

粘性土的结构稳定性及某些特殊土的性状

蒋 国 澄

(水利水电科学研究院岩土所, 北京)

一、概 述

土的结构包括土团粒或颗粒的几何排列(即组构)及粒间结合力两个方面。目前还不能对土的结构作定量分析,也不能直接用到土力学计算中去。但是它有助于阐明土的工程性质的作用机理,解释某些特殊土的性状,预测土在外界因素作用下的变化规律,对工程作出最后判断,进而采取工程措施。

最早注意到土的结构性的是太沙基,他在1925年就提出了蜂窝状结构,用以说明在水中沉积的粘土的不稳定的凝聚结构。以后又发展到卡片或书本式结构。这些都是以单个颗粒的几何排列为基础的,用以解释天然沉积土的结构形成作用。关于压实土的结构,从五十年代起就曾由兰姆^[1,2]、西特等^[3,4]作过系统研究,强调了颗粒定向排列的作用。这些工作都是从一般物理化学原理和土的工程性质的不同表现间接推断的。随着电子显微镜及其他测试手段的发展,为直接观察土的结构和细节提供了有利条件,从单粒结构发展到团粒结构,从定性分析到定量和半定量,推进了对粘土结构的认识^[5,6]。

粘土的组构主要分为团粒或颗粒任意排列的凝聚性组构和定向排列的分散性组构,见图1。

对于给定组成和状态的土,其结构就取决于粒间结合力的性质和大小。粒间引力和斥力相平衡,形成一定的结构:粒间斥力为主,形成分散性结构;而引力为主,形成凝聚性结构。粒间力的来源很多,但对土的结构形成作用来说,主要的是电化学力,化学胶结力和毛管力三种。

1.电化学力,包括静电力和范德华力。静电力可以是引力,也可以是斥力,其大小与距离的平方成反比。范德华力是一种分子引力,其作用机理可以用双电层理论加以解释。在特定条件下,引力和斥力取得平衡,而在环境变化时,双电层的扩散层厚度随之变化。在双电层充分扩张时,颗粒间距变大,引力变小,颗粒易于变位,结构较不稳定,易于平行定向排列,形成分散性结构;而双电层受到压缩时,粒间引力加大,结构趋于稳定,形成任意排列的凝聚结构。

2.粒间胶结物的结合力。这些胶结物包括有机和无机化合物,前者如腐植质,后者如铁铝氧化物的无定形胶体、无机盐类和粘土等。

铁铝氧化物的胶体具有两性性质,故其粒间结合作用与孔隙流体的pH值有关。 Al_2O_3 的等电点pH值为8.1, Fe_2O_3 为7.1,因此它们在高pH值时带负电荷,而在酸性条件下带正电荷。由于粘土颗粒带负电,在酸性环境下,铁铝氧化物胶体可以使粘土胶结成稳固的团粒,

