

国内外标准贯入测试影响因素研究^{*}

卢坤玉, 李兆焱[✉], 袁晓铭, 张思宇

(中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 随着“一带一路”战略的快速推进, 越来越多的中国企业走出去参与国外基础工程建设。目前中国企业在海外基础工程建设中遇到的最大工程问题是国内外使用的技术标准不统一。以标准贯入测试 (以下简称 SPT) 为研究对象, 综合已有研究成果, 对国内外 SPT 的适用范围、修正方法、测试设备以及标贯击数相关性进行了分析对比。结果表明: SPT 用途广泛, 可用来估算土的相关参数以及评估砂土液化等, 但国内外确定土性参数的经验关系多有差异; 对标贯击数的修正有地下水位修正、杆长修正、上覆土压力修正、能量修正, 不同国家标贯击数修正方法不同; 标贯测试设备方面, 中美差异主要体现在落锤类型和释放方式不同, 中英差异主要体现在锤垫质量不同; 当标贯击数较小时, 各国标贯击数之间相差不大, 在实际工程中可不考虑其差异性。

关键词: 标准贯入测试; 修正方法; 能量传递; 欧美标准; 剪切波速

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)03-0582-10

0 引言

标准贯入测试 (以下简称 SPT) 始于 1902 年美国 Raymond 混凝土桩公司, Gow 在水洗式钻孔的底部, 采用 50 kg 的重锤打击 25 mm 钢管, 首次成功采取了不被水冲洗的土样。Terzaghi 等 (1948) 经过一系列试验后给出了标贯击数 N 值 (以下简称 N) 与土的一些工程性质的关系, 并制定出相应的设备标准。之后, 通过不断地改进和标准化, 它的价值和实用性得到了世界各国的认同。

作为一种现场原位测试方法, SPT 操作简单、适用勘察场地范围广、技术成熟, 而且贯入器可以带上扰动土样, 便于现场鉴别描述和后期室内试验测试, 在国内外工程勘察、科学研究中被广泛使用 (李兆焱, 2012; Esfahanizadeh *et al.*, 2015)。但是 SPT 标准在不同国家存在差异, 目前全球使用较多的标准是美国标准和英国标准, 各国工程技术标准的差异成为我国在国外工程中遭遇的最大技术瓶颈 (刘卫民等, 2018)。以中交第一公路勘察设计研究院有限公司的一个海外工程为例, 中方研讨 30 多次才与外方达成一处岩土滑

坡参数的一致意见。技术标准不统一使我国海外工程面临技术分歧、合作破裂等风险, 会严重影响建设工期和合作共赢。随着我国“一带一路”倡议的不断推进, 中国海陆内外互利共赢、构建人类命运共同体的新未来逐渐开启, 大量中国企业将走出国门承担国外基础设施建设, 因此研究国内外 SPT 的适用性、解决工程技术标准不统一等问题就成了当务之急。

本文在已有研究成果基础上, 对国内外 SPT 适用范围、修正方法、测试设备进行了分析对比, 并在分析对比的基础上运用能量转换关系建立了中美、中英 SPT 的相关性。

1 国内外 SPT 适用范围

1.1 确定砂土密实度

砂土的密实度与其工程性质有着密切联系。如处于密实状态, 则其强度高, 是良好的天然地基; 处于松散状态的砂土则是一种软弱地基, 尤其是饱和的粉、细砂, 稳定性很差, 在振动荷载作用下, 可能发生液化。相比于采用相对密实度或天然孔隙比划分砂土密实度 D_r , 在现场进行原位 SPT, 根据 N 间接标定 D_r , 能够有效避免采取

^{*} 收稿日期: 2020-03-11.

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目 (2018A01), 黑龙江省自然科学基金重点项目 (JJ2019ZZ0210) 及黑龙江省自然科学基金资助项目 (LH2019E099) 联合资助。

✉ 通讯作者: 李兆焱 (1982-), 副研究员. 主要从事岩土地震工程研究. E-mail: hkelizhaoyan@163.com.

原状砂样的困难。 N 与 D_r 关系最早由 Gibbs 和 Holtz (1957) 提出：

$$D_r = 210 \sqrt{\frac{N}{\sigma' + 70}}$$

(1)

式中： σ' 为有效上覆压力，单位为 kPa。
Skempton (1986) 收集了从 20 世纪 40 年代末到 80 年代中的欧美及日本等国家和地区的大量标贯测试资料，对正常固结的砂土进行统计分析后，得到如下经验公式：

$$D_r = \sqrt{\frac{N_{60}}{a + b\sigma'}}$$

(2)

式中： N_{60} 为能量修正后的标贯击数； a ， b 为参数。

目前国内外主要规范《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001) 和 ASTM 标准 (D1586 - 11) 采用 N 判定 D_r ，见表 1。

表 1 N 与 D_r 的关系

Tab. 1 Relationship between N and sand density D_r

D_r		N /击	
国外	国内	国外	国内
极松	松散	0 ~ 4	< 10
松散		4 ~ 10	
中密	稍密	10 ~ 30	10 ~ 15
	中密		15 ~ 30
密实	密实	30 ~ 50	> 30
极密		> 50	

