DOI：10.11779/CJGE201512024

含细粒砂性土标贯液化判别方法改进研究

董　林[1, 2]，王兰民[1, 2]，夏　坤[1, 2]，袁晓铭[2]

（1. 中国地震局兰州地震研究所，甘肃 兰州 730000；2. 中国地震局工程力学研究所，黑龙江 哈尔滨 150080）

摘　要：含细粒砂性土相对于纯净砂在自然界中分布更为广泛，但是对于其液化判别，一直都是作为纯净砂液化判别的附属成果，没有得到足够的重视。回顾了中国规范方法与 NCEER 推荐方法，结合 1999 年台湾集集地震液化土与非液化土数据，发现两个方法定义纯净砂的矛盾，通过进一步对比判别结果，建议对两个方法做如下改进：①对中国规范方法，首先取消粉砂黏粒含量取 3%的规定，并且对黏粒含量不大于 3%且细粒含量大于 15%的粉砂及粉土，取 $\rho_c=F_c/4$，否则取 3%；②对 NCEER 方法，当黏粒含量不大于 3%时，只针对细粒含量大于 20%的土，才考虑调整$(N_1)_{60}$。改进之后，中国规范方法过于保守的问题得到解决，NCEER 方法对于黏粒含量不大于 3%且细粒含量大于 5%的土判别结果也不再偏于危险。

关键词：砂性土；细粒；液化；黏粒含量；标准贯入击数

中图分类号：TU43　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－4548(2015)12－2320－06

作者简介：董　林(1985－　)，男，博士研究生，助理研究员，主要从事岩土地震工程研究。E-mail: donglin408@163.com。

Improvement of SPT-based liquefaction discrimination methods for fines-containing sandy soils

DONG Lin[1, 2], WANG Lan-min[1, 2], XIA Kun[1, 2], YUAN Xiao-ming[2]

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China)

Abstract: Most of natural sands contain significant amounts of fines. However, the liquefaction discrimination methods for fines-containing sandy soils are always as a subsidiary to those for clean sands, and enough attention hasn't been paid to. The Chinese method and NCEER method are reviewed, and the discrepancy that two methods define clean sand for Chi-Chi earthquake data is found. By comparing the identification results of soils in Chi-Chi earthquake, the following improvements are suggested for the two methods: (1) for the Chinese method, firstly we should abandon the view that the clay content for silty sands is always 3%. Secondly, for the silty sands and silts with clay content not greater than 3% and fine content more than 15%, take $\rho_c=F_c/4$, if not, take 3%; (2) for the NCEER method, if the clay content is not greater than 3%, we should adjust $(N_1)_{60}$ to $(N_1)_{60cs}$ only for the soils with fine content more than 20%. In doing so, the Chinese method is not any more too conservative, and the NCEER method are no longer tending to be dangerous for the soils with clay content not greater than 3% and fine content more than 5%.

Key words: sandy soil; fines; liquefaction; clay content; blow count of SPT

0　引　　言

饱和土在地震作用下液化是导致地基及上部结构破坏的主要原因，而预测土层在指定地震作用下是否会液化是液化灾害防治的首要任务[1]。标准贯入试验由于操作简单、经验丰富，一直都是液化判别应用最为广泛的方法，其主要有中国的《建筑抗震设计规范》方法和美国的 Seed 方法。两种方法关于纯净砂液化判别式，虽然形式上差别很大，本质上却是近乎相同的[2-4]。但是关于含细粒砂性土，无论是从判别指标、适用土类等，都有显著的区别。

含细粒砂性土是由无黏性的砂粒、粉粒和有黏性的黏粒组成，包括细砂、粉砂和砂质粉土，含细粒土体液化已在世界范围内多次被发现。中国规范对于含细粒砂性土液化判别是在砂土判别式的基础上乘一个黏粒含量（粒径小于 0.005 mm）的修正系数 $\sqrt{3/\rho_c}$。而 Seed 方法是基于液化资料建立细粒含量（粒径小于 0.075 mm）分别大于 15%和 35%的 CRR-$(N_1)_{60}$液化临界曲线。两种方法看起来只是指标选取的不同，实际上最大的差别是适用土类的本质区别。

