

适用于新疆巴楚地区的 CPT 液化判别新方法

李兆焱，王永志，袁晓铭

(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, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 以 2003 年新疆巴楚—伽师地区 Ms6.8 级地震大规模砂土液化为背景, 通过对地震液化场地的详细勘察, 获取了 39 个场地的静力触探勘察数据, 根据现有国内外静力触探液化判别方法均不适合于新疆巴楚地区的情况, 依据实测数据建立了含锥尖阻力基准值、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。建立的液化判别方法分为初判和复判两部分, 初判条件以特征深度表示; 复判公式对液化场地和非液化场地的回判别成功率均在 95% 左右, 可靠度较高。提出的公式形式与中国工程上最常用的液化判别公式一致, 可为新疆地区液化判别及相关地区性规范制订提供技术支持。

关键词: 新疆地区; 静力触探测试; 砂土液化; 判别方法

中图分类号: TU413.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S1-0140-06

作者简介: 李兆焱 (1982-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土地震工程研究, E-mail: hkjlizhaoyan@163.com.

New CPT-based prediction method for soil liquefaction applicable to Bachu region of Xinjiang

LI Zhao-yan, WANG Yong-zhi, YUAN Xiao-ming

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

Abstract: In 2003, a large-scale liquefied phenomenon occurred in Bachu-Jiashi region of Xinjiang due to an earthquake of Ms6.8, 39 in-situ CPT data are collected from the liquefied liquefied sites. Since the existing CPT-based prediction methods for soil liquefaction are not applicable to Bachu region of Xinjiang, a new evaluation formula is proposed based on the measured data of cone tip resistance value, ground water level, sand burial depth and intensity. The evaluation method is divided into the initial evaluation and the next evaluation. The evaluation success ratio is 95% in liquefied sites and is 94% in non-liquefied sites. The results show that the model has high reliability. The form of the proposed formula is in accordance with that of the most commonly-used liquefaction formula in China. The new formula may provide technical support for prediction of soil liquefaction in Xinjiang and relate areas.

Key words: Xinjiang; cone penetration test; soil liquefaction; prediction method

0 引言

在砂土液化研究领域当中, 工程最关心的是场地液化可能性评估和液化评估方法^[1]。自从中国 1961 年黄文熙院士最早提出使用动三轴试验研究砂土液化现象和国际上 1971 年 Seed 和 Idriss 提出的液化简化判别方法以来^[2], 砂土液化问题一直是岩土抗震工程领域研究的一个热点, 历来受到世界各地专家和学者的重视^[3], 而地震液化现场调查和地震现场原位测试是砂土液化研究的最重要手段。

2003 年 2 月 24 日, 新疆维吾尔自治区巴楚县—伽师县附近发生了 Ms6.8 级强烈地震。地震造成大量的人员伤亡和财产损失, 值得注意的是地震后发生了大范围的砂土液化现象, 是中国自 20 世纪发生邢台地震、海城地震、唐山地震后, 近几十年来中国大陆境内砂土液化现象最明显的一次地震, 液化规模与海城地震

相当, 具有重要研究价值, 为检验国家抗震设计规范的可靠性及发展液化判别方法提供了难得的机遇^[4]。

本文以巴楚地震现场勘察为基础, 获取液化场地静力触探勘察数据, 分析现有国内外静力触探液化判别方法的适用性, 建立土层常规参数相关的、与中国工程上最常用的液化判别模型接轨的液化判别新公式, 目标是为新疆地区液化判别及相关地区性规范制订提供技术支持。

1 测试设备

静力触探试验 (CPT) 是岩土工程勘察中常用的一种原位测试技术, 起源于 1945 年荷兰专家提出的“深

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 (2013B10); 国家自然科学基金项目 (41272357, 51278472)

收稿日期: 2013-03-02

层触探”, 原理是使用动力设备将锥形探头匀速推向土体, 在减少扰动的情况下, 勘察土体物理力学性质, 包括土体孔隙水压力、锥尖阻力、侧摩擦阻力等。CPT 相比其它原位测试技术有一定优势, 包括可获得连续数据、探头功能多样性、可重复性和可对土层进行土类划分等, 是国际上重点发展的原位测试技术之一。

本次CPT测试使用荷兰a.p.v.d.berg公司提供的世界最先进CPT探头、探杆和数据处理系统, 使用中国钻探车提供动力系统, 设备参数见表1和图1。本次测试结果中同时得到锥尖阻力、侧摩阻力、摩阻比、孔隙水压力和下管倾斜角度见图1(c)。

表 1 CPT 设备参数

Table 1 Parameters of CPT equipment

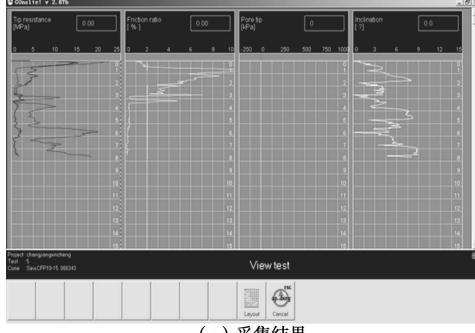
CPT 探头参数				
锥角	直径	截面积	侧筒面积	有效侧壁长
60°	120 cm ²	10 cm ²	150 cm ²	20 cm
动力系统参数				
起拔力	贯入力	贯入速度	锚机扭转力	
240 kN	00 kN	0.2~2.0 m/min	4000 N·m	



(a) 探头和探杆



(b) 钻探车



(c) 采集结果

图 1 CPT 设备

Fig. 1 CPT equipment

2 场地选取

勘察范围分布在震中附近 65 km×55 km, 见图 2。使用静力触探测试、标准贯入测试和剪切波速测试 3 种原位测试^[5], 其中 CPT 勘察数据分布见表 2。

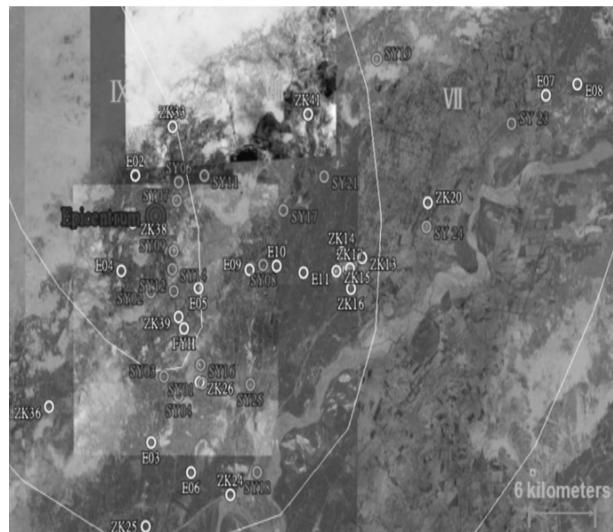


图 2 勘察现场分布图

Fig. 2 Distribution of survey sites

表 2 CPT 数据分布

Table 2 Distribution of CPT data

地震烈度	液化现场	非液化现场	总计
IX	6 个	6 个	12 个
VIII	9 个	9 个	18 个
VII	7 个	3 个	10 个
合计	22 个	18 个	40 个

3 液化层判定

根据国内外经验方法^[6-7], 将地下水位下锥尖阻力值较小而且较稳定的砂土层判定为液化土层, 将地下水位以下锥尖阻力值较大而且较稳定的砂土层判定为非液化土层。图 3 提供了典型场地液化土层和非液化土层的划分实例。由于勘察中同时使用 3 种原位测试对场地进行勘察, 在判定液化层可相互参照, 得到的评定结果更为可靠。

4 液化场地 CPT 数据

通过勘察得到了 22 个液化场地和 17 个非液化场地的 CPT 详细资料。根据液化层判定方法, 将这些勘查数据和判定结果列于表 3。其中, d_w 为水位现场勘察深度 (m), d_s 为饱和砂土层埋深 (m), q_c 为现场测得的锥尖阻力均值 (MPa)。

表 3 场地详细数据

Table 3 Survey data of sites

编号	孔号	烈度	液化场地数据			场地情况
			d_w	d_s	q_c	
1	SY06	IX	4	2.9	5.9	液化
2	SY07	IX	3.5	2.8	3.1	液化
3	SY09	IX	2.7	1.8	1.5	液化
4	SY12	IX	5.4	2.8	2.7	液化
5	SY14	IX	4.5	1.9	0.4	液化
6	ZK30	IX	3.7	2.6	5.5	液化
7	SY01	VIII	3.9	2.9	1.6	液化
8	SY04	VIII	4.0	0.4	6.3	液化
9	SY08	VIII	2.4	0.95	2.2	液化
10	SY11	VIII	5.7	2.9	6.5	液化
11	SY16	VIII	4.5	2.9	10.0	液化
12	SY17	VIII	2.5	0.4	2.2	液化
13	SY18	VIII	6.2	3.4	6.3	液化
14	SY21	VIII	4.1	2.9	4.7	液化
15	SY25	VIII	4.4	2.7	6.0	液化
16	SY05	VII	11.2	3.7	2.5	液化
17	SY19	VII	2.6	2.1	4.9	液化
18	SY23	VII	5.5	2.3	4.9	液化
19	SY24	VII	5.1	2.8	4.4	液化
20	SY26	VII	2	1.5	1.5	液化
21	SY27	VII	5.3	1	5.9	液化
22	SY29	VII	2.4	1.5	1.9	液化
非液化场地数据						
23	E02	IX	7.5	3.8	12.7	非液化
24	E04	IX	3.8	3.1	9.6	非液化
25	E05	IX	6.5	2.4	8.1	非液化
26	ZK33	IX	10.9	2.4	22.7	非液化
27	ZK38	IX	6.1	2.5	13.6	非液化
28	ZK39	IX	4.5	2.65	12.3	非液化
29	E03	VIII	6.6	2.3	15.0	非液化
30	E06	VIII	13.3	3.8	15.6	非液化
31	E09	VIII	7.7	2.9	13.7	非液化
32	E10	VIII	9.1	2.2	13.2	非液化
33	E11	VIII	6.8	1.2	17.0	非液化
34	ZK13	VIII	7.2	3.5	12.3	非液化
35	ZK24	VIII	5.5	2.9	7.7	非液化
36	ZK25	VIII	6.7	1.7	9.3	非液化
37	E07	VII	8.1	2.8	13.9	非液化
38	E08	VII	4.8	4.2	16.3	非液化
39	E12	VII	5.2	2.6	13.9	非液化

5 现有液化判别方法的检验

文献 5 已经对现有的 CPT 液化判别方法对本次地震的适用性进行了检验, 这里仅简单介绍。

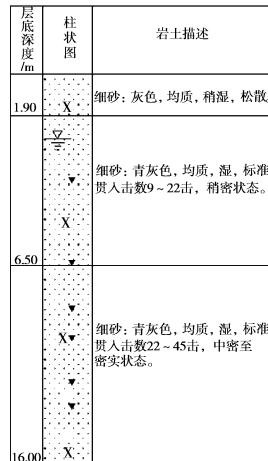
中国规范《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) 方法 (以下简称为中国规范), 其判别公式如下:

$$q_{ccr} = q_{co} \alpha_w \alpha_u \alpha_p , \quad (1a)$$

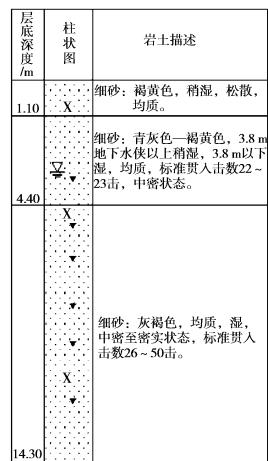
$$\alpha_w = 1 - 0.065(d_w - 2) , \quad (1b)$$

$$\alpha_u = 1 - 0.05(d_u - 2) , \quad (1c)$$

式中, q_{ccr} 为饱和土锥尖阻力临界值 (MPa), q_{co} 是锥尖阻力基准值 (MPa), 具体数值见表 5; α_w , α_u 分别为水位和砂层影响系数; α_p 为土性修正系数。



(a) Sy24 (VIII 度区), 地下水位 2.8 m



(b) E02 (IX 度区), 地下水位 3.8 m

Fig. 3 Determination of liquefied and non-liquefied layers

国外 CPT 液化判别公式主要有以下两个, 其一为 Robertson 公式:

$$q_c = \begin{cases} \frac{(CSR - 0.05) \cdot 10^3}{8.33 K_c [100/(9d_s + 10d_w)]^n}, & q_{clN} < 50 , \\ 10^2 \frac{1}{K_c [100/(9d_s + 10d_w)]^n} \sqrt[3]{\frac{CSR - 0.08}{93}}, & 50 \leq q_{clN} < 160 , \end{cases} \quad (2)$$