1.2 确定砂土内摩擦角

内摩擦角作为砂土特性的 2 个基本参数之一，既是土的抗剪强度指标，也是工程设计的重要参数。砂土作为一种松散介质，难以取得原状试样，不能直接测定内摩擦角 φ 。虽然在国外如日本采用冻结法可采取到原状砂样，进行室内剪切试验，但成本太高，程序也很复杂，只能应用于一些重点研究项目。

一般认为，影响砂土 φ 的主要因素有密度、粒径级配、颗粒形状、矿物成分等。土越密实，磨圆度越小，咬合作用越强，则 φ 就越大。因此可以从砂土密实度的角度考虑建立 N 与 φ 之间的关系，国内外许多学者对此做了大量的研究

(Dunham, 1954; Meyerhof, 1956; Peck *et al.*, 1974; 朱小林, 1995; 杜学玲等, 2005; 陶常飞, 2008; 蒋建平等, 2010; 郭淋等, 2012; 李志平等, 2013; 常士骠, 张苏民, 2007)，见表 2。从表 2 可以看出，不同地区 N 与砂土 φ 的关系式存在一定差异，比如上海地区 φ 随着 N 的增大而增大，而南京地区 φ 随着 N 的增大而减小。这种显著的差异性可能与土层结构、颗粒组成、埋藏环境、形成年代有关，尚需深入研究。

表 2 N 与 φ 的关系

Tab. 2 Relationship between N and sand friction angle φ

研究文献	土类	关系式
Dunham (1954)	均匀圆粒砂	$\varphi = \sqrt{12N} + 15$
	级配良好圆粒砂	$\varphi = \sqrt{12N} + 20$
	级配良好棱角砂	$\varphi = \sqrt{12N} + 25$
Peck 等 (1974)	—	$\varphi = 0.3N + 27$
Meyerhof (1956)	纯净砂	$\varphi = \frac{5}{6}N + 26.7 \quad (4 \leq N \leq 10)$
		$\varphi = \frac{1}{4}N + 32.5 \quad (N > 10)$
朱小林 (1995)	粉细砂	$\varphi = \sqrt{14.1N} + 20.4 \quad (H < 15\text{m})$
		$\varphi = 0.25N + 26.5 \quad (H > 26\text{m})$
杜学玲等 (2005)	粉砂	$\varphi = 0.28N + 29.1$
陶常飞 (2008)	均匀圆粒砂	$\varphi = \sqrt{12N} + 17$
李志平等 (2013)	尾矿砂	$\varphi = 2.077N + 20.29$
蒋建平等 (2010)	—	$\varphi = -0.21N + 28.7$
郭淋等 (2012)	—	$\varphi = 0.36N + 20.9$

1.3 确定土的无侧限抗压强度

试验时，试样在无侧向限制（即周围压力为零）情况下逐渐施加轴向压力，破裂时常在试样侧面可见清晰的破裂面痕迹，这时的压力即为无侧限抗压强度。道路施工中需预制与现场浇筑养护条件一致的圆柱体水泥试块，按期、分批进行无侧限抗压强度试验，以此作为道路基层验收的重要数据之一。但是无侧限抗压试验要求高、试验时间长、测试结果常常与现场不符，考虑到无侧限抗压强度与土层性质有关，所以实际工程中常采用 SPT 确定土的无侧限抗压强度 q_u 。国外主要采用表 3 确定 N 与土的 q_u 的关系，我国《港口工程地质勘察规范》(JTJ 240—1997) 关于 N 与土的 q_u 的关系的规定与其相同。同时，该规范还规定了在有丰富的室内对比资料下，可按相关性建立 N 和 q_u 的经验公式。刘松玉等 (2002)，和礼

红等 (2010) 根据丰富的室内外试验数据分别建立了不同种类水泥桩的 N 与 q_u 的经验公式, 见表 4。

表 3 N 与 q_u 的关系

Tab. 3 Relationship between N and unconfined compressive strength q_u

N /击	<2	2~4	4~8	8~15	15~30	>30
q_u /kPa	<25	25~50	50~100	100~200	200~400	>400

表 4 不同水泥桩 N 与 q_u 的经验公式

Tab. 4 Empirical formula for N and unconfined compressive strength q_u of different cement piles

研究文献	种类	关系式	N 修正
刘松玉等 (2002)	水泥粉喷桩	$q_u = 6.8N + 20 \quad (t = 7 \text{ d})$	杆长修正
		$q_u = 8.0N + 150 \quad (t = 14 \text{ d})$	
		$q_u = 10.0N + 270 \quad (t = 28 \text{ d})$	
		$q_u = 8.3N + 365 \quad (t = 60 \text{ d})$	
		$q_u = 6.0N + 445 \quad (t = 90 \text{ d})$	
和礼红等 (2010)	钉形水泥土 双向搅拌桩	$q_u = 0.0034N^2 + 0.0035N + 0.1721$	—

