

非饱和和无粘性土动剪切模量的实用计算方法

钱学德 , 郭志平

(河海大学土木工程学院 , 江苏南京 210098)

摘要 : 提出可以考虑平均有效应力、孔隙比和颗粒特征对非饱和和无粘性土最大剪切模量比及最优饱和度的综合影响的方法 , 仅需四个参数 : 土的级配、孔隙比、平均有效应力和颗粒形状 , 因此可避免一系列复杂的动力试验 . 提出的方法和 Hardin 公式、吴世明公式一起 , 共同提供了一个计算无粘性土(干的、饱和的或非饱和的) 低幅剪切模量的合理途径 . 而且此模量对土质及场地条件变化的敏感程度也可用本文方法加以确定 .

关键词 : 非饱和和无粘性土 ; 动剪切模量 ; 最大剪切模量比 ; 最优饱和度

中图分类号 : P642.11+4 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-198X(2000)03-0065-08

在计算土中波的传播和地基动力反应时 , 动剪切模量是一个特别重要的土质特性指标 , 它对土的有效侧限应力和孔隙比非常敏感 . Hardin 和 Richart 曾在 1963 年给出了剪切模量 G 与平均有效侧限应力 σ'_0 及孔隙比 e 的经验关系式^[1]:

棱角状砂

圆角状砂

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{3270(2.97 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_0)^{0.5} \\ G &= \frac{6930(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_0)^{0.5} \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式中 G 及 σ_0 的单位均为 kPa.

式(1)被广泛应用于机器基础设计和其它动力工程 , 可以用来确定干砂或完全饱和砂的低幅剪切模量 . 但地基原位土体通常都不是完全饱和的 , 由于毛细作用影响 , 非饱和土的动力反应和干土或饱和土差别很大 . 1984 年 , 吴世明等研究了某些无粘性土在不同饱和度情况下毛细作用对低幅剪切模量的影响 , 并提出一个计算任意饱和度条件下非饱和和无粘性土低幅剪切模量的经验公式^[2]:

$$G = [1 + H(S_r)]G_d \tag{2}$$

式中 : G_d ——干土的低幅剪切模量 , 由式(1)确定 ; $H(S_r)$ ——饱和度 S_r 的函数 , 可由下式确定 :

$$H(S_r) = \begin{cases} (m - 1) \sin(\pi S_r / 2n) & S_r < n \\ (m - 1) H_1(S_r) H_2(S_r) & S_r > n \end{cases} \tag{3}$$

式中 : m ——最大剪切模量比 G_m/G_d ; n ——最优饱和度 S_{rop} , % ; S_r ——饱和度 , 1% ~ 100% ;

$$H_1(S_r) = 0.5(S_r - n)(100 - n)^2 ; \tag{4}$$

$$H_2(S_r) = 1 + \sin\{\pi[S_r + (50 - 1.5n)](100 - n)\} . \tag{5}$$

在使用式(2)时 , 关键在如何正确选定最大剪切模量比 G_m/G_d 和最优饱和度 S_{rop} , 这往往需要通过复杂的动力试验才能确定 . 本文在大量实验结果基础上 , 提出一个能综合考虑平均有效应力、孔隙比、颗粒特征影响的非饱和和无粘性土的最大剪切模量比和最优饱和度计算方法 , 而无需再进行一系列复杂的动力试验 .

1 由孔隙比和颗粒形状确定剪切模量

选用 13 种无粘性土进行共振柱试验 , 以研究其在非饱和条件下的剪切模量 , 试验结果见图 1 [3~4] . 无

论棱角砂或圆角砂,在不同平均有效应力作用下,其最大剪切模量比与孔隙比均成反比线性关系,直线斜率不受侧限应力影响而仅与土粒的形状有关,图示棱角砂的斜率约为 1.025,圆角砂则仅为 0.45.

