

DOI: 10.11779/CJGE201508026

原位十字板试验评价上海软黏土灵敏性的可靠性

高彦斌

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092)

摘 要: 详细分析了上海某工程勘察数据以及相关文献资料, 发现 FVT 试验得到的灵敏度要明显小于 UCT 试验结果, 因而会不同程度地低估上海地区各软黏土层的灵敏度。进一步研究表明, 十字板重塑方式(而不是手工重塑)是造成 FVT 试验得到重塑土强度过高因而灵敏度偏低的主要原因, 而这两种试验采用的试验方法以及原位应力对灵敏度测试结果的影响并不大。这种现象应引起工程界的重视以便正确评价我国沿海地区广泛分布的海相沉积软黏土的结构性和灵敏性。

关键词: 软黏土; 灵敏度; 原位十字板试验; 无侧限抗压强度试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)08-1539-05

作者简介: 高彦斌(1973-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事软土力学特性和软土地基处理方面的研究工作。E-mail: yanbin_gao@tongji.edu.cn。

Reliability of FVT for sensitivity evaluation of Shanghai soft clay

GAO Yan-bin

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji university, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: The geotechnical investigation data from a real project in Shanghai as well as other relevant published data are analyzed. It is found that the sensitivity obtained by the FVT test is significantly smaller than the results of the unconfined compression test (UCT). Thus the sensitivity of soft clay will be underestimated by FVT. The vane-shear remolding method (not the artificial remolding method) makes the FVT obtain much higher remolded strength and therefore the lower sensitivity than UCT. The influences of test methods and in-situ stress state can be neglected. It is pointed out that much attention should be paid to this phenomenon in order to properly evaluate the sensitivity of the marine soft clay distributed in the coastal areas of China.

Key words: soft clay; sensitivity; field van-shear test; unconfined compression test

0 引 言

原状黏性土重塑后强度会降低, 即表现出一定的灵敏性和结构性。Terzaghi^[1]在 1944 年提出了一个评价软黏土灵敏性的指标, 即灵敏度 S_t 。该指标定义为采用无侧限抗压强度试验(Unconfined compression test, 简称 UCT)测定得的原状土峰值强度 q_u 和重塑土峰值强度 q'_u 之比, 即 $S_t = q_u / q'_u$ 。按照灵敏度的大小可以对软黏土的灵敏性(或结构性)进行分类。我国相关规范^[3]采用 Skempton 等^[2]在 1952 年所提出的分类标准, 将软黏土分为中等灵敏性 $2 < S_t \leq 4$ 、高灵敏性 ($4 < S_t \leq 8$)、极灵敏性 ($8 < S_t \leq 16$) 和流性 ($S_t > 16$) 四类。我国沿海地区广泛分布有第四纪海进沉积的软黏土, 分为淤泥和淤泥质土两类, 灵敏度大多在 3~8 之间(如钱征^[4]对天津软土, 樊向阳等^[5]对上

海软土; 缪林昌等^[6]对江苏软土; 李鹏娥^[7]对闽南软黏土), 多属于中等灵敏性土和高灵敏性土。

对于灵敏性过高的土, 由于重塑土强度过小而难以制取标准的圆柱形试样, 则采用原位十字板试验

(Field vane test, 简称 FVT)来测得灵敏度, 即 $S_t = S_u / S'_u$, 其中 S_u 和 S'_u 分别为 FVT 试验测得的原状土和重塑土不排水抗剪强度。与 UCT 试验相比, FVT 试验还有一个优点是可以避免 UCT 试验存在的取样扰动问题。在中国 FVT 已经发展成为工程勘察中测定软黏土灵敏度的主要方法。

FVT 试验属于原位试验而 UCT 试验属于室内试验, 两种试验的原理、方法以及土样所处的应力状态

基金项目: 国家自然科学基金项目(40702051)

收稿日期: 2015-11-15

都有较大的差别, 因此两种方法测得的强度和灵敏度也可能不会完全一致。在总结工程经验的基础上, 中国工程界也有人注意到了这两种方法测得的软黏土的灵敏度存在明显差别, 代表性的工作包括樊向阳等^[5]对这两种方法测得的上海软黏土灵敏度对比分析; 娄炎等^[8]对两种方法测得的杭州湾大桥南岸高速公路试验段软土的灵敏度对比分析。这些为数不多的资料表明 FVT 试验结果要明显小于 UCT 试验结果, 二者差别有时甚至可达到三倍以上, 这样对于同一土层, 两种方法会给出不同的结构性分类结果。然而, 这种现象目前并未引起工程界足够的重视, 造成这种现象的原因也不甚清楚。

