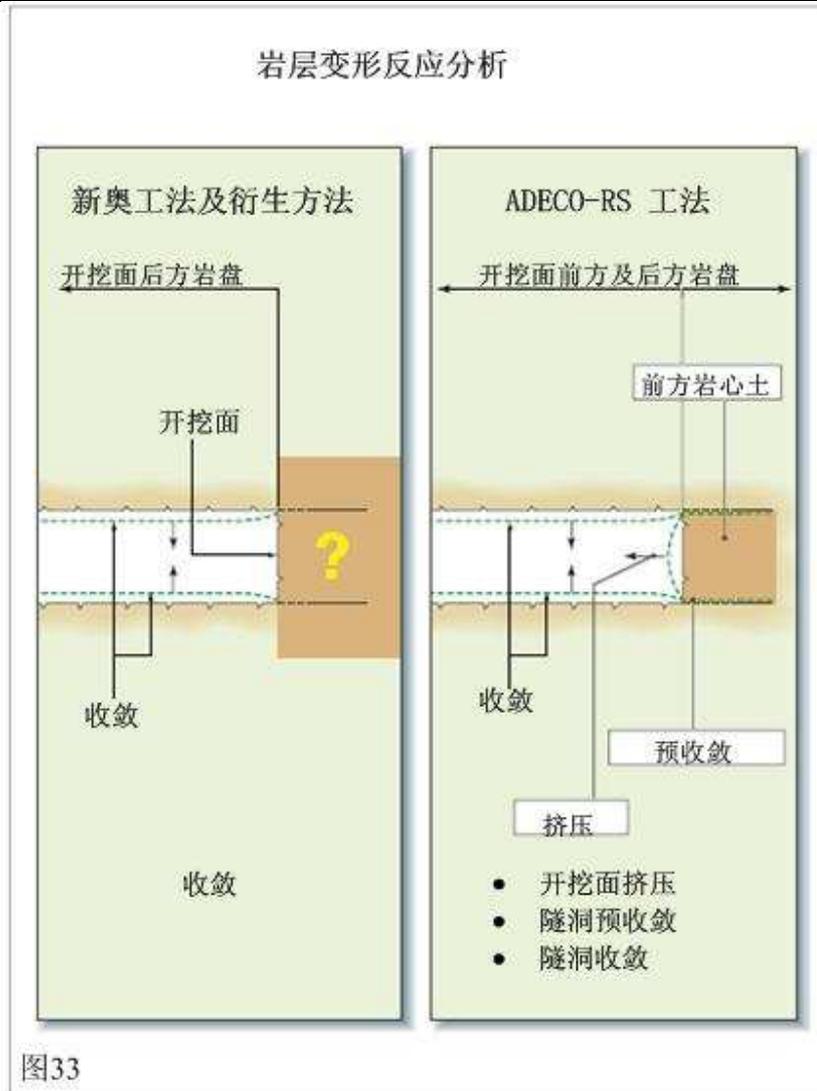
由于这些重要特征，“新意法”引起了相当大的兴趣，迅速确立了相比以前工法而言的优势。在这方面，决定用这种工法制定用于合同授予的设计规范，以及尤为重要地制定了新建

博洛尼亚至佛罗伦萨高速铁路项目的施工设计。此刻，采用这种工法修建了世界上最大的隧道工程：全长90 千米、横断面140 平方米、由于多变的恶劣的地质特性有84.5 千米穿越了极其困难的岩层。尽管条件困难，还是以“整套承包”为基础授予工程合同，因此，承包商要能明显地感觉到设计是足够的完整和可靠的，以能接受含地质风险在内的所有风险。现在，从1998年7月开始的有30%的工程是通过完全的全断面开挖完成的，（见图片5），同时其中有32个断面的平均掘进速度达到每月1600米，〔21〕〔22〕。

