

文章编号:1007-6069(2017)04-0141-10

砂土液化判别方法研究若干进展

王亮¹,薄景山^{1,2},李孝波²,常晁瑜^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所,中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 防灾科技学院,河北 三河 065201)

摘要:由于砂土液化是导致地基失效和上部结构受损的重要原因之一,场地液化判别是饱和砂土场地工程建设中的必要环节,因此砂土液化判别方法研究是工程抗震设计中的一个重要课题。回顾了砂土液化判别方法的研究历史,总结了国内外进行液化判别的主要方法和研究进展,对各判别方法进行了简要述评。在分析当前研究成果的基础上,指出了已有液化判别方法中存在的一些问题,并针对这些问题进行了讨论,包括液化评价指标的获取、标准贯入锤击数基准值的可靠性、液化判别的概率表达和液化判别方法的适用性等。这一工作为从事该领域的研究工作以及今后的研究方向提供了一定参考。

关键词:地震;砂土液化;判别方法;研究进展;研究方向

中图分类号:P315.9

文献标志码:A

Research progress on methods of sand liquefaction potential evaluating

WANG Liang¹, BO Jingshan^{1,2}, LI Xiaobo², CHANG Chaoyu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: Sand liquefaction is an important reason for ground failure and superstructure damage, and site liquefaction analysis is a essential link in engineering construction site evaluation. Therefore, the research of sand liquefaction potential evaluating methods is an important subject in engineering seismic design. The recent advances of main methods for sand liquefaction potential evaluating at home and abroad are summarized, and the brief review of the different methods are made in this paper. Based on analysing the present study results, the existing problems of evaluating liquefaction potential are pointed out, and the proposals for further research are discussed, including acquisition of liquefaction evaluation indexes, reliability of reference value of the standard penetration test, probability prediction method of soil liquefaction, applicability of the liquefaction potential evaluating methods. The works done may provide a reference for the next work and area engaged in the research of this field.

Key words: earthquake; sand liquefaction; evaluation method; research progress; research area

引言

早在 20 世纪 30 年代,美国学者 A. Casagrande 就开始了砂土液化的研究。由于砂土液化会导致地基失

收稿日期:2016-10-20; 修订日期:2016-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51208108);中央高校基本科研业务费专项资金创新团队项目(ZY20160101)

作者简介:王亮(1991-),男,硕士研究生,主要从事岩土工程抗震研究. E-mail:uniquewl@163.com

通讯作者:薄景山(1958-),男,研究员,博士生导师,主要从事岩土地震工程研究. E-mail:bojingshan@163.com

效并造成灾难性的震害,因此,砂土液化是岩土工程界研究的热点问题之一。近百年来,岩土工程界不断地探索砂土液化的形成条件和机理,不断地改进和完善砂土液化的评价方法,取得了大量有科学意义和工程应用价值的优秀成果^[1~3],极大地推动了岩土工程抗震水平的提高。总结这一领域的研究进展,对进一步促进砂土液化的深入研究具有重要意义。

已有研究资料表明:砂土液化的过程较为复杂,其影响因素主要有土性条件、初始应力条件、动荷载条件以及排水条件等^[4]。现阶段,国内外进行砂土液化判别的方法主要分为两类^[5]:第一类是基于地震现场调查资料的经验分析法,这一方法是通过震害调查资料(包括液化和非液化场地)确定判别公式,如规范法、能量法等;第二类是基于现场或室内的试验分析法,该方法是以试验确定的土体量化指标作为液化判别的依据,如 Seed 简化法、剪切波速度与静力触探法等。近年来,还出现了一些新型的综合考虑多指标的非确定性的液化判别方法,如概率法与模糊综合评价与人工神经网络等方法。概述了国内外砂土液化判别方法的研究现状,并对各判别方法进行了简要述评,指出了现有研究方法存在的问题,并提出了解决这些问题的思路。

1 经验分析方法

经验分析方法通常以地震现场液化调查资料为基础,建立区分预测液化与否的界限条件,直观且较为全面的考虑了液化影响因素,对部分难定量分析的因素通常作为隐含量给予考虑,这一方法因为简单易行而被工程界所接受和广泛应用。

1.1 规范法

规范法主要是以标贯资料作为判别依据,早期是以通海地震(1970)、海城地震(1975)、唐山地震(1976)等大地震的现场液化资料和标准贯入试验(SPT)结果为基础建立的经验公式。以《建筑抗震设计规范》为主,液化判别方法的发展经历了4个阶段:《工业与民用建筑抗震设计规范》^[6](TJ 11-78)仅考虑了地震烈度对液化的影响;《建筑抗震设计规范》^[7](GBJ 11-89)增加了近震、远震对标贯击数基准值的取值影响,同时考虑了黏粒含量的对液化判别的影响,并提出了液化指数的计算方法;《建筑抗震设计规范》^[8](GB 50011-2001)采用设计地震分组来确定标贯击数基准值;《建筑抗震设计规范》^[9](GB 50011-2010)对设计地震分组进行了改进,根据设计地震加速度确定标贯基准值,随着液化数据库的不断丰富,为规范中判别公式的进一步修订提供了依据。

