

循環彎曲負載下橢圓形凹槽圓管皺曲損壞之實驗分析

李國龍¹ 洪兆宇^{2*} 潘文峰³

¹私立遠東科技大學電腦應用工程系

²陸軍官校機械工程系

³國立成功大學工程科學系

摘 要

本文主要係實驗分析五種不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下的皺曲損壞行為。實驗結果顯示，不論任何凹槽深度，鋼管的彎矩-曲度關係皆呈現循環硬化的現象，且最後會形成一穩定的迴圈。而橢圓化-曲度關係則呈現不對稱、棘齒狀的變化，且凹槽深度越淺，不對稱現象會越明顯。由雙對數座標中控制曲度-循環至皺曲圈數的關係中發現，五種不同凹槽深度的試件可近似為五條幾乎平行的直線。最後，本文運用 1987 年 Kyriakides and Shaw 所提出的理論方程式，並提出一個與凹槽深度相關的材料參數方程式來描述上述的行為。在與實驗值做比較後發現，理論分析能合理的描述實驗結果。

關鍵詞：橢圓形凹槽 304 不銹鋼管，循環彎曲，橢圓化，循環彎曲至皺曲圈數

Experimental Analysis on the Buckling Failure of Elliptical-Notched Circular Tubes Subjected to Cyclic Bending

Kuo-Long Lee¹, Chao-Yu Hung^{2*}, and Wen-Fung Pan³

¹Department of Computer Application Engineering, Far East University

²Department of Mechanical Engineering, Chinese Military Academy

³Department of Engineering Science, National Cheng Kung University

ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation on the buckling failure of 304 stainless steel tubes with five different elliptical-notched depths subjected to cyclic bending. It can be observed from the experiment data that the steel tube with any notch depth exhibits a cyclic hardening phenomenon from the moment and curvature relationship, and a steady-state loop is found after a few loading cycles. From the relationship between the ovalization and curvature, an unsymmetric and ratcheting manner of the curve is found. Lower notch depth leads to further unsymmetry of the curve. It can also be observed from curvature-number of cycles to produce buckling curve that five almost parallel straight lines can be found for five different notch depths in a log-log scale. Finally, by using the theoretical equation introduced by Kyriakides and Shaw in 1987, a material parameter equation for the notch depth was proposed in this study to simulate the aforementioned relationship. By comparing the theoretical analysis with the experimental data, it is shown that the theoretical formulation can properly represent the experimental results.

Keywords: elliptical-notched 304 stainless steel tubes, cyclic bending, ovalization, number of cycles to produce buckling

文稿收件日期 100.4.21; 文稿修正後接受日期 100.10.19; *通訊作者

Manuscript received April 21, 2011; revised October 19, 2011; * Corresponding author

一、前言

圓管承受循環彎曲負載的載重型態常見於一般的結構物。例如：海中的輸油管線及海上鑽油平台的支柱必須承受海流及海浪循環的衝擊、地震頻繁的建築物必須承受地震時的循環搖晃、發電廠和核電廠熱交換器圓管必須承受熱交換時冷水對管壁的循環衝擊等。彎曲不論是單調或循環彎曲都會造成圓形管面呈現橢圓化(ovalization)的變化(橢圓化 = $\Delta D_o / D_o$ ，其中 D_o 為圓管的外直徑， ΔD_o 為圓管外直徑的變化量)，而隨著彎矩的增加或循環次數的增加，管面橢圓化的變化也跟著增加，最後，當到達某個臨界值時，該圓管會產生皺曲(buckling)的損壞現象。皺曲損壞將造成結構物或機械裝置的嚴重破壞，進而影響結構物或機械裝置的安全，因此，圓管承受循環彎曲負載的行為，對工業界是相當重要且迫切的課題。

