

· 地基与基础 ·



自平衡试桩法在高桩码头工程中的应用*

赵敏, 顾祥奎, 冯浩

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 在高桩码头桩基承载力检测中, 经常受海上场地条件限制, 传统静载荷试验无法实施, 而自平衡试桩法因其试验装置简单、可大吨位加载、可对斜桩检测、场地适应性强等优点逐渐被推广应用。基于深圳某高桩码头的自平衡试桩法应用实例, 分析自平衡试桩法的优势及主要存在问题, 针对问题提出认识、思考和应用建议, 指出荷载箱与上下桩的连接以及被顶开间隙的处理是工程桩中应用自平衡法的关键。在荷载箱埋设后上段桩仍满足抗拔承载力的情况下, 自平衡试桩法可应用于工程桩; 而对于非工程桩, 自平衡试桩法具有广泛的适应性。

关键词: 高桩码头; 桩基承载力; 桩基检测; 静载荷试验; 自平衡试桩法

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0063-08

Application of self-balanced pile test method in high pile wharf engineering

ZHAO Min, GU Xiangkui, FENG Hao

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd. Shanghai, 200032, China)

Abstract: In the testing of pile foundation bearing capacity of high pile wharf, the traditional static load test can not be implemented due to the limitations of offshore site conditions. However, the self-balancing pile test method is gradually popularized and applied because of its advantages such as simple test device, large tonnage loading, inclined pile detection and strong site adaptability. Based on the application example of the self-balancing pile test method in a high pile wharf in Shenzhen, this paper analyzes and summarizes the advantages and main problems of the self-balancing pile test method, and puts forward understanding, thinking and application suggestions for the problems. It points out that the connection between the load cell and the upper and lower piles, as well as the treatment of the jacked gap are the key to the application of self-balancing method in engineering piles. The self-balancing pile test method can be applied to engineering piles when the upper section piles still meet the uplift bearing capacity after the load cell is buried. For non-engineering piles, self-balancing test pile method has wide adaptability.

Keywords: high-pile wharf; bearing capacity of pile foundation; pile foundation detection; static load test; self-balancing pile test method

随着我国经济的快速发展和海洋强国战略的推进实施, 港口码头工程迎来新的发展高峰, 港口建设规模越来越大, 码头靠船等级越来越高。由于前期优质的岸线资源已经开发殆尽, 新建港口码头工程往往面临水深、浪大、流急等更为恶

劣的自然条件, 这给码头工程设计带来新的挑战。高桩码头因对各类地质条件适应能力强、结构沉降小、透空性好、对水流及原有地形影响小等优点在码头工程中得到了广泛应用。桩基是高桩码头的核心, 是关系码头安全与经济的关键构件。

收稿日期: 2024-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200)

作者简介: 赵敏(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程结构设计工作。

由于桩基施工具有隐蔽性，且影响桩基施工质量的因素很多，因此正确评估桩基承载能力至关重要。

传统的静载荷桩基试验方法包括堆载法和锚桩法。对于建港条件较差且靠船等级较高的码头工程，桩基承载力要求也越来越高，这意味着传统试验方法须解决几百吨甚至上千吨的荷载堆放及运输问题或设置多根锚桩及反力大梁^[1]，所需费用昂贵，耗时长，增加了试验检测的安全风险。自平衡试桩法作为一种新型桩基承载力检测方法，因试验装置简单、可大吨位加载、可对斜桩检测、场地适应性强等优点，在港口码头工程中逐渐推广应用。

本文结合自平衡试桩法在某码头灌注桩承载力检测中的应用实例，分析自平衡试桩法优点及主要存在问题，旨在为自平衡试桩法在类似工程中的应用提供借鉴和参考。

1 自平衡试桩法简介

1.1 发展历程

自平衡试桩法的测试思路最早于 1969 年由日本提出，用桩侧阻力作为桩端阻力的反力以测试桩的承载力^[2]。20 世纪 80 年代美国 Osterberg 教授开展了桩承载力自平衡试验方法的研究并应用于工程实践，一般称该方法为 Osterberg-Cell 试桩法或 O-Cell 试桩法^[3-4]。此后 Osterberg-Cell 试桩法迅速发展，在美国、欧洲、加拿大、日本、新加坡等国被广泛应用，并成为北美进行桩基静载荷试验的首选方法^[5]。国内专家对此法进行了介绍和相关试验研究，引起学术界和工程界的广泛关注。东南大学龚维明教授于 1996 年在国内开始工程实际应用，获得了自平衡测试法相关的发明专利，将其命名为“自平衡试桩法”。经过近 30 年的发展，自平衡试桩法已广泛应用于桥梁、高层建筑、地铁、海上风电等工程领域^[6]。目前，