在机械和浸水作用下是稳定的，但在碱性环境下趋于分散。

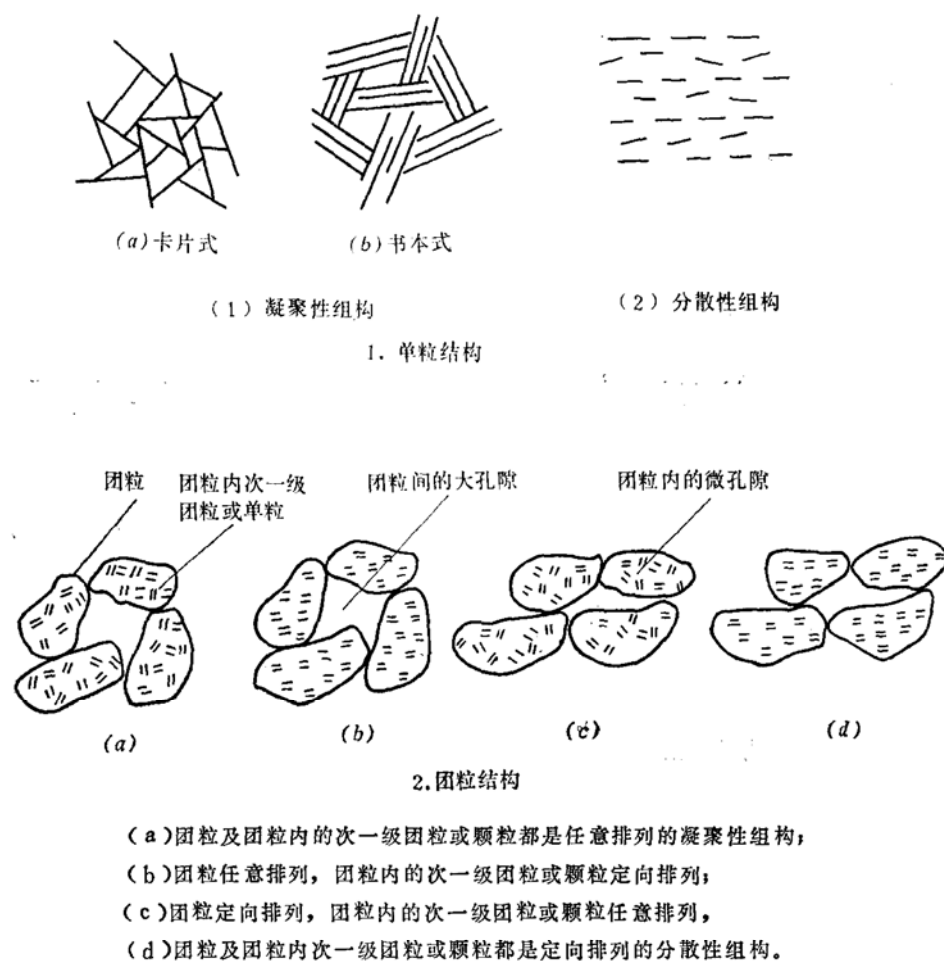


图1 粘土的组构示意图

碳酸钙和碳酸镁等难溶盐，在土中可以呈包膜状、星散状或块状存在。包膜状盐类可以使土粒胶结在一起。星散状盐类的胶结作用很弱，而块状则不起胶结作用。硫酸钙等中溶盐类，其存在状态和所起作用也和难溶盐类相似。因此仅从总含盐量推断土的性质是很不够的，还要研究其存在形态。盐类胶结对水分很敏感，特别是石膏，干燥时胶结强度大，足以维持凝聚性结构的稳定性，而浸湿后强度迅速降低，直至结构崩溃而产生大量湿陷变形。土的性质还可因盐类溶滤而发生变化。

粘土胶结也是一种遇水不稳定的粒间结合力，其胶结力的大小随含水量而变化。

3. 毛管力。在非饱和土中，由气水界面上弯液面的表面张力所构成，薄膜水的楔入压力也有一定作用。毛管力是一种负孔隙压力，可增加粒间的有效应力而增加结构的稳定性。其大小随含水量增加而减小，直到饱和时为零。

粒间结合力的大小和性质决定土体结构的稳定性，从而可用以阐明各种特殊土的性质，并从土体结构稳定性的观点对它作出统一的解释。

二、几种低密度土的性质分析

实践中常遇到一些不同成因的低密度土，往往因结构强度而使土处于欠压密状态，有时

会对工程建设造成许多麻烦。将孔隙比大于1, 干容重 $10 \sim 13.4 \text{ kN/m}^3$ 的几种典型的低密度土的物理力学性质指标列于表1, 并对它们进行对比分析。由表列资料可见, 孔隙比最高的庄寨红土, 其强度比孔隙比低的软粘土要高, 而压缩性也低得多; 也可看到红土的孔隙比虽比兰州黄土为高, 但兰州黄土的压缩性和湿陷性都要高得多。黄土的湿陷性一般是随孔隙比的增加而增加的, 因此如孔隙比达到红土相似的数值, 其湿陷性相对讲还要大。这种情况说明, 尽管密度和孔隙比达到相似量级, 由于其结构性, 特别是粒间结合力的大小和稳定性的不同, 表现不同的力学特性。

近代沉积的淤泥(软粘土)一般是蜂窝状的卡片式或书本式结构, 颗粒间距大, 粒间结合力较弱, 组构本身是不稳定的, 在外力作用下极易发生变化, 趋向于更密实的排列。所以表现出较大的压缩性和较低的抗剪强度, 但浸水后性质无明显变化, 浸水后并无湿陷, 其有效应力抗剪强度并不低。

黄土结构中主要骨架是粗粉粒和少量砂粒, 粒间由细粉粒和粘土联结起来, 大量可溶盐, 特别是中溶盐石膏, 起粒间胶结作用。在低含水量下, 盐类胶结强度较大, 足以维持黄土的大孔隙结构的稳定性, 在外力作用下, 不致受到破坏, 因而具有一定的抗剪强度和呈现中等压缩性。但是一旦浸水, 粒间的盐类和粘土胶结立即软化, 结合力大大降低, 在自重或外力作用下大孔结构崩溃, 从而产生很大的湿陷变形。其压缩与湿陷变形一起, 几乎可达到软粘

