

Application of Contrastive Study on Sand Liquefaction Discrimination Method Based on Standard Penetration Test (SPT) in Pakistan PKM Expressway Project

Lei Wang, Hang Zhang

CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan Hubei
Email: 544393327@qq.com

Received: Feb. 25th, 2019; accepted: Mar. 11th, 2019; published: Mar. 18th, 2019

Abstract

The liquefaction of sand in earthquake is easy to cause uneven settlement of the pavement and structure, leading to safety problems. Aiming at the liquefaction problem, this paper analyzes its mechanism and influencing factors and respectively introduces the identification methods of the saturated sand liquefaction based on standard penetration test at home and abroad, and compares the processing methods of hammering times in the test at home and abroad, and discusses the similarities and differences between different specifications. In the case of the PKM expressway project, the difference between the discriminant results of different specification is compared.

Keywords

Sand Liquefaction, Liquefaction Mechanism, Standard Penetration Test

基于标准贯入试验的国内外砂土液化判别法在巴基斯坦PKM高速公路工程中的应用对比研究

王磊, 张行

中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉
Email: 544393327@qq.com

收稿日期: 2019年2月25日; 录用日期: 2019年3月11日; 发布日期: 2019年3月18日

摘要

地震灾害中砂土液化易引起路基不均匀沉降, 造成路面及桥涵结构物破坏, 引起安全问题。本文针对砂土液化问题, 分析了砂土液化机理及影响因素, 分别介绍了国内外规范基于标准贯入试验判别饱和砂土液化的判别方法, 并对比了国内外标准贯入试验锤击数的处理方法, 探讨了不同规范之间的异同点。结合巴基斯坦PKM高速公路工程案例, 对比了不同规范判别结果的差异。

关键词

砂土液化, 液化机理, 标准贯入试验

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

近年来, 随着我国“一带一路”战略在海外的广泛开展, 中国企业在国外的基础设施项目日益增多。由中国建筑股份有限公司承建的巴基斯坦 PKM (Peshawar-Karachi-Motorway) 高速公路项目是贯穿巴基斯坦全境的重要大动脉。

项目沿线地层为印度河冲洪积平原, 地表以下 1~3 m 为粉土, 其下均为粉细砂(粉细砂典型级配曲线见图 1), 地下水位较浅, 部分路段地下水位 0.5~3 m。工程所在地抗震设防烈度为 7~8 度, 路基存在砂土液化的可能, 需进行场地砂土液化评价。

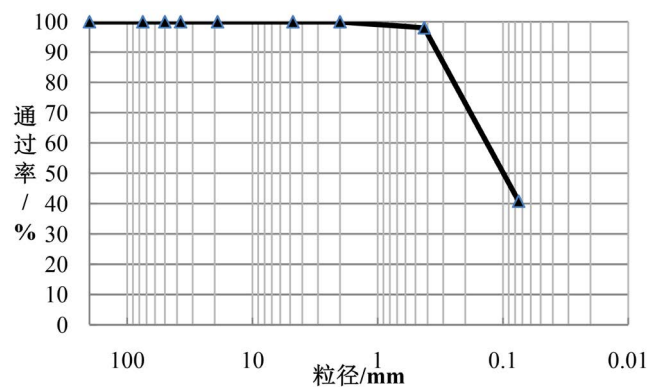


Figure 1. Typical particle size distribution of sand in the PKM project
图 1. PKM 项目砂土典型粒径分布

砂土液化是地震灾害中急需解决的常见工程问题, 一旦发生液化就会对建筑结构造成一系列破坏[1]。因此, 在工程勘察中一般对地面下存在饱和砂土、粉土且地震设防烈度在 7 度及以上的场地进行液化判别。我国《公路工程地质勘察规范》(JTG C20-2011)规定, 地震动峰值加速度大于或等于 0.1 g 的地区, 地面以下 20 m 的深度范围内有饱和砂土、粉土时, 应进行地震液化工程地质勘察。

