中美静力触探判别地震液化方法的效果分析

赵拓宇[1] 辜利江[1] 曹 昱[1] 徐 玮[1] 马明青[2]

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司， 四川 成都 610041；

2. 中国石油西南油气田公司川东北作业分公司， 四川 成都 610021

摘 要：饱和砂土地震液化是一种国内外普遍存在的不良地质作用。许多国外建设项目要求采用欧盟或美国规范标准进行地震液化判别，与中国现行规范标准推荐的方法有明显区别。利用现场静力触探试验的结果，采用美国国家地震工程研究中心（National Center for Earthquake Engineering Research，NCEER）判别法（以下简称 NCEER 法）、美国加州大学教授 Boulanger R W 和 Idriss I M 判别法（以下简称 Boulanger-Idriss 2014 法）和中国铁路规范判别法（以下简称铁路规范法），对国内外 251 个已发生的地震实例进行砂土地震液化验算和讨论。结果显示，3 种判别方法的多数结果符合实际情况。建议海外工程项目采用 Boulanger-Idriss 2014 法和 NCEER 法；中国项目采用中国铁路规范法时，建议用颗粒分析和液塑限试验结果取代摩阻比以划分土体类型。研究成果对静力触探判别地震液化有参考价值。

关键词：地震液化判别；静力触探试验；NCEER 法；Boulanger-Idriss 2014 法

DOI：10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2026. 03. 016

Effect analysis of the Chinese and US earthquake-induced liquefaction assessment using cone penetration testing results

Zhao Tuoyu[1], Gu Lijiang[1], Cao Yu[1], Xu Wei[1], Ma Mingqing[2]

1. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;

2. Northeast Sichuan Operating Company, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan, 610021, China

Abstract: Earthquake-induced liquefaction of saturated sandy soils is a common geological hazard worldwide. Many overseas project owners require the application of US or EU standards and codes, which differ significantly from the liquefaction assessment methods recommended in current Chinese standards. Based on cone penetration test (CPT) results, the National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) method, the Boulanger R W and Idriss I M criterion proposed by these two professors at the University of California, USA (hereinafter referred to as the Boulanger-Idriss 2014 method), and the Chinese Railway Code method were applied to re-evaluate and discuss 251 documented earthquake-induced liquefaction cases from around the world. The results indicate that all three methods are reliable in most cases. The Boulanger-Idriss 2014 method and the NCEER method are recommended for overseas construction projects. When applying the Chinese Railway Code method, it is recommended that grain size distribution analysis and Atterberg limit tests be used in place of friction ratio to classify soil types. The

收稿日期：2024-04-24

作者简介：赵拓宇（1969-），男，高级工程师，硕士，主要从事地质工程和海外油气工程项目投标等工作。E-mail：1773831092@qq. com

findings provide a useful reference for CPT-based earthquake-induced liquefaction assessment.

Keywords: Earthquake-induced liquefaction assessment; Cone penetration test; NCEER method; Boulanger-Idriss 2014 method

0　前言

静力触探是中国规范推荐的一种饱和砂土液化判别手段。由场地地震动峰值加速度(抗震设防烈度)确定可液化土层临界贯入阻力基本值[1],根据土层类别、地下水埋深等场地条件,按经验公式计算液化临界贯入阻力,通过与静力触探实测值对比进行判别,若实测值大于临界值,则判别为不液化,否则为液化。采用静力触探测试成果进行液化判别的中国规范标准较少,主要见于 TB 10018—2018《铁路工程地质原位测试规程》(以下简称铁路规范)[2]、GB 50111—2006(2009 版)《铁路工程抗震设计规范》[3](以下简称 GB 50111—2006)、JTG 3223—2021《公路工程地质原位测试规程》(第 5 版)[4](以下简称公路规范)、GB 50021—2001(2009 版)《岩土工程勘察规范》[5](以下简称岩土规范)、《工程地质手册》[6],以及部分地方规范标准如 DGJ 08 - 11—2018《地基基础设计标准》[7]、DB 37 /5052—2015《建筑岩土工程勘察设计规范》[8]。其中,GB 50111—2006 仅适用于单桥探头成果,其他规范则包含单桥和双桥探头成果。

铁路规范与公路规范在静力触探判别液化方面完全一致,这两个规范与岩土规范、《工程地质手册》的判别经验公式和参数取值基本一致,区别仅在于对临界贯入阻力基本值的取值有差别。前者按地震动峰值加速度查表确定临界贯入阻力基本值,后者按抗震设防烈度查表获取临界贯入阻力基本值,这里采用铁路规范中推荐的经验公式。在采用中国铁路规范判别法(以下简称铁路规范法)时,还需用 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》[9](以下简称地震区划图)确定相关地震参数。

