

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫二：潛艦結構強度分析(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2611-E-002-022-

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：李雅榮

計畫參與人員：鍾承憲、許家豪

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 29 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☐ 成果報告 ☒ 期中進度報告

中進度
報告

潛艇關鍵技術之基礎研究 子計畫二：潛艦結構強度分析(1/3)

計畫類別：☐ 個別型計畫 ☒ 整合型計畫

計畫編號：NSC91-2611-E-002-022

執行期間：91 年 8 月 1 日 至 92 年 7 月 31 日

計畫主持人：李雅榮

共同主持人：

計畫參與人員：鍾承憲、許家豪

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☒ 精簡報告 ☐ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

☐ 赴國外出差或研習心得報告一份

☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份

☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐涉及專利或其他智慧財產權，☐一年☐二年後可公開查詢

執行單位：台大工科及海洋所

中 華 民 國 92 年 5 月 27 日

行政院國家科學委員會整合型專題研究計畫期中進度報告

潛艇關鍵技術之基礎研究 子計畫二：潛艦結構強度分析(1/3)

計畫編號：NSC91-2611-E-002-022

主持人：李雅榮(台大工科及海洋所)

研究人員：鍾承憲、許家豪

一、摘要

高性能潛艦之結構系統，應具有極佳之抵抗潛深水壓及水下爆震的能力，因此本子計畫為配合此目標之追求，將以潛艦壓力殼之耐高壓、耐爆震及耐疲勞破壞的能力為重點，而本計畫第一年之進度，以探討深水壓力下之應力分析及挫曲強度為主。

本子計畫於第一年度中，完成了 209 型潛艇壓力殼(含未開孔模型與開孔模型)之數值模型與網格，並以此模型測試在不同尺寸的內肋骨補強，外殼所承受的應力與變形、挫曲強度的不同，藉此推測該設計條件下，最佳的結構設計。

關鍵字：潛艦、壓力殼

Abstract

The structure system of high capability submarine must have the ability to resist the high pressure under deep water and under water shock loading. Consequently, the aim of this research will be the capability of resisting high pressure, shock loading, and fatigue damage of pressure hull. The achieved percentage of scheduled progress in the first year is to obtain the stress distribution and bulking strength under deep water pressure.

In the first yearly period, we accomplished the mathematical model and suitable finite elements of grid notes of the pressure hull, including the model without aperture and model with apertures and added equipments. Then we use this model to gain the stress distribution, strain distribution and bulking strength in these conditions when the model with different inner ribs. Therefore, we can use those results to

determination the optimization of structure design of this submarine.

Key Words : submarine, pressure hull

二、緣由與目的

一般潛艦艦體結構主要分為：帆罩(指揮塔, Sail)、舵翼(Rudder)、外殼(Outer Shell)及壓力殼(Pressure Hull)等部分。其中壓力殼部分主要由圓筒殼(Cylinder)、半球形殼(Dome)及圓錐殼(Cone)等三種傳統式壓力殼結構所構成。壓力殼功能為形成一耐壓空間，抵抗外壓以保護人員、機器之安全。因此壓力殼的設計為潛艦設計中之重要項目。

如果壓力殼為未補強的單殼構件，在承受壓力下斷面會逐漸變得扁平，很可能在材料未達極限強度前，就已造成挫曲而無法承受更大的壓力。為了改善這個缺點，圓筒形壓力殼經常在筒殼內部等間距的設置環形加強材或艙壁，以改善圓筒型體的低模態挫曲。過去的相關研究多以局部構件為考量，本計畫將進行潛艦整體結構分析，考慮各局部結構接合後的挫曲強度。

未補強的薄殼構件可用薄膜理論來分析之，但加裝環形肋骨後的強度卻沒有確切的理論解，故設計時較難精確掌握與預測，只能依靠實驗來確認粗淺的設計要目。本計畫將使用有限元素方法加以檢討，除了解以往設計上所使用的經驗公式外，亦將修改與測試不同的肋骨尺寸與板厚，使得最終所設計之壓力殼結構盡可能的有效性，將材料強度的使用達到最大限度。

三、基本理論

一般的結構行為大多數為線性問題，其力學基本方程的特點是：(1)幾何方面的應變與位移的關係是線性的。(2)物性方面的應力與應變的關係是線性的。(3)建立於變形前狀態的平衡方程也是線性的。但在許多實際問題中，上述線性關係不能保持，例如板殼的大撓度問題，即為所謂的幾何非線性問題，必須要採用非線性的位移與應變關係，平衡方程式也必須建立在變形後的狀況以考慮變形對平衡的影響。

