



基于原位测试的深层密实法地基处理检测验收

王德咏^{1,2,3}, 梅涛涛^{1,2}, 王 婧^{1,2,3}, 邱青长^{1,2,3}, 梁小丛^{1,2,3}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 境外大面积无黏性土地基常用动力密实法进行加固处理, 检测以静力触探试验(CPT)或标准贯入试验(SPT)为主。我国规范一般根据设计要求直接给出验收需要的锥尖阻力 q_c 值或标贯击数 N 值, 境外地基处理工程验收则不同。对比了中外地基处理密实法设计及验收思路, 总结归纳了常用的原位测试指标(q_c 和 N)与土体的相对密实度的关系。以境外工程为例, 提出了无黏性土验收准则的思路与流程, 建立了基于 q_c 和 N 的密实地基验收曲线。可为境外水运工程地基处理检测验收提供参考。

关键词: 欧美标准; 地基处理; 静力触探试验; 标准贯入试验; 相对密实度

中图分类号: TU 43; U 656. 1⁺39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0190-06

Detection and acceptance of foundation treatment by compact method based on in-situ test

WANG De-yong^{1,2,3}, MEI Tao-tao^{1,2}, WANG Jing^{1,2,3}, QIU Qing-chang^{1,2,3}, LIANG Xiao-cong^{1,2,3}

(1.CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2.Key Laboratory of Environmental Protection & Safety of Communication Foundation Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;

3.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519082, China)

Abstract: The large-area hydraulic sand ground abroad was usually improved by the dynamic compaction method, and its detection was based on the static cone penetration test(CPT) or the standard penetration test(SPT). Chinese relevant standards generally directly give the cone tip resistance q_c value or the standard penetration number N value as acceptance index, while the acceptance criteria of overseas ground improvement projects is different. The design and acceptance ideas of compaction methods for ground improvement at home and abroad were compared, and the relationships between the in-situ test indicators(q_c and N) and the relative compactness of the soil were summarized. Taking overseas projects as examples, the idea and process of acceptance criteria for non-cohesive ground improvement were proposed, and the acceptance curve for dense ground based on q_c and N was established. It can provide a reference for the inspection and acceptance of ground improvement of overseas water transportation projects.

Keywords: European and American standards; ground improvement; cone penetration test; standard penetration test; relative compaction

随着“一带一路”倡议的推进,越来越多的中国企业参与境外基础设施建设。地基处理是建筑稳定和安全的重中之重,而境外地基处理工程以欧美验收标准^[1-2]为主,中国工程检测等规范中的方法与欧美标准存在一定的差异,不熟悉欧美

标准、地基材料或者地基检测标准得不到欧美客方的认可会造成工程成本增加。

在境外地基处理检测验收时,一般须根据地基处理的设计要求提出相应的检测验收曲线^[3-4],这与国内的地基处理检测验收有所不同。国内标

收稿日期: 2020-11-07

作者简介: 王德咏(1982—),男,博士,高级工程师,主要从事岩土工程地基处理和边坡等方面的工作。

准倾向基于经验性判断, 提供具体的验收值, 即确定的标准贯入试验 (SPT)、静力触探试验 (CPT/CPTU) 验收值, 验收标准随机性大。同时辅以载荷板试验, 国外也称之为 ZLT (zone load test)。因此系统地解读欧美地基处理检测验收标准并开展与我国规范的差异研究, 对境外地基处理工程极有意义。

1 欧美深层密实法设计思路

文献 [5] 对比了中、欧、美常用地基处理标准在工艺参数设计方面的差异性。欧美地基处理设计把地基的密实度作为设计指标, 并根据土体相对密实度建立设计指标与工艺参数、验收指标的关系, 见图 1。

