

原位十字板试验测得的软粘土灵敏度

高彦斌^{1,2}

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

摘要: 收集了国内两个地区(上海和杭州湾)以及美国和日本一些地区软粘土的勘察数据,对原位十字板试验(FVT)和无侧限抗压强度试验(UCT)这两种试验所测得的灵敏度和强度进行了详细的对比与分析,并对重塑方式的影响进行了研究.发现这些地区普遍存在FVT试验得到的灵敏度要明显小于UCT试验结果,会严重低估软粘土的灵敏度;而原状土强度和重塑土强度均要大于UCT试验结果,重塑土强度尤其明显.其中重塑方式是一个重要影响因素.研究还发现FVT试验得到的重塑土强度、灵敏度与土的液性指数的相关性随着液性指数的增大而明显变差,与一些广泛使用的经验关系也差别较大.这些结果应该引起工程界的重视.

关键词: 软粘土; 灵敏度; 强度; 液性指数; 原位十字板试验(FVT); 无侧限抗压强度试验

中图分类号: TU41, TU42

文献标志码: A

Sensitivity of Soft Clay Obtained by Field Vane-shear Test

GAO Yanbin^{1,2}

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

Abstract: Field vane-shear test (FVT) and Unconfined Compression test (UCT) are the conventional method for measuring the sensitivity of soft clay in the engineering investigation. Based on the data collected from the domestic soft clay and some regions in US and Japan, the sensitivity and strength obtained by FVT and UCT are compared in detail and the influence of remolding method is also investigated. It is found that the sensitivity obtained by the FVT test is significantly smaller than the UCT and it will underestimate the sensitivity of soft clay, FVT obtains significantly higher strength than UCT tests, especially in the remolded strength. Remolding method used in FVT is found an important influence factor. In addition, the correlations between

remolded strength, sensitivity measured by FVT and liquid limit index are found not good and inconsistent with the published experiential laws. The remolded strength and sensitivity obtained by FVT are unreliable and it should be taken into consideration in evaluating the sensitivity and structural of soft clay.

Key words: soft clay; sensitivity; strength; liquid index; field vane-shear test(FVT); unconfined compression test

原状粘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粘土灵敏性的指标,即灵敏度 S_t .该指标定义为采用无侧限压缩试验(unconfined compression test, 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 $S_t = q_u/q'_u$.国际上广泛采用的是Skempton和Northey^[2]于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 $(S_t > 16)$ 4类.我国相关规范采用的也是这个分类标准^[3].

对于灵敏性过高的土,由于重塑土强度过小而无法制取UCT试验所需的圆柱形试样,则往往采用原位十字板试验(field vane-shear test, FVT)来测得灵敏度,即 $S_t = S_u/S'_u$,其中 S_u 和 S'_u 分别为由FVT试验测得的原状土和重塑土的峰值不排水抗剪强度,并采用与UCT试验完全相同的分类标准.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.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》^[3]中规定“软土的结构性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”.由此可见在软粘土结构性分类方面我国工程界对FVT试验的重视和信赖,大有完全替代UCT试验的趋势.据笔者了解,在其他国

收稿日期: 2015-09-25

第一作者: 高彦斌(1973—),男,工学博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为软土力学特性和软土地基处理.

E-mail: yanbin_gao@tongji.edu.cn

家也存在着类似的现象。

FVT 试验属于原位试验, 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都有较大的差别, 因此两种试验方法测得的原状土、重塑土的强度以及灵敏度也可能不会完全一致。娄炎等^[4]、高彦斌^[5]曾分别针对杭州湾软粘土和上海软粘土进行过这方面的对比讨论, 发现这两种方法测得的灵敏度和强度有较大的差别。高彦斌^[5]甚至还指出 FVT 试验得到的上海软粘土的灵敏度是不可靠的。

本文的目的是收集整理不同地区的勘察资料, 进一步对比这两种试验所测得的不同软粘土灵敏度和强度的差异, 建立两种试验测得的灵敏度和强度(重塑强度)与土的液性指数之间的关系。数据主要来源于 4 篇国内文献^[4-7]和两篇国外文献^[8-9], 其中包括我国的上海软粘土和杭州湾软土, 以及美国和日本一些地区的软粘土。

