



基于 CPTu 和 SPT 原位测试的 地震液化敏感性分析对比

张衍林¹, 石章入², 丛璐³, 邱敏²

(1. 重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;
3. 山西大学电力与建筑学院, 山西 太原 030013)

摘要: 地震液化敏感性通常用抗液化安全系数(FS_{liq})表示, 其计算强烈依赖于原位测试技术。针对国内外砂土液化判别方法的差异性, 依托国外集装箱码头项目, 采用国内外两种原位测试技术 SPT、CPTu, 对两个场地地震液化敏感性进行对比分析。结果表明: 1) 两种方法获取了一致的分析结果, 但总体上 CPTu 分析结果更偏于保守; 2) CPTu 能够揭示更详细的土体特征, 但 FS_{liq} 计算结果可变性更大。3) 验证了我国 SPT 方法的适用性与准确性。

关键词: 地震液化; 安全系数; SPT(标准贯入试验); CPTu(孔压静力触探); 标准

中图分类号: TU 433; U 656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0198-07

Comparative analysis of seismic liquefaction sensitivity based on in-situ CPTu and SPT

ZHANG Yan-lin¹, SHI Zhang-ru², CONG Lu³, QIU Min²

(1. Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China;

2. CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan 430040, China;

3. School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: Seismic liquefaction sensitivity is usually denoted by the ant-liquefaction safety factor(FS_{liq}), and its calculation strongly depends on the in-situ test technology. Given the different methods of sand liquefaction discrimination at home and abroad, this paper, relying on an overseas container terminal project, compares the seismic liquefaction sensitivity of two sites with two in-situ test technologies, i.e., standard penetration test(SPT) and cone penetration test with pore pressure measurement(CPTu), employed respectively at home and abroad. The following observations can be made from the results: 1) The two methods produce consistent analysis results, although those obtained by CPTu are more conservative on the whole. 2) CPTu can reveal more detailed soil characteristics, despite that corresponding FS_{liq} calculated are more variable. 3) The applicability and accuracy of the SPT method are verified.

Keywords: seismic liquefaction; safety factor; standard penetration test(SPT); cone penetration test with pore pressure measurement(CPTu); standard

1953 年, Mogami 和 Kubo^[1]首次使用“液化”一词来描述在地震期间观察到的饱和砂土强度突然丧失的现象。在地震作用下, 一旦发生土体液化, 可能导致地基、桩基承载力丧失, 进而引发

建筑结构沉降、倾斜甚至破坏^[2]。在中国, 1976 年唐山地震引发大面积(约 2.4 万 km^2)砂土液化, 造成大量桥梁、房屋破坏, 农田、机井被埋^[3]。2008 年汶川地震产生了长 500 km、宽 200 km 的

收稿日期: 2021-08-06

作者简介: 张衍林(1983—), 男, 硕士, 讲师, 从事建筑工程管理、建筑工程施工、BIM 技术应用研究。

狭长地震液化区, 区域内近千亩农田、大量工厂与学校受损^[4]。砂土液化在全球范围内造成的地震灾害也不可小觑, 1964 年日本新泻地震中^[5], 地震液化造成整栋楼房倾斜的现象引起了地震工程界的关注, 让科学家认识到, 地震液化不只是喷沙冒水, 更会引起不可逆的破坏。2018 年日本北海道地震^[6]发生于建筑物密集区, 造成路面坍塌, 房屋整体倾斜。2011 年新西兰地震^[7], 土体液化现象“覆盖范围之大, 世界罕见”, 喷沙冒水使大量房屋及汽车被淹没。

