

循环荷载作用下软土计算模型初探

郭中华,余湘娟,严 蕴

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 根据循环三轴试验,得到了上海某地区粘土永久应变-有效应力-加荷周数的关系.对上海某地区三类软土的共振柱试验进行了分析研究,结果表明,三种土类的动剪切模量-剪应变-阻尼比-剪应变关系具有一定规律性.文章最后给出了上海某地区三类软土的动剪切模量比-剪应变-阻尼比-剪应变的数学表达式,并与实测值进行了对比,得到满意的验证.

关键词 软土 弹塑性模型 内时模型 孔压 动剪切模量比 阻尼比

中图分类号 :TU43 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2002)01-0109-04

动荷载在地基或土工建筑物上是很常见的,按荷载持时及与时间的关系可将其分为 3 类,即循环荷载(周期荷载)、冲击荷载与不规则荷载.循环荷载是指以同一振幅和周期往复循环作用的荷载(如机械振动及一般波浪荷载).冲击荷载是强度很大、持时很短的荷载,而随时间没有规律变化的荷载即为不规则荷载(如地震荷载).由于软土的区域性很强,不同地区的土性可能有很大的差异,如上海淤泥质粘土的塑性指数仅 22 左右,而许多粘土的塑性指数高达 60 以上^[1].对于饱和软粘土,在循环荷载作用下,应力-应变关系、振动孔隙水压力发展及产生永久变形规律的计算模型目前还很少,在这方面有必要开展研究与探索工作.

1 动力本构模型

1.1 弹塑性模型

考虑到岩土材料具有残余变性特性,Druck & Prager(1952)最早提出塑性理论的本构模型.由于一般的岩土是一种功硬化或应变软化的材料,故在理想塑性模型基础上分别提出了塑性功硬化模型和塑性帽盖模型这两种弹塑性模型.塑性功硬化模型用来描述剪切屈服、破坏,而塑性帽盖模型则建立在球应力引起岩土材料体积屈服的基础之上.张克绪等^[2]曾用两个基于非曼辛准则的土动弹塑性模型对地震荷载的情况进行了土体反应分析,并与通常采用的等效线性模型作了比较.结果表明,两种模型的结果是可比的,而采用弹塑性模型更为合理.目前土体的弹塑性模型多达数十种,而一个能反映复杂应力条件下主要变形的弹塑性本构模型必须具备记忆应力(应变)历史的能力,而且还要能反映多种应力路径对塑性应变大小和方向的影响^[3].Ramsamooj^[4]认为一个弹塑性模型应该仅仅利用土体的不变材料特性、加载条件及描述土体性状的环境参数,而不宜包含任何经验常数.谢定义^[5]认为,根据硬化规律定量地建立塑性硬化模量场计算塑性应变是弹塑性模型的关键.

1.2 内时模型

内时模型的基本思想是用一个应力-应变过程的内时描述量——内时来描述材料的非弹性性质.在经典的弹塑性理论中,材料内任一点的现时应力状态是该点邻域内整个变形和温度历史的泛函.而在内时理论中,变形历史是用一个取决于变形中材料特性和变形程度的内蕴时间来量度的.内时模型省略了弹塑性模型中屈服面的概念,使材料变形的理论描述与数值计算得到了简化.内时是一个单调递增的函数,它的转换变量可以表示土在受荷过程中的加密作用、体积应变、剪应变、孔压发展及其它各种不可恢复的非线性反应.内时理论取消了屈服面的概念,为了代替原来的加荷准则、流动法则和硬化规律,它给出了新的规定:

a. 假定塑性应变增量 $d\gamma^p$ 总是小于总应变增量 $d\gamma$, 而且随应变的积累减小, 因此, 内时参数是一个非减的纯量, 且随应变的积累而增加.

b. 内时理论将体应变和偏应变分开来计算, 所以塑性应变增量的方向可根据算得的两种应变增量合成得到.

c. 根据塑性应变非负的原则, 加荷时 $d\gamma$ 与 $d\gamma^p$ 同号, $d\gamma$ 为正; 卸荷时 $d\gamma$ 与 $d\gamma^p$ 异号, $d\gamma$ 为负. 故以 $d\gamma$ 大于零或小于零作为加荷或卸荷的根据.

由于内时可表示为应力状态、应变状态及应变的时间过程量的函数, 而应力变化率、应变变化率与内时之间的经验关系可以利用试验结果来确定, 因此, 随着所建立的内时的表达形式及经验关系式的不同, 内时模型可以给出不同表达形式的动力本构关系. 各种形式的内时理论均具有它特定的适用范围, 这主要取决于用什么样的试验结果来确定经验关系式.

