

适用于新疆场地的剪切波速液化判别公式

赵倩玉, 孙 锐*

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

摘要: 2003年新疆巴楚—伽师地区发生了M_S6.8级地震, 地震伴随有大规模砂土液化现象发生。通过现场调查获取了44个场地的剪切波速数据, 其中包含19个液化场地勘察点和25个非液化场地勘察点。使用现有两种典型剪切波速判别液化方法对新疆数据进行预测, 结果表明该地区土性特殊, 判别公式均不适用。据此, 依据新疆场地实测数据提出了适用于新疆地区的剪切波速液化线性判别公式。建立的液化判别公式总成功率达84%, 对液化和非液化场地回判成功率均为84%, 公式形式简单明了, 可靠度良好, 可为新疆地区液化判别及相关地区性标准制订提供参考。

关键词: 新疆地区; 剪切波速; 砂土液化; 判别公式

中图分类号: TU413.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0383-06

作者简介: 赵倩玉(1987-), 女, 黑龙江大庆人, 现为硕士研究生, 主要从事土动力学研究。E-mail: wz_zqy@163.com。

A shear-wave velocity discrimination formula for liquefaction applicable to Xinjiang region

ZHAO Qian-yu, SUN Rui

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

Abstract: In 2003, an M_S6.8 earthquake occurred in Bachu-Jiashi region of Xinjiang, causing large-scale liquefied phenomenon. 44 in-situ V_s records are collected, including 19 liquefied survey points and 25 non-liquefied points. The shear-wave velocity of the in-situ records is verified using two typical liquefaction prediction methods, and all the success discrimination ratios are not satisfied. So a discrimination formula for soil liquefaction applicable to the Xinjiang region is proposed. This formula is based on the Chinese code for seismic design of buildings (GB50011—2010), which is a linear model. The formula is brief and convenient, while the evaluation success ratio of the liquefied sites is 84% and that of the non-liquefied sites is 84%, with the total discrimination success ratio being 84%. Based on the real data analysis, the proposed discrimination method is quite reliable, and it may provide technical support for liquefaction prediction in Xinjiang and the relevant regions.

Key words: Xinjiang region; shear-wave velocity; soil liquefaction; discrimination formula

0 引言

2003年2月24日新疆喀什地区巴楚—伽师交界处附近发生了M_S6.8级地震。地震造成大量的人员伤亡和财产损失, 并伴随着大面积的砂土液化, 是我国境内继邢台、唐山、海城地震后, 近30年内砂土液化现象最具规模的一次地震, 具有重要的研究价值, 为检验及发展我国抗震设计规范液化判别方法提供了难得的机遇^[1]。

剪切波速是在地震作用下反映土体动力学性质的重要物理量^[2-5]。伴随着现代科技的快速发展, 剪切波速测试作为一种简单、便捷的原位测试技术得到了广泛应用, 地震安全性评价、小区划等工作中采用波速判别饱和砂层地震液化的需求也日益强烈。但就我国以剪切波速为指标的砂土液化判别方法而言, 形成现有方法的基础数据尚少, 方法是否适用全国各地也有

待检验。

本文对新疆巴楚—伽师M_S6.8级地震现场进行勘察, 获取了44个场地的剪切波速资料, 以此为基础, 分析现有国内外剪切波速液化判别方法的适用性, 建立土层常规参数相关的、与我国建筑抗震设计规范液化判别模型接轨的液化判别公式, 以用于该地区今后的液化判别问题。

1 测试设备

对新疆地区进行土层波速测试的设备为日本OYO公司生产的高分辨率瞬态表面波测试仪, 检波器过滤低频信号4.5 Hz, 以2 m为间距共布设24个, 有

基金项目: 科技部地震行业专项项目(200708001); 国家自然科学基金项目(41272357, 51278472)

收稿日期: 2013-06-07

*通讯作者

效分析深度达 20 m。测试过程中可利用面波反演直接生成二维土层剪切波速结构分布图。

2 场地勘察

新疆地震勘察点主要分布于震中附近重灾区, 勘察点分布如图 1。为提高测试结果的可靠性, 勘察中以标准贯入、静力触探和剪切波速三种测试结果综合判定场地土力学性质。剪切波速勘察点分布如表 1。

