

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0229

基于中国砂土液化数据库的标准贯入试验液化判别方法研究

王维铭^{1,2,3}, 陈龙伟⁴, 郭婷婷⁴, 汪云龙⁴, 凌贤长³

(1. 黑龙江工程学院 土木与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150050; 2. 黑龙江华正交通工程监理有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150050;

3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

4. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 历史地震液化调查数据是液化判别方法构建、改进以及验证的重要基础, 也是检验现有液化认识和理论的主要标准。通过吸收我国集集、巴楚和松原等地震液化数据, 将基于标准贯入试验 (standard penetration test, 简称 SPT) 锤击数的液化数据量库从 121 个增至 465 个。采用该液化数据库, 对比研究了我国建筑抗震设计规范液化判别方法 (简称建规法)、2 个双曲线模型以及循环剪应力比 CSR 简化方法等 4 种基于 SPT 液化判别方法的可靠性。结果显示: 2 个双曲线模型能够很好地判别液化和非液化数据, 成功率超过 85%, 对液化数据和非液化数据的判别成功率保持均衡; 建规法以及 CSR 简化方法判别结果存在不足; 地震烈度为 7 度区液化数据和非液化数据混合情况较多, 不同液化判别公式判别效果均不够理想, 而对 8 度区和 9 度区液化数据, 4 种方法判别成功率较高; 与以往液化概率判别公式对比, 基于 CSR 计算方法, 采用新液化数据给出的液化风险评估概率判别公式虽然采用数据量不同, 但公式预测临界线匹配良好; 建规法存在明显不足, 对饱和砂层埋深大于 10 m 的深层土液化判别结果过于保守。研究成果可为改进我国规范中液化判别方法提供参考。

关 键 词: 砂土液化; 数据库; 标准贯入试验; 液化判别; 概率水平

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2023) 01—0279—10

Analysis of standard penetration test-based liquefaction evaluation methods using Chinese liquefaction database

WANG Wei-ming^{1,2,3}, CHEN Long-wei⁴, GUO Ting-ting⁴, WANG Yun-long⁴, LING Xian-zhang³

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150050, China; 2. Heilongjiang Huazheng Traffic Engineering Supervision Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang 150050, China; 3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China; 4. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Field data from liquefaction case histories are important basis for the development, calibration, and validation of the liquefaction evaluation methods, and major standard for the validation of current liquefaction theories. Collecting liquefaction data from ChiChi, Bachu and Songyuan earthquakes, the Chinese standard penetration test (SPT)-based liquefaction database significantly increases from 121 to 465 in number. The dataset is used to validate the reliability of four liquefaction evaluation methods based on standard penetration test (SPT), i.e., the Chinese seismic design of building code method (code method), two hyperbolic models, and the cyclic stress ratio (CSR) simplified method. The results indicate that the two hyperbolic models can satisfactorily distinguish the liquefaction data from the non-liquefaction data, with success rates higher than 85% for both liquefaction data and non-liquefaction data. The code method and the simplified CSR method exhibit disadvantages for liquefaction evaluation. The predicted results are not satisfactory for all four methods for seismic intensity of 7, as the liquefaction data are mixed with the non-liquefaction data for this intensity. The overall success rates of the four methods are high for the data from seismic intensities of 8 and 9. A new probabilistic liquefaction evaluation formula based on the CSR method is proposed by regression analysis of the new liquefaction dataset. The

收稿日期: 2022-02-28

录用日期: 2022-05-20

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (No. LH2022D020); 黑龙江省属高校基本科研业务费 (团队项目) (No. 2018CX02); 国家自然科学基金项目 (No. 41741011)。

The work was supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No. LH2022D020); the Fundamental Scientific Research Fund of Heilongjiang Institute of Technology (No. 2018CX02) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41741011).

第一作者简介: 王维铭, 女, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事工程抗震方面的研究。E-mail: wswm1983@163.com

通讯作者: 陈龙伟, 男, 1983 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail: chenlw@iem.ac.cn

predicted critical liquefaction lines are in reasonable agreement with reported probabilistic formula, even though the datasets ever adopted are different. The Chinese code method has obvious limitation with conservative results for soil layers at depth greater than 10 m. The analytical results provide reference for improving the liquefaction evaluation method in Chinese code.

Keywords: sand liquefaction; database; standard penetration test; liquefaction evaluation; probability level

1 引言

地震砂土液化一直是岩土动力学中前沿、热点和难点课题^[1-4]。从近期几次大地震中液化造成的损失来看,液化灾害依然存在,甚至有越来越严重的趋势,地震液化被学者称为防震减灾工作中的一颗“毒瘤”^[5]。我国目前地震灾情形势复杂多变,破坏性地震仍处于频发、多发时期。随着经济社会的发展,地震灾害风险持续攀升,强烈性、破坏性的强震造成巨大经济损失和社会灾害将是过去的数倍。随着韧性城市抗震理念、防灾减灾新理论和方法等的有效实施,强震作用下建筑物毁坏引起的人员伤亡越来越少,但因场地地基和基础破坏导致的基础设施功能损失却仍占有较大比例,场地地震破坏风险评估依然是科研及工程设计的重点任务,其中地震液化是场地破坏最典型的代表。

自 1964 年日本新潟和美国阿拉斯加两次地震后,地震液化研究开始被科研和工程界重视,至今已有近 70 年的历史,对液化机制的认识以及液化减灾技术已经有了重大进步^[6],但仍有一系列问题尚未很好解决,特殊土类液化认识问题以及深层土(>10 m)液化判别问题是其中的代表。特殊土类液化认识主要源于历次地震调查所发现的液化新现象,采用现有理论和方法难以解释。例如,2008 年中国汶川地震发现的大规模砾性土液化现象^[7],打破了过去认为砾性土为非液化性或者砾性土地地不考虑液化影响的结论,建立在砂土基础上的液化判别方法不再适用^[8];2010 年海地地震中首都太子港码头因珊瑚土(钙质砂)液化侧移而毁坏,引发建立在陆源砂液化的理论是否适于珊瑚土的探讨^[9-10]。

