

## 摘 要

隧道开挖的安全性始终是隧道建设者面临的重大而又艰巨的难题，隧道岩质的好坏对隧道开挖的安全性起着决定性作用，故当隧道岩质较差且含水量较大时，采取必要的预支护措施显得尤为必要。

论文针对天汕高速广福隧道的实际情况，开展了超前地表预注浆技术在隧道浅埋偏压破碎带的应用研究。论文中利用 ANSYS 有限元分析法对浅埋偏压破碎带注浆和不注浆两种情况进行了受力和变形两方面的模拟分析，通过此两种工况的监控量测与模拟结果对比，表明注浆方案合理，注浆加固效果明显。论文研究工作对以后超前地表预注浆的实施有指导和借鉴意义。

关键词：公路隧道 浅埋偏压 地表预注浆 分析计算 评价

## Abstract

It is an important and difficult problem of the tunnel carving safety for every tunnel constructor .The rock of tunnel determinates the tunnel carving safety. So when the rock is bad and the water content is big, it is extremely important of necessary pre-support method .According to Guangfu tunnel of Tianshan highway, the paper carries out the study of pre-support method in the surrounding rock under the status of shallow cover layer and oblique load.

Finite element simulation analysis is used to analyze the difference of the grouting and the un-grouting under the status of shallow cover layer and oblique load .Then analyzing the strain and the deformation from the simulation analysis. Contrasting the results of the finite element simulation analysis and the tunnel monitoring control for the estimation of the grouting effect, it is indicated that the grouting case is proper and the reinforce effect is obvious. The study of paper is instructive and worthy of learning.

**Key words:** highway tunnel; shallow cover and oblique load; surface pre-grouting; analysis and calculation; estimation

## 论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：王春晓

2007年6月5日

## 论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：王春晓

2007年6月5日

导师签名：许扣明

2007年6月5日

# 第一章 绪论

## 1.1 选题依据及研究的必要性

近年来,随着我国经济实力的增长和高等级公路的迅猛发展,采用隧道工程穿山越岭逐步为设计师们所接受。新奥法设计施工在我国的隧道施工中,经过多年的探索 and 实际经验总结,已日趋完善。但对于浅埋偏压破碎地段,尤其对渗水严重的浅埋偏压地段,隧道的安全通过问题仍未有一个良好的、可达成共识的解决方案。在此地段下的隧道施工,应慎之又慎。如果施工设计方案不成熟,稍有疏忽,就极有可能造成通天塌方或隧道受偏压整体位移。因此,对于这些地段的地表预加固措施的研究,具有重要的现实意义。

隧道围岩的初始应力场,由于岩体的自重和地质构造作用,在开挖隧道前岩体中就已存在着地应力场,由自重应力场和构造应力场两大部分构成。隧道开挖后,使得围岩在开挖边界处解除了约束,失去了平衡,此时,洞室周边的应力均为零,其结果引起了洞室变形,产生了应力重分布,破坏了开挖前围岩中的初始应力场状态,形成新的二次应力场。因此,隧道端部开挖面对围岩的应力释放和变形发展都有很大的约束作用,使得沿隧道纵向各断面上的二次应力状态和变形都不相同,产生面的“空间效应”,也就是说,开挖段围岩应力场实际上是三维的<sup>[1]</sup>。此时,地层移动不仅在横断面方向,而在纵向亦形成剪切和滑移,总的运行趋势是指向工作面的。处于浅埋偏压段,剪切滑动区会扩大,极易波及地表,引起沉陷。如仅靠开挖后的初期支护,是难以及时控制这种移动的。因此,在开挖前对地层进行预加固,通过注浆预加固来提高岩层整体稳定性,预防塌方很有必要。

## 1.2 注浆法的发展、分类和应用

### 1.2.1 注浆法的概念

注浆法是将浆液通过压浆泵、注浆管均匀注入岩层或土层中,以填充、渗透和挤密等方式,驱走岩石裂隙中或土颗粒间的水和气体,并充填其位置,硬化后将松软的岩土胶结成整体,形成一个强度较高、压缩性较低、抗渗性能较好的新的岩土体,从而使原来较松软的软弱层得到良好的加固。

### 1.2.2 注浆法的发展历史

注浆技术出现于 19 世纪初,其发明者是法国土木工程师查理斯·贝里格尼(Charles Bering),他采用注浆技术修复被水流侵蚀了的挡潮闸的沙砾土地基。这在基础工程历史上第一次应用注浆技术。

人工“压浆泵”的首次使用是在 1845 年,由美国的 W·E·沃森(W·E·Worthen)在一个溢洪道陡槽基础下注入水泥砂浆。1854 年又进行了闸墩砌体的加固。那时,注浆技术仅用作处理地基,而不被认为是一种施工方法。

化学浆液问世于印度。1886 年,英国的豪斯古德(Hosagood)在印度建桥时首次采用。1886 年, W·R·奎尼普尔(W·R·Kinniple)采用粘土水泥砂浆阻止尼罗河的达梅塔(Damitta)和罗萨塔(Rosetta)坝基下的地下渗流。同时,英国研制了“压缩空气注浆泵”,促进了水泥注浆法的发展。1887 年德国的杰沙尔斯基(Jeziorsky)利用一个钻孔灌注水玻璃,另一个相邻钻孔灌注氯化钙,创造了原始的硅化法<sup>[2]</sup>。

注浆技术的进一步发展和广泛应用是在矿井建设工程中,主要用于防止竖井开挖时地下水的渗入,所采用的浆液是水泥浆液。1910 年采用了自动记录压力表,对记录的注浆性状作了系统的研究,建立了注浆压力和渗透性之间的关系。1920 年荷兰采矿工程师 E·J·尤斯登首次论证了化学注浆的可靠性,采用了水玻璃、氯化钙双液双系统的两次压注法,并于 1926 年取得了专利。

注浆技术有系统的改进始于美国科罗拉多河上的胡佛(Hoover)坝基的帷幕注浆,为了补救因开挖基坑引起的裂隙,进行了加固注浆。根据胡佛坝基的注浆工程实践,首次制定了注浆工程设计和施工规范。

上世纪 40 年代,注浆技术的研究和应用得到了迅速的发展,各种水泥浆材和化学浆材相继问世。特别是 60 年代以来,各国大力发展新型注浆材料,注浆工艺和设备得到了空前的进步,其应用范围越来越广。

我国对注浆技术的研究和应用起步较晚,50 年代以前所作的工作甚少,50 年代开始初步掌握注浆技术,1953 年开始研究应用水玻璃作为注浆材料。随着水利水电工程建设的发展和我国化学工业的形成,除水泥、黏土等材料外,50 年代末已形成了环氧树脂、甲基丙烯酸甲脂等注浆材料,60 年代形成了丙烯酰胺注浆材料,70 年代末形成了聚氨酯注浆材料。尤其是进入 80 年代后,根据不同的需要,各种材料在种类、性能得到进一步发展。可以说,经过几十年注浆工作者的努力,在注浆工程领域已具备了众多的材

料种类和工艺技术，积累了丰富的工程经验，其中某些方面已达到了相当高的水平，与国际上也逐步接轨，并在某些方面有独到之处。但相对而言，与国际具有领先水平的国家相比某些方面尚有差距<sup>[3]</sup>。

### 1.2.3 注浆法的工程分类

目前，注浆法按照常规的分类可以分为两类，即静压注浆（或称为灌浆法）和高压喷射注浆。

#### 1. 静压注浆

静压注浆的实质是利用液压、气压和电化学原理，通过注浆管把浆液均匀地注入地层中，浆液以填充、渗透和挤密等方式，赶走土颗粒间或岩石裂隙中的水分和空气后占据其位置，形成一个结构新、强度大、防水性能高和化学稳定性良好的“结石体”。

(1) 静压注浆施工按其作用不同分为固结注浆、帷幕注浆和接触注浆三种。

固结注浆是在岩石表层中钻孔，加固浅层地基常见的注浆方法。作用是增强结构物的承载能力，提高结构物的抗滑稳定性和防渗能力。特点是钻孔浅、孔多，注浆孔在地基内呈面状分布。当岩石裂隙中填充有粘土等杂质时，常将注浆孔划分成组，使用风或水进行群孔冲洗，而后再进行群孔注浆。

帷幕注浆是为增强各种结构物的抗渗能力而被广泛采用的一种处理方法。帷幕注浆将在结构物周围布置钻孔，在钻孔中注浆，使浆液压入岩石裂隙或砂粒石层的空隙中去，形成一道类似帷幕的混凝土防渗墙，以此截断渗流和防止集中渗流。其特点是一般钻孔较深，呈多排线形组合，注浆压力也较大。

接触注浆通常是指在岩石基础上修建结构，在结构混凝土和岩石接触面之间常采用的一种方法。目的在于使两者结合紧密，保持整体性，达到提高岩石抗滑稳定、增进岩石固结与防渗的目的。

(2) 静压注浆按浆液来分类可分为粒状浆液和化学浆液两大类。

粒状浆液包括水泥浆液、黏土浆液和水泥黏土浆液；化学浆液包括水泥类浆液、丙烯酰胺类浆液、聚氨脂类浆液、丙烯酸盐类浆液、木质素类浆液、脲醛树脂类浆液和环氧树脂类浆液等。

(3) 静压注浆按注浆理论可分为渗透注浆、劈裂注浆、压密注浆、电动化学注浆 4 种[4]。

渗透注浆是指在压力作用下使浆液充填土的孔隙和岩石的裂隙，排出孔隙中存在

的自由水和气体，而基本上不改变原状土的结构和体积，所用的注浆压力较小。

劈裂注浆是指在压力作用下，浆液克服地层的初始应力和抗拉强度，引起岩石和土体结构的破坏和扰动，使其沿垂直于小主应力平面发生劈裂，使地层中原有的裂隙或孔隙、浆液的可灌性和扩散距离增大，而所用的注浆压力相对较高。

压密注浆是指通过钻孔在土中灌入极浓的浆液，在注浆点使土体压密，在注浆管端部附近形成浆泡。

电动化学注浆是指在施工时将带孔的注浆管作为阳极，滤水管作为阴极，将溶液由阳极压入土中，并通以直流电，在电渗的作用下，孔隙水由阳极流向阴极，促使通电区域中土的含水量降低，并形成渗流通道，化学浆液也随之流入土的孔隙中，并在土中硬化。

## 2. 高压喷射注浆

当前，高压喷射注浆法的基本种类有单管法、二重管法、三重管法和多重管法等多种方法。它们各有特点，可根据工程要求和土质条件选用。这里不详细叙述。

### 1.2.4 注浆技术的优点

目前，世界上发达国家，如日本、美国、英国、法国等国家的注浆技术研究应用发展很快，各国都有专门的研究机构和施工公司，日本著名的注浆施工公司就有 40 多家。注浆技术的发展之所以这么快是因为注浆技术有许多优点。

1. 施工设备简单。注浆工程施工设备主要由钻孔机械、注浆泵、搅拌装置、喷枪、流量计、止浆塞等，这些设备除钻孔机械稍复杂外，其他都比较简单。

2. 规模小、耗资少。这种加固方法相对其他方法而言，工程实施规模小，人工、材料、机械消耗小，相应减小了加固施工耗资。

3. 占地面积小、施工灵活方便。由于施工设备简单、施工场地小，在狭小的场地、矮小的空间均可施工，对施工周围交通影响较小，在城市高层建筑、市政工程深基础施工中显示出得天独厚的优势。

4. 工期短、见效快。注浆工程施工必须连续进行，可以 24 小时进行，施工效率高。由于通常采用化学注浆，所以凝胶时间短，工程实施见效快。

5. 施工噪声和震动小。施工机械简单，且大部分时间都是靠注浆泵工作由液体压力完成，施工中产生的噪声和震动都很小，对施工周围环境影响小，在居民区施工其优点更突出。

6. 加固深度可深可浅，易于控制。由于该工法是采用成孔压力把浆液注入地层达到加固的目的，其加固深度很好控制，只要地层允许可在成孔范围内任意实施。

7. 应用领域广泛。注浆的应用极广，而且其应用范围还在不断扩大。目前的主要应用领域有土建、市政工程、水利水电、交通能源、隧道、地下铁路、矿井、地下建筑等。

### 1.2.5 注浆法的应用限界

注浆法的适用范围以及对土质改良的结果，不仅取决于注浆材料的性质，也取决于注浆的方法、注浆工艺。注浆方法的选择不仅是注浆设备的选择，还要看试验结果，考虑注浆经验是否丰富，注浆管理的方法是否可行等。常常采用联合的注浆工艺，包括不同的浆材及不同的注浆方法的联合，以适应某些特殊的地质条件和专门注浆目的需要，因此，注浆法的适用界限变得更加复杂。

注浆法的适用范围的相关条件很多，如是否存在着流动的地下水、水量的大小，地基土的非均质性等。因此，不能明确的规定各种浆液的适用范围，也不能用公式很明确的确定。注浆技术人员应在理解适应范围的基础上，联系工程项目的注浆目的、土质改良的效果、现场特有的地质条件、造价的高低来确定采用注浆材料、注浆工艺、注浆方法等进行合适的注浆设计。

在砂砾土层中渗透注浆时，尤其是当注浆的浓度较大时，要求浆液中的颗粒直径比土的孔隙小，粒状浆材中的颗粒才能在孔隙或裂隙中流动。但粒状浆材往往以多粒的形式同时进入孔隙或裂隙，这可导致孔隙的堵塞，因此，仅仅满足颗粒尺寸小于孔隙尺寸是不够的。同时，由于浆液在流动过程中同时存在着凝结过程，有时也造成浆液通道的堵塞。此外，地基土是非均质土，裂隙或孔隙的大小不同，粒状浆材的颗粒尺寸不均匀，若想封闭所有的孔隙，要求粒状浆材的颗粒尺寸不均匀，若想封闭所有的孔隙，要求粒状浆材的颗粒尺寸必须很小，这从技术和经济的角度来看也是困难的。

## 1.3 研究现状分析

### 1. 岩体结构理论的研究现状

岩体孔隙或裂隙是浆液流动的通道，由于岩体结构的不同，造成浆液流经的方式和途径不同，从而产生不同的注浆效果。因此，对岩体结构的研究是整个注浆理论的基础。

(1) 多孔介质理论。该理论认为岩体是一种多孔结构，孔隙是流体流经岩体的通



道, 根据其孔隙分布情况, 又可分为各向同性多孔介质和各向异性多孔介质。

(2) 拟连续介质理论。该理论认为岩体虽受裂隙分割, 但通过该理论应用等效原理处理后, 岩体空间内每一个点上岩石和裂隙都保持连续。因此, 在岩体内每一点上都同时存在岩石介质和孔隙介质, 浆液就是通过这些孔隙在岩体内流动的。

(3) 裂隙介质理论。该理论认为岩体是受裂隙分割的不连续体, 浆液在岩体内通过裂隙网络流动。

(4) 孔隙和裂隙双重介质理论。该理论认为岩体由孔隙性差而透水性强的裂隙系统和孔隙性好而透水性弱的岩块系统组成, 浆液在这种介质中流动时, 既可在裂隙中流动, 又可在岩块中流动, 并在两者之间发生强烈的质量交换。

## 2. 注浆渗流理论的研究现状

渗透注浆是指在压力作用下使浆液充填土的孔隙和岩石的裂隙, 排挤出孔隙中存在的自由水和气体, 而基本不改变原状土的结构和体积, 所用注浆压力相对较小。近几十年来, 国内学者对渗透注浆法进行了广泛而深入的研究, 发展了一系列注浆渗透理论, 如马格理论(球形扩散理论)、柱形扩散理论、袖套管法理论、刘嘉才公式、Baker 公式<sup>[5]</sup>、G Lombad 公式<sup>[6]</sup>等。

各种渗透注浆理论均假设: 浆液按牛顿体或宾汉体考虑, 在裂隙中呈圆盘状扩散; 裂隙为二维光滑裂隙, 开度不变; 忽略固液耦合的影响。

刘嘉才公式:

$$\gamma = 2.21 \sqrt{\frac{0.093 \gamma_g H b^2 \gamma_c^{0.21}}{\mu_g}} + \gamma_c \quad (1.1)$$

Baker 公式:

$$Q = (\pi \gamma_w H b^3) / [6 \mu_g l (\gamma / \gamma_c) n] \quad (1.2)$$

式中:  $\gamma_w$  为水的重度;

$b$  为裂隙张开度;

$H$  为地下水压和注浆压力之和。

## 3. 注浆加固体强度理论及本构关系研究现状

含裂隙岩体注浆加固后, 其强度和抗渗透性将有所提高。被注岩体的强度、抗渗透性的提高程度以及对结构稳定性的影响, 受岩体结构、注浆材料和注浆过程的控制。因此, 对注浆加过后岩体力学特性的本构关系的研究, 是研究注浆理论不可缺少的一个方

面。目前，国内这方面的研究不多，只有一些定性的结论。

#### 4. 注浆模拟试验的研究现状

(1) 前苏联曾进行了细砂层中注浆扩散参数的试验研究<sup>[7]</sup>，试验中以定注浆压力为条件，得出了注浆压力、注浆流量、渗流速度、注浆时间和浆液扩散半径之间的关系：

$$R=283.83P^{0.53}M^{0.23}\mu^{-0.83}T^{0.55} \quad (1.3)$$

$$Q=1564.5P^{1.09}M^{0.43}\mu^{-0.53} \quad (1.4)$$

$$V=618.6P^{1.09}M^{0.43}\mu^{-0.53} \quad (1.5)$$

式中：R 为扩散半径 (cm)；T 为注浆时间 (min)；P 为注浆压力 (MPa)； $\mu$  为浆液黏度 (MPa·s)；Q 为注浆注入量 (L/h)；M 为砂子的粒度模数， $M=2.555 \times 10^2$ ；K 为介质的渗透系数 (cm/s)；V 为渗流速度 (cm/s)。

(2) 国内在注浆参数方面也开展了一系列注浆模拟试验研究。如中国水利水电科学研究院研制的平板型注浆试验台<sup>[8]</sup>，通过试验，建立了牛顿流体在水平光滑裂隙面内的扩散方程，得出了扩散半径与注浆压力、浆液黏度及注浆时间之间的关系：

$$R=9.005^{2.21} \sqrt{\frac{(P_G - P_0)T\delta^2 r_0^{0.21}}{\mu}} + r_0 \quad (1.6)$$

式中：R 为扩散半径 (cm)； $P_G$  为注浆压力 (MPa)； $P_0$  为裂隙内地下水压力 (MPa)；T 为注浆时间 (min)； $\delta$  为裂隙张开度 (cm)； $r_0$  为注浆孔半径 (cm)； $\mu$  为浆液黏度 (MPa·s)。

东北大学研制了槽形反扁圆柱状试验台<sup>[8]</sup>，并用它研究了多孔介质体中注浆渗流过程中的压力分布及其随扩散距离而衰减的规律：

$$R=8.7P^{0.479}K^{0.3647}\mu_0^{-0.4749}t^{0.1509}T^{0.324}h^{0.2706} \quad (1.7)$$

式中：R 为浆液实际扩散距离 (cm)；P 为注浆压力 (MPa)；K 为被注介质的渗透系数 (m/d)； $\mu_0$  为浆液的初始黏度 (MPa·s)；t 为注浆时间 (s)；T 为注浆胶凝时间 (s)；h 为注浆段高度 (m)。