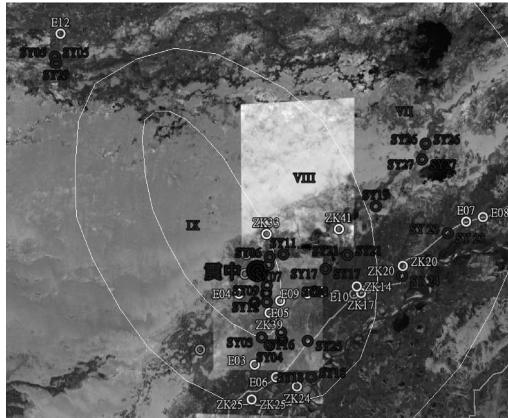


图 1 新疆剪切波速勘察场地

Fig. 1 Survey sites of shear-wave velocity in Xinjiang earthquake

表 1 剪切波速勘察点分布

Table 1 Distribution of measuring points of shear-wave velocity data

烈度	液化场地	非液化场地	合计
7 度	6	5	11
8 度	7	14	21
9 度	6	6	12
合计	19	25	44

3 国内外剪切波速液化判别方法讨论

目前国内外有多种关于剪切波速判别砂土液化的方法。本文主要对其中两种典型剪切波速判别场地液化方法进行讨论。

Andrus 和 Stokoe 等 (1999) 提出基于循环剪应力比法的剪切波速液化判别式^[2-3]。其集合世界范围内众多专家的研究成果, 得出的液化势特征曲线, 并由此总结出了如下的液化判别式。根据循环剪应力比法, 循环应力比 CSR 表示为:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma_v} = 0.65 \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \cdot \gamma_d, \quad (1)$$

式中 a_{max} 为地表峰值加速度 (g); g 为重力加速度; σ_v 为上覆土压力 (kPa); σ'_v 为有效上覆土压力 (kPa); γ_d 为深度修正系数。循环阻力比为 CRR:

$$CRR = \left\{ a \cdot \left(\frac{V_{sl}}{100} \right)^2 + b \cdot \left(\frac{1}{V_{sl}^* - V_{sl}} - \frac{1}{V_{sl}^*} \right) \right\} \cdot MSF_{7.5}, \quad (2)$$

式中 V_{sl} 为实测剪切波速 (m/s); V_{sl}^* 为液化剪切波速上限值 (m/s), 细粒含量未知时取 215 m/s; $MSF_{7.5}$ 为地震震级修正系数; V_{sl} 为归一化剪切波速。

$$V_{sl} = V_{s0} \cdot \left(\frac{100}{\sigma'_v} \right)^{0.25}. \quad (3)$$

循环剪应力比法在国外应用较广, 但由于该方法计算繁杂, 加上地面峰值加速度数据的缺乏, 在国内工程应用中未能得到推广。

我国《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) 方法是石兆吉研究员根据 Dobry 刚度法原理和我国现场资料推演出来的。该公式最初出现在《天津市建筑地基基础设计规范》(TBJI—88, 简称天津规范) 中, 是在唐山, 海城地震调查数据的基础上得出的剪切波速液化判别式。石兆吉 (1993) 在天津规范的基础上对剪切波速液化判别公式进行了改进, 加入了地下水位埋深的影响。最终《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) 在改进的石兆吉公式上增加了黏粒含量影响系数, 得到判别公式如下^[4-7]:

$$V_{scri} = V_{s0} \cdot \left(d_s - 0.0133d_s^2 \right)^{0.5} \left[1.0 - 0.185 \left(\frac{d_w}{d_s} \right) \right] \left(\frac{3}{\rho_c} \right)^{0.5}. \quad (4)$$

其中 d_w 为地下水位埋深 (m); d_s 为剪切波速测试点深度 (m); ρ_c 为黏粒含量百分率, 当小于 3 或为砂土时应采用 3。当烈度是 7, 8 和 9 度时砂土的剪切波速基准值 V_{s0} 按表 2 取值。

