

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.05.002

# 以剪切波速与地表峰值加速度为依据的 地震液化确定性及概率判别法

孔梦云<sup>1,2</sup>, 陈国兴<sup>1,2</sup>, 李小军<sup>2,3</sup>, 常向东<sup>4</sup>, 周国良<sup>4</sup>

(1.南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2.南京工业大学 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏 南京 210009;  
3.中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 4.环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

**摘 要:** 剪切波速作为土性的基本参数, 为评价土体抵抗地震液化的能力提供了一种方法。回顾了以剪切波速和地表峰值加速度为依据的场地地震液化判别方法的演化历史, 依据他人收集的现场液化资料, 合计 49 次地震、618 例液化/不液化场地数据, 提出了确定液化临界曲线的基本原则, 给出了基于修正剪切波速与地表峰值加速度的液化临界曲线, 验证了液化临界曲线的位置对细粒含量、有效上覆压力、震级等因素取值变化的合理性, 分析了估计土层循环应力比  $CSR$  的剪应力折减系数、震级标定系数、有效上覆压力修正系数等因素的不确定性对液化临界曲线的敏感性。结果表明: 液化临界曲线对各种影响因素具有很好的适用性。利用 Monte Carlo 模拟、加权最大似然法和加权经验概率法, 给出了建议的液化临界曲线的名义抗液化安全系数与液化概率的经验关系式及概率等值线, 并对核电厂 I 类、II 类和 III 类抗震物项地基, 分别建议了相应的液化临界曲线。该方法以丰富的现场液化数据为依据, 具有广泛的应用前景。

**关 键 词:** 非基岩核电厂场址; 土体液化判别; 确定性方法; 概率方法; 液化临界曲线; 剪切波速; 地表峰值加速度  
**中图分类号:** TU 435      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000—7598 (2015) 05—1239—15

## Shear wave velocity and peak ground acceleration based deterministic and probabilistic assessment of seismic soil liquefaction potential

KONG Meng-yun<sup>1,2</sup>, CHEN Guo-xing<sup>1,2</sup>, LI Xiao-jun<sup>2,3</sup>, CHANG Xiang-dong<sup>4</sup>, ZHOU Guo-liang<sup>4</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing, Jiangsu 210009, China; 2. Civil Engineering & Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing Technology University, Nanjing, Jiangsu 210009, China; 3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 4. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection of China, Beijing 100082, China)

**Abstract:** As a fundamental parameter of soil, the shear wave velocity (denoted  $V_s$ ) offers a means to determine the seismic resistance of soil to liquefaction. The historical developments of  $V_s$  and peak ground acceleration (denoted PGA)—based assessment method of soil liquefaction potential is reviewed. The basic principle to determine liquefaction triggering curve is given. The corresponding liquefaction triggering curve is proposed based on the database used by Kayen, Andrus, Saygili and Chu for a total of 49 earthquakes, 618 case histories. The position of liquefaction triggering curve is verified with respect to various factors based on the case history database, such as fines content, overburden stress and magnitude scales. In addition, the sensitivity of the database's interpretation to a number of aspects and components of the analysis framework is examined, such as the shear stress reduction factor that accounts for the dynamic response of the soil profile, the magnitude scaling factor, the overburden correction factor for cyclic stress ratio. And the results show these factors have slight effects on the position of the proposed liquefaction triggering curve. At last, the relationship between nominal safety factor and probability of liquefaction as well as the probabilistic contours for the proposed liquefaction triggering curve are given based on Monte Carlo simulation, the weighted maximum likelihood method and weighted empirical probability data. The soil liquefaction triggering curves are proposed for the seismic design category I、II and III of the structure, system and component of nuclear power plants, respectively. The presented assessment is provided with wide application prospects.

**Keywords:** the soil site of nuclear power plants; soil liquefaction assessment; deterministic assessment; probability assessment; liquefaction triggering curve; shear wave velocity; peak ground acceleration

收稿日期: 2013-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41172258); 国家重点基础研究发展计划 (No. 2011CB013601); 国家科技重大专项 (No. 2011ZX06002-010-15; No. 2013ZX06002001-09)。

第一作者简介: 孔梦云, 女, 1989 年生, 硕士, 主要从事地震液化判别方面的研究工作。E-mail: mengyunkong@gmail.com

通讯作者: 陈国兴, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究工作。E-mail: gxchen@njut.edu.cn

## 1 引言

目前,国际上评价场地地震液化可能性的最广泛应用的方法是以标贯试验与地表峰值加速度  $PGA$  值为依据的半经验方法<sup>[1-3]</sup>,但标贯试验对土层的扰动很大,且试验数据的离散性较大,连续性差,难以准确地选择观测土层。此外,砂砾土地也很难通过标贯试验获得可信的结果。剪切波速测试方法作为一种可替代的场地原位测试方法,正好能够弥补标贯试验方法的这一不足,且剪切波速是与小应变剪切模量直接相关的物理量,亦即反映了土体的基本力学性能;剪切波速是场地地震效应分析的基本参数,对不适宜钻孔的场地,也可以采用表面波谱分析技术(spectral-analysis-of-surface-waves technique)以方便测试。因此,基于剪切波速与地表峰值加速度值的场地液化判别方法具有广泛的应用前景。

本文在 Idriss 等<sup>[2-3]</sup>的场地液化评价分析框架的基础上,利用 Kayen<sup>[4]</sup>、Andrus<sup>[5]</sup>等地震液化数据库、Saygili<sup>[6]</sup>和 Chu<sup>[7]</sup>等的地震液化资料,合计 49 次地震中 618 个场地资料,结合我国核电站场址的地震安全要求,提出了一个新的以剪切波速  $V_s$  和地表峰值加速度  $PGA$  为依据的地震液化确定性及其概率判别方法。

## 2 以 $V_s$ 和 $PGA$ 为依据的地震液化判别方法的演化历史

Dobry 等<sup>[8-9]</sup>根据室内试验中饱和砂土产生振动孔压积聚的循环临界剪应变概念,首次提出以  $V_s$  和  $PGA$  值为依据预测砂土液化势的方法。Seed 等<sup>[10]</sup>根据土体最大剪切模量与修正标贯击数  $N_1$  的经验关系式,建议了修正标贯击数  $N_1$  与  $V_s$  的经验关系式,据此给出了土层循环应力比  $CSR$  与  $V_s$  的液化临界关系曲线。Tokimatsu 等<sup>[11]</sup>开展了对细粒(粒径  $\leq 0.075$  mm)含量  $FC$  小于 10% 的冰冻原状砂土样和重塑砂土样的不排水循环三轴对比试验,给出了液化循环  $CSR$  与规范化剪切模量的液化临界关系曲线,据此建立了液化循环  $CSR$  与  $V_s$  的关系。Kayen 等<sup>[12]</sup>利用 1989 年 Loma Prieta 地震液化场地的 4 组剪切波速资料(细粒含量 5%~57%),建议了一条区分液化与不液化的临界关系曲线。Lodge<sup>[13]</sup>收集了 1964 年 Niigata 地震、1983 年 Borah Peak 地震和 1989 年 Loma Prieta 地震的液化场地剪切波速数据,以 Seed 等<sup>[14]</sup>的简化方法为基础,建议了液化临界关系曲线。Andrus 等<sup>[15]</sup>收集世界各地 20 次地震 50 余个典型地震液化场地的剪切波速资料,给出了砂

土液化临界关系曲线。Andrus 等<sup>[5, 16]</sup>更新了其液化数据库<sup>[15]</sup>,收集世界各地 26 次地震 70 余个场地 225 例液化/不液化资料,给出了以  $V_s$  和  $PGA$  为依据的新的砂土液化临界关系曲线。该方法作为 NCEER/NSF 小组的推荐方法<sup>[17-18]</sup>,是 21 世纪初国际上最具有代表性、影响最广泛的场地地震液化剪切波速判别方法,其液化临界关系曲线如图 1、2 所示。不同研究者给出的基于修正  $V_{s1}$  的液化临界关系曲线如图 1 所示。

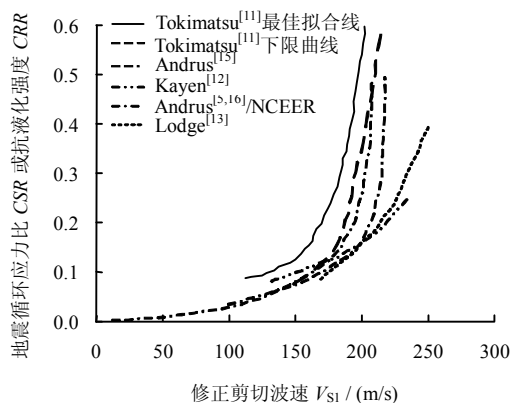


图 1 不同研究者<sup>[11-16]</sup>建议的液化临界曲线

Fig.1 Comparison of relationships proposed by different methods

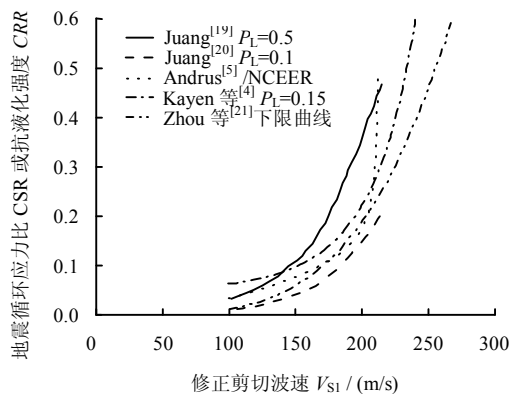


图 2 Kayen 等<sup>[4]</sup>、Zhou 等<sup>[21]</sup>、Andrus 等<sup>[5, 16]</sup>建议的液化临界曲线对比

Fig.2 Comparison of liquefaction triggering curves proposed by Kayen et al. [4], Zhou et al. [21] and Andrus et al. [5, 16]

