



# 港口工程沙土液化判别方法

乔伟刚, 刘健

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 沙土液化是场地和地基的地震效应的重要内容, 我国港口主要采用基于标准贯入试验的沙土液化判别方法以及静力触探等原位测试方法, 而欧美、非洲及东南亚大多采用 Seed 简化法以及基于概率与统计分析的估计方法。通过多种液化判别方法的分析, 论证其合理性, 针对不同性质的工程合理运用于水运港口工程抗震作用。

**关键词:** 沙土液化; 标贯; 静力触探

中图分类号: TU 431

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0171-08

## Liquefaction discrimination method for harbor engineering

QIAO Wei-gang, LIU Jian

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The liquefaction of sandy layer is an important index of the site and foundation seismic effect. The liquefaction of sandy layer discrimination method based on the standard penetration test and static cone penetration test, etc. are mainly adopted for the harbor engineering in China. However, the simplified method of seed and the estimation method based on the probability and statistical analysis are adopted in Europe and America, Africa and Southeast Asia. Analyzing a variety of liquefaction discrimination methods, we prove the rationality of the method. According to different kinds of project, we apply it to the seismic effect for the harbor engineering.

**Keywords:** liquefaction of sandy layer; standard penetration test; static cone penetration

随着海外港口市场的不断拓展, 不少工程区域位于强震区, 工程建设中对于抗震设计的要求较高, 尤其涉外工程咨询审查严格, 场地和地基地震效应的研究相对更加重要, 液化的判别作为地震效应重要组成部分, 其方法不少于数十种, 比较成熟的有十几种。主要有基于室内试验分析的液化估计法、基于震害经验的原位试验液化估计法、基于概率与统计分析的液化估计法。

本文对几种有代表性的液化判别原理、方法、参数、结果进行对比分析, 找出中国规范与国外判别的不同, 供涉外工程技术人员参考。

### 1 基于标准贯入试验的液化判别法

#### 1.1 港口规范法

国内港口通常采用以 JTS 146—2012 《水运工

程抗震设计规范》<sup>[1]</sup> 为主的标准贯入试验判别法判别场地沙土液化。

规范法是在沉积时代、黏粒含量的初判基础上, 通过标贯实测值  $N_{63.5}$  与计算得到的液化判别标贯锤击数临界值  $N_{cr}$  进行对比, 若  $N_{63.5} < N_{cr}$  则会液化, 否则不液化。

地面下 20 m 深度范围内, 液化判别标准锤击数临界值可按式计算:

$$N_{cr} = N_{\alpha} \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{\frac{3}{M_c}} \quad (1)$$

式中:  $N_{cr}$  为液化判别标准贯入锤击数临界值;  $N_{\alpha}$  为液化判别标准贯入锤击数基准值;  $\beta$  为调整系数, 设计地震第 1 组取 0.8, 第 2 组取 0.95, 第 3 组取 1.05;  $d_s$  为饱和土标准贯入点深度 (m);  $d_w$  为地下水位在地面以下的深度 (m), 当地面位

收稿日期: 2014-12-11

作者简介: 乔伟刚 (1970—), 男, 注册岩土工程师, 高级工程师, 从事岩土工程勘察与设计。

于水下时,  $d_w$  取 0;  $M_c$  为黏粒含量, 小于 3%, 为沙土时取 3%。

规范法已成为国内水运工程沙土液化判别的主要原则。但方法缺乏理论基础, 对深层地基土的判别结果偏于保守。

### 1.2 NCEER 法—Seed 简化法<sup>[2-3]</sup>

NCEER 法是在 Seed 的基础上简化的一种试验分析方法。其判断依据为: 由于地震振动作用产生的剪应力大于产生液化所需的剪应力时, 则可能发生沙土液化。Seed 将上述理论简化, 利用等效周期应力比  $CSR$  与地基土的周期阻力比  $CRR$  进行比较来判定沙土液化, 即: 如果  $CRR > CSR$ , 则沙土不液化; 否则沙土液化。

#### 1.2.1 周期应力比 ( $CSR$ ) 的计算

周期应力比是根据场地的地震基本设计参数计算的, 目前 Seed 等<sup>[2]</sup>提出的计算表达式被普遍接受。后来考虑了地震震级的影响, 通过震级比例系数将  $CSR$  转换为震级  $M_s = 7.5$  下的等效  $CSR_{7.5}$ , 即:

$$CSR = 0.65 \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} a_{\max} r_d \quad (2)$$

式中:  $CSR$  为地震循环应力比; 修正系数为 0.65;  $\sigma_0$  为计算深度处土总应力;  $\sigma'_0$  为计算深度处有效应力;  $a_{\max}$  为地面峰值加速度;  $r_d$  为应力折减系数。

$$r_d = \begin{cases} 1.0 - 0.00765z & z \leq 9.15 \text{ m} \\ 1.174 - 0.0267z & 9.15 < z \leq 23 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $z$  为计算点深度。

