

花岗岩风化残积粘性土动力特性 的 试 验 研 究*

吴 炳

(土木工程系)

摘 要

模拟地震作用,对福建省泉州地区的原状花岗岩风化残积粘性土的动应力应变关系、动剪切模量和阻尼比进行了试验研究。研究表明:这种残积粘性土在地震荷载作用下的动应力应变关系也可以很好地用双曲线函数关系来表示。动剪切模量随周围有效压力的增加而增加,随孔隙比的增加而减小,可以用一个经验公式来表示。这种残积土的阻尼比较一般沉积粘性土为高,主要影响因素是土的颗粒形状、组成和动应变幅值。

前 言

在福建省的东部和南部地区广泛分布着母岩为花岗岩类岩石风化残积的粘性土,这种残积粘性土的工程性质与冲(洪)积粘性土及母岩为非花岗岩类岩石的风化残积粘性土的工程性质有着较大的差异。由于未经搬运,土颗粒不可能被磨圆或分选,因而其主要组成成分是棱角状的粗颗粒,细颗粒常被雨水带走,含量较少。而且没有层理构造,均质性差。除含有石英、粘土矿物之外主要是倍半氧化物以及微量元素,如氧化铝和含水氧化铁,致使土层直至深部都呈砖红色和棕褐色。有人建议把这种残积粘性土称为花岗岩风化残积型“中国红土”^[7],也有人建议定名为“福建红土”^[8]。

为进行土工构筑物及建筑物地基的抗震设计,以及动力机器基础和爆破防护工程的设计,都需要土的动力特性参数。通常,土的动力特性是指在动荷作用下土的剪切模量、阻尼及强度、变形,在某一实际工程中可能只需要某项指标。就其实质而言,土的动力特性可用土在动荷作用下的应力-应变关系来描述。例如,所谓动剪切模量表示的是动剪应力和动剪应变中可恢复部分之间的关系;阻尼可用加荷和卸荷循环中应力和应变滞回圈的面积来量度;动强度则定义为一定次数的荷载重复作用下产生某一指定应变所需要的动应力。显然,只要获得

* 本文1986年7月11日收到。

• 试验及成果整理工作主要由向大济和吴晓菁完成,林胜旗也参加了部分试验工作。

各种情况下的应力应变关系, 土的动力特性就可得到了。

为了了解花岗岩类岩石风化残积粘性土的动力特性, 我们结合工程需要, 利用振动三轴仪, 对泉州东郊的原状花岗岩风化残积粘性土, 测定了动弹模、阻尼比, 并对其影响因素进行了探讨, 得到了一些具有实用价值的参数及可资利用的经验公式。并验证了动应力应变关系也符合双曲线函数关系。

试验用土和试验方法

试验所用土由钻探取自泉州东郊, 深度从地表面下 0.9 米至 3.7 米, 全部为原状花岗岩风化残积粘性土。天然容重 $\gamma = 18.23 \sim 19.70 \text{ KN/m}^3$, 天然含水量 $W = 16.13 \sim 23.42\%$, 天然孔隙比 $e = 0.58 \sim 0.79$, 塑性指数 $I_p = 10 \sim 13.7$, 天然饱和度 $S_r = 72 \sim 81\%$ 。完全饱和试样则在试验前经真空饱和法进行饱和。土样的主要物理性指标摘要列于表 1。

表 1

土 样 编 号	取土深度 (m)	天然容重 $\gamma (\text{KN/m}^3)$	天然含水量 $W (\%)$	天然孔隙比 e	饱和度 $S_r (\%)$
4-2	0.90—1.10	19.11	16.50	0.63	72
4'-2	1.10—1.30	18.42	16.13	0.69	100
4-3	1.10—1.30	19.21	18.88	0.66	78
4-1	0.70—0.90	18.42	16.50	0.69	100
4-8	3.30—3.50	18.23	21.76	0.79	75
4-7	3.10—3.30	18.82	22.54	0.74	100
4-5	1.80—2.00	19.21	18.99	0.66	79
4-9	3.50—3.70	18.91	22.63	0.74	100
4'-5	1.80—2.00	19.70	16.64	0.58	78
4-6	2.90—3.10	18.72	23.42	0.76	100
3-2	2.80—3.00	18.82	19.32	0.70	75
4'-6	2.00—2.20	18.91	17.06	0.66	100
4'-3	1.30—1.50	19.01	18.06	0.66	75
4'-4	1.60—1.80	19.40	19.28	0.65	81