我国《水利水电工程地质勘察规范》^[10](GB 50487-2008)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)和《水运工程抗震设计规范》^[11](JTS 146-2012)对液化判别均分为初判和复判2个阶段,初判都考虑了地质年代、黏粒含量、平均粒径和上覆非液化土层厚度4个指标,但表述方式略有不同。复判均采用临界标准贯入击数作为界线参量,当实测的土层标准贯入锤击数大于等于临界标贯锤击数时,则判定为液化土。规范法考虑了土层的土性条件、埋藏条件和动荷载条件对液化判别的影响,对液化影响因素考虑较为全面,但现有方法中仍存在问题:

(1)规范判别公式是以国内几次大震实测资料为基础建立的,其区域性较强,应用到其他场地时,土层的埋藏条件、土的动力学参数可能与数据来源区存在较大差异。规范法给出的临界标贯击数是震后液化场地的资料,这与液化前的标贯击数存在差别,应利用液化前后的标贯资料对比给出液化临界击数;

(2)液化调查资料大多取自自由场地的天然地基,受上覆建筑物的附加应力影响时,地基土的应力-应变状态和孔压等发生明显变化,而规范公式未考虑附加建筑物对液化判别结果的影响;

(3)规范法适用于判别埋深在20 m范围内的饱和砂土层的液化情况,当进行更深层土的液化判别时,其结果理论上偏于保守。

1.2 临界孔隙比法

临界孔隙比法是通过确定饱和砂土的临界孔隙比经验值与土的实际孔隙比对比来判别液化的方法。1936年,Casagrande根据低密砂的剪缩性和高密砂的剪胀性,首次提出了临界孔隙比法,并将剪切破坏状态下体积不变时对应的孔隙比作为临界孔隙比,临界孔隙比法也是世界上最早用来评价砂土液化势的方法。但由于临界孔隙比受荷载条件和侧向边界条件的影响较大,以临界孔隙比作为单一评价指标来判别砂土液化的误差较高,目前已基本不再应用。Castro和Poulos等^[12~14]在Casagrande工作的基础上,提出了一种土体发生流动滑移破坏时,土体保持原有稳定状态的稳态强度法。认为只有松砂才可能发生流滑破坏,并确定

了孔隙比与固结压力之间关系的稳态线,通过稳态线确定了无流滑破坏区与潜在流滑破坏区的范围,以现场实测土体的孔隙比与稳态线对比来判断液化可能性。赵成刚等^[15]对稳态强度法与稳态线在液化判别过程中存在的问题进行了讨论,指出稳态强度与稳态变形并不是在任何条件下都存在的,并对稳态线的唯一性、形状进行了分析和讨论。由于不同研究者的观点不同,即使采用同一组数据也可能得出不同的稳态线,所以稳态强度法的应用还尚未得到普遍认可。

1.3 能量判别法

1982年,Davis等^[16]提出了一种以地震液化调查资料为基础的基于能量概念的判别方法,该方法考虑了饱和砂土液化的机理,并假定孔隙水压力的增减与地震时土中的能量耗散有关。对于给定的地震震级,基于Gutenberg-Richter(1956)地震总辐射能计算方法,确定其到达给定场地的能量。由于土体中消耗的能量导致孔隙水压力增加,Davis假定孔隙水压力增量与能量衰减符合一定的线性关系。通过大量的地震现场调查资料的总结和试验结果的分析,确定了孔压增量与上覆有效压力的比值,并以二者相等时作为液化临界条件。Law等^[17]和Trifunac^[18]均以Gutenberg-Richter提出的地震能量计算方法为基础,分别构造了液化可能性评价公式。Arias(1970)提出了度量地震强度的烈度计算方法,Kayen等^[19]利用Arias烈度方法计算了地震总能量,并建立了评价场地液化可能性的能量判别方法。

能量判别法以大量现场实际调查数据为基础,采用震级、震中距、上覆有效压力和标准贯入击数等参数判别液化,确立了孔压增量与上覆有效压力之间的关系,其物理概念明确,分析过程简单。但能量法也有其局限性,当震中距很小时,上述所假设的能量衰减关系可能不合理,不适用于近场场地的液化判别。另外,Divis选用的调查资料中标准贯入击数均小于20击,对于实测贯入击数大于20击时,关于标准贯入击数的经验公式需要进一步修正。由于上覆有效压力与砂层埋深成正比,而所选用场地资料中初始上覆有效压力均小于135kPa,应谨慎用于深层饱和砂土层的液化判别。

1.4 统计法

统计法是在大量液化与未液化场地震害资料统计分析的基础上,利用灵敏度指标建立的预测液化可能性的经验统计公式。统计分析法通过认识和揭示各液化因素与液化情况间的变化规律,进而对拟建工程场地进行液化判别。

Christian等^[20]采用统计法对39个场地(包括液化和非液化)的地震资料和土性参数进行统计分析,确定了不同液化等级下相对密度与修正加速度关系的临界线。日本学者谷本喜一结合地震调查资料 and 统计分析思想,选取震中距、震级和相对密度等多种参数,根据Fisher准则,构造了以灵敏度为目标的液化判别统计公式,并分别给出了四因素和六因素的经验统计式,为综合多因素评价在液化判别中的应用提供了启示。谢定义在《土动力学》一书中对谷本喜一在该方面的工作进行了详细介绍。王余庆^[21]以谷本喜一统计公式为基础,分析了3组(含523个点)具有代表性的液化资料,建立了包含四因素与五因素的轻亚粘土液化判别式,并根据工程的重要性得出一定的保证率下的场地液化可能性。实例验证表明:对于8度和9度区,五因素统计公式预测效果较好,判别成功率在80%以上,并建议对重要建筑场地进行液化判别时可适当调整保证率。

