

高等职业技术教育“十四五”精品教材建设项目

土力学与地基（含试验指导）

（智媒体版）

主 编 邢焕兰 吕玉梅

副主编 付迎春 习淑娟 邢 栋

主 审 李立增

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

本教材是在高等职业技术教育“十三五”规划教材《土力学与地基》的基础上修订的。根据2019年2月《国家职业教育改革实施方案》提出的“三教改革”之一的教材改革，本教材修订为含试验指导的智媒体版。

在理论深度上，修订教材充分考虑了高职教育的特点，以适度、够用为原则。与原教材相比，修订教材主要有以下方面的改进：

1. 按照新规范的标准进行修订。依据《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)为依据，对有变化的内容进行了修改。

2. 教材内容主要考虑满足学生毕业后从事的工作岗位进行设计，满足学生从事施工单位技术员、试验员，运营单位养护维修员的需求。教材的主要内容分为两部分：第一部分为土力学，主要讲述了土的物理性质、力学性质，土中应力，地基承载力与沉降计算及土压力计算等；第二部分主要讲述了常用的地基处理方法。另外，本书附有土工试验指导书，可用于土工试验指导及完成试验报告。

3. 针对本课程的特点，为使学生更加直观地理解教学内容，同时方便教师的讲解，本教材开发了配套的APP客户端，各章节配有教学动画、教学案例，方便学生自学和练习。

本书突出了职业教育在实际工程中的实用性，根据最新的设计规范、施工规范及土工试验规程进行编写，紧跟工程设计、施工的新技术、新工艺、新理念，缩短了学校与单位的距离。本书在编写过程中，兼顾了交通行业和铁道行业双重规范，因此适用于铁道工程类、地下工程类专业和道路桥梁类专业。

本书由石家庄铁路职业技术学院邢焕兰、吕玉梅主编，河北省化工医药职业技术学院李立增主审。具体分工如下：绪论、第一章、第六章、第七章由邢焕兰编写，第三章、第五章由吕玉梅编写，第二章由石家庄铁路职业技术学院付迎春编写，第四章由石家庄铁路职业技术学院习淑娟编写，第八章和试验指导书由石家庄市公路桥梁建设集团有限公司邢栋编写。全书由邢焕兰统稿。

限于水平，有些章节内容还不够充实，有些问题的论述也只是探讨性的，不妥之处在所难免。在使用本书过程中，如发现有不妥之处，请提出宝贵意见。

作者

2022 年 1 月

本书是根据教育部对高职高专土建类专业的人才培养目标、培养规格以及与之相应的知识、技能、能力和素质结构，并结合我国铁路与公路建设对工程建设人才的要求而编写的。

本书突出了职业教育在实际工程中的实用性，根据最新的设计规范、施工规范及土工试验规程进行编写，紧跟工程设计和施工的新技术、新工艺、新理念，缩短了学校与单位的距离。本书在编写过程中，兼顾了交通运输行业和铁道行业双重规范，适用于道路桥梁类专业、铁道工程类和地下工程类专业。

本书第一章至第七章为土力学部分，主要讲述了土的物理性质、力学性质，土中应力、地基承载力及土压力等；第八章主要讲述了地基处理。

另外，本书附有土力学试验指导书，可用于土工试验指导及完成试验报告。

本书由石家庄铁路职业技术学院邢焕兰、吕玉梅任主编，付迎春、习淑娟任副主编，李立增主审。具体分工如下：第一章、第二章、第六章、试验指导书由邢焕兰编写，第三章、第五章、第七章由石家庄铁路职业技术学院吕玉梅编写，第八章由石家庄铁路职业技术学院付迎春编写，第四章由石家庄铁路职业技术学院习淑娟编写。全书由邢焕兰统稿。

限于水平，有些章节内容还不够充实，有些问题的论述也只是探讨性的。在使用本书过程中，如发现不足之处，请提出宝贵意见。

编者

2015年11月

绪 论	001
-----------	-----

第一章 土的物理性质与工程分类

第一节 土的生成与沉积形式	004
第二节 土的组成、结构与构造	006
第三节 土的物理性质指标	016
第四节 土的物理状态	025
第五节 土的工程分类	034
第六节 土的击实性	043
本章小结	052
复习思考题	052
习 题	052

第二章 土的渗透性

第一节 达西定律及其适用范围	054
第二节 渗透系数与渗透力	058
第三节 土的渗透变形	066
本章小结	072
复习思考题	072
习 题	073

第三章 土中应力计算

第一节 土中应力简介	074
第二节 土中自重应力的分布及计算	075

第三节 基底压力的分布与计算	079
第四节 附加应力的计算	084
本章小结	102
复习思考题	102
习 题	102

第四章 土的压缩性与地基沉降计算

第一节 地基沉降概述	104
第二节 土的压缩性	105
第三节 地基沉降量计算	118
第四节 地基沉降随时间变化的计算	127
第五节 地基容许沉降量与减小沉降的措施	133
本章小结	134
复习思考题	135
习 题	135

第五章 土的抗剪强度

第一节 土的抗剪强度概述	137
第二节 土的强度理论与强度指标	139
第三节 抗剪强度指标的测定方法	144
本章小结	152
复习思考题	153
习 题	153

第六章 土应力

第一节 土压力概述	155
第二节 静止土压力	158
第三节 朗肯土压力理论	159
第四节 库仑土压力理论	164
第五节 常见情况下土压力的计算	169
本章小结	178
复习思考题	178
习 题	179

第七章 天然地基承载力与地基强度检算

第一节	地基承载力简介	180
第二节	现场载荷试验确定地基容许承载力	181
第三节	理论公式确定地基容许承载力	184
第四节	规范法确定地基容许承载力	189
第五节	地基强度检算	201
第六节	几种确定地基容许承载力的方法比较	208
本章小结	.....	211
复习思考题	.....	212
习 题	.....	212

第八章 地基处理

第一节	地基处理概述	213
第二节	换填垫层法	214
第三节	预压法	219
第四节	压实地基和夯实地基	226
第五节	复合地基	234
第六节	注浆加固	252
本章小结	.....	256
复习思考题	.....	256
参考文献	.....	258

绪 论

一、土力学与地基的研究对象

所有建筑物都是修筑在地壳上的，建筑物的全部重量及其所承受的全部荷载都将传递到地壳上。与建筑物相接触，承受建筑物荷载后产生的应力与变形不可忽略的地壳土层称为地基；承受建筑物上部结构产生的荷载并将荷载传到地基中去的建筑物的下部结构称为基础。在地壳表面上存在的岩石风化后所形成的松散颗粒物就是本课程所研究的土。

要保证建筑物安全正常地使用，建筑物、地基和基础必须相适应；其中地基在整个建筑中起着关键的作用，它的变形或破坏，直接影响到整个结构的安全和使用。无论历史上还是现代都有由于地基问题而出现的工程事故。历史上，如意大利的比萨斜塔、加拿大的特朗斯康大谷仓、我国的苏州虎丘塔等都是由于对地基问题重视不够而影响了正常使用。现代的工程事故实例也不在少数，如香港的宝城大厦的倒塌、上海的莲花河畔景苑小区在建住宅的倒塌、四川成都校园春天小区住宅楼的倾斜等。

地壳表面承受建筑物荷载的一定厚度的土层就是地基，地基在受力后所引起的一切变化，都取决于土的性质。为了进行地基设计计算，必须先把土的基本特性搞清楚，然后才能研究地基土的计算方法，看它在外力作用下是否会产生破坏，或产生多大沉降变形。只有掌握了这些土力学基本知识，才能比较科学地解决基础工程中所遇到的实际问题。

二、土力学与地基课程的主要内容

本课程主要讲解土的各种基本性质，根据地基土的性质与建筑物荷载选择地基类型并进行检算，常用的铁路、道路桥梁基础施工及地基处理等。它包含的主要内容有：

- (1) 土的物理和力学性质——与地基设计有关的土的物理、力学性质。
- (2) 地基变形——研究地基在受到荷载作用后的变形规律，用以预测建筑物在修建和使用阶段，其基础的沉降、沉降差和倾斜等情况，保证建筑物不损坏或不影响正常使用。
- (3) 地基的稳定（强度）——研究地基在外力作用下，是否可能发生破坏或丧失稳

定，是否满足一定的安全系数要求。

(4) 其他力学问题，如土中水的渗流而产生的力学作用，挡土结构的土压力计算以及地基处理等。

土力学就是研究土的工程性质以及土在荷载作用下的应力、变形、强度和稳定性的学科；而地基则是研究建筑物作用下地基的受力、变形情况，以及天然地基不满足建筑物要求时的处理方法。

三、本课程的学习要求

根据教学计划和教学大纲的要求，本课程将学习有关路基和桥涵建筑所必需的土力学与地基的基本知识。

本课程牵涉到的自然科学范围很广，学习中要注意联系工程力学、工程地质、路基工程、桥梁工程的一些概念和知识，还要注意从土的特性出发去理解。学习过程中理论联系实际，抓住重点，掌握原理，搞清概念。

本书在论述有关土工试验时，以《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)、《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)为标准；论述桥涵地基基础的内容和要求时，以《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)为依据；论述地基处理时，以《建筑地基处理技术规范》(JTJ 79—2012)为依据。

四、土力学理论的形成和发展

土力学理论有一个形成发展过程。以前，在工程建设中遇到土力学问题，只能凭经验解决。1773—1776年，库仑(Coulomb)提出了土的抗剪强度理论和滑动土楔的土压力理论，土力学进入古典理论时期；朗肯(Rankine, 1857年)从塑性体应力场出发，建立了新的土压力理论，对土力学的发展产生了深远的影响；1885年，布西内斯克(Boussinesq)提出在集中荷载作用下弹性半无限体的应力和位移的计算理论，为以后计算地基承载力和地基变形建立了理论根据；1856年，达西(Darcy)通过试验建立了达西渗透公式，这为研究土中渗流和固结理论打下了理论基础；1922年，费伦纽斯(Fellenius)在处理滑坡问题时，提出了土坡稳定分析的方法。以上这些古典理论到现在还有着实用价值。

1925年，太沙基(Terzaghi)的《土力学》问世，土力学又发展到一个新时期。他所提出的有效压力理论、一维固结理论、地基承载力理论以及一系列研究成果，使土力学形成了一门专门的学科，因而太沙基被公认为现代土力学的奠基人。1936年，国际土力学基础工程学会成立。初期，由太沙基亲自领导，推动了这门学科在世界范围内的发展。

现在，随着施工技术的发展与计算机的应用，土力学的研究又进入了一个全新的时代。这表现为：在设计理论方面，充分考虑了地基土的不均匀性，采用概率统计方

法对地基进行可靠度分析，并按各专业的要求，对旧的地基基础规范进行修正；在土的本构模型研究方面，模拟地基基础实际受力情况并进行分析，为地基基础的设计提供了依据；根据现代建筑对地基的要求，改进试验设备，其中值得注意的是土工离心机的发展，土工离心机不仅可用来研究高坝、深基在土中力作用下的应力状态，还可模拟地震力作用下土的相互作用和动力性质；采用新材料、新工艺加固软弱地基，形成复合地基和复合土体，满足了现代道路桥梁对地基强度与稳定性的要求。

第一章

土的物理性质与工程分类



本章知识要点

- (1) 土的生成及沉积形式。
- (2) 土的三相组成及各相对土工程性质的影响。
- (3) 土的三相图、3个基本试验指标的概念及测定方法、6个导出指标的概念及指标换算。
- (4) 粗粒土密实度的判定，细粒土软硬程度的判定。
- (5) 根据规范进行土的工程分类。
- (6) 土的击实性原理、击实试验及影响击实效果的因素。

第一节 土的生成与沉积形式

一、土的生成

土是岩石风化后的产物，即覆盖在地表上松散的、没有胶结或胶结很弱的颗粒堆积物。

地壳表层的岩石暴露在大气中，受到温度和湿度变化的影响，体积经常发生膨胀和收缩，不均匀的膨胀和收缩使岩石产生裂缝；岩石还长期经受风、霜、雨、雪的侵蚀和动植物活动的破坏，逐渐由大块崩解为形状和大小不同的碎块：这个产生裂缝和逐渐崩解的过程，叫作物理风化。物理风化只改变颗粒的大小和形状，不改变颗粒的成分。物理风化后所形成的碎块与水、氧气、二氧化碳和某些由生物分泌出的有机酸溶液等接触，发生化学变化，产生更细的并与原来的岩石成分不同的颗粒，这个过程叫作化学风化。另外，由动植物活动引起的风化称为生物风化。经过风化作用所形成的矿物颗粒（有时还有有机物质）堆积在一起，中间贯串着孔隙，孔隙中还有水和空气，这种松散的固体颗粒、水和气体的集合体就叫作土。

二、土的沉积形式

物理风化不改变土的矿物成分，产生像碎石和砂等颗粒较粗的土，这类土的颗粒之间没有黏结作用，呈松散状态，称为无黏性土。化学风化产生颗粒很细的土，这类土的颗粒之间因为有黏结力而相互黏结，干时结成硬块，湿时变软有黏性，称为黏性土。土由于成因不同，物理性质和工程特性也不一样。风化作用生成的土，经过剥蚀、搬运、沉积等作用形成不同的沉积类型，见表 1-1。

表 1-1 第四纪沉积土主要成因、类型及堆积特征

成因类型	堆积方式及条件	堆积物特征
残 积	岩石经风化作用而残留在原地的碎屑堆积物	碎屑物自表部向深处由细变粗，其成分与母岩有关，一般不具层理，碎块多呈棱角状，土质不均，具有较大孔隙；厚度变化较大，在山丘顶部较薄、低洼处较厚
坡积或崩积	风化碎屑物由雨水或融雪水沿斜坡搬运，或由本身的重力作用堆积在斜坡上或坡脚处而成	碎屑岩性成分复杂，与高处的岩性组成有直接关系，从坡上往下逐渐变细，分选性差，层理不明显；厚度变化较大，在斜坡陡处较薄、坡脚地段较厚
洪 积	由暂时性洪流将山区或高地的大量风化碎屑物携带至沟口或平缓地带堆积而成	颗粒具有一定的分选性，但往往大小混杂，碎屑多呈亚棱角状，洪积扇顶部颗粒较粗，层理紊乱交错，透镜体及夹层较多，边缘处颗粒细、层理清楚，厚度一般高山区或高地处较大、远处较小
冲 积	由长期的地表水流搬运，在河流阶地、冲积平原和三角洲地带堆积而成	颗粒在河流上游较粗，分选性及磨圆度均好，层理清楚；除牛轭湖及某些河床相沉积外，厚度较稳定
冰 积	由冰川融化携带的碎屑物堆积或沉积而成	粒度相差较大，无分选性，一般不具层理；因冰川形态和规模的差异，厚度变化大
淤 积	在静水或缓慢的流水环境中沉积，并伴有生物、化学作用而成	颗粒以粉粒、黏粒为主，且含有一定数量的有机质或盐类，一般土质松软，有时为淤泥质黏性土、粉土与粉砂互层，具有清晰的薄层理
风 积	在干旱气候条件下，碎屑物被风吹，降落堆积而成	颗粒主要由粉粒或砂粒组成，土质均匀，质纯，孔隙大，结构松散

实践经验表明，土的工程特性一方面取决于其原始堆积条件，另一方面也取决于堆积以后的经历。在沉积过程中，由于颗粒大小、沉积环境和沉积后所受的力等不同，所形成土的类型和性质也就不同。一般地说，在大致相同的地质年代及相似的沉积条件下形成的土，其成分和性质是相近的。沉积年代愈长，上覆土层重量愈大，土压得愈密实，由孔隙水中析出的化学胶结物也愈多。

第二节 土的组成、结构与构造

一、土的组成

土是由固体颗粒、水和气体组成的三相体系。固体部分，一般由矿物质所组成，有时含有有机质（半腐烂和全腐烂的植物和动物残骸等），这一部分构成土的骨架，称为土骨架。土骨架间布满相互贯通的孔隙。当孔隙完全被水充满时，土处于饱和状态，称为饱和土；当孔隙一部分被水占据，另一部分被气体占据时，称为非饱和土；当孔隙完全被气体充满时，则称为干土。水和溶解于水的物质构成土的液体部分。空气及其他一些气体构成土的气体部分。这三部分本身的性质以及它们之间的比例关系和相互作用决定了土的物理力学性质。因此，研究土的性质，首先必须研究土的三相组成。

（一）固体颗粒

固体颗粒构成土骨架，它对土的物理力学性质起决定性的作用。研究固体颗粒就要分析粒径的大小及其在土中所占的百分数，即研究土的颗粒级配；另外，还要研究固体颗粒的矿物成分以及颗粒的形状。这三者之间又是密切相关的。

