

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.05.004

# 我国东南沿海核电海工工程地基土 静动力特性规律研究

王桂萱, 张虎韦, 赵杰

(大连大学 土木工程技术与开发中心, 辽宁 大连 116622)

**摘要:** 对我国沿海核电海工工程地基土的动力特性现状进行了简述,在此基础上以大连大学土木工程技术与开发中心近些年完成的实际核电抗震分析项目为依托,对沿海核电地基土的静、动力特性进行了统计归纳,统计结果表明各土类在不同试验条件下,其三轴排水剪试验与三轴不排水剪试验的结果呈规律性变化;各类土样在不同的试验条件下其动模量与动强度随着围压值的增加而呈现递增趋势,然而其相互的比值呈递减趋势;通过静、动力三轴试验分析得出最大动弹性模量与初始弹性模量的比值范围在2~20的区间内。该论文的研究和统计成果可为今后类似工程抗震设计评价等工作提供参考和基础性资料。

**关键词:** 静动力特性;核电海工工程;共振柱;动三轴;动弹性模量

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)05—0025—07

## Static and Dynamic Characteristics of Foundation Soil of Nuclear Power Offshore Engineering in Southeast Coast of China

WANG Guixuan, ZHANG Huwei, ZHAO Jie

(Civil Engineering Technology Research and Development Center, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

**Abstract:** This paper briefly introduces the current status of the dynamic characteristics of the coastal nuclear power offshore engineering foundations. The actual nuclear power seismic analysis project completed by the Civil Engineering Technology Research and Development Center of Dalian University in recent years is based on the nuclear power in the coastal areas. The static and dynamic characteristics of the foundation soil are statistically summarized. The statistical results show that under different test conditions, the results of the triaxial drainage shear test and the triaxial undrained shear test are regular changes; the circulation is carried out under different conditions. In the load test, the dynamic elastic modulus and the corresponding dynamic strength also increase with the increase of confining pressure, but their mutual ratios decrease. The maximum dynamic elastic modulus and initial are obtained by static and dynamic triaxial test analysis. The ratio of the elastic modulus ranges from 2 to 20. The research and statistical results of this paper can provide reference and basic data for future work on seismic design evaluation of similar projects.

**Keywords:** static and dynamic characteristics; nuclear power offshore engineering; resonant column; dynamic triaxial; dynamic elastic modulus

中国是最大的发展中国家,人口众多,地域分布不均且能源需求量大,传统能源日益匮乏。尤其是

最近几年我国经济的快速发展,能源问题更加的突出。为此,越来越多的人意识到核能是解决这一问

收稿日期:2019-05-17

修稿日期:2019-07-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678100);辽宁省自然科学基金指导计划(20170540043)

作者简介:王桂萱(1960—),男,辽宁庄河人,教授,主要从事岩土工程数值模拟、建筑物健康诊断和工程抗震等方面的研究工作。

E-mail: tumuxinxi@163.com

通讯作者:赵杰(1980—),男,河北邢台人,副教授,主要从事岩土与地下工程、工程抗震研究。E-mail:13942691061@163.com

题的主要方法,并且在经济发展、环境改善、能源结构优化等方面发挥重要的作用。但核电厂选址问题一直是制约核电厂建设可行性的关键。调查资料显示,美国约有 50% 的核电修建在非基岩上,法国大概有 60% 的核电修建于软弱土层上,在日本有一部分核电修建在断层地带或者地基不均匀的土层上。

