Journal of Science and Engineering Technology, Vol. 11, No. 1, pp. 9-19 (2015)

# 局部尖銳凹槽SUS304不鏽鋼管在循環彎曲負載下之

# 力學行為與皺曲損壞

李國龍<sup>1\*</sup>林倩如<sup>2</sup>潘文峰<sup>3</sup> <sup>1</sup>遠東科技大學創新設計與創業管理系 74448台南市新市區中華路49號 <sup>23</sup>國立成功大學工程科學系 70101臺南市東區大學路1號

# 摘要

本文係針對局部尖銳凹槽深度為 0.2、0.4、0.6、0.8、1 mm 的 SUS304 不鏽鋼管,進行曲 度控制循環彎曲負載的實驗,以探討其相關的力學行為與皺曲損壞。由實驗彎矩-曲度的關係中 發現,隨著循環圈數的增加彎矩值也漸漸的增加,並在經過一些循環曲圈數後該關係會呈現一 穩定的迴圈,且凹槽的深度對彎矩-曲度關係幾乎沒有影響。至於橢圓化-曲度關係則隨著循環 圈數的增加而呈現棘齒狀的成長,且凹槽的深度越深橢圓化-曲度關係就越不對稱,橢圓化增加 也就越大。此外,雖然有五種局部尖銳凹槽的深度,但在雙對數座標的控制曲度-循環至皺曲圈 數關係卻呈現五條幾乎平行的直線。最後,本文以有限元素 ANSYS 來模擬彎矩-曲度及橢圓化 -曲度的關係,此外,本文也提出理論模式來描述控制曲度-循環至皺曲圈數的關係。在與實驗 結果比較後發現,理論能夠合理描述實驗結果。

**關鍵詞:**局部尖銳凹槽 SUS304 不鏽鋼管、凹槽深度、循環彎曲、彎矩、曲度、橢圓化、循環 至皺曲圈數、有限元素 ANSYS 分析。

# Mechanical Behavior and Buckling Failure of Local Sharp-notched SUS304 Stainless Steel Tubes Subjected to Cyclic Bending

Kuo-Long Lee<sup>1\*</sup>, Chien-Ju Lin<sup>2</sup> and Wen-Fung Pan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Innovative Design and Entrepreneurship Management, Far East University No. 49, Chung Hua Rd., Hsin-Shih. Tainan County 74448, Taiwan <sup>2,3</sup>Department of Engineering Science, National Cheng Kung University No. 1, University Rd., Tainan City 70101, Taiwan, R.O.C.



#### ABSTRACT

In this study, SUS304 stainless steel tubes with local sharp-notched depths of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1 mm were subjected to cyclic bending for investigating relative mechanical behavior and buckling failure. From observing the experimental moment-curvature relationship, when the number of cycles increased, the bending moment also increased. The relationship became a steady loop after several bending cycles. In addition, the notch depth had no influence on the moment-curvature relationship. Regarding the ovalization-curvature relationship, when the number of cycles increased, it exhibited an increased and ratcheted manner. The greater the depth of the notch, the more unsymmetrical the ovalization-curvature relationship became, and the greater the increase of the ovalization. Furthermore, although five local sharp-notched depths were tested, only five nearly parallel lines were observed for the controlled curvature-number of cycles that produced a buckling relationship in the log-log scale. The finite element ANSYS software package was used to simulate the moment-curvature and ovalization-curvature relationships. In addition, this study proposes a theoretical model for simulating the controlled curvature-number of cycles to produce the buckling relationship. Through comparison of the experimental data, the theoretical model could appropriately simulate the experimental findings.

*Key Words*: local sharp-notched SUS304 stainless steel tubes, notch depths, cyclic bending, moment, curvature, ovalization, number of cycles to produce buckling, finite element ANSYS analysis.

