

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.001

金塘海峡海洋土动剪切模量与阻尼比特性研究*

陈国兴^{1,2}, 杨文保¹, 岳文泽¹, 秦悠¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏 南京 210009)

摘要: 为探究金塘海峡各类海洋土的动剪切模量 G 与阻尼比 λ 特征, 对金塘海峡四个钻孔不同埋深的各类原状海洋土进行了系列室内共振柱试验, 试验结果表明: (1) 各类海洋土均呈现出“低剪切模量, 高阻尼比”的强非线性与滞后特性; 各类海洋土的最大动剪切模量 G_{\max} 均随埋深的增加而增大, 且粉质黏土、粉土、粉质黏土混粉砂、粉砂的 G_{\max} 随埋深的增长速率依次减慢。(2) 随着埋深的增加, 各类海洋土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线移向右上侧, 非线性特性减弱; 相反, $\lambda - \gamma$ 曲线移向右下侧, 土体的滞后性减弱。(3) 给出了金塘海峡各类海洋土 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线随埋深变化的参数值。

关键词: 海洋原状土; 动剪切模量; 阻尼比; 非线性; 滞后性; 埋深

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0001-08

Experimental Studies on the Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio Characteristics of Marine Soils in the Jintang Strait

CHEN Guoxing^{1,2}, YANG Wenbao¹, YUE Wenzhe¹, QIN You¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of dynamic shear modulus G and damping ratio λ for various marine soils in the Jintang Strait, a series of resonant column tests were carried out on various undisturbed marine soils with different depth from four sampling boreholes in the Jintang Strait. The test results show that: (1) various marine soils exhibit strong nonlinearity and hysteresis characterized by “low shear modulus and high damping ratio”; the maximum dynamic shear modulus G_{\max} for various marine soils increases with increasing depth, and the increasing rate of G_{\max} with soil depth decreases following the sequence of silty clay, silt, silty clay mixed silty sand and silty sand. (2) with increasing depth, the $G/G_{\max} - \gamma$ curves of various marine soils shift towards the upper right characterized by low nonlinearity, while the $\lambda - \gamma$ curves move downward and rightward characterized by decreasing hysteresis. (3) parameters of $G/G_{\max} - \gamma$ and $\lambda - \gamma$ curves of various marine soils with depth in the Jintang Strait are presented.

Keywords: undisturbed marine soils; dynamic shear modulus; damping ratio; nonlinearity; hysteresis; soil depth

* 收稿日期: 2019-12-09; 修回日期: 2020-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1500403)资助

作者简介: 陈国兴(1963-), 男, 教授, 博士。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。Email: gxc6307@163.com

引言

随着我国海洋经济的进一步发展,海域场地重大工程建设开始步入高潮。但我国海域及滨海地区特别是邻近板块俯冲带区域的地质构造活动非常活跃,如渤海、台湾海峡、南海、黄海、东海历史上均发生过地震,其中,渤海海域及周边地区就曾发生多次7~8级地震,因而海洋工程结构的地震安全问题不容忽视。位于杭州湾南部海域的金塘海峡,作为宁波港通往舟山及舟山群岛西部的主航道,一直是联结杭州湾城市群交通和对外经贸往来的重要海上通道。金塘海峡作为宁波—舟山港的出海口,随着自由贸易港区的建设,金塘海峡将是宁波—舟山港对外经济贸易的重要出海贸易航道;同时,金塘海峡作为宁波、舟山通往上海港的海上通道,相比陆运,拥有更大体量的交通承载能力;正在筹建的甬舟铁路金塘海底隧道是国内设计长度最长、承受水压最大的水下盾构隧道。

我国海域作为地震频发区域,渤海和台湾海峡、南海北部的地震活动性相对最强,其它海域也均发生过多起破坏性地震。金塘海峡隧道工程场址地震效应的研究区域(不小于工程场址外围150 km)位于长江下游—南黄海地震带。研究区域有史料记载以来发生 $M \geq 4.7$ 级地震30次,其中5.0~6.0级地震14次,6.0~7.0级地震3次,近期最大地震为1505年10月19日南黄海 $6\frac{3}{4}$ 级地震及1996年11月9日长江口以东海域6.1级地震。

