

DOI: 10.11779/CJGE2023S10002

可回收自平衡法检测装置研发及力学特性分析

董建华^{1,2}, 杨博^{1,2}, 田文通^{1,2,3}, 苏世林^{1,2}, 连博^{1,2}, 李建军⁴

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 中国地震局兰州地震研究所中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024)

摘要: 针对传统桩基静载试验中存在的主要问题, 研发了一种可回收自平衡法桩基承载力检测装置, 建立了新型可回收检测结构作用下的试桩荷载传递模型, 推导出层状地基中桩身的荷载传递矩阵, 并通过实际工程三维有限元计算结果, 验证了理论解析方法的可靠性。结合现场实测获取的荷载-位移、桩身轴力等数据, 探究了该结构的工作机理。结果表明: ①该新型结构装配化程度高, 测试周期短, 能耗低, 试验空间要求小, 具备推广价值。②理论解析模型得出的桩身轴力、荷载位移曲线与实测结果吻合较好, 均在误差允许范围内。③相对于传统荷载箱测试结构, 该新型结构测得承载力精度提高3.5%。因此, 该理论模型与新型结构在实际工程中具备很大的适用性与推广价值。

关键词: 桩基础; 自平衡法; 层状地基; 荷载传递模型

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0234-06

作者简介: 董建华(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事柔性边坡支挡结构静动力分析设计与岩土工程方面的研究工作。E-mail: djhua512@163.com。

Development and mechanical characteristics of a recyclable self-balancing detection device

DONG Jianhua^{1,2}, YANG Bo^{1,2}, TIAN Wentong^{1,2,3}, SU Shilin^{1,2}, LIAN Bo^{1,2}, LI Jianjun⁴

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 4. China Communications First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: Aiming at the main problems existing in the static load tests on pile foundations, a recyclable self-balancing detection device for the bearing capacity of the pile foundations is developed. The load transfer model for the test piles under the action of a new recyclable detection structure is established, and the load transfer matrix of pile body in a layered foundation is derived. The reliability of theoretical analysis is verified by the results of three-dimensional finite element calculation in practical engineering. The working mechanism of the structure is studied based on the data of load-displacement and pile axial force obtained from the field measurements. The results show that: (1) The new structure has high assembly degree, short test period, low energy consumption and small test space requirements, and is worth popularizing. (2) The axial load-displacement curves of the pile obtained from the theoretical analytical model are in agreement with the measured results, both of which are within the allowable error range compared with those of the load box test structure. (3) The accuracy of the bearing capacity measured by the new structure is improved by 3.5%. Therefore, the theoretical model and the new structure are of great applicability and popularization value in practical engineering.

Key words: pile foundation; self-balancing method; layered foundation; load transfer model

黄土、软土等复杂恶劣地质环境中山区交通^[3-4]、海

0 引言

近年来, 随着“交通强国”战略和“一带一路”倡议的实施, 大量的超高层建筑、大跨度桥梁、超长海底隧道等工程项目相继出现, 桩基础因其承载力高、稳定性好、变形小等优点^[1-2], 在季节性冻土、湿陷性

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178335); 中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20216200001739); 甘肃省基础研究创新群体项目(20JR10RA205); 陇原青年创新创业人才(团队项目)(2020RCXM120); 甘肃省优秀博士生项目(22JR5RA237, 22JR5RA243); 甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2022CXZX-453, 2022CXZX-447)
收稿日期: 2023-07-05

上风电^[5-6]、跨海大桥等重要项目设施中得到了广泛应用,因此,对桩基承载力进行科学评估,并合理选择其设计参数,是目前亟待解决的问题。

传统的桩基载荷试验有两种方法,一种是高应变法^[7-8],另一种是静压法^[9-14]。高应变动测分析具有快速方便的特点,但测试时桩身弹性的假定与实际不符,因此得到的 $Q-S$ 曲线有一定误差^[15]。静压法可采用堆载法、锚桩横梁法和拉压锚法,堆载法要解决成百上千吨堆载材料的来源、存储和运输及吊装,费时费力;而锚桩横梁法和拉压锚法由于需要设置多个锚桩、反力梁等,设备成本较高,并且容易受到场地、吨位等因素的制约,在试验过程中,基桩的潜能无法完全被挖掘出来,很难获得可靠的试验数据,从而无法科学、合理地评估基桩的承载力。

