

卒業論文

有限要素法解析を用いた素線断線による
ワイヤロープの力学的特性の変化の評価

03-190195 笹倉 まお

指導教員 泉 聡志 教授(泉)

有限要素法解析を用いた素線断線によるワイヤロープの力学的特性の変化の評価

笹倉 まお 指導教員 泉 聡志 教授

Keywords: Wire Rope, Finite Element Analysis, Wire Breakage, IWRC, Fatigue

1. 緒言

クレーン用ワイヤロープ(以下、ロープ)は、その複雑な構造ゆえに、内部素線の挙動の予測や、応力、接触圧力の計測が困難である。そこで、数値解析による内部素線接触状態及び応力状態の可視化が、ロープ破断特性解明に有効となる[1]。

本研究では、Fig.1のように、IWRC 6×Fi(29)ロープの全素線を詳細に再現した有限要素モデルで素線断線が周囲の素線に及ぼす影響を調べる。

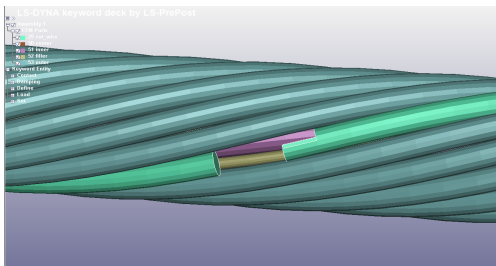


Fig. 1 FEM model of strand

2. Fi(29)ストランド引張解析

Fig. 2に示すように、素線1が断線した場合の、素線1,素線2,16の主応力の長さ方向の分布を示す。素線1の応力低下は50mmの範囲に収まること、周辺の素線2,16は50mmの範囲で数十MPaの応力の上昇が生じることがわかった。素線1の断線の影響は局所的に留まる。

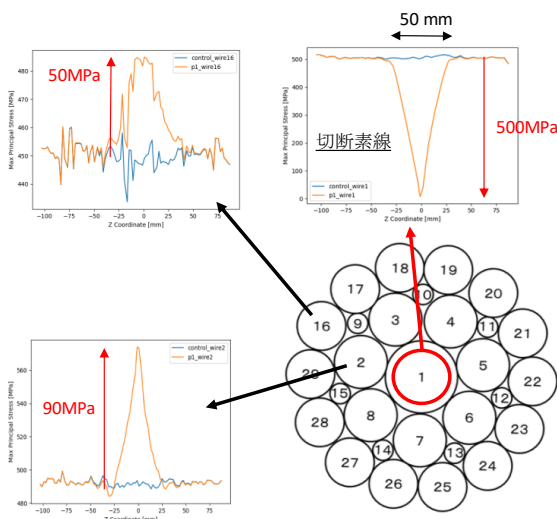


Fig. 2 stress distribution along length direction

Fig. 3に素線2が断線した場合の素線1,2,16の応力分布を示す。素線2の応力低下の影響は200mmに及び素線1よ

りも広いことがわかる。これは素線の拘束状態の違いによると考えられる。

また、素線9が断線した場合は素線9が細いため、周への影響は小さく10MPa程度の応力上昇しか起こらないことがわかった。

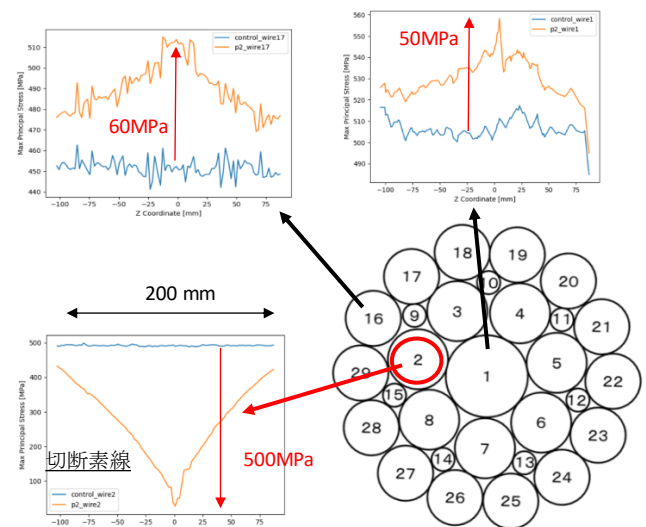


Fig. 3 stress distribution along length direction

3. ロープ引張解析

ロープモデルを作成し、鋼心のIWRCの素線が断線した時の、周囲の素線の応力分布を調べた。ロープの素線の応力分布は形状の非対称のためストランドより複雑になるが、IWRCの素線への影響はFi(29)ストランドモデルと同様の傾向がある。

同様に、Fi(29)の素線が断線した場合を検討したが、IWRCの素線への影響は小さいことがわかった。

4. 結言

Fi(29)ストランド解析より、断線の影響は周囲の素線に及ぶこと、素線の拘束状態に影響されることがわかった。

ロープ解析より、鋼心IWRCは、同じストランド内の断線はストランド解析と同様に影響を受けるが、異なるストランドの断線は影響を受けないことがわかった。

参考文献

- [1] 太田仁衣奈ら,日本機械学会論文集 Vol.88, No.913 (2022), 22-00144.

目次

第 1 章	序論.....	9
1.1	研究背景	9
1.2	先行研究	10
1.2.1	ロープ研究の基礎	10
1.2.2	ロープ有限要素モデルの開発	11
1.3	本研究の新規性と研究目的	11
1.4	本論文の構成	12
第 2 章	直ストランド引張解析.....	13
2.1	解析モデル	13
2.2	解析条件	15
2.3	解析結果	17
2.3.1	$\delta 0$ 断線モデル	17
2.3.2	$\delta 1$ 断線モデル	23
2.3.3	$\delta 2$ 断線モデル	33
第 3 章	ロープ引張解析.....	41
3.1	解析モデル	41
3.2	解析条件	45
3.3	解析結果	46
3.3.1	$I_{out}-\delta 11$ 断線モデル	46
3.3.2	$S_{out}-\delta 3$ 断線モデル	54
第 4 章	結論.....	62
4.1	結論	62
4.2	今後の課題	62
4.2.1	実験による妥当性確認	62
4.2.2	異なる種類のワイヤロープへの応用	62
参考文献		63
謝辞		65

図目次

図 1-1	一般的な鋼心ワイヤロープの構造	9
図 1-2	IWRC 6×Fi(29)の構成	11
図 2-1	Fi(29)ストランドの構成	13
図 2-2	Fi(29)ストランド断面図と素線番号	14
図 2-3	直 Fi(29)ストランドモデルの 3 次元メッシュ形状	14
図 2-4	断線部	15
図 2-5	直ストランド軸方向引張解析荷重曲線	16
図 2-6	control モデルと p1 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主 応力分布.....	18
図 2-7	control モデルと p1 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主 応力分布.....	18
図 2-8	control モデルと p1 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主 応力分布.....	19
図 2-9	control モデルと p1 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主 応力分布.....	19
図 2-10	control モデルと p1 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する 主応力分布.....	20
図 2-11	control モデルと p1 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する 主応力分布.....	20
図 2-12	control モデルと p1 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する 主応力分布.....	21
図 2-13	control モデルと p1 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する 主応力分布.....	21
図 2-14	control モデルと p1 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する 主応力分布.....	22
図 2-15	control モデルと p1 断線モデルにおける wire16 の z 座標に対する 主応力分布.....	22
図 2-17	control モデルと p2 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する 主応力分布.....	23
図 2-19	control モデルと p2 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する 主応力分布.....	25
図 2-21	control モデルと p2 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する 主応力分布.....	25

図 2-22 control モデルと p2 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布.....	26
図 2-23 control モデルと p2 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布.....	26
図 2-24 control モデルと p2 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する主応力分布.....	28
図 2-25 control モデルと p2 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する主応力分布.....	29
図 2-26 control モデルと p2 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する主応力分布.....	29
図 2-27 control モデルと p2 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する主応力分布.....	30
図 2-28 control モデルと p2 断線モデルにおける wire16 の z 座標に対する主応力分布.....	31
図 2-29 control モデルと p2 断線モデルにおける wire17 の z 座標に対する主応力分布.....	31
図 2-30 control モデルと p2 断線モデルにおける wire18 の z 座標に対する主応力分布.....	32
図 2-31 control モデルと p2 断線モデルにおける wire22 の z 座標に対する主応力分布.....	32
図 2-32 control モデルと p9 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布.....	34
図 2-33 control モデルと p9 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主応力分布.....	34
図 2-34 control モデルと p9 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主応力分布.....	35
図 2-35 control モデルと p9 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布.....	35
図 2-36 control モデルと p9 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布.....	36
図 2-37 control モデルと p9 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する主応力分布.....	36
図 2-38 control モデルと p9 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する主応力分布.....	37
図 2-39 control モデルと p9 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する主応力分布.....	37

図 2-40 control モデルと p9 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する主応力分布.....	38
図 2-41 control モデルと p9 断線モデルにおける wire16 の z 座標に対する主応力分布.....	38
図 2-42 control モデルと p9 断線モデルにおける wire17 の z 座標に対する主応力分布.....	39
図 2-43 control モデルと p9 断線モデルにおける wire18 の z 座標に対する主応力分布.....	39
図 2-44 control モデルと p9 断線モデルにおける wire22 の z 座標に対する主応力分布.....	40
図 3-1 鋼心の構成	41
図 3-2 鋼心 IWRC の断面図および素線番号	42
図 3-3 IWRC6×Fi(29)の断面図および素線番号	42
図 3-4 ワイヤロープの z=52 断面	44
図 3-5 ワイヤロープ z=52 断面詳細図	44
図 3-6 ロープの 3 次元メッシュ形状	46
図 3-7 ロープ軸方向引張解析荷重曲線	46
図 3-8 control モデルと p10 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布.....	47
図 3-9 control モデルと p10 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主応力分布.....	48
図 3-10 control モデルと p10 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主応力分布.....	48
図 3-11 control モデルと p10 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布.....	49
図 3-12 control モデルと p10 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布.....	49
図 3-13 control モデルと p10 断線モデルにおける wire6 の z 座標に対する主応力分布.....	50
図 3-14 control モデルと p10 断線モデルにおける wire7 の z 座標に対する主応力分布.....	50
図 3-15 control モデルと p10 断線モデルにおける wire8 の z 座標に対する主応力分布.....	51
図 3-16 control モデルと p10 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する主応力分布.....	51

図 3-17 control モデルと p10 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する主応力分布.....	52
図 3-18 control モデルと p10 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する主応力分布.....	52
図 3-19 control モデルと p10 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する主応力分布.....	53
図 3-20 control モデルと p10 断線モデルにおける wire13 の z 座標に対する主応力分布.....	53
図 3-21 control モデルと p10 断線モデルにおける wire14 の z 座標に対する主応力分布.....	54
図 3-22 control モデルと p189 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布.....	55
図 3-23 control モデルと p189 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主応力分布.....	55
図 3-24 control モデルと p189 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主応力分布.....	56
図 3-25 control モデルと p189 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布.....	56
図 3-26 control モデルと p189 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布.....	57
図 3-27 control モデルと p189 断線モデルにおける wire6 の z 座標に対する主応力分布.....	57
図 3-28 control モデルと p189 断線モデルにおける wire7 の z 座標に対する主応力分布.....	58
図 3-29 control モデルと p189 断線モデルにおける wire8 の z 座標に対する主応力分布.....	58
図 3-30 control モデルと p189 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する主応力分布.....	59
図 3-31 control モデルと p189 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する主応力分布.....	59
図 3-32 control モデルと p189 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する主応力分布.....	60
図 3-33 control モデルと p189 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する主応力分布.....	60
図 3-34 control モデルと p189 断線モデルにおける wire13 の z 座標に対する主応力分布.....	61

図 3-35 control モデルと p189 断線モデルにおける wire14 の z 座標に対する主応力分布	61
---	----

表目次

表 2-1 直 Fi(29)ストランドの幾何学的パラメータ	14
表 2-2 各直ストランドモデルの断線素線と断線部 z 座標, グラフ内呼称	15
表 2-3 Fi(29)ストランド引張解析規模	16
表 2-4 Fi(29)ストランド軸方向引張解析条件	16
表 3-1 I_{in} の幾何学的パラメータ	43
表 3-2 I_{out} の幾何学的パラメータ	43
表 3-3 S_{out} の幾何学的パラメータ	43
表 3-4 ロープ軸方向引張解析規模	45
表 3-5 ロープ軸方向引張解析条件	45

第1章 序論

1.1 研究背景

ワイヤロープ（以下，ロープ）は，素線を複数本撚り合わせたストランド6本を心綱と呼ばれるロープ芯の周りに撚り合わせて作られている．心綱にはストランドやロープと同様に素線を撚り合わせた構造をもつ鋼心と繊維心の二種類がある．一般的な鋼心のロープの構成は図 1-1 に示す通りである．

ロープは，高い引張強度をもつ素線を撚り合わせた構造をもつことで，優れた柔軟性と高い破断強度を併せ持ち，クレーン，ケーブルカー，橋梁など幅広い分野で普及しており，用途に応じて多種多様なロープが用いられている．

本研究の対象は，主にクレーンの巻き上げ用ロープとして普及している IWRC（Independent Wire Rope Core）型ロープの一種，IWRC 6×Fi(29)である．IWRC とは鋼心の一種で 1 本の独立したロープである．心綱が 1 本のロープであることで，繊維心ロープに比べ同じ断面積でより高い引張強度を持ち，つぶれにくく型くずれを起こしにくい．一方で，荷を吊り下げた張力作用下でシーブ（滑車）を繰り返し通過する際，ロープ内部での素線の損傷や破断が進展しやすく，通常の外観検査では検出できないという問題点が存在する．特に IWRC 6×Fi(29) は，実際に内部素線の損傷によるロープ破断事故が相当数発生しており[1]，内部断線メカニズムの解明は急務と言える．

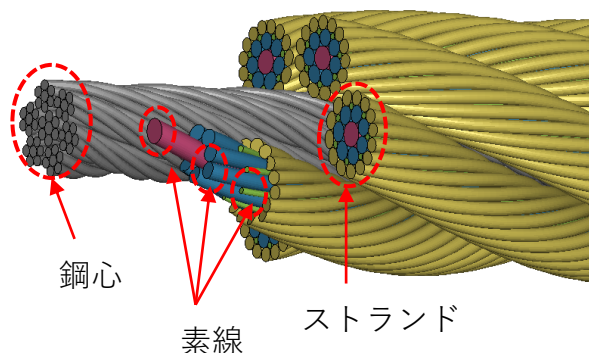


図 1-1 一般的な鋼心ワイヤロープの構造

1.2 先行研究

1.2.1 ロープ研究の基礎

ロープの力学的特性を把握するために、いくつかの理論やモデルの開発が行われてきた。初期の研究としては、Hruska により素線の引張のみを考慮した解析モデルが発表され[2][3]、Love の曲がり梁理論[4]を用いて Knapp らがロープのねじり、曲げも考慮された解析モデルを発表した[5]。その後 Costello らは、このモデルにポアソン比の影響による素線径の変化や、ロープの変形による螺旋角の変化を取り入れた「Theory of Wire Rope」を出版した[6]。以上に列举した解析モデルは実際のロープ特性をよく再現しており、現在においてもロープ設計の指標として活用されている。しかし、接触応力や摩耗、塑性変形は考慮できておらず、ロープ損傷を検討するのは難しい。

解析的アプローチの一方で、ロープの繰り返し曲げ疲労試験や引張試験を行い、ロープ破断特性の解明が試みられてきた。断線数の遷移、断線総数と可視断線数の関係、断線数と繰り返し曲げ回数の関係が明らかにされている[7]-[11]。しかし疲労試験は、ロープ内部での素線の破断箇所や断線数の増加などの過渡的な現象の観察が困難であり、素線の応力状態の測定が確立されていないため、破断メカニズムの解明には不十分である。

ロープ内部の断線を確認する手法としては、漏洩磁束探傷法が存在する。磁化したロープの、素線断線部から発生する漏洩磁束量によって断線度合いを検出する非破壊検査手法である[12]-[15]。しかし、正確な断線位置と断線数の測定は難しく、詳細な断線状態の把握は課題である。ロープ強度低下に対するより定量的な評価が必要である。

ロープはその複雑な構造ゆえに、内部素線の挙動の予測や、応力、接触圧力の計測が困難である。そこで、数値解析による内部素線接触状態及び応力状態の可視化が、ロープ破断特性解明に有効となる。

近年、計算機性能の向上から、有限要素法を用いたロープの解析が行われるようになった[16]-[26]。有限要素法解析の利点として、長年の課題であった塑性変形や素線の接触の考慮が可能である、疲労試験に比べて低コスト、短時間で行うことができる、内部素線の接触状態及び応力状態を可視化できることが挙げられ、ロープ破断メカニズム解明に向けて大きな役割を果たすことが期待できる。しかし先行研究では、ロープの力学的特性及び複雑な接触状態の再現性は未だ不十分で、定量的な評価には至っていない。また、荷重条件は単軸引

張や単純曲げに限られ、実際の使用状況に即した解析はなされていないのが現状である。

1.2.2 ロープ有限要素モデルの開発

ロープの有限要素法解析の課題として、力学的特性の再現の難しさが挙げられる。当研究室では、ロープの軸方向剛性に加えて径方向剛性の妥当性を確認することで、ロープの有限要素モデルの力学的特性の再現を試みてきた。径方向剛性はロープ内部の素線接触状態に依存するため、モデルの撚り状態の妥当性を径方向剛性によって確認できる。当研究室で開発した、ロープの径方向剛性計測法により、試験と同様の条件で行った解析結果と比較することでロープ有限要素モデルの径方向剛性の妥当性の評価が可能となった[27]。太田により IWRC 6×Fi(29) $\phi 14\text{mm}$ の軸方向・径方向剛性の妥当性が確認された有限要素モデルが開発された[28]。このロープは内部断線が可視断線に先行するという課題があり、内部断線を有した状態で使用されている場合がある。内部断線によって剛性がどのように変化するかは未検証である。

1.3 本研究の新規性と研究目的

本論文の研究対象は、クレーン用ロープ IWRC 6×Fi(29)である。図 1-2 にロープ断面図を示す。IWRC 6×Fi(29)は、鋼心 (IWRC) の周りに Fi(29)ストランド (S_{out}) を 6 本撚り合わせた構造になっている。鋼心は、直ストランド (I_{in}) を心として、さらにその周りにストランド (I_{out}) を 6 本撚り合わせている。

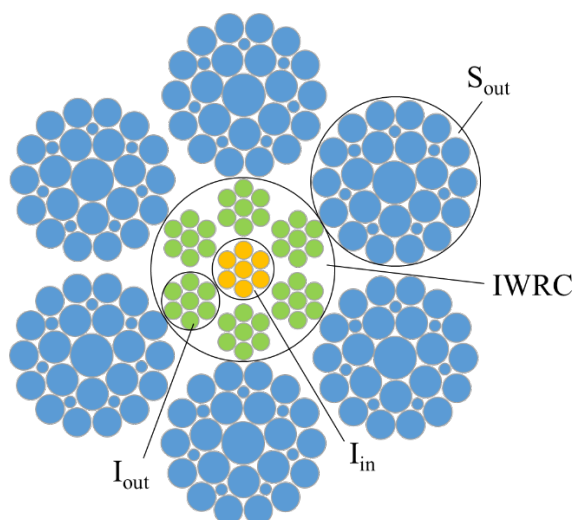


図 1-2 IWRC 6×Fi(29)の構成

本研究では、IWRC 6×Fi(29)ロープの全素線を一本ずつ詳細に再現したうえで内 1 本が断線された状態の有限要素モデルを作成し、このモデルについて、軸方向剛性の変化と各素線の応力状態を評価する。軸方向引張解析は Fi(29)の直ストランドについても行った。断線した素線とそのまわりの素線の主応力の変化を評価し、断線が発生したロープの力学的特性を考察する。

1.4 本論文の構成

本論文は全 4 章から構成される。

第 1 章 序論

本研究の背景、先行研究及び研究目的と研究対象について述べた。

第 2 章 Fi(29)直ストランド引張解析

Fi(29)の直ストランドについて、素線 1 本を断線させたモデルに対して行った解析を述べる。断線させたモデルと断線のないモデルの結果を比較し、各素線の応力の変化を考察する。

第 3 章 ロープ引張解析

ロープについて、素線 1 本を断線させたモデルに対して行った解析について述べる。断線させた素線の箇所がロープの軸方向剛性に及ぼす影響について考察する。

第 4 章 結論

本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について述べる。

第2章 直ストランド引張解析

2.1 解析モデル

本章で解析対象とするのは、ロープに撚られる前のまっすぐな状態(直ストランド)の Fi(29)ストランドである。Fi(29)ストランドは、29本の素線が4層構造で撚り合わされたフィラー(Filler)形ストランドの一種である。本論文では、図 2-1 に示したように各素線をストランド中心から順に $S_{out} - \delta 0$, $\delta 1$, $\delta 2$, $\delta 3$ と呼称する。フィラー形ストランドは、外層素線 $S_{out} - \delta 3$ と内層素線 $S_{out} - \delta 1$ の隙間に細い径のフィラー線 $S_{out} - \delta 2$ が充填されているのを特徴とする。

ストランドを構成する各素線のパラメータを表 2-1 に示す。ただし、ストランドのピッチとはストランド外側素線 $S_{out} - \delta 1 \sim 3$ が中心素線 $S_{out} - \delta 0$ の周りを1周するのに要するストランド軸方向長さのことである。

