

标贯击数液化判别方法的比较^①

刘启旺^{1,2}, 杨玉生^{1,2}, 刘小生^{1,2}, 赵剑明^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048;

2 水利部水工程建设与安全重点实验室, 北京 10048)

摘要:依据标贯击数进行液化判别的方法, 国外以 NCEER 推荐方法(改进 Seed 法)为代表, 国内以《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)为代表。NCEER 方法与国内规范方法所依据的地震液化现场调查资料不同, 采用的液化判据、反映震级影响的方法和考虑黏粒含量影响的方法也不同。将 NCEER 方法以液化临界标贯击数与深度的变化曲线表示, 并将其与国内规范方法确定的液化临界标贯击数随深度的变化曲线进行比较。结果表明, 在相同烈度下: 近震时, 国内规范方法偏于安全; 远震时, 对于 7.5 级以下地震, 国内规范方法偏于安全; 对于 7.5~8.5 级地震, 在一定加速度(烈度)下, NCEER 方法与国内规范方法计算液化临界标贯击数接近, 某些加速度(烈度)下 NCEER 方法偏于安全, 某些加速度(烈度)下国内规范方法偏于安全。研究成果可为《水工建筑物抗震设计规范》的修订提供参考。

关键词: 砂土液化; 判别方法; 临界标贯击数

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0794-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0794

Comparison of Standard Penetration Test (SPT) Methods for Evaluating Seismic Liquefaction Potential

LIU Qi-wang^{1,2}, YANG Yu-sheng^{1,2}, LIU Xiao-sheng^{1,2}, ZHAO Jian-ming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. Key Laboratory on Construction and Security of Water Projects of Ministry of Water Resources, Beijing 100048, China)

Abstract: For the standard penetration test (SPT) method for evaluating seismic liquefaction potential, the liquefaction potential evaluation method recommended by the National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) is typically applied abroad; however, methods recommended by the code for geological investigation of water resources and hydropower engineering (GB50487-2008) and that for seismic design of buildings (GB50011-2010) are used domestically. These methods different in the following aspects: (1) earthquake liquefaction field investigation data; (2) liquefaction criterion; (3) method for reflecting the influence of earthquake magnitude; and (4) method for considering the influence of fines content. In this paper, the method recommended by NCEER is expressed by the curve of critical liquefaction blow count versus depth; a comparison is made between this curve and that determined by domestic methods. Under the same intensity, domestic methods tend to be safe for near earthquakes and distant earthquake with magnitude less than 7.5. For earthquakes with magnitudes of 7.5~8.5, critical liquefaction blow

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划暨 973 计划课题(2013CB036404); 国家自然科学基金青年项目(51209234); 中国水科院优秀青年科研专项(GE0145B102014)

作者简介: 刘启旺(1962-), 男, 高工, 主要从事土石坝和地基抗震研究工作。E-mail: liuqw@iwahr.com。

counts calculated by using the NCEER method are close to that calculated by domestic methods under specific acceleration, which tends to be safe depending on the specific acceleration. For distant earthquakes (design earthquake group 2), under the magnitude of $M=8.0$ and seismic intensity of VII and IX, the critical liquefaction blow counts calculated by the different methods are very close; under the intensity of VIII, the NCEER method tends to be safe. For distant earthquakes (design earthquake group 3), the domestic methods tend to be safe with magnitude not more than 8.0. With the magnitude of $M=8.5$ and acceleration $a_{\max}=0.3g$, the critical liquefaction blow counts calculated by the different methods are close. The NCEER method tends to be safe with acceleration less than $0.3g$, whereas the domestic methods tend to be safe with that more than $0.3g$. For domestic methods, under distant earthquakes (design earthquake group 2), the critical liquefaction blow counts calculated by the different methods are close with a difference of less than 2.5 blow counts. The method used in the code for seismic design of buildings (GB50011-2010) tends to be safe with acceleration not less than $0.3g$. The above research results can provide a reference for code revision of the aseismic design of hydraulic structures.

Key words: sand liquefaction; evaluation method; critical SPT blow counts

0 研究背景

1964 年日本新潟地震和美国阿拉斯加地震发生了大量由于砂土液化而导致的严重震害,引起了工程界的普遍重视。此后有关土的动力液化特性,土体地震液化判别方法和地基抗液化处理措施成为学术界和工程界的重要研究课题。在土地地震液化判别方面,经过长期的改进和完善,基于地震液化调查资料建立的液化判别经验方法已经比较成熟,在工程中得到了广泛的应用。在国外以 Seed 简化法为代表,国内以《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)方法为典型代表。

1971 年 Seed^[1] 提出了判别砂土液化的简化方法,Seed 等^[2-4] 相继对该法进行了改进和完善;1985 年美国国家研究委员会组织召集 36 位著名专家组成工作小组,提交了一份改进 Seed 简化方法的报告^[5],此后该法逐渐成为北美和世界上许多地区进行砂性土液化判别的标准方法;1996 年美国国家地震工程研究中心(NCEER)组织专家组对之前 10 余年的液化判别研究成果和资料进行系统的总结,进一步对 Seed 简化法进行了改进和完善^[6]。

在我国邢台地震(1966 年)年和通海地震(1970 年)砂土震害调查资料基础上,《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11-74)首次在国内规范中给出了采用标贯击数进行砂土液化的判别,后来又进一步根据 1975 年海城地震和 1976 年唐山地震砂土和粉土地震液化的调查资料,对判别式进行修改,并将规范更名为《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89)。《建筑抗