现有的经验统计公式虽然均是采用Fisher准则建立的灵敏度函数,但在数学模型和自变量形式的选取方面,不同的研究学者持不同意见,尚未形成统一的判别标准。随着震害资料的不断积累、数学方法的应用以及计算机技术的发展,寻求更加优化的多元统计模型是未来的发展方向。

2 试验分析方法

试验分析法是依据现场或室内试验进行的液化判别方法。黄文熙院士早在1961年就提出了采用动三轴仪试验研究砂土液化的建议。试验分析适用于非自由场地的液化判别,主要包括Seed简化法、剪切波速法和静力触探法等。

2.1 Seed简化法

Seed等^[22]在1971年提出了基于地震剪应力比的饱和砂土液化判别方法,其本质是通过对比地震作用时土体所受的水平地震剪力与发生液化时所受的水平地震剪力的大小,来评价液化的可能性,这一方法的核心思想如下:

(1) 确定地震作用下土单元所受的等价地震剪应力:

$$\tau_{hv, eg} = 0.65\gamma_d \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i / g \right) \alpha_{max} \quad (1)$$

式中: $\tau_{hv, eg}$ 为土单元所受的等价地震剪应力; γ_i 为第 i 层土体的容重; h_i 为第层土体的厚度; γ_d 为应力折减系数; α_{max} 为地表峰值加速度。

(2) 由动三轴试验确定发生液化时试样在 45° 斜截面上所受的水平地震剪应力:

$$\tau_{hv, d} = C_r \left(\frac{D_r}{2\sigma_3} \right)_{50} \sigma_v \quad (2)$$

式中: $\tau_{hv, d}$ 为发生液化时土体所受的水平地震剪应力; C_r 为修正系数; D_r 为土的相对密度; $(\sigma_{a, d} / 2\sigma_3)_{50}$ 为相对密度为 50% 时饱和砂土发生液化的应力比; σ_v 为上覆有效压力。

(3) 比较式(1)和式(2)可知: 当 $\tau_{hv, eg} \geq \tau_{hv, d}$ 时, 则判定饱和砂土发生液化。

Seed 等^[23] 依据标准贯入试验(SPT)结果对上述方法进行简化, 考虑了细粒含量的影响。Seed 等^[24] 归纳总结了不同国家和不同试验设备的测试结果, 对标贯击数进行了修正, 建立了基于标贯击数修正值与细粒含量关系的砂土抗液化曲线, 这一工作为该方法在世界范围内推广应用奠定了基础。

美国、日本和欧洲国家等均以 Seed 简化法为基础, 分别修订了适用于本国的抗震设计规范。1996 年美国国家地震工程研究中心(NCEER)对 Seed 简化法进行了全面的修订与更新, 形成了基于循环应力比和循环阻力比的简化判别法(亦称“NCEER”法), NCEER 法是美国推荐的砂土液化判别规范方法。Youd 等^[25] 在 2001 年美国 NCEER 和国家自然科学基金委员会(NSF)的总结报告中, 对 NCEER 法进行了详细介绍。日本道路桥梁抗震设计规范以 Seed 简化法为依据^[26], 提出了液化安全系数的概念, 通过比较地震剪应力和抗液化强度来判别场地是否发生液化。《欧洲抗震设计规范 8》^[27] 中规定, 对于浅埋基础, 当饱和砂层埋深超过 15m 时, 可不进行液化敏感性评价, 该规范在 Seed 简化法的基础上, 以标准贯入击数为评价指标给出了简化的经验液化判别图表。

Seed 简化法(抗液化剪应力法, 也称“循环应力法”)考虑了震级、地表峰值加速度、土的容重、相对密度和埋藏深度等液化影响因素, 根据室内试验模拟土层的应力条件, 来确定饱和砂土的抗液化强度, 反映了液化的机理, 该方法是目前国内外应用最为广泛的液化判别方法。但是 Seed 简化法只考虑了单向的水平地震剪切作用, 而实际地震中土体单元受力更加复杂, 这使得判别结果偏于保守。另外, 剪应力比是由重塑土样的室内动三轴液化试验确定的, 与原状土样测试结果还存在一定的差异。

2.2 剪切波速法

剪切波速是表征土的动力特性的重要指标, 反映了土的密实和固结程度。实际上, 剪切波速反映了土体的初始剪切模量, 初始剪切模量越大, 在同一等级的地震作用下, 土体的变形越小。剪切波速法具有测试离散小、测试速度快和经济高效等优点, 已被广泛应用到岩土工程领域, 该方法的关键在于临界剪切波速的确定。

