

DOI: 10.11779/CJGE201902008

# 浅表层软黏土不排水强度的原位测试方法

郭绍曾<sup>1</sup>, 刘润<sup>1</sup>, 张雪东<sup>2</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 中国水利水电研究院岩土工程研究所, 北京 100010)

**摘要:** 提出了一种新的条形探头, 该探头不仅具有全流动探头的优点, 并缩小了已有的全流动探头的端部效应, 可较好地测定浅表层软黏土的不排水强度。开展了条形探头浅层贯入室内模型试验, 分析了探头贯入过程中土体的运动规律。应用数值方法进一步研究了探头贯入过程中的土体破坏模式, 建立了深、浅破坏模式转换深度的下限解。依据试验结果和土体破坏形态, 提出了条形探头在浅层软土中贯入时的虚拟应力场和机动场, 基于极限分析理论求解了土体贯入阻力与土体强度关系的上下限解。根据试验得到的贯入阻力计算出土体强度的上下限值, 十字板强度均位于极限分析上下限解之间, 证明了条形探头探测浅表层软土强度的适用性。

**关键词:** 条形探头; 土体破坏模式; 室内试验; 极限分析

中图分类号: TU413.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)02-0303-08

**作者简介:** 郭绍曾(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事海洋岩土勘察方法研究工作。E-mail: nicefish110@aliyun.com。

## In-situ testing method for undrained shear strength in shallow soft clays

GUO Shao-zeng<sup>1</sup>, LIU Run<sup>1</sup>, ZHANG Xue-dong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100010, China)

**Abstract:** A new type penetrometer named strip penetrometer is proposed. The strip penetrometer has the same advantages of other full-flow penetrometers with less end effect, and it is also applicable to detecting undrained strength of shallow soil. The shallow penetration test results of strip penetrometer are introduced. The motion modes of soils in the tests are analyzed. The lower bound solution at the shallow-deep transforming depth is established based on the numerical simulation. The virtual stress fields and kinematically admissible velocities are proposed as the penetrometer penetrates shallowly, and the lower and upper bounds are solved. The upper and lower limit strengths of soil test are compared with the vane shear strength. The results of the strip penetrometer fit well with the test ones.

**Key words:** strip penetrometer; soil failure mode; laboratory test; limit analysis

## 0 引言

随着中国社会经济的大发展, 海洋工程领域也逐步由近海、浅海向远海、深海不断迈进。深海中海洋工程结构物在结构形式、承力特点、基础性能等方面与浅海结构物有很大的不同, 在设计施工中常需要深海海床浅表层土体的准确强度参数。由于深海海床浅表层土体具有高含水性、高孔隙性、高压缩性、低强度、高灵敏性、高触变性等特点, 因此迫切需要一种可靠的测量其强度的原位勘察方法<sup>[1]</sup>。

为克服常规勘察手段的缺陷, 西澳大利亚大学开发了一种更适合于测量海底软黏土不排水强度的新型原位测试方法——全流动探头静力触探。1984年, Randolph等<sup>[2]</sup>提出了黏土中圆柱形桩水平运动时土体极限阻力的极限分析解; 2000年, Randolph等<sup>[3]</sup>分析了土体全流动状态下球形探头贯入阻力的极限分析上

下限解。在以上的理论分析中, Randolph等将土体简化为刚塑性材料, 满足 Tresca 屈服准则, 且不考虑土重的影响。利用滑移线理论, 构造探头贯入过程土体的滑移线场(如图1所示), 在此基础上建立了机动容许的运动场和静力允许的应力场, 求得了探头贯入过程的土体阻力上下限解。所谓土体的全流动模式就是符合上述理论的土体运动场和应力场。该流动模式认为在T形探头和球形探头贯入过程中土体运动趋势为沿探头下端环绕探头的圆形截面向上, 且首尾相接上下对称。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB046802); 水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金项目(HESS-1516)

**收稿日期:** 2017-11-27

**\*通讯作者** (E-mail: liurun@tju.edu.cn)

1991年, Stewart等首先在离心机试验中应用T形全流动探头探测土体的不排水强度,并与十字板试验(vane)和锥式静力触探(cone)的结果进行了对比<sup>[4]</sup>。1994年, Stewart等第一次将T形全流动探头应用于Burswood半岛的现场原位测试中,取得了良好的效果<sup>[5]</sup>。