除各种规范标准推荐的地震液化判别的经验公式外,李兆炎等人[10]、孔祥兴[11]、王树成[12]、孙东风等人[13]通过总结地震实例,提出了其它基于静力触探测试成果进行液化判别的经验公式,但这些公式目前还未被中国现行规范标准采用。国外工程界一般优先采用标准贯入和静力触探测试成果判别液化[14]。

本文用美国国家地震工程研究中心(National Center for Earthquake Engineering Research, NCEER)判别法(以下简称 NCEER 法)、美国加州大学教授 Boulanger R W 和 Idriss I M 判别法(以下简称 Boulanger-Idriss 2014 法)和铁路规范法这 3 种方法,对 Boulanger R W 和 Idriss I M 2014 年液化判别研究报告中的地震实例数据(均为双桥探头成果)进行液化判别计算和讨论。铁路规范法的计算公式见相关规范,此处不再累述。

1　两种国外液化判别法

1.1　NCEER 法

1.1.1　循环剪切应力比

NCEER 法的思路是对比地层循环剪切抗力比(*CRR*)与地层循环剪切应力比(*CSR*),当前者大于后者判别为不液化,反之为液化。以此为基础,国外在震级、判别深度、有效应力、细粒含量等地震和地层条件上提出了不同的修正方法[14-21]。

1971 年 Seed H B 和 Idriss I M 提出特定地震在地层某深度产生 *CSR*,等效于 65% 最大 *CSR*。地震动反应分析可获取最大剪应力,但在实际工程应用中太过复杂。Seed H B 和 Idriss I M 提出式(1)来估算最大剪应力。

$$CSR_{M,\sigma_v'} = 0.65\frac{\tau_{max}}{\sigma_v'} = 0.65\frac{\sigma_v}{\sigma_v'}\frac{a_{max}}{g}r_d \tag{1}$$

式中:$CSR_{M,\sigma_v'}$为在特定地震震级 M 和有效应力条件下的等效 *CSR*;τ_{max}为地震在地层某一深度处产生的最大剪应力,kPa;σ_v'为该深度处的垂直有效应力,kPa;a_{max}为地震在地表产生的最大水平加速度,m /s^2;σ_v为该深度处的垂直总应力,kPa;g 为重力加速度,取 9.81 m /s^2;r_d 为剪应力折减系数。

Boulanger-Idriss 2014 法和 NCEER 法均用式(1)来确定 *CSR*,只是计算 r_d 略有区别。

对于特定场地和地震条件,应力条件和地震震级是一定的,不同的是确定 r_d。NCEER 法[14]提出 2 种方式估算 r_d,计算结果差别很小,分别见式(2) ~ (3)和式(4)。

方式一:

$$当\ z \leqslant 9.15,\ r_d = 1.0 - 0.007\ 65z \tag{2}$$

$$当\ 9.15 < z \leqslant 23,\ r_d = 1.174 - 0.026\ 7z \tag{3}$$

方式二:

$$r_d = \frac{(1.000 - 0.411\ 3z^{0.5} + 0.040\ 52z + 0.001\ 753z^{1.5})}{(1.000 - 0.417\ 7z^{0.5} + 0.057\ 29z - 0.006\ 205z^{1.5} + 0.001\ 210z^2)} \tag{4}$$

式中:z 为测试点深度,m。

1.1.2 *CRR*

由于地层上履应力对实测锥尖贯入阻力的影响,需进行归一化。非等效纯净砂条件下,归一化锥尖贯入阻力(即未经细粒含量修正)计算见式(5)~(6)。

$$q_{c1N} = C_Q(q_c/p_a) \tag{5}$$

$$C_Q = (p_a/\sigma'_v)^n \tag{6}$$

式中:q_{c1N}为归一化锥尖贯入阻力;C_Q为贯入阻力的归一化系数,取值≤1.7;q_c为实测锥尖贯入阻力,kPa;p_a为1个标准大气压,取101.325 kPa;n为与土类型相关的指数,取值由粒径特征决定,纯净砂取0.5,黏性土取1.0,粉土和砂质粉土取0.5~1.0。

