



# 美标标准贯入试验及标贯值修正与应用

李刚, 刘方, 罗俊

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

**摘要:** 欧、美国家规范及工具书中, 通常采用修正标贯 $N_{60}$ 换算黏性土指标, 采用 $(N_1)_{60}$ 换算砂土指标及进行液化判别。结合委内瑞拉某港口工程按照美标进行标贯试验的实例, 对欧、美国家标准贯入试验方法及标贯值修正方法进行介绍, 并对标贯修正中的一些影响因素进行分析。 $N_{60}$ 主要受锤的能量修正系数 $C_E$ 影响较大, 在黏性土埋深超过10 m时,  $N_{60}$ 一般大于原始标贯值 $N_m$ 。 $(N_1)_{60}$ 在 $N_{60}$ 的基础上需进行深度修正, 上部砂层时,  $(N_1)_{60}$ 大于原始标贯值 $N_m$ ; 下部砂层时,  $(N_1)_{60}$ 一般小于原始标贯值 $N_m$ 。通过多种方法对比, 对于标贯击数在15~50击, 粗颗粒含量较少的超固结黏性土, 采用 $N_{60}$ 值换算其不排水剪切强度 $C_u$ 较可靠。

**关键词:** 标贯试验; 美国标准 (ASTM); 标贯修正;  $N_{60}$ ;  $(N_1)_{60}$ ; 锤的能量系数 $C_E$ ; 有效应力系数 $C_N$

中图分类号: TU 414

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0043-05

## Introduction of SPT method in ASTM and correction and application of SPT

LI Gang, LIU Fang, LUO Jun

(CCCC FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** According to the standard and manual in the American and European countries, corrected SPT  $N_{60}$  is used to obtain the parameter for soil and  $(N_1)_{60}$  is used to obtain the parameters and determine the liquefaction for sand. According to the port project in Venezuela, the SPT method according to ASTM and the corrected SPT method are introduced. The factors influencing the SPT correction are also analyzed.  $N_{60}$  is mainly influenced by energy correction factor  $C_E$ , and when the soil locates more than 10 m, the  $N_{60}$  is usually more than the original value  $N_m$ .  $(N_1)_{60}$  is corrected upon overburden factor  $C_N$  based on  $N_{60}$ , for the top layer sand,  $(N_1)_{60}$  is usually more than the original value  $N_m$  and the lower layer  $(N_1)_{60}$  is usually less than the original value  $N_m$ . Compared by several methods, the undrained shear strength  $C_u$  for a certain over-consolidated clay, with SPT values between 15 and 50 blows and with little coarse grains, can be derived by  $N_{60}$ , which is confirmed to be reliable.

**Key words:** standard penetration test (SPT); American Society for Testing Materials (ASTM); corrected SPT;  $N_{60}$ ;  $(N_1)_{60}$ ; energy correction factor  $C_E$ ; overburden correction factor  $C_N$

近年来, 随着中国企业“走出去”战略的实施, 越来越多的中国公司参与到境外工程的建设中来。在境外项目建设过程中, 需要中国公司遵循欧、美等国际规范进行勘察、设计及施工。

工程勘察包括按照欧、美标准进行现场勘察、试验从而获得岩土参数, 并按照欧、美规范或工具书提供相应参数, 如欧、美国家通常采用

修正后的能量因子为60%时对应的标贯修正值 $N_{60}$ 及能量因子为60%时换算成上覆应力为100 kPa时的标贯修正值 $(N_1)_{60}$ 换算黏性土或砂土指标。对黏性土采用 $N_{60}$ 指标换算不排水剪切强度 ( $C_u$ )、体压缩系数 ( $m_v$ )、不排水杨氏模量 ( $E_u$ ) 及排水杨氏模量 ( $E'$ ) 等指标。对砂土则根据其属性, 通常采用 $(N_1)_{60}$ 换算其摩擦角 ( $\varphi$ )、相对密度

收稿日期: 2013-05-02

作者简介: 李刚 (1981—), 男, 工程师, 主要从事岩土工程勘察工作。

( $D_r$ )<sup>[1]</sup>及对砂土进行液化判别等。

本文结合委内瑞拉CABELLO港口项目的勘察工作,介绍按照美国试验和材料协会ASTM标准实施标贯试验、并按照欧美等国家认可的规范或工具书进行标贯值修正以获得 $N_{60}$ 及 $(N_1)_{60}$ 的方法。

