

# FEMを用いた複撚りコードの初期伸び予測技術

## Estimation of Initial Stretch of Multi-strand Cord by FEM

藤田 崇史\*  
Takashi FUJITA

大橋 章一  
Shoichi OOHASHI

樽井 敏三  
Toshimi TARUI

### 抄 録

タイヤ製造時、ゴム内のコードは伸ばされることになるため、初期伸びが必要となる。しかし、撚り構造が複雑になると、初期伸びを予測することが困難になる。FEMを用いて初期伸びを予測する方法について検討し、初期伸びの弾性率は各々の素線が他の素線に接触しない状態の弾性率に、弾性伸びの弾性率は各々の素線が密着した状態の弾性率に等しいことを示した。初期伸びの大きさはFEMで推定可能であることを示した。

### Abstract

It is necessary to give initial stretch on tire cord because they are stretched in tire production procedres. However, it is difficult to predict initial stretch in complicated cord structures. We have studied how to predict initial stretch in complicated cord using FEM. We suppose Young's modulus of initial stretch in the state that wire does not contact at all, and that Young's modulus of elastic stretch is equal to the one of cord in the state that wire makes full contact. It was shown that the initial stretch can be predicted by FEM.

## 1. 緒 言

複数の部品で構成されている構造物を引っ張ると、図1の模式図に示すように初期伸びと呼ばれる伸びが生じる。この伸びは、橋梁のロープ<sup>1)</sup>やチェーン<sup>2)</sup>等の実使用環境では極力小さくなるよう努力がはらわれている。

しかし、製造過程において初期伸びが有効となる場合も

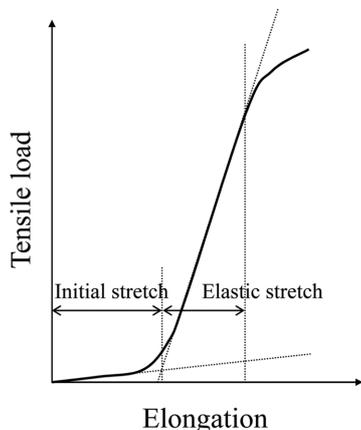


図1 コードの荷重-伸び曲線模式図  
Model diagram of load-elongation curve of steel cord

ある。タイヤ製造時、コードが挿入された生タイヤは、トレッドの刻まれた型に挿入され、内圧を掛けられて型に押し付けられることで、トレッドが形成される。この時、ゴム内のコードは伸ばされることになるため、数%程度の初期伸びを持ち、かつタイヤ製造後は初期伸びが現れないように製造されている。近年コードの撚り構造が多様化・複雑化しており、初期伸びの予測および制御が困難になってきている。実際にコードを撚らずに初期伸びの予測が可能か、FEMを用いて検討を行った。

解析を行うに当たり、M. Roshan Fekr<sup>3)</sup>や野々らのコードの曲げ変形時の応力解析<sup>3,4)</sup>や王らの撚り加工時のコードの変形・歪・応力解析<sup>5)</sup>を参考にした。

## 2. 試験材および実験方法

実験および解析を行うに当たり、玉田らの公開特許広報<sup>6)</sup>を参考にし、ワイヤ径、撚り構造、コードピッチ、ストランドピッチを決定した。

図2に示す応力-歪特性を持つ0.11mm径のワイヤを用いてピッチ1.15mmの1×4×0.11ストランドを作製し、引張試験を行った。更に表1の5×4×0.11構成の複撚りコードを作製し、引張試験を行った。

\* 鉄鋼研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

本研究で用いた複撚りコードの有限要素モデルの例を図3および図4に示す。図3は1×4×0.11ストランドピッチ1.15mmのストランドを模擬したもので、2ピッチ長のモデルを作成した。このモデルは、どのような場合に初期伸びが生じるのか検討することを目的としたモデルである。図4は5×4×0.11ストランドピッチ1.42mm、コードピッチ2.8mm、1ピッチ長のモデルであり、引張試験の検証用のモデルである。引張試験検証用およびストランド

