

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02994>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 余杨, 郭虎, 余建星, 等. 邮轮非常规阶梯甲板极限承载力研究[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 143–149.

YU Y, GUO H, YU J X, et al. Study on ultimate bearing capacity of unconventional stepped deck in cruise ship [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 143–149.

邮轮非常规阶梯甲板极限承载力研究



扫码阅读全文

余杨^{1,2}, 郭虎^{1,2}, 余建星^{1,2}, 王福程^{1,2}, 张凌波^{1,2}, 苏晔凡^{1,2}

1 天津大学 建筑工程学院 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072

2 天津大学 建筑工程学院 天津市港口与海洋工程重点实验室, 天津 300072

摘要: [目的] 为了探究邮轮异型甲板结构的强度底数, 针对邮轮剧院布置使用的非常规阶梯甲板进行极限承载力研究。[方法] 基于 ABAQUS 准静态方法计算阶梯甲板的极限承载力, 确定结构的薄弱位置, 并与常规甲板失效模式进行对比, 同时探究甲板、纵骨、纵桁腹板以及纵桁面板厚度变化对结构极限承载力的影响, 提出支柱加强和纵桁加强两种结构优化方法。[结果] 结果表明: 阶梯甲板的失效主要发生在高度差最大的层交界处, 极限承载力较常规甲板大幅下降, 对应的压缩位移和塌陷深度明显增大; 极限承载力会随甲板、纵骨、纵桁腹板以及纵桁面板厚度的增大而增大, 其中纵桁腹板厚度变化的提升效果最显著; 在结构薄弱位置增设支柱, 或增大该处纵桁腹板高度能有效提高结构的极限承载力。[结论] 所做研究对指导现代邮轮特殊甲板的设计和 optimization 具有重要意义。

关键词: 邮轮; 阶梯甲板; 极限承载力; 结构优化

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02994

Study on ultimate bearing capacity of unconventional stepped deck in cruise ship

YU Yang^{1,2}, GUO Hu^{1,2}, YU Jianxing^{1,2}, WANG Fucheng^{1,2}, ZHANG Lingbo^{1,2}, SU Yefan^{1,2}

1 State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation,

School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2 Tianjin Key Laboratory of Port and Ocean Engineering,

School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: [Objective] In order to determine the strength of the special deck structure of a cruise ship, this study investigates the ultimate bearing capacity of an unconventional stepped deck used in the layout of the cruise theater. [Methods] Based on the quasi-static ABAQUS method, the ultimate bearing capacity of a stepped deck is calculated and the weak positions of the structure are determined and compared with conventional deck failure modes. Meanwhile, the influence of the deck, longitudinal frame, girder web and girder panel thickness on the ultimate bearing capacity of the structure are investigated, and two structural optimization ideas are proposed: pillar reinforcement and longitudinal reinforcement. [Results] The results show that the failure of the stepped deck mainly occurs at the boundary of the layer with the largest height difference; the ultimate bearing capacity of the stepped deck decreases significantly compared with that of a conventional deck; and the corresponding compression displacement and collapse depth increase obviously. The ultimate bearing capacity increases with the thickness of the deck, longitudinal frame, girder web and girder panels, and the improvement effect of girder web thickness is the most significant. The ultimate bearing capacity of the structure can be effectively improved by adding struts or increasing the height of the web in the weak position of the structure. [Conclusion] This study has great significance for the design and optimization of special decks for modern cruise ships.

Key words: cruise ship; stepped deck; ultimate bearing capacity; structure optimization

收稿日期: 2022-07-01 修回日期: 2022-10-21 网络首发时间: 2023-12-04 11:48

基金项目: 工业和信息化部高技术船舶资助项目 (MC-201917-C09)

作者简介: 余杨, 男, 1988 年生, 博士, 副教授。研究方向: 海洋结构可靠性及水动力。E-mail: yang.yu@tju.edu.cn

郭虎, 男, 1998 年生, 硕士生。研究方向: 船舶结构强度及动力响应。E-mail: hu_guo@tju.edu.cn

余建星, 男, 1958 年生, 博士, 教授。研究方向: 海洋结构可靠性研究及风险评估

*通信作者: 余杨

0 引言

豪华邮轮作为一种新兴的高附加值船舶,能够产生巨大的经济效益和社会效益。然而,丰富的功能不仅增大了设计难度,还对船体结构强度提出了更高的要求。目前,在对船舶进行结构设计和强度评估时,更倾向于采用极限状态法取代许用应力法^[1]。传统规范设计通常采用许用应力法,认为只要满足许用应力的要求,结构就不会发生失效。但是这种方法不能评估结构的极限承载能力,也不能确定结构的安全裕度。相比之下,极限状态法更具有优势,它可以真实地反映船体结构的极限强度,在保证结构安全性的同时尽可能地减轻船体重量。因此,研究船体结构的极限强度对于保证船体结构安全、提高经济性等具有重要意义。

