

黄雅虹,吕悦军,彭艳菊,等,2020. 渤海海域黏性土剪切波速与抗剪强度统计关系的初步研究. 中国地震,36(3):527~538.

渤海海域黏性土剪切波速 与抗剪强度统计关系的初步研究

黄雅虹 吕悦军 彭艳菊 方怡

中国地震局地壳应力研究所,北京 100085

摘要 剪切波速与地基土的抗剪强度、剪切模量和卓越周期等参数密切相关,是地震安全性评价中判定场地类别的一个主要指标和参数。鉴于海域工程中剪切波速往往难以直接由原位测得,而室内实验结果又常常与野外现场物探测试值存在较大差异,因此,如何通过其他途径有效获取满足工程需要的剪切波速参数,在海域工程的地震安全性评价等方面具有迫切的实用需求。为此,本文通过对渤海海域数十个石油平台项目中一系列饱和黏性土样品的剪切波速与抗剪强度实验数据的统计分析,尝试采用多种可能的函数来拟合确定二者之间的经验关系。结果表明:对于渤海海域,黏性土剪切波速 V_s 与抗剪强度 S_u 之间的最佳统计经验关系为幂函数 $V_s = 53.751 S_u^{0.376}$ 。此关系可为渤海海域工程中通过不排水抗剪强度估算剪切波速提供一种简便可行的实用性方法。

关键词: 渤海海域 海域黏性土 剪切波速 不排水抗剪强度 统计关系

[文章编号] 1001-4683(2020)03-0527-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

工程地质中的剪切波速是指震动横波在土体内的传播速度,其大小不仅能够一定程度上反映地基土的强度和变形特性,而且与土体的剪切模量和卓越周期有关,是地震安全性评价中判定场地类别的一种主要指标和参数,在场地分类、砂土液化判别、地基土特性评价以及重大工程抗震设计等方面均有所需(华南理工大学等四校合编,1991)。

对于陆地工程而言,场地土的剪切波速通常可在现场直接测得(中华人民共和国住房和城乡建设部,2009)。而对于海域工程,由于水体的影响,则往往难以直接施测,只能采用室内动三轴实验等方法获取(中华人民共和国水利部,1999;王建华等,2004)。但无论陆地工程还是海域工程,由于受土体扰动等各种因素影响,这类实验方法的结果往往误差较大,有时甚至比实测值小一半左右(高印立等,1998),致使剪切波速参数失去了可用性;不仅如此,

[收稿日期] 2019-12-20; [修定日期] 2020-07-20

[项目类别] 中央公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2017-28)、国家重点研发计划(2017YFC1500403)共同资助

[作者简介] 黄雅虹,女,1963年生,副研究员,主要从事地震地质灾害、土动力学特性和场地条件以及地震安全性评价等方面的研究工作。E-mail: yhhuang@aliyun.com

吕悦军,通讯作者,男,1968年生,研究员、博士,主要从事地震危险性、地震灾害风险评估研究。

E-mail: luyj1@263.net

还常存在由于塌孔导致测试数据不连续、或者缺少测试数据的情况。为此,如何根据一些常规实验方法获得较为可靠的土体剪切波速,成为众多学者尝试的方向,如构建土体剪切波速与土层深度、标贯击数等实验参数之间的统计关系(高印立等,1998;陈国兴等,1998;高玉峰等,2003;战吉艳等,2009;刘红帅等,2010;李平等,2010;邱志刚等,2011;齐鑫等,2012;郑金安,1985;郑灿堂等,1999;邱志刚等,2012),或剪切波速与抗剪强度之间的统计关系(石中明等,2003;夏唐代等,2004;陈文强等,2013)等。由于剪切波速与土体埋深的相关性存在着较大的区域性和局限性,而标贯击数受实验操作方法影响较大,导致其与剪切波速回归关系的离散性较大,由此推算的剪切波速值有时并不可靠(陈国兴等,1998)。近年来,虽然剪切波速与抗剪强度相关性研究得到了国内外学者的关注,但目前,这类研究工作主要局限于陆地区域,很少涉及到海域(周杨锐等,2012;裴强等,2013)。对于海域工程场地而言,沉积黏土层往往是场地安全性重点评估的对象。由于海域地层的黏性土明显有别于陆地,其不仅具有饱和性,且场地软土层分布往往较厚,因此,现有的一些基于陆域场地的剪切波速-抗剪强度统计经验关系,远不能适用于海域黏性土。

本文通过对渤海海域数十个石油平台项目中一系列饱和黏性土样品的剪切波速与抗剪强度实验数据的统计分析,研究确定渤海海域黏性土剪切波速与抗剪强度的经验关系,以期为本海域地震安全性评价中剪切波速参数的间接获取提供一种简便可行的实用方法。

