

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.017

整体冲刷对刘五店航道桥锚碇基础稳定性的影响

林路宇^{1,2}, 蔡华忠³, 郭梦雨⁴, 刘宝森¹, 贺瑞⁴, 占晓明⁵

(1. 厦门路桥工程投资发展有限公司; 2. 长安大学公路学院; 3. 福建省交通建设质量安全中心;
4. 河海大学港口海岸与近海工程学院; 5. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司)

摘要: 为研究整体冲刷对厦门刘五店航道桥锚碇承载性能的影响,开展了缩尺模型试验与有限元数值模拟分析。采用均质石英砂模拟锚碇周围土体,在不同冲刷深度工况下,分别进行了单向加载、单向单级加卸载和单向分级递增循环加卸载模型试验,得到了锚碇的荷载-位移曲线;利用模型试验结果对有限元建模方法进行了验证,构建了考虑真实土壤分层与换填加固的原型锚碇三维数值模型。缩尺模型试验结果表明,每增加 $0.33H$ (H 为锚碇埋深)的冲刷深度,锚碇极限承载力降低约14.3%;不同加载方式对极限承载力影响较小。数值模拟结果表明:在原型场地中,当冲刷深度以 $0.2H$ 为阶梯增大时,锚碇极限承载力以约10.3%的速率递减,与缩尺模型试验结果虽数值上略有差异但整体规律一致;随着冲刷加剧,锚碇破坏模式由倾覆为主逐渐演化为以整体滑移为主;在锚碇周围土体本构参数中,内摩擦角对极限承载力的影响最为显著,其次为黏聚力,弹性模量的影响相对较小。

关键词: 锚碇;分体式沉井基础;整体冲刷;物理模型试验;有限元数值模拟;刘五店航道桥

中图分类号: U443.24;TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2026)05-0146-09

Effects of general scour on the stability of the anchorage foundation of the Liuwudian Navigation Channel Bridge

Lin Luyu^{1,2}, Cai Huazhong³, Guo Mengyu⁴, Liu Baosen¹, He Rui⁴, Zhan Xiaoming⁵

(1. Xiamen Road and Bridge Engineering Investment Development Co., Ltd.;

2. School of Highway Engineering, Chang'an University;

3. Fujian Provincial Transportation Construction Quality and Safety Center;

4. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University;

5. Zhejiang Huadong Surveying and Mapping & Engineering Safety Technology Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the influence of general scour on the bearing performance of the anchorage of Xiamen Liuwudian Navigation Channel Bridge, scaled model tests and finite element numerical simulations were conducted. Homogeneous quartz sand was adopted to simulate the soil surrounding the anchorage. Under working conditions with different scour depths, scaled model tests including unidirectional loading, unidirectional single-stage loading-unloading and unidirectional step-increasing cyclic loading-unloading were performed to obtain the load-displacement curves of the anchorage. The finite element modeling method was validated against the test data, and a three-dimensional numerical model of the prototype anchorage, considering actual soil stratification and replacement reinforcement, was established. The scaled model test results reveal that the ultimate bearing capacity of the anchorage decreases by approximately 14.3% with each additional scour depth of $0.33H$ (H denotes the embedded depth of the anchorage), and different loading modes exert slight effects on the ultimate bearing capacity. Numerical simulation results indicate that at the prototype site, the ultimate bearing capacity declines at a rate of about 10.3% when the scour depth increases stepwise by $0.2H$. Although slight numerical differences exist between simulation and test results, their overall variation trends are consistent. As scour intensifies, the failure mode of the anchorage gradually transitions from overturning-dominated to global sliding. Among the constitutive parameters of surrounding soil, the internal friction angle exerts the most significant influence on the ultimate bearing capacity, followed by cohesion, whereas the elastic modulus has a relatively minor effect.

Key words: anchorage; split-type caisson foundation; general scour; physical model tests; finite element numerical simulation; Liuwudian Navigation Channel Bridge

基金项目: 2024年度福建省交通运输科技计划项目(YB202418)

作者简介: 林路宇(1983—),男,高级工程师,硕士,主要从事悬索桥锚碇基础稳定性研究。E-mail:228830117@qq.com

通信作者: 贺瑞(1987—),男,教授,博士,主要从事海底基础动力特性研究。E-mail:herui@hhu.edu.cn

悬索桥凭借其强大的跨越能力,已成为跨越宽阔水域、深邃峡谷等复杂自然条件的关键桥型。悬索桥主缆系统承受的复杂荷载通过锚固系统传递至地基,因此锚碇的承载性能对桥梁整体安全具有决定性影响^[1-3]。在国家海洋强国战略的推动下,悬索桥正在我国东南沿海广泛布局,并向“大跨径、深水、智能化、耐久性”方向发展。

工程实践中,悬索桥常采用重力锚和隧道锚,并在此基础上发展出沉井-桩复合式、齿坎式、根式等多种复合锚碇,以适应复杂的地质条件与多变的荷载环境。现有研究主要聚焦于锚碇基础稳定性评价、桥型比选、承载机理、失稳模式等方面。在研究方法上,通常结合数值模拟与物理模型试验,数值模拟具有分析效率高、可直接基于原型建模、能考虑多种复杂工况等优势,但需引入一定的本构假定与几何简化,其结果可靠性通常依赖试验验证^[4-5];物理模型试验包括室内 1g 模型试验与离心模型试验等,可较为真实地反映结构-地基体系的复杂非线性响应,是揭示新型结构受力机理与验证数值模型的重要手段^[6-7]。二者结合可显著提升锚碇稳定性研究的可靠性。

