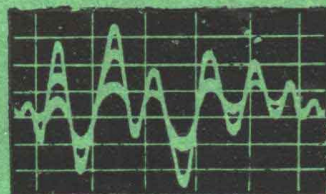


464162

岩土地震工程与土动力学新进展国际会议

论文选译

冶金部勘察科学技术研究所编



前

言

这本文集系选译自1981年4月26日至5月3日在美国圣路易召开的岩土地震工程土动力学新进展国际会议(International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics)的会议录。该会议录是按9个专题编辑的,共三卷,196篇论文。它们反映了当前国际上在地震工程和土动力学方面的新进展,内容主要包括:动荷载下土的变形和强度性状,砂土液化,动荷载下土与构筑物的相互作用,动荷载下土坝和边坡的稳定性,岩土工程实录及数值分析等。

为适应我国社会主义建设的需要,并为有关这方面的勘察、设计、施工及科研等工作人员提供参考资料,从上述会议录的第一、第二卷中选了33篇。其中有6篇是我国提交该会议的部分论文的中文稿,其余的27篇是译文,分别由冶金部勘察科学技术研究所、成都勘察公司以及航空工业部和兵器工业部勘测公司等单位译出。译文总校由林卓斌、徐正葵两同志担任。

由于水平所限,加之时间仓促,难免有错误之处,希读者指正。

冶金部勘察科学技术研究所

一九八二年十一月

目 录

前 言

动荷载下土的变形和强度性状

地震荷载下粘性土的剪切模量和阻尼.....	1
地震波速与深度的相关关系.....	9
一个新的土模型和土动力性质.....	16
根据静强度确定土的动剪切模量.....	23
土在循环荷载下的剪切模量及变形.....	30
不扰动尾矿的循环强度.....	34
软粘土的动力变形特性.....	41
不同循环荷载下土试件的残余孔隙压力和变形性状.....	48
地震荷载下的有效应力土模型.....	53
土在动荷载下的性状.....	59
更新世土的动模量和阻尼的现场测定.....	65
粘性土的动三轴及原位振动试验的性状.....	70
现场和室内试验土的动力性状.....	77

土的液化

场地分析——为判定土的地震液化势.....	84
膨胀角与液化势.....	93
细颗粒含量对用静力触探评价砂土液化势的影响.....	99
一种经验性的液化分析方法.....	105
地震液化的宏观研究.....	110
砂土液化与标准贯入试验及粒径的相关关系.....	121
原状土样的液化特性.....	131
1979年门的内哥罗地震砂土液化地震危险性分析.....	137
对于有效应力液化模型参数的研究.....	148

动荷载下土坝与边坡稳定性

土坝动力渗流变形计算.....	156
地震稳定性的有效应力分析.....	163
用相关法估算坝的地震变形.....	168
论各种非线性土模型的效用.....	176
地震作用下土坝的永久变形.....	183
土结构物的地震稳定性指标.....	192

技术发展水平及其它

构筑物与地质介质的分界面的性状.....	200
1976年以来液化势研究的进展.....	220
地震期间的自由场地运动和设计运动.....	255
地震期间原位孔隙水压力的量测.....	282
不同震级——震中烈度的关系和最大地面加速度的估算.....	289

《附录》

〈岩土地震工程土动力学新进展国际会议〉论文总目录.....	297
-------------------------------	-----

地震荷载下粘性土的剪切模量与阻尼

〔中国〕 胡文尧^① 王天龙^①

〔摘要〕 为了研究土在地震荷载条件下的动力特性,对取自天津的原状饱和粘性土进行了一系列的循环三轴试验。结果表明,不仅是剪切模量,阻尼比随应变的变化规律也可用一个经验关系式表示之;这个关系式的归一化形式在平面图上表现为一簇曲线或两端呈尖灭形的带状区。提出了用于估算弹性或起始剪切模量 G_0 和最大剪应力 τ_{max} 的新的经验方程。对于 G_0 和 τ_{max} 这两个参数,还进行了野外和室内值以及同样荷载水平下动、静三轴试验结果的对比。

一、引言

地震时在沉积土内造成的应力状态,严格地说,是相当复杂的。但是一般认为,地震对地基土或地面结构所造成的破坏,主要是由于基岩运动时向上传播的剪切波。所以,在研究土在地震荷载下的动力特性时,剪应力与剪应变间的关系是要着重考虑的问题;而动态剪切模量和阻尼比这两个参数,对地震设计来说,也许最有用。

土具有应力应变的非线性性质。低应变幅的应力应变性能可通过现场试验或观测得到;但是,要从现场试验得到高应变幅条件下的这种数据是不容易的。室内试验固然有局限性,但它可以对土进行应变由小到直至破坏的试验研究;在很多情况下,它能提供有用的数据。

二、“应变软化”型应力应变关系的数学模型

1. 模量与应变

室内试验表明,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。关于土的“应变软化”型的剪应力剪——应变关系曲线的形状,已根据室内试验结果,提出了著名的论证(R. L. Kondner, 1963; B. O. Hardin, 1972);一般地说,它可合适地以双曲线关系来描述,即应力——应变以及模量——应变关系的归一化形式有

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{\gamma/\gamma_r}{1 + \gamma/\gamma_r} = 1 - \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (1)$$

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (2)$$

其中 τ 和 γ 分别为循环剪应力和循环剪应变; τ_{max} 为最大剪应力; $G (= \tau/\gamma)$ 为割线剪切模量; G_0 为最大割线剪切模量,或称起始或弹性剪切模量;以及 $\gamma_r = \tau_{max}/G_0$,称参考剪应变。

