

土木工程系列

高等学校“十一五”规划教材

高等土力学

主 编 徐学燕
副主编 邱明国

哈尔滨工业大学出版社

高等土力学

主 编 徐学燕
副主编 邱明国

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

全书共分5章:岩土的物理化学性质,黏性土与无黏性土的应力-应变特性,土的弹塑性模型,低温条件下土的应力-应变特性,土的渗透性与渗流计算等。全书力求用通顺易懂的语言、深入浅出的叙述反映近代土力学国内、外的最新成果,为各类土木结构的基础工程沉降计算与稳定计算提供基础理论知识。

本书可作为高等院校岩土工程研究生及土木、交通等建筑专业学生教学用书以及有关科研、工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高等土力学/徐学燕主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2008.5

ISBN 978-7-5603-2664-1

I.高… II.徐… III.土力学-研究生-教材 IV.TU43

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第028693号

策划编辑 郝庆多

责任编辑 张 瑞

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 8 字数 200千字

版 次 2008年9月第1版 2008年9月第1次印刷

印 数 1~3 000册

书 号 ISBN 978-7-5603-2664-1

定 价 19.00元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

原高等土力学讲义已使用多年,根据多届硕士研究生使用情况,结合我们的教学体会与近年来科研项目研究成果,对该讲义进行了全面的修改,在哈尔滨工业大学出版社的帮助下,完成了此书。

本书力图用简练易懂的文字反映近代土力学国内外的新成果,以求硕士研究生知识的深广度在本科的基础上能有所提高。鉴于公路、铁路、电网杆塔、输油管道、工业民用建筑、水利设施在季节冻土区及多年冻土区快速建设,为适应该建设形式需求,结合哈尔滨工业大学长期从事低温条件下岩土的研究工作,本书对低温条件下土的应力变形特性给予加强,增加了叙述该方面内容的章节,这是与其他同类教材不同之处,仅供教学中参考。

本书由哈尔滨工业大学岩土与地下工程教研室徐学燕教授任主编,邱明国副教授任副主编。编写分工为:哈尔滨工业大学胡庆立副教授编写第1章;燕山大学李海山博士编写第2章;哈尔滨工业大学徐学燕教授编写第3章;哈尔滨工业大学邱明国副教授编写第4、5章。硕士研究生李孝臣、陶传迁热心地参加了许多工作,在此深表谢意。

限于编者水平,书中疏漏与不足之处在所难免,恳请批评指正。

作者
2008年6月

目 录

第 1 章 岩土的物理化学性质	1
1.1 黏土矿物颗粒的结晶结构和基本特性	1
1.2 土的结构和构造	6
1.3 岩土工程化学及土工合成材料概论	9
第 2 章 黏性土与无黏性土的应力 - 应变特性	14
2.1 应力路径	14
2.2 土体的压缩性	20
2.3 无黏性土的应力 - 应变特性	33
第 3 章 土的弹塑性模型	39
3.1 土中一点的应力应变状态及表达方法	39
3.2 土的屈服破坏准则	43
3.3 硬化规律与流动法则	50
3.4 弹塑性模型简介	52
第 4 章 低温条件下土的应力 - 应变特性	63
4.1 温度升降过程中土体的冻胀与融化	63
4.2 土体冻胀的影响因素	68
4.3 冻土的力学特性	72
4.4 冻土地基的附加应力和法向冻胀应力	79
4.5 冻结土体融化过程中的变形量	83
第 5 章 土的渗透性与渗流计算	90
5.1 土的渗透性	90
5.2 流网及其应用	100
5.3 基坑排水的计算	107
附录 A	117
参考文献	120

第 1 章 岩土的物理化学性质

土是由矿物和岩石碎屑构成的松软集合体,是岩石长期风化的产物,一般是由固相、液相和气相三相组成。固相是指土体的固体颗粒部分,包括岩石风化产物和生物残骸分解后形成的物质,具有多种矿物成分,骨架间的空隙为液相和气相所填充。土中空隙大部分是相互连通的,形成多孔介质。液相主要是指水及其溶解的少量可溶盐类。气相主要是指空气、水蒸气,有时还有沼气等。土中三相物质的含量比例不同,其形态和性状也就不同。土是自然堆积而形成的,固体颗粒间的联结很弱,因此,其强度较其他固体材料要低得多,且极易随外界环境(湿度、温度)的改变而变化。由于土的成因类型、形成历史不同,其性质及性状极其复杂、多变。为了对土的复杂多变特性的形成原因和作用机理有一基本的了解,本章拟从土质学的角度出发,考虑土的成因、成分及微观结构、矿物成分、土颗粒的带电性、土的组成、组织结构与构造、土体结构性的定量化参数、土的物理化学性质以及岩土工程化学等诸方面影响对土的性质做一简单的探讨,并简要介绍土质改良的一些措施。

1.1 黏土矿物颗粒的结晶结构和基本特性

1.1.1 土质学与土力学的相互关系

土质学属地质学的一个分支,它从土的成因及成分出发,研究土的基本工程性质及影响因素、土质变化的本质原因,并以此为基础进一步研究荷载、温度、水等作用下土成分与性质的变化规律以及土性有效改良措施的一门学科。

土力学是工程力学的分支,以太沙基的著作《SOIL MECHANICS》(土力学)为标志,在 1925 年成为独立的学科。土力学将土视为物理 - 力学系统,根据土的应力 - 应变 - 强度关系提出力学计算模型,并以弹塑计算力学为工具求解土在荷载、温度及水作用下的应力、应变以及土压力、地基承载力、土坡稳定等问题。

土质学与土力学的研究内容、学科体系各有特点,同时又密切相关、相互渗透、相互结合。土力学常常利用土质学中土的成因、成分及微观结构等知识来进一步说明土力学现象的本质,并与土的本构关系研究结合起来,以便更好地解决实际工程中有关土力学的问题。