试验所用仪器是我们自己组装调试的电磁式振动三轴仪。试件高为 10 厘米, 直径为 5 厘米。根据给定的固结压力, 通过给予压力室和气垫一定压力的气体, 使之对试件施加侧向和轴向静压力, 在排水条件下进行等压或不等压固结。由于压力室采用了活塞直径等于试件直径, 因此, 可使试件的侧向压力和轴向压力分别施加, 独立变换, 从而可以得到任意组合的固结比。进行振动试验时, 轴向动应力由轴向激振器的往复运动来施加。首先输给激振器

励磁线圈一额定电压的励磁电流，激振器磁缸立即形成一个恒定均匀的磁场。当 XFD-8 型超低频信号发生器按指定波形、频率和幅值给出一交变电流的脉冲信号，经功率放大器放大后输给激振线圈时，位于恒定磁场中的激振线圈就因电磁力的作用按照与信号相同的波形、频率作竖向往复运动，通过刚性轴将应力传给试件。试验中动应力、变形和孔隙水压力可通过不同类型的传感器，将非电量转换为电信号，经动态电阻应变仪放大后，由紫外线光线记录仪自动拍照记录它们的变化过程。

本试验研究的目的是模拟地震荷载作用下，花岗岩风化残积粘性土的动力特性，试验振动频率采用 1 赫兹，振动次数采用 30 次。

试 验 成 果 及 分 析

(一) 动应力-应变关系

土具有较强烈的应力—应变非线性性质。实验表明，对于某一给定的土，其应力—应变关系曲线的形状取决于荷载的类型和边界的约束条件。一些研究者指出，在低应力水平上（约小于 340KPa），应变软化型应力应变曲线对于许多土都是适宜的。因而，在大多数实际的土动力学问题上都能应用，尤其是对于地震反应分析，荷载和边界约束条件基本符合应变软化型曲线的要求。哈丁（Hardin）和德尼维奇（Drnevich）等人根据对大量沉积土试验资料的分析，提出用康纳尔（Kondner）总结的双曲线型应力应变曲线作为等效滞后弹性模型的骨干曲线（图 1），即

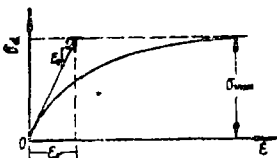


图 1 E_0 、 ϵ_r 及 σ_{max} 的含义

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{a + b\epsilon_d} \tag{1}$$

式中 a 、 b 取决于土性、荷载方式和边界条件的常数。其物理意义可以这样来理解，因为

$$\lim_{\epsilon_d \rightarrow \infty} \frac{\epsilon_d}{a + b\epsilon_d} = \frac{1}{b} \tag{2}$$

所以， $1/b$ 等于应变趋向无穷大时应力所趋近的一个极限值 σ_{max} ， σ_{max} 接近于土体的破坏强度 σ_f ，但又有区别，因为土的破坏方式不尽相同，因而应变趋向无穷大并不一定是剪切破坏条件。又因为

$$\lim_{\epsilon_d \rightarrow 0} \frac{d\sigma_d}{d\epsilon_d} = \lim_{\epsilon_d \rightarrow 0} \frac{a}{(a + b\epsilon_d)^2} = \frac{1}{a} \tag{3}$$

所以， $\frac{1}{a}$ 等于应变极小时应力应变曲线的斜率，称为初始弹性模量或最大弹性模量 E_0 。

式(1)也可改写成

$$\sigma_d = \frac{\epsilon_d}{\frac{1}{E_0} + \frac{\epsilon_d}{\sigma_{max}}} \tag{4}$$

