

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0803

基于标准贯入试验的土壤液化判别公式锤击数 基准值研究

贾端阳^{1,2}, 陈龙伟^{1,2}, 谢旺青^{1,2}, 李鑫洋^{1,2}

(1. 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;
2. 地震灾害防治应急管理重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 我国抗震设计规范中基于标准贯入试验 (standard penetration test, SPT) 锤击数的砂土液化判别公式是我国科学家提出的适于我国国情、具有中国特色且工程应用最广泛、最权威的液化判别公式。该公式的基本原理是采用场地地下水位和饱和砂层埋深修正 SPT 锤击数基准值得到临界锤击数。该方法中 SPT 基准锤击数取决于液化数据, 而构建规范判别公式所采用的数据库主要来自我国 20 世纪六七十年代发生的几次地震的震后勘察测试数据及震害经验, 但数据一直未得到系统地更新。通过搜集、整理、吸收近期国内地震的液化数据, 极大地扩充了我国液化数据库。借鉴我国规范液化判别方法的理论框架, 通过数据分析给出不同烈度下 SPT 锤击数基准值, 构建新的液化判别公式。利用新的判别公式对液化数据进行回判检验。结果显示, 新公式能够较好地判别液化数据和非液化数据, 保持较高、且液化数据和非液化数据均衡的回判成功率。该研究结果可为我国规范液化判别方法的改进提供支撑。

关 键 词: 标准贯入试验; 液化判别公式; 锤击数基准值; 液化数据

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 10-3031-08

Reference blow counts of standard penetration tests used in soil liquefaction evaluation formulae

JIA Duan-yang^{1,2}, CHEN Long-wei^{1,2}, XIE Wang-qing^{1,2}, LI Xin-yang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: The sand liquefaction evaluation formulae based on the standard penetration test (SPT) blow count in China's seismic design code are the most widely used and authoritative liquefaction evaluation formula proposed by Chinese scientists, which are suitable for China's national conditions. The basic principle of this formula is to use the groundwater level of the site and the burial depth of the saturated sand layer to correct the reference value of SPT blow count to obtain the critical blow count. The SPT reference blow counts in this formulae depend on liquefaction data. However, the database used to construct the evaluation formulae in the codes mainly comes from post earthquake survey and testing data as well as earthquake damage experience of several earthquakes that occurred in China in the 1960s and 1970s, but the data has not been systematically updated. By adding liquefaction data from recent earthquakes in China, the number of liquefaction data is significantly increased. Drawing on the theoretical framework of liquefaction discrimination methods in China's codes, this paper gives the benchmark values of SPT blow counts under different intensities through data analysis, and constructs a new liquefaction discrimination formula. To verify the formulae, back-judgement on the data were performed, and the results indicate the success rates of the new formulae are fairly satisfactory and keep balance between liquefaction data and non-liquefaction data. The analytical results presented herein can be helpful for revising liquefaction evaluation methods in seismic design codes.

Keywords: standard penetration test; liquefaction evaluation formulae; reference SPT-blow counts; liquefaction data

收稿日期: 2023-06-13

录用日期: 2023-07-24

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目 (No.2020B01); 黑龙江省自然科学基金 (No.LH2022D020)。

This work was supported by the Scientific Research Fund of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (2020B01) and the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2022D020).

第一作者简介: 贾端阳, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土地震工程、土动力学等方面的研究。E-mail: jiady97@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、土动力学等方面的研究。E-mail: chenlw@iem.ac.cn

1 引言

地震土壤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,所以地震液化被学者称为防震减灾工作中的一颗“毒瘤”^[5]。

液化减灾首要步骤就是对工程场地进行液化判别,最直接的手段就是采用抗震设计规范方法。现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[6]中,基于标准贯入试验(standard penetration test, SPT)锤击数的液化判别方法是国内应用最广泛、最权威的液化判别方法。该方法最早由我国科学家在 20 世纪七八十年代提出,是最有中国特色、最具代表性的液化判别方法,被国际学者称为中国方法,代表了当时的国内外先进水平,随后被《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ 11—74)^[7]所采纳。该规范也是我国最早涉及饱和砂土液化判别的建筑抗震规范,后经历《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ 11—74)^[7]、《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89)^[8]、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[9],到目前最新修订的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[6]。规范改进演化过程中,虽然液化判别公式的形式经历了几番改进,但本质和原则基本未变。

