

袁聚云 汤永净 编著



土 木 工 程 辅 导 丛 书

Soil Mechanics Summary and Exercises

土 力 学

复习与习题



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

土力学复习与习题

袁聚云 汤永净 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

前 言

本书是为了配合土木工程专业的土力学学习需要,在2004年出版的《土力学复习与习题》的基础上编写而成,在编写过程中,充分吸取了师生在教学过程中完成习题时的意见和体会。

本书分为三个部分。第一部分为复习要点,主要是对土力学及其相关知识进行归纳和提炼,包括土的物理性质及工程分类、黏性土的物理化学性质、土中水的运动规律、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力计算、土坡稳定分析和地基承载力,便于读者复习和提高;针对第一部分复习要点,本书在第二部分收集并编写了大量的选择题、判断题以及计算题,以利于读者能举一反三,巩固及提高所学的土力学知识;在第三部分本书对习题做了解答,供读者参考。

本书是为了配合《土力学》课程学习需要而编写,同时也是为了满足各类从事土木工程的技术人员掌握和运用土力学知识的需要,通过对土力学知识要点的复习以及大量习题的练习,以期读者能够对土力学及其相关知识有更全面的理解和掌握,并且提高在设计和施工中运用土力学的能力。

本书由袁聚云和汤永净编著,书中部分习题及解答选自同济大学胡中雄教授等老师的供稿,本书同时还引用了许多教材及习题集中的习题及解答,同济大学研究生韦扣均对本书的插图以及部分习题的解答做了大量的工作,在此一并表示衷心的感谢!

本书可作为土木工程专业的教学参考用书,也可作为研究生入学考试前的复习资料,还可供其他相关专业的师生及工程技术人员参考。

恳请读者提出批评和建议。

编 者

2010年2月于同济大学

目 录

前 言

第一部分 复习要点	1
第一章 土的物理性质及工程分类	3
第一节 土的三相组成	3
第二节 土的颗粒特征	3
第三节 土的三相比例指标	4
第四节 黏性土的界限含水率	6
第五节 无黏性土的密实度	6
第六节 土的工程分类	7
第二章 黏性土的物理化学性质	9
第一节 键力的基本概念	9
第二节 黏土矿物颗粒的结晶结构	10
第三节 黏土颗粒的胶体化学性质	10
第四节 黏性土工程性质的利用和改良	11
第三章 土中水的运动规律	14
第一节 土的毛细性	14
第二节 土的渗透性	14
第三节 流网及其应用	17
第四节 土在冻结过程中水分的迁移和积聚	18
第四章 土中应力计算	20
第一节 土中应力概念	20
第二节 土中自重应力计算	20
第三节 基础底面的压力分布与计算	20
第四节 竖向集中力作用下土中应力计算	21
第五节 竖向分布荷载作用下土中应力计算	22
第六节 应力计算中的其他一些问题	25
第七节 饱和土有效应力原理	26
第五章 土的压缩性与地基沉降计算	27
第一节 土的压缩性概念	27
第二节 土的压缩性试验及指标	27
第三节 地基沉降实用计算方法	29
第四节 饱和黏性土地基沉降与时间的关系	33
第六章 土的抗剪强度	39
第一节 土的抗剪强度概念	39
第二节 土的抗剪强度理论与强度指标	39

第三节	土的抗剪强度指标试验方法及其应用	40
第四节	软土在荷载作用下的强度增长规律	43
第五节	关于土的抗剪强度影响因素的讨论	44
第七章	土压力计算	45
第一节	土压力概念	45
第二节	静止土压力计算	45
第三节	朗金土压力理论	46
第四节	库仑土压力理论	49
第五节	几种特殊情况下的库仑土压力计算	51
第六节	关于土压力的讨论	52
第八章	土坡稳定分析	53
第一节	土坡稳定概念	53
第二节	无黏性土的土坡稳定分析	53
第三节	黏性土的土坡稳定分析	53
第四节	土坡稳定分析的几个问题	58
第九章	地基承载力	60
第一节	地基承载力概念	60
第二节	临塑荷载和临界荷载的确定	61
第三节	极限承载力计算	62
第四节	按规范方法确定地基承载力	64
第五节	关于地基承载力的讨论	65
第二部分	习题	67
第一章	土的物理性质及工程分类	69
第二章	黏性土的物理化学性质	77
第三章	土中水的运动规律	79
第四章	土中应力计算	83
第五章	土的压缩性与地基基础沉降计算	90
第六章	土的抗剪强度	100
第七章	土压力计算	108
第八章	土坡稳定分析	115
第九章	地基承载力	122
第三部分	习题参考解答	129
第一章	土的物理性质及工程分类	131
第二章	黏性土的物理化学性质	144
第三章	土中水的运动规律	145
第四章	土中应力计算	148
第五章	土的压缩性与地基基础沉降计算	159

