水上异形现浇墩台支撑体系关键施工技术

彭志鹏
（中交一航局第五工程有限公司）

摘　要：为解决水上异形现浇墩台桩基分布不规则、结构形式复杂、单次浇筑方量大、底模支撑体系受力复杂及施工安全风险高等问题，以几内亚力拓西芒杜港口项目为背景，将异形结构分解为多个规则单元，分层分块施工。支撑体系采用钢抱箍+主梁+模块化次梁+木方/模板组成。通过有限元软件对支撑体系进行受力分析，优化支撑体系；墩台布设吊装孔，采用门式架+倒链悬吊下落支撑体系至水面，浮筒辅助浮运拆除。结果表明，该支撑体系安全性高、安装与拆除便捷、桩身损伤小，可在类似水上异形现浇结构施工中推广使用。

关键词：高桩码头；异形现浇墩台；支撑体系；模块化；钢抱箍；浮筒

0　引言

水上异形墩台具有降低水流阻力、减少结构风险、节省材料、降低工程成本等特点，在水上工程应用中日益增多。此类结构底标高变化大、桩基分布不均、跨度大、水上作业环境复杂，因此其底部支撑体系比常规墩台复杂。吊筋法、牛腿法等传统支撑方式存在对桩身损伤大、材料周转率低、适用荷载有限等问题，难以实现安全、高效、经济的综合目标。

近年来，国内在大体积现浇墩台施工中，普遍采用分块、分层施工以降低一次浇筑荷载、减少支撑体系风险。同时部分专家学者对水上异形墩台支撑体系和钢抱箍开展了研究，马礼明等[1]提出了钢抱箍在海上现浇大体积墩台底模支撑中的应用；古松等[2]对钢抱箍的受力特性和承载力进行分析研究。

本文以几内亚力拓西芒杜港口项目转运站现浇墩台施工为例，将复杂不规则的墩台分解为多个规则结构，按分解的部位由下至上分块逐层施工，针对异形结构单独设计支撑体系。通过支撑体系设计、施工与拆除全过程研究，总结出一套适用于水上异形墩台支撑体系的施工技术，以期为类似工程施工提供参考。

1　工程概况

1.1　工程概述

几内亚力拓西芒杜港口项目是几内亚西芒杜铁矿矿区系列基础设施的组成部分，工程建设 3 个 4.18 万 DWT 矿石泊位码头和 1 座接岸引桥。码头泊位和引桥之间设置矿石码头转运站。转运站现浇墩台长 37.5 m，宽 43.1 m，厚度 2.03~4.33 m，平面面积 1 589.7 m^2，其基础由 31 根钢管桩组成，钢管桩布置不规则，由多个异形结构（水池、靠船构件、现浇横梁、现浇墩台）组成，墩台断面图如图 1 所示。

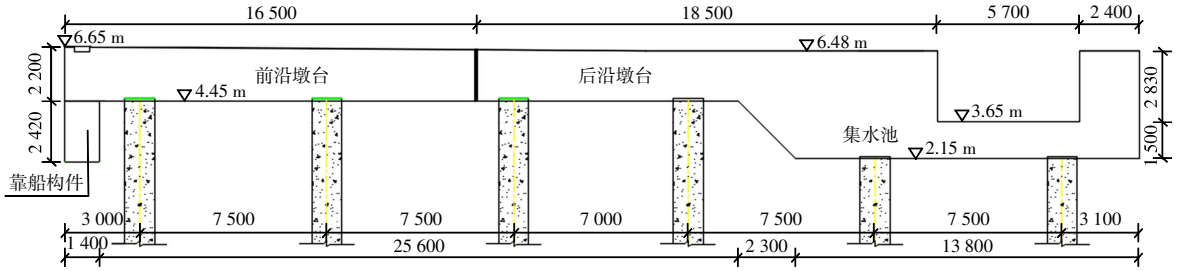


图 1　墩台断面图（mm）

1.2　技术难点及应对措施

1）异形结构多，支撑体系复杂多变。墩台由下卧式水池、靠船构件、现浇横梁等多个异形结构组成，结构底标高多变，支撑体系需根据不同部位进行针对性设计。将复杂异形墩台按结构形式与底标高进行分解，采用分层分块施工思路，对各施工区域分别进行支撑体系设计。

