

應用 ABAQUS 於纖維強化高壓橡膠軟管之爆破壓力預測

張維敏 張正雄 臧祥甫

國家中山科學研究院 飛彈火箭研究所

摘要

纖維強化橡膠高壓軟管在很多石化與民生工業上被廣泛的應用。本文應用 ABAQUS/Standard 結構分析軟體，並藉由某一已知工作壓力及爆破壓力高壓軟管的結構，以及其內襯 Nylon6 尼龍層、NBR 丁腈橡膠層、纖維補強層，加上最外層之 CR 氯丁橡膠層的厚度、位置及機械性質，期能建立一合理的數學模型，藉由此一數學模型能夠準確的預估當補強纖維批覆率(亦即纖維密度)變化，以及纖維補強層層數增加之其他不同設計高壓橡膠軟管的爆破壓力值。

關鍵字：高壓橡膠軟管、纖維強化層、爆破壓力

ABSTRACT

Fiber-reinforced high-pressure rubber hoses have been widely used in chemical and civil industries. In general, the construction layers of a fiber-reinforced high-pressure rubber hose include: a Nylon 6 layer, a NBR rubber layer, one or more fiber-reinforced layers, and a CR rubber layer. In this paper, we apply ABAQUS/Standard and a benchmark high-pressure fiber-reinforced rubber hose whose burst pressure, thickness and mechanical properties of each construction layer are known to establish a reasonable mathematical model that can be applied to predict the burst pressures of other rubber hoses with different fiber densities and fiber-reinforced layers.

Keywords: high-pressure rubber hose, fiber-reinforced layer, burst pressure

一、前言

纖維補強型高壓橡膠軟管已被廣泛的應用在化工與民生工業的領域，例如：液壓系統配管用之高壓軟管，用以輸送液壓油、燃料油、潤滑油、重油...等等。但是可能涉及工業機密的關係，相關的纖維補強型高壓橡膠軟管的設計與分析文獻並不容易找到。

本項研究的目的是，係針對纖維強化高壓軟管的結構模擬方法與數學分析模式進行探討，期能建立一個可靠之數學分析模型以預測各種不同強化纖維編織密度(或稱纖維覆蓋率)、不同纖維補強層數與不同尺寸高壓軟管之爆破壓力進行預測。根據合作之高壓軟管製造公司的商品型錄：工作壓力近似於 1/4 爆破壓力(此僅係一近似經驗公式)。而我們擬建立一合理的數學模式，可以進行不同設計型態高壓軟管爆破

壓力的預測。圖 1 即為擷取一段高壓軟管並予以解剖至纖維補強層之實體圖。高壓軟管的剖面構造第 1 層為內層橡膠(NBR)、第 2 層為纖維補強層、第 3 層為外層橡膠(CR)層、第 4 層為最裡層之樹脂薄層(耐特科技材料 Nylon 6)。其中，纖維補強層係以纖維束沿高壓軟管結構中心軸夾角 ± 54.75 度(亦即兩主要纖維束間之夾角為 109.5 度，合作廠商稱此一角度為理想角度)。



圖 1 纖維補強高壓橡膠軟管解剖實體圖

欲較準確地模擬高壓軟管結構，所遇到最複雜的就是其中第2層的補強纖維層的模擬，以及補強纖維層各材料參數的獲得。本文將應用ABAQUS/Standard的REBAR單元模擬補強纖維的力學特性。

二、結構幾何與材料性質

2.1 結構幾何

表1為合作高壓橡膠軟管製造公司提供的一些軟管尺寸資訊，亦為本項研究建立纖維補強型高壓軟管結構模擬數學模型的參考標的(Benchmark)。此一標的物相當於合作廠商高壓軟管型錄-油管類編號0501的產品，此一參考標的高壓軟管的安全工作壓力為11kgf/cm²，亦即其爆破壓力近似值為44kgf/cm²。

橡膠管結構層	內徑(mm)	外徑(mm)
Nylon 6 尼龍層	15.4	15.7
NBR 橡膠內層	15.7	20.2
纖維補強層	20.2	21.5
CR 橡膠外層	21.5	24.0

