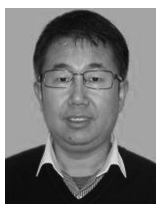


· 地基与基础 ·



欧美标准砂土液化判别方法解读和优化

万中喜, 祁丽华

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要:多数海外项目执行欧美标准, 欧美砂土液化判别方法跟中国标准存在较大差异而且比较复杂, 国内大多勘察技术人员对欧美标准砂土液化判别方法尚掌握不全面、不会正确应用。对照中国水运行业抗震标准, 对欧标 Eurocode 8 和美国 Seed 简化法砂土液化判别方法进行了解读。结合工程案例对 3 种判别方法进行对比分析, 揭示了与中标的差异, 并系统展示了欧美判别标准全貌, 包括其原理、判别条件、判别程序、相关特点等。在此基础上, 针对欧美判别方法存在的缺陷和问题, 在符合标准和误差允许前提下进行简化, 使利用欧美标准判别液化更加简单易行。

关键词:砂土液化判别; 欧标 Eurocode 8; Seed 简化法

中图分类号: U 6; TU 43

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0363-07

Interpretation and optimization of sand liquefaction evaluation methods in Eurocode and America standard

WAN Zhong-xi, QI Li-hua

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Most overseas projects are carried out according to European standards and America standards. The European and American sandy soil liquefaction evaluation methods are quite different from Chinese standard and are more complex, which are not yet accepted widely and applied correctly by most domestic surveying technicians. This paper interpretes the *Code for Seismic Design of Water Transport Engineering*, the *BS EN 1998-5: 2004*, *Eurocode 8*, and the *America Seed method* on the sand liquefaction evaluation. A comparative analysis of the three discrimination methods combined with engineering cases reveals the differences with the winning bid, and systematically displays the full picture of European and American discrimination standards, including its principles, discrimination conditions, discrimination procedures, and related characteristics. On this basis, in view of the defects and problems existing in the European and American discriminant method, the evaluation methods have been simplified under the premise of conforming to the standard and error permissible, making them easier to use the European and American standards to discriminate liquefaction.

Keywords: sand liquefaction evaluation; BS EN 1998-5: 2004, Eurocode 8; simplified Seed method

砂土液化判别是勘察报告必选项和重要内容之一, 海外项目也不例外, 而大多海外项目执行欧美标准, 欧洲砂土液化判别标准为 Eurocode 8^[1], 美国岩土标准 ASTM 系列中无砂土液化判别的有关规定, 业内普遍认可和使用 Seed 简化法^[2], 欧美砂土液化判别标准同中国标准存在

较大差异且复杂繁琐, 广大国内勘察技术人员需要全面了解和掌握该方法和特点。近年业内多名学者对欧美砂土液化判别方法进行了研究, 陈养强^[3]结合国标《建筑抗震设计规范》对欧标 Eurocode 8 进行研究, 唐世栋^[4]、李涛涛等^[5]和符滨等^[6]对照国标对美国 Seed 简化法进行研

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 万中喜(1971—), 男, 硕士, 正高工, 从事岩土工程勘察设计。

究,但从展示海外标准特点、系统性和优化可操作性方面还不够。另外在揭示中外标准判别结果保守程度对比方面,本文的研究成果与前人不完全一致。

本文对照水运行业抗震标准^[7],对基于标准贯入击数的欧美砂土液化判别标准进行了对比分析和解读,较系统地展示了欧美砂土液化判别方法的特点、操作程序和与中标判别结果的差异,并对其存在的不足和缺陷进行优化,便于业内同行系统掌握和正确使用。欧美标准均包含除标贯以外如静力触探、剪切波速等其他判别数据,但标贯是最为广泛使用的数据,且中标以标贯判别为主,为便于对照,本文只介绍基于标贯数据的欧美标准。

1 中欧美液化判别方法

1.1 中标

据中国水运行业标准 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》,当地面以下 20 m 内存在饱和砂土、粉土或混合土层时,应首先初步判别是否液化,对初步判别为可液化的土层,应采用标准贯入试验判别法作进一步判别。

