

用扁铲侧胀试验计算饱和软粘土的不排水抗剪强度

孙 莉 孙仕林

(中国船舶工业勘察设计研究院, 上海 200063)

【摘 要】 评价上海地区饱和软粘土的不排水抗剪强度。通过室内试验及十字板剪切试验得到的不排水抗剪强度 c_u 与用扁铲指数(水平应力指数 K_D) 计算得到的不排水抗剪强度 c_u 进行比较, 说明 Marchetti (1980) 计算 c_u 的公式适用于上海地区的饱和软粘土。同时, 扁铲模量 E_D 与不排水抗剪强度 c_u 具有线性相关性, 故找到了一个更为简便的计算不排水抗剪强度 c_u 的公式。

【关键词】 不排水抗剪强度 c_u ; 扁铲模量 E_D ; 水平应力指数 K_D

【中图分类号】 TU413

Calculation for Undrained Shear Strength of Saturation Cohesive Soils Using Flat Dilatometer

【Abstract】 Through comparing the undrained shear strength determined by laboratory tests with that by DMT horizontal stress index K_D , make a conclusion that Marchetti's equations concerning the evaluation of undrained shear strength are applicable to soft cohesive soils in Shanghai district, and the dilatometer modulus E_D has linear relativity with undrained shear strength.

【Key words】 undrained shear strength c_u ; dilatometer modulus E_D ; horizontal stress index K_D

0 引 言

扁铲侧胀试验(简称 DMT), 自 20 世纪 70 年代末由意大利学者 Marchetti 发明以来, 在北美及欧洲等国家得到了广泛的应用, 并已列入 ASTM (1986) 推荐方法和欧洲 EUROCODE (1994) 等规范及标准。浙江温岭南光地质仪器厂参照国外有关 DMT 试验资料及样机试制成功了 DMT-W1 型扁铲侧胀仪, 于 1998 年 7 月通过鉴定, 很快在国内得到了推广和应用。

近年扁铲侧胀试验在上海地区应用也较

广泛, 上海即将修编的《岩土工程勘察规范》也将把扁铲侧胀试验列入原位测试方法之一。我院在明珠线二期工程、杨浦 M8 线等市政建设工程项目中作了一些扁铲侧胀试验, 积累了一些扁铲测试资料, 在参考国外经验公式计算土工参数的基础上, 与其他原位测试技术及土工试验指标建立关系, 得到了一些适合于上海地区的扁铲侧胀试验公式。

不排水抗剪强度对软土地基中基坑工程、隧道工程、桩基工程等是一个重要的参数。不排水抗剪强度可通过室内土工试验(如

作者简介: 孙 莉, 女, 汉族, 1969 年生, 上海人, 1991 年毕业于同济大学地下建筑与工程系, 工学学士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察与研究作。

无侧限抗剪强度、三轴不固结不排水剪切试验)或原位测试(如十字板剪切试验、扁铲侧胀试验等)获取,但软土层在采取土样过程中易受扰动,土颗粒间的结构强度易降低,往往使土的不排水抗剪强度结果偏小(见图 1), c_{um} 及 $q_u/2$ 比通过十字板试验得到的 c_u 减少约 30%。

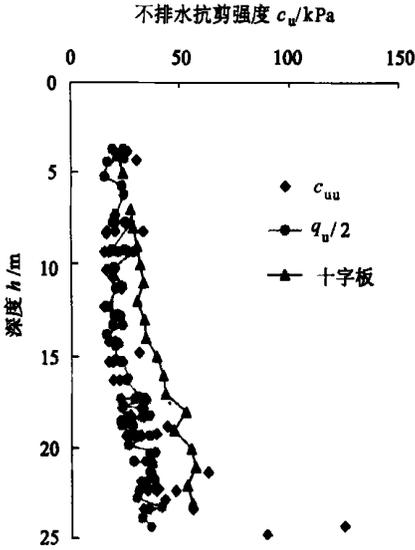


图 1 几种原位和室内试验得到不排水抗剪强度 c_u 的比较

1 扁铲侧胀试验的优点及应用

1.1 扁铲侧胀试验的优点

扁铲试验具有操作简便、重复性好、人为影响因素小、一次试验能获得多个参数、试验结果与人们熟悉的土工参数相关联的特点,同时,扁平状铲大大避免了土体的拱效应,相对于圆柱形探头对土体的挤压较小,使土体扰动也小得多,因此更具准确性。

