

拉環失效模式分析

蔡志隆, 臧祥甫, 李建鋒

中山科學研究院第二研究所

摘要

拉環之結構外形類似鑰匙圈，為以鋼線繞成之多圈環狀結構。因其非單圈閉合之特性，於拉環之側向施力，可輕易拉開拉環，旋轉扣入其他開孔結構件。當使用一 1.5 圈鋼線之拉環來拉開插銷時，發現此拉環之拉脫力有時不到 10kgf，有時約 20kgf，而欲拉出拉銷則需 10kgf 以上的拉力，導致有時會發生無法將拉銷拉出之失效現象。為尋找失效原因，本文使用 Abaqus/Explicit 執行拉環拉脫力動態非線性分析，並探討拉環角度、鋼線圈數、摩擦係數、截斷頻率等參數之影響，找到了拉環拉脫力相差一倍之原因，最後將分析結果與拉環拉力試驗結果作比對。無論是拉環拉脫力或拉開後之形狀，分析與試驗結果均很接近。

關鍵字：拉環、拉脫力、鋼線圈數、摩擦係數

一、緒論

本文所謂之拉環，其結構外形類似鑰匙圈，為以鋼線繞成之多圈環狀結構。因其非單圈閉合之特性，於拉環之側向施力，可輕易拉開拉環，旋轉扣入其他開孔結構件，可用來連結插銷、纜繩…等結構。

當使用一 1.5 圈鋼線之拉環來拉開插銷時，發現此拉環之拉脫力有時不到 10kgf，有時約 20kgf，而欲拉出拉銷則需 10kgf 以上的拉力，導致有時會發生無法將拉銷拉出之失效現象。

本文將使用 Abaqus/Explicit 執行拉環拉脫力動態非線性分析，並探討拉環角度、鋼線圈數、摩擦係數、截斷頻率等參數之影響，以尋找拉環拉脫力相差一倍之原因，最後將分析結果與拉環拉力試驗結果作比對。

二、結構幾何與材料性質

2.1 結構幾何

拉環設計圖如圖 1，鋼線直徑 1mm，拉環內徑 6.7mm，外徑 8.7mm，繞 1.5 圈。拉環的兩端，一端扣入拉銷頂端的小環，拉銷尾端固定，另一端以鋼纜拉動。因本文之重點在拉環的拉脫力評估，為簡化分析，拉銷僅考慮頂端的小環，鋼纜亦以小鋼環模擬，模擬模型如圖 2。

2.2 材料性質

拉環、拉銷頂端的小環、模擬鋼纜的小鋼環均使用彈簧用不鏽鋼線，其材料為 SUS 304，重要材料性質如下[1,2,3]：

彈性模數：20,389 kgf/mm²

降伏強度：125 kgf/mm²(抗拉強度×0.625)

抗拉強度：200 kgf/mm²

柏松比：0.27

密度：7.96×10⁻⁶ kg/mm³

三、分析模型

3.1 模型建立

- (1)拉環、拉銷頂端的小環、模擬鋼纜的小鋼環均以三維實體元素(C3D8R)模擬。
- (2)拉環與拉銷小環、拉環與鋼纜小環、拉環之鋼線與鋼線間均考慮接觸問題，摩擦係數假設為 0.2。
- (3)因拉環兩端承受拉力問題，牽涉大變形之幾何非線性、塑性之材料非線性、各圈鋼線接觸之邊界非線性，其分析非常複雜，若使用一般之隱性(Implicit)積分求解，將會難以收斂；且因實際受力之時間僅 2.6ms，故較適合以顯性(Explicit)積分來求解。本文將以位移控制方式反求施加之負荷，且為方便位移控制及負荷獲得，本文於拉銷頂端的小環、模擬鋼纜的小鋼環均切開一小段，以利使用 Abaqus 之 Kinematic 及 Coupling 控制卡。此為分析處理技巧，不會影響分析結果。
- (4)拉環承受拉力時，拉環對稱面與受力面主要有二個角度：拉環對稱面與受力面一致、拉環對稱面與受力面垂直。分析模型如圖 3，共分割成 15,664 個三維實體元素，19,984 個節點。

3.2. 邊界條件

於拉銷小環開口處施加固定邊界條件。

3.3. 負荷條件

拉環承受鋼纜之拉力負荷條件為 2.6ms 移動 25mm，加速度呈線性變化，位移與作用時間的關係如圖 4。

四、分析結果

4.1. 預設參數

本文除執行拉環之拉脫力評估分析外，亦將針對不同參數執行比較分析。預設參數說明如下：

- (1)鋼線圈數：1.5 圈。
- (2)拉環對稱面與受力面之角度：拉環對稱面與受力

面一致(0°)。

- (3) 摩擦係數：考慮接觸摩擦，摩擦係數為 0.2。
 (4) 截斷頻率(Cut Off Frequency)：截斷頻率取外力頻率的 6 倍(2,308Hz)。本文截斷頻率之取法為：使濾波後之結果維持平滑曲線時，外力頻率的最大倍數。

4.2. 拉環振頻振模分析結果

拉環振頻振模分析結果如圖 5，第一自然振頻 2,812Hz，其對應之週期為 0.000356s(約 0.36ms)。對類似後緣鋸齒波的負荷而言，於小變位情況，作用時間大於第一自然振頻週期的 4 倍(1.44ms)時，一般可視為靜態負荷。

