

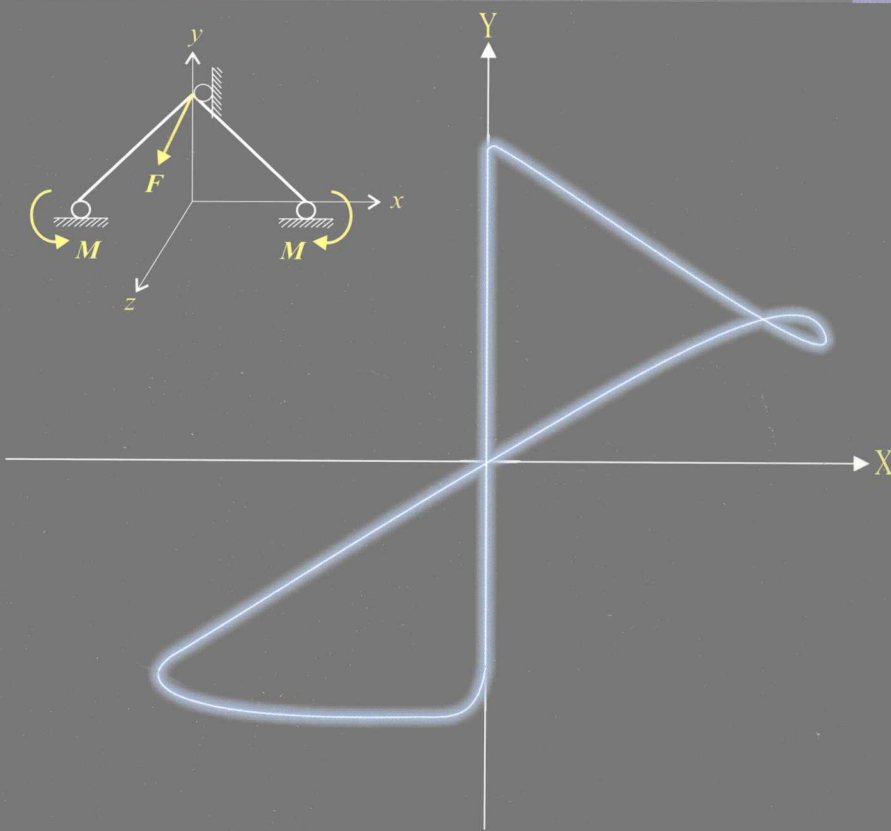
非線性剛構架的 理論與分析

THEORY & ANALYSIS OF
NONLINEAR FRAMED STRUCTURES

Y. B. Yang & S. R. Kuo 原著

楊永斌 譯

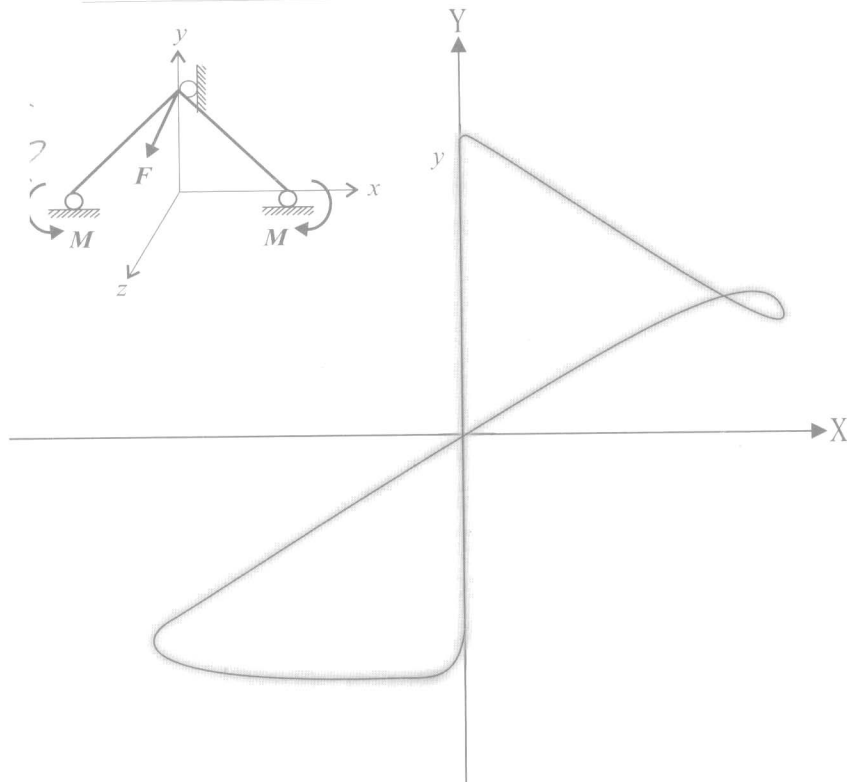
NONLINEAR



非線性剛構架 的理論與分析

THEORY & ANALYSIS OF
NONLINEAR FRAMED STRUCTURES

Y. B. Yang & S. R. Kuo 原著
楊永斌 譯



非線性剛構架的理論與分析

／Y. B.-Yang, S. R. Kuo 原著；楊永斌譯． — 初版 —

台北市：良宜圖書有限公司，民 91

面； 公分

含參考書目及索引

譯自：Theory and Analysis of Nonlinear Framed Structures

ISBN 986-80272-0-9 (平裝)

1. 結構工程 2. 結構力學

441.21

91005476

版權所有

翻印必究

非線性剛構架的理論與分析

中華民國九十一年三月一日初版

定價：600 元 (平裝)

著 者：楊永斌 郭世榮

發行人：楊永斌

出 版：良宜圖書有限公司

地址：台北市 100 汀州路三段 84 號 3 樓

電話：(02) 2367-9528 傳真：(02) 2367-9528

郵政劃撥帳號：07171355

帳 戶：陳桂榮

e-mail：jdyau@mail.tku.edu.tw

(本書若有缺頁或破損，請寄回更換)

譯 序

古代的匠師憑著豐富的經驗和純熟的技術，以及絕頂的天份，在沒有現代力學理論與高性能電腦的協助下，便能建造出類如古希臘神廟、古羅馬萬神殿、古中國木構建築等的不朽建物。然而，隨著力學理論發展的漸趨成熟，和電腦計算工具的日益精進，在現代結構日趨複雜的情況下，工程師所採用的分析工具與設計方法，已不再像以往一樣，光靠經驗技術就能全部涵括，他須要有精確的理論基礎作為分析依據。另方面，近年來由於高科技材料不斷地更新演進，對於如何使結構體輕量化、造型活潑化，更是業者的關心所在，也是工程師必須面臨的新課題。

是以在結構分析上，二十世紀所採用的線彈性分析方法，已不再能完全滿足現代工程規範與分析的需求，因此，如何引進更精確的非線性理論進行分析，已成為現代工程技術發展的主要趨勢之一，然而對於非線性分析所遭遇到的大量計算問題，確是工程師所必須克服的根本問題。還好，拜現代電腦高速計算之賜，採用非線性理論進行結構設計，也已逐漸成為現代工程規範所樂見的一個方法。基於以上的動機，早在十年前，作者即著手將過去所發展的非線性理論研究成果撰寫成書，取名為「Theory and Analysis of Nonlinear Framed Structures」，並於 1994 年委由 Prentice-Hall 圖書公司出版。

時間飛逝，一轉眼七年已過，該書也經常在國際期刊或國際會議有關非線性構架研究的論文中，被引用作為參考書籍之一。然而，該書當年寫作時，是以推展學術國際化作為主要標的，故在語文上選用英文作為表達之工具；近年來，有感於國內年輕學子對於

結構非線性理論仍屬陌生，因此若能將此書譯成中文，對於提升國內在此一領域之研究與應用，應有其正面之意義。

自民國 76 年 6 月 8 日，財團法人中興工程科技研究發展基金會成立以來，即以提升我國研究水準、發展工程科技、及推廣科學教育，並配合國家政策之執行，以促進經濟發展及產業升級作為該基金會之創設目的；並在工程科技教育及研究上，提供經費與計劃給予相關領域之工程專家學者，進行各項科教及研發的工作。此舉不但讓國內工程科研教育人才，得以發揮其所長；對工程科研成果的累積與技術之深耕國內，也有其長期之卓著貢獻。也基於此一提升我國工程科技教育及研究水準的理念，財團法人中興工程科技研究發展基金會特贊助本人將拙著「Theory and Analysis of Nonlinear Framed Structures」一書譯成中文，並付諸桑梓，以饗國內讀者。

本書之中文本譯文工作，主要係由本人過去曾進行非線性理論研究工作的研究生團隊，協力完成，而由本人與姚忠達博士總其成；依章節的不同，參與的人員計有：

姚忠達博士：第一章

吳演聲博士：第二、五章

林正偉先生：第三章

洪曉慧博士：第四章

鄭文雅先生：第六、七章

張國緯先生：第八章

郭世榮博士、紀志昌先生：全書總校正

楊雁婷小姐：封面設計

吳演聲博士、鄭文雅先生：全書總編排

在翻譯的過程中，除了力求能合於原文旨意外，也儘量希望各章譯者能夠做到「信」、「達」、「雅」的地步，同時要求各譯者能將

原書中印刷或打字錯誤處，順便進行校正的工作，期望藉由本書中文版的出現，能對國內有志於結構非線性分析研究者，盡一點棉薄之力。

最後，此書之得以譯成並付印成書，除了對財團法人中興工程科技研究發展基金會提供全部翻譯及刊印經費，深表致謝之外，也要感謝圖文技術有限公司及良宜圖書有限公司代負責執行印刷出版事宜。

作者兼譯者：楊永斌 謹誌
國立台灣大學工學院
二〇〇一年十二月

序（代譯）

爲了找尋能夠描述結構真實非線性行爲所要運用的方法，可以回溯到古代文藝復興時期，而今天我們所看的非線性或是非彈性理論，便是過去將近兩百年間持續發展的成果。然而這些理論成果得以在實務設計上應用卻也是最近幾年來因爲電腦的普遍使用才得以付諸實施成爲可能。一九七〇年代中葉，在康乃爾(Cornell)大學的一群研究人參與了一項將當時已發展的非線性理論予以開發並往前推展的研究工作。在那時候，小電腦(small computer)是讓設計工程師得以在當時技術尚未十分成熟但卻對未來很重要的水平下，藉由交談式電腦繪圖(interactive-computer-graphics)的應用，使他們得以控制整個結構分析的程序並協助他們闡釋複雜結構分析出結果的真實行爲。

楊永斌(Yeong-Bin Yang)先生在一九八〇年於國立台灣大學完成了他的碩士學位之後，隨即參與了康乃爾大學的博士課程，並於一九八四年取得博士學位。他的主要研究領域是在非均勻扭轉(non-uniform torsion)和三維鋼構架彈性非線性分析的大型程式及理論發展。同年，他回到台灣並持續他其在 Ithaca 攻讀博士即已開始發展的研究路線，即始如此，他的研究成果也已遠遠地超過他過去所做的博士論文。是以在相當短的時間內，他即成爲將結構力學中的基本原理轉化成具有實務並可進行電腦運算程序的研究權威。這些研究成果可由楊教授和他的前博士生－郭世榮博士在專業的一流期刊所發表之文章即可見端倪，而這也可從他們對非線性問題的複雜性行爲之創造性精確度及觀察力得到印證。

本書可說是作者過去研究成果的總論，書中闡述了在本領域正在發展的數種方法，甚至有些作者所提出的理論還超過這些已發展

的領域，而全書所涵蓋範圍也包括了結構力學的基礎原理以及時下相關的研究理論，可以說這本書當可作為學生們理想完整地了解目前構架型非線性結構分析的研究性之教科書，並同時也可以當作研究人員的基礎參考書。

因此，本書可以說是一本適時出版的書籍。從本書的內容中，讀者當可印證本書在如何將實際的非線性結構行為轉化成實務可行的電腦計算程序之重要貢獻。

W. McGuire
Ithaca, 紐約

序 文

這本書的寫作動機在於作者過去幾年對於架構型幾何非線性結構分析的體認，以及在這個領域缺乏一本具有良好組織的研究性書本。是以本書可說是作者將過去曾經在期刊上發表有關利用有限元素法計算構架幾何非線性分析的研究論文所綜整而成的專書。然而，要說明的是本書並非過去作者研究工作重新收集的論文集。基於研究與教學上的需要，本書之取材以新穎又具統合一致性作為主要導向，並且重中加入新的體材及足以反應現階段趨向合理非線性分析程序的方向進行。我們相信以書中所呈現的論點，讀者當可發現非線性結構分析的奧妙和美麗。

在過去的三十年間，伴隨著電子算機的快速成長，有限元素法在計算力學上的應用，一直是處在屹立不搖的地位，這點可由它在早期對簡單問題的線性分析計算，到今天如：非線性、非彈性、動力分析等，更具挑戰性的問題工作量可以知道，而這些問題的複雜度可能是十倍、百倍或千倍以上於往日所未曾嘗試過的結構課題。直到今日，許多人仍把有限元素法視為一種對於求解各類非線性問題所必須發展的完整計算工具。然而，經驗告訴我們，這種想法顯得太過於樂觀，因為這之間所牽涉到的各類非線性分析理論，並不見得像線性分析那麼具有確定性及直接性。而這裡面涉及到某些問題也將因不同研究人員的計算程序（大部分都無法明顯地說清楚）之不同而產生會有「因人而異」或是「因問題而異」的計算結果。這種情況對於研究生或是初入這個領域的研究人員而言，勢必會引起極大的困擾。

就像材料力學是線性結構分析的基本立論一樣，連體力學原理

也提供了非線性分析的理論基礎。雖然連體力學原理本身已足以描述固態結構體的非線性行爲，但是有些研究人員並不很嚴謹地遵循這些原理，更有些就直接把非線性分析視爲線性分析的延伸或是重複性的應用。爲了能夠求得具有物理性意義的非線性問題之解，在將有限元素付諸電腦程序執行之前，應該有許多要素須予以考慮。這些要素可以包括：基本的元素理論、非線性元素的檢驗、組成律的合理性、接頭的平衡條件、內力的精確計算、結構幾何的更新、增量疊代的求解法和計算程式的可靠性。所有這些要素既不是也不能夠由線性分析理論中的某部分延伸出來。就數值計算的人員來說，如何在遵循連體力學原理的導引下，將上述所有要素全部予以考慮，這就有待確認了。

針對上述，我們試圖在書中提出以爲核心的彈性構架的非線性結構分析準則具有物理意義的檢驗程序。要特別強調的是，本書是件構在具有物理性意義的理論推導以及介於有限元素程序和相關理論間的直接連結性之基礎上。另外書中所採行的方法是與基本力學原則相一致的理論，它們將可適用於現代的梁理論、非線性元素的檢驗測試、組成律的定義、元素力的計算、疊代解的執行搜尋，和隱藏在程式寫作過程所需要的錯誤偵測方法等。之所以如此做的目的，就是希望將介於理論原理推導與電腦計算程序之間的鴻溝予以降到最低程度。另要再說明的是書中採用的理論推演主要是以勁度（或位移）法爲依據，這主要是著眼於在理論演繹過程中，該法較柔度（或力）法具有相對的容易性。

本書之寫作對象是以熟悉矩陣結構分析並想更進一步探討可變形體力學之工程師和科研人員而寫。其中的材料將適用於以修習過有限元素法和矩陣結構分析之大學部高年級生或研究生，提供他們作一學期三學分的「高等結構分析」課程。至於已經從事於結構

非線性和挫屈分析的研究人員，本書將可作為以連體力學原理為基礎之電腦計算程序的現階段回顧性研究之用。書中所提的原則不但可作為已經完成之研究的理論檢驗，並且在此一般性理論架構上尚可推展到本書並未涵蓋的內容，諸如非均勻扭轉、變斷面構件、塑性和降伏理學、地震效應、動力和衝擊性載重、非保守力等。另外書中所採用的張量符號對於初次研習的研究生或高年級大學生也不是問題，因為在大部分情況，書中所引用的張量之先決知識並不會超過其基本定義，而只是一些基本的張量計算而已。

本書所考量的結構主要是以具有實心斷面的構架型結構為主，這些結構物可以歸納成以下四類：桁架、平面構架、空間構架和曲梁。在這四類結構中除了空間構架涵蓋兩章之外，其餘將以分章的方式獨立說明。全書的組織將以逐層深入的方式安排，從最簡單的桁架理論開始，到以後最複雜的曲梁理論為止，最後以非線性分析的求解程序作為本書的結尾。

第一章首先針對本書所要採用的應變、應力、組成律等基本要素先行介紹，然後推導出適用於 Lagrangian 型式的增量推演法之虛位移原理，再以此作為以後各章節的基礎理論之推導基石。

第二章前半部主要是先將架構結構的傳統線性分析流程作一綱要性介紹，接著就線性和非線性元素的本質檢測作一回顧。在這些檢測法中，剛體測試可以說是最具有重要性的元素檢測方法，這可歸因於該法可以提供在進行逐步非線性分析過程中，作為元素力計算的參考準則。

在第三章，我們將推導平面和空間桁架元素，在本章特別要指明的就是當桁架在受到任何複雜性載重而進入大應變時的真解（exact solution）反應之推演程序。值得一題的是，在此有兩項關鍵因素必須特別注意，即材料常數的更新和桿件力的計算。

在第四章，基於 Bernoulli-Euler 梁的平面保持平面假設，我們可以推導出二維梁的平面構架元素和挫屈微分方程式及邊界條件。同時本章也給予剛體檢測的優異性作了最好的例題說明，它不止可應用在有限元素及其理論的檢測，依據並且也可當作在增量非線性分析的桿件力計算之檢驗參考。

以連體力學原理作為基礎，在進行空間構架挫屈分析時，一個重要的步驟就是要將所有物理量的關係建立在挫屈位態上。藉由這項不變的法則，在第五章所推導的所有空間梁構件挫屈方程式，我們便可透過解析的方式，對一些簡單的構架進行側向挫屈載重分析，而這些例題，我們也將在第六章中，轉成有限元素方程式來加以說明。利用這兩種不同方法的物理性連結，將有助於解決已存在的空間構架挫屈解之分歧現象，同時，第六章的內容也將是空間構架分析的一般性三維理論基礎。

第七章主要是針對曲梁挫屈的理論細節進行說明，本章對於曲梁方程式的特性推導是可以藉由虛位移原理或直梁方程式求得。而要特別說明的是所有物理量關係式仍然是建立在結構體發生挫屈時的位態上，於是我們便可經由直梁元素對曲梁的模擬，計算出與曲梁元素同樣精準的結果。對此，在過去有許多爭論一直認為用直梁來模擬曲梁的挫屈行為是無法辦到的，然透過本章的說明，讀者當可澄清。第八章是本書的總結，主要內容是詳盡地描述構架型結構的增量非線性分析程序，特別要強調的重點是分析過程中涵蓋了有限轉動（finite rotation）的結構幾何更新做法，和利用疊代程序進行非線性矩陣方程式的求解。

總言之，本書希望能夠搭起傳統古典連體力學和現代電腦計算力學之間的一座橋樑。本書的撰寫就是作者在過去對構架型結構的穩定和非線性行為的經歷過程中，所曾經面臨的激動與挑戰的努力

成果。書中對於所參考到的任何文獻均以（作者名字 發表年代）的方式來標示，所有參考文獻均在各章末以第一作者的英文姓名按字母排序。要說明的是，在準備書本撰稿期間，我們並沒有太多時間針對在本領域的所有各研究人員之成就予以誌謝，是以在此我們對於書中沒有提到的論文、文獻、或是與我們具有相通想法的人致以深切的歉意。

書中大部分的研究成果均曾經是受到中華民國國家科學委員會提供之構架型結構和曲梁的非線性與挫屈行為等系列主題研究的經費補助，而本書第一作者就是所有這些研究計劃的主持人。

在此，本書第一作者要對以下的人表達謝意：首先要致以最高敬意的是當作者在康乃爾大學攻讀博士期間的指導教授—已退休的榮譽教授 William McGurire。對於 McGurire 教授的啓蒙，讓作者得以進入到結構非線性力學這個令人深感到興趣的領域中，當作者離開康大之後，他並且鼓勵作者在這個領域繼續研究發展，最後才終能完成這本書。在這本書手稿準備過程中對於來自國立台灣大學同仁們和其他單位的朋友之鼓勵和精神上的支持也要致以感謝，這些人有：陳義男教授（時為台大學院院長）、顏清連教授（前台大工學院院長）、葉超雄教授、陳清泉教授、高健章教授、蔡益超教授、林聰悟教授、陳永祥教授、王寶璽教授、洪宏基教授、田堯彰教授、陳振川教授、羅俊雄教授、張國鎮教授、蔡克銓教授、莫貽隆教授、吳賴雲教授、陳珍誠教授、以及過去的研究生：呂良正、謝明杉、姚忠達、周榮懷等人在本書完稿前所作的貢獻。

位在台大旁邊的中華顧問工程公司的張荻薇先生和其他朋友之長期友誼，也要予以致謝，感謝他們在本書手稿完成時所盡的最大心力。

並且也要感謝第一作者的妻子：如宛和兩個女兒 Judy 及

Carol，還有最小的兒子，由於他們在每個週末假期對身為丈夫和老爸的包容，老爸才有機會利用每一分鐘來完成這本書。總而言，若沒有家庭成員無條件的支持、研究生們的團隊努力、以及來自不同地方的同仁與朋友們的鼓勵，要成長是不可能的。

感謝倪惠姝小姐和圖文技術有限公司在原稿送印前的準備工作，對於他們在付梓前因作者所提出的需求的及耐心的反應，僅此致以感謝之意。最後，感謝 Prentice-Hall 公司的產品採購編輯：Lee Ming Ang 博士和 Jerene Tan 小姐在技術上的協助。

楊永斌、郭世榮
中華民國、台灣、台北

謝 誌

本書之取材有部分內容是取自於作者和其他共同作者在一些期刊上所發表的論文，這些論文如下面之所參考文獻。爲了讓本書的架構具有統一性和層次感，對於所取材的論文，除了加以更新外並重新編寫。作者並且要特別感謝以下擁有書中版權的論文刊物：

(1) ASCE 期刊終已刊登的 Kuo 和 Yang (1991)、Kuo 等 (1993)、Leu 和 Yang (1990) 以及 Yang 和 Kuo (1991b、1991c、1992) 之論文，(2) Elsevier Science Publishers BV 已刊登的 Yang 和 Leu (1991) 之論文，(3) 已刊登在 AIAA 期刊的 Yang 和 Shieh (1990) 論文，(4) 由英國牛津 Pergamon Press 有限公司的 Yang 和 Kuo (1991a) 之 1991 論文版權。

參考文獻。

Kuo, S. R., and Yang, Y. B. (1991), "New Theory on Buckling of Curved Beams," *J. Engrg. Mech.*, ASCE, 117(8), Aug., pp. 1698-1717.

Kuo, S. R., Yang, Y. B., and Chou, J. H. (1993), "Nonlinear Analysis of Space Frames with Finite Rotations," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 119(1), Jan., pp. 1-15.

Leu, L. J., and Yang, Y. B. (1990), "Effects of Rigid Body and Stretching on Nonlinear Analysis of Trusses," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 116(10), Oct., pp. 2582-2598.

Yang, Y. B., and Kuo, S. R. (1991a), "Out-of-Plane Buckling of Angled Frames," *Int. J. Mech. Sci.*, 33(1), Jan., pp. 55-67.

Yang, Y. B., and Kuo, S. R. (1991b), "Consistent Frame Buckling Analysis by Finite Element Method," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 117(4), Apr., pp. 1053-1069.

Yang, Y. B., and Kuo, S. R. (1991c), "Buckling of Frames under Various

Torsional Loadings," *J. Engrg. Mech.*, ASCE, 117(8), Aug., pp. 1681-1697.

Yang, Y. B., and Kuo, S. R. (1992), "Frame Buckling Analysis with Full Consideration of Joint Compatibilities," *J. Engrg. Mech.*, ASCE, 118(5), May, pp. 871-889.

Yang, Y. B., and Leu, L. J. (1991), "Constitutive Laws and Force Recovery Procedures in Nonlinear Analysis of Trusses," *Comp. Meth. in Appl. Mech. & Engrg.*, 92, Nov., pp. 121-131.

Yang, Y. B., and Shieh, M. S. (1990), "Solution Method for Nonlinear Problems with Multiple Critical Points," *AIAA J.*, 28(12), Dec., pp. 2110-2116.

符號說明

在書中 1.2 節已就本書採用之符號通用法則作一說明，以下是本書各章節所採行符號之一覽表。符號的左上標表示物理量所在的位態，而左下標則為量測該物理量的參考位態。在某些情況，當參考位態很容易地被識別時，則左下標即予以省略。至於在進行增量步驟分析時，則物理量之左下標也將不出現。矩陣和向量符號分別以 $[]$ 和 $\{ \}$ 表示。

A	構件斷面積
$[A]$	$[k_i]$ 矩陣的反對稱部分 (Ch.6)
$[\bar{A}]$	在全域座標軸矩陣 $[A]$ (Ch.6)
$a_1, \dots, a_6$	積分常數 (Ch.7)
$b_1, \dots, b_6$	積分常數 (Ch.7)
C	斷面形心
C	斷面的邊界曲線 (Chs 5,7)
C_0	初始未變形位態
C_1	前階段計算位態
C_2	變形現階段位態
C_i	變形現階段位態 (Ch. 8)
C_{i-1}	最後階段計算位態 (Ch. 8)