1.1.2 原生矿物与次生矿物

岩石在各种风化作用下形成的大小不同的颗粒经过搬运、沉积作用形成土,风化作用包括物理风化、化学风化、生物风化等形式。该过程也决定了土一般由固相、液相、气相三相组成。研究证明,黏土的固相,特别是矿物成分在很大程度上决定了土的物理力学性质。固相中的矿物成分包括原生矿物和次生矿物。

1. 原生矿物

物理风化是物理作用使岩石从大的块体分裂为小的块体以及像砂粒大小的土粒的过程,其效果仅仅是使岩(土)由粗变细,由大变小,化学成分与母岩相同,并未改变。粗颗粒的土(碎石、卵石等)及较细颗粒土中(粉土、砂土)的大部分矿物都是原生矿物。这类矿物的化学性质稳定或较稳定,具有较强的抗水性或抗风化能力,亲水性较弱,对土的性质的影响主要由矿物颗粒大小、组成、矿物类型、颗粒形状、表面特征、硬度等因素决定。

2. 次生矿物

岩屑经化学反应变为成分与母岩不同的新矿物,颗粒较细,称为次生矿物。根据在水中的溶解程度,可将次生矿物划分为可溶的次生矿物和不可溶的次生矿物两类。可溶次生矿物主要指各种矿物中化学性质活泼的 K, Na, Ca, Mg 及 Cl, S 等元素,这些元素呈阳离子及酸根离子状态。溶于水后,在迁移过程中,因蒸发浓缩作用形成可溶的卤化物、硫酸盐和碳酸盐。不可溶的次生矿物有次生二氧化硅、倍半氧化物、黏土矿物等。黏土矿物包括高岭石、蒙脱石和伊利石(水云母),这三种矿物成分对细颗粒黏土的物理性质及力学性质起着显著的作用,决定着黏土的可塑性、强度、变形等工程性质。

3. 黏土矿物的晶体结构

黏土矿物的微观结构由两种原子层(晶片)构成:一种是由 Si - O 四面体构成的硅氧晶片,如图 1.1 所示;另一种是由 Al - OH 八面体构成的铝氢氧晶片,如图 1.2 所示。自然界中,四面体、八面体不是单独存在而是成层状排列的,六个四面体在一个平面上排列起来,以相邻的氧原子为公共结点,在平面上构成六边形网络,称为四面体层(即硅氧晶片),如图 1.3 所示;八面体也是连成一片的,其交接处的原子也为相邻单元所共用,称为八面体层(铝氢氧晶片),如图 1.4 所示。

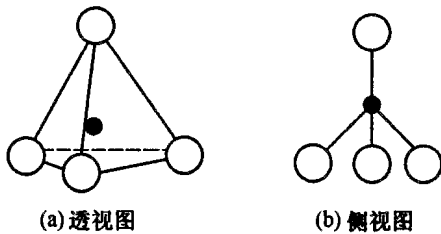


图 1.1 硅氧四面体

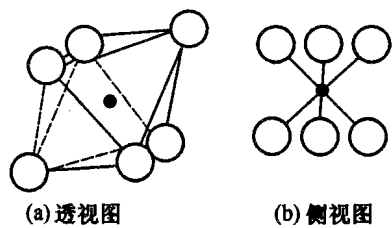


图 1.2 铝氢氧八面体

○ — 氧离子(O²⁻) ; ● — 硅离子(Si⁴⁺)

○ — 氢氧(OH⁻) ; ● — 铝离子(Al³⁺)

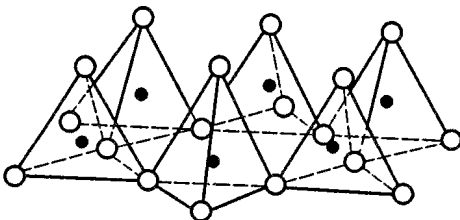


图 1.3 硅氧四面体层(片)

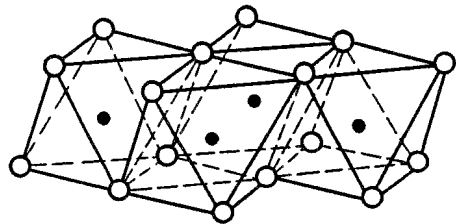


图 1.4 铝氢氧八面体层(片)

4. 黏土矿物的类型

为叙述方便,常用一个梯形符号表示硅氧四面体层(硅片),用一个矩形符号表示铝氢氧八

面体层(铝片),硅片与铝片以不同的形式结合便形成了各种不同的黏土矿物,其中最具有代表性的有:高岭石、蒙脱石和伊利石三种类型。

高岭石类矿物等组成如图 1.5(a) 所示,常产生于酸性环境中,为花岗岩风化后的产物,其分子式为 $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ 。高岭石的命名来源于我国江西浮梁的高岭山,因在那里最早发现了高岭石矿物而命名。与其类似的还有多水高岭石,其晶胞间有水分子进入,呈结晶水状态,分子式为 $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot 4H_2O$ 。高岭石的结构单元为一层硅片和一层铝片组成的一个晶胞,称为 1:1 晶格;晶胞间的联结是氧原子与氢氧基间形成的氢键,联结力很强,致使晶格不能自由活动,水分子很难进入晶胞之间。因此,具有良好的工程性质,如水稳定性好、可塑性低、压缩性低、亲水性差。多水高岭石属高岭石组矿物中的一种,在各片之间含有结晶水,此种矿物是圆杆状或扁平的棒状,含此种矿物的土层或岩层,水侵入后其棒状矿物将起滚珠轴承作用,使各片产生相对滑动,相对变形增大。