因大跨径悬索桥建设需求,各类新型锚碇不断涌现,汪明元等^[8]提出了沉井-钻孔灌注桩的复合锚碇结构,并与沉井锚碇对比证实了其优越性;何亚东^[9]基于有限元模型,对齿坎式重力锚的失效模式和最大承载力进行了分析;Wu 等^[10]通过双轴剪切蠕变试验研究了软岩上带凹槽重力锚的长期稳定性,发现凹槽的抗滑作用有时间依赖性;Cui 等^[11]系统研究了根式桩锚碇基础的静力性能,并推导了锚碇水平位移引起的主塔位移、主梁挠度和内力变化的解析公式。锚碇结构的失稳破坏大致包含滑移破坏、倾覆破坏、地基剪切破坏和复合破坏等形式,取决于荷载水平、岩土性质以及结构设计^[12-13],鲁志强等^[14]发现齿坎和回填均能提升锚碇承载性能,相比于平底锚碇的滑移破坏,齿坎将使锚碇的破坏形式变为齿坎附近岩体的剪切破坏和锚碇的倾覆破坏。

目前,重力式锚碇的研究多集中于规则矩形或椭圆形基础,而对采用分体式矩形沉井基础的重力式锚碇研究相对有限,且现有研究多针对常规尺寸或中小型锚碇,对于深埋、大尺寸的锚碇,其受力复杂程度远超常规工程,相关研究尚不充分。此外,针对冲刷作用下锚碇承载性能及其影响因素的研究仍相对缺乏,不足为承载力的估算提供理论支撑。

针对分体式沉井深大锚碇受力状态复杂且在海域中易受到冲刷导致其服役性能退化的问题,本文采用物理模型试验和数值模拟相结合的方法,对极端冲刷下的刘五店航道桥分体式沉井深大锚碇基础的承载力进行分析,并对影响锚碇承载力的关键参数进行了敏感性分析。

1 工程概况

厦门第三东通道是推动厦门岛内外一体化发展、构建东南沿海综合交通枢纽的重大交通基础设施,刘五店航道桥为其控制性工程,是福建省内跨径最大的桥梁,也是国内少数离岸式海中悬索桥之一。主桥采用三跨吊五跨连续悬索桥方案,桥跨布置为 130 m+380 m+928 m+380 m+130 m,其结构示意图 1。

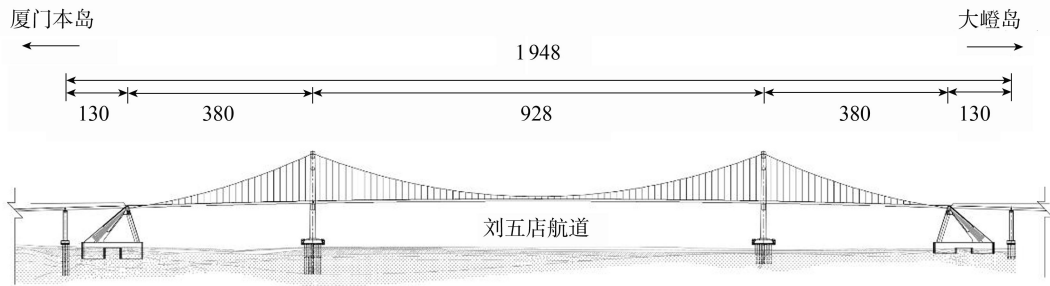


图 1 刘五店航道桥结构示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of Liuwudian Navigation Channel Bridge(unit:m)

选取地质条件相对不利、风险较高的西锚碇作为研究对象。西锚碇采用分体式矩形沉井基础,前、后沉井平面尺寸均为 66 m×48 m(横桥向×顺桥向),高度均为 33.9 m,角隅采用半径为 3.8 m 的圆角过渡;前后沉井之间通过宽 29.5 m、高 11.75 m 的钢壳混凝土系梁连接。锚碇整体宽度为 125.5 m,高度为 74.1 m,全桥设两根主缆,锚碇散索鞍处主缆加载中心距为 45.5 m,锚索与水平面夹角为 10.08°。

开挖范围内地层以软土与风化岩为主,基础持力层主要为砂土状强风化花岗岩,局部为全风化花岗岩,通过换填加固进行局部加强,锚碇埋深 H 约 23.4 m。

2 缩尺模型试验

2.1 模型参数

2.1.1 相似理论及相似比的推导

通过几何相似比 C_l 、重力加速度相似比 C_g 和容重相似比 C_γ 3 个基础比尺,可进行其他变量相似关系的推导。本文试验中,综合考虑原型尺寸(125.5 m)与实验室土槽尺寸,确定 $C_l=400$;试验在 $1g$ 重力场中进行, $C_g=1$;模型砂容重 (15.18 kN/m^3) 与原型土层 ($17.17\sim18.74\text{ kN/m}^3$) 相近,取 $C_\gamma\approx1$ 。

2.1.2 模型土的选择

鉴于分层土难以准确模拟各土层的相对刚度比,易对破裂面的自然发展产生干扰,影响试验结果的可靠性,故采用均质土替代原型多土层。同时,本文试验主要研究锚碇的极限承载状态,重点关注土体强度参数,弹性模量影响较小,其取值无需严格遵循相似准则中难以实现的弹模比。此外,在 $1g$ 模型试验中,黏聚力需按原型土的 $1/400$ 进行缩放,而内摩擦角按 $1:1$ 保持不变,导致合适的黏性土难以选取。为此,选用黏聚力近似为零、内摩擦角与原型相近的均质石英砂,有效解决了强度参数缩放不协调的问题,确保了试验结果与原型工程的可比性。通过多方案比选,选用密实度约 88%、粒径 $0.2\sim0.6\text{ mm}$ 、中值粒径约 0.42 mm 的石英砂作为模型土。原型土与模型土内摩擦角分别为 $21.5^\circ\sim30^\circ$ 、 25° 。