非線性方程組無法直接求解，必須要重複求解線性方程式以得到非線性方程組的解答。

以下為本文中基本理論與一般結構問題在解析上的不同點：

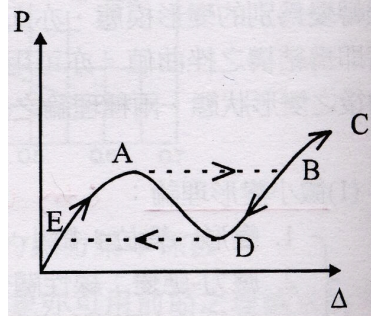
(1) 考慮所有的非線性項：

應變場可以下式表示之：

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right)\end{aligned}$$

(2) 使用大變形的求解方程式。

(3) 以非線性解析求解飛移挫曲的挫曲值，而不是線性的挫曲特徵值。

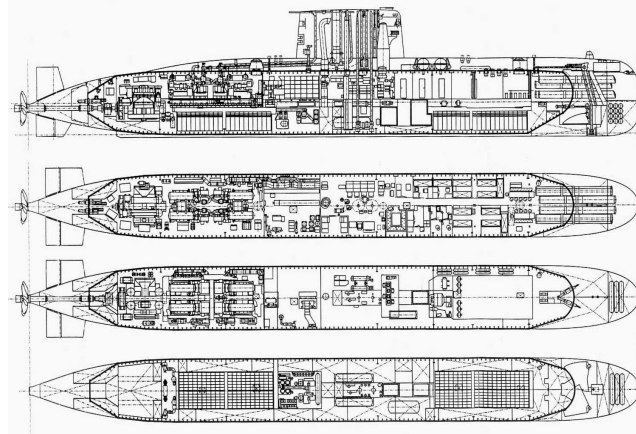


(4) 考慮彈塑性(材料非線性)。

(5) 使用樑元素來模擬肋骨，但輸入肋骨 I 值時，卻必須考慮在肋骨結構與外板的相互影響下，該肋骨的中性軸的位移。而此問題則以「有效幅度」的觀念解決之。

四、研究對象

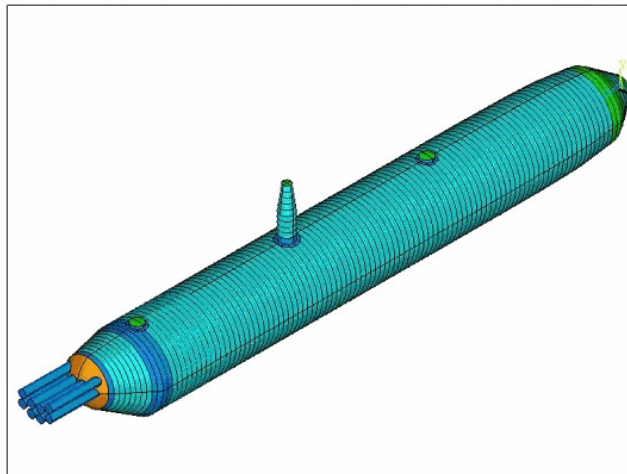
本計畫所探討的對象為德國 HDW 船廠所製之 209-1400 型潛艇。209 級潛艦採用單殼結構，直徑約為 6.2 公尺，壓力殼之材料為 HY-80 高張力鋼，操作潛深可達 250 公尺。



五、模型與邊界條件

由薄膜應力公式($t = \frac{R \cdot P_o}{\sigma_y}$)推估，於極限潛深(估計約為 400m)時，板厚約需要 24.69mm，故計算時使用板厚為 25mm 之 HY-80 高張力鋼。而由經驗公式($L_s = 1.85\sqrt{Rt}$)推估，肋骨間距約為 0.50m，而由一般佈置圖中推算，肋骨間距則約為 0.42m，與經驗式之差距有限，故目前仍採用 0.42m 之肋骨間距。

