



第十一章

地下工程的测试监控技术

城市地下工程



第十一章 地下工程的测试监控技术

第一节 概述

(一) 地下工程测试监控技术的地位

- (1) 地下工程结构体系是由**周围地质体**和**支护结构**构成的，目前的理论与技术水平对该体系所受荷载不是事先能给定的参数；
- (2) 地下工程受到**周围围岩**的物理、力学等时间效应的影响；**支护结构**参与工作的时间；
- (3) 地下工程既承受荷载，又造成荷载，这种**三位**（荷载、材料、承载单元）**一体**的特征与地面工程是极其不同的。



(二)测试与监控技术工作的主要任务

- (1)对某具体工程进行观测和试验，对量测数据进行分析，评价围岩的**稳定性和地下结构**的性能，为设计，施工提供资料；
- (2)通过量测为控制开挖与控制变形提供信息反馈和数据预报；
- (3)通过科学**监控和信息反馈**，优化设计施工，使地下设计施工的动态化，信息化管理成为现实；
- (4)为验证和发展地下工程的设计理论服务，为新的施工方法技术提供可靠的**实践资料**和科学依据，促进经济技术效益的提高。



(三)测试、监控技术的内容

- 地下结构测试与监控主要研究地层与结构之间相互作用的规律，就其实验内容而言，除量测结构的变形，挠度，应力等，还应量测地层给予结构的主动压力(土压力)。



第二节 现场量测

- (一)现场量测的作用
- (1)及时掌握围岩变化的动向和支护系统的受力情况为验证和修改设计提供信息；
- (2)逐步修改初步设计，以适应围岩条件；
- (3)预计工程事故和安全报警；
- (4)检验建筑物的可靠性。



(二)现场量测内容

- (1)岩土力学性能的现场试验;
- (2)施工期间洞内状态观测;
- (3)断面变形量测;
- (4)围岩应变和位移量测;
- (5)支护系统和衬砌结构受力情况量测;
- (6)地表沉陷量测;
- (7)地层弹性波速测定;



(三) 注意事项与要求

- 1. 首先要作出**监控设计**整体方案，考虑到经济效益；
- 2. 从施工监控和信息化设计角度出发，安排量测项目；
- 3. 仪器布置要方便合理，减少干扰；
- 4. 仪器有足够灵敏度和精度，抗干扰性强；
- 5. 建立严格的**监测**管理制度，具有一定理论水平和丰富的实验经验