核电海工工程由防护建筑物及取排水设施组成,主要包括护岸、防波堤、导流堤、取排水明渠(箱涵、隧洞)、直立墙等,具有抵御外海波浪侵袭、保证取排水通畅、提供核反应堆循环冷却水、确保地震等突发情况下安全堆所需的冷却水供应等重要功能,是核安全相关物项。由于核电海工工程投资费用巨大,建设工期长,因此其安全性至关重要。而海洋地基土大多是工程性质不佳的软黏土、粉土和残积土等。就这些软土而言,在土结构相互作用下以及动力荷载作用下很容易发生地基失稳的现象。因此,深入开展核电地基土的静动力特性研究任重道远。国内外学者做了大量的试验研究,刘齐建<sup>[1]</sup>、陈国兴等<sup>[2]</sup>、周健等<sup>[3]</sup>以及李晓飞等<sup>[4]</sup>学者分别对上海、南京、和武汉等区域分布的软弱土层做了许多动力特性试验研究。关于土体动力特性的研究一直备受人们的关注,学术界也有大量的学者们通过采用动三轴试验的研究方式,取得了很多卓有成效的结论<sup>[5-6]</sup>。张勇等<sup>[7]</sup>、魏星等<sup>[8]</sup>、柳艳华等<sup>[9]</sup>学者对饱和和重塑的软黏土采用动三轴试验进行了大量的研究,提出该类土样在循环荷载作用下,其土样在动荷载作用下达到稳定性时的累积应变方程。丁伯阳等<sup>[10]</sup>对杭州地区的软土进行了一系列动三轴试验,得出了本地区软土的应力-应变曲线和动力特性参数等结果。霍华阳等<sup>[11]</sup>学者研究了天津滨海新区特殊结构性的软土,采用室内循环三轴试验的方式,对在交通荷载作用下的结构性淤泥质粉质黏土进行了动力特性研究,得出该类土在长期动荷载作用下的动应力-动应变关系随着加载的频率、围压以及土体本身固结状态的变化规律等结论。陈清华等<sup>[12]</sup>以珠江三角洲区域的淤泥质软土为研究对象,对其进行物理力学指标的检测以及采用室内动三轴试验,对不同围压以及剪应变等条件下的软土进行了动力特性试验研究。国外在 1960 年就开始了关于软土的动力特性试验研究,Hardin 等<sup>[13-15]</sup>和 Yashuara 等<sup>[16]</sup>研究者将动三轴试验设备做了改进,通过大量的室内动力特性试验,在此基础上得出了跟软土动力特性相关的很多结论,而且给出了土动剪模量和阻尼比的计算公式,这对于土体动力特性

的研究具有很大的指导意义。在此研究之后, YashuaraK<sup>[17]</sup>、FujikawaK<sup>[18]</sup>和 Chaijc 等<sup>[19]</sup>分别对土体的动模量、动阻尼比和动累积塑性变形等特性进行了试验研究,也得出了很多关于土体动力特性的重要结论,在试验过程中, YashuaraK 发现振动频率这一因素对软黏土的动强度和变形量的影响不大。

本文以大连大学土木工程技术与开发中心近些年完成的国内核电海工工程地基抗震安全评价分析的实验数据为基础,归纳统计了田湾、宁德、霞浦、漳州、昌江等沿海核电地基土动力特性的相关参数以及引用了核电厂海工构筑物抗震演算方法的改进与海床地基土参数研究的部分数据<sup>[20]</sup>,总结出了一些核电场地土的规律性,以供类似工程抗震设计参考。

## 1 试验设备及性能

试验是在中国地震局工程力学研究所研制的 GZ-II 型共振柱试验机上进行。

多功能动三轴试验是通过计算机进行控制的,在整个试验过程中所需要加的动应力、动变形和孔压值均由微机系统进行采集处理。

## 2 核电地基土静、动力变形与强度参数分析

利用大连大学土木工程技术与开发中心近些年完成的国内核电(漳州、宁德、霞浦、田湾、昌江等)海工工程抗震安全评价的基础实验数据以及引用了文献[20]中的部分数据,进行了地基土静、动力三轴试验分析,在此基础上整理了相关地基土的试验参数,从统计学的角度获得一些沿海核电工程的地基土的规律性。此次试验所研究的对象有淤泥土、黏土、粉质黏土、残积土、砂等五类土体,在进行静、动力三轴试验时所施加的固结围压分别取 100 kPa、150 kPa、200 kPa,按邓肯-张 E-B 模型整理试验参数。

### 2.1 初始模量和最大动剪切模量

在 1963 年,由简布(Janbu)提出了土体在进行三轴试验中的初始弹性模量  $E_i$  与围压  $\sigma_3$  符合指数函数关系,公式如下:

$$E_i = K \cdot P_a \cdot \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

式中:  $K$ 、 $n$  分别为变形模量系数与指数,均为试验参数。

此公式在土力学中为大多数土体本构模型所采纳,  $E_i$  是静三轴试验中土试样的重要参数, 一般称为土的静弹性模量。  $E_i$  在整个试验推导过程中是以  $\varepsilon_a \rightarrow 0$  的方式被定义的, 但是在试验过程中要求较土样在小应变时基本是处于弹性状态的, 这时土体所对应的模量值就是静弹性模量。在进行静三轴试验时, 土样的轴向应变是通过百分表测量得到的, 根据测量的数值来计算所需要的初始模量。

$$G_{\max} = K \cdot P_a \cdot \left( \frac{\sigma_0}{P_a} \right)^n \quad (2)$$

式中:  $K$ 、 $n$  为试验参数;  $\sigma_0$  为初始平均静应力;  $P_a$  为标准大气压。

## 2.2 抗剪强度

在此次三轴试验中, 取  $\sigma - \varepsilon$  关系曲线出现峰值时的所对应的值作为破坏标准, 此时峰值所对应的应力即为土样的抗剪强度; 对于在整个试验过程中没有出现峰值的土样, 取轴向应变的 5% 作为该试样的屈服强度值, 对应的应力值为试验土样的抗剪强度值, 也就是三轴试验中的破坏应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ , 用  $q_f$  来表示, 由摩尔 - 库仑准则可得到抗剪强度的表达式如下

