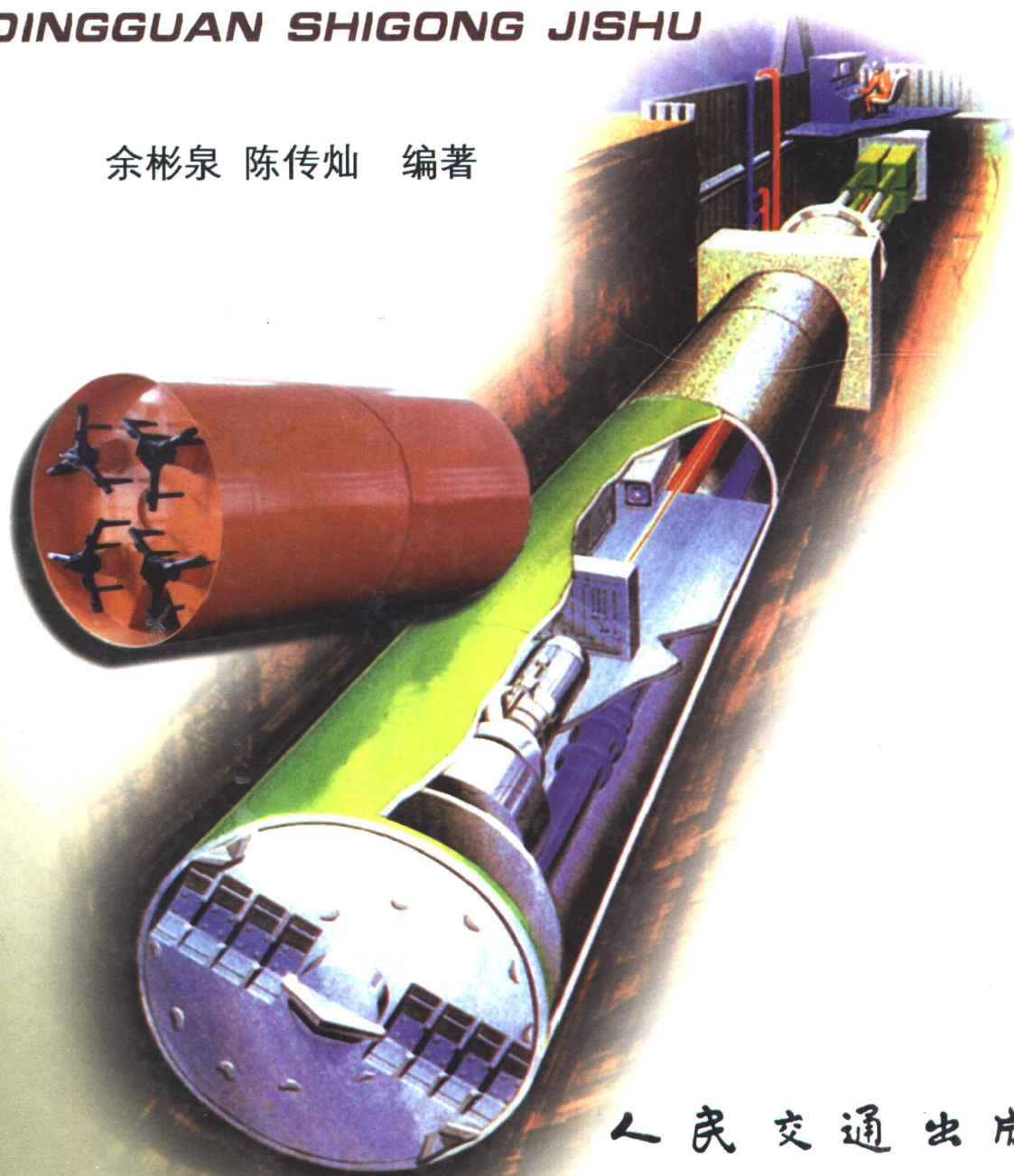


顶管施工技术

DINGGUAN SHIGONG JISHU

余彬泉 陈传灿 编著



人民交通出版社

顶管施工技术

Dingguan Shigong Jishu

余彬泉 陈传灿 编著



人民交通出版社

图书在版编目(CIP)数据

顶管施工技术/余彬泉,陈传灿编著.-北京:人民交通出版社,1998

ISBN 7-114-02991-8

I. 顶… II. ①余… ②陈… III. 隧道工程-顶管-工程施工 IV. U455.47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 09066 号

顶 管 施 工 技 术

余彬泉 陈传灿 编著

插图设计:高静芳 版式设计:刘晓方 责任校对:刘高彤

责任印制:张凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

北京京东印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:390 千

1998年8月 第1版

1998年8月 第1版 第1次印刷

印数:0001~3500册 定价:28.00元

ISBN 7-114-02991-8

T U · 00052

内 容 提 要

全书共 17 章,介绍了从手掘式到机械式各种顶管的施工方法和设备。重点介绍了先进的泥水平衡和土压平衡顶管的施工理论、方法及各种顶管掘进机。另外,对与顶管施工有关材料、辅助设备、自动控制方面的知识、微型顶管以及近几年发展起来的预调式曲线顶管施工也做了介绍。