深层土液化是一个学者和工程师关注、目前工程需求中重点但富有争议的问题。现行《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[11]中,基于标准贯入试验(standard penetration test,简称 SPT)锤击数的液化判别方法虽判别深度至 20 m,但是含有一定的人为因素。理论上讲,规范方法适于砂层埋深小于 10 m 的情况,在埋深为 10~20 m 时明显保守。如将地震烈度为 9 度下埋深为 12 m、标贯击数为 30 以及埋深为 20 m、标贯击数为 37 的非常密实的砂层判成液化,而震害调查和现有理论认识无法支撑这一结论,这一点一直被工程界所诟病,问题根

源在于构建规范判别公式所采用的基础液化数据。说明这里的“度”指“地震烈度”。20 世纪 80 年代前,我国震害调查中所确定的液化层最大深度为 10.5 m,仅有 3 例埋深超过 10 m 的液化数据,液化层埋深为 1~6 m 的占 85%,因为当时工程结构绝大部分为浅基础建筑,仅对埋深 10 m 以内砂层提出合理的液化判别已经能很好满足工程建设需求^[5]。但时至今日,我国工程建设中已经拥有大量高层建筑、深基础结构和地下工程,超过 10 m 的基础工程和地下工程很常见,对超过 10 m 的深层土液化判别必须同时考虑工程的经济性和安全性。要解决这一问题,需要扩充液化调查数据,特别是实际调查的深层土液化数据,以便为改进判别方法提供支持。

目前,国外非常重视液化基础资料数据的储备,正在尝试建立相应的数据库,筹建下一代液化数据库(next generation liquefaction database)^[12],智利学者建立了智利液化数据库^[13]以及其他学者整理了全球范围的液化数据库^[14-17];国内的液化数据库主要是谢君斐^[18]根据 20 世纪 60—70 年代几次大地震的液化调查数据所整理而成,据此形成了抗震设计规范中基于 SPT 的液化判别方法,该液化数据库被国内学者沿用,一直未得到更新。能否将国外液化数据用于改进国内液化判别技术尚需深入研究^[19],所涉及的目标液化特征参数是否具有区域性的问题不在本文范畴,这里不作赘述。

本文在谢君斐^[18]建立的液化数据库的基础上适当剔除不合理或信息不完备的数据,吸收集集^[20-21]、巴楚^[22]以及松原^[23]几次地震的液化 SPT 数据,形成具有我国特色的地震液化数据库。地震液化减灾首要步骤是液化判别,基于 SPT 锤击数的液化判别方法是现阶段工程中使用最广泛、可靠性最好、最经济且有效、方便快捷的液化判别方法。国际上以基于循环剪应力比 CSR(cyclic stress ratio)的液化判别方法为代表,而我国则是以《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[11](简称建规范)中的液化判别方法为代表。采用我国液化数据库,可以评价现有 SPT 液化判别方法的可靠性,根据现有理论框架给出不同液化风险水平下的液化判别方法(确定临界线),为改进液化判别的规范方法提供依据。

2 地震液化数据

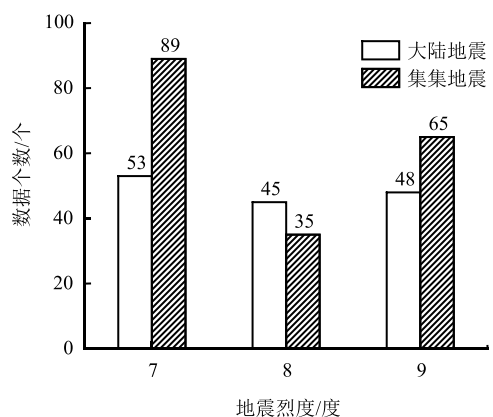
本文以谢君斐^[18]建立的液化数据库为基础, 吸收集集^[20-21]、巴楚^[22]和松原^[23]等几次地震的 SPT 数据, 形成具有我国特色的地震液化数据库。表 1 给出了数据库中地震的基本信息。

表 1 地震液化数据信息

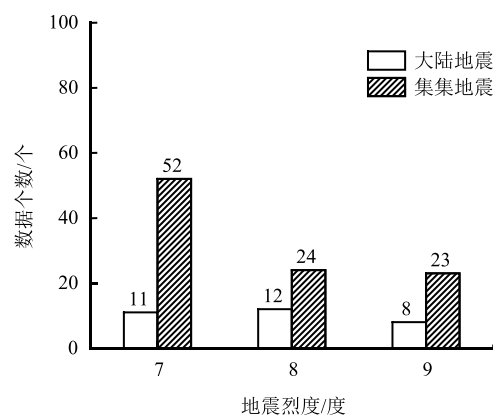
Table 1 Liquefaction data from Chinese earthquakes

序号	地震	时间	震级	液化记录数	非液化记录数
1	通海	1970 年	7.8	9	9
2	海城	1975 年	7.3	7	5
3	唐山	1976 年	7.8	54	37
4	集集	1999 年	7.6	164	124
5	巴楚	2003 年	6.8	20	26
6	松原	2018 年	5.8	5	5

集集地震之前, 我国的液化数据主要来自唐山地震, 占比 75.2%。集集地震中获取了 188 个 SPT 数据^[20], 显著扩充了我国地震液化 SPT 数据库。巴楚地震、松原地震也有液化数据的积累。图 1 为我国液化数据的统计分布, 饱和砂层埋深 d_s 分为 2 组 (分别为图 1(a)和图 1(b))。本文中, 浅层指的是



(a) 砂层埋深 $d_s < 10$ m 数据



(b) 砂层埋深 $d_s \geq 10$ m 数据

图 1 不同烈度区地震液化数据统计分布

Fig.1 Statistical distribution of liquefaction data for different seismic intensities