### 1.4 本文主要内容

本文结合天汕高速公路广福隧道左线 LK7+650~LK7+710，共 60 米的浅埋偏压段进行超前地表预注浆加固。通过现场试验制订合理的施工方案，并对注浆效果做出评价。以下是本文所包含的具体内容：

(1) 通过试验获得现场浆液的合理配合比并对注浆顺序、注浆孔位进行合理布设，指导注浆施工；

(2) 利用 ANSYS 有限元分析方法对注浆前后围岩改善情况进行对比分析，评价注浆效果；

(3) 对注浆后的围岩进行钻芯取样，并利用监控量测数据对注浆段和非注浆段围岩改善情况进行详细对比；

(4) 对比分析理论计算和监控量测结果。

## 第二章 地表注浆加固原理及设计计算

### 2.1 注浆法加固原理

浆液通过注浆机压入管内，从渗透孔压入岩石的节理裂隙面后，并产生硬化。一方面，将原有的裂隙水和地下水从节理裂隙中挤出来，另一方面将破碎岩石连成整体。对于地面陡斜的浅埋隧道围岩失去边约束后，竖向压力为：

$$q_i = rh_i \left[ \frac{1 - \frac{1}{2} rtg\theta h_1^2 \lambda + h_1' \lambda'}{\omega_1} \right] \quad (2.1)$$

$q_i$ —所讨论点的竖向压力强度；

$h_i$ —所讨论点的岩体高度；

$r$ —围岩的容重；

$h_1$ —洞顶岩体高度；

$h_1'$ —拱顶至地面线高度（左侧）；

$h_2'$ —隧道底部至地面线高度（左侧）；

$\omega_1$ —纵向每延米隧道洞顶岩体重量；

$\theta$ —拱顶岩体两侧摩擦角。

$$\lambda = \frac{1}{tg\alpha - tg\beta} \times \frac{tg\beta - tg\varphi_0}{1 + tg\beta(tg\varphi_0 - tg\theta) + tg\varphi_0 tg\theta} \quad (2.2)$$

$$\lambda' = \frac{1}{tg\beta' + tg\alpha} \times \frac{tg\beta' - tg\varphi_0}{1 + tg\beta'(tg\varphi_0 - tg\theta) + tg\varphi_0 tg\theta} \quad (2.3)$$

$$tg\beta = tg\varphi_0 + \sqrt{\frac{(tg\varphi_0^2 + 1)(tg\varphi_0 - tg\alpha)}{tg\varphi_0 - tg\theta}} \quad (2.4)$$

$$tg\beta' = tg\varphi_0 + \sqrt{\frac{(tg\varphi_0^2 + 1)(tg\varphi_0 + tg\alpha)}{tg\varphi_0 - tg\theta}} \quad (2.5)$$

$\beta'$ —可移动岩体与水平面的夹角；

$\varphi_0$ —似摩擦角；

$\theta$ —摩擦角。

隧道因偏压引起水平压力的不平衡(覆盖层厚一侧的压力大于覆盖层浅一侧的压力)，其水平压力大小为：

$$E = 1/2 \gamma \lambda (h_2 - h_1) \quad (2.6)$$

假定侧压力梯形分布，则隧道预埋顶端单位水平侧压力为：

$$e_1 = \gamma h_1 \lambda \quad (2.7)$$

$$e_2 = \gamma h_2 \lambda \quad (2.8)$$

$h_1$ —拱顶至地面线高度(右侧)；

$h_2$ —隧道底部至地面线高度(右侧)；

$h_1'$ 、 $h_2'$ 与 $h_1$ 、 $h_2$ 意义相同(左侧)；

$\gamma$ —围岩的容重；

$$\lambda = (tg \beta - tg \varphi_0) / (tg \beta - tg \alpha) [1 + tg \beta (tg \varphi_0 - tg \theta) + tg \varphi_0 tg \theta] \quad (2.9)$$

$\beta$ 、 $\varphi_0$ 、 $\theta$ 意义同上。

浅埋偏压隧道水平及竖向应力分布如图 2.1 所示。

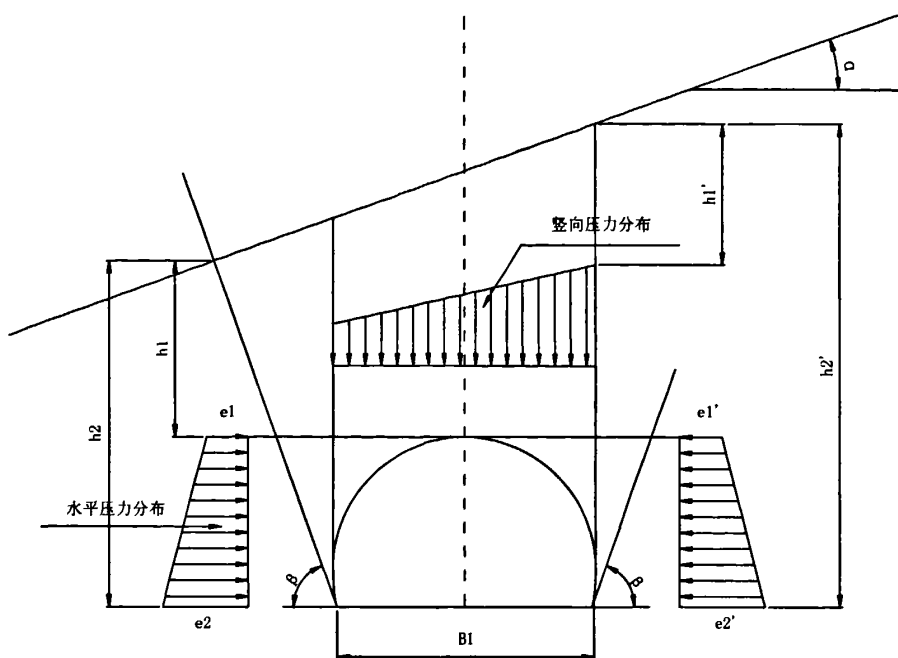


图 2.1 浅埋偏压隧道水平及竖向应力分布图

## 2.2 加固后岩土体强度增长原理

岩土介质在被注浆后，无论是水泥浆液还是化学浆液，都是依靠浆液的渗透凝胶把土颗粒黏结在一起，并充填了岩土的孔隙，使岩土体密度增加；同时，浆液在化学反应过程中，某些化学剂与岩土中的元素进行离子交换形成了新的物质，这都增加了固结后岩土体的黏聚力<sup>[3]</sup>。强度增长的原理可用下式公式表示：

注浆前的无黏性土的抗剪强度 ( $\tau_f$ ) 为：

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (2.10)$$

注浆后的抗剪强度 ( $\tau_f$ ) 为：

$$\tau_f = \sigma \tan \phi + c \quad (2.11)$$

式中： $\sigma$  为土体内剪切面上的法向有效应力； $\phi$  为土的内摩擦角； $c$  为土的黏聚力。

应注意式中，注浆后的内摩擦角  $\phi$  采用的是原土的内摩擦角  $\phi$ ，当注浆压力过大时，土体膨胀，需考虑内摩擦角降低的影响。

黏性土岩体注浆后强度增长与无黏性土不同。在注浆压力作用下，浆液克服了岩土

的初始应力和抗拉强度,使土体沿垂直小主应力的平面上发生劈裂,浆液进入劈裂的土体形成脉状浆液固结体。脉状浆液固结体、由于浆液与土颗粒的化学作用以及因浆液脉状渗透的注入压力而挤密的土体、未受注浆影响的原状土一起组成一种复合土体,共同承受上部荷载。

在对饱和黏性土进行注浆处理时,由于透水性差、强度低、触变性强等特点,当注浆压力小时,浆液难以进入土的孔隙;当注浆压力过大时,由于排水条件差,使孔隙水压力在短短时间内很难消散,土体不能在注浆压力作用下固结而被挤出,这样的注浆效果就不是很理想。

## 2.3 注浆设计计算

注浆设计时,通常把技术上的可行性和经济上的合理性综合起来考虑。首先,应考虑注浆的目的,是用于防渗、加固、提高地基承载力、增加土体的稳定性,还是降低土体的压缩性。近年来,在注浆设计中往往采用综合注浆法,包括不同浆材、不同注浆方式的联合,以适应某些特殊地质条件和专门注浆目的的需要;其次,要考虑注浆的标准,所采用的注浆标准的高低关系到注浆工程的质量、进度、造价和建筑物的安全;第三是选择适宜的注浆材料。注浆目的、标准不同时,所采用的材料也有区别,同时还应考虑到对人类和自然环境的影响。这个问题越来越引起工程界的重视,成为注浆方案取舍的决定性因素。第四,注浆参数的确定。注浆参数主要有注浆压力、浆液扩散半径、浆液浓度及凝胶时间等。

### 2.3.1 注浆设计程序和内容

注浆设计一般遵循的以下几个程序:

- (1) 地质调查 查明工程的地质特性和水文地质条件;
- (2) 方案选择 根据工程性质、注浆目的及地质条件,初步选定注浆方案;
- (3) 注浆试验 除进行室内注浆试验外,对较重要的工程,还应选择有代表性的地段进行注浆试验,以便为确定注浆技术参数及注浆施工方法提供依据;
- (4) 设计和计算 确定各项注浆参数和技术措施;
- (5) 补充和修改设计 在施工期间和竣工后的运用过程中,根据观测所得的异常情况,对原设计进行必要的调整。

设计内容包括以下几个方面:

- (1) 注浆标准 通过注浆要求达到的效果和质量指标;
- (2) 施工范围 包括注浆程度、长度和宽度;
- (3) 注浆材料 包括浆材种类和浆液配方;
- (4) 浆液影响半径 指浆液在设计压力下所能达到的有效扩散距离;
- (5) 钻孔布置 根据浆液影响半径和注浆体设计厚度, 确定合理的孔距、排距、孔数和排数;
- (6) 注浆压力 规定不同地区和不同程度的允许最大注浆压力;
- (7) 注浆效果评价 用各种方法和手段检测注浆效果。

### 2.3.2 方案的选择

根据工程的性质、注浆的目的、所处对象的条件及其它要求可进行方案选择。注浆方案是否成立, 取决于方案能否以最小的投资、最短的工期, 达到工期在设计使用期限内安全可靠运行, 并满足所有的预定功能要求。同时, 要求方案具备施工条件, 能避免工程的环境污染或污染最小, 能保障工程、施工人员的安全。

初步设计可按注浆目的和标准、工程地质和水文地质条件, 大致从浆材和工艺两方面进行选择。重要工程应进行注浆试验加以验证、调整。

#### 1. 注浆目的

注浆目的指提高地基或结构的承载能力、抗滑稳定性、降低变形量、加强或恢复结构的整体性; 防止(减少)地基或结构渗透或渗漏, 提高渗透稳定性, 降低空隙水压力或扬压力; 调整和改善地基或结构的力学性能等<sup>[9]</sup>。

注浆之所以能达到上述目的, 主要依靠下述三种作用:

- (1) 化学胶结作用。不管是水泥还是化学浆液, 都具有能产生胶结力的化学反应, 把岩石或土粒连结在一起, 从而使岩石的整体结构得到加强。
- (2) 惰性填充作用。充填在岩石裂隙及土的孔隙中的浆液凝固后, 因具有不同程度的刚性而能改变岩层及土体对外力的反应机制, 使岩土变形受到约束。
- (3) 离子交换作用。浆液在化学反应过程中, 某些化学剂能与岩土中的元素进行离子交换, 从而形成具有更加理想物质的新材料。

根据研究资料可知, 被灌介质强度的增长是一种受多种因素制约的复杂的物理化学过程, 除灌浆材料外, 下述几个因素对上述三种作用的发挥起着重要的作用:

- (1) 浆液与界面的结合形式



如前面所述,化学胶结作用对被灌介质强度的增长具有决定性的影响,因而注浆时除了要采用强度较高的浆材外,还要求浆液与介质接触面具有良好的接触条件。

然而在实际工程中,自然条件复杂多变,浆液与介质的接触往往很不理想。对于某些不理想的边界条件,不采用有效的工艺措施,就会使浆液与介质的整体强度受到削弱。

### (2) 浆液饱和度

裂隙或孔隙被浆液填满的程度,称为浆液饱和度。一般饱和度越大,被灌介质的强度也越高。

化学注浆一般采用定量注浆的方法,而不是灌至不吃浆为止。灌浆结束后,地层中的浆液往往仍具有一定的流动性,因而在重力作用下,浆液可能向前继续流失,使本来已被填满的孔隙重新出现空洞,使灌浆体的整体强度削弱。

### (3) 时间效应

时间效应对强度也有重要的影响,主要表现在下述几方面:

①许多浆液的凝结时间都较长,被灌介质的力学强度将随时间而增长。这是有利的一面。但在利用这一效应时要兼顾两方面的需要:有时为了使加固体尽快发挥作用而必须缩短凝结时间;为了维持浆液的可灌性则要求适当延长浆液的凝结时间。

②许多浆材都具有明显的蠕变性质,浆材和被灌介质的强度都将受加荷速率和外力作用的影响,进行灌浆设计、施工和试验研究时,都应考虑这一不利的因素。

③浆液搅拌时间过长或同一批浆液灌注时间太久,都将使加固体的强度削弱。

## 2. 注浆标准

所谓注浆标准,原则上指工程要求地层或结构经注浆处理后应达到的质量标准。由于工程性质、注浆目的的要求、所处理对象的条件各不相同,又受到检测手段的局限,故设计的注浆标准常采用防渗标准、强度及变形标准和施工控制标准进行控制。

### (1) 防渗标准

防渗标准是指对地层或结构经过注浆处理后应达到的防渗要求,是工程为了减少地基的渗透流量、避免渗透破坏、降低扬压力提出的对地层的渗透性要求。防渗标准不是绝对的,应根据每个工程各自的特点,通过技术经济比较确定一个相对合理的指标。因此,对于重要的工程、或易于渗透破坏的地层、严格控制渗透量或扬压力的工程,均采用较高的防渗标准。这就使注浆技术的难度、工程规模和费用显著增大。

### (2) 强度及变形标准

强度及变形标准是指对地层或结构经注浆加固处理后应达到的强度和变形要求,是

工程为提高地层或结构的承载力、物理力学性能,改善其变形性能,对抗压强度、抗拉强度、抗剪强度、黏结强度及变形模量、压缩系数、蠕变特性等方面指标的要求。因此,应根据工程性质、注浆目的要求、所处对象的条件,确定所需要的强度、变形标准及适宜的检测手段和指标。

岩石地基的注浆加固处理,常采用固结注浆、接触注浆和回填注浆。这些注浆方法均能显著提高岩石的弹性模量、密实均一程度、抗滑稳定性,减少岩体变形和不均匀沉降,提高其稳定性,加强构筑物与岩基的连接性能,改善受力条件。

### (3) 施工控制标准

工程应用中,防渗标准、强度及变形指标往往是难以确定的。同时,注浆质量指标的检测是在施工后才能进行,有时受到各种条件的局限甚至不能进行检测。为保证工程的质量,注浆工程常采用施工控制标准。通常采用的控制标准为注浆量控制标准和注浆压力控制标准。

#### ① 注浆量控制标准

注浆量控制标准常用于各种地基土渗透注浆。由地基土的孔隙率  $n$ ,设计的注浆体积  $V$  ( $m^3$ ),考虑一定的无效浆液损失系数  $m$ ,则注浆量  $Q$  ( $m^3$ )控制指标可按下述公式计算:

$$Q=Vnm \quad (2.12)$$

工程中常采用分序逐渐加密原则进行注浆,若孔距布置适当,后序孔耗灰量应较前序孔适当递减。后序孔的单位耗灰量和前序孔单位耗灰量之比称为孔序单位耗灰量递减率。若孔序单位耗灰量递减率大于 1,表明与前序孔注浆体尚未搭接,需要增加下一孔序或调整布孔孔距。若孔序单位耗灰量递减率在 0.25~0.75 之间,表明与前序孔注浆体搭接良好,布孔孔距较为合理。因此,可以用各孔序耗灰量递减率来判断孔距是否合理。

#### ② 注浆压力控制标准

根据工程需要,参考注浆试验或经验,可设计出一定的注浆压力作为控制标准。注浆实施时,采用给出的压力,达到一定的压力再继续灌注一定时间便可以结束注浆。

### 3. 注浆浆材的选择

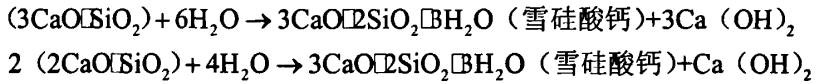
正确选择浆液材料是实现岩土改良、完成注浆工程的关键,因为它直接影响注浆工艺过程,注浆效果及注浆工程的成本及工期。注浆材料分类方法很多,按浆液所处的状态可分为真溶液、悬浮液和乳化液;按工艺性质可分为单浆液和双浆液;按浆液颗粒可

分为粒状浆液和化学浆液；按浆液主剂性质分为无机系列和有机系列两大类，无机系列分为单液水泥类浆液、水泥粘土类浆液、可控域粘土固化浆液、水泥-水玻璃类浆液、水玻璃类浆液等；有机系列分为丙烯酰胺类浆液、木质素类浆液、树脂类浆液、聚氨酯类浆液等。

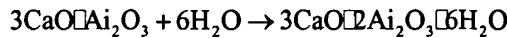
下面仅简单介绍一下水泥单浆液和水泥-水玻璃双浆液两种。

### (1) 水泥浆液

普通水泥采用广东塔牌集团生产的 P. II 42.5R 型水泥，其主要成分是约占 40%~60% 的硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙组成，其加水后的主要反应式如下：



反应生成的雪硅酸钙石呈针状，并逐渐增大形成凝胶及硬化，这是使水泥浆增大强度的主要反应。铝酸三钙与水迅速反应，生成水化铝酸钙，其反应式为：



生成的晶体嵌入凝胶体，使水泥产生结石强度。铁铝酸四钙经水化反应后生成水化铁酸钙。水泥浆的硬化过程分为三个时期：溶解期、胶化期和结晶硬化期，在溶解期水泥与水迅速反应，开始在颗粒表面进行，逐渐溶入水中使周围水溶液达到饱和。胶化期或凝化期凝胶体的形成，使水泥浆具有良好的塑性，此时化学反应继续进行，凝胶体逐渐变稠、凝结。结晶硬化期凝胶体脱水，水化铝酸钙和氢氧化钙结晶嵌入凝胶体，胶体状态迅速变成结晶状态。

### (2) 水玻璃

水玻璃不是单一的化合物，而是氧化钠（ $\text{Na}_2\text{O}$ ）与无水二氧化硅（ $\text{SiO}_2$ ）以各种比例结合的化学物质，其分子式为  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 。水泥浆中加入水玻璃的两个作用，一是速凝剂，掺量较少，一般约占水泥重量的 3%~5%；另一个作用是作为主材料使用，掺量较多。