地震液化是在饱和砂土或饱和粉土上建造结构物面临的主要问题。自 1964 年以来, 人们开展了大量的工作来解释和评估土体液化。早在 1980 年, 周神根^[8]在唐山不同地震烈度地区进行了 100 多次试验, 提出了一个用静力触探 (CPT) 判别砂土液化风险的实用方法。但是由于 CPT 在我国发展缓慢, 这种方法并未推广开来。1995 年, 美国格雷格钻井公司 (Gregg) 孔压静力触探 (CPTu) 资深研究学者 Robertson^[9] 在最新论文上对土体液化及其评价进行了详细的描述和评述。1996 年美国国家地震工程研究中心 (NCEER) 在犹他州盐湖城举办了一场研讨会, 讨论循环液化评价的最新进展, 正式推荐 Robertson 提出的基于 CPTu 地震液化评估方法为 NCEER 标准方法, 之后被公认为最广泛使用的地震液化评估方法。2013 年, 依托 Zhang^[10] 和 Robertson^[11] 的地震液化案例数据, Juang 等^[12] 采用 CPTu 对地震液化沉降进行了评价, 在此基础上开发了一个简化的程序, 用于估计在给定工程项目场地超过规定地基沉降的概率。2017 年, 段伟等^[13] 利用 CPTu 液化判别方法, 对港珠澳大桥岛隧砂土液化势进行评估, 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。

近几十年, 随着 CPT 与 CPTu 技术在我国 的普及, 其技术理论及应用价值受到工程界的重视。2013 年, 童立元^[14] 率领其团队开展液化和非液化区的现场再调查, 采用地震波孔压静力触探

(SCPTu) 评估了唐山大地震地区地震再液化风险, 并与国内液化判别方法进行对比, 指出“CPTu 技术被公认为砂土液化最广泛评价方法, 而现今基于 CPTu 的液化评价方法在我国应用较少, 也是今后在技术手段突破后亟需加深研究的方向”。目前我国采用标准贯入试验 (SPT) 判别地震液化, 是在理论上, 通过大量工程实践数据总结而来, 方法单一、应用范围有限、且极少得到工程实践的验证^[15], 需要对地震液化开展深入研究, 服务于国内外工程建设活动。

本文依托中国企业在南美洲国家承接的集装箱码头项目, 对两个场地地层的砂土液化势开展研究。研究方法分为两种, 一种是国际上通用的 CPTu 方法, 另一种是我国规范推荐的 SPT 方法。将两种方法得到的地层砂土液化评估结果进行对比, 验证了 SPT 方法的适用性与准确性, 为“中国行业标准走出去”倡议在海外项目上的推行提供借鉴意义。

1 液化敏感性评估方法

1.1 CPTu 方法

评估液化敏感性最通用的方法最初由 Seed 等^[16] 提出, 并由欧洲规范 (Eurocode 8) 收录推荐。该方法将液化安全系数 FS_{liq} 作为循环抗力比 (CRR) 和循环应力比 (CSR) 二者的比值, 由式 (1) 表示。CRR 是对指定深度处土体抗液化能力的度量, CSR 是指定位置上土体的预期地震作用。

$$FS_{liq} = \frac{CRR}{CSR}$$

(1)

液化安全系数 $FS_{liq} \geq 1$ 时, 表示土体不液化; $FS_{liq} < 1$ 时, 表示土体液化。根据 Seed 和 Idriss 的建议^[17], CSR 的计算式如下:

$$CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

(2)

式中: a_{max} 是现场峰值地面加速度; g 是重力加速度; σ_{v0} 和 σ'_{v0} 是指定深度处土体的总竖向应力和

有效竖向应力； r_d 是剪应力折减系数。

参数 r_d 是深度的函数，Boulanger^[18] 建议将地震震级纳入其计算式中，表示如下：

$$r_d = e^{[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]} \tag{3}$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \tag{4}$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \tag{5}$$

式中： z 为深度(m)； M 为地震震级，这里指矩震级。

土体抗液化能力由 CRR 提供，可通过现场试验和室内试验进行评估。大量工程经验表明，利用孔压静力触探试验(CPTu)计算 CRR 最为简单、方便。根据 Idriss^[19] 的建议，采用最新的液化潜力评估方法，该方法将实测锥尖阻力调整为等效纯净砂(cs)锥尖阻力，计算循环阻力比(CRR)，表示如下：

$$CRR_{7.5} = \exp\left[\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1\,000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.8\right] \tag{6}$$

