

DOI: 10.11779/CJGE202211005

自落式动力触探 FFP 测试技术理论与应用研究

荣琦¹, 赵泽宁¹, 蔡国军^{*1, 2}, 乔欢欢¹, 武猛¹

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 2. 安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 离岸工程的不断发展对准确获取水下岩土工程参数提出了更高的要求, 自落式动力触探技术 (FFP) 可较准确地获得水下浅层土体的原位特性参数和土体扰动后的参数, 有效缩短勘察时间、降低勘察成本。以自落式动力触探测试技术为研究对象, 自主设计了自落式动力触探仪, 以牛顿运动第二定律为基础, 建立了 FFP 贯入过程中的力学模型与理论体系, 建立了测试数据的处理流程, 利用室内模型试验, 开展了自落式动力触探 FFP 相关贯入机理研究, 以苏锡常南部高速公路太湖隧道项目的典型湖相淤泥质软土为研究对象, 开展了自落式动力触探 FFP 现场试验研究, 建立了基于 FFP 测试技术的软土不排水抗剪强度评价方法。结果表明: 研发的 FFP 触探仪在测试过程中具有良好的准确性和可靠性, 释放高度、触探仪质量、端头形状均会影响贯入深度; FFP 测试技术可以在评价浅层超软土时作为 CPTU 试验或全流触探试验的有效补充。

关键词: 自落式动力触探; 原位测试; 软土; 不排水抗剪强度

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)11-1998-09

作者简介: 荣琦(1996—), 男, 硕士, 主要从事现代原位测试与海洋岩土工程等方面的研究工作。E-mail: rickyong@126.com。

Theory and application of free fall penetration testing technique

RONG Qi¹, ZHAO Ze-ning¹, CAI Guo-jun^{1, 2}, QIAO Huan-huan¹, WU Meng¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: The development of marine engineering highly requires the accurate acquisition of parameters for marine geotechnical engineering. The free fall penetration (FFP) testing technique can accurately obtain the in-situ characteristic parameters of shallow seabed soils and the parameters after soil disturbance, which can effectively shorten the survey time and reduce the survey costs. In this study, the FFP equipment is firstly designed. Then, based on the Newton's second law, the mechanical model and theoretical system for penetration process of FFP are established, and the processing process of test data is established. The penetration mechanism of FFP is also studied using the laboratory model tests. Finally, focusing on the typical lacustrine mucky soft soil in the Taihu Lake Tunnel Project of Suzhou-Wuxi-Changzhou Southern Expressway, the evaluation method for undrained shear strength of soft soils is established based on FFP. The results show that the developed FFP equipment has good accuracy and reliability. The release height, the quality of the penetration probe and the shape of the tip can all affect the penetration depth. The FFP testing technique can be used as an effective supplement to the CPTU tests or the full flow penetration tests in the evaluation of shallow super soft soils.

Key words: free fall penetration; in-situ testing; soft clay; undrained shear strength

0 引言

随着中国“一带一路”区域经济发展战略的实施, 在水上有着越来越多的工程项目^[1]。浅水和近岸岩土工程勘察面临着越来越多的新挑战, 如航道拓宽加深、管线光缆铺设、潮汐波浪发电机等能源转换装置的安装等, 都要求对河湖底岩土体的强度及稳定性进行评价。由于水下沉积物有着天然含水率高、孔隙率大、抗剪强度低、灵敏度高的特点, 这使得在勘察过程中

传统钻孔取样、室内试验会造成应力释放、试样扰动, 试验结果难以反映水下土体的真实物理力学性质, 且成本非常高^[2]。尽管目前孔压静力触探技术 (CPTU) 已适用于软土工程, 且具有快速、可靠的特点, 但在

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (42225206); 国家自然科学基金项目 (42072299)

收稿日期: 2021-08-12

***通信作者** (E-mail: focuscai@163.com)

测试过程中要使用海洋静力触探贯入设备, 如需要大型船只作为运载平台并配备有大型起重机或绞车, 成本较高^[1-3]。自落式动力触探技术 (FFP) 作为一种新型的便携式动力触探装备, 测试时无需大型船只和贯入设备, 操作轻便灵活, 可较准确地获得河湖底浅层土体的原位特性参数和土体扰动后的参数, 有效缩短勘察时间、降低勘察成本。基于 FFP 技术的软土特性研究, 受到国内外学者的广泛关注。

Ingram^[4]于 1982 年首次提出消耗式海底触探仪 (XBP) 这种类鱼雷形动力触探仪的概念。德国不莱梅大学先后开发了两种易于使用的长矛形自由落体触探仪, 浅水型 SW-FFCPT 和深水型 DW-FFCPT^[5-6], 可测量贯入过程中的加速度、锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力, 运动停止后, 还可进行孔压消散试验。不少学者关于基于 FFP 测试技术的土体不排水抗剪强度进行了大量研究, Mosher 等^[6]采用与静力锥型触探试验相似的计算方法, 使用经验系数 N_k , 由 FFCPT 动态贯入阻力 q_d 计算得到不排水抗剪强度; Stegmann 等^[5]采用 Esrig 等提出了中度至高度敏感的水下沉积物的经验关系来确定不排水抗剪强度; Morton 等^[7]提出用于球形自由落体试验中垂直加速度数据, 以获得不排水剪切强度; Chow 等^[8-11]提出从加速度测量计算得到不排水抗剪强度 s_u , 包括通过分析 FFP 下落过程的受力, 并根据加速度数据计算任意时刻的不排水抗剪强度 s_u 的间接法, 和直接测量锥尖阻力 F_t 与锥肩位置的孔隙水压力 u_2 , 并通过动态的锥尖阻力计算 s_u 的直接法。

然而, 应用 FFP 测试技术进行土体性质评价时, 受力模型参数的选取缺少室内数据支撑, 大多参数仍靠经验取值, 也未进行标准室内模型试验的校准, 又因 FFP 触探仪种类繁多、结构各异, 模型参数并不具有通用性。因此, 需要通过室内试验确定适合特定触探仪的参数, 建立一套适合我国实际情况的基于 FFP 的土体评价方法。