基金项目：中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项项目（2013IESLZ03）；科技部地震行业专项项目（201308015）

收稿日期：2014－09－06

中国《建筑抗震设计规范》从 89 规范开始，关于液化判别式中的黏粒含量，就规定为当小于 3 或为砂土时，均应采用 3。这就是说，对于粉砂不管黏粒含量多大，均按纯净砂判别。参照中国关于砂土、粉土分类标准，即为当 F_c＞50%时，才考虑黏粒含量。这与 Seed 将细粒含量 15%和 35%的液化临界曲线向左移，是格格不入的，须知关于纯净砂的液化临界曲线中国规范与 Seed 方法是几乎一致的。

1999 年台湾 M_W7.6 级集集地震[5]，在雾峰区、南投市、员林镇、台中港等地都出现了大面积的液化破坏现象，液化土层包含了细砂、粉砂、粉土等广泛的可液化土类。本文收集了集集地震液化点数据 164 组，非液化点数据 124 组，数据包含液化土深度、地下水位、实测标贯击数、细粒含量与黏粒含量、场地 PGA、CSR 及$(N_1)_{60}$。本文将把这些数据分别代入中国规范方法与 Seed 方法，详细对比各自方法的优缺点，并对各自不足予以改进。

1　现有标贯液化判别方法及判别结果

1.1　中国规范方法及判别结果

根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》第 4.3.4 条：当饱和土标准贯入锤击数（未经杆长修正）小于或等于液化判别标准贯入锤击数临界值时，应判为液化土。

在地面下 20m 深度范围内，液化判别标准贯入锤击数临界值可按下式计算：

$$N_{cr} = N_0\beta\left[\ln(0.6d_s+1.5)-0.1d_w\right]\sqrt{3/\rho_c} \quad 。 \tag{1}$$

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，参照该规范表 4.3.4；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。

设计地震分组的影响，是规范方法借鉴 Seed 关于震级修正系数的成果而建立的[4]。集集地震为 M_W7.6 级，与 7.5 级地震几乎一致，可以不做调整，取 β=1。另外，规范方法最高只考虑 0.4g 场地的判别，因此雾峰区及名间乡（0.789g，1g）不作判别，实际参与液化点 141 个，非液化点 121 个。

按照式（1）对所有 262 个点进行判别，液化点判别成功率 100%（141/141），非液化点判别成功率 59.5%（72/121）。若忽略砂土黏粒含量取 3 的规定，按实际黏粒含量判别，液化点判别成功率 97.87%（138/141），非液化点判别成功率 78.51%（95/121）。可见规范方法对含细粒土过于保守，若规定砂土黏粒含量按实际取值，可部分抵消这种保守的效果。

1.2　美国 NCEER 推荐方法及判别结果

Seed 等[2-3]相继发表文章，建立了包括纯净砂和含细粒砂性土的液化 CRR-$(N_1)_{60}$ 临界曲线。Youd 等于 1996 年受 NCEER（National Center for Earthquake Engineering Research）和 NSF（National Science Foundation）资助，召集了 20 位著名专家组成的工作小组，依据之前 10 a 的研究成果和资料，改进和完善了 Seed 方法，于 2001 年发表了该研究的总结报告[7]。

NCEER 推荐的纯净砂液化判别式为

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

对于含细粒砂性土，则用细粒含量 F_c 将$(N_1)_{60}$ 调整成等价纯净砂$(N_1)_{60cs}$，再代入式（2）判别。调整方法如下：

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad , \tag{3}$$

$$\alpha = 0 \qquad (F_c \leqslant 5\%) \quad , \tag{4a}$$

$$\alpha = \exp[1.76-(190/F_c^2)] \quad (5\%<F_c<35\%) \quad , \tag{4b}$$

$$\alpha = 5.0 \qquad (F_c \geqslant 35\%) \quad , \tag{4c}$$

$$\beta = 1.0 \qquad (F_c \leqslant 55\%) \quad , \tag{5a}$$

$$\beta = [0.99+(F_c^{1.5}/1000)] \quad (5\%<F_c<35\%) \quad , \tag{5b}$$

$$\beta = 1.2 \qquad (F_c \geqslant 35\%) \quad 。 \tag{5c}$$

对集集地震全部数据，液化点判别成功率 92.41%（146/158），非液化点判别成功率 94.35%（117/124）。可见，NCEER 推荐方法的判别成功率是令人满意的。