1 FVT 和 UCT 试验对比

从以下 4 方面来对比 FVT 试验和 UCT 试验的区别。

(1) 剪切方式和破坏面。UCT 试验中圆柱形土样在单向压缩下沿一倾斜的平面破坏。FVT 试验中土体在十字板旋转剪切下形成一个圆柱形的破坏面。由于土的强度的各向异性, 十字板强度被当作土体垂直面和水平面上的平均强度。

(2) 重塑方式。UCT 试验是通过手工揉捏土样方式来充分重塑土样。FVT 试验是利用十字板在原位旋转若干圈(一般在 6 圈以上)来重塑土体, 结构重塑可能不太充分而造成测得的重塑土强度可能偏高。

(3) 土样所处的初始应力状态。UCT 试验中原状土样中的有效应力存在卸载影响, 由于总应力为零, 重塑后土样中有效应力基本完全丧失。FVT 试验中在原位应力状态下测得原状强度, 土体重塑后在原位仍然会有残余的有效应力, 理论上讲会导致测得的原状强度和重塑强度较高。

(4) 土样质量。取样、运输和制样造成的扰动会影响 UCT 试验采用的土样质量, 扰动效应造成测得的原状强度较低, 但不影响重塑强度。FVT 试验中的土样扰动主要源于十字板的贯入。

工程勘察中两种试验得到的强度和灵敏度是上述 4 种因素综合影响的结果。

2 FVT 和 UCT 试验测得的灵敏度

2.1 两种试验得到的灵敏度对比

表 1 给出了三份工程勘察得到的上海软粘土和杭州湾软粘土灵敏度的统计结果, 包括: 樊向阳等^[7]基于上海几个市政工程勘察结果的统计, 高彦斌^[5]基于上海某地铁工程勘察结果的统计, 以及娄炎等^[4]基于杭州湾某工程试验段对慈溪段勘察结果的统计。这些地区分布的软粘土在我国沿海地区具有一定的代表性, 除了杭州湾的②₂ 淤泥质亚砂土液性指数 I_L 较大外, 其余均小于 1.5, 处于软塑和流塑状态。这里需要特别说明的是, 在我国存在塑性指标量测多种方法并存的现象, 这为不同地区数据分析对比造成了困难。上海土的原始勘察资料中给出的塑性指标是按照建工系统规范^[10]测得的结果, 液限略小于碟式仪法; 娄炎等^[4]给出杭州湾土勘察资料中的塑性指标则按照公路系统规范^[11]测得, 液限与碟式仪法等效。表 1 中给出的上海土的液性指数 I_L 是按照经验关系换算后与碟式仪法等效的数据。

表 1 中给出了各土层的由 FVT 和 UCT 试验得到的灵敏度平均值(其中上海土括号内的两个数据分别为统计的数据点数和均方差)以及由 FVT 测得的灵敏度 S_{FVT} 与 UCT 试验测得的灵敏度 S_{UCT} 的比值(即表中最后一列, S_{FVT}/S_{UCT})。这些数据表明:

(1) FVT 试验得到的灵敏度多在 2~4 之间, 数据变化范围小, 离散性小(均方差小)。UCT 试验得到的灵敏度在 3~12 之间, 数据变化范围大, 离散性大(均方差大)。UCT 试验得到的灵敏度数值比较离散可能与土样质量难以统一有关。

(2) FVT 得到的灵敏度明显小于 UCT 试验结果。比值 S_{FVT}/S_{UCT} 在 0.2~1.0 之间, 变化范围很大。

(3) 对于同一种土, 两种试验非常容易出现结构性分类结果不一致的情况。按照 FVT 试验结果大都属中等灵敏。但按照 UCT 试验结果, 有些还可以是高灵敏性或极灵敏性, 比如上海的第 4 层土和杭州湾的 3 个土层。

(4) 这些差异及导致的一些问题在我国沿海地区广泛分布的海相沉积软粘土的灵敏度勘察中应该是普遍存在的, 也是不可忽视的。

Tanaka 等^[9]对日本三个场地(A) Atsuma、(B) Takuhoku 和(C) Y-Ariake 的软粘土的灵敏度进行了研究, 除了 FVT 试验外, 室内试验他们采用落锥法(fall cone test, FCT)替代 UCT 来测定软粘土的

灵敏度. 表 2 是笔者根据 Tanaka 发表的数据整理得到的结果. 可以看出, FVT 和 FCT 测得的灵敏度差

别非常大, 同样表现出原位测试 FVT 得到了的灵敏度要明显小于室内试验 FCT 的结果.