本文利用自主研发的 FFP 设备, 建立了 FFP 贯入过程的受力模型及相关数据处理框架, 基于室内模型试验与现场试验结果, 对触探仪的运动状态进行分析, 研究影响贯入深度的不同因素及土体不排水抗剪强度的评价方法。

1 FFP 设备研发

FFP 探头采用模块化设计, 由端头、探头主体探杆、配重模块探杆、传感器模块探杆、稳定尾翼、吊环组成, 如图 1 (a) 所示。其中端头分为圆锥、半球、

圆柱端头, 锥形端头的锥角为 60° , 直径为 35.7 mm, 半球端头直径为 35.7 mm, 前端为半球状, 圆柱端头直径、高度均为 35.7 mm, 横置于探头前端。

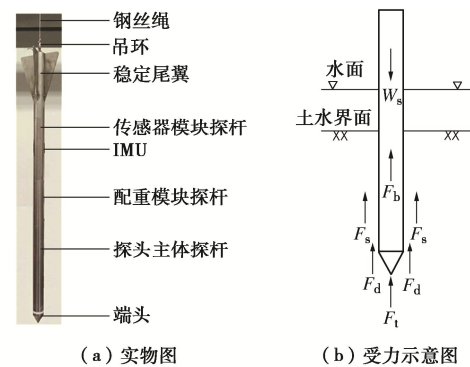


图 1 FFP 探头

Fig. 1 FFP probe

惯性测量单元 (IMU) 是利用惯性定律来测量和检测物体运动时加速度、旋转等多自由度运动参数的装置^[12]。惯性测量单元 IMU 能够有效降低测量噪声, 提高测量精度, 快速求解 FFP 探头运动状态。

2 FFP 测试理论

2.1 FFP 受力模型

当 FFP 完全浸没水中、贯入土体时, 受到如图 1 (b) 所示力的作用, 其中包括 FFP 的浮重 W_s 、端部阻力 F_t 、侧壁阻力 F_s 、拖曳阻力 F_d 、土体浮拖力 F_b 。在贯入过程中, FFP 的运动遵循牛顿第二运动定律, 其运动控制方程:

$$(m + m')a = W_s - F_t - F_s - F_d - F_b, \quad (1)$$

式中, m 为 FFP 触探仪的质量, m' 为附加质量, 即随 FFP 共同加速或减速的土体质量, 对于细长形的 FFP, 这种附加质量仅限于顶端一小块土体质量, 因其足够小, 所以可以将其忽略^[8-11]。

W_s 为 FFP 浸没在水中或者土中时浮重, 即 FFP 的重力扣除在水或土体中受到的浮力, 该力在 FFP 贯入土体时充当动力。

F_t 为端部阻力, 该力产生是 FFP 探头前端土体发生破坏时强度和承载力的体现^[13], 考虑应变率效应的影响, 可表示为

$$F_t = R_{tip} N_c s_u A_t, \quad (2)$$

式中, R_{tip} 为端部阻力的应变率系数, A_t 为 FFP 端部横截面面积, s_u 为 FFP 端头前端土体的不排水抗剪强度, N_c 为承载力系数, 与 FFP 探头形状有关, 圆锥、半球、圆柱端头中承载力系数取值不同。

侧壁阻力 F_s 表示为

$$F_s = R_{shaft} \alpha s_{u(avg)} A_s, \quad (3)$$

式中, $R_{f\text{-shaft}}$ 为侧壁阻力的应变率系数, $s_{u(\text{avg})}$ 为沿触探仪整个侧壁的平均不排水抗剪强度, A_s 为与土体接触的全部侧壁面积, 对于圆柱形探杆, 侧壁面积计算方法为探杆底面周长与贯入土体深度的乘积, α 为界面摩擦比, 可近似为土体灵敏度的倒数^[9]。

拖曳阻力 F_d 表示为

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s C_D A v^2 \quad (4)$$

式中, ρ_s 为土体的饱和密度, C_D 为曳力系数, 对于 FFP 的应用分析, 认为在水体和土体中的曳力系数 C_D 是相同的, 其取值为 0.2~1.2, 对于外形规整的细长形状的物体, C_D 取 0.22 较为合适^[8-11]。

F_b 为土体浮托力, 通过 FFP 排开土体的有效重力计算:

$$F_b = \rho' V_s g \quad (5)$$

式中, ρ' 为土体的浮密度, V_s 为 FFP 在贯入土体时排开土体的体积, 其中包括贯入过程中因空腔效应产生的比 FFP 浸没土体体积多的体积, g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 。排开土体的体积可以近似为 FFP 贯入土体的体积, 即探头体积与贯入探杆的体积。

2.2 应变率效应

在不排水条件下, 土体剪切应变率的增加会导致其不排水抗剪强度的提高, 这种现象称为应变率效应。在剪切应变率较大时, 采用幂函数的形式可较好地体现应变率效应对土体强度的影响^[11]。不同端头形状对于应变率效应的影响可以忽略不计^[8], 而对于细长圆柱形 FFP 触探仪的研究发现, 侧壁阻力更容易受到应变率效应的影响, 这种影响大约比端部阻力高出 19%~23%^[14]。引入系数 n 来考虑应变率效应对端部阻力和侧壁阻力的不同影响。

$$R_f = \left(n \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{\text{ref}}} \right)^\beta = \left(n \frac{v/d}{v_{\text{ref}}/d_{\text{ref}}} \right)^\beta \quad (6)$$

式中, $\dot{\gamma}$ 为应变率, $\dot{\gamma} = v/d$, v 为 FFP 瞬时速度, d 为 FFP 直径, $\dot{\gamma}_{\text{ref}}$ 为参考应变率, $\dot{\gamma}_{\text{ref}} = v_{\text{ref}}/d_{\text{ref}}$, 指在应变率效应对土体强度的影响可以忽略时的应变率, v_{ref} 为参考 FFP 速度, d_{ref} 为参考 FFP 直径, v_{ref} 和 d_{ref} 的选择对应于名义上不排水的条件。