Dobry 等^[28] 根据循环应变法的基本理论, 提出了采用剪切波速判别饱和砂土液化势的方法, 在大量的原位测试的基础上, Dobry 建议饱和砂土发生液化的临界剪应变值取为 4 ~ 10 左右, 并推导出了液化判别公式, 这一半经验半理论的公式已被美国国家标准局(NBS)所采用。Tokimatsu 等^[29] 通过大量试验测定了土的液化应力比和最大动剪切模量, 确定了修正的临界剪切波速与液化应力比的关系。1984 年, 汪闻韶^[30] 在我国提出了采用剪切波速进行地震液化初步鉴别的方法, 该方法的模量比和临界剪应变均采用 Dobry 的建议值。同一年, 石兆吉^[31] 认为 Dobry 给出的临界剪应变建议值过于保守, 根据海城地震和唐山地震现场的实测资料, 建立了以临界剪切波速为指标的粉土液化判别公式, 并进一步将该判别式推广应用到不同地震烈度下饱和砂土的液化判别中。为了满足不同要求和条件下的工程应用问题, 1993 年石兆吉等^[32] 根据地震烈度法、地震剪应力比法和能量法给出了 3 种不同形式的饱和砂土液化判别式。周燕国等^[33] 结合不排水的三轴试验和新型波速测试技术, 在统计了 70 多个液化点的测试资料的基础上, 提出了一种基于临界剪切波速的简化判别方法, 经比较, 这一方法的计算结果与现场实际调查结果吻合较好, 这也验证了抗液化强度与弹性剪切模量成线性相关的经验结论。曹振中等^[34] 根据汶川 8.0 级地震中砂砾土的液化现象, 认为砂土液化的剪切波速判别式对砂砾土不再适用。选取了烈度、地下水位深度、土层埋深、剪切波速基准值以及含砾

量作为评价因子建立了砂砾土的剪切波速液化判别模型,结果表明:所建模型具有较高的判别成功率。

剪切波速法以大量的原位试验数据为基础,可直观反映原状土体特性。随着岩土测试技术日臻成熟,测定值也更加稳定可靠,国内外很多学者利用该指标建立了多种形式的液化判别模型。但由于不同砂样和不同固结水平下的剪切波速有所不同,不易选定出一个确切的临界值,因此,国内现有的基于剪切波速的液化判别公式之间存在较大的差异。

2.3 静力触探法

静力触探(CPT)是岩土工程的一种原位测试手段,早在1917年就用于瑞典铁路建设。由于CPT试验对土样扰动的影响小、识别速度快和操作简单省力等优点,经过不断的发展,该方法已成为岩土工程原位测试常用的一种基本手段。

1984年,Olsen^[35]提出用锥尖贯入阻力和侧壁摩阻力来确定循环阻力比CRR的方法,由于确定CRR时需要进行迭代,为简化其计算的复杂性,采用应力指数对锥尖贯入阻力进行归一化,从而得到了CRR与归一化的锥尖贯入阻力和摩阻力比的函数关系。Robertson等^[36~37]利用CPT测试结果直接计算得到了循环阻力比CRR,通过研究,总结了过去20年间原位试验在液化评价研究中的进展,对比分析了CPT与两种测试方法用于液化判别的适用性。Moss等^[38]在Robertson等的研究基础上,统计了全球液化场地的静力触探数据,提出了基于CPT的确定性与非确定性的液化评估方法,并修正了软弱夹层对锥尖阻力的影响。结果表明:当采用归一化的CPT测试结果作为变量时,上覆有效压力对液化影响的权重减小,建议采用迭代法修正后续应力对液化的影响。

周中根^[39]对唐山地震的不同烈度区进行了大量静力触探试验,采用震中距、地下水位、砂层埋深、覆盖层厚度和砂层贯入阻力这5个参数建立了液化判别模型,推导得出了临界贯入阻力,通过与实测的贯入阻力的比较来判别是否发生液化。《岩土工程勘察规范》^[40](GB50021-2001)中规定:当实测的比贯入阻力或锥尖阻力小于液化时的比贯入阻力临界值或锥尖阻力临界值时,应判定为液化土。采用《铁路工程地质原位测试规程》^[41](TB1008-2003)进行液化判别时,对地震动峰值加速度和砂层埋深的取值给出了明确界定:地震动峰值加速度为0.1g、砂层埋深小于15m的地区与地震动峰值加速度为0.2g或0.4g、砂层埋深小于20m的地区,宜采用CPT法进行判别。李兆焱等^[42]对巴楚地震中采用静力触探法判别液化的适用性进行了研究,结果表明:规范的CPT法对该液化场地的判别成功率为55%,其误判较高,结果偏于危险,认为巴楚地区的土层埋藏条件和土性条件与规范中静力触探的数据来源地区的差异较大,不适用于该地区。

静力触探法经过近百年的工程应用实践,积累了大量的数据基础和实用经验,具有广阔的应用前景。随着试验仪器精度的提高,能够最大限度的避免对原状土的扰动,降低了人为因素的影响,其测试结果能较好地反映土的特性。但遗憾的是,由于建立规范公式的数据来源局限性较强,规范中给出的参考基准值均偏于保守,使得误判率均较高。