早期，Kyriakides 教授和他的研究群便針對各種不同材料的圓管在無外壓或有外壓單調或循環彎曲負載下進行許多的實驗及理論研究。Kyriakides 和 Shaw [1] 針對 6061-T6 鋁管在有外壓單調彎曲負載下進行實驗及理論穩定性的研究；Shaw 和 Kyriakides [2] 對 6061-T6 鋁管及 1018 鋼管做循環彎曲負載力學行為的實驗及理論研究；Kyriakides 和 Shaw [3] 將其研究延伸至循環彎曲負載穩定性（皺曲損壞）的實驗及理論研究；Corona 和 Kyriakides [4] 對 304 不銹鋼管進行不同路徑單調彎曲及外壓負載下皺曲損壞的實驗及理論研究；Corona 和 Kyriakides [5] 對 6061-T6 鋁管及 1020 鋼管做對稱及不對稱循環彎曲負載至皺曲的實驗研究；Kyriakides 和 Ju [6] 設計一種能在管軸方向移動的量測器來量測圓管承受彎曲負載時管壁的變化。

而在國內自 1998 年起，潘教授(Prof. Pan)和他的同僚及學生也針對各種不同的圓管材料，進行循環彎曲負載的實驗及理論研究。他們研究的圓管材料有：304 不銹鋼管、316L 不銹鋼管及鈦合金管，而研究的圓管的相關行為有：對稱彈塑性循環彎曲負載至皺曲的研究、黏塑性循環彎曲負載至皺曲的研究、不同外徑/壁厚比圓管循環彎曲負載至皺曲的研究、不同的平均曲度循環彎曲負載至

皺曲的研究、純彎曲潛變負載至皺曲的研究及不同的平均彎矩循環彎曲負載至皺曲的研究[7-14]。

上述所有圓管的研究皆針對無凹槽且光滑表面的圓管材料，而若是圓管必須要有凹槽的設計或圓管產生凹槽裂紋時，相關實驗及理論分析循環彎曲負載的力學行為及皺曲損壞，勢必會相當的複雜。因此近年來，潘教授的團隊就針對凹槽圓管的行為，進行相關的實驗及理論分析，他們對於尖銳凹槽圓管分析方面有：尖銳凹槽圓管在循環彎曲負載下力學行為及皺曲損壞的研究[15]及尖銳凹槽圓管在循環彎曲負載的橢圓化變化分布的研究[16]。對於橢圓形凹槽圓管分析方面有：有限元素 ANSYS 分析橢圓形凹槽薄壁管在循環彎曲負載下的力學行為[17]及循環彎曲負載下橢圓形凹槽圓管橢圓化分布至皺曲的實驗分析[18]。而[17]的研究為純理論分析相關的力學行為，至於[18]的研究則為實驗分析橢圓化分布的狀況。但對於不同橢圓形凹槽深度圓管的相關力學行為及皺曲損壞循環圈數的研究，至今皆無相關的實驗及理論發表。

本研究係利用成功大學工程科學系工程材料力學分析實驗室的"彎管試驗機"及"曲度-橢圓化量測器"[7]來進行測試不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼管承受循環彎曲負載下的力學行為及皺曲損壞。其中不同的橢圓形凹槽深度有：0.2、0.4、0.6、0.8 及 1.0 mm。量測的結果包含有：彎矩（由彎管試驗機上的力檢出器來量測）、曲度（由曲度-橢圓化量測器上的傾角器來量測）、橢圓化（由曲度-橢圓化量測器上的磁力檢出器來量測）及到達皺曲時的循環圈數（由電腦記錄）。實驗結果可求得的力學行為有：彎矩和曲度的關係及橢圓化和曲度的關係；而皺曲損壞有：控制曲度和循環至皺曲圈數的關係。最後，本文運用 Kyriakides and Shaw [3] 論文中所提出的理論方程式，並同時提出一個相關凹槽深度的材料方程式，使得該理論可以來描述不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載時，控制曲度與循環彎曲至皺曲圈數的關係。理論分析將和本實驗結果進行比較，以驗證理論估算的成效。

二、實驗設備、試件及步驟

2.1 彎管實驗機

本實驗設備(圖 1(a)及(b))係利用兩個鏈輪對稱性地置設於一支撐座上,在兩鏈輪上則掛設有鏈條,油壓缸及力檢出器串連形成的恆等長封閉迴路,且兩個鏈輪盤面上各設有四個對稱的滾輪,而滾子必須經過精密加工,使得上下滾子所形成的空間可供實心桿平順的滑動於其中,且達到最小的空隙。當油壓缸循環往復運動時,實心桿跟著旋轉而帶著中央部分的圓管進行彎曲負載。扣鏈齒輪上的對稱滾子對圓管的施力,形成四點純彎曲負載的狀態。為達成正反彎曲的循環動作,當圓管在架設於實驗機上時,上下油壓缸活塞的初始位置均必須各設定為伸出一半的長度,以便架設圓管。而當施予正向彎曲時,下油壓缸活塞回縮上油壓缸活塞伸長,施予反向彎曲時,則上油壓缸活塞回縮下油壓缸活塞伸長。為確保實驗為純彎曲負載,實心桿在滾輪中必須要很平滑的移動,以確定圓管在軸向方向可任意移動,也就是圓管軸向方向施力為零。詳細彎管實驗機的介紹可參閱參考文獻[1、7]。