内摩擦角是控制极限承载力的关键强度参数,本文专注于锚碇极限状态的研究,因此采用均质石英砂模拟原型地基具有一定的合理性。

2.1.3 模型锚碇的设置

模型锚碇尺寸如图 2 所示,模型体积为 4.15 L,质量为 10.4 kg,重力 G 为 101.92 N,在锚碇底部无砂土埋置(裸露)工况下进行加载试验,此时承载力主要由底面与砂土间摩擦阻力提供,试验获得的极限承载力约为 $0.33G$,计算可得锚底的等效摩擦系数约为 0.33,与工程中基底换填后的摩擦系数不小于 0.31 的要求相符。

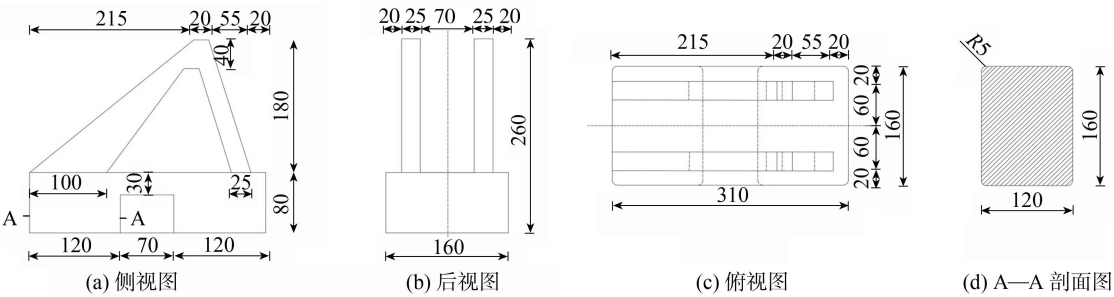


图 2 模型锚碇尺寸参数(单位:mm)

Fig. 2 Dimensional parameters of model anchorage (unit:mm)

2.1.4 $1g$ 模型试验中尺度效应的影响

尺度效应指缩尺模型中,材料力学性质与物理现象无法严格按比例推演至原型。在 $1g$ 模型试验中,模型土体自重应力远低于原型,导致土体剪胀增强,峰值内摩擦角偏高,从而使抗剪强度高于原型高应力状态下的真实值。因此, $1g$ 模型试验不宜直接定量外推原型极限承载力,其价值在于定性揭示冲刷深度对锚碇承载力的影响规律,并为原型数值模拟提供建模依据。

2.2 试验装置

试验在河海大学港航结构实验室的近海岩土工程实验室内 $1.0\text{ m}\times1.0\text{ m}\times1.0\text{ m}$ 的土槽中进行,为减小边界效应的影响,土体在水平方向宽度应大于 3~5 倍的锚碇特征宽度,底部边界距锚碇基底应大于 2~4 倍的锚碇埋深,模型锚碇特征宽度 310 mm、最大埋深 60 mm。锚碇基底距土槽底部 940 mm,远超要求,底部边界效应可忽略。侧边界方面,土体水平方向宽度约为锚碇特征宽度的 3 倍,锚碇居中,前缘距侧壁 345 mm。根据 Wang 等^[15]提出的临界宽度概念,结合模型土内摩擦角为 25° ,算得锚碇前侧土体被动破坏楔体的最大

水平延伸长度约 94 mm,远小于前缘至侧壁距离,滑动破裂面可完全发展,侧边界效应可忽略。

试验中,在锚碇散索鞍位置焊接一刚性横梁,缆索固定于横梁中部,经定滑轮变向后,通过砝码系统模拟主缆荷载的施加,试验采用 10 N 和 4 N 两级砝码,缆索加载方向与水平方向夹角为 10°。设置位移传感器捕获锚碇在加载时的位移和转角,并通过 DH3820N 动态采集仪采集数据,位移传感器量程为 20 cm,灵敏度为 0.2 mV/mm,以半桥电路接入动态采集仪;信号采集器量程为±0.05,最小分辨率为 0.5×10^{-6} [16]。试验装置如图 3 所示。

2.3 试验方案

物理模型试验的研究内容包括两部分:一是改变锚碇埋深,研究冲刷深度对锚碇极限承载力的影响;二是校准数值模型,得到可靠的建模方法后,建立原型锚碇模型进行模拟分析。

为最大化考虑冲刷深度的影响,假设锚碇周围发生整体冲刷,分别设置了无冲刷、冲刷深度 0.33*H* 和 0.66*H* 共 3 种工况,各工况下依次施加不同的荷载:①T1 组单向加载,用于确定不同冲刷深度下锚碇极限承载力;②P1 组单向单级加卸载,用于研究滞回特性与残余变形;③P2 组单向分级递增循环加卸载,用于考察循环荷载下土体刚度退化及累积位移。共得到 9 组物理试验方案,依次记为 T1-1、T1-2、T1-3、P1-1、P1-2、P1-3、P2-1、P2-2、P2-3 (编号中“-”后的数字 1、2、3 分别表示无冲刷、冲刷深度 0.33*H* 和 0.66*H* 工况)

2.4 试验结果

试验中先逐级增加砝码至锚碇失稳,随后进行单向单级加卸载和单向分级递增循环加卸载试验。每次试验前均重新装填砂土。图 4 为各工况下锚碇模型的荷载-位移曲线(图中 *F* 为施加的主缆拉力,*G* 为锚碇重力,*U* 为锚碇散索鞍处的位移,*B* 为锚碇宽度,以 *F*/*G*、*U*/*B* 分别将主缆拉力和锚碇位移进行无量纲化)。由图 4 可知,各冲刷深度对应的极限承载力分别为 0.57*G*、0.51*G*、0.41*G*;不同加载方式下,锚碇的极限承载力基本保持不变。冲刷深度 0.66*H* 工况下,荷载-水平位移曲线在卸载过程中会出现明显的折角,原因是随着荷载减小,锚碇重心位置逐渐恢复,残余变形由荷载控制向自重控制转化。在冲刷深度较浅工况下,单向分级递增循环加卸载在摩擦力承载达到极限后出现明显的刚度退化,可见循环加卸载会引起砂土刚度的衰减。

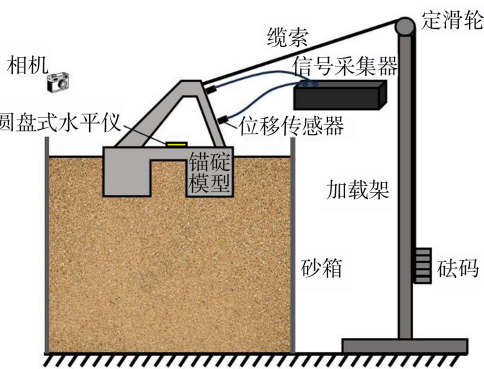


图 3 试验装置示意图
Fig.3 Schematic diagram of the experimental setup

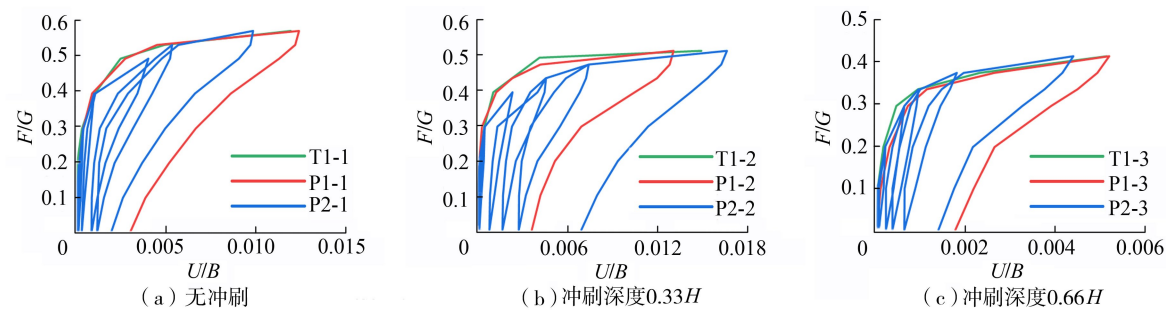


图 4 不同工况下 3 种加载方式锚碇散索鞍处的荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves at the splay saddle of the anchorage under three loading patterns and different working conditions

由图 5 可以看出,锚碇最大的水平位移和残余位移均出现在冲刷深度 0.33*H* 的工况中;锚碇在小变形阶段的初始刚度随冲刷深度变化不显著,主要受锚碇自重控制;随冲刷加剧,荷载-位移曲线更早进入屈服阶段,极限承载力逐步降低,若按线性近似,每增加 0.33*H* 的冲刷深度会导致锚碇极限承载力降低约 14.3%。

3 有限元数值模拟

3.1 建模方法可靠性验证

根据物理模型试验构建三维数值模型,对 3 种冲刷深度工况进行计算,提取锚碇散索鞍处的荷载-位移

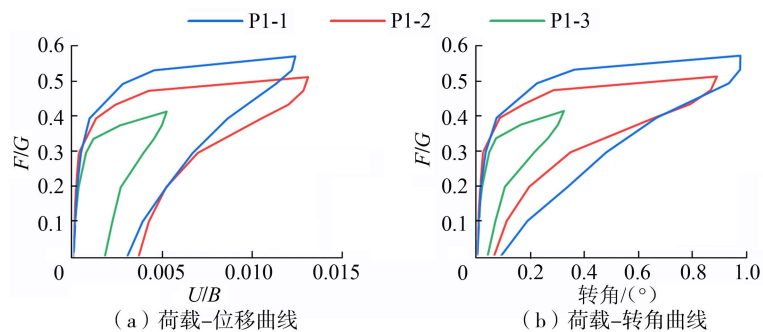


图 5 不同工况下锚碇散索鞍处的荷载-位移与荷载-转角曲线

Fig. 5 Load-displacement and load-rotation curves at the splay saddle of anchorage under different working conditions

曲线与物理模型试验结果对比,结果如图 6 所示,可见数值模拟与物理模型试验得到的荷载-位移曲线在弹性阶段、屈服阶段和破坏前后的总趋势均吻合较好,极限承载力和对应位移亦较为接近。说明本文采用的本构模型、建模流程、边界条件及接触模拟方法能够合理反映锚碇-地基体系的受力特征,为后续研究提供了可靠的建模依据。

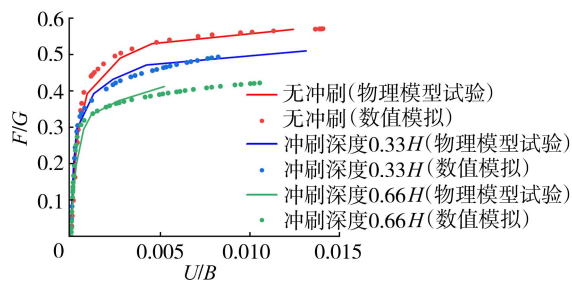


图 6 不同工况下锚碇散索鞍处荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-displacement curves at anchorage splay saddle under different working conditions

3.2 原型锚碇数值模型的构建

基于原型建立三维数值模型,如图 7 所示(图中 γ 为容重, E 为弹性模量, φ 为内摩擦角)。数值模型由锚碇、换填加固混凝土板和锚碇周围土体(共 7 层)组成。土体采用 Mohr-Coulomb (MC) 本构准则模型,MC 本构准则虽在描述土体屈服前非线性刚度衰减上有局限,但本文主要研究极限状态,极限承载力主要由土体抗剪强度参数控制,该本构准则可精准刻画土体宏观剪切破坏包络线,且其数值收敛性更好,完全适用于本文研究。