1.2 扁铲试验在上海地区的适用性

上海地区全新世土层除表层填土及 2~3 m 厚的褐黄色硬壳层外,一般为软弱的粘性土,其中:淤泥质粘性土层③、④,层面埋深一般约 4 m,厚约 13 m;粘土层⑤,层面埋深一般约 17 m,厚约 8 m。据对上海地区全新世的饱和软粘土研究,上述土层(③、④、⑤)具轻度

超固结,其超固结比约为 1.06。Marchetti (1980)提出的土工试验参数(K_o 、OCR、 c_u 等)与扁铲指数(I_d 、 K_D 、 E_D)的关系式一般适用于 $I_d < 1.2$ 的正常固结土,因此扁铲试验可应用于上海软土地层。

2 国外常用的不排水抗剪强度 c_u 经验公式

Marchetti(1980)认为不排水抗剪强度 c_u 为 K_D 的函数,他通过压力计试验得到的超固结比 OCR 和扁铲试验得到的 K_D 值建立了经验公式^[1]:

$$OCR = (0.5 K_D)^{1.56} \quad (1)$$

c_u / σ'_{v0} 与 OCR 的关系采用 Ladd et al (1911)建议的公式:

$$(c_u / \sigma'_{v0})_{oc} = (c_u / \sigma'_{v0})_{nc} (OCR)^\wedge \quad (2)$$

\wedge 一般为 0.85~0.75,取 \wedge 0.8,把式(1)

和(2)合并

$$(c_u / \sigma'_{v0})_{oc} = (c_u / \sigma'_{v0})_{nc} (0.5 K_D)^{1.25} \quad (3)$$

式(3)可写成

$$c_u = (c_u / \sigma'_{v0})_{nc} \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25} \quad (4)$$

Marchetti(1980)通过十字板剪切试验得到

$$(c_u / \sigma'_{v0})_{nc} = 0.22$$

所以式(4)可改写为

$$c_u = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25} \\ = 0.092 5 \sigma'_{v0} K_D^{1.25} \quad (5)$$

式(5)适用于粘土中,当 $I_d > 0.35$ 需要修正,一般为:

$$c_u = 0.092 5 \sigma'_{v0} K_D^{1.25} + 60 (I_d - 0.35) \quad (6)$$

日本的 Iwasaki and Kamei 根据日本粘性土层及室内试验(无侧限抗压强度及不固结不排水剪)得到的不排水抗剪强度进行分析,得到如下关系式:

$$c_u = 0.35 \sigma'_{v0} (0.47 K_D)^{1.14} \quad (7)$$

国外不同的学者根据不同的土质得到许多不同的用扁铲指数计算不排水抗剪强度的公式,一些主要公式概括见表 1^[1]。

表1 用DMI计算不排水抗剪强度公式概括

c_u 计算公式	学者及年代
$c_u = 0.092 5\sigma'_{v0} K_D^{1.25}$	Marchetti(1980)
$c_u = 0.092 5\sigma'_{v0} K_D^{1.25} + 60(I_d - 0.35)$ ($I_d > 0.35$)	
$c_u = 0.35\sigma'_{v0}(0.47 K_D)^{1.14}$	Iwasaki and Kamei(1995)
$c_u = (0.17 \sim 0.21)\sigma'_{v0}(0.50 K_D)^{1.25}$	Lacasse and Lunne(1988)
$c_u = (p_1 - \sigma_{h0}) / N_c$	Roque(1988)
式中: σ_{h0} 为现场水平总应力; $\sigma_{h0} = K_0 \sigma'_{v0} + u_0$; N_c 为与土的刚度、 I_d 有关的系数,为5~9	
$c_u = (p_0 - u_0) / N_c = K_D \sigma'_{v0} / N_c$	Mayne(1987)
式中: N_c 为3~9	