最大剪切模量 G_{\max} (剪切波速 V_s)、动剪切模量比 G/G_{\max} 和阻尼比 λ 与剪应变幅值 γ 的关系曲线是工程场地地震效应评价的最基本参数。国外学者已开展了海洋土动剪切模量 G 与阻尼比 λ 特性的系列研究^[1-4],但迄今国内关于海洋土的 G 与 λ 特性的试验研究多局限于渤海与南海的局部海域^[5-6]。为进一步丰富我国海洋土的 G 与 λ 特性研究,本文结合甬舟铁路金塘海峡海底隧道建设,对金塘海峡100 m以浅的海洋土进行系列共振柱试验,分析了剪应变、埋深对各类海洋土 G 与 λ 的影响,研究了海洋土非线性与滞后性随埋深的变化规律,并提出不同埋深时金塘海峡海洋土的 $G/G_{\max}-\gamma$ 曲线预测方程和 $\lambda-\gamma$ 曲线参数推荐值,为金塘海峡海洋工程抗震设防提供基础性科学资料。

1 试样与试验方案

1.1 海洋原状土钻探取样与基本物理指标

根据现场勘探资料显示,金塘海峡属海洋地貌,海底泥面标高最低约-40 m,海底地形较为平坦,两岸多为剥蚀丘陵,冲海积平原从岸边向主航道缓慢倾斜,最大水深约40 m,海底泥砂基本处于冲淤平衡状态。

为探究金塘海峡各类海洋土的 G 与 λ 特性。通过敞口薄壁取土器提取四个钻孔自地表至基岩深度范围内原状海洋土,各钻孔位置如图1所示,取样钻孔剖面与其现场剪切波速 V_s 剖面如图2所示。根据现场钻探编录及对土样物理性质的室内试验测定,海洋土的土类划分为粉质黏土、粉土、粉砂、以及粉质黏土混粉砂,各类海洋土基本的物理性质见表1。

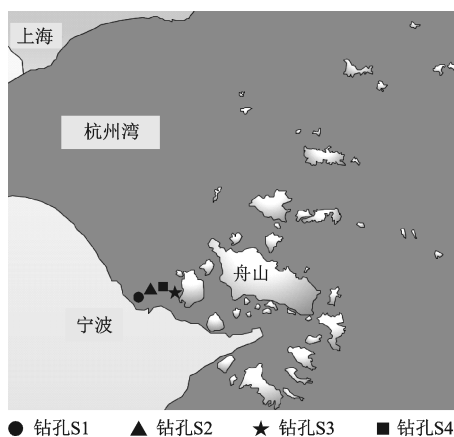


图1 取样钻孔的地理位置

Fig.1 Geographical location of the sampling boreholes

1.2 现场原位剪切波速测试

现场波速 V_s 测试通过XG-I型悬挂式波速测井系统完成。海上钻探平台测波速时,将悬挂式探头(振源和检波器)放入钻孔中,探头自动贴壁,孔中泥浆液作为震源、检波器与井壁的耦合介质;平台台面控制系统控制震源激发信号,产生沿井壁地层传播的S波,两组相距1 m的检波器接收S波信号,并将S波的初至时间和振动波形转换成电信号。测试自下而上逐点进行,间隔1.0 m。图2给出了金塘海峡的取样钻孔剖面及其现场剪切波速 V_s 测试结果。

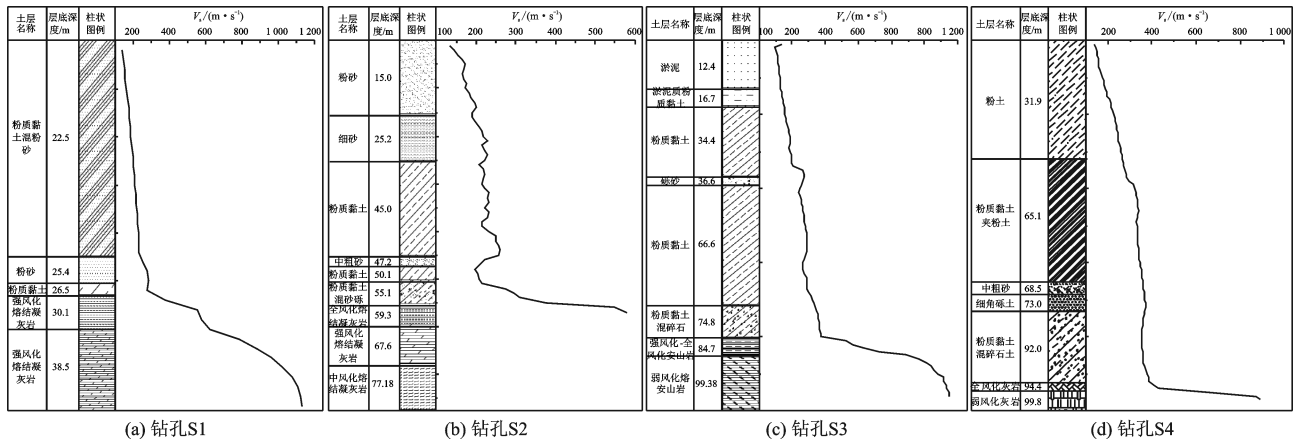


图2 金塘海峡取样钻孔剖面和剪切波速剖面 V_s

Fig.2 Sampling borehole stratigraphic structures and shear wave velocity V_s profiles in the Jintang Strait

