

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.10.025

被动桩水平位移荷载施加位置的探讨

上官士青^{1,2}, 杨 敏^{1,2}, 李卫超^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 被动桩是指一种由于土体水平位移而发生挠曲变形的桩。目前不论是室内试验还是数值计算, 常在模型边界对土体施加水平位移荷载(位移边界条件)形成土体的位移场, 用来研究被动桩的变形特征, 但不同研究者采用的水平位移施加位置(边界位置)与被动桩的距离存在较大差异。结合一个工程案例, 采用有限单元法对水平位移加载位置进行了单变量参数分析。研究表明, 随着水平位移加载位置与被动桩距离的增加, 桩身变形显著减小。这表明了施加位移边界后地基中存在明显的应力扩散。当该距离小于 5.5 倍桩径时, 在模型边界施加同等大小的水平位移所需应力显著增加。同时讨论了水平荷载加载位置与被动桩距离的合理范围, 认为应在 5~8 倍桩径范围之内。

关 键 词: 被动桩; 路堤; 水平位移加载位置; 位移边界条件; 模型试验

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)10-2934-05

Distance between location of displacement applied boundary and passive pile

SHANGGUAN Shi-qing^{1,2}, YANG Min^{1,2}, LI Wei-chao^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Passive pile is a kind of pile deformed due to horizontal movement of soil. To study the deformation behavior of passive pile in both indoor experiment and numerical calculation, a horizontal displacement is normally applied on the model boundary (as a displacement boundary condition) to form a displacement field of soil. However, various distances between the position where horizontal displacement applied (usually the model boundary) and the location of passive pile are chosen by different researchers. According to an embankment field case, the loading position of horizontal displacement is analyzed using one univariate parameter in finite element method. The results show that the deformation of the pile decreases with increasing the distance between loading position and the location of passive pile, which indicates that stress dispersion occurs obviously in the soil after applying the displacement boundary condition. When the distance is less than 5.5 times of the pile diameter, there is much more stress required to achieve the same level of displacement at the model boundary. The distance from loading position to the pile location is also discussed, and it is found that the reasonable distance is in the range of 5-8 times of pile diameter.

Keywords: passive pile; embankment; loading position of horizontal displacement; displacement boundary conditions; model experiment

1 引 言

在很多工程实例中, 工程桩常在土层侧向位移的作用下工作, 如抗滑桩、堆载场附近的桩基、桥头桩基等。De Beer^[1]将这种不直接承受外荷载, 只是由于桩周围土体水平方向运动而引起内力变形的桩称为被动桩。本文讨论的加载位置与桩身的距离是指在室内试验或数值模拟时, 为形成土体主动位移场, 对土体进行水平位移加载的位置与被动桩的

距离, 本文记为 L_1 , 一般在室内模型试验边界处, 或在有限元中通过位移边界条件加载, 见图 1 所示。

国内外已对被动桩问题开展了许多室内试验, 如 Poulos^[2]、Chen^[3]、Pan^[4]等设计了土体在不同侧向位移下被动单桩、群桩的模拟试验。上述试验均使用位移加载, 且在模型箱的两侧同步施加相同大小的位移荷载, 研究桩在整体土水平方向移动下的变形性状。周健等^[5]也针对被动桩进行了室内模型试验, 采用的模拟装置仅在桩的一侧进行加载, 模

收稿日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41172248)。

第一作者简介: 上官士青, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事被动桩及水平受荷桩的研究。E-mail: shangguansq@126.com

拟箱中一侧土体受水平挤压的情况。梁发云^[6]、Guo 等^[7]采用了不同深度剪切推力不同的试验装置, 可以分层模拟不同形状的位移荷载。上述研究均使用了预先设定的边界位移来形成研究模型的位移场, 将位移荷载施加在土体, 但其加载位置与桩的距离不同。对于该距离, 模型试验一般采用 3.3^[5]、5~10^[2]、7.5^[4]、10~15.6^[7]、15^[6]倍的桩径。可见对于 L_1 的选取尚未有明确的共识。

