

几种穿刺分析法在自升式 钻井平台插桩中的探讨

余 稳, 蔡龙龙, 刘剑涛

(中海油田服务股份有限公司, 天津 300459)

摘要: 为了提高自升式钻井平台穿刺分析的准确性, 选取 3 个场址(2 个渤海场址, 命名为 A 场址和 B 场址; 1 个南海场址, 命名为 C 场址), 采用 Baglioni 分析法、3:1 穿刺分析法、冲剪系数分析法和地基压力扩散角法四种穿刺分析法对钻井平台基础进行了承载力分析及穿刺分析, 结果表明: Baglioni 分析法的分析结果基本可靠, 但其对松散砂或密实砂的分析结果与实际结果有一定偏差; 3:1 穿刺分析法的分析结果也基本可靠, 但其等效基础未考虑砂层密实度的影响; 冲剪系数分析法的分析结果存在较大不确定性, 其冲剪系数的选取仍需继续优化; 地基压力扩散角法的分析结果存在较大的局限性, 该方法对钻井平台基础不适用。通过分析可得, 对于一般常规场址, 单一使用 Baglioni 分析法或 3:1 穿刺分析法均可行, 对于复杂的场址宜综合使用多种方法进行分析评价等。结论可为工程地质工程师进行穿刺分析提供参考。

关键词: 穿刺; 扩散角; 内摩擦角; 冲剪; 安全系数

中图分类号: TE951

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2021)03-0214-12

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2021.03.006

引用格式: SHE W, CAI L L, LIU J T. Discussion on the methods for punch-through analysis in the footing penetration of jack-up rig[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(3): 214-225. 余稳, 蔡龙龙, 刘剑涛. 几种穿刺分析法在自升式钻井平台插桩中的探讨[J]. 海岸工程, 2021, 40(3): 214-225.

自升式钻井平台是海洋油气田开发的重要设备之一, 利用该平台可以进行钻井、修井和试采等作业。该平台具有移动性好、作业稳定性强和适用性高等优点, 因此在近海油气开发中得到了广泛应用^[1-3]。仅在我国, 自升式钻井平台在移动式钻井平台中所占比例高达 80%^[4], 已经成为我国海洋油气勘探开发的重要装备。穿刺事故是钻井平台就位期间的最大风险因素, 根据 HSE(Health & Safety Executive)统计资料表明, 穿刺事故约占平台总事故的 53%^[5]。平台穿刺事故频发主要与复杂的海底地层条件有关, 特别是很多区域存在上部为砂土或硬黏土、下部为软黏土的类型“鸡蛋壳”地层, 自升式钻井平台在此类区域作业时存在穿刺的风险。如果穿刺行程超过了平台自身调节控制的能力, 则平台会急速倾斜或倾覆, 造成设备受损或人员伤亡。因此, 穿刺分析是钻井平台插桩预测过程中分析的重点。

对于海底层状结构地层, 在计算时一般简化为多个双层地基的叠加。常用的成层地基极限承载力的计算方法有 Hansen 加权平均法^[6]、Baglioni 分析法^[7]、3:1 穿刺分析法^[8]和冲剪系数分析法^[9]等方法, 目前的研究仍难得到严格的理论解, 所以这些方法大多为经验公式或半经验公式。海上工程地质分析中应用较多的穿刺分析法为 3:1 穿刺分析法^[8], 该方法为《海洋井场调查规范》^[10]中推荐的方法。虽然《海洋井场调查规范》^[10]和 SNAME 规范^[11]都对冲剪系数分析法^[9]进行了介绍说明, 但该方法在工程实践中暂未应用, 此外, 《建筑地基基础设计规范》^[12]对地基受力层范围内有软弱下卧层时, 推荐了验算方法, 即“地基压力扩散角法”, 该方法暂未在自升式钻井平台插桩中运用。所以, 本文将利用地基压力扩散角法对钻井平台基础承载力进行研究分析, 以确定该方法在钻井平台穿刺分析中是否可行。

收稿日期: 2021-02-04

作者简介: 余 稳(1986—), 男, 工程师, 一级建造师, 主要从事海洋工程勘察方面研究. E-mail: shewen@cosl.com.cn

(王 燕 编辑)

对于某些复杂的场址,穿刺分析的结果仍存在预测不准的情况。因此,如何准确地进行穿刺分析是地质工程师需要攻克的一个技术难点。基于此,本文选择渤海 2 个场址(命名为 A 场址和 B 场址)、南海 1 个场址(命名为 C 场址),利用 Baglioni 分析法^[7]、3:1 穿刺分析法^[8]、冲剪系数分析法^[9]和地基压力扩散角法^[12]四种穿刺分析法对钻井平台基础进行承载力分析及穿刺分析,以期提高对自升式钻井平台穿刺分析的准确性。

1 钻井平台基础承载力分析

钻井平台的插桩深度与地层的极限承载力直接相关,土质条件、桩靴的形状及尺寸是影响地层承载力的主要因素。对于自升式钻井平台,通常采用静力压载的方式将桩腿插入海底面以下的土中,当施加的载荷大于地层的极限承载力时,桩靴就会发生贯入,直到土的极限承载力不小于桩靴对土所施加的压力为止。

桩靴基础的极限承载力 Q_s 表达式^[10]为

$$Q_s = Q_v - W_{bf} + \gamma_1 V = (q_n + P_0)A - (D_k - H_{cav})\gamma_1' A + \gamma_1 V, \quad (1)$$

式中: Q_v 为基础底面土的总极限轴向承载力, W_{bf} 为基础上部回填土的有效荷重, γ_1 为桩靴排开土的平均有效重度, V 为桩靴的体积, q_n 为单位面积极限承载力, P_0 为桩靴深度处的有效上覆压力, A 为桩靴的最大水平截面积, D_k 为桩靴最大截面入泥深度, H_{cav} 为桩靴坑上部未回填部分的深度, γ_1' 为基础上部回填土的有效重度。