表1 金塘海峡海洋土的基本物理性质及试验工况

Table 1 Basic physical properties and experimental conditions of marine soils in the Jintang Strait

试验编号	钻孔	埋深 H/m	土类	有效围压 σ'_m	含水率 $w/\%$	比重 G_s	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	土样状态	塑性指数 I_p
A1~A12	S3	18.3~18.5	粉质黏土	123	38.73	2.68	1.81	软塑	15.52
		23.3~23.5	粉质黏土	156	36.57	2.67	1.94	软塑	15.64
		28.3~28.5	粉质黏土	190	36.17	2.70	1.97	可塑	14.37
		33.3~33.5	粉质黏土	233	28.33	2.67	2.06	可塑	15.07
		40.8~41.0	粉质黏土	273	32.10	2.71	2.07	可塑	16.57
		48.3~48.5	粉质黏土	323	33.05	2.70	2.07	可塑	14.76
		53.3~53.5	粉质黏土	356	30.17	2.69	2.04	可塑	13.35
		58.3~58.5	粉质黏土	390	29.87	2.70	2.06	可塑	14.76
		63.3~63.5	粉质黏土	423	29.97	2.70	2.06	可塑	15.97
B1~B12	S3/S4	5.5~5.7	粉土	37	33.56	2.67	1.92	稍密	7.98
		10.4~10.6	粉土	70	30.70	2.67	1.93	稍密	8.87
		15.5~15.7	粉土	104	32.61	2.69	1.92	稍密	9.31
		21.0~21.2	粉土	140	31.08	2.68	1.93	稍密	7.98
		26.0~26.2	粉土	174	27.59	2.69	1.99	稍密	9.01
		31.0~31.2	粉土	207	27.14	2.68	1.99	稍密	8.67
		36.1~36.3	粉土	241	26.67	2.67	2.0	中密	8.57
		38.3~38.5	粉土	256	29.95	2.69	1.94	中密	8.93
		41.2~41.4	粉土	275	28.44	2.69	1.98	中密	9.18
		43.3~43.5	粉土	290	27.86	2.68	2.07	中密	8.97
C1~C7	S1/S2/S4	46.7~46.9	粉土	312	29.34	2.69	1.98	密实	7.94
		52.2~52.4	粉土	349	25.67	2.70	2.00	密实	7.59
		8.8~9.0	粉质黏土混粉砂	60	42.57	2.67	1.73	软塑	23.80
		13.8~14.0	粉质黏土混粉砂	93	40.53	2.69	1.76	软塑	25.90
		18.8~19.0	粉质黏土混粉砂	126	41.18	2.68	1.73	软塑	23.40
		44.3~44.5	粉质黏土混粉砂	296	27.56	2.68	1.74	可塑	18.88
		76.8~77.0	粉质黏土混粉砂	512	32.66	2.68	1.76	可塑	13.61
D1~D2	S1/S2	81.7~81.9	粉质黏土混粉砂	545	30.57	2.67	1.78	可塑	11.38
		86.8~87.0	粉质黏土混粉砂	580	31.46	2.68	1.76	可塑	15.67
D1~D2	S1/S2	3.3~3.5	粉砂	23	45.57	2.70	1.73	稍密	3.89
		23.8~24.0	粉砂	160	44.87	2.69	1.75	稍密	3.58

1.3 共振柱试验

共振柱试验通过GCTS公司研制的TSH-100型共振柱仪完成^[7]。试验分为四步:(1)将原状海洋土制成直径(50×100)mm的实心圆柱样。(2)将土样底部固定在仪器底座,顶部与浮动扭转驱动装置以及位移传感器相连接,根据海洋土的埋深,对试样进行均等固结,具体试验工况见表1。(3)待土样平均应变速率小于 $1\times 10^{-5}/\text{min}$ ^[7]时,试样固结完成。(4)利用全自动悬浮驱动系统以分级增加扭转谐波载荷幅值的形式,获取试样在剪应变幅值 $10^{-6}\sim 5\times 10^{-4}$ 的 G 与 λ 结果。

