

建筑地基 计算原理与实例

顾慰慈 等编著

新规范



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



建筑地基计算原理与实例

顾慰慈 等编著



机械工业出版社

前 言

任何工程建筑物都必须修建在地基上,依靠地面的支撑才能“站立”在地面上,所以地基是工程建筑的重要组成部分,没有一个良好、稳固的地基,建筑物本身修建得再坚实耐用也是不安全的。实践证明,许多工程事故都与地基有关,如1941年加拿大修建的特仑斯肯谷仓,由于基础下面有一层厚度为16m的软黏土层,承载能力较低,因此谷仓建成后初次贮存谷物,就使谷仓的一侧陷入土中8.8m,而另一侧抬高1.5m,整个谷仓倾斜 27° ;某展览馆修建在厚约14m的泥质软黏土地基上,工程建成后当年基础就下沉0.6m,展览馆的中央大厅平均沉降达1.6m,墙面也由于不均匀沉降而产生较大裂缝;又如某水库工程,大坝的河床坝段修建在透水性较强的砂卵石层上,左岸河滩坝段的坝基表面分布有零星的砂质黏土,其下也为透水性较强的砂卵石层,渗透系数达600m/d,1962年汛期,在水头压力作用下坝基内形成剧烈渗流,并在坝后产生管涌,使得坝体背水坡出现四条脱坡裂缝。

上述例子说明,由于地基的承载力不足,沉降变形过大(特别是不均匀沉降过大),渗透破坏(形成管涌和流土),地基失稳等原因,都会导致建筑物丧失功能和使用价值,甚至使建筑物产生破坏和失事,因此在工程建筑物设计时,必须根据建筑物的具体使用条件,对其地基的承载力、变形、强度和稳定性等方面进行核算,以确保建筑物的安全可靠。

本书介绍了建筑地基的设计计算,内容包括在竖直及倾斜荷载作用下地基承载能力的计算,地基的变形计算,地基的平面和深层抗滑稳定性计算,地基的渗流计算和基坑降水,土坡的稳定性计算及挡土墙土压力计算等。书中除介绍了目前工程中常用的计算方法外,还介绍了近年来国内外在这方面的研究成果和经验,特别重点介绍了按极限平衡原理及理论计算地基承载力、地基稳定性、极限边坡和挡土墙土压力的方法。

书中附有大量计算图表,书末附录中还列有土的各种基本数据,可供读者参考使用。为了帮助读者掌握书中所述的计算方法,书中的每章中均附有相应的计算实例,以供读者参考。

本书可供土木工程、建筑工程、水利水电工程、公路和铁路工程、水运工程、矿山工程等专业的技术人员、设计人员和科研人员使用,也可供上述相应专业的大专院校师生阅读及参考。

参加本书编写工作的有顾慰慈、蒋幼新、高红、蒋栩、马宁、车建平等。

编 者

2009年6月20日

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 土的物理性质及工程分类	1
一、土的组成	1
二、土的物理性质指标	4
三、土的物理状态指标	8
四、土的工程分类	9
第二节 土的抗剪强度	14
一、土的抗剪强度理论	14
二、土的剪切试验	15
三、抗剪强度指标 c 、 φ 的标准值	25
第三节 土的极限平衡条件	26
一、土中一点处的应力	26
二、应力圆	27
三、土中应力的极限平衡条件	27
第二章 地基应力计算	30
第一节 地基中的自重应力	30
一、均质地基	30
二、层状地基	31
第二节 基底应力	33
一、中心受压基础	33
二、偏心受压基础	34
三、基底附加应力	37
第三节 地基中的附加应力	38
一、空间问题条件下的附加应力	38
二、平面问题条件下的附加应力	60
三、双层地基中的附加应力	68
四、土的变形模量随深度增大时的附加应力	69
第三章 渗流计算	70
第一节 达西定律	70
一、达西定律基本原理	70
二、渗透系数的测定	72
第二节 流网及其应用	77
一、渗流运动的基本微分方程式	77