最初液化判别方法的构建采用的液化数据主要来源于 20 世纪六七十年代国内几次大地震液化场地勘察数据及震害经验,如 1966 年邢台地震、1970 年通海地震等。后来 1975 年海城地震以及 1976 年唐山地震触发了大量的场地液化,震后液化场地勘察测试数据对 TJ 11—74 规范液化判别公式进行了检验,验证了公式的可靠性。同时,海城和唐山地震场地液化数据对规范液化判别方法进行了补充和改进,形成了 GBJ 11—89 规范液化判别方法。GB 50011—2001 规范液化判别方法是在 GBJ 11—89 规范方法的基础上,将液化判别深度从地下 15 m 延伸至 20 m,以满足工程建设的需要。现行的 GB 50011—2010 规范液化判别公式与 GB 50011—2001 规范保持协调性,将分段函数形式改进成连续函数形式,但基本原则和判别流程保持延续性。

液化数据是构建液化判别公式的基础,国内的液化数据库主要是对 20 世纪发生的几次大地震的液化场地勘察测试数据以及震害经验整理而成,随后该数据库一直被国内学者沿用,未得到系统地更新。随着近期地震液化数据的积累,规范液化判别公式逐渐暴露出局限性^[10],且液化判别的深度仅到

20 m,难以满足现阶段工程建设的需求,亟待改进。

我国规范中基于 SPT 锤击数的液化判别方法具有中国特色,主要体现在:①与我国抗震设计理念保持一致,且以设防烈度作为地震动强度指标;②采用的数据来自国内地震液化场地数据,设备为工程常规试验设备,与工程勘察测试指标保持一致;③液化判别公式给出的是沿砂层埋深变化的临界曲线,简单易懂;④规范判别公式基于液化场地实测数据,明确给出了不同设防烈度下 SPT 锤击数的基准值 N_0 ,以基准值为标准,不同埋深砂层的临界锤击数通过砂层埋藏条件(地下水位、砂层埋深)校正基准值得到临界锤击数;⑤与国际上基于循环应力比(cyclic stress ratio, CSR)液化判别方法原理保持一致^[11-12],但我国规范判别公式中参数物理意义更明确,应用更方便。

采用 SPT 锤击数基准值的方法是我国规范液化判别公式的另一个特色,其值的确定依赖液化数据。规范中判别公式以地下水位 2 m、砂层埋深 3 m 的临界锤击数平均值作为基准锤击数,原因在于当时采用的液化数据多为地下水位 2 m、砂层埋深 3 m。然而,随着液化数据的积累,锤击数基准值是否需要修正是一个值得讨论的问题。本文在国内常用液化数据的基础上,搜集整理近期国内地震液化数据,扩充液化数据库,通过新液化数据库研究规范液化判别公式中锤击数基准值问题。

2 地震液化数据

在谢君斐^[13]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,同时整理吸收集^[14-15]、巴楚^[16]以及松原^[17]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。表 1 展示了该数据库地震基本信息。集集地震之前,我国的液化数据主要来自唐山地震,占比为 75.2%。集集地震中获取了 188 个 SPT 数据,显著扩充了我国地震液化 SPT 数据库。2003 年巴楚地震、2018 年松原地震也有液化数据的积累。

表 1 地震液化数据库基本信息
Table 1 Information of the earthquakes from which liquefaction data are collected

序号	地震	年份/年	震级	液化数据数/个	非液化数据数/个
1	通海	1970	7.8	9	9
2	海城	1975	7.3	7	5
3	唐山	1976	7.8	54	37
4	集集	1999	7.6	164	124
5	巴楚	2003	6.8	20	26
6	松原	2018	5.8	5	5

图 1 显示了搜集数据的地下水位和饱和砂层埋深数据的分布图, 图中实线和虚线分别为采用对数正态和正态分布函数对数据进行拟合的曲线。由图 1 可以看出, 数据库中地下水位主要集中在 6 m 以内, 1~2 m 数据最多; 饱和砂层埋深数据 22 m 以内均有分布, 4~6 m 数据最多。经统计分析, 地下水位深度 d_w 和砂层埋深 d_s 的标准差数值分别为 2 m 和 4 m。