NCEER (National Center for Earthquake Engineering Research)判别法是由美国学者提出的一种

Seed 简化法,其实质是根据矩震级 $M_w = 7.5$ 级下的砂土抗液化阻力与土层中引起的等效循环应力之间的关系,来判断砂土液化问题。

基于标准贯入试验的国内外砂土液化判别方法对比研究有很多,而针对公路工程的砂土液化应用对比研究较少。本文依托巴基斯坦 PKM 高速公路项目,针对国内外两种方法分别进行计算与判别,分析了两种基于标准贯入试验的砂土液化判别机理,对比了不同规范判别结果的差异,为类似工程的砂土液化判别提供借鉴。

2. 砂土液化反应机理与影响因素

2.1. 砂土液化反应机理

地下水位以下的松散、饱和砂土在受到地震瞬间作用时,土颗粒之间有发生振动密实,孔隙减小,若孔隙水不能及时排出,必然导致孔隙水压力急剧上升,产生超静孔隙水压力,这就使原来由砂粒通过其接触点所传递的压力(有效压力)减小,当有效压力完全消失时,砂层会完全丧失抗剪强度和承载能力,变得像液体一样的状态,即通常所说的砂土液化现象。

砂土液化时可能发生地表喷水冒砂、地面塌陷、地基不均匀沉降、地裂等现象,从而造成路基或构筑物发生破坏。

2.2. 砂土液化影响因素

砂土液化影响因素较多,主要有:

1) 地震烈度:地面振动强度越大,液化可能性越大;

2) 震动持续时间:持续时间越长,液化越严重;

3) 上覆非液化土层厚度:上覆非液化土层厚度越厚,侧压力越大,越不容易液化;

4) 地下水位及上覆土层排水条件:水位越高,越容易液化,上覆土层透水性越好,砂土层中的水就会通过上覆土层排出,超静孔隙水压力消散的快,越不容易液化;

5) 土体的级配与粒径:级配均匀的砂土比不均匀的更容易液化,不均匀系数越小,越容易发生液化。粗砂比粉细砂更难液化,因粗砂的超静孔隙水压力消散的快,粗砂颗粒比粉细砂更难处于悬浮状态;

6) 砂土的相对密度:饱和和松散的砂土,比密实砂土更容易液化,松散初始孔隙比越大,孔隙水压力传递的快,在不排水条件下,超静孔隙水压力积累的快,容易液化,粗砂反之。当砂土相对密度超过 65% (6 度)、70% (7 度)、75% (8 度)、85% (9 度)时,可不考虑砂土液化的影响[2];

7) 砂土结构性:包括砂土的颗粒大小、排列,胶结物和均匀性等。

综上所述,砂土液化是多种因素共同作用的结果,总结起来,主要包括:外因(地震荷载条件、砂土埋藏条件)、内因(砂土应力历史及土性条件) [3] [4] [5] [6]。

3. 基于标准贯入试验国内外液化判别方法对比

国内外基于标贯击数判定砂土液化方法较多,本文将公路行业《公路工程地质勘察规范》(JTG C20-2011)与美国 ASTM 规范针对砂土液化判别进行比较,探讨不同规范之间的差异。

3.1. 《公路工程地质勘察规范》砂土液化判别方法

目前,公路行业砂土液化判别分为初判和复判,初判时,综合考虑了地层地质年代、粉土的黏粒含量、基础埋置深度及上覆非液化土层厚度和地下水位埋深等条件,当符合规范规定的情况时可不考虑液化影响。经初判认为有可能液化的土层,可采用标准贯入试验判别法进行复判。当土层实测的修正标准

贯入锤击数 N_1 小于修正液化临界标准贯入锤击数 N_{cr} 时应判别为液化[7]。

$$N_1 = C_n N \tag{1}$$

$$N_{cr} = \left[11.8 \left(1 + 13.06 \frac{\sigma_0}{\sigma_e} K_h C_v \right)^{0.5} - 8.09 \right] \xi \tag{2}$$

