

初始剪应力对外海回填土壤动态特性之影响

Initial shear stress effects on dynamic properties of reclaimed soil in offshore area

简连贵 张上君 胡渊南
(台湾海洋大学河海工程学系, 台湾基隆)

文 摘 采用云林离岛工业区外海料源区土壤为试验用砂, 考虑现有回填地之土壤条件, 采用湿捣法制试样, 探讨不同相对密度、有效围压应力及固结应力比等因素, 进行一系列共振柱试验, 以评估回填土於初始剪应力作用下之土动态特性。由试验结果分析得知, 回填土壤之剪切模量有随固结应力比与有效围压应力之增加而增加之趋势, 而最大剪切模量 ($G_{\max}$) 亦随固结应力比与有效围压应力之增加而增加, 同时不受初始相对密度不同之影响。另回填土壤因固结应力比所引致之最大剪切模量增量远大于孔隙变化所引致之增量。但固结应力比与有效围压应力对阻尼比之影响则较不明显。同时本研究在 Hardin 与 Richart (1963) 所建议之评估方式基础上进行修正, 对云林外海土壤建立非等向压密条件下, 最大剪切模量与不同剪应变所对应之剪切模式经验公式, 可提供回填造地设计、施工及抗震分析之参考。

关键词 回填土壤, 初始剪应力, 共振柱试验, 动态特性

作者简介 简连贵, 现职为台湾海洋大学河海系副教授。研究课题主要为回填造地工程、海洋大地工程及海下施工技术。

Lien-Kwei Chien Shan-Jin Chang Yan-Nam Oh

(Dept. of Harbor and River Eng., National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan 202.)

Abstract In this study, the reclaimed soil in Yun-Ling nearshore area was adopted as testing samples. Different relative densities and consolidation stress ratio were taken into consideration to prepare specimens by the moist tamping method. A series of resonant column triaxial test were performed, to discuss the shear modulus and damping ratio of the reclaimed soil under different initial shear stress and different consolidation stress ratios. In this study, different consolidation stress ratio were used to simulate the reclaimed soil under different initial shear stress. As shown in the test results, the shear modulus of the reclaimed soil increases as the consolidation stress ratio and mean effective confining pressure increase. Similarly, $G_{\max}$ also increases as the consolidation stress ratio increases, but is not influenced by the different initial relative density. The increment of $G_{\max}$ induced by consolidation stress ratio is larger than the increment induced by different void ratios. The influence of consolidation stress ratio on damping ratio is not distinct. Summarizing all the analyzed results and based on the method suggested by Hardin and Richart (1963), a new method to evaluate maximum shear modulus and shear modulus under different shear strain for offshore reclaimed soil under anisotropic consolidation is established. The results in this paper can be provided for reference purposes during design, construction and dynamic analysis on land reclamation.

Key words reclaimed soil, initial shear stress, resonant column test, dynamic properties

1 前 言 *

台湾填海造地目前主要以水力抽砂回填法最受重视, 不仅将废弃土壤作有效运用。且可将回填地作多功能的运用, 是一种符合经济效益的施工方法。台湾地震发生频繁, 回填土壤须承受相当的地震力作用, 对于离岸回填造地区之基础结构物还需考虑风力及波浪反复应力之作用; 此外, 机械运作所产生规律性的振动亦会使回填土壤受反复振动之影响。一般水力抽砂回填土壤大都很疏松, 其相对密度范围由 10% ~ 70%, 且大部分在 50% 以下不易运到紧密的程度^[1]。故针对水力抽砂回填的土壤特性, 于实验时考虑颗粒组构、孔隙比、有效围压及剪应变振幅等条件, 以推求回填土壤含初始剪应力下的动态特性, 并对可能影响回填土壤动态特性的因素加以分析, 以期对回填造地工程安

全有所贡献。

本研究主要以实验室之湿捣法制备试样, 经由一系列共振柱试验探讨含初始剪应力下外海回填土壤的动态特性(剪切模量及阻尼比)。并采用 Hardin 与 Richart^[2] 所建议之评估方式为基础, 以期建立云林外海土壤于非等向压密下之最大剪切模量经验公式。对往后填海造地重大经建工程之推动与造地土层之稳定分析, 提供初步的经验供学术研究及工程规划参考。

2 文献回顾

一般影响土壤剪切模量及阻尼比等动态特性参数的因素有很多^[2], 包括应变振幅、有效平均主应力、孔隙比、荷重循环数、饱和度、超压密比、八面体剪应力、

* 到稿日期: 1998

有效围压、振动频率、时间效应、颗粒大小、形状、矿物成份、土壤结构、因剪应变所产生的体积变化等因素。其中以剪应变振幅、有效平均主应力、孔隙比与土体组构(试样制备方法)对剪切模量及阻尼比的影响最为重要。