震设计规范》(GB50011-2001)进一步对 15~20 m 深度的液化判别问题作出了具体的延伸的规定,即 15~20 m 深度范围内仍按 15 m 深度处的液化临界标贯击数进行判别。《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)又依据我国学者采用概率液化判别的研究成果,并考虑规范的延续性,以对数曲线的形式表达液化临界标贯击数随深度的变化。我国《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)中液化临界标贯击数随深度的变化在 5~15 m 之间,与《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)相同,当深度小于 5 m 时采用 5 m 处的液化临界标贯击数。

Seed^[3] 曾将 Seed 简化法与《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11-74)方法进行过比较,结果显示 7.5 级地震时两者确定的抗液化强度比 CRR 与标贯击数关系曲线十分一致。《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)中,以 VIII 度区(峰值加速度为 $0.2g$)为例对 Seed 简化法和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)计算确定的液化临界击数随深度变化进行过比较研究。结果表明:设计地震 1 组(近震)时,在 12 m 深度内两者液化临界标贯击数较接近,按照《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)给出的比较图中的比例量测换算可知,在 12~20 m 深度范围内,两者液化临界标贯击数最大相差约 3.3 击,《建规》偏于安全;设计地震第 2、第 3 组(远震)时,在 13 m 以内标贯击数最大相差 1.8 击,在 13~20 m 深度范围内最大相差 6.2 击。随着新的震害资料的补充和新的研究成果的积累,不同的方法都有了新的发展,并进行了相应的改进。如 NCEER

对 Seed 简化法计算中的应力折减系数 γ_d 、标贯基数较小时纯净砂的抗液化强度比基准线 $CRR_{7.5}$ 、上覆有效应力归一系数 C_N 、震级比例系数 MSF 等进行了调整,并增加考虑上覆有效应力对抗液化强度比的影响的修正。但已有的研究中没有全面考虑各方法最新调整的因素,还未对调整后的方法进行全面的对比分析。因此,有必要对采用调整后的方法判别砂土地震液化的安全性进行比较研究。

2008年汶川“5·12”大地震之后,水利部组织相关科研院所进行《水工建筑物抗震设计规范》的修订工作。为了给“场地和地基”的修订提供参考,结合水利水电规划设计研究总院主持的《高土石坝抗震性能及抗震安全研究》课题,将 NCEER 推荐的标贯击数液化判别方法与国内规范方法进行系统的对比研究。研究中对依据不同方法确定的液化临界标贯击数随深度的变化曲线进行比较,给出不同方法应用于液化判别时的安全性评价。本文仅给出有关纯净砂的研究及结果,考虑细粒($<0.074\text{ mm}$)含量或黏粒($<0.05\text{ mm}$)含量影响的比较结果将另文阐述。

1 方法概述

1.1 NCEER 推荐方法^[6]

NCEER 推荐方法采用下式判别液化

$$CSR \geq CRR \tag{1}$$

式中, CSR 为地震引起的水平剪应力比; CRR 为可液化土层的抗液化强度比。

水平剪应力比 CSR 采用下式计算:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0.65(a_{max}/g)(\sigma_{v0}/\sigma'_{v0})r_d \tag{2}$$

式中: a_{max} 为地表地震动峰值水平加速度; g 为重力加速度; σ_{v0} 为竖向总应力; σ'_{v0} 为竖向有效应力; r_d 为应力刚度折减系数,随土层性质、地震震级及震中距不同而变化。

NCEER 对计算 γ_d 的方法进行了修正,对于一般工程, γ_d 值建议采用:

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765z & \text{for } z \leq 9.15\text{ m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z & \text{for } 9.15\text{ m} < z \leq 23\text{ m} \end{aligned} \tag{3}$$

抗液化强度比可采用室内原状样试验方法或现场试验方法确定,工程实践中主要采用现场原位试验方法。NCEER 推荐采用图 1 所示曲线确定抗液化强度比。NCEER 对纯净砂在标贯击数较小时对应的抗液化强度比 CRR 曲线进行了调整(图 1 中

坐标原点附近的虚线)。

对于一般工程,为便于编程,图 1 中纯净砂对应的抗液化强度比 $CRR_{7.5}$ 可采用下式表示:

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

式(4)适用于 $(N_1)_{60} < 30$ 的情况,对 $(N_1)_{60} \geq 30$ 的纯净砂视为不液化土。

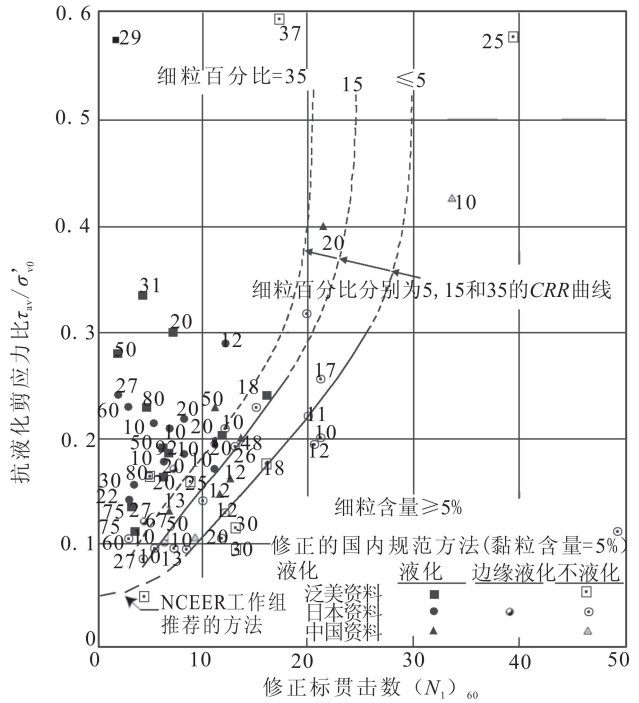


图 1 抗液化剪应力比与修正标贯击数的关系(震级 $M=7.5$)^[6]

