

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0927

基于剪切波速的液化可能性等级评估表法

杨 洋¹, 孙 锐^{2,3}

(1. 东北林业大学 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 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;

3. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 目前国内外提出的液化评估方法以公式形式为主, 其中的概率评估公式结果保守且普遍形式复杂、计算过程繁复, 而大面积、多数据点的液化小区划更需要评估客观且形式简单的方法。为此, 提出了基于剪切波速的优化 Logistic 液化概率公式和对应的液化可能性等级评估表法。根据国内外公开的剪切波速液化现场调查资料, 计算得出了样本液化概率作为液化可能性分级依据, 并通过决策树方法构建了 3 种精度的液化可能性等级表。将 Kayen 等的数据集作为回判数据集, 衡量优化后公式及等级评估表的合理性。结果表明: 优化后的概率公式误判点集中在液化临界线附近, 误判影响程度小于 Kayen 液化概率公式; 3 种精度下的等级评估表均能正确分离出 70% 以上的场地, 且客观地兼顾了液化场地与非液化场地的整体评估, 简化了液化可能性评估过程, 提高了剪切波速液化概率评估方法的适用性, 实现了无需计算即可评估液化可能性的目的, 可为开展以剪切波速为数据来源的液化小区划提供技术支持。

关 键 词: 液化概率等级; 决策树; 液化因素重要性排序; 剪切波速

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2023) 增刊—0634—11

Liquefaction probability criteria table based on shear wave velocity

YANG Yang¹, SUN Rui^{2,3}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

3. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: The existing methods are mainly expressed in equation form for evaluating the soil liquefaction, among which the equation of liquefaction probability evaluation method is particularly complicated and conservative. However, for the liquefaction microzoning of large-area and multi-points, objective and simple methods are needed. Therefor an optimized Logistic liquefaction probability equation and the corresponding tabular liquefaction probability evaluation method were developed. According to the published results of shear wave velocity liquefaction field in-site tests, the liquefaction probabilities of samples were calculated as the basis for grading the liquefaction possibility, and three precision liquefaction probability criteria tables were constructed by decision tree method. Then the data set constructed by Kayen et al. was used as the judgment data set. The differences between the optimized equation and Kayen's liquefaction probability equation were compared to meet the purpose of measuring the reasonableness of the optimized equation and criteria tables. The results show that the influence of misjudgment by the optimized equation on actual engineering is less than Kayen's equation. All the three criteria tables can properly isolate more than 70% of the sites, and the evaluation of liquefied site and non-liquefied site are both well considered. The criteria tables simplify the evaluation process of liquefaction probability, improve the applicability of shear wave velocity liquefaction probability evaluation method, and realize the purpose of evaluating liquefaction probability without calculation. The tabular method will provide support for liquefaction microzoning based on shear wave velocity.

Keywords: liquefaction probability grades; decision tree; rank of importance of liquefaction factors; shear wave velocity

收稿日期: 2022-06-18

录用日期: 2022-08-12

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (No. LH2020E019)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2020E019).

第一作者简介: 杨洋, 女, 1989 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: y53739623@126.com

通讯作者: 孙锐, 女, 1972 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: iemsr@163.com

1 引言

随着地震震后调查的不断深入,越来越多的液化案例展现了地震液化的严重破坏力,极大地影响了地区社会功能的震后恢复^[1-3]。为量化评估区域地震风险,我国始终推行地震安全性评价和风险评估工作,其中,液化小区划是评估地区整体液化风险的有效手段。这一环节可分为液化发生可能性评估与液化破坏程度预估两部分。液化可能性评估是液化破坏程度预估的前提^[4],是地震液化小区划的基础。

与单独工程项目场地的液化判别不同,更大范围的城镇区域液化区划所需场地数据量巨大,仍沿用现行规范中标贯测试方法将耗费大量的人力物力。剪切波速测试方法具有仪器便携性强、数据获取更简易高效等优点,是一种非常适用于中、大尺度液化小区划工作的现场原位测试数据获取方式。剪切波速测试在液化评估中的应用时间较晚,但与标贯、静力触探等原位测试相比,剪切波速数据与室内土力学试验关联性更强,是一种兼具工程价值与研究价值的原位测试方法^[5],近年来也快速积累了大量的液化现场调查资料与测试数据,推动了剪切波速液化判别方法的发展。Dobry 等^[6]构建了最早的确定性剪切波速门槛值液化评估方法。石兆吉^[7]基于我国数据构建了适用于我国的确定性经验公式。陈国兴等^[8]发表了一组适用于粉土的确定性液化判别方法。Andrus^[9]、Kayen^[10]等在 1992—2013 年间,持续搜集并修正 400 多组数据,先后根据不同时期的数据提出并修正了一组确定性液化评估方法与液化概率评估方法。孔梦云等^[11]提出了一组不同概率水平下的液化触发临界线。杨洋等^[12]基于公开的剪切波速液化调查数据构建了基于我国常规参数的液化概率模型。

上述基于剪切波速的液化评估方法展现了由确定性方法向概率性方法的转变趋势,而方法的表现形式均为公式形式。对于需要大量样本统计与计算的液化区划而言,公式形式的液化可能性评估需要更多种类的现场参数与相对复杂的计算。且以上方法为保证小面积工程场地的安全,判别结果往往趋于保守,这与需要客观评估风险的区域性液化小区划工作思路不一致。针对这些问题,本文以液化区划为应用背景,优化构建更客观的液化概率计算公式,利用决策树方法将公式评估形式转化为多种精度的液化可能性评估表,达到减少液化评估所需参数、简化液化判别过程的目的,更满足实际工程需求^[13],为多尺度与多精度的液化小区划研究拓宽思路。

本研究分为两个部分。首先,优化 Logistic 回归(LR)液化概率评价公式,将液化概率计算结果与液化实际情况对比,评价液化概率值的合理性。其次,根据液化概率将数据集中所有场地划分为 3 种精度的液化可能性评估表:将预划分液化可能性等级的数据集代入决策树,得到分类决策树结果。根据决策树的结果,提出由粗到细 3 种精度的液化可能性等级表,比照真实数据验证评价液化可能性等级表的合理性。

