

修士論文

クレーン用ワイヤロープの
内部状態を再現する有限要素解析法の開発と
引張曲げ試験への応用

令和4年2月7日提出

指導教員 泉 聡志 教授 泉

37206195 太田 仁衣奈

クレーン用ワイヤロープの内部状態を再現する有限要素解析法の開発と引張曲げ試験への応用

太田 仁衣奈 指導教員 泉 聡志 教授

Keywords: Wire Rope, Finite Element Analysis, Contact problem, Fatigue, Friction

1. 緒言

クレーン用ワイヤロープ（以下、ロープ）は、素線を数十本撚り合わせたストランドをさらに鋼心の周りに6本撚り合わせて作られている。その構造上優れた柔軟性と高い引張り強度を併せ持つ一方で、素線の損傷や破断がロープ内部において進展しやすく、予期せぬ破断により死傷災害にもつながっている。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。

ロープ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。ロープ有限要素モデルの力学的特性再現性の確認のためには、軸方向剛性に加え径方向剛性についても検討を行う必要があると言える。径方向剛性はロープ内部の素線接触状態に大きく依存すると考えられ、モデルの撚り状態の妥当性を確認することができるためである。

先行研究において径方向剛性を考慮したロープ有限要素モデルが作成された[1]が、ロープ実形状再現性が不十分であった可能性がある。ストランドは、ストランド断面がストランド軸に対して回転しながら心綱に巻き付く構造となっていることから、ストランド断面はストランド軸方向位置に依存する位相を持つ。現実のロープ内で複数本撚り合わされている各ストランドの位相は、それぞれ異なることが予想されるが、これまでの先行研究ではこの位相の非対称性は考慮されておらず、ロープ内の全ストランドの位相が対称なモデルであった。

本研究では、クレーン用ロープ IWRC 6×Fi(29) $\phi 14\text{mm}$ (Fig.1 参照)の全素線を一本ずつ詳細に再現した有限要素モデルを作成し、モデルの軸方向、径方向剛性を実験値と比較することで妥当性を評価する。この検討は、ロープの構成部位であるストランド、鋼心及びロープ全体のそれぞれについて行う。鋼心、ロープのモデリングに際して、鋼心ストランド（以下、 I_{out} ）、ロープストランドそれぞれの位相を考慮したモデルを作成し、その有効性を考察する。妥当性を確認したロープモデルを用いて実際の使用状況を模擬する引張曲げ解析を行い、引張曲げ状態におけるロープ内部の応力状態を考察する。

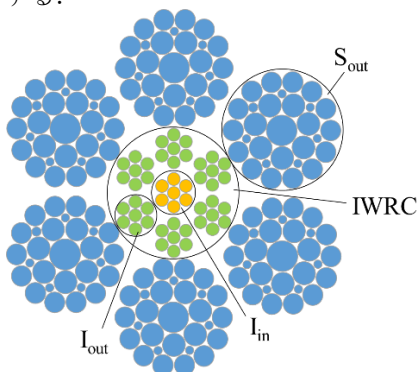


Fig.1 Structure of IWRC 6×Fi(29)

2. Fi(29)ストランドのモデリング

2.1 軸方向剛性

Fi(29)ストランドの全素線を再現したモデルを作成し、その軸方向剛性を確認する軸方向引張解析を行った。同様の条件で行われた試験結果と、引張力5~6kNにおけるヤング率を比較すると、解析では141 GPa、試験では140 GPaであった。これより、Fi(29)ストランドモデルの低引張力の範囲における軸方向剛性は実験値と概ね一致していると言える。

2.2 径方向剛性

Fi(29)ストランドモデルの径方向剛性を確認する径方向圧縮解析を行った。同様の条件で行われた試験結果との比較をFig.2に示す。ストランドはヒステリシスを持っており、解析モデルはこれを再現している。また、負荷時において、試験では低圧縮力域での剛性が低く高圧縮力域にいくにつれ剛性が高くなっているのに対し、解析も同様の傾向を示しているが、高圧縮力域の傾きが試験より小さくなっている。サイクル内の最大変位は、試験に比べ解析は10%大きかった。総括すると、ストランドモデルは概ね実験値を再現していると言える。

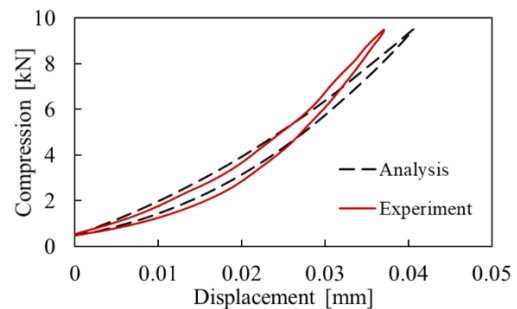


Fig.2 Compression - displacement curve of Fi(29) strand

3. 鋼心のモデリング

3.1 鋼心モデル作成

鋼心の全素線を再現したモデルを作成する。その際、各 I_{out} の位相が全て同じモデルと、それぞれ異なるモデルの2種類を作成し、前者を「同位相鋼心モデル」、後者を「異位相鋼心モデル」と呼ぶこととする。

3.2 軸方向剛性

鋼心モデルの軸方向剛性を確認する軸方向引張解析を行い、同様の条件で行われた試験結果と引張力4~5kNにおけるヤング率を比較すると、同位相鋼心モデルは67.8 GPa、異位相鋼心モデルは67.7 GPa、試験では63.8 GPaであった。これより、二つの鋼心モデルの低引張力の範囲における軸方向剛性は実験値と概ね一致していると言える。

3.3 径方向剛性

鋼心モデルの径方向剛性を確認する径方向圧縮解析を行った。同様の条件で行われた試験結果との比較をFig.3に示す。鋼心はヒステリシスを持っており、二つの解析モデルはこれを再現している。また、ストランド同様に負荷時の高圧縮力域の傾きが試験に比べ小さく、特に同位相鋼心モデルはその傾向が顕著である。サイクル内の最大変位は、異位相鋼心モデルは試験と一致したのに対し、同位相鋼心モデルは試験に比べ10%大きい結果であった。これより、位相によって径方向剛性は変化することが分かった。3.2 と合わせて、ロープモデルの作成にあたっては、軸方向、径方向剛性共に妥当性のある異位相鋼心モデルを採用する。

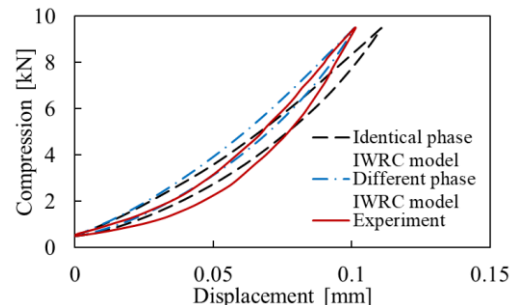


Fig.3 Compression - displacement curve of IWRC

4. ロープのモデリング

4.1 ロープモデル作成

2.で作成したFi(29)ストランドモデルと3.で作成した鋼心モデルを組み合わせることでロープの全素線を再現したモデルを作成する。その際、各ストランドの位相が全て同じモデルと、それぞれ異なるモデルの2種類を作成し、前者を「同位相ロープモデル」、後者を「異位相ロープモデル」と呼ぶこととする。

4.2 軸方向剛性

ロープモデルの軸方向剛性を確認する軸方向引張解析を行い、同様の条件で行われた試験結果と引張力30~35kNにおけるヤング率を比較すると、同位相ロープモデルは52.0GPa、異位相ロープモデルは52.6GPa、試験では62.5GPaであった。これより、二つのロープモデルの低引張力の範囲における軸方向剛性は実験値と概ね一致していると言える。

4.3 径方向剛性

ロープモデルの径方向剛性を確認する径方向圧縮解析を行った。同様の条件で行われた試験結果との比較をFig.4に示す。ロープはヒステリシスを持っており、二つの解析モデルはこれを再現している。ストランド、鋼心同様、負荷時において試験に比べ高圧縮力域の傾きが小さくなっており、同位相ロープモデルはその傾向が顕著である。よって、位相により剛性の差が生まれることが確認できたが、両モデルとも径方向剛性を概ね再現している結果となった。鋼心が異位相となっていることから、同位相ロープモデルにおいてもストランドの対称性に関わらず鋼心との接触が各ストランドで異なるためだと考えられる。ロープ内部で素線のずれが大きくなる高圧縮力域におけるモデルの挙動の再現性が重要視されることから、より実際の接触状態を再現していると考えられる異位相ロープモデルを採用する。

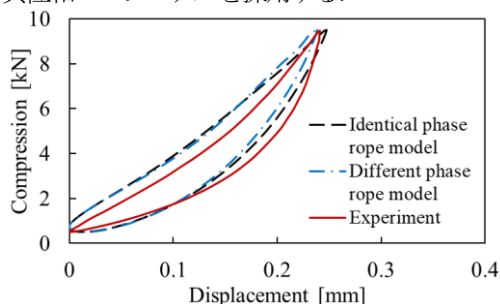


Fig.4 Compression - displacement curve of rope

5. 引張曲げ解析

ロープ両端に引張力32kNを与えながらシーブに沿って曲げる解析を行った。ロープ最外層素線における素線軸方向の最大ひずみは6900 $\mu\epsilon$ であった。実際に引張曲げ試験を行いひずみゲージを用いて計測した素線ひずみは最大で3100 $\mu\epsilon$ であったことから、ひずみのオーダーが一致していることが確認された。また、試験においてはひずみゲージが素線中心軸からずれて貼られているといった貼り付けの仕上りの影響や、断面内素線配置状態の違いにより、実際より低い値が出ていると予想される。したがって、解析における素線ひずみは妥当であり、モデルの引張曲げ挙動の再現性はあると言える。

引張曲げ状態における応力状態を考察する。z=0断面における最大主応力コンター図をFig.5(a)に示す。図内に示したように、各ストランドに①~⑥の番号を振る。ロープの実際の使用状況では、巻取り等により複数のシーブに沿って繰り返し曲げられる運用が成される。ロープにシーブによる両曲げ負荷が加わる際、ロープ断面における曲げ外側と曲げ内側が入れ替わることとなる。そこで、ロープ断面内のy軸方向に対称な位置(ストランド③と⑤)の素線軸方向応力を比較することで素線の疲労を評価する。Fig.5(b)に、ストランド③の拡大図とa~eの5点の応力出力点を示す。各点と対称な位置の5点(ストランド⑤)の素線軸方向応力値から平均応力、

応力振幅を算出する。結果は、Table 1の通りである。ただし、各応力値から、労働安全衛生総合研究所にて測定された素線における残留応力-160MPaを差し引いている。また、表に、先行研究[2]において明らかにされたロープ疲労試験での素線位置と断線数の関係を合わせて示す。表より、疲労試験で断線数の多い場所であるb, d, eでは応力振幅が大きくなっており、疲労損傷の可能性が高いと言える。

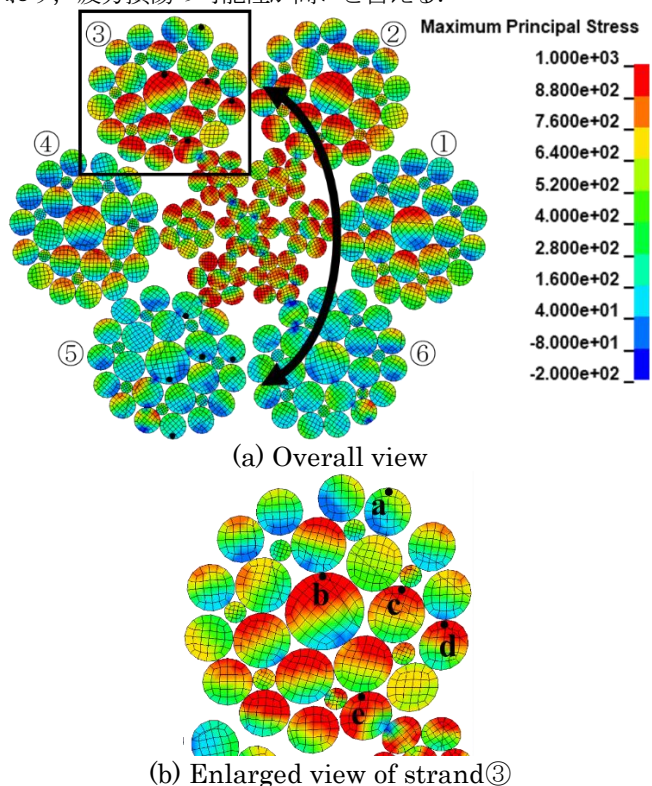


Fig.5 Contour diagram of maximum principal stress of tension bending analysis

Table 1 Comparison of axial stress of wire between outside and inside of bending [MPa] [2]

	a	b	c	d	e
Axial stress of strand ③ (outside of bending)	410	1100	740	900	1200
Axial stress of strand ⑤ (inside of bending)	-300	-610	290	-560	-200
Mean stress	60	250	520	170	500
Stress amplitude	360	860	230	730	700
Number of wire breakage of bending fatigue test [2]	0	6	2	6	22

6. 結言

クレーン用ロープについて、内部のストランド及び σ_{out} の位相非対称性を考慮することで、径方向剛性の再現性が良くなることを明らかにした。軸方向、径方向剛性の妥当性を確認したロープモデルについて引張曲げ解析を行い、素線ひずみの値から解析の再現性を確認した。逆曲げ状態を想定した素線における応力振幅の算出により、実際の疲労試験で断線が多く確認される素線において高い応力振幅が発生しており、疲労損傷の可能性が高いことを明らかにした。

参考文献

- [1] 中谷起也. 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士論文. 2020.
- [2] 本田尚 他. 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-№.44-1). 2014.

