

土的组成、结构与固化技术

贺行洋 陈益民 张文生

(中国建筑材料科学研究院, 北京 100024)

【摘要】 在对土的组成及其结构进行深入分析的基础上, 认为土固化基本原理就是强化土颗粒间结构连结, 改善颗粒接触, 提出由化学作用而形成的同相接触是提高粘土体系强度的关键技术, 并总结了土固化的几个重要技术途径。对目前采用最多的土固化方法——土壤固化剂法进行了分析, 对几类土壤固化剂及其机理进行了阐述。对固化土收缩开裂、水稳定性和抗冻性等几个影响固化土耐久性的主要因素进行了分析探讨。

【关键词】 土; 固化; 结构连结; 土壤固化剂; 耐久性

【中图分类号】 TU 472.5

Composition, Structure and Stabilization of Soil

【Abstract】 On the base of having given a deep analysis on composition and structure of soil, drawing a conclusion that the principle of soil stabilization is enhancing the strength of joints among soil particles and improving the contact of soil particles, proposing that the key technology of increasing the soil strength is chemical reaction occurring between bonding materials and soil particles. And summarizing some important technical methods of soil consolidation. Moreover analyzing the method of soil consolidation agent which is often used at present in soil stabilization and probing into some kinds of soil consolidation agents. At last, analyzing some important factors that influence the stabilizing soil durability such as shrinkage, water resistance, freeze-thaw durability.

【Key words】 Soil; stabilization; structure joint; soil consolidation agent; durability

天然的土体是地壳表层的岩石经历长期(特别是第四纪以来)的风化、搬运、磨蚀和沉积作用形成的, 由固体颗粒、颗粒周围的水分和颗粒与颗粒之间为气体所充满的孔隙组成, 所以土体为三相体^[1~4]。土的固体颗粒大小和形状、矿物成分及其组成三相体系在空间的排列与联结特性, 是决定土的物理力学性质的重要因素。在研究土体的增强改性时, 必须研究土中矿物的基本颗粒与其微集聚体之间相互作用的性质与本质, 即土在自然沉积或人工固化过程中, 经过一系列物理、化学和物理化学综合作用, 以促使在颗粒接触带从结构上产生不同性

质和能量的相互连结作用^[5]。

1 土的组成

自然界的土一般是由各种大小不同的土粒组成, 其粒径大小变化范围极大, 由大到数米以上的漂石, 小到粒径为万分之一毫米粘粒, 甚至更小, 这些不同粒径的土粒对土的结构和性质影响差异很大^[2]。例如, 含10%粗大的砾石、卵石的土, 由于其能构成骨架, 而表现出粗碎屑土的特性, 可压缩性低, 力学强度高; 对于含3%以上细小粘粒的土, 由于它可使其它粒径的土粒具有一定程度的粘结, 而表现出粘土的特性, 可压缩性大而剪切强度小。

基金项目: 科技部科研院所技术开发研究专项资金资助项目(2202EG132166)

2002年中国材料研讨会宣读论文作部分修改。

作者简介: 贺行洋, 1976年生, 男, 汉族, 博士, 主要从事水泥基材料和特殊土壤固化的研究。E-mail: hexingyang

@sohu.com

粘粒是指细度小于 0.002 mm 的片状颗粒,其矿物组成主要是晶质的粘土矿物(高岭石、蒙脱石、伊利石)和非晶质胶体^[6,7]。土中粘粒由于其颗粒极为细小,表面能很大,在粘粒与水溶液界面上易发生吸附、离解或离子交换作用而带电,具有吸引极性水分子和水化离子的能力,即具有胶体性质和强的亲水性。粘土矿物颗粒与水相互作用时,根据作用力的大小可分为强结合水、弱结合水、毛细管水和自由水,土中结合水量是控制形成粘性土的稠度、塑性、膨胀、收缩等水理性质及强度、变形等力学性质的重要因素之一^[8]。