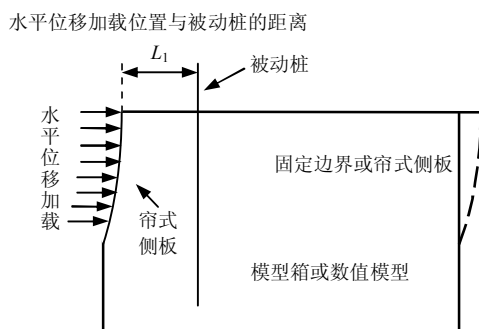


图 1 水平位移加载位置与被动桩的距离示意图
Fig.1 Distance between loading position and location of passive pile

在被动桩的计算分析方法中, 也有采用水平位移作为外荷载的案例, 如 Goh 等^[8]给出的被动桩简化分析方法中, 假设了一种三角形水平位移荷载。Karim 等^[9]采用有限单元法, 将二维固结程序计算得到的土体位移作为位移荷载, 对某路堤一侧的被动桩进行了分析。Karim 等^[9]在有限元中将位移荷载施加在距离被动桩 5.5 倍桩径的土体边界上, 进行计算。在被动桩的有限元计算中, 常采用这种两阶段算法, 第 1 阶段进行无桩自由场 (freefield) 分析 (路堤填筑或堆载等工况), 第 2 阶段按图 1 建模计算土体位移造成的桩身变形。水平位移加载点与桩的距离 (即 L_1) 应用在两阶段算法的第 2 阶段。

上述研究中文献[5, 9]模拟的是局部土体的水平位移, 其他学者则模拟的是土体大范围整体水平位移。

水平位移加载点与桩的距离 (即 L_1) 显然对桩身变形具有重要的影响。但对于该问题, 文献中讨论和分析的较少。本文通过有限单元法, 以 Karim 等^[9]的被动桩案例为基础, 分析了水平位移的加载位置对被动桩变形大小的影响, 并讨论加载位置的合理取值范围。

2 计算模型与验证

Leneghans 路堤位于悉尼南部, 地基土包括

16.5 m 左右厚高压缩性黏土层, 底部为基岩。黏土层中插入排水板进行预压固结。被动桩位于路堤第 1 级坡脚处。Karim 等^[9]计算分两个阶段进行, 第 1 阶段先由二维平面固结程序计算被动桩左侧 3 m 处的土体位移, 第 2 阶段将第 1 阶段计算得到的土体位移作为荷载用于三维程序进行计算。本文仅进行第 2 阶段的计算, 模型见图 2。使用文献[9]给出的二维固结程序计算的土体水平位移结果作为定量位移荷载, 如图 3 所示, 打桩后 90 d 该荷载作用于模型的最左侧边界 (桩基施工后 120 d 的水平位移荷载与堆载后 90 d 的水平位移荷载非常接近, 已略去)。本次计算的二维模型高为 23 m, 长为 35 m, 与文献[9]三维模型相同。

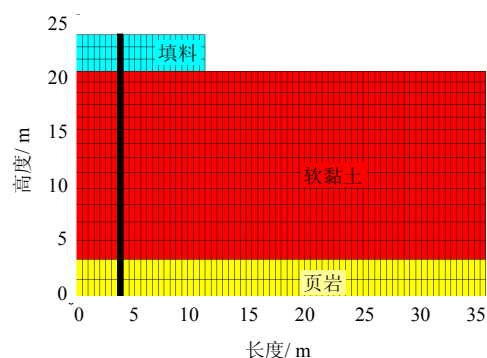


图 2 有限元计算模型网格图
Fig.2 Meshes of the FEM model

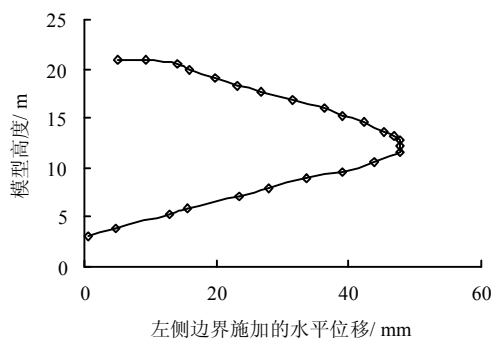


图 3 被动桩计算模型左侧边界位移荷载
Fig.3 Displacement applied on left boundary of passive pile model

