



路基填筑 施工技术

张林洪 吴华金 编著



人民交通出版社

China Communications Press

Luji Tianzhu Shigong Jishu
路基填筑施工技术

张林洪 吴华金 编著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书介绍了土石填料的物理性质、工程分类方法的基础知识以及路基的基本形式和要求,一般土、特殊土和土夹石的力学性质和影响因素;并详细论述了土石填筑料最佳含水率和最大干密度的确定方法,一般路基的填筑施工工艺、方法和质量控制及检验方法,掺灰处治湿软土的理论 and 施工工艺、方法及质量控制方法,粉煤灰填筑路基的结构形式及施工工艺、方法和质量控制方法,多雨潮湿地区路堤填筑施工工艺、方法和质量控制方法及防护技术;同时介绍了路基碾压设备的选型与作业参数的选择。

本书可供公路工程、铁路工程和水利水电工程、市政工程、民航工程的研究、设计、施工技术人员及管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

路基填筑施工技术/张林洪,吴华金编著. —北京:人民交通出版社,2008.7

ISBN 978-7-114-07168-3

I. 路… II. ①张…②吴… III. 路基-填筑-工程施工-施工技术 IV. U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 071484 号

书 名:路基填筑施工技术

著 作 者:张林洪 吴华金

责任编辑:刘永芬

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京宝莲鸿图科技有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:17.75

字 数:454 千

版 次:2008年7月 第1版

印 次:2008年7月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-07168-3

印 数:0001~3000 册

定 价:38.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

在公路工程、铁路工程和水利水电工程、市政工程、民航工程中,都要进行大量的土料和(或)石料填筑。土石料的填筑施工在这些行业的工程中所占比重非常大,而且土石填筑工程的施工方法和质量,直接影响相应工程的质量和成本,因此掌握土石填筑工程的施工技术理论和方法是非常重要的。

没有稳定、坚实的路基,就没有良好的路面。稳定、坚实的路基必须选择合适的填料,根据不同的环境条件和路基填料的性质采用合理的路基结构形式,并严格按照施工技术方法及质量标准进行基底处理和路基填筑。

基底处理、路基填筑施工质量的保证和施工成本的控制,必须从填筑材料的选择或填筑材料的处治,施工机械的选择,填筑施工的基底处理、摊铺层厚、填料的含水率、碾压工艺、碾压遍数等施工参数的控制,到施工质量的检测方法和指标的采用和选择进行全面的控制,才能得到满意的结果。

随着我国社会的发展和进步,公路、铁路、航空和水利水电等工程也在大规模的进行,但是环境要求越来越严格,工程建设所面临的条件和所采用的材料也变得更加复杂多样。如在多雨潮湿地区(或地段)进行土方填筑,采用高含水率(或过湿)土料进行填土工程的施工,利用粉煤灰或炉渣等材料进行路基工程的填筑等,这就对土石工程填筑施工的理论、技术、质量控制标准和方法提出了更多和更高的要求。

随着土石填筑施工设备及技术的更新和进步,也需要对施工设备的选型和作业参数的选择,进行必要的介绍。

综上所述,为了给公路工程、铁路工程、水利水电工程、市政工程和民航工程等行业的技术人员和管理人员提供一个较为全面、系统和详细的技术资料,特编著本书。

本书共分八章。第一章介绍了土石填料的物理性质、工程分类方法的基础知识以及路基的基本形式和要求;第二章介绍了一般土、特殊土和土夹石的力学性质和影响因素;第三章论述了土石填筑料最佳含水率和最大干密度的定义,击实试验的方法和技巧,各类土石的击实特性和击实试验的数据整理分析方法;第四章论述了影响路基压实的因素,一般路基的填筑施工工艺、方法和质量控制标准及检验方法;第五章论述了各类掺灰处治湿软土的理论 and 施工工艺、方法及质量控制方法,并介绍了一些工程的施工工艺、参数和掺灰配合比的实例;第六章论述了粉煤灰的工程性质,粉煤灰填筑路基的结构形式及施工工艺、方法和质量控制

方法;第七章论述了多雨潮湿地区路基填筑施工和道路运行可能遇到的问题,过湿土填筑路堤的施工工艺、方法和质量控制方法,过湿土填筑路堤的沉降计算方法及多雨潮湿地区路堤的防护技术;第八章介绍了路基碾压设备的选型和作业参数的选择。

本书由张林洪、吴华金编著,王萍、周建昆、段翔、彭绍勇、王魁达、刘荣珮、陈加洪、宗家烈、杨俊等参加了本书部分内容的编写和资料整理工作。

本书是在云南省交通厅重点科技项目“多雨潮湿地区路堤填筑施工技术研究”的基础上编写的,在项目研究过程中得到了云南省交通厅、云南省水麻高速公路建设指挥部、云南交通咨询有限公司、昆明理工大学等单位的支持和帮助,在此表示衷心感谢!