2 数据来源及现场液化影响参数重要性分析

深入的现场液化调查工作展现了地震液化的强不确定性,影响因素众多,影响方式复杂。在液化可能性评价过程中,一般选择的液化影响参数越多,预测结果越准确。然而,这将导致评估公式及评估过程愈加复杂,对于涉及到较大范围的液化小区划工作是不适宜的。因此,在准确评估与涉及较少的参数之间取得平衡,对于工程实用和成本节约很重要。

本文对现有数据集中的所有影响因素进行了定量化的重要性排序,方法选用了分类树(CRT)中的重要性排序算法,数据来源于 Andrus 等^[14]发表的公开数据,包括 225 组可液化场地具体特征参数。在排序过程中,以是否液化为因变量,以所有液化影响参数为自变量,获得重要性排序结果如图 1 所示。其中,按照我国《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[15]的表 G.1,按实际场地的地震动峰值加速度划分了地震烈度。

通过相似机制影响液化的影响因素表现出了相近的重要性值。例如,图 1 中代表地震破坏力的参数,如震级、循环应力比 CSR 和峰值加速度 a_{max} ,

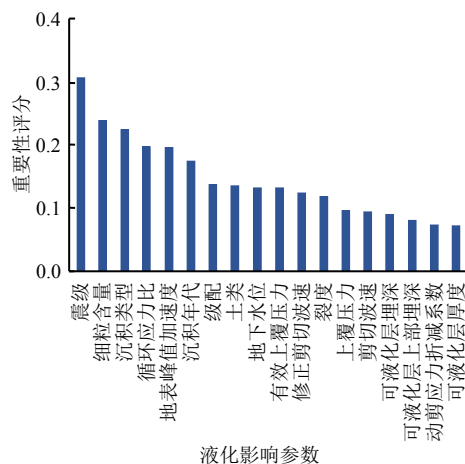


图1 液化影响因素重要性排序(数据来源于文献[14])
Fig.1 Ranking of importance of liquefaction factors
(data from reference[14])

其重要性评分相近。从这个层面上说,该方法得到的液化参数重要性排序结果符合对液化的客观认识,得出的结论是基本合理的。

从重要值上看,CSR、 $a_{\max}$ 和震级3个参数最能代表地震动的破坏强度,这3个参数影响液化发生的机制相近,也展现了相近的重要性评分。其中, $a_{\max}$ 和CSR代表可液化层受到的振动强度或破坏强度,而 $a_{\max}$ 由于独立性更强,可以作为加权参数以增强地震动强度在评估公式中的影响程度。

从可液化层的场地条件来看,细粒含量和沉积条件对土壤液化有显著影响。细粒含量是对液化影响明显的因素之一,但对剪切波速测试值的影响较小^[10-14, 16],在以剪切波速为主要原位测试手段的液化可能性评估中,细粒含量的加入会降低评估方法对剪切波速的敏感性。与室内试验的高可控性不同,现场液化土的偶然性强,现有收集到的数据不足以支持开展相同剪切波速时不同细粒含量对现场液化情况影响的研究分析。因此,在本文选择剪切波速作为原位测试方法的背景下,暂不考虑在公式中选用细粒含量。对于沉积条件来说,考虑到本文方法的应用对象是区域性液化区划,而对于单一区域来说,以国内发生过液化的海城地区为例,其液化集中在西部的冲击平原,区域内沉积环境一致,沉积条件不能对区域内的液化分级起到筛选作用。另外值得注意的是,已有研究发现^[17-20],沉积条件与搬运方式等对土的细粒含量有影响。因此,这两种因素在剪切波速液化评估方法中的体现方式需进一步研究,本文暂不考虑这两个因素的影响,而是选用其他因素。地下水位埋深 d_w 和可液化层埋深 d_s 是现场实测的两个参数。经过简单换算,可间接代表其他场地条件的影响,如上覆土压力、可液化层厚度等,也可用于计算CSR。因此,选择 d_w 和 d_s 作为代表场地条件的参数。

3 剪切波速液化概率计算公式的优化

本文在笔者原提出的 Logistic 液化概率公式^[12]

$$P_L = \Phi \left\{ - \frac{[(0.007 \cdot 3V_{s1})^{2.801} - 1.946 \ln M_w - 0.009 \cdot 9 \ln \sigma'_{v0} + 0.002 \cdot 8FC]}{0.4809} \right\} \quad (3)$$

式中: Φ 代表公式中的概率模型,运用不同编程语言计算时选择相应指令; V_{s1} 为修正剪切波速; M_w 为震级; σ'_{v0} 为有效土覆垂直压力;FC为细粒含量。

在不同的烈度下,以不同的预设液化概率作为液化临界线,获得式(1)与Kayen公式分别在全部样本与3个烈度区(Ⅶ度区、Ⅷ度区、Ⅸ度区)的判

的基础上进行。原公式中,将液化样本分解到不同烈度区,在每个烈度区间内进行独立回归,获得烈度为Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度时的液化概率计算公式。本文在此基础上,将 $a_{\max}$ 的一次函数作为 $\ln(\text{CSR})$ 的回归系数,使得不同烈度的样本可以采用同一个液化概率公式计算。这种拟合方式可以保证不同烈度区内的液化概率评估结果连续。本文用于构建公式的数据集是Andrus等^[14]公布的225组完备数据。

3.1 公式优化

拟合过程中,基于二元 Logistic 回归模型,采用CSR作为过渡拟合参数,由于CSR是通过 d_s 和 d_w 等参数得到的,所以最终的公式不展现CSR参数。为了增强公式拟合中对地震动强度的权重,选择了 $a_{\max}$ 参数作为CSR的权重,加强地震动强度在液化可能性评估中的影响作用。最终获得的剪切波速液化评估公式为

$$P_L = \left\{ 1 + \exp \left[-(3.3a_{\max} + 1.78) \ln \left(0.65a_{\max} \cdot \frac{19d_s}{9d_s + 10d_w} (1 - 0.008d_s) \right) + 0.038V_s - 9.5 \right] \right\}^{-1} \quad (1)$$

$$V_{scr} = \left\{ \ln \left(\frac{1 - P_L}{P_L} \right) + (3.3a_{\max} + 1.78) \ln \left[0.65a_{\max} \cdot \left(\frac{19d_s}{9d_s + 10d_w} (1 - 0.008d_s) \right) + 9.5 \right] \right\} / 0.038 \quad (2)$$

