

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



桩基三维非对称局部冲刷坑条件下土体应力计算简化模型

王增亮¹, 周航¹, 丁选明¹, 吴岱峰², 蔡汝一², 肖治微²

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 重庆市城市建设投资(集团)有限公司, 重庆 400023)

摘要:桥梁桩基周围形成局部冲刷坑时会导致桩基有效埋深减小, 增大工程结构的安全隐患。目前研究的冲刷坑模型多为对称形态, 而工程实际中的冲刷坑多为非对称形态, 桩基处于更不利状态。合理计算桩周形成非对称冲刷坑后土体的应力变化是评价桩基承载力的关键之一, 但目前尚没有严格的理论计算方法。针对该问题, 根据试验实测的非对称冲刷坑形态提出了三维非对称冲刷坑的简化模型。将冲刷坑最大深度以上土体重量看做荷载, 并基于 Boussinesq 点荷载方程在半无限空间中的应用, 推导得到非对称局部冲刷坑内土体垂直及水平有效应力。采用有限元中“生死单元法”模拟半无限空间地基中冲刷坑的形成, 并将有限元计算结果与理论方法计算结果进行对比, 验证了理论计算方法的正确性。基于理论计算方法, 考虑了冲刷坑内桩基的影响, 并与有限元计算结果进行对比, 对比结果验证了理论计算方法的可行性。在此基础上, 设计了一系列工况, 对三维非对称冲刷坑简化模型中的参数进行敏感性分析, 得到非对称冲刷坑条件下桩周土体的垂直及水平有效应力差的变化规律。

关键词:局部冲刷; 应力计算; 非对称冲刷坑; 简化模型; Boussinesq 解

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)05-0045-13

Simplified model of soil stress calculation under the condition of three-dimensional asymmetrical local scour hole of pile foundation

WANG Zengliang¹, ZHOU Hang¹, DING Xuanming¹, WU Daifeng², CAI Ruyi², XIAO Zhiwei²

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area; College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Urban Construction Investment (Group) Co., Chongqing 400023, P. R. China)

Abstract: When the local scour hole is formed around the pile foundation, the effective buried depth of the pile foundation will be reduced, which increases the safety hazard of the engineering structure. The scour hole models in the current research are mostly symmetrical, while the scour holes in engineering practice are mostly asymmetric, which makes the pile foundation in a more unfavorable state. How to calculate the stress change of the soil caused by scour reasonably is pivotal for evaluating the bearing capacity of the pile foundation. However, there is still no strict theoretical calculation method at present. This paper aims to

收稿日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51978105); 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jscx-msxmX0107)

作者简介: 王增亮(1994-), 男, 博士生, 主要从事桩-土相互作用研究, E-mail: wzl940810@163.com.

周航(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: zh4412517@163.com.

Received: 2020-12-02

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978105); Chongqing Technology Innovation and Application Development Special Project (No. cstc2019jscx-msxmX0107)

Author brief: WANG Zengliang (1994-), main research interest: pile-soil interaction, E-mail: wzl940810@163.com. ZHOU Hang (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: zh4412517@163.com.

propose a simplified three-dimensional asymmetric scour hole model based on the asymmetric scour hole shape measured in the experiment. The soil weight above the maximum depth of the scour hole is regarded as a load and is based on the application of Boussinesq's equation in a semi-infinite space. The calculation method of the vertical and horizontal effective stress of the soil in the asymmetric local scour hole has been derived. The "dead-live unit method" in the finite element method is used to simulate the formation of scour holes in the semi-infinite space foundation. And the finite element calculation results are compared with those obtained by the theoretical calculation method, which verifies the correctness of the theoretical calculation method. Subsequently, based on the theoretical calculation method, the influence of the pile foundation in the scour hole is considered and compared with the FEM results. The comparison results indicate that the theoretical calculation method in this research is feasible. On this basis, a series of working conditions has been designed, and the sensitivity analysis of the parameters in the simplified model of the three-dimensional asymmetric scour hole are carried out. Through the analysis, the change law of the vertical and horizontal effective stress difference of the soil around the pile under the condition of the asymmetric scour hole is obtained.

Keywords: local scour; stress calculation; asymmetric scour hole; simplified model; Boussinesq solution

桥梁作为供公路、渠道、铁路、管线等跨越库区、山谷、河流等其他交通线最常用的工程结构,在经济建设和社会发展中发挥着举足轻重的作用。深水桩基础是现代桥梁建设最主要的基础形式之一,具有体积大、阻水面积大的特点。由于深水桩基础所处的水环境非常复杂,在长期的河流冲刷作用下,桩基础周围土体被掏空,导致桩基承载力下降,从而使桥梁、公路发生破坏。董正芳等^[1]收集了典型的 502 座桥梁倒塌事故,发现洪水和冲刷造成的桥梁毁坏事故最多。Lagasse 等^[2]通过统计指出,由冲刷引起的桥梁损坏事故约占 60%。同时,其他学者^[1, 3-5]的研究表明,冲刷是造成桥梁失效的主要原因。

桥梁桩基冲刷形式按中国分类标准分为长期冲刷(一般冲刷)、收缩冲刷以及局部冲刷。与一般冲刷相比(整个河床的自然冲刷),局部冲刷通常发生在桩基础、桥墩、桥台以及其他过水障碍物处,因此,局部冲刷只发生在桩周附近上覆土层^[6-7],造成桩基有效埋深减小。Fischenich^[8]指出桩周局部冲刷深度可达到河床一般冲刷深度的 10 倍。在桩基局部冲刷设计中,有部分学者将局部冲刷深度以上土体全部移除,即将局部冲刷简化为一般冲刷参与桩基设计计算,此种简化方式会使桩基设计过于保守,使桩基承载力不能充分发挥,造成建筑资源的大量浪费。基于此,有规范将局部冲刷坑简化为一个倒截头的圆锥^[9-10],Richardson 等^[11]指出,局部冲刷坑的坡角为河床物质的休止角,其值在 30°~45°之间。在海洋等部分环境中冲刷坑多为这种形态。因此,目前桥梁桩基冲刷方面的设计和研究主要关注桩周

形成对称形态的冲刷坑时,桩基轴向和侧向承载力的计算问题^[12-15]。然而,在库区河道以及河流桩基环境中,桩周形成的局部冲刷坑多为非对称的,具体表现为桩基上游冲刷深度大、冲刷坡度较大,桩基下游冲刷深度小、冲刷坡度也较小^[16-17]。在桩周形成非对称冲刷坑时,采用倒截头圆锥形态的冲刷坑参与设计计算,即忽略桩基受到的水平应力的影响,显然会与实际相差较大。例如,实际工程中,桩周形成非对称冲刷坑时,冲刷小的一侧土体对桩基的水平作用力要大于冲刷较为严重的一侧。桩基在受到两侧不等的水平作用力时,使桩基产生较大的挠曲变形和弯矩,当桩基上部荷载较大时,桩基的挠曲变形会显著增加。然而,目前关于桩周形成非对称冲刷坑时桩周土体应力计算及其对桩基影响的研究较少。开展非对称冲刷坑条件下桩周土体应力计算的研究,可以为桩基设计提供相关的理论依据,也具有一定的实际和学术研究意义。

桩周形成局部冲刷坑时,关于桩周土体应力的计算,笔者回顾了 3 种目前被广泛应用于桩基设计规范的方法,即 API、FHWA-DP (FHWA driven piles)以及 FHWA-DS (FHWA drilled shafts)中建议的方法。其中, FHWA-DP 中假设桩周土体应力不受局部冲刷的影响,即土体应力计算时按未发生局部冲刷条件下的河床表面进行计算^[18],在局部冲刷较为严重的工程中, FHWA-DP 的应力计算方法显然与实际不符,使设计的桩基以及上部结构处于不安全状态。此外, API 和 FHWA-DS 通过引入影响深度的概念来计算局部冲刷引起的桩周土体有效