Chow 等^[8]研究表明: 参考 CPT/CPTU 技术标准, 参考 FFP 速度 v_{ref} 取 2 cm/s , 参考 FFP 直径 d_{ref} 取 35.7 mm , 进而可以计算得到参考应变率 $\dot{\gamma}_{\text{ref}}$ 。

对于端部阻力 n 值取 1, 对于侧壁阻力 n 作为应变率参数 β 的函数:

$$n = 2(1/\beta - 1) \quad (7)$$

在对动态贯入过程应变率效应影响的研究中,

Low 等^[15]和 Chung 等^[16]的研究表明应变率参数 β 的范围为 0.05~0.09, 而 Lehane 等^[17]研究表明应变率参数 β 的范围则为 0.06~0.08。

2.3 测试数据处理

IMU 测量单元测量的 a_{bx} , a_{by} , a_{bz} , 通过方向余弦矩阵 R_b^i ^[18] 转换为惯性坐标系中的 a_x , a_y , a_z 。通过对惯性坐标系下的 a_x , a_y , a_z 进行数值积分, 得到 FFP 在水中自由下落和贯入土体过程中在惯性坐标系下 3 个方向的速度:

$$v_x(t) = v_{x0} + \int_0^t a_x(t) dt \quad (8)$$

类似地可以求出 y 和 z 方向的分速度, 触探仪的速度 v :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (9)$$

通过数值积分来确定触探仪移动的距离 s 为

$$s(t) = s_0 + \int_0^t v(t) dt \quad (10)$$

通过对垂直方向速度 v_z 进行数值积分, 得到触探仪沿 z 轴方向移动的距离 s_z :

$$s_z(t) = s_{z0} + \int_0^t v_z(t) dt \quad (11)$$

3 FFP 室内模型试验

3.1 土样制备

室内试验所用的土为人工配制所得, 主要材料采用粒度为 1250 目的商品高岭土, 为使土样更加接近实际河湖底超软土, 在高岭土粉末中拌和适量的粉质黏土粉末, 粉质黏土约占土体总质量的 20%。取适量混合粉末进行相关室内土工试验, 获取土体的基本物理参数: 含水率 $w=68.4\%$, 密度 $\rho=1.80 \text{ g/cm}^3$, 孔隙 $e=2.73$, 液限 $w_L=57\%$, 塑限 $w_P=29\%$, 饱和度 $S_r=99.9\%$ 。制成含水率为 1.2 倍液限的超软土, 使土样更加接近实际河湖底超软土。土样制备参照了 Chow 等^[8-11]所采用的土性参数。

3.2 试验设备

针对开展 FFP 室内模型试验的要求, 试验架由钢管搭接而成, 高 3500 mm, 上方横梁处放置滑轮, 减少摩擦, 钢丝绳通过滑轮与 FFP 触探仪连接, 如图 2 所示, 试验时可以通过米尺测量, 控制 FFP 释放的高度。

3.3 试验方案

试验先后制备 3 箱土样, 将土样放置于模型箱中, 模型箱底部铺设 50 mm 厚排水砂层并设置排水孔, 分别在自重应力下进行固结, 固结期间, 土样表面用塑料纸覆盖, 防止干燥。1 号箱土样固结 1 d 后, 按要求进行试验, 试验结束后进行充分的搅拌, 固结 30 d 后, 再次进行试验。2 号箱土样, 固结 2 d 进行相关试验。

3 号箱土样, 先固结 2 d 后, 按要求进行试验, 试验结束后进行充分的搅拌, 自重固结 10 d 后, 再次进行试验, 试验方案见表 1。

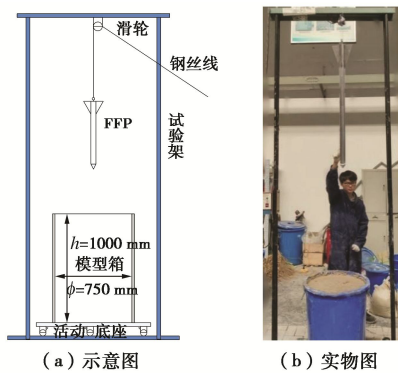


图 2 FFP 室内模型试验架

表 1 室内模型试验方案

Table 1 Laboratory model test schemes					
土样箱号	固结时间/d	端头类型	质量/kg	释放高度/cm	试验组数
1	1	A, B, C	6.70,6.85	20, 40, 60	9
2,3	2	A	6.70	20, 40, 60, 100	14
			8.20	40, 70, 100	
		B	8.20	40, 60, 70, 100	
			C	8.35	
3	10	A	6.70	40, 70, 80, 100	10
			8.20	80, 100	
			9.70	80, 100	
		B	9.70	100	
			C	9.85	
1	30	A	8.20	40,70,100	9
		B	8.20	40,70,100	
		C	8.35	40,70,100	
总计					42

注: 端头类型 A-锥形、B-半球形、C-圆柱形。

3.4 室内模型试验结果分析

(1) 运动状态分析

本文规定以“固结时间(d)-端头类型(ABC)-触探仪质量(kg)-释放高度(cm)”的形式对不同试验进行标记, 其中端头类型字母的规定为 A 表示锥形、B 表示半球形、C 表示圆柱形, 试验中 FFP 下落贯入土体过程的典型加速度变化曲线如图 3 所示, 此处以 10-A-9.70-100、10-B-9.70-100、10-C-9.85-100 等 3 种端头的典型贯入过程的时间-加速度曲线为例进行分析。

FFP 试验贯入过程可以大致分为 4 个阶段: ①准备释放; ②自由下落; ③贯入土体; ④最终制动。

准备释放阶段, FFP 探头通过钢丝绳牵引悬停在半空中, 保持探头的稳定状态, 避免过度的晃动与旋转, 此时探头受到重力和牵引力的作用, 整体达到平衡状态, 加速度均为零。