2 孔压发展规律

循环荷载作用下粘土的不排水孔压特性的研究具有十分明确的工程背景, 在土力学中也具有重要的研究价值, 因而吸引了许多国内外学者, 并积累了很多宝贵的试验资料, 但因问题本身的复杂性, 仍然还有许多问题值得深入研究和探索.

目前许多孔压模型分别从各个角度描述了孔压的变化, 很多模型直接建立了孔压与应变的关系, 有双曲线型、多项式型与指数型等. 周建^[6]认为孔压受到循环应力比、加荷周数、超固结比、加荷频率等的影响, 而且影响应变的因素也有许多, 因此建立孔压与应变的关系比较困难, 也不具有普遍性, 她建议引入一不随各种影响因素变化的客观基准量——加荷周数, 来间接反映土体孔压与应变的关系. 笔者通过对上海某地铁工程原址的粘土进行循环三轴试验, 得到以下结论(如图 1~3 所示):

a. 剪应变与加荷周数成对数型函数关系, 即 $\gamma = 2.57\ln N - 1.123$.

b. 有效应力在上升阶段与加荷周数成指数型函数关系, 在下降阶段与加荷周数成多项式函数关系. 上升阶段 $\sigma = 10^{-5}e^{2.15N}$, 下降阶段 $\sigma = 6 \times 10^{-6}N^4 - 0.001N^3 + 0.132N^2 - 4.788N + 93.739$.

c. 有效应力与剪应变成多项式函数关系, 即 $\sigma = 0.360\gamma^3 - 6.903\gamma^2 + 35.374\gamma + 8.739$.

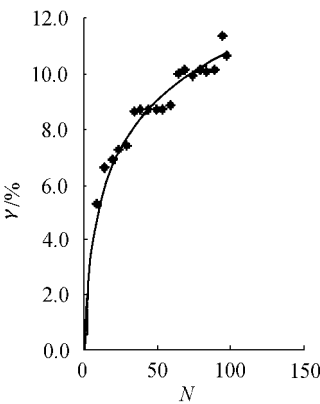


图 1 上海某地区粘土
剪应变与周数的关系

Fig.1 Relationship between

shear strain and load cycles for clay
at a site in Shanghai

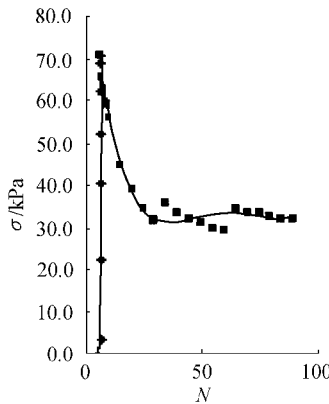


图 2 上海某地区粘土
有效应力与周数的关系

Fig.2 Relationship between

effective stress and loading cycles for clay
at a site in Shanghai

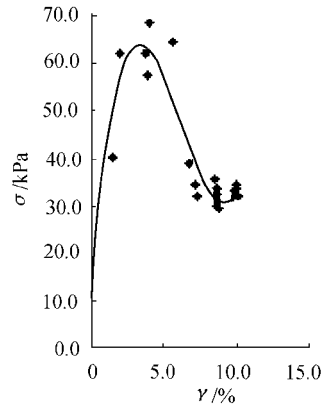


图 3 上海某地区粘土
有效应力与剪应变的关系

Fig.3 Relationship between

effective stress and shear strain for clay
at a site in Shanghai

3 动力计算模型

常熟太仓地区的粉土、粉质粘土与淤泥质粉质粘土的共振柱试验表明, 动剪切模量与剪应变的关系受固结压力影响较大, 同一剪应变下, 固结压力越大, 剪切模量越大; 而阻尼比与剪应变的关系基本上不受固结压力的影响. 图 4, 5 反映了这一现象.

不排水循环荷载短期作用于正常固结和弱超固结土时, 有效应力将降低, 土颗粒结构发生重排, 导致不排水强度与刚度出现弱化. 固结压力对塑性指数较小的土的影响比塑性指数较大时更明显.

