

DOI: 10.11779/CJGE202103007

# 考虑细粒含量的砂土液化判别双曲线模型研究

张小玲<sup>1, 2</sup>, 李秀瑜<sup>1, 2</sup>, 杜修力<sup>1, 2</sup>

(1. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 在砂土的地震液化判别模型中, 大多数模型都是针对洁净砂的液化判别提出来的, 忽略了其中细粒含量的影响, 而细粒含量是影响砂土液化的一个重要因素, 忽略细粒含量的影响会导致液化判别结果过于保守。根据中国大陆以往地震液化资料和台湾集集地震的标准贯入试验数据资料, 在原始双曲线模型的基础上建立了适用于含细粒砂性土的修正的液化判别双曲线模型, 提出了关于细粒影响项的修正系数; 并采用所建模型对中国大陆地震数据和台湾集集地震数据进行回判分析, 讨论了模型的回判成功率; 最后利用国内外大地震液化数据集对判别模型进行检验, 与我国规范方法进行对比来验证该双曲线模型的有效性和适用性。结果表明: 该提出的修正液化判别双曲线模型既适用于不同烈度区的土壤液化判别, 也能对土层深度在 20 m 范围内的砂土液化情况进行有效判别; 而且本文提出的砂土含细粒修正系数项在一定程度上弥补了双曲线液化判别模型适用范围较为局限的缺点, 并在保证液化样本点的判别成功率的基础上, 提高了非液化样本点的判别成功率。

**关键词:** 含细粒砂土; 液化判别; 标贯击数; 双曲线模型

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)03-0448-08

**作者简介:** 张小玲(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土动力学和岩土工程数值模拟等方面的教学和研究工作。

E-mail: zhangxiaoling31@163.com。

## Hyperbolic model for estimating liquefaction potential of sand considering the influences of fine grains

ZHANG Xiao-ling<sup>1, 2</sup>, LI Xiu-yu<sup>1, 2</sup>, DU Xiu-li<sup>1, 2</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In the evaluation models for seismic liquefaction of sand, most models are proposed for the liquefaction potential of clean sand, and the influence of fine grain content is often ignored. However, the fine grain content is an important factor of soil liquefaction, and it will result in the conservative result if neglected. Based on the previous liquefaction data in the mainland of China and the standard penetration test data of Chi-Chi earthquake in Taiwan of China, the modified coefficient of influence term of fine grains is proposed, and the hyperbolic model of liquefaction evaluation for fine-grained sand is established. The proposed model is applied to the data for estimating, and its success rate is discussed. Finally, the model is examined by the large seismic liquefaction data set, and its validity and applicability are verified by comparing with the standard method. The results show the proposed modified liquefaction hyperbolic model is applicable to the liquefaction evaluation of soils in the areas with different intensities, and can effectively estimate liquefaction of sand within the soil depth of 20 m. The proposed correction coefficient of fine grain content in sand can make up for the limitation of the application range of the hyperbolic model for liquefaction evaluation, and on the basis of keeping the evaluation success rate for liquefaction samples, the evaluation success rate for non-liquefaction samples is improved.

**Key words:** fine-grained sand; liquefaction evaluation; blow count of standard penetration test; hyperbolic model

## 0 引言

地震作用引起的饱和砂土液化是导致地基失效等地震灾害的主要原因, 因此预测土壤在地震作用下是否发生液化是液化灾害防治的首要任务。液化判别可以评估土体性能, 对场地是否液化进行预测, 以便及

时应对可能发生的液化危害。而建立合理有效的砂土地震液化判别模型, 是解决这一问题的重要手段<sup>[1]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51778020); 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005)

**收稿日期:** 2020-05-09

液化判别主要分为室内试验和现场测试。标准贯入试验是目前应用最广泛的现场测试方法,有大量现场试验记录的数据资料,其测试结果也比较可靠。近年来,以标准贯入试验为依据的地震液化判别方法的研究不断有成果出现,但是大部分的研究成果都是以 Seed 等<sup>[2]</sup>提出的“简化方法”为基础,通过采用更新的现场试验液化案例数据资料来对“简化方法”进行修正,再根据某一土层深度处地震引起的循环剪应力比与土层的循环抗力比的大小的对比结果来判断地震液化是否发生。Youd 等<sup>[3]</sup>对 Seed 等提出的“简化方法”进行了更新和方法总结,该研究也成为后来学者们对地震液化判别方法进行改进的重要参考。例如:Idriss 等<sup>[4]</sup>重新整理了重大地震液化场地的标准贯入试验资料,并基于更新数据资料对标贯试验的  $N$  值进行了校正;陈国兴等<sup>[5]</sup>合并了谢君斐和 Idris 等的资料,并基于该扩展数据集对 Idriss 等改进的“简化方法”进行了修正。