式中： N 为实测的标准贯入锤击数； C_n 为标准贯入锤击数的修正系数，按表 1 采用； σ_0 为标准贯入点处土的总上覆压力(kPa)； σ_e 为标准贯入点处土的有效上覆压力(kPa)； K_h 为水平地震系数，按表 2 采用； C_v 为地震剪应力随深度的折减系数，按表 3 采用； ξ 为黏粒含量修正系数， $\xi = 1 - 0.17\rho_c^{0.5}$ ； ρ_c 为黏粒含量百分率(%)。

Table 1. Correction factor for the blow counts of SPT

表 1. 标准贯入锤击数的修正系数 C_n

σ_0 (kPa)	0	20	40	60	80
C_n	2	1.70	1.46	1.29	1.16
σ_0 (kPa)	100	120	140	160	180
C_n	1.05	0.97	0.89	0.83	0.78
σ_0 (kPa)	200	220	240	260	280
C_n	0.72	0.69	0.65	0.60	0.58
σ_0 (kPa)	300	350	400	450	500
C_n	0.55	0.49	0.44	0.42	0.40

注：表格数据来源于 JTG C20-2011，公路工程地质勘察规范。

Table 2. The horizontal seismic influence coefficient

表 2. 水平地震影响系数 K_h

抗震设防烈度	7	8	9
水平地震系数 K_h	0.1	0.2	0.4

注：表格数据来源于 JTG C20-2011，公路工程地质勘察规范。

Table 3. Reduction coefficient of seismic shearing stress with depth

表 3. 地震剪应力随深度的折减系数 C_v

d_s (m)	1	2	3	4	5
C_v	0.994	0.991	0.986	0.976	0.965
d_s (m)	6	7	8	9	10
C_v	0.958	0.945	0.935	0.920	0.902
d_s (m)	11	12	13	14	15
C_v	0.884	0.866	0.844	0.822	0.794
d_s (m)	16	17	18	19	20
C_v	0.741	0.691	0.647	0.631	0.612

注：表格数据来源于 JTG C20-2011，公路工程地质勘察规范。

在不同的抗震烈度下，分别分析不同地下水位 d_w 及标贯深度 d_s 时临界标贯锤击数变化规律(砂土的黏粒含量 ρ_c 取为 3)见图 2。

由图 2 可以看出：1) 临界标贯锤击数随着砂土埋深的增加呈现先增大后减小的变化。在设计地震烈度为 7 度， $d_w = 0.5$ m 条件下，0~6 m 范围内，随着砂土埋深增加，临界标贯锤击数逐渐增加；当砂土埋

深在 6~20 范围时, 临界标贯锤击数随着砂土埋深增大而逐渐减少; 当抗震设防烈度为 8 度或者 9 度时, 其变化趋势与抗震设防烈度为 7 度的情况类似; 2) 在相同砂土埋深和抗震设防烈度条件下, 临界标贯锤击数随着地下水位埋深增加而减少。