Hardin 和 Drenvich^[3] 提出砂土剪应力与剪应变关系呈近似曲线, 当应变增加时则应力-应变曲线斜率变小, 即剪切模量会随着应变振幅的增加而减少。在阻尼比方面根据 Hall 与 Richart^[4] 针对颗粒性土壤弹性波能量消散之研究指出, 干渥太华砂之阻尼比随剪应变之增加而增加。当剪应变介于 $10^{-3}\%$ ~ $10^{-2}\%$ 时, 阻尼比之变化非常小(小于 2%), 而当剪应变大于 $10^{-2}\%$ 时, 阻尼比增加的幅度则有增加之趋势。Seed 和 Idriss^[5] 就剪切模量与围压的关系发展出以下之关系式, 由方程式显示剪切模量会随着平均主应力的增加而增加。

$$G = 1000 \cdot K_2 \cdot (\sigma'_m)^{0.5} \quad (1)$$

式中 σ'_m 为平均有效主应力, 单位 psf; K_2 为决定砂土孔隙比及剪应变的参数。

Hardin 和 Richart^[2] 提出对砂性土壤而言, 当剪应变低于 $10^{-3}\%$ 时剪切模量会趋于一最大值, 其值仅与围压及孔隙比有关, 关系式如下所示:

$$G_{\max} = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_m)^n \quad (2)$$

$$\text{式中 } F(e) = \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \quad (\text{对角状颗粒砂}) \quad (3)$$

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \quad (\text{对圆形颗粒砂}) \quad (4)$$

A 与 n 皆为常数, 分别代表垂直截距及斜率, 且与剪应变大小有关。

同时 Hall 与 Richart^[4] 由试验研究发现, 阻尼比大致上随围压之增加而降低, 但亦可能随围压之增加而增加。Iwasaki 和 Tatuoka^[6] 根据多种不同的干净砂之试验结果归纳出剪切模量之最大值, 以下式表示:

$$G_{\max} = 900 \cdot F(e) \cdot (\sigma'_m)^{0.4} \quad (5)$$

由以上经验公式可知剪切模量会随着平均主应力的增加而增加。同时以往学者研究可得知 $G_{\max}$ 与有效平均主应力的幂次有关系, 当应变振幅由零或很小时变化至大应变, 其次幂由 0.5 递增至 1.0。而孔隙比对 $G_{\max}$ 的影响为当孔隙比增加时 $G_{\max}$ 会随之下降。

就固结应力比而言, 常以固结应力比来表示($K = \sigma_1/\sigma_3$, 其中, σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力)。Peiji 与 Richart^[7] 采用渥太华干砂, 以不同之固结应力比(K)施加于试体上, 进行非等向压密, 于试体压密完成后利用共振柱进行共振柱试验。由试验结果得知, 固结应力比增加时, 其剪切模量有下降之趋势, 但固结

应力比小于 2.5~3.0 时, 固结应力比对剪切模量之影响小于 10%。陈尧中等人(1991)^[8] 就台北粉土质细砂, 进行非等向压密共振柱试验结果指出, 在同一平均有效围压下, 最大剪切模量随超压密比之增加而增加。另当一化剪切模量随应力比之增加而降低。当应力比小于 2 时, 当一化剪切模量之减少并不明显, 而当应力比 $K=3$ 时, 当一化剪切模量值约降低 12%。但 Peiji 与 Richart 仅就渥太华干砂进行试验, 并无考虑细料含量。而陈尧中等人仅就低细料含量(2%, 10%)之台北粉土质细砂, 进行非等向压密共振柱试验。因此是否能有效评估含非塑性细料回填土壤, 于初始剪应力作用下之动态特性, 仍有待进一步之研究。

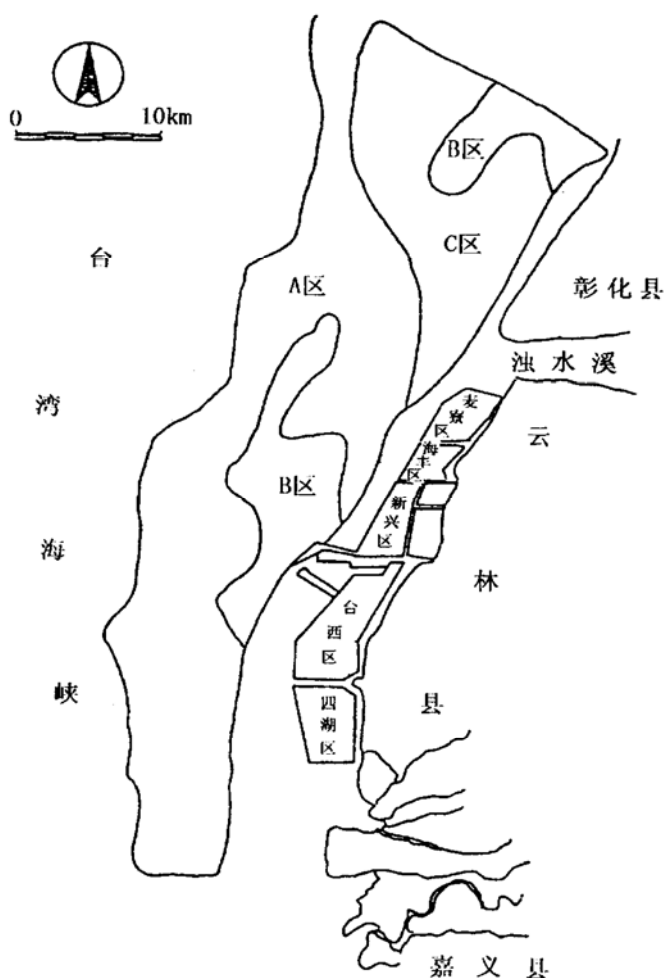


图1 云林外海料源区位置示意图

Fig. 1 Location of soil samples

3 试验砂样·仪器及方法

本研究所采用之试验土样为云林离岛工业区土样, 因外海砂源 A, B 两区(震动取样分区示意图如图 1)之土样基本性质相近^[9], 故将两区土样混合烘干、过筛, 将大于 #200 筛之干净土样作为试验土样; 依据原位振动取样土壤一般物理性质之资料, 砂土颗粒形状为次角形。粒径及土壤一般物理性质如表 1 所示。