另一个为 Olsen 公式:

$$q_c = \frac{CSR + 0.025 - 0.17R_f + 0.028R_f^2 - 0.0016R_f^3}{0.00128} \cdot (\sigma'_{vo})^{0.7} , \quad (3)$$

式中, CSR 为地震循环剪应力比; K_c 为土性修正系数; q_{clN} 为修正到 100 kPa 的锥尖阻力值; R_f 为摩阻比; σ'_{vo} 为有效上覆压力。

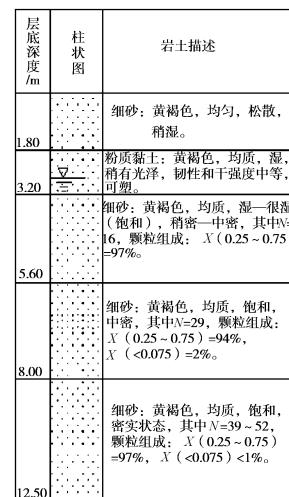
使用公式 (1) ~ (3) 对现场 CPT 勘察资料进行

判别, 结果如表 4, 同时将典型判别场地绘于图 4。由表 4 可见, Robertson 方法和 Olsen 方法给出的结果定性一致, 但成功率很低, 均偏于危险; 而中国规范 CPT 液化判别方法表面上偏于保守, 但如图 4 所示, 与国外 CPT 液化判别方法均定性相反^[4], 需要深入研究。鉴于此, 现有方法不能使用, 需要建立一个适合于本地区的基于 CPT 砂土液化判别方法。

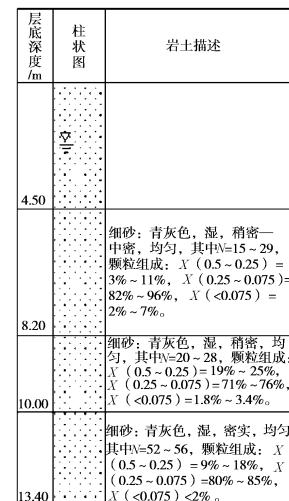
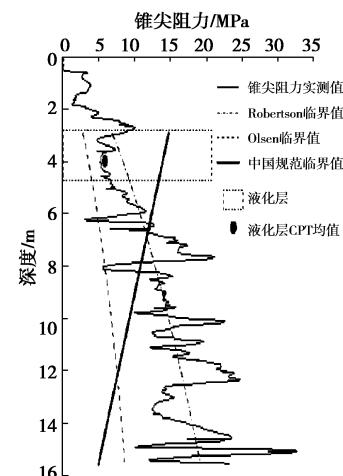
表 4 CPT 液化判别成功率

Table 4 Prediction success ratio of CPT liquefaction

类别	中国规范判别 方法	判别成功率/%	
		Robertson 判别 方法	Olsen 判别方法
液化场地	91	59	32
非液化场地	71	76	100
平均	82	67	62



