

湖南公路学会道路专业委员会 编

# 道路工程

人民交通出版社

图书馆资料

U41

1

01163

1001567

87·3/22

# 道 路 工 程

本书是根据《道路工程》课程的教学大纲编写的。本书可作为高等院校道路工程专业及相关专业的教材。本书也可供从事道路工程工作的工程技术人员参考。

湖南公路学会道路专业委员会 编



道 路 工 程

湖南公路学会道路专业委员会编

湖南大学图书馆藏

长沙

湖南公路学会道路专业委员会编

## 人 民 交 通 出 版 社

地址：北京人民交通出版社  
电话：010-6700111

5851001

8878.78

### 内 容 提 要

本书主要阐述道路工程的设计和施工问题，全书分道路建筑材料、公路路线设计、路基工程、路面工程、路面结构与施工等五篇，对于道路工程的设计和施工作了详细的全面的叙述，是一本系统性较强的书籍，可以作为道路工程人员的培训教材，也可作为大中专师生的教学参考书。

湖南公路学会道路专业委员会 编



### 道 路 工 程

湖南公路学会道路专业委员会 编

人民交通出版社出版

本社发行

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092<sub>1/16</sub> 印张：28.75 字数：698 千

1983年7月 第1版

1983年7月 第1版 第1次印刷

印数：0001—11,000册 定价：4.40元

# 前 言

本书主要是根据我国最新的有关公路工程技术标准、规范及各大专院校的教学大纲与教材编写的。我们编写本书的主要目的在于培训道路专业的工程技术人员，因此，在本书中力求做到讲清基本概念和基本理论；同时也介绍了一些国外的新理论、新技术、新工艺，使读者在增加知识、提高理论水平的基础上，结合自己的工作实践，本着推陈出新、洋为中用的原则，去搞好自己的工作，以满足公路建设事业不断发展的需要。

全书分为道路建筑材料、公路路线设计、路基工程、路面设计、路面结构与施工几大部分。各篇自成体系，文句较为通俗易懂，便于单篇选用，专题学习。

本书由湖南公路学会道路专业委员会主编，参加编写和审阅工作的同志分工如下：第一篇第一章至第四章及第六章由湖南省交通科学研究所蔡菲琳编写，第五章由湖南省交通科学研究所徐家明、习应祥编写，全篇由同济大学严家伋审阅；第二篇第一章至第四章由湖南大学冯桂炎编写，第五章至第七章由湖南大学陈敏尧、倪江华编写，全篇由南京工学院徐吉谦审阅；第三篇第一章至第五章由湖南大学薛珊荣编写，第六章由倪江华编写，第七章由陈敏尧编写，全篇由南京工学院周宪华审阅；第四篇第一章至第五章由湖南省交通科学研究所梁锡三编写，湖南大学赵汉涛审阅，第六章由西安公路学院王秉纲编写，同济大学姚祖康审阅；第五篇第一章至第五章由徐家明编写，第六章由王秉纲编写，全篇由同济大学杨家琪审阅。

本书适合公路、城建、林业等系统作为培训道路工程人员的教材，也可作为大中专公路院校的教学参考书和从事公路与城市道路工作的在职职工的自学读物。

由于我们的业务水平不高和编写时间仓促，书中的缺点在所难免，敬请读者多提宝贵意见，迳寄本委员会，以便再版时修改。

湖南公路学会道路专业委员会

1982年8月

# 目 录

## 第一篇 道路建筑材料

绪论	1
第一章 土的性质及路用土的要求	3
第一节 土的组成及其对土的性质影响	3
第二节 土的物理性质指标	10
第三节 土质分类	15
第四节 路面用土要求	18
第二章 砂石材料	19
第一节 概述	19
第二节 天然石料的技术性质和技术要求	22
第三节 集料的技术性质	28
第四节 矿质混合料的组成设计方法	32
第三章 无机结合料	44
第一节 石灰	44
第二节 水泥	46
第三节 路用工业废渣	54
第四章 水泥混凝土	57
第一节 水泥混凝土的概述与组成材料	57
第二节 普通混凝土的主要技术性质	62
第三节 混凝土的外加剂	70
第四节 水泥混凝土的配合比设计	73
第五节 其他水泥混凝土	82
第五章 有机结合料	83
第一节 石油沥青	83
第二节 其它各类沥青	98
一、天然沥青	98
二、煤沥青	98
三、乳化沥青	101
第六章 沥青混合料	111
第一节 地沥青混合料	112
第二节 其它各类沥青混合料	133