2　中国规范方法与 NCEER 方法对比

2.1　细颗粒特征指标对比

本文收集了集集地震液化土与非液化土数据[5]，建立了细粒含量 F_c 与黏粒含量 ρ_c 的关系散点图，见图 1。可以看出细粒含量随黏粒含量增大呈现增长的趋势，但是在一个较宽的带内变化。笔者划出了两个区域（实线）：ρ_c＜5%，但 F_c＞35%；F_c＜50%，但 ρ_c＞10%。这两个区域既有液化点，也有非液化点，说明单一的 F_c 或 ρ_c 都不能完全反映细颗粒含量的特征，综合细粒含量与黏粒含量判别液化应比单独使用任一指标要更为稳妥。另外，对于 ρ_c ≤3%的土，中国规范视其为纯净砂。NCEER 法则规定 F_c≤5%的土为纯净砂。笔者在图中又画出了 ρ_c ≤3%，但 F_c＞5%的区域（虚线），即这些点按照中国方法无需调整，而按 NCEER 法则必须右移，笔者称这一区域为“矛盾区”。不考虑 F_c=4%的点，其他所有数据点为“剩下区”。

2.2　“矛盾区”两个方法判别结果对比

不考虑 F_c=4%的点，对 1.1 节所有 141 个液化点、121 个非液化点，筛选出 ρ_c ≤3%的液化点 54 个、非液化点 58 个。用中国规范方法对以上点判别（忽略砂

土黏粒含量取 3 的规定），结果为液化点判别成功率 100%（54/54），非液化点判别成功率 72.41%（42/58）。接下来，同样不考虑 F_c=4%的点，对 1.2 节所有 158 个液化点、124 个非液化点，筛选出 ρ_c ≤3%的液化点 53 个、非液化点 58 个。用 NCEER 方法判别结果为液化点判别成功率 88.68%（47/53），非液化点判别成功率 94.83%（55/58），判别结果分别见图 2，3。可见中国规范方法非常保守，而 NCEER 方法略显危险。

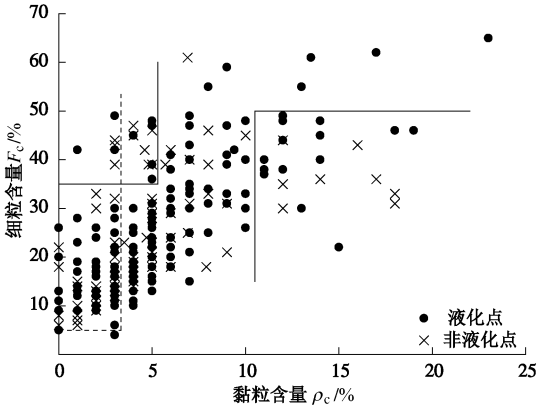

图 1 集集地震液化与非液化土细粒含量与黏粒含量散点图

Fig.1 Scatter plot of fine content with clay content for known cases of liquefaction and nonliquefaction in Chi-Chi earthquake

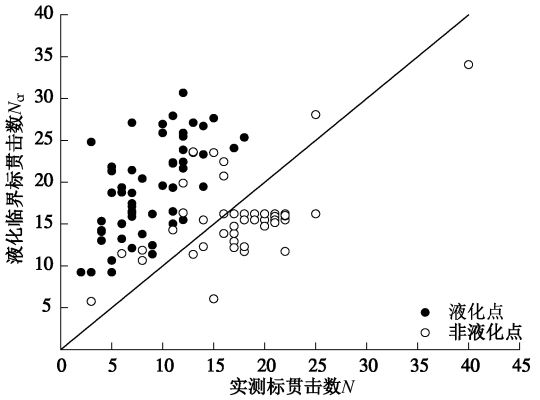

图 2 “矛盾区”中国规范方法判别结果

Fig. 2 Identification results of Chinese code method for “conflicting area”

