大直径钢圆筒结构疲劳损伤特性分析*

李　亚[1]，吴　兵[2]
（1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司，上海 200125；
2. 中国矿产资源集团舟山发展有限公司，浙江 舟山 316021）

摘要：针对某外海基础设施项目超深入土大直径钢圆筒结构，对振动下沉施工阶段的激振荷载、安装后不利结构状态波浪荷载作用下结构疲劳损伤特性进行分析。通过长持时连续激振方式进行试验筒振沉阶段性能试验，测试验证结构-设备系统极端工况的力学性能；提出 E_2 型疲劳曲线和参数取值方法，疲劳分析结果与实际试验吻合良好。提出采用间歇连续激振输入方式的振沉施工工艺，实现基于力反馈的精准振沉输入调控，可有效降低总激振时间和疲劳损伤，使得振沉期间结构疲劳安全度达到接近 2.0。根据规则波和非规则波条件波浪模型试验数据，得到不利计算工况波浪致钢圆筒结构疲劳损伤因子小于 0.1，其中不规则波小于规则波情况，且波浪作用在总损伤因子中占比相对较小。

关键词：大直径钢圆筒；振沉；波浪荷载；疲劳损伤
中图分类号：U655.54+1；TU753.62　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0233-07

Fatigue damage characteristics analysis of large-diameter steel cylinder structure

LI Ya[1], WU Bing[2]
(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200125, China;
2. CMRC Zhoushan Development Co., Ltd., Zhoushan 316021, China)

Abstract: On the basis of an offshore infrastructure project, the fatigue damage characteristics of a large-diameter steel cylinder structure ultra-deep into foundation soil are analyzed under the vibration force during the sinking construction stage and the wave load after installation. The performance test is carried out through continuous long time vibration force input during the sinking of the test steel cylinder, and the mechanical performance of the structure-equipment system under extreme conditions is tested and verified. The E_2 fatigue curve and parameter value obtaining method are presented, and the fatigue analysis results are in good agreement with the actual test. An intermittent continuous vibration force input method is proposed together with the achievement of accurate vibration input control based on force feedback, which can effectively reduce the total vibration time and fatigue damage, and make the fatigue safety of the structure reach nearly 2.0 during vibration sinking construction. According to the test data obtained from physical models under regular and irregular wave conditions, the fatigue damage factor of the steel cylinder caused by sea wave load is less than 0.1, and the irregular wave is less than the regular wave, which accounts for a relatively small proportion in the total damage factor.

Keywords: large-diameter steel cylinder; vibration sinking; wave load; fatigue damage

处于外海的某交通基础设施项目，采用大直径钢圆筒作为海上围堰结构，为国内继港珠澳大桥岛隧工程、深中通道岛隧工程之后又一个应用大直径钢圆筒进行海上快速成岛的重大工程。该工程的钢圆筒直径 22 m，最大筒高 60 m 以上，最大入土深度超过 50 m，高度、深度参数超过现有其他工程钢圆筒结构，此前未有类似超深大直径钢圆筒结构的实施经验。钢圆筒结构在振沉入土

收稿日期：2025-11-16　　**录用时间：**2025-12-08
*基金项目：中交三航院专项研究课题(2023-257)；中矿资源舟山公司科技研发项目(2024112)
作者简介：李亚(1983—)，男，硕士，正高级工程师，从事交通与土木工程结构研究工作。

水运工程

过程中受力大，振沉过程中应力循环次数多，对顶部区焊缝等薄弱部位影响大，存在疲劳损伤的可能性，特别是对于振沉总时间长、连续高频振动占比大的情况。疲劳问题对于钢圆筒设计十分重要，疲劳破坏不同于静力破坏，静力破坏表现为塑性变形，疲劳损伤则是在应力循环作用下产生的材料累积损伤现象；一旦出现损伤裂纹，结构刚度分布会出现不均匀和间断，在振动锤组强大的激振力作用下，振动反馈呈现不同步，钢板极有可能因受力过大进而破坏撕裂，振动锤组也面临受损风险，施工将存在极大的安全风险。

