

自動車用ブレーキホースかしめ部の応力計算法の 提案と計算結果*

大田 健人¹⁾ 野田 尚昭²⁾ 金 俸基³⁾

Newly Proposed Stress Analysis for Crimped Portion of Hydraulic Brake Hose

Kento Ota Nao-Aki Noda Bongkee Kim

Usually, automobile high-pressure hose, such as hydraulic brake hose, has been developed through investigating several actual prototype hoses experimentally. Recently, high durability for brake hose has been required because periodic renewing the brake hoses has not been requested anymore. In this study, FEM stress analysis has been applied to the crimped portion of hydraulic brake hose in order to promote the development of the automobile hoses more efficiently. The sealing performance is discussed focusing on the normal stress between the nipple and inner rubber with varying several important geometrical dimensions of crimped portion.

Key Words: (Standardized) Computer-Aided Design (CAD)/Computer Aided Manufacturing/Computer Aided Engineering , Finite Element Analysis (FEM) (Free) Sealing Performance, Brake Hose(B2)

1. 緒言

ブレーキホースは一般的に、ゴムホースにスリーブを組み付け、外側から力を与えてスリーブに永久変形を加えることにより生じる、ゴムとニップル間の高い面圧によりシール性能を維持している。シール性能の向上のため、ニップルの表面やスリーブの内面に溝加工を施す場合もあるが、これらの設計・開発は主に実験や経験に基づいているため、大量の時間が費やされている。また、1995年、自家用乗用車及び自家用軽自動車のブレーキホースは定期交換部品制度の対象から除外された⁽¹⁾ため、ブレーキホースはより高い耐久性能が求められている。そのため、ゴム層の熱劣化や圧縮永久歪（へたり）、ならびにニップルの溝の有無がシール性能にどのような影響を及ぼすのかを解明することが求められている。このような点を考慮して、最近 FEM 解析も行われるようになり⁽²⁾、著者らも先に、図1に示すような、従来主に実験的デー

タに基づいて設計されていた高圧ホースのかしめ構造を、軸対称 FEM モデルを用いて定量的に解析する手法を検討した⁽³⁾。

本研究では、まず、かしめ部の形状がシール性に及ぼす影響を検討する。次に、かしめ部への外力がシール性に及ぼす影響を検討する。前者は、上記の 2 次元軸対称モデルを使用するが、後者は 2 次元軸対称モデルでは全ての外力の影響を解析できないため、新たに作成した 3 次元モデルを使用し、かしめ部シール性を定量的に解析する手法を検討する。

2. 解析条件

図2に内面ゴムおよび外面ゴムの応力ひずみ関係の実測値を示す。通常、ゴムの応力ひずみ特性は S 文字状の非線形曲線になるので、本研究の解析には、非線形モデルの Arruda-Boyce 材料モデルを使用する。ブレーキホースにはホース内部に補強用として PVA 素材の繊維層が使用されるが、解析用ソフトウェア上で繊維一本一本を定義するのが現状では困難なため、補強層は異方性弾性材料として断面形状を一致させることで材料定数を定義する。そして、補強層の材料定数である E_r , $E_\theta=E_z$, $\nu_r\theta$, $\nu_{rz}=\nu_{rz}$ を種々に変化させ、解析形状がかしめ後断面形状と最も一致する材料定数を求め、補強層のモデルとして使用する。ブレーキホースの解析ではホース構成を内面ゴム、補強層、外面ゴムの三層構造とし、この三層は完全接着されているものとする。ホースとニップル外面およびスリーブ内面は接触しており、摩擦係数を 0.3 とし、

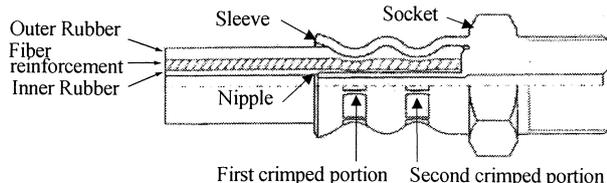


Fig. 1 Hydraulic brake hose with crimping

*2010年9月30日受理. 2010年9月30日自動車技術会秋季学術講演会において発表.