图 7 原型锚碇数值模型

Fig. 7 Numerical model of the prototype anchorage

西锚基底换填加固后,底部摩擦系数不小于 0.31,在模型中考虑为锚碇底部相互分离的两块混凝土板,锚碇和混凝土板均采用线弹性本构模型。土体尺寸为 628 m×330 m×130 m,采用 MC 本构准则模型。模型采用八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R),整体共计有 161804 个节点、150450 个网格。由于土体模型尺寸较大,因此采用渐变过渡型网格,经网格密度可靠性验证,当前网格密度满足试验要求。

主缆荷载与水平方向夹角为 10.08° ,锚碇顶部两根主缆之间的水平距离为 45.5 m ,主缆拉力以面荷载的形式施加于前锚室底板上。模型中切向接触采用库仑摩擦模型(罚函数形式),法向接触采用“硬接触”。

整个分析过程分为 3 步:①地应力初始平衡。在未激活锚碇与换填加固混凝土板的情况下建立初始地应力场。②坑内开挖与结构激活。模拟基坑内土体开挖并激活锚碇与换填加固混凝土板单元。③主缆荷载加载分析。施加主缆水平拉力,直至体系进入极限状态。在原型三维锚碇模型基础上,设置冲刷深度、基底摩擦系数及土体材料参数变化的多个工况,用于开展参数敏感性分析。

3.3 模拟结果与分析

3.3.1 无冲刷工况

JTG/T D65-05—2015《公路悬索桥设计规范》规定运营阶段锚碇的水平位移不宜大于主跨跨径的 0.01% ,竖向位移宜不大于主跨跨径的 0.02% 。本桥主跨跨径为 928 m ,对应水平与竖向位移限值分别为 92.8 mm 和 185.6 mm 。数值分析结果如图 8 所示,锚碇在主缆拉力作用下以水平位移为主,竖向变形较小,因此可采用散索鞍水平位移达到 92.8 mm 时对应的主缆拉力作为锚碇在运营工况下的允许承载力,其值约为 $0.047G$ 。锚碇失稳破坏时,对应的极限主缆拉力约为 $0.5G$ 。

极限主缆拉力下锚碇状态如图 9 所示,可见极限主缆拉力导致锚碇前端下沉、后端上拔,整体绕基底前侧向前倾覆,最大位移出现在锚顶前缘,锚碇前锚室、散索鞍支墩、前后沉井系梁处应力水平较高,沉井基础箱体应力相对较小,在结构设计中应适当提高上述关键部位的刚度。

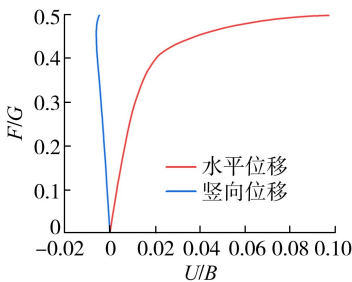


图 8 无冲刷工况下锚碇散索鞍处荷载-位移曲线
Fig.8 Load-displacement curve at the splay saddle of anchorage under no scour condition

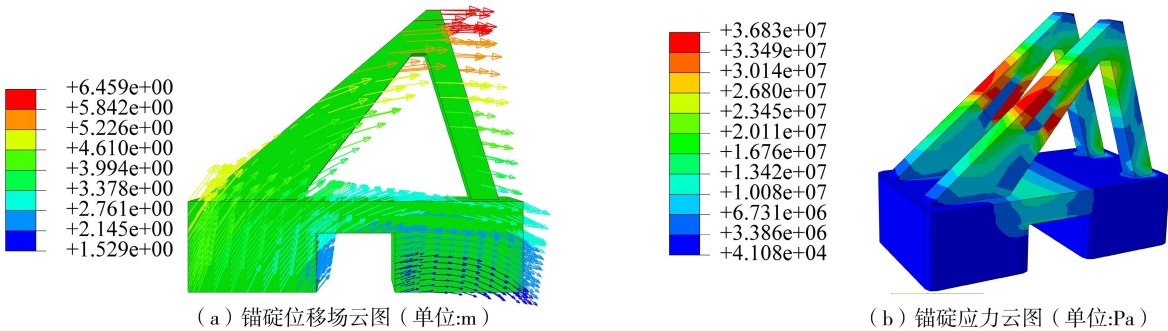


图 9 极限主缆拉力下锚碇状态
Fig.9 Anchorage behavior under ultimate main cable tension

锚碇周围土体的位移、应力与等效塑性应变见图 10,极限主缆拉力作用下,锚碇前侧上部土体隆起,基底前缘形成凹陷,锚碇后侧土体有明显下沉;土体最大应力集中在锚碇前趾处的基底接触区;随着荷载增加,塑性区逐渐扩展并最终贯通,导致地基剪切破坏。

3.3.2 参数敏感性分析

在原型数值模拟基础上,进行锚碇极限承载力参数分析,分析过程中只单独改变某一参数,分别研究冲刷深度、锚碇底部摩擦系数、锚碇四周土体材料参数(内摩擦角、弹性模量、黏聚力)对锚碇承载性能的影响,分析方案见表 1。

表 1 数值模型分析方案
Table 1 Numerical analysis schemes

冲刷深度		摩擦系数		内摩擦角		弹性模量		黏聚力	
分析组次	参数取值	分析组次	参数取值	分析组次	参数取值	分析组次	参数取值	分析组次	参数取值
R-1	$0.2H$	S-1	0.1	T-1	φ_0	U-1	E_0	V-1	c_0
R-2	$0.4H$	S-2	0.2	T-2	$1.2\varphi_0$	U-2	$1.2E_0$	V-2	$1.2c_0$
R-3	$0.6H$	S-3	0.3	T-3	$1.2^2\varphi_0$	U-3	1.2^2E_0	V-3	1.2^2c_0
R-4	$0.8H$	S-4	0.4	T-4	$1.2^3\varphi_0$	U-4	1.2^3E_0	V-4	1.2^3c_0
R-5	$1.0H$	S-5	0.5	T-5	$1.2^4\varphi_0$	U-5	1.2^4E_0	V-5	1.2^4c_0