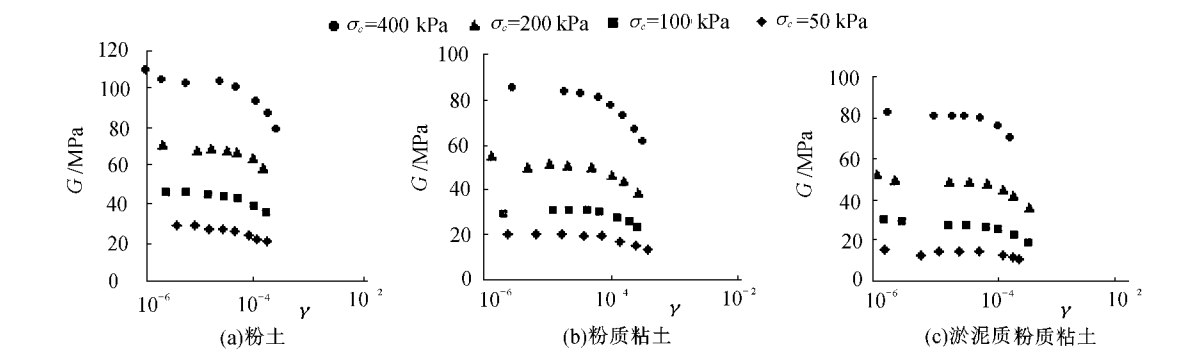


图 4 软土剪切模量与剪应变的关系

Fig.4 Relationship between shear modulus and shear strain for soft soils

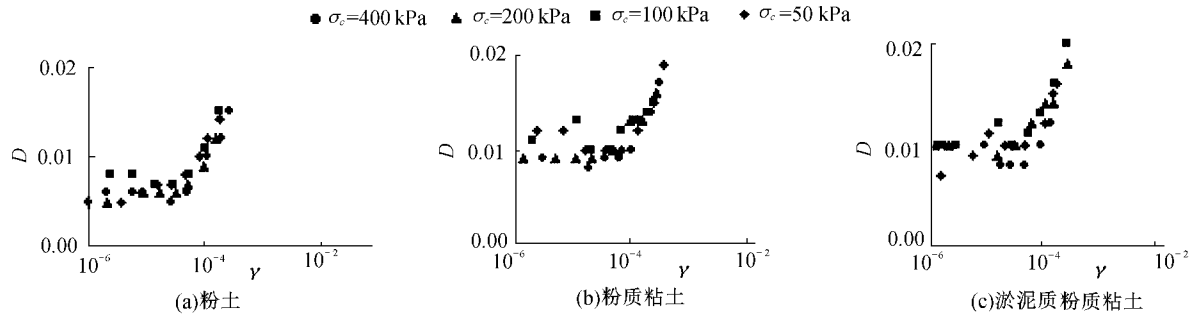


图 5 软土阻尼比与剪应变的关系

Fig.5 Relationship between damping ratio and shear strain for soft soils

Hardin,Drnevich^[7] 1972 年提出了双曲线型的动剪切模量 G 与动剪应变 γ 的经验关系模型,而 Seed 和 Martin 认为在描述各类土的剪应力与剪应变关系时,更宜采用 Davidenkov 模型:

$$G/G_{\max} = 1 - \left[\frac{(|\gamma|/\gamma_r)^{2B}}{1 + (|\gamma|/\gamma_r)^{2B}} \right]^A \tag{1}$$

式中: $G_{\max}$ ——最大动剪切模量; γ_r ——参考剪应变; A,B ——试验常数.

试验研究^[1]表明,上海某地区软土的阻尼比可用如下经验公式给出:

$$D/D_{\max} = (1 - G/G_{\max})^\beta = \left[\frac{(|\gamma|/\gamma_r)^{2B}}{1 + (|\gamma|/\gamma_r)^{2B}} \right]^{A\beta} \tag{2}$$

从而

$$D = \left[\frac{(|\gamma|/\gamma_r)^{2B}}{1 + (|\gamma|/\gamma_r)^{2B}} \right]^{A\beta} \cdot D_{\max} \tag{3}$$

式中: $D,D_{\max}$ ——阻尼比、最大阻尼比; β —— $D-\gamma$ 曲线的形状系数.

对于中等围压,归一化的剪切模量基本与次固结时间和应力水平无关,而与剪应变水平有关.笔者根据试验结果,分别对上面 3 类土的剪切模量比 $G/G_{\max}$ 及阻尼比进行了计算值与实测值比较,详见图 6,7 及表 1.