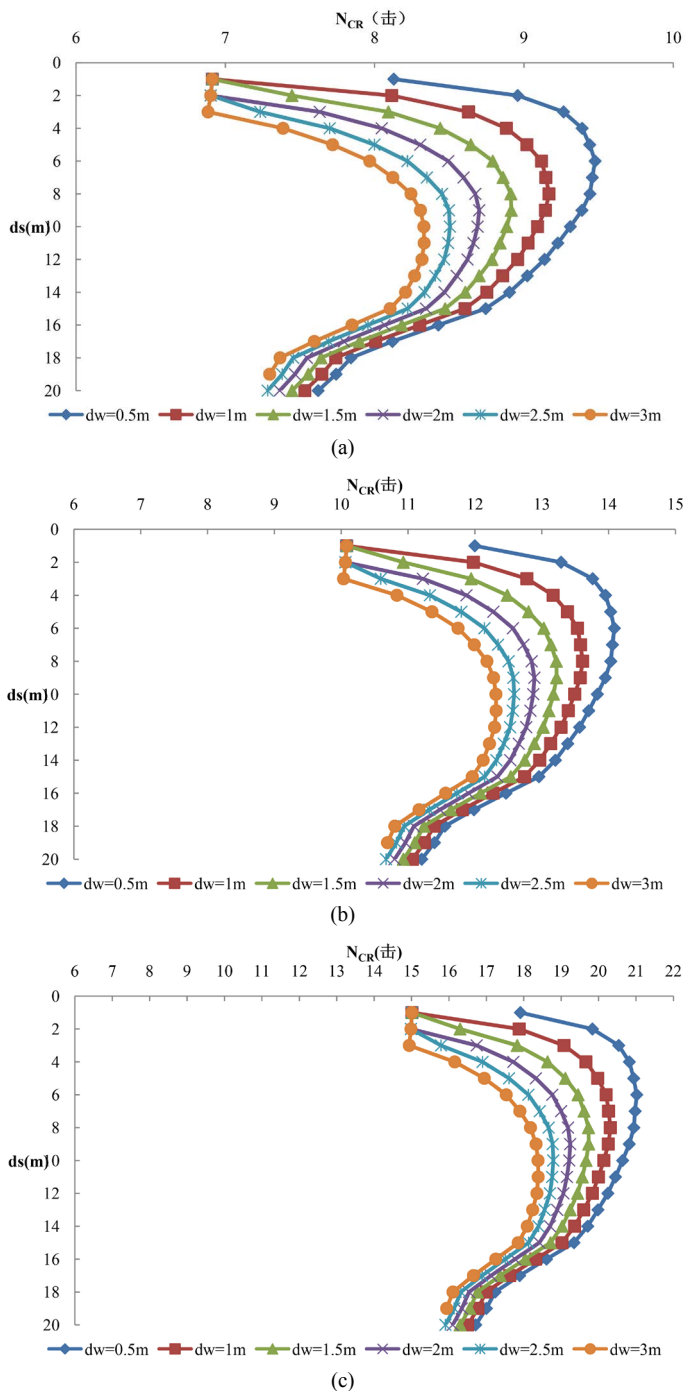


Figure 2. The relation curves between critical blow counts of SPT and burial depth of sand layer at different water levels. (a) 7 degree seismic fortification intensity; (b) 8 degree seismic fortification intensity; (c) 9 degree seismic fortification intensity