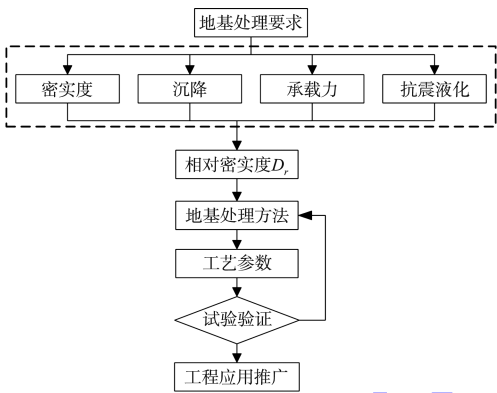


图 1 欧美密实法地基处理设计流程

对于大面积地基处理设计, 国内一般根据地基处理设计要求提出承载力、沉降与液化稳定性等设计指标的具体要求值, 直接给出需要达到的标贯击数 N 值或锥尖阻力 q_c 值, 进而通过规范或经验提出相应的工艺参数; 欧美标准中除上述 3 大设计指标外, 还有对密实度的要求, 其思路是先根据试验等将设计的指标转换成标贯击数 N 值或锥尖阻力 q_c 值, 再根据 N 值或 q_c 值与相对密实度 D_r 指标之间经验关系, 转换成 D_r 的指标要求, 最后根据相对密实度来设计工艺技术参数。

2 相对密实度与原位检测指标的关系

对于无黏性地基而言, 相对密实度是反映无黏性土工程性质的重要指标, Lee 等、Youssef 等^[6]通过多组试验建立了砂土相对密实度和压实度的线性关系。同时也有不少专家学者^[7-8]建立了原位测试指标与砂土相对密实度的关系, 并以相对密实度为纽带建立地基设计指标与检测指标的关系, 使地基处理效果检测验收准则的提出更为严谨。

2.1 相对密实度 D_r 与 CPT 经验关系

砂土的相对密实度往往采用标定槽试验进行统计分析, 建立 D_r 与锥尖阻力之间的经验或半理论-半经验关系式。基于 CPT 的砂土相对密实度评估方法^[9]见表 1。

表 1 基于 CPT/CPTU 的砂土相对密实度评估方法

计算公式	文献来源	参数取值
$D_r = k_3 + k_4 \lg \left[\frac{(q_c/k_1)}{(\sigma'_{v0}/k_0)^{k_2}} \right]$	Jamiolkowski 等 ^[10] , 1985 Lunne 等 ^[11] , 1997	D_r 为相对密实度, q_c 为实测锥尖阻力, σ'_{v0} 为原位有效竖向应力, $k_0 \sim k_4$ 为经验系数, $k_0 = 0.100, k_1 = 0.098, k_2 = 0.5, k_3 = -98, k_4 = 66$
$D_r = \frac{1}{k_2} \ln \left[\frac{q_c}{k_0 (\sigma')^{k_1}} \right]$	Baldi 等 ^[12] , 1986 Lunne 等, 1997	σ' 为上覆地层有效应力; 正常固结: $k_0 = 157, k_1 = 0.55, k_2 = 2.41, \sigma' = \sigma'_{v0}$; 超固结: $k_0 = 181, k_1 = 0.55, k_2 = 2.46$
$D_r = \left[\frac{Q_t}{305k_1 \cdot OCR^{0.18} \cdot (1.2 + 0.05 \lg(t/100))} \right]^{0.5} \cdot 100$ $Q_t = (q_t - \sigma'_{v0}) / \sigma'_{v0}$ $q_t = q_c + u(1-a)$	Kulhawy, Mayne ^[13] , 1990	Q_t 为归一化锥尖阻力, q_t 为修正锥尖阻力, OCR 为超固结比, 经验系数 k_1 取值如下: 中等压缩: $k_1 = 1.0$, 高压缩: $k_1 = 1.09$, 低压缩: $k_1 = 0.91, t$ 为胶结年代; u 为孔隙水压力; a 为修正系数
$D_r = 0.478 (q_{c1N})^{0.264} - 1.063$	Cubrinovski, Ishihara ^[14] , 1999	q_{c1N} 为等效归一化锥尖阻力

续表1

计算公式	文献来源	参数取值
$D_r = 100 \left[k_1 \ln \left(\frac{q_c/p_a}{\sqrt{\sigma'_{v0}/p_a}} \right) + k_2 \right]$ $D_r = 0.478 (q_{cIN})^{0.264} - 1.063$	Jamiolkowski 等 ^[15] , 2001 Mayne ^[16] , 2007	p_a 为参考应力 (100 kPa); k_1 取 0.268; k_2 与固结比相关, 中等压缩时 $k_2 = -0.675$, 高压压缩时 $k_2 \leq 1.0$, 低压压缩时 $k_2 \geq -2.0$ 。
$Q_m = [(q_t - \sigma_{v0})/p_a] \cdot [p_a/(\sigma'_{v0})]^n$	Robertson 等, 2009	Q_m 为归一化锥尖阻力, σ_{v0} 为原位有效竖向应力; C_{Dr} 范围为 300 ~ 400, 一般取平均值 350

