

DOI: 10.11779/CJGE201411012

液化判别的双曲线模型

孙锐, 赵倩玉, 袁晓铭*

(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: 基于国内外液化判别方法存在的问题, 提出了一个双曲线形式的液化判别新模型。采用中国大陆以往 156 例液化数据完成了基于标准贯入试验的新公式构造, 利用近来集集和阪神地震 312 例液化新数据进行了检验, 并与现有规范方法和 Seed 方法进行了对比, 结果表明: 提出的双曲线模型和液化判别公式对不同地震烈度、地下水位和砂层埋深均有较好的适用性; 新模型弥补了现有规范Ⅶ度下浅层液化(砂层埋深小于 10 m)判别偏于危险的缺欠, 对Ⅷ度和Ⅸ度下浅层土液化和非液化场地的成功率比现有规范表现得更为均衡; 新模型可满足临界曲线浅层内快速变化、深层时明显变缓的客观实际要求, 克服了规范Ⅷ度、Ⅸ度下深层土(砂层埋深 10~20 m)判别严重保守的弊端; 新模型具有渐近线形式, 更符合实际情况, 消除了 Seed 方法中标准贯入临界值随土层埋深增加先递增后递减的不正常现象。

关键词: 砂土液化; 标准贯入击数; 双曲线; 判别公式

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)11-2061-08

作者简介: 孙锐(1977-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: iemsr@163.com。

Hyperbolic model for estimating liquefaction potential of sand

SUN Rui^{1,2}, ZHAO Qian-yu^{1,2}, YUAN Xiao-ming^{1,2*}

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: A new hyperbolic model for estimating liquefaction potential of sand is proposed to solve the exiting problems in the available liquefaction discrimination methods. By collecting 156 in-situ SPT data from previously liquefied and non-liquefied sites in China, a new SPT-based formula is proposed. The reliability of the new formula is verified by 312 data collected from 1995 Kobe Earthquake and 1999 Chi-Chi Earthquake. The estimated results by the new formula are compared with those by the code method and Seed method, indicating that the hyperbolic model is quite adaptable for a wide range of seismic intensities, ground water level and buried depth of sand. The new model compensates the limitation that the discriminated results of shallow sand (less than 10 m deep) tend to be risky by the code method under intensity VII. Using the new model, the success discrimination ratios of liquefied and non-liquefied sites for shallow sand under intensities VIII and IX are more uniform than those by the code method. The critical discriminating curve of the new model meets the fact that its slope is large in shallow while small in deep one. The disadvantage that the discrimination of soils 10 m to 20 m in depth under intensities VIII and IX is significantly conservative by the code method is corrected. The proposed model adopts asymptotic form which is closely consistent with the real condition and avoids the abnormal phenomena using the Seed method in which N_{cr} increases and afterward decreases with depth.

Key words: sand liquefaction; blow cont of standard penetration test; hyperbola; liquefaction discrimination formula

0 引言

砂土液化是典型的地震灾害之一, 是一个全球性的科学问题^[1-2], 近来也首次出现了以液化为震害主因的地震^[3]。对于砂土液化的研究至今已有近五十年历史, 其中场地液化判别是进行工程抗震设防和工程抗震设计的首要步骤, 发展合理可靠的液化判别方法对保障我国国民经济建设安全具有重要意义^[4]。

抗震设计规范在工程中使用广泛, 目前中国的液

化判别方法的代表是现行《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)中规定的方法^[5](简称 2010 建规法, 下同), 其基础是《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)(简称 1989 建规法, 下同), 是一个以地下水位、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278472, 41272357); 中央级公益性研究所基本科研业务费专项项目(2013B10)

收稿日期: 2014-03-07

*通讯作者

埋深、标准贯入击数等土层常规指标为直接变量，具有中国特色的砂土液化判别方法。自 1998 年《中国人民共和国防震减灾法》颁布实施以来，按其要求开展的地震小区划和工程场地地震安全性评价工作在全国范围内日益广泛。按国家标准《工程场地地震安全性评价》(GB17741—2005)的要求，场地液化预测为其中必要环节，并规定采用建规法完成液化判别工作。液化判别方法既决定着工程结构的地震安全，又与工程造价密切相关，其合理性和可靠性成为更重要的问题，方法本身需要不断完善。

2010 建规法液化判别公式的本质与 1989 建规法相同，来源于中国大陆 20 世纪六、七十年代几次大地震液化调查资料。近 30 年来，针对 1989 建规法使用中出现问题，规范修订过程中做了 2 次微小调整，但到目前仍没有从根本上解决问题，究其原因液化判别公式的基本模式问题没有解决。规范修订中先后采用的线性模式、分段式线性模式和对数模式均存在显著的不合理性，采用近来大地震液化资料对其进行检验也得不到令人满意的结果，特别是在深层土液化预测方面十分保守，经济上已经造成很大浪费。

本文将剖析中国建规法液化判别公式的不足，以大陆现有液化数据库实测资料为基本数据，仍以地下水位、埋深、标准贯入击数等土层常规指标为直接变量，采用新的模型解决现有判别公式存在的关键问题，构造砂土液化判别新公式，并利用近来大地震液化资料进行不同砂层埋深和不同地震动强度的分项检验，对比新公式与现有公式的关系，论证新模型和公式的合理性和可行性。