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cdot \cos\varphi + 2\sigma_3 \cdot \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (3)$$

## 2.3 最大动剪切模量

通过整理振动三轴试验数据结果, 可以得出试验土样的最大动剪切模量  $G_{\max}$ 、最大动模量  $E_{\max}$  的值, 以及试验土样所对应的动剪应变幅值  $\gamma$ ,  $G_{\max}$ 、 $E_{\max}$  指的是当土样的  $\gamma = 10^{-6}$  时, 所对应的动剪模量和动弹性模量, 一般也称为土样的最大动剪切模量和最大动弹性模量。两者的关系式表示如下:

$$E_{\max} = 2(1 + \nu) G_{\max} \quad (4)$$

式中:  $\nu$  为土样的泊松比, 不排水试验时取 0.5。

## 2.4 动强度

动强度是指土试样在一定动应力重复次数  $N_f$  的作用下, 所产生的某一指定破坏应变时所需的动应力<sup>[21]</sup>。震动次数可参照 Seed 提出的不同震级作用下等效循环次数来进行确定, 如表 1 所示。

表 1 地震震级与等效循环振次表

地震震级	5.5 ~ 6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
等效周期/s	5	8	12	20	30

在三轴试验中随着土样破坏应变判断标准不

同, 其所对应的动强度也不尽相同。所以, 在进行动强度的试验中, 要求得动强度的值, 首先破坏标准是首要条件。

## 3 实验结果整理

### 3.1 变形与强度参数统计

将漳州、宁德、霞浦、田湾、昌江以及参考文献 [21] 等核电海工工程实验数据进行统计归纳。各土类的试验参数统计见表 2, 以及各类土固结排水剪、固结不排水剪、动强度试验的强度参数固结不排水剪、动强度试验的强度参数黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  的统计见表 3。

各土类的变形模量系数  $K$  与土体强度参数  $c$ 、 $\varphi$  的平均值与计算标准差见表 4。统计试验数据表明, 不同土样在不同的三轴试验条件下, 其土样的变形模量系数  $K$  都比在固结排水试验条件下的  $K_{CD}$  小, 在固结不排水试验条件下的  $K_{CU}$  次之, 而且土样的动模量系数  $K_d$  有最大值。当不同土样在相同的试验条件下时, 有如下结果, 其各类土样的变形模量系数  $K$  的大小较为明显, 试验数据显示淤泥最小、其次是黏土、全风化土、粉质黏土、残积土、砂最大。在试验数据统计的强度参数  $\varphi$  值中一般有固结排水剪条件下土样的强度  $\varphi_{CD}$  最大, 然而固结不排水剪试验土样的强度与  $\varphi_{CU}$  动强度  $\varphi_d$  大小是不确定的。

### 3.2 静模量与强度关系

根据表 2、表 3 中三轴试验数据统计, 并采用邓肯 - 张 E-B 模型中的初始模量计算公式(1)以及摩尔 - 库仑强度准则关系式(2), 能求得各类土(淤泥土、黏土、粉质黏土、砂、全分化土)在三轴排水以及三轴不排水试验条件下的初始弹性模量  $E_i$  及抗剪强度  $q_f$  的值,  $E_i - q_f$  关系如图 1 所示, 坐标采用双对数坐标。

从图 1 可以看出一般规律: 无论是三轴排水剪试验 (CD) 还是三轴不排水条件下的三轴试验 (CU), 可以看出各类土样的初始模量与抗剪强度的关系基本上成正相关, 当围压值逐渐增大时, 其试验土样的初始弹性模量  $E_i$  和强度  $q_f$  都有明显增大的趋势, 但是其  $E_i/q_f$  无明显的规律性, 而各类土这一比值均分布在 1:10 ~ 1:100 之间; 在相同的围压条件下, 不同试验土样的三轴不排水试验的  $E_i/q_f$  都比三轴排水试验的  $E_i/q_f$  值大。