本文将结合上海某工程勘察数据详细分析两种试验所测得上海软黏土不排水抗剪强度和灵敏度差异性的规律, 并从多方面分析造成这种差异的原因。进而在此基础上, 对中国工程界以 FVT 试验方法来评价中国海相沉积软黏土灵敏性的现状进行评述。

1 上海某工程的软黏土灵敏性勘察

1.1 地质情况

上海软黏土是中国沿海地区具有代表性的一种海相沉积软黏土, 孔隙比在 1.0~1.5 之间。该工程场地均位于上海浦东金海路附近, 场地典型地层分布、含水率 (天然含水率 w_0 , 塑限含水率 w_p , 液限含水率 w_L) 随深度 Z 的变化以及由单桥静力触探得到比贯入阻力曲线 (p_s 曲线) 如图 1 所示。其中塑限含水率 w_p 采用搓条法测得, 液限含水率 w_L 采用落锥法测得 (圆锥质量 76g 沉入深度 10 mm)。该场地 25 m 深度范围内分布着第③层淤泥质粉质黏土、第④层淤泥质黏土层和第⑤层黏土, 厚度分别为 8, 10 和 5 m 左右, 孔隙比在 1.0~1.5 之间, 是上海地区的主要海相沉积软土层。表 1 给出了这 3 个软土层基本物理力学指标平均值。第③层的塑性和含水率较其他两个土层略低一些; 第④层和第⑤层具有相近的塑性, 但第⑤层的含水率要略低一些。

表 1 场地土层物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土层	孔隙比 e_0	含水率 $w_0/\%$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	比贯入阻力 P_s /MPa
③	1.207	42.8	21.7	36.5	15.4	1.41	0.63
④	1.390	48.9	23.5	43.6	20.1	1.29	0.64
⑤	1.292	44.7	23.8	45.0	21.3	1.00	0.89

该工程共进行了 8 个 FVT 试验孔, 并在 12 个钻孔中采用敞口薄壁取土器取原状土进行了四十多组 UCT 试验, 这种取土方法也是中国沿海地区采取软黏

土原状土样的主要方法。FVT 试验和 UCT 试验的操作严格按照相关规范^[9-10]的规定进行。FVT 试验采用高度为 100 mm、宽度为 50 mm 的十字板头, 剪切速率为 $0.1^\circ/\text{s}$, 十字板旋转 6 圈后测重塑土的强度。

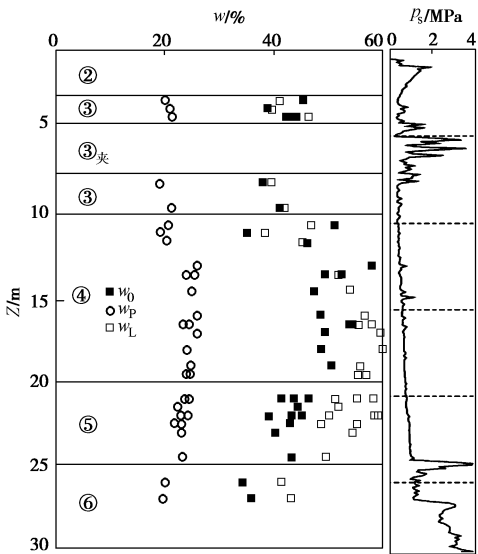


图 1 场地土层分布及工程特性

Fig. 1 Soil distribution and geotechnical properties of site

1.2 灵敏度测试结果

由 8 个 FVT 试验孔和 40 组 UCT 试验得到的灵敏度 S_t 与深度 Z 的关系曲线见图 2 所示。FVT 试验测得的 3 个土层的灵敏度集中在 2.5~3.5 较窄的范围内, 数据离散小; UCT 试验测得的灵敏度在 2.5~5.0 之间, 数据离散性较大。可以看出, 绝大部分 FVT 试验得到灵敏度明显小于 UCT 试验得到的灵敏度。