隧道设计和施工艺术也许失去了一些迷人的魅力，但是没有限制住想象力，从使用效率和用途中，得到了“新意法”的原理。

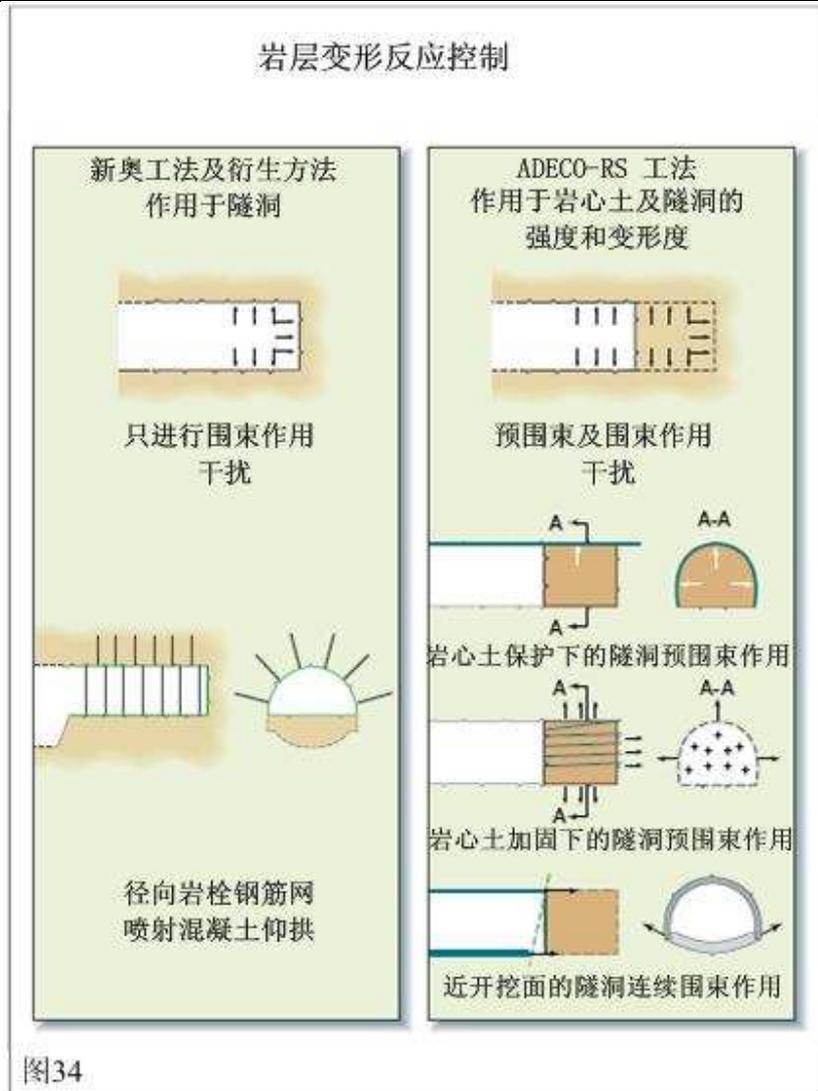
# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