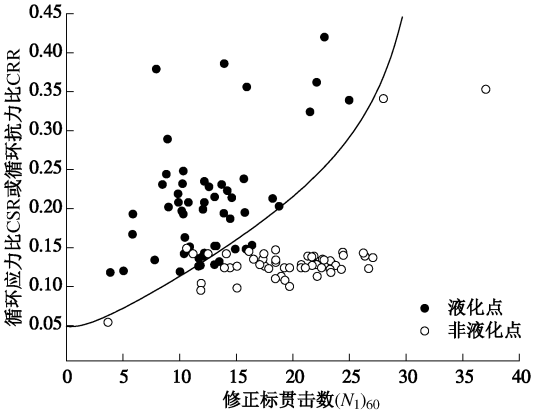

图 3 “矛盾区”NCEER 方法判别结果

Fig. 3 Identification results of method recommended by NCEER for “conflicting area”

2.3 “剩下区”两个方法判别结果对比

对 1.1 节所有 141 个液化点、121 个非液化点，经过 2.2 节筛选后剩下的 ρ_c ＞3%液化点 86 个、非液化点 63 个。用中国规范方法判别（忽略砂土黏粒含量取 3 的规定），结果为液化点判别成功率 96.51%（83/86），非液化点判别成功率 84.13%（53/63）。接下来，对 1.2 节所有 158 个液化点、124 个非液化点，经过 2.2 节筛选后剩下的 ρ_c ＞3%液化点 104 个、非液化点 66 个。用 NCEER 方法判别结果为液化点判别成功率 95.19%（99/104），非液化点判别成功率 93.94%（62/66），判别结果分别见图 4，5。

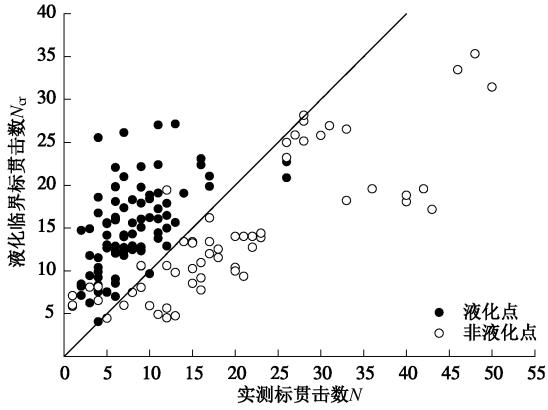

图 4 “剩下区”中国规范方法判别结果

Fig. 4 Identification results of Chinese code method for “other area”

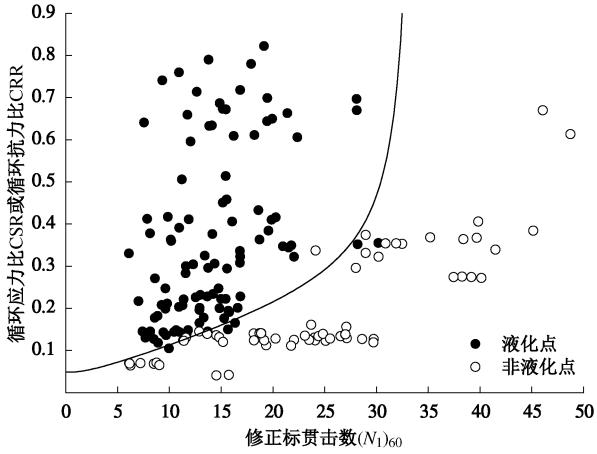

图 5 “剩下区”NCEER 方法判别结果

Fig. 5 Identification results of method recommended by NCEER for “other area”

中国规范方法误判非液化点 10 个，有 6 个点标贯击数过小，即图 4 最左端非液化点，对应图 5 也是最左端非液化点。参照 NCEER 专家组对 Seed 纯净砂曲线的修改[7]，将曲线过圆点修改到（0，0.05）。实际上对于标贯如此之小的土层，即使地震时不液化，也很可能出现其他的破坏，对其进行预处理符合安全角