目 录

第一章 基础理论	1
第一节 土的物理性质	1
第二节 土的工程分类	12
第三节 路基形式和要求	20
第二章 土的力学性质及影响因素	30
第一节 黏性土的力学性质及影响因素	30
第二节 特殊土的力学性质及影响因素	45
第三节 黏性土在浸水压缩后密实度和含水率的变化规律	58
第四节 无黏性土的力学性质及影响因素	61
第五节 土夹石的力学性质及影响因素	63
第三章 土石填筑料最佳含水率和最大干密度的确定方法	68
第一节 最佳含水率的定义	68
第二节 影响击实的因素及击实技巧	70
第三节 击实数据的整理分析	92
第四章 路基的填筑施工	101
第一节 路基施工工艺	101
第二节 压实度控制方法	102
第三节 路基施工参数的试验确定	104
第四节 击实曲线与压实曲线的关系	107
第五节 施工控制含水率	112
第六节 影响路基压实的因素及压实的控制方法	120
第七节 碾压过程中含水率及密实度的变化	133
第八节 高填方路基的压实	134
第九节 路堑的压实方法	135
第十节 快速测定压实度的方法	135
第十一节 含水率测定方法的选择	137
第五章 掺灰处治湿软土路基填料的方法	139
第一节 概述	139
第二节 掺灰处治湿软土路基填料的理论方法	141
第三节 掺灰处治湿软路基填土的施工方法	167
第四节 掺灰处治湿软路基填土的施工质量控制方法	183
第五节 掺灰处治湿软土的室内试验方法	188

附录	191
附录 5.1 掺生石灰处治路基填土的实例	191
附录 5.2 掺熟石灰处治路基填土的实例	195
附录 5.3 掺水泥处治路基填土的实例	200
附录 5.4 掺石灰—粉煤灰处治路基填土的实例	201
附录 5.5 掺 NCS 处治路基填土的实例	202
附录 5.6 掺灰路基的施工参数实例表	205
第六章 采用粉煤灰填筑路基的施工方法	207
第一节 粉煤灰的种类及工程特性	207
第二节 粉煤灰路基结构	210
第三节 粉煤灰路基的填筑施工	211
第四节 粉煤灰填筑路基的施工质量检验和试验控制	213
第七章 多雨潮湿地区路堤填筑施工及防护技术	215
第一节 多雨潮湿地区路堤填筑施工及道路运行存在的问题	215
第二节 料场和路基基底路界内排水降低土料含水率的技术方法	220
第三节 多雨潮湿地区过湿土路基基底的处治	226
第四节 采用过湿土填筑路基的施工方法	231
第五节 多雨潮湿地区路基的防护技术	259
第八章 路基碾压设备的选择与使用	265
第一节 压路机的选型依据	265
第二节 压路机压实作业参数的合理选择	270
参考文献	275

第一章 基础理论

第一节 土的物理性质

岩石是构成地壳的自然物体,由多种矿物或一种矿物组成的集合体。岩石的颗粒胶结较坚固,但经过成岩过程和长期地质历史中的多次地壳运动,岩体被层理、节理、裂隙、断层等各种结构面所切割,所以,天然岩体既有连续性又具有裂隙性。从天然岩体开采的石料,有的呈完整的块体,有的是被许多裂隙切割的块体。

土是覆盖于地表、没有胶结和弱胶结的堆积物。土是地表岩石在漫长的地质年代经过物理风化、化学风化生成的。这些风化产物或者保留在原地,或者由风、水或冰川搬运形成新的沉积物。土是由矿物颗粒和或大或小的孔隙组合起来的,这些孔隙被水和空气所填充,所以土的显著特征是它的多孔性和散体性。

土是由矿物颗粒(固相)、水(液相)和气体(气相)所组成的三相体系,各种土的颗粒大小和矿物成分差别很大,三相间的数量比例也不相同,而且土颗粒与其周围的水又发生着复杂的物理化学作用。所以,要研究土的性质就必须了解土的三相组成以及土的结构和构造等特征。

土的三相决定物质的性质、相对含量以及土的结构、构造等各种因素,必然在土的轻重、松密、干湿、软硬等一系列物理性质和状态上有不同的反映。土的物理性质又在一定程度上决定了它的力学性质,所以物理性质是土的最基本的工程特性。

一、土的组成

1. 土的固体颗粒

土的固体颗粒(土粒)的大小和形状、矿物成分及其组成情况是决定土的物理力学性质的重要因素。粗大土粒往往是岩石经物理风化作用形成的碎屑,或是岩石中未产生化学变化的矿物颗粒,如石英和长石等;而细小土粒主要是化学风化作用形成的次生矿物和生成过程中混入的有机物质。粗大土粒其形状都呈块状或粒状,而细小土粒其形状主要呈片状。土粒的组合情况就是大小土粒含量的相对数量关系。

(1)土的颗粒级配 在自然界中存在的土,都是由大小不同的土粒组成的。土粒的粒径由粗到细逐渐变化时,土的性质相应地发生变化,例如土的性质随着粒径变细可由无黏性变化到有黏性。因而,可以将土中各种不同粒径的土粒,按适当的粒径范围,分为若干粒组,各个粒组随着分界尺寸的不同而呈现出一定质的变化。