应力的损失。即影响深度以上土体有效应力线性减小,影响深度以下桩周土体有效应力与未发生局部冲刷一致。可以看出,API 和 FHWA-DS 中建议方法弥补了 FHWA-DP 中方法的不足,但 API 和 FHWA-DS 中计算方法只适用于固定形态的冲刷坑。如 FHWA-DS 适用于冲刷坑底部宽度为 0、冲刷坑坡角为 26.6° 、冲刷深度可变的工程条件^[19],API 适用于冲刷深度为 1.5 倍的桩径、冲刷坑底部宽度为 0、冲刷坑坡角固定的条件,且规范中并未指定冲刷坑坡角的大小^[20]。然而,实际工程中,冲刷坑形态并非固定形态,因此,这 3 种建议方法有很大的局限性。在此基础上,Lin 等^[21-22]基于 Boussinesq 解得到了可以考虑冲刷深度、冲刷坑顶部宽度、冲刷坑底部宽度及冲刷坑坡角可变的桩周土体应力计算解析解。使得局部冲刷坑条件下桩周土体应力计算更加符合工程实际,该解析解只适用于计算对称冲刷坑形态的桩周土体垂直有效应力。对于库区河道环境,桩周形成非对称局部冲刷坑时的工程状况并不适用。笔者根据实际工程调查以及室内试验得到的非对称局部冲刷坑形态,提出了非对称冲刷坑的简化模型,并给出了桩周形成非对称冲刷坑时的土体应力计算方法。主要思路为:根据试验及工程实际中非对称冲刷坑的横、纵截面形态,提出了非对称冲刷坑的简化模型,在此基础上,假设非对称冲刷坑最大冲刷深度以上土体重度为外荷载并引起了冲刷坑深度以下土体产生附加应力,基于 Boussinesq 解的严格定义及适用条件,假设桩径为 0,得到冲刷坑深度以下土体的垂直和水平附加应力。通过与最大冲刷坑深度以下土体应力的叠加,得到非对称冲刷坑内土体应力值,并通过有限元计算结果进行对比验证,在此基础上考虑桩径的影响。通过与有限元计算结果的对比验证,探讨了有桩时桩周土体应力计算的正确性。最后,对简化模型的参数进行了敏感性分析。

1 非对称冲刷坑条件下土体应力计算理论模型

Butch 等^[17]研究指出,非对称局部冲刷坑呈现出桩基上游冲刷坑冲刷深度大、冲刷坑坡角大,桩基下游冲刷坑冲刷深度小、冲刷坑坡角小的形态。Diab^[16]通过大型模型槽试验得到的圆桩桩周非对称局部冲刷坑随时间变化的横、纵截面图如图 1 所示。基于此,笔者提出的三维非对称局部冲刷坑简化模型图

如图 2 所示。图 3 为简化模型剖面图与平面图。

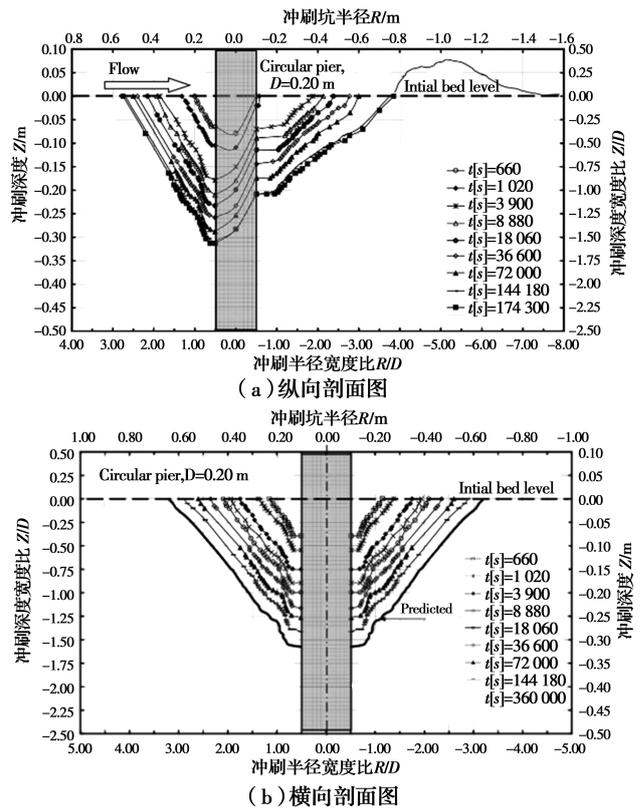


图 1 非对称局部冲刷坑纵向和横向剖面图^[16]

Fig. 1 Scour longitudinal profiles and scour lateral profiles around pile

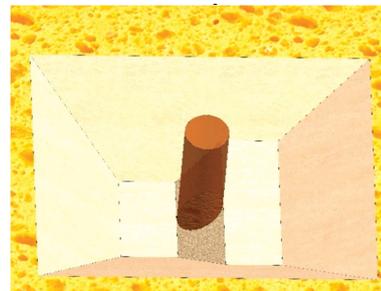


图 2 三维非对称局部冲刷坑简化模型图

Fig. 2 Simplified model of three-dimensional asymmetric local scour hole

简化模型中用以表征非对称局部冲刷坑的几何参数包括:桩基上游顶部长度 S_{wt1} 、桩基上游底部长度 S_{wb1} 、桩基上游底部宽度 S_{t1} 、冲刷坑宽度 $2b$ 、桩基下游顶部长度 S_{wt2} 、桩基下游底部长度 S_{wb2} 、桩基下游底部宽度 S_{t2} 、桩基上游冲刷坑深度 S_{d1} 、桩基下游冲刷坑深度 S_{d2} 、桩基上游冲刷坑坡度 β_1 、桩基下游冲刷坑坡度 β_2 以及桩基两侧坡度 β_3 ,由于简化模型关于 xoz 平面对称,为了便于计算,采用一半模型参与计算,在图 3(b)中也只标注了一半模型的几何尺寸。

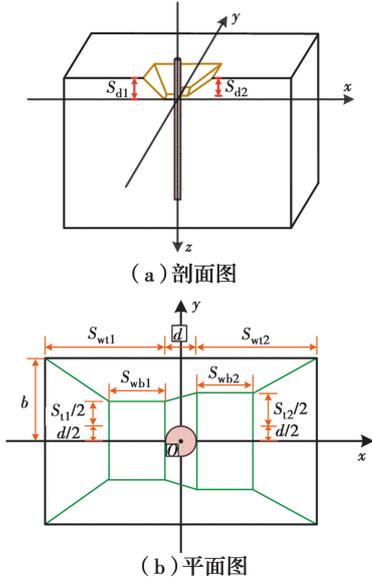


图 3 非对称局部冲刷坑简化模型剖面图和平面图

Fig. 3 Sectional view and plan view of simplified model of asymmetric local scourhole