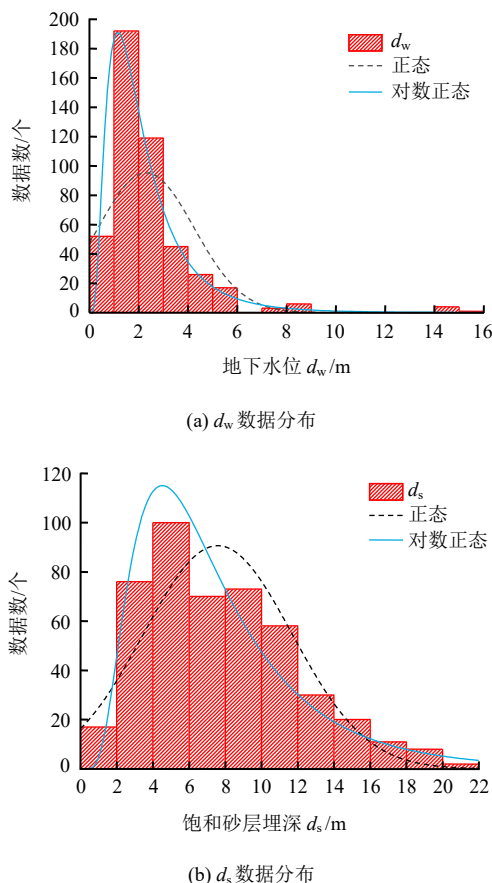


图 1 搜集整理的分布图
Fig.1 Histograms of d_w and d_s data distribution

3 液化判别公式的建立

3.1 公式模型

以《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ 11—74) [7] 最早采用的砂土液化判别模型为参考, 其判别公式为

$$N_{cr} = N_0 [1 + \alpha_s (d_s - 3) + \alpha_w (d_w - 2)] \quad (1)$$

式中: N_{cr} 为临界标贯击数; N_0 为液化判别标准贯入击数基准值, TJ 11—74 规范中设防烈度为 7、8、9 度时 N_0 分别对应 6、10、16 击; d_w 为地下水位深度 (m); d_s 为饱和砂层埋深 (m); α_w 和 α_s 为地下水位和砂土埋深影响系数, 可采用实测数据确定。

从基本原理来看, 式 (1) 本质上是通过地下水位和砂层埋深修正基准锤击数, 得到不同砂层埋深和地下水位临界锤击数。有两个问题需要回答: ①将锤击数修正到多大的地下水位和多大埋深的“标准”条件; ②如何确定锤击数基准值, 即在不同的烈度下, 能够合理地将液化数据和非液化数据区分开的临界锤击数。

3.2 地下水位和饱和砂层埋深基准值的确定

液化判别公式 (1) 建立之初所采用的我国液化 SPT 数据库中地下水位基本分布在 2 m 左右, 液化的深度在地表以下 2~4 m, 平均为 3 m。所以, 公式基本模型中采用地下水位 $d_w = 2$ m 和砂土埋深 $d_s = 3$ m 作为基准工况。但是, 随着液化数据的累积, 液化饱和砂层埋深、液化场地地下水位数据都得到了补充, 有必要对基准工况进行更新。

图 1 为新的液化数据库中 d_w 和 d_s 统计分布图。虽数据不完全符合正态分布或对数正态分布, 但是从拟合效果来看, 采用正态和对数正态拟合能够在一定程度上模拟数据的分布规律。所以, 本文分别采用对数正态、正态分布函数拟合数据, 以均值 (方法 1)、50% 分位值 (方法 2) 以及对数正态拟合得到的峰值 (方法 3) 点对应的 d_w 和 d_s 代表值作为基准值。而方法 4, 将数据进行整体分布分析 (见图 2), 数据分布最密集点作为 d_w 和 d_s 基准值。为了方便计算以及工程应用, 这里将基准值按照精度 0.5 进行取整, 表 2 给出采用不同方法所确定的 d_w 和 d_s 基准值。

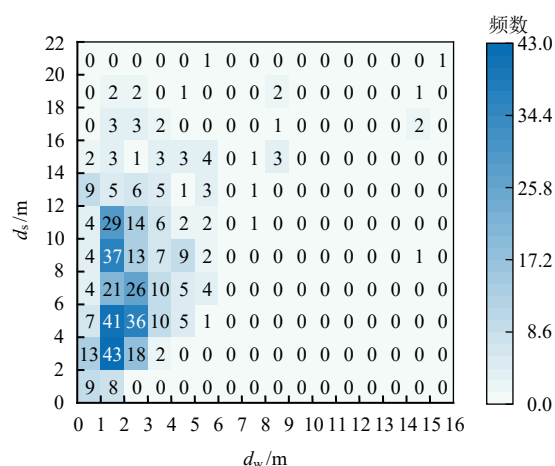


图 2 新的液化数据库中 d_w 和 d_s 数据联合分布
Fig.2 Heatmap of the joint distribution of new d_w and d_s data