1 规范液化判别方法

1.1 数据来源

《建筑抗震设计规范》中液化判别方法虽已经修订，但基础数据的来源于中国大陆 20 世纪六、七十年代几次大地震液化调查资料^[6]，其中含有 156 个分布在Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度区的有效资料，这些数据是建规法形成的基础。本文仍将以这 156 个场地实测数据为样本形成新的液化判别公式，以便与现有规范进行对比。这些数据样本中份量较大的依次为唐山、通海和海城地震，3 次地震的数据占到总数的 85%，其中唐山地震数据近 60%，成为规范法与本文方法的主要数据来源。

图 1 表示了样本中砂层埋深的分布，其中横坐标为液化或非液化砂层的平均埋深，纵坐标为砂层不同埋深出现的频率。基本构成示于表 1、2 和图 1。

表 1 中国规范液化数据库组成

Table 1 Summary of database used for seismic design codes in China

总数	液化点	非液化点	埋深 <10 m	埋深 ≥10 m	烈度		
					Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
156	95	61	141	15	50	48	58

表 2 中国规范液化数据库砂层埋深分布

Table 2 Distribution of soil depth in database

类型	埋深/m							
	0~	2~	4~	6~	8~	10~	15~	≥20
液化点	2	4	6	8	10	15	20	—
非液化点	10	12	11	7	9	11	0	1

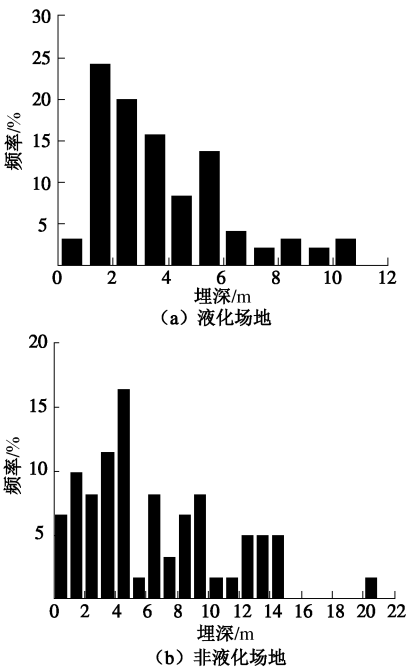


图 1 中国建筑抗震设计规范与本文液化判别方法使用的液化资料中砂层埋深的频率直方图

Fig. 1 Frequency distribution of soil depth in database used both in China's code method and this paper

样本中液化与非液化场地地下水位分别在 0~4 m 和 0~6 m 之间，在 0.5~2.5 m 范围内的数据则分别占到 80%和 65%。从表 1 可见，样本在Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ 3 个烈度区分布较为均匀，但缺乏高烈度区数据。如图 1 所示，样本中非液化砂层埋深 1~10 m 的占 80%，而液化场砂层埋深分布主要分布在浅层，1~6 m 的占 85%。特别值得注意的是，砂层埋深大于 10 m 的样本很少，且沿深度分布很不均衡，液化场地仅有埋深分别为 10.0、10.3、10.5 m 的 3 个数据。

1.2 规范的发展

目前中国各类工程中应用的砂土液化判别方法是以《建筑抗震设计规范》为基础，多采用标准贯入锤击数进行土壤液化判别。规范由 1970 年试行版发展至 2010 年，40 a 来经历过几次修订，本文将其分为线性公式、分段式线性公式和对数公式 3 个阶段。

1989 建规中液化判别采用线性公式:

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3/\rho_c} \quad (1)$$

式中 N_{cr} 为液化判别标准贯入击数临界值, N_0 为液化判别标准贯入击数基准值; d_w 为地下水位深度(m); d_s 为饱和砂土埋深 (m), ρ_c 为黏粒含量百分率。按规范规定, 式 (1) 只适用于砂层深度 15 m 以内的液化判别。但事实上, 由于液化场地仅有埋深分别为 10.0, 10.3, 10.5 m 的 3 个数据, 因此原则上式 (1) 仅适于埋深 10 m 以内。

随后的经济建设中, 工程上对预测超过 15 m 的深层土液化可能性的要求日趋强烈, 为此,《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001) (简称 2001 建规法, 下同) 中将 1989 建规的液化判别深度延伸到 20 m, 判别采用分段式线性公式:

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3/\rho_c} \quad (d_s \leq 15), \quad (2)$$

$$N_{cr} = N_0 (2.4 - 0.1d_w) \sqrt{3/\rho_c} \quad (15 \leq d_s \leq 20) \quad (3)$$

式 (2) 和 (3) 的本质是分段线性公式, 15 m 以内与 1989 建规相同, 15~20 m 采用定值的直线形式, 其中定值取为 15 m 处的临界值。