各素線に対し、1 から 29 までの番号を中心素線から順に割り当てた。その番号を図 2-2 に示す。

本研究ではある1素線の要素を部分的に削除することで、素線を2つに分けて断線を再現した。断線部の様子を図 2-4 に示す。断線なしの control モデルと、 $\delta 1$, $\delta 2$, $\delta 3$ の3種の素線をそれぞれ1本ずつ断線させた4種のモデルを作成した。表 2-2 に各モデルの断線素線と断線部 z 座標、グラフ内での呼称を示す。

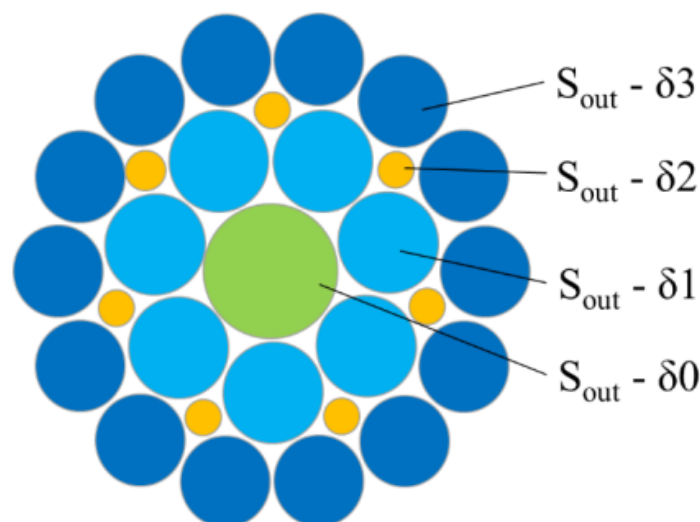


図 2-1 Fi(29)ストランドの構成

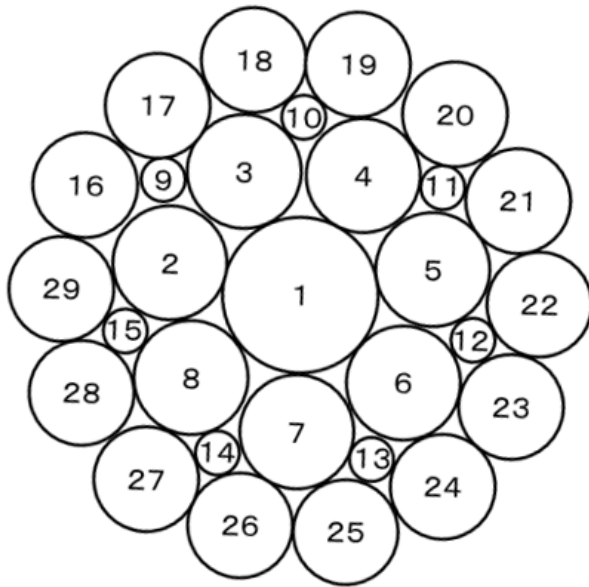


図 2-2 Fi(29)ストランド断面図と素線番号



図 2-3 直 Fi(29)ストランドモデルの 3 次元メッシュ形状

表 2-1 直 Fi(29)ストランドの幾何学的パラメータ

	Curve shape	Diameter[mm]	Pitch length	Number
$\delta 0$	Straight	1.3	—	1
$\delta 1$	Helix	0.95	37	7
$\delta 2$	Helix	0.37		7
$\delta 3$	Helix	0.81		14

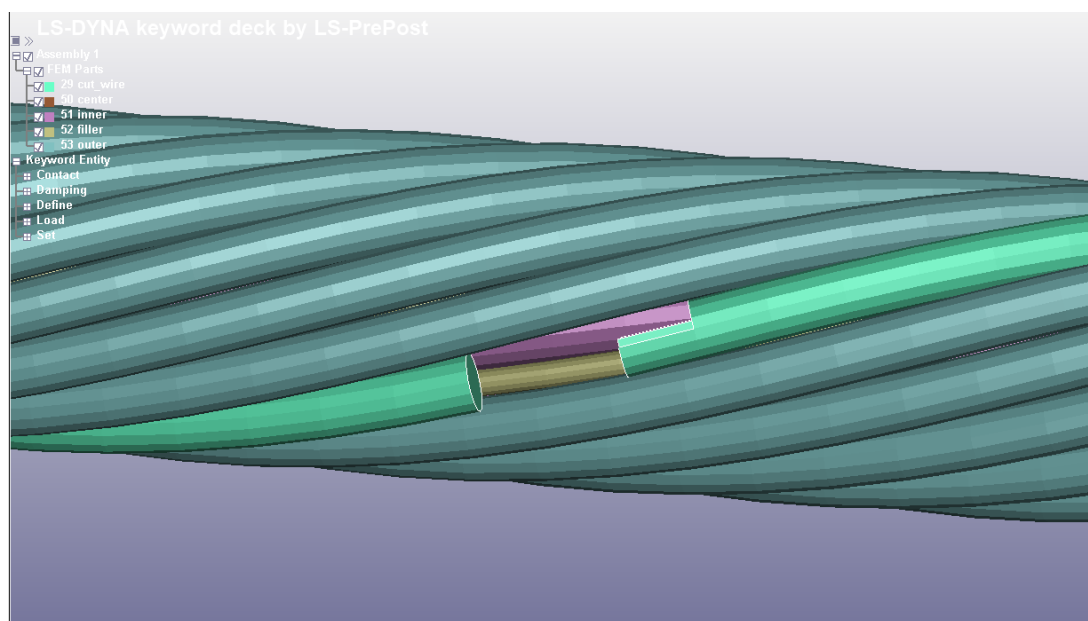


図 2-4 断線部

表 2-2 各直ストランドモデルの断線素線と断線部 z 座標，グラフ内呼称

モデル名	断線素線	断線部 z 座標	グラフ内呼称
control	-	-	control
$\delta 0$ 断線モデル	wire1	0	p1
$\delta 1$ 断線モデル	wire2		p2
$\delta 2$ 断線モデル	wire9		p9

2.2 解析条件

解析規模を表 2-3 に，解析条件を表 2-4 に示す．

境界条件を述べる．引張力により直ストランドの撓りが戻るのを防ぐため，直ストランド両端 2.5 mm における全節点について，各端中心節点に剛体拘束し，z 軸方向の回転を拘束した．直ストランド軸方向が z 軸と一致するよう座標軸を設定しており，直ストランドの長さは $z = -110.6$ から $z = 93$ までの 203.6mm である．

荷重条件を述べる．各端中心節点に z 軸方向に引張力を加えた．引張力は，線形に増加させた．荷重曲線は図 2-5 の通りである．

表 2-3 Fi(29)ストランド引張解析規模

節点数	262769
要素数	204160

表 2-4 Fi(29)ストランド軸方向引張解析条件

解析ソフト	LS-DYNA R11.2.2
解析手法	準静的陽解法
要素	ソリッド要素
接触定義位置	素線間(ペナルティ法)
解析時間	0.1[s]
タイムステップ	2.37×10^{-8} [s]
材料特性	E=205[GPa], Et1=79.7[GPa], Et2=6.29[GPa], $\nu=0.3$
摩擦係数	0.1

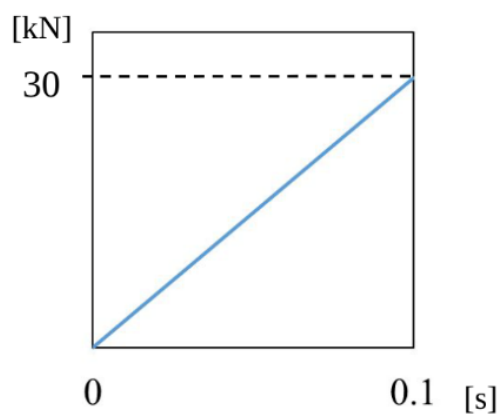


図 2-5 直ストランド軸方向引張解析荷重曲線

2.3 解析結果

2.3.1 $\delta 0$ 断線モデル

まず，断線なし control モデルと $\delta 0$ 断線モデルの 2 種類のモデルについて，各素線の z 座標に対する主応力の分布を比較する．図 2-6 に control モデルと p1 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布を示す．断線素線 wire1 については，control モデルでは z 座標にかかわらず 500MPa 程度の主応力を一様に受けているのに対し，断線モデルでは断線部付近の主応力は 0 近くに落ち込み，離れるに従い大きくなっている．断線部 $z=0$ から 30 mm 離れた $z=-30$ ， $+30$ において，control と同程度の応力となり，そこから端に向かっては断線による影響を受けていない．

素線 $\delta 1$ に該当する wire2 について比較すると，control モデルは全体として 490MPa 程度であるのに対し．断線モデルは $z=0$ で最大値 570MPa を取り，離れるにしたがって下がっている．30mm 離れたところで control の値を下回り，断線部から 40mm で control と同程度となる．同じく素線 $\delta 1$ の Wire3, 4, 5 でも同じ傾向が見られる．

素線 $\delta 2$ に当たる Wire9 では，control モデルの応力値の揺れが $\delta 1$ より大きい．470MPa から 500MPa の値をとる．断線モデルの応力値が $z=0$ で最大値 540MPa をとり，30mm 離れたところで control と同程度となる．同じく素線 $\delta 2$ の Wire10, 11, 12 でも同じ傾向が見られる．

素線 $\delta 3$ に当たる wire16 では，control の応力値は 440MPa から 460MPa の値をとる．断線モデルは $z=0$ で最大値 480MPa をとり，40mm 離れたところで control と同程度となる．

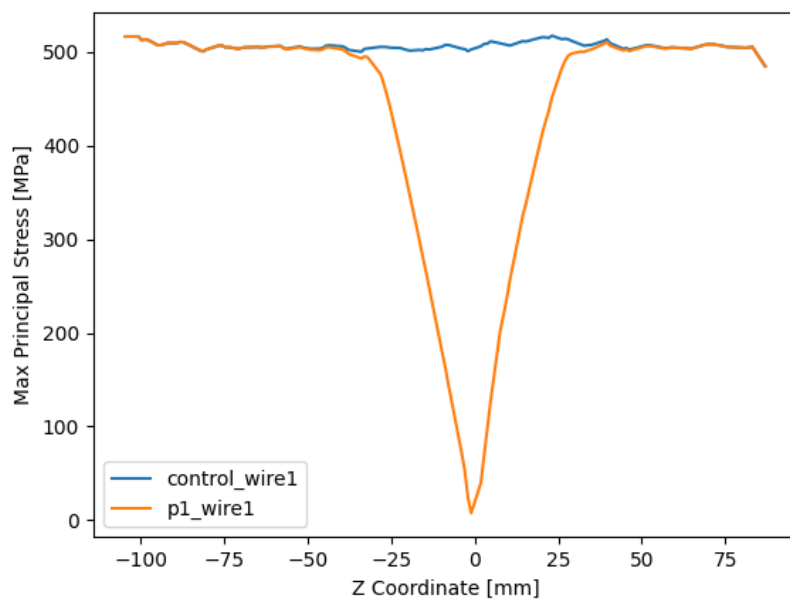


図 2-6 control モデルと p1 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布

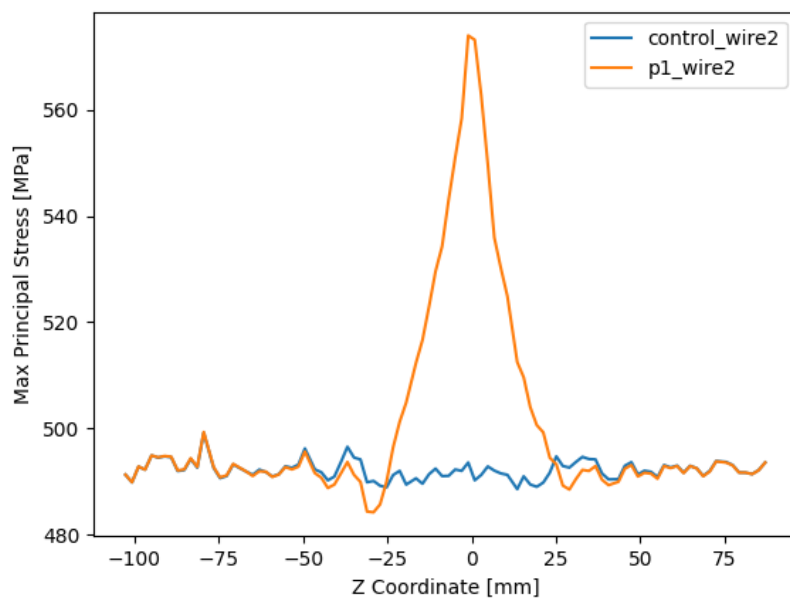


図 2-7 control モデルと p1 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主応力分布

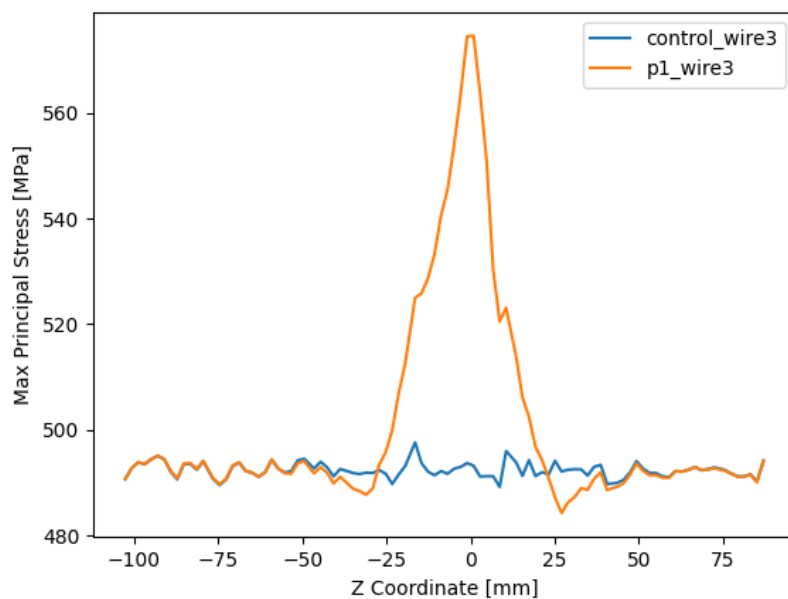


図 2-8 control モデルと p1 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主応力分布

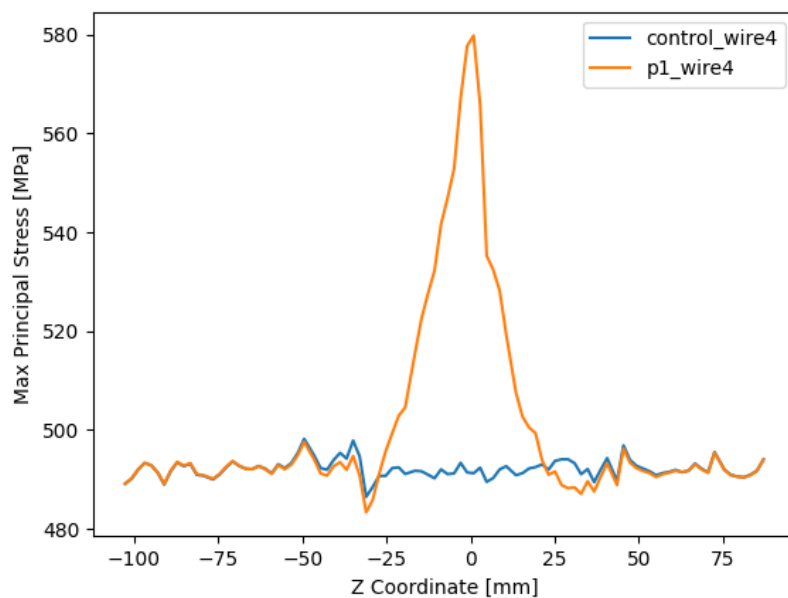


図 2-9 control モデルと p1 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布

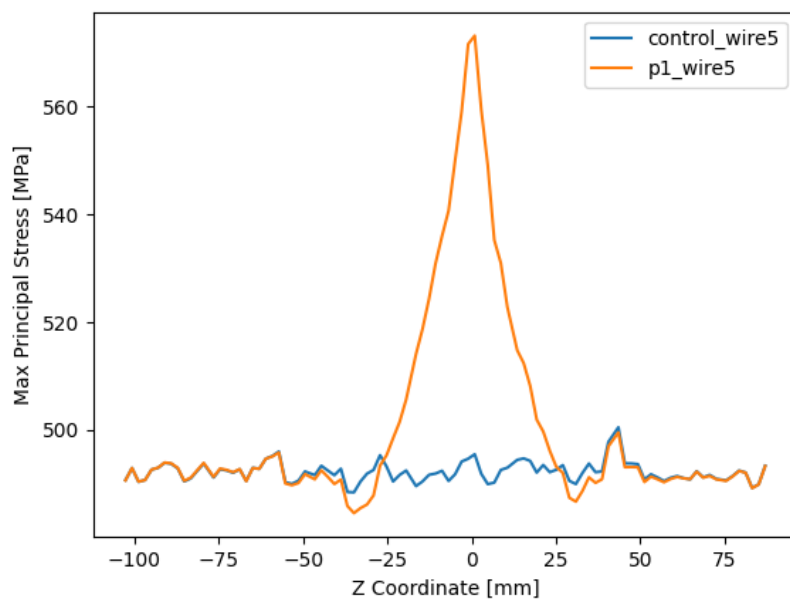


図 2-10 control モデルと p1 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布

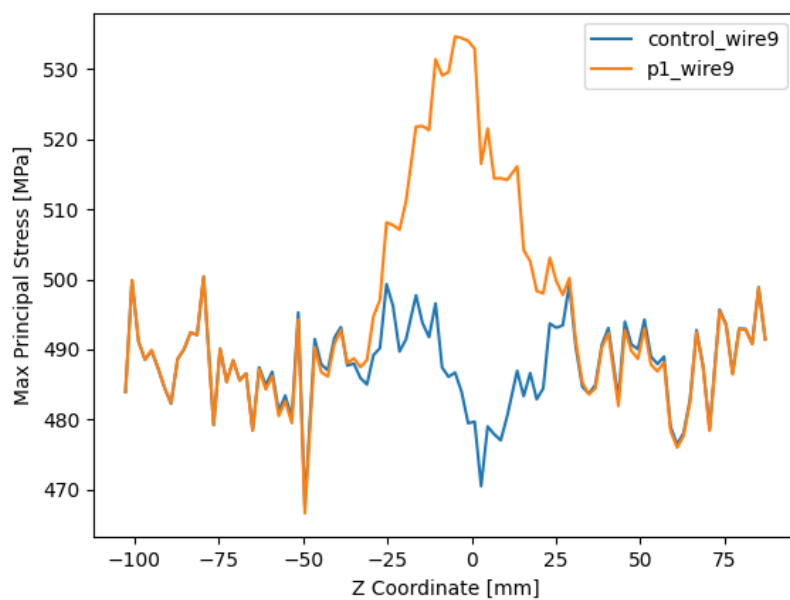


図 2-11 control モデルと p1 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する主応力分布

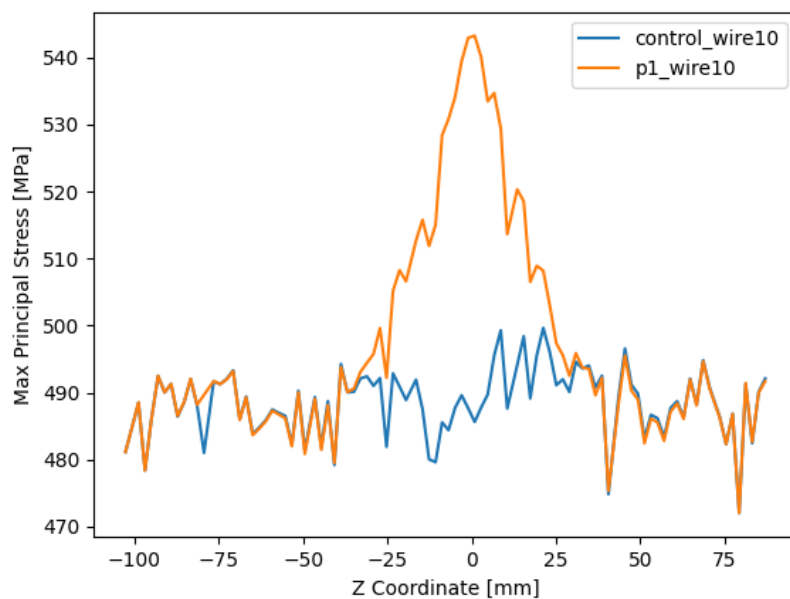


図 2-12 control モデルと p1 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する主応力分布