国内大部分省份已有自平衡测试规程，国家住建部也于 2017 年颁布了 JGJ/T 403—2017《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》^[7]。自平衡试桩法在港口高桩码头工程中应用相对较少，2020 年交通运输部颁布了 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》^[8]，首次将自平衡试桩法纳入到水运工程规范当中，为高桩码头项目采用自平衡试桩法检测桩基承载力提供了规范依据。

1.2 原理

自平衡试桩法被认为是接近于竖向抗压和竖向抗拔桩实际工作条件的试验方法^[9]，其主要装置是一种特制的加载设备——荷载箱，荷载箱包括活塞、顶盖、底盖及箱壁等。荷载箱预先埋设于桩身“平衡点”，一般位于桩端或桩身下部。试验加载时，从桩顶输油管对荷载箱内腔施加压力，产生向上和向下的推力，从而调动桩周土的侧阻力和端阻力，直至达到允许的极限位移。荷载箱提供荷载推力的大小和荷载箱的向上、向下位移均可通过仪器测得，根据荷载与位移 $Q-s$ 曲线的对应关系，即可得到上段桩和下段桩的极限承载力。图 1 为自平衡试桩法试验系统，图 2 为自平衡试桩法原理。理论上若“平衡点”预估准确，则上段桩和下段桩在荷载箱推力下可同时达到极限承载力，经一定关系的转换处理后将两者相加则可得到整根桩的极限承载力。

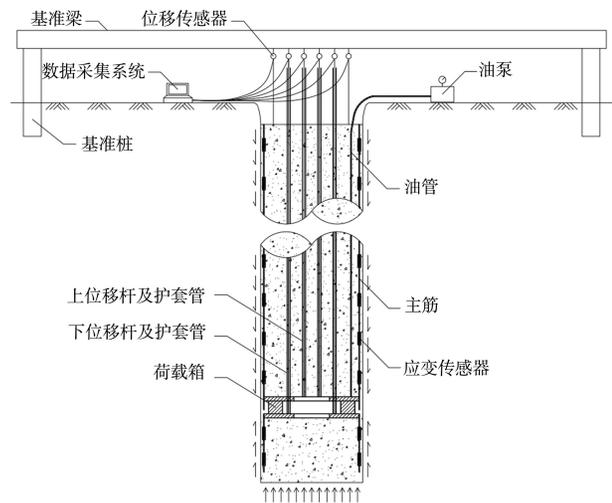


图 1 自平衡试桩法试验系统
Fig. 1 Test system of self-balancing pile test method

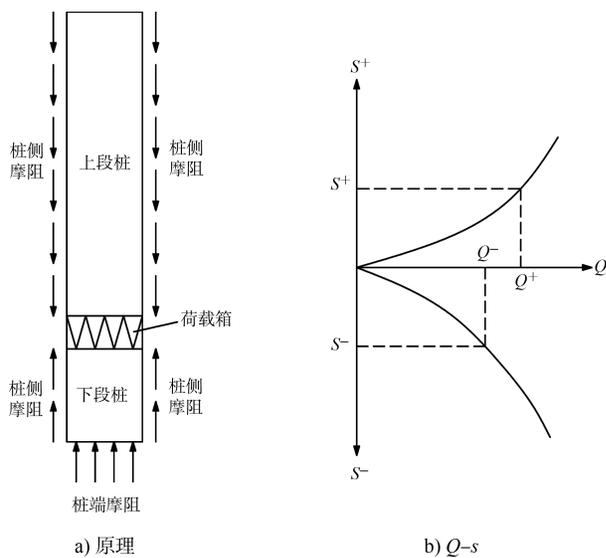


图2 自平衡试桩法原理

Fig. 2 Principle of self-balancing pile test method

自平衡试桩法与传统静载荷试验方法相比,主要优点包括:1) 装置简单,不需要锚桩和反力架,对狭小场地试桩、坡地试桩、基坑底试桩、水上试桩等各类不利环境具有广泛的适应性;2) 不需要运入数百吨或数千吨的堆载物料,节省了大量的试验时间和空间,降低试验安全风险,既安全又经济地实现大吨位加载;3) 可测试斜桩等任意角度桩基的承载力,对码头桩基承载力检测的针对性和代表性更强;4) 该法利用桩侧阻力、桩端阻力提供上、下段桩的平衡反力,因此可清楚地区分桩侧阻力和桩端阻力分布。