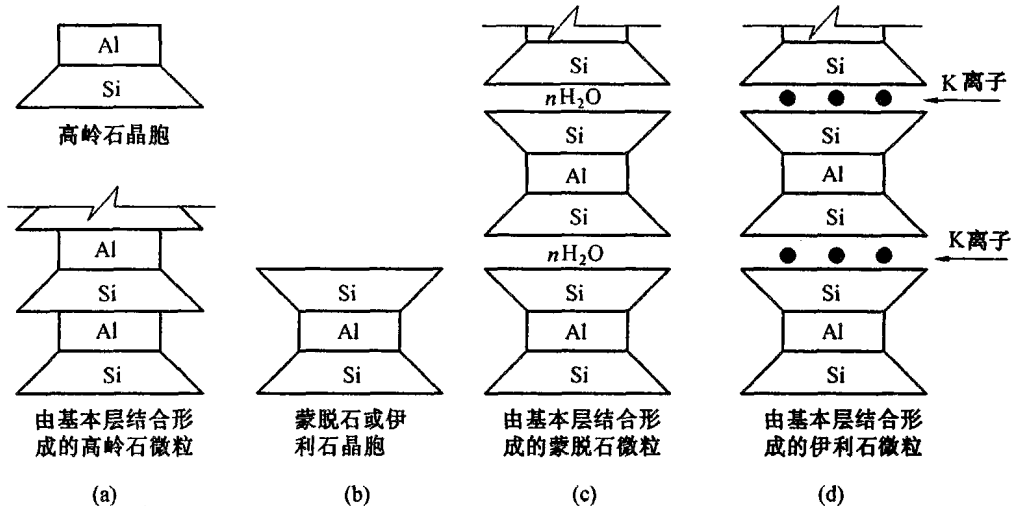


图 1.5 高岭石、蒙脱石及伊利石的组成示意图

蒙脱石分子式为 $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$,其组成如图 1.5(b) 所示,常由火山灰、玄武岩在碱性和排水不良的环境中风化而成。其晶胞的基本结构是两硅片中间夹一铝片,为 2:1 晶格。由于晶胞的上下两面都是氧原子,故晶胞间的联结很弱,水分子极易进入晶胞之间而改变晶胞间的距离。因此,蒙脱石吸水后强烈膨胀,体积可增大数倍,是很多工程地质问题的起因。蒙脱石矿物呈灰白色、青色,具有高塑性、高压缩性、低强度、低渗透性的特点。工程中,当蒙脱石含量达到 5% 以上时,土体就会有显著的胀缩性。

伊利石又称水云母,分子式为 $KAl_2(AlSi_3O_{10}) \cdot (OH)_2 \cdot H_2O$,其组成如图 1.5(d) 所示,是云母类水化物黏土矿物的统称,其结构单元类似于蒙脱石的 2:1 三层结构,只是其硅片中的 Si 原子约有 20% 被 Al 所替换。伊利石与蒙脱石的最大区别是伊利石晶胞间的结合不是范德华键力,而是由钾离子或钠离子形成类似共价键的联结力,故其联结力介于高岭石和蒙脱石之间,工程特性也介于二者之间,是较不稳定的中间产物。

除上述三种最常见的黏土矿物外,还有绿泥石和水铝英石。绿泥石由三层结构中间再夹一层铝氢氧八面体连接起来,属 2:1:1 型的层状结构,分子式为 $Mg_6[AlSi_3O_{10}](OH)_8 \cdot n(H_2O)$,一般由变质岩风化而来,性质类似伊利石。除上述层状结构外,还有链状结构的黏土矿物,它们

是碱性环境中的风化产物,但不多见。水铝英石属非晶质矿物,多为四面体和八面体无规律排列组成的矿物,通常同多水高岭石伴生,由火山灰在良好的排水条件下风化而成。

各种不同类型的黏土矿物的工程性质差异显著,表 1.1 所列指标可清楚地说明这个问题,同样的黏粒含量,塑性指数以蒙脱石最高,伊利石次之,高岭石最低;蒙脱石的渗透系数最小,高岭石的渗透系数最大;蒙脱石的层间联结最弱、抗剪强度最低。

表 1.1 不同黏土矿物的特性数据

矿物名称	硅铝率	比表面积 $/(m^2 \cdot g^{-1})$	离子交换量 $/(mmol \cdot 100 g^{-1})$	液限 W_L	塑性指数 I_p	压缩指数	有效内摩擦角
高岭石	2	10 ~ 20	3 ~ 15	50	20	0.2	$20^\circ \sim 30^\circ$
伊利石	2 ~ 4	65 ~ 100	10 ~ 40	100 ~ 120	50 ~ 65	0.6 ~ 1	$20^\circ \sim 25^\circ$
蒙脱石	> 4	外 50 ~ 120 内 700 ~ 800	80 ~ 150	150 ~ 700	100 ~ 650	1 ~ 3	$12^\circ \sim 20^\circ$

1.1.3 黏土矿物的硅铝率与判别

由于黏土矿物成分对于黏性土的工程性质有重要影响,因此对工程场地的黏土矿物种类鉴别十分重要。常用的判别方法包括电子显微镜分析法、X 射线差热分析法、化学分析法和染色体法等。前三种方法都需要精密的仪器,后两种方法相对简单些。常用的化学分析法是通过黏土矿物的全量化学分析,测得各主要元素的相对含量,如 SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , CaO , K_2O , Na_2O , SO_3 , H_2O 等(其中 Al_2O_3 , Fe_2O_3 称为倍半氧化物,用 R_2O_3 表示),由此推算出分子式,从而鉴别其矿物类型。

1. 黏土矿物的硅铝率

不同黏土矿物土中所含 SiO_2 与 R_2O_3 分子数的比值称为硅铝率。如 SiO_2 的含量为 $x\%$, 分子量为 60.06; Al_2O_3 的含量为 $y\%$, 分子量为 101.94; Fe_2O_3 的含量为 $z\%$, 分子量为 165.7, 则硅铝率 K 为

$$K = \frac{\frac{x}{60.06}}{\frac{y}{101.94} + \frac{z}{165.7}} \quad (1.1)$$

从黏土矿物的结构单元可知,蒙脱石是 2:1 晶格,而高岭石是 1:1 晶格,蒙脱石的 SiO_2 含量比高岭石高,故其硅铝率比高岭石高得多;伊利石虽然也是 2:1 晶格,但由于硅片中的部分硅被铝所替代,其 SiO_2 相对含量比蒙脱石低,因此硅铝率介于蒙脱石与高岭石之间。一般情况下,高岭石硅铝率 $K = 2$,蒙脱石硅铝率 $K > 4$,伊利石硅铝率 $K = 2 \sim 4$,由硅铝率的大小可粗略地判别黏土矿物的类型。