2 试验结果与分析

2.1 动剪切模量 G 与阻尼比 λ

图3给出金塘海峡海洋土的动剪切模量 G 与阻尼比 λ 随应变幅值 γ 变化的试验值。可以看出,金塘海峡各类海洋土均呈现 G 随 γ 增大而衰减、 λ 随 γ 增大而增长的特征。当 $\gamma < 10^{-5}$ 时, G 随 γ 增大而略有衰减、 λ 随 γ 增大而略有增长;随着 γ 的增大($\gamma > 10^{-5}$),呈现出 G 明显衰减、 λ 明显增长的特征;随着 γ 的进一步增大($\gamma > 10^{-4}$),呈现出 G 迅速衰减、 λ 迅速增长的特征。

从图3还可以发现,由于海洋土的特殊海洋沉积环境,无论海洋沉积土埋深的浅与深,金塘海峡各类海洋土均呈现出“低剪切模量、高阻尼比”的强非线性与滞后性特征。同时,相同剪应变幅值 γ 下,

各类海洋土均呈现 G 随埋深增加而明显增大、 λ 随埋深增加而略有减小的特征。但 G 与 λ 随埋深的变化幅度因海洋土类的差异而明显不同。

2.2 最大动剪切模量 G_{\max}

当 $\gamma \leq 10^{-6}$ 时,土体通常处于近似弹性体力学状态,此时, G 通常被称为最大(小应变)动剪切模量 G_{\max} 。依据B.O.Hardin等^[8]提出的双曲线模型,存在关系式 $1/G = a + b\gamma$ 。由于TSH-100型共振柱仪可精准测量小应变水平的 G 值^[7,9],故通过 $1/G$ 与 γ 之间的关系式($\gamma \rightarrow 0$),可得出金塘海峡各类海洋土在不同埋深时的 G_{\max} 值。

另一方面,基于金塘海峡各钻孔现场剪切波速 V_s 的测试结果,通过 G_{\max} 与 V_s 的波动理论公式 $G_{\max} = \rho V_s^2$ 计算出土体的 $G_{\max\text{-field}}$ 值。图4给出了金塘海峡海洋土的现场 $G_{\max\text{-field}}$ 值与室内 G_{\max} 值。可以发现,各类海洋土的现场 $G_{\max\text{-field}}$ 值与室内 G_{\max} 值均随着埋深增大而增长,但在相同土类与埋深下,现场 V_s 计算的 $G_{\max\text{-field}}$ 值大于室内试验测试的 G_{\max} 值。由于海域环境中海床波速 V_s 的测试受波浪、潮汐、洋流、海风等因素的干扰较大,致使波速测试结果往往偏大。由于海域场地钻孔成本昂贵、现场测试环境恶劣,近20年来,在渤海海域油气平台场地地震安全性评价工作中,场地土波速值均采用室内测试值为参考。鉴于当前海域场地原位测试技术的测量准确性有待于进一步改进和验证,对海洋土 G_{\max} (或 V_s)的评价可采用室内试验结果作为依据。

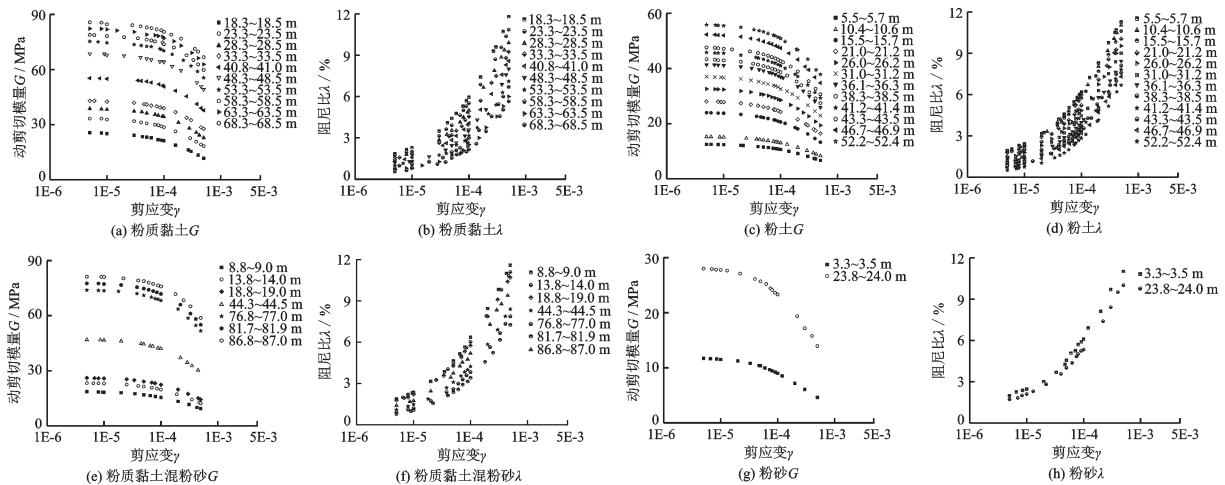


图3 金塘海峡各类海洋土动剪切模量 G 和阻尼比 λ 随剪应变幅值的变化

Fig.3 Variations of dynamic shear modulus G and damping ratio λ with shear strain amplitude γ for various marine soils in the Jintang Strait

