文章编号：1007−7294(2026)08−1377−10

I 型金属夹芯板极限强度简化计算方法研究

李政杰[1,2,3,4]，胡嘉骏[2,3,4]，金星瑜[2,3,4]，赵　南[2,3,4]，冯国庆[1]
（1. 哈尔滨工程大学，哈尔滨 150001；2. 中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082；3. 深海技术科学太湖试验室，江苏 无锡 214082；4. 船舶结构安全全国重点实验室，江苏 无锡 214082）

摘要：针对面内压缩载荷作用下 I 型金属夹芯板的极限承载问题，开展了 I 型金属夹芯板系列算例非线性有限元计算，对其典型失效模式和极限承载能力进行了分析，计算结果表明：面内压缩载荷作用下，I 型金属夹芯板的主要失效模式为屈服或局部板格屈曲导致整体崩溃，其压缩极限强度与面板和芯板的柔度高度相关。由此提出了一种基于面板/芯板板格应力叠加的剖面极限应力简化计算方法。经与系列算例非线性有限元计算结果对比，简化计算方法的平均相对误差为−5.53%，与公开模型试验结果的偏差为 5.45%，具有良好的精度，可为工程设计中 I 型金属夹芯板极限强度快速计算和构型参数设计提供技术支撑。

关键词：金属夹芯板；失效模式；极限承载能力；简化计算方法；非线性有限元
中图分类号：U661.4　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.08.013

Simplified calculation method for ultimate strength of I-type metal sandwich panels

LI Zheng−jie[1,2,3,4], *HU Jia−jun*[2,3,4], *JIN Xing−yu*[2,3,4], *ZHAO Nan*[2,3,4], *FENG Guo−qing*[1]
(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 3. Taihu Loboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, China; 4. National Key Laboratory of Ship Structural Safety, Wuxi 214082, China)

Abstract: Aiming at the ultimate bearing capacity problem of I-type metal sandwich panels under in-plane compressive loads, a series of nonlinear finite element calculations were carried out for I-type metal sandwich panels examples. The typical failure modes and ultimate bearing capacity were analyzed. The calculation results show that the main failure modes are yielding or overall collapse caused by local panel buckling. The compressive ultimate strength is highly correlated with the flexibility of the face plates and core plates. Based on this, a simplified method for calculating the ultimate stress by superimposing the stresses of the face sheets and core plates is proposed. Compared with the nonlinear finite element results, the simplified method yields a mean relative error of −5.53%, and a deviation of 5.45% from published model test data, indicating good accuracy. This method can provide technical support for the rapid prediction of the ultimate strength and the design of configuration parameters of I-type metal sandwich panels.

Key words: metal sandwich panels; failure mode; ultimate bearing capacity; simplified calculation method; nonlinear finite element

---

收稿日期：2025−12−20
基金项目：国家重点研发计划资助(2022YFB3306200)
作者简介：李政杰(1986−)，男，硕士，高级工程师，通讯作者，E-mail：lizhengjie@cssrc.com.cn。

0 引 言

船体结构的极限强度问题,一直是世界范围内学者们密切关注的领域,ISSC(International Ship and Offshore Structure Congress)设置了专门的极限强度委员会以长期关注船体结构的极限承载问题。金属夹芯板作为一种轻质结构,其面内极限承载特性是其在主船体甲板结构中应用的一个关键要素,因此,如何快速准确地评估金属夹芯板的极限强度对推动金属夹芯板在船体结构工程中的应用至关重要。

目前,针对传统加筋板结构的极限强度计算,主要有解析法、非线性有限元法和简化计算方法。Paik[1−2] 等基于正交异性板和弹塑性大变形理论,推导了加筋板极限强度计算的半解析法;Pedersen 和崔维成等[3]、Mansour 等[4] 利用弹塑性方法(EPM 法)推导了光板、加筋板的压缩极限强度计算公式;祁恩荣等[5] 联合中国船级社开发了 EPM 高阶屈曲计算程序。上述研究为加筋板结构的极限强度分析奠定了理论基础。

随着计算机技术的高速发展,非线性有限元法已越来越受欢迎。2012 年,ISSC 开始提出了针对船体加筋板结构极限强度非线性有限元计算的基准算例(Benchmark)[6],对比分析各研究者非线性有限元计算方法的优缺点,以期形成准确可靠的非线性有限元法。计算结果表明:在合理考虑结构模型范围的选取、边界条件的设置、网格单元的划分、初始缺陷的模拟等因素的前提下,可获得较为准确的极限值。但非线性有限元法计算工作量较大,且需要计算者具有丰富的计算经验。