考虑到实际上的液化临界值不可能是分段直线形式, 2010 建规中将液化判别模式修改为连续形式, 其表达式为

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3/\rho_c} \quad (4)$$

式中, β 为调整系数, 设计地震第一组取 0.80, 第二组取 0.95, 第三组取 1.05。

2 规范液化判别方法的检验分析

2.1 对中国大陆数据的回判分析

对于形成公式的原始数据(表 1), 1989 建规、2001 建规与 2010 建规回判成功率见表 3, 需要注意的是, 1989 建规和 2001 建规在土层深度 15 m 以下才有差异, 而原始数据液化点均在 11 m 以内, 埋深 15 m 以上的非液化点也远离临界线, 因此 1989 建规和 2001 建规对原始数据的回判成功率相同。由表 3, 从总体成功率来看, 几个公式回判成功率均在 80%以上, 达到了令人满意的程度。

与以往不同的是, 本文此次采用了更细化的分烈度的检验方式, 从中可以得到更多的信息。如表 3 所示, VII度时, 2001 建规和 2010 建规总体成功率相差不多, 但二者液化回判成功率分别为 67%和 59%, 非液化判别成功率分别为 94%和 91%, 二者均明显偏于危险; VIII度时, 2001 建规 2010 建规总体成功率较高 (90%左右), 二者的液化回判成功率分别为 96%和 93%, 非液化判别成功率均为 80%, 较偏于保守; IX度时, 2001 建规和 2010 建规总体成功率较好 (均大于 80%), 二者的液化回判成功率分别为 93%和 85%,

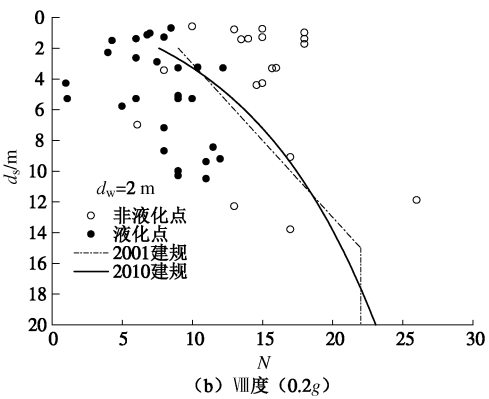
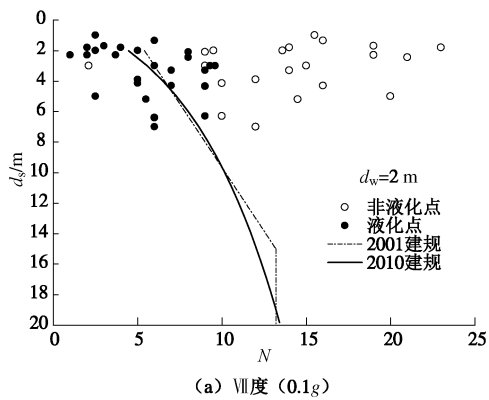
非液化判别成功率均为 67%和 72%, 均偏于保守。

表 3 建规方法对原始数据的回判成功率

Table 3 Success ratios of China's code method (%)

建规方法	类型	烈度			总体成功率
		VII度 (0.1g)	VIII度 (0.2g)	IX度 (0.4g)	
1989	液化	67	96	93	86
2001	非液化	94	80	67	80
建规	总体	78	90	84	84
2010	液化	59	93	85	80
建规	非液化	91	80	72	82
	总体	74	88	81	81

将 2001 建规和 2010 建规中液化判别临界标准贯入与埋深的关系示于图 2, 图 2 中地下水位取为 2 m。从图 2 可见, 临界标准贯入曲线模式主要受浅层数据点控制, 2001 建规和 2010 建规虽然能较好地反映埋深小于 10 m 的情况, 但到深层时明显保守, 如 IX 度埋深 12 m 时, 标准贯入击数为 30 的砂层将被判别为液化, 而现有的现场调查资料表明这种情况并不存在。究其原因, 是现有临界标准贯入曲线模式并不合适。由图 2 数据点可见, 合理的临界标准贯入曲线模式应满足浅层内曲率快速变化, 到深层时变化明显变缓且应有渐近线存在。此外, 从土层反应分析也可看出, 剪应力在浅层随深度增加较快, 而在深层变化速度减慢, 而液化与剪应力大小密切相关, 剪应力大时易液化, 剪应力小时不易液化。因此, 临界标准贯入曲线也应体现这一性质, 而 2001 建规和 2010 建规的判别公式没有做到这一点, 其公式模式“顾头(浅层)顾不了尾(深层)”。