1. 颗粒的矿物成分和颗粒分组

土的颗粒一般由各种矿物组成，也含有少量有机质。土粒的矿物成分可分为两类：

（1）原生矿物，即物理风化所产生的粗颗粒矿物。它们与原来岩石的矿物成分相同，常见的有长石、石英、角闪石和云母等。

（2）次生矿物，即化学风化后产生的矿物，如颗粒极细的黏土矿物，常见的有高岭土、伊利土和蒙脱土等。

矿物成分对黏性土性质的影响很大，例如，黏性土中含有大量蒙脱土时，这种土就具有强烈的膨胀性，它的收缩性和压缩性也大。

颗粒的粗细对土的性质影响也很大。颗粒愈细，单位体积内颗粒的表面积就愈大，与水接触的面积就愈多，颗粒相互作用的能力就愈强。

颗粒具有不同的形状，如块状、片状等，这和土的矿物成分有关，也和土粒所经历的风化搬运过程有关。

颗粒粒径的大小称为粒度，工程上把粒度相近的颗粒合为一组，称为粒组。粒组的划分应能反映粒径大小变化引起土的物理性质变化这一客观规律。一般地说，同一粒组的土，其物理性质大致相同；不同粒组的土，其物理性质有较大差别。

《铁路桥涵地基和基础设计规范》（TB 10093—2017）对粒组的划分见表 1-2。

《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363—2019）对粒组的划分见表 1-3。

表 1-2 《铁路桥涵地基和基础设计规范》中土的颗粒分组

颗粒名称		粒径 d/mm	主要特征
漂石（浑圆、圆棱） 或块石（尖棱）	大	$d > 800$	无黏性，透水性很大，毛细水上升高度很小
	中	$400 < d \leq 800$	
	小	$200 < d \leq 400$	
卵石（浑圆、圆棱） 或碎石（尖棱）	大	$100 < d \leq 200$	
	小	$60 < d \leq 100$	
粗圆砾（浑圆、圆棱） 或粗角砾（尖棱）	大	$40 < d \leq 60$	
	小	$20 < d \leq 40$	
细圆砾（浑圆、圆棱） 或细角砾	大	$10 < d \leq 20$	
	中	$5 < d \leq 10$	
	小	$2 < d \leq 5$	
砂 粒	粗	$0.5 < d \leq 2$	无黏性，易透水，有一定毛细水上升高度
	中	$0.25 < d \leq 0.5$	
	细	$0.075 < d \leq 0.25$	
粉 粒		$0.005 \leq d \leq 0.075$	湿时有黏性，透水性小，毛细水上升高度较大
黏 粒		$d < 0.005$	有黏性和可塑性，透水性极微，其性质随含水率有较大变化

表 1-3 《公路桥涵地基与基础设计规范》中土的颗粒分组

粒组名称		粒径/mm	一般特性	
巨粒组	漂石、块石	大于 200	无黏性，孔隙比大，透水性大，毛细水上升高度极微，不能保持水分，能承受很大静水压力，压缩性小	
	卵石、小块石	60~200		
粗粒组	砾、角砾	粗	20~60	无黏性，易透水，毛细水上升高度不大，遇水不膨胀，干燥时不收缩且松散，不呈现可塑性，能保持水分，能承受较大静水压力，压缩性较小
		中	5~20	
		细	2~5	
	砂	粗	0.5~2	
		中	0.25~0.5	
		细	0.075~0.25	
细粒组	粉 粒	0.002~0.075	湿润时出现轻微黏性，透水性小，遇水膨胀或干缩都不显著，毛细水上升较快、上升高度较大	
	黏 粒	小于 0.002	黏性大，几乎不透水，湿润时呈现可塑性，遇水膨胀或干缩都较显著，压缩性大	

2. 颗粒级配分析方法

天然土是粒径大小不同土粒的混合物，它包含着若干粒组的土粒。土中各粒组的干土质量占该土总质量的百分数叫作土的颗粒级配。颗粒大小分析的目的，就是确定土的颗粒级配，也就是确定土中各粒组颗粒的相对含量。颗粒级配是影响土（特别是无黏性土）工程性质的主要因素，因此常被用来作为土的分类和定名的标准。根据《铁路工程土工试验规程》（TB 10102—2010）的规定，颗粒大小分析可采用筛析法、密度计法和移液管法。筛析法适用于粒径小于或等于 200 mm、大于 0.075 mm 的土。密度计法和移液管法适用于粒径小于 0.075 mm 的土。土中含有粒径大于和小于 0.075 mm 的颗粒各超过总质量的 10% 时，应联合使用筛析法及密度计或移液管法。考虑到本课程的主要教学目的，本书只介绍筛析法。

用筛析法作土的颗粒大小分析，其主要设备是一套标准筛。这套标准筛中的各筛按筛孔孔径大小的不同由上至下排列（最上层筛子的筛孔最大，往下的筛子其筛孔依次减小），上加顶盖，下加底盘，叠在一起。标准筛有粗筛和细筛两种。粗筛的孔径（圆孔）为 200 mm、150 mm、100 mm、75 mm、60 mm、40 mm、20 mm、10 mm、5 mm、2 mm，细筛的孔径为 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm 和 0.075 mm。

根据土样最大粒径的大小确定试样的用量，如表 1-4。

表 1-4 土的颗粒分析试样用量

最大颗粒粒径/mm	试样用量/g
< 2	100 ~ 300
< 10	300 ~ 1000
< 20	1000 ~ 2000
< 40	2000 ~ 4000
< 60	≥ 5000
< 75	≥ 6000
< 100	≥ 8000
< 150	≥ 10 000
< 200	≥ 10 000

试验时，对于无黏性的土，将烘干或风干的土样放入筛孔孔径为 2 mm 的筛进行筛析，分别称出筛上和筛下土的质量。取筛上的土样倒入依次叠好的粗筛最上层，进行筛析；将筛下粒径小于 2 mm 的土样倒入依次叠好的细筛最上层筛中进行筛析（细筛可放在筛析机上摇筛，摇筛时间一般为 10 ~ 15 min），使细土分别通过各级筛孔漏下。称出存留在每层筛子和底盘内的土粒质量，就可以计算出粒径小于（或大于）某一数值的土粒质量占土样总质量的百分数。表 1-5 是《铁路工程土工试验规程》筛析试验成果记录。表 1-6 是《公路工程土工试验规程》（JTG 3430—2020）筛析试验成果记录。

表 1-5 粗筛与细筛联合分析计算实例

粗筛分析用的风干试样质量=5000 g, 小于 0.075 mm 的试样质量占总质量的百分数=6.7%						
细筛分析用小于 2 mm 试样质量=300 g, 小于 2 mm 的试样质量占总试样质量的百分数=80%						
筛类别	孔径 /mm	分计留筛试样质量 /g	累计留筛试样质量 /g	小于该孔径试样的质量 /g	小于该孔径试样质量百分数 /%	小于该孔径试样质量占总试样质量百分数 /%
粗筛	60	0	0	5000	100	100
	40	475	475	4525	90.5	90.5
	20	25	500	4500	90.0	90.0
	10	50	550	4450	89.0	89.0
	5	150	700	4300	86.0	86.0
	2	300	1000	4000	80.0	80.0
细筛	2	0	0	300	100	100 × 0.8 = 80.0
	1	52.5	52.5	247.5	82.5	82.5 × 0.8 = 66.0
	0.5	101.1	153.6	146.4	48.8	48.8 × 0.8 = 39.0
	0.25	78.9	232.5	67.5	22.5	22.5 × 0.8 = 18.0
	0.075	42.3	274.8	25.2	8.4	8.4 × 0.8 = 6.7
筛底存留/g		23.2	298	2.0	0.7	0.7 × 0.8 = 0.6

表 1-6 颗粒大小分析试验记录 (筛析法)

工程名称 _____ 试验者 _____
 土样编号 _____ 计算者 _____
 土样说明 _____ 试验日期 _____ 校核者 _____

筛前总土质量=3000 g				小于 2 mm 取样试样质量=810 g				
小于 2 mm 土质量=810 g				小于 2 mm 土占总土质量的百分数=27%				
粗筛分析				细筛分析				
孔径 /mm	累计留筛土质量/g	小于该孔径土质量/g	小于该孔径土质量百分数/%	孔径 /mm	累计留筛土质量/g	小于该孔径土质量/g	小于该孔径土质量百分数/%	占总土质量百分数/%
40	0	3000	100	2.0	2190	810	100	27.0
20	350	2650	88.3	1.0	2410	590	72.8	19.7
10	920	2080	69.3	0.5	2740	260	32.1	8.7
5	1600	1400	46.7	0.25	2920	80	9.9	2.7
2	2190	810	27.0	0.075	2980	20	2.5	0.7

对土的颗粒大小分析试验成果, 可用下列两种方式表达:

(1) 表格法。

表格法即列表说明土样中各粒组干土质量占土样总质量的百分数。表 1-7 就是根据

表 1-5 列出的该土样的颗粒级配表。

表 1-7 颗粒级配

粒径/mm	>20	10~20	5~10	2~5	1~2	0.5~1.0	0.25~0.5	0.075~0.25	<0.075
百分数/%	10.0	1.0	3.0	6.0	14.0	27.0	21.0	11.3	6.7

(2) 颗粒级配曲线法。

该法即在半对数坐标系(纵坐标用普通比例尺表示小于某粒径的土的质量百分数,横坐标用对数比例尺表示粒径),绘制颗粒大小级配曲线。图 1-1 就是根据表 1-5 绘制的级配曲线。

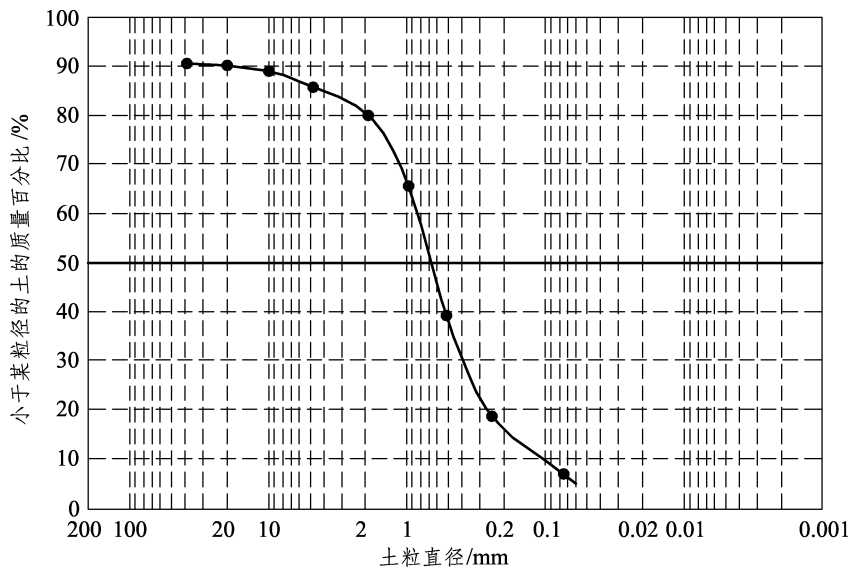


图 1-1 根据表 1-5 绘制的级配曲线

在颗粒级配曲线上,可以找到对应于颗粒含量小于 10%、30%和 60%的粒径 d_{10} 、 d_{30} 和 d_{60} , 这 3 个粒径组成级配指标:

$$\text{不均匀系数 } C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

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

式中 d_{60} ——限制粒径,表示分布曲线上小于该粒径的颗粒质量占总质量 60%的粒径(mm);
 d_{10} ——有效粒径,表示分布曲线上小于该粒径的颗粒质量占总质量 10%的粒径(mm);
 d_{30} ——平均粒径,表示分布曲线上小于该粒径的颗粒质量占总质量 30%的粒径(mm)。

由图 1-1 查得 $d_{10} = 0.12 \text{ mm}$ 、 $d_{30} = 0.4 \text{ mm}$ 、 $d_{60} = 0.84 \text{ mm}$, 可以计算得出:

$$\text{不均匀系数 } C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.84}{0.12} = 7$$

$$\text{曲率系数 } C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} = \frac{0.4^2}{0.84 \times 0.12} = 1.6$$

从图 1-1 可以看出，不均匀系数 C_u 表示粒径的分布范围， C_u 愈大，表示土愈不均匀，即颗粒粒径相差悬殊。如果级配曲线是连续的， C_u 愈大，则级配曲线愈平缓，表示土中含有粗细不同的颗粒，级配良好。级配良好的土，压实后，细颗粒充填于粗颗粒所形成的孔隙中，压实土体密度高，力学性质好。

曲率系数 C_c 用以描述颗粒级配曲线的连续性。如果级配曲线斜率不连续，曲线上的某位置出现水平段，则水平段范围内的粒组缺失；如水平段的范围较大，则土的组成是粗的粗，细的细，级配不好，不易密实。如果曲线上的某位置出现陡降段，则陡降段范围内的粒组集中，土中粗颗粒和细颗粒含量较少，级配不好，也不易密实。

一般用途不同，对填料的要求亦不同。在路基设计中，要求压实填料级配良好。《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016) 规定：当 $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 时，可认为土的级配良好；当 $C_u < 5$ 或 $C_c \neq 1 \sim 3$ 时，则认为土的级配不良。但当填料用于反滤层时，则要求填料粒径均匀。

筛析法适用于粒径大于 0.075 mm 的土。对于粒径小于 0.075 mm 的土，应采用密度计法或移液管法进行测定。根据密度计法或移液管法的试验结果，同样可绘制颗粒级配曲线。若某土样中粒径大于 0.075 mm 的土虽较多，但粒径小于 0.075 mm 的土仍超过土样总质量的 10%，则应采用筛析法和密度计法（或筛析法和移液管法）进行联合试验。图 1-2 中，曲线 1 是根据筛析法试验结果绘制的，曲线 2 是根据筛析法和密度计法联合试验的结果绘制的，曲线 3 是根据密度计法试验结果绘制的。

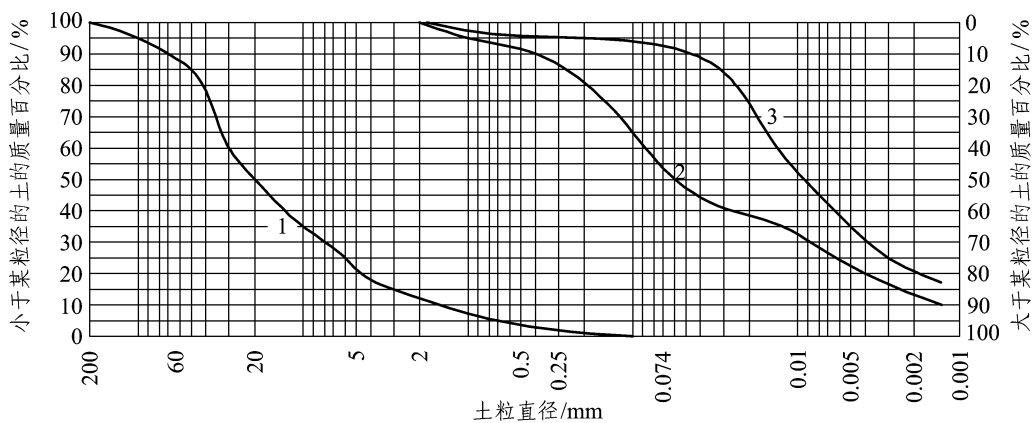


图 1-2 颗粒级配曲线

(二) 土中水

在天然土的孔隙中通常含有一定量的液体，其主要成分是水，温度不同，水的状态也不同。土中的细颗粒越多，与水反应的面越多，因而受水的影响越大。试验证明，土颗粒的表面带有负电荷。水分子是极性分子，由带正电荷的 H^+ 和带负电荷的 OH^- 组成。这样水分子中的 H^+ 会被颗粒表面的负电荷吸引而定向地排列在颗粒的四周，离

颗粒表面愈近，吸引力愈大，如图 1-3 所示。土中水按其所受土粒的吸引力大小可分为结合水和非结合水。

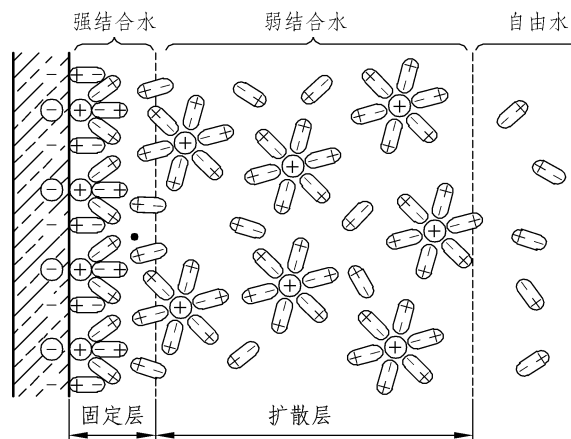


图 1-3 土中固体颗粒与水的相互作用

1. 结合水

这部分水是受土粒表面电场作用力吸引而包围在颗粒周围，不传递静水压力，也不受重力影响的水。结合水因离颗粒表面远近不同，受电场作用力大小也不同，可分为强结合水和弱结合水。

(1) 强结合水（吸着水）。

强结合水是被颗粒表面负电荷紧紧吸附在土粒周围的很薄的一层水。这种水的性质接近于固体，不冻结，不因重力影响而转移，不传递静水压力，不导电，具有极大的黏滞性、弹性和抗剪强度，只有在 105 ℃ 以上的温度烘烤时才能全部蒸发。这种水对土的性质影响较小。土粒可以从潮湿空气中吸附这种水。仅含强结合水的黏土呈干硬状态或半干硬状态，碾碎则成粉末。砂类土也可能有极少量吸着水，仅含吸着水的砂类土呈散粒状。

