

考虑土体冲刷应力历史的单桩承载性状分析^{*}

李彦初^{1,2}, 梁发云²

(1.成都市市政工程设计研究院,成都 610023;2.同济大学 地下建筑与工程系,上海 200092)

摘 要:目前分析冲刷对桥梁桩基承载力的影响通常采用将冲刷土体直接移除的方法,近似认为冲刷使得桩基埋深减少,桩头出露高度增加。这种方法忽略了冲刷后土体应力历史变化对桩基承载性能的影响。笔者提出了一种能够考虑土体应力历史的简化方法,该方法适用于 ABAQUS 内置的 Mohr-Coulomb 模型,应用 ABAQUS 软件对竖向受荷单桩进行了数值模拟,与模型试验结果的对比,验证了该方法的可行性。通过参数分析,进一步考察了冲刷深度对桩基竖向承载力的影响。研究表明,冲刷将极大地降低摩擦桩的竖向承载能力,其极限承载力损失量随冲刷深度的增加呈线性增加趋势。因此,实际工程中必须重视冲刷对摩擦型桩基竖向承载力的影响。

关键词:冲刷应力历史;单桩;竖向承载力;数值模拟;模型试验

中图分类号:TU473

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)06-1624-06

Numerical Simulation of Bearing Behaviors of Single Pile under Scouring Conditions Considering Soil Stress History

Li Yanchu^{1,2}, Liang Fayun^{2*}

(1. Chengdu Municipal Engineering and Research Design Institute, Chengdu, 610000, P.R. China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China)

Abstract: A common way to analyze the vertical bearing behaviors of bridge scoured piles is to remove the scoured soil while just considering decrease of embedded depth and increase of exposing height. This approach ignores the fact that the remaining soil experiences different stress histories before and after scouring, which can be expected to affect vertical bearing behavior of piles. In this paper, a simplified method applicable to numerical analysis with ABAQUS which can consider stress history of soil after scouring is proposed and verified by comparing results of numerical calculation and model tests. Moreover, the influence of scouring depths on vertical bearing behavior of piles is investigated by numerical analysis. The results show that scour results in significant reduce of vertical bearing capacity of friction piles. The vertical bearing capacity decreases with increase of scouring depth linearly. Thus great attention should be paid to the effect of scouring on vertical bearing capacity of friction piles in engineering practice.

Keywords: scoured stress history; single pile; vertical bearing behaviors; numerical simulation; model test

* 收稿日期:2017-05-23(修改稿)

作者简介:李彦初(1989-),男,成都人,硕士,助理工程师,主要从事岩土工程、道路工程等研究工作。

E-mail:liyc06@gmail.com

通讯作者:梁发云(1976-),男,安徽肥东人,博士,教授,主要从事土力学与基础工程领域的教学与研究。

E-mail:fyliang@tongji.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(41172246);上海市人才发展资金(201548);中央高校基本科研业务费(0200219237)

0 引言

冲刷是由水流作用引起河床侵蚀的一种自然现象。统计资料表明,冲刷是导致桥梁破坏的最主要原因,超过 50% 的桥梁破坏与洪水冲刷有关。洪水作用下桥墩周围冲刷深度通常可达到数米以上,冲刷导致桥墩基础裸露或覆土高程降低,从而削弱了地基土对桥墩桩基础的侧向支撑作用,降低了桥墩桩基础承载性能,由此导致的桥墩桩基础承载或变形失效是造成桥梁损毁的重要原因^[1-2]。

目前关于水流冲刷的研究大多集中于冲刷作用机理,对于冲刷后桩基承载特性的研究还较为缺乏。闫澍旺等^[3]引入模拟开挖的思想,将土体冲刷过程视为土体开挖进行数值模拟,分析冲刷前后桩基承载性状。其研究结果表明,工程上按高承台计算模式简单地考虑冲刷对桩基承载性状的影响,不能反映土体冲刷后的卸载回弹效应。Liang 等^[4]对冲刷作用下竖向受荷单桩承载特性进行了有限元分析,探讨了冲刷深度和范围对桩基承载性状的影响。Lin 等^[5-6]采用修正的 p - y 曲线对比分析了土体冲刷应力历史对水平受荷桩承载特性的影响。Liang 等^[7-8]进一步分析了冲刷作用下单桩的屈曲承载能力以及冲刷对桩基础动力阻抗的影响。