目前，国内在大型跨海通道项目中成功应用了大直径钢圆筒结构，其快速筑岛成陆、绿色环保的技术优势在工程实施中效果显著，取得了一系列研究成果。大直径钢圆筒的相关研究主要集中于振沉施工装备及工艺、筒体构造及连接方式、结构稳定性等方面[1-3]，尚未有大直径钢圆筒疲劳性能的相关研究文献，JTS 167-13—2019《插入式钢圆筒结构设计与施工规范》[4]也未有直接涉及疲劳分析验算的要求。虽然国内具备最大 30 米级深度的钢圆筒实施经验，但由于振沉相对容易，设计施工振沉安全系数大，工程实施中尚未触及疲劳损伤问题；然而，对于 50 米级入土深度的钢圆筒结构，振沉时间长、激振荷载大，疲劳问题极可能是设计施工控制因素，必须引起足够重视，不能照搬以往经验；有必要对钢圆筒振沉疲劳性能进行相关试验及分析，并研究相适应的疲劳曲线类型，进而在施工工艺等方面提出应对措施，确保钢圆筒振沉安全。除了考虑振沉安装期间的疲劳累积，还要考虑钢圆筒所处的外海环境极端海况频发，需要针对施工周期内不利受力工况状态，对波浪荷载引起结构疲劳损伤进行量化分析研究，为采取相应设计措施提供依据，确保结构安全性。故本文基于外海某交通基础设施项目的超深入土大直径钢圆筒结构，对其疲劳特性进行分析研究，并针对性提出施工工艺措施和设计疲劳曲线。本文在疲劳损伤方面的探索研究，将对提升大直径钢圆筒结构在复杂环境条件的适应能力、扩展该结构类型的适用范围起到积极作用。

1 钢圆筒结构

某交通基础设施项目建设于我国外海，采用大直径钢圆筒作为施工期围堰结构，以满足外海不利环境快速成陆的要求，同时钢圆筒可作为永久陆域边界的组合子结构，起到稳固边界的功能。钢圆筒直径 22 m，最大筒高 60 m 以上，最大入土深度超过 50 m，钢圆筒结构施工见图 1。钢圆筒为空间筒壳型薄壁结构，主体壁厚 16 mm，为满足钢圆筒振沉时的压屈稳定、控制施工各阶段结构整体变形，筒壁采取一系列加劲加强措施，主要包括筒壁顶底两端局部段壁板加厚、筒壁竖向布设加强肋、环向布设加强环肋或加强圈板，以提高钢圆筒结构的有效刚度。

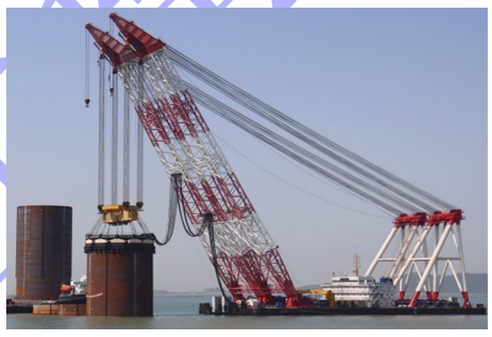


图 1 大直径钢圆筒结构施工

Fig. 1 Construction of large-diameter steel cylinder

2 疲劳分析方法

2.1 疲劳分析流程

结构疲劳分析一般采用时域分析方法，其中关键是得到结构焊缝处应力时程曲线，进一步统计分析可得到疲劳荷载谱，再根据 *S-N* 曲线（*S* 为应力幅；*N* 为疲劳破坏时应力循环次数[5]）计算出结构疲劳损伤值，并求得结构疲劳寿命[6]。

2.2 名义应力和热点应力

名义应力 σ_{nom} 是考虑结构几何外形而不考虑焊缝处应力集中效应计算得到的应力，热点应力 σ_{hot} 是焊缝处的最大应力，应力集中程度一般用应力集中系数表示，即 σ_{hot} 与 σ_{nom} 的比值。应力集中系数是分析焊接结构应力集中程度的重要参数，计算模型应能充分反映焊接几何形状、材料力学性能等各因素的影响。由于钢圆筒结构形式的复杂性，可采用局部结构区段力学模型分析钢圆筒顶部焊缝

处热点应力。对该工程振动锤组激振荷载作用下筒壁顶部变壁厚处(由顶部加厚区 16～25 mm)焊缝区进行计算，顶部结构见图 2；计算发现焊缝区存在明显的应力集中现象，筒壁顶部剖面及应力分布见图 3，计算得到应力集中系数约为 1.22。