表2 結果一覧  
List of results

Specimen	Strand pitch	Cord pitch	Initial stretch	
			Exp.	Calc.
A	1.42mm	3.5mm	3.0%	3.2%
B		2.8mm	3.5%	4.2%
C	1.15mm	2.3mm	4.1%	4.4%

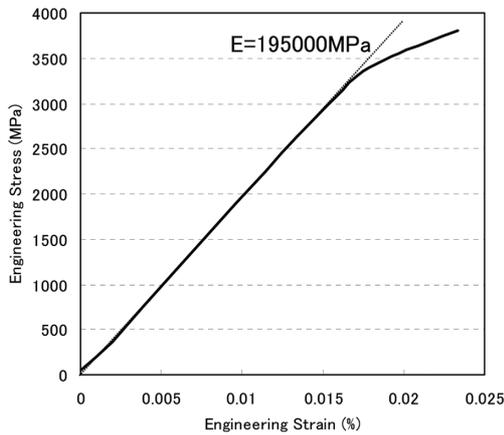


図2 ワイヤの応力-歪曲線  
Stress-strain curve of steel wire

表1 コードの構成  
Cord structure used for the examination

Specimen	Strand pitch	Cord pitch
A	1.42mm	3.5mm
B		2.8mm
C	1.15mm	2.3mm



図3 1×4×0.11ストランドのモデル  
1×4×0.11 strand model for FEM

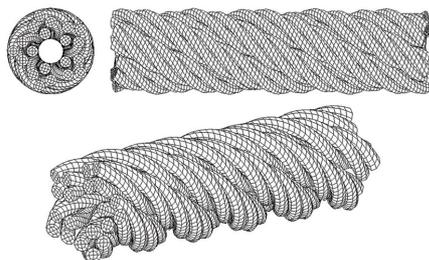


図4 5×4×0.11コードのモデル  
5×4×0.11 cord model for FEM

ピッチとコードピッチの影響を調査することを目的として、表2のモデルを作成した。なお、各々の素線の形状<sup>7)</sup>は自製のソフトウェアで作成し、作成した形状を元にMARCでFEM計算を行った。

以下、計算条件を述べる。端面の拘束は素線1本1本について行い、端面の一方を変位制御ノードA点を介して位置拘束し、他方も同様に変位制御ノードB点を介してコードの軸線方向の変位を与えた。初期端面の法線ベクトルはコード軸線に対しある角度を持っているが、コードを伸ばした時、その角度は小さくなると考えられるので、端面の回転は自由とした。図3のモデルであるなら4本の素線、図4のモデルであるなら20本の素線に対し各々同一の設定を行い、変位制御ノードB点の変位と荷重をサンプリングした。

なお、実際の試験片には、撚り加工時に生じた塑性変形により、加工硬化および残留応力があると考えられるが、本研究の解析目的が初期伸びの推定を目的とした低応力時の解析であるため、初期歪、初期応力は考慮せず、解析は弾性解析とした。計算に用いた材料常数は、図2から得られた弾性率195000MPaとポアソン比0.3を用いた。素線間の摩擦は0とした。