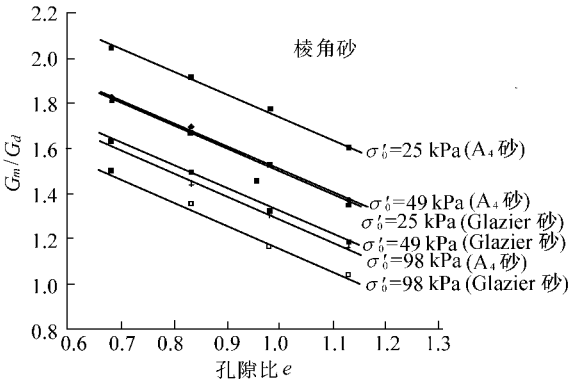


图 1 在不同平均应力作用下棱角砂 G_m/G_d 与孔隙比的关系
Fig.1 G_m/G_d versus void ratio at various confining pressures for angular sands

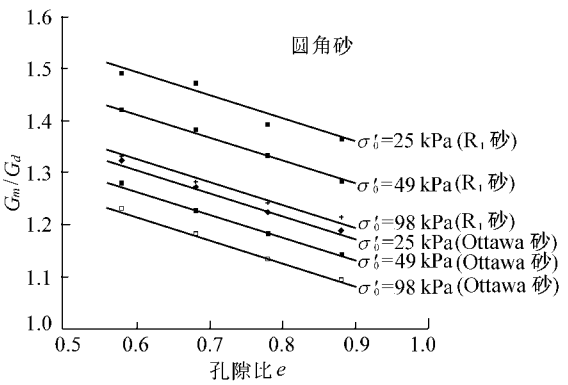


图 2 在不同平均应力作用下圆角砂 G_m/G_d 与孔隙比的关系
Fig.2 G_m/G_d versus void ratio at various confining pressures for subrounded sands

根据试验求得的线性关系,可导出线性回归方程

$$G_m/G_d = (G_m/G_d)_{e_0} - k(e - e_0)$$

式中: G_m/G_d ——任意孔隙比 e 时土体的最大剪切模量比; k ——试验直线的线性斜率,棱角砂取 1.025,圆角砂取 0.45; $(G_m/G_d)_{e_0}$ ——对应一特定孔隙比 e_0 时土体的最大剪切模量比; e_0 ——任意选定的参照孔隙比,在针对这 13 种砂进行试验时,取 $e_0 = 0.78$,故上式可写成

$$G_m/G_d = (G_m/G_d)_{0.78} - k(e - 0.78) \tag{6}$$

图 3、4 分别表示 $e = 0.78$ 时棱角砂和圆角砂在三种不同平均应力作用下,土粒粒径与最大剪切模量比之间的关系,其曲线族可用下式表示:

$$b_0 = FD^{-1/t} \tag{7}$$

式中: b_0 —— $e = 0.78$ 时, $i^\#$ 粒组的最大剪切模量比; $i^\#$ ——美国标准筛的筛号,有 45, 50, 70, 80, 100, 120, 140, 170, 200, 270 及 400 共 11 种,其对应筛孔尺寸为 0.35, 0.297, 0.21, 0.18, 0.149, 0.125, 0.105, 0.088, 0.074, 0.053 及 0.037 mm,小于 400[#] 筛的土粒即为粘粒,若 $i = 120$,即表示能通过 100[#] 筛而留在 120[#] 筛上的那些土粒,以此类推; D —— $i^\#$ 粒组的平均粒径, μm ; F, t ——实验参数,与平均应力有关,可用经验公式计算:

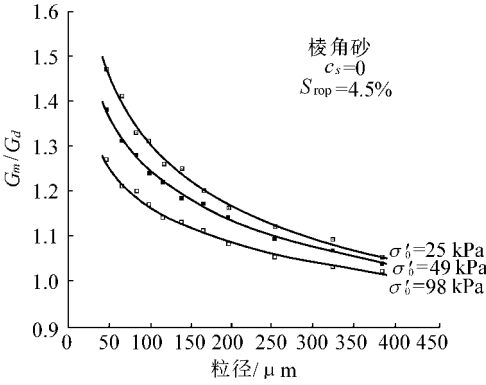


图 3 棱角砂 G_m/G_d 与粒径关系曲线
Fig.3 G_m/G_d versus grain diameter for angular sands

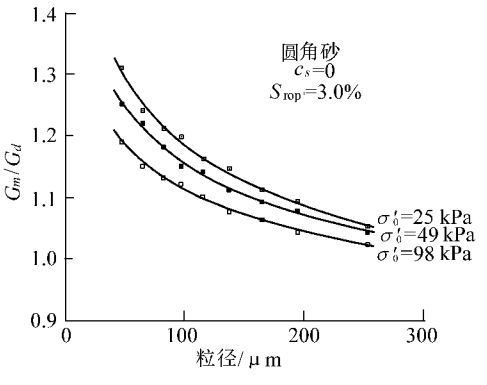


图 4 圆角砂 G_m/G_d 与粒径关系曲线
Fig.4 G_m/G_d versus grain diameter for subrounded sands

棱角砂

$$F = 6.380\sigma_0'^{-0.269}$$

$$t = 0.441\sigma_0'^{-0.319}$$

圆角砂

$$F = 3.449\sigma_0'^{-0.154}$$

$$t = 0.251\sigma_0'^{-0.217}$$

(8)