注浆用水玻璃对其模数和浓度有一定的要求，模数  $M$  是描述水玻璃性能的一个重要参数，其定义为：

$$M = \frac{\text{SiO}_2 \text{克分子数}}{\text{Na}_2\text{O} \text{克分子数}}$$

水玻璃模数的大小对注浆的影响很大。模数小时，二氧化硅含量低，凝结时间长，

结石体强度低；模数大时，二氧化硅含量高，凝结时间短，结石体强度高。模数过大过小都对注浆不利。注浆时，一般要求水玻璃的模数在 2.4~3.4 较为合适。

水玻璃的浓度以波美度  $Be'$  表示。波美度与密度有如下的关系：

$$Be' = 145 - \frac{145}{\rho}$$

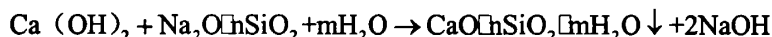
或

$$\rho = \frac{145}{145 - Be'}$$

水玻璃出厂浓度一般为 (50~56)  $Be'$ ，而注浆使用的范围为 (30~45)  $Be'$ 。

### (3) 水泥—水玻璃浆液

水泥—水玻璃浆液即 CS 浆液。水泥的凝结和硬化，主要是水泥水化析出凝胶性的胶体物质所引起的，其反应产生的氢氧化钙与水玻璃反应，生成具有一定强度的凝胶体—水化硅酸钙：



随着氢氧化钙的不断增加，氢氧化钙与水玻璃的反应继续进行，胶质体越来越多，强度也随之增高，CS 浆液的初期强度与氢氧化钙反应起主要作用，后期为水泥本身的水化作用。模数和浓度是控制水玻璃浆液的重要参数，模数  $M$  定义为二氧化硅和氧化钠的物质量之比，模数大小对注浆影响很大，模数小，二氧化硅含量低，凝胶慢并且结石强度低，而模数大则反之，一般注浆的模数  $M=2.4\sim3.4$  为宜。

### (4) 水泥-水玻璃浆液基本性能

水泥-水玻璃浆液最主要的性能表现为凝胶时间和强度等方面。现在其基本性能介绍如下：

#### 1. 凝胶时间

①随着水泥标号的提高，胶凝时间减小；同一标号的水泥，随着水灰比 (W:C) 增大，凝胶时间增大。

②随着水玻璃浓度的增大，凝胶时间增大；同一浓度的水玻璃，随水灰比增大，凝胶时间增大。

③随着 C:S 增大，凝胶时间减小；其他条件相同时，加入缓凝剂，凝胶时间增大。

④随着缓凝剂用量的增大，凝胶时间增长速度加快，缓凝作用更为显著，凝胶时间增大，但会使固结体强度降低。

#### 2. 抗压、抗折强度

①随着水泥标号的提高，抗压强度增大；同一标号的水泥，随水灰比的增大，抗压强度减小。

②水玻璃浓度越大，抗压强度下降越快；同一浓度的水玻璃，随着水灰比增大，抗压强度减小。

③随着C: S的增大，抗压强度增大；其他条件相同时，加入早强剂，抗压强度增大。

### 2.3.3 注浆扩散半径和注浆孔位布设

#### 1. 扩散半径的确定

浆液的扩散半径是在一定工艺条件下，浆液在地层中扩散程度的数学统计的描述值是确定排数、孔距和排距等的重要参数，其值可用理论公式估算。通常，浆液的实际扩散半径都小于各种理论值。这是由于水泥浆液在进入细小裂隙的过程中，注浆压力使浆液中的水分被渗滤出来，浆液逐渐变稠，流动的距离就会变小。其次，计算所用的某些参数在注浆过程中为一变量，从而导致了计算值和实际值的差别，当地基条件复杂或计算参数不易准确选定时，应通过现场注浆试验来确定。

本文采用渗透注浆，代表性的渗透注浆理论有球形扩散理论、柱形扩散理论和袖套管法理论。现介绍球形扩散理论方法<sup>[4]</sup>。

Maag (1938) 的简化计算模型如图 2.2 所示。其中的假定为：①被灌物质结构为均匀的和各向同性的；②浆液为牛顿体；③浆液从注浆管底端注入地基土内；④浆液在地层中呈球状扩散。

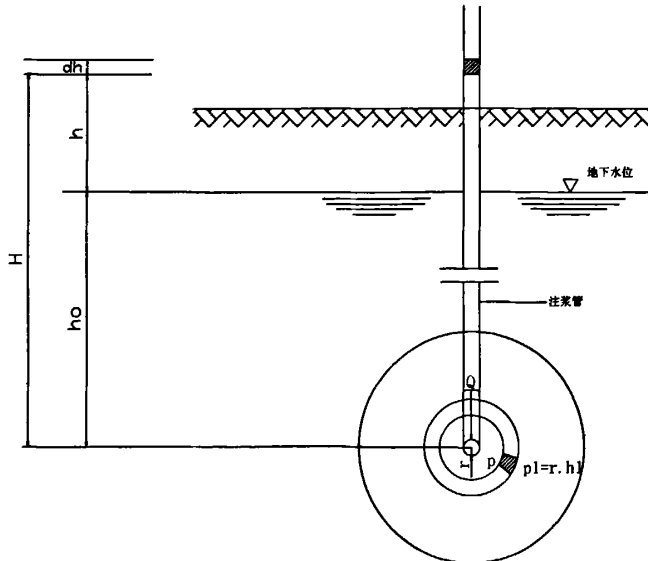


图 2.2 注浆管底端注浆球形扩散

根据达西定律:

$$Q = K_g A t = 4\pi r^2 K_g t (-dh/dr) \quad (2.13)$$

$$-dh = \frac{Q\beta}{4\pi r^2 K t} \cdot dr$$

积分后得:

$$h = \frac{Q\beta}{4\pi K t \cdot 100} \cdot \frac{1}{r} + C$$

当  $r = r_0$  时,  $h = H$ ;  $r = r_1$  时,  $h = h_0$ , 代入上式得:

$$H - h_0 = \frac{Q\beta}{4\pi K t} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right)$$

已知:  $Q = 4/3 \times \pi r_1^3 n$ ,  $h_1 = H - h_0$ , 代入上式得:

$$h_1 = \frac{r_1^3 \beta \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right) n}{3K t \cdot 100}$$

由于  $r_1$  比  $r_0$  大得多, 故考虑  $\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \approx \frac{1}{r_0}$ , 则:

$$h_1 = \frac{r_1^3 \beta n}{3K t r_0 \cdot 100}$$

$$\therefore t = \frac{r_1^3 \beta n}{3K h_1 r_0} \quad (2.14)$$

或

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{3K h_1 r_0 t}{\beta \cdot n}} \quad (2.15)$$

式中:  $K$  为土的渗透系数 (cm/s);  $Q$  为注浆量 ( $cm^3$ );  $K_g$  为浆液在地层中的渗透系数

(cm/s),  $K_g = \frac{K}{\beta}$ ;  $\beta$  为浆液粘度对水的粘度比;  $A$  为渗透面积 ( $cm^2$ );  $r$ 、 $r_1$  为浆液的

扩散半径 (cm);  $h$ 、 $h_1$  为注浆压力 (MPa);  $h_0$  为注浆点以上的地下承压水头, (MPa);

$H$  为地下水压头和注浆压力之和 (cm);  $r_0$  为注浆管半径 (cm);  $t$  为注浆时间 (s);  $n$

为土的孔隙率。

## 2. 注浆孔位的布设

注浆孔的布设是根据浆液的有效范围，并应相互重叠，使被加固土体在平面和深度范围内连成一个整体的原则决定的。

### (1) 单排孔的布置

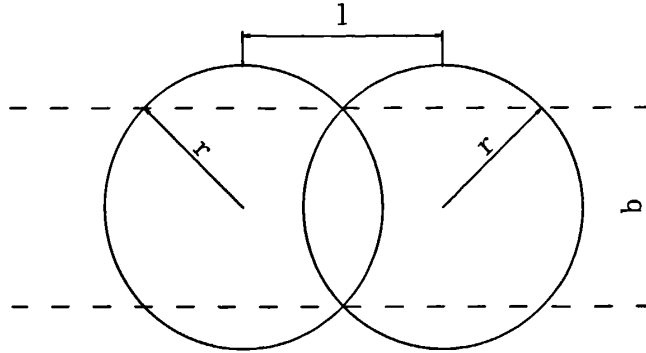


图 2.3 单排孔的布置

如图 2.3 所示， $l$  为注浆孔距， $r$  为浆液扩散半径，则注浆体的厚度  $b$  为：

$$b = 2\sqrt{r^2 - \left[ (l-r) + \frac{r-(l-r)}{2} \right]^2} = 2\sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} \quad (2.16)$$

当  $l=2r$  时，两圆相切， $b$  值为零。

如注浆体的设计厚度为  $T$ ，则注浆孔距为：

$$l = 2 \cdot \sqrt{r^2 - \frac{T^2}{4}} \quad (2.17)$$

### (2) 多排孔布置

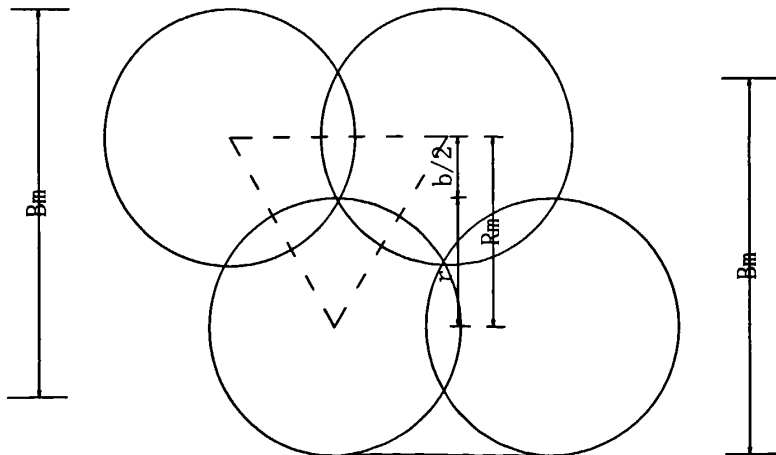


图 2.4 孔排间的最优搭接

当单排孔不能满足设计厚度的时候，就要采用两排以上的多排孔。而多排孔的设计原则是要充分发挥注浆孔的潜力，以获得最大的注浆体的厚度，不允许出现两排孔间的搭接不紧密的“窗口”，也不要要求搭接过多出现浪费。

图 2.4 为两排孔正好紧密搭接的最优设计布孔方案。

根据上述分析，可推导出最优排距  $R_m$  和最大注浆有效厚度  $B_m$  的计算公式。

① 两排孔

$$R_m = r + \frac{b}{2} = r + \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} \quad (2.18)$$

$$B_m = 2r + b = 2 \left[ r + \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} \right] \quad (2.19a)$$

② 三排孔

$R_m$  与上式相同

$$B_m = 2r + b = 2 \left[ r + 2\sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} \right] \quad (2.19b)$$

③ 五排孔

$R_m$  与上式相同

$$B_m = 2r + b = 4 \left[ r + 1.5\sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} \right] \quad (2.19c)$$

综上所述，可得出多排孔的最优排距为  $R_m = r + \frac{b}{2} = r + \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}}$ ，最优厚度则为：

① 奇数排

$$B_m = (n-1) \left[ r + \frac{(n+1)b}{(n-1)2} \right] = (n-1) \left[ r + \frac{(n+1)}{(n-1)} \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} \right] \quad (2.20)$$

② 偶数排

$$B_m = n \left( r + \frac{b}{2} \right) = n \left[ r + \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}} \right] \quad (2.21)$$

上述公式中，n 为注浆孔排数。



### 2.3.4 注浆压力设计计算

注浆压力是给予浆液在土层中渗透、扩散及劈裂、压实的能量，其大小决定着注浆效果的好坏和费用的高低。用较高的注浆压力可增加浆液的扩散能力，使钻孔数尽可能的少，从而降低注浆费用。同时，高压可使软弱地基的强度和不透水性得到改善，还可挤出浆液及土中多余水分，使结石体强度得以提高，土的密度增加。但注浆压力超过某一界限时，可导致地基土产生剪切破坏。注浆压力的大小和土的密度、强度、渗透性、钻孔深度、位置、注浆顺序及注浆材料的性质有关，一般可参照类似工程的经验和有关公式初步拟出，再在工程实施中的前期逐步调整确定。

破碎岩体注浆，岩石地基注浆容许压力公式为：

$$p = p_0 + m_1 m_2 D \quad (2.22)$$

式中： $p_0$ 为容许注浆压力初值， $10^5 \text{ Pa}$ ； $m_1$ 为注浆方法系数， $10^5 \text{ Pa/m}$ ； $m_2$ 为注浆次序系数， $10^5 \text{ Pa/m}$ ，I、II、III序孔分别选择1、1~1.25、1~1.5；D为注浆段埋深，m。 $p_0$ 及 $m_1$ 可由表2.1查出。

表 2.1  $p_0$  及  $m_1$  选用表

岩性	$p_0$ ( $10^5 \text{ Pa}$ )	$m_1$ ( $10^5 \text{ Pa/m}$ )	
		自上而下	自下而上
裂隙细小且小，结构密实的岩石	1.5~3.0	2.0	1.0~1.2
弱风化裂隙岩石、无大裂隙但有层理沉积岩	0.5~1.5	1.0	0.5~0.6
严重风化裂隙岩石、有近水平层理的沉积岩	0.25~0.5	0.5	0.2~0.3

### 2.3.5 注浆量计算

单孔注浆量按下式计算：

$$Q = \pi r^2 H n a (1 + \beta) \quad (2.23)$$

r: 扩散半径

H: 注浆段长

n: 孔隙率

a: 浆液填充率

$\beta$ : 浆液损失率

## 2.4 注浆次序

注浆次序必须采用适合于地基条件、现场环境及注浆目的的方式进行，而且注浆次序对注浆效果好坏有着很大的作用，一般的注浆次序的原则是从外围进行围、堵、截，内部进行填、压。

以堵水、防渗为目的的注浆，原则上，注浆的施工次序就是逐渐缩小孔距，即钻孔逐渐加密。其优点是：浆液逐渐挤密压实，可以促进注浆的连续性；能够逐序升高注浆压力，有利于浆液的扩散和提高浆液结石的密实性；根据各次序孔的单位注入量的分析，可反映出注浆情况和注浆质量，为增减注浆孔提供依据；减少邻孔串浆现象，有利于施工。

以加固为目的的注浆孔的施工特点是“围、挤、压”，就是先将注浆区圈围住，再在中间插孔注浆挤密，最后逐序压实，这样易于保证注浆质量。所以，注浆的施工次序必须遵循逐渐加密的原则。先注第一次序孔，而后开始第二次序孔的注浆，依次类推。这样还可以随着各次序孔的推进，及时检查注浆效果。

## 第三章 地表预注浆技术的实施应用

### 3.1 工程概况

天汕高速公路广福隧道，位于广东省梅州市蕉岭县广福镇和文福镇之间，为分离式双洞隧道，其中左线隧道起止里程 LK5+932~LK8+046，全长 2114 米，平面线形采用直线和半径 6701.683m 的圆曲线；右线隧道 K5+942~K8+043，全长 2101 米，平面线形采用直线和半径 4100m 的圆曲线。隧道左、右线纵坡均为-1.72%，路面横坡 2%；隧道建筑限界宽 10.75 米，高 5 米，内轮廓净宽 10.75 米，净高 7.01 米。广福隧道平面位置受隧道两端洞外展线、隧址区地形、地貌、工程地质和水文地质等条件控制。隧道左右线分修，为了尽量减小隧道左右线施工的相互干扰，同时方便隧道外展线；依据隧道总体的地质条件，最后确定左右线隧道的隧道中线间距为 35~45m。隧道前后路基采用分离式路基，路线平面设计线为分离式路基左侧边缘线，距行车道中心线 5.5m，距隧道中心线 5.85m。

广福隧道纵面位置尽量缩短隧道的长度，以控制隧道规模；尽量降低洞外接线工程难度、提高隧道的运营和养护条件；选择地质条件好的位置进洞，降低隧道洞口工程量和进洞的施工难度。鉴于隧址区地下水不丰，隧道排水压力不大；同时为了尽量利用汽车活塞风，提高隧道的通风效果，考虑到路线从龙岩至梅州呈总体下降趋势，左右线均采用-1.72%单向坡。路线纵断面设计线为左侧路缘带左边沿线，纵断面设计线距行车道中线 4.50m，距隧道中线 4.85m。隧道设计标高线为左侧水沟盖板顶与电缆沟壁交点的连线，其距行车道中线 4.25m，距隧道中线 4.60m。

隧道近南北走向。山脊最大高程 480.0 米，相对高差 180.0 米，属于低山丘陵地貌。北端洞口外地势比较平坦，为一山间小盆地；南端地处山间沟谷，地势比较复杂。山体受后期（喜山期）的构造运动影响比较严重，断层发育，小断层较多。其中对隧道影响较大的 F1 断裂，与隧道走向平行；其次级的小断层横贯隧道，造成围岩破碎，岩体完整性差。

注浆段为隧道左线 LK7+650~LK7+710，长 60 米。此段属于浅埋偏压段，最大埋深为 29.3 米，最小埋深为 23 米，围岩比较破碎。

### 3.2 场地工程地质与水文地质条件

#### 3.2.1 地层结构及岩性

隧道山体表层以第四系坡积、残积、冲积而形成的填土层所覆盖；下伏基岩为燕山期中粗粒粹裂花岗岩，岩石构造节理裂隙发育，岩芯以短柱状、粹块状、块状为主，地层自上而下分为5层：

(1) 素填土：浅黄~褐红色，湿，主要是由于附近坡积和山体滑坡或冲积堆积而成，土质均匀性差，松散，含较多的粹石块，顶部见大量的植物根须。

(2) 强风化粹裂花岗岩：肉红色为主，夹灰褐色；岩石成分主要以钾长石、石英为主，含少量的黑云母，中粗粒结构，粹块用手可折断，场区均有分布，层厚不均。

(3) 强~弱风化粹裂花岗岩：肉红~褐红色，中粗粒结构；岩石成分以钾长石、石英为主，含少量的黑云母及叶腊石，构造节理裂隙非常发育，裂隙面叶腊石化成灰绿色，偶见石英脉，节理面常被铁锰质渲染严重成褐黑色，岩芯呈粹块状，局部短柱状。RQD约10%~13%，属II类围岩。

(4) 弱风化粹裂花岗岩：肉红~褐红色，岩石成分以钾长石、石英为主，含少量的黑云母及叶腊石，由于受构造运动的影响，岩芯呈粹块状、块状镶嵌结构产出。构造节理裂隙发育，节理面常被铁锰质渲染，沿节理发育处钾长石风化严重，岩石强度稍差。RQD约7%~62%，属II~III类围岩。

(5) 微风化粹裂花岗岩：肉红~褐红色，岩石成分以钾长石、石英为主，含少量的黑云母及叶腊石，中粗粒结构。由于受构造运动的影响，岩石呈大块状、块状镶嵌结构，裂隙面偶见铁锰质渲染，岩石新鲜、坚硬。RQD约13%~78%，属III类围岩。

广福隧道所穿越山体为燕山五期的花岗岩体，岩性以粗粒花岗岩为主，呈块状、巨块状，整体岩性较好。山体表层以第四系的坡、残积形成的硬塑—坚硬状的亚粘土、含砾亚粘土及砾石，进、出洞口位置主要以硬塑状的亚粘土及全、强风化花岗岩为主。

