

中美孟加拉细粒土液化判别标准对比

吴姿^{1,2}

(1.中交集团国际工程技术标准研发中心,湖北 武汉 430056; 2.中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 430056)

摘要:中国、美国、孟加拉国三国现行抗震设计规范中针对细粒土的液化判别标准各不相同。为提出可供工程应用及中国规范修订参考的评判标准,该文通过对比三国判别流程和标准,并分析其形成过程,在孟加拉国达卡及周边城市采取的168个细粒土样液化判别应用基础上,综合评价了各判别流程和标准的合理性。最后提出了一套融合各标准的细粒土液化判别流程及其结果评价标准。

关键词:细粒土;液化;中国标准;黏粒含量;塑性指数

中图分类号:U442.2

文献标志码:A

Comparison of Chinese, American, and Bangladeshi Criteria for Liquefaction Judgment of Fine-Grained Soil

WU Zi^{1,2}

(1.Research and Development Center on International Engineering Standards, CCCC, Wuhan, Hubei 430056, China;

2.CCCC Second Highway Consultant Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: The criteria for liquefaction judgment of fine-grained soil in current seismic design codes of China, the United States, and Bangladesh are quite different. In order to propose the judgment criteria for engineering application and Chinese code revision, this paper compared the judgment processes and criteria of the three countries. After analyzing the formation process, based on the application of the criteria for liquefaction judgment of 168 fine-grained soil samples collected in Dhaka, Bangladesh and surrounding cities, the rationality of each judgment process and criteria was evaluated comprehensively. Finally, a set of judgment processes and result criteria for fine-grained soil liquefaction integrating all criteria were put forward.

Keywords: fine-grained soil; liquefaction; Chinese criteria; clay content; plasticity index

0 引言

“一带一路”处于亚欧非及大洋板块的交汇处,地理环境复杂,地壳活跃,地震灾害频发^[1],基础设施的抗震设计非常关键;“一带一路”国家多为发展中国家,自身设计规范往往不够健全,需要参考欧美规范。孟加拉国的桥梁抗震设计一般结合《孟加拉国家建筑标准》BNBC (Bangladesh National Building Code)^[2]和美国国家公路与运输协会 AASHTO (American Association of State Highway and Trans-

portation Officials)标准《LRFD桥梁抗震设计规范》^[3](AASHTO桥抗规)进行,中国技术人员还会参照中国标准进行复核,三者的协调常常产生许多问题。

地震区地基土的液化对桥梁桩基沉降及承载力的影响非常明显,地基土的液化判别是抗震设计的重要步骤。目前在世界范围内已对砂土液化有广泛深入的研究,细粒土的液化机理、判别指标和标准则还存在很多不确定性。

中美规范对于细粒土(Fine-Grained Soils)的定义一致,均指细粒(粒径小于0.075 mm的颗粒)含量

收稿日期:2022-07-15(修改稿)

基金项目:中交集团工程技术标准国际化战略研究与实践项目(编号:2022-ZJKJ-PTJS15);中交第二公路勘察设计研究院有限公司科技研发项目(编号:KJFZ-2020-006)

作者简介:吴姿,女,硕士,工程师/注册结构工程师.E-mail:deadeazoe@hotmail.com

F_{FC} (Fines Content)超过 50% 的土。可能液化的细粒土按中国标准分类包含粉土或低塑性黏土,按美国统一土壤分类系统 USCS(Unified Soil Classification System)则包含 ML、ML-CL 或 CL。

地基土的液化判别一般采用经验法,即对过往地震液化和未液化的土样进行收集和试验,然后总结得出包络性的特征。液化细粒土样本、试验建立和结果总结因思路的不同都可能使得研究结果不同。

本文细述三国细粒土的液化判别标准,了解其形成过程,最后通过工程应用解释各标准的不同点并探讨其融合的可能性。

1 中美孟细粒土液化判别标准

1.1 中国

中国建筑、公路、铁路等行业现行抗震设计规范中的判别要求大致相同,分为初判和复判两阶段。

以《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[4]为例:在地震烈度分别为 7 度、8 度和 9 度区,若饱和粉土(不含黄土)的黏粒(粒径小于 0.005 mm 的颗粒)含量百分率分别不小于 10%、13% 和 16% 时,可初步判为不液化土。