但對拉環被拉開之大變位情況，當拉環被拉開後，其第一自然振頻會降低，對應之週期會變大。拉環拉開後之振頻振模分析結果如圖 6，第一自然振頻 2,131Hz，其對應之週期為 0.000496s(約 0.5ms)，此時作用時間需大於 2ms 時，方可視為靜態負荷。

對本文分析之作用負荷(2.6ms 移動 25mm)，雖然其作用時間 2.6ms 大於 1.44ms，但因前面一半約 1.3ms 之位移量很小，故其週期幾乎只能視為 1.3ms，再加上拉環拉開後自然振頻所對應之週期變成 2ms，故作用負荷仍屬動態負荷。

4.3 預設參數之分析結果

因係以顯性(Explicit)積分來求解，所輸入之負荷為動態負荷，故其輸出會有動態之振盪效應。圖 7 為其動能(ALLKE)與內能(ALLIE)之比較。由圖觀之，動能與位能之比值超過 5%，動態效應不能忽略。

作用力與作用時間之關係如圖 8，本文使用 Abaqus/CAE 提供之濾波器(saeGeneralFilter, cutoffFrequency=2,308)濾波後之結果亦加入圖 8，濾波後最大值为 19.94kgf。

不同作用時間之有效應力(von Mises Stress)分佈如圖 9，最大主應變分佈如圖 10。由圖 9 及圖 10，拉環被拉開的過程，已發生大範圍的塑性變形，但因最大應力未達抗拉強度，最大塑性應變並未貫穿鋼線截面，故不致於將拉環拉斷，但是拉環被拉開後，會產生永久變形，其形狀近似" α "形(如圖 11)。

4.4 不同的拉環對稱面與受合力面角度之比較分析結果

當拉環對稱面與受合力面角度由預設之一致(0°)改為垂直時(90°)，作用力與時間之關係如圖 12，本文使用 Abaqus/CAE 提供之濾波器(saeGeneralFilter, cutoffFrequency=2308)濾波後之結果亦加入圖 12，濾波後最大值为 8.55kgf。

不同時間之有效應力分佈如圖 13，最大主應變分佈如圖 14。由圖 13 及圖 14，拉環被拉開的過程，亦已發生大範圍的塑性變形，但因最大應力未達抗拉強度，最大塑性應變並未貫穿鋼線截面，故不致於將拉環拉斷，但是拉環被拉開後，會產生永久變形，其形狀近似" C "形(如圖 15)。

拉環對稱面與受合力面之角度除 0° 及 90° 外，本文亦執行了 45°、135°、180° 之分析，不同的拉環對稱面與受合力面角度之分析結果綜整表 1。由表 1，不同的拉環對稱面與受合力面角度之分析結果顯示：

- (1) 僅有在拉環對稱面與受合力面垂直時，濾波後最大拉脫力較小，僅約 8.55kgf，其餘 0°、45°、135°、180° 情況，濾波後最大拉脫力均較大且相差不多，均為 20kgf 左右。
- (2) 故拉環僅在 90° 時，方有最大拉脫力小於 10kgf 之情況，此時即無法將拉銷拉出。
- (3) 於 45° 及 135° 情況從最大拉力往下掉時，明顯有第二高峰，其平均值約 8.5kgf，約略是 90° 情況之拉力高峰平均值。其原因為：一開始拉動時，一端為一根鋼線，另一端為二根鋼線，拉動到一半時，二根鋼線的那一端，其中一根鋼線會滑開，僅剩一根鋼線，此時類似 90° 情況，拉環的兩端均是一根鋼線。故本文研判：無論其原始角度為何，當兩端僅各拉一根鋼線時，最大拉力高峰期之平均值約 8.5kgf，當一端拉一根鋼線、而另一端拉二根鋼線時，最大拉力高峰期之平均值約為 20kgf。為驗證此一想法，本文將於下一小節探討 2 圈鋼線之拉環的分析結果。
- (4) 僅有在拉環對稱面與受合力面一致時(0° 及 180° 情況)，拉環將拉開時會呈" γ 有切口之橢圓形"，拉環拉開後會近似" α "形(如圖 11)；其餘 45°、90°、135° 情況，拉環拉開後會近似" C "形(如圖 15)。

4.5 不同的鋼線圈數之比較分析結果

為確認最大拉力是否如同前小節本文所研判，與受合力兩端所拉的鋼線圈數有關，本小節執行了 2 圈鋼線之拉環的分析結果(0° 與 90°)，其與 1.5 圈鋼線拉環之分析結果綜整比較表 2。

由表 2，當 2 圈鋼線 0° 狀況時，一開始拉動後，即是一端拉一根鋼線、而另一端拉二根鋼線，其濾波後最大拉力果如本文前小節所研判約 20kgf；而當 2 圈鋼線 90° 狀況時，兩端均拉兩根鋼線，最大拉力增至 40kgf 左右。

4.6 不同的摩擦係數之比較分析結果

本文預設之摩擦係數為 0.2，不同的摩擦係數之分析結果綜整如表 3。由表 3，無摩擦時拉脫力僅 14.11kgf，摩擦係數為 0.3 時，拉脫力增至 24.23kgf。不同的摩擦係數之分析結果顯示：摩擦係數的大小對濾波後最大拉力的影響很大。另無摩擦時，拉環將拉開時的變形與有摩擦時不同，原本在下側的鋼線會滑到上側。