### - 、 前言

圓管在實際結構物應用中,常承受循環彎曲的載重型 態,例如:海底放流管或輸送管路遭受洋流衝擊,海上平台 構架必須抵抗巨大風浪的衝擊,位於地震頻繁地區的建築物 必須承受地震時的強烈搖晃,...。當圓管承受彎曲負載時, 圓形管面會隨著彎曲程度的增加漸呈橢圓化(ovalization) 的變化,而橢圓化的定義為外直徑的縮減量(ΔD<sub>o</sub> = D<sub>o</sub> - D) 除以原始的外直徑(D<sub>o</sub>)(如圖1所示)。在循環彎曲負載時, 管面橢圓化的變化會隨著循環彎矩或曲度呈棘齒 (ratcheting)的變化,而且隨著循環次數的增加,管面橢圓 化的量也跟著增加。最後,當到達某個循環次數及橢圓化達 到某個臨界值時,圓管會發生皺曲(buckling)的損壞現象。 所以,研究圓管承受循環彎曲負載的力學行為乃至於皺曲損 壞對工業界是相當重要的課題。

有關圓管循環彎曲負載的研究至今已有相當的成果。自 1980年起,Kyriakides 教授和他的研究群便設計出循環彎曲 負載的機械裝置,並針對各種不同材料的圓管(6061-T6 鋁 管、1018 鋼管、304 不鏽鋼管、1020 鋼管)在無外壓、有 外壓或有內壓、單調或循環彎曲負載下進行許多的實驗及理 論研究[3-8, 10-11, 17-18, 23-24]。在國內自 1998年起,潘文 峰教授(Prof. W. F. Pan)、同僚及學生也針對各種不同的圓 管材料,進行單調或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 不鏽鋼管、316 不鏽鋼管及鈦合金 管,而研究的圓管的相關行為有:對稱彈塑性(elastoplastic) 循環彎曲負載至皺曲的研究、黏塑性(viscoplastic)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(mean curvature)循環彎曲 負載至皺曲的研究、不同的平均彎矩(mean moment)循環 彎曲負載至皺曲的研究及純彎曲潛變(pure bending creep) 負載至皺曲的研究[1-2, 13, 16, 19-22]。



圖 1. 圓管橢圓化定義示意圖



上述所有圓管的研究皆針對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,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, 自 2010 年起潘教授、同僚及學生就針對凹槽圓管的行為, 進行相關的實驗及理論分析,而所研究凹槽圓管的相關行為 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[12],尖銳凹槽圓管在循環彎曲負載下橢圓化變化分布 的研究[9]及不同外徑/壁厚比尖銳凹槽圓管在循環彎曲負載 下行為的研究[14]。然而上述的研究的尖銳凹槽皆為環圓周 凹槽(circumferential notch),也就是環繞圓管圓周一圈的凹 槽(如圖 2 所示)。但若凹槽的型態是局部凹槽時,則該凹 槽圓管承受循環彎曲負載時的行為必定和環圓周凹槽圓管 的行為有很大的差異。因此,本文提出研究不同深度局部尖 銳凹槽圓管在循環彎曲負載時的力學行為及皺曲損壞。

# 二、實驗設備、試件及步驟

#### (一) 彎管實驗機

本研究的實驗設備(圖3)係利用兩個鏈輪對稱性地置 設於支承座上,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。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[22]。

#### (二)曲度-橢圓化量測器

Pan 等人[22]設計一種圓管"曲度-橢圓化量測器"(如圖 4 所示),該裝置可緊密夾合的安裝於測試圓管的長距的中 間,並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,



圖 2. 環圓周尖銳凹槽圓管示意圖



圖 3. 彎管實驗機示意圖



圖4. 曲度-橢圓化量測器示意圖

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



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。當圓管承受彎曲負載時,兩傾角器會量測到角度的變化,經由簡單的數學運算便可求得圓管的曲度量。

