



高等职业技术教育“十三五”规划教材

TULIXUE_{YU}
DIJI

土力学与 地基

(含试验指导)

主 编 邢焕兰 吕玉梅



西南交通大学出版社

高等职业技术教育“十三五”规划教材

土力学与地基

(含试验指导)

主 编 邢焕兰 吕玉梅
副主编 付迎春 习淑娟
主 审 李立增

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

土力学与地基: 含试验指导 / 邢焕兰, 吕玉梅主编.
—成都: 西南交通大学出版社, 2016.4
高等职业技术教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5643-4623-2

I. 土... II. 邢... 吕... III. ①土力学—高等
职业教育—教材②地基—基础(工程)—高等职业教育—
教材 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 064723 号

高等职业技术教育“十三五”规划教材

土力学与地基

(含试验指导)

主编 邢焕兰 吕玉梅

*

责任编辑 曾荣兵

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼

邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://www.xnjdcbs.com>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 总印张: 15.75

总字数: 391 千

2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-4623-2

套价: 38.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

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，兼顾了交通运输部和铁道部双重规范，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

目 录

绪 论	1
第一章 土的物理性质与工程分类	3
第一节 土的生成	3
第二节 土的组成、结构与构造	4
第三节 土的物理性质指标	14
第四节 土的物理状态	24
第五节 土的工程分类	31
第六节 土的击实性	39
本章小结	46
复习思考题	46
习 题	47
第二章 土的渗透性	48
第一节 达西定律	48
第二节 渗透力与临界水力梯度	51
第三节 土的渗透变形	53
本章小结	58
复习思考题	59
习 题	59
第三章 土体中的应力计算	60
第一节 土中应力简介	60
第二节 土中自重应力的分布及计算	61
第三节 基底压力的分布与计算	64
第四节 附加应力的计算	68
本章小结	77
复习思考题	78
习 题	78
第四章 土的压缩性与地基沉降计算	80
第一节 概 述	80
第二节 土的压缩性	81
第三节 地基沉降量计算	93
第四节 地基沉降随时间变化的计算	100
第五节 地基容许沉降量与减小沉降的措施	104
本章小结	105
复习思考题	106
习 题	106

第五章 土的抗剪强度 108

第一节 概 述 108

第二节 土的强度理论与强度指标 110

第三节 强度指标的测定方法 114

本章小结 121

复习思考题 122

习 题 122

第六章 土压力 124

第一节 概 述 124

第二节 静止土压力 127

第三节 朗肯土压力理论 128

第四节 库仑土压力理论 134

第五节 常见情况下土压力的计算 138

本章小结 146

复习思考题 146

习 题 147

第七章 天然地基承载力与地基强度检算 148

第一节 地基承载力简介 148

第二节 现场荷载试验确定地基容许承载力 149

第三节 理论公式确定地基容许承载力 152

第四节 按规范法确定地基容许承载力 155

第五节 地基强度检算 169

第六节 几种确定地基容许承载力的方法比较 172

本章小结 175

复习思考题 176

习 题 176

第八章 地基处理 178

第一节 概 述 178

第二节 换填垫层法 179

第三节 预压法 184

第四节 压实地基和夯实地基 191

第五节 复合地基 199

第六节 注浆加固 215

本章小结 219

复习思考题 219

参考文献 221

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，如香港的宝城大厦事故、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。只有掌握了土力学的这些基本知识，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

本门课程主要讲述土的各种基本性质，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的地基处理等。它包含的主要内容有：

（1）土的物理和力学性质——与地基基础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；而地基则是研究在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，地基处理的方法。

三、本课程的学习要求

根据教学计划和教学大纲的要求，本课程将介绍有关路基和桥涵建筑所必需的土力学与地基基础的基本知识。

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》(TB10102—2010)、《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)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》(TB10002.5—2005)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ D63—2007)为依据；论述地基处理时，以《建筑地基处理技术规范》(JTJ79—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年布辛纳斯克(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。具体表现在：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；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；根据现代建筑的对地基的要求，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、深基在土重力作用下的应力状态，还可模拟地震力作用下的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，满足了现代铁路桥梁与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. 土的形成及沉积形式；
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、三个基本试验指标概念及测定方法、六个导出指标概念及指标换算；
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. 土的击实性的概念、击实试验及击实效果的影响因素。

第一节 土的生成

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。经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，厚度在山丘顶部较薄、低洼处较厚，厚度变化较大
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，厚度在斜坡陡处较薄、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，层理紊乱呈交错，透镜体及夹层较多，边缘处颗粒细，层理清楚，其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，所形成的土的类型和性质就不同。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。沉积年代越长，上覆土层质量越大，土压得越密实，由孔隙水中析出的化学胶结物也越多。

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质和动物残骸等），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，为非饱和土；当孔隙完全被气体充满时，就称为干土。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比，称为土的粒径级配。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。即经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、伊里土和蒙脱土等，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。颗粒越小，单位体积内颗粒的表面积就越大，与水接触的面积就越大，颗粒相互作用的能力就越强。

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 10002.5—2005）对粒组的划分见表 1-2。

表 1-2 《铁路桥涵地基和基础设计规范》的土的颗粒分组

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，其性质随含水量有较大变化

《公路桥涵地基和基础设计规范》(JTG D 63—2007) 对粒组的划分见表 1-3。

表 1-3 《公路桥涵地基和基础设计规范》的土的颗粒分组

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，能承受很大静压，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		<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. 粒径级配分析方法

天然土是粒径大小不同的土粒的混合体，它包含着若干粒组的土粒。各粒组的质量占干土土样总质量的百分比叫作颗粒级配。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）的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》(TB10102—2010, J1135—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 的土颗粒组成的土样。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，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 60 mm、40 mm、20 mm、10 mm、5 mm、2 mm，细筛的孔径为 2.0 mm、1.0 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，见表 1-4。

表 1-4 土的颗粒分析试样用量表

最大颗粒粒径/mm	试样用量/g
<2	100 ~ 300
<10	300 ~ 1 000
<20	1 000 ~ 2 000

续表

最大颗粒粒径/mm	试样用量/g
<40	2 000 ~ 4 000
<60	≥ 5 000
<75	≥ 6 000
<100	≥ 8 000
<150	≥ 10 000
<200	≥ 10 000

试验时，对于无黏聚性的土，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筛中进行筛析，再将筛下粒径小于 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比。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》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 = 5 000 g，小于 0.075 mm 的试样质量占总质量的百分比 = 6.7%						
细筛分析用小于 2 mm 试样质量 = 300 g，小于 2 mm 的试样质量占总质量的百分比 = 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比/%	小于该孔径试样质量占总试样质量百分比/%
粗筛	60	0	0	5 000	100	100
	40	475	475	4 525	90.5	90.5
	20	25	500	4 500	90.0	90.0
	10	50	550	4 450	89.0	89.0
	5	150	700	4 300	86.0	86.0
	2	300	1 000	4 000	80.0	80.0
细筛	2	0	0	300	100	$100 \times 0.8 = 80.0$
	1	52.5	52.5	247.5	82.5	$82.5 \times 0.8 = 66.0$
	0.5	101.1	153.6	146.4	48.8	$48.8 \times 0.8 = 39.0$
	0.25	78.9	232.2	67.5	22.5	$22.5 \times 0.8 = 18.0$
	0.075	42.3	274.8	25.2	8.4	$8.4 \times 0.8 = 6.7$
筛底存留/g		23.2	298	2.0	0.7	$0.7 \times 0.8 = 0.6$

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_____				校核者_____				
筛前总土质量 = 3 000 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 = 27%				
粗筛分析				细筛分析				
孔径 /mm	累积留筛 土质量 /g	小于该孔 径土质量 /g	小于该孔 径土质量 百分比/%	孔径 /mm	累积留筛 土质量 /g	小于该孔 径土质量 /g	小于该孔 径土质量 百分比 /%	占总土质量 百分比 /%
40	0	3 000	100	2.0	2 190	810	100	27.0
20	350	2 650	88.3	1.0	2 410	590	72.8	19.7
10	920	2 080	69.3	0.5	2 740	260	32.1	8.7
5	1 600	1 400	46.7	0.25	2 920	80	9.9	2.7
2	2 190	810	27.0	0.075	2 980	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。

列表说明土样中各粒组的土质量占土样总质量的百分比。表 1-7 就是根据表 1-6 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	0.25 ~ 0.075	<0.075
百分比	11.7%	19.0%	22.6%	19.7%	7.3%	11.0%	6.0%	2%	0.7%

（2）颗粒级配曲线法。

在半对数坐标系上，纵坐标用普通比例尺表示小于某粒径的土质量百分比，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 1-6 所绘的级配曲线。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} ，这三个粒径组成级配指标：

不均匀系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

(1-1)

曲率系数

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

(1-2)

式中 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} ——中间粒径，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；
 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。

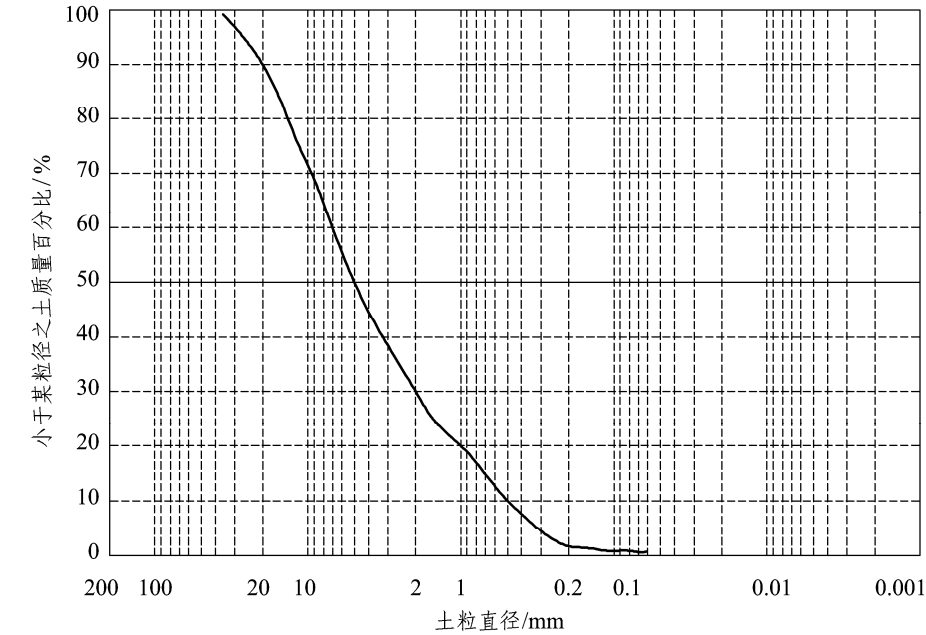


图 1-1 据表 1-6 所绘的级配曲线

由图 1-1 查 $d_{10} = 0.5\text{ mm}$ 、 $d_{30} = 2\text{ mm}$ 、 $d_{60} = 7\text{ mm}$ ，计算：

不均匀系数 $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{7}{0.5} = 14$

曲率系数 $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} = \frac{2^2}{7 \times 0.5} = 1.14$

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 越大，表示土越不均匀，即粗颗粒和细颗粒相差悬殊。如果级配曲线是连续的， C_u 越大，则级配曲线越平缓，表示土中含有许多粗细不同的颗粒；粒组的变化范围广，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含量为零；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含量太多，粗、细颗粒含量较少，级配不好，不易密实。

《铁路路基设计规范》、《公路路基填土压实技术规则》规定，当 $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ ，可认为土的级配良好；当 $C_u < 5$ 或 $C_c \neq 1 \sim 3$ ，则认为土的级配不良。