表 1 高壓橡膠軟管各結構層之位置尺寸

2.2 材料性質

合作廠商製造之高壓軟管之構造由外往內：第1層內層為具優異耐油與耐燃性的丁腈橡膠(NBR)、第2層為纖維補強層、第3層為外層氯丁橡膠(CR)、另最內層為很薄的樹脂層(耐特科技材料Nylon 6)。其各層材料之機械性質如下：

NBR丁腈橡膠層：

Young's Modulus : 0.2552kgf/mm²

Poisson's Ratio: 0.4995

CR氯丁橡膠層：

Young's Modulus: 0.4414kgf/mm²

Poisson's Ratio : 0.4995

纖維補強層：

Young's Modulus:2566kgf/mm²(第一段斜率)

Young's Modulus:417kgf/mm²(第二段斜率)

Poisson's Ratio : 0.4

Nylon6樹脂層：

Young's Modulus: 21.52kgf/mm²

Poisson's Ratio : 0.4

其中纖維補強層係針對其中一股纖維進行測試，由於纖維束係由纖維絲所構成的撓性體，稍受力即嚴重變形、纖維絲部分斷裂或開始進行高分子材料之結晶變化。故其測試所得應力-應變曲線並不穩定(將會呈現雙線性曲線)，會呈現兩段斜率。甚至夾頭夾持纖維束時，纖維束之截面積即刻變化。故研判所量測之彈性係數與截面積亦存在變異性。經過與本院專業單位研討後，基於實際使用範圍建議使用第一段斜率值 2566kgf/mm² 為纖維補強層材料之楊氏係數。

三、有限元素分析模型

本篇論文採用 Simulia Abaqus/CAE 進行建模與後處理，結構分析時則用 Simulia Abaqus/ Standard [1,2,3]執行。

高壓軟管製造公司所製造之高壓軟管必須符合SAE J1527、TYPE A1-15、BARRIER或ISO 7840 A1等規範，其中與結構力學相關之測試要求，僅為其承受高內壓負荷之能力測試。

高壓軟管承受內壓負荷，基本上是一個近似軸對稱結構分析的問題。但是，其中之纖維加強層並非是一軸對稱結構。因此，本文所採用之結構分析模型係擷取一段長度為50mm的高壓橡膠軟管(取1/4具代表性結構建模)，依照各橡膠層的厚度對3維結構進行六面體固體單元分割(Partition)，而Nylon6樹脂層以連體板殼單元SC8R貼附於NBR橡膠層內緣。高壓軟管之結構分析模型剖面示如圖2。

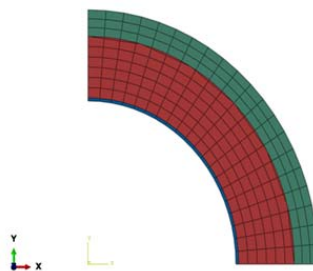


圖 2 高壓橡膠軟管結構分析模型剖面網格

其中，構造最為複雜的纖維加強層，則係以與高壓軟管圓周周向局部座標軸夾角35.25與144.75度之纖維束主軸方向（亦即兩纖維束間夾角109.5度）的兩層Rebar Layer來加以模擬，此兩層Rebar Layer則係以Embedded Element方式被拘束（夾層）在NBR層與CR層橡膠之間，並提供高壓軟管纖維補強的功能。

而由於高壓軟管結構中各層材料（除了纖維補強層）之延展性都相當良好，所以當其承受內壓時，纖維補強層中任一股纖維束的破壞斷裂負荷，即為決定高壓軟管爆破壓力的最重要因素。圖3為兩層Rebar Layer的纖維束主軸方向（其中之藍色線條為纖維束排列方向，其與圖4圓周周向局部座標軸1軸夾角分別為35.25與144.75度，兩纖維束間之夾角109.5度）：

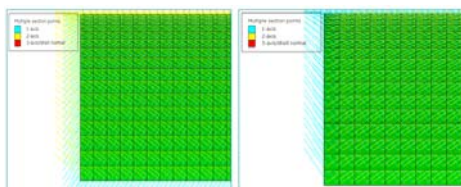


圖3 兩層Rebar Layer的纖維束主軸方向（其中之藍色線條為纖維束排列方向。

圖4 為Rebar Layer纖維束方向說明示意圖。Rebar Layer的應用，起初是應用在鋼筋混凝土之加強鋼筋的模擬，其後又推廣至車用輪胎纖維補強層的模擬應用上，甚至複合材料之強化纖維層之模擬上。