第六章	土的抗剪强度.....	173
第七章	土压力计算.....	187
第八章	土坡稳定分析.....	200
第九章	地基承载力.....	214
参考文献		225

第一部分

复习要点

第一章 土的物理性质及工程分类

第一节 土的三相组成

土是由固体颗粒(固相)、水(液相)和气体(气相)三部分组成的,称为土的三相组成。随着三相物质的质量和体积的比例不同,土的性质也随之发生变化。

土的固相包括无机矿物颗粒和有机质,是构成土的骨架最基本的物质。

土的液相是指存在于土孔隙中的水。

土的气相是指充填在土孔隙中的气体。

第二节 土的颗粒特征

天然土是由大小不同的颗粒所组成的,土粒的大小通常以其平均直径表示,称为粒径,又称为粒度。

土的颗粒大小及其组成情况,通常用土中各个不同粒组的相对含量(各粒组干土质量的百分比)来表示,称为土的颗粒级配,它可用以描述土中不同粒径土粒的分布特征。

常用的土的颗粒级配的表示方法有表格法、累计曲线法和三角坐标法。

(1) 表格法:是以列表形式直接表达各粒组的相对含量。表格法有两种表示方法,一种是以累计含量百分比表示的;另一种是以粒组表示的。

(2) 累计曲线法:是一种图示的方法,通常用半对数纸绘制,横坐标(按对数比例尺)表示某一粒径,纵坐标表示小于某一粒径的土粒的百分含量。

在累计曲线上,可确定两个描述土的级配的指标

不均匀系数

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

曲率系数

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

式中, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别相当于累计百分含量为 10%、30% 和 60% 的粒径。 d_{10} 称为有效粒径; d_{60} 称为限制粒径。

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况,曲率系数则是描述累计曲线整体形状

的指标。

(3) 三角坐标法:也是一种图示法,它是利用等边三角形内任意一点至三个边的垂直距离的总和恒等于三角形之高的原理,用以表示组成土的三个粒组的相对含量。

第三节 土的三相比比例指标

土的三相物质在体积和质量上的比例关系称为三相比比例指标。

三相比比例指标反映了土的干燥与潮湿、疏松与紧密,是评价土的工程性质的最基本的物理性质指标,也是岩土工程勘察报告中不可缺少的基本内容。

把在土体中实际上是处于分散状态的三相物质理想化地分别集中在一起,构成如图 1-1 所示的三相图。土的体积 V 为土中空气的体积 V_a 、水的体积 V_w 和土粒的体积 V_s 之和;土的质量 m 为土中空气的质量 m_a 、水的质量 m_w 和土粒的质量 m_s 之和;通常认为空气的质量可以忽略,则土样的质量就仅为水和土粒质量之和。