4.7 不同的截斷頻率(Cut Off Frequency)之比較分析結果

本文對分析結果之濾波屬低通濾波(Low Pass Filter)，目的在濾除由於數值誤差所導致的高頻雜訊。依據取樣定理(Sampling Theorem)[5]，截斷頻率必須為取樣頻率的一半以下。以本文 2.6ms 取 500 個點，取樣頻率約 50,000Hz，故截斷頻率必須小於 25,000Hz。另由拉環之振頻振模分析結果，或動能與位能之比值，可知負荷條件仍屬動態負荷。且因負荷作用時間很短，在結構反應尚未激起前，拉環即已拉脫。故截斷頻率毋需大於結構件的自然振頻。此外，截斷頻率亦不能太小，否則濾波後之結果會過於平滑

而導致失真。拉環之第一自然振頻 2,812Hz，故本文之截斷頻率預設值為 2,308Hz，此值除小於拉環之第一自然振頻外，亦為使濾波後之結果維持平滑曲線時外力頻率的最大倍數(6 倍)。

不同的截斷頻率之比較分析結果如圖 16，其中，Frequency 表外力頻率，以 2 倍外力頻率(769Hz)濾波後之最大拉力值為 20.15，濾波後之波形明顯過於平滑，以 4 倍外力頻率(1,539Hz)濾波後之最大拉力值為 20.11，以 6 倍外力頻率(2,308Hz)濾波後之最大拉力值為 19.94，以 8 倍外力頻率(3,077Hz)濾波後之最大拉力值為 19.93。不同的截斷頻率，濾波後之波形略有差異，但最大拉力值相差不大。

4.8 不同的負荷作用時間之比較分析結果

負荷作用時間除 2.6ms 外，本文另執行了 1ms、6ms、18ms 之分析(移動距離相同、加速度為線性變化)，不同的負荷作用時間之比較分析結果綜整如表 4。由表 4，不同的負荷作用時間，濾波前作用力與時間之關係曲線明顯有差異，但濾波後的最大拉力則相差無幾，約 20kgf 左右。

五、分析與試驗之比對

5.1 拉環拉力試驗設置

試驗設置如圖 17，拉環上方為鋼纜，拉環下方為拉銷。採靜態試驗方式執行，執行時間約 8~10sec，取樣頻率為 1,000Hz。

5.2 拉環拉力試驗結果

(1) 拉環對稱面與受力的角度一致時

試驗結果如圖 18，最大拉力約 20.2kgf，若不考慮最大峰值，其拉力高峰之平均值約 19kgf。值得注意的是：試驗結果顯示由最大拉力落下後略有振盪才拉脫，其趨勢近似分析之 180° 狀況而非 0° 狀況，故與試驗值比對之分析值，將採用 180° 狀況之分析結果。

(2) 拉環對稱面與受力的角度垂直時

試驗結果如圖 19，最大拉力約 10.5kgf，若不考慮最大峰值，其拉力高峰之平均值約 8kgf。

5.3 分析與試驗之比較

(1) 最大拉脫力之比較

為與試驗值作比較，本文另執行負荷作用時間 18ms 之分析。當作用時間為 18ms 時，拉環最大拉脫力分析值的動態效應幾乎可以忽略，此時可視為擬靜態。分析與試驗之比較綜整如表 5(括號內為試驗曲線拉力高峰之平均值)。

由表 4，拉環最大脫拉力之分析值與試驗值相當接近且趨勢一致。唯當注意，分析時摩擦係數對分析結果之影響很大，而本文之預設值為 0.2，研判與實際值相差不多，方便分析值與試驗值頗為接近。

(2) 拉環拉開後形狀之比較

拉環拉開後形狀分析與試驗之比較綜整如表 6。表 6 中，當拉環對稱面與受力的角度一致時，並無 1.5 圈鋼線之拉環拉開後形狀的試驗照片，但 2 圈鋼線之拉環拉開後形狀的試驗照片，則與分析結果一

致，其形狀均近似“ α ”形；而當拉環對稱面與受力的角度垂直時，拉環拉開後形狀分析結果亦與試驗結果一致，其形狀均近似“C”形。

至於為何 1.5 圈鋼線之拉環拉開後形狀無近似“ α ”形之試驗結果，研判可能試驗時僅以目視方法調整拉環之角度，無法維持接近 0°(或 180°)狀態，而是有一小角度(例 15°或 165°)，故拉環拉開後其形狀近似較扁的“C”形(如圖 20 及圖 21)而非“ α ”形。

六、結論

1.5 圈鋼線之拉環的拉脫力有時不到 10kgf、有時約 20kgf 的原因為：當拉環受力的兩端均為一根鋼線時，其最大拉脫力接近 10kgf；當一端為一根鋼線、而另一端為二根鋼線時，其最大拉脫力即約 20kgf。

摩擦係數的大小對拉環最大拉脫力的影響很大，本文摩擦係數之預設值為 0.2，研判與實際值相差不多，方便分析值與試驗值頗為接近。

拉環兩端承受拉力問題，牽涉大變形之幾何非線性、塑性之材料非線性、各圈鋼線接觸之邊界非線性，其分析非常複雜。本文以 Abaqus/Explicit 執行拉環拉脫力動態非線性分析，無論是拉環的最大拉脫力值，或是拉環拉開後之形狀，分析結果均與試驗結果相當接近，此再次顯示 Abaqus 軟體於處理非線性問題上的卓越能力。