桩基自平衡载荷试验是基于改进传统载荷试验的反力系统发展而来的,称之为 O-Cell 法^[16-18],国内称为自平衡法^[19-21];作为一种新的桩基承载力检测手段,因该技术受场地条件限制较少,故而特别适用于一些特殊工程,如深基坑工程的桩基承载力检测试验。但该测试技术的主要缺陷在于,主要设备荷载箱是一种特别设计可用于加载的设备,造价高昂;使用时焊接在钢筋笼上,试验完毕后无法回收^[22]。

本文研发了一种可回收自平衡法桩基承载力检测装置,具有适用范围广、造价低廉、测试周期短等优点,并根据荷载传递特性模型分析了该新型测试装置的工作机理,并通过现场实测结果和三维有限元计算进行了验证,结合桩身荷载沉降、轴力等数据,揭示了可回收自平衡法桩基承载力检测装置的工作机理。

1 新型检测结构的提出及工作机理

1.1 新型可回收检测结构的提出及构造

针对现有测试技术周期长、受地形影响大等原因,基于自平衡法的测试原理和开瓶器受力方式,从节能减排、绿色低碳等角度出发,提出一种可回收自平衡法桩基承载力检测装置^[22],装置主要包括试验桩、液压千斤顶、反力梁、反力锚筋、反力钢板、位移监测系统,结构原理及装置如图 1 所示。

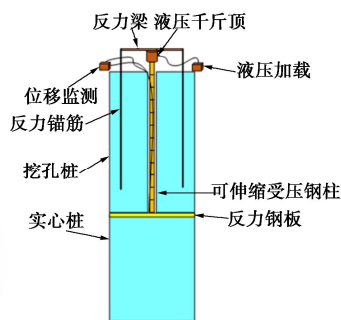


图 1 新型检测结构

Fig. 1 New detection structure

该装置采用分离桩体和加载系统的方式,实现了一种可回收自平衡法桩基承载力检测,主要做法是在桩身中性点下放置反力钢板,上段桩预设孔洞并安装受压钢柱,钢柱顶安装液压千斤顶和反力梁,并通过反力锚筋与桩身连接形成整体测试装置,试验时,液压加载系统控制千斤顶沿垂直方向同时施加荷载,得到上段挖孔桩向上、下段实心桩向下的位移,绘制 $Q-S$ 曲线,进而得到桩基承载力、桩基沉降等参数。

1.2 工作机理及主要优点

该装置工作的主要技术原理为:①作用力与反作用力原理:在实心桩和挖孔桩交界处设置钢板,将桩身分为上下两部分,液压千斤顶加载时锚筋受向上拉力,同时通过预留孔洞内插入的受压杆对钢板产生向下压力。②检测原理:在作用力与反作用力原理下,液压千斤顶通过受压杆和钢板下压使实心桩产生向下位移,由于锚筋和钢梁组成的反力系统使得挖孔桩产生向上位移,绘制对应的“ $Q-S$ 曲线”,判断桩基承载力。③回收原理:测量结束以后,拆除钢梁、液压千斤顶、扩大盘,按照设计高度切割锚筋,运用起重设备将受压杆从挖孔桩的预留孔洞中分段吊出回收,拆除各构件以便再次组装利用,上端桩体的预留孔洞内填筑混凝土并振捣填实后可作为承载桩使用。

其主要的优点是:①该装置使用空间小,特别适用于坡地、水上、基坑底、狭窄场地;②该装置利用桩的侧阻力与端阻力互为反力,可清楚区分侧阻力与端阻力分布以及各自的荷载-位移曲线;③该装置使用液压千斤顶提供荷载,费用低,可多根桩同时测试,测试周期短,有利于增加试桩数量,扩大检测范围;④试验结束后,组合钢柱吊出回收再利用,大量节约资源;⑤在试验桩预留孔洞注浆后,试验桩仍可作为工程承载桩使用,经济效益显著。

2 工作机理分析

2.1 荷载传递函数微分方程

基本假设如下:

(1) 桩为弹性体,忽略受压钢柱、反力钢板的变形及反力锚筋与上段桩之间的相对位移。

(2) 可由单元上下两面的轴向力和平均截面刚度来计算各单元应变。

(3) 桩端承载力-沉降量关系及不同深度的桩侧摩阻力-变形量关系与标准试验方法相同。

新型可回收检测结构的工作机理及微单元受力分析如图 2 所示。

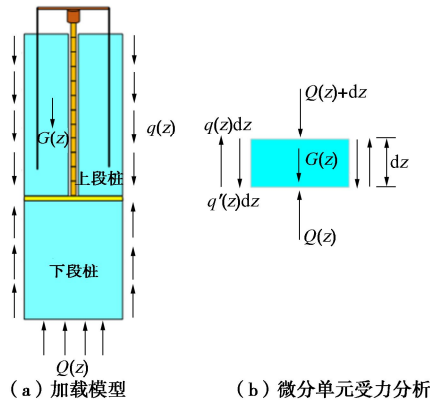


图2 荷载传递模型

Fig. 2 Load transfer model

由微单元受力可得

$$\frac{ds^2(z)}{dz^2} = \frac{U}{EA} q(z) \quad (1)$$

式中: U 为桩周长; E 和 A 分别为桩的弹性模量和横截面积。根据剪切位移法, 假设桩周土的位移为

$$s(z) = \frac{q(z)r_0}{G_s} \ln(r_m/r_0) \quad (2)$$

式中: $q(z)$ 为桩侧摩阻力; r_0 为桩半径; r_m 为有效影响半径, $r_m = 2.5L(1-\nu_s)$, L 为桩长; G_s 为桩侧土剪切模量; ν_s 为土体泊松比。

将式(2)代入式(1)可得

$$\frac{d^2s(z)}{dz^2} - \frac{U}{EA} \cdot \frac{s(z) \cdot G_s}{r_0 \cdot \ln(r_m/r_0)} = 0 \quad (3)$$

令 $k = (2\pi \cdot G_s) / \ln(r_m/r_0)$, 定义为桩土剪切刚度系数, $\alpha = \sqrt{k/EA}$, 可得

$$\frac{d^2s(z)}{dz^2} - \alpha^2 \cdot s(z) = 0 \quad (4)$$

2.2 上段桩荷载传递规律

自平衡法检测中, 上段桩自重对端承载力有一定影响, 因此, 考虑上段桩自重影响时, 其桩侧荷载传递基本微分方程为

$$\frac{ds_1^2(z)}{dz^2} - \alpha^2 s_1(z) = \frac{\gamma}{E} \quad (5)$$

式中, γ 为桩体重度。

上段桩顶的边界条件为

$$Q_1(z) = -EA \frac{ds_1(z)}{dz} \Big|_{z=0} = 0 \quad (6)$$

上段桩底的边界条件为

$$Q_1(z) = -EA \frac{ds_1(z)}{dz} \Big|_{z=L_1} = Q_u, s_1(z) = s_1(z) \Big|_{z=L_1} = s_u \quad (7)$$

式中: Q_u 和 s_u 分别为液压千斤顶施加的向上的荷载与产生的位移。

根据式(5)可得, 上段桩的桩身位移和轴力为

$$\begin{cases} s_1(z) = C_1 e^{\alpha z} + C_2 e^{-\alpha z} - \frac{\gamma}{\alpha^2 E} \\ Q_1(z) = -C_1 EA \alpha e^{\alpha z} + C_2 EA \alpha e^{-\alpha z} \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_1 和 C_2 为常数, 可由式(6), (7) 确定。

将式(8)用矩阵形式表达为

$$\begin{Bmatrix} s_1(z) \\ Q_1(z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\alpha z} & e^{-\alpha z} \\ -EA \alpha e^{\alpha z} & EA \alpha e^{-\alpha z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \frac{\gamma}{\alpha^2 E} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

试验桩侧地基土层按照单元厚度为 h_i 进行划分, 可得桩单元顶部的内力和位移表达为

$$\begin{Bmatrix} s_1(z_i) \\ Q_1(z_i) \end{Bmatrix} = T^1(z) \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \frac{\gamma}{\alpha^2 E} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

其中,

$$T^1 = \begin{bmatrix} \cosh(\alpha h_i) & -(EA \alpha)^{-1} \sinh(\alpha h_i) \\ -EA \alpha \sinh(\alpha h_i) & \cosh(\alpha h_i) \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据位移连续性条件可得:

$$\begin{Bmatrix} s_1(z=L_1) \\ Q_1(z=L_1) \end{Bmatrix} = [T^1] \begin{Bmatrix} s_1(z=0) \\ Q_1(z=0) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \frac{\gamma}{\alpha^2 E} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