2 自平衡试桩法的争议问题

自平衡试桩法虽然相比传统静载荷试验具有明显的优势,但由于上段桩受力机制与传统静载荷试验以及工程桩实际受荷条件存在较大差异,学术界仍然对其试验结果的准确性和可靠性存在质疑^[10-14]。

2.1 “平衡点”的确定问题

荷载箱的埋置深度,即“平衡点”位置的确定是能否准确测试出桩基极限承载力的关键问题,但试验方案制定时只能依据地勘报告中给出的土层侧阻力和端阻力推荐值进行估算,而岩土本身具有高度的复杂性,地勘报告给出的推荐值多是依据规范的经验值,使得试验“平衡点”的估算具

有很大的不确定性。这种不确定性会导致试验时上、下两段桩很难同时达到预先设定的极限条件,参考国内已完成的试验结果,基本都是其中一段达到极限条件,而另一段还未达到极限条件。实际操作中自平衡试桩法很难测试出极限承载力。因此,“自平衡”是一种理想状态,实际操作中“平衡点”是一个可遇而不可求的理想点。

2.2 承载力的确定问题

承载力的确定问题主要包括上、下段桩试验极限承载力的确定问题和转换为整桩极限承载力的转换关系问题。

目前试验极限承载力的确定一般根据试验位移随荷载的变化特性确定,对于陡变形 $Q-s$ 曲线,取曲线发生明显陡变位置对应的荷载值为上、下段桩的极限承载力;对于缓变形 $Q-s$ 曲线,多数规范推荐取位移 $s=40$ mm 时对应的荷载值为极限承载力。陡变形 $Q-s$ 曲线的判定标准没有异议,但对于缓变形 $Q-s$ 曲线,其 40 mm 的取值是参考传统静载荷试验的判定标准,而同一桩基自平衡试验实际施加的载荷远小于传统静载荷试验施加的载荷,有学者质疑直接按传统静载荷试验位移判定标准确定自平衡极限承载力缺乏依据。

上、下段桩试验极限承载力需经一定转换关系得到整桩极限承载力,目前国外转换方法并不统一,有些国家直接将上、下桩段试验值相加得到整桩极限承载力;有些国家将上段桩试验值乘以大于 1 的转换系数后,再与下段桩试验值相加得到整桩极限承载力。而我国规范根据不同土层类型,对上段桩试验值除以 0.7~1.0(砂土取 0.7,黏性土、粉土取 0.8,岩层取 1.0)的转换系数后,与下段桩试验值相加得到整桩极限承载力。该系数的取值仅与土层类型有关,而未考虑土层上、下层相对位置及土层深度、厚度等其他因素的影响,仅是一个经验取值,且该系数取值大小对整桩极限承载力影响显著,因此其取值合理性仍被很多专家学者质疑。

2.3 工程桩的完整性问题

自平衡试桩法将荷载箱埋置于桩身当中,桩

身在荷载箱位置分为上、下两段,桩身钢筋也需要在荷载箱位置断开,虽然通过焊接或套筒将上下钢筋与荷载箱进行了连接,但荷载箱的特殊属性必然会影响整个桩身的均质性和完整性。试验加载过程中,荷载箱位置会上下推开一定间隙,虽然试验后会进行灌浆处理,但由于检测手段有限,其灌浆效果的可靠性存疑,因此若将自平衡试桩法应用于工程桩,则存在断桩可能。