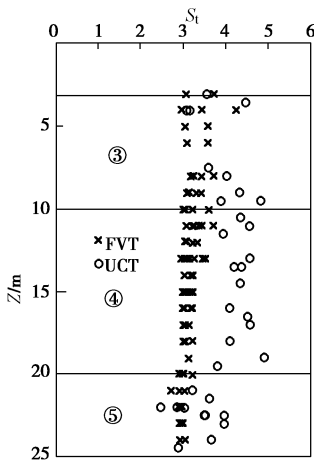


图 2 FVT 试验和 UCT 试验得到的灵敏度 S_t

Fig. 2 Sensitivities measured by FVT and UCT

表 2 给出了这些灵敏度数值的统计结果, 包括平均值、数据点数和均方差。从表 2 也可以看出 FVT 试验得到的灵敏度要明显小于 UCT 试验的结果, 且 3 个土层中第④层土差别最大, 两种方法测得的灵敏度平均值分别为 3.10 (FVT) 和 4.46 (UCT), FVT 试验为 UCT 试验的 0.7 倍。按照中国采用的结构性分类

标准，两种试验方法对第③层和第⑤层的分类结果是一致的，属中等灵敏性土；但对第④层土，按 FVT 试验划分为中等灵敏性土，而按 UCT 试验则划分为高灵敏性土，两种试验方法的分类结果不一致。

表 2 FVT 试验和 UCT 试验灵敏度统计

Table 2 Statistics of sensitivities obtained by FVT and UCT						
土 层	S_t 平均值 (数据点数, 均方差)					
	本文 (单个工程)			樊向阳等 (几个工程)		
	FVT 试验	UCT 试验	FVT /UCT	FVT 试验	UCT 试验	FVT /UCT
③	3.35 (41,0.36)	3.98 (12,0.68)	0.84	2.32 (22, 0.8)	3.71 (13,1.19)	0.63
④	3.10 (75,0.13)	4.46 (11,0.38)	0.70	2.54 (30,0.42)	5.18 (44,1.87)	0.50
⑤	2.94 (18,0.08)	3.24 (17,0.63)	0.91	3.69 (16,0.67)	4.53 (59,1.26)	0.81

表 2 中同时给出了樊向阳等对上海地区几个市政工程（上海市轨道交通 M8 线, 明珠线二期, 浦东国际机）的勘察数据的统计结果，其中包括 135 组 UCT 试验数据和 5 个钻孔的 FVT 试验数据。表 2 给出的这些统计结果表明：①FVT 试验得到的灵敏度要明显小于 UCT 试验的结果；②这种差别与土性有关，3 个土层中第④层土差别最大，其次是第③层土，差别最小的是第⑤层土。这种规律在上海地区应该不是偶然现象而应该是一种普遍规律。当然，正如前面提到的，由于 UCT 试验得到的灵敏度值较为离散，实际工程中个别 UCT 试验结果小于 FVT 试验结果也是正常的。

在这些 UCT 试验中，峰值强度对应的应变在 5%~8%。明显大于破坏应变为 3%左右的高质量土样。从理论上讲，受取土扰动的影响，这些 UCT 试验得到的原状土强度偏小而导致测得的灵敏度偏小。也就是讲，采用高质量的原状土样进行的 UCT 试验得到的灵敏度应该比这些工程勘察中采用薄壁取土器取土的 UCT 试验得到的灵敏度还要高，后面介绍的高彦斌等^[13]采用块状土样的试验结果将证明这一点。而由 FVT 试验得到的灵敏度比这些受取土扰动影响的 UCT 试验的结果还要小，显然 FVT 试验会严重低估这些软黏土的真实灵敏度。

1.3 不排水抗剪强度

图 3 给出了 FVT 试验和 UCT 试验得到的不排水抗剪强度与深度 Z 的关系曲线，包括 FVT 试验测得的原状土强度 S_u 和重塑土强度 S'_u ，UCT 试验测得的原状土强度 $q_u/2$ 和重塑土强度 $q'_u/2$ 。可以看出，FVT 试验得到的原状土强度和重塑土强度与深度 Z 的关系比较明显，在第③层土中随着深度的增加而减小，而在