$d_s < 10$ m, 深层指的是 $d_s \geq 10$ m。不同分组内按照烈度细分为 3 组来对比统计集集地震和大陆地震中的液化数据量。由图 1 可见, 对于浅层液化数据, 大陆地震数据在地震烈度 7、8 和 9 度区分布较均匀, 集集地震补充了数据量; 对于深层液化数据, 大陆地震液化数据量很少且多来自 2003 年巴楚地震后的现场勘察数据; 集集地震深层土液化数据较丰富, 弥补了深层土液化数据的不足。

图 2 显示我国液化 SPT 数据随砂层埋深变化的分布特征。通过集集地震液化数据的补充, 特别是深层土液化数据的补充, 使我国液化数据从砂层埋深到数据量都得到极大的丰富, 特别是砂层埋深 10~20 m 的液化数据。使用这些数据, 一来可以验证我国液化判别公式的可靠性; 二来可以为液化理论的发展以及判别方法的改进提供基础。

3 不同液化判别方法结果分析

本文的判别方法主要是针对 SPT 的液化判别方法, 而针对其他现场测试参数指标 (如圆锥静力触探、剪切波速等) 的判别方法没有分析。

3.1 简化方法

CSR 简化方法由 Seed 等^[24]在 1971 年提出, 后经学者进一步改进和完善。其中, 最具代表性的工作是 Youd 等^[25]于 1997 年受美国国家地震工程研究中心 (National Center for Earthquake Engineering Research, 简称 NCEER) 和美国国家科学基金会委托, 在 Seed 简化方法基础上整理成的 NCEER 判别方法^[25]。该方法中, 地震循环剪应力比 CSR 的计算公式为

$$CSR = 0.65 r_d \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \quad (1)$$

式中: $a_{\max}$ 为地表峰值加速度; g 为重力加速度; σ_v 为上覆土压力; σ'_v 为有效上覆土压力; r_d 为应力折减系数。

NCEER 判别方法具有概念明确、逻辑清晰、计算简单等优点, 通过 r_d 将刚体运动的“惯性力”转化成作用在土体中的水平剪应力。应力折减系数 r_d 采用如下分段线性函数表达, 即

$$\left. \begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.007 \, 65 d_s, \, d_s \leq 9.15 \\ r_d &= 1.174 - 0.026 \, 7 d_s, \, 9.15 < d_s \leq 23.00 \\ r_d &= 0.744 - 0.008 d_s, \, 23.00 < d_s \leq 30.00 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

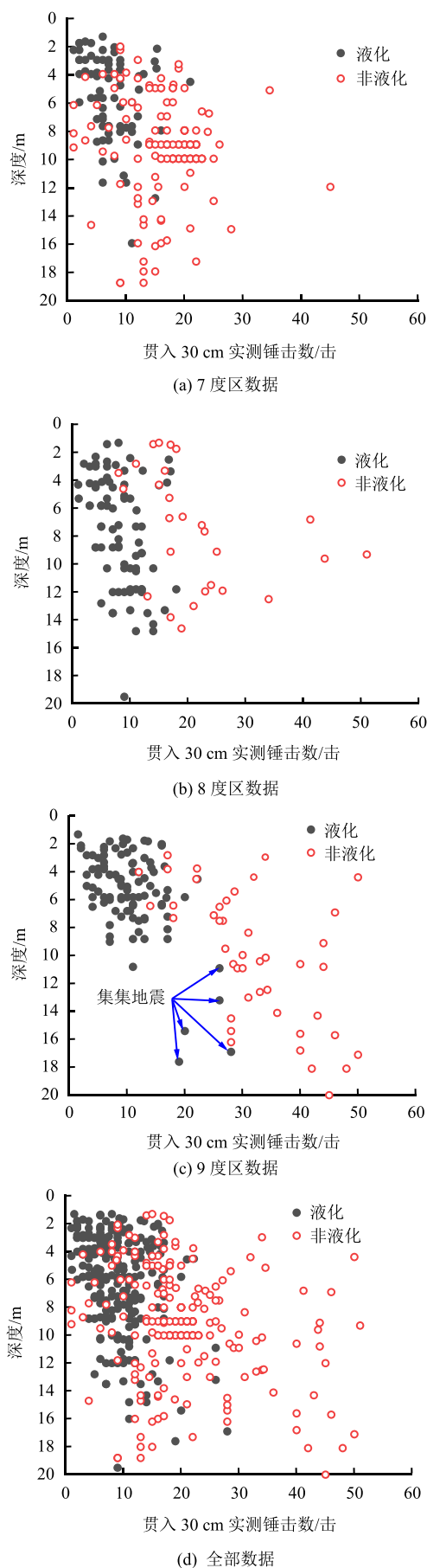


图2 我国地震液化 SPT 锤击数随深度的分布
Fig.2 Distributions of SPT blow count with depth from Chinese earthquakes

计算 r_d 还可以采用连续的多项式拟合经验公式^[25]:

$$r_d = \frac{f(d_s)}{g(d_s)} \quad (3)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} f(d_s) &= 1.0 - 0.411 3d_s^{0.5} + 0.040 52d_s + 0.001 753d_s^{1.5} \\ g(d_s) &= 1.0 - 0.417 7d_s^{0.5} + 0.057 29d_s - 0.006 205d_s^{1.5} + 0.001 210d_s^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

本文计算 CSR 值时 r_d 的计算采用的是多项经验公式 (3) 和式 (4)。根据地震动强度及场地土层参数得到 CSR, 然后与土体抗液化的循环阻力比 CRR (cyclic resistance ratio) 对比, 以进行液化判别。就物理意义而言, 简化方法是基于安全系数 F_s 的方法, 即

$$F_s = \frac{\text{CRR}}{\text{CSR}} \quad (5)$$

$F_s < 1.0$ 时, 土体即判为液化; 反之被判为不液化。

CRR 可通过土层现场测试指标 (如 SPT 锤击数、剪切波速等) 或者室内试验参数来体现。逻辑上讲, CRR 表达土体的抗液化能力, CSR 反映地震等外荷载的作用。令 $\text{CSR} = \text{CRR}$, 即可获得液化判别的临界线。本文将采用式 (1) 计算 CSR, 按照简化算法得到液化判别临界线。

