

基于微观结构的软土变形计算模型*

周翠英, 林春秀

(中山大学工学院//岩土工程与信息技术研究中心, 广东广州 510275)

摘要: 基于土体微观结构演化建立其土体沉降计算模型是值得探索的新方法和新途径。研究首先从室内固结试验和三轴固结试验出发, 研究不同荷载条件下软土微观结构变化与固结变形特征; 并运用图像处理技术, 提取微观结构参数, 分析微观结构参数与荷载、变形和强度之间的关系, 建立基于微观结构的软土沉降计算模型; 最后, 将这一模型应用于实际工程中, 计算结果与监测值对比分析表明: 二者具有较好的一致性, 验证了该模型的实用价值。

关键词: 软土; 微观结构参数; 固结实验; 变形计算模型; 工程应用

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 01-0016-05

土体沉降计算问题是土力学的前沿课题之一, 也是沿海地区软土工程实践的热点问题之一。目前有关土体的沉降计算模型基本是采用理想弹性-刚塑性体或非线性弹性-弹塑性体的经典力学方法建立的, 而土体本身是一种非均匀、不连续、各向异性的不确定性介质, 这些复杂性特征从根本上取决于土体微观结构的非连续性和非确定性。由于常温常压下土体的成分不可能发生变化, 人们采用各种方法进行地基处理的目的是通过排水固结或其他措施改善土体的结构, 因此, 基于土体微观结构建立其沉降计算模型是沉降计算的关键之所在。

本文通过对珠江三角洲地区代表性饱和软土在室内不同压力条件下的固结试验研究, 探讨了软粘土在固结过程中微观结构参数变化和变形量的变化, 建立了基于微观结构的变形计算模型。

1 软土微观结构参数及其与变形之间的关系

1.1 软土微观结构基本特征参数

研究表明: 珠江三角洲地区软土的结构可划分为蜂窝状、海绵状、骨架状、絮状和凝块状等五种类型^[1]。通过对以上五种类型的软土微观结构代表性照片的分析, 结合前人研究成果^[2-9], 本研究采用以下参数描述软土固结过程中微观结构的变化。

1.1.1 孔隙特征参数 ①孔隙率 n : 软土微观结构图像中, 孔隙总面积与微结构图像面积的比值。

孔隙率表示土体中孔隙的多少, 是土体结构疏松程度的衡量标准之一。②孔隙比 e : 软土微观结构图像中, 孔隙总面积与颗粒总面积的比值。它能表示土体结构的松密程度, 和土体宏观物理力学性质中的孔隙比是可以对比的。③孔隙个数: 软土微观结构图像中, 孔隙(连通的孔隙)的数量。孔隙个数反映软土内部孔隙数目的多少。④孔隙平均面积: 软土微观结构图像中, 孔隙总面积与个数之比。孔隙平均面积越大, 说明土体内部的孔隙直径越大, 在孔隙率一定的情况下透水性越好; 反之, 说明土体内部孔隙直径越小, 在孔隙率一定的情况下透水性越差。

1.1.2 颗粒特征参数 ①颗粒个数 n_p : 土体微观结构图像中, 单位面积颗粒的数量。②颗粒平均面积 a_p : 土体微观结构图像中, 颗粒总面积与颗粒个数之比。颗粒平均面积越大, 说明土粒形态越粗大(一般对应于较松散结构), 颗粒平均面积越小, 说明土粒越细碎(一般对应于较致密结构)。

1.1.3 分形特征参数^[10-12] ①孔隙分布分维 D_{bd} : 采用 Sandbox 方法求取^[12], 即以边长为 ε 的正方形将图像分割成规格为 $(L/\varepsilon) * (L/\varepsilon)$ 的正交型格网, 设格网中含有孔隙(或一部分)的格子总数为 $N(\varepsilon)$, 那么如果改变 ε , 使其在一定值域范围内变化, 则将得到相应的序列值 $N(\varepsilon_1)$, $N(\varepsilon_2)$, $\dots, N(\varepsilon_n)$ 。那么, 孔隙分布分维: D_{bd}

* 收稿日期: 2007-08-13

基金项目: 国家 863 高技术探索计划资助项目(2007AA11Z112); 国家自然科学基金资助项目(59809008, 40672194); 广东省自然科学基金重点资助项目(013188, 06104932); 广东省科技攻关十五重点专项资助项目(2001B30803); 广东粤东高速公路实业发展有限公司委托资助项目(7101043)