#### 3.2.2 地质构造及地震

注浆段 LK7+650~LK7+710 多为弱风化粹裂花岗岩，局部微风化，中粗粒结构；岩石成分以钾长石为主，石英次之，含少量的黑云母；受构造运动影响，岩石构造节理裂隙发育，整体岩石呈块石状、碎石块状镶嵌结构产出，破碎裂隙常被铁锰质渲染成褐黑

色，偶见热液蚀变矿物叶腊石和石英脉填充。整体岩石受构造应力作用，热液蚀变矿物叶腊石含量较多，常呈不规则脉状、团块状出现，致使岩石整体强度变低，岩石常沿裂隙面断开，而且松散状的覆盖土层相对较厚，顶板岩石厚度薄且破碎，同时结合钻孔施工时泥浆大量漏失的情况，开挖时极有可能出现大面积的坍塌、冒顶现象。

因此在该段实施地面高压预注浆处理，提高围岩强度，降低围岩的透水性能，以便隧道安全迅速的通过破碎带。

根据广东省地震烈度区划图(1:1800000)，广东省蕉岭县处于VI度地区、梅县处于VII度地区。根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)和《公路工程技术标准》(JTG B01-2003)，梅州地区的地震动峰值加速度系数(g)为0.05，采用简易抗震设防。

### 3.2.3 水文地质条件

根据现场记录，钻机钻进时大部分钻孔有泥浆漏失现象。钻孔稳定水位观测：稳定水位在0.10~35.50米之间，证明基岩裂隙具有一定的导透水能力。分析认为此段地层地下水均以孔隙潜水、基岩裂隙水为主，补给来源于地表。场区左侧有一季节性冲沟，雨季流量大于40m<sup>3</sup>/d，旱季出现断流由于地表覆盖层为冲、坡积松散状填土，含砂量高，渗蓄水性能好，基岩构造节理裂隙发育，故地表水容易直接补给。

根据计算预测，开挖后单孔隧道涌水量达到717.35 m<sup>3</sup>/d。但龙岩端涌水量少些，梅州端涌水量大些，隧道涌水量随季节变化较大。施工时应加强预测，并做好防、排水措施。

根据隧道水样试验，参照分解类腐蚀评价标准，此段地表水与地下水均无侵蚀性。

## 3.3 注浆的目的及注浆工艺

隧道穿越破碎、浅埋、富水区，极易造成冒顶、塌方和突水现象，造成重大的安全隐患。本次注浆区域外围采用水泥-水玻璃双液浆，内部采用水泥浆液。通过对地表注浆关键工艺的研究，以提高注浆填充、加固断层破碎带的效果，以期降低围岩渗透系数、改善隧道成拱的作用，即通过注浆管将浆液均匀地注入地层中，浆液以填充、渗透和挤密等方式，赶走岩石裂隙中的水分和空气后占据其位置，经过人工控制一定时间后，浆液使原来松散的裂隙胶结成一个整体，形成一个结构新、强度大、防水性能高和化学性能良好的“结石体”，进而达到保护地下水资源、保证工程安全的目的；通过对注浆地段隧道结构受力状态的测试和洞内出漏水状态的量测，分析采用地表注浆后浅埋破碎带

围岩级别的改善程度和减少该段洞内涌水量。

本次注浆从其施工作用上，施工工艺属于静压注浆中的固结注浆，从注浆理论上又属于渗透注浆。

### 3.4 广福隧道注浆实施

#### 3.4.1 注浆设备及注浆材料

注浆设备选用郑州众鑫机械厂生产的 FBY-50/70 型液压注浆机。主要工作指标如表 3.1 所示：

表 3.1 设备的性能指标

主要指标	数值	单位
流量	50	L/min
工作压力	0.5~7	Mpa
电机功率	11	Kw

注浆采用水泥单液浆和水泥~水玻璃双液浆两种浆液。其中水泥选用广东塔牌集团生产的 P. II 42.5R 型水泥，双浆液中的水玻璃采用广东丰顺外加剂厂生产的 40Be’，模数为 2.65 的中性硅酸钠。

对浆液的性能作了几组有代表性的现场配合比，通过现场试验得出的凝结时间、强度等性能，选择适合广福隧道地表注浆的最佳配合比。各配合比下的凝结时间、强度变化如表 3.2 所示。

表3.2 现场试验配合比

水灰比	水玻璃:水泥 (质量比)	凝结时间		抗压强度 (MPa)		抗折强度 (MPa)	
		初凝	终凝	3天	28天	3天	28天
1: 1	3%	2h35min	4h42min	4.48	9	2.4	3.6
0.8: 1	3%	1h47min	4h54min	7.52	14.1	2.6	3.83
0.7:1	3%	1h40min	2h46min	7.6	14.8	3.08	4.25
0.7:1	0	2h31min	3h32min	10.6	19.8	3.38	5.23
0.6: 1	3%	1h2min	3h51min	13.88	24.2	3.95	5.83
0.5:1	0	1h15min	3h40min	19.6	29.4	5.27	7.48
0.8: 1	17%	45min	2h57min	5.1	8.8	1.5	2.18

0.8:1	15%	1h24min	2h41min	5.3	10.3	1.53	2.19
0.8:1	19%	21min40s	2h11min	4.53	6.35	1.32	2.12

因此, 根据现场配合比试验及设备所能达到的要求, 决定单浆液采用水灰比为 0.5:

1, 双浆液采用水灰比为 0.8: 1, 水玻璃和水泥的质量比为 15%。

### 3.4.2 注浆范围

注浆范围可根据地质情况、地下水压力大小和隧道施工方法等因素综合考虑。一般来说, 注浆加固半径为隧道开挖半径的 2-3 倍, 当地下水压力过大或在水下施工时, 应为隧道开挖半径的 4-6 倍<sup>[10]</sup>。

本次地表注浆加固的区段为 LK7+650~LK7+710; 竖向范围为开挖轮廓拱顶以上 8 米至拱底以下 2 米; 横向范围为开挖轮廓以外 3.8 米。注浆时, 先行钻孔, 钻孔孔径为 91mm; 之后在钻孔内放入 32mm 的钢管, 钢管下半段设置注浆孔; 最后通过钢管向围岩注浆; 在有地质钻孔处应利用地质孔作为注浆孔。具体的加固范围如图 3.1 所示:

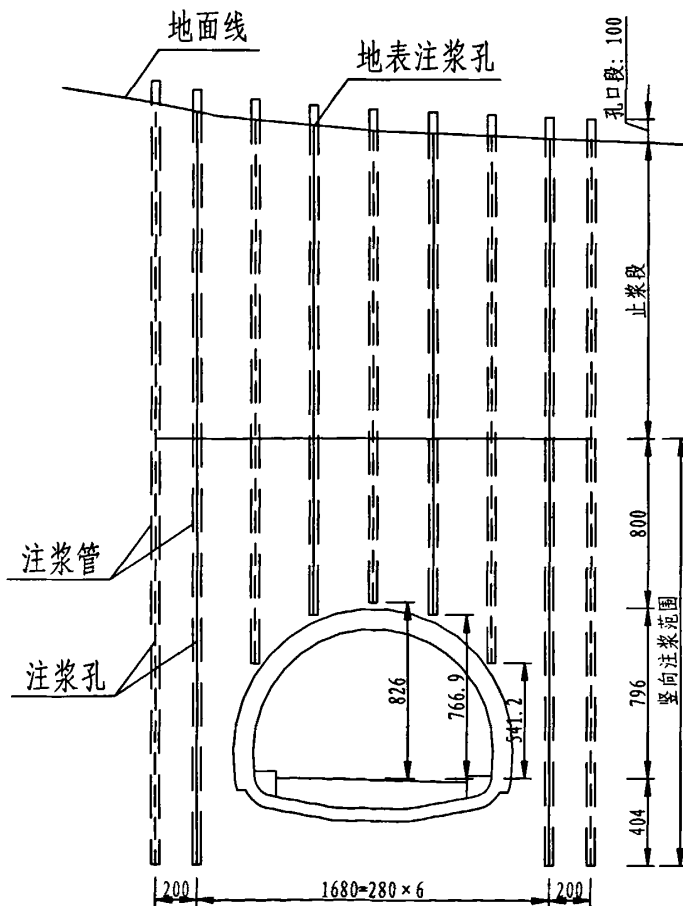


图 3.1 注浆加固图

### 3.4.3 注浆孔位的布设

在广福隧道的设计中，由于地层的不均匀性，浆液的扩散半径是不规则的，利用公式很难准确计算扩散半径。注浆扩散半径与渗透系数、孔隙率、注浆压力、浆液的注入能力、浆液的粘度及注浆时间等多方面的因素有关。本设计根据注浆试验确定注浆的扩散半径为 1.5 米，并通过现场对注浆压力、注浆注入能力和注浆时间等情况来及时调整注浆扩散半径。其孔位平面图和孔位布设图如图 3.2 和图 3.3 所示。

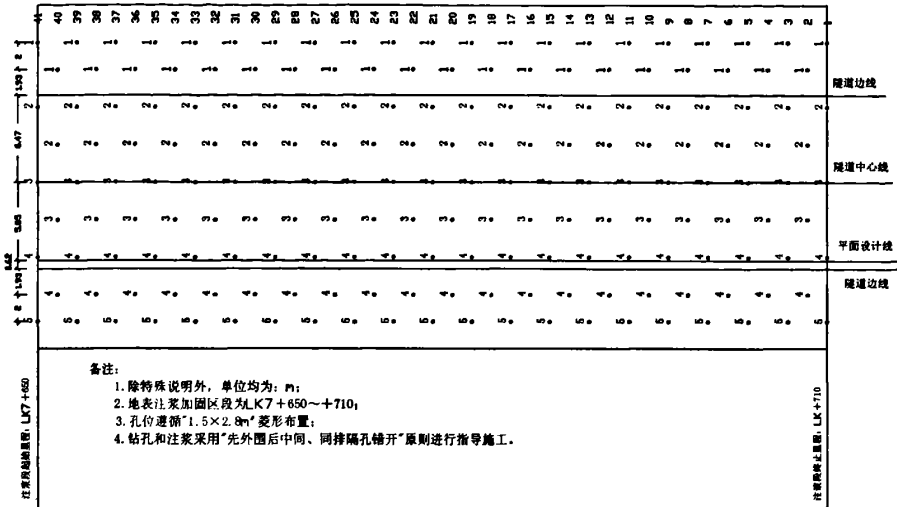


图 3.2 地表注浆孔位平面图

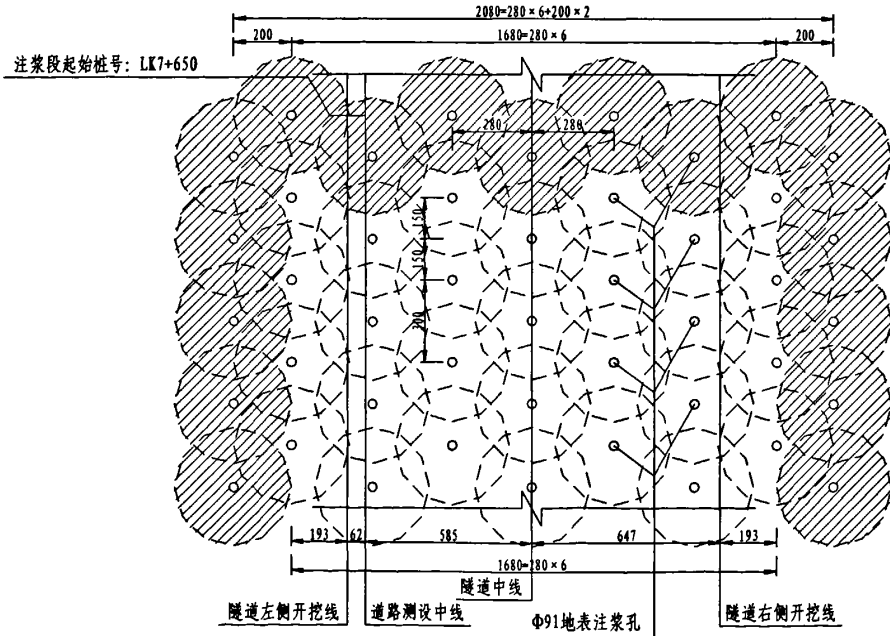


图 3.3 地表注浆孔位布设图



### 3.4.4 注浆次序及注浆压力

广福隧道注浆以堵水和加固为目的，所以总体注浆顺序为：由出口梅州段向进口龙岩段方向按顺序进行，注浆时先外围后内部，并采取同排隔孔错开的注浆方式。每孔又采取分段注浆的方式，每次注浆结束后及时清孔，以便保证下次顺利压注。

在注浆区域的外围采用水泥-水玻璃双液浆，内部采用水泥浆液；当内部区域的地下水丰富、地下水活动较强、单孔注浆量太大时，采用水泥-水玻璃浆液，根据实际情况确定。

本次注浆岩性属于弱风化裂隙岩石、无大裂隙但有层理的沉积岩，所以经公式 2.3-11 计算得到注浆容许压力为：1~3MPa。

### 3.4.5 注浆的施工方法及施工要点

#### 1. 施工方法

广福隧道注浆施工方法采用自下而上分段注浆法。此注浆方法是将钻孔一直钻到设计孔深，然后自下而上逐段进行注浆。如图 3.4 所示。

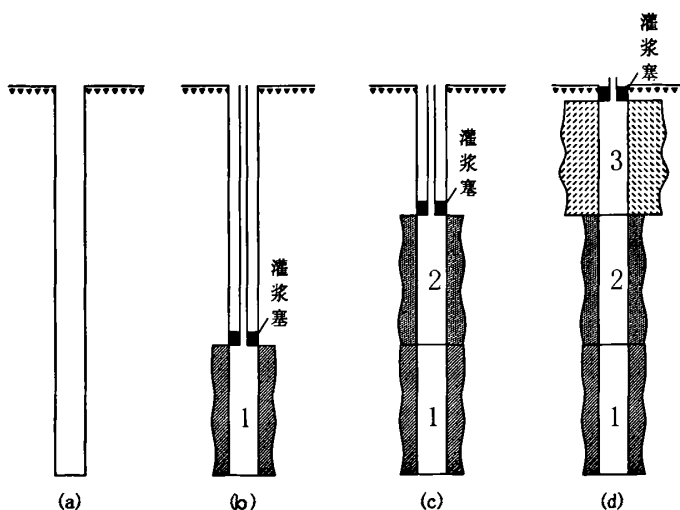


图 3.4 自下而上分段注浆程序示意图

(a) 钻孔；(b) 第一段注浆；(c) 第二段注浆；(d) 第三段注浆

1、2、3—注浆先后顺序的段号

#### 2. 注浆工艺要点

(1) 注浆开始前做好准备工作，包括机械器具、仪表、管路、注浆材料、水、电等的检查及必要试验。

(2) 注浆过程中，经常观测和记录注浆压力的变化情况，掌握注浆量。特别要注

意止浆盘的变形和饱浆情况。如果止浆盘发生变形，应停止注浆，及时处理。发生跑浆时，及时用填塞棉砂、打木楔和糊塑胶泥或速凝砂浆的方法堵漏。

(3) 为使浆液在本孔一定范围内扩散，而不致串浆或冒浆，影响注浆效果，在进浆量很大而压力不上升的情况下，以注浆量控制注浆为结束标准，当进浆量很小时，以注浆压力来控制。

(4) 启动注浆泵，正常运转后关闭泵口阀门，泵停止运转后，旋转压力调节旋钮，将油压调在要求的油压刻度值上，随着注浆阻力的增大，泵压随之增高，当达到调定值时，会自动停泵。

### 3.4.6 地表注浆过程

地表注浆过程如下：

1. 清理地表施工现场；如图 3.5 所示：



图 3.5 场地清理图

2. 按设计布置钻孔位置并开始钻孔，钻孔孔径为  $\phi 91$ ，之后在钻孔内放入  $\phi 32$  的钢管，钢管下半段设置注浆孔，在有地质钻孔时用其作为注浆孔。钻孔过程如图 3.6 所示：



图 3.6 钻孔图

3. 取芯：对岩质情况进行钻孔取芯，如图 3.7 所示：

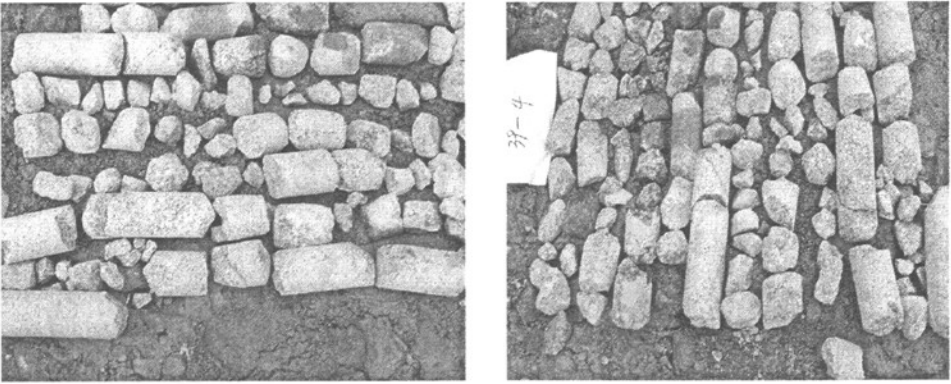


图 3.7 钻孔后岩芯取样图

4. 清孔：采用高压风将孔内泥浆杂物吹干净；
5. 下管：将加工好的管子插入孔内；
6. 封孔：为确保压力，保证注浆效果，将钢管与地面接头处的缝用水泥砂浆封严实，露出地表的钢管不得打眼钻孔；
7. 压浆：以压浆机将配好的浆液注入孔内。双液注浆工艺流程如图 3.8 所示：

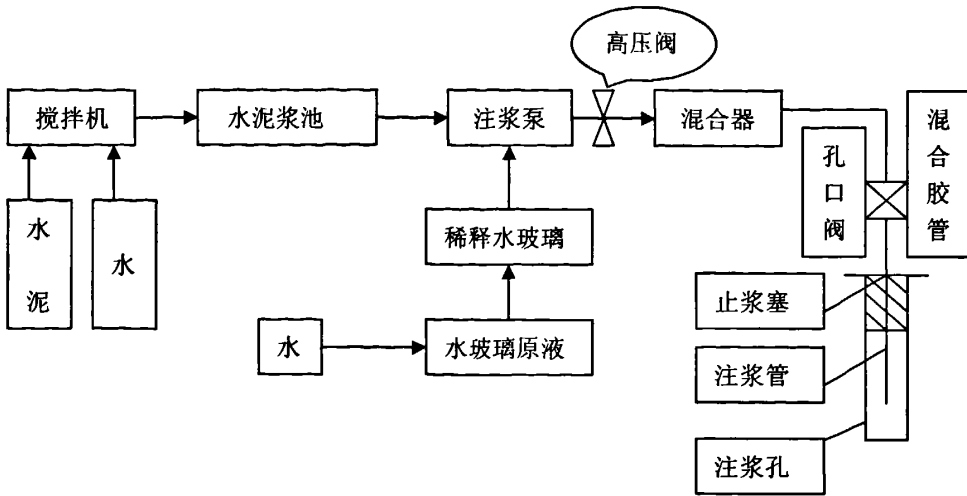


图3.8 注浆工艺流程图

### 3.4.7 异常情况的处理

#### 1. 串浆

在注浆过程中，当浆液从其他注浆钻孔内流出的现象，称为串浆。防止及处理串浆的主要措施有：

- (1) 对注浆孔进行间隔注浆；
- (2) 适当延长相邻两注浆孔先后施工的间隔时间，待前一孔注浆的浆液基本凝固后，再开始后一孔的注浆；
- (3) 将串浆孔用止浆塞堵住，待注浆结束后，串浆孔再继续注浆。