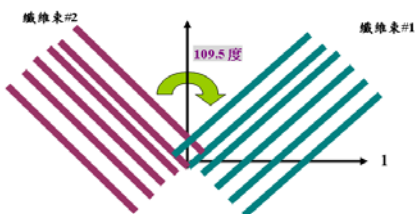


圖4 Rebar Layer兩層主要的的纖維束主軸方向與夾角說明示意圖

Rebar Layer中所需定義的參數為Rebar的材料性質、Rebar截面積、Rebar間隙 (Spacing)、以及Rebar的角度 (Orientation)。對於本文所需探討的高壓軟管的模擬，其參數中以Rebar截面積較難以界定。

在以下的高壓軟管分析模擬應用實例中，我們首先利用合作廠商提供之分析參考標的物-相當於合作廠商高壓軟管型錄油管類編號0501的產品，其安全工作壓力為11kgf/cm²，亦即此一高壓軟管之預估爆破壓力為44kgf/cm²。藉由略微調整Rebar的截面積參數（本文所選用之單束Rebar截面積為0.068mm²），以逼近此一規格軟管之破壞壓力，並運用相同的一組設計參數推廣應用於不同補強纖維密度（亦即纖維覆蓋率）以及更多層補強纖維（例如：商品型錄代號0502、0503）之高壓軟管的爆破壓力與工作壓力的預估。

本文之纖維強化高壓軟管模擬中，以合作廠商提供之單股纖維補強層纖維絲所能夠承載之張力負荷達到其斷裂負荷10+/-0.5 kgf作為高壓軟管爆破壓力之研判依據。另為簡化分析，本文中所有的材質均假設為線性彈性材料組成律。

四、分析結果與應用實例

4.1 Rebar Layer 應用於高壓軟管模擬實例之 1-纖維批覆層率變化之影響(編號0501 產品的纖維批覆率改變之影響模擬)

根據實地參訪位於某工業區高壓軟管製造公司的現場，其高壓軟管編織纖維補強層之編織機紗筒架(或稱紗錠數)數目有:12、24、32、48等四種。紗筒架的數目以及所編織的纖維補強層層數，即決定了纖維補強層的編織密度與纖維覆蓋率。圖5即為某高壓軟管編織機之紗筒架的示意圖：



圖5 高壓軟管編織機之紗筒架的示意圖

本章節中我們首先模擬分析之參考標的物相當於合作廠商高壓軟管型錄-油管類編號0501的產品。其補強纖維編織機的紗筒架數目為32。

4.1.1 編織機紗筒數32個之高壓軟管數值模擬

若採取標準編織機紗筒架數為32，每一紗束編織至橡膠管之近似寬度約為1.5mm，而假設纖維補強層所在位置橡膠軟管外徑為21.5mm。依此估算紗束之間隙(Spacing)為

$$\text{Spacing}=(\pi \times 21.5) / 32=2.125 \text{ mm}$$

式中， π (圓周率)=3.1416。

其結構分析模型之設計參數如下：

加強纖維線材(聚乙烯醇(PVA) fiber 丹尼數 1000dtex)

單股纖維強度(斷裂負荷)=10.0+/-0.5kgf(合作高壓軟管公司提供)

根據量測數據以及耐特公司型錄

單束 Rebar 截面積假設為 0.068mm²

負荷邊界條件，係以壓力 100kgf/cm² 施加於高壓軟管結構分析模型之內緣。

在有限單元結構分析模型中，以兩層 Rebar Layer 分別模擬與局部座標軸-軟管周向軸夾角 35.35 以及 144.75 度的纖維補強層。模擬纖維補強層之 Rebar Layers 則被拘束在 NBR 橡膠層以及 CR 橡膠層之間，以發揮其補強功能。數值模擬結果之編號 0501 高壓軟管中段結構之 Rebar Layer 纖維補強層之 Rebar Force 的分佈圖示於圖 6。其 Rebar Force 的最大值為 22.86kgf，這是產品型號為 0501 之高壓軟管承受 100kgf/cm² 內壓力的分析結果。