NCEER法[14]推荐Robertson P K等人[20]于1988年提出的采用静力触探结果判别砂土液化的方法。Robertson P K等人提出了土行为类型指数(soil behavior type index)的概念,用于划分液化土的类型,计算见式(7)~(9)。

$$I_C = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5} \tag{7}$$

$$Q = [(q_c - \sigma_v)/p_a][(p_a/\sigma'_v)^n] \tag{8}$$

$$F = [f_s/(q_c - \sigma_v)]100\% \tag{9}$$

式中:I_C为土行为类型指数;Q为归一化锥尖阻力;F为归一化摩阻比;f_s为实测侧壁摩阻力,kPa;

Robertson P K等人提出了确定I_C的主要流程。

1)先设$n=1.0$,按式(7)~(9)计算出I_C,如$I_C>2.6$,表明地层黏粒含量高,不会液化,但需要现场取土样进行颗粒分析、液塑限和天然含水量试验,并采用一些判别标准以确认,如中国准则。NCEER[14]引用中国准则为:只有当同时满足如下3个条件时,才会发生液化:黏粒(粒径<5 μm)含量<15%、液限<35%、天然含水量>0.9倍液限。

2)如$I_C<2.6$,土壤很可能为粗颗粒,重新设$n=0.5$,并重新计算C_Q和Q,按公式(7)~(9)再次计算I_C,如重新计算的$I_C<2.6$,土划分为非塑性土和粗颗粒,此I_C值可用于估算液化抗力;如$I_C>2.6$,土可能为粉土,具有塑性,再次设$n=0.7$,按式(5)~(6)再次计算q_{c1N},用式(7)再次计算I_C(现场取土样试验确定土的类型,采用其他判别标准,如中国准则)

利用最终的I_C、式(10)计算$(q_{c1N})_{cs}$。

等效纯净砂条件下归一化锥尖贯入阻力计算见式(10)。

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c q_{c1N} \tag{10}$$

式中:$(q_{c1N})_{cs}$为等效纯净砂条件下归一化锥尖贯入阻力;K_c为土体粒径特征的修正系数。当$I_C \leqslant 1.64$,$K_c=1.0$;当$I_C>1.64$,$K_c = -4.03I_c^4 + 5.581I_c^3 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88$。

纯净砂条件下,在震级$M=7.5$级时的*CRR*计算见式(11)~(12)。

当$(q_{c1N})_{cs} < 50$,

$$CRR_{M=7.5} = 0.833[(q_{c1N})_{cs}/1\,000] + 0.05 \tag{11}$$

当$50 \leqslant (q_{c1N})_{cs} < 160$,

$$CRR_{M=7.5} = 93[(q_{c1N})_{cs}/1\,000]^3 + 0.08 \tag{12}$$

式中:$CRR_{M=7.5}$为纯净砂震级条件下震级$M=7.5$级的*CRR*。公式在$(q_{c1N})_{cs}<160$时有效,当$(q_{c1N})_{cs}\geqslant 160$时,地层因足够密实,可直接判别为不液化。

Seed H B和Idriss I M于1982年引入震级标定系数(*MSF*),以将$CRR_{M=7.5}$修正为场地实际遭遇震级的CRR_M,可用表1确定*MSF*。

表1 震级标定系数(*MSF*)表

Tab.1 Magnitude scaling factors

M	*MSF*
5.5	2.20~2.80
6.0	1.76~2.10
6.5	1.44~1.60
7.0	1.19~1.25
7.5	1.00
8.0	0.84
8.5	0.72

表1中,当$M<7.5$时,*MSF*为范围值,基于安全考虑取下限值,从而建立M与*MSF*的多项式关系[22],见式(13)。

$$MSF = -0.026\,7M^3 + 0.68M^2 - 6.033\,3M + 19.247 \tag{13}$$

综上所述,地层抗液化安全系数(*FS*)计算见式(14)。

$$FS = \frac{CRR_M}{CSR_M} = \left(\frac{CRR_{M=7.5}}{CSR_M}\right)MSF \tag{14}$$

1.2 Boulanger-Idriss 2014法

根据世界各地大量的地震实例,美国加州大学教授Boulanger R W和Idriss I M按NCEER法思路,于2010年提出了不同的基于静力触探试验的液化判别方法[19],并于2014年改进了该方法[15]。

如前所述,该方法框架与NCEER法框架基本相同,主要差异体现在对*CRR*的计算。

1.2.1 *CSR*

可用式(1)来计算*CSR*,对于其中的r_d,Boulanger R M和Idriss I M采用了式(15)~(17)来确定。

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z)M] \tag{15}$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126\sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \tag{16}$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118\sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \tag{17}$$