模型外型如下：



開孔處與附件之尺寸：

人孔蓋尺寸	
直徑(mm)	1000
突出高度(mm)	200
補強區域直徑(mm)	1400
補強區厚度(mm)	50
蓋子厚度(mm)	45

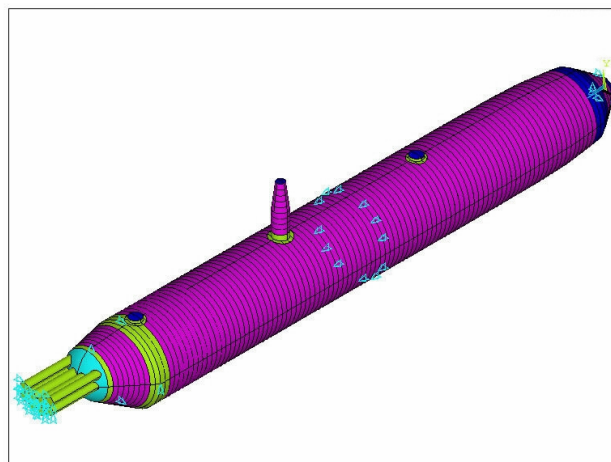
曲率半徑(mm)	2343.75
----------	---------

指揮塔尺寸	
底部直徑(mm)	1200
頂部直徑(mm)	660
補強區域直徑(mm)	1900
補強區厚度(mm)	50
蓋子厚度(mm)	45
曲率半徑(mm)	2343.75
圓筒高度(mm)	2100
錐筒高度(mm)	2100

壓力殼前後圓蓋	
厚度(mm)	60
曲率半徑(mm)	2343.75

錐殼與桶殼交接處之補強尺寸	
補強範圍	交接處前後各兩肋骨間距 共長約 1.68m 與艏艉圓筒蓋相接處補強一肋骨範圍
補強厚度	
前部	50mm
後部	45mm

邊界條件與外力如下：

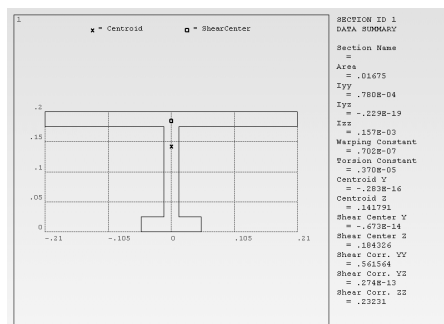


除其他類似於未開孔模型的邊界條件設定之外，魚雷管亦必須限制其切線方向的轉動。而外力則為垂直於外板的壓力，方向向內。

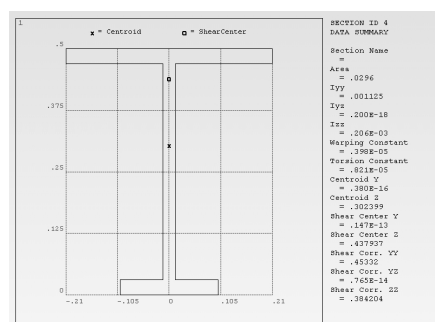
六、最終建議結構尺寸及其計算結果

最終建議的結構尺寸除外版與附屬結構之尺寸如上節外，所使用的肋骨如下：

一般肋骨：深度為 20cm，共 101 組



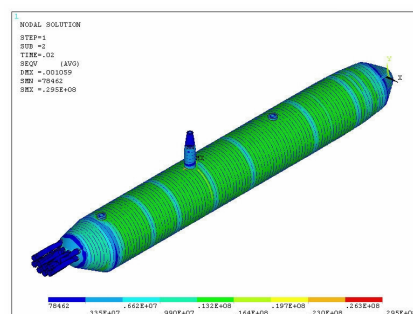
大肋骨:深度為 50cm，共 8 組



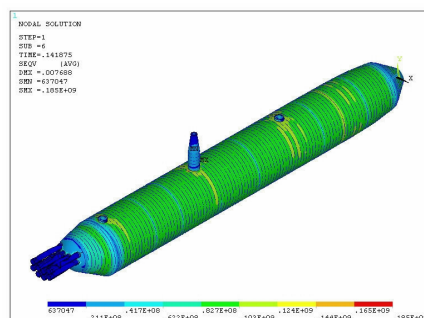
以上兩者的有效幅度皆取為 42cm。

以下為部分計算結果：

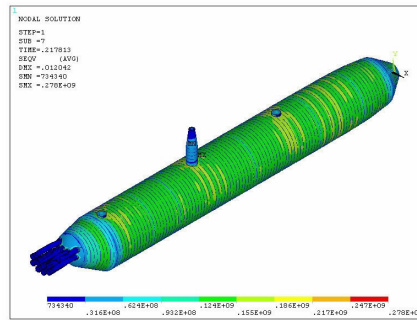
Load = 0.2 MPa(潛深約為 19.9m)



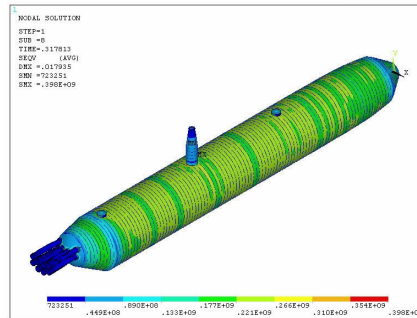
Load = 1.4188 MPa(潛深約為 141.2m)



