

地下工程建设预报预警北京市重点实验室

# 粉细砂地层浅埋暗挖法

## 注浆加固技术指南

Silty-Fine Sand Stratum Shallow Mining Method Grouting Reinforcement Technique Guide

叶英 编著



中

出版社

# 粉细砂地层浅埋暗挖法 注浆加固技术指南

叶 英 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

粉细砂地层浅埋暗挖法注浆加固技术指南/叶英编  
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 8  
ISBN 978-7-112-15633-7

I. ①粉… II. ①叶… III. ①地铁隧道-流砂层-  
浅埋暗挖-注浆加固-指南 IV. ①U459.1-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 163945 号

粉细砂地层浅埋暗挖法注浆加固技术指南

叶 英 编 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京世知印务有限公司印刷

\*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 4% 字数: 130 千字

2013 年 10 月第一版 2013 年 10 月第一次印刷

定价: 20.00 元

ISBN 978 - 7 - 112 - 15633 - 7

(24233)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

浅埋暗挖法是一些城市地铁隧道施工的主要形式，在所开挖的区间隧道和地铁车站上方通常会存在一层含水细砂及粉细砂层，对于饱和含水砂层的施工是土木工程界的一大难题，采用注浆技术可保证开挖的安全进行，因此，有必要研究粉细砂地层的注浆机理，据此确定注浆材料、注浆压力、凝胶时间、加固范围等注浆参数，以注浆效果后评价结果为开挖条件，减少注浆施工的盲目性，提高开挖的安全性。本书作为该领域的专项研究成果，对保证粉细砂地层开挖隧道的正常施工、降低费用以及减少对环境的影响有着巨大的意义。本书可供从事地铁施工的技术人员参考。

\* \* \*

责任编辑：曾 威

责任设计：董建平

责任校对：肖 剑 赵 颖

## 前 言

目前，越来越多的城市为缓解拥挤的地面交通都在修建或筹建地铁工程。我国正在修建和拟建地铁城市已有二十多个，浅埋暗挖法是地铁隧道施工的主要形式。第四系地层是城市地下常见的地层，这不可避免地要遇到饱水、松散、稳定性差的土层。随着人们环境保护意识的增强和隧道在既有建筑物下面穿过的情况增多，施工条件越来越苛刻。采用注浆技术在一定程度上可以解决这些问题，这就预示着注浆技术在我国地铁工程中有着巨大的发展市场。

由于城市所处的特殊地质环境，在所开挖的区间隧道和地铁车站上方通常会存在一层含水细砂及粉细砂层，该砂层的存在对隧道暗挖施工造成严重影响，不仅可引起地层的较大变形，而且有时还会造成塌方，甚至地表大范围塌陷。同时由于泥砂互层的存在，即使实行降水，在两种地层的接触位置仍难免残留部分泥水，这显然会给施工造成较大的影响。浅埋暗挖施工的基本条件是要求无水施工，并保证开挖面的稳定性。由于地层条件以及城市环境保护的需要，有些地区不适宜降水施工或者降水效果不理想，这就要求在带水条件下施工，势必增加施工难度。

已有的研究表明，在上覆砂层的隧道开挖时其超前地层变形成倍增加，占总变形量的40%~50%，同时由于地层超前变形的增大也恶化了开挖掌子面的稳定性，而掌子面的稳定性对保障浅埋暗挖施工安全非常重要，因此对砂层，尤其是含水砂层进行

改良就显得非常重要。\*

一般认为，采用管棚或小导管配合注浆是该类地层条件下隧道施工的重要途径，所遇到的主要问题是研制性能可靠的注浆材料以及选择合理的注浆工艺。在含水砂层条件下进行浅埋暗挖施工所遇到的主要问题是掌子面的稳定性、施工安全和对周围地层（包括重要的建筑物和构筑物）环境的影响。