1 数据资料情况

本文实验数据来源于渤海海域 42 个海洋石油平台(70 余个钻孔)中波速和抗剪强度资料较完整的 25 个石油平台的 35 个钻孔(图 1),其中,深度 10~12m 的钻孔 5 个,深度 39~41m 的钻孔 3 个,深度 100~121m 的钻孔 30 个。因此,剪切波速及不排水抗剪强度的实测值涉及的深度范围为 10~121m,表 1 列出了每个场地的钻孔数量和原状土样不排水抗剪强度实验数据的个数。现场实验包括手动十字板、电动十字板。室内实验为针对海域饱和土的不固结不排水剪切实验(UU 实验)。需要指出的是,本文的现场实验实为船上实验,有别于陆地工程的原位实验。收集到的现场测试数据和原状土样实验数据均在 450 个以上,其中参与统计分析的剪切波速值范围为 75.6~531.5m/s,由于海域场地土层较软,在统计深度内实际波速值大多<500m/s(>500m/s 的值几乎全为凸值)。

2 实验方法简介

在海域工程中,目前较为普遍地应用图 2 的剪切波速实验装置测试剪切波速,该装置由三轴压力室、剪切波发射与接收传感器以及 DB4 型多波测量仪组成。测量时,剪切波发射传感器接收到超声测量装置发出的电信号后,产生的剪切振动以剪切波动的方式沿土样轴向传播;当位于土样另一端的接收传感器感受到剪切波后,将该剪切振动转换为电信号并由测量装置接收,以此可以准确测量出剪切波通过试样的时间。最后,依据试样的轴向长度及剪切波通过试样的时间,即可确定试样的剪切波速。具体测试步骤在相关文献(周杨锐等,2012)中已有详细说明。