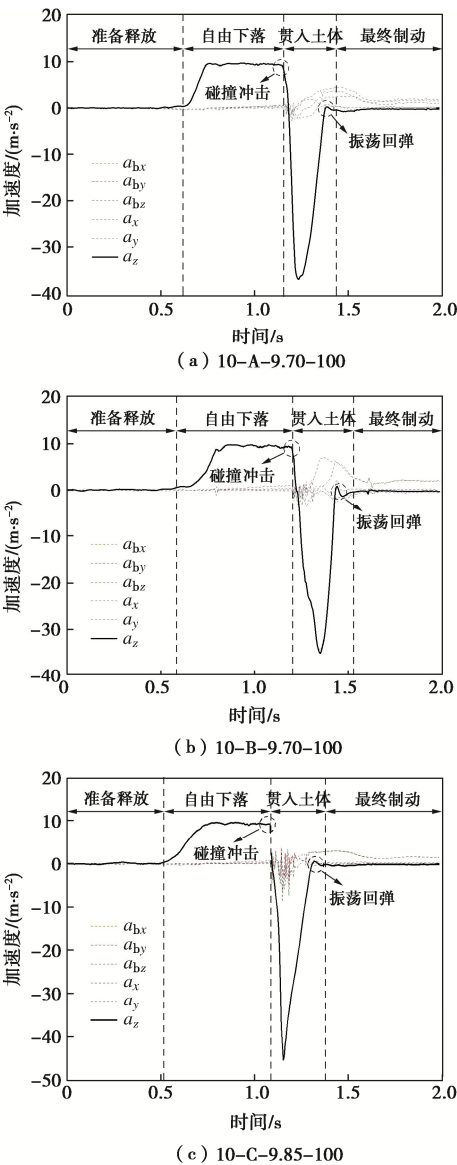


图 3 FFP 贯入土体过程的加速度变化曲线

Fig. 3 Variation curve of acceleration of FFP into soil

自由下落阶段, 释放牵引探头的钢丝绳, FFP 探头因重力作用, 做自由落体运动, 其竖直方向的加速度 a_z 迅速增加到重力加速度 ($g=9.8 \text{ m/s}^2$) 左右, 其他方向的加速度维持在零附近。值得注意的是, a_z 并不会达到 g , 而是以略小于 g 的数值维持一段时间, 这是因为探头在下落过程, 虽然已释放牵引钢丝绳并且钢丝绳通过定滑轮进行牵引, 但在拖动钢丝绳一起下落的过程中, 钢丝绳仍会对探头的运动产生阻碍效果, 致使探头在下落过程中的加速度 a_z 不会达到重力加速度 g 。下文分析碰撞速度时, 同样体现该阻碍效果。当 FFP 探头接触土体发生碰撞时, 加速度会发生突变, 急剧降低, 产生拐点, 如图中碰撞冲击点所示, 3 种端头中圆柱形端头突变最为明显, 这是因为圆柱形端头在接触土体时, 接触面积最大且没有过度。

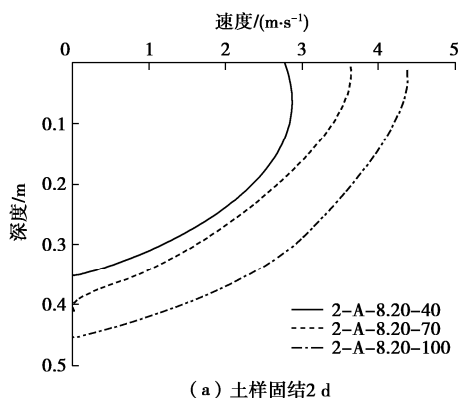
在贯入土体阶段, 除 z 轴方向的加速发生变化外, 其他方向的加速度也产生变化, 说明此阶段 FFP 探头

整体发生了轻微的倾斜, 惯性坐标下的 a_z 与体坐标系下的 a_{bz} 出现错位。此过程中, 加速度 a_z 先减小至零, FFP 做加速度减小的加速运动; 然后 a_z 方向反转并逐渐增大, FFP 做加速度增大的减速运动; a_z 达到最大值后, 逐渐减小, FFP 做加速度减小的减速运动; 特别注意的是, 在加速度减小至零, FFP 停止运动之前, 加速度 a_z 会在极短时间内出现振荡回弹, 这种振荡回弹现象在诸多研究自由落体的文献中被提及^[8-11]。

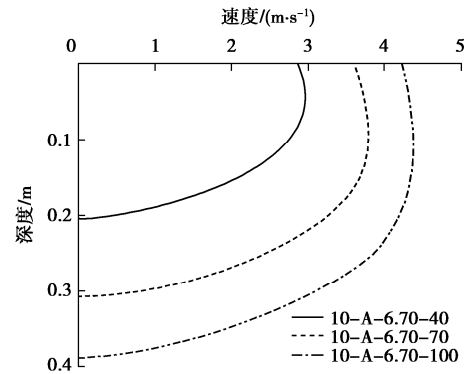
在最终制动阶段, 从图 3 中可知, FFP 探头在 z 轴方向加速度归零, 但在其他方向上, 还存在小数值的加速度分量, 说明此时探头在其他方向上发生了微小倾斜。整个运动过程中, FFP 探头产生的最大加速度在贯入土体的初期, 锥形端头 FFP 最大加速度出现在 $t=1.235$ s 处, $a_{\max}=-36.92$ m/s², 半球形端头 FFP 的最大加速度出现在 $t=1.35$ s 处, $a_{\max}=-35.32$ m/s², 圆柱形端头 FFP 的最大加速度出现在 $t=1.155$ s 处, $a_{\max}=-45.30$ m/s²。

