

土的抗剪真强度探索

蔡建¹, 蔡继锋²

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 2. 江苏城市职业学院, 江苏 南通 226000)

摘要: 为了研究土的含水率不变时土的抗剪强度与有效应力的关系, 根据土的卸载抗剪强度的计算方法, 结合超固结土与正常固结土的应力关系, 分析了加载和卸载过程中土的抗剪强度的变化规律, 然后从理论上分析出伏斯列夫在试验的基础上提出真强度理论的两个真强度参数的计算公式。经过推导得出了伏斯列夫土的抗剪真强度线的理论解。最后通过求极限和求导数的方法由伏斯列夫超固结土真强度理论得到真正意义上同一结构的超固结土、正常固结土、欠固结土的抗剪真强度的计算公式。

关键词: 抗剪真强度; 卸载抗剪强度; 超固结土; 正常固结土

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)06-0934-06

作者简介: 蔡建(1966-), 男, 江苏如东人, 博士, 从事岩土工程专业设计、检测研究工作。E-mail: cjshiw@163.com。

True shear strength of soil

CAI Jian¹, CAI Ji-feng²

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., CCCC, Shanghai 200120, China; 2. Jiangsu City Vocation College, Nantong 226000, China)

Abstract: In order to investigate the relation between the shear strength and the effective normal stress of soil under the same water content, according to the methods for unloading shear strength of soil, the variation rules of shear strength of the soil under loading and unloading conditions are analyzed considering the stress relation between over-consolidated soil and normally consolidated soil. Formulas for the two true strength parameters of the true strength theory based on the tests by Hvorslev are proposed. Finally, the formula of shear strength with the same structure in a real sense for over-consolidated soil, normally consolidated soil, and under-consolidated soil is deduced by solving the limit and derivation according to the Hvorslev's true strength theory for over-consolidated soil.

Key words: true shear strength; unloading shear strength; over-consolidated soil; normally consolidated soil

0 引言

土体的抗剪强度是土力学的主要经典内容之一, 是研究地基稳定、地基承载力等问题的基础, 绝大多数岩土工程与土的抗剪强度有关。目前对土体的抗剪强度除少量试验研究外, 理论研究较少。研究土体的抗剪真强度对解决岩土工程问题具有极大的理论和现实意义。Coulomb 对土进行了一系列试验, 得出土的加载抗剪强度规律, 文献[1]探索了土的卸载抗剪强度的计算方法, 伏斯列夫(Hvorslev, 1937)在试验的基础上提出真强度理论^[2], 定性提出土的真强度参数为 c_e , j_e 。然而伏斯列夫未能从理论上定量给出两个真强度参数的计算方法, 不便于该公式的应用。本文在土的卸载抗剪强度的基础上研究了土的抗剪真强度, 从理论上给出土的抗剪真强度参数的计算方法和伏斯列夫(Hvorslev)真强度线的理论解, 最后给出真正意义上同一结构土的抗剪真强度计算公式, 丰富和发

展了伏斯列夫土的真强度理论, 并进行了适当的验证。

1 土的抗剪真强度

1.1 伏斯列夫(Hvorslev)真强度理论

图1给出了伏斯列夫试验的抗剪真强度线。在图1的上半部分为含水率(或孔隙比)与有效应力的关系, 下半部分为抗剪强度与有效应力的关系, 图1中 efd 线为伏斯列夫在试验的基础上得出真强度理论线, 该真强度线上土的含水率相等, 反映了土的抗剪强度与有效应力的关系:

$$t = c_e + s' \tan j_e \quad (1)$$

式中 c_e 为土的真黏聚力; j_e 为土的真内摩擦角。

文献[2]中指出“试验表明, 在不同的 w_f 下, j_e 基

本上不变, 而 c_e 则随 w_f 的增大而减小。对于高含水率的重塑黏土, c_e 与等效固结应力 s'_e (正常固结曲线上与 ω_f 对应的固结压力) 成正比。因此, 可写成 $c_e = \xi s'_e$, ξ 为凝聚系数, 对于给定的土, ξ 为常数”。正常固结曲线上与 w_f 对应的固结压力是图 1 中 D 点对应的固结压力 s'_d , 也就是说 $c_e = \xi s'_d$ 。