表 2 试验各土类的变形模量系数

土样类型	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$K_{CD}$	$n_{CD}$	$K_{CU}$	$n_{CU}$	$K_d$	$n_d$	核电项目
淤泥	1.177	18.42	0.890	90.97	0.136	217	0.591	福清*
	1.641	28.73	0.631	56.20	0.950	251	0.760	漳州
	0.951	23.12	0.721	19.10	0.650	376	0.760	田湾
	1.212	10.54	0.890	—	—	281	0.298	霞浦
	1.156	19.23	0.833	—	—	312	0.323	霞浦
	1.152	25.40	0.803	45.90	0.952	217	0.736	宁德*
粉质黏土	1.977	48.40	0.670	48.40	1.071	660	0.670	漳州
	1.597	—	—	75.89	0.959	—	—	福清*
	1.550	78.30	0.700	64.10	0.620	—	—	田湾
	1.660	38.20	0.610	198.70	0.550	709	0.051	田湾
	1.556	26.24	0.527	—	—	400	0.620	霞浦
	1.568	31.41	0.841	—	—	324	0.780	霞浦
	1.985	14.10	0.320	14.20	0.320	617	0.421	漳州
	1.295	49.32	0.841	46.64	0.612	241	0.699	宁德
黏土	1.146	45.39	0.967	40.28	0.838	211	0.693	宁德
	1.350	77.90	0.610	60.20	0.580	527	0.560	田湾
	0.970	73.00	0.953	37.40	1.970	252	0.197	阳江*
粉细砂	1.400	36.12	0.514	246.00	0.165	417	0.662	漳州
	1.640	256.00	0.159	87.50	0.196	514	0.329	宁德*
	1.550	31.83	0.692	135.00	0.650	891	0.461	漳州
	1.420	77.24	0.984	158.00	0.891	490	0.740	漳州
中粗砂	1.630	99.55	0.437	186.10	0.350	441	0.653	漳州
	1.550	551.70	0.550	—	—	844	0.421	田湾
	1.680	42.90	0.652	—	—	456	0.410	昌江
粉砂	1.650	710.40	0.560	—	—	—	—	田湾
	1.460	55.72	0.431	—	—	521	0.250	霞浦
全风化土	1.683	88.61	0.577	109.60	0.751	295	0.770	漳州
	1.379	85.02	26.280	—	18.780	288	0.602	福清*
	1.407	91.57	28.120	86.50	—	—	—	福清*
残积土	1.520	138.00	25.000	156.60	23.100	445	0.473	阳江*