2. 黏土矿物的比表面积

对于黏性土来讲,不仅黏土矿物的类型对土的性质有着重要的影响,而且由于黏土矿物颗粒表面具有和水相互作用的能力,黏土矿物表面与水相接触的范围即其表面积对土的工程性质也有重要影响,表面积越大,这种能力越强。通常用比表面积来表征土的表面积的大小,即单位质量(或体积)的黏土矿物颗粒所具有的表面积,如按单位质量计,则其单位为 m^2/g 。各种黏

土矿物由于分散度及晶格构造特征不同,表面积具有明显的差别。蒙脱石类矿物的晶胞间连接力很弱,不仅具有外表面,同时还具有巨大的内表面。土中常见黏土矿物的比表面积见表 1.1。

1.1.4 黏土矿物及其与水的相互作用

1. 黏土颗粒的带电性

列依斯(Reuss)在 1807 年通过试验证明黏土颗粒是带负电荷的。试验方法及装置如图 1.6 所示,在潮湿的黏土中插入两根玻璃管,在玻璃管内撒上一层洁净的砂土,注入清水到同样的高度,在清水中插入电极,通以直流电。经过一段时间后发现,正极玻璃管内的水慢慢变浑浊且水位逐渐下降,这说明带负电的黏土颗粒在电场力作用下移向阳极,称为电泳;负极水清澈透明但水位升高,是含有的阳离子(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等)与极性水分子一起向负极移动的结果,这种现象称为电渗。电泳和电渗是同时发生的,统称为黏性土的电动现象。黏性土中的孔隙大部分被结合水所填充,堵塞了自由水渗透的通道,因而透水性差,使黏性土中排水疏干十分困难。利用电渗现象,采取电渗排水的措施可有效地疏干地下水、减少土的含水量、改善土的工程性质。但是,电渗加固耗电量大,费用较高,一般只用于既有建筑物的加固。

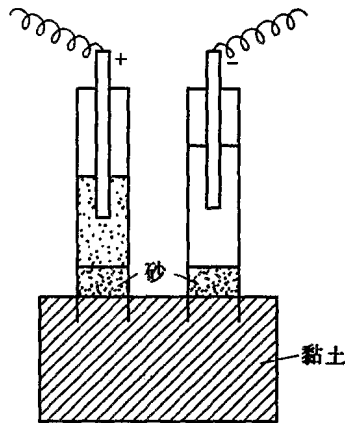


图 1.6 电动现象

黏土颗粒带电荷的多少用土粒表面与零电位的电位差表示,称为热力电位。土粒周围所形成的电场,离土粒表面越远电位越低。在最靠近土粒表面的地方,静电引力最强,把水化阳离子和极性水分子紧紧地吸附在土粒表面,形成吸附层(强结合水)。在吸附层以外,静电引力已比较小,水化阳离子和极性水分子排列的不那么紧密,活动性也比吸附层大些,此层为扩散层(弱结合水)。吸附层与扩散层间的电位差称为电动电位,其值取决于土粒表面离子与固定层中的反离子总数的差,是电动现象产生的主要原因。

2. 离子交换

扩散层中的阳离子与介质溶液中的其他阳离子进行交换的现象叫做离子交换。

离子交换能力是指一定条件下 100 g 干土中含有的可置换离子的物质的量,以摩尔当量每 100 g 表示,三种主要黏土矿物的离子交换量见表 1.1。土的离子交换能力越强,土的工程性质随介质物理化学条件变化而变化的程度就越强。离子交换能力取决于矿物成分、土粒大小及分散程度、交换离子的成分及浓度等因素。

(1) 矿物成分

原生矿物交换量极小,矿物亲水性越强,交换能力越大。

(2) 土粒大小与分散程度

土颗粒越小、越分散,交换量就越高;结构越紧密,交换量越小。

(3) 溶液中交换离子的属性与浓度

浓度越大交换能力越强。同样浓度时,阳离子的交换能力主要与离子价数、离子大小及浓度相关。土中常见离子交换能力排序为

$$\text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{H}^{+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{Li}^{+} > \text{Na}^{+} \quad (1.2)$$

工程中,常在黏土中掺加石灰来改善黏土的性质,实际上就是利用了 Ca^{2+} 的交换作用,通过交换黏土地基中的低价阳离子使扩散层变薄,从而使黏土粒相互靠拢、挤密,提高地基强度,降低压缩性。可见,离子交换原理具有重要的实用价值。

3. 黏土颗粒间的相互作用力

两个带负电荷的土粒之间同时存在范德华力和静电力。范德华力是土粒间相互吸引的力,引力随土粒间距的增大而衰减;静电力是带同性电荷的土粒间相互排斥的力,斥力随土粒间距的增大而衰减。当引力和斥力平衡后的净作用力为斥力时,土粒互相排斥,处于分散状态,形成的结构为平衡结构;当净作用为引力时,土粒互相吸引,产生凝聚,形成絮状结构。

1.2 土的结构和构造

1.2.1 土的结构

土的结构与构造对土的性质有很大影响。土的结构是指土的物质组成(主要指土粒,也包括孔隙)的空间排列以及土粒间的联结特征的综合。结构是在成土过程中逐渐形成的,不同成因年代的土,其结构特征是不同的。一般分为单粒结构、蜂窝状结构、絮状结构和分散结构等类型。

1. 单粒结构

这是无黏性土的结构特征,其特点是由于颗粒较大,土粒间的分子吸引力相对很小,土体极性极小,土粒间没有连接存在。按土粒间的相互排列的紧密程度,可以将其分为疏松和紧密两种状态。疏松状态的单粒结构在荷载作用下会趋向紧密,从而导致土体产生很大的变形,因此,这种土层未经处理一般不宜用作建筑物地基。密实状态的单粒结构在剪应力作用下产生剪胀,使结构变松。单粒结构的紧密程度取决于矿物成分、颗粒形状、均匀程度、沉积条件等,片状矿物组成的砂土最为疏松;浑圆的颗粒组成的砂土比带有棱角的颗粒组成的砂土紧密,土粒越不均匀,结构越紧密,土的沉积速度越快,土的结构密实状态越小。