## 第二篇 公路路线设计

第一章 路线设计概述	138
第一节 路线设计基本要求	138
第二节 公路技术等级	139
第三节 影响路线设计的主要因素	140
第二章 公路路幅	142
第一节 路幅的基本类型	142
第二节 路幅的组成部分	143
第三节 公路建筑限界	145
第三章 平面线形设计	146
第一节 平面线形要素	146
第二节 平曲线(圆曲线)	148
第三节 超高和加宽	149
第四节 缓和曲线	152
第五节 行车视距	156
第四章 纵断面线形设计	159
第一节 纵坡与坡长	159
第二节 竖曲线	161
第三节 纵断面设计方法	165
第四节 纵面线形和平面线形的协调	168
第五章 路线交叉设计	170
第一节 平面交叉	170
第二节 立体交叉	176
第六章 公路选线	180
第一节 平原地区选线	181
第二节 丘陵地区选线	183
第三节 山岭区越岭线的选线	188
第四节 沿河(溪)线的选线	195
第七章 公路定线方法	199
第一节 纸上定线	200
第二节 实地定线	204
第三节 航测选线	208

## 第三篇 路基工程

第一章 路基设计概论	212
第一节 路基的作用及对路基的一般要求	212
第二节 路基横断面的基本形式	213

第三节	路基的常见病害	215
第四节	路基用土及土基潮湿类型	216
第五节	路基高度	218
第六节	路基工程的其他设施	219
<b>第二章</b>	<b>路基排水设计</b>	<b>220</b>
第一节	路基排水设计的一般原则	220
第二节	地面排水设计	221
第三节	排水沟渠的水文与水力计算	224
第四节	地下排水设计	229
<b>第三章</b>	<b>路基稳定性验算</b>	<b>234</b>
第一节	边坡稳定性验算	234
第二节	浸水路堤边坡稳定性验算	242
第三节	陡坡路堤的整体稳定性验算	247
<b>第四章</b>	<b>路基挡土墙设计</b>	<b>250</b>
第一节	挡土墙的分类与构造	250
第二节	挡土墙的土压力计算	254
第三节	挡土墙稳定性验算	263
第四节	浸水地区挡土墙设计	266
<b>第五章</b>	<b>路基防护与加固</b>	<b>272</b>
第一节	路基坡面防护	272
第二节	冲刷防护	276
<b>第六章</b>	<b>土路基压实</b>	<b>278</b>
第一节	压实原理	278
第二节	土基压实工作	282
<b>第七章</b>	<b>路基石方爆破</b>	<b>284</b>
第一节	爆破原理	284
第二节	爆破材料	287
第三节	常用的爆破方法	288
第四节	施工安全	294

## 第四篇 路面设计

<b>第一章</b>	<b>柔性路面设计的基本概念</b>	<b>295</b>
第一节	设计原则和要求	295
第二节	路面的构造	295
第三节	路面结构层及其分类	297
第四节	路面等级和面层类型的确定	297
第五节	公路自然区划和路基土分类	298
第六节	路基状况对路面设计的影响	300
第七节	路面结构设计	303

第二章 车辆荷载、交通量和设计标准	305
第一节 车辆荷载	305
第二节 交通量和车辆横向分布系数	308
第三节 柔性路面的设计标准	311
第四节 车辆换算与标准车	314
第三章 柔性路面的应力和弯沉	317
第一节 半无限体中的应力和弯沉	317
第二节 层状体系中的应力和弯沉	319
第四章 原有路面补强设计	327
第一节 原有路面的补强测定	327
第二节 补强公式与图解	328
第三节 原有路面计算弯沉 $I_0$ 的确定	329
第四节 路面补强设计程序及算例	334
第五章 新建路面厚度计算	335
第一节 新建路面的调查	335
第二节 计算公式	336
第三节 土基回弹模量的确定	340
第四节 新建路面设计程序及算例	341
第六章 水泥混凝土路面设计	343
第一节 水泥混凝土路面的力学特性与计算理论	343
第二节 水泥混凝土路面板厚设计	346
第三节 混凝土路面平面尺寸设计	352
第四节 双层混凝土路面的板厚设计	356
附录	359

## 第五篇 路面结构与施工

第一章 稳定土与工业废渣路面	366
第一节 概述	366
第二节 石灰稳定土路面	367
第三节 石灰土路面的施工	373
第四节 水泥稳定土路面	377
第五节 沥青稳定土路面	378
第六节 综合稳定土路面	380
第七节 工业废渣路面	381
第二章 碎石路面	385
第一节 水结碎石路面	386
第二节 泥结碎石路面	388
第三节 泥灰结碎石路面	389
第四节 干压碎石基层	390