3.3 标贯锤击数基准值的确定

确定 d_w 和 d_s 基准值之后, 可以通过数据分析, 给出不同烈度下 SPT 锤击数的基准值。根据锤击数

表 2 不同方法得到的地下水位和饱和砂层埋深基准值

Table 2 Reference values of groundwater tables and saturated sand buried depth using different methods

方法	d_w /m	d_s /m
方法 1	2.0	7.5
方法 2	2.0	7.0
方法 3	1.5	4.5
方法 4	2.0	4.0

基准值的含义,即在设定地震烈度下,选取地下水位和饱和砂层埋深与 d_w 和 d_s 基准值一致的液化场地 SPT 锤击数和非液化场地 SPT 锤击数,基准锤击数值能够将液化数据和非液化数据有效区分开。所以,确定锤击数基准值,首先对数据按照烈度进行分组,然后每个分组选取地下水位和砂层埋深与 d_w 和 d_s 基准值相等或者相近的液化数据和非液化数据。鉴于数据量的局限以及完全符合 d_w 和 d_s 基准值的数据有限,所以在实际计算时,以 d_w 和 d_s 基准值为中心值,选取地下水位和砂土埋深 1 倍标准差范围内的数据。图 3 为不同烈度下筛选的液化和非液化数据分布情况。

为了确定不同烈度下锤击数基准值,以判别液化和非液化数据的成功率最高、且液化和非液化数据判别成功率基本平衡为原则。基于此原则,这里采用逐步试算的方法,以每个分组数据中最小非液化锤击数为起点,逐次增加 1 次锤击数(注:锤击数为整数),通过比对成功率,确定临界锤击数的最优值,即锤击数基准值 N_0 。表 3 给出了不同方法的标准贯入锤击数基准值。表 4~6 列出不同方法所得的基准值以及对应的液化数据和非液化数据判别成功率。由表 4~6 的回判成功率对比可以看出,不同烈度下,4 种方法确定的锤击数基准值能够较好地判别液化数据和非液化数据,成功率均超过 80%。

3.4 地下水位和砂土埋深影响系数的确定

确定了 d_w 和 d_s 基准工况以及 SPT 锤击数基准值后,将其代入式(1),然后通过回判成功率来确定 d_w 和 d_s 影响系数 α_w 和 α_s 值。借鉴已发表文献中采用的 d_w 和 d_s 影响系数 α_w 和 α_s 值确定方法^[16, 18],同样以判别成功率最高为原则。从已发表的研究结果看出,影响系数值基本在 $[-0.2, 0.2]$ 区间,在此区间内变化 α_w 和 α_s 取值,得到液化数据和非液化数据回判等值线图,叠加两幅等值线图找到回判成功率均较高的区域,搜索获取 α_w 和 α_s 优化解答。图 4 显示不同的 α_w 和 α_s 取值下,以及采用方法 1 的基准锤击数以及基准地下水位和饱和砂层埋深。液化数据和非液化数据回判成功率等值线图,如图 4(a)、4(b) 所示。将液化和非液化数据回判成功率等值线图进