式中： q_{c1Ncs} 为对应于标准化等效纯净砂锥尖阻力。

根据 Idriss 的建议，纯净砂的细粒含量(FC)低于 5%。该方法中引入细粒百分比反映了细颗粒在土体液化敏感性中的重要性。为便于计算，所有 CPTu 分析均使用 CLiq[®]软件进行计算。

对于 7.5 级以外的地震，循环应力比需要用震级修正标度系数 MSF 进行校正。对于其他震级下的 CRR，可以乘以震级修正标度系数 MSF 来获得，即：

$$CRR = CRR_{7.5} \cdot MSF \tag{7}$$

本研究中，根据 Idriss 的推荐，考虑土体类型，MSF 的计算式表示如下：

对于砂性土：

$$MSF = 6.9 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 0.058 \leq 1.8 \tag{8}$$

对于黏性土：

$$MSF = 1.12 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) + 0.828 \leq 1.13 \tag{9}$$

1.2 SPT 方法

根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[20]，当饱和砂土、粉土需要进一步液化判别时，应采用标准贯入试验判别地面以下 20 m 深度范围内土体的液化趋势；当饱和土标准贯入锤击数小于或等于液化判别标准贯入锤击数临界值时，应判为液化土。

地面以下 20 m 深度范围内，液化判别标准贯入击数临界值计算式如下：

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \tag{10}$$

$$FS_{liq} = \frac{N_{cr}}{N_{60}} \tag{11}$$

式中： N_{cr} 为液化判别标准贯入锤击数临界值； N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值，可按表 1 取值； N_{60} 为修正后标贯击数； d_s 为饱和土标准贯入点深度(m)； d_w 为地下水埋深(m)； ρ_c 为黏粒含量百分率，当为砂土或小于 3 时，取 3； β 为调整系数，设计地震第 1 组取 0.8，第 2 组取 0.95，第 3 组取 1.05。

表 1 标贯击数基准值取值

设计基本地震加速度	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g
标准贯入锤击数基准值 N_0	7	10	12	16	19

2 案例分析

2.1 项目概况及地层分布

拟建的集装箱码头位于玻利瓦尔港，是厄瓜多尔海岸最南端的港口，它位于埃尔奥罗省圣罗莎河口入口东侧，主要用于出口香蕉和大虾。为了获取现场地质与岩土特征信息，在陆地与海上开展了大量钻孔与 CPTu 测试，钻孔过程中进行了密集 SPT 测试及取芯。揭露主要地层自上而下分别为：淤泥、黏土、粉砂、黏土、粉砂、黏土、密砂、密实粉砂等，砂土和黏土相互交错，钻孔深度范围内没有揭示岩层。

高地震活动区、厚剖面的近期冲积砂层的存在是触发液化的必要条件，根据厄瓜多尔抗震规范 *The National Ecuadorian Norm-Peligro Sismico-Diseno Sismo Resistente*，项目区位于第 V 区，最大地震震级 8.8 级，基本峰值加速度值(475 a 重

现期)为 0.40g, 地表加速度 0.48g, 属于地震高发区, 地层存在明显地震液化风险。

2.2 测试结果及地层评价

为了排除地层差异性造成的影响, 从大量勘察孔中选取了两组相邻的钻孔与 CPTu 孔(图 1)。其中钻孔 B_7 与静探孔 CPTu-9 位于场地西北角, 钻孔揭示地下水埋深 0.9 m; 钻孔 E_5 与静探孔 CPTu-13 位于场地南边, 钻孔揭示地下水埋深 1.6 m。



图 1 CPTu 与 SPT 测试点平面分布

图 2 显示在这两个位置获取的标准贯入测试结果, 包括土体剖面与标准贯入阻力 N_{60} 。根据取芯结果可知, 两个位置的土体剖面差异性很大, 钻孔 B_7 揭示表层黏土较浅, 厚度约 2 m, 往下为厚度约 20 m 的粉细砂地层、粉质黏土地层; 而钻孔 E_5 揭示表层厚度约为 6 m 的黏土层, 往下为厚度约 5 m 的粉细砂层、厚度约为 5 m 的中砂层, 再往下为厚度约 12 m 的黏土层。两个位置都是典型的海相沉积地层, 黏土与砂土相互交错。