黏性土的单位面积极限承载力 q_n 的计算公式^[10]为

$$q_n = 6(1 + 0.2D_k/B_s)S_{un} \leq 9S_{un}, \quad (2)$$

式中: B_s 为桩靴的当量直径, S_{un} 为桩靴最大截面以下($B_s/2$) 深度内土的平均不排水抗剪强度。

砂性土的单位面积极限承载力 q_n 计算公式^[10] 为

$$q_n = 0.3\gamma B_s N_r + P_0(N_q - 1) \leq q_{max}, \quad (3)$$

式中: γ 为桩靴最大截面以下($B_s/2$) 深度内土的平均有效重度, N_r 和 N_q 为排水粒状土的无量纲承载力系数, q_{max} 为 q_n 的限制值(N_q 和 q_{max} 推荐值参考文献^[13])。

2 穿刺分析

当在上硬下软的层状地层中进行预压插桩时,桩靴很可能会穿透上覆硬土层,造成桩腿的迅速下沉,形成“穿刺”现象。因此,对于这种类型的土质剖面必须进行穿刺分析来评价桩靴潜在的穿刺风险。

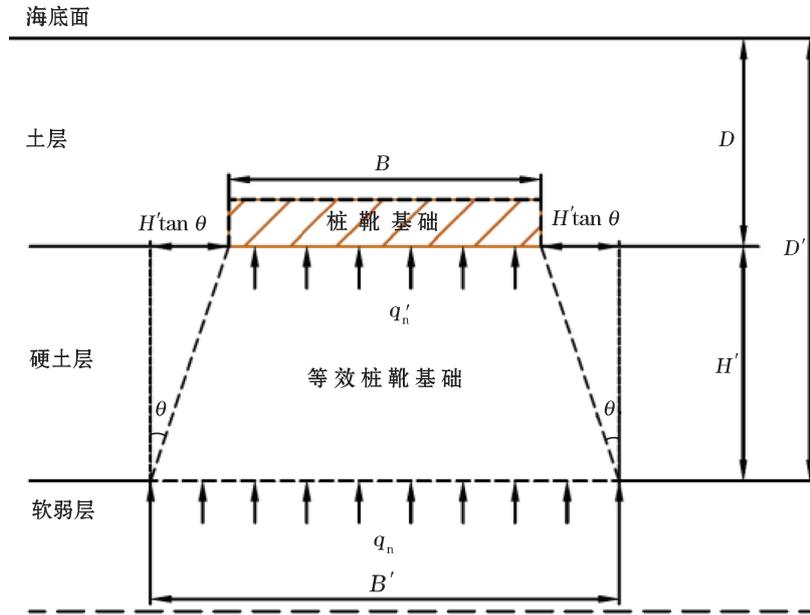
2.1 Baglioni 分析法

Baglioni 分析法^[7]的原理是假定作用在上部基底的荷载沿某个角度 θ (扩散角)向下线性扩散直至下卧软土层,在下层土上表面形成一个面积按比例放大的等效基础,该等效基础所受到的下层土的极限承载力即为原基础的双层地基极限承载力(图 1)。

Baglioni 等^[7]指出,当砂层厚度小于桩靴直径的 2.5 倍时,假定砂土的扩散角 θ 与砂土的有效内摩擦角 Φ 相等,并且当穿刺发生时,全部荷载将在破坏区域的范围内转移到假象桩靴之上,于是成层土极限承载力可以等价于软土层对假象桩靴的极限承载力,穿刺分析中计算硬土层单位面积等效净极限承载力 q_n' 的计算公式^[7]为

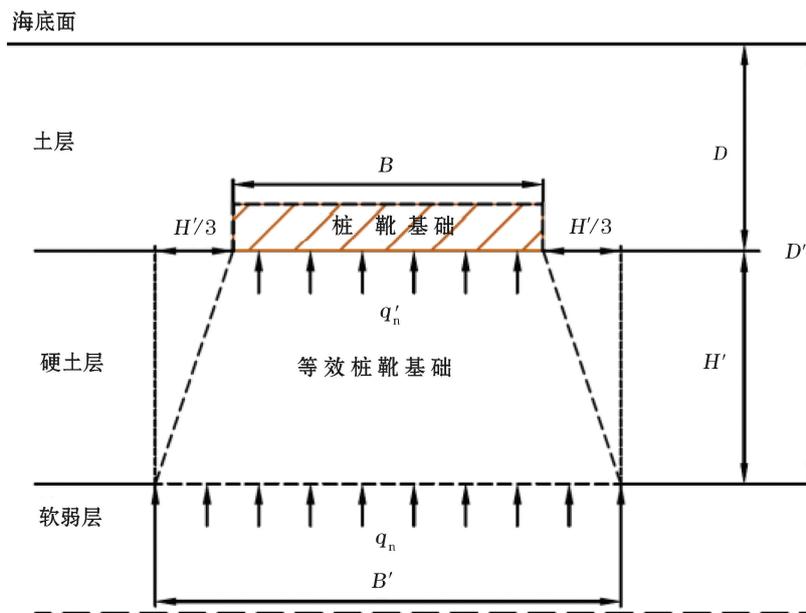
$$q_n' = 6S_{ub}[1 + 0.2(D_k + H')/(B + 2H'\tan\theta)](1 + 2H'\tan\theta/B) - W/A \leq q_{nh}, \quad (4)$$

式中: S_{ub} 为下伏软黏土层的平均不排水抗剪强度, H' 为桩靴最大截面下硬土层的厚度, W 为实际基础与等效基础深度间“土塞”的有效荷重, q_{nh} 为硬土层的单位面积净极限承载力。

图 1 Baglioni 分析法示意图^[7]Fig.1 Schematic diagram of the Baglioni method^[7]

2.2 3 : 1 穿刺分析法

3 : 1 穿刺分析法由 Young 和 Focht^[8]于 1981 年提出。该方法假定施加在上层(硬层)的基础荷载通过硬层向下扩展,在下卧软弱层顶面产生一假想的“等效基础”,该等效基础的扩展比例为 3 : 1(垂直方向 : 水平方向)。如果施加在等效基础上的压力超过下层土的承载力,则穿刺将会发生(图 2)。该方法与 Baglioni 分析法的原理基本一致,其相当于使用了一个恒定的扩散角($\theta=18.435^\circ$)。该方法计算的等效基础的大小只与砂层厚度有关,

图 2 3 : 1 穿刺分析法示意图^[8]Fig.2 Schematic diagram of the 3 : 1 method^[8]