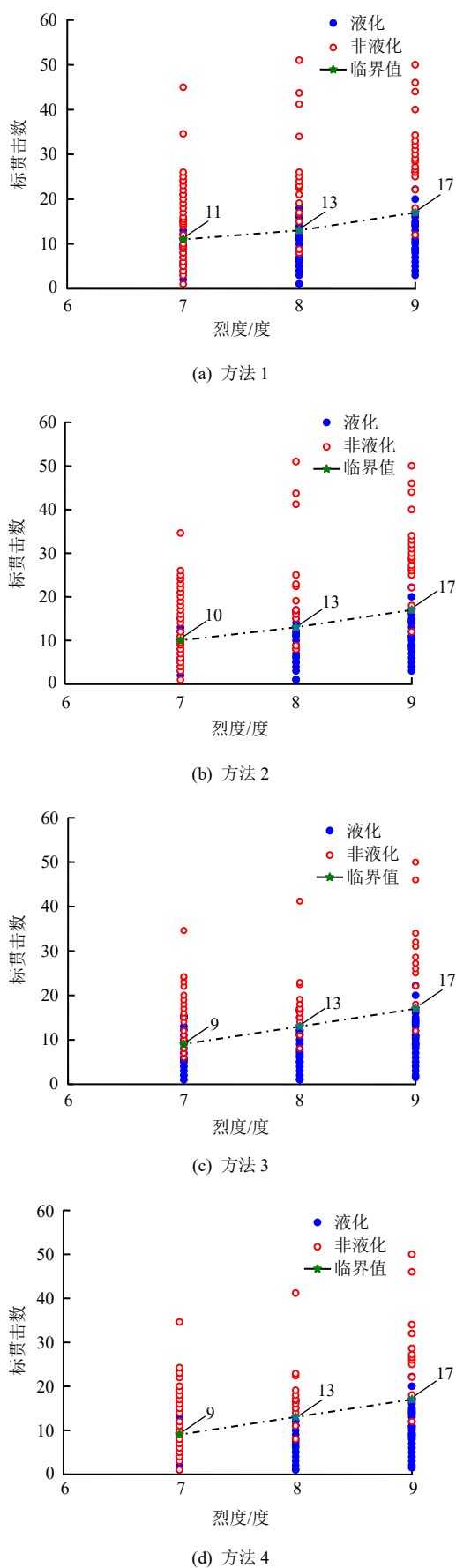


图 3 不同烈度液化数据和非液化数据得到的 d_w 和 d_s 基准值
Fig.3 The reference values of d_w and d_s obtained using liquefaction data and non-liquefaction data for different seismic intensities

表 3 不同方法得到的标准贯入锤击数基准值

Table 3 Reference SPT-blow counts obtained by different methods

方法	锤击数基准值/击		
	7 度	8 度	9 度
方法 1	11	13	17
方法 2	10	13	17
方法 3	9	13	17
方法 4	9	13	17

表 4 设防烈度 7 度时 SPT 锤击数基准值以及判别成功率

Table 4 Reference SPT-blow counts for earthquake fortification intensity 7 and the corresponding success rates of judgment

方法	N_0 /击	液化数据成功率/%	非液化数据成功率/%
方法 1	11	84.78	81.00
方法 2	10	83.02	84.04
方法 3	9	83.33	89.47
方法 4	9	83.33	80.94

表 5 设防烈度 8 度时 SPT 锤击数基准值以及判别成功率

Table 5 Reference SPT-blow counts for earthquake fortification intensity 8 and the corresponding success rates of judgment

方法	N_0 /击	液化数据成功率/%	非液化数据成功率/%
方法 1	13	92.54	89.47
方法 2	13	93.22	85.71
方法 3	13	92.31	85.71
方法 4	13	92.00	85.71

表 6 设防烈度 9 度时 SPT 锤击数基准值以及判别成功率

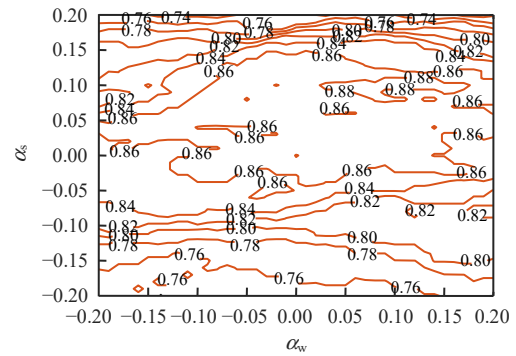
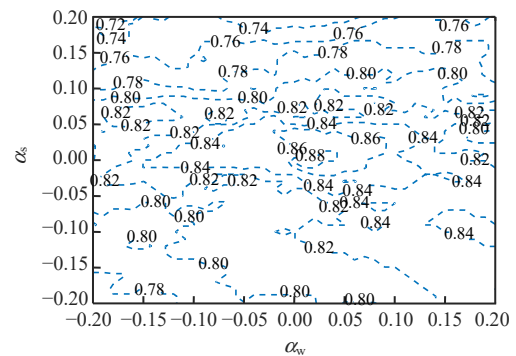
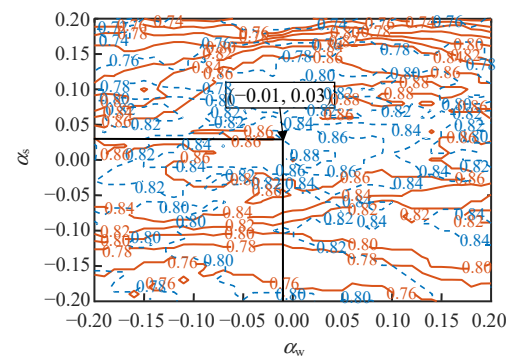
Table 6 Reference SPT-blow counts for earthquake fortification intensity 9 and the corresponding success rates of judgment

方法	N_0 /击	液化数据成功率/%	非液化数据成功率/%
方法 1	17	93.10	95.45
方法 2	17	95.24	95.24
方法 3	17	97.40	92.31
方法 4	17	97.40	92.31