本研究所采用的共振柱试验系统,系日本 Seiken Inc. 公司所制造的共振柱三轴试验设备(resonant column triaxial test apparatus model DTC-158),此设备主要可分为气压控制系统,振荡控制系统,量测采集系统及共振柱三轴室四大部分,设备示意图如图2所示。

表1 回填土壤之基本物理性质

Table 1 Physical properties of soil samples

比重 G_s	2.691
最大干密度 $\gamma_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	1.59
最小干密度 $\gamma_{dmin}/(g \cdot cm^{-3})$	1.199
平均颗粒粒径 D_{50}/mm	0.1643
D_{60}/mm	0.1688
D_{30}/mm	0.1384
D_{10}/mm	0.100
均匀系数 C_u	1.688
曲率系数 C_d	1.347

3.2 试样制备方法

本研究主要利用传统湿捣法(moist tamping, 简称 MT)为主,准备不同相对密度(40%, 60%, 80%)之试体进行共振柱试验,详细试样制备步骤请参考文献[10]。

3.3 试验内容

利用 Seiken 发展的共振柱系统下进行共振柱试验,探讨影响回填土壤动态特性的因素(包括:相对密度,有效围压,剪应变振幅及固结应力比 K)。考虑回填土壤厚度一般为 10~15 m,将试体依次以不同围压(98, 147, 196kPa)进行多阶式压密,并于各阶段之不同固结应力比(1, 1.5, 2, 2.5, 3)压密完成后进行共振柱试验,以评估非等向压密所引致之初始剪应力对回填土壤动态特性之影响。本研究考量回填土壤一般回填

厚度,于试体施加有效围压后,施加非阶段性初始静态剪应力,以评估非等向压密所引致之初始剪应力对回填土壤动态特性之影响。最后进行共振柱试验以探讨固结应力比所引致之初始剪应力对回填土壤动态特性之影响。

4 试验结果分析及讨论

4.1 回填土壤初始剪应力与固结应力比之定义

回填土壤于自然边坡,波浪作用与上部结构物荷重之作用下,都可能形成原位土壤之非等向压密条件,而并非无初始静态剪应力(initial static shear stress)存在。一般土壤在结构物荷重作用下,除了远离结构物之土壤及位于结构物对称轴正下方之土壤外,其余之土壤皆或多或少存有初始静态剪应力。一般现场土壤固结应力比(consolidation stress ratio, K)将因斜坡之角度及土单元所在之位置而不同,其值大约介于 1.5 至 2.5 之间^[11],故本研究拟采用之固结应力比为 1, 1.5, 2, 2.5, 3。以下就初始剪应力与固结应力比之定义作一说明。

土单元于初始剪应力作用下,考虑沿假设断面($\alpha = 45^\circ$)上之初始剪应力,则初始剪应力(τ_s)可定义为所施加轴差应力的 1/2

$$\tau_s = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_m}{2} = \frac{\Delta\sigma_d}{2} \quad (6)$$

式中 τ_s 为初始剪应力; σ'_1 为有效轴向应力; σ'_m 为平均有效围压应力; $\Delta\sigma_d$ 为轴差应力。

而固结应力比(K)定义为有效轴向应力(σ'_1)与平均有效围压应力(σ'_m)之比值。由式(6)即可求得初始剪应力 τ_s 与固结应力比(K)之关系式如下所示:

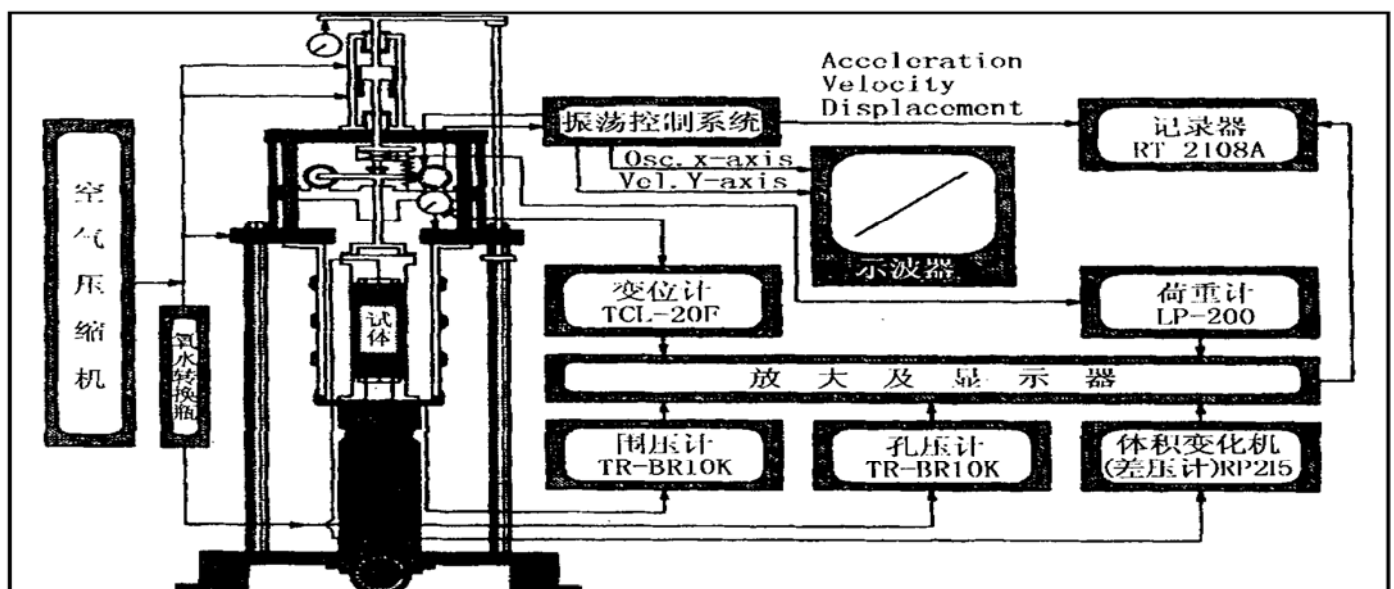


图2 共振柱三轴试验仪示意图

Fig. 2 Sketch of resonant column test system

$$\tau_s = \frac{\sigma'_m(K-1)}{2} \quad (7)$$

由式(7)可知, 当固结应力比 $K=1$ 之情况下, 土壤承受等向压密应力, 即土壤不含初始剪应力; 而当固结应力比 $K \neq 1$ 时, 则土壤则处于非等向压密应力情况下, 土壤将承受一初始静态剪应力。

4.2 孔隙比与有效围压对最大剪切模量之影响

回填土壤共振柱试验典型结果示意图如图3所示。由剪切模量与剪应变关系曲线中得知, 回填土壤之剪切模量随所施加固结应力比之增加而有增加趋势。另由试验结果得知, 回填土壤相对密度亦随固结应力比与有效围压之增加而有增加趋势, 即孔隙比相对减少, 如图4所示。因孔隙比减少亦会导致剪切模量增加, 此乃因为孔隙比减少时, 土壤颗粒间之接触面积将随之增大, 更有利于应力波之传递, 故导致回填土壤剪切模量有增加之趋势。为了解回填土壤在不同固结应力比与有效围压作用下, 所产生之孔隙变化对剪切模量之贡献, 本研究采用 Hardin 与 Richart^[2] 所提出之砂性土壤最大剪切模量分析模式为基础(如式(2)~式(4)所示), 以进一步评估比较其影响。

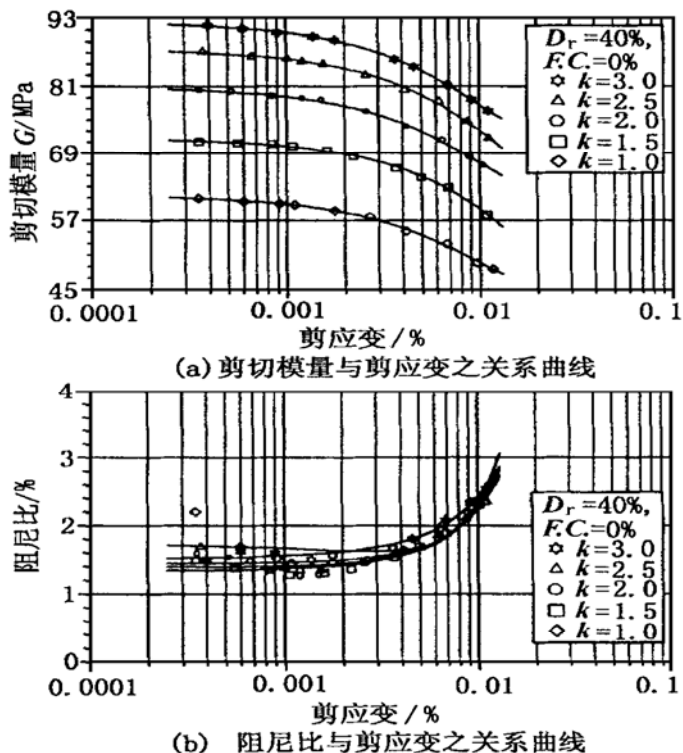


图3 典型云林外海土壤共振柱试验结果(剪切模量和阻尼比)

Fig. 3 Typical test results of resonant column test

云林外海回填土壤由电子显微照像分析^[10], 得知其砂土颗粒形状为次角形, 故 $F(e)$ 采用式(3)。利用 $F(e)$ 可将回填土壤孔隙比 $G_{\max}$ 之贡献纳入考量, 进而了解孔隙比与平均有效围压对 $G_{\max}$ 之影响。