二、流网的特性·····	79
三、流网图的应用·····	81
四、流网图的绘制·····	83
第三节 基坑降水·····	89
一、明沟排水·····	89
二、井点降水·····	90
三、井点降水的计算·····	94
四、基坑渗流计算·····	105
第四节 渗透变形及其防治·····	110
一、管涌和流土的判别·····	110
二、渗透破坏的临界坡降·····	113
三、防止渗透破坏的措施·····	115
四、反滤层的设计·····	115
第五节 基坑抗渗、抗隆起稳定性验算·····	120
一、基坑抗渗流稳定性的验算·····	120
二、基坑抗隆起稳定性的验算·····	120
三、建筑物基础抗浮稳定性验算·····	121
第六节 层状地基的渗流计算·····	122
一、综合渗透系数的计算·····	122
二、层状地基的渗流计算·····	124
第七节 排水沟的渗流计算·····	126
一、两侧排水·····	126
二、四周排水(上、下和两侧同时排水)·····	130
第八节 渠道的渗流量计算·····	134
一、渠道自由渗漏的计算·····	134
二、渠道顶托渗漏的计算·····	139
第四章 地基的变形和建筑物的沉降·····	140
第一节 概述·····	140
第二节 土的压缩性·····	140
一、土的压缩试验、压缩曲线和压缩性指标·····	141
二、土的侧压力系数 k_0 和变形模量 E_0 ·····	145
第三节 基础埋置深度和地基压缩层深度的确定·····	147
一、基础埋置深度的确定·····	147
二、地基压缩层深度的确定·····	151
第四节 地基变形特征和允许变形值·····	153
一、地基变形特征·····	153
二、建筑物设计时地基变形的控制·····	154
三、建筑物地基变形的允许值·····	154
第五节 地基最终沉降量的计算·····	155

一、用 $e \sim p$ 曲线或压缩系数 a 计算最终沉降量	155
二、用 $e \sim \log p$ 曲线或压缩指数 C 计算最终沉降量	162
三、根据压缩模量 E_s 计算最终沉降量	169
四、根据建筑地基基础设计规范方法计算地基最终沉降量	170
五、考虑侧向变形的地基沉降量计算	181
六、用等值层法确定地基的沉降量	182
七、砂砾石地基的沉降计算	183
八、建筑地基回弹再压缩变形的计算	185
九、地基沉降与时间的关系	185
第六节 地基的固结计算	187
一、孔隙压力	187
二、孔隙压力的基本微分方程	189
三、孔隙压力的计算	193
四、土的固结度	195
五、土的固结系数	199
第七节 各种因素对沉降的影响	201
一、次压缩沉降的计算	201
二、加荷速度对沉降的影响	202
三、起始水力坡降的影响	204
第五章 挡土墙土压力计算	207
第一节 概述	207
第二节 静止土压力和弹性状态土压力	210
一、静止土压力	210
二、静止土压力系数	212
三、弹性状态土压力	214
第三节 按朗肯土压力理论计算土压力	215
一、朗肯土压力理论	215
二、无黏性土的主动土压力	216
三、黏性土的主动土压力	225
四、无黏性土的被动土压力	235
五、黏性土的被动土压力	238
第四节 按库仑土压力理论计算土压力	241
一、库仑土压力理论	241
二、主动土压力	242
三、被动土压力	255
四、黏性土情况	258
第五节 按极限平衡原理计算土压力	267
一、土中一点处滑裂面的方向	267
二、无黏性土的土压力计算	270

三、黏性土的土压力计算	279
第六节 按朗肯土压力理论计算墙面和填土表面倾斜时的土压力	300
一、墙面竖直、土体表面倾斜时土压力的计算	300
二、墙面倾斜、土体表面倾斜时土压力的计算	305
第七节 地震土压力的计算	312
一、物部-冈部方法	312
二、地震规范方法	315
第八节 作用在涵管上的土压力	316
一、沟埋式涵管上的土压力	317
二、上埋式涵管上的土压力	319
第九节 作用在板桩墙上的土压力	320
一、非锚固板桩墙上的土压力	321
二、锚固板桩墙上的土压力	324
第六章 土坡的稳定性计算	327
第一节 土坡稳定性概述	327
第二节 无黏性土土坡的稳定性计算	328
一、自然状态下的土坡	328
二、有地下水渗流时的无黏性土土坡	329
第三节 黏性土土坡稳定分析的基本原理和稳定数法	332
一、黏性土土坡稳定分析的基本原理	332
二、稳定数法	333
第四节 土坡稳定分析的条分法	337
一、简单条分法	337
二、条分法的简化计算	339
三、土坡稳定性的查表计算法	345
第五节 考虑土条间侧向力作用的稳定分析方法	346
一、考虑土条间作用有水平力 E	346
二、考虑土条间作用有水平推力 E 和垂直剪应力 T (毕晓普法)	349
第六节 最小稳定安全因数值确定	351
一、扇形面积法	351
二、十字线法	351
三、多角形面积法	352
四、抛物线法	353
第七节 地基中有软弱层时土坡的稳定性计算	354
第八节 大气降水对土坡稳定性的影响	356
第九节 直立土坡和斜坡的极限稳定高度	359
一、直立土坡的极限稳定高度	359
二、斜坡的极限稳定高度	363
第十节 用极限平衡理论计算土坡的极限稳定坡面	369

