

专题情报资料

隧75—01

总 32号

考虑岩石—支撑相互作用的 隧道支撑结构的分析

铁道部科学研究院西南研究所

一九七五年三月 峨眉

目 录

摘 要	1
引 言	1
隧道支撑结构的理想化	4
隧道支撑	5
成排的钢肋支撑	8
拼装砌块衬砌	10
岩 体	10
主 系 统	20
主动荷载的应用	26
分析 方 法	27
数 值 结 果	30
例 1	30
例 2	42
摘要和小 结	48
参 考 文 献	49
附 录 A. —— 弹性埋入圆形隧道支撑的承载和应力系数	51
附 录 B. —— 符号表	63
用有限单元法计算各向异性岩层的变位和应力	65
文 献	84

摘 要

美国矿务局用矩阵分析方法研究了支撑与岩石相互作用原理。这种方法有利于将这个问题列成数学式手用电子计算机计算。

该原理是由本文的两个主要部分说明的。前面，为了矩阵分析的需要，讨论了隧道支撑结构系统的理想化；然后为了求解，讨论了必需的分析方法。为了进行所提出的分析，必需准备好一个普通的刚架矩阵计算程序如一台中等型号计算机。

所举例题是一个受垂直分布荷载的圆形隧道支撑。研究了三种厚度与半径比，与四种支撑和岩石模量比的组合。该题阐明分析支撑——岩石相互作用所用的主要方法，并对结果进行了考查，揭露出支撑和岩石的相对刚度对结果的影响。

引 言

由于要把支撑和岩石间的相互作用考虑进去是困难的，使隧道支撑的应力计算复杂化了。支撑应力是由作用（主动）荷载和相互作用（被动）荷载联合产生的。主动荷载包括岩石压力、静水压力、动水压力、支撑的自重等等，被动荷载是由于主动荷载迫使隧道支撑压紧其相邻的岩体而产生的，被动荷载的大小和分布取决于支撑——岩石的相互作用，并且是支撑和岩石两者结构性质以及存在于支撑与岩石分界面间联接的函数。在支撑下面的岩石基础反作用力也是相互

作用的一部分。本报告介绍了对于上述情况的支撑应力计算的一个合理方法。

这一课题由矿务局研究分块崩落开采法时给以推动，研究了因挖矿而影响矿区内岩石和混凝土隧道衬砌的地层压力、变形和应变。由于对用以说明这些记录关系的数学模型，规定适当的边界条件时遇到困难，推动了对支撑——岩石相互作用的研究。在这个报告里，采用了结构矩阵理论(7—8)。

支撑和基础(围岩)具有相互作用的事实，已多次为人们所注意，对这一主题已进行了大量研究，特别是泥土浅埋的地下结构(管道、水管、涵洞、薄壳构造；地下室等)。奥尔古德(Allgood)⁽¹⁾研究了土壤模量对圆筒动态的影响，布朗(Brown)⁽²⁻³⁾得出作用在刚性和柔性涵洞上的力的分佈和大小。布尔森(Bulson)⁽⁴⁾确定了埋管上土壤压力的分佈。科普(Corn)⁽⁵⁾讨论了用柔性衬砌作地层支撑时双端支撑——岩石相互作用的一些优点。

塞歇(Szechy)⁽¹⁰⁾ 在论述弹性地埋置在土层内的圆形支撑时，阐明了设计隧道支撑时支撑——岩石相互作用的重要性。因为岩石的横向约束力的大小对支撑墙的弯矩具有重大的影响。

在这里论述支撑^与岩石相互作用的意图是使问题一般化，以作大多数型式的隧道支撑和隧道支撑系统的结构特征，能按本计算^{方法}，高效率的在计算机上进行。

应用结构矩阵法是达此目标的有效手段。第一，因为电子计算机的高速度，问题的大小不受限制，第二，既然任何类型的结构杆件（梁、板、连杆等）组合的，或是任何种组成的任一弹性体，都可以用一系列方程式来代表，那么结构问题的复杂性实际上就不再是一个限制因素了。