土中的结合水量取决于土粒的带电性质,而土粒的带电性质是同土粒的矿物成份,粒径大小及水溶液成份等很多因素有关^[7,9]。土粒的矿物成分不同,晶体结构或晶体格架不同,亲水性差别悬殊,矿物亲水性愈强,土中结合水尤其是弱结合水愈多;粘粒愈多,粒径愈小,亲水性将愈强,结合水膜将愈厚。水溶液中的 OH^- 离子有助于粘粒表面层分子的电离,因此溶液的 pH 值愈大, ξ 电位越大,则结合水数量多。在 ξ 电位一定的条件下,水溶液中的离子价数愈高,它愈容易受粘粒胶核的静电引力作用进入胶核外部的固定层,而扩散层中这些离子将相对减少, ξ 电位也就愈小,弱结合水以及整个结合水量将相对减少。水溶液离子浓度大,进入固定层的机会多,则扩散层中离子数量相对减少, ξ 电位也就愈少,从而扩散层减薄,弱结合水数量减少。

粘土及粉土等细颗粒土,因其孔隙率和含水量一般较大,相应地可压缩性大而剪切强度小,同时具有粘性及塑性性质,另外重塑后由于絮状构造被破坏,剪切强度降低。当外力作用时,土颗粒不易稳定,容易形成软土^[11],成为土壤固化技术的重点和难点。

2 土的结构

粘土矿物晶体的强度非常高,其值可达 10^3 MPa,但粘土的力学性质并不决定于这种基本结构单元——粘土矿物晶体的强度,而决

定于土粒之间的结构连结力^[10],结构连结是在一系列物理、物理化学和化学作用下形成的,这些作用促使在颗粒接触带上产生不同性质和能量的相互作用,在土体中作用在颗粒之间的粘结力本质上是一种表面力,属物理粘结,比颗粒内原子间的坚固的化学粘结小得多。土的固化和稳定的基本原理就是强化颗粒间结构连结,改善颗粒接触^[11,12]。

在粘土体系中,对结构连结有重要影响的有毛细管力、离子-静电力以及化学键力等,它们属吸引力,与其相反的力是水化膜的楔入作用力,此种力一方面可降低粘土体系的表面能,另一方面可扩大颗粒之间距离,从而降低了粒间的吸引力^[12]。

粘土体系的结构连结不是沿土颗粒所有相界面进行的,而只是在其最靠近的地方(接触点上)进行。因此,粒间结构连结特性又受其接触的类型控制^[9]。当粘土体系经凝聚和压实作用时,便产生颗粒间的凝聚接触的结构(见图 1a),这类接触形成的连结主要是靠分子长距离的相互作用力,这种结构连结作用极弱,几乎不具有强度。在外荷载或干燥作用下,随着粘粒的接近,水膜可能变薄,继而破裂,形成过渡类型接触(见图 1b),此种接触的基础是离子-静电相互作用力和毛细管力。过渡接触的重要特性是其对水的非稳定性,亦即在去掉外加压力或粘土湿化时,容易吸附水分子,并转化为凝聚接触。当粘土体系的压力或温度进一步增大或在新相位接触处结晶,使得粘土颗粒间直接接触面积增加,过渡接触变成同相接触(见图 1c)。同相接触是靠化学键力和离子-静电的相互作用而形成的,其大小可达 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ N,同相接触的粘土,对水来说是

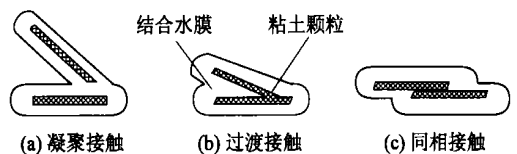


图 1 粘土体系接触类型示意图

不可逆的,其强度不会因湿化而消失,浸水时也不会塑化。因此,由化学作用力而形成同相接触是提高粘土体系强度的关键技术。

3 土固化的技术途径

通过土的组成、结构的分析可知,土的固化和稳定的基本原理就是强化颗粒间结构连结,改善颗粒接触。因此,土的固化过程必须重视以下几个技术途径^[12,13]。

3.1 挤压

挤压可缩短颗粒间距,增加颗粒接触面积和数量,从而增强颗粒间的结构连结。挤压的措施有两种:一为外力压密,这对含水量较低的土的稳定非常有用;二为固化材料在土结构内部产生膨胀挤密,这对不同含水量的土固化都是有益的,尤其是对湿塑性土、泥浆的固化是至关重要的。