表 2 剪切波速基准值

Table 2 Reference values of shear-wave velocity

土类	$V_{s0}/(m \cdot s^{-1})$		
	7 度	8 度	9 度
砂土	65	95	130
粉土	45	65	90

使用公式 (1) ~ (4) 对新疆场地剪切波速资料进行预测, 两种判别方法的预测结果如表 3。

表 3 剪切波速液化预测成功率

Table 3 Ratios of successful prediction for liquefaction by shear-wave velocity

判别方法	判别成功率/%		
	液化场地	非液化场地	合计
Andrus 和 Stokoe 方法	26	100	68
岩土工程勘察规范法	58	36	45

可以看出, Andrus 和 Stokoe 的循环剪应力比法判别液化场地偏危险, 非液化场地偏保守; 岩土工程勘察规范方法对于液化、非液化场地判别成功率均低于 60%, 判别结果不可靠。目前这两种典型方法的预测结果都产生了严重偏差, 初步分析表明, 新疆地区土层条件特殊^[1], 应以本地区现场实测数据为基础, 形成新的剪切波速判别公式。

4 适用于新疆地区的波速液化判别公式

4.1 剪切波速液化判别模型

参照《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001) 中标准贯入锤击数液化判别式的基本形式, 建立新的直线型剪切波速液化判别公式:

$$V_{\text{scri}} = V_{s0} [1 + \alpha_w (d_w - 2) + \alpha_s (d_s - 3)] , \quad (5)$$

式中 V_{scri} 为临界剪切波速 (m/s); V_{s0} 为剪切波速基准值 (m/s); α_w 为地下水位埋深影响系数; α_s 为液化层埋深影响系数; d_w 为地下水位埋深 (m); d_s 为液化层埋深 (m)。该公式是我国专家学者多年的研究成果, 公式形式直观且计算简便。

4.2 剪切波速修正公式

剪切波速基准值 V_{s0} 表示不同烈度、同一地下水位及埋深条件下, 液化与非液化之间的剪切波速临界线。由于测试点的液化层埋深和地下水位埋深各不相同, 无法将数据绘在同一图中进行比较。因此, 需将测试点剪切波速数据修正到统一的地下水位埋深和液化层埋深。

Sykora (1987), Kayen 等 (1992), Robertson 等 (1992) 按照传统的标准贯入锤击数和静力触探锥尖阻力的上覆土压力修正方式, 对 V_s 进行了修正^[8-9], 修正公式:

$$V_{s1} = V_s C_v = V_s \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^m , \quad (6)$$

式中 V_{s1} 为修正上覆土应力后的剪切波速 (m/s); C_v 为修正测量波速上覆土压力的因子; p_a 为参考应力 (kPa); σ'_v 为初始有效上覆土应力 (kPa)。 m 为经验常数, 不同土类的 m 取值不同, Yamada 等 (2008) 发现基于塑性指数不同, 公式 (6) 中 m 取值不同, 其中净砂 m 取 0.25, 黏性土 m 取值为 0.5。

本文中选用公式 (6) 形式对剪切波速进行修正, 由于新疆地震中液化场地均为砂土液化, m 取 0.25, 即:

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.25} . \quad (7)$$

4.3 剪切波速修正标准

对剪切波速进行修正时, 需首先确定剪切波速修正中的参考应力, 即标准深度的确定。

从《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11—74) 延续至今《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010), 在建立液化判别公式时, 全部资料来源于 1962 年至 1970 年间 6 次地震, 包括砂土液化引起地基破坏实例 12 个, 以及已知的 58 例液化和非液化场地资料。这些实例中, 地下水位平均约 2 m, 发生液化深度为 2~

4 m, 平均约 3 m。因此本文取 $d_w=2$ m, $d_s=3$ m 为标准深度^[10], 砂土平均重度取 19 kN/m³。则剪切波速修正公式的形式可进一步化为:

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{9d_s + 10d_w}{\sigma'_v} \right)^{0.25} = V_s \left(\frac{47}{\sigma'_v} \right)^{0.25} , \quad (8)$$