表 1 工程勘察得到的上海和杭州湾软粘土灵敏度

Tab.1 Three statistics of sensitivities obtained by site investigation

来源, 区域 (中国)	土层	液性 指数 I_L	S_t 平均值(数据点数, 均方差)		$S_{FVT}/$ S_{UCT}
			S_{FVT}	S_{UCT}	
樊向阳等 ^[7] , 上海	③淤泥质粉质粘土		2.32(22, 0.8)	3.71(13, 1.19)	0.63
	④淤泥质粘土		2.54(30, 0.42)	5.18(44, 1.87)	0.50
	⑤粘土		3.69(16, 0.67)	4.53(59, 1.26)	0.81
高彦斌 ^[5] , 上海	③淤泥质粉质粘土	1.11	3.35(41, 0.36)	3.98(12, 0.68)	0.84
	④淤泥质粘土	0.93	3.10(75, 0.13)	4.46(11, 0.38)	0.70
	⑤粘土	0.72	2.94(18, 0.08)	3.24(17, 0.63)	0.91
娄炎等 ^[4] , 杭州湾	② ₁ 亚粘土	0.79	3.3	8.1	0.41
	② ₂ 淤泥质亚砂土	1.82	2.9	11.4	0.25
	③ ₁ 淤泥质亚粘土	1.44	2.4	11.2	0.21

注: 表中的 I_L 采用与 Casagrande 碟式仪法等效的液限计算得到.

表 2 日本三个地区软粘土灵敏度平均值(根据文献[9]整理)

Tab.2 Sensitivities of three soils in Japan (from reference 9)

场地 (日本)	液性指数 I_L	S_t		$S_{FVT}/$ S_{UCT}
		S_{FVT}	S_{FCT}	
(A) Atsuma	1.0	3	9	0.33
(B) Takuhoku	1.0	4	10	0.40
(C) Y-Ariake	1.2	3.3	16	0.21

2.2 不同试验得到的灵敏度与液性指数之间的关系

Bjerrum^[12]研究了 Norwegian 海积软粘土的灵敏度 S_t 与液性指数 I_L 之间的关系, 发现在 $I_L - \lg S_t$ 半对数坐标系下二者近似存在图 1a 所示的线性关系. Mitchell^[13]根据土的压缩原理, 认为灵敏度应该不仅与液性指数有关, 同时还与竖向有效应力 p'_v 有关(即埋深), 给出了图 1b 所示的经验关系图. 这也是目前为止灵敏性与物理指标之间相关性研究的最主要的两个成果. 图 2 给出了本文作者整理得到的当 p'_v 分别取 50 kPa(对应深度约 5 m)和 200 kPa(对应深度约 25 m)情况下 Mitchell 给出的两条关系曲线与 Bjerrum 给出的关系曲线的对比. 可以看出, 在这种这个深度变化范围内(5~25 m)这两个关系总体上还是一致的, 当 $I_L > 0.8$ 时, Bjerrum 给出的经验关系正好在 Mitchell 所给出的经验关系范围内.