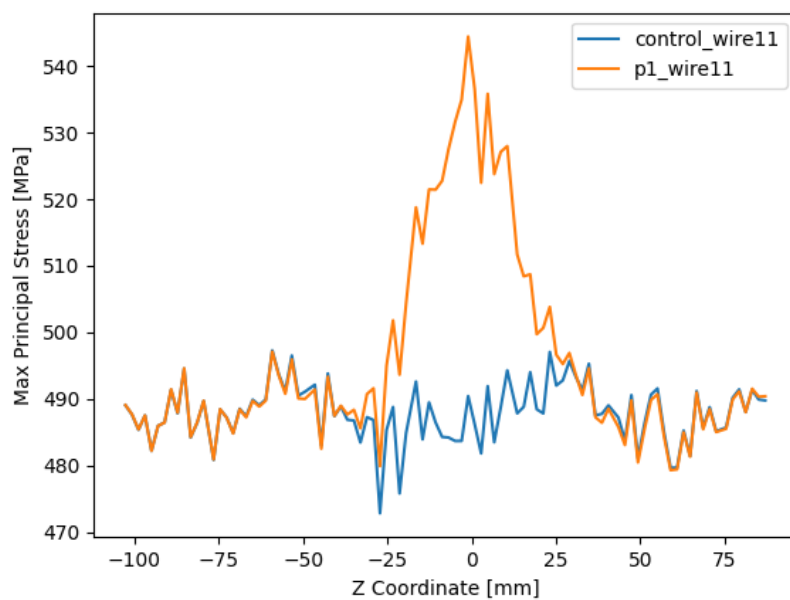


図 2-13 control モデルと p1 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する主応力分布

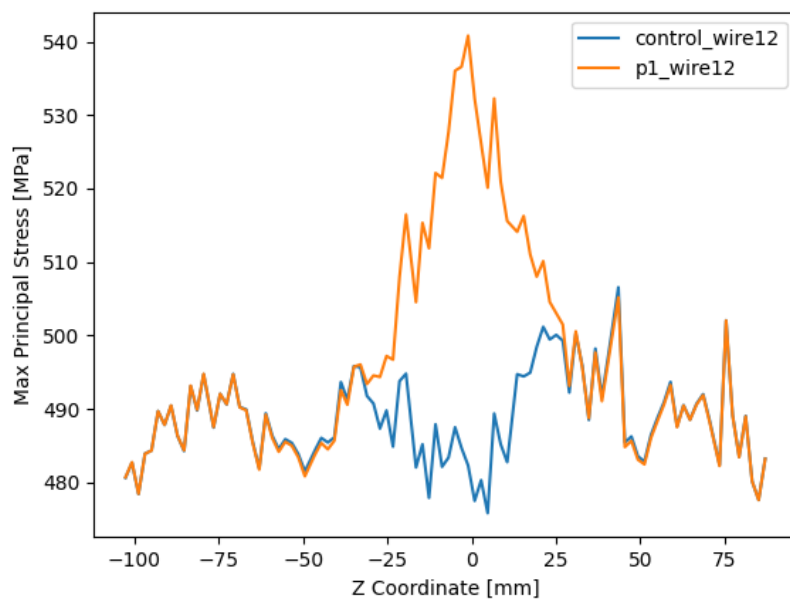


図 2-14 control モデルと p1 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する主応力分布

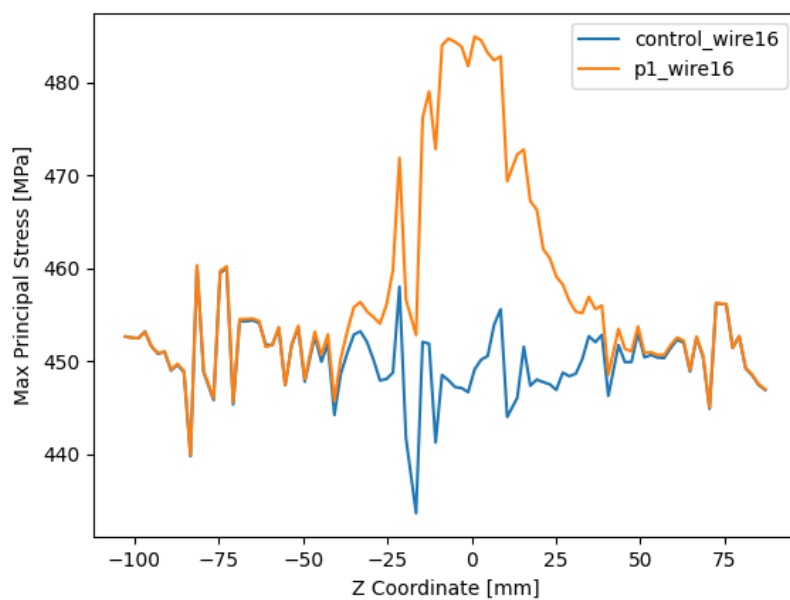


図 2-15 control モデルと p1 断線モデルにおける wire16 の z 座標に対する主応力分布

2.3.2 $\delta 1$ 断線モデル

次に $\delta 1$ 素線である wire2 を断線したモデルを control と比較する。

図 2-16 に control モデルと p2 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布を示す。素線 $\delta 0$ に当たる wire1 では，control では 500MPa から 520MPa の応力を受けている。それに対し断線モデルでは断線部 $z=0$ で最大値 560MPa をとる。断線部から離れるほど control モデルに近づくが，解析モデルの端でも同じ値にまで下がることはなかった。

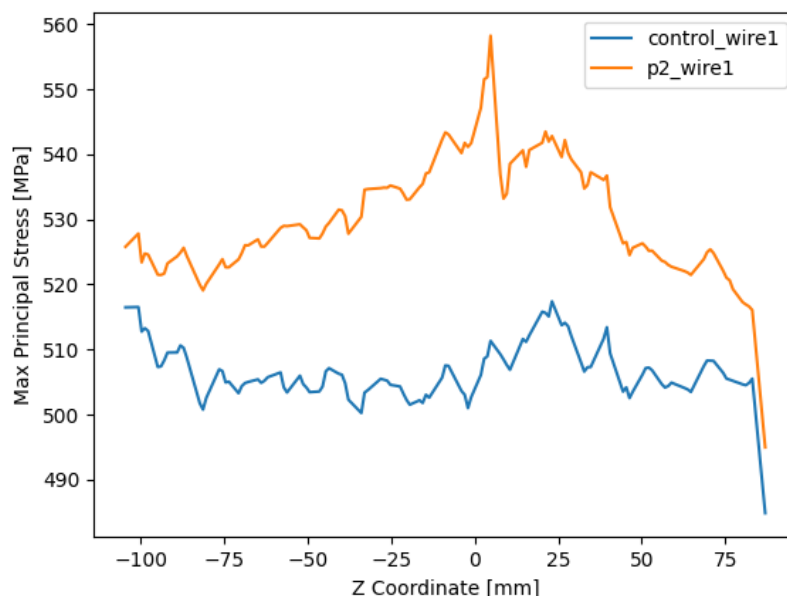


図 2-16 control モデルと p2 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布

次に wire2 について評価する。図 2-17 に control モデルと p2 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主応力分布を示す。素線 $\delta 1$ の中でも断線素線である wire2 では，control モデルは一様に 500MPa を受けているのに対し，断線モデルでは，断線部付近の主応力は 0 近くに落ち込み，離れるに従い大きくなっている。モデルの端でも control と同じ値にまで上がりきらなかった。図 2-6 の p1 断線モデルでは断線部位から 30mm の時点で断線モデルと control モデルの主応力が同程度になっているのに対し，図 2-17 においては断線部からの距離が 105mm 離れた地点においても断線モデルの主応力が control モデルよりも小さいままである。この違いは周辺素線との摩擦力の大きさに差があるためで

はないかと考えられる．この距離がどのような因子で決定されるかは，今後研究する価値があると思われる．

次に，素線 $\delta 1$ を断線素線に近い順に wire3, wire4, wire5 と見ていく．図 2-18 に control モデルと p2 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主応力分布を示す．Wire3 では control モデルでの主応力が 490MPa から 495MPa を取るのに対し，断線モデルでは $z=0$ で最大値 550MPa をとり，断線部から離れるほど control に近づくように値が落ちるが同じになることはない．これは素線断線により，wire2 にかかっていた主応力を周辺素線が負担しているためだと考えられる．断線モデルにおける主応力が $z=0$ から離れるほど小さくなっているのは，その地点における断線素線にかかる主応力が上昇しているためである．図 2-19 に control モデルと p2 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布を示す．Wire4 では断線モデルの主応力が $z=0$ で最大値 520MPa をとり，これは wire3 の断線モデルにおける最大主応力よりも小さい．さらに，断線素線からの距離が増加するほど断線モデルの主応力が control に近づくが，その変化の傾きは wire4 の方が wire3 よりも緩やかである．Wire3 同様グラフ端でも断線モデルの主応力が control と同じ値にはならない．図 2-20 に control モデルと p2 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布を示す．Wire5 では断線モデルの主応力が $z=0$ で最大値 505MPa をとる．断線部から 70mm 離れたところでは control と同程度の値をとっており，さらに離れた $z=-100$ 以下および $z=75$ 以上では control の値を下回っている．これは wire3, wire4 の結果には見られない傾向であるが，グラフ端にあたる拘束部付近では要素が極端な変形が起こることが多い． $z=-75$ と $z=75$ における主応力を比較すると，モデル端 $z=-105.6$ から比較的遠い $z=-75$ では断線モデルと control の主応力が同程度であるのに対し，モデル端 $z=88$ に比較的近い $z=75$ では断線モデルの主応力が control を下回っていることから，断線部からの距離以外の影響を受けていることがわかる．グラフ端の結果は実際のワイヤーロープの挙動と大きく外れている可能性がある．断線モデルにおける主応力の最大値は wire3, wire4, wire5 の順に小さくなっており，断線素線 wire2 に近い素線ほど，素線の断線による主応力の増加が大きいといえる．

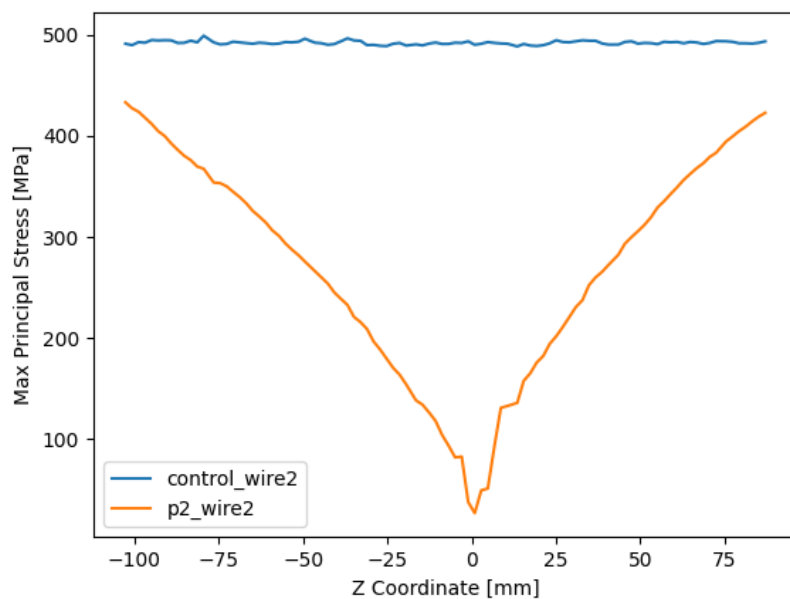


図 2-17 control モデルと p2 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主応力分布

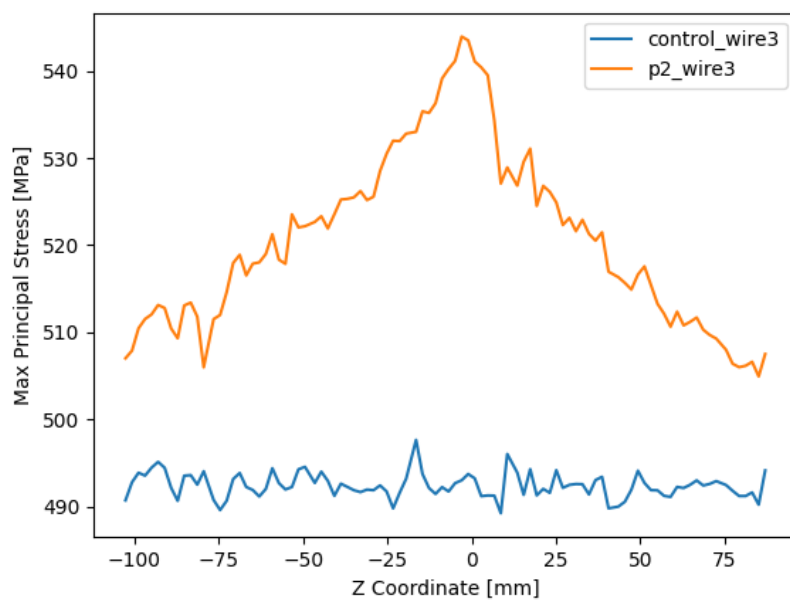


図 2-18 control モデルと p2 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主応力分布

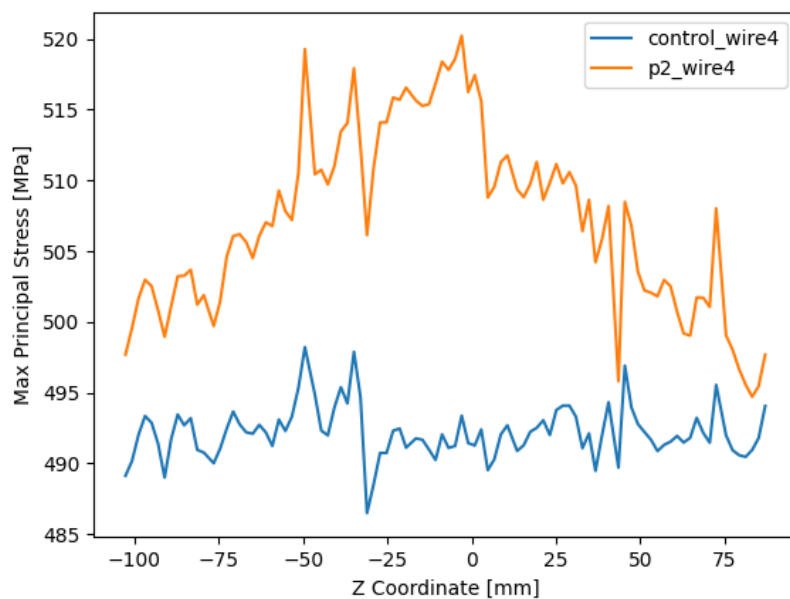


図 2-19 control モデルと p2 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布

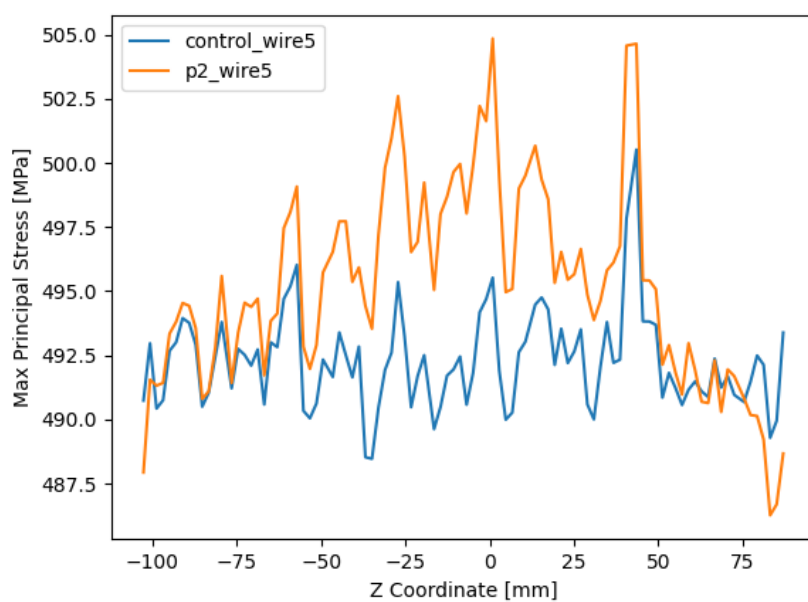


図 2-20 control モデルと p2 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布

続いて、素線 $\delta 2$ にあたる wire9, wire10, wire11, wire12 の評価を行う。図 2-21, 図 2-22, 図 2-23, 図 2-24 に control モデルと断線モデルでの wire9, wire10, wire11, wire12 それぞれの z 座標に対する主応力分布を示す。wire9, wire10, wire11, wire12 では、control モデルの主応力ははいずれも 470MPa から 500MPa の値をとる。図 2-21 より断線モデルの wire9 では $z=0$ で最大主応力 650MPa をとる。断線モデルの主応力は $z=-20$ から $z=0$ の範囲で 550MPa を上回る値をとっており、それ以外の部分では 525MPa 程度の値をとっている。図 2-18 の wire3 の主応力分布と比較すると、wire9 の最大主応力 650MPa であり、wire3 の最大主応力 550MPa よりも 100MPa 大きい。この要因は 2 つ考えられ、まず 1 つ目に断線素線との中心距離が wire9 の方が近いいため、より大きな主応力変化の影響を受けているからである。2 つ目に、 $\delta 1$ である wire3 は直径が 0.945mm であるのに対し、 $\delta 2$ である wire9 は直径が 0.370mm であるため、wire9 は断面積が小さく、内力に対する応力が大きくなるからであると考えられる。図 f の p1 モデルの wire9 の結果と比較すると図 f では断線位置からの距離が 30mm 以上の地点においては control と断線モデルの主応力が同じであるのに対し、図 2-21 では全体にわたって control よりも断線モデルの主応力が大きくなっている。これは図 2-6 に示すように、p1 モデルでは素線断線 wire1 の主応力が断線位置から 30mm 以上離れた地点で control と同程度になっているのに対し、p2 モデルでは、図 2-17 に示すように断線素線 wire2 の主応力がモデル端においても control よりも小さく、断線による周辺素線への影響がモデル全体にわたって起こっているためだと考えられる。図 2-21 のグラフ端で断線モデルの主応力が control を下回っているのは拘束部に近いことによる影響であると考えられる。

図 2-22 の wire10 では、断線モデルの主応力が $z=0$ で最大値 750MPa をとっている。最大主応力は図 2-21 に示す wire9 の最大主応力よりも大きくなっている。さらに $z=-80$ 付近および $z=-5$ 付近でも 380MPa と 450MPa 程度のピーク値をとっている。これらは $\delta 2$ 素線の直径が 0.37mm と小さく、解析における要素も小さいので、主応力値を取得するための代表要素が素線中心からずれてしまったからである。素線内部では曲げによる主応力の局所的な差が生まれているため、素線中心の値とは、ずれた値となっていると考えられる。従って図 2-22 の評価ではこれらのピーク値を無視する。wire10 の断線モデルの主応力は図 2-21 の wire9 の結果と同様に、断線部付近にピークを取り、全体として control よりも主応力が大きくなっている。次に図 2-23 の wire11 を評価する。wire11 の断線モデルの主応力分布は全体を通して control よりも大きく、山型の形状である。図 2-21 と図 2-22 に示す wire9 と wire10 の結果で見られた、 $z=0$ 付近での極端な主応力の上昇は見られない。これは wire11 が接している wire4

と wire5 の主応力分布が図 2-19 と図 2-20 に示すように緩やかになっていることと対応していると考えられる．最後に図 2-24 の wire12 を評価する．wire12 は断線素線である wire2 に対してストランド中心からの位相が逆の位置である．図 2-24 より，wire12 の断線モデルの主応力は control よりもモデル全体を通して大きい，その差は同種の $\delta 2$ 素線である wire9, wire10, wire11 での断線モデルと control との差分よりも小さい． $z=-50$ から $z=40$ の範囲では，断線モデルと control の差分が比較的大きい．wire12 は断線素線から最も遠い $\delta 2$ 素線であるため，素線断線による影響が小さいと言える．

以上より $\delta 2$ 素線においても $\delta 1$ と同様に，断線モデルの方が control よりもモデル全体で主応力が大きく，断線素線から遠ざかるほど，主応力の変化が小さいことがわかった．一方， $\delta 2$ ではその細さから，control, 断線モデルの両方で主応力の最小値と最大値の差が $\delta 1$ と比較して大きい傾向にあった．

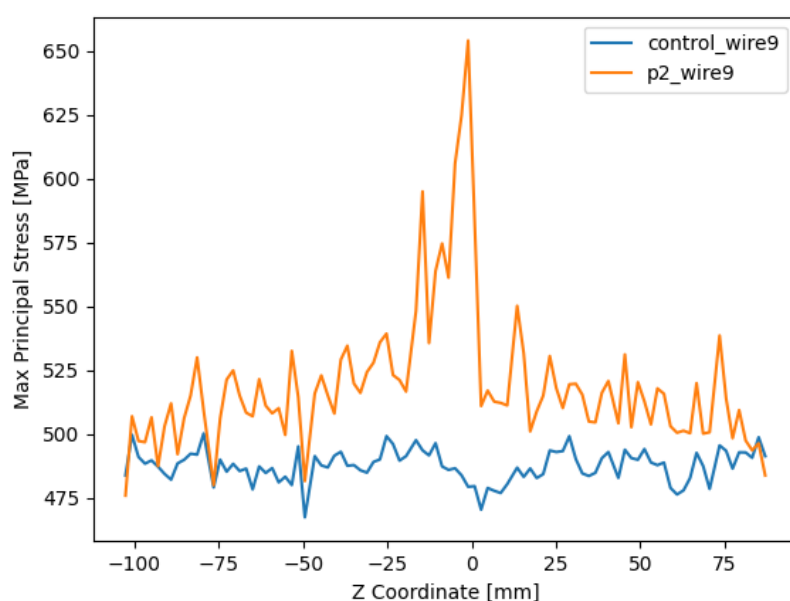


図 2-21 control モデルと p2 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する主応力分布