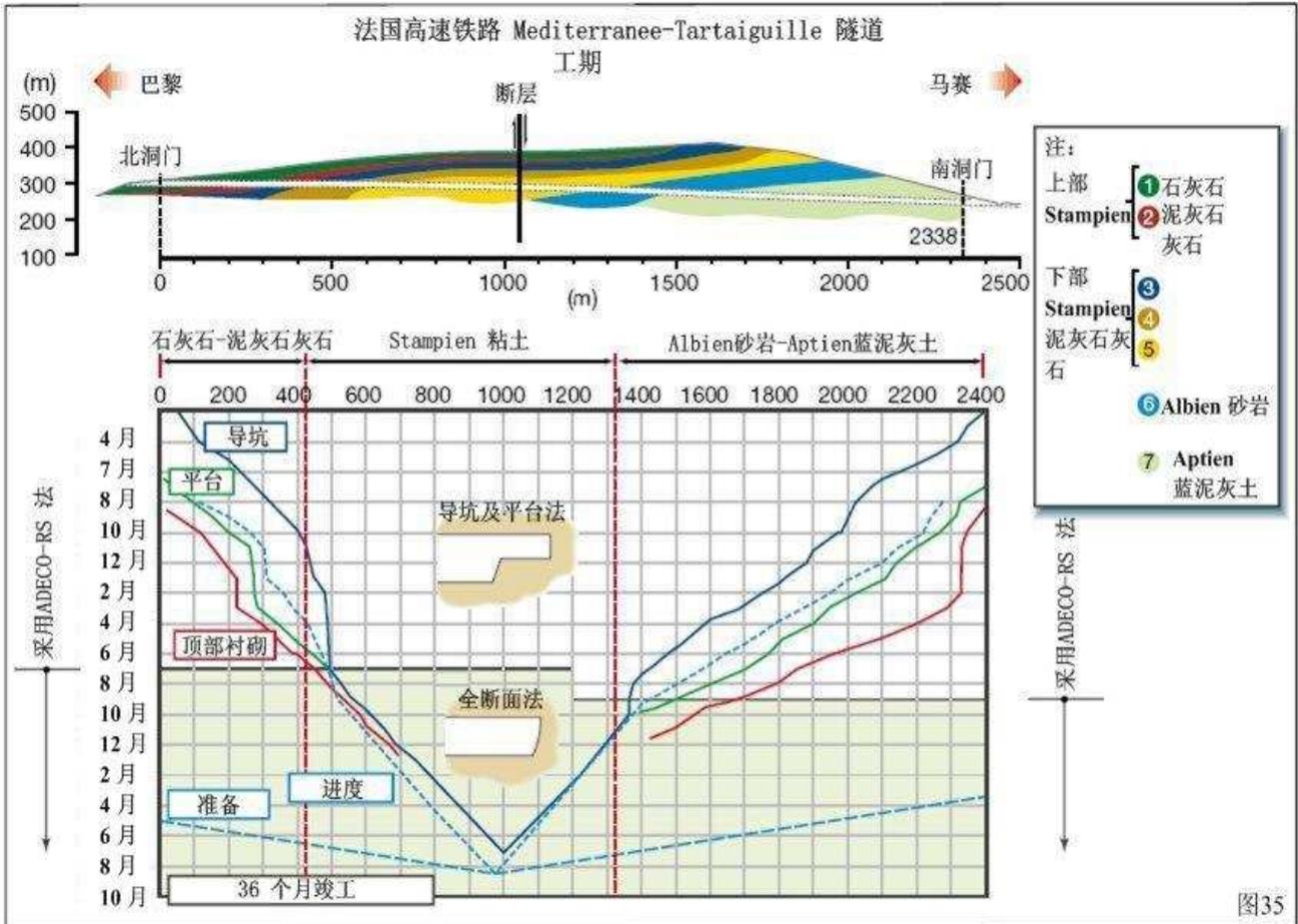
# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