#### (三) 實驗試件與步驟

本研究的實驗試件為外徑=33.8 mm、壁厚=2.5 mm 的 SUS304 不鏽鋼圓管。圖 5 為局部尖銳凹槽 SUS304 不鏽鋼 管的幾何形狀示意圖,其中所考慮的不同局部尖銳凹槽深度 a 為 0.2、0.4、0.6、0.8 及 1 mm,而根據鑽頭的尺寸,凹槽 表面圓形直徑 b 分別為 0.6、1.2、1.8、2.4 及 3 mm,而圖 6 為深度 1 mm 局部尖銳凹槽 SUS304 不鏽鋼管的照片。至於 所有深度的局部尖銳凹槽方向皆考慮為 y 軸的方向,如圖 7 所示。選擇該方向的原因是因為循環彎矩的方向為 z 軸方 向,而該方向的局部尖銳凹槽是彎矩所造成最大傷害的方 向,也就是橢圓化成長的速度最快且循環彎曲至皺曲圈數最 少的方向。實驗為對稱曲度控制的循環彎曲負載,其中循環 彎曲的控制曲度範圍為± 0.2~±0.5 m<sup>-1</sup>。實驗是以曲度-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,同時也將記錄到達皺曲的循環圈數。



圖 5. 局部尖銳凹槽圓管示意圖



圖 6. 深度 1 mm 局部尖銳凹槽 SUS304 不鏽鋼管



圖 7. 圓管截面的局部尖銳凹槽方向示意圖



圖 8. 實驗與 ANSYS 建立之 SUS304 不鏽鋼單軸應力-應變 關係圖

#### 三、有限元素 ANSYS 分析局部尖銳凹槽 SUS

304 不鏽鋼管在循環彎曲負載之力學行為

#### (一)材料參數設定

在 ANSYS 材料設定介面中,要先將楊氏係數與蒲松比 數值輸入,而本研究圓管的變形有塑性變形,所以還要設定 塑性的參數。本研究選用了多線性運動硬化(multilinear kinematic hardening)理論來描述單軸應力-應變的關係,而 根據實驗 SUS304 不鏽鋼的單軸應力和應變關係,ANSYS 所建立的單軸應力和應變關係,如圖 8 所示。

#### (二)幾何模型

本研究的模型為中央有局部尖銳凹槽的圓管,為了使網 格切割的品質提高,要將局部尖銳凹槽的部分獨立出來,所 以選用SolidWorks建立模型,因為SolidWorks可以輕易的將



模型分割成所需的形式。圖9為深度1 mm局部尖銳凹槽1/2 圓管的模型圖。由於分析的結構為左右對稱,為了減少節點 及元素的數量,使分析速度加快,因此只建立二分之一的圓 管模型。



圖 9. 深度為 1 mm 局部尖銳凹槽 1/2 圓管模型圖



圖 10. 局部尖銳凹槽 1/2 圓管網格化模型圖



圖 11. 圓管純彎曲負載時對稱面 (x-y 面) 示意圖



圖 12. 圓管對稱面限制條件圖

#### (三)網格分割

本研究分析的圓管是屬於3D結構且為彈塑性變形行為 的非線性分析,所以選擇的元素為SOLID 185。因為SOLID 185適用於3D結構,除了基本的六面體,也允許變形成棱 柱、四面體和金字塔型。其形狀為六面體時,擁有8個節點, 每個節點有3個自由度。若有結點重疊的情況,則其形狀可 退化成棱柱、四面體或金字塔型。SOLID 185可處理塑性 (plasticity)、超彈性(hyperelasticity)、應力硬化(stress stiffening)、潛變(creep)、大變形(large deflection)和大 應變(large strain)等情況。圖10為局部尖銳凹槽1/2圓管之 網格化模型圖。

#### (四)邊界條件設定

完成有限元素模型後,就可以設定負載與邊界條件,這 個步驟相當重要,必須要盡可能符合真實情況,分析出來的 結果才會準確。因模型有做對稱性的簡化,所以要在對稱面 設定 Frictionless Support, ANSYS Workbench 會自動設定成 對稱面應有的限制條件。在純彎曲負載時,圓管截面變化如 圖 11 所示,其中對稱面(x-y 面)的各點只有 x 或 y 方向的 位移,並沒有 z 方向的位移,所以在 ANSYS 分析上將該對 稱面的 z 方向位移設定為 0,如圖 12 所示。

#### (五) 負載條件設定

本研究以圓管兩端施與z方向旋轉的角度0,來模擬實際 圓管純彎曲負載的變形的情形。而根據圖13,0角度為:

$$\theta = L / \rho$$

(1)