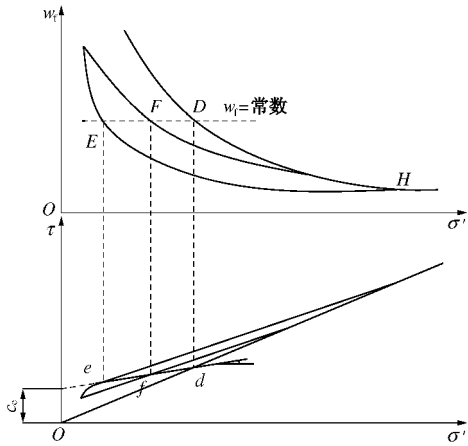


图 1 伏斯列夫试验的抗剪真强度线

Fig. 1 Curves of true shear strength from Hvorslev tests

同时文献[2]中也指出“把不同结构试样的试验点连成一条强度线是不合适的。但是, 不管怎样, 在现有的强度理论中能较全面考虑影响因素的还推伏斯列夫理论。”在图 1 中如果前期固结应力 H 点向 D 点不断减小, 同时 E 点向 D 点不断变化, 最后 H 点和 E 点均变化到极限 D 点, 这样 E 点和 D 点的伏斯列夫真强度 ED 连线就转变成相同结构试样的两个试验点连成的一条强度线, 在概念上 E 点、 D 点是 2 个试验点, 实际上 2 个试验点重合为一个点, 显然用试验方法不能解决这样的问题, 下面用求极限和求导数的方法可从理论上探索土的抗剪真强度。

1.2 土的含水率与抗剪强度的关系

假设土的饱和度为 100%, 根据土的三项指标有

$$w = \frac{g_w}{g_s} e \quad (2)$$

式中 w 为土的含水率; g_s 为土的颗粒重度; g_w 为水的重度; e 为土的孔隙比。式 (2) 说明土的含水率与孔隙比有对应关系。

土的室内固结压缩试验反映了土的孔隙比 e 与有效固结应力 s' (或用 p 表示) 的对应关系, 固结压缩试验的成果可用 e 与 s' 和 e 与 $\lg s'$ 两种方法表示 (如图 2 所示), 可以将土的含水率 (或孔隙比 e) 与土的抗剪强度联系在一起。

在图 2 中的上半部分表示含水率 (或孔隙比 e) 与固结应力的对数值 $\lg s'$ 的关系。假设土体的正常固结应力为图中 D 点, 超固结到图中的 H 点, 然后卸载

到 E 点, 因为 E 点和 D 点的孔隙比相等, 所以 E 点的含水率与 D 点含水率相等, F 点与 E 点类似。

图 2 的下半部分为抗剪强度与有效应力的关系, 假设土体为正常固结土, 从未受到过周围固结压力的饱和正常固结试样不具有强度^[2], 土的黏聚力为 0, 土的内摩擦角为 j_0 。

图 2 中正常固结 AH 线, 对应抗剪强度 ah 线, 超固结 EH 线, 对应抗剪强度 eh 线, 固结压缩线与抗剪强度线之间有一一对应关系。超固结 EH 线上 E 点、 H 点对应的正应力用 s'_e , s'_H 表示, 正常固结 AH 线上 A 点、 D 点、 H 点对应的正应力用 s'_a , s'_d , s'_h 表示, 其中 $s'_H = s'_h$ 。 e 点的正应力和剪应力用 s'_e , t_e 表示, 其中 $s'_a = s'_e$ 。