一、土坡的极限稳定坡面	369
二、土坡坡顶的极限荷载	385
第十一节 增加土坡和护面稳定性的措施	388
第七章 地基承载能力的计算	394
第一节 地基承载力的确定	394
一、根据有关表格确定地基承载力	394
二、根据地基土的强度理论计算式确定地基承载力设计值	403
第二节 地基的临塑荷载和临界荷载	405
一、地基变形的发展	405
二、临塑荷载和临界荷载	406
第三节 竖直荷载作用下地基的极限承载力	411
一、地基破坏的类型	411
二、竖直荷载作用下地基的极限承载力	413
第四节 倾斜荷载作用下地基的极限承载力	433
一、当不考虑渗流(孔隙压力)作用时地基的极限承载力	433
二、考虑渗流或孔隙压力作用时地基的极限承载力	449
第五节 地基极限承载力的图解方法	454
一、图解法	454
二、图解解析法	457
第六节 倾斜荷载作用下层状地基的极限承载力	466
一、破坏体形状	466
二、拉裂面位置的确定	467
三、滑动面间的角度关系和应力关系	469
四、地基极限承载力	473
第七节 根据土的极限平衡理论计算地基的极限承载力	477
一、特征线方程及其解法	477
二、地基极限平衡区的形状及其特征区的划分	480
三、极限平衡区内的应力和角度关系	481
四、地基极限荷载的计算	489
第八节 地基极限承载力的查表计算法	503
第九节 偏心倾斜荷载作用下地基极限承载力的计算	506
一、偏心倾斜荷载作用下地基极限平衡区的形状	506
二、偏心倾斜荷载作用下地基的极限承载力	512
第十节 基础下地基承载力的计算	526
一、基础下地基软弱下卧层承载力的计算	526
二、换土垫层的计算	528
三、桩基承载力的计算	530
第八章 地基的稳定性	536
第一节 倾斜荷载作用下地基的稳定性	536

一、抗滑稳定性	536
二、抗滑失稳的形态	537
第二节 平面滑动和表层滑动	538
一、平面滑动	538
二、表层滑动	542
第三节 局部深层滑动和深层滑动	543
一、局部深层滑动	543
二、深层滑动	561
第四节 深层滑动的圆弧滑动面法	562
第五节 岩石地基的抗滑稳定性计算	566
一、单斜滑动的抗滑稳定性计算	567
二、双斜滑动的抗滑稳定性计算	568
第六节 非均质地基上建筑物的稳定性计算	571
一、建筑物与地基接触面的应力计算	571
二、地基抗剪强度的计算	573
附录	575
附录 A 土的含水量和最大密度	575
表 A-1 各种土的最优含水量和最大密度	575
表 A-2 土的相对密度(比重)	575
表 A-3 土的自然干密度	576
表 A-4 土的干密度、含水量及自然密度的关系	577
附录 B 土的力学性质指标	578
表 B-1 土的平均物理力学指标	578
表 B-2 岩土の力学性质指标	579
表 B-3 土的液性指数和孔隙比	579
表 B-4 砂砾石的内摩擦角 φ 与相对密度的关系	579
表 B-5 砂砾石内摩擦角 φ 与标准贯入击数 N 和相对紧密度 D_r 的关系	580
附录 C 土的休止角	580
表 C 土的休止角	580
附录 D 土的渗透系数	580
表 D 土的渗透系数	580
附录 E 土的抗剪强度	581
表 E-1 黏性土饱和固结快剪的抗剪强度指标 φ 、 c 值的一般范围	581
表 E-2 不含砾的原状土饱和快剪的抗剪强度指标	581
表 E-3 含少量砾的原状土饱和快剪的抗剪强度指标	581
表 E-4 砾质原状土的饱和快剪的抗剪强度指标	581
表 E-5 原状土不同干密度的抗剪强度指标	581
表 E-6 击实土的抗剪强度指标	582
表 E-7 击实土不同干密度的抗剪强度指标	582

