

真空预压加固软基时土体的损伤

丁绿芳¹, 郭志平², 赵维炳²

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 从损伤力学的观点出发, 引入损伤比因子考虑土体的损伤, 根据室内试验确定了土体的损伤比及计算参数. 比较了弹塑性模型、粘弹塑性模型以及考虑土体损伤的粘弹塑性模型的计算成果, 结果表明, 考虑了土体损伤的粘弹塑性模型计算的地基沉降与实测资料较吻合.

关键词 流变 损伤 双屈服面模型 沉降 真空预压

中图分类号 : TU471.8 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-1980(2002)04-0057-04

1 土体的损伤

材料在荷载作用或温度改变等因素影响下, 其强度会降低, 这是因为在材料失效以前, 材料中已经产生了微观裂纹和微观空洞. 人们将材料与结构中的微观缺陷的出现和扩张称为损伤^[1]. 经典的固体力学理论完备地描述了无损材料的力学性能(弹性、粘弹性、塑性、粘塑性等), 然而, 材料或构件的工作过程是不断损伤的过程, 用无损材料的本构关系描述受损材料的力学性能显然不合理.

原状粘土大多具有一定的结构性. 所谓土的结构性, 是指土颗粒及孔隙的性状及排列形式(或称组构)以及颗粒之间力的相互作用^[2]. 土的结构性是不可逆的, 一旦结构受到扰动破坏, 将无法在短期内得到恢复, 力学特性受到一定程度的影响. 土体在原状土、破损段和破损后三个阶段的力学特性不同, 很难用统一的参数来表示, 引入损伤概念, 可以量化施工过程中土体力学性质的受损程度.

2 损伤比因子

实际工程中的土体材料受到各种因素引起的不同程度的扰动, 其强度会降低. 这里, 引入损伤比因子来表示土体的受损程度.

定义一种理想的原状土和一种理想的完全损伤土, 前者代表天然沉积土或人工填筑土, 后者代表原状土受到某种因素作用后结构性完全丧失的土体. 土体的变形和破坏可以认为是由原状土到完全损伤土的演变过程, 即把受施工扰动土体视为具有不同力学特性的两种理想土的组合, 而变形和破坏则是原状土所占的比重逐步减小和受损土的比重逐步增大的过程. 因此, 土体的力学性质是两种土的综合反应, 即 $S = (1 - \omega) S_i + \omega S_d$, 其中 S_i 为原状土的力学参数, S_d 为损伤土的力学参数, ω 为损伤比(即损伤土在总土体中所占的比重).

由于土体材料的特殊性, 一般从宏观角度来假定损伤比. 本文所采用的损伤比因子, 主要考虑土体的体积应变和剪应变, 在 ω 中引入 ϵ_v 和 ϵ_s , 并假设^[3]

$$\omega = 1 - e^{-(c_0 + c_a \epsilon_v + c_b \epsilon_s)} \quad (1)$$

式中: c_0 ——考虑取样扰动的影响因子; ϵ_v ——体积应变, $\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$; ϵ_s ——剪应变, $\epsilon_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}$; c_a, c_b ——参数, 通过拟合原状土和重塑土的压缩曲线确定.

3 加固区的沉降计算

深圳河北岸大部分地段表层为新近回填的素填土, 其下为 6 ~ 20 m 厚的滨海相、海陆交互相沉积的淤

泥、淤泥质粉质粘土和亚粘土层,其土质具有孔隙比大、含水量高、压缩性大、强度及承载力低等特点.为了保证直立挡墙基础的承载力及河道开挖的安全和稳定,设计采用塑料板排水和砂井桩挤密与排水真空预压法加固岸坡软土地基的技术方案.工程中,塑料排水板的打设不论采用何种机械和方法,均会使土体的力学性质变差,即土体受到了一定程度的损伤.

本文计算中,以一个试验区为例,该区的平面见示意图 1.在试验区内选取 CH1+900 作为典型计算断面(见图 2),断面上设置膜面沉降板和测斜管等观测仪器.塑料排水板间距为 1.2 m,正方形布置,打至高程 -12.0 m.计算中,土体的力学性质指标取值时考虑土体的损伤,从而使计算结果更符合实际情况.