目次

第1章	序論.....	10
1.1	研究背景.....	10
1.2	先行研究.....	11
1.2.1	ロープ研究の基礎.....	11
1.2.2	ロープ有限要素モデルの開発.....	11
1.3	研究目的と本研究の新規性.....	13
1.4	本論文の構成.....	14
第2章	ストランドのモデリング.....	15
2.1	諸言.....	15
2.2	ストランドのモデリング.....	15
2.2.1	解析対象.....	15
2.2.2	ストランドモデル形状作成.....	16
2.2.3	材料特性.....	19
2.3	軸方向引張試験.....	21
2.4	軸方向引張解析.....	21
2.4.1	解析条件.....	21
2.4.2	解析結果.....	23
2.5	径方向圧縮試験.....	25
2.5.1	試験条件.....	25
2.5.2	試験結果.....	27
2.6	径方向圧縮解析.....	28
2.6.1	解析条件.....	28
2.6.2	解析結果.....	30
2.7	結言.....	32

第3章	鋼心のモデリング	33
3.1	諸言	33
3.2	鋼心のモデリング	33
3.2.1	解析対象	33
3.2.2	鋼心モデル形状作成	34
3.3	軸方向引張試験	41
3.4	軸方向引張解析	41
3.4.1	解析条件	41
3.4.2	解析結果	43
3.5	径方向圧縮試験	46
3.5.1	試験条件	46
3.5.2	試験結果	47
3.6	径方向圧縮解析	48
3.6.1	解析条件	48
3.6.2	解析結果	50
3.7	結言	54
第4章	ロープのモデリング	55
4.1	諸言	55
4.2	ロープのモデリング	55
4.2.1	解析対象	55
4.2.2	ロープモデル形状作成	55
4.3	軸方向引張試験	58
4.4	軸方向引張解析	58
4.4.1	解析条件	58
4.4.2	解析結果	60
4.5	径方向圧縮試験	64
4.5.1	試験条件	64
4.5.2	試験結果	65
4.6	径方向圧縮解析	66

4.6.1	解析条件.....	66
4.6.2	解析結果.....	68
4.7	結言.....	69
第5章	引張曲げ解析.....	70
5.1	諸言.....	70
5.2	素線ひずみ計測.....	70
5.2.1	試験条件.....	70
5.2.2	試験結果.....	73
5.3	引張曲げ疲労試験.....	75
5.3.1	試験条件.....	75
5.3.2	試験結果.....	75
5.4	引張曲げ解析.....	77
5.4.1	解析モデル.....	77
5.5	解析条件.....	79
5.6	解析結果.....	81
5.6.1	ロープモデルの挙動.....	81
5.6.2	素線のひずみ.....	86
5.6.3	ロープ内部の応力状態.....	90
5.6.4	素線の疲労評価.....	96
第6章	結論.....	99
6.1	結論.....	99
6.2	今後の課題.....	99
6.2.1	解析モデルの改良.....	99
6.2.2	動的引張曲げ挙動の再現と摩耗予測.....	100
参考文献	101	
謝辞	104	
付録A	マスキング.....	105
付録B	セグメントベースコンタクト.....	106

目次

図 1-1	ワイヤロープの構成	10
図 1-2	中谷の解析モデル[33].....	12
図 1-3	IWRC 6×Fi(29)の構成	13
図 2-1	Fi(29)ストランドの構成	15
図 2-2	素線中心螺旋曲線模式図	16
図 2-3	直 Fi(29)ストランドの CAD 形状	17
図 2-4	直 Fi(29)ストランドの 3 次元メッシュ形状	17
図 2-5	直 Fi(29)ストランド断面 CT スキャン画像	18
図 2-6	CT スキャン画像とモデル断面の比較	19
図 2-7	素線引張力・変位曲線	19
図 2-8	素線応力・ひずみ曲線	20
図 2-9	Fi(29)ストランド引張力・伸び曲線	21
図 2-10	Fi(29)ストランド軸方向引張解析モデル全体図.....	22
図 2-11	Fi(29)ストランド軸方向引張解析荷重曲線.....	22
図 2-12	解析，試験における Fi(29)ストランド引張力・伸び曲線の比較.....	24
図 2-13	Fi(29)ストランド軸方向引張解析最大主応力コンター図 [MPa]	24
図 2-14	Fi(29)ストランド軸方向引張解析素線中心部最大主応力ベクトル図.....	25
図 2-15	Fi(29)ストランド径方向圧縮試験装置模式図.....	26
図 2-16	Fi(29)ストランド径方向圧縮試験の様子	26
図 2-17	Fi(29)ストランド径方向圧縮試験治具	27
図 2-18	Fi(29)ストランド圧縮力・変位曲線（全サイクル）	28
図 2-19	Fi(29)ストランド圧縮力・変位曲線（最終サイクル）	28
図 2-20	Fi(29)ストランド径方向圧縮解析全体図	29
図 2-21	Fi(29)ストランド径方向圧縮解析荷重曲線	30
図 2-22	解析，試験における Fi(29)ストランド圧縮力・変位曲線の比較.....	31
図 2-23	Fi(29)ストランド径方向圧縮解析ミーゼス応力コンター図 [MPa].....	32
図 3-1	鋼心の構成	33
図 3-2	ストランド中心螺旋曲線模式図	35
図 3-3	ストランド内部のローカル座標系	35
図 3-4	素線中心位置	37
図 3-5	ストランドとロープの螺旋展開図	38
図 3-6	ロープ断面 CT スキャン画像鋼心部拡大図	39
図 3-7	鋼心の 3 次元メッシュ形状	40

図 3-8	鋼心引張力・伸び曲線	41
図 3-9	鋼心軸方向引張解析全体図	42
図 3-10	鋼心軸方向引張解析荷重曲線	42
図 3-11	解析，試験における鋼心引張力・伸び曲線の比較.....	43
図 3-12	同位相鋼心モデル軸方向引張解析最大主応力コンター図 [MPa]	44
図 3-13	異位相鋼心モデル軸方向引張解析最大主応力コンター図 [MPa]	45
図 3-14	鋼心軸方向引張解析最大主応力ベクトル図	45
図 3-15	鋼心径方向圧縮試験治具	46
図 3-16	鋼心圧縮力・変位曲線（全サイクル）	47
図 3-17	鋼心圧縮力・変位曲線（最終サイクル）	47
図 3-18	鋼心径方向圧縮解析全体図	48
図 3-19	鋼心径方向圧縮解析荷重曲線	49
図 3-20	解析，試験における鋼心圧縮力・変位曲線の比較.....	50
図 3-21	解析，試験 2 回目における鋼心圧縮力・変位曲線の比較.....	51
図 3-22	鋼心径方向圧縮解析 I_{out} 接触面圧コンター図 [MPa].....	52
図 3-23	鋼心径方向圧縮解析 I_{out} 接触面圧ヒストグラム	53
図 3-24	鋼心径方向圧縮解析ミーゼス応力コンター図 [MPa]	53
図 4-1	ロープ断面 CT スキャン画像	56
図 4-2	ロープの 3 次元メッシュ形状	57
図 4-3	ロープ引張力・伸び曲線	58
図 4-4	ロープ軸方向引張解析全体図	59
図 4-5	ロープ軸方向引張解析荷重曲線	60
図 4-6	解析，試験におけるロープ引張力・伸び曲線の比較.....	61
図 4-7	ロープ軸方向引張解析最大主応力コンター図 [MPa]	62
図 4-8	異位相鋼心モデル最大主応力ベクトル図	63
図 4-9	ロープ径方向圧縮試験治具	64
図 4-10	ロープ圧縮力・変位曲線（全サイクル）	65
図 4-11	ロープ圧縮力・変位曲線（最終サイクル）	65
図 4-12	ロープ径方向圧縮解析全体図	66
図 4-13	ロープ径方向圧縮解析荷重曲線	67
図 4-14	解析，試験におけるロープ圧縮力・変位曲線の比較.....	68
図 4-15	ロープ径方向圧縮解析ミーゼス応力コンター図 [MPa]	69
図 5-1	U 字曲げ試験機模式図	70
図 5-2	ロープ・シーブ断面模式図	71
図 5-3	引張曲げ試験の様子	71
図 5-4	ひずみゲージ貼付部のロープ断面模式図	72

図 5-5	素線ひずみの時刻歴 (1 回目)	73
図 5-6	素線ひずみの時刻歴 (2 回目)	74
図 5-7	試験対象ロープにおける試験片切り出し方	75
図 5-8	ロープ試験片	76
図 5-9	ロープ試験片断線の様子	76
図 5-10	ロープモデル全体図	77
図 5-11	ロープ簡略化モデル応力・ひずみ曲線	77
図 5-12	引張曲げ解析全体図	78
図 5-13	引張曲げ解析荷重曲線	80
図 5-14	引張曲げ解析シーブ x 方向変位拘束部	80
図 5-15	引張曲げ解析におけるモデルの挙動	81
図 5-16	ロープ・シーブの接触部断面模式図	82
図 5-17	引張曲げ状態のモデル断面図 ($z=0$ 断面)	83
図 5-18	引張曲げ状態のロープ全体図	84
図 5-19	単純引張状態, 引張曲げ状態のロープ	84
図 5-20	ロープ接触面圧コンター図 [MPa]	85
図 5-21	ロープ端付近のロープ断面図	85
図 5-22	ロープ中心線の z 座標と x 座標の関係 ($t=0.08$)	86
図 5-23	シーブ頂点付近のストランド ($t=0.08$)	87
図 5-24	ロープ断面における $x'y'$ 座標系	87
図 5-25	ストランド①～④で素線 b のひずみが最大となるロープ断面	88
図 5-26	ストランド①における z' 座標系	89
図 5-27	ストランド①～④の素線 b におけるひずみと z' 座標の関係	89
図 5-28	引張曲げ解析最大主応力コンター図 [MPa]	90
図 5-29	ストランド②, ③最大主応力コンター図 [MPa]	91
図 5-30	鋼心最大主応力コンター図 [MPa]	92
図 5-31	引張曲げ解析最大主応力ベクトル図鋼心	93
図 5-32	引張曲げ解析最大主応力ベクトル図ストランド	94
図 5-33	引張曲げ解析ミーゼス応力コンター図 [MPa]	95
図 5-34	ロープ引張曲げ解析最大主応力コンター図 [MPa]	96
図 5-35	ストランド内素線の分類[15]	97
図 5-36	ロープ引張曲げ解析における応力振幅算出点	98

表目次

表 2-1	直 Fi(29)ストランドの幾何学的パラメータ	16
表 2-2	X 線 CT 装置による測定条件	18
表 2-3	素線材料特性	20
表 2-4	Fi(29)ストランド軸方向引張解析規模	22
表 2-5	Fi(29)ストランド軸方向引張解析条件	22
表 2-6	Fi(29)ストランド軸方向引張解析時間	23
表 2-7	Fi(29)ストランド軸方向ヤング率 [GPa].....	24
表 2-8	Fi(29)ストランド径方向圧縮試験装置	26
表 2-9	治具材料特性	29
表 2-10	Fi(29)ストランド径方向圧縮解析規模	29
表 2-11	Fi(29)ストランド径方向圧縮解析条件.....	29
表 2-12	Fi(29)ストランド径方向圧縮解析時間	30
表 3-1	鋼心の幾何学的パラメータ	34
表 3-2	$z = 0$ における各 I_{out} の θ と ϕ の関係	39
表 3-3	鋼心軸方向引張解析規模	42
表 3-4	鋼心軸方向引張解析条件	42
表 3-5	鋼心軸方向引張解析時間	43
表 3-6	鋼心軸方向ヤング率 [GPa].....	43
表 3-7	鋼心径方向圧縮解析規模	48
表 3-8	鋼心径方向圧縮解析条件	49
表 3-9	鋼心径方向圧縮解析時間	50
表 4-1	螺旋 Fi(29)ストランドの幾何学的パラメータ	55
表 4-2	$z = 0$ における各ストランドの θ と ϕ の関係.....	56
表 4-3	ロープ軸方向引張解析規模	59
表 4-4	ロープ軸方向引張解析条件	59
表 4-5	ロープ軸方向引張解析時間	60
表 4-6	ロープ軸方向ヤング率 [GPa].....	61
表 4-7	ロープ径方向圧縮解析規模	66
表 4-8	ロープ径方向圧縮解析条件	67
表 4-9	ロープ径方向圧縮解析時間	68
表 5-1	ひずみゲージ概要	71
表 5-2	引張曲げ試験条件	73
表 5-3	引張曲げ疲労試験条件	75