#### 1.2.2 基于标贯击数的循环阻力比 $CRR$

ECEER 推荐采用  $CRR$  与修正标准锤击数  $N_1$  关系表示的  $CRR$  基准曲线进行表征。

根据以往的地震调查研究, Seed 等提出了在 7.5 级地震下, 修正的标贯锤击数与  $CRR_{7.5}$  关系曲线(图 1)。Rauch 提出了纯净沙中  $CRR_{7.5}$  的拟合公式:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (4)$$

式(4)仅适用于  $(N_1)_{60} < 30$ 。对于  $(N_1)_{60} \geq 30$  的沙, Seed 等认为太密实而不会发生液化现象<sup>[3]</sup>。

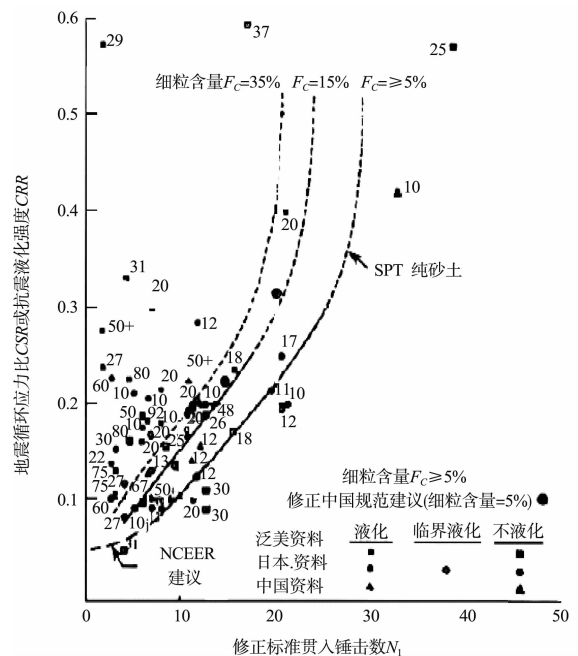


图 1  $CRR$  与  $(N_1)_{60}$  关系曲线

#### 1) 标贯锤击数修正。

$(N_1)_{60}$  是将实测标贯锤击数修正为上覆压应力为 100 kPa、能量比或效率为 60% 时的锤击数。修正公式如下:

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_b C_s C_r C_e \quad (5)$$

式中:  $N_m$  为标贯击数实测值;  $C_N$  为深度修正因子;  $C_b$  为钻孔口径修正因子;  $C_s$  为取土器修正因子;  $C_r$  为杆长修正因子;  $C_e$  为能量修正因子。

#### 2) 沙土中细粒含量影响。

Seed 等发现土体  $CRR$  随着黏粒含量的增加而增大, 不同黏粒含量的  $CRR$  曲线见图 1。Idriss 等提出的修正公式如下:

$$(N_1)_{60f} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  为修正因子;  $(N_1)_{60f}$  为经黏粒含量修正后的标贯击数。其中  $\alpha$ 、 $\beta$  根据下式计算:

$$\begin{cases} \alpha = 0.00, \beta = 1.00 & F_c \leq 5\% \\ \alpha = \exp[1.76 - (190/F_c^2)], \beta = 0.99 + F_c^{1.5}/100 & 5\% < F_c < 35\% \\ \alpha = 0.00, \beta = 1.00 & F_c \geq 35\% \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $F_c$  为黏粒含量。

#### 3) 上覆应力修正。

Seed 简化法是针对平缓场地提出的, 这种场地条件下, 静止剪切应力较小。Seed 提出了  $K_\alpha$ 、

$K_\sigma$  两个修正因子, 使之适用于上覆荷载和静止剪切应力较大的场地。修正公式如下:

$$CRR_v = CRR_{7.5} K_\alpha K_\sigma \quad (8)$$

式中:  $CRR_v$  为修正的  $CRR$ 。

由于  $K_\alpha$  的取值还需要深入研究, 目前常规工程中一般不考虑  $K_\sigma$  的影响。  $K_\sigma$  取值见表 1。

表 1 上覆应力修正因子  $K_\sigma$  取值

$K_\sigma$ 取值	$\sigma'_m$
1.0	$\sigma'_m = 0 \sim 1.0$
$0.0069\sigma'_m/2 - 0.1162\sigma'_m + 1.0843$	$1.0 < \sigma'_m \leq 10$
0.59	$\sigma'_m > 10$

注:  $\sigma'_m$  为有效上覆土应力。

#### 4) $CRR$ 震级修正。

图 1 为 7.5 级地震下的  $CRR$  曲线, 为了适用于其他震级下沙土液化判别, Seed 等引入了震级修正因子 ( $MSF_s$ ):

$$CRR_M = CRR_v \cdot MSF_s \quad (9)$$

式中:  $CRR_M$  为根据震级修正后的  $CRR$ ;  $MSF_s$  为震级修正因子,  $MSF_s = 10^{2.24/M-2.56}$  ( $M$  为震级)。