本书供从事顶管施工的工程技术人员使用,也可供大专院校有关专业师生参考。

(作者通信地址:200232 上海市宛平南路 1067 号 余彬泉)

前 言

在世界范围内,顶管施工技术发展至今已有 100 余年的历史,在我国也有 44 年的发展历史了。在最近的 20 多年中,顶管施工技术无论是在施工理论,还是在施工工艺方面,都有了突飞猛进的发展,在我国也不例外,其中有些方面还居于世界领先水平。但是,目前国内有关顶管施工技术方面的专业书籍却少得可怜,即使有几本也因出版时间较早,已无法满足读者的需求。作者在长期从事教学、科研和多年参与施工的实践中,倍感责任重大,必须尽快地编写一本内容新颖而实用的有关顶管施工的专业书籍,以飨读者。在各方面的大力支持和帮助下,现在终于如愿以偿了。

在本书中,我们介绍了从手掘式到机械式各种顶管施工的方法和设备。其中,重点介绍了先进的泥水平衡和土压平衡顶管的施工理论、方法及各种顶管掘进机。另外,对与顶管施工有关的材料、辅助设备和自动控制技术等方面的知识以及微型顶管也作了介绍。还对近几年才发展起来的预调式曲线顶管施工也作了较详细的介绍。除此之外,还介绍了一些顶管施工常用的计算方法。

我们深信,本书在一定程度上可帮助读者较全面地了解顶管施工技术并对从事顶管施工的工程技术人员有一定的参考价值,也可作为教学参考读物供在校师生学习参考。

在本书的编写过程中,我们得到了日本推进协会常务理事兼技术委员长石桥信利先生、日本伊势机公司海外部部长佐藤真人先生和该部的黄仕元先生、南野建设公司的南野辉久先生的大力支持和具体帮助,并向我们提供了不少非常有价值的资料,对此我们表示衷心地感谢。上海市第二市政工程有限公司顶管技术研究所的赵国强先生为本书的插图花费了不少心血和精力,对此我们也表示感谢。

由于时间仓促和作者水平所限,书中一定还存在不少缺点和错误,望读者给予批评和指正。

作 者

1997 年 12 月 1 日 于上海

目 录

第一章 土的分类及特征	1
第一节 土的结构与分类.....	1
第二节 土的基本性质.....	3
第三节 土的物理特性.....	5
第四节 土的渗透系数和土的抗剪强度.....	7
第五节 土压力.....	9
第二章 与顶管施工有关的机械传动基础知识	12
第一节 行星减速器	12
第二节 钢球离合器	14
第三节 液力偶合器	17
第四节 磁粉离合器	19
第三章 顶管施工概论	23
第一节 顶管施工的历史和现状	23
第二节 顶管施工的基本原理	25
第三节 顶管施工的分类及特点	29
第四章 工作坑和接收坑	33
第一节 工作坑和接收坑的种类	33
第二节 工作坑和接收坑的选取原则	33
第三节 工作坑和接收坑的构筑方法	34
第四节 洞口止水方法	35
第五节 进出洞口的措施	38
第六节 工作坑的布置	39
第七节 工作坑后座的受力分析	41
第五章 顶管施工主要的配套设备	44
第一节 主顶设备	44
第二节 基坑导轨	48
第三节 顶铁和后靠背	49
第四节 起重设备	53
第五节 注润滑浆设备	53
第六节 出土设备	54
第六章 顶管常用的管材和管接口形式	58
第一节 管材的分类和选用原则	58
第二节 企口管	61
第三节 T 型套环管接口	64

第四节	F 型管接口	65
第五节	玻璃纤维加强管	67
第六节	钢管及其他管材	68
第七节	管材的防腐措施	70
第七章	手掘式顶管施工	72
第一节	手掘式顶管施工工艺	72
第二节	挖掘面的稳定及其计算	73
第三节	手掘式工具管的形式	77
第四节	挤压式工具管	80
第八章	泥水式顶管施工	84
第一节	泥水式顶管施工概述	84
第二节	泥水平衡顶管的基本原理	87
第三节	切削刀盘可浮动的泥水平衡顶管掘进机	90
第四节	具有破碎功能的泥水平衡顶管掘进机	92
第五节	气压式泥水平衡顶管掘进机	98
第六节	浓泥水式顶管掘进机	98
第九章	泥水输送设备及泥水管理	102
第一节	进排泥泵	102
第二节	基坑旁通装置	103
第三节	泥水管路系统	105
第四节	泥水处理	108
第五节	泥水管理	111
第十章	土压式顶管施工	115
第一节	土压式顶管施工概述	115
第二节	土压平衡顶管施工的基本原理	117
第三节	多刀盘土压平衡顶管掘进机	119
第四节	DK 式土压平衡顶管掘进机	121
第五节	其他土压式顶管掘进机	124
第十一章	气压式顶管施工	127
第一节	气压式顶管施工概述	127
第二节	全气压式顶管施工	128
第三节	局部气压式顶管施工	131
第四节	气压顶管施工有关的计算	132
第十二章	微型顶管施工	134
第一节	微型顶管施工概述	134
第二节	压入式微型顶管	135
第三节	螺旋钻式微型顶管	141
第四节	其他形式的微型顶管	145
第十三章	其他形式的顶管施工	148
第一节	钢管顶管施工	148