3.2 化学胶结

通过加入一定土壤稳定固化材料,其水化后能很好胶结土粒表面,与粘土矿物的活性成分反应生成胶结构质;而且在水化硬化过程中吸收大量水份,产生固相体积膨胀;这些都能增加土粒之间的结构连结,对土起到较强的稳定固化作用。

3.3 调整土中孔隙溶液组成

在土孔隙溶液中,引入高价阳离子如 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} ,将使粘土表面 ξ 电位降低,扩散层减薄,颗粒之间的距离缩短;提高土孔隙水溶液的阳离子浓度,也可使颗粒表面 ξ 电位降低,颗粒之间的距离缩短。颗粒间的距离缩短,可使水化膜楔入作用力随之减小,结构连结进入分子间相互作用力范畴,促进粘土颗粒凝聚。另外,在土孔隙溶液中引入 K^+ 、 NH_4^+ 等离子,填入粘土矿物层间的六角形网眼中,可加强其层间连结^[7],对土体固化起到一定作用。

4 几类常用土壤固化剂及其机理

土的稳定固化,经过长期的研究,取得了许多重要成果。土壤固化剂稳定固化土的方法仍是目前最经济实用、采用最多的方法,即

在要固化的土体中均匀加入一定量的固化材料,并施加一较低的压力,使颗粒新相位接触处产生结晶和胶结,形成类同相接触,从而使土具有一定的强度和水稳定性。土壤固化剂品种可分为无机、有机类,无机-有机复合类和工业废渣类等。从实际使用情况看,无机类占主导地位,特别是石灰、水泥、工业废渣由于有较好的性价比在土壤固化工程应用广泛。

4.1 石灰类

石灰对土所起的有效作用是最早被人类熟知的。在我国长城、古罗马一些道路都曾用石灰来稳定固化土。当石灰加入到含有粘粒的土中,土孔隙溶液中 Ca^{2+} 离子浓度大幅度增加,由于 Ca^{2+} 离子具有较强的离子交换能力,因此 Ca^{2+} 可置换出粘土吸附的水合 Na^+ 离子,此反应可用下式表示:



这个过程可降低粘土颗粒的水膜层厚度,有利于粘土颗粒形成较强的结构连结,促使粘土凝聚作用增加,使粘土微结构团粒化;石灰溶解重结晶形成的水化氢氧化钙对石灰土强度的提高也有正面影响,是石灰对粘土早期胶结的主要形式;石灰与微细粘粒中活性 SiO_2 和 Al_2O_3 间的火山灰反应和 $Ca(OH)_2$ 的碳化作用是缓慢的过程,均有助于石灰土强度的形成,火山灰反应产物是石灰土后期强度的主要构成^[14~19]。因此,用石灰稳定固化的土体早期强度较低。

4.2 水泥类

水泥是目前使用较成功的土壤固化剂,用水泥胶结的土体具有较好的承载力,良好的变形特性、抗水、耐热和抗冻效应^[17~19]。

水泥对土固化作用有^[20]:水泥水化反应产生的 C-S-H 和 C-A-H 凝胶,附着在颗粒表面,并形成 $Ca(OH)_2$ 。 Ca^{2+} 与土粒表面吸附离子发生阳离子交换反应,使土粒改性和团粒化。 Ca^{2+} 、 OH^- 渗透进入土颗粒内部,与粘土矿物发生物理化学反应,继续生成上述胶凝物质。上述作用使土颗粒表面的颗粒间接触点

可形成不可逆的凝结硬化,并以水泥新生水化物为界面形成类同相接触,可改善土体的稳定性,增强土体内部结构连结和抗变形摩擦力,从而提高土体的强度和耐久性^[21]。

4.3 工业废渣类

粉煤灰配合石灰、水泥是工业废渣中利用最多的一种,主要是由于其在石灰、水泥水化的碱性环境中具有潜在水化活性,人们从经济和环保角度出发,用其来固化、稳定土体,粉煤灰配合石灰、水泥固化土体的机理与石灰类、水泥类固化剂的固化机理类似^[22~24]。

