

基桩自平衡静载试验中平衡点问题研究

严子林¹, 刘松²

(1. 四川星宇天成建筑工程质量检测有限公司, 四川 成都 610299; 2. 四川正路建设工程检测咨询有限公司, 四川 成都 610299)

摘要: 基桩自平衡静载试验是一种被广泛采用的单桩竖向承载力测试方法, 平衡点位置的确定是保证试验成功的重要条件。相关规范采用竖向力平衡条件确定平衡点, 在多个现场试验中发现以此条件确定的平衡点位置上下位移差异较大, 极易造成荷载箱达到最大行程时某段桩承载力尚未充分发挥的状况。本文针对试验中位移差异问题, 提出用桩土界面刚度平衡确定位移协调平衡点位置, 以达到试验过程中位移协调的目的。为此, 采用实测数据结合有限元数值计算, 对平衡点位置上下位移差异较大的原因进行分析, 提出刚度平衡条件, 建立位移协调平衡点的经验计算公式, 并采用数值计算及实测数据对经验公式进行验证, 结果表明经验公式具有较好的效果, 对确保试验成功具有重要意义。

关键词: 自平衡荷载试验; 竖向承载力; 平衡点; 数值分析; 单桩位移

中图分类号: TU473.1+6

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0475-06

Research on the equilibrium point in self-balanced static load test of pile foundations

YAN Zilin¹, LIU Song²

(1. Sichuan Xingyu Tiancheng Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Chengdu 610299, Sichuan, China;

2. Sichuan Zhenglu Construction Engineering Testing Consulting Co., Ltd., Chengdu 610299, Sichuan, China)

Abstract: Self-balanced static load test of pile foundations is a widely adopted method to determine the vertical bearing capacity of single pile. The depth of the equilibrium point is crucial to ensure the success of the test. The relevant specifications adopt vertical force balance condition to determine the equilibrium point. But it has been found in a number of field tests that the equilibrium points determined by this condition cause large displacement difference between the upper and lower positions, potentially leading to insufficient utilization of pile bearing capacity when the load box reaches its maximum travel. An empirical formula was proposed to determine the position of equilibrium point based on the stiffness equilibrium condition of the pile-soil interface, in order to achieve displacement compatibility in the test process. Therefore, measured data, combined with finite element numerical calculations, were used to analyse the reasons for the large displacement differences, and verify the superiority of the empirical formula. The results show that the empirical formula is reasonable and is important to ensure that the tests are conducted successfully.

Key words: self-balanced static load test; vertical bearing capacity; equilibrium point; numerical analysis; single pile displacement

0 引言

基桩自平衡静载试验具有较为突出的优点, 其测试结果较为准确, 能充分激发桩端阻力、桩底反力^[1], 且不受检测工作面的限制, 在场地工作条件较差的情况下亦可顺利实施, 有效地解决了基桩大吨位承载力检测的工作难题^[2]。自平衡法是将荷载

箱埋入桩内某荷载平衡点处, 将荷载箱的高压油管和位移棒引到地面, 由高压油泵向荷载箱充油, 将力传递到桩身, 通过自平衡来维持加载, 根据荷载-位移曲线判断基桩承载力^[3]。在基桩自平衡静载试验中, 对平衡点位置的确定尤为重要, 所测得的单桩承载力将会随着平衡点位置的不同而不同^[4], 因此, 准确确定平衡点位置是保证试验成功的重要条

件。如今,相关检测规范均对试验中平衡点位置有明确的定义,即上段桩侧阻力与上段桩自重之和等于下段桩侧阻力与端阻力之和的位置^[5]。现有对平衡点的确定方法包括规范公式法、数值模拟法等,其中规范公式法符合相关检测规范对平衡点的定义。而作者在多次试验中发现以规范公式确定的平衡点位置在加载中上下位移不协调,且差异过大。一般上段桩位移较下段桩位移小得多,通常在下段桩发挥到极限承载力时,上段桩承载力尚未充分发挥,甚至发挥程度很低。一般规范依据位移确定承载力极限值,根据规范对于承载力的取值原则,在上下位移差异较大的情况下无法达到预期效果。位移的差异化不仅导致承载力取值的准确性较差,甚至可能在试验加载尚未结束时,荷载箱行程已经达到极限而无法继续加载,导致整个试验的失败。因此对试验平衡点位置的确定,若仅考虑土阻力的平