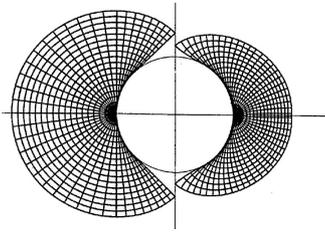


图1 T形和球形探头的土体全流动破坏模式

Fig. 1 Full-flow failure mode of T-bar and ball penetrometer

从20世纪80年代初期开始至今,国内外学者对全流动贯入仪进行了大量研究。DeJong等<sup>[6]</sup>结合过去20多年全流动贯入仪在工程应用和科学研究方面的成果,提供全流动贯入仪在试验和数值等的规范做法,内容包括:设备设计,试验步骤和数据处理等。Yafrate等<sup>[7]</sup>深入研究应用全流动贯入仪预测重塑土的不排水抗剪强度和土的灵敏度,并且推导出一系列的公式,可以在室内试验和原位试验数据不足的情况下,用来估算土的相关性质。Lunne等<sup>[8]</sup>对比分析多处典型软土场地的测试数据,发现强度各向异性对全流动贯入仪测得的强度的影响;重塑土的阻力系数大于原状土的,且随灵敏度变化但不受土的性质指标影响。近年来,全流动贯入仪广泛应用于工程现场和离心模型试验中测试饱和软黏土的工程力学性质。Low等<sup>[9]</sup>应用T-bar、Ball等全流动贯入仪评价Burswood软黏土的工程性状,结合原位测试和土工室内试验技术,研究贯入过程中土体扰动对土的力学性质、强度各向异性的影响及应变速率对抗剪强度的影响。范庆来等<sup>[10]</sup>通过ABAQUS有限元软件分析T-bar的贯入机制,并探讨贯入速率、强度各向异性与应变软化对T-bar阻力系数的影响。蔡国军等<sup>[11-13]</sup>总结了国内外学者对全流动触探仪的理论及试验研究,包括贯入阻力与软土不排水抗剪强度之间的关系、循环贯入试验对重塑土特性的评价,通过数值模拟得出T型全流动触探仪的阻力系数等。由此可见,全流动探头虽有较好的理论支撑,但需要一定的贯入深度才能形成土体的全流动模式,且T形探头端部圆形横截面面积较大,具有较强的端部效应。

本文提出了一种新的探头形式——条形探头,如图2所示。针对该探头开展了软黏土中的浅层贯入室内模型试验,提出了计算深浅破坏模式转换临界深度

的计算方法,基于极限分析理论建立了贯入阻力与土体不排水强度的关系。



图2 条形探头

Fig. 2 Strip penetrometer

## 1 条形探头浅层贯入室内模型试验

### 1.1 试验用土与条形探头

试验用软黏土采用高岭土配置而成,对填制后的土体进行基本物理性质试验,土体参数如表1所示。对不同深度的土体进行了十字板剪切强度试验,试验所得深度5, 15, 25 cm处土体不排水抗剪强度分别为5, 6, 7 kPa。条形探头如图2所示,长25 cm,宽4 cm,厚1 cm。

表1 试验用土参数

Table 1 Soil parameters

含水率 /%	$w_L$ /%	$w_p$ /%	$G_s$	重度 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$E_s$ /MPa
53.2	55.05	17.3	2.74	16.75	1.33

### 1.2 传感器布置与试验过程

试验用模型箱长60 cm,宽60 cm,高80 cm,填土高度50 cm。填土前先在模型箱四面沿深度方向标记不同刻度,保证在后续填土过程中土层的平整性以及试验传感器布置的准确性,如图3所示。



(a) 试验前模型箱

(b) 填土后模型箱

图3 试验模型箱

Fig. 3 Model casing

为了测试贯入过程中探头阻力及土体位移分布规律,探头与探杆连接处安装有光纤力传感器,测量探头的贯入阻力;在填制土体的过程中,在不同深度处布置有光纤位移传感器测量土体的位移运动形态,布置方式如图4,5所示。位移传感器分别布置在5, 15, 25 cm深度处,每个深度分别布置5个位移计,位移计距贯入处探头轴线距离分别为2, 4, 6, 8, 10 cm,各位移计横向间隔1 cm。