两个位置的前 30 m 深度范围内地层, 标准贯入阻力值均不超过 15 击。其中, 钻孔 B_7 中粉质黏土段 SPT 击数较为平均, 约为 10 击; 其他深度范围内 SPT 击数非常离散, 无法通过 SPT 击数来区分不同土体类别。钻孔 E_5 中 SPT 多集中在 5~10 击, 黏土 SPT 平均击数接近 5, 砂土 SPT 平均击数接近 10; 两个 SPT 极值出现在 5 m 和 17 m 深度处, 5 m 深度处 SPT 大于 10, 17 m 深度处 SPT 为 0, 这是因为两个试验点处于不同类别土体的分界面上; 5 m 之上为黏土、之下为砂土, 下伏硬层能够为 SPT 提供持力层, 导致 SPT 偏大; 17 m 之上为砂土、之下为黏土, 软弱下卧层无法为 SPT

提供支撑, 导致 SPT 偏小。

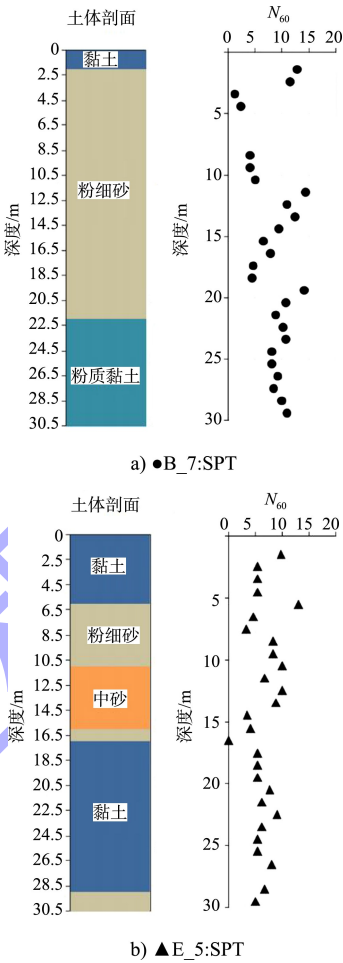


图 2 地层分布与标贯击数

图 3、4 分别为两个位置静探孔 CPTu-9 和 CP-Tu-13 测试结果, 包括锥尖阻力 q_t 、摩阻比 R_f 、孔隙水压力 u 和土体行为类型(SBT)指数 I_c , I_c 在 1~9 代表不同土体类型指数。同样, 两个位置的土体无论在结构上还是强度上, 都存在较大差异。从锥尖阻力曲线来看, CPTu-9 揭示黏土地层并不明显, 不是典型的直线段, 表明黏土中夹杂粉细砂; 粉细砂地层锥尖阻力曲线起伏波动较大, 特别是 5~8 m 深度范围内 q_t 值明显高于其他地层, 最大 q_t 值达到 14 MPa。静探孔 CPTu-13 锥尖阻力曲线分段非常明显, 自上而下可以清晰地辨别出黏土、砂土及黏土地层, 黏土地层是典型直线段, 表明黏粒含量高, 纯度较好; 砂土地层中粉细砂与中砂锥尖阻力区别比较明显, 各段曲线起伏变化小, 最大 q_t 值为 8 MPa。

