



静载试验法与高应变法在桩基检测中的综合比较研究

林杰昶

(广东国基检测科技有限公司,广东 广州 510000)

摘要:为确保桩基工程的安全、可靠和经济高效,提升桩基检测的准确性至关重要。文章以某大型电厂桩基工程质量检测为研究对象,分别采用静载试验法和高应变动力检测法对后注浆灌注桩试桩区3根试桩进行检测,并将检测结果与理论计算结果进行综合对比分析。结果表明:相较于高应变法,静载试验所提供的检测结果更为直观且精确,能够更真实地反映桩基的实际承载性能,但静载试验的实施过程耗时较长,且伴随的经济成本也相对较高;静载试验及高应变法所获得的实测承载力特征值均大于设计时所设定的承载力特征值标准,满足设计要求;两种检测方法所得的承载力检测结果均与理论公式计算得出的结果相符,高应变法所获得的承载力特征值比静载试验得出的结果小;高应变法在桩基承载力检测领域,以其高效、经济的特点,能够作为静载试验有效补充。本研究成果可为同类工程中的桩基检测提供参考和借鉴。

关键词:桩基检测; 静载试验; 高应变法; 承载力; 沉降量

中图分类号:TU 473.1*6

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)04-0081-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.04.053

Comprehensive comparative study of high strain method and static load test method in pile foundation testing

LIN Jiechang

(Guangdong Guoji Testing Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: To evaluate the reliability and applicability of pile foundation load testing methods, It is of great significant to enhance the accuracy of pile foundation testing. Taking the quality inspection of pile foundations for a large power plant as the research subject, three test piles in the post-grouting bored pile test area are respectively tested using the static load test method and high strain dynamic testing method. The testing results are comprehensively compared and analyzed against theoretical calculations. The results show that compared to the high strain method, the static load test provides more direct and accurate detection results, offering a truer reflection of the actual bearing capacity of the pile foundation. However, the implementation of the static load test is time-consuming and comes with relatively higher economic costs. Both the static load test and high strain method yielded measured characteristic values of bearing capacity that exceeded the standard characteristic values set during design, meeting design requirements. The bearing capacity test results obtained from both methods corresponded with the results calculated by theoretical formulas; however, the characteristic value of bearing capacity obtained by the high strain method is smaller than that derived from the static load test. With its efficient and economical characteristics, the high strain method can serve as an effective supplement to the static load test in the field of pile foundation bearing capacity testing. The outcomes of this study can provide reference and guidance for pile foundation testing in similar engineering projects.

Key words: pile foundation testing; static load test; high strain method; bearing capacity; settlement

收稿日期: 2024-07-15

作者简介: 林杰昶(1993—),男,工程师,从事地基基础检测方面的研究。

在那些地层条件无法达到建筑物承载力需求或沉降控制标准的情况下,采用桩基解决方案显示出显著的效能。鉴于桩基位于地下的特性,其施工质量和控制过程不易直接观测,因此其质量好坏会受到包括地质条件、施工技术、材料选用等多种因素的综合制约。一旦桩基存在质量问题,将直接牵连并威胁到上部结构的安全性与运营的稳定性^[1]。近年来,高应变法作为一种先进的桩基检测技术,在桩基工程质量检测领域获得了日益广泛的推广与应用^[2]。因此,为了保障桩基工程的安全和质量,针对当前应用较为广泛的高应变法与传统静载试验法展开在桩基检测中的综合比较研究是十分必要的。

国内外的专家学者对高应变法和静载试验法在桩基检测中的应用进行了详尽的研究。杨泽东^[3]针对在采用高应变法进行检测时,大直径空心管桩桩头顶端易受损伤这一常见问题,设计了一种创新的桩头处理方案,该方案在工程实践中得到了验证。毛远伟等^[4]在处理大吨位高应变试桩的检测中,引入并应用桩顶装置测力法,通过进行整体锤现场测试,其准确性和可靠性得到了充分验证。SAKR^[5]对高应变动力检测的适用性进行了研究,动力桩试验用于评估打入桩和螺旋桩的静态承载能力,结果表明高应变动力检测可以作为一种评估螺旋桩承载力的合适工具。蒋维^[6]从设备的选型与安装、承载力与变形的理论验算,以及试验过程中的安全考量等多个维度,系统阐述了试验的关键环节与注意事项,并通过具体工程案例的深入剖析,最终得出的结论证实了静载试验方法的稳健性和可靠性。王京汉等^[7]介绍了螺纹桩的施工技术特点,并依托于工程实践案例对螺纹桩的承载力进行了静载试验的详尽研究。BACA 等^[8]参考奥斯特伯格试验,研究了一种新的双向桩静载试验方法,等效桩承载力约为标准试验承载力的 80%。然而,当前研究多集中于对单个桩基检测方法进行研究,而关于高应变法与静载试验法在桩基检测中的综合比较研究则较少。