对于饱和含水砂层的施工，是土木工程界的一大难题，在该地层中开挖隧道极易发生涌水、涌砂、塌方等工程灾害，目前，国内外类似工程可借鉴的经验不多。砂层松散，无粘聚力，自稳能力很差。在大断面含水砂层的条件下进行隧道施工非常困难。在城市地铁施工中由于地层变形和周围环境控制的要求严而工期又紧，使得在某些情况下不考虑经济代价，每延米区间隧道土建施工费可高达 10 万~20 万元，这通常也对安全造成一定的影响。在饱和含水砂层中开挖隧道的关键工作是防止涌水、涌砂和地层坍塌等工程事故。

采用注浆技术可用来加固掌子面上方的拱部地层，以提高地层的力学性能，如强度和抗变形能力，可以保证开挖的安全进行，减少开挖引起的地面沉降。

因此，有必要研究粉细砂地层的注浆机理，据此进行注浆选材、合理确定注浆压力、注浆的凝胶时间、注浆加固范围等注浆参数，以及进行注浆效果评价等以减少注浆施工的盲目性，有针对性地对此种地层的注浆给予指导。将研究成果推广使用，对于城市地铁建设和粉细砂地层开挖隧道的安全施工，减少隧道开挖对周围环境的影响以及减少工程材料费用有着巨大的意义，也必将产生巨大的经济效益、社会效益和环境效益。

在本书的编写中，得到北京市轨道交通建设管理有限公司和北京市市政工程研究院各位领导对研究工作的大力支持。书中内容得到地下工程建设预报预警北京市重点实验室项目组成员的多方协助与合作，这里表示感谢。

限于作者的水平与经验，书中内容难免有疏漏谬误不当之处，敬请读者批评指正。

叶 英

2013. 7. 31

# 目 录

<b>1 粉细砂概述</b> .....	1
1.1 粉细砂的基本性质 .....	1
1.1.1 粉细砂的粒径 .....	1
1.1.2 天然含水率 .....	2
1.1.3 重度 .....	2
1.1.4 孔隙比 .....	3
1.2 粉细砂的工程性质 .....	7
1.2.1 颗粒级配的影响 .....	8
1.2.2 细粒含量的影响 .....	10
1.2.3 含不同粘土矿物的水敏性 .....	12
1.2.4 初始固结应力的影响 .....	15
1.2.5 不同结构的动弹模与动弹应变 .....	16
参考文献 .....	17
<b>2 浅埋暗挖法注浆加固技术</b> .....	18
2.1 粉细砂地层注浆加固机理 .....	18
2.1.1 可注性理论 .....	20
2.1.2 浆液的流变性 .....	21
2.2 浆液的选择 .....	33
2.2.1 注浆选材原则 .....	33
2.2.2 浆液的选择要求 .....	34
2.2.3 浆液的性能分析 .....	37
2.3 粉细砂地层中注浆参数的确定 .....	41



2.3.1	水灰比对注浆的影响 .....	41
2.3.2	小导管参数的确定 .....	42
2.3.3	浆液的用量计算 .....	43
2.3.4	注浆加固带厚度的确定 .....	45
2.3.5	柱状扩散的时间、半径及孔距 .....	45
2.3.6	注浆孔的位置及半径确定 .....	48
2.3.7	注浆压力的确定 .....	49
2.4	超前支护注浆加固 .....	51
2.4.1	超前支护的适用范围 .....	52
2.4.2	超前支护技术的评价分析 .....	54
2.4.3	超前小导管注浆 .....	56
2.4.4	管棚超前注浆支护 .....	67
2.4.5	水平旋喷注浆支护 .....	93
	参考文献 .....	121
<b>3</b>	<b>注浆效果的检验与评价 .....</b>	<b>122</b>
3.1	注浆效果的评价标准 .....	122
3.2	注浆效果检查方法 .....	124
3.2.1	$p-Q-t$ 曲线法 .....	125
3.2.2	注浆量分布特征法 .....	126
3.2.3	浆液充填率反算法 .....	128
3.2.4	涌水量对比法 .....	129
3.2.5	渗透系数测定法 .....	130
3.2.6	力学指标测试法 .....	130
3.2.7	PST 法 .....	131
3.2.8	检查孔法 .....	132
3.2.9	开挖取样法 .....	134
3.2.10	变位推测法 .....	136
3.2.11	物探法 .....	136
	参考文献 .....	138