与“简化方法”具有同样代表性并在国内广泛应用的液化判别方法是中国《建筑抗震设计规范》中的液化判别方法<sup>[6]</sup>。国内液化判别法自 1970 年试行版规范的提出到现行的 2010 版规范被广泛使用以来,进行了几次修改。由于原始资料的局限性,1989 年版规范中的线性判别公式只适用于土层深度在 10 m 以内的情况;随着数据资料的丰富,2001 年版规范判别式扩展到适用于土层深度在 20 m 内的分段线性公式,而现行 2016 年版《建筑抗震设计规范》采用的是 2010 年版规范中的对数型连续公式<sup>[7]</sup>。

由于采用中国建规方法在地震烈度为Ⅷ度和Ⅸ时对 10~20 m 深度处砂土的液化判别结果过于保守;而采用 Seed 等的“简化方法”判别液化时会出现标准贯入击数临界值随土层深度增加先增加后减小的不合理现象。因此,孙锐等<sup>[8]</sup>提出了双曲线型的液化判别模型,弥补了中国建规法和“简化方法”在砂土地震液化判别中的缺陷,但这个原始双曲线模型仅仅适用于不考虑细粒含量的影响的洁净砂地震液化判别。

根据地震液化的震害调查结果发现,地震液化的砂土地震中通常都含有一定量的细粒土,为此研究者们通过室内试验来研究分析细粒含量对砂土液化的影响。马利超<sup>[9]</sup>通过动三轴试验和对砂土中细粒分布状态的微观观察发现随着细粒含量的增加,含细粒砂土中的细颗粒会逐渐分布在砂粒间的接触部位,增加了土体的抗液化强度。陈宇龙等<sup>[10]</sup>通过对含非塑性细粒的饱和砂土进行单调加载和循环扭剪试验发现随着细粒含量的增大,饱和砂土达到液化时的循环次数在减少。由于砂土中细粒的存在会影响土颗粒的分布状态和颗粒间的接触,从而影响土体的抗液化能力,因此

对含细粒砂土的地震液化评估进行研究具有重要实际意义和工程价值。

自 1976 年唐山地震中出现了含细粒砂土发生液化的案例以来,国内外学者展开了一系列针对含细粒砂土液化判别的研究。含细粒砂土中的“细粒”通常用黏粒含量(粒径小于 0.005 mm)或细粒含量(粒径小于 0.075 mm)来表示,研究中一般根据不同的土体类别选用不同的细粒指标<sup>[11]</sup>。关于这方面的研究,钟龙辉<sup>[12]</sup>基于唐山地震实际液化资料提出了轻亚黏土的液化判定方法,按黏粒含量的大小修正实际标贯击数,最终通过修正的标贯击数和实测标贯击数的对比分析来判定土壤是否液化。Seed 等<sup>[13]</sup>在其 1971 年对“简化方法”的研究的基础上根据实测资料建立了细粒含量分别为 15%和 35%的土层的循环抗力比  $CRR$  与修正标贯击数 $(N_1)_{60}$  的液化临界曲线。刘颖<sup>[14]</sup>认为标准贯入击数与黏粒含量百分数的倒数( $C_v=1/\rho_c$ )之间存在一定的函数关系,由此建议了建规法中考虑黏粒含量的修正项。董林等<sup>[11]</sup>通过分析集集地震数据资料,对“简化方法”和建规法中的含细粒影响项进行了改进,指出在对含细粒砂性土进行液化判别时应综合考虑黏粒含量和细粒含量的影响。这些学者提出的针对含细粒砂土的液化判别方法都是以建规方法和 Seed 等提出的“简化方法”中的洁净砂模型为基础展开研究,在考虑细粒含量影响的砂土液化判别模型中也存在前述相同的问题。

本文基于原始的双曲线模型,根据大陆以往地震液化资料和台湾集集地震的标准贯入试验数据资料,建立了针对含细粒砂性土液化判别的计算公式,并利用国内外大地震液化数据集对提出的计算公式进行检验来验证所建判别模型的正确性,为含细粒砂土的地震液化判别研究的发展提供参考。

## 1 数据来源

双曲线模型的建立是基于大陆建规法形成和检验所采用的国内数据资料,来源于 20 世纪六七十年代大陆几次大地震的现场记录,主要包括唐山地震、通海地震和海城地震的液化资料<sup>[15]</sup>。筛除了实测标准贯入击数大于 50 的数据资料后,共有现场数据 150 例,其中液化样本 95 例,非液化样本 55 例,且该组成数据在各地震烈度区的分布较为均衡(Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度的样本数分别为 50 例、47 例和 53 例),但其中 90%的数据资料的土层深度在 10 m 以内,浅层土的数据资料占多数。

1999 年台湾集集地震数据是近年来记录的发生地震规模较大,液化资料记录较为详尽的数据资料,包含有许多含细粒砂土在不同深度处液化的记录情况<sup>[16]</sup>。