1)・2)・3)九州工業大学大学院(804-8550 北九州市戸畑仙水町1-1-1)

表1に解析に用いた材料物性値を示す。

表2より、補強層の材料定数は $E_r=40$ [MPa], $E_\theta=E_z=100$ [MPa]の時に内ゴム、補強層、外ゴムの第一かしめ部、第二かしめ部の誤差が最大でも10.1%以下となり最小となることが分かる。そこで補強層を異方性弾性体としてこの材料定数を使用

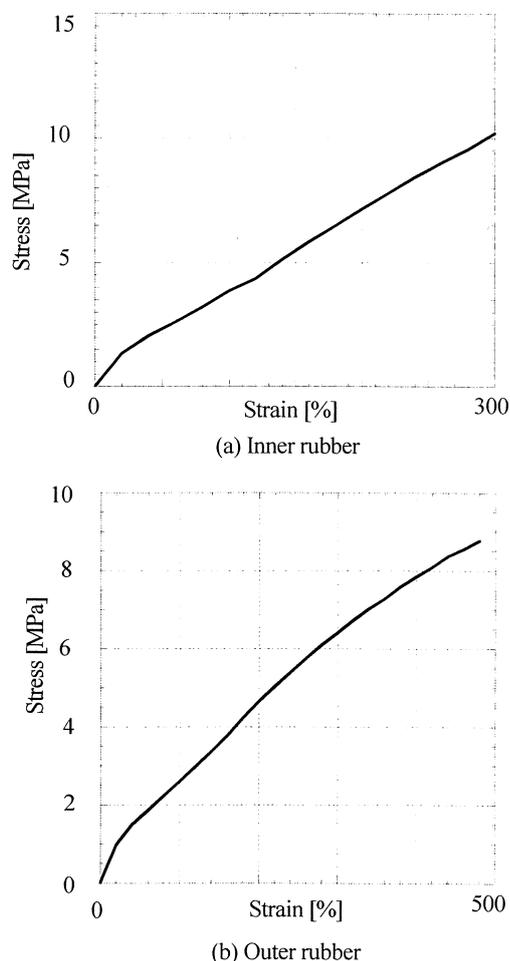


Fig.2 Stress strain relation of rubbers

Table1 Material data used in FEM analysis

	Material	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Outer Rubber	EPDM	Use of experimental data	Use of experimental data ($\nu \approx 0.45$)
Inner Rubber	EPDM	Use of experimental data	Use of experimental data ($\nu \approx 0.45$)
Fiber reinforcement in the r-direction	PVA	40	0.2
Fiber reinforcement in the θ - and z-directions	PVA	100	0.2
Sleeve	S10C	207000	0.29
	Rigid body (3D model)		
Nipple and Tool	Rigid body		

する。なお、ポアソン比を種々に変化させても、形状・応力共に、影響は小さいことが分かったので、 $\nu_r=\nu_\theta=\nu_z=0.2$ とした。

なお、本研究では、計算時間を短縮するため、3次元軸対称モデルで解析を行ない、外側からかしめ工具で全周を締め付けるような解析を行った。この際、工具・ニップルは変形が微小なため剛体として定義した。本解析における評価方法は、シール性能に影響する要因として、ニップル外面と内ゴム間に生じる垂直応力で評価を行う。