初判认定需要进一步判别时,采用标准贯入试验判别法,实际锤击数 N 小于临界锤击数 N_{cr} 则判为液化土。

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3/\rho_c} \quad (1)$$

式中: N_0 为液化判别标贯锤击数临界值,按设计基本地震加速度取值; β 为设计地震分组调整系数; d_s 为贯入点深度; d_w 为地下水位; ρ_c 为黏粒含量百分率,小于 3% 或为砂土时取 3%。

取 $d_w=0$ 时,得到 N_{cr} 和 d_s 、 ρ_c 间的关系如图 1 所示。

1.2 美国

AASHTO 桥抗规的判别可以分为初筛、初判和复判三步。

低塑性粉土同时满足下列两个条件时需要进行液化评估:① 地下水位距离现状地面或设计地面的较低面不超过 15 m;② 地面 23 m 以内,土修正后的 SPT 锤击数 $(N_1)_{60}$ 不超过 25。

初判推荐采用 Boulanger 和 Idriss 标准(B&I 标准)或 Bray 和 Sancio 标准(B&S 标准)。

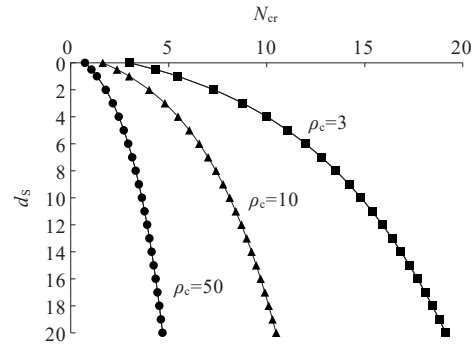


图 1 标准贯入试验判别法

Figure 1 Standard penetration test criteria

1.2.1 B&I 标准

Boulanger 等^[5]通过试验发现细粒土在循环荷载下分别表现出类似砂土或黏土的特性,一般可以以塑性指数 $I_p=7$ 为界,划分为类砂土(Sand-Like)土和类黏土(Clay-Like)土,如图 2 所示。对于 CL-ML, $I_p \geq 5$ 时可界定为类黏土。同时,根据土在循环荷载下不同的破坏形式,建议将“液化(Liquefaction)”一词专门用于描述类砂土,而“循环软化(Cyclic Softening)”描述类黏土的破坏。

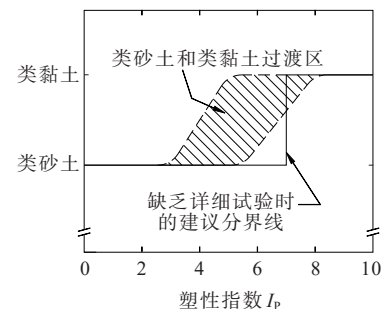


图 2 Boulanger 和 Idriss 标准^[5]

Figure 2 Boulanger and Idriss criteria^[5]

工程应用上,标准认为类砂土可采用砂土常用的“简化方法”(Simplified Methods)进行液化复判,类黏土的复判则应通过试验或建立在土性类似的土样上的经验法进行。

1.2.2 B&S 标准

Bray 等^[6]认为塑性指数 I_p 和含水率比 w_c/w_L 是细粒土液化判别的合适指标,依据这两个指标将土分成可能、一般可能和不太可能液化 3 个区,如图 3 所示。

Bray 等^[6]认为土的矿物构成、孔隙率、超固结比、地质年代等同样可能影响土体的液化, $I_p > 18$ 的土也可能在地震作用下失去强度,因此应用该标准时应综合各因素加以判断。

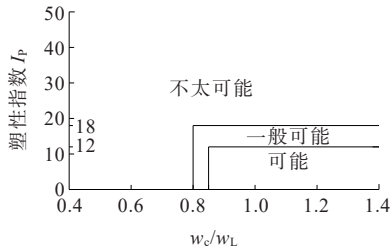


图3 Bray和Sancio标准^[6]