土中土粒的大小及其组成情况,通常以土中各个粒组的相对含量(各粒组占土粒总质量的百分数)来表示,称为土的颗粒级配。

土的颗粒级配是通过土的颗粒分析试验测定的。对于粒径大于 0.074mm 的粗粒组可用筛分法测定,粒径小于 0.074mm 的细粒组可用比重计法或者移液管法测定。使用的标准筛分粗筛和细筛,粗筛孔径分为:60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm;细筛孔径分为:2mm、0.5mm、0.25mm、0.074mm。试验时将风干、分散的代表性土样通过一套孔径不同的标准筛,称出留在各个筛子上的土重,即可求得各个粒组的相对含量。粒径小于 0.074mm 的极细砂、

粉粒和黏粒难以筛分,一般可根据土粒在水中匀速下沉时的速度与粒径的理论关系,用比重计法或移液管法测得颗粒级配。

根据颗粒分析试验成果,可以绘制如图 1-1 所示的颗粒级配曲线,其横坐标表示粒径,采用对数坐标表示,纵坐标表示小于(或大于)某粒径的土重含量。由曲线的坡度可以大致判断土的均匀程度。如曲线较陡,则表示粒径大小相差不多,土粒较均匀;反之,曲线平缓,则表示粒径大小相差悬殊,土粒不均匀,即级配良好。

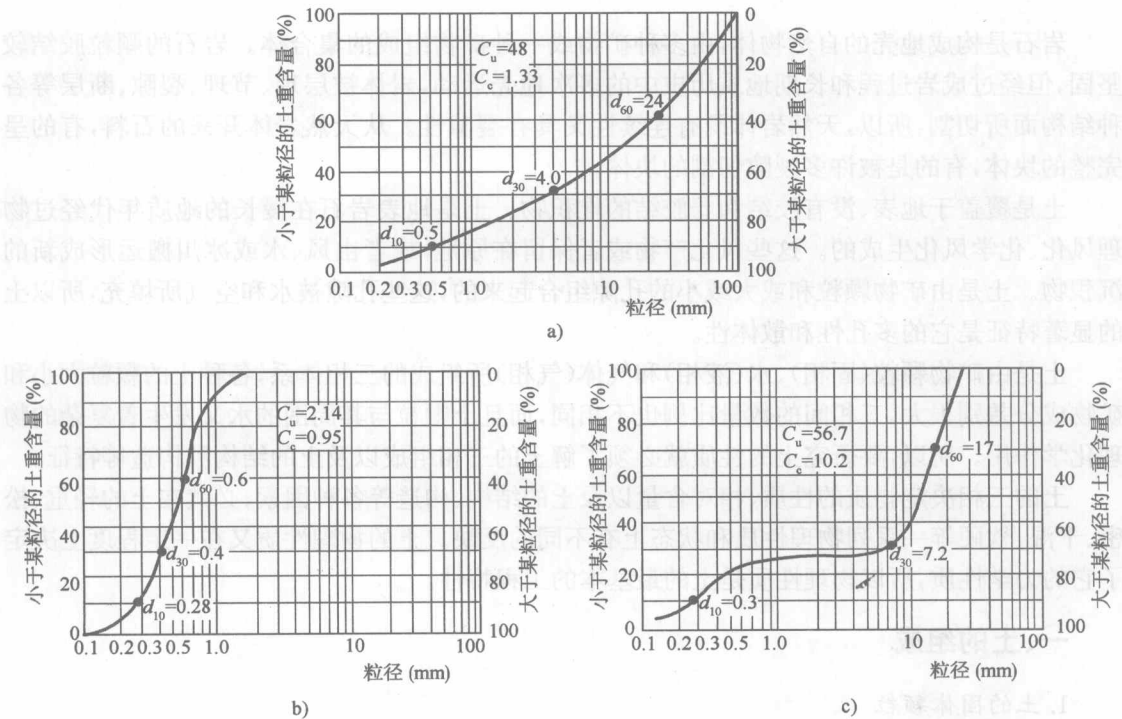


图 1-1 土的颗粒级配曲线

a)良好级配;b)不良级配;c)不良级配

小于某粒径的土重含量为 60% 时,相应的粒径称为控制粒径 d_{60} 。小于某粒径的土重含量为 10% 时,该粒径称为有效粒径 d_{10} 。当小于某粒径的土重含量为 30% 时,该粒径用 d_{30} 表示。

用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 两个指标来分别表示颗粒级配曲线的坡度和形状,其定义为:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (1-2)$$

良好级配是指土的粒径范围较宽广,各个粒组都有一定含量,其颗粒级配曲线多呈下凹形。须同时满足以下两个条件: $C_u \geq 5$; $C_c = 1 \sim 3$ 。如图 1-1a)。

不良级配是指土的颗粒均匀或缺乏中间粒径。不能同时满足: $C_u \geq 5$; $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件。例如,图 1-1b)及图 1-1c)代表两个不良级配土的颗粒级配曲线。