行叠加, 搜寻二者成功率高的区域给出 α_w 和 α_s 建议值 (见图 4(c))。同样步骤, 图 5~7 分别显示其他 3 种方法 α_w 和 α_s 不同取值时, 液化和非液化数据回判成功率的等值线图, 以及叠加二者等值线图给出的 α_w 和 α_s 推荐值。表 7 列出了不同方法的 α_w 和 α_s 推荐值, 可以看出, 不同方法建议的 α_w 和 α_s 值差别不显著。

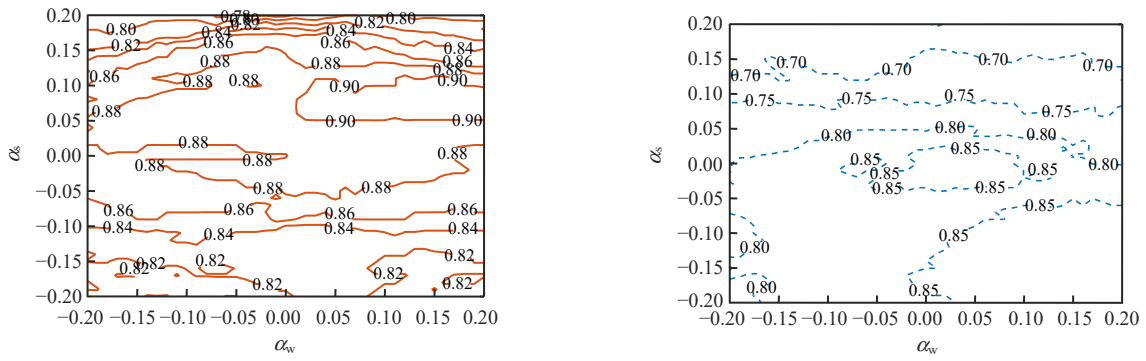
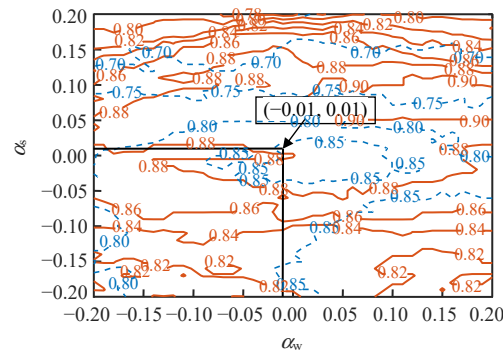
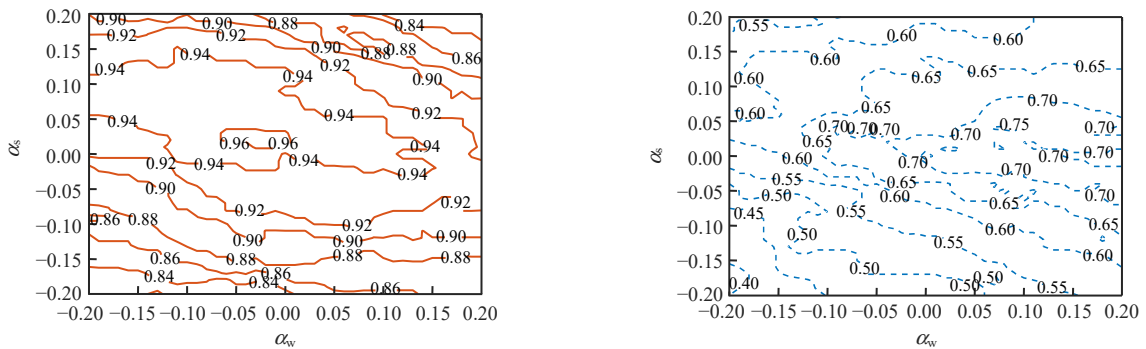
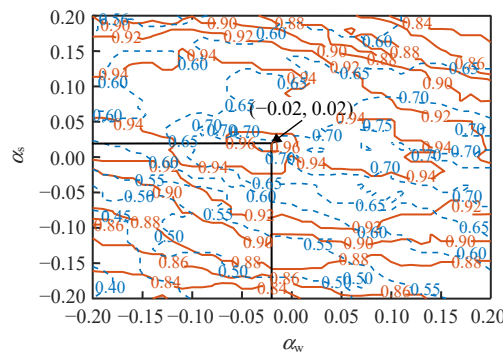
4 液化判别新公式的回判成功率