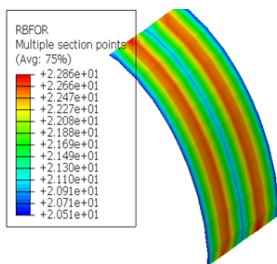


圖6 編織機紗筒數32之補強層Rebar Force分佈圖

而根據合作廠商提供之補強纖維線材(聚乙烯醇 PVA fiber)之強度(斷裂負荷)=10.0+/- 0.5kg，取其平均值為 10kgf。且假設高壓軟管所有組成材料都係屬於線性彈性材料組成律，則可推估編號 0501 之參考標地物高壓軟管，在標準編織機紗筒架數為 32 的情況下，其爆破壓力的近似值為：

$$P_{burst} = 100 \times \frac{10}{22.86} = 43.75 \text{ kgf / cm}^2$$

此一爆破壓力的預估數值與合作廠商型錄所提供編號 0501 高壓軟管爆破壓力值(44kg f/cm²)相當接近。

4.1.2 編織機紗筒數增加為 48 個時之高壓軟管數值模擬

若改變編織機紗筒架數目為 48 個紗筒，則補強纖維層之纖維束批覆率會增加，預期該高壓軟管所能承受壓力之能力也會增加，亦即其爆破壓力將會增加。在此，先估算紗筒架數目變更為 48 個時，高壓軟管之間隙變動如下：

$$\text{Spacing}=(\pi \times 21.5) / 48=2.8143 \text{ mm}$$

而其餘結構分析模型設計參數與前一章節完全相同。同樣以壓力 100kgf/cm² 施加於高壓軟管結構分析模型之內緣。

在此，首先假設紗筒架數增加為 48 個的分析狀況以增加補強纖維紗束批覆率，數值模擬結果之纖維補強型高壓軟管 Rebar Layer 纖維補強層之 Rebar Force 的分佈圖示於圖 7。其補強纖維層 Rebar Force 的最大值為 16.66kgf，這是合作廠商產品型號為 0501 之纖維補強型(編織紗筒架數增加為 48 個)高壓軟管承受 100kgf/cm² 內壓力的分析結果。

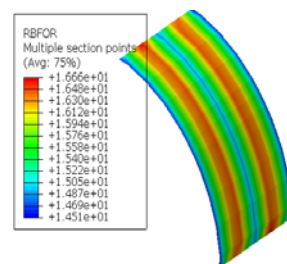


圖7 編織機紗筒數48之補強層Rebar Force分佈圖

根據合作廠商提供之補強纖維線材(聚乙烯醇 PVA fiber)之強度(斷裂負荷)=10.0+/-0.5kgf，取其平均值為 10kgf。且假設高壓軟管所有組成材料都係屬於線性彈性材料組成律，則可推估 0501 之纖維補強型(編織機紗架筒數增加為 48 個)高壓軟管，其爆破壓力的預測值為：

$$p_{burst} = 100 \times \frac{10}{16.66} = 60.02 \text{kgf} / \text{cm}^2$$

4.1.3 編織機紗架筒數減少為 24 個時之高壓軟管數值模擬

若改變編織機紗架筒數目由 32 個調降為 24 個紗架筒，則補強纖維層之纖維束批覆率會減少，預期該高壓軟管承受內壓力之能力也將會降低，亦即其預期爆破壓力會降低。在此，應用 ABAQUS 計算編織機紗架筒數目減少為 24 個時，高壓軟管纖維編織層之間隙值變動如下：

$$\text{Spacing} = (\pi \times 21.5) / 12 = 5.6287 \text{mm}$$

而其餘結構分析模型設計參數與前一章節完全相同。同樣以壓力 100kgf/cm² 施加於高壓軟管結構分析模型之內緣。

在此，假設編織機紗架筒減少為 24 個以降低補強紗束批覆率，有限單元數值模擬此一弱化型高壓軟管結果之 Rebar Layer 纖維補強層之 Rebar Force 的分佈圖示於圖 8。其 Rebar Force 的最大值為 28.15kgf，這是產品型號為 0501 之弱化型(編織機紗架筒數減少為 24 個)高壓軟管承受 100kgf/cm² 內壓力的分析結果。