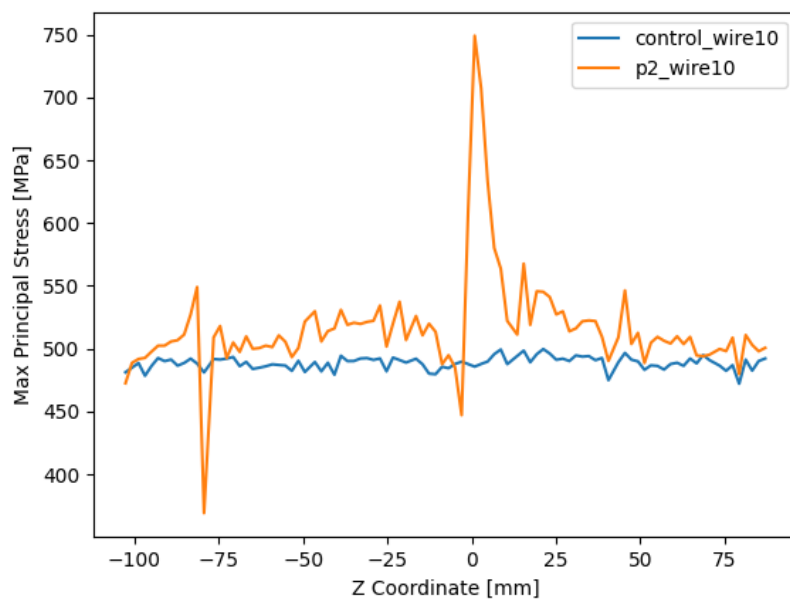


図 2-22 control モデルと p2 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する主応力分布

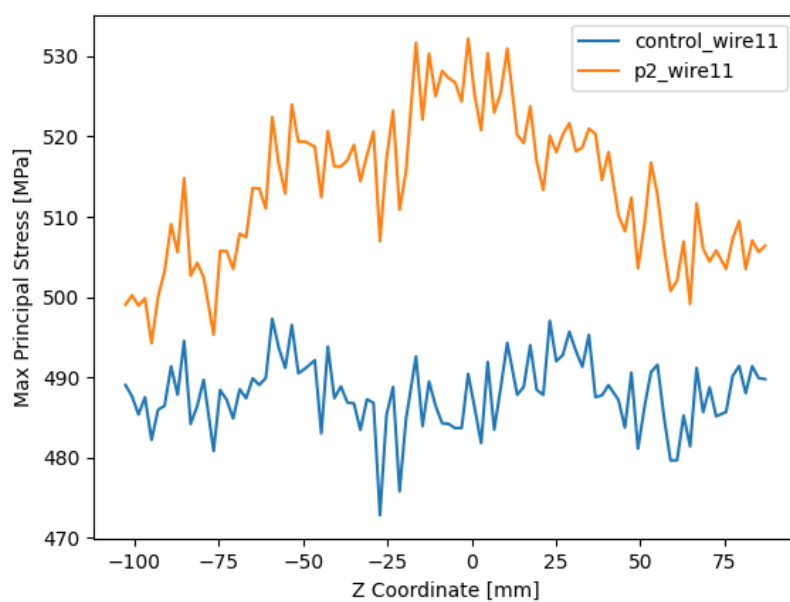


図 2-23 control モデルと p2 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する主応力分布

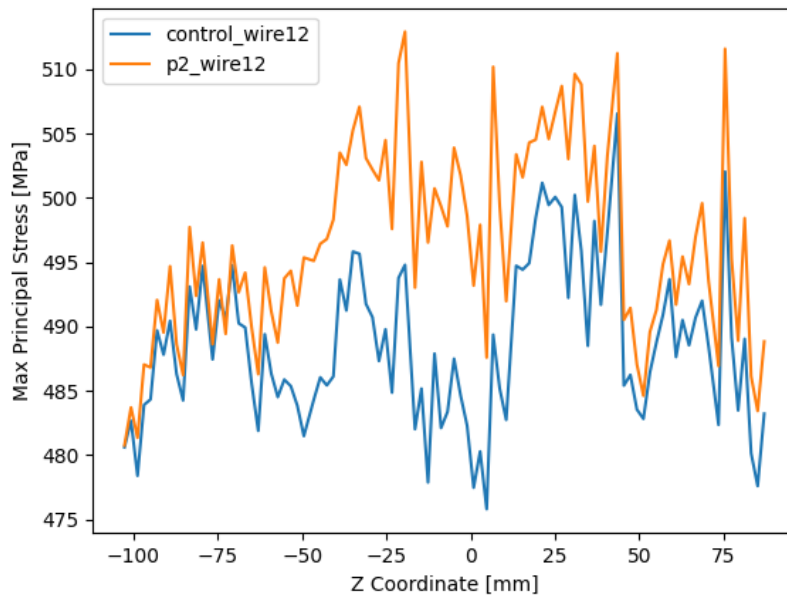


図 2-24 control モデルと p2 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する主応力分布

最後に、素線 $\delta 3$ にあたる wire16, wire17, wire18, wire22 の評価を行う。図 2-25, 図 2-26, 図 2-27, 図 2-28 に control モデルと断線モデルでの wire16, wire17, wire18, wire22 それぞれの z 座標に対する主応力分布を示す。wire16, wire17, wire18, wire22 では、control モデルの主応力ははいつでも 440MPa から 470MPa の値をとる。wire16 の断線モデルの主応力分布は全体としては control を下回りるが、5つの箇所 control を上回る極値をとっている。この周期的な変化は、表 2-1 に示す直ストランドのピッチ 37mm と同程度であることから、素線の z 軸に垂直な断面上での位置によって変化していると考えられる。wire17 の断線モデルの主応力分布は全体として control を上回り、 $z=0$ から離れるほど値の下がる山型となっている。wire18 では wire17 と同じく断線モデルの主応力分布が control を上回り、山型となっているが、断線モデルと control との差は比較的小さい。wire22 でも同じく断線モデルの主応力分布が control を上回り、山型となっており、断線モデルと control の主応力差は wire17 と同程度である。

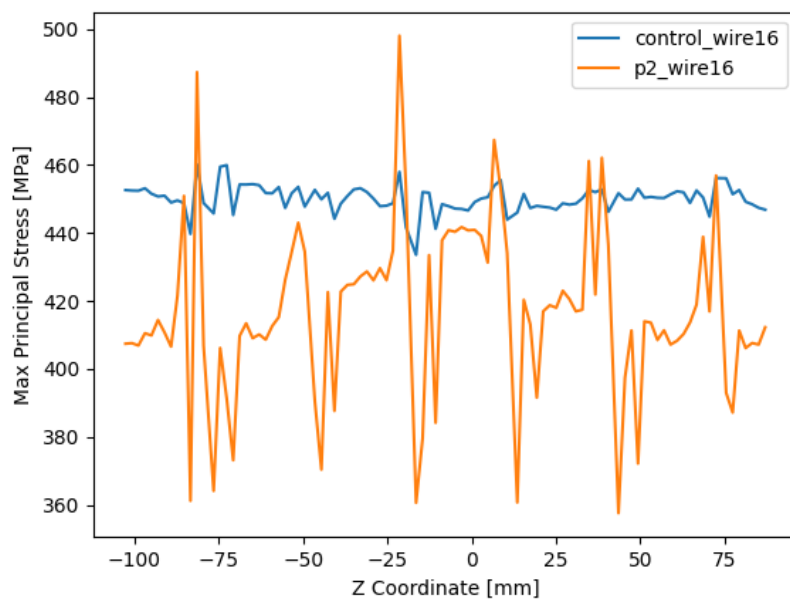


図 2-25 control モデルと p2 断線モデルにおける wire16 の z 座標に対する主応力分布

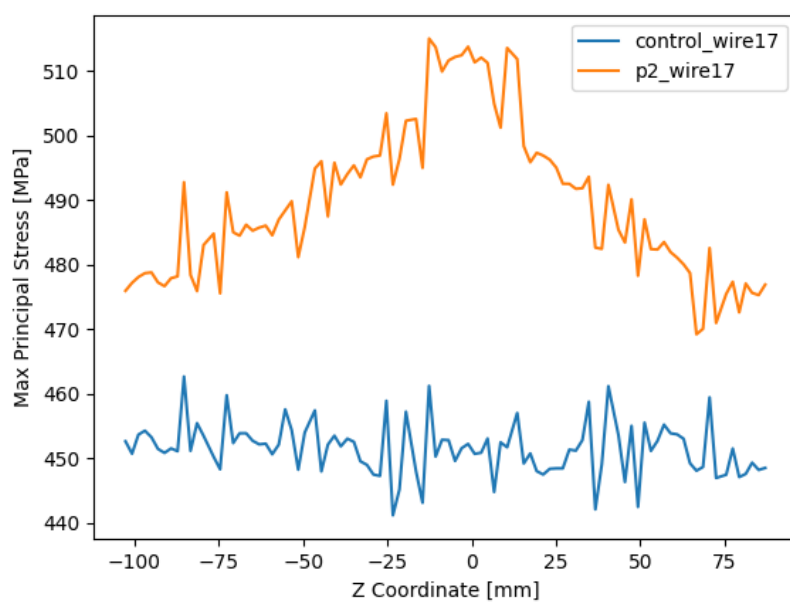


図 2-26 control モデルと p2 断線モデルにおける wire17 の z 座標に対する主応力分布

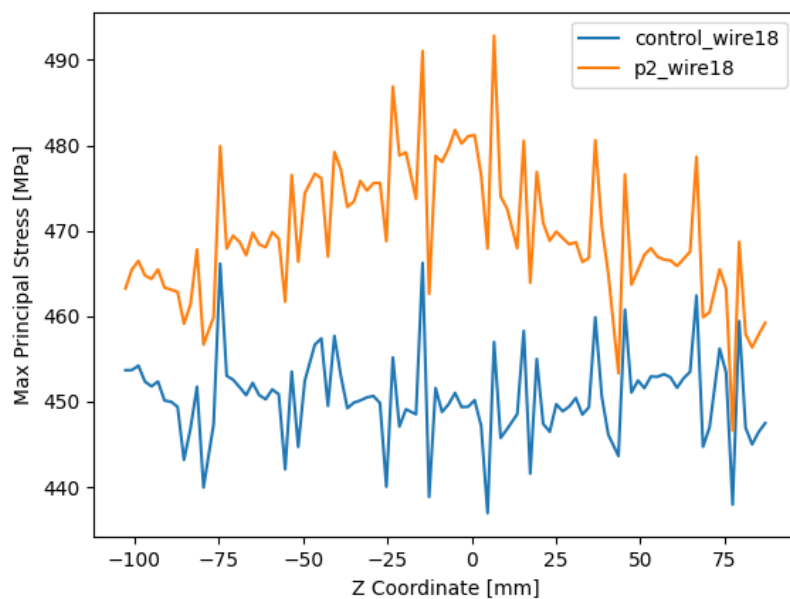


図 2-27 control モデルと p2 断線モデルにおける wire18 の z 座標に対する主応力分布

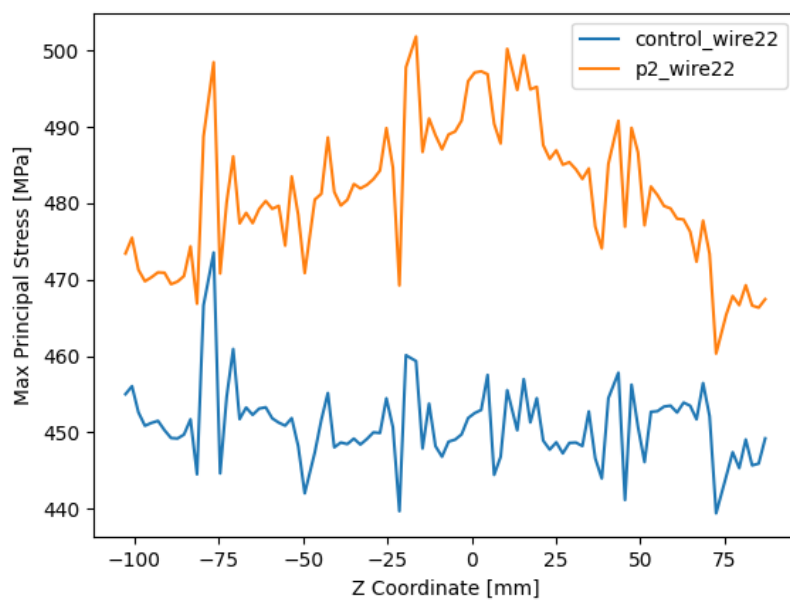


図 2-28 control モデルと p2 断線モデルにおける wire22 の z 座標に対する主応力分布

2.3.3 $\delta 2$ 断線モデル

最後に $\delta 2$ 素線である wire9 を断線したモデルを control と比較する。

図 2-29 に wire1 についての control モデルと p9 断線モデルにおける z 座標に対する主応力分布を示す。control は端の外れ値を除いて、500MPa から 520MPa の値をとる。全体を通して断線モデルの主応力は control と同程度であるが、 $z=0$ の両側 30mm では control の値を上回る。

図 2-30, 図 2-31, 図 2-32, 図 2-33 に wire2, wire3, wire4, wire5 についての control モデルと p9 断線モデルにおける z 座標に対する主応力分布を示す。これらの $\delta 1$ 素線の control の主応力は 486MPa から 500MPa の値をとる。wire2, wire3, wire4, wire5 のいずれも、全体を通して断線モデルの主応力は control と同程度であるが、 $z=0$ の両側 30mm では control の値を上回る。さらに、その差は断線素線から遠い素線ほど小さい。

図 2-34, 図 2-35, 図 2-36, 図 2-37 に wire9, wire10, wire11, wire12 についての control モデルと p9 断線モデルにおける z 座標に対する主応力分布を示す。これらの $\delta 2$ 素線の control の主応力は 470MPa から 505MPa の値をとる。wire9 は断線素線である。断線モデルでは断線部付近の主応力は 0 近くに落ち込み、離れるに従い大きくなっている。断線部 $z=0$ から 50 mm 離れた $z=-50, +50$ において、control と同程度の応力となり、そこから端に向かっては断線による影響を受けていない。wire10, wire11, wire12 では $\delta 1$ 素線同様、いずれもモデル全体を通して断線モデルの主応力は control と同程度であるが、 $z=0$ の両側 30mm では control の値を上回る。さらに、その差は断線素線から遠い素線ほど小さい。ただし、断線モデルと control の主応力差は $\delta 1$ 素線よりもさらに小さい傾向にある。

図 2-38, 図 2-39, 図 2-40, 図 2-41 に wire16, wire17, wire18, wire22 についての control モデルと p9 断線モデルにおける z 座標に対する主応力分布を示す。これらの $\delta 3$ 素線の control の主応力は 435MPa から 475MPa の値をとる。wire16, wire17, wire18, wire22 のいずれも、全体を通して断線モデルの主応力は control と同程度であるが、 $z=0$ の両側 30mm では control の値を上回る。さらに、その差は wire16, wire17, wire18 の順に断線素線から遠い素線ほど小さいが、wire22 では wire16 より小さく wire17 より大きい。

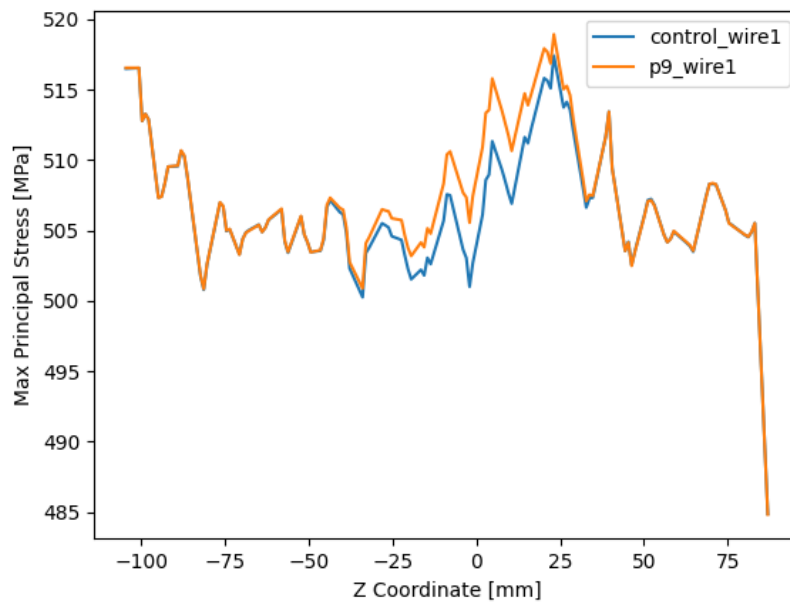


図 2-29 control モデルと p9 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布

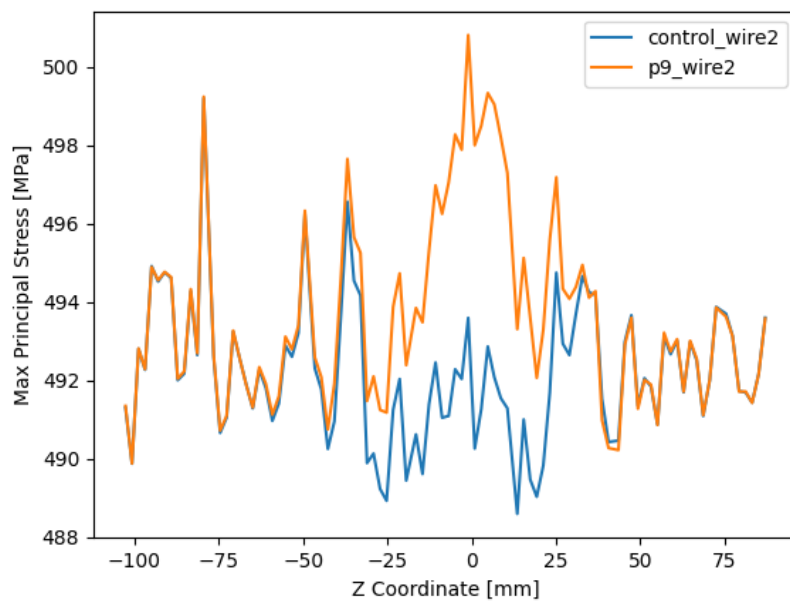


図 2-30 control モデルと p9 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主応力分布

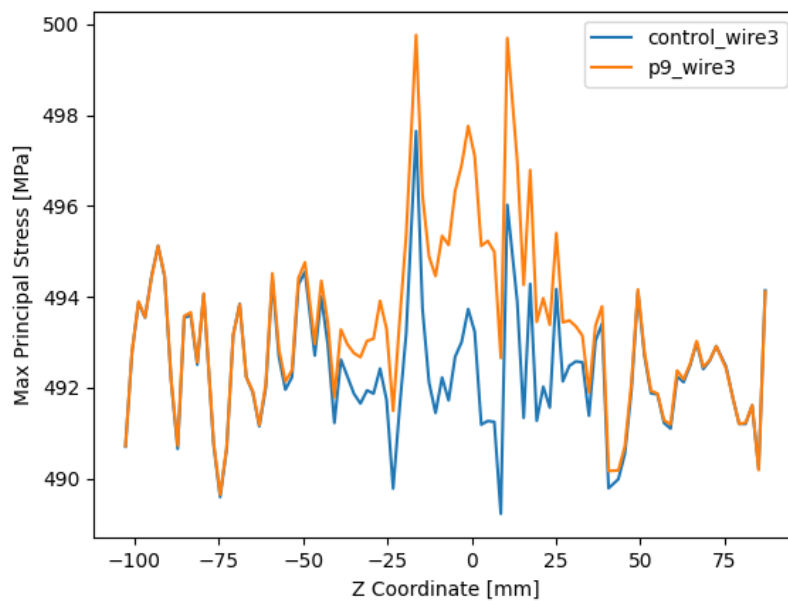


図 2-31 control モデルと p9 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主応力分布