第五节	级配砾(碎)石路面	391
第六节	天然砂砾基层	394
第七节	无机结合料稳定砂砾基层	394
第八节	磨耗层、保护层	395
<b>第三章</b>	<b>沥青路面</b>	<b>396</b>
第一节	概述	396
第二节	沥青路面类型的选择	398
第三节	沥青类路面对基层的要求	400
第四节	沥青表面处治	401
第五节	沥青贯入式路面	407
第六节	上拌下贯式沥青路面	409
第七节	沥青碎石路面	409
第八节	沥青混凝土路面	411
第九节	磨耗层与保护层	420
第十节	油灰砂和油灰土路面	421
<b>第四章</b>	<b>沥青路面结构层的强度与稳定性</b>	<b>424</b>
第一节	沥青路面的强度及其影响因素	424
第二节	沥青路面的高温稳定性	426
第三节	沥青路面的低温抗裂稳定性	427
第四节	沥青面层的潮湿稳定性与老化问题	430
第五节	沥青路面的抗滑问题	430
<b>第五章</b>	<b>沥青路面的养护</b>	<b>433</b>
第一节	概述	433
第二节	沥青路面在整个使用期间的一般规律	434
第三节	养护工作的主要内容	435
第四节	沥青路面的病害及养护处理办法	436
<b>第六章</b>	<b>水泥混凝土路面的构造与施工</b>	<b>438</b>
第一节	概述	438
第二节	水泥混凝土路面结构	439
第三节	水泥混凝土路面的接缝构造与填缝材料	441
第四节	水泥混凝土路面的施工	444
第五节	水泥混凝土路面的损坏现象与养护维修	448

114

# 第一篇 道路建筑材料

## 绪 论

### 一、道路建筑材料在道路结构物中的作用及其应具备的性质

材料是工程结构物的物质基础，材料质量的优劣以及配制是否合理，选用是否适当等等，均直接影响结构物的质量。

在道路与桥梁结构物的修建费用中，用于材料的费用约达30~50%，某些重要工程甚至可达70~80%。所以节约工程投资，降低工程造价，认真合理地选配和应用材料具有很大的潜力。

随着筑路材料品种的增加和性能的改善，促使新技术、新设计、新工艺的发展。所以对道路建筑材料的研究，是推进道路与桥梁技术发展的重要基础。

道路与桥梁工程都是一种承受频繁交通瞬时动荷载的反复作用的结构物，同时又是一种无遮盖而裸露于大自然的结构物。它不仅受到交通车辆施加的极其复杂的力系的作用，同时又受到各种复杂的自然因素的恶劣影响。

在道路路面上由于车辆水平与竖直动力的作用，在运行频繁时，路面材料会出现多次重复的不同大小，不同符号的应力。久而久之，荷载就把路面材料削弱，而路面在压力、撞击、剪力影响之下逐渐压毁、劈裂、磨耗。在很大的各种力的作用下，整体的路面上可能出现裂缝与破口。在水平力作用下，塑性材料可能出现推移。

道路路面材料的磨耗和压毁，个别组成颗粒的粉碎、空洞、破口，皱纹的出现等引起材料的总破坏，造成道路路面质量的恶化，而最后使路面破坏。

自然因素的作用对路面的损坏也极为不利。落在路面上的水，可以破坏路面的粘聚力；溶解某些物质并使材料软化，因而降低材料和整个路面强度。在冰冻时，留存在孔隙中的水的体积胀大，而在反复的冻融过程中使路面破坏。透进路基的水可以降低土壤的承载能力，这样就引起了路面的不同变形。风也能将路面损坏产物从道路行车部分吹走，其结果使下层尚未遭破坏的暴露出来。

昼夜与季节温度的变化引起路面中应力的周期性变化，这样会导致路面的膨胀、收缩、皱纹与裂缝的出现，使有机胶结材料轻量部分被蒸散。

由于建筑材料在道路建筑物中承受各种样式的破坏作用，因此用于修筑道路与桥梁结构物的材料，不仅需要具有抵抗复杂应力复合作用下的综合力学强度性能，同时还要保证在各种自然因素的长期恶劣影响下综合力学强度不发生明显的衰降，这就是所谓持久稳定性。为保证这些性能，通常要求建筑材料具备下列四方面的性质。

1. 力学性质 就是材料抵抗车辆荷载复杂力系综合作用的性能。目前主要是测定材料各种静态强度，如抗压、抗拉、抗弯、抗剪等强度，或者某些特殊设计的经验指标，如磨耗、冲击等。或者假定各种材料之间可能存在一定关系，以抗压强度作为基准，在材料试验时仅测定

其抗压强度(标号),然后折算为其他强度。

2.物理性质 材料力学强度随其环境条件而改变,影响材料力学性质的物理因素主要是温度和湿度。材料在温度升高或含水率增加时,强度即显著降低。通常用热稳定性与水稳性等来表征其强度变化的程度。