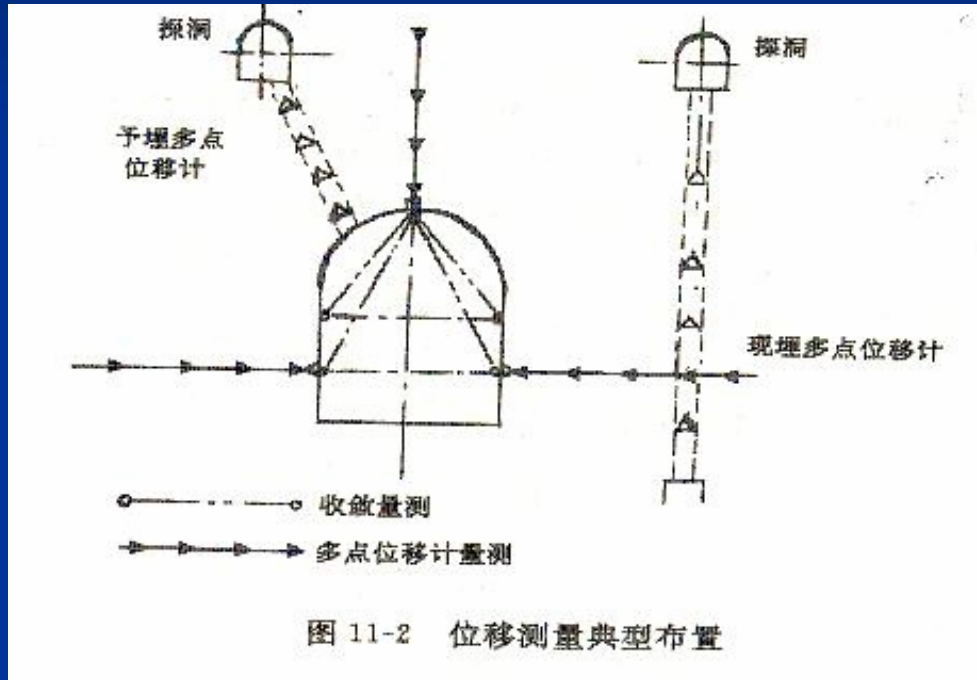
(四)地下洞室监测方法

- 地下洞室监测的主要目的是了解围岩的稳定性及支护作用状态。通常以位移监测，应力应变监测应用最为广泛。
- (1)量测规划
- (2)位移量测点的最好布置
- (3)位移监测
- (4)应力应变监测



位移监测

- 典型的位移量测断面布置如下图



- (1) 收敛量测
- (2) 钻孔多点位移计量器



收敛监测仪器





应力应变监测

- 所布置的量测仪器有如下几种：
- (1)在围岩与衬砌接触面处埋设压力盒，量测接触应力；
- (2)在锚杆上或受力钢筋上串联焊接锚杆应力计或钢筋计，量测锚杆或钢筋的受力情况及支护效果。
- (3)在衬砌内部埋设水银液压应力计，元件沿径向布置，地支护可靠性进行判断；
- (4)钢架支撑上贴电阻应变片，量测金属支架受力情况。

地铁管片螺栓内力监测





(五) 现场量测资料的分析整理

- **现场量测资料**存在一定离散性和误差，对量测(监测)资料必须进行**误差分析、回归分析和归纳整理**，找出所测数据资料的内部规律。以便提供反馈和应用。
- 仍以**位移量测数据处理**为例，余项整理类似。



(六)反分析法概念

- **反分析的方法**，基本上可以分为二类：
直接逼近法和逆过程法。
- **直接逼近法**是建立在**迭代过程**基础上的，通过迭代过程利用最小误差函数逐次修正未知函数的试算值，直至逼近最终解。但计算起来很费时间。
- **逆过程法**则采用同所谓“**正分析**”相反的计算过程来求解。



第三节 模型试验

- 模型实验(或称模拟研究)是以相似理论为基础,建立模型,通过模型实验得到某些量与量间的规律,然后再将所获得的规律推广到与之相似的同类(或异类)现象的实际对象中去应用的一项科学技术。
- 现在模拟试验技术可以分为:物理模拟(也称“同类模拟”)、数学模拟(也称“异类模拟”)、计算机模拟(也称“数值模拟”)、信息模拟(也称“功能模拟”)



一、相似理论基础

- **相似理论**是说明自然界和工程中各种相似现象相似性质与相似规律的理论，它的理论基础是关于相似的**三个定理**。
 - **(一)相似三定理**
 - **(二)相似准则的导出及相似准则的判断**



1. 相似第一定理

- **相似第一定理**可表述为：“对相似的现象，其相似指标等于1。”或表述为“相似现象其相似准则的数值相同。”
- 这一定理不仅是对相似现象相似性质的一种说明，也是相似现象的必然结果。



相似现象具备如下相似性质

- (1)相似现象，能为文字上完全相同的方程组或函数式所描述；
- (2)两个体系(原型与模型)相似，则表征这两个体系的一切物理量在空间和时间相对应的各点；
- (3)相似现象，各相似常数值不能任意选择，要受其相似指标 $y(C)=1$ 的约束；
- (4)体系相似，则相似准则为定数，这是相似必须具备的条件。



2. 相似第二定理

- **相似第二定理认为**：“约束两相似现象的基本物理方程可以用**量纲分析**的方法转换成用相似准则型式表达的方程，两个相似系统的方程必须相同”
- **相似第二定理**，仍然是说明相似现象的相似性质的，它告诉我们：(1)任何一个现象的函数式都可以用准则方程的形式来表示；(2)转换来的准则方程其准则数有 $(n-k)$ 个；(3)准则 (π) 是无因次的**综合数群**。



3.相似第三定理(逆定理)