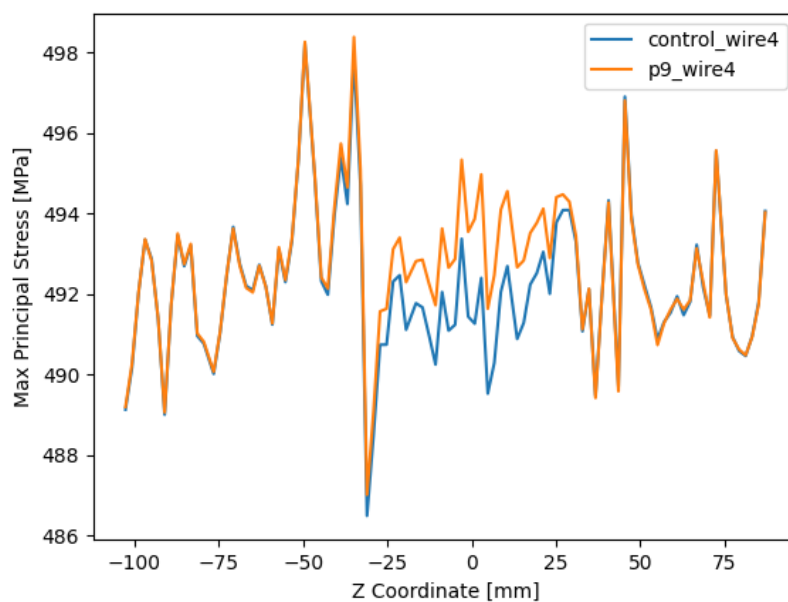


図 2-32 control モデルと p9 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布

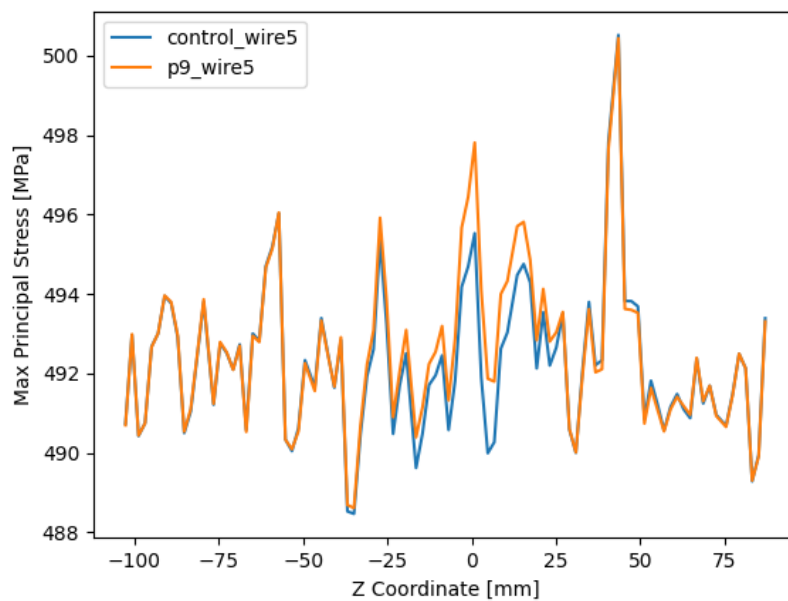


図 2-33 control モデルと p9 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布

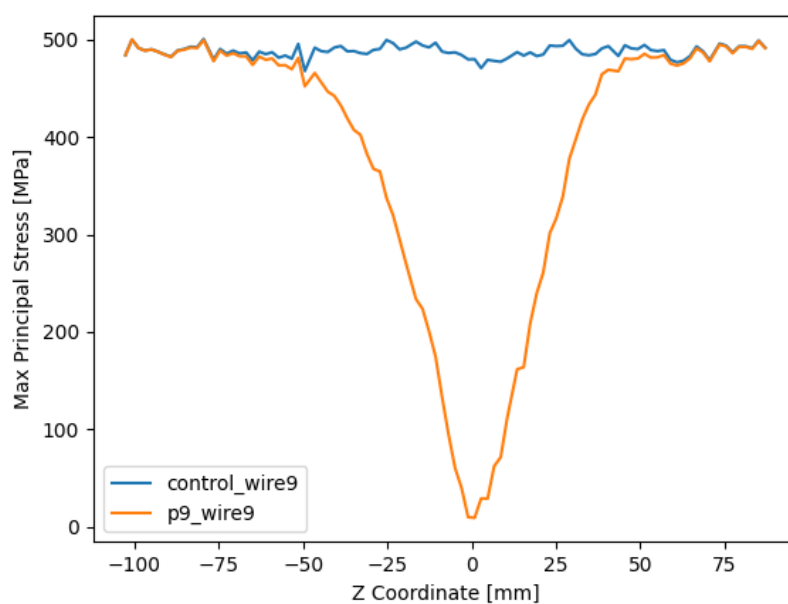


図 2-34 control モデルと p9 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する主応力分布

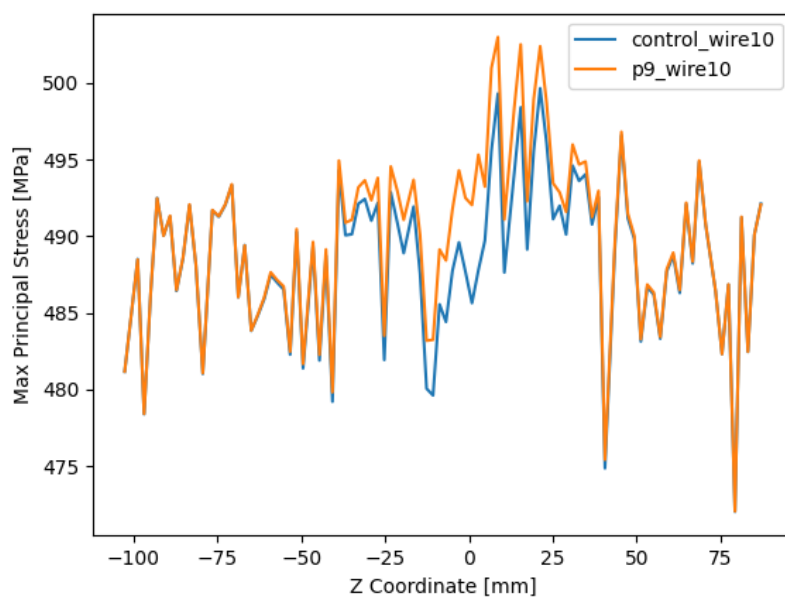


図 2-35 control モデルと p9 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する主応力分布

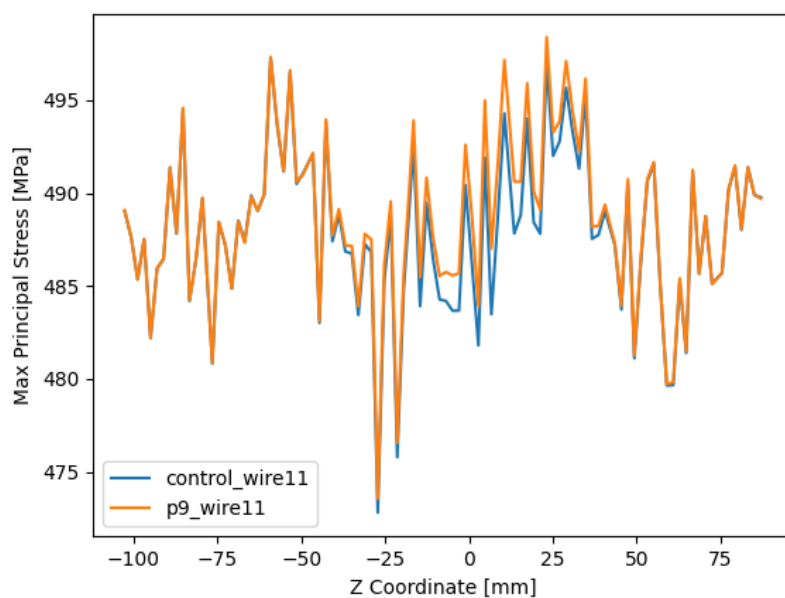


図 2-36 control モデルと p9 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する主応力分布

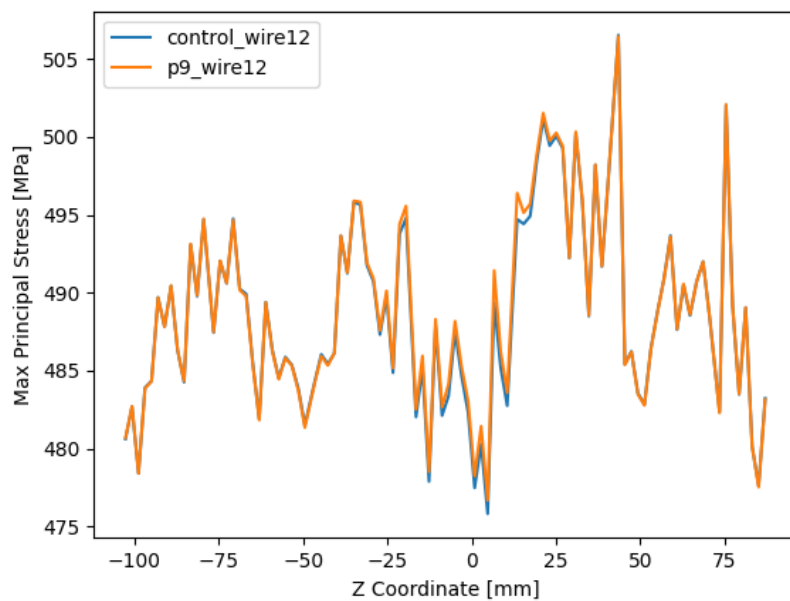


図 2-37 control モデルと p9 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する主応力分布

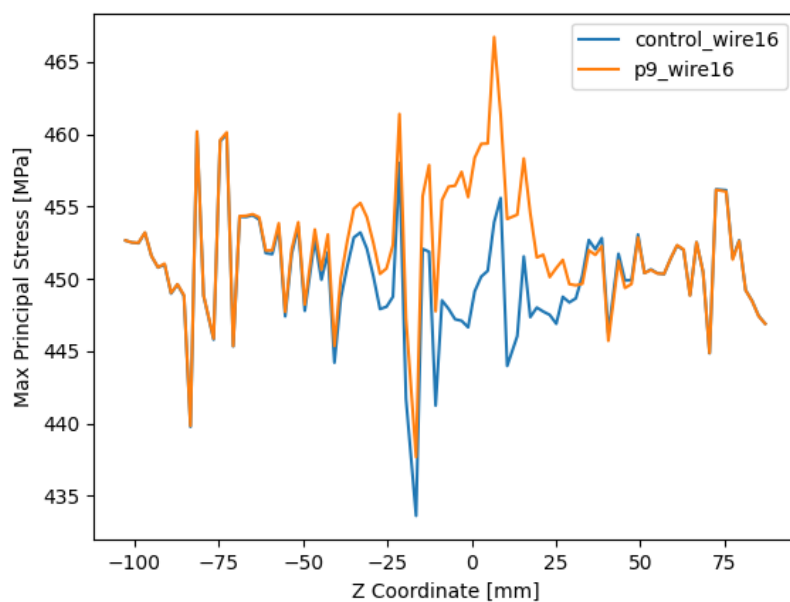


図 2-38 control モデルと p9 断線モデルにおける wire16 の z 座標に対する主応力分布

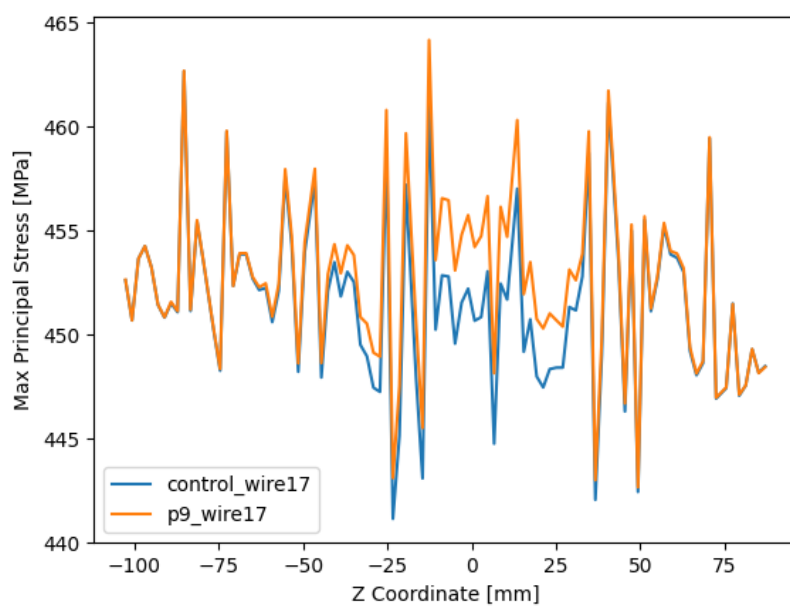


図 2-39 control モデルと p9 断線モデルにおける wire17 の z 座標に対する主応力分布

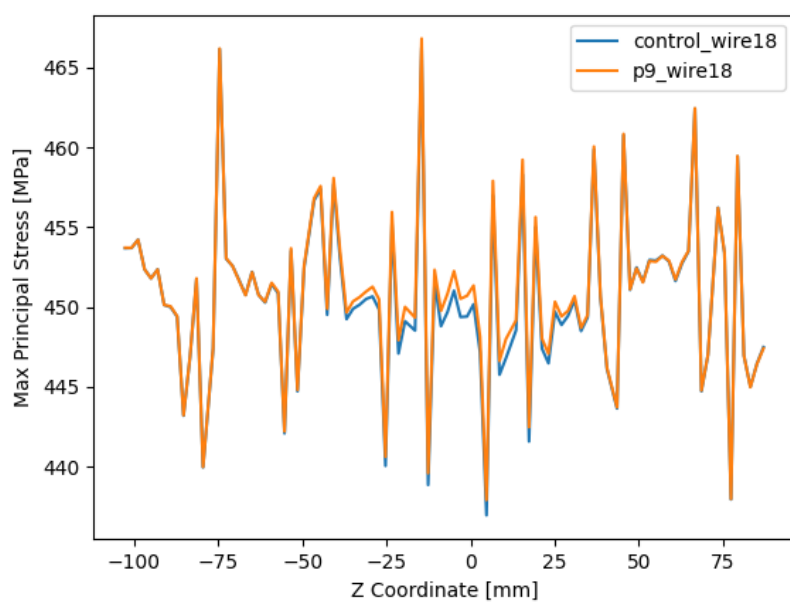


図 2-40 control モデルと p9 断線モデルにおける wire18 の z 座標に対する主応力分布

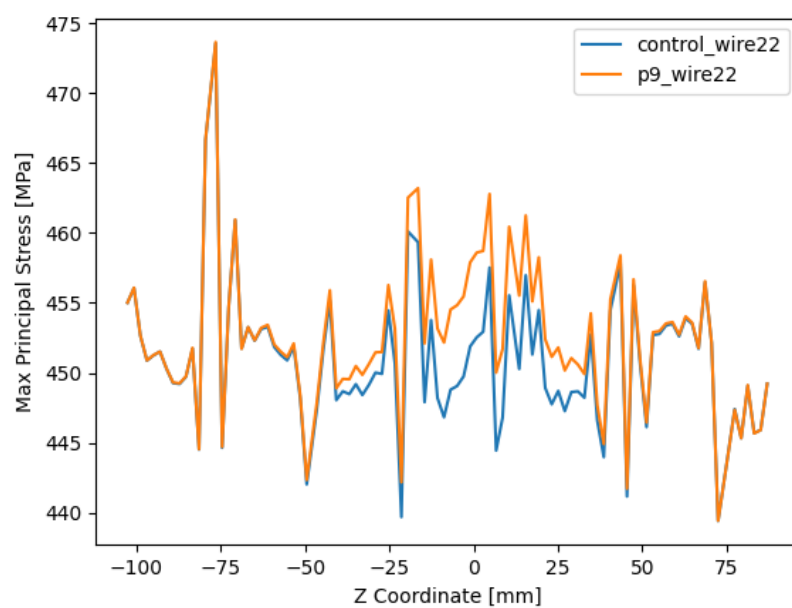


図 2-41 control モデルと p9 断線モデルにおける wire22 の z 座標に対する主応力分布

第3章 ロープ引張解析

3.1 解析モデル

本章で解析対象とするのは、IWRC6×Fi(29) $\phi 16\text{mm}$ である。鋼心の周りに Fi(29)ストランドが 6 本撚り合わされた構造となっている。まず、ロープの中心を構成する鋼心について説明する。

鋼心は、直ストランド(I_{in})をコアとして、さらにその周りに同一の構成のストランド(I_{out})を 6 本撚り合わせて構成されている。図 3-1 に鋼心断面図を示す。本論文では、各素線をそれぞれのストランド中心から順に I_{in} において $I_{in}-\delta 00$, $I_{in}-\delta 01$, I_{out} において $I_{out}-\delta 10$, $I_{out}-\delta 11$ と呼称する。 I_{in} , I_{out} の各素線のパラメータをそれぞれ表 3-1, 表 3-2 に示す。

ロープを構成する螺旋 Fi(29)ストランドのパラメータを表 3-3 に示す。

各素線に対し鋼心中心から順に 1 から 49 までの番号を割り当てた。その番号を図 3-2 に示す。続いて、ストランドにも 50 から 223 までの素線番号を割り当てた。その番号を図 3-3 に示す。

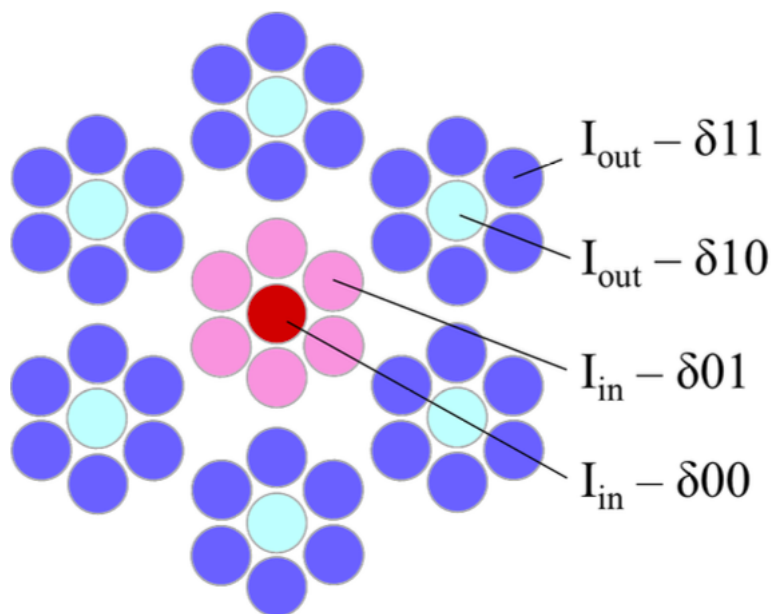


図 3-1 鋼心の構成

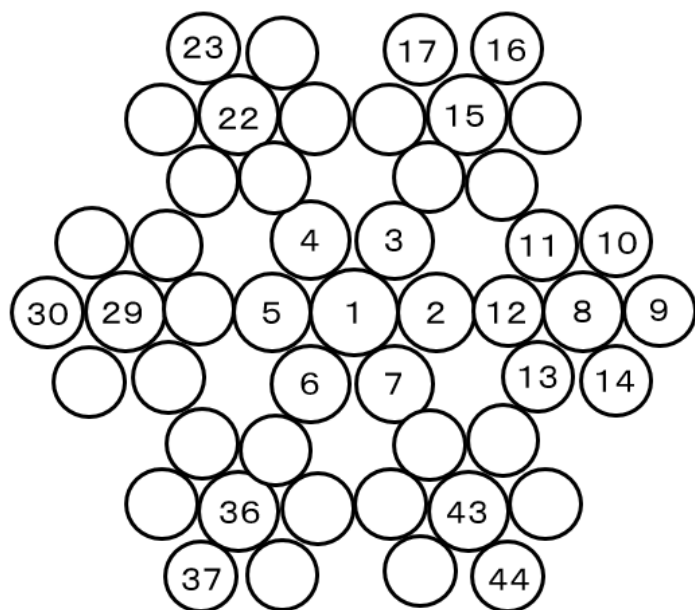


図 3-2 鋼心 IWRC の断面図および素線番号

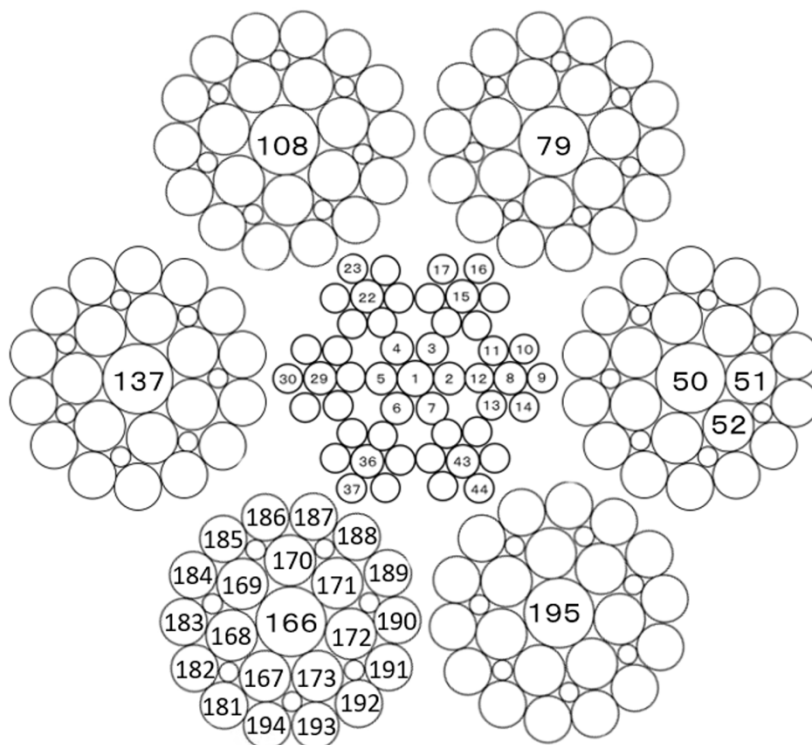


図 3-3 IWRC6×Fi(29)の断面図および素線番号

表 3-1 I_{in} の幾何学的パラメータ

	Curve shape	Diameter[mm]	Pitch length[mm]	Number
$\delta 00$	Straight	0.83	–	1
$\delta 01$	Helix	0.73	17	6

表 3-2 I_{out} の幾何学的パラメータ

	Curve shape	Diameter[mm]	Pitch length[mm]		Number	
			Strand	Wires in strand	Strand	Wires in strand
$\delta 10$	Helix	0.73	44	–	6	1
$\delta 11$	Double helix	0.67		30		6

表 3-3 S_{out} の幾何学的パラメータ

	Curve shape	Diameter[mm]	Pitch length[mm]		Number		
			Strand	Wires in strand	Strand	Wires in strand	
$\delta 0$	Helix	1.5	100	–	6	1	
$\delta 1$	Double helix	1.1		30		7	
$\delta 2$	Double helix	0.42					14
$\delta 3$	Double helix	0.90					