该地震资料中的水平峰值加速度是由地震台记录的,较为准确且不需要估计;该数据资料包含了许多土层深度大于 10 m 的土壤液化资料,应用该数据资料可以有效地检验双曲线模型对不同烈度区中土层深度在 20 m 以内的液化判别情况的适用性。另外,台湾集集地震液化资料是为数不多的同时记录了场地土的黏粒含量  $\rho_c$  和细粒含量 FC 的数据资料,对含细粒砂性土的研究提供了宝贵的资料。

Cetin 等<sup>[17]</sup>将世界范围内大地震液化资料总结形成了 Cetin 数据集,该数据资料收集了各地区的原始记录情况,对各地区的原始资料进行了详细的评定,并修正了不同地区现场测试的标准贯入锤击数。该地震液化数据集包括 113 个液化场地和 95 个非液化场地数据以及 2 个边缘场地案例。

本文分别采用这 3 种地震液化资料作为样本数据集对双曲线模型进行改进。首先采用原始数据资料作为基础数据集修正了原始双曲线模型,并对原始双曲线模型和修正双曲线模型的判别情况进行了对比分析;然后采用数据资料可靠且同时记录了场地的细粒含量和黏粒含量的集集地震数据集来确定砂土含细粒时液化判别的修正系数,建立了含细粒砂土的液化判别双曲线模型;最后采用丰富性和多样性较强的,并且对不同地区的液化资料进行了统一修正的 Cetin 数据集作为检验样本来检验双曲线型的液化判别模型在不同土层条件或不同地震烈度区的适应性。

## 2 修正的砂土液化判别双曲线模型

在孙锐等<sup>[8]</sup>一文中,利用大陆地震液化数据来验证所建立的双曲线模型的判别成功率,从其判别结果上看,用于砂土液化判别的双曲线模型相对于 2010 版建规判别法在液化和非液化的判别成功率上均有提高。另外,文献中收集了日本阪神地震和台湾集集地震数据资料,并对该模型的判别结果进行验证,结果显示所建立的双曲线模型保持了建规法对液化样本判别成功率较高的优点,还大大提高了非液化样本的判别成功率。图 1 显示了孙锐双曲线模型对各数据集的判别成功率。由于世界各国所使用的标准贯入试验标准不同,所测得的标贯击数  $N$  值需进行的修正也有所不同。中国地震原始资料中并未记录标准贯入试验的修正参数,故采用标贯试验的实测值进行分析;而台湾集集地震数据资料和 Cetin 数据集采用的是修正后的标准贯入击数值( $N_1$ )<sub>60</sub> 作为标贯试验的实测值来进行判别对比。

从图 1 中原始液化判别双曲线模型对 3 种数据集的检验结果可以看出,该模型在评估大陆数据和集集

地震液化案例时的效果较好,且其液化样本的判别成功率和非液化样本的判别成功率大致相等,均在 80% 以上;而在对 Cetin 综合数据集的判别分析中,非液化案例的判别结果良好,液化案例的判别成功率相对较低。分析原因有以下两点,一是综合数据集中有许多早期的液化数据,不同地区的标准贯入试验结果存在较大差异, $N$  值修正后这种差异仍然存在;二是原始液化判别的双曲线模型选取的临界标准贯入击数初值偏小,也就是各烈度区的临界标贯击数基准值偏小,这样会导致原始双曲线模型对地表附近砂土的判别结果偏危险。本文针对这个问题通过对不同烈度区的实测标贯击数散点图的统计分析重新确定了临界标贯击数基准值的大小,并对液化判别双曲线模型中的土层深度和地下水位深度这两个液化判别影响项采用了先独立再组合的分解分析法,在此基础上提出了针对洁净砂地震液化判别的修正双曲线模型。

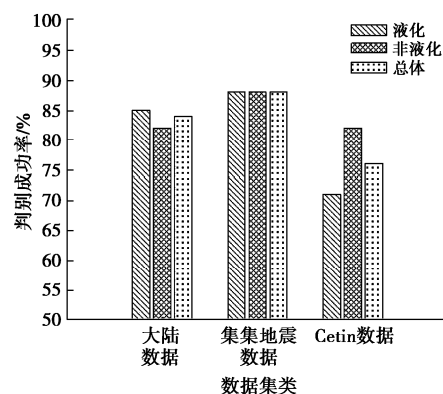


图1 原始双曲线模型对各数据集的判别结果

Fig. 1 Evaluated results of original hyperbolic model for data sets

本文采用与原始双曲线模型相同的大陆地震液化资料作为回归总样本,并基于原始双曲线模型<sup>[8]</sup>提出了修正的液化判别双曲线模型为

$$N_{cr} = N' \cdot (1 - k_3 d_w) \left( k_2 + \frac{d_s}{d_s + k_1} \right) \cdot \gamma \quad (1)$$