由此可得到全部勘察点的修正剪切波速, 见表 4。

表 4 剪切波速修正结果

Table 4 Corrected results of shear-wave velocity

序号	勘察点	烈度	d_w /m	d_s /m	V_s /(m·s ⁻¹)	V_{s1} /(m·s ⁻¹)	是否 液化
1	SY19	7	2.1	2.6	166.2	168.6	是
2	SY23	7	2.3	5.5	152.7	137.0	是
3	SY24	7	2.8	5.1	151.5	135.3	是
4	SY26	7	1.5	2.0	128.4	140.3	是
5	SY27	7	1.0	5.3	160.4	152.4	是
6	SY29	7	1.5	2.4	128.6	136.9	是
7	SY01	8	2.9	3.9	162.5	150.4	是
8	SY04	8	1.5	4.0	163.7	160.4	是
9	SY08	8	1.0	2.4	116.1	128.2	是
10	SY11	8	2.9	5.7	173.3	151.6	是
11	SY16	8	2.9	4.5	177.0	160.5	是
12	SY18	8	3.4	6.2	171.0	145.4	是
13	SY25	8	2.0	4.4	173.4	163.4	是
14	SY06	9	2.9	4.0	170.6	157.3	是
15	SY07	9	2.8	3.5	160.7	151.5	是
16	SY09	9	1.8	2.7	151.3	155.3	是
17	SY12	9	2.8	5.4	187.4	165.9	是
18	SY14	9	1.9	2.6	169.3	173.7	是
19	ZK30	9	2.6	3.7	164.7	155.4	是
20	E08	7	4.2	4.8	179.0	154.3	否
21	E12	7	2.6	5.2	186.3	167.0	否
22	E13	7	2.7	6.8	195.0	166.6	否
23	E07	7	2.8	8.1	189.0	156.1	否
24	ZK20	7	3.5	12.0	234.3	177.4	否
25	E03	8	2.3	6.6	188.8	164.1	否
26	ZK25	8	1.7	6.7	189.7	167.5	否
27	E11	8	1.2	6.8	242.3	216.9	否
28	ZK13	8	3.5	7.2	197.0	163.2	否
29	ZK17	8	2.7	7.5	284.7	239.1	否
30	E09	8	2.9	7.7	200.5	166.7	否
31	E10	8	2.2	9.1	204.9	168.0	否
32	ZK14	8	3.0	9.6	300.1	239.2	否
33	ZK24	8	2.9	11.5	223.6	172.6	否
34	ZK41	8	2.5	11.5	275.0	213.9	否
35	ZK15	8	2.3	12.0	227.6	176.1	否
36	ZK16	8	1.6	12.5	340.7	265.0	否
37	ZK26	8	3.5	13.0	215.5	160.7	否
38	E06	8	3.8	13.3	226.0	167.0	否
39	E04	9	3.1	3.8	204.2	188.2	否
40	ZK39	9	2.7	4.5	202.7	185.2	否
41	E05	9	2.4	6.5	200.0	173.8	否

42	E02	9	3.8	7.5	218.5	178.5	否
43	ZK33	9	2.4	10.9	224.6	176.9	否
44	ZK38	9	2.5	11.9	237.2	183.2	否

4.4 剪切波速液化判别公式基准值

直线型剪切波速液化判别公式基准值的确定,需确定液化点与非液化点的临界线,如图2所示,以烈度为横坐标,以表4中修正的剪切波速为纵坐标,绘出液化、非液化勘察点。

图2中不同烈度对应的液化与非液化勘察点的波速临界点即为直线型判别公式的剪切波速基准值,对应取值见表5。

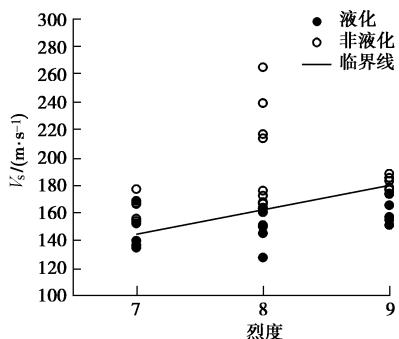


图2 修正的剪切波速与烈度关系曲线

Fig. 2 Relationship between corrected shear-wave velocity and intensity

表5 不同烈度下剪切波速基准值

Table 5 Reference values of shear-wave velocity under different intensities

烈度	7度	8度	9度
$V_{s0}/(m\cdot s^{-1})$	145	162	180

4.5 地下水位埋深与液化层埋深影响系数

我国建筑抗震设计规范在确定标准贯入锤击数液化判别公式的影响参数时,由于只有浅层液化资料缺少深层液化资料,因此采用Seed方法求出。本文中新疆勘察点地下水位埋深和液化层埋深具有一定变化,并且由于44个勘察点数据量有限,为直接推导影响系数 α_w 、 α_s 增加了不确定性。本文采用优化方法解决这一问题。