式中: P_L 为饱和土的液化概率; V_s 为实测剪切波速(m/s); V_{scr} 为预设液化概率 P_L 的临界剪切波速。在指定液化概率时,当实测剪切波速 V_s 小于 V_{scr} 时,土层被判别为液化;否则,不会发生液化。

3.2 公式准确性评价

为横向比较式(1)、(2)的准确性,将本文公式与Kayen液化概率公式共同回判Kayen拟合样本。这组样本包括287组液化场地与128组非液化场地。Kayen等^[10]根据这组数据构建的贝叶斯更新(Bayesian analysis)剪切波速液化概率公式为

别情况,如图2所示。其中,随着预设液化概率的降低,液化场地的判别正确率提高,非液化场地的判别正确率降低。两组公式都满足最基本的液化概率合理性评价,但均匀程度不同,将在下文做详细分析。

以液化概率50%为临界,获得各个烈度下的二分类液化回判成功率,即判别结果与实际液化结果

对比后，判别正确的比例，结果如表 1 所示。考虑到剪切波速测试普遍存在误差，将 -10% 剪切波速

误差影响下的液化场地判别影响差异也一并列出，标识为表中的 -10% 列。

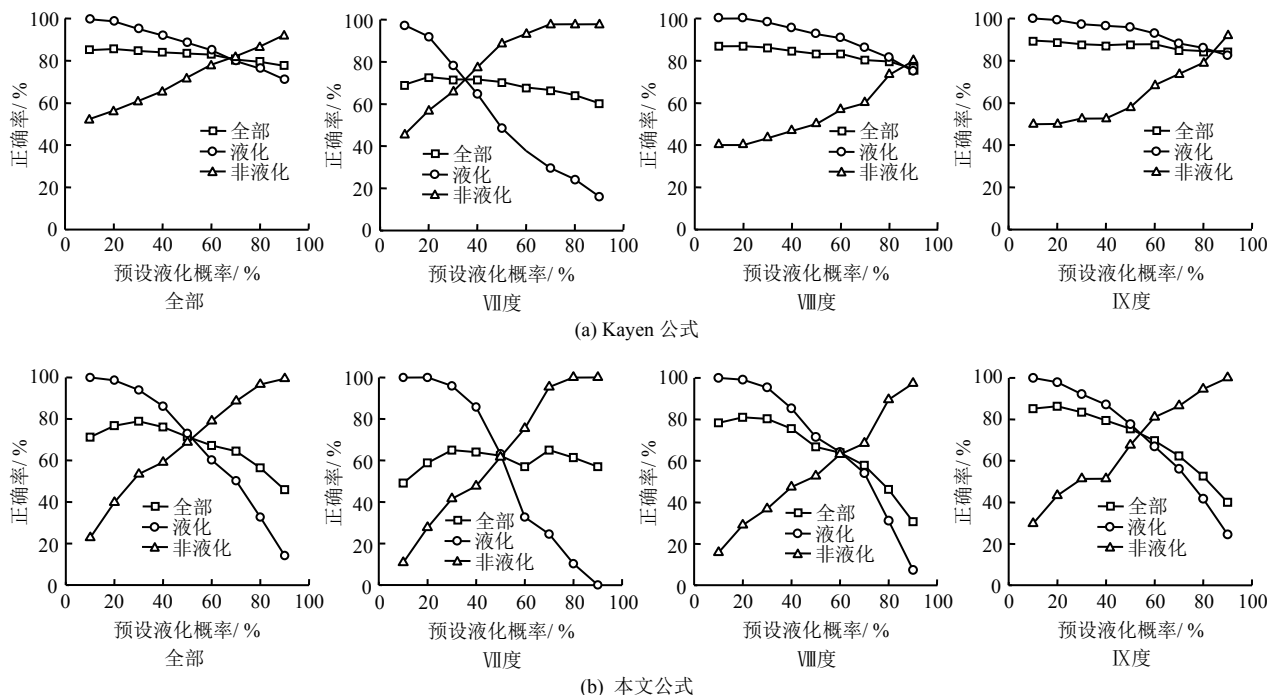


图 2 Kayen 公式与本文公式 (1) 在不同概率水平下的判别结果

Fig.2 Success rates of different preset liquefaction probabilities by Kayen equation and Equation (1) in this paper

表 1 Kayen 公式与本文公式 (1) 在 $P_L=50\%$ 回判成功率对比 (单位: %)

Table 1 Comparison of success rates by Kayen equation and Equation (1) in this paper (unit: %)

烈度	Kayen 公式				本文公式			
	全部	液化	-10%误差	非液化	全部	液化	-10%误差	非液化
全部	83	89	99	72	71	75	89	62
V	100	—	—	100	100	—	—	100
VI	100	—	—	100	100	—	—	100
VII	70	49	89	89	57	70	92	45
VIII	83	93	100	50	73	79	93	53
IX	88	96	100	58	72	73	85	71

注: “—”代表数据缺失。

由于 Kayen 公式与式 (1) 是基于两种不同的概率模型构建的，得到的判别结果差异较大，主要体现在判别准确程度与对不同烈度、不同液化情况范围统计下的判别均匀程度两方面。

从准确程度方面分析，以 50% 为分界线的回判结果来看，Kayen 公式的整体正确率更高，本文公式低 15% 左右。在考虑 -10% 的剪切波速测试误差后，Kayen 公式与本文公式对液化场地的判别正确率分别提升了 10% 与 14%，两组公式的正确率差异减少至 10%，且都达到 85% 以上。