(2)土粒的矿物成分 土粒是岩石风化的产物。岩石经物理风化后破碎成碎屑,但其矿物成分并不改变,主要还是构成岩石的那些原生矿物,如石英、长石、云母等。岩石经化学风化后,其原生矿物发生了化学变化而形成次生矿物。次生矿物按其与水作用的关系可分为可溶的与不可溶的两种。可溶者又细分为易溶、中溶和难溶的三种。不可溶的次生矿物都是原生矿物经溶滤过后的次生变质产物,是构成黏土颗粒的主要成分,故又称为黏土矿物。

不同矿物成分对土的性质有着不同的影响,其中以细粒组的黏土矿物尤为重要。黏土矿物的颗粒极小,在电子显微镜下观察到的形状一般呈片状,也有的为针状、管状、或棒状。经 X 射线分析证明其内部具有层状晶体构造,基本上是由两种原子层(称为晶片)构成的。一种是硅氧晶片,另一种是铝氢氧晶片。由于晶片组合情况的不同,便形成了具有不同性质的各种黏土矿物。其中主要的有蒙脱石、伊利石和高岭石等。主要黏土矿物的物理特性见表 1-1。

主要黏土矿物的物理特性 表 1-1

黏土矿物	形 状	直径(10^{-6}m)	厚度(10^{-6}m)	比表面积(m^2/g)
蒙脱石	薄片状	0.1~1	0.001~0.01	700~800
伊利石	片状	0.1~2	0.01~0.2	65~100
高岭石	具有一定的形状,呈六边形片状	0.3~4	0.05~5	10~20

蒙脱石晶片之间间距大,具有非常弱的键联结,亲水性强,易引起大量膨胀和收缩。另外,压缩性高、强度低亦是蒙脱石的显著特点。高岭石晶片之间间距小,具有很强的氢键联结,结合十分牢固,因此,水不能自由渗入,亲水性差、可塑性低、压缩性亦低。伊利石矿物的工程性质则恰好居于二者之间。

2. 土中的水 and 气

(1)土中的水 土中的液体部分通常是水,它与固体颗粒一样在土的组成结构中占有重要地位。不能将土中的水看成是与固体颗粒机械混合的物质,水有机地参加土的结构,对土的性质起到很大影响。土的性质变化并不完全与土的湿度变化成正比,而是一种复杂的物理—化学变化。土的性质不仅取决于水形态、结构以及介质的物理条件及化学成分。

A. K. 拉里奥诺夫等人利用现代观点对土中的水提出了新的划分方法。划分原则是:①形态;②水分子引力与重力引力的关系;③水与矿物颗粒相联结的形式。见表 1-2。

土 中 水 的 分 类 表 1-2

水 的 形 态	水分子引力 P_m 与重力引力 P_r 的关系	水与矿物颗粒的联结形式
气态水		物理—化学联结
液态水	结合水 $P_m > P_r$ 强结合水(似固体水) 弱结合水(过渡型水)	物理—化学联结
	毛细管水 $P_m \geq P_r$	物理—力学与物理—化学混合联结
	重力水 $P_m < P_r$	物理—力学联结
固态水	结晶水和化学结合水,冰	

从理论研究角度来说,对各种水均有研究的必要。但对研究土的工程性质而言,气态水应属气体部分,固态水的冰及结晶水应属固体部分。因此一般在土力学中,土中水均指液态水,按表 1-2 划分为强结合水、弱结合水、毛细管水和重力水四种类型。

①强结合水。强结合水是指紧靠土的固体颗粒表面,厚度仅含 2~3 个分子层的水,水分子由于静电引力和氢键联结力的作用,牢固地吸附于颗粒表面。因此它具有高黏度和抗剪强度,没有溶解能力,不能传递静水压力,只有吸热变成蒸汽时,才能移动。

②弱结合水。弱结合水紧靠于强结合水的外围,形成一层结合水膜,具有定向排列和渗透吸附特性。它仍然不能传递静水压力,但水膜较厚的弱结合水能向邻近的水膜缓慢转移。当土中含有较多的弱结合水时,土则有一定可塑性,砂土比表面积小,几乎不具有可塑性,而黏性土的比表面积较大,其可塑性范围就大。

弱结合水离土粒表面越远,其受到的静电引力越弱小,并逐渐过渡到自由水。自由水的性质和普通水一样,能传递静水压力,有溶解能力。自由水按其移动所受作用力不同,可分为毛细管水和重力水。

③毛细管水。毛细管水是受到水与空气交界面处表面张力作用的自由水。毛细管水存在于潜水位以上土层中。毛细管水按其是否与地下水面是否联系可分为毛细悬挂水(与地下水无直接联系)和毛细上升水(与地下水相连)两种。

当土中孔隙中局部存在毛细水时,毛细水的弯液面和土粒接触处的表面引力反作用于土粒,使土粒之间由于这种毛管压力而挤紧,土因而具有微弱的内聚力,称为毛细管内聚力或假黏聚力。在施工现场常常可以看到稍微湿状的砂堆,能保持垂直陡壁达几十厘米高而不坍落,就是因为具有毛细管内聚力的缘故。