2. 蜂窝状结构

这是粒径在 $0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$ 左右粉粒组成的土粒的结构形式。当土粒在水中沉积时,基本是单个土粒下沉,在下沉途中碰上已沉积的土粒时,如土粒间的引力对自重而言已足够大,则此土粒就停留在最初的接触点上而不再下沉,形成很大孔隙的蜂窝状结构。

3. 絮状结构

这是黏土颗粒特有的结构形式。悬浮在水中的黏粒当水溶液中介质发生变化时(例如河流

入海时),因海水的钠离子浓度比较大,扩散层厚度减薄,黏粒互相聚合,以面-边或面-角的接触方式形成絮状物下沉。因而絮状结构具有较大的孔隙率,对扰动比较敏感,性质比较均匀。试验证明,此时黏土颗粒大多成板状或台阶状,在板面上带负电,角和棱边带正电。在淡水中沉积时,由于扩散厚度较厚,黏土颗粒间联结很弱,呈平行结构,形成面对面片状堆积,称为分散结构。分散结构密度较大,具有各向异性的特性。

4. 分散结构

分散结构是指经分选的砂、碎石有较大的埋藏深度,无明显层次。结核状构造是在细粒土中有明显的大颗粒或聚集的结核。

自然界中土体在外界条件(如荷载、温度、湿度或介质条件)发生变化时其结构会发生变化。保持天然含水量但天然结构被破坏的重塑土的强度比原状土的强度低,其比值可作为反映土的结构对强度影响的强、弱程度,常用灵敏度 S_t 来表示,即

$$S_t = \frac{q_u}{q'_u} \quad (1.3)$$

式中 q'_u —— 重塑土无侧限抗压强度;
 q_u —— 原状土无侧限抗压强度。

S_t 越大,表示结构性对强度的影响越大。土的结构被扰动后,强度降低,压缩性增大,因此在取土试验或施工过程中都必须尽量减少扰动,避免破坏土的原状结构,以保护土体抗力的实际状态。

对土体结构性的研究,不仅包括土粒的排列分布、联结,还包括对土孔隙的研究(如孔隙大小、形状及分布等)。土体孔隙的大小及形状对土的强度、压缩性及透水性也是一个重要和不可忽视的因素。孔隙比越大,在荷载作用下孔隙体积改变越大,压缩性越大。

1.2.2 土的构造

土的构造是指土粒间的相对位置与填充空间的特征,亦指不同土层间相互位置的特征。认清构造在土中的变化程度,鉴定特殊构造要素(层理、结合体、裂隙)的特点是构造研究的基本内容。层理构造是土体在搬运、沉积过程中成层堆积而形成的,不同沉积时间,其组成土层的矿物成分、颗粒级配各不相同。由于搬运、沉积的不定期性,搬运能量的不稳定性,每次堆积的物质不同,因此该成层是不规则交错,有时形成砂土中夹黏土层的夹层,某一夹层沿水平方向逐渐减薄的尖灭层或透镜体。

同时,应充分注意地层的层理构造及裂隙。层理构造是指土体成层状分布,因而判断土层中是否有软弱下卧层,尤其是不均匀的软弱层十分重要,以便采取切实可行的工程措施,避免危害。而土的裂隙构造是土体被许多细小的裂隙所分割,破坏土的整体性,影响土体强度、边坡稳定、压缩性,作为建筑物地基时主要应注意它的胀缩性,如我国西北的黄土(垂直裂隙),干燥时强度很高,可形成很深的垂直边坡,但在浸水时,强度丧失,压缩增加,具有“湿陷”的特性。

1.2.3 土的结构性及量化参数

土的结构性是决定各类型土的力学特性的一个最根本的内在因素。它应与土的粒度、密度和湿度一起,成为土变形、强度等力学特性变化的依据。因此,反映土的结构性的量化参数应能全面反映土颗粒的排列特征和联结特征的同时,还应该反映土的变形、强度的特性变化,并

建立它们之间的关系。

1. 土体的自身结构使其具备抵抗荷载的能力

在加荷过程中,该指标能反映初始结构性破坏和次生结构性的耦合变化。当作用力未达到初始的联结强度时,土体变形很小,应力与应变之间表现为线性关系;当作用力达到结构强度时,土的初始结构被大部分破坏,外荷的微小增量会引起变形的非线性较大增长;当外荷超过土的结构强度而继续加大时,随着变形的增加,被破坏的土结构又会逐渐达到新的稳定,形成次生结构,并且在次生结构形成的强度增长不足以抵抗外荷应力增长的速度时出现土的最终破坏,这个过程是结构性参数应该表达的。

土的结构性受到土固相颗粒的成分、大小、形状、分布、粗糙度与黏聚程度的影响,受到土骨架排列的定向性、均匀性和稳定性的影响,它与土孔隙的大小、分布、密集度、连通率与含水率有关,也与微裂隙的分布、走向、密度及连通率有关,是其在搬运、沉积过程中的生成条件与环境而决定的客观状态。

由于它是一种复杂的客观存在,那么研究土结构性最好的方法是使土的结构性破坏,让它的结构势充分表现出来。使土的结构性发生变化或破坏的根本途径是扰动、加荷和浸水。扰动能够破坏土的联结作用,使土颗粒间的联结强度降低;加荷能改变土颗粒的排列方式,孔隙体积减小,从而改变土颗粒的联结特征;浸水可使土中溶于水的盐类结晶、溶解,吸力联结丧失(例如湿陷土),水膜楔入土粒孔隙之中,使土所固有的胀缩势释放出来。