其中L為圓管原始長度的一半長度,而ρ為曲度半徑。至於 曲度κ為:



$$\kappa = 1 / \rho$$
 (2)

根據第二節中彎管實驗機的實驗操作,圖14顯示ANSYS Workbench所建立的負載條件,其中彎矩是在z方向,所以z 方向設定可以旋轉(負載條件A)。此外,x及y方向都沒有 旋轉,所以x及y方向的旋轉設定為0(負載條件B和C)。至 於z方向的控制曲度則根據方程式(1)及(2)算出的旋轉 角度去做設定。



圖13. 圓管純彎曲負載角度θ之計算圖



圖 14. 圓管之負載條件圖



 圖 15. (a) 實驗局部尖銳凹槽深度為 0.2mm 的 SUS304 不 鏽鋼管在循環彎曲負載下之彎矩(M)與曲度(κ)





圖 15.(b) ANSYS 模擬局部尖銳凹槽深度為 0.2 mm 的
 SUS304 不鏽鋼管在循環彎曲負載下之彎矩(M)
 與曲度(κ) 關係圖

# 四、實驗結果、分析結果與討論

(一)不同深度局部尖銳凹槽 SUS304 不鏽鋼管在循環彎曲 負載下之力學行為

圖 15(a)為實驗局部尖銳凹槽深度為 0.2mm 的 SUS304 不鏽鋼管在循環彎曲負載下的彎矩(M)與曲度(κ)關係 圖,其中而控制曲度為±0.3m<sup>-1</sup>。實驗結果顯示,經過幾次 循環後 M-κ的關係會呈現穩定的迴圈。然而從迴圈中發現, 初始幾圈迴圈的彎矩值較小,隨著循環圈數增加,彎矩值也 跟著增加,而增加量會越來越小,最後呈現穩定的迴圈(循



環硬化)。這個現象與文獻 Lee 等人[16]所測試無凹槽 SUS304 不鏽鋼圓管 M-κ關係的趨勢非常相似。此外,實驗 結果也顯示,局部尖銳凹槽的深度對 M-κ的關係曲線影響不 大,而且曲線圖形的形狀大小與趨勢幾乎相同,因此,本研 究僅顯示凹槽深度 0.2mm 的 M-κ曲線。圖 15(b)為 ANSYS 模擬局部尖銳凹槽深度為 0.2mm 的 SUS304 不鏽鋼管在循 環彎曲負載下的彎矩(M)與曲度(κ)關係圖。由於 ANSYS 無法模擬循環硬化的現象,所以 M-κ曲線僅只有一個迴圈。

圖 16(a) 至圖 16(e) 分別顯示實驗局部尖銳凹槽深 度為 0.2、0.4、0.6、0.8 及 1 mm 的 SUS304 不鏽鋼管在循 環彎曲負載下的橢圓化  $(\triangle D_0/D_0)$  與曲度  $(\kappa)$  關係圖,其 中控制曲度仍為±0.3 m<sup>-1</sup>。由圖中顯示,橢圓化呈現棘齒狀 增加,而第一圈增加的橢圓化量較多,至第三圈時橢圓化的 增加量開始趨於穩定。由不同局部尖銳凹槽深度的  $\triangle D_0/D_0-\kappa$ 曲線發現,當凹槽深度較淺時, $\triangle D_0/D_0-\kappa$ 曲線呈 現較對稱的趨勢,而當凹槽深度較深時,△D<sub>0</sub>/D<sub>0</sub>-κ曲線呈 現較不對稱的趨勢。至於曲線呈現左高右低的現象係負載開 始的方向所造成(向上彎曲),若是開始的負載方向為向下 彎曲,則曲線呈現右高左低的現象。此外,比較圖 16 (a) 至圖 16(e) 可以發現,隨著凹槽深度越深,橢圓化的值會 越大。圖 17(a) 至圖 17(e) 分別顯示 ANSYS 模擬局部 尖銳凹槽深度為 0.2、0.4、0.6、0.8 及 1 mm 的 SUS304 不 鏽鋼管在循環彎曲負載下的橢圓化( $△D_0/D_0$ )與曲度(κ) 關係圖。







