

科技部補助專題研究計畫成果報告 期末報告

考慮扭曲硬化之塑性異向性模式的評估與應用(3/3~3/3)

計畫類別：個別型計畫
計畫編號：MOST 104-2221-E-157-005-
執行期間：104年08月01日至105年09月30日
執行單位：中華學校財團法人中華科技大學航空機械系

計畫主持人：呂學育

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：王穎諄
碩士班研究生-兼任助理人員：蘇承維
碩士班研究生-兼任助理人員：萬文彥
大專生-兼任助理人員：鄧凱中

報告附件：出席國際學術會議心得報告

中華民國 105 年 10 月 28 日

中文摘要：本報告呈現原規劃為三年期計畫的第三年成果，此原規劃為三年期計畫的最終目的致力於循環彈塑性問題的降伏面扭曲之特徵現象的模擬，藉以建立循環彈塑性現象的準確及有效率的數值探討，進而深入掌握影響參數及先進組成律之開發與修正。本報告分成三部分，其中第一部分呈現發表於「第七屆計算方法國際研討會，The 7th International Conference on Computational Methods, ICCM」，第二部分呈現發表於「2016中華民國航太學會學術研討會」的成果，第三部分呈現發表於「中華民國力學學會第四十屆全國力學會議」的成果。工程結構常遭逢循環負荷作用，導致的循環塑性現象，可能形成彈性安定，或塑性應變交變的塑性安定，抑或塑性應變累積的棘齒而導致破壞。基於結構設計及安全評估，棘齒等複雜循環塑性反應的掌握，不僅為設計法規所重視，也一直為關注之研究議題，惟走動式硬化或等向性/走動式混合硬化等組成律，因無法描述由試驗觀察的降伏面扭曲現象，棘齒現象的模擬尚無法有滿意結果。本年度計畫承續前期研究成果，考慮各類型材料及負荷型態的棘齒問題探討，建立循環塑性現象的準確及有效率的數值模式，並推廣應用於結構件的循環塑性現象的探討。分析案例採用 SS 304 與 CS 1026 材料，探討結構承受單軸與多軸循環負荷時之循環彈塑性行為，分析結果並與文獻上的實驗結果及數值分析結果比較，以驗證所建構之考慮降伏面扭曲的循環彈塑性分析模式之正確性。

中文關鍵詞：塑性異向性，等向性硬化，走動式硬化，扭曲硬化，單軸/多軸循環彈塑性分析，彈性安定，塑性安定，棘齒，參數擬合，有限元素法。

英文摘要：The report presents the research result of the third-year phase of a proposed three-year ranged project. The ultimate goal of the three-year ranged project is to contribute to the development and improvement of advanced constitutive models for simulations of cyclic plasticity phenomena. The report consists of three parts. In the first part, we present the results published in The 7th International Conference on Computational Methods, ICCM. 5. In the second part, we then show the results presented in The 40th National Conference on Theoretical and Applied Mechanics, 2016. In the third part, we then show the results presented in 2016 AASRC Conference, 2016. Engineering structures are often exposed to cyclic loads. Structures of elastic-plastic materials under cyclic loads may behave in some cyclic plasticity phenomena such as elastic shakedown, plastic shakedown and ratcheting. The predictions of cyclic plasticity phenomena are of great importance to structural design and safety evaluation. Accordingly, ratcheting based criteria has been included in some design codes. Considerable experimental, theoretical and numerical attention has been paid to uniaxial/multi-axial ratcheting. However, it is found kinematic hardening models are not general enough to simulate ratcheting experiments. The

deficiencies of kinematic hardening models may be attributed to the fact that yield surface distortion is neglected. In the project, we aim to take yield surface distortion into account in order to investigate cyclic elastic-plastic behavior. We enhance the capability of ABAQUS in the simulation of yield surface distortion by editing the user subroutine. Case studies are performed by ABAQUS and compared with those experimental and numerical results of SS304/CS1026 published in the literature, in order to test and verify the correctness of user subroutine.

英文關鍵詞： plastic anisotropy, isotropic hardening, kinematic hardening, distortional hardening, uniaxial/multiaxial cyclic elastic-plastic analysis, elastic shakedown, plastic shakedown, ratcheting, parameter fitting, finite-element method.

摘要

本報告呈現原規劃為三年期計畫的第三年成果，此原規劃為三年期計畫的最終目的致力於循環彈塑性問題的降伏面扭曲之特徵現象的模擬，藉以建立循環彈塑性現象的準確及有效率的數值探討，進而深入掌握影響參數及先進組成律之開發與修正。

本報告分成三部分，其中第一部分呈現發表於「第七屆計算方法國際研討會, The 7th International Conference on Computational Methods, ICCM」的成果，第二部分呈現發表於「2016 中華民國航太學會學術研討會」的成果，第三部分呈現發表於「中華民國力學學會第四十屆全國力學會議」的成果。

工程結構常遭逢循環負荷作用，導致的循環塑性現象，可能形成彈性安定，或塑性應變交變的塑性安定，抑或塑性應變累積的棘齒而導致破壞。基於結構設計及安全評估，棘齒等複雜循環塑性反應的掌握，不僅為設計法規所重視，也一直為關注之研究議題，惟走動式硬化或等向性/走動式混合硬化等組成律，因無法描述由試驗觀察的降伏面扭曲現象，棘齒現象的模擬尚無法有滿意結果。

本年度計畫承續前期研究成果，考慮各類型材料及負荷型態的棘齒問題探討，建立循環塑性現象的準確及有效率的數值模式，並推廣應用於結構件的循環塑性現象的探討。分析案例採用 SS 304 與 CS 1026 材料，探討結構承受單軸與多軸循環負荷時之循環彈塑性行為，分析結果並與文獻上的實驗結果及數值分析結果比較，以驗證所建構之考慮降伏面扭曲的循環彈塑性分析模式之正確性。

關鍵字：塑性異向性，等向性硬化，走動式硬化，扭曲硬化，單軸/多軸循環彈塑性分析，彈性安定，棘齒，低週期疲勞破壞，有限元素法。

ABSTRACT

The report presents the research result of the third-year phase of a proposed three-year ranged project. The ultimate goal of the three-year ranged project is to contribute to the development and improvement of advanced constitutive models for simulations of cyclic plasticity phenomena. The report consists of three parts. In the first part, we show the results presented in The 7th International Conference on Computational Methods, ICCM. In the second part, we then show the results presented in The 40th National Conference on Theoretical and Applied Mechanics, 2016. In the third part, we then show the results presented in 2016 AASRC Conference, 2016.

Engineering structures are often exposed to cyclic loads. Structures of elastic-plastic materials under cyclic loads may behave in some cyclic plasticity phenomena such as elastic shakedown, plastic shakedown and ratcheting. The predictions of cyclic plasticity phenomena are of great importance to structural design and safety evaluation. Accordingly, ratcheting based criteria has been included in some design codes. Considerable experimental, theoretical and numerical attention has been paid to uniaxial/multi-axial ratcheting. However, it is found kinematic hardening models are not general enough to simulate ratcheting experiments. The deficiencies of kinematic hardening models may be attributed to the fact that yield surface distortion is neglected.

In the project, we aim to take yield surface distortion into account in order to investigate cyclic elastic-plastic behavior. We enhance the capability of ABAQUS in the simulation of yield surface distortion by editing the user subroutine. Case studies are performed by ABAQUS and compared with those experimental and numerical results of SS304/CS1026 published in the literature, in order to test and verify the correctness of user subroutine.

Keywords: plastic anisotropy, isotropic hardening, kinematic hardening, distortional hardening, uniaxial/multi-axial cyclic elastic-plastic analysis, elastic shakedown, ratcheting, plastic shakedown, finite-element method.

Contents

Cyclic plasticity simulations with yield surface distortion by ABAQUS (基於 ABAQUS 之考慮降伏面扭曲的循環塑性分析)	4
考慮降伏面扭曲的循環彈塑性行為分析 (Analysis of cyclic elastic-plastic behavior with yield surface distortion)	6
考慮 Chaboche 走動式硬化模式之桁架結構彈塑性分析 (Elastic-plastic analysis of truss structures with Chaboche kinematic model)	18
Self-Evaluation of Research Results	28

Cyclic plasticity simulations with yield surface distortion by ABAQUS

†*S.Y. Leu¹, K.C. Liao², and C.W. Su¹

¹Department of Aviation Mechanical Engineering, China University of Science and Technology, Taiwan, R.O.C.

²Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taiwan, R.O.C.

*Presenting author: syleu@cc.cust.edu.tw

†Corresponding author: syleu@cc.cust.edu.tw

Abstract

To improve the ratcheting predictions, the need to consider yield surface distortion has been recognized. Rokhgireh and Nayebi (2012) combined the nonlinear kinematic hardening model of Chaboche with the yield surface distortion model of Baltov and Sawczuk (1964) for the simulations of uniaxial and multi-axial ratcheting. The simulated results of uniaxial ratcheting of CS1026 and SS 304 were compared to the experimental results of Hassan and Kyriakides (1992), Kang and Kan (2007), respectively. On the other hand, the simulations of multi-axial ratcheting involving CS1026 and SS 304 were compared to the experimental results of Bari and Hassan (2002), Corona et al. (1996), Hassan et al. (2008), Kang et al. (2004). It was illustrated that the modified model (Rokhgireh and Nayebi, 2012) gives good predictions of the ratcheting strain increment in various uniaxial and multi-axial tests.

Since ratcheting predictions is of great importance to safety assessment and structural design, it is imperative to develop a robust numerical framework for ratcheting simulations. Due to the complex task of numerical implementation, the general-purpose finite-element commercial codes, e.g. ABAQUS and ANSYS, are comparable tools for accurate simulations of ratcheting responses. However, the existing plasticity models in ABAQUS or ANSYS cannot describe yield surface distortion.

The paper is to present simulations of cyclic plasticity phenomena by ABAQUS. The advanced constitutive model by Rokhgireh and Nayebi (2012) is to be formulated and implemented into ABAQUS via the user subroutine UMAT. Formulation and implementation are to be validated with comparisons between simulations and experiments of CS1026 and SS 304 (Hassan and Kyriakides, 1992; Kang and Kan, 2007), respectively. Finally, a numerical framework based on ABAQUS will be provided with advanced constitutive models general enough for simulations of cyclic plasticity phenomena to aid safety assessment and structural design.

Keywords: Cyclic plasticity, Distortional hardening, Elastic shakedown, Plastic shakedown, Ratcheting, ABAQUS.