表1 几种典型低密度土的物理力学性质

土的名称	含水量	干容重	土粒比重	孔隙比	流限	塑限	塑性指数	<5μ 颗粒含量	压缩系数	湿陷系数	三轴饱和固结不排水剪				不排水剪总强度		文献
	w (%)	γ _d (kN/m ³)	G _s	e	w _L (%)	w _P (%)	I _P	(%)	α (1/MPa)	δ _s	总应力		有效应力		c	φ	
											c	φ	c'	φ'			
杜湖软粘土	48.5	11.7	2.73	1.32	37.8	21.8	16	46	1.11		0.12	12.5°	0	26°			[7]
盘山软粘土	39.4	13.4		1.03	39	24	15	35.2	0.71		0.14	14.3°	0.13	27.8°	0.35	0	[8]
庄寨红土	58.3	10.45	2.82	1.70	83.3	52.7	31.1	61	0.1~0.5		0.12	21°	0.18	28°	0.35	5.5°	[9]
天生桥红土	38.5	13.3	2.91	1.195	76.1	43.3	32.8	81	0.23~0.26	0.02~0.03	0.64	15.9°	0.25	25.5°	1.85	5.6°	①
兰州黄土	12.8	13.2		1.06	27	17	10	24	0.33	0.08							[10]

①南盘江天生桥水电站堆石坝心墙土料试验报告, 水利水电科学研究院岩土所, 1982。

土同等的量级。

红土具有较高的孔隙比, 形成相对开放的孔隙结构。但由于在特定的生成条件下, 氧化铁铝相对富集, 在酸性介质条件下, 它带有正电荷, 和粘土颗粒表面的负电荷相吸, 结合力较强而稳定, 组成不易为浸水或其他机械作用所破坏的稳固团粒结构。因此, 它虽然具有高含水量和低密度, 但仍具有较高的力学强度和较低的压缩性。形成与一般沉积粘土的物理与力学性质指标间相关关系不相同的所谓异常性状。但是在高压下, 由于不同强度的团粒被不断破坏, 团粒内部次级团粒和颗粒的重新定向排列, 红土仍会发生一定程度的压缩变形, 压缩曲线在14.9MPa压力下仍有一定的坡度。因此对高坝仍将有较大的总压缩变形量, 但不会发生某种压力或浸水的突然变形。

各种土的孔隙比 e 与应力 p 之间有一定的相应关系, 由于土体结构强度和稳定性的不同, 其 $e-p$ 关系曲线发展过程也有所不同。如破坏其结构联结强度, 则与一般粘性土就没有什么不同了^[11]。

三、土的凝聚与分散

五十年代末,我们接触到一些南方红土,注意到其特殊性质来源于土体的稳定团粒结构,其结构特性可以用团粒度指标 A 表示:

$$A = p_1 / p_2$$

式中 p_1 及 p_2 分别为加和不加化学分散剂时得出的粘粒含量百分数^[12]。从有限的资料分析,红土的 A 值一般大于20,典型红土可达到 ∞ ^②。由于这种耐水的团粒结构,使红土的耐水性好,抗冲蚀能力极强,如庄寨水库红土坝体与涵管之间的渗漏水多年并无冲蚀扩大的趋势。

粘性土吸水膨胀和失水收缩是普遍现象,国内外将胀缩达到一定程度,有可能危及工程建筑的土称为膨胀土,视为一种特殊土类。一般以与土的亲水性有关的指标作为定性判别,如自由膨胀率 $F_s > 40\%$,液限 $w_L > 40\%$,缩限 $w_s < 12\%$ 等。这都说明粒间结合力随浸水程度而有相应的变化,但这种结构的变化还没有达到使颗粒完全分散的程度。

六十年代初,澳大利亚发现某些粘土在水中有不同程度的分散性,易于被水冲蚀,是许多中小土坝失事的内在原因。七十年代以来又发表了许多研究成果,制订出一些鉴别方法^[18~15]。国内的研究表明以直接显示抗冲蚀能力的针孔试验和表征结构特性的双比重计试验鉴定分散性较为可靠^③。双比重计试验方法与上述红土团粒度试验相似,结果以分散度指标 D 表示:

$$D = p_2 / p_1$$

D 少于30%为非分散性土,30~50%为过渡型,大于50%为分散性土^[14]。 D 值与 A 值互为倒数关系,所以两者是可以通用的。

某些红土、膨胀土、分散土的团粒度指标的示例汇总于表2,可以看出 A 或 D 值可以很好反映土的凝聚与分散特性,可用以对这些特殊土的特性,从结构稳定性的角度作出统一的解释。即具有稳固团粒结构的红土耐水性最好,其 A 值一般大于20(或 D 值小于0.05);结构不太稳定的粘性土,吸水易于膨胀,即为膨胀性土,尚不致完全分散,其 A 值都大于3.3(或 D 值小于0.3);而不稳定结构的分散性土,其 A 值都小于2(或 D 值大于0.5)。在膨胀性土和一般粘性土间可能还有一个大致的分界,尚需积累资料才能进一步讨论。