同时可以发现,用以表征非对称局部冲刷坑的几何参数间存在如式(1)~式(4)所示关系。

$$S_{wt1} = \frac{S_{d1}}{\tan \beta_1} + S_{wb1} \quad (1)$$

$$S_{wt2} = \frac{S_{d2}}{\tan \beta_2} + S_{wb2} \quad (2)$$

$$\frac{S_{t2}}{2} = \frac{S_{t1}}{2} + (S_{d1} - S_{d2}) \cot \beta_3 \quad (3)$$

$$\Delta \sigma_{z1}' = \int_0^{\frac{d}{2}} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{S_{t1}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} \left(\frac{S_{d1} - S_{d2}}{2} + \frac{S_{d1} - S_{d2}}{d} \times x \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (7)$$

$$\Delta \sigma_{z2}' = \int_0^{\frac{d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^{\lambda_1} \frac{3}{2\pi} \left(\left(\frac{S_{d1} - S_{d2}}{2} + \frac{S_{d1} - S_{d2}}{d} \times x \right) - \frac{2y - (S_{t1} + d)}{S_{t2} - S_{t1}} (S_{d1} - S_{d2}) \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (8)$$

$$\Delta \sigma_{z3}' = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{S_{wb2}+d}{2}} \int_0^{\frac{S_{t1}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} (S_{d1} - S_{d2}) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (9)$$

$$\Delta \sigma_{z4}' = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{S_{wb2}+d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^{\frac{S_{t2}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} \left((S_{d1} - S_{d2}) - (S_{d1} - S_{d2}) \times \frac{2\left(y - \frac{S_{t1}}{2} - \frac{d}{2}\right)}{S_{t2} - S_{t1}} \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (10)$$

$$\Delta \sigma_{z5}' = \int_{\frac{S_{wb2}+d}{2}}^{\frac{S_{wt2}+d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^{\frac{S_{t1}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} \left((S_{d1} - S_{d2}) + S_{d2} \times \frac{x - \left(S_{wb2} + \frac{d}{2}\right)}{S_{wt2} - S_{wb2}} \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (11)$$

$$\Delta \sigma_{z6}' = \int_{\frac{S_{wb2}+d}{2}}^{\frac{S_{wt2}+d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^{\lambda_2} \frac{3}{2\pi} \left((S_{d1} - S_{d2}) + \frac{x - S_{wb2} - \frac{d}{2}}{S_{wt2} - S_{wb2}} S_{d2} - \frac{y - (S_{t1} + d)/2}{b - (S_{t1} + d)/2} S_{d1} \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (12)$$

$$\Delta \sigma_{z7}' = \int_0^{\frac{d}{2}} \int_{\frac{S_{wt1}+d}{2}}^{\frac{S_{t1}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} \left(S_{d1} \times \frac{y - \left(S_{t1} + \frac{d}{2}\right)}{b - \frac{S_{t1}}{2} - \frac{d}{2}} \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (13)$$

$$b = \frac{S_{t1}}{2} + \frac{d}{2} + S_{d1} \times \cot \beta_3 \quad (4)$$

如图 3(a)所示,假设 xoy 平面以上土体重度为外荷载(局部冲刷坑最大冲刷深度以上未冲刷土体),并在 xoy 平面任意深度处产生垂直附加应力项 $\Delta \sigma_z$ 、水平附加应力项 $\Delta \sigma_x$,则 xoy 平面以下为半无限空间地基。根据 Boussinesq 解,桩周土体的垂直和水平附加应力计算用式(5)、式(6)表示。

$$\sigma_z = \frac{3P(x,y) \times z^3}{2\pi \times (x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad (5)$$

$$\sigma_x = \frac{3P(x,y)}{2\pi} \left\{ \frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)x^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3} \right] \right\} \quad (6)$$

式中: $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ 。

1.1 非对称冲刷坑下垂直有效应力(σ_z')计算

非对称局部冲刷坑下,桩周土体垂直有效应力计算分为两部分:第 1 部分为 xoy 平面以下土体的垂直有效应力,第 2 部分为 xoy 平面以上土体产生的附加应力项。对式(5)在 x, y 方向上进行分段二重积分即可得到任意深度 z 处垂直方向上的附加应力项。具体如式(7)~式(21)。

$$\Delta \sigma_{z8}' = \int_0^{\frac{S_{wt2}+d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^b \frac{3}{2\pi} \left(S_{d1} \times \frac{y - \left(S_{t1} + \frac{d}{2} \right)}{b - \frac{S_{t1}}{2} - \frac{d}{2}} \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (14)$$

$$\Delta \sigma_{z9}' = \int_{-\frac{S_{wt1}+d}{2}}^{\frac{S_{wb1}+d}{2}} \int_0^{\frac{S_{t1}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} \left(S_{d1} \times \frac{x + \left(S_{wb1} + \frac{d}{2} \right)}{S_{wb1} - S_{wt1}} \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (15)$$

$$\Delta \sigma_{z10}' = \int_{-\frac{S_{wt1}+d}{2}}^{\frac{S_{wb1}+d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^{\lambda_3} \frac{3}{2\pi} \left(\frac{x + \left(S_{wb1} + \frac{d}{2} \right)}{S_{wb1} - S_{wt1}} S_{d1} - \frac{2y - (S_{t1} + d)}{2b - (S_{t1} + d)} S_{d1} \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (16)$$

$$\Delta \sigma_{z11}' = \int_{-\frac{d}{2}}^0 \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{S_{t1}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} \left(\frac{S_{d1} - S_{d2}}{2} - \frac{S_{d1} - S_{d2}}{2} \times \frac{2x}{d} \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (17)$$

$$\Delta \sigma_{z12}' = \int_{-\frac{d}{2}}^0 \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^{\lambda_4} \frac{3}{2\pi} \left(\left[\frac{S_{d1} - S_{d2}}{2} + \frac{S_{d1} - S_{d2}}{d} \times x - \frac{2y - S_{t1} - d}{S_{t2} - S_{t1}} (S_{d1} - S_{d2}) \right] \right) \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (18)$$

$$\Delta \sigma_{z13}' = \int_{-\infty}^{\frac{S_{wt1}+d}{2}} \int_0^b \frac{3}{2\pi} S_{d1} \times \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (19)$$

$$\Delta \sigma_{z14}' = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_b^{+\infty} \frac{3}{2\pi} S_{d1} \times \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (20)$$

$$\Delta \sigma_{z15}' = \int_{\frac{S_{wt2}+d}{2}}^{+\infty} \int_0^b \frac{3}{2\pi} S_{d1} \times \gamma' \times \frac{z^3}{R^5} dx dy \quad (21)$$

$$\text{式中: } \lambda_1 = \frac{S_{t2} - S_{t1}}{2d} \times x + \frac{S_{t1} + S_{t2} + 2d}{4};$$

$$\lambda_2 = \frac{b - (S_{t2} + d)/2}{S_{wt2} - S_{wb2}} x + b -$$

$$\frac{b - (S_{t2} + d)/2}{S_{wt2} - S_{wb2}} \left(S_{wt2} + \frac{d}{2} \right);$$

$$\lambda_3 = \frac{2b - S_{t1} - d}{2(S_{wb1} - S_{wt1})} \left(x + S_{wt1} + \frac{d}{2} \right) + b;$$

$$\lambda_4 = \frac{S_{t2} - S_{t1}}{2d} \times x + \frac{S_{t1} + S_{t2} + 2d}{4}.$$

$$\sigma_z' = 2\Delta \sigma_z' + \gamma' z \quad (22)$$

式中: $\Delta \sigma_z$ 为以上各分量的叠加。

1.2 非对称冲刷坑下水平有效应力 σ_x' 计算

非对称冲刷坑条件下桩周土体水平有效应力计算也分为两部分:第1部分为 xOy 平面以下土体水平有效应力部分,该部分按静止土压力理论参与计算,第2部分为 xOy 平面以上土体重度引起的附加应力项,通过 Boussinesq 解在 x, y 方向分段进行二重积分得到。具体如式(23)~式(34)。