#### 2. 冒浆

在注浆过程中，浆液沿着注浆管或地质裂隙冒出地表的現象，称为冒浆。冒浆的处理措施有：

- (1) 在冒浆处，采用麻线等物嵌入有浆液冒出缝隙内，再用水玻璃、水泥混合液进行及时封堵；
- (2) 采用低压、浓浆、限流、限量、间歇注浆的方法进行灌注；
- (3) 在地表设置止浆盘，尤其是埋层较浅处的注浆，山体上覆压力不够或注浆压力过大都将导致冒浆。止浆盘施作采用在地表覆盖双层钢筋网片后再喷射20cm厚的混凝土。

### 3. 浆液无法注入

- (1) 找出注浆中断原因，尽快解决，及早恢复注浆。
- (2) 如不能立即恢复注浆，应立即冲洗注浆管，防止堵管，而后再恢复施工。

### 4. 漏浆

- (1) 采用低压、浓浆、限流、限量、间歇注浆的方法进行灌注。
- (2) 必要时，可注入砂浆或其他填充材料先堵漏浆通道再按方法①进行处理。
- (3) 采用水泥—水玻璃双浆液进行处理。

## 第四章 广福隧道地表注浆数值模拟

### 4.1 基本原理

#### 4.1.1 有限元法简介

在众多的工程数值计算方法中，有限元法(FEM)很早就以其适用性强的突出优点而成为工程数值分析中最有效的工具。经过半个世纪的发展，有限单元法已十分成熟并在各个领域的工程分析中广泛应用<sup>[1]</sup>。

有限元法的基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个、且按一定方式相互连接在一起的单元的组合体。由于单元能按不同的连接方式进行组合，且单元本身又可以有不同的形状，因此可以模型化几何形状复杂的求解区域。有限元法作为数值分析方法的另一个重要特点是利用在每一个单元内假设的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数或其导数在单元的各个结点的数值和其插值函数来表达。这样一来，一个问题的有限元分析中，未知场函数或其导数在各个结点上的数值就成为新的未知量（也即自由度），从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。一经求解出这些未知量，就可以通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值，从而得到整个求解域上的近似解。显然随着单元数目的增加，也即单元尺寸的缩小，或者随着单元自由度的增加及插值函数精度的提高，解的近似程度将不断改进。如果单元是满足收敛要求的，近似解最后将收敛于精确解。

完整的有限元分析流程如图 4.1 所示。

#### 4.1.2 开挖（卸荷）施工的模拟

隧道开挖施工过程主要包括岩体分步开挖及支护结构的分步设置等。用以模拟不同施工阶段力学性态的有限元方程为：

$$([K_0] + [\Delta K_i])\{\Delta \delta_i\} = \{\Delta F_{ir}\} + \{\Delta F_{ia}\} \quad i=1 \sim M \quad (4-1)$$

式中： $M$ ——施工总阶段数；

$[K_0]$ ——开挖前岩土体的初始总刚度矩阵；

$[\Delta K_i]$ ——施工过程中岩土体和支护结构刚度的增量或减量，其值为挖去

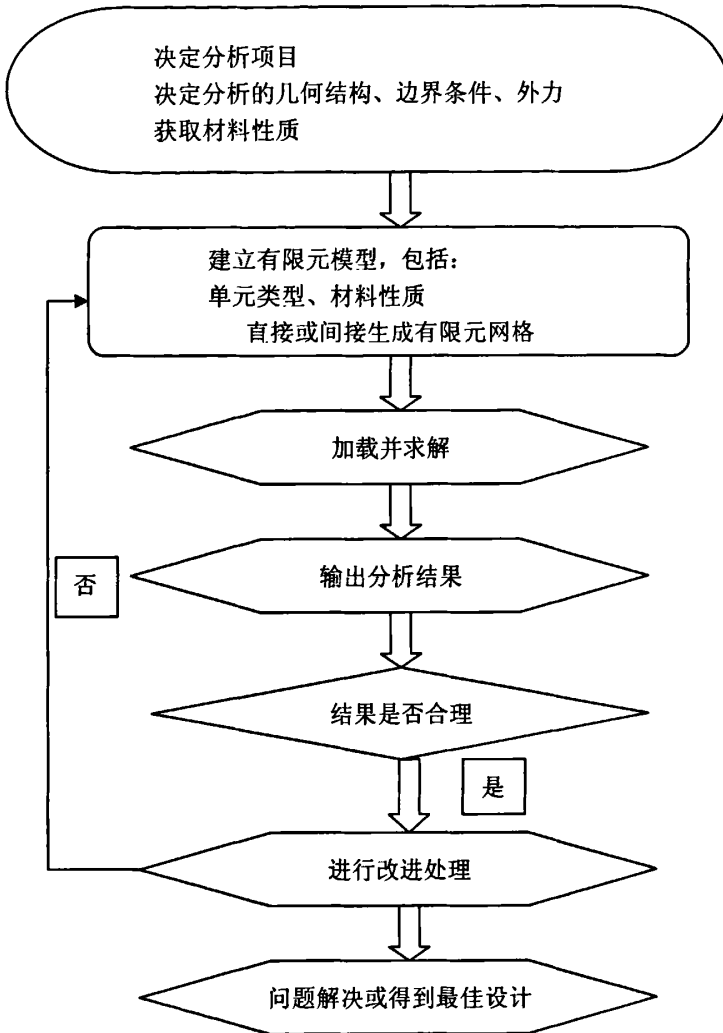


图 4.1 有限元分析流程

岩土体单元及设置或拆除支护结构单元的刚度；

$\{\Delta F_{ir}\}$ ——由开挖释放产生的边界增量节点力列阵，初次开挖由岩土体自重、地下水荷载、地面超载等确定，其后各开挖步由当前应力状态决定；

$\{\Delta F_{ia}\}$ ——施工过程中增加的节点荷载列阵；

$\{\Delta \delta_i\}$ ——任一施工阶段产生的节点增量位移列阵。

任一施工阶段  $i$  的位移  $\{\delta_i\}$ 、应变  $\{\varepsilon_i\}$  和应力  $\{\sigma_i\}$  分别为：

$$\{\delta_i\} = \sum_{j=1}^i \{\Delta\delta_j\}; \quad (4-2)$$

$$\{\varepsilon_i\} = \sum_{j=1}^i \{\Delta\varepsilon_j\} \quad (4-3)$$

$$\{\sigma_i\} = \{\sigma_0\} + \sum_{j=1}^i \{\Delta\sigma_j\} \quad (4-4)$$

式中： $\{\sigma_0\}$ ——初始应力；

$\{\Delta\sigma_j\}$ ——各施工阶段的增量应力。

在施工过程的有限元仿真分析中，以不同的开挖阶段来进行模拟的；分步卸载由开挖面向前推进引起，

#### 4.1.3 计算软件简介

本文所用计算软件 ANSYS 是一种大型通用有限元软件。能够进行包括结构、热、声、流体、电磁场等学科的研究。在土木工程、航天航空、交通等领域有着广泛的应用。它的功能有以下几点：

1. 建立计算模型或者输出结构、组件或系统的 CAD 模型；
2. 应用施加载荷或者其他设计条件；
3. 研究模型的物理响应，比如应力水平等；
4. 做数值模拟实验；
5. 对结构进行优化设计。

#### 4.1.4 隧道施工过程的有限元软件模拟

##### 1. 初始地应力的模拟

在所用软件中，有两种方法可用来模拟初始地应力，一种是只考虑岩体的自重应力，忽略其构造应力，在分析的第一步，首先计算岩体的自重应力场。这种方法计算简单方便，只需给出岩体的各项参数即可计算。不足之处在于计算出的应力场与实际应力场有偏差，而且岩体在自重作用下还产生了初始位移，在继续分析后续施工工序时，得到的位移结果是累加了初始位移的结果，而现实中初始位移早就结束，对隧洞的开挖不产生影响，因此在以后的每个施工阶段分析位移场时，需减去初始位移场<sup>[12]</sup>。

在进行结构分析时，所用软件中可以使用输入文件来把初应力指定为一种载荷，因



此当具有实测的初始地应力资料时,可将初始地应力写成初应力载荷文件,然后读入所用软件作为载荷条件,就可直接进行第一步的开挖计算。所得应力场和位移场就是开挖后的实际应力场和位移场,无需进行加减。

## 2. 开挖与支护过程的模拟

在软件中可以用杀死和激活单元来模拟材料的消去和添加。利用这种单元的生死功能,可以简单有效地模拟隧道的开挖和支护过程。

杀死单元时,程序将通过用一个非常小的数乘以单元的刚度,并从总质量矩阵消去单元的质量来实现“杀死”单元。无活性的载荷(压力、热通量、热应变等等)被设置为零。隧道开挖时,可直接选择将被开挖掉的单元,然后将其杀死(ekill),即可实现开挖的模拟。

施作支护时,可首先将相应支护部分在开挖时被杀死的单元激活(ealive),然后改变其材料性质参考号(mpchg)。

## 4.2 计算模型及参数

### 4.2.1 计算假定

- (1) 计算模型取为线弹性,认为岩体及衬砌的受力和变形在弹性范围内变化;
- (2) 岩体的变形是各向同性的;
- (3) 隧道的受力和变形是平面应变问题;
- (4) 岩体的初始应力场不考虑构造应力,仅考虑其自重应力;

依照上述条件建立了隧道的有限元计算模型。在有限元计算中,边界约束条件对计算结果影响较大。因此,为尽量减少二维有限元模型中边界约束条件对计算结果产生的不利影响。计算模型的边界范围按照以下原则进行了确定,即有限元计算模型所取的地层范围是:水平方向取约6倍隧道宽度约65m,垂直方向隧道左侧的距离约50米,右侧距离约35米,而隧道上方就按实际地形建立模型。仿真模型图及模型网格划分图分别如图4.2、图4.3所示。

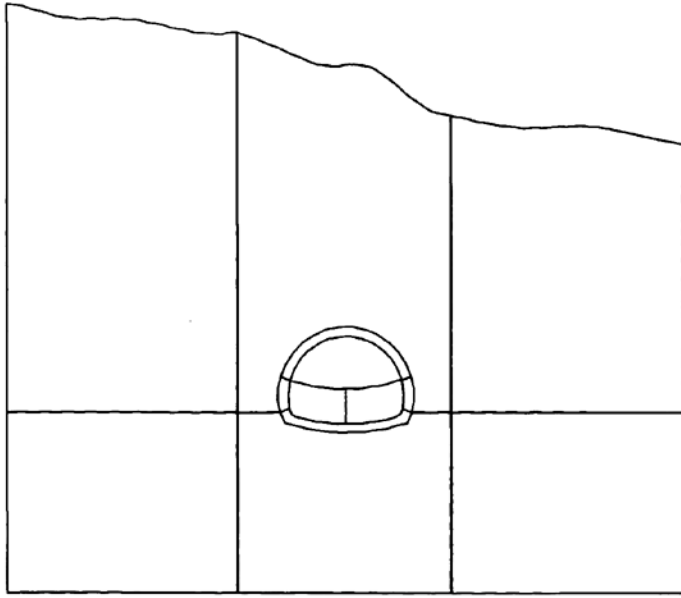


图 4.2 仿真模型图

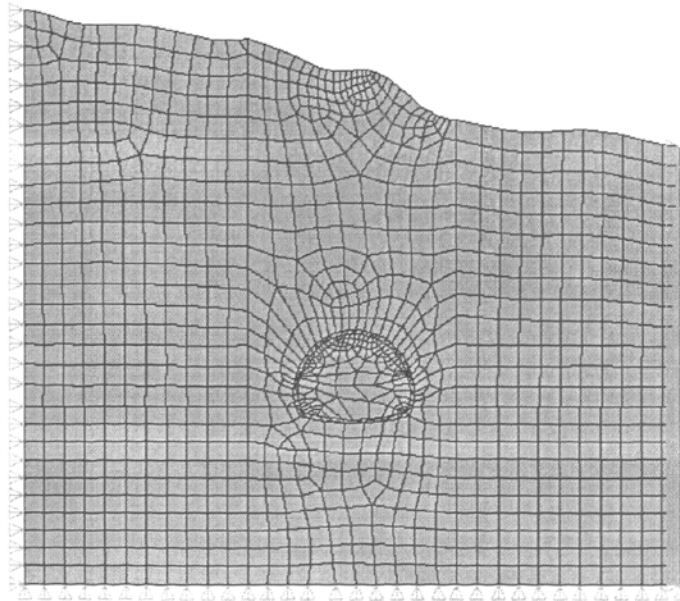


图 4.3 网格划分图

#### 4.2.2 计算内容说明

本文采用分步开挖支护的方法分别计算了隧道注浆前和注浆后结构的受力, 并进行注浆前后结构受力的比较。在计算中, 围岩材料的本构关系采用 Drucker-Prager (D-P) 模型。

### 4.2.3 模拟说明

本次有限元计算中隧道结构的有限元计算采用隧道与地层共同作用的受力模式模拟分析隧道结构的受力与变形。一次衬砌用梁单元进行模拟,其模量为格栅钢架和喷射混凝土的综合模量,即将喷射混凝土的模量提高到1.2倍,并利用梁单元来分析塌方处治后一次衬砌的受力和弯矩情况;围岩、二次衬砌和注浆段均用二维平面应变单元进行模拟,分析地表注浆前后地表沉降和周边围岩收敛情况。隧道开挖支护的应力释放情况:隧道开挖释放40%应力,一次衬砌释放再释放40%应力,最后二次衬砌释放其余20%应力。

### 4.2.4 计算模型的参数选取

本文计算模型的各项参数选取如表4.1所示:

表 4.1 参数值选取

类别	E (pa)	u	Dense (kg/m <sup>3</sup> )	C (MPa)	$\Phi$ (°)
II类围岩	2e9	0.35	1900	0.1	25
一次衬砌	23e9	0.2	2300	0.5	30
二次衬砌	29e9	0.2	2500	0.6	35
注浆段	18e9	0.3	2100	0.4	28

## 4.3 有限元数值模拟计算结果分析

### 4.3.1 未注浆的结果分析

#### 1. 初期支护结果分析

由于初期支护的受力情况决定了开挖后隧道的稳定,所以在隧道整个受力分析中是十分重要的。计算得到的轴力和弯矩大小如图4.4和4.5。

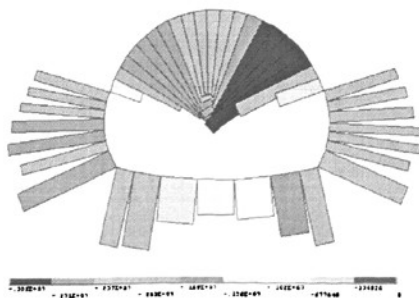


图 4.4 初期支护轴力图 (Pa)

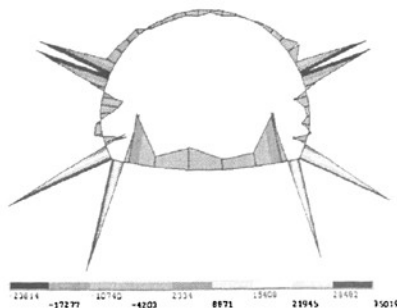


图 4.5 初期支护弯矩图 (N·m)

从轴力图可以看出：最大拉应力出现在左侧边墙底部与仰拱结合部位，最大值约为 2.7MPa。在起拱线附近拉、压应力出现了变换，这是由于分部开挖施工正好开挖至起拱线处附近，所以其起拱线处就容易形成拉、压应力结合部。拱顶和拱腰处的压力比较平均，均在 2.2~3MPa 之间；边墙处以受拉为主，大小为 2~2.6MPa；仰拱部位受拉，大小为 1~2MPa，只有仰拱中部所力略微小些，约为 1MPa。所以，从整体受力来看，整个拱圈受力大小均在 2MPa 左右。

从弯矩图可以看出：起拱线附近的负弯矩最大，约 20000 N·m，这可能是由于开挖顺序引起应力突变造成的弯矩变大，整个拱顶、拱腰的弯矩均较小，边墙与仰拱结合部位的正弯矩最大，达到约 18000 N·m。仰拱弯矩相对大些，全为负弯矩，最大负弯矩达到了约 15000 N·m。整个弯矩图来说，最大正弯矩和最大负弯矩很明显，所以施工工序的影响很大。

## 2. 二次衬砌结果分析

二次衬砌模拟分析结果如图 4.6 和 4.7 所示。

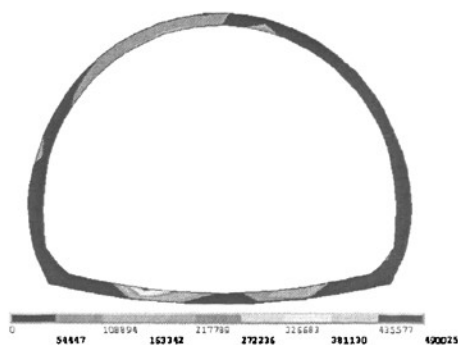


图 4.6 二次衬砌拉应力图 (Pa)

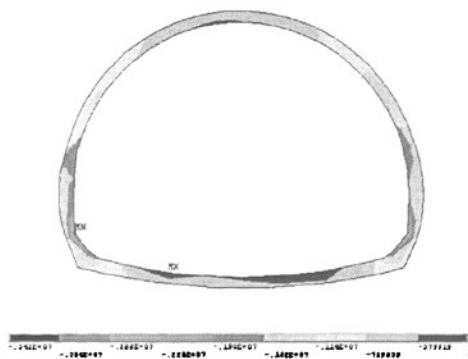


图 4.7 二次衬砌的压应力图 (Pa)

从拉应力图可以分析出：左侧拱腰的拉应力明显比右侧大，这是因为左侧隧道埋深比右侧大，最大拉应力出现在仰拱左侧部位，最大拉应力值约为 0.4MPa。拱圈的其它部分拉应力都很小。

从压应力图可以看出：整个受力情况来看，压应力在拱顶和仰拱处的应力比较小，最小应力部位是拱顶和仰拱的内侧。从拱顶到拱腰至边墙，所受的应力逐渐增大，从边墙和仰拱连接部位开始应力又开始逐渐减小。由于一次衬砌拱顶部分承受了比较大的压应力，因此二次衬砌的拱顶部分的压应力很小。边墙处内侧的压应力较外侧大。最大压应力出现在边墙与仰拱连接处的内侧，大小为 2.5MPa 左右。

### 3. 变形分析

通过分析二次衬砌变形大小来分析注浆的必要性，二次衬砌变形大小如图 4.8 所示。

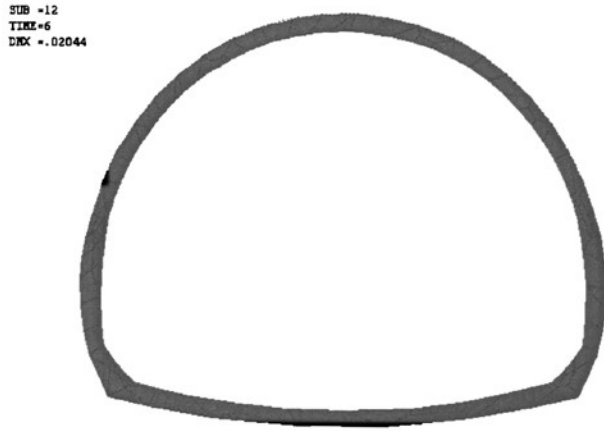


图 4.8 二次衬砌变形图 (m)