注: φ_0 、 E_0 、 c_0 分别为基准内摩擦角、基准弹性模量和基准黏聚力。

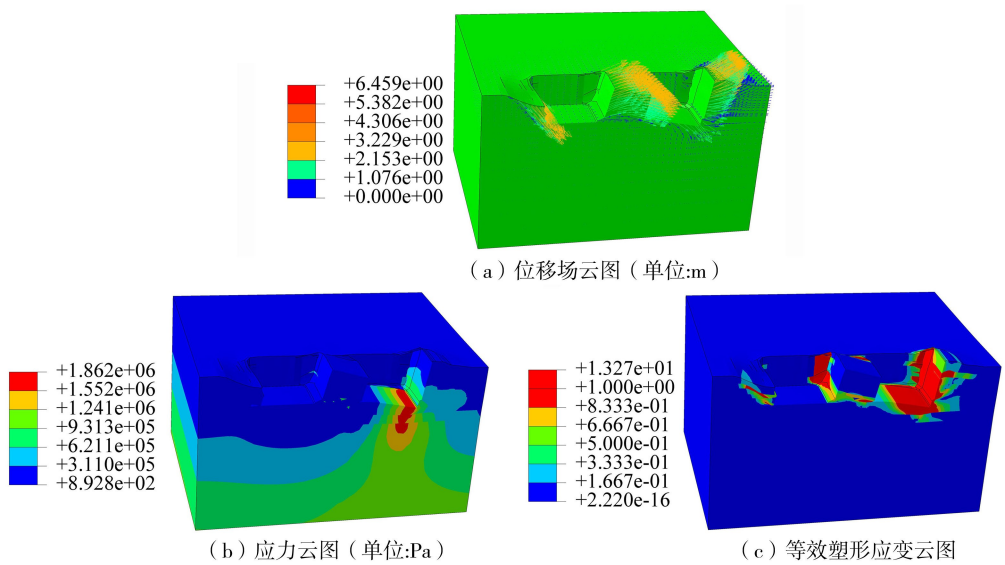


图 10 极限主缆拉力下锚碇周围土体状态

Fig. 10 Behavior of surrounding soil around the anchorage under ultimate main cable tension

图 11 为不同工况下锚碇散索鞍处的荷载-位移曲线,随着冲刷深度的增加,荷载-位移曲线初始刚度变化不大,但更早进入屈服阶段,极限承载力单调降低(冲刷深度为 $0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ 、 $1.0H$ 时极限承载力依次为 $0.450G$ 、 $0.413G$ 、 $0.370G$ 、 $0.329G$ 、 $0.291G$),冲刷深度每增加 $0.2H$,极限承载力以约 10.3% 的速率减小。物理模型试验中,冲刷深度每增加 $0.33H$,锚碇的极限承载力以大约 14.3% 的速率减小,若将物理模型试验结果线性折算,每 $0.2H$ 冲刷深度导致极限承载力减小约 9.0% ,略低于原型数值模拟中约 10.3% 的衰减速率。这种差异可以从锚碇极限抗力的组成角度分析:物理模型试验采用了均质松散的石英砂,其前侧提供的土压力有限,极限抗力主要由基底摩擦主导,故对冲刷深度的敏感度相对较小;而原型锚碇前侧土体的强度较高,提供了较大的侧向抗力,因此,当发生同等比例的冲刷时,前侧被动土压力的减小更为明显,从而表现出更高的衰减速率。物理模型试验与数值模拟中,冲刷深度对极限承载力的影响存在数值差异,但整体规律是一致的。

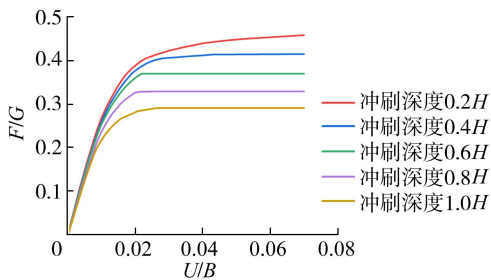


图 11 不同工况下锚碇散索鞍处的荷载-位移曲线
Fig. 11 Load-displacement curves at the splay saddle of the anchorage under different working conditions

为了印证冲刷对锚碇破坏模式的影响,本文提取了不同工况下极限破坏时锚碇的位移矢量场进行分析。浅冲刷工况下(图 12(a)(b)),锚碇侧向土抗力对锚碇承载力贡献较大,这时锚碇顶部有较大的位移,但土