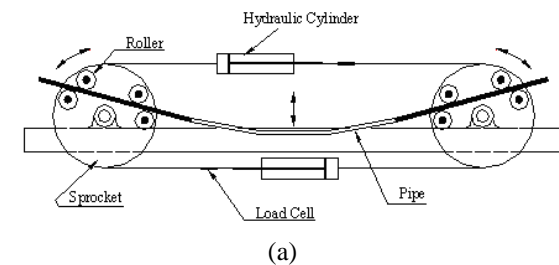


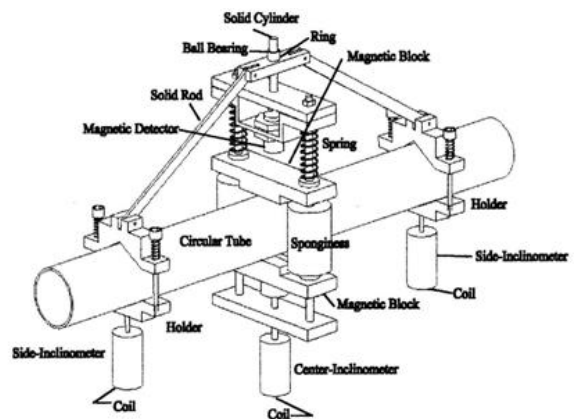
圖 1. 彎管實驗機之(a)示意圖及(b)照片

2.2 曲度-橢圓化量測器

Pan et al. [7]設計一種圓管”曲度-橢圓化量測器”(如圖 2(a)及(b)所示),該裝置可緊密夾合的安裝於測試圓管的長距的中間,該量

測器能同時及準確的量測圓管在彎曲負載時,圓管所產生的曲度及橢圓化的變化。當量測器安置於測試圓管的中央,該檢測器的彈簧便壓迫使上下磁性塊夾緊管徑的上下兩端。當圓管承受彎曲負載管徑發生變化時,上磁性塊與磁性檢測器的距離發生變動,由磁場所產生的變化,磁性檢測器即可檢測出管徑橢圓化的變化量。同時,安裝於管徑檢測器正下方的中央傾角器可檢測出檢測器是否有傾斜。該裝置的兩側傾角器分別以夾具固定於圓管上,每個側傾角器分別以桿件與中央部分的管徑橢圓化檢測器相連接。為避免桿件因彎曲而變形,桿件與管徑橢圓化檢測器相連接處以可上下移動的環管為接頭。位於正上方的實心桿面上有導引移動的軌道,以避免彎曲的方向改變。圓管未彎曲變形前傾角器是以垂直方向固定,當圓管彎曲變形時,兩傾角器便測得兩傾斜角度分別為 θ_1 和 θ_2 (如圖 3 所示)。假設兩夾具固定時的距離為 L_0 (中立面在長軸方向兩夾具間的距離), ρ 為圓心至中立面的距離,則圓管的曲度 κ 為(如圖 3 所示):

$$\kappa = 1/\rho = (\theta_1 + \theta_2) / L_0 \quad (1)$$





(b)