文献[9]中给出的现场 4 层土体其物理性质相近, 因此, 将其简化为一层土, 土体采用修正剑桥模型, $\lambda = 0.33$, $\kappa = 0.066$, $M = 1.113$, 泊松比取 0.3。土的有效重度为 8.5 kN/m³。地基土由于前期进行过堆载预压固结, 因此, 对于不同土层设置不同的前期固结压力 P_{c0} , 详见表 1。桩采用两根长为 22.2 m, 桩间距为 3.5 m, 外径为 550 mm 的八边形预制混凝土桩 (按实心圆桩建模), 排列方向与路堤平行。

表 1 土层其他参数^[9]
Table 1 Other parameters of soil^[9]

土层厚度 /m	临界状态线单位 应力孔隙比 e_{cs}	层顶处 P_{c0} /kPa
3.1	2.70	153.0
5.0	3.08	122.5
2.2	3.08	77.6
6.0	2.70	84.9

对于被动桩的模拟, 本文使用 Feddema 等^[10]建议的刚度等效公式, 将实际三维问题简化为平面应变问题:

$$EI_{\text{model}} = \frac{EI_{\text{pile}}}{sD_{\text{pile}}} \quad (1)$$

式中: s 为二维模型换算参数, 一般取 1.5~3; D_{pile} 为桩径; EI_{model} 为二维计算模型中桩的等效刚度; EI_{pile} 为桩的实际刚度, 其中桩身实际弹性模量 $E = 25 \text{ GPa}$ 。该公式可用于排桩或单桩。

桩-土接触采用弹性摩擦接触, 刚度取小值 5 kPa/mm。边界条件为底部垂直方向自由度约束, 右侧水平方向自由度约束。

将图 3 位移作为荷载进行有限元计算, 计算结果见图 4、5。可见本文计算结果大于打桩后 90 d 现场实测数据, 略小于文献[9]使用 FALAC^{3D} 计算的结果。

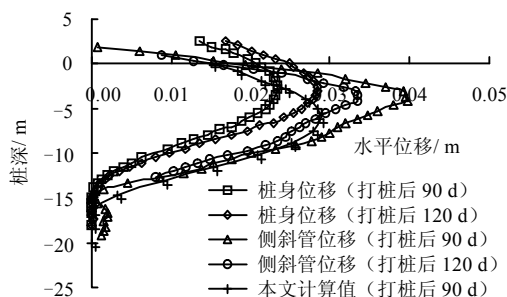


图 4 计算结果与现场实测数据的对比
Fig.4 Comparison between calculation result and measured data

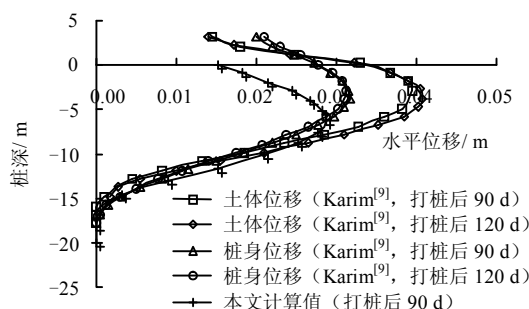


图 5 本文结果结果与 Karim 计算结果的对比
Fig.5 Comparison of results between this paper and Karim method

3 水平位移加载位置的参数分析

为研究水平位移加载位置对被动桩变形计算结果的影响, 分别将水平位移加载位置移动到距离被动桩 4、5、6 m (分别为 7.2、9.1、10.9 倍桩径) 处进行加载计算。荷载采用标定计算时荷载的 1~1.4 倍, 计算结果如图 6~8 所示。

