

中英美标准十字板剪切试验对比分析及应用

陈默¹, 张瑞祺²

(1. 中交一航局第一工程有限公司; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司)

摘要:为了更好地应用软土十字板抗剪强度指标分析地基强度及稳定性, 对比英标(BS EN ISO 22476-9:2014)、美标(ASTM D2573/D2573M-15)与中国标准对十字板剪切试验设备和技术规定存在的差异, 重点分析不同标准对修正系数取值推荐的方法。结合工程实例, 对沼泽相泥炭质土十字板抗剪强度按照中美标准分别进行修正, 发现修正后的抗剪强度指标相近。可为国内工程师应用十字板抗剪强度指标评价软土特性提供一定的借鉴作用。

关键词:十字板剪切试验; 高径比; 峰值强度; 修正系数; 不排水抗剪强度; 有效应力

0 引言

十字板剪切试验^[1](Field Vane Shear Test)于1928年由瑞士奥尔桑(J·Olsson)首先提出, 我国于1954年开始使用十字板剪切试验测定饱和软黏土抗剪强度, 由于十字板剪切试验不需要采取土样, 特别是对于难以取样的高灵敏土, 现场进行十字板剪切试验方法简便, 测试结果可靠。十字板剪切试验通过插入土中的十字板, 以一定的剪切速率旋转, 对土体形成圆柱破坏面, 测得土体破坏时最大的抵抗力矩, 从而计算得到土体的不排水抗剪强度、残余抗剪强度、灵敏度、土体的固结程度等。影响十字板剪切试验因素很多, 主要有土的各向异性、剪切面剪应力非均匀分布、应变软化、十字板厚度、间歇时间、扭转速率等。

现行的各国十字板剪切试验标准为: 中国标准 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》(2009年版)^[2](简称国标)、英国标准 BS EN ISO 22476-9:2014《岩土工程勘察与测试-原位测试-第9部分: 十字板剪切试验》^[3](简称英标)以及美国标准 ASTM D2573/D2573M-15《饱和细粒土十字板剪切试验方法》^[4](简称美标)。国内标准规定十字板剪切试验主要用于测定软黏土($\phi \approx 0^\circ$)不排水抗剪强度。而英标和美标对于十字板剪切试验应用土质更宽泛, 可以测定粉土、饱和软黏土、硬黏土不排水抗剪强度指标。通过对比中英美三国十字板抗剪强度试验标准的异同, 方便中国工程师在海外开展工程项目时, 遇到业主提供的勘察报告采用的是英标或美标时, 能很好地转化成国标进行十字板抗剪强度指标的应用, 有力地推动中国企业在海外开展工程项目。

1 设备规格对比

各国标准规定的设备规格及适用范围基本接近, 但仍存在一定的差异。十字板形状中国和英国标准规定均为矩形, 而美国标准中分为矩形和菱形。直径方面英美标准比较接近, 均比较宽泛, 我国十字板直径比较固定。高径比中国和英国均为2, 而美国为1.0~2.5。其他方面各国均比较接近。各国标准规定的十字板规格对比见表1。

表1 各国标准规定的十字板规格对比

标准	直径 D / mm	高度 H / mm	板厚 t / mm	板轴杆 直径 d /mm	板端刃 角 $\alpha/^\circ$	高径比 H/D	面积 比/%
英标	33~100	66~100	0.8~3.0	16~20	0	2	≤ 12
美标	35~100	70~250	0.8~3.0	14~20	0 或 45	1~2.5	≤ 10
国标	50	100	2~3	13~16	0	2	≤ 15
	75	150					
	100	200					

2 试验技术要求对比

各国标准十字板剪切试验技术要求的差异并不大。贯入形式均分为钻孔和连续贯入。避免土体受扰动, 对于钻孔方式进行试验, 各国标准均对十字板压入原状土深度做了具体要求。在剪切速率方面中英标准一致, 与美标略有不同。当测得原状土峰值强度后, 应将土体充分扰动后进行土体残余抗剪强度试验, 各国标准对十字板扰动圈数规定略有不同。各国标准对于十字板剪切试验技术要求如下:

1) 英标规定: 采用钻孔或连续贯入的方式, 贯入速率不大于20 mm/s。将十字板头压入到原状土深度为板高的2倍或孔径的3倍深度后, 先静止2~5 min 再开始剪切试验。剪切速率控制在

0.1~0.2 (°)/s, 剪切破坏时间约 2~4 min。当测读到最大扭矩时停止试验, 将十字板旋转至少 10 圈, 让土体充分扰动, 按照剪切速率控制在 0.1~0.2 (°)/s, 剪切破坏时间约 2~4 min, 测读扰动土体抗剪强度, 完成试验。

2) 美标规定: 采用钻孔或连续贯入的方式, 将十字板头压入至少 5 倍孔径或十字板高度。剪切速率控制在 3~7 (°)/min, 剪切破坏时间约为 2~4 min, 软土中可用 10~15 min。当测读到最大扭矩时停止试验, 将十字板旋转 5~10 圈, 让土体充分扰动, 按照剪切速率控制在 3~7 (°)/min, 剪切破坏时间约为 2~4 min, 软土中可用 10~15 min, 测读扰动土体抗剪强度, 完成试验。

3) 国标规定: 采用钻孔或连续贯入的方式, 将十字板头压入 3~5 倍孔径或套管直径, 应在静止 2~3 min 后, 再开始进行剪切试验。剪切速率控制在 0.1~0.2 (°)/s, 当测读到最大扭矩后, 应再继续测读 1 min, 然后停止试验。将十字板旋转 6 圈, 让土体充分扰动, 按照剪切速率控制在 0.1~0.2 (°)/s, 当测读到最大扭矩后, 应再继续测读 1 min, 然后停止试验, 测读扰动土体抗剪强度, 完成试验。

3 修正系数的推荐方法

3.1 影响土体十字板抗剪强度的因素

十字板剪切试验测得的是土体的峰值强度, 直接用于工程计算是不安全的, 所以应对峰值强度进行修正。各国标准均给出十字板修正系数的推荐方法。英标 BS EN1997-2:2007^[9]推荐的方法, 主要依据土的界限含水率和固结状态进行修正; 美标推荐的方法, 主要考虑土的塑性指数和剪切破坏时间; 我国推荐的方法主要考虑土的状态与塑性指数。

十字板抗剪强度与峰值强度存在的相关关系见式(1)。

$$c_u = \mu c_{fu} \quad (1)$$

式中: c_u 为土体不排水抗剪强度, kPa; μ 为修正系数; c_{fu} 为现场十字板试验测得峰值强度, kPa。

3.2 英标对修正系数的推荐方法

根据英标 BS EN ISO 22476-9:2014 附录 D 和 BS EN1997-2:2007 附录 I, 首先确定土的固结状态, 然后采用相应的关系式确定修正系数。土的固结状态可用高压固结试验计算得到或查土体固结状态区分图确定, 土体固结状态区分图见图 1。