表 5-4	素線断線本数の分類	76
表 5-5	引張曲げ解析モデル材料特性	78
表 5-6	引張曲げ解析規模	78
表 5-7	引張曲げ解析条件	79
表 5-8	引張曲げ解析時間	81
表 5-9	ストランド最外層素線の素線軸方向ひずみと曲げ外側からの角度	87
表 5-10	IWRC 6×Fi(29) Φ16 mm の S 字曲げ疲労試験条件[15]	97
表 5-11	素線分類と断線数[15]	97
表 5-12	引張曲げ状態における曲げ外側・内側の素線軸方向応力の比較[15]	98

第1章 序論

1.1 研究背景

ワイヤロープ（以下，ロープ）は，素線を数本～数十本撚り合わせたストランドをさらに心綱と呼ばれるロープ芯の周りに 6 から 8 本程撚り合わせて作られている．心綱には繊維心と鋼心の二種類があり，鋼心もまた，ストランドを複数本撚り合わせた構造となっている．一般的な鋼心ロープの構成は図 1-1 に示す通りである．

ロープは，その構造上優れた柔軟性と高い引張り強度を併せ持つ．クレーン，エレベータ，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，主にクレーンの吊り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 型ロープは，鋼心自体が 1 本の独立したロープであることを特徴とする．これにより，繊維心ロープに比べ同じ断面積でより高い引張り強度を持ち，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，素線の損傷や破断が，通常の外観検査では検出できないロープ内部において進展しやす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．

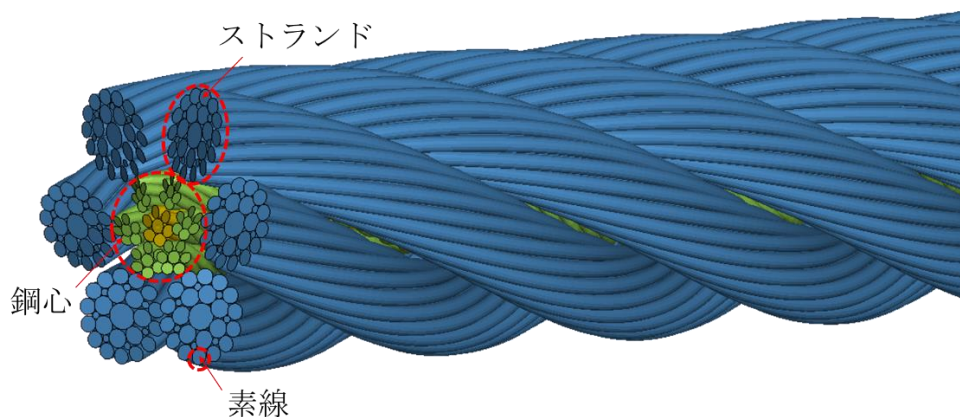


図 1-1 ワイヤロープの構成

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についての理論、モデルの開発は長くなされてきた。初期の研究では、Hruska により素線の引張のみを考慮した解析モデルが、続いて Knapp らによりロープのねじり、曲げも考慮された解析モデルが発表された[2][3][4][5]。その後 Costello らは、従来のモデルに加えポアソン比の影響による素線径の変化や、変形による素線螺旋角の変化を取り入れた「Theory of Wire Rope」を出版した[6]。これらの解析モデルは現実のロープ特性をよく再現することから、今日でもロープ設計の指標に用いられている一方で、ロープ損傷の原因とされる接触や摩耗、塑性の検討は難しいという欠点を抱えている。

また、ロープ破断特性解明のため、実際のロープを対象とした繰り返し曲げ疲労試験が行われてきた。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が[7]-[11]、ロープ内部の素線接触状態や素線にかかる応力の測定、断線が発生するまでの過渡的な現象の観察は困難である。

ロープ内部の損傷状態を把握する研究としては、漏洩磁束探傷法が存在する。磁化したロープの、素線断線部での断面積減少による漏洩磁束量の変化を検出する非破壊検査手法である[12]-[15]。しかし、断線位置、断線数の詳細な把握は依然課題となっており、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。ロープ有限要素モデルの力学的特性再現性の確認のためには、軸方向剛性に加え径方向剛性についても検討を行う必要があると言える。径方向剛性はロープ内部の素線接触状態に大きく依存すると考えられ、モデルの撚り状態の妥当性を確認することができるためである。そこ

で当研究室では、ロープ径方向剛性計測法を開発した．これにより、ロープモデルでも試験と同様の解析を行い結果を比較することで、モデル径方向剛性の妥当性の評価を可能にした[27]．

また、1.2.1 を受け当研究室では、ロープモデルについて実際の使用状況を模擬する引張曲げ挙動の有限要素法解析に取り組んできた[28]-[33]．前研究[33]では、繊維心入りのエレベータ用ロープについて全素線と繊維心を再現するモデルを作成し、モデルの軸方向、径方向剛性が概ね妥当性があることを確認した上で、引張曲げ解析を行い素線応力状態を可視化した．しかし、引張曲げ状態の再現として、シーブを上昇させ続けることでシーブをロープに押し付け曲げ状態を保つ（図 1-2 (a)参照）という手法をとっていた．よって、現実の引張曲げ状態とは素線の挙動が異なることが予想される．

さらに、ロープ実形状の再現性が不十分であった可能性がある．ストランドは、ストランド断面がストランド軸に対して回転しながら心綱に巻き付く構造となっていることから、ストランド断面はストランド軸方向位置に依存する位相を持つ．現実のロープ内で複数本撚り合わされている各ストランドの位相は、それぞれ異なることが予想されるが、これまで当研究室による先行研究ではこの位相の非対称性は考慮されておらず、ロープ内の全ストランドの位相が対称なモデルであった（図 1-2 (b)参照）．

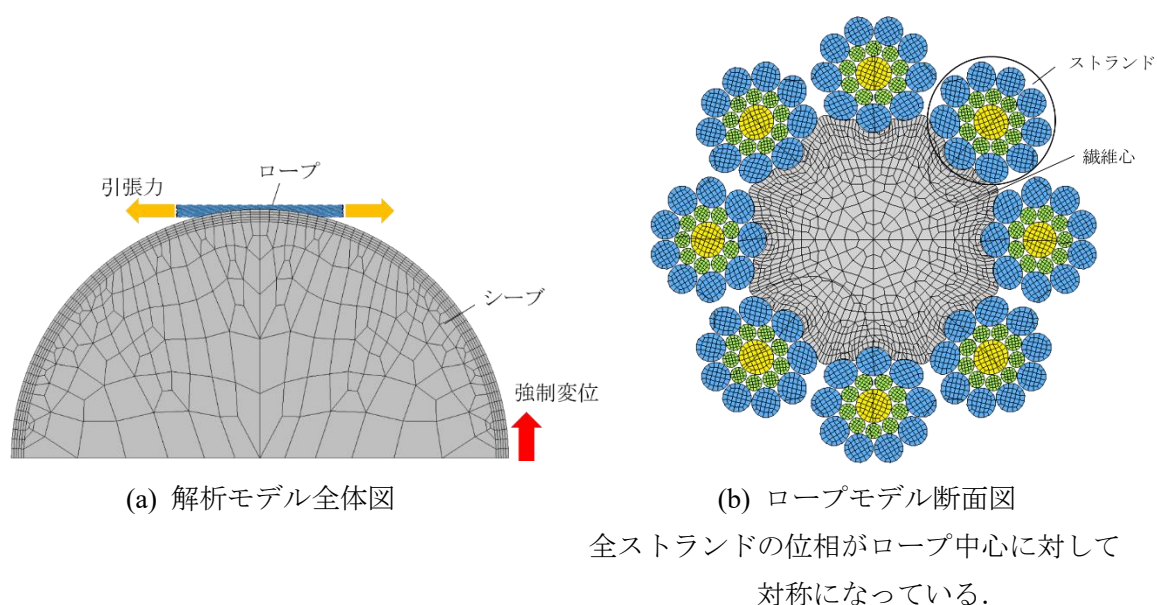


図 1-2 中谷の解析モデル[33]

1.3 研究目的と本研究の新規性

本論文の研究対象は，クレーン用ロープ IWRC 6×Fi(29)， $\phi 14\text{mm}$ である．図 1-3 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．

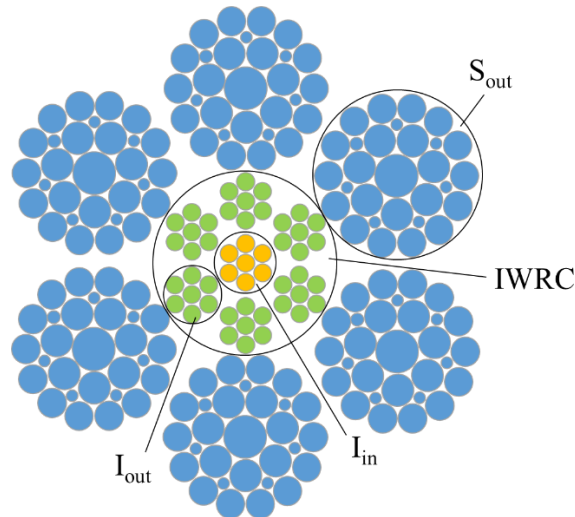


図 1-3 IWRC 6×Fi(29)の構成

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有限要素モデルを作成し，このモデルについて，軸方向，径方向の剛性を実験値と比較することで妥当性を評価する．力学的特性の検討は，ロープの構成部位であるストランド，鋼心及びロープ全体のそれぞれについて行う．モデル作成において，1.2 で述べた先行研究に対して本研究で新しく行った点を述べる．

1. ストランドのモデリングに際して，モデルの妥当性確認のため，X 線 CT 装置を用いてストランド断面の撮影を行った．得られたストランドの実形状断面とモデル断面を比較し，モデルの素線配置状態の再現性を考察した．
2. ストランド（ S_{out} ），鋼心ストランド（ I_{out} ）のモデリングに際して，全ストランドの位相が等しいモデルに加えて，位相の非対称性を考慮したモデルを作成した．2 種類のモデルの軸方向，径方向剛性を比較することで，ロープのモデリングにおける位相考慮の有効性について論じた．
3. 引張曲げ解析に用いるロープモデルとして，全素線をソリッド要素を用いてモデリングした詳細モデル部分と，ビーム要素でロープ剛性を再現した簡易モデル部分を組み合わせることで，現実的な計算時間で引張曲げ挙動の解を得ることを可能にした．

以上の 2 点についてモデルの改良を行い，ロープ引張曲げ解析を行うことで，モデルの挙動及び応力状態，接触状態を可視化し考察する．

1.4 本論文の構成

本論文は全 6 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)ストランドのモデリング

Fi(29)ストランドについて，モデル作成方法を述べる．また，実際の Fi(29)ストランドの軸方向，径方向剛性を確認する試験と，それに対応して行った解析について述べる．試験と解析の結果を比較することで，モデルの妥当性を検討する．

第 3 章 鋼心のモデリング

鋼心について，異なる手法による「同位相鋼心モデル」，「異位相鋼心モデル」の 2 種類のモデル作成方法を述べる．また，実際の鋼心の軸方向，径方向剛性を確認する試験と，それに対応して行った解析について述べる．試験と解析の結果を比較することで，2 種類のモデルの妥当性をそれぞれ検討し，内一つのモデルを採用する．

第 4 章 ロープのモデリング

ロープについて，異なる手法による「同位相ロープモデル」，「異位相ロープモデル」の 2 種類のモデル作成方法を述べる．いずれのモデルも第 2 章で作成したストランドモデル，第 3 章で採用した鋼心モデルを元に作成する．また，実際のロープの軸方向，径方向剛性を確認する試験と，それに対応して行った解析について述べる．試験と解析の結果を比較することで，2 種類のモデルの妥当性をそれぞれ検討し，内一つのモデルを採用する．

第 5 章 引張曲げ解析

引張曲げ試験における素線ひずみ計測及び引張曲げ疲労試験の概要と結果と，第 4 章で作成したロープモデルを用いて行った引張曲げ解析の条件と結果を述べる．解析の妥当性を試験との素線ひずみの比較により検討し，素線応力状態の考察と疲労評価を行う．