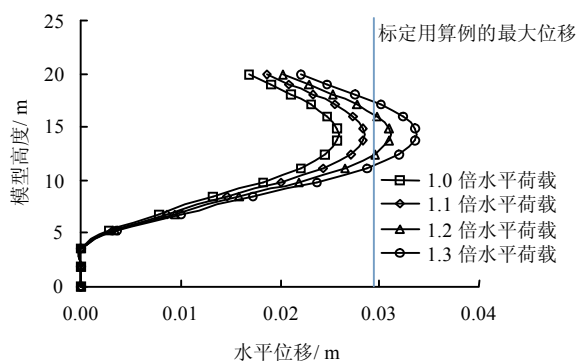


图 6 桩的水平位移 (加载位置距桩 4 m)
Fig.6 Horizontal displacements of passive pile (at a distance of 4 m to loading position)

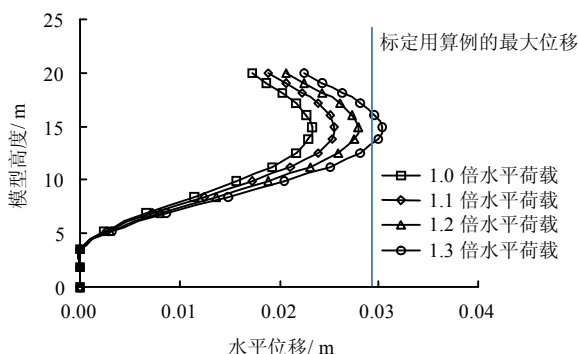


图 7 桩的水平位移 (加载位置距桩 5 m)
Fig.7 Horizontal displacements of passive pile (at a distance of 5 m to loading position)

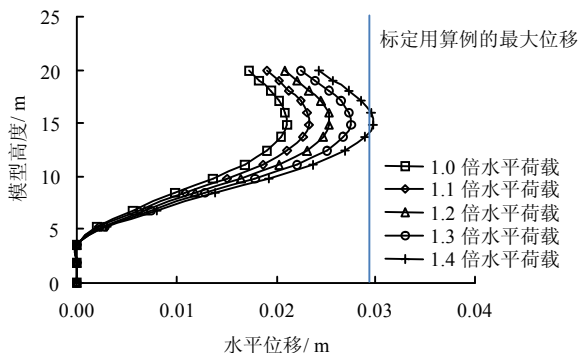


图 8 桩的水平位移 (加载位置距桩 6 m)
Fig.8 Horizontal displacements of passive pile (at a distance of 6 m to loading position)

由计算结果可见, 水平位移荷载加载位置距离被动桩越远, 对被动桩产生的影响越小, 因而被动

桩的变形越小。这主要是由于水平位移荷载-地基土-被动桩的荷载传递顺序下的应力扩散造成的,当水平位移荷载作用于地基土时,地基土首先受到一定程度的压缩后将荷载传递给桩身,如图 1 所示。当加载位置距被动桩较远时,地基土厚度增加,地基土中应力的扩散使得被动桩受到的应力减小了。对于该算例,软土层下为基岩,而大多数情况下软土层下若存在较硬的持力层,水平位移加载后的应力可有效扩散。当被动桩距离加载位置 4、5、6 m 时,需要原加载位置(距离桩身 3 m)处水平位移荷载的约 1.1~1.4 倍才能计算得到相同的桩身变形。可见加载位置对于被动桩的变形计算结果影响较大。桩身变形随 L_1 的增加而减小。

实际情况下,土体的水平方向移动多是由垂直方向的均布荷载引起的,不同位置土体的主动水平位移也不同。考虑在平面半空间进行垂直方向均布加载,根据对称性,一般情况下以堆填中心处水平位移最小,堆载边界处水平位移最大。为了考察天然地基在堆填下不同位置处土体的水平位移变化规律,以 Leneghans 路堤为基础计算了 20 m 宽、60 kPa 均布荷载下地基土的变形。计算时不考虑分级填筑,仅参考该案例的土体参数,进行平面半空间垂直方向均布加载。计算结果如图 9 所示,由图可见,由路堤填筑引起的土体水平位移是随着水平方向的位置而改变的。为便于讨论,将水平位移加载位置与