# 1 粉细砂概述

粉细砂的成因可分为：冲积、洪积、淤积和风积等类型。粉细砂天然容重较小，天然状态下无黏性、无塑性，为磨圆度较好的颗粒结构，呈松散状态，粉粘粒（ $<0.05\text{mm}$ ）含量很少，内摩擦角为  $26^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ，几乎没有粘聚性。颗粒组成多集中在  $0.25\sim 0.074\text{mm}$ ，分选性一般，颗粒组成较单一、级配不良。由于粉粘粒的含量很少，粉细砂的矿物成分以长石、石英为主， $\text{SiO}_2$  的含量占  $55\%\sim 68\%$ ，因此粉细砂的表面活性很低。另一方面，粉细砂的渗透性能较好，渗透系数在  $n\times 10^{-3}\text{cm/s}$ ，毛细水上升高度小于  $1\text{m}$ 。压实成形后抗剪强度很低，整体稳定性较差。在地震、机器振动、列车行驶、打桩以及爆破等动力荷载（振动）作用下，粉细砂（特别是饱和粉细砂）表现出类似液体性状而完全失去承载能力的现象，称为粉细砂的液化，形成喷砂、冒水、震陷、滑塌、地基失稳等灾害。其中又以地震引起的大面积甚至深层的粉细砂液化的危害性最大。因此，近年来粉细砂的振动液化引起了国内外工程界的普遍重视，成为工程设计中考虑的重要因素之一。

## 1.1 粉细砂的基本性质

粉细砂的静力特性受许多因素的影响，在不同的试验条件下会表现出不同的性状。影响因素主要包括以下几个方面。

### 1.1.1 粉细砂的粒径

按《疏浚岩土分类标准》JTJ/T 320—1996 和《岩土工程勘

察规范》GB 50021—2001 划分如下：

粉砂：粒径  $d > 0.075\text{mm}$  颗粒大于总质量的 50%。

细砂：粒径  $d > 0.075\text{mm}$  颗粒大于总质量的 85%。

一般情况粉砂和细砂粘粒  $d < 0.005\text{mm}$  含量小于 10%，如超过 10% 则按混合土定名。粉粒  $d = (0.005 \sim 0.075\text{mm})$  含粉砂量一般为 20%~45%，细砂一般为 8%~14%。

(1) 粉细砂的粒径分布均匀，且粒径范围很小，结构松散，在外界荷载作用下，很容易变形。

(2) 粉细砂土体主要靠取决于粒间法向压力的粒间摩擦力维持本身稳定和承载能力。

(3) 在饱和水情况下，粉细砂在荷载作用下的变形速率加大，按变形控制的承载力较低。

(4) 粉细砂渗透系数一般为  $1.2 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，属于中等透水性。天然沉积粉细砂水平向渗透系数明显大于垂直向渗透系数。

### 1.1.2 天然含水率

在天然状态下，气候干燥地区，位于地表的粉细砂含水率很低。随着埋藏深度的增加，粉细砂的含水率在浅层 2~5m 的范围以及中部 5~8m 的范围均呈先增后减的变化趋势，含水率在 2.2% 左右，如图 1-1 所示。

不同的气候条件下，粉细砂含水率变化较大，同时受大气降水和地下潜水位的影响。

### 1.1.3 重度

粉细砂的干重度值介于  $14.3 \sim 15.5\text{kN/m}^3$  之间，平均值为  $14.90\text{kN/m}^3$ 。湿重度值介于  $15.3 \sim 16.0\text{kN/m}^3$ ，平均值为  $15.65\text{kN/m}^3$ 。如图 1-2 所示。