简化计算方法通常基于理论分析、模型试验和有限元计算等大量结果,通过统计拟合形成简化计算公式。在船体结构设计初级阶段,该方法可快速便捷地评估结构的极限强度,为工程中船体结构设计提供技术支撑。Von Karman 等[7]、Frankland[8]、Faulkner[9]、崔维成和 Mansour[10]、Smith 等[11]、Soares[12]、Ueda 等[13]、Paik 等[14]、Zhang 等[15] 许多学者先后提出了大量的简化计算公式,为加筋板结构的极限强度评估提供了重要支撑。DNV(1987)[16] 和 IACS [17] 规范中也给出了加筋板不同失效模式下的极限应力计算公式,以指导加筋板结构设计,为结构设计的初期阶段快速设计与计算提供便利,具有重要的工程意义。

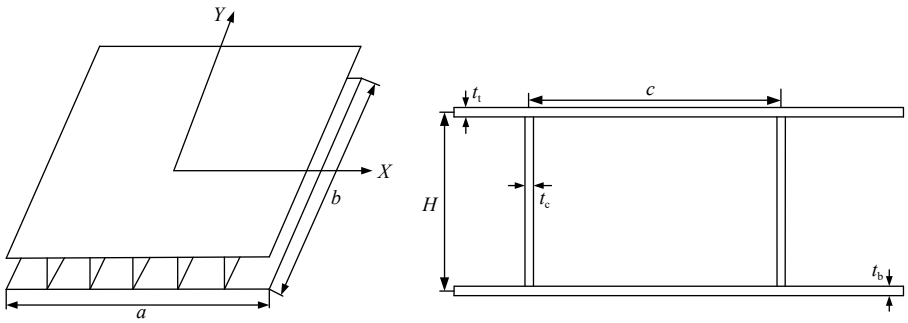
然而,针对金属夹芯板的面内承载特性,目前相关研究不多,仅有一些非线性有限元计算方面的分析[18−22],对金属夹芯板的承载特性进行了初步探讨,尚未形成简单适用的简化方法。因此,本文针对面内压缩载荷作用下 I 型金属夹芯板的极限承载问题,通过开展系列算例非线性有限元计算,对其典型失效模式和极限承载能力进行分析,以期建立一种 I 型金属夹芯板极限强度的简化计算方法,为 I 型金属夹芯板的极限强度快速计算提供支撑,从而为 I 型金属夹芯板的构型设计提供参考。

1 单轴压缩作用下 I 型金属夹芯板失效模式分析

1.1 典型 I 型金属夹芯板算例介绍

I 型金属夹芯板由上、下面板及芯材组成,具有刚度大、重量轻的特点。夹芯结构横向宽度为a,纵向长度为b,上面板与下面板厚度分别为t_t和t_b,芯材厚度为t_c,芯层高度为H,I 型夹芯间距为c。典型 I 型金属夹芯板如图 1 所示。

参考一般船体甲板板架结构的布置特点,结合船用钢材的板厚规格和金属夹芯板的设计需求,以纵桁和强横梁作为支撑边界,设计了一组 I 型金属夹芯板算例,开展单轴压缩作用下系列算例非线性有限元计算,算例几何参数如表 1 所示,对算例按照“I-PmSn-HcCd”形式进行编号,其中“Pm”代表上、下面板厚度,m 有 2、3、4、5 共 4 个值分别代表厚度 2.5 mm、3 mm、4 mm、5 mm;“Sn”代表芯材厚度,n 有 2、3、4、5 共 4 个值分别代表厚度 2.5 mm、3 mm、4 mm、5 mm;“Hc”代表芯材高度,c 有 10、20、30 共 3 个值分别代表高度 100 mm、200 mm、300 mm;“Cd”代表芯材间距,d 有 15、20、25、30 共 4 个值分别代表间距 150 mm、200 mm、250 mm、300 mm。



（a）I 型夹芯板整体图　　（b）胞元细节图

图 1 I 型金属夹芯板示意图

Fig.1 Schematic diagram of I-type corrugated sandwich plate

表 1 金属夹芯板几何参数

Tab.1 Geometric parameters of metal sandwich panels

I型金属夹芯板$a\times b$/mm	C/mm	t_t和t_b/mm	t_c/mm	H/mm
≈2500×2500	150/200/250/300	2.5/3/4/5	2.5/3/4/5	100/200/300

1.2 非线性有限元计算模型及边界条件

参考 ISSC Benchmark[6] 中建议的加筋板极限强度有限元模型范围和边界条件，考虑船体甲板板架中纵桁和强横梁的弹性支撑作用，金属夹芯板有限元模型采用“1/2+1+1/2”的模型范围，横向和纵向各延伸 1/2 范围。有限元模型均采用四节点 shell 单元进行模拟，芯材高度划分 6 个单元，芯材间距按单元长宽比约 1.0 划分，并保证每个间距内单元数量不少于 4 个，以确保局部板格可呈现出屈曲失稳模态，有限元模型如图 2 所示。

有限元模型采用理想弹塑性材料，忽略材料的塑性强化效应，具体参数如表 2 所示。忽略初始变形和残余应力的影响。

有限元模型四周采用对称边界条件，纵桁和强横梁位置施加垂向节点约束，模型纵向中部节点施加纵向位移约束；模型两端施加幅值相同、方向相反的位移载荷，使得模型呈现单向压缩状态，边界条件如图 3 所示。