④重力水。重力水是存在于地下水位以下土层中的地下水。它是在重力或压力差作用下能运动的自由水,对土粒产生浮力作用。

(2)土中的气体 土中的气体是存在于土空隙中未被水所占据的部分,有的是与大气相通的自由气体,有的是与大气不通的封闭气体。前者在土受到外荷作用时很容易被挤出,对土的性质无甚影响。后者的存在会减小土的透水性,增大土的弹性,并影响土在外荷作用下的压缩过程。

当土所受的压力变小时,土中原受压缩的气泡就会膨胀,因受压而溶解于水中的气体,也会溢出。这都会使土中孔隙体积增加,甚至破坏土的结构,从而改变土的工程性质。由于土中气相的数量与分布情况不易测定,故气相对土的物理力学性质的影响问题,目前研究得还不够。

二、土的三相比例关系

为了对土的基本物理性质有所了解,需要对土的三相——土粒(固相)、土中水(液相)和土中气(气相)的组成情况进行数量上的研究。

土的各组成部分的质量和体积之间的比例关系,随着各种条件的变化而改变。例如,地下水位的升高或降低,都将改变土中水的含量;经过压实的土,其孔隙体积将减小。这些变化都可以通过相应指标的具体数字反映出来。

表示土的三相组成比例关系的指标,称为土的三相比例指标,包括土粒比重、含水率、重度、孔隙比、孔隙率、体积率和饱和度等。

1. 三相比例指标定义

为了便于说明和计算,用图 1-2 所示的土的三相组成示意图来表示各部分之间的数量关系。

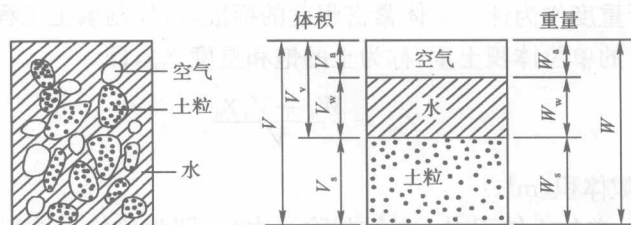


图 1-2 土的三相组成示意图

(1) 土粒比重 土粒重与同体积的 4℃ 时的水重之比, 称为土粒比重, 即

$$G_s = \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{1}{\gamma_w} \quad (1-3)$$

式中: W_s ——土粒重, kN;

V_s ——土粒体积, m^3 ;

γ_w ——4℃ 时单位体积的水重, $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$ 。

土颗粒比重决定于土的矿物成分, 它的数值一般为 2.6~2.8; 有机质土为 2.4~4.5; 泥炭土为 1.5~1.8。

土粒比重可在试验室内测定。粒径小于 5mm 的土用比重瓶法测定。粒径大于 5mm 的土, 其中含大于 20mm 颗粒小于 10% 时, 用浮称法测定; 含大于 20mm 颗粒大于 10% 时, 用虹吸筒法测定; 粒径小于 5mm 部分用比重瓶法测定, 取其加权平均值作为该土的土粒比重。

(2) 土的含水率 w 土中水重 W_w 与土粒重 W_s 之比, 称为土的含水率; 通常以百分数表示。

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (1-4)$$

式中: W_w ——土中水重, kN。

含水率 w 是标志土的湿度的一个重要物理指标。

土的含水率一般用“烘干法”测定。先称小块原状土样的湿土重, 湿、干土重之差与干土重的比值, 就是土的含水率。

(3) 土的重度 γ 单位体积的土重称为土的重度 γ , 即

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-5)$$

式中: W ——土的总重, kN;

V ——土的总体积, m^3 。

天然状态下土的重度变化范围较大。一般黏性土, $\gamma = 18 \sim 20 \text{ kN/m}^3$; 砂土 $\gamma = 16 \sim 20 \text{ kN/m}^3$; 腐殖土 $\gamma = 15 \sim 17 \text{ kN/m}^3$ 。

土的重度测定一般黏性土用“环刀法”测定, 用一个圆环刀(刀刃向下)放在削平的原状土样面上, 徐徐削去环刀外围的土, 边削边压, 使保持天然态的土样压满环刀容积内, 将环刀上下土样削平, 称得环刀内土样重, 求得它与环刀容积的比值即天然重度。

(4) 土的干重度 γ_d 、饱和重度 γ_{sat} 和浮重度 γ' 单位体积中固体土颗粒部分的土重, 称为土的干重度 γ_d , 即

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (1-6)$$

在工程上常把干重度作为评定土体紧密程度的标准,以控制填土工程的施工质量。

孔隙中充满水时的单位体积土重,称为土的饱和重度 γ_{sat} ,即

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V} \quad (1-7)$$

式中: V_v ——土中孔隙体积, m^3 。

在地下水位以下,单位土体积中土粒重扣除浮力后,即为单位土体积中的有效土粒重,称为土的浮重度 γ' ,即

$$\gamma' = \frac{W_s - V_s \gamma_w}{V} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (1-8)$$