(2) 弱结合水（薄膜水）。

在强结合水外面一定范围内的水分子，仍会受到颗粒表面负电荷的吸引力作用而吸附在颗粒的四周，这种水称为弱结合水。显然，离颗粒表面愈远，水分子所受的电分子力就愈小，因而薄膜水的性质随着离颗粒表面距离的变化而变化，从接近于吸着水至变为自由水。弱结合水从整体来说呈黏滞状态，但其黏滞性是从内向外逐渐降低的。它仍不能传递静水压力。薄膜水受力时能从水膜较厚处缓慢转移至较薄处；砂类土可认为不含薄膜水，黏性土的薄膜水较厚，且薄膜水的含量随黏粒增多而增大。薄膜水的多少对黏性土的性质影响很大，黏性土的一系列特性如黏性、塑性、压实性等都和薄膜水有关。

2. 非结合水

非结合水是土粒水化膜以外的液态水，虽然土粒的吸引力对它有影响，但它主要

是受重力作用的控制，能传递静水压力，可分为毛细水和重力水。

(1) 毛细水。

土中存在着很多大小不一、互相连通的微小孔隙，形成了错综复杂的通道，由于毛细表面张力的作用，形成了毛细水。毛细作用使毛细水从土的微细通道上升到高出自由水面以上。上升高度介于0（砾石、卵石）到5~6m（黏土）。粒径2mm以上的土颗粒间，由于颗粒较粗，一般不会出现毛细现象。由于毛细水高出自由水面，可以在地下水位以上一定高度内形成毛细饱水区，好像将地下水位抬高了一样。由于毛细水的上升可能引起道路翻浆、盐渍化、冻害等路基病害，导致路基失稳；因此，了解和认识土的毛细性，对土木工程的勘测、设计有重要意义。

(2) 重力水。

在自由水位以下、土粒吸附力范围以外的水，在本身重力作用下，可在土中自由移动，故称重力水。重力水在土中能产生和传递静水压力，对土产生浮力。在开挖基坑和修筑地下结构物时，若有重力水存在，应采取排水、防水措施。土中应力的大小与重力水也有关系。

(三) 土中气体

土中的气体主要是空气和水汽，在某些有机质土中可含有较多的二氧化碳、沼气及硫化氢等气体。土中的气体有不同的存在形式：与外界大气相连通的自由气体、被土粒表面吸附的结合气体、被孔隙水包围的封闭气体和溶解气体。

土中气体对土的工程性质影响一般较小。但在某些情况下，其影响仍不可忽略，如：封闭气体的存在会降低土的透水性，使土体难以压实；在压缩状态下可能会冲破土层逸出，造成土体突然沉陷；溶解于水的二氧化碳会加剧化学潜蚀等作用；在温度、压力变化时，近地表土体孔隙水中气体的溶解或释放，会改变土体的结构和压缩性。

二、土的结构

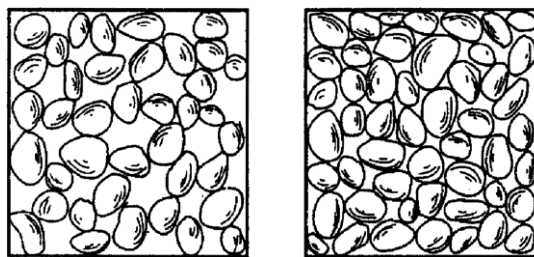
很多试验资料表明，同一种土，原状土样和重塑土样（将原状土样破碎，在实验室内重新制备的土样）的力学性质有很大差别。甚至用不同方法制备的重塑土样，尽管组成一样，密度控制也相同，性质仍有所差别。也就是说，土的组成和状态并不是决定土的性质全部因素，土的结构对土的性质也有很大影响。土粒或土粒集合体的大小、形状、相互排列与联结等综合特征，称为土的结构。土的天然结构是在其沉积和存在的整个历史过程中形成的。土因其组成、沉积环境和沉积年代不同形成各种很复杂的结构。通常土的结构可分为三种基本类型：单粒结构、蜂窝结构和絮状结构。

1. 单粒结构

这种结构由较大土粒在自重作用下，于水或空气中下落堆积而成。碎石类土和砂类土就是单粒结构的土。单粒结构因土粒较大，土粒之间的分子引力远小于土粒自重，土粒之间几乎没有相互联结作用，是典型的散粒状物体。这种结构的土，其强度主要

来源于土粒之间的内摩擦力。

由于生成条件不同，单粒结构可能是紧密的，也可能是松散的。在松散的砂类土中，砂粒处于较不稳定状态，并可能具有超过土粒尺寸的较大孔隙，在静力荷载作用下，压缩不大，但在动力荷载或其他振动荷载作用下土粒易于变位压密，孔隙度降低，地基突然沉陷，导致建筑物破坏，如图 1-4 (a)。密实砂土则相反，从工程地质观点来看，紧密结构是最理想的结构。具有紧密结构的土层，在建筑物的静力荷重下不会压缩沉陷，在动力荷重或振动的情况下，孔隙度的变化也很小，不致造成破坏，如图 1-4 (b)。紧密结构的砂土只有在侧向松动，如开挖基坑后才会变成流砂状态。



(a) 松散单粒结构 (b) 密实单粒结构

图 1-4 单粒结构

2. 蜂窝结构

较细的土粒在自重作用下于水中下沉时，由于其颗粒细、质量轻，碰到已沉稳的土粒，如两土粒间接触点处的分子引力大于下沉土粒的重量，土粒便被吸引而不再下沉。如此继续不已，可逐渐形成链环状单元。很多这样的链环联结起来，就形成疏松的蜂窝结构，如图 1-5。蜂窝结构的土中单个孔隙体积一般远大于土粒本身的尺寸，孔隙体积也较大。如沉积后没有受过比较大的上覆压力，则在建筑物上覆荷载作用下，可能产生较大沉降。这种结构常见于黏性土中。

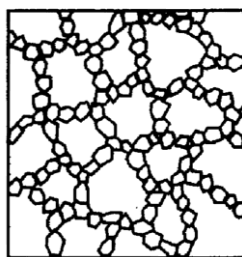


图 1-5 蜂窝结构

3. 絮状结构

絮状结构是颗粒最细小的黏性土的特有结构形式。最细小的黏粒大都呈针状或片状，它在水中呈现胶体特性。这主要是由于电分子力的作用，使土粒表面附有一层极薄的水膜。这种带有水膜的土粒在水中运动时，与其他土粒碰撞而凝聚成小链环状的土粒集合，然后沉积成大的链环，形成不稳定的复杂絮状结构。这种结构在海相沉积

黏土中常见（图 1-6）。

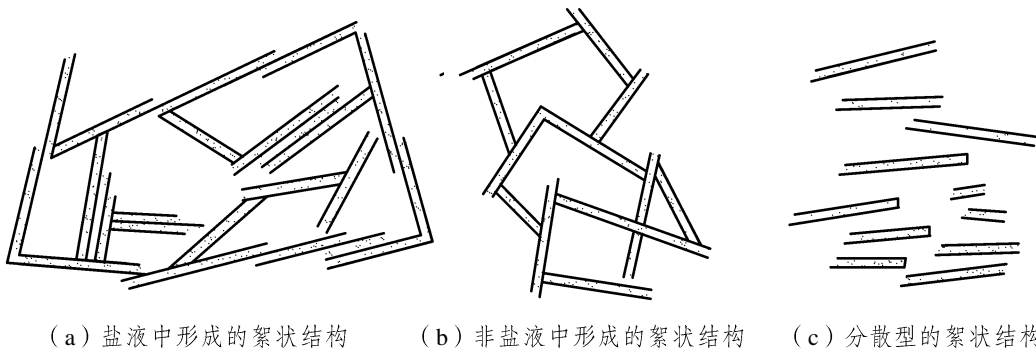


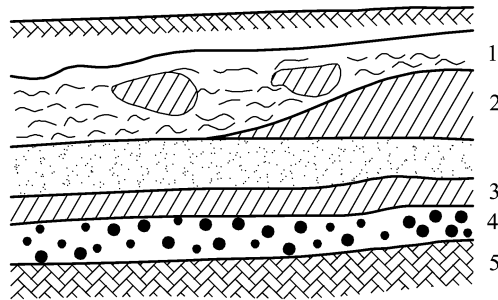
图 1-6 常见的絮状结构

在土的以上三种结构中，密实的单粒结构强度大、压缩性小，工程性质最好；蜂窝结构次之；絮状结构最差。尤其是絮状结构在其天然结构遭到破坏时，强度极低，压缩性极大，不能作为天然地基。

还应说明，土的结构受扰动后，其原有的物理力学性质会变化。因此，在取土样做试验时，应尽量减少扰动，避免破坏土的原状结构。

三、土的构造

土的构造是指土体中各结构单元之间的关系，如层状土体、互层土体、裂隙土体、软弱夹层、透水层与不透水层等，其主要特征是土的成层性和裂隙性，即层理构造与裂隙构造，另外还有结核构造，见图 1-7。



1—淤泥夹黏土透镜体；2—黏土尖灭层；3—砂土夹黏土层；4—砾石层；5—基岩。

图 1-7 土的层理构造

1. 层理构造

土粒在沉积过程中，由于不同的地质作用和沉积环境条件，物质成分大体相同的土粒在水平方向沉积成一定厚度，呈现出成层特征。第四纪冲积层具有明显的层状构造（又称层理）。因沉积环境条件的变化，常又会出现夹层、尖灭和透镜体等交错层理。砂、砾石等沉积物，当沉积厚度较大时，往往无明显的层理而呈分散状，又称为分散

构造。

2. 裂隙构造

裂隙构造是指土层中存在的各种裂隙，裂隙中往往有盐类的沉淀，如黄土层中常分布的柱状裂隙。坚硬或硬塑黏土层中有不连续裂隙，破坏了土的整体性。裂隙面是土中的软弱结构面，沿裂隙面的抗剪强度很低而渗透性却很高，浸水后裂隙张开，工程性质更差。

3. 结核构造

在细粒土中明显掺有大颗粒或聚集的铁质、钙质等结合体、贝壳等杂物的构造称为结核构造，如含结核黄土中的结合体、含砾石的冰积黏土等均属此类。由于大颗粒或结核往往分散，故此类土的性质取决于细颗粒部分。

当把土层作为地基时，应认真研究土层的构造情况，特别是尖灭层和透镜体的存在会影响土层的受力和压缩的不均匀性，常会引起地基的不均匀变形。

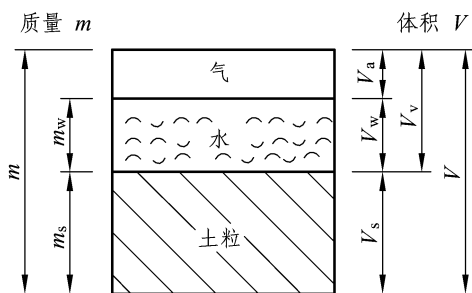
第三节 土的物理性质指标

对于钢材、混凝土等一般连续性材料，只要知道密度 ρ 就能直接确定这种材料的密实程度；对于三相体的土，同样的密度 ρ ，单位体积内可以是固体颗粒的质量多一些，水的质量少一些，也可以是固体颗粒的质量少一些而水的质量多一些，同时气体的体积也可以不相同，所以不能用一个单一的指标来说明三相间量的比例。土的三相组成的性质，特别是固体颗粒的性质，直接影响到土的工程特性。同样一种土，密实时强度高，松散时强度低。对于细粒土，含水率少时则硬，含水率多时则软。这说明土的性质不仅决定于三相组成的性质，而且三相之间的比例关系也是影响土的一个很重要的因素。

一、土的三相图

为了使这个问题形象化，以获得清楚的概念，在土力学中，通常用三相图表示土的三相组成，如图 1-8。三相图的右侧表示三相组成的体积，三相图的左侧则表示三相组成的质量。

在图示的这些量中，独立的有 V_s 、 V_w 、 V_a 、 m_w 、 m_s 5 个量。 1 cm^3 水的质量等于 1 g ，故在数值上 $V_w = m_w$ 。此外，当我们研究这些量的相对比例关系时，总是取某一定数量的土体来分析，例如取 $V=1\text{ cm}^3$ 或 $m=1\text{ g}$ 或 $V_s=1\text{ cm}^3$ 等等，因此又可以消去一个未知量。这样，对于这一定数量的三相土体，只要知道其中 3 个独立的量，其他各量就可以从图中直接算出。所以，三相图是土力学中用以计算三相量比例关系的一种简单而又很有用的工具。



V —土的总体积； V_v —土的孔隙部分体积； V_s —土的固体颗粒实体的体积； V_w —水的体积； V_a —气体体积； m —土的总质量； m_w —水的质量； m_s —固体颗粒质量。

图 1-8 土的三相示意图

二、确定三相比例关系的基本试验指标

为了确定三相图各量中的 3 个指标——密度、土粒相对密度和含水率，就必须通过实验室的试验测定。通常做 3 个基本物理性质试验：密度试验、颗粒密度试验和含水率试验。

1. 土的密度 (ρ) 与重度 (γ)

土的密度定义为在天然状态下单位体积土的质量，用式 (1-3) 表示，其范围为 $1.6 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$ 。

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_v} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1-3)$$

在天然状态下，单位体积土所受重力，称为土的天然重度，简称重度，用式 (1-4) 表示：

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \frac{(m_s + m_w)g}{V} = \rho g \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-4)$$

式中 $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ，为重力加速度，工程上有时为了计算方便，取 $g=10 \text{ m/s}^2$ 。

应该明确，重度并不是实测指标。通常是实测土的密度 ρ 再算出重度 γ 。土的重度与土的含水率和密实度有关，一般土的重度范围为 $16 \sim 22 \text{ kN/m}^3$ 。土的密度的测定方法见表 1-8。

表 1-8 土的密度的测定方法

测定方法	适用条件
环刀法	粉土、黏性土
蜡封法	环刀难以切削并易碎裂的土
灌砂法	现场测定最大粒径小于 75 mm 的土
灌水法	现场测定最大粒径小于 200 mm 的土
气囊法	现场测定最大粒径小于 40 mm 的土
核子射线法	现场测定填料为细粒土、粗粒土的压实密度，测定前宜用灌砂法的结果进行标定

2. 土粒相对密度 (或比密度) G_s

土粒相对密度定义为土颗粒的质量与同体积 4 °C 蒸馏水的质量之比, 即

$$G_s = \frac{m_s}{V_s \times \rho_w^{4^\circ\text{C}}} = \frac{\rho_s}{\rho_w^{4^\circ\text{C}}} \quad (1-5)$$

式中 ρ_s —— 土粒密度, 即单位体积土粒的质量 (g/cm^3);

$\rho_w^{4^\circ\text{C}}$ —— 4 °C 时蒸馏水的密度 (g/cm^3)。

因为 $\rho_w^{4^\circ\text{C}} = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$, 故实用上, 土粒相对密度在数值上等于土粒密度, 即 $G_s = \rho_s$, 是无量纲数。

天然土颗粒是由不同的矿物所组成的, 这些矿物的土粒相对密度各不相同。试验测定的是土粒的平均相对密度。土粒相对密度变化范围不大, 细粒土 (黏性土) 一般在 2.70 ~ 2.75, 砂土的相对密度为 2.65 左右。土中有机质含量增加时, 土粒相对密度减小。

单位体积土粒重量称为土粒重度。土粒重度不是实测指标, 通常是通过实测土粒相对密度 G_s 求出土粒重度 γ_s 。由土粒重度的定义, 可得出 G_s 与 γ_s 的关系式为

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{m_s g}{V_s} = \rho_s g \quad (\text{kN}/\text{m}^3) \quad (1-6)$$

式中 W_s —— 土样内土粒重力 (kN)。

土粒重度的常用单位为 kN/m^3 。土粒相对密度的测定方法见表 1-9。

表 1-9 土粒相对密度的测定方法

测定方法	适用条件
比重瓶法	最大粒径小于 5 mm 的土
浮称法	粒径大于等于 5 mm, 且粒径大于 20 mm 的颗粒含量少于 10% 的土
虹吸筒法	粒径大于等于 5 mm, 且粒径大于 20 mm 的颗粒含量大于 10% 的土

3. 土的含水率 w

土的含水率定义为土中水的质量与土粒质量之比, 以百分数表示。

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\% = \left(\frac{m}{m_s} - 1 \right) \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 w —— 土的含水率 (%)。

土的天然含水率是无量纲量, 其测定方法见表 1-10。

表 1-10 土的含水率的测定方法

测定方法	适用条件
烘干法	测定含水率的标准方法, 适用于各类土
碳化钙减量法	适用于各类土
酒精燃烧法	适用于不含有机质的砂类土、粉土和黏性土

核子射线法 现场原位测定填料为细粒土和粗粒土的含水率，测定前宜用灌砂法的结果进行标定

土的天然含水率变化很大。干的砂类土，含水率为 0~3%，饱和软黏土的含水率可达 80%。一般情况下，对同一类土，当含水率增大时，其强度降低。

三、确定三相量比例关系的其他常用指标

测出土的密度 ρ 、土粒相对密度 G_s 和土的含水率 w 后，就可以根据图 1-9 所示的三相图，计算出三相组成各自体积和质量的数值。工程上为了便于表示三相含量的某些特征，定义如下几种指标。下面几个指标是根据其定义和 3 个实测指标换算得出的，故称为导出指标。