### 3. 試験結果および解析

#### 3.1 1×4×0.11の試験結果と解析

図5に1×4×0.11ストランドの引張試験と解析結果を示す。当初、ストランドを密に巻いたモデルで計算を行っ

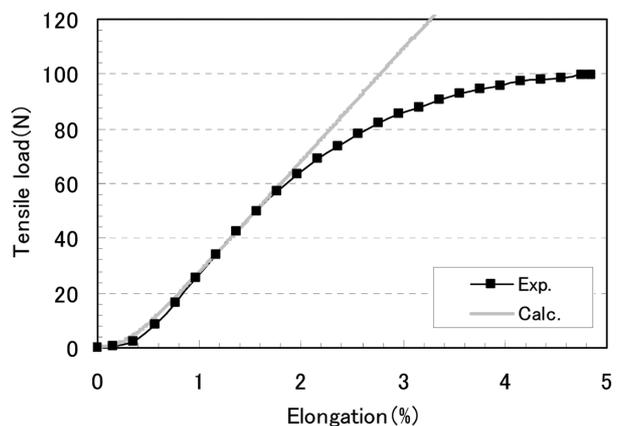


図5 1×4×0.11ストランドの荷重-伸び曲線  
Load-elongation curve of 1×4×0.11 strand

たが、初期伸びが出なかったため、素線間に隙間を設けたモデルを作成し、実測値と良い一致を得た。このことから、初期伸びの発現には素線間の隙間が必要であることが判る。

初期伸びの間、素線は他の素線に拘束されることなく変形していると考え、図3のモデルを図6に示したように分解し、各々の素線が他の素線にぶつからないようにして引張った場合について計算を行った。結果を図7に示す。図7は図5の初期伸びの部分拡大した図であり、図中示した“単純ばね”が図6モデルの計算結果である。初期伸びの領域において、単純ばねモデルで概ね予測可能と考える。

上記では実測値と良い一致と述べたが、図7の計算結果は0.2%~1.0%の領域において実測値より高い値を示している。しかしながら、1.0%~1.8%の弾性伸び領域ではほぼ重なっており、計算では初期伸びと弾性伸びの間に遷移領域が存在していることを示している。この遷移領域ではどのような現象が生じているのか解析した結果、0~0.2%の計算上初期伸びを示している領域では素線間は点接触であるのに対し、0.2~1.0%の領域では計算ステップ毎に点接触の数が増えて一部線接触になり、1.0~1.8%の弾性伸びの領域では全面線接触になっていることが判った。実測値では、計算でみられた遷移領域がほとんど観察されず、点接触から全面線接触への移行が速やかに生じている

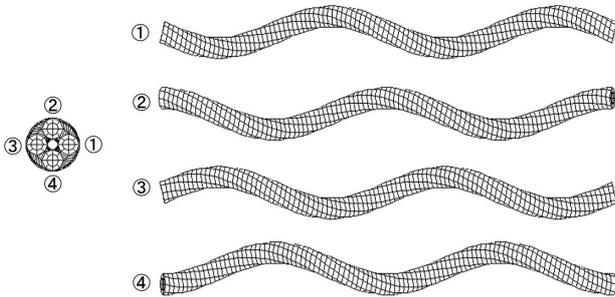


図6 単純ばねモデル(1×4×0.11ストランドを分解したモデル)  
Simple springs model which decomposed 1×4×0.11 strand

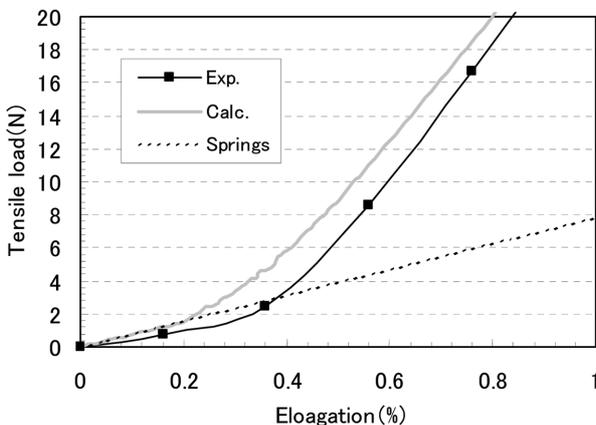


図7 1×4×0.11ストランドの荷重-伸び曲線  
Load-elongation curves of 1×4×0.11 strand

と考えられる。

本研究の計算では、用いたモデルが2ピッチ長と、実際の引張試験の試験片長に比べかなり短いものとなっている。このため、端面の拘束条件の影響が出たものと推測している。ピッチ長の影響の明確化が今後の課題である。