加筋板作为船体最主要受力结构之一,其极限强度一直是国内外学者关注的重点。Paik等^[2-3]对双壳船外底加筋板进行了研究,模型选取了“1/2+1+1/2”强构件跨度,探究了初始缺陷、荷载类型及计算方法对结构极限承载力的影响。Cui等^[4]在研究集装箱船极限强度时,总结了加筋板初始挠度变形的经验公式,并计算了在轴向压力和海水侧向压力的联合作用下加筋板的极限承载力。Liu等^[5]探究了结构开口对强度的影响,通过有限元模拟和试验分析了大开口甲板和开孔高腹板纵桁的失效行为。同时,Liu等^[6]还深入研究了大跨度甲板的屈曲、极限强度及其渐进破坏过程。万琪等^[7]通过讨论大跨度甲板纵向受压的稳定性,提出了大跨度甲板板架的优化设计思路。张婧等^[8]考虑模型范围和初始缺陷对加筋板极限承载力的影响,计算了复杂载荷作用下的极限强度。郭国虎^[9]通过试验和有限元模拟计算了邮轮高腹板板架的极限承载力,探究了腹板开孔不同比例的影响效果。甘进等^[10]研究了邮轮上层建筑中开孔高腹板甲板的失效模式和极限强度。周红昌等^[11]通过试验模拟了甲板和舷侧同时开口及甲板双开口两种形式的双层板架在轴压下的极限承载力,总结了多开口甲板的破坏规律。

综上所述,关于加筋板极限承载力的研究已经取得了许多成果,但大都局限于常规甲板以及在其基础上衍生的开口、大跨度和高腹板等板架结构。然而随着船舶功能性的发展,一些非常规板架被逐渐加入到船舶设计中,比如在大中型邮轮剧场和影院布置使用的阶梯状甲板,其极限强度的研究同样具有实际意义。鉴于此,本文将开

展针对邮轮非常规阶梯甲板的强度研究,在与等尺寸常规甲板对比分析的基础上,总结结构的失效特点,提出结构优化设计思路。

1 数值模型

1.1 模型尺寸及材料属性

图1为邮轮剧院位置的甲板结构图,根据图纸实际尺寸建立阶梯甲板模型,如图2所示。模型长20.6 m,宽18.2 m,共有7层阶梯,分别记为T0~T6,其中T0~T1高度差为750 mm,T1~T6高度差均为150 mm。甲板纵骨间距为700 mm,沿船长方向布置4根450×8/150×10的T型纵桁,纵骨建模简化为150×7的板条结构。AB和MN为甲板边,整个结构采用S4R四节点通用壳单元模拟,运算过程中采用减缩积分。

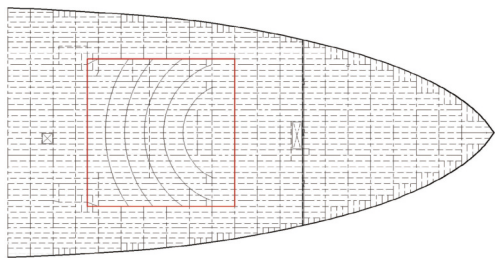


图1 邮轮剧院甲板结构图

Fig. 1 Deck structure of cruise theatre

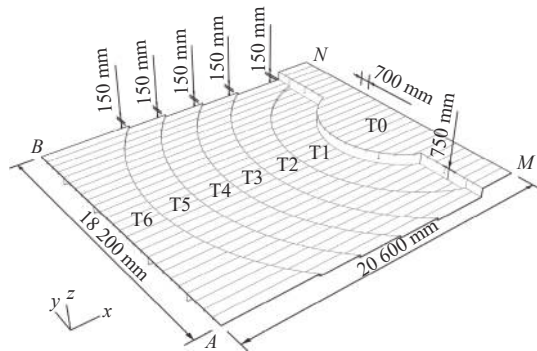


图2 阶梯甲板三维模型图

Fig. 2 3D model drawing of stepped deck

根据中国船级社规范^[12]要求,强力甲板结构及以下甲板结构主要支撑构件的剖面模数 W 和惯性矩 I 满足如下关系:

$$W \nlessgtr 5Sh^2K \quad (1)$$

$$I \nlessgtr 2Wl/K \quad (2)$$

式中: S 为主要支撑构件的间距; h 为甲板压头; l 为主要支撑构件的跨距; K 为材料系数。

由于结构的特殊性,纵桁间距和跨距并非完全等距。计算规范要求的惯性矩时,各结构参数均取最大值,因此可得规范要求的纵桁惯性矩

$I \nless 10 \times 5.6 \times 0.45 \times 4.413^3 = 2\ 166\ \text{cm}^4$, 而本文使用的纵桁惯性矩为 $11\ 677\ \text{cm}^4$, 满足规范要求。