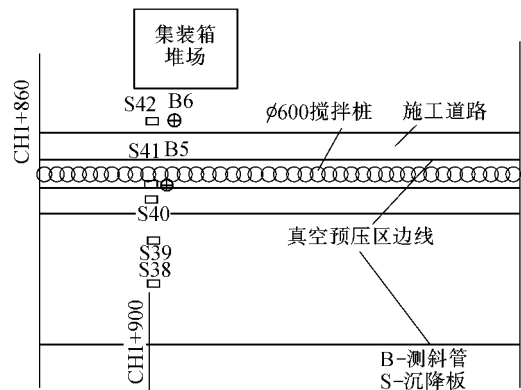


图 1 试验区平面示意图

Fig.1 Plan of experimental zone

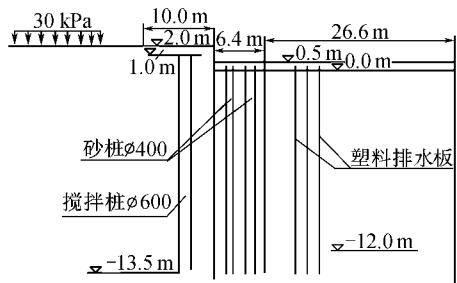


图 2 计算断面示意图

Fig.2 Sketch of calculation section

计算模型采用将双屈服面弹塑性模型^[4]和修正的 Komamura-Huang^[5]模型结合起来的双屈服面粘弹-粘塑性模型,并引入损伤比概念.

3.1 计算参数的确定

双屈服面粘弹-粘塑性模型,包含 $\nu, E_0, \eta_e, \eta_p, E_1, M_1, M_2, p_r, h, m, a, \omega$ 共 12 个参数,对于原状土,取弹性泊松比 $\nu = 0.3$,除 ω 外, M_1, M_2, p_r, h, m 和 a 由普通三轴试验即可测定^[6], E_0, η_e, η_p, E_1 需由应力式三轴试验确定^[5].

3.1.1 ω 的确定

将原状土的压缩曲线与重塑土的压缩曲线进行对比,如图 3 所示.设两条曲线大体上平行时的转折点处孔隙比为 e_a ,再假设此时的损伤比 $\omega = 0.95$,由式(1)可得

$$c_a = \frac{\ln 20 - c_0}{(e_0 - e_a)/(1 + e_0)} - c_b \tag{2}$$

再设无侧限试验中应力-应变曲线下降后期的转折点处的 $\omega = 0.95$,考虑到此时 $\epsilon_v = 0$,由式(1)可得

$$c_b = \frac{\ln 20 - c_0}{1.5 \epsilon_b}$$

此处假设 $\epsilon_b = e_a/(1 + e_0)$.

对于取自工程现场的原状土,进行了大量的原状土与重塑土的压缩对比试验,整理试验资料可得各参数如下 密度 $\rho = 1.59 \sim 1.78 \text{ g/cm}^3$,含水量 $w = 43.2\% \sim 72.3\%$, $c_a = 2.0 \sim 3.6$, $c_b = 6.52 \sim 7.87$.

3.1.2 粘性参数的确定

由室内应力式三轴试验确定土体的粘性参数^[5].对从工程现场取回的土样,进行了 4 组不同围压下的三轴流变试验.土样的物理性质指标见表 1.对于 $\sigma_3 = 50, 100, 150$ 和 200 kPa 不同围压下的试验,步骤大致如下:(a)装样固结,在各向等压的情况下使土样固结,时间一般为 12 h 左右;(b)读取固结完成时的体积应变和轴向应变,然后分级施加轴向偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$),分级的依据是应力水平 s ,第 1 级为 $s = 10\%$ 左右,第 2,3,4 级依次为 30%,50%,75%;(c)施加增量 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ 后,记录轴向变形和体积变形随时间的变化过程,直至变形稳定为止(每 24 h 轴向变形小于 0.005 mm);(d)变形稳定后施加下一级荷载.如此反复,直至试样破坏.