加载装置采用直流电动机,电动机配有调速器,

调节调速器将贯入速度固定在 2 mm/s。试验用槽钢作为反力梁, 将伺服电机固定在反力梁上, 采用砝码配重提供反力。

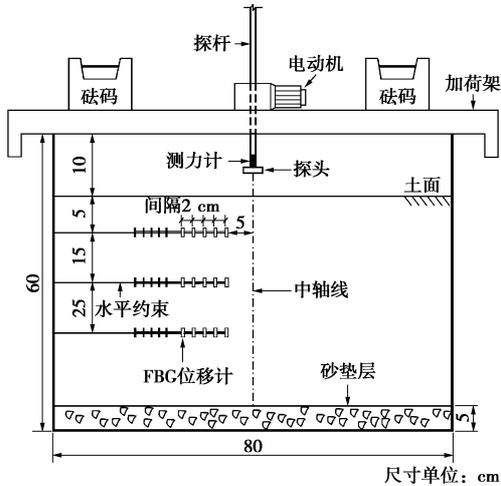


图 4 位移传感器剖面布置图

Fig. 4 Profile layout of displacement sensors

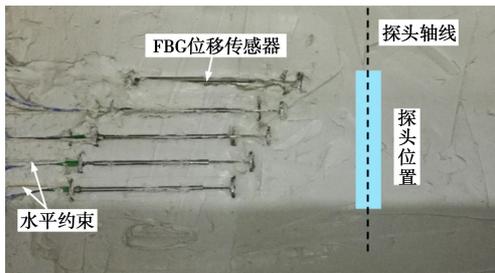


图 5 位移传感器平面布置图

Fig. 5 Plane layout of displacement sensors

将高岭土以 1 倍液限的配比与水混合, 将其充分搅拌均匀, 制成软黏土土浆, 将制备好的软黏土转移至模型箱中。在如图 4 所示的设计深度处, 将软黏土找平, 然后把光纤光栅位移传感器按图 5 所示方法布置妥当, 并将传感器连接线固定在试验箱侧壁上, 并编号引出。传感器安装完成后, 再将这一层软黏土的表面刮毛, 继续铺设软黏土, 防止出现分层现象。将软黏土铺设至距试验箱顶面 10 cm 处, 再将软黏土表面刮平。将软黏土静置固结, 并保持软黏土表面有一层水膜保护, 防止软黏土表面干裂。每 12 h 观测一次试验箱软黏土表面的沉降量, 测量方法为测量土面距离模型箱表面的距离, 直到两次观测之间的沉降几乎为零。本次试验的固结时间约 10 d。

### 1.3 探头的贯入阻力

图 6 为室内试验中条形探头贯入时的土体阻力。由图 6 可知, 贯入阻力在很短的贯入距离后由 0 增长到接近 80 N, 这一过程代表了探头从接触土体到表层土体达到了极限状态的过程。随着条形探头的贯入过程, 土体阻力逐渐增加, 这是因为土体强度随深度变

大, 贯入阻力也随之增加。

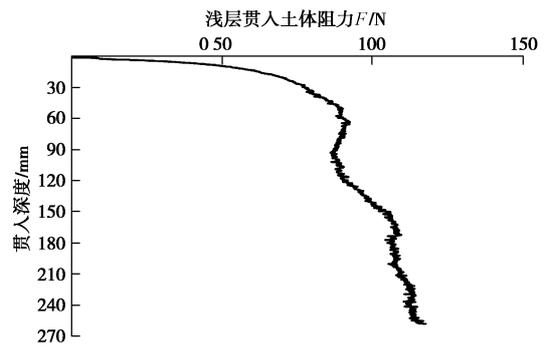


图 6 室内试验中条形探头贯入的土体阻力

Fig. 6 Soil resistance vs. penetration depth

### 1.4 土体运动趋势分析

图 7 为条形探头浅层贯入后土体破坏形态的照片。由图 7 可知, 土体在探头贯入过程中向四周挤压, 形成了一道直立的土壁, 在贯入过程中探头上方土体并没有回流, 而土体表面有微微的隆起。这与 Randolph 等<sup>[13]</sup>提出的全流动破坏模式有较大区别, 说明在浅层贯入过程中, 土体的运动破坏形态呈部分流动的破坏模式。

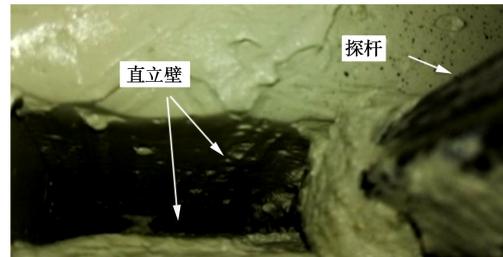


图 7 土体破坏形态

Fig. 7 Failure mode of soil

图 8~10 分别为不同贯入深度处的光纤位移计的试验结果。由图 8~10 可知, 距离探头的远近影响土体水平位移的大小, 距探头越远, 土体位移越小, 说明探头贯入过程对土体的破坏扰动有一定的范围, 而影响较大的只有距探头较近的局部土体, 影响区域约为 3B 范围内的土体。土体的最大水平向位移发生在探头贯入深度以下约 1.0B 处, 说明探头贯入过程中对贯入深度相同的土体位移影响最大, 且具有一定的滞后性。

## 2 深浅破坏模式及转换深度

### 2.1 浅层破坏模式和深层破坏模式

为了进一步分析条形探头贯入过程中土体的运动破坏过程, 采用 CEL 大变形数值模拟方法<sup>[15-16]</sup>模拟了条形探头的贯入过程, 土体的物理力学参数按表 1 所示的室内试验土体参数取值, 贯入速度为 2 mm/s, 贯