Table 2 Thickness of three layers

(a) First crimped portion

E_r [Mpa]	$E_\theta=E_z$ [MPa]		Inner rubber	Reinforcement	Outer rubber
40	100	Thickness[mm]	0.44	1.04	0.46
		Error [%]	4.8	4.0	-6.7
40	80	Thickness[mm]	0.43	1.03	0.48
		Error [%]	6.1	5.2	-11.8
60	100	Thickness[mm]	0.40	1.10	0.44
		Error [%]	11.8	-1.5	-1.2
40	120	Thickness[mm]	0.44	1.06	0.45
		Error [%]	3.1	2.9	-3
60	120	Thickness[mm]	0.42	1.1	0.42
		Error [%]	9.4	-2.1	2.6
Experiment		Thickness[mm]	0.46	1.08	0.43

(b) Second crimped portion

E_r [Mpa]	$E_\theta=E_z$ [MPa]		Inner rubber	Reinforcement	Outer rubber
40	100	Thickness[mm]	0.66	1.15	0.51
		Error [%]	10.1	-9.9	0.2
40	80	Thickness[mm]	0.66	1.13	0.53
		Error [%]	9.7	-8.5	-4.7
60	100	Thickness[mm]	0.64	1.20	0.48
		Error [%]	13.1	-15.0	4.7
40	120	Thickness[mm]	0.66	1.16	0.49
		Error [%]	9.7	-11.1	3.9
60	120	Thickness[mm]	0.65	1.21	0.47
		Error [%]	11.6	-15.6	7.7
Experiment		Thickness[mm]	0.73	1.04	0.51

3. かしめ部の形状がシール性能に及ぼす影響

図3(a)にブレーキホースのかしめ部の実際の形状の例を示す。図3(a)では長さ l_{c0} mmの工具で2ヶ所かした形状となっており、これは実験や経験を基に設計されている。そこで、FEM解析によって内面ゴムとニップル間の σ_r に注目してかしめ形状がシール性能に及ぼす影響を検討する。かしめ部の形状でシール性能に影響を及ぼす要素としては、かしめ部の長さ、数、間隔、かしめ量などが挙げられる。

3. 1. かしめ部の長さがシール性能に及ぼす影響

かしめ部を1ヶ所とし、かしめ量 Δu_2 を一定としてかしめ部の長さを変化させた場合、シール性能にどのような影響を及ぼすかを調べる。図3(a)~(c)にかしめ部の長さの影響を

調べるために用いた解析モデルを示す。ここでは、かしめ量 Δu_2 は実際のブレーキホースの第2 かしめ部と同じとする。かしめ部の長さは実際のブレーキホースと同じ l_{c0} mm のモデルと、かしめ部長さの影響を調べるために6mm としたモデルを用いて、内面ゴムとニップル外面との間の垂直応力でシール性能を評価する。

図4にかしめ部の長さを変化させた場合の垂直応力を示す。これを見ると、かしめ部の長さが大きくなるにつれ、高い垂直応力が生じる範囲が大きくなっていることがわかる。また、