图 2. 不同水位下临界标贯锤击数与砂土埋深关系曲线。(a) 抗震设防烈度 7 度; (b) 抗震设防烈度 8 度; (c) 抗震设防烈度 9 度

在不同黏粒含量 ρ_c 下(地下水位 $d_w = 3$ m), 分析不同标贯深度 d_s 时临界标贯锤击数变化规律见图 3。

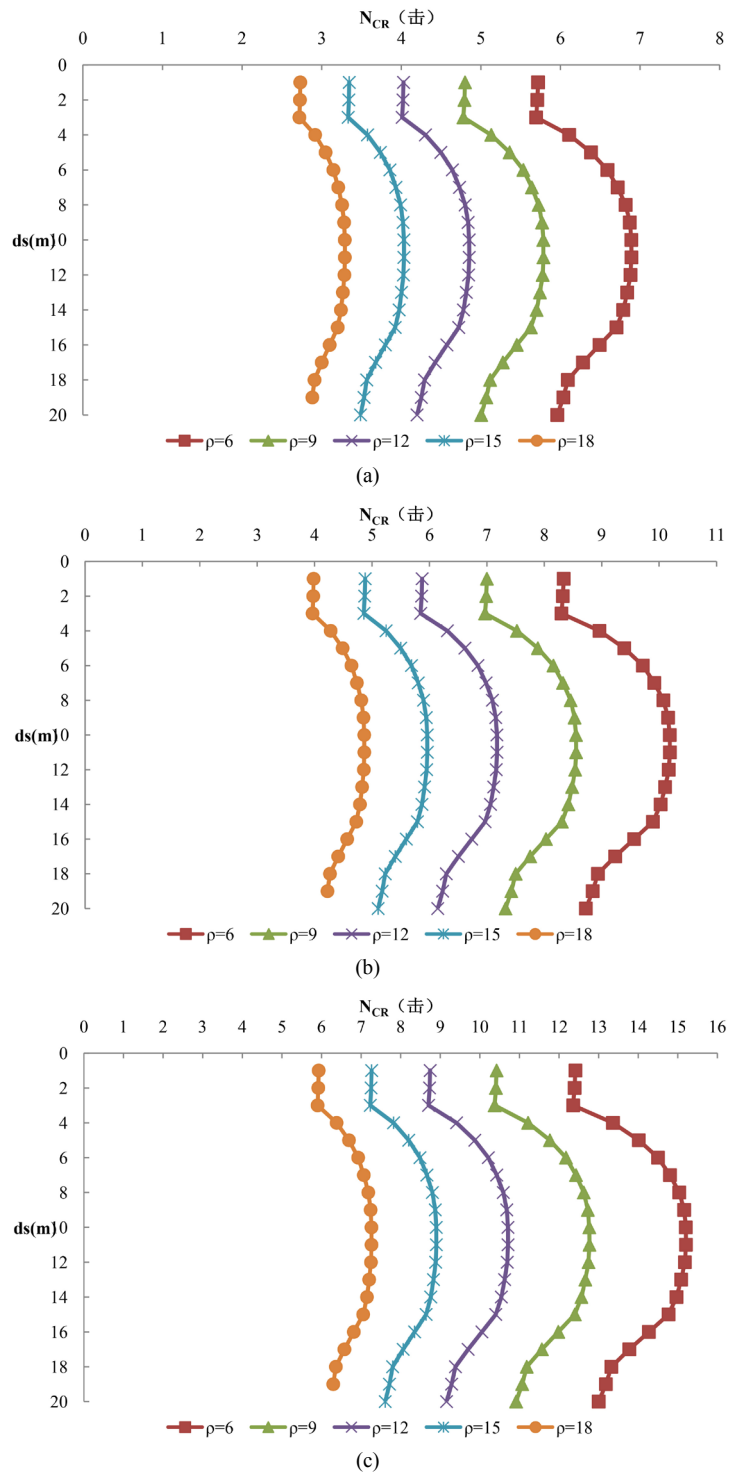


Figure 3. The relation curves between critical blow counts of SPT and burial depth of sand layer at different clay content. (a) 7 degree seismic fortification intensity, $d_w = 3$ m; (b) 8 degree seismic fortification intensity, $d_w = 3$ m; (c) 9 degree seismic fortification intensity, $d_w = 3$ m

图 3. 不同黏粒含量时临界标贯锤击数与砂土埋深关系曲线。(a) 抗震设防烈度 7 度, $d_w = 3$ m; (b) 抗震设防烈度 8 度, $d_w = 3$ m; (c) 抗震设防烈度 9 度, $d_w = 3$ m

由图3可以看出: 1) 临界标贯锤击数随着砂土黏粒含量增加而减少, 反应出砂土黏粒含量越高, 越不容易液化; 2) 当场地地震加速度及砂土黏粒含量为一定值时, 地下水位以上(0~3 m)的砂土临界标贯锤击数基本不变, 地下水位以下的砂土临界标贯锤击数随着砂土的埋深增加呈现先增大后减小的趋势。

3.2. NCEER 砂土液化判别方法

NCEER 推荐采用下列方法判别液化[8], 即 $CSR \geq CRR$ 时为液化, 其中 CSR 为地震引起的水平剪应力比, CRR 为可液化土层的抗液化强度比。

水平剪应力比 CSR 采用下式计算:

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma'_{v0}) = 0.65(a_{max} / g)(\sigma'_{v0} / \sigma'_{v0})r_d \quad (3)$$

$$r_d = 1.0 - 0.00765z, z \leq 9.15 \text{ m} \quad (4)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z, 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \quad (4)$$