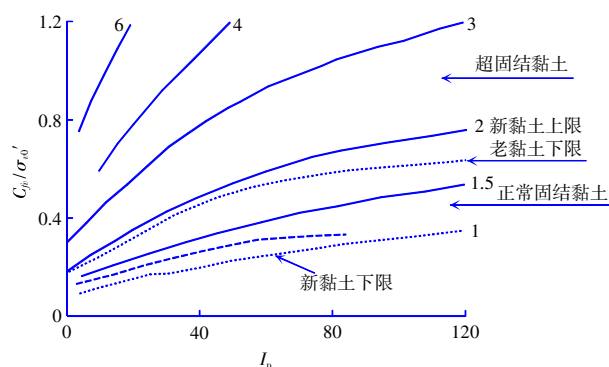


图1 土体固结状态区分图

1) 利用液限 w_L 确定修正系数 μ

利用土体液限确定欠固结、正常固结软弱黏性土修正系数, 具体相关关系见图 2。

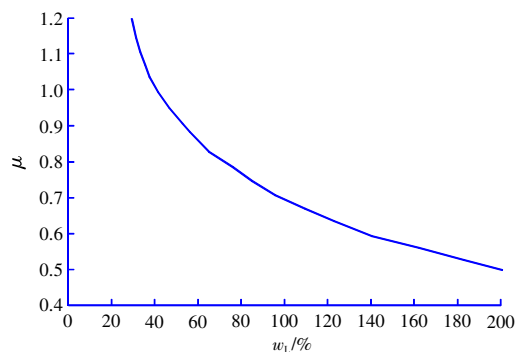


图2 欠固结、正常固结软黏土液限与修正系数关系曲线

当通过图 2 查得修正系数大于 1.2 时, 没有其他地质勘察资料不得使用。

对于裂隙黏土, 修正系数取值应小于 0.3, 除十字板剪切试验外, 还应通过其他试验确定土体不排水抗剪强度, 如载荷试验。

2) 利用塑性指数 I_p 及 C_{fu}/σ'_{v0} 确定修正系数 μ

当土的固结状态确定后, 利用 C_{fu}/σ'_{v0} 确定黏土的修正系数, 具体相关关系见图 3。对于欠固结、正常固结黏土采用曲线 1, 对于超固结黏土采用曲线 2。

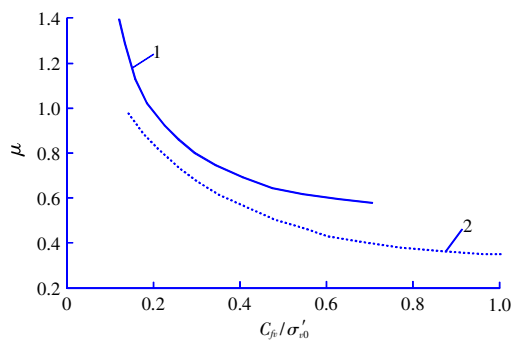


图3 C_{fu}/σ'_{v0} 与修正系数 μ 相关关系曲线

对于已知塑性指数 I_p 的超固结黏土，不排水抗剪强度的修正系数与土体的有效竖向应力 σ'_{v0} 还存在如下相关关系，见图 4。

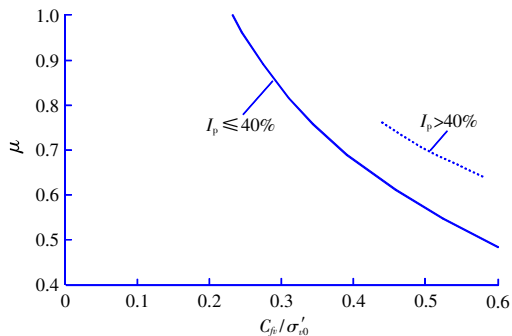


图 4 超固结软黏土塑性指数、有效应力与修正系数关系曲线

3) 公式法确定修正系数 μ

①对于正常固结、超固结比 R_{oc} 小于 1.3 的软黏土，可以用式(2)确定修正系数 μ ：

$$\mu = \left(\frac{0.43}{w_L} \right)^{0.45} \geq 0.5 \quad (2)$$

②对于超固结比 R_{oc} 大于 1.3 的超固结黏土，可以用式(3)确定修正系数 μ ：

$$\mu = \left(\frac{0.43}{w_L} \right)^{0.45} \times \left(\frac{R_{oc}}{1.3} \right)^{-0.15} \quad (3)$$

③当土的固结状态不确定、固结比未知时，可采用式(4)确定修正系数 μ ：

$$\mu = \left(\frac{0.43}{w_L} \right)^{0.45} \times \left(\frac{c_{fv}}{0.585 w_L \times \sigma'_{v0}} \right)^{-0.15} \quad (4)$$

式中： $c_{fv} = 1.45 \times w_L \times \sigma'_p$ ， σ'_p 为有效先期固结压力，kPa。

3.3 美标对修正系数的推荐方法

根据美标 ASTM D2573/D2573M-15 附录，通过对影响十字板剪切试验因素进行分析比较，对于黏土、淤泥，当 $I_p > 5$ 时，采用式(5)确定修正系数 μ ， $\mu = \mu_A \mu_R$ ， μ_A 为土的各向异性修正系数， μ_A 随土的塑性指数 I_p 增大逐渐减小，取值范围为 1.05~1.10； μ_R 为剪切破坏时间的修正系数。

$$\mu = 1.05 - b \cdot I_p^{0.5} \quad (5)$$

式中： $b = 0.015 + 0.0075 \log t_f$ ， t_f 为剪切破坏时间；对于软土地基采用标准方法进行十字板剪切试验时，通常 t_f 取 10^4 。