从判别均匀程度方面分析，如图 2 所示，式 (1) 的液化场地与非液化场地的判别正确率在 50% 预设液化概率到达平衡，但 Kayen 公式的平衡点在各个

烈度下是不稳定的：在 VIII 度和 IX 度区时约为 90% 概率水平，在 VII 度区约为 30%，差异较大，且均不是常规意义的 50% 概率水平。分析表明，本文概率结果在各个烈度区没有突变，而 Kayen 公式有趋势不一致的较大突变：在低烈度区 (VII 度) 计算得到的概率值较实际情况偏小，在高烈度区 (VIII、IX 度) 得到的概率值偏大，且这种偏大程度较高。将两个公式的误判点液化概率统计如图 3 所示。

Kayen 公式中，误判点中 50% 场地的概率值分布在 90%~100%，从工程角度看，这部分的非液化场地被判别为高液化可能性，属于明显误判。这也是 Kayen 公式会明显高估场地液化概率的一个体现。本文公式的误判点中，92% 的误判点概率值分布在 $50\% \pm 30\%$ 附近，72% 的误判点概率值分布在 $50\% \pm 20\%$ 附近，误判点主要集中在 50% 液化临界线附近，这部分也是以往临界线二元判别方法难以准确划分的场地。

以上结论说明，在当前数据及拟合方式的支持下，基于剪切波速的场地液化概率准确性在逐渐提升，但未来研究中仍有进步的空间，主要原因在于剪切波速数据对于液化与非液化的区分度低于标贯参数^[12]，而剪切波速的误差也增加了液化数据与非液化数据的混沌程度。

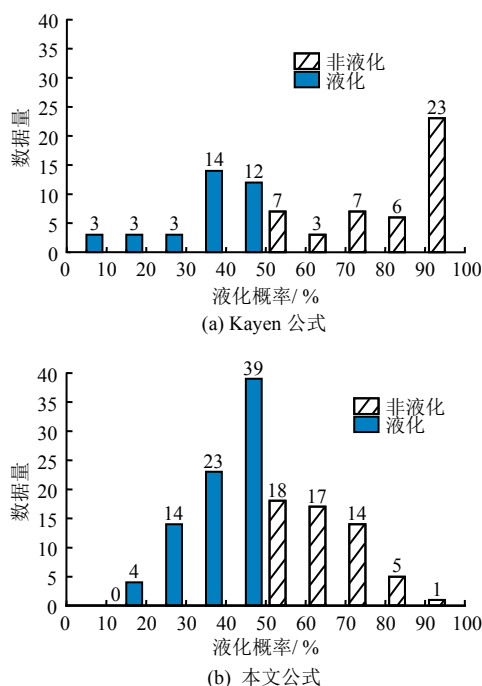


图3 误判点液化概率分布对比

Fig.3 Distribution comparison of liquefaction probability of misjudgment points

目前《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010 (2016 年版))^[21]中的二元结果判别方法在应用过程中,非此即彼的判别结果要求公式精确或偏于保守,才能避免工程使用时发生危险。但液化具有强不确定性,现有的公式拟合水平难以达到精确模拟,因此只能选择偏于保守,但偏于保守的公式直接导致一定量的非液化场地被预估为液化场地,导致区域内液化风险的评估客观性不足。基于这一工程实际的考虑,本文构建剪切波速液化概率公式时,更注重对场地的客观评估,即尽量贴合液化真实情况,而不是牺牲非液化场地的判别正确率以保证液化场地的高判别正确率,以更好地衔接液化小区划工作。与 Kayen 液化概率公式对比结果也表明,本文公式的判别结果更为客观均衡。

4 多精度液化可能性等级表

液化评价是我国场地评价的规范流程,也是液化小区划的基础。如何让方法的合理性与简便性并存是我国科学家与工程师共同关注的问题,我国规范的简便性也优于其他国家推荐方法。下文将液化概率评估过程从公式计算简化到查表评估,在保证准确合理的前提下,对方法的简便性进行探索。

与依靠液化概率公式进行液化评估的方式相比,剪切波速概率液化可能性等级表具有如下优势:

(1) 在合理评估场地液化情况的前提下,省略了公式计算的流程,直接代入现场获取的参数即可

快速获得液化可能性等级,增强了工程实用性。

(2) 分级结果更直观地展现了液化可能性变化趋势,利于多尺度液化小区划的分析与呈现。

(3) 剪切波速数据获取简便,降低了大尺度液化小区划的整体造价,为多尺度液化区划研究提供依据。

统计后发现,本文公式在二元判别的误判点中,42%的误判点集中在概率值 40%~60%之间,72%的误判点集中在概率值 30%~70%之间。其中,78%的液化误判点液化概率集中在 30%~50%之间,49%的液化误判点集中在液化概率 40%~50%之间,33%的非液化场地误判点集中在 50%~60%之间,64%的非液化场地误判点集中在 50%~70%的液化概率区间内,如图 3 所示。在以上结果的支持下,将精确的液化概率数值结果粗化到 20%、30%或 50%的液化概率区间段后,能有效弱化当前的 40%~60%液化概率区间段的判别误差,也能从一定程度上规避剪切波速测试误差的影响。

引入机器学习中的分类树算法用于液化概率评估过程从公式计算到查表评估的简化,按照液化发生客观规律人工筛选分类树结果,并将分类树规则转化为表格形式。利用多种分类树方法试算后,最终选用分类效果较好的 CHAID 分类树与 CRT 分类树两种方法。

CHAID (Chi-squared automatic interaction detector) 是决策树的一种^[22],它采用多路分割的方式,按照卡方检验的显著性对多分类的自变量类别进行合并,从而达到对样本的拆分,最终对样本进行最优分割,形成多叉树形式的分类规则。CRT (classification and regression tree) 是 Breiman 于 1984 年提出的一种决策树构建算法^[23],通过循环二分对由测试变量和目标变量构成的训练数据集,最终形成二叉树形式的决策树结果。该算法既可以用于分类,也可以用于连续变量的预测。以上两种决策树方法在经济领域、医学领域等均有广泛的应用。

分类树构建过程中,数据量越大的无偏数据集带来越准确的分类规则。由于地震的发生具有偶然性,地震带来的现场液化数据天然具有强不确定性,震后调查收集的数据集是难以均衡完备的。为尽量提取天然数据集展现的液化发生规律,本文将与 Andrus^[9]、Kayen^[10]等公布的数据集筛选后,删除重复数据后,将剩余的 473 组数据全部作为训练集,验证时采用十折交叉验证方法,以减少数据集因人为划分训练集与验证集而带来的数据偏差。计算的因变量是由式 (1) 计算得的液化概率,自变量为图 1