第二节	管套式顶管施工·····	150
第三节	管棚施工·····	153
第四节	箱涵顶进·····	156
第五节	气泡式顶管施工·····	159
第十四章	长距离顶管施工·····	162
第一节	长距离顶管施工概述·····	162
第二节	注浆减摩·····	163
第三节	中继间的使用·····	166
第四节	通风·····	170
第十五章	曲线顶管施工·····	172
第一节	曲线顶管施工概述·····	172
第二节	曲线顶管施工中的有关计算·····	173
第三节	预调式曲线顶管·····	177
第四节	曲线顶管施工中的测量·····	182
第十六章	顶管施工中常用的计算方法·····	187
第一节	推力的计算·····	187
第二节	土压平衡顶管施工的计算·····	192
第三节	泥水平衡顶管施工的计算·····	195
第十七章	顶管掘进机控制系统·····	200
第一节	概述·····	200
第二节	动力元件的选择与设计·····	205
第三节	伺服阀、伺服放大器选择·····	209
第四节	信号检测及激光导向系统·····	216
第五节	系统设计要点、油源设计·····	225
第六节	液压控制系统的安装与调试·····	232
主要参考文献·····		234

第一章 土的分类及特征

第一节 土的结构与分类

土的结构是指构成土的自然状态下骨架的固体颗粒或土的集合体的大小、形状、排列和联接方式。土的结构大体可分为单粒结构、蜂窝状结构和絮状结构三种(图 1-1-1)。

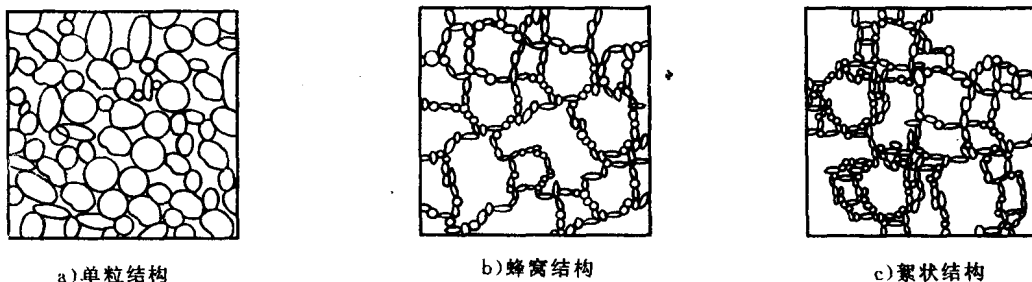


图 1-1-1 土的结构

单粒结构多见于砂和砂砾等这类颗粒比较大的土中。因为颗粒比较大,相互之间没有连结作用,成散粒状。如果这类土的颗粒之间的空隙比较大,则比较疏松,颗粒间的相对位置也就不稳定,容易产生沉降。相反,如果这类土的颗粒之间的空隙比较小,则比较密实,颗粒间的相对位置比较稳定,不容易产生沉降。

蜂窝状结构多见于粒径在 $0.02\text{mm} \sim 0.002\text{mm}$ 的粉土和粘土等沉积地质的土中。该土颗粒在下沉过程中,遇到已沉的土颗粒时,由于分子引力对自重而言已足够大,这时,颗粒不再下沉,在土颗粒与颗粒之间产生了大于颗粒直径的蜂窝状空隙。

絮状结构有时也称绒粒结构或絮凝结构,其粒径多小于 0.002mm ,可长期在水中悬浮,不易下沉。而这种极细的颗粒往往又带有相同的负电荷,它们之间相互排斥也使其悬浮在水中。当这种土粒遇到离子浓度很大的海水时,它们颗粒之间的排斥力减小了,会沉积下来,成了絮状结构。

土的分类方法有许多种,顶管施工中常用的有三种;按颗粒的大小、按各种颗粒组成的百分比和凭直观感觉来判断。

按土颗粒的大小来分可分为砾石、粗砂、中砂、细砂、粉土、粘土和胶粒。

我们把颗粒直径在 2mm 以上的称作为砾石;把颗粒直径在 $0.5\text{mm} \sim 2.0\text{mm}$ 之间的称作为粗砂;把颗粒直径在 $0.25\text{mm} \sim 0.5\text{mm}$ 之间的称作为中砂;把颗粒直径在 $0.074\text{mm} \sim 0.25\text{mm}$ 之间的称作为细砂。区分的方法则往往采用具有标准网孔直径的筛子进行筛分。通常,又把以上的土统称作砂砾土。