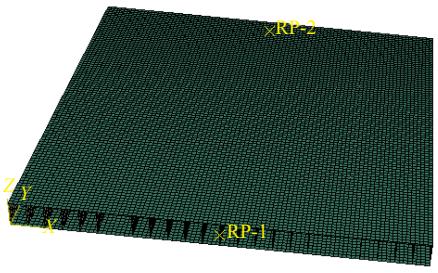


图 2 金属夹芯板有限元模型

Fig.2 Finite element model of the metal sandwich panel

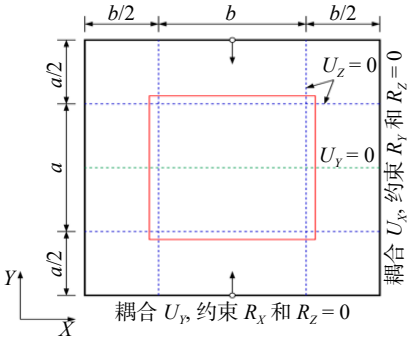


图 3 有限元模型边界条件示意图

Fig.3 Schematic diagram of finite element model boundary conditions

1.3 典型失效模式分析

图 4 给出了金属夹芯板端部的典型平均应力-应变曲线。从夹芯结构平均应力−应变关系上，可将其失效过程划分为以下 3 个阶段：(1)线弹性阶段：轴向载荷和轴向位移基本呈线性。在

表 2 有限元模型材料参数

Tab.2 Material parameters of the finite element model

弹性模量E/MPa	泊松比v	屈服强度σ_y/MPa
205 800	0.3	355

该阶段，夹芯结构没有发生材料和结构的破坏。(2)塑性阶段：随载荷的持续增加，结构产生塑性变形，刚度显著降低。整个阶段呈现一定的下降趋势，表现出明显的非线性特征，直至结构达到极限强度并发生破坏。(3)后极限强度阶段：夹芯结构在达到极限承载能力后发生崩溃，结构的承载能力迅速下降。

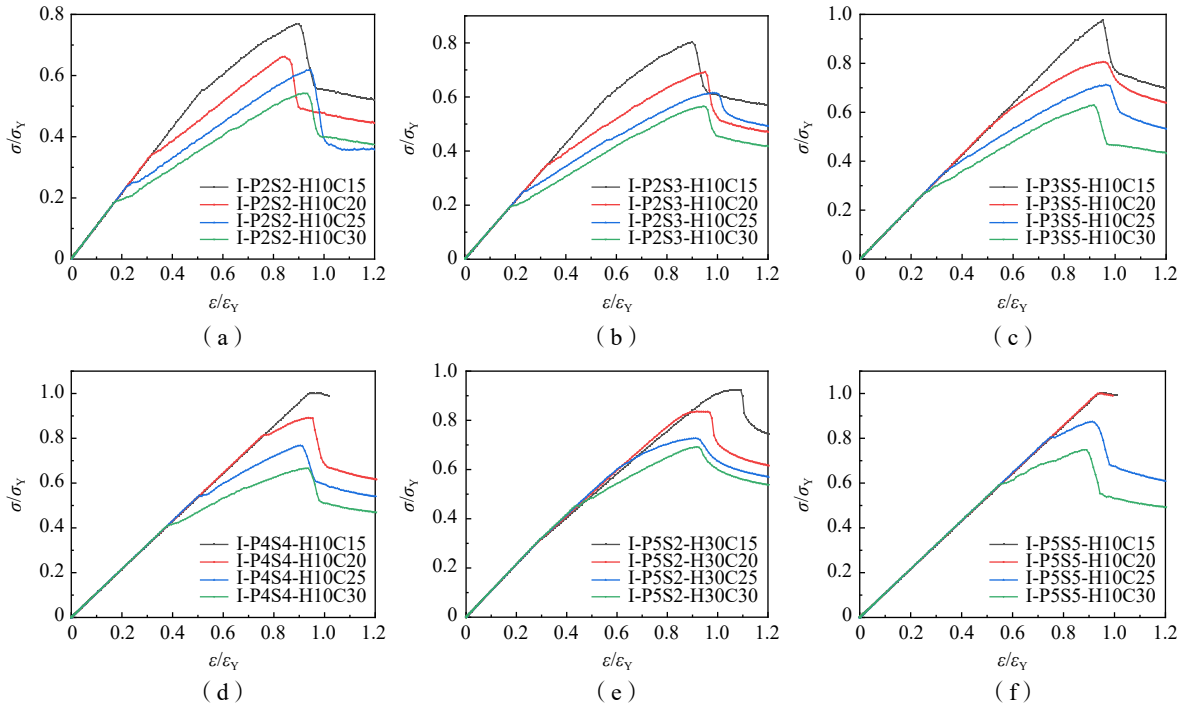
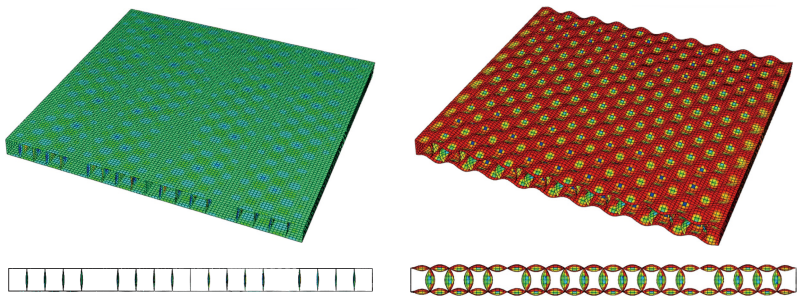