土体不排水抗剪强度的确定多采用现场测试与室内测试相结合的方法。其中,现场实验又分小型十字板(手动和电动)实验与微型十字板实验;室内通常采用不固结不排水三轴

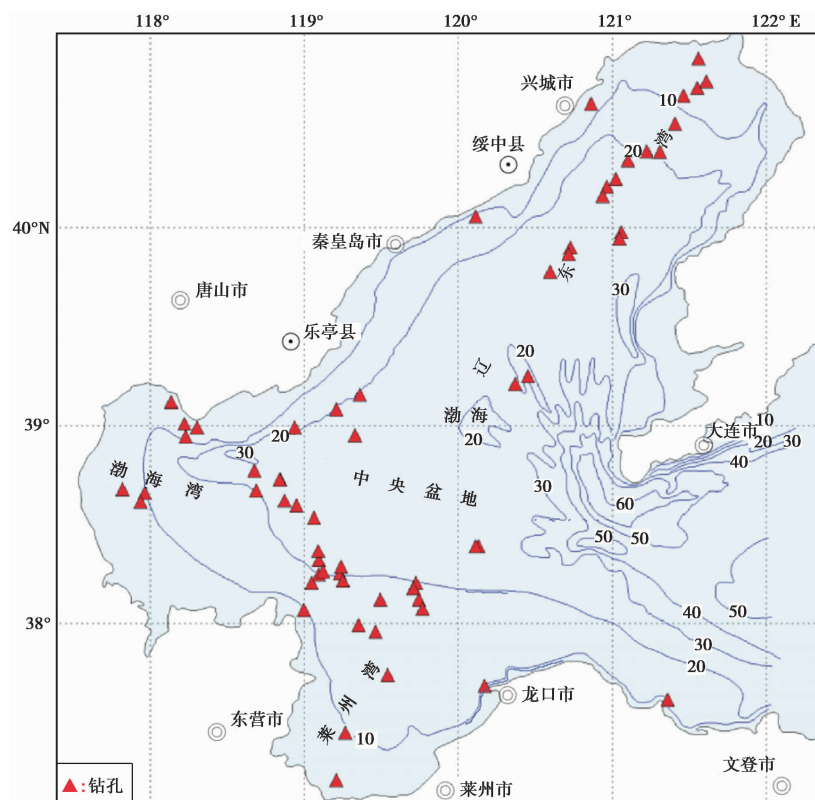


图 1 渤海海域工程钻孔分布

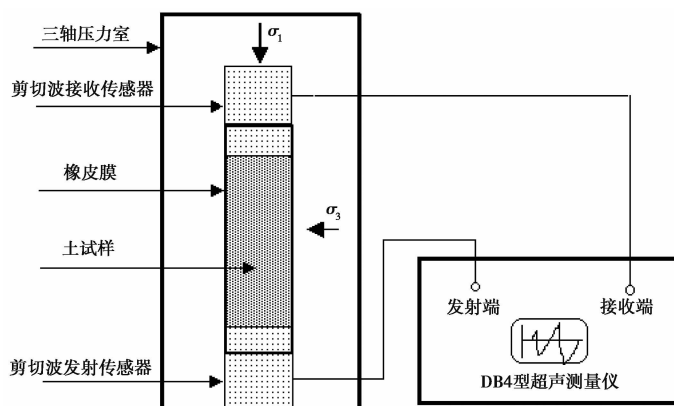


图 2 剪切波速实验装置示意图

压缩实验(UU 实验)和无侧限压缩实验等方法。

在统计的资料中,不排水抗剪强度实验主要采用小型十字板(手动和电动)实验和不排水不固结三轴压缩实验(UU 实验),具体实验方法依据美国 ASTM 规范(Annual Book of ASTM Standard)(ASTM,2000),其要点分别简述如下:

小型十字板实验为现场实验,在取样现场的土样管底部进行,通常用于测定黏性土样的

表 1 钻孔和实验数据基本情况

序号	项目代号	钻孔深度 /m	钻孔数	不排水抗剪强度实验的数据个数		
				现场实验		室内实验
				手动	电动	抗剪强度 (UU 实验)
1	BZ3-2	100.3	1	29	18	20
2	QHD33-1	120.2	1	15	15	8
3	BZ26-3WHPA	120.3	1	19	21	26
4	BZ26-3WHPB	120.3	1	22	18	21
5	BZ29-4WHPA	120.2	1	18	24	13
6	BZ29-4WHPB	120.2	1	17	25	18
7	BZ28-2S-CEP	120.3	3	25	37	47
8	BZ28-2S WHPB	120.2	2	45	18	43
9	BZ34-1 WHPE	120.2	1	19	11	25
10	BZ34-1 WHPF	120.3	1	23	9	16
11	BZ34-2/4CEPA	120.0	2	19	19	38
12	BZ34-2/4 WHPB	120.4	2	44	18	40
13	JX1-1WHPB	120.1	2	20	24	26
		120.8				
14	JX1-1CEPA	120.2	2	43	17	35
		120.4				
15	JZ25-1WHPA	120.2	2	40	23	70
16	JZ9-3W	100.5	1	20	17	14
17	JZ25-1S-CEP	114.2	2	13	18	22
		120.2				
18	JZ25-1S-WHPB	120.2	1	16	11	8
19	JZ25-1S-WHPC	120.1	1	4	3	1
20	JZ21-1	120.5	2	18	19	16
21	JZ20-2S	120.7	1	15	22	20
22	JZ 9-3-SLPW	120.3	1	17	19	28
23	JZ 9-3-DRPE	119.6	1	26	26	32
24	JZ 9-3-DRPW	120.4	1	22	33	32
25	LD5-2-2	40.4	1	6	6	0
实验数据总个数			35	570	471	619

抗剪强度。小型十字板剪力仪由一个带放射状叶片的金属圆盘构成,叶片从一个平面上凸起。实验时,圆盘和土的一个平面压紧,直至叶片完全进入土中。然后通过一个扭矩弹簧的旋转对圆盘施加扭矩,直到叶片之间的土质从土样中剪断为止。扭矩弹簧的旋转经过校正可直接地指出土的抗剪强度。本文十字板实验均在勘探船上通过箱式取样器采集的非扰动土中直接进行。

不固结不排水三轴压缩实验 (UU 实验) 为室内实验。将制备好的土样 (天然含水量下的原状黏性土样或重塑土样) 装进一个薄的橡胶膜中,并使其受到相应的围压。围压应等于土样深度处的上覆压力,或最大为 1700kPa。然后以一定的应变速率对土样施加轴向荷载直至应变近于恒定情况下土样破坏,在围压作用下和轴向加载期间不允许排水。不排水抗

剪强度值取土样破坏时总轴向应力与围压的差的一半。

上述 3 种实验方法,适用的范围有所不同,因此,在实际海域工程中往往结合使用。例如,大多数工程的现场十字板实验,不适合较深的土层,而 UU 实验则可以弥补该不足。而且,分析中所用剪切波速值来源于动三轴实验,因此在二者的相关性分析中存在的误差也比较接近。

3 实验数据预处理

本文收集的不排水抗剪强度实验数据,来源于不同的方法,包括现场的手动十字板和电动十字板以及室内的三轴压缩 UU 实验等。其中一部分数据属于同一土样的不同实验结果,即同一钻孔、同一深度的土样选用不同方法的测试结果。因此,对这些数据进行合理的预处理,是开展后续统计分析的重要环节。

首先,理论上,每种实验方法的一系列实验结果在其正常的误差范围内,总体上应该有较好的一致性,如有差异也是由实验误差和离散性造成的(龚晓南,2011)。而实际上,任何实验数据都难免出现一些明显偏离正常群体量值区间的“粗差点”或“孤突点”。例如,对于十字板剪切实验来说,不均匀土层,特别是夹有薄层粉细砂或粉土的软黏土,均会使结果出现较大的偏离;因此,本文数据预处理的第一步工作是对每种方法的实验结果进行“粗差点”的挑选并剔除。具体做法为:根据是否符合以下基本规律和经验常识,确定量值明显过高或过低的粗差点。