References

- [1] Rokhgireh, H. and Nayebi, A. (2012) Cyclic uniaxial and multiaxial loading with yield surface distortion consideration on prediction of ratcheting, *Mechanics of Materials* **47**, 61-74.
- [2] Baltov, A. and Sawczuk, A. (1964) A rule of anisotropic hardening, *Acta Mechanica* **1**, 81-92.
- [3] Hassan, T. and Kyriakides, S. (1992) Ratcheting in cyclic plasticity, part I: uniaxial behavior. *International Journal of Plasticity* **8**, 91-116.
- [4] Kang, G. and Kan, Q. (2007) Constitutive modeling for uniaxial time-dependent ratcheting of SS304 stainless steel, *Mechanics of Materials* **39** 488-499.
- [5] Bari, S. and Hassan, T. (2002) An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation, *International Journal of Plasticity* **18** 873-894.

- [6] Corona, E., Hassan, T. and Kyriakides, S. (1996) On the performance of kinematic hardening rules in predicting a class of biaxial ratcheting histories, *International Journal of Plasticity* **12** 117-145.
- [7] Hassan, T., Taleb, L. and Krishna, S. (2008) Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models, *International Journal of Plasticity* **24**, 1863-1889.

考慮降伏面扭曲的循環彈塑性行為分析

Analysis of cyclic elastic-plastic behavior with yield surface distortion

呂學育^a 廖國基^b 蘇承維^c

^a 中華科技大學航空機械系

^b 國立臺灣大學生物產業機電工程系

^c 中華科技大學飛機系統工程碩士班

Shyue-Yuh Leu^a K.-C. Liao^b Cheng-Wei Su^b

^aDepartment of Aviation Mechanical Engineering, China University of Science and Technology

^bDepartment of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University

^cGraduate School of Aircraft System Engineering, China University of Science and Technology

摘要

本論文嘗試考慮降伏面扭曲現象，以期較準確探討循環彈塑性行為。有限元素商業化分析軟體具有泛用之彈塑性分析功能，惟均尚未能提供考慮降伏面扭曲的模擬功能。因此本文基於 ABAQUS 所提供使用者副程式的功能，採用文獻上所推導的扭曲硬化模式，編寫模擬材料降伏面扭曲現象，以擴充 ABAQUS 的考慮循環負荷作用之彈塑性分析功能。分析案例採用 CS 1026 材料，探討結構承受單軸循環負荷時之循環彈塑性行為，分析結果並與文獻上的實驗結果及數值分析結果比較，以驗證所建構之考慮降伏面扭曲的循環彈塑性分析模式之正確性。

關鍵字：降伏面扭曲、有限元素分析、單軸循環彈塑性分析、棘輪。

Abstract

The thesis aims to take yield surface distortion into account in order to investigate cyclic elastic-plastic behavior. Finite-element commercial codes provide elastic-plastic analysis for multi-purposes. However, they do not take into account yield surface distortion. Therefore, we enhance the capability of ABAQUS in the simulation of yield surface distortion by editing the user subroutine. The advanced constitutive model considering the distortional hardening available in the literature is adopted. Case studies are performed by ABAQUS and compared with those experimental and numerical results of CS1026 published in the literature, in order to test and verify the correctness of user subroutine.

Keywords : Yield surface distortion. Finite-element analysis. Uniaxial cyclic elastic-plastic analysis. Ratcheting.

一、前言

結構承受外力負載時的反應，取決於負載的大小與型態，因而產生不同的結構行為。結構承受負荷可分為單調式或循環式，這兩種負載型態最大的差異為循環式負載呈週期性變化如圖 1 所示，單調式負載是一個隨著時間呈現單純變大或變小的應力如圖 2 所示。

一般工程的組件或結構例如：「發電廠管路、飛機渦輪轉子與飛機蒙皮」等，都常遭逢循環式負載作用，當機械結構累積到一定的塑性應變時，結構將會發生塑性崩潰(plastic collapse)，因此結構不論是受到單軸還是多軸的循環式負載作用時，都是一個很重要的議題。

當結構承載單調式負載且應力小於降伏強度時，結構則呈現純彈性行為。當結構承受的循環式負載未超過安定負載時，在起初幾個週期內結構會有塑性變形，在這之後結構並未產生新的塑性應變，反而呈現純彈性行為，則稱為彈性安定(elastic shakedown)。如圖 3 所示。若作用在結構上的循環式負載超過安定負載時，而結構發生正負交替之塑性變形，此時結構內部之塑性應變並未累加，此行為稱低週期疲勞破壞(low-cycle fatigue failure)。如圖 4 所示。若作用在結構上的循環式負載超過安定負載時，塑性應變不斷隨著時間的增加而累加，此行為稱棘輪反應(ratcheting)[1]。如圖 5 所示。

由於結構的設計目的在於將棘輪反應或低週期疲勞破壞排除在外，所以能準確地預估結構材料的彈塑性行為，對於結構設計以及安全評估來說是一項不可忽視的重要議題。

二、文獻回顧與理論探討

一般硬化行為可分為等向性硬化(isotropic hardening)與走動式硬化(kinematic hardening)。當材料承受負荷時，初始降伏面會放大或縮小，但是它不移動，此行為稱等向性硬化，如圖 6。當材料承受負荷時，初始降伏面並不會放大或縮小，而是在降伏面上移動，此行為稱走動式硬化，如圖 7。

文獻[2]提到，當結構產生棘輪反應時材料會過度變形，而使結構損壞，因此能準確地預估及解決棘輪反應是一個重要的議題。然而，阿姆斯特壯走動式硬化模式[3]雖被廣泛應用，但有高估棘輪分析結果的缺點。因此，Chaboche 推導出以多組 C_i, γ_i 改善阿姆斯特壯走動式硬化模式[4]，使得走動式硬化模式更加精確，將背應力變化率 \dot{X} 表示為

$$\dot{X} = \frac{2}{3} C_i \dot{\epsilon} - \gamma_i X \dot{\epsilon} \quad (1)$$

其中

X 為背應力張量

C_i 和 γ_i 為材料參數

$\dot{\epsilon}$ 為塑性應變率

$\dot{\epsilon}$ 為累積塑性應變率

根據文獻[4-5]研究顯示，走動式硬化模式雖然能成功模擬單軸循環式負荷的棘輪行為，但是卻高估了多軸的棘輪分析結果。因此文獻[6]結合 Chaboche 走動式硬化模式[4]及 Baltov and Sawczuk [7]扭曲模式之降伏面扭曲模式，如圖 8，其關係式如下

$$F = F_0 + F_1 - \frac{2}{3} \sigma_y^2 \quad (2)$$

Chaboche 走動式硬化模式[4]關係式如下

$$F_0 = (S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (3)$$

其中

S_{ij} 為偏應力

α_{ij} 為偏背應力張量

Baltov and Sawczuk [7] 使用異向性硬化規則來模擬降伏面平移、旋轉與脹縮，由於省略了不可壓縮性的限制，所以將關係式表示如下

$$F_1 = A_0 s_{ij}^p s_{ki}^p (S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ki} - \alpha_{ki}) \quad (4)$$

其中

A_0 為表示降伏面的膨脹或收縮的純量

s_{ij}^p 和 s_{ki}^p 為塑性應變率

S_{ij} 和 S_{ki} 為偏應力

α_{ij} 和 α_{ki} 為偏背應力張量

三、問題描述

本章考慮管狀結構承受軸向循環式負荷作用，試件幾何參考於文獻[8]其直徑為 60mm、內徑為 22.34mm、長度為 154mm，詳細尺寸參考圖 9 所示。分析案例中，假設硬化行為遵文獻[6]所推導之兼具 Chaboche 走動式硬化模式[4]以及 Baltov and Sawczuk 模式[7]考慮降伏面的平移、旋轉與膨脹，而降伏行為則遵循慣用的 Von Mises 降伏準則。所考慮之材料參數是依據文獻上所提供的 CS1026 碳鋼材質[6]，如表 1 所示。

四、數值分析模式建立

本章所考量之分析模式採用 ABAQUS 提供的八節點實體元素 C3D8 進行結構彈塑性分析，由於考量之結構幾何為軸對稱，因此將結構簡化為如圖 10 所示之 5° 分析模式，並應用 ABAQUS 提供之使用者材料副程式(UMAT)的功能，編寫文獻[6]所推導之降伏面扭曲模式，以加值擴充材料模擬之功能。分析採用逐步法，並記錄每一次循環時結構產生的反應。

五、分析結論

本節探討 CS1026 碳鋼材質，並與文獻上之實驗結果[9]及數值模擬結果[6]比對。

5.1 案例一

負載作用每 $t = 60$ 秒為一次循環週期，總歷時 $T_{step-by-step} = 2700$ 秒，如圖 11 所示。平均應力均為 45(MPa)，應力振幅為 220.6(MPa)。如圖 12 所示，循環負載最大值為 $\sigma_{max} = 265.6$ ，最小值為 $\sigma_{min} = -175.6$ 。對應於上述循環負荷之作用，擷取分析模式中反應較大之區域 (ABAQUS 結構元素 160、節點 98)。應力與應變關係圖如圖 13 所示，由應變之循環次數變化情形，可知結構處於棘輪狀態。由圖 14 的循環週期與應變關係圖之實驗與數值模擬結果比對，分析結果和數值模擬結果[6]與實驗結果[9]比對三者結果大致吻合。另一方面，由圖 15 的循環週期與應變關係圖之本文分析結果與 Chaboche 走動式硬化模式[4]分析結果做一個比對，相較於本文分析結果，Chaboche 走動式硬化模式[4]在第 30 個週期後塑性應變較大。為了增加應用性，我們將降伏面扭曲模式與 Chaboche 走動式硬化模式加入一個穩定的內壓，並用三種不同大小的內壓做比對如圖 16 所示，並觀察其所發生的塑性變形。由圖 17 發現，當施加的內壓越大時，塑性應變會越小，然而內壓為 3000 時，本文分析結果會與 Chaboche 走動式硬化模式吻合。

5.2 案例二

負載作用每 $t = 60$ 秒為一次循環週期，總歷時 $T_{step-by-step} = 2400$ 秒，如圖 11 所示。平均應力均為 44.5(MPa)，每 10 次循環換一個應力振幅，應力振幅分別為 174.5(MPa)、193.5(MPa)、211.5(MPa)、228.5(MPa)。如圖 18 所示，循環負載最大值分別為 $\sigma_{max} = 219$ 、 $\sigma_{max} = 238$ 、

$\sigma_{max} = 256$ 、 $\sigma_{max} = 273$ ，最小值分別為 $\sigma_{min} = -150$ 、 $\sigma_{min} = -149$ 、 $\sigma_{min} = -167$ 、 $\sigma_{min} = -184$ 。對應於上述循環負荷之作用，擷取分析模式中反應較大之區域(ABAQUS 結構元素 160、節點 98)，應力與應變關係圖如圖 19a 所示，文獻上之實驗與數值結果如圖 19b、19c 所示，由應變之循環次數變化情形，可知結構處於棘輪狀態。由圖 20 的循環週期與應變關係圖之實驗與數值模擬結果比對，本文分析結果與實驗結果[9]在第 1~13 個循環時較為吻合，與數值模擬結果[6]在第 14~35 個循環時較為吻合，與數值模擬結果[9]在第 36~40 個循環時較為吻合。另一方面，為了增加應用性，我們將此案例加入一個穩定的內壓，並用三種不同大小的內壓做比對如圖 21 所示，並觀察其所發生的塑性變形。由圖 22 發現，起初前 10 個週期的塑性應變並未有明顯的變化，第 10~20 週期在不同的應力振幅情況下所反應出的塑性應變已有差異性，隨後在第 20~30 週期、第 30~40 週期其所反應出的塑性應變可以明顯地看出當應力振幅、內壓力越大時，其產生的塑性應變將會變小。