2）施工荷载大，安全要求高。墩台桩基横向

最大跨度 8.5 m，纵向最大跨度 7.5 m，结构最厚部位达 4.33 m，支撑体系承载力、刚度、稳定性要求高，传统牛腿法对桩体损伤较大，设计难度大。采用钢抱箍作为核心承重构件，上部铺设型钢主梁、次梁组成受力体系，以满足大跨度、大荷载施工要求；支撑体系次梁采用模块化简支安装方式，加快施工效率，降低海上施工风险。

3）墩台面积大，混凝土浇筑强度大。现浇墩台平面面积 1 589.7 m^2，混凝土总量 3 955.3 m^3，单次浇筑方量大，受泵车覆盖能力和水上施工条件限制，无法保证连续浇筑，若组织不当易产生施工冷缝，影响结构整体性。将墩台分为前沿墩台和后沿墩台 2 部分依次施工，将施工缝设置在受力最小部位。各墩台分层浇筑，第 3 层浇筑厚度最大，层厚为 0.8 m，单次最大浇筑方量 800 m^3。新旧混凝土结合面进行凿毛处理，清除浮浆和松动石子，并用淡水冲洗干净、充分湿润。浇筑时，在施工缝处喷涂界面剂，以确保新旧混凝土结合紧密。

4）支撑体安拆难度大，施工安全风险高。墩台混凝土浇筑完成后，底部支撑体系处于封闭水上环境，型钢构件无法采用大型起重设备整体拆除，拆除空间受限，构件重量大、作业工序多，施工组织与安全控制难度较高。拆除时采用倒链与门式架将支撑体系整体悬吊下落至水面，将型钢支撑进行分解，用浮筒助浮运至可吊装区域。

2　墩台分层分块与支撑体系设计

2.1　分层分块设计理念

采用分层分块的设计思路，将复杂墩台按结构形态与底标高分解为横梁、水池底板、前沿墩台、后沿墩台、靠船构件 5 个独立施工区域，分阶段进行施工。各区域划分独立支撑单元，单独计算受力。水池底板、前沿墩台、后沿墩台等一次浇筑面积大的区域，控制首层浇筑高度为 0.5 m，减少支撑承受的瞬时面荷载，确保支撑体系承载力、刚度、稳定性在不同施工阶段满足要求。

2.2　支撑体系比选

水上现浇构件常用的底模支撑方法主要有吊筋法、牛腿法和抱箍法[3]。表 1 对 3 种支撑体系进行综合分析比较，钢抱箍支撑法对桩身母材零损伤，对桩身防腐损伤小；安装过程机械化程度高，工艺简便，适用于大荷载支撑体系。经比选，本项目采用抱箍法支撑体系。

表 1　支撑体系对比分析

施工工艺	对桩身影响	承载能力	工序复杂程度	施工效率
吊筋法	微小	低	复杂	中等
牛腿法	破坏涂层	高	简单	中等
抱箍法	可忽略	高	简单	高

2.3　支撑系统

钢抱箍支撑体系由钢抱箍、主梁、模块化次梁、木方及模板组成。抱箍通过高强螺栓紧固在桩身上，作为主要承重节点，将上部结构荷载通过摩擦力传递至桩基。主梁放置在钢抱箍牛腿上，次梁按照一定间距垂直布置在主梁上，二者共同构成空间受力骨架，次梁上铺设木方与木模板。支撑体系传力路径明确，实现荷载均匀分配。

主梁直接搁置在钢抱箍的牛腿上，使用直径 25 mm 精轧螺纹钢将桩基两侧的主梁对拉。主梁与次梁之间采用简支搁置方式，次梁直接布置于主梁上，在主、次梁搭接位置的四角增加用钢板制成的 V 形铁片限位，V 形铁片与次梁点焊固定，拆除时只需敲击即可。

3　底模支撑设计

3.1　关键结构设计

1）主梁分段安装与设计

主梁采用双拼 56b 工字钢焊接组成，沿桩基大跨度方向安装。主梁腹板中心位置每隔 2 m 横向焊接 1 个吊耳，吊耳尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm，中间开孔直径 40 mm，作为浮筒挂点。主梁分段制作，单节主梁最大重量不超过 6 t，满足起重吊装要求。主梁接头设置在抱箍牛腿正上方。横梁靠船构件的凸出横梁为 650 mm，对横梁前沿主梁设计成 Z 字形结构，使其完美契合结构底线。靠船构件前沿部分主梁置于结构底部，主梁后沿采用双拼 20a 工字钢立柱固定主梁，防止主梁倾覆，主梁向结构外侧外伸 1.5 m 作为施工平台，如图 2 所示。