在这个报告里，隧道支撑体系按三种相互机械作用来考虑：支撑与岩石的联系和围绕着支撑的岩体。上述三项的结构特性可彼此独立地给予理想化，然后，可根据它们的相互作用确定整个系统的结构性质。

支撑结构可以是成排的（钢筋支撑）或（联接的）衬砌。它的构造可以是连续的或分段的。它的组件是由梁、柱、拱或是它们的适当的组合构件所组成。支撑的联接点可以是刚结或铰结。

支撑与围岩周边的^联系可以是连续的或不连续的。在联系点上可能有几种传递力的形式：即只传递法向力、或只传递剪力、或既传递法向力又传递剪力（例如在刚性触地段）。

岩体变形特性直接与其弹性性质的大小和分布有关。这些特性可能包括：各向同性的材料性质， E 和 ν 或代表岩体更复杂的材料性质（如同质的各向异性、成层各向异性等）

由于主动荷载而引起的支撑—岩石的相互作用，可按下列的方法确定。首先将支撑、支撑—岩石联系和岩石所组成的结构绘成理想化的模型。其次，确定由主动荷载直接作用在支撑上

的变形。支撑变形所勾画的轮廓就是支撑和岩石间的互相作用区域。这个可用下列步骤求取：第一次分析，从没有相互作用的区域拿掉联系支撑和岩石间的单元，然后再进行第二次分析，经过检查，从没有相互作用的新区域拿掉联系单元，假如单元在上一次被拿掉的地方，这一次又出现相互作用，则再加上联系单元，反复以上程序，直至联系单元正好都放在相互作用的地方，在没有相互作用的地方全部拿掉为止。从这个分析里，可求取作用在支撑上的力及其分布。

隧道支撑结构系统的理想化

为了矩阵分析，一个真实结构的理想化，是将结构看成为一个离散单元的集合体其中每一离散单元都有已知的荷载——变形关系。这个方法详细讨论，已由普柴维斯基 (Przemienicki) (17) 给出。这里，意欲讨论的是，在模拟隧道支撑系统的三种基本机械作用即支撑、支撑与岩体的联系，岩体的本身中可采用何种通用类型的离散单元。用梁单元和轴力单元，模拟支撑的结构性质，用轴力单元和剪力单元模拟联系，用板单元模拟岩体。

梁单元可以是直线的或曲线的单元，它的力学性质是由弹性梁理论确定，通过该单元可传递弯矩、剪力和推力。轴力单元是直线单元，它的力学性质如同弹簧相似，剪力单元是线单元，它只传递法向于轴线的剪力。

板单元、是三角形单元或梯形单元、它的力学性质可按微小变形的弹性理论求得。

一般说来，分析刚架结构的矩阵分析计算机程序内都包括了上述那些单元。如果未能包括，可按普茨维尼基或其他人的方法，加到那些程序内。图1绘出，上述各单元的图例。将在这个报告的其他部分里，分别说明其用法。

隧道支撑

这里所提供的矩阵方法可用于分析任何形状的、任何材料的（只要是线弹性）、任何类型的（成排的钢肋支撑或衬砌）和任何构造形式的（连续的或分段拼装的断面）支撑。

为了阐明支撑的理想化，我们考虑了两种型式的隧道支撑（见图2 a, b）；成排带有仰拱的连续钢肋支撑（图2 b）和拼装混凝土块衬砌（图2 c）。这种方法的普遍性可以用下列的事实来说明，两种支撑系统虽然在马蹄形上基本是相同的，但在支撑类型上（成排的钢肋支撑对衬砌），构造形式上（连续的对拼装的）；材料上（钢肋对混凝土）和构件的结构特性上（梁对抗压构件）均不相同。