六、結論

本文利用 ABAQUS(2014)使用者材料副程式的功能，編寫降伏面扭曲硬化模式，探討管狀結構受軸向之單軸循環負載作用，分析案例考慮 CS1026 碳鋼材質，由分析結果顯示，本文案例一的分析結果與實驗結果[9]及文獻上數值模擬[6]比對皆吻合，另一方面，加入穩定內壓後，會使得塑性應變變小，當穩定內壓越大時，降伏面扭曲模式與 Chaboche 走動式硬化模式所分析出來的結果皆會越接近。本文案例二的分析結果與文獻上數值模擬[6]比對較為吻合，另一方面，加入穩定內壓後可以發現，當應力振幅越來越大時，受到內壓力的干擾將會更明顯，由於以上兩個案例的負載作用型態皆不同，也跟實驗結果與數值模擬結果有良好的吻合度，最後，證實所建構之使用者材料副程式應用於單軸的正確性。

誌謝

本文研究內容執行期間，承蒙科技部計畫(編號: MOST 104-2221-E-157-005-)在研究經費上的支持，在此特別致上謝意。

參考文獻

- [1] König, J. A., "Shakedown of elastic-plastic structure", Elsevier, 1987.
- [2] Segle, P., Eklund, G. and Skog, M., "A two-rod testing approach for understanding ratcheting in structures", International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 184-193, March-April 2016.
- [3] Armstrong, P. J. and Frederick, C. O., "A mathematical representation of the multiaxial bauschinger effect (CEGB Report RD/B/N/731)", Berkeley: Berkeley Nuclear Laboratories, 1966.
- [4] Chaboche, J. L., "On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects", International Journal of Plasticity, pp. 661-678, January 1991.
- [5] Ohno, N. and Wang, J.-D., "Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, Part I: formulations and basic features for ratcheting behavior", International Journal of Plasticity, pp. 375-390, January 1993.
- [6] Rokhgireh, H. and Nayebi, A., "Cyclic uniaxial and multiaxial loading with yield surface distortion consideration on prediction of ratcheting", Mechanics of Materials, pp. 61-74, April 2012.
- [7] Baltov, A. and Sawczuk, A., "A rule of anisotropic hardening", Acta Mechanica, pp. 81-92, September 1964.
- [8] Portier, L., Calloch, S., Marquis, D. and Geyer, P., "Ratchetting under tension-torsion loadings: experiments and modelling", International Journal of Plasticity, pp. 303-335, March 2000.
- [9] Hassan, T. and Kyriakides, S., "Ratcheting in cyclic plasticity, Part I: uniaxial behavior", Int. J.

Plast. 8, pp. 91-116, January 1992.

- [10] Fouvry, S., Kapsa, Ph. and Vincent, L., “An elastic–plastic shakedown analysis of fretting wear”, *Mechanics of Materials*, pp. 41-54, January 2001.
- [11] Abdel-Karim, M., “Shakedown of complex structures according to various hardening rules”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 427-458, January 2005.
- [12] Feigenbaum, H. P. and Dafalias, Y. F., “Directional distortional hardening in metal plasticity within thermodynamics”, *International Journal of Solids and Structures*, pp. 7526-7542, May 2007.

表 1 CS1026 碳鋼材料參數表[6]

C_1	C_2	C_3	C_4	γ_1
52103	26184	18600	1760	2194
γ_2	γ_3	γ_4	A_0	E
1645	435	11.1	-40	200
S_y				
187				

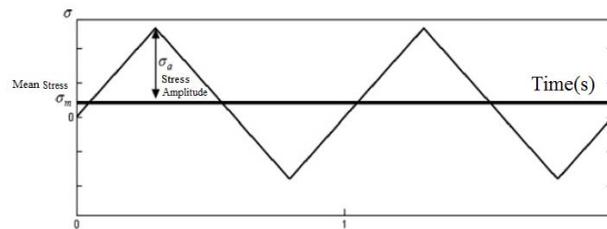


圖 1 循環式負載示意圖 [6]

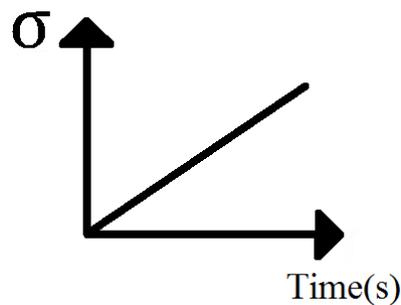


圖 2 單調式負載示意圖

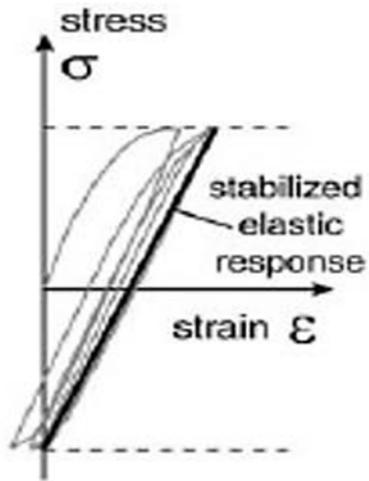


圖 3 彈性安定之應力與應變示意圖 [10]

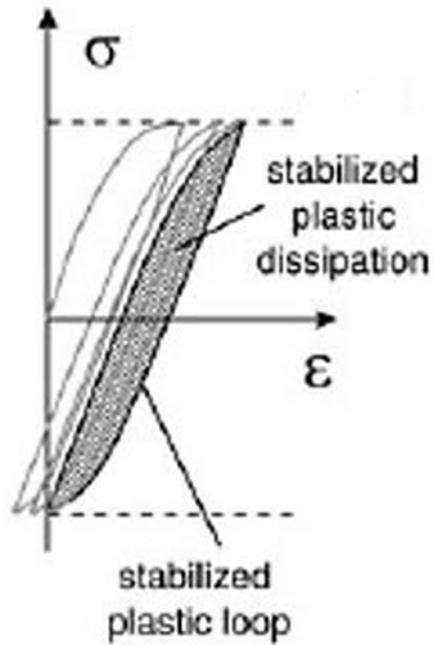


圖 4 低週期疲勞破壞之應力與應變示意圖 [10]

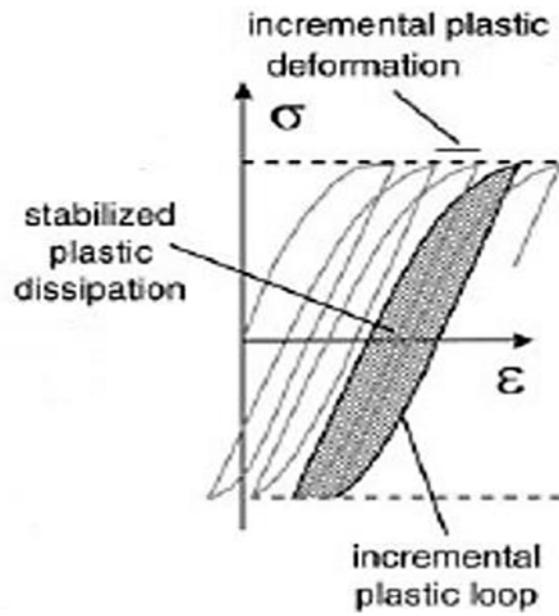


圖 5 棘輪反應之應力與應變示意圖 [10]

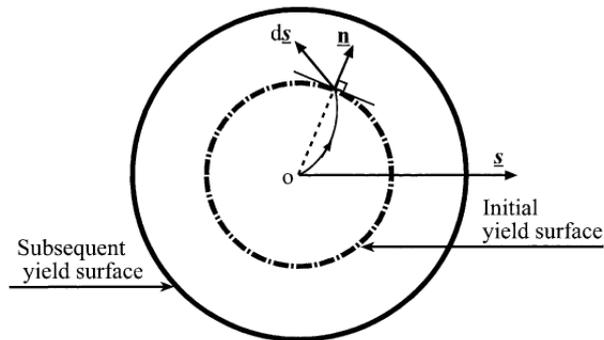


圖 6 等向性硬化示意圖 [11]

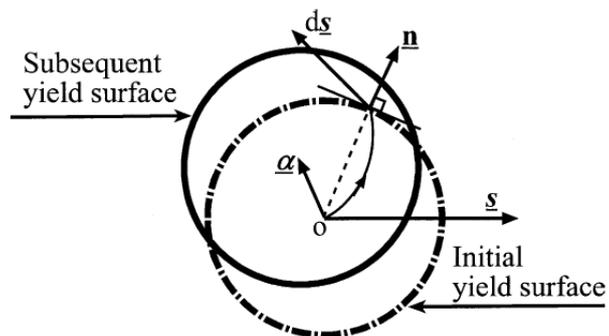


圖 7 走動式硬化示意圖 [11]

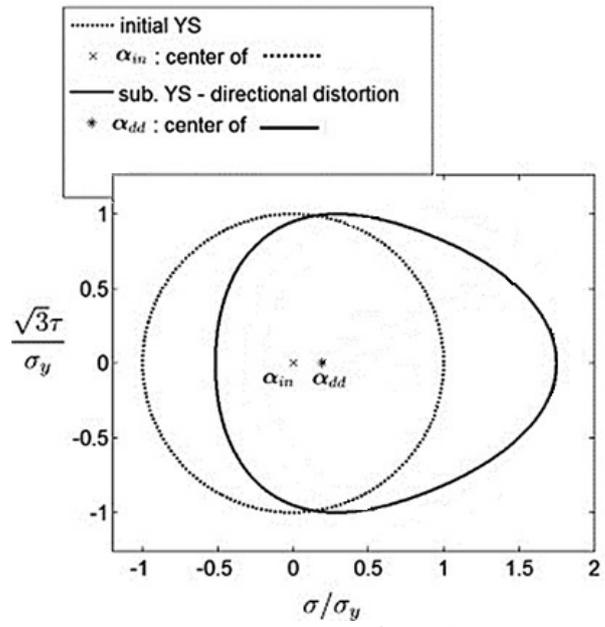


圖 8 扭曲硬化示意圖 [12]