式中：$\alpha(z)$、$\beta(z)$是测试点深度 z 的无量纲函数；式(16)～(17)中正弦函数内的单位为弧度。

1.2.2　*CRR*

Boulanger R M 和 Idriss I M 提出了某震级下循环剪切抗力比 $CRR_{M,\sigma_v'}$的计算方法，见式(18)。

$$CRR_{M,\sigma_v'} = CRR_{M=7.5,\sigma_v'=1atm} \cdot MSF \cdot K_\sigma \tag{18}$$

式中：$CRR_{M=7.5,\sigma_v'=1atm}$为有效应力等同 1 个标准大气压和震级 7.5 级条件下地层的 CRR；K_σ 为上覆地层修正系数；C_σ 为与 q_{c1Ncs}有关的系数，具体计算见式(19)～(23)。

$$CRR_{M=7.5,\sigma_v'=1atm} = \exp\left\{\frac{(q_{c1N})_{cs}}{113}+\left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1\,000}\right]^2-\left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{140}\right]^3+\left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{137}\right]^4-2.8\right\} \tag{19}$$

$$MSF = 1+(MSF_{max}-1)\left\{\frac{\exp\left(\frac{-M}{4}\right)-\exp\left(\frac{-7.5}{4}\right)}{\exp\left(\frac{-5.25}{4}\right)-\exp\left(\frac{-7.5}{4}\right)}\right\} \tag{20}$$

$$MSF_{max} = 1.09+\left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{180}\right]^3 \leqslant 2.2 \tag{21}$$

$$K_\sigma = 1-C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma_v'}{P_a}\right) \leqslant 1.1 \tag{22}$$

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3-8.27[(q_{c1N})_{cs}]^{0.264}} \leqslant 0.3 \tag{23}$$

式中：$(q_{c1N})_{cs}$取值范围 21～254，计算见式(24)。

$$(q_{c1N})_{cs} = q_{c1N}+\Delta q_{c1N} \tag{24}$$

式中：Δq_{c1N}为关于细粒含量的修正值，可理解为将在一定细粒含量地层条件下的锥尖阻力，换算成等效纯净砂地层条件下(细粒含量≤5%)的锥尖阻力的修正值。

q_{c1N}计算见式(25)。

$$q_{c1N} = C_n q_{cN} = C_n \frac{q_c}{p_a} \tag{25}$$

式中：C_n 为修正上覆有效应力的系数，通过迭代方式确定，计算见式(26)～(28)。

$$C_n = \left(\frac{p_a}{\sigma_v'}\right)^m \leqslant 1.7 \tag{26}$$

$$m = 1.338-0.249[(q_{c1N})_{cs}]^{0.264} \tag{27}$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9+\frac{q_{c1N}}{14.6}\right)\exp\left[1.63-\frac{9.7}{FC+2}-\left(\frac{15.7}{FC+2}\right)^2\right] \tag{28}$$

式中：FC 为细粒含量；m 为与$(q_{c1N})_{cs}$相关的系数。

2　地震实例判别

本次效果分析利用 Boulanger R M 和 Idriss I M 两位学者于 2014 年发表的基于静力触探试验进行液化判别研究报告中表 3.1 所列出的 253 个实例[19]，震级从 5.9～9.0 级，场地地表最大水平加速度 0.88～8.24 m/s^2。由于铁路规范和地震区划图所涉及的地震动峰值加速度范围的原因，本次分析剔除了 2 个地表最大水平加速度 > 7.36 m/s^2 的实例，最终参与分析的为 251 个实例。

该报告将地表沉降、开裂、喷砂、侧向位移等现象判别为液化。原报告中有 2 个特殊实例，原描述用词为“Marginal”，即处于液化边缘或临界状态。从安全角度将这 2 例按液化发生考虑。

根据前述两种国外方法和铁路规范法，对 251 个地震实例分别计算出 2 种国外方法的$(q_{c1N})_{cs}$、q_{c1N}、r_d、K_σ、MSF、CSR_M、CSR_M、安全系数，以及铁路规范法的影响系数、摩阻比、锥尖阻力基准值、锥尖阻力临界值和安全系数。

由于铁路规范法与国外 2 种方法的差异，需要处理如下部分输入数据：采用实例中的地表最大水平加速度代替规范中地震动峰值加速度；根据地震区划图确定每个实例的地震动峰值加速度的分区值(0.1、0.15、0.2、0.3、0.4 g)，再按铁路规范[2]表 5.5.18－1 确定每个实例的临界锥尖阻力基本值。

3　判别结果与讨论

用 3 种液化判别方法判别 251 个地震实例，结果与实际情况的对比见表 2。

表 2　液化判别 251 个地震实例的结果与实际情况对比表

Tab. 2　Comparison of the results of liquefaction assessment for 251 earthquake cases with the actual situation