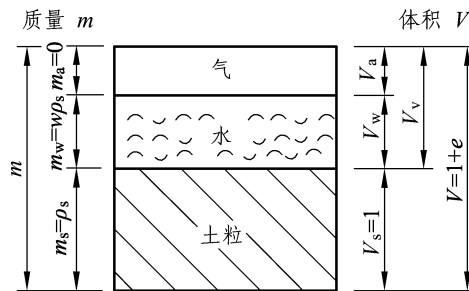


图 1-9 土的三相换算图

1. 表示土中孔隙含量的指标

工程上常用孔隙比 e 或孔隙率 n 表示土中孔隙的含量。

孔隙比 e 指孔隙体积与固体颗粒实体体积之比，表示为

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-8)$$

孔隙比用小数表示。对同一类土，孔隙比越小，土越密实；孔隙比越大，土越松散。它是表示土的密实程度的重要物理性质指标。

孔隙比为土体中一部分与另外一部分的比值，所以孔隙比可能大于 1。

孔隙率（孔隙度） n 指孔隙体积与土体总体积之比，用百分数表示，即

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-9)$$

由定义知，孔隙率为土体中部分与整体的比值，所以孔隙率恒小于 1。

下面根据孔隙比的定义和 3 个实测指标来推导孔隙比的换算关系式。

从 3 个实测指标的定义及其表达式可知，物理性质指标的计算结果与所取土样的体积（或质量）大小无关。因此，可假设土样的土粒体积 $V_s = 1$ 个单位体积，土样其余部分的体积和质量可用其他物理性质指标来表示，如图 1-9 所示。现对图 1-9 各部分的体积和质量的关系说明如下：假设 $V_s = 1$ ，根据式（1-5）可得土粒质量 $m_s = G_s V_s \rho_w^{4^\circ\text{C}} = \rho_s$ ；再根据式（1-7），可得水的质量 $m_w = w m_s = w G_s V_s \rho_w^{4^\circ\text{C}} = w \rho_s$ ，故土体的

总质量 $m = m_s + m_w = \rho_s(1+w)$ 。另根据孔隙比的定义 $e = \frac{V_v}{V_s}$ ，前面假设 $V_s = 1$ ，则 $V_v = e$ ，土体总体积 $V = V_s + V_v = 1 + e$ 。

确定了土体的总质量与总体积，土体的密度即可表达出来：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\rho_s(1+w)}{1+e}$$

可得
$$e = \frac{\rho_s(1+w)}{\rho} - 1 \quad (1-10)$$

根据密度和重度的关系可得

$$e = \frac{\gamma_s(1+w)}{\gamma} - 1 \quad (1-11)$$

需要说明的是，推导式（1-10）时以土粒体积 $V_s = 1$ 作为计算出发点。但是，由于各物理性质指标都是三相间量的比例关系，而不是量的绝对值，因此，取其他量为 1（例如设土的体积 $V = 1$ ）作为计算的出发点，也可以得出相同的换算关系式。

另外，推导孔隙率的换算关系式，可以假设总体积 $V = 1$ 个单位体积，则根据孔隙率的定义 $n = \frac{V_v}{V}$ ，孔隙体积 $V_v = n$ ，土颗粒体积 $V_s = 1 - n$ 。

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{V} = m_s + m_w = (1-n)\rho_s + (1-n)\rho_s w \\ &= \rho_s(1-n)(1+w) \end{aligned}$$

所以
$$n = 1 - \frac{\rho}{\rho_s(1+w)} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s(1+w)} \quad (1-12)$$

在土力学和地基的计算中，孔隙比 e 与孔隙率 n 的应用都较为广泛。因此，如采用三相图计算土的物理性质指标，计算孔隙比 e 时常假定 $V_s = 1$ ，计算孔隙率 n 时常假定 $V = 1$ 。

孔隙比和孔隙率都是用以表示孔隙体积含量的指标。两者之间可以用式（1-13）、式（1-14）互换：

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (1-13)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-14)$$

土的孔隙比或孔隙率都可用来表示同一种土的松、密程度，它随土形成过程中所受的压力、颗粒级配和颗粒排列的状况而变化。一般来说，粗粒土的孔隙率小，细粒土的孔隙率大。例如砂类土的孔隙率一般为 28% ~ 35%，而黏性土的孔隙率有时可高达 70%，在这种情况下，单位体积内孔隙的体积比土颗粒的体积大很多。

2. 表示土中含水程度的指标

含水率 w 当然是表示土中含水程度的一个重要指标。此外，工程上往往需要知道孔隙充满水的程度，这就是土的饱和度 S_r 。所以饱和度为

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

饱和度的换算关系式可根据定义和图 1-9 求得

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{wG_s}{e} \quad (1-16)$$

根据孔隙比与孔隙率的关系得

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{(1-n)wG_w}{n} \quad (1-17)$$

显然，干土的饱和度 $S_r = 0$ ，而一般认为饱和度大于 80% 的土就是饱和的。

3. 表示土的密度和重度的几种指标

土的密度除了用上述 ρ 表示以外，工程计算上，还常用如下 3 种密度，即干密度、饱和密度和浮重度。

(1) 干密度 ρ_d 与干重度 γ_d 。

单位体积土体中的土粒质量称为土的干密度，用 ρ_d 表示，其范围为 $1.4 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ 。

根据图 1-9，当假设 $V_s = 1$ 时，干密度可用式 (1-18) 计算：

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{\rho_s}{1+e} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1-18)$$

另外，根据干密度定义

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{m - m_w}{V} = \rho - \frac{wm_s}{V} = \rho - w \cdot \rho_d$$

得
$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1-19)$$

同理，单位体积土体中的土粒重力称为土的干重度，用 γ_d 表示。

干重度的换算关系式可根据其与干密度的关系得出：

$$\gamma_d = \frac{m_s g}{V} = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{\gamma}{1+w} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-20)$$

干密度愈大，表示土愈密实。在路基工程中，常以干密度作为路基密实程度的判断指标。

(2) 饱和密度 ρ_{sat} 和饱和重度 γ_{sat} 。

饱和密度是孔隙完全被水充满时单位体积土体的质量，用 ρ_{sat} 表示，其范围为 $1.8 \sim 2.3 \text{ g/cm}^3$ 。

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V}$$

假设 $V_s = 1$ ，则利用图 1-9， ρ_{sat} 可用式 (1-21) 计算：

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{\rho_s + e\rho_w}{1+e} \quad (1-21)$$

土体孔隙中完全充满水时土的重度称为饱和重度，用 γ_{sat} 表示，可用式 (1-22) 计算：

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{m_s g + V_v \gamma_w}{V} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} \quad (1-22)$$

三相图中当假设土体体积为 1 时，

$$\gamma_{\text{sat}} = (1-n)\gamma_s + n\gamma_w \quad (1-23)$$

(3) 土的浮重度 γ' 。

在水下的土体，要受到水的浮力作用，其重力会减轻。浮力的大小等于土粒排开水的重力。因此，土的浮重度等于单位体积土体中的土粒重力减去土粒排开水的重力，其定义为

$$\gamma' = \frac{m_s g - V_s \gamma_w}{V} \quad (1-24)$$

浮重度的换算关系式可根据浮重度的定义和图 1-9 得出：

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} \quad (1-25)$$

浮重度等于土的饱和重度减去水的重度：

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (1-26)$$

对于同一种土，几种密度有以下几种关系：

$$\rho_{\text{sat}} \geq \rho \geq \rho_d$$

ρ 为天然密度，在地下水位以下部分的土基本是饱和的，这时土的天然密度就等于饱和密度；干燥状态的砂土，土的天然密度基本上等于干密度。

相应于这几种密度，工程上还经常用天然重度 γ 、饱和重度 γ_{sat} 、浮重度 γ' 和干重度 γ_d 来表示土在不同含水状态下单位体积的重力。同样地，这几种重度在数值上存在如下关系：

$$\gamma_{\text{sat}} \geq \gamma \geq \gamma_d \geq \gamma'$$

为了便于应用，将上述土的物理性质指标的类别、名称、符号、定义表达式、常用换算关系式和单位列于表 1-11。

表 1-11 土的物理性质指标及换算关系

类别	名称	符号	定义表达式	常用换算关系	单位
----	----	----	-------	--------	----

实测 指标	密度 重度	ρ γ	$\rho = \frac{m}{V}$ $\gamma = \frac{mg}{V}$	$\rho = \frac{G_s + S_r e}{1 + e}$ $\gamma = \frac{\gamma_s + S_r e \gamma_w}{1 + e}$	g/cm^3 kN/m^3
----------	----------	--------------------	---	--	------------------------------------

续表

类别	名称	符号	定义表达式	常用换算关系	单位	
实测 指标	含水率	w	$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\%$	$w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$ $w = \frac{S_r e}{G_s}$	—	
	土粒相对密度 土粒重度	G_s γ_s	$G_s = \frac{m_s}{V_s \times \rho_w}$ $\gamma_s = \frac{m_s g}{V_s} = G_s g$	$G_s = \frac{S_r e}{w}$ $\gamma_s = \frac{S_r e \gamma_w}{w}$	—	
导出 指标	反映土体 中孔隙相 对大小	孔隙比	$e = \frac{V_v}{V_s}$	$e = \frac{G_s \rho_w (1 + w) - \rho}{\rho}$ $e = \frac{\gamma_s (1 + w) - \gamma}{\gamma}$ $e = \frac{n}{1 - n}$ $e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$	—	
		孔隙率 (孔隙度)	n	$n = \frac{V_v}{V}$	$n = 1 - \frac{\rho}{G_s (1 + w)}$ $e = \frac{n}{1 - n}$ $n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$	—
	反映土体 中的湿度	饱和度	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_v}$	$S_r = \frac{w G_s}{e}$ $S_r = \frac{(1 - n) G_w w}{n}$ $S_r = \frac{w \cdot \gamma_d}{n \gamma_w}$	—
	反映土的 单位体积 的质量或	干密度 干重度	ρ_d γ_d	$\rho_d = \frac{m_s}{V}$ $\gamma_d = \frac{m_s g}{V}$	$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + e} = \frac{\rho}{1 + w}$ $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e} = \frac{\gamma}{1 + w}$	g/cm^3 kN/m^3

重量	饱和密度 饱和重度	ρ_{sat} γ_{sat}	$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V}$ $\gamma_{\text{sat}} = \frac{m_s g + V_v \gamma_w}{V}$	$\rho_{\text{sat}} = \frac{G_s \rho_w + e \rho_w}{1 + e}$ $\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s + e \gamma_w}{1 + e}$ $\gamma_{\text{sat}} = (1 - n) \gamma_s + n \gamma_w$	g/cm^3 kN/m^3
	浮重度	γ'	$\gamma' = \frac{m_s g - V_v \gamma_w}{V}$ $= \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$	$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$ $\gamma' = (1 - n)(\gamma_s - \gamma_w)$	kN/m^3

【例题 1-1】某饱和土样体积为 98.0 cm^3 ，总质量为 189.0 g ，此土样烘干后质量为 164.0 g 。试求此土样的含水率、孔隙比、干重度。

【解】饱和土体指土中孔隙全部被水充满，故为两相体系，如图 1-10 所示。

土样烘干前、后质量已知，则水的质量 $m_w = m - m_s = 189 - 164 = 25 \text{ g}$

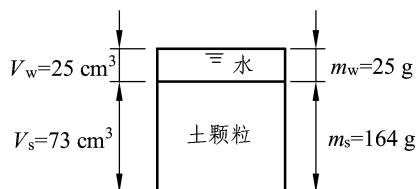


图 1-10 例题 1-1 土的三相图

水的体积 $V_w = V_v = 25 \text{ cm}^3$

土粒体积 $V_s = V - V_v = 98 - 25 = 73 \text{ cm}^3$

土样的含水率 $w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{25}{164} = 15.2\%$

土样的孔隙比 $e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{25}{73} = 0.34$

土的干重度 $\gamma_d = \frac{m_s g}{V} = \frac{164 \times 10}{98} = 16.7 \text{ kN/m}^3$



土的物理性质指标教学案例

【例题 1-2】土样总质量为 97.0 g ，总体积为 54.0 cm^3 ，此土样烘干后质量为 78.0 g ，土粒相对密度 $G_s = 2.66$ 。试求此土样的天然密度、天然含水率、孔隙比、饱和度、干密度、饱和密度、饱和重度和浮重度。

【解】本题有两种解法，一种是根据三相图（图 1-11）求解，一种是由公式求解。

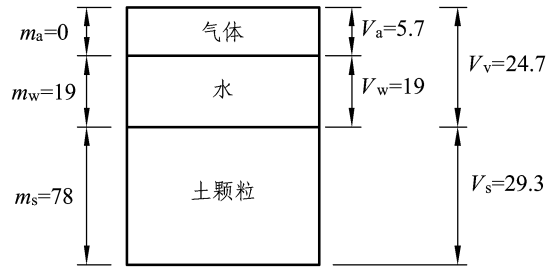


图 1-11 例题 1-2 土的三相图

方法一：利用三相图求解

(1) 求各相的质量与体积。

水的质量与体积

$$m_w = m - m_s = 97 - 78 = 19 \text{ g}$$

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} = \frac{19}{1} = 19 \text{ cm}^3$$

$$\text{土颗粒的体积 } V_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{78}{2.66} = 29.3 \text{ cm}^3$$

$$\text{气体的体积 } V_a = V - V_s - V_w = 5.7 \text{ cm}^3$$

(2) 根据求出的各量画出土的三相图，见图 1-11。

(3) 根据三相图求出各指标。

$$\text{土的天然密度 } \rho = \frac{m}{V} = \frac{97}{54} = 1.80 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{土的含水率 } w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{19}{78} = 24.4\%$$

$$\text{土的孔隙比 } e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{24.7}{29.3} = 0.84$$

$$\text{土的饱和度 } S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{19}{24.7} = 0.77$$

$$\text{土的干密度 } \rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{78}{54} = 1.44 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{土的饱和密度 } \rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} = 1.90 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{土的饱和重度 } \gamma_{\text{sat}} = \frac{m_s g + V_v \gamma_w}{V} = 19.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{土的浮重度 } \gamma' = \frac{m_s g - V_s \gamma_w}{V} = 9.0 \text{ kN/m}^3$$

方法二：根据 3 个实测指标，利用换算公式求解

$$e = \frac{\gamma_s(1+w)}{\gamma} - 1 = \frac{26.6(1+24.4\%)}{18.0} - 1 = 0.84$$

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{\rho}{1+w} = 1.44 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} = \frac{26.6 + 0.84 \times 10}{1 + 0.84} = 19.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 19.2 - 10 = 9.0 \text{ kN/m}^3$$

$$S_r = \frac{G_s w}{e} = \frac{2.66 \times 24.4\%}{0.84} = 0.77$$

第四节 土的物理状态

土的工程特性除了与土的三相组成有关系外，还与其天然状态下的存在状态有关。土的物理状态，对于粗颗粒土（无黏性土）来说，是指土的密实程度；对黏性土土则是指土的软硬程度或稠度。

一、无黏性土的物理状态

粗颗粒土（无黏性土）包括砂土和碎石土。无黏性土的密实程度和潮湿程度对其工程性质有重大影响。密实的无黏性土结构稳定，压缩性小，强度较高，可作为良好的天然地基。松散的无黏性土常有超过土粒粒径的较大孔隙，特别是饱和的细砂和粉砂，结构稳定性差，强度较小，压缩性较大，还容易发生流砂等现象，是一种软弱地基。水可降低无黏性土颗粒间的摩擦力，也会使其强度降低，因此，密实程度和潮湿程度是无黏性土重要的物理状态指标。

1. 粗粒土（无黏性土）的密实度

土的密实度通常指单位体积中固体颗粒的含量。土颗粒含量多，土就密实；土颗粒含量少，土就疏松。从这一角度分析，在上述三相比例指标中，干密度 ρ_d 和孔隙比 e （或孔隙率 n ）都是表示土的密实度的指标。但是这种用固体含量或孔隙含量表示密实度的方法有其明显的缺点，主要是这种表示方法没有考虑到颗粒级配这一重要因素的影响。为说明这个问题，取两种不同级配的砂土进行分析。假定第一种砂是理想的均匀圆球，不均匀系数 $C_u = 1.0$ 。这种砂最密实的排列，如图 1-12（a）所示，通过计算可知最小孔隙比 $e_{\text{min}} = 0.35$ ，如果砂粒的相对密度 $G_s = 2.65$ ，则最密实时的干密度 $\rho_{d\text{max}} = 1.96 \text{ g/cm}^3$ 。第二种砂同样是理想的圆球。但其级配中除大的圆球外，还有小的圆球可以充填于孔隙中，即不均匀系数 $C_u > 1.0$ ，如图 1-12（b）。显然，这种砂最密时的最小孔隙比 $e_{\text{min}} < 0.35$ 。就是说这两种砂若都具有同样的孔隙比 $e = 0.35$ ，对于第一种砂，已处于最密实的状态，而对于第二种砂则不是最密实的。实践中，往往可以碰到不均匀系数很大的砂砾混合料，孔隙比 $e \leq 0.35$ ，干密度 $\rho_d \geq 2.05 \text{ g/cm}^3$ 时，仍然只处