初步判别:当满足下列条件之一时,可判为不液化,否则为可液化土,需要进一步判别。

- 1)地质年代为第四纪晚更新世(Q_3)及其以前时;
- 2)土的粒径小于 5 mm 颗粒含量的质量百分率 $\leq 30\%$ 时;
- 3)对粒径小于 5 mm 颗粒含量质量百分率 $>30\%$ 的土,当采用六偏磷酸钠作为分散剂的测定方法测得的粉土,其粒径小于 0.005 mm 的黏粒含量的百分率,7 度、8 度和 9 度分别不小于 10%、13%和 16%时。

进一步判别满足式(1)时应判为液化土:

$$N_{63.5} < N_{cr} \tag{1}$$

式中: $N_{63.5}$ 为未经杆长修正的饱和土标准贯入锤击数实测值; N_{cr} 为液化判别标准贯入锤击数临界值:

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] (3\%/M_c)^{0.5} \tag{2}$$

式中: N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值,按表 1 取值; β 为调整系数,设计地震第 1 组取 0.80,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深度(m);当地面位于水下时, d_w 取 0; M_c 为黏粒含量百分率(%),小于 3% 或为砂土时,取 3%。

表 1 液化判别标准贯入锤击数基准值

设计基本地震加速度	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	0.40g
液化判别标准贯入锤击数基准值 N_0	7	10	12	16	19

1.2 欧标

据欧洲规范 BS EN 1998-5: 2004, Eurocode 8,当地下水位埋藏较浅,且水位以下分布较连续或厚层松散砂土(含或不含粉/黏细粒)时,应进行液化判别。

初步判别:1)当饱和砂土埋藏深度大于 15 m 时,浅基础地基可不考虑液化。2) α 为 A 类场地设计地震加速度与重力加速度 g 之比; S 为按场地类别取值的土壤参数,依据 BS EN 1998-1: 2004,按表 2 取值。当 $\alpha S < 0.15$ 且至少满足以下条件之一时可忽略液化风险:①砂土中黏粒含量大于

20%且塑性指数大于 10;②砂土中粉粒含量大于 35%,且其标贯击数 $N_{1(60)} > 20$;③纯净砂土,且其标贯击数 $N_{1(60)} > 30$ 。

表 2 土壤参数按场地类别取值

场地类别	S	
	表面波震级 $M_s > 5.5$	表面波震级 $M_s \leq 5.5$
A	1.00	1.00
B	1.20	1.35
C	1.15	1.50
D	1.35	1.80
E	1.40	1.60

表 2 中场地类别 A~E,按表 3 确定。

表 3 场地类别

场地类别	岩土层特征描述	岩土层参数		
		$v_{s,30}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$N/\text{击}$	C_u/kPa
A	岩层或类似岩石地层, 表面覆盖层不超过 5 m	>800	—	—
B	几十米厚极密实砂土、砾石, 或坚硬黏性土, 且其强度随深度增加	$360\sim 800$	>50	>250
C	几十至几百米厚密实-中密砂土、砾石, 或硬塑黏性土	$180\sim <360$	$15\sim 50$	$70\sim 250$
D	松散至中密的砂土、砾石, 或软至硬塑黏性土	<180	<15	<70
E	表层为厚 5~20 m、 $v_s<360\text{ m/s}$ 的冲积土层, 下覆 $v_s>800\text{ m/s}$ 基岩	—	—	—

$N_{1(60)}$ 为实测标贯击数经上覆压力和能量修正后的标准化击数, 可表示为式(3):

$$N_{1(60)} = C_N N_{60} \tag{3}$$

其中: $C_N = (100/\sigma'_{vo})^{0.5}$ (4)
式中: C_N 为 100 kPa 基准有效上覆压力修正系数; σ'_{vo} 为标贯点处的有效上覆压力 (kPa); N_{60} 为能量修正系数, 欧标规范没有具体规定该系数的取值方法, 可参考下述美标取值。