图 3 给出了根据表 1 和表 2 给出的数据绘制的不同试验方法测得的上海粘土(③、④和⑤)、杭州湾

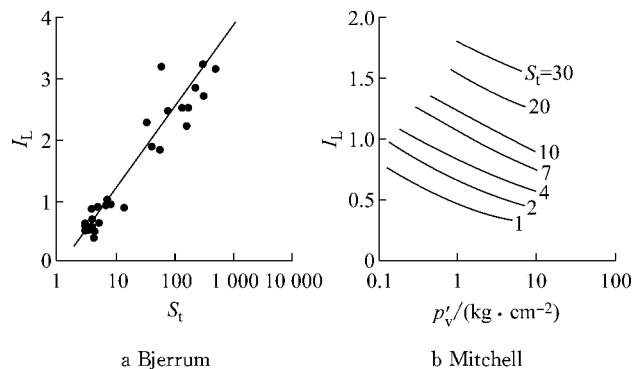


图 1 Bjerrum 和 Mitchell 给出的 $S_t - I_L$ 关系

Fig.1 $S_t - I_L$ relationships given by Bjerrum and Mitchell

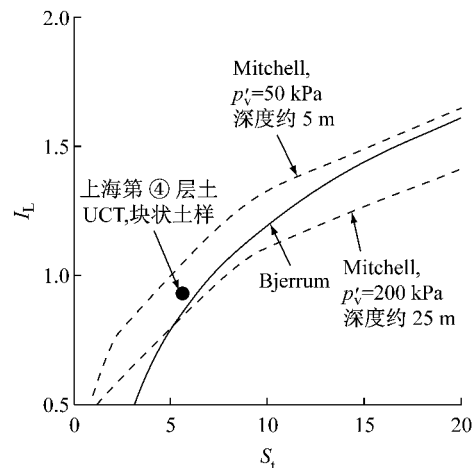


图 2 Bjerrum 和 Mitchell 的经验关系对比
Fig.2 Comparison of the relationships given by Bjerrum and Mitchell

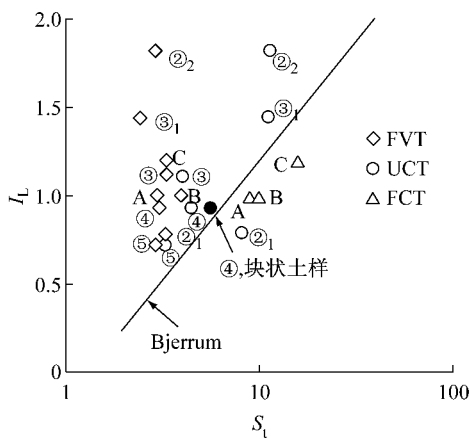


图 3 不同试验测得的 $S_t - I_L$ 关系

Fig.3 $S_t - I_L$ relationships obtained by different tests

粘土(②₁、②₂和③₁)和日本三个地区(A、B和C)软粘土的 $S_t - I_L$ 关系,图中还给出了 Bjerrum 的关系曲线作为对比.可以看出,这些 FVT 试验得到 S_t 与 I_L 的关系不明显,在 I_L 有较大范围变化的情况下 S_t 集中在一个非常狭窄的范围内($S_t = 2 \sim 4$);工程勘察的 UCT 试验得到数据虽然较为离散,但总体上能够反映出 S_t 随 I_L 增大而增大的规律;Tanaka 等给出的另外一种室内试验 FCT 的结果则非常接近 Bjerrum 的关系曲线.

2.3 不同试验得到的灵敏度可靠性的评价

灵敏度的定义是基于 UCT 试验的,因此 UCT 试验是测定软粘土灵敏度的标准方法.然而,工程勘察中采取的原状土样的取土质量往往难以得到保证,会造成测得的原状土强度偏低,且离散性较大,但是取土质量并不会影响重塑强度.因此可以推断,工程勘察中 UCT 试验得到的灵敏度应该是偏低的.这也许可以解释为什么图 3 中上海粘土和杭州湾粘土的勘察数据大多数位于 Bjerrum 关系曲线上方.图 2—3 中给出的高彦斌等^[6]采用质量较好的块状土样的上海第 4 层土的 UCT 试验结果(实心圆点所示)可以进一步证明这一点.采用块状土样的 UCT 试验得到的灵敏度平均值为 5.6,比工程勘察 UCT 试验得到的灵敏度要明显大一些,且非常接近 Mitchell 和 Bjerrum 给出的关系曲线,也说明这些经验关系应当也适用于我国沿海地区广泛分布的软粘土.