3 对争议问题的分析

3.1 “平衡点”的确定问题

“平衡点”位置的确定是一个多因素影响的复杂问题,客观上很难在试验前准确估算出“平衡点”位置。但“平衡点”失真对试验结果的影响偏于保守,即一段达到极限承载力,另一段未到极限承载力,所得结果小于真实的极限承载力,因此认为这种偏差在工程应用上完全可以接受。若实际需求必须测试出真实的极限承载力,可根据试验情况采取其他附加措施进行二次测试。如初次试验时上段桩先达到极限位移而下段桩未达到,则可在桩顶进行反向堆载后进行二次测试,直至下段桩达到极限位移;反之则可通过在桩底进行后注浆提高桩端承载力,然后进行二次测试,直至上段桩达到极限位移,或确定桩端持力层可靠且荷载箱活塞行程仍有空间时,可直接继续加载,直至上段桩达到极限位移或下段桩达到极限活塞行程。因此,在试验方案确定“平衡点”位置时,应提前评估地勘报告土层参数的可靠性,并根据桩端土层性质及后续附加措施实施的便利性,有意识地选择向上或向下预留承载力余量,以保证试验目标顺利达成。

3.2 承载力的确定问题

关于参考传统静载荷试验极限位移的标准进行判定问题,考虑试验桩基的竖向位移主要与桩身截面及周边土体性质有关,对位移极限状态的认定和试验施加荷载大小无关,因此对于缓变形 $Q-s$ 曲线,在传统静载荷试验已有大量实际案例验证的基础上,直接参考传统静载荷试验取位移

$s=40\text{ mm}$ 时对应的荷载值为极限承载力具有一定的合理性。

关于上段桩转换系数取值合理性问题,我国规范主要依据不同土体负摩阻力和正摩阻力的经验关系系数取值 $0.7\sim 1.0$ 。传统静载荷受压桩试验时桩顶受压,桩侧土表现为正摩阻力;受拉桩试验时桩顶受拉,桩侧土表现为负摩阻力。而自平衡试桩法上段桩试验时,虽然桩侧土表现为负摩阻力,但其上段桩桩身受力与传统受拉桩桩身受力区别显著。传统受拉桩桩顶受拉,桩身受拉应力,因泊松效应,桩侧壁法向应力减小,桩侧阻力会相应弱化;自平衡试桩法上段桩底部当荷载箱上推时受压,桩身受压应力,导致径向膨胀,侧阻力会相应增大。笔者认为规范按不同土体将自平衡上段桩试验荷载除以 $0.7\sim 1.0$ 的转换系数以得到极限承载力的做法存在一定风险,建议针对转换系数进行专项现场试验,为该系数取值提供可靠依据,以确保结构安全。

3.3 工程桩的完整性问题

美国 Osterberg-Cell 试桩法早期应用时,是将荷载箱埋设于桩端,因此也被称为“桩端加载试桩法”,经过大量实际应用经验的积累和发展,荷载箱可根据不同地质和不同桩型的受力条件确定埋设位置。由于下段桩包含了桩端阻力,因此荷载箱一般位于桩身下部。荷载箱的埋设将完整桩身人为地分为上、下两段,并且在试验中顶开一定间隙,这是自平衡试桩法应用于工程桩存在的问题。虽然国内规范均强调试验后通过注浆仍可作为工程桩使用,但现有规范对如何注浆以及如何检验注浆质量均未有明确规定,现有的检测手段实现工程桩的注浆检验难度很大。即使试验后注浆能达到预期效果,注浆也只能解决荷载箱继续受压问题,不能解决后续受拉问题。由于自平衡荷载箱中的活塞行程一般都有较大富余,若工程桩后续使用中承受较大的上拔力,那么荷载箱试验间隙将作为先天缺陷影响整桩的抗拔承载力。因此,荷载箱的埋设确实影响了桩身完整性,但这并不意味着工程桩就不能应用自平衡试桩法进

行承载力检测。对于使用期上拔力要求不高的工程桩,若荷载箱的埋设位置能够确保上段桩的桩侧阻力满足使用期上拔力的承载力要求,则可采用自平衡试桩法。至于荷载箱试验间隙对水平承载力的影响,由于荷载箱位置基本远处于桩身反弯点以下,所处位置受水平力基本可以忽略不计,可以认为对水平承载力影响不大。因此,在有可靠措施确保注浆质量的前提下,若抗拔承载力要求不高,则自平衡试桩法可应用于工程桩。对于抗拔承载力要求高的桩,应对荷载箱的受拉连接方式及可靠性进行研究和论证。