注:(1) \* 数据来源于文献[20]。(2) CD 代表固结排水;CU 代表固结不排水;d 代表动态。以下表格相同。

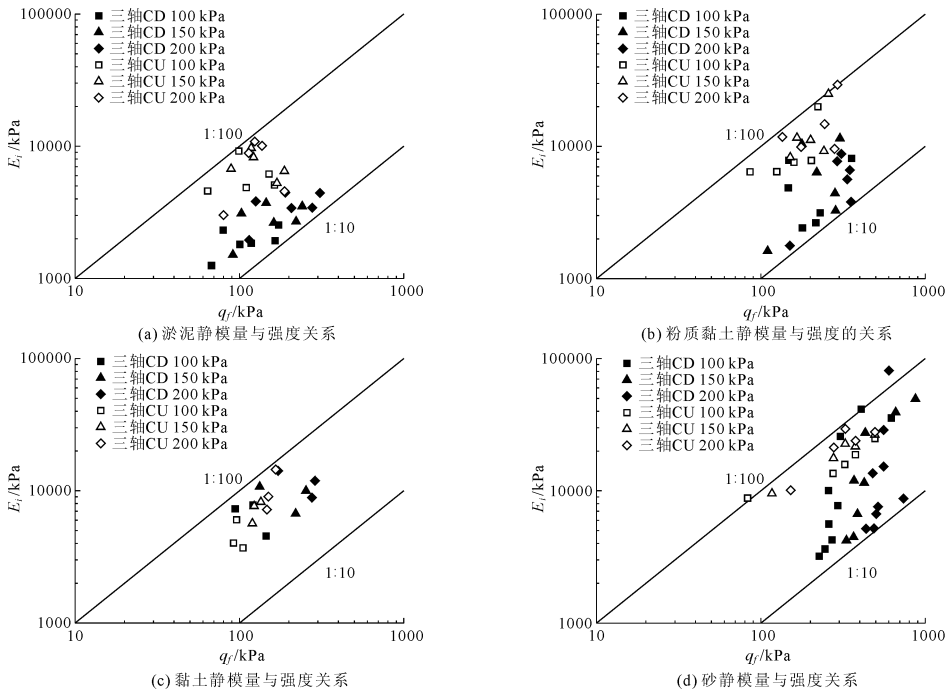


图 1 各类土静模量与强度关系

表 3 不同试验条件下各土样的强度参数

土样类型	干密度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$c_{CD}$	$\varphi_{CD}$	$c_{CU}$	$\varphi_{CU}$	$c_d$	$\varphi_d$	核电项目
淤泥	1.177	10.43	17.94	25.63	9.29	—	—	福清*
	1.641	4.14	18.00	1.24	13.40	9.50	7.70	漳州
	0.951	13.90	10.80	10.20	7.10	9.90	8.00	田湾
	1.212	8.46	11.00	6.92	16.80	9.80	8.00	霞浦
	1.156	17.93	21.10	12.28	20.40	19.80	10.00	霞浦
	1.152	12.00	23.90	5.93	11.48	—	—	宁德*
粉质黏土	1.977	0.78	24.80	46.78	16.30	15.6	7.80	漳州
	1.597	—	—	27.13	17.35	—	—	福清*
	1.550	33.90	13.60	30.60	11.60	23.60	9.80	田湾
	1.660	60.30	18.20	57.80	15.20	24.70	12.90	田湾
	1.556	25.23	24.10	20.03	28.50	24.60	12.90	霞浦
	1.568	43.07	20.30	36.49	19.40	40.00	13.90	霞浦
	1.985	52.86	22.20	48.83	19.30	15.60	7.80	漳州
	1.295	11.74	23.90	12.02	14.81	10.80	17.20	宁德
黏土	1.146	18.76	20.86	14.04	12.59	11.40	16.80	宁德
	1.350	20.50	14.60	17.20	12.20	17.40	11.70	田湾
	0.970	6.30	16.20	17.00	13.60	—	—	阳江*
粉细砂	1.400	0.37	33.30	246.00	0.17	4.70	4.50	漳州
	1.550	4.80	30.80	135.00	0.65	2.30	9.60	漳州
	1.640	13.70	34.00	5.92	14.70	9.70	20.30	宁德*
	1.420	7.70	34.70	158.00	0.89	4.30	7.10	漳州
中粗砂	1.630	10.13	31.70	186.00	0.35	6.74	5.00	漳州
	1.550	10.70	35.70	—	—	17.70	7.80	田湾
	1.680	10.56	32.45	—	—	2.54	17.40	昌江
粉砂	1.650	18.00	38.60	—	—	23.60	9.80	田湾
	1.460	0.62	34.20	—	—	14.70	7.70	霞浦
全风化石	1.683	18.41	32.60	15.34	28.60	5.10	18.40	漳州
残积土	1.379	21.65	26.28	24.18	18.78	11.50	18.30	福清*
	1.407	9.14	28.12	—	—	—	—	福清*
	1.520	26.80	25.00	18.50	23.10	17.40	19.70	阳江*

注: \* 数据来源于文献[20]。

表 4 核电地基土的变形模量系数与强度参数统计

土样类型	特征值 名称	$K_{CD}$	$c_{CD}$	$\varphi_{CD}$	$K_{CU}$	$c_{CU}$	$\varphi_{CU}$	$K_d$	$c_d$	$\varphi_d$
淤泥土	均值	20.91	11.14	17.12	53.04	10.37	13.08	275.67	12.25	8.43
	标准差	6.37	4.72	5.30	29.73	8.39	4.90	61.49	5.04	0.92
粉质黏土	均值	41.00	32.55	21.02	74.66	34.96	17.81	491.80	22.13	11.76
	标准差	19.09	19.97	3.72	64.23	15.52	5.01	178.50	8.84	3.21
黏土	均值	65.43	15.19	17.22	45.96	16.08	12.80	330.00	14.40	14.25
	标准差	17.53	7.75	3.25	12.42	1.77	0.72	171.83	3.00	2.55
砂	均值	206.83	8.51	33.94	162.52	136.23	3.35	571.75	9.59	9.91
	标准差	83.16	5.83	2.32	59.01	99.17	0.28	186.35	7.51	5.42
全风化石	均值	88.61	18.41	32.60	109.60	109.60	28.60	295.00	5.10	18.40
	标准差	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
残积土	均值	104.86	19.20	26.47	121.55	21.34	20.94	366.50	14.45	19.00
	标准差	28.88	9.08	1.57	49.57	4.02	3.06	111.02	4.17	0.99