进一步判别采用基于标贯击数的图解法, 见图 1。图 1 中, σ'_{vo} 为标贯点处的有效上覆压力; τ_e 为地

震剪应力, 可通过式(5)计算:

$$\tau_e = 0.65\alpha S \sigma'_{vo} \tag{5}$$

式中: σ'_{vo} 为标贯点处总上覆压力。

应用图 1 进行液化判别: 1) 公式(5)的适用深度不超过 20 m。2) 当坐标点位于曲线左侧上方时, 判为液化点; 当坐标点位于曲线右侧下方时, 判为不液化。3) 考虑安全系数 $\lambda = 1.25$, 计算时, $N_{1(60)} \times 1.25$ 或 $\tau_e/\sigma'_{vo} \times 0.8$ 。4) 图 1 适用于表面波震级为 7.5 级情况, 当为其他震级时, 纵坐标应乘以表 4 中的 CM 系数。

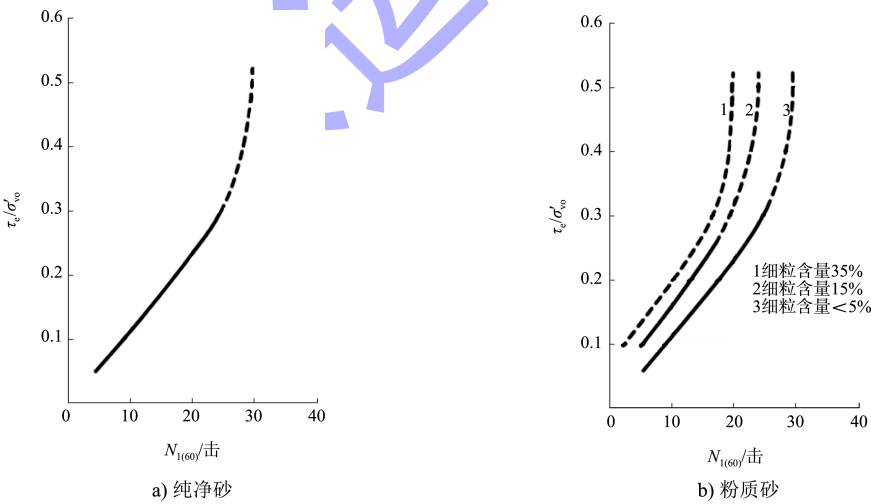


图 1 $M_s = 7.5$ 时地震循环应力 τ_e 比与循环应力比 $N_{1(60)}$ 关系曲线

表 4 系数 CM 取值					
M_s	5.5	6.0	6.5	7.0	8.0
CM	2.86	2.20	1.69	1.30	0.67

1.3 美标

美国 ASTM 标准体系中没有砂土液化相关规定, 美国业内广泛认可和使用 Seed 简化法。

Seed 简化法的基本原理是将由地震所引起的等效循环应力 CSR 与砂土的抗液化阻力 CRR 进行比较。采用公式判别法,当安全系数 $F_s > 1$ 时,则判为不液化;反之,判为液化,如式(6):

$$\begin{cases} CRR_{7.5} = 1/[34 - N_{1(60)}] + N_{1(60)}/135 + 50/[10 \cdot N_{1(60)} + 45]^2 - 1/200 & (N_{1(60)} < 30 \text{ 的纯净砂}) \\ CRR_{7.5} = 1/[34 - N'_{1(60)}] + N'_{1(60)}/135 + 50/[10 \cdot N'_{1(60)} + 45]^2 - 1/200 & (\text{细粒含量} > 5\% \text{ 的砂土}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $N_{1(60)}$ 为将实测标准贯入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, $N'_{1(60)}$ 为在 $N_{1(60)}$ 基础上进一步按细粒含量修正后的标贯击数值:

$$N_{1(60)} = N_M C_N C_E C_B C_R C_S \quad (8)$$

$$N'_{1(60)} = \alpha + \beta N_{1(60)} \quad (9)$$

式中: N_M 为实测标贯击数(击); C_N 为上覆压力修正因子,同式(4); C_E 为能量修正因子; C_B 为钻孔直径修正因子; C_R 为杆长修正因子; C_S 为取土器修正因子; α 和 β 为细粒含量修正因子,各因子可参照表 5 取值。

