

TU DE WULI LIXUE XINGZHI
BIANHUA
GUI LV YAN JIU

土的物理力学性质 变化规律研究

曾月进 李 辉 胡兴福 曾明顺 曾明德 著



西南交通大学出版社
Http://press.swjtu.edu.cn

土的物理力学性质 变化规律研究

曾月进 李 辉 胡兴福 曾明顺 曾明德 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 提 要

本书主要提出了以下一些土力学理论: ① 外作用对土做功使土物理力学指标改变, 土的先期固结压力与物理力学指标具一定关系。② 地基土的承载力由土的力学强度和土所受侧向约束压力的大小确定。③ 地基应力场由地基土的物理力学指标、基础底平面上土的压力和基础底面压力确定。④ 土的变形特点表现为弹塑性。塑性变形主要由土固结时土中水和空气排出土体产生。弹性变形由土颗粒卸荷回弹和土吸水膨胀产生。地基沉降与卸荷回弹是一个缓慢运动过程。⑤ 用外作用对土做功的方法计算地基沉降量。

作者对上述理论进行了实验研究, 取得一些成果, 并介绍在一些工程中应用。

图书在版编目 (C I P) 数据

土的物理力学性质变化规律研究 / 曾月进著. 一成都: 西南交通大学出版社, 2012.11
ISBN 978-7-5643-2048-5

I. ①土… II. ①曾… III. ①土—物理力学—研究
IV. ①P642.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 276162 号

土的物理力学性质变化规律研究

曾月进 李 辉 胡兴福 曾明顺 曾明德 著

*

责任编辑 杨 勇

特邀编辑 曾荣兵

封面设计 原谋书装

西南交通大学出版社出版发行

成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031

发行部电话: 028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川川印印刷有限公司印刷

*

成品尺寸: 148 mm × 210 mm 印张: 6.875

字数: 190 千字

2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-2048-5

定价: 35.00 元

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

一种土的物理力学指标可以有很大的变化,这是由什么原因引起的?其变化有没有一定规律?地基沉降是决定建筑安全的最重要因素,能否找到一个较准确的计算方法?这些问题必须在理论上有新的突破,但只有通过实践才能找到其规律。笔者在三十多年岩土工程工作中,不断地探索,形成了一个基本认识:外作用对土作用,使土的物理力学性质发生变化,土的物理力学性质指标跟外作用大小有一定关系。地基应力场由土的物理力学指标、荷载特点决定。在本书中,提出采用外力对土做功的方法计算地基沉降。笔者通过二十多年实验研究,找到了一些规律,并在工程实践中采用取得了较好的社会效益。但这只是一个开始,其要走的路还很漫长。

四川建筑职业学院、西南科技大学实验室部分师生对本研究项目作了较多实验工作,为研究提供资料。近三十年内,在有关老师和领导的支持和关心下,研究工作才取得一点成绩。

特别是我们老师、领导陈思友、马国详同志在 1985—1988 年期间的大力支持并领导研究工作,走出了研究土的物理力学性质变化规律的第一步。并取得一些重要成果。

1988 年德阳石刻挡土墙设计中进行了大量土的抗剪参数跟土的含水量之间关系试验研究并取得一定成果。1988 年德阳市建筑学会印发曾月进、马国详的论文后,德阳市膨胀土的研究对土的抗剪力跟先期固结压力含水量间关系进行了论证,指出了研究方向。本书出版他们功不可没。

本书仅介绍了这方面研究的初步结果,奉献给读者,抛砖引玉,以期共同探讨。书稿由成都信息工程学院杜先云教授审定,在此表示感谢!

笔 者

2012 年 6 月

目 录

1	土的成因类型和物理力学指标	1
1.1	土的成因及组成	1
1.2	土的物理力学指标	6
2	土的力学性质概论	14
2.1	材料的力学性质	14
2.2	土的特殊物理力学性质	15
2.3	围压约束与土承载力之间的关系	16
2.4	地基应力场	17
2.5	土力学的研究方法	17
3	地基沉降运动	19
3.1	地基沉降运动概述	19
3.2	土沉降运动的试验研究	20
4	外作用对土的物理力学性质的影响	30
4.1	压力对土做功的试验研究	30
4.2	土的弹塑性与先期固结压力的试验研究	39
4.3	功与土的物理力学指标的试验研究	43
4.4	土抗剪参数的试验研究	50
4.5	土的弹性变形的试验研究	55
4.6	土的先期固结压力与物理力学指标的关系	63
4.7	土的压缩	68
4.8	地基沉降的影响因素	71
4.9	天然土层的先期固结压力与地基可压缩土层	78
5	地基应力场	80
5.1	土的侧压力与抗剪力之间关系的试验研究	80
5.2	不同基础的地基应力场	91
6	地基承载力	126
6.1	材料微粒间的结合能与材料承载力间的关系	126