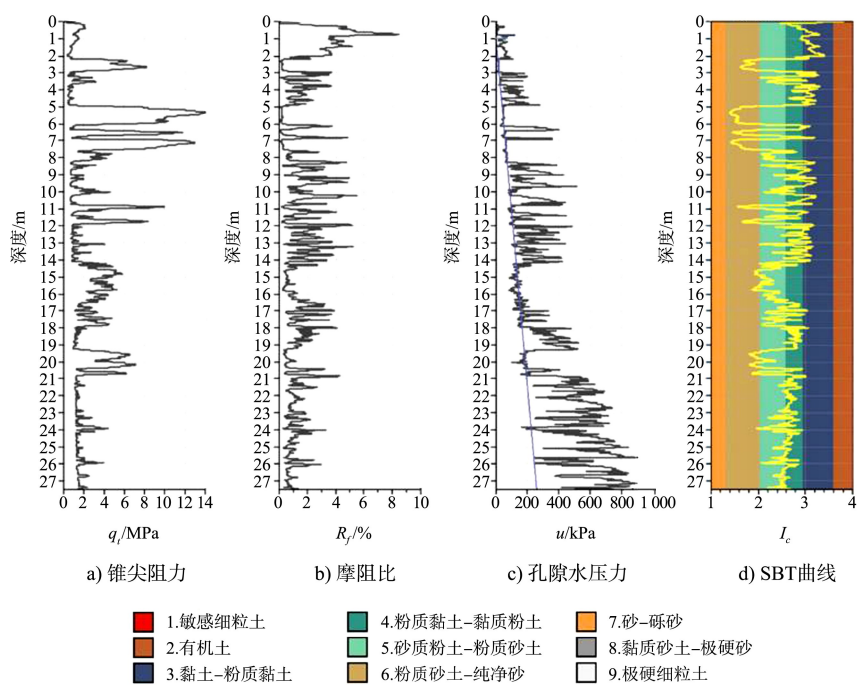


图 3 CPTu-9 测试曲线与土体分类

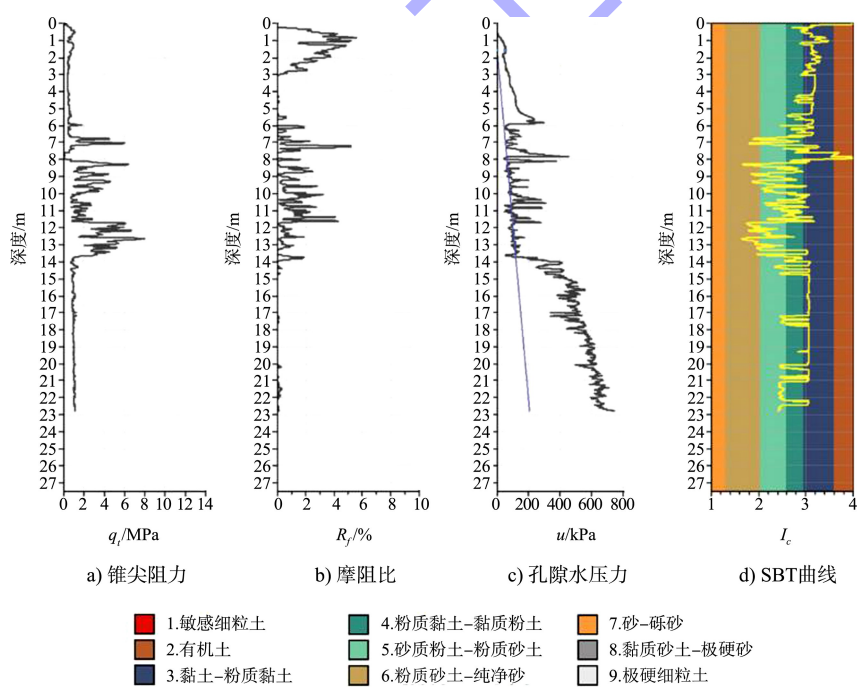


图 4 CPTu-13 测试曲线与土体分类

2.3 试验场地液化敏感性评价

将图 2 中的土体剖面分别与图 3、4 中土体特性剖面进行比较，可知土体划分大体一致，只是 CPTu 曲线记录了更多土体信息，并将土体分类进行了细化。如钻孔 B_7 揭示中间土层为粉细砂，而 CPTu 结果揭示出粉质黏土、黏质粉土、砂质粉土