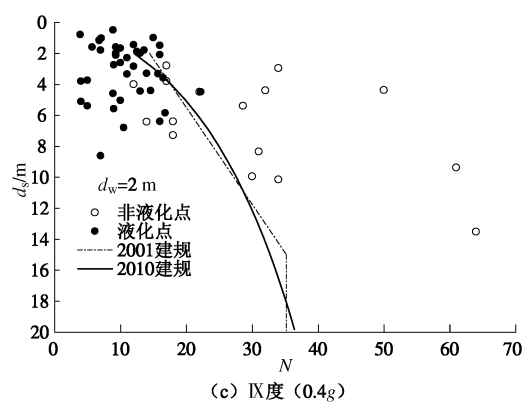


图 2 2001 建规和 2010 建规中液化判别临界标准贯入与埋深的关系曲线

Fig. 2 Relationship between N_{cr} and d_s in China's codes
2. 2 近来大地震液化调查的新数据

1995 年日本阪神地震和 1999 年台湾集集地震是近些年来砂土液化最具规模的大地震，本文收集了两次地震中 312 组样本^[7]，地面运动强度 $0.09g\sim0.707g$ ，其中砂层埋深 $10\sim22\text{ m}$ 数据为 97 个，占到了数据总量的 31%。两次地震中液化场地和非液化场地地下水位分别在 $0\sim9\text{ m}$ 和 $0.5\sim15\text{ m}$ 之间，其中 $1\sim3\text{ m}$ 范围内分别占 70%和 65%，阪神和集集地震液化调查数据基本构成示于表 4，表中Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ度与地震加速度峰值对应关系按文献[8]取值。由表 4，样本在Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ三个主要烈度区分布较为均匀。

表 4 近来大地震液化调查数据组成

Table 4 Data collected from recent earthquakes							
液 化 点	非 液 化 点	埋深		烈度			总数
		<10 m	≥10 m	Ⅶ度 (0.090 ~0.177)g	Ⅷ度 (0.178 ~0.353)g	Ⅸ度 (0.354 ~0.707)g	
173	139	215	97	119	77	116	312

新数据样本沿深度的分布如图 3 所示。液化样本主要区间为 $2\sim9\text{ m}$ ，大于 10 m 的样本有 36 个，占液化样本的 21%。非液化样本在 $9\sim11\text{ m}$ 处呈现峰值，其他深度样本数量基本相当， 10 m 以上样本有 61 个，占非液化样本的 44%，比重较大。

与以往国内大陆数据对比，阪神和集集地震的新数据有两个特点：①砂层埋深大于 10 m 的数据明显增多，液化场地中深层数据由原来的 3%增到 21%，非液化场地的深层数据则由 20%增到 44%；②砂层埋深均值有较大增长，液化场地埋深均值由原来的 3.7 m 增到 7.0 m ，非液化场地则由 6.4 m 增到 9.8 m 。这样的新数据为检验液化判别方法对深层土的适用性提供了条件。

2010 建规对表 4 中列出的近来大地震数据的判别

结果见表 5、6。从图 2 可见，2001 建规与 2010 建规液化判别临界曲线相差不大，因此这里仅讨论 2010 建规。

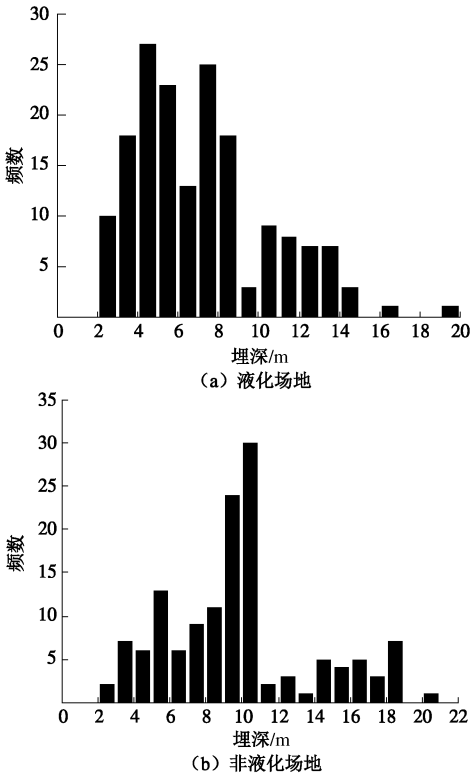


图 3 近来大地震液化调查数据中砂层埋深分布

Fig. 3 Distribution of soil depth of verification data collected from recent earthquakes

由表 5、6 可知，就总体成功率而言，建规法成功率为 83%，表现良好，但将数据分为液化和非液化两档时，液化判别总体成功率上升，非液化判别总体成功率下降；将数据分为埋深大于和小于 10 m 两档时，小于 10 m 的总体成功率上升，大于 10 m 总体成功率下降。这说明，建规法对液化和非液化、埋深大于和小于 10 m 土层判别均存在不对等情况，小于 10 m 的液化情况成功率趋势将偏高，大于 10 m 的非液化情况成功率趋势将偏低。进一步，如表 5 所示，对于 10 m 以内数据，液化判别成功率达 86%，而非液化成功率为 88%；对于大于 10 m 的数据，液化成功率更高达为 97%，非液化成功率仅为 40%，将很多非液化点误判为液化。显然，建规法对埋深大于和小于 10 m 土层的适用性上存在显著差异。液化场地判别成功率随埋深增大呈现上升，对非液化场地成功率随埋深增大呈明显下降，小于 10 m 时较为保守，大于 10 m 时显著保守。

从新数据的检验可更清楚看到，规范中现有临界标准贯入曲线模式不合适，无法适应浅层内曲率快速变化、深层时变化明显变缓的数据特征，公式模式还是不能深浅层兼顾。

表 5 近来大地震数据对现有建筑抗震设计规范液化判别方法的检验

Table 5 Verification of China's seismic design code method using data collected from recent earthquakes