$$\Delta \sigma_{x1}' = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{S_{wb2}+d}{2}} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{S_{t1}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} (S_{d1} - S_{d2}) \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (23)$$

$$\Delta \sigma_{x2}' = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{S_{wb2}+d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^{\frac{S_{t2}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} \left((S_{d1} - S_{d2}) - (S_{d1} - S_{d2}) \times \frac{2 \left(y - \frac{S_{t1}}{2} - \frac{d}{2} \right)}{S_{t2} - S_{t1}} \right) \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (24)$$

$$\Delta \sigma_{x3}' = \int_{\frac{S_{wb2}+d}{2}}^{\frac{S_{wt2}+d}{2}} \int_0^{\frac{S_{t1}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} \left((S_{d1} - S_{d2}) + S_{d2} \times \frac{x - \left(S_{wb2} + \frac{d}{2} \right)}{S_{wt2} - S_{wb2}} \right) \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (25)$$

$$\Delta \sigma_{x4}' = \int_{\frac{S_{wb2}+d}{2}}^{\frac{S_{wt2}+d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^{\lambda_2} \frac{3}{2\pi} \left((S_{d1} - S_{d2}) + \frac{x - S_{wb2} - \frac{d}{2}}{S_{wt2} - S_{wb2}} S_{d2} - \frac{y - (S_{t1} + d)/2}{b - (S_{t1} + d)/2} S_{d1} \right) \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (26)$$

$$\Delta \sigma_{x5}' = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \int_{\frac{S_{wt1}+d}{2}}^b \frac{3}{2\pi} \left(S_{d1} \times \frac{y - \left(S_{t1} + \frac{d}{2} \right)}{b - \frac{S_{t1}}{2} - \frac{d}{2}} \right) \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (27)$$

则可以得到非对称冲刷坑内桩周任意深度 z 处的垂直有效应力,可表示为

$$\Delta \sigma_{x6}' = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{S_{wt2}+d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^b \frac{3}{2\pi} \left(S_{d1} \times \frac{y - \left(S_{t1} + \frac{d}{2} \right)}{b - \frac{S_{t1}}{2} - \frac{d}{2}} \right) \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (28)$$

$$\Delta \sigma_{x7}' = \int_{\frac{S_{wt1}+d}{2}}^{\frac{S_{wb1}+d}{2}} \int_0^{\frac{S_{t1}+d}{2}} \frac{3}{2\pi} \left(S_{d1} \times \frac{x + \left(S_{wb1} + \frac{d}{2} \right)}{S_{wb1} - S_{wt1}} \right) \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (29)$$

$$\Delta \sigma_{x8}' = \int_{\frac{S_{wt1}+d}{2}}^{\frac{S_{wb1}+d}{2}} \int_{\frac{S_{t1}+d}{2}}^{\lambda_3} \frac{3}{2\pi} \left(\frac{x + \left(S_{wb1} + \frac{d}{2} \right)}{S_{wb1} - S_{wt1}} S_{d1} - \frac{2y - \left(S_{t1} + d \right)}{2b - \left(S_{t1} + d \right)} S_{d1} \right) \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (30)$$

$$\Delta \sigma_{x9}' = \int_{-\infty}^{\frac{S_{wt1}+d}{2}} \int_0^b \frac{3}{2\pi} S_{d1} \times \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (31)$$

$$\Delta \sigma_{x10}' = \int_{-\infty}^{-\frac{d}{2}} \int_b^{+\infty} \frac{3}{2\pi} S_{d1} \times \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (32)$$

$$\Delta \sigma_{x11}' = \int_{\frac{d}{2}}^{+\infty} \int_b^{+\infty} \frac{3}{2\pi} S_{d1} \times \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (33)$$

$$\Delta \sigma_{x12}' = \int_{\frac{S_{wt2}+d}{2}}^{+\infty} \int_0^b \frac{3}{2\pi} S_{d1} \times \gamma' \times \lambda_5 dx dy \quad (34)$$

式中: $\lambda_5 = \frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)x^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3} \right]$

由此,得到非对称冲刷坑条件下桩周任意深度 z 处土体的水平有效应力,可表示为

$$\sigma_x' = 2\Delta \sigma_x' + K_0 \gamma' z \quad (35)$$

式中: $K_0 = \nu / (1-\nu)$ 为静止土压力系数; γ' 为土的有效重度。

2 模型验证

为验证提出的非对称冲刷坑内土体应力计算模型的正确性,验证中忽略桩径的影响(即 $d=0$),符合 Boussinesq 解的严格使用条件。土体垂直及水平有效应力计算公式如式(35)、式(36)。用 MATLAB 软件对计算公式进行数值积分并与 ABAQUS 数值计算结果进行对比验证。由于冲刷坑模型关于平面对称,因此,ABAQUS 模拟时选取坑体模型的一半进行分析。在 ABAQUS 数值模型中采用“生死单元法”来模拟冲刷坑的形成。具体分为两个分析步:第 1 个分析步为地应力平衡分析步,第 2 个分析步采用“生死单元”杀死局部冲刷坑内的土体模拟被冲刷的土体。数值模型中冲刷坑的几何参数见表 1,表 1 中坑体参数由 Diab 试验数据等比放大得到,土的弹性模量为 80 MPa,泊松比 $\nu=0.3$,土体的有效重度 $\gamma'=10.4 \text{ kN/m}^3$,ABAQUS 模型如图 4 所示,模型长度为 35 m、宽度为 16 m、高度为 15 m。

$$\sigma_z' = 2(\Delta \sigma_{z3}' + \Delta \sigma_{z4}' + \Delta \sigma_{z5}' + \Delta \sigma_{z6}' +$$

$$\Delta \sigma_{z7}' + \Delta \sigma_{z8}' + \Delta \sigma_{z9}' + \Delta \sigma_{z10}' + \Delta \sigma_{z13}' + \Delta \sigma_{z14}' + \Delta \sigma_{z15}') + \gamma' z \quad (36)$$

表 1 非对称冲刷坑参数

Table 1 Parameters of asymmetric scour hole

S_{wt1}/m	S_{wb1}/m	S_{wt2}/m	S_{wb2}/m	S_{d1}/m	S_{d2}/m
1.35	0.3	2.01	0.27	0.837	0.632 4
b/m	$\beta_1/(\text{°})$	$\beta_2/(\text{°})$	$\beta_3/(\text{°})$	$(S_{t1}/2)/\text{m}$	$(S_{t2}/2)/\text{m}$
1.59	39	20	32	0.24	0.5

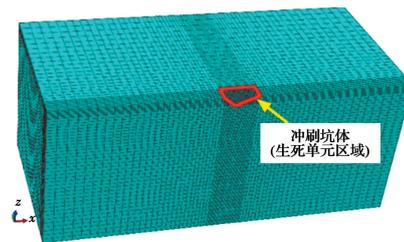


图 4 有限元计算模型图

Fig. 4 Finite element calculation model

提出的简化模型的计算结果与有限元冲刷模拟的计算结果对比如图 5 所示,图 5(a)为冲刷坑中心位置处垂直有效应力对比图,图 5(b)为水平有效应力对比图。通过与未冲刷时土体内部垂直有效应力的对比发现,冲刷坑形成后减小了土体的垂直有效应力,且这种减小趋势只出现在一定深度范围内,这与 FHWA-DS、API 以及 Lin 等^[19-22]的结论一致。同时可以看出,提出的理论计算结果与有限元计算结果具有较好的一致性。从而验证了提出的非对称