### 1.2.3 液化判别

判别因子计算公式为:

$$F_s = CRR_M / CSR \quad (10)$$

若  $F_s > 1$ , 则不会发生液化; 否则有液化的可能。

## 2 基于静力触探试验的液化判别方法

### 2.1 国内规范法

我国规范判别法属于经验法, 是根据在邢台地震 (1966 年)、通海地震 (1970 年)、海城地震 (1975 年)、唐山地震 (1976 年) 及国外历史上地震后出现喷水、冒沙、滑移与沉陷等地面变形为标志的液化场地上进行的对比试验数据, 运用概率统计法建立起来的, 因而具有较强的实用性和针对性。但方法缺乏理论基础, 对深层地基土的判别结果偏于保守。

TB 10041—2003 《铁路工程地质原位测试规程》<sup>[4]</sup> 采用单、双桥 CPT 进行沙土液化的判别, 提出了地震动峰值加速度为 0.1g 的地区地面下 15 m

以内, 地震动峰值加速度为 0.2g 或 0.4g 的地区地面下 20 m 以内可能液化的地层适宜采用 CPT 方法进行判别。提出了在一定地震烈度条件下, 场地的饱和沙土发生液化时所对应的单桥触探液化临界比贯入阻力  $P'_s$  或双桥触探液化临界锥尖阻力  $q'_c$  的计算方法。其判别沙土液化表达式为:

$$P'_s = p_{s0} \alpha_1 \alpha_3 \alpha_4 \quad (11)$$

$$q'_c = q_{c0} \alpha_1 \alpha_3 \alpha_4 \quad (12)$$

$$\alpha_1 = 1 - 0.065(d_w - 2) \quad (13)$$

$$\alpha_3 = 1 - 0.050(d_u - 2) \quad (14)$$

式中:  $p_{s0}$ 、 $q_{c0}$  分别为地下水深度  $d_w = 2$  m、上覆非液化土层厚度  $d_u = 2$  m 时, 可液化土层的临界贯入阻力;  $\alpha_1$  为地下水位埋深  $d_w$  的修正系数, 地面常年有水且与地下水有水力联系时, 取  $\alpha_1 = 1.13$ ;  $\alpha_3$  为上覆非液化土层厚度  $d_u$  的修正系数, 对于深基础, 取  $\alpha_u = 1.0$ ;  $\alpha_4$  为与 CPT 摩阻比有关的黏粒含量修正系数。

当实测比贯入阻力或锥尖阻力小于单桥触探液化比贯入阻力临界值或双桥触探液化锥尖阻力临界值时, 应判别为液化土; 否则沙土不液化。

### 2.2 Robertson 法及其简化 Olsen 法

#### 1) Robertson 法。

基于 Seed 简化法的静力触探试验液化判别方法主要采用静力触探试验的结果计算地基土的周期阻力比  $CRR$ 。其主要方法为 Robertson 法: 采用 CPT 土质分类公式及液化潜能评估方法, 其最大优点就是分析流程中的每一步骤均以数学式表达, 可以直接应用 CPT 试验成果计算周期阻力比  $CRR$ , 逐步计算该深度的液化潜能。通过采用多种手段来修正 CPT 试验成果, 使得这一方法逐步完善。该理论是基于对薄层土锥尖阻力修正和对场地及土性修正的基础上建立的。

由于土层上覆应力对 CPT 锥尖阻力有较大影响, 即相同性质的土层在不同的深度, 其 CPT 探头阻力是不同的, 因此需对 CPT 锥尖阻力进行归一化。在考虑初始有效应力  $\sigma'_{v0}$  和标准大气压力  $P_a$  ( $P_a = 100$  kPa) 的前提下, 对静探指标的贯入阻力 (锥尖阻力  $q_c$  与侧壁摩阻力  $f_s$ ) 进行了修

正, 即

$$Q = C_q q_c \tag{15}$$

$$F = C_f f_s \tag{16}$$

其中:  $C_q = (p_a/\sigma'_{vo})^c \tag{17}$

$$C_f = (p_a/\sigma'_{vo})^s \tag{18}$$

式中:  $c$  和  $s$  均为指数, 需根据锥尖阻力和摩阻比  
的值查图确定。根据计算出的  $Q$  和  $F$  值, 就可以  
按下式计算土的特性指数  $I_C$ , 即

$$I_C = [(3.47 - \lg Q)^2 + (\lg F + 1.22)^2]^{0.5} \tag{19}$$

当  $I_C > 2.6$  时, 令  $q_{CIN} = Q$ ; 当  $I_C \leq 2.6$  时,  
令  $Q = q_{CIN} = (q_c/p_{a2})(p_a/\sigma'_{vo})^{0.5} \tag{20}$

