

基于 NCEER 法与建筑抗震设计规范法的 砂土液化判别方法*

冯 波

(中交四航工程研究院有限公司, 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要:《建筑抗震设计规范》中建议的方法对深层地基土的判别结果偏于保守, NCEER 法判别计算复杂, 另外对深层地基土的判别也偏于不安全。对基于标准贯入击数的 NCEER 液化判别方法进行简化, 推导了临界锤击数的表达式, 并将其与规范法相结合, 提出改进的简化临界锤击数计算方法。该计算方法仅与计算点深度与地下水位埋深有关, 公式应用方便, 便于工程人员掌握。

关键词: 砂土; 抗震; 液化; NCEER

中图分类号: TU 43; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0159-06

Sandy soil liquefaction identifying method based on NCEER method and code for seismic design of buildings

FENG Bo

(Key Laboratory of Environmental Protection and Security of Transportation Infrastructure Projects of CCCC, CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The method suggested by *Code for Seismic Design of Buildings* is conservative for deep soils, while NCEER method is complexity for engineering practice, in addition, the calculation result is unsafe for deep soils. In this paper, the NCEER method based on standard blow number is simplified, and the expression of critical blow count is derived. The improved method based on the simplified NCEER method and code method is proposed, which can be expressed as a function of depth of water table and calculation point and easy for engineers to master.

Keywords: sand; liquefaction; earthquake; NCEER

目前, 国外使用范围较广的液化判别方法为 SEED 法, 或是以 SEED 法为基础发展的判别方法。例如 Youd 等于 2001 年 10 月发表的改进后的“简化方法”, 称为 NCEER 法, 其基本概念是先求地震作用下不同深度土处的剪应力, 再求该处发生液化所必需的剪应力(液化强度)^[1]。

我国学者在 SEED 简化判别方法的框架下, 根据人工神经网络模型与我国大量的液化和未液化现场观测数据, 得到极限状态时的液化强度比函数, 建立安全裕量方程, 利用结构系统的可靠度理论得到液化概率与安全系数的映射函数, 并

给出任一震级不同概率水平、不同地面加速度以及不同地下水位和埋深的液化临界锤击数。GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》建议的液化判别公式根据以上研究成果并考虑规范延续性修改而成^[2-5]。

规范法对深层地基土的判别结果偏于保守, NCEER 法判别计算复杂, 在实际工程应用时工程技术不好运用, 另外对深层地基土的判别也偏于不安全^[6-7]。本文借鉴文献[7]的计算方法, 对 NCEER 法与规范法进行简化并综合, 提出改进的简易判别方法。

收稿日期: 2015-12-28

*基金项目: 中国博士后科学基金(2014M562179)

作者简介: 冯波(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事地质工程、岩土工程方面的研究。

1 液化判别方法简介

1.1 NECCR 法

地震引起的等效循环应力比 CSR (cyclic stress ratio) 按式(1)计算。

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \times \frac{\alpha_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d MSF^{-1} \quad (1)$$

式中： τ_{av} 为等效循环地震剪应力； α_{max} 为地震引起的水平地面运动峰值加速度； g 为重力加速度； σ_{v0} 为总上覆压力； σ'_{v0} 为竖向有效上覆压力； r_d 为应力折减系数，Liao 等建议 r_d 用式(2)计算。

$$r_d = \begin{cases} 1.0 - 0.00765z & z \leq 9.15 \text{ m} \\ 1.174 - 0.0267z & 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

式中： MSF 为震级标定系数，NCEER 建议按表 1 确定震级标定系数值。

表 1 震级标定系数值

震级	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
MSF	2.2~2.8	1.76~2.1	1.44~1.6	1.19~1.25	1.0	0.84	0.72

以震级约为 7.5、液化或非液化场地的地震现场考察结果为依据得到的 CSR 和标准贯入击数 N_1 的关系见图 1。区分液化场地和非液化场地的分界线即为抗液化强度曲线。推荐这条曲线适用于震级约为 7.5 的地震砂土液化判别。 N_1 是将实测标准贯入击数修正到有效上覆压力约为 100 kPa、落锤能量比或效率为 60% 时的修正标准贯入击数。