圖 16.(b) 實驗局部尖銳凹槽深度為 0.4mm SUS304 不鏽鋼

管在循環彎曲負載下之橢圓化  $(\Delta D_0/D_0)$  與曲度





圖 16.(c)實驗局部尖銳凹槽深度為 0.6mm SUS304 不鏽鋼
 管在循環彎曲負載下之橢圓化(△D<sub>0</sub>/D<sub>0</sub>)與曲度
 (κ)關係圖



圖16.(d) 實驗局部尖銳凹槽深度為0.8 mm SUS304不鏽鋼
 管在循環彎曲負載下之橢圓化(△D<sub>0</sub>/D<sub>0</sub>)與曲度
 (κ) 關係圖





圖16.(e)實驗局部尖銳凹槽深度為1 mm SUS304不鏽鋼管
 在循環彎曲負載下之橢圓化(△D<sub>0</sub>/D<sub>0</sub>)與曲度(κ)
 關係圖



圖 17.(a)ANSYS 模擬局部尖銳凹槽深度為 0.2mm SUS304 不鏽鋼管在循環彎曲負載下之橢圓化(△D<sub>0</sub>/D<sub>0</sub>) 與曲度(κ)關係圖







圖 17.(c)ANSYS 模擬局部尖銳凹槽深度為 0.6mm SUS304 不鏽鋼管在循環彎曲負載下之橢圓化(△D₀/D₀) 與曲度(κ)關係圖



圖 17.(d)ANSYS 模擬局部尖銳凹槽深度為 0.8 mm SUS304
 不鏽鋼管在循環彎曲負載下之橢圓化(△D₀/D₀)
 與曲度(κ)關係圖



圖 17.(e) ANSYS 模擬局部尖銳凹槽深度為 1 mm SUS304 不鏽鋼管在循環彎曲負載下之橢圓化(△D₀/D₀) 與曲度(κ)關係圖



# (二)不同深度局部尖銳凹槽 SUS304 不鏽鋼管在循環彎曲 負載下之皺曲損壞

圖 18(a)為不同深度局部尖銳凹槽 SUS304 不鏽鋼管 在循環彎曲負載下控制曲度( $\kappa_c$ )與循環至皺曲圈數( $N_b$ ) 的關係。在比較固定的凹槽深度時,控制曲度量越大則循環 至皺曲的圈數就越少;而比較固定的控制曲度時,凹槽深度 越深,則達到皺曲時所需循環圈數就越少。若將圖 18(a) 的實驗數據以雙對數座標來顯示,則呈現圖 18(b),由圖 中發現,雖然實驗有五種不同深度的局部尖銳凹槽,但在雙 對數座標的  $\kappa_c-N_b$ 卻呈現五條幾乎平行的直線。

Kyriakides 與 Shaw[10]在 1987 年針對不同材料的圓管 在不同的控制曲度下,進行單調與對稱循環彎曲負載的實 驗。根據實驗結果,他們提出的 κ<sub>c</sub>與 N<sub>b</sub>關係式為:

$$\kappa_{c} = C \left( N_{b} \right)^{-\alpha} \vec{x} \log \kappa_{c} = \log C - \alpha \log N_{b}$$
(3)

其中 C 為材料參數,也就是當  $N_b=1$  時所對應的控制曲度 量,而  $\alpha$ 為材料參數,也就是  $\kappa_c 與 N_b$ 對數關係中的直線斜 率值。根據他們的實驗結果 Al-6061-T6 鋁合金管與 AISI-1018 鋼管其 C 值求得分別為 0.988 及 0.968,而  $\alpha$  值 求得分別為 0.12 及 0.078。