且  $p_{a2} = 0.1 \text{ MPa}$ 。利用这些数值重新计算特性指  
数  $I_C$ 。若此时特性指数  $I_C > 2.6$ , 则  $q_{CIN}$  值的计算  
表达式为:

$$q_{CIN} = (q_c/q_{a2})(p_a/\sigma'_{vo})^{0.75} \tag{21}$$

计算出归一化锥尖阻力值  $q_{CIN}$  后, 得出等价纯  
净沙归一化贯入阻力

$$(q_{CIN})_{CS} = K_C q_{CIN} \tag{22}$$

$$\begin{cases} \text{当 } I_C \leq 1.64 \text{ 或 } 1.64 < I_C < 2.36, \text{ 且 } F < 0.5\% \text{ 时,} \\ K_C = 1.0 \\ \text{当 } 1.64 < K_C < 2.6, \text{ 且有 } F > 0.5\% \text{ 时,} \\ K_C = -0.403I_C^4 + 5.581I_C^3 - 21.630I_C^2 + 33.750I_C - 17.880 \\ \text{当 } K_C \geq 2.6, \text{ 可停止计算} \end{cases} \tag{23}$$

对地震震级  $M_s = 7.5$  的  $CRR_{7.5}$ , 按下式计算:

$$\begin{cases} CRR_{7.5} = 0.833 [(q_{CIN})_{CS}/1000]^3 + 0.05 & q_{CIN} < 50 \\ CRR_{7.5} = 93 [(q_{CIN})_{CS}/1000]^3 + 0.08 & 50 \leq q_{CIN} < 160 \end{cases} \tag{24}$$

2) Olsen 法。

因 Robertson 法算法繁琐, Olsen 发展了使用  
锥尖阻力  $q_c$  和侧壁摩阻力  $f_s$  预测液化阻力的方  
法。建议采用应力指数  $C$  对  $q_c$  进行归一化, 因为  
应力指数  $C$  是归一化锥尖阻力  $q_{c1}$  和摩阻比 ( $R_f$ )  
的函数, 通过一个迭代程序确定。Olsen 提出一个  
基于 CPT 的土特征图, 可以通过迭代程序确定应  
力指数。为了避免迭代程序, 创建了一个简化方  
法, 使用一个 0.6 的常应力指数, 这个简化方法

用于确定  $CRR$  的表达式如下:

$$\begin{cases} CRR = 0.00128q_{c1} - 0.025 + 0.17R_f - \\ 0.028R_f^2 + 0.0016R_f^3 \\ q_{c1} = \frac{q_c}{(\sigma'_{vo})^{0.7}} \end{cases} \tag{25}$$

### 3 基于室内试验分析的液化估计法

我国现行规范未涉及采用室内试验进行液化  
判别。Seed 等提出了液化判别的“简化方法”<sup>[5]</sup>。  
这个方法由如下基本步骤组成:

1) 确定地震时水平地面下饱和沙土单元承受  
的等效水平地震剪应力:

$$\tau_e = 0.65K \cdot \frac{a_{max}}{g} \rho g d_s \tag{26}$$

式中:  $K$  为应力折减系数;  $\rho$  为深度  $d_s$  以上的上覆  
土层的天然密度, 地下水位以下为饱和密度, 多层  
土应分层计算 ( $t/m^3$ );  $d_s$  为沙土所处的深度 (m)。

根据动三轴试验确定饱和沙土单元抗液化剪  
应力:

$$\tau = C_r \sigma'_v \cdot \frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \tag{27}$$

式中:  $\tau$  为沙土的抗液化剪应力 (kPa);  $C_r$  为应力  
校正系数;  $\sigma'_v$  为地震前上覆土层自重有效压力 (kPa)。

2) 将饱和沙土单元承受的等效水平地震剪应  
力和发生液化需要的抗液化地震剪应力进行比较。  
如果地震所产生的剪应力大于液化所需的剪应力,  
则发生液化。

### 4 各种液化判别法的比较

#### 4.1 基于标准贯入试验的比较

1) NCEER 法是一种试验分析方法, 理论依据  
强; 而规范法是统计分析法, 是一种经验法。

2) 在确定地震影响时, NCEER 法是按“震  
级”来考虑的, 而规范法则是按“烈度”来考虑的。

3) NCEER 法中标贯击数还要进行修正, 考虑  
了深度、杆长、不同国家测试方式的影响。而规  
范法则直接采用现场实测标贯击数进行判别, 不  
需要修正。

4) 规范法中除了设防烈度外, 主要考虑了测

点深度和地下水水位的影响, 而 NCEER 法中还含有其他一些影响因素。

#### 4.2 基于静力触探试验的比较

1) 国内规范法为实际贯入阻力和临界阻力进行比较; Robertson 法及 Olsen 法采用周期阻力比  $CRR$  与周期应力比  $CSR$  进行比较。