3 其他方法

3.1 概率法

地震砂土液化是地震引起的,由于地震发生的不确定性,人们自然考虑到砂土液化的不确定性,同时也在探索砂土液化判别的概率表达。概率法大多是以液化调查资料和试验数据为基础建立的回归函数,现有的概率判别方法大致分为两种:一是二分类变量的Logistic回归分析法;二是基于可靠指标的可靠性分析法。Liao^[43]基于278个测点的SPT数据,以标贯击数和循环应力比作为自变量,建立了4个适用于不同液化条件下的二项Logistic回归判别模型。Juang等^[44~45]以SPT与CPT数据为基础,分别建立了基于贝叶斯理论的条件概率液化判别公式,给出了液化等级与安全系数的关系,所建公式均取得了较高的判别成功率。潘建平^[46]在Juang等的研究基础上,选取修正的标贯击数和等效循环应力比建立了液化判别的Logistic回归模型。袁晓铭等^[47]以标贯击数、地震动峰值加速度、标准贯入点深度和地下水位深度4个常规土层参数作为自变量,构造了判别砂土液化的概率计算公式和不同概率水平下的标贯击数临界值计算公式。结果表明:规范法的判别成功率与液化概率为50%时的计算结果基本相当,且液化概率公式在液化场地的回判成功率高于非液化场地。孙锐等^[48]基于标准贯入试验的液化数据,建立了液化判别的双曲线模型,并验证了该模型对不同地震强度、砂层埋深和地下水位条件下的场地均有较好的适用性。

汪明武等^[49]采用包括震级、峰值加速度以及标贯击数在内的9个影响因子建立了评价液化的可靠度公式,并应用到了某工程场地的液化判别中,取得了较为满意的结果。余跃心等^[50~51]通过拟合抗液化能力与标贯击数之间的非线性关系,确立了液化概率与安全系数的关系曲线,其计算结果与规范法进行对比后,认为规范法的液化判别结果离散度较大,结果偏于保守。陈国兴和孔梦云等^[52~53]分别以标贯试验、剪切波速和峰值加速度的测试数据为依据,利用 Monte Carlo 模拟、加权的最大似然估计法和加权的经验概率法,确定了安全系数与液化概率的临界液化曲线及概率等值线,并针对核电厂工程场地的不同分类,给出了临界液化曲线。分析表明:临界曲线几乎不受等效循环应力比和标贯击数取值误差的影响。

由于工程场地液化判别的要求也不断提高,对场地仅给出液化“是”与“否”的确定性结果已不能满足工程建设的需求。概率方法兼顾了工程建设对经济与安全的要求,考虑了不确定性因素存在的风险。现阶段,已发展了多种液化判别的概率方法,但由于参数的选取和处理方式不同,所得到的判别公式存在较大差异,难以与国内规范的液化判别方法相结合。为了更好的服务于工程建设,建立与结构抗震设计流程相匹配的液化概率判别方法,是今后研究的一个方向。

3.2 人工神经网络法

砂土液化的影响因素有很多,为了全面有效地描述液化势与各影响因素之间的映射关系,很多研究学者提出了应用人工神经网络方法建立综合多因素的液化判别模型。1993年,蔡煜东等^[54]将基于反向传播的神经网络模型用于砂土液化判别,引起了岩土工程界对人工神经网络方法在工程应用中的注意。任文杰等^[55]以烈度、震中距、标贯击数、地下水位、平均粒径、砂层埋深、剪应力比和不均匀系数8个实测指标建立了液化预测的神经网络模型,计算得出了不同参数对液化影响的贡献率,其中:对引起液化的贡献较大,并进一步验证了模型的有效性。陈国兴等^[56]基于径向基函数的神经网络模型,构造了临界抗液化强度曲线,并给出了具有概率意义的抗液化强度公式,该方法对液化与非液化场地的判别结果均具有较高的可靠性。范付松等^[57]选取规范法与 Seed 简化法判别结果相同的数据作为原始训练样本,建立了广义回归的神经网络模型,并对前面两种判别方法的歧义结果进行了回判,结果证实了该模型具有良好的适用性和准确性。

人工神经网络是一种具有自学习与自适应性的新型信息处理系统,可通过高度非线性计算灵活地处理液化判别中多指标的复杂问题,具有良好的应用前景。但考虑多因素综合评价时,其收敛速度较慢、易出现奇异值,且神经网络模型无法解释运算推理过程和依据,无法体现砂土液化作用的内在机理,只能通过对多类型的和大量的原始资料进行训练,来提高模型预测准确率。

3.3 模糊综合评价法

由于地震发生的不确定性,影响液化判别的各因素及其相互作用均存在一定的不确定性和模糊性,这种模糊事件适宜用模糊数学的方法来解决。1992年,周锡元等^[58]将模糊概率方法应用到砂土液化危险性评价中,提出了隶属函数与液化危害等级划分标准。翁焕学^[59]选取了地震烈度作为评价集,以相对密度、平均粒径、上覆有效压力和标贯击数作为因素集,以各因素对某一烈度下液化可能性的影响权重建立单因素评价矩阵,通过模糊矩阵的合成运算,直接计算得出抗液化临界烈度的液化判别公式。赵艳林等^[60]提出了基于灰色关联分析理论的综合评价法,考虑了地震烈度、标贯击数、平均粒径和上覆有效压力4个影响因素,通过26个液化实例建模并与实际液化情况对比,说明了该判别方法的有效性。薛新华等^[61]和刘章军等^[62]分别选取不同的影响因子作为评价子集,对模糊评价方法用于液化判别的可行性进行了研究,通过实例分析表明:该评价方法均得了良好的适用性,具有较高的判别成功率。但由于受研究者的知识水平、工程经验以及液化资料占有量的影响,各评价因子的权重矩阵和隶属度函数的取值和形式存在较大的差异。