剪切波速液化判别公式(5)可化为

$$\frac{V_{\text{scri}}}{V_{s0}} = 1 + \alpha_w (d_w - 2) + \alpha_s (d_s - 3) \quad (9)$$

在理想情况下,只考虑地下水位埋深影响,忽略液化层埋深,可把液化层埋深视为一常数项 C_s ,则上式记为

$$\frac{V_{\text{scri}}}{V_{s0}} = 1 + \alpha_w (d_w - 2) + C_s \quad (10)$$

此时临界剪切波速与剪切波速基准值的比为 d_w 的一次函数,地下水位埋深影响因素 α_w 为比例系数。

以实测剪切波速与剪切波速基准值之比为横坐

标,液化层埋深 d_w 为纵坐标,可以得到区分液化点与非液化点的临界线,即公式(10)。如图3,4所示,临界线斜率 α_w 取值范围为-0.15~0.2,同理,液化层埋深影响系数范围-0.24~0.24。

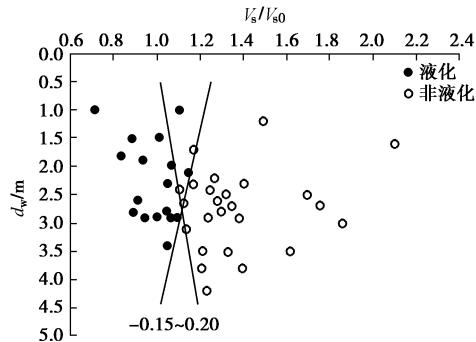


图3 剪切波速比与地下水位埋深关系

Fig. 3 Relationship between shear-wave velocity and ground water depth

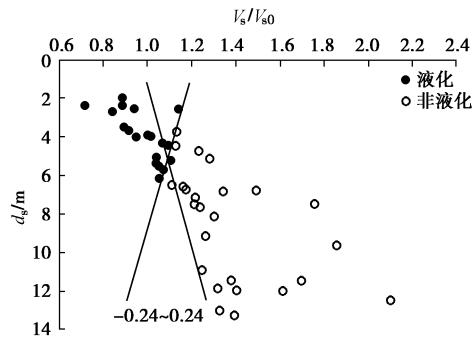


图4 剪切波速比与液化层埋深关系

Fig. 4 Relationship between shear-wave velocity and liquefaction layer depth

李兆焱(2012),对地下水位埋深和液化层埋深与液化势之间关系进行了理论解答。分别列举多部规范中液化判别公式,并以Seed模型为基础,给出水位埋深和液化层埋深与液化势关系的理论解。通过分析论证得出的结论:对于同一液化层埋深的饱和砂层,液化判别公式中地下水位埋深与液化临界值呈递减函数;对于同一水位埋深的饱和砂层,液化判别公式中液化层埋深与液化临界值呈递增函数^[1]。通过上述分析,地下水位影响系数 α_w 介于-0.15~0,液化层埋深影响系数 α_s 介于0~0.24。

上述方法为单独考虑水位埋深或液化层埋深的理想情况。实际工况中水位埋深和液化层埋深间具有相互关联性,为了得到更合理的影响系数,本文以提高液化判别式成功率前提,来综合分析水位和液化层埋深的影响权重。

分别计算水位埋深影响系数和液化层埋深影响系数在不同取值下对应液化点、非液化点判别成功率等值线,计算结果见图5和图6。将液化点、非液化点情况综合考虑,得到图7。此时液化等值线(虚线)

与非液化等值线(实线)交汇区域内液化与非液化判别成功率均可达80%以上。在保证 α_w 取负值、 α_s 取正值的前提下, 尽可能满足液化、非液化判别成功率最大, 这里选取 $\alpha_w=-0.02$, $\alpha_s=0.04$ 。