样本 类型	总样 本	全部液 化样本	全部非 液化 样本	埋深<10 m 全部样 本	埋深>10 m 全部 样本	埋深<10 m 液化样本	埋深>10 m 液化样本	埋深<10 m 非液化样 本	埋深>10 m 非液化样 本
成功率/%	83	88	76	87	68	86	97	88	40

表 6 2010 年建规方法对近来大地震数据的判别成功率
Table 6 Success ratios of China's code method using data collected from recent earthquakes (%)

类型	烈度			总体 成功率
	VII度 (0.1g)	VIII度 (0.2g)	IX度 (0.4g)	
液化	85	95	94	88
非液化	85	31	73	76
总体	85	84	85	83

3 液化判别的双曲线模型

3.1 新模型的基本要求

根据以上分析, 为克服现有模型和公式的缺点, 新模型应满足以下要求: ①临界标准贯入曲线能够深浅兼顾, 即曲线满足浅层内曲率快速变化、深层时变化明显变缓; ②当砂层埋深很大(理论上趋于无穷)时, 临界标准贯入曲线应有渐近线存在; ③形式简单, 其中参数最好有明确物理含义。

3.2 双曲线模型

本文尝试包括线性、对数、指数和 Seed 的 CSR 等模型, 但均不能达到以上要求, 特别是不能同时满足①和②, 为此最终选定土动力学中常用的模型——双曲线模型。双曲线模型的优点, 最重要的是当自变量 x 较小时, 因变量 y 随 x 的增加而快速递增, 当自变量 x 较大并趋近于无穷时, y 随 x 增大而增加速率放慢且有渐近线的优势, 很符合液化临界值随土层深度变化的表现及本文得到的认识。

根据双曲线的基本形式, 给出表达式:

$$N_{cr} = N'_1 \cdot \frac{d_s}{d_s + k_1}, \tag{5}$$

式中, N_{cr} 为标准贯入基数临界值, d_s 为土层埋深, k_1 为待定参数项。当土层埋深值 d_s 趋于无穷大时, 临界标准贯入击数 N_{cr} 无限趋于 N'_1 , 此时 N'_1 为临界标准贯入击数极限值。

当 d_s 取 0 时, N_{cr} 为 0, 即对于地表的土层, 任何情况都判别为不液化, 这一点显然不符合工程实际, 因此增加临界标准贯入基数初值修正系数 k_2 , 则变形为

$$N_{cr} = N'_2 \cdot \left(k_2 + \frac{d_s}{d_s + k_1} \right), \tag{6}$$

式中, k_1, k_2 为待定参数项。当 d_s 取 0 时, 地表土液

化的临界标准贯入击数为 $N'_2 \cdot k_2$; 当 d_s 趋于无穷时, 临界标准贯入击数极限取值为 $N'_2 \cdot (k_2 + 1)$ 。

式(6)中仅考虑了液化层埋深影响, 根据水位埋深对砂土液化影响的讨论分析^[9]可知, 随着地下水水位的增加, 临界标准贯入值应该逐渐减小, 即应在式(6)中增加水位埋深对临界标准贯入基数的影响系数 k_3 , 因此式(6)进一步写为

$$N_{cr} = N'_3 \cdot (1 - k_3 d_w) \left(k_2 + \frac{d_s}{d_s + k_1} \right), \tag{7}$$

式中, N'_3/k_1 为标准贯入击数临界曲线在起始点变化率, 即地下水位与土层埋深均为 0 时标准贯入临界曲线的变化率, 也是双曲线的最大曲率, k_1 越大则起始点斜率越小, 反之越大; k_2 为土层埋深为 0 时, 临界标准贯入击数初值($d_s=0$ 的临界标准贯入击数)影响系数, k_2 越大则临界标准贯入击数的初值越大, 反之亦然; k_3 为水位埋深影响系数, 其他条件不变时, k_3 越大则临界标准贯入击数越小。

3.3 参数取值范围

根据各参数的物理意义, 待定系数取值范围如下:

(1) 在地下水位不变时, 标准贯入击数临界值随土层埋深增加而递增, 则 k_1 应为正数, 考虑到液化层范围取为 0~20 m, k_1 的取值超过 20 会造成 d_s 影响权重变小, 因此 $0 < k_1 \leq 20$ 。

(2) 在地下水位和液化土层埋深均为 0 时间, 临界标准贯入击数初值为 $N' \cdot k_2$, k_2 为临界标准贯入初值修正系数, 取值范围为 $0 < k_2 < 1$ 。

(3) k_3 为地下水位修正系数, 需保证水位埋深修正项 $(1 - k_3 d_w) > 0$, 根据国内外调查数据统计结果, 水位埋深分布范围为 0~16 m, 假定水位埋深可达 20 m, 带入水位埋深修正项中, 得到 $0 < k_3 \leq 0.05$ 。