6.2	地基承载力与土的物理力学指标及基础平面上压力的关系	132
6.3	地基承载力与加荷速度之间的关系	138
7	用压力对土做功的原理计算地基沉降	141
7.1	用压力对土做功的方法计算条形基础沉降	141
7.2	用压力对土做功的方法计算桩基础沉降	149
7.3	用外力对土做功的方法计算地基沉降小结	160
8	土的物理力学指标变化规律的工程应用	162
8.1	桩基础的桩长确定方法	162
8.2	楔形桩沉降计算	168
8.3	土抗剪参数变化规律在挡土墙设计中的应用	176
8.4	挡土墙墙基埋深确定方法	180
8.5	地基沉降控制工程实例	182
8.6	以地基变形指标确定加固地基的方法	184
8.7	罗江县××苑控制地基沉降方法	188
附录 A	楔形桩承载能力	193
A.1	桩侧阻力	193
A.2	楔形桩承载力	194
A.3	楔形桩静荷载试验	197
A.4	楔形桩的极限平衡承载力	200
A.5	工程实例	202
A.6	楔形桩的沉降特点	202
A.7	楔形桩的轴压力特征	203
A.8	楔形桩经济效果	204
附录 B	楔形桩侧压力系数试验研究土压力系数的实验研究	205
B.1	黏性土的土压力	205
B.2	桩周与土的外摩擦角 δ 、侧压力系数 k_s	206
B.3	楔形桩的侧压力系数	208
B.4	结 论	210
	参考文献	212

1 土的成因类型和物理力学指标

1.1 土的成因及组成

1.1.1 土的形成与类型

土是地壳表层的岩石风化的产物。这种风化作用一般分为物理风化、化学风化和生物风化三种。由于气温变化，岩石胀缩开裂、崩解为碎块的属于物理风化。这种风化作用只改变颗粒的大小与形状，不改变矿物成分，形成的土颗粒较大，称为原生矿物。由于水溶液、大气等因素影响，使岩石的矿物成分不断溶解水化、氧化、碳酸化而引起岩石破碎的属于化学风化。这种风化作用使岩石的矿物成分发生改变，土的颗粒变得很细，产生次生矿物。由于动、植物的生长使岩石破碎的属于生物风化，这种风化具有物理风化和化学风化的双重作用。

在地质学中，把地质年代分为太古代、元古代、古生代、中生代和新生代五大代。每代又分为若干纪，每纪又分为若干世。土基本是在新生代第四纪（距今 2.5 万年~100 万年）形成的，因此，土也被称为第四纪沉积物。由于土体沉积的历史不长，尚未胶结岩化，通常是松散软弱的多孔体，其性质与岩石有很大差别。

土有不同的类型划分方法。工程上按工程性能近似的原则对土进行分类，称为土的工程分类。作为建筑地基的土，可以分为碎石土、砂土、粉土、黏性土和人工填土。

1. 碎石土

粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土称为碎石土。按

颗粒形状及粒组含量不同，碎石土可分为漂石、块石、卵石、碎石和圆砾（见表 1.1.1）。

表 1.1.1 碎石土的分类

土的名称	颗粒形状	粒组含量
漂石 块石	圆形及亚圆形为主 棱角形为主	粒径大于 200 mm 的颗粒含量超过全重 50%
卵石 碎石	圆形及亚圆形为主 棱角形为主	粒径大于 20 mm 的颗粒含量超过全重 50%
圆砾 角砾	圆形及亚圆形为主 棱角形为主	粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过全重 50%

注：分类时应根据粒组含量栏从上到下以最先符合者确定。

2. 砂土

砂土是指粒径大于 2 mm 的颗粒含量不超过全重 50%、粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土。按粒组含量不同，砂土可分为砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂（见表 1.1.2）。

表 1.1.2 砂土的分类

土的名称	粒组含量
砾砂	粒径大于 2 mm 的颗粒含量占全重 25%~50%
粗砂	粒径大于 0.5 mm 的颗粒含量超过全重 50%
中砂	粒径大于 0.25 mm 的颗粒含量超过全重 50%
细砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重 85%
粉砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重 50%