所示的液化影响参数，以输出的决策树规则用于构建液化可能性等级评估表。

基于以上背景，下文以概率结果更客观的式(1)为联结，对全部样本的液化概率计算值进行预分级，将样本的预分级结果与现场参数输入进行分类树计算，将获得的分类树及分类规则作为依据，归纳液化可能性等级表。

4.1 预分级

目前国际上对于液化可能性等级的分级方式有很多，主要有 15%、35%、65%、85% (Chen 等^[24])，5%、20%、50%、80%、95% (Cetin 等^[25])，15%、50%、85% (Boulanger 等^[26])。结合以上研究成果，将式(1)代入数据集中计算，获得所有样本的液化概率值，再以液化概率值 10%为界限对数据进行了划分，分布规律如图 4 所示。

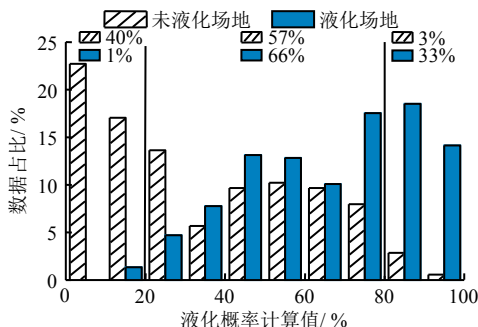


图 4 用于初步分类的概率值分布直方图

Fig.4 Histogram of P_L versus data frequency for preliminary classification

预分级后的数据中， P_L 在 0%~20%范围内包括 40%的非液化场地和 1%的液化场地。 P_L 在 80%~100%范围内包括 33%的液化场地和 3%的非液化场地。分级界限选择 20%与 80%的话，能优先控制液化可能性等级高与低的较准确评价，保证最终分级规则的总体合理性。根据以上结论，拟定以下 3 种精度的分级界限，具体如表 2 所示。

表 2 3 种精度下液化可能性分级的概率范围

Table 2 Probability range of three precision classification criteria for liquefaction probability

等级	3 等级	4 等级	5 等级
液化概率范围	低(0%~20%)	低(0%~20%)	低(0%~20%)
	中(20%~80%)	中低(20%~50%)	中低(20%~40%)
	高(80%~100%)	中高(50%~80%)	中(40%~60%)
		高(80%~100%)	中高(60%~80%)
			高(80%~100%)

4.2 分类树试验

分别将以上 3 种预分级后的数据集代入到分类树方法中运算。

4.2.1 3 等级

在 3 等级液化可能性等级表构建时，采用机器学习中的 CHAID 分类树方法，衡量多组输出结果后，最终结果选择如图 5 所示的树状结果，该树状结果符合土壤液化规律，并对数据进行了充分细分。树的划分依据 V_s 和 $a_{\max}$ 两个参数。

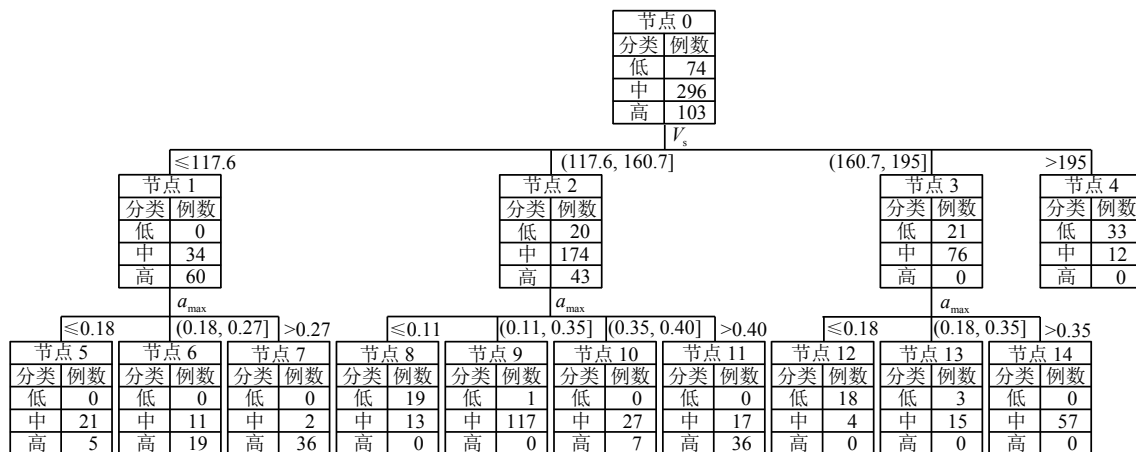


图 5 作为 3 等级剪切波速液化可能性分级依据的决策树

Fig.5 Decision tree for shear wave velocity liquefaction potential grades (three grades)

树的第 1 层以剪切波速作为分枝参数，根据剪切波速的 3 个节点值 (117.6、160.7、195.0 m/s，在图 5 中以红线标注) 将数据集分为 4 部分。在这 4 部分中，以地震动加速度 $a_{\max}$ 作为分离参数，树继

续生长。最后，树有 11 个纯度相对较高的终节点。本研究选择该树的结果作为建立 3 等级液化可能性评估表的分级依据。考虑到剪切波速实际测试误差及工程实用性，将剪切波速分界点就近取整，如剪

切波速数值 117.6 m/s 就近取整至 120 m/s, 160.7 m/s 就近取整至 160 m/s 等, 其他节点以此类推。整理后的 3 等级评估表如表 3 所示, 3 个等级由低到高分别是低等级 (1)、中等级 (2) 与高等级 (3)。由于试验数据集中最大剪切波速为 317 m/s, 故将其作为表格应用的上限值。剪切波速大于 317 m/s 被归入低液化可能性等级。

表 3 3 等级液化可能性评估表
Table 3 Criteria table of liquefaction potential grade (three grades)