衡,则与承载力取值原则不符,作者认为应该从上下位移协调的角度来确定平衡点位置,才能使试验达到预期效果。基于此问题,作者对试验时位移不协调的原因进行分析,并通过对比实测数据与数值分析结果,基于桩土界面刚度理论,提出位移协调的平衡点位置经验计算公式,再选择不同土层与基桩参数,模拟实际加载条件进行数值计算,将其位移计算结果与现场实测结果对比,验证经验计算公式的优越性。

1 实测结果与数值分析对比

1.1 基桩及土层参数

本次选取某地铁车站工程基桩进行现场实测及有限元模拟,桩径为1.2 m,桩长为15 m,桩身混凝土强度为C30,桩端持力层为密实卵石层,桩顶以下土层参数如表1所示。

表1 桩顶以下土层参数
Table 1 Parameters of strata under pile top

土层	厚度/m	重度/(kN/m ³)	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	泊松比	侧阻力/kPa	端阻力/kPa
中密卵石层	2.0	19	43	32	0.30	140	—
密实卵石层	>20	21	48	43	0.25	150	3 000

1.2 现场试验情况及结果

试验前根据土层参数,即根据土阻力及桩身自重确定平衡点位置大致为桩端以上2 m处,预埋荷载箱最大量程为6 000 kN。在平衡点位置拟通过荷载箱对桩施加5 000 kN荷载,荷载分10级加载^[5]。通过现场自平衡静载试验,在最大加载量下,上桩的最大竖向位移为3.24 mm,下桩的最大竖向位移为8.86 mm,下桩最大竖向位移约为上桩最大竖向位移的2.7倍,其位移明显不协调。

1.3 数值计算情况及结果

为分析其原因及验证试验数据,作者通过Midas GTX NX有限元软件对基桩及土层建立实体三维模型进行数值计算,桩土模型如图1所示。土层采用摩尔-库伦本构模型,基桩采用线弹性材料本构模型^[6]。模型尺寸为20 m(直径)×30 m(高),上表面设置为自由边界,下表面限制水平及竖向位移,侧面限制水平位移^[7],网格划分采用自适应十节点四面体单元,单元数量共计163 945个。通过有限元数值计算,上桩最大竖向位移为3.94 mm,下桩最大竖向位移为10.29 mm,下桩最大竖向位移约为上桩最大竖向位移的2.6倍,上、下段桩位移同实测结果一样出现明显不协调。

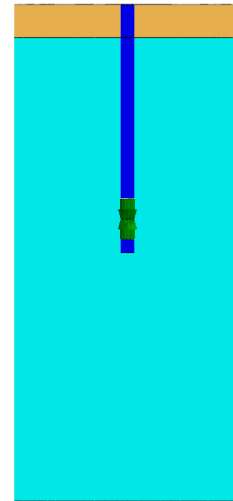
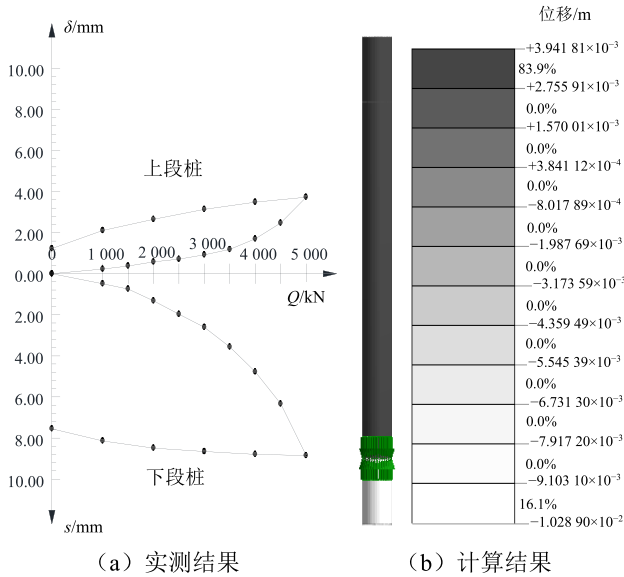


图1 桩土模型图

Fig. 1 Diagram of pile and soil

1.4 实测及计算结果对比分析

实测结果与数值计算结果对比图如图2所示,通过实测与计算结果的对比分析表明,计算结果与实测结果具有较好的一致性,本次采用的数值计算准确性满足研究需要。受计算精度及现场试验条件影响,实测结果与计算结果的上桩及下桩最大位移值有所差异,但通过上、下段桩最大位移对比可知,在此平衡点位置加载时的实测值与计算值均出现上桩位移远小于下桩位移的情况。