2) 国内规范法直接采用现场实测锥尖阻力, Robertson 及 Olsen 法需对原始数据进行修正。

3) 国内规范法考虑了近震与远震的不同影响, 并考虑了黏粒含量、地下水水位、上覆土层对液化的影响; Robertson 不仅考虑土性、场地等影响因素, 更有一套完善的计算流程, 对液化后的场地沉陷及侧向变形可进行预测。

#### 4.3 基于室内试验分析的比较

国内对于室内试验分析在现行的规范中还未具体体现, 而国外一般采取动三轴试验进行地震剪应力比较分析, 该方法是液化判别的发展方向。影响饱和土体液化强度的因素有很多, 其中包括

土体本身的特性(土的类型、密度、结构、级配、透水性等)和初始应力状态及动力荷载的特性(振动荷载幅值、振动频率等)。

### 5 工程实例的比较

#### 5.1 基于标准贯入试验实例比较

印尼国家电力公司(PLN)建设印尼 ADIPALA ( $1 \times 660$  MW) 燃煤电站项目, 位于中爪哇省芝拉扎市区的南岸, 拟建装卸煤码头, 码头场区上部主要地层为中沙和细沙, 为中密状, 基岩的基本地震加速度为  $0.29g$ , 场地地表的基本地震加速度为  $0.30g$ , 分别采用了水运抗震规范法和 NCEER 法进行沙土液化判别。

##### 5.1.1 水运抗震规范法

该工程共布置了 21 个沙土液化判别孔, 选取代表性 BH01 孔进行判别(表 2)。其它钻孔的判别结果基本和该钻孔一致, 除表层几米以内的不液化, 下部基本液化。

表 2 BH01 孔水运抗震液化判别

土名	标贯点 深度 $d_s/m$	实测标贯 击数 $N_i/\text{击}$	黏粒含量 $P_c/\%$	地下水位 $d_w/m$	地震分组 调整系数 $\beta$	标贯基准 击数 $N_0/\text{击}$	临界标贯 击数 $N_{cr}/\text{击}$	是否 液化
沙	1.0	18	5.0	0.00	0.8	19.0	8.7	否
沙	2.0	18	3.0	0.00	0.8	19.0	15.1	否
沙	3.0	18	3.0	0.00	0.8	19.0	18.1	是
沙	4.0	18	3.0	0.00	0.8	19.0	20.7	是
沙	5.0	18	3.0	0.00	0.8	19.0	22.9	是
沙	6.0	18	3.0	0.00	0.8	19.0	24.8	是
沙	7.0	18	3.0	0.00	0.8	19.0	26.5	是
沙	8.0	18	3.0	0.00	0.8	19.0	28.0	是
沙	9.0	18	3.0	0.00	0.8	19.0	29.4	是
沙	10.0	18	3.0	0.00	0.8	19.0	30.6	是
沙	12.2	26	3.0	0.00	0.8	19.0	33.0	是
沙	14.2	31	3.0	0.00	0.8	19.0	35.0	是
沙	16.2	25	3.0	0.00	0.8	19.0	36.7	是
沙	18.2	31	3.0	0.00	0.8	19.0	38.3	是

##### 5.1.2 NCEER 法

同样选取 BH01 孔采用不同的动峰值加速度计算, 结果见表 3。

其它钻孔判别结果亦与本孔类似, 基本不液化。

通过上述两表可知国内规范法简单实用, 易于工程人员掌握, 而 NCEER 法理论性强。两种沙

土液化判别方法(表 4) 所示参数有所不同。

两者主要的区别在于, NCEER 采用了地面峰值加速度以及上覆荷载, 更加合理地考虑了震级的影响, 地面峰值加速度在使用时可基本参照《建筑抗震设计规范》5.1.4 执行。而规范法采用了地抗震设防烈度, 更多地考虑了震中距及场地类型的影响。