本研究首先采用不同平均有效围压与不同相对密

度之干净砂(不含细料者), 于等向压密条件下之共振柱试验资料, 以平均有效围压为 x 轴, $G_{\max}/F(e)$ 为 y 轴, 绘于双对数坐标系统下, 如图5所示。经由线性回归统计分析整理计算, 可得最大剪切模量与平均有效围压之关系。同时可推求得式(2)中之参数 A 及 n , 分别为 87.296 及 0.553。经由以上之分析, 云林外海料源区回填土壤之最大剪切模量可表示为:

$$G_{\max} = 87.296 \cdot F(e) \cdot (\sigma'_m)^{0.553} \quad (8)$$

式中 $G_{\max}$ 为回填土壤最大剪切模量, 单位 MPa; σ'_m 为平均有效围压, 单位 MPa。

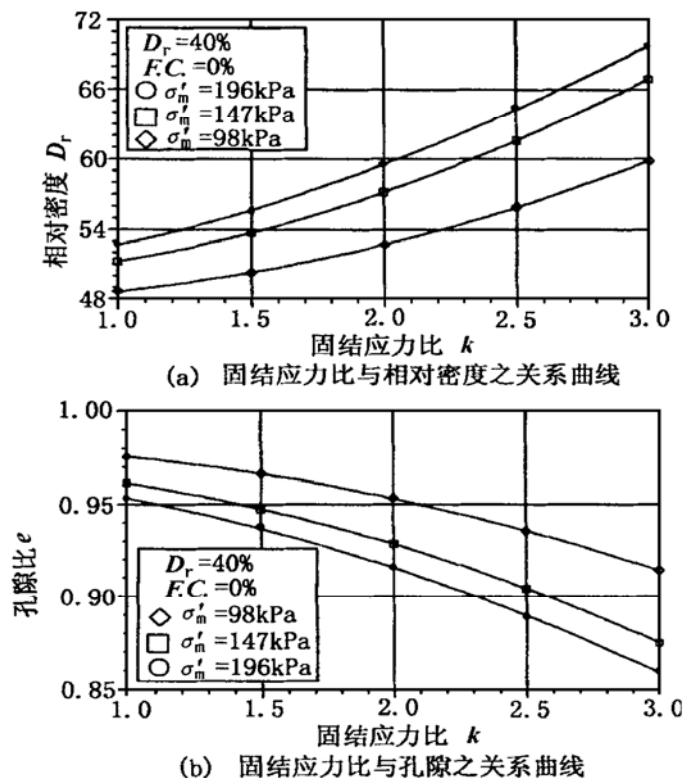


图4 典型云林外海土壤共振柱试验结果(相对密度和孔隙比)

Fig. 4 Typical test results of resonant column test

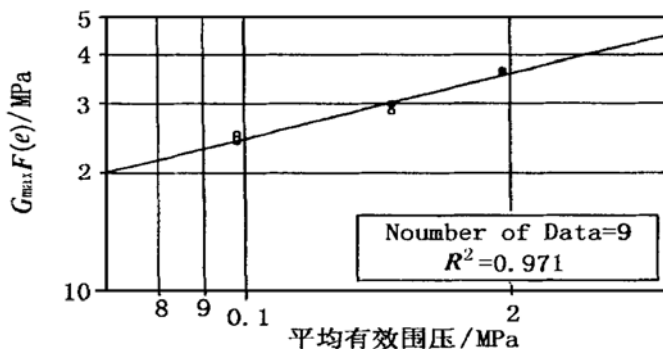


图5 回填土壤 $G_{\max}/F(e)$ 与有效围压之关系曲线

Fig. 5 Relation between $G_{\max}/F(e)$ and mean effective confining pressure of reclaimed soil

另本研究考虑回填土壤非等向压密($K=1.5, 2, 2.5, 3$)之情况, 将非等向压密条件下之试验条件代入式(8), 并将模式估计值与试验值作一比较后发现: 云

林外海料源区回填土壤 $G_{\max}$ 之表示式(即式(8)), 并无法适度表示于初始剪应力作用下云林外海料源区土壤之最大剪切模量值(由试验所得), 且不同相对密度与不同平均有效围压下, 试验值与计算值之间都相当大的差异性, 且 K 值越大其差异性越显著, 如图 6 所示。欲了解此一差异性, 本研究针对非等向压密应力本身对最大剪切模量之影响, 于下节作进一步之评估探讨。

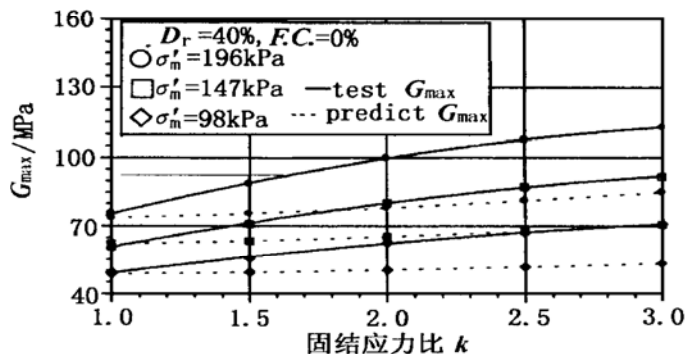


图 6 等向压密回填土壤 $G_{\max}$ 预测值(式(8))与试验值之比较关系图($D_r = 40\%$)

Fig. 6 Relation between predicted and tested $G_{\max}$ of reclaimed soil ($D_r = 40\%$)

4.3 固结应力比对最大剪切模量之影响

本研究利用式(8)计算所得之模式估计值与试验值间之比较分析发现, 其差异值随固结应力比之增加而增大, 但考虑同一固结应力比、不同相对密度条件时, 其间之差异值皆位于试验容许误差范围($\pm 2\%$)内, 且具有良好之相关性存在, 故可视为在初始剪应力下回填土壤 $G_{\max}$ 不受不同相对密度(孔隙比)之影响, 如图 7 所示。产生此增量之可能原因为试体于非等轴差应力与有效围压作用下, 使土壤颗粒长轴有较一致之排列方式(一般在外力作用下, 颗粒长轴指向趋于垂直作用力方向), 更利于剪力波之传递。