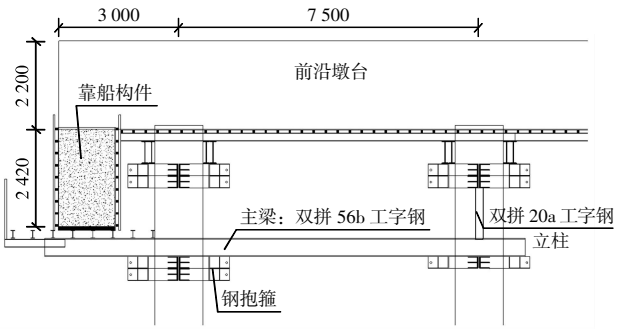


图 2　靠船构件主梁安装示意图（mm）

2）模块化次梁设计

传统次梁安装方法为单根工字钢依次吊装至主梁上。本项目创新将单根散装的 20a 工字钢次梁，在陆地加工场预先在专用胎架上焊接成大型平面模块。制作完成后运输至现场实现模块化拼装方式，降低了水上作业时间，保证了次梁安装精度，提高了搭设效率。

3）异形池底专项设计

水池斜面底部支撑采用三角支撑桁架。三角支撑桁架由 10 号槽钢焊接制成，桁架三角架间距 2.1 m，底部通长设置 20a 工字钢作为水平支撑，斜面通长布置 8 号槽钢作为次梁，斜面荷载有效地分解并传递至底部主梁系统，水池与现浇横梁连接位置采用悬臂钢梁+盘扣式脚手架组合式支撑体系，实现异形结构支撑定制化设计，其支撑体系如图 3 所示。

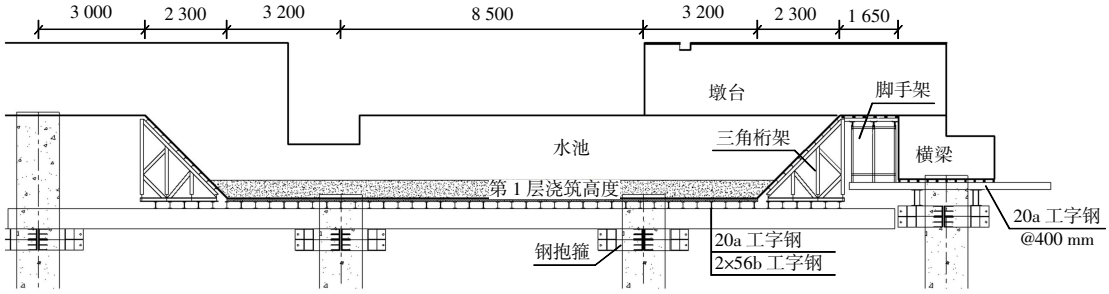


图 3　支撑体系示意图（mm）

4）支撑核心钢抱箍的设计

钢抱箍是本体系的安全核心，其工作原理是通过高强螺栓的预紧力使 2 个半圆形钢箍紧紧抱住钢管桩，在接触面产生强大的正压力，正压力转化为静摩擦力，抵抗结构传递的竖向荷载。钢抱箍由 2 个半圆形组成，采用 20 mm 厚 Q235B 钢板弯制，高度 560 mm，以提供足够的摩擦面积。钢抱箍上焊接 2 个 56a 工字钢作为牛腿，单侧牛腿长 500 mm。钢抱箍通过 24 个 M30 高强螺栓（性能等级 10.9S）紧固在钢管桩上。钢抱箍内侧粘贴厚度为 5 mm 橡胶板以增大摩擦力。

5）拆模专用工装门式架设计

为安全、高效地完成主、次梁拆除工作，专门设计拆模门式架。该门式架核心功能是为多个 10 t 倒链提供稳定、可靠顶部吊点，确保倒链具备足够的垂直行程空间。拆模门式架高度为 1.5 m，宽度为 1 m，门式架立柱和横梁材料选择 20a 工字钢，底部横向水平梁选择 20a 槽钢，以有效抵抗在起吊和下放过程中因不同步可能产生的水平力，防止架体倾覆。耳板采用 14 mm 厚 Q235 钢板制作，中部开 ϕ70 mm 销轴孔，以适配倒链。