七、參考文獻

1. 小笠富士雄，機械設計手冊。
2. 蔡春源，新編機械設計手冊。
3. 翁通楹，機械設計手冊。
4. Abaqus Documentation, Analysis User's Manual, Version 6.9.
5. 坂卷佳壽美(白中和譯)，數位信號處理。

八、表格

表 1：不同的拉環對稱面與受力面角度之分析結果

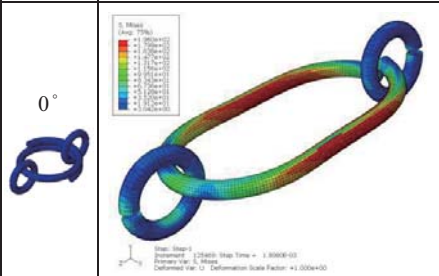
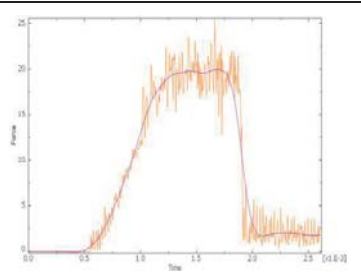
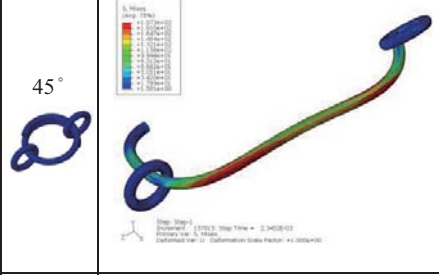
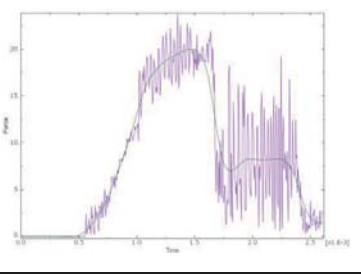
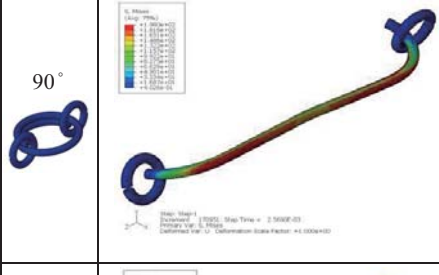
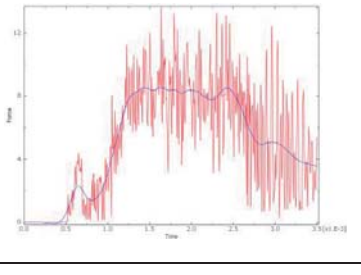
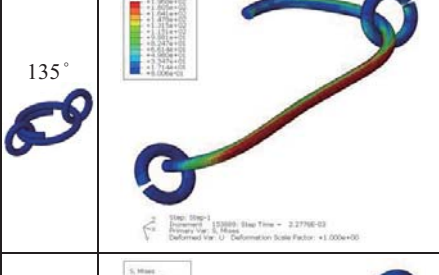
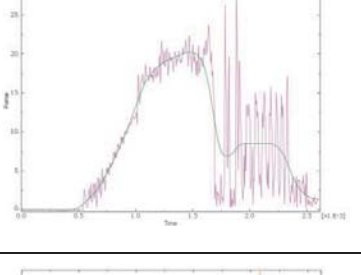
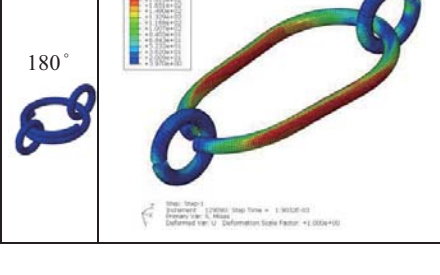
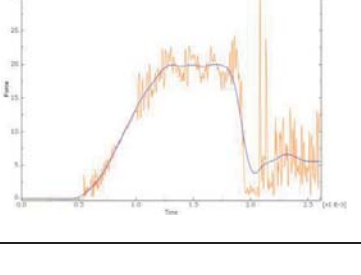
角度	拉環將拉開時應力分佈	作用力與作用時間之關係	濾波後最大拉脫力(kgf)
0°	 <p>Step: Step1 Element: 123456 Step Time = 1.8000E-01 Element of: Stress Deformed (in U) Deformation Scale Factor = 1.0000E+01</p>		19.94
45°	 <p>Step: Step1 Element: 123456 Step Time = 2.3400E-01 Element of: Stress Deformed (in U) Deformation Scale Factor = 1.0000E+01</p>		19.97
90°	 <p>Step: Step1 Element: 123456 Step Time = 2.7600E-01 Element of: Stress Deformed (in U) Deformation Scale Factor = 1.0000E+01</p>		8.55
135°	 <p>Step: Step1 Element: 123456 Step Time = 2.2750E-01 Element of: Stress Deformed (in U) Deformation Scale Factor = 1.0000E+01</p>		20.21
180°	 <p>Step: Step1 Element: 123456 Step Time = 1.9000E-01 Element of: Stress Deformed (in U) Deformation Scale Factor = 1.0000E+01</p>		20.0