Figure 3 Bray and Sancio criteria^[6]

砂土和类砂土液化判别的“简化方法”在众多文献^[7-8]中有过介绍分析,本文不再赘述。

需要指出,在AASHTO桥抗规中,用一句话对B&I标准进行了概况:“Boulanger和Idriss(2006)建议在塑性指数 $I_p \geq 7$ 时考虑土壤具有类似黏土的特性[即不易液化(Not Susceptible to Liquefaction)]。”可认为 $I_p \geq 7$ 即判为不液化,但如前文所述,B&I标准实际是对细粒土进一步细分的准则, $I_p \geq 7$ 的类黏土不易“液化”,但可能发生“循环软化”。

1.3 孟加拉国

BNBC推荐Finn等^[9-10]在1994年提出的方法进行液化判别。有以下特征的细粒土可能液化:①黏粒(粒径小于0.005 mm)含量 $\leq 10\%$;②液限 $w_L \leq 36\%$;③天然含水率 $w \leq 0.9w_L$;④液性指数 $I_L \leq 0.75$ 。

对照Finn等^[9-10]的论文,规范中的4个指标,有3个存在错误之处,应分别为“黏粒含量 $\leq 15\%$;天然含水率 $\geq 0.91w_L$;液性指数 ≥ 0.75 ”。

1.4 发展过程

董林^[11]回顾了中国细粒土液化判别标准的发展;汪闻韶^[12]于1980年提出的液化初判准则发展为水利行业的液化初判条件:对粒径小于5 mm颗粒质量百分率大于30%的土,其中在地震设防烈度7度、8度和9度下,黏粒含量分别不小于16%、18%和20%时,可判为不液化。

赵倩玉^[13]总结了我国复判标准的发展沿革:于20世纪70年代形成,适用范围从饱和砂土拓展至粉土;判别深度由15 m内拓展至20 m内;公式线形由直线发展为折线,再到对数曲线。历次修订都是依据中国大量的观测数据,最近一次修订还结合了“简化方法”的框架。

陈国兴等^[14]整理了国外细粒土液化评价准则的发展;Seed等^[15]于1983年在汪闻韶^[12]的液化初判准则

基础上提出了一个液化粉土判别的“中国标准(Chinese Criteria)”:黏粒(粒径小于0.005 mm)含量 $< 15\%$;液限 $w_L < 35\%$;含水率 $w > 0.9w_L$;Finn等^[9-10]于1991年基于一些实例研究对“中国标准”进行了前文所述的修正为BNBC采用;Andrews等^[16]在2000年进行了中美指标的转换,形成了美国广泛使用的“修正的中国标准”,如表1所示。Seed等^[17]基于土耳其Kocaeli地震和中国台湾集集地震对“中国标准”提出了质疑,指出:黏粒含量不应作为液化判别的指标,土体中细粒土的矿物构成及其整体对土体可塑性的贡献更大。Boulanger等^[5]以及Bray等^[6]分别提出了他们的判别标准,为现行美国推荐规范。

表1 修正的中国标准

Table 1 Modified Chinese criteria

黏粒 ^① 含量/%	判定结果	
	液限 ^② $< 32\%$	液限 ^② $\geq 32\%$
< 10	可能液化	需进一步验证
≥ 10	需进一步验证	安全

注:①黏粒定义为粒径小于0.002 mm的颗粒;②液限由Casagrande液限仪测得。

1.5 对比分析

中标初判和BNBC判别标准源于20世纪80—90年代的研究成果,近年的地震液化实例表明黏粒含量不是细粒土液化判别的可靠指标^[17],因此二者不宜单独使用。

中美判别标准最初独立发展,而后有了兼容并蓄和各自不断的修正改进,二者表面上看不同,实际内核相互关联。

中美各阶段的判别指标如表2所示。美标初筛和初判共5个指标,相较之下中标初判仅有唯一的黏粒含量指标,因此,美标判别流程可能更全面。复判标准上,中美理论框架一致,指标只是 C_{FC} 或 ρ_c 、修正或未修正的锤击数的区别,可互为参考。