$a_{\max} / g$	不同 V_s ($m \cdot s^{-1}$) 时液化可能性分级			
	(0, 120]	(120, 160]	(160, 200]	(200, 317]
(0, 0.11]	2	1	1	1
(0.11, 0.18]	2	2	1	1
(0.18, 0.35]	3	2	2	1
(0.35, 0.76]	3	3	2	1

对 3 等级评估表的结果进行分析。表 4 中的正确百分比表示该等级的实际样本中被预测正确的比例, 全部百分比表示该等级的预测样本中被预测正确的比例。研究发现, 3 个等级的正确百分比均在 80% 以上, 尤其是高、低等级数据正确百分比均可接近或超过 90%。这表明该模型对这两部分数据都有很好的分离效果。

表 4 3 等级评估表回判结果
Table 4 Judgment results for three grades

实际值	预测值			正确百分比 / %
	低	中	高	
低	68	6	0	92
中	22	219	55	74
高	0	5	98	95
全部百分比 / %	76	95	64	81

4.2.2 4 等级

4 等级液化可能性评估表在构建时, 拟定了两种思路: ①将测试集全部按 4 分类重新划分, 形成独立 4 等级分类树; ②在 3 等级的划分基础上, 将原“中等级”的数据继续划分, 将得到的结果与原 3 等级综合, 以获取 4 等级评估表。对比两组划分结果后, 发现第 2 种思路获得的评估表正确程度更高。因此, 选择后者构建 4 等级液化可能性评估表。

分析表 3、4 后发现, 整个中等级液化概率范围较大 ($20\% < P_L < 80\%$), 占总数据量的 62%。试算多种决策树方法后, 选择了分类更明显的 CRT 分类树方法。将中等级以 $P_L = 50\%$ 继续划分后, 原 3 等

级评估表中的中等级细分为中-低等级与中-高等级。原中等级细分的 CRT 分类树结果如图 6 所示。最终获得的分类树有 5 个纯度较高的终节点, 且整体符合液化发生规律。

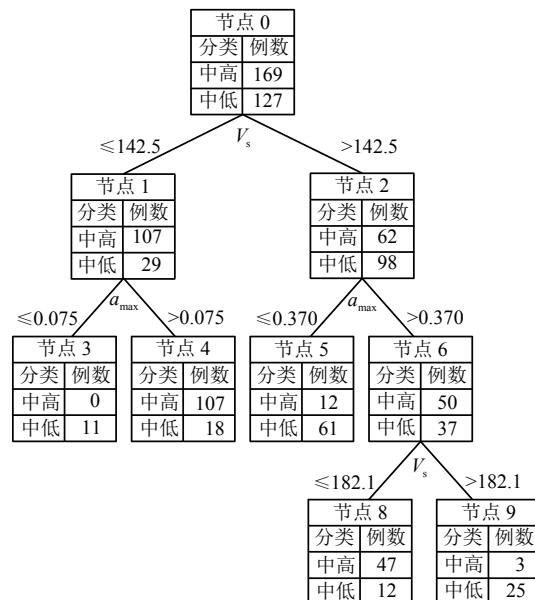


图 6 针对中等级的细分决策树 ($20\% < P_L < 80\%$)
Fig.6 Refined decision tree for medium grade ($20\% < P_L < 80\%$)

这部分数据分类树的回判结果如表 5 所示。其中, 中-低、中-高两个等级的正确百分比分别为 83%、72%, 两个等级对应的全部百分比分别为 69%、82%。这说明该模型能够更准确地识别中低等级, 判别结果略偏于保守。被细分的子数据集也是液化场地与非液化场地剪切波速测试结果混程程度较高的部分, 这在之前的研究中已有阐述。虽然本部分数据中已经有 77% 被决策树方法正确分离, 但在后续研究中, 还会考虑其他参数, 继续优化该部分数据的分离。

综合图 5 与图 6 两棵分类树的结果, 得到了 4 等级液化可能性评估表, 如表 6 所示。其中, 将液化可能性按液化概率由低到高依次分为低 (1)、中-低 (2)、中-高 (3) 和高 (4)。剪切波速大于 317 m/s 被归入低液化可能性等级。

表 5 中等级回判结果
Table 5 Judgment results for medium grade

实际值	预测值		正确百分比 / %
	中-低	中-高	
中-低	106	21	83
中-高	48	121	72
全部百分比 / %	69	85	77

表 6 4 等级液化可能性评估表
Table 6 Criteria table of liquefaction potential grade (four grades)

$a_{\max} / g$	不同 V_s ($m \cdot s^{-1}$) 时液化可能性分级					
	(0, 120]	(120, 140]	(140, 160]	(160, 180]	(180, 200]	(200, 317]
(0, 0.075]	2	2	2	1	1	1
(0.075, 0.18]	3	3	2	1	1	1
(0.18, 0.37]	4	3	2	2	2	1
(0.37, 0.4]	4	3	3	3	2	1
(0.4, 0.76]	4	4	4	3	2	1

应用 4 等级评估表回判试验数据集, 得到回判结果如表 7 所示。在预测结果中, 4 种等级的回判正确率在 60%~93%之间。其中, 预测为低等级的场地中, 81%的场地为非液化场地, 原液化场地中的 93%为预测为高液化等级, 评估结果合理。

4 等级评估表的准确性低于 3 等级评估表, 主要原因为: 4 等级评估表中对剪切波速数值进行了取整, 其取整范围与剪切波速的测试误差 ($\pm 10\%$) 相近。取整后, 74%的误判场地为较低液化可能性等级的场地被预测为较高液化可能性等级的场地。整体液化可能性评估的趋势偏于保守。

表 7 4 等级评估表回判结果
Table 7 Judgment results for four grades

实际值	预测值				正确百分比 / %
	低	中-低	中-高	高	
低	47	27	0	0	64
中-低	8	90	29	0	71
中-高	0	21	101	47	60
高	3	0	4	96	93
全部百分比/%	81	65	75	67	71

基本依据, 包括 V_s 、 $a_{\max}$ 与 d_w 3 个参数。分析后发现, 当前树对地震加速度小于 0.11g 范围内的数据划分不够精细。将涉及到的 44 组数据继续划分, 获得如图 7 所示的该部分数据分类树结果。这部分数据中不包括 80%~100%液化概率值的数据, 因此, 分类树中仅体现了对前 4 个等级的划分。