第 6 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 ストランドのモデリング

2.1 諸言

本章では，Fi(29)ストランドのモデリング方法を述べ，作成したモデルの軸方向，径方向剛性を確認する解析と，同様の条件で行われた試験について，その概要と結果を説明する．得られた試験結果と解析結果を比較し，モデルの妥当性の評価を行う．

2.2 ストランドのモデリング

2.2.1 解析対象

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．

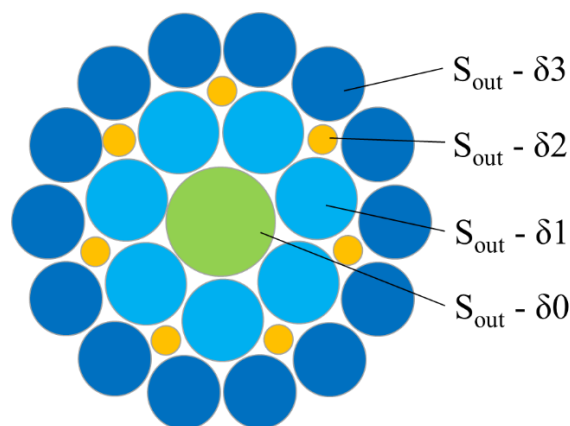


図 2-1 Fi(29)ストランドの構成

表 2-1 直 Fi(29)ストランドの幾何学的パラメータ

Wire type			Curve shape	Diameter [mm]		Pitch length [mm]	Number of wires
Outer strand of wire rope	S _{out}	δ0	Straight	4.7	1.3	37	1
		δ1	Helix		0.95		7
		δ2	Helix		0.37		7
		δ3	Helix		0.81		14

2.2.2 ストランドモデル形状作成

直ストランドモデルについて，全素線を幾何学的計算により形状作成する．直ストランドは，一本のまっすぐな中心素線 S_{out} - δ0 とその周りに螺旋状に撚られた複数の素線 S_{out} - δ1 ~ 3 から成り，これら素線の中心曲線を座標表示することを考える．

図 2-2 に，素線中心螺旋曲線の模式図を示す．ストランド軸とz軸が一致するように xyz 座標を設定し，素線の螺旋半径を R_w ，螺旋角を α_w とすると， $(R_w, 0, 0)$ を通る螺旋の座標は z 軸周りの回転角 θ を用いて(2-1)のように表される．

$$\begin{aligned} x_0 &= R_w \cos \theta \\ y_0 &= R_w \sin \theta \\ z_0 &= \theta R_w \tan \alpha_w \end{aligned} \quad (2-1)$$

また，螺旋角 α_w は R_w とストランドピッチ p_s から

$$\alpha_w = \tan^{-1} \frac{p_s}{2\pi R_w} \quad (2-2)$$

と求められる．

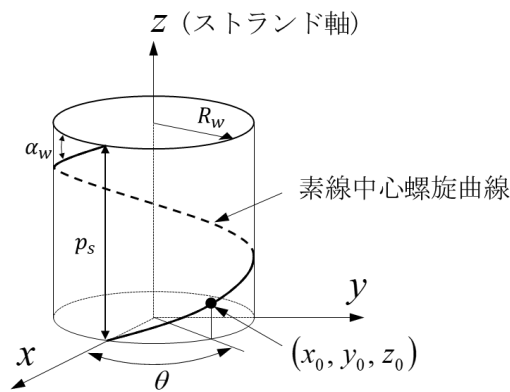


図 2-2 素線中心螺旋曲線模式図

これらを用いて、直ストランドモデルの 3 次元 CAD 形状を作成する。手順は以下の通りである。

- ① (2-1)を用いて各素線の中心曲線を描画する。
- ② 各中心曲線の一端点に、端点を中心とする素線断面の円を曲線に対して垂直な面にスケッチする。
- ③ スケッチした円を中心曲線に沿ってスイープする。

この操作は Dassault Systèmes SolidWorks 社製の SolidWorks を用いて行った。作成した直ストランドモデルの CAD 形状を図 2-3 に示す。



図 2-3 直 Fi(29)ストランドの CAD 形状

次に、作成した CAD 形状に対しメッシングを行う。各素線の端面に 2 次元メッシュを作成し、これが各素線中心線に沿って等間隔に押し出されることで素線一本分の 3 次元メッシュが生成される。この操作は Altair Engineering 社製の Altair HyperWorks を用いて行った。ストランドモデルの断面と全体形状を図 2-4 に示す。

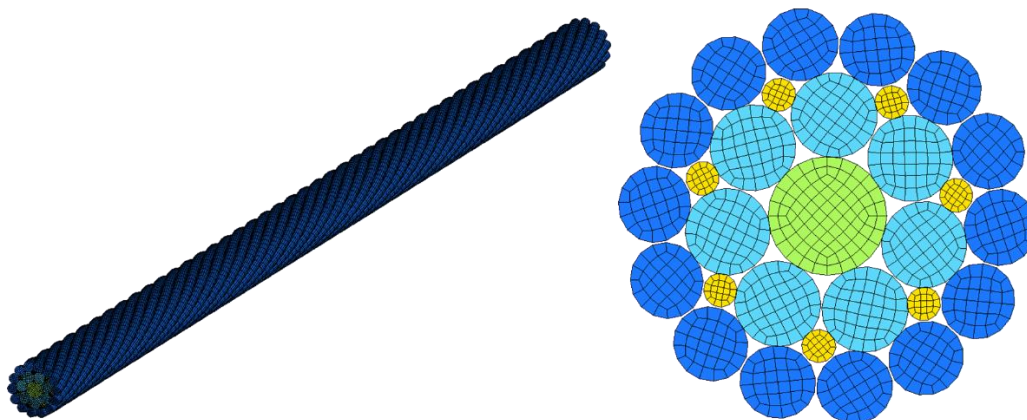
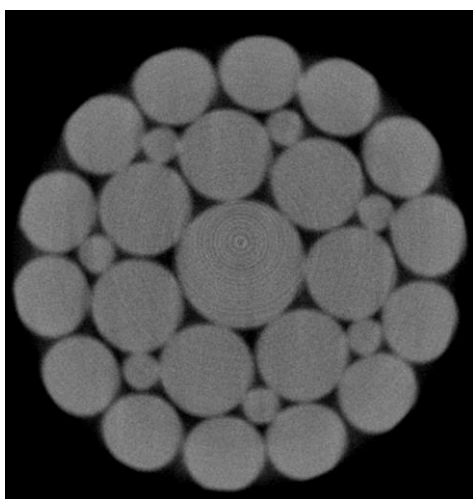


図 2-4 直 Fi(29)ストランドの 3 次元メッシュ形状

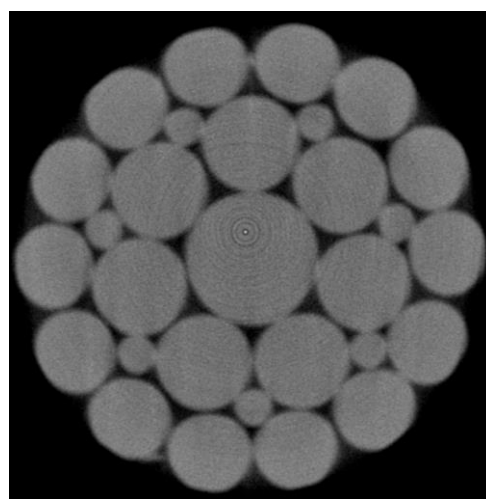
ストランドモデルと実際のストランドの断面を比較することで、素線の配置状態及び素線形状の妥当性を検討するため、X線CT装置によるストランド断面撮影を行った。撮影対象として、300 mmの直ストランドを用意した。測定条件を表 2-2 に示す。撮影範囲は軸方向中心部の 10 mm ($-5 \leq z \leq 5$) として、1000 枚の断面画像を取得した。図 2-5 (a), (b)に、 $z = 0, 5$ における X 線 CT 画像を、図 2-6 (a), (b)に、図 2-5 と図 2-4 のモデル断面図を重ね合わせた画像を示す。ただし、 $z = 5$ のモデル断面図は、 $z = 0$ のモデル断面図に対してピッチ分だけ回転させている。図 2-6 (a)より、モデルと実際のストランドの素線配置、形状に大きな差はないことが分かる。実際のストランドの $S_{out}-\delta 3$ は、よりつぶれた形状となっているもの、配置がモデルと比較しずれているものがあるが、その差は軽微である。次に図 2-6 (b)より、モデルと実際のピッチのずれは 3° で、概ね合致している。よって、モデルの実形状再現性は高いことが確認された。

表 2-2 X 線 CT 装置による測定条件

Product name	TOSCANER-30000 μ CM (Toshiba IT & Control Systems Corp.)
Resolution	10 μ m
Number of images	1000
Observation range	10 mm ($-5 \leq z \leq 5$)



(a) $z = 0$ 断面



(b) $z = 5$ 断面

図 2-5 直 Fi(29)ストランド断面 CT スキャン画像

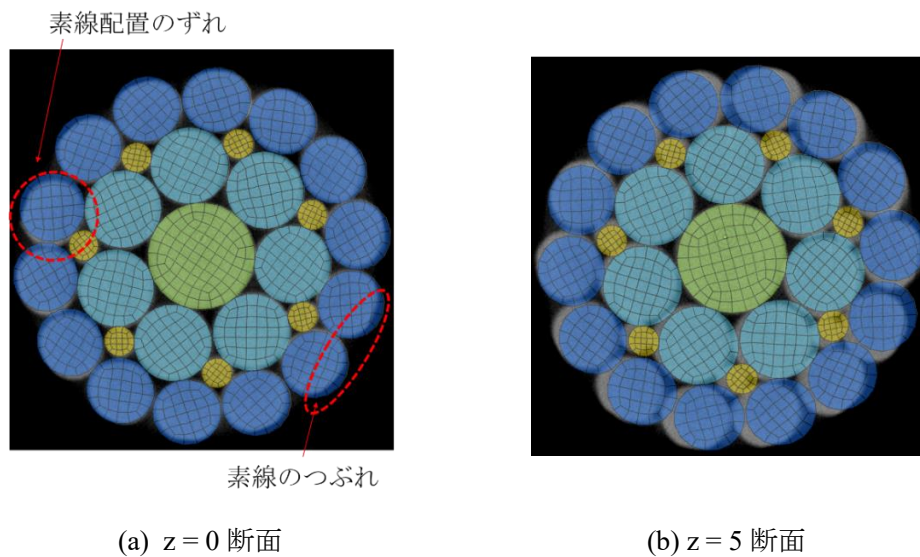


図 2-6 CT スキャン画像とモデル断面の比較

2.2.3 材料特性

素線の材料特性は、東京製綱株式会社にて行われた素線引張試験の結果を用いて設定した。引張試験に用いられた素線は、直径 1.07 mm で、伸びは規長 150 mm で測定を行った。平均試験速度は 5.4 N/s として、素線が破断するまで引張力を加え続けた。得られた引張り・変位曲線を図 2-7 に示す。これより真応力・真ひずみ曲線を算出し、三直線近似することで材料特性を求めた。密度については、計算時間短縮のためマススケーリング（付録 A マススケーリング参照）を用いており、実際の 100 倍としている。素線とモデルの応力・ひずみ曲線は図 2-8、材料特性値は表 2-3 の通りである。以降の本論文の全解析において、素線の材料特性としてこの値を用いている。