判别结果与实际相比较	Boulanger-Idriss 2014 法		NCEER 法		铁路规范法	
	数量/个	百分比	数量/个	百分比	数量/个	百分比
一致(判别成功)	213	84.9%	199	79.3%	194	77.29%
保守	32	12.7%	19	7.6%	26	10.36%
危险	6	2.4%	33	13.1%	31	12.35%

注：一致(判别成功)指判别结果与实际情况一致；保守指判别为液化，而实际情况为不液化；危险指判别为不液化，而实际情况为液化。后两种判别结果与实际情况均不一致。

依据 251 个实例，Boulanger-Idriss 2014 法判别成功率（有文献用回判成功率[23]）最高，达到 84.9%，其次 NCEER 法 79.3%，铁路规范法较 NCEER 法稍差。从安全角度来看，Boulanger-Idriss 2014 法的安全性也最高，仅出现 6 例结果危险的判别，其次为铁路规范法，出现 31 例结果危险的判别，NCEER 法安全性较铁路规范法稍差，出现 33 例判别结果危险的判别。

根据各实例的地震动水平加速度和中国地震区划图[9]附表 G.1 中地震动峰值加速度与地震烈度对照表，将实例地震烈度为 3 类，即为 7 度、8 度和 9 度，分别比较 3 种判别法的结果与实际情况，详见表 3～5。

9 度地震的 74 个地震实例的判别结果与实际情况对比见表 3。Boulanger-Idriss 2014 法成功率最高，其他两种方法结果一致。Boulanger-Idriss 2014 法安全性也最好，无危险判别，NCEER 法安全性稍好于铁路规范法。

表 3　烈度为 9 度的 74 个地震实例的液化判别结果与实际情况对比表

Tab.3　Comparison of the results of liquefaction assessment for 74 earthquake cases with the actual situation (seismic intensity = 9)

判别结果与实际相比较	Boulanger-Idriss 2014 法		NCEER 法		铁路规范法	
	数量/个	百分比	数量/个	百分比	数量/个	百分比
一致（判别成功）	65	87.8%	63	85.1%	63	85.1%
保守	9	12.2%	6	8.1%	4	5.4%
危险	0	0	5	6.8%	7	9.5%

8 度地震的 131 个地震实例的判别结果与实际情况对比见表 4。Boulanger-Idriss 2014 法的成功率最高，达到 88.5%，NCEER 法 81.7% 其次，铁路规范法 74.05% 为最低，三者之间有较显著差距。Boulanger-Idriss 2014 法安全性也最好，危险判别仅 3.1%，NCEER 法安全性其次，危险判别 13.0%，铁路规范法最差，危险判别 13.74%。

表 4　烈度为 8 度的 131 个地震实例的液化判别结果与实际情况对比表

Tab.4　Comparison of the results of liquefaction assessment for 131 earthquake cases with the actual situation (seismic intensity = 8)

判别结果与实际相比较	Boulanger-Idriss 2014 法		NCEER 法		铁路规范法	
	数量/个	百分比	数量/个	百分比	数量/个	百分比
一致（判别成功）	116	88.5%	107	81.7%	97	74.05%
保守	11	8.4%	7	5.3%	16	12.21%
危险	4	3.1%	17	13.0%	18	13.74%

7 度地震的 46 个实例的判别结果与实际情况对比见表 5。铁路规范法成功率最高，为 73.92%；Boulanger-Idriss 2014 法为 69.6%；NCEER 法最差，为 63.0%。Boulanger-Idriss 2014 法安全性最好，危险判别仅 4.3%；铁路规范法安全性其次，为 13.04%；NCEER 法最差，达 23.9%。

表 5　烈度为 7 度的 46 个地震实例的液化判别结果与实际情况对比表

Tab.5　Comparison of the results of liquefaction assessment for 46 earthquake cases with the actual situation (seismic intensity = 7)

判别结果与实际相比较	Boulanger-Idriss 2014 法		NCEER 法		铁路规范法	
	数量/个	百分比	数量/个	百分比	数量/个	百分比
一致（判别成功）	32	69.6%	29	63.0%	34	73.92%
保守	12	26.1%	6	13.0%	6	13.04%
危险	2	4.3%	11	23.9%	6	13.04%