式中, L_1 为上段桩长。

荷载试验过程中, 上段桩侧土体出现塑性区, 第 i 段桩单元侧摩阻力达到土体剪切强度 q_{fu} 后, 假定该单元进入塑性状态后摩阻力保持稳定状态, 后期增加的荷载将转移到上部弹性区域的桩单元承担, 第 i 段桩单元微分方程为

$$\frac{ds_1^2(z)}{dz^2} - \frac{U}{EA} q_{fu} = \frac{\gamma}{E} \quad (13)$$

求解并表达为增量形式为

$$\begin{Bmatrix} \Delta s_{1i} \\ \Delta Q_{1i} \end{Bmatrix} = [T_f] \begin{Bmatrix} \Delta s_{1i} \\ \Delta Q_{1i} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \frac{\gamma}{\alpha^2 E} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

其中,

$$[T_f]_i = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{h_i}{EA} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.3 下段桩荷载传递规律

对于下段桩受压加载时, 不需要克服桩自重, 桩侧受正摩阻力作用, 受力特征与传统受压桩相同, 同理可得

$$\frac{ds_2^2(z)}{dz^2} - \alpha^2 s_2(z) = 0 \quad (16)$$

式中, $s_2(z)$ 与 $Q_2(z)$ 分别表示下段桩 z 位置处的位移与轴力。同理可得

$$\begin{Bmatrix} s_2(z_i) \\ Q_2(z_i) \end{Bmatrix}_b = [T^2(z_i)] \begin{Bmatrix} s_2(z_i) \\ Q_2(z_i) \end{Bmatrix}, \quad (17)$$

其中,

$$T^2(z_i) = \begin{bmatrix} \cosh(\alpha h_i) & -(EA\alpha)^{-1} \sinh(\alpha h_i) \\ -EA\alpha \sinh(\alpha h_i) & \cosh(\alpha h_i) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

2.4 Q-S 曲线等效转换方法

以反力钢板位置为起点, 将上段桩分割为 n 个单元, 桩身任意处的内力与变形量如下:

$$Q(i) = Q(0) + \sum_{m=1}^i q(m)\{U(m) + U(m+1)\}q(m) / 2, \quad (19)$$

$$s(i) = s(0) + \sum_{m=1}^i \frac{Q(m) + Q(m+1)}{m+1} \frac{h(m)}{E(m)A(m) + E(m+1)A(m+1)}. \quad (20)$$

式中: $Q(0)$ 为 $i=0$ 处桩的轴力 (kN), 即上部液压千斤顶的加载值; $s(0)$ 为 $i=0$ 处桩的位移 (m), 即上段桩的位移; $q(m)$ 为 m 处的桩侧摩阻力 (kPa)。

上段桩等效转换桩顶 $i=n$ 时的荷载和位移如下:

$$Q(n) = Q(0) + \sum_{m=1}^n q(m)\{U(m) + U(m+1)\}q(m) / 2, \quad (21)$$

$$s(n) = s(0) + \frac{h(n)}{E(n)A(n) + E(n-1)A(n-1)} \cdot \left\{ 2Q(0) + \sum_{m=1}^{n-1} q(m)[U(m) + U(m+1)]h(m) + q(n)[U(n) + U(n-1)]h(n) / 2 \right\}. \quad (22)$$

根据上文建立的荷载传递模型, 采用 MATLAB 编程可得到多层地基中上、下段桩的轴力、位移值, 根据式 (21), (22) 将测试结果进行转换, 在利用等荷载法将试桩的 $Q-S$ 曲线转换为传统静压桩的 $Q-S$ 曲线, 可得到试桩的极限承载力:

$$Q_u = Q_{u上} + Q_{u下}. \quad (23)$$

3 工程对比与数值模拟分析

3.1 工程概况与数值模拟建模

以润扬长江大桥桩基承载力检测工程^[23]为参考, 基于 ABAQUS 建立了大型三维有限元分析模型 (如图 3), 由于篇幅限制, 详细参数与测试方法见文献 [23]。