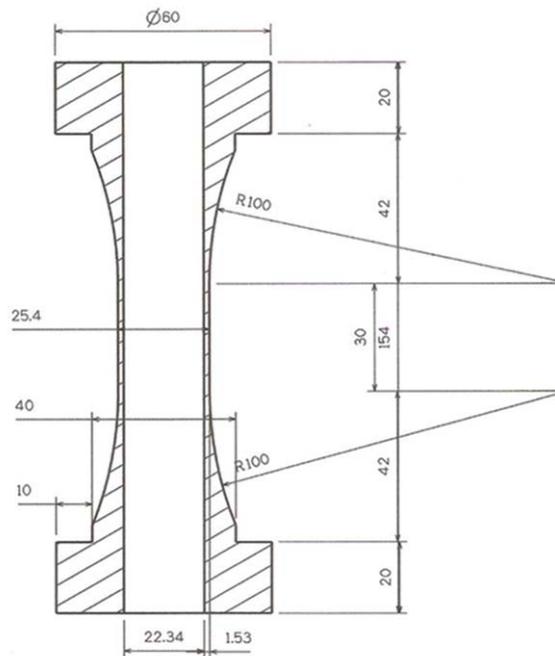


圖 9 受單軸循環負載之結構示意圖[8]

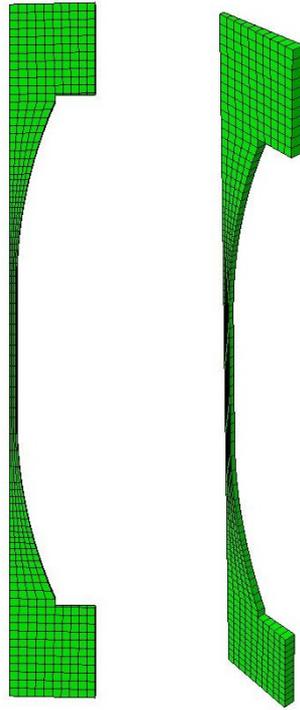


圖 10 結構五度示意圖

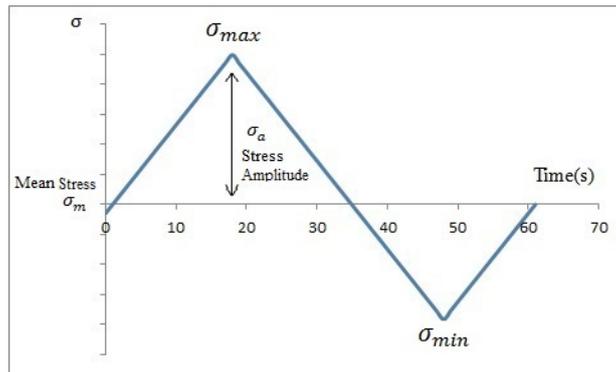


圖 11 逐步法分析設定循環負載

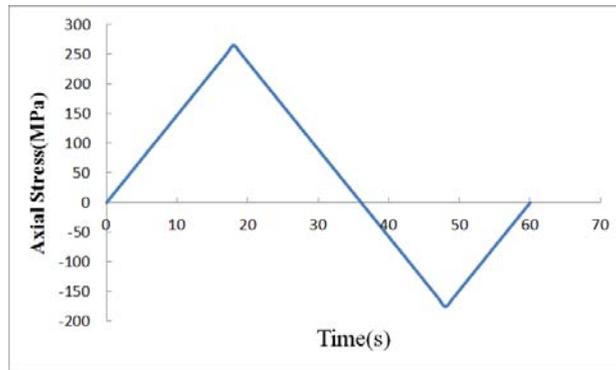


圖 12 循環負載(案例一每 60 秒一次循環)

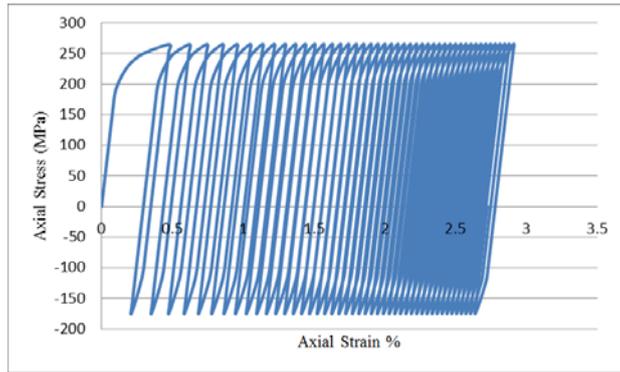


圖 13 應力與應變關係圖之本文分析結果(案例一)

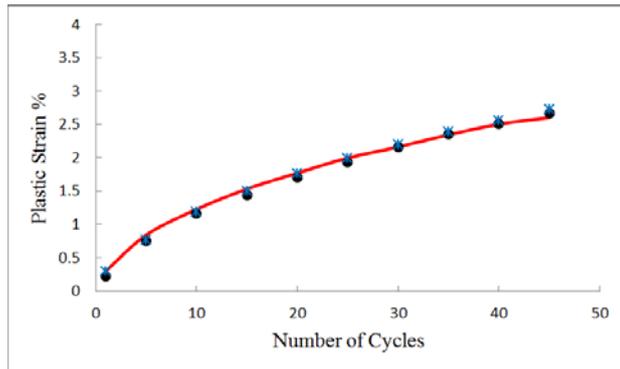


圖 14 循環週期與應變關係圖之實驗與數值結果比對
(案例一 ● 實驗結果[9]; * 本文分析結果; — 數值模擬結果[6])

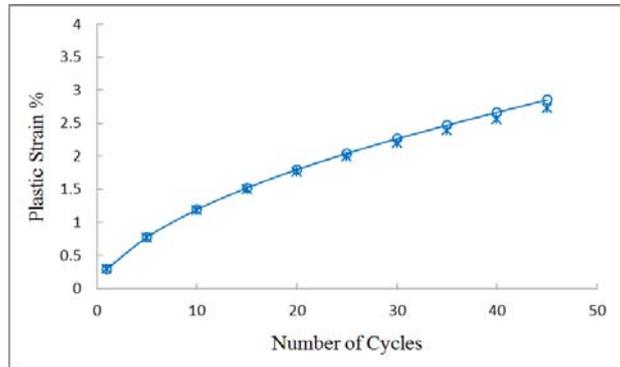


圖 15 循環週期與應變關係圖之本文分析結果與 Chaboche 走動式硬化模式[4]分析結果比對
(案例一 * 本文分析結果; ⊕ Chaboche 走動式硬化模式分析結果)

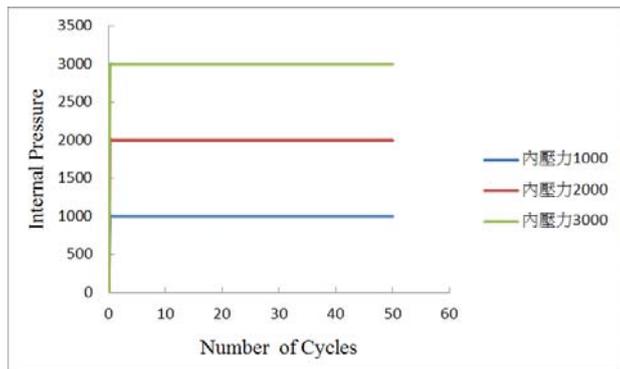


圖 16 循環負載(案例一內壓力)

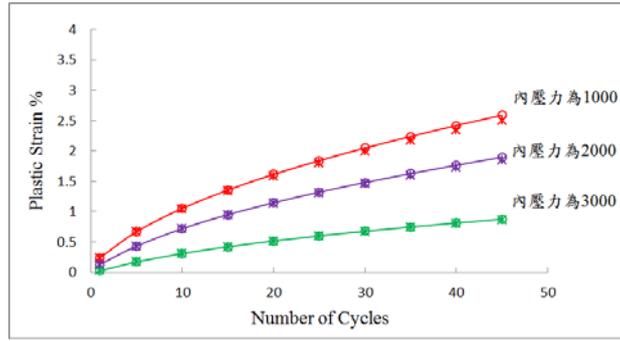


圖 17 循環週期與應變關係圖之本文分析結果與 Chaboche 走動式硬化模式[4]分析結果比對(案例一 * * * 本文分析結果; —○— —□— —■— Chaboche 走動式硬化模式分析結果)

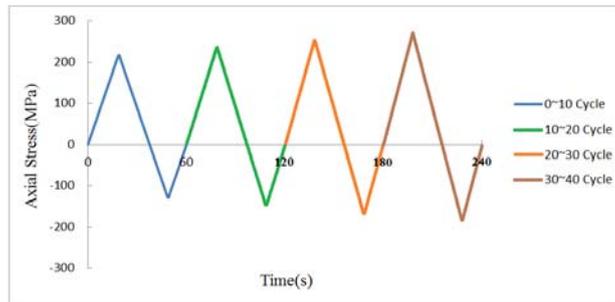


圖 18 循環負載(案例二每 10 次循環換一個應力振幅)

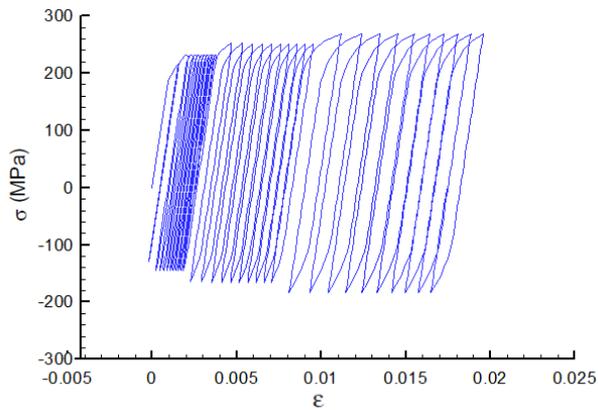


圖 19a 應力與應變關係圖之本文分析結果 (案例二)

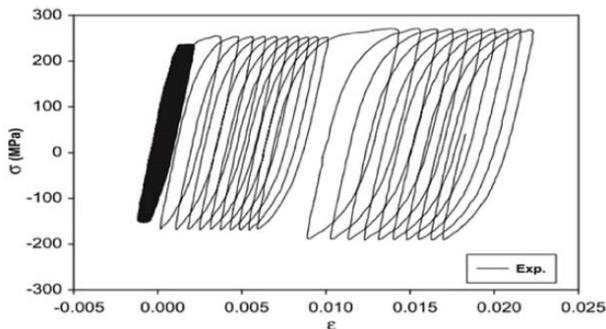


圖 19b 應力與應變關係圖之實驗結果(案例二) [9]

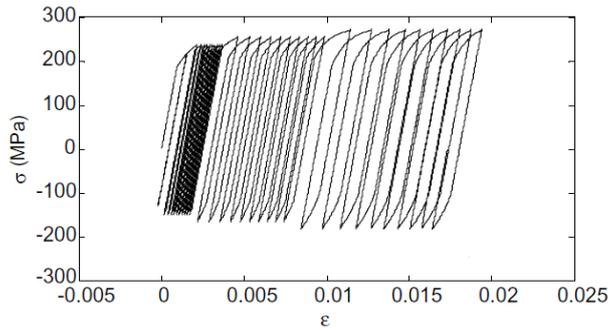


圖 19c 應力與應變關係圖之數值結果(案例二) [6]