Mayne 指出, Jamiolkowski 等和 Baldi 等的方法并未考虑柔性壁标定槽所引起的锥尖阻力 q_c 降低效应, 而 Jamiolkowski 等所提出的方法则考虑了尺寸效应和压缩性对关系式建立的影响, 并分析 5 个国家的不扰动试样和 CPT 测试数据, 验证了 Jamiolkowski 等方法的适用性。Mayne 同时指出, 对于碳质或含钙质砂土, 通常由于颗粒破碎而趋于符合高压压缩性土的估算公式。Robertson 和 Campanella 总结和评价了已有砂土标定槽中 CPT 的试验结果, 强调了压缩性对相对密实度的影响。

相对密实度 D_r 与 CPT 经验关系主要以 Baldi 提出的经验关系为主, 在欧美设计文件中应用较为普遍, 其公式为:

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \frac{q_c}{C_0 (\sigma')^{C_1}}$$

(1)

式中: C_0 、 C_1 、 C_2 为砂土经验系数; σ' 为上覆地层有效应力; q_c 为 CPT 锥尖阻力。Baldi 基于 10 组试验提出适用于正常固结且非沉积、非胶结硅质砂经验系数为 $C_0 = 157$ 、 $C_1 = 0.55$ 、 $C_2 = 2.41$; 适用于正常超固结砂的经验系数为 $C_0 = 181$ 、 $C_1 = 0.55$ 、 $C_2 = 2.61$, 对应的关系见图 2。

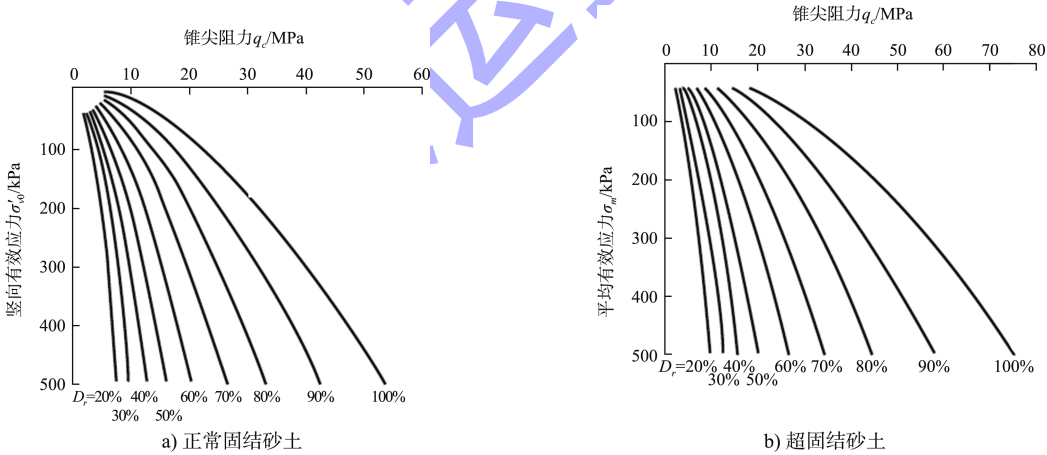


图 2 考虑上覆压力的砂土 D_r 与 q_c 的经验关系

2.2 相对密实度 D_r 与 SPT 经验关系

无黏性土的相对密实度可以基于标贯击数导

出, 对基于 SPT 的砂土相对密实度 (D_r) 评估方法^[17]进行了总结, 见表 2。

表 2 基于 SPT 的砂土相对密实度评估方法

计算公式	文献来源	参数含义或取值
$D_r = \sqrt{N/(17+0.25\sigma'_v)}$ $N = 20D_r^{2.5} + 0.21\sigma'_v D_r^2$	Gibbs, Holtz ^[18] , 1957 Meyerhof ^[18] , 1957	N 为实测的标准贯入锤击数
$D_r = \begin{cases} \sqrt{N/(20+0.84\sigma'_v)} & \sigma'_v < 72 \text{ kPa} \\ \sqrt{N/(65+0.21\sigma'_v)} & \sigma'_v \geq 72 \text{ kPa} \end{cases}$	Peck, Bazaraa ^[20] , 1969	—