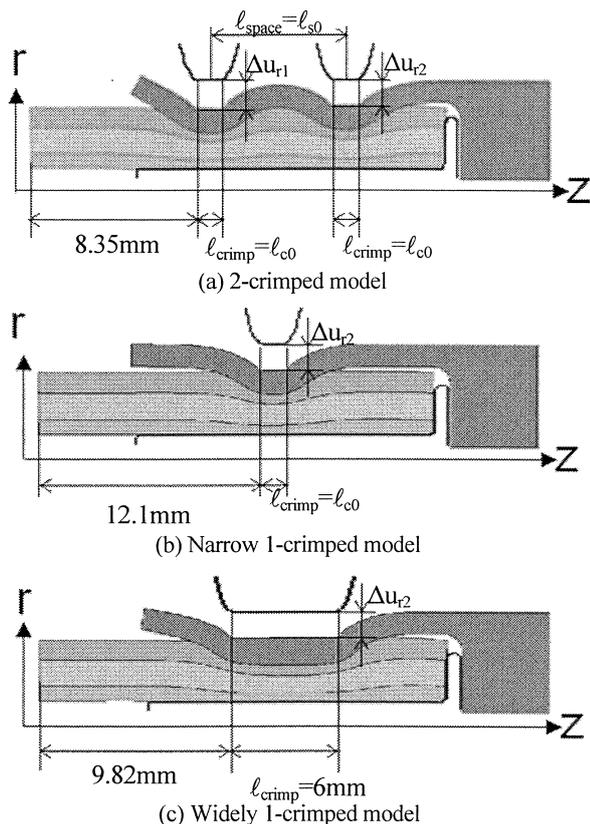


Fig.3 Model for the effect of caulked length

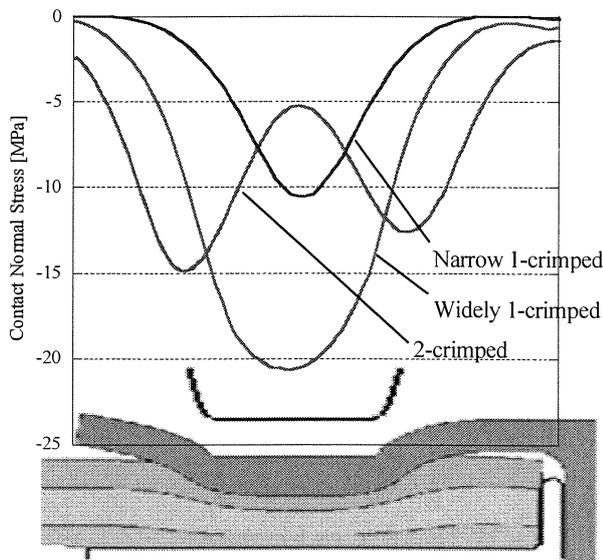


Fig.4 Relationship between σ_r and caulked length

かしめ部の長さが大きくなるにつれ、最大垂直応力も増加していることがわかる。すなわち、かしめ量が一定でも、かしめ部の長さが大きくなると高い垂直応力が生じる範囲が大きくなるだけでなく、最大垂直応力も増加することが明らかとなった。図5にかしめ部長さ $l_{crimp} = l_{c0}$ mm の工具で2ヶ所かしめた図3(a)の場合と、長さ $l_{crimp} = 6$ mm の工具で1ヶ所かしめた図3(c)の場合に生じた主ひずみを示す。これを見ると、ゴムホースに生じた主ひずみの最大値にはあまり差がないため、かしめ部の長さを変えた場合でもかしめ過程においてゴムの損傷に影響はないと考えられる。しかし、補強層に着目すると、かしめ部長さ6mmの場合では主ひずみが生じる範囲が大きくなっていることがわかる。しかし、補強層に生じるひずみの最大値には大きな違いは認められない。