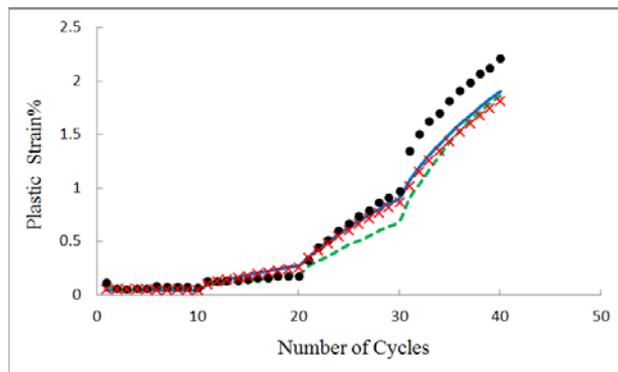


圖 20 循環週期與應變關係圖之實驗與數值模擬結果比對(案例二 ●實驗結果[9]; — 本文分析結果; - - 數值模擬結果[9]; × 數值模擬結果[6])

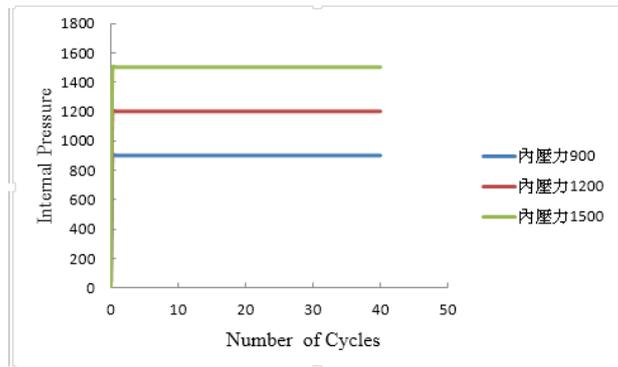


圖 21 循環負載(案例二內壓力)

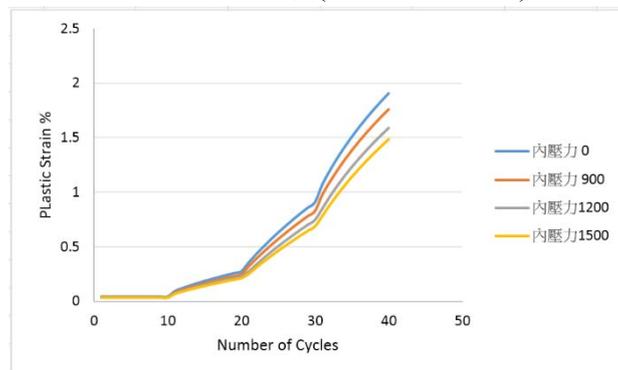


圖 22 循環週期與應變關係圖之本文分析結果與施加 900、1200、1500 內壓力的本文結果比對(案例二 — 本文分析結果; — 施加 900 內壓力 — 施加 1200 內壓力 — 施加 1500 內壓力的本文分析結果)

考慮 Chaboche 走動式硬化模式之桁架結構彈塑性分析

呂學育¹、王穎諄²

¹ 中華科技大學航空機械系

² 中華科技大學飛機系統工程碩士班

E-mail: syleu@cc.cust.edu.tw

科技部計畫編號: MOST 104-2221-E-157-005

摘要

本文考慮桁架桿件具 Chaboche 非線性走動式硬化行為，分別利用安定分析直接法及有限元素逐步法，探討桁架結構承受循環負荷作用下之彈塑性行為分析。首先利用安定分析之上、下限定理，將循環彈塑性問題陳述為最佳化問題，並藉由數值運算軟體 MATLAB 所提供之最佳化演算法，獲得最大下限解等於最小上限解，即為安定分析之真正解。

另一方面，藉由 ABAQUS 所提供之有限元素逐步分析法，除了可驗證利用 MATLAB 所計算之安定極限負載，並探討當桁架結構承受超出安定極限負載時，可能發生塑性崩潰、低週期疲勞破壞、棘輪等彈塑性行為。

於案例分析中，分別考慮 Armstrong-Frederic、Chaboche 走動式硬化模式，進行三桿件之桁架結構之循環彈塑性問題探討與比較。最後由分析案例之結果，進行安定分析直接法及有限元素逐步法的結果比較，同時也探討基於不同之非線性走動式硬化模式的循環彈塑性行為差異。

關鍵詞：安定分析、有限元素逐步分析、非線性走動式硬化、彈性安定、棘輪。

前言

一般而言，道路鋪面、鐵路軌道、電廠管路、渦輪轉子及飛機結構等所承受之外力負載型態大多為循環式外力。結構承受循環負載時，起初幾個週期內結構發生了塑性應變，之後未再發生新的塑性應變，而呈現純彈性行為，則稱為彈性安定(elastic shakedown)。若作用在結構上的循環式負載超過安定負載時，而結構發生正負交替之塑性變形，此時結構內部之塑性應變並未累加，結構將發生低週期疲勞破壞或稱交替塑性破壞 (alternating plasticity)。若作用在結構上的循環式負載超過安定負載時，且塑性應變不斷的增加，稱為累積塑性破壞(incremental plastic collapse)或稱為棘輪反應[1-6]。

實際結構所承受的負載常為複雜之循環式負載，因此探討結構所承受複雜之循環式負載後的彈塑性行為反應，是結構設計與安全評估的重要課題。

為了要準確預估複雜循環彈塑性行為反應，須採用合宜之硬化模式，其中 Armstrong-Frederic (AF) 走動式硬化模式為目前較為熟悉且廣為應用之走動式硬化模式，之後，Chaboche 根據 AF 走動式硬化規則，將背應力(backstress)修改為多組背應力所累加形成的走動式硬化模式，此模式較能夠預估出結構之行為反應。

研究方法

基於安定分析之上、下限定理，我們將求解安定負載問題陳述為最佳化問題，其下限定理陳述為一找尋最大下限解之極值問題，上限定理陳述為一找尋最小上限解之極值問題。

2.1 桁架走動式硬化之安定分析下限定理陳述

基於 Melan 提出之安定分析下限定理，桁架結構問題陳述為以軸向力為變數的極值問題，由於桿件之總應力可拆解成彈性應力及殘餘應力，假設結構存在一個不隨時間改變、自我平衡之殘餘應力，若桿件之總應力不違反降伏條件，此桁架結構會處於安定，問題之數學規劃表示如下：

$$\begin{aligned} \max \quad & \lambda \\ \text{s.t.} \quad & \left| \bar{\mathbf{t}} - \frac{3}{2} \bar{\mathbf{x}} \right|_{\infty} \leq 1 \\ & \bar{\mathbf{t}} = \lambda \bar{\mathbf{t}}^E + \bar{\boldsymbol{\rho}} \\ & \mathbf{R} \bar{\boldsymbol{\rho}} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中

λ 為負載係數

$\bar{\mathbf{t}} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{t}$ 為無因次化軸向力

\mathbf{t} 為軸向力

$\bar{\mathbf{t}}^E = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{t}^E$ 為無因次化彈性軸向力

\mathbf{t}^E 為彈性軸向力

$\bar{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{B}^{-1} \boldsymbol{\rho}$ 無因次化殘餘軸向力

$\boldsymbol{\rho}$ 為不隨時間變化的殘餘應力

\mathbf{B} 為對角初始降伏力矩陣

\mathbf{R} 為係數矩陣

$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{x}$ 為無因次化之類力(force-like)背應力

\mathbf{x} 為類力(force-like)背應力

2.2 桁架走動式硬化之安定分析上限定理陳述

基於 Koiter 提出之安定分析上限定理，桁架結構問題陳述為存在一個塑性應變率，使得其在一個循環週期所累積之塑性應變滿足諧合條件，假如外力所作的功不大於塑性耗散，則結構將處於安定。問題之數學規劃如下所示：

$$\begin{aligned} \min \quad & \bar{\lambda} \\ \text{s.t.} \quad & \bar{\lambda} = \|\mathbf{B}^T \mathbf{R}^T \mathbf{u}\| + (\mathbf{B}^T \mathbf{R}^T \mathbf{u})^T \left(\frac{3}{2} \bar{\lambda} \right) \\ & \mathbf{u}^T (\mathbf{R} \mathbf{B} \bar{\mathbf{t}}^E) = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$\bar{\lambda}$ 為負載係數

\mathbf{u} 為位移

接著利用 MATLAB 內建最佳化工具箱(Optimization Toolbox™)[7-8]，所提供之最佳化演算法，將上、下限問題撰寫成 M-file 程式碼透過最佳化函數 fmincon、linprog 進行運算，藉以探討桁架之安定極限負載。另外利用對偶性質驗證所求解之安定極限負載之正確性。

此外，基於比較及驗證，本文亦利用商業化之有限元素分析軟體 ABAQUS，提供之有限元素之彈塑性分析功能進行分析，藉由 ABAQUS 內建之有限元素逐步法[9]，所求得之應力應變圖觀察並記錄結構於每一週期之反應，藉此方能判斷結構之行為反應、再透過塑性耗散來確認結構安定與否。

分析案例及結果討論

本文探討案例為三桿件桁架結構，三桿件桁架結構由桿件 OA、桿件 OB、桿件 OC 組成，各桿件夾角為 60°，三桿件邊界條件為鉸子支承，如圖 1 所示。於分析案例中，我們使用 von Mises 降伏準則[10]來模擬桁架結構之塑性降伏行為，考慮不同型態的走動式硬化模式，分別為 AF 和 Chaboche。

考慮 AF 走動式硬化模式，可將背應力變化率 \dot{X} 表示為

$$\dot{X} = \frac{2}{3} C \dot{\epsilon} - \gamma X \dot{\epsilon} \quad (3)$$

其中

C 和 γ 為硬化材料參數

$\dot{\epsilon}$ 為塑性應變率

$\dot{\bar{\epsilon}}$ 為等效塑性應變率

考慮 Chaboche 走動式硬化模式時，可將背應力變化率 \dot{X} 表示為

$$\dot{X} = \sum_{j=1}^m \frac{2}{3} C_j \dot{\epsilon} - \gamma_j X_j \dot{\bar{\epsilon}} \quad (4)$$

其中

m 為硬化材料參數 C_j 和 γ_j 的數目。

AF 走動式硬化模式之材料參數[11]

楊氏係數 $E = 181.517GPa$

蒲松比 $\nu = 0.3$

初始降伏強度 $\sigma_y = 170MPa$

走動式硬化參數 $C = 1380GPa$

走動式硬化參數 $\gamma = 101$

Chaboche 走動式硬化模式之材料參數[12]