于中等密实度状态，有时还需要采取工程措施再予以加密。

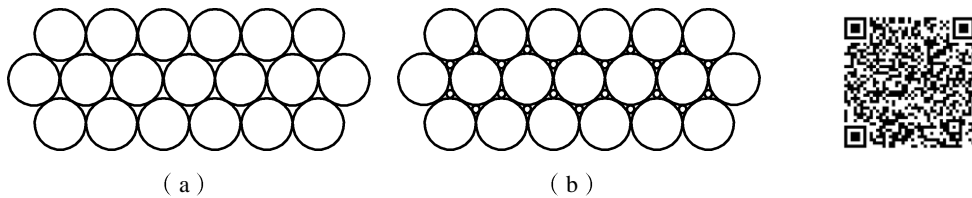


图 1-12 土的颗粒排列方式 不同级配无黏性土的密实度

工程上为了更好地表明粗粒土（无黏性土）所处的密实状态，采用将现场土的天然孔隙比 e 与该种土所能达到最密时的孔隙比 e_{\min} 和最松时的孔隙比 e_{\max} 相对比的办法，来表示天然状态下孔隙比为 e 时土的密实度。这种度量密实度的指标称为相对密度 D_r ，表示为

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1-27)$$

式中 e ——粗粒土的天然孔隙比；

e_{\max} ——土的最大孔隙比，测定的方法是将松散的风干土样通过长颈漏斗轻轻地倒入容器，避免重力冲击，求得土的最小干密度再经换算得到 e_{\max} （详见《铁路工程土工试验规程》）；

e_{\min} ——土的最小孔隙比，测定的方法是将松散的风干土装在金属容器内，按规定方法振动和锤击，直至密度不再提高，求得最大干重度后经换算得到 e_{\min} （详见《铁路工程土工试验规程》）。

当 $D_r = 0$ 时， $e = e_{\max}$ ，表示土处于最松状态；当 $D_r = 1$ 时， $e = e_{\min}$ ，表示土处于最密实状态。用相对密度 D_r 判定粗粒土的密实度，根据《铁路桥涵地基和基础设计规范》的分类标准见表 1-12。《公路桥涵地基与基础设计规范》已取消根据相对密度判定土的密实度标准。将孔隙比与干重度的关系式 $e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$ 代入式（1-27）整理后，可以得到用干密度表示的相对密度的表达式为

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{d\min})\rho_{d\max}}{(\rho_{d\max} - \rho_{d\min})\rho_d} = \frac{(\gamma_d - \gamma_{d\min})\gamma_{d\max}}{(\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min})\gamma_d} \quad (1-28)$$

式中 ρ_d 、 γ_d ——对应于天然孔隙比为 e 时土的干密度、干重度；

$\rho_{d\min}$ 、 $\gamma_{d\min}$ ——相当于孔隙比为 e_{\max} 时土的干密度、干重度，即最松干密度、最松干重度；

$\rho_{d\max}$ 、 $\gamma_{d\max}$ ——相当于孔隙比为 e_{\min} 时土的干密度、干重度，即最密干密度、最密干重度。

应当指出，目前虽然已有一套测定最大孔隙比和最小孔隙比的试验方法，但是在实验室条件下测得各种土理论上的 e_{\max} 和 e_{\min} 却十分困难。在静水中很缓慢沉积形成

的土，孔隙比有时可能比实验室能测得的 e_{\max} 还大。同样，在漫长地质年代中，受各种自然力作用下堆积形成的土，其孔隙比有时比实验室能测得的 e_{\min} 还小。此外，埋藏在地下深处，特别是地下水位以下的无黏性土的天然孔隙比很难准确测定。因此，相对于这一指标，理论上虽然能够更合理地用以确定土的密实状态，但由于上述原因，通常多用于填方的质量控制中，对于天然土尚难以应用，因为 e_{\min} 和 e_{\max} 都难以准确测定。天然砂土的密实度只能在现场进行原位标准贯入试验，根据锤击数 N ，按表 1-12、表 1-13 的标准间接判定。

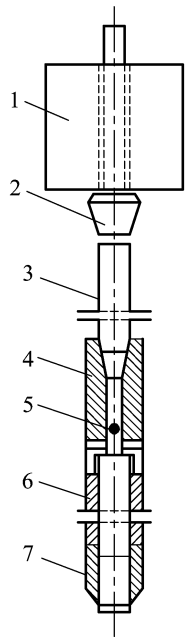
表 1-12 砂类土密度程度划分标准（《铁路桥涵地基和基础设计规范》）

密实程度	标准贯入锤击数 N	相对密度 D_r
密实	$N > 30$	$D_r > 0.67$
中密	$15 < N \leq 30$	$0.4 < D_r \leq 0.67$
稍密	$10 < N \leq 15$	$0.33 < D_r \leq 0.4$
松散	$N \leq 10$	$D_r \leq 0.33$

表 1-13 砂土的密实度划分标准（《公路桥涵地基与基础设计规范》）

标准贯入锤击数 N	密实度	标准贯入锤击数 N	密实度
$N \leq 10$	松散	$15 < N \leq 30$	中密
$10 < N \leq 15$	稍密	$N > 30$	密实

标准贯入试验主要设备如图 1-13 所示。做标贯试验时，先用钻具钻入地基中预定标高，然后将标准贯入器换装到钻杆端部，用质量为 63.5 kg 的穿心锤以 760 mm 的落距把标准贯入器竖直打入土中 150 mm（此时不计锤击数），以后再打入土中 300 mm 并记录贯入此 300 mm 所需的锤击数 N ，据 N 即可从表 1-12、表 1-13 中查出砂类土的密实程度。从表 1-12、表 1-13 中可看出：锤击数 N 大时土较密实， N 较小时土较松散。



1—穿心锤；2—锤垫；3—触探杆；4—贯入器头；
5—出水孔；6—贯入器身；7—贯入器靴。

图 1-13 标准贯入试验设备

应该说明，标准贯入试验所得的锤击数 N ，不仅可用于划分砂类土的密实程度，而且在高烈度地震区，还可作为判断砂类土是否会振动液化的计算指标。

【例题 1-3】某砂样的天然密度 $\rho = 1.78 \text{ g/cm}^3$ ，含水率 $w = 18.5\%$ ，土粒相对密度 $G_s = 2.65$ ，最大干密度 $\rho_{d\max} = 1.62 \text{ g/cm}^3$ ，最小干密度 $\rho_{d\min} = 1.40 \text{ g/cm}^3$ 。试求其相对密度 D_r ，并判定其密实程度。

【解】(1) 用干密度计算。

计算砂样在天然状态下的干密度：

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} = \frac{1.78}{1+0.185} = 1.50 \text{ g/cm}^3$$

砂土相对密度：

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{d\min})\rho_{d\max}}{(\rho_{d\max} - \rho_{d\min})\rho_d} = \frac{(1.50 - 1.40) \times 1.62}{(1.62 - 1.40) \times 1.50} = 0.49$$

(2) 用孔隙比计算。

$$\text{砂样的天然孔隙比 } e = \frac{\rho_s(1+w)}{\rho} - 1 = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2.65}{1.50} - 1 = 0.767$$

相应于最大干密度的孔隙比是砂样的最小孔隙比 e_{\min} ，相应于最小干密度的孔隙比是砂样的最大孔隙比 e_{\max} 。



标准贯入试验



无黏性土的物理状态教学案例

$$e_{\max} = \frac{\rho_s}{\rho_{d\min}} - 1 = \frac{2.65}{1.40} - 1 = 0.893$$

$$e_{\min} = \frac{\rho_s}{\rho_{d\max}} - 1 = \frac{2.65}{1.62} - 1 = 0.636$$

将各孔隙比代入式 (1-27):

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{0.893 - 0.767}{0.893 - 0.636} = 0.49$$

据 $D_r = 0.49$ 查表 1-12, 可判定此砂类土处于中密状态。

从理论上说, 相对密度 D_r 能比较确切地反映砂类土的密实程度。有时为了准确起见, 在一些地点既做标贯试验又钻探取样, 通过钻探测定土的 e 、 e_{\max} 和 e_{\min} , 取得锤击数与相对密度 D_r 的对应数据, 进而综合考虑确定地基承载力。(注:《公路桥涵地基与基础设计规范》已取消按相对密度确定砂土的密实度。)

《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017) 规定, 碎石类土密实程度划分凭经验在野外鉴别, 即根据土骨架的紧密情况、孔隙中充填物的充实程度、边坡稳定情况和钻进的难易程度来判断, 见表 1-14。

表 1-14 碎石类土密实程度的划分 (《铁路桥涵地基和基础设计规范》)

密实程度	结构特征	天然坡和开挖情况	钻探情况
密实	骨架颗粒交错紧贴连续接触, 孔隙填满、密实	天然陡坡稳定, 坎下堆积物较少。镐挖掘困难, 用撬棍方能松动, 坑壁稳定。从坑壁取出大颗粒后, 能保持凹面形状	钻进困难。钻探时, 钻具跳动剧烈, 孔壁较稳定
中密	骨架颗粒排列疏密不匀, 部分颗粒不接触, 孔隙填满, 但不密实	天然坡不易陡立或坎下堆积物较多。天然坡大于粗颗粒的安息角。镐可挖掘, 坑壁有掉块现象。充填物为砂类土时, 坑壁取出大颗粒处, 不易保持凹面形状	钻进较难。钻探时, 钻具跳动不剧烈, 孔壁有坍塌现象

续表

密实程度	结构特征	天然坡和开挖情况	钻探情况
稍密	多数骨架颗粒不接触, 孔隙基本填满, 但较松散	不易形成陡坎, 天然坡略大于粗颗粒的安息角。镐较易挖掘, 坑壁易掉块, 从坑壁取出大颗粒后易坍塌	钻进较难。钻探时, 钻具有跳动, 孔壁较易坍塌
松散	骨架颗粒有较大孔隙, 充填物少, 且松散	锹可以挖掘。天然坡多为主要颗粒的安息角。坑壁易坍塌	钻进较容易。钻进中孔壁易坍塌

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)规定,碎石类土密实度可根据重型动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 按表 1-15 进行分级。当缺乏试验数据时,碎石土平均粒径大于 50 mm 或最大粒径大于 100 mm 时,可按表 1-16 分级。

表 1-15 碎石土密实度划分标准(《公路桥涵地基与基础设计规范》)

标准贯入锤击数 $N_{63.5}$	密实度	标准贯入锤击数 $N_{63.5}$	密实度
$N_{63.5} \leq 5$	松散	$10 < N_{63.5} \leq 20$	中密
$5 < N_{63.5} \leq 10$	稍密	$N_{63.5} > 20$	密实

注:① 本表适用于平均粒径小于或等于 50 mm 且最大粒径不超过 100 mm 的卵石、碎石、圆砾、角砾。

② 表内 $N_{63.5}$ 为经修正后锤击数的平均值。

表 1-16 碎石类土密实程度野外鉴别(《公路桥涵地基与基础设计规范》)

密实度	骨架颗粒含量和排列	可挖性	可钻性
松散	骨架颗粒质量小于总质量的 60%, 排列混乱, 大部分不接触	锹可以挖掘, 井壁易坍塌, 从井壁取出大颗粒后, 立即坍塌	钻进较易, 钻杆稍有跳动, 孔壁易坍塌
中密	骨架颗粒质量等于总质量的 60%~70%, 呈交错排列, 大部分接触	锹镐可挖掘, 井壁有掉块现象, 从井壁取出大颗粒处, 能保持凹面形状	钻进较困难, 钻杆、吊锤跳动不剧烈, 孔壁有坍塌现象
密实	骨架颗粒质量大于总质量的 70%, 呈交错排列, 连续接触	锹镐挖掘困难, 用撬棍方能松动, 井壁较稳定	钻进困难, 钻杆、吊锤跳动剧烈, 孔壁较稳定

2. 粗颗粒土(无黏性土)的潮湿程度

除密实程度以外,潮湿程度对碎石类土和砂类土的工程性质也有一定影响。碎石类土和砂类土的潮湿程度按饱和度的大小来划分,见表 1-17。从表 1-17 可看出,当饱和度 $S_r > 80\%$ 时,即可视为饱和,这是因为当 $S_r > 80\%$ 时,土中虽仍有少量气体,但大都是封闭气体,故可视为饱和土。

表 1-17 碎石类土及砂类土潮湿程度划分标准

潮湿程度	饱和度 $S_r / \%$	潮湿程度	饱和度 $S_r / \%$
稍湿	$S_r \leq 50$	饱和	$S_r > 80$
潮湿	$50 < S_r \leq 80$		

二、黏性土的物理状态

1. 黏性土(细粒土)的稠度

黏性土最主要的物理状态特征是它的稠度。稠度是指土的软硬程度或土对外力引起变形或破坏的抵抗能力。土中含水率很低时，水都被土颗粒表面的电荷紧紧吸着于颗粒表面，成为强结合水。强结合水的性质接近于固态。因此，当土粒之间只有强结合水时[图 1-14 (a)]，按水膜厚薄不同，土呈现固态或半固态。

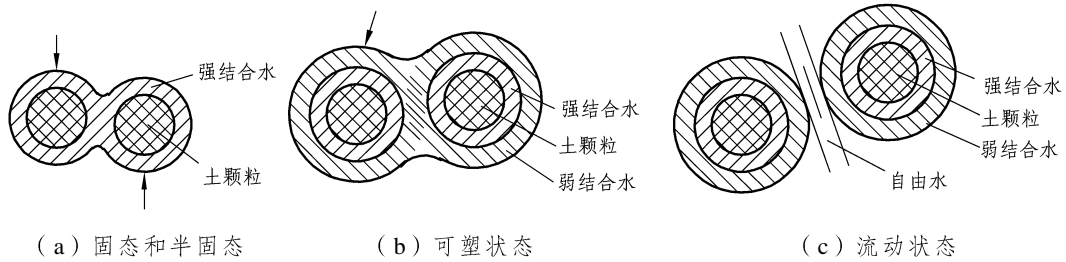


图 1-14 土中水与稠度状态

随着含水率增加，被吸附在土颗粒周围的水膜加厚，土粒周围除强结合水外还有弱结合水，如图 1-14 (b)。弱结合水受土粒的引力作用呈黏滞状态，不能传递静水压力，不能自由流动，但受力作用时可以变形，能从水膜较厚处向邻近较薄处移动。当含水率在一定范围时，土体受外力作用可以改变形状而不产生裂纹，外力取消后仍然保持形状的性质，称为可塑性。弱结合水的存在是土具有可塑性的原因。土处在可塑状态的含水率变化范围，大体上相当于土粒所能够吸附弱结合水的能力。这一范围的大小主要决定于土的比表面积和矿物成分。黏性大的土比表面积大，矿物亲水能力强的土(例如蒙脱土)，能吸附较多的结合水的土，它的可塑性含水率的变化范围也必定大。

当含水率继续增加，土中除结合水外，已有相当数量的水处于电场引力影响范围以外，成为自由水。这时土粒之间被自由水所隔开[图 1-14 (c)]，土体不能承受任何剪应力，而呈流动状态。

2. 稠度界限

土从一种状态进入另外一种状态的分界含水率称为土的特征含水率，或称稠度界限。工程上常用的稠度界限有液性界限 w_L 和塑性界限 w_p ，如图 1-15。

液性界限 (w_L) 简称液限，相当于土从塑性状态转变为液性状态时的分界含水率，是弱结合水含量达到最大时的含水率，是土体处于黏滞塑性状态时的含水率。在该界限时，土体出现一定的流动阻力即最小可量度的剪切强度，理论上是强度“从有到无”的分界点。

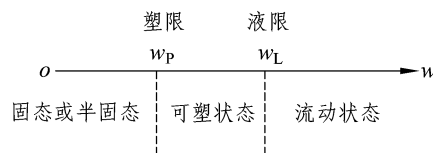


图 1-15 黏性土的物理状态与含水率的关系

塑性界限 (w_p)，简称塑限，相当于土从半固体状态转变为塑性状态时的含水率。

这时，土中水的形态大约是强结合水含量达到最大时的含水率。

现在，液限 w_L 、塑限 w_p 用液、塑限联合测定仪测定，详见《铁路工程土工试验规程》《公路工程土工试验规程》。但是，所有这些测定方法仍然是根据表象观察土在某种含水率下是否“流动”或者是否“可塑”，而不是真正根据土中水的形态来划分的。实际上，土中水的形态，定性区分比较容易，定量划分则颇为困难。目前尚不能够定量地以结合水膜的厚度来确定液限或塑限。从这个意义上说，液限和塑限与其说是一种理论标准，不如说是一种人为确定的标准。尽管如此，并不妨碍人们去认识细粒土随着含水率的增加，可以从固态或半固态变为塑态再变为液态的特性，而实测的塑限和液限则是一种近似的定量分界含水率。

目前，当确定土的液限值用于了解土的物理性质及国际交流时，采用 76 g 平衡锤下沉深度 17 mm 时的含水率或碟式仪法确定液限；而用于工程按现行标准《岩土工程勘察规范》(GB 50021) 和《铁路工程岩土分类标准》(TB 10077) 等进行黏性土分类和确定黏性土承载力标准时，需按锥体沉入土中 10 mm 确定的液限计算塑性指数、液性指数和含水比。塑限采用平衡锤下沉深度 2 mm 所对应的含水率。