抗液化强度比 CRR 的确定可采用室内试验或原位测试的方法确定, 其中原位测试可选用标准贯入试验(SPT)、静力触探(CPT)、剪切波试验及 Becker 贯入测试(BPT)等方法, 本文仅讨论 NCEER 基于标准贯入试验 SPT 确定抗液化强度比 CRR 的方法。

NCEER 针对纯净砂土的抗液化强度比 CRR 的计算为:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (5)$$

式中, $(N_1)_{60}$ 为考虑上覆压力为 100 kPa, 标准贯入试验能量锤击效率为 60%时修正后的标贯锤击数。式(5)仅适用于 $(N_1)_{60} < 30$ 的情况, 当 $(N_1)_{60} \geq 30$ 时, 可认为砂土密实程度较高, 判别为不液化。针对 $(N_1)_{60}$ 的确定, 国外学者有着不同的意见, 美国 ASTM 标准给出了 $(N_1)_{60}$ 的确定方法:

$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60} \quad (6)$$

$$C_N = (\sigma'_{vef} / \sigma'_v)^n \quad (7)$$

$$N_{60} = N_m \times (ER_i / 60) \quad (8)$$

式中, N_m 为标准贯入试验实测锤击数; ER_i 为锤击效率; C_N 为应力修正因子; $(N_1)_{60}$ 为考虑上覆压力为 100kPa, 标准贯入试验能量锤击效率为 60%时修正后的标贯锤击数; σ'_{vef} 为参考应力水平; σ'_v 为测试点处竖向有效应力; n 为应力指数。

针对应力修正因子 C_N 的取值, 不同学者给出了建议取值, 见图4[9]。

参考文献[9]通过拟合、分析, 给出临界标贯锤击数计算的公式为:

$$N_{cr} = 1.38\sqrt{10d_w + 8z} \ln \left[13 \frac{a_{max}}{g} \frac{18z}{10d_w + 8z} r_d \right] \quad (9)$$

$$r_d = 1 - \left(\frac{38z^5 - 907z^4 - 17920z^3 + 509577z^2 +}{666272z} \right) \times 10^{-8} \quad (10)$$

式中: a_{max} / g 为地面最大加速度与重力加速度的比值; d_w 为地下水位; r_d 为应力折减系数; z 为砂土的埋深; N_{cr} 为临界标贯锤击数。