# Rocksoil s.p.A

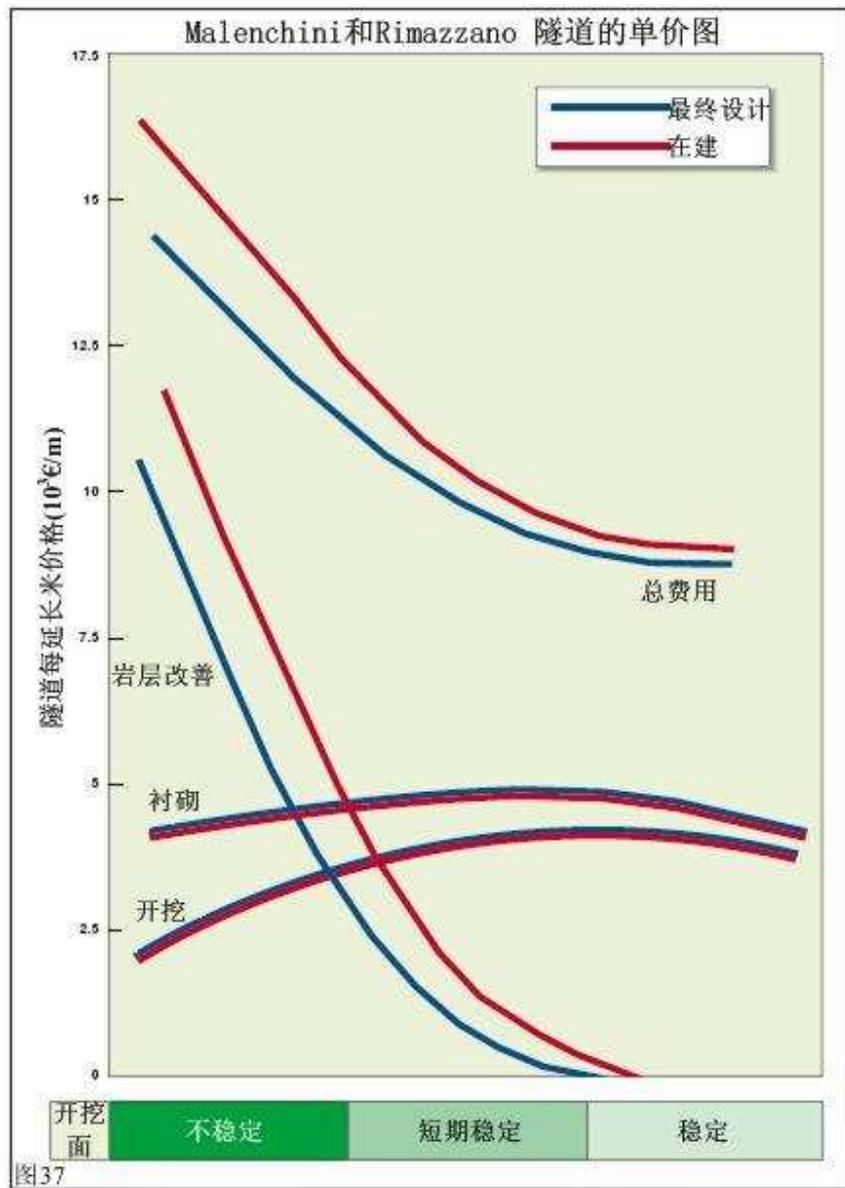
specialists in Geo-engineering since 1979



图36

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979



# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

---



图片4: Tartaignille 隧道 (法国马赛至里昂高速铁路 Mediterranee, 岩层: 膨胀性粘土 (75%的高岭石), 覆盖层: 100米, 隧道直径: 15 米)。采用玻璃纤维构件加固开挖面 (180m<sup>2</sup>)。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

---



图片5: Pianoro 隧道（意大利博洛尼亚至佛罗伦萨高速铁路，岩层：胶结泥砂土，覆盖层：150 米，隧道直径：13.30米）。采用玻璃纤维构件加固开挖面。

# Rocksoil s.p.A

specialists in Geo-engineering since 1979

表格1 运用“新意法”所述的设计和施工标准，致使我们能够取得相当大的成功，即使是用其它方法不可能解决的困难隧道的开挖。一些以上涉及到的隧道列表如下：

隧道名称	修建年份	长度（米）	岩层类型	最大覆盖埋深（米）	掘进速度（米/天） 平均值÷最大值
“Tasso”（佛罗伦萨至Arezzo 铁路）	1988	1220	砂质土	50	2.0÷3.2
“Targia”（Bicocca至锡拉库扎铁路）	1989	1200	玄武碎屑岩	50	2.0÷3.3
“San Vitale”（Caserta至Foggia铁路）	1991	1250	鳞状粘土	100	1.6÷2.4
“Vasto”（安科纳至巴里铁路）	1993	1220	粉质粘土及 粘质粉土	135	1.6÷2.6
“Tartaiguille”（马赛至里昂高速铁路Mediterranee）	1996	15	膨胀性粘土	110	1.4÷1.9
“Appia Antica”（罗马外环高速公路）	1999	2065	砂质砾石	18	2.3+3.3