- **相似第三定理认为：“只有具有相同的单值条件和相同的主导相似准则时，现象才互相相似。”**
- **主导相似准则是指在系统中具有重要意义的物理常数和几何性质所组成的准则。**



单值条件

- (1)原型与模型的几何条件相似；
- (2)在所研究的系统中具有显著意义的物理量，相似常数成比例；
- (3)初始状态相似；
- (4)边界条件相似。



(二)相似准则的导出及相似准则的判断

■ 1、相似准则的导出

■ 求相似准则的方法最常用的方法有：

相似转换法：是由基本方程和全部单值条件导出相似准则的方法。

因次(量纲)分析法：是获得准责的主要，甚至是唯一的方法。

矩阵法：在具体运算时运用矩阵式求准则



2.相似准则的特性

- 由于相似现象的相似准则，在数值上相等

因此，若有相似准则 $\pi_1; \pi_2; \dots \pi_r$ 。则：

$\pi_i^{a_i}$ —仍是相似准则；($i=1,2,\dots,r$)

$\pi_1^{a_1} \pi_1^{a_2} \dots \pi_1^{a_r}$ —仍是相似准则；

$\pi_1^{a_1} \pm \pi_1^{a_2} \pm \dots \pm \pi_1^{a_r}$ —仍是相似准则；

$\pi_i \pm a$ —仍是相似准则(a 为常数)；

$a\pi_i$ —仍是相似准则；



3. 准则的选择与判断

- 应符合以下原则：
 - (1) 准则的数目等于参数个数与基本量个数之差；
 - (2) 一个准则中所包括的参数一般以2—4个为好，过多应作分解，准则是无因次的；
 - (3) 一个准则中最好仅有一个导来量；
 - (4) 准则可以分解，也可以互相组合；
 - (5) 相同准则在准则方程中，只出现一个即可。



二 模型设计

- **模型设计**的理论基础是**相似理论**。这里主要介绍物理相似模型设计，即模型与原型属类的现象，一般称**同类模拟**，也常被称为相似(Similar 卸)；



(一)物理相似模型设计基本原则

- (1)模型与原型应该是几何相似的。
- (2)模型与原型的两系统应该是属于同一种性质的相似现象。或者说，模型与原型间同名准数(准则的数值)相等。
- (3)模型与原型的同类物理参数对应成比例，且比例为常数。
- (4)模型与原型的初始条件与边界条件相似。



(二)模型设计的步骤

- (1)列出准备模拟的现象的**微分方程式**或**罗列参数**求出准则，并写出准则方程。准则方程是定性准则与非定性准则间的一般函数关系式。
- (2)初定**模型方案**。
- (3)试定**几何缩比**(几何相似常数)。