附录 F 压缩系数	582
表 F-1 原状土的压缩系数	582
表 F-2 击实土的压缩系数	583
附录 G 侧压力系数 ξ 、泊松比 μ 及 β	583
表 G 侧压力系数 ξ 、泊松比 μ 及 β	583
附录 H 土的压缩模量	583
表 H 土的压缩模量	583
附录 I 摩擦系数	584
表 I-1 岩土与基底的摩擦系数 f 和锚固体黏结强度	584
附录 J 土的允许渗透坡降	584
表 J-1 无黏性土的允许坡降	584
表 J-2 各种土的允许坡降值	584
附录 K 地基的容许承载力	585
表 K-1 岩石容许承载力 $[R]$	585
表 K-2 碎石土容许承载力 $[R]$	585
表 K-3 砂土容许承载力 $[R]$	586
表 K-4 老黏性土容许承载力 $[R]$	586
表 K-5 一般黏性土容许承载力 $[R]$	586
表 K-6 沿海地区淤泥和淤泥质土容许承载力 $[R]$	586
表 K-7 红黏土容许承载力 $[R]$	586
表 K-8 黏性素填土容许承载力 $[R]$	586
表 K-9 砂土容许承载力 $[R]$	587
表 K-10 老黏性土和一般黏性土容许承载力 $[R]$	587
表 K-11 一般黏性土容许承载力 $[R]$	587
表 K-12 黏性素填土容许承载力 $[R]$	587
表 K-13 基础宽度和埋深的承载力修正系数 m_B 、 m_D	587
表 K-14 承载力系数 N_B 、 N_D 、 N_C	588
附录 L 岩土边坡坡度	588
表 L-1 土的挖方边坡坡度	588
表 L-2 岩石挖方边坡坡度	589
表 L-3 土质边坡坡度允许值	589
表 L-4 路堤边坡坡度	589
表 L-5 填石边坡坡度	590
表 L-6 砌石边坡坡度	590
表 L-7 压实填土边坡的允许值	590
附录 M 桩的极限阻力	590
表 M-1 桩的极限侧阻力标准值 q_s	590
表 M-2 修正系数 α	591
表 M-3 桩的极限端阻力标准值 q_{pk}	592

第一章 概 述

第一节 土的物理性质及工程分类

一、土的组成

土是由固体颗粒、液体(水)和气体(空气)所组成,通常称为三相,即固相、液相和气相。随着土的颗粒大小、形状、矿物成分及其三相组成的比例不同,土的物理性质也将发生变化,它表现在土的干湿、松紧、软硬、轻重及强度等性质上。

(一)土的固体颗粒

土的固体颗粒一般主要是由矿物颗粒所构成,此外还含有一定的有机物质。土的固体颗粒的尺寸、形状、矿物成分及颗粒大小对土的物理力学性质有很大影响,所以工程中常将性质相近的土粒划分为一组,称为粒组,将土划分为若干粒组,因此也可以说土是由不同粒组构成的混合物。

表 1-1 是常用的粒组划分方法,根据粒径的大小将土粒划分为六组,即漂石(块石)颗粒、卵石(碎石)颗粒、圆砾(角砾)颗粒、砂粒、粉粒和黏粒。

表 1-1 土的粒组划分

		粒径范围/mm	一般特征
漂石或块石颗粒 卵石或碎石颗粒		>200 20~200	透水性很大,无黏性,无毛细水
圆砾或角砾颗粒	粗	20~10	透水性很大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径大小
	中	10~5	
	细	5~2	
砂粒	粗	2~0.5	易透水,当混入云母等杂质时透水性减小,而压缩性增加;无黏性,遇水不膨胀,干燥时松散,毛细水上升不大,随粒径变小而增大
	中	0.5~0.25	
	细	0.25~0.1	
	极细	0.1~0.075	
粉粒	粗	0.075~0.01	透水性小,湿时稍有黏性,遇水膨胀小,干时稍有收缩;毛细水上升高度较大、较快,极易出现冻胀现象
	细	0.01~0.005	
黏粒		<0.005	透水性很小;湿时有黏性、可塑性,遇水膨胀大,干时收缩显著;毛细水上升高度大,但速度较慢