图 4 模型端部的平均应力-应变曲线

Fig.4 Dimensionless average stress-strain curve

图 5 分别给出了芯板开始屈曲、面板芯板极限状态同时屈曲时的变形情况。金属夹芯板承载过程中，刚度较小的构件先开始屈曲，随着承载增加，屈曲变形逐步增加，导致其他部位也发生屈曲，直至整体失效到达极限状态，随后形成塑性铰，卸载失去承载能力。

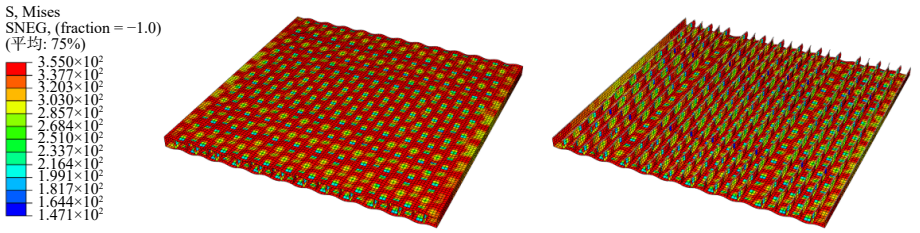


(a) 芯材开始出现塑性　(b) 极限时刻变形情况

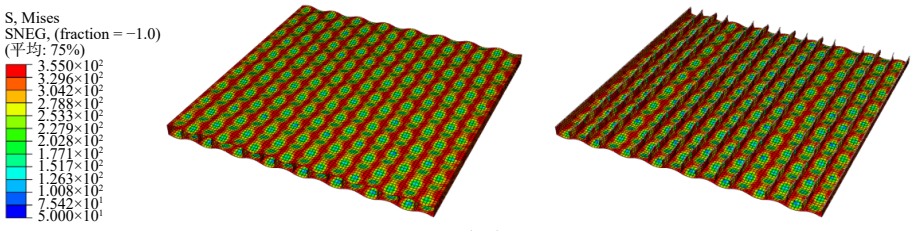
图 5 不同时刻夹芯结构变形情况

Fig.5 Deformation of the sandwich structure at different moments

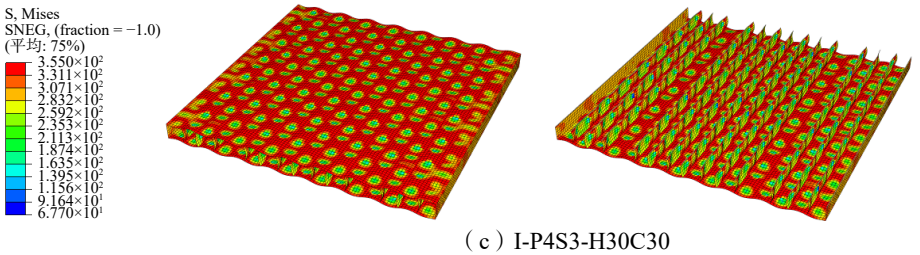
单轴压缩下金属夹芯板的失效模式基本一致，极限状态均表现为板格屈曲失效或屈服失效。屈曲失效状态时，小板格呈现多个半波失稳波形，如图 6 所示。面板和芯材的尺寸参数搭配不同，导致两者刚度不同，进而影响屈曲失稳的先后次序。当芯材刚度大于面板刚度时，面板先屈曲，并进入塑性，随后塑性变形进一步扩展，最终导致整体崩溃失效；反之，当芯材刚度小于面板刚度时，芯板先屈曲，塑性变形扩展，最终导致整体崩溃失效。当面板或芯板板格较弱时，板格容易发生屈曲失稳，金属夹芯板以局部板格屈曲失效导致整体崩溃失效；随着面板或芯材厚度的增加，部分结构的板格发生屈服失效，呈现塑性屈服失效。