表 5 修正因子取值

修正因子	适用条件	取值
C_N	-	$(100/\sigma'_{vo})^{0.5}$
		$C_N \leq 1.7$
C_E	环形锤	0.5~1.0
	安全锤	0.7~1.2
	自动落锤	0.8~1.3
C_B	钻孔直径 65~115 mm	1.00
	钻孔直径 150 mm	1.05
	钻孔直径 200 mm	1.15
C_R	杆长 <3 m	0.75
	杆长 3~<4 m	0.80
	杆长 4~6 m	0.85
C_R	杆长 6~<10 m	0.95
	杆长 10~30 m	1.00
C_S	标准采样器	1.00
	无衬管采样器	1.1~1.3

$$F_s = (CRR_{7.5}/CSR) \cdot MSF \quad (6)$$

式中: $CRR_{7.5}$ 为震级为 7.5 级的抗液化阻力,基于 SPT 法的砂土抗液化阻力可用式(7)表示:

续表 5

修正因子	适用条件	取值
α	细粒含量 $F_c \leq 5$	0
	$5 < F_c < 35$	$\exp(1.76 - 190/F_c^2)$
	$35 \leq F_c$	5.0
β	细粒含量 $F_c \leq 5$	1.0
	$5 < F_c < 35$	$0.99 + F_c^{1.5}/1\,000$
	$35 \leq F_c$	1.2

式(6)中, CSR 为由地震引起的等效循环应力,可由式(10)计算。

$$CSR = (\tau_{av}/\sigma'_{vo}) = 0.65(\alpha_{max}/g)(\sigma_{vo}/\sigma'_{vo})r_d \quad (10)$$

式中: τ_{av} 为地震引起的平均剪应力; σ_{vo} 为总上覆土压力; σ'_{vo} 为有效上覆土压力; a_{max} 为地面峰值水平加速度; r_d 为地震剪应力随深度折减系数,可由式(11)计算:

$$\begin{cases} r_d = 1.0 - 0.007\,65z & (z \leq 9.15 \text{ m}) \\ r_d = 1.174 - 0.026\,7z & (9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: z 为地表以下深度(m)。

式(6)中, MSF 为震级比例因子,可采用式(12)计算:

$$MSF = 10^{2.24/M_W^{2.56}} \quad (12)$$

式中: M_W 为地震震级。

2 中欧美液化判别方法对比

2.1 判别方法对比

判别方法对比结果见表 6。

表 6 中欧美砂土液化判别方法对比

砂土液化判别方法	基本原理	判别方式	适用范围	相关条件与指标
中标 JTS 146—2012		先根据地质年代、颗粒组成和地震烈度进行初步判别。当初步判别为可液化土层时,再根据实测标贯击数和临界标贯击数采用公式法进一步判别	1) 饱和砂土、粉土或混合土层; 2) 地面以下 20 m	1) 地震烈度; 2) 设计基本地震加速度和地震分组; 3) 地质年代; 4) 砂土颗粒组成; 5) 地下水位埋深 d_w ; 6) 实测标贯击数 N ; 7) 标贯点深度 d_s ; 8) 黏粒含量 M_c
欧标 BS EN 1998-5:2004	当地震引起的循环应力大于砂土地基抗液化阻力时,场地发生液化,反之,不液化	先根据地震参数、土壤参数、颗粒组成和标贯击数进行初步判别。当初步判别为可液化土层时,再采用由地震引起的循环应力比 τ_v/σ'_v 为纵轴、地基抗液化阻力参数 $N_{l(60)}$ 为横轴的曲线图法进一步判别	1) 地下水位埋藏较浅,且水位以下分布较连续或厚层松散砂土(含或不含粉/黏细粒); 2) 地面以下 20 m	1) 表面波震级 M_s ; 2) 设计地震加速度 α ; 3) 与场地类别有关的土壤参数 S ; 4) 砂土颗粒组成; 5) 经土覆压力、能量和杆长修正后标贯击数 $N_{l(60)}$; 6) 标贯点处的总上覆压力 σ_v 和有效上覆压力 σ'_v ; 7) 安全系数 λ
美国简化 Seed 法		采用由地震引起的等效循环应力 CSR 和地基抗液化阻力 CRR 构成的公式法判别	1) 纯净砂土或含细颗粒砂土; 2) 地面以下 23 m	1) 地震震级 M_w ; 2) 地面峰值加速度 α_{max} ; 3) 经土覆压力、能量、杆长、钻孔直径、采样器和细粒含量修正后标贯击数 $N_{l(60)}$ 和 $N'_{l(60)}$; 4) 标贯点处的总上覆压力 σ_v 和有效上覆压力 σ'_v ; 5) 标贯点深度 z
对比分析	基本原理相同	判别方式差异较大	美标未明确是否为地下水位以下的饱和砂土	中标采用实测标贯击数,判别公式中考虑了地下水位、测点埋深和黏粒含量影响;欧美标准采用修正后的标贯击数,考虑了上覆压力、锤击能量、测点埋深等影响