表 2：不同的鋼線圈數之比較分析結果

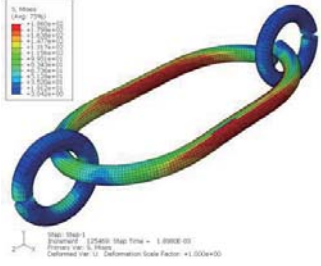
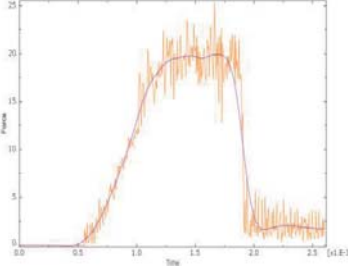
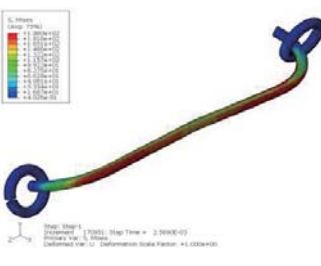
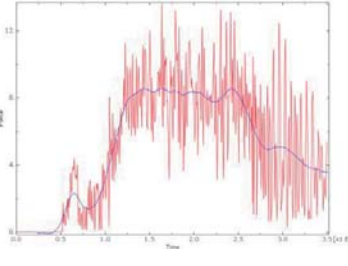
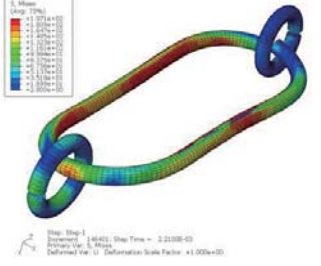
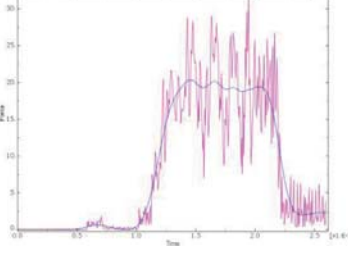
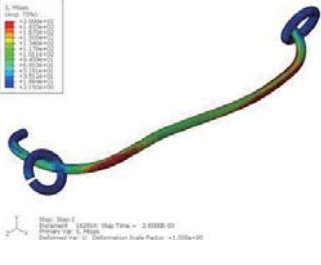
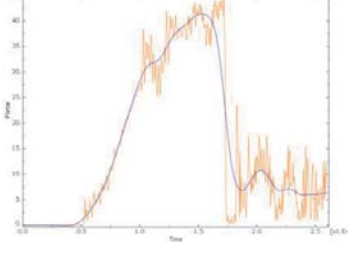
角度	拉環將拉開時應力分佈	作用力與作用時間之關係	濾波後最大拉脫力(kgf)
1.5 圈 0°			19.94
1.5 圈 90°			8.55
2 圈 0°			20.33
2 圈 90°			41.4

表 3：不同的摩擦係數之比較分析結果

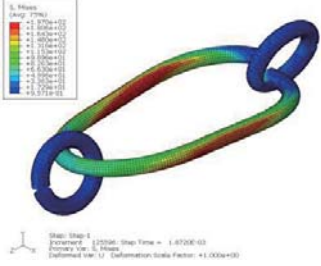
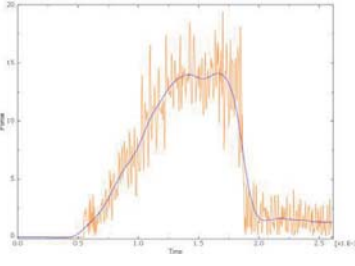
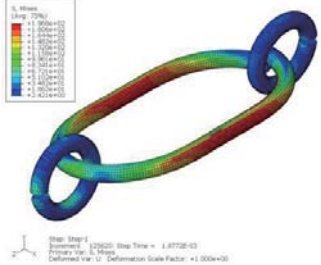
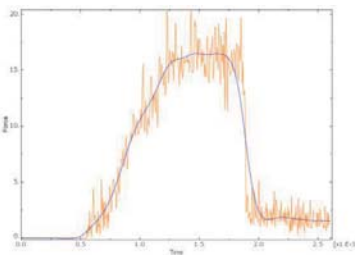
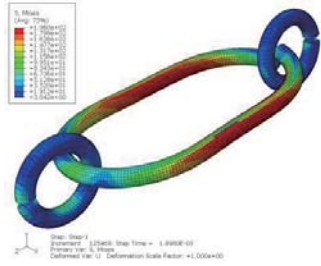
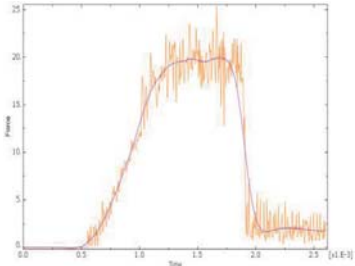
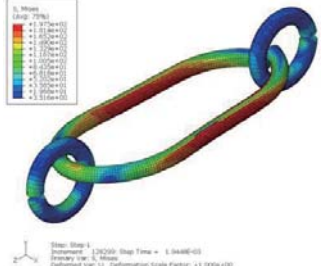
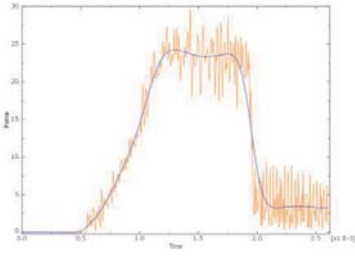
摩擦係數	拉環將拉開時應力分佈	作用力與作用時間之關係	濾波後最大拉脫力(kgf)
0	 <p>Step: Step-0 Element: 129200, Step Time = 1.4732E-03 Frame's vis: 0, Frame Deformed vis: U, Deformation Scale Factor = 1.000E+00</p>		14.11
0.1	 <p>Step: Step-0 Element: 129200, Step Time = 1.4732E-03 Frame's vis: 0, Frame Deformed vis: U, Deformation Scale Factor = 1.000E+00</p>		16.50
0.2	 <p>Step: Step-0 Element: 129200, Step Time = 1.4944E-03 Frame's vis: 0, Frame Deformed vis: U, Deformation Scale Factor = 1.000E+00</p>		19.94
0.3	 <p>Step: Step-0 Element: 129200, Step Time = 1.9444E-03 Frame's vis: 0, Frame Deformed vis: U, Deformation Scale Factor = 1.000E+00</p>		24.23