(1)在同一土层中土体的不排水抗剪强度随深度增加总体上应该相应增大(华南理工大学等四校合编,1991;王广军等,1986)。

(2)在软土地基中,随着孔隙水压力的消散,有效应力增大,地基的抗剪强度也相应增大,同时,剪切波速度也不同程度地增大(高印立等,1998;石中明等,2003;Hardin et al, 1963)。

(3)同一深度条件下或相同剪切波速下的实验值应大致接近,对显著偏离群体的个别离散点归类为异常粗差点。

其次,对于同一土样的某个参数,尽管测定的方法可以有多种,但正确或最优的结果只能是一个。因此,如何最大限度地克服不同方法偶然性偏差影响,获得尽可能接近真实的最优结果,是本文数据预处理的第二步工作。我们所采取的原则是对同一钻孔相同层位下多个抗剪强度测定值取加权平均。具体做法分以下几种情况。

(1)同一实验方法中,同一钻孔相同层位的多个测试数据取等权平均值。

(2)不同实验方法中,相同钻孔、同一层位的实验数据取加权平均值,其权重的取值,基于以下经验性原则:①室内实验的权重大于现场十字板(电动、手动)实验。理论上说,现场十字板所测抗剪强度与实验室三轴压缩实验的结果应该相当,但实际上,由于海域工程的现场十字板实验是在工作船的取样箱中直接进行,虽然是未经装箱运输的原状土样,但由于从钻孔中取出的样品为卸荷状态,缺失了上覆压力,故所获得的抗剪强度值相对偏小,且十字板强度反映的主要是竖直面的抗剪强度,该面上的强度通常为各面(侧面及上、下底面)强度中的小值,工程中若直接采用此值,将会偏于保守。再加上海洋工程中的黏性土并非纯黏土,往往含有砂包等,实验时十字板的板头较小,也会导致其存在一定误差。而室内实验虽

然存在运输制备土样的扰动,但由于实验中施加围压,其结果比十字板更符合实际情况,因此在海域工程中往往采用该值。②根据经验,当土层非常软时,室内实验无法测得准确的值,而十字板实验测得的强度则相对较准确。③十字板实验中的手动和电动相比,由于手动的人为操作所引起的误差更大,因此,电动十字板所占权重相对较大。

根据上述原则,在实验数据的预处理中,各种情况下的权重取值见表 2。

表 2 同一钻孔、同一土层不同实验结果加权平均时的权重取值

共存实验值情形	权重大小
UU 实验、电动十字板、手动十字板	0.65、0.25、0.1
UU 实验、电动十字板	0.65、0.35
UU 实验、手动十字板	0.8、0.2
电动十字板、手动十字板	0.6、0.4

图 3 为本文收集、整理的所有实验数据。由于众多数据出自同一钻孔、同一土层但不同手段的实验结果,所以表现出数据丰富但离散度亦较大的特点。其中,对于那些明显偏离正常范围的“粗差点”,在图中进行了判定和标示(红色五角星),并在统计分析中予以剔除。手动、电动十字板数据分别剔除了 51 个和 42 个,所占比例分别为 9.0%(51/565)、8.9%(42/471)。可以看出其分布粗略地反映出土样不排水抗剪强度与剪切波速的相互关系。

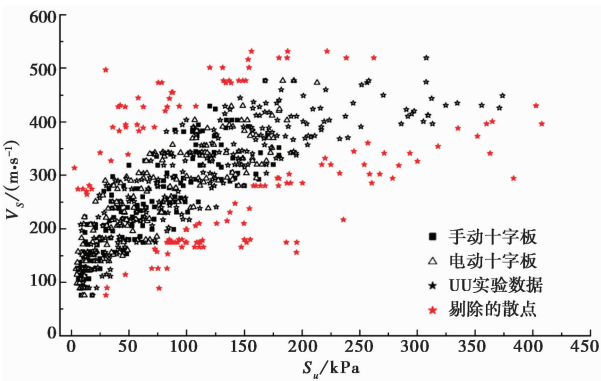


图 3 本文收集的所有实验数据

图 4 为剔除“粗差点”并对同一钻孔、同一土层、多种实验手段的数据进行加权平均整理后的结果。这里的整理包括剔除“粗差点”并对同一钻孔、同一土层、多种实验手段的数据进行加权平均,获取最可信的估值。其分布较为清晰地反映出土样不排水抗剪强度与剪切波速的相互关系。