本文提出了一种能够考虑冲刷后土体应力历史的简化方法,该方法适用于 Mohr-Coulomb 模型,利用有限元软件 ABAQUS 对竖向受荷单桩进行了数值模拟,与模型试验结果进行对比,验证了该方法的可行性,并在此基础上分析了冲刷深度对桩基竖向承载力的影响。

1 考虑应力历史的简化方法

评价水流冲刷对桥梁桩基竖向承载力的影响通常采用直接将冲刷土体移去的简化方法,即认为桩基埋深减少,桩头出露高度增加,仅考虑由桩侧摩阻力减小造成的承载力损失。这种方法忽略了冲刷后土体经历了从正常固结(NC)到超固结(OC)状态的变化,土体物理力学特性可能发生的变化。美国海军工程设计手册(NAVFAC)^[9]提出了桩基竖向承载力计算的建议公式如下:

$$Q_u = (\sigma'_t \times N_q \times A_p) + (K \times \sigma'_v \times \tan\delta \times S_p) \tag{1}$$

式中: Q_u 为极限承载力; σ'_t 为桩端有效应力; N_q 为桩端承载力系数; A_p 为桩端截面积; K 为水平土

压力系数; σ'_v 为桩埋深中点处有效应力; δ 为桩土接触面摩擦角; S_p 为桩身侧面积。

Lin 等^[6]针对 p - y 曲线相关的两个土性参数(土体容重和土体内摩擦角)进行了研究,得出了冲刷后土体容重和土体内摩擦角的修正值,并利用修正后的 p - y 曲线研究了冲刷后桩基的水平承载性状。其研究表明,冲刷后土体超固结比(OCR)对土体容重的影响很小,可认为土体容重在冲刷前后保持不变。因此,超固结比可按式(2)计算。

$$OCR = \frac{\gamma_{int} H_{int}}{\gamma_{sc} H_{sc}} = \frac{H_{int}}{H_{sc}} \tag{2}$$

式中: γ_{int} 为冲刷前土体容重; γ_{sc} 为冲刷后土体容重, $\gamma_{int} \approx \gamma_{sc}$; H_{int} 为冲刷前土层深度; H_{sc} 为冲刷后土层深度。

参照 Lin 等^[6]的分析方法,本文基于式(1)探讨冲刷前后影响桩基竖向承载力的相关参数变化。如式(1)所示,桩基竖向承载力由桩端阻力和桩侧摩阻力组成。对于桩端阻力来说,桩端处土层有效应力 σ'_t 为影响桩端阻力的主要因素,由于冲刷前后土体容重变化很小, σ'_t 的变化主要受土层厚度改变的影响;对于桩侧摩阻力来说,土层厚度、水平土压力系数 K 和桩土接触面摩擦系数 $\tan\delta$ 为影响桩侧摩阻力的主要因素。 $\tan\delta$ 仅与土体内摩擦角 φ 相关,Lin 等^[6]研究表明冲刷前后土体内摩擦角 φ 变化并不显著,当超固结比(OCR)达 3.0 时,内摩擦角变化不超过 5%,因此本文假定冲刷前后土体内摩擦角 φ 保持不变,也即 $\tan\delta$ 保持不变;土层厚度与超固结比(OCR)直接相关,如式(2)所示。因此,下文将重点考察水平土压力系数 K 与超固结比(OCR)之间的联系,以反映冲刷前后 K 的变化。

对于竖向受荷单桩与土相互作用的模型,桩侧土体的水平土压力可看作静止土压力。对于正常固结土,静止土压力系数经验公式如下^[10]:

$$K = 1 - \sin\varphi \tag{3}$$

超固结土的静止土压力系数经验公式^[11]如下:

$$K = (1 - \sin\varphi) OCR^{\sin\varphi} \tag{4}$$

对于超固结比(OCR)的确定,根据式(1)可知水平土压力系数主要影响桩侧摩阻力,计算公式中 σ'_v 为桩埋深中点处土层有效应力,因此可将桩埋深中点处土层作为参考土层,以确定冲刷前后的超固结比(OCR),图 1 为冲刷前后地基剖面示意图。