本文在深入解析高应变法与静载试验法在桩基检测中的工作机理、实施目标及优缺点的基础上,针对某大型发电站的桩基项目,选取试桩区内的 3 根后注浆灌注桩作为样本,运用静载试验

法与高应变动力检测法这两种不同的检测技术进行试验,通过对所得数据与理论计算结果进行全面比较和深入分析,以期为类似工程中的桩基检测提供参考和借鉴。

1 检测原理

1.1 静载试验法检测原理

静载试验是一种评估桩基承载力和变形特性的直接方法,其检测原理基于对结构施加静态荷载并观察其反应。静载试验通常用于验证设计的承载力假设,评估桩基的安全性和稳定性。在静载试验中,荷载被逐步或一次性施加于桩顶或地基表面,荷载可以是垂直的,也可以是水平的。荷载通常由堆载法、反力梁法或锚桩法等方式提供。当荷载施加时,会观测桩顶或地基表面的位移。这通常通过精密的测量仪器如位移传感器、百分表或电子水准仪来完成,以记录荷载作用下桩或地基的沉降、上拔或水平位移。在荷载施加的每一个阶段,位移数据都被记录下来。通过绘制荷载-位移曲线,可以分析桩或地基的承载力和变形特性。当荷载与位移之间的关系不再线性,或位移突然增加到不可接受的程度时,可以确定承载力极限。根据荷载-位移曲线,可以确定桩基的最大承载力。

当上部结构的荷载传递至桩基础时,上部结构的荷载 F 首先作用在桩顶,然后该荷载被分解并传递给两个主要部分:一部分通过桩侧面与土壤之间的摩擦力被土壤所吸收,这部分力被称为桩侧摩阻力 F_c ;另一部分则传递至桩底,由桩尖下方的土壤所提供的抵抗力来承担,这部分力称为桩端阻力 F_d 。计算公式如下。

$$F = F_c + F_d \quad (1)$$

静载试验通过精心设计的分级加载,不仅能够细致地描绘出桩基在荷载作用下的沉降曲线,还能据此评估桩基的极限承载力。这种方法特别适用于那些直径较大或长度较长的桩基,能够有效地控制和评估这类桩基的承载性能。通过一系列的荷载-位移测试,包括其在不同荷载下的响应特性以及最终的承载力极限,这对于确保桩基工程的安全性和可靠性至关重要。

1.2 高应变法检测原理

高应变动力检测是一种用于评估桩基承载力

的现场检测技术。基于波动理论，分析锤击后桩内产生的应力波传播情况。通过在桩顶使用重锤以自由落体的方式冲击桩顶，从而产生瞬时的高应变脉冲。在桩顶安装传感器，通常包括加速度传感器和力传感器，应力波在桩内传播时，遇到桩身截面变化、桩土界面或桩端时会发生反射和透射，这些信号会被传感器捕捉。应用测量得到的锤击瞬间桩顶的速度和锤与桩之间的接触力时程曲线，可以分析桩的承载力和结构状况。

高应变检测技术主要包括波动方程法、锤击贯入试桩法、静动法以及凯司法。其中，凯司法作为一项以波动理论为核心的技术，是一种专门用于桩基动力检测和分析的先进方法。该方法能够在打桩过程中实现即时监测，同时在工程竣工验收阶段，通过精密的计算和分析，准确提供桩基的承载能力和桩身结构完整性等关键信息^[9]。对于尺寸不大、长度合理且具有均匀截面特征的桩体，采用凯司法^[10]计算其承载力是颇为适宜的，计算公式如下。

$$F_c = \frac{1}{2}(1 - J_c) \cdot [F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] + \frac{1}{2}(1 + J_c) \cdot \left[F\left(t_1 + \frac{2L}{C}\right) - ZV\left(t_1 + \frac{2L}{C}\right) \right] \quad (2)$$