注：分类时应根据粒组含量栏从上到下以最先符合者确定。

3. 粉土

粉土是指粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过全重 50%、塑性指数 $I_p \leq 10$ 的土。粉土的性质介于砂土和性土之间。

4. 黏性土

黏性土是指塑性指数 $I_p \geq 10$ 的土。按塑性指数不同，黏性土可

分为黏土和粉质黏土（见表 1.1.3）。

表 1.1.3 黏性土的分类

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

5. 人工填土

由于人类活动而堆填的土称为人工填土。按其组成和成因可分为素填土、压实填土、杂填土和冲填土。素填土指由碎石土、砂土、粉土、黏性土等组成的填土。经过压实或夯实的素填土称为压实填土。杂填土指含有建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂物的填土。冲填土是指水力冲填泥沙形成的填土。

1.1.2 土的结构和构造

1. 土的结构

在土生长过程中所形成的土粒的空间排列及其连接形式称为土的结构。通常认为，土的结构有单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种。

单粒结构是由砂粒或更粗大的颗粒在水或空气中沉积形成。由于颗粒自重大于颗粒之间的引力，故每个颗粒在自重作用下单独下沉而达到稳定状态。如图 1.1.1 所示，松散的单粒结构是不稳定的，在荷载作用下变形较大，见图 1.1.1 (a)；密实的单粒结构是良好的天然地基，见图 1.1.1 (b)。

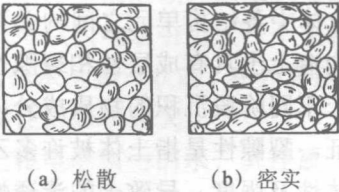


图 1.1.1 单粒结构

蜂窝结构是由粉粒（粒径在 $0.005 \sim 0.075 \text{ mm}$ ）在水是下沉形成的。由于颗粒之间的引力大于其自身重力，下沉的颗粒遇到已沉积的颗粒时，就停留在最初的接触点上不再下沉，形成具有较大空隙的蜂窝结构，如图 1.1.2 所示。

絮状结构是由黏粒（粒径不大于 0.005 mm ）集合体组成。这些颗粒不因为自重而下沉，长期悬浮在水中，在水中运动时形成小链环状的土集粒而下沉，碰到另一个小链环被吸引，形成空隙很大的絮状结构，如图 1.1.3 所示。

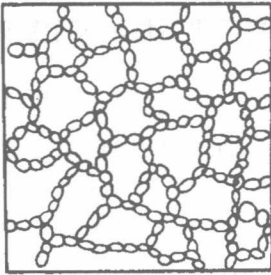


图 1.1.2 蜂窝结构

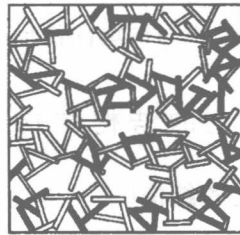


图 1.1.3 絮状结构

在上述三种结构中，以密实的单粒结构的土的工程性质最好，后两种结构土会因扰动而破坏其天然结构，故强度低、压缩性大，不可作为天然地基用土。

2. 土的构造

土的构造是指土体中各结构单元之间的关系，是从宏观的角度研究土的组成。在构造上土具有成层性和裂隙性。成层性是指土粒在沉积过程中，由于不同阶段沉积的物质成分、颗粒大小等不同，沿竖向呈现成层特征。裂隙性是指土体被许多不连续的小裂隙所分割，破坏了土的整体性及强度，导致土的渗透性高，工程性质差。有些坚硬和硬塑状态的黏性土具有此种构造。

1.1.3 土的三相组成

1. 土中固体颗粒

土粒的矿物成分决定于母岩的矿物成分及风化作用类型。粗大的土颗粒往往是岩石经物理风化作用形成的原生矿物，其矿物成分与母岩相同，常见的如石英、长石、云母等，一般砾石、砂等都属此类。这种矿物成分的性质较稳定，由其组成的土表现出无性、透水性较大、压缩性较低等性质。细小的土颗粒主要是岩石经化学风化作用形成的次生矿物，其矿物成分与母岩石完全不相同，如黏土矿物的蒙脱石、伊利石、高龄石等。次生矿物性质不稳定，具有较强的亲水性，遇水膨胀，脱水收缩。上述三种黏土矿物的亲水性依次为：蒙脱石最大，伊利石次之，高龄石最小。