续表2

计算公式	文献来源	参数含义或取值
$D_r = \begin{cases} \sqrt{N/(a+b\sigma'_v)} & \text{正常固结} \\ \sqrt{N/(a+C_{\text{ocr}}b\sigma'_v)} & \text{超固结} \end{cases}$	Skempton ^[21] , 1986	$C_{\text{ocr}} = \frac{1+2K_o}{1+2K_{\text{ONC}}}$, $K_{\text{ONC}} = 1-\sin\varphi'$ $K_o = K_{\text{ONC}}(\text{OCR})^{\sin\varphi'}$, φ' 为有效内摩擦角, a 、 b 为经验系数
$D_r = 0.21 \sqrt{N/(17+\sigma'_v/98)} + \Delta N_f/1.7$	Tokimatsu, Yoshimi ^[22] , 1983	ΔN_f 为与砂土细粒含量有关修正变量
$D_r = C_0 \cdot \sigma'_{v0}^{-C_1} \cdot N_{60}^{C_2}$	Yoshida ^[23] , 1988	$18 < C_0 < 25$, 最优值是 25; $0.44 < C_2 < 0.57$, 最优值是 0.46; $0.12 < C_1 < 0.14$, 最优值是 0.12。 N_{60} 为修正为标准应力波能量比的标贯击数
$D_r = \sqrt{\frac{N_{78}(e_{\text{max}} - e_{\text{min}})^{1.7}}{9}} \sqrt{\frac{98}{\sigma'_v}}$	Cubrinovski, Ishihara, 1999	N_{78} 为考虑上覆压力为 100 kPa, 标准贯入试验能量锤击效率为 78% 时修正后的标贯锤击数, e_{max} 为最大孔隙比, e_{min} 为最小孔隙比

相对密实度与 SPT 关系, 目前最常用且比较可靠的是由 Gibbs and Holz 提出的经验关系, 见图 3。

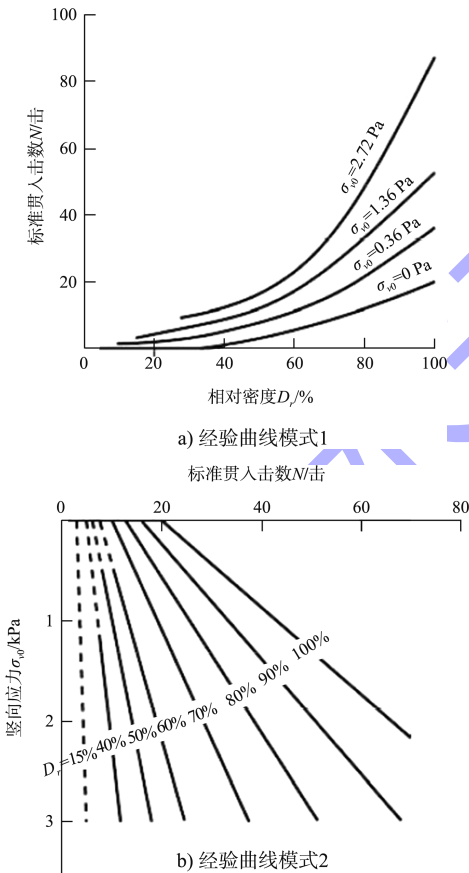


图 3 砂土 D_r 与 N 的经验关系

Meyerhof 给出了 N 值和 D_r 的间接关系:

$$\frac{N}{D_r^2} = a + b\sigma_{vo} \tag{2}$$

Skempton 通过 5 种不同的土类的试验数据, 发现 a 和 b 与场地相关。 $15 < a < 54$, $0.204 < b < 0.306$ (以 N'_{70} 为基准), 一般常用 a 和 b 的平均值, 得到:

$$\frac{N'_{70}}{D_r^2} = 32 + 0.288\sigma'_{vo} \tag{3}$$

式中: a 、 b 为经验系数; σ'_{vo} 为有效上覆地层应力(kPa)。对于正常固结砂土, 平均密度为 $1.6 \sim 1.7 \text{ t/m}^3$ 且深度在 6 m 左右的情况下, $N'_{70}/D_r^2 \approx 60$; 对于细砂, 相应的 N 值还应乘上相应的折减系数 55/60; 如为粗砂, N 值折减系数为 65/60; 对于密实砂土, 系数 a 随伴随时间增加呈现增加趋势。