Juang 等<sup>[19]</sup>根据 Andrus 等<sup>[5]</sup>提供的液化数据库,基于人工神经网络的训练与试验,给出了砂土液化临界关系曲线,并通过逻辑回归和函数映射方法提出了砂土液化概率判别法。Juang 等<sup>[20]</sup>对比了采用逻辑回归和贝叶斯映射方法进行概率分析的优劣性,认为采用贝叶斯映射方法更加合理、简单,液化概率为 0.5 和 0.1 的液化概率等值线如图 2 所示。Zhou 等<sup>[21]</sup>结合压电陶瓷弯曲元动测技术,通过

循环三轴试验数据, 补充了高循环应力比 ( $CSR > 0.3$ ) 和高修正剪切波速的液化数据, 建议了液化临界曲线的最佳拟合曲线和下限曲线 (图 2)。Kayen 等<sup>[4]</sup>利用 35 次地震、422 例液化/不液化场地数据, 依据 Cetin 等<sup>[22]</sup>液化判别方法的基本构架, 采用贝叶斯回归和结构可靠性方法, 给出了液化概率等值线图, 并建议将液化概率  $P_L = 0.15$  的液化临界曲线作为液化判别确定性曲线 (图 2), 因其现场资料最为丰富, 其液化临界曲线也最具可信性, 但其概率模型计算繁琐。

### 3 新的液化临界线及其验证

#### 3.1 场地液化资料

Kayen 等<sup>[4]</sup>液化数据库包含了 35 次地震中的 415 例场地液化资料。鉴于 Kayen 等<sup>[4]</sup>与 Andrus 等<sup>[5]</sup>液化数据库中有部分场地液化资料是重复的, 本文删去了 Andrus 等数据库重复的数据 (见表 1), 保留了 Andrus 等数据库中未重复的 17 次地震中的 150 例场地液化资料。结合 Kayen 等<sup>[4]</sup>液化数据库 35 次地震中 415 例场地液化资料、Saygili<sup>[6]</sup>给出的 2 次地震中的 41 例场地液化资料以及 Chu 等<sup>[7]</sup>给出的台湾集集地震 12 例场地液化资料<sup>[23]</sup>, 总共收集到 49 次地震中的 618 例液化/不液化场地数据。其中, 380 例液化场地数据、234 例不液化场地数据、4 例边缘场地数据, 如表 2 所示。液化场地是地表有明显喷水、冒砂或地面沉降、开裂、侧滑等液化现象的场地; 不液化场地地表既无明显液化现象, 也没有其他迹象能推断其发生液化的描述; 边缘场地则是处于或者很接近于液化场地或不液化的场地。

表 1 Kayen 数据库与 Andrus 等数据库  
发生重复的地震信息

Table 1 Information of the repetitive data  
in Andrus and Kayen databases

| 数据库    | 序号 | 地震                    | 时间<br>/ 年 | 液化<br>场址数 | 不液化<br>场址数 |
|--------|----|-----------------------|-----------|-----------|------------|
| Kayen  | 1  | Niigata 地震            | 1964      | 3         | 1          |
|        | 2  | Haicheng 地震           | 1975      | 5         | 1          |
|        | 3  | Imperial Calley 地震    | 1979      | 4         | 7          |
|        | 4  | Mid-Chiba 地震          | 1980      | 0         | 2          |
|        | 5  | Westmorland 地震        | 1981      | 6         | 5          |
| Andrus | 1  | Borah Peak 地震         | 1983      | 15        | 3          |
|        | 2  | Elmore Ranch 地震       | 1987      | 0         | 11         |
|        | 3  | Chiba-Toho-Okii 地震    | 1987      | 0         | 1          |
|        | 4  | Superstition Hills 地震 | 1987      | 3         | 8          |

表 2 剪切波速液化数据库的基本信息  
Table 2 Basic information of liquefaction data  
from  $V_s$  case history database

| 序号 | 地震名称                 | 时间<br>/ 年 | 震级      | 液化<br>场址数 | 不液化<br>场址数 | 资料来源                                                |
|----|----------------------|-----------|---------|-----------|------------|-----------------------------------------------------|
| 1  | San Francisco        | 1906      | 7.7     | 9         | 5          | Andrus 等 <sup>[5]</sup> ,<br>Kayen 等 <sup>[4]</sup> |
| 2  | Fukul                | 1948      | 7.1     | 10        | 1          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 3  | Daly City            | 1957      | 5.3     | 0         | 5          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 4  | Niigata              | 1964      | 7.5     | 6         | 3          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 5  | Tokachi Oki          | 1968      | 7.9     | 5         | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 6  | Miyagi Ken Oki       | 1973      | 7.4     | 10        | 1          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 7  | Haicheng             | 1975      | 7.1     | 5         | 1          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 8  | Tangshan             | 1976      | 8       | 16        | 8          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 9  | Miyagi Ken Oki       | 1978      | 6.7     | 2         | 6          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 10 | Omperial Valley      | 1979      | 6.5     | 4         | 7          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 11 | Mid Chiba            | 1980      | 5.9     | 0         | 2          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 12 | Westmorland          | 1981      | 5.9     | 6         | 5          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 13 | Nihonkai Chubu       | 1983      | 7.7     | 8         | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 14 | Nihonkai-Chubu 余震    | 1983      | 7       | 2         | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 15 | Bora Peak            | 1983      | 6.9     | 20        | 4          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 16 | Chiba Ibaaragi       | 1985      | 6       | 0         | 2          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 17 | Taiwan(event Lsst2)  | 1985      | 5.3     | 0         | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 18 | Taiwan(event Lsst3)  | 1985      | 5.5     | 0         | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 19 | Taiwan(event Lsst4)  | 1985      | 6.6     | 0         | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 20 | Taiwan(event Lsst6)  | 1985      | 5.4     | 0         | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 21 | Taiwan(event Lsst7)  | 1985      | 6.6     | 0         | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 22 | Taiwan(event Lsst8)  | 1985      | 6.2     | 0         | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 23 | Taiwan(event Lsst12) | 1985      | 6.2     | 0         | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 24 | Taiwan(event Lsst13) | 1985      | 6.2     | 0         | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 25 | Taiwan(event Lsst16) | 1985      | 7.6     | 0         | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 26 | Lotung LSST          | 1986      | 6.6     | 0         | 5          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 27 | Lotung LSST          | 1986      | 6       | 0         | 1          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 28 | Chiba Ibaragi Kenkyo | 1986      | 6       | 0         | 2          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 29 | Chiba Toho Oki       | 1987      | 6.5     | 0         | 1          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 30 | Superstition Hills   | 1987      | 6.5     | 3         | 8          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 31 | Elmore Ranch         | 1987      | 5.9     | 0         | 11         | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 32 | Loma Prieta          | 1989      | 7       | 75        | 51         | Andrus 等 <sup>[5]</sup> ,<br>Kayen 等 <sup>[4]</sup> |
| 33 | Kushior              | 1993      | 7.6/8.3 | 10        | 0          | Andrus 等 <sup>[5]</sup> ,<br>Kayen 等 <sup>[4]</sup> |
| 34 | hokkaido Nansei Oki  | 1993      | 7.7/8.3 | 27        | 4          | Andrus 等 <sup>[5]</sup> ,<br>Kayen 等 <sup>[4]</sup> |
| 35 | Northridge           | 1994      | 6.7     | 3         | 0          | Andrus 等 <sup>[5]</sup>                             |
| 36 | Hyogo Nambu          | 1995      | 7       | 78        | 26         | Andrus 等 <sup>[5]</sup> ,<br>Kayen 等 <sup>[4]</sup> |
| 37 | Chi Chi              | 1999      | 7.6     | 40        | 16         | Chu 等,<br>Saygili,<br>Kayen 等 <sup>[4]</sup>        |
| 38 | Tukey                | 1999      | 7.4     | 8         | 5          | Saygili,<br>Kayen 等 <sup>[4]</sup>                  |
| 39 | Tottori Seibu        | 2000      | 6.8     | 3         | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 40 | Geiyo Hiroshima      | 2001      | 6.8     | 5         | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 41 | Denali Fault         | 2002      | 7.9     | 3         | 5          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 42 | Denali Fault         | 2002      | 7       | 1         | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 43 | Sanriku Minami       | 2003      | 7       | 2         | 9          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 44 | Tokachi Oki          | 2003      | 7.8     | 3         | 3          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 45 | Tokachi Oki 余震       | 2003      | 7.1     | 0         | 1          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 46 | Niigata Chuetsu Oki  | 2007      | 6.6     | 2         | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 47 | Achaia-Elia          | 2008      | 6.5     | 2         | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 48 | Tohoku               | 2011      | 9       | 2         | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |
| 49 | Tohoku 余震            | 2011      | 7.4     | 10        | 0          | Kayen 等 <sup>[4]</sup>                              |

### 3.2 以 $V_s$ 和 $PGA$ 为依据的液化临界曲线

所有液化或不液化场地的土层循环  $CSR$  均按照 Idriss-Bounanger 液化判别方法的基本构架<sup>[1-3]</sup>重新计算, 计算公式详见文献[1]3.1.2 节式 (5)~(10)。

对于核电厂这一类重大工程的场址, 应尽可能避免将液化场地误判为不液化场地, 否则, 其后果是极为严重的。依据 Idriss 等<sup>[2-3]</sup>确定液化临界曲线的基本方法, 本文确定液化临界曲线的基本原则是: 修正剪切波速  $V_{SI} \leq 200$  m/s 时, 以液化数据点的下界限值控制液化临界曲线的位置, 即控制液化临界曲线与液化点的下边界相切;  $V_{SI} > 200$  m/s 时, 以不液化数据点的上界限值控制液化临界曲线的位置, 即控制液化临界曲线与不液化点的上边界相切。

依据上述液化或不液化场地数据, 绘制土层的地震循环应力比  $CSR$  与修正剪切波速  $V_{SI}$  的散点图, 如图 3 所示。图中的  $CSR$  值已规范化为矩震级  $M_w = 7.5$ 、上覆有效压力  $\sigma'_v = 100$  kPa 的循环  $CSR$ 。据此, 场地液化临界曲线可表示为

$$CRR_{M_w=7.5, \sigma'_v=100 \text{ kPa}} = \exp \left[ \frac{V_{SI}}{86.4} + \left( \frac{V_{SI}}{134.0} \right)^2 - \left( \frac{V_{SI}}{125.2} \right)^3 + \left( \frac{V_{SI}}{158.5} \right)^4 - 4.8 \right] \quad (1)$$