2. 结构性参数指标的确定

目前,国内学者根据土力学中黏性土的灵敏度是利用扰动的手段显示出土的结构性,黄土的湿陷系数和膨胀土的自由膨胀率等是用加水手段显示出土的结构性的方法。将以上两种扰动和加水的方法同时使土的结构性破坏,在土工试验中,经过扰动后破坏结构性的土样为重塑土样,加水后破坏土结构的土样为浸水饱和土样,保持初始结构性与含水量的土样为原状土样,将这三个土样分别在荷载作用下进行压缩试验,得出三条压缩曲线,即可用下述公式得到土的结构性参数 m_p ,即

$$m_p = \frac{m_1}{m_2} = \frac{\frac{S_e}{S_0}}{\frac{S_0}{S_r}} = \frac{S_r \cdot S_e}{S_0^2} \quad (1.4)$$

式中 S_0 , S_e 和 S_r ——分别为原状样、饱和样和重塑样在某一压力 P 作用下的变形量(或应变量)。

从式(1.4)可以看出,土的联结能力越强,扰动重塑样的强度损失越大,在力作用下发生的变形也越大,则 m_2 越小;土的排列越不稳定,浸水后在力的作用下结构破坏越大,发生的变形也越大,则 m_1 越大。用一个越小的值 m_2 去除一个越大的值 m_1 来表示土的结构性参数 m_p 将具有较好的敏感性。因此, m_p 的大小可以反映土样结构性的强弱。

例如,对于结构性灵敏的黏性土,因其湿度一般较高,其对浸水的反映一般 $m_1 \approx 1$,此时, $m_p \approx \frac{S_r}{S_0}$,与灵敏度概念相似,只是它用变形比替代了原来的强度比,所以,此结构性参数可以反映黏性土的灵敏度;对于低含水量的自重湿陷性黄土,当结构强度越大(m_2 越小),土骨架孔隙所占的比例越大(m_1 越大),则结构性参数 m_p 就越大,从而表现出湿陷性黄土可溶盐溶于

水,土骨架塌落引起湿陷的现象。这样,结构性参数 m_p 可以很好地反映湿陷性。

土结构性参数的 m_p 下标 p 表示土的结构性在产生变形的过程中应力 p 的大小是变化的,在荷载动态变化过程中,三个土样的变形随之变化,所以该参数可以反映土初始结构性与次生结构性耦合变化过程中的动态变化。

土的结构性参数 m_p ,可以用常规的压缩试验方法确定,简单易行。在各因素变化时,该指标反映黏性土的结构性较灵敏,因而便于在工程中推广应用,但它对于无黏性土不适用。

结构性参数随研究的具体问题不同而定义不同。当研究黄土场地在震作用下产生突然附加沉降即震陷时,电镜图像显示黄土震陷的强弱是由于不同胶结程度颗粒受地震荷载作用下的崩散难易程度和孔隙的填充程度所决定。以粉粒组成的集粒为主的架空结构动力稳定性较好,因此,黄土震陷与土体架空孔隙面积、粒状、凝块和镶嵌有关。根据其不同结构可分为:高震陷结构、中震陷结构、低震陷结构和微弱震陷结构,其划分标准为震陷系数与微观特征参数,震陷系数分别为:12% ~ 6%, 6% ~ 3%, 3% ~ 1% 及 1% 以下,微观特征参数划分为:11 ~ 7, 7 ~ 5, 5 ~ 4 及 4 以下。此时结构性参数的评定指标为震陷系数与电镜微观特征参数。因此,结构性参数的定义要根据不同土质,研究的不同目的,具体问题具体分析。

1.3 岩土工程化学及土工合成材料概论

众所周知,散粒状低抗力的碎石、中粗砂加入适量的水泥和水,水泥与水作用后水化,生成硅酸二钙、硅酸三钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙等凝胶体,经适当的工艺处理(振捣、密实、成型)后将其变成抗力比散粒状的原土(碎石、砂)高百倍的人工铸石,称为混凝土。其他的土与碎石、砂类似,也是一种散粒状材料,所以抗力低,主要原因是组成土的各颗粒间联结作用弱所致。如果有可能,在土体当中掺入某些胶结料(如水泥浆、水泥粉、粉煤灰或生石灰)拌和后固化、挤密,使其像碎石、沙子与混凝土那样,与土产生适当的化学反应并固化,从而增加各土颗粒间的联结强度,则土的抗力就会大幅度提高。即将低抗力的岩土通过适当的掺加剂,发生胶结、凝固、化学反应后,改良为高抗力的土体,这就是一门新兴的边缘学科——岩土工程化学。

岩土工程化学是以岩土体作为研究对象,将化学、地质学、材料学、岩石力学、土力学、基础工程学及环境工程学的研究方法相结合,研究岩体和土体性能の利用、整治和改造等综合性的技术学科,如岩土的化学改良和改性、加固与防渗、化学检查与勘测以及岩土工程中的其他化学工程问题等。

1.3.1 岩土工程化学的作用

岩土工程化学的核心问题是岩土的原位变性、改良和加固,因此其主要的特征是原位化学反应过程及其对岩体或土体改良作用的机理。岩土工程化学所涉及的化学反应过程都是在原位土体上进行的,因而可称其为土体的原位化学反应。这些反应过程主要包括以下几方面。

1. 电动化学作用

土粒表面遇到外来的浆液后,浆液与土粒间发生各种形式的物理、化学反应,在土粒表面产生化学作用;某些具有高渗透性能的低黏度化学浆液,由于其对岩土介质具有极强的亲和性,在渗透过程中通过浆液 - 介质 - 水之间的界面作用产生吸渗压力,能够自动渗入黏土中,达到一般压力渗透灌浆无法达到的效果,化学浆液的这一现象称为自动吸渗机制。同时由于浆