入深度为 2 m。模拟结果发现条形探头贯入过程中先后出现了两种不同的破坏模式，代表形态如图 11, 12 所示，图中蓝色代表土体，红色代表空腔。

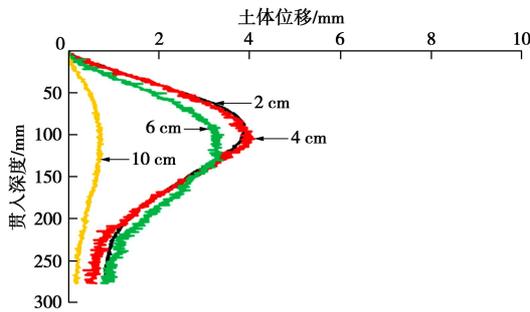


图 8 贯入过程中 5 cm 深度处土体的水平位移

Fig. 8 Horizontal displacements at penetration depth of 5 cm

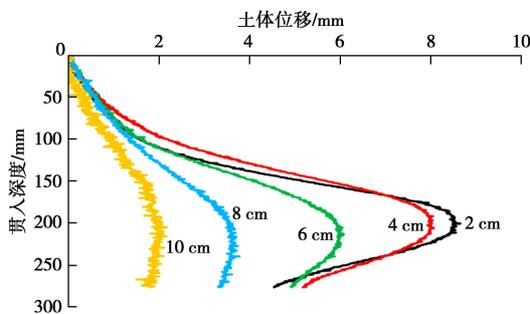


图 9 贯入过程中 15 cm 深度处土体的水平位移

Fig. 9 Horizontal displacements at penetration depth of 15 cm

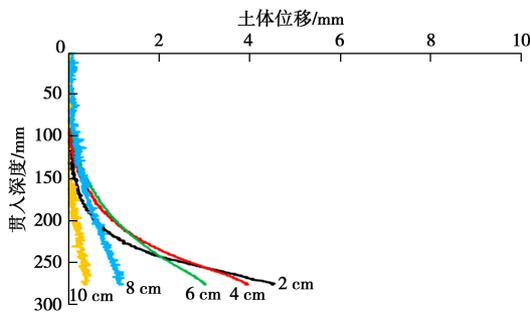


图 10 贯入过程中 25 cm 深度处土体的水平位移

Fig. 10 Horizontal displacements at penetration depth of 25 cm

在贯入初期，土体被探头挤压向四周运动，土体表面上拱，塑性破坏面自探头底部斜向贯通到地表，同时在探头上部形成一个空腔，空腔壁面直立且没有回流现象，如图 11 所示，称之为浅层破坏模式；当达到一定贯入深度后，空腔表面已不能保持直立状态，土体回流明显，塑性破坏面自探头底部环绕探头一圈，如图 12 所示，称之为深层破坏模式。由于浅层破坏模式和深层破坏模式形成的破坏面有较大区别，因此探头贯入阻力与土体强度的关系也有所不相同。确定浅层与深层破坏模式的临界转换深度  $H_{tr}$  十分关键。

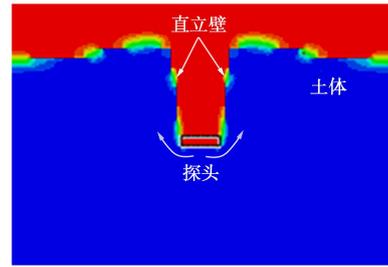


图 11 浅层破坏模式

Fig. 11 Failure mode of shallow soil

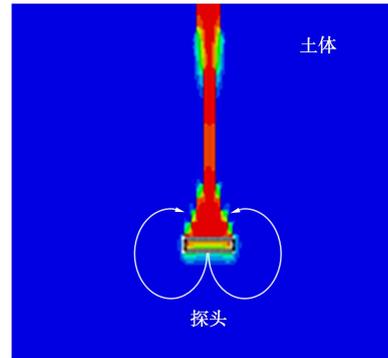


图 12 深层破坏模式

Fig. 12 Failure mode of deep soil

## 2.2 临界转换深度的下限解

假设满足屈服准则的曲面族函数的一阶导数为

$\frac{dz}{dx} = h'(x, z)$ ，满足屈服条件和屈服函数的极值条件的应力分量有如下关系<sup>[17]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) - \frac{2S_u h'}{1+h'^2}, \\ \sigma_z &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) + \frac{2S_u h'}{1+h'^2}, \\ \tau_{xz} &= \frac{1-h'^2}{1+h'^2} S_u, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中， $\sigma_x$ ， $\sigma_y$ ， $\tau_{xz}$  为屈服区内任意点的应力， $h'$  为屈服曲面族函数的一阶导数， $S_u$  为土的不排水强度。

记  $\sigma_e = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z)$ ，则满足平衡方程、屈服条件和屈服函数的极值条件下的土体极限状态应力场方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_e}{\partial x} + h' \frac{\partial \sigma_e}{\partial z} - \frac{2S_u}{1+h'^2} \left( \frac{\partial h'}{\partial x} + h' \frac{\partial h'}{\partial z} \right) &= \gamma' h', \\ -h' \frac{\partial \sigma_e}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_e}{\partial z} + \frac{2S_u}{1+h'^2} \left( -h' \frac{\partial h'}{\partial x} + \frac{\partial h'}{\partial z} \right) &= \gamma'. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

容易得出式 (2) 的解为

$$\sigma_e = \gamma' z + 2S_u \arctan h' + C_0 \quad (h' = -x/z \text{ 或 } h' = k_0), \quad (3)$$