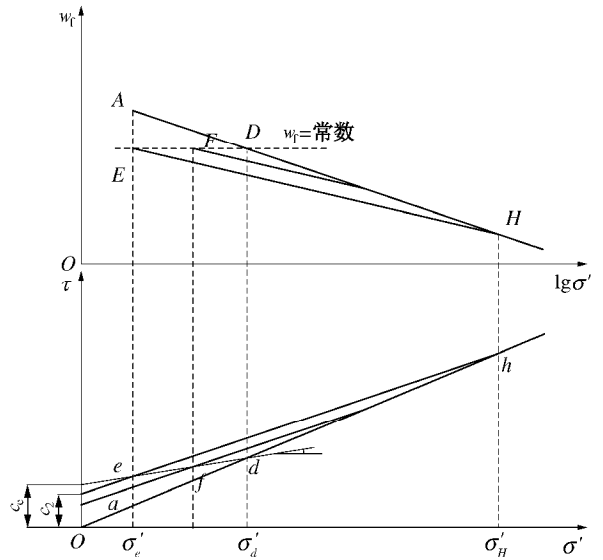


图 2 土的抗剪真强度与应力历史的关系

Fig. 2 Relation between true shear strength and stress history

1.3 伏斯列夫真强度公式探索

伏斯列夫 (Hvorslev) 真强度理论线是罗斯科 (Roscoe.1963, 1968) 的弹塑性本构理论即“临界状态土力学”的基石, 有必要深入研究伏斯列夫 (Hvorslev) 真强度理论线内在的、本质上的变化规律及计算方法。设

$$OCR = s'_H / s'_E \quad (3)$$

式中 OCR 为土的超固结比。

由文献[4]得

$$s'_d / s'_E = OCR^I \quad (4)$$

$$I = 1 - c_s / c_c \quad (5)$$

式中 I 为土性系数; c_s 为土的膨胀指数或土的回弹再压缩指数; c_c 为土的压缩指数。

文献[1]中的式 (4) 可改成用应力表示

$$s'_E = s'_e \left(\frac{s'_H}{s'_e} \right)^I \quad (6)$$

式(6)可理解为图2中假设土体为正常固结压缩线上H点经卸载到E点,土体的最大前期固结应力为 s'_H ,卸载后的土体竖向应力(上覆压力)有两个计算值,一个为不考虑超固结影响土体的竖向应力(上覆压力)为 s'_e ,一个为考虑超固结影响土体的竖向应力(上覆压力)为 s'_E ,换句话说一个土样经过卸载后位于卸载回弹线上土体竖向应力(上覆压力)为 s'_e ,与它具有相同孔隙比所对应的正常固结压缩线上的土体竖向应力(上覆压力)为 s'_E 。

由式(4)、(6)可得

$$\frac{s'_d}{OCR^I} = s'_e \left(\frac{s'_H}{s'_e} \right)^I \quad (7)$$

由式(7)化简后得

$$s'_e = \frac{s'_d \frac{1}{1-I}}{(s'_H OCR)^{\frac{1}{1-I}}} \quad (8)$$

在图2中DH线为正常固结曲线,可得

$$de(\text{或}dw) = c_c (\lg s'_H - \lg s'_d) \quad (9)$$

HE为卸载固结曲线,可得:

$$de(\text{或}dw) = c_s (\lg s'_H - \lg s'_E) \quad (10)$$

由式(9)、(10)得

$$\frac{s'_H}{s'_d} = \left(\frac{s'_H}{s'_E} \right)^{\frac{c_s}{c_c}} \quad (11)$$

由式(3)、(11)得

$$\frac{s'_H}{s'_d} = (OCR)^{\frac{c_s}{c_c}} \quad (12)$$

由式(8)、(12)得

$$s'_e = \frac{s'_d}{(OCR^{\frac{1+c_s}{c_c}})^{\frac{1}{1-I}}} \quad (13)$$

将式(13)化简得

$$s'_e = s'_d OCR^{\frac{1(1-2)}{1-I}} \quad (14)$$

正常固结应力抗剪强度线oh线上d点的正应力和剪应力用 s'_d, t_d 表示,则

$$t_d = s'_d \tan j_0 \quad (15)$$

超固结应力抗剪强度线eh线上e点的剪应力 t'_e 可根据式(4)表示为

$$t'_e = s'_d OCR^{-I} \tan j_0 \quad (16)$$

d点和e点的剪应力差为

$$\Delta t = s'_d \tan j_0 - s'_d OCR^{-I} \tan j_0 \quad (17)$$

d点和e点的正应力差为

$$\Delta s = s'_d - s'_d OCR^{\frac{1(1-2)}{1-I}} \quad (18)$$

真强度线ed的斜率为

$$k_e = \frac{s'_d - s'_d OCR^{-I}}{s'_d - s'_d OCR^{\frac{1(1-2)}{1-I}}} \tan j_0 \quad (19)$$

将式(19)化简可得

$$k_e = \frac{1 - OCR^{-I}}{1 - OCR^{\frac{1(1-2)}{1-I}}} \tan j_0 \quad (20)$$

设

$$n = \frac{1 - OCR^{-I}}{1 - OCR^{\frac{1(1-2)}{1-I}}} \quad (21)$$

则式(20)可简化为

$$k_e = n \tan j_0 \quad (22)$$

根据d点的正应力和抗剪强度及式(22)可得土的抗剪真强度公式

$$t = c_e + k_e s' \quad (23)$$

其中

$$\begin{cases} c_e = (1-n)s'_d \tan j_0 \\ k_e = n \tan j_0 \end{cases} \quad (24)$$

参数同前。

式(21)表示了n与土的超固结比OCR的关系,取I=0.64时不同的OCR计算的n值见图3。

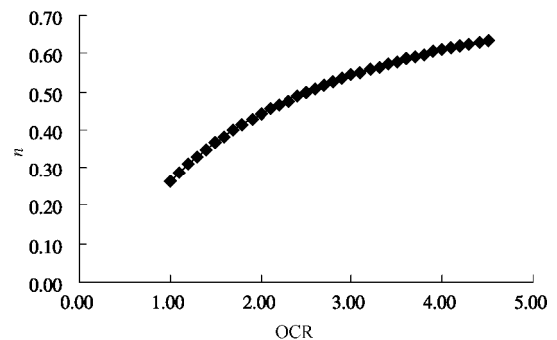


图3 n与OCR的关系图($\lambda=0.64$)

Fig. 3 Relation between n and OCR ($\lambda=0.64$)

从图2,3可以看出试验时E,F,D三点对应的正应力相差不大,3点土的超固结比OCR变化不大时,n值变化较小, $j_e = \arctan(n \tan j_0)$,即 j_e 基本不变。

式(23)、(24)的结论与伏斯列夫理论基本一致,比较结果见表1。

1.4 正常固结土的抗剪真强度公式探索

当土的超固结比OCR极限接近于1时,前期固结应力H点和卸载后的E点均接近于D点,式(21)右边的分子、分母均接近于0,式(21)右边为“ $\frac{0}{0}$ ”

型,n可采用洛必达法则求极限为

$$\lim_{OCR \rightarrow 1} n = \frac{1-I}{2-I} \quad (25)$$

根据式(25)得出由土性系数I决定的n值再代入式(23)、(24)得

$$t = \frac{1}{2-I} s'_d \tan j_0 + \frac{1-I}{2-I} s' \tan j_0 \quad (26)$$

表 1 伏斯列夫理论的结论与本文结果的比较

Table 1 Comparison between Hvorslev's and present results		
序号	伏斯列夫理论	本文
①	在不同的 w_f 下, j_e 基本上不变。	$j_e = \arctan(n \tan j_0)$, OCR 变化不大时, j_e 基本上不变。
②	c_e 则随 w_f 的增大而减小。	因随 w_f 的增大 s'_d 减小, 所以 c_e 则随 w_f 的增大而减小。
③	c_e 与等效固结应力 s'_d 成正比, $c_e = \xi s'_d$, ξ 为凝聚系数。	c_e 与等效固结应力 s'_d 成正比, $c_e = (1-n)s'_d \tan j_0$ 。
④	对于给定的土, ξ 为常数。	对于给定的土, OCR 变化不大时, 对应的 ξ 项基本为常数。

正常固结土的真强度指标可表示为

$$\begin{cases} c_e = \frac{1}{2-I} s'_d \tan j_0, \\ k_e = \frac{1-I}{2-I} \tan j_0. \end{cases} \quad (27)$$