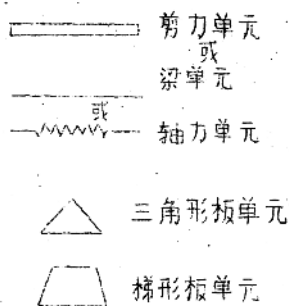
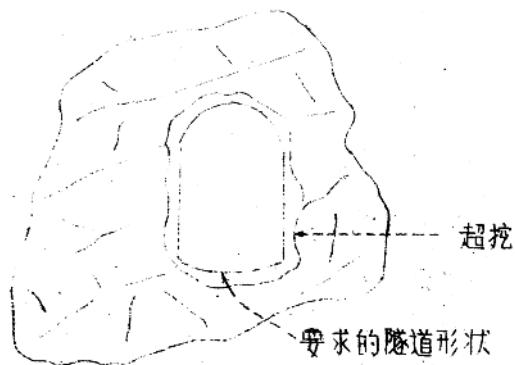


图1 结构单元图例

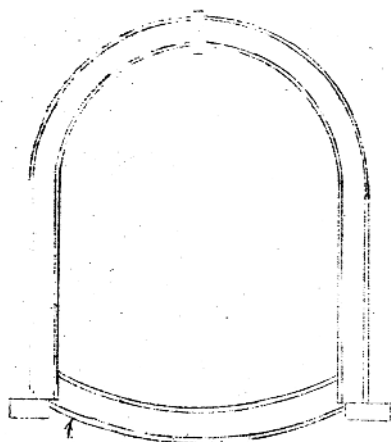
钢肋支撑能传递弯矩、剪力和推力，因此应该用梁单元，拼装块状衬砌，由于它是分段构造不能传递弯矩和剪力，只能传递轴向压力，因此应当用轴力单元。在确定单元数目方面，不管那种支撑都根据以下条件考虑：(1)按勾画几何轮廓线确定所需数目 (2)按求分解外荷载所需的数目 (3)按构件定义所需数目 (4)按单元定义所需数目。

由于在不同的^结构问题中，各个项目有不同的主要性，因此应用上面所列条件时，没有规定那一条要首先考虑。一个较复杂结构形状显然比一个简单形状的结构需要更多的单元。同理，当外荷载分佈可以分解成为静定的当量节点荷载时，增加节点数可提高精确性。当结构的构件沿其长度方面是变截面时，比一个等截面的构件需要更多的单元数（按单元定义）。最后，倘若在某桌上的力是不连续的，为了确定这种构件间的联接点（按构件定义）就需要用节点。（nodal points）来表示。

图2 b所示的钢肋支撑，在其顶部有一联结用以联接支撑的二个垂直的柱式构件。假若联结是刚性的，力是连续的，按构件的定义不需设为一个节点。另一方面，如联结^是铰结，如前可知，不能传递转动动力，即需要设一个节点，以适应构件间不连续的力。

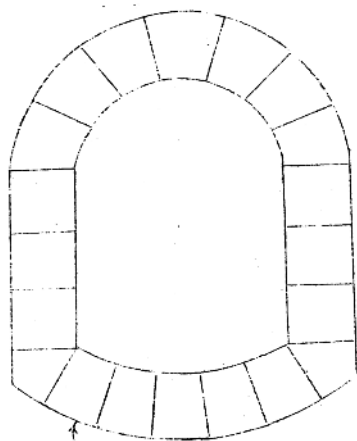


(a)



带仰拱的连续钢肋支撑

(b)



分段拼装砌块

(c)