作者简介: 周翠英(1963年生), 女, 教授, 博士生导师; E-mail: zhoucey@mail.sysu.edu.cn

$= -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} (\ln N(\omega) / \ln \omega)$ ，孔隙分布分维是孔隙大小和分布的一种综合反映。②颗粒分布分维：其求取方法与孔隙分布分维相类似，只不过把处理对象换成颗粒。

1.2 软土微观结构参数与压缩量的关系

不同压力条件下室内固结实验后，得到的饱和软土变形量（压缩量）与相应的微观结构参数的关系如表 1 所示。

表 1 软土微观结构参数与压缩量的关系

Tab. 1 Relation between micro-structural parameters and compression modulus of softclay

压缩量 S/mm	孔隙率 n/%	孔隙比 e	孔隙个数	孔隙平均面积 / μm^2	颗粒个数	颗粒平均面积 / μm^2	孔隙分布分维	颗粒分布分维
0.000	54.13	1.1801	184	29.42	279	16.44	1.7419	1.6032
0.942	50.37	1.0149	201	25.06	254	19.15	1.7274	1.7193
1.772	46.92	0.8839	221	21.23	389	13.90	1.7177	1.7708
2.137	43.99	0.7883	269	16.35	354	15.82	1.7039	1.7833
2.482	42.18	0.7295	289	14.60	297	19.47	1.6840	1.8169
2.788	40.56	0.6824	329	12.33	410	14.25	1.6815	1.8019
3.041	38.98	0.6388	372	10.48	442	13.81	1.6604	1.8162
3.279	38.73	0.6321	346	11.19	465	13.18	1.6632	1.8521

根据表 1 中软土的压缩量数值与其相应微观结构参数的数据，拟合二者之间的相互关系。通过分析软土固结过程中微观结构的变化规律和拟合结果可知，试验获取的 8 个微观结构定量参数中，和压力呈指数和多项式关系，与压力呈指数关系的有：孔隙率、孔隙比、孔隙个数、孔隙平均面积，与压力呈多项式关系的有：颗粒分布分维和孔隙分布分维；和压缩量呈线性关系的有：孔隙率、孔隙比、颗粒分布分维和孔隙分布分维；呈二次函数关系的有：孔隙个数、孔隙平均面积；其它的结构参数与压力和压缩量的变化关系比较不明显。

2.1 软土固结过程微观结构参数与变形参数的关系

本研究选取适当的微观结构定量参数建立软土微观结构沉降模型。选取原则：①与压力、压缩量有较好的相关性；②要有清楚的物理意义。据此确定的微观结构定量参数有五个，它们分别是：①孔隙率 n ，②孔隙比 e ，③孔隙平均面积或孔隙平均直径 R_d ，④颗粒分布分维 D_{pd} ，⑤孔隙分布分维 D_{bd} ，这些参数用于建立沉降计算模型。

由表 2 可以看到，孔隙率、孔隙比、孔隙平均面积或孔隙平均直径、颗粒分布分维、孔隙分布分维等参数与压力和压缩量之间相关性好，可以用来建立基于微观结构的软土沉降计算模型。

2 基于微观结构的软土变形模型研究

表 2 软粘土微观结构定量参数与压力、压缩量、强度（粘聚力）的相关关系表

Tab. 2 Correlativity between micro-structural parameters and pressure and compression and strength of soft soil

微观结构 定量参数	与压力 (P) 相关关系		与压缩量 (S) 相关关系	
	关系表达式	相关性	关系表达式	相关性
孔隙率 n	双曲线关系： $n = n_0 - \frac{a_p}{P + b_1}$	$R^2 = 0.9837$ 好	线性： $S = a_n n + b_n$	$R^2 = 0.9904$ 好
孔隙比 e	双曲线关系： $e = e_0 - \frac{a_2 P}{P + b_2}$	$R^2 = 0.9756$ 好	线性： $S = a_e e + b_e$	$R_2 = 0.994$ 好
孔隙个数 n_d	指数关系： $n_d = n_{d0} \exp(B_d \sigma)$	$R^2 = 0.9417$ 较好	二次式： $S = a_{nd} n_d^2 + b_{ad} n_d + c_{ad}$	$R^2 = 0.9499$ 较好
孔隙平均面积 (平均直径) a_d	指数关系： $a_d = a_{d0} \exp(B_d \sigma)$	$R^2 = 0.9666$ 好	二次式： $S = a_{ad} n_d^2 + b_{nd} n_d + c_{nd}$	$R^2 = 0.9756$ 好
颗粒个数 a^p	-	$R^2 = 0.69$ 不明显	-	$R^2 = 0.6535$ 不明显
颗粒平均面积 a^p	-	$R^2 = 0.6023$ 不明显	-	$R^2 = 0.6221$ 不明显
颗粒分布分维 d_{pd}	二次式： $d_{pd} a \sigma^2 + b \sigma + c$	$R^2 = 0.9629$ 较好	线性： $S = k_p \sigma + b_p$	$R^2 = 0.9322$ 较好
孔隙分布分维 D_{bd}	线性关系： $d_{bd} = d \sigma + f$	$R^2 = 0.9577$ 较好	线性： $S = k_b \sigma + b_b$	$R^2 = 0.9251$ 较好