(2) 影响贯入深度因素

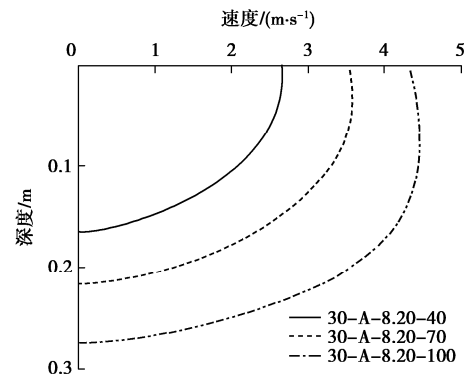
以锥形端头为例研究不同释放高度, 即不同碰撞速度, 对贯入速度和深度的影响, 如图 4 所示, FFP 分别从 40, 70, 100 cm 高度释放, 碰撞速度分别为 2.73, 3.56, 4.29 m/s, 每次分别相对提高 30.4%, 20.5%。从图中可知, FFP 贯入土体后都出现了首先加速的情况, 速度达到最大值后, 迅速降低, 直至停止贯入。达到最大速度的深度, 各图不尽相同, 但总体的趋势是, 随着释放高度和碰撞速度的提高, 达到最大速度的深度也在增加, 如图 4 (b) 中达到最大速度的深度分别为 5, 10, 14 cm。图 4 (a) 中贯入深度分别为 35.7, 40.8, 45.2 cm, 分别相对提高 14.2%, 10.8%; 图 4 (b) 中贯入深度分别为 20.5, 30.9, 38.7 cm, 分别相对提高 50.7%, 25.5%; 图 4 (c) 中贯入深度分别为 16.5, 21.7, 27.4 cm, 分别相对提高 31.2%, 28.1%。总体来看, 在同一土体中, 随着释放高度的提高, 贯入土体的深度也随之增加, 即贯入深度与释放高度呈正相关。从不同的土体来看, 随着土体强度的增加, 相同情况的 FFP 测试, 贯入深度随之减少, 即贯入深度与土体强度呈负相关。



(a) 土样固结2 d



(b) 土样固结10 d



(c) 土样固结30 d

图 4 不同释放高度下的贯入速度随深度变化曲线

Fig. 4 Curves of penetration velocity changing with depth at different release heights

试验中锥形端头触探仪的 3 种质量分别为 6.70, 8.20, 9.70 kg, 不同质量下的贯入试验如图 5 所示, 图 5 (a) 中展示了在固结 2 d 的土样中 2 组试验, 质量为 6.70, 8.20 kg 的触探仪分别在 40, 100 cm 的高度释放, 图中质量为 6.70 kg 的试验并没出现前文所述速度增加的现象, 此现象可能与质量存在关系。第 1 组中的贯入深度分别为 14.5, 35.7 cm, 第 2 组中贯入深度为 37.3, 45.3 cm, 两组试验中, 质量均提高了 22.4%, 但贯入深度分别增加了 146.2%, 21.4%。在图 5 (b) 中, 3 种不同质量触探仪下落时的速度随深度变化的曲线非常接近, 速度最大值均出现在 10~15 cm, 贯入深度分别为 39.7, 45.1, 49.7 cm, 分别相对增加了 13.6%, 10.2%, 质量相对增加为 22.4%, 18.3%, 质量增加引起的贯入深度的增加并没有图 5 (a) 那么明显。对比图 5 (a), 5 (b) 可知, FFP 触探仪质量的增加会对贯入深度产生正向的增加效果, 但是这种增加效果会随着土体强度的增加而逐渐减弱。

共使用 3 种端头进行试验, 分别为锥形、半球形和圆柱形端头, 不同端头下贯入深度随深度的变化如图 6 所示。需要特别注意的一点是, 因圆柱形端头体

积较前两者稍大, 所以质量比其他端头大 0.15 kg, 但多出的这部分质量仅占总质量的 2.2%~1.5%, 所以本文在进行试验分析时忽略该部分质量的影响, 认为 3 种端头的质量是相同的。

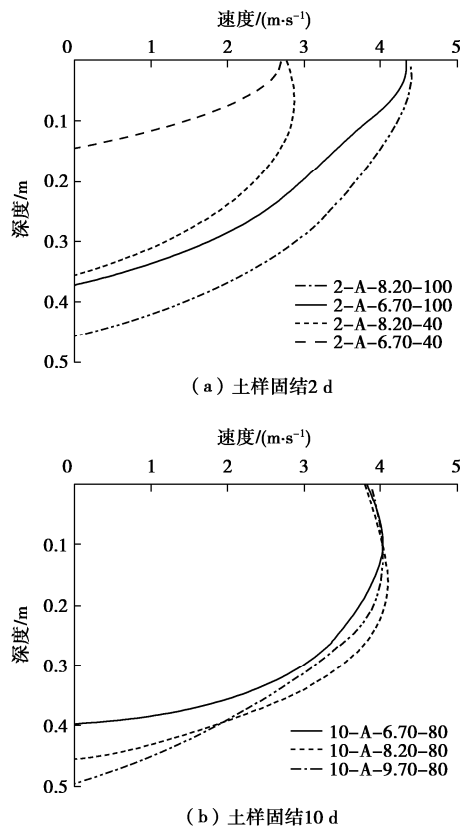


图 5 不同质量下的贯入速度随深度变化曲线

Fig. 5 Curves of penetration velocity changing with depth under different masses

在图 6 (a) 中, 因土体仅固结 1 d, 强度较低, 端头对贯入速度和深度的影响并不明显, 贯入速度随深度的变化曲线几乎一致, 图 6 (a) 中的贯入深度集中在 55 cm 附近。图 6 (b) 中, 贯入深度由浅到深分别为圆柱形、锥形、半球形端头, 分别为 42.8, 50.9, 62.3 cm。图 6 (c) 中, 贯入深度由浅到深分别为圆柱形、锥形、半球形端头, 深度分别为 27.0, 34.0, 47.8 cm, 该结果与前文中锥形、半球形、圆柱形端头的承载力系数 (15, 12.5, 21) 相对应。在图 6 (b), 6 (c) 中, 锥形端头在贯入土体前期, 速度增加的幅度要高于半球形端头, 但随后速度急剧降低, 而半球形端头虽然速度增加没有锥形端头高, 但速度降低较为缓慢, 贯入也较深, 这反映出半球形端头相较锥形端头更易于在超软土中贯入。总体而言, 在贯入土体强度不是非常低的条件下, 端头的类型会影响贯入时的速度与深度, 半球形端头更容易贯入, 深度最深, 圆柱形端头更难贯入, 深度最浅, 锥形端头则介于二