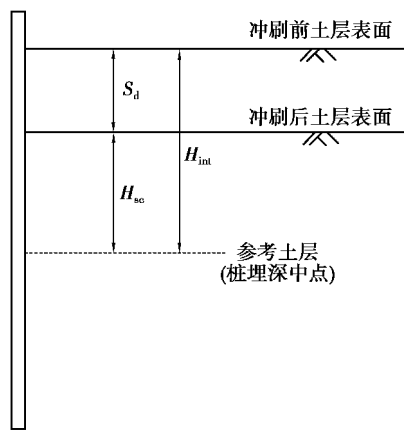


图 1 冲刷前后地基剖面图

Fig.1 Profile of pile foundation before and after scouring

由式(3)、式(4)可得冲刷前后桩侧水平土压力系数之比为:

$$m_e = \frac{1}{OCR^{\sin\varphi}} \tag{5}$$

由于式(3)和(4)为计算冲刷前后水平土压力系数的经验公式,因此式(5)得到的 m_e 也为经验值。

水平土压力系数 K 可由弹性理论得到,如式(6)所示^[10]。将冲刷前土体泊松比 v_{int} 和冲刷后土体泊松比 v_{sc} 分别代入式(6),即可得到冲刷前水平土压力系数 K_{int} 和冲刷后水平土压力系数 K_{sc} 。 K_{int} 和 K_{sc} 均为水平土压力系数的理论值,将 K_{int} 和 K_{sc} 代入式(7)可计算得到的冲刷前后水平土压力系数的比值 m_i 。

$$K = \frac{v}{1 - v} \tag{6}$$

式中: v 为土体泊松比。

$$m_i \frac{K_{int}}{K_{sc}} = \frac{v_{int}(1 - v_{sc})}{v_{sc}(1 - v_{sc})} \tag{7}$$

式中: K_{int} 为冲刷前水平土压力系数; K_{sc} 为冲刷后水平土压力系数; v_{int} 为冲刷前土体泊松比; v_{sc} 为冲刷后土体泊松比。

将式(7)变换为如下形式:

$$v_{sc} = \frac{v_{int}}{v_{int} + m_i(1 - v_{int})} \tag{8}$$

式中: m_i 为冲刷前后水平土压力系数比值的理论值,为便于求解,假定 $m_i \approx m_e$, m_e 为冲刷前后水平土压力系数比值的经验值。式(8)变换为:

$$v_{sc} = \frac{v_{int}}{v_{int} + m_e(1 - v_{int})} \tag{9}$$

将式(5)代入式(9)即可得到冲刷后土体泊松比与超固结比的关系:

$$v_{sc} = \frac{OCR^{\sin\varphi} v_{int}}{1 + (OCR^{\sin\varphi} - 1) v_{int}} \tag{10}$$

式(10)表明,在 ABAQUS 有限元分析中可以通过修正土体泊松比 v 来考虑冲刷前后水平土压力系数 K 的变化,从而反映超固结比 OCR 的影响。

2 数值分析与模型试验对比分析

2.1 模型试验概况

2.1.1 试验装置

模型槽几何尺寸为 3 000 mm(长)×2 100 mm(宽)×3 200 mm(高),壁厚 300 mm。模型槽地下部分深 1.8 m,地上部分高 1.4 m。加载和量测装置采用同济大学软土物理模型试验系统。

2.1.2 试验模型桩

试验所用模型桩为无缝空心铝管,上下封底,桩外径为 83 mm,壁厚 4 mm,桩长为 2.2 m,模型桩弹性模量为 70 GPa。结合试验设备和场地条件,试验选取 $S = 600$ mm(7.5 D),可近似忽略桩的相互作用影响^[12],模型桩布置如图 2 所示。