(4) 当 d_w 取 0, d_s 趋于无穷大时, 标准贯入击数临界值对应值为 $(k_2 + 1) N'_3$, 参考国内外现有调查结果在 20 m 深度时临界标准贯入击数的表现, 临界标准贯入击数极限值在 VII 度可取为 8~17, VIII 度可取为 20~30, IX 度可取为 32~46。

3.4 新判别公式

应用 Matlab 编程, 将表 1 中的中国大陆地区液化调查样本代入式(7)进行回归分析, 得到不同系数组合条件下双曲线公式对大陆数据的判别结果。取综合判别最优的系数组带入模型, 得到基于烈度的判别公

式:

$$N_{cr} = N'_3(1 - 0.02d_w)\left(0.27 + \frac{d_s}{d_s + 6.2}\right) \quad (8)$$

进一步, 若以 N' 表示 d_w 取 0 时临界标准贯入击数极限值, 可液化判别临界标准贯入击数的双曲线计算公式:

$$N_{cr} = 0.79N' \cdot (1 - 0.02d_w)\left(0.27 + \frac{d_s}{d_s + 6.2}\right) \quad (9)$$

其中 N' 按照表 6 取值, 其他加速度下 N' 的计算可按表 7 插值得到. 使用式 (9), 若砂层实测标准贯入值小于 N_{cr} , 则判为液化, 反之不液化.

表 7 不同加速度下 N' 取值对照表

Table 7 Reference values of N' under different intensities					
加速度峰值/ g	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
临界标准贯入击数极限值 N'	16	20	23	31	37

4 双曲线模型的可靠性分析

4.1 大陆地区数据回判

本文式 (9) 与 2001 和 2010 建规液化判别公式对大陆地区 156 组数据回判结果的对比如表 8 所示. 由表 8 可以看出, 式 (9) 与建规整体判别成功率相差不多, 保持了现有规范的优点. 同时, 式 (9) 在 VII、VIII、IX 度的总成功率分别为 80%, 88% 和 84%, 均在 80% 以上, 比现有规范表现均衡. 特别是式 (9) 在 VII 度下的表现明显比规范要好. VII 度时建规液化回判成功率 60% 左右, 非液化判别成功率 90% 以上, 明显偏于危险, 而式 (9) 分别是 74% 和 87%, 较为均衡; IX 度时, 2010 建规在非液化回判成功率上较 2001 建规有所提高, 但液化及整体成功率却均有所下降, 双曲线模型则在保持非液化成功率的基础上, 在这两方面较现行建规有所提高.

表 8 本文双曲线模型与规范对大陆数据回判成功率的对比

Table 8 Discrimination results of proposed formula and China's seismic design code method				
(%)				
烈度	场地情况	2001 建规	2010 建规	双曲线
VII 度	液化	67	59	74
	非液化	91	91	87
	总体	78	74	80
VIII 度	液化	96	93	89
	非液化	80	80	85
	总体	90	88	88
IX 度	液化	93	85	90
	非液化	67	72	72
	总体	84	81	84
整体	液化	86	80	85
	非液化	80	82	82
	总体	84	81	84

4.2 近来大地震数据判别结果比较

将近来大地震数据按土层埋深划分, 对于双曲线模型和 2010 建规方法, 液化判别结果对比如表 9 和图 4 所示.

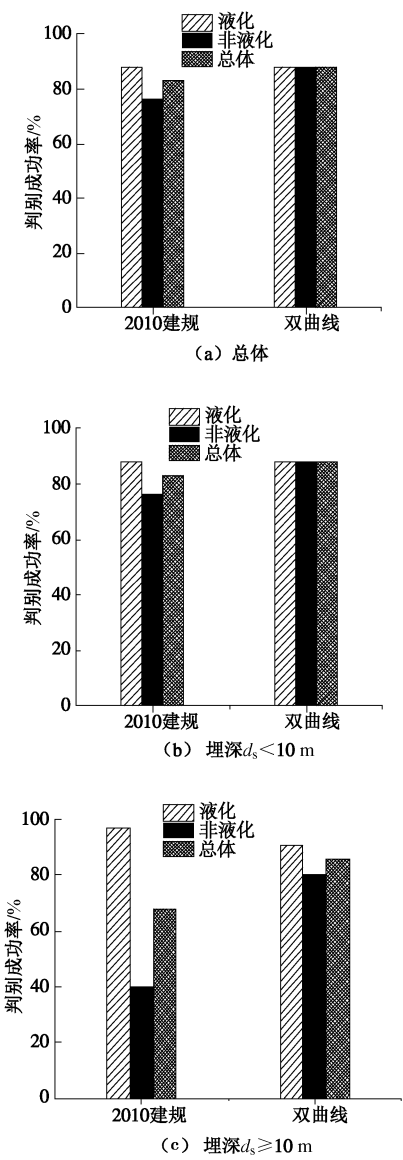


图 4 本文双曲线模型与 2010 建规对近来大地震液化数据判别比较

Fig. 4 Comparison between proposed formula and China's seismic design code method using data from recent earthquakes