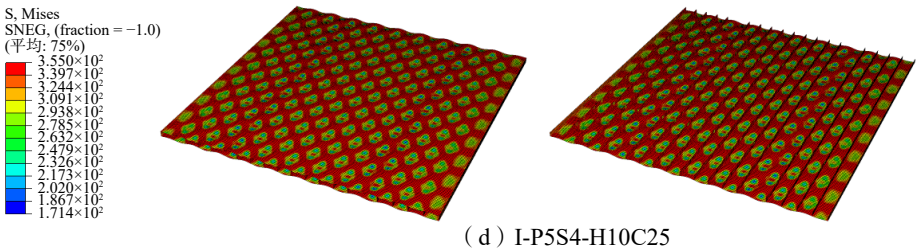
（a）I-P3S2-H20C20



（b）I-P2S2-H20C30



（c）I-P4S3-H30C30



（d）I-P5S4-H10C25

图 6　极限屈曲状态 Mises 应力云图

Fig.6　Mises stress contour of the ultimate buckling state

2　I 型金属夹芯板极限强度简化计算方法

由于金属夹芯板主要以板格屈曲/屈服失效导致夹芯结构整体崩溃丧失承载能力，因此基于单元离散的思想，将金属夹芯板离散为芯板板格和面板板格，如图 7 所示。通过叠加两种板格应力可得到整体的承载能力，以此根据截面面积进行平均，即可通过板格的极限应力来计算金属夹芯板的极限强度，如公式(1)所示。

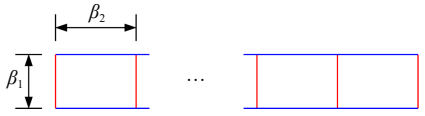


图 7　金属夹芯板离散方式

Fig.7　Discretization method of the metal sandwich panel

$$\psi_{\mathrm{u}}=\frac{\sum_{1}^{i}\sigma_i\times A_i+\sum_{1}^{j}\sigma_j\times A_j}{\sum_{1}^{i}A_i+\sum_{1}^{j}A_j} \tag{1}$$

式中：ψ_{u}为金属夹芯板平均极限应力，i为上下面板板格的数量总和，j为芯材板格的数量，σ_i和σ_j分别为第i和j个板格的应力，A_i和A_j分别为第i和j个板格的横截面面积。

2.1 板格极限强度简化计算公式分析

对于板格的极限强度简化计算公式，比较经典的公式有 Von Karman、Frankland、Faulkner 和 Smith 等，如表 3 所示。其中 Frankland 公式具有较高的精度，且型式简单，被广泛采纳使用。在 CCS 规范 Smith 法中，板单元屈曲失效是以 Frankland 公式为基础，根据板格的细长比进行了修正，形成了板单元的屈曲强度计算公式。

表 3 板格极限强度典型简化计算公式

Tab.3 Typical simplified calculation formulas for ultimate strength of plates

提出经典公式的学者	简化计算公式	公式特点
Von Karman（1932）	$\varphi_u = \dfrac{1.9}{\beta}$	最早提出，为后屈曲有效带板宽度计算奠定了基础
Frankland（1940）	$\varphi_u = \dfrac{2.25}{\beta} - \dfrac{1.25}{\beta^2}$	应用最为广泛
Faulkner（1975）	$\varphi_u = \dfrac{2}{\beta} - \dfrac{1}{\beta^2}$	型式较为简单
Smith（1988）	$\varphi_u = 0.23 + \dfrac{1.16}{\beta} - \dfrac{0.48}{\beta^2} + \dfrac{0.09}{\beta^3}$	多项式拟合

备注：φ_u为板格极限应力的无因次化，$\varphi_u = \dfrac{\sigma_u}{\sigma_y}$，$\beta$为板格的柔度系数，$\beta = \dfrac{b}{t}\sqrt{\dfrac{\sigma_y}{E}}$，$b$为板格宽度，$t$为板格厚度，$\sigma_y$和$E$为板格的材料屈服强度和弹性模量，$\sigma_u$为板格的极限应力。

针对 Frankland 公式，绘制了无因次极限应力−柔度函数曲线，如图 8 所示。由曲线可知，当板格柔度系数较小时，其极限应力值为负，失去了承载能力的物理含义。实际中，板格柔度较小，即板格宽度较小，厚度较大时板格主要表现为塑性屈服失效，其无因次极限应力为 1.0。板格柔度较大时，板格宽度较大板厚较小，薄板整体刚度较小使得屈曲失稳更易发生，以致极限应力随着柔度增加有所降低。