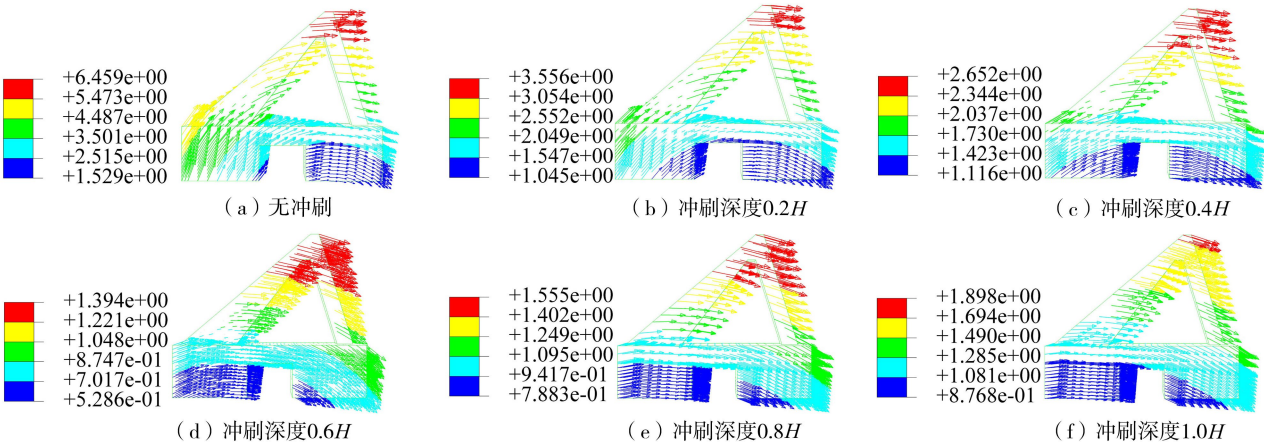


图 12 不同工况下极限破坏时锚碇位移矢量场(单位:m)

Fig. 12 Displacement vector field of the anchorage at ultimate failure under different working conditions (unit: m)

体对锚碇下部的水平位移限制较强,使得锚碇上下位移差值较大,锚碇后侧的竖向位移明显大于水平位移,旋转中心位于前侧基底,锚碇向前倾覆。中等冲刷工况下(图 12(c)(d)),侧向土抗力约束减弱,锚碇上下位移差值逐渐缩小,锚碇后侧位移趋于水平,可见锚碇的滑移趋势越来越强。深冲刷工况下(图 12(e)(f)),侧向土抗力约束极弱,锚碇上下位移幅值趋于一致,锚碇后侧位移近乎水平,旋转中心持续后移,系统的水平抗力几乎完全由底部摩擦力承担,破坏模式由倾覆变为整体滑移。

由数值模拟结果(图 13)可知,基底摩擦系数 $\mu=0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$ 时,锚碇极限承载力依次为 $0.381G,0.446G,0.497G,0.508G,0.514G$,可见当摩擦系数以 0.1 为阶梯增加且 $\mu<0.3$ 时,锚碇极限承载力以约 14.0% 的速率增大;当 $\mu>0.3$ 时,极限承载力增幅显著减小,平均增幅仅 1.7% 。这表明基底摩擦系数在一定范围内对提高锚碇承载能力十分有效,但当摩擦系数达到约 0.3 后,继续提高则增益有限。工程设计中,可将 $\mu\approx0.3$ 视为基底摩擦力利用的“经济上限”。

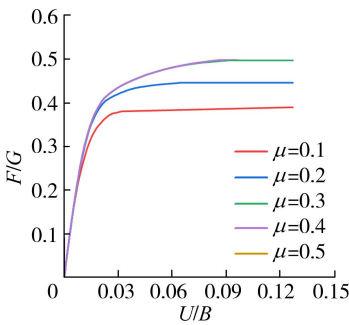


图 13 不同摩擦系数下锚碇荷载-位移曲线
Fig. 13 Load-displacement curves of the anchorage under different friction coefficients

在原型无冲刷工况下,分别对周围土体的内摩擦角、弹性模量和黏聚力进行单参数敏感性分析,结果见图 14。由图 14 可知:①当土体内摩擦角以 20% 的幅度逐步增大时,对应极限承载力依次为 $0.442G,0.473G,0.500G,0.523G,0.551G$ 。平均来看,内摩擦角每提高 20% ,极限承载力约提高 5.71% ,说明内摩擦角作为控制土体抗剪强度的主要指标,对锚碇极限承载力具有最显著的影响。②土体弹性模量同样以 20% 幅度递增时,对应极限承载力依次为 $0.493G,0.496G,0.500G,0.504G,0.506G$,土体弹性模量的增大对极限承载力的提升幅度仅为 0.67% ,弹性模量主要影响体系的变形刚度而对极限状态贡献有限。③当黏聚力以 20% 的幅度递增时,极限承载力依次为 $0.491G,0.495G,0.500G,0.507G,0.515G$,平均提升幅度仅为 1.2% ,介于内摩擦角与弹性模量之间。

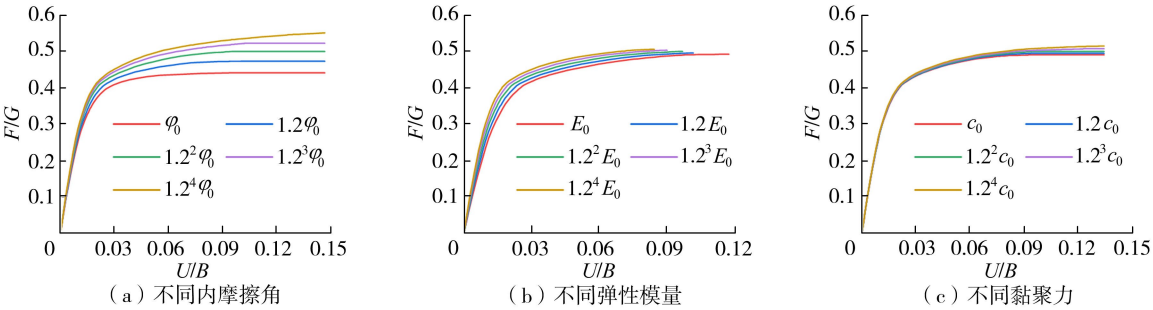


图 14 不同土体材料参数下锚碇荷载-位移曲线
Fig. 14 Effect of soil-rock material parameters on load-displacement curves of anchorage