结构材料采用高强度钢, 密度 $\rho = 7\ 850\ \text{kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 2.06 \times 10^{11}\ \text{Pa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$, 屈服强度 $\sigma_Y = 355\ \text{MPa}$ 。塑性属性选用双线性弹塑性材料模型^[13], 屈服后模量为 $E_n = 1 \times 10^9\ \text{Pa}$ 。

1.2 初始缺陷设置

加筋板在焊接过程中会不可避免地产生初始挠度变形, 而初始缺陷的存在会对板架的极限强度产生影响。板架的初始缺陷包括 3 种^[14]: 板架整体初始挠度 ω_{op1} , 加强筋梁柱型初始挠度 ω_{oc} 以及加强筋侧倾型初始挠度 ω_{os} , 分别为

$$\omega_{op1} = A_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (3)$$

$$\omega_{oc} = B_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (4)$$

$$\omega_{os} = C_0 \frac{z}{h_w} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (5)$$

式中: A_0 , B_0 和 C_0 分别为对应的初始挠度幅值, 其中, $A_0 = 0.1\beta^2 t$, $B_0 = C_0 = 0.001\ 5a$, a 为横向构件间距, b 为纵向构件间距; t 为板架厚度; m 为板架屈曲半波数; h_w 为加强筋高度。

板架的柔度系数 β 为

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \quad (6)$$

计算过程中, 利用场函数分别将 3 种初始缺陷以位移载荷的形式施加到对应的网格节点上, 计算得到结果文件, 并将其重新导入, 作为后续计算的初始状态。添加初始挠度变形后的阶梯甲板如图 3 所示。

1.3 载荷及边界条件

本文基于 ABAQUS 准静态方法计算阶梯甲板的极限承载力, 将甲板边 AB 和 MN 所有节点分别耦合至对应边中点 $RP1$ 和 $RP2$ 。

在四边均设置边界条件 $U_y = 0$, $U_z = 0$, $UR_x = 0$,

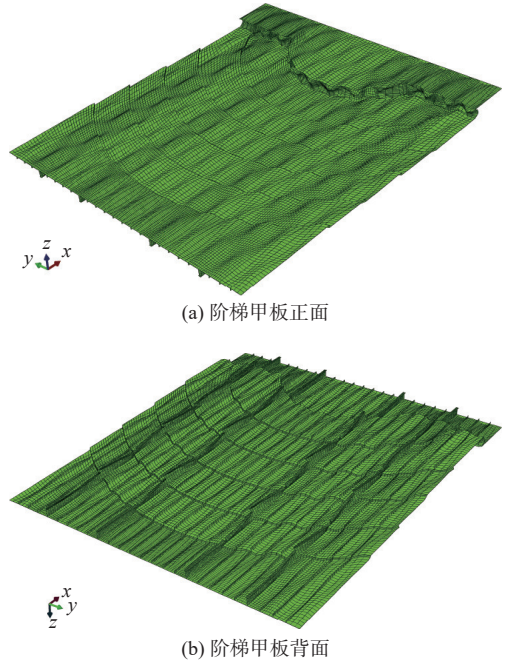


图 3 效果放大 10 倍后的初始变形

Fig. 3 The initial deformation after the effect is magnified by ten times

$UR_z = 0$, 沿 x 轴方向的纵向位移和沿 y 轴的转动设置自由约束。然后分别在耦合点 $RP1$ 和 $RP2$ 同时施加相向、等大的位移载荷, 模拟板架在船长方向受到的总纵弯曲压力, 最终提取耦合点的力和位移数据。

1.4 网格收敛性分析

网格收敛性分析结果如表 1 所示, 其中, N_{AB} 和 N_{BN} 分别为阶梯甲板沿船宽及船长方向的单元数; N_G 为纵骨高度方向单元数; N_{HF} 和 N_{HM} 分别为纵桁腹板高度及面板宽度方向单元数; N_{SUM} 为单元总数。由表 1 可知, 随着网格数量逐渐增多, 极限承载力计算结果趋于收敛。为达到较高的计算效率与精度, 最终选定网格 3 进行计算。