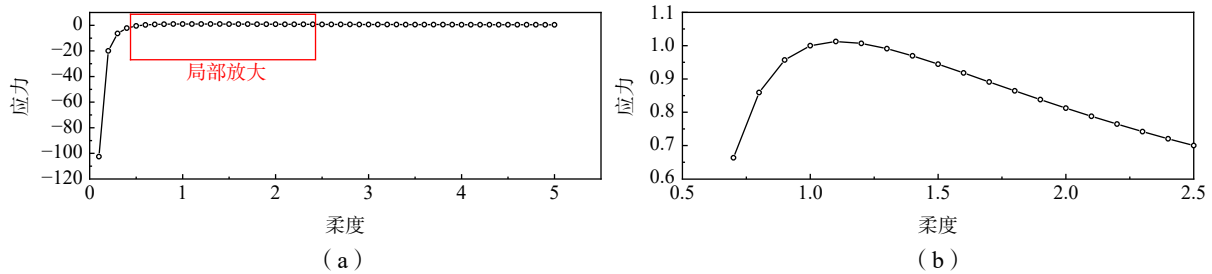


图 8 无因次极限应力-柔度曲线

Fig.8 Stress-flexibility curve of the refined element

在船体板格设计中，为提高结构的承载能力，应尽可能充分发挥材料的承载性能，使其板格极限应力接近 1.0。因此，板格设计时尺寸搭配的柔度取值应限定在一定的范围内。

2.2 I 型金属夹芯板尺寸参数配比分析

常规船用薄钢板的板厚一般有 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm，对于金属夹芯板，其芯材高度或间距可取 40 mm、60 mm、80 mm、100 mm、120 mm、140 mm、160 mm、180 mm，当钢材屈服强度取为 355 MPa，弹性模量取为 206 000 MPa 时，由此搭配形成的板格柔度系数计算值见表 4，其典型柔度 β 取值范围为 0.277~2.491。

2.3 金属夹芯板离散板格极限应力简化计算公式

根据上表数值可知，柔度 β 较小，表明板厚较大且板格宽度较小，这种板格一般呈现为材料塑性屈服失效，表明其极限应力值近似为 1.0。对板格极限应力计算公式分析可知，当柔度 β 取 0.7 时，无因次极限应力为 0.66。结合实际 I 型金属夹芯板可能的尺寸配比，对于板格 β 小于 0.7 时，板格的极限承载应力取为 1.0，即金属夹芯板面板/芯材板格的无因次极限应力简化计算公式修订为

表 4 不同尺寸组合下柔度 β 计算值

Tab.4 Calculated values of β under different dimension combinations

t/mm	b/mm							
	40	60	80	100	120	140	160	180
3	0.554	0.830	1.107	1.384	1.661	1.937	2.214	2.491
4	0.415	0.623	0.830	1.038	1.245	1.453	1.661	1.868
5	0.332	0.498	0.664	0.830	0.996	1.162	1.328	1.494
6	0.277	0.415	0.554	0.692	0.830	0.969	1.107	1.245

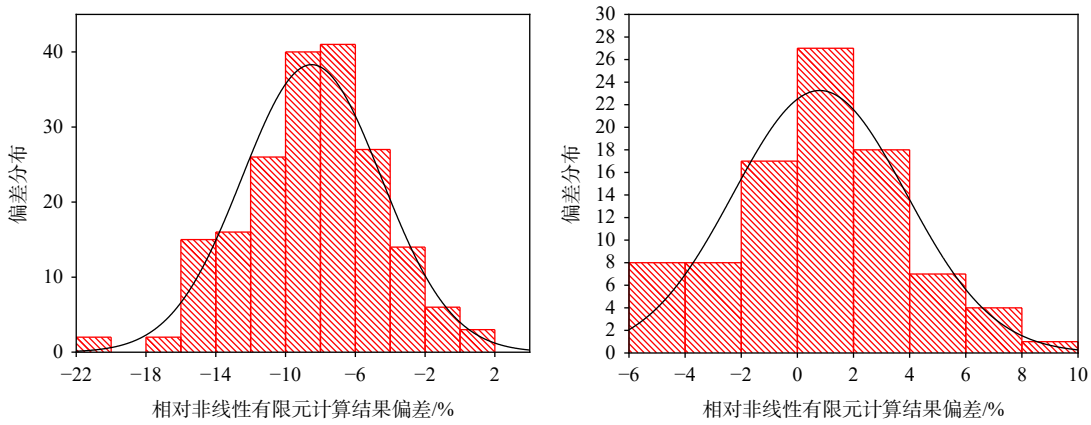
$$\sigma_i=\begin{cases}\dfrac{2.25}{\beta_i}-\dfrac{1.25}{{\beta_i}^2}, & \text{当}\beta\geqslant 0.7\text{时}\\ 1, & \text{当}\beta<0.7\text{时}\end{cases} \tag{2}$$

式中：β_i为金属夹芯板面板或芯板板格的柔度，σ_i为金属夹芯板格的无因次平均极限应力。

3 I 型金属夹芯板极限强度简化计算对比验证

3.1 金属夹芯板系列算例计算结果对比分析

针对上述单轴压缩下的 192 个系列 I 型金属夹芯板算例，利用简化公式计算得到了其极限应力，并与非线性有限元结果进行比较。简化计算结果稍小于有限元计算结果，相对偏差主要分布在−4%~−12%，平均偏差为−8.5%，服从正态分布，如图 9(a)所示。