计算 CSR 的关键是确定式 (1) 的各个参数, 计算时难以确定的是砂层上覆有效压力以及上覆土压力, 与这两个参数密切相关的是土层密度。土体重度一般为 $16 \sim 22 \text{ kN/m}^3$, 且比较稳定^[17]。由于整理所得液化数据中土体密度信息大多缺失。为简化起见, 本文将地下水位 d_w 以上土体的重度设为 18 kN/m^3 , 将水位以下土体的重度设为 20 kN/m^3 , 重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$, 则 CSR 可以简化成:

$$\begin{aligned} \text{CSR} &= 0.65 r_d \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) = \\ &0.65 r_d \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \left(\frac{10d_s - d_w}{5d_s + 4d_w} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

集集地震液化数据有对应的 $a_{\max}$ 信息, 而大陆地区的液化数据大多没有 $a_{\max}$ 数据, 地震动强度指标采用地震烈度。“烈度”的思想在我国抗震设计规范中占有独特地位, 也是我国液化数据的特色, 但具有一定的局限性。为克服这一缺陷, 本文采用我国规范中《地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[26] 给出的烈度与 $a_{\max}$ 简化对应关系来估计, 烈度 7、8

和 9 度对应的 $a_{\max}$ 分别为 0.1g、0.2g 和 0.4g。我国液化数据库给出了 d_s 和 d_w 信息，可以通过式 (6) 计算 CSR。

Youd 等^[25]在 Seed 简化方法基础上提出了基于 SPT 锤击数的 NCEER 判别公式，其液化临界线数学表达式为^[26]

$$CSR = CRR = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (7)$$

式中： $(N_1)_{60}$ 为经过锤击能量、上覆土压力等参数修正而得的 SPT 锤击数。能量修正为根据实测锤击能量将锤击数修正为理论锤击能量 60% 的锤击数。式 (7) 的适用范围为 $(N_1)_{60} < 30$ 击。需要说明的是，我国 20 世纪 60—70 年代地震液化数据中的 SPT 锤击数为未经修正的实测锤击数，液化判别公式中变量 SPT 锤击数为实测值。当时现场勘察的信息缺失以及数据形式的不一致性使式 (7) 中 $(N_1)_{60}$ 难以准确确定，导致我国液化数据很少被国外学者采用。国外学者发表的研究成果较少提及我国地震液化数据，Seed 等^[14]在参考唐山地震液化数据及判别公式时估计其能量传递率为 50%~60%。为解决这一问题，需要对我国早期地震液化数据进行科学合理的研判和假定，研究修正系数取值及其不确定性对 SPT 锤击数的影响。这一问题尚需进一步深入研究，本文不再赘述。作为定性对比参考，本文使用实测锤击数 N 直接取代式 (7) 中的 $(N_1)_{60}$ 。后文中，NCEER 法的液化判别临界线就是通过式 (7) 计算得到。

国外计算 CSR 时考虑震级 M_w 的影响，通过震级调整系数 MSF (magnitude scaling factor) 将 CSR 值调整到震级为 $M_w = 7.5$ 的标准值 $CSR_{M_w=7.5}$ 。从所整理的数据来看，除了巴楚和松原地震，其他地震震级都在 7.5 左右。本文中，CSR 的计算考虑震级的影响，震级校正采用的震级校正系数为^[25]

$$CSR_{M_w=7.5} = CSR / MSF = CSR (10^{2.24} / M_w^{2.56})^{-1} \quad (8)$$

3.2 我国规范的液化判别方法

《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)^[27]中液化判别方法主要基于中国 20 世纪 60—70 年代几次大地震液化调查数据。历经几次修订，现阶段《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[11]给出的饱和砂土液化临界 SPT 锤击数计算公式为

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \quad (9)$$

式中： N_{cr} 为液化判别标贯击数临界值； β 为设计地

震调整系数，参照抗震设计规范取值； N_0 为液化判别标贯击数基准值，按表 2 取值；其他参数确定方法同前。需要注意的是，式 (9) 中的饱和砂层判别深度范围为地下 20 m 以内。严格意义上讲，规范判别公式不适用于判别埋深超过 10 m 的砂土层液化；但是，由于实际工程建筑的需求，公式判别深度在《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)^[27]中为 15 m，而《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[28]中延伸至 20 m。

表 2 《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 液化判别标贯击数基准值 N_0 ^[11]

设计地震加速度/g	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
N_0 /击	7	10	12	16	19

3.3 液化判别的双曲线模型

为克服现行建规液化判别公式缺点，Yang 等^[29]在我国历史地震液化数据库的基础上增加了集集地震和 1995 年日本阪神地震等液化数据，特别是近百条砂层埋深超过 10 m 的液化数据，提出了与饱和砂层埋深协调的砂土液化临界锤击数 N' 的双曲线模型（简称双曲线模型（2017）^[29]），模型公式为

$$N_{cr} = 0.79 N' (1 - 0.02 d_w) \left(0.27 + \frac{d_s}{d_s + 6.2} \right) \quad (10)$$

式中：标贯击数基准值 N' 按照表 3 取值；液化判别深度小于 20 m。为了与将峰值加速度作为地震动强度指标的常用判别方法相协调，改进式 (10)，提出将峰值加速度 $a_{\max}$ 为变量的计算公式，即

$$N_{cr} = \frac{58 a_{\max}}{a_{\max} + 0.40} (1 - 0.02 d_w) \left(0.27 + \frac{d_s}{d_s + 6.2} \right) \quad (11)$$

表 3 不同加速度下 N' 的取值^[29]

加速度峰值/g	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
N' /击	16	20	23	31	37

从表 3 可见，对于不同的设计加速度，液化判别标贯击数基准值由归档方式得到，加速度最大值为 0.4g。但是，对于重大工程和已经进行过场地地震安全性评价的工程，可以给出更为准确的地表加速度（如高地震危险性区超过 0.4g）。因此，袁晓铭