3 扁铲侧胀试验的主要读数及扁铲指数

3.1 扁铲试验的主要读数

扁铲试验时,把插板压入土中预定的试验深度,用控制箱加气压,使膜片膨胀,并用压力表或测力数字仪测量气压,膜片回复初始位置时的位移量为0.05 mm,此时发出一电信号,测定压力A,然后继续加气使膜片扩张到1.1 mm的位移量,发出第二电信号,测定压力B,降低气压,当膜片回缩到开始扩张的位置(0.05 mm)发出第三电信号,测读此时的气压C值。野外读数A、B、C经过仪器的率定、数值的修正,可转为 p_0 、 p_1 、 p_2 三个主要参数。扁铲试验结果一般可整理成如图2的曲线。

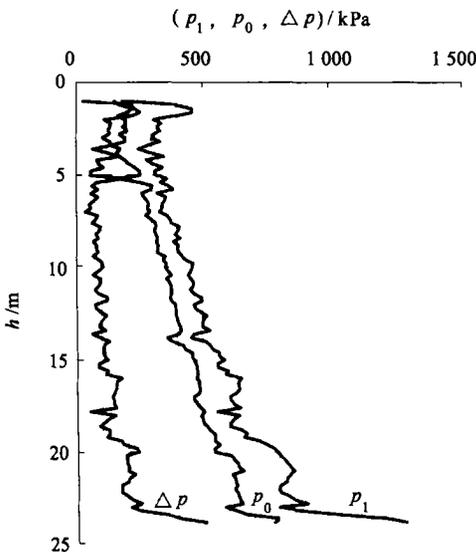


图2 ($p_1, p_0, \Delta p$)- h 关系曲线

3.2 扁铲指数

通过上述3个主要参数可得到3个扁铲指数 I_d 、 K_D 、 E_D [2]。

1)材料指数 I_d

$$I_d = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0) \quad (8)$$

可用于划分土类。

2)水平应力指数 K_D

$$K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0} \quad (9)$$

式中: σ'_{v0} ——试验点的有效应力。

一般认为正常固结土 $K_D \approx 2$,同时 K_D 曲线与OCR曲线非常相似,这就为了解土的沉积和应力历史提供了帮助。

3)扁铲模量 E_D

根据弹性理论,对于60 mm直径的膜片,1.1 mm的位移,其换算关系为:

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0) = 34.7 \Delta p_0 \quad (10)$$

扁铲指数 I_d 、 K_D 、 E_D 曲线见图3。从图3可看出, I_d 与土的性质关系较为密切,一般根据其来划分土层, K_D 随深度变化不大,特别是10 m以下, $K_D \approx 2$,而 E_D 随深度变化较明显。

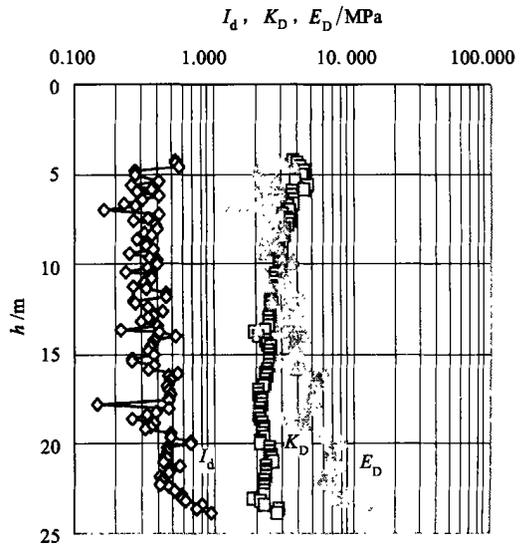


图3 (I_d, K_D, E_D)- h 关系曲线

4 不排水抗剪强度 c_u 与扁铲指数的关系

目前我们常用 Marchetti (1980)的公式 $c_u = 0.092 5\sigma'_{v0} K_D^{1.25}$ 计算粘性土层的不排水

抗剪强度 c_u , 用该公式计算的 c_u 与十字板剪切试验得到的峰值抗剪强度是一致的(见图 4), 说明 Marchetti 的公式同样适用于上海地区正常固结的软粘土。