冲刷坑内运用 Boussinesq 解计算土体应力的正确性和可靠性。

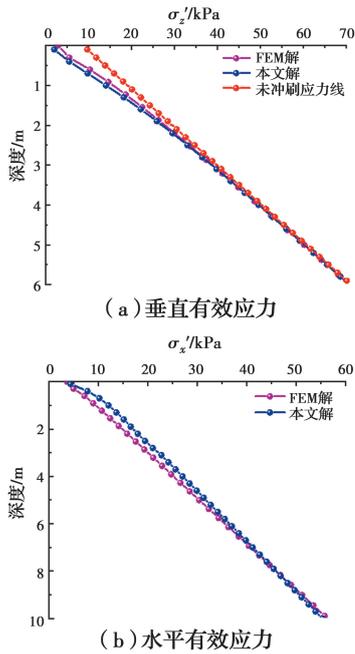


图 5 本文解与有限元计算对比

Fig. 5 Comparison of the proposed solution with the FEM

3 考虑有桩条件下土体应力计算适用性探讨

提出的计算模型是基于严格定义在半无限地基中 Boussinesq 点荷载方程得到的,在应用 Boussinesq 方程时忽略了桩径的影响。该部分引入桩径的影响,即 $d \neq 0$ 时,通过与有限元计算结果进行对比验证,从而探讨考虑冲刷坑内存在桩时桩周土体应力计算的适用性和可行性。由于有限元计算模型关于平面对称,故采用模型的一半进行分析,如图 6 所示。ABAQUS 有限元数值模型分为两个分析步进行计算:第 1 个分析步为地应力平衡分析步,第 2 个分析步采用“生死单元法”模拟桩周冲刷坑的形成。模型的参数为:土体的弹性模量为 80 MPa、泊松比 $\nu_s = 0.3$ 、土体的有效重度 $\gamma' = 10.4 \text{ kN/m}^3$ 、桩的弹性模量为 20 GPa、桩径为 1.8 m、泊松比为 $\nu_p = 0.2$ 、桩长为 14 m、模型长度为 54 m、宽度为 27 m、高度为 23 m,因此,可以忽略边界效应的影响。模型所采用的坑体参数如表 2 所示、有限元模型底部约束 3 个方向的位移、4 个侧面分别约束 x 、 y 方向的位移。由于模型中桩基的存在,模型得到的土体垂直有效应力为桩周土体的垂直有效应力值,

提出的计算模型中桩基上、下游侧土体水平有效应力分别按式(37)、式(38)计算。

$$\sigma_{x\text{上游}}' = 2(\Delta\sigma_{x5}' + \Delta\sigma_{x7}' + \Delta\sigma_{x8}' + \Delta\sigma_{x9}' + \Delta\sigma_{x10}') + K_0 \gamma' z \quad (37)$$

$$\sigma_{x\text{下游}}' = 2(\Delta\sigma_{x1}' + \Delta\sigma_{x2}' + \Delta\sigma_{x3}' + \Delta\sigma_{x4}' + \Delta\sigma_{x6}' + \Delta\sigma_{x11}' + \Delta\sigma_{x12}') + K_0 \gamma' z \quad (38)$$

表 2 有桩条件下非对称冲刷坑参数

Table 2 Parameters of asymmetric scour hole with pile

S_{wt1}/m	S_{wb1}/m	S_{wt2}/m	S_{wb2}/m	S_{d1}/m	S_{d2}/m
4.05	0.9	5.03	1.23	2.4	1.2
b/m	$\beta_1/(\circ)$	$\beta_2/(\circ)$	$\beta_3/(\circ)$	$(S_{t1}/2)/\text{m}$	$(S_{t2}/2)/\text{m}$
5.4	37	18	31	0.5	2.5

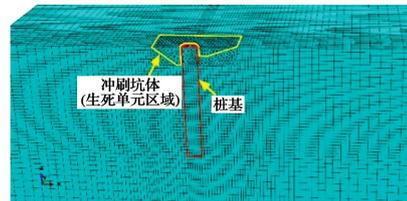


图 6 有桩时有限元计算模型

Fig. 6 Finite element calculation model with pile

图 7 为非对称冲刷坑内有桩时理论计算结果与有限元计算结果对比图,提出的计算模型的结果由 MATLAB 软件进行数值积分得到,有限元计算结果提取的是桩周土体的垂直有效应力以及桩基上、下游土体的水平有效应力。图 7(a)为非对称冲刷坑内土体垂直有效应力对比曲线,图 7(b)、(c)分别为桩基上下游土体水平有效应力结果对比图。可以看出,提出的土体应力计算模型结果与有限元计算结果表现出较好的一致性。因此,简化模型用来计算非对称冲刷坑内土体的垂直有效应力以及桩基上、下游土体的水平有效应力是可行的。

4 参数分析

由简化模型可以看出,非对称冲刷坑计算模型中的独立变量有 9 个: S_{wt1} 、 S_{wb1} 、 S_{d1} 、 S_{d2} 、 S_{wt2} 、 S_{wb2} 、 d 、 b 、 S_{t1} 。为便于探讨各独立变量对非对称冲刷坑内土体应力的影响大小,此部分围绕 9 个独立变量设计了部分工况,进行了参数敏感性分析。

4.1 不同参数下冲刷坑内桩周土体垂直有效应力变化分析

为便于进行垂直有效应力的参数分析,此处引

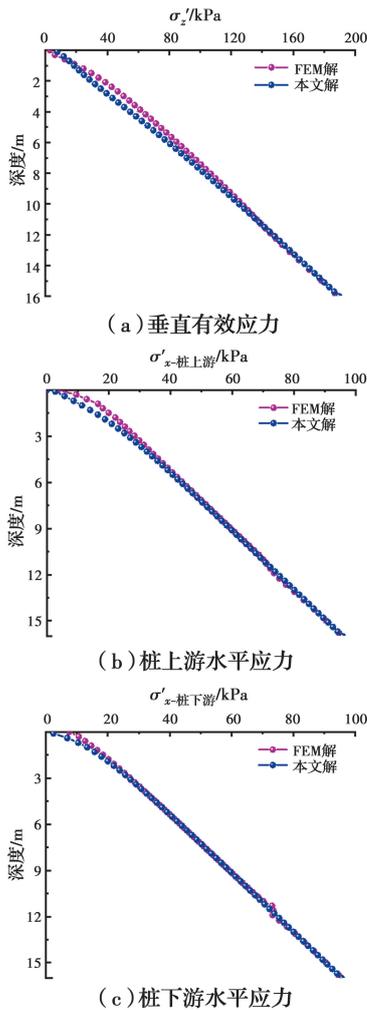


图 7 有桩时本文解与有限元对比

Fig. 7 Comparison between the proposed solution and the FEM when pile is considered

入垂直有效应力率(式(39))来分析非对称局部冲刷坑形成后桩周土体垂直有效应力的变化。

$$\frac{\sigma_z'}{\sigma_{z0}'} = \frac{\Delta\sigma_z + \gamma'z}{\gamma'(z + S_{d1})} \quad (39)$$

式中： σ_{z0}' 为未冲刷时 xoy 平面以下的垂直有效应力。

图 8~图 16 为非对称局部冲刷坑模型中 9 个独立变量对桩周土体垂直有效应力变化规律的影响关系图,参与计算的土体有效重度 $\gamma' = 10.4 \text{ kN/m}^3$ 。由图 8 可看出,桩周土体垂直有效应力率随着深度的增加逐渐增大,深度 10 m 以下时,有效应力率的值趋近于 1,说明局部冲刷坑对桩周土体垂直有效应力的影响在一定深度以内,影响深度以下时土体垂直有效应力与未冲刷时保持一致。当桩基上游顶部冲刷长度 S_{wt1} 从 3 m 到 7 m 逐渐增加时,同一深度处 S_{wt1} 的值越大,土体垂直有效应力率的值越小;