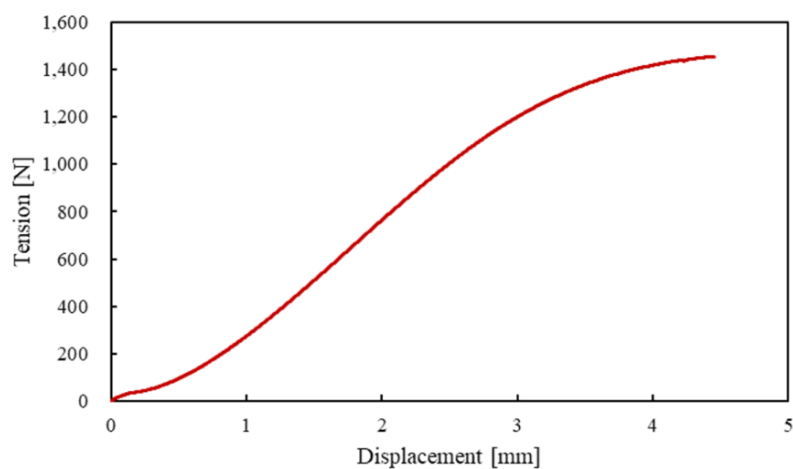


図 2-7 素線引張り・変位曲線

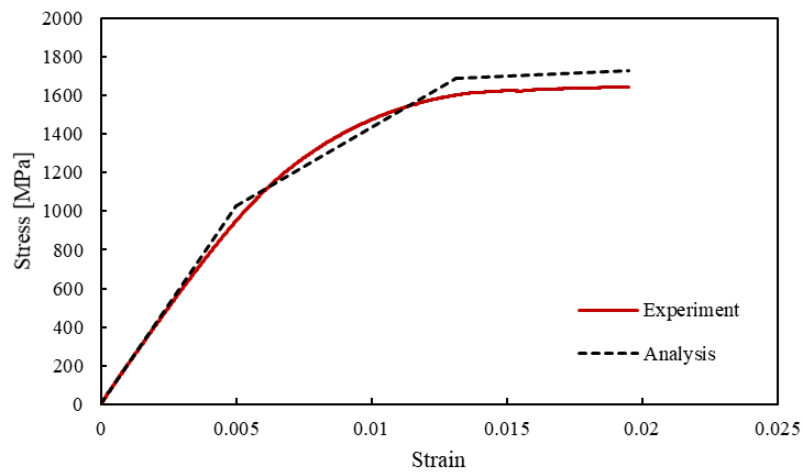


図 2-8 素線応力・ひずみ曲線

表 2-3 素線材料特性

Density [ton/mm ³]		8.0×10^{-7}
Young's modulus [GPa]		205
Plastic factor	$1025 \leq \sigma \leq 1689$	79.7
[GPa]	$1689 \leq \sigma \leq 1729$	6.29
Poisson's ratio		0.3
Yield stress [MPa]		1025

2.3 軸方向引張試験

東京製綱株式会社で行われたストランド軸方向引張試験についてその概要と結果を述べる。ストランドが破断するまで引張力を与え続け、伸びを測定した。伸びは規長 500mm で測定を行った。得られた引張力・伸び曲線を図 2-9 に示す。これより、引張力 15kN まで引張力と伸びは線形の関係で、それ以降では非線形な挙動を示すことが分かる。これは、引張力 15kN 以降で素線が塑性変形しているためと考えられる。

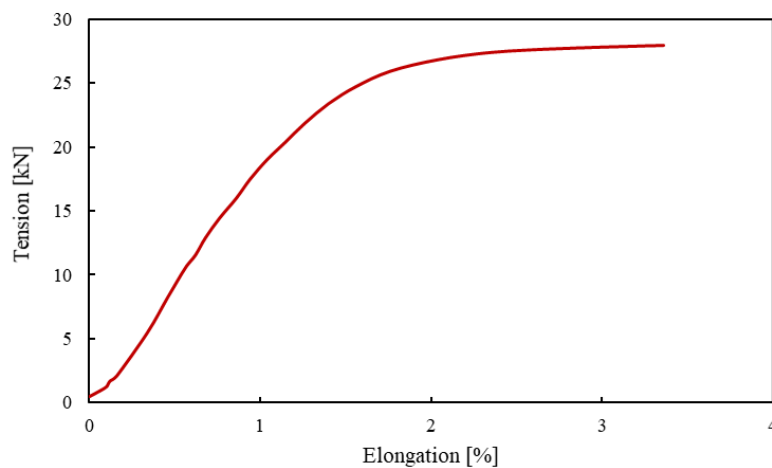


図 2-9 Fi(29)ストランド引張力・伸び曲線

2.4 軸方向引張解析

2.4.1 解析条件

2.3 の試験と同様の条件で解析を行い、結果を比較することでモデルの軸方向の力学的特性の妥当性を検討する。解析モデルの全体図を図 2-10 に示す。ストランドモデルの長さは 110 mm で、直ストランド 3 ピッチ分である。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、ストランド軸方向中心部を $z=0$ としている。解析規模を表 2-4 に、解析条件を表 2-5 に示す。

境界条件を述べる。ストランド両端 3 mm における全節点について、各ストランド端中心節点に剛体拘束し、z 軸方向の回転を拘束した。これは、引張力が加わることでストランドが撓りの戻り方向に自転しほどけていくのを防ぐためである。

荷重条件を述べる。各ストランド端中心節点に 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 2-11 の通りである。



図 2-10 Fi(29)ストランド軸方向引張解析モデル全体図

表 2-4 Fi(29)ストランド軸方向引張解析規模

Nodes	237953
Elements	186872

表 2-5 Fi(29)ストランド軸方向引張解析条件

Analysis software	LS-DYNA R9.0.1 (Quasistatic explicit method)
Element	Solid element
Contact algorithm	Penalty method
Analysis time [s]	0.1
Time step [s]	7.3×10^{-7}

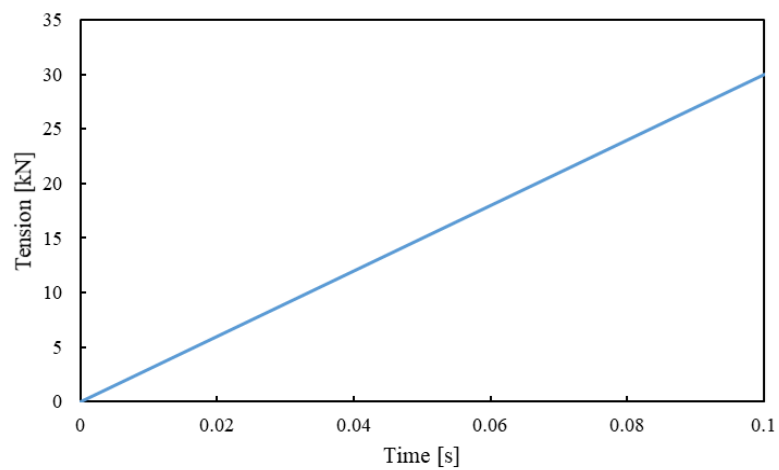


図 2-11 Fi(29)ストランド軸方向引張解析荷重曲線

解析手法として、準静的陽解法を用いている。本研究の解析は素線間の接触をすべて考慮するため、接触箇所が非常に多い。よってそれぞれの接触点における振動により陰解法では計算が収束しないためである。

接触計算の手法について述べる。本研究のモデルはソリッド要素を用いており、接触、摩擦アルゴリズムにはペナルティ法を使用する。ペナルティ法は、要素同士が貫入した際にその貫入量に比例した反発力を働かせることで押し返し、接触を再現する手法であり、マスター、スレーブという概念を用いている。接触する二要素について一方の要素をスレーブ、他方の要素をマスターと定義し、スレーブ節点とマスター面要素間にはギャップ距離が導入される。スレーブ節点がマスター面要素とのギャップ距離内に貫入すると、二要素は接触したと判定され、マスター、スレーブ間に仮想的な弾性バネが設置される。仮想バネの反発力によって二要素は遠ざかり、再度節点がギャップ距離外に出ると、このバネは削除される。さらに、LS-DYNA の接触設定の機能であるセグメントベースコンタクトを採用することで、要素の面－面間、面－エッジ間、エッジ－エッジ間の貫入も考慮する。このセグメントベースコンタクトの詳細については付録 B セグメントベースコンタクトに記載する。

2.4.2 解析結果

ストランドモデルの引張状態について、軸方向剛性の算出及び素線応力状態の可視化を行う。解析にかかった時間は表 2-6 の通りである。

表 2-6 Fi(29)ストランド軸方向引張解析時間

CPU cores	16
Running times [h]	16

(1) 引張力・変位曲線

解析から得られた軸方向の引張力と伸びの関係と試験との比較を図 2-12 に示す。伸びは、モデルの両端点間距離の変位を出力している。これより、解析では試験に対して 78 % という小さい引張力で破断することが分かる。これは、素線の材料特性に起因すると考えられる。解析モデルに設定した材料特性は、撚られる前の状態の素線のものである。素線は、ストランドに撚られることで加工硬化すると予想される。

クレーン用ロープは一般に安全率 5 で運用されることから、試験での破断力の 20 % の範囲での剛性を解析、試験で比較する。ストランド破断力 27.9 kN に対し実働引張力を考慮し 5~6 kN の範囲でのヤング率を算出すると、表 2-7 の通りであった。よって、ストランドモデルの低引張力の範囲における軸方向剛性は実験値と概ね一致していると言える。

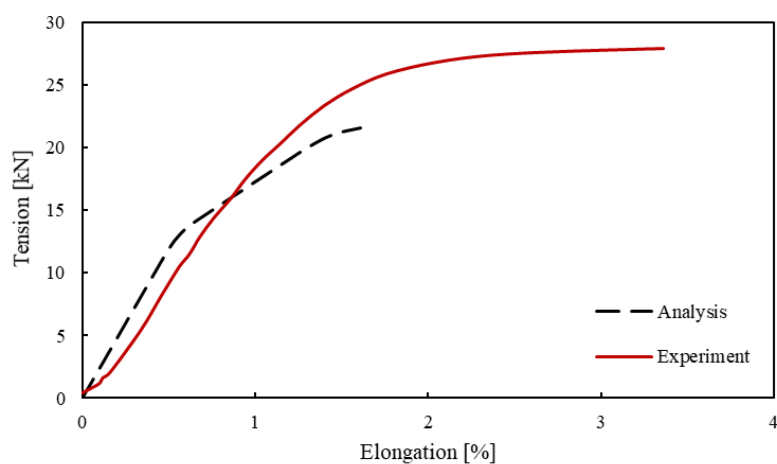


図 2-12 解析，試験における Fi(29)ストランド引張力・伸び曲線の比較

表 2-7 Fi(29)ストランド軸方向ヤング率 [GPa]

Analysis	141
Experiment	140

(2) 応力状態

図 2-13 に、 $t=0.06$ （引張力 18 kN）の $z=0$ でのストランド断面の最大主応力コンター図を示す。これより、断面全体が一般的な応力分布となっていることが分かる。また、図 2-14 に $t=0.06$ の $z=0$ 近傍における最大主応力ベクトル図を示す。これより、全素線において最大主応力は各素線軸方向に働いていることが読み取れる。

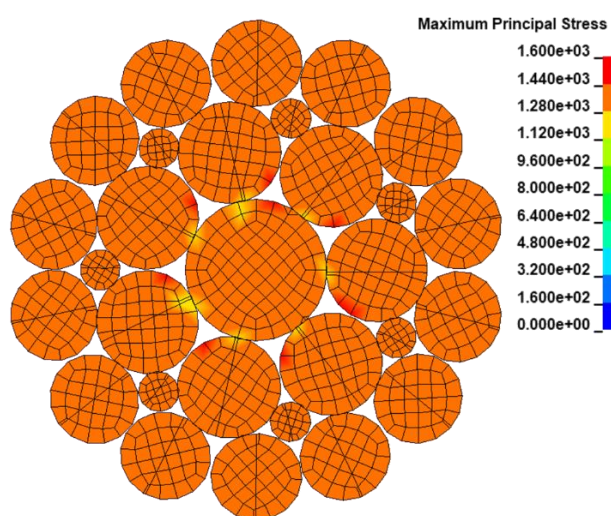


図 2-13 Fi(29)ストランド軸方向引張解析最大主応力コンター図 [MPa]
($t=0.06$, $z=0$ 断面)

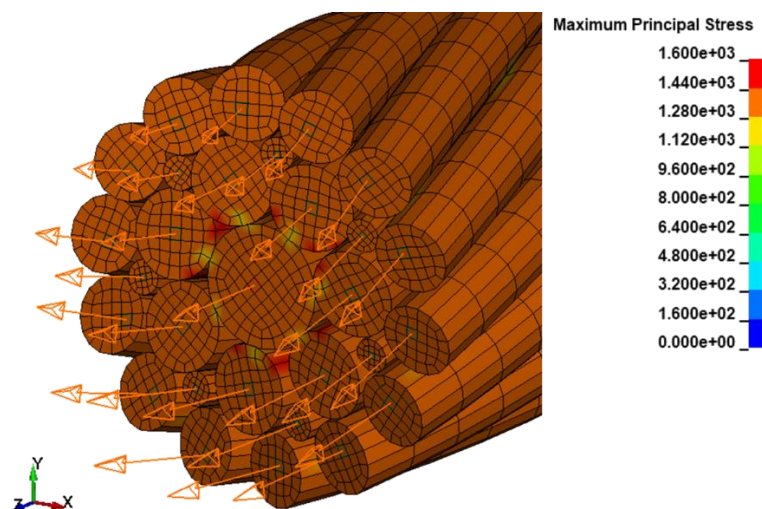


図 2-14 Fi(29)ストランド軸方向引張解析素線中心部最大主応力ベクトル図
($t = 0.06$, $z = 0$ 近傍)