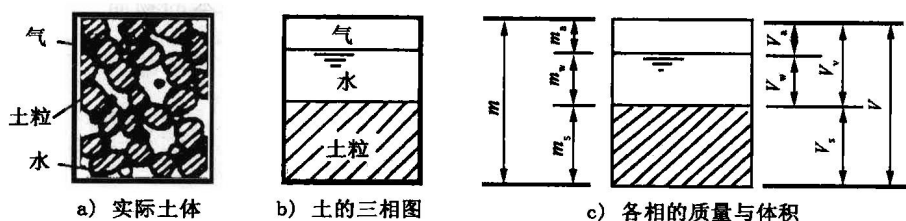


图 1-1 土的三相图

土的三相比比例指标可分为两类,一类是试验指标;另一类是换算指标。

(一) 试验指标

通过试验测定的指标称为试验指标,包括土的密度、土粒比重和含水率。

1. 土的密度 ρ

土的密度是指单位体积土的质量,单位为 g/cm^3 ,若土的体积为 V ,质量为 m ,则土的密度 ρ 可表示为

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

由土的质量产生的单位体积的重力称为土的重力密度 γ ,简称为重度,其单位为 kN/m^3 ,即

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

对天然土求得的密度称为天然密度或湿密度,相应的重度称为天然重度或湿重度。

2. 土粒比重 G_s

土粒比重是指土粒质量 m_s 与同体积 4°C 时纯水的质量之比,可表示为

$$G_s = \frac{m_s}{V_s \rho_{w1}} = \frac{\rho_s}{\rho_{w1}} \quad (1-5)$$

式中, ρ_{w1} 为纯水在 4°C 时的密度 ($= 1\text{g}/\text{cm}^3$); ρ_s 为土粒密度。

3. 土的含水率 w

土的含水率是指土中水的质量 m_w 与土粒质量 m_s 之比,可表示为

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

(二) 换算指标

通过计算求得的指标称为换算指标,包括土的干密度、饱和密度、有效密度、孔隙比、孔隙率和饱和度。

1. 土的干密度 ρ_d , 饱和密度 ρ_{sat} 和有效密度 ρ'

土的干密度是指土的颗粒质量 m_s 与土的总体积 V 之比,单位为 g/cm^3 ,可表示为

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1-7)$$

土的饱和密度是当土的孔隙中全部为水所充满时的密度,即全部充满孔隙的水的质量 m_w 与颗粒质量 m_s 之和与土的总体积 V 之比,单位为 g/cm^3 ,可表示为

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (1-8)$$

式中 V_v ——土的孔隙体积;

ρ_w ——水的密度($\approx 1 \text{ g}/\text{cm}^3$)。

单位土体积中土粒的质量扣除同体积水的质量后,即为单位土体积中土粒的有效质量,称为土的有效密度(又称浮密度),单位为 g/cm^3 ,可表示为

$$\rho' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} = \rho_{sat} - \rho_w \quad (1-9)$$

当干密度、饱和密度和有效密度乘以重力加速度 g ,则分别为干重度 γ_d ,饱和重度 γ_{sat} 和有效重度 γ' ,单位为 kN/m^3 ,由式(1-10)~式(1-12)表示:

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (1-10)$$

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g \quad (1-11)$$

$$\gamma' = \rho' g \quad (1-12)$$

2. 土的孔隙比 e 和孔隙率 n

土的孔隙比是土中孔隙的体积 V_v 与土粒体积 V_s 之比,以小数计,可表示为

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-13)$$

土的孔隙率是土中孔隙的体积 V_v 与土的总体积 V 之比,以百分数计,可表示为

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-14)$$

3. 土的饱和度 S_r

土的饱和度是指土中孔隙中水的体积 V_w 与孔隙体积 V_v 之比,以百分数计,可表示为

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

(三) 三相比例指标的互相换算

土的三相比例指标之间可以互相换算,根据土的密度(或重度)、土粒比重和土的含水率三个试验指标,可以用换算求得全部计算指标,也可以用某几个指标换算其他的指标,土的三相比例指标的换算关系见表 1-1。

表 1-1

土的三相比例指标换算关系

换算指标	用试验指标计算的公式	用其他指标计算的公式
孔隙比 e	$e = \frac{G_s(1+w)\gamma_w}{\gamma} - 1$	$e = \frac{G_s\gamma_w}{\gamma_d} - 1$ $e = \frac{wG_s}{S_r}$
饱和重度 γ_{sat}	$\gamma_{sat} = \frac{\gamma(G_s - 1)}{G_s(1+w)} + \gamma_w$	$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e}\gamma_w$ $\gamma_{sat} = \gamma' + \gamma_w$
饱和度 S_r	$S_r = \frac{\gamma G_s w}{G_s(1+W)\gamma_w - \gamma}$	$S_r = \frac{wG_s}{e}$
干重度 γ_d	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$	$\gamma_d = \frac{G_s}{1+e}\gamma_w$
孔隙率 n	$n = 1 - \frac{\gamma}{G_s(1+w)\gamma_w}$	$n = \frac{e}{1+e}$
有效重度 γ'	$\gamma' = \frac{\gamma(G_s - 1)}{G_s(1+w)}$	$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