2 结果分析

2.1 阶梯甲板极限承载力

基于上述模型进行数值计算, 整个过程中内

表 1 收敛性分析结果

Table 1 Results of convergence analysis

方案	网格数量 N						极限承载力/kN	相对误差/%
	N_{AB}	N_{BN}	N_G	N_{HF}	N_{HM}	N_{SUM}		
网格1	78	104	2	6	2	22 208	4 318	11.37
网格2	108	104	2	6	2	26 735	4 053	4.54
网格3	108	104	3	9	4	33 492	3 877	
网格4	156	104	3	9	4	41 355	3 771	-2.73

能和动能变化如图4所示,最终得到了阶梯甲板受压后的载荷-位移曲线(图5)。从图5可以看出,随着纵向压缩位移的增大,甲板承受的力也会增大,当受压边位移增大到13 cm时,结构达到极限强度状态,此时对应的极限承载力 $F_{max} = 3\ 877\text{ kN}$ 。超过极限状态后,甲板的承载能力略微下降并保持在一个相对平稳的状态。结合图6阶梯甲板极限强度状态的应力和位移云图可以看出,阶梯甲板受压后的失效主要发生在T0和T1层交界处,并且塌陷中心最大下降深度超过了0.62 m。同时,各阶梯层纵桁都发生了不同程度的变形,其中T0层居中的两根纵桁侧倾屈服明显。

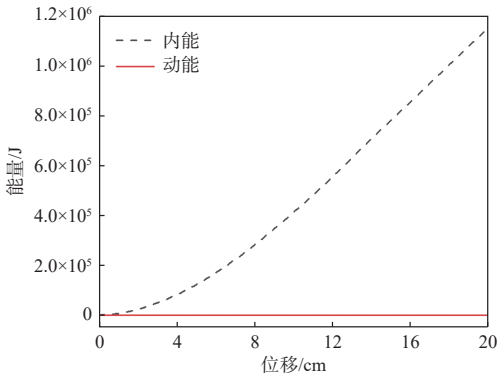


图4 能量变化曲线
Fig. 4 Energy curve

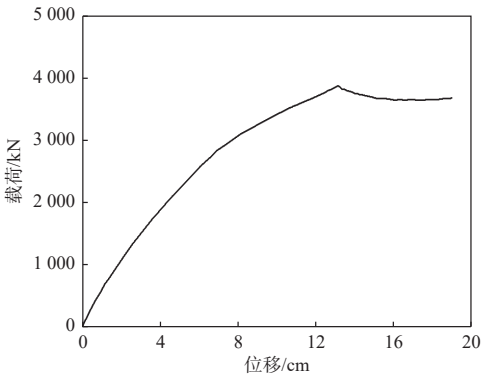
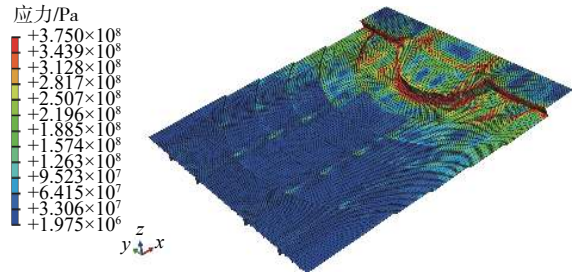


图5 载荷-位移曲线
Fig. 5 Load-displacement curve

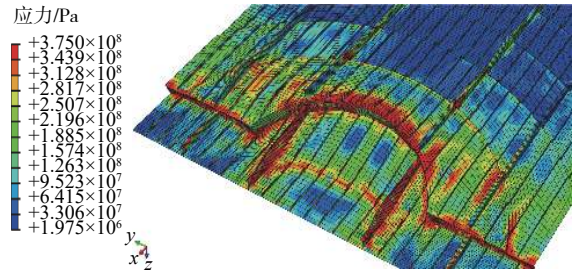
2.2 失效模式对比

为了对阶梯甲板的失效特点有更清晰的认识,与常规大跨度甲板进行了对比分析。计算过程中常规甲板的几何尺寸、材料参数、边界条件以及初始缺陷的设置均与阶梯甲板保持一致。

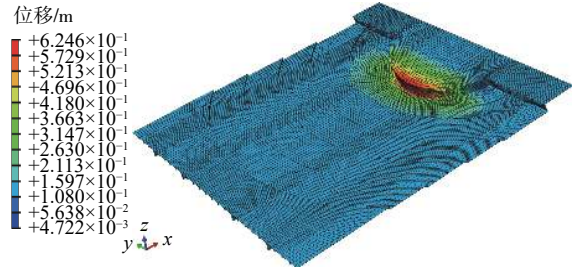
对比图6和图7可以看出,常规甲板受压失效模式呈现规律的对称分布,主要发生板格间的块状屈服,并且从几何中心开始塌陷并向外辐射。而阶梯甲板则以高度差最大的T0和T1层交