表2 中美规范细粒土液化判别指标

Table 2 Judgment indexes for fine-grained soil liquefaction

规范	in codes of China and the US		
	初筛指标	初判指标	复判指标
中国	—	ρ_c	d_s, d_w, ρ_c, N
美国	$d_w, (N_1)_{60}$	w_L, I_p, w_c	$d_s, d_w, C_{FC}, (N_1)_{60}$

注: C_{FC} 指细粒含量; $(N_1)_{60}$ 为SPT锤击数。

2 实例应用

选取位于孟加拉国首都达卡及周边城市的4个依据美标完成地勘的项目,取深度不超过20 m、分类为CL和ML的土样,共计168个,对其进行液化判别。

2.1 数据转换

2.1.1 抗震设防烈度及地震分组

达卡及周边城市大震(50年超越概率2%)峰值加速度为 $0.20g$,与中国规范(50年超越概率10%)的7度区($0.10g$)较接近。中标的设计地震分组调整系数 β 偏于保守取为1.05。

2.1.2 细粒含量 C_{FC} 与黏粒含量 ρ_c

有3个项目共80个试样结果同时包含了 C_{FC} 和 ρ_c (粒径小于 0.005 mm),列出散点图如图4所示。可见,二者的比例关系不明显,下限1.3倍,上限6.4倍,93.75%分布在1.5~5.0倍之间。

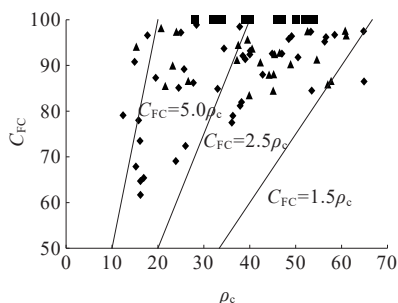


图4 细粒与黏粒含量散点图

Figure 4 Scatter plots of fine grain and clay content

Seed^[15,17]认为 $\rho_c=5\%$ 对应 $C_{FC}=15\%\sim 25\%$,即 C_{FC} 为 ρ_c 的3~5倍,他取4倍换算。Seed的换算比例下限比本例高,可能是砂土和细粒土粒径组成的差别。液化判别中取的换算倍数越大,即 ρ_c 越低,结果越偏于保守,因此本文综合取5倍换算。

2.1.3 标贯锤击数 N 的修正

美标使用的 $(N_1)_{60}$ 需要经过锤击能量 E_R 和上覆压力进行修正。

$$(N_1)_{60} = C_N (E_R/60\%) N \quad (2)$$

$$C_N = 0.77 \lg(1914/\sigma'_v), \text{ 且 } C_N < 2.0 \quad (3)$$

式中: C_N 为超载修正系数; E_R 对于自动落锤(Auto Trip Hammer)能量取80%, σ'_v 为有效上覆压力。

2.2 判别结果

2.2.1 中国规范

168个试样黏粒含量或换算所得黏粒含量均不

小于10%,全部判为不液化。

为进一步讨论,仍对所有试样进行复判,结果如图5所示。有4个试样 $N < N_{cr}$,可能液化。

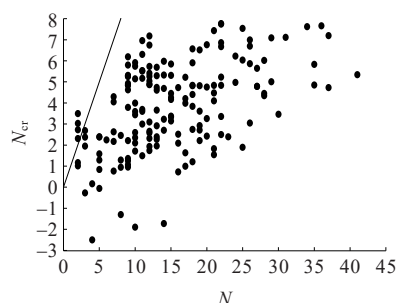


图5 标准贯入试验判别法结果

Figure 5 Results of standard penetration test criteria

2.2.2 美国规范

139个试样同时满足初筛条件 $d_w \leq 15\text{ m}$ 和 $(N_1)_{60} \leq 25$ 。

168个试样的B&S标准判别结果如图6所示。3个试样判为可能液化,8个判为一般可能,其中共有4个不满足初筛条件,即综合来说有7个试样判为可能液化。

所有试样 $I_p \geq 7$,根据B&I标准全部划分为类黏土,需要通过试验进行验证。作为参考,仍全部采用“简化方法” $C_{FC} \geq 35\%$ 曲线进行判别,结果如图7所示。14个试样判为可能液化,均满足初筛条件。