注:1. 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆形状(圆形或近圆形);块石、碎石和角砾颗粒都带有棱角。

2. 黏粒又称黏土粒;粉粒又称粉土粒。

3. 黏粒的粒径上限也有采用 0.002mm 的。

1. 土的颗粒级配

土中各粒组质量的相对含量(即各粒组的质量占总土粒总重的百分数)称为土的颗粒级配。

土的颗粒级配可通过土的颗粒分析试验来确定,常用的分析试验方法有筛分法和比重计法两种。筛分法适用于粒径大于 0.1mm 的土,而比重计法则适用于粒径小于 0.1mm 的土。

筛分法是将土样预先风干、分散,将事先称好质量的土样放入一套孔径大小不同的筛子中,筛孔直径从上到下逐渐减小(如孔径为 20mm、2mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm 的筛子及底盘),经振动摇筛后,分别称出残留在各个筛中及底盘上的土粒质量,然后除以土样总重,即可求得各粒组的相对含量。比重计法是将少量土样(粒径小于 0.1mm)放入盛满水的比重瓶中,由于颗粒大小不同的土粒在水中下沉的速度不同,粒径大的土粒下沉速度快,粒径小的土粒下沉速度慢,因此,通过比重计测定不同时间土(粒)水混合液的密度,就可以算出某一粒径的土粒质量占总土重的百分数。

根据土的颗粒分析试验结果,在半对数纸上,以纵坐标表示小于某一粒径的土的质量百分数,横坐标表示粒径,就可绘制出土的颗粒级配曲线,如图 1-1 所示。

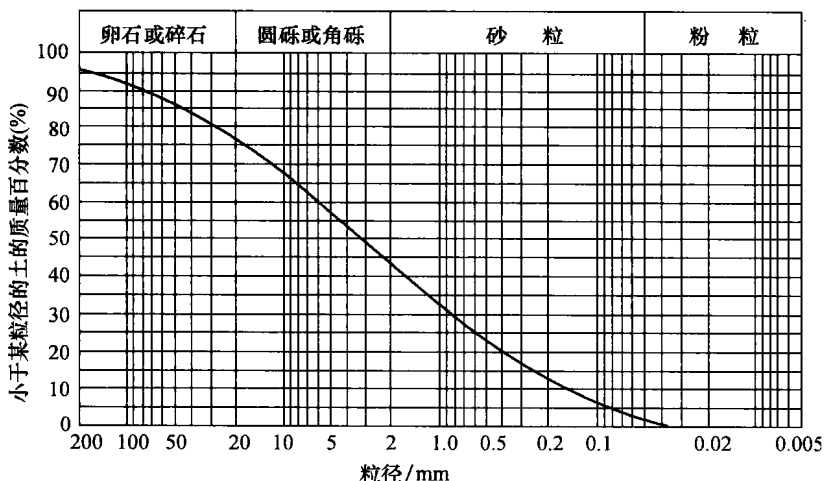


图 1-1 土的颗粒级配曲线

2. 土的颗粒分布

在图 1-2 中有三条土的颗粒级配曲线,曲线 A 的中部有一水平段,表示这种土缺乏该部分相应粒径的土粒,土的这种级配称为不连续级配;曲线 B 和曲线 C 的坡度都是逐渐变化的,不存在水平段,表示土的颗粒大小分布是连续的,这种土的级配称为连续级配,但曲线 B 的走势较陡,土粒大小分布范围较窄,表示土粒比较均匀,各级粒组的级配不良;曲线 C 的形状比较平缓,土粒大小分布范围较宽,表示土粒大小不均匀,所以各级粒组的级配良好。

在工程中,通常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来描述级配曲线的坡度和形状,以判别土粒的级配是否良好。