参数同前。

式 (26) 就是真正意义上同一种结构即正常固结土的抗剪真强度计算公式。

假设土体为完全的弹性体, $I=0$, 正常固结土的斜率 (即真内摩擦角的正切值) 为有效应力表示的内摩擦角的正切值的二分之一。假设土体的黏粒含量很高, 土体为完全的塑性体, $I=1$, 正常固结土的斜率 (即真内摩擦角的正切值) 为 0。即真内摩擦角 j_e 介于 0 和 $\arctan(1/2 \tan j_0)$ 之间, 比室内抗剪强度试验的快剪 (不排水剪) 的内摩擦角值大, 比慢剪 (排水剪) 的内摩擦角值小。

1.5 超固结土的抗剪真强度公式探索

(1) 伏斯列夫(Hvorslev)真强度线的理论解

由式 (14)、(16) 得

$$\begin{cases} t'_e = s'_d \text{OCR}^{-1} \tan j_0, \\ s'_e = s'_d \text{OCR}^{\frac{1-(1-2)}{1-I}}. \end{cases} \quad (28)$$

由式 (28) 消去参数 OCR 化简得

$$t'_e = (s'_e)^{\frac{1-I}{2-I}} (s'_d)^{\frac{1}{2-I}} \tan j_0 \quad (29)$$

用 s 表示正应力, 用 t 表示剪应力, 式 (29) 可表示为

$$t = s^{\frac{1-I}{2-I}} (s'_d)^{\frac{1}{2-I}} \tan j_0 \quad (s \leq s'_d) \quad (30)$$

参数同前。

式 (30) 表示与等效固结应力 s'_d 含水率相等的土的抗剪强度与有效正应力的关系式, 即伏斯列夫(Hvorslev)真强度线的理论解, 它是一条幂函数曲线。

假设土的 $I=0.64$, $j_0=28^\circ$, 等效固结应力 s'_d 分

别为 200, 300, 400 kPa, 采用式 (30) 计算的土的抗剪真强度计算结果见图 4。罗斯科(Roscoe.1963,1968)的弹塑性本构理论中先假设伏斯列夫(Hvorslev)真强度线为一条不通过原点的直线, 再结合试验结果给出应力较小段是一条通过原点的直线所组成的状态边界面, 其形状与图 4 的曲线基本一致^[5]。假设不考虑应力较小段, 基本上是一条直线, 直线在 t 轴上的截距 (即真黏聚力) 随等效固结应力 s'_d 增大而增大, 随等效固结应力 s'_d 增大直线的倾角略微增大。

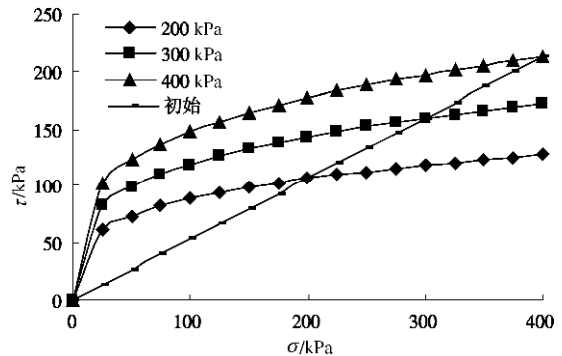


图 4 伏斯列夫(Hvorslev)真强度理论解计算结果

Fig. 4 Results of Hvorslev's true shear strength of soil

式 (30) 对正应力 s 求导数, 当 $s = s'_d$ 时该点的导数为 $(1-I)/(2-I) \tan j_0$, 与等效固结应力 s'_d 无关, 与前面式 (27) 表示的正常固结土的抗剪真强度线的斜率相同。

从本文的推导过程看土的抗剪真强度线与初始抗剪强度线的交点代表正常固结土的抗剪真强度。初始抗剪强度线的左上方部分表示含水率相同, 但前期固结应力不同的超固结土的伏斯列夫(Hvorslev)抗剪真强度线, 是不同结构土的抗剪强度点连线。对于初始抗剪强度线的右下方部分, 正应力已超过公式推导时的取值范围, 不能解释其物理意义, 该部分没有价值。