3.2　支撑体系安全验算

为确保支撑体系在各种最不利工况下的安全，采用 midas Civil 建模进行有限元分析。

1）模型建立与荷载取值

为减少由于模型复杂性造成的计算错误，同时按照不同施工阶段进行分区域建模，按照横梁、水池、后沿墩台、靠船构件、前沿墩台底模 5 个施工区域分别建立模型，其中水池底模模型如图 4 所示。

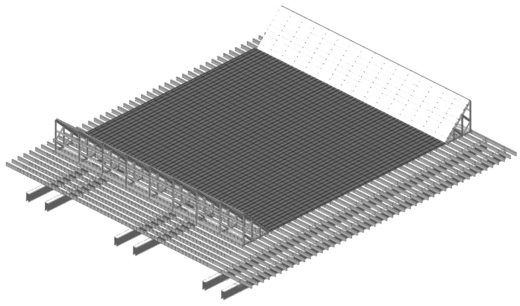


图 4　水池底模模型

根据 JT/T 1516—2024《公路工程脚手架与支架施工安全技术规程》进行荷载和安全系数取值[4]。

① 模板支撑体系的自重标准值（G_{4k}）计算过程部分零件未建模，综合考虑自重系数取 1.1，软件自动计算支撑体系自重。

② 新浇筑混凝土（包括钢筋）自重标准值（G_{5k}）取 26 kN/m^3。底模受到的均布面荷载=G_{5k}×首层混凝土浇筑高度，水池及墩台首层混凝土浇筑高度为 0.5 m，底模受到的均布面荷载为 13 kN/m^2。

③ 施工荷载标准值（Q_{2k}）：施工人员及设备自重标准值，取 3 kN/m^2。

④ 荷载分项系数中永久荷载取 1.3，可变荷载取 1.5。

2）结构受力计算

计算结果显示，在各区最不利荷载组合下，支撑体系关键构件型材应力计算结果如表 2 所示。

表 2　计算结果

区域		材料	组合应力/MPa	剪应力/MPa
横梁	主梁	双拼 45a 工字钢	121.3	36.9
	次梁	20a 工字钢	21.8	17.9
水池	主梁	双拼 56b 工字钢	151.6	28.4
	次梁	20a 工字钢	132.8	26.9
	三角桁架	10 号槽钢	134.0	25.7
	三角桁架次梁	8 号槽钢	33.1	1.9
后沿墩台	主梁	双拼 56b 工字钢	177.1	32.2
	次梁	20a 工字钢	141.2	38.8
前沿墩台	主梁	双拼 56b 工字钢	152.5	30.5
	次梁	20a 工字钢	141.6	31.2
靠船构件	主梁	双拼 56b 工字钢	146.0	25.3
	次梁	20a 工字钢	80.0	35.9

Q235 钢抗剪强度设计值为 125 MPa，抗拉、抗压、抗弯强度设计值为 215 MPa；由表 2 可知，墩台所使用的型钢强度满足要求。

3）钢抱箍计算

通过 midas Civil 可直接得出钢抱箍承受的上部主梁传递反力，计算结果表明，钢抱箍承受的最大反力值位于墩台前沿部位，单个抱箍上主梁最大的反力和为 1 588.3 kN，单根主梁最大反力为 816.8 kN。钢抱箍的设计要求为整体承受不小于 1 588.3 kN 的竖向荷载，单侧牛腿承受不小于 816.8 kN 的压力。

① 钢带计算

钢抱箍螺栓的总紧固力 $F_{紧}$计算公式为：

$$F_{紧}=G/\mu \tag{1}$$

式中：μ 为摩擦系数，本项目选取了类似项目中的摩擦系数取值，μ=0.3[5]；G 为结构的竖向荷载，kN，取 1 588.3 kN。

经计算，$F_{紧}$=5 294.33 kN。

钢抱箍高强螺栓数目 m 计算公式为：

$$m=F_{紧}/N_1 \tag{2}$$

式中：N_1 为高强螺栓的设计预拉力值，kN，M30（性能等级 10.9S）为 355 kN。

经计算，$m\approx15$，小于 24，因此钢抱箍上的螺栓个数满足要求。

钢抱箍对桩身的压应力 $\sigma_{压}$计算公式为：

$$\sigma_{压}=\frac{F_{紧}}{A_{触}} \tag{3}$$

式中：$A_{触}$为钢带（钢抱箍）与桩身的接触面积，m^2，桩直径取 1.2 m，抱箍高度取 0.56 m。

钢带内应力 $\sigma_{内}$计算公式为：

$$\sigma_{内}=\frac{\sigma_{压}\times r}{t} \tag{4}$$

式中：r 为桩的半径，m，取 0.6 m；t 为钢带（钢抱箍钢板）厚度，m，取 0.02 m。

经计算，$\sigma_{内}$=75.27 N/mm^2，$\sigma_{内}<f$（f 为抗拉设计值，20 mm 厚钢板取值 205 N/mm^2）。因此，采用高度 560 mm、厚度 20 mm 的钢板制作钢抱箍满足要求。

② 牛腿焊缝计算

牛腿与钢抱箍采用沿全面施焊的角焊缝连接，并假定全部剪力由工字钢腹板的连接焊缝承担[6]。全部焊缝对工字钢 x 轴的截面惯性矩近似取 I=5.17×10^8 mm^4，焊缝在最外边缘处的截面抵抗矩 W_1 计算公式为：

$$W_1=\frac{I}{y_1} \tag{5}$$

式中：y_1 为最外边缘处到该中性轴的垂直几何距离，mm，取 294 mm。

经计算，W_1=1.75×10^6 mm^3。

焊缝在腹板顶部的截面抵抗矩 W_2 计算公式为：

$$W_2=\frac{I}{y_2} \tag{6}$$

式中：y_2 为腹板顶部到该中性轴的垂直几何距离，mm，取 259 mm。

经计算，W_2=2×10^6 mm^3。

单侧牛腿为双拼 56a 工字钢，主梁的反力距离抱箍牛腿根部宽度 e 按照 200 mm 计算，则单个牛腿受到的力 $F_{牛}$为 408.4 kN，产生的偏心弯矩 M 计算公式为：

$$M=F_{牛}\times e \tag{7}$$

经计算，M=81.68 kN·m。

焊缝在最外边缘处的最大应力 σ_{M1} 计算公式为：

$$\sigma_{M1}=\frac{M}{W_1} \tag{8}$$

经计算，σ_{M1}=46.67 N/mm^2，$\sigma_{M1}<\beta_f f_f^w$，$\beta_f$ 为角焊缝的强度设计值增大系数，取 1.22；f_f^w为角焊缝的强度设计值，N/mm^2，取 160 N/mm^2。

56a 工字钢腹板厚度为 12.5 mm，则腹板角焊缝的焊脚尺寸为 $A_{焊}$=9 065 mm²。

垂直于焊缝长度方向的应力 σ_{M2} 计算公式为：

$$\sigma_{M2}=\frac{M}{W_2} \tag{9}$$

经计算，σ_{M2}=40.84 N/mm²。

沿焊缝长度方向的剪应力 τ_F 计算公式为：

$$\tau_F=\frac{F_{牛}}{A_{焊}} \tag{10}$$

经计算，τ_F=44.98 N/mm²。

在翼缘和腹板交接的腹板顶角焊缝处在偏心弯矩 M 和剪力 V 共同作用下的应力 σ_{fl} 计算公式为：

$$\sigma_{fl}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_{M2}}{\beta_f}\right)^2+\tau_F^2} \tag{11}$$

经计算，σ_{fl}=56.01 N/mm²，$\sigma_{fl}<f_f^w$，因此采用 56a 工字钢作为钢抱箍上的牛腿满足要求。

4）支撑拆除验算

支撑体系的拆除是异形墩台底模施工关键风险点之一，异形墩台底模拆除采用倒链作为支撑拆除的核心承重与升降装置。拆除方案的设计与验算紧密围绕倒链的承载能力展开。10 t 倒链重量可达 85 kg 以上，该规格是现场人工倒运与安装的效率与安全极限，整个拆除系统的设计必须以单点荷载不超过此限值为基本原则。

在既有有限元模型基础上，将底模拆除阶段倒链的固定位置作为模型的支撑边界条件，通过对倒链设置数量及布置位置进行多工况试算分析，综合比较各方案的受力情况，以确定满足安全性、实用性的最优倒链布置方案，最不利位置吊点所分担的支撑体系自重为 9.3 t，小于 10 t（10 t 倒链的设计荷载值），满足要求。