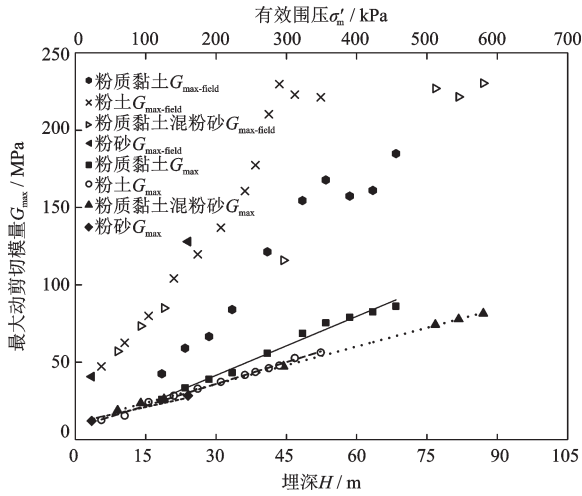


图4 金塘海峡海洋土最大动剪切模量 G_{\max} 随埋深的变化
Fig.4 Variations of the maximum dynamic shear modulus G_{\max} with soil depth for various marine soils in the Jintang Strait

此外,图4给出了金塘海峡海洋土的 G_{\max} 试验值随埋深的变化关系。可以明显看出,各类海洋土的 G_{\max} 与埋深存在显著的相关性, G_{\max} 均随埋深的增大而以一定速率增长,且粉质黏土、粉土、粉质黏土混粉砂、粉砂的 G_{\max} 随埋深增大而增长的速率依次变慢。采用文献[9]提出的原状土 G_{\max} 预测方程对金塘海峡各类海洋土的 G_{\max} 进行拟合分析:

$$G_{\max} = A + n \times 0.1P_a \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right) \quad (1)$$

式中, A 和 n 为拟合参数,具体参数值见表2; σ'_m/P_a 表征土层埋深 H ,对海洋土, H 与 σ'_m 的关系可近似地表示为: $\sigma'_m = H \times 20/3$ kPa; P_a 为标准大气压,取 $1 P_a = 100$ kPa。

表2给出金塘海峡各类海洋土 G_{\max} 随埋深经验关系的具体拟合参数,其中,可决系数 R^2 均大于0.97,这表明以埋深预测海洋土 G_{\max} 的方法是可信的。

表2 金塘海峡海洋土 G_{\max} 与埋深的经验关系拟合参数
Table 2 Fitted parameters of the empirical relationship between G_{\max} and soil depth for various marine soils in the Jintang Strait

土类	A	n	可决系数 R^2
粉质黏土	3.32	1.90	0.985
粉土	7.73	1.41	0.994
粉质黏土混粉砂	11.55	1.21	0.999
粉砂	11.00	1.00	0.974

2.3 海洋土的非线性与滞后性特性

为探究金塘海峡海洋土的非线性特性随埋深的变化特征,将 G 进行归一化处理,利用 G/G_{\max} 表征海洋土的非线性特征。各类海洋土 $G/G_{\max} - \gamma$ 关系曲线采用 Davidenkov 模型^[10]进行拟合分析:

$$\frac{G}{G_{\max}} = 1 - \left[\frac{(\gamma/\gamma_0)^{2\beta}}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2\beta}} \right]^\alpha \quad (2)$$

式中, α, β 为拟合参数; γ_0 为参考剪应变,本文取 $G/G_{\max} = 0.5$ 时的剪应变幅值。

为探究金塘海峡各类海洋土的滞后性特性随埋深的变化特征,采用陈国兴等^[11-12]提出的经验公式拟合不同埋深海洋原状土的 $\lambda - \gamma$ 关系曲线:

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0 (1 - G/G_{\max})^B \quad (3)$$

式中, λ_{\min} 为土的基本阻尼比,与土的类型、固结状态与沉积环境有关; λ_0 和 B 为阻尼比曲线形状系数,与土的类型有关。

图5显示了海洋土试样的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线。可以看出,各类海洋土均呈现出明显的强非线性与滞后性特征:当 $\gamma < 10^{-5}$ 时,随着 γ 的增大, G/G_{\max} 略有衰减, λ 略有增长;当 $\gamma > 10^{-5}$ 时,随着 γ 的增大, G/G_{\max} 迅速衰退并趋于0, λ 迅速增长,直至 $\gamma > 0.1$ 时趋于稳定, λ 达到最大值 λ_{\max} 。