楊氏係數 $E = 200GPa$

蒲松比 $\nu = 0.3$

初始降伏強度 $\sigma_y = 187MPa$

走動式硬化參數 $C_1 = 65.103GPa$

走動式硬化參數 $C_2 = 39.584GPa$

走動式硬化參數 $C_3 = 1.675GPa$

走動式硬化參數 $\gamma_1 = 7511.4$

走動式硬化參數 $\gamma_2 = 405.3$

走動式硬化參數 $\gamma_3 = 4$

案例一：考慮桁架桿件具有 AF 走動式硬化模式行為，循環負載作用於節點 O，循環負載的範圍考慮為 $P \leq V \leq 3P$ 。採用 MATLAB 所提供之最佳化函數 linprog、fmincon 運算結果得知，下限問題最大解為 0.720，上限問題最小解為 0.720，上、下收斂情況如圖 3 所示。

接著利用逐步法分析之應力、應變圖得知，當負載係數 $(P/\sigma_y A_0)$ 為 0.720 時，初期 OB 桿件受到負載時為純彈性行為，隨著循環負荷持續作用下，OB 桿件達降伏後，將進入塑性行為，最後回復成彈性行為，如圖 5 所示。再藉由 OB 桿件之塑性耗散確認，OB 桿件之塑性耗散並

沒有隨著循環週期的增加而改變，如圖 6 所示，故將 OB 桿件判斷為彈性安定。當負載係數($P/\sigma_y A_0$)增加為 0.721，藉由逐步法分析之應力、應變圖，初期 OB 桿件受到負載時為純彈性行為，隨著循環負荷持續作用下，OB 桿件達降伏後，進入塑性行為，如圖 7 所示。再藉由 OB 桿件之塑性耗散確認，OB 桿件之塑性耗散會隨著時間週期增加而瞬間產生急劇變化，如圖 8 所示，故將 OB 桿件判斷為塑性崩壞。由此可知結構之安定極限負載係數($P/\sigma_y A_0$)為 0.720。

案例二：考慮桁架桿件具有 Chaboche 走動式硬化模式行為(三組 C 、 γ)，循環負載作用於節點 O，循環負載的範圍考慮為 $P \leq V \leq 3P$ 。採用 MATLAB 所提供之最佳化函數 linprog、fmincon 運算結果得知，下限問題最大解為 1.250，上限問題最小解為 1.250，上、下收斂情況如圖 4 所示。

接著利用逐步法分析之結果，繪製應力、應變圖，當負載係數($P/\sigma_y A_0$)為 1.250 時，初期 OB 桿件受到負載時為純彈性行為，隨著循環負荷持續作用下 OB 桿件達降伏後，將進入塑性行為，最後回復成彈性行為，如圖 9 所示。再藉由 OB 桿件之塑性耗散確認，OB 桿件之塑性耗散並沒有隨著循環週期的增加而改變，如圖 10 所示，故將 OA、OB 桿件判斷為彈性安定。當負載係數($P/\sigma_y A_0$)增加為 1.251，藉由逐步法分析之應力、應變圖，初期 OB 桿件受到負載時為純彈性行為，隨著循環負荷持續作用下，OB 桿件達降伏後，將進入塑性行為，最後會形成漸進式迴圈，如圖 11 所示。再藉由 OB 桿件之塑性耗散確認，OB 桿件之塑性耗散會隨著時間週期增加而增加，如圖 12 所示，故將 OB 桿件判斷為棘輪反應。由此可知結構之安定極限負載係數($P/\sigma_y A_0$)為 1.250。另外，為求桿件之極限負載能力，故將負載係數增加至 2.538 桿件將會發生塑性崩壞如圖 13 所示及塑性耗散如圖 14 所示。

致謝

本文研究執行期間，承蒙科技部計畫(編號: MOST 104-2221-E-157-005-經費補助，特在此致謝。

結論

安定分析為基於上限、下限定理的直接法，可以迅速地求解出桁架結構之安定極限負載能力。本文將直接法推廣考慮 Chaboche 走動式硬化模式，將問題陳述為最佳化問題，透過 MATLAB 最佳化工具箱之最佳化函數 linprog、fmincon 進行求解，獲得安定極限負載的下限及上限解，另外也利用 ABAQUS 彈塑性分析功能進行驗證，其結果吻合度相當良好。由分析結果得知，當採用 AF 走動式硬化模式時，負荷範圍為 $P \leq V \leq 3P$ ，當結構超出安定極限負載時，發生塑性崩潰；另一方面，在 Chaboche 走動式硬化模式，當結構超出安定極限負載時，發生棘輪反應。

參考文獻

- [1] J. A. König and G. Maier, “Shakedown analysis of elastic-plastic structures: a review of recent developments,” Nuclear Engineering and Design, Vol.66, pp.81-95, (1981).
- [2] J. A. König, “Shakedown of elastic-plastic structure,” Nuclear Engineering and Design, Vol.28, pp.121-136, (1987).
- [3] D. Weichert and G. Maier, “Inelastic Behavior of Structures under Variable Repeated Loads: Direct Analysis Methods,” New York, Springer, (2002).
- [4] M. Staat and M. Heitzer, “Numerical methods for limit and shakedown analysis:deterministic and probabilistic problems,” John von Neumann Institute for Computing, (2003)
- [5] J. Borwick, *Loudspeaker and Headphone Handbook*, 3rd ed. (Focal, Oxford, UK, 2001), pp. 108–137.
- [6] D. Weichert and A. Ponter, “Limit States of Materials and Structures: Direct Methods,” New York, Springer, (2009).
- [7] MATLAB.
<http://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html>
- [8] MATLAB.
<http://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>
- [9] ABAQUS, ABAQUS Analysis User’s Manual, Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, RI, USA.
- [10] R. Hill, “The Mathematical Theory of Plasticity,” Oxford, Clarendon Press, 1950.
- [11] O. U. Colak, “Kinematic hardening rules for modeling uniaxial and multiaxial ratcheting,” Materials & Design, Vol.29, pp.1575-1581, (2008).
- [12] A. H. Mahmoudi, S. M. Pezeshki-Najafabadi and H. Badnava “Parameter determination of Chaboche kinematic hardening model using a multi objective Genetic Algorithm,” Computational Materials Science, Vol.50, pp.1114-1122, (2011).

表 1 ABAQUS 與 MATLAB 安定極限負載係數($P/\sigma_y A_0$)計算結果

	三桿件桁架結構			
	AF 走動式硬化		Chaboche 走動式硬化	
	ABAQUS	MATLAB	ABAQUS	MATLAB
$P \leq V \leq 3P$	0.720	0.720	1.250	1.250

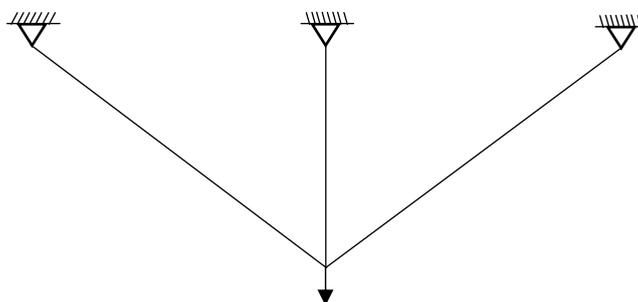


圖 1 三桿件桁架結構示意圖

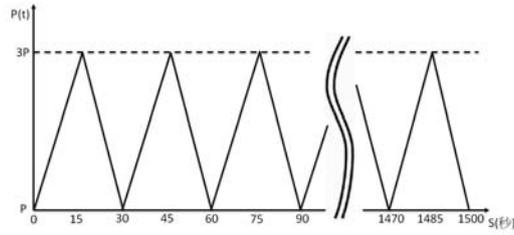


圖 2 循環負載示意($P \leq V \leq 3P$)

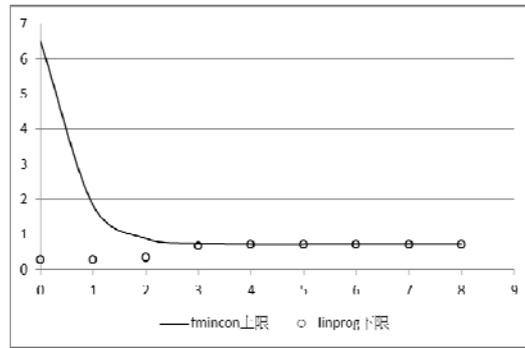


圖 3 MATLAB 上、下限收斂情況圖
(AF 走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$)

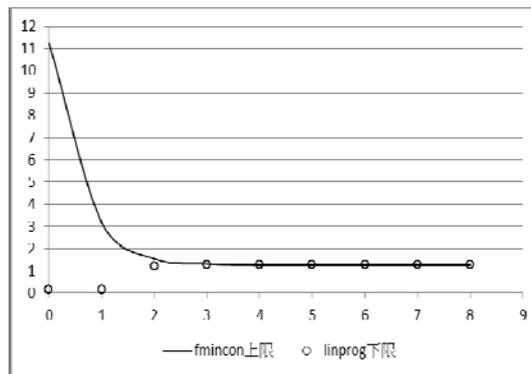


圖 4 MATLAB 上、下限收斂情況圖
(Chaboche 三組 C 、 γ 、 $P \leq V \leq 3P$)

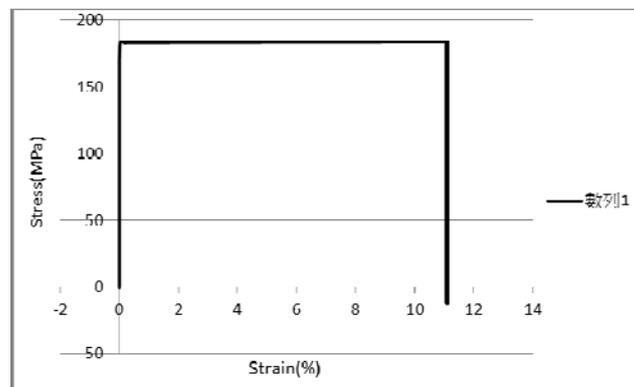


圖 5 OB 桿件應力應變關係

(AF 走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 0.720$)

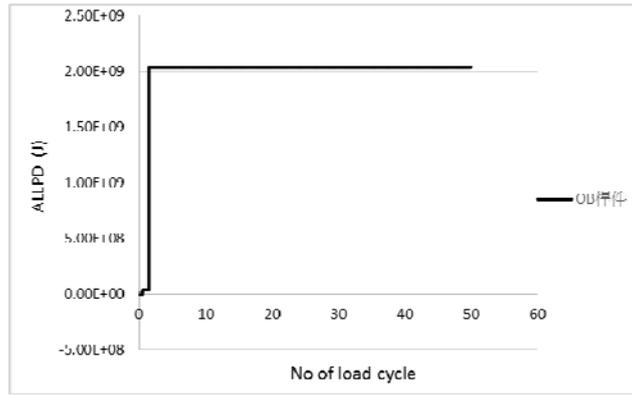


圖 6 OB 桿件塑性耗散的變化

(AF 走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 0.720$)