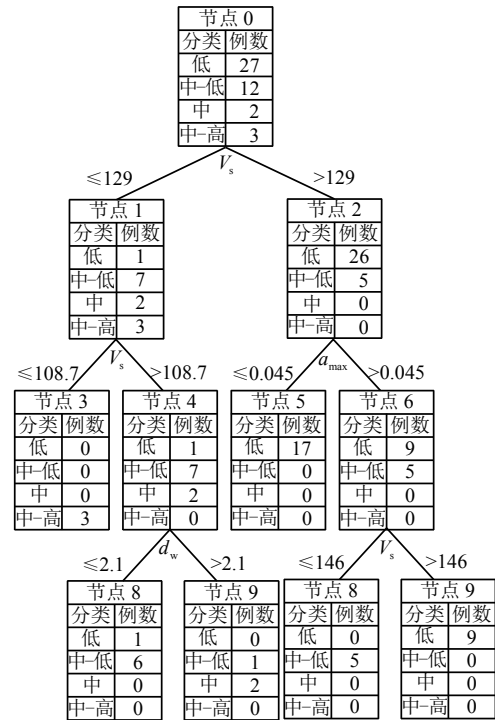


图 7 $a_{\max} < 0.11g$ 部分数据分类树结果
Fig.7 Classification tree for part of the data ($a_{\max} < 0.11g$)

4.2.3 5 等级

为继续提高评估表的精度与准确度, 重新利用分类树算法对数据集进行 5 等级划分。多次试算后, 选择 CHAID 分类树输出的结果作为 5 等级划分的

将两组分类树综合, 整理得到 5 等级液化可能性评估表, 如表 8 所示。等级随 3 个参数的变化均匀合理, 符合液化发生的客观规律。5 个等级分别为低 (1)、中-低 (2)、中 (3)、中-高 (4) 和高 (5)。

表 8 5 等级液化可能性评估表
Fig.8 Criteria table of liquefaction potential grade (five grades)

$a_{\max} / g$	不同 V_s ($m \cdot s^{-1}$) 时液化可能性分级							d_w / m
	(0, 120]	(120, 130]	(130, 140]	(140, 160]	(160, 195]	(195, 260]	(260, 317]	
(0, 0.045]	2	2	1	1	1	1	1	—
(0.045, 0.11]	3	2	2	1	1	1	1	—
(0.11, 0.18]	5	4	4	3	1	1	1	(0, 0.5]
	5	3	3	3	1	1	1	(0.5, 0.9]
	4	3	3	3	1	1	1	(0.9, 1.7]
(0.18, 0.27]	4	3	3	2	1	1	1	>1.7
	5	4	4	3	2	1	1	≤1.1
	4	4	4	3	2	1	1	>1.1
(0.27, 0.35]	5	4	4	3	2	1	1	—
(0.35, 0.4]	5	4	4	4	3	2	1	—
(0.4, 0.5]	5	5	5	5	4	2	1	(0, 1.7]
	5	5	5	5	3	2	1	(1.7, 2]
	5	4	4	4	3	2	1	>2
>0.5	5	5	5	5	4	3	2	(0, 1.7]
	5	5	5	5	3	2	1	>1.7

5 等级评估表对测试数据的回判结果如表 9 所示。整体正确率为 78%，介于 3 等级与 4 等级评估表之间。预分级是低与中-低等级两部分数据的正确率低于其他 3 个等级，其误判主要来源于较低等级的数据被划分至相邻较高等级。如中-低等级的回判正确率为 65%，但其中有 28% 的场地液化可能性被高估到中等级。这种影响是略偏于保守的，有利于液化风险控制，因此未进行修正。但在今后研究中，随着非液化场地数据的补充，这部分数据的划分效果仍有提高的空间。

表 9 5 等级评估表回判结果
Table 9 Judgment results for five grades

实际值	预测值					正确百分比 / %
	1	2	3	4	5	
1	49	25	0	0	0	66
2	5	46	20	0	0	65
3	0	5	90	15	2	80
4	0	0	10	94	9	83
5	0	0	0	14	89	86
全部百分比/ %	91	61	75	76	89	78

横向对比以上 3 种精度的回判准确程度后发现，3 种精度评估表的整体正确率分布在 70%~85% 之间，评估等级中包括了液化概率 50% 的 3 等级与 5 等级方法的整体正确率更高，分别为 81% 与 78%，而判别等级中以 50% 为界的 4 等级方法整体正确率（71%）最低，这与本文公式判别结果中 50% 附近集中较多的误判点是相符的，也证明本系列方法在构建时将 50% 包含到某一等级内，而不直接以 50% 为分界的思路是合适的。

实际应用于液化区划时，推荐使用准确性更高的 3 等级与 5 等级方法。对于整体液化可能性较小的地区，3 等级与 5 等级的评估结果差异不大，而 3 等级评估所需参数更少，节约总体造价。对于有液化历史的地区，应用略偏于保守的 5 等级方法可获得更详细可靠的液化区划结果。虽然上述方法的主要应用对象是液化小区划，但也能快速评估具体工程场地的液化可能性。落实到具体场地时，可根据建筑物的重要性程度及历史液化情况，选择适宜的评估等级精度。

5 结 论

本文采取 Logistic 回归模型与决策树结合的方式，根据真实震后调查资料，选取剪切波速测试为原位测试手段，建立了 3 种精度的剪切波速液化可能性等级表，将传统的现场参数—液化概率值—液

化可能性等级的评估过程简化为现场参数—液化可能性等级，并检验了等级表的有效性和适用性。主要结论如下：

（1）本文概率公式与 Kayen 公式对比后发现，本文公式对液化与非液化场地的区分更客观均衡，误判点分布范围主要在液化概率 50% 的临界线附近。该公式更适合需要客观评估区域液化可能性的液化小区划工作。

（2）依托 CHAID 和 CRT 分类树方法，建立了 3 种精度的液化可能性评价表。该系列方法形式简单，3 等级、4 等级与 5 等级液化可能性评估表的判别正确率依次为 81%、71% 与 78%。相比公式判别方法，多种精度的等级表能更有效地评估液化可能性。实际应用时，准确性在 80% 左右的 3 等级与 5 等级方法更适合液化小区划的分级需求。