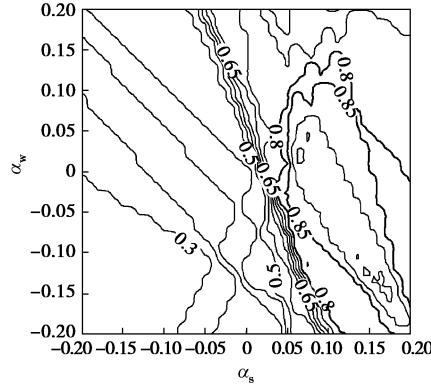


图 5 α_w 、 α_s 对于液化点判别成功率影响等值线

Fig. 5 Effects of α_w and α_s on ratio of successful discrimination for liquefied sites

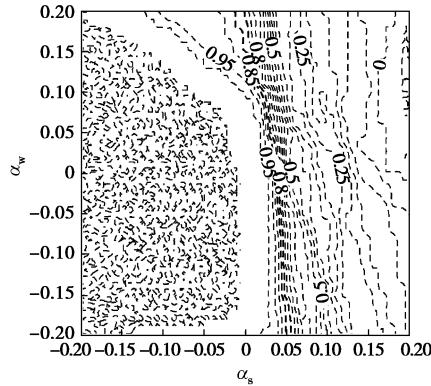


图 6 α_w 、 α_s 对于非液化点判别成功率影响等值线

Fig. 6 Effects of α_w and α_s on ratio of successful discrimination for non-liquefied sites

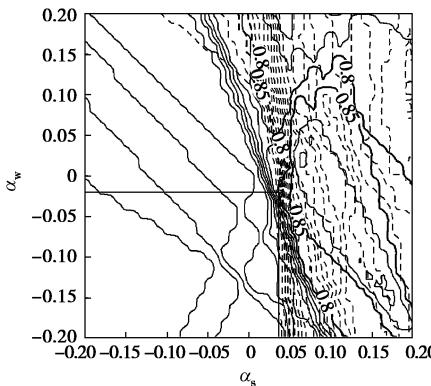


图 7 α_w 、 α_s 对于液化、非液化点判别成功率综合影响等值线

Fig. 7 Effects of α_w and α_s on ratio of successful discrimination for liquefied and non-liquefied sites

4.6 液化判别公式

综合上文分析结果, 最终得到适用于新疆地区的直线型剪切波速液化判别公式:

$$V_{\text{scri}} = V_{s0} [1 - 0.02(d_w - 2) + 0.04(d_s - 3)], \quad (11)$$

式中 V_{scri} 为临界剪切波速 (m/s); V_{s0} 为剪切波速基

准值 (m/s), 按表 5 取值; d_w 为地下水位埋深 (m); d_s 为液化层埋深 (m)。当临界剪切波速值大于实测剪切波速值时, 判为液化, 否则判为非液化。

5 剪切波速液化判别公式的回判分析

新疆地区剪切波速液化判别公式是基于新疆现场数据得到的, 公式形式简便、具有良好的适用性。新疆地区勘察点共计 44 个, 其中液化点 19 个, 非液化点 25 个。判别结果如表 6 所示, 直线型液化判别公式对液化测试点回判成功率为 84%, 非液化测试点回判成功率为 84%, 总回判成功率达 84%。