(5)土的孔隙比 e 和孔隙率 n 土的孔隙比 e 是土中孔隙体积与土粒体积之比,以小数表示,即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-9)$$

土的气孔隙比 e_a 是土中气体积与土粒体积之比,以小数表示,即

$$e_a = \frac{V_a}{V_s} \quad (1-10)$$

式中: V_a ——土中空气体积, m^3 。

土的水孔隙比 e_w 是土中水体积与土粒体积之比,以小数表示,即

$$e_w = \frac{V_w}{V_s} \quad (1-11)$$

式中: V_w ——土中水分体积, m^3 。

显然,由式(1-9)~式(1-11)可知:

$$e = e_a + e_w \quad (1-12)$$

土的孔隙率 n 是土中孔隙所占体积与总体积之比,以百分数表示,即

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-13)$$

(6)土的体积率 土的体积率有土粒子体积率 v_s 、水体积率 v_w 和气体积率 v_a 。

土粒子体积率 v_s 是土中土粒体积与土的总体积比,一般用百分数表示,即

$$v_s = \frac{V_s}{V} \times 100\% \quad (1-14)$$

水体积率 v_w 是土中水体积与土的总体积比,一般用百分数表示,即

$$v_w = \frac{V_w}{V} \times 100\% \quad (1-15)$$

气体积率 v_a 是土中气体积与土的总体积比,一般用百分数表示,即

$$v_a = \frac{V_a}{V} \times 100\% \quad (1-16)$$

由式(1-13)~式(1-16)可知:

$$v_w + v_a = n \quad (1-17)$$

$$v_w + v_a + v_s = 1 \quad (1-18)$$

(7)土的饱和度 土中被水充满的孔隙体积与孔隙总体积之比,称为土的饱和度,以百分数表示,即

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-19)$$

式中符号意义同前。

2. 三相比比例指标换算

在土的三相比比例指标中,土粒比重 G_s 、含水率 w 和重度 γ 三个指标是通过试验测定的。在已知这三个基本指标后,可以推导出各指标的计算式。

通常令图 1-2 中的 V_s 等于 1, 则 $V_w = wG_s$, $V_s = e$, $V = 1 + e$, $W_s = G_s\gamma_w$, $W_w = wG_s\gamma_w$, $W = (1+w)G_s\gamma_w$ 。土的三相比比例换算公式汇总列于表 1-3。

土的三相比比例换算公式

表 1-3

指标名称	符号	单位	三相比比例指标表达式	常用换算公式
比重	G_s		$G_s = \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{1}{\gamma_w}$	$G_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} (1+e)$, $G_s = \frac{S_r e}{w}$
含水率	w		$w = \frac{W_w}{W_s}$	$w = \frac{S_r e}{G_s}$, $w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$
重度	γ	kN/m^3	$\gamma = \frac{W}{V}$	$\gamma = \gamma_d (1+w)$, $\gamma = \frac{G_s \gamma_w (1+w)}{1+e}$
干重度	γ_d	kN/m^3	$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$, $\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}$, $\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{S_r}}$, $\gamma_d = \frac{(1-v_a) \gamma_w}{\frac{1}{G_s} + w}$
饱和重度	γ_{sat}	kN/m^3	$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V}$	$\gamma_{\text{sat}} = \frac{G_s + e \gamma_w}{1+e}$
浮重度	γ'	kN/m^3	$\gamma' = \frac{W_s - V_s \gamma_w}{V}$	$\gamma' = \frac{G_s - 1}{1+e} \gamma_w = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$
孔隙比	e		$e = \frac{V_v}{V_s}$	$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1$
气孔隙比	e_a		$e_a = \frac{V_a}{V_s}$	$e_a = e - w G_s$
水孔隙比	e_w		$e_w = \frac{V_w}{V_s}$	$e_w = w G_s$
孔隙率	n		$n = \frac{V_v}{V}$	$n = \frac{e}{1+e}$, $n = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_w}$
土粒体积率	v_s		$v_s = \frac{V_s}{V}$	$v_s = \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_w}$, $v_s = 1 - \frac{v_w}{S_r}$
水体积率	v_w		$v_w = \frac{V_w}{V}$	$v_w = \frac{w \gamma_d}{\gamma_w}$
气体积率	v_a		$v_a = \frac{V_a}{V}$	$v_a = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \left(w + \frac{1}{G_s} \right)$
饱和度	S_r		$S_r = \frac{V_w}{V_v}$	$S_r = \frac{G_s w \gamma_d}{G_s \gamma_w - \gamma_d}$, $S_r = \frac{G_s w}{e}$, $S_r = \frac{e_w}{e}$