2.2 判别结果对比

2.2.1 钻孔信息

分别选取海域和陆域各 1 个钻孔,其相关钻孔信息见表 7。

表 7 钻孔信息

钻孔	标贯点深度/m	实测标贯击数/击	黏粒含量 (<0.005 mm)/%	细粒含量 (<.063 mm 或 <0.075 mm)/%
	0.3	5	4.0	18.0
海域 H1 钻孔,泥面以上水深 10 m,粉细砂,地下水位埋深 0 m	1.8	11	4.7	19.3
	3.3	16	3.7	12.7
	4.8	22	4.0	14.3
	6.3	29	4.4	16.0
	7.8	38	5.1	17.3
	9.3	56	2.7	11.7

续表 7

钻孔	标贯点深度/m	实测标贯击数/击	黏粒含量 (<0.005 mm)/%	细粒含量 (<.063 mm 或 <0.075 mm)/%
	2.3	3	3.5	16.5
	3.3	7	5.2	18.2
陆域 H1 钻孔,粉细砂,地下水位埋深 2 m	4.3	13	3.8	13.3
	5.3	18	6.3	15.4
	6.3	20	5.8	17.4
	7.3	30	4.6	16.8
	8.3	35	5.7	13.2

2.2.2 判别结果

各标准均按 7(0.15g)、8(0.15g)、9(0.15g) 级 3 种地震条件判别分析,判别结果见表 8。判别结果表明:相对于中标而言,欧美标准偏保守。

表 8 钻孔砂土液化判别结果

钻孔	标贯点深度/m	实测标贯击数/击	7(0.15g)			8(0.30g)			9(0.40g)		
			中标	欧标	美标	中标	欧标	美标	中标	欧标	美标
海域 H1 钻孔， 粉细砂	0.3	5	不液化	液化	不液化	液化	液化	液化	液化	液化	液化
	1.8	11	不液化	不液化	不液化	液化	液化	液化	液化	液化	液化
	3.3	16	不液化	不液化	不液化	液化	液化	液化	液化	液化	液化
	4.8	22	不液化	不液化	不液化	不液化	液化	液化	不液化	液化	液化
	6.3	29	不液化	不液化	不液化	不液化	液化	不液化	不液化	液化	不液化
	7.8	38	不液化	不液化	不液化	不液化	液化	不液化	不液化	液化	不液化
	9.3	56	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化
陆域 L1 钻孔， 粉细砂	2.3	3	液化	液化	不液化	液化	液化	液化	液化	液化	液化
	3.3	7	不液化	不液化	不液化	液化	液化	液化	液化	液化	液化
	4.3	13	不液化	不液化	不液化	液化	液化	液化	液化	液化	液化
	5.3	18	不液化	不液化	不液化	不液化	液化	液化	不液化	液化	液化
	6.3	20	不液化	不液化	不液化	不液化	液化	不液化	不液化	液化	不液化
	7.3	30	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化
	8.3	35	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化	不液化