在轴向应变过程线中,取应力水平较低时(小于 10%)的柔度函数曲线,用下降法确定 E_0 和 E_1 ,点绘不同 σ_3 下的 $(E_0/p_a) \sim (p/p_a)$ 以及 $(E_1/p_a) \sim (p/p_a)$ 于双对数坐标纸上,得近似直线,直线的截距和斜率即为

E_0^*, n_0 和 E_1^*, n_1 .

表 1 土样的物理性质指标

Table 1 Parameters of soil samples

试样编号	$w/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E_0
1	51.6	16.27	1.43
2	52.0	16.66	1.38
3	43.2	17.44	1.17
4	61.4	16.09	1.62
5	59.2	16.27	1.56

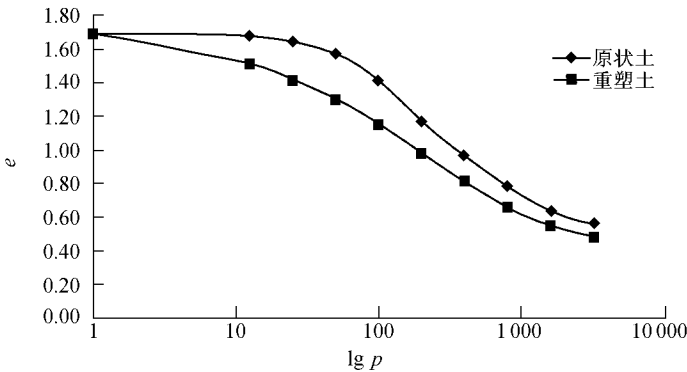


图 3 压缩试验曲线

Fig.3 Compression test curves of soil samples

3.1.3 重塑土参数的确定

对于重塑土,主要考虑其强度参数 c 和 φ 、弹性模量 E 以及渗透系数 k .

a. c 和 φ 的确定.由重塑土的三轴固结不排水试验资料整理可得其有效抗剪强度 c 和 φ .从试验结果看,重塑土的粘聚力 c 在8.0 ~ 17.0 kPa之间,比原状土的减小了 20% ~ 35%;而摩擦角 φ 并没有明显的改变,从这一点可以看出粘性土的各向异性主要表现在粘聚力 c 上,而摩擦角 φ 的各向异性不明显.

b. 弹性模量 E 的确定.采用共振柱三轴试验测定重塑土的弹性模量.分加和不加围压两种情况,测定重塑土的弹性模量随时间的变化规律,试验结果如图 4 所示.由图 4 可见,在不施加围压的情况下,土体的弹性模量恢复得很慢.而施加了围压后,土体的弹性模量恢复较快.把重塑土与原状土的弹性模量进行对比,可见重塑土的弹性模量为原状土的 33%.

c. 重塑土渗透系数的确定.采用南水渗透仪测定原状土与重塑土的渗透系数,试验结果如图 5 所示.由图 5 可见,随着时间的推移,重塑土的渗透系数逐渐增大,但是,约经过 2 d 后其值不再变化,约为 2.5×10^{-8} cm/s,约为原状土(6.54×10^{-7} cm/s)的 3.4%.

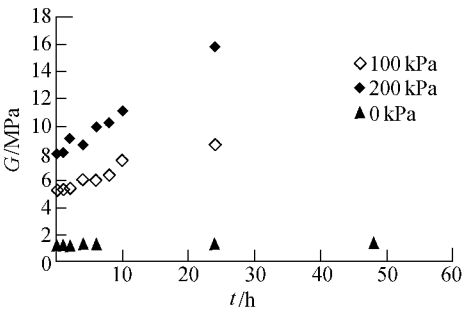


图 4 重塑土弹性模量随时间的变化

Fig.4 Variation of elastic modulus of remolded soil with time

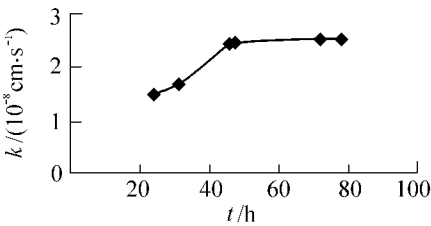


图 5 重塑土渗透系数随时间的变化

Fig.5 Variation of permeability coefficient of remolded soil with time

3.2 计算结果及分析

采用有限元方法计算加固地基的变形,并假设在进行真空预压前各单元节点的超静孔隙压力和初始位移均为零.真空预压时,砂垫层中所有节点的孔隙压力为负的真空压力,砂垫层以外的地基表面孔隙压力为零.约束地基表面位移、地基侧边界的水平向位移和底边界的垂直向位移.