式中  $N_{cr}$  为标贯击数临界值;  $N'$  为临界标准贯入击数基准值;  $d_s$  为标准贯入点的土层深度;  $d_w$  为地下水位深度;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  为回归系数;  $\gamma$  为组合系数。

修正的液化判别双曲线模型的确定主要分为三步:第一步是确定临界标准贯入基准值  $N'$ , 基于原始数据共 150 个样本点的地震烈度和实测标准贯入击数的统计关系,直观地确定液化和非液化之间的临界标贯击数值基准值  $N'$ <sup>[15]</sup>;第二步是确定  $d_w$  和  $d_s$  对标贯击数临界值  $N_{cr}$  的影响,通过对原始样本点的回归计算,分别考虑  $d_w$  和  $d_s$  这两个因素对液化判别的影响,确定各影响项的回归系数;第三步是将这两个影响项组合,通过对整体样本的回归计算,确定了组合系数  $\gamma$

的值为 1。从而得到了修正的砂土液化判别双曲线模型如下式所示：

$$N_{cr} = N' \cdot (1 - 0.035d_w) \left( 0.7 + \frac{d_s}{d_s + 6} \right) \quad (2)$$

式中，确定临界标准贯入基准值  $N'$  时，参考建规法中确定临界标准贯入击数的方法<sup>[18]</sup>，基于地表附近( $d_s=3$  m,  $d_w=2$  m) 的砂土发生液化时的临界标准贯入击数，并在采用的原始数据中增加了海城地震和唐山地震液化的资料数据，通过各样本点地震烈度和实测标准贯入击数的统计关系，最终确定临界标准贯入击数基准值  $N'$  在地震烈度为Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度时分别为 9，12，17。

为了验证修正双曲线模型的判别效果，将国内地震液化原始数据代入修正的双曲线模型来计算其回判成功率，并与 2010 版建规判别法和原始双曲线模型的回判成功率进行比较，得到了不同判别方法的回判结果如表 1 所示。通过分析这 3 种液化判别方法的回判结果可以发现，原始双曲线模型和修正双曲线模型对原始样本的回判结果都优于 2010 版建规判别法，并且从全部样本的回判结果上看，修正双曲线模型在保持非液化样本判别成功率的基础上，提高了对液化样本的判别成功率。

表 1 液化回判成功率

Table 1 Success rates of liquefaction estimating (%)

烈度	场地情况	2010 建规法	原始双曲线模型	修正双曲线模型
Ⅶ度样本	液化	59	74	100
	非液化	91	87	78
	整体	74	80	90
Ⅷ度样本	液化	93	89	96
	非液化	80	85	90
	整体	88	88	93
Ⅸ度样本	液化	85	90	90
	非液化	72	72	78
	整体	81	84	86
全部样本	液化	80	85	95
	非液化	82	82	82
	整体	81	84	90

3 含细粒砂土的双曲线液化判别模型

3.1 细粒含量对砂土液化的影响

一般情况下，含细粒砂是指由无黏性砂粒、粉粒和有黏性的黏粒组成的砂土，其中粉粒和砂粒的物理性质比较接近，而且含细粒砂土的液化性能主要受黏粒含量的影响<sup>[19]</sup>，因此本文首先是将黏粒含量作为含细粒指标来判别液化。20 世纪后全球发生的多起强震中都发现了含有非塑性细粒的深层土液化的案例。为

了扩大该修正双曲线模型的应用范围，使其可适用于非塑性细粒土的液化判别，本文引入含细粒影响范围更广的细粒含量作为细粒指标，并将修正双曲线模型的含细粒影响项从按黏粒含量进行修正扩展到根据细粒含量进行修正。以此来判别含细粒砂土的地震液化情况。

本文首先考虑黏粒含量对含细粒砂土液化判别的影响，并以黏粒含量的百分比值作为分类标准。参考中国 2010 版《建筑抗震设计规范》中判别饱和砂土液化的地震烈度要求，在地震烈度为Ⅵ度时砂土液化现象出现的可能性较低，危害性较小，故不考虑地震烈度为Ⅵ度时的砂土液化样本。表 2 给出了集集地震资料中 272 例土体样本按黏粒含量进行分类的样本统计结果。

表 2 集集地震数据中按黏粒含量分类统计的样本统计结果

Table 2 Statistical results of Chi-Chi earthquake sample data by

clay content			
黏粒含量 $\rho_c$ /%	液化数	非液化数	合计
$\leq 3$	55	57	112
4	17	20	37
5	23	12	35
6	14	5	19
7	12	2	14
8	5	6	11
9	6	2	8
10	6	1	7
11	3	0	3
12	4	3	7
$> 12$	13	6	19
总数	158	114	272