者之间。

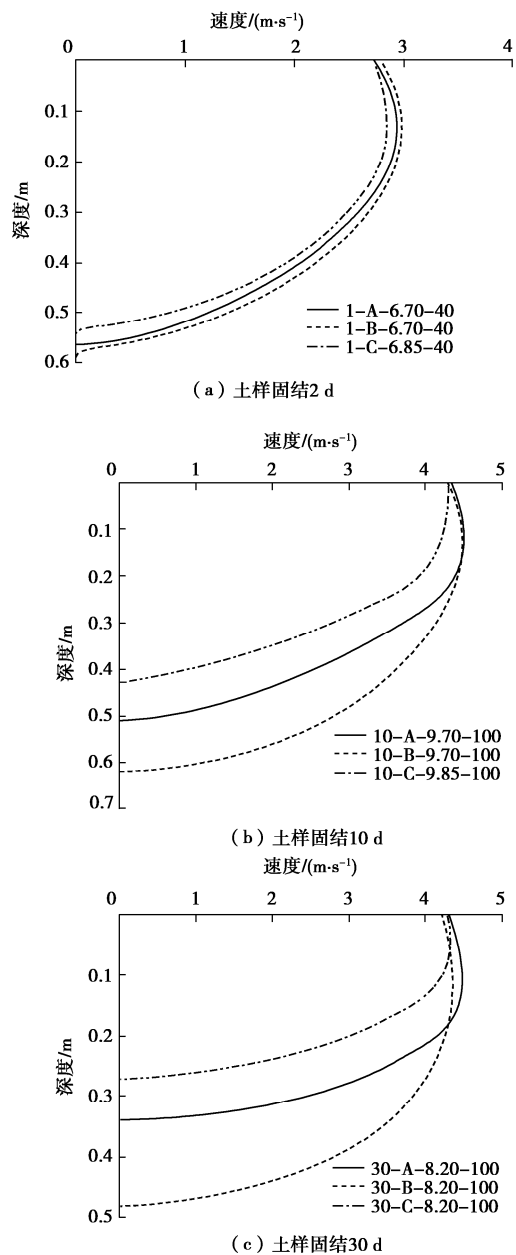


图 6 不同端头下的贯入速度随深度变化曲线

Fig. 6 Curves of penetration velocity changing with depth at different tips

(3) 基于 FFP 试验的土体不排水抗剪强度评价
将 FFP 测试时的数据进行处理, 加速度对时间一次积分获得速度数据, 二次积分获得贯入深度数据, 然后将加速度、速度、深度数据代入到力学模型, 模型中的参数取值见表 2, 计算获得土体的不排水抗剪强度 s_u 。

需要指出的是, 土体对应的 α 值并非一致, 确定合适的界面摩擦比 α 的值是十分必要的。理想情况下, 确定土体深度范围内每一点的 α 值并代入至式 (3) 计算结果精度是最高的, 但是这在实际工程中成

表 2 FFP 室内模型与现场试验的基本参数取值表

试验类型	质量 m/kg	重力加速 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	土体饱和密度 $\rho_s/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	探头直径 d/mm	参考速度 $v_{\text{ref}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	端头截面积 A/cm^2		承载力系数			界面摩擦比 α	曳力系数 C_d		应变率参数 β
						锥/半球形	圆柱形	N_{c-kt}	N_{c-b}	N_{c-t}		锥形	半球/圆柱形	
室内模型试验	6.70~9.85	9.81	1.80	35.7	0.02	10	12.75	15	12.5	21	0.41	0.22	0.35	0.06
现场试验	8.20, 8.35	9.81	1.70	35.7	0.02	10	12.75	15	12.5	21	0.29	0.22	0.35	0.06

本较大，与 FFP 经济快速的优点相悖，难以实现。因此，在容许误差范围内，选取对应场地的 α 代表值更为合理简便。

将 FFP 试验获得的 4 种土体不排水抗剪强度 s_u 与十字板剪切试验（VST）结果进行比较，取每种土体中 5~6 次典型试验值为代表，不排水抗剪强度随深度的变化如图 7 所示。

值得注意的是，本文研发的自落式动力触探贯入仪 FFP 的采集频率为 200 Hz，即采集时间间隔为 0.005 s，所以试验分析获得的土体强度值为间隔 0.005 s 的数据点，因 FFP 触探仪在贯入土体时，速度整体上是减小的，所以相同的时间间隔内，贯入的深度也会逐渐减小，所以导致图中 FFP 试验获得的 s_u 对应的数据点随深度逐渐变得密集。

从图 7 可以看到，FFP 试验获得的不排水抗剪强度在深度较浅的位置，一般都是由很小的强度值开始增长，并很快达到土体的真实强度值，并在略高于土体强度至附近维持稳定，在贯入土体的后期，强度值会有突然减小的趋势，这是因为在贯入过程的末期，触探仪的速度减小至零左右，仅产生微小的位移，加速度值也降低，从而致使计算得到的土体强度值出现锐减现象。

整体而言，FFP 试验获得的不排水抗剪强度与 VST 试验获得的强度值具有相当不错的一致性，通过本文的方法评价超软土的不排水抗剪强度具有良好的准确性和可靠性。自落式动力触探 FFP 测试技术为河湖相超软土的强度评价提供了一种新型、便捷、准确、可靠的技术手段。