忽略了砂层密实度的影响。穿刺分析中计算硬土层单位面积等效净极限承载力 q'_n 的计算公式^[8]为

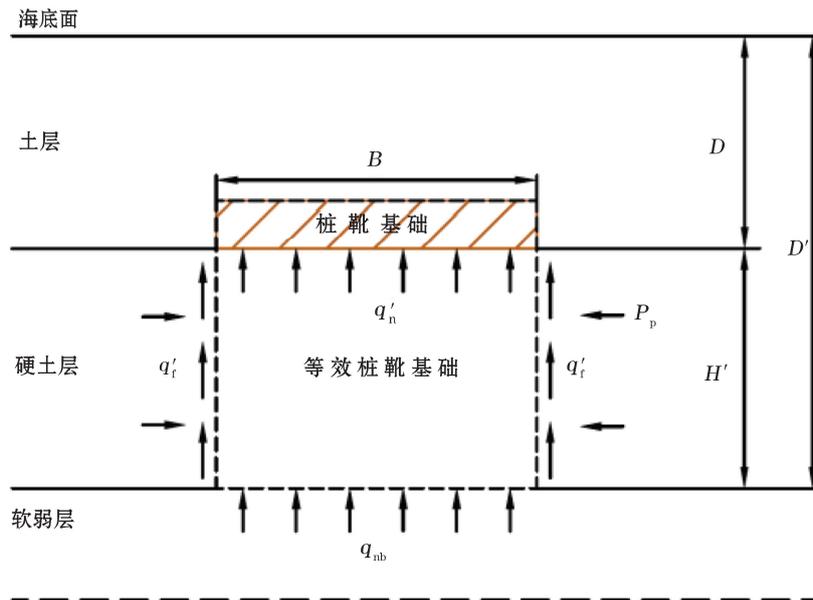
$$q'_n = 6S_{ub}[1 + 0.2(D_k + H')/(B + 2H'/3)][1 + 2H'/(3B)] - W/A \leq q_{nh} \quad (5)$$

2.3 冲剪系数分析法

1980年, Hanna 和 Meyerhof^[9] 提出冲剪系数分析法, 该方法原理是: 假设地基中上层硬土发生剪切破坏, 并根据相应理论假定破坏面的方向为竖直向下, 可以将基底下的柱状土体(土塞)看作基础的一部分, 则双层土的极限承载力可以看作是基础与柱状土体所受承载力的合力(图 3)。由于上下土层承载力差别较大, 基础底部柱体形状的土块将跟随基础一起向下运动, 进入到下层软土中, 在这一过程中, 上层硬土和下层软土的性质不发生改变。该方法在实际插桩计算中还未得到广泛应用。利用冲剪系数分析法计算硬土层单位面积等效净极限承载力 q'_n 的计算公式^[9]为

$$q'_n = [q_{nb} + 2H'/B_s(H'\gamma_y + 2P_0)]K_s \tan \Phi - H'\gamma_y \leq q_{nh} \quad (6)$$

式中: q_{nb} 为下部软黏土的单位面积净极限承载力; γ_y 为桩靴底部硬土层的平均有效重度; K_s 为上层硬砂层冲剪系数, 可近似求得: $K_s \tan \Phi \approx 3S_{ub}/(B_s \gamma_y)$ 。



注: P_p 为剪切破坏面上的被动土压力, q'_t 为剪切破坏面受到的侧向阻力

图 3 冲剪系数分析法示意图^[9]

Fig.3 Schematic diagram of the punching shear coefficient method^[9]

2.4 地基压力扩散角法

地基压力扩散角法^[12]的原理是: 假设基底的压力按扩散角被分散至软弱下卧层的顶面, 然后比较此处的应力与软弱下卧层承载力的大小(图 4)。

对矩形基础, 相应于荷载效应标准组合时, 软弱下卧层顶面处的附加压力值 P_z 的计算公式^[12]为

$$P_z = lb(P_k - P_c)/(b + 2z \tan \theta)(l + 2z \tan \theta) \quad (7)$$

式中: b 为矩形基础底边的宽度, l 为矩形基础底边的长度, P_k 为标准组合时基础底面处的平均压力值, P_c 为基础底面处土的自重压力值, z 为基础底面至软弱下卧层顶面的距离, θ 为地基

表 1 地基压力扩散角 θ

Table 1 Foundation pressure expansion angle θ

E_{s1}/E_{s2}	$z/b=0.25$	$z/b=0.50$
3	6°	23°
5	10°	25°
10	20°	30°

注: E_{s1} 为上层硬土的压缩模量, E_{s2} 为下层软土的压缩模量

压力扩散线与垂直线的夹角,可按表 1 计算。当 $z/b < 0.25$ 时,取 $\theta = 0^\circ$,这一参数在需要时可以通过试验来确定。当 $0.25 \leq z/b \leq 0.50$ 时,地基压力扩散角 θ 可插值使用。当 $z/b > 0.50$ 时,地基压力扩散角 θ 取 $z/b = 0.50$ 时的数值。实际计算钻井平台近似圆形基础承载力时,可按式(7)简化计算。

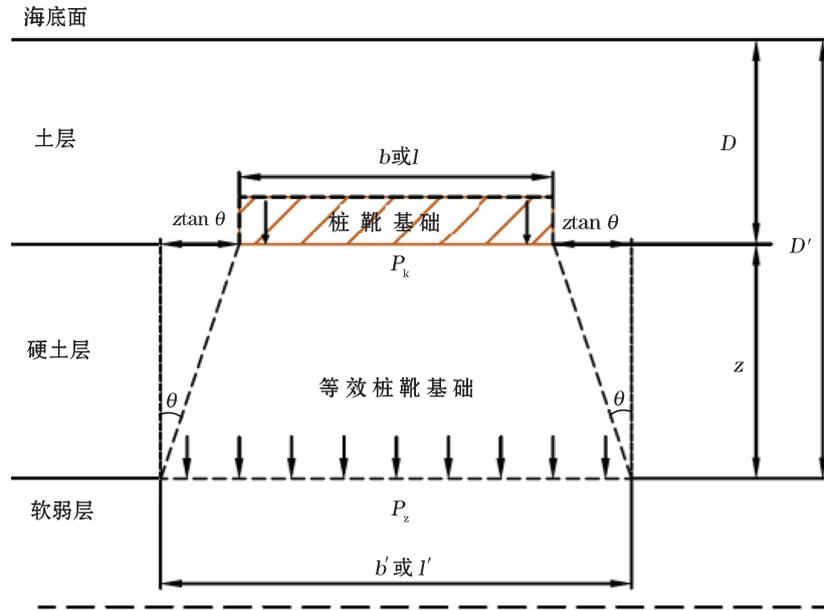


图 4 地基压力扩散角法示意图^[12]