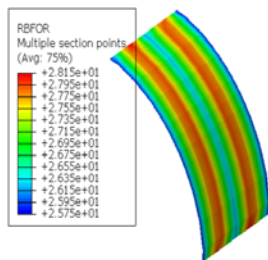


圖8 編織機紗架筒數24之補強層Rebar Force分佈圖

而根據合作高壓軟管製造廠商提供之線材(聚乙烯醇 PVA fiber)之強度(斷裂

負荷) =10.0+/-0.5kgf，取其平均值為 10kgf。且假設高壓軟管所有組成材料都係屬於線性彈性材料組成律，則可推估纖維批覆率降低之弱化型 0501 (編織機紗架筒數減少為 24 個)高壓軟管，其爆破壓力的預測值為：

$$p_{burst} = 100 \times \frac{10}{28.15} = 35.52 \text{kgf} / \text{cm}^2$$

4.2 Rebar Layer應用於高壓軟管模擬實例之2-補強纖維層數變化之影響(編號0502, 0503高壓軟管之模擬)

本節將以0501, 0502, 0503高壓軟管(對應之纖維補強層分別為1,2,3層)為例，預估當補強纖維層數變化時，對於高壓軟管的爆破壓力的影響。表2為合作廠商提供產品型錄之摘要資料：

產品編號	I.D內徑mm	Braid編織層數	管壁厚 度mm	工作壓力 kgf/mm ²
0501	15.9	1	3.5	11
0502	15.9	2	3.5	18
0503	15.9	3	3.5	21

表2 合作廠商提供之高壓軟管型錄摘要

其中，產品編號為0501的高壓軟管之模擬已經於上一節有詳盡的討論，故在此不在贅述。

4.2.1 纖維補強層數 2 層(產品編號 0502)

此一分析狀況以有 2 層編織纖維加強層之 0502 高壓軟管為對象，且若採取標準編織機紗架筒數與產品 0501 相同為 32 個，每一紗束編織至橡膠管之近似寬度約為 1.5mm，而假設纖維補強層之第 1 層所在位置橡膠管外徑為 21.5mm(編號 0501 產品量測值)。第 2 層所在位置假設為橡膠軟管外徑為 22.125mm(配合有限單元橡膠層分割網格)。

依此估算兩纖維補強層紗束之間隙值分別為

$$\text{Spacing \#1} = (\pi \times 21.5) / 16 = 4.2215 \text{mm}$$

$$\text{Spacing \#2} = (\pi \times 22.125) / 16 = 4.3442 \text{mm}$$

而其餘結構分析模型設計參數與前一章節完全相同。負荷邊界條件，同樣以

壓力 100kgf/cm² 施加於高壓軟管結構分析模型之內緣。

在有限單元結構分析模型中，以總共 4 層 Rebar Layer 分別模擬與局部座標軸-高壓軟管周向軸夾角 35.35 以及 144.75 度的之第 1 層以及第 2 層纖維補強層。其中，第 1 層纖維補強層(外徑為 21.5mm)之 Rebar Layers 被拘束在 NBR 橡膠層以及 CR 橡膠層之間，第 2 層纖維補強層(外徑為 22.125mm)之 Rebar Layers 被拘束在 CR 橡膠層之間，以協同發揮其纖維補強功能。有限單元數值模擬結果之 0502 高壓軟管中段結構的纖維補強層之 Rebar Force 的分佈圖示於圖 9。其中，第 1 層纖維補強層 Rebar Force 的最大值為 13.88kgf，第 2 層纖維補強層 Rebar Force 的最大值為 12.71kgf。這是模擬產品型號為 0502 之高壓軟管承受 100kgf/cm² 內壓力的分析結果。

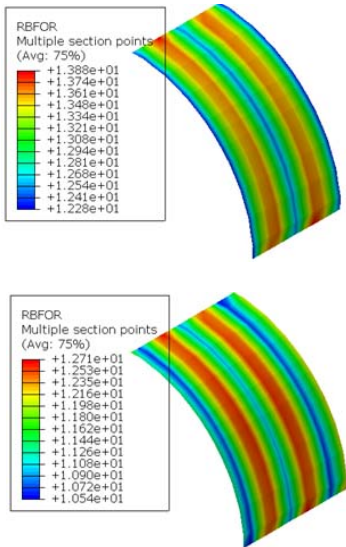


圖9 編號0502高壓軟管兩纖維補強層之 Rebar Force分布圖

而根據合作廠商提供之線材(聚乙烯醇 PVA fiber)之強度試驗值(斷裂負荷)為 10.0±0.5kg，取其平均值為 10kgf。且假設高壓軟管所有組成材料都係屬於線性彈性材料組成律，則可推估具有 2 層纖維補強層之高壓軟管(產品型號編號為 0502 之高壓軟管)在標準編織機紗架筒數為 32 個的情況下，其爆破壓力的近似值為：

