

DOI: 10.11779/CJGE2021S2036

悬索桥锚碇研究现状及未来发展趋势

赵小晴¹, 詹伟^{2*}, 严鑫², 王金昌¹, 杨仲轩¹, 龚晓南¹

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江省道桥检测与养护技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310023)

摘要: 随着大跨悬索桥跨径的增加, 对锚碇基础提出了更高要求, 锚碇尺寸越来越大导致造价越来越高, 统计分析了已有悬索桥重力式锚碇基础的信息; 从规范方法和基于机理分析方法角度对传统锚碇基础和新型桩碇组合结构基础进行了分析, 提出了满足稳定和变形分析的计算方法和策略, 并对新型桩碇组合结构基础的研究给出了建议。

关键词: 悬索桥; 沉井锚碇; 桩碇组合结构; 规范方法; 机理分析

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0150-04

作者简介: 赵小晴(1995—), 女, 博士研究生, 主要从事锚碇基础方面的科研工作。E-mail: xqzhao@zju.edu.cn。

Research status and future development prospect of suspension bridge anchorage

ZHAO Xiao-qing¹, ZHAN Wei², YAN Xin², WANG Jin-chang¹, YANG Zhong-xuan¹, GONG Xiao-nan¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Road and Bridge Detection and Maintenance Technology Research of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China)

Abstract: With the increase of the span of long-span suspension bridges, higher requirements are put forward for anchorage foundation. The larger and larger size of anchorage leads to higher and higher cost. The information of the existing gravity anchorage foundation of suspension bridge is statistically analyzed. The traditional anchorage foundation and the new pile anchorage composite structure foundation are analyzed from the angle of the standard method and the mechanism-based analysis method. The relevant method and strategy of stability and deformation analysis are put forward, and some suggestions for the researches on the new pile anchorage composite structure foundation are given.

Key words: suspension bridge; caisson anchorage; pile anchorage composite structure; specification method; mechanism analysis

0 引言

随着交通科技的快速发展, 中国桥梁建设水平大幅提升, 桥梁跨越能力也越来越大, 以满足日益增长的交通运输需求, 其中悬索桥单跨最大跨径已接近2000 m, 跨越能力最强。

悬索桥主要受力构件包括锚碇、塔和主缆, 锚碇作为主要承力结构物, 一般都采用重力式锚碇, 且锚碇基础底板设置于下部持力层上, 是支承主缆、保证全桥主体结构受力稳定的关键部位。重力式锚碇包括沉井基础, 地连墙基础, 复合锚碇基础等。目前国内大跨径桥锚碇基础一般选用沉井基础或者地下连续墙基础。埋置于地下的锚碇基础受到岩土体的支撑及侧向约束作用, 特别是变形控制问题需要考虑岩土体与锚碇基础的共同作用, 为此提出上部采用沉井基础下部采用钻孔灌注桩的复合锚碇基础形式以满足结构稳定和变形的要求, 即桩碇组合结构。桩碇组合结构作为一种新型锚碇基础需要展开针对性研究, 传统悬索桥沉井基础与桩碇组合结构基础的结构型式如图1所

示。国内外典型大跨径的悬索桥锚碇基础见表1所示。图2给出了悬索主缆拉力随着跨径增加示意图, 由图2可见悬索桥跨径随跨径呈非线性增加, 从而对锚碇基础提出了更高要求, 图3给出了锚碇基础占总造价随悬索桥跨径的变化情况, 因此需要对锚碇基础进行深入研究。

1 国内外研究现状

陈晓平等^[1]、徐涛等^[2]以不同沉井基础为研究对象, 对其下沉施工进行了全过程实时监测, 并利用实测资料系统分析了沉井的下沉机理和受力特性, 得到了井壁侧摩阻力和刃脚端阻力的大小和分布特征, 以及侧摩阻力沿深度呈抛物线形分布的规律。李宗哲等^[3]采用钢筋应力计和土压力计分别监测沉井在下沉过程

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078457); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2020050)

收稿日期: 2021-08-18

*通信作者 (E-mail: zhanwei@zju.edu.cn)

中的侧摩阻力和刃脚土压力, 得到了每节沉井的侧摩阻力、沉井与土层的摩擦系数以及刃脚土压力结果, 利用监测数据控制了沉井的安全平稳下沉。邓友生等^[4]基于武汉鹦鹉洲长江大桥北锚碇大型圆形沉井的施工过程, 建立了沉井和周边土体的三维计算模型, 分析了沉井结构及其周围的地下连续防护墙在下沉与封底过程中的应力分布与变形情况, 并研究了沉井下沉过程对周边环境的影响。