3. 塑性指数和液性指数

(1) 塑性指数。

从图 1-15 可看出，液限和塑限是土处于可塑状态的上限含水率和下限含水率。塑性指数等于土的液限含水率与塑限含水率之差，用 I_p 表示。

$$I_p = w_L - w_p \quad (1-29)$$

规范规定塑性指数通常用不带“%”符号的数字表示。

塑性指数表示黏性土处于可塑状态时含水率的变化范围。塑性指数愈大，说明土中含有的结合水愈多，也就表明土的颗粒愈细或矿物成分吸附水的能力愈大。因此，塑性指数是一个能比较全面反映土的组成情况（包括颗粒级配、矿物成分等等）的物理状态指标。

生成条件相似（即土的结构和状态相似）、塑性指数相近的土，一般均有相近的物理性质；同时，塑性指数的测定方法简便。因此，规范采用塑性指数作为黏性土的分类指标，见表 1-18。

表 1-18 粉土及黏性土按塑性指数分类

塑性指数 I_p	土的名称
$I_p > 17$	黏土
$10 < I_p \leq 17$	粉质黏土
$I_p \leq 10$	粉土

(2) 液性指数。

土的比表面积和矿物成分不同，吸附结合水的能力也不同。因此，同样的含水率

对于黏性高的土，水的形态可能全是结合水，而对于黏性低的土，则可能有相当部分的水已经是自由水。换句话说，仅仅知道含水率的绝对值，并不能说明土处于什么状态。要说明细粒土的稠度状态，需要有一个表征土的天然含水率与分界含水率之间相对关系的指标，这就是液性指数 I_L ：

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (1-30)$$

《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)对黏性土的潮湿(软硬)程度按液性指数划分，如表 1-19；《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)的分类见表 1-20。

表 1-19 黏性土的状态分类(《铁路桥涵地基和基础设计规范》)

液性指数 I_L	状态	液性指数 I_L	状态
$I_L \leq 0$	坚硬	$0.5 < I_L \leq 1$	软塑
$0 < I_L \leq 0.5$	硬塑	$I_L > 1$	流塑

表 1-20 黏性土的状态分类(《公路桥涵地基与基础设计规范》)

液性指数 I_L	状态	液性指数 I_L	状态
$I_L \leq 0$	坚硬	$0.75 < I_L \leq 1$	软塑
$0 < I_L \leq 0.25$	硬塑	$I_L > 1$	流塑
$0.25 < I_L \leq 0.75$	可塑		

从图 1-15 可以看出：当 $w < w_p$ 时，天然土处于固态、半固态；当 $w \geq w_L$ 时，土处于流动状态；当 w 在 w_p 和 w_L 之间时，土处于可塑状态。可见图 1-15 和表 1-19、表 1-20 是一致的。

【例题 1-4】有一完全饱和黏性土样，经试验测得其天然含水率 $w = 30\%$ ，土粒相对密度为 2.73，液限 $w_L = 33\%$ ，塑限 $w_p = 17\%$ ，试确定该土样的孔隙比、干密度、饱和密度并确定土样的名称及状态。

【解】因土样是完全饱和的，所以其饱和度为 $S_r = 1$ 。

由 $S_r = \frac{w \cdot G_s}{e} = 1$ 求得土样孔隙比：

$$e = w \cdot G_s = 0.3 \times 2.73 = 0.82$$

土样干密度： $\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} = \frac{2.73}{1+0.82} = 1.5 \text{ g/cm}^3$

土样的饱和密度： $\rho_{\text{sat}} = \frac{\rho_s + e \cdot \rho_w}{1+e} = \frac{2.73 + 0.82 \times 1}{1+0.82} = 1.95 \text{ g/cm}^3$

土样塑性指数： $I_p = w_L - w_p = 33 - 17 = 16$

查表 1-18，可知此土样为粉质黏土。



黏性土的物理状态
教学案例

$$\text{土样的液性指数: } I_L = \frac{w - w_p}{I_p} = \frac{30 - 17}{16} = 0.81$$

查表 1-19 或表 1-20, 可知此粉质黏土处于软塑状态。

【例题 1-5】有 A、B、C 三种土样, 其天然含水率、液限、塑限见表 1-21, 试确定土的名称及状态。

【解】土样的试验数据及计算结果见表 1-21。

表 1-21 试验数据及计算结果

土样编号	天然含水率 $w / \%$	液限含水率 $w_L / \%$	塑限含水率 $w_p / \%$	塑性指数 $I_p = w_L - w_p$	液性指数 $I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$	土的名称	土的状态
A	44.0	48.0	26.2	21.8	0.82	黏土	软塑
B	34.5	33.2	21.0	12.2	1.11	粉质黏土	流塑
C	23.2	31.2	21.1	10.1	0.21	粉质黏土	硬塑

第五节 土的工程分类

自然界中土的种类很多, 工程性质各异, 根据其具体使用目的有不同的分类方法。合理的分类能比较恰当地选择定量分析的指标和评价土(岩)的工程性质, 有利于进行工程设计和施工。由于各部门对土的工程性质的着眼点不完全相同, 所以国内使用的土名和土的分类法并不统一, 各个部门使用各自部门的规范。

一、土的工程分类的依据

从土的组成可以知道, 自然界中的各种土, 大体上可以分为两大类: 粗粒土和细粒土。

粗粒土的工程性质, 如透水性、压缩性和强度等, 很大程度上取决于土的颗粒级配。因此, 粗粒土按其级配组成再分成细类。

细粒土的工程性质不仅取决于土的颗粒级配, 还与土粒的矿物成分有密切的关系。可以认为, 比表面积和矿物成分在很大程度上决定了土的性质。直接量测和鉴定土的比表面积和矿物成分均比较困难, 但比表面积和矿物成分对土影响的直接表现是土吸附结合水的能力。反映土吸附结合水能力的指标有液限 w_L 、塑限 w_p 、塑性指数 I_p 。根据长期以来很多试验结果的统计分析所得的结论, 在这 3 个指标中, 液限 w_L 、塑性指数 I_p 与土的工程性质的关系更密切、规律性更强。因此, 国内外对细粒土的分类, 多用塑性指数 I_p 或者液限 w_L 加塑性指数 I_p 作为分类指标。

下面主要介绍《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019) 的分类法。

二、《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017) 分类法

《铁路桥涵地基和基础设计规范》将地基分为岩石、碎石土、砂土、粉土、黏性土和特殊性岩土等等。

(一) 岩 石

岩石为颗粒间具有连接牢固、呈整体或具有节理裂隙的地质体。在铁路工程中,岩石应按其坚硬程度、抗风化能力、软化程度进行分类。

1. 根据强度进行坚硬程度分级

岩石的坚硬程度应根据岩石饱和单轴抗压强度 R_c 按表 1-22 分为坚硬岩、较硬岩、较软岩、软岩和极软岩 5 个等级。

表 1-22 岩石坚硬程度分级

岩石单轴饱和抗压强度 R_c /MPa	$R_c > 60$	$60 \geq R_c > 30$	$30 \geq R_c > 15$	$15 \geq R_c > 5$	$R_c \leq 5$
坚硬程度	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩

2. 新鲜岩石抗风化能力的分级

新鲜岩石抗风化能力的分级应按表 1-23 进行。

表 1-23 新鲜岩石抗风化能力的分级

项 目	不易风化的		易风化的
软化性	不易软化的		易软化的
耐冻性	耐冻的		不耐冻的
岩浆岩的结构	细粒的		粗粒的
造岩矿物	以石英为主	长石、辉石、角闪石较多	黄铁矿、橄榄石、黑云母含量较多
胶结物	硅质的	钙质的	泥质的
耐风化时间	暴露一两年尚不易风化		暴露后数日至数月即出现风化

3. 岩石按软化系数分类

岩石按软化系数 k_r 可分为易软化岩石和不易软化岩石: 当软化系数 $k_r \leq 0.75$ 时, 应定为易软化岩石; 当 $k_r > 0.75$ 时, 定为不易软化岩石。

软化系数为同一岩石中单轴饱和抗压强度与风干状态下岩石单轴抗压强度的比值。

除了以上岩石的分类外, 作为地基的岩体还可以按照节理宽度、节理发育程度、受地质构造影响程度、岩体完整程度、风化程度划分。

当岩石具有特殊成分、特殊结构或特殊性质时, 应定为特殊性岩石, 如易溶性岩

石、膨胀性岩石、崩解性岩石、盐渍化岩石等。

(二) 碎石土

碎石土为粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过总质量 50% 的土。

1. 碎石土按颗粒形状与粒组含量分类

碎石土按颗粒形状与粒组含量分为 8 类，如表 1-24。

表 1-24 碎石土的分类

土的名称	颗粒形状	粒组含量
漂石土	浑圆或圆棱形为主	粒径大于 200 mm 颗粒的质量超过总质量的 50%
块石土	尖棱状为主	
卵石土	浑圆或圆棱形为主	粒径大于 60 mm 颗粒的质量超过总质量的 50%
碎石土	尖棱状为主	
粗圆砾土	浑圆或圆棱形为主	粒径大于 20 mm 颗粒的质量超过总质量的 50%
粗角砾土	尖棱状为主	
细圆砾土	浑圆或圆棱形为主	粒径大于 2 mm 颗粒的质量超过总质量的 50%
细角砾土	尖棱状为主	

注：分类时应根据粒径分组，由大到小，以最先符合者确定。

2. 碎石土按密实程度分类

碎石土的密实度，可现场根据结构特征、天然坡和开挖情况、钻探情况进行鉴别，见表 1-14。

3. 碎石土按潮湿程度分类

碎石土按潮湿程度分类可根据饱和度按表 1-17 划分。

(三) 砂 土

砂土为粒径大于 2 mm 的颗粒含量不超过总质量 50% 且粒径大于 0.075 mm 的颗粒超过总质量 50% 的土。

1. 砂土根据粒组含量分类 (表 1-25)

表 1-25 砂土根据粒组含量分类

土的名称	粒组含量
砾砂	粒径大于 2 mm 的颗粒的质量占总质量的 25% ~ 50%
粗砂	粒径大于 0.5 mm 的颗粒的质量超过总质量的 50%

中砂	粒径大于 0.25 mm 的颗粒的质量超过总质量的 50%
细砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒的质量超过总质量的 85%
粉砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒的质量超过总质量的 50%

注：分类时应根据颗粒级配，由大到小，以最先符合者确定。

2. 砂土按密实程度分类

砂土密实度可根据相对密实度 D_r 、标准贯入锤击数 N 按表 1-12 分类。

3. 砂土按潮湿程度分类

砂土按潮湿程度分类可根据饱和度按表 1-17 划分。

(四) 粉 土

粉土为塑性指数 $I_p \leq 10$ 且粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量少于总质量 50% 的土。

粉土的密实程度根据孔隙比 e 划分，其潮湿程度应根据天然含水率 w 划分，见表 1-26。

表 1-26 粉土的按密实程度与潮湿程度分类

密实程度分类		潮湿程度分类	
孔隙比 e	密实程度	天然含水率 $w/\%$	潮湿程度
$e < 0.75$	密 实	$w < 20$	稍 湿
$0.75 \leq e \leq 0.90$	中 密	$20 \leq w \leq 30$	潮 湿
$e > 0.90$	稍 密	$w > 30$	饱 和

(五) 黏性土

黏性土为塑性指数 $I_p > 10$ 且粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过总质量 50% 的土。

1. 黏性土根据塑性指数分类

黏性土根据塑性指数的划分见表 1-18，液限采用 76 g 平衡锤、入土深度为 10 mm 的数值。

2. 黏性土根据液性指数分类

黏性土根据液性指数 I_L 进行软硬状态分类，见表 1-19。

3. 黏性土根据沉积年代分类

(1) 老黏性土：第四纪晚更新世 (Q_3) 及以前年代沉积的黏性土。这种土沉积的年代很久，经受了很长的地质作用，因此土密实而坚硬，强度高，压缩性和透水性小，压缩模量一般大于 10 MPa。

(2) 一般黏性土：第四纪全新世 (Q_4) 沉积的黏性土。这种土的分布范围很广，工程中经常遇到，压缩模量一般在 4~15 MPa，透水性较小或很小。

(3) 新近沉积的黏性土：在人类文化期 (Q_4^2) 以来沉积的黏性土，沉积年代一般

不超过 5000 年，这种土的工程性质较差。

(六) 塑性图细粒土分类法

用塑性指数 I_p 对细粒土进行分类虽较简便，但分类界限最高为 17，不能区别不同的高塑性土，而且相同塑性指数的细粒土可以有不同的液限和塑限，液限在塑性指标中是最敏感的，故相同塑性指数的土的性质也会不同。因此，用塑性指数 I_p 和液限 w_L 两个指标对细粒土进行分类会比只用塑性指数一个指标更加合理。卡萨格兰德 (A. Casagrande) 统计了大量试验资料后首先提出了按塑性指数 I_p 和液限 w_L 对细粒土分类定名的塑性图。

当采用圆锥仪法试验，取平衡锤质量为 76 g、圆锥仪入土深度为 10 mm 的含水率为液限时，按表 1-27 分类。

表 1-27 细粒土按塑性图分类

一级名称		二级名称			
		液限	名称	塑性图	
粉土	塑性指数 $I_p \leq 10$ 且粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过全部质量 50% 的土	$w_L < 40\%$	低液限粉土	<p>图中：C 为黏土，M 为粉土，H 为高液限，L 为低液限，如 ML 代表低液限粉土；O 表示有机质土。</p>	
		$w_L \geq 40\%$	高液限粉土		
黏性土	粉质黏土	$10 < I_p \leq 17$	$w_L < 40\%$		低液限粉质黏土
			$w_L \geq 40\%$		高液限粉质黏土
黏性土	黏土	$I_p > 17$	$w_L < 40\%$		低液限黏土
			$w_L \geq 40\%$		高液限黏土
有机土		有机质含量大于 5%			

三、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363-2019) 分类法

《公路桥涵地基与基础设计规范》将土分为岩石、碎石土、砂土、粉土、黏性土和特殊性岩土。

(一) 岩石

岩石为颗粒间具有连接牢固、呈整体或具有节理裂隙的地质体。作为公路桥涵地基，除应确定岩石的地质名称外，尚应按规定划分其坚硬程度、风化程度、完整程度、节理发育程度并进行分类。

1. 根据强度进行坚硬程度分级

岩石的坚硬程度应根据岩块的饱和单轴抗压强度标准值按表 1-28 分为坚硬岩、较硬岩、较软岩、软岩和极软岩 5 个等级。

表 1-28 岩石坚硬程度分级

坚硬程度类别	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩
饱和单轴抗压强度标准值 f_{rk} /MPa	$f_{rk} > 60$	$60 \geq f_{rk} > 30$	$30 \geq f_{rk} > 15$	$15 \geq f_{rk} > 5$	$f_{rk} \leq 5$

2. 根据风化程度分级

岩石按风化程度分级，见表 1-29。

表 1-29 岩石的风化程度分级

风化程度	野外特征	风化程度系数指标	
		波速比 k_v	风化系数 k_f
未风化	岩质新鲜，偶见风化痕迹	0.9~1.0	0.9~1.0
微风化	结构基本未变，仅节理面有渲染或略有变色，有少量风化痕迹	0.8~0.9	0.8~0.9
中风化	结构部分破坏，沿节理面有次生矿物，风化裂隙发育，岩体被切割成岩块，用镐难挖，岩心钻方可钻进	0.6~0.8	0.4~0.8
强风化	结构大部分破坏，矿物成分显著变化，风化裂隙很发育，岩体破碎，用镐可挖，干钻不易钻进	0.4~0.6	< 0.4
全风化	结构基本破坏，但尚可辨认，有残余结构强度，可用镐挖，干钻可钻进	0.2~0.4	—
残积土	组织结构全部破坏，已风化成土状，锹镐易挖掘，干钻易钻进，具可塑性	< 0.2	—

- 注：① 波速比 k_v 为风化岩石与新鲜岩石纵波速度之比。
 ② 风化系数 k_f 为风化岩石与新鲜岩石单轴抗压强度之比。
 ③ 岩石风化程度除按表中野外特征和定量指标划分外，也可根据当地经验划分。
 ④ 花岗岩类岩石可采用标准贯入试验划分为强风化、全风化、残积土。
 ⑤ 泥岩和半成岩，可不进行风化程度划分。

3. 按软化系数分级

岩石按软化系数不同可分为软化岩石和不软化岩石：当软化系数等于或小于 0.75 时，应定为软化岩石；大于 0.75 时，定为不软化岩石。

4. 根据完整程度分级

岩体完整程度根据完整性指数按表 1-30 分为完整、较完整、较破碎、破碎和极破碎 5 个等级。

表 1-30 岩体完整程度划分

完整程度等级	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎
完整性指数	>0.75	0.75~0.55	0.55~0.35	0.35~0.15	<0.15