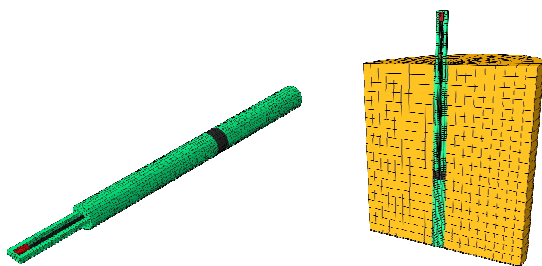


图 3 数值分析模型

Fig. 3 Numerical model

3.2 试桩 Q-S 曲线对比分析

荷载箱加载现场实测结果、数值模拟分析结果与新型检测结构加载时的对比曲线如图 4 所示, 可以看出, 三者上段桩与下段桩的 $Q-S$ 曲线发展趋势基本一致, 加载分为 15 个等级, 每级 8000 kN, 加载结束后, 上段桩位移 18.26 mm, 下端桩位移 7.91 mm, 因此取上、下段桩极限承载力分别为 62771 kN 和 56436 kN。就数值大小而言, 本文理论计算结果比现场实测结果大 0.16%~12.49%, 可认为该新型可回收桩基检测结构在合理评价桩基承载力方面具有优势; 数值分析结果略小于现场实测结果, 可能与现场土层非均匀性、桩-土相对位移、边界条件等的简化分析有关。

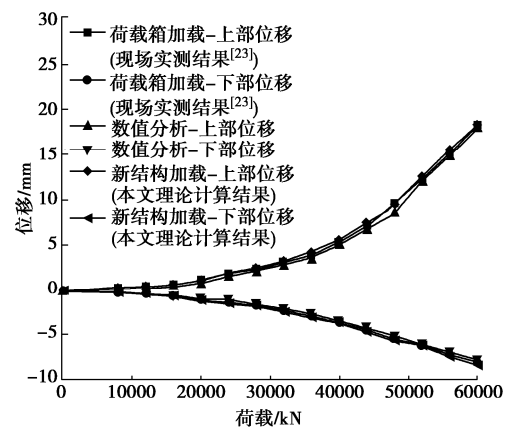


图 4 试桩 Q-S 曲线

Fig. 4 Q-S curves of test piles

3.3 桩身轴力分析

各级加载下, 桩身轴力对比如图 5 所示, 可以看出理论计算结果、数值模拟结果与实测结果均比较吻合; 下段桩轴力出现衰减, 表明荷载较小时, 施加荷载主要由桩身下部土层承担, 荷载逐级增大时, 上部土层逐渐发挥作用; 从曲线疏密程度来看, 曲线越稀疏轴力衰减越大, 从钢板位置向上 25 m 范围内曲线较疏, 可认为该部分土层承担的荷载较大。

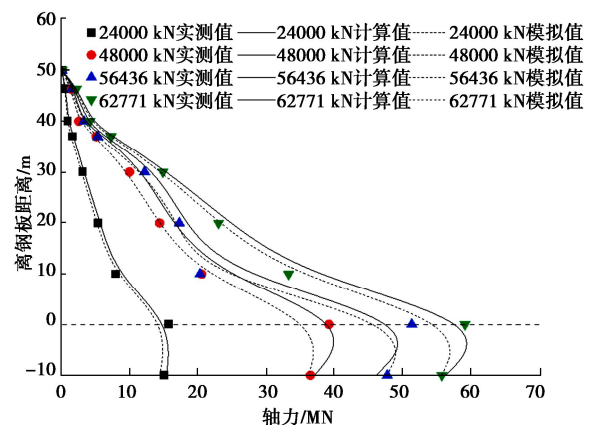


图 5 各级加载下试桩轴力分布

Fig. 5 Distribution of axial force of test piles under different loads

3.4 等效转换结果分析

从图6可以看出,现场实测结果、理论计算结果和数值模拟结果基本吻合,现场实测桩基承载力比数值模拟结果大3.5%,本文理论计算结果为119207 kN,可见新型可回收结构检测结果优于荷载箱结构,精度提高3.5%。