对比金塘海峡各类海洋土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线随埋深的变化关系可知,随着埋深的增加, $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线移向右上方, G/G_{\max} 的衰退梯度减小,这意味着土体的非线性特性减弱;相反, $\lambda - \gamma$ 曲线移向右下方,即 γ 相同时 λ 减小,这意味着土体的滞后性减弱。

由此可知,埋深对金塘海峡海洋土 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 曲线的形状存在明显影响。为建立不同埋深下各类海洋土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线,需研究 Davidenkov 模型的拟合参数 α, β, γ_0 与埋深的相关性关系。发现,同长江口海相土^[9]的试验规律相似,对不同埋深的粉质黏土、粉质黏土混粉砂、粉砂, α 均接近于1, β 接近于0.5,而对于不同埋深的粉土, α 同样接近于1, β 则接近于0.48。这表明,对于金塘海峡各类海洋土,埋深对拟合参数 α 和 β 均无显著影响。

图6给出了金塘海峡各类海洋土的参考剪应变 γ_0 与埋深 H 的关系。由图可知,同长江口海相土^[9]参考剪应变 γ_0 的变化规律相似,金塘海峡各类海洋土的 γ_0 随着埋深 H 的增加呈线性增长趋势,但 γ_0 随埋深 H 的增长速率因土类不同而存在明显的差异,

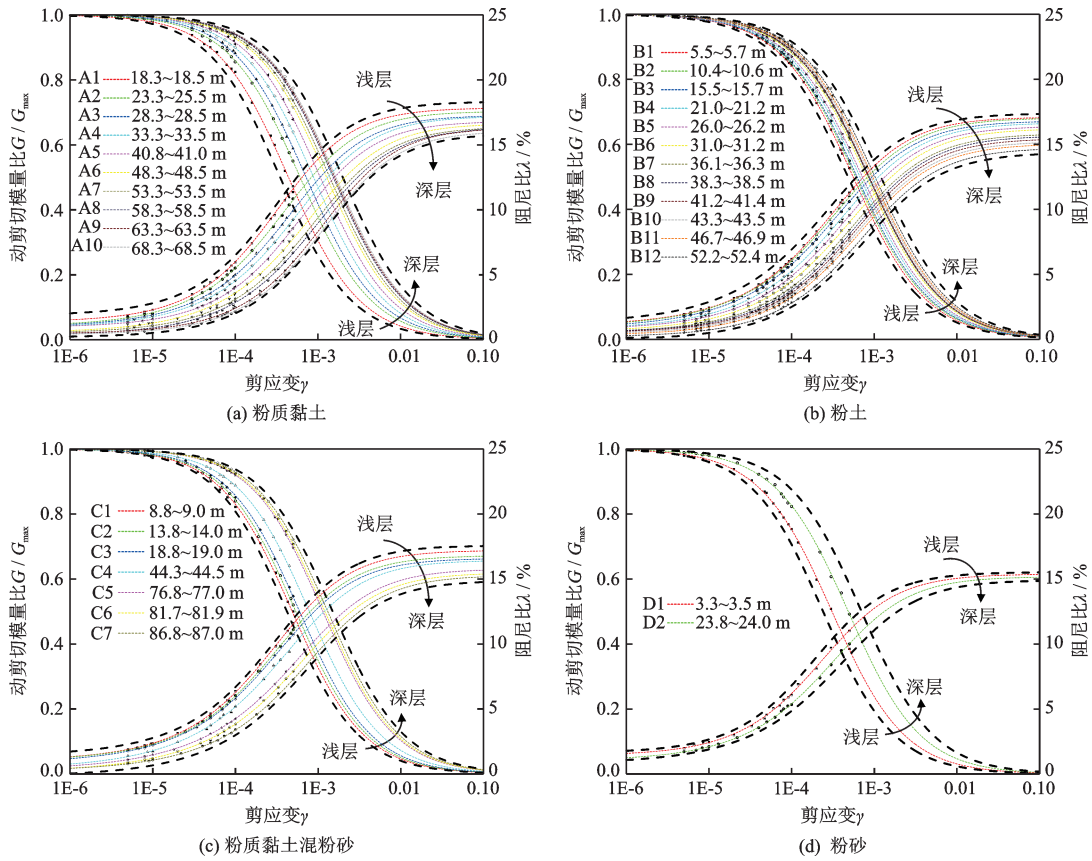


图5 金塘海峡各类海洋土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 关系曲线

Fig. 5 Comparison of $G/G_{\max} - \gamma$ and $\lambda - \gamma$ curves for various marine soils in the Jintang Strait