从二次衬砌变形图，可以看到：隧道施作二次衬砌后，如果不注浆二次衬砌的变形大小为 2cm 左右，变形过大。所以，要进行地表注浆处理。

### 4. 设计的注浆区的拉、压应力结果分析

作为设计注浆的区域，通过数值模拟来分析此区域注浆前的受力情况。其拉、压应力如图 4.9 和 4.10 所示。

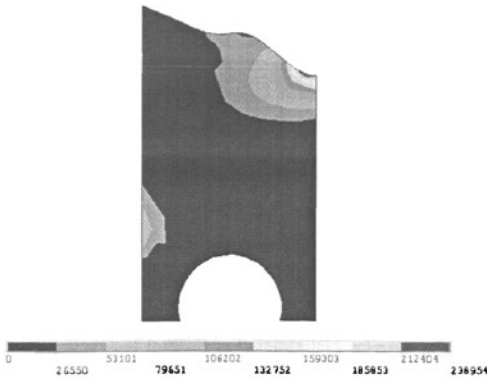


图 4.9 设计注浆区的拉应力图 (Pa)

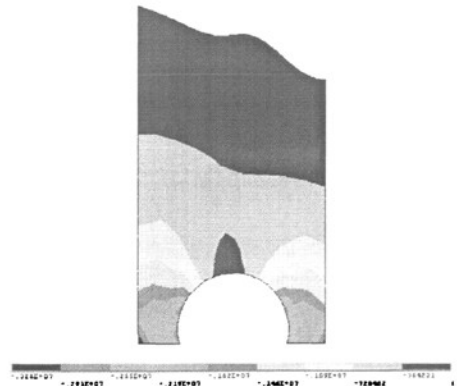


图 4.10 设计注浆区的压应力图 (Pa)

从拉力图分析，整个注浆区域所受的拉力很小，只有在右侧上部的受力稍微大些，达到了 0.2MPa。隧道周边的拉应力都非常小，理论上可以忽略不计。

从压力图分析，随着埋深的增加，注浆区域所受的压力逐渐增大。在隧道边墙处达到了最大，大小约 2.5MPa。在拱圈附近，拱顶的压力最小，到了拱腰部位压力增大，

直到边墙部分达到了最大压应力。

### 1. 变形分析

注浆后，整个模型的变形分析如图 4.11 所示。

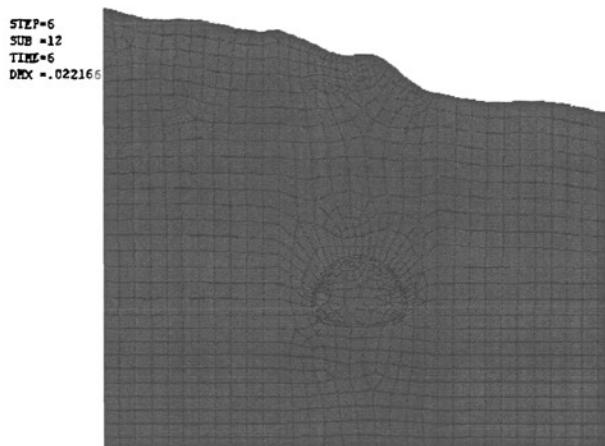


图 4.11 整体变形图 (m)

从图中分析可以看出，整个隧道最大沉降量仅为 2.2cm，沉降变形很小。

### 2. 初期支护受力分析

注浆后的初期支护轴力和弯矩如图 4.12 和图 4.13 所示。

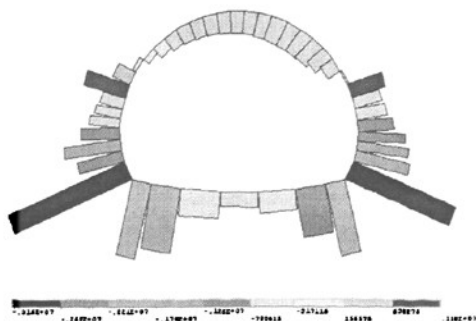


图 4.12 初期支护轴力图 (Pa)

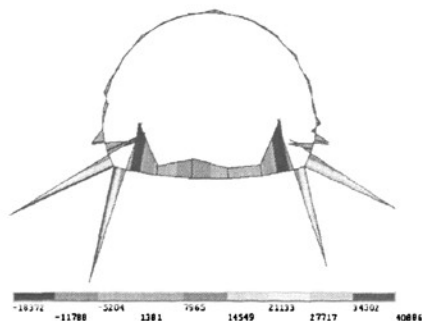


图 4.13 初期支护弯矩图 (N·m)

从轴力图可以看出，起拱线上方所受的压力较小，最大压力仅为 0.5MPa 左右，起拱线以下部分变为拉应力，而且拉应力从起拱线开始至边墙底部开始逐渐增大，最大拉应力出现在边墙底部，最大拉应力大小为 2.8MPa 左右。仰拱受拉，拉力大小从与边墙结合部位开始逐渐变小，仰拱中部的拉力最小，仰拱部分的最小拉应力为 0.7MPa 左右。

从弯矩图可以看出，除了两个正负弯矩突变的部位弯矩较大外，整个拱圈的弯矩都很小。最大正弯矩出现在边墙和仰拱结合部位，大小约为 30000 N·m。最大负弯矩位

于仰拱处，与最大正弯矩处紧连，最大负弯矩大小约为  $14500 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

### 3. 二次衬砌结果分析

二次衬砌计算分析结果如图 4.14 和图 4.15 所示。



图 4.14 二次衬砌拉应力图 (Pa)

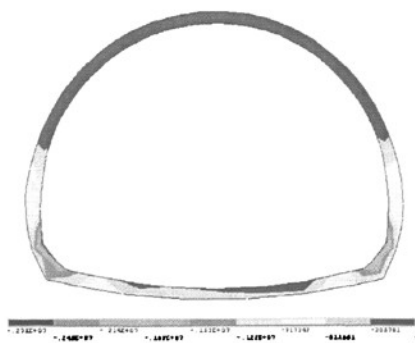


图 4.15 二次衬砌压应力图 (Pa)

从二次衬砌的拉应力图可以看出，整个拱圈所受拉应力很小，甚至在理论上可认为不受力；只有仰拱中部附近所受的力相对大些，约为  $0.2 \text{ MPa}$ 。所以，从整个受力情况看，二衬承受的拉应力非常小，受力没有突变的情况，很均匀。

从二次衬砌的压应力图可以看出，拱圈和拱腰部分的压应力很小，应力大小约为  $0.1 \text{ MPa}$  左右，从起拱线开始至边墙底部压应力逐渐增大，最大压应力出现在仰拱和边墙结合部位的内侧，最大压应力大小约为  $2 \text{ MPa}$ 。从边墙与仰拱结果部位开始至仰拱中部，所受的压应力又开始逐渐变小，最小压应力出现在仰拱中部，大小为  $0.2 \text{ MPa}$ ，而且仰拱内存的压应力大于外侧压应力。

### 4. 注浆区域结果分析

注浆区域的拉、压应力图分别如图 4.16 和 4.17 所示。

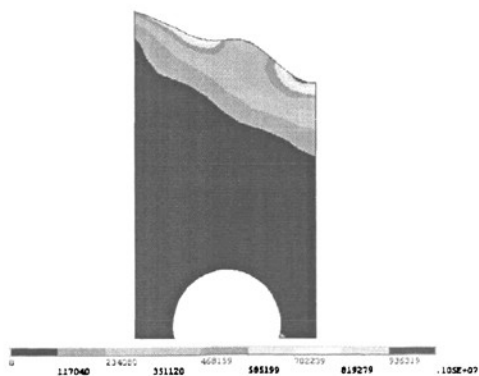


图 4.16 注浆区拉应力图 (Pa)

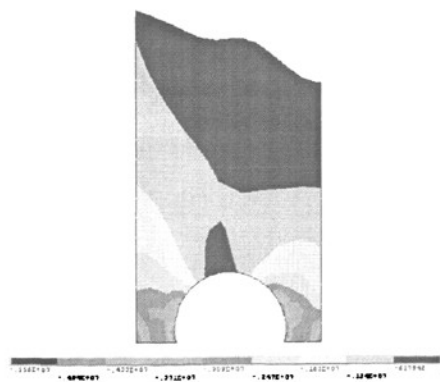


图 4.17 注浆区压应力图 (Pa)

从拉应力图可以看出，隧道 5 米以下开始拉应力就变得非常小。所以，从理论上讲，

可以认为注浆后隧道所受的拉应力为零，只受到压应力。

从压应力图可以看出，随着埋深的增加，所受的压应力也逐渐增大。在隧道拱圈部分，压应力沿隧道中线基本呈轴对称。拱圈周围的压应力内侧压应力大于外侧压应力。最大压应力为 3.8MPa 左右。

#### 4.4 未注浆和注浆数值模拟受力结果对比分析

从以上的结果来看，注浆后初期支护和二次衬砌的受力明显比未注浆的受力要均匀很多。注浆与未注浆各部分所受最大拉应力、最大压应力和弯矩等受力分析比较如表 4.2 所示。

表 4.2 受力分析比较表

内容		类别	未注浆	注浆后
		初期支护	轴向应力 (MPa)	$\sigma_{1max}$
		$\sigma_{3min}$	-3	-0.5
	弯矩 (N·m)	最大正	18000	30000
		最大负	20000	15000
二次衬砌	拉应力 (MPa)	$\sigma_{1max}$	0.4	0.2
	压应力 (MPa)	$\sigma_{3min}$	-2.5	-2
设计注浆区	拉应力 (MPa)	$\sigma_{1max}$	0.2	拉力很小，理论可忽略
	压应力 (MPa)	$\sigma_{3min}$	-2.5	-3.8

从表 4.2 所列出的最大拉、压应力和最大正负弯矩，我们可以发现如下规律：

(1) 注浆后隧道初期支护中的压应力  $\sigma_{3min}$ ，二次衬砌中的拉应力和压应力，设计的注浆区的拉应力相比不进行注浆的结果明显减小。其中，初期支护中的拱顶部分的最大压应力减小了 83.3%，从 3MPa 变为 0.5MPa；二次衬砌上的最大拉应力减小了 50%，



从 0.4MPa 变为 0.2MPa; 二次衬砌中上的最大压应力减小了 20%, 从 2.5MPa 变为 2MPa; 经过注浆后, 注浆区域的拉应力变得非常小。所以, 注浆效果还是比较明显的。

(2) 从表中还可以看到, 初期支护的拉应力、最大正弯矩和设计注浆区的拉应力的数值经过注浆后反而增大了。这并不是说注浆的效果不好, 因为此表列出的是各个受力最大值。现在对这几个数值进行详细分析。

①初期支护的拉应力: 经过注浆后初期支护的最大拉应力比未注浆时增加了 0.1MPa。但对比注浆前后的受力图 4-4 和图 4-12 可以发现, 注浆后, 除了可能因为施工原因在边墙底和仰拱连接部位出现的最大拉应力比较大, 拱圈其它部分受力均比未注浆的模拟结果小。

②初期支护的最大正弯矩: 最大正弯矩出现的部位也是出现最大拉应力的部位, 所以正是因为最大拉应力才使正弯矩突然增大。对比图 4-5 和图 4-13 可以发现和初期拉应力很相似的规律。除了最大弯矩点, 注浆后整个拱圈的受力很小, 而且受力很均匀。

③设计注浆区域的压应力增大是因为水泥和水泥-水玻璃浆液使围岩的比重增大, 比重的增大自然使受到的压应力增大。所以, 注浆后, 其压应力的增大是合理的。

所以, 通过对受力增大部分的分析, 可以知道注浆效果还是明显的。

## 第五章 注浆效果分析与评价

本次注浆效果主要从以下几个方面进行评价：

1. 通过注浆后的钻芯取样对取样岩芯进行强度和结石率方面的评价；
2. 对注浆段进行掌子面观测、拱顶下沉、净空收敛和内力分析等方面的监测，通过监测从对水害的治理和受力方面进行效果评价；
3. 对注浆段和相邻非注浆段进行内力分析比较分析；
4. 对右侧相近里程塌方段围岩和注浆段围岩进行比较分析，从而间接证明注浆效果。

### 5.1 基本评价

#### 1. 钻芯取样

根据有关规范，岩体的结石率必须达到 95% 以上，28d 极限抗压强度不低于 5.8MPa，否则进行补孔灌浆。

对注浆区域进行钻芯取样，并对取样岩芯进行结石率分析和抗压强度分析。

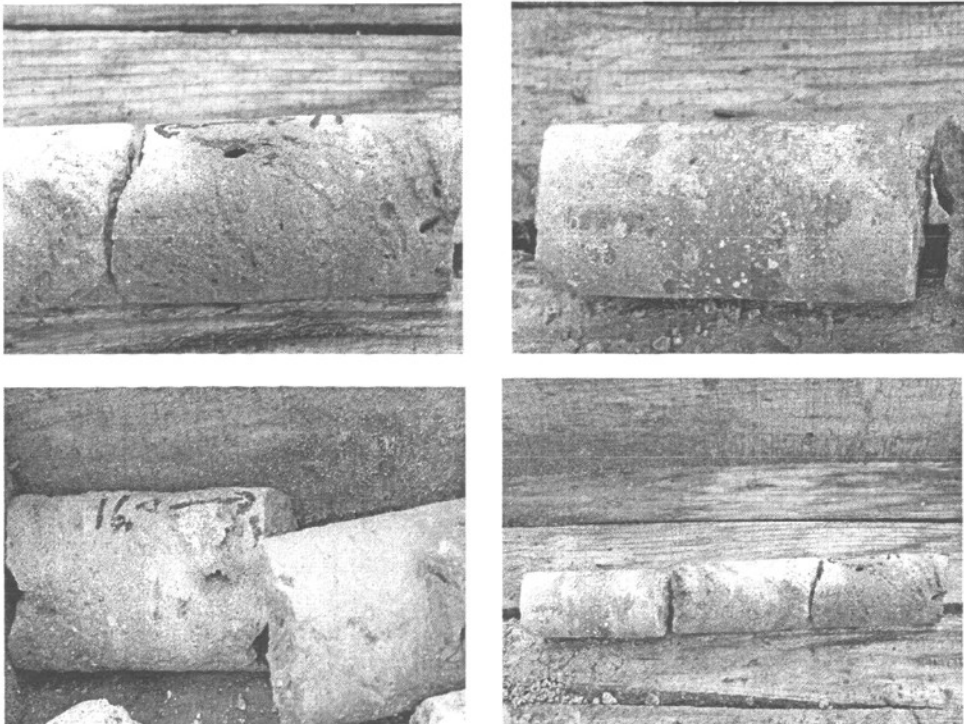


图 5.1 注浆后钻芯取样图

钻芯取样图如 5.1 所示。经过对岩芯的抗压强度试验，所取的岩体 28d 平均抗压强

度达到了 9.7MPa，而且岩体的结石率达到了 96.5%，所以符合规范要求。

## 2. 掌子面状况

掌子面围岩地质情况描述如表 5.1 所示。注浆段围岩开挖后的掌子面情况如图 5.2，而相邻未注浆段Ⅲ类围岩开挖后掌子面情况如图 5.3 所示。

随着掌子面的深入，仔细观察后可以发现，注浆止水效果明显。注浆段开挖后掌子面滴水情况基本不很明显，而相邻未注浆段Ⅲ类围岩开挖后掌子面甚至出现了涌水情况，这点从图 5-2 和图 5-3 的对比中可以明显看出。围岩的完整程度得到一定的改善，因为在开挖的过程中可以发现注浆浆液，浆液的渗入肯定使岩石和浆液很好结合在一起。

表 5.1 围岩地质情况表

里程	围岩完整情况	地下水情况	围岩节理裂隙走向及倾角/特殊地质情况
LK7+710 ~ LK7+650	掌子面围岩节理、裂隙发育，岩体呈碎石状压碎结构，围岩破碎，能发现注浆浆液结石体	掌子面及拱顶基本无滴水	围岩受构造影响严重，节理裂隙发育，主节理走向与隧道轴线近平行~大角度相交，倾角多为 60 度左右，节理间距 < 0.4m；裂隙面微张，见夹泥及铁锰质浸染

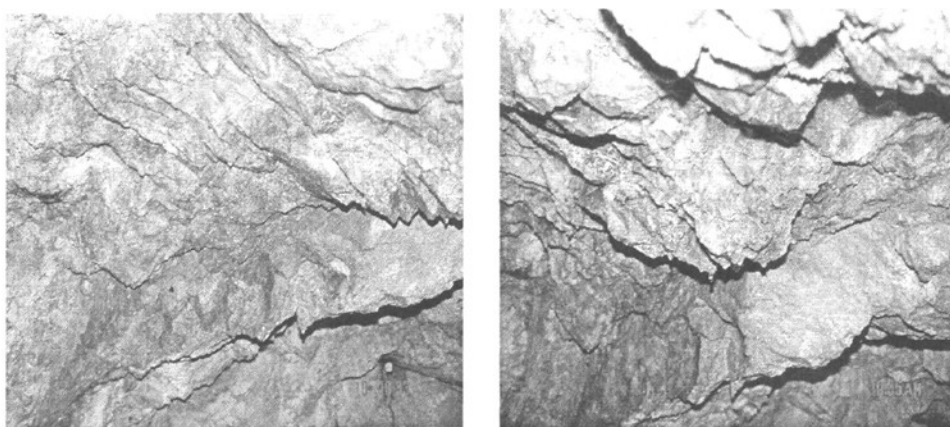


图 5.2 注浆后掌子面状况图



图 5.3 相邻未注浆段Ⅲ类围岩涌水情况图

软弱破碎围岩当遇到丰富的地下水时，围岩类别一般采用“遇水降级”的分类方法，可考虑降 1~2 级。此次注浆段围岩类别为 II 类，如果开挖遇到大量地下水就要降为 I 类。而开挖后没有出现大量涌水，说明通过注浆相当于使围岩的类别提高了一个等级，从而大大有利于隧道开挖的安全性。

### 3. 净空收敛

对注浆段 LK7+650~LK7+710 段进行了净空收敛观测。断面里程、观测时间及总收敛值见表 5.2。图 5.4、图 5.5 为基本稳定后的测点历时曲线，并对测值进行了回归处理，回归函数列于各个图中。

表 5.2 净空收敛统计表

围岩类别	断面里程	埋设时间	量测截止时间	总收敛值 (mm)	最终收敛速率 (mm/d)
II S <sub>2-1</sub>	LK7+660	9-19	9-24	5.97	0.96
	LK7+680	9-13	9-24	11.87	0.42
	LK7+710	9-6	9-24	10.86	0.34