材料的物理性质可用某些物理常数来表征,如比重、容重、孔隙率等。这些物理常数是材料内部组成结构的反映,同时也和力学性质存在一定的关系,可以用以推断力学性质。

3.化学性质 是材料抵抗各种周围环境对其化学作用的能力。材料长期承受周围介质(如桥墩在工业废水中)或其他侵蚀作用外,通常受到大气因素、日光中的紫外线、空气中的氧以及水的综合作用,引起“陈化”。特别是沥青或各种有机材料更为显著。

4.工艺性质 是材料适于按照一定工艺流程加工的性能。例如水泥混凝土在成型以前要求有一定的流动性,以便制作成一定形状的梁。但是加工工艺不同,要求的流动性亦不同。

以上四方面性能是互相联系、互相制约的。在研究材料性能时,必须统筹考虑。

## 二、材料性能检验工作的重要性及一般方法

材料性能检验是为了掌握材料的技术性能,对保证工程质量、合理使用材料、加速施工进度、降低工程造价,都起着重要的作用。因此要求材料性能检验工作必须准确,密切配合设计和施工。

材料性能的检验测定通常可采用实验室常规检定,实验室模拟试验以及现场修筑试验路面检定等方法。而本书主要着重于试验室内对原材料性能的一般常规检定,包括物理性质、力学性质、化学性质、工艺性质等试验。

## 三、道路建筑材料质量的标准化和国家标准与技术规范

应用于道路与桥梁的材料及其制品都必须具备一定的技术性质,以适应道路结构物不同建筑结构与施工条件的要求。为了控制材料的质量,并使之标准化,国家和有关部门对各种筑路材料制订了相应的标准和规范。在道路设计与建筑过程中我们即按这些指标来评价材料的质量。

目前我国建筑材料技术标准有国家标准和部标准两种。国家标准由有关科学研究机关起草、由有关主管部提出,由国家计量总局发布,并确定实施日期。以字母“GB”代号表示“国标”。部颁标准是由各部批准的标准。例如道路建筑石料有交通部批准的标准“交通”(JT);金属材料有冶金工业部批准的“冶标”(YB);木材的标准有林业部批准的“林标”(LB);沥青材料有石油工业部批准的标准“石油”(SY)等等。

## 四、道路建筑材料及其分类

用于道路和桥梁的建筑材料很多,按照产源、制法、性质以及应用可把道路建筑材料分成下列几类:

(1)土壤材料:粘土、砂土……等。

(2)天然石料:岩石经天然风化而成不同粗度的松散状态的粒料(如砂、砾、漂石等)以及岩石经加工而成不同尺寸与形状的块状石料(如碎石、块石等)。

(3)人造石料:如烧土产品、矿渣材料及产品等。

(4)无机胶结材:如石灰、石膏、水泥等及其配制品。

(5)有机胶结材:如沥青及其混合物。

(6)金属材料。

(7)木材。

(8)其他材料及产品：如橡胶、环氧树脂等。

对于上述材料，将引述于各章中，对金属材料、木材、其他材料不予介绍。

## 第一章 土的性质及路用土的要求

### 第一节 土的组成及其对土的性质影响

土是不连续介质，在道路工程中主要研究对象是松软土。土的特点是：

(1)土是自然历史组合体。各类松软土都是经过漫长的地质历史，并在各种复杂的自然和地质因素作用下形成。随着时间、地点、环境以及形成方式的不同，其性质各有所差异，因此，在研究土的工程性质时，强调对其成因类型和地质历史方面的研究具有重要意义。

(2)土是相系组合体。它是由三相（固、液、气）所组成的体系。固相包括矿物颗粒和有机质，又称土的骨架；液相是指土中水，它部分或全部地充满于土粒间的孔隙内；气相是指土中空气、水汽或其它封闭气体。它占据着未被水所充满的那部分孔隙。固相是构成土的主要部分，叫做“土粒”。土粒之间有孔隙，如为液相（通常是水）所充满，则形成饱和土。如果孔隙间液、气相并存时，则形成湿土，属三相体。因此我们不能单纯研究土中的某一相，而必须对同时并存的三相的质和量以及它们之间的相互关系一并加以研究，做出定性、定量的评价。

(3)土是多矿物组合体。在一般情况下，一种土将含有5~10种或更多的矿物，其中除原生矿物外，次生粘土矿物是主要成分。

#### 一、土中的矿物成分与有机质成分

土中的矿物成分可以分为原生矿物和次生矿物两大类。

原生矿物是指岩浆在冷凝过程中形成的矿物，如石英、长石、云母等。

次生矿物是原生矿物发生化学风化作用而形成的新矿物，如三氧化二铁、高岭石、蒙脱石、伊利石、碳酸钙等。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，是构成粘土颗粒的主要成分，故又称为粘土矿物。