Fig.4 Schematic diagram of the foundation pressure expansion angle method^[12]

3 钻井平台插桩实例

孔压静力触探(Piezocene Penetration Test, PCPT)是目前海上最常用的原位测试技术,其贯入过程连续,测试结果可靠,能如实反映探遇土的类型和强度随深度的变化,精确划分土层^[14]。其测量指标包括锥端阻力、侧摩阻力和孔隙压力。本文选择了 3 个场址(2 个渤海场址,命名为 A 场址和 B 场址;1 个南海场址,命名为 C 场址)的 PCPT 测试结果及土质设计参数,分别利用 Baglioni 分析法、3:1 穿刺分析法、冲剪系数分析法和地基压力扩散角法对钻井平台基础进行了承载力分析及穿刺分析。

3.1 A 场址

在渤海 A 场址完成了 1 个 PCPT 测试孔和 1 个取样孔,2 个孔在钻遇深度内的土层分布基本一致。A 场址的 PCPT 测试结果(以 0~30 m 为例)如图 5 所示,结果表明:0 m $d \le 10.7\text{ m}$ (d 为海底面以下深度)的土质为承载力较低的黏性土,10.7 m $d \le 30\text{ m}$ 的土质主要为黏性土夹薄层砂性土。A 场址土质设计参数如表 2 所示。

表 2 A 场址土质设计参数

Table 2 Parameters designed for soil at Site A

d/m	土质描述	水下容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	不排水抗剪强度/kPa	有效内摩擦角
$0.0 < d \leq 10.7$	粉质黏土	6.9	2~20	—
$10.7 < d \leq 13.0$	粉土	8.7	—	20°
$13.0 < d \leq 18.3$	粉质黏土	8.8	24~35	—

续表

d/m	土质描述	水下容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	不排水抗剪强度/kPa	有效内摩擦角
$18.3 < d \leq 22.0$	粉土	9.1	—	20°
$22.0 < d \leq 25.0$	黏土	7.7	30~50	—
$25.0 < d \leq 29.6$	黏土	7.7	50	—
$29.6 < d \leq 30.0$	粉质细砂	8.4	—	35°

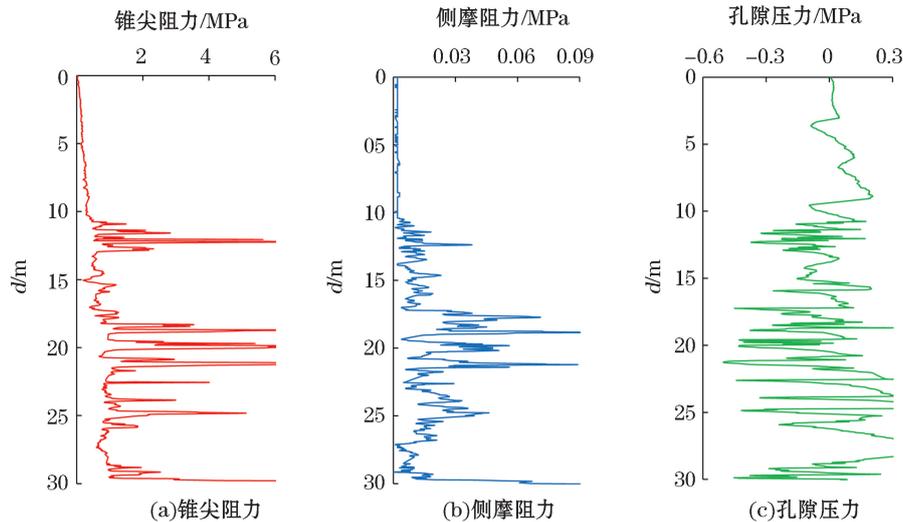


图5 A场址PCPT测试结果

Fig.5 Results of PCPT test at Site A

A场址插桩就位的钻井平台为四腿自升式移动钻井平台,其桩靴式基础的最宽部分面积为 83 m^2 ,等效直径为 10.3 m ,每只桩靴的最大预压载为 20.6 MN 。利用表2中的土质参数进行了桩靴基础承载力分析及穿刺分析,其结果以承载力曲线形式如图6所示。Baglioni分析法、3:1穿刺分析法和冲剪系数分析法三种方法分析结果表明:在最大预压载下,钻井平台桩靴尖的初始入泥深度均为 10.7 m ,在该深度处3种方法的穿刺相对安全系数分别为 $1.25, 1.20$ 和 1.23 ;如果穿刺发生,钻井平台桩靴尖的最终入泥深度为 13.8 m 。需要说明的是:穿刺相对安全系数为硬土层计算的最大极限承载力与单桩最大预压荷载的比值。当穿刺相对安全系数 ≥ 1.5 时,穿刺不会发生;当 $1.2 \leq$ 穿刺相对安全系数 < 1.5 时,穿刺发生概率较低;当 $1.0 \leq$ 穿刺相对安全系数 < 1.2 时,穿刺发生的概率一般,随着数值的减小,穿刺发生的概率逐步增加;当穿刺相对安全系数 < 1.0 时,穿刺会发生。

地基压力扩散角法的分析结果表明:在最大预压载下,钻井平台桩靴尖的最终入泥深度为 13.8 m 。然而A场址的实际插桩结果是:钻井平台桩靴尖的最终入泥深度为 $11.2 \sim 11.4 \text{ m}$,且4个桩腿在插桩过程中均未发生穿刺。

对实际插桩结果进行反分析,可以得出:Baglioni分析法、3:1穿刺分析法和冲剪系数分析法三种方法的初始入泥深度(10.7 m)与实际插桩结果($11.2 \sim 11.4 \text{ m}$)较为吻合;而初始入泥深度处的穿刺发生的概率较低,与实际插桩未发生穿刺也基本吻合。因此,3种方法分析结果能够对A场址就位的钻井平台提供较好的参考。但是,地基压力扩散角法分析的结果(13.8 m)与实际插桩结果($11.2 \sim 11.4 \text{ m}$)存在一定偏差。这是由于硬层的厚度($10.7 \sim 13.4 \text{ m}$)小于桩靴直径的 $1/4$,地基压力扩散角 θ 取 0° ,即硬层的承载力直接使用下部软黏土层顶部的承载力,这显然是与实际情况存在偏差。该方法主要用来验算建筑地基基础,且主要针对