图 5 较好地显示了不排水抗剪强度实验值随深度增大而大致线性增大的基本规律和特征。

4 剪切波速与抗剪强度的统计关系

根据实验数据所绘制的土样剪切波速与不排水抗剪强度的散点分布图(图 4),直观地尝试构建了 4 种可能的关系模型。

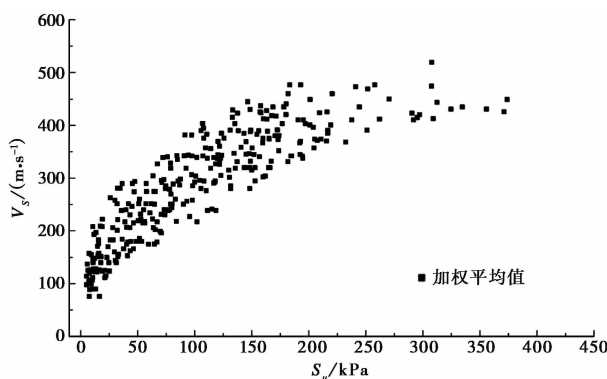


图 4 整理后的实验数据

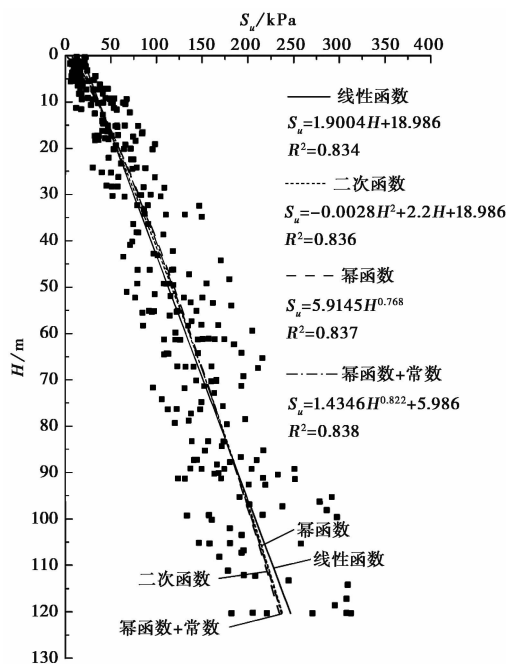


图 5 黏土不排水抗剪强度随深度的变化

- (1) 线性函数: $V_s = aS_u + b$;
- (2) 二次函数: $V_s = aS_u^2 + bS_u + c$;
- (3) 幂函数: $V_s = aS_u^b$;
- (4) 幂函数+常数: $V_s = aS_u^b + c$ 。

基于 OriginLab 公司开发的 Oringin V8.0 软件,进行了严密的回归拟合,具体结果如图 6 所示。

从图 6 的 4 种不同函数的拟合可以看出,线性函数的拟合优度为 0.737,而其余 3 种类型函数的拟合优度明显更好,且均在 0.83 左右,并无实质性的差别。基于“在拟合优度差异不大的情况下,优选参数较少且形式简单的函数”的惯例,确定出渤海海域黏性土剪切波速

