

固结比对黏性土动剪切模量影响的研究

孙 静¹, 袁晓铭²

(1. 黑龙江大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150086; 2. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080)

摘 要: 采用共振柱试验方法, 对固结比对黏性土最大动剪切模量和对动剪切模量比与剪应变非线性关系的影响进行了研究, 并通过土层地震反应计算, 初步给出了这种影响对地表反应谱作用的估计。通过对粉质黏土和粉土的系统试验, 提出了计算不同固结比粉质黏土和粉土最大动剪切模量的建议公式, 并与 Hardin 公式进行了对比。结果显示, 固结比 $k_c > 1.0$ 时的最大动剪切模量较 $k_c = 1.0$ 时的增长程度明显比 Hardin 公式要大。与砂土试验结果相比, 固结比对黏性土最大动剪切模量影响程度更大。同时, 分析了固结比对动剪切模量比与剪应变非线性关系及对地表反应谱的影响。结果表明, 固结比对黏性土动剪切模量比与剪应变非线性关系有一定影响, 随固结比增加, 动剪切模量比非线性关系曲线有一定提高, 动剪切模量比值增大, 在强地震作用下的土层反应分析中应考虑实际固结比的影响。

关 键 词: 固结比; 动剪切模量; 黏性土; 共振柱试验; 反应谱

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Effect of consolidation ratio of cohesive soils on dynamic shear modulus

SUN Jing¹, YUAN Xiao-ming²

(1. Institute of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150086, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: By using the resonant column device tests, the effect of the consolidation ratio on the maximum dynamic shear modulus (DSM) and the DSM versus the shear strain for two types of soils were investigated. The effect of the DSM versus the shear strain under different consolidation ratios on spectrum of surface ground motion was evaluated by the soil layer response calculation. An incremental formula for calculating the maximum DSM for the cases of the anisotropic consolidation was presented. The new formula indicates that the increasing degree of the maximum DSM due to $k_c > 1.0$ is significantly larger than that predicted by Hardin and Black's formula. Compared with sand, the increment of the maximum DSM due to anisotropic consolidation is much larger than that of sand. Also, the effect of the consolidation ratios on DSM versus the shear strain and surface ground motion was demonstrated. The results indicate the DSM versus the shear strain increases with increasing of the consolidation ratios and the effects of the consolidation ratio on DSM versus the shear strain should be considered for the incidence of the strong earthquake.

Key words: consolidation ratio; dynamic shear modulus; cohesive soil; resonant column tests; response spectrum

1 前 言

在工程场地地震安全性评价中进行土层地震反应分析时, 一项重要的工作是确定土的动剪切模量比与剪应变的非线性关系。土的动剪切模量比与剪应变非线性关系是影响土层地震反应分析结果的主要因素之一, 其重要作用已经成为公认的事实, 其合理性和可靠程度对土层地震反应分析结果会产生显著的影响, 特别是对强地震作用下的土层地震反

应结果^[1-3]。土的动剪切模量可由现场和实验室内测出, 以往实验室由于仪器设备的限制, 测出土的动剪切模量主要是针对均等固结的结果, 而实际土层、工程场地和土工构筑物中, 由于侧压力系数和泊松比的存在, 固结比 $k_c = 1.0$ 这种状态基本不存在, 土体大多为非均等固结。

固结比对动剪切模量的影响主要包括两方面, 一是对最大动剪切模量的影响; 二是对动剪切模量比与剪应变非线性关系的影响。固结比对最大动剪

切模量的影响是工程中非常重要但争议颇大的问题。由于固结比对最大动剪切模量的影响不是很清楚,一些学者和工程技术人员使用 Hardin 和 Black 公式(简称 Hardin 公式)来计算固结比大于 1.0 时的最大动剪切模量^[4-5]。一些研究结果对此有异议,何昌荣^[6]采用动三轴试验结果分析后认为这会使计算结果偏小,而俞培基^[7]则支持 Hardin 公式。固结比对动剪切模量比与剪应变非线性关系的影响是一个尚少研究的课题。以往在为工程提供动剪切模量比这个参数时,一般不考虑固结比的影响,只给出均等固结的试验结果。