$V_{SI}$  按下式计算:

$$V_{SI} = V_s \left( \frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^{0.25} \quad (2)$$

式中:  $V_s$  为现场剪切波速实测值;  $\sigma'_v$  为测试土层深度处的有效上覆应力;  $P_a$  为标准大气压强;  $\sigma'_v$  与  $P_a$  的量纲相同。

图 3 比较了式 (1) 与 Kayen<sup>[4]</sup>、Andrus<sup>[5, 16]</sup>、Zhou<sup>[21]</sup>等给出的液化临界曲线及现场液化或不液化场地数据点的关系。在修正剪切波速  $100 \text{ m/s} < V_{SI} < 250 \text{ m/s}$  区间内, 本文建议的液化临界曲线包络了 Andrus 等、Kayen 等的液化临界曲线的下限。Andrus 等<sup>[5, 16]</sup>液化临界曲线有 31 个液化数据点在临界线下方, 2 个液化点正好在液化临界曲线上; Kayen 等<sup>[5]</sup>的液化临界曲线有 17 个液化数据点在液化临界曲线下方, 2 个液化数据点正好在液化临界曲线上; 式 (1) 的液化临界曲线有 3 个液化数据点在液化临界曲线下方, 1 个液化数据点正好在液化临界曲线上, 1 个液化数据点的下边界与液化临界曲线相切, 显著降低了液化数据点的误判率。Zhou 等<sup>[21]</sup>的液化临界曲线有 4 个液化数据点在其下方, 1 个液化数据点正好在液化临界曲线上。从图 3 中

明显可以看到, 当  $V_{SI} > 212 \text{ m/s}$ , 相比式 (1) 的液化临界线, 有更多的不液化数据点落在 Zhou 等的液化临界曲线上方, 亦即该曲线偏于保守。

值得注意的是, 在修正剪切波速  $V_{SI} \approx 300 \text{ m/s}$  处有一例异常的场地液化数据, 明显偏离不同研究者给出的液化临界曲线, 其原因不明。该液化场地取自 1999 年台湾集集地震的 Wufeng 地区<sup>[6]</sup>, 地表  $PGA = 0.67g$ , 临界液化土层深为  $1.8 \text{ m}$ , 地下水位深度为  $1.14 \text{ m}$ , 现场  $V_s = 208 \text{ m/s}$ 。

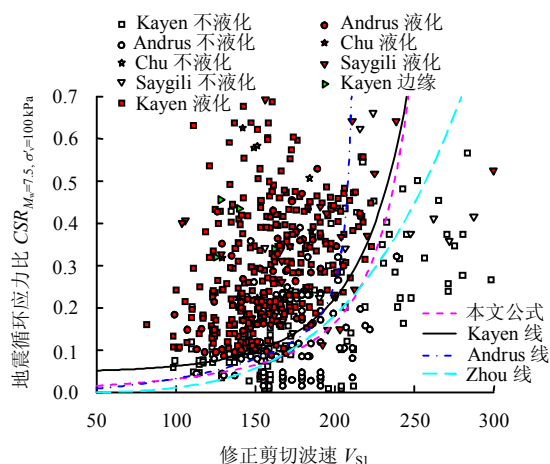


图 3 本文式 (1) 与 Kayen 等<sup>[4]</sup>、Andrus 等<sup>[5]</sup>、Zhou 等<sup>[21]</sup>给出的液化临界曲线及现场液化场地数据点的关系  
Fig.3  $V_s$  case histories of database compared with the liquefaction triggering curves versus  $V_{SI}$  with equations proposed by this paper, by Andrus et al., Zhou et al. and Kayen et al.

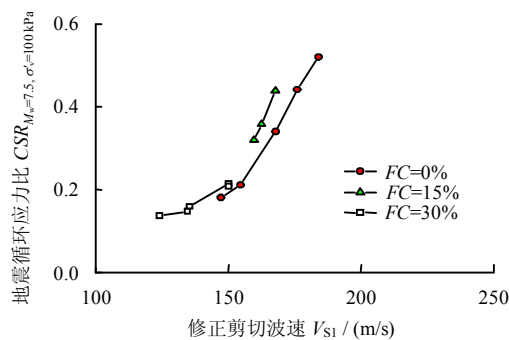
### 3.3 液化临界曲线的合理性验证

以现场液化或不液化场地数据点为依据, 通过分析土层循环  $CSR_{M_w=7.5, \sigma'_v=100 \text{ kPa}}$  计算的不确定性来验证液化临界曲线式 (1) 的合理性。这些参数估计的不确定性应使液化临界曲线的位置合理的保守, 且大部分液化点均在液化临界线之上, 并落在液化临界线上方的不液化点的数量应当比落在液化临界线下方的液化点数量多。

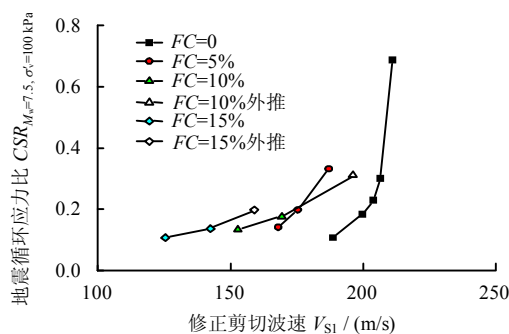
#### 3.3.1 细粒含量 $FC$ 的变化

Kayen 等认为<sup>[4]</sup>,  $FC$  主要通过 3 个途径影响液化: 影响土壤颗粒机制, 影响现场贯入试验 SPT 和静力触探试验 CPT 等的结果, 影响剪切波速。不少学者通过试验证明了土中细粒含量越高, 砂土的最大剪切模量  $G_{max}$  降低得越多, 但未能直接从  $FC$  对  $V_s$  影响的研究得到  $FC$  对液化临界曲线  $CRR-V_{SI}$  的影响。Huang 等<sup>[24]</sup>对不同细粒含量的台湾 Mai Liao 粉砂重塑土样进行不排水单剪和循环三轴剪切试验, 发现对于细粒含量分别为 0、15% 和 30% 的重

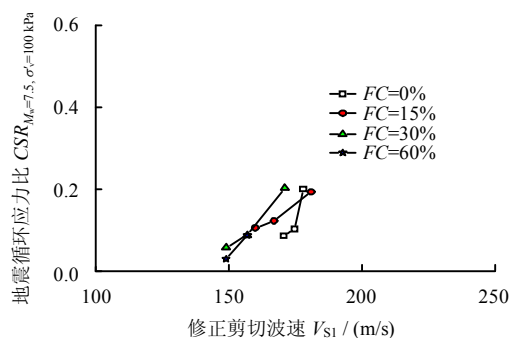
塑土样,  $CRR-V_{S1}$  的位置差别不大, 如图 4(a)所示。Liu 等<sup>[25]</sup>和 Dabiri 等<sup>[26]</sup>的研究也得出类似的结果, 如图 4(b)和图 4(c)所示。Kayen 等<sup>[4]</sup>分析了有细粒含量资料的 109 例场地, 如图 4(d)所示为其模型在  $FC=0$  ( $FC < 5\%$ ) 和  $FC=35\%$  时的曲线, 可以看



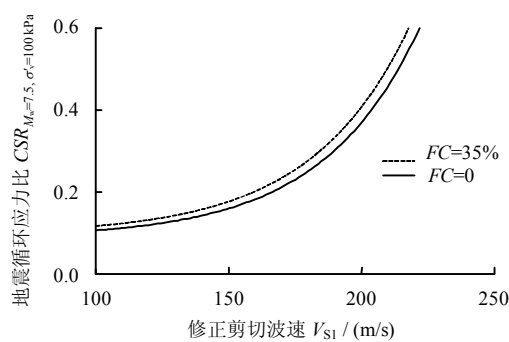
(a) Huang 对台湾 Mai Liao 土的试验



(b) Liu 对 Carraro 数据的分析



(c) Dabiri 对 Firoozkooh 土的试验



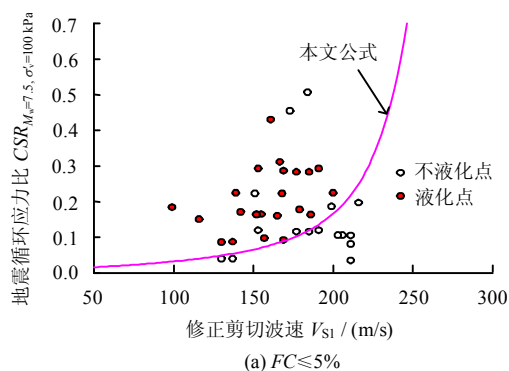
(d) Kayen 对数据的分析

图 4 不同细粒含量时土的  $CRR-V_{S1}$  关系

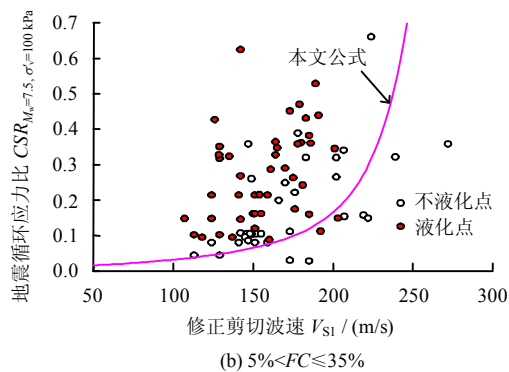
Fig.4 Relationships of  $CRR-V_{S1}$  with different fines contents

出, 两者的  $V_{S1}$  仅相差了 5 m/s。这与 Andrus 等<sup>[16]</sup>、Zhou 等<sup>[21]</sup>的结果几乎一致。上述研究表明, 细粒含量  $FC$  对液化临界曲线  $CRR-V_{S1}$  位置的影响很小。