或者

$$E = E_o \left(\frac{1}{1 + \frac{\epsilon_d}{\epsilon_r}} \right) \tag{5}$$

式中

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_{max}}{E_o} \tag{6}$$

称为“参考应变”。 ϵ_r 也就是 E_o 坡度线与 σ_{max} 水平线交点的横座标。

这样，只要确定常数 E_o 和 ϵ_r (或者 E_o 、 σ_{max})，就能根据式(5)得到相应于不同应变值的等效弹性模量 E 。

不同侧向应力及不同应力比的试验结果所得的 $\sigma_d - \epsilon_d$ 曲线如图 2—15 所示，初始动弹

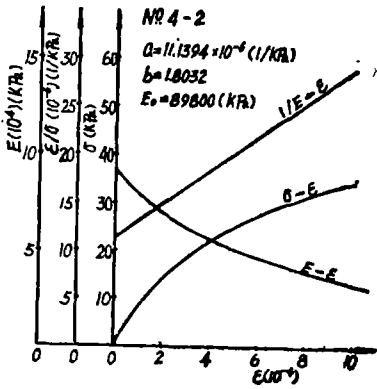


图 2

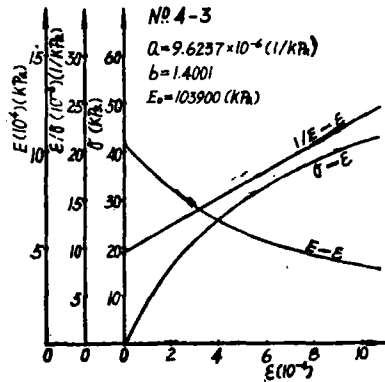


图 3

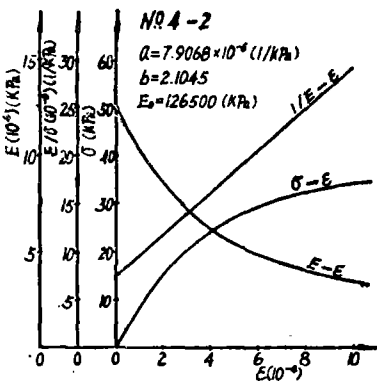


图 4

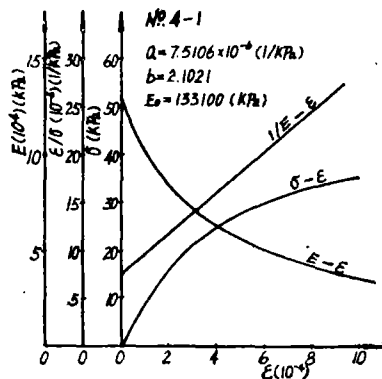


图 5

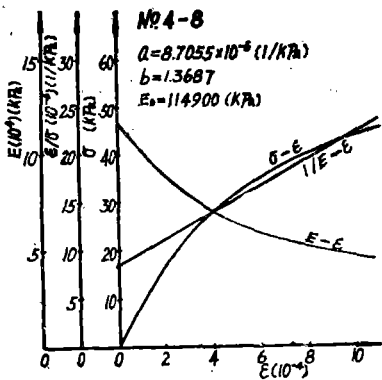


图 6

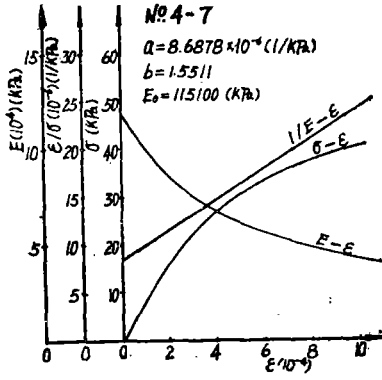


图 7

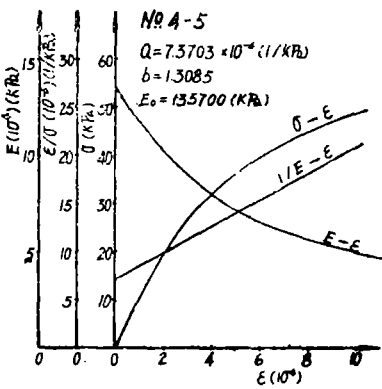


图 8

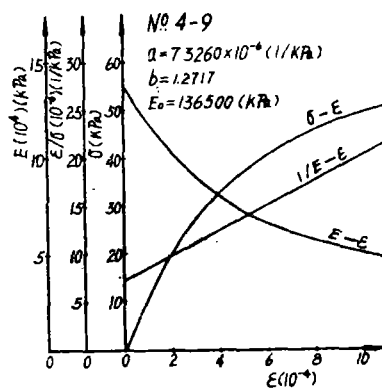