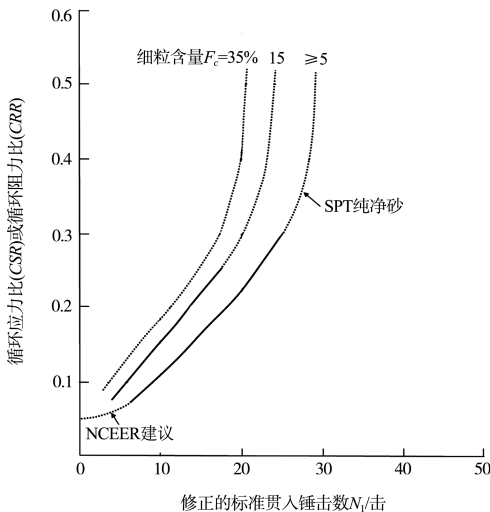


图 1 以修正标准贯入锤击数为指标的液化判别曲线

图 1 中细粒(粒径小于 0.075 mm 的颗粒)含量小于 5% 的分界限称之为砂土基本曲线，用式(3)表示。

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (3)$$

另外，图 1 中还给出了细粒含量为 15% 和 35% 的两条分界线。显然，细粒含量越高，土的抗液化强度也愈高。细粒含量对抗液化强度 CRR 的影响，Idriss 采用 SEED R B 将含细粒的砂土 $(N_1)_{60}$ 修正为等效纯净砂土 $(N_1)_{60cs}$ 的方法，按式(4)计算。

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta (N_1)_{60} \quad (4)$$

式中： α 、 β 为考虑细粒含量 F_c 的修正系数，按下述规定确定：当 $F_c \leq 5\%$ 时， $\alpha = 0$ ， $\beta = 1.0$ ；当 $5\% < F_c < 35\%$ 时， $\alpha = \exp[1.76 - (190/F_c^2)]$ ， $\beta = 0.99 + F_c^{1.5}/1000$ ；当 $F_c \geq 35\%$ 时， $\alpha = 5.0$ ， $\beta = 1.2$ 。

修正的标准贯入击数与实测标准贯入击数按式(5)换算。

$$(N_1)_{60} = C_N C_E C_B C_R C_S N_m \quad (5)$$

式中： N_m 为现场标贯击数实测值； C_N 为标贯击数按 100 kPa 的有效上覆应力进行修正的修正系数； C_E 为锤击能量修正系数； C_B 为钻孔直径修正系数； C_R 为杆长修正系数； C_S 为与取样方法有关的系数。

修正系数 C_N 按式(6)计算。

$$C_N = \begin{cases} (P_a/\sigma'_{v0})^{0.5} & \sigma'_{v0} \leq 200 \text{ kPa} \\ \frac{2.2}{1.2 + \sigma'_{v0}} & 200 \text{ kPa} < \sigma'_{v0} < 300 \text{ kPa} \end{cases} \quad (6)$$

当有效上覆压力 $\sigma'_{v0} > 300$ kPa 时，由于不同研究者建议的修正系数计算公式离散较大，NCEER 未建议相应的计算公式。这里 $P_a = 1 \text{ atm} \approx 100 \text{ kPa}$ 。另外，NCEER 建议， C_N 最大值等于 1.7。

若 $CSR > CRR$ ，砂土液化，否则，砂土不液化。

1.2 规范法

规范法对初步判断为可液化的饱和砂土或粉

土层, 采用标准贯入试验判别法作进一步判别, 当符合 $N_{63.5} > N_{cr}$ 时, 判定为液化土。其中, $N_{63.5}$ 为未经杆长修正的饱和土标准贯入锤击数实测值; N_{cr} 为液化判别标准锤击数临界值, 按式(7)计算。

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{\frac{3}{M_c}} \quad (7)$$

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, 按表 2 采用; 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的深度(m), 当地面位于地下水位以下时, 取 0; M_c 为黏粒含量百分率, 小于 3 或为砂土时, 取 3。

表 2 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/击	7	10	12	16	19

注: g 为重力加速度。

1.3 判别方法对比

以某工程为例, 场区内地震动峰值加速度为 0.20g, 设计地震分组为第 1 组, 地震动反映谱特征周期为 0.35 s, 相应地震基本烈度为Ⅷ度。

场地范围内, 表层为平均厚度约 8 m 的吹填土, 以中细砂为主, 含大量贝壳碎片, 局部夹粉土薄层及少量泥质, 平均标贯击数为 8 击, 其天然密度 $\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$, 地下水位深度 $d_w = 0.5 \text{ m}$ 。