2.5 径方向圧縮試験

2.5.1 試験条件

ストランドを上下の治具で挟み、上側の治具に圧縮力を加えてストランドの径方向変位を計測することで、圧縮力と変位の関係を求めた。実際の使用状況を模擬するため、ストランドは引張力を加えた状態とした。圧縮力を加える範囲が重複しないよう、300 mm の間隔を空けて 2 回試験を行った。試験の模式図を図 2-15 に、実際の試験の様子を図 2-16 に示す。試験装置は表 2-8 の通りである。

荷重条件を述べる。圧縮力は最小値 0.5～最大値 9.5 kN の sin 波とし、準静的な状態とするため 1 周期を 100 s とした。また、20 サイクル行った。これは、ストランドが素線を撚り合わせた構造をしていることからストランド内部に隙間が存在しており、サイクルを経る毎にその隙間が埋まっていくことで変位が変わっていく可能性があると考えたためである。引張力は、ワイヤクリップを用いてストランドの片端を地面に固定し、もう片端をホイストにつなぎ引き上げることで与えた。引張力の大きさは 200 N で、クレーンスケールにより計測している。

変位の出力は、上下の治具に設置した棒間の長さの変化をレーザー変位計で測定することで行った。これは、圧縮力による治具の変形の影響を極力なくするためである。ストランドが治具の間で動かないよう、上下両方の治具には $\phi 5.0$ mm の溝が彫られている。治具の構造を図 2-17 に示す。材質は SS400 である。

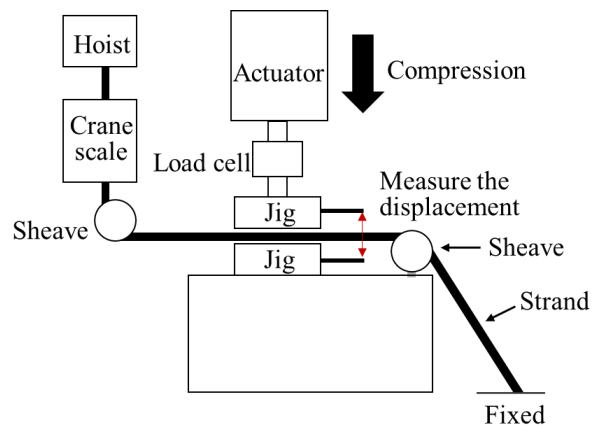
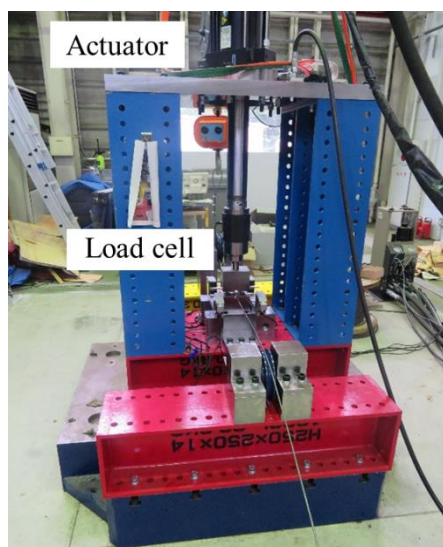
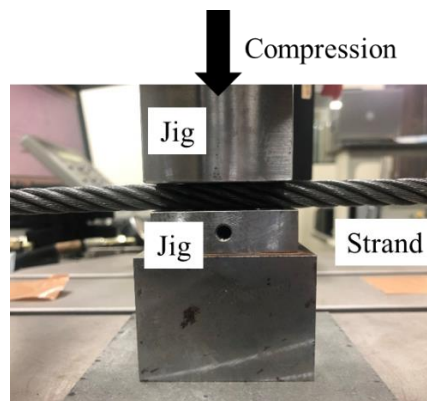


図 2-15 Fi(29)ストランド径方向圧縮試験装置模式図



(a) 試験装置概観



(b) 圧縮部

図 2-16 Fi(29)ストランド径方向圧縮試験の様子

表 2-8 Fi(29)ストランド径方向圧縮試験装置

Actuator	Single Ended Actuator 201.35G (MTS)
Load cell	Force Transducer 661.22D-01 (MTS)
Lasor distance sensor	LS-7030M (KEYENCE)

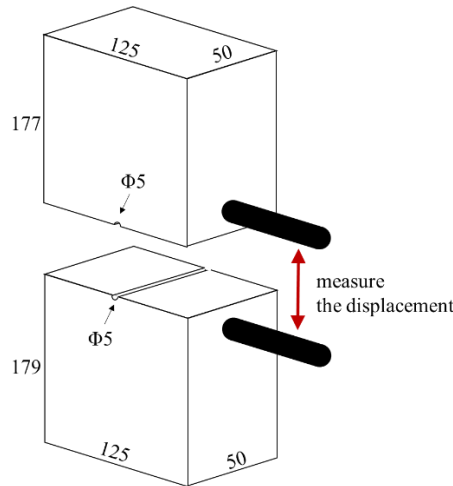


図 2-17 Fi(29)ストランド径方向圧縮試験治具

2.5.2 試験結果

2 回分の各 20 サイクルのストランドの圧縮力・変位曲線を図 2-18 に示す。変位は初めに 0.5 kN 負荷したときを基準としている。1 サイクル目に 9.5 kN まで負荷したときの変位が 2 回の試験で異なっているが、初期状態においてストランド軸と治具溝の中心軸がずれていたことが原因として予想される。2 サイクル目以降は挙動が 2 回の試験で共通しており、一度高圧縮力を加えられたストランドは溝の中で安定した位置におさまることによって適切に径方向剛性を計測できるようになると考えられる。その後、サイクルを経るごとにグラフが右へシフトしており、圧縮を繰り返すごとにストランド内の隙間が埋まっていくと考えられる。さらに負荷時について、圧縮力が大きくなるほど変位の幅が徐々に小さくなっている。これは、圧縮荷重が大きくなるにつれ素線の隙間が埋まっていき、弾性率が大きくなるためだと考えられる。

図 2-19 に、各試験での 20 サイクル目の圧縮力・変位曲線を示す。変位は、20 サイクル目の最初に 0.5 kN 負荷したときを基準としている。これより、1 回目と 2 回目で挙動、最大変位はほぼ一致しておりばらつきは無い。また、ストランドはヒステリシスを持っていることが分かる。

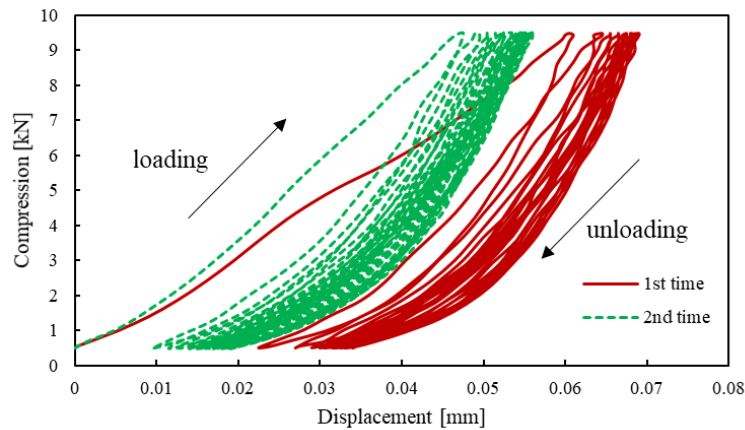


図 2-18 Fi(29)ストランド圧縮力・変位曲線（全サイクル）

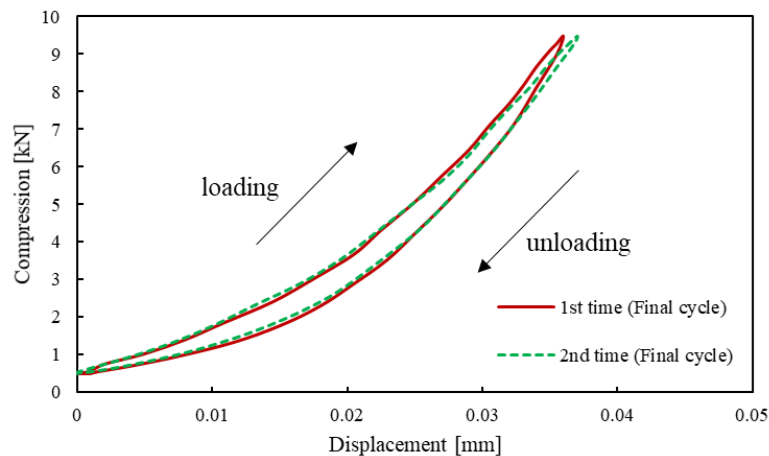


図 2-19 Fi(29)ストランド圧縮力・変位曲線（最終サイクル）

2.6 径方向圧縮解析

2.6.1 解析条件

2.5 の試験と同様の条件で解析を行い，結果を比較することでモデルの径方向の力学的特性の妥当性を検討する．解析モデルの全体図を図 2-20 に示す．ストランドモデルの長さは 62 mm である．ストランド軸方向を z 軸と一致させ，治具の上面に垂直となる方向を y 軸とした．座標軸の原点は，ストランド軸方向中心部におけるストランド断面の中心点である．治具は等方弾塑性体としてモデリングした．治具の材料特性を表 2-9 に，解析規模を表 2-10 に，解析条件を表 2-11 に示す．

境界条件を述べる．ストランドの両端部 3 mm をそれぞれ端面の中心節点に剛体接続し， z 軸方向の回転を拘束した状態で両端に引張力 200 N を加えつつ，上側の治具中心点に y 軸

方向下向きに圧縮力を負荷した。上側の治具上面は剛体拘束し、y 方向以外の変位と回転を拘束している。下側の治具底面は、全方向の変位を拘束した。引張力と圧縮力の荷重曲線は図 2-21 の通りである。ストランドに引張力を与えた状態で振動が収まるまで安定させた後、9.5 kN の圧縮力を加えさらに振動が収まった状態から、試験同様 sin 波で圧縮力を与えた。0.035～0.065 s は最大値 9.5 kN、最小値 0.5 kN、周期 0.02 s の sin 波である。

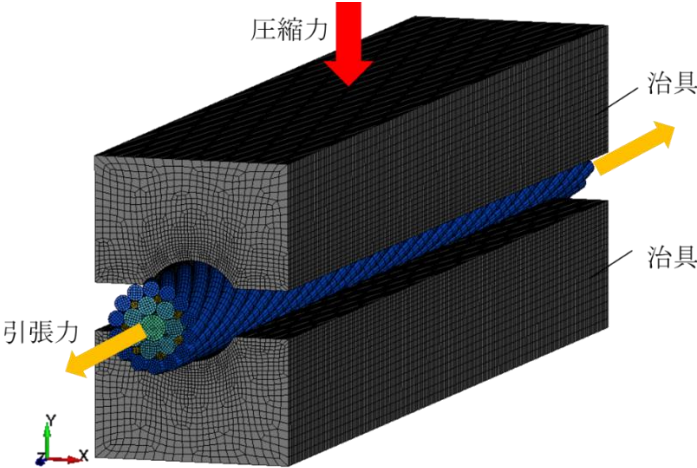


図 2-20 Fi(29)ストランド径方向圧縮解析全体図

表 2-9 治具材料特性

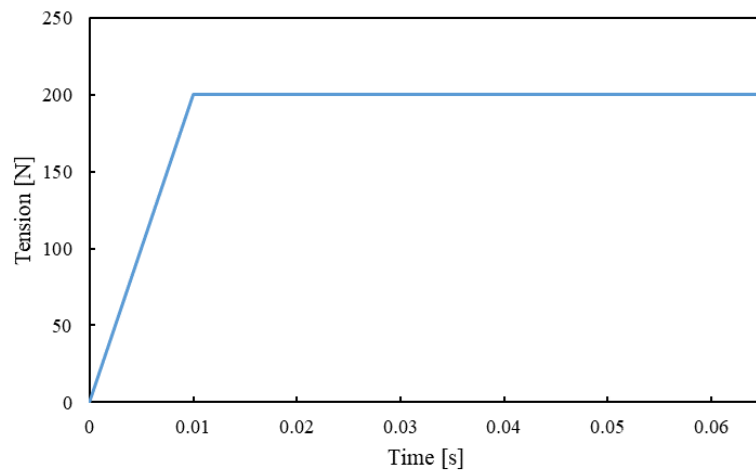
Young's modulus [GPa]	196
Poisson's ratio	0.3
Density [ton/mm ³]	8.0×10^{-7}