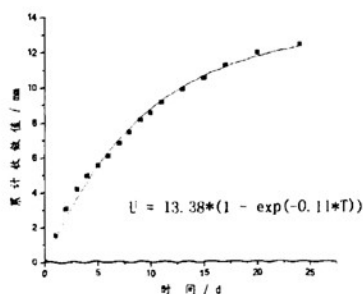


图 5.4 LK7+680 净空收敛历时曲线图

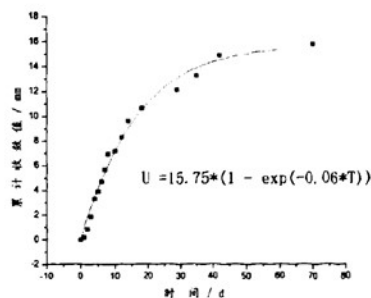


图 5.5 LK7+710 净空收敛历时曲线图

根据数据显示,该段净空收敛值累积收敛值在10天内达到了12mm左右,日均水平收敛速率一般为0.4~0.9mm/d。符合规范要求。

#### 4. 拱顶下沉

断面里程、观测时间及累计下沉量见表5.3。图5.6、图5.7为基本稳定后测点的历时曲线,并对测值进行了回归处理,回归函数列于各个图中。

表 5.3 拱顶下沉统计表

围岩类别	断面里程	埋设时间	量测截止时间	总收敛值 (mm)	最终收敛速率 (mm/d)
II S <sub>2-1</sub>	LK7+660	9-19	9-24	5.66	0.77
	LK7+680	9-13	9-24	10.28	0.46
	LK7+710	9-6	9-24	12.35	0.38

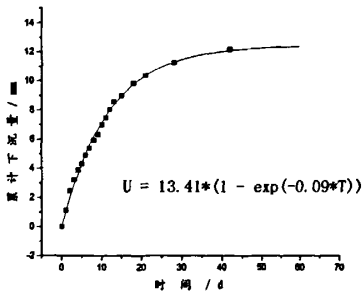


图 5.6 K7+680 拱顶下沉历时曲线图

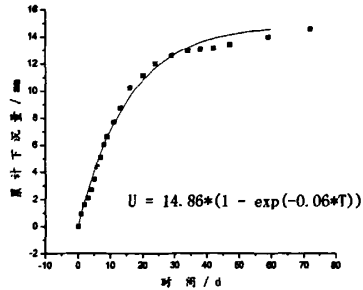


图 5.7 K7+710 拱顶下沉历时曲线图

由于该段埋深较浅、围岩破碎,拱顶下沉量稳定在5~14mm,日均下沉速率稳定在0.5mm/d。

拱顶下沉的曲线回归分析表明,仰拱开挖对拱顶沉降有较大的影响,但其影响程度较净空收敛小。隧道最终稳定的拱顶下沉值较收敛值小。上台阶和仰拱开挖产生的拱顶下沉各占总下沉值的80%、20%左右。

从回归曲线看,每条实测曲线都有一个拐点,在拐点之前,即仰拱开挖之前,拱顶下沉有一个稳定阶段,而仰拱开挖对初期支护结构变形有影响,拱顶下沉量增加,但增长幅度不大,稳定时间也较快。

## 5.2 注浆段隧道衬砌结构内力分析

### 5.2.1 注浆断面锚杆内力分析

在注浆段LK7+690断面布设锚杆钢筋计,分别位于拱顶、拱腰及上下台阶开挖连接

处,共5个观测点。锚杆钢筋计采用三根不同长度钢筋计焊接而成。由于施工的原因拱顶锚杆钢筋计被破坏,因此没有拱顶数据进行内力分析。

锚杆轴力分布图如图 5.8 所示,锚杆轴力历时曲线图如图 5.9 所示。

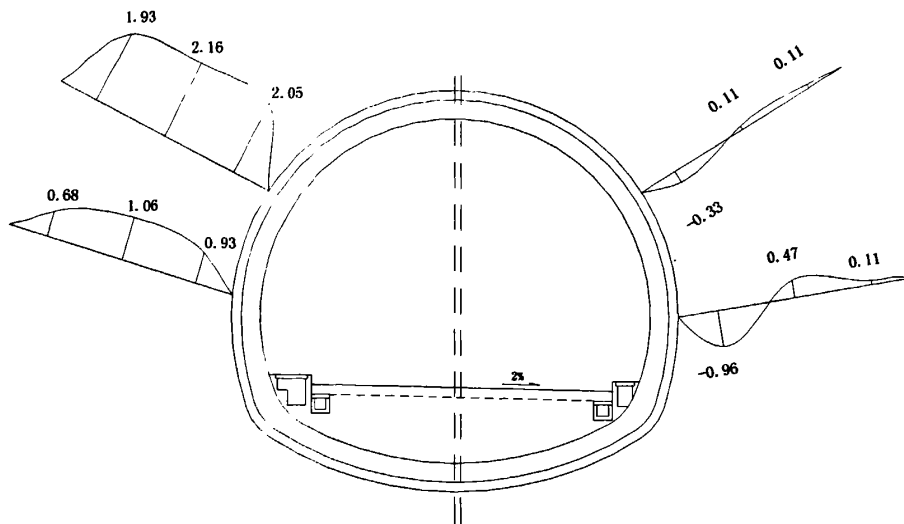


图 5.8 锚杆轴力分布图(单位:KN)

从图 5-8 中可以基本看到锚杆的受力规律:

(1) 初支整体结构形成后与围岩共同变形,有向隧道结构内部位移的趋势,而复合式衬砌是通过锚杆的作用使隧道初支结构和围岩共同变形并趋于稳定的过程,充分发挥围岩的自成拱效应,锚杆在隧道结构和围岩共同变形过程中起到一个桥梁与纽带的作用,其受力状态比较复杂,锚杆既约束围岩松动区岩石向隧道内空运动,又受围岩弹性区岩石约束。

(2) 左侧锚杆受力较大,基本处于受拉状态;右侧锚杆处于拉压组合状态,锚杆头部的钢筋计处于受压状态,可能是由于施工原因,总体来说受力状态合理,锚杆充分发挥了约束围岩松动的作用。

(3) 锚杆头部和尾部的应力较小,中间的应力较大。锚杆约束围岩松动区岩石的作用未发挥出来,仅起到和初期支护一起约束围岩弹性区变形的作用。

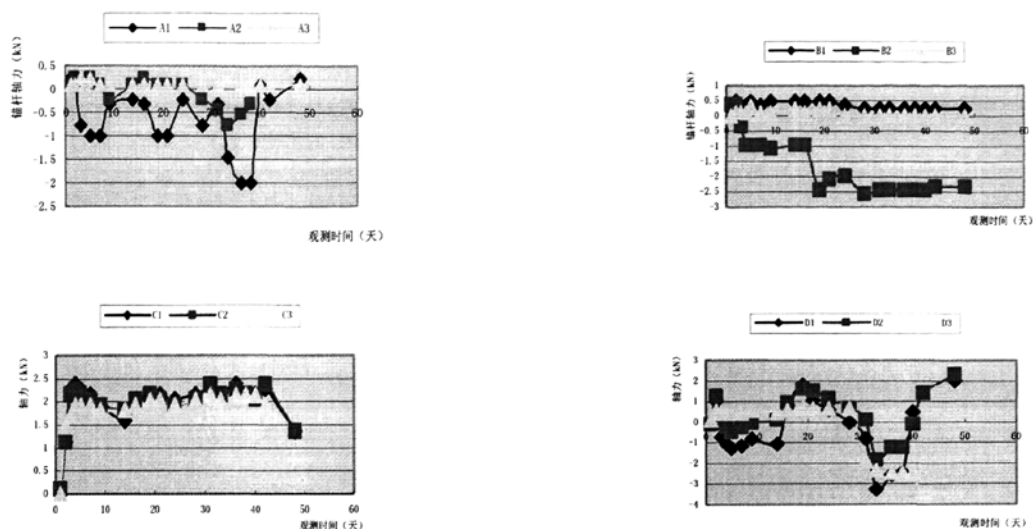


图 5.9 锚杆轴力历时曲线图

从图 5.9 可以看出锚杆受力随时间变化的规律:

(1) 锚杆在安装后与锚固剂、围岩和初期支护一起共同发挥作用, 约束围岩变形, 使围岩和隧道结构变形、受力趋向稳定。

(2) 对于 A1 和 B2 来说, 在 10 月 24 号也就是观测时间达到 20 天左右时候由于左侧仰拱的开挖使锚杆轴力产生一个突变, 这说明仰拱的开挖对于拱腰的轴力产生了较大的影响, 由于开挖是采用半幅开挖, 所以左侧的开挖对于右侧的轴力没有任何影响的。

(3) 对于右侧拱腰位置的锚杆钢筋计 C1、C2、C3 来说, 锚杆的轴力一直很稳定, 基本没有什么变化, 说明这段位置的初支强度很稳定。

(4) 对于 D1、D2、D3 来说, 在观测时间 32 天左右也有一个共同的突变, 这是由于右半幅仰拱的开挖对其产生了影响, 由于这根锚杆位于拱脚位置, 所以开挖对其产生的影响较大。

(5) 对于锚杆轴力曲线的较小变化都是符合受力要求的。

锚杆内力是检验锚杆效果和锚杆强度的依据, 可根据锚杆极限抗拉或抗压强度与锚杆内力的比值  $K$  做出判断, 通常  $K \geq 1$  就满足要求, 通过对测的锚杆内力数据的分析,  $K$  最小值为 4.3, 都满足安全要求, 不需要增加锚杆数量或加粗锚杆直径; 也反映了围岩内部位移较小, 围岩比较稳定。

### 5.2.2 注浆断面格栅内力分析

在注浆段 LK7+690 处布置格栅钢筋计, 采用格栅内外两侧对称布置。格栅钢筋计

布设位置同锚杆钢筋计布设位置。

格栅应力变化历时曲线如图 5.10 所示。

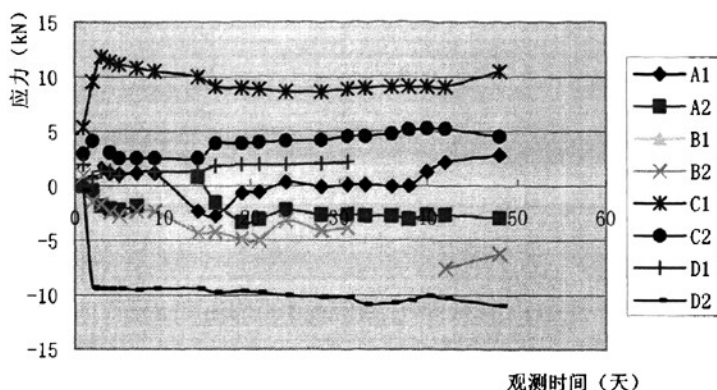


图 5.10 LK7+690 格栅应力变化历时曲线

从图 5.10 中可以看出格栅内力变化规律：

(1) 曲线的发展趋势显示，格栅的内力变化基本很稳定，在支护作完 5 天内格栅的内力就基本趋于稳定，支护作完的 2 天内轴力的变化很明显，当趋于稳定后格栅的轴力就基本不再产生变化了。这说明格栅很好的发挥了支撑围岩的作用。

(2) C1 和 D2 分别为左侧拱腰内侧和拱脚外侧产生的内力，分别产生了最大拉力和最大压力，最大拉力为 10.48kN，最大压力为 10.96kN。这说明左侧拱腰的力向拱圈内收敛的力很大。

(3) 总体来说，左侧受力明显大于右侧受力。

(4) 格栅内力较小，说明格栅承受较小的松弛荷载，围岩的自拱效应较为明显，同时也反映出设计支护的合理性。

### 5.2.3 注浆段仰拱内力分析

#### (1) 仰拱格栅主断面内力

仰拱格栅主断面位于 LK7+690 处，钢筋计布设的位置分别位于仰拱中部及两侧，共 5 个观测点，采用格栅内外两侧对称布设。



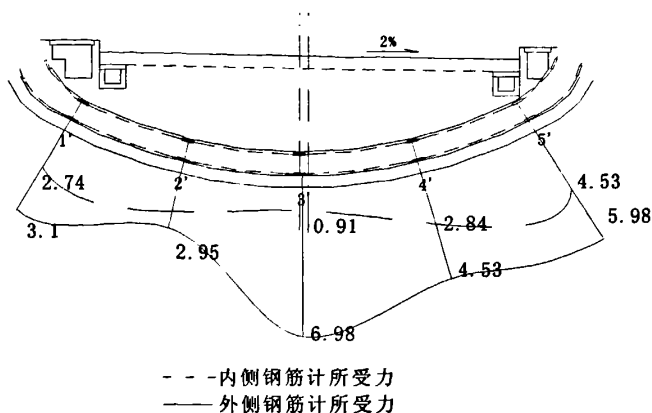


图 5.11 仰拱格栅主断面受力分布图 (KN)

从图 5.11 可以看出:

①总体来说,在主断面内仰拱格栅外侧所受的力大,而内侧所受的力相对较小;右半幅仰拱受力比左半幅大。

②仰拱所受的力全部为拉力,这说明仰拱所受的力为使仰拱外张的拉力。这样的张力可以更好的支撑围岩产生的压力,说明起到了仰拱的作用。

### (3) 仰拱格栅辅断面内力

仰拱格栅的辅断面位于 LK7+688 处,钢筋计的布设位于仰拱中部及两侧,共 3 个观测点,采用格栅内外两侧对称布设。

从辅断面受力图 5.12 可以看出:

①仰拱两侧受力较大,而仰拱中间受力相对较小;栅外侧受力较大,内侧受力较小;由于仰拱施工是采用半幅开挖,所以可能由于施工工序的问题使仰拱中间受力较小。与主断面的仰拱中间部分受力产生了矛盾。

②仰拱所受的力仍然是拉力,其作用和主断面的作用相同。

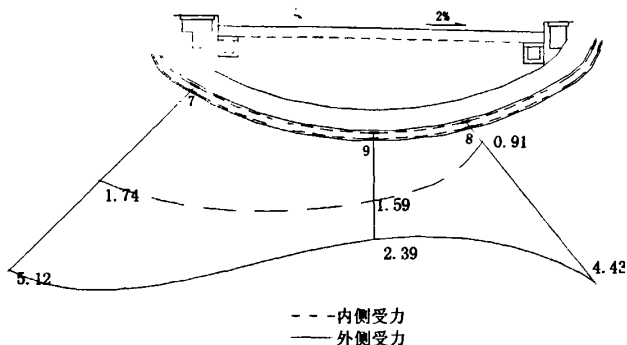


图 5.12 仰拱格栅幅断面受力分布图 (KN)

(4) 仰拱主辅断面联合分析受力历时曲线关系

将仰拱主断面和辅断面的布设点结合起来分析整个仰拱的受力。

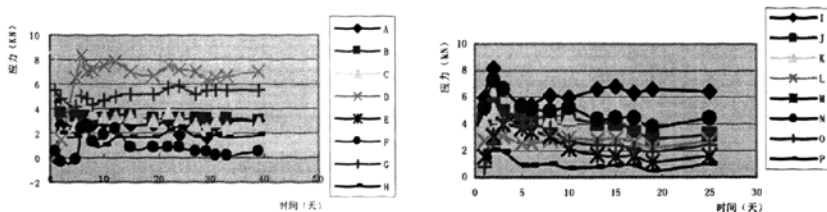


图 5.13 左侧仰拱格栅应力历时曲线图

从图 5.13 中可以看出注浆段主辅断面的仰拱受力历时曲线的关系：

①从历时曲线来看，在观测几天后各个部位的受力都趋于稳定，曲线的走势很平缓，这说明仰拱受力没有受到施工的影响。仰拱从一开始就发挥了它支撑围岩的作用，而且一直很好的保证了围岩的稳定。

②仰拱受力稳定后所受的力全部为拉力，这与前面的内力分析是吻合的。

5.2.4 二次衬砌的内力分析

对于主断面 LK7+690 进行二次衬砌内力观测。此断面布设 7 个观测点，钢筋计布设于二次衬砌的钢格栅内，采用格栅内外两侧对称布设。

二次衬砌内力分布和二次衬砌钢筋应力历时曲线分别如图 5.14 和图 5.15 所示。

从图 5.14 中可以看出混凝土内力分布及变化规律：

(1) 监测结果显示，二衬混凝土基本稳定时只有在拱顶部分存在很小的拉力，拱腰和拱脚位置都为压应力，拱脚位置的压应力较大，最大压力分别为 11.57KN 和 9.58KN。

(2) 由于二衬主要不是起支撑围岩的作用，拱脚处的力偏大。

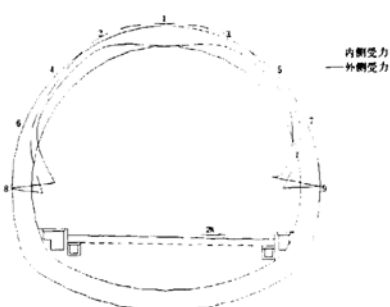


图 5.14 二次衬砌内力分析图

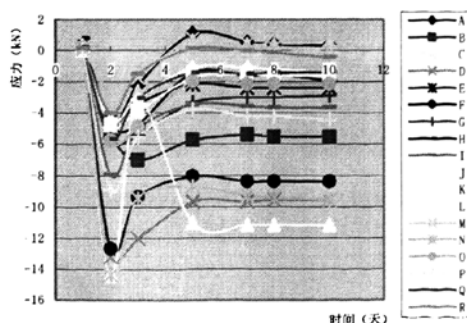


图 5.15 二次衬砌钢筋应力历时曲线

从图 5.15 中可以看出混凝土内应力的变化规律：

(1) 各个曲线发展趋势显示，混凝土内应力的变化受内部因素和外界因素影响，但是外界因素影响较小。混凝土内应力变化也主要经历了两个阶段：内力快速增长阶段，该阶段为浇筑结束后 5 天左右，混凝土强度快速提高；趋向稳定阶段，该阶段二衬混凝土强度趋于稳定，在此阶段结构也渐趋稳定状态。混凝土浇筑后会有一定的收缩，产生拉应力，而加入适当的添加剂可以防止或减少混凝土的收缩、开裂，同时降低拉应力，从测试情况看，添加剂配比基本合理。

