

DOI: 10.11779/CJGE2017S2057

# 基于 CPTU 测试的港珠澳大桥砂土液化评价方法研究

段 伟<sup>1</sup>, 蔡国军<sup>\*1</sup>, 刘松玉<sup>1</sup>, 祝刘文<sup>2</sup>, 杜 宇<sup>2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510275)

**摘要:** 地震液化是引起地基失稳和上部结构损害的直接原因之一, 因此, 液化评价是土工抗震勘察中的重要内容。以港珠澳大桥岛隧工程为例, 通过 CPTU 数据与标准贯入试验、剪切波速试验结果分析比较, 一方面建立了可靠的 CPTU 数据与 SPT、剪切波速的相关关系; 另一方面利用 CPTU 液化判别方法, 对岛隧砂土液化势进行了评估, 并与 SPT、剪切波速判别液化结果进行对比验证, 得出基于 CPTU 液化判别法具有一定优势。研究结果可为类似重要工程勘察提供参考依据。

**关键词:** 孔压静力触探; 液化; 周期阻力比; 剪切波速; 标贯试验

**中图分类号:** TU443      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2017)S2-0236-04

**作者简介:** 段 伟(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事现代原位测试技术方面的研究。E-mail: zbdxdw@163.com。

## Evaluation method for sand liquefaction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge based on CPTU tests

DUAN Wei<sup>1</sup>, CAI Guo-jun<sup>1</sup>, LIU Song-yu<sup>1</sup>, ZHU Liu-wen<sup>2</sup>, DU Yu<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. CCCC-FHDI Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The earthquake liquefaction is one of the direct causes for unstable ground and damage of upper structure. Therefore, the liquefaction assessment is an important part of anti-seismic investigation in engineering. By taking the island and tunnel project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge as an example, the CPTU data is compared with the results of standard penetration tests and shear wave velocity tests. On one hand, the correlations between CPTU data and SPT, shear wave velocity are established. On the other hand, the sand liquefaction potential of the island tunnel is evaluated by the method of CPTU and compared with the liquefaction results of SPT and shear wave velocity. The results show that the liquefaction method of CPTU has certain advantages and may provide reference basis for similar engineering survey.

**Key words:** piezocene penetration test; liquefaction; cyclic resistance ratio; shear wave velocity; standard penetration test

## 0 引言

在地震作用下, 土体液化往往会引起地基不均匀沉陷, 因此成为相关学者热点关注的课题之一。目前对于地震液化的判别, 主要分为室内试验与原位测试, 为了扰动小, 能够代表土层原始应力状态指标, 工程中广泛使用原位测试方法。典型的现场原位测试方法有基于静力触探(CPT)、标准贯入(SPT)、剪切波速( $V_s$ )法等, 随着地震液化方面理论与试验研究等不断突破, 试验手段与技术的不断创新与改进, 以孔压静力触探(CPTU)<sup>[1]</sup>为代表的改进原位测试方法成为从小应变到大应变水平能够确定土体性质的最常用的现场原位测试方法, 在地震液化评价应用领域取得良好效果。

本文首先介绍了基于CPTU测试的砂土液化判别方法, 结合港珠澳大桥岛隧工程砂土液化场地, 进行

了CPTU成果解译, 分析了CPTU与剪切波速、SPT之间的相关性, 利用CPTU、剪切波速、SPT进行了该场地液化判别分析比较。

## 1 砂土液化评估方法

国际上针对液化评估较多采用Seed简化法<sup>[2]</sup>, 该法最初是利用标准贯入试验, 在国际地震工程研究中心(NCEER)研讨会上将该法扩展到CPT/CPTU测试技术中<sup>[3]</sup>, 因CPTU测试具有连续性, 可重复性, 能提供地层数据的连续曲线, 因此, 通过CPTU数据能对

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0800201); 国家自然科学基金项目(41672294); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYCX17\_0139)

收稿日期: 2017-08-02

\*通讯作者 (E-mail: focuscail@163.com)

地层进行连续液化判别, 生成抗震液化剖面。

### 1.1 基于 CPTU 液化评估方法

基于 CPTU 液化判别法分为确定性方法与概率法, 工程应用中一般采用确定性方法, 即安全系数法, 可表示为  $F_s = \text{CRR}/\text{CSR}_{7.5}$ , 若  $F_s > 1$ , 则判别为液化。