利用式(9)~(10)分别绘制不同地震烈度、砂土埋深及地下水位时临界标贯锤击数的变化规律, 见图5。

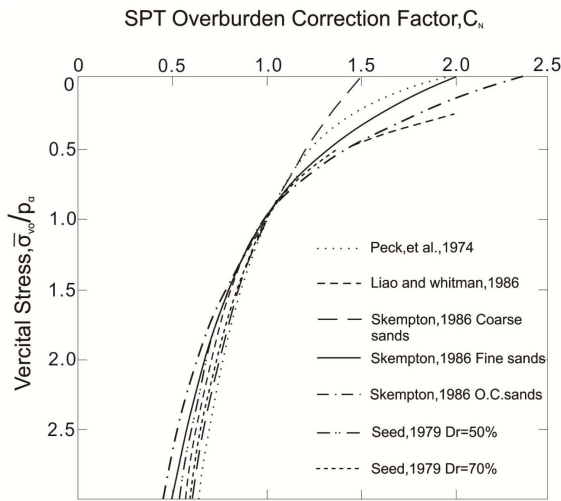


Figure 4. C_N Factor by various investigation (20)
图 4. 不同研究给出的修正因子 C_N 取值

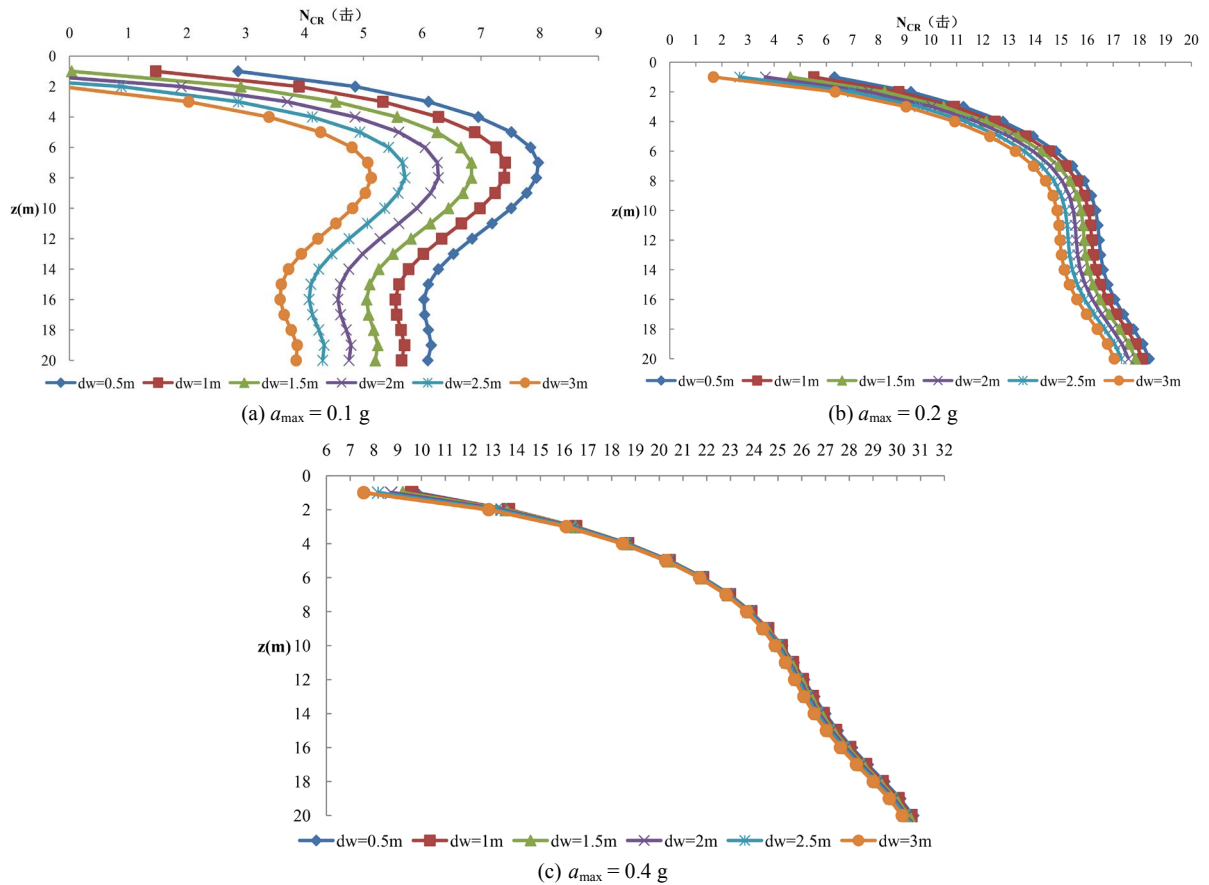


Figure 5. The relation curves of the horizontal seismic acceleration, critical blow counts of SPT at the water table and burial depth of sand layer

图 5. 地震水平加速度、地下水位临界标贯锤击数与砂土埋深关系曲线

由图 5 可以看出: 当地震水平加速度 $a = 0.1 g$ (7 度) 时, 临界标贯锤击数随着砂土埋深的变化趋势与我国公路行业《公路工程地质勘察规范》变化趋势一致, 即呈现随着埋深增加, 临界标贯锤击数先增大

后减小的趋势, 而国内规范方法计算的临界标贯锤击数明显大于 NCEER 方法, 因此国内规范方法偏于安全。对比分析 $a = 0.2 \text{ g}$ (8 度) 和 $a = 0.4 \text{ g}$ (9 度) 临界标贯锤击数变化曲线图, 临界标贯锤击数随着砂土埋深的增加, 临界标贯锤击数增大; 且土层深度 5 m 以内, 国内规范方法偏于安全; 土层深度 5~8 m 范围内, 两种方法计算的临界标贯锤击数相当; 土层深度大于 8 m 时, 国内规范方法计算的临界标贯锤击数小于 NCEER 方法, 因此, 土层深度大于 8 m 的情况下, NCEER 方法偏于安全。