在循环三轴试验中,直接量测的是循环轴应力和循环轴应变。不过,由这种试验得到的应力——应变或模量——应变的关系,容易转换成以剪应力——剪应变或剪切模量——剪应变关系表示的形式。既然剪切模量与压缩模量之间有一简单关系;若在假定以三轴压缩试验的圆柱形试样的 45° 倾斜平面上的应力和应变,来模拟受简单或直接剪切试样在水平面上的应力状态的话,就有

^①中国同济大学结构理论研究所郑大同科研组

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = \frac{\varepsilon/\varepsilon_r}{1+\varepsilon/\varepsilon_r} \rightarrow \frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{\gamma/\gamma_r}{(1+\nu)/(1+\nu_0)+\gamma/\gamma_r} \quad (3)$$

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{1+\varepsilon/\varepsilon_r} \rightarrow \frac{G}{G_0} = \frac{1}{(1+\nu)/(1+\nu_0)+\gamma/\gamma_r} \quad (4)$$

其中 σ 和 ε 分别为循环轴应力和循环轴应变； σ_{max} 为最大轴应力； $E(=\sigma/\varepsilon)$ 为割线压缩模量； E_0 为最大割线压缩模量，或称起始或弹性压缩模量； $\varepsilon_r = \sigma_{max}/E_0$ ，称参考轴应变；以及 ν_0 和 ν 分别为低幅应变和破坏前任一应变时的泊松比。

关于泊松比，就工程计算目地，常将它看作常值（不随应变变化）。R.V. Whitman (1970) 建议：对于充分饱和的土，泊松比可以取 0.5；对于饱和度低的土，泊松比取 0.35，也许比较合理；对于处于充分饱和和低饱和之间的土，取中间值。在我们的试验中也观测到，充分饱和土的泊松比值与 0.5 非常接近。对于饱和或基本饱和的粘性土，可以假定 $\nu = \nu_0$ 。于是，式 (3) 和 (4) 箭头两边的关系式是等价的，它们间的转换就变成十分方便。式 (3) 和 (4) 可用图 1 中的有关曲线表示。

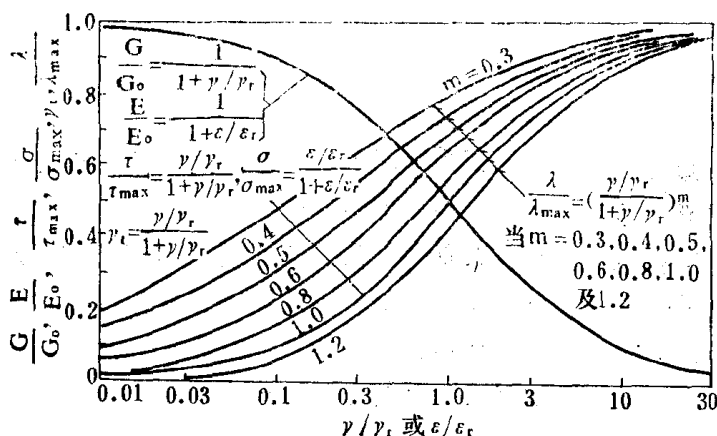


图1 应力、模量或阻尼比随应变变化的模式图

2. 阻尼比与应变

试验表明，土的滞后阻尼随应变的变化规律比较复杂，它难于以双曲线关系表示。

根据试验，以下的经验方程

$$\frac{\lambda}{\lambda_{max}} = \left(1 - \frac{G}{G_0}\right)^m = \left(\frac{\gamma/\gamma_r}{1+\gamma/\gamma_r}\right)^m \quad (5)$$

可近似地描述这种关系。其中 λ 为破坏前任一应变时的阻尼比；最大阻尼比 λ_{max} 和 m 为由试验确定的参数。从式 (5) 不难看出，在 λ_{max} 和 γ_r 为常值时， m 值愈大，比值 λ/γ 愈小。所以 m 也可定义为 $\lambda/\lambda_{max} - \gamma/\gamma_r$ 曲线的形状系数。方程 (5) 可以用一族曲线或两头呈尖灭形的条带区表示，如图 1。显然方程 (5) 可写成

$$\text{Log} \frac{\lambda}{\lambda_{max}} = m \text{Log} \gamma \gamma' \quad (6)$$

其中

$$\gamma' = \frac{\gamma/\gamma_r}{1+\gamma/\gamma_r} = 1 - \frac{G}{G_0} \quad (7)$$

γ' 称“转换应变”。方程 (6) 可以用双对数平面上的一簇幅射形直线或一斜三角形区域表示，如图 2 所示。方程 (7) 可用图 1 的相应曲线表示。

三、经验方程的参数

有四个独立参数，即

$G_0, \tau_{max}, \lambda_{max}$ 和 m 。

1. 起始或弹性剪切模量

土只有在小应变幅时才具有类似于线性的应力—应变关系。室内试验表明，当剪应变在 10^{-5} 或更小时，剪切波速 V_s 实际上不随应变变化 (6)。波速试验时的剪应变通常为 10^{-6} 或更小。共振柱类型的室内试验也可将应变控制到 10^{-6} 这样的量级。循环加载类型的室内