#### (1) 等效周期应力比的求解

根据场地的地震基本设计参数可计算周期应力比, 目前普遍采用的是Seed等<sup>[2]</sup>提出计算式, 考虑到震级的影响, 最终等效周期应力比CSR<sub>7.5</sub>的求解为

$$\text{CSR}_{7.5} = 0.65 \frac{\sigma'_{v0} a_{\max}}{\sigma'_{v0} g} r_d / \text{MSF} \quad (1)$$

式中 CSR<sub>7.5</sub> 为通过震级比例系数转换为震级  $M_s = 7.5$  下的周期应力比;  $\sigma'_{v0}$  和  $\sigma'_{v0}$  分别为计算深度处土体总上覆应力和有效上覆应力 (kPa);  $a_{\max}$  为地面最大加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $g$  为重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $r_d$  为应力折减系数; MSF 为震级比例系数。参数求解具体见文献[3]。

#### (2) 周期阻力比的求解

很多学者提出了不同的基于 CPTU 测试技术计算 CRR 的方法<sup>[4-5]</sup>, 下面主要介绍 Robertson 法。

Robertson 等<sup>[4]</sup>提出基于 CPT 液化势评估方法, 后来进行了修正, 提出了修正的 CRR 计算模型, 其具体求解过程如下。

引入应力指数  $n$  对 CPTU 锥尖阻力测试值进行归一标准化处理, 反映了所贯入土体的应力水平, 应力指数  $n$  为

$$n = 0.381 I_c + 0.05(\sigma'_{v0} / P_a) - 0.15 \leq 1.0 \quad (2)$$

式中,  $I_c$  为土体类型指标参数,

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \lg Q_{tn})^2 + (1.22 + \lg F_r)^2} \quad (3)$$

式中,  $Q_{tn}$  为归一化锥尖阻力,  $F_r$  为摩阻比。

通过引入细粒修正系数  $k_c$  对标准化的锥尖阻力  $Q_{tn}$  进行修正, 得到标准化的纯砂锥尖阻力  $Q_{tns} = k_c Q_{tn}$ 。

最后基于  $Q_{tns}$ , 周期阻力比 CRR 的求解:

$$\text{CRR} = \begin{cases} 93 \left( \frac{Q_{tns}}{1000} \right)^3 + 0.08 & (50 \leq Q_{tns} < 160) \\ 0.833 \left( \frac{Q_{tns}}{1000} \right) + 0.05 & (Q_{tns} \leq 50) \end{cases} \quad (4)$$

表 1 剪切波速评估汇总表

Table 1 Summary of evaluation of shear wave velocity

方法序号	方法	剪切波速评估公式	适用土层
方法 1	Baldi 等 <sup>[8]</sup>	$V_s = 277(q_t)^{0.13}(\sigma'_{v0})^{0.27}$	非胶结新近沉积砂层
方法 2	Mayne 等 <sup>[9]</sup>	$V_s = 1.75(q_t)^{0.627}$	黏性土层
方法 3	Hegazy 等 <sup>[10]</sup>	$V_s = [10.1 \cdot \lg q_t - 11.4]^{1.67} [f_s / q_t \cdot 100]^{0.3}$	所有土层
方法 4	Mayne <sup>[11]</sup>	$V_s = 118.8 \lg(f_s) + 18.5$	所有土层
方法 5	Robertson <sup>[12]</sup>	$V_s = [10^{(0.55I_c + 1.68)}(q_t - \sigma'_{v0}) / P_a]^{0.5}$	非胶结的全新世—更新世土层