$$Z = \frac{EA}{C} \quad (3)$$

式中： F_c 为单桩承载力计算值，kN； J_c 为凯司法阻尼系数； t_1 为速度第一峰值对应的时刻，ms； $F(t_1)$ 为速度第一峰时刻的锤击力，kN； $V(t_1)$ 为速度第一峰时刻的质点运动速度，m/s； Z 为桩身阻抗，kN·s/m； A 为桩身截面积，m²； L 为测点下桩长，m； E 为桩身材料弹性模量，kPa； C 为桩身应力波传播速度，m/s。

2 两种检测方法的优缺点

静载试验通过在桩顶施加荷载，并精细记录桩顶的相应位移反应，从而评估出桩基所能承受的最大荷载水平。这个过程通常需要持续几天到一周或更长时间，具体取决于荷载的施加速度、观测频率以及达到极限承载力所需的时间。静载试验的每个荷载级都需要等待桩顶位移达到稳定标准后才能进行下一级荷载的施加，这决定了静

载试验的检测周期较长。因此，静载试验法通常仅在关键结构或需要高精度数据的场合使用。静载试验被公认为评估桩基承载力最为精确与可信的检测手段。然而，由于该试验方法耗时较长，施工成本高昂，且对试验场地条件有较高要求，其在实际应用中难以实现随机抽样的大面积检测。这一局限性意味着静载试验难以对整个工程项目进行有效的概率统计分析，导致其检测结果的代表性受到了一定限制。

高应变法是一种快速检测方法，通过在桩顶施加瞬时的高能量冲击，利用传感器记录桩顶的速度和力时程曲线，然后通过软件分析这些数据，来评估桩的承载力和完整性。由于高应变法的检测过程快速且自动化程度高，单桩的检测时间通常只需要几分钟到半小时不等。因此，高应变法适用于需要快速评估大量桩基承载力和完整性的场合，如工程验收阶段的大批量检测。然而，高应变法在检测过程中，桩顶的动态位移幅度较小，显著低于静载试验中的位移量，高应变法在大直径、扩底或超长桩的极限承载力检测时存在局限性，一般不适合用于设计阶段的承载力数据检测，而更适合应用于工程竣工后的桩基性能验证，确保其承载能力符合预期标准。此外，高应变法的检测结果受多种因素的影响，包括桩土系统的特性、检测设备的精度以及数据分析的复杂性等，这些因素共同作用下，使得高应变法的检测结果在准确性方面与静载试验相比仍有较大差距。

综上所述，高应变法的检测周期短，适用于快速、大批量的桩基检测，而静载试验法虽然提供更精确的数据，但检测周期长，适用于需要高精度承载力评估的场合。

3 工程案例

3.1 工程背景

拟建工程为某大型电厂，厂区所处的地形特征表现为广阔的平坦地带，根据工程地质勘察报告，该场地的地质剖面显示，在勘探深度内，地层物质主要来源于历史上河流与洪水的沉积作用，形成了以粉质黏土和粉细砂为主的土层，这些土层属于第四纪冲洪积层，具有典型的黏性土和砂

质土特征。桩基检测试验特别选择了后注浆灌注桩技术且桩身和桩底均注浆,并在场地内设置了由 3 根试验桩构成的检测区域。被检测的桩是摩擦型桩,设计桩径 $\varnothing 700$ mm,桩长为 30.0 m,实际桩长为 36.0 m,设计桩身混凝土强度等级为 C30,试桩估算单桩竖向承载力特征值为 3 200 kN。

3.2 检测方法

3.2.1 静载试验检测法

针对 3 根选定的试桩,逐一进行了单桩竖向抗压静载测试,试验采用了慢速维持荷载法进行加载,其中加载反力由锚桩反力装置提供。具体加载过程分为 11 个阶段,每一轮荷载施加后,桩顶沉降量会在 5、10、15、20、25 min 这几个时间点被精确记录,此后,每隔 30 min 重复测量一次,每轮荷载施加后都会有一段观测期,用于密切跟踪桩顶沉降的变化情况,直至沉降速率稳定,才进入下一阶段的加载,以此确保试验数据的准确性和可靠性。在卸载阶段,每一轮荷载需保持 1 h 的稳定状态,期间分别在第 15、30、60 min 记录桩顶的沉降量,完成这一系列测量后,方可进行下一级荷载的卸除。当所有荷载完全卸载至零后,需持续监测桩顶的残余沉降情况,整个监测过程持续 3 h。只有当试验加载达到了工程设计所要求的极限荷载,并且随后的监测显示桩顶沉降量的变化趋于平稳,不再有显著增加,才能停止进一步的加载测试。这一准则确保了试验既能检验桩基在极端条件下的承载能力,又不至于超出安全范围,对桩基造成不必要的损害。