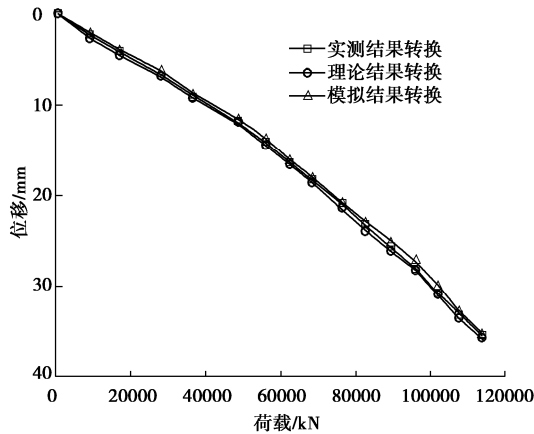


图6 试桩等效荷载曲线

Fig. 6 Equivalent load curves of test piles

4 结 论

本文研发了一种可回收自平衡桩基承载力检测装置,建立了荷载传递模型,分析了新型结构的工作机理,并与现场实测结果、数值模拟结果进行了对比分析,主要结论如下:

(1) 通过分离桩体和加载系统的方式,提出一种可回收自平衡法桩基承载力检测装置,主要做法是在桩身中性点下放置反力钢板,替代荷载箱进行加载,特别适用于坡地、水上、基坑底、狭窄场地,结构巧妙,装配化程度高,具备可回收、低耗能等优点,为桩基承载力检测提供了新的思路。

(2) 建立了新型结构作用下的桩体荷载传递模型,本文理论结果分析表明,解析模型能够合理反映新型结构作用下的上、下段桩的荷载沉降特性以及桩身轴力等分布规律,与现场实测结果、数值模拟结果吻合程度较好,承载力检测精度提高3.5%,可认为该新型结构具有一定的适用性和推广价值。

(3) 本文仅针对新型检测装置作用的等截面试桩进行了荷载传递机理分析,但对湿陷性黄土、冻土等特殊地层桩和变截面桩未进行研究,以待下一步进行现场试验,综合分析该新型结构的工作原理。

参考文献:

[1] SU D, WU Z, LEI G et al. Numerical study on the installation effect of a jacked pile in sands on the pile vertical bearing

capacities[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 145: 104690.

[2] 江 杰, 付臣志, 王顺苇, 等. 考虑实际分布形式的水平受荷桩周土抗力分析方法[J]. 工程力学, 2021, 38(11): 199-211. (JIANG Jie, FU Chenzhi, WANG Shunwei, et al. Analytical method of soil resistance around laterally loaded piles considering its actual distribution[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(11): 199-211. (in Chinese))

[3] LIU K F, FENG W Q, CAI Y H, et al. Physical model study of pile type effect on long-term settlement of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment under traffic loading[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 38: 100923.

[4] 张 振, 郑文强, 叶观宝, 等. 循环荷载下水泥土桩复合单元体变形特性及其地基长期沉降计算方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 21-29. (ZHANG Zhen, ZHENG Wenqiang, YE Guanbao, et al. Deformation and long-term settlement calculation method of unit cell of soil-cement column-reinforced soft soil under cyclic loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11): 21-29. (in Chinese))

[5] IU P Y, LIU C Y, ZHANG S M, et al. Depth-varying corrosion characteristics and stability bearing capacity of steel pipe piles under aggressive marine environment[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112649.

[6] 孙毅龙, 许成顺, 杜修力, 等. 海上风电大直径单桩的修正 p - y 曲线模型[J]. 工程力学, 2021, 38(4): 44-53. (SUN Yilong, XU Chengshun, DU Xiuli, et al. A modified p - y curve model of large-monopiles of offshore wind power plants[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4): 44-53. (in Chinese))

[7] 刘士伟. 高应变法测承载力在预应力管桩检测中的应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015. (LIU Shiwei. Application Research on High Strain Measurement of Bearing Capacity in the Detection of Prestressed Pipe Pile[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2015. (in Chinese))

[8] 缪泽军. 高应变法在人工挖孔嵌岩桩检测中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 2): 557-562. (MIAO Zejun. Application of high strain dynamic in testing of rock-inset pile with hand excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 557-562. (in Chinese))