表 6 剪切波速勘察点回判结果

Table 6 Discrimination results based on data of in-situ V_s

序号	勘察点	烈度	d_w /m	d_s /m	V_s /(m·s ⁻¹)	V_{scri} /(m·s ⁻¹)	是否 液化	判别
1	SY19	7	2.1	2.6	166.2	142.1	是	否
2	SY23	7	2.3	5.5	152.7	158.6	是	是
3	SY24	7	2.8	5.1	151.5	154.9	是	是
4	SY26	7	1.5	2	128.4	140.7	是	是
5	SY27	7	1	5.3	160.4	161.0	是	是
6	SY29	7	1.5	2.4	128.6	142.7	是	是
7	SY01	8	2.9	3.9	162.5	164.9	是	是
8	SY04	8	1.5	4	163.7	169.8	是	是
9	SY08	8	1	2.4	116.1	161.4	是	是
10	SY11	8	2.9	5.7	173.3	176.6	是	是
11	SY16	8	2.9	4.5	177	168.5	是	否
12	SY18	8	3.4	6.2	171	177.9	是	是
13	SY25	8	2	4.4	173.4	170.7	是	否
14	SY06	9	2.9	4	170.6	184.0	是	是
15	SY07	9	2.8	3.5	160.7	180.7	是	是
16	SY09	9	1.8	2.7	151.3	178.6	是	是
17	SY12	9	2.8	5.4	187.4	194.4	是	是
18	SY14	9	1.9	2.6	169.3	177.1	是	是
19	ZK30	9	2.6	3.7	164.7	182.9	是	是
20	E08	7	4.2	4.8	179	148.8	否	否
21	E12	7	2.6	5.2	186.3	155.7	否	否
22	E13	7	2.7	6.8	195	165.0	否	否
23	E07	7	2.8	8.1	189	172.3	否	否
24	ZK20	7	3.5	12	234.3	192.9	否	否
25	E03	8	2.3	6.6	188.8	184.4	否	否
26	ZK25	8	1.7	6.7	189.7	186.9	否	否
27	E11	8	1.2	6.8	242.3	189.2	否	否
28	ZK13	8	3.5	7.2	197	184.4	否	否
29	ZK17	8	2.7	7.5	284.7	188.9	否	否
30	E09	8	2.9	7.7	200.5	189.2	否	否
31	E10	8	2.2	9.1	204.9	200.9	否	否
32	ZK14	8	3	9.6	300.1	201.5	否	否
33	ZK24	8	2.9	11.5	223.6	213.8	否	否
34	ZK41	8	2.5	11.5	275	215.5	否	否
35	ZK15	8	2.3	12	227.6	219.0	否	否
36	ZK16	8	1.6	12.5	340.7	224.9	否	否
37	ZK26	8	3.5	13	215.5	221.9	否	是
38	E06	8	3.8	13.3	226	222.6	否	否
39	E04	9	3.1	3.8	204.2	181.4	否	否
40	ZK39	9	2.7	4.5	202.7	188.5	否	否
41	E05	9	2.4	6.5	200	203.8	否	是

42	E02	9	3.8	7.5	218.5	205.9	否	否
43	ZK33	9	2.4	10.9	224.6	235.4	否	是
44	ZK38	9	2.5	11.9	237.2	241.9	否	是

6 结 语

以 2003 年新疆巴楚—伽师 M_s 6.8 级地震 44 个场地勘察剪切波速数据为基础, 分析现有国内外剪切波速液化判别方法均不适用于新疆巴楚地区。文中借鉴我国专家学者多年的研究成果, 以线性形式为基本模型, 依据新疆场地实测数据建立了含剪切波速基准值、地下水位、砂层埋深、地震烈度等常规参数的液化判别新公式。判别公式对液化场地回判成功率为 84%, 非液化场地的回判成功率为 84%, 总成功率达 84%, 可靠度良好, 可为新疆地区液化判别及其相关地区性标准制订提供参考。

参考文献:

- [1] 李兆焱. 基于巴楚地震调查的液化判别方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012. (LI Zhao-yan. A study into liquefaction discrimination methods based on surveys of the bachu earthquake[D]. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, 2012. (in Chinese))
- [2] ANDRUS R D, STOKOE II K H. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, ASCE, 2000, **126**(11): 1015 – 1025.
- [3] YOUD 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 Geoenviromental Engineering, ASCE, 2001, **127**(4): 297 – 313.
- [4] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (GB50011—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001. (in Chinese))
- [5] TBJ1—88 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. (TBJ1—88 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993. (in Chinese))
- [6] 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 土壤液化势的剪切波速判别方法[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(1): 74 – 80. (SHI Zhao-ji, YU Shou-song, FENG Wan-ling. Shear wave velocity based soil liquefaction evaluation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(1): 74 – 80. (in Chinese))
- [7] DOBRY R, LADD R S. Discussion to “Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes” by Seed H B and “Liquefaction potential: science versus practice” by Peck R B[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1980, **106**(6): 720 – 724.
- [8] SYKORA D W. Creation of a data base of seismic shear wave velocities for correlation analysis (GL-87-26) [R]. Geotech Lab Misc, 1987.
- [9] ROBERTSON P K, WOELLER D J, FINN W D L. Seismic cone penetration test for evaluation liquefaction potential under cyclic loading[J]. Can Geotech J, 1992, **29**(4): 686 – 695.
- [10] 谢君斐. 关于修改抗震规范砂土液化判别的几点意见[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))

(本文责编 明经平)