表 4：不同的負荷作用時間之比較分析結果

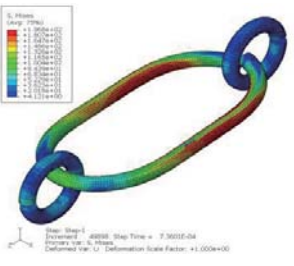
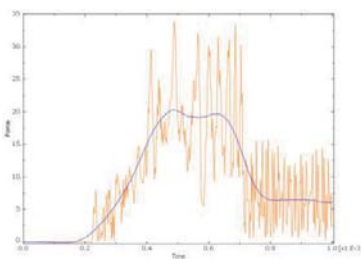
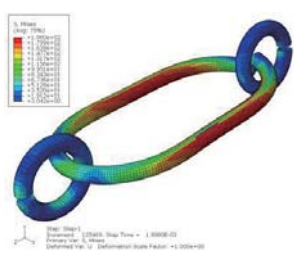
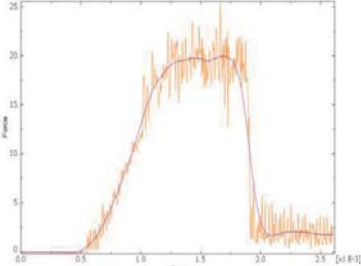
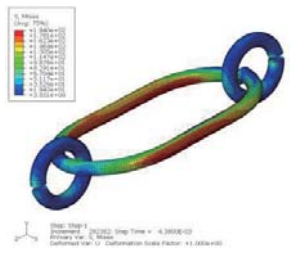
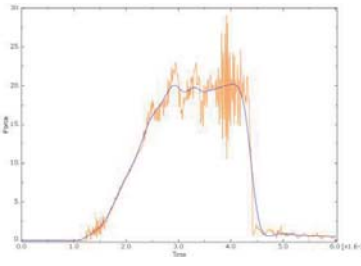
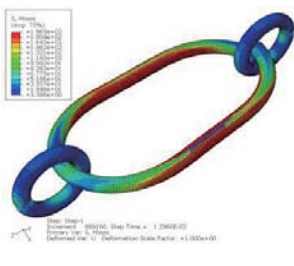
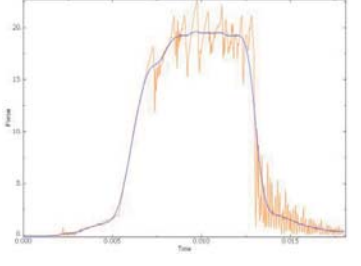
作用時間	拉環將拉開時應力分佈	作用力與時間之關係	濾波後最大拉脫力(kgf)
1ms	 <p>Step: Step1 Increment: 48888, Step Time = 7.3601E-04 Deformed Via: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00</p>		20.26
2.6ms	 <p>Step: Step1 Increment: 12888, Step Time = 1.8890E-03 Deformed Via: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00</p>		19.94
6ms	 <p>Step: Step1 Increment: 12888, Step Time = 4.3890E-03 Deformed Via: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00</p>		20.19
18ms	 <p>Step: Step1 Increment: 88222, Step Time = 1.2800E-02 Deformed Via: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00</p>		19.61

表 5：分析與試驗最大拉力之比較


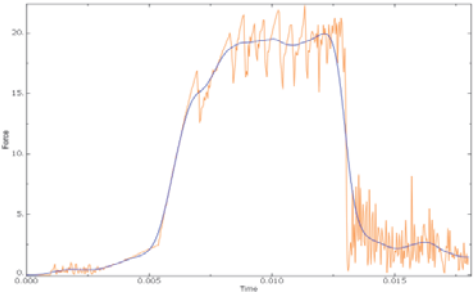

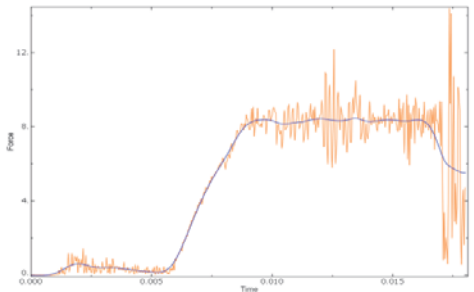






拉環對稱面與 受力面角度	分析值	試驗值
<p>一致時(180°)</p> 	 <p>19.97kgf</p>	<p>20.2kgf (19.0kgf)</p>
<p>垂直時(90°)</p> 	 <p>8.46kgf</p>	<p>10.5kgf (8.0kgf)</p>