模糊综合评价法通过隶属度理论对所蕴含信息呈现模糊性的液化资料做出较合理的量化评价,其判别成功率较为满意,所包含的信息丰富,可作进一步的深入研究。模糊综合评价法对评价指标权值的确定主观性较强,权重取值是否合理是判别方法有效性的关键,可由专家进行系统评定,形成统一认识;当指标较多时,各指标权值分配过小,导致评价结果失真,可进行分层建模加以改进。

4 问题与讨论

总结近年来国内外砂土液化判别方法的研究工作,虽已取得上述研究进展,但由于砂土液化问题的复杂性以及地震发生的不确定性,仍存在以下几方面的问题与不足。

(1)液化评价指标的获取。液化评价指标的可靠性是砂土液化预测成功的关键,我国规范中液化判别公式的建立多采用液化后场地的测试数据,液化前后土层的孔隙比和密实度等均发生显著变化,而规范中并未对这种前后存在的差异进行合理修正。由于地震的不确定性,测定同一场地液化前后的试验数据难度较大,如何获取地震前后同一场地的液化评价指标也是今后研究的难题;

(2)标准贯入锤击数基准值的可靠性。规范中标准贯入锤击数基准值是以天然地基的自由场地实测数据统计确定的,当土层受上覆附加压力的影响,其受力状态和孔隙水压力等都发生一定的变化。工程上,以天然地基的判别结果作为非自由场地的液化判别依据其合理性受到质疑,因此,应分析上覆建筑物的附加压力对标准贯入锤击数基准值的影响;

(3)液化判别的概率表达。地震的发生本就是不确定的事件,而目前工程应用的液化判别方法给出的却是确定性的结果,已不能满足结构抗震设计和工程抗震分析的需求,因此,建立一种简单方便、可靠性强且与现有规范和试验方法良好结合的液化概率评价方法具有重要意义;

(4)液化判别方法的适用性。我国工程场地地质条件复杂,现有判别方法多是依据某一地区或某几次地震液化资料建立的,在全国范围内应用均存在较大的局限性。通过不断积累液化数据资料,结合现有液化判别研究成果,建立适用于地区性的液化判别方法十分必要。

5 结语

砂土液化是饱和砂土场地工程建设中必须回答的问题。针对砂土液化判别方法的研究历史、研究现状和主要成果进行了较为系统的总结和述评,指出了各种方法的适用性和存在的问题。近百年来,通过地震震害调查和液化测试试验已认识到了砂土液化破坏的严重性,并取得了大量的具有重要理论意义和工程应用价值的研究成果。由于地震液化的复杂性和不确定性,从判别液化的理论研究到工程实践的过程中仍存在很多值得进一步探讨的问题。我国属于地震多发的国家,潜在液化土层分布广泛,液化震害严重,对建筑物的安全存在极大威胁。当前,除了进一步丰富地震液化数据资料库和分析现有判别方法的可靠性外,还应着重发展更合理实用的液化判别方法,使砂土液化判别结果能够更好的与工程场地评价和结构抗震设计工作相结合,进一步满足工程抗震设计的需求。

参考文献

- [1] 王刚,张建民. 地震液化问题研究进展[J]. 力学进展, 2007, 37(4): 575-589.
WANG Gang, ZHANG Jianmin. Recent advances in seismic liquefaction research[J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(4): 575-589. (in Chinese)
- [2] 袁晓铭,孙锐. 我国规范液化分析方法的发展设想[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 351-358.
YUAN Xiaoming, SUN Rui. Proposals of liquefaction analytical methods in Chinese seismic design provisions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 351-358. (in Chinese)
- [3] 陈国兴,金丹丹,常向东,等. 最近20年地震中场地液化现象的回顾与土体液化可能性的评价准则[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2737-2755.
CHEN Guoxing, JIN Dandan, CHANG Xiangdong, et al. Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes in recent twenty years and liquefaction susceptibility criteria for soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2737-2755. (in Chinese)
- [4] 谢定义. 土动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2011.
XIE Dingyi. Soil Dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [5] 张克绪,谢君斐. 土动力学[M]. 北京:地震出版社, 1989.
ZHANG Kexu, XIE Junfei. Soil Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese)
- [6] TJ 11-78 工业与民用建筑抗震设计规范[S]. 北京, 1979.
TJ 11-78 Code for Seismic Design of Industrial and Civil Buildings[S]. Beijing, 1979. (in Chinese)
- [7] GBJ 11-89 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1989.
GBJ 11-89 Code for Seismic Design Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 1989. (in Chinese)
- [8] GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
GB50011-2001 Code for Seismic Design Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [9] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010 Code for Seismic Design Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [10] GB50487-2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2009.