（a）系列算例计算结果偏差分布　　（b）公开系列算例计算结果偏差分布

图 9 计算结果相对偏差分布

Fig.9 Distribution of relative deviations of calculation results

3.2 公开系列算例非线性有限元计算结果对比分析

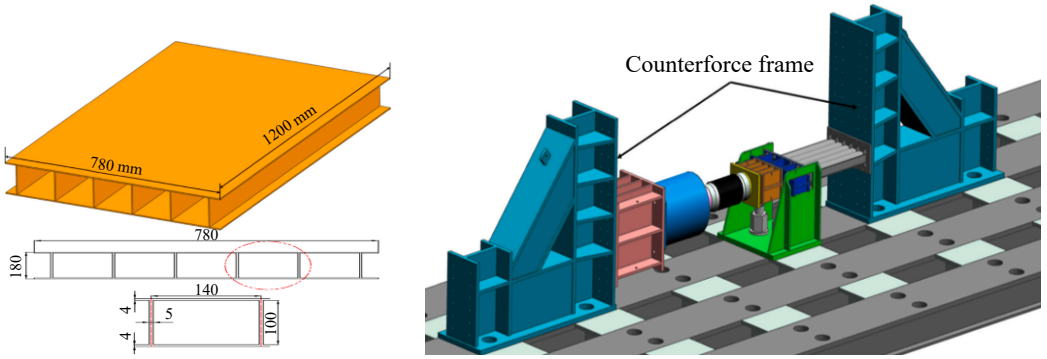
针对上海交通大学王德禹教授团队论文中的 90 个系列金属夹芯板算例[23]，开展了金属夹芯板极限强度简化计算，并与公开的非线性有限计算结果进行比较，简化计算方法计算结果与之吻合较好。相对偏差主要分布在−2%~4%，两者平均偏差为 0.8%，见图 9(b)所示。3.1 节中系列算例的简化计算结果偏差大于 3.2 中公开算例的偏差值，主要是因为公开算例的非线性有限元计算考虑了初始变形的影响，导致其计算结果稍低，因此，简化计算结果与之吻合较好。

针对两种算例非线性有限元计算结果，简化计算结果与之相对平均偏差为−5.53%，稍小于非线性有限元计算结果，总体水平较为保守，用于指导 I 型金属夹芯板结构工程设计偏于安全。

3.3 公开模型试验结果对比分析

王德禹教授团队开展了单轴压缩作用下金属夹芯板的极限强度模型试验[23]，试验模型和加载方式

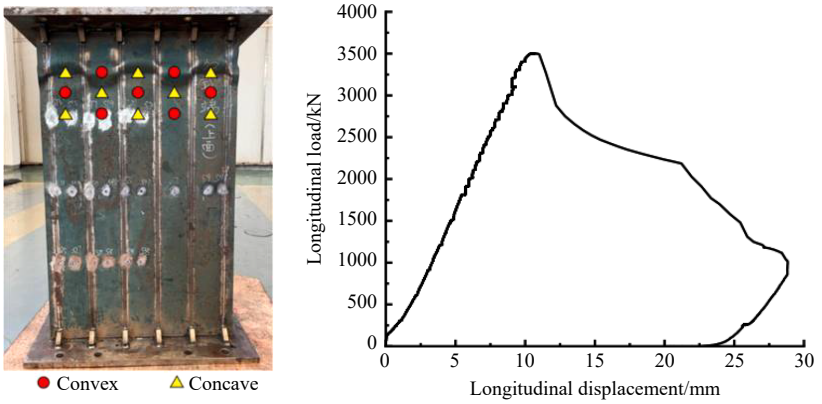
如图 10 所示，试验结果如图 11 所示。试验结果显示，模型上下面板屈曲失效导致横向形成塑性铰，整体崩溃失去承载能力，其端面平均极限应力为 378.9 MPa。



（a）金属夹芯试验模型　　（b）试验加载方式

图 10 单轴压缩模型试验[23]

Fig.10 Uniaxial compression model test[23]



（a）试验模型破坏模式　　（b）位移-载荷曲线

图 11 模型试验结果[23]

Fig.11 Model test results [23]

针对试验模型，通过简化计算方法对其极限承载能力进行计算，其计算结果为 399.5 MPa，相对试验结果，偏差为 5.45%，吻合较好。模型试验结果较简化计算结果偏小，主要是由于模型焊接产生初始变形和残余应力以及激光穿透焊存在少许缺陷所致。

4 结　论

本文以 I 型金属夹芯板为对象，开展了面内单轴压缩载荷作用下系列算例的非线性有限元计算，分析了其典型失效模式和极限承载能力，提出了一种基于面板和芯板应力叠加的金属夹芯板极限应力的简化计算方法，可为 I 型金属夹芯板极限强度快速计算提供参考。主要结论如下：

(1)I 型金属夹芯板的主要失效模式为屈服或局部板格屈曲导致整体崩溃，单轴压缩下金属夹芯板的极限强度与面板和芯板板格的柔度高度相关。

(2)基于单元离散的思想，将金属夹芯板离散为芯板板格和面板板格，通过叠加两种板格应力来计算整体结构的承载应力，由此建立了 I 型金属夹芯板极限应力的简化计算方法。

(3)经与系列算例非线性有限元计算结果对比，简化方法的平均相对误差为−5.53%，与公开模型试验结果对比，偏差为 5.45%，具有良好的精度。可为 I 型金属夹芯板工程设计中极限应力快速计算和构型参数设计提供技术支撑。

参 考 文 献：

[1] Paik J K, Thayamballi A K, Lee S K, Kang S J. A semi-analytical method for the elastic-plastic large deflection analysis of welded steel or aluminum plating under combined in-plane and lateral loads[J]. Thin-Walled Structures, 2001, 39(2): 125−152.