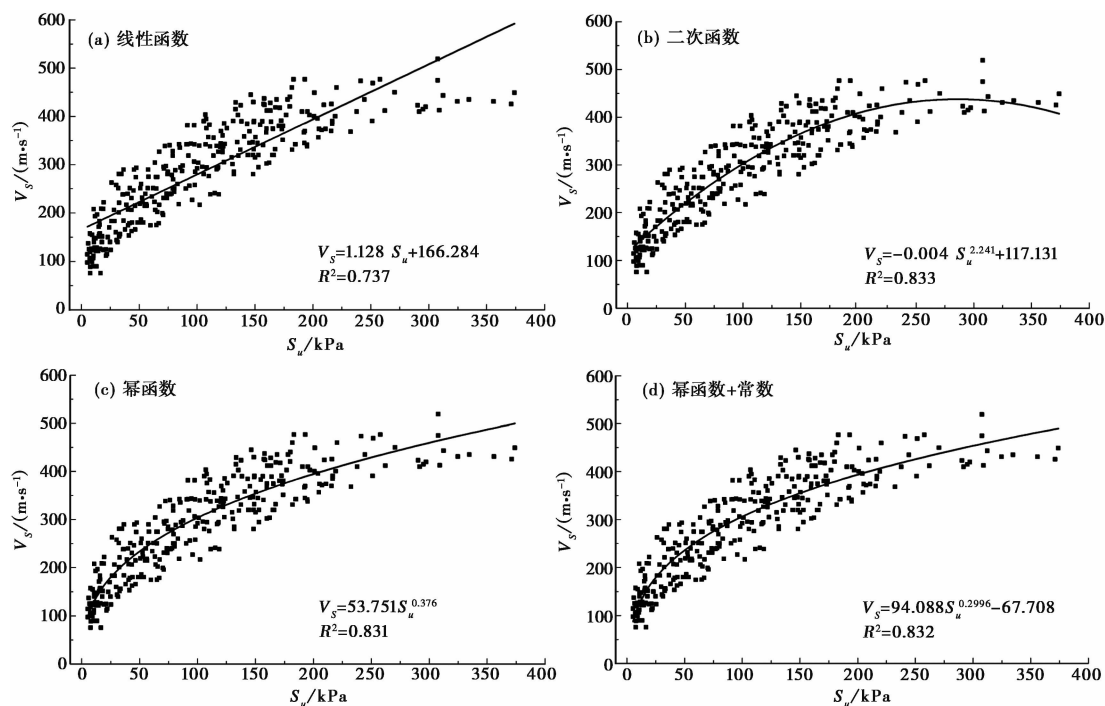


图6 剪切波速与不排水抗剪强度关系的拟合回归

V_s 与抗剪强度 S_u 之间的统计经验关系为幂函数

$$V_s = 53.751 S_u^{0.376} \quad (1)$$

5 讨论

为了检验上述所得统计关系的有效性,使之能够实际应用于海域工程黏性土剪切波速的确定,选取了3个工程实例进行计算检验对比。表2列出了渤海海域某石油平台工程地质勘察中3个钻孔(1#、2#、3#)在不同深度地层剪切波速和抗剪强度的实验值,基于本文统计经验关系($V_s = 53.751 S_u^{0.376}$)计算所得剪切波速结果见表3、图7。3个钻孔虽不属于本次统计数据中,但从其拟合结果可以看出:

(1) 据现场抗剪强度测试值计算所得剪切波速与实测剪切波速之间的误差均相对均较小,误差范围在 $-8.85\% \sim 10.00\%$ 之间,能满足实际工程的要求,因此,总体上回归方程较为可靠。

(2) 剪切波速计算值与实测值在地层较浅处($<50\text{m}$)或抗剪强度较小($<100\text{kPa}$)时的差异较小,随深度(或抗剪强度)增加,差异有所增大(表3、图7)。

(3) 剪切波速计算值在土层埋深 >50 后(除个别点外)普遍小于实测值(表3),可能与不同实验室波速测试的系统偏差有关:一方面是实验方法差异所致,剪切波速实验为动力实验,而抗剪强度属静力实验,且实验中施加的围压也会导致结果偏大;另一方面,由于海洋黏性土土质局部不太均一,实例中深部黏性土层中局部夹杂粉砂薄层,因而导致实验得到的剪切波速值偏大。但由于误差率不大,总体来说,回归方程仍较为可靠,具有较好的实用性。



表 3 不排水抗剪强度实测值与计算值比较

1 [#] 钻孔		实测值		计算值	
岩性	深度	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	抗剪强度 S_u / kPa	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	偏差 /%
粉质黏土夹细砂质粉砂	4.30	126.0	10.88	131.77	-4.58
	10.20	183.0	28.65	189.59	-3.60
	13.30	206.0	43.27	221.36	-7.46
粉质黏土	49.50	327.0	118.50	323.19	1.17
粉质黏土	67.50	374.0	161.01	362.64	3.04
粉质黏土	79.60	403.0	176.85	375.66	6.79
粉质黏土	96.90	449.0	215.19	404.39	9.93
粉质黏土	105.35	477.0	257.85	432.83	9.26
	120.25	519.0	307.83	462.62	9.47
2 [#] 钻孔		实测值		计算值	
岩性	深度	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	抗剪强度 S_u / kPa	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	偏差 /%
粉质黏土	4.60	126	9.17	123.60	1.91
	8.60	183	26.11	183.10	-0.06
	10.70	206	28.16	188.36	8.56
	15.30	217	38.39	211.62	2.48
	20.90	231	53.25	239.30	-3.59
粉质黏土与细砂质粉砂互层	22.40	241	68.00	262.33	-8.85
	61.20	357	122.34	327.09	8.38
	75.70	391	153.60	356.28	8.88
	81.70	403	179.20	377.52	6.32
	87.35	424	209.49	400.33	5.58
粉质黏土	107.30	477	262.97	436.03	8.59
3 [#] 钻孔		实测值		计算值	
岩性	深度	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	抗剪强度 S_u / kPa	剪切波速 $V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	偏差 /%
粉质黏土	4.80	126	9.46	125.03	0.77
	5.70	183	24.93	179.94	1.67
	12.80	206	29.80	192.41	6.60
	14.70	217	41.46	217.83	-0.38
	42.85	306	97.496	300.35	1.85
	51.90	327	105.93	309.86	5.24
粉质黏土与细砂质粉砂互层	70.05	374	160.49	362.20	3.15
	78.50	403	196.93	391.14	2.94
	87.80	424	215.36	401.67	4.60
粉质黏土	107.30	477	260.00	434.18	8.98