4 工程应用

4.1 工程概况

深圳某码头为20万吨级集装箱码头,采用高桩梁板结构。由于码头区域地质复杂,岩面起伏较大,且基岩多为软岩,码头桩基根据不同受力需求采用 $\phi 1\ 400\ \text{mm}$ 钢管桩和 $\phi 1\ 400\ \text{mm}$ 灌注桩等不同桩型,其中 $\phi 1\ 400\ \text{mm}$ 钢管桩设计桩力标准值为7 250 kN, $\phi 1\ 400\ \text{mm}$ 灌注桩设计桩力标准值为10.5 MN。为检验施工质量并验证桩基承载力,需抽检部分桩基进行静载荷试验。原计划所有抽检桩基均采用传统锚桩堆载法进行试验,但由于该区域基岩覆盖层普遍较薄,锚桩提供抗拔力有限,试验堆载质量要求较大。经计算, $\phi 1\ 400\ \text{mm}$ 钢管桩最大试验荷载14.5 MN须额外堆载923 t重物。试验平台位于海上,堆载料的上下运输极为不便,正式试验时,仅堆载料上下就需要历时20 d,拉长试验周期的同时也严重影响了平台周边区域的正常施工。若仍按传统锚桩堆载法进行试验, $\phi 1\ 400\ \text{mm}$ 灌注桩最大试验荷载需达到21.0 MN,堆载质量将达到1 500 t以上,

根据前期实施情况测算,堆载料上下至少需30 d以上,单桩试验周期将进一步拉长至2个月以上,严重影响整个项目工期。如此大的堆载质量也大大增加了试验安全风险,因此建议采用自平衡试桩法。

4.2 试验方案

根据地勘钻孔和桩位布置,选取MK64钻孔邻近的 $\phi 1\ 400\ \text{mm}$ 灌注桩(A11-9#)进行试桩。MK64钻孔揭示土层自上而下依次为:③₂粉质黏土、③_{2a}中粗砂、③₃中粗砂、③₄粉质黏土、⑧₁全风化角砾岩、⑧₂强风化角砾岩和⑧₃中风化角砾岩,未揭示出微风化岩层。其中⑧₂强风化角砾岩层顶高程为-33.0 m,⑧₃中风化角砾岩层顶高程为-60.2 m。⑧₃中风化角砾岩饱和抗压强度仅为3.8 MPa,属于软岩,根据JTS 147-7—2022《水运工程桩基设计规范》^[15],应按灌注桩计算桩基承载力。试桩设计桩长为67.35 m,设计抗压承载力标准值 $\geq 21.0\ \text{MN}$,设计抗拔承载力标准值 $\geq 7.6\ \text{MN}$ 。

4.2.1 “平衡点”的确定及荷载箱的安装

“平衡点”的确定即确定荷载箱的埋设位置,该试桩设置一层荷载箱,埋设位置主要根据地勘报告提供的各土层参数进行试算确定。上段桩抗拔承载力 Q_{us} 为各土层侧阻力加上段桩自重,下段桩抗压承载力 Q_{ux} 为各土层侧阻力加桩端阻力。通过试算,最终确定荷载箱中心高程为-53.32 m,此时 $Q_{us} = Q_{ux}$ 。需要注意的是,上段桩各土层侧阻力需考虑侧阻力修正系数,根据JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》取值,黏土为0.8,砂土为0.7,岩层为1.0。试验最大加载值根据广东省标准DBJ/T 15-103—2014《基桩自平衡法静载试验技术规程》^[16]计算确定。试桩主要参数见表1。

表1 试桩主要参数

Tab. 1 Main parameters for test piles

桩径/m	桩尖持力层	桩长/m	桩顶高程/m	桩底高程/m	泥面高程/m	设计抗压承载力标准值/MN	设计抗拔承载力标准值/MN	荷载箱中心高程/m	最大加载值/MN
1.4	⑧ ₃ 中风化角砾层	67.35	3.35	-64.0	-14.5	≥ 21.0	≥ 7.6	-53.32	10.3