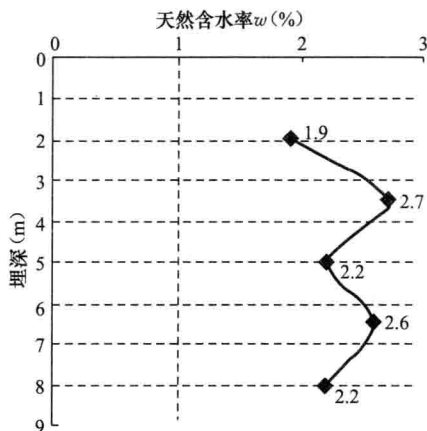


图 1-1 粉细砂天然含水率随埋藏深度变化曲线

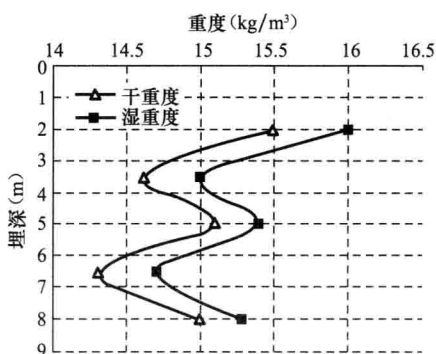


图 1-2 粉细砂重度随埋藏深度变化曲线

#### 1.1.4 孔隙比

由于历史成因不同，砂土存在的密实度可能会差别很大，松散状态与密实状态砂土会表现出截然不同的力学特性，在较低围压作用下，松砂为剪缩，而密砂为剪胀。

粉细砂的孔隙比一般在 0.6~0.85 之间, 如图 1-3 所示, 随埋藏深度的增加, 在浅层 2~5m 的范围以及中部 5~8m 的范围均呈先增后减的变化趋势, 但孔隙比不超过 0.85。

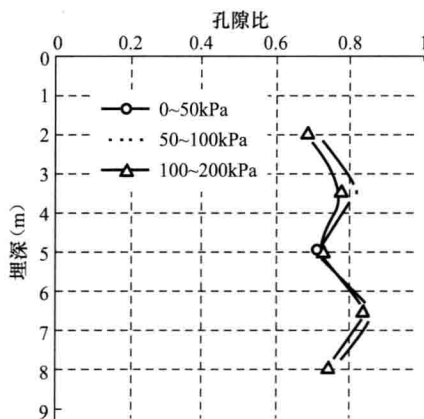


图 1-3 粉细砂孔隙比随埋藏深度变化曲线

这里列举几处粉细砂试样的基本性质试验结果。表 1-1 取自武汉长江隧道工程施工场地内, 粉细砂⑤<sub>1</sub>: 灰~青灰色, 含有有机质及云母, 夹薄层粉土及粉质粘土, 呈饱和、稍密状态; 粉细砂⑤<sub>2</sub>: 灰~青灰色, 含有有机质及云母, 偶夹薄层粉土及粉质粘土, 呈饱和、中密状态。

它们的颗粒组成见表 1-1, 最大干密度、最小干密度及试验控制干密度见表 1-2。

粉细砂颗粒组成

表 1-1

粒径 (mm)	>0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.005	<0.005	$D_{50}$	$C_u$
⑤ <sub>1</sub>	6.9	59.39	18.04	15.58	6.06	0.09	5.88
⑤ <sub>2</sub>	12.74	66.35	9.1	9.9	2.69	0.15	6.64

最大干密度、最小干密度及试验控制干密度 表 1-2

试 样	最大干密度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )	最小干密度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )	试验控制干 密度 $D_r =$ 40%	试验控制干 密度 $D_r =$ 50%	试验控制干 密度 $D_r =$ 60%
⑤ <sub>1</sub>	1.58	1.25	1.38	1.42	1.45
⑤ <sub>2</sub>	1.7	1.37	1.5	1.54	1.57