表 1 “剩下区”12 个误判点详细数据

Table 1 Detailed information of 12 misclassified points in “other area”

孔号	是否液化	d_s/m	F_C/%	ρ_c/%	d_w/m	PGA/g	实测 N	N_{cr}	判别液化	CSR	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60cs}$
B1	否	7.7	24	4.7	4.0	0.084	4	6.54	是	0.068	3.91	8.51
B1	否	6.2	42	4.6	4.0	0.084	1	5.87	是	0.064	1.04	6.25
B2	否	8.7	23	3.5	4.0	0.084	3	8.08	是	0.070	2.87	7.22
B2	否	14.7	39	5.7	4.0	0.084	4	8.14	是	0.071	3.13	8.76
B3	否	9.2	39	4.8	4.0	0.084	1	7.10	是	0.070	0.93	6.12
B3	否	8.2	42	6.0	4.0	0.084	1	5.99	是	0.069	0.97	6.16
BH-4	否	16.0	18	4.0	2.7	0.165	12	19.43	是	0.145	9.06	12.89
BH-C3	否	18.8	45	4.0	14.6	0.181	9	10.55	是	0.130	5.50	11.60
BH-D2	否	18.8	45	10.0	8.2	0.181	9	10.60	是	0.123	5.34	11.41
A130-2	否	15.4	18	6.0	3.0	0.420	28	28.16	是	0.337	19.59	24.12
A130-1	是	10.9	31	8.0	3.1	0.420	26	20.86	否	0.355	21.87	30.20
A130-1	是	13.2	31	8.0	3.1	0.420	26	22.73	否	0.352	20.15	28.20

度的考量。另外 4 个误判非液化点，土层深度分别为 16.0，18.8，18.8，15.4 m，按照 NCEER 方法判别也是误判，地震时很可能已经液化，只是因为土层太深而没有地表破坏迹象而已。

NCEER 方法误判液化点 5 个，其中图 5 最右端 2 个点，对应图 4 规范方法也是最右端 2 个误判液化点，可能是选择钻孔位置时出现的失误。总体来说，中国规范方法和 NCEER 方法对于“剩下区”的判别结果都是相当成功的。

以上 12 个典型误判点的详细信息，见表 1。

3　中国规范方法与 NCEER 方法改进

3.1　数据分析

根据 2.2 节和 2.3 节的分析结果，中国规范方法和 NCEER 推荐方法对“剩下区”判别结果都相当成功，而对于“矛盾区”，则一个过于保守，一个略显危险。笔者再次对集集地震细粒含量 F_c 与黏粒含量 ρ_c 的关系散点图进行分析，发现本文收集资料基本上都是含细粒砂性土，真正意义上的纯净砂只有一个。根据《岩土工程勘察规范》GB 50021—2001 砂土分类标准（表 2），对图 1 的数据进行了重新分类，见图 6。另外，Seed 等[3]在对比中国规范与其方法时，认为 ρ_c=5%大致对应 F_c=15%～25%。笔者取中间位置，在图 6 中划出 y=4x 的直线，直线两边范围大致相等。

表 2 《岩土工程勘察规范》砂土分类

Table 2 Sand classification in China's Code for investigation of geotechnical engineering

土的名称	粒组含量
砾砂	粒径大于 2 mm 的颗粒质量占总质量 25%～50%
粗砂	粒径大于 0.5 mm 的颗粒质量超过总质量 50%
中砂	粒径大于 0.25 mm 的颗粒质量超过总质量 50%
细砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量超过总质量 85%
粉砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量超过总质量 50%