对比 3 种判别法本身在不同烈度条件下的判别结果可知，各判别法的判别成功率和安全性均随烈度的增加而提高。

总体而言，2 种基于应力的外国方法所涉及的参数多，计算过程复杂，铁路规范法涉及的参数不多，使用方便，计算过程简单；Boulanger-Idriss 2014 法判别成功率和安全性均最好，其他两种在判别成功率上较 Boulanger-Idriss 2014 法稍差，但安全性较 Boulanger-Idriss 2014 法差别较大；NCEER 法和铁路规范法之间的判别效果差别不大。

表 6 为判别结果危险的部分实例（12 个），各方法的方法危险判别实例数量和危险判别实例安全系数的平均值分别为：Boulanger-Idriss 2014 法 5 例和 1.197，NCEER 法 11 例和 1.35，铁路规范法 9 例和 1.469，即判别效果排列顺序为 Boulanger-Idriss 2014 法 > NCEER 法 > 铁路规范法。Boulanger-Idriss 2014 法共有 5 例结果

危险的判别,其中有 3 例的 *FS* 为 1.02 ~ 1.039,判别结果接近 1.0,即更接近实际情况。

3 种方法判别结果皆呈保守的 13 个实例见表 7。3 种方法的判别安全系数平均值为:Boulanger-Idriss 2014 法 0.567,NCEER 法 0.615,铁路规范法 0.576。判别效果排列顺序为 NCEER 法 > Boulanger-Idriss 2014 法 ≈ 铁路规范法,即 NCEER 法在保守判别实例中更接近实际情况,其他两种方法的判别效果很接近。

表 6　判别结果危险的 12 个实例表

Tab. 6　12 cases of dangerous assessment outcomes

地震时间	地震场地	实例信息			Boulanger-Idriss 2014 法		NCEER 法		铁路规范法	
		震级	地表最大水平加速度 /($m \cdot s^{-2}$)	是否发生液化	抗液化安全系数	判别结果与实际相比较	抗液化安全系数	判别结果与实际相比较	抗液化安全系数	判别结果与实际相比较
1964-06-16	日本新潟地震 D-Kawagisho-cho	7.6	1.59	是	0.620	一致	0.755	一致	1.16	危险
1980-06-09	墨西哥墨西卡利市地震 Delta Site 4	6.33	1.86	是	1.250	危险	1.342	危险	0.51	一致
1983-10-28	美国爱达荷州博拉峰地震 Whiskey Springs Site 2	6.88	4.91	是	0.911	一致	1.897	危险	1.03	危险
1983-10-28	美国爱达荷州博拉峰地震 Whiskey Springs Site 3	6.88	4.91	是	0.507	一致	1.383	危险	2.2	危险
1987-03-02	新西兰埃奇库姆地震 Awaroa Farm AWA001	6.6	3.63	是	1.660	危险	1.253	危险	1.07	危险
1987-11-24	美国迷信山地震(两次地震中的震级 M=6.5) Wildlife B	6.54	2.02	是	1.016	危险	1.335	危险	1.1	危险
1989-10-18	美国洛马普里塔地震 State Beach Pathway	6.93	2.75	是	1.039	危险	1.612	危险	0.74	一致
1989-10-18	美国洛马普里塔地震 Jefferson Ranch(JRR.148)	6.93	2.06	是	0.729	一致	1.072	危险	1.62	危险
1989-10-18	美国洛马普里塔地震 Pajaro Dunes(PD1.44)	6.93	2.16	是	0.899	一致	1.332	危险	1.56	危险
1989-10-18	美国洛马普里塔地震 Tanimura(TAN.103)	6.93	1.28	是	0.952	一致	1.178	危险	2.19	危险
2011-02-22	新西兰基督城地震 KAN.26c	6.2	1.78	是	1.021	危险	1.212	危险	0.57	一致
2010-09-04	新西兰达菲尔德地震 SNB.01	7.0	1.67	是	0.928	一致	1.238	危险	1.3	危险