圖 2. 曲度-橢圓化量測器之(a)示意圖及(b)照片

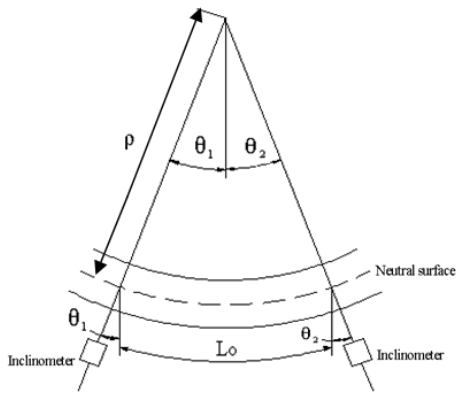
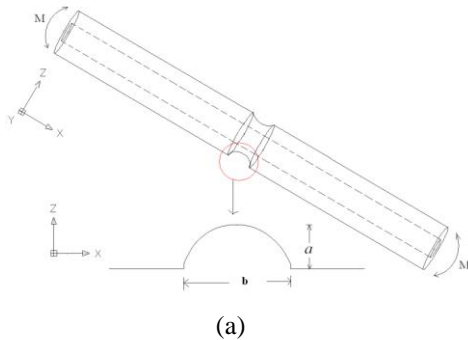


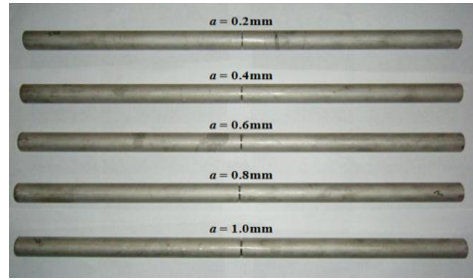
圖 3. 圓管彎曲負載時傾角器之角度變化圖

2.3 實驗試件與實驗步驟

本研究的實驗試件為外直徑(D_o) = 31.8 mm、壁厚(t) = 1.5 mm 的 304 不銹鋼圓管，具有五種不同深度 a 的橢圓形凹槽分別為：0.2、0.4、0.6、0.8 及 1.0 mm，而凹槽的寬度 b 皆為 0.4 mm。圖 4(a) 為橢圓形凹槽圓管的幾何形狀示意圖，而圖 4(b) 為五種橢圓形凹槽深度 304 不銹鋼圓管的照片。



(a)



(b)

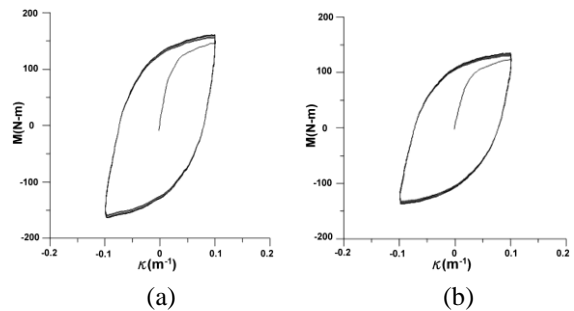
圖 4. 橢圓形凹槽 304 不銹鋼管之外形尺寸
 (a)示意圖及(b)照片

實驗係採取對稱曲度控制循環彎曲負載模式進行，控制曲度值為 $\pm 0.025 \text{ m}^{-1} \sim \pm 0.5 \text{ m}^{-1}$ 之間。並以曲度-橢圓化量測器來量測圓管的曲度及橢圓化量；以力檢出器來量測彎矩；並由電腦記錄到達皺曲時的循環圈數。

三、實驗結果與討論

3.1 橢圓形凹槽 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下之力學行為

圖 5(a)~(e)分別顯示橢圓形凹槽深度為 0.2、0.4、0.6、0.8 及 1.0 mm 的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下的彎矩(M)-曲度(κ)關係，其中的控制曲度範圍為 $\pm 0.1 \text{ m}^{-1}$ 。從圖形中可觀察出，在相同曲度控制下，不同凹槽深度所得到的曲線十分類似，彎矩與曲度的關係皆呈現一個很相似的迴圈，且彎矩-曲度曲線迴圈在經過幾個循環圈數後，硬化現象漸趨於穩定的狀態。



(a)

(b)