本章で扱うモデルの断線箇所は，wire10 と wire189 の $z=52$ 部である．内部で素線同士が接触している部分を，摩耗しやすいと考えられることから断線箇所として選んだ．ワイヤロープの $z=52$ 断面を図 3-4 に示す．IWRC の最も外側に位置する $I_{out}-\delta 11$ とストランドの最も外側に位置する $S_{out}-\delta 3$ が接触していることがわかる．wire10 と wire189 を図 3-5 に示す．

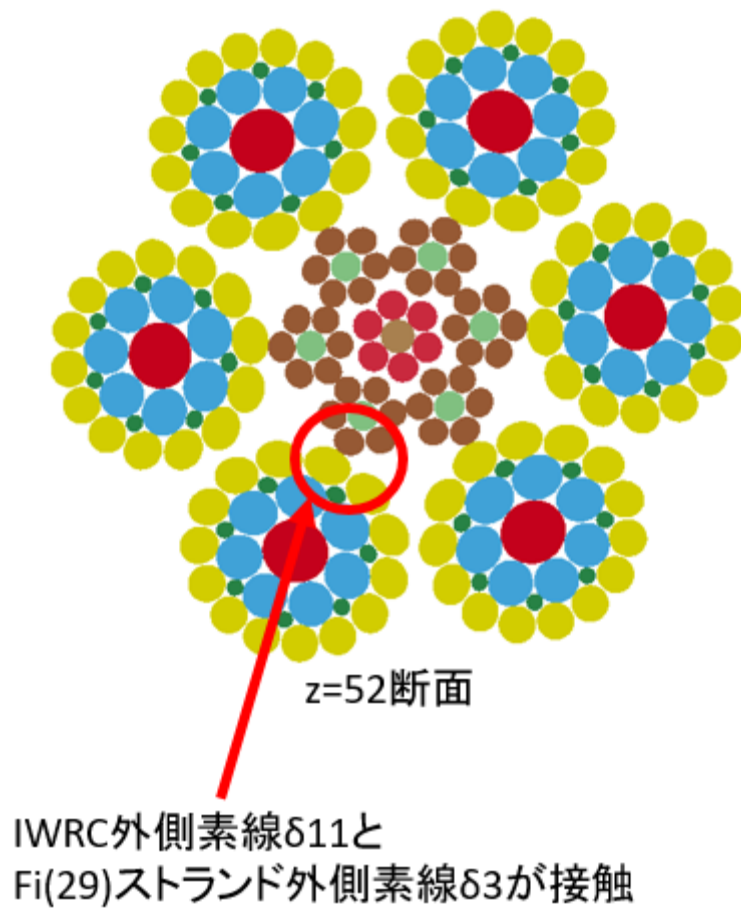


図 3-4 ワイヤロープの $z=52$ 断面

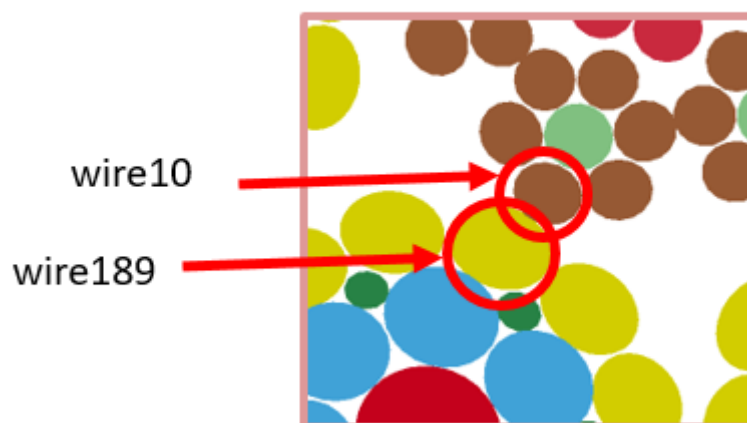


図 3-5 ワイヤロープ $z=52$ 断面詳細図

3.2 解析条件

解析規模を表 3-4 に，解析条件を表 3-5 に示す．

境界条件を述べる．引張力によりロープの撓りが戻るのを防ぐため，ロープ両端 2.5 mm における全節点について，各ロープ端中心節点に剛体拘束し，z 軸方向の回転を拘束した．ロープ軸方向が z 軸と一致するよう座標軸を設定しており，ロープの長さは $z = -5$ から $z = 125$ までの 130mm である．ロープの 3 次元メッシュ形状を図 3-6 に示す．

荷重条件を述べる．各ロープ端中心節点に z 軸方向に引張力を加えた．引張力は，線形に増加させた．荷重曲線は図 3-7 の通りである．

表 3-4 ロープ軸方向引張解析規模

節点数	4411067
要素数	3726540

表 3-5 ロープ軸方向引張解析条件

解析ソフト	LS-DYNA R11.2.2
解析手法	準静的陽解法
要素	ソリッド要素
接触定義位置	素線間 (ペナルティ法)
解析時間	0.1[s]
タイムステップ	2.37×10^{-8} [s]
材料特性	$E=205$ [GPa], $E_{t1}=79.7$ [GPa], $E_{t2}=6.29$ [GPa], $\nu=0.3$
摩擦係数	0.1

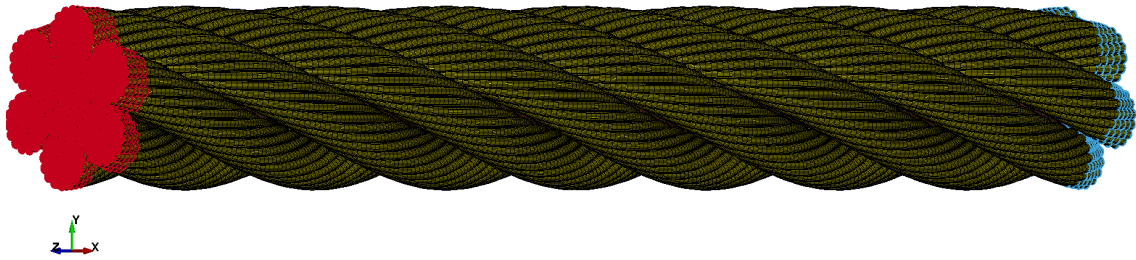


図 3-6 ロープの 3 次元メッシュ形状

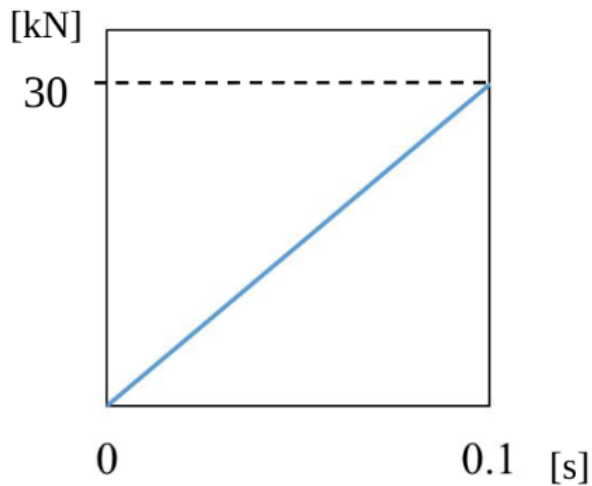


図 3-7 ロープ軸方向引張解析荷重曲線

3.3 解析結果

3.3.1 I_{out} - $\delta 11$ 断線モデル

まず、断線なし control モデルと I_{out} - $\delta 11$ 断線モデルの 2 種類のモデルについて、各素線の z 座標に対する主応力の分布を比較する。 I_{out} - $\delta 11$ 断線モデルを wire10 が断線素線であることから、以降 p10 断線モデルと呼ぶ。

図 3-8, 図 3-9, 図 3-10, 図 3-11, 図 3-12, 図 3-13, 図 3-14 に wire1, wire2, wire3, wire4, wire5, wire6, wire7 についての control モデルと p10 断線モデルにおける z 座標に対する主応力分布を示す。これらは I_{in} 素線である。これらの control の主応力は 700MPa から 1050MPa の値をとる。全体として同程度の主応力分布が見られた。

図 3-15, 図 3-16, 図 3-17, 図 3-18, 図 3-19, 図 3-20, 図 3-21 に wire8, wire9, wire10, wire11, wire12, wire13, wire14 についての control モデルと

p10 断線モデルにおける z 座標に対する主応力分布を示す。これらは I_{out} 素線である。これらの control の主応力は 400MPa から 800MPa の値をとる。 I_{out} の中心素線である wire8 の断線モデルの主応力は、断線部 $z=52$ 付近では control よりも大きく、離れたところでは同程度か少し小さな値となる。wire9 は断線素線の隣に位置する。wire9 の断線モデルの主応力は $z=40$ から $z=100$ の範囲では control より大きく、それより端側では control と同程度か少し小さな値をとる。wire10 は断線素線であり、断線モデルの主応力分布は全体として control より小さく、谷型を描く。wire11 は wire9 と同様断線素線と隣り合う素線であり、同様の傾向が見られた。wire12, wire13, wire14 はいずれも全体として断線モデルの主応力が control より小さかった。

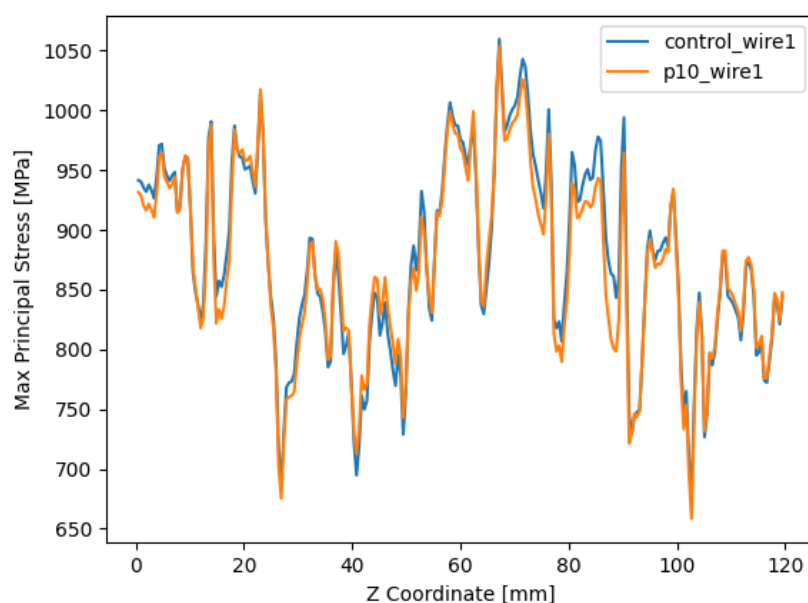


図 3-8 control モデルと p10 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布

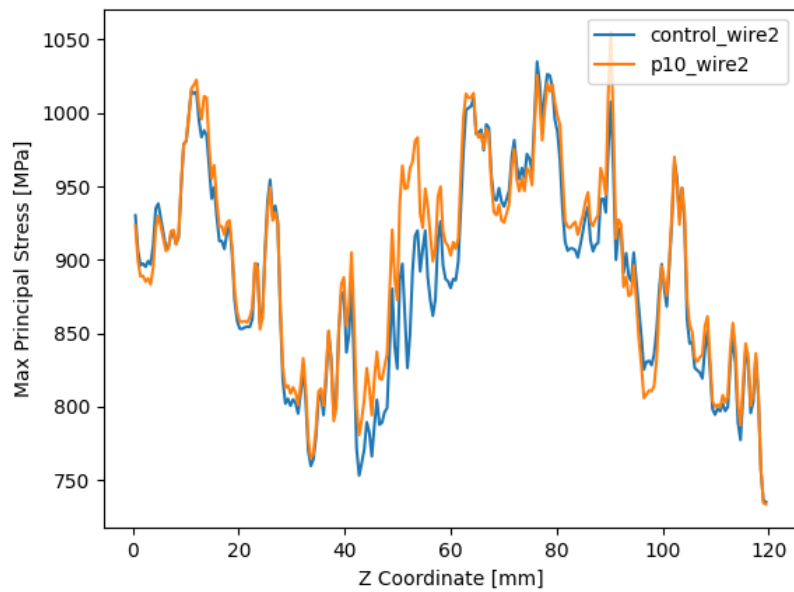


図 3-9 control モデルと p10 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主応力分布

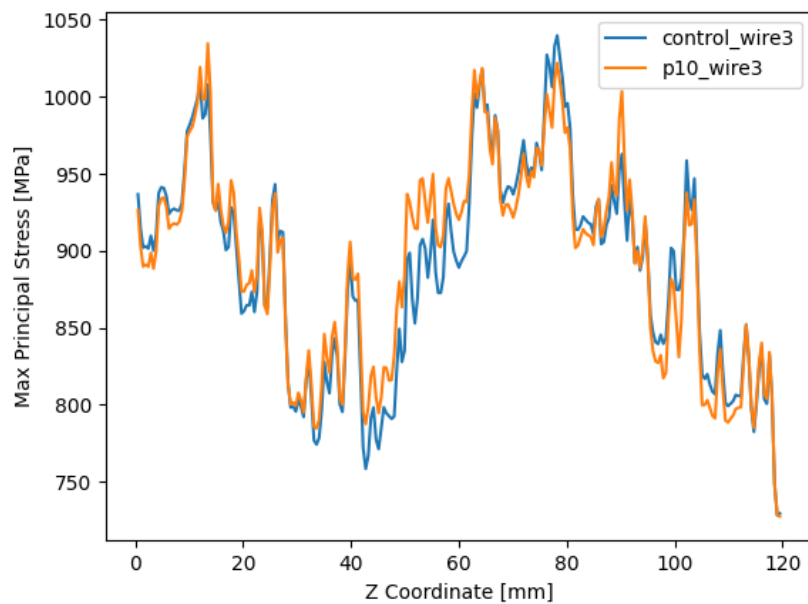


図 3-10 control モデルと p10 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主応力分布

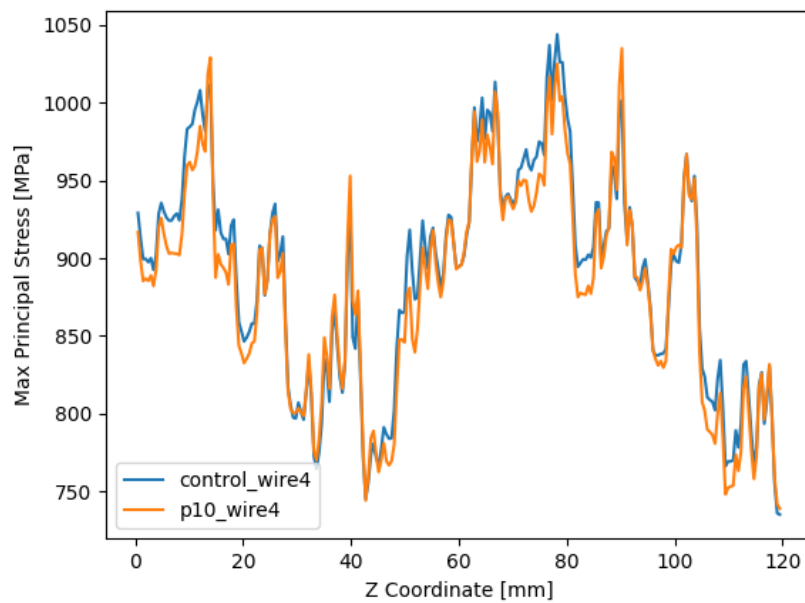


図 3-11 control モデルと p10 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布

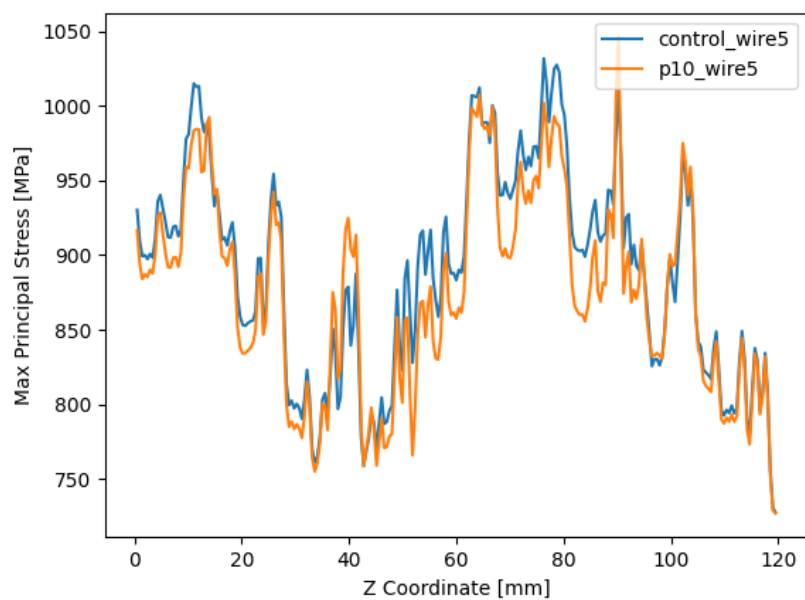


図 3-12 control モデルと p10 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布

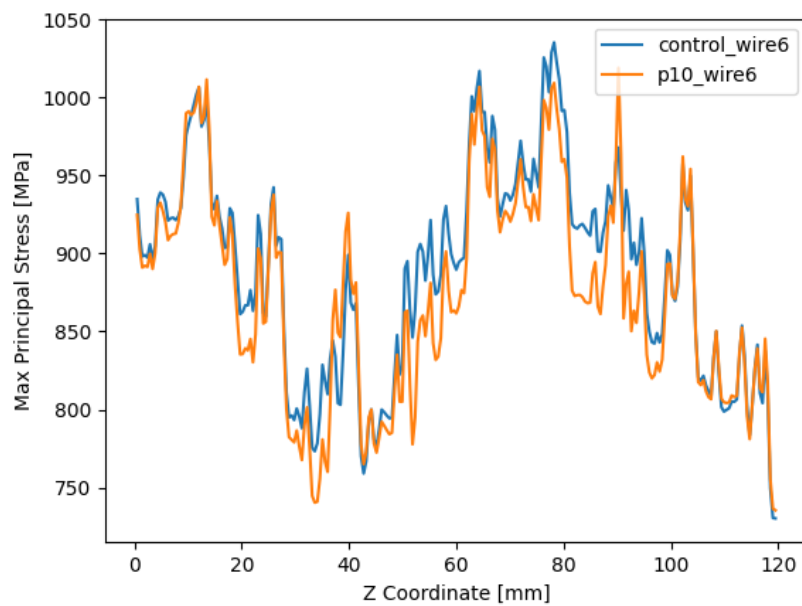


図 3-13 control モデルと p10 断線モデルにおける wire6 の z 座標に対する主応力分布

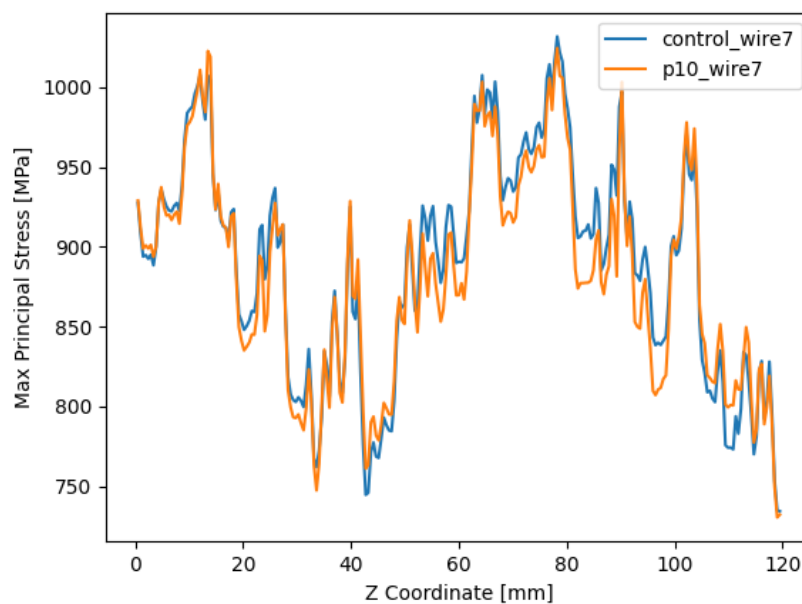


図 3-14 control モデルと p10 断線モデルにおける wire7 の z 座標に対する主応力分布

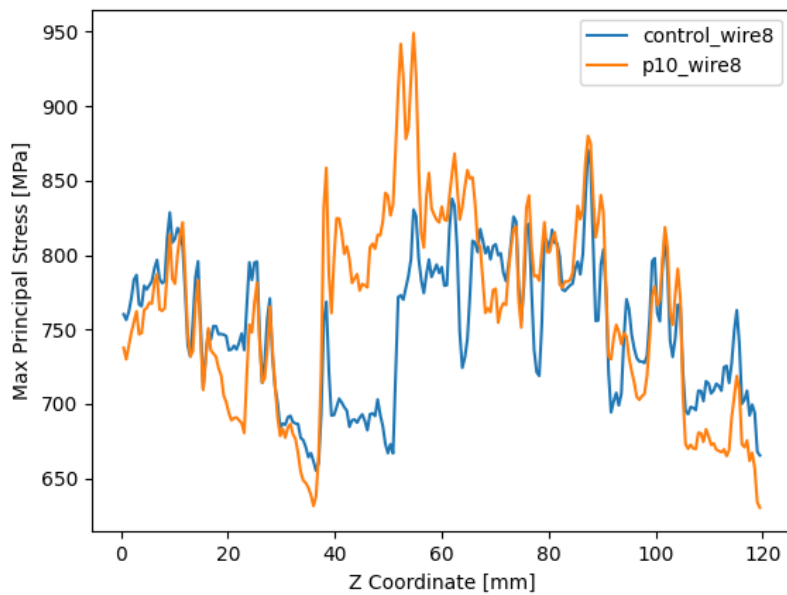


図 3-15 control モデルと p10 断線モデルにおける wire8 の z 座標に対する主応力分布

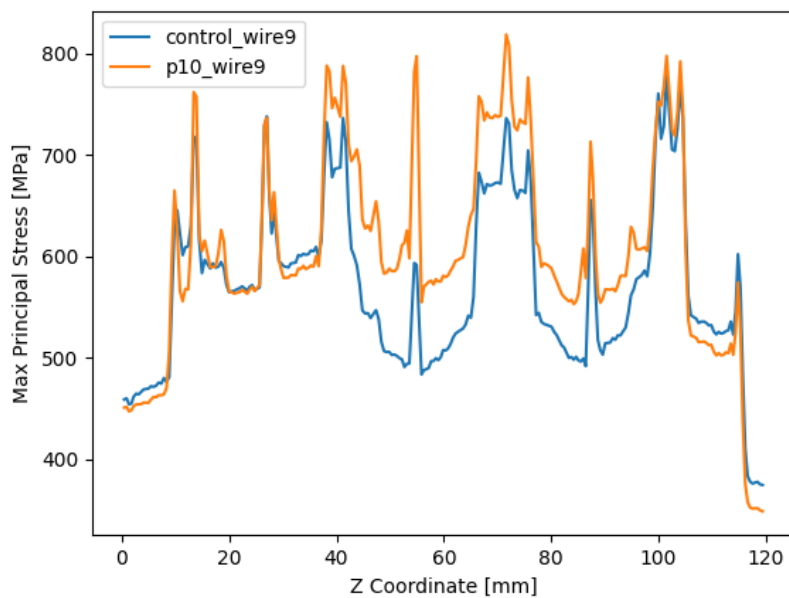


図 3-16 control モデルと p10 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する主応力分布