表 3 NCEER 法液化判别

深度/m		土名	密度/ ( $t \cdot m^{-3}$ )	深度/m	震级	折减系数	循环应力比 CSR		影响系数		$(N_1)_{60f}$ (修正级数)	震级比例 系数 MSF	7.5 震级的抗液化强度 $CRR_{7.5}$	抗液化强度 $CRR_M$	安全系数		是否液化
自	至						0.2g	0.29g	$\alpha$	$\beta$					0.2g	0.29g	
0.0	1.0	沙	1.92	1	6.90	0.99	0.13	0.19	5.00	1.20	37	1.24	0.06	0.08	0.60	0.42	是
1.0	2.0	沙	1.92	2	6.90	0.98	0.13	0.19	5.00	1.20	33	1.24	1.39	1.72	6.50	6.50	否
2.0	3.0	沙	1.92	3	6.90	0.98	0.13	0.18	5.00	1.20	30	1.24	0.47	0.59	4.62	3.18	否
3.0	4.0	沙	1.92	4	6.90	0.97	0.17	0.25	5.00	1.20	32	1.24	0.70	0.87	5.11	3.52	否
4.0	5.0	沙	1.92	5	6.90	0.96	0.16	0.23	2.50	1.05	25	1.24	0.29	0.36	2.29	1.58	否
5.0	6.0	沙	1.92	6	6.90	0.95	0.19	0.28	2.50	1.05	25	1.24	0.29	0.36	1.91	1.32	否
6.0	7.0	沙	1.92	7	6.90	0.95	0.18	0.25	2.50	1.05	25	1.24	0.30	0.37	2.13	1.47	否
7.0	8.0	沙	1.92	8	6.90	0.94	0.20	0.29	2.50	1.05	26	1.24	0.30	0.38	1.88	1.29	否
8.0	9.0	沙	1.92	9	6.90	0.93	0.19	0.27	5.00	1.20	29	1.24	0.42	0.52	2.82	1.94	否
9.0	10.0	沙	1.92	10	6.90	0.91	0.20	0.29	5.00	1.20	29	1.24	0.43	0.53	2.61	1.80	否
10.0	12.2	沙	1.92	12	6.90	0.85	0.18	0.26	0.56	1.02	28	1.24	0.38	0.47	2.60	1.79	否
12.2	14.2	沙	1.92	14	6.90	0.8	0.19	0.27	0.00	1.00	32	1.24	0.64	0.79	4.22	2.91	否
14.2	16.2	沙	1.92	16	6.90	0.74	0.17	0.24	0.00	1.00	23	1.24	0.26	0.32	1.90	1.31	否
16.2	18.2	沙	1.92	18	6.90	0.69	0.17	0.24	0.30	1.01	28	1.24	0.39	0.48	2.85	1.97	否
18.2	20.2	沙	1.92	20	6.90	0.64	0.15	0.22	0.03	1.00	24	1.24	0.27	0.34	2.27	1.56	否
20.0	22.0	沙	1.92	22	6.90	0.59	0.14	0.21	0.12	1.01	23	1.24	0.25	0.31	2.15	1.49	否
22.0	24.2	沙	1.92	24	6.90	0.55	0.13	0.19	0.12	1.01	16	1.24	0.17	0.22	1.64	1.13	否
24.2	25.8	沙	1.92	26	6.90	0.54	0.13	0.20	0.12	1.01	16	1.24	0.17	0.21	1.59	1.10	否

表 4 基于标贯计算参数对比

方法	计算参数
规范法	设计基本地震加速度
	实测标贯值
	地下水位
	黏粒含量
	地震分组调整系数
	深度
NCEER 法	地面峰值加速度
	上覆荷载(总应力和有效应力)
	地震震级
	修正的标贯值
	深度
	地下水位
	黏粒含量

NCEER 法地震震级的提高循环应力比增加并不十分明显。另外两种方法均说明地下水位越浅,地基土越容易液化,这与地基土的液化机理相适应。

由上述分析可知规范液化判别法偏于保守,基本为液化;而 NCEER 法除表层外,基本为不液化。

5.2 基于静力触探试验实例比较

已建成的泰州长江大桥两侧引桥,上部主要地层为第 4 系冲积沙土,分别采用了《铁路工程地质原位测试规程》(表 5)和 Olsen 法(表 6)进行判别,该区地震动峰值加速度值为 0.1g,相应地震基本烈度为 VII 度区。

表 5 铁路工程地质原位测试规程法液化判别

孔号	土层范围/m	土名	实测锥尖阻力/MPa	地下水位 $d_w$ /m	地下水位埋深影响系数 $\alpha_1$	上覆非液化土层厚度 $d_u$ /m	上覆非液化土层厚度影响系数 $\alpha_3$	修正系数 $\alpha_4$	基准值	锥尖阻力临界值/MPa	是否液化
EJ120	1.5~3.8	粉土	1.43	0.6	1.09	0.7	1.065	0.45	5	2.61	是
	10.5~11.7	粉沙	1.80	0.6	1.09	7.4	0.730	1.00	5	3.98	是
	11.7~18.8	粉沙	4.55	0.6	1.09	7.4	0.730	1.00	5	3.98	否
	18.8~19.6	粉沙	8.30	0.6	1.09	7.4	0.730	1.00	5	3.98	否
EJ158	1.3~6.5	粉土	2.18	1.1	1.06	1.3	1.035	0.45	5	2.46	是
	6.5~14.4	粉沙	5.12	1.1	1.06	1.3	1.035	1.00	5	5.48	是
	14.4~15.9	粉土	3.52	1.1	1.06	1.3	1.035	0.45	5	2.46	否
	15.9~17.4	粉沙	4.48	1.1	1.06	1.3	1.035	1.00	5	5.48	是
	17.4~20.1	粉土	3.19	1.1	1.06	1.3	1.035	0.45	5	2.46	否
EJ150	2.4~4.8	粉沙	2.14	1.1	1.06	0.0	1.100	1.00	5	5.82	是
	4.8~9.6	粉沙	4.50	1.1	1.06	0.0	1.100	1.00	5	5.82	是
	9.6~20.0	粉土	3.79	1.1	1.06	0.0	1.100	0.45	5	2.62	否