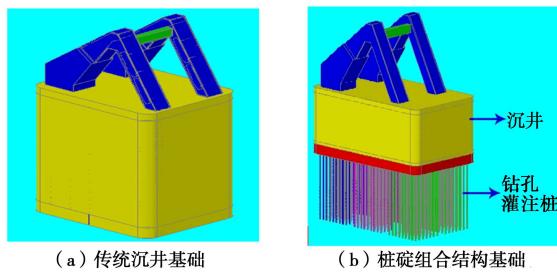


图 1 传统沉井基础和桩碇组合结构基础示意图

Fig. 1 Schematic graph of traditional caisson anchorage and pile anchorage composite structure foundation

邓燕羚^[5]针对国内首个伴随台风影响的强潮河口处深厚淤泥层地质下的超大型水中沉井基础, 通过比较完整的现场实测数据和相应的理论计算研究, 采用先进的数值模拟分析方法, 对该沉井基础在下沉施工过程中的复杂受力性能、下沉稳定性和地基土体的承载能力进行系统、深入地分析。张计炜^[6]以温州市瓯江北口大桥中塔沉井基础为研究对象, 采用现场监测、理论计算和数值分析相结合的方法, 在全面研究深厚软土层中超大沉井施工下沉全过程的基底端阻力和侧壁摩阻力受力特性及变化规律的基础上, 进一步

分析沉井下沉前期淤泥层中的突沉机理及相应预防措施, 并通过对比分析探索不同施工工况对沉井下沉过程的影响。桩碇组合结构复合锚碇基础在国外已有采用, 但由于工程实例少, 在国内很少被人注意, 目前尚没有采用桩碇组合结构的报导。

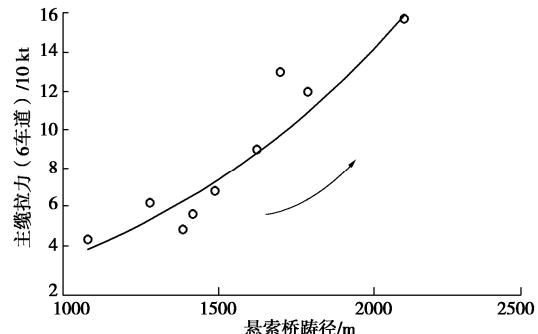


图 2 悬索桥主缆拉力随主跨径增加变化

Fig. 2 Variation of cable tension of suspension bridges with increase of main span

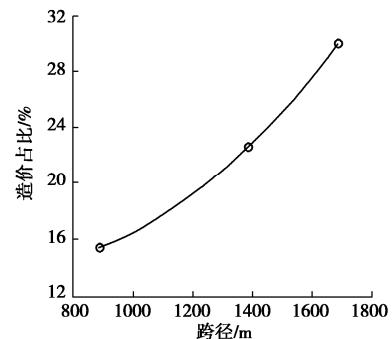


图 3 锚碇基础造价占全桥造价比随跨径变化情况

Fig. 3 Variation of ratio of anchorage foundation cost to total bridge cost with span