3 欧美液化判别方法优化

结合以上对比分析，中标砂土液化判别方法简单易操作，欧美须对标贯击数进行修正，采用多个公式和图表进行判别，方法较繁琐，另外欧美标准均存在缺陷，为方便同行使用，在误差和规范允许情况下，笔者进行了适度优化。

3.1 欧标的优化

3.1.1 震级系数

震级系数 CM 表 4 中，最大震级至 8 级，超过 8 级如 8.5 级、9 级则无参考，基于已有数据进行了数据拟合，见图 2。

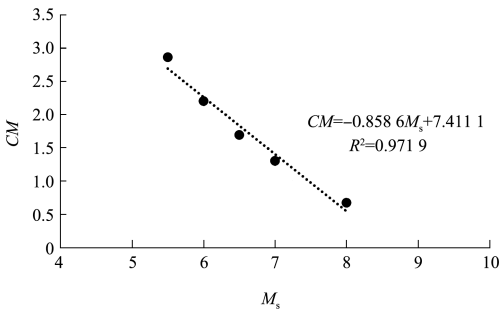


图 2 震级与修正系数关系曲线

从图 2 可得，震级修正系数与震级的关系式为：
 $CM = -0.86M_s + 7.41 \quad (R^2 = 0.97) \quad (13)$

3.1.2 作图判别法优化

欧标采用作图法判别，非常繁琐，费时费力且误差大，另外与细粒含量相关的 3 条曲线不连续，如细粒含量 10% 和 20% 的判别点则无依据曲

线，若依据细粒含量为 15% 进行判别，则产生一定误差。因此，参考美标的做法并基于欧标曲线建立了公式，见图 3。

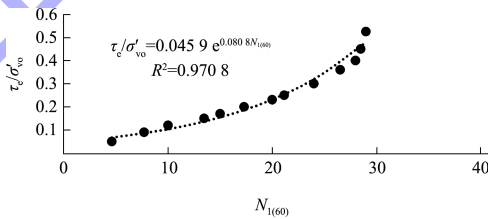


图 3 液化应力比与 $N_{1(60)}$ 关系曲线 ($M_s = 7.5$)

从图 3 可得液化应力比与 $N_{1(60)}$ 的相关公式：

$$\tau_e/\sigma'_{vo} = 0.046e^{0.08N_{1(60)}} \quad (R^2 = 0.97) \quad (14)$$

为便于区分，设由 $N_{1(60)}$ 计算的 τ_e/σ'_{vo} 为 $B_{7.5}$ ，由地震剪应力 τ_e 计算的剪应力比 τ_e/σ'_{vo} 为 A ，则液化判别安全系数 F_s 可采用式 (15) 表达：

$$F_s = A/(B_{7.5} \cdot CM) \quad (15)$$

$$A = 0.65\alpha S\sigma_{vo}/\sigma'_{vo} \quad (16)$$

$$\begin{cases} B_{7.5} = 0.046e^{0.08N_{1(60)}} & (\text{细粒含量} < 5\%) \\ B_{7.5} = 0.046e^{0.08N'_{1(60)}} & (\text{细粒含量} \geq 5\%) \end{cases} \quad (17)$$

式 (17) 中适用于细粒含量 $\geq 5\%$ 的砂土，可采用美标式 (9) 计算 $N'_{1(60)}$ 的值。这样，就实现了公式化的欧标液化判别，大大提高了岩土工程师工作的效率。

3.2 美标的优化

3.2.1 判别程序优化

美标砂土液化直接采用公式进行判别，但在

工作中发现, 采用式(7)计算 $CRR_{7.5}$ 时, 无论是纯净砂还是含细颗粒砂土, 只要 $N_{1(60)} \geq 30$ 击, 均得出异常结果。鉴于文献中也言明公式(7)仅适用于 $N_{1(60)} < 30$ 击情况, 当纯净砂 $N_{1(60)} \geq 30$ 击时, 认为就不能液化了, 笔者认为, 这种情况还适用于细粒含量大于 5% 的砂土, 因为细粒含量增加是液化的阻止因素, 因此建议, 把这个情况作为初步判别条件, 即无论是纯净砂土还是非纯净砂土, 当 $N_{1(60)} \geq 30$ 击时, 直接判为不液化。