- GB50487 - 2008 Code for Engineering Geological Investigation of Water Resources and Hydropower[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese)
- [11] JTS146 - 2012 水运工程抗震设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2012.
JTS146 - 2012 Code for Seismic Design of Water Transportation Engineering[S]. Beijing: China Communication Press, 2012. (in Chinese)
- [12] CASTRO G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(6): 551 - 569.
- [13] CASTRO G, CHRISTIAN J T. Shear strength of soils and cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1976, 102: 887 - 894.
- [14] POULOS S J, CASTRO G, FRANCE J W. Liquefaction evaluation procedure[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(6): 772 - 792.
- [15] 赵成刚, 尤昌龙. 饱和砂土液化与稳态强度[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 90 - 96.
ZHAO Chenggang, YOU Changlong. Liquefaction and steady state strength[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 90 - 96. (in Chinese)
- [16] DAVIS R O, BERRILL J B. Energy dissipation and seismic liquefaction in sands[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1982, 10: 59 - 68.
- [17] LAW K T, CAO Y L, HE G N. An energy approach for assessing seismic liquefaction potential[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(3): 320 - 329.
- [18] TRIFUNAC M D. Empirical criteria for liquefaction in sands via standard penetration tests and seismic wave energy[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1995, 14(6): 419 - 426.
- [19] KAYEN R E, MITCHELL J K. Assessment of liquefaction potential during earthquakes by Arias intensity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(12): 1162 - 1174.
- [20] CHRISTIAN J T, SWIGER W F. Statistics of liquefaction and SPT results[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(11): 1135 - 1150.
- [21] 王余庆, 栾芳, 韩清宇, 等. 预测轻亚粘土液化势的统计公式[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(3): 102 - 112.
WANG Yuqing, LUAN Fang, HAN Qingyu, et al. Formulae for predicting liquefaction potential of clayey silt as derived from a statistical method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(3): 102 - 112. (in Chinese)
- [22] SEED H B, IDRIS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, 1971.
- [23] 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.
- [24] SEED H B, Tokimatsu K, Harder L F, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(12): 1425 - 1445.
- [25] YOU D 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, 2001.
- [26] FUKUTAKE K, OHTSUKI A, SATO M, et al. Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison with results from shaking table test[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19(7): 977 - 992.
- [27] BS EN 1998 - 5; 2004 Eurocode 8; Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 5: Foundation, Retaining Structure and Geotechnical Engineering[S]. London: BSI, 2004.
- [28] DOBRY R, LADD R S, POWELL D, et al. Prediction of pore water pressure build up and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method[J]. NBS Building Science Series 138, National Bureau of Standards, Maryland, 1982.
- [29] TOKIMATSU K, KUWAYAMA S, TAMURA S. Liquefaction potential evaluation based on rayleigh wave investigation and its comparison with field behavior[C]. Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1991.
- [30] 汪闻韶. 关于饱和砂土液化机理和判别方法的某些探讨[C]. 水利水电科学研究院科学研究论文集. 北京: 水利电力出版社, 1984.
WANG Wenshao. Discussion on mechanism of saturation sand soil liquefaction and discriminant method[C]. Proceedings of Water Resources and Hydropower Research. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 1984. (in Chinese)
- [31] 石兆吉. 判别水平土层液化势的剪切波速法[J]. 水文地质工程地质, 1986, 4: 55 - 61.
SHI Zhaoji. Shear wave velocity based horizontal soil liquefaction evaluation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1986, 4: 55 - 61. (in Chinese)
- [32] 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 土壤液化势的剪切波速判别法[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(1): 74 - 80.
SHI Zhaoji, YU Shousong, FENG Wanling. Shear wave velocity based soil liquefaction evaluation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(1): 74 - 80. (in Chinese)
- [33] 周燕国, 陈云敏, 柯瀚. 砂土液化势剪切波速简化判别法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2369 - 2375.
ZHOU Yanguo, CHEN Yunmin, KE Han. Improvement of simplified procedure for liquefaction potential evaluation of sands by shear wave velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2369 - 2375. (in Chinese)
- [34] 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 Zhenzhong, YUAN Xiaoming. Shear wave velocity-based approach for evaluating gravel soils liquefaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 943-951. (in Chinese)
- [35] OLSEN R S. Liquefaction analysis using the cone penetrometer test[C]. Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco:Englewood Cliffs, 1984:247-254.
- [36] ROBERTSON P K, WRIDE C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 442-459.
- [37] ROBERTSON P K. Comparing CPT and Vs liquefaction triggering methods[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015: 141(9): 1-10.
- [38] MOSS R E, SEED R B, KAYEN R E, et al. CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006.
- [39] 周神根. 静力触探判别砂土液化[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(3): 38-45.
ZHOU Shengen. Evaluation of the liquefaction of sand by static cone penetration test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(3): 38-45. (in Chinese)
- [40] GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
GB50021-2001 Code for Investigation of Geotechnical Engineering[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [41] TB1008-2003 铁路工程地质原位测试规程[S]. 北京:中国铁道出版社, 2003
TB1008-2003 Code for In-situ Measurement of Railway Engineering Geology[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [42] 李兆焱, 孙锐, 曹振中, 等. 静力触探法对巴楚地震液化判别的适用性[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3907-3912.
LI Zhaoyan, SUN Rui, CAO Zhenzhong, et al. Feasibility of cone penetration test to evaluating Bachu earthquake liquefaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3907-3912. (in Chinese)
- [43] LIAO S S C, VENEZIANO D, WHITMAN R V. Regression models for evaluating liquefaction probability[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(4): 389-411.
- [44] JUANG C H, CHEN C J, JIANG T, et al. Risk-based liquefaction potential evaluation using standard penetration tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(6): 1195-1208.
- [45] JUANG C H, YUAN H, LEE D H, et al. Simplified cone penetration test-based method for evaluating liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(1): 66-80.
- [46] 潘建平, 孔宪京, 邹德高. 基于 Logistic 回归模型的砂土液化概率评价[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2567-2571.
PAN Jianping, KONG Xianjing, ZOU Degao. Probabilistic evaluation of sand liquefaction based on Logistic regression model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2567-2571. (in Chinese)
- [47] 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 Xiaoming, CAO Zhenzhong. Conventional soils parameters-based liquefaction probabilistic evaluation formula and its reliability analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(4): 99-108. (in Chinese)
- [48] 孙锐, 赵倩玉, 袁晓铭. 液化判别的双曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2061-2068.
SUN Rui, ZHAO Qianyu, YUAN Xiaoming. Hyperbolic model for estimating liquefaction potential of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2061-2068. (in Chinese)
- [49] 汪明武, 罗国焯. 可靠性分析在砂土液化势评价中的应用[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 542-544.
WANG Mingwu, LUO Guoyu. Application of reliability analysis to assessment of sand liquefaction potential[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 542-544. (in Chinese)
- [50] 余跃心, 刘汉龙, 高玉峰. 场地液化势评价概率模型[J]. 工程勘察, 2002(5): 4-7.
SHE Yuexin, LIU Hanlong, GAO Yufeng. Probabilistic model for the evaluation of site liquefaction potential[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002(5): 4-7. (in Chinese)
- [51] 余跃心. 砂土液化判别方法可靠性评价[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 803-807.
SHE Yunxin. Probability evaluation of liquefaction distinguishing method of sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 803-807. (in Chinese)
- [52] 陈国兴, 孔梦云, 李小军, 等. 以标贯试验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 Guoxing, KONG Mengyun, LI Xiaojun, 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. (in Chinese)
- [53] 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.
KONG Mengyun, CHEN Guoxing, LI Xiaojun, 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. (in Chinese)
- [54] 蔡煜东, 宫家文, 姚林声. 砂土液化预测的人工神经网络模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(6): 53-58.
CAI Yudong, GONG Jiawen, YAO Linsheng. Artificial neural network model for prediction of liquefaction of sandy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(6): 53-58. (in Chinese)