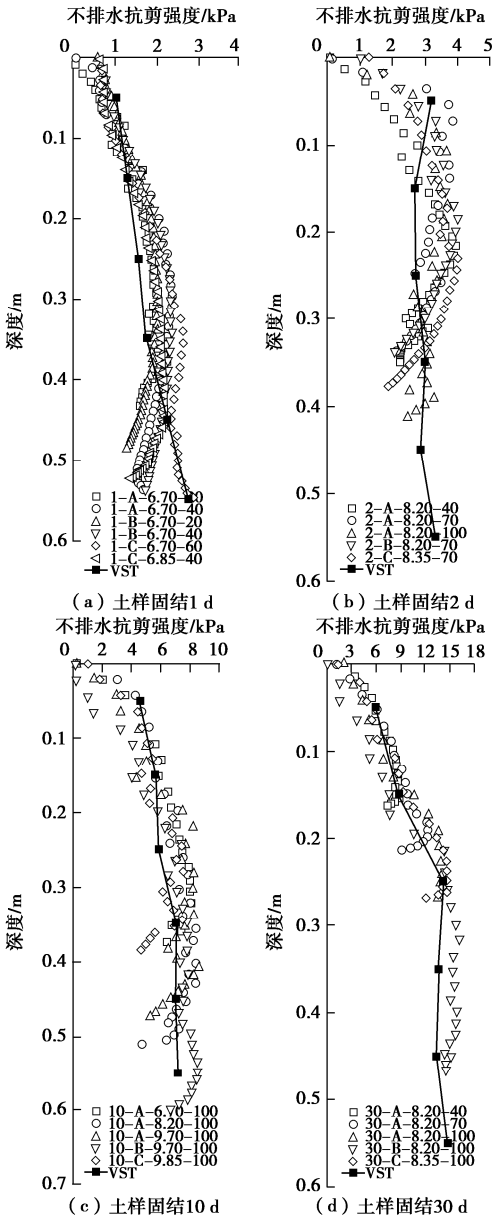


图 7 FFP 试验获得的土体不排水抗剪强度

Fig. 7 Undrained shear strengths of soils obtained from FFP tests

4 FFP 现场试验

4.1 工程概况

苏锡常南部高速公路太湖隧道项目地处太湖湖荡平原区，地势低洼，地面一般标高为-0.6~1.0 m，依据该项目勘察成果及区域地质资料，场地区揭示地层主要为全新统黏性土层及上更新统黏性土、粉土、粉砂层，局部地段浅部堆积人工填土层，下部局部揭示侏罗系黄尖组安山岩和泥盆系五通组砂岩。太湖隧道湖底浅部为连续分布的软土，软土主要物理指标：天然含水率=31.0%~65.0%，天然密度 $\rho_0=1.51\sim1.86\text{ g/cm}^3$ ，天然孔隙比 $e=1.0\sim1.945$ ，液限 $w_L=35.6\%\sim41.0\%$ ，塑限 $w_p=19.8\%\sim21.7\%$ ，塑性指数 $I_p=10.2\sim23.4$ ，液性指数 $I_L=1.01\sim1.99$ 。1-2 层软土土性为淤泥、淤泥质黏土，灰褐色—灰色，流塑，局部软塑，土质不均，局部地段夹粉砂、粉土薄层，具高孔隙比，高压缩性。该层主要分布于，层顶埋深为 0.00~3.60 m，

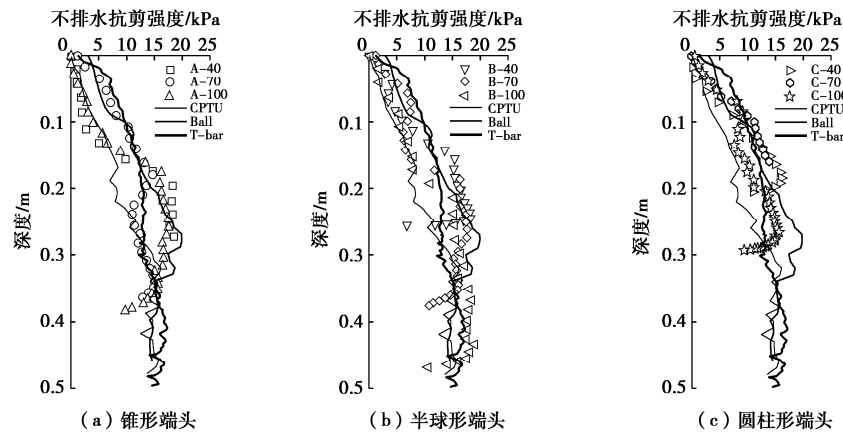


图 8 基于 3 种现场试验的土体不排水抗剪强度

Fig. 8 Undrained shear strengths of soils based on three field tests

层顶标高为 3.37~2.78 m, 层底埋深为 0.20~10.50 m, 层厚为 0.20~10.50 m。通过十字板剪切试验, 十字板不排水强度约为 1.9~26.8 kPa, 灵敏度约为 2.30~4.80, 平均值为 3.49, 属于中高灵敏度, 有机质含量一般为 0.43%~2.59%。

4.2 基于 FFP 测试结果的土体不排水抗剪强度评价

本次 FFP 现场试验中, 基本参数的选取如表 2 所示, 本次现场试验中土体的灵敏度取值为 3.5, 计算得到的界面摩擦比 α 值为 0.29。

通过前文建立的 FFP 触探仪在贯入土体过程中的力学模型, 利用触探仪贯入过程中的加速度数据, 可以计算获得土体的不排水抗剪强度 s_u , 与基于 CPTU 试验和全流触探试验的不排水抗剪强度相比较, 如图 8 所示。

在 3 种不同端头的 FFP 试验中, 半球形端头能贯入更深的土体, 圆柱形端头贯入的深度最浅。从图 8 可以看到, 3 种现场试验都显示出相同的土体强度规律, 前 0.25 m 土体不排水抗剪强度逐渐增加, 0.25 m 之后强度值逐渐稳定在 15 kPa 左右。