注：岩石完整性指数为岩体纵波速度与岩块纵波速度之比的平方。

5. 根据节理发育程度分类

岩体节理发育程度根据节理间距按表 1-31 分为节理很发育、节理发育、节理不发育 3 类。

表 1-31 岩体节理发育程度的分类

发育程度	节理不发育	节理发育	节理很发育
节理间距/mm	>400	200~400	20~200

当岩石具有特殊成分、特殊结构或特殊性质时，应定为特殊性岩石，如易溶性岩石、膨胀性岩石、崩解性岩石、盐渍化岩石等。

(二) 碎石土

碎石土为粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过总质量 50% 的土。

1. 碎石土按颗粒形状与粒组含量分类

碎石土按颗粒形状与粒组含量分为 6 类，如表 1-32。

表 1-32 碎石土的分类

土的名称	颗粒形状	粒组含量
漂石	圆形或亚圆形为主	粒径大于 200 mm 的颗粒含量超过总质量的 50%
块石	棱角形为主	
卵石	圆形或亚圆形为主	粒径大于 20 mm 的颗粒含量超过总质量的 50%
碎石	棱角形为主	
圆砾	圆形或亚圆形为主	粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过总质量的 50%
角砾	棱角形为主	

注：碎石土分类时应根据粒组含量从大到小以最先符合者确定。

2. 碎石土按密实程度分类

碎石土的密实度，可根据重型动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 按表 1-15 分为松散、稍密、中密、密实 4 级。当缺乏有关试验数据时，若碎石土平均粒径大于 50 mm 或最大粒径大于 100 mm，可现场鉴别其密实度，见表 1-16。

(三) 砂 土

砂土为粒径大于 2 mm 的颗粒含量不超过总质量 50% 且粒径大于 0.075 mm 的颗粒超过总质量 50% 的土。

1. 砂土根据粒组含量分类 (表 1-33)

表 1-33 砂土根据粒组含量的分类

土的名称	粒组含量
砾砂	粒径大于 2 mm 的颗粒含量占总质量的 25% ~ 50%
粗砂	粒径大于 0.5 mm 的颗粒含量超过总质量的 50%
中砂	粒径大于 0.25 mm 的颗粒含量超过总质量的 50%
细砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过总质量的 85%
粉砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过总质量的 50%

注：砂土分类时根据粒组含量从大到小以最先符合者确定。

2. 砂土按密实程度分类

砂土密实度可根据标准贯入锤击数按表 1-13 分为 4 级。

(四) 粉土

粉土为塑性指数 $I_p \leq 10$ 且粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过总质量 50% 的土。

粉土的密实度应根据孔隙比 e 划分为密实、中密和稍密，其湿度应根据天然含水率 w 划分为稍湿、湿、很湿。密实度和湿度的划分见表 1-34。

表 1-34 粉土按密实度与湿度分类

密实度分类		湿度分类	
孔隙比 e	密实度	天然含水率 w	湿度
$e < 0.75$	密实	$w < 20$	稍湿
$0.75 \leq e \leq 0.90$	中密	$20 \leq w \leq 30$	湿
$e > 0.90$	稍密	$w > 30$	很湿

(五) 黏性土

黏性土为塑性指数 $I_p > 10$ 且粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过总质量 50% 的土。

- (1) 黏性土根据塑性指数分类，见表 1-18。
- (2) 黏性土根据液性指数 I_L 进行软硬状态分类，见表 1-20。
- (3) 黏性土根据沉积年代分类，见表 1-35。

表 1-35 黏性土按沉积年代分类

沉积年代	土的分类
第四纪晚更新世 (Q_3) 及以前	老黏性土
第四纪晚全新世 (Q_4)	一般黏性土
第四纪晚全新世 (Q_4) 以后	新近沉积黏性土

(六) 特殊性岩土

具有一些特殊成分、结构和性质的区域性地基土应定为特殊性土，如软土、膨胀

土、湿陷性土、红黏土、冻土、盐渍土和填土等。

1. 软 土

软土是指滨海、湖沼、谷地、河滩等处天然含水率高、天然孔隙比大、抗剪强度低且符合表 1-36 规定的细粒土，如淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等。

表 1-36 软土地基鉴别指标

指标名称	天然含水率 w	天然孔隙比 e	直剪内摩擦角 φ	十字板剪切强度 c_u	压缩系数 a_{1-2}
指标值	$\geq 35\%$ 或液限	≥ 1.0	宜小于 5°	< 35 kPa	宜大于 0.5 MPa^{-1}

2. 淤泥与淤泥质土

淤泥是在静水或缓慢的流水环境中沉积，并经生物化学作用形成，其天然含水率大于液限，天然孔隙比大于或等于 1.5 的黏性土。

淤泥质土是天然含水率大于液限而天然孔隙比小于 1.5 但大于等于 1.0 的黏性土或粉土。

3. 膨胀土

膨胀土是土中黏粒成分主要由亲水性矿物组成，同时具有显著的吸水膨胀和失水收缩特性，其自由膨胀率大于或等于 40% 的黏性土。

4. 湿陷性土

湿陷性土是浸水后产生附加沉降且湿陷系数大于或等于 0.015 的土。

5. 红黏土与次生红黏土

红黏土是碳酸盐岩系的岩石经红土化作用形成的液限大于 50 的高塑性黏土。

次生红黏土是红黏土经再搬运后仍保留其基本特征且液限大于 45 的土。

6. 盐渍土

盐渍土是土中易溶盐含量大于 0.3%，并具有溶陷、盐胀、腐蚀等工程特征的土。

7. 填 土

填土根据其组成和成因，可分为素填土、压实填土、杂填土、冲填土。素填土为由碎石土、砂土、粉土、黏性土等组成的填土；经过压实或夯实的素填土为压实填土；杂填土为含有建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂物的填土；冲填土为由水力充填泥沙形成的填土。

【例题 1-6】取烘干后的 500 g 土样筛析，表 1-37 中为留筛质量，底盘内试样质量为 20 g，试确定此土样的名称，并求此土样的不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 。



按《铁路桥涵地基和基础设计规范》的分类教学案例（例 1-6）

表 1-37 筛析试验结果

筛孔孔径/mm	2.0	1.0	0.5	0.25	0.075	底筛
留筛质量/g	50	150	150	100	30	20

【解】根据筛析结果，粒径大于 2 mm 的土粒质量占全部土质量的 10%，粒径大于 0.075 mm 颗粒的质量超过总质量的 50%，所以该土样是砂类土，具体计算见表 1-38。

表 1-38 筛析试验计算结果表

筛孔孔径/mm	2.0	1.0	0.5	0.25	0.075	底筛
留筛质量/g	50	150	150	100	30	20
累计留筛质量/g	50	200	350	450	480	500
大于筛孔孔径百分数/%	10	40	70	90	96	100
小于某粒径百分数/%	90	60	30	10	4	0

查表 1-25 或表 1-33，按表从上至下核对，粒径大于 0.5 mm 的土粒质量占全部土质量的 70%，大于表 1-25 或表 1-33 中关于粗砂的规定，且最先符合条件，所以该土样应定名为粗砂。

由表 1-38 计算结果知： $d_{10}=0.25$ mm， $d_{30}=0.5$ mm， $d_{60}=1.0$ mm。

$$\text{不均匀系数: } C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{1.0}{0.25} = 4$$

$$\text{曲率系数: } C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} = \frac{0.5^2}{1.0 \times 0.25} = 1$$



按《铁路桥涵地基和基础设计规范》的分类教学案例

第六节 土的击实性

填土受到夯击或碾压等动力作用后，孔隙体积会减小，密度将增大。在工程中，常见的土坝、公路路堤、铁路路堤等的填筑土料，都要求击实到一定的密实程度。其目的是改善土的力学性能，即减小填土的压缩性和透水性，提高其抗剪强度。软弱地基也可用击实改善其工程性质，以提高强度和减小变形。为了经济有效地将填土击实到符合工程要求的标准，有必要对填土的击实特性进行研究。常用的研究方法有两种：一种是在室内用击实仪进行击实试验；另一种是在现场用压实机具进行压实试验。后者属于施工课程的内容，本节仅介绍击实试验的方法和填土的击实特性等方面的一些基本问题。

一、击实试验

土的击实（或压实）就是利用工程机械挤紧土中的颗粒，增加土体单位体积内土粒的质量，减小孔隙比，增加密实度。其目的是提高土的强度，降低土的压缩性和透水性。土的压实效果常以干密度 ρ_d 或干重度 γ_d 来表示。

实践经验表明：在一定的击实能量下，土中的含水率适当时，压实的效果最好。这个适当的含水率称为最优含水率 w_{opt} ，与之相对应的干密度称为最大干密度 ρ_{dmax} ，相对应的干重度称为最大干重度 γ_{dmax} 。

土的最优含水率与最大干密度可在实验室内做击实试验测定。土的击实试验应该在比较符合实际施工机械效果的经验基础上，试验才可靠。但实际上，很难定量地确定出施工机械压实功能等现场因素。所以在实验室里，只能人为地规定某种击实试验方法作为标准击实方法。

铁路工程中击实试验根据土粒大小的不同分为轻型击实和重型击实，仪器构造见图 1-16。轻型击实击锤质量为 2.5 kg，落高 305 mm，单位体积击实功约为 600 kJ/m^3 ；重型击实击锤质量为 4.5 kg，落高 457 mm，单位体积击实功约为 2700 kJ/m^3 。

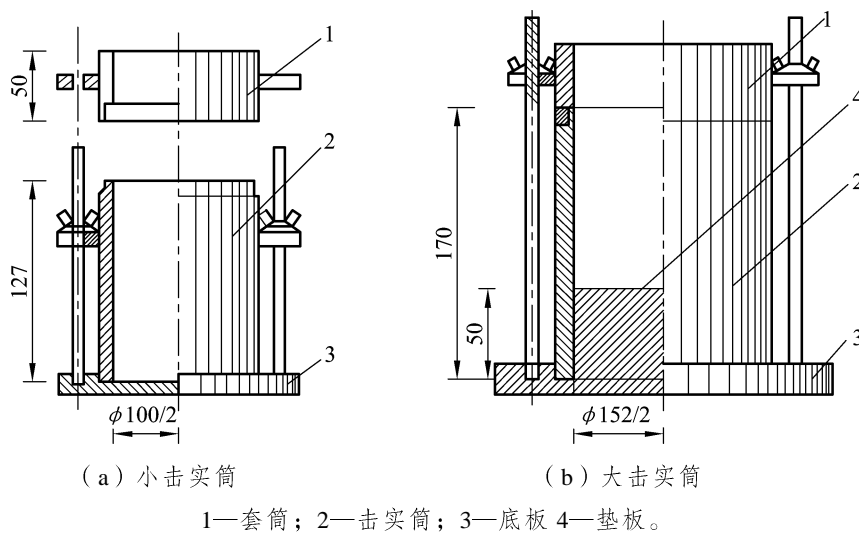


图 1-16 击实仪（单位：mm）

试验时，准备同一土质、在最优含水率附近依次相差约 2% 含水率的土样至少 5 个。将击实仪放在坚硬的地面上，安装好击实筒及护筒（大击实筒内还要放入垫块），击实筒内壁涂少许润滑油。每个试样应根据选用的试验类型，按规定分层击实。每层高度应大致相等，两层交界处层面应刨毛，所用试样的总量应使最后的击实面超出击实筒顶不大于 6 mm。击实完成后卸下套筒、刮平击实筒两端余土，将土推出称得质量为 m ，除以击实筒体积，即可计算出击实土样湿密度 ρ 。在试样中心处取 2 个代表性土样按烘干法测定其含水率 w ，相应土样的干密度可按 $\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$ 进行计算。

以含水率 w 为横坐标、干密度 ρ_d 为纵坐标，绘出如图 1-17 所示的 ρ_d-w 曲线，称为击实曲线。

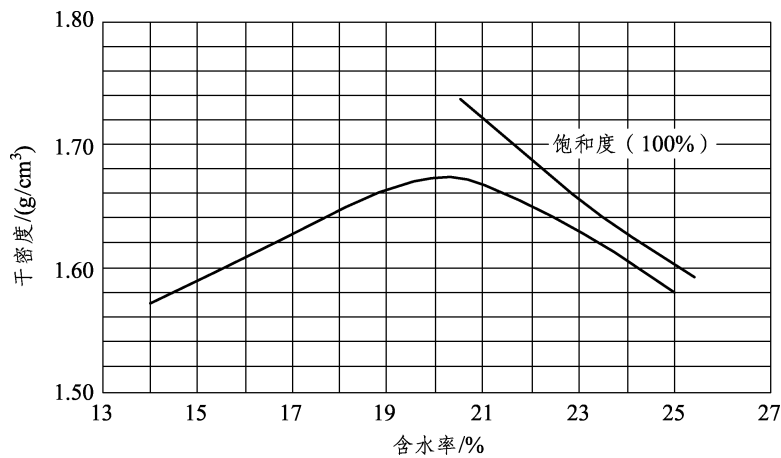


图 1-17 击实曲线

二、影响最大干密度（或最大干重度）的几个因素

（一）含水率的影响

从击实曲线图中可知：当含水率较低时，干密度较小；随着含水率的增大，干密度也逐渐增大，表明击实效果逐步提高；当含水率超过某一限值时，干密度则随含水率的增大而减小，即击实效果下降。这说明土的击实效果随含水率的变化而变化，并在击实曲线上出现一个干密度的峰值，这个峰值就是最大干密度 ρ_{dmax} ，相应的含水率就是最优含水率 w_{opt} 。

在压实过程中，土的含水率对所能达到的密实度起着非常大的作用。锤击或碾压的功需要克服土颗粒间的内摩阻力和黏结力，才能使土颗粒产生位移并互相靠近。土的内摩阻力和黏结力是随密实度而增加的。土的含水率小时，土颗粒间的内摩阻力大，压实到一定程度后，某一压实功不再能克服土的抗力，压实所得的干密度小。当土的含水率逐渐增加时，水在土颗粒间起着润滑作用，使土的内摩阻力减小，因此同样的压实功可以得到较大的干密度。在这个过程中，单位土体内空气的体积逐渐减小，而固体体积和水的体积则逐渐增加，所以土的密度增加。当土的含水率增加到超过某一限度后，虽然土的内摩阻力还在减少，但单位体积中空气的体积已减到最小限度，而水的体积却在不断增加。由于水是不可压缩的，因此在同样的击实功下，土的干密度反而逐渐减小。土的干密度与含水率就形成了图 1-17 上的驼峰形击实曲线。

在图 1-17 中，击实曲线右上方的一条线，称为饱和曲线，它表示土在饱和状态时的含水率与干密度之间的关系。由于土处于三相状态，当土被击实到最大密度时，土体孔隙中的空气不易排出，即使加大击实能量也不能将土中气体完全排出，所以击实的土体不可能达到完全饱和的程度。因此，当土的干密度相同时，击实曲线上各点的含水率必然都小于饱和曲线上相应的含水率，所以击实曲线一般都位于饱和曲线的左下侧，而不与饱和曲线相交。

（二）击实功能的影响

试验表明，同一种土的最优含水率与最大干密度不是一个固定的数值，而是随着击实能量的变化而变化的。从图 1-18 可以看出，当击实次数增加，土的最大干密度也随之增加，而最优含水率却相应减小。另外，在同一含水率时，土的干密度随击实次数的增加而增大，但超过一定击数时增加效果不再明显，这时增加击数就是浪费击实能量。所以，只有在最优含水率下，才能以最小的击实能量达到对应的最大干密度。

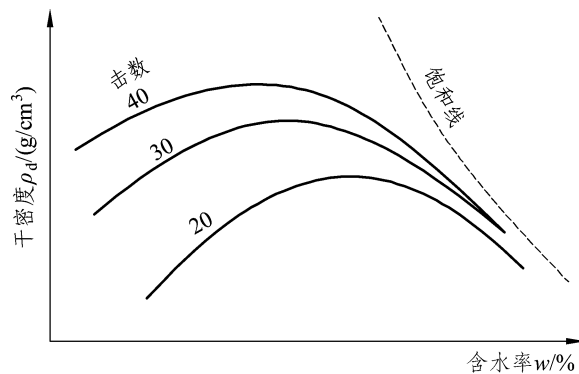


图 1-18 含水率与击实功的关系

另外，某一击实次数下的最大干密度值，可以在其他含水率下用增加击实次数的方法得到。但是，试验研究发现，这两种土的密度虽然相同，但其强度与水稳性却不一样：对应于最优含水率和最大干密度的土，强度最高，且在浸水后的强度也最大（即水稳性好）；而通过增加击实次数所得的土，遇水以后强度降低很多，甚至发生湿陷，水稳性较差。由于土坝、路堤等土工建筑物难免受水浸润，所以，在施工中控制填土的含水率，使其等于或接近最优含水率，是有其经济合理的现实意义的。

（三）不同土类的击实特性

土中黏粒愈多，在同一含水率下，黏粒周围的结合水膜则愈薄，土的移动阻力就愈大，击实也愈困难。所以最优含水率的数值，随土中黏粒含量的增加而增大，而最大干密度却随土中黏粒含量的增加而减小。

土的级配对压实效果也有很大影响，实践证明，均匀颗粒的土及单一尺寸的土，都难以碾压密实。颗粒大小不均匀、级配良好的土，在击实荷载作用下，容易挤紧。所以同类型的土，由于颗粒级配不同，最优含水率和最大干密度也并不一样。

图 1-19 中 1~5 曲线是粒径从大到小 5 种土料在同一标准击实条件下试验所得的曲线，从 5 条击实曲线中可以看出，随着土颗粒粒径逐渐减小，其最大干密度逐渐减小，而最优含水率逐渐增加。