(a) 液化场地, IX 度区



(b) 非液化场地, VIII 度区

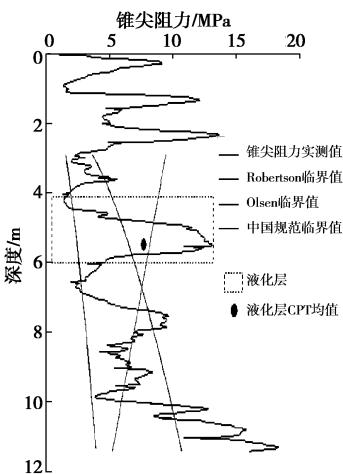


图 4 CPT 液化判别方法在典型场地中的应用

Fig. 4 Feasibility of CPT methods for typical sites

6 新公式的建立

6.1 初判条件

根据表 2 统计结果, 将 39 个勘察场地的水位深度和非液化土层厚度汇总于图 5, 得到巴楚地区液化特征深度见表 5。

当勘察场地 d_w 和 d_s 深度大于场地特征深度时, 可以忽略砂土液化对场地的影响。

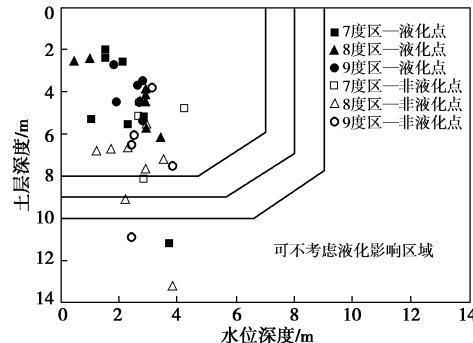


图 5 场地特征深度

Fig. 5 Characteristic depth of liquefied sites

表 5 d_w 和 d_s 特征深度Table 5 Characteristic depth of d_w and d_s

烈度	VII	VIII	IX
水位特征深度/m	7	8	9
土层特征深度/m	8	9	10

6.2 复判基本模型

中国最早的液化判别规范(《工业与民用建筑抗震规范》TJ11—74) 的标准贯入测试液化判别公式的形式为^[9]

$$N_{cr} = N_0 [1 + \alpha_w (d_w - 2) + \alpha_s (d_s - 3)] , \quad (4)$$

式中, N_{cr} 为临界标贯击数; N_0 为地表附近 (d_w 约 2 m, d_s 约 3 m) 发生液化的标贯击数基准值。

随着规范的发展, 公式形式虽有所改变, 但临界线的大小并没有实质性变化。本文所要建立的锥尖阻力液化判别公式参考公式 (4) 取为

$$q_{cr} = q_0 [1 + \alpha_w (d_w - 2) + \alpha_s (d_s - 3)] , \quad (5)$$

式中, q_{cr} 为临界锥尖阻力值; q_0 为地表附近液化的锥尖阻力基准值。

6.3 锥尖阻力基准值

根据 Olsen 提出的修正方法^[5], 将不同场地的地下水位和液化层深度修正到地下水位 2 m 和砂层埋深 3 m。39 个场地的数据汇总得到针对巴楚地震不同烈度下的锥尖阻力基准值见图 6 和表 6。

表 6 锥尖阻力基准值

Table 6 Values of cone tip resistance

烈度	7	8	9
q_0 /MPa	4.8	5.8	7.4

6.4 α_w 和 α_s 的确定

根据勘察数据, 使用 MATLAB 软件对结果进行优化。得到 α_s 和 α_w 不同对非液化场地成功率的影响

分布见图 7, 图中由右至左代表非液化场地判别成功率由低到高; 对液化场地成功率影响分布见图 8, 图中由左至右代表液化场地判别成功率由低到高。综合图 7、图 8 得到 α_s 和 α_w 的最优取值见图 9, 得到 α_w 为 -0.1、 α_s 为 0.1。