对的是条形基础与方形基础,因此将其应用于钻井平台的圆形基础存在一定的局限性。

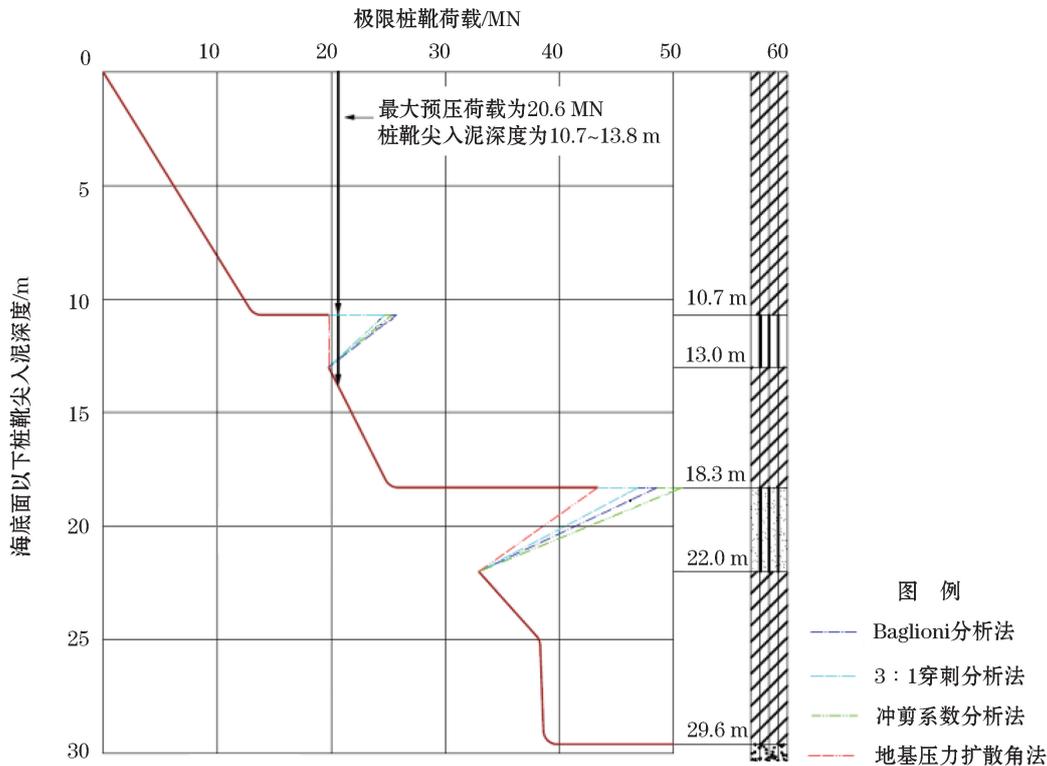


图6 A场址穿刺分析结果

Fig.6 Results from the punch-through analysis at Site A

此外,我们再探讨A场址10.7~13.0 m和18.3~22.0 m的穿刺分析结果:两个深度处3:1穿刺分析法计算的硬层顶部承载力均小于Baglioni分析法和冲剪系数分析法的分析结果。这是由于3:1穿刺分析法计算的等效基础的大小只与砂层厚度有关,忽略了砂层密实度的影响,导致该方法对于松散砂的计算结果会偏大,对于密实砂的计算结果会偏小。

3.2 B场址

在渤海B场址完成了1个PCPT测试孔和1个取样孔,2个孔在钻遇深度内的土层分布基本一致。B场址的PCPT测试结果(以0~30 m为例)如图7所示,结果表明: $0\text{ m} < d \leq 8.4\text{ m}$ 的土质为承载力较低黏性土; $8.4\text{ m} < d \leq 10.6\text{ m}$ 的土质为承载力较好的砂性土; $10.6\text{ m} < d \leq 16.2\text{ m}$ 的土质为承载力一般的黏性土, $16.2\text{ m} < d \leq 30\text{ m}$ 的土质为承载力较好的砂性土。B场址土质设计参数(以0~30 m为例)如表3所示。

B场址插桩就位的钻井平台为三腿自升式移动钻井平台,其桩靴式基础的最宽部分面积为 156.3 m^2 ,等效直径为14.1 m,桩靴尖至最大截面处的高度为0.9 m,每只桩靴的最大预压载为42.2 MN。利用表3的土质设计参数进行了桩靴基础承载力分析及穿刺分析,其结果如图8所示。Baglioni分析和3:1穿刺分析法的分析结果表明:在最大预压载下,钻井平台桩靴尖的初始入泥深度均为9.3 m,在该深度处2种方法的穿刺相对安全系数分别为1.16和1.14;如果穿刺发生,钻井平台桩靴尖的最终入泥深度为14.9 m。冲剪系数分析法和地基压力扩散角法的分析结果表明:在最大预压载下,钻井平台桩靴尖的最终入泥深度为14.9 m。