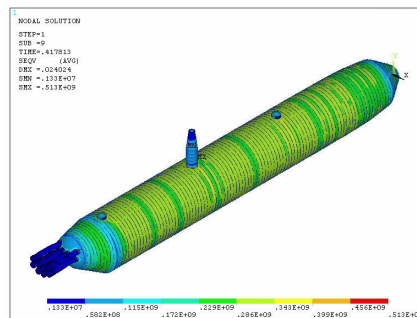
Load = 2.1781 MPa(潛深約為 216.7m)



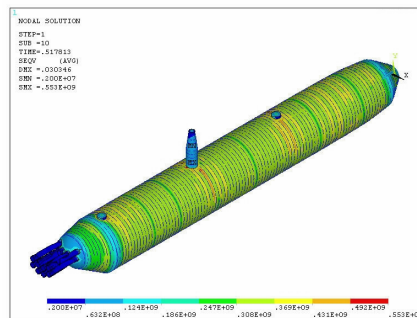
Load = 3.1781 MPa(潛深約為 316.2m)



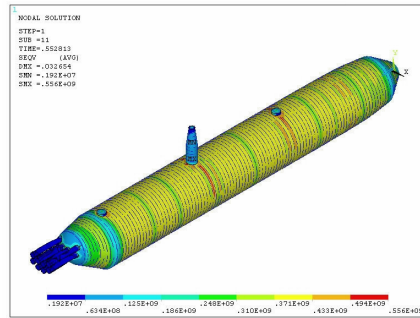
Load = 4.1781 MPa(潛深約為 415.7m)



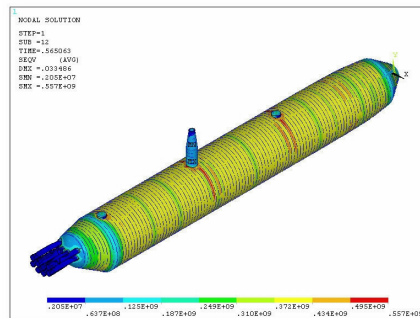
Load = 5.1781 MPa(潛深約為 515.2m)



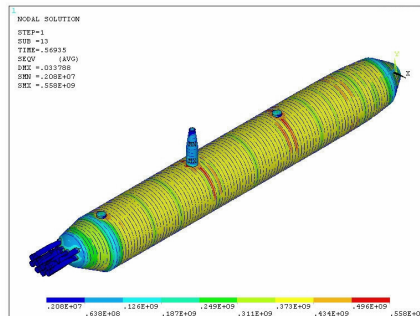
Load = 5.5281 MPa(潛深約為 550.1m)



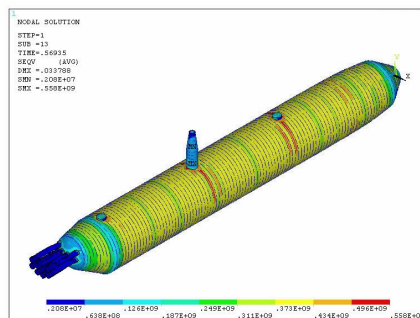
Load = 5.6506 MPa(潛深約為 562.2m)



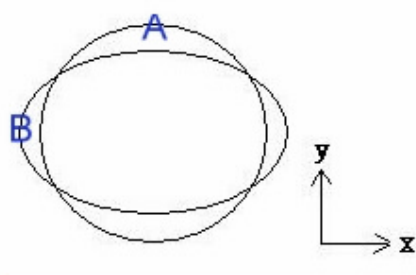
Load = 5.6935 MPa(潛深約為 566.5m)



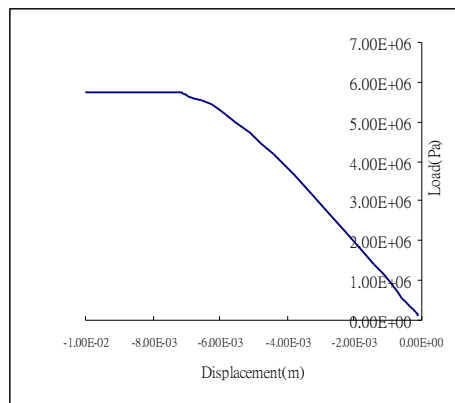
Load = 5.7364 MPa(潛深約為 570.8m)