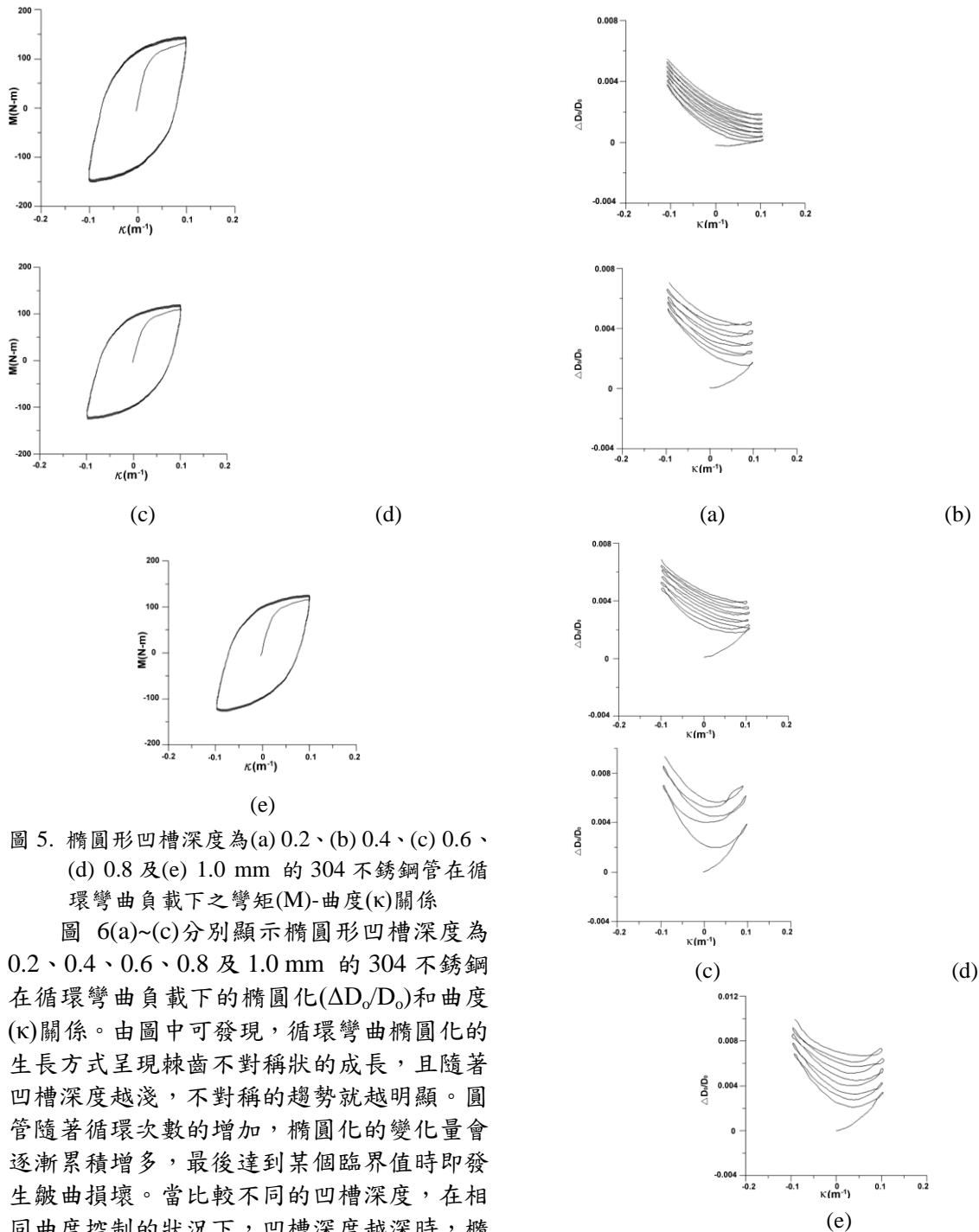


圖 5. 橢圓形凹槽深度為(a) 0.2、(b) 0.4、(c) 0.6、(d) 0.8 及(e) 1.0 mm 的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下之彎矩(M)-曲度(κ)關係

圖 6(a)~(e)分別顯示橢圓形凹槽深度為 0.2、0.4、0.6、0.8 及 1.0 mm 的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下的橢圓化($\Delta D_o/D_o$)和曲度(κ)關係。由圖中可發現，循環彎曲橢圓化的生長方式呈現棘齒不對稱狀的成長，且隨著凹槽深度越淺，不對稱的趨勢就越明顯。圓管隨著循環次數的增加，橢圓化的變化量會逐漸累積增多，最後達到某個臨界值時即發生皺曲損壞。當比較不同的凹槽深度，在相同曲度控制的狀況下，凹槽深度越深時，橢圓化成長速度就越快，也就是累積的橢圓化量速度就越快，所以到達皺曲損壞所需的循環圈數就越少。