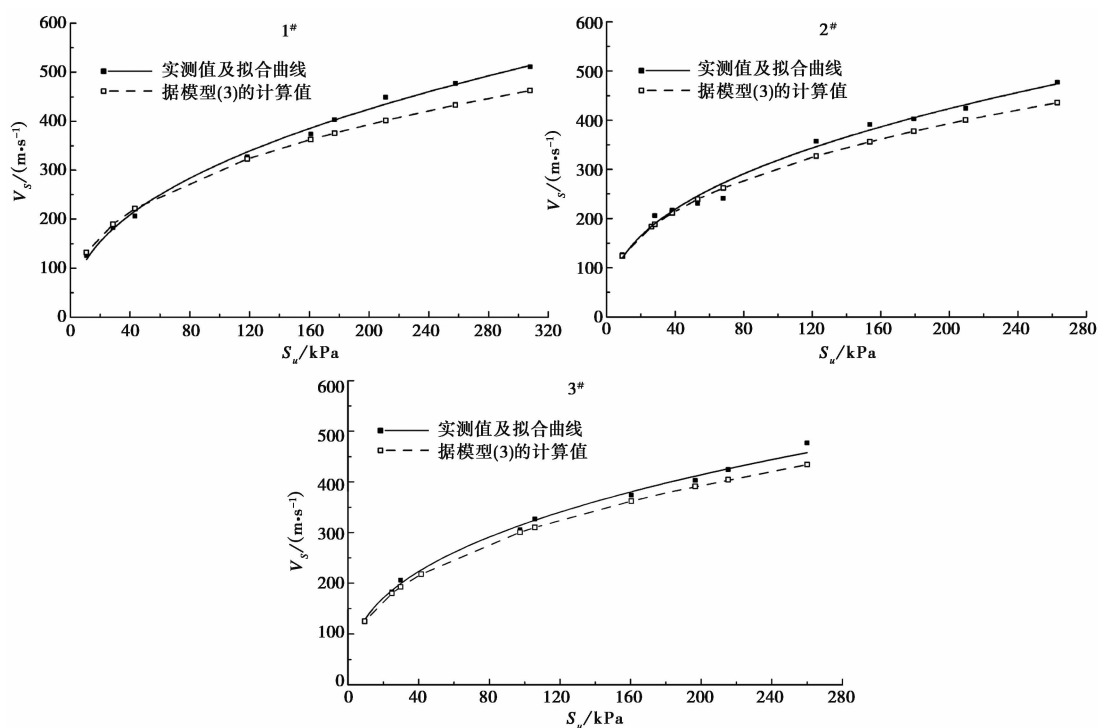


图 7 实测剪切波速与根据拟合模型计算的剪切波速值对比

关于抗剪强度与剪切波速的统计关系,在陆域工程场地中,前人的研究中有些认为符合线性关系(夏唐代等,2004;陈文强等,2013;闫澍旺等,2009),也有些认为符合幂函数分布(石中明等,2003;Kondner,1963;张宝山,1984)。从本文的统计结果来看,海域场地土和陆域场地土确实存在着差异。因此,需要基于某一具体海域的实际土样实验数据,统计出适合于该区域的经验关系。

6 结论

在目前海洋工程原位波速测试工作难度较大的情况下,本文通过较充分的工程实例数据统计分析,显示了剪切波速与抗剪强度之间具有明显的相关性。

通过对渤海海域 25 个石油平台项目中 35 个钻孔的一系列饱和黏性土样品剪切波速与抗剪强度实验数据的统计分析,研究确定了该海域黏性土剪切波速与抗剪强度的最佳经验关系为 $V_s = 53.751S_u^{0.376}$ 。该结果表明,海域饱和黏性土的剪切波速与抗剪强度具有较好的相关性。在海域工程中缺少剪切波速测试值时,利用此关系式可以对剪切波速进行快速而合理地计算,从而可以用于地震安全性评价中的土层地震反应分析计算及软土震陷判定。因此,利用本文所得到的统计关系式对海域黏性土的剪切波速值进行估算不失为一种简便、可行的实用性方法。

参考文献

陈国兴,徐建龙,袁灿勤,1998. 南京城区岩土体剪切波速与土层深度的关系. 南京建筑工程学院学报, (2):32~37.