式中， $C_0$ ， $k_0$  为待定常数， $\gamma'$  为土的有效重度。

将式 (3) 代入式 (1) 中可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \gamma'z + 2S_u \left( \arctan h' - \frac{h'}{1+h'^2} \right) + C_0, \\ \sigma_z &= \gamma'z + 2S_u \left( \arctan h' + \frac{h'}{1+h'^2} \right) + C_0, \\ \tau_{xz} &= \frac{1-h'^2}{1+h'^2} S_u. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

假设条形探头贯入深度正好位于深浅破坏模式的临界转换深度  $H_{tr}$ , 构造土体极限状态下的滑动面如图 13 所示, 根据对称性任取探头的一半进行分析。

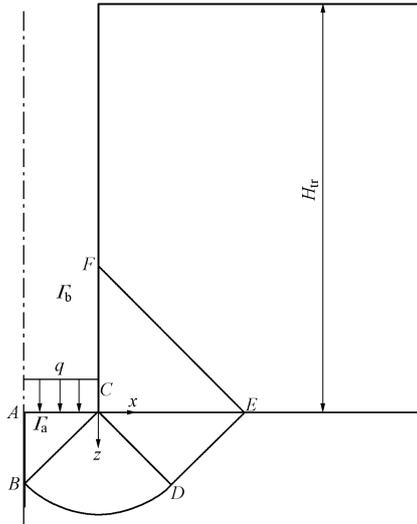


图 13 条形探头在深浅转换深度时的滑动面

Fig. 13 Failure plane at shallow-depth transforming depth

在垂直坡面  $\Gamma_b$  上荷载边界条件为

$$x=0, \sigma_x = \tau_{xz} = 0. \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (1) 中可知  $h' = \pm 1$ , 由几何关系可确定在边界  $\Gamma_b$  上  $h' = 1$ , 代入式 (3), 可求得

$$C_0 = -\frac{S_u}{2}(\pi - 2) - \gamma'z. \quad (6)$$

对滑动面  $FE$  上的  $F$  点, 根据几何关系可得

$$C_0 = -\frac{S_u}{2}(\pi - 2) - \gamma' \frac{B}{2} \frac{1 - \tan \frac{\Delta}{2}}{1 + \tan \frac{\Delta}{2}}. \quad (7)$$

式中,  $B$  为条形探头的宽度。

可求得  $E$  点的竖向应力  $\sigma_z$  为

$$\sigma_z = 2S_u - \gamma' \frac{B}{2} \frac{1 - \tan \frac{\Delta}{2}}{1 + \tan \frac{\Delta}{2}}, \quad (8)$$

又  $E$  点的竖向应力  $\sigma_z$  为

$$\sigma_z = \gamma' H_{tr}, \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (8) 中可得

$$H_{tr} = \frac{2S_u}{\gamma'} - \frac{B}{2} \frac{1 - \tan \frac{\Delta}{2}}{1 + \tan \frac{\Delta}{2}}. \quad (10)$$

进一步分析可知, 由图 13 所构造的滑动面族:

$$h' = \begin{cases} \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) & (ABC \text{区域}) \\ -\frac{x}{z} & (CBD \text{区域}) \\ \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Delta}{2}\right) & (CDE \text{区域}) \\ 1 & (CEF \text{区域}) \end{cases}. \quad (11)$$

同理, 整个极限破坏区域的应力满足方程 (1)、(2), 即图 13 所构造的应力场满足平衡方程、屈服条件和屈服函数的极值条件。根据极限分析的下限定理, 由式 (11) 求得的是条形探头深浅破坏模式临界转换深度  $H_{tr}$  的一个下限解。

当土体表面完全粗糙时,  $\Delta = \pi/2$ , 可得  $H_{tr} = \frac{2S_u}{\gamma'}$ ,

此时式 (11) 退化为竖直挖破临界高度的解。

根据上述试验的相关参数, 可计算出本次试验的深、浅破坏模式临界转换深度  $H_{tr}$  为 70 cm, 因此在本次试验的贯入深度范围内均为浅层破坏模式。

### 3 浅层破坏模式下贯入阻力与土体强度的关系

假设饱和软黏土为刚塑性体, 满足 Tresca 强度准则, 其屈服强度等于土体的不排水抗剪强度  $S_u$ , 土体有效重度为  $\gamma'$ 。

#### 3.1 条形探头贯入阻力与土体强度关系的下限解

构造条形探头在浅层贯入过程中土体的滑动面如图 14 所示, 其中  $AB$  为探头的中轴线, 根据对称性取探头的一半进行分析,  $C$  点为几何坐标系的原点, 探头贯入深度为  $H$ 。