注: t 为桩芯的龄期。

1.4 确定土的压缩模量

压缩模量是反映土体性质的重要参数, 可采用双层双动取样器取原状土样, 进行相关室内试验得到。但是先取样再进行室内试验, 成本高、工作量大、周期长, 而 SPT 是判别土层类型、获取土层强度和变形参数的较可靠方法。工程地质手册 (第四版) (常士骝, 张苏民, 2007) 给出了我国一些勘察设计院以及欧美广泛使用的 N 与压缩模量 E_s 之间的关系。目前, 我国也有学者通过室内试验和 SPT 数据建立了 N 与 E_s 的相关性经验公式 (李小和, 2008), 见表 5。

1.5 估算地基承载力

地基承载力是指地基承担荷载的能力, 是针对地基基础设计、为方便评价地基强度而提出的值 (汪莹鹤等, 2013), 主要由原位测试并结合工程实践经验等综合确定。采用 SPT 确定地基承载力有着明显的优势, 它适用的土层范围广, 如各种砂土、粉土、以及黏性土等。SPT 测量土层可达 100 m 深, 试验成本低、效果良好。《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 中给出的 N 值与砂土、黏性土地基承载力标准值 f_k 的经验关系见表 6, 7。

表 5 N 与 E_s 的关系

Tab. 5 Relationship between N and compressive modulus E_s

研究文献	数据库来源	土类	关系式	N 修正
Schultze 和 Menzenbach (1961)	—	细砂	$E_s = 0.49N + 7.1$	—
西南综合勘察院	唐山	粉、细砂	$E_s = 0.276N + 10.22$	—
冶金部武汉勘察设计院	中南、华南	黏土	$E_s = 1.04N + 4.89$	—
蒋建平 (2010)	南京	砂土	$E_s = 0.90396N + 2.77003$	杆长修正
		黏土	$E_s = 0.70855N + 1.76287$	
郭淋等 (2012)	武汉	砂土	$E_s = 0.4023N + 2.9048$	—
		黏土	$E_s = 0.5613N + 3.8965$	
李小和 (2008)	—	红黏土	$E_s = 0.0115N^2 + 0.335N + 3$	杆长修正
朱小林 (1995)	上海	浅层粉细砂	$E_s = 4.8N^{0.42}$	上覆土压力修正
		深层粉细砂	$E_s = 1.06N^{0.75}H^{0.125}$	

注: E_s 单位为 MPa; H 为标准贯入深度, $H < 15\text{m}$ 时为浅层, $H > 15\text{m}$ 时为深层。

表 6 N 与砂土 f_k 的关系

Tab. 6 Relationship between N and standard value of sand foundation bearing capacity f_k

N /击	f_k /kPa	
	中、粗砂	粉、细砂
10	180	140
15	250	180
30	340	250
50	500	340

表 7 N 与黏性土 f_k 的关系

Tab. 7 Relationship between N and standard value of bearing capacity of viscous soil foundation f_k

N /击	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
f_k /kPa	105	145	190	235	280	325	370	430	515	600	680

国外学者采用 Terzaghi 等 (1948) 公式估算地基承载力标准值 f_k :

对于条形基础为：

$$f_k = 12N$$

(3)

对于独立基础为：

$$f_k = 15N$$

(4)

1.6 估算剪切波速

N 和剪切波速 V_s 都是地震工程中表征土层力学特性的重要参数。《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）规定了基于 N 对砂土地震液化判别的方法。在工程中 V_s 也可以判定砂土液化（孙锐，袁晓铭，2019）。密实的土层的 N 一般相对较高，同时 V_s 也很大，二者存在一定的相关关系（邱志刚等，2012），国内学者通过对现场实测数据进行回归分析建立了 $N \sim V_s$ 经验公式（王梦龙，2016），见表 8。

表 8 N 与 V_s 的关系

Tab. 8 Relationship between N and shear wave velocity V_s

数据库来源	经验公式	土类
北京	$V_s = 85.90N^{0.349}$	砂类土
秦皇岛	$V_s = 114.82N^{0.287}$	砂类土
烟台市	$V_s = 120.80N^{0.275}$	砂类土
下辽河平原	$V_s = 69.1N^{0.4}$	砂土
唐山	$V_s = 159.6N^{0.284}$	砂土
新疆巴楚	$V_s = 98.787N^{0.224}$	砂土
南京	$V_s = 99N^{0.32}$	砂类土
	$V_s = 9N^{0.34}$	粉土
武汉	$V_s = 91N^{0.299}$	砂土
	$V_s = 100N^{0.4}$	淤泥
	$V_s = 80N^{0.4}$	黏性土
	$V_s = 80N^{0.35}$	砂类土
山东	$V_s = 60N^{0.5}$	砂子
	$V_s = 50N^{0.5}$	砾卵石
	$V_s = 100N^{0.33}$	黏性土
日本	$V_s = 80N^{0.33}$	砂类土

从表 8 中可以看出，各地区 N 和 V_s 关系符合 $V_s = aN^b$ 这一幂函数形式，且不同地区、不同土类 a 、 b 不同。大多数学者给出的是砂土的 $N \sim V_s$ 关系，将各地区砂土 $N \sim V_s$ 关系进行对比（图 1）。从图 1 中可以看出， $N \sim V_s$ 曲线具有显著的地区差异性，差异性原因可能与地质年代、土的搬运和沉积方式有关。因此采用经验公式估算某一地区的 V_s 时，只能采用本地区的经验公式。