本研究为便于分析比较, 将此增量定义为 $\Delta G_{\max(s)}$ 。由图 7 知, $\Delta G_{\max(s)}$ 随固结应力比之增加而增加, 在不同平均有效围压应力下, 最大剪切模量增量 $\Delta G_{\max(s)}$ 与固结应力比(K)有良好关系存在, 如下列各式所示:

$$\Delta G_{\max(s)} (\sigma'_m = 98 \text{ kPa}) = -3.749 \cdot K^2 + 23.696 \cdot K - 20.073 \quad (9)$$

$$\Delta G_{\max(s)} (\sigma'_m = 147 \text{ kPa}) = -4.856 \cdot K^2 + 31.147 \cdot K - 26.459 \quad (10)$$

$$\Delta G_{\max(s)} (\sigma'_m = 196 \text{ kPa}) = -5.657 \cdot K^2 + 36.147 \cdot K - 30.610 \quad (11)$$

当固结应力比(K)大于 3.0 时, $\Delta G_{\max(s)}$ 有趋向某一定值之趋势。本研究在此定义固结应力比 $K = 3$

时, 最大剪切模量因颗粒组构变化所产生之增量极值为 $\Delta G_{\max(s)u}$, 且此一定值随有效围压之增加而增加。本研究将各阶段最大剪切模量增量以 $\Delta G_{\max(s)u}$ 进行当一化, 如图 8 所示。不同平均有效围压下所产生之不同最大剪切模量增量经当一化后, 有相当好的一致性。则非等向压密下回填土壤之最大剪切模量 $G_{\max}^*$

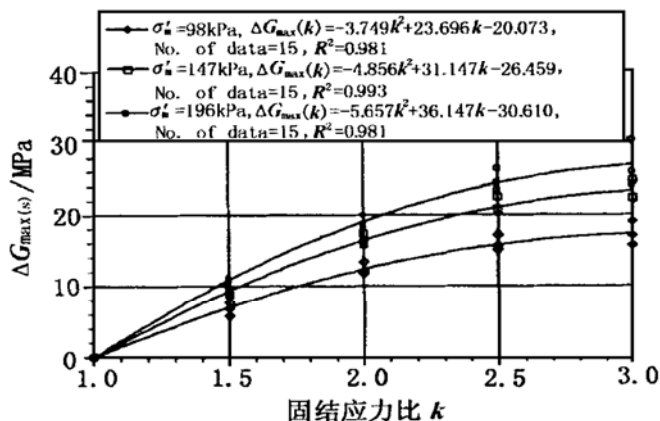


图 7 回填土壤最大剪切模量增量与固结应力比之关系曲线

Fig. 7 Relation between consolidation stress ratio and increment of maximum shear modulus

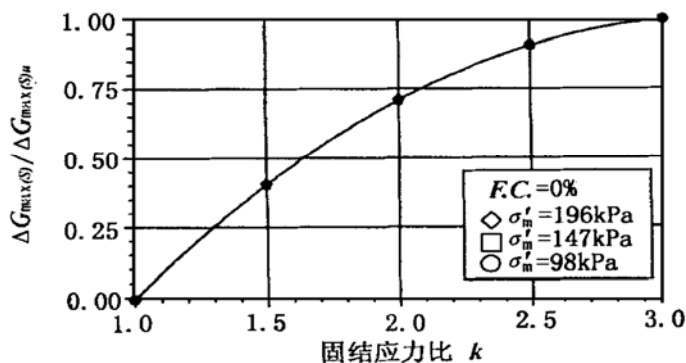


图 8 回填土壤最大剪切模量增量当一化后与固结应力比之关系曲线

Fig. 8 Relation between normalized increment of maximum shear modulus and consolidation stress ratio

可表示为

$$G_{\max}^* = G_{\max} + \Delta G_{\max(s)} \quad (12)$$

利用上式, 则 $\Delta G_{\max(s)}$ 可表示为

$$\Delta G_{\max(s)} = G_{\max}^* - G_{\max} \quad (13)$$

经线性回归统计分析, 于不同有效围压与固结应力比作用下, 回填土壤最大剪切模量增量关系式可表示为

$$\Delta G_{\max(s)} = \Delta G_{\max(s)u} \cdot (-0.212K^2 + 1.351K - 1.145) \quad (14)$$

$$\Delta G_{\max(s)u} = -491.292 \cdot (\sigma'_m)^2 + 242.895 \cdot \sigma'_m - 1.826 \quad (15)$$

式中 $\Delta G_{\max(s)}$ 为颗粒组构不同所产生之最大剪切模

量增量(MPa); $\Delta G_{\max(s)u}$ 为最大剪切模量增量之极值(MPa); K 为固结应力比(1~3); σ'_m 为有效围压(0.0981~0.1962)(MPa)。

综合上述之分析评估, 本研究考虑非等向压密作用之影响, 原式(8)云林外海料源区回填土壤之最大剪切模量预估公式, 结合式(14)可进一步修正为

$$G_{\max}^* = 87.296 \cdot F(e) \cdot (\sigma'_m)^{0.553} + \Delta G_{\max(s)} \quad (16)$$