(9)

式中 σ_0' 均以 kPa 计。

取四个粒组的棱角砂及圆角砂,其小于 400# 筛的颗粒含量不同,在三种不同平均应力作用下与最大剪切模量比的关系如图 5、6 所示。这个关系也可用回归分析导出

$$\alpha_i = [(A^{1-C_s} - 1)(A - 1)]b_0 + [1 + (A^{1-C_s} - 1)(A - 1)]b_1$$

(10)

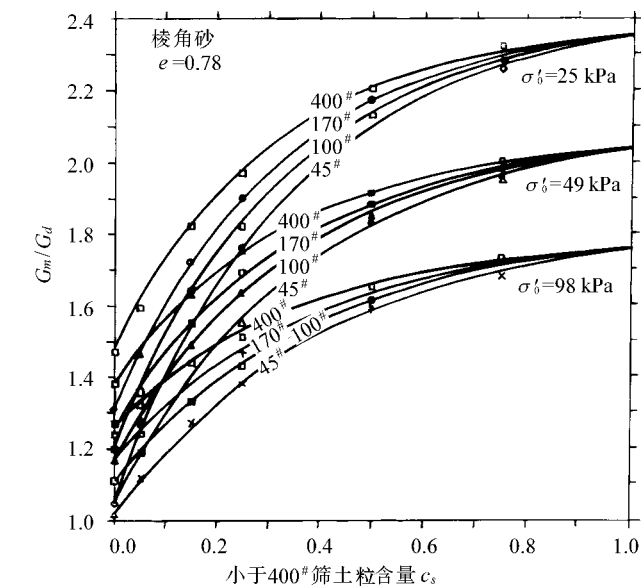


图 5 棱角砂 G_m/G_d 与小于 400# 颗粒含量的关系

Fig.5 G_m/G_d versus content of minus #400 sieve size fraction for angular sands

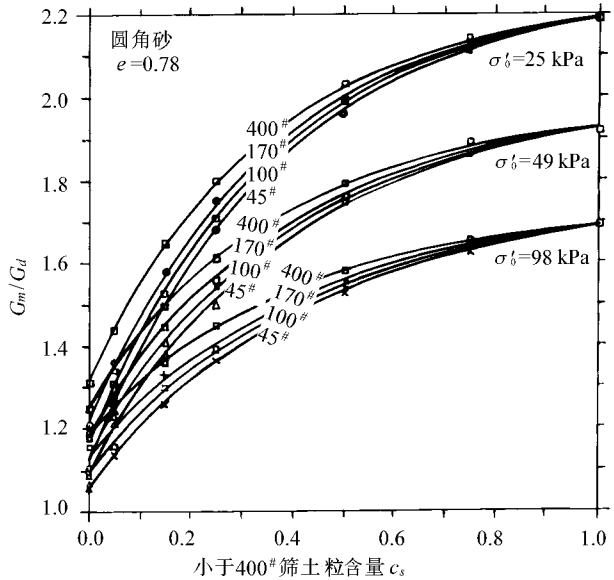


图 6 圆角砂 G_m/G_d 与小于 400# 颗粒含量的关系

Fig.6 G_m/G_d versus content of minus #400 sieve size fraction for subrounded sands

式中: α_i ——当 $e = 0.78$, 小于 400# 筛颗粒含量不同时, i 粒组的最大剪切模量比; C_s ——小于 400# 筛的颗粒含量与试样土粒总重量之比, 其值从 0 至 1; b_1 —— $e = 0.78$ 时, 小于 400# 筛颗粒的最大剪切模量比; A ——经验常数。

式 (10) 中 b_0 值可由式 (7) 算出, b_1 值也与平均应力有关, 可用经验公式求出

棱角砂

$$b_1 = 4.674\sigma_0'^{-0.214}$$

圆角砂

$$b_1 = 4.033\sigma_0'^{-0.190}$$

(11)

经验常数 A 则与平均应力和土粒粒径有关

棱角砂

$$A = 153.940\sigma_0'^{-0.331}D^{-0.186}$$

圆角砂

$$A = 103.466\sigma_0'^{-0.343}D^{-0.158}$$

(12)