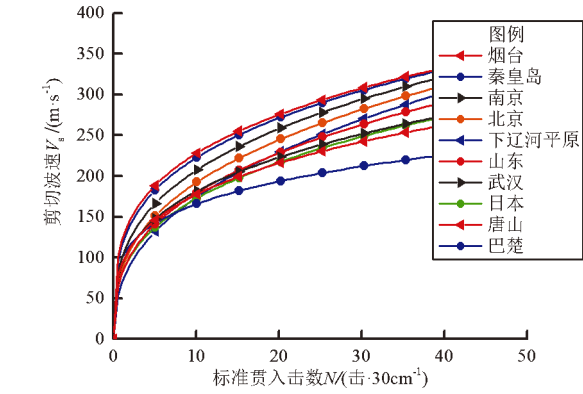


图 1 国内外不同地区砂土 N 与 V_s 关系对比
Fig. 1 Comparison of the relationship between the number of strikes N and the shear wave velocity of sand V_s in different regions in China and over the world

1.7 评价砂土液化

20 世纪 70 年代初期，国内外的研究者先后提出用 N 作为砂土液化判别的标准，经过 40 多年发展，SPT 作为液化判别的一种原位测试方法日渐成熟（赵倩玉，2013）。

《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）采用 N 作为判别液化的基本指标。在完成初判后，复判公式为：

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3/\rho_c}$$

($d_s \leq 20$ m)

(5)

式中： N_{cr} 为标贯击数临界值； N_0 为标贯击数基准值； d_s 为饱和土标准贯入点深度，单位为 m； d_w 为地下水位，单位为 m； ρ_c 为黏粒含量百分率，当小于 3 或为砂土时，应采用 3。

1964 年日本新潟地震后，Seed 和 Idriss 等（1971）首次提出了被称为简化方法的土体抗液化强度估计方法。随着土液化研究的不断深入，Seed 简化方法也在不断发展（王克，2018）。Youd 和 Idriss（2001）受美国国家地震工程研究中心和国家科学基金委的资助，提出了改进的简化方法，该方法是 21 世纪初国际上最具有代表性、影响最广泛的液化判别方法。该方法是将砂土中由振动作用产生的剪应力 CSR 与产生液化所需的剪应力 CRR 进行比较，当计算出的 $CSR > CRR$ 时，判断为液化场地；反之当 $CSR < CRR$ 时，判断为非液化场地。其中 CSR 由 Seed 简化法给出， CRR 则以原位测试作为衡量指标。

Rauch (1998) 给出了纯净砂 SPT 的抗液化应力比公式:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (6)$$

式中: $(N_1)_{60}$ 为上覆压力是 100 kPa 同时锤击能是 60% 的标贯击数修正值。该公式适用于 $(N_1)_{60} < 30$ 的情况; 如果 $(N_1)_{60} > 30$, 纯净砂将非常密实, 不会发生液化现象。

1.8 评价 SPT 的应用

从上文的介绍可以看出 SPT 应用广泛, 操作简单, 但在实际工程应用中还存在以下 2 个主要问题:

(1) 操作时 N 受到场地的自然地质条件、操作机械及方式、勘探深度等多种因素的影响, 测试结果存在一定的误差。

(2) 采用 N 确定土性参数, 估算 V_s , 评价砂土液化, 大多采用的是经验公式, 因此存在区域性差别。例如在采用 N 估算 V_s 时, N 取 20 击, 得到烟台地区砂土 $V_s = 275.3$ m/s, 日本地区砂土 $V_s = 215.0$ m/s, 巴楚地区砂土 $V_s = 193.7$ m/s, 即烟台地区与日本地区 V_s 相差 60.3 m/s, 与巴楚地区相差 81.6 m/s, 差别较大。因此国内外的 SPT 经验公式不是通用的, 因为各地区土的沉积年代, 搬运方式不同, 本地区 SPT 经验公式都是根据本地区砂土室内外试验测试数据建立的, 具有针对性, 同时也存在局限性, 即如果采用其他地区 SPT 经验公式计算本地区土性参数等可能会产生较大误差, 结果不可靠。

针对第一个问题, 国内外规范提出了相应的修正方法, 下文会进行详细说明。针对第二个问题, 本文建议实际工程中采用 N 确定土性参数等时, 应采用本地区对应的经验公式, 这样可以避免区域性差异的影响。