(2) 从图中可以看到，在二衬混凝土拆模以后的几天里，混凝土强度上升的很快，而后才渐趋稳定，因此这个阶段一定要注意混凝土的养生，以防混凝土的开裂。

### 5.3 非注浆段内力分析及与注浆段的比较

非注浆段位于 LK7+618，属于三类围岩，在这个断面布设了一主断面来与注浆段进行比较。开挖是采用台阶开挖，故分别进行上台阶受力和下台阶的受力分析。

#### 5.3.1 格栅受力分析及比较

##### (1) 上台价格栅的受力分析

对非注浆段上台价格栅断面，共布设 7 个观测点，采用格栅内外两侧对称布设。其应力历时曲线如图 5.16。

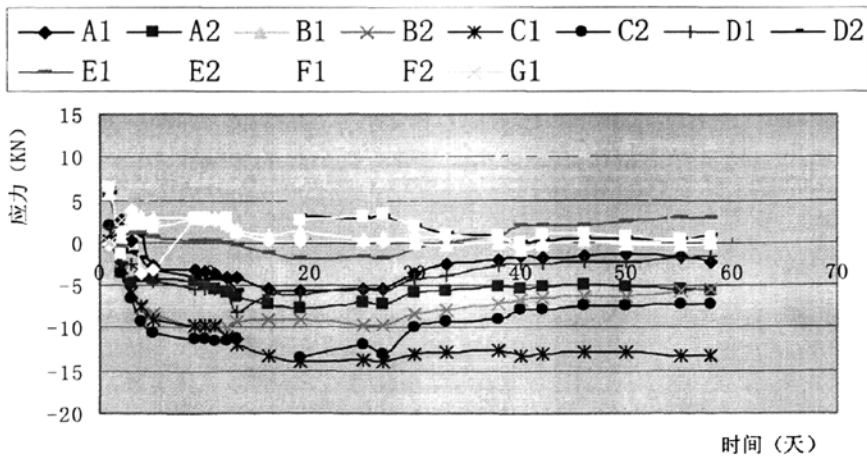


图 5.16 格栅应力历时曲线图

从图 5.16 中可以看出：

①各个曲线总体的趋势，刚开始几天有比较大的应力变化，然后曲线就开始趋于平

稳,这说明格栅支撑住围岩的压力,围岩自成拱的能力较好,隧道开挖、支护及时,初支结构强度较好。

②非注浆段最大拉力和压力分别为 11.81kN 和 13.98kN,而且左右侧所受力基本是对称的。

### (2) 下台阶格栅的受力分析及与相同部位的非注浆段受力比较

对非注浆段下台阶格栅断面,共布设 2 个观测点,采用格栅内外两侧对称布设。其应力历时曲线如图 5.17 所示。

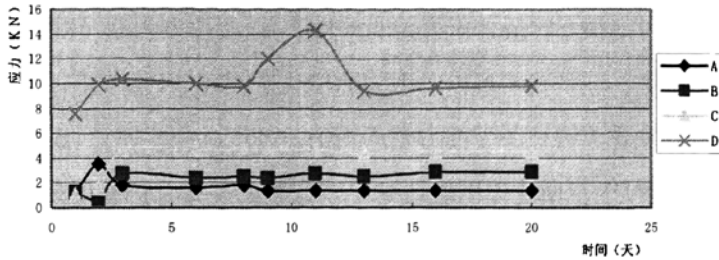


图 5.17 LK7+618 下部格栅应力历时曲线图

从图 5.17 中可以看出:

①非注浆段下部格栅所受的力全为拉力,只有 D 钢筋计所受的力大一些,最大拉力为 14.29kN,其他钢筋计的力全在 5kN 以下,说明下部格栅所受的力很小,上部围岩支撑的作用很大,使下部不用承受过大的力。

②通过与相同位置的注浆和未注浆的下部格栅受力进行比较,注浆段所受的最大拉力和压力分别为 10.48kN 和 10.85kN,其他的拉力和压力基本在 5kN 左右;注浆段所受的最大力为 14.29kN,其他力基本也是在 5kN 左右,其曲线和注浆段基本相似都是受到的力不大,所受的力和三类围岩所受的力差不多,而且最大力比三类围岩所受的力还小,所以可以看出注浆的效果是不错的。

③A、B、C 三根锚杆从开始稳定其力就基本没有变化,说明锚杆在锚固剂的作用下,很好的约束了围岩的变形,是隧道围岩和结构变形、受力趋于稳定。

### 5.3.2 锚杆的受力分析及比较

#### (1) 上台阶锚杆的受力分析

非注浆段上台阶锚杆断面,共布设 3 个观测点,每根锚杆由三根钢筋计组成。其应力历时曲线如图 5.18 所示。

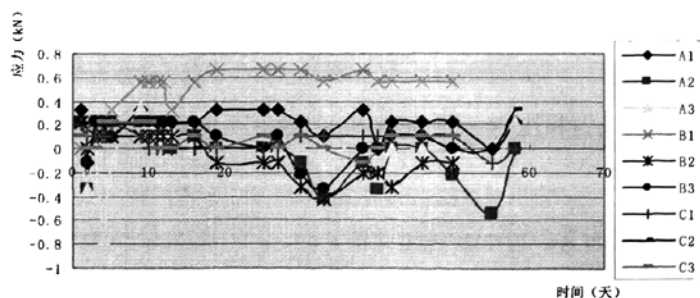


图 5.18 锚杆应力历时曲线图

从图中可以看出内力分布及变化的规律:

①锚杆所受的力都很小,最大压力为 0.56kN,最大拉力为 0.76kN。虽然锚杆的力从图上看一直有变化,但是我们可以发现力的变化全在 0.2kN 左右的变化,这样的变化是很小的基本可以看成锚杆所受的力是不变的。

②锚杆所受的力很小说明这段围岩还是比较完整的,锚杆的作用是使整个围岩更加稳固了。

#### (2) 下台阶锚杆的受力分析及与注浆段锚杆受力的比较

非注浆段下台阶锚杆断面,共布设 2 个观测点,每根锚杆由三根钢筋计组成。其应力历时曲线如图 5.19 所示。

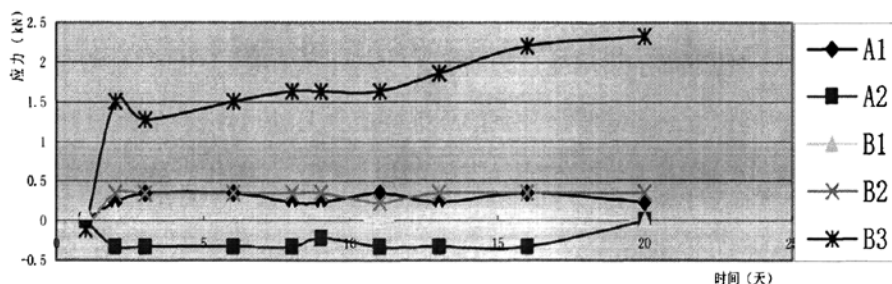


图 5.19 LK7+615 下部锚杆轴力历时曲线图

从图 5.19 中可以分析锚杆所受的力的变化和规律:

①A1、A2、B1、B2 钢筋计所受的力都很小,全在 0.5kN 以下,只有 B3 所受的拉力相对大一些,最大也只有 2.38kN。说明这段围岩和上部分析的情况基本一致,就是围岩情况比较好的。

②B3 位于拱脚处可能由于施工的影响使力有些许的变化,但是变化也是很小的。

③通过与注浆段锚杆所受的力进行比较可以发现,下部所受的力都不大,而且没有多大的变化,最大力均为 2.5kN 左右,所以可以看出下部开挖后很稳定。

通过与三类围岩进行比较可以看出注浆段围岩的受力不大,基本与三类围岩的受力差不多,更加验证了注浆的效果是明显的而且是十分有效的。

#### 5.4 注浆段与塌方段的分析比较

2005年10月26日凌晨5:30,广福隧道右线K7+575~K7+560发生塌方塌方。堆积体主要为强~弱风化的辉绿花岗岩,多为中大块及巨块状,岩块直径分布极不均匀,堆积体中含有较多的强~全风化粉末状物质。从K7+650~K7+590段表现出围岩变差,K7+650~K7+590段设计变更由IV类围岩变为III类围岩。塌方后情况如图5.20所示。

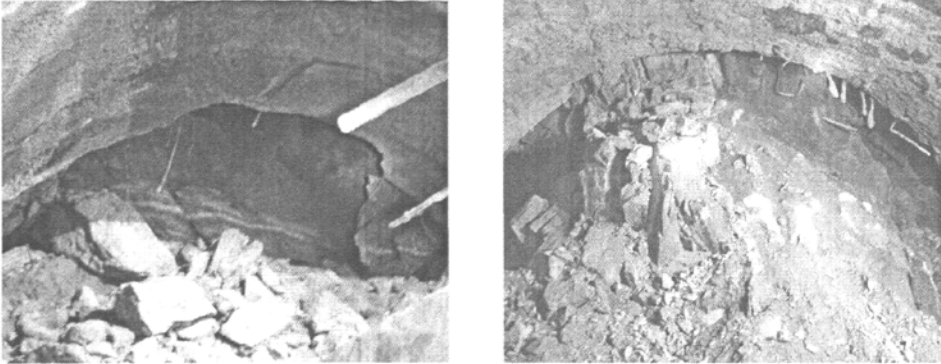


图 5.20 K7+575 段塌方图

从图中可以看到,塌方 K7+575 段的岩质—辉绿花岗岩有的部分已经变得比较破碎。尽管产生塌方的原因是多方面的,但是围岩条件的好坏对开挖的安全性有着很大的作用。

注浆段里程号为 LK7+650~LK7+710,塌方邻近段—K7+650~K7+590 段已表现出围岩变差。所以,里程相差不远的左右洞,右洞围岩情况好,但是发生了塌方;左洞围岩条件差,经过注浆处理后,隧道开挖安全通过。

所以,通过对比可以看到,地表注浆是有必要的,而且注浆效果是显著的。

## 结论和建议

### 主要结论

本文针对广福隧道 LK7+650~LK7+710 浅埋偏压段进行地表注浆，通过理论和工程实际的结合介绍注浆法的应用，并通过 ANSYS 有限元进行模拟，最后对注浆的效果进行评价。从以上研究内容得到以下结论：

1. 注浆的目的不同，所采用的注浆工艺也就不同。本文的目的就是要改善隧道围岩并减少隧道内的涌水量，所以本次注浆从其施工作用的上看，施工工艺属于静压注浆中的固结注浆，从注浆理论上又属于渗透注浆。

2. 在实际工程中，注浆材料的选择及配合比要根据施工设备和场地情况选择合适的材料和配合比，一般配合比要进行现场试验，并根据注浆情况进行不断的调配。

3. 利用 ANSYS 数值模拟对注浆和不注浆两种情况进行受力和变形方面的比较分析。从分析结果看到，初期支护中的拱顶部分的最大压应力减小了 83.3%；二次衬砌上的最大拉应力减小了 50%；二次衬砌中上的最大压应力减小了 20%；经过注浆后，注浆区域的拉应力变得非常小。所以，通过注浆和不注浆两种情况结果的对比，发现注浆的效果是明显的。

4. 在实际工程对注浆效果主要从四个方面来进行评价。①通过注浆后的钻芯取样对取样岩芯进行强度和结石率方面的评价；②对注浆段进行掌子面观测、拱顶下沉、净空收敛和内力分析等方面的监测，通过监测从对水害的治理和受力方面进行效果评价；③对注浆段和相邻非注浆段进行内力分析比较分析；④对右侧相近里程塌方段围岩和注浆段围岩进行比较分析。通过这四个方面的分析比较，得出注浆效果良好的结论。

### 进一步研究建议

由于笔者的水平有限，对于浅埋偏压隧道注浆方法还有待于今后进一步的研究。笔者觉得今后应该在以下方面进行努力，以进一步提高注浆法在理论和实践水平。

1. 通过采用地表注浆方案加固隧道浅埋偏压破碎带来减小隧道开挖周边围岩的渗透系数并提高围岩的强度和完整度，达到安全快速通过破碎带，并对注浆后围岩取样进行相关的物理力学特性的试验，通过数据报相关单位进行围岩等级支护方面的修改。从而注浆的研究在实际工程和经济上，得到应用的益处。

2. 加强研究注浆量与围岩强度提高的关系，浆液的扩散半径与围岩孔隙比、地下

水渗透系数间的具体关系，浆液的扩散半径与当前理论扩散半径的偏差。从而，修正当前通用的一种或几种注浆量理论公式和注浆扩散半径的理论公式，希望能够完善当前地表注浆效果评价和理论计算方面的不足，是注浆法在处理各类软弱围岩中得到广泛的应用。



## 参考文献

- [1] 毕露成. 双液注浆锚管加固在渗水软弱围岩浅埋偏压隧道中的应用. 广州大学学报 (综合版). 2001 年 8 月 第 15 卷 第 8 期
- [2] 王杰等. 注浆技术的发展与展望. 沈阳建筑工程学院学报. 1997 年 1 月 第 13 卷第 1 期
- [3] 中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会编. 锚固与注浆技术手册. 北京: 中国电力出版社, 1999. 9
- [4] 彭振斌主编. 注浆工程设计计算与施工. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. 8
- [5] 何修仁. 注浆加固与堵水. 沈阳: 东北化工学院出版社, 1990
- [6] Lombad G. The role of the cohesion in cement grouting of rock[A]. In: Fifteen Congress on Large Dams[C]. Laruanne: [s. n. ], 1985
- [7] 杨米加, 陈明雄, 贺永年. 注浆理论的研究现状及发展方向. 岩土力学与工程学报, 2001, 11. 第 20 卷, 第 6 期
- [8] 周维垣, 杨若琼. 二滩拱坝注浆电镜扫描结果及分析[A]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- [9] 刘正峰主编. 地基与基础工程新技术实用手册 (第四卷). 海潮出版社, 2000
- [10] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论. 合肥: 安徽教育出版社, 2004. 12
- [11] 李黎明编著. ANSYS 有限元分析实用教程. 北京: 清华大学出版社, 2005. 1
- [12] 李权编著. ANSYS 在土木工程中的应用. 北京: 人民邮电出版社, 2005. 6
- [13] 何修仁. 注浆加固与堵水[M]. 沈阳: 东北工业学院出版社, 1990
- [14] 王毅才主编. 隧道工程. 北京: 人民交通出版社, 2000. 8
- [15] 王杰等. 岩土注浆技术的理论探讨. 长江科学院院报 2000. 6
- [16] 张驰等. 岩土注浆技术的理论探讨. 沈阳建筑工程学院院报, 2001
- [17] 葛家良等. 注浆模拟实验及应用的研究 [J]. 岩土工程学报, 1997. 1
- [18] 高大钊, 袁聚云主编. 土质学与土力学. 北京: 人民交通出版社, 2001. 3
- [19] 重庆交通科研设计院主编. 中华人民共和国行业标准公路隧道设计规范. 北京: 人民交通出版社, 2004. 8
- [20] 闫莫明, 徐祯祥, 苏自约主编. 岩土锚固技术手册. 北京: 人民交通出版社, 2004. 4
- [21] 刘妮娜. 注浆法在湿陷性黄土路基暗穴处理中的应用研究. 2003. 5

- [22]刘晓敏. 注浆技术的发展及应用. 安徽建筑. 2000. 3
- [23]关宝树编著. 隧道工程设计要点集. 北京: 人民交通出版社, 2003. 11
- [24]汪志刚. 注浆工艺及其在施工中的应用. 西部探矿工程. 2002 年增刊(001)
- [25]操太林, 徐得潜. 预注浆加固技术在黄梅山隧道洞口施工中的应用. 合肥工业大学学报(自然科学版). 第 27 卷第 2 期
- [26]郑秀华. 水泥-水玻璃浆材在灌浆工程中的应用. 水文地质工程地质. 2000 年第 2 期
- [27]邓矿辉, 谭毓浚. 地表深孔预注浆加固断层破碎带. 公路. 1999. 5
- [28]刘嘉材. 裂缝灌浆扩散半径研究. 水利水电科研院科学研究论文集第 8 集. 水利出版社, 1982
- [29]白永年等. 土坝坝体和堤防灌浆. 北京:水利出版社, 1985
- [30]龚晓南. 高等土力学. 杭州:浙江大学出版社, 1996
- [31]李长洪. 碎裂岩体注浆理论及应用研究(D). 北京科技大学, 1999
- [32]熊厚金. 中国化学灌浆的过去、现在与未来. 1991 年全国灌浆技术学术讨论会论文集
- [33]熊厚金. 中国化学灌浆的成就, 国际岩土锚固与灌浆新进展. 北京:中国建筑工业出版社, 1996
- [34]廖树忠、郑智军等. 注浆技术在加固隧道围岩中的应用(J). 重庆交通学院学报. 2001. 6
- [35]坪井直道著, 吴永宽译. 化学注浆法的实际应用[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1980
- [36]郑长成, 裂隙岩体灌浆的模拟研究[D], 中南工业大学博士学位论文, 1999
- [37]吴理云. 注浆理论基础[M]. 沈阳:东北工学院出版社, 1981
- [38]葛家良. 注浆技术的现状与发展趋向综述[J]. 首届全国岩石锚固与灌浆技术学术讨论会. 北京, 1995
- [39]杜嘉鸿等. 地下建筑注浆工程手册[M]. 北京:科学出版社, 1992
- [40]王新杰, 王儿湘. 注浆技术在我国地铁工程中的应用[J]国际岩土锚固与灌浆新进展. 北京:中国建筑工业出版社, 1996
- [41]E. Nonveiller. Grouting theory and practice. New York: Elsevier Science Publishing Company, 1989
- [42]Arving V Shroff, Dhananjay L. Shah. Grouting Technology-in Tunneling and Dam

Construction. A. A. Baikema, Lotterdam, 1993

[43]Houlsby, A. C. Construction and Design of Cement Grouting — A Guide to Grouting in RockFormation. John Wiley&Sons Inci, 1990

[44]Hakansson, U. etc. A techniaue for measuring the rheological properties of injected grout. Stockholm: Swedish Rock Engineering Research Foundation (BEFO), 1991

[45]Hakansson, U. Etc. Rheological properties of microfine cement grouts. Tunneling and Underground Space Technology, 1992, 7

[46]T. Kawasaki etc. "Deep mixing method using cement hardening agent". PROC. 10<sup>th</sup> ICSMFE. 1981

[47]J. E. Flether: Piping. AGU, 1954, Vol. 35(2)

[48]R. J. Crouch: A role of Tunnelin Gully I-dead Pogession J. Soil. Cons. NSW, 1983, Vol138 (1)

## 攻读学位期间取得的研究成果

### 攻读硕士学位期间公开发表文章

- 1、王春晓，谢永利. 大管棚超前支护技术在龙头山隧道洞口浅埋段施工中的作用. 长安大学研究生学生年会论文集 2006 年卷·上卷
- 2、王春晓，张连成，陈旭. 天汕高速公路蕉梅段路基环保施工探讨. 交通节能与环保 NO. 3 2006

### 攻读硕士学位期间参与的科研项目

- 1、参加了《天汕高速广福隧道施工管理》的课题研究和报告的编写。
- 2、参加了《超前地表注浆在隧道浅埋偏压破碎带的应用研究》的课题研究和报告的编写。
- 3、参加了《天汕高速桥头跳车处治研究》的课题研究和报告的编写。

## 致 谢

子在川上，曰：“逝者如斯夫！不舍昼夜。”在三年的硕士求学时间即将结束之际，想到孔子的这句话，心中无限感慨，心情久久不能平静……在此之际，谨向这段时间内给过我指导、支持、关怀和帮助的导师和朋友们表示我最衷心的感谢。

在这里，首先要向导师谢永利教授和杨晓华教授表达弟子的崇敬之情和感谢之意。两位教授以他们高尚的人格、渊博的学识和严谨的学风在做人和做事上影响教育着我，这对我来说是一生受用的宝贵财富。

本文是在两位导师的悉心指导下完成的。从论文的选题、现场调研到论文撰写、修改、定稿整个过程中，无不凝聚着他们的心血。没有他们的悉心指导，就不可能有今天学业的顺利完成。再次表示弟子的感谢！

在读研期间，师母张军丽老师在求学生活上给与的无微不至的关怀，在此表示深深的谢意。课题组的张宏光老师、李哲老师、李又云老师、王亚琼老师都曾经在学习上给予了许多关心和帮助，也表示感谢。

在此，还要感谢在论文写作方面给我很大帮助的来弘鹏师兄，在现场调研期间给与很多照顾的张连成师兄，在生活和求职过程中给出了很多指导的张贯峰师兄、康佐师兄。

最后，感谢父母和哥哥对我二十多年的求学生涯的理解、关心和支持。