及粉质砂土的互层情况；孔 E_5 揭示中间土层为粉细砂和中砂，而 CPTu 结果揭示了砂质粉土的存在，并清晰地表明了 3 种土体的具体位置及厚度。

此外，CPTu 结果揭示了砂层中黏土/粉土薄层的存在。通过静水压力线上方的孔隙水压力曲线，CPTu 清晰地揭示了这些薄层的位置。黏土/

粉土的存在必然会对液化条件下土体的响应产生影响。

根据这些测试结果, 对液化敏感性进行评价。基于 SPT 和 CPTu, 对两个位置不同深度处的抗液化安全系数进行深入计算, 结果见图 5、6。整个深度方向安全系数值均较低, 表明两个位置都存在较厚的易液化土层。图 5 中有两个点例外, 即 6.0~7.5 m 深度处 FS_{liq} 大于 1, 单从 SPT 击数曲线无法解释, 但是从 CPTu 曲线可知该处为中砂-粗砂, q_t 值达到最大, 没有液化的风险。

根据两种评估方法, 获得了一致的评估结果, 且 SPT 和 CPTu 测得的 FS_{liq} 绝对值差异较小。两个钻探孔的 FS_{liq} 平均值分别为 0.43 和 0.48, 两个静探孔中与标贯测试点相同深度的 FS_{liq} 平均值分别为 0.41 和 0.35, 总体上 CPTu 测试结果更偏于保守。但是, 基于 CPTu 的 FS_{liq} 的可变性比 SPT 大, 这种可变性源于 CPTu 试验方法提供更详细的土体特征, 即揭示了细粒土和粗粒土的互层关系。

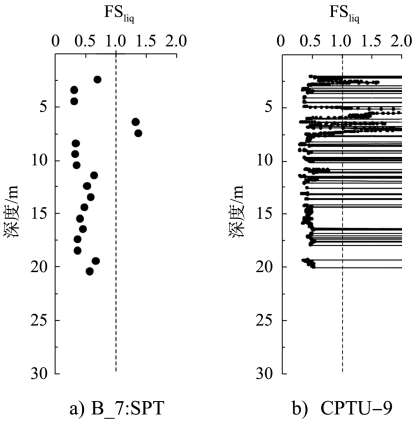


图 5 场地 1 抗液化安全系数

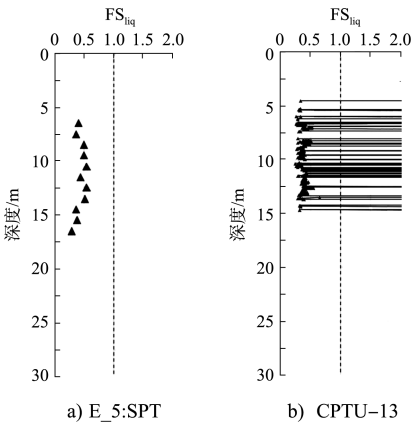


图 6 场地 2 抗液化安全系数

3 结论

1) 通过对比两个钻孔的标贯击数与地层分布可知, 很难通过 SPT 击数来区分不同土体类别, 一方面是因为标贯测试无法克服排水条件的限制, 另一方面是标贯测试容易受到土体界面的影响, 标贯击数表现出很大的差异性。

2) 与钻孔取芯相比, CPTu 曲线记录了更多土体信息, 并将土体分类进行了细化。通过比较孔隙水压力曲线与静水压力直线的位置, 可以直观地识别出砂土层中黏土/粉土薄层的位置, 为砂土液化评估提供更详细的依据。

3) 利用 SPT 与 CPTu 测试方法, 对两个位置的土层砂土液化势进行评估, 获取了一致的评估结果, 总体上 CPTu 评估结果更偏于保守。CPTu 揭示了更详细的土体特征, 也导致基于 CPTu 的 FS_{liq} 计算结果可变性更大。

参考文献:

[1] MOGAMI T, KUBO K. The behaviour of soil during vibration[C] //Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London: International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1953: 152-153.

[2] 郭培军, 李克钊. 用静力触探评价饱和和砂土的液化势[J]. 岩土工程学报, 1989(1): 13-24.

[3] 邱毅. 唐山地震液化场地再调查及数据分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008.

[4] 侯龙清, 徐红梅, 曹振中, 等. 汶川地震液化土层类型验证及土性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1119-1124.

[5] 吴再光, 韩国城, 林皋. 砂土地震液化的概率分析[J]. 大连工学院学报, 1988(2): 111-118.