在表 2 中，当砂土中的黏粒含量  $\rho_c \leq 3\%$  时，通常把该砂土作为“洁净砂”考虑，不对砂土的临界标准贯入击数值进行修正。而当土体中的黏粒含量  $\rho_c > 12\%$  时，黏粒的增加对标贯击数  $N$  值无明显影响，所以仍按  $\rho_c = 12\%$  考虑。由于黏粒含量  $\rho_c > 6\%$  的各分类组下的数据样本较少且不均衡，为了保证结果的稳定性，针对非液化样本中实测标贯击数  $N$  值普遍偏大的现象，选择筛去  $\rho_c = 8\%$  和  $\rho_c = 12\%$  的分类下偏离临界状态曲线较远的点。利用该统计分类方法可以分别计算各黏粒含量分类组所对应的临界标准贯入击数修正系数。

3.2 含细粒修正的砂土液化判别双曲线模型

关于临界标准贯入击数修正系数的确定<sup>[12]</sup>，本文依据建规判别法的建立过程，通过对标贯击数临界值进行含细粒修正来确定临界标贯击数等效值，首先基于国内样本数据得到考虑黏粒含量的临界标准贯入击数修正系数，然后根据黏粒含量修正系数确定相应的

细粒含量修正系数，最终形成考虑细粒含量的砂土液化判别的修正双曲线模型，具体过程如下：

(1) 首先，用  $\alpha$  表示修正双曲线模型中计算的临界标准贯入击数的修正系数，以此来考虑黏粒含量大小对砂土液化的影响。 $N_{cr\text{等效}}$  表示按黏粒含量修正后的标准贯入击数临界值的等效值， $N_{cr}$  表示由修正的双曲线模型计算得到的临界标贯击数，两者的关系如下式所示：

$$N_{cr\text{等效}} = \alpha \cdot N_{cr} \quad (3)$$

具体地，利用 MATLAB 计算程序进行统计回归，以实测的标贯击数  $N$  值作为  $N_{cr\text{等效}}$  的目标值，由此得到各黏粒含量下的  $\alpha$  值。

(2) 分析得出不同黏粒含量下的  $\alpha$  值整体呈下降趋势。将不同黏粒含量下的修正系数  $\alpha$  与黏粒含量的变化关系用图 2 表示。从图 2 可以看出，临界标准贯入击数的修正系数  $\alpha$  随着黏粒含量  $\rho_c$  的增加而逐渐减小。假设  $\alpha$  和  $\rho_c$  之间存在负相关的线性关系：

$$\alpha = -t \times \rho_c + h \quad (4)$$

式中， $t, h$  为线性函数系数。由线性回归可得  $t=0.0555$ ， $h=1.2537$ 。根据该线性关系即可得到各黏粒含量  $\rho_c$  下的修正系数  $\alpha$  的线性结果值。

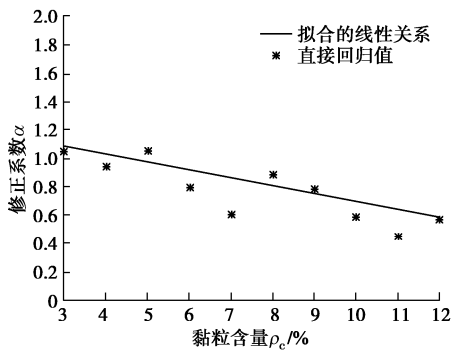


图2 黏粒含量和修正系数线性关系图

Fig. 2 Linear relation between clay content and correction coefficient

(3) 分别针对砂土中不同黏粒含量分类下对应的细粒含量值进行分析，得到它们各自对应的细粒含量的平均数，中位数，众数，以此来确定各黏粒含量对应的细粒含量范围，由于  $\rho_c$  值较大的部分数据样本较少，故不分析其众数。图 3 给出了砂土中不同黏粒含量下对应的细粒含量平均值和中位数的变化趋势，根据细粒含量统计参数随黏粒含量变化的变化趋势，直观地确定各黏粒含量对应的细粒含量值，即图中星号点所表示的对应值。

(4) 根据图 3 砂土的细粒含量随黏粒含量的变化趋势图，确定黏粒含量与细粒含量的对应关系，结果如表 3 所示。当砂土中细粒含量的实际记录值非整数

时，用插值法得到修正系数  $\alpha$  [12]。

表 3 标贯击数的修正系数确定值

Table 3 Deterministic coefficients of SPT					
细粒含量 FC/%	≤15	30	35	40	45
黏粒含量 $\rho_c$ /%	≤3	6	7	9	12
修正系数 $\alpha$	1.09	0.92	0.87	0.75	0.59