FVT 试验得到的灵敏度集中在 2~4 之间,且与软粘土液性指数的相关性差.因此,FVT 试验会严重低估软粘土的灵敏度,尤其是对液性指数较高、灵敏度较大的软粘土,造成的误差更大.这样看来,FVT 试验测得的灵敏度应该是不可靠的,基于 FVT 试验

结果所给出的软粘土结构性的评价也是不准确的.

另外,从图 3 给出的 Tanaka 等的试验结果可以看出,FCT 试验也是一种相对可靠的测定软粘土灵敏度的室内试验方法.与 UCT 试验相比,FCT 试验还有一个优点是避免 UCT 试验中当重塑土较软时的制样问题,较适用于高灵敏性的软粘土.

3 工程勘察 FVT、UCT 试验测得的强度

这一部分将从强度方面来进一步对比两种试验得到的结果.图 4 给出了高彦斌^[5]所提供的上海某地铁工程勘察 UCT 和 FVT 试验测得的原状土强度和重塑土强度.图 5 给出了根据娄炎等^[4]的杭州湾软粘土工程勘察结果的基础上,整理得到了强度随深度 Z 的分布图.可以看出,两份勘察结果给出了相同的规律:FVT 和 UCT 试验得到的强度存在较大的差别,无论是原状土强度还是重塑土强度,FVT 试验结果总体上都要比 UCT 试验结果大一些.正如第 1 节提到的,原位有效应力、取样扰动、重塑方式都可能是造成这个现象的因素.

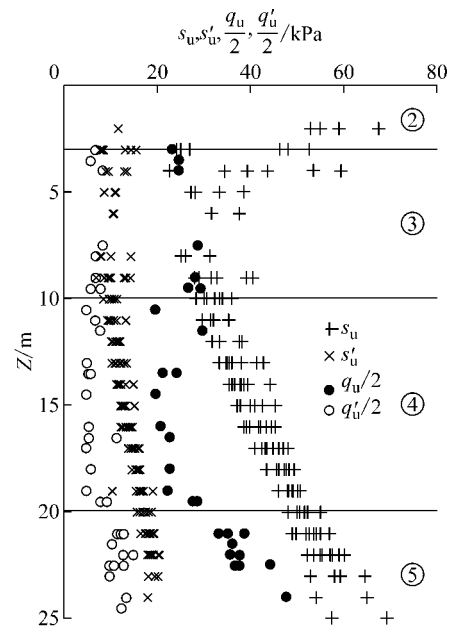


图 4 上海某地铁工程勘察的不排水抗剪强度

Fig.4 Undrained shear strengths obtained by site investigation for a subway project in Shanghai

表 3 和表 4 是笔者给出的这些勘察数据的统计结果,包括 FVT 和 UCT 试验得到的各层土的原状土强度 S_u 和重塑土强度 S'_u 平均值以及 FVT 试验与 UCT 试验结果的比值(S_{FVT} / S_{UCT}).从这些统计

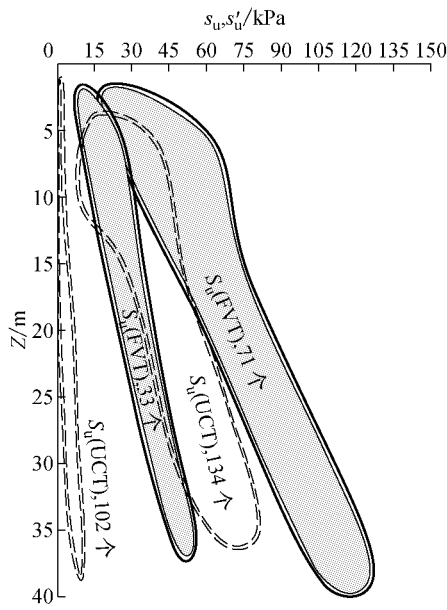


图 5 杭州湾某工程勘测的不排水抗剪强度
Fig.5 Undrained shear strengths obtained by site investigation for a project in Hangzhou Bay