考虑有利于桩底沉渣向上排出以及混凝土受力均匀等因素,试验选用带导流体结构以及上下环

带结构的环带形荷载箱(图3),其最大行程20 cm,可分别提供上段桩和下段桩的最大推力12.6 MN,

满足试验最大加载值 10.3 MN 的要求。荷载箱的上、下钢板分别与上、下钢筋笼的主筋连接(主筋端部先用套筒与主筋套丝连接,再将套筒与荷载箱焊接),再用 L 形钢筋与主筋套筒以及荷载箱焊接在一起,加强主筋和荷载箱的连接强度。钢筋笼之间设置喇叭筋,其数量和直径与主筋相同(图 4)。荷载箱下部锥体空腔在安装前须采用不低于桩身混凝土强度的混凝土进行预浇筑充实。



图 3 试验用环带形荷载箱
Fig. 3 Annular load cell for test

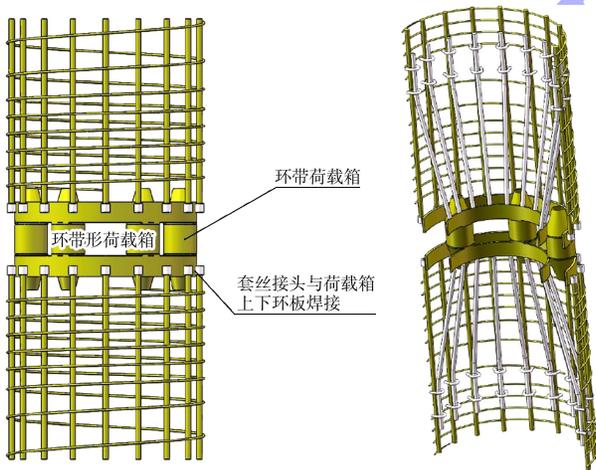


图 4 荷载箱与钢筋笼连接
Fig. 4 Connection of load cell and reinforcement cage

4.2.2 试验加载过程及判定标准

自平衡试验加卸载分级进行,每级加载量为预估最大加载量的 1/15~1/10。第 1 级按 2 倍分级荷载加载。每级卸载量可为 2~3 个加载级的荷载值。加卸载应均匀连续,每级荷载在维持过程中的变化幅度不得大于分级荷载的 10%。向上、向下 2 个方向应分别判定和取值,平衡状态下 2 个

方向均宜达到终止加载条件再终止加载。每个方向的加载终止条件和相应极限加载值的取值按 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》执行。试验加载见表 2。

表 2 试桩加载分级
Tab. 2 Loading classification for test piles

加载序号	荷载值	持续时间
1	1/5P	≥1 h
2	3/10P	≥1 h
3	4/10P	≥1 h
4	5/10P	≥1 h
5	6/10P	≥1 h
6	7/10P	≥1 h
7	8/10P	≥1 h
8	9/10P	≥1 h
9	P	≥2 h
10	4/5P	≥1 h
11	3/5P	≥1 h
12	2/5P	≥1 h
13	1/5P	≥1 h
14	0	≥2 h

注: 1) P 为荷载箱最大加载值; 2) 每级加卸载后第 1 h 内应在第 0、5、10、15、30、45、60 min 测读位移, 后每隔 30 min 测读 1 次, 达到相对稳定后方可加卸下一级荷载, 卸载到零后至少观测 2 h, 测读时间间隔同加载; 3) 加卸载的稳定标准: 每级加卸载的向上、向下位移量在最后 30 min 内均不大于 0.1 mm。

4.2.3 试验后注浆

自平衡试验在工程桩上进行, 试验后须对荷载箱顶开的间隙进行注浆处理。注浆参考 DBJ/T 15-103—2014《基桩自平衡法静载试验技术规程》附录 E 执行, 采用 2 根注浆管。注浆液采用水泥砂浆, 注浆压力不小于 0.3 MPa, 注浆管注浆时间间隔不超过 12 h。当浆液从另一根注浆管冒出, 或注浆总量达到理论注浆量且注浆压力达到 0.5 MPa 时, 终止注浆。

4.2.4 单桩极限承载力的确定

根据 JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》, 基桩轴向抗压极限承载力和抗拔极限承载力按式(1)、(2)计算:

$$Q_u = (Q_{uu} - W) / \gamma + Q_{ud} \tag{1}$$

$$Q_u = Q_{uu} \tag{2}$$

式中: Q_u 为试桩的极限承载力, Q_{uu} 为试桩上段

桩的极限加载值, Q_{ud} 为试桩下段桩的极限加载值; W 为试桩荷载箱上部桩自重力和附加力之和, 该试桩约为 1.2 MN; γ 为侧阻力修正系数, 试验认为强风化角砾岩已接近半岩半土状, 根据上段桩周各土层综合取 $\gamma=0.85$ 。