## 1 设备及测试方法

### 1.1 设备

现场试验及标贯能量分析分别按照ASTM D1586<sup>[2]</sup>及ASTM 4633-10<sup>[3]</sup>进行实施。试验中采用的主要设备见表1。

表1 现场标贯试验主要设备

参数	钻杆直径/ mm	单位质量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	锤/ kg	锤垫/ kg	标贯取样器/mm (Split-Barrel Sampler)	取样衬管壁厚(Liner)/ mm	标准贯入能量分析仪 (SPTANALYZER)
ASTM规范规定的参数	$\phi 41.2$	4.5~7.5	$63.5 \pm 1$	15~20	内径 $38.1 \pm 1.3$ , 外径 $50.8 \pm 1.3$	1.6	美国Pile Dynamics, Inc.公司 (PDI)生产的标准贯入能量分 析仪(SPT ANALYZER)
实际参数	$\phi 42$	7.3	63.5	15	内径38, 外径51	1.6	

注: 1.按照ASTM D1586,可采用34.9 mm及38.1 mm两种内径的标贯器。当放置取样衬管时,采用38.1 mm的标贯器;当不放置衬管时,采用34.9 mm标贯器。2.整个标贯设备还包括挂钩、导杆等,同时ASTM中规定贯入设备(锤、锤垫、挂钩及导杆等)总质量不超过 $(113 \pm 5)\text{kg}$ 。

### 1.2 标贯试验及能量测试方法

钻探采用回转钻进方法,钻孔孔径为 $\phi 110$ 及 $\phi 91$ 两种。标准贯入试验时采用自由落锤,落距为76 cm,通过钻杆锤击装有衬管的标贯取样器。锤击深度45 cm,分成3段,按照每段15 cm进行计数,其中第1段15 cm为预备锤,后两段15 cm的标贯击数相加为实际贯入击数 $N_m$ 值。标贯试验终止试验要求如下:

- 1) 当其中任意一段击数达到50击,停止标贯试验,记录标贯击数 $N$ 及对应的实际贯入深度。
- 2) 当总标贯击数达到100击时,停止标贯试验,记录相应的贯入深度。
- 3) 当标贯击数为10击,没有贯入度时,停止标贯试验。

当未出现上述3种情况时,直接锤击45 cm并记录各段读标贯数。

ASTM D4633中对于标贯试验过程中能量因子的测定有专门介绍,中交第四航务工程勘察设计院有限公司于2011年首次在港珠澳大桥勘察中采用美国Pile Dynamics, Inc.公司(PDI)的标准贯入能量分析仪(SPT ANALYZER)对标贯试验过程中的能量因子进行测定,取得了很好的效果<sup>[4]</sup>。委内瑞拉工程勘察项目同样采用该分析仪对现场2个钻孔共130个试验点进行了能量因子的测定。

## 2 标贯修正方法

### 2.1 标贯修正公式

国外常采用能量因子为60%时对应的标贯修正值 $N_{60}$ 换算黏性土的一些参数。而 $N_{60}$ 修正的因素影响众多,国外学者自20世纪以来的研究表明标贯试验击数受钻孔孔径、取样器是否装衬管、杆长及锤击的能量传递效率<sup>[5]</sup>等影响。本文推荐采用式(1)对 $N_{60}$ 进行修正:

$$N_{60} = N_m C_E C_B C_R C_S \quad (1)$$

式中: $N_{60}$ 为能量因子为60%时对应的标贯修正值; $N_m$ 为现场测得的贯入值; $C_E$ 为锤的能量修正系数; $C_B$ 为孔径修正系数; $C_R$ 为杆长修正系数; $C_S$ 为是否装标贯衬管的修正系数。

当然,也有学者认为上述修正公式尚应包括锤垫校正系数 $C_A$ ,贯入速率校正系数 $C_{BF}$ 及锤的衬垫修正系数 $C_C$ 。但大部分工程地质应用中,并不考虑这3项校正系数的影响<sup>[6]</sup>。