(a) 实测结果 (b) 计算结果
图 2 实测结果与数值计算结果对比图

Fig. 2 Comparison between measured and calculated results

作者在多个项目的试验过程中发现, 规范公式计算的平衡点位置处出现上下位移明显不协调是普遍存在的现象。经过分析, 在平衡点计算时, 采用静力平衡确定平衡点位置, 未考虑界面土体应力-应变相应关系, 且未考虑桩侧、桩端阻力发挥的不同步性^[8], 导致平衡点位置确定时仅满足力的平衡, 不满足位移的协调。静载试验方法需通过位移量确定承载力取值, 若仅满足力的平衡而不满足位移协调则与试验取值原则相悖。因此, 作者认为应采用位移协调的平衡点位置才能与该试验方法相契合。

2 经验公式建立

2.1 建立原则

在确定位移协调平衡点位置时, 作者通过考虑桩土界面的刚度建立经验计算公式。

桩土相对位移受荷载大小及桩土界面特性控制, 其中桩土界面刚度是影响桩土相对位移的重要因素。首先应通过已有的理论公式确定各土层桩土界面的法向刚度模量及剪切刚度模量两个重要参数^[9], 刚度模量可通过 $P-y$ 曲线分析得到^[10], 在无相关试验资料时可通过以下理论公式计算。

法向刚度模量:

$$K_n = E_{\text{oad},i} / t_{vi} \quad (1)$$

剪切刚度模量:

$$K_t = G_i / t_{vi} \quad (2)$$

$$E_{\text{oad},i} = \frac{2G_i(1-\nu_i)}{1-2\nu_i} \quad (3)$$

$$G_i = RG_{\text{soil}} \quad (4)$$

$$G_{\text{soil}} = \frac{E}{2(1+\nu_{\text{soil},i})} \quad (5)$$

式中: ν_i 为界面泊松比, 按 0.45 取值; t_{vi} 为界面虚拟厚度系数, 按 0.01~0.10 取值 (岩土与结构强度差异越大, 取值越小); R 为强度折减系数, 砂土与钢接触取 0.6~0.7, 黏土与钢接触取 0.5, 砂土与混凝土接触取 0.8~1.0, 黏土与混凝土接触取 0.7~1.0; $E_{\text{oad},i}$ 为界面压缩模量; G_i 为界面剪切模量; G_{soil} 为土层剪切模量; E 为土层弹性模量, 近似取为土层压缩模量; $\nu_{\text{soil},i}$ 为土层泊松比。

通过式 (1)~(5) 的理论公式与岩土勘察报告中的土层参数, 可计算界面刚度模量, 单位为 kN/m^3 。上、下段桩加载量相等, 但界面的面积与刚度不同, 因此假设应力按刚度平衡分配, 在界面上仅需考虑界面刚度分配问题, 在上、下段桩界面上对刚度进行积分, 假定以此为上、下段桩的总刚度, 通过试算上、下段桩总刚度相等的位置, 确定试验中平衡点的位置, 以达到上、下段桩位移协调的目的。

2.2 经验公式建立

依靠上述理论公式 (1)~(5) 及相关理论, 作者通过大量数值计算确定相关参数的取值, 并综合理论公式与数值计算结果, 提出如下位移协调的经验公式:

$$\sum \frac{0.5ul_{\text{上}i}R_iE_{si}\lambda_i}{(1+\nu_{\text{soil},i})t_{vi}} = \sum \frac{0.5ul_{\text{下}i}R_iE_{si}}{(1+\nu_{\text{soil},i})t_{vi}} + \frac{5.5A_pR_iE_{si}}{(1+\nu_{\text{soil},i})t_{vi}} \quad (6)$$

式中: u 为桩身周长; A_p 为桩端截面积; $l_{\text{上}i}$ 为上段桩桩周 i 土层厚度; $l_{\text{下}i}$ 为下段桩桩周 i 土层厚度; E_{si} 为各土层压缩模量; $\nu_{\text{soil},i}$ 为土层泊松比, 根据勘察报告或经验取值, 对于碎石土可取 0.27, 砂土可取 0.30, 粉土可取 0.35, 粉质黏土可取 0.38, 黏土可取 0.42; t_{vi} 为界面虚拟厚度系数, 对于碎石土可取 0.06, 砂土可取 0.04, 粉土及黏土可取 0.02; R_i 为强度折减系数, 碎石土及砂土取 0.9, 粉土及黏土取 0.8; λ_i 为抗拔刚度折减系数, 取 0.8。