图2 隧道开挖和两种支撑形式

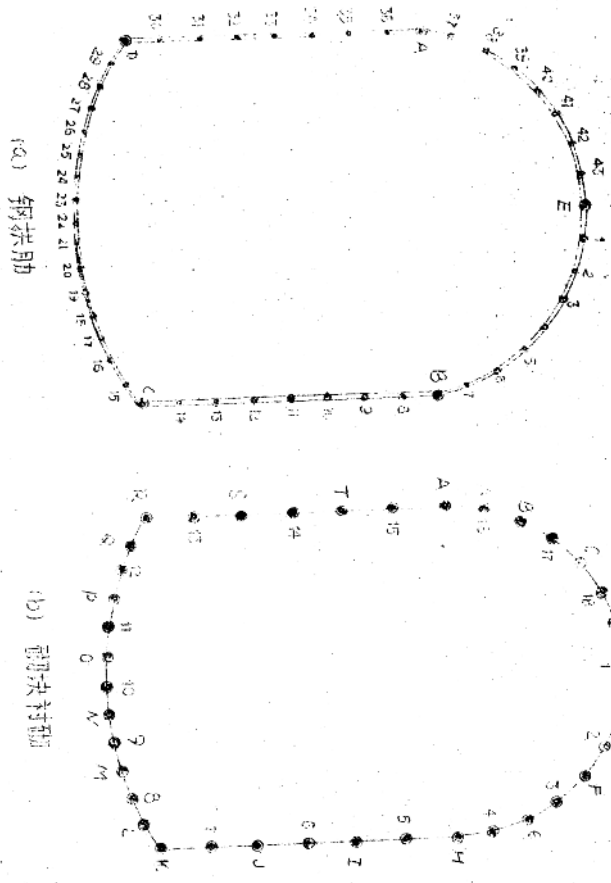
成排的钢肋支撑

用四个梁单元就足以画出钢肋支撑结构的几何轮廓。从A到B和从C到D(图3a),需要用二个曲梁单元(每段一个)从A到D和从B到C,两段都需要用直线梁单元。另外,也可以用一些直线梁单元以模拟两个曲线形状以代替两个曲线梁单元。

因为钢肋支撑由三个构件所组成,确定这些构件间的联接时需要用三个节点。点C和D是勾绘结构几何轮廓线所需要三点。另一点E位于支撑的顶点,这三个点都假设为铰接。因为钢肋具有等截面和同一弹性性质,故单元定义,不需要另加节点。至此,按支撑的几何轮廓、构件的定义和单元定义,有五个节点是足够了。由于外荷载分解的需要,还需考虑附加节点。一般说来,对于很不规则分布荷载,必需得有数目较多的附加节点。本例里,规定了点号1—43为附加节点。

刚性联接

简单联接



(a) 钢拱肋

(b) 衬砌衬砌

图 3 理想化的钢拱肋和衬砌衬砌

为了对作用在钢肋支撑上的外荷载，进行分解而提供附加节点时，必须记住，在实际上，外部岩石荷载传递到支撑，是通过沿周边一系列间隔布置的楔塞，为此通常是用木楔块打进岩石和钢肋之间的空隙。因此，在这种情况下的理想化，就仅选沿着支撑周围的节点作为楔塞点；其余部分，则不受外荷载作用。

拼装砌块衬砌

拼装砌块衬砌的理想化与钢肋支撑的理想化有区别。这种衬砌，由20个只能传递轴向力的砌块（图2C）拼装。在这种情况下下的联结是铰接的。

采用11个节点（A到T，图3b）以限定支撑的构件。另加一些节点（1到18）使之符合结构的几何形状，且有助于外荷载的分解。

为了隧道衬砌的理想化，在已选定几何形状和所需要的结构单元后，为了完善该理想化还需进一步说明结构单元的有关结构性质。如对轴力构件来说，要指出横断面积和弹性模量。

岩体

岩体起到像能给以约束力的基础一样的作用，包围在隧道支撑的周围。传递到基础上的主动荷载分佈与岩体的刚性有关，另一方面，刚性又可衡量作用荷载所产生的岩石反作用。这个反作用的大小决定作用支撑上的荷载的力学性质、几何形状和荷载的