2 国内外 N 修正方法

2.1 地下水位修正

对于有效粒径在 0.1 ~ 0.05 mm 内的饱和粉、细砂, 当其密度大于某一临界密度时, 贯入阻力将会偏大。相应于此临界密度的 N 为 15, 故在此类砂土贯入击数 $N > 15$ 时, 其有效击数为:

$$N' = 15 + \frac{1}{2}(N - 15) \quad (7)$$

式中: N 为未校正的饱和粉、细砂的标贯击数; N' 为校正后的标贯击数。

2.2 杆长修正

《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89) 和第一届国际触探试验会议 (ISOPT - 1, 1988) 推荐的 SPT 试验规程以及 Skempton (1986) 均提出按式 (8) 进行钻杆长度修正, 但是给出的杆长修正系数不同, 见表 9。目前国际上使用的最广泛的是 Skempton (1986) 提出的修正方法:

$$N' = \alpha_L N \quad (8)$$

式中: N' 为经杆长修正后的标贯击数; α_L 为杆长修正系数。

表 9 杆长修正系数

Tab. 9 Rod length correction factor

L/m	α_L		
	GBJ 7—89	ISOPT - 1 (1988)	Skempton (1986)
≤ 3	1.00	0.77	0.75
6	0.92	0.92	0.85
9	0.86	0.97	0.95
12	0.81	0.99	1.00
15	0.77	1.00	1.00
18	0.73	1.00	1.00
21	0.70	1.00	1.00

《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7—89) 规定当 L 为 3 ~ 21 m 时, 进行钻杆长度修正, 杆长修正系数 α_L 值是基于牛顿碰撞理论计算得出, α_L 随 L 的增大而减小。 L 的修正限制为 21 m, 是由于 $L > 21$ m 时, 探杆系统质量已超过落锤质量的 2 倍, 按碰撞理论, 能量损失已很大, SPT 已不适用。第一届国际触探试验会议 (ISOPT - 1, 1988) 推荐的 SPT 试验规程和 Skempton (1986) 都是基于弹性波动理论得到 α_L , α_L 随 L 的增大而增大。运用这 2 种修正方法, 当 $L > 10$ m 时, 不需要进行杆长修正, 是因为按照弹性波动理论, 当 $L < 10$ m 时, 随着 L 的增加, 有效能量逐渐增大, $L > 10$ m 后趋于定值。

由于不同修正方法得出 α_L 的与 L 的变化关系不同, 同济大学于 1987 年专门进行了 SPT 杆件传

输能量的试验实测，试验孔深 60 m，试验结果表明波动理论是符合实际的，即 α_L 随 L 的增大而增大。

日本学者宇都一马等根据压缩波的传递原理，实测了水平搁置的 120 m 长钻杆顶端与低端的打击动应力的衰减情况和位移，提出了 N 的杆长修正公式（冯铭璋，1986）：

$$N' = (1.06 - 0.003L) N \quad (L \geq 20 \text{ m}) \quad (9)$$

式中： N' 为修正后的标贯击数； L 为杆长（单位：m）。

式（9）已被日本工业标准（JIS A1219—2001）所采用，作为日本指导性法规。该方法是将 20 m 作为杆长修正的界限点，即 $L > 20$ m 时才进行修正， $L < 20$ m 时不修正，因为当 $L < 20$ m 时，按照压缩波传递原理在探杆末端冲击引起的波动量衰减很小，可以忽略。目前国内在实际工程中进行深度较大的 SPT 时，进行杆长修正也会采用宇都一马公式。

2.3 上覆土压力修正

Gibbs 和 Holtz（1957）在三轴砂箱中进行 SPT，三轴砂箱的竖向和侧向施加的应力可以模拟现场不同深度处的应力条件，根据该室内试验结果，首次得出砂土自重压力（上覆压力）对 SPT 结果有很大的影响这一结论，但建议的上覆压力修正值在应用于均匀土层的底部时存在不足（吴晓东，2014）。为此，后来国外许多学者提出了目前更为广泛接受的上覆土压力修正公式（Peck *et al*, 1974；Seed *et al*, 1985；Skempton, 1986；Liao, Whitman, 1986），见表 10。目前国际上使用较多的是 Seed 等（1985）以及 Liao 和 Whitman（1986）提出的公式。

2.4 能量修正

美国标准（ASTM D1586 - 11）指出不同 SPT 设备及操作人员在毗邻钻孔的同一土层中所得的 N 变动幅度可达到 100%，但是如果使用相同设备和人员则 N 变异系数仅为 10%，因此测定不同落锤系统能量效率，并将其标准化到某个基准能量效率比下是很重要的。落锤的能量效率比 E_r 定义为：

$$E_r = E_{\text{mea}}/E_{\text{tho}} \quad (10)$$

式中： E_{mea} 为落锤实际能量； E_{tho} 为落锤理论能量。

表 10 上覆土压力修正公式

Tab. 10 Overburden pressure correction formula

研究者	修正公式	土类
Peck 等（1974）	$N' = 0.771g \left(\frac{20}{\sigma'_{vo}/tg/ft^{-2}} \right) N$	—
Seed 等（1985）	$N' = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5} N$	—
Skempton（1986）	$N' = \frac{2}{1 + \sigma'_{vo}} N$	细砂，正常固结
	$N' = \frac{3}{2 + \sigma'_{vo}} N$	粗砂，正常固结
	$N' = \frac{1.7}{0.7 + \sigma'_{vo}} N$	细砂，超固结
Liao 和 Whitman（1986）	$N' = \frac{2.2}{1.2 + \sigma'_{vo}/P_a} N$	—