根据参数  $I_c$  分别对  $n$  和  $k_c$  进行取值, 参数  $Q_{tn}$  和  $F_r$  的求解, 详见文献[3]。

### 1.2 基于 SPT 及剪切波速 $V_s$ 液化评估方法

基于 SPT 及剪切波速  $V_s$  进行 CRR 的计算具体参考文献[3], 限于篇幅, 在此不再论述。

### 1.3 CPTU 数据与 SPT、 $V_s$ 的相关性

国内外学者做了大量有关 CPTU 与 SPT 之间相关性的研究工作。Robertson 进行了  $(q_t / P_a) / N_{60}$  比值与土体平均粒径  $D_{50}$  相关关系的研究<sup>[6]</sup>, 得出土体的平均粒径跟土体类型相关的结论。因此, Robertson 针对不同类型的土体提出  $(q_t / P_a) / N_{60}$  建议值。Jefferies 等<sup>[7]</sup>提出基于  $I_c$  的 CPT-SPT 相关关系, 适用于  $I_c < 4.06$  的土体。

国外对  $V_s$  与 CPTU 数据的相关性做了大量研究, 最具代表性方法见表 1。

## 2 试验研究

### 2.1 场地描述

试验场地位于珠江三角洲入海口, 场区一带分布的饱和粉土及砂土层有: 14 层全新世海相沉积中砂层、22 层早更新世陆相沉积粉细砂层、33 层晚更新世海陆交互相沉积粉细砂层、34 层晚更新世海陆交互相沉积中砂层、42 层晚更新世冲积相沉积粉细砂层、43 层晚更新世冲积相沉积含砾细砂层、44 层晚更新世冲积相沉积中砂层和 45 层晚更新世冲积相沉积粗砂层。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)<sup>[13]</sup> 及《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02—01—2008)<sup>[14]</sup> 的初判准则, 初判仅 14 层全新世松散中砂具有液化势, 应做进一步判断。根据美国 NCEER 研讨会上的规定, 地质年代为第四纪更新世以前的粉土及砂土可判为不液化土, 纯砂 ( $N_1$ )<sub>60</sub> > 30 时可判为不液化土。据此可初判: 45 层 ( $N_1$ )<sub>60</sub> > 30, 不具备发生液化的条件, 可不考虑砂土液化对场地的影响; 14 层、22 层、33 层、34 层、42 层、43 层、44 层需进行进一步液化判别。

### 2.2 CPTU 试验设备

本次 CPTU 试验采用美国 Vertek 孔压探头。所使用探头集成了常规 CPT、孔压、倾斜功能模块。



### 3 CPTU 成果解译

#### 3.1 CPTU 与 SPT 相关性分析

该工程补充地质勘察采用英标标贯器进行了大量 SPT 试验, 对 SPT 试验进行了能量校正, 有关英标与国标的标贯成果相关性、差异性、转换分析见廖先斌等<sup>[15]</sup>的研究, 在此不再赘述。

将本工程 SPT 试验结果与 CPTU 数据进行对比分析, 限于篇幅, 选取典型土层可得出以下相关关系, 见图 1。

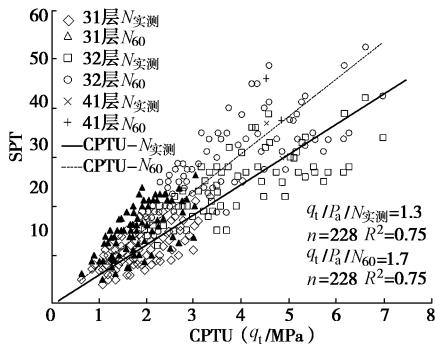


图 1 典型层  $q_t$ -SPT 相关关系

Fig. 1 Correlation between  $q_t$  and SPT of typical layer

由上述对比分析结果可得港珠澳地区土层 CPTU-SPT 相关关系汇总见表 2, 可看出, 整体误差值在 18.2%~20% 之间, 砂土层中比黏土误差稍大。

表 2 港珠澳地区 CPTU-SPT 相关关系表

Table 2 Relationship between CPTU and SPT in HongKong-Zhuhai Macao Bridge

地层编号	土体类型	$(q_t/P_a)/N$ 测	$(q_t/P_a)/N_{60}$
21	黏土—粉质黏土	1.1	0.9
31, 32, 41	黏土—粉质黏土, 夹薄层细砂	1.6	1.3
33, 34, 42	粉细砂, 中砂, 混少量黏土	3.0	2.4
43, 44, 45	中粗砂	4.1	3.3