通过式 (6) 试算可大致确定上、下段桩位移协调的位置, 由于上段桩破坏时为骤然破坏, 因此为保证上段桩的相对稳定, 式 (6) 中忽略上段桩桩身自重的影响, 将上段桩桩身自重作为上段桩的安全储备。若桩顶有压重 W , 可将加载量 Q 与加载量减桩顶压重 ($Q-W$) 的比值作为系数, 对上段桩参数进行增强, 从而试算平衡点位置, 公式变为:

$$\frac{Q}{Q-W} \sum \frac{0.5ul_{\text{上}i}R_iE_{si}\lambda_i}{(1+\nu_{\text{soil},i})t_{vi}} = \sum \frac{0.5ul_{\text{下}i}R_iE_{si}}{(1+\nu_{\text{soil},i})t_{vi}} + \frac{5.5A_pR_iE_{si}}{(1+\nu_{\text{soil},i})t_{vi}} \quad (7)$$

若平衡点位于桩端，式(7)的等式左侧仍然小于等式右侧，则可通过将平衡点位置定于桩端，通过式(7)试算桩顶压重 W 。

2.3 经验公式验证

依据上述原则建立的经验公式可有效改善试验中上下位移不协调的情况。作者采用数值分析方法对经验公式进行验证。本次采用的3种工况均为以往实际试验工况，通过对规范公式计算的平衡点位置进行加载，测得相应的位移数据。分析时则通过经验公式计算平衡点位置，并建立模型，在这个平衡点位置加载进行数值计算，模型边界条件及网格划分方法同1.3节。通过规范公式计算平衡点位置加载的实测位移数据与本文经验公式计算平衡点位置加载的计算位移数据的对比分析，验证本文经验公式的优越性。

(1) 工况一

工况一设置同上述1.1节，基桩桩径为1.2 m，桩长为15 m，长径比为12.5。桩身混凝土强度为C30，桩端持力层为密实卵石层，最大加载量为5 000 kN。工况一桩顶以下土层参数见表1。

(2) 工况二

基桩桩径为0.8 m，桩长为20 m，长径比为25。桩身混凝土强度为C30，桩端持力层为密实卵石层，最大加载量为4 000 kN。工况二桩顶以下土层参数见表2所示。

表2 工况二桩顶以下土层参数

Table 2 Parameters of strata under pile top in Case 2

土层	厚度/m	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	泊松比	侧阻力/kPa	端阻力/kPa
稍密粉土层	3	19.4	15	18	5.5	0.30	35	—
稍密细砂层	4	18.5	—	21	9.0	0.29	20	—
中密中粗砂层	3	19.0	—	25	12.0	0.27	62	—
中密卵石层	8	22.0	—	38	38.0	0.18	130	—
密实卵石层	21	23.0	—	45	47.0	0.15	150	3 200

表3 工况三桩顶以下土层参数

Table 3 Parameters of strata under pile top in Case 3

土层	厚度/m	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	泊松比	侧阻力/kPa	端阻力/kPa
砾砂层	3	19	—	30	26	0.30	65	—
中密卵石层	5	20	—	41	45	0.27	120	—
密实卵石层	25	22	—	48	47	0.25	140	4 000

表4 平衡点位置对比

Table 4 Comparison of equilibrium point positions

工况	土阻力确定的平衡点位置	本文确定的平衡点位置	2种方法确定的平衡点位置距离
一	桩端以上2.0 m	桩端以上4.5 m	2.5 m
二	桩端以上3.1 m	桩端以上4.2 m	1.1 m
三	桩端，且需压重1 960 kN	桩端以上2.0 m	2.0 m，且减少压重1 960 kN

(3) 工况三

基桩桩径为1.4 m，桩长为10 m，长径比为7。桩身混凝土强度为C30，桩端持力层为密实卵石层，最大加载量为5 000 kN。工况三桩顶以下土层参数见表3所示。