在式 (1) 经验模型的基础上, 通过前文得到的锤击数基准值、 d_w 和 d_s 基准值以及 α_w 和 α_s 推荐值, 可以建立新的 SPT 液化判别公式。说明一点, 由于液化数据库中饱和和砂层埋深分布在 22 m 以内,

(a) α_w 和 α_s 不同取值液化数据回判成功率的等值线(b) α_w 和 α_s 不同取值非液化回判成功率的等值线(c) 综合液化和非液化数据回判成功率得到的 α_w 和 α_s 推荐值图 4 α_w 和 α_s 不同取值得到判别成功率的等值线图(方法 1)Fig.4 Contours of success rates of judgement by varying α_w and α_s values using the method 1

所以液化判别公式的适应深度也应在 22 m 以内。将不同方法得到的判别新公式, 以及 TJ 11—74 规范^[7]、GB 50011—2010 规范^[6]中的液化判别公式, 对液化数据和非液化数据进行回判检验。表 8 给出了液化数据、非液化数据以及全部数据的回判成功率。

由表 8 的成功率数据对比可以看出, 与规范判别公式判别结果对比, 本文 4 种方法给出的液化判别公式的回判成功率较理想, 除了方法 3 得到的液化判别公式对非液化数据回判成功率为 77.67%, 其他情况均超过 85%。而 TJ 11—74 规范和 GB 50011—2010 规范公式能够较好地判别液化数据但

(a) α_w 和 α_s 不同取值液化数据判别成功率的等值线(b) α_w 和 α_s 不同取值非液化数据判别成功率的等值线(c) 综合液化和非液化数据判别成功率得到的 α_w 和 α_s 推荐值图 5 α_w 和 α_s 不同取值得到判别成功率的等值线图 (方法 2)Fig.5 Contours of success rates of judgement by varying α_w and α_s values using the method 2(a) α_w 和 α_s 不同取值液化数据判别成功率的等值线(b) α_w 和 α_s 不同取值非液化数据判别成功率的等值线(c) 综合液化和非液化数据判别成功率得到的 α_w 和 α_s 推荐值图 6 α_w 和 α_s 不同取值得到判别成功率的等值线图 (方法 3)Fig.6 Contours of success rates of judgement by varying α_w and α_s values using the method 3