注：1 t/ft⁻² ≈ 100 kPa；Pa 为大气压强（100 kPa）；σ'vo 为有效上覆土压力（kPa）。

由于美国安全锤的能量效率比接近 60%，所以 Seed（1983），Skempton（1986）均建议将 60% 作为比较各种落锤系统能量效率的基准，锤击能量修正后的标贯击数为 N' ：

$$N' = N \frac{E_r}{60} \quad (11)$$

2.5 不同修正的适用性

《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001）规定了用于判别砂土液化、划分砂土密实度及划分花岗岩类残积土、全风化、强风化的界限，计算剪切波速时不对 N 进行修正，因为建立 N 与这些工程性质的关系时并未对 N 进行修正。如我国在建立砂土液化判别公式时，其中的标贯基准值是由 1971 年以前我国大陆地区的 6 次大地震的实测标贯数据绘图后确定的，并未进行修正，所以在对新的地区进行液化判别时无需对 N 进行修正。在运用 N 确定土的无侧限抗压强度、压缩模量、地基承载力时，应根据在建立经验公式时是否有修正以及进行了何种修正来考虑。如李小和（2008）根据武广客运专线沿线的红黏土数据建立 N 与压缩模量的经验公式时进行了杆长修正，那么在运用该公式时需要进行相同的杆长修正。总体来说我国规范要求对标贯一般不进行修正或者仅进行杆长修正，这是根据建立经验公式时是否进行修

正考虑的,是合理的,在应用规范时不会对结果产生很大的误差。

目前欧美规范中仅对采用 N 进行砂土液化判定的情况进行了规定,这是因为欧美采用改进后的 Seed 简化方法进行液化判别,也就是将砂土中由振动作用产生的剪应力 CSR 与产生液化所需的剪应力 CRR 进行比较, CSR 与地震的地面水平峰值加速度及埋藏深度有关,与 N 无关,没有能量损失,而 CRR 是由 N 得到的,考虑到 SPT 中的各种影响因素导致的能量损失,需要将 N 进行修正后得到的 CRR 与 CSR 进行比较。

表 11 N 修正系数

Tab. 11 Correction coefficient N

修正因素	设备变量	修正系数	修正值
能量比	环形锤	C_E	1.5 ~ 1.0
能量比	安全锤	C_E	0.7 ~ 1.2
能量比	自动锤	C_E	0.8 ~ 1.3
钻孔直径	65 ~ 115 mm	C_B	1.0
钻孔直径	150 mm	C_B	1.05
钻孔直径	200 mm	C_B	1.15
杆长	< 3 m	C_R	0.75
杆长	3 ~ 4 m	C_R	0.8
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
取样方法	标准采样器	C_S	1.0
取样方法	没有衬里的采样器	C_S	1.1 ~ 1.3

表 12 GB 和 ASTM 标贯设备尺寸

Tab. 12 SPT equipment dimension of GB and ASTM

国家	落锤				贯入器			管靴			钻杆直径 /mm
	类型	方式	质量/kg	落距/mm	长度/mm	外径/mm	内径/mm	长度/mm	刃口角度/(°)	厚度/mm	
中国	Pilcon 锤	人工 机械	63.5	760	> 500	50	35	50 ~ 76	18 ~ 20	1.6	42.0
美国	安全锤 穿心锤	人工	63.5	760	457 ~ 762	50.8	34.9	25 ~ 50	16 ~ 23	2.54	41.2

3.2 中国与英国 N 相关性

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)和英国标准(BS 1377 - 9: 1990)规定的设备见表 14。从表中可以看出英国标准规定的设备规格与我国现行标准基本类似,但锤垫的质量差别较大。

美国标准 (ASTM D1586 - 11) 和欧洲标准 (BS EN ISO 22476 - 3: 2005) 中相应的修正系数见表 11, 规定的修正公式为:

$$(N_1)_{60} = NC_N C_E C_B C_R C_S \quad (12)$$

式中: C_N 为上覆土压力修正系数, 一般采用 Liao 和 Whitman (1986) 建议的公式; C_E 为锤击能量比修正系数; C_B 为钻孔直径修正系数; C_R 为杆长修正系数; C_S 为有无衬垫情况下的修正系数。

我国学者对 N 也会采用国外修正公式进行修正 (王士杰等, 2005), 但是目前还没有相关研究表明这样修正是否合理, 与采用我国修正公式进行修正差别多大, 这些问题尚待研究。

3 国内外 SPT 相关性比较

3.1 中国与美国 N 相关性

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001) 和美国标准 (ASTM D1586 - 11) 规定的设备见表 12。从表中可以看出美国标准的设备规格与我国现行标准基本类似, 主要区别是落锤的类型和释放方式不同。Seed 等 (1985) 给出了中国、美国不同落锤不同释放方式下的能量传递率, 机械下落的 Pilcon 锤和人工下落的安全锤的能量传递率相同, 都为 60%, 人工下落的 Pilcon 锤和穿心锤的能量传递率分别为 50% 和 45%。以不同种类的锤传递给钻杆的能量差异为基础, 得到了中美 N 的相关性, 见表 13。