不均匀系数为

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

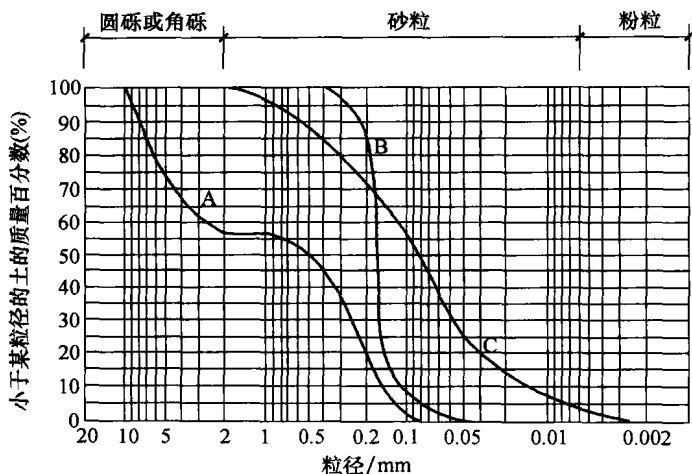


图 1-2 土的不同粒径级配曲线

式中 d_{60} ——在颗粒级配曲线上相应于土粒含量小于 60% 的粒径 (mm)，这一粒径通常称为控制粒径；

d_{10} ——在颗粒级配曲线上相应于土粒含量小于 10% 的粒径 (mm)，这一粒径通常称为有效粒径。

曲率系数为

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

式中 d_{30} ——在颗粒级配曲线上相应于土粒含量小于 30% 的粒径 (mm)。

不均匀系数 C_u 表示土粒大小的不均匀程度，不均匀系数愈小，颗粒级配曲线愈陡，表明土粒大小愈均匀，各级粒组的级配愈不良；反之，不均匀系数愈大，颗粒级配曲线就愈平缓，表明土粒大小愈不均匀，各级粒组的级配就愈良好。工程中通常将 $C_u \leq 5$ 的土称为均匀土， $C_u > 10$ 的土称为不均匀土。

曲率系数 C_c 反映颗粒级配曲线的形状，当 $C_c = 1 \sim 3$ 时表示土粒大小是连续的，其变化有一定规律性。

有的部门也提出，同时能满足 $C_u > 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 的土为级配良好的土，不能同时满足上述条件的土为级配不良的土。

(二) 土中的水

土中的水对土的性质，特别是对细颗粒土的性质有很大影响，如将影响土的黏性、塑性和膨胀性。土中的水通常可分为结晶水、结合水（也称吸着水）和自由水三类。

1. 结晶水

结晶水存在于矿物结晶体中，只有在高温的情况下才能将其从矿物中析出，因此可将其视为矿物的一部分。

2. 结合水

结合水是指吸附在土粒表面的水，是由于土粒表面带电分子吸引所吸附的水，这种水愈靠近

土粒表面其吸附愈牢固,随着离土粒表面的距离增大,吸附力就逐渐减弱,其活动性也就增强。

3. 自由水

自由水是在土粒电场影响范围之外的水,又可分为重力水和毛细水两种。

重力水是指在重力作用下能沿着土的孔隙自由流动的水,这种水能传递静水压力和溶解土中的盐类,同时在流动中能带走土中的细小颗粒,产生渗流破坏和降低土的强度,对工程的影响较大。

毛细水存在于土的孔隙中,是指受到水和空气分界面处液面表面张力作用沿着土的孔隙形成的细小通道自地下水面逐渐上升而形成毛细水。毛细水既受重力作用,又受表面张力作用,其上升的高度和速度决定于土的孔隙大小及形状。毛细水上升到地表面时,会引起土地的盐碱化和沼泽化,在冬季会增大土的冻胀性。

(三)土中气体

土中气体一般可分为两种,一种是与大气相通的气体,另一种是不与大气相通的封闭气体。前者的成分主要是空气,它在荷载作用下会被挤出土中,对土的力学性质影响不大;后者的成分可能是空气、水汽或天然气,呈封闭气体状态,在压力较大时会被压缩或溶解于水,压力减小时又可恢复原状,由于这种气体的存在,可使土的渗透性减小,弹性增大,并延缓了土的压缩变形和膨胀变形。