在本文第二节中曾从矿物成分及粒间结合力性质说明红土结构稳定性的机理。而分散性土则是结构不稳定的另一例子。它以蒙脱石类矿物为主,晶层间以交换性钠离子为主,遇水后因双电层扩张而使土体膨胀,直至分散成原级颗粒,形成稳定的悬浮液,在流动水中不断带走而产生类似管涌的渗透破坏现象,称为分散性管涌,与一般粘性土中粘粒含量越高,抗冲蚀能力越强的规律表现上有矛盾,而形成另一种类型的特殊土。分散性土大致要具备三个基本条件^④:

1. 含有一定数量的晶格不稳定的蒙脱石类粘土矿物,且交换性阳离子中以钠为主;

② 蒋国澄,土质学概论(提纲),研究生教材,水利水电科学研究院,1984。

③ 刘杰,袁孟辛、缪良娟,分散性粘土的机理、鉴定和防护,待发表。

④ 蒋国澄、朱思哲,压实土的工程性质,土石坝基本技术问题研究班讲义,水利水电科学研究院,1982。

2. 粒间没有足以抑制膨胀和分散的胶结物, 如有机质、碳酸盐、游离铁铝氧化物等;

3. 不致促进土粒絮凝的碱性介质环境及低盐浓度。

同时, 也可看出, 改变环境条件, 可以改变结构的稳定性和凝聚分散条件, 从而改变特殊土的性质, 使它向有利的方向转化, 为土质改良工程提供理论依据。

表 2 红土、膨胀土和分散土的 A 和 D 值

试 样	$p_1(\%)$	$p_2(\%)$	A	D	备 注
红 土	南 水 庄 寨	71 61~73	3 3	23.7 20.3~24.3	0.042 0.049~0.041
	菲 尔 泽	51.5	0~4	12.9~ ∞	0~0.078
	天 生 桥	53~58	0	∞	0
膨 胀 土	桃山—1	52	15	3.5	0.29
	桃山—2	50	12.5	4.0	0.25
	桃山—3	52	11	4.7	0.21
	桃山—4	47	6	7.8	0.13
分 散 土	南引—2	29.2	28	1.04	0.96
	南引—6	38.2	32.6	1.17	0.84

四、结 语

对给定的土, 粒间胶结力大小和性质决定着土体结构的稳定性, 从而决定特殊土的性状, 以此可以解释某些表现的“异常”特征。对稳定结构的土, 只要根据现场的环境条件及其变化, 模拟实际情况进行试验, 得出其力学性质指标, 就可在实际工程中加以应用。对不稳定结构的土, 其性状在试验中也已得到反映, 可据以采取必要的工程措施。

参 考 文 献

- [1] Lambe, T. W., The Structure of Compacted Clay, J. SMFD, ASCE, Vol. 84, No. SM 2, 1958.
- [2] Lambe, T. W., The Engineering Behavior of Compacted Clay, J. SMFD, ASCE, Vol. 84, No. SM 2, 1958.
- [3] Seed, H. B. & Chan, C. K., Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays, J. SMFD, ASCE, Vol. 85, No. SM 5, 1959.
- [4] Seed, H. B., Mitchell, J. K. & Chan, C. K., The Strength of Compacted Cohesive Soils, Proc. ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960.
- [5] Mitchell, J. K., Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, 1976.
- [6] Yong, R. N. & Warkentin, B. P., Soil Properties and Behavior, Elsevier Scientific Publishing Co., 1975.
- [7] 浙江省水利电力局、浙江大学土木系, 杜湖水库利用砂井处理土坝软粘土地基, 坝工建设技术经验汇编, 第一集, 水利电力出版社, 1975.
- [8] 陈愈炯、孔凡玲、潘仁根、李振丰, 双台子河闸基坑软粘土边坡稳定分析, 软土地基学术讨

论会论文选集，水利出版社，1980。

- [9] 卞富宗，红土作为筑坝土料的特性研究，水利学报，1980年第4期。
- [10] 甘肃省建工局建筑科学研究所、第八冶金建设公司研究所，自重湿陷性黄土的试验研究，第三届土力学及基础工程学术会议论文选集，中国建筑工业出版社，1981。
- [11] 王继庄，游离氧化铁对红粘土工程特性的影响，岩土工程学报，第5卷第1期，1983。
- [12] 蒋国澄，具有稳固团粒结构的南方高塑性红粘土坝料特性，水利水电技术，1962年第1期。
- [13] Sherard, J. L. et. al., Piping in Earth Dams of Dispersive Clay, Performance of Earth and Earthsupported Structure, Vol. 1, Part 1, 1972.
- [14] Sherard, J. L. et. al., Identification and Nature of Dispersive Soils, J. GED, ASCE, Vol. 102, No. GT 4, 1976.
- [15] Proc. of ASTM Symposium on Dispersive Clay, ASTM, STP623, 1977.