表 1 国内外典型大跨径悬索桥重力式锚碇基础

Table 1 Typical caisson anchorages of long-span suspension bridges

桥名	桥型	主跨径/m	锚碇基础尺寸/m	基础持力层
明石海峡大桥	悬索桥	1990	神户侧 (地连墙 $\Phi 85 \times 63.5$)	沉积岩
南京仙新路大桥	悬索桥	1760	淡路侧 (沉井 $80 \times 63 \times 26$)	花岗岩
杨泗港长江大桥	悬索桥	1700	南锚碇 (地连墙 $\Phi 68 \times 64$)	微风化砾岩
			南锚碇 (地连墙 $\Phi 98 \times 36$)	坚硬黏土层
			北锚碇 (地连墙 $\Phi 98 \times 44$)	坚硬黏土层
			东锚碇 (地连墙 $\Phi 90 \times 29$)	泥岩
虎门二桥	悬索桥	1688	西锚碇 (地连墙 $\Phi 90 \times 35.2$)	泥质粉砂岩
			南锚碇 (扩大基础 $63.6 \times 74.7 \times 50.3$)	微风化岩石
西堠门大桥	悬索桥	1650	北锚碇 (扩大基础 $60.0 \times 81.7 \times 50$)	微风化岩石
丹麦大贝尔特桥	悬索桥	1624	两侧锚碇 (沉井 $78 \times 35 \times 20$)	砾石
南京长江四桥	悬索桥	1418	南锚碇 (地连墙 $58.2 \times 44.2 \times 76.0$)	密实卵砾石
			北锚碇 (沉井 $69 \times 51 \times 58$)	含砾中粗砂
泰州长江大桥	悬索桥	1080+1080	南锚碇 (沉井 $67.9 \times 52 \times 41$)	粉砂
			北锚碇 (沉井 $67.9 \times 52 \times 57$)	粗砂
马鞍山长江大桥	悬索桥	1080	南锚碇 (沉井 $60.2 \times 55.4 \times 48.0$)	圆砾土
			北锚碇 (沉井 $60.2 \times 55.4 \times 41.0$)	中密中砂
武汉鹦鹉洲大桥	悬索桥	850	南锚碇 ($\Phi 66 \times 29$)	微风化岩石
			北锚碇 ($\Phi 66 \times 43$)	砾砂

2 基于规范的锚碇设计方法

悬索桥的锚碇设计主要是基于《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG D63—2007^[7]和《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65—05—2015^[8]两本规范的相关条款执行。承载力角度需要验算基底承载力、基础稳定和抗滑，将锚碇抽象为刚体的计算简图，不考虑锚碇周围土体的提供约束荷载，得到偏于安全的计算结果。根据《公路悬索桥设计规范》JTG/T D65—05—2015 的 8.4.2 条要求锚碇前、后端基底在施工、运营阶段应不出现拉应力，对基底应力的最大值也提出了要求；同时在 8.4.3 节对运营阶段锚碇允许水平变位提出不宜大于 1‰倍的主跨跨径，竖向变位不宜大于 2‰倍的主跨跨径要求。

3 基于机理分析的锚碇设计方法

不论是传统的锚碇基础还是改进后的桩碇组合结构基础，基于基础与岩土体的相互作用以及锚碇施工至后期的运营考虑，都需要建立更为真实反映实际物理过程的计算分析模型，才能得到较为合理的计算结果，为锚碇基础的全生命周期运营过程提供数据支撑。分析中需要重点考虑以下几点：①在缆索传递的荷载作用下，锚碇基础、岩土体以及二者之间的界面关系；②地基中的成层饱和土受荷后产生的超孔隙水压力消散；③基础受到水浮力作用。因此，岩土层需要选用刚度非线性并且采用有效应力指标的本构模型，如黏土以及砂性土等土层采用土体硬化模型（HS）以及在此基础上演化而来的考虑小刚度的土体硬化模型（HSS），而反映 Mohr–Coulomb 强度的黏聚力和内摩擦角均需要采用有效指标，可由固结排水试验获得。HS 本构模型应力应变曲线，以及在主应力空间的屈服面分别见图 4 和图 5 所示。土体的刚度具有典型的应力依赖性，加载非线性，而且卸载模量与加载不同，因此需要采用 HS 本构模型或者其演化的本构模型进行计算分析。

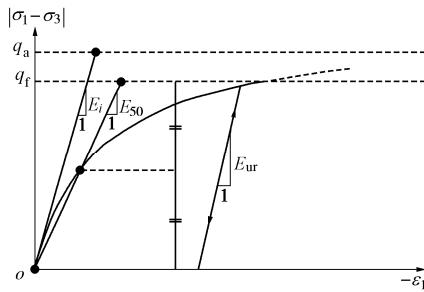


图 4 HS 模型的应力应变曲线

Fig. 4 Deviatoric stress-strain curves of HS model

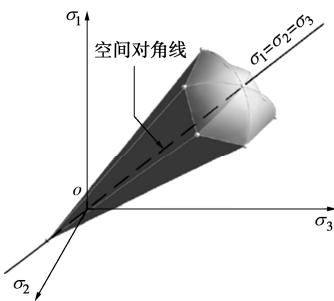


图 5 主应力空间中的屈服面

Fig. 5 Yield surfaces in principal stress space

由表 1 可知，很多锚碇基础均嵌入到岩层中，能够反映岩石风化以及节理分布的本构模型为 Hoek–Brown 模型，该模型不仅引入了地质参数 GSI、岩石完整参数 m_i 和施工扰动参数 D ，且可以与传统的岩石本构 Mohr–Coulomb 参数进行一定的转换，为参数确定提供了便捷。霍克布朗破坏准则采用最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 的关系式见式（1）所示，式中的参数由式（2）～（4）来确定。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(mb \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a, \quad (1)$$