3 工程实例

以科威特某液化天然气站场地项目及东帝汶帝巴湾新集装箱码头项目为例, 提出地基处理验收准则的建立方法与流程。两工程的地基处理要求见表 3。

表 3 案例地基处理指标及要求

工程案例	地基处理方法	承载力	沉降	相对密实度	液化稳定性	主要验收手段
工程 1: 科威特某液化天然气场地地基处理项目	振冲密实法	$\geq 200 \text{ kPa}$	10 a 沉降 $\leq 25 \text{ mm}$	水下 $D_r \geq 60\%$ 水上 $D_r \geq 80\%$	液化潜力指数 < 2	CPT
工程 2: 东帝汶帝巴湾新集装箱码头项目	碎石桩	1 m 以下承载力大于 250 kPa	25 a 沉降 $\leq 35 \text{ mm}$	桩间土 $D_r \geq 50\%$	抗液化安全系数 > 1.1	SPT

关于工程 1 的验收准则，首先根据地基要求的抗液化强度、压实度、承载力、沉降分别建立与对应疏浚土相对密实度的关系，形成相应的验收曲线，再综合获得地基加固处理的验收曲线，文献 [3] 进行了详细的阐述，得到的验收曲线见图 4。

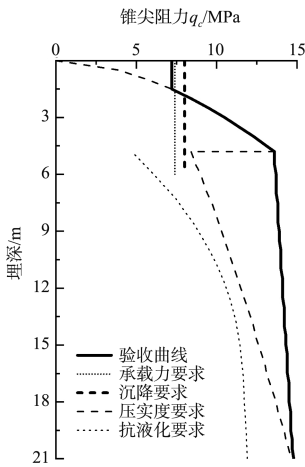


图 4 科威特某振冲密实加固地基验收曲线

对于工程 2，考虑到工程地处于强震地区，最大地震设计加速度达 0.53g，验收准则关系建立采用文献 [24] 中的计算公式：

$$D_r = \sqrt{(N_1)_{60}}/46 \tag{4}$$

根据对应的临界密实度，可获得考虑可修正后的标贯击数 $(N_1)_{60}$ ，然后考虑地基土体的埋深、细粒含量，根据文献 [25] 计算不同深度的液化安全系数，并核算对应的承载力和沉降。当然，在这个项目中，抗震要求很高，能满足抗震的话，其它设计指标均能满足。建立的碎石桩桩间土的验收曲线见图 5。

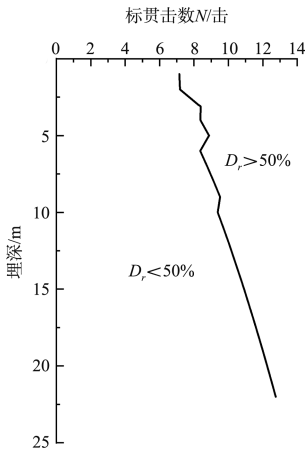


图 5 东帝汶某碎石桩加固地基桩间土验收曲线

应用标准贯入试验验收时，标贯试验设备方面，需要注意：中美的落锤类型和方式不同，中英的锤垫质量不同；中、欧、美对标贯击数的水位、杆长、上覆土压力、能量修正不同。在应用时一定要注意设备的适用范围、修正方法以及相关性经验关系的实用性等。与国内规范给出的验收指标 (N 值或 q_c) 相比，境外地基处理应用的验收曲线考虑了土体的细粒含量以及上覆土压力的影响，相对更为科学。

4 结论

1) 基于欧美标准的海外地基处理工程，一般根据地基设计指标的承载力、沉降、密实度、抗震液化等要求，基于相对密实度的转换，建立不同设计指标与检测指标的关系曲线，然后综合得到地基检测的验收曲线。

2) 在应用标贯试验来建立地基处理验收曲线时，一定要注意中外设备及规范中得到的标贯击数的区别，应用时应建立相应的转换关系。

3) 地基处理验收曲线的确定对工程的质量、进度、成本来说极为关键，本文采用 CPT 提出的验收曲线能够定量地反映并满足场地的液化、压实度、承载力、沉降各方面的要求，具有一定的科学性。

参考文献：

[1] British Standards Institution. Eurocode 7: Geotechnical design-Part 2: Ground investigation and testing[S]. London: British Standards Institution, 2007.

[2] Navfac. Soil dynamics and special design aspects[R]. Washington: Navfac, 1997.

[3] 王德咏, 陈华林, 梁小丛, 等. 静力触探技术在吹填砂地基处理全过程中的应用[J]. 水运工程, 2018 (5): 176-182.

[4] 叶锋, 陈小利, 贺迎春, 等. 基于 CPT 判别土类及状态在地基检测中的应用[J]. 水运工程, 2013 (9): 160-163.

[5] LEE K L, SINGH A. Compaction of granular soils [C]// Engineering Geology and Soils Engineering Symposium, Proceedings of the 9th Annual. Boise: Engineering Geology and Soils Engineering, 1971.

[6] YOUSSEF G, ABDELRAHMAN G. Correlations between relative density and compaction test parameters[C]. 12th ICSGE. Cairo - Egypt : Ain Shams University Faculty of

Engineering , 2007.

[7] ROBERTSON P K C. Guide to cone penetration testing[M]. 6th ed. California: Gregg Drilling and Testing, Inc, 2015.

[8] BOWLES J E. Foundation analysis and design[M].Singapore: McGraw-Hill International Editions, 1997.

[9] 东南大学.孔压静力触探测试技术规程: T CCES1—2017[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[10] JAMIOLKOWSKI M, LADD C C, GERMAINE J T, et al. New developments in field and laboratory testing of soils[C]// Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation. San Francisco: [s.n.], 1985: 57-153.

[11] LUNNE T, POWELL J J M, ROBERTSON P K. Cone penetration testing in geotechnical practice [M]. London: Blackie Academic and Professional, 1997.

[12] BALDI G. Interpretation of CPT's and CPTU's. Part 2: Drained penetration of sands[C]. Proc. 4th Int. Geotech. Sem. Field Instrumentation and In Situ measurements, Singapore: NT1, 1986: 143-156.

[13] KULHAWY F H , MAYNE P W . Manual on estimating soil properties for foundation design[M].Atlanta: Geogia Institute of Technology, 1990.

[14] CUBRINOVSKI M, ISHIHARA K. Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils[J]. Soils and foundations, 1999, 39(5) : 61-71.

[15] JAMIOLKOWSKI M, LO PRESTI D C F , MANASSERO M. Evaluation of rntive density and shear strength of sands from CPT and DMT[C]// Soil Behavior and Soft Ground Construction, ASCE Geotechnical Special Publication. Reston, Virginia : American Society of Civil Engineers, 2001: 201-238.

[16] MAYNE P W. Invited overview paper: in-situ test calibrations for evaluating soil parameters, characterization & engineering properties of natural soils [M]. London: Taylor & Francis Group, 2007: 1602-1652.

[17] HAMIDI B, HAMID N, SERGE V. Relative density concept is not a reliable criterion[J] . Ground improvement, 2013, 166(4) : 196-208.

[18] GIBBS H J, HOLTZ W G, GIBBS H J.Research on determining the density of sands by spoon penetration testing[M]. Denver, Colo. : Commissioner's Office, Engineering Laboratories, 1956.

[19] HALDAR A, TANG W H, Probabilistic evaluation of liquefaction potential [J] . J Geotech Engng Div ASCE, 1979, 105(2) : 145-163.

[20] PECK RB, BAZARAA A R S S. Discussion of settlement of spread-footings on sand[J] . J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 1969, 95(SM3) , 305-309.

[21] SKEMPTON A W. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation [J] . Geotechnique, 1986, 36(3) : 425-447.

[22] TOKIMATSU K, YOSHIMI Y. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content [J] . Soils and foundations, 1983, 23(4) : 56-74.

[23] YOSHIDA Y, IKEMI M, KOKUSHO T. Empirical formulas of SPT blow-counts for gravelly soils[J].Penetration testing, 1988(1) : 381-387.

[24] IDRIS I M, BOULANGER R W. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2004, 26(2-4) : 115-130.

[25] 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 & geoenvironmental engineering, 2001, 127(4) : 297-313.

(本文编辑 武亚庆)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：www. sygc. com. cn，敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部