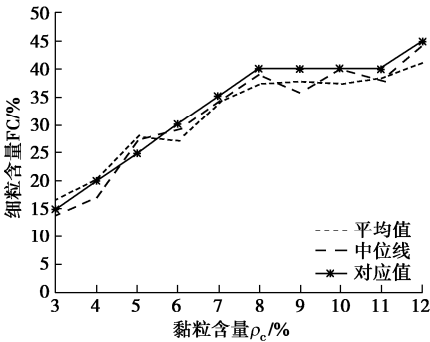


图3 细粒含量变化趋势图

Fig. 3 Trends of fine grain content

综上，将洁净砂液化判别的双曲线模型和含细粒砂土中细粒影响项以及其他因素影响项进行组合，得到了含细粒砂性土液化判别双曲线模型表示如下：

$$N_{cr\text{等效}} = \alpha N' \cdot (1 - 0.035d_w) \left( 0.7 + \frac{d_s}{d_s + 6} \right) \quad (5)$$

式中， $N_{cr\text{等效}}$  为考虑细粒修正后的临界标贯击数等效值， $\alpha$  为临界标贯击数修正系数，按表 3 取得。当砂层实测的标准贯入值小于临界标贯击数等效值时，即  $N < N_{cr\text{等效}}$  时，判定为砂土发生液化，反之则判为砂土不液化。

4 修正双曲线模型的检验分析

4.1 对洁净砂液化案例的检验分析

为了检验修正的双曲线模型对洁净砂地震液化判别结果，将原始双曲线模型和修正双曲线模型对集集地震液化样本的判别情况进行了对比，对比结果如图 4 所示。图 4 把双曲线模型中地下水位  $d_w=2\text{ m}$  时的结果作为典型的代表曲线，对原始双曲线模型和修正双曲线模型的评估结果进行了对比分析，并将样本点按烈度区（Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度）分别绘制在图 4（a），（b），

（c）3 个坐标图中，图中实心点表示液化点，空心点表示非液化点。从临界标准贯入击数与土层深度的关系图中可以明显地看出，在地震烈度为Ⅶ度时，修正双曲线模型对液化样本的判别结果要优于原始双曲线模型；而在地震烈度为Ⅷ度时，修正双曲线模型一定程度上改善了原始双曲线模型对非液化样本的判别结果；地震烈度为Ⅸ度时由于高烈度区样本案例不足，两种双曲线模型的对比结果不是很明显，但从总体上看修正双曲线模型不仅保持了原始双曲线模型判别结

果良好的优势,也改善了原始双曲线模型在浅层处的液化临界线的偏于危险的情况,提高了液化判别结果的安全程度。

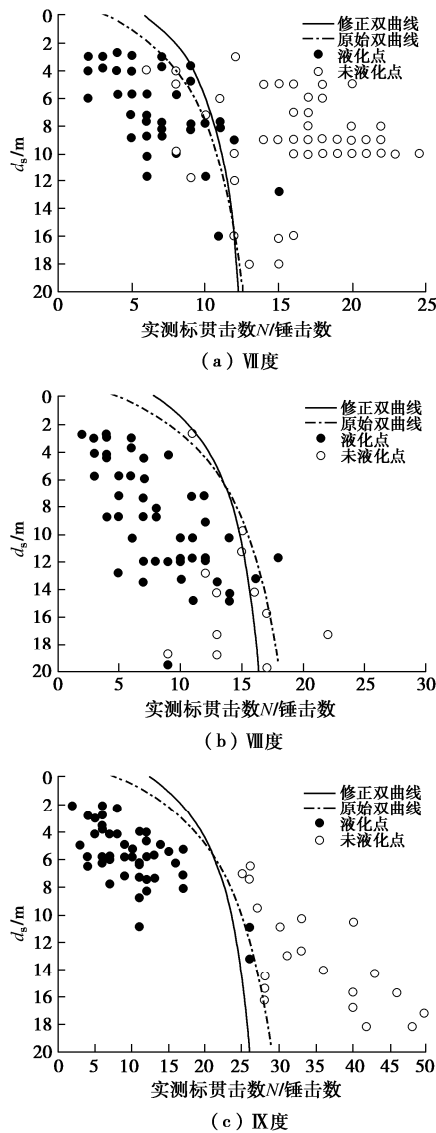


图4 临界标准贯入击数与土层深度的关系

Fig. 4 Relationship between critical SPT number and soil depth

#### 4.2 对含细粒砂液化案例的检验分析

为了分析修正的双曲线模型中增加含细粒修正项之后的对砂土地基的液化评估效果,将修正的含细粒砂土液化判别双曲线模型分别代入台湾集集地震液化样本和 Cetin 地震液化数据集样本进行判别分析,并将结果分别绘制在图 5 (a) 和 5 (b) 中。图中以液化场地样本点的临界标贯击数  $N_{cr}$  为样本点的纵坐标,以实测标贯击数  $N$  值为样本点的横坐标来确定图中的基础样本点;以标准贯入试验的判断标准为依据,并确定  $N_{实测} = \alpha \cdot N_{cr}$  的关系线为临界线,根据临界标贯击数修正系数  $\alpha$  的范围确定临界线的位置区间来反映含细粒修正后的判别结果。从图 5 (a) 和 5 (b) 的

结果可以发现,在临界线区间范围内有许多液化点和非液化点,临界线区间范围左侧主要是液化点,右侧主要是非液化点。

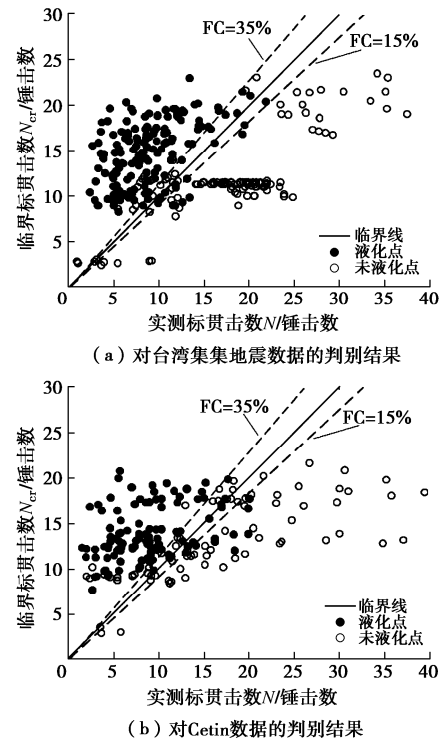


图5 含细粒修正双曲线模型判别结果的检验

Fig. 5 Results of evaluation for Cetin's data set by corrected hyperbolic model

图 5 的结果也反映了本文提出的考虑含细粒影响的修正双曲线模型可以有效地应用于含细粒砂土的地震液化判别。随着细粒含量的增加,临界线逐渐左移使得非液化区范围增大,非液化样本判别成功的数量就会增多,这主要是因为砂土中细粒的存在会贡献于土的骨架,使得土体的抗液化能力增强,利用现场试验测得的标贯击数就会增大,而采用修正双曲线模型得到的等效临界标准贯入击数值就会相对减小,这样有利于非液化样本的判别。

同时,将该 Cetin 数据集样本代入修正的砂土液化判别双曲线模型中得到的判别结果与实际液化情况进行对比,由于数据集中只有细粒含量  $FC$  的记录资料,故只计算考虑和不考虑细粒含量  $FC$  影响的修正双曲线模型这两种情况的液化判别成功率。通过计算得到,不考虑细粒含量  $FC$  影响的修正的砂土液化判别双曲线模型对液化和非液化样本的判别成功率分别为 71% (80/113) 和 85% (81/95),而图 1 中原始双曲线模型对液化和非液化样本的判别成功率分别为 71% 和 82%,从对比结果可以看出,修正的含细粒砂土液化判别双曲线模型在保证液化样本的判别成功率的基础上,通过采用对临界标贯击数进行含细粒修正

的方法,提高了 Cetin 综合数据资料中非液化样本的判别成功率;当对修正双曲线模型计算得到的标贯击数临界值采用细粒含量修正系数修正后,修正的含细粒砂土液化判别双曲线模型对液化和非液化样本的判别成功率分别为 67% (76/113) 和 88% (84/95)。与图 5 (a) 和 5 (b) 中反映的规律相同,修正双曲线模型对液化样本的判别成功率稍有降低,而其对于非液化样本的判别成功率结果有一定提高,但从总体样本的判别成功率上看,考虑含细粒修正后的双曲线模型对场地整体的液化或非液化判别的总成功率是保持稳定的。

由于本文计算中所采用的砂土细粒含量和黏粒含量的对应关系是通过统计方法得到的,且该计算模型假设对于黏粒含量  $p_c \leq 3\%$  的砂土,规范视其为纯净砂。而“Seed 简化法”的改进方法“NCEER 推荐法”则规定细粒含量  $FC \leq 5\%$  的砂土为纯净砂。而在  $p_c \leq 3\%$ ,  $FC > 5\%$  的区域,台湾集集地震数据资料存在大量的样本点共 110 个,占总样本数的 40%,其中液化案例 53 个,非液化案例 57 个。如果采用建规法和“简化方法”同时对该区域样本点进行判别,会出现是否需要对该区域样本点进行“纯净砂简化”的争议问题,影响所采用的液化判别方法对该区域样本点判别结果的可信度。而本文所建立的修正双曲线模型是基于统计分析的方法得到的,对于黏粒含量  $p_c \leq 3\%$  和细粒含量  $FC \leq 5\%$  的界定并非“洁净砂”的定义,只作为修正双曲线模型中考虑黏粒含量或细粒含量影响的统计边界。本文的修正双曲线模型如果按砂土黏粒含量修正系数考虑该区域的样本点时,修正系数  $\alpha = 1.09$ ,此时修正双曲线模型的液化判别成功率为 91% (48/53),而非液化判别成功率为 91% (52/57);如果按砂土细粒含量修正系数考虑该区域的样本点时,修正双曲线模型的液化判别成功率为 85% (45/53),非液化判别成功率为 95% (54/57)。两种情况的判别结果基本一致。由此表明了本文提出的修正双曲线模型不受两种细粒指标关于“洁净砂”定义的限制,并不会因为选用指标不同得出较大差异的判别结果。