风化作用的进一步发展往往有生物作用参与，形成造壤作用，使土增加了有机质成分，其颗粒亦很小，称为“腐植质”。此外软土中尚可能包括有动植物残骸形成的泥炭。

矿物成分与有机质成分是决定土的物理性质和工程性质的重要因素，亦是鉴别区域土质特征的重要标志。特别是高岭土等粘土矿物，对细粒土的物理-力学性质起着显著的作用。高岭土浸湿时膨胀性不大、吸附（保持于表面）各种物质能力小，蒙脱土的塑性非常大，在水中膨胀能力与吸附能力都很大，湿时会很快的丧失承载能力。此外，原生矿物中的云母和次生矿物中的盐类对于某些土的性质有重要的作用。例如粉土中的云母和黄土中的碳酸钙，随着土中碳酸盐含量的增加，粘土类土的粗粒成分增多，压缩性减少，抗剪强度加大。必须注意，土中易溶水的盐类，一旦被水溶滤之后，土的压缩性增大，这对工程建筑具有重要的意义。土中存在着各种有机质，对土的物理-力学性质也有重大影响。其影响程度取决于：有机质的成分；有机质分解程度；有机质与土的矿物颗粒之间在数量上的比例关系。

从表面上看土的颜色，在一定程度上反映土的固相的不同成分与含量。红色、黄色和棕

色通常表示土中含有较多的三氧化二铁,并说明氧化程度较高,且存在着较多的三氧化二铝等氧化物;黑色表示土中含有较多的有机质或含有锰的化合物;灰蓝和灰绿色一般含亚铁化合物,它在缺氧的条件下形成的;而白色或灰白色则表示土中有机质较少,且主要含石英或含高岭石等粘土矿物。当然湿度会影响颜色的深浅,一般描述的是潮湿状态的土的颜色。

## 二、土中的水

### (一)土中的水及其基本类型

土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。水在土中可引起楔形压力、潜蚀、热渗透、溶解和沉积等许多作用。不能将土中的水看成是与固体颗粒相混合的物质。水有机地参加土的结构,对土的性状有着巨大影响。土的性质不仅取决于水的绝对含量,而且取决于水的形态、结构、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水提出了新的分类方法。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。其分类方法列于表1-1-1。

土中水的分类

表1-1-1

水的形态	水分子引力 $P_m$ 与重力引力 $P_\gamma$ 之关系	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 $P_m > P_\gamma$ 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 $P_m \geq P_\gamma$	物理-力学与物理-化学混合联结
	重力水 $P_\gamma > P_m$	物理-力学联结
固态水	结晶水和化学结合水 $P_m$ , 冰	

从理论角度来说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,结晶水和化合水应属固体部分,从土力学的观点可以不予考虑。因此我们将土中的水按其结构形式划分为如下四种类型:

1)强结合水(或称吸着水):2~3分子层的水,形成于固体颗粒的周围,具有特殊结构与高密度。

2)弱结合水(或称薄膜水):为强结合水周围多层分子水膜的水,具有定向排列和渗透吸附特性。

3)毛细水:处于颗粒间孔隙的边角部位和填充于管状的孔隙之中,具有特殊结构。

4)自由水(或称重力水):处于颗粒间的大孔之中,在重力梯度作用下可产生移动。

### (二)结合水

结合水的机理是土质学研究的一个重要内容,是解释粘性土一系列工程特性的必备基础知识,是影响粘性土物理性质的主要因素之一,如土的塑性、膨胀、崩解、收缩、渗透等特性的发展均直接取决于水化膜的厚度。这里仅作简单说明。

次生矿物颗粒,特别是粘土矿物颗粒具有较强的与水相互作用的能力,称为亲水性;腐植质也有很大的亲水性。这些亲水性的土颗粒表面对于水分子和离子都有吸引的能力,结合水的厚度不超过 $0.25 \sim 0.5\mu$ ,在靠近土粒表面的地方引力最大,水分子离子排列得十分紧密,其结合水厚度不超过 $0.003\mu$ ,通常把这层称为强结合水。其比重大于1,冰点在零下几

十度，大部分在 $-78^{\circ}\text{C}$ 也不冻结。表面引力随着距离增大而迅速降低，距土粒表面稍远的地方，水分子仍定向排列，但不如强结合水那么紧密；因此这种水有可能从较厚的水膜或溶液浓度较低处缓慢迁移到较薄的水膜或浓度较高处，亦即可能从一个土粒迁移到另一个土粒，这种运动与重力无关，这层不能传递静水压力的水是弱结合水。结合水的简化模型如图1-1-1。

### (三) 毛细管水

毛细管水在土的液相结构中占有重要地位。这种现象通常用水与空气界面上的表面张力来解释。近来发现毛细管力亦具有复杂的电学性质。B·A·崔多维奇曾提出，毛细管上升高度是分子引力的结果，其数值与固液界面上的离子及分子的水化能有关。值得注意的是在真空中则失去毛细管现象，这一事实至今尚无满意的解释。多数人把毛细管水看作是由物理-化学和物理-力学联结所致。

