

从微细结构方面解释某黏性土压缩特性的差异

周宇泉,胡 昕,洪宝宁,孙 秋

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 利用土体微细结构光学测试系统对黏性土在压缩过程中微细结构变化进行了定量分析研究,提取并分析相关微细结构特征参数。研究表明,从微细观角度来看,黏性土的压缩性主要受 3 个因素影响:土体颗粒自身形态的变化、土体颗粒排列方式的变化以及土体孔隙形态的变化。

关键词 黏性土 微细结构 压缩性 定向度 分布分维

中图分类号 :TU411.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2006)01-0031-03

Explaining the variation of compressive behavior of a cohesive soil from microstructure//ZHOU Yu-quan, HU Xin, HONG Bao-ning, SUN Qiu (Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : A quantitative analysis was performed of the microstructure variation of a cohesive soil during the compression process by use of the optical measurement system for microstructure of soil, and some characteristic parameters for the microstructure were obtained and analyzed. The result shows that the compressive behavior of the cohesive soil is mainly affected by three factors, including the variations of shapes and arrangement of soil particles and pore shapes of soil.

Key words : cohesive soil ; microstructure ; compressive behavior ; degree of polymerization ; distribution and fractal dimension

在岩土工程中,土体的压缩沉降一直是大家较为关注的问题之一,尤其是在软弱深厚地基的处理上,更是要耗费大量的人力、物力、财力。而土体的位移和变形主要是由土体内结构变化(结构单元体之间的相对位移和错动等)所导致的,因此,要研究土体压缩变形的本质,微细结构是研究的起点^[1],并在这一基础上,建立相关的数学模型及土体微结构量化指标,以达到研究和预测土体压缩变形的目的。

土体的微观结构十分复杂,获得的信息数据量也十分巨大,因此这些信息数据的微小变化就有可能导致土体在宏观变形特性上产生较大差异。为了使土体微结构定量研究能进一步指导工程实际,本文针对某实际工程中所用两处土场的土体压缩性存在较大差异的问题,从微细结构方面对这种现象进行解释。

1 试验土样特性

江苏省某设计单位在对某坝体填料进行常规土工试验中,发现该坝体填料较同类土体沉降变形量大,且所用填料土体(分别取自两处土场)压缩特性存在较大差异。常规土工试验结果见表 1,从表中可以看到,采集的 7 个土样的塑性指数 I_p 均远大于

10,且压缩系数 $a_{v0.1\sim0.2}$ 均大于 0.5 MPa^{-1} ,属高压缩性黏土。7 组土样分别编号 T1 ~ T7,其中 T1 ~ T5 取自同一土场,T6 和 T7 取自另一土场,且 T6 和 T7 与其他土样相比压缩系数偏小。为了分析造成土样间压缩系数产生差异的原因,总结经验,有必要进行深入、系统的试验研究,为此进行了微细结构观测试验,以期从微细结构方面找出其中的原因。

表 1 土样物理力学性质

编号	含水率/ %	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		孔隙比 e_0	饱和度 $S_r/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	压缩系数 $a_{v0.1\sim0.2}/\text{MPa}^{-1}$
		湿	干							
T1	36.0	1.85	1.36	1.000	98	48.8	21.9	26.9	0.52	0.983
T2	32.4	1.92	1.45	0.889	100	46.3	20.1	26.2	0.47	0.905
T3	34.8	1.90	1.41	0.944	101	43.8	22.1	21.7	0.59	0.915
T4	38.2	1.81	1.31	1.092	96	50.3	24.8	25.5	0.53	0.911
T5	35.8	1.86	1.37	1.000	98	47.6	21.4	26.2	0.55	0.864
T6			1.45	0.890		38.8	20.5	18.3		0.622
T7			1.40	0.957		46.8	21.3	25.5		0.772

注:土粒相对体积质量除 T1 土样为 2.72 外,其余均为 2.74。

2 微细结构特征参数

从微细结构图像处理角度来看,微细结构要素可综合为颗粒形态与排列方式、孔隙形态与排列方

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50279008)
作者简介 周宇泉(1976—),男,江苏南京人,硕士,从事岩土体微细结构理论和试验研究。E-mail :moyuan@126.com

式和联结形式等几个方面^[2,3]。对土体压缩性影响程度较大的因素主要包括颗粒圆度、颗粒分布分维、颗粒定向度等。本文主要采用分形几何学去处理土体微细结构特征量的不确定性问题,其相应结构参数的含义及算法可参见文献[1,4],以下对两个主要微细结构参数做简要介绍。