塑性指数与修正系数相关关系见图 5，对于正常操作十字板剪切破坏情况采用曲线 4。

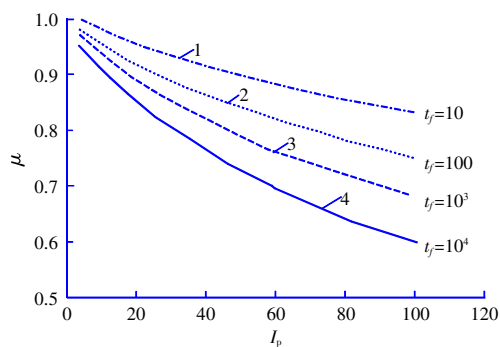


图 5 塑性指数、剪切破坏时间与修正系数相关曲线

3.4 国标对修正系数的推荐方法

国标 GB 50021—2001(2009 年版)在条文说明中指出，土体的不排水抗剪强度一般只有峰值强度的 60%~70%。在实际工程中，需根据土质条件和当地经验对十字板测定的值进行修正，推荐采用 Daccal 的塑性指数确定修正系数 μ ，曲线 2 适用于液性指数大于 1.1 的土，曲线 1 适用于其他软黏土。塑性指数与修正系数相关关系见图 6。

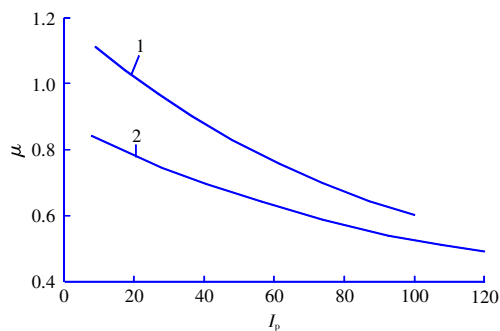


图 6 塑性指数与修正系数相关关系图

TB 10018—2003《铁路工程地质原位测试规程》^[6]规定：当塑性指数 $I_p \leq 20$ ，修正系数 $\mu = 1.0$ ，当塑性指数 $20 < I_p \leq 40$ ，修正系数 $\mu = 0.9$ 。

3.5 各国标准对于修正系数取值方法对比

通过比较中英美推荐的修正系数取值方法可知：

1) 十字板剪切强度修正系数均与土的塑性指数有关，塑性指数越大修正系数越小；

2) 英标中修正系数考虑了土的塑性指数、固结状态和有效应力，提出了采用液限确定正常固结黏土、采用塑性指数 I_p 及 c_{fv}/σ'_{v0} 关系确定正常固结黏土和超固结黏土、利用经验公式计算等 3 种方法确定修正系数；

3) 美标中修正系数考虑土塑性指数和剪切破坏时间，提出了 $I_p > 5$ 时的计算公式和查塑性指数与修正系数相关关系曲线图 2 种方法；

4) 国标中修正系数考虑土的状态和塑性指数,提出了根据液性指数及塑性指数,查修正曲线和直接根据塑性指数计算2种方法。

4 工程实例

4.1 工程地质

以南美洲某工程为例,根据地质勘察报告,依据揭露土层的时代成因、埋藏条件、分布规律、土的物理力学指标将土层自上而下分为4个土层:

1) 泥炭土(地层编号Ⅰ),厚度约1.5~4.0 m,灰褐—灰黑色,饱和,流塑—软塑状态,无层理,含大量有机质,属高压缩性土;

2) 泥炭质土(地层编号Ⅱ),厚度约5.8~11.0 m,灰褐—灰色,流塑—软塑状态,无层理,切面光

滑,土质较均匀,属高压缩性土;