#### 3.2 CPTU 数据与波速测试的相关性分析

本次还进行悬挂式 P-S 波速试验, 将表 1 中前 4 种经验公式评估方法与实测值进行对比分析, 典型结果如下图 2。

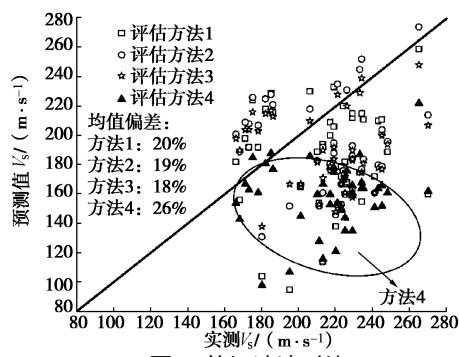


图 2 剪切波速对比

Fig. 2 Comparison of shear wave velocities

分析发现, 上述 4 种方法的评估结果与实测值有

一定偏差, 其中方法 4 偏差较大。原因可能是由于摩阻力  $f_s$  稳定性差, 采用该参数进行  $V_s$  预测时表现出较大的离散性。鉴于此, 通过统计分析, 建立黏性土剪切波速与锥尖阻力的关系(图 3), 提出适用于该地区 CPTU 数据与  $V_s$  的相关关系如下:

$$V_s = 174 q_t^{0.28}, \quad (5)$$

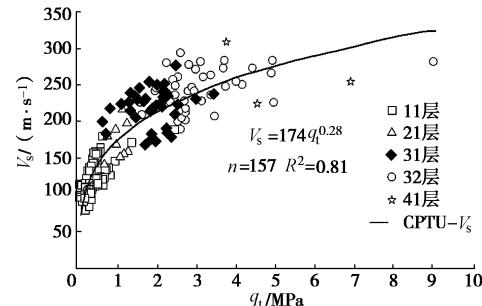


图 3 港珠澳区域的 CPTU 数据与剪切波速  $V_s$  的相关关系

Fig. 3 The correlation between CPTU data and  $V_s$  in HongKong-Zhuhai Macao Bridge

在砂土中, 将 Robertson<sup>[12]</sup>公式修正, 建立相关关系如图 4 所示。

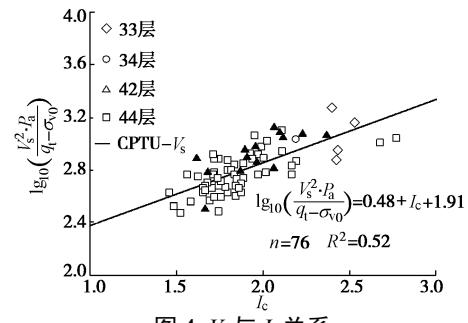


图 4  $V_s$  与  $I_c$  关系

Fig. 4 Correlation between  $I_c$  and  $V_s$

经过分析推荐采用下式评估砂土的剪切波速:

$$V_s = [10^{(0.48 I_c + 1.91)} (q_t - \sigma_{vo}) / P_a]^{0.5} \quad (6)$$

### 4 砂土液化判别分析

#### 4.1 基于 CPTU 判别结果

采用前述 CPTU 判别标准, 判别结果如图 5 所示。

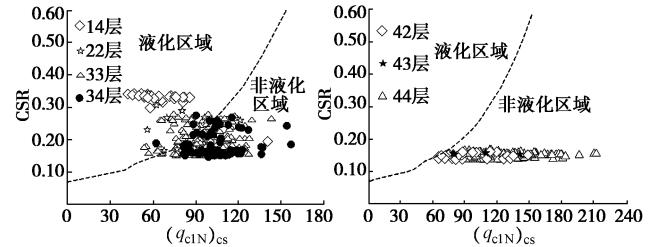


图 5 基于 CPTU 数据液化判别

Fig. 5 Liquefaction discrimination based on CPTU data

由图 5 可知: 14 层为可液化土层, 22 层为局部可液化土层, 33 层、34 层绝大多数区域呈现非液化性, 在部分地段呈现液化性, 42 层、43 层、44 层均为不液化土层。