结果可以定量地对比两种试验所测得的强度的差别。可以看出,原状土强度比值 S_{FVT}/S_{UCT} 在 1.39~2.22 倍之间,而重塑土强度比值在 1.58~11.29 之间。重塑土强度比值要明显比原状土强度比值大一些,变化范围也大一些。可见,FVT 试验测得的过大的重塑土强度是第 2.1 节提到的该试验测得的灵敏度偏低的原因。

表 3 上海某地铁工程不排水抗剪强度统计结果

Tab.3 Undrained shear strengths obtained by site investigation for a subway project in Shanghai

土层	原状土			重塑土		
	S_u (FVT)/kPa	S_u (UCT)/kPa	S_{FVT}/S_{UCT}	S_u' (FVT)/kPa	S_u' (UCT)/kPa	S_{FVT}/S_{UCT}
③	34.5 (41,9.1)	24.8 (12,2.4)	1.39	10.1 (41,2.1)	6.4 (12,0.68)	1.58
④	41.4 (75,6.5)	22.3 (11,2.7)	1.86	13.4 (75,2.4)	5 (11,0.39)	2.68
⑤	54.5 (18,2.78)	37.1 (17,5.3)	1.47	18.5 (18,1.0)	11.7 (17,0.48)	1.58

注:括号中的数据分别为数据点总数和均方差

表 4 杭州湾某工程不排水抗剪强度统计结果

Tab.4 Undrained shear strengths obtained by site investigation for a project in Hangzhou Bay

深度/m	原状土			重塑土		
	S_u (FVT)/kPa	S_u (UCT)/kPa	S_{FVT}/S_{UCT}	S_u' (FVT)/kPa	S_u' (UCT)/kPa	S_{FVT}/S_{UCT}
15	61.3	27.6	2.22	25.33	2.2	11.29
20	74.1	38.0	1.95	31.9	3.7	8.50
25	86.9	48.5	1.80	38.4	5.3	7.31
30	99.7	58.8	1.69	45.0	6.8	6.65

4 重塑方式对十字板强度和灵敏度影响

国外不少学者采用室内十字板试验(laboratory vane test, LVT)研究了重塑方式对十字板测得的重塑土强度的影响。20 世纪 80 年代, Chaney 和 Richardson^[8]便对重塑方式的影响进行了研究,采用的土样取自美国 Mississippi Fan 和 Eel River Fan 两个地区,他们得到的十字板重塑和手工重塑方式下的重塑土强度和灵敏度,以及两种方法测得的灵敏度的比值 $S_{u,手工}/S_{u,十字板}$ 汇总于表 5。表 5 还给出了笔者根据 Tanaka 等^[9]发表的数据整理得到的在两种不同的重塑方式下得到的日本 Takuhoku 和 Y-Ariake 地区软土的重塑土强度和灵敏度的平均值。从表 5 给出的数据可以看出,除了美国 Mississippi Fan 一个特例外,其他地区的 LVT 试验结果均表明十字板重塑后的强度要明显大于手工重塑后的强度,而灵敏度则相反。重塑方式对重塑土强度和灵敏度的影响非常显著而不可忽视的。

表 5 不同重塑方式下 LVT 试验结果汇总

Tab.5 Results of LVT using different remolding methods

资料来源	地区	S_u /kPa	重塑方法 S_u' /kPa	S_i	$S_{u,手工}/S_{u,十字板}$
文献 [8]	1. 美国 Mississippi Fan	22	十字板(约 5 次), 2.5 手工, 7.7	8.8 2.9	0.3
	2. 美国 Eel River Fan	12.2	十字板(约 5 次), 5.8 手工, 2.5	2.1 4.9	2.33
	3. 美国 Eel River Fan *	8.5	十字板(约 5 次), 3.3 手工, 2.5	2.6 3.4	1.3
文献 [9]	4. 美国 Eel River Fan *	15.7	十字板(约 5 次), 5.0 手工, 3.6	3.1 4.4	1.4
	5. Takuhoku	30	十字板(30 次), 10 手工, 3.5	3.0 8.5	2.8
	6. Y-Ariake	25	十字板(30 次), 11.5 手工, 1.5	2.2 16.7	7.6