第四节 黏性土的界限含水率

黏性土从一种状态变到另一种状态的分界含水率称为界限含水率,流动状态与可塑状态间的界限含水率称为液限 w_L ;可塑状态与半固体状态间的界限含水率称为塑限 w_P ;半固体状态与固体状态间的界限含水率称为缩限 w_S 。

测定黏性土的塑限 w_P 的试验方法主要是滚搓法。测定黏性土的液限 w_L 的试验方法主要有圆锥仪法和碟式仪法,也可采用液塑限联合测定法测定土的液限和塑限。

黏性土可塑性的大小可用黏性土处在可塑状态的含水率变化范围来衡量,从液限到塑限含水率的变化范围愈大,土的可塑性愈好,这个范围称为塑性指数 I_P 。

$$I_P = w_L - w_P \quad (1-16)$$

塑性指数习惯上用不带 % 的数值表示。

液性指数 I_L 是指黏性土的天然含水率和塑限的差值与塑性指数之比。液性指数可被用来表示黏性土所处的软硬状态,由下式定义:

$$I_L = \frac{w - w_P}{I_P} = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} \quad (1-17)$$

液性指数越大,表示土越软。可塑状态的土的液性指数在 0 到 1 之间,液性指数大于 1 的土处于流动状态,小于 0 的土则处于固体状态或半固体状态。

第五节 无黏性土的密实度

无黏性土一般是指碎石土和砂土,粉土属于砂土和黏性土的过渡类型,但是其物质组

成、结构及物理力学性质主要接近砂土,特别是砂质粉土。

无黏性土的密实度是判定其工程性质的重要指标,它综合地反映了无黏性土颗粒的矿物组成、颗粒级配、颗粒形状和排列等对其工程性质的影响。

(一) 砂土相对密度

土的孔隙比一般可以用来描述土的密实程度,但砂土的密实程度并不单独取决于孔隙比,而在很大程度上还取决于土的颗粒级配情况。

当砂土处于最密实状态时,其孔隙比称为最小孔隙比 $e_{\min}$;而砂土处于最疏松状态时,其孔隙比则称为最大孔隙比 $e_{\max}$ 。砂土的相对密度 D_r 可按下式计算:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1-18)$$

当砂土的天然孔隙比接近于最小孔隙比时,相对密实度 D_r 接近于 1,表明砂土接近于最密实的状态;而当天然孔隙比接近于最大孔隙比则表明砂土处于最松散的状态,其相对密实度接近于 0。

根据砂土的相对密度,可将砂土划分为密实、中密和松散三种密实度。

(二) 无黏性土密实度分类

在工程实践中通常用标准贯入击数来划分砂土的密实度。

标准贯入试验是用规定的锤重(63.5kg)和落距(76cm),把标准贯入器(带有刃口的对开管,外径50mm,内径35mm)打入土中,记录贯入一定深度(30cm)所需的锤击数 N 值的原位测试方法。根据标准贯入锤击数可将砂土划分为密实、中密、稍密和松散四种状态。

碎石土的密实度可根据圆锥动力触探锤击数分类;粉土的密实度可根据孔隙比分类。

第六节 土的工程分类

(一) 碎石土分类

碎石土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量超过总质量 50% 的土,按颗粒级配和颗粒形状可进一步划分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾和角砾。

(二) 砂土分类

砂土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过总质量 50%,且粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过总质量的 50% 的土。按颗粒级配,砂土可进一步划分为砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂。

(三) 细粒土分类

粒径大于 0.075mm 的颗粒含量不超过总质量 50% 的土属于细粒土,按塑性指数,细粒土可划分为粉土和黏性土两大类,黏性土可再进一步划分为粉质黏土和黏土两个亚类。

粉土是介于砂土和黏性土之间的过渡性土类,它具有砂土和黏性土的某些特征,根据黏

粒含量可以将粉土划分为砂质粉土和黏质粉土。

(四) 按塑性图分类

塑性图以塑性指数为纵坐标，液限为横坐标，如图 1-2 所示。图中有两条经验界限，斜线称为 A 线，它的方程为 $I_p = 0.73(w_L - 20)$ ，它的作用是区分有机土和无机土、黏土和粉土，A 线上侧是无机黏土，下侧是无机粉土或有机土；竖线称为 B 线，其方程为 $w_L = 50\%$ ，其作用是区分高塑性土和低塑性土。