圖 6. 橢圓形凹槽深度為(a) 0.2、(b) 0.4、(c) 0.6、(d) 0.8 及(e) 1.0 mm 的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下之橢圓化($\Delta D_o/D_o$)和曲度(κ)關係

3.2 橢圓形凹槽 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下之皺曲損壞

圖 7 為實驗不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼在循環彎曲負載下的控制曲度(κ_c)與循環至皺曲圈數(N_b)關係。圖中顯示，在相同的凹槽深度下，控制曲度越大者，循環至皺曲圈數就越少。而在相同的控制曲度下，凹槽深度越深者，循環至皺曲圈數也就越少。若將圖 7 中的實驗數據以雙對數座標表示可得圖 8，其中所有直線係以最小平方方法近似而得。圖中顯示，五種不同凹槽深度對應五條幾乎平行的直線，但直線彼此的間距並不相等。

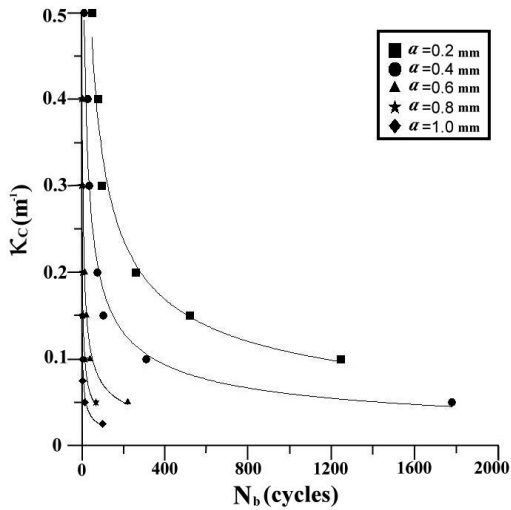


圖 7. 實驗不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下之控制曲度(κ_c)與循環至皺曲圈數(N_b)關係

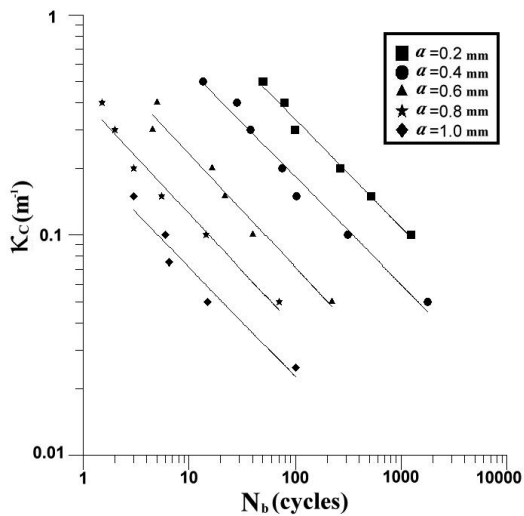


圖 8. 實驗不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下之控制曲度(κ_c)與循環至皺曲圈數(N_b)雙對數座標關係

Kyriakides and Shaw [3]曾針對光滑表面的 Al-6061-T6 鋁合金管與 AISI-1018 鋼管，進行不同曲度控制循環彎曲的實驗。根據實驗結果，他們提出對於 κ_c 及 N_b 的關係方程式為：

$$\kappa_c = C(N_b)^{-\alpha} \quad (2)$$

其中 C 為 $N_b = 1$ 時所對應的控制曲度，而 α 為 κ_c 與 N_b 對數關係中的直線斜率。本研究根據五種不同橢圓形凹槽深度，0.2、0.4、0.6、0.8 及 1.0 mm，由方程式(2)中找到五個不同 C 值分別為 3.242、1.758、0.764、0.411 及 0.224。圖 9 為雙對數座標 C 對 a/t 的實驗關係圖，圖中顯示兩者呈現線性的關係，本文即提出 C 的方程式為：

$$C = C_1 \left(\frac{a}{t} \right)^{-\gamma} \quad (3)$$

a)
 或

$$\log C = \log C_1 - \gamma \log \left(\frac{a}{t} \right) \quad (3)$$

b)

其中 $0 < a < t$ ，而 C_1 及 γ 為材料參數。由圖九中顯示， γ 為直線的斜率(= 5.89)，而 C_1 可求得為 7.11。將方程式(2)與方程式(3a)合併，可得 κ_c 及 N_b 的修正型方程式為：

$$\kappa_c = C_1 \left(\frac{a}{t} \right)^{-\gamma} (N_b)^{-\alpha} \quad (4)$$

)