类型(均布、集中等)。

岩体的理想化按二种形式放置。一种形式是包括隧道在内的岩体的有限单元模型,另一种形式是由弹簧组成的结构模型,这种弹簧是与分析弹性基础梁用的温克勒式(Winkler-type)基础相类似,建立岩体模型应该考虑到支撑的形式,是成排的钢肋支撑还是连续的衬砌,因为成排的钢肋对于岩体是产生集中线荷载的反作用,显然是不同于连续衬砌对岩体产生均布荷载(沿隧道轴)的反作用。

图4表示一座在弹性均质岩体中隧道的一种可能的理想化。这种模型是沿着隧道周围,由三角形或四边形单元联结起来形成一连续体,模型的弹性性质是基于岩体的杨氏弹性模量和岩体应变单元的泊桑比;有限元的荷载—变形关系,是基于平面应变分析。按理想模型的最大尺寸应当远大于隧道的最大尺寸。按圣文南屈理(Saint-Venant's Principle)将模型的边界设在隧道最大尺寸六倍处,可获得岩体的弹性反作用的良好近似。图4中,沿断面A—A的边界就是在六倍于隧道半径处。

断面A—A是足尺模型的边界

断面B—B是简化模型的边界

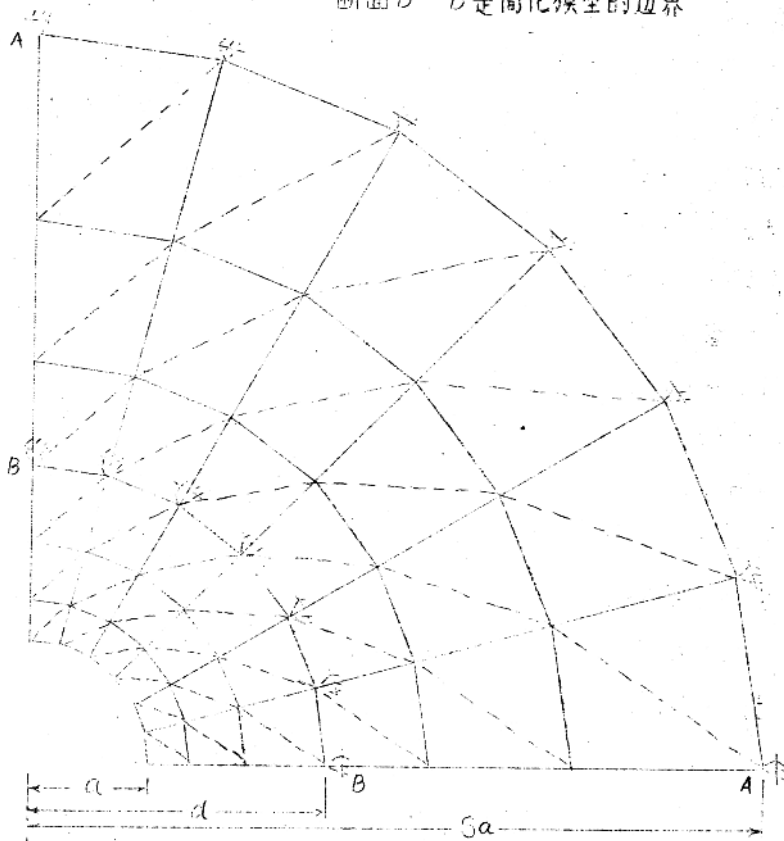


图4 弹性均质材料的岩体理想化

假设岩体具有不规则的力学性质，这些性质可以拆取给一些有限元给定适当固有性质关系以取得近似的结果。图5显示成层各向异性岩体的一种可能的理想化。每一层以层理面分开，并且弹性模量 E_1 和 E_2 的大小可不相同。对于处理不规则的岩体，这个例子指示其理想化是可能的。