Fig.1 Relationship between the shear stress ratio and corrected blow count ($M=7.5$)

图 1 还给出了考虑细粒($<0.074\text{ mm}$)含量 FC 对抗液化剪应力比与修正标贯击数关系曲线的影响。为便于编程计算,采用式(5)来计算不同细粒含量时,对试验标贯击数进行修正后得到等效洁净砂的标贯击数,以考虑细粒含量的影响。

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \tag{5}$$

式中: α 、 β 的值按细粒含量 FC 来确定。当 $FC \leq 5\%$ 时, $\alpha = 0$, $\beta = 1.0$; 当 $FC \geq 35\%$ 时, $\alpha = 5.0$, $\beta = 1.2$; 当 $5\% < FC < 35\%$ 时, α 、 β 采用下式计算:

$$\begin{aligned} \alpha &= \exp[1.76 - (190/FC^2)], \\ \beta &= [0.99 + (FC^{1.5}/1000)] \end{aligned} \tag{6}$$

除细粒含量和级配特征影响标贯击数 $(N_1)_{60}$ 外,标贯测试系统参数和上覆有效应力对 $(N_1)_{60}$ 也

有影响,采用下式校正:

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S = C_N C_{60} \quad (8)$$

式中: N_m 为实测标准贯入击数; C_N 为上覆有效应力归一系数; C_E 为击锤能量修正系数; C_B 为钻孔直径修正系数; C_R 为钻杆长度修正系数; C_S 为护壁校正系数。

C_E 、 C_B 、 C_R 和 C_S 实际上是标贯试验测试系统的校正系数,对于一定的测试系统,其对应的值是确定的。 C_N 是将不同上覆有效应力下测得的标贯击数归一到 100 kPa 时的校正系数,在上覆有效应力 $\sigma'_{v0} \leq 200$ kPa 时,NCEER 建议采用式(9)计算 C_N 值,其最大值不超过 1.7。

$$C_N = (P_a / \sigma'_{v0})^{0.5} \quad (9)$$

式中: P_a 为大气压力; σ'_{v0} 为钻孔试验时的有效上覆压力。

当震级 $M \neq 7.5$ 或上覆有效应力 $\sigma'_{v0} > 100$ kPa 时,应考虑不同震级和上覆有效应力对液化判别的影响,NCEER 推荐采用下式定义抗液化安全系数 FS :

$$FS = (CRR_{7.5} / CSR) MSF \cdot K_\sigma \quad (10)$$

$$MSF = 10^{2.24 / M^{2.56}} \quad (11)$$

$$MSF = (M / 7.5)^{-2.56} \quad (12)$$

$$K_\sigma = (\sigma'_{v0} / P_a)^{f-1} \quad (13)$$

式中: $CRR_{7.5}$ 为抗液化强度比,由图 1 或式(4)确定; MSF 为震级比例系数,当 $M < 7.5$ 时, MSF 的下限采用式(11)计算,上限采用式(12)计算,当 $M_w > 7.5$ 时,采用式(11)计算 MSF ; K_σ 为上覆应力校正系数; f 为与场地条件(包括相对密度、应力历史、沉积年代和超固结比等)有关的指数, f 的取值见表 1。

表 1 不同相对密度对应的 f 值^[6]

Table 1 The value f versus relative density

相对密度 $D_r / \%$	≤ 40	40~60	≥ 80	
f	0.8	0.8~0.7	0.7~0.6	0.6

1.2 国内规范的方法

我国规范采用下式判别液化

$$N < N_{cr} \quad (14)$$

式中: N 为实测标贯击数; N_{cr} 为液化临界标贯击数。

《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(下文简称《建规》)采用下式计算液化临界标贯击数:

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3\% / \rho_c} \quad (15)$$

式中: N_{cr} 为液化判别标准贯入锤击数临界值; N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值; d_s 为饱和土标准贯入点深度(m); d_w 为地下水位(m); ρ_c 为黏粒含量百分率,当小于 3% 或为砂土时应采用 3%; β 为调整系数,设计地震第一组取 0.80,第二组取 0.95,第三组取 1.05。

《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)(下文简称《水规》)采用下式计算液化临界标贯击数

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3\% / \rho_c} \quad (16)$$

式中: ρ_c 为土的黏粒含量质量百分率(%),当 $\rho_c < 3\%$ 时, ρ_c 取 3%; N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值; d_s 为当标准贯入点在地面以下 5 m 以内的深度时,应采用 5 m 计算。