## 5 结 论

本文基于砂土液化判别的原始双曲线模型,根据大陆地震液化资料和台湾集集地震的标准贯入试验数据资料,建立了适用于含细粒砂性土的液化判别双曲线模型,提出了关于细粒含量影响项的修正系数,并对修正双曲线模型的有效性和适用性进行了检验,主要结论如下:

(1)从修正的砂土液化判别双曲线模型对于中国

大陆地震液化资料的回判结果表明,考虑细粒含量影响的修正双曲线模型能有效提高液化的判别成功率,且能适应不同地震烈度区土层深度在 20 m 内的判别情况。

(2)将液化判别双曲线模型进行含细粒影响项的修正弥补了原始双曲线模型只适用于洁净砂的局限性,对于含细粒的砂性土的液化判别结果表现较为稳定。

(3)本文提出了利用地震液化砂土中细粒含量和黏粒含量的对应关系建立修正系数的方法,该方法可以有效地消除砂土中细粒含量和黏粒含量应用过程中的转换误差。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, **97**(9): 1249 - 1273.
- [3] YOUNG 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.
- [4] IDRISS I M, BOULANGER R W. SPT-based Liquefaction Triggering Procedures[R]. Davis: University of California, 2010.
- [5] CHEN G X, XU L Y, KONG M Y, et al. Calibration of a CRR model based on an expanded SPT-based database for assessing soil liquefaction potential[J]. Engineering Geology, 2015, **196**: 305 - 312.
- [6] 陈国兴, 胡庆兴, 刘学珠. 关于砂土液化判别的若干意见[J]. 地震工程与工程振动, 2002, **22**(1): 141 - 151. (CHEN Guo-xing, HU Qing-xing, LIU Xue-zhu. Some comments on methodologies for estimating liquefaction of study soils[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, **22**(1): 141 - 151. (in Chinese))
- [7] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016. (Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010[S]. 2016. (in Chinese))
- [8] 孙 锐, 赵倩玉, 袁晓铭. 液化判别的双曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2061 - 2068. (SUN Rui, ZHAO Qian-yu, YUAN Xiao-ming. Hyperbolic model for estimating liquefaction potential of sand[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 2061 - 2068. (in Chinese))
- [9] 马利超. 高黏粒含量砂性土液化可能性与动强度评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. (MA Li-chao. The Liquefaction Susceptibility and Assessment of Dynamical Resistance in High Clay Content Sand[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese))
- [10] 陈宇龙, 张宇宁. 非塑性细粒对饱和砂土液化特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(2): 507 - 516. (CHEN Yu-long, ZHANG Yu-ning. Experimental study of effects of non-plastic fines on liquefaction properties of saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(2): 507 - 516. (in Chinese))
- [11] 董林, 王兰民, 夏坤, 等. 含细粒砂性土标贯液化判别方法改进研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(12): 2320 - 2325. (DONG Lin, WANG Lan-min, XIA Kun, et al. Improvement of SPT-based liquefaction discrimination methods for fines-containing sandy soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(12): 2320 - 2325. (in Chinese))
- [12] 钟龙辉. 轻亚黏土地震液化判定方法的分析[J]. 岩土工程学报, 1980, **2**(3): 113 - 122. (ZHONG Long-hui. Analysis for evaluating liquefaction of low plasticity clays(CL) during earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, **2**(3): 113 - 122. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 刘颖. 关于修改抗震规范砂土液化判别式问题再同谢君斐同志商榷[J]. 地震工程与工程振动, 1986, **6**(1): 82 - 90. (LIU Ying. Discuss with Xie Junfei again about the problem of the formular estimating the liquefaction of sand in revised aseismic design code[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1986, **6**(1): 82 - 90. (in Chinese))
- [15] 谢君斐. 关于修改抗震规范砂土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))
- [16] 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.
- [17] CETIN K O, SEED R B, KAYEN R E, et al. Dataset on SPT-based seismic soil liquefaction[J]. Data in Brief, 2018, **20**: 544 - 548.
- [18] 中国科学院工程软科学研究所. 地震工程研究报告集[M]. 第三集. 北京: 科学出版社, 1977. (Institute of Soft Science of Engineering, Chinese Academy of Sciences. A Collection of Seismic Engineering Research Reports[M]. The Third Set. Beijing: Science Press, 1977. (in Chinese))
- [19] 谢定义. 动荷载下土的强度特性[J]. 水利学报, 1987, **12**: 17 - 32. (XIE Ding-yi. Strength characteristics of soils under dynamic loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, **12**: 17 - 32. (in Chinese))