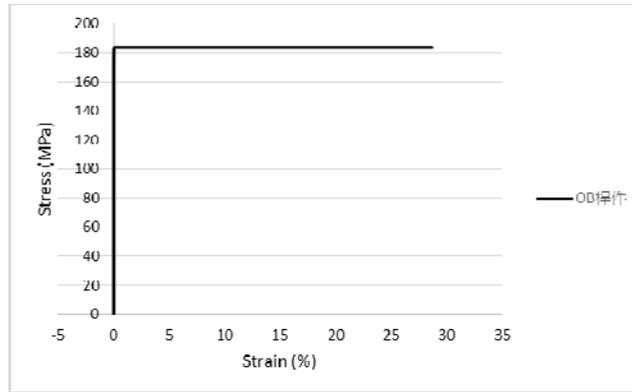


圖 7 OB 桿件應力應變關係

(AF 走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 0.721$)

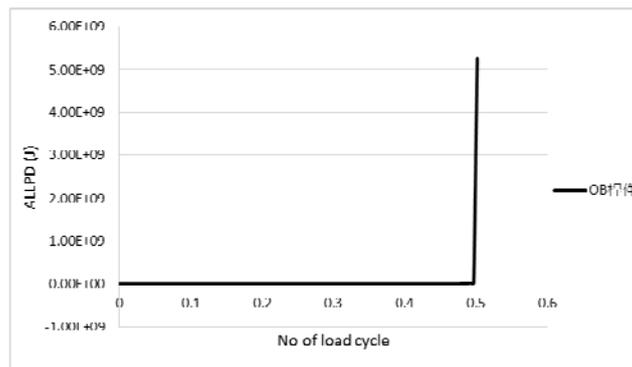


圖 8 OB 桿件塑性耗散的變化

(AF 走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 0.721$)

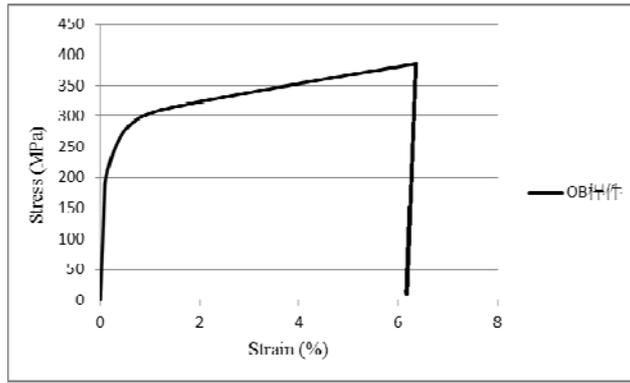


圖 9 OB 桿件應力應變關係

(Chaboche 三組走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 1.250$)

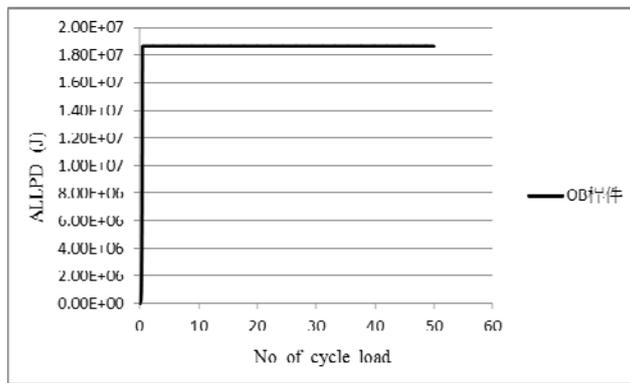


圖 10 OB 桿件塑性耗散的變化

(Chaboche 三組走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 1.250$)

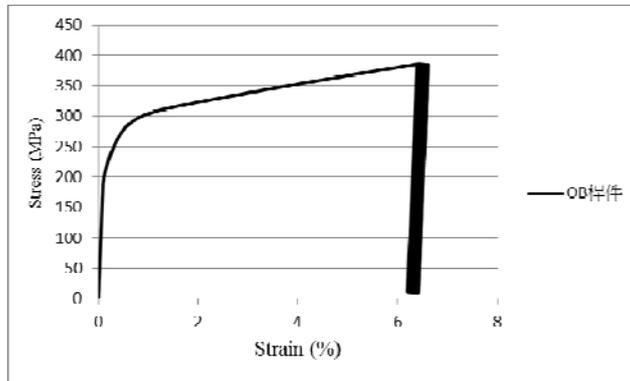


圖 11 OB 桿件應力應變關係

(Chaboche 三組走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 1.251$)

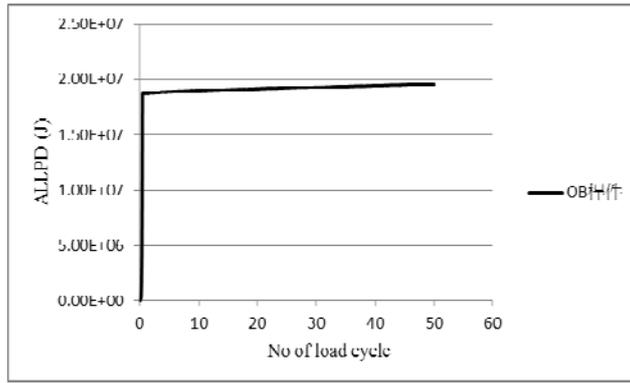


圖 12 OB 桿件塑性耗散的變化
(Chaboche 三組走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 1.251$)

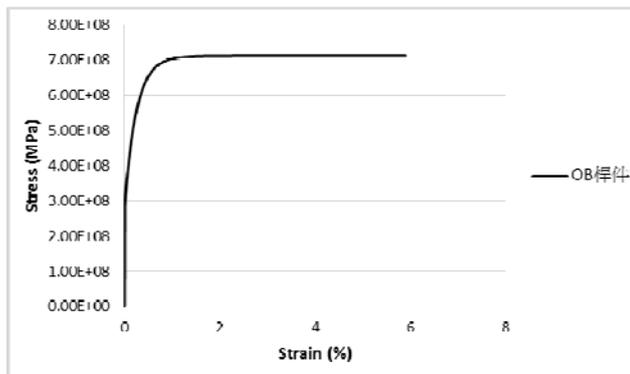


圖 13 OB 桿件應力應變關係
(Chaboche 三組走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 2.538$)

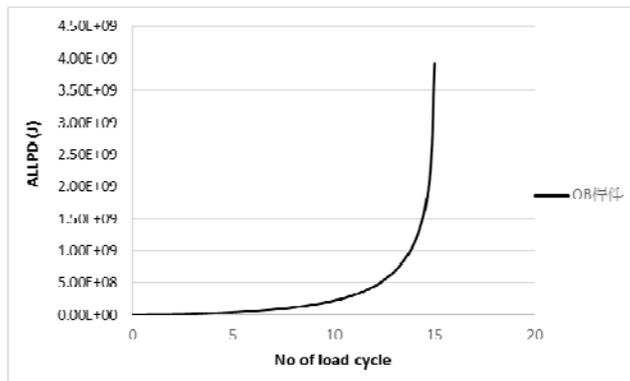


圖 14 OB 桿件塑性耗散的變化
(Chaboche 三組走動式硬化模式、 $P \leq V \leq 3P$ 、 $P/\sigma_y A_0 = 2.538$)

Self-Evaluation of Research Results

Overall speaking, the project has been performed as proposed. Three students in the master program have acquired appropriate training during the execution of the project. In addition, a part of research results has been presented in an international conference. Also, several journal papers, in the field of cyclic plasticity involving distortional hardening, are to appear or in preparation.

科技部補助專題研究計畫出席國際學術會議心得報告

日期：2016 年 9 月 5 日

計畫編號	MOST 104—2221—E—157—005—		
計畫名稱	考慮扭曲硬化之塑性異向性模式的評估與應用(3/3~3/3)		
出國人員姓名	呂學育	服務機構及職稱	中華科技大學副教授兼系主任
會議時間	2016 年 8 月 1 日 至 2016 年 8 月 4 日	會議地點	美國加州柏克萊大學
會議名稱	(中文) 第七屆計算方法國際研討會 (英文)The 7th International Conference on Computational Methods (ICCM)		
發表題目	(中文) 基於 ABAQUS 之考慮降伏面扭曲的循環塑性分析 (英文) Cyclic plasticity simulations with yield surface distortion by ABAQUS		

一、參加會議經過

因為預期時差問題，所以筆者刻意提前在 7 月 30 日由桃園機場出發，並於當地時間 7 月 30 日下午順利抵達，惟因在機場利用共乘方式前往住宿的地方，因此抵達下榻之處已晚間時刻。

利用 7 月 31 日作為研討會的各项準備，包括時差適應及熟悉往返研討會場地的規劃。8 月 1 日依規定時間前往研討會辦理簡單的報到，領取研討會簡單的議程手冊，對研討會議程及相關環境有一初步了解。

第七屆計算方法國際研討會 The 7th International Conference on Computational

Methods (ICCM 2016)，於 2016 年 8 月 1 日~4 日在美國加州柏克萊大學舉辦。開幕式是在 8 月 2 日舉行，在研討會主席的簡單致詞後，緊接安排二場的大會專題演講，演講貴賓分別為美國西北大學(Northwestern University, U.S.A.)的 Wing Kam Liu 教授(演講題目：Mechanistic Data-Driven Design of Complex Multiscale Material Systems)，以及美國史丹福大學(Stanford University, U.S.A.) Charbel Farhat 教授(演講題目：Real-Time Multiscale Modeling via Projection-Based Model Reduction)。

另外研討會主辦單位也分別在 8 月 3 日~4 日早上，各緊湊安排同時進行的三場大會主題演講，而研討會論文也依主題性質，分成約 67 個主題會場進行口頭發表。

筆者是參加 Modelling and Characterization of Mechanical Behaviour of Advanced Materials 的主題會場，除獲邀擔任會場主持人，所發表論文也獲選為邀請演講(invited speech)。這是筆者在國際研討會第二次擔任會場主持人，也是第一次獲邀成為邀請演講者，能有這樣的殊榮，主要是多年前在前往波蘭華莎參加固體力學研討會時，結識了這次主題會場的籌畫者，二人多年來僅透過 e-mail 聯繫，但對彼此的研究則因主題相近而一直彼此敬重。

筆者發表的論文安排在 8 月 3 日早上，題目為 Cyclic Plasticity Simulations with Yield Surface Distortion by ABAQUS，是目前筆者科技部專題研究計畫的部分研究成果。論文發表時，並引起三個問題的提問，主要針對研究動機、數值模型、分析模式等。