4　施工应用

4.1　支撑体系搭设

根据底模支撑结构和墩台底标高放出抱箍安装位置，通过吊装配合自制专用吊具将钢抱箍安装至设计位置，使用气动扭矩扳手将抱箍高强螺栓拧至设计扭矩。

主梁采用两点吊装方式，使用 YC 型工字钢夹辅助吊装。将主梁安装至钢抱箍上，2 根主梁接头位置位于牛腿上。主梁安装完成后，再将模块化次梁整体吊装至主梁上，用铅丝将木方垂直固定在次梁顶部，木方上方铺设模板，用铁钉固定。

4.2　支撑体系拆除

根据计算主梁拆除的吊点位置，在墩台内部预留 200 mm×200 mm 的孔洞。在预留孔洞上方设置龙门支架，倒链上部挂在支架吊耳上，另一端固定钢丝绳。主梁和钢抱箍吊点通过 1.5 t 倒链和吊带连接，主梁两端的钢抱箍下落 1 m 重新拧紧，其余钢抱箍直接拆除。然后用倒链降低整体底模高度，安排专人统一指挥，多人缓慢降落松动倒链，下放前在倒链的链条上做好标记，确保每个倒链下放步调一致，将整个底模落至钢抱箍上。使用撬棍撬松木模和木方等，然后将木方和模板依次递出。

拆除次梁时，先将次梁底部有阻挡的部位切除，然后使用吊机或浮筒将整片次梁移动至墩台边，再吊出。拆除主梁时，先用倒链将主梁下放至高潮位淹没区域并固定，将主梁切断至能够挪出的长度，在主梁两侧捆绑浮筒，确保总浮力大于主梁重量。待高潮位时，主梁借助浮力浮至水面。随后，用吊车吊起主梁一端，另外一端固定，通过吊带调整其角度，从桩间空隙中移出墩台底部区域，最后用吊车将其吊离水面。

5　应用效果

本技术在几内亚力拓西芒杜港口项目中的应用取得了显著的综合效益，体现在以下方面：

1）施工安全性与可靠性显著提升。通过分块分层的方式拆解异形现浇墩台，通过有限元计算软件对各区域分别单独进行支撑体系验算，解决了桩基分布不规则、海上大体积混凝土浇筑覆盖强度不足、异形构件多等难题，确保了异形结构各区域在浇筑与拆除阶段的受力安全。

2）施工效率大幅提高，经济效益显著。采用钢抱箍作为支撑体系核心受力构件，降低了对桩身母材与防腐涂层的损伤，安拆便捷，可实现周转使用。次梁模块化设计将大量水上高空散装作业转化为地面预制和整体吊装，大幅提升安装效率，减少水上高空作业风险，适应海外熟练工人短缺的现状。采用门式架配合倒链的整体下放、浮筒辅助浮运拆除方案，解决了封闭空间内大型构件拆除难题，并有效缩短拆除工期，经济效益显著。

6　结语

本文以几内亚力拓西芒杜港口项目为背景，针对水上异形现浇墩台施工难题，提出并实践以

分层分块设计与钢抱箍核心支撑体系为基础的关键技术。通过有限元分析设计、底模模块化施工及整体下放拆除工艺，有效解决了结构不规则、荷载大、安拆风险高等问题，实现了安全、高效、经济的目标。本技术可为类似复杂水上现浇结构施工提供借鉴，其标准化、可周转的特点具有良好的推广价值。

本研究基于特定工程条件总结的技术要点具有参考价值，但也存在一定局限性。如钢抱箍本身锈迹对钢管桩表面有一定的污染；钢抱箍的摩擦力系数受各种外界因素影响较大，其长期可靠性仍需进一步验证。此外，模块化次梁的通用性设计更好地适应多样化的异形结构轮廓仍有优化的空间。未来可进一步研究 BIM 技术对底模支撑体系的可视化设计与施工模拟，以提升此类复杂水上现浇结构施工的精细化、智能化管理水平。

参考文献：

[1] 马礼明，张野. 钢抱箍在海上现浇大体积高桩承台底模支撑系统中的应用[J]. 工程建设与设计，2020(3)：178–180，185.

[2] 古松，吕勇康，顾颖，等. 钢抱箍受力特性与承载能力试验研究[J]. 公路交通科技，2023，40(12)：74–81.

[3] 中交第一航务工程局有限公司. 港口工程施工手册[M]. 北京：人民交通出版社，2014.

[4] JT/T 1516—2024 公路工程脚手架与支架施工安全技术规程[S].

[5] JTS 215—2018 码头结构施工规范[S].

[6] 李星荣，秦斌. 钢结构设计手册(上下册)[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.