等^[5]在式(11)基础上,提出了含剧烈地震动作用的不同埋深砂土液化统一判别公式(简称双曲线模型(2021)^[5]),相应数学表达式为

$$N_{cr} = \frac{69a_{\max}}{a_{\max} + 0.40} (1 - 0.02d_w) \left(0.21 + \frac{0.79d_s}{d_s + 6.2} \right) \quad (12)$$

式(12)的适用范围为 $0.08g < a_{\max} < 0.90g$ 。

3.4 不同判别公式的判别结果对比

下面针对我国液化数据,采用4个液化判别公式进行判别与对比。图3显示不同判别公式得到的临界线与实际数据的对比。图4使用柱状图形式对4个公式的判别成功率进行对比,表4为图4相应判别成功率数值的列表。

对于7度区(见图3(a)),4个判别公式预测的临界线基本一致,但对液化数据判别结果不太理想。这一点可以从表4直接看出:7度区4个方法对液化数据判别成功率均较低,建规法^[11]成功率为55.41%,NCEER方法^[25]成功率更低,仅为43.24%。但是,对非液化数据的判别成功率却达到80%以上。这说明,4种判别公式对7度区判别结果偏于危险,这与7度区液化数据质量有关。由图可见,7度区液化数据主要集中在浅层,且数据离散性较大,液化数据与非液化数据重叠较多,出现锤击数超过15击(甚至20击)仍液化的“特殊”案例。液化数据与非液化数据混合的现象,使液化出现误判。

对于8度区(见图3(b)),4个判别公式都能很好判别液化数据和非液化数据:对液化数据判别成功率都在90%以上;对非液化数据,4个公式也表现良好,除了NCEER法成功率为75%外,其他3种方法的成功率都超过了85%。对比4种方法预测的临界线发现,两双曲线公式预测结果基本重合,预测的临界锤击数小于规范法和NCEER法的计算结果,且随深度增加,预测值与临界线的差别不断增大。对于浅层液化数据判别成功率,建规法与两个双曲线预测线差别不明显;对于深层液化数据,建规法和NCEER法计算结果大于双曲线模型预测结果,且随着深度增加,这一差别趋于增大。

需要注意的是,NCEER方法虽然具备概念和逻辑清晰等优点,但液化判别临界线在7度和8度下埋深超过10m后出现明显不合理的回弯现象。这是因为,NCEER方法理论上只适于埋深小于12m的情况^[14],不宜用于更深土层的判别。

对于9度区(见图3(c)),4种方法对液化数据的判别成功率都很高,超过了90%;而对于非液化数据,除了NCEER法,其他3种方法的判别成功

率超过80%,表现良好。对于浅层,不同公式得到的临界线差别较小;对于深层,这一差别随深度增加而明显增大。两个双曲线模型的临界线差不多,其临界击数预测值明显小于规范法和NCEER法,NCEER法和建规法在深层严重保守,出现埋深20m处、锤击数近37击的“密实”砂土液化的不合理结果。

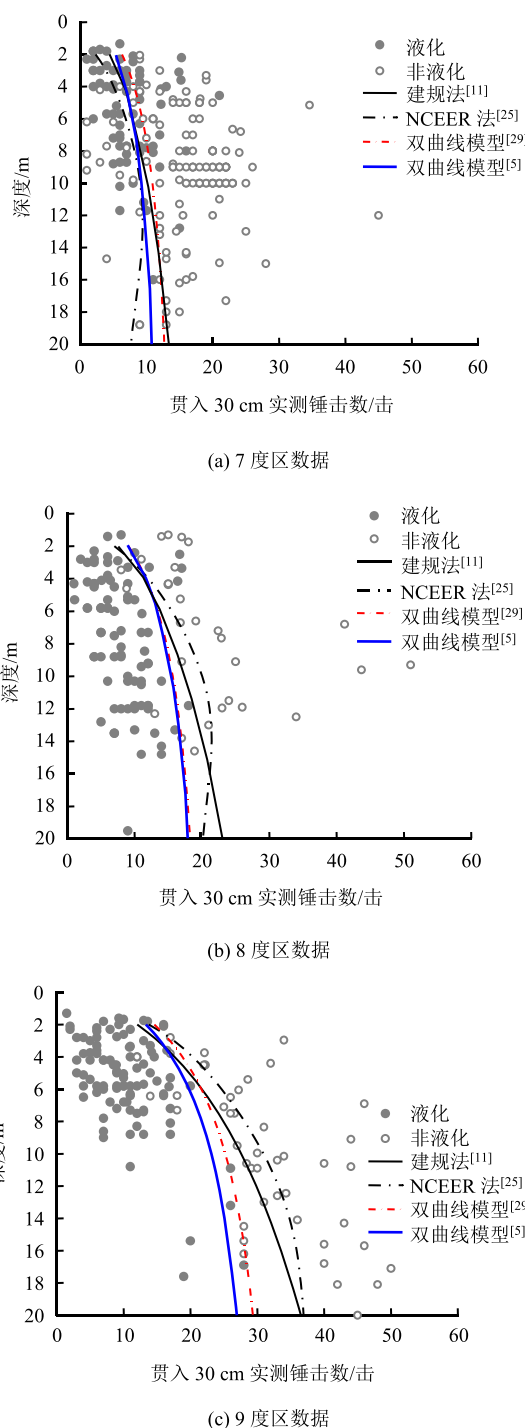


图3 4种液化判别公式液化临界线与实际数据对比 ($d_w=2.0\text{ m}$)

Fig.3 Comparison of the critical lines of four liquefaction evaluation methods and liquefaction data ($d_w=2.0\text{ m}$)