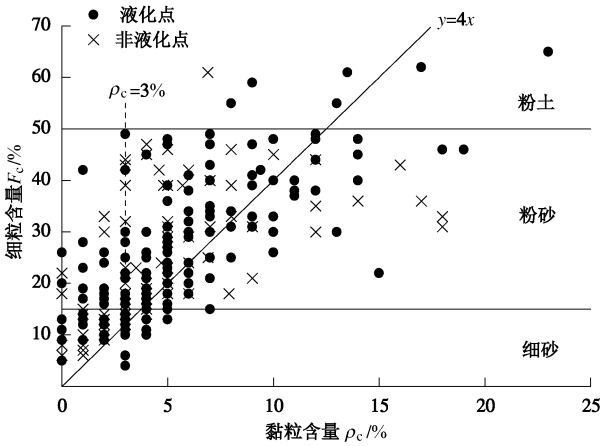

图 6 集集地震液化与非液化土分类

Fig. 6 Soil classification for known cases of liquefaction and nonliquefaction in Chi-Chi earthquake

3.2　中国规范方法改进

正如 2.1 节所述，单一的 F_c 或 ρ_c 都不能完全反应细颗粒含量的特征，笔者对于规范方法的改进就是在黏粒含量的基础上，结合细粒含量来判别液化。考虑到 Seed 等[3]只对 F_c≥15%的粉砂进行调整，而 y= 4x 之上的点，F_c 可能很大、ρ_c 却很小，笔者建议对 F_c≥15%且 F_c≥4 ρ_c 的土，取 ρ_c=F_c/4，否则取实测 ρ_c，当最终 ρ_c≤3%时，取 ρ_c=3%。

采用以上规定对“矛盾区”和“剩下区”重新进行判别，“矛盾区”液化点判别成功率 98.15%（53/54），非液化点判别成功率 77.59%（45/58），“剩下区”液化点判别成功率 95.35%（82/86），非液化点判别成功率 85.71%（54/63）。判别结果见图 7，8。

对比 2.2 和 2.3 节判别结果，可见对于“矛盾区”和“剩下区”，液化点判别成功率分别下降 1/54，1/86，而非液化点判别成功率上升 3/58，1/63。进一步对比图 2 与图 7，规范方法改进之后，使“矛盾区”液化点整体趋于临界线，并使液化判别不再像之前那样过

表 3 “矛盾区”5 个误判点详细数据

Table 3 Detailed information of 5 misclassified points in “conflicting area”

孔号	是否液化	d_s/m	F_c/%	ρ_c/%	d_w/m	PGA/g	实测 N	N_{cr}	判别液化	N_{cr} 改进	CSR	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60cs}$	$(N_1)_{60cs}$ 改进
BH-2	否	6.0	8	0	2.7	0.165	11	14.27	是	14.27	0.142	12.07	12.52	12.07
BH-2	否	16.0	18	0	2.7	0.165	16	22.44	是	18.32	0.145	12.08	16.12	12.08
BH-5	否	12.0	8	0	2.7	0.165	12	19.88	是	19.88	0.149	10.20	10.63	10.20
BH-B1	否	18.8	15	1	4.4	0.181	13	23.61	是	21.12	0.142	8.29	11.19	8.29
A125-9	否	7.1	15	1	2.9	0.420	25	28.05	是	25.09	0.341	24.34	28.01	24.34

于保守，可以减少不必要的浪费。而对比图 4，8，改进方法对“剩下区”意义不大，建议对“剩下区”不使用改进方法。

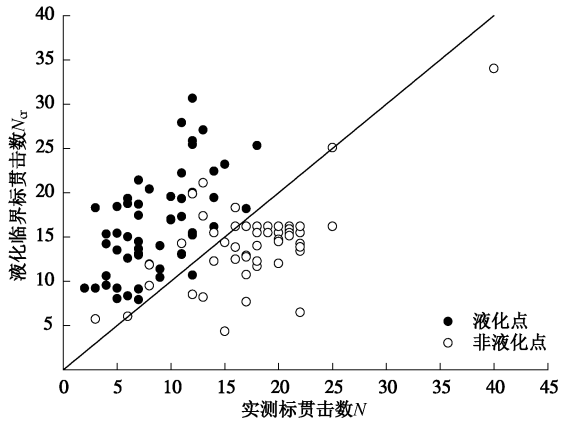

图 7 “矛盾区”中国规范改进方法判别结果

Fig. 7 Identification results of improved Chinese code method for “conflicting area”