* 此实验十字板水平向插入土中,两个试验两个深度。

* * 表中列出的为笔者根据原始文献整理得到的平均值

Chaney 和 Richardson^[8]还研究了十字板旋转次数对重塑土强度的影响,发现旋转次数达到 3~10 次之间后重塑土强度并不会随着旋转次数的增加而有明显的减小。在 Tanaka 等^[9]的试验中,十字板重塑采用的旋转次数高达 30 次。可见,增加旋转次数并不能够使得十字板试验测得的重塑土强度接近手工重塑土的强度,不能够提高 FVT 试验的可靠性。

笔者曾采用高质量的块状土样研究了重塑方式对上海第 4 层的强度和灵敏度的影响^[6],得到的结

果见表 6. 十字板重塑(旋转 6 次)和手工重塑情况下得到的重塑土强度分别为 8.6 和 4.9 kPa, 灵敏度分别为 3.4 和 6.0. 可见重塑方式对我国沿海地区软粘土的强度和灵敏度的影响也是显著的. 与表中给出 UCT 试验结果的对比可以看出, 在采用相同的手工重塑情况下, 两种试验测得的重塑土强度和灵敏度差别不大, 这说明剪切方式并不会对试验结果产生显著影响.

表 6 不同试验得到的上海第 4 层土强度和灵敏度^[6]

Tab.6 Sensitivity and strength of Shanghai clay, layer 4

试验	S_u /kPa	重塑方法及 S_u'/kPa	S_t
块状土样 UCT	28.5	手工重塑, 5.4	5.6
块状土样 LVT	29.5	手工重塑, 4.9	6.0
		十字板重塑(6 次), 8.6	3.4

5 重塑强度与液性指数的关系

重塑土强度 S_u' 被认为与土的液性指数 I_L 有关. 图 6 给出了 Houston 和 Mitchell、Leroueil 等、Wroth 和 Wood 等给出适用于试验室制备的饱和粘性土的 S_u' 与 I_L 的经验关系^[13]. 其中 Houston 和 Mitchell 的成果考虑了测试方法所带来的影响, 并给出了一个变化范围. 这些经验关系被广泛用来确定重塑饱和粘性土的强度.

图 6 还给出了不同试验(FVT, UCT, FCT)得到的不同地区(上海、杭州湾和日本)软粘土的重塑强度和液性指数之间的关系. 图中关于杭州湾软粘土的数据是表 1 所示的三个土层的平均值. 上海软粘土三个土层的数据点来自笔者对原工程勘察数据的重新整理. Tanaka 等发表的关于日本粘土的数据, 笔者只整理了其中 Y-Ariake 粘土的试验数据, 原因是这个地区的试验数据多一些. 图 6 中给出了 FVT、FCT、LVT(30)、和 LVT(R)4 类试验结果的大致范围, 其中 LVT(30)和 LVT(R)分别代表 LVT 试验中十字板旋转 30 次和手工重塑两种重塑方式. 从图 6 给出的经验关系式和试验数据可以看出:

(1) 不管采用何种方法, 采用在天然含水率下手工重塑的室内试验(UCT, FCT 和 LVT(R))得到的结果与经验关系较为接近, 但并不完全吻合, 位于这些经验关系偏上一点的位置.

(2) FVT 试验数据较为离散, 大多在这些经验关系的上方, 且与 I_L 的关系不明显. 这三种经验关系均不适用于估算 FVT 试验得到的重塑土强度.

(3) 从 Y-Ariake 粘土 FVT 和 LVT 试验数据对

比可以看出, 采用相同的十字板重塑方式的 LVT(30)和 FVT 试验得到结果相近, 而采用手工重塑的 LVT(R)试验和得到的强度要低得多, 这说明重塑方式对强度的影响要比原位应力的影响更为显著.