式 (11) (12) 中的 σ_0' 均以 kPa 计, D 以 μm 计。

这样, 对小于 400# 筛颗粒含量不同的各粒组棱角砂和圆角砂, 其最大剪切模量比即可由式 (10) 求出。图 5、6 上的点是试验结果, 曲线则是根据回归方程算出的。

图 7、8 分别表示棱角砂与圆角砂在不同 C_s 值时孔隙比与最优饱和度的实验关系, 通过回归分析可导出最优饱和度与孔隙比成指数函数关系, 其经验公式为

$$S_{rop} = a^e + b$$

(13)

式中 a, b 为经验常数, 其值与 C_s 有关, 试验曲线见图 9、10, 图中点是实验值, 曲线由回归关系式求出, 曲线回归关系式为:

棱角砂

$$a = 0.021 \{ (0.00391 C_s^{-1} - 1) + 4.80 \}$$

圆角砂

$$a = 0.087 \{ (0.00177 C_s^{-1} - 1) + 4.45 \}$$

$$b = 12.3 - 0.10(129^{1-C_s} - 1)$$

$$b = 11.7 - 0.344(42.6^{1-C_s} - 1)$$

(14)

式(13)可用来计算任意孔隙比和 C_s 值时棱角砂和圆角砂的最优饱和度,图7、8中的点是实测值,曲线由式(13)~(14)算出。

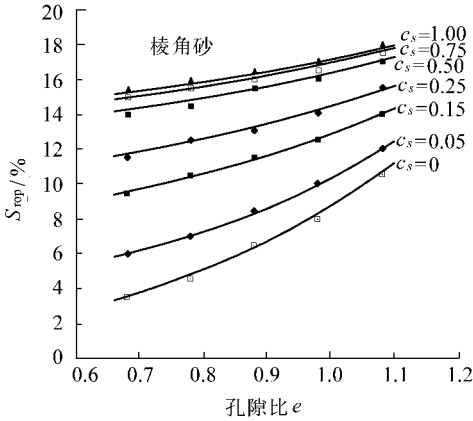


图7 不同 C_s 值棱角砂的最优饱和度与孔隙比关系

Fig.7 Optimum degree of saturation versus void ratio for angular sands with various c_s

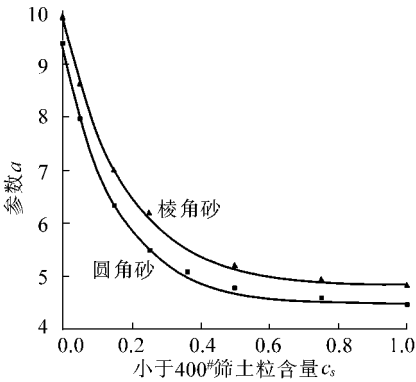


图9 C_s 与参数 a 关系曲线

Fig.9 C_s versus parameter a

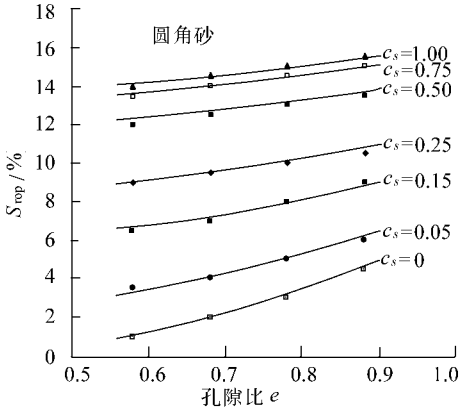


图8 不同 C_s 值圆角砂的最优饱和度与孔隙比关系

Fig.8 Optimum degree of saturation versus void ratio for subrounded sands with various c_s