图 9

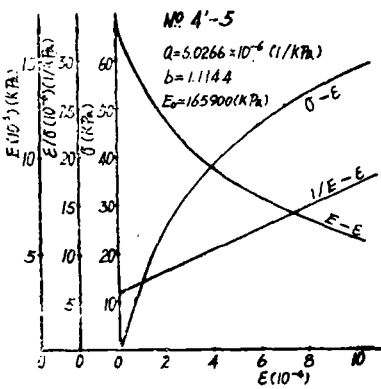


图 10

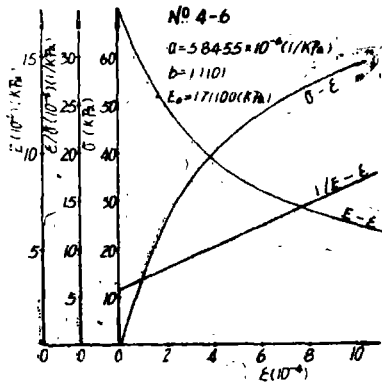


图 11

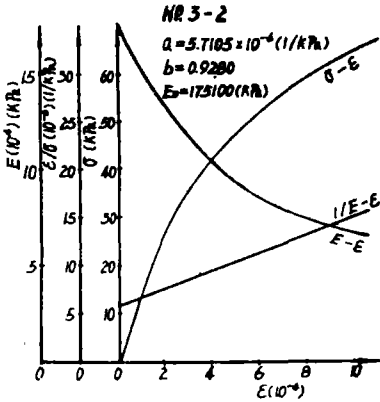


图 12

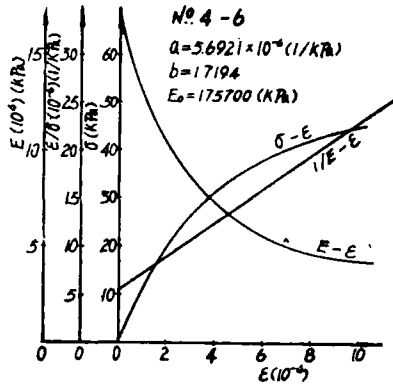


图 13

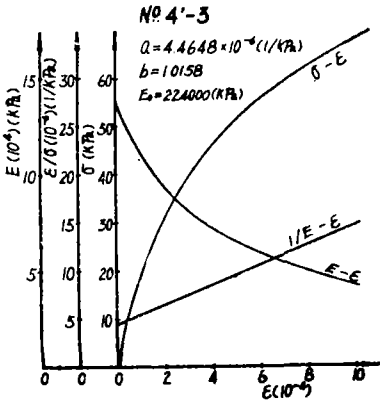


图 14

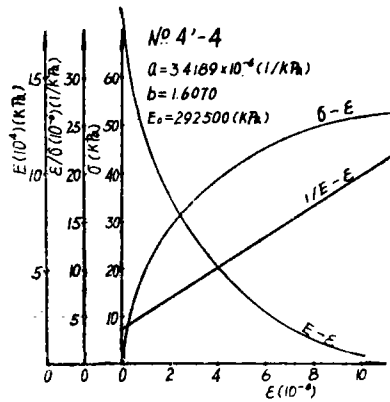


图 15

性模量 E_0 从试验资料外推求得。以 E/E_0 及 ϵ/ϵ_r 为参数整理试验资料, 作出图 16 的 E/E_0 - $\log \epsilon/\epsilon_r$ 曲线。动弹性模量 E 随轴应变 ϵ_d 变化的归一化方程为

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon}{\epsilon_r}} \quad (7)$$

试验结果表明, 在地震荷载作用下, 应变软化型双曲线对于花岗岩风化残积粘性土也同样适宜的。

(二) 动剪切模量与阻尼比

模量及阻尼比的定义如图 17 所示。在振动三轴试验中, 只能测定土的轴向应力及轴向应变, 土的剪应力及剪应变不能直接测定。但可用三轴压缩试验中圆柱形试样 45° 面上剪应力和剪应变条件来模拟地震时现场土层中水平面上的剪应力和剪应变。