表 7　判别结果保守的 13 个实例表

Tab. 7　13 cases of conservative assessment outcomes

地震时间	地震场地	实例信息			Boulanger-Idriss 2014 法		NCEER 法		铁路规范法	
		震级	地表最大水平加速度 /($m \cdot s^{-2}$)	是否发生液化	抗液化安全系数	判别结果与实际相比较	抗液化安全系数	判别结果与实际相比较	抗液化安全系数	判别结果与实际相比较
1975-02-04	中国海城地震第 17 中学	7.0	2.943	否	0.497	保守	0.448	保守	0.364	保守
1976-07-27	中国唐山地震 T36	7.6	1.57	否	0.721	保守	0.784	保守	0.989	保守
1987-03-02	新西兰埃奇库姆地震 Brady Farm BDY004	6.6	3.92	否	0.617	保守	0.709	保守	0.751	保守
1987-03-02	新西兰埃奇库姆地震 Brady Farm BDY004	6.6	3.92	否	0.393	保守	0.571	保守	0.507	保守
1987-03-02	新西兰埃奇库姆地震 Whakatane Board Mill WBM001&2	6.6	2.65	否	0.376	保守	0.603	保守	0.631	保守
1987-11-24	美国迷信山地震 Radio Tower-Unit B(R2)	6.54	1.96	否	0.806	保守	0.438	保守	0.239	保守
1989-10-18	美国洛马普里塔地震 Leonardini(LEN.37)	6.93	2.16	否	0.553	保守	0.645	保守	0.618	保守
1989-10-18	美国洛马普里塔地震 Radovich(RAD.98)	6.93	3.73	否	0.484	保守	0.726	保守	0.977	保守
1989-10-18	美国洛马普里塔地震 McGowan Farm(MCG.136)	6.93	2.55	否	0.578	保守	0.695	保守	0.708	保守
1989-10-18	美国洛马普里塔地震 McGowan Farm(MCG.138)	6.93	2.55	否	0.671	保守	0.581	保守	0.358	保守
1995-01-16	日本兵库县南部地震 Nagashi Park	6.9	6.38	否	0.517	保守	0.748	保守	0.447	保守
2010-09-04	新西兰达菲尔德地震 SHY.09	7.0	1.83	否	0.591	保守	0.664	保守	0.536	保守
2010-09-04	新西兰达菲尔德地震 RCH.14	7.0	1.8	否	0.565	保守	0.378	保守	0.357	保守

需要指出，黏粒（细粒）含量对液化判别影响很大，铁路规范法的成功率和安全性稍差与此相关。该方法均未要求颗粒分析试验，而是通过摩阻比或塑性指数确定黏粒含量修正系数，再计算液化临界贯入阻力，虽然摩阻比/塑性指数与黏粒含量相关，但不能直接体现后者。NCEER 法虽然也要求采样进行颗粒分析试验，但试验结果用于辅助判别（如前述中国准则），而不是直接用于计算 $CRR_{M=7.5}$。Boulanger-Idriss 2014 法就对细粒含量进行了修正，其判别效果明显好于前两者判别效果。

针对目前铁路规范法中的上述问题，这里按实例中细粒含量而不是按摩阻比重新划分土的类型，进而重新进行液化判别计算。按实例中的细粒含量数据，大部分实例的地层应划分为砂土（黏粒含量修正系数取 1.0），重新计算后，铁路规范法判别结果的成功率为 80.5%，保守判别 18.3%，危险判别 1.2%。和前面按摩阻比划分土的类型的方法（表 2 中铁路规范法结果）相比，除成功率略有提高外，且危险判别率大幅下降，判别法的安全性大大增加，即就成功率而言，Boulanger-Idriss 2014 法 > 铁路规范法 > NCEER 法；安全性上，铁路规范法 > Boulanger-Idriss 2014 法 > NCEER 法。故建议在利用静力触探的铁路规范法中，需现场采样进行颗粒分析和液塑限试验，据此划分土的类型，使黏粒含量修正系数取值更合理。

综上所述，当按摩阻比重新划分土的类型时，3 种方法中的 Boulanger-Idriss 2014 法从成功率和安全性上，均优于其它两种方法（当然这与该方法是在 NCEER 法基础上改进并参考了上述 251 个地震实例有一定关系）；当按颗粒分析结果划分土的类型时，Boulanger-Idriss 2014 法的成功率仍最高，但铁路规范法的安全性最好。

4 结论和建议

本文采用 2 种国外基于静力触探试验结果的判别地震液化方法和中国铁路规范法，对 251 个已发生地震的实例进行液化判别验算和讨论，得出如下结论和建议。

1）当按摩阻比划分土的类型，成功率上，Boulanger-Idriss 2014 法 > NCEER 法 > 铁路规范法；安全性上，Boulanger-Idriss 2014 法 > 铁路规范法 > NCEER 法，NCEER 法与铁路规范法效果差别不大。

2）各判别法本身的判别成功率和安全性均随地震烈度的增加而提高。

3）当按颗粒分析结果划分土的类型，成功率排序与 1）相同；安全性上，铁路规范法 > Boulanger-Idriss 2014 法 > NCEER 法。

4）建议海外项目同时采用 Boulanger-Idriss 2014 法与 NCEER 法，中国项目采用铁路规范法时，建议用颗粒分析和液塑限试验结果取代摩阻比以划分土体类型，改进判别效果。

参考文献：

[1] 刘启旺，杨玉生，刘小生，等. 标贯击数液化判别方法的比较[J]. 地震工程学报，2015，37(3)：794-802.
Liu Qiwang, Yang Yusheng, Liu Xiaosheng, et al. Comparision of standard penetration test (SPT) methods for evaluating seismic liquefaction potential [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37 (3): 794-802.