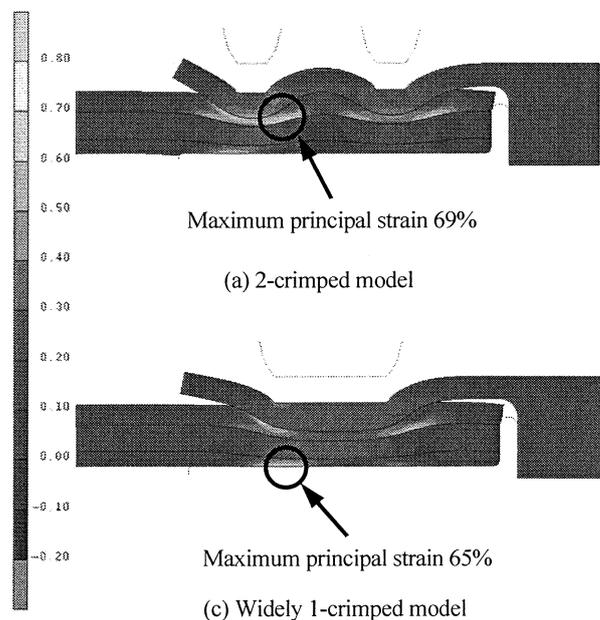


Fig.5 Principal strain for model (a) (c) in Fig.3

3. 2. かしめ部の数がシール性能に及ぼす影響

かしめ部の長さを一定としてかしめ部の数を変化させた場合に、シール性能にどのような影響を及ぼすのかを調べる。図6(a) (b) (c)にかしめ部の数の影響を調べるために用いた解析モデルを示す。かしめ部の長さは全て l_{c0} mm とし、かしめ量は実際の例図3(a)を参考にして第1 かしめ部 Δu_{r1} 、第2 かしめ部 Δu_{r2} 、第3 かしめ部 Δu_{r3} ($\Delta u_{r1} > \Delta u_{r2} > \Delta u_{r3}$) を設定した。これらの解析モデルを用いて、かしめ部の数を変化させた場合の内面ゴムとニップル間の垂直応力でシール性能を評価する。

図7にかしめ部の数を変化させた場合の垂直応力を示す。これを見ると、かしめ部の数が多くなるにつれ、高い垂直応力が生じる範囲が大きくなっていることがわかる。また、第1 かしめ部で生じている最大垂直応力に着目すると、かしめ量が一定でも、かしめ部の数が多くなるにつれ、最大垂直応力