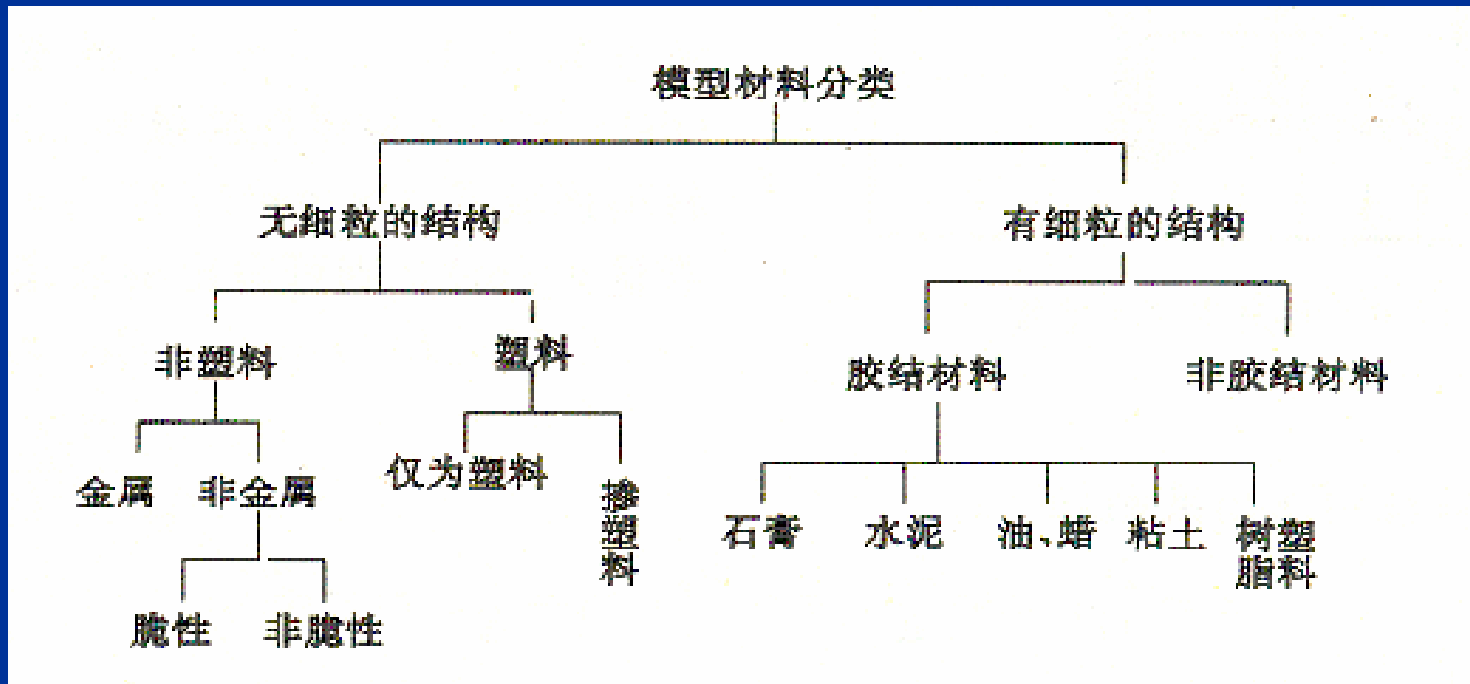
几何缩比的确定应考虑到以下几点

- (1) 传感器的大小和精度要求；
- (2) 原型经几何缩比转换成模型后，尺寸不易太大；
- (3) 模型中经相似转换后参数的数值有实的可能，也可以控制；
- (4) 根据几何缩比和各准则模型尺寸，计算各参数在模型试验中的数值——模型设计；
- (5) 安排试验顺序；
- (6) 进行试验和量测；(7) 数据整理。



(三) 模型材料

- 正确选择模型材料是能否正确模拟原型的关键验技术中与量测技术同等重要的主要内容之一。





1.对模型材料的要求

- (1)主要力学性质应能模拟**原型材料**的力学性质，即材料力学性能相似，但随着试验目的和加载方式、量测设备的不同，对相似材料的要求也不同；
- (2)**模型材料**应具备通过配比的变化，就可调整材料某些性质的特点，以适应**相似条件**的需要；
- (3)试验过程中材料的力学性能稳定，不易受外界条件的影响；
- (4)制作方便、凝固时间短，成本低，来源丰



2. 模型材料分类

- 按配制相似材料的原材料可分为两类：
 - (1) 骨料：如砂、尾砂、粘土、铁粉、铅丹、铝粉、晶石粉、铝粉、云母粉、软木屑等。
 - (2) 胶结材料：如石膏、水泥、石蜡、石灰、碳酸钙、水玻璃、树脂等。
- 随着模拟研究的发展，根据岩土复杂的特性，特别是对其受力后的膨胀性、流变性的模拟要求，也有人将模型材料作如下分类(29页图表)