圖 10 的虛線係利用方程式(4)所描述的理论結果。由圖中可以觀察出，模擬結果(虛線)十分接近於實驗結果(實線)。

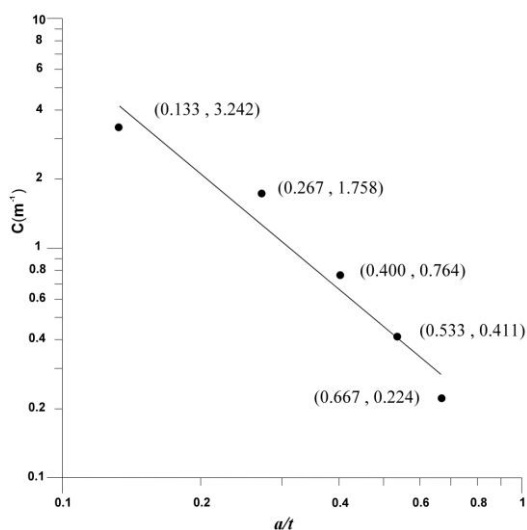


圖 9. 實驗與理論循環彎曲負載下 C 對 a/t 之雙對數座標關係圖

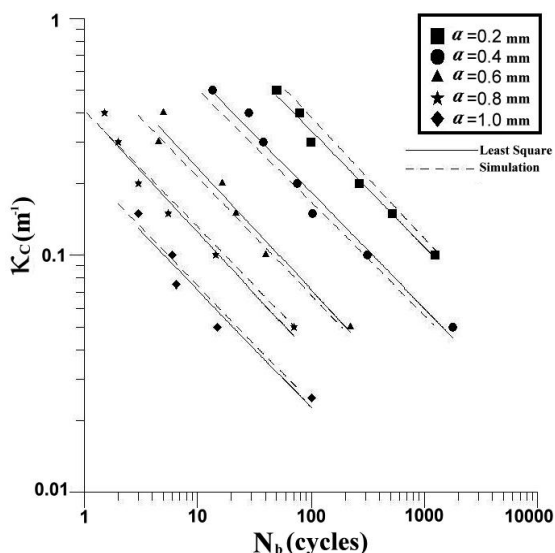


圖 10. 實驗與理論不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載下之控制曲度 (κ_c) 與循環至 皺曲圈數 (N_b) 雙對數座標關係

四、結 論

本研究係探討不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼管，在循環彎曲負載的力學行為和皺曲損壞。經由實驗及理論分析結果，可歸納出下列幾項結論：

(1) 不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼管在循環彎曲負載作用時， M - κ 迴圈關係皆呈現出循環硬化的現象，且於經過一些循環圈數後， M - κ 的關係皆呈現穩定的迴圈。

- (2) 由 $\Delta D_o/D_o$ - κ 的曲線關係顯示，循環彎曲橢圓化的生長方式呈現棘齒且不對稱狀的成長，且隨著凹槽深度越淺，不對稱的趨勢就越明顯。而凹槽深度越深，橢圓化生長的就越快。
- (3) 在循環彎曲負載作用下，五種不同凹槽深度雙對數座標的 κ_c - N_b 關係，呈現五條幾乎平行的直線，但彼此的間距並不相等。而控制 κ_c 越大或 a 越大， N_b 的值就越小。
- (4) 本研究提出一個修正型方程式(4)，該方程式可用來描述不同橢圓形凹槽深度的 304 不銹鋼管承受循環彎曲時 κ_c 與 N_b 之間的關係。經與實驗數據比較後發現，理論模式可合理的估算實驗結果。

符號說明

a	橢圓形凹槽深度
b	橢圓形凹槽寬度
C	材料參數
C_1	材料參數
D_o	圓管外直徑
L_0	兩夾具固定時的距離
M	彎矩
N_b	循環至皺曲圈數
t	圓管壁厚
α	材料參數
ΔD_o	圓管外直徑變化量
γ	材料參數
κ	曲度
κ_c	控制曲度
θ_1	傾角器測得的傾斜角度
θ_2	傾角器測得的傾斜角度
ρ	圓心至中立面的距離