[9] 袁从华, 章 光. 大吨位堆载法对单桩承载力试验的影响[J]. 岩土力学, 1997, 18(1): 78-83. (YUAN Conghua,

- ZHANG Guang. Analyses of effects of high-tonnage piling-up weights method on static load test for bearing capacity of a single pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1997, **18**(1): 78-83. (in Chinese))
- [10] 孙熙平, 张勇, 郑锋勇, 等. 高桩码头基桩竖向承载力原型试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(9): 2609-2615. (SUN Xiping, ZHANG Yong, ZHENG Fengyong, et al. Research on bearing capacity prototype test of high-piled wharf piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(9): 2609-2615. (in Chinese))
- [11] 朱超, 贾学斌, 杨宇. 大吨位嵌岩桩承载力现场足尺试验研究[J]. *建筑结构*, 2021, **51**(增刊 2): 1608-1612. (ZHU Chao, JIA Xuebin, YANG Yu. Field full scale test on large tonnage bearing capacity of rock-socketed piles[J]. *Building Structure*, 2021, **51**(S2): 1608-1612. (in Chinese))
- [12] 褚克南, 张文伟, 姚学朝, 等. 软土地区桩基超大吨位堆载试验、装置及工艺方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2003, **25**(1): 41-46. (CHU Kenan, ZHANG Wenwei, YAO Xuechao, et al. Study on facilities and technology of pile test in soft soil under extra-heavy load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, **25**(1): 41-46. (in Chinese))
- [13] 邓会元, 戴国亮, 龚维明, 等. 不同平衡堆载条件下桩基承载特性的原位试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(11): 3063-3070. (DENG Huiyuan, DAI Guoliang, GONG Weiming, et al. *In situ* experimental study of bearing characteristics of pile foundation under different balanced surcharges[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(11): 3063-3070. (in Chinese))
- [14] 周洪波, 黄胜生. 锚桩法单桩静载试验中群桩相互作用及误差分析[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(10): 1613-1616. (ZHOU Hongbo, HUANG Shengsheng. Interaction and error analysis of pile groups in anchor-pile loading test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(10): 1613-1616. (in Chinese))
- [15] 赵海生. 高应变法模拟 $Q-s$ 曲线误差分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(12): 2129-2135. (ZHAO Haisheng. Errors study on $Q-s$ curve of pile simulated by high strain dynamic testing method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(12): 2129-2135. (in Chinese))
- [16] OSTERBERG J. New device for load testing driven piles and drilled shafts separates friction and end bearing[C]// *International Conference on Piling and Deep Foundations*, 1989: 421-427.
- [17] FELLENIUS B H, ALTAEE A, KULESZA R, et al. O-cell testing and FE analysis of 28-m-deep barrette in Manila, Philippines[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, **125**(7): 566-575.
- [18] CASTELLI R J, FAN K. O-cell test results for drilled shafts in marl and limestone[C]// *Deep Foundations 2002*, Orlando, Florida, USA. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2002: 807-823.
- [19] 龚维明, 蒋永生, 翟晋. 桩承载力自平衡测试法[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(5): 532-536. (GONG Weiming, JIANG Yongsheng, ZHAI Jin. Self-balanced loading test for pile bearing capacity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(5): 532-536. (in Chinese))
- [20] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 等. 桩承载力自平衡测试理论与实践[J]. *建筑结构学报*, 2002, **23**(1): 82-88. (GONG Weiming, DAI Guoliang, JIANG Yongsheng, et al. Theory and practice of self-balanced loading test for pile bearing capacity[J]. *Journal of Building Structures*, 2002, **23**(1): 82-88. (in Chinese))
- [21] 徐长节, 李碧青, 蔡袁强. 自平衡法试桩的承载特性试验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, **46**(7): 1262-1268. (XU Changjie, LI Biqing, CAI Yuanqiang. Bearing behaviors of self-balanced pile[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, **46**(7): 1262-1268. (in Chinese))
- [22] 董建华, 田文通, 杨博, 等. 一种可回收自平衡法桩基承载力检测装置及施做方法: CN111962573B[P]. 2021-10-08. (DONG Jianhua, TIAN Wentong, YANG Bo, et al. Recyclable Pile Foundation Bearing Capacity Detection Device Based on Self-Balancing Method and Construction Method: CN111962573B[P]. 2021-10-08. (in Chinese))
- [23] 龚维明, 戴国亮. 桩承载力自平衡测试技术研究与应用[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (GONG Weiming, DAI Guoliang. *Research and Application of Self-Balancing Test Technology for Pile Bearing Capacity*[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese))