



静力触探技术(CPT) 在砂性地基处理验收检测中的应用

张林, 郭嫣嫣

(大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司, 辽宁大连 116023)

摘要: 在砂土上进行地基处理设计时, 为了满足上部结构的稳定性及使用要求, 常规定一项或多项验收指标(液化判别、相对密度等)。如何判断经过处理后的地基满足验收指标是关键问题。针对上述问题, 工程上常采用原位试验数据建立与验收指标的相关性, 得到经验公式。对比国内外常用的基于CPT计算砂土指标的公式, 综合确定验收曲线(满足最小锥尖阻力 q_c 和土层深度的关系)。结果表明: 1) 在满足砂土相对密度的同时, 有效内摩擦角和承载力不作为控制因素。2) 若工后沉降不满足要求, 应当适当提高基于相对密度要求的验收标准。3) CPT能提供关于土层数据的连续曲线, 与土层性质之间的数据较为丰富。4) 基于CPT计算的验收指标, 可为地基处理工艺提供指导依据。

关键词: 静力触探(CPT); 相对密度; 摩擦角; 状态参数

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0191-07

Application of cone penetration test in acceptance inspection of sand foundation treatment

ZHANG Lin, GUO Yan-yan

(The Design Institute of Civil Engineering & Architecture Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to satisfy the stability and use requirements of the superstructure, one or more acceptance indexes (liquefaction judgment, relative density, etc.) are often specified in the design of the foundation treatment on sand soil. How to judge that the treated foundation meets the acceptance index is the key problem. In view of the above problems, the correlation between the in-situ test data and the acceptance index is often established in engineering, and the empirical formula is obtained. In this paper, the acceptance curve (which satisfies the relationship between the minimum cone resistance q_c and the soil depth) is determined comprehensively by comparing the commonly used formulas for calculating sand indexes based on CPT at home and abroad. The results show that: 1) The effective internal friction angle and bearing capacity are not considered as the controlling factors while the relative density of sand is satisfied. 2) If the post-construction settlement does not meet the requirements, the acceptance criteria based on the relative density requirements should be appropriately raised. 3) CPT can provide continuous curve of soil layer data, and there is abundant data between it and soil properties. 4) The acceptance index based on CPT calculation can provide guidance for the foundation treatment technology.

Keywords: cone penetration test (CPT); relative density; friction angle; state parameter

国外某项目直立式防波堤属于深水防波堤, 原始水深在 30~40 m, 根据地勘资料, 表层细砂及底层中砂均为易液化砂层, 岩层埋深较深。在进行地基处理设计时, 若考虑将液化土层全部挖

除, 则造价高、工期长; 而无填料振冲密实法对于砂土地基来说是一种非常有效的地基处理方法。无填料振冲密实法对砂土细颗粒含量较为敏感, 理想的情况下, 土层细颗粒(粒径 <0.075 mm)含

收稿日期: 2021-08-23

作者简介: 张林(1990—), 男, 工程师, 从事港口及航道工程设计、咨询工作。

量应该小于10%。国内外学者普遍认为振冲挤密法仅适合细颗粒含量小于12%(需要根据土的颗粒级配、振冲器功率、振冲间距等进行试验确定)的粗砂或者中细砂地基^[1]。该项目原状土层细颗粒含量分布范围较广,在9%~25%。为了达到预期的处理效果,首先根据Brown提出的方法^[2]利用土的颗粒级配判别砂土是否适合振冲,然后将不适合振冲的、含泥量过大的细砂挖除后对底层中砂进行无填料振冲密实。

为了保证砂土不液化、满足结构安全及使用要求,国外工程师提出了以下振冲验收标准:液化判别安全系数大于1.25、砂土的相对密度大于70%、有效内摩擦角大于35°、地基承载力大于300 kPa、20 a工后沉降小于30 mm。