$$p_{burst} = 100 \times \frac{10}{13.88} = 72.05 \text{ kgf} / \text{cm}^2$$

此一計算數值與根據合作廠商型錄經由工作壓力 18kgf/cm² 所預估之 0502 高壓軟管爆破壓力值(72kgf/cm²)亦屬相當接近。

4.2.2 纖維補強層數 3 層(產品編號 0503)

本節分析狀況以產品編號 0503 高壓軟管為模擬對象。若採取標準編織機紗架筒數為 32，每一紗束編織至橡膠管之近似寬度約為 1.5mm。在此，假設纖維補強層之第 1 層所在位置橡膠軟管外徑為 21.5mm(量測數據)。第 2 層所在位置橡膠軟管外徑為 22.125mm。第 3 層(最內層)所在位置橡膠軟管外徑為 20.7375mm。

依此估算 3 層纖維補強層紗束之間間隙分別為

$$\text{Spacing}=(\pi) \cdot 21.5 / 16=4.2215 \text{ mm}$$

$$\text{Spacing}=(\pi) \cdot 22.125 / 16=4.3442 \text{ mm}$$

$$\text{Spacing}=(\pi) \cdot 20.7375 / 16=4.0718 \text{ mm}$$

而其餘結構分析模型設計參數與前一章節完全相同。負荷邊界條件，同樣以壓力 100kgf/cm² 施加於高壓軟管結構分析模型之內緣。

在有限單元結構分析模型中，以總共 6 層 Rebar Layer 分別模擬與局部座標軸-軟管周向軸夾角 35.35 以及 144.75 度的之第 1 層以及第 2,3 層纖維補強層。其中，第 1 層纖維補強層(位置外徑為 21.5mm)之 Rebar Layers 被拘束在 NBR 橡膠層以及 CR 橡膠層之間，第 2 層纖維補強層(位置外徑為 22.125mm)之 Rebar Layers 被拘束在 CR 橡膠層之間，以協同發揮其纖維補強功能。第 3 層纖維補強層(位置外徑為 20.7375mm)之 Rebar Layers 則被拘束在 NBR 橡膠層之間。3 層纖維補強協同發揮其纖維補強功能。有限單元數值模擬結果之 0503 高壓軟管中段結構之 Rebar Force 的分佈圖示於圖 10。觀察此圖之分析結果顯示，第 1 層纖維補強層 Rebar Force 的最大值為 10.80kgf，第 2 層纖維補強層 Rebar Force 的最大值為 8.92kgf，第 3 層纖維補

強層 Rebar Force 的最大值為 8.09kgf。

而根據合作廠商提供之線材(聚乙烯醇 PVA fiber)之強度試驗值(斷裂負荷)為 =10.0+/-0.5kgf，取其平均值為 10kgf。且假設高壓軟管所有組成材料都係屬於線性彈性材料組成律，則可推估具有 3 層補強層之高壓軟管(產品型號為 0503)在標準編織機紗架筒數為 32 的情況下，其爆破壓力的近似值為：

$$p_{burst} = 100 \times \frac{10}{10.80} = 92.59 \text{ kgf} / \text{cm}^2$$

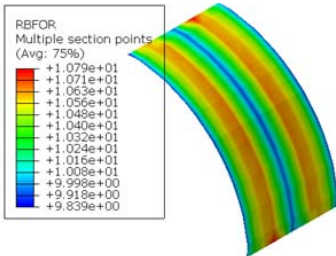
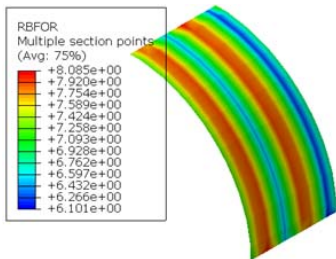
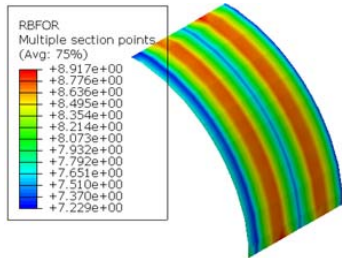