も増加していることがわかる。このことにより、かしめ部の数が大きくなると高い垂直応力が生じる範囲が大きくなるだけでなく、最大垂直応力自体も増加すると考えられる。

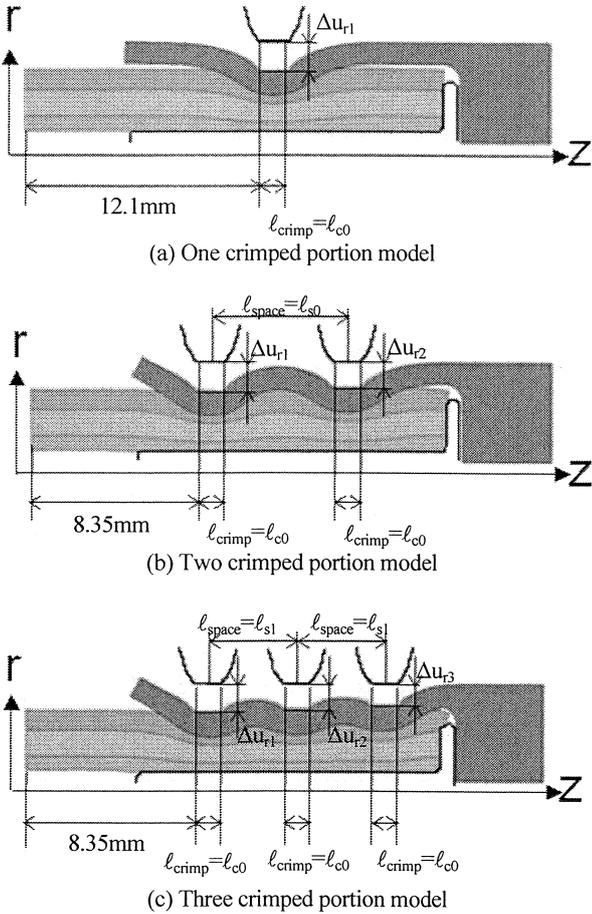


Fig.6 Model for the effect of number of crimped portion

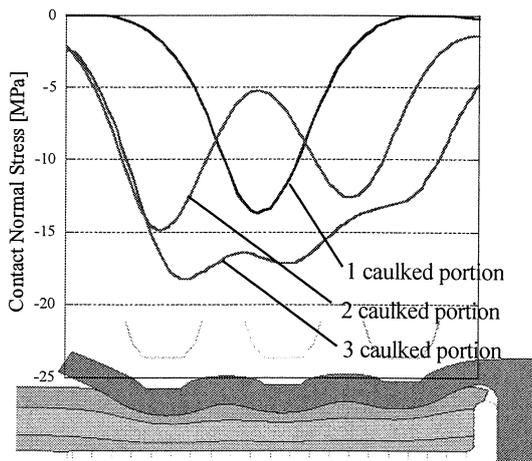


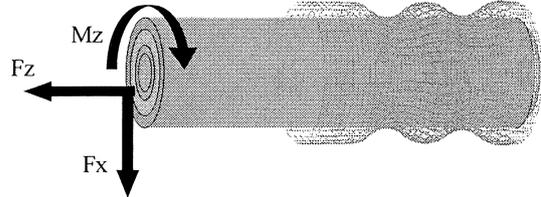
Fig.7 Relationship between σ_r and number of crimped portion

4. かしめ後の外力による影響

車に配管したブレーキホースは路面からの上下運動、ハンドル操作によるねじり運動、ブレーキングによる圧力といった複雑な外力を受ける。そこでかしめをおこなった新品のブレーキホースに引張り、曲げ、ねじり荷重など与えることで

これらの外力を想定しシール性能にどのような影響を与えるか検討する。解析条件と荷重方向については表 3 に示す。CASE1 として引張り・圧縮荷重 F_z 、CASE2 では曲げ荷重 F_x 、CASE3 にねじりモーメント M_z の外力を想定し与えられた荷重条件において解析を行った。

Table3 Condition of the external force



	CASE1 Tension/Compression	CASE2 Bend	CASE3 Torsion
F_z	$\pm 10(N)$ $\pm 100(N)$	0	0
F_x	0	$10(N)$	0
M_z	0	0	$1(N \cdot m)$
FEM Model	2D	3D	3D

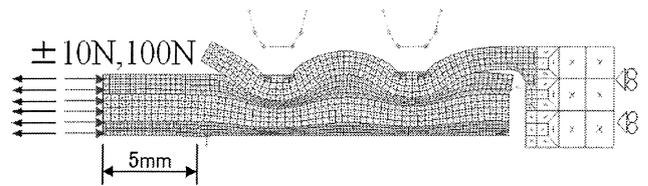


Fig.8 Axial force model

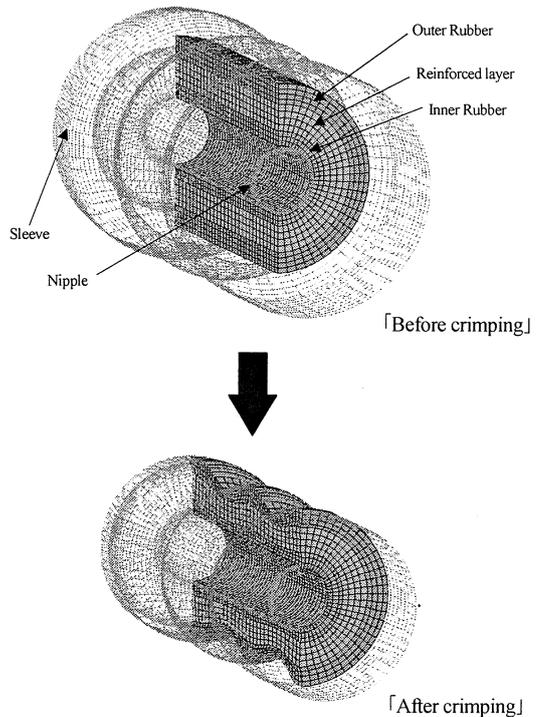
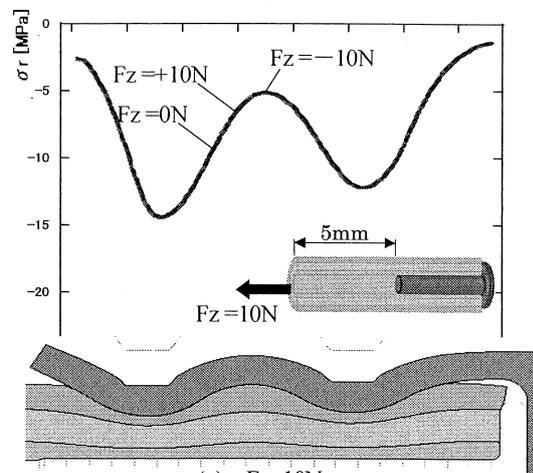
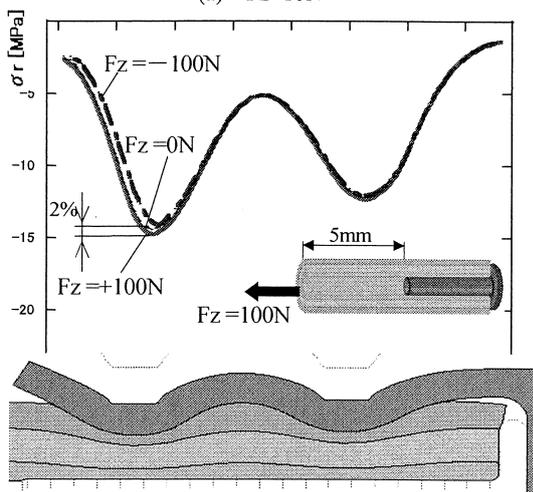