由方程式(3)可知 α 為平行直線的斜率,根據圖 18(b), α 值可求得為 0.69。而 C 值對應凹槽深度 a 為 0.2、0.4、0.6、 0.8 及 1 mm 分別為 11.51、17.53、26.73、40.83 及 62.23。 若考慮 logC 與凹槽深度/壁厚(a/t)的關係,可發現非常接 近於線性的關係(如圖 19 所示),則 C 與 a/t 的關係可提出 為:

$$\log C = \log \beta_0 + \beta \left( a/t \right) \tag{4}$$

其中  $\beta_0 \gtrsim \beta$  為材料參數,可求得為 1.42 以及-1.37。圖 20 為實驗與理論模擬不同局部尖銳凹槽深度 SUS304 不鏽鋼管 在循環彎曲負載下控制曲度( $\kappa_c$ )與循環至皺曲圈數( $N_b$ ) 的對數座標關係。

# 五、結論

本研究係探討局部尖銳凹槽深度為 0.2、0.4、0.6、0.8、 1 mm 的 SUS304 不鏽鋼管,在對稱曲度控制循環彎曲負載 的力學行為與皺曲損壞。根據實驗的結果進行相關的理論



圖18. 實驗不同深度局部尖銳凹槽 SUS304不鏽鋼管在循環
 彎曲負載下控制曲度(κ<sub>c</sub>)與循環至皺曲圈數(N<sub>b</sub>)
 之(a)十進位座標及(b)雙對數座標關係

分析,所獲得的結果大致可歸納成以下的結論:

(一)由彎矩-曲度曲線中顯示,不同深度局部尖銳凹槽 SUS304不鏽鋼管承受循環彎曲負載時,試件會產生循 環硬化的現象,而反覆的加載與卸載後,其迴圈會趨 於穩定的狀態。此外,凹槽深度對彎矩-曲度曲線形狀 大小與趨勢沒有影響。





圖 20. 實驗與理論分析不同深度局部尖銳凹槽 SUS304 不鏽
 鋼管在循環彎曲負載下控制曲度(κ<sub>c</sub>)與循環至皺曲
 圈數(N<sub>b</sub>)之雙對數座標關係

(二)由橢圓化-曲度曲線中顯示,不同深度局部尖銳凹槽
 SUS304 不鏽鋼管承受循環彎曲負載時,曲線在加載與
 卸載的過程中,皆呈非線性的變化,而橢圓化成長的
 方式呈現棘齒狀的趨勢。此外,凹槽深度越深,橢圓
 化-曲度曲線就越不對稱,且橢圓化成長速度也越快。
 (三)本研究以 Solid Works 建立 3D 模型,並將該模型導

入有限元素 ANSYS,接著進行網格分割及邊界與負載 條件的設定,則該模式可運用來分析不同深度局部尖 銳凹槽圓管在曲度控制循環彎曲負載下的彎矩-曲度 及橢圓化-曲度關係。結果顯示,有限元素 ANSYS 分 析可合理的描述實驗結果。

- (四)由實驗不同深度局部尖銳凹槽 SUS304 不鏽鋼管在循環營曲負載下控制曲度-循環至皺曲圈數的關係中顯示,凹槽深度越深,則達到皺曲時所需循環圈數就越少。若將上述關係以雙對數座標來表示可發現,雖然實驗有五種不同的局部尖銳凹槽深度,但在雙對數座標的控制曲度-循環至皺曲圈數關係卻呈現五條幾乎平行的直線。
- (五)本研究運用 Kyriakides 與 Shaw [2]所提出的關係方程 式(3),並根據實驗結果提出材料參數 C 與 a/t(凹槽 深度/壁厚)的關係方程式(4),來描述控制曲度-循 環至皺曲圈數的關係。在與實驗結果比較後發現,理 論和實驗的結果相當契合。

### 參考文獻

- Chang, K. H. and W. F. Pan (2009) Buckling life estimation of circular tubes under cyclic bending. *International Journal of Solids and Structures*, 46(2), 254-270.
- Chang, K. H., W. F. Pan and K. L. Lee (2008) Mean moment effect of thin-walled tubes under cyclic bending. *Structural Engineering and Mechanics*, 28(5), 495-514.
- Corona, E. and S. Kyriakides (1988) On the collapse of inelastic tubes under combined bending and pressure. *International Journal of Solids and Structures*, 24(5), 505-535.
- Corona, E. and S. Kyriakides (1991) An experimental investigation of the degradation and buckling of circular tubes under cyclic bending and external pressure. *Thin-Walled Structures*, 12(3), 229-263.
- Corona, E. and S. Kyriakides (2000) Asymmetric collapse modes of pipes under combined bending and pressure. *International Journal of Solids and Structures*, 24(5), 505-535.
- Corona, E. and S. Vaze (1996) Buckling of elastic-plastic square tubes under bending. *International Journal of Mechanical Sciences*, 38(7), 753-775.