表 2-10 Fi(29)ストランド径方向圧縮解析規模

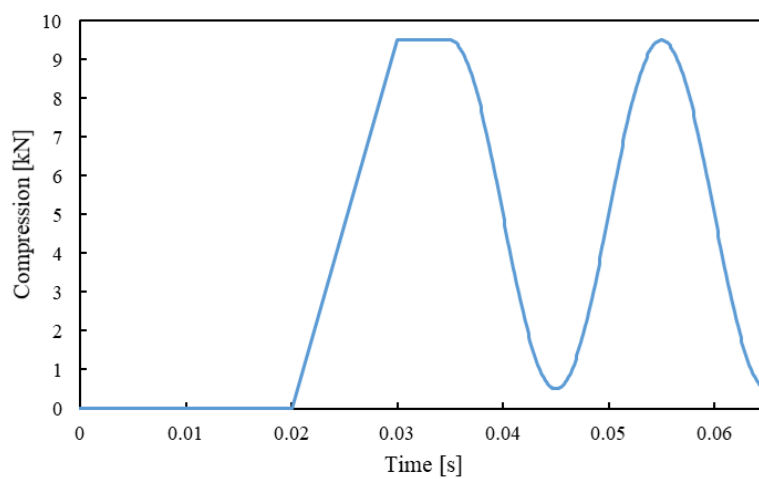
Nodes	567667
Elements	510964

表 2-11 Fi(29)ストランド径方向圧縮解析条件

Analysis software	LS-DYNA R9.0.1 (Quasistatic explicit method)
Element	Solid element
Contact algorithm	Penalty method
Analysis time [s]	0.065
Time step [s]	7.3×10^{-7}
Friction factor	0.1



(a) 引張力



(b) 圧縮力

図 2-21 Fi(29)ストランド径方向圧縮解析荷重曲線

2.6.2 解析結果

ストランドモデルの圧縮状態について、径方向剛性及び素線応力状態の可視化、接触状態の考察を行う。解析にかかった時間は表 2-12 の通りである。

表 2-12 Fi(29)ストランド径方向圧縮解析時間

CPU cores	16
Running times [h]	44

(1) 圧縮力・変位曲線

解析から得られた圧縮力と径方向変位の関係と、試験との比較を図 2-22 に示す。試験結果は最終サイクルの変位を、解析結果は 0.045 ~ 0.065 s の 1 サイクルの変位を表示している。変位は、試験同様上側の治具上面の変位を出力しており、サイクルにおいて最初に 0.5 kN 負荷したときを基準としている。

グラフより、解析モデルはヒステリシスを再現していることが分かる。また、負荷時において、試験では低圧縮力域での剛性が低く高圧縮力域にいくにつれ剛性が高くなっているのに対し、解析も同様の傾向を示しているが、高圧縮力域の傾きが試験より小さくなっている。サイクル内の最大変位は、試験 2 回目に比べ解析は 10 % 大きい結果となった。総括すると、ストランドモデルは概ね実験値を再現している。

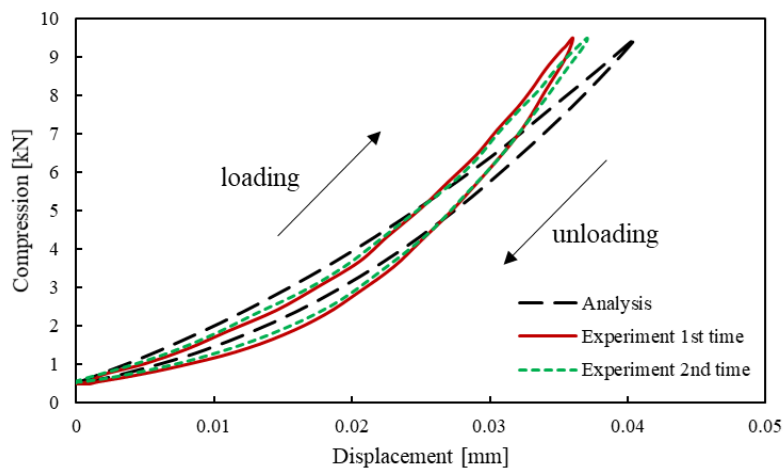
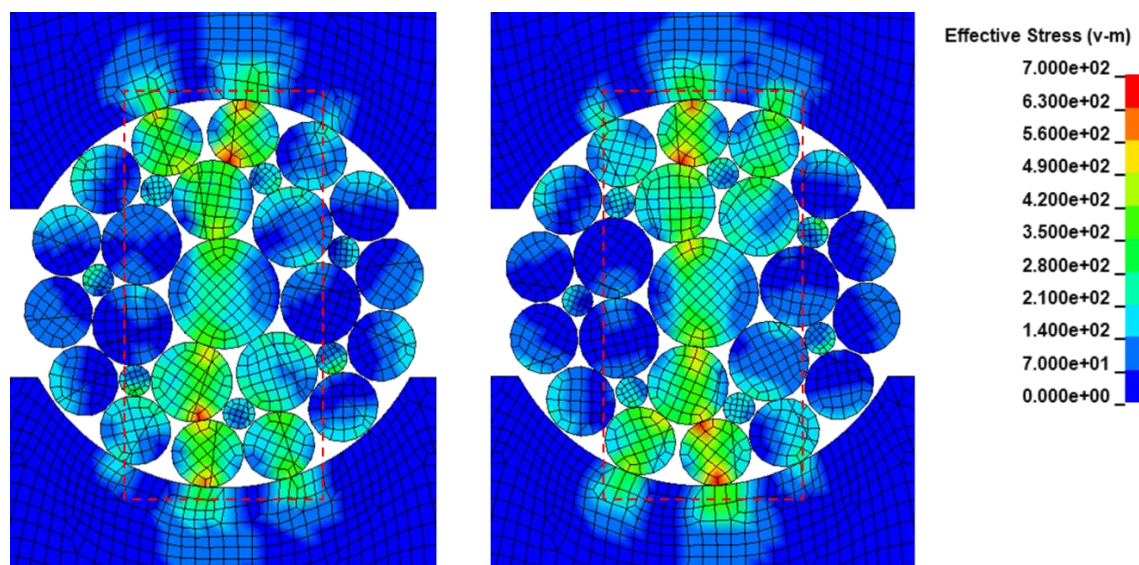


図 2-22 解析，試験における Fi(29)ストランド圧縮力・変位曲線の比較

(2) 応力状態

図 2-23 に、 $t = 0.055$ （圧縮力 9.5 kN）の $z = 0, 10$ でのモデル断面のミーゼス応力コンター図を示す。素線間のずれはほぼ見られず、素線配置の対称性により圧縮力が均等に分散されていると考えられる。図で赤点線枠内に示したように、溝中心部において、 y 軸方向に上から治具 $\rightarrow S_{out} - \delta 3 \rightarrow S_{out} - \delta 1 \rightarrow S_{out} - \delta 0 \rightarrow S_{out} - \delta 1 \rightarrow S_{out} - \delta 3 \rightarrow$ 治具と直線状に素線が並ぶとき、 $S_{out} - \delta 1$ と $S_{out} - \delta 3$ において素線接触箇所で応力が高くなることが分かる。



(a) $z = 0$ 断面

(b) $z = 10$ 断面

図 2-23 Fi(29)ストランド径方向圧縮解析ミーゼス応力コンター図 [MPa]
($t = 0.055$, 圧縮力 9.5 kN)

2.7 結言

ストランドモデルは、実際のストランドの断面状態を良く再現し、軸方向、径方向共に剛性も試験と概ね一致した。したがって、十分妥当性のあるモデルと言える。第4章のワイヤロープモデルの作成にあたって、このストランドモデルを元にモデリングを行う。

第3章 鋼心のモデリング

3.1 諸言

本章では、鋼心のモデリングを「同位相鋼心モデル」、「異位相鋼心モデル」の2種類提示する。それぞれの手法で作成したモデルの軸方向、径方向剛性を確認する解析と、同様の条件で行われた試験について、その概要と結果を説明する。得られた試験結果と解析結果を比較し、二つのモデルの妥当性の評価を行いその内一つのモデルを採用する。

3.2 鋼心のモデリング

3.2.1 解析対象

本章で解析対象とするのは、IWRC 6×Fi(29)の鋼心である。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。鋼心を構成する各素線のパラメータを表 3-1 に示す。

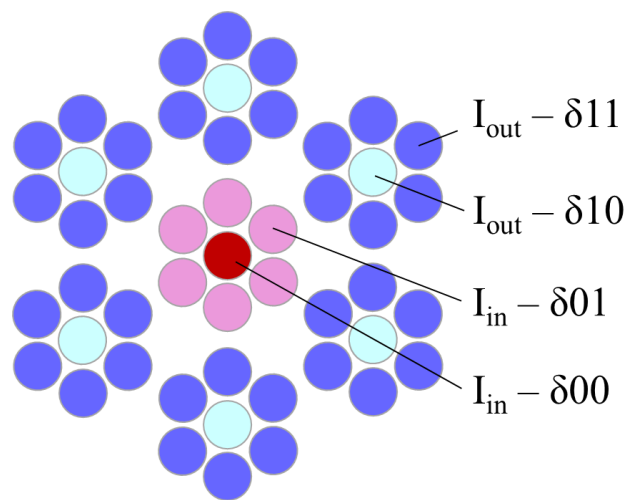


図 3-1 鋼心の構成

表 3-1 鋼心の幾何学的パラメータ

Wire type			Curve shape	Diameter [mm]		Pitch length [mm]		Number	
								Strand	Wires in strand
IWRC	I _{in}	800	Straight	5.7	2.0		15	1	1
		801	Helix						6
	I _{out}	810	Helix		1.8		6	1	
		811	Double helix					6	

3.2.2 鋼心モデル形状作成

鋼心モデルを幾何学的計算により作成する。2.2.2 と同様に，全素線の中心曲線を座標表示する。

(1) I_{in} の座標表示

I_{in} において，I_{in} - 800 は直線形状，I_{in} - 801 は螺旋形状であるから，2.2.2 の直ストランドモデルと同様の考え方で全素線の中心曲線を座標表示することが出来る。

(2) I_{out} の座標表示

(2)-(i) ストランド中心の螺旋パラメータ表示

I_{out} - 810 は螺旋形状であるから，2.2.2 で述べたストランドモデリングの素線中心の螺旋のパラメータ表示において，ストランド中心軸をロープ中心軸，素線をストランドにそれぞれ置き換えて導出される螺旋と同様である。

よって図 3-2 のようにロープ中心軸とz軸が一致するように座標軸を設定し，ロープ中心軸と周りのあるストランド中心との距離とR_s，ストランド中心の螺旋角をα_sとすると，(R_s, 0, 0)を通る螺旋の座標はz軸周りの回転角θを用いて(3-1)のように表される。

$$\begin{aligned}
 x_0 &= R_s \cos \theta \\
 y_0 &= R_s \sin \theta \\
 z_0 &= \theta R_s \tan \alpha_s
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$

螺旋角α_sはR_wと IWRC ピッチp_iから

$$\alpha_s = \tan^{-1} \frac{p_i}{2\pi R_s}
 \tag{3-2}$$

と表すことができる。

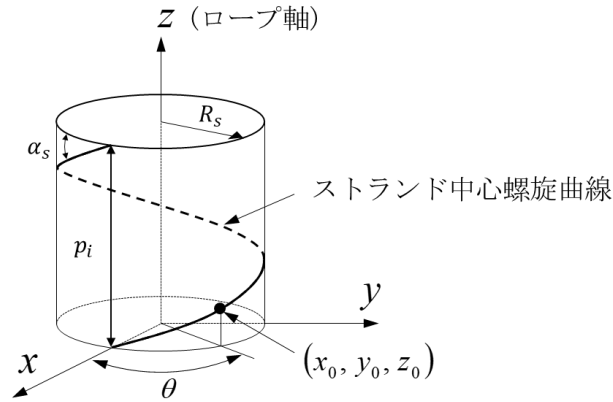


図 3-2 ストランド中心螺旋曲線模式図

(2)-(ii) グローバル座標系とストランド内部のローカル座標系の関係

二重螺旋形状の素線座標を，ストランド中心との相対的な位置関係により求めるため，図 3-3 に示すようなストランドにおけるローカル座標系 x_s, y_s, z_s を導入する．ストランド中心を原点とし， z_s 軸が常にストランド中心螺旋の接線ベクトルと一致するような座標系である． x_s 軸は，(i)のグローバル座標系において $\theta = 0$ での x 軸に一致するように設定する．よって x_s 軸はストランド中心螺旋の主法線ベクトルの逆ベクトル， y_s 軸は同螺旋の従法線ベクトルの逆ベクトルと一致する．