式(16)适用于 15 m 以内,对于 15~20 m 之间,在实用中通常采用《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)建议的公式:

$$N_{cr} = N_0 (2.4 - 0.1d_w) \sqrt{3\% / \rho_c} \quad (17)$$

1.3 NCEER 方法与国内规范方法的差异

《水规》和《建规》方法与 NCEER 方法所依据的地震液化现场调查资料不同,包括地震动强度、地表峰值加速度、发生液化的深度和土性条件等均有差异。此外,采用的液化判据、反映震级影响的方法和考虑细粒(黏粒)含量影响的方法也不相同。要对二者进行比较分析,应将液化判据统一到相同的表现形式,并且要确定震级、烈度与地震分组的大致对应关系。

1.3.1 液化判别的思路

Seed 简化法是在地震中液化与未液化场地地震害调查的基础上,给出了震级 $M = 7.5$ 、上覆有效应力 $\sigma'_{v0} = 100$ kPa 时液化与未液化的抗液化强度比分界线。当 $\sigma'_{v0} \neq 100$ kPa 时,应先将试验标贯击数修正到 100 kPa 再进行液化判别。当震级 $M \neq 7.5$ 、上覆有效应力 $\sigma'_{v0} > 100$ kPa 时,采用震级比例系数和上覆有效应力校正系数考虑这些因素的影响。

建筑抗震设计规范中则依据不同地震烈度(地表峰值加速度),给出近震和远震(或设计地震分组)情况下的液化判别标贯击数的基准值,并给出公式计算不同试验点深度和地下水埋深下的液化临界标贯击数,再与试验标贯击数进行比较,判别液化可能性。

1.3.2 反映震级影响的方法

在地表峰值加速度(烈度)相同的条件下,较大震级、较远震中距的地震(远震)的影响与较小震级、

较近震中距的地震(近震)的影响相比,尽管地面峰值加速度可能比较接近,但在频率成分和持续时间上会有较大差异。远震的低频率成分丰富,持续时间长,近震高频成分相对丰富,持续时间短。对于一般的覆盖层地基,在地震导致液化方面,远震的作用明显大于近震。

在相同地表峰值加速度(烈度)下,《水规》以近震和远震来反映震级和震中距对液化临界标贯击数的影响,《建规》以设计地震分组来反映震级和震中距对液化临界标贯击数的影响,NCEER方法则采用震级比例系数来反映不同震级对液化临界曲线的影响。《建规》中的“设计地震1组”对应于《水规》中的“近震”,《建规》中的“设计地震2组”大致与《水规》中的“远震”对应。因此,要将NCEER方法和国内规范方法进行对比,需要确定震级、烈度与地震分组的大致对应关系。

2 以深度与液化临界标贯击数关系表示 NCEER 方法的步骤

震级 $M=7.5$ 时上覆应力 $\sigma'_{v0} < 100$ kPa 采用 NCEER 方法确定液化临界标贯击数,如下:

(1) 给定地表峰值加速度 a_{max} ,通过式(2)计算不同深度处的地震循环剪应力比 CSR ;

(2) 由于要计算液化临界标贯击数,则需要使土体抗力与地震剪应力相等,即可令 $CRR_{7.5} = CSR$;

(3) 依据图1或式(4)计算 $(N_1)_{60}$,所获得的 $(N_1)_{60}$ 即为上覆有效应力为 100 kPa 时的液化临界标贯击数 N_{cr} ;

(4) 采用下式将液化临界标贯击校正到相应深度,获得相应深度下的液化临界标贯击数 N_{cr} 。

$$N_{cr} = (N_1)_{60} / C_N \quad (18)$$

当震级 $M \neq 7.5$ 、上覆有效应力 $\sigma'_{v0} > 100$ kPa 时,NCEER 推荐采用式(10)考虑震级、上覆有效应力对液化判别的影响。因此,当震级 $M \neq 7.5$ 或上覆应力 $\sigma'_{v0} > 100$ kPa 时,在步骤(2)中,应采用震级比例系数 MSF 和上覆应力校正系数 K_s 对地震循环剪应力比进行校正,即令:

$$CRR_{7.5} = CSR / (MSF \times K_s) \quad (19)$$

再按照步骤(3)和(4)确定相应深度处的液化临界标贯击数 N_{cr} 。

3 标贯击数液化判别方法的比较研究

3.1 震级、烈度与地震分组的对应关系

根据地震资料统计分析,我国 1980 年烈度表采

用表2所示的经验关系。对于中浅源地震,震中烈度与震级的大致对应关系见表3^[7-8]。根据表2及表3的经验关系,可得地面峰值加速度、地震烈度与震级(近震或远震)的大致对应关系(表4)。

表2 地面峰值加速度 a_{max} 与烈度 I 的经验关系^[7-8]

a_{max}/g	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4
I	6.6	7.2	7.6	8.2	8.6

地表峰值加速度与烈度的经验关系: $lg a_s = 0.31 \pm 0.15$

表3 震中烈度 I_0 与震级 M 对照表^[7-8]

I_0	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
M	4	4½	5	5½	6½	6¾	7¼	8	8½

震中烈度与震级 M 的经验关系: $M = 0.58I_0 + 1.5$

表4 地震烈度 I 、地面峰值加速度 a_{max} 与震级 M 的对应关系

Table 4 Relationship between intensity I , peak ground acceleration a_{max} and magnitude M

a_{max}/g	0.1	0.15	0.20	0.3	0.4
烈度 I	6.6	7.2	7.6	8.2	8.6
对应近震	5.0~5.5	5.5~6.0	6.0	6.0~6.5	6.5~7.0
震级远震	>6.0~6.5	>6.5~7.0	>7.0	>7.0~7.5	>7.5~8.0