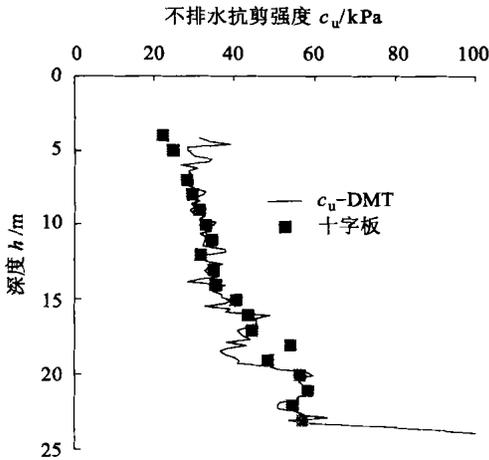


图 4 用扁铲侧胀试验与十字板剪切试验得到的不排水抗剪强度比较

用 Marchetti(1980)的公式计算粘性土层的不排水抗剪强度 c_u 时, 因 K_D 随深度变化不明显, 故 σ'_{v0} 对计算结果的贡献较大。图 3 的 E_D 与深度的关系曲线与图 4 的 c_u 与深度的关系曲线形态基本一致, 把同一深度的扁铲模量 E_D 与同一深度试验点由 Marchetti (1980) 公式计算得到的 c_u 建立关系(见图 5), 从图 5 可以看出, 这两者之间线性关系明显, 对 E_D 和 c_u 用最小二乘法进行线性回归, 得到如下关系式:

$$c_u = 0.005 2 E_D + 17.11 \quad (11)$$

$$R^2 = 0.93 \quad (12)$$

通过 E_D 与 c_u 的线性关系, 可采用 E_D (或 Δp) 可直接求得 c_u , 计算极为方便。当采用公式(5)、(6)计算 c_u 时, 需要计算试验点的有效

应力 σ'_{v0} 、试验点的孔隙水压力 u_0 等, 计算工作量较大。

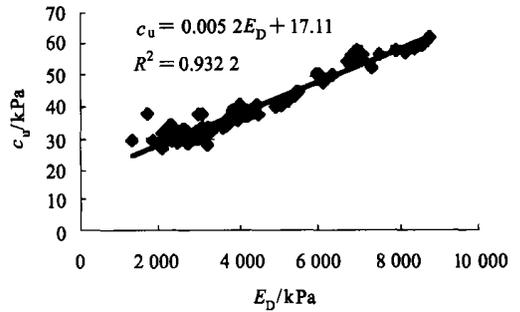


图 5 不排水抗剪强度 c_u 与扁铲模量 E_D 的关系

5 结论

1) 扁铲侧胀试验适用于上海地区软土层, Marchetti(1980)的计算不排水抗剪强度的公式适用于上海地区全新世的饱和软粘土。

2) 扁铲模量 E_D 与不排水抗剪强度 c_u 具有线性相关性, 其关系式为:

$$c_u = 0.005 2 E_D + 17.11 \quad (13)$$

用上式计算 c_u 更为简便, 更直接。

参 考 文 献

- 1 Takeshi Kamei and Kimitoshi Iwasaki, Evaluation of Undrained Shear Strength on Cohesive Soils Using a Flat Dilatometer, Soils and Foundations, 1995, 35(2):111~116
- 2 Report of the ISSMGE Technical Committee 16 on Ground property Characterisation from In-situ Testing, The Flat Dilatometer Test (DMT) In Investigations, International society for soil Mechanics and Geotechnical Engineering(ISSMEG)

收稿日期:2002-05-27