3.2.2 标贯击数修正优化

简化 Seed 法考虑了多个修正参数 (N_M 、 C_N 、 C_E 、 C_B 、 C_R 、 C_S), 见式(8), 修正时较为繁琐且容易出错, 考虑两个原因: 第一, 美标 ASTM D6066-96 标准^[8]和欧标 BS EN 1998-5: 2004 标准中定义的 $N_{1(60)}$ 仅考虑上覆压力和能量两个修正因素; 第二, 一般液化点分布在浅部, 杆长修正因子和采样器修正因子是相反的, 可以相互抵消部分系数, 如标贯试验点 4 m 处杆长修正系数为 0.8, 采样器修正系数为 1.2, 有相互抵消作用, 因此, 建议使用美标时, 对于标贯击数修正, 可按 D6066-96 仅做能量和上覆压力修正, 同时, 因为国内同行已普遍采用自动脱钩法标贯设备, 其能量修正系数取 1, 这样 $N_{1(60)}$ 可仅考虑上覆压力修正:

$$N_{1(60)} = (100/\sigma'_{v0})^{0.5} \tag{19}$$

同时, 对于深度小于 3 m 的标贯击数, 还需乘以 0.75 能量修正系数。

4 结论

- 1) 欧标 Eurocode 8 砂土液化判别标准跟中标差异较大, 采用曲线图判别法, 曲线图以地震引起的循环应力比 τ_e/σ'_{v0} 为纵轴, 以地基抗液化阻力参数 $N_{1(60)}$ 为横轴。采用修正后的标贯击数 $N_{1(60)}$ 作图, 考虑了上覆压力、锤击能量的影响。
- 2) 美国 Seed 简化法砂土液化判别方法跟中标差异较大, 采用由地震引起的等效循环应力 CSR 和地基抗液化阻力 CRR 构成的公式法判别。采用

- 修正后的标贯击数 $N_{1(60)}$ 和 $N'_{1(60)}$ 计算 CRR, 考虑了上覆压力、锤击能量和测点深度的影响。
- 3) 通过实际水域、陆域工程案例对比, 在 7、8、9 度震级条件下, 深度 0~10 m 范围内, 欧美液化判别标准较中标保守。
- 4) 欧标 Eurocode 8 砂土液化判别标准中震级系数表存在缺陷, 曲线图判别法复杂繁琐, 可采用笔者优化后的公式进行判别, 便于正确高效使用。
- 5) 美国 Seed 简化法砂土液化判别中 $CRR_{7.5}$ 计算公式存在缺陷, $N_{1(60)}$ 修正复杂繁琐, 可采用笔者优化的判别程序和 $N_{1(60)}$ 修正公式, 便于正确高效使用。
- 参考文献:
- [1] CEN. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance; BS EN 1998-5: 2004[S]. Brusells: Comit  Europeende Norma lisation, 2004.

[2] YOU D T L, IDRIS 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] 陈养强. 中欧抗震规范关于地基土砂土液化的判别研究[J]. 铁道建筑技术, 2019(10): 63-68.

[4] 唐世栋, 罗立疆, 林华国. 国内外砂土液化判别方法的比较[J]. 工程勘察, 2007(4): 4-6.

[5] 李涛涛, 陶凯. 基于标贯的国内外砂土液化判别方法[J]. 工程建设与设计, 2015(5): 53-56.

[6] 符滨, 孟秋宏. 基于标准贯入测试的国内外砂土液化判别法对比分析[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(7): 340-344.

[7] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

[8] ASTM. Standard practice for determining the normalized penetration resistance of sands for evaluation of liquefaction potential: D6066-96 [S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 1997.
- (本文编辑 武亚庆)