3.2 标贯击数液化判别方法的比较研究

为对 Seed 简化法与国内规范方法进行对比,以均质砂层为例进行研究。假定地下水埋深以上砂层天然容重为 18 kN/m³,地下水埋深以下砂层饱和容重为 19 kN/m³。

由于依据 NCEER 方法确定液化临界标贯击数随深度的变化曲线时,上覆有效应力 $\sigma'_{v0} > 100$ kPa 时,需要采用式(19)对地震循环剪应力比进行校正,其中 K_s 值与相对密度 D_r 有关,当上覆有效应力 $\sigma'_{v0} > 100$ kPa 时, D_r 越大 K_s 越小,由式(19)计算的抗液化强度比 $CRR_{7.5}$ 越大,相应的计算液化临界标贯击数越大。因此,本节首先考察相对密度对液化临界标贯击数的影响程度,选择用于 NCEER 方法与国内规范方法进行对比的相对密度,依据确定的相对密度按照 NCEER 方法计算确定液化临界标贯击数与深度关系曲线,再将其与按照国内规范方法确定的液化临界标贯击数随深度变化曲线进行对比分析。

3.2.1 相对密度对液化临界标贯击数的影响

表5和图2给出了当上覆有效应力 $\sigma'_{v0} > 100$ kPa(9 m 以下),地表峰值加速度为 0.4g 时,相同震

表 5 不同相对密度下 NCEER 方法计算液化临界标贯击数的比较 ($a_{max}=0.4g$)

Table 5 Comparison of critical SPT blow counts under different relative densities using the NCEER method ($a_{max}=0.4g$)

深度/m	$(N_{cr})_{D_r \approx 60\%} - (N_{cr})_{D_r \leq 40\%}$				$(N_{cr})_{D_r \geq 80\%} - (N_{cr})_{D_r \approx 60\%}$			
	M=5.5	M=6.5	M=7.5	M=8.5	M=5.5	M=6.5	M=7.5	M=8.5
9.0~15.0	0.0~0.9	0.0~0.8	0.0~0.5	0.0~0.2	0.0~0.9	0.0~0.8	0.0~0.5	0.0~0.8
15.0~20.0	0.9~1.6	0.8~1.6	0.5~1.1	0.2~0.6	0.9~1.6	0.8~1.5	0.5~0.9	0.2~0.5

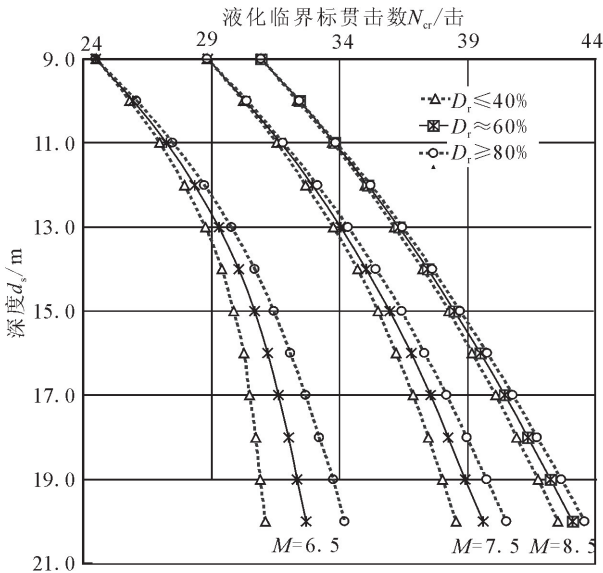


图 2 相对密度对液化临界标贯击数的影响 ($a_{max}=0.4g$)

Fig.2 The impact of relative density on critical SPT blow counts ($a_{max}=0.4g$)

级、不同相对密度计算液化临界标贯击数的对比情况:

(1) 在相同震级下,相对密度越大,计算液化临界标贯击数越大;

(2) 震级在 6.5~8.5 之间, $D_r \leq 40\%$ 时,计算液化临界标贯击数比 $D_r \approx 60\%$ 时小 0~1.6 击,当 $D_r \geq 80\%$ 时,计算液化临界标贯击数比 $D_r \approx 60\%$ 时大 0~1.6 击。

当地面峰值加速度为其他值时,计算液化临界标贯击数对比情况与 0.4g 时相似,最大相差基本在 1.6~1.7 击以内,限于篇幅,本文不再给出相关图表。

因此,进行上覆有效应力对抗液化强度的校正时,相对密度对 NCEER 方法计算液化临界标贯击数的影响相对来说比较小。实际工程中,易液化砂土通常处于松散或中密状态,紧密状态的砂层通常不易液化。本文在依据 NCEER 方法计算液化临界标贯击数随深度的变化关系曲线时,取相对密度 $D_r \approx 60\%$ 。

3.2.2 标贯击数液化判别方法的比较

将 NCEER 方法以深度与液化临界标贯击数的关系表示,并结合震级与烈度、地震分组的关系,用 NCEER 方法与国内规范方法分别计算液化临界标贯击数,并进行对比。计算 K_e 时,按 $D_r \approx 60\%$ 取 f 值,采用公式 $MSF = 10^{224} / M_w^{2.56}$ 计算震级比例系数。图 3 给出了地表峰值加速度 a_{max} 为 0.1g、0.15g、0.2g、0.3g 和 0.4g 时,液化临界标贯击数随深度变化的对比情况。