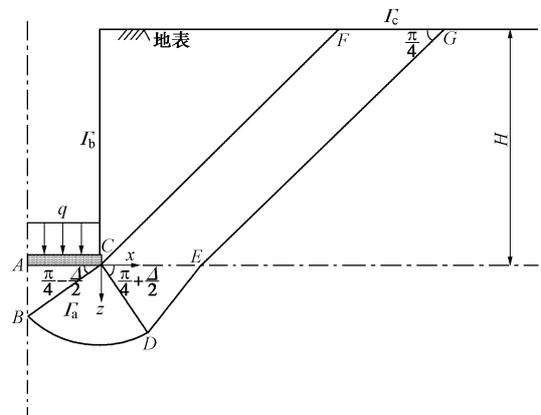


图 14 条形探头在浅层破坏时的滑动面

Fig. 14 Failure plane of shallow failure mode

在  $\Gamma_c$  上荷载边界条件为

$$z = -H, \sigma_z = \tau_{xz} = 0. \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (1) 中可知  $h' = \pm 1$ , 由几何

关系可确定在边界  $\Gamma_c$  上  $h' = -1$ ，代入式 (3)，可求得

$$C_0 = \frac{S_u}{2}(\pi+2) + \gamma'H \quad (13)$$

在  $\Gamma_a$  上荷载边界条件为

$$z=0, \tau_{xz} = \alpha S_u \quad (14)$$

式中， $\alpha$  为探头表面黏聚力系数， $0 \leq \alpha \leq 1$ ，当  $\alpha=0$  时表示探头与土体之间表面光滑，当  $\alpha=1$  时表示探头与土体之间表面完全粗糙，不会发生相对滑动。探头表面的土体应力状态莫尔应力圆如图 15 所示，由图可知，当土体表面处于极限状态时， $\sin \Delta = \alpha$ 。

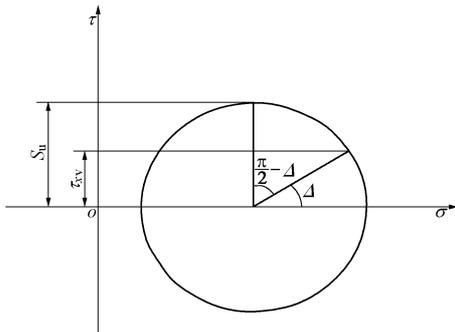


图 15 探头表面莫尔应力圆

Fig. 15 Mohr stress circle at penetrometer surface

将式 (14) 代入式 (1) 中可求得

$$h' = \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) \quad (15)$$

将式 (13)、(15) 代入式 (4) 中，可求得  $\Gamma_a$  上的垂直极限荷载为

$$q = \sigma_z = \gamma'H + S_u(\pi - \Delta + \cos \Delta + 1) \quad (16)$$

进一步分析可知，由图 16 所构造的滑动面族：

$$h' = \begin{cases} \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) & (ABC \text{ 区域}) \\ -\frac{x}{z} & (CBD \text{ 区域}) \\ \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Delta}{2}\right) & (CDE \text{ 区域}) \\ -1 & (CEFG \text{ 区域}) \end{cases} \quad (17)$$

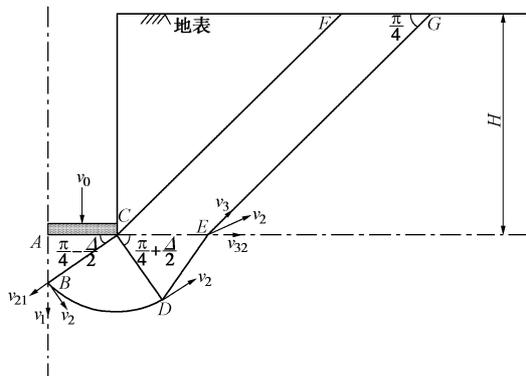


图 16 条形探头在浅层破坏时的机动场

Fig. 16 Kinematically admissible velocity fields of shallow failure mode

根据式 (4)、(13) 和 (17) 可得到土体极限状态区域内任意一点的应力状态，且整个破坏区域的应力满足方程 (1)、(2)，即图 14 所构造的应力场满足平衡方程、屈服条件和屈服函数的极值条件。根据极限分析的下限定理，由式 (16) 求得的极限荷载就是条形探头浅层贯入时土体阻力的一个下限解

### 3.2 条形探头贯入阻力与土体强度关系的上限解

由图 16 所示的滑动面构造如下图所示的机动场，假设竖向荷载的速度为  $v_0$ 。其中  $ABC$  区域为刚性核， $BCD$  为辐射耗散区， $BC$ 、 $CE$ 、 $DE$ 、 $CF$  和  $EG$  为速度间断面。机动场的速度关系矢量图如图 20 所示。

由图 17 可知： $v_1 = v_0$ ， $v_2 = v_0 \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right)$ ，  
 $v_{21} = v_0 \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right)$ ， $v_3 = \sqrt{2}v_2 \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right)$ ， $v_{32} = \sqrt{2}v_2 \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right)$ 。