图 2　钢圆筒顶部结构

Fig. 2　Structure at top of steel cylinder

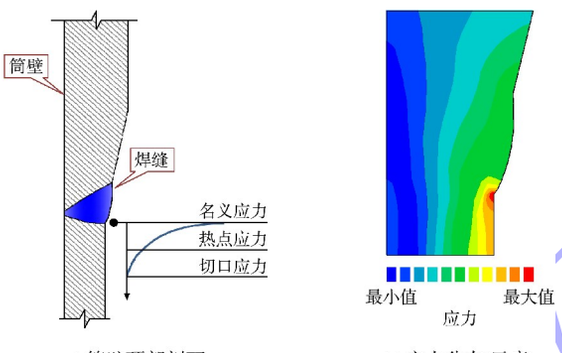


图 3　钢圆筒筒壁顶部剖面及应力分布

Fig. 3　Section of top wall of steel cylinder and stress distribution

2.3　*S-N* 曲线及线性疲劳累积损伤理论

S-N 曲线可根据节点连接形状、焊接方式等因素分为不同等级类别曲线。对于近海工程钢结构，节点 *S-N* 曲线包括 B、C、D、E、F、F_2、G、W 共 8 条等级曲线(按序定义为级别 1～8)，且 *S-N* 曲线在双对数坐标下为双折线形式。

N 和 *S* 的关系为：

$$\begin{cases} \lg N = \lg K_1 - m_1 \lg S & (N \leqslant N_q) \\ \lg N = \lg K_2 - m_2 \lg S & (N > N_q) \end{cases} \tag{1}$$

式中：N_q 为双段线分界点对应的应力循环次数；m_1、m_2 为双对数坐标下 *S-N* 曲线斜率的负倒数；$\lg K_1$、$\lg K_2$ 为双对数坐标下 *S-N* 曲线在 $\lg N$ 轴上的截距。

疲劳时域分析方法中，在求得疲劳荷载谱后，根据 *S-N* 曲线可得到各级应力幅对应的疲劳损伤值；结构总疲劳损伤计算采用 Miner 线性疲劳累计损伤理论，其假定各应力幅水平循环作用下结构的疲劳损伤是独立的，总损伤由各独立损伤线性叠加而成，即：

$$\eta = \sum_{i=1}^{k} \eta_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \tag{2}$$

式中：η 为结构总疲劳损伤值(当 $\eta \geqslant 1$ 时，结构发生疲劳破坏)，又称疲劳损伤因子；η_i 为各级应力幅对应的疲劳损伤值；k 为应力幅分级数；n_i 为第 i 级应力幅对应的循环次数；N_i 为第 i 级应力幅对应的最大循环次数(关联疲劳寿命)。

3　振沉施工期钢圆筒疲劳损伤分析

3.1　试验工况

钢圆筒振动下沉采用联组振动锤，多台振动锤之间必须采用同步措施，以形成有效同步激振力向下传递，振动锤组激振力计算公式为：

$$F(t) = N_e F_0 \sin(\omega t + \varphi) \tag{3}$$

式中：$F(t)$ 为 t 时刻总激振力，kN；N_e 为振动锤总台数；F_0 为单台振动锤相应转速的最大激振力，kN；ω 为角速度，rad/s，$\omega = 2\pi n_r/60$，其中 n_r 为偏心块的转速，r/min；φ 为相位角，(°)。

3.2　试验筒连续激振施工方式疲劳损伤分析

该工程位于外海环境，钢圆筒入土深度达到 50 m，且进入硬持力层较深，振沉难度远超类似项目[7]，施工中可能出现长时间振沉的极端情况，为此开展钢圆筒振沉试验研究。试验筒采用长持时连续激振方式，以测试验证结构-设备系统极端工况的激振疲劳性能，并对设备、结构参数匹配性进行验证，当监测无法继续下沉时即停锤。本文试验激振总时间达到 75 min，振动锤组转速为 900～1 200 r/min，最后阶段筒体贯入度急剧下降，难以继续下沉，监测发现钢圆筒出现顶部振动加速度偏大、水面水花过大的振动异常现象，继续激振有损伤破坏风险，随即终止试验，由于连续振沉时间过长，后检测发现钢圆筒顶部焊缝局部已开始出现疲劳损伤迹象，即基本达到结构疲劳