參考文獻

- [1] Kyriakides, S. and Shaw, P.K., "Response and Stability of Elastoplastic Circular Pipes under Combined Bending and External Pressure," *Int J. Solids Struct.*, Vol. 18, No. 11, pp. 957-973,

- 1982.
- [2] Shaw, P. K. and Kyriakides, S., "Inelastic Analysis of Thin-Walled Tubes under Cyclic Bending," *Int J. Solids Struct.*, Vol. 21, No. 11, pp.1073-1110, 1985.
- [3] Kyriakides, S. and Shaw, P. K., "Inelastic Buckling of Tubes under Cyclic Loads," *ASME J. Pres. Ves. Tech.*, Vol. 109, pp. 169-178, 1987.
- [4] Corona, E. and Kyriakides, S., "On the Collapse of Inelastic Tubes under Combined Bending and Pressure," *Int J. Solids Struct.*, Vol. 24, pp. 505-535, 1988.
- [5] Corona, E. and Kyriakides, S., "An Experimental Investigation Degradation and Buckling of Circular Tubes under Cyclic Bending and External Pressure," *Thin-Walled Struct.*, Vol. 12, pp. 229-263, 1991.
- [6] Kyriakides, S. and Ju, G.T., "Bifurcation and Localization Instabilities in Cylindrical Shells under Bending," - I. Experiments. *Int. J. Solids and Struct.*, Vol. 29, No. 9, pp. 1117-1142, 1992.
- [7] Pan, W. F., Wang, T. R. and Hsu, C. M., "A Curvature-Ovalization Measurement Apparatus for Circular Tubes under Cyclic Bending," *Exp. Mech.*, Vol. 38, No. 2, pp. 99-102, 1998.
- [8] Pan, W. F. and Her, Y. S., "Viscoplastic Collapse of Thin-Walled Tubes under Cyclic Bending," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 120, pp. 287-290, 1998.
- [9] Pan, W. F. and Lee, K. L., "The Effect of Mean Curvature on the Response and Collapse of Thin-Walled Tubes under Cyclic Bending," *JSME Int. J. (Japan Society of Mechanical Engineers), Series A*, Vol. 45, No. 2, pp. 309-318, 2002.
- [10] 徐建民、李國龍、潘文峰，"圓管在對稱及不對稱循環彎曲負載下力學行為之實驗研究"，*技術學刊*，第 18 卷，第 2 期，257-262 頁，2003。
- [11] Lee, K. L. and Chang, K. H., "Endochronic Simulation for Viscoplastic Collapse of Long, Thick-walled Tubes Subjected to External Pressure and Axial Tension," *Struct. Eng. Mech. – an Int. J.*, Vol. 18, No. 5, pp. 627-644, 2004.
- [12] Chang, K. H., Pan, W. F. and Lee, K. L., "Mean Moment Effect of Thin-walled Tubes under Cyclic Bending," *Struct. Eng. Mech. – an Int. J.*, Vol. 28, No. 5, pp. 495-514, 2008.
- [13] 張高華、李國龍、潘文峰，"圓管承受循環彎曲負載截面變形量測器之設計"，*技術學刊*，第 23 卷，第 1 期，21-28 頁，2008。
- [14] Chang, K. H. and Pan, W. F., "Buckling Life Estimation of Circular Tubes under Cyclic Bending," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 46, pp. 254-270, 2009.
- [15] Lee, K. L., "Mechanical Behavior and Buckling Failure of Sharp-Notched Circular Tubes under Cyclic Bending," *Struct. Eng. Mech. – an Int. J.*, Vol. 34, No. 3, pp. 367-376, 2010.
- [16] Lee, K. L., Hung, C. Y. and Pan, W. F., "Variation of Ovalization for Sharp-Notched Circular Tubes under Cyclic Bending," *J. Mech.*, Vol. 26, No. 3, pp. 403-411, 2010.
- [17] 林煒凱，有限元素 ANSYS 分析橢圓形凹槽薄壁管在循環彎曲負載下之力學行為，國立成功大學工程科學系碩士論文，2007。
- [18] 黃鈺茜，循環彎曲負載下橢圓形凹槽圓管皺曲損壞之實驗分析，國立成功大學工程科學系碩士論文，2009。