3.2.2 高应变检测法

对 3 根试桩均实施了高应变动力检测,助 FEI-C5 分析仪及相应的传感器来采集数据。检测过程中,10 t 的重锤从 1.5 m 高度自由落下,撞击桩顶,而预先安装在桩侧、距桩顶 2 m 处的传感器群组则负责捕捉撞击瞬间的加速度与力变化。这些原始信号随即通过桩基动测系统进行处理,从而转换为数

字化信息。为了对比静载试验和高应变法检测的数据,以评估两种方法的一致性和差异性,先进行静载试验再进行高应变法检测,从而可避免对后续静载试验得到的检测数据产生影响。

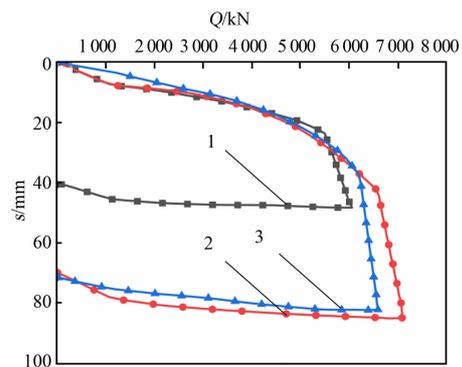
3.3 检测结果

3.3.1 静载试验法检测结果

对 SP1~SP3 这 3 根试桩进行了静载试验,3 根试桩的 $Q-s$ 曲线如图 1 所示。 Q 为承载力特征值, kN; s 为沉降, mm。在桩基静载检测中极限承载力的取值基于位移控制法,当荷载达到某一值时,桩顶位移量达到某一规定值,此时的荷载即为极限承载力。检测结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,3 根试桩的承载力特征值分别为 2 768.9、3 299.3、3 105.4 kN,均大于设计承载力特征值 2 050 kN,满足设计要求。

3.3.2 高应变法检测结果

高应变法采用 FEIPWAPC 拟合分析软件对 SP1~SP3 这 3 根试桩的实测数据进行拟合分析。以典型的试桩 SP1 为例,图 2 给出了相应的数据处理曲线。