按性质毛细水与自由水有区别。其冰点低于 $0^{\circ}\text{C}$ ，其数值取决于毛细管的直径，当直径为 $0.006$ 毫米时，其冰点为 $-18.5^{\circ}\text{C}$ ，而在其直径增大至 $1.57$ 毫米时，则冰点上升至 $-6.4^{\circ}\text{C}$ 。这是由于毛细管中缺少对流运动，以及它的水分子结构特殊所致。毛细管水不能象重力水那样流动，其他性质与重力水接近。

毛细水有三种形态：1) 毛细管状水，土体毛细带中的毛细管完全被水填满所产生；2) 悬挂毛细水，此时毛细管内部常有气孔存在，水有如袖膜状态；3) 毛细边角水，水只存在于毛细管的边角部位。在上述水中，第一类对土结构的形成意义最大，后两种水对土的某些工程性质的形成有影响。K·太沙基对这两种水的意义极为重视，他认为土粒干燥后弯液面直径缩小，产生过渡的毛细管压力可促使土的强度增高。毛细水三种状态如图1-1-2所示。

毛细管水对土中气体的分布与流动起有一定作用，常是导致产生密闭气体的原因。毛细水对土的工程性质的形成，意义十分重大，它控制以下几种现象的发展。

1) 产生毛细管水压，其数值可按下式确定：

$$P = \frac{2\sigma\cos\varphi}{\gamma_k}$$

式中： $P$ ——毛细管水压力；  
 $\sigma$ ——液体表面张力系数；  
 $\varphi$ ——液体浸湿毛细管壁的角度；  
 $\gamma_k$ ——毛细管直径。

毛细管水压力值亦可通过采用土中孔隙的比表面积来表示：

$$P = S \cdot a \cos\varphi$$

式中： $S$ ——孔隙表面积；  
 $a$ ——某种系数。

图1-1-2 土中毛细管水类型示意图  
 1-毛细管状水；2-悬挂毛细水；3-毛细边角水

2) 产生毛细管水流，其速度与土的粒度、结构以及距水源远近有关，每昼夜为 $0.1 \sim 0.5$ 厘米至 $3 \sim 7$ 米。

3) 产生毛细管水渗透压力及随之而来的水分毛细管渗透运动。这是由于盐溶液的浓度

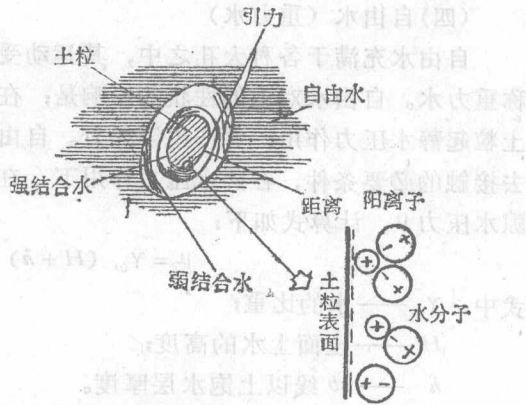
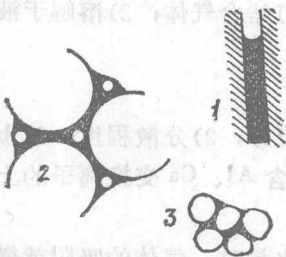


图1-1-1 结合水的简化模型



(化学能梯度) 所产生。其数值同样是土的粒度的函数。在细小孔隙中, 此种压力可达 3~5 个大气压, 而在大孔隙中其数值则微不足道, 不到 1 个大气压。

4) 对砂土而言, 由毛细管作用而产生于三相界面的表面张力可使土粒相互靠近而形成“假凝聚力”。一旦砂土被水饱和时, 则这种力随即消失。毛细管上升将助长地基土的冰冻现象, 从而危害公路路面及房屋基础。

#### (四) 自由水 (重力水)

自由水充满于各种大孔之中, 其运动受重力作用控制, 故又称重力水。自由水对土的性状的影响是: 在水、土两相体系中对土粒起静水压力作用, 并产生浮托力。自由水也是造成颗粒间失去接触的的必要条件, 在静水压力作用下, 在土结构体系中产生孔隙水压力  $\mu$ , 计算式如下:

$$\mu = \gamma_w (H + h)$$

式中:  $\gamma_w$  —— 水的比重;

$H$  —— 土面上水的高度;

$h$  ——  $ab$  线以上饱水层厚度。

有效压力能改变土的孔隙比及各种物理-力学性质, 此种压力是由固体颗粒部分的重量产生的, 对图 1-1-3 中的  $a-b$  断面而言, 其数值  $P' = h(\gamma - \gamma_w)$ , 其中  $\gamma$  为土的容重。