试验的最小有效应变为 1×10^{-4} 这样的量级；并常借助外推法得到这种“假定性”的起始

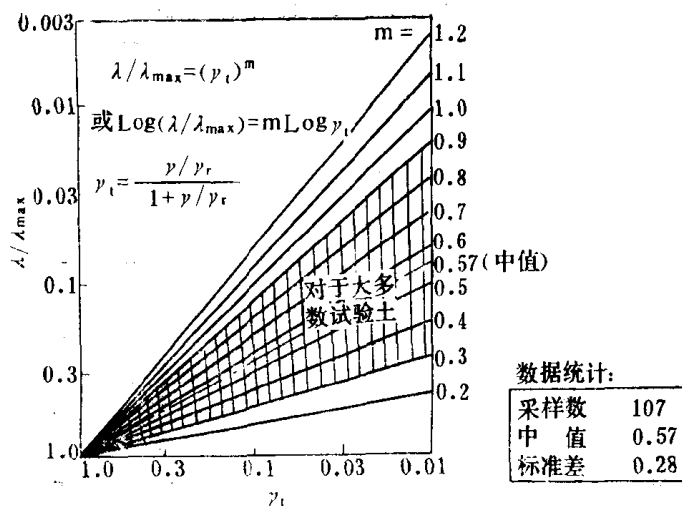


图2 λ/λ_{max} 与 p_i 关系图

或弹性模量。此外，根据室内和野外试验结果，可以建立模量 G_0 与相关性的物理力学性质指标的关系。因此，有机会可用野外试验结果来校核室内试验结果或进行各种试验结果的相互比较。

2. 最大剪应力 τ_{max}

这一参数常由室内试验确定。例如循环加载类型的室内试验，不仅能提供 G_0 值，也可提供 τ_{max} 值。这里的 τ_{max} 未必就是抗剪强度，但是两者可能是比较接近的。为了充分地应用静力试验数据和合理地选定这一参数值，建立静力抗剪强度与循环抗剪强度间的关系，可能是有用的。可以把土的循环抗剪强度看作是它的静力抗剪强度附加动力效应。

3. 阻尼比参数 λ_{max} 和 m

实际上很难在野外条件下来系统地研究阻尼比随应变变化的规律。这种研究的大多数是在实验室内进行的。室内循环加载式试验可以提供这两个参数值。

四、试验结果与讨论

试验土的类型和性质指标如表1所示。

$\phi 40 \times 80$ 毫米的原状圆柱形土样在循环加载

前，经重新饱和和在指定的压力下重新固结。有些试样上的固结压力是根据地静压力估计的，试图恢复原先的应力状态；而另一些试样的压力是按试验要求指定的，例如，为了研究起始模量 G_0 与平均固结应力 σ'_m 间关系，同一土样各试件上施加不同的固结压力。

国产电磁激振式 DSZ-100 型动力三轴仪用于这一研究。正

弦波式荷载沿轴向施加，采用的频率为 1 或 2 赫。循环加载试验是在不排水条件下进行的。循环加载程序和记录的波形略如图3。

关于同一土样各试件上施加同样固结压力试验 $1/E$ 与 ε 关系的代表性结果如图4所示。

试验表明，若土样内的土是均质的，试验时操作是仔细的，同一土样各试样的试验数据会落在单一的直线上，如图4所示；否则，数据可能是分散的，但对每一试样来说，其数据几乎总是在一条直线上的。这样，对于特定的土来说，应变软化型应力应变关系曲线宜于以双曲线表示。关于相同土样的各试件施加不等固结压力的代表性结果如图5所示。根据试验结果，可得到给定土的起始模量 G_0 和平均固结压力 σ'_m 的关系。试验结果汇集在图6。试验表明， G_0 和 σ'_m/σ'_v 的关系在双对数坐标平面上大体上可用直线关系来代表，即

$$G_0 = 1000 K \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_v} \right)^n \quad (8)$$

这关系式首先由 H. B. Seed 和 I. M. Idriss (1970) 提出。在方程 (8) 中， σ'_v 为压力参数，可取为一个单位（如 1 公斤/厘米²，1 吨/米² 等）； K 和 n 为由试验确定的参数。从式 (8) 可看出， K 为 $\sigma'_m = \sigma'_v$ 时的 $G_0/1000$ 。从图6注意到，对于土的不同， n 值只在狭窄的范围内变动。并且发现 n 值随土的压缩性的增加略有增大。为工程计算实用

試驗土的类型和主要的性质指标

表 1

顺序	試驗土类型	场 地	取土深度 (米)	含水量 w (%)	容量 γ 克/厘米 ³	孔隙比 e	饱和度 S_r (%)	液限	塑限	塑性指数	液性指数
1	CH, 很软	永和桥工地	4.4~8.4	49.1	1.74	1.341	100	46.1	24.5	21.6	1.0
2		汉沽桥工地	3.0~5.0	46.3	1.76	1.279	99	45.0	25.0	20.0	1.1
3		汉沽桥工地	16.0~18.0	42.2	1.84	1.118	100	41.0	22.0	19.0	1.1
4	CI, 很软	永和桥工地	11.7~13.0	39.4	1.78	1.130	95	34.2	18.5	15.7	1.0
5		永和桥工地	12.0~16.0	30.2	2.01	0.766	100	25.7	16.5	9.2	1.0
6		农林局工地	9.7~10.7	30.7	1.90	0.866	96	28.2	17.0	11.2	1.2
7		汉沽桥工地	7.0~8.0	34.4	1.89	0.993	100				
8		汉沽桥工地	8.0~13.0	38.2	1.86	1.021	100	36.5	20.2	16.3	1.1
9	CI, 软	汉沽桥工地	15.7~16.7	26.4	2.01	0.771	100	27.8	17.0	10.8	0.9
10	CL, 软	汉沽桥工地	21.7~23.7	24.8	1.99	0.691	97	26.7	17.0	9.7	0.8
11		永和桥工地	30.7	22.5	2.05	0.613	99	24.0	15.0	9.0	0.8
12	CH, 中等	永和桥工地	9.0~10.0	31.6	1.91	0.881	98	46.0	24.5	21.5	0.3
13		农林局工地	17.7	36.0	1.82	1.042	94	42.5	23.0	19.5	0.7
14		永和桥工地	24.5~25.4	41.2	1.79	1.163	97	50.8	26.5	24.5	0.6
15	CI, 中等	永和桥工地	18.7~21.7	27.9	1.95	0.789	96	32.2	18.0	14.2	0.7
16		汉沽桥工地	8.7	26.6	1.99	0.727	99				
17		汉沽桥工地	23.0~25.0	27.3	1.96	0.760	97	34.6	19.0	15.6	0.5