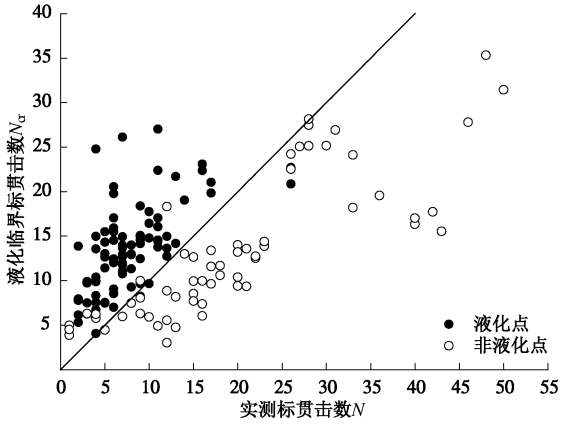

图 8 “剩下区”中国规范改进方法判别结果

Fig. 8 Identification results of improved Chinese code method for “other area”

规范液化判别式规定“黏粒含量百分率，当小于 3 或为砂土时，应采用 3”。文献[9]描述了昆明地区由于特殊地理环境生成了一批砂粒、黏粒含量偏高，粉粒含量偏低的粉砂，按表 2 分类为粉砂，而按黏粒含量（6%～12%）与塑性指数又似粉土，对于其液化判别一度造成困惑。图 6 中，集集地震粉砂液化点最大黏粒含量达到 19%，可见，忽视粉砂里的黏粒成分不可取。1.1 节已经证明，对于粉砂最好按实际黏粒含量判别液化。另一方面，对于黏粒含量小于 3%的粉砂，由于粉粒含量偏高（F_c≥15%），也必须考虑到粉粒对砂性土孔压容易累积导致抗液化强度降低的影响。换句话说，土体黏粒含量小于 3%并不代表是纯净砂，甚至很多粉土黏粒含量都小于 3%。

3.3 NCEER 方法改进

用 NCEER 方法对“剩下区”判别结果为液化点判别成功率 95.19%（99/104），非液化点判别成功率 93.94%（62/66）。考虑到表 1 中，有 2 个误判液化点、4 个误判非液化点，用规范方法判别也是误判，很可能由于土层太深、勘察位置失误等原因造成误判。总体来看，NCEER 方法对“剩下区”判别成功率非常高，并且液化和非液化判别成功率彼此接近，几乎达到理想的状态。而对于“矛盾区” 液化点判别成功率 88.68%（47/53），非液化点判别成功率 94.83%（55/58），偏于危险。

NCEER 方法是以细粒含量来判别液化，笔者对于其方法的改进，是在细粒含量的基础上，结合黏粒含量来判别液化。笔者建议对 ρ_c ≤3%的土，只有当 F_c≥20%时，才考虑用式（3）～（5）来调整$(N_1)_{60}$。之所以选择 F_c≥20%，而不是 15%，是希望尽量将方法定的偏于保守一些。

采用以上规定对“矛盾区”重新进行判别，液化点判别成功率 96.23%（51/53），非液化点判别成功率 91.38%（53/58），判别结果见图 9。5 个误判非液化点，用规范方法及规范改进方法同样误判，5 个点详细信息见表 3。可见改进 NCEER 方法变得更加精确，而如果考虑到以上 5 个误判非液化点可能并非误判，改进规范方法对“矛盾区”非液化判别成功率也达到了非常好的效果。

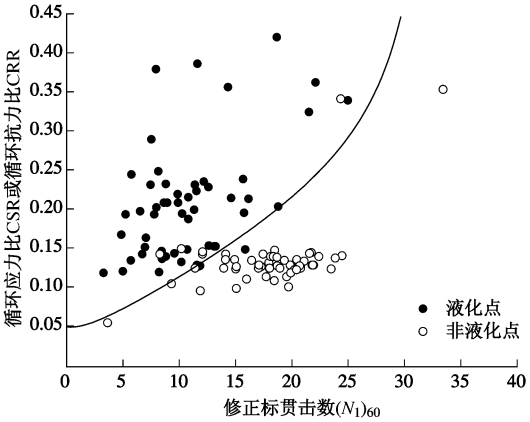

图 9 “矛盾区”NCEER 改进方法判别结果

Fig. 9 Identification results of improved NCEER method for “conflicting area”