性能临界极限状态。

根据本文试验实际数据，试验筒振沉阶段参数见表 1，试验筒疲劳荷载谱见图 4。

表 1　试验筒振沉阶段参数

Tab. 1　Parameters of test cylinder during vibration sinking

振沉阶段	转速/(r·min^{-1})	振沉持续时间/min
1	900	20
2	1 000	30
3	1 100	15
4	1 200	10

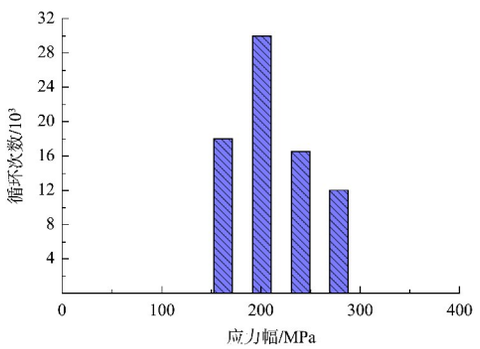


图 4　试验筒振沉施工疲劳荷载谱

Fig. 4　Fatigue load spectrum of test cylinder during vibration sinking

根据钢圆筒焊缝要求，顶部区焊缝为一级焊缝，考虑到筒壁变厚度偏心影响以及焊缝交叉等不利因素，设计中 *S-N* 曲线等级按照 E 与 F 级的中间类型考虑，定义为 E_2 曲线，该曲线参数按照 $\lg K_1$、$\lg K_2$ 变化趋势线进行线性插值求解，具体趋势线见图 5，得到 E_2 曲线的计算参数见表 2，表中同时列出 E、F 级别曲线参数。

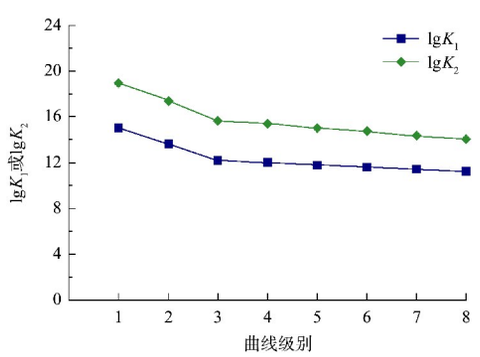


图 5　不同曲线等级类别 $\lg K_1$、$\lg K_2$ 变化趋势线

Fig. 5　Changing trend curves of $\lg K_1$ and $\lg K_2$ versus different curve grades

表 2　E_2 型曲线计算参数

Tab. 2　Calculation parameters for E_2 type curve

曲线等级	$K_1/10^{12}$	$K_2/10^{15}$	m_1	m_2	$N_q/10^7$
E	1.04	2.30	3.0	5.0	1.0
E_2	0.81	1.51	3.0	5.0	1.0
F	0.63	1.00	3.0	5.0	1.0

按照名义应力法进行计算，E、E_2、F 三种不同曲线级别得到损伤因子分别为 0.769、0.988、1.270，考虑与实际试验临界状态的匹配度，选用本文定义的 E_2 曲线计算吻合度较高；另外按照热点应力法计算得到的损伤因子为 0.956，也与上述结果接近，表明 E_2 曲线参数取值合理，为后续结构疲劳分析奠定了基础。根据试验筒测试反馈情况，为确保结构振沉安全，后续施工时应通过调整施工工艺，提高基于不同筒位地质、入土深度条件计算预测转速配置的精确度，并采取减少高转速占比、连续振沉时间及吊力控制等综合措施，提高激振能量有效传递利用率，避免长时间高频振沉对钢圆筒结构产生疲劳损伤。

3.3　减损振沉施工工艺及疲劳损伤分析

根据试验筒的相关结果改进调整振沉施工工艺，实际施工采用间歇连续激振方式，进行分次激振能量 E_i 输入(每次激振时间为 T_i)，有效降低了总激振时间，该振沉方式通过控制短时间激振作用刚好超越土体结构临界破坏状态以减少摩阻力，施工中通过密切监控钢圆筒吊力以控制单次激振输入时间，实现基于力反馈的精准能量输入调控达到减少激振总时间的目的，避免钢结构累积疲劳损伤，该减损振沉施工工艺的激振方式见图 6。