(a) 阶梯甲板正面应力云图



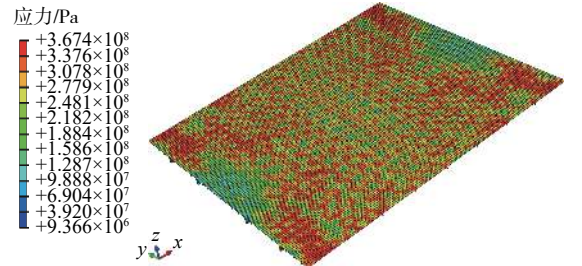
(b) 阶梯甲板背面应力云图



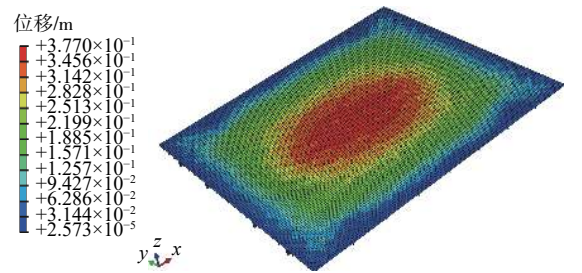
(c) 位移云图

图6 阶梯甲板极限强度状态

Fig. 6 Ultimate strength condition of step deck



(a) 应力云图



(b) 位移云图

图7 常规甲板极限强度状态

Fig. 7 Ultimate strength condition of general deck

界处为塌陷中心,高应力区域主要集中在各阶梯层交界位置,并呈环状屈服。同时从表2的数据对比可以看出,阶梯甲板的极限承载力较等尺寸常规甲板下降明显,仅为常规甲板的20%左右,

极限强度状态对应的纵向压缩位移和塌陷中心的深度也显著增大。

表 2 阶梯甲板与常规甲板极限强度对比

Table 2 Comparison of ultimate strength between stepped deck and general deck

	纵向压缩位移/cm	极限承载力/kN	塌陷中心深度/m
阶梯甲板	13.2	3 877	0.62
常规甲板	2.1	20 774	0.37

2.3 结构参数效应

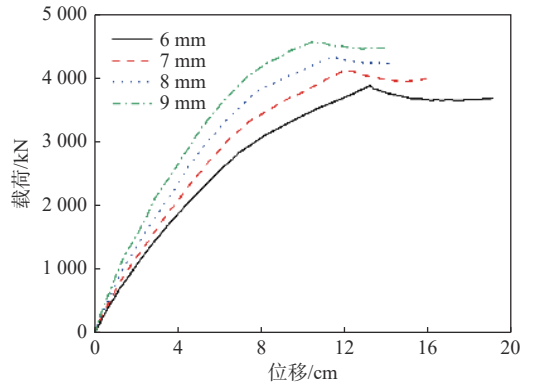
为进一步明确不同结构参数对极限承载力的影响,在保持结构几何尺寸不变的前提下,探究甲板、纵骨、纵桁腹板以及纵桁面板厚度变化对阶梯甲板极限承载力的影响效果。以 1 mm 厚度为增量,分别选取厚度 6~9 mm 的甲板、7~10 mm 的纵骨、8~11 mm 的纵桁腹板、10~13 mm 的纵桁面板进行强度计算,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,随着甲板、纵骨、纵桁腹板以及纵桁面板厚度的增大,结构的极限承载力均会增大,但增大甲板厚度会使极限强度状态对应的位移减小;其余 3 项参数的增大会使极限强度状态对应的位移增大,说明结构极限承载力增大的同时抵抗变形的能力也在增强。此外,从图 8(d)可以看出,纵桁面板板厚的变化几乎不影响结构达到极限状态之前的受力情况,仅增大了结构的极限承载力和极限状态对应的位移;而其余 3 项参数的增大会使结构极限状态之前的受力也随之增大。从影响效果来看,当甲板厚度由 6 mm 增大到 9 mm 时,结构极限承载力增加了 686 kN;当纵骨厚度由 7 mm 增大到 10 mm 时,结构极限承载力增加了 625 kN;当纵桁腹板厚度由 8 mm 增大到 11 mm 时,结构极限承载力增加了 980 kN;当纵桁面板厚度由 10 mm 增大到 13 mm 时,结构极限承载力增加了 342 kN。