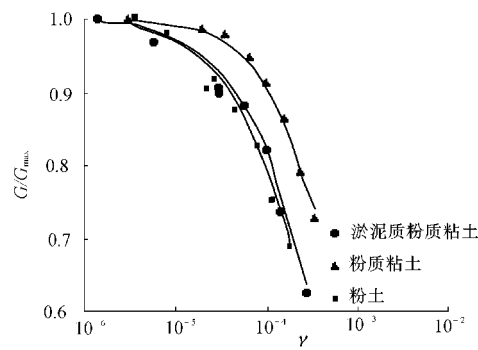


图 6 上海某地区软土剪切模量比与剪应变的关系

Fig.6 Relationship between shear modulus and shear strain for soft soils at a site in Shanghai

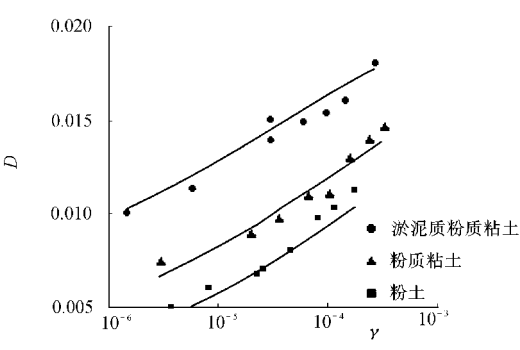


图 7 上海某地区软土阻尼比与剪应变的关系

Fig.7 Relationship between damping ratio and shear strain for soft soils at a site in Shanghai

4 结 语

a. 本文简述了弹塑性模型、内时模型的基本思想,结合工程特性,可为应用于具体土类提供参考.

b. 可以从各个角度来描述孔压发展规律,周建建议引入一客观基准量——加荷周数,来间接反映土体孔压与应变的关系. 通过粘土循环三轴试验,笔者认为 剪应变与加荷周数成对数型函数关系 有效应力在上升阶段与加荷周数成指数型函数关系,在下降阶段与加荷周数成多项式函数关系 有效应力与剪应变成多项式函数关系.

c. 本文对常熟太仓地区的淤泥质粉质粘土、粉质粘土及粉土进行了共振柱试验研究,发现动剪切模量与剪应变的关系受固结压力影响较大,而阻尼比与剪应变的关系基本上不受固结压力的影响. 依据 $G/G_{\max} = 1 - \left[\frac{(|\gamma|/\gamma_r)^{2B}}{1 + (|\gamma|/\gamma_r)^{2B}} \right]^A$ 以及 $D = \left[\frac{(|\gamma|/\gamma_r)^{2B}}{1 + (|\gamma|/\gamma_r)^{2B}} \right]^{A\beta} \cdot D_{\max}$,分别对上面 3 类土的剪切模量比 $G/G_{\max}$ 及阻尼比 D 进行了很好的模拟.

参考文献：

[1] 黄雨,陈竹昌,周红波.上海软土的动力计算模型[J].同济大学学报,2000,28(3) 359~363.
[2] 张克绪,李明宰,王治琨.基于非曼辛准则的土动弹塑性模型[J].地震工程与工程振动,1997,17(2) 74~80.
[3] 陈生水.土的本构模型研究之浅见[J].岩土工程学报,1992,14(2) 89~92.
[4] Ramsamooj D V,Alwash A J. Model prediction of cyclic response of soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1990,116(7) 1053~1072.
[5] 谢定义.土动力学[M].西安 西安交通大学出版社,1988. 203~224.
[6] 周建.饱和软粘土循环变形的弹塑性研究[J].岩土工程学报,2000,22(4) 499~502.
[7] Hardin B O,Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils :Design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1972,98(SM7) 667~691.

Discussion on Calculation Model for Soft Soil under Cyclic Loading

GUO Zhong-hua, YU Xiang-juan, YAN Yun
(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :Based on triaxial test results, the relationship between permanent strain, effective stress, and loading cycles is obtained for clay in shanghai . Analysis of the cyclic triaxial test results of three kinds of soft soils in Shanghai shows that a certain regularity exists between the dynamic shear modulus and the shear strain, and between the damping ratio and the shear strain of the three kinds of soils. In addition, mathematical expressions of the dynamic shear modulus ratio shear strain and the damping ratio-shear strain are presented for soils in Shanghai. Compared with measured data, the calculated result is satisfactory.

Key words :soft soil ;elasto-plastic model ;endochronic model ;pore pressure ;dynamic shear modulus ratio ;damping ratio

表 1 上海某地区软土剪切模量、阻尼比计算公式参数
Table 1 Parameters for calculation of shear modulus and
damping ratio of soft soils at a site in shanghai

土 类	γ_r	A	B	$D_{\max}$	β
粉 土	3.87×10^{-4}	1.10	0.44	0.014	0.25
粉质粘土	6.15×10^{-4}	1.36	0.43	0.017	0.15
淤泥质粉质粘土	4.05×10^{-4}	1.18	0.42	0.020	0.12