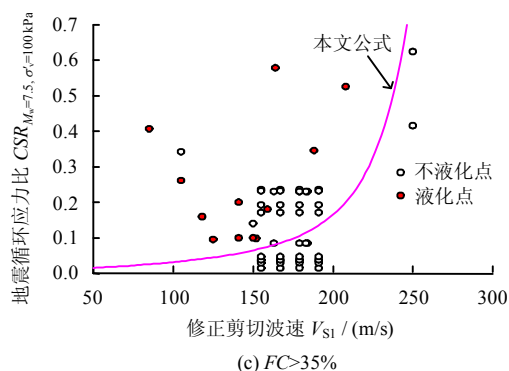
Kayen 等<sup>[4]</sup>的液化场地数据库中没有给出场地土的  $FC$  数据, 但 Andrus 等<sup>[5]</sup>液化场地数据库及 Saygili<sup>[6]</sup>、Chu 等<sup>[7]</sup>液化场地数据共 183 例, 给出了场地土的  $FC$  数据, 采用这些数据进行了  $FC$  对式(1)表示的  $CRR-V_{S1}$  的合理性验证, 验证结果如图 5 所示。图 5(a)为液化临界曲线对洁净砂 (clean sand,  $FC \leq 5\%$ ) 的验证结果, 有 1 例液化数据点的下边界与液化临界曲线相切。图 5(b)为液化临界曲线对细粒含量  $5\% < FC \leq 35\%$  时土的验证结果, 验证表明, 有 1 例液化数据点的下边界接近液化临界曲线,



(a)  $FC \leq 5\%$



(b)  $5\% < FC \leq 35\%$



(c)  $FC > 35\%$

图 5 液化临界曲线对不同细粒含量土的液化和不液化数据点的适用性验证

Fig.5 Distribution of case history data with different fine contents compared with the liquefaction triggering curve proposed by this paper

2 例液化数据在液化临界曲线下方, 落在液化临界曲线下方的液化场址分别是 1999 年台湾集集地震中的 Nantou 地区和 Yuanlin 地区场地: Nantou 地区场地地表  $PGA = 0.38g$ , 临界土层深为 7.8 m, 地下水位深度为 0.99 m, 现场  $V_s = 195$  m/s; Yuanlin 地区液化场地地表  $PGA = 0.18g$ , 临界土层深为 2.2 m, 地下水位深度为 2 m, 现场  $V_s = 150$  m/s。图 5(c) 为液化临界曲线对细粒含量  $FC > 35\%$  时土的验证结果, 验证表明, 没有液化数据在液化临界曲线下方。从上面的分析可以得出,  $FC$  对  $CRR-V_{S1}$  位置的影响并不大, 因此, 以剪切波速为指标评价场地液化时, 可以忽略  $FC$  的变化对场地液化评价结果的影响。

### 3.3.2 有效上覆压力 $\sigma'_v$ 的变化

不同有效上覆压力的场地液化或不液化数据点与  $CRR-V_{S1}$  的相对位置的分析结果如图 6 所示。将有效上覆压力  $\sigma'_v$  分为 5 个区间  $\leq 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 120$  和  $> 120$  kPa 对  $CRR-V_{S1}$  位置的合理性进行验证。图 6(a) 为式 (1) 对  $\sigma'_v \leq 40$  kPa 现场液化或不液化数据点的验证结果: 在  $V_{S1} < 200$  m/s 区间, 液化临界线上方附近有 1 个液化数据点; 有 2 个液化数据点落在液化临界曲线下方。图 6(b) 为对  $\sigma'_v$  为  $40 \sim 60$  kPa 区间现场液化或不液化数据点的验证结果: 有 1 例液化数据点在液化临界曲线下方, 1 例液化数据点正好在液化临界曲线上, 2 例液化数据点的下边界接近液化临界曲线, 在  $V_{S1} > 200$  m/s 区间的 1 个不液化数据点的上边界与液化临界曲线相切。图 6(c) 为对  $\sigma'_v$  为  $60 \sim 80$  kPa 区间现场液化或不液化数据点的验证结果, 有 1 个液化数据点的下边界与液化临界曲线相切。图 6(a)~6(c) 中的现场液化或不液化数据点包括了靠近液化临界曲线的大部分液化及不液化数据点。图 6(d) 和图 6(e) 分别为对  $\sigma'_v$  为  $80 \sim 120$  kPa 和  $\sigma'_v > 120$  kPa 区间的现场液化或不液化数据点的验证结果, 均没有液化数据点在液化临界曲线下方。这表明液化临界曲线的位置对不同有效上覆压力的液化或不液化数据点分布合理。

### 3.3.3 震级的变化

#### (1) Kayen 等<sup>[4]</sup>液化场地数据库

液化场地数据库中的地震震级用矩震级  $M_w$  表示 (见表 3)。数据库中的部分地震, Idriss 等<sup>[3]</sup>与 Kayen 等<sup>[4]</sup>给出的  $M_w$  值数据有出入, 图 7 分别为采用 Idriss 等、Kayen 等<sup>[4]</sup>给出的  $M_w$  值时, 液化或不液化数据点与液化临界曲线的相对位置关系。图 7(b) 中的数据点相比于图 7(a) 中数据点的  $CSR$  值略微偏低, 但这不影响液化临界曲线与数据点的相对位置关系。

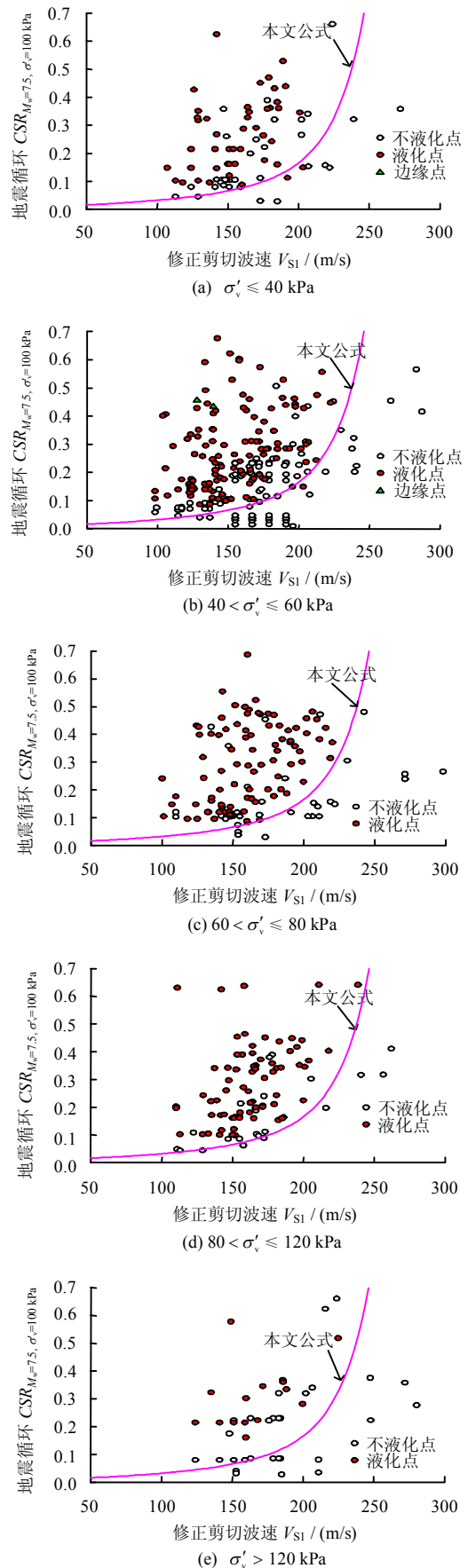
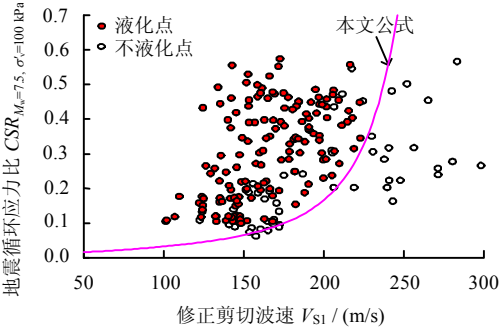


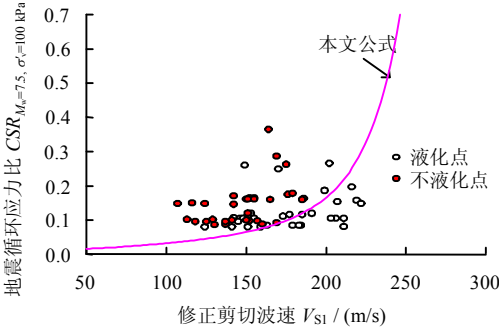
图 6 液化临界曲线对不同有效上覆压力的液化或不液化点数据的合理性验证  
Fig.6 Sensitivity of case history data with different effective overburden stresses to liquefaction or nonliquefaction triggering curves proposed by this paper

表 3 Idriss 等<sup>[3]</sup>和 Kayen 等<sup>[4]</sup>液化数据库  $M_w$  值数据有出入的地震  
Table 3 Different  $M_w$  between Idriss<sup>[3]</sup> and Kayen<sup>[4]</sup> et al database

| 数据库 $M_w$ | Fukui<br>(1948) | Niigata<br>(1964) | Tokachi Oki<br>(1968) | Haicheng<br>(1975) | Tangshan<br>(1976) | Miyagi Ken Oki<br>(1978) | Nihinkai-Chubu 余震<br>(1983) | Loma Prieta<br>(1989) | Hyogo Nambu<br>(1995) |
|-----------|-----------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Idriss 等  | 7.0             | 7.6               | 7.5                   | 7.0                | 7.6                | 6.5                      | 6.8                         | 6.93                  | 6.9                   |
| Kayen     | 7.1             | 7.5               | 7.9                   | 7.1                | 8.0                | 6.7                      | 7.0                         | 7.00                  | 7.0                   |



(a) Kayen 等<sup>[4]</sup>的矩震级



(b) Idriss 等<sup>[3]</sup>的矩震级

图 7 液化临界线对矩震级  $M_w$  取值差异性的合理性验证  
Fig.7 Sensitivity of case history data with different earthquake magnitude scales to the liquefaction triggering curves proposed by this paper