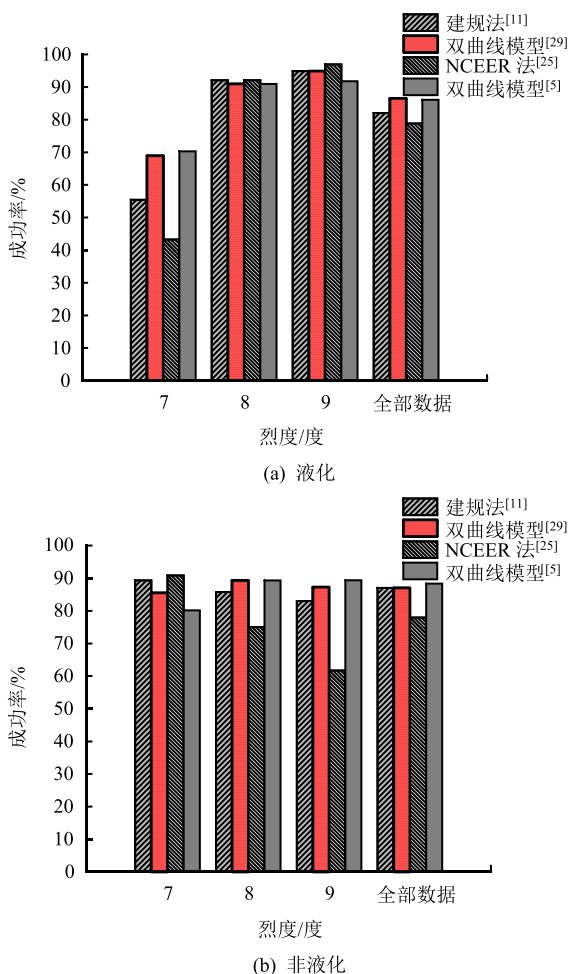


图 4 不同液化判别公式的回判成功率对比

Fig.4 Comparison of success rates of different liquefaction evaluation methods

表 4 不同设防烈度下液化判别公式的回判成功率(单位: %)

Table 4 Success rates of liquefaction evaluation methods for liquefaction data for different seismic intensities (unit: %)

判别方法	7 度		8 度		9 度		全部数据	
	液化	非液化	液化	非液化	液化	非液化	液化	非液化
建规法 ^[11]	55.41	89.31	92.05	85.71	94.85	82.98	81.98	87.01
双曲线模型 ^[29]	68.92	85.50	90.91	89.29	94.85	87.23	86.49	87.01
NCEER 法 ^[25]	43.24	90.84	92.05	75.00	96.91	61.70	78.83	77.92
双曲线模型 ^[5]	70.27	80.15	90.91	89.29	91.75	89.36	86.04	88.31

对比 4 种液化判别公式的临界线可以看出, 7 度区判别结果差别不大, 非液化数据判别成功率略高于液化数据判别成功率; 在较高地震烈度(如 8 度和 9 度)区, 4 种公式对液化数据和非液化数据均表现良好, 尤其是双曲线模型, 不仅具有很高的液化数据判别成功率, 对非液化数据具有与液化成功率比较均衡, 更为科学合理。埋深超过 10 m 时, NCEER 法和建规法所得液化临界线随深度增大而迅速增大, 出现标贯击数非常大而又被判别成液化

的情况, 这会导致工程建设成本不合理的大幅度提高, 难以被实践接受。

4 液化判别概率分析

随着风险概念引入岩土工程, 液化概率判别技术成为一个热点课题^[30-31]。液化判别的概率分析是一个典型二分类问题, 可以采用数学逻辑(Logistic)回归分析理论及方法进行研究^[32-33]。根据逻辑回归分析, 多自变量下二元概率求解的通用公式为

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp(-\beta_0 - \sum_i \beta_i \cdot \theta_i)} \quad (13)$$

式中: P_L 为液化概率; θ_i 为液化判别特征参数(如标贯锤击数、地下水位、饱和砂层埋深、地震震级等); β_i 为拟合系数 ($i=0,1,2,3,\dots$)。

基于安全系数的液化判别(式(5))实质上也可理解为土体可能遭遇的地震荷载“需求”与土体本身抗液化“能力”之间的对比。液化判别公式中变量的选择能够反映荷载“需求”以及表征土体抗液化“能力”。根据所整理的液化数据库, 将判别公式中变量选为循环剪应力比 CSR 来表征土体所遭遇的地震荷载“需求”, 用标贯击数来表征土体抗液化“能力”。液化判别公式就是建立“需求”与“能力”之间的关系。根据式(13), 液化可能性可写成

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp[-\beta_0 - \beta_1 N - \beta_2 \ln(\text{CSR})]} \quad (14)$$

或者反过来, 相应的 CSR 可以写为

$$\text{CSR} = \exp \left\{ \frac{-1}{\beta_2} \left[\beta_0 + \beta_1 N + \ln \left(\frac{1 - P_L}{P_L} \right) \right] \right\} \quad (15)$$

通过对液化数据进行 Logistic 回归分析, 可以得到式(14)中的拟合系数 β_i ($i=0, 1, 2$)。将液化数据按照烈度指标 7、8 和 9 度分成 3 个组, 对每组液化数据分别进行回归分析, 再将所有数据合并进行回归分析, 得到不同工况下的拟合系数, 结果见表 5。从表 5 可以看出, 不同工况下拟合系数 β_0 和 β_2 有差别, 但未出现量级上的差别, 而 β_1 差别不明显。

表 5 数据回归系数值

Table 5 Coefficients in regression analysis for liquefaction data

系数	β_0	β_1	β_2
7 度	6.155	-0.370 3	1.328
8 度	12.900	-0.398 2	3.774
9 度	10.450	-0.337 8	3.331
全部数据	8.369	-0.299 5	2.367