(2) 超固结土的抗剪真强度公式探索

真正意义上同一结构的土应指土的组成相同, 应力历史相同, 即前期固结应力相同, 土的超固结比相同。

式 (30) 表示含水率相同, 但结构不同的抗剪强度点的关系, 采用类似图 2 中 D 点求极限的方法, 式 (30) 对 s 求导数, 由伏斯列夫(Hvorslev)抗剪真强度线上的点和对应的导数所确定的直线, 就是真正意义上同一结构土的抗剪真强度线。对式 (30) 求导数并将 e 点的正应力代入得抗剪真强度线的斜率

$$k_3 = \frac{1-I}{2-I} (s'_e)^{\frac{-1}{2-I}} \cdot (s'_d)^{\frac{1}{2-I}} \cdot \tan j_0 \quad (31)$$

由式 (28)、(31) 得

$$t = t'_e + k_3 (s - s'_e) \quad (32)$$

参数同前。

式(32)就是真正意义上同一结构即超固结土的抗剪真强度计算公式。从式(28)、(31)知它与土性系数 I 、土的初始内摩擦角、等效固结应力 s'_d (或前期固结应力 s'_H)、土的超固结比 OCR 有关。

假设土的 $I=0.64$, $j_0=28^\circ$ 、等效固结应力 s'_d 为 300 kPa, 土的超固结比 OCR=1.0 和 1.5, 计算的伏斯列夫(Hvorslev)抗剪真强度线和式(32)确定的抗剪真强度线见图5。

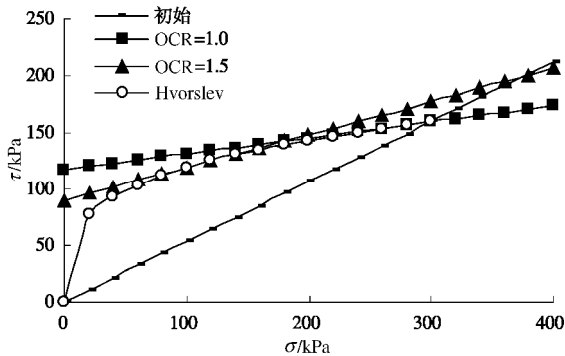


图5 超固结土的抗剪真强度计算结果

Fig. 5 Results of true shear strength of over-consolidated soil

1.6 欠固结土的抗剪真强度公式探索

将伏斯列夫(Hvorslev)关于真强度理论的思维方法继续延伸, 在图2中增加欠固结土的固结压缩曲线 GJ 和对应的抗剪强度线 gj 并作适当修改后见图6。图6中 Q 点对应的正应力用 s'_q 表示。对于 Q 点应力状态的土样, 与等效固结应力 s'_d 含水率相等对应的相等的抗剪强度为图中 G 点对应的抗剪强度。在图6中等效固结应力 d 点的正应力和剪应力分别为 s'_d , t_d , 其中 $t_d = s'_d \tan j_0$ 。假设图6中 g 点和 d 点的正应力差为 Δs , g 点的正应力和剪应力分别为 s'_g , t_g 。 gj 强度线的抗剪强度计算公式为

$$t = (s - \Delta s) \tan j_0 \quad (33)$$

将 g 点坐标代入式(33)并化简得 $t_g = s'_d \tan j_0$, 所以欠固结土的抗剪真强度 dg 线是与等效固结应力 d 点强度相等的直线。

$$\begin{cases} c_e = s'_d \tan j_0, \\ j_e = 0. \end{cases} \quad (s > s'_d) \quad (34)$$

参数同前。

2 土的抗剪真强度公式的验证

魏汝龙^[3]通过试算分析出土的真摩擦角和凝聚系数 x , 采用逐步修正法计算的近似值见表2。用 j'_0 代替 j_0 (j'_0 是试验时采用强度包线与有效应力 Mohr 圆相切求得的值), 同时将 x 代入式(24) (令 $x = (1-n) \tan j_0$) 计算出 n 值, 再根据 n 值计算出式(24)的 k_e 值, 求出土的真摩擦角见表2。本文的结

果与魏汝龙法计算的结果基本一致。

表2 土的真摩擦角的计算对比表

Table 2 Comparison of true friction angles of soil

土名	$j'_0 / (^\circ)$	ξ	魏汝龙法 $/(^\circ)$	本文 $/(^\circ)$
Haslemere 重塑黏土	23	0.08	17	18.9
上海某码头黏土	28	0.13	20	21.9