(2) Andrus 等<sup>[5]</sup>液化场地数据库

Andrus 等<sup>[5]</sup>液化场地数据库中 1989 年 Loma Prieta 地震  $M_w = 7.0$ , 而 Idriss 等<sup>[3]</sup>数据库中  $M_w = 6.93$ 。图 8 分别是取  $M_w = 7.0$  和  $M_w = 6.93$  时, 1989 年 Loma Prieta 地震液化数据与式 (1) 表示的液化临界曲线之间的关系。可以发现, 无论取  $M_w = 7.0$  还是  $M_w = 6.93$ , 对液化临界曲线的位置几乎没有影响。

Andrus 等<sup>[5]</sup>液化场地数据库中, 1993 年的 Kushiro Oki 地震和 Hokkaido Nansei Oki 地震  $M_w = 8.3$ ; 而在 Kayen 等<sup>[4]</sup>数据库中, 这两次地震的矩震级分别为  $M_w = 7.6$  和  $M_w = 7.7$ 。图 9 分别给出了根据 Andrus 数据库的矩震级值和 Kayen 数据库的矩震级值计算的 Kushiro Oki 地震和 Hokkaido Nansei Oki 地震液化数据与液化临界曲线式 (1) 的位置关系, 液化数据点离临界线较远。可以发现, 不论取哪一个数据库的矩震级值, 均不影响液化临界曲线的位置。

Fig.8 取不同矩震级时, 1989 年 Loma Prieta 地震液化数据点与本文液化临界曲线的关系

Fig.8 Relationship between the liquefaction triggering curve proposed by this paper and the case history data in 1989 Loma Prieta earthquake for different earthquake magnitude scales

采用不同的震级表示方法, 同一次地震的震级大小不尽相同, 甚至采用同一概念的震级, 由于地震台站所处的位置不同, 不同国家、不同地震台站给出的地震震级的大小, 也存在一定的差异。以上分析表明, 液化临界曲线式 (1) 对震级在一点范围内的取值差异均有很好的适应性, 对液化临界曲线位置的确定影响甚小。

3.4 液化临界曲线对不同影响因素修正方法的敏感性分析

3.4.1 有效上覆压力修正系数  $K_\sigma$  的变化

Idriss 等<sup>[3]</sup>给出的计算循环应力比 CSR 的  $K_\sigma$  计算公式如下:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln(\sigma'_v / P_a) \leq 1.1 \quad (3)$$

其中:

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60CS}}} \leq 0.3 \quad (4)$$

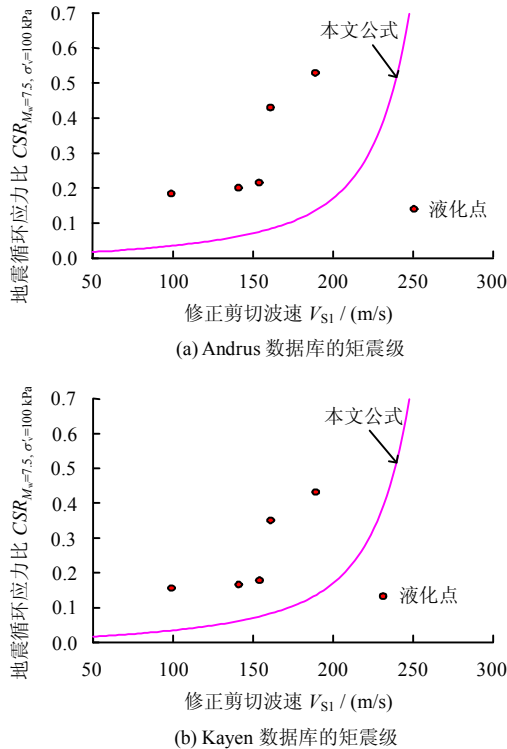


图9 取不同矩震级值时, Kushiro Oki 地震和 Hokkaido Nansei Oki 地震液化数据与本文液化临界曲线的关系  
Fig.9 Relationship between the liquefaction triggering curve proposed by this paper and the case history data in Kushiro Oki earthquake and Hokkaido Nansei Oki earthquake for different earthquake magnitude scales

式中:  $(N_1)_{60CS}$  为等效洁净砂的修正标准贯入锤击数。

$K_\sigma$  上限值为 1.1, 且以等效洁净砂的修正标准贯入锤击数  $(N_1)_{60CS}$  为计算指标。如图 6 所示, 剪切波速液化数据中以  $\sigma'_v \leq 60$  kPa 的数据为多数, 上覆有效压力的平均值为 65.6 kPa。Idriss 等<sup>[3]</sup>认为, 当  $\sigma'_v \leq 100$  kPa 时,  $1.0 \leq K_\sigma \leq 1.1$ ; 且当  $\sigma'_v < 64.4$  kPa 时, 可以不考虑  $K_\sigma$  修正, 即  $K_\sigma = 1.0$ 。确定液化临界曲线式 (1) 时, 取所有液化或不液化场地数据点的  $K_\sigma = 1.1$ 。图 10 为  $K_\sigma = 1.0$  时, 液化临界曲线与液化或不液化数据点的关系, 有 2 个液化点的上边界与液化临界曲线接近, 1 个液化数据点的下边界与液化临界曲线相切。因此, 对有效上覆压力修正系数  $K_\sigma$  取 1.1 或 1.0, 液化临界曲线式 (1) 的位置均是合理的。

#### 3.4.2 土层剪应力折减系数 $r_d$ 的变化

不同学者建议的计算循环 CSR 的  $r_d$  的表达式各不相同, 图 11 分别比较了采用 Cetin<sup>[22]</sup>、Kishida<sup>[3, 27]</sup> 以及 Youd<sup>[18]</sup> 等建议的  $r_d$  计算公式时, 液化或不液化场地数据点与液化临界曲线式 (1) 的相对位置关系。图 11(a) 中有 5 个液化数据点在液化临界曲线下方, 其中有 2 个液化数据点的上边界与液化临界曲线相切, 2 个液化数据点正好在液化临界曲线上,

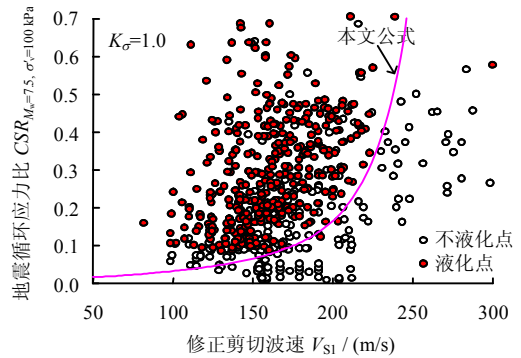


图10  $K_\sigma=1.0$  时液化临界曲线与液化场地数据点的关系  
Fig.10 Relationship between the liquefaction triggering curve and the case history data at  $K_\sigma=1.0$

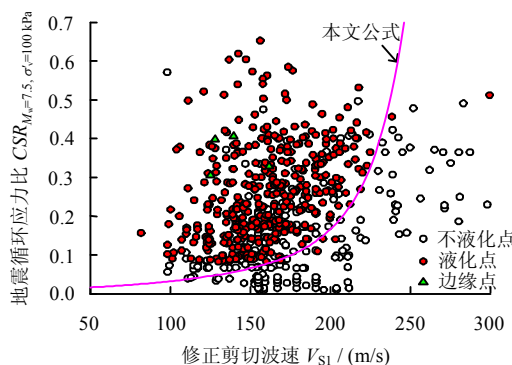
3 个液化数据点的下边界与液化临界曲线相切; 图 11(b) 中有 1 个液化数据点在液化临界曲线下方, 2 个液化数据点正好在液化临界曲线上, 2 个液化数据点的下边界与液化临界曲线相切; 图 11(c) 中 3 个液化数据点落在液化临界曲线下方, 1 个液化点在液化临界曲线上, 2 个液化点的下边界与液化临界曲线相切。图 11(a) 和图 11(c) 中液化或不液化数据点的位置相对于图 3 中的位置向下移动, 图 11(b) 中的液化数据点相对图 3 中的位置向上移动。总体上看, 液化临界曲线的位置对剪应力折减系数  $r_d$  的计算方法不敏感, 这说明本文给出的液化临界曲线式 (1) 的位置是合理的。

#### 3.4.3 震级标定系数 $MSF$ 的变化

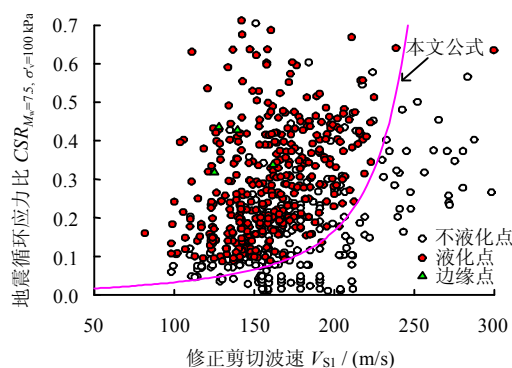
不同学者建议的计算循环 CSR 的震级标定系数  $MSF$  的取值或表达式也各不相同。Youd 等<sup>[18]</sup> 建议了  $MSF$  取值: 震级小于 7.5 时, 以 Andrus 等<sup>[15]</sup> 公式为上限值; 震级大于 7.5 时, 采用 Seed 等<sup>[28]</sup> 公式。Kayen 等<sup>[4]</sup> 建议的  $MSF$  计算值与 Cetin 等<sup>[22]</sup> 以曲线形式给出的  $MSF$  值很接近。

图 12 给出了依据 Andrus 等、Seed 等、Kayen 等公式计算  $MSF$  值时液化或不液化场地数据点与液化临界曲线式 (1) 的相对位置关系。图 12(a) 中有 3 个液化点的下边界与液化临界曲线相切, 1 个液化点正好在临界曲线上; 图 12(b) 中有 3 个液化点在液化临界曲线下方, 2 个液化点正好在液化临界曲线上, 3 个液化点的下边界与液化临界曲线相切; 且图 12(a)、图 12(b) 中液化或不液化数据点的位置与图 3 中的位置相比很接近。图 12(c) 中 4 个液化点在液化临界曲线下方, 且其中一个液化点的上边界与液化临界曲线相切, 整体上液化或不液化数据点相比图 3、图 12(a) 和图 12(b) 中的位置要略往上移动, 但不影响液化临界线的位置。这表明, 液化临界曲线的位置对不同研究者建议的  $MSF$  计算公式