- 陈文强,赵宇飞,赵发辉,等,2013. 岩体工程特性现场测试方法及其成果相关性研究. 水文地质工程地质, **40**(6):55~61.
- 高印立,阎澍旺,王金英,1998. 剪切波速与土性指标间的统计关系. 建筑科学, **14**(5):20~22.
- 高玉峰,刘汉龙,2003. 合肥膨胀土剪切波速的特征分析. 岩土工程学报, **25**(3):371~373.
- 龚晓南,2011. 软黏土地基土体抗剪强度若干问题. 岩土工程学报, **33**(10):1596~1600.
- 华南理工大学等四校合编,1991. 地基及基础. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社.
- 李平,薄景山,孙有为,等,2010. 西昌市场地剪切波速与土层深度经验关系. 世界地震工程, **26**(4):13~17.
- 刘红帅,郑桐,齐文浩,等,2010. 常规土类剪切波速与埋深的关系分析. 岩土工程学报, **32**(7):1142~1149.
- 裴强,雷焕珍,刘红帅,2013. 渤海浅表土层剪切波速与埋深间的关联性. 世界地震工程, **29**(2):46~51.
- 齐鑫,丁浩,2012. 下辽河平原区剪切波速与土层埋深关系分析. 世界地震工程, **28**(3):151~156.
- 邱志刚,薄景山,罗奇峰,2012. 土壤剪切波速与标贯击数关系的统计分析. 自然灾害学报, **21**(2):102~107.
- 邱志刚,薄景山,罗奇峰,2011. 土壤剪切波速与埋深关系的统计分析. 世界地震工程, **27**(3):81~88.
- 石中明,周华飞,梁国钱,等,2003. 瑞利波法估算地基抗剪强度的应用. 中国市政工程, (2):58~60.
- 王广军,苏经宇,1986. 连云港碱厂层状土剪切波速沿深度变化的推测. 勘察科学技术, (3):35~38.
- 王建华,程国勇,张立,2004. 一种在三轴压力室内测试土样剪切波速的新装置. 天津大学学报, **37**(2):152~156.
- 夏唐代,颜可珍,石中明,等,2004. 地基剪切波速与抗剪强度的关系研究. 岩石力学与工程学报, **23**(增刊 I):4435~4437.
- 闫澍旺,封晓伟,侯晋芳,等,2009. 用十字板强度推算软黏土抗剪强度指标的方法及应用. 岩土工程学报, **31**(12):1805~1810.
- 战吉艳,陈国兴,刘建达,2009. 苏州城区深软场地土剪切波速与土层深度的经验关系. 世界地震工程, **25**(2):11~17.
- 张宝山,1984. 地基土的弹性波速度. 工程勘察, (3):75~76.
- 郑灿堂,顾红鹰,徐尚杰,等,1999. 土的横波波速与标贯击数关系的实验研究. 山东水利, (6~7):92~93.
- 郑金安,1985. 软土的地震波速与标准贯入击数、深度的相关特征. 岩土工程学报, **7**(1):68~75.
- 中华人民共和国水利部,1999. SL 237-1999 土工实验规程. 北京:中国水利水电出版社.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2009. GB 50021-2001 岩土工程勘察规范(2009 年版). 北京:中国建筑工业出版社.
- 周杨锐,董明明,吴海京,等,2012. 海洋浅层土质剪切波速与深度的关系分析. 海洋通报, **31**(1):63~66,87.
- ASTM,2000. Annual Book of ASTM Standard 2000;Section 4;Construction;Volume 04.02;Concrete and Aggregates. USA:ASTM International.
- Hardin B O, Richart Jr F E,1963. Elastic wave velocities in granular soil. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, **89**(1):33~65.
- Kondner R L,1963. Hyperbolic stress-strain response;cohesive soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, **89**(1):115~143.

A Preliminary Study on Statistical Relationship between Shear Wave Velocity and Shear Strength of Clayey Soil in Bohai Sea Area

Huang Yahong Lü Yuejun Peng Yanju Fang Yi

National Institute of Natural Hazards, MEMC, Beijing 100085, China

Abstract As a key index and parameter to determine the site type in seismic safety evaluation for marine engineering, shear wave velocity is closely related to the strength, shear modulus and predominant period of site foundation soil. However, the shear wave velocities are usually difficult to be directly obtained in situ test, and the test results from laboratory are generally much different from their actual values, it is important to obtain the shear wave velocity parameters through other indirect means for the seismic safety evaluation of marine engineering. In this paper, based on the statistic analysis of the laboratory test results of the shear wave velocity and shear strength of a series of the saturated clayey soil samples from dozens of oil platform projects in Bohai Sea area, we conducted a variety of possible function fittings to determine the empirical relationship between the shear wave velocity V_s and the shear strength S_u . The result shows that the power function $V_s = 53.751S_u^{0.376}$ represents the best statistical empirical relation among the different fitting curves. The relation function we obtain can provide a simple and feasible method for estimating shear wave velocity through undrained shear strength in marine engineering in Bohai Sea area.

Keywords: Bohai Sea area; Marine clay soil; Shear wave velocity; Undrained shear strength; Statistical relations