被动桩的距离定义为 L_1 , 将水平位移加载位置与堆填边界的距离定义为 L_2 , 被动桩与堆填边界的距离为 L_3 , 如图 9 所示。在相对位置 $2x/B=1\sim 1.5$ 的范围内(B 为均布荷载宽度),土体主动水平位移变化量约为 17%。

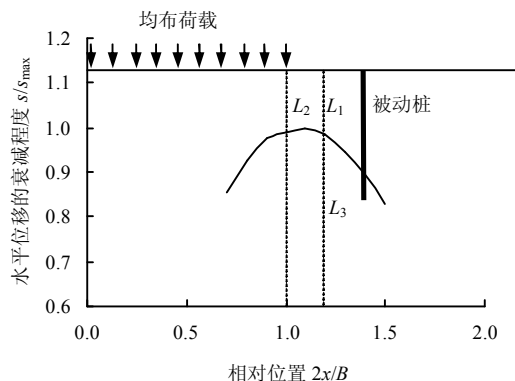


图 9 均布荷载引起的土体初始水平位移(无桩)
Fig.9 Initial horizontal displacement of soil caused by uniform load (without pile)

由图 9 可知,在被动桩水平位移加载位置的参数分析中应考虑不同水平位移加载位置的土体主动位移量大小的差异。按上述均布荷载下土体水平位移计算结果进行修正,设计以下 5 组水平位移加载位置与堆填边界的距离不同的情况进行计算,见表 2。

表 2 不同位置的土体初始位移
Table 2 Initial displacements of soil at different positions

L_1 /m	第 1 组		第 2 组		第 3 组		第 4 组		第 5 组	
	L_2 /m	水平位移荷载 相对大小	L_2 /m	水平位移荷载 相对大小	L_2 /m	水平位移荷载 相对大小	L_2 /m	水平位移荷载 相对大小	L_2 /m	水平位移荷载 相对大小
3	1	1.20	2	1.18	3	1.14	4	1.07	5	1.00
4	0	1.19	1	1.20	2	1.18	3	1.14	4	1.07
5			0	1.19	1	1.20	2	1.18	3	1.14
6					0	1.19	1	1.20	2	1.18

图 10 表明了以上 5 组不同情况下被动桩变形的发展趋势,可见,即便在水平位移加载时考虑土体主动位移场(无桩)在水平方向上的变化,桩身变形随加载位置与被动桩的距离 L_1 的增加仍是减小的。

4 讨 论

在被动桩模型试验或是数值计算时,如果不是模拟大面积的土体整体移动,水平荷载加载位置与被动桩的距离应存在一个合理范围。

(1) 水平位移加载位置(对于土体加载,一般位于图 1 模型的边界处)与被动桩的距离应足够靠

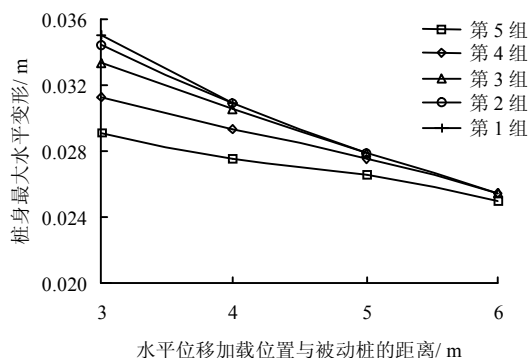


图 10 桩的最大水平位移与水平荷载加载位置的关系
Fig.10 Relationship between the maximum horizontal displacement and horizontal loading position

近。由第 3 节的计算可见, 桩身变形随加载位置与被动桩距离 L_1 的增加而迅速减小, 如加载位置距被动桩太远, 则水平位移加载后引起的应力增量在地基土中扩散过多, 传递给被动桩的荷载减小, 因此, L_1 不宜过小。可以认为, L_1 达到侧向受荷桩的影响范围即可, 如我国港口桩基规范^[11]给出的水平群桩内桩的相互影响范围为 $8D$ (D 为桩径)。如果不是模拟大面积的土体整体移动, 则施加边界荷载形成的土体位移场是向无限远处衰减的, 而这种衰减程度难以估计, 因此, 为了准确形成土体位移场, 土体水平荷载的加载位置与被动桩的距离应尽量靠近。