注:该工程为线性带状工程,沿线静力触探孔较多。

表 6 Olsen 法液化判别

孔号	深度/m		土名	密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	试验 深度/m	总应力 $\delta_0$ / (kN·m <sup>-2</sup> )	有效应力 $\delta'_0$ / (kN·m <sup>-2</sup> )	震级比例 系数 $MSF$	循环应力比 $CSR/(0.1g)$	锥尖阻力 $q_c$ /MPa	摩阻比 $R_f$	修正锥尖 阻力 $q_{ci}$ /kPa	抗液化 强度 $CRR$	安全 系数	是否 液化
	自	至													
EJ120	1.5	3.8	粉土	1.9	3.8	72.2	42.2	1.2	0.67	1.43	0.81	104.1	1.3	1.9	否
	10.5	11.7	粉沙	1.9	11.7	222.3	113.3	1.2	0.77	1.80	1.02	65.7	0.7	0.9	是
	11.7	18.8	粉沙	1.9	18.8	357.2	177.2	1.2	0.79	4.55	0.74	121.4	1.5	1.9	否
	18.8	19.6	粉沙	1.9	19.6	372.4	184.4	1.2	0.79	8.30	0.44	215.3	2.8	3.5	否
EJ158	1.3	6.5	粉土	1.9	6.5	123.5	69.5	1.2	0.69	2.18	0.66	112.0	1.4	2.0	否
	6.5	14.4	粉沙	1.9	14.4	273.6	137.0	1.2	0.78	5.12	0.65	163.5	2.1	2.6	否
	14.4	15.9	粉土	1.9	15.9	302.1	150.5	1.2	0.78	3.52	0.88	105.3	1.3	1.6	否
	15.9	17.4	粉沙	1.9	17.4	330.6	164.0	1.2	0.79	4.48	0.70	126.2	1.6	2.0	否
EJ150	17.4	20.1	粉土	1.9	20.1	381.9	188.3	1.2	0.79	3.19	1.07	81.5	0.9	1.1	否
	2.4	4.8	粉沙	1.9	4.8	91.2	54.2	1.2	0.66	2.14	0.68	130.8	1.6	2.5	否
	4.8	9.6	粉沙	1.9	9.6	182.4	97.4	1.2	0.73	4.50	0.60	182.5	2.3	3.2	否
	9.6	20	粉土	1.9	20.0	380.0	191.0	1.2	0.78	3.79	0.73	95.9	1.2	1.5	否

同标贯法类似, Olsen 法理论性更强, 而规范法容易理解操作, 两种判别方法所需参数不同 (表 7)。

表 7 基于静力触探计算参数对比

方法	计算参数
规范法	地震动峰值加速度
	实测贯入阻力
	地下水位
	上覆非液化土层厚度 黏粒含量
Olsen 法	地面峰值加速度
	上覆荷载(总应力和有效应力)
	地震震级
	修正的锥尖阻力
	摩阻比
地下水位	

两者均以地震动峰值加速度为评判基准, 主要的区别在于, Olsen 采用了上覆荷载, 更加合理地考虑了震级的影响, 并对锥尖阻力进行了归一化修正。经研究, 黏土颗粒对地震液化具有阻滞作用。目前国内规范法黏粒含量的测定一般均通过室内土工试验确定。工程中由于取样的代表性不足, 人为因素对黏粒含量测定结果影响较大, 是造成液化判别结果离散性大的主要原因之一。

由上述分析可知, 结果同标贯法一致, 国内规范法偏于保守, 上部土层为液化, 而 Olsen 法除个别为液化, 其它基本判为不液化。两者不一致的结论在其它工程中也经常出现, 但总体来说规范法偏于安全。究其原因可能是人们在决定液化强度曲线时, 往往带有一定的主观性, 液化强度比并不真正代表地震时饱和沙土的极限状态, 而

它本身隐含有多大的安全储备也并不确切, 用它来进行液化可靠度分析显然是不适宜的。因此, 应进一步探讨液化势评价的概率估计方法。

### 5.3 动三轴液化估算法实例

某长江大桥表层为饱和沙土, 试验地点为南北两岸的桥址处, 其指标见表 8。试验采用 3 个固结压力, 分别为 80、140、200 kPa, 一个固结比为  $K_c = 1$ 。破坏标准采用轴向应变值 5%。