2.1.3 试验地基土

试验用土取自常州某工程的原型场地土,严格按照分层填铺,每层土填铺一定的质量,以质量控制填土的均匀性^[13]。室内土工试验测得主要土性参数如表 1 所示。

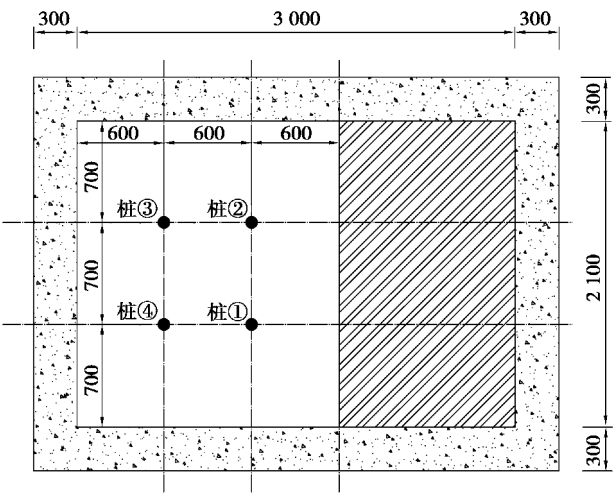


图 2 模型桩布置示意图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of piles installation(unit:mm)

表 1 土体物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical indexes of soil

容重 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率 ω	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	凝聚力 c/kPa	侧限压缩模 量 E/MPa
15.50	6.33%	33.7	0.5	11.59

2.2 试验方案设计

已有研究表明^[3],冲刷深度是影响桩基承载性状的重要因素之一,本次试验将重点考察冲刷深度对桩基竖向承载性状的影响。如图3所示,在模型槽中预埋模型桩,桩头初始出露高度为 $S_0=20\text{ cm}$,原始泥面以下桩长 $L_0=200\text{ cm}$ 。

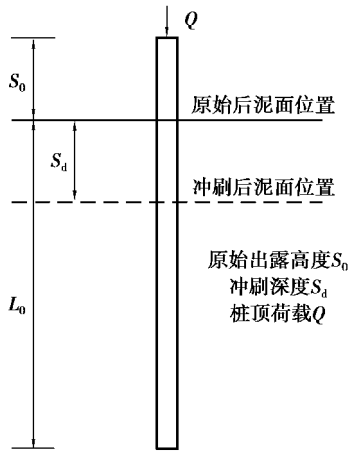


图3 桩基冲刷示意图

Fig.3 Schematic diagram of scouring around pile foundation

试验时采用挖掉上覆土层的方法模拟冲刷深度的变化,这也是目前模型试验中模拟冲刷作用的常用方法^[12]。各桩的设计冲刷深度 S_d 如表2所示。单桩静载荷试验依据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[14],采用快速维持荷载法测试单桩承载力。试验以 0.5 kN 为一级,逐级施加。

表2 各桩冲刷深度

Table 2 Scouring depth of piles				
桩号	1#	2#	3#	4#
冲刷深度 S_d	0	$0.1L_0$	$0.2L_0$	$0.4L_0$

2.3 静载试验结果

按照图2所示编号的顺序对各桩进行竖向静载试验。图5为各桩静载试验 $Q-s$ 曲线。结果表明,4根桩的 $Q-s$ 曲线大致均为缓变型曲线,桩基端阻力占主要作用,当沉降量超过 60 mm 时,认为达到破坏标准,停止加载,取前一级荷载为极限承载力。

图4可以看出1#和2#桩的极限承载力相同且曲线较为接近,这是因为对于端阻为主的桩,被冲刷掉的 $0.1L_0$ (也即 20 cm)浅层地基土提供的摩阻力较小,对桩基承载力造成的损失相对较小。随着冲刷深度的增加,冲刷导致的桩基侧摩阻力损失逐渐明显,对桩基承载能力的影响逐渐显著。