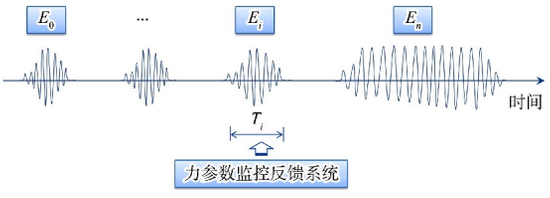


图 6　间歇连续激振方式

Fig. 6　Intermittent continuous excitation mode

实际施工期间钢圆筒有效激振作用时间基本控制在 35 min 左右。按照 E_2 曲线，某典型钢圆筒结构疲劳荷载谱见图 7，疲劳损伤因子具体计算结

果见表 3，损伤因子为 0.507，可见通过振沉工艺的改进使得疲劳损伤因子显著减小。

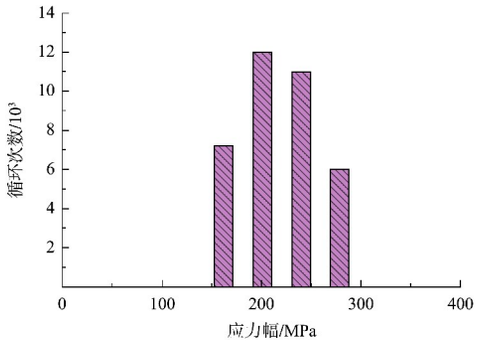


图 7　实际施工时某典型钢圆筒振沉疲劳荷载谱
Fig. 7　Fatigue load spectrum of typical steel cylinder during actual construction

表 3　典型钢圆筒振沉施工期损伤因子计算结果
Tab. 3　Damage factors of typical steel cylinder during vibration sinking

振沉阶段	转速/(r·min^{-1})	持续时间/min	损伤因子
1	900	8	0.036
2	1 000	12	0.114
3	1 100	10	0.185
4	1 200	5	0.171
合计	–	35	0.507

根据振沉疲劳损伤分析，钢圆筒振沉总时间宜控制在 40 min 以内，如超过 60 min 焊缝疲劳破坏的风险加大；并应采取多方面措施提高激振能量有效利用效率，按照具体地层分布提前精确分析各阶段最小适宜转速，避免高转速引起筒顶部横向振动等无效能量消耗以及不利的疲劳累积影响。根据对比分析，采用间歇连续激振方式有效降低了总激振时间，相对于试验筒连续振沉施工方式，疲劳损伤因子下降接近 50%，从而使得振沉期间结构的疲劳安全度达到约 2.0，确保了项目后续超 100 个钢圆筒的顺利振沉，其中最大振沉深度突破 50 m，创造了该类型结构振沉深度的工程纪录。

4　波浪作用下钢圆筒顶部区疲劳损伤分析

4.1　分析方法

完整围堰断面结构未形成之前的施工阶段，为预留围堰上部结构基础空间，筒内回填砂留置一定未填满空间，则会形成筒体上部空筒近似悬臂的受力状态[8]，由于外海波浪大、台风等极端天气时有发生，该工况对于薄壁筒体结构受力较为不利，国内项目也出现过波浪致薄壁钢结构受损的情况，且外海环境钢结构现场修复较为困难。为此，需要分析波浪作用下钢圆筒焊接不利位置的疲劳性能[9-10]，评估影响程度，确保钢圆筒围堰结构的安全性；由于筒形结构所受波浪作用的复杂随机特性，采用物理模型试验手段研究波浪荷载情况。

4.2　基于波浪模型试验的波浪荷载测试

4.2.1　试验方法及设备

断面试验在海岸和近海工程全国重点实验室的海洋环境水槽中进行，钢圆筒断面试验模型几何比尺为 1:30，试验模型见图 8，采用点压力传感器测量试验过程中钢圆筒表面波压力及波吸力。

a) 海洋环境水槽

b) 钢圆筒布置

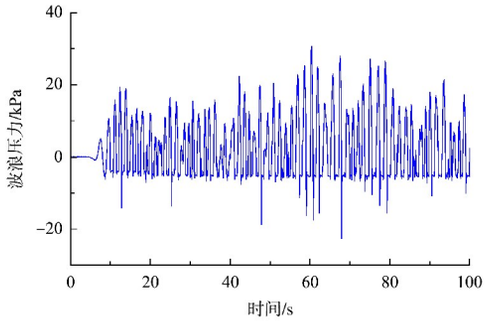
图 8　钢圆筒结构波浪模型试验
Fig. 8　Wave model test of the steel cylinder