表 8 沙样指标

沙样编号	取土深度/m	相对密度	土类
S-1	6.3 ~ 6.45	0.70	细沙
N-1	12.7 ~ 12.9	0.65	粉沙

饱和沙土的液化结果以液化应力  $\sigma_d/(2\sigma'_0)$  和破坏振次  $\lg N_f$  的关系曲线见图 2。

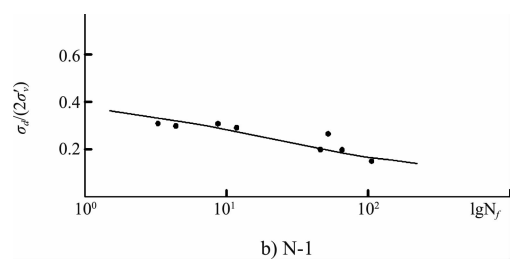
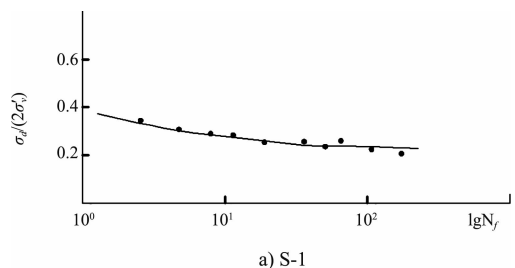


图 2  $\sigma_d/(2\sigma'_0)$  与  $\lg N_f$  关系曲线

### 1) 抗液化剪力的计算。

根据前述公式计算不同的振次下的抗液化剪应力  $\tau$  见表 9。

表 9 不同振次下抗液化剪应力

沙样 编号	$\sigma_d/(2\sigma'_v)$		上覆土层自重 有效应力 $\sigma'_v/kPa$	$\tau/kPa$	
	$N_f=10$	$N_f=20$		$N_f=10$	$N_f=20$
S-1	0.290	0.275	57.33	10.81	10.25
N-1	0.260	0.228	109.22	17.89	16.69

### 2) 平均剪应力的计算。

该场地的地震反应分析计算结果见表 10。

表 10 地震反应分析计算结果

50 a 超越概率/%	地震烈度	地面 PGA/gal	等效振次 $N$
10	6.7	213.15	10
2	7.9	494.51	20

据 PGA 值可计算出地震作用时的等效平均剪应力  $\tau_e$ ，计算结果见表 11。

表 11 地震时土层中的平均剪应力

层位 编号	深度/m	$\tau_e/kPa$	
		超越概率 10%	超越概率 2%
S-1	6.3~6.45	15.84	36.75
N-1	12.7~12.9	27.66	64.17

注：为 50 a 超越概率。

将表 10 中沙层的抗液化剪应力  $\tau$  与表 11 中的等效平均剪应力  $\tau_e$  进行比较，就可对液化的可能性作出判断。即： $\tau_e > \tau$  时，可能液化； $\tau_e < \tau$  时，不可能液化。最终判断该长江大桥场地的饱和和沙层在未来遭受到 50 a 基准期内超越概率为 10% 和 2% 的地震作用时可能发生液化。

## 6 结论

1) 基于原位测试的国内规范法是根据以往地震经验统计得出的经验方法，缺乏理论基础，但简单实用，工程人员易掌握。在初判中较全面地考虑了场地震基本烈度、土层年代、黏粒含量、地下水等重要因素，最终判定从设防烈度、黏粒

含量、标贯击数或静探阻力等试验结果等因素出发，对液化及其程度作出定量计算判定划分，并采取对应的处理措施。

2) NCEER 法、Robertson 及 Olsen 法，均利用等效周期应力比 CSR 与地基土的周期阻力比 CRR 进行比较来判定沙土液化，充分考虑了场地条件、黏粒含量、震级等多种影响因素，对标贯击数和静探阻力进行修正后进行地震应力的比较。是目前国外广泛采用的方法。

3) 国内规范法判定较国外保守，在涉外工程中，充分理解设计意图，可采用不同的判别方法，满足不同的需求，准确预测判定沙土液化，并做好相应的处理措施，强化海外工程理念。

4) NCEER 法或 Robertson 法等在国内的规范规程中还没有明文规定，这需要有更多的工程实践去检验和总结。其合理的运用可促进港工勘察人员熟悉及掌握沙土液化判定的国际标准体系，进一步提升勘察业务的核心竞争力。

## 参考文献：

- [1] JTS 146—2003 水运工程抗震设计规范[S].
- [2] Youd T L, Idriss I M. 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: ASCE, 2001, 127(4): 297-313.
- [3] 童立元, 涂启柱, 刘松玉, 等. 基于多功能地震波孔压静力触探的唐山地区沙土液化特性再调查试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(S1): 2 782-2 791.
- [4] TB 10041—2003 铁路工程地质原位测试规程[S].
- [5] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division: ASCE, 1971, 97(9): 1 249-1 273.

(本文编辑 武亚庆)