根据材料力学原理, 轴应力与剪应力、轴应变与剪应变以及弹性模量与剪切模量之间存在

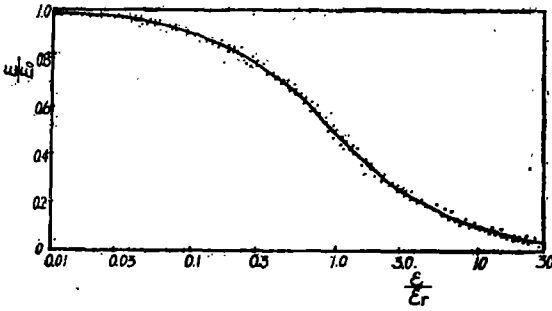


图 16 $\frac{E}{E_0} - \frac{e}{e_r}$ 曲线

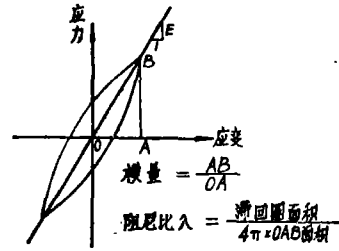


图 17 模量及阻尼比的定义

着以下对应关系

$$\tau = \frac{\sigma}{2} \tag{8}$$

$$r = (1 + \nu)\varepsilon \tag{9}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{10}$$

$$r_r = (1 + \nu)\varepsilon_r \tag{11}$$

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{r}{r_r}} \tag{12}$$

式中 r_r 称为“参考剪应变”， G_0 为初始剪切模量（或最大剪切模量）， ν 为泊桑比，目前尚无可靠的量测方法。对于粘性土来说， ν 值的可能变化范围为 0.35（小应变时）—0.5（破坏时）。在本文中，取 $\nu = 0.41$ ， $K_0 = 0.7$ 。

1. 初始剪切模量 G_0 ：

初始剪切模量定义为剪应变极小时剪应力剪应变曲线的斜率。本文以剪应变 $r = 5 \times 10^{-5}$ 时的剪切模量为初始剪切模量。关于土的初始剪切模量 G_0 ，根据哈丁（Hardin）等人对各种沉积土的研究表明，主要与土类、初始孔隙比 e 及有效平均固结压力 σ_0 等因素有关。作者对花岗岩风化残积粘性土的试验研究表明，花岗岩风化残积粘性土的初始剪切模量 G_0 随孔隙比 e 和有效平均固结压力 σ_0 的变化规律与各种沉积粘性土类似， G_0 随 σ_0 的增加而增加，随着 e 的增加而减小。

将试验结果按 σ_0 归一，然后进行最小二乘法拟合，可得出如下形式的经验公式

$$G_0 = 170 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{0.49} \quad (\text{Kg/cm}^2) \tag{13}$$

或

$$G_0 = 1624 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \sigma_0^{0.49} \quad (\text{KPa}) \tag{14}$$

式(13)、(14)只适用于 $e = 0.58 - 0.79$ ， $\sigma_0 = 40 - 300 \text{KPa}$ 的范围内，超出此范围是否适用

尚未经验证。

曾国熙等研究了饱和度对粉煤灰动剪切模量的影响^[4]，吴世明研究了饱和度对细颗粒砂动剪切模量的影响^[5]，认为饱和度对剪切模量的影响不能忽视，而且存在一个最佳动力饱和度。本试验所用的原状花岗岩风化残积粘性土的天然饱和度在72—81%，经真空饱和以后的试件，其初始动剪切模量普遍都有提高。因此，饱和度对动剪切模量的影响是不能忽视的。由于受原状土样的限制，对于花岗岩风化残积粘性土低饱和度时动剪切模量的变化情况尚未探索。