对于规则波，将给定的波浪有效波高和平均周期输入造波设备进行模拟，根据得到波浪历时曲线和波浪参数进行控制，最终得到符合试验要求的目标波浪。对于不规则波，采用 JONSWAP 谱模拟，根据试验波浪要素，由试验水槽造波机产生不规则波浪，在波浪控制点位置布置浪高仪

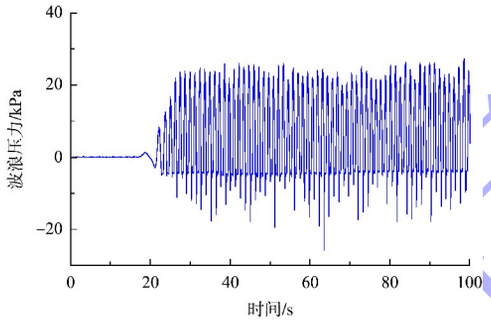
采集不规则波的波高和周期数据，通过调整造波参数，反复修正率定，使实测波浪参数数据与试验要求一致，且实测波浪频谱与目标理论频谱吻合。

4.2.2　钢圆筒受力测试结果

通过试验得到设计高水位对应的不规则波、波高为 $H_{1\%}$ 规则波典型试验工况下波浪压力，其中钢圆筒顶部测点压力时程曲线见图 9。



a) 不规则波



b) 规则波

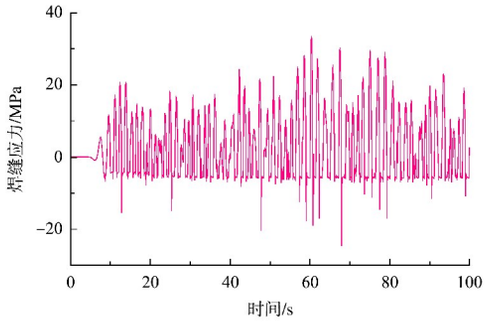
图 9　筒体顶部测点波浪压力时程

Fig. 9　Time history of wave pressure at top point of cylinder

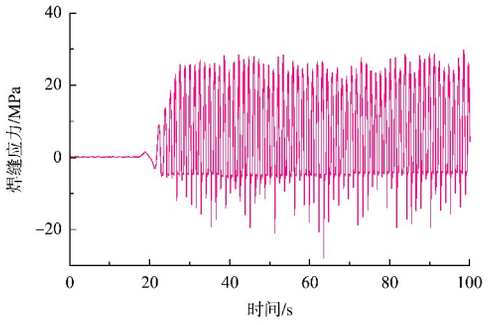
4.3　钢圆筒顶部焊缝应力及疲劳损伤计算

4.3.1　应力时程

不规则波、规则波条件下钢圆筒顶部变截面连接处焊缝应力时程见图 10。



a) 不规则波



b) 规则波

图 10　筒体顶部焊缝应力时程

Fig. 10　Stress time history of weld at top of cylinder

4.3.2　钢圆筒疲劳损伤计算

钢圆筒疲劳计算基于应力时程，由于波浪荷载的随机特性以及结构动力响应的复杂机理[11]，应力也会呈现随机特性；通过对应力时程曲线数据统计分析，可得到应力幅和相应的循环次数。考虑工程区域实际海况条件，得到波浪作用下损伤因子以及总损伤因子(叠加振沉施工损伤)计算结果见表 4。可以发现，不规则波小于规则波损伤因子，波浪作用下损伤因子均小于 0.1，在总损伤因子中占比小于 15%，比例相对较小，最不利结构状态对应的剩余疲劳寿命分别为 70.4、17.4 个月，均大于实际施工窗口期，结构疲劳安全满足要求，但也揭示了上部空筒段的不利受力状态，应尽量减少空置时间，在台风极端工况应采取措施形成防护，避免钢结构疲劳受损；另外，设计和施工中均应重点关注钢圆筒关键部位焊接连接区域，厚薄板过渡处采取斜向坡度以减小应力集中，施工中优化工艺流程，特别应避免振沉施工阶段出现损伤甚至焊缝开裂，影响结构性能。

表 4　钢圆筒顶部焊缝处损伤因子计算结果

Tab. 4　Calculation results for damage factors of weld at top of steel cylinder

类别	波浪作用下损伤因子	总损伤因子	最不利状态剩余疲劳寿命/个月	安全系数
不规则波	0.021	0.528	70.4	1.895
规则波	0.085	0.592	17.4	1.690