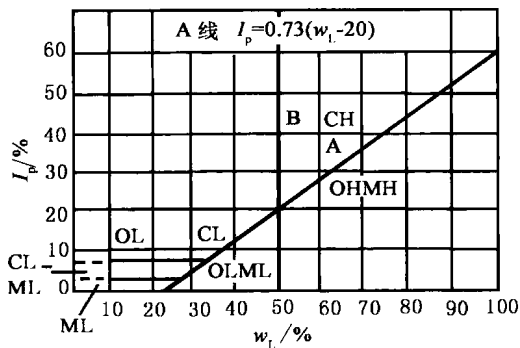


图 1-2 塑性图

在 A 线以上的土分类为黏土，液限大于 50%，称为高塑性黏土 CH，液限小于 50%，称为低塑性黏土 CL；

在 A 线以下的土分类为粉土，液限大于 50%，称为高塑性粉土 MH，液限小于 50%，称为低塑性粉土 ML。在低塑性区，如果土样处于 A 线以上，而塑性指数范围在 4 到 7 之间，则土的分类应给以相应的搭界分类 CL - ML。

在应用塑性图分类时，应注意液限试验标准的不同，在欧美国家是采用卡萨格兰特碟式仪测定的，而我国则采用锥式仪沉入深度

17mm 的标准，因此用塑性图分类的结果也可能不同。

第二章 黏性土的物理化学性质

黏土矿物可以分成蒙脱石、伊利石和高岭石三种类型。这些黏土矿物具有独特的结晶结构特征,即组成矿物的原子和分子的排列以及与原子与原子之间和分子与分子之间的联结力,这种联结力统称为键力。

黏性土的可塑性、压缩性、胀缩性、强度等工程性质主要受上述各种因素与颗粒周围介质之间的相互作用所制约,这也是黏性土物理化学特性的本质。

第一节 键力的基本概念

所谓键力是指原子与原子之间或分子与分子之间的一种联结力。键力主要有化学键、分子键和氢键三种。

(一) 化学键

原子与原子之间的联结称为化学键,也称为主键或高能键。根据联结的形式又可分为离子键、共价键和金属键三种。

不同元素的原子通过化学反应构成一种新的物质分子,异性原子之间的联结力称为离子键;两个同性原子形成同一元素分子的联结力称为共价键;通过自由电子而将原子或离子联结成结晶格架的联结力称为金属键。离子键、共价键和金属键都属于主键,主键的影响范围最小,而其联结能则最大。

(二) 分子键

分子键又称范德华(Vander Waals)键或次键、低能键。所谓分子键就是指分子与分子之间的联结力。分子键的能量大小与温度有关,当温度升高时,其能量就减小。

分子键力的影响范围比离子键力大得多,但其键能则比离子键能小得多。

(三) 氢键

氢键是介于主键与次键之间的一种键力。氢原子失去一个电子成为一个裸露的原子核,当它与其他带有负电荷的原子相互吸引时,即构成特殊的氢键。氢键的影响范围很小,其键能比离子键能大。

土粒本身的强度是由主键形成的,而土粒与土粒之间,土粒与水分子之间的吸引力则由次键及氢键形成的,土粒之间的联结力远比土粒本身的强度小,因此,土体的强度主要取决于土粒之间的联结。

第二节 黏土矿物颗粒的结晶结构

黏土矿物的结晶结构主要由硅氧四面体和氢氧化铝八面体(也称三水铝石八面体)两个基本结构单元组成。四面体片与八面体片的不同组合堆叠,形成了不同类型的黏土矿物,土中常见的黏土矿物主要有高岭石、蒙脱石和伊利石三大类。

高岭石类黏土矿物中,结构单位层之间为氧与氢氧联结或氢氧与氢氧联结,单位层与单位层之间除范德华键外,还有氢键,因此提供了较强的联结力,所以高岭石的膨胀性和压缩性都较小。

蒙脱石类黏土矿物中,结构单位层间为氧与氧联结,其键力很弱,易为具有氢键的强极化水分子楔入而分开。因此,蒙脱石的晶格活动性极大,表现出来的工程特性是膨胀性及压缩性都比高岭石大得多。