2.1 分布性指标——分布分维

黏性土的的微观结构是一种混沌体,也是一种具有统计自相似性的分形结构体。岩土体的工程性质实际上是岩土体结构单元体性质的综合体现,而结构单元体又在很大程度上取决于土粒集合体甚至于更小的单粒矿物的性质。从这种意义上讲,它们之间具有较为明显的层次性和自相似性。一幅图像的颗粒分布情况既反映颗粒系统的形态,又可说明土体的密实情况。由此可以用统计自相似的方法来确定地描述黏性土微结构的特征,确定颗粒分布的维数。由于这个维数是个介于 1~2 之间的分数,于是称之为分布分维。根据 Mandelbrot 提出的数方格统计方法,分布分维可由式(1)得出:

$$N(r) = cr^{-D_f} \tag{1}$$

式中: $N(r)$ 为颗粒所占格子数; r 为格子的边长; c 为修正系数。改变格子的边长即 r 值,颗粒所占格子数 $N(r)$ 也将发生改变。在双对数坐标系中, $\ln N(r) \sim \ln r$ 呈直线关系,而直线的斜率 D_f 即为所求的分维数。一般说来,分布分维越大,反映土中颗粒分布分散,颗粒在空间分布的凌乱化程度加剧。分布分维的概念同样适用于孔隙,只需在分析时将颗粒改成孔隙即可。

2.2 有序性指标——定向度

在图像处理时,颗粒的定向性以其最长弦的方位确定,对应的参数为方位角 α 。不同的颗粒有不同的方位角,方位角可以取 $0 \sim \pi$ 中的任何值。为表示微细结构单元体排列的总体有序性,概率熵被引入到土的微细结构分析中^[1],定义定向程度 H 的算法如下:假设颗粒的方位角为 α ,其值域为 $[0, \pi]$,现以 α 增量将其分成 n 等分,然后确定一个颗粒定向于某一区间 $[i, i+1]$ 的概率为 $P_i(\alpha)$,相应地,各区间的对应概率系列为 $P_1(\alpha), P_2(\alpha), \dots, P_n(\alpha)$ 。

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i(\alpha) \log_n P_i(\alpha) \tag{2}$$

这样 H 就表达了颗粒排列的有序化程度。从式(2)可以看出, H 的取值在 $[0, 1]$ 区间,当 $H=0$ 时,表明所有的结构单元体排列方向均在同一方位,显示出单元体排列的有序度最高;当 $H=1$ 时,表明单元体完全随机排列,在每一方位区中,结构单元体出现概率相同,完全无序。 H 越大,颗粒的有序性越差。

3 微细结构试验及试验成果分析

3.1 试验方法及结果

利用河海大学微细结构实验室自行研制的三轴加载设备^[4-6]对试样施加三轴荷载(在本试验中,主要进行单轴压缩),加载的同时由 CCD 摄像机连续拍摄经长距显微镜放大的岩土微细结构照片,并将得到的视频图像分别传输到视频监视器和计算机中,利用图像采集卡将传入计算机的视频信号转化为数字图像。试样承受的荷载及轴向位移等信息采用传感器来测读,同时传输到计算机中。利用自行编制的岩土微细结构分析程序 GEOIMAGE 对一系列微细结构图像进行处理分析,获得岩土体微细结构的孔隙及颗粒数目、面积、周长、定向度、分布分维等量化信息。

本次试验采用逐级加载法,即在某级荷载作用下土样达到相对稳定后采集图像,再进行下一级加荷。对每组试样根据制备情况分别取 3 个或 4 个典型区在不同的放大倍数下进行观测,同时在不同的轴向力作用下分别拍摄微细结构图片。之所以采用不同的放大倍数,是为了更加清楚地观测土样在各个放大层面上的结构特征,从而对土样微结构特征能有一个更全面的刻画;另外,在细观这一尺寸层次上,土体具有理想的自相似性,放大倍数的不同,不会对结构参数造成显著的影响。由于篇幅所限,这里只给出土样 T1 的微细结构图片,见图 1。从图 1 中可以看出,随着轴向压力的增大,土体颗粒集聚体逐步增大,孔隙以及裂隙逐步缩小,表现出土体密实度显著提高。待图像全部采集完毕后再用自行研制开发的微细结构分析程序 GEOIMAGE 对图像进行处理分析,每组土样各观测点系列图片处理结果如表 2 所示。