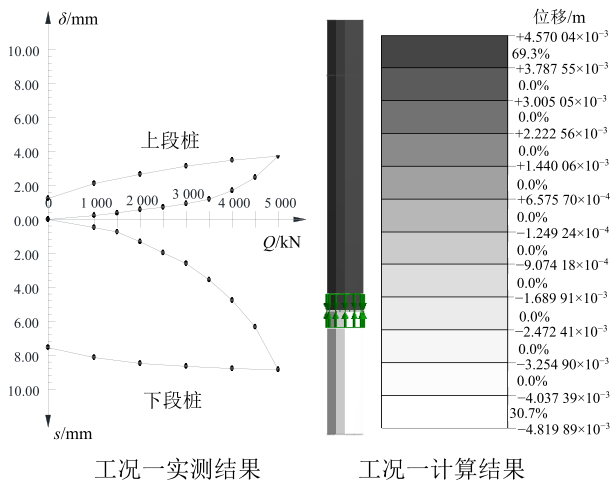
(4) 平衡点位置对比

各工况通过传统土阻力平衡方式及本文经验公式分别确定平衡点位置，对2种方法确定的平衡点位置进行对比。通过2种方法计算的各工况下平衡点位置对比如表4所示。

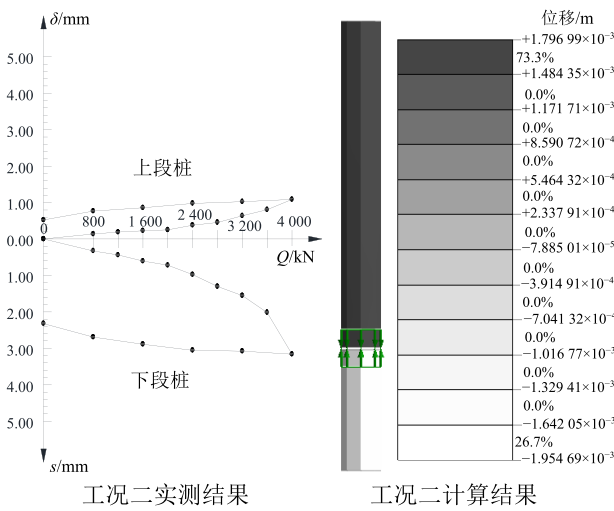
(5) 实测结果与数值计算结果对比分析

实测结果与数值计算结果对比图如图3所示。规范公式确定的平衡点位置加载实测位移数据与本文经验公式确定的平衡点位置加载数值计算数据如表5所示。

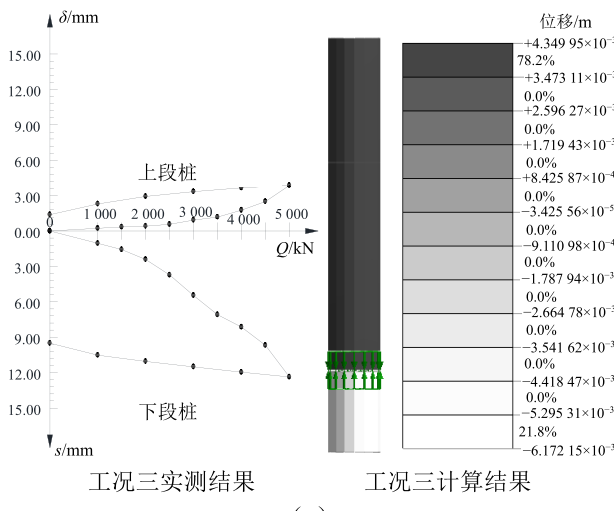
通过上述数值计算结果发现，采用本文经验公式计算的平衡点位置均在土阻力平衡点位置之上。由数值计算的上桩位移均小于下桩位移，作者认为是由于在经验计算公式中未考虑上桩自重，导致位移协调的计算平衡点位置比实际下移。工况一及工况二计算所得上下位移基本一致，工况三由于桩径较大，且桩长较短，上桩自重作用影响程度较大，其上下位移差异较大，同时相较于土阻力平衡点位置相差很大。由于上桩破坏为骤然破坏，为避免上桩的骤然破坏造成试验失败，将上桩自重当作上桩的安全储备，符合论文既定的思想。



(a)



(b)



(c)

图 3 实测结果与数值计算结果对比图

Fig. 3 Comparison diagram between measured and calculated results

通过规范规定的竖向力平衡点位置加载实测结果与本文位移协调平衡点位置加载的数值计算结果对比发现, 以位移协调平衡点作为加载面, 其上下位移差异要远小于以竖向力平衡点位置作为加载面的位移差异, 上下位移基本能保持协调。因

此本文提出的经验公式相较于传统规范公式, 具有明显的优越性。

表 5 实测结果与数值计算结果对比表

Table 5 Comparison table between measured and calculated results

工况	上位移		下位移		$S_{上}-S_{下}$	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算
一	3.24	4.57	8.86	4.82	-5.62	-0.25
二	1.09	1.80	3.16	1.95	-2.07	-0.15
三	3.88	4.35	12.37	6.17	-8.49	-1.82