注: (1)CH, CI和CL分别表示高、中、低液限的粘性土;

(2)表内的性质指标值为平均值。

目的, 建议 n 值取0.6°

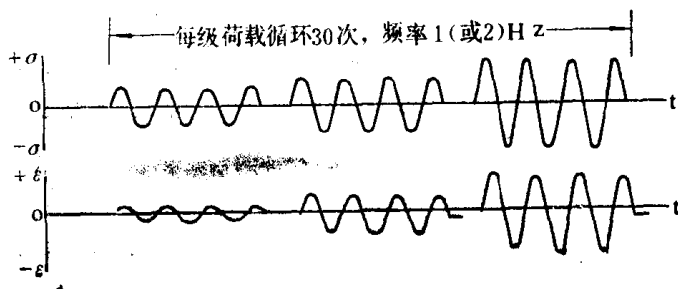


图3 循环的应力和应变简图

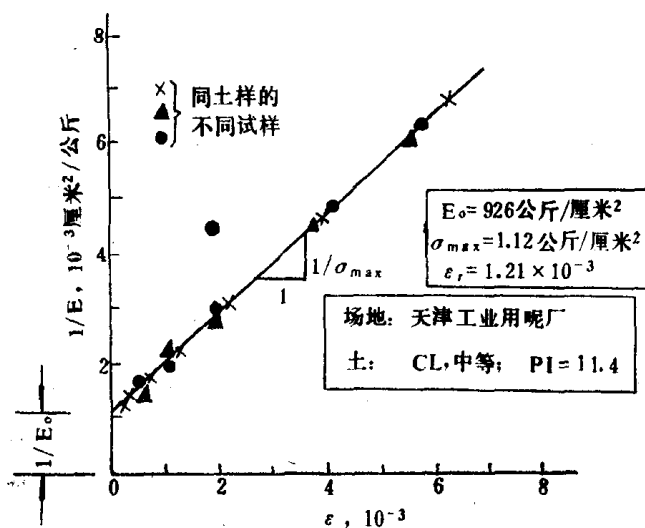


图4 各试样上相同固结压力试验的代表性结果

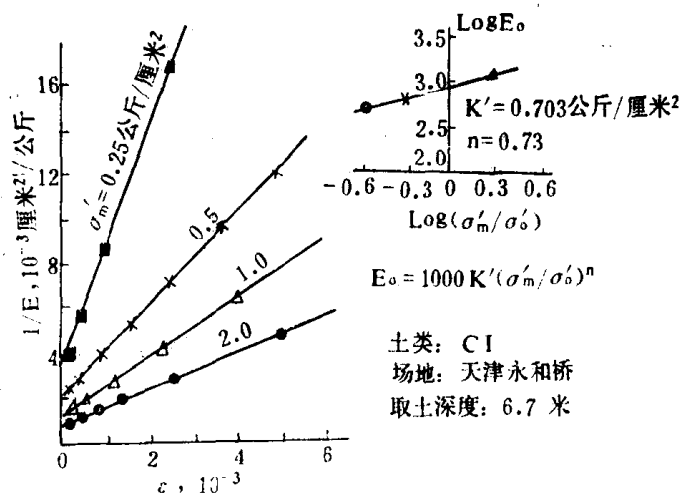


图5 不同固结压力条件下 $1/E$ 与 e 关系的代表性结果

试验表明, 对于正常固结或轻度超固结的土, 起始或弹性模量 G_0 基本上取决于平均固结压力 σ'_m 和孔隙比 e 。试验结果汇集在图7。据此, 我们可以得到

$$V_s = (212 - 124.4e) (\sigma'_m)^{0.25} \quad (9)$$

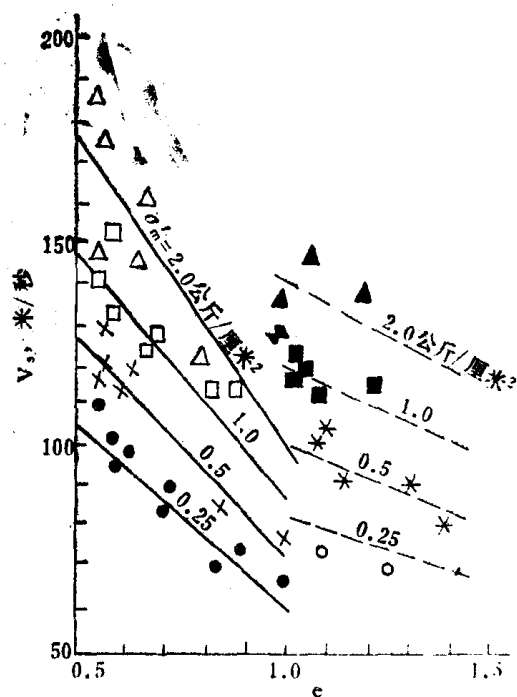


图7 V_s 与 e 的关系

既然有 $G_0 = \rho v_s^2$ (ρ 为土的质量密度), 用于估算软或中等的饱和粘性土的起始剪切模量的经验公式给出如下:

$$G_0 = 158 \rho (1.70 - e)^2 (\sigma'_m)^{0.5} \quad (10a)$$

或:

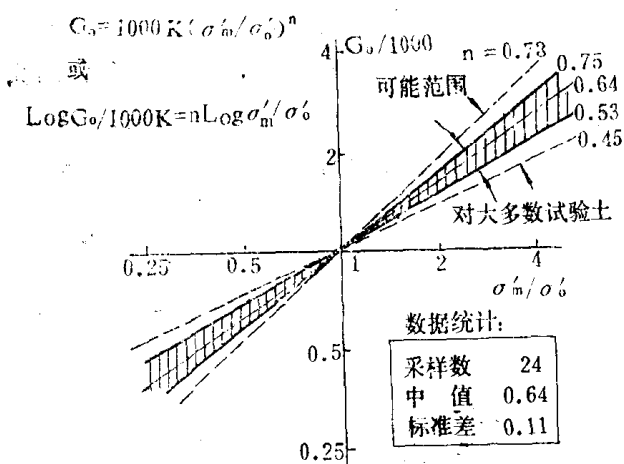


图6 $G_0/1000K$ 与 σ'_m/σ'_0 的关系

$$G_0 = 426 \left(\frac{1+0.37e}{1+e} \right) (1.70-e)^2 (\sigma'_m)^{0.5} \quad (10b)$$

其中 γ 为土的容重。应当强调的是，式(8)的 K 对应于应力为 σ'_0 时的孔隙比，而式(9)或(10)是对应于应力为 σ'_m 时的孔隙比，所以，式(9)或(10)中 σ'_m 的幂与式(8)中 σ'_m/σ'_0 的幂并不相同。

关于 G_0/G 与 γ 的关系的结果如图8所示。从图可以看到试验土 γ 值的变化范围。

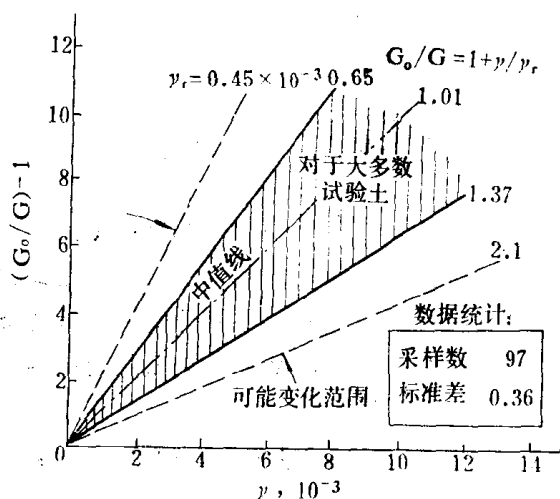


图8 试验得到的 G_0/G 与 γ 关系

试验表明，对于均压固结情况来说， σ_{max} 或 τ_{max} ($=\sigma_{max}/2$) 值主要取决于固结压力；而且两者之间具有线性关系。对于所

试验的土，可表示为

$$\sigma_{max} \text{ (或 } 2\tau_{max} \text{)} = 0.15 + 0.47\sigma'_m \quad (11)$$

G_0 的现场波速试验值(由波速换算得到)和室内动三轴试验值(试验结果外推)比较表明，前者几乎总是大于后者，如图9所示。两者比值约为1.2~1.8，平均比值约为1.5。这里的室内 G_0 值未进行次固结效应的校正，不然的话，两者会更接近。

进行过室内动、静三轴试验的对比。荷载等级和水平相同，并皆为固结快剪。结果表明，前者的 τ_{max} 值总是低于后者。比值 $(\tau_{max})_{静}/(\tau_{max})_{动}$ 视土性而异，土的塑性指数愈低，比值愈大，就所试验的土来说，它可低到1.2，也可高到14。可惜这次试验未能提供关于这方面可用于抗震设计的校正系数值。

阻尼比随“转换应变”变化的代表性结果如图10所示。试验数据显得有些分散，但就各个试样来说，在双对数坐标平面上大体上可用直线表示。试验表明， λ 值因土性或固结压力的不同变化较大，如图2中的阴影区域所示。 λ_{max} 值似乎是比较稳定的，对于试验的土，为工程实用目的， λ_{max} 值可取为20%。

大多数试验研究表明，应变软化型应力应变关系可用双曲线关系表示。但是，阻尼比与应变间的关系，不同作者所得的结果却差异相当大。图11为本试验研究与其他作者结果之比较。比较表明，虽然差异明显，但趋势是一致的。

在循环三轴压缩试验中，量测的最小有效应变约为 1×10^{-4} ；大多数饱和粘性土破坏的循环应变约为 1×10^{-2} 或更大。文中的种种结论都是以这一应变范围的量测结果为基础的。