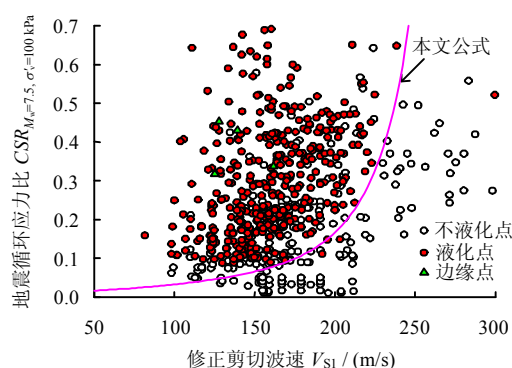
不敏感,本文给出的液化临界曲线式(1)的位置是合理的。



(a) Cetin 的  $r_d$  公式



(b) Kishida 的  $r_d$  公式



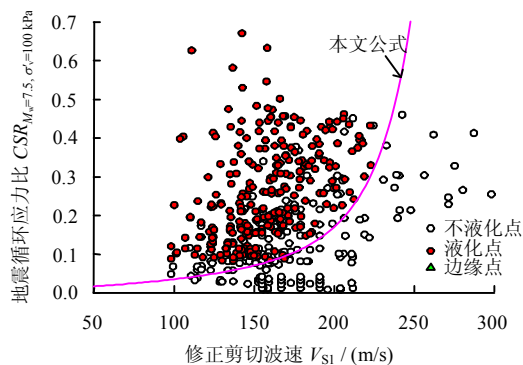
(c) Youd 的  $r_d$  公式

图 11 液化临界曲线对 Cetin 等<sup>[22]</sup>、Kishida 等<sup>[27]</sup>及 Youd 等<sup>[18]</sup>剪应力折减系数  $r_d$  公式的适用性验证

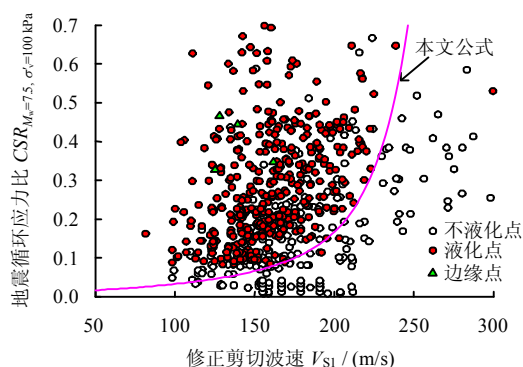
Fig.11 Sensitivity of case history data processed with the  $r_d$  relationships by Cetin et al.<sup>[22]</sup>, Kishida et al.<sup>[27]</sup> and Youd et al.<sup>[18]</sup> compared with the liquefaction triggering curve proposed by this paper

### 3.5 液化临界曲线对含砾砂土液化评价的适用性

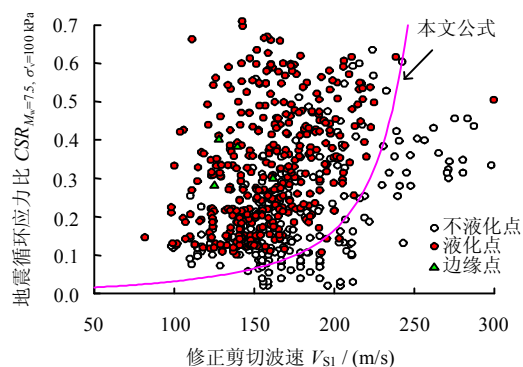
曹振中<sup>[29]</sup>给出了 2008 年汶川地震中 47 例含砾砂土液化场地的剪切波速数据,其中 30 例液化场地数据、17 例不液化场地数据,主要位于液化较为明显的德阳市境内。汶川地震震级为 8.0,测试剪切波速场地的液化临界深度  $d_s$  为 1.9~11.9 m,地



(a) Andrus 的 MSF 公式



(b) Seed 的 MSF 公式



(c) Kayen 的 MSF 公式

图 12 依据 Andrus 等<sup>[5,16]</sup>、Seed 等<sup>[8]</sup>以及 Kayen 等<sup>[4]</sup>的 MSF 公式计算的现场液化或不液化数据点与液化临界曲线的关系

Fig.12 Sensitivity of case history data processed with different MSF relationships by Andrus<sup>[5,16]</sup>, Seed<sup>[8]</sup> and Kayen<sup>[4]</sup>, compared with the liquefaction or nonliquefaction triggering curves proposed by this paper

下水位深  $d_w$  为 0.6~8.0 m,修正  $V_{S1}$  为 160~364 m/s。PGA 依据中国地震台站记录给出的地表峰值加速度等值线图插值确定,介于(0.09~0.49)g 之间。依据文献[1]3.1.2 节公式计算的土层循环 CSR 为 0.11~0.73。

图 13 给出了液化临界曲线式(1)与汶川地震含砾砂土地点液化或不液化数据点的相对位置关系。可以看出,有相当高比例的液化数据点位于液化临界曲线下方,被误判为不液化场地。依据国内

外 49 次地震、614 例液化/不液化场地数据给出的液化临界曲线式 (1), 为何对汶川地震含砾砂土地地的液化数据不适用呢? 笔者认为, 可能存在以下两个原因。

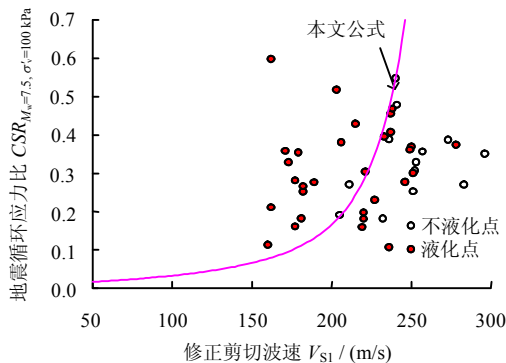


图 13 建议的液化临界曲线与汶川地震含砾砂土液化场地液化或不液化数据的相对位置关系

Fig.13 Relationship between the liquefaction triggering curve and data of gravel soils during Wenchuan Earthquake

(1) 地表  $PGA$  的估算精度不够。四川省地形复杂, 获取汶川地震主震加速度记录的地震台站主要位于龙门山中, 在液化调查数据点范围内无获取记录的台站, 且附近 10 km 范围内仅有 4 个获取记录的台站, 无法直接给出液化场地上的地表  $PGA$ 。文献[29]中液化或不液化测试点的地表  $PGA$  值是依据国家强震动台网中心发布的汶川 8.0 级地震加速度等值线图插值得到。图 14 所示为各液化测试点分布图, 测试点地处成都平原边缘, 位于四川高山高原区域与四川东部盆地山地区域的过渡区域, 靠近龙门山东面山脚, 地势急剧变化。

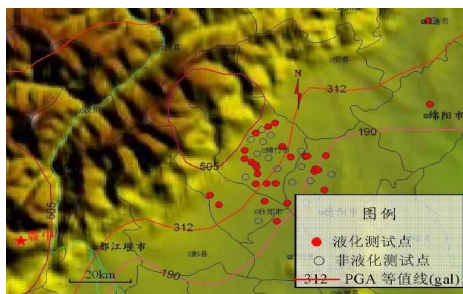


图 14 汶川地震中液化或不液化含砾砂土地地波速测试点在四川盆地中的位置

Fig.14 Investigated sites location at Sichuan Basin during Wenchuan Earthquake

(2) 含砾砂土的  $V_s$  比一般的砂土或粉土大。对于同样密实性的含砾砂土和一般砂土, 含砾砂土的剪切波速相对更大<sup>[29]</sup>; 含砾砂土中的剪切波速值大

小与其颗粒级配有关<sup>[30]</sup>。当其他因素不变, 含砾量越高, 含砾砂土的剪切波速值越大<sup>[31]</sup>。Iyisan<sup>[32]</sup>分析土耳其 Erzincan 地区土层的剪切波速与标贯试验击数、上覆有效压力关系时, 发现含砾砂土的剪切波速值大于一般的砂土。

以上分析表明, 依据液化或不液化的砂土和粉土地地资料建立的液化临界曲线, 对含砾砂土地地的液化评价是否适用, 尚有待进一步研究。

## 4 地震液化判别方法的概率分析

图 3 所示的液化临界曲线式 (1) 给出了一条区分液化与不液化区域的确定性临界状态线。通常将处于临界线上方的场地判为液化场地, 处于临界线下方的场地判为不液化场地。然而从图中可以看出, 有部分的非液化数据点在液化临界曲线的上方, 也有少数的液化数据点在液化临界曲线的下方, 还有若干液化和非液化数据点正好在液化临界曲线上; 此外, 一些在液化临界线下方很近处的数据点, 很难判定其液化可能性, 在工程中可能会带来风险。为此, 对于沿海核电厂这类重大工程场地的液化判别, 给出具有概率含义的液化临界曲线计算公式是十分必要的。

### 4.1 加权最大似然法和加权经验概率法

利用加权最大似然方法, 采用式 (5) 的逻辑回归模型, 以剪切波速和地表  $PGA$  值为依据的砂土液化概率判别模型<sup>[20, 33]</sup>可表示为

$$P_L = \frac{1}{1 + (F_s / A)^B} \quad (5)$$

式中:  $A$ 、 $B$  均为参数;  $F_s$  为抗液化安全系数。

以现场液化/不液化场地数据为样本, 其中液化场地数据 380 例, 不液化场地数据 234 例, 采用式 (5) 的逻辑回归模型, 加权最大似然方程可以表示为

$$L(a, b | D) = \left\{ \prod_{i=1}^{380} \frac{1}{1 + (F_s / A)^B} \right\}^{\omega_L} \cdot \left\{ \prod_{j=1}^{234} \left( 1 - \frac{1}{1 + (F_s / A)^B} \right) \right\}^{\omega_{NL}} \quad (6)$$