在钻杆直径、锤的类型、落锤方式、落距、贯入器、钻杆长度等均相同的条件下, 锤垫质量越大, 在锤击过程中锤垫与锤之间摩擦消耗的能量就越大, 实际锤击传递的能量相对于锤垫质量小的标贯设备要低。

表 13 中美标贯转换公式

Tab. 13 Chinese and American standard conversion formula

中国		美国		转换公式
锤类型	落锤方式	锤类型	落锤方式	
Pilcon 锤	机械	安全锤	人工	$N_{中} = N_{美}$
		穿心锤		$N_{中} = 0.75 N_{美}$
	人工	安全锤		$N_{中} = 1.2 N_{美}$
		穿心锤		$N_{中} = 0.9 N_{美}$

廖先斌等（2013）采用标贯能量分析仪，通过测量不同直径钻杆的中国和英国标贯设备实际锤击能量，计算实际与理论锤击能量的能量比，

建立了中国和英国标准贯入击数转换公式。

当钻杆直径为 50 mm 时：

$$N_{中} = 0.83 N_{英} \tag{13}$$

当钻杆直径为 42 mm 时：

$$N_{中} = 0.79 N_{英} \tag{14}$$

由上述公式可见，在 N 较小时，各国标贯之间相差不大，在实际工程中可不考虑它们的差异性。但当 N 很大时，比如在运用 N 计算地基承载力时，标贯可达到 50 击以上，这时就应考虑各国标贯的差异。

表 14 GB 和 BS 标贯设备尺寸

Tab. 14 SPT equipment dimension of GB and BS

国家	落锤				锤垫		贯入器			管靴		
	类型	方式	质量/kg	落距/mm	直径/mm	质量/kg	长度/mm	外径/mm	内径/mm	长度/mm	刃口角度/(°)	厚度/mm
中国	Pilcon 锤	人工 机械	63.5	760	8.2	3.42	>500	51	35	50 ~ 76	18 ~ 20	1.6
英国	Pilcon 锤	机械	63.5	760	13.6	13.94	≥450	50	35	25 ~ 75	—	1.6

4 结论

本文以 SPT 为研究对象，整理分析了国内外 SPT 的适用范围、修正方法和相关性比较，得到结论如下：

（1）SPT 是一种国内外常用的勘察测试手段，常用标贯击数 N 值确定砂土的密实度、砂土的内摩擦角、一般粘性土的无侧限抗压强度、土的压缩模量、单桩极限承载力、剪切波速等常规参数以及判别砂土液化。

（2）国内外 SPT 确定常规参数的经验值多有差异，如：密实度划分范围不同，不同地区 N 和内摩擦角经验公式不同，不同地区标贯与剪切波速关系对比差异显著。这是由于不同地区土的平均粒径、不均匀系数、孔隙比、相对密实度、土的形成年代、埋藏条件等存在着差异，即不同地区土体存在地区差异。

（3）SPT 在实际操作中会有能量损失，对标贯击数 N 的修正主要有地下水位、杆长、上覆土压力及能量修正。国内外对 N 的修正有不同的规定，甚至修正系数定性相反，对于深层勘查和深

海工程建议采用标贯能量测试。

（4）美国和英国使用的标贯设备是目前世界上最常使用的 2 种原位测试设备，对比研究了中美、中英设备的参数和转换公式，给出了中美、中英标准贯入击数的经验关系式，可在实际工程中参考使用。

（5）随着“一带一路”的推进，我国参与的跨国工程将大量增多，困扰我国工程师的技术标准不统一的问题也将会日益凸显。国内外工程勘察测试指标如何达成一致，是急需解决的问题。这需要我们进行实际工程对比验证、理论分析、室内试验等方面的深入研究。

参考文献：

常士骝,张苏民. 2007. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京:中国建筑业出版社.

杜学玲,杨俊彪,张喜发. 2005. 沙漠砂抗剪强度指标与原位测试指标关系研究[J]. 岩土力学,26(5):837-840.

冯铭璋. 1986. 关于标准贯入试验杆长修正公式的讨论[J]. 工程勘察,(2):17-18.

郭淋,王春艳,张飞,等. 2012. 标贯试验 N 值与土体物理力学参数的相关性分析[J]. 安全与环境工程,19(4):148-152.