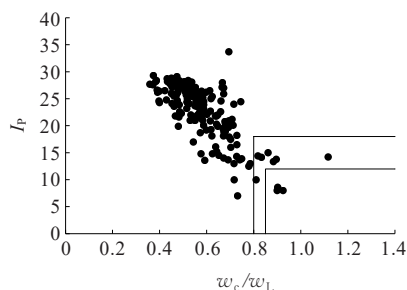


图6 B&S标准判别结果

Figure 6 Results of B&S criteria

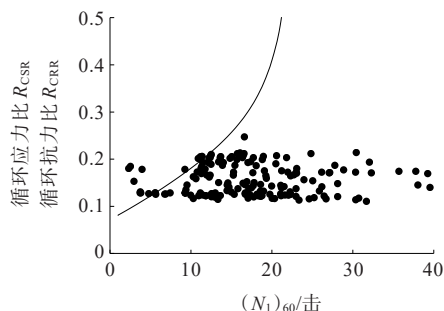


图7 “简化方法”判别结果

Figure 7 Results of simplified methods

2.2.3 孟加拉国规范

同中标初判,全部试样 $\rho_c > 10\%$,均判为不液化。

2.2.4 综合结果

综合各标准判别结果如图8所示。图中数字为可能液化的试样编号,“+”数量为判别结果的综合参考度。中标复判和“简化方法”按规范流程实际未使用,此处作为参考,参考度“+”;B&S标准参考度“++”。可以认为,1个“+”可能性较低;2个及以上“+”的试样液化可能性较大:或是规范推荐,或由至少两个标准判定。最终,168个试样中共有8个试样判为液化可能性较大。

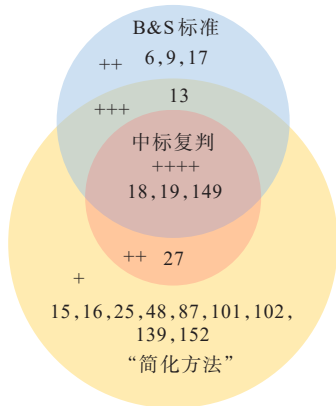


图8 综合判别结果

Figure 8 Overall judgement results

2.3 结果分析

中标复判结果全部属于液化可能性较大的试样,但由于初判的否决未能进入复判。可以认为,中标复判标准的准确率很高,而黏粒含量的初判指标确实偏于不安全导致了漏判,中标判别流程存在不合理。

美标3个判别阶段由宽泛到严格,流程相对合理。初判推荐的B&I标准或B&S标准不矛盾,可互为参照。“简化方法”结果的35.7%属于液化可能性较大的试样,其中完全包含了中标复判的结果,与B&S标准的结果也有一定重合度,可以认为其对于类黏土也有一定参考价值。

孟加拉国标准高度依赖不可靠的黏粒含量指标,不宜使用。

基于细粒土液化判别的不确定性,统筹不同标准的判别结果是更全面和合理的。推广各标准参考度至类砂土:中标复判标准参考度“+”;B&S标准和“简化方法”参考度“++”,可以得到一套中美融合