深度逐渐增大时,不同 S_{wt1} 曲线之间的差异呈现出先增大后减小的现象,深度 4~10 m 范围内上游冲刷长度 S_{wt1} 对土体垂直有效应力率的影响最大。图 9 为桩基上游底部冲刷长度 S_{wb1} 对冲刷坑内桩周土体垂直有效应力率的影响关系曲线。可以看出,同一深度处土体垂直有效应力率随着 S_{wb1} 值的增大而逐渐减小,然而这种变化趋势不明显,即 S_{wb1} 值对土体垂直有效应力率的影响较小,在深度 12 m 处土体垂直有效应力率达到 0.98。图 10 为桩基下游顶部冲刷坑长度 S_{wt2} 影响下土体垂直有效应力率变化关系曲线。可以看出,同一深度处 S_{wt2} 从 3~7 m 逐渐增大时,土体垂直有效应力率呈现出减小的现象,但减小值较小,在深度 15 m 时,土体垂直有效应力率值趋近

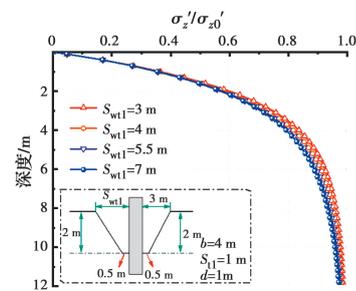


图 8 不同 S_{wt1} 下垂直有效应力率随深度的变化曲线

Fig. 8 Variation of effective stress rate around the pile for different S_{wt1}

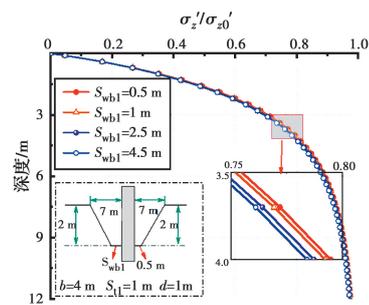


图 9 不同 S_{wb1} 下垂直有效应力率随深度的变化曲线

Fig. 9 Variation of effective stress rate around the pile for different S_{wb1}

于 1。图 11 表明,土体垂直有效应力率受桩基下游冲刷坑底部宽度的影响较小,深度 15 m 以下时土体垂直有效应力与未冲刷时应力值一致。由图 12 可知,冲刷坑以下 1.5 m 深度范围内,同一深度处土体垂直有效应力随桩基上游冲刷深度 S_{d1} 的增大而增大,深度大于 1.5 m 时呈现出变化规律相反的现象。分析其原因为,冲刷坑深度增大时,冲刷坑底以上剩

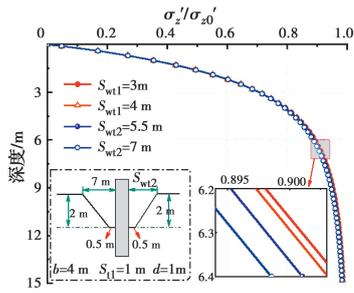


图 10 不同 S_{wt2} 下垂直有效应力率随深度的变化曲线
 Fig. 10 Variation of effective stress rate around the pile for different S_{wt2}

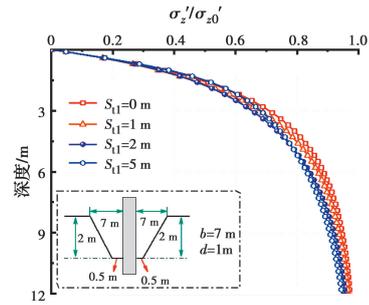


图 14 不同 S_{d1} 下垂直有效应力率随深度的变化
 Fig. 14 Variation of effective stress rate around the pile for different S_{d1}

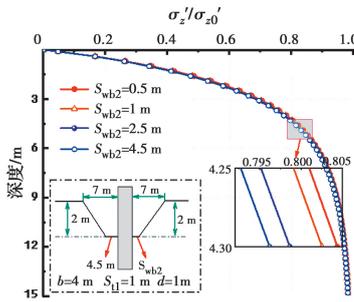


图 11 不同 S_{wb2} 下垂直有效应力率随深度的变化
 Fig. 11 Variation of effective stress rate around the pile for different S_{wb2}

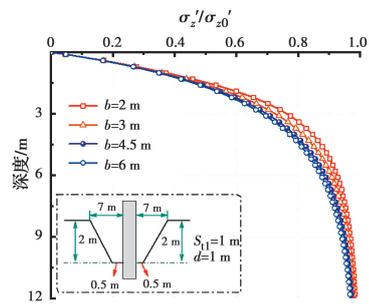


图 15 不同 b 下垂直有效应力率随深度的变化
 Fig. 15 Variation of effective stress rate around the pile for different b

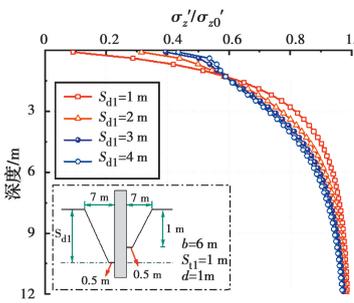


图 12 不同 S_{d1} 下垂直有效应力率随深度的变化
 Fig. 12 Variation of effective stress rate around the pile for different S_{d1}

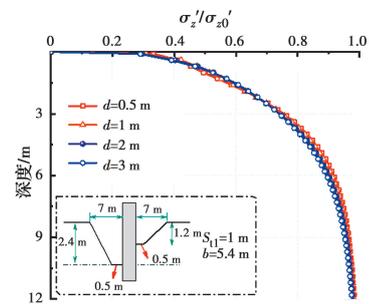


图 16 不同 d 下垂直有效应力率随深度的变化
 Fig. 16 Variation of effective stress rate around the pile for different d

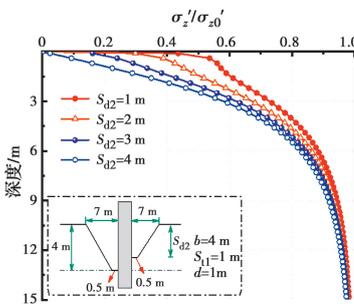


图 13 不同 S_{d2} 下垂直有效应力率随深度的变化
 Fig. 13 Variation of effective stress rate around the pile for different S_{d2}

余土体(冲刷坑深度范围内未冲刷土体)对坑底以下浅层土体的影响越大,且冲刷坑深度越大对坑底以下土体垂直有效影响深度越深。由图 13 可以看出,桩基下游冲刷深度 S_{d2} 增加过程中,同一深度处土体垂直有效应力率呈现出减小的现象,该现象在冲刷坑底浅层范围内变化明显,且 S_{d2} 值越大其影响深度越深。图 14 为桩基上游冲刷坑底部宽度变化时的土体垂直有效应力率变化关系曲线。 S_{d1} 的增加对应于冲刷坑两侧坡度 β_3 的增大,可以看出,冲刷坑两侧坡度 β_3 增大时同一深度处土体垂直有效应力