注：A、B、C、D、E、F和G ~ 层理面

每一层的 E_1 和 E_2 具有不同的量

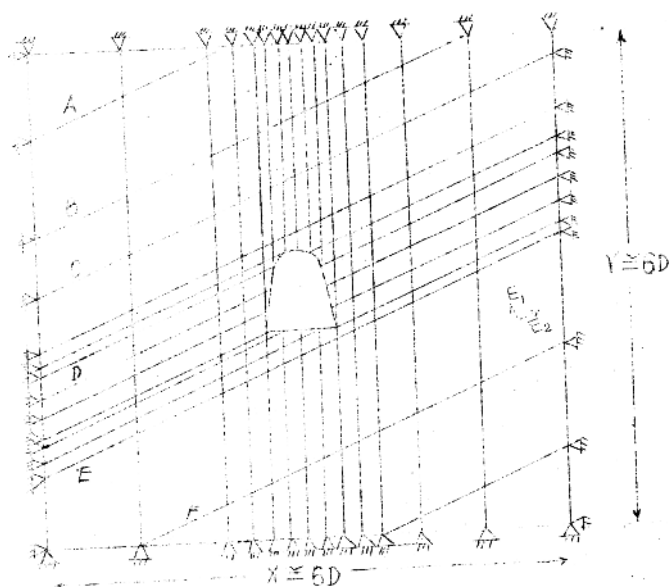


图5 具有成层各向异性的岩体理想化

为了对岩体的弹性反作用的进行理想化，上述方法是足够的。但是对多数支撑——岩石相互作用的问题，就涉及到建立的模型比起所需的模型来是大大太贵一些，由于这个理由，也许选用一个较简单的但欠精确的模型还恰当一些。

一个可能较简单的模型是一个把边界固定在比位倍隧道最大尺寸(高或宽)小得多之处的模型。这样，由几何尺寸的改变引起的刚性变化，可适当地调整模型的弹性^性来弥补。图4中沿B—B断面固定边界的模型就是这样的简化模型。这个模型的有效弹性模量可以用(1)作用在均匀介质圆形隧道上的均布内压力以及(2)作用在固定在它的外部边界处厚圆筒上的均布压力等的压力变形比 P/u 列出方程式近似地求得。这些关系式是现成的，可从铁木生可(TimoShenko)(11)作的参考资料得到。得有效弹性模量的结果如下：

$$E^* = \frac{\beta^2}{\beta^2 + 1} \cdot \frac{E}{1 + \nu}, \quad (1)$$

相关的有效泊松比(Poisson's Ratio)

$$\text{其中} \quad \nu^* = 0, \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad \beta = a/a$$

在本报告以后的例题里，将应用以前所提出温克勒式基础模型。在支撑模型的周围采用了弹簧且作用在支撑形心轴线的法向上。在例题里，所使用的弹簧器从于温克勒式基础相似的假设：(1)基础是弹性的；(2)反作用力正比于压入深度；和(3)岩石周围任一点

的变形正比于支撑产生的被动力。

温克勒式基础不但已经用在隧道支撑与岩石相互作用的应用上(10),而且是处理岩体刚度的最简单方法。如前,用简化了有限元模型,必须对隧道_{基础}(围岩)用一个相当岩体刚度的弹簧常数。这个常数可应用均匀介质内圆形隧道遭受到内压力为(p)的压力变形比(k_u),再取得基础的模量,而近似地求出,基础模量即

$$C = \frac{E}{a(1+\nu)} \quad (3)$$

由此,弹簧常数可由基础的模量(C)与支撑与岩体间的接触面积相乘而得到,即是

$$k = CA \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad A = ba\theta \quad (5)$$

其中 b 是隧道支撑沿着隧道轴线的宽度, a 是坑道的半径, 而 θ 是确定弹簧常数那个拼装段的角

弹簧常数可用这些参数表示如下

$$k^* = \frac{E}{1+\nu} (b\theta) \quad (6)$$

尽管应用按图(4)简化的有限元模型和圆形隧道采用温克勒式基础而获得了良好的计算结果,但在普遍应用上,尚遗留一个按计算方法具体化的问题。

最后,应考虑到隧道支撑是由成排的支撑。还是由衬砌组成的。在图(5)里,指出衬砌和成排的支撑之间的不同。衬