5 固化土的耐久性

土体的固化技术虽然取得了长足的进步,但由于土的组成、结构的复杂多样性,使得在一些实际工程中土的固化工作并没有取得预期效果,很多固化土较早的出现了膨胀、开裂、隆起、沉降和强度损失等破坏,提高固化土耐久性有待进一步的研究。影响固化土耐久性不良的因素主要有收缩开裂、水稳定性和抗冻性。

5.1 收缩开裂

收缩开裂是影响固化土耐久性的重要因素,收缩开裂的产生主要与环境温度、湿度变化引起的不均匀体积收缩和固化材料水化收缩有关。水泥固化土的失水时干缩裂缝可达 $0.5 \sim 3 \text{ mm}$,干缩拉应力达 13.1 kg/cm^2 ;土体层内部温度差也会在土体内产生温度应力,致使土体开裂破坏^[22]。有关研究表明^[18]:水泥掺量对水泥固化土收缩性能影响很大,尤其是当水泥掺量超过 6% 时(这个数值可能小于配制水泥土时所要求的水泥基掺量),固化土基层裂缝将显著增多。水泥稳定土收缩开裂主要原因是水泥水化反应的体积减缩以及水泥水化作用消耗粘粒吸附水引起的干燥收缩所致^[23]。因此,一般认为,水泥土的收缩裂缝是不可避免的,掺入工业废渣有利于改善水泥固化土的收缩开裂。

5.2 水稳定性

粘土吸附水就会产生膨胀,从矿物学观点看,膨胀的大小取决于粘土矿物的种类和含

量、它们之间的可交换离子、水的电解质含量以及内部结构^[7]。固化土虽然在固化材料的胶结作用下具有一定的强度,但其粘土矿物的结构并未破坏,当固化土遇水浸湿后,土体中亲水性强烈的粘土矿物如蒙脱石、伊利石等会吸收水分产生膨胀,在土体内部产生湿应力,破坏土体的结构,致使其强度降低^[24,25]。另外,盐渍地环境中的土体由于含有较高的盐分,固化土遇水浸湿后,盐分的溶解析晶会使土体的结构破坏,致使其强度降低。因此水稳定性是固化土耐久性的一个重要指标,只有当固化土具有足够的水稳定性,才能保证固化土的长期稳定性。

5.3 抗冻性

由松散颗粒构成微孔网状组织的固化土,遭受天然条件下冻融循环而破坏是很常见现象,因此,抗冻性也是评价固化土耐久性的重要指标^[3]。

在北方和青藏地区,进入寒冷季节,固化土温度下降,自由水开始结冰,随着温度的进一步下降,土粒结合水外层也会结冰;同时结合水膜减薄使结合水的离子浓度增加,产生渗附压力(即当二种水溶液的浓度不同时,此二种水溶液会产生一种压力差,使浓度较小溶液中水向浓度较大的溶液渗流)。在渗附压力作用下,就会吸引下部未冻结区孔隙中的水分子,使之向冻结区移动,但一到冻结区,在负温的作用下,未冻结水结冰使冰体积继续增大,结冰在土体内形成结冰应力,土体隆胀,固化土发生冻胀现象;还有,在冻土中,水与冰处在不同温度、不同蒸汽压力之下,也产生水蒸汽分子的迁移,导致冻土中冰体积不断增长,固化土冻胀加剧。另外,更为严重的是,当气温上升,冰由表面向下融化,土层中所含水分无法向下渗透(冰尚未融化),自由水积聚起来会导致土层强度的急剧下降。目前,土体抗冻性问题还没有较好的解决办法。

6 结论

土作为三相体,固体颗粒大小和形状、矿物

成分及其组成的三相体系在空间的排列与联结特性,是决定土物理力学性质的重要因素。

1) 土由于组成、粘土矿物含量不同而使其物理力学性质各异。粘土及粉土等细颗粒土,因其孔隙率和含水率一般较大,相应地可压缩性大而剪切强度小。当外力作用时,土颗粒不易稳定,容易形成软土,成为土壤固化技术的重点和难点。