和礼红,李艳,张妮娜,等. 2010. 钉形水泥土双向搅拌桩桩身强度差

- 异原因分析与检测探讨[J]. 岩土力学, 31(S1): 255-260.
- 蒋建平, 李晓昭, 罗国焜. 2010. 南京地铁地基土标贯与物理及力学参数关系试验研究[J]. 铁道学报, 32(1): 123-127.
- 李小和. 2008. 武广客运专线红黏土地基压缩模量确定方法研究[J]. 铁道工程学报, 25(12): 37-44.
- 李兆焱. 2012. 基于巴楚地震调查的液化判别方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 李志平, 彭振斌, 肖尊群, 等. 2013. 含水率影响下尾矿砂内摩擦角随标贯击数变化研究[J]. 岩土力学, 34(5): 1340-1344.
- 廖先斌, 郭晓勇, 杜宇. 2013. 英标和国标标贯设备试验结果相关性分析[J]. 岩土力学, 34(1): 143-147.
- 刘松玉, 章定文, 邵俐. 2002. 标准贯入试验(SPT)在水泥粉喷桩质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 21(S2): 2382-2386.
- 刘卫民, 丁小军, 谷志文, 等. 2018. 欧美岩土工程勘察标准解读[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 邱志刚, 薄景山, 罗奇峰. 2012. 土壤剪切波速与标贯击数关系的统计分析[J]. 自然灾害学报, 21(2): 102-107.
- 孙锐, 袁晓铭. 2019. 适于不同深度土层液化的剪切波速判别公式[J]. 岩土工程学报, 41(3): 439-447.
- 陶常飞. 2008. 曹妃甸浅滩海洋工程地质特征及插桩深度研究[D]. 青岛: 中国海洋大学.
- 汪莹鹤, 赵新益, 曾长贤. 2013. 地基承载力确定方法综述[J]. 铁道工程学报, 30(7): 16-21.
- 王克. 2018. 动剪应力折减系数影响因素及计算方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 王梦龙. 2016. 国家标准液化判别方法区域化修正初探[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 王士杰, 何满潮, 张吉占. 2005. 用归一化标准贯入 N 值估算砂土的相对密度[J]. 岩土工程学报, 27(6): 682-685.
- 吴晓东. 2014. 中外标准对标准贯入试验规定之对比[J]. 铁道勘察, 40(4): 32-36.
- 赵倩玉. 2013. 我国规范标贯液化判别方法的改进研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 朱小林. 1995. 由原位测试估算砂土岩土参数的方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 23(3): 333-337.
- Dunham J W. 1954. Pile Foundations For Building[J]. Proceeding of the American Society of Civil Engineers, 80(1): 1-21.
- Esfahanizadeh M, Nabizadeh F, Yazarloo R. 2015. Correlation between Standard Penetration (NSPT) and Shear Wave Velocity (VS) for Young Coastal Sands of The Caspian Sea[J]. Arabian Journal of Geosciences, 8(9): 1-9.
- Gibbs H J, Holtz W G. 1957. Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing[C]. London: Proceeding of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 35-39.
- Liao S C, Whitman R V. 1986. Overburden Correction Factors for SPT in Sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 112(3): 373-377.
- Meyerhof G G. 1956. Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 82(1): 1-19.
- Peck R B, Hansen W W, Thornburn T H. 1974. Foundation Engineering[M]. New York: John Wiley and Sons.
- Rauch A F. 1998. Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using Cone Penetration Test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 35(3): 442-459.
- Schultze E, Menzenbach E. 1961. Standard Penetration Test and Compressibility of Soils[C]. Paris: Proceeding of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 527.
- Seed H B, Idriss I M, Arango I. 1983. Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 109(3): 458-482.
- Seed H B, Idriss I M. 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 97(SM9): 1249-1273.
- Seed H B, Tokimatsu K, Harder L F, et al. 1985. Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 111(12): 1425-1445.
- Skempton A W. 1986. Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation[J]. Geotechnique, 37(3): 411-412.
- Terzaghi K, Peck R B, Mesri G. 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. New York: Wiley.
- Youd T L, Idriss I M. 2001. 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, 127(10): 296-313.
- GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范[S].
- GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50021—2001, 岩土工程勘察规范[S].
- GBJ 7—89, 建筑地基基础设计规范[S].
- JIS A1219—2001, 标准贯入试验方法[S].
- JTJ 240—1997, 港口工程地质勘察规范[S].
- ASTM D1586—11, Standard Test Method for Penetration Test and Split-barrel Sampling of Soils[S].
- BS 1377—9:1990, Methods of test for soils for civil engineering purposes - Part 9: In-situ tests[S].
- BS EN ISO 22476—3:2005, Geotechnical Investigation and Testing - Field Testing - Part 3: Standard penetration test[S].

Influence Factors of Standard Penetration Test in China and Over the World

LU Kunyu, LI Zhaoyan, YUAN Xiaoming, ZHANG Siyu

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,
China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

With the rapid advancement of the “One Belt, One Road” strategy, more and more Chinese companies went out to participate in the construction of foreign infrastructure projects. At present, the biggest engineering problem encountered by Chinese companies in the construction of foreign infrastructures is that the technical standards used in China and over the world are not consistent. This paper took the standard penetration test as the research object, and synthesized the existing research results, then analyzed and compared the applicable scope, correction method, test equipment, and the correlation of the standard penetration test of the domestic and international standard penetration test. The results show that domestic and international standard test is widely used, can be used to estimate soil related parameters and evaluate sand liquefaction, however the empirical relationship between soil parameters is different in China and over the world. The correction of the standard number of hits has a water table correction, rod length correction, overburden pressure correction, energy correction, different national standard penetration number correction methods. When the standard number of strokes is small, the difference between the number of standard strokes in each country is small. In actual engineering, the differences between them can be ignored.

Keywords: standard penetration test; correction method; energy transmission; European and American standards; shear wave velocity