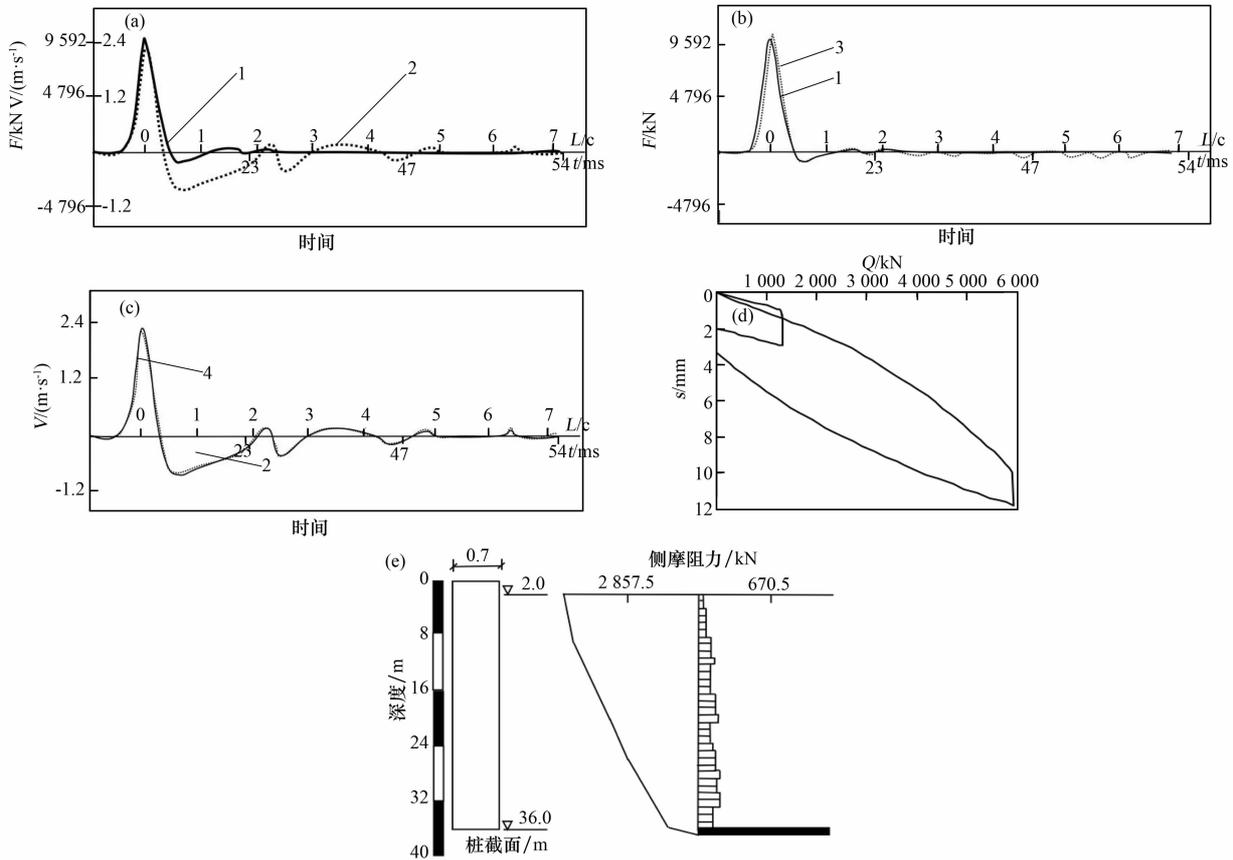
1—SP1; 2—SP2; 3—SP3。

图 1 3 根试桩的 $Q-s$ 曲线

3 根试桩的承载力计算结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,3 根试桩的承载力特征值分别为 2 443.2、3 233.1、2 686.5 kN,均大于设计承载力特征值 2 050 kN,满足设计要求。

表 1 静载试验法桩基承载力检测结果

桩号	最大加载值/kN	最大沉降量/mm	极限承载力/kN	承载力特征值/kN	设计承载力特征值/kN
SP1	6 050	47.35	5 537.8	2 768.9	2 050
SP2	7 150	86.43	6 598.6	3 299.3	2 050
SP3	6 550	83.47	6 210.7	3 105.4	2 050



(a) 力与速度实测曲线；(b) 力实测与拟合曲线；(c) 速度实测与拟合曲线；
 (d) 荷载 - 沉降曲线；(e) 桩身剖面及土阻力分布
 1—实测力；2—实测速度；3—力拟合曲线；4—速度拟合曲线。

图 2 S1 试桩高应变法拟合曲线

表 2 高应变法承载力检测结果

kN

桩号	端阻力	侧阻力	极限承载力	承载力特征值	设计承载力特征值
SP1	1 321.5	3 564.8	4 886.3	2 443.2	2 050
SP2	1 898.3	4 567.9	6 466.2	3 233.1	2 050
SP3	1 018.6	4 354.3	5 372.9	2 686.5	2 050

4 与理论公式的综合比较分析

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) 中的相关规定，后注浆灌注桩的单桩极限承载力 Q_{uk} 可以通过以下公式进行预估。

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{gsk} + Q_{gpk} \quad (4)$$

$$Q_{uk} = u \sum q_{sjk} l_j + u \sum \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + \beta_p q_{pk} A_p$$

式中： Q_{sk} 为后注浆非竖向增强段的总极限侧阻力标准值，kN； Q_{gsk} 为后注浆竖向增强段的总极限侧阻力标准值，kN； Q_{gpk} 为后注浆总极限端阻力标准值，kN； u 为桩身周长，m； l_j 为后注浆非竖向增强段第 j 层土厚度，m； l_{gi} 为后注浆竖向增强段