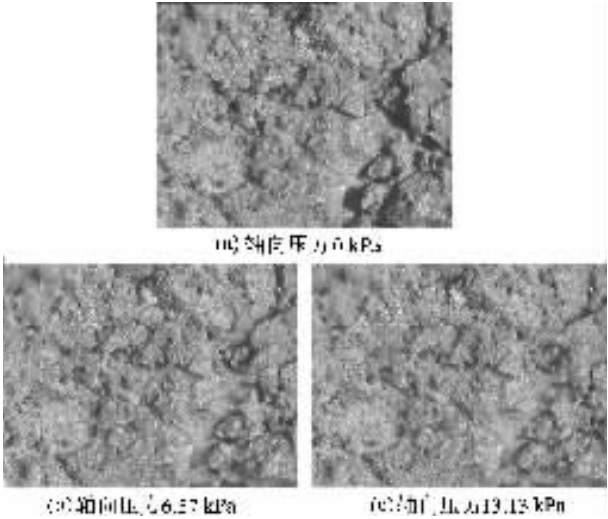


图 1 土样 T1 受压微细结构变化(放大 280 倍)

表 2 土样受压微观结构定量分析结果

编 号	面积比例/%		数目		定向度		分布分维		不均匀系数		曲率系数		颗粒圆度	载荷/kPa
	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙		
T1 (放大 280 倍)	47.3	52.7	26	27	0.64	0.68	1.74	1.76	3.74	3.32	0.53	0.60	0.78	0
	49.3	50.7	27	18	0.65	0.66	1.75	1.75	3.71	1.80	0.70	1.11	0.71	6.57
	52.2	47.8	28	30	0.68	0.64	1.77	1.73	3.79	3.22	0.60	0.81	0.77	13.13
T2 (放大 74 倍)	59.9	40.1	40	21	0.74	0.57	1.80	1.69	3.24	3.56	1.08	0.66	0.70	0
	61.5	38.5	39	43	0.75	0.55	1.80	1.68	3.03	3.36	0.88	1.40	0.65	6.57
	64.3	35.7	35	45	0.77	0.52	1.81	1.66	3.21	3.05	1.09	1.08	0.59	13.13
T3 (放大 178 倍)	44.8	55.2	26	34	0.64	0.70	1.69	1.71	2.86	2.65	1.05	0.94	0.91	0
	44.4	55.6	28	32	0.68	0.70	1.71	1.71	3.16	2.52	0.82	0.86	0.89	6.57
	49.7	51.3	31	35	0.71	0.65	1.76	1.68	2.58	2.03	0.96	0.87	0.87	13.13
T4 (放大 124 倍)	57.5	42.5	25	23	0.71	0.58	1.78	1.71	2.41	2.35	0.91	0.85	0.65	0
	62.5	37.5	26	32	0.75	0.54	1.80	1.68	2.41	2.35	0.83	0.99	0.58	6.57
	56.3	43.7	31	32	0.71	0.60	1.78	1.72	2.76	3.06	0.80	0.65	0.77	13.13
T5 (放大 268 倍)	52.3	47.7	25	35	0.67	0.64	1.78	1.76	2.61	3.06	1.00	0.71	0.91	0
	53.0	47.0	26	36	0.67	0.63	1.78	1.75	2.83	2.77	0.78	0.84	0.88	6.57
	54.0	46.0	27	32	0.68	0.62	1.78	1.74	2.61	2.58	0.77	0.84	0.82	13.13
T6 (放大 293 倍)	51.3	48.7	26	37	0.55	0.74	1.71	1.82	2.56	2.14	0.88	0.91	0.89	0
	53.8	46.2	28	40	0.57	0.74	1.73	1.79	2.22	2.35	0.86	0.87	0.81	6.57
	57.9	42.1	30	38	0.60	0.72	1.76	1.80	1.98	2.11	0.97	0.97	0.75	13.13
T7 (放大 220 倍)	41.0	59.0	23	27	0.57	0.73	1.68	1.75	2.03	2.19	0.66	1.01	0.89	0
	42.4	57.6	22	28	0.58	0.72	1.68	1.75	4.60	3.22	0.39	0.68	0.78	6.57
	49.1	50.9	23	33	0.64	0.76	1.72	1.72	3.22	3.46	0.56	0.62	0.67	13.13