对于纯净的砂土,通常认为,其标准贯入击数受上覆侧应力影响较大,而侧应力受上覆应力影响。因此对砂土标贯进行修正时,需考虑上覆侧应力对标贯击数的影响<sup>[7]</sup>,相应的能量因子为60%时对应的上覆应力为100 kPa时的标贯击数 $(N_1)_{60}$ 修正计算公式如下:

$$(N_1)_{60} = N_{60} C_N \quad (2)$$

式中: $(N_1)_{60}$ 为有效应力为100 kPa时,能量因子为

60%的修正标贯击数;  $C_N$ 为上覆有效应力系数, 最大值不超过1.7。

### 2.2 标贯修正参数的确定

#### 2.2.1 锤的能量修正系数 $C_E$

自1971年DeMello发表相关综述, 锤击能量才开始受到关注。通常锤在自由下落过程中, 由于受设备、锤垫等的影响, 重锤的实际锤击能量并不能100%输送至贯入器使贯入器产生贯入, 一般都会有能量损失。Kovacs和Salonmone发现实际输入的锤击能量用于使贯入器产生贯入大致只是理论锤击能量的30%~80%, Riggs等得到的比例为70%~100%<sup>[8]</sup>, 2011年, 中交第四航务工程勘察设计院有限公司在港珠澳大桥测试时的能量因子平均值为67%<sup>[4]</sup>。实际贯入能量因子  $E_r$  为:

$$\text{能量因子 } E_r = \frac{\text{输入至取样器的实际贯入能量 } E_a}{\text{输入的锤击能量 } E_m} \quad (3)$$

通常不同钻机设备获得的能量因子会有差异, 实际较大的能量因子  $E_{rm}$  会使贯入击数  $N_m$  线性较小。但不同能量贯入因子与对应的标贯击数的乘积为常量。

$$E_{r1}N_1 = E_{rm}N_m \quad (4)$$

上式经过换算, 可得式(5):

$$N_1 = N_m \frac{E_{rm}}{E_{r1}} \quad (5)$$

式中:  $\frac{E_{rm}}{E_{r1}}$  即为修正系数  $C_E$ 。

本勘察项目采用SPT分析仪进行了能量因子的测定, 本工程的的标贯能量测试时力( $F$ )及速度( $v$ )随时间变化的曲线见图1。

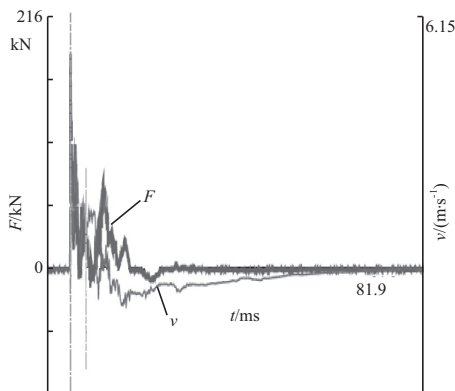


图1 标贯能量测试时力( $F$ )及速度( $v$ )随时间变化的曲线

对现场测试的2个钻孔130个试验点的统计分析表明本次试验的能量因子  $E_{rm}$  为68%, 对应的标贯值为实测值  $N_m$ 。

换算的  $E_{r1}=60%$  对应的  $N_{60}$  与实测值  $N$  的关系为:

$$N_{60} = N_m \frac{E_{rm}}{E_{r1}} = N_m \times \frac{68\%}{60\%} = 1.13N_m \quad (6)$$

本工程换算  $N_{60}$  的能量修正系数  $C_E$  为1.13。

#### 2.2.2 杆长等修正系数

钻孔孔径、杆长及是否装取样器的修正系数按照如表2<sup>[5]</sup>选取。

表2 SPT孔径, 杆长及贯入器等修正系数值

项目	范围	参数	取值
孔径	65~115 mm	$C_B$	1.00
孔径	150 mm	$C_B$	1.05
孔径	200 mm	$C_B$	1.15
杆长	0~3 m	$C_R$	0.75
杆长	3~4 m	$C_R$	0.80
杆长	4~6 m	$C_R$	0.85
杆长	6~10 m	$C_R$	0.95
杆长	10~30 m	$C_R$	1.0
贯入器	有衬管	$C_S$	1.0
贯入器	无衬管	$C_S$	1.1~1.3

由表2可知, 本工程钻孔孔径为  $\phi 110$  及  $\phi 91$  两种, 孔径范围为65~115 mm, 对应的孔径修正系数  $C_B=1.0$ ; 现场贯入器均装有衬管,  $C_S=1.0$ ; 杆长修正系数依据深度范围依次取值为0.75, 0.85, 0.95及1.0等。