我们把颗粒直径在 $0.005\text{mm} \sim 0.074\text{mm}$ 之间的土称作为粉土;把颗粒直径在 $0.001\text{mm} \sim 0.005\text{mm}$ 之间的土称作为粘土;把颗粒直径在 0.001mm 以下的土称作为胶粘土。区分这些

颗粒大小的方法常常是用相对密度计来测其沉淀速度的大小和差别,然后作出判断,因此也称相对密度计法。

土的第二种分类方法是根据土的各种粒径颗粒所组成的百分比的多少来加以区分的。在顶管施工中,不可能遇上单一土,而是由许多不同粒径的土颗粒混合而成的土,因此,就有必要按土中各种粒径颗粒所组成的百分比来区分和命名这些土。

如果粒径大于 2mm 的颗粒占总质量的 20%~50%时,则称该土为砾石。

如果粒径大于 0.5mm 的颗粒占总质量的 50%以上时,则称该土为粗砂。

如果粒径大于 0.25mm 的颗粒占总质量的 50%以上时,则称该土为中砂。

如果粒径大于 0.074mm 的颗粒占总质量的 75%以上时,则称该土为细砂。

如果粒径大于 0.074mm 的颗粒占总质量的 75%以下时,则称该土为粉土。我们对以上砂土的分类和确定名称时,必须根据颗粒组合量由大到小进行排列,并且以最先符合条件者来确定其分类名称。

如果砂的含量占总质量的 50%以下,而粉粒,即 0.005mm~0.074mm 的颗粒占总质量的 50%~100%时,粘粒,即 0.001mm~0.005mm 的颗粒占全部质量的 20%以下时,则称该土为粉土。

如果粉粒含量占总质量的 50%以下,而粘粒含量占总质量的 30%~100%时,则称该土为粘土。

以上两种土的分类方法都必须在试验室中进行。而第三种土的分类方法是凭我们肉眼观察和手的直观感觉来进行的,它不很准确,全凭经验,但它快速简便,非常实用。

首先是砂,用我们的肉眼看上去,它的颗粒较粗而且非常明显,当我们把它烘干以后就能很容易地把它区分出来。另外,如果我们把砂捏在手心,先握紧拳头,然后把手心向上,再松开拳头,如果是干燥状态下的砂,则始终成松散状的;如果是潮湿状态下的砂,它能成团,但只要用另外一只手的手指轻轻一碰,就立刻会松散开来。因此,砂是很容易辨别的。

粉土,一般它的粉粒含量占 80%以上,而砂粒和粘粒的含量都比较少。它在干燥状态时,即使成块状,也容易松散开来,颗粒看上去有点像面粉。这时,如果我们把它紧握在手心,当手心向上摊开时,也比较容易松散开来。如果是潮湿状态时,用手可以暂时把它捏成团。

另外,如果遇到一堆含有一定水分的粉质土,我们能站得上去,它有一定的承载力;如果我们用一只脚的前鞋掌,较快地不断地拍打它,不一会儿,就能看到它表面会渗出许多水来,土体也变得软了,承载力也明显下降。这时,如果我们再站上去,就很容易陷下去。

粘土,它主要含粘粒。干燥状态下,它如果已成块状,则有一定的强度,如果它成粉状,用手指捻摩,可感觉到其颗粒极细腻,还带有一定润滑感。含有一定水分时,我们可以把它捏成任意形状,有粘性。

还有,区别粉土、粉质粘土和粘土的方法是用手在台面上把它们搓成条,根据搓成条的直径的大小就能判断:能搓成 2mm~3mm 的土条的,是粉土;能搓成 0.5mm~2mm 的土条的,是粉质粘土;能搓成长度不小于手掌,直径不大于 0.5mm 土条的,且手捏一端它不会断的,这就是粘土。

淤泥,是含有大量有机物的粘土,大多呈黑色,有一股腥臭味。有时,淤泥中也含有少量的纤维。如果把淤泥捞起来烘干,则体积会明显地缩小。

第二节 土的基本性质

普通的土是由气体、液体和固体这三相物质组成的。其中,空气、水汽和土中其他的一些气体构成了土中的气相。水以及水所溶解的盐类构成了土中的液相。而土中的矿物颗粒是土的骨架,它构成了土的固相。为了便于说明土的性质,通常我们把原来是相互分散的土的气相、液相和固相这三相各自集合起来,绘成土的三相简图(图 1-2-1)。图中各符号的意义为:

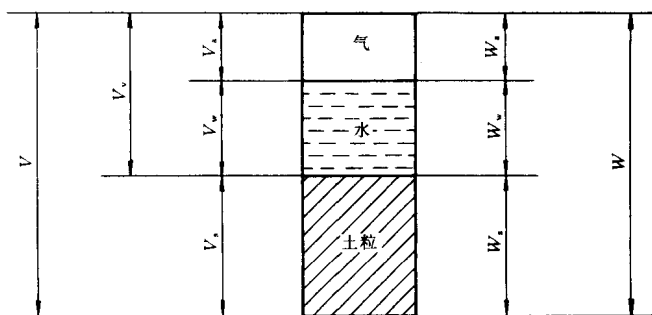


图 1-2-1 土的三相简图

- V ——土的总体积;
- W ——土的总重力;
- V_s ——土中固体颗粒的体积;
- V_v ——土中孔隙的体积;
- V_a ——土中空气的体积;
- V_w ——土中水的体积;
- W_s ——土中颗粒(105℃下烘干)的重力;
- W_w ——土中水的重力;
- W_a ——土中空气的重力(通常 $W_a=0$)。

上述土中各相物质间的比例关系和它们组成的形式以及相互结合的强弱和状态就决定了土的物理性质。用来说明土的物理性质及状态的定量参数就称之为土的物理指标。其中常用的有以下几种。

一、土颗粒的相对密度(d_s)

土颗粒的相对密度是指土颗粒密度与同体积的 4℃ 蒸馏水的密度之比^①。

$$d_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (1-2-1)$$

式中: γ_w ——蒸馏水在 4℃ 的重(力密)度,通常取 10kN/m^3 。

土颗粒的相对密度一般在 2.65~2.80 之间。其中,砂土颗粒的相对密度约为 2.65,粘土颗粒的相对密度约在 2.70~2.80 之间。如果土中含有大量有机质时,其颗粒相对密度将显著变小。

二、土的容重(γ)

在天然状态下,单位体积土所受到的重力称为土的容重。

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-2-2)$$

三、干土重度(γ_d)

处于无水的二相状态时,单位体积土颗粒所受到的重力称为干土的重力密度,简称干土重度或重度。

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{m_s g}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-2-3)$$

^① 相对密度是指某物体的密度与同体积的 4℃ 蒸馏水的密度之比。由于相对密度(无量纲值)与密度两者的数值相同,就把它们混同而通用了,其实不然。——编者

式中： m_s ——固体土颗粒的质量；

g ——重力加速度，通常取 10m/s^2 。

四、饱和土重度(γ_m)

当土的孔隙全部被水所充满时，单位体积土受到的重力称为饱和土的重力密度，简称饱和土重度。

$$\gamma_m = \frac{W_s + W'_w}{V} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-2-4)$$

式中： W'_w ——土中全部孔隙被水充满时水的重力。

五、土的浮重度(γ')

在地下水位以下的土的颗粒所受到的重力在减去水的浮力之后的重度称作为土的浮重度，简称浮重度。

$$\gamma' = \frac{W_s + W'_w - V \gamma_w}{V} = \gamma_m - \gamma_w \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-2-5)$$

六、土的含水量(w)

在天然状态下，土中所含水的重力与土颗粒重力之比，称为土的含水量，它常用百分数表示。

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100(\%) \quad (1-2-6)$$

土的含水量反映了土的干湿程度。含水量越大，说明该土就越湿；含水量越小，说明该土就越干。在实际施工中所遇到土的含水量的变化幅度非常大，砂土可在 $0\% \sim 40\%$ 之间变化，粘土可在 $20\% \sim 100\%$ 之间，有时甚至可在高达百分之几百之间变化。

七、土的孔隙比(e)

土中的孔隙体积与土颗粒体积之比，称作为土的孔隙比，简称孔隙比，用小数表示。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-2-7)$$

八、土的孔隙率(n)

土的孔隙体积所占总体积的百分数，称作为土的孔隙率，简称孔隙率。

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (\%) \quad (1-2-8)$$

孔隙比 e 与孔隙率 n 有以下关系：

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-2-9)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100 \quad (\%) \quad (1-2-10)$$

对于一般土来说，孔隙比和孔隙率不表示孔隙的大小，只表示孔隙的总体积。孔隙比与孔隙体积变化成正比，所以孔隙比可反映土的密实程度。一般粘性土的孔隙比在 $0.4 \sim 1.2$ 之间，

砂性土的孔隙比在 0.5~1.0 之间,而淤泥的孔隙比可高达 1.5 以上。

九、土的饱和度(S_r)

土中水所占的体积和孔隙所占的体积之比值,称为土的饱和度,用小数表示:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (1-2-11)$$

它反映了水充填土孔隙的程度,即反映了土的潮湿程度。当 $S_r=0$ 时,土是完全干的;当 $S_r<0.5$ 时,土是稍湿的;当 $S_r=0.5\sim0.8$ 时,土是很湿的;当 $S_r>0.8$ 时,土是饱和的;当 $S_r=1.0$ 时,土处于完全饱和状态。

第三节 土的物理特性

一、无粘性土的物理特性

无粘性土是指砂土和碎石类土。这类土中无粘粒,不具有可塑性,呈单粒结构。它的性质主要取决于颗粒粒径及其级配。因此,土的密实度是反映这类土工程性质的主要指标。呈密实状态时,土的强度大;呈松散状态时,特别是饱和的粉土和细砂,其稳定性很差,在震动荷载作用下,易发生液化。