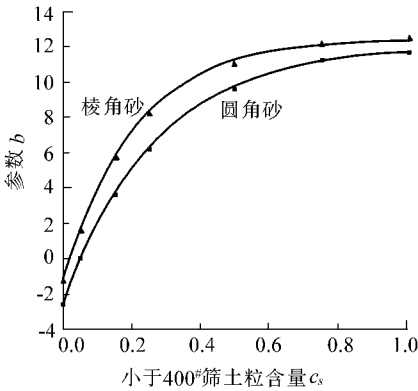


图10 C_s 与参数 b 关系曲线

Fig.10 C_s versus parameter b

2 最大剪切模量比的确定

当试样孔隙比一定时, G_m/G_d 的确定方法如下:假定试样体积为 V ,见图11(a),并设试样中土粒的最小粒径均大于400#筛,其孔隙体积为 V_v ,土粒的体积及重量分别为 V_{s1} 及 W_1 ,则该试样的孔隙比为

$$e_0 = V_v/V_{s1}$$

假想试样中的土粒能被分成不同粒组,并将同一粒组的颗粒集成若干扇形体,如图11(b),图中 $i^{\#}$ 粒组的意义同前。每个扇形体的孔隙比均等于试样的孔隙比,即

$$V_{vi}/V_{s1i} = V_v/V_{s1} = e_0 \tag{15}$$

式中 V_{vi} 及 V_{s1i} 为 $i^{\#}$ 粒组扇形体中的孔隙体积和土粒体积。

若在试样中加入小于400#筛的土粒而保持试样总体积不变,如图12(a),此时试样孔隙比由 e_0 减小到 e 。设所加入的小于400#筛的土粒体积和重量分别为 V_{s2} 及 W_2 ,则有

$$e = (V_v - V_{s2})/(V_{s1} + V_{s2})$$

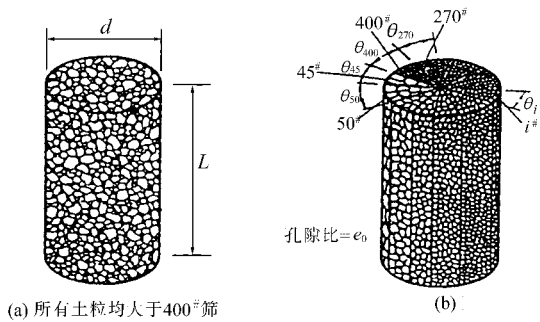


图 11 土样示意图
Fig.11 Sketch of soil sample

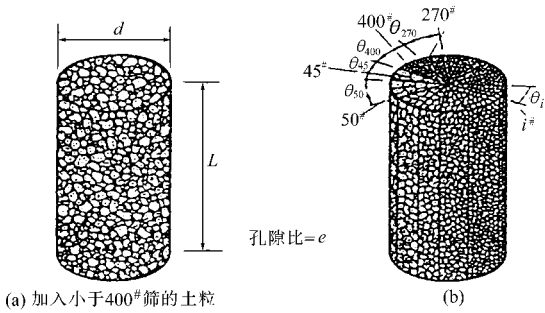


图 12 加入小于 400# 筛土粒后的土样示意图
Fig.12 Sketch of soil sample with some minus # 400 sieve size fractions added

同样,此时每一 $i^{\#}$ 粒组扇形体的孔隙比均为 e ,即

$$(V_{vi} - V_{s2i})(V_{s1i} + V_{s2i}) = (V_v - V_{s2})(V_{s1} + V_{s2}) = e \tag{16}$$

式中 V_{s2i} 为 $i^{\#}$ 粒组扇形体中所加入的小于 400# 筛土粒体积。

由式 (15) 及 (16), 可以求得 $(e_0 - e)(1 + e) = V_{s2i}/V_{s1i} = V_{s2}/V_{s1}$ (17)

对上式乘以土粒的容重 γ_s , 则上式可改写成

$$W_{2i}/W_{1i} = W_2/W_1 \tag{18}$$

或 $W_{2i}/(W_{1i} + W_{2i}) = W_2/(W_1 + W_2) = W_2/W$ (19)

式中 W_{1i} 及 W_{2i} 分别为 $i^{\#}$ 粒组扇形体中大于 400# 筛和小于 400# 筛土粒的重量, W 为试样中土粒总重量。

根据前述 C_s 的定义, 有 $C_s = W_2/(W_1 + W_2) = W_2/W$ (20)

及 $C_{si} = W_{2i}/(W_{1i} + W_{2i})$ (21)