二、土的物理性质指标

土是由固相、液相和气相三相组成的,这三相比例关系的变化将直接影响到土的物理力学性质。

土的物理力学性质指标有两类,一类是实测指标,也称为基本指标,是指要通过取土样做试验来测定的指标;另一类是换算指标,是指可通过实测指标进行换算得出的指标。

(一)实测指标

实测指标或基本指标有三项,即土的质量密度和重度(重力密度)、土的相对密度及土的含水量。

1. 土的质量密度和重度

(1)土的质量密度。土在天然状态下单位体积的质量称为土的质量密度,又称为土的天然密度或湿密度,即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3)$$

式中 ρ ——土的质量密度(g/cm^3);

m ——土的质量(g);

V ——土的体积(cm^3)。

在天然状态下土的密度的变化范围较大,一般在 $1.6 \sim 2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间。

(2)土的重力密度。单位体积土体的重力称为土的重力密度(简称重度),即

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

式中 γ ——土的重力密度(N/cm^3);

ρ ——土的质量密度;

g ——土的重力加速度,约等于 9.807m/s^2 ,在工程中常近似地取 $g=10\text{m/s}^2$ 。

2. 土粒的相对密度

土粒比重是指土颗粒在 $105\sim 110^\circ\text{C}$ 温度下烘至恒重时的质量与同体积 4°C 时纯水的质量之比,简称为比重,即

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{m_s/V_s}{\rho_w} = \frac{m_s}{V_s \rho_w} \quad (1-5)$$

式中 G_s ——土粒比重;

ρ_s ——土颗粒的密度, $\rho_s = \frac{m_s}{V_s} (\text{g/cm}^3)$;

ρ_w —— 4°C 时纯水的密度,一般取 $\rho_w = 1\text{g/cm}^3$;

m_s ——土颗粒的质量(g/cm^3);

V_s ——土颗粒的体积(cm^3)。

土粒比重与土粒的矿物成分有关,砂土的土粒比重约为 $G_s = 2.65$,黏性土的土粒比重约为 $G_s = 2.67\sim 2.74$ 。

3. 土的含水量

在天然状态下,土中水的质量与土颗粒质量之比值的百分数称为土的含水量,即

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 w ——土的含水量(%);

m_w ——水的质量(g/cm^3);

m_s ——土颗粒的质量(g/cm^3)。

土的天然含水量变化较大,一般情况下,砂土的天然含水量 $w=0\sim 40\%$,黏性土的天然含水量 $w=15\%\sim 60\%$ 。

(二)换算指标

土的换算指标主要有土的孔隙比和孔隙率,土的饱和度。

1. 土的孔隙比和孔隙率

(1)土的孔隙比。土的孔隙比是指土中孔隙的体积与土颗粒体积之比,一般用小数表示,即

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

式中 e ——土的孔隙比;

V_v ——土中孔隙体积(cm^3);

V_s ——土中土颗粒的体积(cm^3)。

对于黏性土,孔隙比约为 $0.4\sim 1.2$;对于砂土,孔隙比约为 $0.3\sim 0.9$ 。

(2)土的孔隙率。土的孔隙率是指土中孔隙的体积与土的总体积之比值的百分数,即

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

式中 n ——土的孔隙率(%);

V ——土的体积(cm^3);

V_v ——土中孔隙的体积(cm^3);

由于 $V = V_s + V_v$, 故代入式(1-8)后得

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{V_v}{V_s \left(1 + \frac{V_v}{V_s}\right)} = \frac{e}{1 + e} \quad (1-9)$$

由于 $V_s = V - V_v$, 代入式(1-7)后得

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{V_v}{V \left(1 - \frac{V_v}{V}\right)} = \frac{n}{1 - n} \quad (1-10)$$

2. 土的饱和度

土的饱和度是指土中水的体积与孔隙体积之比值, 即

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

式中 S_r ——土的饱和度;

V_w ——土中水的体积(cm^3);

V_v ——土中孔隙的体积(cm^3);

土的饱和度反映土中孔隙被水充满的程度, 也就是反映土的潮湿程度, 当 $S_r < 50\%$ 时为稍湿; 当 $50\% < S_r \leq 80\%$ 时为很湿; 当 $S_r > 80\%$ 时为饱和, 当 $S_r = 100\%$ 时为完全饱和。