- Corona, E., L. H. Lee and S. Kyriakides (2006) Yield anisotropic effects on buckling of circular tubes under bending. *International Journal of Solids and Structures*, 43(22), 7099-7118.
- Hallai, J. F. and S. Kyriakides (2011) On the effect of Lüders bands on the bending of steel tubes. *International Journal of Solids and Structures*, 48(24), 3275-3284.
- Hung, C. Y. and K. L. Lee (2010) The influence of curvature-rate on the response and collapse of sharp-notched circular tubes under cyclic bending. *Journal* of Solid Mechanics and Materials Engineering, 4(12), 1754-1764.
- Kyriakides, S. and P. K. Shaw (1987) Inelastic buckling of tubes under cyclic loads. *ASME Journal of Pressure Vessel* and Technology, 109(2), 169-178.
- Kyriakides, S., A. Ok and E. Corona (2008) Localization and propagation of curvature under pure bending in steel tubes with Lüders bands. *International Journal of Solids* and Structures, 45(10), 3074-3087.
- Lee, K. L. (2010) Mechanical behavior and buckling failure of sharp-notched circular tubes under cyclic bending. *Structural Engineering and Mechanics*, 34(3), 367-376.
- Lee, K. L. and W. F. Pan (2002) Pure bending creep of SUS 304 stainless steel. *Steel and Composite Structures*, 2(6), 461-474.
- Lee, K. L., C. M. Hsu and W. F. Pan (2012) The influence of diameter-to-thickness ratios on the response and collapse of sharp-notched circular tubes under cyclic bending. *Journal of Mechanics*, 28(3), 461-468.
- Lee, K. L., C. Y. Hung and W. F. Pan (2010) Variation of ovalization for sharp-notched circular tubes under cyclic bending. *Journal of Mechanics*, 26(3), 403-41.
- 16. Lee, K. L., W. F. Pan and J. N. Kuo (2001) The influence of the diameter-to-thickness ratio on the stability of

circular tubes under cyclic bending. *International Journal* of Solids and Structures, 38(14), 2401-2413.

- Limam, A., L. H. Lee and S. Kyriakides (2012) On the collapse of dented tubes under combined bending and internal pressure. *International Journal of Mechanical Sciences*, 55(1), 1-12.
- Limam, A., L. H. Lee, E. Corana and S. Kyriakides (2010) Inelastic wrinkling and collapse of tubes under combined bending and internal pressure. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(5), 637-647.
- Pan, W. F. and C. H. Fan (1998) An experimental study on the effect of curvature-rate at preloading stage on subsequent creep or relaxation of thin-walled tubes under pure bending. *JSME International Journal, Series A*, 41(4), 525-531.
- Pan, W. F. and Y. S. Her (1998) Viscoplastic collapse of thin-walled tubes under cyclic bending. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 120(4), 287-290.
- Pan, W. F. and K. L. Lee (2002) The effect of mean curvature on the response and collapse of thin-walled tubes under cyclic bending. *JSME International Journal, Series A*, 45(2), 309-318.
- Pan, W. F., T. R. Wang and C. M. Hsu (1998) A curvatureovalization measurement apparatus for circular tubes under cyclic bending. *Experimental Mechanics*, 38(2), 99-102.
- Shaw, P. K. and S. Kyriakides (1985) Inelastic analysis of thin-walled tubes under cyclic bending. *International Journal of Solids and Structures*, 21(11), 1073-1110.
- Vaze, S. and E. Corona (1998) Degradation and collapse of square tubes under cyclic bending. *Thin-Walled Structures*, 31(4), 325-341.

收件:103.09.29 修正:103.10.31 接受:103.12.02