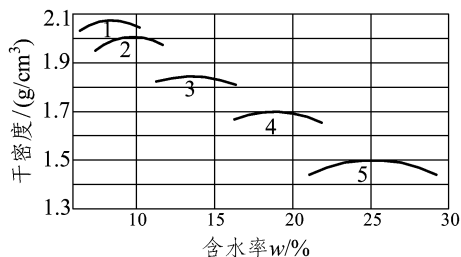


图 1-19 土颗粒粒径大小与含水率关系

【例题 1-7】用标准击实试验法测得土样密度及含水率如表 1-39，已知土粒相对密度 $G_s = 2.75$ ，求最大干密度、最优含水率及其相应的饱和度。

【解】(1) 按式 $\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$ 计算各个土样击实后的干密度数值，如表 1-39 所示。

表 1-39 击实试验结果

试验号	1	2	3	4	5	6
密度/(g/cm ³)	1.78	1.86	1.93	1.98	1.98	1.96
含水率/%	14.7	17.0	18.8	20.6	21.7	23.5
干密度/(g/cm ³)	1.55	1.59	1.62	1.64	1.63	1.59

(2) 以含水率 w 为横坐标、干密度 ρ_d 为纵坐标，绘击实曲线，如图 1-20 所示。

(3) 在击实曲线上，查得最优含水率 $w_{opt} = 21\%$ ，最大干密度 $\rho_{dmax} = 1.64 \text{ g/cm}^3$ 。

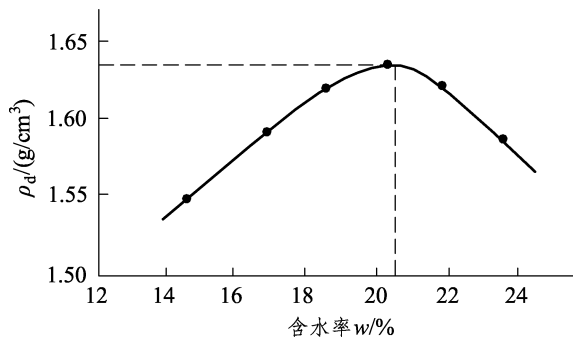


图 1-20 例 1-7 击实曲线

计算最大干密度所对应的孔隙比

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_{dmax}} - 1 = \frac{2.75}{1.64} - 1 = 0.68$$

相应的饱和度为

$$S_r = G_s \cdot \frac{w_{opt}}{e} = 2.75 \times \frac{21\%}{0.68} = 0.85$$

对一些中小型工程，当没有试验资料时，可用经验公式 (1-31) 估算最大干重度：

$$\gamma_{d\max} = \eta \frac{\gamma_w G_s}{1 + w_{\text{opt}} G_s} \quad (1-31)$$

式中 G_s ——土粒相对密度；
 γ_w ——水的重度 (kN/m^3)；
 η ——经验系数，黏土为 0.95，粉质黏土为 0.96，粉土为 0.97；
 w_{opt} ——最优含水率，按当地经验或取 $w_p + 2\%$ ，其中 w_p 为塑限。

三、填土的含水率和碾压标准的控制

由于黏性填土存在着最优含水率，因此在填土施工时应将土料的含水率控制在最优含水率左右，以期用较小的能量获得最好的压实效果。当含水率控制在最优含水率的干侧（即小于最优含水率）时，击实土的结构常具有凝聚结构的特征。这种土比较均匀，强度较高，较脆硬，不易压密，但浸水时容易产生附加沉降。当含水率控制在最优含水率的湿侧（即大于最优含水率）时，土具有分散结构的特征。这种土的可塑性大，适应变形的能力强，但强度较低，且具有不等向性。所以，填土含水率比最优含水率偏高或偏低，填土的性质各有优缺点，在设计土料时要根据对填土提出的要求和当地土料的天然含水率，选定合适的含水率。

工程中填土碾压标准常采用压实系数 K 、地基系数 K_{30} 、相对密度 D_r 、孔隙率 n 来控制。



填土含水率和碾压标准的控制



填土含水率与碾压标准的控制教学案例

1. 压实系数 K

压实系数为填土压实后干密度与标准击实试验得出的最大干密度之比，见式 (1-32)。

$$K = \frac{\rho_d}{\rho_{d\max}} \times 100\% \quad (1-32)$$

铁路基床以下路堤填料的压实标准见表 1-40。

表 1-40 基床以下路堤填料的压实标准 [《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)]

铁路等级与设计速度		填料	压实标准		
			压实系数 K	地基系数 K_{30} /(MPa/m)	7 d 饱和和无侧限 抗压强度/kPa
客货共线铁路、 城际铁路有 砟轨道	200 km/h	细粒土	≥ 0.9	≥ 90	—
		砂类土、细砾土	≥ 0.9	≥ 110	—
		碎石类土及粗砾土	≥ 0.9	≥ 130	—
		化学改良土	≥ 0.9	—	≥ 250

续表

铁路等级与设计速度		填料	压实标准		
			压实系数 K	地基系数 K_{30} /(MPa/m)	7 d 饱和和无侧限 抗压强度/kPa
客货共线铁路、 城际铁路有 砟轨道	160 km/h	细粒土、砂类土	≥ 0.9	≥ 80	—
		砾石类、碎石类土	≥ 0.9	≥ 110	—
	120 km/h	块石类	≥ 0.9	≥ 130	—
		化学改良土	≥ 0.9	—	≥ 200
高速铁路及无砟轨道客货 共线铁路、城际铁路		砂类土及细砾土	≥ 0.92	≥ 110	—
		碎石类土及粗砾土	≥ 0.92	≥ 130	—
		化学改良土	≥ 0.92	—	≥ 250
重载铁路		细粒土、砂类土	≥ 0.92	≥ 90	—
		细砾土	≥ 0.92	≥ 110	—
		碎石类土及粗砾土	≥ 0.92	≥ 130	—
		化学改良土	≥ 0.92	—	≥ 250

公路路基压实度（压实系数）要求如表 1-41。

表 1-41 路堤压实系数标准[《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)]

路基部位		路面底面以下深度 /m	压实度 $K/\%$		
			高速公路 一级公路	二级公路	三、四级公路
上路床		0~0.3	≥ 96	≥ 95	≥ 94
下路床	轻、中等及重交通	0.3~0.8	≥ 96	≥ 95	≥ 94
	特重、极重交通	0.3~1.2			—
上路堤	轻、中等及重交通	0.8~1.5	≥ 94	≥ 94	≥ 93
	特重、极重交通	1.2~1.9			—
下路堤	轻、中等及重交通	>1.5	≥ 93	≥ 92	≥ 90
	特重、极重交通	>1.9			

注：表列压实度以现行《公路工程试验规程》(JTG E40) 重型击实试验为准。

2. 地基系数 K_{30}

地基系数 K_{30} 是通过试验测得的直径 30 cm 荷载板下沉 1.25 mm 时对应的荷载强度 p_s (MPa) 与其下沉量 1.25 mm 的比值：

$$K_{30} = \frac{p_s}{S_s} \quad (\text{MPa/m})$$

表 1-42 为柳南客专路基 K_{30} 检测试验结果，图 1-21 为根据表 1-42 所绘 $p-s$ 曲线，自曲线查得 $K_{30} = \frac{0.2}{1.25} = 160 \text{ MPa/m}$ 。

表 1-42 地基系数 K_{30} 试验结果

加载顺序	压力表或测力计 读数/MPa	承载板荷载 强度/MPa	百分表读数 (0.01 mm)				累计沉降量 s/mm
			1	2	3	平均值	
预压	0.1	0.01	13	11	—	12	0.12
复位	0.0	0.00	0	0	—	0	0.00
1	1.1	0.04	39	37	—	38	0.38
2	2.7	0.08	60	60	—	60	0.60
3	4.2	0.12	81	83	—	82	0.82
4	5.8	0.16	102	100	—	101	1.01
5	7.3	0.20	125	125	—	125	1.25

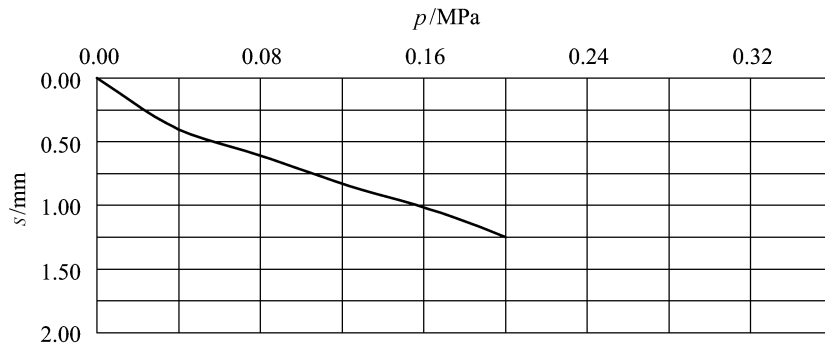


图 1-21 根据 K_{30} 试验结果所绘 $p-s$ 曲线

3. 相对密度 D_r

利用相对密度来控制压实标准的相关内容见本章第四节。

4. 孔隙率 n

孔隙率 n 为土的孔隙体积与总体积的比值，表 1-43 为柳南客专路基孔隙率 n 检测试验结果。

表 1-43 路基孔隙率试验报告

土工试验 报告编号	LN-V-ZT12J2- TL201003-1		颗粒密度/ (g/cm^3)	2.54	试验方法 灌水法	最优含水率 /%	11.0
填料类型	土质砾砂	标高/m	83.631	碾压遍数	8	填土厚度/cm	30
检测位置		DK720+760 左 1 m		DK720+775 中		DK720+795 右 1 m	
灌注前水的体积/ cm^3		11 000		12 000		11 100	
灌注后水的体积/ cm^3		3110		4000		3150	
试坑体积/ cm^3		7890		8000		7950	
土的质量/g		16 990		16 720		16 300	
土的含水率/%		11.0		10.5		11.0	
土的湿密度/(g/cm^3)		2.15		2.09		2.05	

续表

土的干密度/(g/cm ³)	1.94	1.89	1.85
孔隙率/%	24	26	27
规定值/%	<31		
检测评定依据: 《客运专线铁路路基工程施工质量验收暂行标准》(铁建设[2005]160号)	试验意见: 该段路基基床以下路堤所检孔隙率符合设计要求		

四、粗粒土的压实性

砂和砂砾等粗粒土的压实性也与含水率有关,不过不存在一个最优含水率。一般在完全干燥或者充分洒水饱和的情况下容易压实到较大的干密度。粗粒土处于潮湿状态时,由于毛细压力增加了粒间阻力,压实干密度显著降低。粗砂在含水率为4%~5%,中砂在含水率为7%左右时,压实干密度最小,如图1-22。所以,在压实砂砾时要充分洒水使土料饱和。

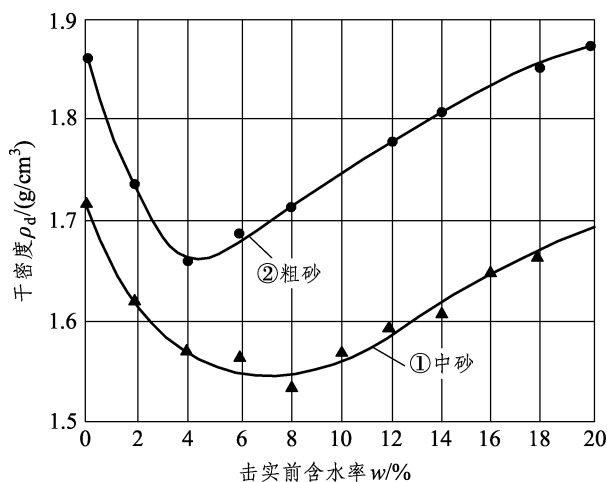


图 1-22 粗粒土的击实曲线

【例题 1-8】某均质土坝长 1.0 km,高 12 m,坝顶宽 8 m,坝底宽 44 m,要求压实系数不小于 0.95。天然料场中土料含水率为 21%,土粒相对密度为 2.72,土的天然密度为 1.78 g/cm³。试验测得最大干密度为 1.68 g/cm³,最优含水率为 20%,求填筑该土坝需从料场取土多少?

【解】土坝的体积 $V = \frac{1}{2}(8+44) \times 12 \times 1000 = 312\ 000\ \text{m}^3$

压实后干土料重 $G = K \cdot \gamma_{d\max} V = 0.95 \times 16.8 \times 312\ 000 = 4.98 \times 10^6\ \text{kN}$

天然土料的干密度 $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} = \frac{17.8}{1+21\%} = 14.71\ \text{kN/m}^3$

天然土料的体积 $V = \frac{G}{\gamma_d} = \frac{4.98 \times 10^6}{14.71} = 3.38 \times 10^5\ \text{m}^3$



土的物理性质与
工程分类习题

本章小结

本章主要学习了土的物理性质及土的工程分类、土的击实性。

土是岩石经过风化、剥蚀、搬运、沉积所形成的松散颗粒物，是由固体颗粒、水、气体所组成的三相体系。土的三相中，固体颗粒对土的工程性质影响最大，工程上用颗粒级配评价固体颗粒组成优劣。

表示土的三相组成在量上比例关系的 3 个实测指标和 6 个导出指标是土的物理性质的体现。3 个实测指标有密度、含水率、土粒相对密度，6 个导出指标是孔隙比、孔隙度、饱和度、干密度、饱和密度和浮重度。

土的物理状态对粗颗粒来说是其密实程度，判定指标有相对密实度和标准贯入锤击数；细粒土的物理状态是其软硬程度或稠度，可用液性指数来判定；另外，塑性指数是黏性土工程分类的依据。

土的工程分类是根据现场观测与室内试验综合考虑的结果。

土的击实性的测定方法有室内击实试验和现场压实试验。室内击实试验可以测定最优含水率和最大干密度。影响最大干密度的因素有含水率、击实功能、土的种类和级配，检测路基填筑质量的标准有压实度、地基系数、相对密度和孔隙率。

复习思考题

- 1-1 土是怎样形成的？风化作用分为哪几类？
- 1-2 按成因不同，土有哪几种沉积类型？
- 1-3 土由哪几部分组成？哪部分对土的工程性质起决定性作用？
- 1-4 颗粒级配曲线是如何绘出的？如何根据级配曲线判定土的级配组成？
- 1-5 土中的水分哪几类？对黏性土影响最大的是哪种水？
- 1-6 为什么不同种类的无黏性土的密实程度不能用天然孔隙比来表示，而要用土的相对密度来评价？
- 1-7 塑性指数和液性指数有什么物理意义？
- 1-8 对土进行分类，有什么实际意义？
- 1-9 影响干密度的因素有哪些？填土压实的判定标准有哪些？

习 题

1-1 有一块体积 $V=63 \text{ cm}^3$ 的原状土样，质量为 $m=110 \text{ g}$ ，烘干后质量为 $m_s=87 \text{ g}$ ，已知土粒的相对密度 $G_s=2.66$ 。求其天然密度 ρ 、天然含水率 w 、干密度 ρ_d 、饱和重度 γ_{sat} 、浮重度 γ' 、孔隙比 e 及饱和度 S_r 。

1-2 试用土的物理性质指标换算图证明下列物理指标的换算公式：

$$\text{孔隙率 } n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

$$\text{饱和度 } S_r = \frac{G_s \cdot w}{e}$$

1-3 已知饱和软土的塑性指数 $I_p=27$ ，液限 $w_L=57\%$ ，液性指数 $I_L=1.2$ ，土粒相对密度 $G_s=2.66 \text{ t/m}^3$ ，求孔隙比 e 。

1-4 有两个原状黏性土样，经试验测得其天然含水率 w 、液限 w_L 、塑限 w_p ，见表 1-44。试确定土样的名称与状态。

表 1-44 习题 1-4 试验数据

试样编号	天然含水率 $w/\%$	液限 w_L $\%$	塑限 w_p $\%$	塑性指数 I_L	液性指数 I_p	状态	名称
1	30.5	39.0	21.0				
2	21.0	31.0	17.0				

1-5 测得砂土的天然重度为 $\gamma=18.0 \text{ kN/m}^3$ ，含水率 $w=9.8\%$ ，土粒重度为 $\gamma_s=26.7 \text{ kN/m}^3$ ，最大孔隙比 $e_{\max}=0.655$ ，最小孔隙比 $e_{\min}=0.475$ 。试求砂土的天然孔隙比 e 及其相对密度 D_r ，并判定该土的密实程度。

1-6 某砂土筛析试验结果见表 1-45，试确定该砂样的名称。

表 1-45 习题 1-6 试验数据

粒径范围/mm	>2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075
粒组占干土总质量的百分数/%	9.5	19.6	20.2	38.4	12.3

1-7 某工地在填土施工过程中所用土料的含水率为 8%，为便于夯实，需在土料中加水，使其含水率增至 15%，试求每 10 kg 质量的土料的加水量。

1-8 某路基填土施工中，采用环刀法测得压实后土的密度 $\rho=1.85 \text{ g/cm}^3$ ，含水率 $w=7\%$ ，实验室标准击实试验测得土的最大干密度 $\rho_{d,\max}=1.68 \text{ g/cm}^3$ ，工程要求的压实系数 $K=0.94$ ，试判断施工质量是否达到要求？