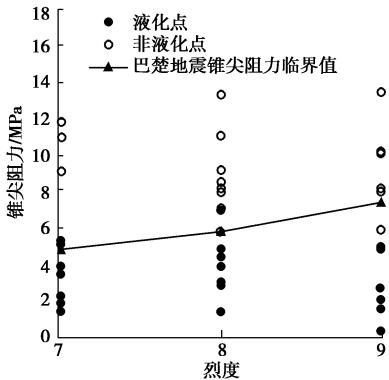


图 6 锥尖阻力值的分布

Fig. 6 Distinction of cone tip resistance values

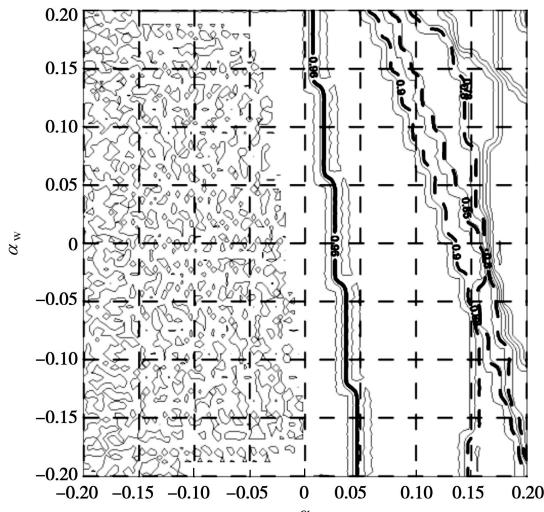


图 7 α_s 和 α_w 对非液化场地的影响

Fig. 7 Effect of α_s and α_w on non-liquefaction sites

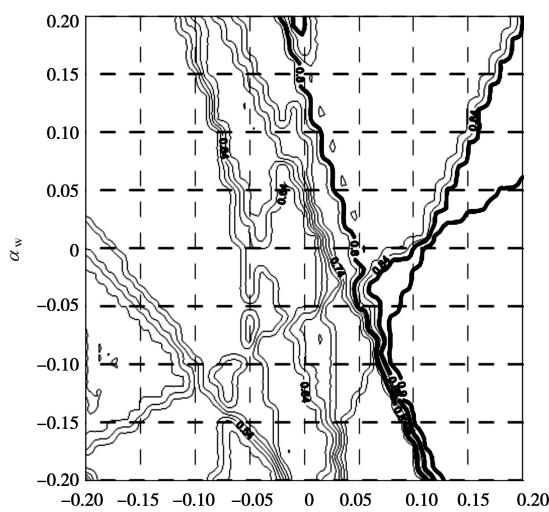


图 8 α_s 和 α_w 对液化场地的影响

Fig. 8 Effect of α_s and α_w on liquefaction sites

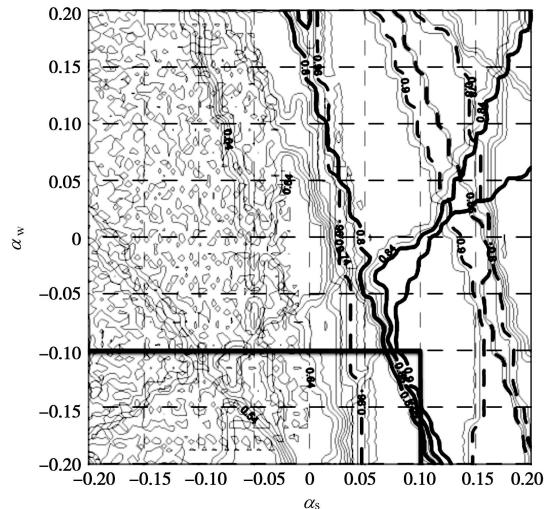


图 9 α_s 和 α_w 的优化取值

Fig. 9 Optimal values of α_s and α_w

6.5 复判公式

综上分析, 可以将 CPT 液化判别复判公式写为

$$q_{cr} = q_0 [0.9 - 0.1d_w + 0.1d_s] \quad (6)$$

当临界锥尖阻力平均值大于实测锥尖阻力平均值时判别为非液化场地, 反之判别为液化场地。

用建立的新公式判别 39 个勘察场地, 得到液化场地判别成功率为 95%, 非液化场地判别成功率为 94%。一定程度上说明新公式的可靠。

7 结语

本文以 2003 年新疆巴楚—伽师 Ms6.8 级地震液化场地调查为基础, 获取了 39 个场地的静力触探勘察数据, 根据现有国内外静力触探液化判别方法均不适合于新疆巴楚地区的情况, 借鉴中国工程上最常用的液化判别模型, 依据新的实测数据建立了含锥尖阻力基准值、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。所提出的液化判别方法分为初判和复判两部分, 复判公式对液化场地和非液化场地的回判成功率均在 95% 左右, 可靠度较高, 可为新疆地区液化判别及相关地区性规范制订提供参考。

致谢: 参加本文工作的还有东华理工大学的侯龙清副教授。感谢新疆地震局和地方各级政府的大力支持与配合。

参考文献:

- [1] SEED H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquake[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1979, **105**(GT2): 201–255.
- [2] SEED H B, IDRISI I M. Simplified procedure for evaluating

- soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, **107**(SM9): 1249 – 1274.
- [3] YOUD T L, IDRISI I M. Proceedings of the NCEER Workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils[R]. Buffalo: NCEER, 1997.
- [4] 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]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, 2012(in Chinese))
- [5] 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 Zhao-yan, SUN Rui, CAO Zhen-zhong, et al. Feasibility of cone penetration test to evaluating Bachu earthquake liquefaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3907 – 3912. (in Chinese))
- [6] HOLZER Thomas L, BENNETT Michael J, PONTI Daniel J, et al. Liquefaction and soil failure during 1994 northridge earthquake[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**: 438 – 452.
- [7] HWANG Jin-hung, YANG Chin-wen. Verification of critical cyclic strength curve by Taiwan Chi-Chi earthquake data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, **21**: 237 – 257.
- [8] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (GB50021—2001 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001. (in Chinese))
- [9] 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 李运辉)