表 6：分析與試驗拉環拉開後形狀之比較

拉環對稱面與受力面角度	分析	試驗
<p>一致時(2 圈鋼線)</p> 		
<p>垂直時(1.5 圈鋼線)</p> 		

九、圖片

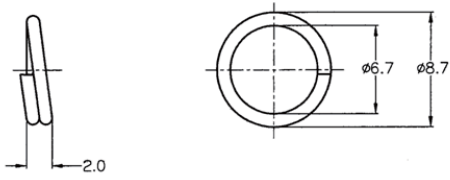
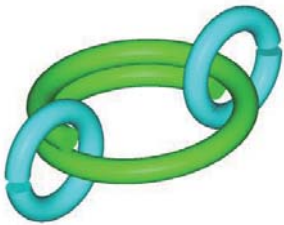


圖 1 拉環設計圖

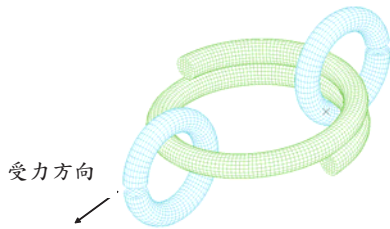


(a)拉環對稱面與受力面一致

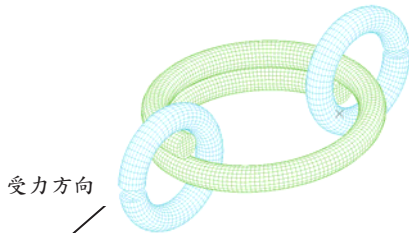


(b)拉環對稱面與受力面垂直

圖 2 拉環模擬模型



(a)拉環對稱面與受力面一致



(b)拉環對稱面與受力面垂直

圖 3 拉環、拉銷、鋼纜有限元素分析模型

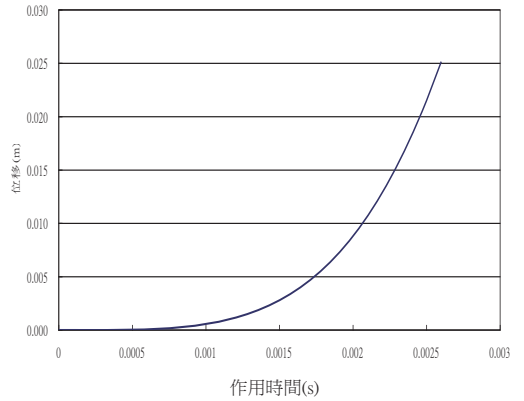


圖 4 作用負荷之位移與時間的關係

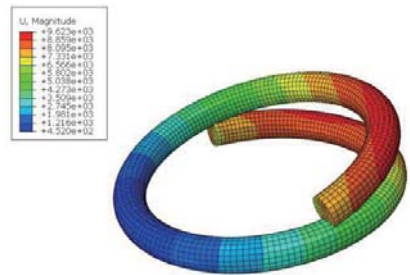


圖 5 拉環之第一自然振頻振模

Step: Step
Mode 1: Value = 3.12228E+08 Freq = 2812.3 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.546E-04

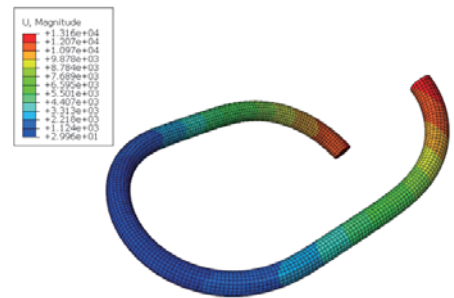


圖 6 拉環拉開後之第一自然振頻振模

Step: Step-1
Mode 1: Value = 1.79193E+08 Freq = 2130.5 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +3.415E-04