笔者^[8-9]曾研究了固结比对砂土动剪切模量的影响,认为固结比对砂土最大动剪切模量有重要和不可忽视的影响,对动剪切模量比与剪应变非线性关系有一定影响。从目前对黏性土的研究和一些黏性土的初步试验结果来看,固结比对黏性土最大动剪切模量的影响也很大,甚至比对砂土的影响程度还要大很多,那么,非均等固结下黏性土的最大动剪切模量是如何变化的,是否可以采用和砂土相同的模式来描述。另外,固结比对黏性土动剪切模量比与剪应变非线性关系的影响究竟有多大,在实际应用于土层地震反应分析时是否可以直接采用均等固结的试验结果来进行计算,都还需深入地研究。

2 试验仪器和试样

2.1 试验仪器

由于共振柱仪具有原理简单、操作方便、边界条件清晰及结果离散小和可重复性好等优点,已成为目前小应变范围内测定土动剪切模量最好的仪器设备。但以往国内外共振柱仪基本上适于均等固结条件下的土工试验。为查明非均等固结下土的动剪切模量,中国地震局工程力学研究所于 2002 年专门研制了多功能共振柱试验机,如图 1 所示,新增的功能之一就是能够进行偏压试验。本次所有试验测试采用该仪器。



图 1 多功能共振柱试验机

Fig.1 The resonant column device used for tests

2.2 试样

试样直径为 3.91 cm,高 8.00 cm,试验采用常规的固定-自由方式,采用 3 个实际工程场地的试样,包括粉质黏土和粉土。粉质黏土采用山东滨州套尔河大桥工程场地 4 个试样、山东长清大学城工程场地 6 个试样和山东济南黄河隧道工程场地 4 个试样,共 3 个场地 14 个试样,粉土采用山东滨州套尔河大桥工程场地 3 个试样。两种土样的主要物理指标见表 1。

表 1 试验用土物性指标

Table 1 Physical specifications of soils

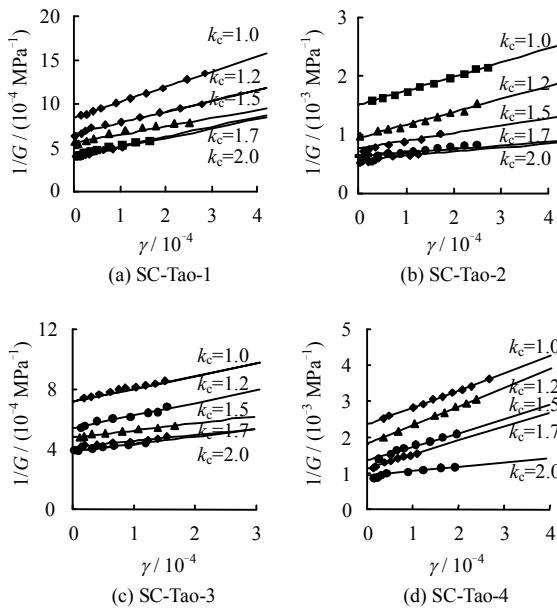
土性	编号	埋深 / m	密度 /(g/cm ³)	含水率 / %
粉质黏土	SC-Tao-1	25.3~25.5	2.161	17.36
	SC-Tao-2	30.7~30.9	1.989	30.83
	SC-Tao-3	34.6~34.8	2.175	17.18
	SC-Tao-4	36.6~36.8	2.063	23.50
	SC-Chang-5	9.8~10.0	2.140	19.90
	SC-Chang-6	16.2~16.4	2.078	23.37
	SC-Chang-7	20.6~20.8	1.974	27.84
	SC-Chang-8	26.2~26.4	2.099	20.69
	SC-Chang-9	17.6~17.8	2.057	19.73
	SC-Chang-10	32.2~32.4	1.974	26.21
	SC-Huang-11	16.4~16.6	2.094	21.23
	SC-Huang-12	29.6~29.8	2.014	22.62
	SC-Huang-13	15.4~15.6	2.135	19.25
	SC-Huang-14	23.1~23.3	2.167	18.55
粉土	S-Tao-1	15.4~15.6	2.138	15.00
	S-Tao-2	19.0~19.2	2.146	17.58
	S-Tao-3	22.2~22.4	2.156	19.79