图 5 显示液化概率为 50% (即 $P_L=50\%$) 时液化判别临界线与实测数据的对比。由图 5 看出, 将 7 度区数据回归得到的液化临界线用于高烈度区时明显高于其他情况下的临界线。原因是仅采用 7 度区数据, 而没有高烈度区数据作为控制点。所以, 高烈度临界线的预测可靠性有待商榷。而且, 从图 5 可以看出, 7 度区的液化数据和非液化数据重叠部分较多, 这一现象导致预测结果不理想, 7 度区数据临界线具有不确定性。数据出现重合现象, 其原因包括多方面。首先, 地震动强度指标“烈度”具有人为主观性, 其描述地震动强度具有不确定性。在没有建筑结构的地区, 如唐山、巴楚等地震中液化点多发生在农田中, 烈度的评定具有很大的随机性, 主要根据附近城镇烈度评定结果或者烈度评定时画定的烈度圈。其次, 液化、非液化场地的确定时可能存在非液化点的“误判”。液化场地一般是指震后调查时发现喷水冒砂、地面裂缝、侧移等现象的场地, 没有发现类似现象的场地一般定为非液化场地。这就会导致场地土层实际发生液化, 但砂层没有喷出地表而被误判为非液化场地。数据重合可能还有其他原因, 但数据年代较久且记录缺失, 难以考证, 需要深入分析。在未来研究中, 吸收国外其他地区的液化数据, 补充数据量, 通过建立数据质量的评价方法, 评估现有数据的可靠性。

采用烈度为 8 度区数据、9 度区数据以及全部数据得到的临界线吻合较好, 3 条临界线差别不大, 说明 8 度和 9 度区液化数据和非液化数据具有明显“聚类特征”且界限分明, 这一点也可以从图 3 和图 5 直观看出。所以, 相比 7 度区液化数据, 8 度区和 9 度区数据判别结果更好。

袁晓铭等^[1]采用 20 世纪 60—70 年代的地震液化数据, 提出了液化判别的概率公式:

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp\{-[9.04 - 0.31N + 2.84\ln(CSR)]\}} \quad (16)$$

本文中液化数据不仅来自 20 世纪 60—70 年代发生的地震液化数据, 而且增加了 2018 年松原、2003 年巴楚、1999 年集集等地震的液化数据, 数据量由原来的 121 个增加到 465 个。使用新的数据进行逻辑回归, 得到液化概率判别公式:

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp[-8.369 + 0.2995N - 2.367\ln(CSR)]} \quad (17)$$

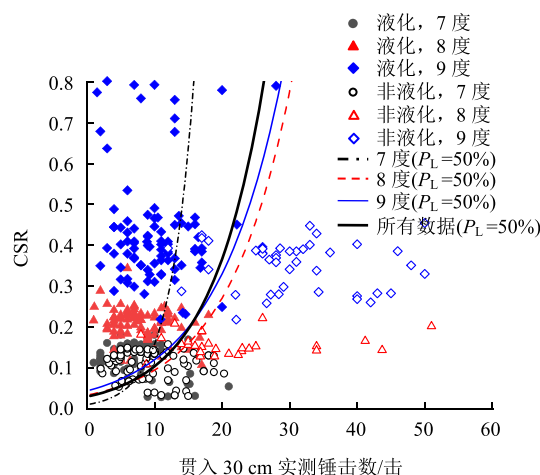


图 5 不同烈度下液化回归得到的临界线
Fig.5 Critical lines from regression analysis of liquefaction data for different seismic intensities

对比式 (16)、(17) 可知, 不同数据样本回归的拟合系数基本一致。图 6 给出了液化概率为 30%、50%、80% 情况下两个判别公式得到的液化临界线。由图 6 可以看出, 采用不同数据量得到液化判别临界线几乎完全一样, 验证了判别公式的鲁棒性, 但本文公式采用了更加丰富的液化数据库, 更具有说服力。

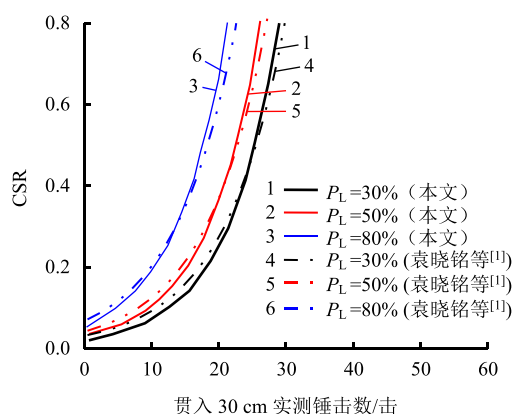


图 6 本文建立的液化临界曲线与袁晓铭等^[1]提出的公式的液化判别临界线对比

Fig.6 Comparison of critical liquefaction lines of current study with the lines proposed by Yuan et al^[1] for liquefaction probabilities of 30%, 50% and 80%

5 结 论

本文通过整理我国地震液化 SPT 数据, 形成了具有我国特色的液化数据库, 为液化判别技术的改进和发展提供了良好的基础数据。本文主要工作和结论如下:

(1) 通过吸收集集、巴楚等地震液化数据, 将

我国液化数据库显著扩充, 数据量由原来是 121 个增加到 465 个, 数据库中饱和砂层埋深超过 10 m 的数据较丰富, 弥补了原来数据库中缺少深层土液化数据的局限。

(2) 通过液化数据对比研究了国内外基于 SPT 的液化判别公式的可靠性, 结果显示双曲线模型能够很好地判别液化和非液化数据, 数据回判成功率超过 85%, 对液化数据和非液化数据的判别成功率较为平衡。

(3) 就液化数据判别对比检验结果来看, 基于 SPT 锤击数的液化判别建规法存在明显不足, 对饱和砂层埋深大于 10 m 深层土的判别结果过于保守。

(4) 就数据自身特征来看, 7 度区的液化数据和非液化数据混合情况较多, 导致不同液化判别公式对 7 度区液化数据判别效果均不够理想; 而 8 度区和 9 度区液化数据分布具有明显“聚类特征”且界限分明, 液化判别结果较好。