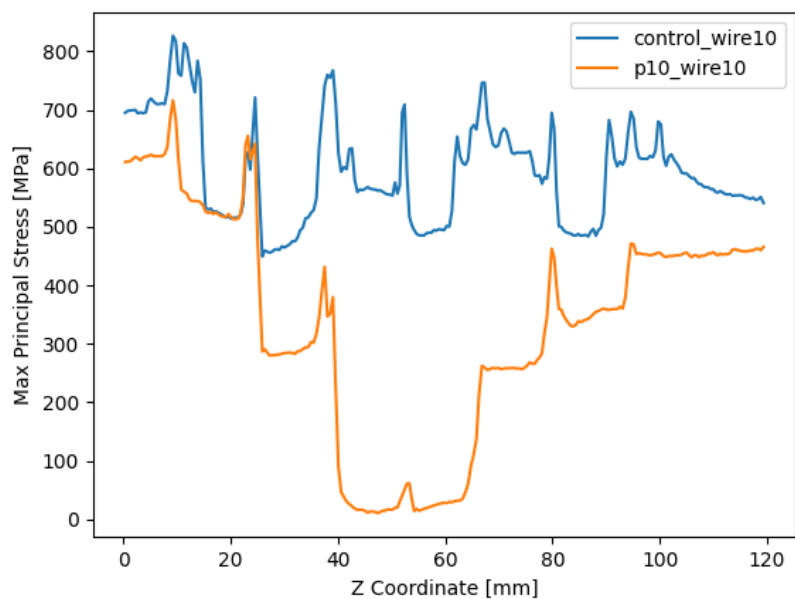


図 3-17 control モデルと p10 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する主応力分布

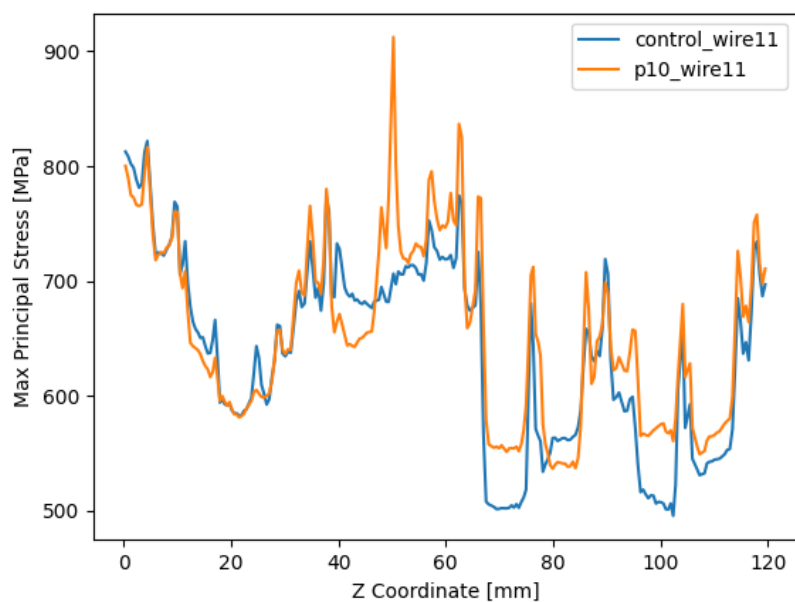


図 3-18 control モデルと p10 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する主応力分布

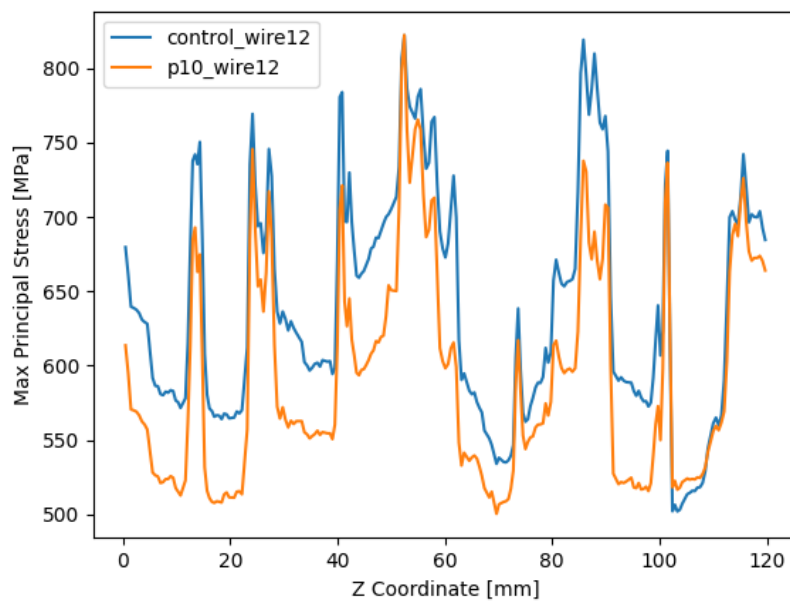


図 3-19 control モデルと p10 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する主応力分布

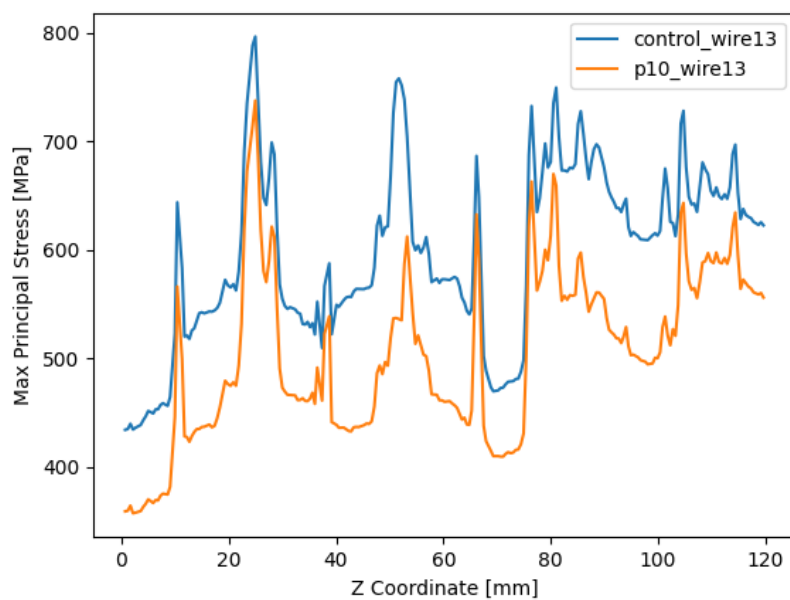


図 3-20 control モデルと p10 断線モデルにおける wire13 の z 座標に対する主応力分布

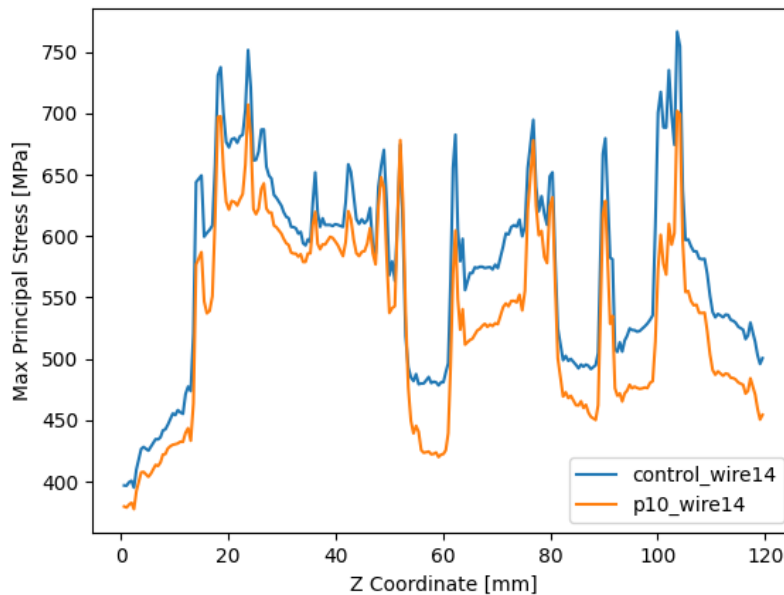


図 3-21 control モデルと p10 断線モデルにおける wire14 の z 座標に対する主応力分布

3.3.2 $S_{out}-\delta 3$ 断線モデル

つぎに、断線なし control モデルと $S_{out}-\delta 3$ 断線モデルの 2 種類のモデルについて、各素線の z 座標に対する主応力の分布を比較する。 $S_{out}-\delta 3$ 断線モデルを以降 p189 断線モデルと呼ぶ。

図 3-22, 図 3-23, 図 3-24, 図 3-25, 図 3-26, 図 3-27, 図 3-28 に wire1, wire2, wire3, wire4, wire5, wire6, wire7 についての control モデルと p189 断線モデルにおける z 座標に対する主応力分布を示す。これらは I_{in} 素線である。これらの control の主応力は 700MPa から 1050MPa の値をとる。いずれも全体として断線モデルと control で同程度の主応力分布が見られた。

図 3-29, 図 3-30, 図 3-31, 図 3-32, 図 3-33, 図 3-34, 図 3-35 に wire8, wire9, wire10, wire11, wire12, wire13, wire14 についての control モデルと p189 断線モデルにおける z 座標に対する主応力分布を示す。これらは I_{out} 素線である。 I_{out} の中心素線である wire8 は、 $z=52$ 付近では control よりも大きく、離れたところでは同程度となる。wire9 の断線モデルの主応力は control と同程度であった。断線素線 wire189 と接する wire10 では、wire8 同様、 $z=52$ 付近では control よりも大きく、離れたところでは同程度となった。wire11,