圖10 編號0503高壓軟管3纖維補強層之 Rebar Force分布圖(初估位置)

根據此一數值計算之工作壓力為 $92.59/4=23.15\text{kgf/cm}^2$ 與合作廠商高壓軟管編號0503產品型錄之工作壓力值 21kgf/cm^2 略有差異。其差異性產生的原因，推估係編號0503商品件第3層纖維補強層的確實位置與本節模擬多層補強纖維層之假設位置有所差異所導致。

以下嘗試略微調整第 3 層纖維補強層的位置(由於合作廠商並未提供纖維補強層確實位置)。假設纖維補強層之第 1 層所在位置位於橡膠軟管外徑為 21.5mm 處(量測數據)。第 2 層所在位置位於橡膠軟管外徑為 22.125mm 處。而調整第 3 層(最內層)所在位置位於橡膠軟管外徑為 19.975mm 處。

依此估算 3 層纖維補強層紗束之間的時間隙分別為

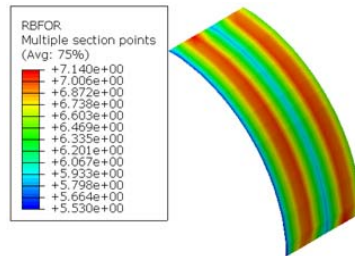
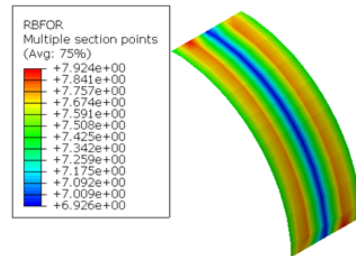
$$\text{Spacing}=(\pi()*21.5)/16=4.2215\text{mm}$$

$$\text{Spacing}=(\pi()*22.125)/16=4.3442\text{mm}$$

$$\text{Spacing}=(\pi()*19.975)/16=3.9221\text{mm}$$

而其餘結構分析模型設計參數與先前算例完全相同。負荷邊界條件，同樣以壓力 100kgf/cm^2 施加於高壓軟管結構分析模型之內緣。

有限單元數值模擬結果之編號 0503 高壓軟管中段結構 3 層 Reba Layer 纖維補強層之 Rebar Force 的分佈圖示於圖 11。其中，第 1 層纖維補強層 Rebar Force 的最大值為 7.92kgf，第 2 層纖維補強層 Rebar Force 的最大值為 7.14kgf，第 3 層(最內層)纖維補強層 Rebar Force 的最大值為 12.17kgf。



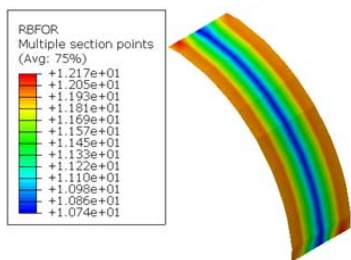


圖 11 編號 0503 高壓軟管 3 纖維補強層之 Rebar Force 分布圖(略微調整各補強層徑向位置)

合作高壓軟管公司提供之線材(聚乙烯醇 PVA fiber)之纖維強度(斷裂負荷)=10.0+/-0.5kgf，取其平均值為 10kgf。且假設高壓軟管所有組成材料都係屬於線性彈性材料組成律，則可推估具有 3 層纖維補強層之高壓軟管(相當於產品型號為 0503 之高壓軟管)在標準編織機紗架筒數為 32 的情況下，其爆破壓力的近似值修正為：

$$p_{burst} = 100 \times \frac{10}{12.17} = 82.17 \text{ kgf / cm}^2$$

根據此一爆破壓力數值計算之工作壓力為 82.17/4=20.54kgf/cm²，此一預估數值與配合公司高壓軟管產品 0503 型錄上之工作壓力值 21kgf/cm² 已經相當接近。