伊利石矿物晶格结构虽与蒙脱石相似,但在单位层面之间嵌有带正电荷的钾离子,单位层之间的联结介于高岭石和蒙脱石之间,故表现出来的膨胀性和压缩性也介于高岭石和蒙脱石之间。

第三节 黏土颗粒的胶体化学性质

黏土颗粒粒径非常微小,小于 0.005mm ,在介质中具有明显的胶体化学特性,这起源于黏土颗粒表面带电性。

(一) 黏土颗粒表面带电的成因

黏土颗粒表面带电的成因,主要有以下几个方面:

- (1) 边缘破键造成电荷不平衡。
- (2) 同晶置换作用。
- (3) 水化解离作用。
- (4) 选择性吸附。

(二) 双电层的概念

根据水受颗粒表面静电引力作用的强弱,可以将土中水划分为三种类型:强结合水、弱结合水和自由水(图 2-1)。

1. 强结合水

强结合水是指紧靠土颗粒表面的水,受表面电荷静电引力最强。静电引力把极性水分子和水化阳离子牢固地吸附在颗粒表面上形成固定层。这部分水的特征是没有溶解能力,不能传递静水压力,不能自由移动,只有吸热变成蒸汽时才能移动。强结合水层称为吸附层或固定层。

2. 弱结合水

弱结合水就是紧靠强结合水外围的一层水膜。在这层水膜范围内,水分子和水化阳离子仍受到一定程度的静电引力,离颗粒表面距离越远,受静电引力越小。这部分的水仍然不

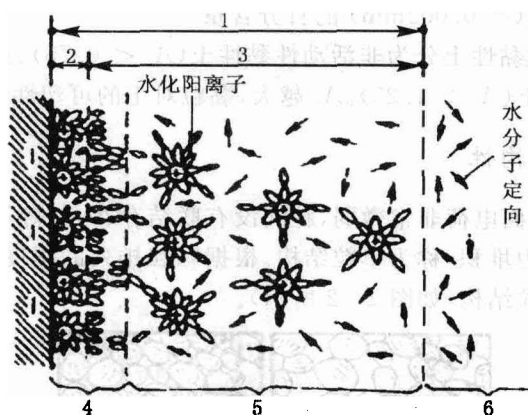


图 2-1 结合水形成的一般图式

1—双电层；2—吸附层；3—扩散层；4—吸附结合水；5—渗透吸附水；6—自由水

能传递静水压力，但水膜较厚的弱结合水能向邻近较薄水膜处缓慢转移。

弱结合水层称为扩散层。固定层和扩散层与土粒表面负电荷一起构成所谓双电层。

扩散层水膜的厚度对黏性土的工程性质有直接的影响。水膜厚度大，土的可塑性高，颗粒之间的距离相对也大，因此土体的膨胀性和收缩性大，土的压缩性也大，而强度相对降低。

3. 自由水

自由水又称重力水，是指不受土粒表面电荷电场影响的水。它的性质和普通水一样，能传递静水压力，在水头差作用下流动，冰点为 0°C ，具有溶解能力。

第四节 黏性土工程性质的利用和改良

黏土矿物具有特殊的结晶构造和带电的特性，在工程实践中，可以利用其特性为工程服务；也可根据其特性，正确有效地选择处理的措施，达到改良和加固的目的。

(一) 改良与加固方法

在电场作用下，带有负电荷的黏土颗粒向阳极移动，这种电动现象称为电泳；而水分子及水化阳离子向阴极移动，这种电动现象称为电渗。

利用黏土矿物特性对黏性土工程性质进行改良与加固的方法主要有：

- (1) 采用电渗排水的方法降低地下水位。
- (2) 利用电渗电泳原理来改良软黏土的工程性质。
- (3) 利用高价阳离子置换低价离子的办法来改善土的工程性质。

除了黏土矿物的成份对工程性质有明显影响外，黏土颗粒的含量也有较大的影响。在工程实践中，提出了一个既能反映黏土矿物成分，又能反映黏土颗粒含量影响的综合指标 A_c ，称为胶体活性指数，其表达式为

$$A_c = \frac{I_p}{P_{<0.002}} \quad (2-1)$$

式中 I_p ——土的塑性指数；