4.3 试验结果

自平衡试验结果见表 3。荷载箱荷载-荷载箱上面板位移、荷载箱荷载-荷载箱下面板位移以及荷载箱荷载-桩顶位移的 $Q-s$ 曲线见图 5。由表 3 可知, 该桩荷载箱上面板向上的最大位移量为 2.52 mm, 卸载后残余位移量为 0.61 mm; 荷载箱下面板向下的最大位移量为 3.95 mm, 卸载后残余位移量为 1.64 mm; 桩顶向上的最大位移量为 0.5 mm, 卸载后残余位移量为 0.21 mm。由此可知, 上、下段桩在承受荷载 10.3 MN 时, 均未破坏, 即未达到极限状态, 也未测试出极限承载力, 但足够说明单桩轴向抗压极限承载力不小于 21.0 MN, 单桩轴向抗拔极限承载力不小于 10.3 MN。该试桩作为桩基质量控制的检验手段, 主要目的是对桩基承载力进行验证, 虽未测试出极限承载力, 但已满足验证要求。

表 3 自平衡试验结果
Tab. 3 Self-balancing test results

加载 序号	荷载/ MN	上面板位移/mm		下面板位移/mm		桩顶位移/mm	
		本级	累计	本级	累计	本级	累计
1	2.026	0.03	0.03	-0.22	-0.22	0.01	0.01
2	3.090	0.08	0.11	-0.06	-0.28	0.05	0.06
3	4.120	0.25	0.36	-0.60	-0.88	0.07	0.13
4	5.150	0.08	0.44	-0.07	-0.95	0.03	0.16
5	6.180	0.09	0.53	-0.08	-1.03	0.02	0.18
6	7.210	0.14	0.67	-0.15	-1.18	0.07	0.25
7	8.240	0.35	1.02	-0.63	-1.81	0.06	0.31
8	9.270	0.91	1.93	-1.12	-2.93	0.10	0.41
9	10.300	0.59	2.52	-1.02	-3.95	0.09	0.50
10	8.240	-0.05	2.47	0.08	-3.87	-0.02	0.48
11	6.180	-0.13	2.34	0.12	-3.75	-0.02	0.46
12	4.120	-0.18	2.16	0.28	-3.47	-0.11	0.35
13	2.060	-0.66	1.50	0.27	-3.20	-0.02	0.33
14	0	-0.89	0.61	1.56	-1.64	-0.12	0.21

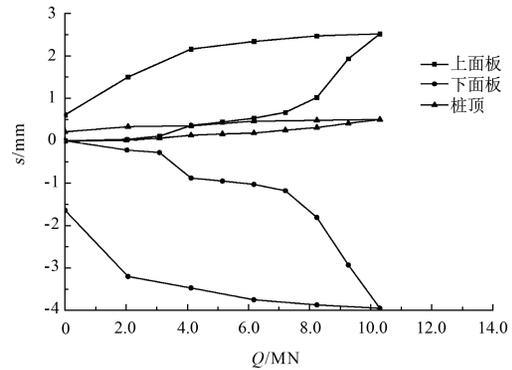


图 5 自平衡试验 $Q-s$ 曲线

Fig. 5 $Q-s$ curves for self-balancing test

5 结论

1) 自平衡试桩法在工程应用中仍存在一些争议, 如“平衡点”的确定、承载力的确定和工程桩的完整性等。但“平衡点”失真对试验结果的影响是偏于保守的, 因此应用于工程完全可以接受; 虽然目前承载力确定方法的依据并不充分, 但是已成功实施的大量自平衡试验, 在一定程度上验证了该方法的合理性; 荷载箱对桩身完整性的影响是在工程桩中推广应用的主要问题, 但根据工程桩的实际受力条件和试验需求, 在有可靠措施确保注浆质量的前提下, 若上段桩侧阻力可满足工程桩的抗拔承载力要求, 则自平衡试桩法可应用于工程桩。