评价这类土的密实状态如何,通常有两种方法。第一种是用孔隙比 e 的大小作为判断指标,划分的标准详见表 1-3-1。

砂性土密实度划分标准

表 1-3-1

土 的 名 称	密 实 程 度			
	密 实	中 等 密 实	稍 密 实	松 散
中砂~砂砾	$e<0.6$	$0.6\leq e\leq 0.75$	$0.75\leq e\leq 0.85$	$e>0.85$
粉土~细砂	$e<0.7$	$0.7\leq e\leq 0.85$	$0.85\leq e\leq 0.95$	$e>0.95$

在现场勘察中,很难保持砂性土的天然结构,因此试验的结果往往与实际出入较大,孔隙比的值就不准,很少采用。

第二种是工程中常用的用标准贯入锤击数 N 来划分砂土密实度。

标准贯入试验用的仪器和设备主要有标准贯入器、触探杆、空心锤、支架及卷扬机等五大部分组成。

标准贯入器的外径为 51mm,长 700mm,可分成器靴、器身和器头三部分。器靴在最下端,是一个孔径为 $\phi 35$ mm,长度为 80mm 且带有 19.78° 刃口的切土器。

器身長 500mm,孔径也为 $\phi 35$ mm。它可以分为两半,使用过程中安装在器靴和器头之间,成为一个整体。

器身長 175mm,孔径略小些。在其中部钻有交叉的 4 个排水孔。下端安装器身,上端安装触探杆。

空心锤质量为 63.5kg,在触探杆中可以自由起落,落下时打击在触探杆的一个凸肩上,可把标准贯入器打入土层中。空心锤的吊起高度距触探杆凸肩打击面 $76\text{cm}\pm 2\text{cm}$ 。

支架为一个高度约 5m 的三脚架。支架上安装有滑轮,卷扬机的钢丝绳通过滑轮可把空心锤提升,到达 $76\text{cm}\pm 2\text{cm}$ 的高度后可让其自由落下。每打入土中 30cm 的锤击数 N 即为标准

贯入指标。如果触探杆长度大于 3m,其实测数和标准贯入锤击数需按表 1-3-2 进行修正。

标准贯入试验触探杆长度修正系数 α

表 1-3-2

触探杆长度(m)	≤ 3	6	9	12	15	18	21
α	1.00	0.92	0.86	0.81	0.77	0.73	0.70

我们可简称标准贯入锤击数为 N 值。当 N 值在 0~4 之间时,砂土是极松的;当 N 值在 4~10 之间时,砂土是松散的;当 N 值在 10~15 之间时,砂土是稍密实的;当 N 值在 15~30 之间时,砂土是中等密实的;当 N 值在 30~50 之间时,砂土是很密实的;当 N 值大于 50 以上时,砂土是极密实的。

二、粘性土的物理特性

粘性土与砂性土在性质上有很大的不同。粘性土中的水多呈泥浆状,可以流动。含水量减少时,泥浆变稠,当含水量减少到一定程度时,则不能流动,变成可塑状。含水量再进一步减少,粘土就从可塑状态变成半固体状态。这时,土的形状可不变,但体积却因含水量的减少而收缩。当粘土中的含水量进一步减少时,就从半固体状态变成固体状态。到了固体状态时,其体积和形状都维持不变。

我们把粘土从一种状态过渡到另一种状态之间的分界含水量称作为粘土的界限含水量,通常都用百分数来表示。

1. 液限(w_L)

是指粘土由可塑状态到流动状态的分界含水量,亦称流限。

2. 塑限(w_p)

是指粘土由塑性状态到半固体状态的分界含水量。

3. 缩限(w_r)

是指粘土由半固体状态到固体状态的分界含水量。

4. 粘土的塑性指数(I_p)

粘土的塑性指数是土的液限与塑限之间差值的百分数。

$$I_p = w_L - w_p \quad (1-3-1)$$

塑性指数 I_p 通常又是判断该土是粉土还是粘土的一个重要指标。当土的 $I_p \leq 10$ 时,称该土为粉土,它是一种介于砂和粘土之间的土。而且习惯上往往把数值后的百分号省略,如上述的 $I_p \leq 10$,而不写成 $I_p \leq 10\%$ 。

当 $I_p \geq 10$ 时,称该土为粘土。在粘土中,又可把 $I_p > 17$ 的称为粘土,把 $10 < I_p \leq 17$ 的称为粉质粘土。

5. 粘土的液性指数(I_L)

粘土的液性指数 I_L 是判别粘土软硬程度的一个指标,它可以由下式求得:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (1-3-2)$$

当 $I_L > 1$ 时,粘土成流塑状态;当 $0.75 \leq I_L \leq 1$ 时,粘土呈软塑状态;当 $0.25 \leq I_L \leq 0.75$ 时,粘土呈可塑状态;当 $0 < I_L \leq 0.25$ 时,粘土呈硬塑状态;当 $I_L \geq 0$ 时,粘土呈坚硬状态。

三、常用土的密实程度的判断方法

在顶管施工中,掌握和判断土的密实程度是选择顶管施工方法的依据之一,常用的土的密

实程度的判断可以参考表 1-3-3 中所列的几种方法。

土的密实程度的判断方法

表 1-3-3

土质	密实程度	判断方法	N 值	内聚力 c (kPa)
砂土	非常松散	用手把 $\phi 13\text{mm}$ 钢筋比较容易插入	4 以下	
	松散	能用挖掘机容易挖动	4~10	
土	稍密实	用 2.2kg 铁锤, 较容易把 $\phi 13\text{mm}$ 钢筋打入	10~30	
	中密实	可用上述方法将 $\phi 13\text{mm}$ 钢筋打入 30cm 左右	30~50	
	很密实	用前述方法只能将 $\phi 13\text{mm}$ 钢筋打入 5~6cm, 且有金属声发出	50 以上	
粘土	非常软	用手握成 10cm 拳头, 很容易贯入	2 以下	12.5 以下
	软	用拇指可贯入 10cm 左右, 较轻松	2~4	12.5~25.0
	一般	用拇指加中等的力, 可贯入 10cm 左右	4~8	25.0~50.0
	稍硬	用拇指和加很大的力, 只能形成一个凹坑	8~15	50.0~100.0
	非常硬	可用挖掘机挖动	15~30	100.0~200.0
	固结	只能用十字镐挖, 且比较费劲	30 以上	200.0 以上

四、土的内聚力(c)

粘土的颗粒能粘在一起而不松散开来, 同时也可粘附在其他物体的表面, 这就是土的粘性。它来源于土粒子之间的内聚力。

内聚力按其成因的不同可分为三种: 原始内聚力、加固内聚力和毛细内聚力。

原始内聚力是由土粒间的分子引力而产生的一种力。带有同性电荷的土粒之间有排斥力, 但土粒间的分子则有吸引力, 颗粒越愈近, 吸引力就越大。

带异性电荷的土粒及土粒间的公共水膜都起粘聚作用, 这些都是原始内聚力。

原始内聚力的大小取决于土粒的矿物成分和土的密度, 密度越大, 原始内聚力也越大。

加固内聚力是由土的化学胶结作用而形成的粘聚力。主要包括下列几个方面: 首先, 由于孔隙水中析出的氢氧化铝、氢氧化铁、碳酸钙和氧化硅等物质使土粒胶结形成粘聚力; 其次, 由于覆土压力使土粒长期直接接触而发生再结晶作用而产生粘聚力; 再次, 胶体凝聚后随时间增长和脱水作用, 土粒间形成化学键的晶体而产生粘聚力等。

毛细内聚力是由孔隙中毛细水的毛细压力所产生的粘聚力。毛细内聚力在砂性土中可起一些作用, 如潮湿的砂可以捏成团。但因其数值微小且受含水量变化的影响大, 一般都忽略不计。毛细内聚力在粘性土中也是微不足道。

第四节 土的渗透系数和土的抗剪强度

一、渗透系数(K)

地下水由于重力等作用力而产生的流动是受土的渗透系数影响的。渗透系数的物理意义为当水力坡度等于 1 时水的渗透速度。它是表征土的透水性指标。

$$K = \frac{Q}{AI} = \frac{v}{I} \quad (1-4-1)$$

式中： K ——渗透系数(cm/s)；
 Q ——渗透通过的水量(cm³/s)；
 A ——通过水量的总横截面积(cm²)；
 v ——渗透速度(cm/s)；
 I ——水力坡度。

渗透系数同时受土颗粒的大小、孔隙比和土的构造等诸多因素的影响。表 1-4-1 为各种土质的渗透系数的概略值。

渗透系数 (cm/s)	10 ²	10	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
透水性能	大		中等		小		很小		实际上不透水		
土的种类	大的砾石		粗砂及粗砂和土混合		细砂、粉土、粉质粘土和片状粘土等				不透水的均质粘土		

二、土的抗剪强度(τ_f)

土的抗剪强度与金属、混凝土等材料的抗剪强度不同，它不是一个定值，而是受许多因素的影响。不仅不同类型土的抗剪强度不同，即使同一种土，在不同条件下的抗剪强度也不同。它与剪损前土的密度、含水量、剪切方式、剪切时排水排气等条件有关。

土的抗剪强度是土抗剪切破坏力的极限能力。当土体中某点的剪应力达到土体的抗剪强度时，该点便会沿着剪应力方向发生剪切破坏。抗剪强度是土力学中表示土的性质的一个重要力学指标。

土的抗剪强度测定方法之一是直接做剪切试验。它的试验器材是两个上下对合在一起的盒子，两个盒底分别都是由透水性材料制成。试验时，在两个对合的盒中放满土样，然后在两盒上通过加压板先加上垂直方向的压应力 σ ，再向上下两个盒上不断加大水平方向的剪力，使上下盒发生相对错动，把土样在上下盒交界的面处剪坏，从而测得土的抗剪强度 τ_f 。