由式 (19) 可知, $C_s = C_{si}$, 故有

$$W_{2i} = C_s(W_{1i} + W_{2i}) = C_s W_{1i}/(1 - C_s) \tag{22}$$

现定义 $i^{\#}$ 粒组扇形体中, $i^{\#}$ 粒组土粒重量加上小于 400# 筛的土粒重量与试样土粒总重量之比为 $i^{\#}$ 粒组的修正重量比, 以 Y_i 表示; 同时定义 X_i 为 $i^{\#}$ 粒组土粒重量与试样土粒总重量之比, 即

$$X_i = W_{1i}/W \tag{23}$$

$$Y_i = (W_{1i} + W_{2i})/W = X_i/(1 - C_s) \tag{24}$$

若试样的最小颗粒尺寸均小于 400# 筛, 即 $C_s = 0$, 则 $Y_i = X_i$, X_i 值可通过颗粒分布曲线求出。

如图 13 所示, 假定在湿润条件下图中每一扇形体的剪切模量分别为 $G_{45}, G_{50}, \dots, G_i, \dots, G_{270}$ 及 G_{400} 。同时由材料力学可知, 圆形截面的惯性矩 $J = \pi d^4/32$, 扇形截面的惯性矩则为

$$J_i = (\theta_i/360)J = (\theta_i/360)\pi d^4/32 \tag{25}$$

式中 d ——试样直径; θ_i —— $i^{\#}$ 粒组扇形体的中心角 ($^{\circ}$)。

若在试样上作用一扭矩 T , 如图 13(c), 并设试样顶部与底部截面之间的扭转角为 Ψ , 则所有扇形体的扭转角都等于 Ψ , 见图 13(d)。若整个非饱和试样剪切模量为 G , 试样的扭转角可用下式表示:

$$\Psi = TL/JG \tag{26}$$

即扭矩 $T = \Psi JG/L$ (27)

式中 L 为试样高。

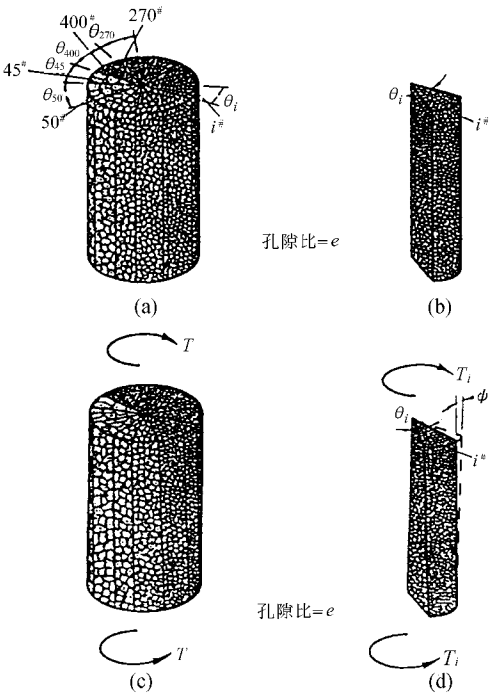


图 13 扭矩作用下的土样
Fig.13 Soil sample subjected to torque

现将扭矩 T 分配至每个扇形体, 分别以 $T_{45}, T_{50}, \dots, T_i, \dots$ 表示, 则 $T = \sum T_i$, 又因每个扇形体的高度 L 和扭转角 Ψ 均相同, 其扭矩 $T = \Psi J_i G_i / L$, 故有

$$JG = \sum J_i G_i$$

(28)

将式(25)代入, 得

$$G = \sum (\theta_i / 360) G_i$$

(29)

因为所有扇形体的容重、高度和半径均相同, 根据 Y_i 的定义, 有 $\theta_i / 360 = Y_i$, 最后得到剪切模量的公式为

$$G = \sum G_i Y_i$$

(30)

当饱和度达到最优值时, 剪切模量最大, 式(30)写成

$$G_m = \sum G_{mi} Y_i$$

(31)

适用于干砂的公式(1), 其剪切模量仅与孔隙比 e 和平均应力 σ'_0 有关, 而对同一试样, 每个粒组扇形体的 e 和 σ'_0 是一样的. 因此, 对于干砂, 整个试样的剪切模量和每一扇形体的剪切模量相同, 即 $G_d = G_{di}$, 式(31)可标准化为

$$G_m / G_d = \sum (G_m / G_d)_i Y_i$$

(32)

在本文中, 各试样的孔隙比 e_0 均取为 0.78, 并以 α_i 表示 $i^\#$ 粒组的最大剪切模量比, 上式即可写成

$$(G_m / G_d)_{0.78} = \sum \alpha_i Y_i$$

(33)

α_i 可由式(10)算出. 若试样的最小颗粒尺寸均大于 400 $^\#$ 筛, 即 $C_s = 0$, $Y_i = X_i$, 式(33)也可简化为

$$(G_m / G_d)_{0.78} = \sum \alpha_i X_i$$

(34)

只要能求出 $(G_m / G_d)_{0.78}$, 任何一个孔隙比条件下的最大剪切模量比 G_m / G_d 即可由式(6)算出.