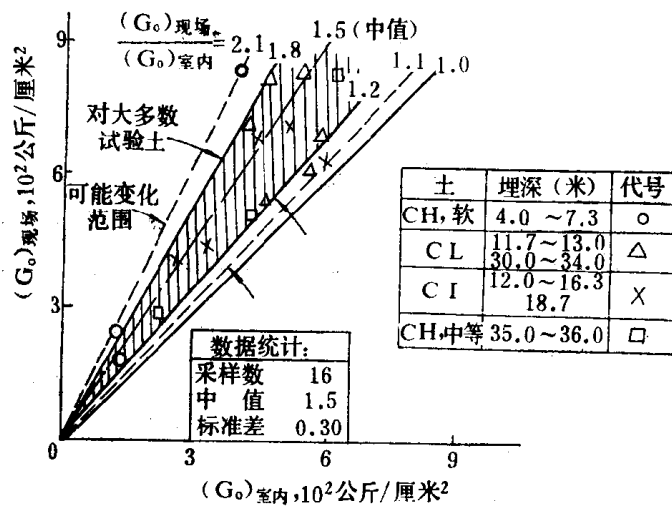


图9 G_o 现场值与室内值的比较

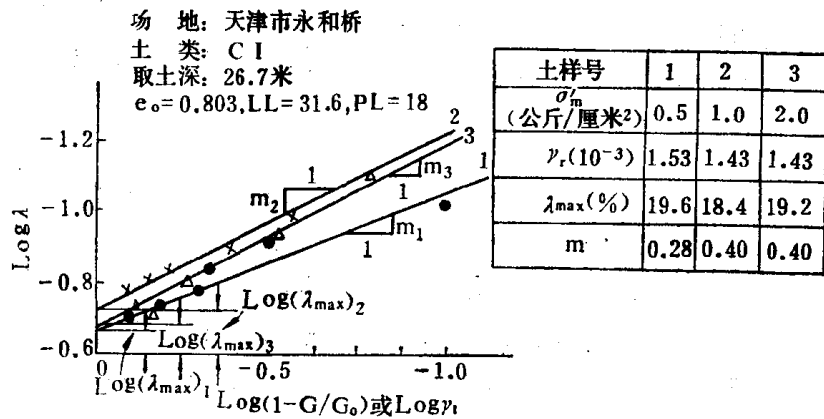


图10 λ 与 γ_r 关系的代表性试验结果

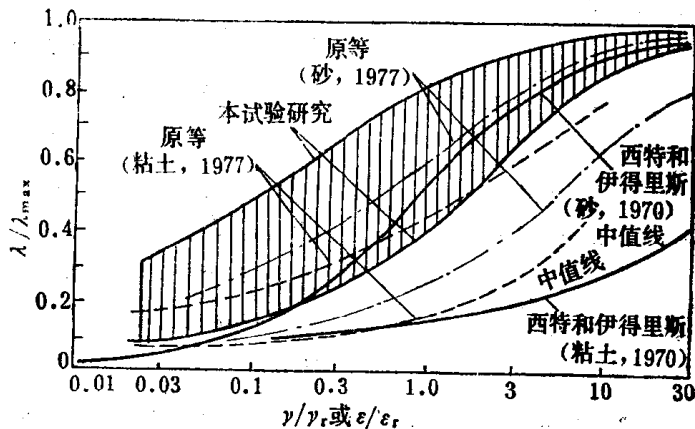


图11 阻尼比随应变变化研究结果之比较

结 论

土在一定的循环应变幅范围内的“应变软化型”应力应变关系,足以用双曲线关系表示;从而模量随循环应变的变化可恰当地用一个经验关系式表示之。

2. 给定固结压力下的剪切波速与孔隙比之间可近似地以直线关系表示之。提出了关于不扰动饱和粘性土 G_v 值的经验公式。

3. 在均压固结条件下参数 τ_{max} 或 σ_{max} 值主要取决于固结压力。提出了关于 σ_{max} (或 τ_{max})与平均固结压力 σ'_m 之间的经验关系。

4. 比较了由现场剪切波速试验得到的和由室内试验得到的 G_v 值。比较表明,前者几乎总是大于后者,两者比值的变化范围约

为1.2~1.8。

5. 试验表明,最大的循环剪应力 τ_{max} 几乎总是低于静力的,两者的比值在相当大的范围内变化。

6. 提出了阻尼比随应变变化的经验方程。试验表明, m 值在相当大的范围内变化,而 λ_{max} 值似乎是一个比较稳定的值。为工程实用目的, λ_{max} 值可取为20%。

感谢: 本文为郑大同科学研究所进行一项研究工作的一部分成果。研究工作得到同济大学土力学实验室和天津市政工程局勘测队的支持。对于郑大同教授的亲切指导和评述,对于参加此项研究工作的同志们在取样、试验和资料整理方面的协助,表示感谢。

参考文献

- (1) Hardin, B. O. and V. P. Drnevich (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils, Design Equations and Curves", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 98, No. SM7, Proc. Paper 9006, pp. 667~692.
- (2) Hardin, B. O. and V. P. Drnevich (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils, Measurement and Parameter Effects", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 98, No. SM6, Proc. Paper 8977, pp. 603~624.
- (3) Hara, A. and Y. Kiyota (1977), "Dynamic Shear Tests of Soils for Seismic Analyses", *Proc. 9th International Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo*, Vol. 2, pp. 247~250.
- (4) Hu Wenyao and Wang Tianlong (1980), "Shear Modulus and Damping of Cohesive Soil under Earthquake Loading Conditions", *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 82~94.
- (5) Massarsch, K. R. and Drnevich (1979), "Seismic Site Response of Nonlinear Soil Media", *Jour. of the Geotechnical Engineering Division ASCE*, Vol. 105, No. GT1, Proc. Paper 14269, pp. 123~126.
- (6) Richart, F. E. Jr., 1977, "Dynamic Stress-Strain Relationship for Soils", *Proc. 9th ICSMFE, Tokyo*, Vol. 2, pp. 605~612.
- (7) Richart, F. E. Jr., R. D. Woods and J. R. Hall, Jr., 1970, "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- (8) Wilson, S. D. et al (1972), "Soil Behavior under Earthquake Loading Conditions", Report to U.S. Atomic Energy Commission, A Joint Venture of SW-AJA.