试验区从 1998 年 9 月 9 日开始抽真空,经 20 d 真空度达到 80 kPa,试验加固区以外的集装箱堆场荷载按 30 kPa 计算,施工道路的荷载取 10 kPa^[7].

利用各种模型计算的 S38 测点的地表沉降及实测值见表 2.

表 2 S38 测点的沉降实测值及计算值
Table 2 Measured and calculated settlements at point S38

时间/d	实测值/cm	弹塑性模型		粘弹塑性模型		考虑损伤的粘弹塑性模型	
		计算值/cm	误差/%	计算值/cm	误差/%	计算值/cm	误差/%
4	3.2	1.8	-43.8	1.9	-40.0	2.7	-13.1
8	10.2	6.1	-40.2	6.7	-34.4	7.7	-24.5
12	16.4	11.6	-29.3	12.3	-25.0	13.9	-15.2
16	20.9	16.9	-19.1	18.0	-13.9	21.0	0.5
20	23.8	24.8	4.2	25.1	5.5	28.9	21.4
24	27.7	26.9	-2.6	28.8	4.2	33.9	22.3
30	32.0	32.2	0.6	34.2	6.9	39.8	24.3
39	41.0	38.7	-5.6	40.5	-1.2	46.7	13.9
52	50.0	45.2	-9.6	48.4	-3.2	54.8	9.6
72	63.8	52.1	-18.3	55.7	-12.7	63.3	-0.8
103	73.0	60.8	-16.6	63.8	-12.6	71.0	-2.7

比较计算结果与实测值可见,考虑了损伤的粘弹塑性双屈服面模型的计算结果最接近实测值,比没有考虑流变的弹塑性模型精度提高了 5% 左右;考虑土体损伤与仅考虑软土流变性时的沉降计算结果相差约 10% ~ 20%,第 4 天的沉降相差达 27%,随着加固时间的延长,两者的差值逐渐减小.可见,在加固初期,土体的受损比较严重,因此没有考虑损伤的计算值与实测值相差较大.随着加固时间的延长,土体的受损有了一定程度的恢复,且强度得到了提高,故此时两种计算方法的结果相差较小.说明土体在施工过程中的确受到了一定程度的损伤,计算中采用的参数考虑了损伤的影响,从而使计算结果及沉降的预测更符合实际情况.

4 结 语

- a. 沿海地区软土地基加固计算时,应考虑软土的流变性.
- b. 采用塑料排水板加固软土地基时,排水板的打设使土体受到了一定程度的损伤.沉降计算时,引入损伤比因子可以使计算精度提高 10% 左右.

参考文献：

[1] 吴鸿遥. 损伤力学[M]. 北京:国防工业出版社,1990.1~4.
[2] 张诚厚,袁文明,戴济群. 软粘土的结构性及其对路基沉降的影响[J]. 岩土工程学报,1995,17(5):25~32.
[3] 沈珠江. 结构性粘土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报,1993,15(3):21~28.
[4] 殷宗泽. 一个土体的双屈服面应力-应变模型[J]. 岩土工程学报,1988,10(4):64~71.
[5] 赵维炳,施建勇. 软土固结与流变[M]. 南京:河海大学出版社,1996.240~242.
[6] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利电力出版社,1996.70~79.
[7] 丁绿芳. 软土地基的流变损伤研究[D]. 南京:河海大学,1999.

Damage to soft soil under vacuum preloading

DING Lu-fang¹, GUO Zhi-ping², ZHAO Wei-bing²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China ;

2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :Based on the concept of damage mechanics, a damage factor of soil is developed. The damage factor and other calculation parameters of soil are obtained through laboratory tests. A comparison of the settlements calculated by the elastoplastic model, the visco-elastoplastic model, and the visco-elastoplastic model considering damage to soil shows that the result of the last model is in good agreement with the measured data.

Key words :creep ; damage ; two yield surface model ; settlement ; vacuum preloading