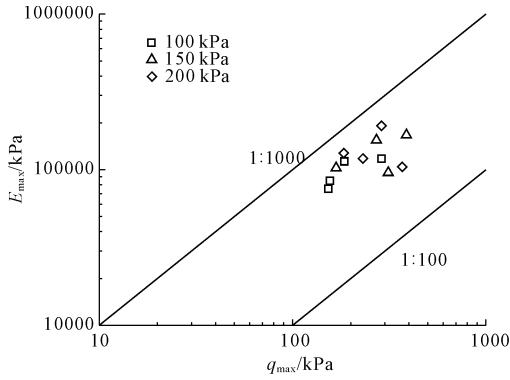
### 3.3 动模量与动强度关系

由试验数据统计表 3 中各类土的动模量试验参数  $K_d$ 、 $n_d$  以及通过最大动剪切模量公式(2)和剪切

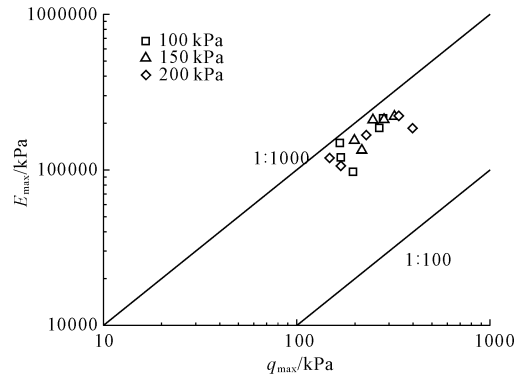
模量与弹性模量之间的换算关系式(4),可以计算得出不同类型土在不同试验条件下(淤泥、粉质黏土、黏土和砂)的最大弹性模量  $E_{max}$  的值,通过试验

数据统计表 5 中各类土的动强度试验参数  $c_d$ 、 $\varphi_d$  以及通过摩尔 - 库仑公式 (3), 可以求解出不同类型土的强度值  $q_{max}$ , 做出二者关系图  $E_{max} - q_{max}$ , 坐标采用双对数坐标。

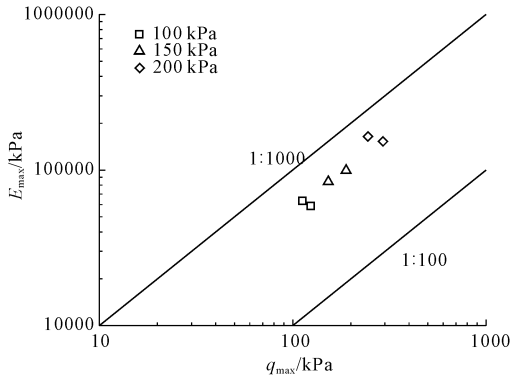
从图 2 可以看出, 在不排水条件下进行各类土



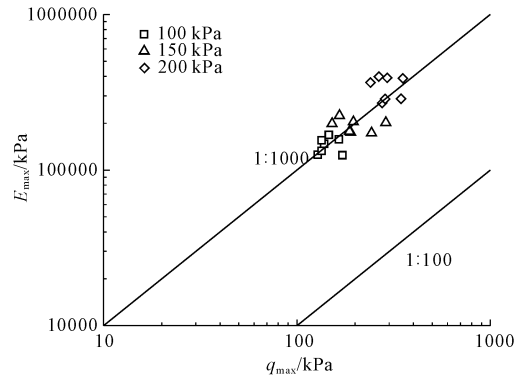
(a) 淤泥动模量与强度关系



(b) 粉质黏土动模量与强度关系



(c) 黏土动模量与强度关系



(d) 砂动模量与强度关系

图 2 各类土动模量与强度关系

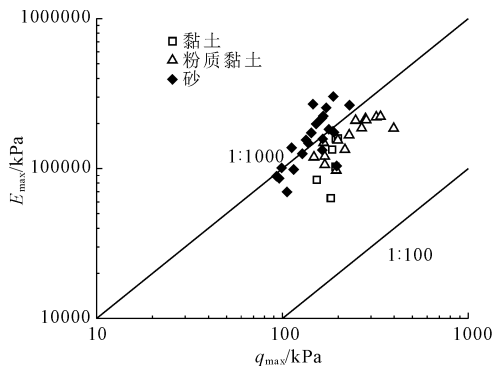


图 3 各类土  $E_{max}$  与  $q_{max}$  的关系 (CU)

### 3.4 静、动模量关系

将各地区土类的  $E_{max}$  和  $E_i$  关系汇总见图 4, 同时与日本龙冈文夫教授等研究软岩所得出  $E_{max}$  和  $E_i$  的比值范围为 2 ~ 20 的结论 (见图 5) 进行对比, 统计分析结果表明两者结论基本吻合。

日本的龙冈文夫教授认为, 一般在进行传统的室内三轴试验时, 测量试样的轴向应变的过程中没

的室内循环荷载试验时, 当施加的围压值增大时, 其各类土本身的动弹性模量  $E_{max}$  所对应的强度  $q_{max}$  值都有明显增大的趋势, 但是  $E_{max}/q_{max}$  的比值基本上在减小。图 3 显示, 其动弹性模量  $E_{max}$  与对应的强度  $q_{max}$  的值砂土比黏土和粉质黏土大。