(1) 《水规》与《建规》的比较

表 6 为采用《水规》与《建规》计算液化临界标贯击数的差异情况。由图 3 和表 6 可知:

表 6 《水规》与《建规》的比较 (5~20 m)

Table 6 Comparison of N_{cr} using “water code” and “building code” (5~20 m)

a_{max}/g	$(N_{cr})_{水规} - (N_{cr})_{建1}$	$(N_{cr})_{水规} - (N_{cr})_{建2}$
0.1	-0.3~1.2	0.9~3.3
0.15	-1.6~0.4	-0.8~1.6
0.2	-1.1~1.3	-1.0~1.9
0.3	-2.2~1.1	-3.5~0.3
0.4	-1.3~2.5	-3.8~0.8

① 在地表峰值加速度 $a_{max}=0.1g \sim 0.4g$ 之间,《水规》(近震)与《建规》(设计地震 1 组)计算液化临界标贯击数比较接近,相差在 2.5 击以内;

② 在地表峰值加速度分别为 0.1g、0.15g、0.20g、0.30g 和 0.40g 时,采用《水规》(远震)与《建规》(设计地震 2 组)计算液化临界标贯击数差值分别不超过 3.3、1.6、1.9、3.5 和 3.8 击, $a_{max}=0.3g \sim 0.4g$ 时,《建规》方法偏于安全。

(2) 《水规》与 NCEER 方法的比较

表 7 给出了《水规》(远震)与 NCEER 法计算液化临界标贯击数的差异。由图 3 和表 7 可知,当地表峰值加速度 $a_{max}=0.1g \sim 0.4g$,近震时采用《水规》计算液化临界标贯击数明显大于采用 NCEER 方法,近震时《水规》偏于安全。相同地表峰值加速度下,《水规》(远震)与 NCEER 方法比较分析的汇总结果见表 8。

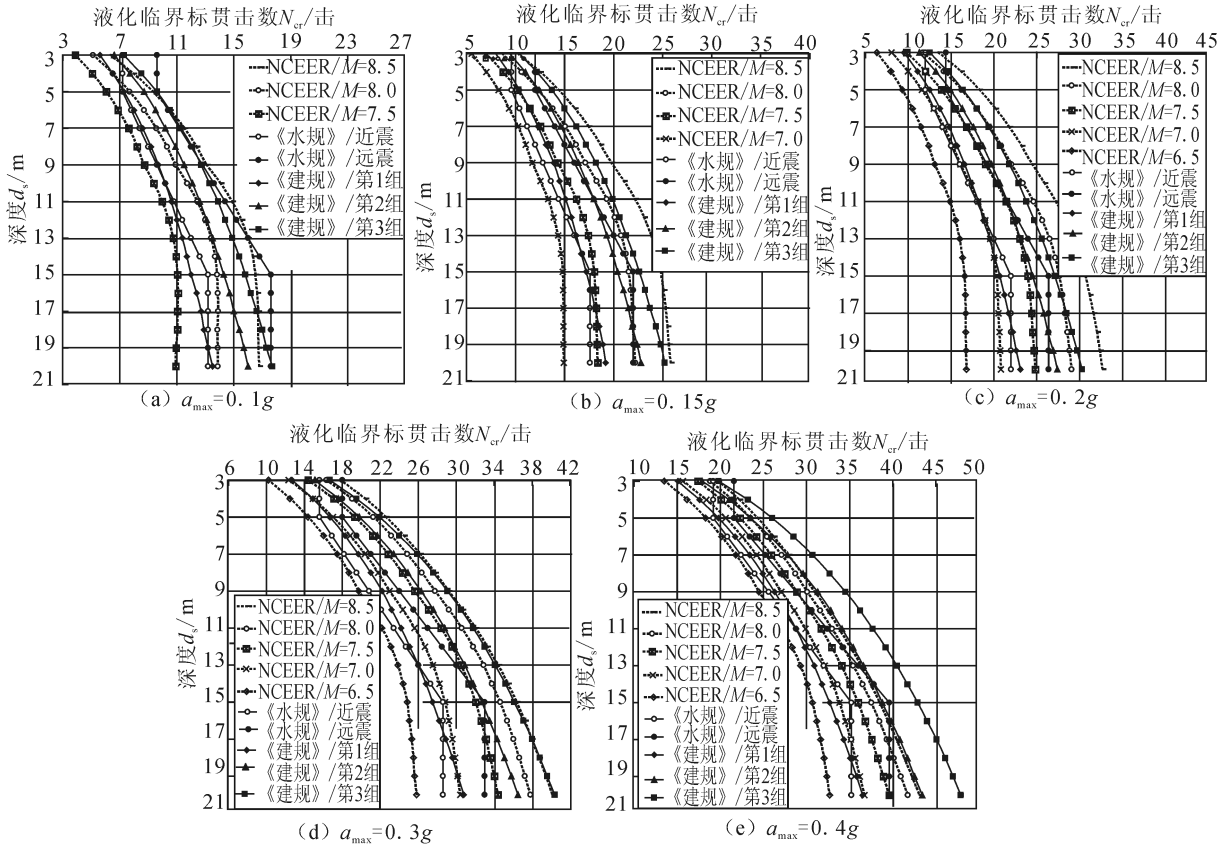


图3 不同地震峰值加速度时液化临界标贯击数随深度变化的对比

Fig.3 Variation of critical SPT blow counts of liquefaction with depth under different a_{max}