针对砂土的相对密度和有效内摩擦角等参数的确定,本文对比分析国内外常用的基于静力触探CPT的计算公式,分析各公式的适用范围,结合工后沉降量确定验收曲线。最后,根据CPT验收曲线计算承载力和液化判别,可为相似工程验收提供参考。基于CPT的液化判别可参考Boulangier方法^[3]。

1 相对密度

砂土的相对密度作为力学特性的指标广泛应用于工程中,判断砂土的密实状态的最简便方法是利用孔隙比。孔隙比不能反映土颗粒的形状和级配,对于不同的砂土,相同的孔隙比不能说明密实度也相同^[4]。因此,引用相对密度 D_r 来评价土的密实状态。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

式中: e 、 e_{\max} 、 e_{\min} 分别为原始、最大、最小孔隙比。

孔隙比的测定往往伴随一定的误差,此外,粗粒土的应力、应变和强度特性过于复杂,不能仅用土的相对密度来表示。然而,国外一些项目仍然会使用相对密度作为经过地基处理土层的验收标准,所以相对密度仍然应用广泛。

由于从砂土中提取未扰动样本十分困难,且

成本较高。工程上常用原位试验数据建立与相对密度的相关性,得到经验公式,这种间接的评估方法增加了诸多不确定性。通过与在实验室中确定的相对密度比较进行数据校正,原位试验方法已被广泛应用于岩土工程。

静力触探(CPT)在确定土的类型、变形特性、强度特性和渗流固结方面均有十分广泛的应用、成果准确可靠。Schmertmann^[5]在实验室进行CPT试验,首次提出了锥尖阻力 q_c 和相对密度 D_r 之间的综合关系。并认为对于正常固结、未老化的细至中砂(细颗粒含量小于5%),相对密度 D_r 由下式计算:

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \frac{q_c}{C_0 \sigma'_{vo} C_1} \quad (2)$$

式中: q_c 为锥尖阻力; C_0 、 C_1 、 C_2 为常数,取值见表1; σ'_{vo} 为有效垂直应力。

对未胶结中等压缩的中细石英砂,Baldi^[6]在Schmertmann研究的基础上,根据大量校准室内测试结果,对公式(2)进行修正。Baldi认为实验室测量的 q_c 很大程度上受到水平有效应力 σ'_{ho} 的影响。为了考虑 σ'_{vo} 和 σ'_{ho} 的影响,在超固结状态下,将公式(2)中的 σ'_{vo} 用有效平均应力 σ'_m 代替,即 $\sigma'_{vo} = \sigma'_m$ 。

Jamiolkowski^[7]提出了归一化锥尖阻力 Q_{cn} (基于 q_c 计算)与相对密度 D_r 的公式。

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \frac{Q_{cn}}{C_0} \quad (3)$$

$$Q_{cn} = \left(\frac{q_c}{P_a} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{C_1} \quad (4)$$

式中: P_a 为1个标准大气压强度,为100 kPa。超固结状态下 σ'_{vo} 定义与Baldi相同,即利用 σ'_m 代替 σ'_{vo} 。

Robertson^[8]认为目前在超固结砂土上应用 σ'_{ho} 和 σ'_m 代替 σ'_{vo} 非常困难,因为在原位试验或选择合适的 σ'_{ho} 来评估天然砂土的应力历史存在本质上难题。

为了简化计算,对于砂土,Robertson^[9]将公式(4)中 C_1 用0.5代替,最终得到公式(5)。然后代入公式(3)中计算相对密度。同时Robertson提

出公式(5)计算的 Q_{cn} 可以用公式(6)计算的 Q_m 代替。对于砂土, 计算所得 Q_{cn} 比 Q_m 高约 3%, 对相对密度 D_r 的计算基本没有影响。

$$Q_{cn} = \left(\frac{q_c}{P_a} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$Q_m = \left(\frac{q_r - \sigma'_{vo}}{P_a} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (6)$$

式中: Q_m 为归一化锥尖阻力(基于 q_r 计算); σ'_{vo} 为总竖向应力; q_r 为经孔压 u_2 修正的锥尖阻力, $q_r = q_c + u_2(1-a)$; u_2 为锥肩部位测试的孔隙水压力; a 为圆锥头锥底的横截面积与圆锥头顶柱的横截面积之比; n 为随土壤类型而变化的指数, 对黏性土, $n=1$; 对纯净砂, $n=0.5$; 对粉土和砂质粉土, n 在 0.5~1 取值。

Lunne 等^[10] 建议只在测量了 u_2 的情况下进行孔压修正。否则, 在砂土中, 可以近似用 q_c 代替 q_r 。面积比 a 在 0.7~0.9 变化, 其取值不能仅从几何因素来确定, 而应通过实验室校正或类似的试验来确定。

表 1 不同研究者定义的 C_0 、 C_1 、 C_2 常数

方法	C_0	C_1	C_2	备注
Schmertmann (1976)	50.00	0.70	2.91	正常固结
Baldi (1986)	157.00	0.55	2.41	正常固结
Baldi (1986)	181.00	0.55	2.61	超固结
Jamiolkowski (2003)	17.74	0.55	2.90	正常固结
Jamiolkowski (2003)	23.19	0.56	2.97	超固结
Robertson (2014)	15.70	0.50	2.41	-

Kulhawy 和 Mayne^[11] 提出了一种更简单的估算相对密度的公式:

$$D_r^2 = \frac{Q_{cn}}{305 Q_c Q_{OCR} Q_A} \quad (7)$$

式中: Q_c 为压缩系数, 从 0.90(低压缩)到 1.10(高压缩); Q_{OCR} 为超固结系数, $Q_{OCR} = OCR^{0.18}$; Q_A 为老化因素, $Q_A = 1.2 + 0.05 \lg\left(\frac{t}{100}\right)$, t 为时间(a); OCR为超固结比, 对于超固结比的计算, 可参考 Kulhawy 和 Mayne 等相关论文。

对于大多数年代近的、未胶结的硅基砂, 公式(7)可以简化为:

$$D_r^2 = \frac{Q_m}{350} \quad (8)$$

公式(8)中的常数 350 通常对应于中砂; 对于细砂, 该常数可以接近 300; 对于粗砂, 该常数可以接近 400。

国内规范《水运工程静力触探技术规程》^[12] 无黏性土相对密度计算公式如下:

$$D_r = (31.78 \ln q_t - 13.98) / 100 \quad (9)$$

国内规范的计算公式是通过室内试验及现场内置环刀取砂器得到的干密度计算相对密度, 然后与对应的 CPTU 数据分析得出公式(9), 在给定验收相对密度后, q_t 不随深度改变。

Schmertmann、Jamiolkowski、Baldi、Robertson 根据大量试验结果, 提出的公式(2)(3)不仅考虑了锥尖阻力与相对密度的关系, 还考虑了有效垂直应力对其的影响。Kulhawy 和 Mayne 方法同时考虑了土的压缩性、老化因素、超固结系数, 更为全面。见图 1。

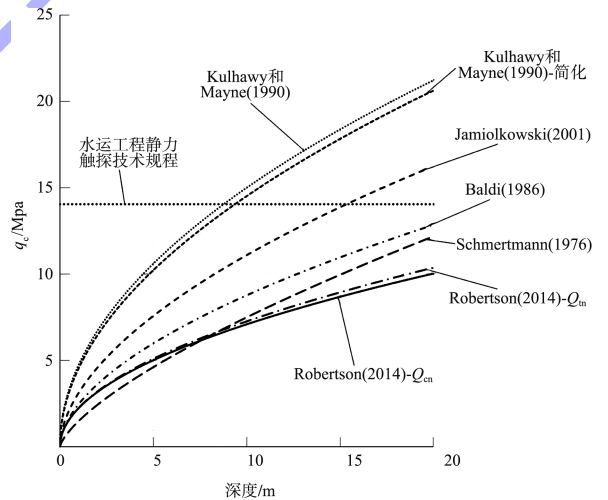


图 1 不同方法基于相对密度要求的 CPT 验收曲线

相对密度作为振冲密实法验收指标, 取值在 70%~90%。一般以相对密度达到 70%为基准^[13]。本项目亦采用 70%的标准, 国外项目例如塞内加尔达喀尔港、阿什杜德港, 也使上述标准作为验收条件。但因每个项目的地质情况不同、设计条件不同, 相对密度达到 70%作为一项验收指标, 应结合地质条件、设计条件综合确定。

为了达到 $D_r = 70\%$ 的验收标准,进行无填料振冲密实后的地基应满足基于CPT的最小 q_c 值。国外方法达到 $D_r = 70\%$ 时,不同深度需要的 q_c 值不同,土层越深 q_c 值越大。Kulhawy和Mayne及简化方法计算的 q_c 值最大,其简化方法公式(8)中参数取值范围大,需要一定的工程经验,所以应用上具有局限性;Jamiolkowski的计算结果接近平均值;Schmertmann、Baldi计算值稍大;Robertson计算值最小。本文为了对比有效内摩擦角、承载力、沉降等验收指标与相对密度的控制关系,首先采用Robertson方法确定相对密度验收曲线。若有效内摩擦角、承载力、沉降等验收指标控制验收标准,应采用图1中其它方法提高验收标准或者对Robertson方法进行局部修正。

2 状态参数

虽然土体的相对密度被广泛用于表征砂土液化地基或吹填工程等的密实度。砂土的变形特性主要取决于土体相对密度与所处的有效应力水平^[14]。Been和Jefferies为了同时反映相对密度与应力水平变化对砂土变形性质的双重影响,提出了状态参数 ψ 的概念,见图2,即在相同平均有效应力下,砂土的孔隙率 e 与临界状态孔隙率 e_c 之差。当 $\psi > 0$ 表示砂土当前处于松散状态,在荷载作用下发生剪缩;当 $\psi < 0$ 表示砂土当前处于密实状态,受荷作用下发生剪胀。

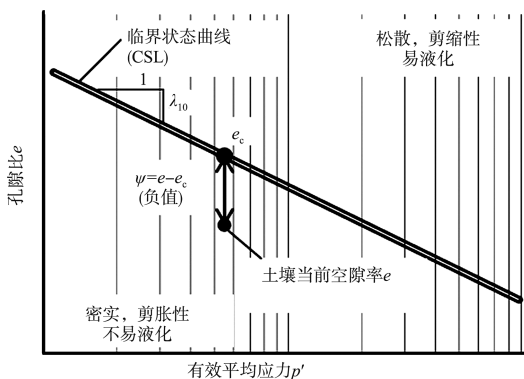


图2 状态参数定义

Been和Jefferies^[15]提出了利用CPTU确定状态参数的方法:

$$\psi = -\frac{\ln\left(Q_p \cdot \frac{1-B_q}{k}\right)}{m} \quad (10)$$

$$k = \left(3 + \frac{0.85}{\lambda_{10}}\right)M \quad (11)$$

$$m = 11.9 - 13.3 \lambda_{10} \quad (12)$$

$$\lambda_{10} = \frac{1}{34 - 10I_{c,BJ}} \quad (13)$$

式中: Q_p 为基于平均应力的归一化锥尖阻力, $Q_p = \left(\frac{q_t - \sigma_m}{\sigma'_m}\right)$, σ_m 为总平均应力, σ'_m 为有效平均应力,也可表示为 p' ; B_q 为孔压参数比, $B_q = (u_2 - u_0) / (q_c - \sigma_{vo})$; u_0 为原位初始孔隙压力; k 、 m 与临界状态参数有关; M 为临界状态摩擦比,一般通过三轴压缩试验确定,在缺乏室内三轴试验等数据信息下, M 值一般取1.2; λ_{10} 为临界状态线以10为底的斜率,见图2; $I_{c,BJ}$ 为土体类型指标参数,与下文中的参数 I_c 定义相同,但计算公式有所区别。

Plewes等^[16]建议用以下方法来估算 λ_{10} :

$$\lambda_{10} = \frac{F}{10} \quad (14)$$

式中: F 为归一化摩阻比, $F = f_s / (q_c - \sigma_{vo})$, f_s 为侧壁摩阻力。

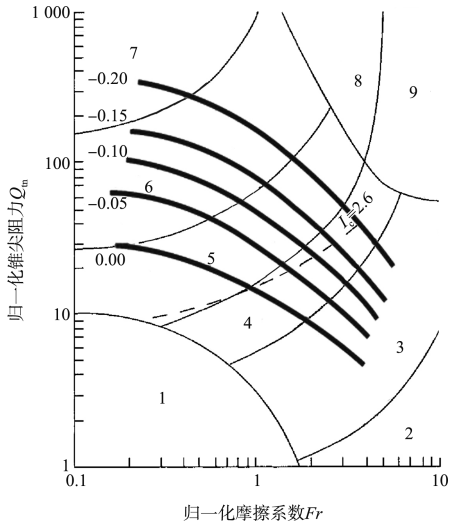
Robertson^[17]基于Been和Jefferies提出 ψ 与 $Q_{m,cs}$ 之间的简化近似关系:

$$\psi = 0.56 - 0.331g Q_{m,cs} \quad (15)$$

$$Q_{m,cs} = K_c Q_{ln} \quad (16)$$

式中: $Q_{m,cs}$ 为净砂归一化锥尖阻力; K_c 为修正因子,是土体特性(例如细粒含量和塑性的综合影响)的函数。 K_c 根据土体类型指标参数 I_c 来计算,如果 $I_c \leq 1.64$, $K_c = 1$; 如果 $I_c > 1.64$,则 $K_c = -0.403I_c^4 + 5.581I_c^3 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88$, I_c 计算参考Robertson。

Robertson在基于CPT土壤分类图上近似地绘制出状态参数等值线,见图3。Robertson认为在利用CPT计算状态参数的实际应用中,收缩-膨胀的边界在经验上应被取为 $\psi = -0.05$ 。



注: 1. 灵敏细粒土; 2. 有机土壤-泥炭; 3. 黏土; 粉质黏土-黏土; 4. 粉土混合物: 黏质粉土-粉质黏土; 5. 砂混合物: 粉砂-砂质粉土; 6. 砂: 纯净砂-粉砂; 7. 砾砂-密实砂; 8. 非常硬的砂-黏土砂; 9. 极硬细砂。

图 3 基于状态参数等值曲线

当砂土 ($I_c \leq 2.05$) 相对密度达到 70% 时 (利用 Robertson 计算锥尖阻力, 下同), $\psi = -0.12 \sim -0.08$, 砂土当前处于密实状态; 相对密度达到 90% 时, $\psi = -0.19 \sim -0.15$ 。综合上述相对密度和状态参数指标, 经过振冲处理后的砂土要达到密实状态, 70% 的相对密度验收标准是合理的, 且具有经济性。

3 有效内摩擦角

为了保证结构稳定性满足规范要求, 在进行上部结构设计时, 还需要确定地基砂土的物理力学指标, 尤其是砂土内摩擦角。同时, 砂土的地基承载力主要由土层的内摩擦角决定^[18]。

砂土的抗剪强度通常用有效内摩擦角 φ' 表示。Robertson 提出了公式 (17), 用于估算未胶结、未老化、适度可压缩、主要为石英砂的有效内摩擦角 φ' , 该公式是基于校准实验室测试的结果。

$$\tan \varphi' = \frac{1}{2.68} \left[\lg \left(\frac{q_c}{\sigma'_{vo}} \right) + 0.29 \right] \quad (17)$$

Kulhawy 和 Mayne 提出适用于磨圆度好的非胶结石英砂有效内摩擦角评估经验公式:

$$\varphi' = 17.6 + 11 \lg Q_{m} \quad (18)$$

公式 (17) (18) 所得的砂土内摩擦角全部大于试验结果, 很大程度上高估了砂土内摩擦角^[19]。因

此, 该式在计算混有细粒质砂土时应根据区域经验进行折减。对于细粒土, 确定有效内摩擦角的最佳方法是通过高质量原状土的固结三轴试验。

Jefferies 和 Been^[20] 研究表明, 对于大部分砂土, 状态参数 ψ 与峰值摩擦角 φ' 之间存在很好的相关性。

$$\varphi' = \varphi'_{cv} - 48\psi \quad (19)$$

式中: φ'_{cv} 为恒定体积 (或临界状态) 摩擦角, 根据 Bolton^[21], 通常石英砂的摩擦角约为 33° , 但软质砂和碳酸盐岩的摩擦角可高达 40° 。

国内规范 JTS/T 242—2020《水运工程静力触探技术规程》无黏性土的有效内摩擦角计算公式如下:

粉砂、细砂:

$$\varphi' = 3.65 \ln (q_t - \sigma_{vo}) + 27.1 \quad (20)$$

中砂、粗砂、砾砂:

$$\varphi' = 3.30 \ln (q_t - \sigma_{vo}) + 29.5 \quad (21)$$

Jefferies 和 Been 基于状态参数的公式计算值偏大, 但与其他方法相比更具有优势, 因为状态参数包括了土层颗粒特征和矿物学的重要性。

Robertson 计算有效内摩擦角的公式与 Jefferies 和 Been 结果相差不大, 见图 4。与国外公式相比, 国内规范相同深度的土层摩擦角整体偏小, 因此需要的 q_c 最大。当砂土相对密度达到 70% (Robertson) 时, 根据相同深度对应 q_c 计算的有效内摩擦角, 上述 4 种方法计算的值在 $36.7^\circ \sim 42.3^\circ$, 均满足验收标准。

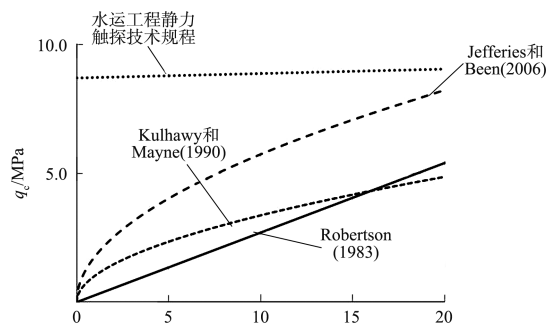


图 4 不同方法基于有效内摩擦角要求的 CPT 验收曲线

4 沉降及承载力

在砂土基础设计中, 既要满足稳定性的要求,

又要满足沉降量要求。砂土渗透性高，因此沉降会立即发生。然而，由于外界因素如水位变化、地震荷载等，工后沉降也不可忽视。砂土的工后沉降主要由土体蠕变产生。

Schmertmann^[22]提出了一种计算砂土地基沉降的方法，即将地基下的土壤划分成不同的层，然后计算每一层的沉降，各层的沉降之和表示土体的总沉降。该方法是计算颗粒土地基沉降最合理的方法之一，在世界范围内得到广泛应用。

$$s = C_1 C_2 \Delta p \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_z}{C_3 E_i} \cdot \Delta Z_i \right) \quad (22)$$

$$E_i = \alpha_E q_c \quad (23)$$

$$\alpha_E = 0.015 (10^{0.55 I_c + 1.68}) \quad (24)$$

式中： s 为地基最终沉降量； C_1 为基础埋深修正系数， $C_1 = 1 - 0.5 \left(\frac{\sigma_{vo}}{\Delta p} \right) \geq 0.5$ ； C_2 为土壤蠕变修正系数， $C_2 = 1 + 0.2 \lg(10t)$ ； C_3 为基础形状修正系数，圆形基础取1.0，方形基础取1.2，条形基础取1.75； t 为加载后的时间； I_z 为应变影响系数； E_i 为第*i*层土体等效杨氏模量； α_E 为与荷载程度、土壤密度、应力历史、胶结、年龄、颗粒形状和矿物学相关的参数； ΔZ_i 为基底下土层分层厚度； Δp 为基底附加应力。

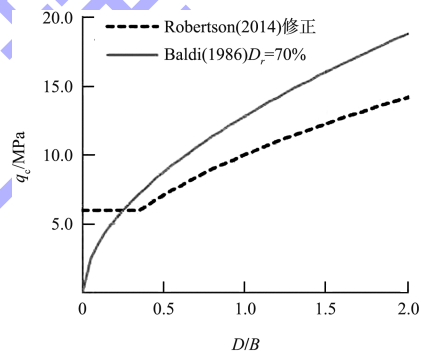
E_i 除利用公式(24)计算以外，对于年轻正常固结砂，可取 $2q_c \sim 4q_c$ ；对于年代大于1 000 a的正常固结砂，可取 $4q_c \sim 10q_c$ ；对于超固结砂可取 $6q_c \sim 20q_c$ 。

Schmertmann方法基于大量工程实例进行计算，计算公式简单、物理意义明确。研究表明，Schmertmann方法计算所得的沉降值与实测值相差不大，其影响沉降量计算精度的关键是确定杨氏模量。经计算，在达到70% (Robertson)的相对密度情况下，附加应力为300 kPa的条形基础工后沉降为32.8 mm，大于设计要求的30.0 mm；相对密度达到80%时，为25.8 mm；相对密度达到90%时，为20.3 mm。

根据相对密度等于70%确定的CPT验收曲线，利用国外方法计算的表层砂土锥尖阻力较小，因

此计算的工后沉降主要发生在表层。为了工后沉降满足要求，应对Robertson验收曲线进行修正，使表层锥尖阻力大于6 MPa，见图5。计算所得沉降量为29.3 mm。或者直接采用Baldi确定验收曲线，计算沉降量为26.5 mm。两种方法确定的验收曲线均是相对经济的，初步确定工艺参数后，需经过试验区验证其适用性方可进行大规模振冲处理。必要时应该分区确定验收曲线，以确保工程质量。

按照上述验收曲线进行地基处理后，计算深度范围内锥尖阻力 $q_{c(av)} > 7.0$ MPa。根据Robertson提供的承载力计算公式，容许承载力 $q_{all} > 370$ kPa，满足验收标准。



注：D为深度；B为宽度。

图5 最终验收曲线

5 结论

1) 为了达到地基处理预期的效果，首先应判别砂土是否适合振冲。国内外普遍认为振冲挤密法仅适合细颗粒含量小于12%~15%的粗砂或者中细砂地基，Brown利用土的颗粒级配判别砂土是否适合振冲，具有一定参考意义。

2) 综合相对密度和状态参数指标，经过振冲处理后的砂土($I_c \leq 2.05$)相对密度达到70%时，状态参数 ψ 小于临界值(Robertson建议取-0.05)，砂土处于密实状态。从压实效果方面考虑，70%的相对密度验收标准是合理的，且具有经济性。

3) Jefferies和Been基于状态参数的计算有效内摩擦角的公式，计算 φ' 偏小，约为37°，但与其他方法相比更具有优势，因为状态参数包括了土层颗粒特征和矿物学的重要性。

4)根据相对密度为70%确定的CPT验收曲线,利用国外方法计算的表层砂土锥尖阻力较小,计算的工后沉降较大(附加应力为300 kPa的条形基础,沉降大于30 mm)且主要发生在表层。因此适当提高表层砂土的锥尖阻力以达到设计要求,相比于提高相对密度至80%,更具有经济性。

5)根据最终验收曲线,利用Robertson提供的承载力计算公式,容许承载力 q_{all} 大于300 kPa;利用基于CPT液化判别的Boulangier方法,在矩震级为7级,地震动峰值加速度0.1g的场地,液化判别安全系数大于1.25,均满足设计要求。

参考文献:

- [1] 郭小兵,梁小丛,王德咏.吹填地基无填料振冲密实法质量监控工艺分析[J].水运工程,2018(11):209-213.
- [2] BROWN R.Vibroflotation compaction of cohesionless soils[J]. Journal of geotechnical engineering division, 1977, 103(12): 1437-1451.
- [3] BOULANGER R W, IDRIS I M . CPT and SPT based liquefaction triggering procedures[R]. California: Center for Geotechnical Modeling Department of Civil and Environmental Engineering University of California, 2014.
- [4] 郭莹,郭承侃,陆尚谟.土力学[M].大连:大连理工大学出版社,2003.
- [5] SCHMERTMANN J H. An updated correlation between relative density, D_r , and Fugro-type electric cone bearing, q_c [R]. Vicksburg: Waterways Experimental Station, 1976
- [6] BALDI G, BELLOTI R, GHIONNA V, et al. Interpretation of CPTs and CPTUs. Part 2: Drained penetration of sands [C]// Proc. 4th Int. Geotech. Sem. Field Instrumentation and In Situ measurements. Singapore: [s. n.], 1986: 143-156.
- [7] JAMIOLKOWSKI M, PRESTI D L, MANASSERO M. Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT[C]// Symposium on Soil Behavior and Soft Ground Construction. Virginia: ASCE. 2003: 201-238.
- [8] ROBERTSON P K, CA MPANELLA R G. Interpretation of cone penetration tests. Part I: sand[J]. Canadian geotechnical journal, 1983, 20(4): 718-733.
- [9] ROBERTSON P K, CABAL K. Guide to cone penetration testing[M]. 6th ed. California: Gregg Drilling and Testing, Inc., 2015.
- [10] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. Florida: CRC Press, 1997.
- [11] KULHAWY F H, MAYNE P W. Manual on estimating soil properties for foundation design[R]. New York: Electric Power Research Institute, 1990.
- [12] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.水运工程静力触探技术规程: JTS/T 242—2020 [S].北京:人民交通出版社,2021.
- [13] 交通部運輸研究所.港灣構造物設計基準修訂: 94-5-297(1) [S]. 臺北:交通部運研所,2005.
- [14] 段伟,蔡国军,刘松玉,等.无黏性土的电阻率 CPTU 状态参数确定方法及其液化评价[J].交通运输工程学报,2019,19(2): 59-68.
- [15] BEEN K, CROOKS J H, JEFFERIES M G. Interpretation of material state from the CPT in sands and clays[C]// Penetration Testing in the U K, Geotechnolgy. Birmingham: Thomas Telford Publishing, 1989.
- [16] PLEWES H D, DAVIES M P, JEFFERIES M G. CPT based screening procedure for evaluating liquefaction susceptibility[C]// Proc. of 45th Canadian Geotechnical Conf., Vancouver: BiTech Publishers, 1992: 41-49.
- [17] ROBERTSON P K. Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT[C]// 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT10. Huntington Beach: [s. n.], 2010.
- [18] 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.
- [19] 王虎刚,贾巍.孔压静力触探在确定砂土内摩擦角中的应用[J].海岸工程,2020,39(2): 124-129.
- [20] JEFFERIES M G, BEEN K. Soil liquefaction: A critical state approach[M]. Florida: CRC Press, 2006.
- [21] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands[J]. Geotechnique, 1987, 36(2): 219-226.
- [22] SCHMERTMANN J H. Static cone to compute static settlement over sand[J]. Soil mechanics and foundation division journal(ASCE), 1970, 96(3): 1011-1043.