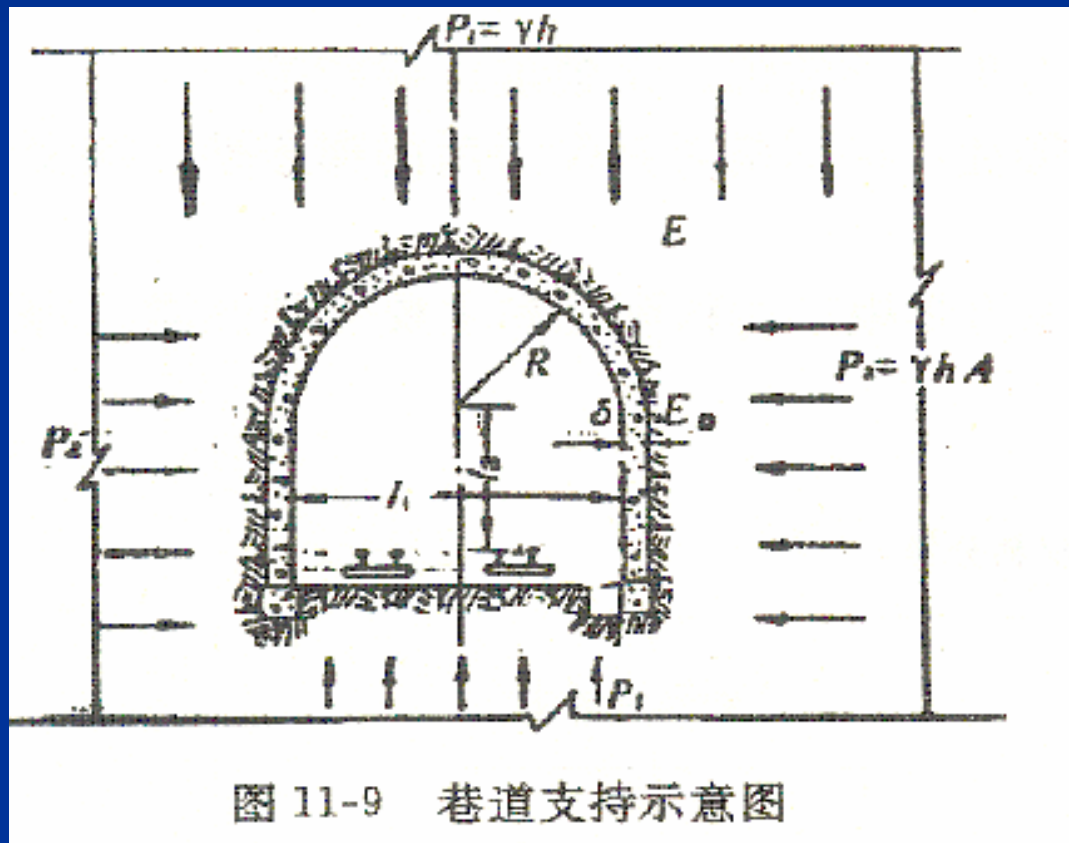
(四)模型试验

- 以某洞室支护的模型设计为例，介绍设计过程
- 1.基本假设：1)水平洞室支护可按平面问题处理；
2)岩土是均匀连续的
- 2.列参数求出准则
- 3.确定几何缩比
- 4.确定试验方案
- 5.模型设计计算
- 6.数据处理



巷道支持示意图

- 下面是巷道支持示意图





(五) 试验规划与试验数据整理

■ 1. 试验规划

- 已设计出模型并制定了试验方法后，来安排试验，合理的**试验规划**，应该是以最少的试验次数，最小的试验工作量并能达到完成试验任务的目的，解决这个问题的较好方法，就是**正交试验法**。（也称正交设计法）。
- **正交设计**是一种科学的安排与分析多因素试验的方法，这种方法简单易行，灵活多样，效果良好。它是使用为**正交试验法**专门设计的表来安排实验的。



2. 数据处理

- **大量的试验数据可分为两大类**，一类数据是围绕其**真值**，是可以信赖的数据，称**正常数据**，无疑是待整理的正常数据；另一类数据与一般数据有明显区别，被称为**奇异数据**，对这一类数据不可忽视。
- **模型试验研究**如果是为了解决具体工程或课题时，用**相似转换法**把模型试验结果，转换为原型数据，供工程设计施工时应用。而对于模型试验研究是为了解决一类问题的数据处理，则要按照**相似第二定理**。



回归方程的类型

■ 参数间或准则间的函数式，常用回归方法求得，常遇到的**回归方程**的类型有以下几种：

(1) 线性函数： $y = ax + b$;

(2) 二次或高次函数： $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$;

(3) 对数函数： $y = bx^a$;

(4) 指数函数： $y = ab^{cx}$;

(5) 抛物线函数： $y = \frac{1}{a + bx}$