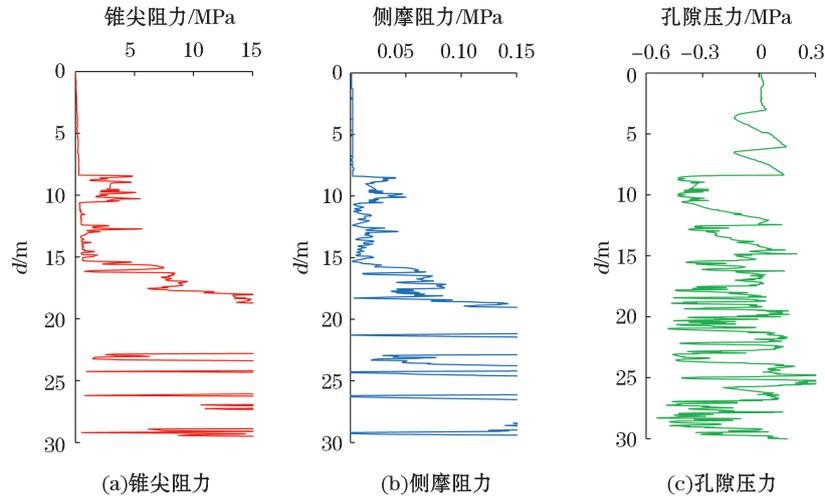


图 7 B 场址 PCPT 测试结果

Fig.7 Results of PCPT test at Site B

表 3 B 场址土质设计参数表

Table 3 Parameters designed for soil at Site B

d/m	土质描述	水下容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	不排水抗剪强度/ kPa	有效内摩擦角
$0.0 < d \leq 7.5$	黏土	6.3	2~13	—
$7.5 < d \leq 8.4$	黏土	7.2	13~20	—
$8.4 < d \leq 10.6$	粉土	8.8	—	20°
$10.6 < d \leq 16.2$	粉质黏土	8.6	35	—
$16.2 < d \leq 18.8$	粉土	8.4	—	25°
$18.8 < d \leq 30.0$	粉质细砂	8.6	—	35°

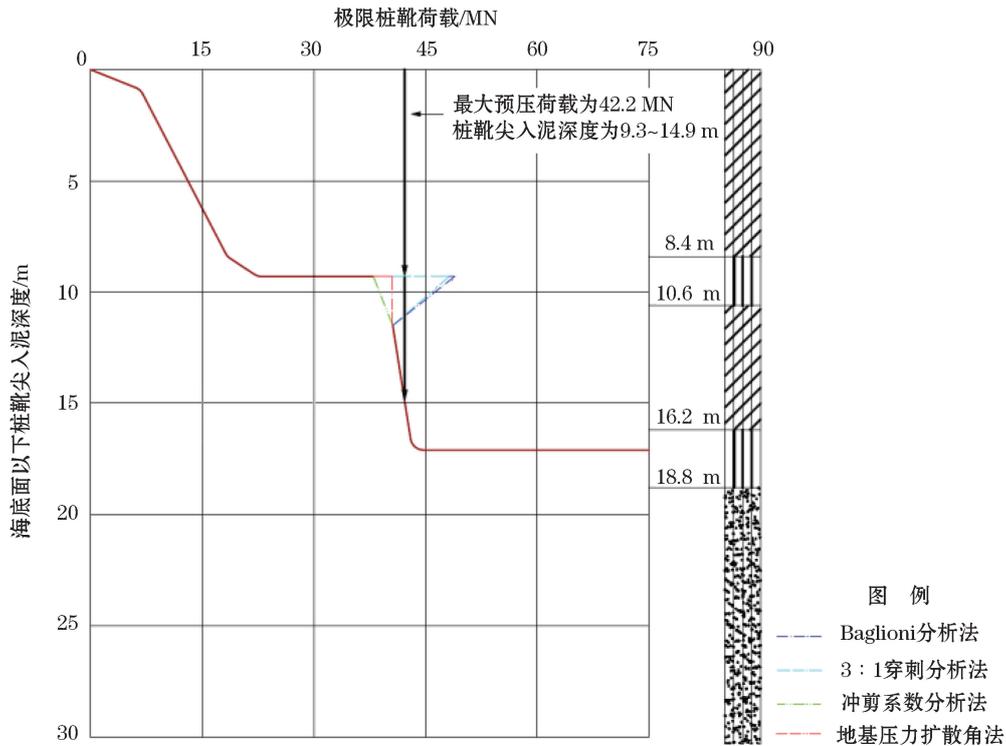


图 8 B 场址穿刺分析结果

Fig.8 Results from the punch-through analysis at Site B

然而,B场址的实际插桩结果是钻井平台桩靴尖的最终入泥深度为8.5~9.6 m,且3个桩腿在插桩过程中均未发生穿刺。

对实际插桩结果进行反分析,可以得出:Baglioni分析法和3:1穿刺分析法两种方法的初始入泥深度(9.3 m)与实际插桩结果(8.5~9.6 m)非常吻合;而初始入泥深度处穿刺发生的概率一般与实际插桩未发生穿刺一般吻合。因此,Baglioni分析法和3:1穿刺分析法的分析结果能够对钻井平台在B场址插桩就位提供参考。然而,冲剪系数分析法和地基压力扩散角法的分析结果(14.9 m)与实际插桩结果(8.5~9.6 m)存在一定偏差。地基压力扩散角法的分析结果与实际插桩结果存在偏差原因与A场址基本一致;而冲剪系数分析法计算出来的硬层顶部承载力比下部软黏土层顶部的承载力还低,这显然是不合理的,究其原因主要还是冲剪系数选取的不合理,使用近似公式计算出的冲剪系数与实际冲剪系数存在一定的偏差。因此,冲剪系数的选取还需要根据更多的工程实践来进行优化。

3.3 C场址

在南海C场址完成了3个PCPT测试孔和1个取样孔,4个孔在钻遇深度内的土层分布基本一致。我们以1#桩腿位置0~30 m的调查成果为例来进行分析,C场址1#桩腿的PCPT测试结果和土质设计参数如图9和表4所示,结果表明: $0\text{ m}<d\leq 1.0\text{ m}$ 为承载力较低黏性土; $1.0\text{ m}<d\leq 8.0\text{ m}$ 的土质为承载力较好的砂性土; $8.0\text{ m}<d\leq 14.3\text{ m}$ 的土质为承载力一般的黏性土, $14.3\text{ m}<d\leq 30\text{ m}$ 的土质为承载力较好的砂性土夹薄层黏性土。