表7 《水规》(远震)与 NCEER 方法比较

Table 7 Comparison of N_{cr} using "water code" (for far earthquake) and NCEER method

a_{max}/g	$M=6.0$	$M=6.5$	$M=7.0$	$M=7.5$	$M=8.0$	$M=8.5$
0.10	8.0~14.6	6.5~11.9	5.0~9.3	3.6~6.7	1.7~3.8	-0.5~1.1
0.15	-	5.6~10.4	3.7~7.2	1.5~4.0	-1.3~0.5	-2.4~-4.2
0.20	-	-	2.6~6.1	0.6~2.5	-3.0~-1.2	-6.3~-3.9
0.30	-	-	0.6~4.2	-1.8~1.0	-4.8~-1.6	-3.4~-7.1
0.40	-	-	-	-0.8~3.6	-2.0~2.1	-3.5~1.1

(3) 《建规》与 NCEER 方法的比较

表9为《建规》(设计地震2、3组)与NCEER方法计算液化临界标贯击数的差异情况。由图3和表9可知,当地表峰值加速度 $a_{max}=0.1g\sim 0.4g$,近震时采用《建规》计算液化临界标贯击数明显大于采用NCEER方法计算液化临界标贯击数,近震时《建规》偏于安全。相同地表峰值加速度(烈度)下,《建规》(远震)与NCEER方法比较分析的汇总结果见

表8 《水规》与 NCEER 方法比较分析结果汇总

Tab 8 Comparison results of "water code" method and NCEER method

a_{max}/g	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4
近震	《水规》方法偏于安全				
远震	$M=8.5$ 时, N_{cr} 相差1.1击以内,震级 $M\leq 8.0$ 时,水规偏于安全	$M=8.0$ 时, N_{cr} 相差1.3击以内,震级 $M\geq 8.0$ 时, NCEER方法偏于安全	$M=7.5$ 时, N_{cr} 相差2.5击以内,震级 $M\leq 7.5$ 时水规方法偏于安全,震级 $M\geq 8.0$ 级时, NCEER方法偏于安全	$M=7.5$ 时, N_{cr} 相差1.8击以内,震级 $M\leq 7.0$ 时,水规方法偏于安全,震级 $M\geq 7.5$ 时, NCEER方法偏于安全	$M=7.5$ 时, N_{cr} 相差2.1击以内,震级 $M\geq 7.5$ 时, NCEER方法偏于安全

表10。

4 结论

对国外液化判别中广泛采用的 NCEER 推荐方

法(改进 Seed 法)(以液化临界标贯击数与深度的变化曲线表示 NCEER 方法的液化判别标准)、国内《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)中的标贯击数法、《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中

表 9 《建规》(远震)与 NCEER 比较

Table 9 Comparison results of "building code" method (for far earthquake) and NCEER method

a_{max}		M					
		6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
0.10g	设计地震 2 组	5.9~13.0	5.1~10.3	3.9~7.7	2.6~5.1	0.1~2.1	-2.5~0.3
	设计地震 3 组	6.6~14.7	5.8~12.0	4.6~9.4	3.4~6.8	1.5~3.8	-1.1~0.0
0.15g	设计地震 2 组	-	5.2~11.2	3.9~7.9	1.8~4.4	-1.5~0.8	-4.6~-0.8
	设计地震 3 组	-	6.2~13.6	4.9~10.3	3.4~6.8	0.5~3.0	-2.6~0.2
0.20g	设计地震 2 组	-	-	3.2~6.6	0.1~2.6	-3.3~-0.4	-6.2~-2.2
	设计地震 3 组	-	-	4.5~9.5	2.4~5.5	-0.9~1.2	-3.7~-1.0
0.30g	设计地震 2 组	-	-	2.8~6.1	0.2~2.1	-2.0~-1.2	-3.7~-2.7
	设计地震 3 组	-	-	4.4~10.0	2.3~6.0	0.4~2.6	-1.1~0.3
0.40g	设计地震 2 组	-	-	-	0.5~3.8	-0.9~1.7	-1.9~0.4
	设计地震 3 组	-	-	-	2.4~8.3	1.0~6.2	0.0~4.8

表 10 《建规》(远震)与 NCEER 方法比较分析结果汇总

Table 10 Comparison results of "building code" method (for far earthquake) and NCEER method

a_{max}/g	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4
设计地震 1 组	《建规》方法偏于安全				
设计地震 2 组	M=8.0 时, N_{cr} 相差 2.1 击以内, 震级 $M \leq 8.0$ 时, 建规偏于安全	M=8.0 时, N_{cr} 相差 1.5 击以内, 震级 $M \geq 8.0$ 时, NCEER 方法偏于安全	M=7.5 时, N_{cr} 相差 2.6 击以内, 震级 $M \leq 7.5$ 时建规方法偏于安全, 震级 $M \geq 8.0$ 时, NCEER 方法偏于安全	M=7.5 时, N_{cr} 相差 2.1 击以内, 震级 $M \leq 7.5$ 时, 建规方法偏于安全, 震级 $M \geq 8.0$ 时, NCEER 方法偏于安全	M=8.0~8.5 时, N_{cr} 相差 1.9 击以内, 震级 $M < 8.5$ 时, 建规方法偏于安全
设计地震 3 组	M=8.5 时, N_{cr} 相差 1.1 击以内, 震级 $M \leq 8.0$ 时, 建规偏于安全	M=8.5 时, N_{cr} 相差 2.6 击以内, 震级 $M \leq 8.0$ 时, 建规方法偏于安全	M=8.0 级, N_{cr} 相差 1.2 击以内, 震级 $M < 8.0$ 时建规方法偏于安全, 震级 $M > 8.0$ 时, NCEER 方法偏于安全	M=8.5 时, N_{cr} 相差 1.1 击以内, 震级 $M < 8.5$ 时, 建规方法偏于安全	$M \leq 8.5$ 时, 建规方法偏于安全