4 结论与建议

关于砂土液化，前人已做过广泛而深入的研究。但是对于含细粒砂性土，尤其是对其液化的判别从来都只是作为砂土液化判别方法的附属成果。本文回顾了中国规范判别方法和 NCEER 推荐方法，结合 1999 年台湾集集地震液化与非液化土数据分析，发现综合细粒含量和黏粒含量判别液化比单独使用任一指标要更为稳妥。得出以下 4 点结论。

（1）对于 $\rho_c \leqslant 3\%$的土，中国规范视其为纯净砂，不做调整，而 NCEER 法则规定 $F_c \leqslant 5\%$的土为纯净砂。集集地震数据显示有 111 个点 $\rho_c \leqslant 3\%$且 $F_c > 5\%$，笔者称之为“矛盾区”，其他数据为“剩下区”。用两个方法对两个区分别进行判别之后，发现两个方法对“剩下区”判别都很成功，恰恰是对于“矛盾区”，规范方法过于保守，而 NCEER 方法略显危险。

（2）本文建议对中国规范方法，首先取消粉砂黏粒含量取 3%的规定，按实际黏粒含量判别。并且对黏粒含量小于 3%的粉砂及粉土，取 $\rho_c = F_c/4$，否则取 3%。改进之后，规范方法过于保守的问题得到解决。

（3）对 NCEER 方法，当土黏粒含量小于 3%时，只有当 $F_c \geqslant 20\%$，才考虑用式（3）～（5）来调整$(N_1)_{60}$。改进之后，NCEER 方法对集集地震液化与非液化判别都达到了近乎理想的状态。

（4）谢君斐[4]在建立 89 规范砂土液化判别式时，首先是建立的 CRR-$(N_1)_{60}$ 关系式，然后再转化成 74 规范的形式，当时是考虑为工程技术人员使用简单方便。但随着时代的进步，工程师水平的整体提升以及中国建设力量向国外走出去的发展需求，有必要推广使用 NCEER 方法。更何况，其物理意义明确，也利于方法本身的发展。

需要指出的是，由于各个国家所使用的细粒、黏粒粒径标准不尽相同，所以能同时验证含细粒土中美标贯液化判别方法的历史地震数据是非常之少的。本文对两个方法的改进，是在集集地震数据的基础上建立的，而关于粉粒、黏粒各自对抗液化强度及现场力学指标的影响将在以后做进一步研究。

参考文献：

[1] SEED R B, CETIN K O, MOSS R E S, et al. Recent advances in soil liquefaction engineering, a unified and consistent framework[R]. California: Earthquake Engineering Research Center, 2003.

[2] SEED H B, IDRISS I M, ARANGO I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **109**(3): 458 – 482.

[3] SEED H B, TOKIMATSU K, HARDER L F, et al. The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(12): 1425 – 1445.

[4] 谢君斐. 关于修改抗震规范砂上液化判别式的几点意见[J]. 地震工程与工程振动, 1984, **4**(2): 95 – 126. (XIE Jun-fei. Some comments on the formular estimating the liquefaction of sand in revised aseismic design code[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, **4**(2): 95 – 126. (in Chinese))

[5] HWANG J H, YANG C W. Verification of critical cyclic strength curve by Taiwan Chi-Chi earthquake data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, **21**: 237 – 257.

[6] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2010. (GB0011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2010. (in Chinese))

[7] 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 Geoenvironment Engineering, 2001, **127**(4): 297 – 313.

[8] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2001. (GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2001. (in Chinese))

[9] 喻　萍, 袁苏跃, 王海莹. 昆明地区粉、砂土液化判别存在问题的讨论[J]. 昆明理工大学学报（理工版）, 2004, **29**(2): 99 – 102. (YU Ping, YUAN Su-yue, WANG Hai-ying. Discussion about the questions of the differentiation method for liquefaction of sandy and silty soil in kunming area[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2004, **29**(2): 99 – 102. (in Chinese))