液的介电常数比水小得多,浆液的渗入,参与改变黏土的结构,提高其渗透率,使浆液能够更有效地渗入到土体中。此外还有在电动化学灌浆中存在的电动化学作用过程。

2. 化学胶结作用

不管是水泥浆或其他化学浆液与土粒接触,水化后都将生成凝胶体,都将发生具有胶结力的化学反应,把岩石或土粒胶结在一起,增加各土颗粒间的联结作用,提高整体结构强度。外来物质在凝胶过程中不仅本身发生多种复杂的化学反应,同时也会与土中的某些成分发生相互反应,从而改变土的结构、提高土的强度。如桐油(主要成分为桐油酸三甘油酯)与黏土混合后,桐油被扩展,在黏土表面形成分子油膜,使土体形成较粗的细小颗粒的集合体(颗粒团),加入糯米汁后,糯米汁在土粒间渗透、扩散,糯米汁自身的黏结性能将众多细小颗粒的集合体胶结在一起,形成较大的粒团。水泥浆与土体的离子交换作用、团粒化作用、凝硬反应、碳酸化作用,黄土的碱液加固作用,聚氨酯与土中孔隙水的反应,高分子材料与土粒发生的交联反应等系列反应,并伴随着释放出大量的反应热量,导致土体脱水、压密或土体结构与强度的改变。

3. 充填作用

固结材料固化后本身具有较高强度,充填于土体孔隙中,与土体共同承受外荷载,它的存在限制了土体的变形,提高了土体抵抗外力的能力。

4. 挤密作用

浆液在高压作用力下灌入土体中,使周围土体得到密实并排除部分孔隙水,从而提高土体强度。

5. 骨架作用

施工过程中的瞬间压力一旦超过土粒之间的联结作用,就会导致土体劈裂,产生较大的裂隙,浆液灌入、渗入、充填其中后必然会形成脉状及网状浆液体,固化后形成一个空间无规则的“杆系”结构体,该结构体类似土“骨架”,具有一定的抗力,可支撑外来压力,同时也限制了其中土体的变形。

6. 防渗作用

浆液充填于岩石裂隙、空洞及土体孔隙中,凝硬、固化后阻塞了流体的渗流通道,提高了土体的防渗性能。

通过以上多种机制的协同作用,使原来承载能力低、防渗能力差、变形大的低抗力岩体或土体变为高抗力的承载结构体或防渗体,以满足工程之需求。

1.3.2 岩土工程化学的应用

1. 岩土工程化学在我国古代土木工程中的应用

我国人类的文明史可以追溯至七八千年以前,古代人民凭借其在生产及生活中积累的丰富经验,极其成功而又富有创造性地解决了多种土木工程及岩土工程问题。近年的甘肃省大地湾遗址考古证实建于 5 000 多年以前的 F901 宫殿中所用的广义混凝土,5 000 多年以后其强度仍相当于今天的 C10 水平。石灰的应用可以看做是化学原理应用于土木工程及岩土工程的典型实例,它的使用历史可以追溯至原始社会晚期。我国许多古建筑的砌体结构及其基础砌体中采用糯米浆加白(石)灰作为胶结料已有数千年的历史,这些胶结料具有极好的耐久性,完全可以与今天的水泥砂浆相媲美,即使是在寒冷、潮湿的地下环境中,其强度亦可历经百年而不退化,此种作法直至 20 世纪初期仍在砌体结构中延续,如哈尔滨兆麟街上于中东铁路修建时

期建造的索菲亚教堂即是如此(现为一级保护建筑)。即使是在今天的古建筑修复、修缮工程中,按照国家规定的“修旧如旧”的原则,仍采用此法。先人们不但能够应用无机化学材料,如黏土、岩石、石灰等,也懂得使用有机化学材料,如树胶(树脂)、动物血、糯米汁(淀粉)等,通过适当的击打、夯实、堆砌、浇灌等物理手段或烘烤、焙烧、冶炼等化学方法,如修筑万里长城时,因地制宜,就地取材,在高山峻岭以石修筑,在黄土地区以土夯筑,在无石无土的戈壁滩则以沙漠中特有的柳条和芦苇与砂、砾石互层铺筑,并泼以糯米汁以增加土的坚固性和耐久性等,用今天的观点看,其第二种作法就是一种典型的“加筋”作用。大庆建设初期的“干打垒”,20世纪60~70年代东北农村的围墙在黏土中加“草筋”等均属此类。数千年前为躲避战乱而迁徙到广东、福建等地的客家人曾用糯米饭、红糖、鸡蛋清及桐油拌和三合土,建造坚固的土墙;河北赵州的石拱桥、陕西的灞桥以及福建的洛阳桥等,在无法烧制波特兰水泥的古代,桥体石块间的榫头连接采用糯米汁、牛血、石灰或桐油等混合物做胶结料(砂浆)对其进行胶结、充填;福建的洛阳桥位于洛阳江的人海处,江宽、浪急、潮水涨落,难以修建,为此建桥者用抛石的方法建造基础并在抛石表面和石缝间人工养殖牡蛎,使其大量繁殖,将分散的石块黏接成牢固的整体等,用今天的观点看,均应属于岩土工程化学的范畴。

2. 岩土工程的化学加固

岩土工程的化学加固是指利用各种浆液(如水泥浆、黏土浆、水玻璃浆、纸浆或其他各种具有胶结作用的浆液)或粉料(如水泥粉、生石灰粉、粉煤灰等),通过灌注渗入、高压喷射或机械搅拌等手段,使掺加料与土颗粒结合,发生化学反应后将其胶结在一起,以改善地基土物理、力学性质的地基处理方法。

浆液与土混合常用的方法之一是灌浆,即利用液压、气压或电化学原理,通过注浆管把浆液注入地层,浆液通过渗透、填充、挤密等方式,占据土体中原有的孔隙空间,与土结合并发生一系列的化学反应,将原来松散的土粒胶结形成一个新的高抗力的整体。