3 最大剪切模量比和最优饱和度的计算步骤

- 以上已建立起确定非饱和和无粘性土最大剪切模量比及最优饱和度的理论基础, 其具体计算步骤如下:
- a. 用 Youd 法测定土的圆度值^[5], 以确定土粒形状;
 - b. 测定土的颗粒分布并计算 X_i 值;
 - c. 由颗粒分布结果, 计算土中小于 400 $^\#$ 筛的土粒含量, 求出 C_s ;
 - d. 根据 C_s 值、孔隙比 e 以及土粒形状, 由式(13)及(14)计算最优饱和度 S_{rop} ;
 - e. 对每一粒组计算 Y_i 值;
 - f. 对应于参照孔隙比 $e_0 = 0.78$, 利用经验公式(7)~(12)算出每一粒组的最大剪切模量比 α_i ;
 - g. 用式(33)算出对应于 $e_0 = 0.78$ 时的最大剪切模量比 $(G_m / G_d)_{0.78}$;
 - h. 由式(6)计算任意孔隙比条件下的最大剪切模量比 G_m / G_d .

作为算例, 表 1 给出了对 Glazier way 砂最大剪切模量比 $(G_m / G_d)_{0.78}$ 的计算过程及其结果.

表 1 Glazier way 砂最大剪切模量比 $(G_m / G_d)_{0.78}$ 计算结果
Table 1 Calculated results of maximum shear modulus ratio for Glazier way sand ($e = 0.78$)

筛号	X_i	Y_i	$\sigma'_0 = 25 \text{ kPa}$		$\sigma'_0 = 49 \text{ kPa}$		$\sigma'_0 = 98 \text{ kPa}$	
			α_i	$\alpha_i Y_i$	α_i	$\alpha_i Y_i$	α_i	$\alpha_i Y_i$
45	0.005	0.005 8	1.490	0.008 6	1.358	0.007 9	1.246	0.007 2
50	0.012	0.013 9	1.512	0.021 0	1.377	0.019 1	1.260	0.017 5
70	0.026	0.030 0	1.545	0.046 4	1.403	0.042 1	1.280	0.038 4
80	0.019	0.021 9	1.580	0.034 6	1.432	0.031 4	1.302	0.028 5
100	0.032	0.037 0	1.604	0.059 3	1.451	0.053 7	1.317	0.048 7
120	0.036	0.041 6	1.629	0.067 8	1.471	0.061 2	1.333	0.055 5
140	0.045	0.052 0	1.655	0.086 1	1.492	0.077 6	1.348	0.070 1
170	0.064	0.073 9	1.680	0.124 2	1.511	0.111 7	1.363	0.100 7
200	0.089	0.102 8	1.706	0.175 4	1.532	0.157 5	1.378	0.141 7
270	0.344	0.397 2	1.743	0.692 3	1.561	0.620 0	1.400	0.556 1
400	0.194	0.224 0	1.797	0.402 5	1.604	0.359 3	1.431	0.320 5
C_s	0.134							
$(G_m / G_d)_{0.78} = \sum \alpha_i Y_i$				1.72		1.54		1.38

4 计算结果与实验结果之比较

以上所提出的计算方法及经验公式 ,均系根据 13 种砂料的共振柱试验结果归纳出来的 ,为了验证此法及经验公式对其它砂料有无普遍意义和推广价值 ,能否适合于工程应用 ,选择了该 13 种砂以外的 Mortar 砂 (棱角状) 和 Agsco 砂 (圆角状) 来进行比较 . 表 2 及表 3 表示这两种砂最大剪切模量比的计算值和实测值的比较 ,表 4 及表 5 则列出这两种砂最优饱和度的计算值和实测值的比较结果 . 可以看出 ,用本文方法计算的结果与共振柱试验结果相当一致 .