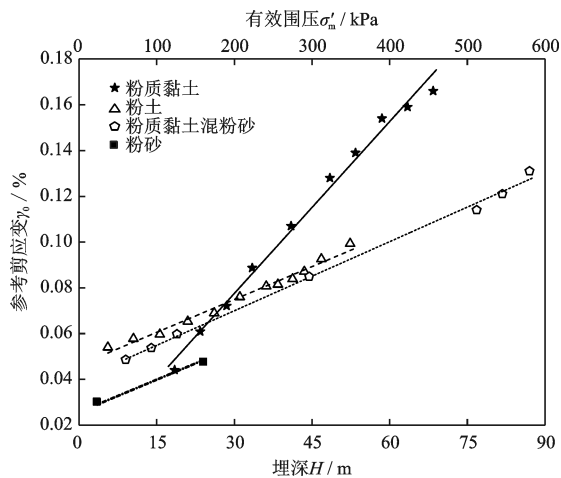


图6 金塘海峡各类海洋土参考剪应变 γ_0 随埋深的变化

Fig.6 Variations of reference shear strain γ_0 with soil depth for various marine soils in the Jintang Strait

其中,粉质黏土、粉质黏土混粉砂、粉土的 γ_0 增长速率依次减慢。这也解释了图5中各类海洋土 $G/G_{\max} - \gamma$ 关系曲线随埋深的变化趋势。金塘海峡各类海洋土 γ_0 与埋深 H 的经验关系可表示为:

$$\gamma_0(\%) = C + D \times (\sigma'_m / P_a) \quad (4)$$

式中, C 和 D 为拟合参数; σ'_m / P_a 表征埋深对 γ_0 的

影响。

该经验关系对各类海洋土的具体拟合参数见表3。

综上,鉴于金塘海峡各类海洋土 $G/G_{\max} - \gamma$ 关系曲线,参数 α, β, γ_0 随埋深的变化关系中各类海洋土拟合参数 α 均接近于1,Davidenkov模型公式可以进一步简化为:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2\beta}} \quad (5)$$

其中,表3给出了 $G/G_{\max} - \gamma$ 预测方程对金塘海峡各类海洋土的参数推荐值。

另外,观察图3和图5中各类海洋土的 $\lambda - \gamma$ 曲

表3 金塘海峡海洋土 $G/G_{\max} - \gamma$ 预测方程的参数值

Table 3 Parameters for the $G/G_{\max} - \gamma$ prediction equation of various marine soils in the Jintang Strait

土类	α	β	C	D
粉质黏土	1	0.50	0.002 49	0.037 6
粉土	1	0.48	0.046 2	0.014 4
粉质黏土混粉砂	1	0.50	0.039 8	0.015 1
粉砂	1	0.50	0.025 5	0.014 2

线特征可知,埋深相差不大时,各类海洋土 $\lambda-\gamma$ 曲线的变化并不明显,一定埋深范围内各类海洋土的 $\lambda-\gamma$ 关系可取平均曲线。因此,表4给出了金塘海

峡不同埋深的各类海洋土 $G/G_{\max}-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$ 关系曲线的参数推荐值,可供工程抗震场地地震效应分析参考使用。

表4 金塘海峡各类海洋土的 $G/G_{\max}-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$ 曲线随埋深变化的参数值

Table 4 Parameters at different depths for the $G/G_{\max}-\gamma$ and $\lambda-\gamma$ curves of various marine soils in the Jintang strait