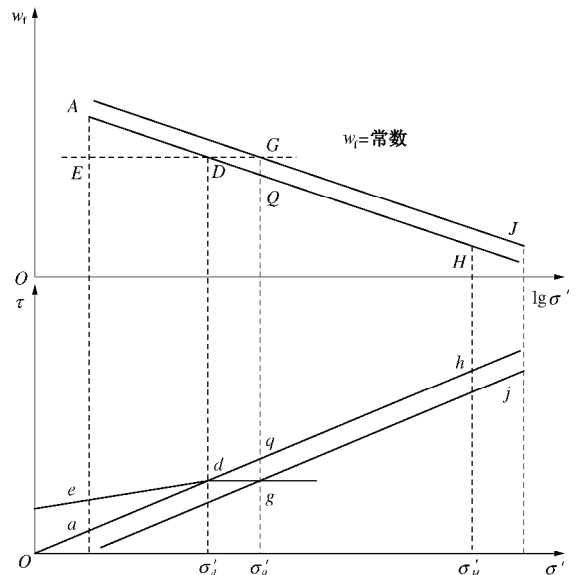


图6 土的抗剪真强度与应力历史的关系

Fig. 6 Relation between true shear strength and stress history

3 Krey-Tidemann 真强度线与 Hvorslev 真强度线的区别

Krey 认为“含水率相同的试样的抗剪强度 τ 与法向应力 σ 之间的关系近似地为一略为倾斜的直线^[3]”。图7是 Tidemann 为了证实 Krey 的理论的试验抗剪强度线, “Tidemann 为了尽可能保持含水率不变的条件, 采用迅速退荷和快剪的作法^[3]”, 他认为是一组含水率不变的真强度线, 认为是一组平行的直线。

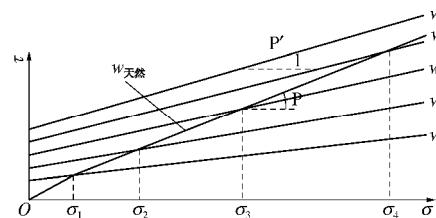


图7 Krey 的抗剪强度线

Fig.7 Krey's curves of shear strength of soil

根据 Tidemann 的试验方法明显地看出他的试验强度线是加载后再卸载的抗剪强度线, 就是文献[1]的式(9)表示的土的卸载抗剪强度线。文献[1]中的式(9)用应力可表示为

$$t = s \cdot \left(\frac{s'_H}{s}\right)^l \cdot \tan j_0 \quad (s \leq s'_H) \quad (35)$$

化简得式(36):

$$t = s^{1-I} (s'_H)^I \tan j_0 \quad (s \leq s'_H) \quad (36)$$

假设土的 $I = 0.64$, $j_0 = 28^\circ$ 、等效固结应力 s'_d 分别为 200, 300, 400 kPa, 采用式 (30) 计算的 Hvorslev 真强度线为图 8 的三条实心点连线。设前期固结应力 s'_H 为 200, 300, 400 kPa, 采用式 (36) 计算的 Krey-Tidemann 强度线为图 8 的三条空心点连线, 空心点连线与图 7 中 Tidemann 试验的 Krey 强度线相似。从图中可看出 Krey-Tidemann 和 Hvorslev 两者的真强度线是有区别的, 假设前期固结应力 s'_H 为 400 kPa 的超固结土对应的等效固结应力 s'_d 为 300 kPa, 忽略图 8 中应力较小段, 强度线近似看成直线, 从图中看出 Hvorslev 正方形实心点连线的真强度线与 Krey-Tidemann 三角形空心点连线的真强度线(卸载抗剪强度线)相比内摩擦角小, 黏聚力大。