[6] 王兰民, 车爱兰, 王林. 日本北海道 6.7 级地震灾害特点与启示[J]. 城市与减灾, 2019(1): 1-8.

[7] 赵登科, 王自法, 刘渊, 等. 基于新西兰实际震害资料的地震损失不确定性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(2): 84-95.

[8] 周神根. 静力触探判别砂土液化[J]. 岩土工程学报, 1980(3): 38-45.

[9] ROBERTSON P K, WRIE C E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test[J]. NRC research

press Ottawa, Canada, 1998, 35(3): 442-459

[10] ZHANG G, ROBERTSON P K, BRACHMAN R W I. Estimating liquefaction induced ground settlements from CPT for level ground[J]. Canadian geotechnical journal, 2002, 39: 1168-1180.

[11] ROBERTSON P K. Performance based earthquake design using the CPT[C]//Tokyo: International Conference on Performance-Based Design in Earthquake, 2009.

[12] JUANG, C H, YUAN H, LEE D H, et al. Simplified cone penetration test-based method for evaluating liquefaction resistance of soils[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2003, 129(1): 66-80.

[13] 段伟, 蔡国军, 刘松玉, 等. 基于 CPTU 测试的港珠澳大桥砂土液化评价方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S2): 236-239.

[14] 童立元, 涂启柱, 刘松玉, 等. 基于多功能地震波孔压静力触探的唐山地区砂土液化特性再调查试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2782-2791.

[15] 杨洋. 基于我国规范参数的土层液化可能性评价方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019.

[16] SEED H B, IDRIS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of geotechnical engineering division (ASCE), 1971, 97(9): 1249-1273.

[17] SEED H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes[J]. Journal of geotechnical engineering division (ASCE), 1979, 105(2): 201-255.

[18] BOULANGER R W, IDRIS I M. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures[R]. Davis: University of California, 2014.

[19] IDRIS I M, BOULANGER R W. SPT-Based Liquefaction Triggering Procedures[R]. Davis: University of California, 2010.

[20] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

深中通道海底沉管隧道 E18 管节安装成功

4 月 24 日, 经 23 h 20 min 的连续作业, 粤港澳大湾区核心枢纽工程深中通道 E18 管节顺利完成沉放对接, 至此已安装管节长度累计达 3 877.8 m, 突破沉管段总长度 (5 035 m) 的 3/4。

E18 管节长 165 m, 为爬坡段标准管节, 其安装隧址位于浅滩区, 部分水域施工水深受限。中交一航局深中通道项目工程部沉管分部部长管泽旭说: “受限于浅滩区系泊需要乘高潮作业, 将管节沉放窗口期调整至落急期, 虽然整体水文条件较平潮期差, 但是水深能满足船舶系泊要求。”项目周密筹划、提前部署, 开展原泥面水深多波束扫测, 精准锁定浅点区域位置, 优化船舶系泊锚位, 有效降低浅滩对施工的影响。

当前复杂多变的新冠肺炎疫情, 为项目人员管理带来严峻挑战。4 月以来, 珠江口冷空气活动不断, 强对流、突风、大雾天气频发。各种不利因素产生叠加效应, 对海上施工作业带来较大挑战。建设团队严守防疫和安全两道底线, 科学组织、协同作业, 依托国家海洋预报中心强化气象监测, 锁定最佳施工时间, 并通过调整整平工艺、强化风险管控等方式, 为沉管顺利安装对接提供保障。

4 月 23 日凌晨 3 时 30 分, 沉管浮运安装作业正式开始, “一航津安 1”沉管运安一体船提带 E18 管节乘潮启航, 经过近 50 km 航道浮运, 于 14 时抵达施工水域。4 月 24 日凌晨 2 时 50 分, 经精调沉放、拉合及水力压接等工序, E18 管节完成对接安装, 对接精度满足验收评定标准。

深中通道是国家重大工程, 全长 24 km, 是集“桥、岛、隧、水下互通”于一体的世界级跨海集群工程。海底隧道长约 6.8 km, 其中沉管段 5 km 左右, 由 32 个管节及 1 个最终接头组成, 为特长超宽双向八车道海底沉管隧道。