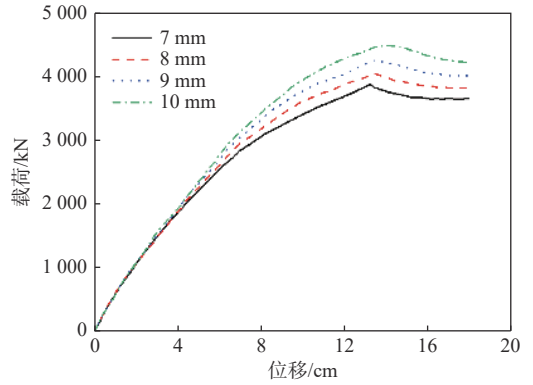
以原结构为参照,分别将甲板、纵骨、纵桁腹板以及纵桁面板厚度变化对阶梯甲板极限承载力的提升转化成百分比,如图 9 所示。可以看出,当板厚均以 1 mm 为增量均匀递增时,纵桁腹板的变化对结构极限承载力的提升效果最显著,增幅超过 25%;甲板和纵骨的提升效果相近,均为 16% 左右;而纵桁面板变化的提升效果最有限,仅为 8%。

3 结构加强和优化

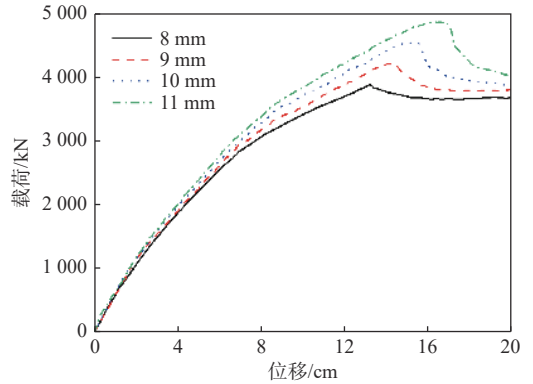
通过上述的数值计算和分析,可以得到邮轮阶梯甲板结构的薄弱位置以及结构参数变化对极