3 非均等固结下最大动剪切模量建议公式

3.1 粉质黏土试验

粉质黏土试验采用 3 个工程场地共 14 个试样进行偏压试验。根据土样的埋深对试样施加围压,每一种围压下分别施加 5 种不同偏压(k_c 分别为 1.0、1.2、1.5、1.7 和 2.0),总计 70 种独立工况。试样安装完毕后,立即对其施加围压和偏压,固结 8 h。固结完成后,开始做试验,逐级施加振动应力。试验过程中,共振柱仪的排水阀门处于关闭状态,对每一个土样,采用常规分级加荷的自由振动方法得到动剪切模量。

对试验得到的动剪切模量 G 与剪应变 γ 之间的关系,采用 $G = 1/(a + b\gamma)$ 回归,限于篇幅,回归参数 a 和 b 这里略去。将山东滨州套尔河大桥工程场地 4 个试样的 $1/G - \gamma$ 试验点和回归曲线示于图 2,其他两个场地与此类同,不再赘述。

图2 套尔河粉质黏土 $1/G-\gamma$ 试验点和回归曲线Fig.2 The regression curve of $1/G-\gamma$ for Taoerhe's silty clay

从图2可以看出, 试验结果的规律性很好, 数据离散性也很小。最大动剪切模量 $G_{\max}$ 为 $1/G-\gamma$ 关系曲线纵坐标的截距, 也相当于 $\gamma \rightarrow 0$ 时 $G = 1/(a+b\gamma)$ 中的 G 值。从 $G_{\max}$ 与围压的关系, 可以将 $G_{\max}$ 的增量写成如下形式:

$$\frac{G_{\max}}{G_0} = 1 + C(k_c - 1)^B \quad (1)$$

式中: G_0 为均等固结条件下的最大动剪切模量; $G_{\max}$ 为非均等固结下最大动剪切模量; $G_{\max}/G_0$ 为由于固结比 $k_c > 1.0$ 造成的最大动剪切模量的增量。通过回归, 系数 $C = 1.25$, 指数 $B = 0.76$ 。

所有试验数据与回归公式的对比结果如图3所示。对比结果表明, 公式计算和试验值之间误差平均为 8.8%, 回归公式对非均等固结下最大动剪切模量的模拟是很成功的。

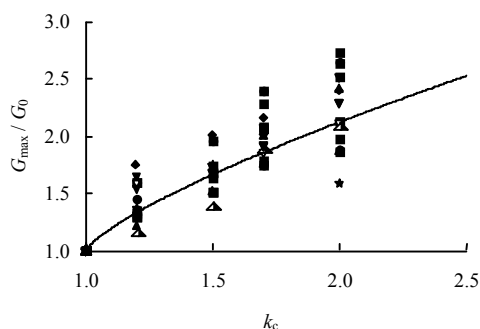


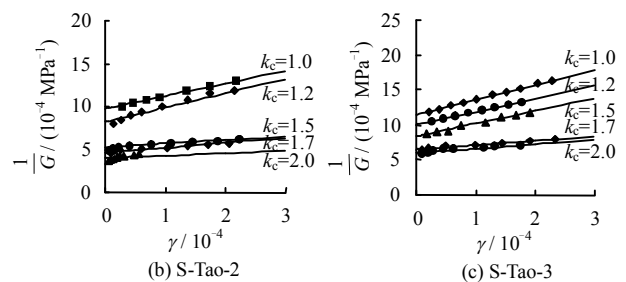
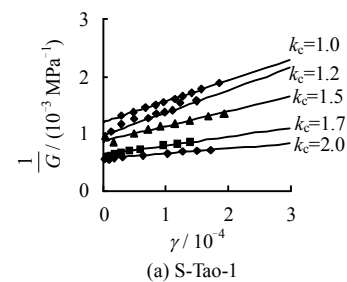
图3 粉质黏土试验建立的公式和试验值的比较

Fig.3 Comparison between the presented formula and all of the test data for silty clay

3.2 粉土试验

粉土选取山东滨州套尔河大桥工程场地3个试样, 根据土样的埋深对试样施加围压, 每一种围压下分别施加5种不同偏压 (k_c 分别为 1.0、1.2、1.5、1.7 和 2.0), 总计 15 种独立工况。

对试验得到的动剪切模量 G 与剪应变 γ 之间的关系, 采用 $G = 1/(a+b\gamma)$ 回归, 套尔河 3 个试样的 $1/G-\gamma$ 试验点和回归曲线如图4所示, 从图可以看出试验结果的规律性很好, 数据离散性也很小。

图4 套尔河粉土 $1/G-\gamma$ 试验点和回归曲线Fig.4 The regression curve of $1/G-\gamma$ for Taoerhe's silt

对粉土的试验结果进行回归, 得到的回归公式和粉质黏土的形式一样, 但系数略有不同, 粉土系数 $C = 1.20$, 指数 $B = 1.05$ 。所有试验数据与回归公式的对比结果见图5。结果表明, 公式计算和试验值之间误差平均为 8.7%, 公式模拟是成功的。

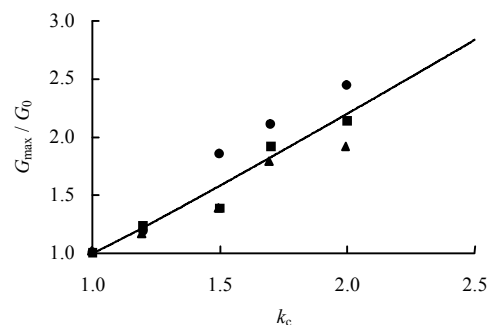


图5 粉土试验建立的公式和试验值的比较

Fig.5 Comparison between the presented formula and all of the test data for silt

3.3 本文建议公式

土的类别不同, 固结比对最大动剪切模量的影

响程度也不同,为方便工程上应用,本文综合两种土的试验结果,给出如下建议公式,

粉质黏土:

$$\frac{G_{\max}}{G_0} = 1 + 1.25(k_c - 1)^{0.76} \quad (2)$$

粉土:

$$\frac{G_{\max}}{G_0} = 1 + 1.20(k_c - 1)^{1.05} \quad (3)$$

建议公式中的系数 C 分别取1.25和1.20,与固结比 $k_c = 2.0$ 时得到的 $G_{\max}/G_0$ 分别为2.25和2.20相当,即 $k_c = 2.0$ 时粉质黏土和粉土的 $G_{\max}$ 比 $k_c = 1.0$ 时的 $G_{\max}$ 分别增长了125%和120%。

本文只给出3个场地17个土的试验结果,继续进行更多的试验,以使公式更加完善。

3.4 与砂土的比较

笔者^[8-9]采用共振柱试验方法,曾研究了固结比对砂土最大动剪切模量的影响。通过对福建标准砂和哈尔滨砂的系统试验,提出了计算不同固结比下砂土最大动剪切模量的公式为

$$\frac{G_{\max}}{G_0} = 1 + 0.66(k_c - 1)^{0.54} \quad (4)$$

式中的系数 C 为0.66,相当于固结比 $k_c = 2.0$ 时的 $G_{\max}$ 比 $k_c = 1.0$ 时的 $G_{\max}$ 增长了66%。

把粉质黏土公式(2)和砂土公式(4)对比结果示于图6。结果表明,固结比对黏性土最大动剪切模量有很大影响,与砂土的结果相比,固结比对黏性土最大动剪切模量影响程度更大。

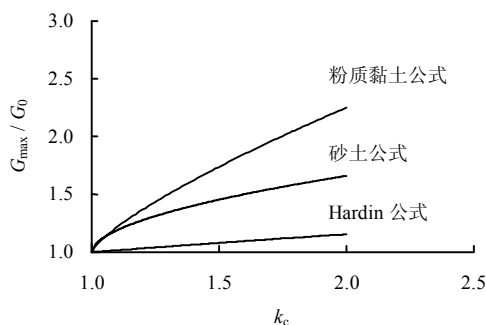


图6 3个公式 $G_{\max}/G_0-k_c$ 关系的比较

Fig.6 Comparison of $G_{\max}/G_0-k_c$ for three formulas

3.5 与其他结果的比较

由于土体非均等固结对最大动剪切模量影响的认识不明确,一些学者和技术人员用Hardin公式计算固结比 $k_c > 1.0$ 时的最大动剪切模量。在 $\sigma_2 = \sigma_3$

和 $\sigma_1 = k_c \sigma_3$ 条件下,按Hardin公式, $G_{\max}/G_0$ 为

$$\frac{G_{\max}}{G_0} = \left(\frac{2 + k_c}{3} \right)^{0.5} \quad (5)$$

把粉质黏土公式(2)与Hardin公式(5)进行对比分析,结果见图6。由图6可以看出,二者在形式上不相同,Hardin公式中 $G_{\max}$ 与固结比 k_c 呈直线形式增长,而本文建议公式认为 $G_{\max}$ 与固结比 k_c 呈指数形式增长。土体非均等固结对 $G_{\max}$ 的影响程度上也有很大差异,建议公式的影响程度明显比Hardin公式大。例如,粉质黏土公式(2)得到 $k_c = 1.5$ 和 $k_c = 2.0$ 时的 $G_{\max}/G_0$ 分别为1.74和2.25,而Hardin公式得到的 $G_{\max}/G_0$ 分别为1.08和1.15。

何昌荣^[6]采用动三轴试验对黏性土进行了较为系统的动模量试验,得到 $k_c = 2.0$ 时的 $G_{\max}/G_0$ 约为1.35~1.99,与本文粉质黏土公式(2)中 $k_c = 2.0$ 时 $G_{\max}/G_0$ 为2.25的结果具有一定可比性。

4 固结比对动剪切模量比与剪应变非线性关系影响

4.1 粉质黏土试验

根据粉质黏土试验结果回归得到的参数 a 和 b ,采用双曲线模型,得到归一化后不同固结比下的动剪切模量比与剪应变 $G/G_{\max}-\gamma$ 关系曲线,这里仅绘出套尔河大桥粉质黏土的 $G/G_{\max}-\gamma$ 关系曲线如图7所示。由图7可以看出,固结比对动剪切模量比关系曲线有一定影响。随固结比增加,动剪切模量比关系曲线提高,动剪切模量比值增大。例如,套尔河大桥的粉质黏土在剪应变 γ 为 10^{-4} 时,固结比 k_c 为2.0和1.5时的 $G/G_{\max}$ 分别比 k_c 为1.0时的 $G/G_{\max}$ 增加3.2%~10.0%和2.0%~7.0%。

4.2 粉土试验

根据套尔河大桥粉土试验结果回归得到的参数 a 和 b ,得到归一化后不同固结比下的动剪切模量比与剪应变 $G/G_{\max}-\gamma$ 关系曲线如图8所示。由图可以看出,其结果与粉质黏土类似,即随着固结比增加,动剪切模量比关系曲线提高,动剪切模量比值增大。

5 实际固结比对地表反应谱的影响

5.1 计算方法

根据固结比对动剪切模量比与剪应变关系曲线影响的试验结果,对考虑实际固结比对地表地震动的影响进行土层地震反应分析计算。

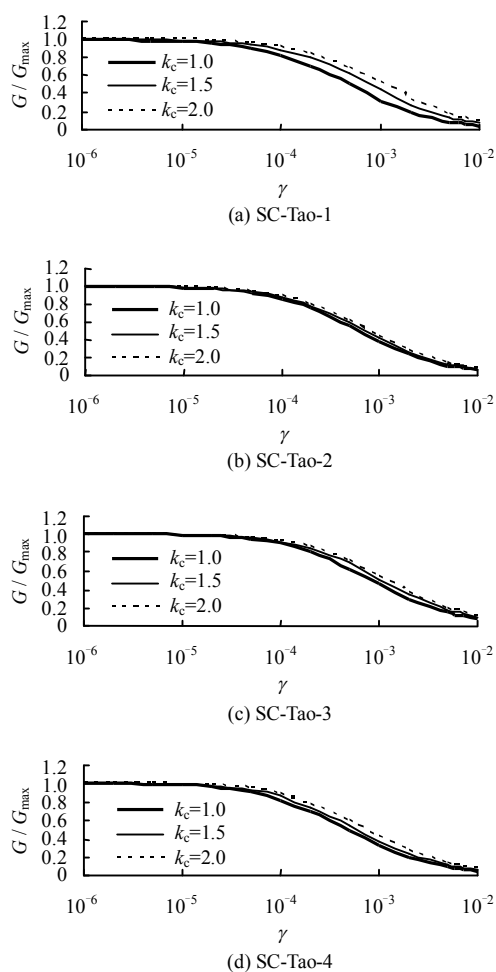


图7 固结比对粉质黏土 $G/G_{\max}$ - γ 关系曲线的影响
Fig.7 Effect of the consolidation ratios on $G/G_{\max}$ - γ for silty clay

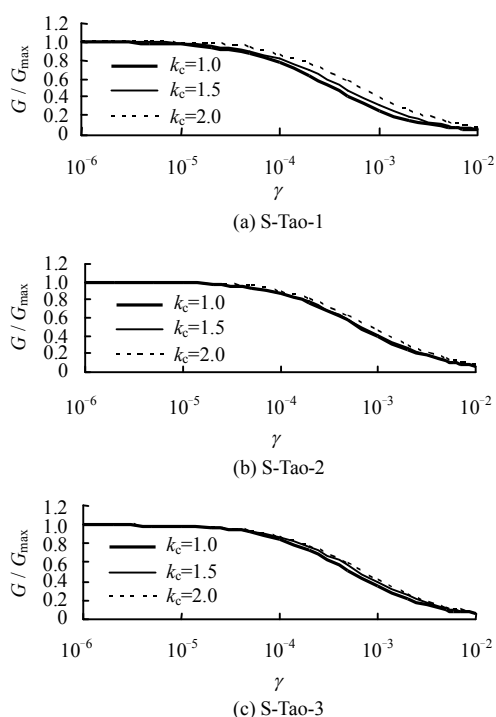


图8 固结比对粉土 $G/G_{\max}$ - γ 关系曲线的影响
Fig.8 Effect of the consolidation ratio on $G/G_{\max}$ - γ for silt

计算采用李小军^[10]的一维土层地震反应分析计算程序, 该程序利用等效线性化方法处理土层非线性地震反应问题, 是目前国内进行场地土层地震反应分析的通用程序。本文采用了两个土层模型, 厚度分别为 30 m 和 50 m, 两个模型中土层采用全粉质黏土层, 密度为 2.161 g/cm^3 。

动剪切模量比非线性关系采用图 7(a) 中 SC-Tao-1 的试验结果, 在剪应变 γ 为 10^{-4} 时, $k_c = 2.0$ 和 $k_c = 1.5$ 时的动剪切模量比分别比 $k_c = 1.0$ 时的动剪切模量比大 10% 和 6%。土层地震反应分析中动剪切模量比非线性关系依次取为 $k_c = 1.0$ 、1.5、2.0 共 3 种工况。实际工程中 $G_{\max}$ 由波速得到, 本文按实际试验得到, 计算的 3 种工况中, $G_{\max}$ 保持不变, 同时, 阻尼比非线性关系也保持不变, 只考虑土的动剪切模量比非线性关系对地表反应谱的影响。

5.2 输入波

土层地震反应分析中, 共选取 4 条基岩地震动作为输入波, 分别为 El-Centro 波、Taft 波、迁安波和北京饭店波, 如图 9 所示 (图中 t 为时间), 其中 El-Centro 波和迁安波为冲击型, Taft 波和北京饭店波为振动型。实际计算时地震动加速度时程的峰值均标定为 3.92 m/s^2 。

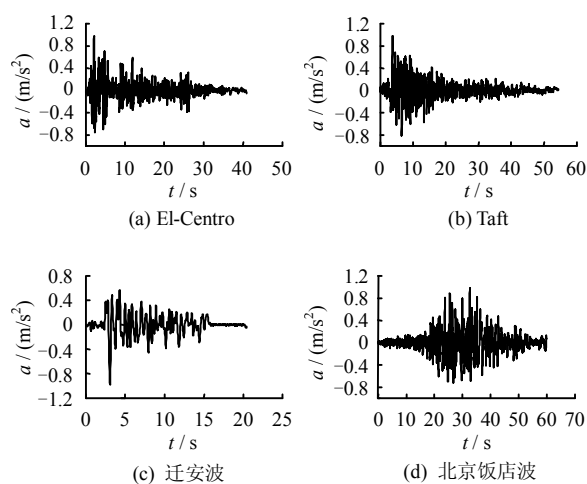


图9 输入地震波
Fig.9 The input earthquake waves

5.3 计算结果

两种土层厚度模型中, 动剪切模量比非线性关系分别取 $k_c = 1.0$ 、1.5、2.0 时对地表反应谱影响的计算结果如图 10、11 (图中 T 为周期) 所示。由图 11 中可以看出, $k_c = 1.0$ 时计算的反应谱形状与 $k_c = 2.0$ 和 $k_c = 1.5$ 计算的反应谱形状有较明显不

同, 反应谱有所右移且反应谱峰值较小。计算结果表明, 两种深度下 $k_c = 1.0$ 时计算的平均特征周期比 $k_c = 2.0$ 和 $k_c = 1.5$ 时计算的平均特征周期平均增大 31% 和 26%, 其中反应谱特征周期按文献[11]中方法计算。另外, $k_c = 2.0$ 和 $k_c = 1.5$ 时计算的平均地表加速度峰值分别比 $k_c = 1.0$ 时计算的平均地表加速度峰值平均增大 47% 和 36%。计算结果表明, 与均等固结相比, 考虑实际固结比情况下, 土体的动剪切模量比有一定增大, 强地震下土层地表加速度峰值有一定增大, 反应谱特征周期则明显减小。

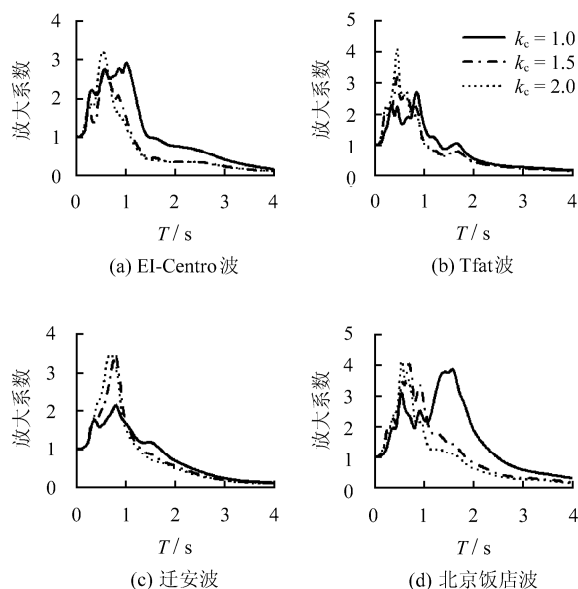


图10 非线性动剪切模量比对地表反应谱的影响(厚度为30 m)

Fig.10 Effect of nonlinear DSM ratio on surface acceleration spectra for soil layer of 30 m

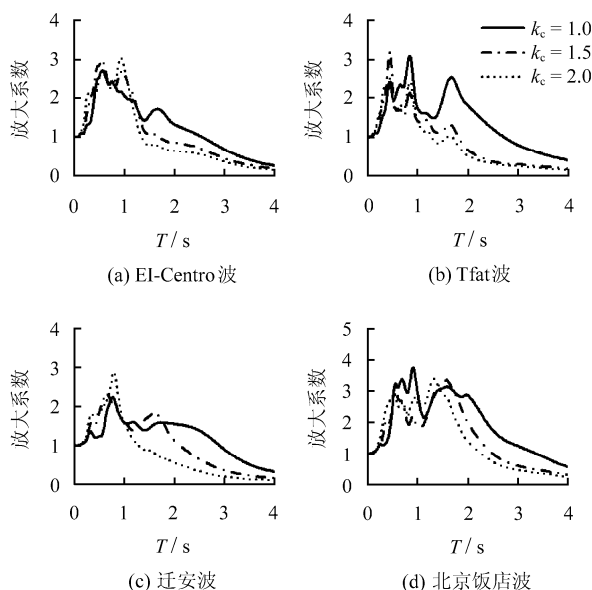


图11 非线性动剪切模量比对地表反应谱的影响(厚度为50 m)

Fig.11 Effect of nonlinear DSM ratio on surface acceleration spectra for soil layer of 50 m

6 结 论

(1) 固结比对粉质黏土和粉土最大动剪切模量有重要和不可忽视的影响, 对动剪切模量比与剪应变非线性关系曲线有一定影响。

(2) 计算不同固结比粉质黏土最大动剪切模量的建议公式为式(2), 粉土最大动剪切模量建议公式为式(3)。公式显示, 固结比 $k_c > 1.0$ 时的最大动剪切模量较 $k_c = 1.0$ 时的增长程度明显比 Hardin 公式要大。

(3) 与砂土的结果相比, 固结比对黏性土最大动剪切模量影响程度更大。

(4) 随固结比增加, 黏性土动剪切模量比与剪应变关系曲线提高, 动剪切模量比值增大。

(5) 初步分析表明, 在强地震动作用下应以实际固结条件的动剪切模量比为准计算土层反应, 若取均等固结下动剪切模量比, 则会带来较大误差, 表现为土层地表加速度峰值会减小, 而反应谱特征周期延长。

参 考 文 献

- [1] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 133—139.
YUAN Xing-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of soils[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(4): 133—139.
- [2] 王绍博, 丁海平. 土动力参数对土层动力反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(1): 105—108.
WANG Shao-bo, DING Hai-ping. Effect of soil dynamic parameters on seismic responses of soil layer[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, 21(1): 105—108.
- [3] 孙静, 袁晓铭, 孙锐. 土动剪切模量和阻尼比的推荐值和规范值的合理性比较[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 125—133.
SUN Jing, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Reasonability comparison between recommended and code values of dynamic shear modulus and damping ratio of soils[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2004, 24(2): 125—133.
- [4] HARDIN B O, BLACK W L. Vibration modulus of normally consolidated clay[J]. *Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1968, 94(2): 353—369.

- [5] HARDIN B O, BLACK W L. Vibration modulus of normally consolidated clay (closure)[J]. **Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1969, 95(6): 1531—1537.
- [6] 何昌荣. 动模量和阻尼的动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 39—48.
HE Chang-rong. Dynamic triaxial test on dynamic modulus and damping ratio[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(2): 39—48.
- [7] YU PEIJI, RICHART F E. Stress ratio effects on shear modulus of dry sands[J]. **Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1984, 110(3): 331—345.
- [8] 孙静, 袁晓铭. 固结比对砂土动剪切模量及地表反应谱的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 443—448.
- SUN Jing, YUAN Xiao-ming. Effects of consolidation ratios of sands on dynamic shear modulus and response spectrum of soil surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 443—448.
- [9] SUN JING, YUAN Xiao-ming. The effect of the consolidation ratio of sands on dynamic shear modulus and response spectrum of soil layer[J]. **Geotechnical Special Publication, ASCE**, 2006, 150: 437—443.
- [10] 廖振鹏, 李小军. 地表土层地震反应的等效线性化解法. 地震小区划-理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 141—153.
- [11] 廖振鹏, 李大华. 设计地震反应谱的双参数标定模型. 地震小区划-理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 196—206.