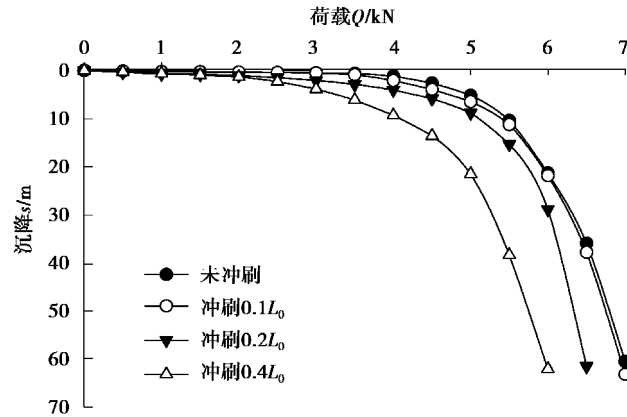


图4 单桩静载 $Q-s$ 曲线

Fig.4 $Q-s$ curves of piles

2.4 数值分析与模型试验对比分析

采用第2节提出的简化方法,在ABAQUS中输入修正后的土体泊松比和水平土压力系数,进行地应力平衡,得到新的土体初始地应力,以此来考虑冲刷后土体的应力历史。图5和图6分别为试验和有限元计算的各桩 $Q-s$ 曲线对比情况。

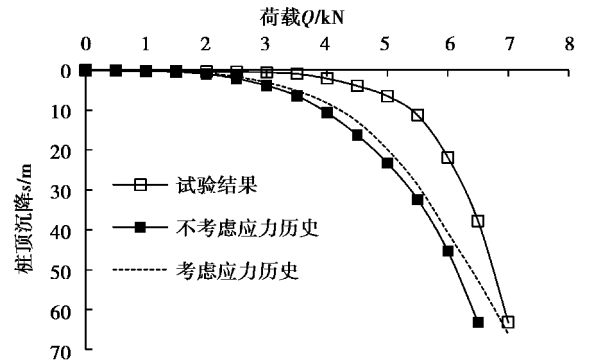


图5 冲刷 $0.1L_0$ 桩 $Q-s$ 曲线对比

Fig.5 $Q-s$ curves of piles under scouring depth of $0.1L_0$

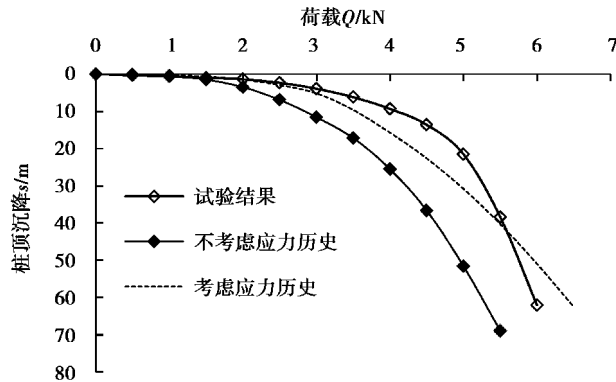


图6 冲刷 $0.4L_0$ 桩 $Q-s$ 曲线对比

Fig.6 $Q-s$ curves of piles under scouring depth of $0.4L_0$

从图5和图6中可看出,随着冲刷深度的增

加,采用考虑土体应力历史的简化方法计算结果与模型试验更为接近,但在冲刷深度较浅时,土体应力历史是对桩基承载性能的影响非常有限;然而,随着冲刷深度的增加,考虑应力历史的影响越明显,本文提出的简化方法是合理的。

3 冲刷对单桩承载影响参数分析

采用有限元分析的手段,重点考察冲刷深度对摩擦型桩基竖向承载力的影响。采用文献[15]的算例,桩长 20 m,桩径为 0.5 m,弹性模量为 28 GPa,泊松比为 0.167。土体为两层,具体计算参数如表 3。土体采用 Mohr-Coulomb 模型,计算侧界取 20 m,桩端以下土层深度取 20 m。桩土界面摩擦系数取 0.4。

定义冲刷比 $k=S_d/H_p$,其中 S_d 为冲刷深度, H_p 为桩基的原始埋深。定义桩基极限承载力折减系数 $\eta=(Q_{int}-Q_{sc})/Q_{int}$,其中 Q_{sc} 为冲刷后单桩极限承载力, Q_{int} 为未冲刷单桩的极限承载力。

表 3 土体计算参数

Table 3 Calculation parameters of soils						
类别	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	重度 $\gamma/$ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	剪胀角 $\psi/(^\circ)$
桩侧土	5	0.35	18	3	20	0.1
持力层	5	0.3	18	0.1	35	10