参 考 文 献

- [1] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙锐. 2011 年新西兰 Mw6.3 地震液化及岩土震害述评[J]. 世界地震工程, 2013, 29(3): 1-9.
CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Review of liquefaction phenomena and geotechnical damage in the 2011 New Zealand Mw6.3 earthquake[J]. **World Earthquake Engineering**, 2013, 29(3): 1-9.
- [2] 曹振中, 袁晓铭. 砾性土液化原理与判别技术: 以汶川 8.0 级地震为背景[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
CAO Zhen-zhong, YUAN Xiao-ming. Liquefaction principle and discrimination technology of gravelly soil: based on Wenchuan M8.0 earthquake[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [3] 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.
- [4] YOUD T L, NOBLE S K. Liquefaction criteria based on statistical and probabilistic analyses[C]//NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Salt Lake City, Utah: National Center for Earthquake Engineering Research, 1997: 201-215.
- [5] 汪闻韶. 土地地震减灾工程中的一个重要参量——剪切波速[J]. 水利学报, 1994(3): 80-84, 89.

- WANG Wen-shao. An important parameter in geotechnical engineering for earthquake disaster mitigation—shear wave velocity[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1994(3): 80-84, 89.
- [6] DOBRY R, STOKOE K H II, LADD R S, et al. Liquefaction susceptibility from S-wave velocity[C]// Proceedings of the ASCE National Convention, In Situ Tests to Evaluate Liquefaction Susceptibility. New York: ASCE, 1981.
- [7] 石兆吉. 判别水平土层液化势的剪切波速法[J]. 水文地质和工程地质, 1986, 6(4): 9-11.
- SHI Zhao-ji. Shear wave velocity method for determining liquefaction potential of horizontal soil layer[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 1986, 6(4): 9-11.
- [8] 陈国兴, 张克绪, 谢君斐. 以剪切波速为指标的液化判别方法及其适用性[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(1): 97-103.
- CHEN Guo-xing, ZHANG Ke-xu, XIE Jun-fei. Liquefaction identification method based on shear wave velocity and its applicability[J]. **Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture**, 1996, 29(1): 97-103.
- [9] ANDRUS R D, STOKOE K H, JUANG C H. Guide for shear wave-based liquefaction potential evaluation[J]. **Earthquake Spectra**, 2004, 20(2): 285-308.
- [10] 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.
- [11] 孔梦云, 陈国兴, 李小军, 等. 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其概率判别法[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1239-1252, 1260.
- KONG Meng-yun, CHEN Guo-xing, LI Xiao-jun, et al. Shear wave velocity and peak ground acceleration based deterministic and probabilistic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(5): 1239-1252, 1260.
- [12] 杨洋, 孙锐, 陈卓识, 等. 基于土层常规参数的剪切波速液化概率计算公式[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2755-2764.
- YANG Yang, SUN Rui, CHEN Zhuo-shi, et al. Liquefaction probabilistic evaluation formula based on shear wave velocity and conventional site parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(7): 2755-2764.
- [13] HSEIN J C, GONG W, MARTIN J R, et al. Model selection in geological and geotechnical engineering in the face of uncertainty—does a complex model always outperform a simple model?[J]. **Engineering Geology**, 2018, 242: 184-196.
- [14] ANDRUS R D, STOKOE K H, CHUNG R M, et al. Guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurement and simplified procedures[R]. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2003.
- [15] 中国地震局. GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 地震出版社, 2015.
- China Earthquake Administration. GB 18306 — 2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. Beijing: Seismological Press, 2015.
- [16] 董林, 夏坤, 李少华, 等. 剪切波速液化判别方法对粉砂及粉土适用性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(2): 225-232.
- DONG Lin, XIA Kun, LI Shao-hua, et al. Study on applicability of V_s -based liquefaction potential assessment methods for silty sands and silts[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Dynamics**, 2019, 39(2): 225-232.
- [17] 赵娜, 王建华. 饱和松散粉土剪切波速对其抗液化强度影响的研究[J]. 勘察科学技术, 2006(2): 11-13.
- ZHAO Na, WANG Jian-hua. Research on relativity between the shear wave velocity and the liquefaction resistance of loose saturated sand[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2006(2): 11-13.
- [18] 袁启旺. 对淮安市区粉土地基液化评价的思考[J]. 淮阴工学院学报, 2006, 15(5): 82-85.
- YUAN Qi-wang. On evaluation of the silty soil in Huaian city[J]. **Journal of Huaiyin Institute of Technology**, 2006, 15(5): 82-85.
- [19] 李铁飞, 陈学良, 高孟潭. 玉溪盆地浅层土层颗粒特征与剪切波速的关系研究[J]. 地震学报, 2016, 38(6): 934-941, 960.

- LI Tie-fei, CHEN Xue-liang, GAO Meng-tan. Relationship between particle characteristic and shear wave velocity of shallow soil in Yuxi basin[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2016, 38(6): 934-941, 960.
- [20] 王小花. 黄河三角洲饱和地基土地震液化判别综合方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- WANG Xiao-hua. Research on method of earthquake liquefaction estimation of saturated soil in Yellow River delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 (2016 年版) 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 (2016 ed.) Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [22] KASS G V. An exploratory technique for investigating large quantities of categorical data[J]. **Journal of the Royal Statistical Society**, 1980, 29(2):119-127.
- [23] BREIMAN L, FRIEDMAN J, OLSHEN R, et al. Classification and regression trees[M]. London: Chapman and Hall, 1984.
- [24] CHEN C J, JUANG C H. Calibration of SPT-and CPT-based liquefaction evaluation methods[C]//Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000 (GSP 97) on Innovations and Applications in Geotechnical Site Characterization. Reston, VA: [s. n.], 2000: 49-64.
- [25] CETIN K O, SEED R B, DER 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**, 2004, 130(12): 1314-1340.
- [26] BOULANGER R W, IDRISS I M. Probabilistic standard penetration test-based liquefaction-triggering procedure[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(10): 1185-1195.