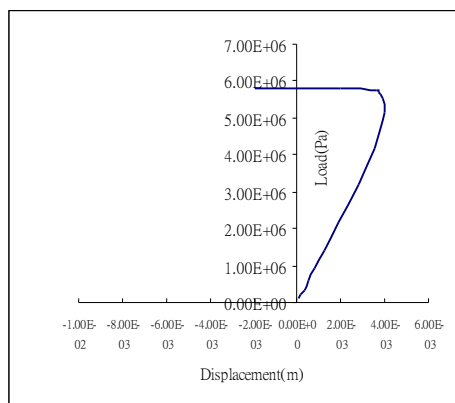
最終壓潰方向示意圖：



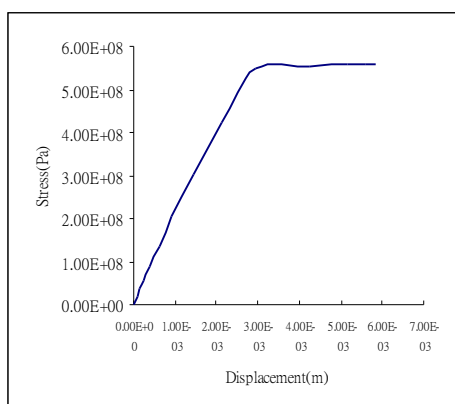
於船舳上側處(A 點)所觀察之外力與變形關係圖如下：



於船舳右側處(B 點)所觀察之外力與變形關係圖如下：



於船舳上側處所觀察之應力與變形關係圖如下：



當模型受到較小的壓力時，壓力殼首先均勻的向內縮，當壓力殼的受力到達塑性發生點時，部分材料開始發生軟化現象，隨著壓力的逐漸增加，塑性區域

也逐漸變大，導致壓力殼整體結構崩潰，呈現如上圖的最終挫曲模式：A 點逐漸向內縮，B 點則先向內縮，到達臨界點時突然向外變形，而整體挫曲的模式則為向 x 方向增長的壓潰模式。應力的部分狀況則為：在低壓下，應力分佈與彈性解大約相同，逐漸增加外壓後，結構仍可以均衡的將外力傳遞到整體之上，所以還沒有看到應力集中較嚴重的點。但當水深超過 500 公尺之後，可以發現在指揮塔開口處附近與後面的人孔蓋附近，有一兩道外板其應力值已經增加到了 500MPa 左右(HY-80 的 $\sigma_y = 552\text{MPa}$)，甚至補強區域的外緣處應力幾乎已經達到 Yielding Point。

與彈性解不同的地方在於，逐漸加壓之後最大應力值並沒有增加，而是達到塑性的區域逐漸擴大，原本只集中在開孔處周圍，而後逐漸擴大到整圈外板上，由此可以發現，在承受高壓之後，破壞點仍集中在大開孔處附近，直到結構發生整體挫曲之前其他的位置並沒有明顯的損壞，故我們可以大體推定，若單純的考慮靜壓負荷，此板厚與肋骨尺寸應該已經可行，只需要局部將開孔處船段整體加厚，便可以達到設計要求。

七、結論

- (1) 應力分佈受板厚影響大，小區域的高應力可以用局部的補強來加以緩和。
- (2) 整體挫曲值固然受板厚影響，但增加板厚來增加挫曲值是比較不經濟的方式，而局部的補強對於挫曲值的影響也不大。比較好的方式是增加肋骨的 I 值來改善。
- (3) 艏端的壓力殼蓋如按照所得之一般佈置圖使用平板，應無法承受設計水深時的壓力，需要複雜的補強方式才行，但如果使用圓球蓋(如船艙)，則可以不需要加以補強。
- (4) 壓力殼應力集中的位置主要在開孔殼板的接合處，因此在此處之殼板均需適度地增加殼厚作為補強，否則材料容易在此處發生破壞。當水壓逐漸增大，除造成接合處的破壞，更影響附近船段之外板，使得開孔處兩側環肋間的殼板均產生高應力，應考慮置換整段船殼(換成厚度較大的外殼)的可能性。
- (5) 模擬過程中，應力分佈大約可以掌握，如果關注點集中在設計水深(400m)之內，幾乎可用線性的結果模擬，但結構整體挫曲值卻因分析法的不同而有很大的差異，以此模型為例，該模型在線性分析時挫曲值為 900m，非線性分析時降為 700m，然而多考慮材料之塑性後，水深約 550m 時就已經有部分區域進入塑性。

八、參考文獻

- [1] 潛艇概念設計，陸磐安著，2002。
- [2] Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures，Johnston B.G，1976。
- [4] 有限元素法，王勗成、邵敏編著，1980。
- [5] 基礎結構學，李雅榮編撰，1990。

[6]船舶計算結構力學，聶武、孫麗萍編著，1999。