wire12, wire13, wire14 では、いずれも全体として断線モデルと control で同程度の主応力分布が見られた。

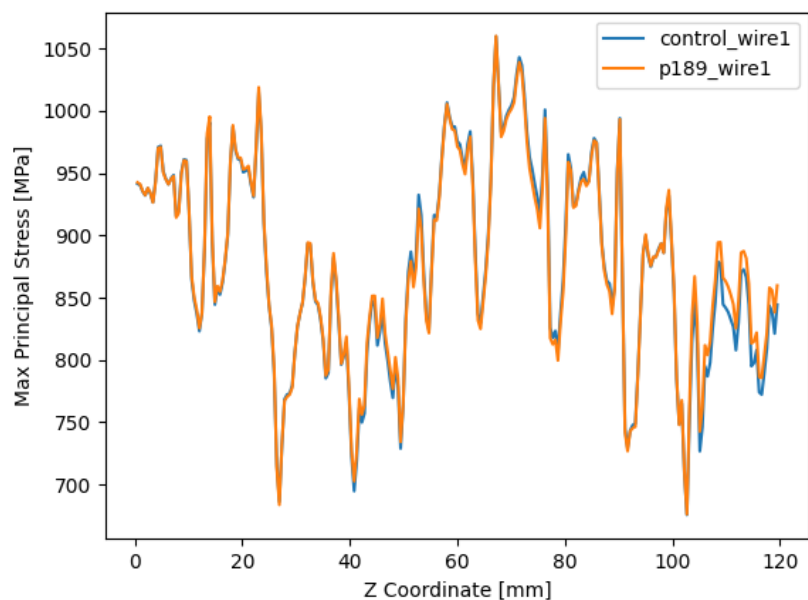


図 3-22 control モデルと p189 断線モデルにおける wire1 の z 座標に対する主応力分布

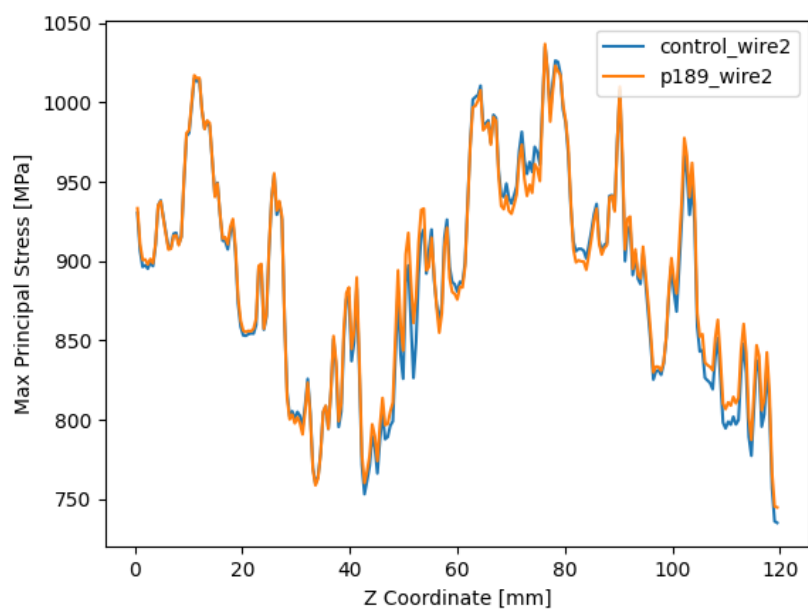


図 3-23 control モデルと p189 断線モデルにおける wire2 の z 座標に対する主応力分布

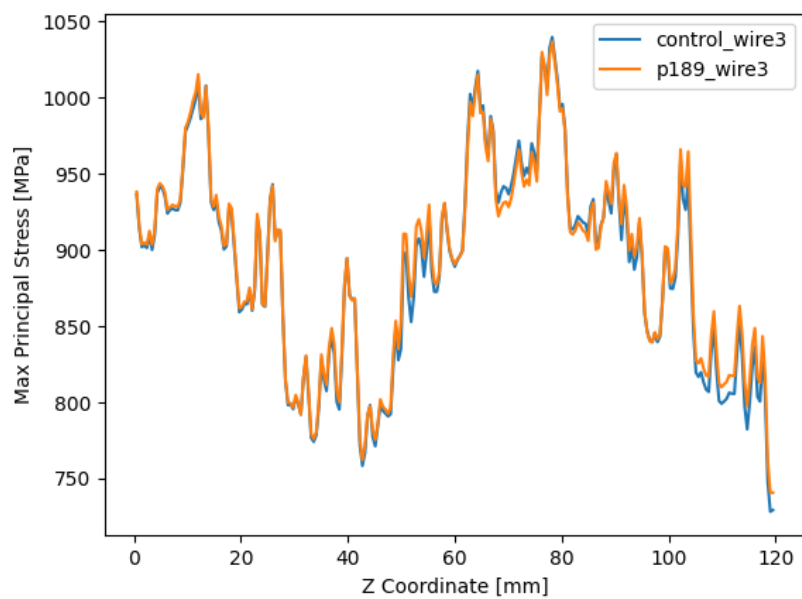


図 3-24 control モデルと p189 断線モデルにおける wire3 の z 座標に対する主応力分布

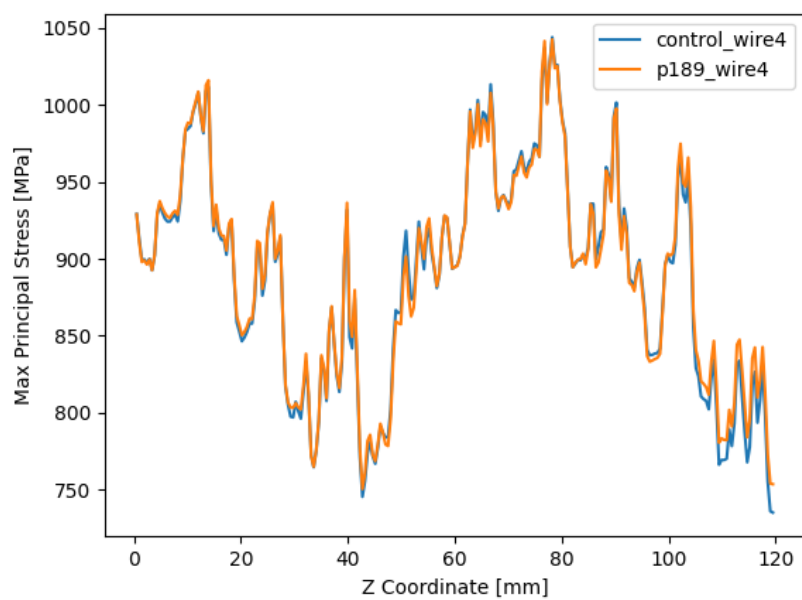


図 3-25 control モデルと p189 断線モデルにおける wire4 の z 座標に対する主応力分布

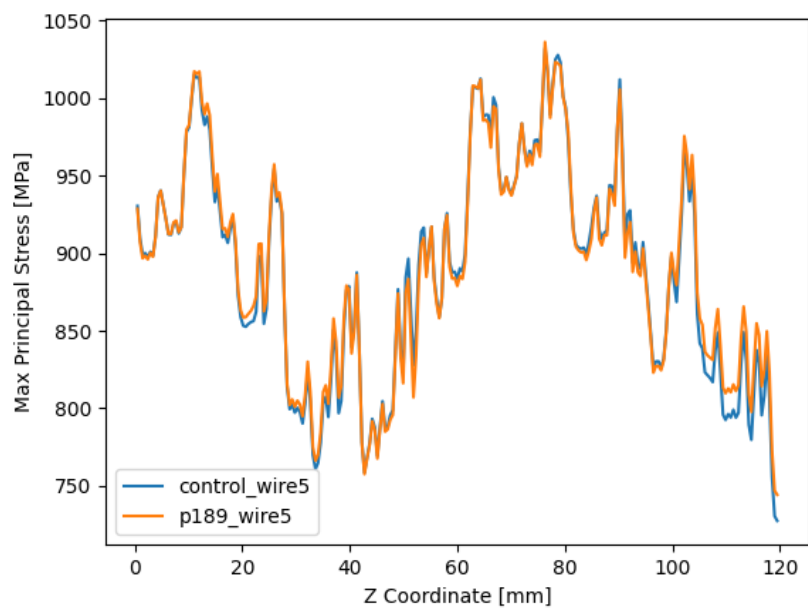


図 3-26 control モデルと p189 断線モデルにおける wire5 の z 座標に対する主応力分布

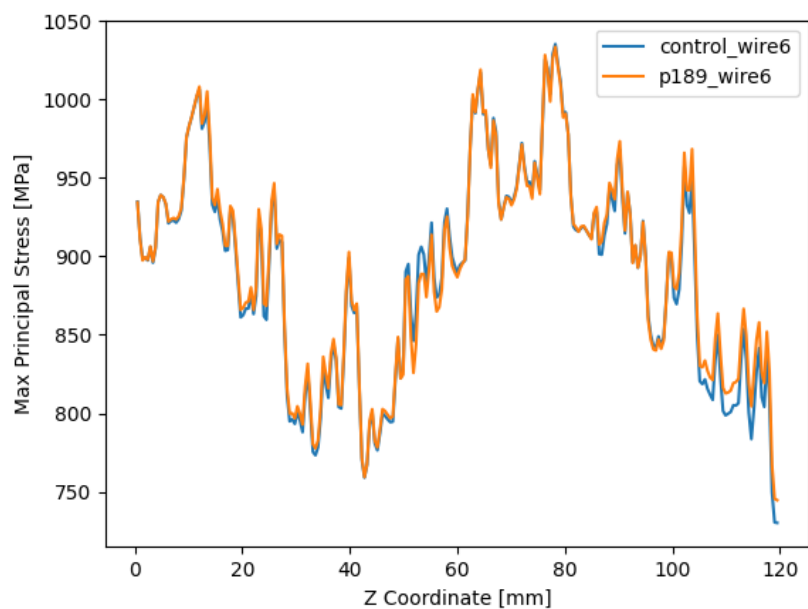


図 3-27 control モデルと p189 断線モデルにおける wire6 の z 座標に対する主応力分布

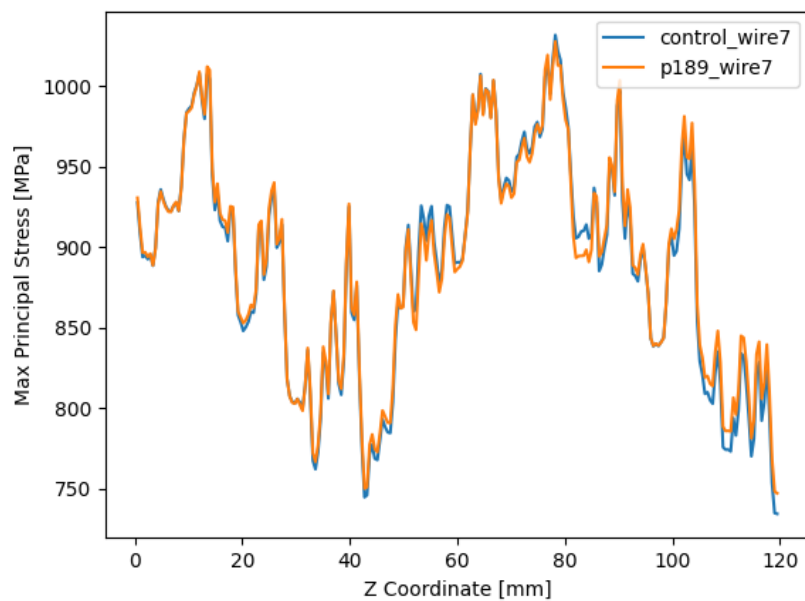


図 3-28 control モデルと p189 断線モデルにおける wire7 の z 座標に対する主応力分布

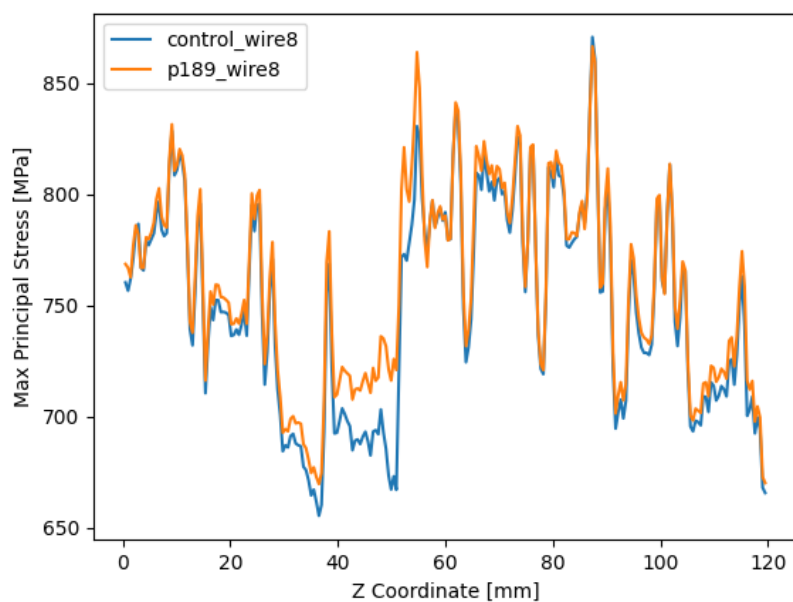


図 3-29 control モデルと p189 断線モデルにおける wire8 の z 座標に対する主応力分布

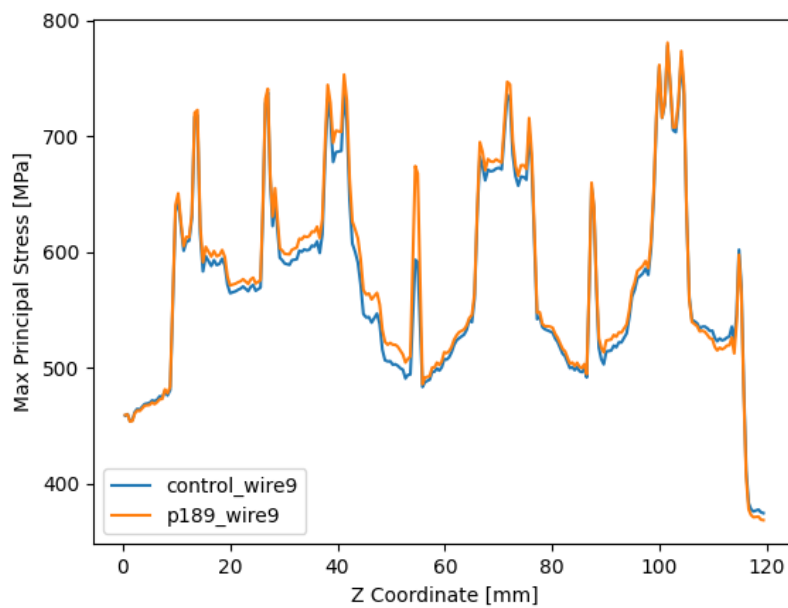


図 3-30 control モデルと p189 断線モデルにおける wire9 の z 座標に対する主応力分布

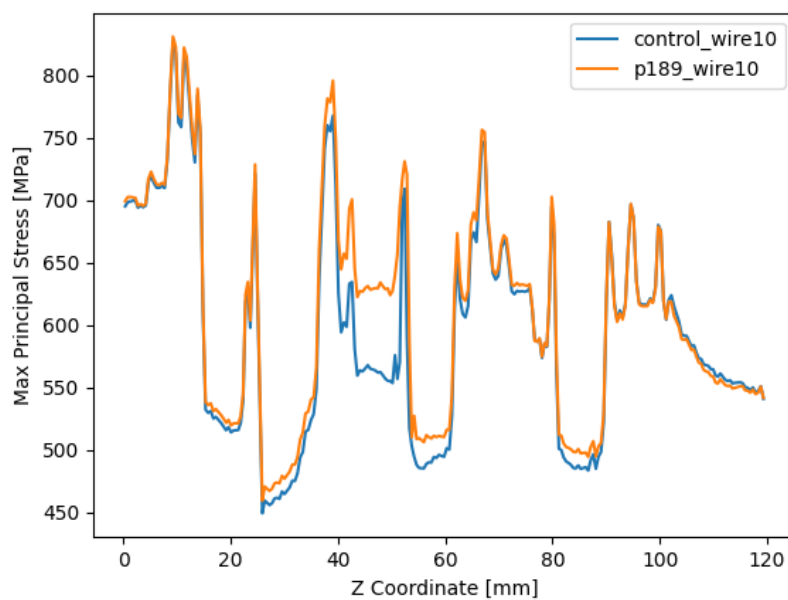


図 3-31 control モデルと p189 断線モデルにおける wire10 の z 座標に対する主応力分布

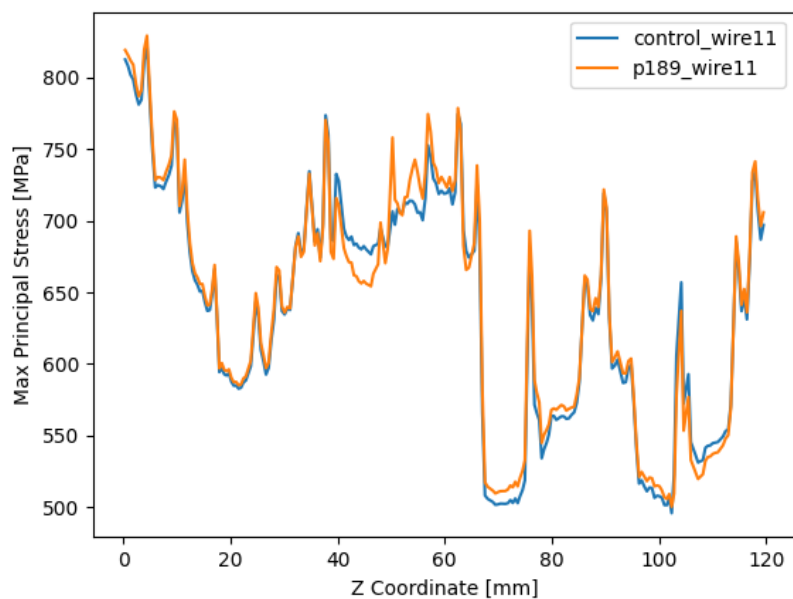


図 3-32 control モデルと p189 断線モデルにおける wire11 の z 座標に対する主応力分布

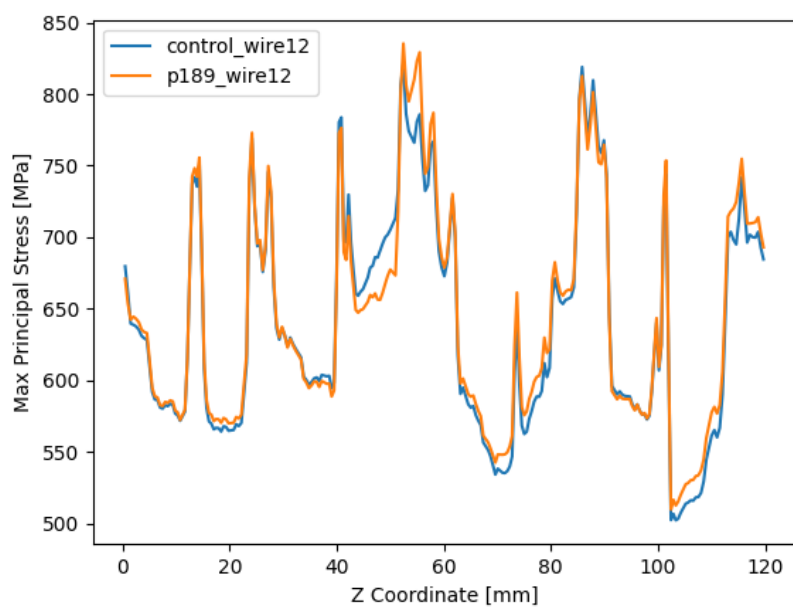


図 3-33 control モデルと p189 断線モデルにおける wire12 の z 座標に対する主応力分布

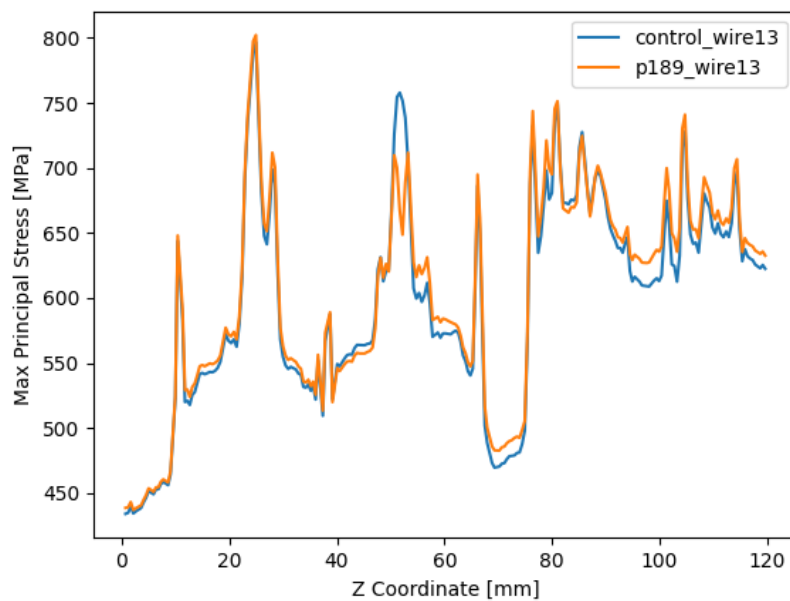


図 3-34 control モデルと p189 断線モデルにおける wire13 の z 座標に対する主応力分布

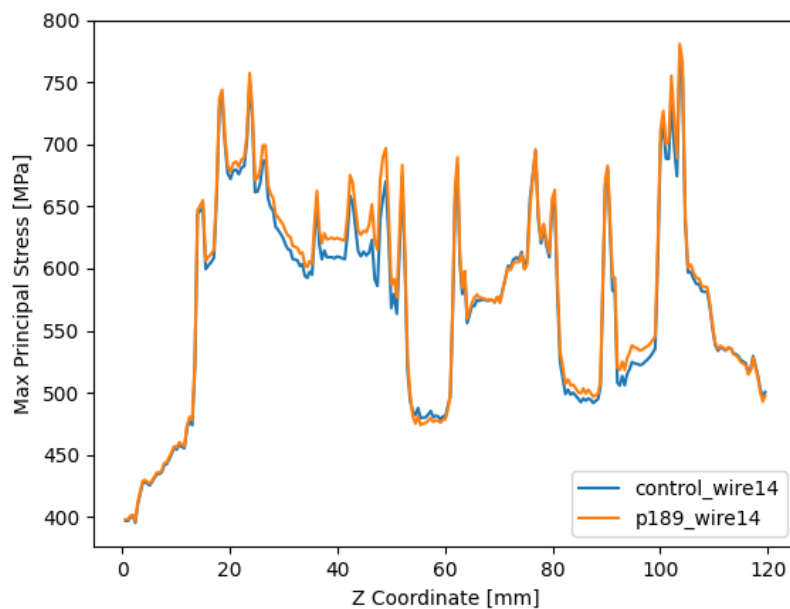


図 3-35 control モデルと p189 断線モデルにおける wire14 の z 座標に対する主応力分布

第4章 結論

4.1 結論

本研究では、クレーン用ワイヤロープ IWRC 6×Fi(29)ロープについて、素線断線による力学的特性の変化の評価を、有限要素法解析を用いて行った。直ストランドについて、3種の素線断線モデルを作成し、それぞれにおける引張解析の結果を断線なしモデルと比較した。ロープについて、2種の素線断線モデルを作成し、それぞれにおける引張解析の結果を断線なしモデルと比較した。

得られた結果から、断線素線における応力分布は、断線部から離れるほど断線なしの場合の応力分布に近づくことがわかった。また、断線素線以外の素線においては、断線素線に距離が近い素線は断線による影響を受けやすいのに対し、距離の遠い素線は、受ける影響が少ないことが明らかになった。

4.2 今後の課題

4.2.1 実験による妥当性確認

本研究で用いた IWRC 6×Fi(29)モデルは先行研究によって妥当性が確認されているが、素線断線状態での解析の妥当性は確認されていない。同条件の実験との、剛性やひずみなどの力学的特性の比較が必要であると考えられる。

4.2.2 異なる種類のワイヤロープへの応用

本研究ではクレーン用ワイヤロープ IWRC 6×Fi(29)について解析を行った。シール型、ウォーリントン型、ウォーリントンシール型など、異なる種類のワイヤロープへの応用を行うことで、ワイヤロープ設計のより定量的な指針を得られると考えられる。

参考文献

- [1] 田中正清. クレーン用ワイヤロープの破断事例と対策. 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集 pp. 639-640 (2000)
- [2] Federico H Hruska. Radial forces in wire ropes. Wire and wire products, Vol.27, No.5, pp.459–463, 1952.
- [3] FH Hruska. Tangential forces in wire ropes. Wire and wire products, Vol.28, No.5, pp.455–460, 1953.
- [4] A.E.H.Love. A treatise on the mathematical theory of elasticity. Dover Publications Inc., 1944.
- [5] RH Knapp. Derivation of a new stiffness matrix for helically armoured cables considering tension and torsion. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.14, No.4, pp.515–529, 1979.
- [6] G.A.Costello. Theory of Wire Rope. Mechanical Engineering Series. Springer New York, 1997.
- [7] S Nabijou and RE Hobbs. Fatigue of wire ropes bent over small sheaves. International Journal of Fatigue, Vol.16, No.7, pp.453–460, 1994.
- [8] 田中正清, 鴻巣真二. S 曲げ疲労を受けるワイヤロープの損傷挙動の定量評価 : IWRC6 Fi(29)の場合. 材料, Vol.44, No.503, pp.1086–1091, 1995.
- [9] Marco Giglio and Andrea Manes. Bending fatigue tests on a metallic wire rope for aircraft rescue hoists. Engineering Failure Analysis, Vol.10, No.2, pp.223–235, 2003.
- [10] M Giglio and A Manes. Life prediction of a wire rope subjected to axial and bending loads. Engineering Failure Analysis, Vol.12, No.4, pp.549–568, 2005.
- [11] 本田尚, 山際謙太, 山口篤志, 佐々木哲也. 従来材及び新素材クレーン用ロープの経年損傷評価と廃棄基準の見直し. 労働安全衛生総合研究所 特別研究報告(SRR-No.44-1). 2014.
- [12] 大塚賢哉, 青木義男. 二次元平面におけるマルチセンサデータを用いた特徴量抽出によるワイヤロープの損傷検出. 日本機械学会論文集 Vol.87, No.902 (2021), pp.1-13.
- [13] Ju-Won Kim and Seunghee Park. Magnetic Flux Leakage Sensing and Artificial Neural Network Pattern Recognition-Based Automated Damage Detection and Quantification for Wire Rope Non-Destructive Evaluation, . Sensors, Vol.18, No.109 (2018), pp.1-19.
- [14] Vasily, V. Sukhorukov, Dmitry, A. Slesarev and Alexander, N. Vorontsov, Electromagnetic Inspection and Diagnostics of Steel Ropes: Technology, Effectiveness and Problems, Materials Evaluation, Vol.72, No.8 (2014), pp.1019–1027.
- [15] 吉元慎治, 小坂大吾, 橋本光男, 大西友治, 石田礼. 漏洩磁束探傷法によるロープ検査の数値解析による評価. 非破壊検査 Vol.59, No.3 (2010), pp.131-137.

- [16] M Roshan Fekr, G McClure, and M Farzaneh. Application of adina to stress analysis of an optical ground wire. *Computers & structures*, Vol.72, No.1, pp.301–316, 1999.
- [17] WG Jiang, MS Yao, and JM Walton. A concise finite element model for simple straight wire rope strand. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.41, No.2, pp.143–161, 1999.
- [18] WG Jiang, JL Henshall, and JM Walton. A concise finite element model for three-layered straight wire rope strand. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.42, No.1, pp.63–86, 2000.
- [19] Wen-Guang Jiang. A concise finite element model for pure bending analysis of simple wire strand. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.54, No.1, pp.69–73, 2012.
- [20] 佐々木康二, 岩倉昭太, 高橋龍彦, 守谷敏之, 古川一平. 統計的手法に基づくワイヤロープの曲げ疲労寿命予測. *日本機械学会論文集 A 編*, Vol.71, No.707, pp.1003–1008, 2005.
- [21] Gordana M Kastratović and Nenad D Vidanović. Some aspects of 3D finite element modeling of independent wire rope core. *FME transactions*, Vol.39, No.1, pp.37–40, 2011.
- [22] E Stanova, G Fedorko, M Fabian, and S Kmet. Computer modelling of wire strands and ropes part II : Finite element-based applications. *Advances in Engineering Soft-ware*, Vol.42, No.6, pp.322–331, 2011.
- [23] Cengiz Erdonmez and C Erdem Imrak. A finite element model for independent wire rope core with double helical geometry subjected to axial loads. *Sadhana*, Vol.36, No.6, pp.995–1008, 2011.
- [24] Dangang Wang, Dekun Zhang, Songquan Wang, and Shirong Ge. Finite element analysis of hoisting rope and fretting wear evolution and fatigue life estimation of steel wires. *Engineering Failure Analysis*, Vol.27, pp.173–193, 2013.
- [25] V Fontanari, M Benedetti, and BD Monelli. Elasto-plastic behavior of a warrington-seale rope : Experimental analysis and finite element modeling. *Engineering Structures*, Vol.82, pp.113–120, 2015.
- [26] Juan Wu. The finite element modeling of spiral ropes. *International Journal of Coal Science & Technology*, Vol.1, Issue 3, pp. 346–355, 2014
- [27] 泉聡志, 中谷起也, 太田仁衣奈, 波田野明日可, 山際謙太. エレベータ用ロープの径方向剛性を再現する有限要素モデリング. *日本機械学会論文集* Vol.87, No.896 (2021), 20-00418.
- [28] 太田仁衣奈, 緒方公俊, 山際謙太, 泉聡志. IWRC ワイヤロープの有限要素モデリングによる軸方向と径方向剛性の再現. *日本機械学会論文集* Vol.88, No.913 (2022), 22-00144.

謝辞

本研究は、泉教授のご指導の元で進められました。私の度重なる体調不良により研究活動が滞った際にも、適切なご助言をいただいたことで、本論文を書き上げることができました。お忙しい中でのご指導、本当にありがとうございました。

波田野講師には研究室配属時に担当教員としてご指導をいただきました。当初のテーマでの論文執筆は叶いませんでしたが、お忙しい中熱心にご指導いただきありがとうございました。

榎間助教には週毎の研究会にてのご助言や、開発環境の構築を通してお世話になりました。ありがとうございました。

ワイヤロープの研究を共に行った緒方氏、児玉氏には、本研究に関して細かなご助言をいただきました。心から感謝申し上げます。

また、研究室の他の皆様にも、有限要素法の知識、解析ソフトの使用方法に関して、様々なご助言をいただきました。研究室内の全ての皆様に支えられ、本論文を執筆することができました。深く御礼申し上げます。

最後に、大学生活を支えてくれた母に感謝を表して、以上を謝辞といたします。

2023 年 1 月 27 日

笹倉 まお