表 3 为深度 0.5 ~ 8 m 范围内两种规范液化判别结果。NCEER 法判定为全部不液化, 而规范法判定结果为全部液化, 两种方法判定结果完全相反。

表 3 不同方法液化判别结果对比

标贯深度/m	实测击数/击	NCEER 法			规范法	
		CSR	CRR	是否液化	N_{cr}	是否液化
0.5	4	0.062	0.086	否	5.2	是
2.0	6	0.104	0.115	否	9.1	是
3.5	8	0.115	0.146	否	11.8	是
5.0	10	0.119	0.159	否	14.0	是
6.5	9	0.121	0.130	否	15.7	是
8.0	11	0.121	0.143	否	17.2	是

2 液化判别方法简化

2.1 NECCR 法简化

1) 循环阻力比 CRR 简化。

不考虑震级标定, CRR 与 $(N_1)_{60}$ 关系见图 2。

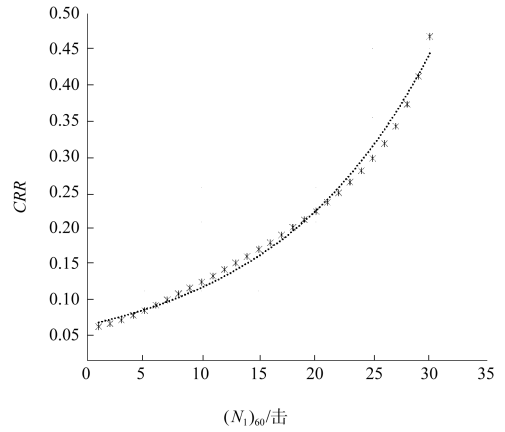


图 2 CRR 与 $(N_1)_{60}$ 的关系

图 2 拟合曲线可用式(8)表示:

$$CRR = 0.0513 e^{0.0719(N_1)_{60}} \quad (8)$$

其中, $R^2 = 0.9916$, 满足工程计算要求。

2) 应力条件简化。

为方便计算, 取土体密度为 1.8 t/m^3 , 取水的密度为 1.0 t/m^3 , 不考虑上覆有效应力的变化范围, 则 C_N 可用式(9)表示:

$$C_N = (P_a / \sigma'_{v0})^{0.5} = \frac{10}{\sqrt{10d_w + 8z}} \quad (9)$$

因此, 修正后的锤击数可表示为式(10):

$$(N_1)_{60} = \frac{10}{\sqrt{10d_w + 8z}} N \quad (10)$$

本文研究对象为砂土, 不考虑黏粒含量的影响, $(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60}$ 。

因此, CSR 可简化为式(11):

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \times \frac{\alpha_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d = 0.65 \times \frac{\alpha_{max}}{g} \cdot \frac{18z}{10d_w + 8z} r_d \quad (11)$$

3) 临界锤击数求解。

由式(8)可求得临界锤击数表达式为:

$$(N_1)_{60} = 13.9 \ln \left(\frac{CRR}{0.0513} \right) \quad (12)$$

不考虑震级标定系数, 地基土液化的临界条件为 $CRR = CSR$, 可求得:

$$(N_1)_{60} = 13.9 \ln \left(\frac{CRR \cdot MSF^{-1}}{0.0513} \right) = 13.9 \ln \left(12.67 \times \frac{\alpha_{\max}}{g} \cdot \frac{18Z}{10d_w + 8Z} r_d \right) \quad (13)$$

因此，未经杆长修正的临界锤击数可表示为：

$$N_{cr} = 1.39 \sqrt{10d_w + 8Z} \ln \left(12.67 \times \frac{\alpha_{\max}}{g} \cdot \frac{18Z}{10d_w + 8Z} r_d \right) \quad (14)$$