细粒土液化判别标准:美标判别流程框架下,结合B&S和B&I标准,加入中标复判标准和“简化方法”,综合不同标准的参考度得到判别结果的总体参考度,流程图如图9所示。

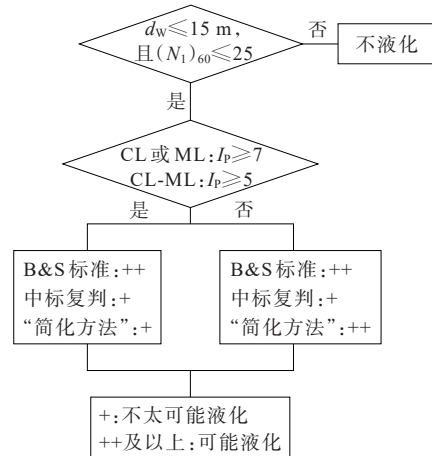


图9 中美标融合细粒土液化判别标准流程图

Figure 9 Flow chart of liquefaction judgment of fine-grained soil integrating criteria of China and the US

3 结论

(1) 中美孟现行规范中关于细粒土的液化判别均存在一定问题。中国和孟加拉国基于黏粒含量的判别条文修订相对滞后,BNBC中甚至出现了低级笔误;ASSHTO桥抗规更贴近学界进展,但内容的概括却可能产生误导。技术人员在应用相关条文时应加以辨别。

(2) 中国初判标准和BNBC推荐的Finn等^[9]标准中黏粒含量指标偏于不安全,不建议单独应用。中国复判标准准确率较高。美标判别流程相对合理,其初判的B&S标准和B&I标准可结合使用,一般适用于砂土和类砂土的“简化方法”,对于类黏土也有一定参考价值。

(3) 在美标判别流程框架下,融合中标复判标准、B&I标准、B&S标准以及“简化方法”,并依据各标准的可靠度可以得到判别结果的综合参考度,这一中美融合细粒土液化判别标准可供工程应用及中国规范修订参考。

参考文献:

References:

[1] 王紫薇,蔡红艳,陈慕琳,等.“一带一路”地区百余年地震

- 时空演变特征[J].自然灾害学报,2021,30(1): 141-154.
- WANG Ziwei, CAI Hongyan, CHEN Mulin, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of earthquake in “the Belt and Road” for over 100 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(1): 141-154.
- [2] Housing and Building Research Institute. Bangladesh national building code 2020[S]. Dhaka: Ministry of Housing and Public Works, 2020.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design[S]. Washington: D.C., 2011.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[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. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [5] BOULANGER R W, IDRIS I M. Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1413-1426.
- [6] BRAY J D, SANCIO R B. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(9): 1165-1177.
- [7] YOUD T L, IDRIS I M. 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, 127(4): 297-313.
- [8] 曾凡振, 侯建国, 李扬. 中美抗震规范地基土液化判别方法的比较研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊2): 309-314.
- ZENG Fanzhen, HOU Jianguo, LI Yang. A comparative study on the method of foundation soil liquefaction between Chinese and American codes of seismic design[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(sup 2): 309-314.
- [9] FINN W D L. Assessment of liquefaction potential and post-liquefaction behavior of earth structures: Developments 1981—1991[J]. Engineering, Environmental Science, 1991.
- [10] FINN W D L, LEDBETTER R H, MARCUSON III W F. The evolution of geotechnical earthquake engineering practice in North America: 1954—1994[C]// 1995-Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering & Soil Dynamics, The Netherlands: Engineering Geology, 1995.
- [11] 董林. 黄土及一般含细粒土体液化判别方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.
- Dong Lin. Study on mechanical characteristics of loess and liquefaction discrimination methods for widespread fines-containing soils[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016.
- [12] 汪闻韶. 土液化特征中的几点发现[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(3): 55-63.
- WANG Wenshao. Some findings in soil liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(3): 55-63.
- [13] 赵倩玉. 我国规范标贯液化判别方法的改进研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- ZHAO Qianyu. Improvement of liquefaction discrimination method based on surveys of the standard penetration test data in Chinese code[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013.
- [14] 陈国兴, 金丹, 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, 2795.
- 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, 2795.
- [15] 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.
- [16] ANDREWS D C A, MARTIN G R. Criteria for liquefaction of silty soils[J]. Proc, 12th World Conf on Earthquake Engineering, 2000: 1-8.
- [17] SEED R B, CETIN K O, MOSS R E S, et al. Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework[C]// Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar. Long Beach California: April 30, 2003.