Fig.9 FEM model for 3D Analysis

CASE 1 の引張・圧縮荷重を与えたときのシール性能への影響を検討する軸対称モデルを図 8 に示す。ホース端部に与える荷重は $\pm 10\text{N}$, 100N とする。図 10 に引張・圧縮荷重 F_z を与えた場合のニップル-内面ゴム間の垂直応力 σ_r を示す。図 10 (a) では荷重の影響がほとんど見られない。図 10 (b) は安

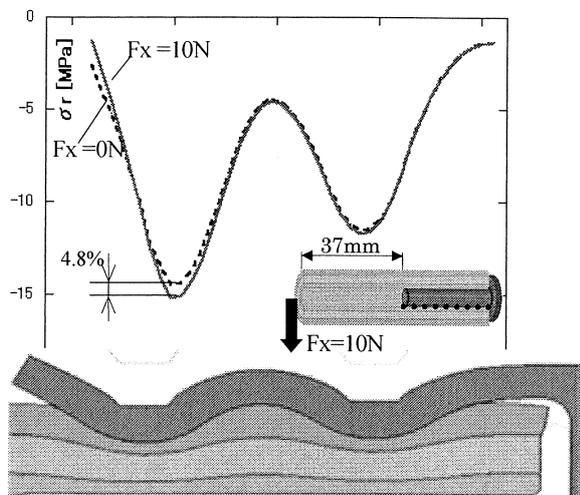


(a) $F_z=10\text{N}$



(b) $F_z=100\text{N}$

Fig.10 The effect of F_z on σ_r



(a) σ_r at the bottom of nipple

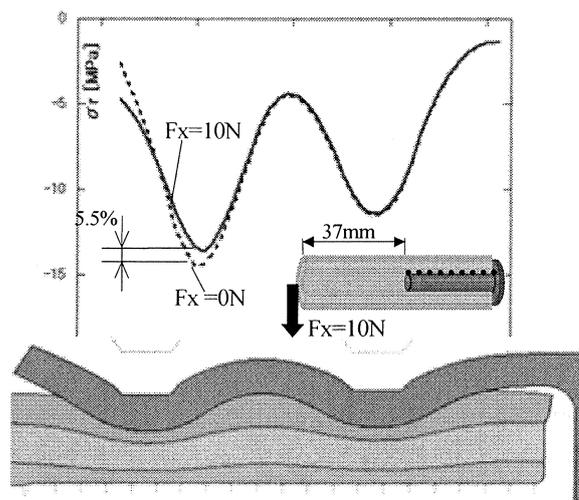
Fig.11 The effect of F_x on σ_r

全のために想定される荷重の10倍である $F_z=100\text{N}$ を作用させたが、この場合でも σ_r が約 2%しか変わらない。よって引張・圧縮荷重のシール性能への影響は無視できるものと考えられる。