总体来看, 基于 FFP 试验的不排水抗剪强度与 CPTU 试验和全流触探试验获得的强度值比较吻合, 证明实际工程中, FFP 测试技术可以在评价浅层超软土时作为 CPTU 试验^[19-20]或全流触探试验的替代或者补充, 此外 FFP 测试技术还具有另外两者不具备的快速、便捷、经济的特点。

5 结 论

本文自主设计并研发了自落式动力触探仪 FFP, 建立 FFP 贯入过程中的力学模型与理论体系, 以苏锡常南部高速公路太湖隧道项目的典型淤泥质软土为研究对象, 开展自落式动力触探 FFP 的室内模型试验和现场试验研究, 得到 4 点结论。

(1) 自主设计并研发了自落式动力触探 FFP 探头, 包括端头、探头主体、配重模块、传感器模块、稳定尾翼、吊环六部分, 可采集加速度、角速度数据, 并配套采集软件, 可实现显示并记录触探仪运动数据, 该触探仪具有良好的性能和可靠性。

(2) 以牛顿运动第二定律为基础, 建立了 FFP 触探仪在贯入土体过程中的受力学模型, 通过加速度数据对时间的一次、二次积分获得触探仪贯入过程中的速度与深度数据, 建立了 FFP 测试数据处理框架, 对采集到的加速度数据和角速度数据进行一定流程的处理可确保数据准确、可靠, 减少试验误差。

(3) 本文研发的 FFP 触探仪在测试过程中具有良好的准确性和可靠性, 释放高度、触探仪质量、端头形状均会影响贯入深度。

(4) 结合室内模型试验与现场试验结果, 建立基于 FFP 测试技术的土体不排水抗剪强度的评价方法, FFP 测试技术可以在评价浅层超软土时作为 CPTU 试验或全流触探试验的有效补充。

参考文献:

- [1] WU M, CAI G J, LIU L L, et al. Quantitative identification of cutoff wall construction defects using Bayesian approach based on excess pore water pressure[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(6): 2553 - 2571.
- [2] ZHAO Z N, DUAN W, CAI G J. A novel PSO-KELM based soil liquefaction potential evaluation system using CPT and V_s measurements[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 150: 106930.
- [3] ZHAO Z N, DUAN W, CAI G J, et al. CPT-based fully probabilistic seismic liquefaction potential assessment to reduce uncertainty: integrating XGBoost algorithm with Bayesian theorem[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 149:

- 104868.
- [4] INGRAM C. Expendable penetrometer for seafloor classification[J]. *Geo-Marine Letters*, 1982, **2**(3/4): 239 – 241.
- [5] STEGMANN S, VILLINGER H, KOPF A. Design of a modular, marine free-fall cone penetrometer[J]. *Sea Technology*, 2006, **47**(2): 27.
- [6] MOSHER D C, CHRISTIAN H, CUNNINGHAM D, et al. The Harpoon free fall cone penetrometer for rapid offshore geotechnical assessment[C]// *Offshore Site Investigation and Geotechnics, Confronting New Challenges and Sharing Knowledge*, London UK, 2007: 195 – 202.
- [7] MORTON J P, O'LOUGHLIN C D, WHITE D J. Estimation of soil strength in fine-grained soils by instrumented free-fall sphere tests[J]. *Géotechnique*, 2016, **66**(12): 959 – 968.
- [8] CHOW S H, O'LOUGHLIN C D, WHITE D J, et al. An extended interpretation of the free-fall piezocone test in clay[J]. *Géotechnique*, 2017: 1 – 14.
- [9] CHOW S H, AIREY D W. Free-falling penetrometers: a laboratory investigation in clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, **140**(1): 201 – 214.
- [10] CHOW S H, O'LOUGHLIN C D, RANDOLPH M F. Soil strength estimation and pore pressure dissipation for free-fall piezocone in soft clay[J]. *Géotechnique*, 2014, **64**(10): 817 – 827.
- [11] CHOW S H, AIREY D W. Soil strength characterisation using free-falling penetrometers[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(13): 1131 – 1143.
- [12] 杨磊, 庞硕, 杨耀民, 等. 基于 9DOF IMU 的 AUV 惯性导航技术研究[J]. *计算机测量与控制*, 2016, **24**(3): 133 – 135, 153. (YANG Lei, PANG Shuo, YANG Yao-min, et al. Study of navigation for AUV based on 9 DOF IMU[J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, **24**(3): 133 – 135, 153. (in Chinese))
- [13] BLAKE A P, O'LOUGHLIN C D. Installation of dynamically embedded plate anchors as assessed through field tests[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, **52**(9): 1270 – 1282.
- [14] DAYAL U, ALLEN J H. The effect of penetration rate on the strength of remolded clay and sand samples[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1975, **12**(3): 336 – 348.
- [15] LOW H, RANDOLPH M, DEJONG J T, et al. Variable rate full-flow penetration tests intact and remoulded soil[C]// *Variable rate full-flow penetration tests intact and remoulded soil*. London UK: Taylor & Francis, 2008: 1087 – 1092.
- [16] CHUNG S F, RANDOLPH M F, SCHNEIDER J A. Effect of penetration rate on penetrometer resistance in clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(9): 1188 – 1196.
- [17] LEHANE B M, O'LOUGHLIN C D, GAUDIN C, et al. Rate effects on penetrometer resistance in Kaolin[J]. *Géotechnique*, 2009, **59**(1): 41 – 52.
- [18] BLAKE A P, O'LOUGHLIN C D, MORTON J P, et al. In situ measurement of the dynamic penetration of free-fall projectiles in soft soils using a low-cost inertial measurement unit[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2016, **39**(2): 20140135.
- [19] WU M, ZHAO Z N, CAI G J, et al. In situ evaluation of soil contaminated by total petroleum hydrocarbons using membrane interface probe: a case study from Nanjing, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, **81**(4): 1 – 20.
- [20] ZHAO Z, CONGRESS S S C, CAI G, et al. Bayesian probabilistic characterization of consolidation behavior of clays using CPTU data[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, **17**(3): 931 – 948.