3. 土的饱和密度和饱和重度

(1) 干密度和干重度。干密度是指土中不存在水时的密度, 也就是单位体积土体中土颗粒的质量, 即

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1-12)$$

式中 ρ_d ——土的干密度(g/cm^3);

m_s ——土颗粒的质量(g);

V ——土的体积(cm^3)。

干重度是指土中不存在水时的重度, 也就是单位体积土体中土颗粒所受的重力, 即

$$\gamma_d = \rho_d \cdot g \quad (1-13)$$

式中 γ_d ——土的干重度(N/cm^3);

g ——重力加速度(cm/s^2)。

(2) 浮密度和浮重度。浮密度是指被水淹没时土的密度, 也就是单位体积土体中土颗粒所受的重力减去土颗粒所受的浮力, 即

$$\rho' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} \quad (1-14)$$

式中 ρ' ——浮密度(g/cm^3);

m_s ——土颗粒的质量(g);

V_s ——土颗粒的体积(cm^3);

ρ_w ——水的密度(g/cm^3);

V ——土的体积(cm^3)。

浮重度是指被水淹没时土的重度,也就是单位体积土体中土颗粒所受的重力减去土颗粒所受的浮力,即

$$\gamma' = \frac{m_s g - V_s \rho_w \cdot g}{V} \quad (1-15)$$

式中 g ——重力加速度(m/s^2);

其他符号意义同前。

(3)饱和密度和饱和重度。饱和密度是指土的孔隙全部充满水时单位体积土的质量,即

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (1-16)$$

式中 ρ_{sat} ——饱和密度(g/cm^3);

V_v ——土的孔隙体积(cm^3);

V ——土的全部体积(cm^3);

其他符号意义同前。

饱和重度是指土的孔隙全部充满水时单位体积土的重力,即

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{m_s g + V_v \rho_w g}{V} = \gamma' + \rho_w g = \gamma' + \gamma_w \quad (1-17)$$

式中 γ_w ——水的重度(N/cm^3);

其他符号意义同前。

(4)湿密度和湿重度。湿密度是指土的孔隙中存在水但未被水充满时,单位体积土的质量,也称天然密度,用式(1-3)表示。

湿重度是指土的孔隙中存在水但未被水充满时,单位体积土的重力,也称天然重度,用式(1-4)表示。

(三)土的物理性质指标的换算

在工程设计中常用的物理性质指标换算公式见表 1-2。

表 1-2 常用的物理性质指标换算公式

物理性质指标	符号	表达式	用实测指标换算的公式	用其他指标换算的公式
孔隙比	e	$e = \frac{V_v}{V_s}$	$e = \frac{d_s \gamma_w (1+w)}{\gamma} - 1$	$e = \frac{d_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1, e = \frac{d_s w}{S_r}, e = \frac{n}{1-n}$
孔隙率	n	$n = \frac{V_v}{V}$	$n = 1 - \frac{\gamma}{d_s \gamma_w (1+w)}$	$n = \frac{d_s \gamma_w - \gamma_d}{d_s \gamma_w}$
干重度	γ_d	$\gamma_d = \rho_d g$	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$	$\gamma_d = \frac{d_s \gamma_w}{1+e}, \gamma_d = \frac{n S_r}{w} \gamma_w$
浮重度	γ'	$\gamma' = \frac{m_s - V_s \rho_w g}{V}$	$\gamma' = \frac{(d_s - 1) \gamma}{d_s (1+w)}$	$\gamma' = \frac{(d_s - 1) \gamma_w}{1+e}, \gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w,$ $\gamma' = (d_s - 1)(1-n) \gamma_w$
饱和重度	γ_{sat}	$\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} g$	$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(d_s - 1) \gamma}{d_s (1+w)} + \gamma_w$	$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(d_s + e) \gamma_w}{1+e}, \gamma_{\text{sat}} = \gamma' + \gamma_w$ $\gamma_{\text{sat}} = d_s \gamma_w (1-n) + n \gamma_w$
饱和度	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_v}$	$S_r = \frac{d_s w \gamma}{d_s \gamma_w (1+w) - \gamma}$	$S_r = \frac{d_s w}{e}, S_r = \frac{d_s \cdot w \cdot \gamma_d}{d_s \gamma_w - \gamma_d},$ $S_r = \frac{\gamma(1+e) - d_s \gamma_w}{e \gamma_w}$