[2] TB 10018—2018 铁路工程地质原位测试规程[S].
TB 10018—2018 Code for in-situ testing of railway engineering geology [S].

[3] GB 50111—2006(2009 版)铁路工程抗震设计规范[S].
GB 50111—2006(2009 Version) Code for seismic design of railway engineering [S].

[4] JTG 3223—2021 公路工程地质原位测试规程[S].
JTG 3223—2021 Code for in-situ testing of highway engineering geology [S].

[5] GB 50021—2001(2009 版) 岩土工程勘察规范[S].
GB 50021—2001(2009 Version) Code for investigation of geotechnical engineering [S].

[6] 化建新，郑建国. 工程地质手册[M]. 第五版. 北京：中国建筑工业出版社，2018：738-739.
Hua Jianxin, Zheng Jianguo. Handbook of engineering geology [M]. 5th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2018: 738-739.

[7] DGJ 08－11—2018 地基基础设计标准[S].
DGJ 08－11—2018 Foundation design code [S].

[8] DB 37/5052—2015 建筑岩土工程勘察设计规范[S].
DB 37/5052—2015 Code for geotechnical engineering investigation and design of buildings [S].

[9] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S].
GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China [S].

[10] 李兆炎，王永志，袁晓铭. 适用于新疆巴楚地区的 CPT 液化判别新方法[J]. 岩土工程学报，2013，35(增刊 1)：140-145.
Li Zhaoyan, Wang Yongzhi, Yuan Xiaoming. New CPT-based prediction method for soil liquefaction applicable to Bachu region of Xinjiang [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (S1): 140-145.

[11] 孔祥兴. 静力触探判别饱和砂性土液化公式的探讨[J]. 江苏地质,1993,17(增刊 1):205-208.
Kong Xiangxing. Discussion on the formula of liquefied saturated sandy soil discriminated by the static sounding method in Urban District of Huaiyin, Jiangsu Province [J]. Jiangsu Geology, 1993, 17 (S1): 205-208.

[12] 王树成. 利用静力触探试验判别砂土基准值的探讨[J]. 吉林建筑工程学院学报,1996,13(2):17-21.
Wang Shucheng. The discussion of judging the base value of liquidation of sandy soil by means of static sounding test [J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, 1996, 13 (2): 17-21.

[13] 孙东风,张宏明,刘　攀. 剪切波速与静力触探在砂土液化判别中的应用[J]. 港工技术, 2018, 55 (增刊 1):135-139.
Sun Dongfeng, Zhang Hongming, Liu Pan. Shear wave velocity test and static cone penetration test used for discrimination of liquefaction of sandy soils [J]. Port Engineering Technology, 2018, 55 (S1): 135-139.

[14] Youd T L, Idriss 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, 127 (4): 297-313.

[15] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97 (9): 1249-1273.

[16] Seed H B, Idriss I M. Analysis of soil liquefaction: Niigata Earthquake [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93 (3): 83-108.

[17] Idriss I M, Boulanger R W. Soil liquefaction during earthquakes [M]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 2008.

[18] Idriss I M, Boulanger R W. SPT-based liquefaction triggering procedures: UCD /CGM-10 /02 [R]. Davis, California: Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 2010.

[19] Boulanger R W, Idriss I M. CPT and SPT-based liquefaction triggering procedures: UCD /CGM-14 /01 [R]. Davis, California: Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, 2014.

[20] Robertson P K, Wride C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35 (3): 442-459.

[21] Day R W. Geotechnical earthquake engineering handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 2002: 6. 10-6. 17.

[22] 赵拓宇. 三种用标准贯入判别地震液化方法的效果分析[J]. 天然气与石油,2024,42(2):137-144.
Zhao Tuoyu. Analysis on the effect of three earthquake-induced liquefaction triggering procedures using Standard Penetration Test [J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42 (2): 137-144.

[23] 陈国兴,张克绪,谢君斐. 液化判别的可靠性研究[J]. 地震工程与工程振动,1991,11(2):85-96.
Chen Guoxing, Zhang Kexu, Xie Junfei. Research on reliability of liquefaction prediction [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1991, 11 (2): 85-96.