[2] Paik J K, Bong J K, Jung K S. Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part II stiffened panels [J]. Ocean Engineering, 2008, 35: 271−280.

[3] Cui W C, Wang Y J, Pedersen P T. Strength of ship plates under combined loading[J]. Marine Structures, 2002, 15(1): 75−97.

[4] Cui W C, Mansour A E. Generalization of a simplified method for predicting ultimate compressive strength of ship panels[J]. Int Ship Build Prog, 1999, 46(447): 139−157.

[5] 祁恩荣, 等. 加筋板格高级屈曲分析技术研究及软件开发[J]. 船舶力学, 2016, 20(4): 1007−7294.
Qi E R, et al. Study on advanced buckling analysis technology and software development for stiffened plates[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(4): 1007−7294. (in Chinese)

[6] Yao T. Report of specialist committee Ⅲ. 1 ultimate strength[C]. Proceedings of the 18th International Ship and Offshore Structures Congress(ISSC 2012), Rostock, 2012: 285−363.

[7] Von Karman, Ernest E. Sechler, L. H. Donnell. The strength of thin plates in compression[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1932, 54(2): 53−56.

[8] Frankland J M. The strength of ship plating under edge compression[R]. United States Experimental Model Basin, Washington, 1940.

[9] Faulkner D. A review of effective plating for use in the analysis of stiffened plating in bending and compression[J]. Journal of Ship Research, 1975, 19(1): 1–17.

[10] Cui W, Mansour A E. Generalization of a simplified method for predicting ultimate compressive strength of the panels[J]. Int. Shipbuilding Progress, 1999, 46: 447, 291−303.

[11] Smith C S, Davidson P C, Chapman J C, Dowling P J. Strength and stiffness of ship's plating under in-plane compression and tension[J]. Trans RINA, 1998, 130.

[12] Soares C G. Design equation for ship plate elements under uniaxial compression[J]. J Construct Steel Res., 1992, 22: 99−114.

[13] Ueda Y, Yao T, Nakacho K, et al. Prediction of welding residual stress, deformation and ultimate strength of plate panels. In: Engineering design in welded constructions[M]. Oxford: Pergamon Press, 1992: 251−259.

[14] Jeom Kee Paik, Bong Ju Kim. Ultimate strength formulations for stiffened panels under combined axial load, in-plane bending and lateral Pressure: A benchmark study[J]. Thin Walled Structures, 2002(40): 45−83.

[15] Zhang S M, Khanl. Buckling and ultimate capability of the plates and stiffened Panels in anxial compression[J]. Marine Struetures, 2009(22): 791−808.

[16] DNV-RP. Recommended practice DNV-RP-C201-buckling strength of plated structures[S]. Høvik, Norway: Det Norske Veritas, 2002.

[17] IACS. Common structural rules for bulk carriers[S]. London: International Association of Classification Societies, 2006.

[18] Zhong Q, Wang D Y. Ultimate strength behavior of laser-welded I-core sandwich plates under in-plane compression[J]. Ocean Engineering, 2021(238): 109685.

[19] Zhong Q, Wang D Y. Ultimate strength characteristics and assessment of laser welded I-core sandwich plates under combined biaxial compression and lateral pressure[J]. Ocean Engineering, 2022a(263): 112324.

[20] 李政杰, 黄　路, 赵　南, 等. 单轴压缩下金属夹层板极限承载性能分析[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 53–58.
Li Z J, Huang L, Zhao N, et al. Ultimate bearing capacity for steel sandwich panels under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(4): 53–58. (in Chinese)

[21] 洪婷婷, 田阿利, 潘康华. 组合压载下金属折叠式夹层板的后屈曲极限强度分析[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(9): 43–47.
Hong T T, Tian A L, Pan K H. Post-buckling strength analysis of corrugated core sandwich panel under combined

compression loading[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(9): 43–47. (in Chinese)

[22] 王　果, 胡宗文, 王自力, 张延昌. 夹层板面内连接结构力学性能数值仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(6): 54–59.
Wang G, Hu Z W, Wang Z L, Zhang Y C. Numerical simulation technology for mechanical property analysis of sandwich panel connections in plane[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(6): 54–59. (in Chinese)

[23] Zhao M J, Han Z J, Zhong Q, et al. Experimental study of laser welded joint failure and overall ultimate strength for I-core sandwich panels[J]. Ocean Engineering, 2025(324): 120562.