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right), \quad (2)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right), \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp \left(\frac{-GSI}{15} \right) - \exp \left(\frac{-20}{3} \right) \right]. \quad (4)$$

岩土层与锚碇基础的界面表达也尤为重要，界面反应相互接触的两种介质的行为，特别是土体的非线性导致界面的非线性，因此需要建立能够反映岩土体的刚度非线性的界面刚度，强度可以通过相邻土体的黏聚力和内摩擦角计算得到的抗剪强度进行控制。对于大型复杂的三维计算分析，沉井基础以及群桩可分别简化为板和桩，桩与岩土体的相互作用用三向弹簧表示，即与桩身轴线相垂直的两个法向弹簧和与之平行的一个剪切弹簧，如图 6 所示，弹簧刚度则通过周围岩土层的非线性本构模型参数确定。

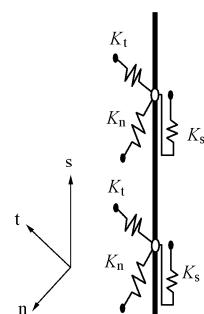


图 6 桩土界面的三向弹簧

Fig. 6 Three-dimensional spring of interface between pile and soil

4 结语

由于岩土层复杂多变以及悬索桥已有基础或新型基础与岩土层的界面的复杂性, 需要在原有规范基础以及机理分析基础上系统开展锚碇基础的深入研究。结合模型试验、现场实测数据及数值模拟分析对不同桩径、桩长、嵌岩深度及土层条件的桩碇组合结构荷载传递机理及变形破坏规律进行研究, 提出大跨度悬索桥桩碇组合结构的设计方法, 丰富悬索桥锚碇的设计体系。基于室内模型试验及依托工程的计算分析, 建立考虑接触及岩土体非线性行为的桩碇组合结构设计计算分析方法, 提出桩碇组合结构优化设计方案, 为新型复合锚碇基础的推广应用提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 陈晓平, 茜平一, 张志勇. 沉井基础下沉阻力分布特征研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 148–152. (CHEN Xiao-ping, QIAN Ping-yi, ZHANG Zhi-yong. Study on penetration resistance distribution characteristic of sunk shaft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 148–152. (in Chinese))
- [2] 徐涛, 李杨, 吴民武, 等. 向家坝水电站围堰基础沉井施工下沉阻力监测[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(8): 92–94. (XU Tao, LI Yang, WU Min-wu, et al. Resistance monitoring in construction of caisson foundation of cofferdam of Xiangjiaba Hydropower Station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(8): 92–94. (in Chinese))
- [3] 李宗哲, 朱婧, 居炎飞, 等. 大型沉井群的沉井下沉阻力监测技术[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2009, 26(2): 43–46, 51. (LI Zong-zhe, ZHU Jing, JU Yan-fei, et al. Monitoring technique for sinking resistance of large caisson group[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2009, 26(2): 43–46, 51. (in Chinese))
- [4] 邓友生, 万昌中, 闫卫玲, 等. 大型圆形沉井结构应力及其周边沉降计算[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 502–508. (DENG You-sheng, WAN Chang-zhong, YAN Wei-ling, et al. Stress of large cylindrical caisson structure and its adjacent settlement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 502–508. (in Chinese))
- [5] 邓燕羚. 深厚软土地区大型桥梁沉井基础的下沉稳定性及地基承载能力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. (DENG Yan-ling. The Research on Sinking Stability and Foundation Bearing Capacity of Caisson Foundation of Large Bridge in Deep Soft Soil Area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese))
- [6] 张计炜. 深厚淤泥软土地区超大沉井下沉施工监测及沉机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. (ZHANG Ji-wei. The Research on Sinking Stability and Foundation Bearing Capacity of Caisson Foundation of Large Bridge in Deep Soft Soil Area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese))
- [7] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 2019. (Specifications for Design of Foundation of Highway Bridges and Culverts: JTG 3363—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [8] 公路悬索桥设计规范: JGJ/T D65—05—2015[S]. 2015. (Specifications for Design of Highway Suspension Bridge: JGJ/T D65—05—2015[S]. 2015. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)