针对试验值与估计值之比较中发现, 如图9所示。式(16)可适当预估外海料源回填土壤之最大剪切模量。故由以上分析过程得知, 云林外海料源区回填土壤于非等向压密应力所引致之初始剪应力作用下, 对最大剪切模量有相当程度之影响。利用本研究所建立之关系式(式(16)), 可适当预估不同固结应力比、不同深度与相对密度(孔隙比)下, 干净之外海料源区回填土壤最大剪切模量 $G_{\max}^*$, 可进一步提供回填造地及海岸结构物规划设计之参考。

另本研究为深入了解于不同有效围压及非等向压密应力作用下, 因孔隙比与不同压密应力作用引致颗粒组构改变对最大剪切模量之贡献, 利用式(8)计算出不同有效围压与不同固结应力比作用下之最大剪切模量; 利用固结应力比 $K=1$ 时所对应之最大剪切模量视为参考比较标准值, 而不同固结应力比($K>1$)作用下之最大剪切模量与比较标准值间之差值则视为孔隙改变对最大剪切模量之贡献。

另利用式(14)计算出不同应力作用下, 因颗粒组构改变所造成之最大剪切模量增量 $\Delta G_{\max(s)}$ 。将以上之增量分别与参考最大剪切模量作一比较, 并计算出各增量之百分比, 藉以了解云林外海料源区回填土壤因孔隙比与颗粒组构改变对最大剪切模量之贡献及其贡献比例大小, 其计算公式与结果如表2所示。由表3分析可得知

(1) 在不同压密应力(有效围压、非等向压密应力)作用下, 回填土壤最大剪切模量增量百分比随压密应力之增加而增加, 其原因可能是是于较大之压密应力作用下, 孔隙比之变化较为明显, 且颗粒排列方式有较佳之异向性, 这两项因素皆有利于剪切波传递之故。

(2) 于不同之初始相对密度下, 最大剪切模量增量百分比随初始相对密度之增加而减少, 可能因较大之初始相对密度于相同应力条件作用下所造成之孔隙变化与颗粒组构调整较不明显, 尤其是孔隙变化对最大剪切模量影响此项因素, 其间之差异十分明显。

(3) 将两影响条件所造成之增量百分比作一比较后发现, 因颗粒组构调整所产生之增量百分比皆大于孔隙变化所产生之增量百分比, 且前者的为后者之2~19倍(分别发生于 $D_r=40\%$, $K=3.0$ 与 $D_r=80\%$,

$K=1.5$)。故Hardin与Richart所提出之砂性土壤最大剪切模量分析模式, 可适用于等向压密下回填土壤最大剪切模量之评估。但于非等向压密条件下, 则需利用本研究所建议之方式加以调整, 否则将造成评估上相当大之误差量。

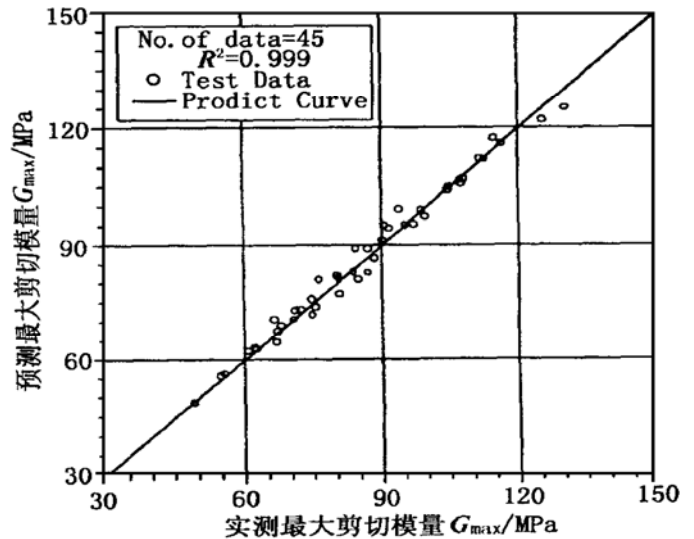


图9 本研究所建议 $G_{\max}$ 修正预测值(式(19))与实测值之比较

Fig. 9 Relation between predicted (Eq. (19)) and tested $G_{\max}$ of reclaimed soil

4.4 初始剪应力对最大剪切模量之影响

为了解初始剪应力对回填土壤最大剪切模量之影响, 本研究初始剪应力比(initial shear stress ratio, SR_i)定义为初始剪应力(τ_s)与有效围压应力(σ'_m)之比值, 以探讨初始应力作用对回填土壤最大剪切模量之影响, 利用前节所导出初始应力与固结应力比之关系式, 即可得到初始剪应力比(SR_i)与固结应力比(K)之间的关系, 如下式所示:

$$SR_i = \frac{K-1}{2} \quad (17)$$

将式(17)代入式(14), 即可得到于初始剪应力作用下, 回填土壤最大剪切模量之增量 $\Delta G_{\max(s)}$ 关系式为

$$\Delta G_{\max(s)} = \Delta G_{\max(s)u} \cdot [-0.848 \cdot (SR_i)^2 + 1.854 \cdot SR_i - 0.004] \quad (18)$$

故云林外海料源区回填土壤含初始剪应力之最大剪切模量值 $G_{\max}^*$, 可以进一步改变为

$$G_{\max}^* = 87.296 \cdot F(e) \cdot (\sigma'_m)^{0.553} + \Delta G_{\max(s)} \quad (19)$$

5 结 论

(1) 不同相对密度、不同有效围压应力与不同固结应力比条件下之回填土壤, 其剪切模量均随剪应变振幅之增加而减少。

表 2 不同剪应力作用下回填土壤最大剪切模量增量百分比

Table 2 Increment of $G_{\max}$ under different stress condition

有效围 压应力 /MPa	固结应 力比 K	最大剪切模量增量百分比/% ^①								
		孔隙比不同			颗粒组构不同			总 增 量		
		$D_r=40\%$	60	80	40	60	80	40	60	80
0.098	$K=1.0$	0.21	0.19	0.16	-0.21	-0.19	-0.16	0.00	0.00	0.00
	$K=1.5$	1.59	1.02	0.56	14.39	12.58	10.85	15.98	13.60	11.41
	$K=2.0$	3.67	2.12	0.98	25.22	22.04	19.02	28.89	24.16	20.01
	$K=2.5$	6.49	3.48	1.39	32.28	28.22	24.35	38.77	31.70	25.73
	$K=3.0$	9.95	5.24	1.75	35.57	31.09	26.83	45.52	36.33	28.58
0.147	$K=1.0$	0.22	0.20	0.17	-0.22	-0.20	-0.17	0.00	0.00	0.00
	$K=1.5$	2.32	1.32	0.75	15.16	13.34	11.60	17.48	14.66	12.36
	$K=2.0$	5.29	2.85	1.39	26.58	23.39	20.34	31.87	26.24	21.73
	$K=2.5$	9.21	4.82	2.09	34.02	29.94	26.03	43.23	34.76	28.12
	$K=3.0$	14.08	7.35	2.83	37.49	32.99	28.69	51.57	40.34	31.52
0.196	$K=1.0$	0.22	0.19	0.17	-0.22	-0.19	-0.17	0.00	0.00	0.00
	$K=1.5$	2.58	1.51	0.72	14.77	13.12	11.42	17.35	14.63	12.14
	$K=2.0$	6.01	3.32	1.40	25.89	22.99	20.01	31.90	26.32	21.41
	$K=2.5$	10.37	5.66	2.19	33.14	29.43	25.62	43.50	35.09	27.80
	$K=3.0$	15.31	8.72	3.07	36.51	32.43	28.23	51.83	41.15	31.29

①增量百分比(%)= $\frac{\text{变化增量} \times 100}{\text{参考值}}$ (%)

(2) 回填土壤之剪切模量与最大剪切模量($G_{\max}$)随有效围压与固结应力比之增加而增加, 且其增量($\Delta G_{\max(s)}$)并不因初始相对密度之不同而有明显之改变。另固结应力比对阻尼比之影响则较不明显。

(3) 回填土壤之剪切模量与最大剪应力模数($G_{\max}$)皆随初始剪应力之增加而增加, 且不同初始相对密度之回填土壤亦有相同之趋势。另初始剪应力对阻尼比之影响则较不明显。

(4) 本研究利用固结应力比 $K=1$ 之最大剪切模量为参考比较标准值, 分别计算出不同固结应力比($K>1$)作用下之最大剪切模量增量百分比。将增量百分比作一比较后发现, 因颗粒组构调整所产生之增量百分比皆大于孔隙变化所产生之增量百分比, 且前者约为后者之 2~19 倍。

(5) 本研究利用传统湿捣法准备不同初始条件之试体, 于不同压密应力状态下进行一系列共振柱试验。经试验分析已成功建立云林外海料源区回填土壤于非等向压密下之最大剪切模量评估公式。与不同剪应变振幅作用下所对应之剪切模量预估值, 以供填海造地回填区或振动式基础结构物规划设计参考。

参 考 文 献

1 Sladen J A, Hewitt K J. Influence of placement method on the in site density of hydraulic sand fills. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(3): 453~ 466

2 Hardin B O, Richart F E. Elastic wave velocities in granular soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1963. 89(SM11): 603~ 624

3 Hardin B O, Drenvich V P. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(SM7): 603~ 624

4 Hall R T, Richart F E. Dissipation of elastic wave energy in granular soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, 89(SM6): 27~ 56

5 Seed H B, Idriss I M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report No. EERC 70- 10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley 1970

6 Iwasaki T, Tatsuoka F. Effect of grain size and grading on dynamic shear modulus of sands. Soils and Foundations, 1977, 17(3): 19~ 35

7 Peiji Yu, Richart F E. Stress ratio effects on shear modulus of dry sand. J Geotech Eng Div, ASCE, 1984, 110(3): 332~ 345

8 陈尧中, 赖颖芳. 非均向压密下砂土之最大剪切模量与液化阻抗之关系. 中国土木水利工程学刊, 1995, 7(2): 143~ 150

9 财团法人中兴工程顾问社. 云林离岛式基础工业区开发计划抽砂造地规划- 外海砂源调查报告, 1992

10 简连贵. 台湾西部外海抽砂回填土壤动态特性之研究. 国科会专题研究报告, 1994

11 李建中, 简连贵, 郑清江. 含初始剪应力之砂质土壤动态变形特性之研究. 中国土木水利工程学刊, 1991, 3(4): 309~ 319