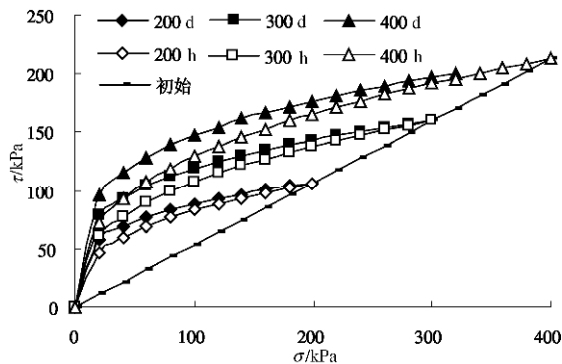


图 8 Krey-Tidemann 真强度线与 Hvorslev 真强度线的区别

Fig. 8 Difference between Krey-Tidemann's and Hvorslev's curves of true shear strength of soil

4 讨 论

文中的抗剪真强度严格地讲应该是饱和土的抗剪真强度, 为了尊重伏斯列夫(Hvorslev, 1937)真强度理论的提法, 所以文中未做更改。值得一提的是伏斯列夫(Hvorslev)真强度线本质上与伏斯列夫(Hvorslev)本人当初的观点不一样, 它不是一条直线, 通过理论发现它是一条幂函数曲线, 这一点也被剑桥模型的状态边界的形状所映证。 I 是土性参数, 不同的土 I 值不同, 可由室内试验确定, Mayne 通过 96 种黏土的试验结果为^[3]: I 在 0.3 到 1.0 之间变化, 缺少试验资料时可采用 I 的统计平均值 0.64。

土的真强度理论是 krey 于 1927 年提出, Tidemann 进行试验验证以及伏斯列夫(Hvorslev) 1937 年进行试验的基础上提出的, 是土的抗剪强度的关键指标, 至今仍是令人向往而未能解决的难题。通过上网搜索较难发现有参考价值的相关中英文参考文献, 笔者感到遗憾的是既无其它资料可进一步进行土的抗剪真强度公式验证, 也较难采用室内试验进行验证, 因为本文的结论没有得到充分的验证, 是理论上推导的土的

抗剪真强度, 只是一种理论探索, 土体的抗剪强度是研究岩土工程问题的基础, 笔者希望能够抛砖引玉使得土体的抗剪强度在理论方面有更大的突破, 文中有错误之处敬请专家指正。

5 结 论

(1) 正常固结土抗剪真强度线的真黏聚力 c_e 与 $1/(2-I)$ 、等效固结应力 s'_d , 有效应力表示的内摩擦角的正切值成正比; 土的斜率(即真内摩擦角的正切值)与 $(1-I)/(2-I)$, 有效应力表示的内摩擦角的正切值成正比。

(2) 伏斯列夫(Hvorslev)真强度线在理论上是一条幂函数曲线, 它与正应力 s 的 $(1-I)/(2-I)$ 次幂、等效固结应力 s'_d 的 $1/(2-I)$ 次幂、有效应力表示的内摩擦角的正切值成正比。

(3) 超固结土的抗剪真强度线计算公式可由式 (32) 表示, 它与土性系数 I 、土的初始内摩擦角 j_0 , 等效固结应力 s'_d (或前期固结应力 s'_H), 土的超固结比 OCR 有关。

(4) 欠固结土的抗剪真强度线是与等效固结应力强度相等的直线, 真黏聚力为等效固结应力 s'_d 和有效应力表示的内摩擦角的正切值的积, 真内摩擦角为 0。

参考文献:

- [1] 蔡建, 周健. 土的卸载抗剪强度[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 606 - 610. (CAI Jian, ZHOU Jian. Unloading shear strength of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 606 - 610. (in Chinese))
- [2] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 261 - 271. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Geotechnical principles and calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1996: 261 - 271. (in Chinese))
- [3] 魏汝龙. 软黏土的强度和变形[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987: 80 - 84. (WEI Ru-long. Soft clay strength and deformation[M]. Beijing: People's Traffic Press, 1987: 80 - 84. (in Chinese))
- [4] 胡中雄. 土力学与环境土力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 250. (HU Zhong-xiong. Soil mechanics and environment engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997: 250. (in Chinese))
- [5] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 100. (ZHENG Ying-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiao-nan. The Principles of Geotechnical Plastic Mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004: 100. (in Chinese))