- [55] 任文杰, 苏经宇, 窦远明, 等. 砂土液化判别的人工神经网络方法[J]. 河北工业大学学报, 2002, 31(2): 21-25.
REN Wenjie, SU Jingyu, DOU Yuanming, et al. A neural network model for predicting sand liquefaction[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2002, 31(2): 21-25. (in Chinese)
- [56] 陈国兴, 李方明. 基于径向基函数神经网络模型的砂土液化概率判别方法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 301-305.
CHEN Guoxing, LI Fangming. Probabilistic estimation of sand liquefaction based on neural network model of radial basis function[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 301-305. (in Chinese)
- [57] 范付松, 胡新丽, 李长冬, 等. 基于广义回归神经网络的砂土液化综合判别方法[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(4): 47-51.
FAN Fusong, HU Xinli, LI Changdong, et al. Integrated evaluation of sand liquefaction based on generalized regression neural network[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(4): 47-51. (in Chinese)
- [58] 周锡元, 苏经宇, 樊水荣. 液化危害评价的模糊概率方法及其应用[J]. 地震工程与工程振动, 1992, 12(4): 93-101.
ZHOU Xiyuan, SU Jingyu, FAN Shuirong. Fuzzy-probability method for soil liquefaction hazard evaluation and its application[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1992, 12(4): 93-101. (in Chinese)
- [59] 翁焕学. 砂土地震液化模糊综合评判实用方法[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 74-79.
WENG Huanxue. Fuzzy synthetic methods of appraisal of sand liquefaction during earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 74-79. (in Chinese)
- [60] 赵艳林, 杨绿峰, 吴敏哲. 砂土液化的灰色综合评判[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 72-79.
ZHAO Yanlin, YANG Lufeng, WU Minzhe. Grey synthetical evaluation of liquefaction of sands[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(1): 72-79. (in Chinese)
- [61] 薛新华, 张我华, 刘红军. 砂土地震液化的模糊综合评判法[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(1): 55-58, 79.
XUE Xinhua, ZHANG Wohua, LIU Hongjun. Comprehensive fuzzy evaluation method for sand liquefaction[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(1): 55-58, 79. (in Chinese)
- [62] 刘章军, 叶燎原, 彭刚. 砂土地震液化的模糊概率评判方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 876-880.
LIU Zhangjun, YE Liaoyuan, PENG Gang. Fuzzy probability comprehensive evaluation method for sand liquefaction during earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 876-880. (in Chinese)