### 3.2 5×4×0.11の試験結果と解析

図8に5×4×0.11コードの引張試験結果を示す。試験片A<B<Cの順に初期伸びが大きくなり、弾性伸び時の弾性率が低下する傾向が現れている。

図4には5×4×0.11ストランドピッチ1.42mm、コードピッチ2.8mm、1ピッチ長のモデルを示したが、同様に5×4×0.11ストランドピッチ1.42mm、コードピッチ3.5mm、1ピッチ長のモデルと5×4×0.11ストランドピッチ1.15mm、コードピッチ2.3mm、1ピッチ長のモデルを作成した。なお、素線間の隙間は1×4×0.11と同等とした。

まず、初期伸び時の弾性率が単純ばねモデルで再現可能か確認するために、作成したモデルを素線毎にばらばらにし、各々の素線が他の素線にぶつからないようにして引張った場合について計算を行った。結果を図9に示す。多

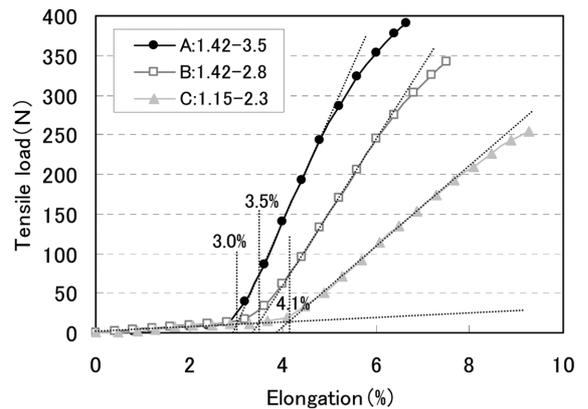


図8 5×4×0.11コードの荷重-伸び曲線  
Load-elongation curves of 5×4×0.11 cord

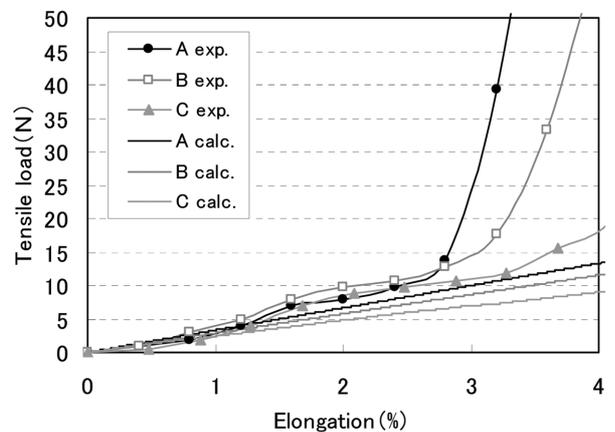


図9 実測値と単純ばねモデルとの比較  
Comparison with the experimental results and the calculated results by simple springs model

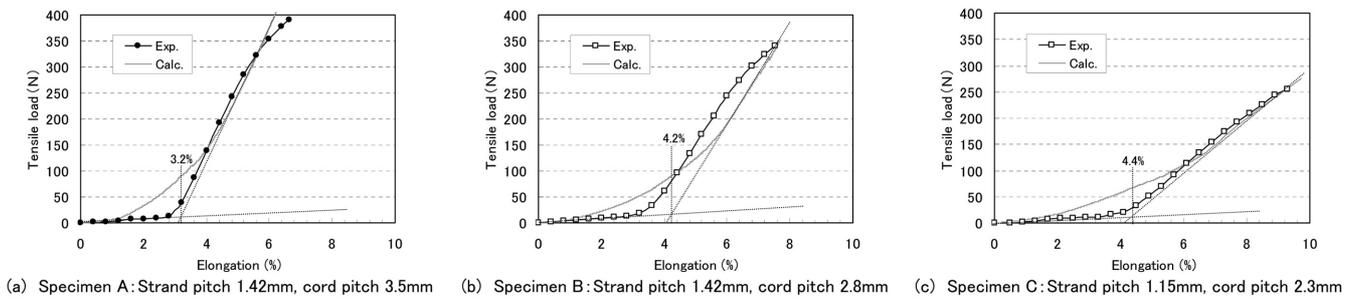


図10 5×4×0.11コードの変形特性, 計算値との比較

Comparison with the experimental results and the calculated results, load-elongation curve of 5×4×0.11 cord