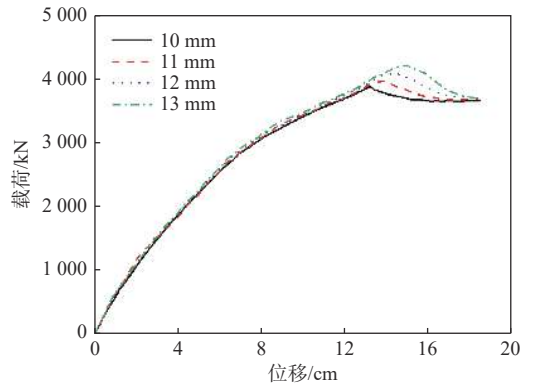
(a) 甲板板厚效应



(b) 纵骨板厚效应



(c) 纵桁腹板板厚效应



(d) 纵桁面板板厚效应

图 8 阶梯甲板结构参数变化影响

Fig. 8 Influence of structural parameter change of step deck

极限承载力的影响效果。下面从结构的角提出两种加强方案: 支柱加强和纵桁加强, 如图 10 所示。

支柱加强是在 T0 和 T1 层交界处增设 2 根 3 m

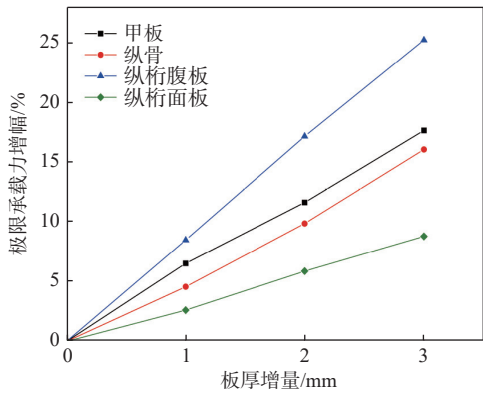


图9 极限承载力增幅曲线

Fig. 9 Increase curve of ultimate bearing capacity

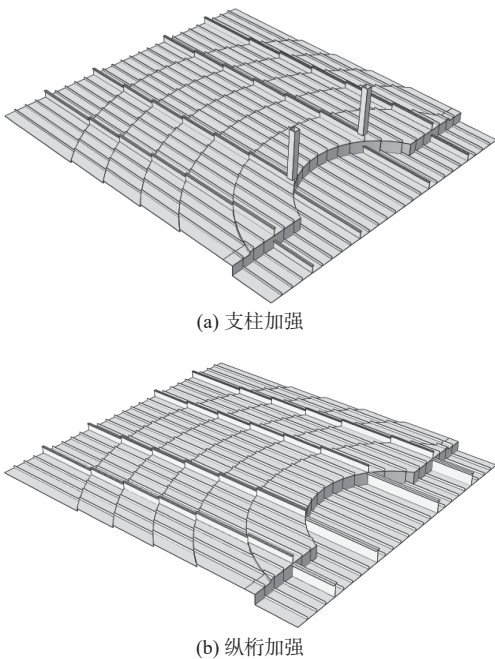


图10 阶梯甲板结构优化

Fig. 10 Stepped deck structural optimization

长的方形支柱,以此限制结构变形时的垂向位移;纵桁加强是将T0层的纵桁腹板加高,并将对应的纵桁面板由150 mm加宽至300 mm,以此减弱高腹板的不稳定性。同时,为了进一步探究加强方案的效率,分别选取3种尺寸的支柱和纵桁进行计算,与原结构对比,结果如表3和表4所示。

图11给出了支柱尺寸 350×12 和T0层纵桁尺寸 $750 \times 8/300 \times 10$ 的应力结果。结合表3可以看出,支柱加强在结构总重量小幅增加的同时有效提高了结构的极限承载力,并且支柱尺寸越大,结构极限承载力越大。但是增大支柱尺寸必然会占用下层甲板的空间,影响邮轮的功能性。而结合表4可以看出,纵桁加强能明显提高结构的极限承载力。但是,纵桁加强也并非越高越好。从对比中可以看出,当T0层纵桁加高至与T1层甲板高度(750 mm)相等时,结构极限承载力提高了35.8%,增幅最大,而对应的结构总重量仅增加了

1.6%,其次是当T0层纵桁加高至与T1层纵桁平时(1200 mm),极限承载力增幅较大。

表3 支柱加强结果

支柱尺寸/mm	结构总重量/kg	极限承载力/kN	结构总重量增幅/%	极限承载力增幅/%
无支柱(原结构)	25 957	3 877		
150×12	26 296	4 030	1.3	3.9
250×12	26 527	4 324	2.2	11.5
350×12	26 760	4 537	3.1	17.0

表4 纵桁加强结果

T0层纵桁尺寸/mm	结构总重量/kg	极限承载力/kN	结构总重量增幅/%	极限承载力增幅/%
450×8/150×10(原结构)	25 957	3 877		
750×8/300×10	26 379	5 264	1.6	35.8
1000×8/300×10	26 598	4 746	2.5	22.4
1200×8/300×10	26 772	5 034	3.1	29.8

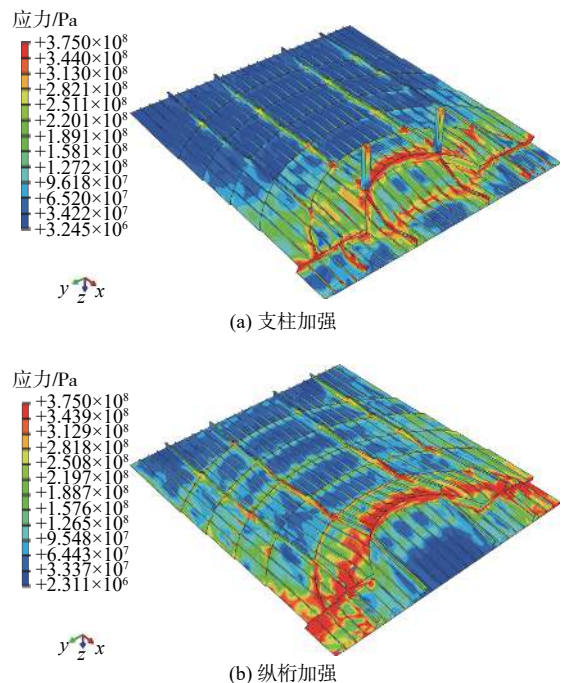


图11 加强结构极限强度状态

Fig. 11 Ultimate strength condition of strengthen structure

4 结论

本文以现代邮轮非常规阶梯甲板为研究对象,基于ABAQUS准静态方法计算了结构的极限承载力,与常规甲板失效特点进行了对比,分析了甲板、纵骨、纵桁腹板和纵桁面板厚度变化带来的影响,并提供了两种结构优化思路,得出以下结论:

1) 阶梯甲板的薄弱位置为高度差最大的T0和T1层交界处,在纵向压缩过程中,塌陷中心

和高应力区域均集中在该处,并且主要屈服区域成环状分布。常规甲板受压失效呈规律的对称分布,主要发生板格间的块状屈服,并且从几何中心开始塌陷并向外辐射。

2) 阶梯甲板的极限承载力下降明显,仅为等尺寸常规甲板的20%左右,且极限强度状态对应的纵向压缩位移和塌陷中心的深度明显增大。

3) 阶梯甲板的极限承载力随着甲板、纵骨、纵桁腹板以及纵桁面板板厚的增大而增大,其中增大纵桁腹板厚度的提升效果最显著,其次是甲板板厚。

4) 在阶梯甲板薄弱位置增设支柱或者增大T0层纵桁腹板高度,能保证结构总重量小幅增加的同时有效提高极限承载力。支柱尺寸越大,加强效果越明显;当其高度与T1层甲板相等时,纵桁加强效果最优。

参考文献:

- [1] 梅佳雪, 杜尊峰, 朱海涛. 船体结构加筋板极限强度的影响因素[J]. *船舶工程*, 2021, 43(9): 37–42, 64.
MEI J X, DU Z F, ZHU H T. Influencing factors of ultimate strength of stiffened plate of ship structure[J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(9): 37–42, 64 (in Chinese).
- [2] PAIK J K, SEO J K. Nonlinear finite element method models for ultimate strength analysis of steel stiffened-plate structures under combined biaxial compression and lateral pressure actions—Part I: plate elements[J]. *Thin-Walled Structures*, 2009, 47(8/9): 1008–1017.
- [3] PAIK J K, SEO J K. Nonlinear finite element method models for ultimate strength analysis of steel stiffened-plate structures under combined biaxial compression and lateral pressure actions—Part II: stiffened panels[J]. *Thin-Walled Structures*, 2009, 47(8/9): 998–1007.
- [4] CUI J J, WANG D Y, MA N. A study of container ship structures' ultimate strength under corrosion effects[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 130: 454–470.
- [5] LIU B, GAO L J, AO L, et al. Experimental and numerical analysis of ultimate compressive strength of stiffened panel with openings[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108453.
- [6] LIU B, YAO X N, LIN Y S, et al. Experimental and numerical analysis of ultimate compressive strength of long-span stiffened panels[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 237: 109633.
- [7] 万琪, 王福花. 大跨度无支撑甲板纵向稳定性分析和优化设计[J]. *中国造船*, 2011, 52(1): 17–25.
WAN Q, WANG F H. Longitudinal stability analysis and optimum design of supportless long-span deck structure[J]. *Shipbuilding of China*, 2011, 52(1): 17–25 (in Chinese).
- [8] 张婧, 施兴华, 顾学康. 具有初始缺陷的船体加筋板结构在复杂受力状态下的极限强度研究[J]. *中国造船*, 2013, 54(1): 60–70.
ZHANG J, SHI X H, GU X K. Ultimate strength study of stiffened plate under complex loading with initial imperfections[J]. *Shipbuilding of China*, 2013, 54(1): 60–70 (in Chinese).
- [9] 郭国虎. 大型邮轮上层建筑典型承载结构强度评估方法研究[D]. 湖北: 武汉理工大学, 2019.
GUO G H. Study on strength assessment method for typical bearing structure of cruise superstructure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [10] 甘进, 单欧, 吴卫国, 等. 邮轮典型开孔高腹板板架结构极限强度分析[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(5): 181–188.
GAN J, SHAN O, WU W G, et al. Ultimate strength analysis of typical perforated high web frame structure in cruise ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(5): 181–188 (in Chinese).
- [11] 周红昌, 孔祥韶, 袁天, 等. 多开口甲板板架结构极限承载力实验研究[J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(2): 45–50.
ZHOU H C, KONG X S, YUAN T, et al. Experimental study on the ultimate bearing capacity of deck grillage structure with multiple openings[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(2): 45–50 (in Chinese).
- [12] 中国船级社. 钢质海船入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
CCS. Rules for Classification of sea-going steel ships [M]. Beijing: China Communications Press, 2018 (in Chinese).
- [13] SHI G J, GAO D W. Analysis of hull girder ultimate strength for cruise ship with multi-layer superstructures [J]. *Ships and Offshore Structures*, 2019, 14(7): 698–708.
- [14] CUI J J, WANG D Y, MA N. Key influencing factors in ultimate strength analysis for large container ships[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2019, 29(1): 85–96.