4. 工程案例对比分析

巴基斯坦 PKM 高速公路位于印度河冲洪积平原, 工程所在场地地下水位较高, 场地 50 年超越概率 10% 的设计地震加速度 $0.16\sim 0.24 \text{ g}$, 地震烈度为 8 度。工程所在地地表以下 1~3 m 为粉土, 中部为松散 - 稍密的粉细砂, 其下为密实~极密实粉细砂层(图 6)。



Figure 6. The SPT test sampling in drill holes
图 6. 钻孔 SPT 测试取样

选取部分钻孔, 分别采用我国《公路工程地质勘察规范》(JTJ C20-2011)和 NCEER 标准判别砂土液化情况, 列于表 4。

Table 4. The correlation table of different standards in the sand liquefaction estimation
表 4. 不同标准砂土液化判别对比表

钻孔编号	深度 (m)	标贯击数 (击)	判别结果			
			公路规范		NCEER	
			判别结果	I_{le}	判别结果	I_{le}
BH49	9.00	4	液化		液化	
	10.50	6	液化		液化	
	12.00	7	液化		液化	
	13.50	3	液化		液化	
	14.50	5	液化	24.4	液化	28.2
	15.50	19	不液化		液化	
	17.00	31	不液化		不液化	
	18.50	32	不液化		不液化	
	20.00	23	不液化		液化	

Continued

	2.50	6.0	不液化		不液化	
	4.00	5.0	液化		液化	
	5.50	7.0	液化		液化	
	7.00	9.0	液化		液化	
	8.50	8.0	液化		液化	
BH607	10.00	7.0	液化	22.3	液化	27.1
	11.50	8.0	液化		液化	
	13.00	7.0	液化		液化	
	14.50	14.0	液化		液化	
	16.00	16.0	不液化		液化	
	17.50	20.0	不液化		不液化	
	19.00	24.0	不液化		不液化	

从表 4 中液化判别结果可以看出, 国内规范方法与 NCEER 方法对巴基斯坦 PKM 高速公路部分钻孔的液化判别结果基本一致, 仅在 BH49 孔 15.5 m、20 m 与 BH607 孔 16 m 处判别结果不一致, 且 NCEER 方法均偏于安全, 这与前述两种液化判别方法对比研究结论一致。

5. 结语

本文介绍了砂土液化机理, 对比了国内公路行业与国外 NCEER 基于标准贯入试验判别砂土液化的方法, 从临界标贯锤击数及实测标贯击数修正等方面介绍了国内外规范处理的差异。结合工程案例, 对比了两种方法判别液化结果的差别, 反映出公路行业与国外规范判别差异较小, 土层深度大于 8 m 时 NCEER 方法偏于安全。

参考文献

- [1] 任红梅, 吕西林, 李培振. 饱和砂土液化研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 166-175.
- [2] GB50487-2008 水利水电工程地质勘察规范[S].
- [3] 林军, 沙鹏, 常金源. 粉土和砂土液化判别的现行规范对比[J]. 工程勘察, 2016, 44(12): 25-32.
- [4] 赵倩玉. 我国规范标贯液化判别方法的改进研究[D]: [硕士学位论文]. 黑龙江: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- [5] 陈国兴, 孔梦云, 李小军, 等. 以标贯试验为依据的砂土液化确定性及其概率判别法[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 9-27.
- [6] 邱亚兵, 朱晟. 地震液化判别及危害性评价[J]. 地震工程学报, 2014(3): 555-561.
- [7] JTGC20-2011 公路工程地质勘察规范[S].
- [8] Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., et al. (2001) Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 127, 297-313. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(297))
- [9] 唐世栋, 罗立疆, 林华国. 国内外砂土液化判别方法的比较[J]. 工程勘察, 2007(4): 4-6, 42.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org