这样取三个以上的土样，分别加上不同的垂直压力，便测得相应的抗剪强度，并由此绘出该土的抗剪强度曲线。在垂直方向压力变化不大时，抗剪强度与垂直压应力 σ 的关系近似一条直线(图 1-4-1)。

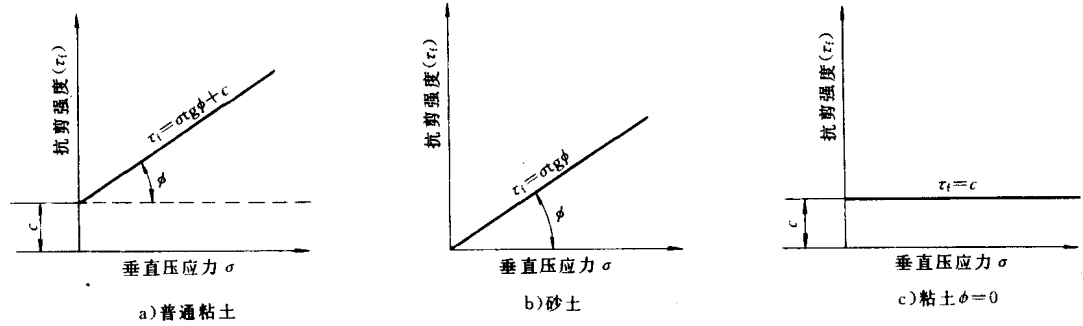


图 1-4-1 抗剪强度与垂直压应力的关系

因此，对于普通的粘性土，其抗剪强度与垂直压应力的关系可用直线方程表示：

$$\tau_f = \sigma \tan \phi + c \tag{1-4-2}$$

对于砂性土:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (1-4-3)$$

对于 $\phi=0$ 的粘土:

$$\tau_f = c \quad (1-4-4)$$

式中: ϕ ——为土的内摩擦角。

砂土的内摩擦角一般随其颗粒变细而逐渐降低。在砂砾、粗砂、中砂中的 ϕ 值约为 $32^\circ \sim 40^\circ$, 细砂和粉土的 ϕ 值约为 $28^\circ \sim 36^\circ$ 。松散的砂的 ϕ 角与天然休止角相近, 密实砂的 ϕ 角比天然休止角大。饱和状态的砂比同样密度的干砂的 ϕ 值少 $1^\circ \sim 2^\circ$ 左右。

粘土的抗剪强度指标变化范围很大, 受结构破坏、垂直有效压力下的固结程度、剪切方式等因素的影响比砂土大得多。粘土的内摩擦角 ϕ 的变化范围大致在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间, 粘聚力 c 值一般为 $(10 \sim 100) \text{ kPa}$, 坚硬的粘土则更大些。

在一定试验条件下得出的内聚力 c 和内摩擦角 ϕ 一般能反映抗剪强度的大小, 因此称 c 和 ϕ 为土的抗剪强度指标。

第五节 土 压 力

在顶管的工作坑内, 如果后座墙不插入土中, 它就是一堵挡土墙。土压力就是指墙后的土由于它自重或作用在土表面的荷载对墙体所产生的侧向压力。它的大小主要与墙身的位移、墙高和土的物理力学性质以及地面荷载等有着十分密切的关系。

根据挡土墙移动或静止的状态, 作用在挡土墙上的土压力有主动土压力、静止土压力和被动土压力三种。其中主动土压力最小, 被动土压力最大, 静止土压力则介于两者之间, 如图 1-5-1 所示。

当挡土墙墙体向前转动或平行移动时, 墙后的土压力会渐渐变小。当墙体的位移达到某一定值时, 墙后的土体内应力达到极限的平衡状态, 此时的土压力达到最小值。这时的土压力是由土推墙, 因此称为主动土压力。

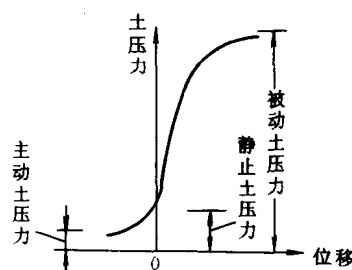


图 1-5-1 土压力间的关系

当土为无粘性土时, 主动土压力强度 p_a 为:

$$p_a = \gamma h \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{kPa}) \quad (1-5-1)$$

式中: γ ——土的容重 (kN/m^3);

h ——深度 (m);

ϕ ——土的内摩擦角 ($^\circ$)。

当土为粘性土时, 主动土压力强度 p_a 为:

$$p_a = \gamma h \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (1-5-2)$$

式中: c ——土的内聚力 (kPa)。

这时, 当 $h=0$ 时, p_a 为:

$$p_a = -2c \tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (1-5-3)$$

无粘性土的主动土压力强度分布图请参见图 1-5-2。