其下部的两个土层中，则随着深度的增加而线性增加。第③层土的 FVT 试验数据要离散一些，这与该层土含有较多的薄层砂土夹层有关。但是，UCT 试验得到不排水抗剪强度与深度的关系不明显。尤其是在第④层土中，由于 UCT 试验得到的原状土强度随深度的增长并不明显，造成两种试验得到的原状土强度的差别随深度的增加而加大。取土卸载造成的土中有效应力的减小可能是造成这个现象的原因之一，而取样造成的土体结构扰动随着深度增大而增大也可能也是另外一个因素。

从图 3 可以看出无论是原状土强度还是重塑土强度，大部分 FVT 试验结果大于 UCT 试验结果。表 3 给出了这两种试验得到的不排水抗剪强度的统计结果，包括平均值，数据点数和均方差，另外还给出这两种试验所得的不排水抗剪强度的比值，即原状土强度比 $S_u/(q_u/2)$ 和重塑土强度比 $S'_u/(q'_u/2)$ 。第③、④和⑤层的原状土强度比 $S_u/(q_u/2)$ 的平均值为 1.39、1.86 和 1.47，重塑土强度比 $S'_u/(q'_u/2)$ 的平均值分别 1.58、2.68、1.58。可以看出，重塑土强度比 $S'_u/(q'_u/2)$ 要普遍高于原状土强度比 $S_u/(q_u/2)$ ，第④层土中尤为明显。因此，FVT 试验得到的重塑强度过高是造成该方法测得的灵敏度较低的原因。

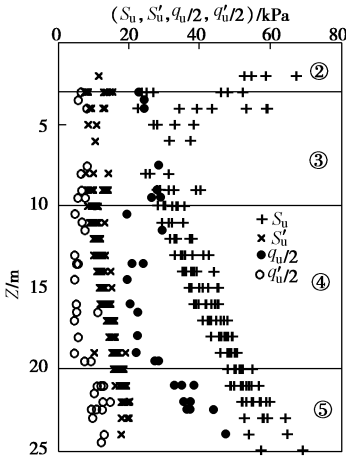


图 3 FVT 试验和 UCT 试验测得的不排水抗剪强度

Fig. 3 Undrained shear strengths measured by FVT and UCT

1.4 FVT 试验得到 S'_u 过高的原因分析

FVT 试验得到较高的重塑土强度可能与重塑方式有关。UCT 试验采用的重塑方式是在保持天然含水状态下人工揉搓土样，FVT 则是在原位将十字板旋转若干圈（一般 6 圈以上）来重塑土样。这里将前者称为“手工重塑”而后者称为“十字板重塑”。十字板重塑如不能达到手工重塑的效果则可能会使得测试得到的重塑强度较高。Chaney 等^[12]、Tsnaka 等^[13]给出的试验结果也验证了这一点。Chaney 等^[12]同时还发现有相反的情况存在：一种液性指数较低的黏土（约 0.4）

的十字板重塑土样反而具有比手工重塑土样小的强度。另外，这些研究还发现增加十字板旋转次数并不能够消除这种差别，重塑强度并不会随着旋转次数的增加而有明显变化。

表 3 FVT 试验和 UCT 试验不排水抗剪强度统计结果
Table 3 Statistics of undrained shear strengths obtained by FVT and UCT

土 层	不排水抗剪强度平均值 (数据点数, 均方差)				强度比	
	原状土		重塑土		原状土	重塑土
	S_u /kPa	$q_u/2$ /kPa	S'_u /kPa	$q'_u/2$ /kPa	$S_u/(q_u/2)$	$q_u/(q_u/2)$
③	34.5 (41,9.1)	24.8 (12,2.4)	10.1 (41,2.1)	6.4 (12,0.68)	1.39	1.58
④	41.4 (75,6.5)	22.3 (11,2.7)	13.4 (75,2.4)	5 (11,0.39)	1.86	2.68
⑤	54.5 (18,2.78)	37.1 (17,5.3)	18.5 (18,1.0)	11.7 (17,0.48)	1.47	1.58