土类	埋深范围/m	α	β	$\gamma_0/\%$	λ_{\min}	λ_0	B
粉质黏土	0~10	1	0.50	0.015 0	1.60	16.50	0.75
	10~20	1	0.50	0.040 0	1.37	16.50	0.75
	20~30	1	0.50	0.065 2	1.10	16.50	0.70
	30~40	1	0.50	0.090	0.95	16.30	0.70
	40~50	1	0.50	0.115	0.70	16.10	0.65
	50~60	1	0.50	0.140	0.50	15.80	0.66
	60~70	1	0.50	0.165	0.46	15.80	0.74
粉土	0~10	1	0.48	0.051	1.05	16.07	0.61
	10~20	1	0.48	0.060 6	0.83	15.97	0.62
	20~30	1	0.48	0.070 2	0.73	15.67	0.66
	30~40	1	0.48	0.079 8	0.50	15.33	0.68
	40~50	1	0.48	0.089 4	0.30	14.75	0.71
	50~60	1	0.48	0.099	0.20	14.55	0.74
	60~70	1	0.48	0.109	0.10	14.35	0.72
粉质黏土混粉砂	0~10	1	0.50	0.044 8	1.05	16.20	0.64
	10~20	1	0.50	0.054 9	0.95	15.80	0.61
	20~30	1	0.50	0.065	0.80	15.77	0.58
	30~40	1	0.50	0.075	0.50	15.80	0.57
	40~50	1	0.50	0.085 1	0.36	16.00	0.55
	50~60	1	0.50	0.095 2	0.33	15.70	0.55
	60~70	1	0.50	0.105	0.28	15.55	0.54
	70~80	1	0.50	0.115	0.25	15.34	0.55
80~90	1	0.50	0.125	0.22	15.00	0.58	
粉砂	0~10	1	0.50	0.030 2	1.40	14.00	0.77
	10~20	1	0.50	0.039 7	1.20	14.10	0.75
	20~30	1	0.50	0.049 1	1.00	14.18	0.70

3 结论

通过金塘海峡各类海洋土的系列共振柱试验,探讨了各类海洋土的剪切模量 G 与阻尼比 λ 特性及其随埋深的变化规律,主要结论如下:

(1)各类海洋土均呈现“低剪切模量、高阻尼比”的基本动力特性,且随着埋深的增大,各类海洋土的动力非线性特性减弱,并伴随着滞后性减弱。

(2)随着埋深增加,海洋粉质黏土、粉土、粉质

黏土混粉砂 G_{\max} 的增长速率依次减弱,建立了金塘海峡各类海洋土 G_{\max} 随埋深增大而增大的经验关系。

(3)基于各类海洋土 $G/G_{\max}-\gamma$ 曲线和 $\lambda-\gamma$ 曲线随埋深的变化规律,给出了 $G/G_{\max}-\gamma$ 和 $\lambda-\gamma$ 曲线随埋深变化的参数值。

参考文献:

[1] Koutsoftas D C, Fisher J A. Dynamic properties of two marine clays[J]. Journal of the Geotechnical Engineer-

- ing Division, ASCE, 1980, 106(6): 645-657.
- [2] Kagawa T. Moduli and damping factors of soft marine clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(9): 1 360-1 375.
- [3] Vrettos C, Savidis S. Shear modulus and damping for Mediterranean sea clays of medium plasticity[M]. Rotterdam, Balkema: Earthquake Geotechnical Engineering, 1999: 71-76.
- [4] Lanzo G, Pagliaroli A, Tommasi P, et al. Simple shear testing of sensitive, very soft offshore clay for wide strain range[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(11): 1 277-1 288.
- [5] 孙田, 陈国兴, 周恩全, 等. 琼州海峡100 m以浅海洋土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 375-382.
Sun T, Chen G X, Zhou E Q, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of marine soils in Qiongzhou Strait with depth less than 100 m[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup 2): 375-382. (in Chinese)
- [6] 兰景岩, 刘化涤, 吕悦军, 等. 渤海海域典型场地土的动剪切模量比和阻尼比的统计值[J]. 地震研究, 2012, 35(2): 260-267.
Lan J Y, Liu H D, Lyu Y J, et al. Statistical value of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of the soils in bohai sea[J]. Journal of Seismological Research, 2012, 35(2): 260-267. (in Chinese)
- [7] Chen G X, Zhao D F, Chen W Y, et al. Excess pore-water pressure generation in cyclic undrained testing[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2019, 145(7), 04019022.
- [8] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASEC, 1972, 98(7): 667-692.
- [9] 杨文保, 吴琪, 陈国兴. 长江入海口原状土动剪切模量预测方法探究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3 889-3 896.
Yang W B, Wu Q, Chen G X. Study on dynamic shear modulus prediction method of undisturbed soil in the estuary of the Yangtze River [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3 889-3 896. (in Chinese)
- [10] Martin P P, Seed H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108 (7) : 935-952.
- [11] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 南京新近沉积土动剪切模量比与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 1 023-1 027.
Chen G X, Liu X Zh, Zhu D H, et al. Experimental studies on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of recently deposited soils in Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (8) : 1 023-1 027. (in Chinese)
- [12] 陈国兴, 卜屹凡, 周正龙, 等. 沉积相和深度对第四纪土动剪切模量和阻尼比的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1 344-1 350.
Chen G X, Bu Y F, Zhou Zh L, et al. The influence of quaternary soil sedimentary facies and depth on the normalized dynamic shear modulus and damping ratio over a wide strain range[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1 344-1 350. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)