地震波速与深度的相关关系

〔美国〕 Marshall Lew, Robert Chieruzzi等

〔摘要〕本文叙述了不同岩土工程分类的土和岩石的地震波速与深度的相关关系。认为地震波速取决于地质年代、砾石含量、地下水位深度、干容重及复盖层的埋藏深度。

引言

这篇论文提出了地震波速、深度和岩土工程参数之间的相关关系。这些相关关系是建立在岩土工程分类法的基础之上的，此分类法根据土或岩石类型、地质年代、砾石含量、地下水位深度及复盖层的埋藏深度来阐明地震波速范围。

这些关系对地震工程和机器振动问题可能是有用的。在判断和预测由于地震或机器激震引起的地面运动反应时，需要具有关于剪切波和压缩波以及与之有联系的剪切模量和泊松比的知识。需要了解直至剪切波速达2500英尺/秒或更高的那些深度处的剪切波速度剖面，以便计算某一给定场地的特征周期；而且又需要用它来计算按统一建筑法规〔5〕所规定的土—构筑物相互作用系数 S 。

地震波速资料

这项研究是以111个场地测得的剪切波速和压缩波速数据为基础的。约有62个场地的勘察是由UCLA地震试验室完成的〔3〕〔4〕，这些场地全部位于或靠近洛杉矶地区的加速度记录站，这些站曾记录了1971年圣费尔

南多地震的地面运动。

另外48个场地由 Le Roy Crandall联合公司进行了勘察。大部分场地是作为综合的岩土工程勘察的一部分而进行了研究，要求弄清场地的特征周期以及（或者）进行场地反应研究〔1〕。其中10个场地做了地震折射法勘察，3个场地用了跨孔法，其余35个场地则进行了孔内测试。孔内测试的穿透深度一般为50至135英尺，多数约为75英尺；仅有一个场地的探测深度达410英尺。正如其它场地一样，这48个场地中的大多数位于南加利福尼亚。约有37个测定是在洛杉矶和Orange县场地完成的，另9个测定中有一个在Ventura县附近，一个在Kern县，4个在圣地亚哥县，其余3个在旧金山湾地区完成的。

所测得的剪切波速和压缩波速至少代表5英尺厚地层的平均速度。

岩土工程分类法

表1所列的岩土工程分类表明土和岩石类型的主要和次要的分类。可以肯定，通用的分类法如土的统一分类法（USCS）既不完善又不妥当。

此岩土工程分类法的主要分类系指天然土、填土和岩石，次要分类包括地下水效应、砾石含量、干容重、岩石硬度、岩石类型和地质年代。本分类法各部分的详细说明见表1的岩土工程分类法。

剪切波速相关关系

对于表层和一些近地表沉积层建立了有关111个场地的剪切波速的统计关系，其结果见表2，剪切波速统计一览表。所有结果系用试验规模、速度范围、近似速度、标准

离差及误差系数表示。误差系数是标准离差与平均值的无量纲比，是一种很方便的表示统计离散的方法。这些系数比较小，在0.08——0.14之间，说明剪切波速数据的相对一致性和较小的离散性。

还制作了类似的压缩波速和泊松比的统计一览表，详见Campbell等人(1)的报告。

岩土工程分类法

表1

岩土工程分类		描 述	干容重 (磅/英尺 ³)	深 度 (英尺)
天然土	砾石和软的 卵石含量 <10%	全新世新近泛滥平原、湖、沼泽、河口及三角洲沉积层，水力充填土；可能含有机物。	<100	≥0
		饱和的全新世土	90—110	>10—15
		密度很小的全新世土；主要为细粒的。	<90	≥0
		软至中软的全新世和更新世粘土及粘土质粉土；一般为深灰至黑色。	<100	0
			<80	≥10
	中等的	中等密度的未饱和全新世土；在30—50英尺深度以下可能含一定数量的砾石。	90—110	≥0
		饱和的未胶结更新世和始新世土；在深度10—20英尺以下可能含一定数量的砾石。	95—115	>10—15
		密度小的更新世和始新世土	90—100	≥0
	硬的	密度大的全新世土	>110	≥0
		未饱和和未胶结中等密度的更新世和始新世土；在深度10—20英尺以下可能含一定数量的砾石。	100—115	≥0
	很硬	密度大的全新世和始新世土。	>117	≥0
	砾石和卵石含量 >10%	表层	地表的天然土和设计的充填土，含砾石、卵石或漂石；以粗颗粒为主；全新世，更新世和始新世。	
			含10—15%砾石；少量卵石和漂石	0
			含大于50%的砾石；少量卵石和漂石	0
天然土	砾石和卵石含量 >10%	表层下的地层	含10—15%砾石、卵石和漂石；主要是粗颗粒天然土；	
			全新世	115—130
			更新世和始新世	5—30
			全新世	115—130
			更新世和始新世	5—10
			全新世	125—135
			更新世和始新世	5—20
			全新世	125—135
			更新世和始新世	5—20

填土	非设计的	表层下	松的或稍加夯实的人工填土（水力冲填除外）；砾石、卵石含量 $<10\%$	100—115	0
		的地层	机械夯实的人工填土，砾石、卵石含量 $<10\%$	110—125	0
岩石	沉积岩	软的	强风化，密度小的上新世和中新世粉砂岩和页岩；多呈棕至浅灰色；中新世页岩为富砂质和硅藻的。	65—90	15—50
		中硬的	中风化，中等密度的粉砂岩和页岩；上新世粉砂岩，主要呈块状，深灰色。中新世页岩为富砂质和硅藻的。	90—105	≥ 0
		坚硬的	中风化，中等密度至密度大的中新世粉砂岩、页岩、砂岩和砾岩。	>95	≥ 0
	基底杂岩	强风化	强风化火成岩和变质岩	"	≥ 0
		中风化	中风化、破碎的火成岩和变质岩	"	≥ 0
		稍风化	未风化或稍风化、破碎的火成岩和变质岩	"	≥ 0

剪 切 波 速 统 计 一 览 表

表 2

岩土工程描述	数 据	剪切波速 (英尺/秒)		标准离差	误差系数
	个 数	范 围	平 均		
表层土和填土, 含10%以下的砾石					
软天然土	12	360—560	460	60	0.13
软粘土(深度>10英尺)	3	460—690	550	—	—
中等天然土	23	520—790	620	80	0.13
硬天然土	31	735—1180	940	100	0.11
非设计填土	12	400—550	490	50	0.10
设计填土	18	560—940	710	110	0.16

近地表土, 含10%以上的砾石(按砾石含量)

10—50%(表层土)	7	805—1150	980	130	0.13
>50%(表层土)	6	1220—1430	1320	80	0.06
10—50%(5至10—30英尺)	3	1180—1430	1430	—	—
10—50%并含卵石(5至20—50英尺)	8	1670—1980	1780	115	0.06

近地表岩石

软和中硬沉积岩(表层)	5	1040—1260	1160	90	0.08
坚硬沉积岩(表层)	6	1280—1480	1360	110	0.08
软沉积岩(15—50英尺)	8	1220—1500	1380	110	0.08
中风化基底岩石 (10—100英尺)	8	3300—4610	4040	430	0.11

Campbell和Duke(2)发现剪切波速度与深度的关系可恰当地用下式表示:

$$V_s = kd^n \quad (1)$$

式中 V_s 为剪切波速, d 为深度, n 为取决于岩土工程分类的常数。

但是, 为了说明地表剪切波速的渐变性质, 方程(1)可略加修改。新的表达式如下:

$$V_s = k(d+c)^n \quad (2)$$

式中 C 为地表 V_s 的非零值。这样, 当 d 趋于零时, 剪切波速值则为 $V_s = kc^n$ 。

为了能够用回归分析来求出8种岩土工程分类中每一种的常数 k 、 d 和 n , 曾利用了足够的资料。将方程(2)两边取自然对数使之线性化, 则得到下式:

$$\ln v_s = \ln k + n \ln (d+c) \quad (3)$$

回归分类一览表表示于表3, 表中剪切波

速的单位是英尺/秒, 深度为英尺。为此目的, 深度系数取由地表至层顶的垂直距离, 而不是象有些研究者那样计算到该层的中点。对于表层, 深度取层厚的1/3。根据表3所列的统计一览表, 平均相关系数为0.94, 平均标准离差为0.13。这些数值说明方程(3)得出的资料相当可靠。 $\ln v_s$ 的标准离差值为0.13, 相当于 v_s 的增殖因素为1.14。

对于8种岩土工程分类的数据曲线图、回归方程以及标准离差界限示于图1和图2。小方块代表各深度得到的数据, 并按至各相应层顶部的距离进行制图。小圆圈代表表层剪切波速数据, 所绘制的为表示在该层厚度的1/3处。对于图1(b)中的软天然土, 以三角形表示孔内地震波速数据, 这些数据系取自帝国河谷的El Centro和Parkfield附近的Cholame, 载于该管理委员会(NRC)提供的一份研究报告中(Shannon & Wilson

v_s 回归分析一览表

$$\ln v_s = \ln k + n \ln (d + c)$$

表 3

岩土工程描述	回 归 系 数			相 关 系 数	$\ln v_s$ 的 标准离差	数 据 个 数
	$\ln k$	n	c			
软天然土	5.134	0.456	3.9	0.97	0.11	29
" (El Centro Cholame)	5.665	0.296	0.3	0.93	0.16	41
中等天然土	5.674	0.408	1.8	0.95	0.12	59
饱和硬天然土	5.432	0.460	0.0	0.95	0.14	18
中等和饱和硬天然土	5.628	0.413	2.4	0.95	0.13	76
未饱和硬天然土	6.251	0.349	2.0	0.93	0.13	50
中硬沉积岩	5.862	0.472	0.0	0.95	0.13	9
坚硬沉积岩	6.607	0.405	0.0	0.87	0.15	13

有限公司和Agbabian联合公司, 1975)。这些速度要比在更大的洛杉矶地区所得到的速度低一些。

现在用已有的数据去和上述岩土工程分类法中所有组成部分建立相关关系是不适当的。