除了重塑方式外，试验过程中土体所处的应力状态的不同应该也是造成 FVT 试验得到的重塑土强度要远高于 UCT 试验的另外一个原因。在 FVT 试验中，重塑后土中的有效应力会减小，但不会完全丧失。而 FVT 试验得到的重塑土强度随深度线性增长的现象极可能与残余有效应力有关。但是在 UCT 试验中，我们发现重塑后土样中的有效应力几乎为零，这也会造成 UCT 试验测得的重塑土的强度较低，而且与取土的深度关系不明显。但是需要特别说明的是，应力状态同样也会对原状土强度产生影响，这也是造成前 FVT 试验得到的原状土强度比 UCT 试验大的主要原因。

2 结合第④层土块状土样试验结果进行的进一步对比分析

在 3 个土层中，两种试验给出的第④层土的强度和灵敏度的差别是最大的。高彦斌等^[13]曾采取上海第④层土的块状土样对该土层的灵敏性及其机理进行了详细的研究，共进行了 5 组 UCT 试验以及两种重塑方法（十字板重塑和手工重塑）下 4 个测点的室内十字板试验（Laboratory vane test, 简称 LVT 试验）。表 4 汇总了由这些试验得到的原状土强度、重塑土强度和灵敏度强度的平均值。下面结合表 2~4 的数据从以下 4 方面进行进一步分析。

2.1 对勘察结果的评价

采用块状土样的 UCT 试验给出的原状土强度为 28.5 kPa，重塑土强度为 5.4 kPa，灵敏度为 5.6（见表 4）。工程勘察 UCT 试验得到第④层土的平均值为原状

土强度 22.3 kPa，重塑土强度 5.0 kPa，灵敏度 4.46（见表 2，3）。可见由于土样扰动，工程勘察 UCT 试验对原状土强度和灵敏度低估约 20%。工程勘察中由 FVT 试验得到的第④层土的灵敏度平均值仅为 3.1，低估 45%。可见 FVT 试验严重低估该土层的灵敏性，其可靠性不及 UCT 试验。在其他两个土层中，应该也存在同样的情况。

2.2 两种试验方法的影响

采用块状土样的 UCT 试验和 LVT 试验给出的原状土强度分别为 28.5 kPa 和 29.5 kPa。在采用相同的手工重塑方式下，两种试验测得的重塑土强度平均值分别为 5.4 kPa 和 4.9 kPa，灵敏度分别为 6.0 和 5.6。这些数据说明在完全相同的试验条件下，这两种方法得到的强度和灵敏度均差别不大，说明试验方法本身对强度和灵敏度的测试结果影响不大。

2.3 重塑方式的影响

在采用手工重塑下，LVT 试验测得的重塑土强度为 4.9 kPa，灵敏度为 5.6。而在采用十字板重塑下，LVT 试验测得的重塑土强度为 8.6 kPa，灵敏度仅 3.4。后者的重塑土强度为前者的 1.8 倍，但灵敏度只有 1/1.8。可见重塑方式对重塑土强度和灵敏度的试验结果的影响显著。因此可以推断十字板重塑应该是造成工程勘察中 FVT 试验得到的重塑土强度较大而灵敏度较低的一个重要因素。

2.4 原位应力对 FVT 试验结果的影响

通过对比 LVT（采用十字板重塑）和 FVT 试验结果可以分析原位应力对 FVT 试验结果的影响。LVT 试验测得的原状土强度为 29.5 kPa，重塑土强度为 8.6 kPa（十字板重塑），灵敏度为 3.4（见表 4）。在取土深度处 FVT 试验得到的原状强度为 33 kPa，重塑土强度为 11 kPa，灵敏度为 3。可以看出，虽然原位应力会导致 FVT 试验测得的强度增大，但对灵敏度的影响似乎并不那么明显。因此，FVT 试验得到较低的灵敏度的主要原因应该还是前面提到的重塑方式。

表 4 块状土样灵敏度试验结果汇总（平均值）

Table 4 Summarized results of sensitivities obtained from block samples (average values)			
试验方法	S_u 和 $q_u/2$ /kPa	重塑方法, S'_u 和 $q'_u/2$ /kPa	灵敏度 S_t
UCT	28.5	手工重塑, 5.4	5.6
LVT	29.5	手工重塑, 4.9	6.0
		十字板重, 8.6	3.4