有考虑实验端部对试样土体本身的影响, 这就会导致在使用试验所测得的数据来计算土样的弹性模量时会出现偏小的情况, 这时计算出的弹性模量被称为土样的静弹性模量 ( $E_i$ ), 由于该数值在线弹性变形范围内对于岩土体需要进行数值分析时过于偏小, 所以不能作为真正的弹性模量来对岩土本身的

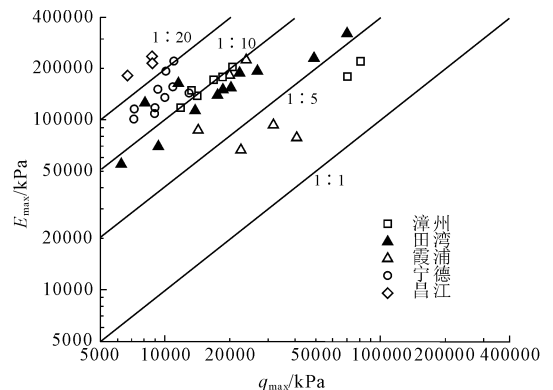


图 4 海洋地基土  $E_{max}$  与  $E_i$  的关系

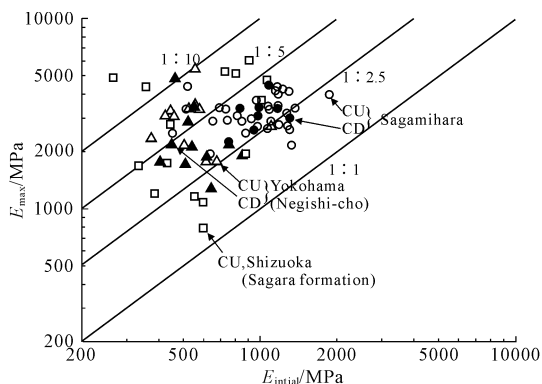


图5 软岩  $E_{\max}$  与  $E_i$  的比较<sup>[22]</sup>

性质做出评价,这个结果在本文试验数据统计中也得到了验证。

## 4 结论

本文在系统研究国内核电海工工程地基土参数的基础上,通过统计分析得出试样在相同围压下动弹性模量与强度比值  $E_{\max}/q_{\max}$  大于静弹性模量与强度比值  $E_i/q_f$ ,这一结论在文献[15]中也有提到。由图1可以总结出各类土在静三轴试验不排水条件下的  $E_i/q_f$  值大于在排水试验条件下的数值。

通过实际核电海工工程的相关试验资料,整理了静、动三轴试验(淤泥、粉质黏土、全风化土、黏土和砂)的变形参数  $K$ 、 $n$  以及强度参数  $c$ 、 $\varphi$ ,得出以下结论:

(1) 不管是在三轴排水剪试验(CD)条件下还是在排水剪试验(CU)条件下,均有各类土的初始模量与其本身的抗剪强度成正相关关系这一结论,当围压值增大时,土样的初始弹性模量  $E_i$  和强度  $q_f$  也都增大,但是  $E_i/q_f$  的比值没有特别明显的规律性,不同类型试验土样的  $E_i/q_f$  这一比值都分布在 1:10 ~ 1:100 这一区间内;当围压相同时,不同类型土试样在三轴固结不排水剪试验(CU)条件下的  $E_i/q_f$  都大于三轴固结排水剪试验(CD)的  $E_i/q_f$ 。

(2) 在不排水条件下进行室内循环荷载试验时,当围压增大时,其各类土试样的动弹性模量  $E_{\max}$  与对应的强度  $q_{\max}$  都增大,但是  $E_{\max}/q_{\max}$  的比值基本上呈递减趋势。

(3) 通过对部分海工工程地基土的静、动弹性模量统计分析可得,  $E_{\max}/E_i$  比值范围在 2 ~ 20 区间内。

## 参考文献:

[1] 刘齐建. 软土地铁建筑结构抗震设计计算理论的研究

[D]. 上海:同济大学,2005.