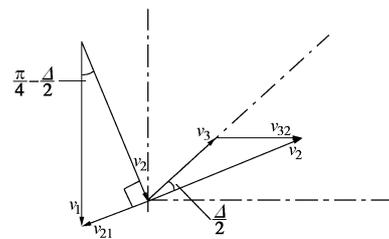


图 17 机动场的速度矢量图

Fig. 17 Velocity vectors of kinematically admissible velocity fields

由几何关系可知： $\overline{BC} = \overline{DE} = \frac{B}{2} \csc\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right)$ ，  
 $\overline{CF} = \overline{EG} = \sqrt{2}H$ ， $\overline{BD} = \frac{\pi}{2} \overline{BC} = \frac{\pi B}{2} \csc\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right)$ ， $\overline{CE} = 2\overline{DE} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Delta}{2}\right) = B \csc\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Delta}{2}\right)$ 。

$BC$  上的能量耗散率为

$$W_{BC} = S_u \cdot \overline{BC} \cdot v_{21} = \frac{1}{2} B S_u v_0 \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) \quad (18)$$

辐射耗散区  $BCD$  的能量耗散率为

$$W_{BD} = S_u \cdot \overline{BD} \cdot v_2 = \frac{\pi}{4} B S_u v_0 \quad (19)$$

$DE$  上的能量耗散率为

$$W_{DE} = S_u \cdot \overline{DE} \cdot v_2 \cos \Delta = \frac{1}{2} B S_u v_0 \cos \Delta \quad (20)$$

$CE$  上的能量耗散率为

$$W_{CE} = S_u \cdot \overline{CE} \cdot v_{32} = \frac{1}{2} B S_u v_0 (\sin \Delta + \cos \Delta - 1) \quad (21)$$

$CF$  和  $EG$  上的能量耗散率为

$$W_{CF} = W_{EG} = S_u \cdot \overline{CF} \cdot v_3 = \frac{1}{2} H S_u v_0 \cos \Delta \quad (22)$$

ABC 区域重力产生的外功率为

$$W_{ABC} = \gamma' \cdot S_{\Delta ABC} \cdot v_1 = \frac{1}{8} \gamma' v_0 B^2 \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) \quad (23)$$

BCD 区域重力产生的外功率为

$$W_{BCD} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \gamma' v_2 \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2} + \theta\right) \cdot \frac{1}{2} BC^2 d\theta \\ = \frac{1}{8} \gamma' v_0 B^2 \left[1 - \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right)\right] \quad (24)$$

DCE 区域重力产生的外功率为

$$W_{DCE} = -\gamma' \cdot S_{\Delta DCE} \cdot v_2 \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) \\ = -\frac{1}{4} \gamma' v_0 B^2 \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta}{2}\right) \cos \Delta \quad (25)$$

CEFG 区域重力产生的外功率为

$$W_{CEFG} = -\gamma' \cdot S_{\Delta CEF} \cdot v_3 \sin \frac{\pi}{4} \\ = -\frac{1}{2} \gamma' v_0 BH \cos \Delta \quad (26)$$

由外功率等于内功率可知

$$p v_0 \frac{B}{2} + W_{ABC} + W_{BCD} + W_{DCE} + W_{CEFG} \\ = W_{BC} + W_{BD} + W_{DE} + W_{CE} + W_{CF} + W_{EG} \quad (27)$$

将式 (18) ~ (26) 代入式 (27), 可得

$$p = \gamma' B \left( \frac{1}{2} \frac{\cos^2 \Delta}{1 + \sin \Delta} + \frac{H}{B} \cos \Delta - \frac{1}{4} \right) + S_u \cdot \\ \left( \frac{\cos \Delta}{1 + \sin \Delta} + \sin \Delta + 2 \cos \Delta + 2 \frac{H}{B} \cos \Delta + \frac{\pi}{2} - 1 \right) \quad (28)$$

### 3.3 试验验证

假设高岭土的黏滞系数  $\alpha$  等于 1, 由上下限解式 (16)、(28), 根据试验得到的土体抗力, 分别计算土体不排水强度的上限和下限, 并与十字板剪切强度进行比较, 如图 18 所示。

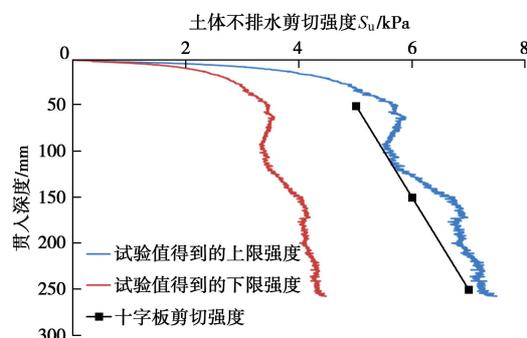


图 18 土体强度的上下限值与十字板剪切强度的比较

Fig. 18 Comparison between upper and lower limit soil strengths and vane shear strengths

由图 18 可知, 十字板剪切强度位于理论计算的上下限解之间, 且更靠近于上限解, 这验证了条形探头可用来探测海底较软的浅表层软黏土的原位强度。

## 4 结 论

基于新型条形探头开展了软黏土浅层贯入室内模型试验, 分析了探头贯入过程中的土体破坏模式和运动规律, 建立了条形探头贯入阻力与土体不排水强度的关系, 得到以下 3 点结论。