从表 9 和图 4 可见, 就总体成功率而言, 本文式 (9) 与建规法分别为 88% 和 83%, 均表现良好. 但将数据分为液化和非液化两档时, 建规法判别总体成功率出现明显差别, 液化为 88% 而非液化为 76%; 本文式 (9) 则保持均衡, 液化与非液化均为 88%. 将数据分为埋深大于和小于 10 m 两档时, 建规法总体成功率也出现明显差别, 成功率分别为 68% 和 87%; 本文公式则能保持均衡, 成功率分别为 86% 和 89%. 进一步, 将全部数据细分为不同埋深的液化和非液化

表 9 本文双曲线模型与规范对近来大地震数据判别成功率的对比

Table 9 Verification of proposed formula and China's seismic design code method using data collected from 1995 Kobe Earthquake and 1999 Chi-Chi Earthquake (%)

方法	总样 本	全部液 化样本	全部非 液化 样本	埋深<10 m 全部样本	埋深>10 m 全部样本	埋深<10 m 液化 样本	埋深>10 m 液化 样本	埋深<10 m 非液化 样本	埋深>10 m 非液化 样本
2010 建规	83	88	76	87	68	86	97	88	40
本文式 (9)	88	88	88	89	86	87	91	91	80

场地, 从表 9 和图 4 可见, 在土层埋深小于 10 m 范围内, 双曲线液化和非液化判别成功率为 87%和 91%, 而建规液化和非液化 86%和 88%。在土层埋深大于 10 m 时, 与建规判别严重保守 (液化样本判别成功率高达 97%, 但非液化样本成功率仅为 40%) 的情况相比, 双曲线模型对液化和非液化的成功率均达 80%以上。由此可见, 就近来大地震新数据而言, 建规法对液化场地成功率随埋深增大而上升、对非液化场地成功率随埋深增大而下降, 而本文式 (9) 克服了建规法对液化和非液化、埋深大于和小于 10 m 土层判别存在的不对等的缺点, 无论是浅层和深层土情况均能较好地适应。

5 曲线模式的对比

对于不同烈度, 将本文提出的双曲线模型与 2001 建规、2010 建规和 Seed 的 CSR 方法标准贯入临界值沿深度变化曲线进行对比, 结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 在 2~6 m 浅层, 几种方法相差不是很显著, 从工程意义上讲这种差别基本可以忽略; 在砂层埋深 6~12 m 时, 4 种方法出现了较大差异, 但 4 种曲线的形式定性上没有出现异常; 当砂层埋深为 12 m 以上, 4 种方法在定性和定量上均表现不同, 特别是双曲线模型与其他方法之间差异十分显著。

在砂层埋深 6~12 m 时, 因为数据来源不同, 适用地区不同, 4 种方法出现的差异是可以理解的, 而且 4 种方法中的临界曲线定性上均随砂层埋深增加而增加, 符合一般规律和现有认识, 4 种方法的差异也是可以接受的。

当砂层埋深为 12 m 以上, 4 种方法在定性和定量上均表现不同。具体而言, 对于Ⅶ度情况, Seed 方法出现了临界标准贯入随深度增加而减小的不正常现象, 其他方法结果则相差不大。对于Ⅷ度和Ⅸ度情况, Seed 方法数值上与建规法较为接近, 但 Seed 方法的临界标准贯入随深度增加而减小的不正常现象仍然存在。Ⅷ度下双曲线模型与其它方法有一定差别, Ⅸ度下差异显著。需注意的是, 在土层埋深大于 12 m 时, 建规临界击数可达到 35 左右, 按砂土密实度划分标准, 标准贯入击数大于 30 即为密实砂土, 而目前未发现国内外标准贯入液化调查数据中有 30 击以上的液

化样本。另外, 从表 9 和图 5 可见, 在土层埋深大于 10 m 时, 与建规对新数据液化样本 97%正确率, 非液化 40%正确率的严重偏于保守情况相比, 双曲线模型对新数据液化和非液化样本 91%和 80%的正确率, 表现较为均衡, 可见双曲线模式在深层能够更好地反映客观事实。