2.2 软土微观结构变形计算模型的建立

基本假设：①土体只发生竖向压缩变形；②土体竖向方向（垂直于压力面的方向）上的微观结构符合统计上的均匀分布；③土颗粒不可压缩；④荷载一次瞬时施加并维持不变。

根据形变的定义，基于试验数据和以上相关关系的分析得到某级荷载 ΔP_i 作用下某一时间 t （取荷载 P 施加的时刻为 t_0 ）所产生的沉降量为：

$$S_i = \omega_H = \frac{\Delta P_i H}{\Delta E s_i} \left(1 + \frac{T}{t - t_0}\right)^{-1} = S_{ult} \left(1 + \frac{T}{t - t_0}\right)^{-1}$$

S_{ult} 为荷载 P 作用下土体所产生的最终沉降量： S_{ult}

$$= \frac{\Delta P_i H}{\Delta E s_i} = \varepsilon_p H$$

则荷载 P 作用下任一时间 t 的土体变形固结度 $U(t)$ 为：

$$U(t) = \frac{S}{S_{ult}} = \frac{1}{1 + \frac{T}{t}} = \left(1 + \frac{T}{t}\right)^{-1}$$

模型中的参数和土的初始状态、土体固结过程特性有关，即和土体天然结构、土体固结过程中的结构变化有关。在荷载作用下，土体微结构改变，土体发生压缩，土体微观的结构变化是宏观变形的本质，推导得到下式：

$$T = C_T \frac{e^3 \exp(D_{bd})}{r_d (D_{pd})^2}$$

该式表明 T 与孔隙率成正比关系，与孔隙平均直径 r_d 成反比关系，与孔隙分布分维成指数关系，与颗粒分布分维的平方成反比。式中 C_T 为与土体排水条件有关的系数，当土层厚度一定，排水距离和排水方式也确定时， C_T 为一常量，单位是 $L^{-2} T$ 。土层厚度越大，排水距离越长，则 C_T 越大， T 越大，因而土体固结速度越慢。即 C_T 与土层厚度、排水距离的变化是同向的。对本研究的软粘土侧限固结试验（土样高度为 2 cm，面积 30 cm²，上下排水）而言， C_T 值约为 8.0。

图 1 是理论计算的 T 值和实际试验测定 T 值的对比关系。表明上式是比较符合实际的。

3 工程应用

3.1 工程简介

中山 - 江门高速公路起点为中山市港口镇，终点在江门市四村，全长 27.614 km，是广东省珠江三角洲地区高速公路网的重要组成部分。该高速公

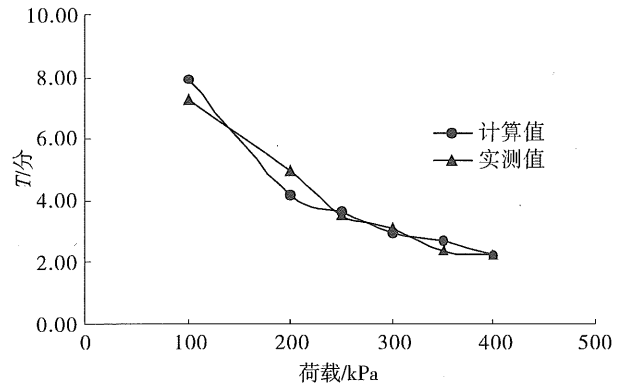


图 1 T 值的理论计算值与实测值的比较

Fig. 1 Comparison between academic value and practical

路地处珠江三角洲河网地区，其地层分布情况见图 2。软基路段占全长的 50% 以上，淤泥层厚度平均约为 11 m，淤泥层下多为淤泥质粘土，两者总厚度平均达 24 m，最厚达 40 m，采用堆载预压和砂井排水的方法进行软基处理：路基填土高度平均 6.7 m，砂井间距为 1.3 m。土体在天然状态下的物理力学性质参数见表 3。