3. 三相比例的图示

一个土的三相比例关系可以用各种三相比例指标的数值表示,也可以用图示法表示土的三相比例关系。图示法的特点是:既可以在图上同时反映几个比例指标数值,又可以绘制比例指标间关系曲线,如压实试验的含水率干重度关系曲线等。下面分别介绍干重度图、体积率图、孔隙比图和 $\frac{1}{\gamma_d}-w$ 图等四种图示法。

(1) 含水率干重度图 含水率干重度图是以含水率为横坐标,干重度为纵坐标,并在图上绘有饱和度 S_r 等值线和气态率等值线,如图 1-3 所示。

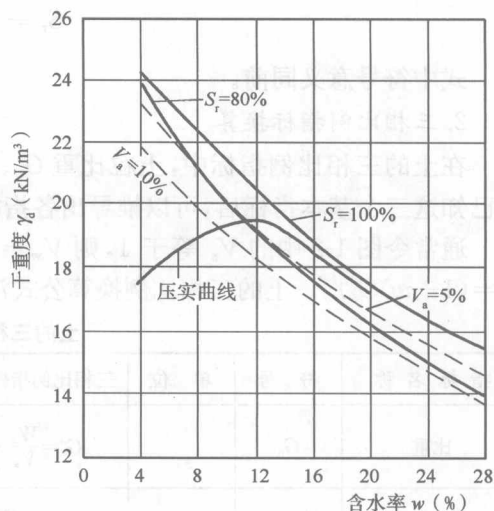


图 1-3 含水率干重度图

饱和度 S_r 等值线是一组曲线,其代表方程为:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + \frac{w}{S_r}} \quad (1-20)$$

取 $S_r=100\%$,代入(1-20)式得:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + w} \quad (1-21)$$

上式是 $S_r=100\%$ 等值线的表达式,利用该式可绘制 $S_r=100\%$ 的等值线。取 $S_r=80\%$ 代入式(1-20),同理,可绘制 $S_r=80\%$ 的等值线。依此类推。

气态率等值线也是一组曲线,其代表方程为:

$$v_a = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \left(\frac{1}{G_s} + w \right) \quad (1-22)$$

取 $v_a=0\%$,代入上式得:

$$1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \left(\frac{1}{G_s} + w \right) = 0 \quad (1-23)$$

式(1-23)是 $v_a=0\%$ 的等值线表达式,利用该式可绘制 $v_a=0\%$ 的等值线。同样,取 $v_a=10\%$ 、 $v_a=20\%$ 、 $v_a=30\%$ 等分别代入式(1-22),可分别绘制 $v_a=10\%$ 、 $v_a=20\%$ 、 $v_a=30\%$ 的等值线。

根据压实试验结果,一般在含水率干重度图上绘制含水率与压实干重度关系曲线,即压实曲线(图 1-3)。

由式(1-20)及式(1-22),可知,饱和等值线和气态率等值线均与比重 G_s 有关,因此比重不同的土的压实曲线不宜绘在同一图上。

(2) 体积率图 体积率图是以水体率 v_w 为横坐标,土粒体积率为纵坐标,并在图上绘制饱和度 S_r 等值线及气态率 v_a 等值线,如图 1-4 所示。

饱和度 S_r 等值线是一组直线,其代表方程为:

$$v_s = 1 - \frac{v_w}{S_r} \quad (1-24)$$

取 $S_r=100\%$ 、 $S_r=90\%$ 、 $S_r=80\%$ ……代入式(1-24),分别绘制 $S_r=100\%$ 、 $S_r=90\%$ 、 $S_r=80\%$ ……等值线。

气体积率等值线也是一组直线,其代表方程为:

$$v_s = 1 - v_a - v_w \quad (1-25)$$

取 $v_a=0\%$ 、 $v_a=10\%$ 、 $v_a=20\%$ ……代入上式,分别绘制 $v_a=0\%$ 、 $v_a=10\%$ 、 $v_a=20\%$ ……的等值线。