#### 2.2.3 上覆应力修正系数 $C_N$

根据文献[5], Seed 及 Idriss (1982):

$$C_N = 2.2 / (1.2 + \sigma'_{v0} / P_a) \quad (7)$$

根据文献[5], Liao 及 Whitman (1986):

$$C_N = (P_a / \sigma'_{v0})^{0.5} \quad (8)$$

式中:  $\sigma'_{v0}$  为有效上覆应力;  $P_a=100$  kPa。

国外学者采用装有大试样现场砂土的大型箱子在不同侧限应力下, 进行标贯试验, 根据上述两式, 画出  $C_N$  及有效应力曲线进行对比。对比成果表明, 在有效上覆应力小于200 kPa时, 式(7)及(8)均适用; 而在有效上覆应力大于200 kPa时, 式(8)并不适用, 在上覆有效应力超过300 kPa时, 式(7)依然更适用<sup>[5]</sup>。本工程进行上

覆应力修正时，采用式(7)。

### 2.3 标贯修正值比较

本项目主要黏性土深度基本埋深超过10 m，当黏性土的标贯值 $N_m$ 修正为 $N_{60}$ 时，主要修正系数为标贯能量修正系数 $C_E$ 。本工程能量因子 $E_r$ 参考值为68%，相应的能量修正系数 $C_E$ 取值1.13。因此，黏性土的标贯修正值 $N_{60}$ 大于其原始标贯值 $N_m$ 。

当对砂土标贯值修正为 $(N_1)_{60}$ 时，需考虑有效上覆应力因素 $C_N$ 影响，深度越深，有效应力因素 $C_N$ 越小。 $N_{60}$ 、 $(N_1)_{60}$ 与原始值 $N_m$ 对比见图2。

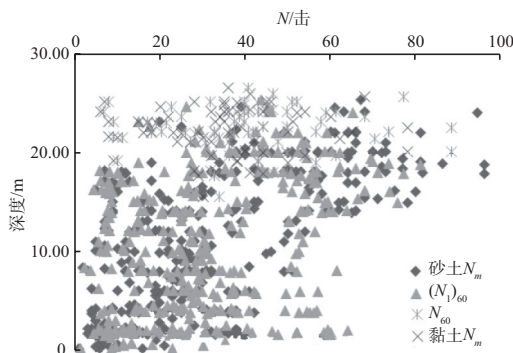


图2 SPT-深度关系

### 3 标贯修正值应用分析

标贯修正值应用十分广泛，基于标贯试验使土体在不排水条件下剪切破坏的机理，国外常常使用标贯 $N_{60}$ 值换算土的不排水剪切强度 $C_u$ ，而 $C_u$ 又通常用来换算土的承载力等；另外也常采用 $N_{60}$ 值换算黏性土的土体压缩系数 $m_v$ 及黏性土的模量指标等，采用 $(N_1)_{60}$ 换算砂土内摩擦角及进行液化判别等。以下仅就标贯 $N_{60}$ 值换算 $C_u$ 进行分析。

对于超固结黏性土，Straud<sup>[7]</sup>认为 $C_u$ 及 $N_{60}$ 之间有很好的相关关系，见图3。

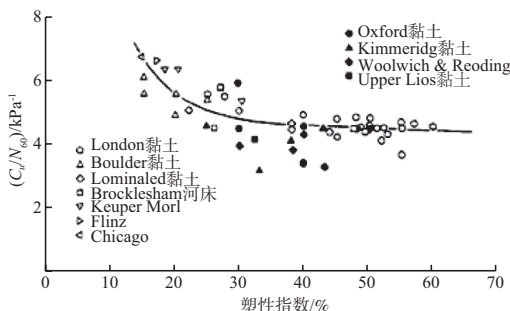


图3  $C_u$ 及 $N_{60}$ 关系曲线

从图3中可以看出， $C_u/N_{60}$ 的范围通常在4.5~6.0。

选取委内瑞拉某港口工程中陆地的④层进行分析。④层高程范围-25.00~-40.00 m，平均塑性指数 $P_l$ 为20.8，OCR为1.1~1.3，为超固结土。根据该层粗颗粒含量的差异，定名也分为含砂瘦黏土/砂质瘦黏土，因组成颗粒成分差异，该层标贯值离散性较大，平均 $N_{60}$ 值49.7击。

选取在15~50击的标贯值对应的土样进行UU试验及进行现场袖珍贯入仪测试。将该层由 $N_{60}$ 值换算的 $C_u$ 值、UU试验 $C_u$ 值及现场袖珍贯入仪剪切强度换算的 $C_u$ 值进行分析比较，作出 $C_u$ -高程散点关系见图4。