快速流动的水对土的性状影响颇大。自由水在流动时产生动水压力, 带动颗粒产生机械潜蚀。在产生动水压力的同时, 还将使土粒之间丧失接触而出现液化。自由水运动及其溶解能力是产生化学潜蚀的主要原因。化学潜蚀将使土中产生盐类的溶蚀而使土的团聚结构破坏, 导致分散度升高而影响土的工程性质。自由水不仅能溶蚀并带走物质, 而且有时亦能通过溶液中的沉淀而生成新的物质, 从而导致土的成分及结构的改变。

### 三、土中的气体

#### (一) 土中气体和基本类型

气体在土中按体积大约可占 1~2% 甚至 40~50%。干土中的气体含量并非完全取决于孔隙的体积, 而在一定程度上与其结构特点有关, 首先取决于是否存有吸附气体及成分。土中气体除含有空气主要成分外, 含量最多的是水汽、碳酸气、氮气、甲烷气、重碳酸氢、镭以及其他气体, 土中气体存在放射性是促使地表土层形成电场的主要因素。

土中气体按其所处状态和结构特点, 大致分为以下几种类型: 1) 结合气体; 2) 溶解于液相中的溶解气体; 3) 密闭气体; 4) 自由气体。

#### (二) 结合气体 (又称表面吸附气体)

土的结合气体含量与许多因素有关, 其中主要有: 1) 土的矿物成分; 2) 分散程度; 3) 土的湿度; 4) 气体成分等。富含 Na、K 等交换离子的土吸附能量强, 含 Al、Ca 交换离子的土吸附能量弱。

土体湿度增高, 吸附气体将随之降低。当湿度超过最大吸着含水量时, 气体的吸附就微不足道了。气体吸附随温度升高将迅速降低, 当温度高于 40°C 时, 吸附根本不发生。大气压力增高可使气体吸附有所增长。

#### (三) 溶解气体

在土的液相部分常存在着溶解气体, 其溶解数值取决于温度、压力、气体的物理-化学性质及溶液的化学成分。溶解气体的主要成分有碳酸气、氧、水汽等。

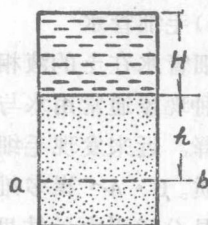


图 1-1-3 结构体系中产生孔隙水的压力示意图  
 $H$ —土面上水的高度;  $h$ — $ab$  断面以上的饱水层厚度

溶解气体对土的性状影响如下:

1) 改变水的结构及溶液的性质。当形成水化物时, 它的作用更为显著, 可对土粒施加力学作用。

2) 当温度、压力增高时, 可从自然溶液中释放出小气泡。释放出的气泡具有相当大的比表面积和活性, 小气泡集结成大气泡, 在土中形成密闭气体。

3) 溶解气体可加强化学溶蚀过程。如在水中溶解有碳酸气, 则水的溶解能力可急剧增大。

在近地表土层中, 溶解于土中液体的气体在温度、压力变化时, 特别易于产生溶解和释放过程。当温度升高时可使气体在孔隙中产生释放过程, 释放气体将引起土中水、气态体积的增加, 导致在土中形成裂隙。另一部分释放出来的气体将留在土中形成密闭气体而影响土的弹性。当温度降低, 则可使气体在孔隙中相应地产生溶解。此时水、气总体积就缩小, 从而引起土体在外荷不变的情况下产生压密而导致土体压缩性随季节有所变化的重要原因。

#### (四) 自由气体与密闭气体

此类气体是土中的主要气体, 充填于颗粒之间的大小孔隙中, 控制自由气体总含量的因素是: 1) 孔隙度; 2) 湿度; 3) 物理环境特点 (压力、温度、空气湿度)。

单位体积中的气体体积可按式确定:

$$\left(\frac{e}{G} - \frac{W}{r_w}\right)\gamma_d \quad (\text{崔多维奇公式})$$

式中:  $e$ ——孔隙比;  $G$ ——土粒比重;  $W$ ——含水量;  $\gamma_w$ ——水的容重;  $\gamma_d$ ——土的干容重。

对黄土的研究表明, 当干土中自由气体含量低于 20% 时, 则不湿陷; 当其含量为 21~23% 时湿陷可有可无; 而当自由气体含量高于 24% 时, 则常属湿陷性黄土。黄土湿化后急剧地释放出气泡是其产生湿陷的主要原因。

自由空气含量是湿度的函数, 且具有双曲线性质。土的渗透性与自由空气含量的关系更明显, 对同一成因类型和矿物组成的土, 其渗透性与自由空气之间有定量的依存关系。

在建筑过程中, 表层土受水浸湿, 常形成密闭空气, 如图 1-1-4 所示系原状土层中密闭气体的位置。密闭气体的作用十分大, 它可降低建筑物的沉降量。当其突然排除时, 则导致基础与建筑物的变形。密闭气体还能降低土层的透水性及透气性, 是控制填土堤坝长期沉降的一个重要因素。土中存在密闭气体将使其压密条件产生变化, 由于密闭气体的存在, 可使本来不可压密的土压密。



图1-1-4 密闭气体形成示意图  
1-空气; 2-水; 3-颗粒

#### 四、土的压实最佳含水量

在工程中填土压实是很重要的, 如路堤、土坝等土工构筑物都是把土作为建筑材料, 经压实而成的。又如在山区, 为了合理利用地形, 可用半填半挖的地基, 经填土后可作为公路路基。填土不同于天然土层, 因为经挖掘、搬运之后, 天然土层的原状结构已被破坏, 天然的含水量亦已变化, 而且填土时必然留下许多大体积的孔隙。所以未经压实的填土的抗剪强度极低, 压缩性特大且很不均匀, 遇水可能发生湿陷或崩解现象, 造成建筑物在荷载作用下产生过大的变形、开裂和边坡的坍塌。

压实土的实质是用一定的外部功能使土在短时期内得到新的结构强度 (包括增强粗粒土



之间的磨擦和咬合，以及增加细粒土之间的引力)以改善土的性质。经验告诉我们，相同的压实功能对于不同状态土的压实效果可以完全不相同。填土能否得到足够的密度，在很大程度上与土的湿度有关，土的含水量太高或太低对压实效果均不利，只能在最佳含水量时效果最好，达到最为密实的填土密度。其原因为：当土样的含水量较小时，粒间引力较大，在一定的外部功能作用下，还不能有效地克服引力而使土粒相对移动，这时压实效果比较差；增大含水量时，结合水膜逐渐增厚，减小了引力，减小了凝集程度，土粒在相同功能条件下易于移动而挤密，所以压实效果较好，但当含水量增大到一定程度之后，孔隙中已出现了自由水，结合水膜的扩大作用不显著了，因而引力的减小也不十分显著，同时自由水填充在孔隙中，阻止土粒移动的作用却随着含水量的增加而渐渐显著起来，所以压实效果又下降了，因此最佳含水量与之相应的最大干容重二个指标对路基设计和施工是很重要的。

除了含水量对压实的影响之外，压实能量与粒径级配也起着一定的作用。压实能量愈大(在某一限度以内)，最佳含水量愈小，最大干容重愈大。所以最佳含水量对同一种土而言也不是一个常数，而是随压实方法而异的。这个现象可用结合水膜理论来解释，结合水膜愈薄，其性质愈接近固体，其抵抗位移的能力也就愈大，所以在较大压实能量作用下，能获得较小最佳含水量和较大干容重。

不同粒径级配的土，采用同一压实方法所得“含水量-干容重”曲线的形状均相似，但最佳含水量及最大干容重各不相同，含细分散颗粒愈多，特别是含有机胶粒愈多的土，其最佳含水量愈大，最大干容重愈小。换句话说，比面积大小直接影响最佳含水量及最大干容重这个现象亦可用束缚水膜理论解释。

土的最佳含水量数值一般在土的塑限上下，表1-1-2列出各种土壤最佳含水量和最大干容重的参考数据。

表1-1-2

土的种类	最佳含水量 (重量%)	最大干容重 (克/厘米 <sup>3</sup> )	土的种类	最佳含水量 (重量%)	最大干容重 (克/厘米 <sup>3</sup> )
砂土	8~12	1.80~1.88	亚粘土	12~15	1.85~1.95
亚砂土	9~15	1.85~2.08	重亚粘土	16~20	1.67~1.79
粉土	16~22	1.61~1.80	粘土	19~23	1.58~1.70
粉质亚粘土	18~21	1.65~1.74			

## 五、粘性土的物理-化学性质

### (一)粘性土属分散系

在粘性土中，矿物颗粒就是分散相，土中的水(确切地说是水溶液)就是分散介质。分散相的分相程度越高(即比表面积越大)界面上的物理-化学作用越强烈，具有很强的和水相互作用的能力。通常把小于2微米(即0.002毫米)的粘土颗粒作为胶体分散系来研究，其物理-化学现象包括吸附、离子交换、凝聚、触变等。当分散相的粒径小于0.001微米时，已成为单分子或离子状态，所以没有界面的物理-化学作用，这种分散系称为分子分散系(即溶液)。

### (二)粘性土的胶体性质

#### 1.电泳与电渗现象

大多数由粘土矿物组成的细颗粒中最细的部分已是化学上的所谓“胶体”。这些粘土颗