式中:  $D$  为液化和不液化数据;  $\omega_{NL}$  和  $\omega_L$  分别为修正不液化数据和液化数据样本数量差异的权重因子。

根据 Cetin 等<sup>[34]</sup>的研究结果, 一般  $1.0 < \omega_{NL} / \omega_L < 3.0$ , 通常取  $1.5 < \omega_{NL} / \omega_L < 2.0$ , 且建议选用  $\omega_{NL} = 1.2$ ,  $\omega_L = 0.8$ 。目前, 尚无法证明这种选择是否正确合理。

现场液化/不液化场地数据样本数据库中的每

个数据点, 均依据液化临界曲线式(1)和文献[1] 3.1.2 节的公式计算加权经验概率法所用的名义抗液化安全系数  $\tilde{F}_s$ 。将这些数据点根据  $\tilde{F}_s$  值的大小按给定的组距分类, 如取组距为 0.1, 则各组的  $\tilde{F}_s$  值分别为 0~0.1、0.1~0.2、0.2~0.3, …, 据此可计算出每一组中的液化或非液化数据点的个数。假设第  $n$  组的液化数据点和不液化数据点的个数分别为  $n_L$  和  $n_{NL}$ , 则依据加权经验概率法的概念, 可按式(7) 计算每一组距内的液化概率<sup>[1]</sup>:

$$P_L = \frac{\omega_L n_L}{\omega_L n_L + \omega_{NL} n_{NL}} \quad (7)$$

图 15 所示是当权重因子比分别为 1.0、1.2、1.5 和 1.8 时, 组距 0.1 和 0.2 的加权经验概率及其拟合曲线与加权最大似然法曲线的相对关系。权重因子比取不同时, 式(5) 中参数取值如表 4 所示。可以看出, 最大似然法与加权经验概率法的结果基本一致, 且随着权重因子比从 1.0 增加至 1.8, 加权最大似然结果曲线略微降低。

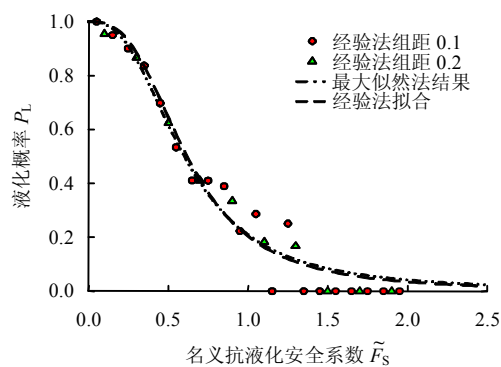
#### 4.2 液化临界曲线的概率分析

本文所用液化和不液化数据分别为 380 例和 234 例, 样本数量相差较大, 不液化数据与液化数据数量相差近 1.5 倍。Kayen 等<sup>[4]</sup>中液化和不液化场地数据分别为 287 例和 124 例、Moss 等<sup>[35]</sup>中液化和不液化场地数据分别是 138 例和 43 例, 均采用  $\omega_{NL}/\omega_L = 1.5$ 。因此, 本文也选用  $\omega_{NL}/\omega_L = 1.5$  进行液化概率分析。

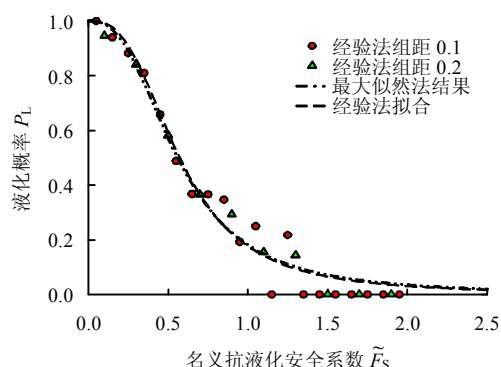
权重因子比  $\omega_{NL}/\omega_L = 1.5$  时, 采用 Monte Carlo 模拟 (MC 法)、加权最大似然法及加权经验概率法计算液化临界曲线式(1)的名义抗液化安全系数  $\tilde{F}_s$  (依据工程实践标准输入可接受的名义参数所计算的定值) 与液化概率  $P_L$  的关系。如图 16 所示, 方框点是 MC 法的分析结果, 圆点和三角形点分别是组距为 0.1 和 0.2 时加权经验概率法的计算结果, 点划线是根据加权最大似然方法所求曲线, 虚线是对加权经验概率法结果的拟合曲线。其中使用 MC 方法时选取了 10 000 个样本点; 根据加权最大似然方法所求曲线的逻辑回归式(5) 的参数分别为:  $A=0.509$ ,  $B=2.511$ 。可以发现, 利用这 3 种方法计算的结果曲线趋势几乎一致。

因此, 依据逻辑回归公式(5), 得到  $P_L$  与  $\tilde{F}_s$  的关系式为

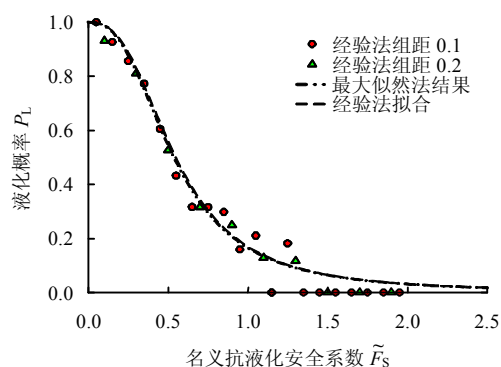
$$\left. \begin{aligned} P_L(\tilde{F}_s) &= \frac{1}{1 + \left( \tilde{F}_s / 0.509 \right)^{2.511}} \\ \tilde{F}_s[P_L] &= 0.509(P_L^{-1} - 1)^{0.398} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$



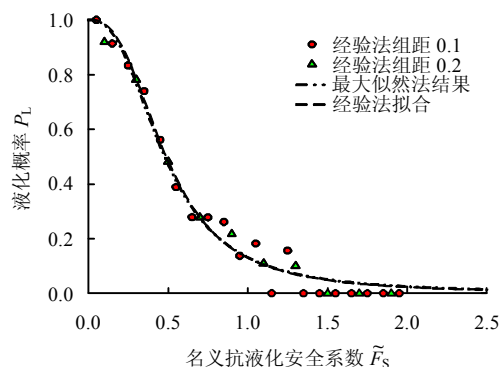
(a)  $\omega_{NL}/\omega_L=1.0$



(b)  $\omega_{NL}/\omega_L=1.2$



(c)  $\omega_{NL}/\omega_L=1.5$



(d)  $\omega_{NL}/\omega_L=1.8$

图 15 不同权重因子比时组距 0.1 和 0.2 的加权经验概率及其拟合曲线与加权最大似然法曲线相对关系

Fig.15  $P_L - \tilde{F}_s$  relationships for different  $\omega_{NL}/\omega_L$  ratios—empirical data versus maximum likelihood results

表 4 采用不同权重因子比时式 (5) 中参数取值  
Table 4 Parameters  $A$  and  $B$  for equation (5) derived with various assumptions of weight ratios

| $\omega_{NL}/\omega_L$ | $A$   | $B$   |
|------------------------|-------|-------|
| 1.0                    | 0.597 | 2.532 |
| 1.2                    | 0.556 | 2.519 |
| 1.5                    | 0.509 | 2.511 |
| 1.8                    | 0.473 | 2.508 |

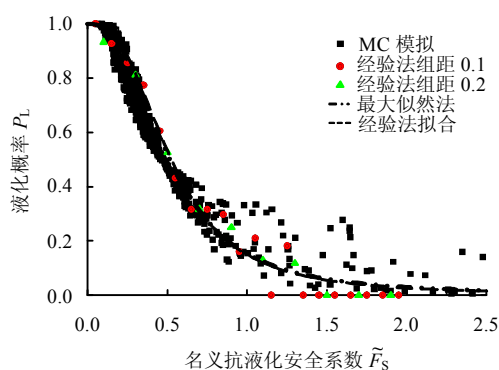


图 16 用 Monte Carlo 模拟、加权最大似然法和加权经验概率法求得的液化临界曲线的  $P_L$  与  $\bar{F}_s$  关系的比较

Fig.16 Comparison of different  $\bar{F}_s - P_L$  relationships derived from Monte Carlo simulation, the weighted maximum likelihood method and weighted empirical probability method

依据本文的概率模型及液化或不液化场地资料, Kayen 等<sup>[4]</sup>液化临界曲线的液化概率为 26.8%。图 17 给出了液化临界曲线式 (1) 的 15%、25% 液化概率等值线以及 Kayen 等<sup>[4]</sup>的液化临界曲线与液化或不液化场地数据点的比较。液化临界曲线式 (1) 的 25% 液化概率等值线与 Kayen 等<sup>[4]</sup>液化临界曲线约在  $V_{S1} \approx 218$  m/s 处相交; 在  $V_{S1} < 218$  m/s 区间内, 相比于液化临界曲线式 (1) 的 25% 液化概率等值线, Kayen 等<sup>[4]</sup>液化临界曲线将更多的液化点误判为不液化点。同时, 图 17 还给出了液化临界曲线式 (1) 的 15% 液化概率等值线, 该曲线包络了 Kayen 等<sup>[4]</sup>的液化临界曲线。可以看出, 总体上, 液化临界曲线式 (1) 的 25% 液化等概率线的位置要比 Kayen<sup>[4]</sup>液化临界曲线的位置更合理一些。

因此, 对于非岩基核电厂址抗震物项 I 类 (与核安全有关的重要物项)、II 类和 III 类 (与核安全无关的物项) 的饱和地基液化判别<sup>[1]</sup>, 建议分别按液化概率  $P_L$  为 0.05、0.15 和 0.25 (对应的名义抗液化安全系数  $\bar{F}_s$  为 1.643、1.015 和 0.788) 的液化临界曲线作为饱和地基液化确定性分析的液化判别式。

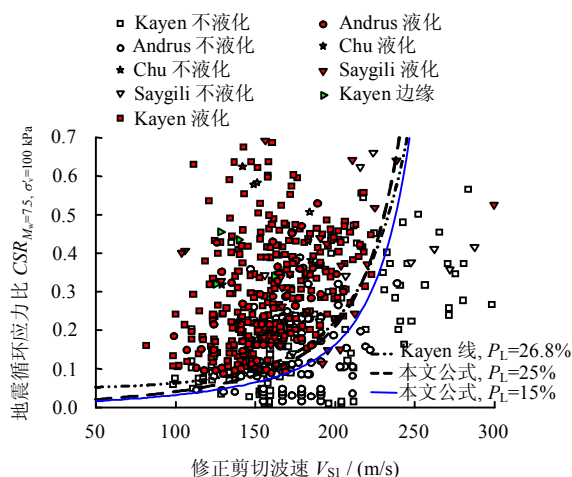


图 17 本文式 (1) 的 15%、25% 液化等概率线与 Kayen 等<sup>[4]</sup>液化临界曲线的比较

Fig.17 Comparison of 15%, 25% probability contour curves prepared based on the liquefaction triggering curve of equation (1) with the liquefaction triggering curves proposed by Kayen et al.