2. 阻尼比 λ ：

图 18 给出了阻尼比 λ 随应变幅 ε 的变化曲线，图中资料的试验条件是，应力比为 1 和 1.43，侧向压力的变化范围为 35—300 KPa，振动频率为 1 赫兹，振动次数为 30 次，饱和度为 72—100%，固结时间为 1 小时。试验结果表明，不同侧向固结压力、不同应力比及不同孔隙比和饱和度条件下所得到的阻尼比都密集在一个狭窄的区域内，可用一条平均曲线来表示。因此，可不考虑固结压力及应力比对阻尼比的影响。对土的阻尼比的主要影响因素是土的颗粒形状和组成、孔隙比和应变幅值。花岗岩风化残积粘性土的阻尼比 λ 的变化范围为 0.10—0.25， λ 随应变幅值 ε 的增大而增大，当 $\varepsilon < 1 \times 10^{-4}$ 时， λ 约为 0.10，当 $\varepsilon = 5 \times 10^{-4}$ — 10×10^{-4} ， λ 约为 0.15，当 $\lambda > 1 \times 10^{-2}$ 时，土接近破坏，其阻尼比 λ 在 0.20 以上，甚至可达 0.25。上述 λ 与 ε 的关系如图 18 所示。与一般沉积粘性土对比，花岗岩风化残积粘性土的阻尼比要大得多，这是由于其颗粒组成主要为棱角状的粗颗粒，内摩擦力较大的原故。

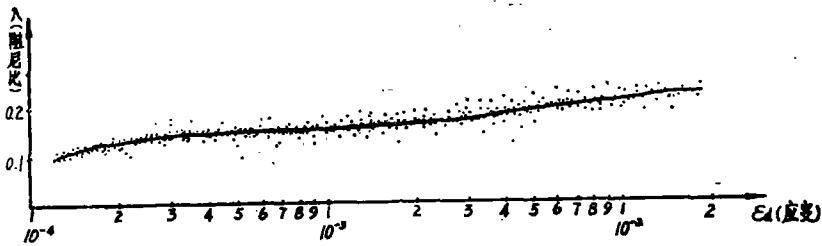


图 18 土的阻尼比

结 论

1. 花岗岩风化残积粘性土，在一定的动应变变化范围内 ($\gamma < 10^{-2}$)，动应力应变间的关系可足够准确地以双曲线函数关系来表示，从而动弹性模量 E (或动剪切模量 G) 与动应变 ε_d (或动剪应变 γ_d) 间的关系可以用单一的一根曲线来表示。

2. 对花岗岩风化残积粘性土，当没有条件进行动三轴试验时，初始剪切模量 G_0 可用式(13)、(14)来估算。 G_0 随着 e 的增加而减小，随着 σ_0 的增加而加大。

3. 花岗岩风化残积粘性土的阻尼比 λ ，比一般沉积粘性土大，一般在 0.10—0.25，随着应变幅的增大而增大。

参 考 文 献

- (1) Hardin B.O. Drnevich, V.P., Shear Modulus and Damping in Soils—Measurement and Parameter Effects, J.SMF Dn, ASCE, 98, SM6, June, (1972), 603—624.
- (2) Hardin, B. O. , Drnevich, V.P. , Shear Modulus and Damping in Soils—Design Equations and curves, J.SMF Dn, ASCE, 98, SM7, July, (1972), 667—692.
- (3) Richart, F. E. , Jr. , Dynamic Stress—Strain Relationships for Soils, Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, 2 (1977) .
- (4) 曾国熙等, 粉煤灰的动剪切模量, 岩土工程学报, 5 (1985) .
- (5) 吴世明, 非饱和和无粘性土的动剪切模量, 岩土工程学报, 6 (1985) .
- (6) 胡文尧等, 原状饱和粘性土在地震作用下的剪切模量和阻尼比, 岩土工程学报, 3 (1980) .
- (7) 高国瑞, 中国红土的微结构和工程性质, 岩土工程学报, 5 (1985) .
- (8) 陈淦, “福建红土”工程地质特性的初步探讨, 工程勘察, 3 (1984) .

Experimental Investigation on Dynamic Properties of Weathered Granite Residual-Cohesive Soil

Wu Bing

Abstract

Simulating the earthquake loading conditions, a series of cyclic triaxial compression tests were carried out on undisturbed samples of weathered granite-residual cohesive soil taken from Quanzhou so as to investigate the dynamic shear modulus and damp ratio. It is found that the dynamic shear modulus increases as the confining pressure increases and decreases as the voidratio increases. The shear modulus can be expressed by an empirical formula. The damp ratio increases as the amplitude of strain increases.