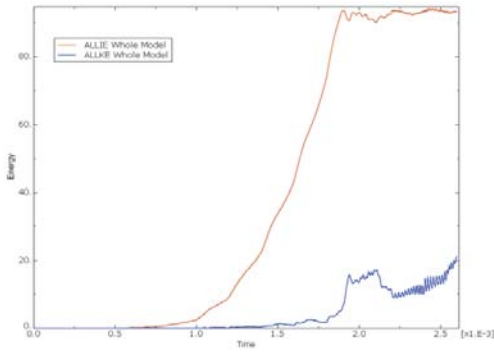


圖 7 動能與位能之比較

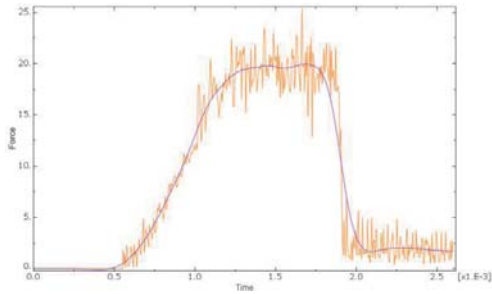


圖 8 拉環拉脫力與作用時間之關係

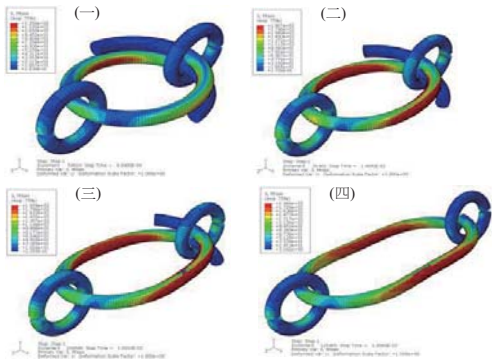


圖 9 不同作用時間之有效應力分佈

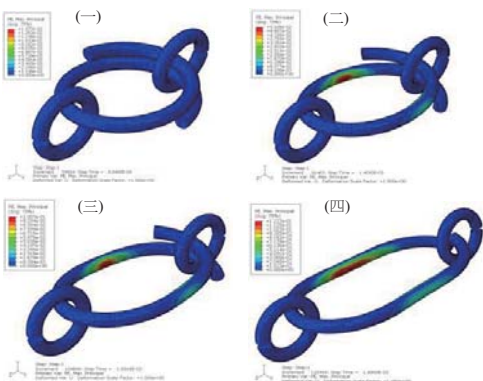


圖 10 不同作用時間之最大主應變分佈



圖 11 拉環對稱面與受力面角度一致時拉開後形狀

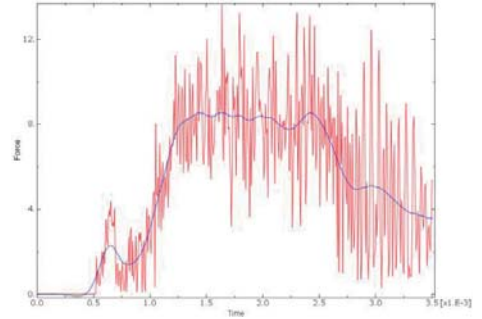


圖 12 拉環對稱面與受力面角度垂直時拉脫力與作用時間之關係

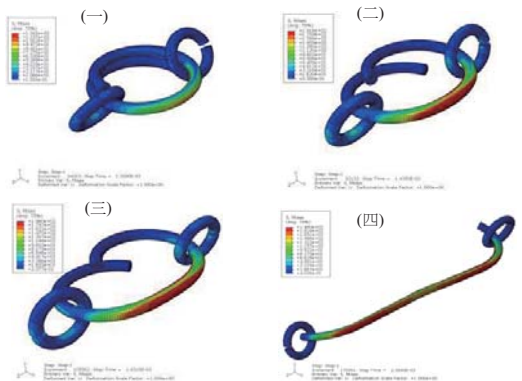


圖 13 拉環對稱面與受力面角度垂直時不同作用時間之有效應力分佈

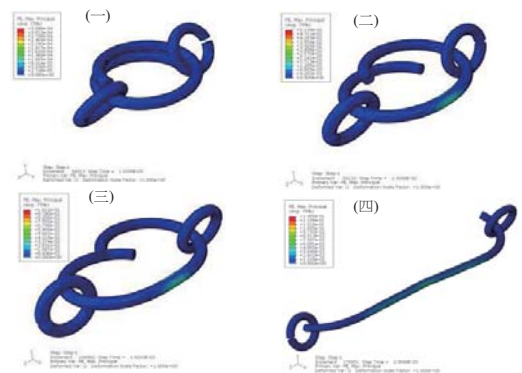


圖 14 拉環對稱面與受力面角度垂直時不同作用時間之最大主應變分佈



圖 15 拉環對稱面與受力面角度垂直時拉開後形狀

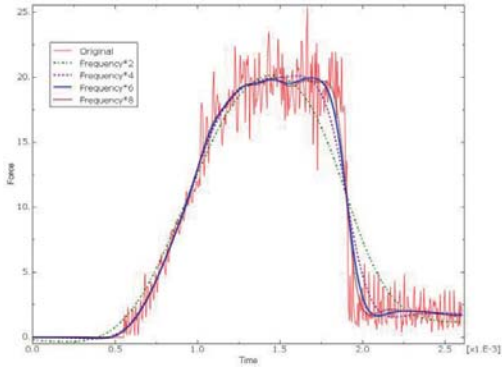


圖 16 作用力與作用時間之關係以不同截斷頻率濾波之比較分析結果



圖 17 拉環拉力試驗設置

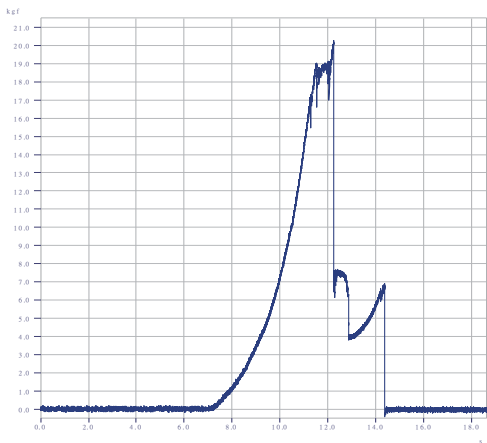


圖 18 拉環對稱面與受力面角度一致時之拉力試驗結果

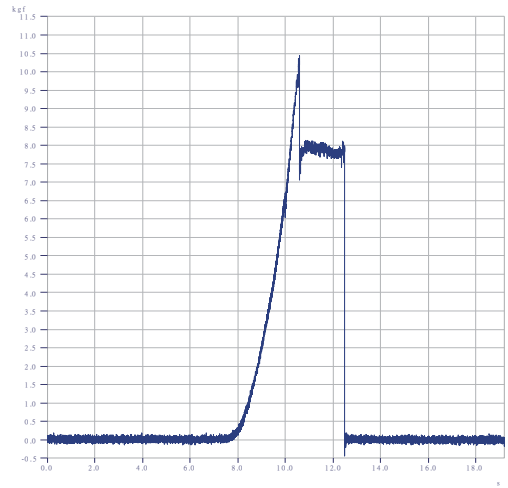


圖 19 拉環對稱面與受力面角度垂直時之拉力試驗結果



圖 20 拉環對稱面與受力面夾 15° 時拉環拉開後之結果



圖 21 拉環對稱面與受力面夾 165° 時拉環拉開後之結果