CASE2 の曲げ荷重 $F_x=10\text{N}$ のシール性能への影響の解析は 3 次元モデルによって行った。その結果を図 11 (a) (b) に示す。図 11 (a) よりニップル下部では $F_x=10\text{N}$ の荷重で σ_r が 4.8%増加する。一方、図 11 (b) のニップル上部では σ_r が 5.5%減少する。よって曲げ荷重のシール性能への影響はあまり大きくない。なお、図 11 (a) (b) で $F_x=0$ の場合も 3 次元モデルで解析を行ったが、その結果は軸対称モデルの結果と 0.1%以内で一致しており解析の精度が高いことが確認できた。

CASE3 のねじりモーメント $M_z=1\text{N}\cdot\text{m}$ を与えた場合の結果を図 12 に示す。これを見ると、 M_z の影響はほとんど見られない。

これらの結果より、引張・圧縮、曲げ、ねじりのいずれの外力もシール性能への影響はほとんど無視できるものと考えられる。



(b) σ_r at the top of nipple

Fig.11 The effect of F_x on σ_r

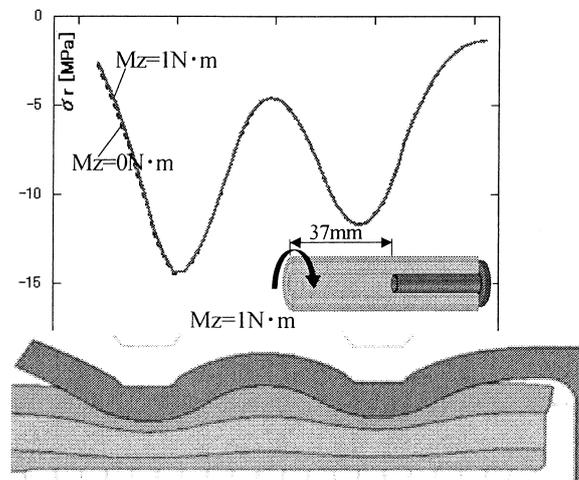


Fig.12 The effect of M_z on σ_r

5. 結 論

(1) かしめ部の長さを大きくすると、高い垂直応力が生じる範囲が大きくなるだけでなく、ニップル-内面ゴム間の最大垂直応力自体も増加する。また、平がしめは補強層に生じるひずみの範囲が大きくなることが明らかとなったが、補強層に生じるひずみの最大値には大きな違いは認められない。

(2) かしめ部の数を増やすと、かしめ部の長さを大きくした場合と同様に高い垂直応力が生じる範囲が大きくなるだけでなく、最大垂直応力自体も増加する。

(3) 走行中にブレーキホースが受ける引張・圧縮、曲げ、ねじりなどの外力がシール性能に及ぼす影響を調べた結果、ニップルと内面ゴム間に生じる σ_r の変化は5.5%以下であり、外力の影響は無視できると推定される。

参 考 文 献

- (1) Ishikawa, T., Hagiwara, H., Uno, A., Brake Hose with High Durability and Low-cost, Hitachi Cable, No.20, p.137-142 (2001)
- (2) Ishii, K., FEM Analysis for Crimp of Hydraulic Brake Hose, Technical Report of Meiji Rubber & Chemical, Vol.44, p.3-6 (2003)
- (3) Noda, N.-A., Yoshimura, S., Kawahara, H. and Tuyunaru, S., FEM Analysis for Sealing Performance of Hydraulic Brake Hose Crimped Portion and Its Life Estimation, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.74, No.748, pp.54-59