(2) 水平位移加载位置与被动桩的位置不宜过于靠近。Pan 等^[12]的模型试验表明, 被动桩桩身 $3D$ 范围内土体产生了塑形破坏。如果被动桩距离加载位置过于接近, 桩身模量远大于土体模量, 进行水平位移加载时需要施加的应力会显著增加, 见表 3。对于本例, 水平应力在 $L_1 = 3 \text{ m}$ (约 $5.5D$) 时陡然增加, 该处即为施加位移荷载时土体应力状况的拐点。

表 3 位移加载所需的水平应力

Table 3 Required horizontal stress for boundary loading

L_1 / m	最大节点力 / kN	最大节点 力增量/ kN	L_1 / m	最大节点力 / kN	最大节点 力增量/ kN
1	82.55		4	40.05	5.78
2	58.34	24.21	5	36.62	3.43
3	45.83	12.51	6	33.84	2.78

由上述讨论可知, 如模拟局部土体水平位移场, 则水平位移加载位置与被动桩的距离应大于 5 倍桩径, 不宜大于侧向受荷桩影响范围 8 倍桩径。但实际情况中被动桩可能紧邻堆载处的坡脚, 水平位移的加载位置与被动桩之间如存在额外的堆载, 可适当减小水平位移加载位置与被动桩的距离。

5 结论与建议

本文通过 Leneghans 路堤一侧的被动桩实例进行了水平位移加载位置对桩身变形影响的参数分析, 探讨了合理的水平位移荷载加载位置。研究表明:

(1) 随着水平位移加载位置 (位移边界条件的位置) 与被动桩的距离的增加, 桩身变形显著减小。

(2) 当该距离小于 5.5 倍桩径时, 施加同等大小的水平位移所需应力显著增加。

(3) 水平荷载加载位置与被动桩的距离存在一个合理的取值范围, 如果不是模拟大范围土体的移动, 由上述讨论, 对于桩底深入较强持力层的被动

桩, 水平位移的施加位置 (位移边界条件的位置) 与被动桩的距离建议取 5~8 倍桩径。

参考文献

- [1] DE BEER E E. Effects of horizontal loads on piles due to surcharge or seismic effects[C]//Proceedings of 9th ICSMFE. Tokyo: [s. n.], 1977: 547—558.
- [2] POULOS H G, CHEN L T, HULL T S. Model tests on single piles subjected to lateral soil movement[J]. *Soils and Foundations*, 1995, 35(4): 85—92.
- [3] CHEN L T, POULOS H G, HULL T S. Model tests on pile groups subjected to soil movement[J]. *Soils and Foundations*, 1997, 37(1): 1—12.
- [4] PAN J L, GOH A T C, WONG K S, et al. Ultimate soil pressures for piles subjected to lateral soil movements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(6): 530—535.
- [5] 周健, 亓宾, 曾庆有. 被动侧向受荷桩模型试验及颗粒流数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(10): 1449—1454.
ZHOU Jian, QI Bin, ZENG Qing-you. Model tests and PFC^{2D} numerical analysis on laterally loaded passive piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(10): 1449—1454.
- [6] 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 Fa-yun, YAO Guo-sheng, CHEN Hai-bing, 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.
- [7] GUO W D, QIN H Y. Thrust and bending moment of rigid piles subjected to moving soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(2): 180—196.
- [8] GOH A T C, TEH C I, WONG K S. Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(9): 792—801.
- [9] KARIM M R, LO S C R, GNANENDRAN C T. Behaviour of piles subjected to passive loading due to embankment construction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 51(3): 303—310.
- [10] FEDDEMA A, BREDEVELD J, VAN A F. Lateral loading of pile foundations due to embankment construction[C]//Proceedings of 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. London: Taylor & Francis, 2010: 631—636.
- [11] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. JTS 167-4-2012 港口工程桩基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [12] PAN J L, GOH A T C, WONG K S, et al. Model tests on single piles in soft clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(4): 890—897.