- [2] 陈国兴,庄海洋. 基于 Davidenkov 骨架曲线的土体动力本构关系及其参数研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(8):860-864.
- [3] 周健,秦天,孔戈. 武汉长江隧道横断面地震响应分析[J]. 工程抗震与加固改造,2007,29(2):84-92.
- [4] 李晓飞,孙锐,袁晓铭. 基于实际记录的现有等效线性化分析程序对比研究[J]. 地震工程学报,2015,37(1):144-151.
- [5] 仝玉丁,杨贵,刘汉龙. 原状和重塑海洋粉土动力特性对比试验研究[J]. 地震工程学报,2014,36(4):952-957.
- [6] 杨正权,刘启旺,刘小生,等. 超深厚覆盖层中深埋细粒土动力变形和强度特性三轴试验研究[J]. 地震工程学报,2014,36(4):824-831.
- [7] 张勇,孔令伟,郭爱国,等. 循环荷载下饱和软土的累积塑性应变试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(6):1542-1548.
- [8] 魏星,黄茂松. 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J]. 岩土力学,2009,30(11):3342-3348.
- [9] 柳艳华,黄茂松,李帅. 循环荷载下结构性软黏土的各向异性边界模型[J]. 岩土工程学报,2010,32(7):1065-1071.
- [10] 丁伯阳,张勇. 杭州第四系软土动力特性试验与土结构性影响的探讨[J]. 岩土力学,2012,33(2):336-342.
- [11] 霍华阳,姜岩. 交通荷载作用下结构性软土动应力—动应变关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S1):3052-3057.
- [12] 陈清华,冉少庭. 淤泥类土动力学性质的试验研究[J]. 资源环境与工程,2008,22(3):365-368.
- [13] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soil: design equation curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972,98(7):279-287.
- [14] Hardin B O, Black W L. Closure to vibration modulus of normally consolidated clay: design equation and curves [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1969,95(6):1531-1537.
- [15] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soil: measurement and parameter effects[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972,98(6):603-624.
- [16] Yashuara K, Yamanouchi T, Hirao K. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay[J]. Soils and Foundations, 1982,22(3):77-91.

工期,大、小主应力量值均随连接板长度的逐渐增大而减小,竖向、水平向位移量值亦均逐渐减小;而在蓄水期,大、小主应力量值均随连接板长度的逐渐增大而增大,竖向、水平向位移量值亦均逐渐增大。

(3) 对于接缝变形,连接板长度增加对防渗墙与连接板接缝切向变形的影响最为明显,通过增加连接板长度,可明显降低防渗墙与连接板接缝的切向错动。

### 参考文献:

[1] 温立峰,柴军瑞,王 晓. 深覆盖层上面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 岩土力学, 2015,36(8):2386-2394.

[2] 李 为,苗 喆. 察汗乌苏面板坝监测资料分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(5): 30-35.

[3] 熊成林,邓 伟,姜 龙. 基于深厚覆盖层面的面板堆石坝沉降变形规律分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(2): 150-154.

[4] 罗守成. 对深厚覆盖层地质问题的认识[J]. 水力发电, 1995(4):21-24.

[5] 姜 妮. 复杂坝基条件下混凝土面板堆石坝抗滑稳定分析方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.

[6] 张 博,李 伟. 混凝土面板堆石坝三维渗流场特性分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 223-226.

[7] 酆能惠,米占宽,孙大伟. 深覆盖层上面板堆石坝防渗墙应力变形性状影响因素的研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 26-31.

[8] 赵魁芝,李国英,米占宽. 汉坪咀混凝土面板堆石坝防渗体系设计方案优选[J]. 水利水运工程学报, 2004(2): 45-50.

[9] 酆能惠,孙大伟,米占宽,等. 覆盖层上高面板坝连接板长度优化分析[J]. 水利水电技术, 2005, 36(7): 81-85.

[10] 刁慧贤,束一鸣,姜晓桢. 深覆盖层高面板堆石坝连接板型式优化分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11): 79-83.

[11] 姜苏阳,邢建营,韩健,等. 深覆盖层地基修建高面板堆石坝技术难点分析[J]. 人民黄河, 2011, 33(12): 139-140.

[12] 沈 婷,李国英,李 云,等. 覆盖层上面板堆石坝趾板与基础连接方式的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2588-2592.

[13] 司才龙,刘灿. 神树水电站混凝土面板堆石坝高趾墙及面板动力响应分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 130-134.

[14] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.

[15] 顾淦臣,束一鸣,沈长松. 土石坝工程经验与创新[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.

(上接第31页)

[17] Yasuhara K, Murakami S, Song B W. Postcyclic degradation of strength and stiffness for low plasticity silt[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(8):756-769.

[18] Fujikawa K. On optimistic design of low embankment road on soft subsoil by considering the traffic-load-induced settlement [D]. Saga: Saga University, 1996.

[19] Chai J C, Miuran. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11):907-916.

[20] 崔冰雪. 核电厂海工构筑物抗震演算方法的改进与海床地基土参数研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014.

[21] Tatsuoka F, Kohata Y. Stiffness of Hard Soils and Soft Rocks in Engineering Applications[C]//Pre-failure deformation of geomaterials. Proceedings of the international symposium, Japan:Sapporo,1995.

[22] Kim Y, Tatsuoka F, Ochi K. Deformation characteristic at small strains of sedimentary soft rocks by triaxial compression tests[J]. Geotechnique, 1994, 44(3):461-478.