少実測値の方が高くなる傾向が見られるが、複撚りにおいても初期伸び時の弾性率は単純ばねモデルで予測可能であることが判る。

次に、ばらばらの素線を複撚りコードとして組み上げて計算を行った。計算結果を図10に示す。図には実測値、計算値以外にも各々2本ずつ補助線が引かれているが、低弾性の補助線は単純ばねモデルで得られた弾性率を元にした補助線であり、高弾性の補助線は複撚りコードモデルでほぼ直線状になった領域を元にした補助線である。この2直線の交点を計算で得られた初期伸びとしている。なお、高弾性の補助線は実測値の弾性伸び領域の傾きにほぼ等しく、弾性伸び時の弾性率も推定可能である。

結果の一覧を表2に示す。全体的に計算値の方が大きめの値となること、試験片Bにおいて多少実測値との乖離が見られること、単純ばねから弾性伸び間の遷移領域が実測値に比べ大きいこと等の問題点はあるものの、初期伸びの大小関係を推定可能な程度の精度は確保できていると考えている。

なお、本研究の計算では1コードピッチ長とモデル長さが短いため、1×4×0.11ストランドモデルと同様、端面拘束の影響により単純ばねから弾性伸び間の遷移領域が実測値に比べ大きくなったと考えている。ただし単純に計算ピッチ長を長くするだけでは、計算時間が掛り、計算の不安定性も増すため、拘束条件の再検討およびソルバーの変更等の検討も必要と考える。

#### 4. 結 言

FEMを用いて複撚りコードの初期伸びのシミュレーションを行った結果、初期伸びの弾性率は各々の素線が他の素線にぶつからないようにして引張った時の弾性率に、弾性伸びの弾性率は各々の素線が完全線接触し、素線間の隙間が無くなった時の弾性率に等しいことが判った。また、初期伸びの大きさは、単純ばねモデル(初期伸び弾性率)と複撚りコードモデル(弾性伸び弾性率)から得られ

る2本の補助線の交点により、推定可能であることが判った。一方、研究を進める過程でいくつかの問題点も明らかとなり、今後、これらの課題を解決していくことが重要である。

#### 参照文献

- 1) 下村 稔: 日本機械学会誌. 101 (952), 144-145 (1998.03)
- 2) 川合豊彦: 特殊鋼. 45 (12), 10-13 (1996.12)
- 3) Fekr, M.R., McClure, G., Farzaneh, M.: Comput Struct. 72 (1/3), 301-316 (1999.07)
- 4) 野々一義, 高橋秀雄, 飯塚 博: 日本機械学会論文集 C. 73 (730), 1834-1839 (2007.06.25)
- 5) 王 桂蘭, 相沢龍彦, 木原諄二, 村上卓也, 蔵重新次: 塑性と加工. 39 (453), 1075-1080 (1998.10)
- 6) 日本公開特許広報. 特開2010-180483. 2010年8月19日
- 7) 小野 進: 工学の数学—ワイヤロープの微分幾何学—. 初版, 東京, (株)アグネ技術センター, 2005, p. 213



藤田崇史 Takashi FUJITA  
鉄鋼研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員  
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



大橋章一 Shoichi OOHASHI  
釜石製鐵所 製造部 マネジャー



樽井敏三 Toshimi TARUI  
鉄鋼研究所 棒鋼・線材研究部長 工博