#### 4.2 基于 SPT 判别结果

判别结果如下: 34 层、42 层、43 层、44 层均为不液化土层; 22 层仅有一个钻孔有标准贯入试验液化判别结果, 也显示为不液化土层; 33 层除了个别位置显示具有液化势外, 总体上显示为不液化土; 14 层没有标贯判别资料。

#### 4.3 基于剪切波速判别结果

判别结果如下: 34 层、42 层、43 层、44 层均为不液化土层; 33 层除了个别位置显示具有液化势外, 总体上显示为不液化土, 14 层和 22 层没有波速判别资料。

由判别结果可知, 该地区全新世砂土、更新世上部地层的砂土易于地震液化, 更新世中下部地层砂土为不易于液化。当锥尖阻力值或者实测击数一定的情况下, 深度越小, 上覆应力越小, 所含黏粒含量越小 (由土类指数  $n$  和土体类型指标参数  $I_c$  得到) 的地层越容易液化。

### 5 结 论

本文采用 CPTU 测试技术在港珠澳大桥工程进行了应用, 初步得到以下 3 点结论。

(1) 3 种方法对于厚层砂土的判别结果一致; 而对于薄层砂土, 由于 SPT 和剪切波速试验间隔的影响, 有效样本点数量非常有限, 而 CPTU 能提供关于地层数据的连续曲线, 对于薄层砂土的液化判别优势更加明显。

(2) 建立了 CPTU 与 SPT 之间的关系, 相关性好, 整体误差值在 18.2%~20% 之间, 砂土层比黏土层的误差稍大。建立了 CPTU 与波速之间的关系, 可以看出 4 种方法预测值与实测值基本一致, 方法 4 的偏差稍大。

(3) 通过研究经过孔隙水压力和上覆土压力校正过的 CPTU 数据与波速试验结果, 对国外已有经验公式修正, 建立了可靠的 CPTU 数据与剪切波速的相关性公式。对国外经验公式进行了修正, 提出了适用于珠三角洲的经验公式, 该公式可作为国内 CPTU 解译标准及规程制定的一个参考。

### 参考文献:

- [1] 邹海峰, 刘松玉, 蔡国军, 等. 基于电阻率 CPTU 的饱和砂土液化势评价研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1280~1288. (ZOU Hai-feng, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. Evaluation of liquefaction potential of saturated sands based on piezocene penetration tests on resistivity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1280~1288. (in Chinese))
- [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, 97(9): 1249~1273.
- [3] YOUD T L, IDRISI 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(10): 817~833.
- [4] ROBERTSON P K, WRIDE C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 442~459.
- [5] OLSEN R. Liquefaction analysis using the cone penetrometer test (CPT)[C]// Eight World Conference on Earthquake Engineering, 1984.
- [6] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G, WIGHTMAN A. SPT-CPT correlations[J]. ASCE J of Geotechnical Engineering, 1983, 109(11): 1449~159.
- [7] JEFFERIES M G, DAVIES M P. Estimation of SPT N values from the CPT[M]. ASTM. 1993.
- [8] BALDI G, BELLOTTI R, GHIONNA V N, et al. Modulus of sands from CPTs and DMTs[C]// Proc. 12th ICSMFE, 1989: 165~170.
- [9] MAYNE P W, RIX G J. Correlations between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays[J]. Soils and Foundations, 1995, 35(2): 107~110.
- [10] HEGAZY Y A, MAYNE P W. Statistical correlations between Vs and cone penetration data for different soil types[C]// Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT. 1995: 173~178.
- [11] MAYNE P W. The Second James K. Mitchell Lecture: undisturbed sand strength from seismic cone tests[J]. Geomechanics & Geoengineering, 2006, 1(4): 239~257.
- [12] ROBERTSON P K. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 136(6): 842~853.
- [13] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2010. (GB50011—2010 Guidelines for seismic design of buildings[S]. 2010. (in Chinese))
- [14] JT/T B02—01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 2008. (JT/T B02—01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges[S]. 2008. (in Chinese))
- [15] 廖先斌, 郭晓勇, 杜宇. 英标和国标标贯设备试验结果相关性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 182~185. (LIAO Xian-bin, GUO Xiao-yong, DU Yu. Correlation analysis of standard penetration test results on British and Chinese standard equipments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 182~185. (in Chinese))