2) 在土体中作用在颗粒之间的粘结力本质上是一种表面力,比颗粒内的原子间的坚固的化学粘结小得多。土的固化和稳定的基本原理就是强化颗粒间结构连结,关键是使土颗粒间产生由化学粘结形成的同相接触。

3) 土的固化过程必须重视挤压、化学胶结和调整土中孔隙溶液组成等技术途径。

4) 土壤固化剂稳定固化土的方法仍是目前最经济实用、采用最多的方法,无机类占主导地位,特别是石灰、水泥、工业废渣由于其有较好的性价比在土壤固化工程应用最为广泛。

5) 影响固化土耐久性不良的因素主要有收缩开裂、水稳定性和抗冻性。

参 考 文 献

- 1 中堀和英等编著. 软土地基处理. 张文全译. 北京: 人民交通出版社, 1982. 1~30
- 2 唐业清. 土力学基础工程. 北京: 中国铁道出版社, 1989. 19~27
- 3 华南工学院等四校合编. 地基及基础. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. 1~137
- 4 竣治平. 基础工程. 北京: 人民交通出版社, 1986. 1~89
- 5 Mohamed A M O. The role of clay minerals in marly soils on its stability. *Engineering Geology*. 1999, 57 (3-4): 193~203
- 6 瓦久尼娜 AΦ, 柯察金娜 3 著. 土壤及土质物理性质测定法. 程云生等译. 北京: 科学出版社, 1965~145
- 7 格里姆 R E 著. 粘土矿物学. 许冀泉译. 北京: 地质出版社, 1960. 22~109
- 8 巴布可夫 BΦ 等著. 土学及土力学(上册). 陈梁生

- 等译. 北京: 高等教育出版社, 1956. 1~167
- 9 浙江大学等四校合编. 硅酸盐物理化学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 142~157
- 10 邱则有, 蒋墩. 粘土固化剂综述与探讨. *硅酸盐建筑制品*. 1993(3): 25~30
- 11 松尾新一郎著. 土质加固方法手册. 孙明漳等译. 北京: 中国铁道出版社, 1983. 1~144
- 12 周明凯. 高性能水泥基土壤固化材料的设计、制备与机理研究. (学位论文). 武汉: 武汉大学, 1999. 1~99
- 13 张登良. 加固土原理. 北京: 人民交通出版社, 1990. 6~94
- 14 许永明, 张可, 张登良. 石灰加固级配砂砾强度机理的研究. *西安公路学院学报*. 1992, 12(3): 1~9
- 15 商庆森, 刘树堂等. 石灰稳定黄河冲积粉土的研究. *西安公路学院学报*. 1993, 13(3): 6~12
- 16 宋玉华. 用生石灰粉作石灰稳定土路面基层方法浅探. *山东交通科技*. 1993(增刊): 62~65
- 17 文江泉等. 软基处理中水泥改良软土实验研究. *路基工程*. 1995(3): 13~16
- 18 Tao-Wei Feng; Jia-Yih Lee; Yi-Jiuan Lee Consolidation behavior of a soft mud treated with small cement content *Engineering Geology*, 2001, 59(3-4): 327~335
- 19 范豫庆, 杨得光等. 水泥稳定及综合稳定类路面基层研究. *云南公路科技*. 1994(4): 10~21
- 20 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探. *岩土工程学报*. 1994, 16(1): 62~68
- 21 Kaniraj S R, Havanagi V G. Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures cement and concrete research, 1999, 29(5): 673~677
- 22 习应祥, 朱梦良. 钒矿渣用作路面基层材料的研究. *中南公路工程*. 1995(2): 41~46
- 23 Gerald A. Miller; Shahriar Azad Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust *Construction and Building Materials*, 2000, 14(2): 89~97
- 24 白云升. 几种地基加固材料的应用. *铁路地质与地基*. 1989(3): 1~13
- 25 沙庆林. 水泥稳定土基层和底基层. 北京: 人民交通出版社, 1981. 77~117