(1) 条形探头在土体内的影响区域约为  $3B$ , 土体的最大水平向位移发生在探头贯入深度以下约  $1.0B$  处, 说明土体对探头贯入的响应存在滞后性, 实测数据表明贯入深度较浅时探头周边土体没有回流现象, 呈现浅层无回流破坏模式。

(2) 数值分析结果表明随着条形探头的贯入, 其周边土体的破坏模式发生了转变, 从浅层破坏模式发展为深层破坏模式, 根据假设的深浅转换破坏面推导得到了两种破坏模式转换深度的下限解。本次试验的转换深度  $H_r$  为 70 cm。

(3) 通过极限分析的上下限法, 建立了条形探头贯入阻力与土体不排水强度关系的理论解, 该方法得到了试验的验证, 条形探头可用于海洋浅表层软黏土原位强度的测试。

### 参考文献:

- [1] 郭绍曾, 刘 润. 静力触探测试技术在海洋工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 1): 207 - 211. (GUO Shao-zeng, LIU Run. Application of cone penetration test in offshore engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 207 - 211. (in Chinese))
- [2] RANDOLPH M F, HOULSBY G T. The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil[J]. Géotechnique, 1984, 36(36): 457 - 457
- [3] RANDOLPH M F, MARTIN C M, HU Y. Limiting resistance of a spherical penetrometer in cohesive material[J]. Géotechnique, 2000, 50(5): 573 - 582.
- [4] STEWART D P, RANDOLPH M F. A New site investigation tool for the centrifuge[C]// Proceedings of the International Conference Centrifuge. Rotterdam, 1991: 531 - 531.
- [5] STEWART D P, RANDOLPH M F. T-Bar penetration testing in soft clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2230 - 2235.
- [6] DEJONG J T, YAFRATE N J, DEGROOT D J. Evaluation of undrained shear strength using full-flow penetrometers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 137(1): 14 - 26.
- [7] YAFRATE N J, DEJONG J T. Considerations in evaluating the remoulded undrained shear strength from full-flow

- penetrometer cycling[C]// Proceedings of the 1st International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Rotterdam: Taylor & Francis, 2005: 991 - 997.
- [8] LUNNE T, RANDOLPH M F, CHUNG S F. Comparison of cone and T-bar factors in two onshore and one offshore clay sediments[C]// Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Balkema, 2005: 981 - 989.
- [9] LOW H E, MAYNARD M L, RANDOLPH M F, et al. Geotechnical characterisation and engineering properties of Burswood clay[J]. Géotechnique, 2011, **61**(7): 575 - 591.
- [10] 范庆来, 栾茂田, 刘占阁. 软土中 T 型触探仪贯入阻力的数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, **30**(9): 2850 - 2854. (FAN Qing-lai, LUAN Mao-tian, LIU Zhan-ge. Numerical simulation of penetration resistance of T-bar penetrometer in soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(9): 2850 - 2854. (in Chinese))
- [11] 蔡国军, 张涛, 刘松玉, 等. 江苏海相黏土电阻率与岩土特性参数间相关性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1470 - 1477. (CAI Guo-jun, ZHANG Tao, LIU Song-yu, et al. Relationship between electrical resistivity and geotechnical characteristic parameters for Jiangsu marine clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1470 - 1477. (in Chinese))
- [12] 蔡国军, 刘松玉, ANAND J P, 等. 基于 CPTU 测试的桩基承载力可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 404 - 412. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, ANAND J P, et al. Reliability assessment of bearing capacity of pile foundation based on CPTU data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 404 - 412. (in Chinese))
- [13] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于聚类分析理论的 CPTU 土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 416 - 424. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Soil classification using CPTU data based upon cluster analysis theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 416 - 424. (in Chinese))
- [14] WHITE D J, GAUDIN C, BOYLAN N, et al. Interpretation of T-bar penetrometer tests at shallow embedment and in very soft soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **47**(2): 218 - 229.
- [15] 郭绍曾, 刘润, 洪兆徽, 等. 插桩过程对临近平台桩基础的影响研究[J]. 地震工程学报, 2015, **37**(2): 446 - 452. (GUO Shao-zeng, LIU Run, HONG Zhao-hui. Influence of spudcan penetration on pile foundations near a platform[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, **37**(2): 446 - 452. (in Chinese))
- [16] 周龙, 刘润, 郭绍曾, 等. 桩靴连续贯入过程的动态模拟方法研究[J]. 地震工程学报, 2015, **37**(2): 460 - 466. (ZHOU Long, LIU Run, GUO Shao-zeng et al. A Dynamic simulation method for continuous spudcan penetration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, **37**(2): 460 - 466. (in Chinese))
- [17] 黄传志. 土体极限分析理论与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (HUANG Chuan-zhi. Theory and application of soil limit analysis[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))