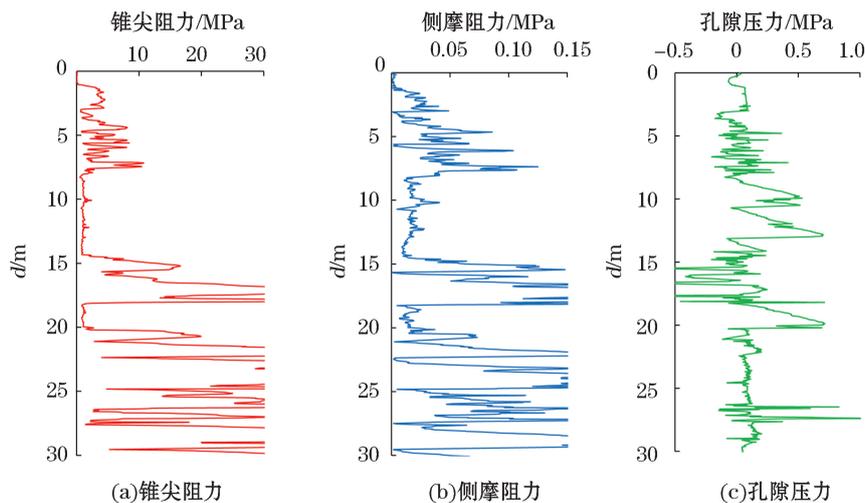


图9 C场址1#桩腿PCPT测试结果
Fig.9 Results of PCPT test at Site C

表4 C场址土质设计参数

Table 4 Parameters designed for soil at Site C

d/m	土质描述	水下容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	不排水抗剪强度/ kPa	有效内摩擦角
$0.0 < d \leq 1.0$	砂质黏土	8.3	2~5	—
$1.0 < d \leq 3.0$	细砂	9.0	—	25°
$3.0 < d \leq 8.0$	砂质粉土	8.8	—	25°
$8.0 < d \leq 14.3$	粉质黏土	7.1	58	—
$14.3 < d \leq 18.2$	粉质细砂	9.5	—	35°
$18.2 < d \leq 20.2$	粉质黏土	8.0	60	—
$20.2 < d \leq 30.0$	细砂	10.5	—	35°

C 场址插桩就位的钻井平台为三腿自升式移动钻井平台,其桩靴式基础的最宽部分面积为 254 m²,等效直径为 18.0 m,桩靴尖至最大截面处的高度为 1.2 m,每只桩靴的最大预压载为 112.2 MN。利用表 4 中的土质设计参数进行了桩靴基础承载力分析及穿刺分析,其结果以承载力曲线形式表示,见图 10。

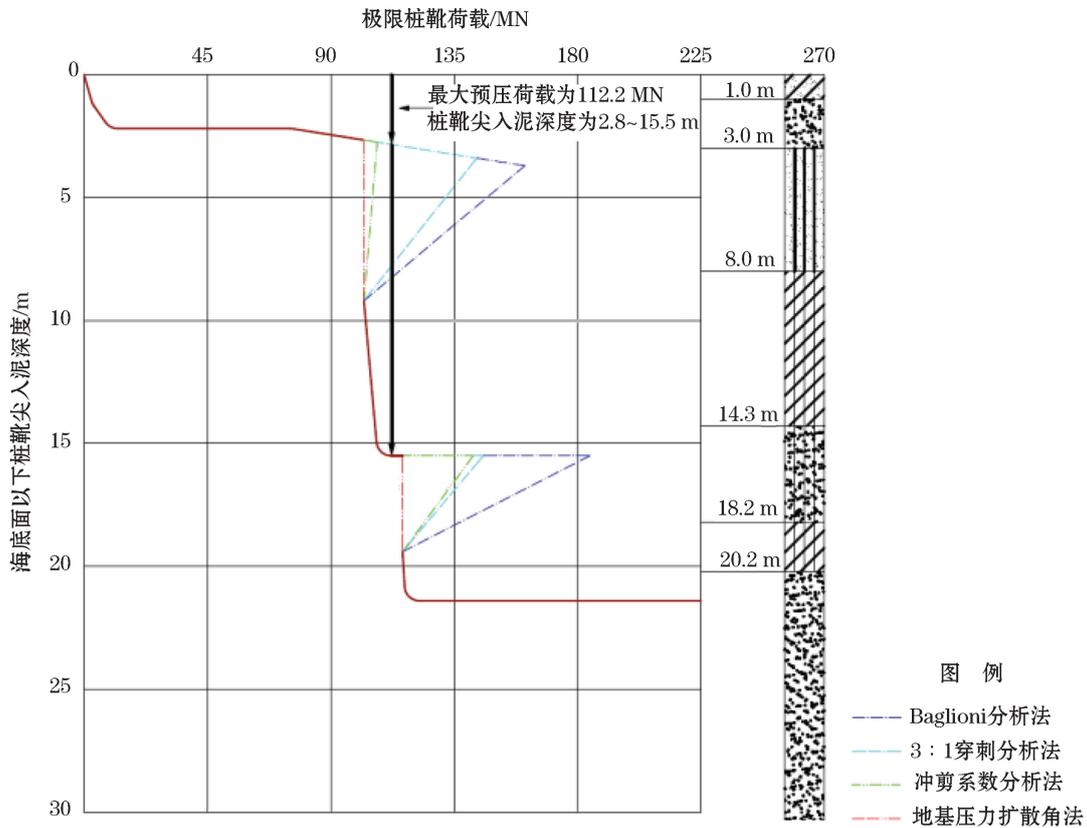


图 10 C 场址穿刺分析结果

Fig.10 Results from the punch-through analysis at Site C

Baglioni 分析和 3 : 1 穿刺分析法的分析结果表明:在最大预压载下,钻井平台桩靴尖的初始入泥深度为 2.8 m,在该深度处 2 种方法的穿刺相对安全系数分别为 1.43 和 1.28;如果穿刺发生,钻井平台桩靴尖的最终入泥深度为 15.5 m。冲剪系数分析法和地基压力扩散角法的分析结果表明:在最大预压载下,钻井平台桩靴尖的最终入泥深度为 15.5 m。

然而,C 场址的实际插桩结果是钻井平台 1# 桩靴尖的最终入泥深度为 3.1 m,且在插桩过程中未发生穿刺。

对实际插桩结果进行反分析,可以得出:Baglioni 分析法和 3 : 1 穿刺分析法两种方法的初始入泥深度(2.8 m)与实际插桩结果(3.1 m)较为吻合;而初始入泥深度处的穿刺发生的概率较低,与实际插桩未发生穿刺也基本吻合。因此,Baglioni 分析法和 3 : 1 穿刺分析法的分析结果能够对 A 场址就位的钻井平台提供较好的参考。但是冲剪系数分析法和地基压力扩散角法的分析结果(15.5 m)与实际插桩结果(3.1 m)存在较大的偏差。地基压力扩散角法的分析结果与实际插桩结果存在偏差原因与 A、B 场址基本一致;而冲剪系数分析法在 C 场址计算出来的承载力偏低,究其原因主要还是冲剪系数选取的不合理,因此,冲剪系数的选取还需要根据更多的工程实践来进行优化。