3) 黏土(地层编号Ⅲ),灰白色,软塑—可塑状态,无层理,主要由黏土组成,含少量细砂,属中压缩性土;

4) 中细砂(地层编号Ⅳ),主要由细砂组成,呈灰白色,无层理,中密,颗粒较均匀,质纯。

4.2 土的物理指标

分别采用美标和国标对泥炭质土和黏土进行土工室内试验,美标土的液限采用碟式仪,塑限采用搓条法;国标液限和塑限采用液塑限联合测定仪^[7]。得出土的物理指标见表2,表2中数据均按照规范中数据统计要求剔除异常值,具有很好的代表性。

表2 土的主要物理指标

地层编号	岩土名称	统计项目	含水率/ %	天然密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	美标界限含水率及稠度指标				国标界限含水率及稠度指标			
					液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L
Ⅱ	泥炭质土	平均值	149.5	14.5	104.2	55.5	48.7	0.98	68.6	40.0	28.6	1.41
Ⅲ	黏土	平均值	51.2	17.2	—	—	—	—	56.4	34.1	22.2	0.71

4.3 现场十字板指标修正

现场十字板剪切试验采用电测式CLD-3型静力触探—十字板两用仪。根据地质情况,现场进行了12个十字板剪切孔。十字板剪切试验采用连续贯入的方式,试验间距为1 m,剪切速率控制在 $6(^{\circ})/\text{min}$ 。将泥炭质土层范围内的十字板峰值强度进行统计取平均值,分别采用美标和国标推荐的修正系数取值方法对峰值强度进行修正。采用美标推荐的方法根据图5,当塑性指数 $I_p=48.7$,查曲线 $\mu=0.732$;采用国标推荐的方法根据图6,当塑性指数 $I_p=28.6$,查曲线 $\mu=0.745$;修正前后十字板抗剪强度随深度变化曲线见图7。

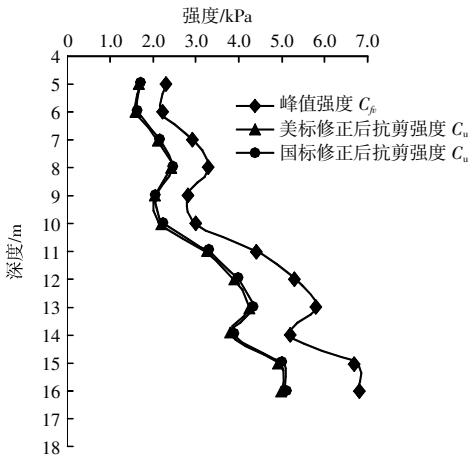


图7 修正前后十字板抗剪强度随深度变化曲线
由图7可知,采用美标和国标进行室内试验,

虽然所得土的塑性指数不同,但是修正系数很接近,最终土的抗剪强度相差很小。

5 结语

十字板抗剪强度指标可以用于计算地基承载力,评价施工期边坡的安全性。国外进行岩土工程勘察时,采用标准规格十字板进行软土十字板剪切试验可以得到更准确的土的抗剪强度指标。比较中英美推荐的修正系数取值方法可知:英标中修正系数考虑了土的塑性指数、固结状态和有效应力;比美标和国标仅考虑土塑性指数更可靠。沼泽相泥炭质土具有塑性指数高、灵敏度高、固结比小等工程特性,现场十字板剪切试验采用美标和国标方法,在进行峰值强度修正时,应结合当地工程经验,考虑土的固结状态对塑性指数进行修正。

参考文献:

[1] 化建新,郑建国. 工程地质手册[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
[2] GB 50021—2001,岩土工程勘察规范(2009年版)[S].
[3] BS EN ISO 22476-9:2014,Geotechnical investigation and testing—Field testing —Part 9: Field Vane test[S].
[4] ASTM D2573/D2573M-15,Standard test method for field vane shear test in saturated fine-grained soils[S].
[5] BS EN 1997-2:2007,Geotechnical design—Part 2:Ground investigation and testing[S].
[6] TB 10018—2003,铁路工程地质原位测试规程[S].
[7] GB/T 50123—2019,土工试验方法标准[S].