地层编号	层底深度 /m	分层厚度 /m	柱状图 1: 200
①	1.60	1.60	⊗
②	3.40	1.80	⊗
③	4.00	0.80	f_v
⑤	8.36	4.30	⊗
⑤ ₁	9.56	1.20	f_v
⑤	12.99	3.40	⊗
⑤ ₁	14.29	1.30	f_v
⑤	18.72	4.40	⊗
⑤ ₁	19.12	0.40	f_v
⑤	21.22	2.10	⊗
⑦	23.07	1.85	f_v
⑧	24.69	1.60	⊗
⑦	33.78	9.00	f_v

图 2 计算断面钻孔柱状图

Fig. 2 Drill histogram of calculation section

表 3 试验土样的物理力学性质
Tab. 3 Physical and mechanical properties of the test soft soil

定名	天然密度 $\rho_s/g/cm^3$	土粒比重 G_s	饱和度 $S_r/\%$	含水量 $W/\%$	孔隙比 e_0	塑性指数 IP
淤泥质粘土	1.78	2.68	>94	50	>1.1	18~23

3.2 沉降计算

本研究选取的计算断面位于中江高速公路 11 标试验段，该路段软基处理采用的方法为砂井堆载预压法（见图 3）。对该路段分别采用规范推荐的分层总和法、本研究模型法以及根据现场监测资料推导三种方法来计算软土的最终沉降量，计算结果如下：实际监测的趋势外推法 176.80 mm，规范法为 117.86 mm，本文模型法为 166.22 mm。

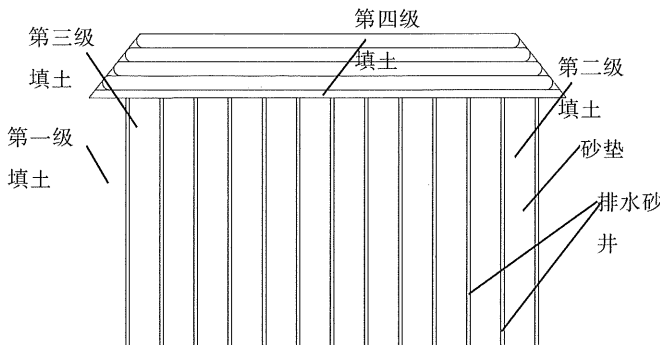


图 3 路堤断面示意图

Fig. 3 Section map highway embankment

从计算结果可知，采用规范推荐的分层总和法、本研究模型法计算的最终沉降量分别是 117.86 mm、166.22 mm，而根据现场监测资料趋势外推的最终沉降量是 176.80 mm，可见本研究模型的计算结果与实际监测结果吻合得较好，这一结果从图 4 中也已经体现出来。从图 4 可以看到，模型计算的沉降结果比实际情况要小一些。其原因在于实际工程是打砂井排水的，土体实际固结速度比

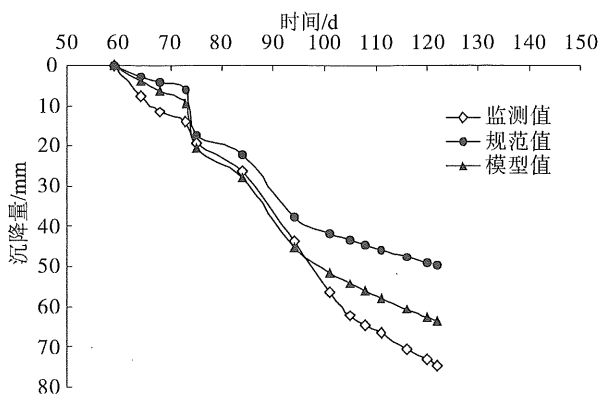


图 4 计算结果与实际监测沉降对比

Fig. 4 Comparison between calculation results and

没有竖向排水体的软粘土固结要快，而本研究沉降计算模型没有考虑到砂井排水的作用，因此，计算的固结度偏小，导致相同时间下的固结沉降计算结果较实际值偏小。

4 结 论

(1) 本文采用了孔隙特征参数（孔隙率、孔隙比、孔隙个数、孔隙平均面积）和颗粒特征参数（颗粒个数、颗粒平均面积）以及分形特征参数（孔隙分布分维、颗粒分布分维）来描述软土在压缩变形过程中微观结构的变化特征。根据微观结构参数与压力和压缩量之间相关性，选择孔隙率、孔隙比、孔隙平均面积（或孔隙平均直径）、颗粒分布分维、孔隙分布分维五个参数建立了基于微观结构的软土沉降计算模型。