由式(14)可知，简化后的 N_{cr} 仅与地下水位及标准贯入测试点的埋深有关，这与我国抗震规范法一致。

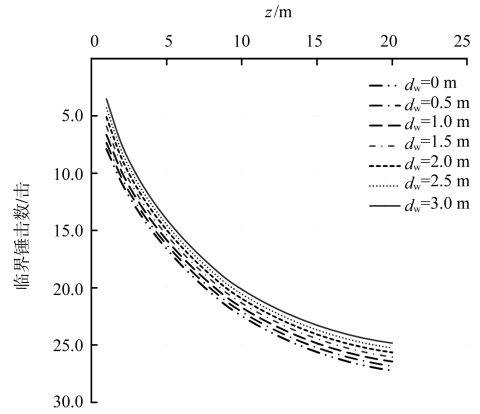
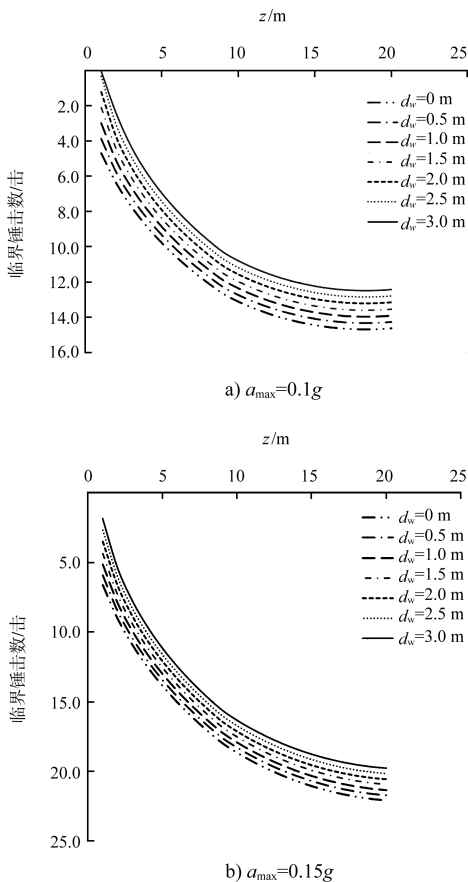
2.2 规范法简化

只考虑砂土，因此 M_c 取 3，忽略地震分组影响，取 $\beta = 1$ ，则临界锤击数可用式(15)表示。

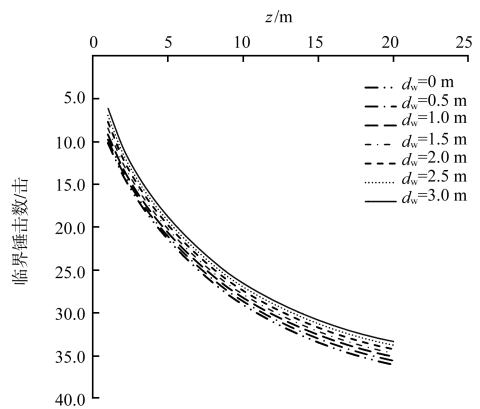
$$N_{cr} = N_0 [\ln(0.6z + 1.5) - 0.1d_w] \quad (15)$$

3 液化判别方法改进

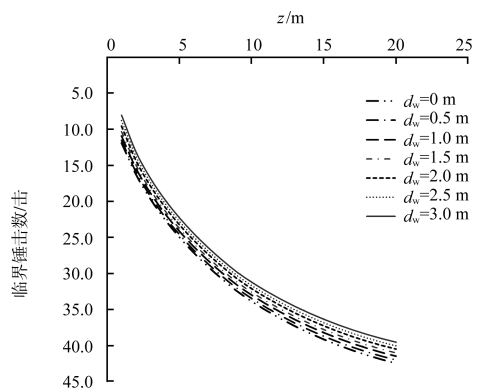
首先求出不同峰值加速度条件下，地下水位变化范围为 0~3 m 时，两种方法所得临界标贯击数的平均值（图 3）。