的标贯击数法进行对比。结果表明,在相同烈度下:

(1) 近震时,国内规范方法偏于安全;

(2) 远震(设计地震 2 组)且震级 $M \leq 7.5$ 时,国内规范方法偏于安全(震级 $M = 7.5$ 、地表峰值加速度 $a_{max} = 0.3g$ 时,国内规范方法与 NCEER 方法计算结果接近,相差不超过 2.1 击);远震(设计地震 2 组)且震级 $M = 8.0$ 、烈度为Ⅶ度或Ⅷ度时国内规范方法与 NCEER 方法计算结果接近($a_{max} = 0.1g$ 时,国内规范方法偏于安全),烈度为Ⅷ度时 NCEER 方法偏于安全;远震(设计地震 2 组)且震级 $M = 8.5$ 时, NCEER 方法偏于安全($a_{max} = 0.1g$ 时,《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)与 NCEER 方法计算结果接近,相差不超过 1.1 击);

(3) 远震(设计地震 3 组)且震级 $M \leq 8.0$ 时,《建筑抗震设计规范》(GBJ5001-2010)方法明显比 NCEER 方法偏于安全(震级 $M = 8.0$, $a_{max} = 0.2g$ 时,两者计算结果接近,相差不超过 1.2 击);远震(设计地震 3 组)且震级 $M = 8.5$ 、 $a_{max} = 0.3g$ 时,《建筑抗震设计规范》(GBJ5001-2010)方法计算结果与 NCEER 方法计算结果一致,相差不超过 1.1 击, $a_{max} < 0.3g$ 时, NCEER 方法偏于安全, $a_{max} > 0.3g$

时,《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)方法偏于安全;

(4) 《水规》(近震)与《建规》(设计地震 1 组)计算液化临界标贯击数接近(相差 2.5 击以内)。在地表峰值加速度为 0.1g、0.15g、0.20g、0.30g 和 0.40g 时,采用《水规》(远震)与《建规》(设计地震 2 组)计算液化临界标贯击数差值分别不超过 3.3 击、1.6 击、1.9 击、3.5 击和 3.8 击, $a_{max} = 0.3g \sim 0.4g$ 时,《建规》方法偏于安全。即小震时《水规》方法与《建规》方法计算液化临界标贯击数比较接近,大震时《建规》方法偏于安全。

这些系统的研究成果为《水工建筑物抗震设计规范》的修订提供了依据,也可以作为实际工程中评价标贯击数法液化判别结果的参考依据。

参考文献(References)

[1] Seed H B, Idriss I M. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential[J]. J Soil Mechanics and Foundation Div, ASCE, 1971, 97(9): 1249-1273.
 [2] Seed H B. Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes[J]. J Geotech Eng Div, ASCE, 1979, 105(2): 201-225

- [3] Seed H B, Idriss I M. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes[R]. Oakland, Calif; Earthquake Engineering Research Institute Monograph, 1982.
- [4] Seed H B, Tokimatsu K, Harder L F, et al. The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations [J]. J Geotech Engrg, ASCE, 1985, 111(12): 1425-1445.
- [5] National Research Council (NRC). Liquefaction of Soils During Earthquakes[M]. Washington, D.C; National Academy Press, 1985.
- [6] T L Youd, I M Idriss, et al. Liquefaction Resistance of Soils Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF[J]. Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 8: 297-313.
- [7] 李杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992. LI Jie, LI Guo-qiang. Introduction of Earthquake Engineering [M]. Beijing: Earthquake Press, 1992. (in Chinese)
- [8] 顾淦臣, 沈长松, 岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. GU Gan-chen, SHEN Chang-song, CEN Wei-jun. Earthquake Engineering for Earth-rockfill Dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese)

(上接 793 页)

- [16] 聂庆科, 白冰, 胡建敏, 等. 循环荷载作用下软土的孔压模式和强度特征[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 724-729. NIE Qing-ke, BAI Bing, HU Jian-min, et al. The Pore Pressure Model and Undrained Shear Strength of Soft Clay Under Cyclic Loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (Supp.): 724-729. (in Chinese)
- [17] Ne Wilson, J R Greenwood. Pore Pressure and Strains After Repeated Loading of Saturated Clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11: 269-277.
- [18] 黄博, 丁浩, 陈云敏. 高速列车荷载作用的动三轴试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 195-202. HUANG BO, DING Hao, CHEN Yun-min. Simulation of High-speed Train Load by Dynamic Triaxial Tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 33 (2): 195-202. (in Chinese)
- [19] 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (11): 1742-1747. WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Study on Effect of Traffic Loading Induced Static Deviator Stress on Undrained Cyclic Properties of Saturated Soft Clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 29 (11): 1742-1747. (in Chinese)