图 18 给出了液化临界曲线式 (1) 的 5%、15%、25%、40% 和 65% 液化概率等值线。名义抗液化安全系数  $\bar{F}_s = 1$  的液化临界曲线接近于液化概率  $P_L = 0.15$  的等值线, 即液化临界曲线式 (1) 表示的确定性液化判别结果对应的液化概率为 15.5%。按液化概率水平, 本文将饱和地基的液化可能性分为 5 个等级, 表 5 所示为以修正  $V_{S1}$  和  $PGA$  为依据的液化判别方法在不同液化等级时的概率水平及其名义抗液化安全系数。

变换式 (1) 和式 (8), 不同概率水平的液化临界曲线可表示为

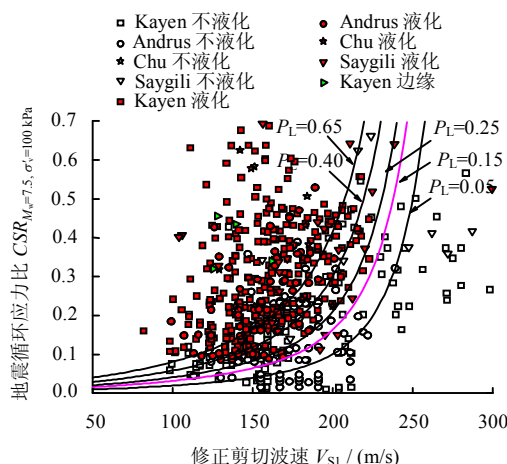


图 18 液化临界曲线的概率等值线

Fig.18 Probability curves prepared based on the liquefaction triggering curves of equation (1) along with the liquefaction database

表5 饱和地基的液化可能性分类

Table 5 Liquefaction classification for saturated ground based on liquefaction probability

| 分类 | 液化概率                   | 分类描述     | 名义抗液化安全系数 $\tilde{F}_s$          |
|----|------------------------|----------|----------------------------------|
| 1  | $P_L > 0.65$           | 几乎肯定液化   | $\tilde{F}_s < 0.398$            |
| 2  | $0.40 < P_L \leq 0.65$ | 液化可能性很大  | $0.398 \leq \tilde{F}_s < 0.598$ |
| 3  | $0.20 < P_L \leq 0.40$ | 很可能液化    | $0.598 \leq \tilde{F}_s < 0.884$ |
| 4  | $0.05 < P_L \leq 0.20$ | 液化可能性很小  | $0.884 \leq \tilde{F}_s < 1.643$ |
| 5  | $P_L \leq 0.05$        | 几乎可肯定不液化 | $1.643 \leq \tilde{F}_s$         |

$$CRR_{M_w=7.5, \sigma'_v=100 \text{ kPa}} = \tilde{F}_s^{-1}(P_L) \exp \left[ \frac{V_{SI}}{86.4} + \left( \frac{V_{SI}}{134} \right)^2 - \left( \frac{V_{SI}}{125.2} \right)^3 + \left( \frac{V_{SI}}{158.5} \right)^4 - 4.8 \right] \quad (9)$$

对核电厂址抗震 I 类、II 类和 III 类物项的地基,  $\tilde{F}_s^{-1}(P_L)$  的取值依次取为 0.608、0.985 和 1.269。

## 5 结 论

以 Idriss-Boulanger 液化判别法的分析框架为基础, 依据 49 次地震、618 例现场液化/不液化场地数据, 考虑我国沿海非岩基核电厂这类重大工程场址的液化判别要求, 提出了具有坚实的物理意义和以丰富的现场液化数据为依据的地震液化临界曲线和概率判别法。

(1) 液化临界曲线的确定原则为:  $V_{SI} \leq 200$  m/s 时, 控制液化临界曲线与液化数据点的下界相切;  $V_{SI} \geq 200$  m/s 时, 控制液化临界曲线与不液化点的上界相切。

(2) 依据 Kayen 液化数据库、Andrus 液化数据库、Saygili 数据以及 Chu 数据, 给出了液化临界曲线公式 (1)。

(3) 验证了本文建议的液化临界曲线对细粒含量、有效上覆压力和震级等因素取值变化的合理性, 分析了液化临界曲线对计算土层循环应力比 CSR 的剪应力折减系数、震级标定系数和有效上覆压力修正系数等因素的敏感性。验证表明, 本文的液化临界曲线不易受各种因素的影响, 对液化判别具有广泛的适用性。

(4) 利用 Monte Carlo 模拟、加权最大似然法和加权经验概率法, 给出了本文液化临界曲线的名义抗液化安全系数  $\tilde{F}_s$  与液化概率  $P_L$  的经验关系及概率等值线, 并对核电厂址 I 类、II 类和 III 类抗震物项的地基液化判别, 分别建议了相应的液化临界曲线。

## 参 考 文 献

- [1] 陈国兴, 孔梦云, 李小军, 等. 以标贯试验与地表峰值加速度为依据的砂土液化确定性及其概率判别法[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 9—27.  
CHEN Guo-xing, KONG Meng-yun, LI Xiao-jun, et al. Deterministic and probabilistic triggering correlations for assessment of seismic soil liquefaction at nuclear power plant[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(1): 9—27.
- [2] IDRIS I M, BOULANGER R W. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes[C]//Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE, 2004. Davis: Department of Civil & Environmental Engineering University of California, 2004.
- [3] IDRIS I M, BOULANGER R W. SPT-based liquefaction triggering procedures(Rep. UCD/CGM-10/02)[R]. Davis: Department of Civil and Environmental Engineering University of California, 2010.
- [4] KAYEN R, MOSS R E S, THOMPSON E M, et al. Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(3): 407—419.
- [5] ANDRUS R D, STOKOE K H I I, CHUNG R M. Draft guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedures[M]. Maryland: US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1999.
- [6] SAYGILI G. Liquefaction potential assessment in soil deposits using artificial neural networks[D]. Montreal: Concordia University, 2005.
- [7] CHU B L, HSU S C, CHANG Y M. Ground behavior and liquefaction analyses in central Taiwan-Wufeng[J]. **Engineering Geology**, 2004, 71(1): 119—139.
- [8] DOBRY R, POWELL D J, YOKEL F Y, et al. Liquefaction potential of saturated sand—the stiffness method[C]//Proceedings of 7th World Conference on Earthquake Engineering. New York: American Society of Civil Engineers, 1980: 25—32.
- [9] DOBRY R, STOKOE K H I I, LADD R S, et al. Liquefaction susceptibility from S-wave velocity[C]//Situ Test to Evaluate Liquefaction Susceptibility,

- Proceedings, ASCE National Convention. St. Louis: American Society of Civil Engineers, 1981: 81—544.
- [10] SEED H B, IDRIS I M, ARANGO I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1983, 109(3): 458—482.
- [11] TOKIMASTU K, UCHIDA A. Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity[J]. **Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 1990, 30(2): 33—42.
- [12] KAYEN R E, MITCHELL J K, SEED R B, et al. Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data[C]//Fourth Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Honolulu, Hawaii. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, 1992, 1(92-0019): 177—204.
- [13] LODGE A L. Shear wave velocity measurements for subsurface characterization[D]. Berkeley: University of California, 1994.
- [14] SEED H B, IDRIS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Divisions, American Society of Civil Engineers**, 1971, 97(SM9): 1249—1273.
- [15] ANDRUS R D, STOKOE K H. Liquefaction resistance based on shear wave velocity[C]//NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Salt Lake City, Utah, Technical Report NCEER-97-0022. New York: National Center for Earthquake Engineering Research, 1997, 97: 89—128.
- [16] ANDRUS R D, STOKOE K H. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2000, 126(11): 1015—1025.
- [17] YOUNG T L, IDRIS I M. Proceedings of the NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils[M]. New York: State University of New York, 1997.
- [18] YOUNG T L, IDRIS I M, ANDRUS R D, et al. 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(10): 817—833.
- [19] JUANG C H, CHEN C J, JIANG T. Probabilistic framework for liquefaction potential by shear wave velocity[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2001, 127(8): 670—678.
- [20] JUANG C H, JIANG T, ANDRUS R D. Assessing probability-based methods for liquefaction potential evaluation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2002, 128(7): 580—589.
- [21] ZHOU Y G, CHEN Y M. Laboratory investigation on assessing liquefaction resistance of sandy soils by shear wave velocity[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(8): 959—972.
- [22] CETIN K O, SEED R B, KIUREGHIAN A D, et al. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2004, 130(12): 1314—1340.
- [23] MOH. Site investigation of liquefied soil at Nantou and Wufeng Areas[M]. Tai Wan: Ya Xin Engineering, 2000.
- [24] HUANG Y T, HUANG A B, KUO Y C, et al. A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(9): 733—743.
- [25] DABIRI R, ASKARI F, SHAFIEE A, et al. Shear wave velocity-based liquefaction resistance of sand-silt mixtures: deterministic versus probabilistic approach[J]. **Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering**, 2011, 35(C2): 199—215.
- [26] LIU N, MITCHELL J K. Influence of nonplastic fines on shear wave velocity-based assessment of liquefaction[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(8): 1091—1097.
- [27] KISHIDA T, BOULANGER R W, ABRAHAMSON N A, et al. Site effects for the Sacramento-San Joaquin Delta[J]. **Earthquake Spectra**, 2009, 25(2): 301—322.