(2) 通过对饱和软土在室内不同压力条件下的固结试验研究，分析和探讨了软土在固结过程中微观结构参数和变形量的变化之间的关系。表明随着压力的不断增大，软土的压缩量也逐渐增加，其微观结构也不断发生变化，这是土体在受荷过程中不断调整自身以适应外加荷载的微观结构变化的宏观表现。在此基础上对微观结构特征参数和变形量之间的关系做了进一步的量化分析，建立了相应的变形计算模型。

(3) 将所得的变形模型应用于实际工程中，并与规范的分层总和法以及根据现场监测资料推导的结果相比较得出，本研究模型的计算结果与实际监测结果吻合得较好，具有一定的实用性，可以在相似地质条件下的其他软基处理工程中应用。

参考文献：

[1] 周翠英, 牟春梅. 珠江三角洲软土分布及其结构类型划分[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(6): 81-84.
ZHOU Cuiying, MU Chunmei. Distribution and microstructure classification of soft clay in the Pearl River delta [J]. Acta Scientiarum Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(6): 81-84.

[2] SHI B, LI S. Quantitative approach on SEM images of microstructure of clay soils [J]. Science in China (Series B), 1995, 36(8): 741-748.

- [3] PUSCH R. Experience from preparation and investigation of clay microstructure[J]. *Engineering Geology*, 1999, 54:187-194.
- [4] PUSCH R. SCHOMBURG J. Impact of microstructure on the hydraulic conductivity of undisturbed and artificially prepared smectitic clay[J]. *Engineering Geology*, 1999, 54:167-172.
- [5] PUSCH R. WESTON R. Microstructural stability controls the hydraulic conductivity of smectitic buffer clay[J]. *Applied Clay Science*, 2003, 23: 35-41.
- [6] CURRAN KJ, HILL PS, MILLIGAN TG. Time variation of floc properties in a settling column[J]. *Journal of Sea Research*, 2003, 49: 1-9.
- [7] SU·LEYMAN DALGYC, ORHAN S. Settlement predictions in the Anatolian Motorway, Turkey[J]. *Engineering Geology*. 2002, 67:185-199.
- [8] TOVEY N K. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs soil fabric[J]. *Journal of Microscopy*, 1990, 120:303-315.
- [9] TOVEY N K, KRINSLEY D H. Mapping of the orientation of fine-grained minerals in soils and sediments[J], *Bulletin of IAEG*, 1992, 46:92-101.
- [10] MANDELBROT B B. *The Fractal Geometry of Nature* [M], San Francisco:W H Freeman, 1982.
- [11] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distribution analysis and limitations, *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56:362-369.
- [12] MCBRATHNEY A B. Comments on“Fractal distribution of soil aggregate-size distribution calculated by number and mass”[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57:1393-1394.
- [13] 胡瑞林. 粘性土微结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.

Research on Deformation Calculation Model of Soft Soil Based on Microstructure

ZHOU Cui-ying, LIN Chun-xiu

(Research Centre for Geotechnical Engineering and Information Technology//School of Engineering,
Sun Yat-sen University, Guangdong 510275, China)

Abstract: Modeling for settlement calculation of soil based on its microstructure is a new way worth to try. The study mainly includes five parts: ① research on the characters of macro-deformation and microstructure of soft clay ground on consolidation test and consolidated tri-axial test; ② adopting image-processing technique to extract parameters of soil microstructure; ③ analyzing the relationship between microstructure parameters and loading, deformation as well as strength; ④ using numerical analysis method to construct calculation model of settlement in soft clay strata ground on microstructure; ⑤ applying the new model based on the microstructure parameters to practical engineering, and the results show that the calculated data are very close to the monitored ones. Meanwhile, the results show that the varying regularities of microstructure of soft clay is well coincided with the regularities of deformation and strength in the experimental study. It also means that the model has some significance on innovation and practice.

Key words: soft soil, microstructure parameters parameters, consolidation and deformation test, settlement calculation model, application to engineering