c) $a_{\max} = 0.2g$



d) $a_{\max} = 0.3g$



e) $a_{\max} = 0.4g$

图 3 不同峰值加速度下 3 种判别法锤击数临界值平均值随水位和深度的变化

由图 3 可知，临界锤击数平均值随深度变化近似抛物线关系。在某一峰值加速度下，不同地下水位临界锤击数 N_{cr}^n 可以采用下式进行拟合：

$$N_{cr}^n = A_0 z^2 + A_1 z + A_2 \quad (16)$$

式中： A_0 、 A_1 、 A_2 为与峰值加速度与地下水位有关的参数。根据图 4 拟合后的参数方程见表 4。

表 4 不同峰值加速度不同地下水位临界锤击数拟合方程

d_w/m	$a_{max}=0.1g$	$a_{max}=0.15g$	$a_{max}=0.2g$	$a_{max}=0.3g$	$a_{max}=0.4g$
0	$-0.0394z^2+1.2996z+4.0385$	$-0.0498z^2+1.7875z+5.7583$	$-0.0569z^2+2.1225z+6.935$	$-0.0693z^2+2.6981z+8.9929$	$-0.0784z^2+3.1207z+10.508$
0.5	$-0.0414z^2+1.3567z+3.3062$	$-0.0512z^2+1.826z+5.1515$	$-0.0579z^2+2.1477z+6.4205$	$-0.0697z^2+2.7048z+8.579$	$-0.0784z^2+3.1142z+10.161$
1.0	$-0.0437z^2+1.4211z+2.5231$	$-0.0531z^2+1.8763z+4.465$	$-0.0594z^2+2.1879z+5.8057$	$-0.0708z^2+2.7307z+8.0358$	$-0.0792z^2+3.1301z+9.6647$
1.5	$-0.0461z^2+1.4878z+1.7194$	$-0.0551z^2+1.9315z+3.7388$	$-0.0612z^2+2.235z+5.1378$	$-0.0723z^2+2.7664z+7.4205$	$-0.0804z^2+3.1576z+9.0827$
2.0	$-0.0485z^2+1.5549z+0.9074$	$-0.0572z^2+1.989z+2.9907$	$-0.0631z^2+2.2857z+4.4381$	$-0.0739z^2+2.8075z+6.7595$	$-0.0819z^2+3.192z+8.4451$
2.5	$-0.0508z^2+1.6214z+0.0935$	$-0.0593z^2+2.0473z+2.2297$	$-0.0651z^2+2.3383z+3.718$	$-0.0756z^2+2.8519z+6.0674$	$-0.0834z^2+3.2305z+7.7689$
3.0	$-0.0513z^2+1.6405z+0.4657$	$-0.0614z^2+2.1058z+1.4614$	$-0.067z^2+2.3917z+2.9845$	$-0.0774z^2+2.8982z+5.3533$	$-0.085z^2+3.2718z+7.0645$

不同峰值加速度下, A_0 、 A_1 、 A_2 值与地下水位关系见图 4。可见 A_0 、 A_1 、 A_2 值与地下水位近似成线性关系。 A_0 、 A_1 、 A_2 值拟合结果见表 5。

对某一峰值加速度下, 不同地下水位时的临界锤击数可由式(16)求得, 式中各系数按不同烈度及水位查表 5。

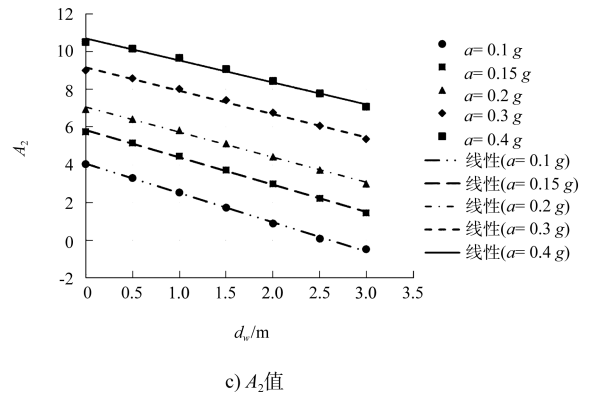
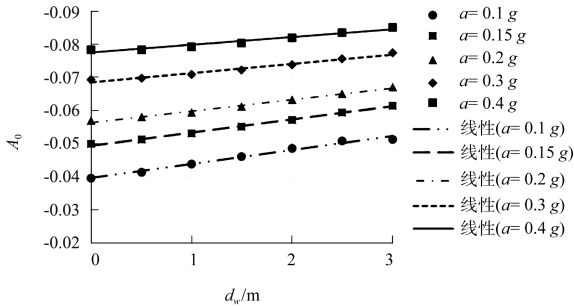
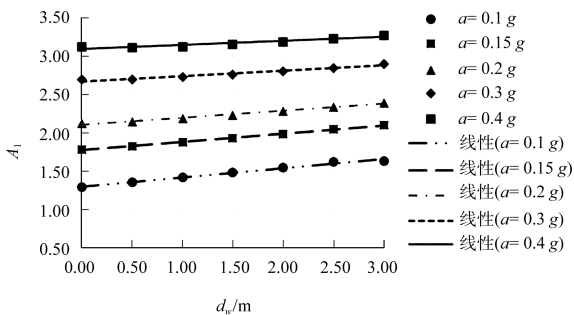