内第 i 层土厚度，m； q_{sik} 、 q_{sjk} 、 q_{pk} 分别为后注浆竖向增强段第 i 层土层初始极限侧阻力标准值 (kPa)、非竖向增强段第 j 土层初始极限侧阻力标准值 (kPa)、初始极限端阻力标准值 (kPa)； β_{si} 、 β_p 分别为后注浆侧阻力、端阻力增强系数。

对 3 种方法得到的单桩极限承载力进行对比，如表 3 所示。表 3 中单桩 SP3 由理论公式计算得到的极限承载力为 6 236.7 kN；试桩估算单桩竖向承载力特征值 3 200 kN，通过试桩试验得到的单桩在竖向荷载作用下能够承受的最大荷载的一半；设计承载力特征值 2 500 kN 是在设计阶段，根据工程经验结合地质资料等因素确定的单桩竖

向承载力；三者共同构成了桩基础施工中的承载力评估体系。由表 3 可以看出，静载试验和高应变法得到的极限承载力与理论公式计算结果相接近，但相较于静载试验的实测结果，高应变法的实测数据反映出较低的承载力水平。这主要是由于一方面高应变检测法通过施加瞬时荷载，因加载时间过短，未能使桩侧摩擦力和桩端承力达到最大发挥状态，这导致了所测极限承载力数值相对偏低；另一方面先做静载试验会对桩和周围土体产生塑性变形，会降低桩的实际承载力，从而影响高应变法检测的结果。鉴于静载试验方法在操作效率和经济成本方面的不足，高应变法以其快速、经济的特点，为桩基承载力检测提供了一个切实可行的替代方案，尤其在需要快速评估大量桩基承载性能的工程时，其优势更为明显。因此，高应变法在桩基检测中的应用前景广阔，是优化检测流程、提升工作效率的有效途径。

表 3 3 种方法极限承载力比较 kN

桩号	静载试验法	高应变法	理论公式
SP1	5 537.8	4 886.3	6 236.7
SP2	6 598.6	6 466.2	6 236.7
SP3	6 210.7	5 372.9	6 236.7

5 结 论

(1) 相较于高应变法，尽管静载试验法在反映桩基承载性能方面具备较高的精确度，能够提供直观且可靠的检测数据，但其检测过程的耗时较长且经济成本较高。因此，在工程实际中选择高应变法可以在保证一定检测精度的前提下，显著缩短检测时间并降低经济成本，特别适用于对检测效率和成本有较高要求的工程项目。

(2) 静载试验法及高应变法所获得的实测承载力特征值均大于设计时所设定的承载力特征值标准，能够满足设计要求。

(3) 高应变法得到的承载力检测数值低于静载试验法，两种检测方法所得到的承载力结果与理论公式的计算结果呈现出良好的吻合度。

(4) 高应变法在桩基承载力检测领域，以其高效、经济的特点，能够作为静载试验有效补充。

参考文献：

- [1] 郑海源, 缪易辰, 潘文, 等. 桩基检测技术研究进展 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(1): 4 - 10.
- [2] 吴玉龙, 蔡俊华, 顾盛, 等. 新型基桩高应变检测装置的研发与应用 [J]. 工程质量, 2017, 35(6): 68 - 71.
- [3] 杨泽东. 一种大直径空心管桩高应变法检测中桩头处理方法探讨 [J]. 安徽建筑, 2023, 30(7): 168 - 170.
- [4] 毛远伟, 林海铭. 桩顶装置测力法在大吨位高应变试桩中的应用研究 [J]. 广东建材, 2022, 38(12): 20 - 23.
- [5] SAKR M. Comparison between high strain dynamic and static load tests of helical piles in cohesive soils [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 54: 20 - 30.
- [6] 蒋维. 基桩大吨位静载试验研究与实例分析 [J]. 土工基础, 2024, 38(3): 525 - 529.
- [7] 王京汉, 黎光明. 螺旋桩桩基承载力静载与高应变检测对比分析 [J]. 工程建设, 2007(1): 14 - 17.
- [8] BACA M, BRZAŃKAŁA W, RYBAK J. Bi-directional static load tests of pile models [J]. Applied Sciences, 2020, 10(16): 5492.
- [9] 车言飞. 桩基检测中高应变动力检测原理及方法 [J]. 住宅与房地产, 2019(27): 190.
- [10] 建筑基桩检测技术规范: JGJ106—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.