4 结 论

- a. 随着冲刷深度增加,荷载-位移曲线屈服点提前出现,极限承载力显著降低。每当冲刷深度增加 $0.33H$,极限承载力降低约 14.3% 。3 种加载方式(单向加载、单向单级加卸载、单向分级递增循环加卸载)对极限承载力影响较小,但循环加卸载会导致砂土刚度衰减。
- b. 极限工况下锚碇整体向前倾覆,前锚室、散索鞍支墩、系梁处应力较高,沉井箱体应力较小。锚碇前侧土体隆起、后侧土体下陷,塑性区逐渐发展并最终贯通导致地基剪切破坏。
- c. 冲刷深度以 $0.2H$ 为阶梯增大时,锚碇极限承载力以约 10.3% 的速率降低,冲刷对锚碇稳定性具有显著不利影响。随着冲刷加剧,锚碇破坏模式逐渐由浅冲刷工况下的倾覆破坏向深冲刷工况下的整体滑移破坏转变,冲刷削弱了锚碇的被动土抗力与抗倾覆能力。
- d. 提高锚碇底部摩擦系数可显著提升其极限承载力,但当摩擦系数达到某一阈值后,其对承载力的提升效果趋于平缓。在土体参数中,内摩擦角是影响锚碇极限承载力的首要参数,黏聚力次之,弹性模量主要影响工作状态下的变形,对极限承载力影响较小。

e. 本文基于整体冲刷假定,未考虑实际局部冲刷坑的非对称形态、坡面几何及局部深槽特征,因此所得定量结论外推至局部冲刷工况时需结合冲刷坑形状进行修正。

参考文献:

[1] 叶文海,魏奇芬,叶恒梅.大跨径悬索桥锚碇基础设计与计算发展综述[C]//第二十届全国桥梁学术会议论文集.武汉:中国土木工程学会桥梁与结构工程分会,2012:172-178.

[2] 张志恒,梁铎.深水锚碇基础概念设计[J].内蒙古科技与经济,2013(11):101. (Zhang Zhiheng, Liang Duo. Conceptual design of deepwater anchorage foundation[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2013(11):101. (in Chinese))

[3] 林荣安.悬索桥重力式锚碇系统受力分析及其优化[D].西安:长安大学,2008.

[4] 苏静波,楼淑君,霍瑞丽.锚碇沉井基础稳定性的规范算法与有限元方法的对比[J].盐城工学院学报(自然科学版),2008,21(4):4-7. (Su Jingbo, Lou Shujun, Huo Ruili. Comparison between normative method and finite element method for stability of open caisson anchorage foundation[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science Edition), 2008, 21(4):4-7. (in Chinese))

[5] 朱晓文,赵启林,朱凯,等.润扬大桥北锚碇基础三维数值仿真分析[J].东南大学学报(自然科学版),2005,35(2):293-297. (Zhu Xiaowen, Zhao Qilin, Zhu Kai, et al. 3-D simulation of Runyang suspended bridge's north anchorage[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2005, 35(2):293-297. (in Chinese))

[6] 李永盛.江阴长江公路大桥北锚碇模型试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),1995,23(2):134-140. (Li Yongsheng. Model test study on north anchorage of Jiangyin Yangtze River Bridge[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1995, 23(2):134-140. (in Chinese))

[7] 李家平,张子新,黄宏伟,等.宁波庆丰大桥锚碇室内相似模型试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(8):1011-1016. (Li Jiaping, Zhang Zixin, Huang Hongwei, et al. Research on similarity model test of anchorage of Qingfeng suspension bridge in Ningbo[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(8):1011-1016. (in Chinese))

[8] 汪明元,赵小晴,龚晓南,等.沉井-钻孔灌注桩复合锚碇受力变形特性试验研究[J].建筑结构,2025,55(13):142-147. (Wang Mingyuan, Zhao Xiaoqing, Gong Xiaonan, et al. Experimental study on deformation and mechanical characteristics of caisson-bored pile composite anchorage[J]. Building Structure, 2025, 55(13):142-147. (in Chinese))

[9] 何亚东.大跨度悬索桥齿坎式重力锚碇承载机理和稳定性研究[D].成都:西南交通大学,2021.

[10] Wu C J, Lai Y J, Cao X J, et al. Long-term stability of gravity anchorage with notched sill for suspension bridge on soft rock ground[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2020, 570(2):022038.

[11] Cui Mingzhu, Ren Weixin, Yin Yonggao. Numerical analysis and field load testing of a suspension bridge with a root pile anchorage[J]. Structures, 2021, 34(7):1373-1382.

[12] 崖岗,韩冬冬,石海洋,等.虎门二桥坭洲水道桥重力式锚碇基础稳定性研究[J].公路,2017,62(4):129-135. (Ya Gang, Han Dongdong, Shi Haiyang, et al. Stability study on gravity anchorage foundation of Nizhou Waterway Bridge of Humen Second Bridge[J]. Highway, 2017, 62(4):129-135. (in Chinese))

[13] 李家平.软土地区悬索桥重力式锚碇稳定性和变位研究[D].上海:同济大学,2006.

[14] 鲁志强,陈贺,张永华,等.基于数值仿真的重力式锚碇承载机制研究[J].公路交通科技,2021,38(8):67-74. (Lu Zhiqiang, Chen He, Zhang Yonghua, et al. Study on load-bearing mechanism of gravity anchorage based on numerical simulation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(8):67-74. (in Chinese))

[15] Wang Xu, Dang Faning, Cao Xiaoshan, et al. Solution for active and passive earth pressure on rigid retaining walls with narrow backfill[J]. Applidciences, 2025, 15(4):1750-1750.

[16] 袁煜晖,贺瑞,朱元张.水平循环荷载下嵌岩单桩基础受力特性试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):97-106. (Yuan Yuhui, He Rui, Zhu Yuanzhang. Experimental study on characteristics of rock-socketed monopile under lateral cyclic loads[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6):97-106. (in Chinese))

(收稿日期:2026-01-23 编辑:熊水斌)