3.2 微细结构试验成果分析

从各土样的外形特征上看,除土样的颜色有较大区别外,7 个试样表面上并没有太大的差别。然而,通过显微设备的观察及采集的图像和图像处理分析后的数据可以看出,几种土样具有不同的微细结构特征值,而这些特征值与土体的压缩性质有密切的关系。在连续加载试验中,可以看到,试样 T6 和 T7 微细结构特征参数值(平均值)较为接近,而其他几组土样的微细结构特征参数值差异较大。这些差异主要反映在分形参数(即定向度和分布分维)上,如表 3 和表 4 所示。

表 3 各组土样颗粒分布分维数值

荷载/kPa	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
0	1.75	1.77	1.75	1.76	1.77	1.73	1.73
6.57	1.76	1.79	1.78	1.78	1.79	1.75	1.75
13.13	1.77	1.80	1.80	1.79	1.79	1.75	1.75

表 4 各组土样颗粒定向度数值

荷载/kPa	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
0	0.65	0.71	0.66	0.67	0.65	0.57	0.64
6.57	0.67	0.73	0.68	0.71	0.69	0.62	0.64
13.13	0.69	0.77	0.73	0.74	0.70	0.61	0.66

通过比较可以发现,T6 和 T7 在颗粒定向度上普遍小于其他 5 组土样,T6 在受压过程中的定向度更是只有 0.57,0.62,0.61,说明这两组土样颗粒的定向性优于其他土样,或者说其他土样与 T6 及 T7 相比,颗粒排列更为混乱。定向度较低的土体,其颗粒具有较大程度的方向一致性,从而表现出较强的

抵抗变形的能力,即要产生相同的垂向位移,须施加更大的荷载,而定向度较高的土体,颗粒排列混乱,颗粒间构成点状接触的概率较大,在荷载作用下土体的稳定性就相对较差,更易受力压缩变形。

受压过程中,T6 及 T7 的分布分维(平均值)在 1.73~1.75 的范围间变化,也明显小于同样受力条件下的其他土样(1.75~1.80)(见表 3),分布分维越大,土体颗粒在空间分布的凌乱化程度加剧,结构骨架的松散度大幅提高,所以在加载受力条件下,会进行较大幅度的结构调整,产生较大的变形,从而具有较高的压缩性。一般认为颗粒分布分维与土的黏聚力成反比关系,即土体分布分维越大,土颗粒分布越混乱、越松散,黏聚力也越小,而颗粒分布越紧凑,土的黏聚力越大^[3,7]。

微细结构变化的外部反映是变形量的增减,或者说,微细结构的变化是宏观变形的本质。正是由于试样 T6 和 T7 在受压过程中与其他土样在结构参数变化上的这些微小差异,使得 T6 和 T7 两组土样在实际工程中的变形可能会稍小于其他 5 组土样,从而使它们表现出稍高于其他土样的抗压性能。

在试验中还可以看到,一方面,在压力作用下,土体通过自身形态的变化和排列形式的调整,逐步向稳定的承载形式过渡,使变形向逐渐减小的趋势发展;另一方面,由于超静孔隙水压的增加,土体连通性大大增强,增加了土体骨架的疏松和凌乱程度,同时,也加大了土体的压缩性。

(下转第 36 页)

防洪经费主要由国家财政储备支付的传统做法,不单纯是增加国家开支的问题,同时也不利于居民防洪意识的建立,导致蓄滞洪区和洪泛区的不合理开发,因而影响防洪减灾目的的实现。事实上,防洪和减轻洪水灾害是全民的事业,洪水区居民有责任承担适当的义务。所以,防洪事业资金的来源就不能只是单纯地由国家支付,应由收益各方共同承担^[5]。

根据预测,“十一·五”期间,江苏的水利总投资为480亿元(2000年价格),平均每年98亿元,水利基本建设投资为191.76亿元,其中防洪投资将需要164.73亿元,每年平均的水利基本建设投资和防洪投资分别为38.35亿元和32.94亿元。城市防洪投资约为44.08亿元。根据江苏省防洪投入机制的现状,一味依赖国家投资,就目前的财政状况是不现实的,大量摊派到企业,增加企业负担也不是解决问题的办法。

江苏省的防洪投入机制应根据各地区的发展状况,充分发挥各自优势,多渠道融资。地方政府部门应积极出台鼓励多渠道增加防洪投入资金的优惠政策,可以采取向银行贷款、向受益企事业单位集资以及通过金融市场等方法筹集资金,加快防洪工程与非工程建设。