二、與會心得

筆者對於多年來能獲科技部經費資助，得以連續參加歐美頗具盛名的研討會，

一向抱持著感恩及樂在其中的態度，因為感恩所以珍惜得來不易的機會，而然樂在其中，係因能倘佯在來自世界各路高手的論文殿堂，不僅能在專業上獲得交流討論機會，也能享受主辦單位在各方面的精心策劃安排。

幾點印象深刻的研討會參加心得，因為研討會主題為計算方法，所以其實廣納各領域的論文，加上相近領域論文篇數多，所以論文廣度及縱向深度令人印象深刻。

論文發表會場提問及討論熱絡，一向是歐美研討會的特色，而亞太地區的研討會則常出現無人發問的冷場局面。

歐美的論文主題總是能貼近實際上的應用需要，所以原創性比較足夠，同時不管是以解析或數值為主要方法，也多能有實驗的結果來佐證，這是筆者一直深深自嘆不足之處。

相較於國內研討會收費標準，歐美研討會收費一向非常地高，但另一方面主辦單位所提供的軟硬體支援設備也相對上成熟及充分許多，讓研討會生色不少，也讓參加人員能夠在舒適的環境中，盡情地投入研討會的活動。

當然，雖然遠渡重洋地來到太平洋彼岸參加研討會，時差問題的確是很大困擾，但類似的研討會真的很值得國內學術研究者的參加，在多領域及多方面的不同主題論文的衝擊，對筆者與同儕的討論，或碩士班學生的指導，都有非常大的幫助。

另一方面，筆者也看到為數眾多的中國大陸、日本與韓國的學者參加此次研討會，尤其也有不少是年輕學生，相信大家都深深了解到多參加國際研討會的收穫。

最後，另一項額外的收穫，應該就是他山之石可以攻錯，對日後辦理各項研討會將更胸有成竹。

三、發表論文全文或摘要

Cyclic plasticity simulations with yield surface distortion by ABAQUS

†*S.Y. Leu¹, K.C. Liao², and C.W. Su¹

¹Department of Aviation Mechanical Engineering, China University of Science and Technology, Taiwan, R.O.C.

²Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Taiwan, R.O.C.

*Presenting author: syleu@cc.cust.edu.tw

†Corresponding author: syleu@cc.cust.edu.tw

Abstract

To improve the ratcheting predictions, the need to consider yield surface distortion has been recognized. Rokhgireh and Nayebi (2012) combined the nonlinear kinematic hardening model of Chaboche with the yield surface distortion model of Baltov and Sawczuk (1964) for the simulations of uniaxial and multi-axial ratcheting. The simulated results of uniaxial ratcheting of CS1026 and SS 304 were compared to the experimental results of Hassan and Kyriakides (1992), Kang and Kan (2007), respectively. On the other hand, the simulations of multi-axial ratcheting involving CS1026 and SS 304 were compared to the experimental results of Bari and Hassan (2002), Corona et al. (1996), Hassan et al. (2008), Kang et al. (2004). It was illustrated that the modified model (Rokhgireh and Nayebi, 2012) gives good predictions of the ratcheting strain increment in various uniaxial and multi-axial tests.

Since ratcheting predictions is of great importance to safety assessment and structural design, it is imperative to develop a robust numerical framework for ratcheting simulations. Due to the complex task of numerical implementation, the general-purpose finite-element commercial codes, e.g. ABAQUS and ANSYS, are comparable tools for accurate simulations of ratcheting responses. However, the existing plasticity models in ABAQUS or ANSYS cannot describe yield surface distortion.

The paper is to present simulations of cyclic plasticity phenomena by ABAQUS. The advanced constitutive model by Rokhgireh and Nayebi (2012) is to be formulated and implemented into ABAQUS via the user subroutine UMAT. Formulation and implementation are to be validated with comparisons between simulations and experiments of CS1026 and SS 304 (Hassan and Kyriakides, 1992; Kang and Kan, 2007), respectively. Finally, a numerical framework based on ABAQUS will be provided with advanced constitutive models general enough for simulations of cyclic plasticity phenomena to aid safety assessment and structural design.

Keywords: Cyclic plasticity, Distortional hardening, Elastic shakedown, Plastic shakedown, Ratcheting, ABAQUS.

References

- [1] Rokhgireh, H. and Nayebi, A. (2012) Cyclic uniaxial and multiaxial loading with yield surface distortion consideration on prediction of ratcheting, *Mechanics of Materials* **47**, 61-74.
- [2] Baltov, A. and Sawczuk, A. (1964) A rule of anisotropic hardening, *Acta Mechanica* **1**, 81-92.
- [3] Hassan, T. and Kyriakides, S. (1992) Ratcheting in cyclic plasticity, part I: uniaxial behavior. *International Journal of Plasticity* **8**, 91-116.
- [4] Kang, G. and Kan, Q. (2007) Constitutive modeling for uniaxial time-dependent ratcheting of SS304 stainless steel, *Mechanics of Materials* **39** 488-499.
- [5] Bari, S. and Hassan, T. (2002) An advancement in cyclic plasticity modeling for multiaxial ratcheting simulation, *International Journal of Plasticity* **18** 873-894.
- [6] Corona, E., Hassan, T. and Kyriakides, S. (1996) On the performance of kinematic hardening rules in predicting a class of biaxial ratcheting histories, *International Journal of Plasticity* **12** 117-145.
- [7] Hassan, T., Taleb, L. and Krishna, S. (2008) Influence of non-proportional loading on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models, *International Journal of Plasticity* **24**, 1863-1889.

四、建議

鼓勵踴躍參加國際研討會，尤其投入經費補助年輕學生，以增廣研究視野。

五、攜回資料名稱及內容

研討會議程手冊。

六、其他



照片一、研討會開幕式



照片二、大會專題演講(一)



照片三、大會專題演講(二)



照片四、大會專題演講會場

科技部補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2016/10/11

科技部補助計畫	計畫名稱: 考慮扭曲硬化之塑性異向性模式的評估與應用(3/3~3/3)
	計畫主持人: 呂學育
	計畫編號: 104-2221-E-157-005- 學門領域: 結構應力
無研發成果推廣資料	

104年度專題研究計畫成果彙整表

計畫主持人：呂學育			計畫編號：104-2221-E-157-005-			
計畫名稱：考慮扭曲硬化之塑性異向性模式的評估與應用(3/3~3/3)						
成果項目		量化	單位	質化 (說明：各成果項目請附佐證資料或細項說明，如期刊名稱、年份、卷期、起訖頁數、證號...等)		
國內	學術性論文	期刊論文	0	篇	1)考慮降伏面扭曲的循環彈塑性行為分析, 2016中華民國航太學會學術研討會, 高雄市岡山, 中華民國105年11月5日 .2)考慮 Chaboche 走動式硬化模式之桁架結構彈塑性分析, 中華民國力學學會第四十屆全國力學會議, 國立交通大學, 新竹市, 2016年11月25-26日.	
		研討會論文	2			
		專書	0	本		
		專書論文	0	章		
		技術報告	0	篇		
		其他	2	篇		碩士學位, 1)考慮降伏面扭曲之數值分析模式建立與驗證, 中華科技大學/飛機系統工程研究所/104/碩士研究生:蘇承維; 2)桁架結構之循環彈塑性行為分析, 中華科技大學/飛機系統工程研究所/104/碩士研究生:王穎諄
	智慧財產權及成果	專利權	發明專利	申請中	0	件
				已獲得	0	
				新型/設計專利	0	
		商標權	0			
		營業秘密	0			
		積體電路電路布局權	0			
		著作權	0			
		品種權	0			
		其他	0			
技術移轉	件數	0	件			
	收入	0	千元			
國外	學術性論文	期刊論文	2	篇	撰寫中	
		研討會論文	1		邀請論文, 第七屆計算方法國際研討會(The 7th International Conference on Computational Methods, ICCM), 2016/8/1~8/4, Paper ID 1968.	
		專書	0	本		
		專書論文	0	章		
		技術報告	0	篇		

		其他		0	篇	
智慧財產權 及成果	專利權	發明專利	申請中	0	件	
			已獲得	0		
		新型/設計專利	0			
	商標權		0			
	營業秘密		0			
	積體電路電路布局權		0			
	著作權		0			
	品種權		0			
	其他		0			
	技術移轉	件數		0		件
收入			0	千元		
參與計畫人力	本國籍	大專生		1	人次	
		碩士生		3		
		博士生		0		
		博士後研究員		0		
		專任助理		0		
	非本國籍	大專生		0		
		碩士生		0		
		博士生		0		
		博士後研究員		0		
		專任助理		0		
其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)			本計畫部分成果發表於第七屆計算方法國際研討會(The 7th International Conference on Computational Methods, ICCM)，該研討會2016/8/1~8/4 假美國加州柏克萊大學舉行，計畫主持人獲邀為論文發表分場主持人，口頭報告論文並榮獲該場次之邀請論文。			

科技部補助專題研究計畫成果自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現（簡要敘述成果是否具有政策應用參考價值及具影響公共利益之重大發現）或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以100字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形（請於其他欄註明專利及技轉之證號、合約、申請及洽談等詳細資訊）

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以200字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，以500字為限）

本年度計畫承續前期研究成果，考慮各類型材料及負荷型態的棘齒問題探討，建立循環塑性現象的準確及有效率的數值模式，並推廣應用於結構件的循環塑性現象的探討。有限元素商業化分析軟體具有泛用之彈塑性分析功能，惟均尚未能提供考慮降伏面扭曲的模擬功能。本年度計畫，基於ABAQUS所提供使用者材料副程式的功能，編寫模擬材料降伏面扭曲現象，並與ABAQUS主程式連接，以提升擴充ABAQUS的考慮循環負荷作用之彈塑性分析功能。分析案例採用SS 304與CS 1026材料，探討結構承受單軸與多軸循環負荷時之循環彈塑性行為，分析結果並與文獻上的實驗結果及數值分析結果比較。本計畫研究成果可進一步提供不同類型的負荷及結構的相關彈塑性行為分析，未來也可延伸考慮不同材料降伏面扭曲現象的模擬，提升在實際工程問題(如塑性加工製程模擬，結構最佳化)的應用性。

本計畫部分成果發表於第七屆計算方法國際研討會(ICCM)，該研討會2016/8/1~8/4 假美國加州柏克萊大學舉行，計畫主持人獲邀為論文發表分場主持人，口頭報告論文並榮獲該場次之邀請論文。

4. 主要發現

本研究具有政策應用參考價值： 否 是，建議提供機關經濟部工業局（勾選「是」者，請列舉建議可提供施政參考之業務主管機關）

本研究具影響公共利益之重大發現：否 是

說明：（以150字為限）

有限元素商業化分析軟體具有泛用之彈塑性分析功能，惟均尚未能提供考慮降伏面扭曲的模擬功能。本年度計畫已成功提升擴充ABAQUS的考慮循環負荷作用之彈塑性分析功能。