2) 目前规范按不同土体将自平衡上段桩试验荷载除以 0.7~1.0 的转换系数以得到极限承载力的做法存在一定风险, 建议进行专项现场试验确定转换系数, 在无可靠试验数据支撑的情况下, 不论何种土体, 建议保守取值 1.0, 以确保结构安全。

3) 荷载箱与上下桩的连接以及被顶开间隙的处理是工程桩中应用自平衡法的关键, 建议在荷载箱的选型时应强调注浆工艺的可行性和可靠性, 并应有相应的检测措施进行验证, 以确保注浆质量满足要求。

4) 自平衡试桩法相比传统静载荷试验具有显著优势, 特别是对于高桩码头在水上试验条件受限或试验荷载很大的桩基, 自平衡试桩法能大幅降低试验难度, 减少试验周期, 节约试验费用和

施工工期。在确认荷载箱埋设后仍满足抗拔承载力的情况下,自平衡试桩法可以在工程桩中推广应用;而对于非工程桩,自平衡试桩法具有广泛的适应性。

参考文献:

- [1] 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 W M, JIANG Y S, ZHAI J. Self-balanced loading test for pile bearing capacity [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2000, 22(5): 532-536.
- [2] 李广信,黄锋,帅志杰. 不同加载方式下桩的摩擦力的试验研究[J]. 工业建筑, 1999, 29(12): 19-21, 67.
LI G X, HUANG F, SHUAI Z J. Test study on influence of loading ways on friction of pile [J]. Industrial construction, 1999, 29(12): 19-21, 67.
- [3] 龚维明,戴国亮. 桩承载力自平衡法的几个关键问题讨论[J]. 公路, 2005(8): 24-27.
GONG W M, DAI G L. Discussion on several key questions about self-balanced test method for pile bearing capacity[J]. Highway, 2005(8): 24-27.
- [4] 李箐. 钻孔灌注嵌岩桩自平衡静载试验研究与分析[D]. 长沙:中南大学, 2007.
LI Q. Research and analysis of self-balanced static load test of rock-socketed pile drilled and injected [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [5] 徐勇. 桩基自平衡试桩法的理论分析及工程应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
XU Y. Theoretical analysis and engineering application of pile self-balanced test method of foundation pile [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [6] 王磊,戴国亮. 自平衡测试法在港口码头工程中的应用研究[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(12): 168-170.
WANG L, DAI G L. Application of self-balanced test method in port wharf engineering [J]. China water transport(Second half of month), 2017, 17(12): 168-170.
- [7] 东南大学,江西中联建设集团有限公司. 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.
Southeast University, Jiangxi Zhonglian Construction Group Co., Ltd. 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.
- [8] 中交四航工程研究院有限公司,广州港湾工程质量检测有限公司. 水运工程基桩试验检测技术规范: JTS 240—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou Port Engineering Quality Inspection Co., Ltd. Technical code for testing and inspection of waterway engineering foundation piles: JTS 240—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [9] 董武忠. 洞庭湖区大直径超长钻孔灌注桩竖向承载性状试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
DONG W Z. Experimental research on vertical bearing behavior of super-long and large diameter bored piles in Dongting Lake [D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [10] 徐风云. 桩承载力自平衡法的可靠性之质疑[J]. 公路, 2004, (7): 12-19.
XU F Y. Question about reliability of self-balanced method of pile bearing capacity [J]. Highway, 2004, (7): 12-19.
- [11] 徐风云,黄文机. 桩承载力自平衡法存在的几个关键问题[J]. 公路, 2005(4): 42-46.
XU F Y, HUANG W J. Several key problems of self-balancing method of pile bearing capacity [J]. Highway, 2005(4): 42-46.
- [12] 杨翠珠,程旻,盛天予,等. 自平衡法测桩的缺陷分析[J]. 江苏建筑, 2015(6): 70-72.
YANG C Z, CHENG M, SHENG T Y, et al. Defect analysis of self-balancing pile testing [J]. Jiangsu construction, 2015(6): 70-72.
- [13] 蒋志军,雷发洪,张平川. 使用自平衡法测试基桩承载力的几个问题[J]. 四川建筑, 2016, 36(3): 272-273.
JIANG Z J, LEI F H, ZHANG P C. Some problems of using self-balancing method to test bearing capacity of foundation piles [J]. Sichuan architecture, 2016, 36(3): 272-273.

(下转第 144 页)