此外,我们再探讨 C 场址 14.3~18.2 m 的穿刺分析结果:按照 Baglioni 分析法计算的硬层顶部承载力远大于 3 : 1 穿刺分析法和冲剪系数分析法计算结果,这是因为 Baglioni 分析法的计算原理为扩散角 θ 与有效内摩擦角 Φ 相等关系在一定范围内是合适的,对于松散砂的扩散角 θ 实际会大于砂土有效内摩擦角 Φ ,密

实砂扩散角 θ 实际会小于砂土有效内摩擦角 Φ 。该层为密实砂,所以 Baglioni 分析法计算的结果比实际结果偏大。

4 结 论

利用 Baglioni 分析法、3 : 1 穿刺分析法、冲剪系数分析法和地基压力扩散角法四种方法对本文选取的 3 个场址进行了穿刺分析,得出主要结论:

①对于常规场址,单一使用 Baglioni 分析法或 3 : 1 穿刺分析法进行承载力分析和穿刺分析均能对钻井平台就位提供较好的参考结论。

②冲剪系数分析法评价的结果存在较大不确定性,冲剪系数的选取仍需根据工程实践不断优化。因此,不建议单独使用冲剪系数分析法对钻井平台的插桩预测结果进行评价。

③地基压力扩散角法主要用来验算建筑地基基础,针对的主要是小型条形基础或方形基础,将其应用于大型的钻井平台圆形基础存在较大的局限性。因此,不建议使用地基压力扩散角法对钻井平台的插桩预测结果进行评价。

④对于复杂的场址,利用单一穿刺分析方法对钻井平台插桩预测结果的评价存在一定的局限性,建议综合使用多种方法进行多方位的分析判断,以提高穿刺分析的准确性,为钻井平台插桩就位提供更精确的指导建议。

参考文献 (References):

- [1] WANG Z T, ZHAO J T. The development and foreground of the self-elevation drilling platform in our country[J]. China Offshore Platform, 2008(4): 8-13. 汪张棠, 赵建亭. 我国自升式钻井平台的发展与前景[J]. 中国海洋平台, 2008(4): 8-13.
- [2] LUO H Z, MENG Z B. General situation of deep water self-elevating drilling unit develop in China[J]. China Offshore Platform, 2010(4): 4-7. 罗宏志, 蒙古彬. 国内深水自升式钻井平台发展概况[J]. 中国海洋平台, 2010(4): 4-7.
- [3] ZHANG P F, YU X J, LUAN S, et al. Current technologies and future development of jack-up rig[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(3): 55-59. 张鹏飞, 于兴军, 栾苏, 等. 自升式钻井平台的技术现状和发展趋势[J]. 石油机械, 2015, 43(3): 55-59.
- [4] WANG J B. Jack-up rig footing penetration prediction and punch-through analysis and research[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. 王金彪. 自升式钻井平台桩靴插深预测及穿刺分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [5] DIER A, CARROLL B, ABOLFATHI S. Guidelines for jack-up rigs with particular reference to foundation integrity[R]. UK: Health and Safety Executive (HSE), 2004.
- [6] HANSEN J B. A revised and extended formula for bearing capacity[J]. Danish Geotechnical Institute Bulletin, 1970, 28(1): 5-11.
- [7] BAGLIONI V P, CHOW G S, ENDLEY S N. Jack-up rig foundation stability in stratified soil profiles[C]// Offshore Technology Conference, Houston, USA. 1982.
- [8] YOUNG A G, FOCHT J A. Subsurface hazards affect mobile jack-up rig operations[J]. Soundings, 1981, 3(2): 4-9.
- [9] HANNA A M, MEYERHOF G G. Design chart for ultimate bearing capacity of foundation on sand overlying soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(2): 300-303.
- [10] Petroleum Drilling Engineering Specialty Standardization Committee. Specification for ,marine well site survey: SY/T 6707-2016[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016. 石油钻井工程专业标准化委员会. 海洋井场调查规范: SY/T 6707-2016[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- [11] Noble Denton Consultancy Services Limited. Recommended practice for site specific assessment of mobile Jack-up Units: Third Edition - May 2007[S]. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 2007.
- [12] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [13] ISO/TC 67, Materials, Equipment and Offshore Structures for the Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries, Subcommittee SC 7, Offshore Structures. Petroleum and natural gas Industries-specific requirements for offshore structures: part 4 geotechnical and founda-

tion design considerations: ISO 19901-4: 2003(Modified)[S]. Washington D C, USA: The American Petroleum Institute (API) Publishing Services, 2014.

- [14] ZHENG X Y, ZHOU S W, YAO S L. Key issues for the jack-up rig leg penetration analysis[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(1): 84-89. 郑喜耀, 周松望, 姚首龙. 自升式钻井平台插桩分析的几个关键问题[J]. 海洋通报, 2014, 33(1): 84-89.

Discussion on the Methods for Punch-Through Analysis in the Footing Penetration of Jack-up Rig

SHE Wen, CAI Long-long, LIU Jian-tao
(China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of the punch-through analysis in footing penetration of jack-up rig, 3 sites named as Site A and Site B in the Bohai Sea and Site C in the South China Sea are selected and 4 punch-through analysis methods including Baglioni analysis method, 3 : 1 punch-through analysis method, punching shear coefficient method and foundation pressure expansion angle method are chosen for the bearing capacity and punch-through analyses of the drilling rig foundation. The analysis results show that the results from the Baglioni method are basically reliable, but there is a certain deviation between the actual results and the results from the analysis of loose sand or dense sand; the results from the 3 : 1 method are also basically reliable, but the influence of sand layer density is not considered for its equivalent foundation; for the results from the punching shear coefficient method, greater uncertainty is present and the coefficient needs to be optimized further; and the results from the foundation pressure expansion angle method have greater limitations, indicating that this method could not be applicable for the analysis of the foundation of jack-up rig. It is therefore concluded that either the Baglioni method or the 3 : 1 method can be used alone at general sites. For complicated sites, multiple methods should be comprehensively used for the analysis and evaluation. This study can provide a reference for geotechnical engineers to carry out punch-through analysis.

Key words: punch-through; expansion angle; internal friction angle; punching shear; safety factor

Received: February 4, 2021