表 1-3 为粉细砂颗分及定名试验，取自于西霞院坝基，位于小浪底水利枢纽工程下游 16km 处。

颗分试验结果 表 1-3

编 号	取样深度 (m)	室内定名	颗粒组成 (%)					
			砂粒 (mm)			粉粒 (mm)		粘粒 (mm)
			0.5~ 2	0.25~ 0.5	0.075~ 0.25	0.05~ 0.075	0.005~ 0.05	
北 K3	1.1	极细砂		7.7	53.6	21.1	12.4	5.2
北 K4	0.8	极细砂		5.7	47.0	24.7	17.1	5.5
南 K5	1.2	极细砂	15.3	22.0	33.0	12.6	11.7	5.5

北京地区新街口及芍药居等地铁隧道粉细砂样品的粒径分布如图 1-4、图 1-5 所示。

图 1-4 为在芍药居地下隧道工地所取粉细砂样，可见此处粉细砂颗粒的分布较为均一，平均粒径为  $118.64\mu m$ ， $D_{90}$  为  $213.61\mu m$ 。比表面积为  $0.2645m^2/g$ 。

图 1-5 是在新街口地铁工地所取粉细砂样，该粉细砂样的粒径分布范围略大于图 1-4，但是相对来讲分布也比较集中。 $D_{50}$  为  $137.74\mu m$ ， $D_{90}$  为  $272.09\mu m$ 。比表面积为  $0.3579m^2/g$ 。

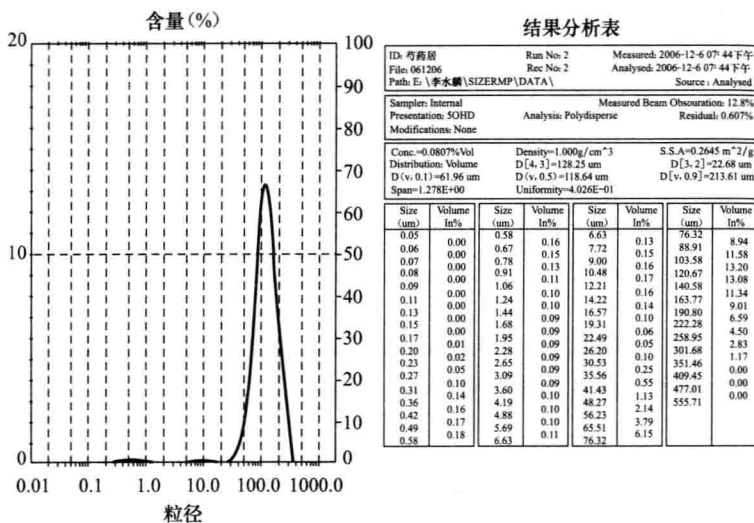


图 1-4 芍药居地铁粉细砂的粒径分布图

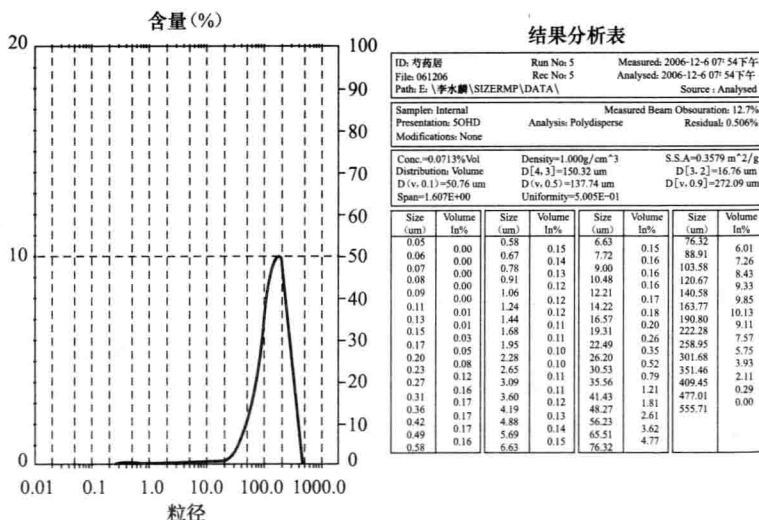


图 1-5 新街口地铁粉细砂的粒径分布图

## 1.2 粉细砂的工程性质

粉细砂土的工程性质介于砂性土与粘性土之间，在天然状态下，结构松散，密度也较低，在自重的作用下即可压密，埋深较大的粉细砂层，密度也较大。在有水的粉细砂地层，内摩擦角也很大，由以往的工程实践和实验室试验，总结出粉细砂土以下主要的工程性质：