图 4 不同峰值加速度下 A_0 、 A_1 、 A_2 值与地下水位关系



a) A_0 值



b) A_1 值

表 5 A_0 、 A_1 、 A_2 值拟合结果

a_{max}	A_0	A_1	A_2
0.1g	$-0.0042d_w-0.0395$	$0.1204d_w+1.3025$	$-1.5396d_w+4.0411$
0.15g	$-0.0039d_w-0.0494$	$0.1079d_w+1.7758$	$-1.4435d_w+5.8503$
0.2g	$-0.0035d_w-0.0563$	$0.0919d_w+2.1063$	$-1.3303d_w+7.0582$
0.3g	$-0.0028d_w-0.0685$	$0.0694d_w+2.6756$	$-1.2299d_w+9.1603$
0.4g	$-0.0023d_w-0.0775$	$0.0534d_w+3.0937$	$-1.1667d_w+10.707$

以地下水位埋深 0.5 m 为例, 不同峰值加速度下, 采用本文改进的计算方法、简化的 NCEER 法与简化的规范法求得的临界锤击数见图 5。

由图 5 可知, 在地基土埋深较浅时, 本文改进的计算方法略保守; 当地基土埋深大于 2 m 时, 规范法趋于保守, 而 NCEER 法又偏于不安全, 本文改进方法则适中。

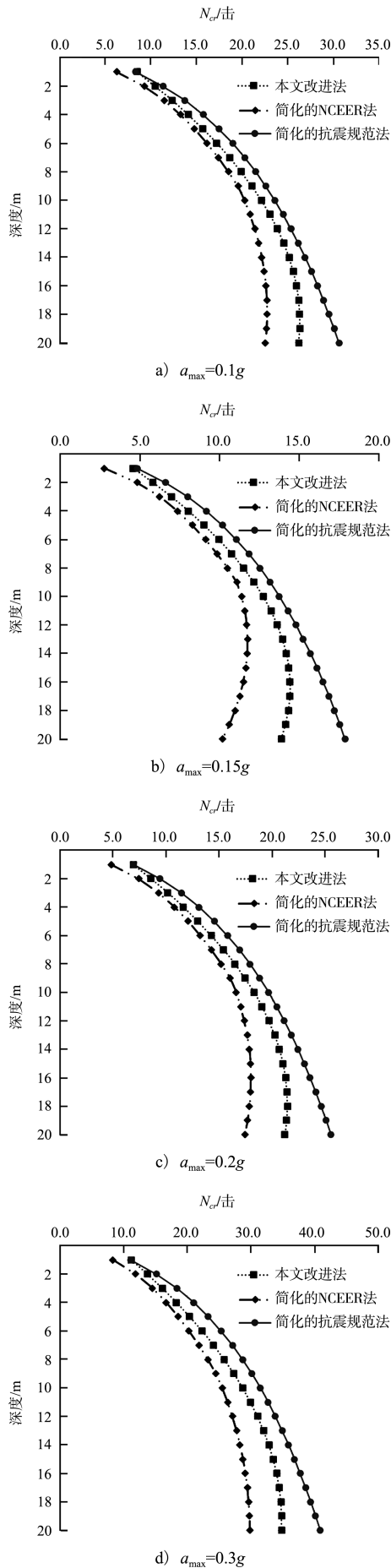


图5 不同方法液化判别结果对比

4 结论

1) 通过对循环阻力比 CRR 及应力条件的简化, 不考虑震级标定系数, 提出了简化的基于标准贯入击数的 NCEER 液化判别方法, 推导了临界锤击数的表达式。

2) 将基于简化的 NCEER 法的临界锤击数表达式与规范法相结合, 取二者平均值, 推导了改进的简化临界锤击数计算方法。该计算方法仅与计算点深度与地下水位埋深有关, 公式应用方便, 便于工程人员掌握。

3) 计算实例表明, 在地基土埋深较浅时, 本文改进的计算方法略保守, 当地基土埋深大于 2 m 时, 规范法趋于保守, 而 NCEER 法又偏于不安全, 本文改进方法则适中。

参考文献:

- [1] 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 & Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(4): 817-833.
- [2] TJ 11—1978 工业与民用建筑抗震设计规范[S].
- [3] GBJ 11—1989 建筑抗震设计规范[S].
- [4] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
- [5] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
- [6] 李颖, 贡金鑫. 国内外抗震规范地基土液化判别方法比较[J]. 水运工程, 2008(8): 30-38.
- [7] 林华国, 贾兆宏, 张立丽. 砂土液化判别方法研究[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(2): 89-93. (本文编辑 武亚庆)