绘制压实曲线时,先将已知的含水率 w 和干重度 γ_d 按以下二式分别换算成 v_w 和 v_s 。

$$v_w = w G_s v_s \quad (1-26)$$

$$v_s = \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_w} \quad (1-27)$$

根据求得的 v_w 、 v_s 绘制压实曲线(图 1-4)。此压实曲线代表 V_w 与 V_s 关系曲线。

由式(1-24)及式(1-25)可知,饱和度 S_r 等值线及气体积率等值线均与土的性质无关,不同土的压实曲线可以绘在同一图上。

(3)孔隙比图 孔隙比图是以水孔隙比 e_w 为横坐标,孔隙比 e 为纵坐标,并在图上绘有饱和度 S_r 等值线和气孔隙比 e_a 等值线,如图 1-5 所示。

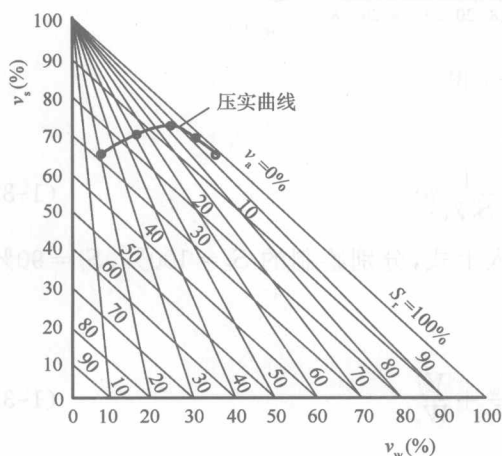


图 1-4 体积率图

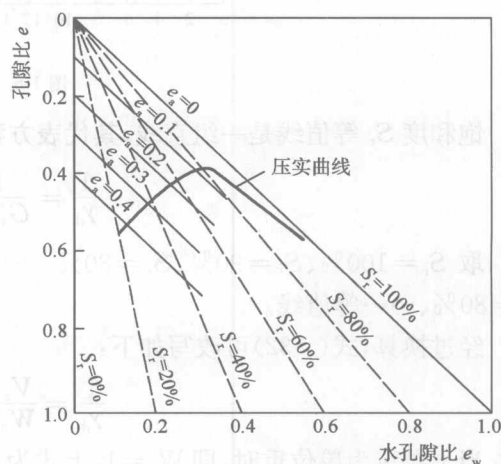


图 1-5 孔隙比图

饱和度 S_r 等值线是一组直线,其代表方程式为:

$$e = \frac{e_w}{S_r} \quad (1-28)$$

取 $S_r=100\%$ 、 $S_r=80\%$ 、 $S_r=60\%$ ……代入上式,分别绘制 $S_r=100\%$ 、 $S_r=80\%$ 、 $S_r=60\%$ ……的等值线。

气孔隙比 e_a 等值线也是一组直线,其代表方程为:

$$e = e_w + e_a \quad (1-29)$$

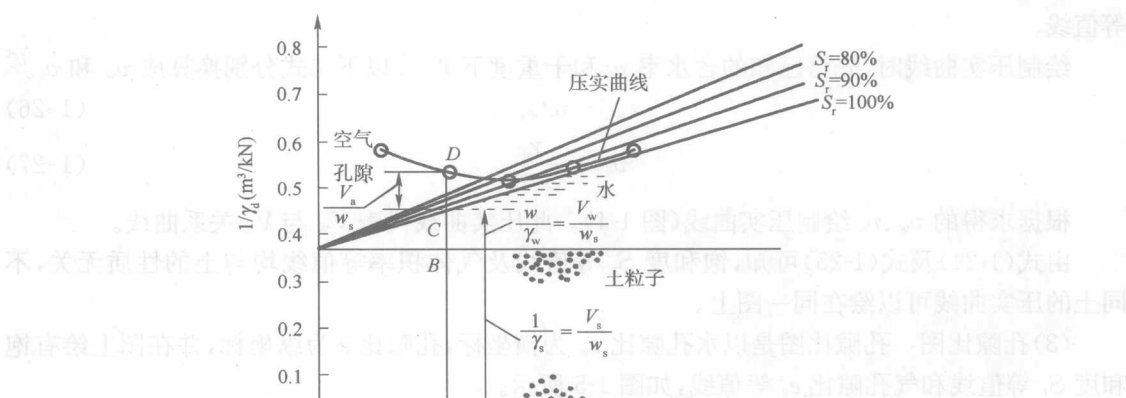
取 $e_a=0$ 、 $e_a=0.1$ 、 $e_a=0.2$ ……代入上式,分别绘制 $e_a=0$ 、 $e_a=0.1$ 、 $e_a=0.2$ ……的等值线。

在孔隙比图上绘制压实曲线时,先将已知的含水率 w 和干重度 γ_d 按以下二式换算成 e_w 和 e ,即

$\gamma_d = \frac{1}{\dots}$

根据换算的 e_w 、 e 绘制压实曲线(图 1-5),此压实曲线 e_w 与 e 的关系曲线。

S_r 等值线,如图 1-6 所示。

 $S_r=80\%$ 、……等值线。

经过换算,式(1-32)可改写如下:

$$\overline{\chi_d} = \overline{W_s} + \overline{W_g} + \overline{W_a}$$

当土粒重为单位重时,即 $W_s=1$,上式为:

以上说明:当土粒重为单位重时,纵坐标 $\frac{1}{\gamma_d}$ 代表土粒体积、水孔隙体积和气孔隙体积之和。

如图 1-6 上的 D 点,纵坐标为 AD ,其中: AB 段代表当土粒为单位重时土粒的体积, BC 段代表当土粒为单位重时水孔隙体积; CD 段代表当土粒为单位重时气孔隙体积。

三、无黏性土的相对密实度

相对密度是无黏性土紧密程度的指标,对土工建筑物和地基的稳定性,特别是抗震稳定性方面具有重要意义。砂土的紧密程度不能仅从它的孔隙比的大小来衡量。对于颗粒大小、形状及不均匀系数不同的两种砂土,即使孔隙比完全相同,但其紧密程度可能有很大差别。因此,需根据砂土孔隙比与极限孔隙比(最大孔隙比和最小孔隙比)的相对关系来表示。