图 7 为未冲刷情况下单桩 Q - s 曲线,呈明显陡降型,陡降点发生在约 1 300 kN 处,极限荷载可认为是 1 300 kN,初步判断该桩为摩擦桩。图 8 为达极限荷载时桩基 N - L 曲线,桩端处轴力约为 155 kN,仅占桩顶荷载的 11.9%,说明桩侧摩阻力承担了大部分桩顶荷载,据此可判定该桩为典型摩擦桩。

设置冲刷深度变化范围从 0~10 m,以 2 m 为间隔,共 6 个冲刷深度,各冲刷深度对应的超固结比 OCR 如表 4。

表 4 各冲刷深度对应的超固结比

Table 4 Values of OCR under different scouring depths						
冲刷深度 S_d/m	0	2	4	6	8	10
OCR	1.00	1.22	1.50	1.86	2.33	3.00

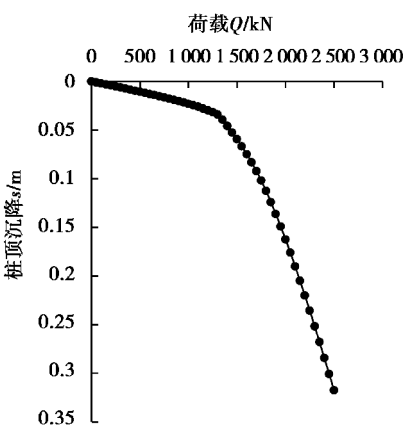


图 7 未冲刷单桩 Q - s 曲线

Fig.7 Q - s curve of single pile without scouring

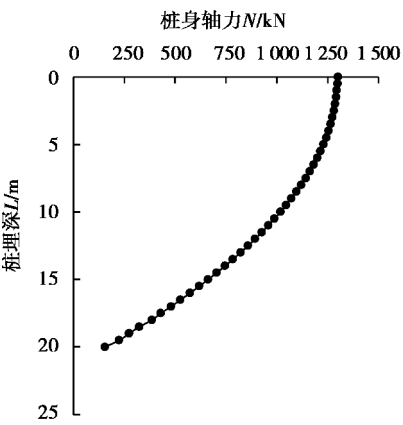


图 8 未冲刷单桩轴力分布

Fig.8 Axis force distribution of single pile without scouring

图 9 显示了不同冲刷比的单桩 Q - s 曲线。从图中可看出,随着冲刷比增加,曲线陡降点位置逐渐向左移动,说明桩基极限承载力逐渐降低。

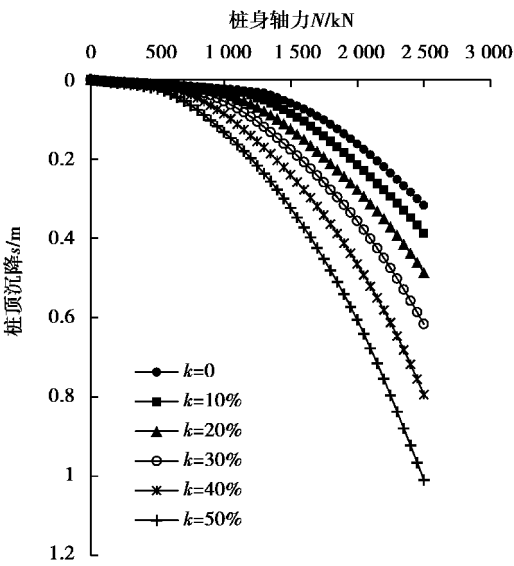


图 9 不同冲刷比的单桩 Q - s 曲线

Fig.9 Q - s curves of single pile with different scouring ratio

从图 10 中可以看出, η 随 k 的增大而单调递增, 两者近似呈线性关系, 线性拟合可得式 (11)。

$$\eta = 1.285\,7k + 0.007\,3 \quad (11)$$

通过式 (11) 计算可得, 当 $k=39.5\%$ 时, $\eta=50\%$, 当 $k=50\%$ 时, $\eta=61.5\%$, 说明随着冲刷深度的增大, 桩基承载力减小明显。因此, 在实际工程中, 冲刷深度对于摩擦桩承载性能的影响不容忽视。

图 10 给出了冲刷比 k 与极限承载力折减系数 η 的关系。

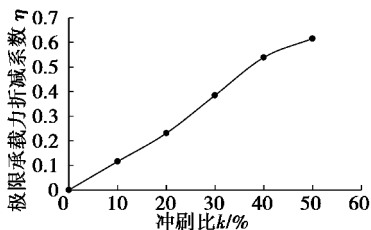


图 10 k 与 η 的关系曲线

Fig.10 Relation curves of k and η

4 结论

基于 Mohr-Coulomb 模型, 提出一种可考虑土体应力历史的简化分析方法。与模型试验对比验证表明, 考虑土体应力历史有效地提高了计算精度, 简便地反映了土体冲刷应力历史的影响。

基于该简化方法, 采用 ABAQUS 软件, 建立竖向受荷单桩轴对称模型进行数值分析, 考察冲刷深度对桩基承载性状的影响, 参数分析表明:

(1) 对于端阻承载为主的桩基, 冲刷深度对其竖向承载力的影响很小, 这与模型试验的结论一致, 冲刷造成的竖向承载力损失对于端承桩的影响较小。

(2) 对于侧摩阻为主的桩基, 冲刷显著降低了其竖向承载力, 应重视冲刷对摩擦型桩的竖向承载力影响。

参考文献 (References)

[1] Liang F Y, Bennett C R, Parsons R L, et al. A literature review on behavior of scoured piles under bridges [A] // The 2009 International Foundation Congress and Equipment Expo [C]. Orlando, USA, 2009:482-489.

[2] Lin C, Han J, Bennett C, et al. Case history analysis of bridge failures due to scour [A] // The Proceedings of the International Symposium of Climatic Effects on Pavement and Geotechnical Infrastructure [C]. Fairbanks, AK, USA, 2013:204-216.

[3] 闫澍旺, 高江林, 王成华. 水流冲刷对桩基承载性状影响的数值模拟 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (5): 1458-1464. (Yan Shuwang, Gao Jianglin, Wang Chenghua. Numerical simulation of effect of fluid scour on bearing behavior of pile foundation [J]. Rock and Soil

Mechanics, 2009, 30 (5): 1458-1464. (in Chinese))

[4] Liang F Y, Wang Y Q, Han J. Numerical analysis of scouring effects on the behavior of pile foundations with the Mohr-Coulomb model [A] // The GeoHunan International Conference [C]. Changsha, 2011:82-87.

[5] Lin C, Han J, Bennett C, et al. Behavior of laterally loaded piles under scour conditions considering the stress history of undrained soft clay [J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE, 2014, 140 (6): 06014005 (1-6).

[6] Lin C, Bennett C, Han J, et al. Scour effects on the response of laterally loaded piles considering stress history of sand [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37 (7/8): 1008-1014.

[7] Liang F Y, Zhang H, Huang M S. Extreme scour effects on the buckling of bridge piles considering the stress history of soft clay [J]. Natural Hazards, 2015, 77 (2): 1143-1159.

[8] Liang F Y, Zhang H, Huang M S. Scour effect on dynamic impedances of pile groups in layered soils [J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2015, 1 (3): 6-10.

[9] Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC). Foundations and earth structures, design manual 7.2 [M]. May, Department of Defense, Washington, D.C. 1982.

[10] Jaky J. The coefficient of earth pressure at rest [J]. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 1944, 78 (22): 355-358.

[11] Mayne P W, Kulhawy F H. K_0 -OCR relationships in soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1982, 108 (6): 851-872.

[12] 梁发云, 姚国圣, 陈海兵, 等. 土体侧移作用下既有轴向受荷桩性状的室内模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (10): 1063-1069. (Liang Fayun, Yao Guosheng, Chen Haibing, et al. Model tests on behavior of axially loaded piles subjected to lateral soil movement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (10): 1063-1069. (in Chinese))

[13] Kishore N Y, Rao S N, Mani J S. The behavior of laterally loaded pile subjected to scour in marine environment [J]. Journal of Civil Engineering, KSCE, 2009, 13 (4): 403-408.

[14] 中华人民共和国行业标准编写组. 建筑基桩检测技术规范 (JGJ 106-2014) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles (JGJ 106-2014) [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014. (in Chinese))

[15] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007. (Wang Jinchang, Chen Yekai. Application of ABAQUS in civil engineering [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007. (in Chinese))