率减小且影响深度增大,在深度 3~9 m 范围内对土体垂直有效应力率的影响最大。图 15 给出了冲刷坑宽度增加时的土体应力变化关系曲线,由图 15 可以看出,冲刷坑宽度的变化对冲刷坑底以下土体的垂直有效应力值影响较为明显。在冲刷坑底深度 3~11 m 范围内不同曲线之间的差异较其他深度处更为明显,深度 12 m 以下不同曲线趋于重合且接近于 1。图 16 为考虑三维非对称冲刷坑内桩径变化时的土体垂直有效应力率变化规律曲线图。由图 16 可以看出,冲刷坑形态不变时,土体垂直有效应力率随桩径的增大逐渐减小,然而这种减小趋势不明显,即桩径的大小对冲刷坑以下土体的垂直有效应力的影响较小。

4.2 不同参数下冲刷坑内桩周土体水平有效应力差分析

桩周形成非对称冲刷坑时,桩基下游冲刷剩余土体量大于桩基上游,会造成桩基上、下游土体的水平有效应力存在差异,具体表现为桩基下游土体水平有效应力大于桩基上游。该部分就桩基上、下游的土体水平有效应力差进行参数敏感性分析。由于三维非对称局部冲刷坑模型中冲刷坑的冲刷宽度 b 不会引起桩基上下游的水平有效应力差,因此,此部分参数分析包括 8 个参数: S_{wt1} 、 S_{wb1} 、 S_{d1} 、 S_{d2} 、 S_{wt2} 、 S_{wb2} 、 d 、 S_{t1} 。

图 17~图 24 为 8 个参数影响下的冲刷坑内桩周土体水平有效应力差变化规律曲线。参与计算的土体有效重度 $\gamma' = 18 \text{ kN/m}^3$ 、泊松比 $\nu = 0.3$ 。图 17 为桩基上游冲刷坑顶部长度 S_{wt1} 逐渐增大时,桩周土体水平有效应力差变化关系曲线。由图 17 可

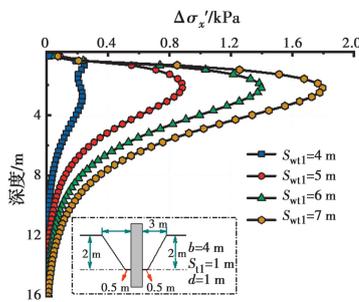


图 17 不同 S_{wt1} 下水平有效应力差随深度的变化
Fig. 17 Difference of horizontal effective stress varies with depth for different S_{wt1}

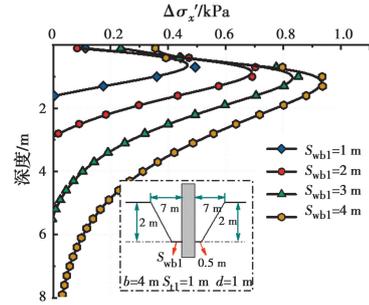


图 18 不同 S_{wb1} 下水平有效应力差随深度的变化
Fig. 18 Difference of horizontal effective stress varies with depth for different S_{wb1}

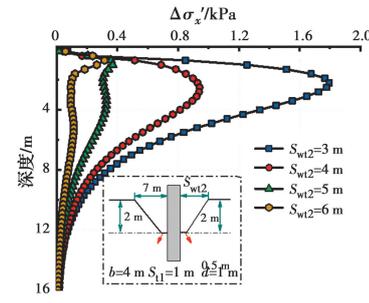


图 19 不同 S_{wt2} 下水平有效应力差随深度的变化
Fig. 19 Difference of horizontal effective stress varies with depth for different S_{wt2}

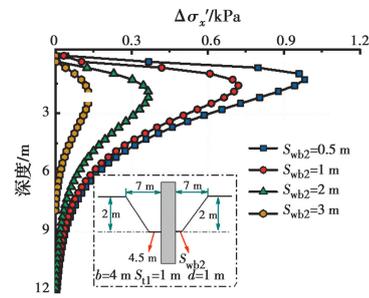


图 20 不同 S_{wb2} 下水平有效应力差随深度的变化
Fig. 20 Difference of horizontal effective stress varies with depth for different S_{wb2}

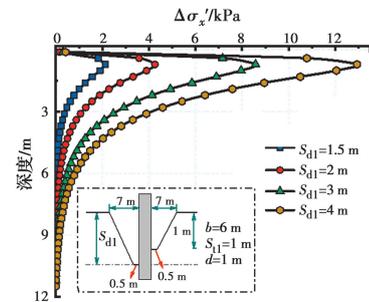


图 21 不同 S_{d1} 下水平有效应力差随深度的变化
Fig. 21 Difference of horizontal effective stress varies with depth for different S_{d1}

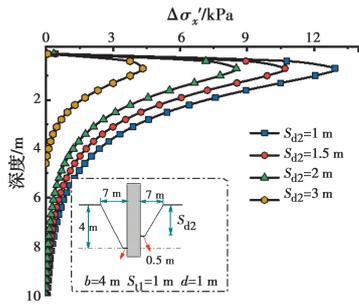


图 22 不同 S_{d2} 下水平有效应力差随深度的变化
 Fig. 22 Difference of horizontal effective stress varies with depth for different S_{d2}

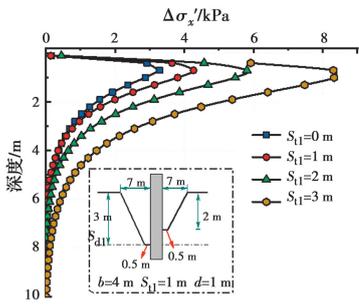


图 23 不同 S_{d1} 下水平有效应力差随深度的变化
 Fig. 23 Difference of horizontal effective stress varies with depth for different S_{d1}

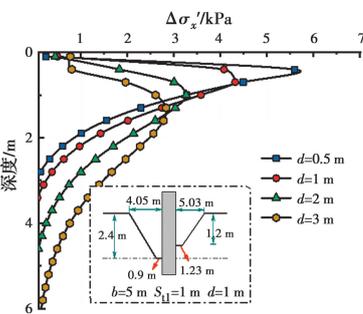


图 24 不同 d 下水平有效应力差随深度的变化
 Fig. 24 Difference of horizontal effective stress varies with depth for different d

可以看出, $S_{wt2}=3\text{ m}$ 时, 同一深度下 S_{wt1} 的增大使土体水平有效应力差逐渐增大, 这种差异性随着深度的增加, 出现先增大后减小的趋势, 在深度 4 m 范围内差异性达到最大值 1.8 kPa。且水平有效应力差只存在于冲刷坑底以下的一定深度范围内, 即存在影响深度, 影响深度以下水平有效应力差接近于 0。图 18 为桩基上游底部冲刷长度 S_{wb1} 的增大时土体水平有效应力差变化规律曲线。 S_{wb1} 增大对应于桩基上游坡度 β_1 的增大, 由图 18 可以看出, S_{wb1} 增大时, 同一深度下水平有效应力差也随之增大, S_{wb1} 的变化对水平有效应力差的影响较小, 均在 1 kPa 以

内, 影响深度为 8 m。图 19 为桩基下游顶部冲刷坑长度 S_{wt2} 影响下土体水平有效应力差变化关系曲线图。 S_{wt2} 的增大对应于桩基下游坡度 β_2 的减小, 由图 19 可以看出, S_{wt2} 增大时同一深度处水平有效应力差增大, 影响深度为 16 m。由图 20 可知, 同一深度土体水平有效应力差随着 S_{wb2} 的增加而减小, 这是由于 S_{wb2} 的不断增大, 其值逐渐趋近于 S_{wb1} , 使桩基上、下游侧的非对称性减小, 但 S_{wb2} 的变化对水平有效应力差的影响较小, 均在 1 kPa 范围内。图 21 为土体水平有效应力差受桩基上游冲刷深度变化关系曲线图。可以看出, S_{d1} 增大时土体水平有效应力差值也随之增大, 最大可达到 13 kPa, 在深度 6 m 范围内差值变化明显, 9 m 以下深度水平有效应力差值趋近于 0。图 22 为桩基下游冲刷深度 S_{d2} 增加时, 土体水平有效应力差变化规律曲线图, 由图 22 可知, S_{d2} 增大时, 水平有效应力差逐渐减小, 这是由于 S_{d2} 增大时其值逐渐趋近于 S_{d1} , 减小了冲刷坑的非对称性。 S_{d2} 的变化对水平有效应力差的影响较大, 最大值可达到 12.9 kPa, 影响深度为 10 m。图 23 为 S_{d1} 增大时水平有效应力差变化规律曲线图。 S_{d1} 的增加对应于冲刷坑两侧坡度 β_3 的增大, 可知水平有效应力差随着 S_{d1} 的增大呈现出增大的趋势, 其影响深度为 10 m。图 24 为一非对称冲刷坑内不同桩径变化时的水平有效应力差规律曲线图。可以看出, 桩径越小时, 土体水平有效应力差值越大, 随着桩径的增大, 最大水平有效应力差值逐渐减小, 最大值出现深度却在增大, 其影响深度出现增大的趋势。

需要注意的是, 参数敏感性分析中只是对单一因素进行敏感性分析(即其他参数保持不变), 而实际工程中, 桩周土体的垂直有效应力及水平有效应力差值为各因素的耦合作用结果。

5 结论

基于试验实测非对称冲刷坑形态, 提出了桩周非对称冲刷坑三维简化模型, 且基于 Boussinesq 点荷载方程得到非对称冲刷坑内桩周土体应力计算方程。基于该计算方法对桩周土体的垂直有效应力及桩基上、下游水平有效应力差进行了计算, 并对简化模型中的参数做了土体应力的敏感性分析, 得出以下主要结论:

1) 提出的冲刷坑内土体应力计算方法是将局部冲刷坑内最大冲刷深度以上土体(冲刷深度范围内

冲刷剩余土体)重度作为外荷载,并基于 Boussinesq 点荷载方程在半无限空间中的应用得到的。而后采用有限元中“生死单元法”模拟半无限空间内冲刷坑,通过与有限元计算结果的对比,验证了计算方法的正确性。随后在半无限空间中考虑了桩径的影响,采用有限元模拟了桩周非对称冲刷坑,通过有限元计算结果与本文提出的冲刷坑内有桩存在时的理论计算结果进行对比分析,验证了考虑桩径时理论计算方法的可行性。

2)冲刷坑的形成对坑底以下一定深度土体的垂直有效应力存在较大影响,该深度称之为冲刷坑造成的影响深度,这与 API、FHWA-DP 中所述一致。提出的计算方法可得到任意形态冲刷坑的影响深度以及桩周土体的垂直有效应力值,弥补了 API 与 FHWA-DP 中只可以计算特定形态冲刷坑的不足,且提出的计算模型可以考虑库区等环境下冲刷坑的非对称性的影响,使得理论计算更贴合实际工程。

3)参数分析表明,桩周形成冲刷坑的尺寸越大,对冲刷坑底以下土体的垂直有效应力影响越大,影响深度也随之增大;参数敏感性分析可以得到,冲刷深度以及冲刷坑宽度的变化对桩周土体的垂直有效应力的影响最大;在影响深度以下,冲刷坑形态参数的改变对土体垂直有效应力没有影响,且影响深度以下土体的垂直有效应力值等于未形成冲刷坑时该处的垂直有效应力。

4)非对称冲刷坑会造成桩基上、下游侧土体水平有效应力存在差异,具体表现为桩基下游土体水平有效应力大于桩基上游。通过参数分析得到桩基上、下游冲刷深度的差异对桩周土体的水平有效应力差值影响最大,有效重度越大的土体,水平有效应力差值越明显。桩周土体的水平有效应力差也存在影响深度且在冲刷坑底部以下浅层土体差值最大。

参考文献:

[1] 董正方, 郭进, 王君杰. 桥梁倒塌事故综述及其预防对策[J]. 上海公路, 2009(2): 30-32.
DONGZ F, GUO J, WANG J J. Summary and prevention countermeasures of bridge collapses [J]. Shanghai Highways, 2009(2): 30-32. (in Chinese)

[2] National Cooperative Highway Research Program. Countermeasures to protect bridge piers from scour: NCHRP Report 593 [R]. Washington, D. C. :

Transportation Research Board, 2007.

[3] WARDHANA K, HADIPRIONO F C. Analysis of recent bridge failures in the United States [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(3): 144-150.

[4] SMITH D W. Bridge failures [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1976, 60(3): 367-382.

[5] BRIAUD J L, TING F C K, CHEN H C, et al. SRICOS: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125 (4): 237-246.

[6] TSENG W C, KUO Y S, CHEN J W. An investigation into the effect of scour on the loading and deformation responses of monopile foundations [J]. Energies, 2017, 10(8): 1190.

[7] QI W G, GAO F P, RANDOLPH M F, et al. Scour effects on p - y curves for shallowly embedded piles in sand [J]. Géotechnique, 2016, 66(8): 648-660.

[8] FISCHENICH C, LANDERS M. Computing scour EMRRP technical notes Collection Vicksburg [M]. U. S. Army Engineer Research and Development Center, 1999.

[9] ARNESON L A, ZEVENBERGEN L W, LAGASSE P F, et al. Evaluating scour at bridges [R]. U. S. National Highway Institute, 2012.

[10] WHITEHOUSE R. Scour at marine structures: A manual for practical applications [M]. London, UK: Thomas Telford Ltd, 1998.

[11] RICHARDSON E V. Evaluating scour at bridges [M]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2001.

[12] ZHANG H, CHEN S L, LIANG F Y. Effects of scour-hole dimensions and soil stress history on the behavior of laterally loaded piles in soft clay under scour conditions [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 84: 198-209.

[13] LIN Y J, LIN C. Effects of scour-hole dimensions on lateral behavior of piles in sands [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 111: 30-41.

[14] YANG X F, ZHANG C R, HUANG M S, et al. Lateral loading of a pile using strain wedge model and its application under scouring [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36 (3): 340-350.

- [15] LIANG F Y, ZHANG H, WANG J L. Variational solution for the effect of vertical load on the lateral response of offshore piles [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 99: 23-33.
- [16] DIAB R M A E. Experimental investigation on scouring around piers of different shape and alignment in gravel [D]. Tu Darmstadt, 2011.
- [17] BUTCH G K. Scour-hole dimensions at selected bridge piers in New York [C]//U. S. North American Water and Environment Congress & Destructive Water. ASCE, 1996.
- [18] HANNIGAN P J, RAUSCHE F, LIKINS G E, et al. Design and construction of driven pile foundations - Volume I [R]. U. S. National Highway Institute, 2016.
- [19] O' NEIL M W, REESE L C. Drilled shafts: Construction procedures and design methods [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1990, 5(1/2): 156-157.
- [20] API. API Recommended Practice, Geotechnical and Foundation Design Considerations [S]. Washington, D. C. , USA: American Petroleum Institute, 2011.
- [21] LIN C, WU R. Evaluation of vertical effective stress and pile lateral capacities considering scour-hole dimensions [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(1): 135-143.
- [22] LIN C. The loss of pile axial capacities due to scour: vertical stress distribution [J]. *DEStech Transactions on Materials Science and Engineering*, 2017 (ictim). DOI:10.12783/dtmse/ictim2017/10056.

(编辑 章润红)