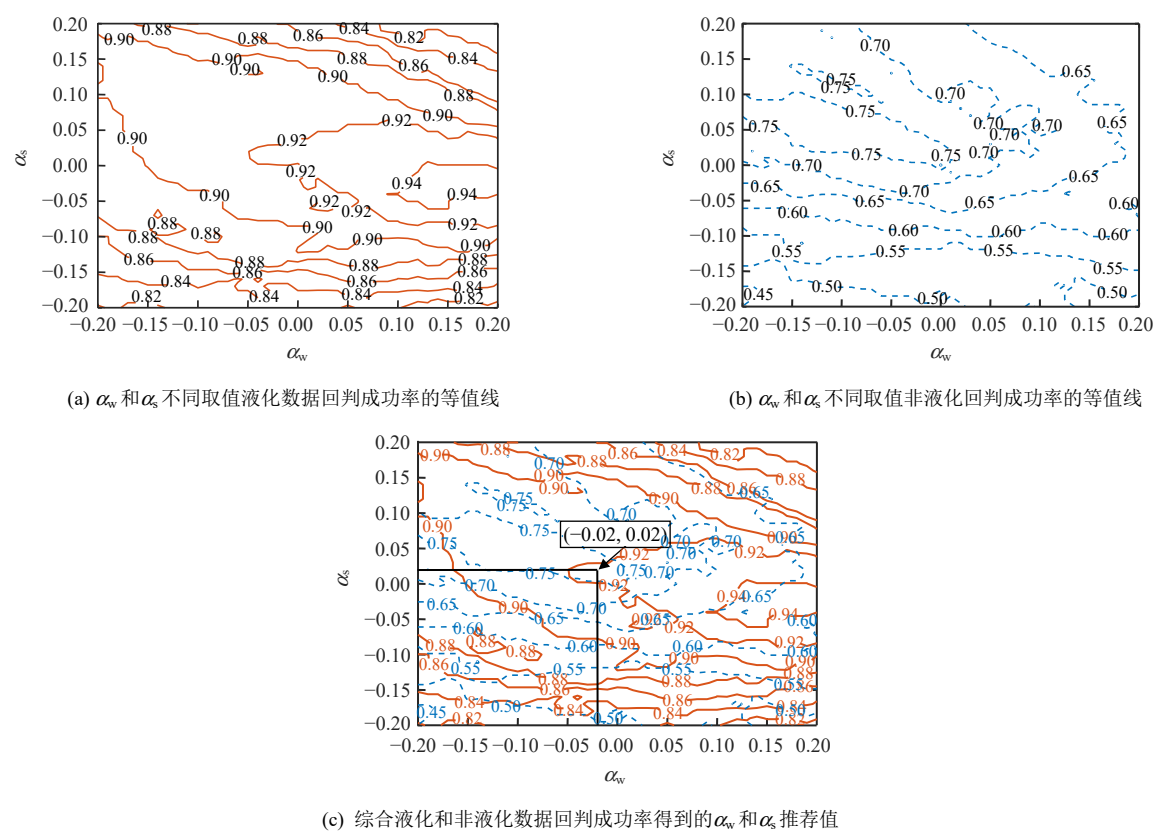


图 7 α_w 和 α_s 不同取值得到判别成功率的等值线图（方法 4）

Fig.7 Contours of success rates of judgement by varying α_w and α_s values using the method 4

表 7 不同方法得到的影响系数 α_w 和 α_s 推荐值

Table 7 The recommended values of α_w and α_s obtained by different methods

方法	α_w	α_s
方法 1	-0.01	0.03
方法 2	-0.01	0.01
方法 3	-0.02	0.02
方法 4	-0.02	0.02

表 8 液化判别新公式对液化数据的回判成功率

Table 8 Success rates of back-judgement by the proposed formulae

判别公式	液化数据 成功率/%	非液化数据 成功率/%	全部数据 成功率/%
方法 1	88.03	82.52	85.59
方法 2	87.26	85.92	86.67
方法 3	93.44	77.67	86.45
方法 4	88.80	87.38	88.60
TJ 11—74 规范	84.94	77.18	81.51
GB 50011—2010 规范	91.51	56.80	76.31

非液化数据成功率相对较低，特别是 GB 50011—2010 规范公式，非液化数据判别成功率最低，仅为 56.8%。对比本文 4 种方法得到的判别公式的回判成功率，发现 4 种方法的回判成功率均较高，且液化数据和非液化数据的判别成功率较均衡，其中方法 4 得到判别公式的回判成功率最理想。

5 结 论

搜集、整理、吸收国内近期地震液化数据，显著地扩充了我国基于 SPT 数据的液化数据库。通过对液化数据分析，重新确定了规范液化判别公式中基准地下水位、饱和砂层埋深以及 SPT 锤击数基准值等，主要工作和结论概括如下：

- (1) 整理、吸收我国近期几次地震的 SPT 液化数据，扩展和补充了 SPT 液化数据库，使数据量从百余条扩充到 465 条，其中液化数据 259 条，非液化数据 206 条。
- (2) 借鉴 TJ 11—74 规范液化判别方法的理论框架，采用新的液化数据库更新了地下水位、砂土埋深基准值以及标准贯入击数基准值，构建了液化判别新公式，采用新公式对液化数据库进行了回判分析，给出了地下水位和砂土埋深影响系数推荐值。
- (3) 对比检验不同判别公式对液化数据的回判成功率，发现与规范液化判别公式对比，新判别公式能够较好地判别液化数据和非液化数据，且保持较高、对液化数据和非液化数据较均衡的成功率。

参 考 文 献

[1] 刘恢先. 唐山大地震震害[M]. 北京: 地震出版社,

1989.
LIU Hui-xian. Damage of the great Tangshan earthquake[M]. Beijing: Seismic Press, 1989.
- [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] 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.
- [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. A 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] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [7] 国家基本建设委员会建筑科学研究院. TJ 11—74 工业与民用建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1974.
Academy of Building Research of the Committee of China Fundamental Building. TJ 11—74 Code for seismic design of civil and industrial buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1974.
- [8] 中华人民共和国原城乡建设环境保护部. GBJ 11—89 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
Former Ministry of Urban-Rural Development and Environment Protection of the People's Republic of China. GBJ 11—89 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB 50011—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. GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [10] 王维铭, 陈龙伟, 郭婷婷, 等. 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[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 279-288.
WANG Wei-ming, CHEN Long-wei, GUO Ting-ting, et al. Analysis of standard penetration test-based liquefaction evaluation methods using Chinese liquefaction database[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(1): 279-288.
- [11] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, 1971, 97(SM9): 1249-1273.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 曹振中, 袁晓铭. 砂砾土液化的剪切波速判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 943-951.
CAO Zhen-zhong, YUAN Xiao-ming. Shear wave velocity-based approach for evaluating gravel soils liquefaction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(5): 943-951.