3 结论与讨论

本文的研究结果表明：对于上海软黏土，FVT 试

验得到的灵敏度要普遍小于 UCT 试验,其中第④层土差别最大,其次是第③层土,差别最小的是第⑤层土;第④层土容易出现两种试验方法给出的结构性分类不一致的情况。采用第④层土块状土样进一步研究表明,工程勘察中 FVT 试验和 UCT 试验均会在一定程度上低估该土层的灵敏度,尤其是 FVT 试验。因此,工程勘察中 FVT 试验对上海软黏土灵敏性评价的可靠性不及 UCT 试验。从本文的试验数据来看,造成这种现象的主要原因是 FVT 试验采用的十字板重塑方式导致其得到远高于工重塑情况下的重塑土强度。

软黏土灵敏度的定义以及按照灵敏度的大小来进行结构性分类最初是基于 UCT 试验的。2011 年中华人民共和国住房和城乡建设部发布的《软土地区岩土工程勘察规程》中规定“软土的结构分类宜采用原位十字板剪切试验,也可采用无侧限抗压强度试验方法测定灵敏度”。由此可见中国工程界对 FVT 试验的重视和信赖,这也许该归因于我国工程界取土质量问题得不到有效改善而使得 UCT 试验结果不可靠。然而,FVT 试验采用的重塑方法会造成其低估上海地区以及可能其他沿海地区海相软黏土的灵敏性和结构性,这一点同样应该引起工程界的重视。

参考文献:

- [1] TERZAGHI Karl. Ends and means in soil mechanics[J]. Engineering Journal, 1944, 27(12): 608 - 613.
- [2] JGJ83—2011 软土地区岩土工程勘察规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011. (JGJ83—2011 Specification for geotechnical investigation in soft clay area[S]. Beijing: Chinese building industry press, 2011. (in Chinese))
- [3] SKEMPTON A W, NORTHEY R D. The sensitivity of clays[J]. Geotechnical, 1952, 3(1): 30 - 53.
- [4] 钱 征. 天津新港软土的一些工程特性. 天津软土地基[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1987. (QIAN Zheng. Engineering properties of soft soils in Tianjin new port[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1987. (in Chinese))
- [5] 樊向阳, 顾国荣, 黄宏伟. 上海地区土体灵敏度的研究[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(3): 130 - 132. (FAN Xiang-yang, GU Guo-rong, HUANG Hong-wei. Study on soil sensitivity in shanghai region[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(3): 130 - 132. (in Chinese))
- [6] 缪林昌, 经 绯. 江苏海相敏感性软土特征研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1283 - 1286. (MIAO Lin-chang, JING Fei. Features research of Jiangsu marine sensitive soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1283 - 1286. (in Chinese))
- [7] 李鹏娥. 闽南地区软黏土灵敏度试验及分析[J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2006, 27(1): 61 - 63. (LI Peng-e. Test and analysis of the soft clay sensitivity in south Fujian Province[J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2006, 27(1): 61 - 63. (in Chinese))
- [8] 娄 炎, 何 宁, 娄 斌. 高速公路深厚软基工后沉降控制成套技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 1 - 329. (LOU Yan, HE Ning, LOU Bin. Monitor and control method of settlement and deformation for soft foundation in expressway[M]. Beijing: China Communications Press, 2011: 1 - 329. (in Chinese))
- [9] DGJ08—37—2012 上海市工程建设规范岩土工程勘察规范[S]. 2012. (GJ08—37—2012 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2012. (in Chinese))
- [10] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [11] 高彦斌, 鲍文鹏, 楼康明. 上海地区第 4 层淤泥质黏土灵敏性试验与分析[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2015, 43(1): 140 - 145. (GAO Yan-bin, BAO Wen-peng, LOU Kang-ming. Sensitive test and analysis of the No.4 Muddy Silty Clay in Shanghai[J]. Journal of Tongji university (Natural Science), 2015, 43(1): 140 - 145. (in Chinese))
- [12] CHANEY R C, RICHARDSON G N. Measurement of residual/remolded vane shear strength of marine sediments[C]// International Symposium on Laboratory and Field Vane Shear Strength Testing, Tampa, Fla. 1987: 166 - 181.
- [13] TANAKA Hiroyuki, HIRABAYASHI Hiroshi, MATSUOKA Tatsuya, et al. Use of fall cone test as measurement of shear strength for soft clay materials[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4): 590 - 599.