(5) 基于 CSR 计算方法, 采用新的液化数据库得到了液化概率判别公式。与现有判别液化概率判别公式对比, 虽然采用的数据量不同, 但判别临界线几乎完全一致。

参 考 文 献

- [1] 袁晓铭, 曹振中. 基于土层常规参数的液化发生概率计算公式及其可靠性研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(4): 99-108.
YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong. Conventional soils parameters-based liquefaction probabilistic evaluation formula and its reliability analysis[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, 47(4): 99-108.
- [2] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Liquefaction of soils during earthquakes[M]. Washington D. C.: National Academy Press, 1985.
- [3] KRAMER S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. New York: Prentice-Hall Inc., 1996.
- [4] 张思宇, 李兆焱, 袁晓铭. 基于静力触探试验的液化判别新方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1596-1606.
ZHANG Si-yu, LI Zhao-yan, YUAN Xiao-ming. A new method for evaluating liquefaction based on cone penetration test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(6): 1596-1606.
- [5] 袁晓铭, 费扬, 陈龙伟, 等. 含剧烈地震动作用不同埋深砂土液化判别统一公式[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2101-2112.
YUAN Xiao-ming, FEI Yang, CHEN Long-wei, et al. An unified formula for predicting sand liquefaction in different buried depths under severe ground motion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(10): 2101-2112.
- [6] National Academies of Science, Engineering and Medicine. State of the art and practice in the assessment of earthquake-induced soil liquefaction and its consequences[M]. Washington D C: the National Academies Press, 2016.
- [7] CHEN L W, YUAN X M, CAO Z Z, et al. Liquefaction macrophenomena in the great Wenchuan earthquake[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2009, 8(2): 219-229.
- [8] CAO Z Z, YOU D T L, YUAN X M. Chinese dynamic penetration test for liquefaction evaluation in gravelly soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(8): 1320-1333.
- [9] GREEN R A, OLSEN S M, COX B R, et al. Geotechnical aspects of failures at Port-au-Prince seaport during the 12 January 2010 Haiti earthquake[J]. **Earthquake Spectra**, 2011, 27(Suppl. 1): 43-65.
- [10] 袁晓铭, 张文彬, 段志刚, 等. 珊瑚土工程场地地震液化特征解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3799-3811.
YUAN Xiao-ming, ZHANG Wen-bin, DUAN Zhi-gang, et al. Analysis for characteristics of seismic liquefaction in engineering sites of coralline soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl. 2): 3799-3811.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [12] BRANDENBERG S J, ZIMMARO P, STEWART J P, et al. Next-generation liquefaction database[J]. **Earthquake Spectra**, 2020, 36(2): 939-959.
- [13] GONZALO M, RUZ F, ESCRIBANO D, et al. Chilean liquefaction case history database[J]. **Earthquake Spectra**, 2022, 38(3): 2260-2280.
- [14] SEED H B, TOKIMATSU K, HARDER L F Jr, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(12): 1425-1445.
- [15] CETIN K O, SEED R B, DER KIUREGHIAN A, et al. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction

- potential[J]. **Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering**, 2004, 130(12): 1314-1340.
- [16] IDRIS I M, BOULANGER R M. SPT-based liquefaction triggering procedures[R]. Davis: Report for Center for Geotechnical Modeling Department of Civil Environmental Engineering, University of California, 2010.
- [17] CETIN K O, SEED R B, KAYEN R E, et al. SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction triggering hazard[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2018, 115: 698-709.
- [18] 谢君斐. 关于修改抗震规范砂土液化判别式的几点意见[J]. 地震工程与工程震动, 1984, 4(2): 95-126.
- XIE Jun-fei. Some comments on the formula for estimating the liquefaction of sand in revised aseismic design code[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1984, 4(2): 95-126.
- [19] 王维铭, 孙锐, 曹振中, 等. 国内外地震液化场地特征对比研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3913-3918.
- WANG Wei-ming, SUN Rui, CAO Zhen-zhong, et al. Comparative study of features of liquefied sites at home and abroad [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3913-3918.
- [20] HWANG J H, YANG C W. Verification of critical cyclic strength curve by Taiwan Chichi earthquake data[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2001, 21: 237-257.
- [21] CHANG M, KUO C P, SHAU S H, et al. Comparison of SPT-*N*-based analysis methods in evaluation of liquefaction potential during the 1999 Chi-chi earthquake in Taiwan[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38: 393-406.
- [22] 李兆焱, 袁晓铭, 曹振中, 等. 基于新疆巴楚地震调查的砂土液化判别新公式[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 483-489.
- LI Zhao-yan, YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong et al. New evaluation formula for sand liquefaction based on survey of Bachu earthquake in Xinjiang[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(3): 483-489.
- [23] 李平, 田兆阳, 薄景山, 等. 松原 5.7 级地震砂土液化研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 91-99.
- LI Ping, TIAN Zhao-yang, BO Jing-shan, et al. Study on sand liquefaction of the magnitude 5.7 Songyuan earthquake[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2019, 52(9): 91-99.
- [24] SEED H B, IDRIS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, 1971, 97(SM9): 1249-1273.
- [25] YOUNG T L, IDRIS 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.
- [26] 全国地震区划图编委会. GB 18306—2015 地震动参数区划图[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Editorial Committee of National Seismic Zoning Map. GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.
- [27] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. GBJ11—89 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- Ministry of Urban and Rural Construction and Environmental Protection of the People's Republic of China. GBJ11 — 89 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1989.
- [28] 中华人民共和国建设部. GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50011 — 2001 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.
- [29] YANG Y, CHEN L, SUN R, et al. A depth-consistent SPT-based empirical equation for evaluating sand liquefaction[J]. **Engineering Geology**, 2017, 221: 41-49.
- [30] 袁近远, 李天宁, 王兰民, 等. 砂土液化概率计算新方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 541-549.
- YUAN Jin-yuan, LI Tian-ning, WANG Lan-min, et al. New method for calculating the probability of sand liquefaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(3): 541-549.
- [31] ZHANG J, WANG T P, XIAO S H, et al. Chinese code methods for liquefaction potential assessment based on standard penetration test: an extension[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2021, 144:106697.
- [32] HILBE J M. Logistic regression models[M]. London: Chapman and Hall/CRC Press, 2009
- [33] LIAO S C, VENEZIANO D, WHITMAN R V. Regression models for evaluating liquefaction probability[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 114(4): 389-411.