2. 土中水

土中水按其形态可分为液态水、固态水、气态水。固态水是指土中的水在温度降至 0°C 以下时结成的冰。水结冰后体积会增大，使土体产生冻胀破坏土的结构，同时冻土融化使土体强度大大降低。气态水是指土中出现的水蒸气，一般对土的性质影响不大。液态水除结晶水紧紧吸附于固体颗粒的晶格内部外，还存在结合水和自由水两大类。

结合水是受土粒表面电场吸引的水，分强结合水和弱结合水两大类。强结合水指紧靠于土粒表面的结合水，所受电场的作用力很大，几乎完全固定排列，丧失了液体的特性而类似固体。弱结合水是强结合水以外，电场作用范围以内的水，但电场作用力随着与土粒距离增大而减弱，可以因电场引力从一个土粒的周围转移到另一个土粒的周围。弱结合水呈黏滞状态，在外界压力下可以挤压变形，对黏性土的物理力学性质影响较大。

自由水是不受土粒电场引力的水，其性质与普通水相同，分重力水和毛细水两种。重力水存在于地下水位以下的土孔隙中，它能在重力或压力差作用下流动，且能传递水压力，对土粒有浮力作用。

毛细水存在于地下水位以上的土孔隙中，由于水和空气交界处弯液面上产生的表面张力作用，土中自由水从地下水位通过毛细管（土粒间的孔隙贯通，形成无数不规则的毛细管）逐渐上升，形成毛细水。根据物理学可知，毛细管直径越小，毛细水的上升高度越高，故粉粒土中毛细水上升高度比砂类土高，在工程中要注意地基土湿润、冻胀及基础防潮。

3. 土中气体

土中气体常与大气连通或以封闭气泡的形式存在于未被水占据的土孔隙中。前者在受压力作用时能够从孔隙中挤出，对土的性质影响不大；后者在受压力作用时被压缩或溶解于水中，压力减小时又能有所复原，对土的性质有较大影响，如渗透性减小、延长变形稳定的时间等。

1.2 土的物理力学指标

1.2.1 土的物理性质指标

土是由固体颗粒、水和气体组成的三相分散体系。三相的相对含量不同，对土的工程性质有很大影响。

土的物理性质指标包括重度、含水量、土颗粒相对密度、干重度、饱和重度、有效重度、空隙比、孔隙率和饱和度。其中，前三个指标可以由室内试验直接测得，故称为基本指标。

1. 土的重度

土单位体积的重量称为土的重度，用 γ 表示：

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1.2.1)$$

式中 W ——土的总重量， $W = W_s + W_w$ ；

V ——土的总体积, $V = V_s + V_w + V_a$;

其中 W_s ——土粒重量;

W_w ——土中水重量;

V_s ——土粒体积;

V_a ——土中气体体积;

V_w ——土中水体积。

土的重度一般用环刀法测定。天然状态下土的重度变化范围为 $16 \sim 22 \text{ kN/m}^3$ 。土的重度越大,表明土越密实;反之,土的重度越小,表明土越松软。

2. 土的含水量

土中水的重量与土粒重量之比称为土的含水量,用 w 表示:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

土的含水量通常用烘干法测定,也可近似采用酒精燃烧法快速测定。

土的含水量反映土的干湿程度。含水量越大,说明土越湿,一般说来也就越软。天然状态下土的含水量变化范围较大,一般砂土 $0 \sim 40\%$,黏性土 $20\% \sim 60\%$,有的甚至更高。

3. 土粒相对密度

土粒重量与同体积 4°C 时水的重量之比称为土粒相对密度或称为土粒比重,用 d_s 表示。

$$d_s = \frac{W_s}{W_w} \cdot \frac{1}{\gamma_w} \quad (1.2.3)$$

式中 γ_w ——纯水在 4°C 时的重度,取 9.8 kN/m^3 。

土粒的相对密度通常用比重瓶法测定。由于天然土是由不同的矿物颗粒所组成,而这些颗粒的相对密度各不相同,因此试验测定的是平均相对密度。

一般来说,砂土的土粒相对密度为 2.65~2.95,黏性土为 2.70~2.75。

4. 土的干重度

土单位体积中土粒的重量称为土的干重度,用 γ_d 表示:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (1.2.4)$$

土的干重度反映土的紧密程度,工程上常用它作为控制人工填土密实度的指标。

5. 土的饱和重度

土孔隙中全部充满水时单位体积大重量称为土的饱和重度,用 γ_{sat} 表示:

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V} \quad (1.2.5)$$

式中 V_v ——土中孔隙体积。

6. 土的有效重度

水下土的单位体积的重量称为土的有效重度,或称为浮重度,用 γ' 表示:

$$\gamma' = \frac{W_s - V_s \gamma_w}{V} \quad (1.2.6)$$

处于水下的土由于受到水的浮力作用,使土所受重力减小,土受到的浮力等于同体积的水重 $V_s \gamma_w$ 。

7. 土的孔隙比

土中孔隙体积与土粒体积之比称为土的孔隙比,用 e 表示:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.2.7)$$

土的孔隙比可用来评价天然土层的密实程度。一般 $e < 0.6$ 的土

是密实的低压缩性土； $e > 1$ 的土是疏松的高压缩性土。

8. 土的孔隙率

土中孔隙体积与土的总体积之比称为土的孔隙率，用 n 表示：

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1.2.8)$$

土的孔隙率也用来反映土的密实程度，一般粗粒土的孔隙率比细粒土的小。

9. 土颗粒体积率

土颗粒体积与土体积的比值称为土颗粒体积率，用 t_v 表示：

$$t_v = \frac{V_d}{V} \times 100\% \quad (1.2.9)$$

10. 土的饱和度

土中水的体积与孔隙体积之比称为土的饱和度，用 s_r 表示：

$$s_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1.2.10)$$

土的饱和度反映土中孔隙体积被水充满的程度： $s_r = 0$ 表示土处于完全干燥状态； $s_r = 100\%$ 表示土处于完全饱和状态。

1.2.2 土的物理状态指标

1. 无黏性土的密实度

无黏性土一般指具有单粒结构碎石土和砂土，其工程性质与土的密实程度有关。

由于碎石土颗粒较粗，试验时不易取得原状土样，规范采用重型圆锥动力触探锤击数将其密实度划分为松散、稍密、中密和密实四种。判定标准如下：

$N_{63.5} \leq 5$ 松散

$5 < N_{63.5} \leq 10$ 稍密

$10 < N_{63.5} \leq 20$ 中密

$N_{63.5} > 20$ 密实

砂土的密实度通常采用相对密实度 D_r 来判别：

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1.2.11)$$

式中 e ——砂土在天然状态下的孔隙比；

$e_{\max}$ ——砂土的最大孔隙比，即最松散状态下的孔隙比；

$e_{\min}$ ——砂土的最小孔隙比，即最密实状态下的孔隙比。

砂土密实度的判定标准如下：

$0 \leq D_r \leq 0.33$ 松散

$0.33 < D_r \leq 0.67$ 中密

$0.67 < D_r \leq 1$ 密实

由于 e 、 $e_{\max}$ 和 $e_{\min}$ 不易测准，用相对密实度 D_r 来判定砂土密实度存在许多问题，因此规范根据标准贯入试验锤击数 N 来评定砂土的密实度。评定标准如下：

$N \leq 10$ 松散

$10 < N \leq 15$ 稍密

$15 < N \leq 30$ 中密

$N > 30$ 密实

2. 黏性土的物理状态特征

(1) 界限含水量。

根据含水量的不同，黏性土有固态、半固态、可塑状态和流动状态四种物理状态。黏性土由一种状态转变到另一种状态的分界含水量称为界限含水量。其中，由流动状态转变为可塑状态的界限含水量称为液限，用 w_L 表示；由可塑状态转变为半固态时的界限含水量称为塑限，用 w_p 表示；由半固态转变为固态时的界限含水量称为

缩限，用 w_s 表示。

(2) 塑性指数。

液限与塑限的差值称为塑性指数，计算时略去百分号，用 I_p 表示。即

$$I_p = w_L - w_p \quad (1.2.12)$$

(3) 液性指数。

土的天然含水量与塑限的差值除以塑性指数，称为液性指数，用 I_L 表示。即

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p} = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (1.2.13)$$

(4) 灵敏度。

反映黏性土结构性强弱的指标称为灵敏度，用 S_t 表示：

$$S_t = \frac{q_u}{q_0} \quad (1.2.14)$$

式中 q_0 ——原状土的强度；

q_u ——与原状土的含水量、重度等相同，结构完全破坏的重塑土的强度。

根据灵敏度可将性黏土分为高灵敏度、中灵敏度、低灵敏度的土。

$1 < S_t \leq 2$ 低灵敏度

$2 < S_t \leq 4$ 中灵敏度

$S_t > 4$ 高灵敏度

土的灵敏度越高，结构性越强，扰动后土的强度降低得越多。

1.2.3 土的力学指标

土是矿物颗粒所组成的松散颗粒集合体，其力学性质与刚体、弹性体、流体等都有所不同。土的力学指标较多，建筑工程中常用