表 2 Mortar 砂最大剪切模量比计算值和实测值的比较

Table 2 Comparison of predicted vs. measured maximum shear modulus ratio for Mortar sand

孔隙比	$\sigma'_0 = 25 \text{ kPa}$		$\sigma'_0 = 49 \text{ kPa}$		$\sigma'_0 = 98 \text{ kPa}$	
	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
0.68	1.53	1.55	1.43	1.43	1.32	1.34
0.83	1.38	1.35	1.28	1.30	1.17	1.16
0.98	1.22	1.24	1.13	1.10	1.02	1.04

表 3 Agsco 砂最大剪切模量比计算值和实测值的比较

Table 3 Comparison of predicted vs. measured maximum shear modulus ratio for Agsco sand

孔隙比	$\sigma'_0 = 25 \text{ kPa}$		$\sigma'_0 = 49 \text{ kPa}$		$\sigma'_0 = 98 \text{ kPa}$	
	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
0.58	1.30	1.31	1.27	1.28	1.22	1.22
0.68	1.26	1.25	1.22	1.20	1.18	1.17
0.78	1.22	1.20	1.18	1.18	1.13	1.15
0.88	1.17	1.18	1.13	1.15	1.09	1.08

表 4 棱角砂最优饱和度计算值和实测值之比较

Table 4 Comparison of predicted vs. measured optimum degree of saturation for angular sand %

砂料	$e = 0.68$		$e = 0.83$		$e = 0.98$	
	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
Mortar 砂	6.0	6.0	7.7	7.5	10.0	10.0

表 5 圆角砂最优饱和度计算值和实测值之比较

Table 5 Comparison of predicted vs. measured optimum degree of saturation for subrounded sand %

砂料	$e = 0.58$		$e = 0.68$		$e = 0.78$		$e = 0.88$	
	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
Agsco 砂	1.3	1.2	2.2	2.0	3.3	3.2	4.8	4.5

5 结 论

本文提出的方法是确定非饱和和无粘性土最大剪切模量比和最优饱和度的一种实用方法 ,仅需四个参数 : 颗粒级配、孔隙比、平均有效应力以及颗粒形状 . 因此 ,可以无需进行一系列复杂的动力试验 . 本法仅适用于棱角状或圆角状的无粘性土 ,这些土中小于 200# 筛筛孔的颗粒应是非塑性的 . 棱角砂包含的圆粒在 0.17 ~ 0.25 之间 ,圆角砂含有的圆粒在 0.35 ~ 0.49 之间 .

适用于干砂的公式 (1) ,在非饱和条件下对 Hardin 公式进行修正的吴世明公式 (2) ,以及本文提出的计算非饱和和无粘性土最大剪切模量比和最优饱和度的方法一起提供了一个完整的手段 ,可以用来计算无粘性土在干燥或非饱和条件下的低幅剪切模量 . 根据计算结果 ,还可判断在土质和场地条件发生变化时对模量变化的敏感程度 .

参考文献 :

[1] Hardin B O ,Richart F E Jr. Elastic wave velocities in granular soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering ,ASCE , 1963 ,89(1) 33 ~ 65 .
[2] Wu Shiming ,Gray D H ,Richart F E Jr. Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts[J]. Journal of Geotechnical Engineering , ASCE ,1984 ,110(9) :1188 ~ 1203 .
[3] Qian Xuede ,Gray D H ,Woods R D. Resonant column test on partially saturatd sands[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal ,1991 .

- [4] Qian Xuede ,Gray D H ,Woods R D.Voids and Granulometry :Effects on shear modulus of unsaturated sands[J].Journal of Geotechnical Engineering ,ASCE ,1992 ,119(2) 295 ~ 315 .
- [5] Youd T L.Factor controlling maximum and minimum densities of sand[A].In :Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils[C].ASTM STP523 ,1973.98 ~ 1120 .

A Useful Procedure for Estimating the Dynamic Shear Modulus of Partially Saturated Cohesionless Soils

QIAN Xue-de , GUO Zhi-ping

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

Abstract: A method is proposed for predicting the combined effect of confining stress ,void ratio ,and particle characteristics on the maximum shear modulus ratio and optimum degree of saturation in partially saturated cohesionless soils.Only four soil parameters are needed ,namely ,gradation ,void ratio ,confining pressure ,and grain shape. Thus ,a series of complicated dynamic tests can be avoided.Hardin 's Equation ,Wu 's Equation ,and the method described herein for calculating the maximum shear modulus ratio and the optimum degree of saturation of partially saturated cohesionless soils together provide a complete approach for evaluating the low-amplitude shear modulus of cohesionless soils in either a dry or partially saturated condition. Furthermore ,the sensitivity of the modulus to variations in soil and site condition can be determined by means of this predictive technique.

Key words :partially saturated cohesionless soils ;dynamic shear modulus ;maximum shear modulus ratio ;optimum degree of saturation