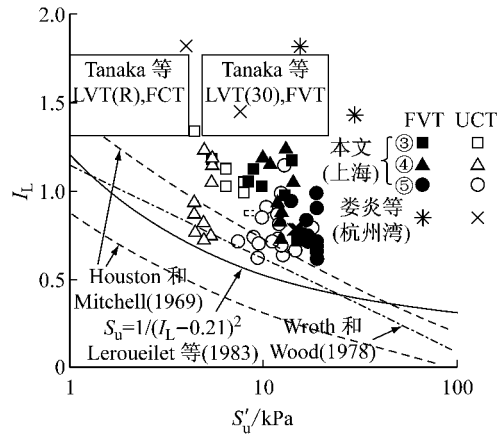


图 6 不同试验得到的 S_u' 与 I_L 的关系

Fig.6 Relationships between S_u' and I_L obtained by different tests

6 结论

本文在所收集得到的国内外一些工程勘察数据以及室内实验数据的基础上, 对 FVT 和 UCT 测得的软粘土的灵敏度和强度进行了对比研究, 得到的主要结论如下:

(1) 工程勘察中 FVT 试验得到的灵敏度多在 2~4 之间, 与液性指数的相关性不好, 普遍小于 UCT 试验结果. FVT 试验得到的灵敏度并不可靠, 低估了软粘土的灵敏性. 土的液性指数越高, 这种误差越大.

(2) 工程勘察中 FVT 和 UCT 试验的得到的强度也有明显的差别, FVT 试验得到的强度要普遍大于 UCT 试验结果, 尤其是重塑土强度. 从有限的角度来看, 重塑方式是造成 FVT 试验得到重塑土强度较高而灵敏度较低的一个主要因素.

(3) 当液性指数较大时, FVT 试验测得的原位重塑强度与液性指数的相关性较差, 与建立在人工制备土试验结果基础上的重塑土强度与液性指数的经验关系差别较大. 即使是 UCT 试验结果也与这些经验关系有明显的出入. 重塑土的强度似乎与重塑方式以及初始结构性(或含水率)有关.

(4) 我国沿海其他地区很可能也存在类似的情况, 不能盲目认为 FVT 一定比 UCT 可靠. 希望能够通过一些高质量的 UCT 试验建立我国沿海地区软

粘土的 $S_t \sim I_L$ 经验关系, 这样在工程中可通过参数 I_L 来评价我国沿海地区软粘土结构性强弱.

参考文献:

- [1] Terzaghi K. Ends and means in soil mechanics [J]. Engineering Journal, 1944, 27(12):608.
- [2] Skempton A W, Northey R D. The sensitivity of clays [J]. Geotechnical, 1952, 3(1):30.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ83—2011 Specification for geotechnical investigation in soft clay area[S]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 2011.
- [4] 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. LOU Yan, HE Ning, LOU Bin. Settlement control technique for highway soft foundation [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [5] 高彦斌. 原位十字板试验评价上海软粘土灵敏性的可靠性[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8):1539. GAO Yanbin. The reliability of FVT for sensitivity evaluation of Shanghai soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8):1539.
- [6] 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. GAO Yanbin, BAO Wenpeng, LOU Kangming. Sensitive test and analysis of the No. 4 muddy silty clay in Shanghai [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(1): 140.
- [7] 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. FAN Xiangyang, GU Guorong, HUANG Hongwei. Study on soil sensitivity in Shanghai Region [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(3):130.
- [8] Chaney R C, Richardson G N. Measurement of residual/remolded vane shear strength of marine sediments[M]//Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies. Edited by Richards A F. [S.l.]: ASTM, 1988:166-181.
- [9] Tanaka H, Hirabayashi H, Matsuoka T, et al. Use of fall cone test as measurement of shear strength for soft clay materials [J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4):590.
- [10] 上海市工程建设规范 DGJ08-37—2012 岩土工程勘察规范[S]. 上海: [s. n.], 2012. Shanghai Building Construction Standard. DGJ08-37—2012 Code for Investigation of Geotechnical Engineering [S]. Shanghai: [s. n.], 2012.
- [11] JTGE40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. JTGE40—2007 Test method of soils for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [12] Bjerrum L. Geotechnical properties of Norwegian marine clays [J]. Geotechnical, 1954, 4(2):49.
- [13] Mitchell J K, Soga K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. 3rd ed. [S.l.]: John Wiley, Sons, Inc. 2005.