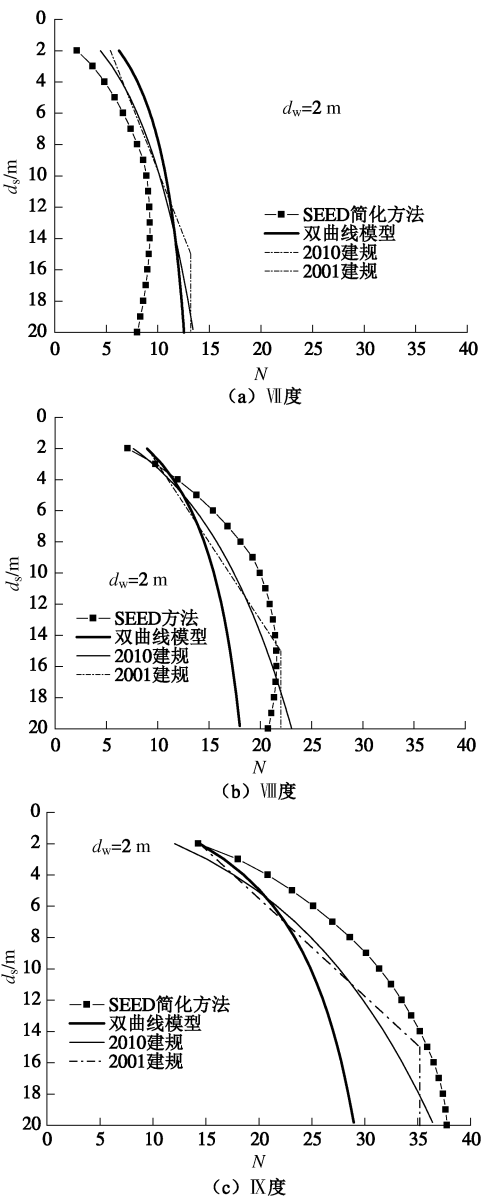


图 5 不同方法液化临界标准贯入曲线随深度变化模式比较

Fig. 5 Relation curves of N_{cr} and d_s from different methods

较之现有其他方法, 本文的双曲线模型无论对浅

层和深层土液化数据均能较好地适应, 究其原因双曲线模式本身所具有的优点导致的。2010 建规、Seed 的 CSR 模型虽也为曲线形式, 但其临界标准贯入曲线沿深度的变化曲率均不能满足浅层内快速变化、深层时明显变缓的客观要求。以 IX 度为例, 对 2 m 和 20 m 液化临界曲线, 2010 建规在这两处切线斜率分别为 3.37 和 0.68, 双曲线模型则分别为 2.58 与 0.25, 两条临界线在 20 m 处的变化率分别为 2 m 处的 20% 和 10%, 即双曲线模型液化临界值在埋深较浅时变化较大, 但在较深处变化率可明显降低, 而 2010 建规液化临界值在埋深较大时仍维持较大变化率, 从而导致其在 20 m 时临界值达 37 击左右的。对于 Seed 的 CSR 模型, 在土层较浅时临界标准贯入曲线与 2010 建规相当, 但土层较深时, 因其模型自身问题, 造成此时回缩, 以至于出现了图 6 中 VII 度和 VIII 度下标准贯入临界曲线随深度增加而减小的不正常现象。

6 结 论

(1) 中国大陆地区以往液化数据回判和近来大地震液化新数据的检验结果表明, 提出的双曲线模型和液化判别公式对不同地震烈度、地下水位和砂层埋深均有较好的适用性。

(2) 双曲线模型弥补了中国现有规范 VII 度浅层液化(砂层埋深小于 10 m)判别偏于危险的缺欠, 而对 VIII 度浅层土液化和非液化场地的成功率比现有规范表现得更为均衡。

(3) 双曲线的曲线模式可满足临界曲线浅层内快速变化、深层时明显变缓的客观要求, 克服了中国规范 VIII 度、IX 度时深层土(砂层埋深 10~20 m)判别严重保守的弊端。

(4) 提出的具有渐近线形式的双曲线模型更符合实际情况, 消除了 Seed 方法中标准贯入临界值随土层埋深增加先递增后递减的不正常现象。

参考文献:

- [1] 黄 雨, 于 淼, BHATTACHARYA Subhamoy. 2011 年日本东北地区太平洋近海地震地基液化灾害综述[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 834 - 840. (HUANG Yu, YU Miao, BHATTACHARYA Subhamoy. Review on liquefaction-induced damages of soils and foundations during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake(Japan)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 834 - 840 (in Chinese))
- [2] YOU D T L, IDRIS I M. Liquefaction resistance of soils :report from the 1996 NCEER and 1998NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineering, 2001, 127(4): 297 - 313.
- [3] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙 锐. 2011 年新西兰 M_w 6.3 地震液化及岩土震害评述[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 2011New Zealand M_w 6.3 earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [4] 陈国兴. 对我国六种抗震设计规范中液化判别规定的综述和建议[J]. 南京建筑工程学院学报, 1995(2): 54 - 61. (CHEN Guo-xing. Some opinion and proposition on the formulas of the liquefaction estimation of sandy soils in six aseismic design codes in China[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1995(2): 54 - 61. (in Chinese))
- [5] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2010. (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2010. (in Chinese))
- [6] 谢君斐. 关于修改抗震规范砂土液化判别式的几点意见[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(2): 95 - 126. (XIE Jun-fei. Some comments on the formula for estimating the liquefaction of sand in revised a seismic design code[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration 1984, 4(2): 95 - 126. (in Chinese))
- [7] 王维铭. 场地液化特征研究及液化影响因素评价[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013. (WANG Wei-ming. Study on liquefaction characteristics and liquefaction-influencing factors assessment[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese))
- [8] GB/T17742—2008 中国地震烈度表[S]. 2009. (GB/T17742—2008 The Chinese seismic intensity scale[S]. 2009. (in Chinese))
- [9] 李兆焱, 汪云龙, 曹振中, 等. 我国规范液化判别方法在新疆地区适用性检验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 396 - 400. (LI Zhao-yan WANG Yun-long, CAO Zhen-zhong, et al. Feasibility of liquefaction prediction method in China's seismic code to Xinjiang region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 396 - 400. (in Chinese))