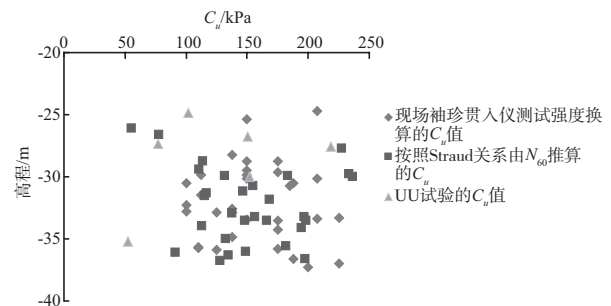


图4  $C_u$ -高程关系曲线

由图4可以看出，该层同一高程位置，各种换算指标之间吻合较好。 $N_{60}$ 值换算 $C_u$ 值与现场袖珍贯入仪剪切强度换算的 $C_u$ 值基本一致，与UU试验的 $C_u$ 值也基本吻合，因为试样扰动，部分UU试验的 $C_u$ 值偏小。采用 $N_{60}$ 值换算 $C_u$ 值反映了现场测试的优越性，换算值相对可靠。

### 4 结论

1) 利用欧、美规范或标准进行勘察分析时，首先需采取吻合欧、美规范的设备与方法进行标贯测试；其次需对标贯按照其规范进行修正，并提供相应的修正值 $N_{60}$ 及 $(N_1)_{60}$ 。

2)  $N_{60}$ 修正时，主要修正系数为标贯能量转换因子 $C_E$ ，其他孔径、是否穿衬管及当深度超过10 m时对应系数基本为1.0。当采用本文提及的标贯设备规格时，在现场无法进行能量分析时，可取能量因子参考值为68%。 $(N_1)_{60}$ 修正时，需考虑

有效上覆应力因素 $C_N$ 影响,深度越深,有效应力因素 $C_N$ 越小。

3) 通常黏性土指标采用 $N_{60}$ 换算,砂土指标采用 $(N_1)_{60}$ 计算。因此黏性土的标贯值只需修正成 $N_{60}$ ,而砂土标贯则需考虑上覆有效应力修正为 $(N_1)_{60}$ 。

4) 对于标贯 $N$ 值在15~50击,粗颗粒含量较少的超固结黏性土,在室内试验测试数据少及受试样扰动造成试验中偏小的情况下,可以采用 $N_{60}$ 值换算 $C_u$ 值进行对比分析。

#### 参考文献:

- [1] Construction industry research and information association. The Standard Penetration Test (SPT): Methods and use [M]. London: CIRIA Report 143, 1995.
- [2] ASTM D1586-08. Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils [S]. United States: The American Society for Testing and Materials, 2008: 1-7.
- [3] ASTM D4633-10. Standard test method for stress wave energy measurement for dynamic penetrometer testing systems [S]. United States: The American Society for Testing and Materials, 2010:1-7.
- [4] 廖先斌,郭晓勇,杜宇. 英标和国标标贯设备试验结果相关性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 143-147.
- [5] Youd T L, Idriss I M, Ronald D Andrus, et al. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(10): 817-833.
- [6] Jeffery A, McGregor J, Michael Duncan. Performance and use of the standard penetration test in geotechnical engineering practice [R]. Virginia: Tech Center for Geotechnical Practice and Research, 1998: 26-34.
- [7] Karl Terzaghi, Ralph B Peck, Gholamreza Mesri. Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. 3rd Edition. United States of America: Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [8] Joseph E Bowles. Foundation Analysis and Design[M]. 5th Edition. United States of America: McGraw-Hill Companies. Inc, 1996.

(本文编辑 武亚庆)

## · 消 息 ·

### 一航局中标安徽合肥繁华大道东延工程

近日,一航局中标安徽合肥市繁华大道东延工程肥东段一标段施工工程,中标金额为1.82亿元,合同工期390个日历天。

繁华大道东延工程总长约12.6 km,一部分位于肥东县内,另一部分位于合肥市市区,其中肥东段全长6.71 km,计划投资4.7亿元。一航局中标的东延工程肥东段一标全长2.495 km,为城市主干路,道路宽50 m。施工起点为桥头集路,终点为店忠路。主要施工内容包括土方、道路、排水、2座桥梁、照明和交通预埋以及绿化工程等。

该工程地处市区,交通量大,地下管线复杂,安全文明施工要求高,工期要求紧,为此一航局制定了详细的施工计划。该工程建成后,将对提升合肥市繁华大道的交通功能,分流合肥市二环路过境车辆,缓解合肥市市区交通压力具有积极意义。

摘编自《中国交通建设网》