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%，应采用筛析法和密度计法（或筛析法和移液管法）联合试验。图 1-2 中的曲线 1

是根据筛析法试验结果绘制的，图 1-2 中曲线 2、3 是根据筛析法和密度计法联合试验的结果绘制的。

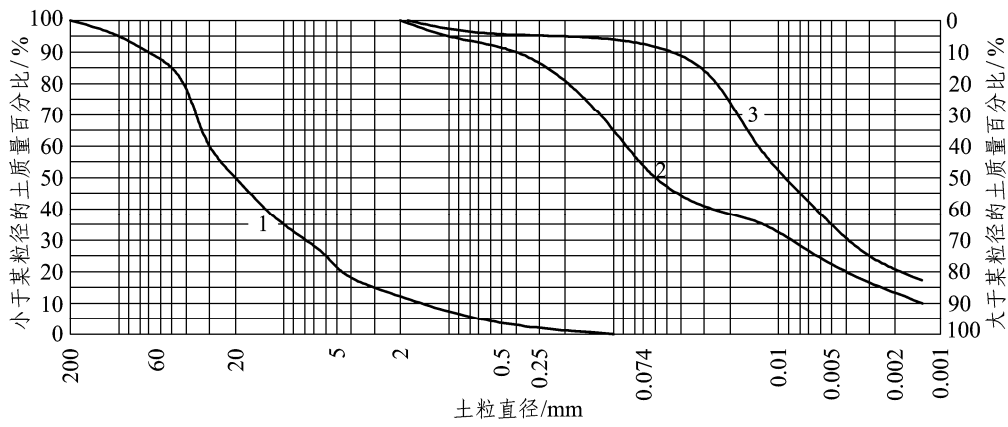


图 1-2 颗粒级配曲线

(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，离颗粒表面越近，吸引力越大，如图 1-3 所示。土中水按所受土粒的吸引力大小可分为结合水和非结合水。

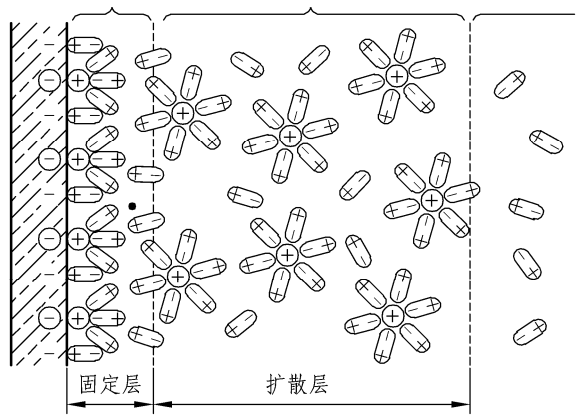


图 1-3 土中固体颗粒与水的相互作用

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很薄的一层

水，见图 1-3 中固定层。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成散粒状。

(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周围，这种水称为弱结合水，见图 1-3 中扩散层。显然，离颗粒表面越远，分子所受的电分子力就越小，因而薄膜水的性质随着离开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。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（黏性、塑性——土可以捏成各种形状而不破裂也不流动的特性、压实性等）都和弱结合水有关。

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，但主要是受重力作用的控制，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，形成错综复杂的通道，由于毛细表面张力的作用，形成毛细水。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 5~6 m（黏土）。粒径 2 mm 以上的土颗粒间，一般认为不会出现毛细现象。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，如同将地下水位抬高。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，由于重力水的存在，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

土中未被水占据的孔隙，都充满了气体。土中气体分为两类：与大气相连通的自由气体和与大气隔绝的封闭气体（气泡）。自由气体一般不影响土的性质，封闭气体的存在会增加土体的弹性，减小土的透水性。目前还未发现土中气体对土的性质有值得重视的影响，因此在工程上一般都不予考虑。

二、土的结构

很多实验资料表明，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，