3.2 加大对非工程防洪投资的力度

尽管防洪工程措施在江苏省防洪中一直发挥着重要的作用,并取得了巨大的经济和社会效益,但随着防洪标准的不断提高,投资的边际效益将递减,甚至为零。一个20年一遇的防洪工程投资的投入产出比可能是很高的,但如果将其建设标准提高到100年一遇,其投入产出比可能是很低的。

从经济学的角度来看,盲目提高防洪标准是不经济的,因为还有其他更经济的防洪方式可供选择。如不是修堤而是建立蓄滞洪区,采取“小水防、大水撤”的策略可能成本更低,不是将整个流域的防洪标准都提高,而是采取有所为有所不为的原则,根据不同情况制定不同的标准,防止盲目攀比提高标准,造成资源的浪费。根据江苏省水文资源勘测局的分析^[6],100年一遇与50年一遇高潮位相比,南京站高0.30m,镇江站高0.24m。也就是说,同样的堤防标准,如果原来能防御100年一遇洪水的话,现在只能防御50年一遇洪水。

从人水和谐和的现代治水理念来看,一味加高堤坝并非高枕无忧之策,即使把防洪标准建设成200年一遇,也无法保证在200年一遇的防洪大堤刚建成之时不会出现500年一遇的洪水,也可能200年的防洪大堤在500年内并未遇到200年一遇的洪水。这样的话,要么巨额投资建成的大堤被冲毁,要么让大量本可用来改善人民生活水平的稀缺资源浪费在等待防御更大的洪水上。为了节约社会资源以

提高人民的整体福利水平,可以通过有效的非工程措施成倍地提高工程设施的防洪效益。正是基于这一观点,人类在对付特大洪水方面不能仅依靠高标准的堤防,而是要学会更多与水相处的技巧和策略——自然而经济的方式,即合理使用各种非工程防洪措施是更有效而明智的。

参考文献:

[1] 龙子泉. 流域防洪效益计算宏观模型[J]. 水科学进展, 2002,13(4): 446-448.
[2] 陆菊春. 水利投入对国民经济增长贡献的量化方法研究[J]. 水电能源科学, 2002,20(1): 54-56.
[3] 高弋绢, 黄涛珍, 袁汝华. 我国水利“十五”投资效益预测[J]. 水利经济, 2002,20(6): 32-34.
[4] 陈锡康, 李景华. 长江流域片水利投资后向效应经济分析[J]. 水利经济, 2003,21(2): 45-48.
[5] 王保乾. 如何完善我国基础设施投融资的运行机制[J]. 西部论丛, 2002(9): 24-26.
[6] 薛其昌. 防洪与经济发展的几个关系[J]. 中国水利, 2000(2): 23-25.

(收稿日期 2005-03-03 编辑 高建群)

+++++
(上接第33页)

4 结 语

通过本次微细结构试验研究,了解了该坝体填土在受压过程中分形参数(分布分维、定向度等)的变化情况,同时,看到了7组土样在受压过程中微细结构特征参数变化的发展趋势。这些成果都为坝体填料压缩性偏大,以及坝体填料在压缩性方面存在差异问题的解释提供了较好的依据。从土体微细结构变化的定量分析入手,研究土体的各种工程现象,在我国岩土工程界中是一个前沿的研究领域,它可为揭示土体在实际工程中所表现出来的各种现象的本质提供一条有效的途径,从而发挥出更大的作用。

参考文献:

[1] 施斌. 粘性土击实过程中微观结构的定量评价[J]. 岩土工程学报, 1996,18(4): 57-62.
[2] 施斌, 李生林, TOLKACHEV M. 粘性土微观结构 SEM 图像定量研究[J]. 中国科学, 1995,25(6): 666-672.
[3] 胡瑞林, 官国琳, 李向全. 黄土湿陷性的微结构效应[J]. 工程地质学报, 1999,17(2): 161-167.
[4] 刘敬辉. 岩土体微细结构试验方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
[5] 葛修润, 李廷芥, 张梅英, 等. 适用于岩石力学细观实验研究的加载仪[J]. 岩土力学, 2000,21(3): 289-293.
[6] 刘敬辉, 洪宝宁, 张海波. 土体微细结构变化过程的试验研究方法[J]. 岩土力学, 2003,24(5): 744-747.
[7] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990,12(4): 3-10.

(收稿日期 2004-12-16 编辑 熊水斌)