当土体的渗透系数过小($k < 10^{-6}$ m/s)、浆液在土中不能有效扩散时,可能还要借助于电场力,用注浆管作阳极,利用滤水管作阴极,通以直流电,采用电渗的电化学原理来增加浆液的渗透速度或渗透半径,这就形成了电化学灌浆。在均匀性较差的土体中,浆液渗透不均匀,易在土中形成较大的无浆土块或表面有浆液、内部无浆液胶结的包裹体而影响加固效果,此时,可采用加大注浆压力、劈裂注浆或喷射注浆,即通过加大注浆压力或喷射的方法,将土体原来的结构彻底破坏,加入浆液后重新胶结,重新形成一个新的整体。灌浆所用的浆液本身是含水的,当土体的含水量过大、灌浆后导致土体含水过多时,也可采用喷射或拌和干粉(水泥粉、粉煤灰、生石灰粉、石膏粉等)的办法将土体胶结,这就是深层搅拌法。在这类方法中,使用最多的胶结料是水泥粉,因此其代表性的作法为水泥土搅拌法。

水泥土搅拌法适用于处理正常固结的淤泥、淤泥质土、粉土、饱和黄土、素填土、黏性土以及无流动地下水的饱和松砂等,一般对含有较多高岭石、多水高岭石、蒙脱石等黏土的加固效果较好,而对于含有较多伊利石、氯化物及水铝英石等矿物和含有有机质过多的土体,则加固效果欠佳。试验证明:对软土地基,在加入水泥粉的同时,再加入与水泥适量或等量的粉煤灰,则加固体的强度可比单纯掺加水泥粉的水泥土提高10%左右。由于水泥土中水泥掺量较少,水泥的水化、水解及固化等反应均是在土的围绕下进行的,水泥颗粒周围均是阻水性较好的黏土颗粒,因而,无论是反应速度还是在反应过程中生成的凝胶体数量等均不及在碎石及中粗砂的孔隙内(即混凝土),因此它的反应速率变慢,反应时间相对延长,且在每一个反应过程中,都

会产生新的凝胶体,凝胶体积累后会以纤维状的形式向外扩张、延伸、分叉,逐步渗入到邻近土颗粒的孔隙中,结晶后生成网状空间体。混凝土终凝后需要很好的养护,否则强度将大受影响;而水泥土则不然,它们处于地下潮湿状态,环境温度、湿度变化很小,养护方法及温度、湿度的变化仅对短期强度产生影响,对长期强度影响甚微,与传统的混凝土材料相比,强度的增长速率相对缓慢,龄期超过3个月后,强度仍在缓慢增加。利用现代的电子显微镜观察,水泥和土的凝硬反应约需3个月左右的时间才能充分完成,从工程的角度上看,选用3个月的龄期作为水泥土的强度标准值较为适宜。同时水泥土对负温反应亦不敏感,水泥土试块在低温下,经长期冻结后强度并不增长,但恢复正温后强度仍可继续提高,冻结试件解冻后正常养护90 d,其强度与标准养护条件同龄期的强度非常接近,相差一般不超过10%,也就是说,水泥土具有很好的抗冻性及冻融循环稳定性,这一点与传统的混凝土相比有很大的差异。传统的混凝土在强度增长期内是不允许受冻的,否则,强度严重受损,导致无法应用。水泥土则不然,现有的试验已经证实,只要环境温度不低于 -15°C ,水泥土的强度就不会受到大的损害。即使是像哈尔滨这样严寒地区的最冷季节,地面0.5 m以下的地温一般均在 -15°C 以上,常常是不低于 -10°C ,此温度对水泥土的损害甚微,从工程的角度上看,其影响完全可以忽略,因此在冬季也完全可以进行水泥土搅拌法的施工。

1.3.3 土工合成材料在岩土工程中的应用

任何单一的材料都有其长处和短处,将两种或两种以上的材料复合,各取其长处,回避其短处,这就形成了今天的复合材料。钢筋混凝土是由抗拉强度极高、耐火性极差且不能单独承压的钢筋和抗压强度较高且不能承拉的混凝土复合而成,合成后广泛应用于土木工程。土工合成材料是由承压性能好的原状土和其他抗拉性能好或具有某种特殊工程性能的材料复合而成,它是近20年来在岩土工程中开发与应用的一门新技术,它是以人工合成的聚合物,如塑料、化纤、合成橡胶等为原料制成的产品,按照工程的需要置于土体内部、表面或各层土体之间,以起到加强或保护土体的作用,俗称“加筋土”。同传统的混凝土类似,只能承压而不能受拉,其压、拉强度比一般均在10以上,钢筋的特点是强度极高,但仅能受拉而不能承压,耐火性极差,在空气中易锈蚀。为解决此问题,工程应用时就扬长避短,从受力的角度上考虑,在混凝土构件内部压力由混凝土承受,受拉区配置适量的受力钢筋以承受外荷载,两者共同受力,形成了一个不可分割的整体,从而解决了大量的工程技术问题。其最大的特点在于两种材料复合后,用混凝土包裹住钢筋,即解决了钢筋材料的受压失稳、耐火、锈蚀等问题,同时,受拉钢筋的配置从根本上解决了混凝土材料的承拉问题,使复合体(钢筋混凝土)构件或结构的抗力得以大幅度提高。土体亦如此,其力学特点与传统的混凝土类似,只能“承压”而不能“承拉”,即使是在自重作用下,侧向变形导致的拉应变过大时,也会使土体破坏,加入抗拉载体(土工合成材料)后,抗拉载体与土粒之间的摩擦、咬合、自锁等作用限制了土体的水平向拉应变,对土体的侧向变形起到了一个很好的约束作用,土中的拉应力直接传给了外加的抗拉载体,相当于在土中的受拉区加入了起抗拉作用的“钢筋”,因而可以大大提高土的抗力,这就是所谓的“加筋”。从20世纪60年代法国人Henri Vidal提出在土中“加筋”可以提高土体强度的概念起到目前的数十年中,“加筋”已由最初的单纯提高土体强度发展到今天的多种综合用途,它可以反滤、排水、隔离、防渗、防护、加固地基、加固土坡和堤坝、修建挡土墙及代替“卷材”防水等。

土工合成材料在国际上的应用起源于20世纪50年代,直至70年代末期无纺织物的推广