3 结 论

本文对实际基桩自平衡静载试验中出现的问题进行分析, 通过实测数据与数值计算结果进行对比, 提出适应试验方法的位移协调平衡点概念, 并以桩土界面刚度理论为基础, 建立位移协调平衡点位置的计算经验公式。

(1) 平衡点不可仅考虑土阻力的静力平衡, 以上、下段桩位移协调的平衡点作为试验时的平衡点位置更符合试验方法对承载力的取值原则。

(2) 位移协调的平衡点计算可通过有限元分析软件进行数值计算, 本文提出更为简便的经验计算公式, 通过经验公式确定的平衡点位置与数值分析得到的位移协调平衡点位置基本一致。

(3) 本文通过有限元数值分析与实测数据对比, 确认有限元方法对于位移计算分析的精度基本满足工程需要, 并确认有限元法对于本次分析的有效性。因此采用有限元分析对经验公式进行验证, 并与规范公式的实测结果进行对比, 验证了本文所提出的经验公式的合理性。但对于长径比较小的桩, 经验公式计算所得的平衡点位置上下位移有一定差异, 为保证上段桩不出现骤然破坏, 此差异可作为上段桩的安全储备, 实际应用中可忽略此差异或进行专门研究。

(4) 规范法使得上段桩承载力无法充分发挥, 测得的承载力可能比实际偏小, 采用本文方法可避免由于下段桩位移过大导致单桩静载试验失败, 且测得的承载力更为准确, 与基桩实际承载力偏差更小。在后续研究中, 可通过现场实测进一步验证本文所提经验公式的优越性。

参考文献

[1] 马晔, 王陶. 超长钻孔桩自平衡荷载试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 275-278.

- MA Ye, WANG Tao. Experimental study on bearing behavior of super-long drilled pile with the self-balanced load test method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 275-278.
- [2] 李光旭. 自平衡法在基桩检测中的应用浅析[J]. 交通科技, 2015(1): 4-6.
LI Guangxu. Application of self-balancing method in foundation pile detection[J]. Transportation Science & Technology, 2015(1): 4-6.
- [3] 李忠春, 金志坚, 曾章海. 基桩自平衡试桩法在建设工程中的应用[J]. 浙江建筑, 2008, 25(4): 20-22.
LI Zhongchun, JIN Zhijian, ZENG Zhanghai. Application of self balance test method of foundation pile in construction engineering[J]. Zhejiang Construction, 2008, 25(4): 20-22.
- [4] 史佩栋. 关于 Osterberg 静载荷试桩法的进一步探讨[J]. 工业建筑, 1998, 28(2): 56-58.
SHI Peidong. Further discussion on Osterberg static load pile test method[J]. Industrial Construction, 1998, 28(2): 56-58.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩自平衡静载试验技术规程: JGJ/T 403—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Static Loading Test of Self-Balanced Method of Building Foundation Piles: JGJ/T 403—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [6] 刘耀东, 聂闯, 梅靖宇, 等. 超长桩竖向承载力模型试验及有限元研究[J]. 中外公路, 2019, 39(4): 1-5.
LIU Yaodong, NIE Chuang, MEI Jingyu, et al. Study on vertical bearing capacity of super long pile using model test and finite element[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(4): 1-5.
- [7] 周焱. 自平衡法在桥梁基桩检测中的应用及有限元模拟[J]. 湖南交通科技, 2013, 39(3): 83-86, 158.
ZHOU Yi. Application and finite element simulation of self-balancing method in bridge foundation pile detection[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2013, 39(3): 83-86, 158.
- [8] 张培印. 中欧(新加坡)规范桩基竖向抗压承载力计算方法对比[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 211-214.
ZHANG Peiyin. Calculation methods comparison of pile vertical compressive bearing capacity in China and Singapore design codes[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 211-214.
- [9] 黄凌君, 刘纪峰, 陈续鸿. 复杂地质环境下超长深水钻孔灌注单桩承载性能[J]. 水运工程, 2018(7): 172-176, 181.
HUANG Lingjun, LIU Jifeng, CHEN Xuhong. Single pile bearing performance of super-long deep water drilling in complicated geological environment[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(7): 172-176, 181.
- [10] 詹啸. 桩土相互作用模型分析及土弹簧的刚度确定[J]. 科协论坛(下半月), 2013(4): 9-10.
ZHAN Xiao. Model analysis of pile-soil interaction and determination of soil spring stiffness[J]. Science & Technology Association Forum, 2013(4): 9-10.