5　结论

1）针对某交通基础设施项目超深入土大直径钢圆筒结构，为充分验证振沉中可能出现的极端

不利工况，在试验阶段成功开展了长持时连续振沉工况设备-结构匹配验证，通过试验验证了结构-设备系统的承载性能；针对钢圆筒结构焊接连接具体形式，提出 E_2 型疲劳曲线和参数取值方法，疲劳分析结果与实际试验吻合性高，为结构疲劳计算提供了支撑。

2）本文根据试验筒的实际振沉结果，创新调整施工工艺，实际施工采用间歇连续激振方式，有效降低了总激振时间，相对于试验筒连续振沉施工方式，疲劳损伤因子下降约 50%，从而使得振沉期间结构的疲劳安全度达到约 2.0。

3）本文对不规则波、规则波作用下钢圆筒疲劳进行分析计算，得到波浪致损伤因子均小于 0.1，不规则波小于规则波情况，在总损伤因子中占比相对较小；但应加强筒壁关键过渡连接的质量可靠性，在施工期间注意及时采取防护措施，避免极端海况下钢圆筒疲劳受损。

参考文献：

[1] 林鸣, 裴岷山, 刘晓东, 等. 港珠澳大桥岛隧工程建造技术[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(6): 955-964.
LIN M, PEI M S, LIU X D, et al. Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Island-Tunnel Project building technology[J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2023, 53(6): 955-964.

[2] 王彦林, 闫禹. 港珠澳大桥外海人工岛快速成岛技术[J]. 施工技术, 2012, 41(8): 47-51, 66.
WANG Y L, YAN Y. Rapid island-formation technology about artificial island in open sea in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Construction technology, 2012, 41(8): 47-51, 66.

[3] 金文良, 李宏钧, 彭英俊, 等. 深中通道岛隧工程绿色建造技术探索[J]. 公路, 2023, 68(10): 256-263.
JIN W L, LI H J, PENG Y J, et al. Explorations on green construction technology of the island and tunnel project of the Shenzhen-Zhongshan Link [J]. Highway, 2023, 68(10): 256-263.

[4] 插入式钢圆筒结构设计与施工规范: JTS 167-13—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Design and construction code of embedded steelplate cylinder structure: JTS 167-13-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

[5] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Standard for design of steel structures: GB 50017-2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

[6] 王蒂, 湛伟杰, 吴双杰, 等. 构皮滩升船机主提升机卷筒结构焊缝疲劳强度分析[J]. 水运工程, 2023(6): 108-113.
WANG D, ZHAN W J, WU S J, et al. Fatigue strength analysis of drum welds of main hoist of Goupitan ship lift[J]. Port & waterway engineering, 2023(6): 108-113.

[7] 陈福全, 雷金山, 汪金卫. 高频液压振动锤沉桩的打入性状分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(1): 41-47.
CHEN F Q, LEI J S, WANG J W. Penetration behaviour due to vibratory pile driving using the high frequency hydraulic vibratory hammer [J]. Journal of railway science and engineering, 2009, 6(1): 41-47.

[8] 王刚, 陈杨, 张建民. 大圆筒结构倾覆稳定分析的有限元法[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 238-241.
WANG G, CHEN Y, ZHANG J M. Finite element method for analyzing overturn stability of large cylindrical structures[J]. Rock and soil mechanics, 2006, 27(2): 238-241.

[9] 靳军伟, 杨敏, 王伟, 等. 海上风电机组基础浪致疲劳分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(5): 74-78, 83.
JIN J W, YANG M, WANG W, et al. Analysis on wave-induced fatigue of offshore wind turbine foundation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(5): 74-78, 83.

[10] LI Y, CHENG Z K, NI Q Q. Dynamic response of pile-cap structure under random sea wave action [J]. Procedia engineering, 2015, 116: 1027-1035.

[11] 马宏旺, 杨峻, 陈龙珠. 长期反复荷载作用对海上风电单桩基础的影响分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 121-126, 141.
MA H W, YANG J, CHEN L Z. Effects of long-term cyclic loadings on offshore wind turbine monopile foundation [J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(2): 121-126, 141.

（本文编辑　王璁）

水运工程