五、結論

1. 本文係針對工業用纖維強化高壓軟管結構之強勁度進行分析。期能建立一合理的數學模型，藉由一已知工作壓力及預期爆破壓力高壓軟管的結構(在此為型錄商品代號0501)，以及其內襯Nylon6層、NBR橡膠層、纖維補強層、以及外層之CR橡膠層的厚度、位置及機械性質，計算當補強纖維批覆率(亦即纖維密度)變化以及當纖維補強層層數增加時，此一數學模型亦能夠準確的預估其爆破壓力值。
2. 纖維強化高壓軟管各層構造結構當中，以纖維補強層的力學行為最難掌握。本文對於構造最為複雜的纖維加強層，係以與軟管周向局部座標軸夾

角35.25與144.75度之纖維束主軸方向(兩纖維束間夾角為109.5度)的兩層Rebar Layer來加以模擬，此兩層Rebar Layer則係以Embedded Element方式被拘束在NBR層與CR層橡膠之間，並提供高壓軟管之纖維補強的功能。由於高壓軟管其他結構層(除纖維強化層)的延展性甚佳，故當纖維補強層中任一股纖維束斷裂時，即會造成高壓軟管的瞬間爆破。

3. 本文面臨的另一問題為對於各層材料的掌握較為困難，尤其是纖維補強層的纖維束機械性質-不易準確地量測其截面積、以及其楊氏係數(亦即彈性模數)。另外，NBR與CR橡膠層在施加內壓力過程中，也可能達到大應變的材料非線性的範圍。為簡化問題起見，本文對高壓軟管各層材料僅考量線性彈性之材料組成律。
4. 本文的第1個應用實例，針對合作廠商高壓軟管型錄-油管類標號0501的產品進行模擬，其原先之補強纖維編織機的紗架筒數目為32，本文計算所得之爆破壓力值與產品型錄上之數值44kgf/cm²相當接近。若改變編織機紗架筒數目為48個紗架筒，則補強纖維層之纖維束批覆率會增加，預期高壓軟管承受壓力之能力也會增加，推估補強型0501(紗架筒數增加為48個)高壓軟管，其爆破壓力的預測值為60.0kgf/cm²。但若降低編織機紗架筒數目為24個時，則補強纖維層之纖維束批覆率會減少，預期該弱化型0501高壓軟管承受內壓力之能力也將會降低。計算結果顯示其爆破壓力的預測值為35.5kgf/cm²。
5. 本文的第2個應用實例，以產品型錄編號0502, 0503高壓軟管(對應之纖維補強層數分別為2,3層)為例，探討當補強纖維層數變化時，對於高壓軟管的爆破壓力的影響。針對有2層編織纖維補強層之0502高壓軟管，承受100kgf/cm²內壓負荷有限單元數值模擬結果之高壓軟管中段結構之第1層纖維補強層Rebar Force的最大值

為13.88kgf，第2層纖維補強層Rebar Force的最大值為12.71kgf。據此預估之爆破壓力值與根據合作高壓軟管製造公司型錄經由工作壓力18kgf/cm²所預估之爆破壓力值72kgf/cm²亦相當接近。

6. 本文另計算有3層編織纖維加強層之0503高壓軟管，承受100kgf/cm²內壓負荷有限單元數值模擬結果之第1層纖維補強層Rebar Force的最大值為7.92kgf，第2層纖維補強層Rebar Force的最大值為7.14kgf，第3層纖維補強層Rebar Force的最大值為12.17kgf。經由數值模擬之爆破壓力數值以計算操作壓力為20.54kgf/cm²，與合作廠商高壓軟管產品型錄之建議操作壓力值21.0kgf/cm²亦相當接近。
7. 根據本文探討的幾個應用實例，目前應用ABAQUS/Standard所建立的有限單元分析模式所得之高壓軟管爆破壓力或是操作壓力，皆與高壓軟管合作製造廠商所提供的產品型錄上之數值相近。相信本文所建立的數學分析模型可以應用在纖維補強型橡膠高壓軟管的產品開發應用上，而不需耗費大量的人工與金錢去進行昂貴又耗時的高壓軟管爆破壓力試驗。

六、參考文獻

- [1] ABAQUS Analysis User's Manual, Version 11.
- [2] ABAQUS/CAE User's Manual, Version 11.
- [3] ABAQUS Example Problems Manual, Version 11.