(1) 粉细砂的粒径分布均匀，且粒径范围很小，结构松散，在外界荷载作用下，很容易变形。受中心荷载时，易发生均匀沉降，受偏压时，发生不均匀沉降，承载力很差，其破坏的范围也较中心荷载作用时大。由于粉细砂土的结构松散，在破坏滑移时往往是瞬间的、突然的。

(2) 粉细砂土体主要靠取决于粒间法向压力的粒间摩擦力维持本身稳定和承载能力。所以在受剪力的作用下土体很容易失稳，使得土颗粒重新排列，趋于密实。

所以粒间压力有助于稳定；粒间的剪力则引起变形、位移。通过三轴固结不排水剪切试验得出，粉细砂土体的总应力下的抗剪强度指标（粘聚力和内摩擦角）与有效应力下抗剪强度指标（粘聚力和内摩擦角）很接近，表明粉细砂排水消散孔隙水的固结速率较快。

在一定荷载作用下，随着固结度提高，抗剪强度逐渐增长，且增长幅度较大。受荷速率较大，孔隙比大于临界孔隙比的饱和粉细砂很快变形，而孔隙排水又滞后，土中应力大部分由孔隙水承担，形成孔隙水压力，剪切面上的有效应力很小，强度很低，甚至诱发剪切液化。粗砂的孔隙水压力达到最大值后，便立即开始减小；而粉细砂在初始液化发生后的最大孔隙水压力，能随加荷速率增加而保持常值。

(3) 在被水饱和情况下，粉细砂在荷载作用下的变形速率加



大，而变形控制的承载力较低。若加荷速率过快，会产生一定的孔隙水压力，变形速率加快。粉细砂遇水即饱和，失去结构凝聚力，湿化崩解时间不到 1 分钟；其自然休止角由非饱和状态的  $33.8^{\circ}\sim 37.3^{\circ}$ ，降为水下状态的  $26.6^{\circ}\sim 27.1^{\circ}$ 。出水或局部受压时，粉细砂所含的水分也易析出，强度相应增长。

(4) 粉细砂渗透系数一般为  $1.2\times 10^{-3}\sim 6.0\times 10^{-3}$  cm/s，属于中等透水性。天然沉积粉细砂水平向渗透系数明显大于垂直向渗透系数。粉细砂不均匀系数一般不大于 5，渗透破坏形式主要为流土，继后产生流沙现象。均匀疏松的粉细砂会产生特有的流土现象，在初始阶段，地表出现小泉涌及冒泡，接着出现大面积地表向上鼓起，继之迅速浮动，产生渗透液化现象。

(5) 饱和粉细砂在往复剪切作用下，会瞬间发生滑移破坏，孔隙体积减小，趋于振密，而不可压缩的孔隙水一时不能及时排出，导致孔隙水压力（超静水压力）骤然上升，使通过砂土颗粒间互相接触所传递的接触压力大大减少，摩擦阻力随之减小。当孔隙水压力上升到等于上覆压力时，接触完全消失，抗剪强度也随之丧失，粉细砂从散粒状态转变为黏滞流体状态，产生振动液化流动现象。

### 1.2.1 颗粒级配的影响

粉细砂工程性质主要取决于其密实程度，这里列举用重型压实标准提高砂土的密实度。实验结果如图 1-6 所示。

从图 1-6 可以看到：

(1) 在含水量较小时，干密度偏小，表明在含水量较低时，砂土难以压密实，随着含水量的增加，干密度开始逐渐增大。

(2) 级配不良的粉土质砂的击实曲线并不像普通细粒土的击实曲线是一个单峰值曲线，它是一个双峰值曲线。干密度随着含水量的逐渐增大呈现先减小，后增大，再减小的规律。

这主要是由于级配不良的粉土质砂本身所决定的。通常，土