以下，ストランドにおけるローカル座標系とグローバル座標系の関係を導出する．

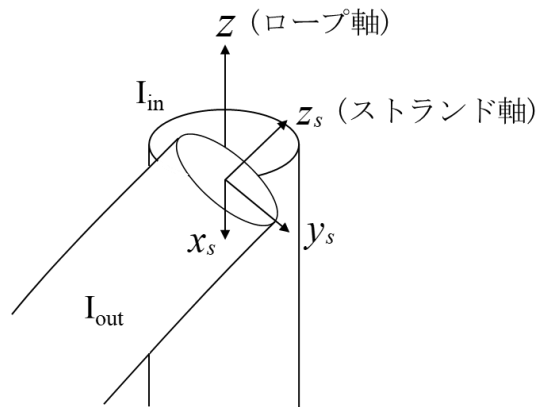


図 3-3 ストランド内部のローカル座標系

まず，螺旋の弧長 s は θ をパラメータとして次のように表される．

$$\begin{aligned}
 s(\theta) &= \int_0^\theta \sqrt{\left(\frac{dx_0}{d\theta}\right)^2 + \left(\frac{dy_0}{d\theta}\right)^2 + \left(\frac{dz_0}{d\theta}\right)^2} d\theta \\
 &= \int_0^\theta \sqrt{(-R_s \sin\theta)^2 + (R_s \cos\theta)^2 + (R_s \tan\alpha)^2} d\theta \\
 &= \int_0^\theta R_s \frac{d\theta}{\cos\alpha} = \frac{R_s}{\cos\alpha} \theta
 \end{aligned} \tag{3-3}$$

ストランド中心螺旋上の位置ベクトルを $\mathbf{r}(\theta) = (x_0, y_0, z_0)$ とおくと，単位接線ベクトル $\mathbf{T}(\theta)$ (z_s 軸方向)は，

$$\begin{aligned}
 \mathbf{T}(\theta) &= \frac{d\mathbf{r}}{ds} = \frac{d\mathbf{r}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{ds} \\
 &= (-R_s \sin\theta, R_s \cos\theta, R_s \tan\alpha) \cdot \frac{\cos\alpha}{R_s} \\
 &= (-\sin\theta \cos\alpha, \cos\theta \cos\alpha, \sin\alpha)
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

単位主法線ベクトル $\mathbf{N}(\theta)$ (x_s 軸の逆ベクトル)は，

$$\begin{aligned}
 \mathbf{N}(\theta) &= \frac{\frac{d\mathbf{T}}{ds}}{\left\| \frac{d\mathbf{T}}{ds} \right\|} = \frac{\frac{d\mathbf{T}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{ds}}{\left\| \frac{d\mathbf{T}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{ds} \right\|} \\
 &= \frac{(-\cos\theta \cos\alpha, -\sin\theta \cos\alpha, 0) \cdot \frac{\cos\alpha}{R_s}}{\left\| (-\cos\theta \cos\alpha, -\sin\theta \cos\alpha, 0) \cdot \frac{\cos\alpha}{R_s} \right\|} \\
 &= (-\cos\theta, -\sin\theta, 0)
 \end{aligned} \tag{3-5}$$

単位従法線ベクトル $\mathbf{B}(\theta)$ (y_s 軸の逆ベクトル)は，

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B}(\theta) &= \mathbf{T} \times \mathbf{N} \\
 &= (\sin\theta \sin\alpha, -\cos\theta \sin\alpha, \cos\alpha)
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

とそれぞれ求められる．

以上の式を用いて，ストランド内部のローカル座標系 (x_s, y_s, z_s) とグローバル座標系 (x, y, z) の関係は次のように表される．

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + x_s \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix} + y_s \begin{pmatrix} -\sin\theta \sin\alpha \\ \cos\theta \sin\alpha \\ \cos\alpha \end{pmatrix} + z_s \begin{pmatrix} -\sin\theta \cos\alpha \\ \cos\theta \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} R_s \cos\theta \\ R_s \sin\theta \\ \theta R_s \tan\alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \sin\alpha & -\sin\theta \cos\alpha \\ \sin\theta & \cos\theta \sin\alpha & \cos\theta \cos\alpha \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3-7}$$

(2)-(iii) 素線中心の座標

図 3-4 に示すように、素線の中心位置は(ii)で設定したローカル座標系においてストランド中心からの距離 R_w とストランド中心周りの回転角 ϕ を用いて次のように表される。

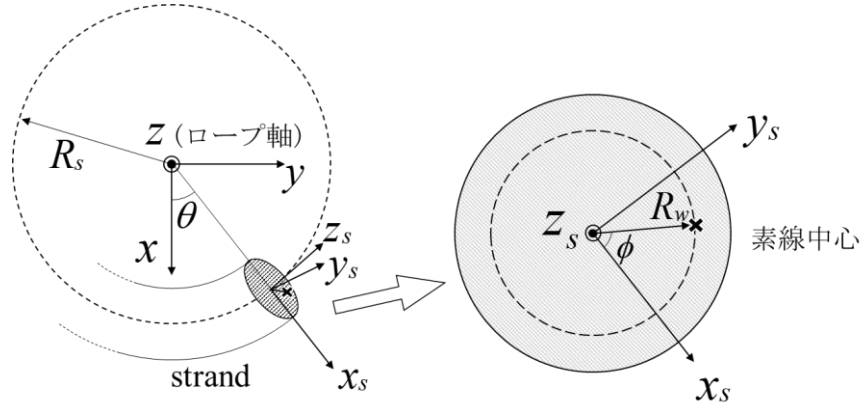


図 3-4 素線中心位置

$$\begin{aligned} x_s &= R_w \cos \phi \\ y_s &= R_w \sin \phi \\ z_s &= 0 \end{aligned} \quad (3-8)$$

これを(ii)で求めた座標変換式(3-7)に代入することで、素線中心の座標は次のように記述される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s \cos \theta + R_w (\cos \theta \cos \phi - \sin \theta \sin \phi \sin \alpha) \\ R_s \sin \theta + R_w (\sin \theta \cos \phi + \cos \theta \sin \phi \sin \alpha) \\ \theta R_s \tan \alpha - R_w \sin \phi \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

(2)-(iv) θ と ϕ の関係

本項では θ と ϕ が満たす関係式を導出する。

長さ ΔL のストランドについて、このストランドがロープ軸 (z 軸) 周りに $\Delta \theta$ だけ回転しており、また、ストランド内では素線がストランド中心軸 (z_s 軸) 周りに $\Delta \phi$ だけ回転しているとすると、ストランドおよび素線の螺旋の展開図は図 3-5 のように表される。

このとき、ストランドの螺旋角 β は(3-2)式の α と同様、 R_w とストランドピッチ p_s から

$$\beta \tan^{-1} \frac{p_s}{2\pi R_w} \quad (3-10)$$

と表せる。

ここで図 3-5 (a)から,

$$\Delta L = \frac{|\Delta\theta|R_s}{\cos\alpha} \quad (3-11)$$

図 3-5 (b)から,

$$\Delta L = |\Delta\phi|R_w \tan\beta \quad (3-12)$$

であることから, $|\Delta\theta|$ と $|\Delta\phi|$ との間には以下のような関係式が成立することが分かる.

$$|\Delta\phi| = \frac{R_s}{R_w \tan\beta \cos\alpha} |\Delta\theta| \quad (3-13)$$

普通撚りの場合, ストランドの撚り方向とロープの撚り方向は逆であることを考慮すると, $\Delta\theta$ と $\Delta\phi$ との関係は以下のように表すことができる.

$$\Delta\phi = -\frac{R_s}{R_w \tan\beta \cos\alpha} \Delta\theta \quad (3-14)$$

これより, $\theta = 0$ におけるストランド断面内の ϕ が定まれば, 任意の θ に対して素線中心の座標を求めることができる.

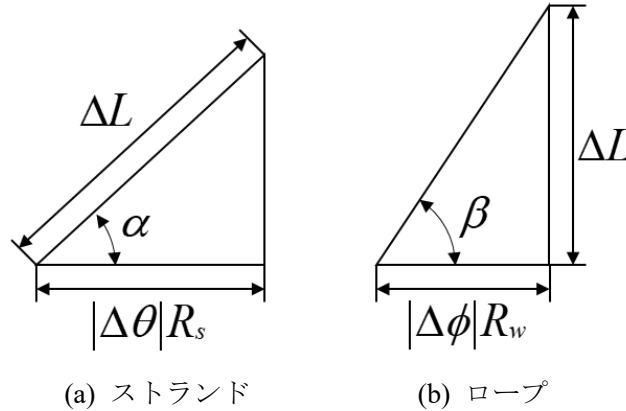


図 3-5 ストランドとロープの螺旋展開図

(3) モデル形状作成

3.2.2(1), 3.2.2(2)を用いて, 2.2.2 と同様の手順で鋼心モデルの 3 次元 CAD 形状を作成した後, メッシングを行う. ここで, I_{in} 周りに六つ存在する各 I_{out} の位相について考慮する. 3.2.2(2)のxyz座標系を用いて, $z = 0$ において $\theta = 0, 60, 120, 180, 240, 300$ にそれぞれ I_{out} 中心位置があるとする, 各 θ に対する ϕ の値によって I_{out} の位相を変化させることができる. ϕ を全て同じ値にしたモデルと, それぞれ異なる値を用いたモデルの 2 種類を作成し, 前者を「同位相鋼心モデル」, 後者を「異位相鋼心モデル」と呼ぶこととする.

異位相鋼心モデルの作成にあたって、X線CT装置を用いてロープ断面を撮影することで実際の鋼心断面を観察した。撮影対象として、300 mmのロープを用意した。測定条件は表2-2と同様で、解像度は10 μm 、撮影範囲は軸方向中心部の10 mm ($-5 \leq z \leq 5$)で、1000枚の断面画像を取得した。図3-6に、 $z = 0$ におけるX線CT画像の鋼心部拡大図を示す。これより、一断面において I_{in} と接触部を持つ I_{out} 、持たない I_{out} の両方が存在しており、実際の鋼心では全 I_{out} の位相は一致していないことが分かる。

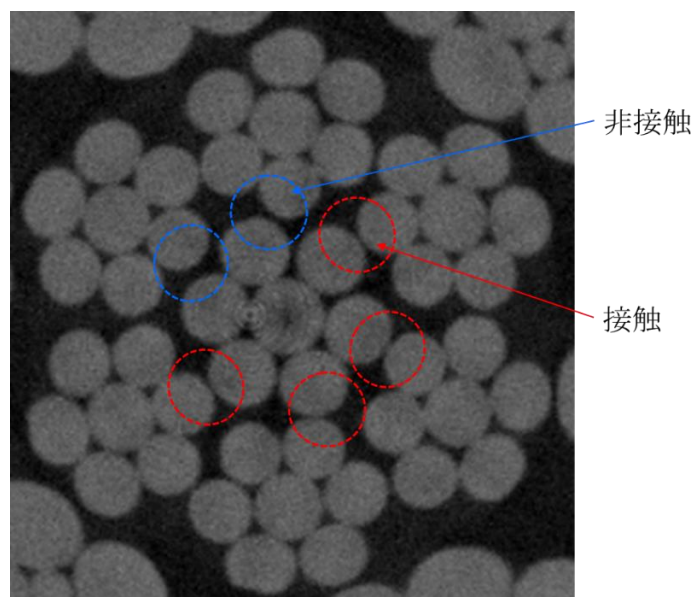
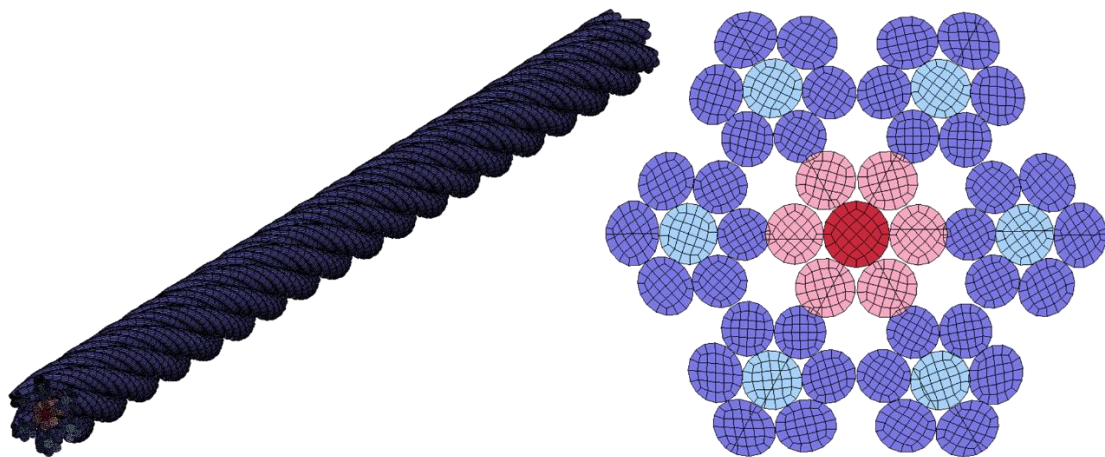


図 3-6 ロープ断面 CT スキャン画像鋼心部拡大図

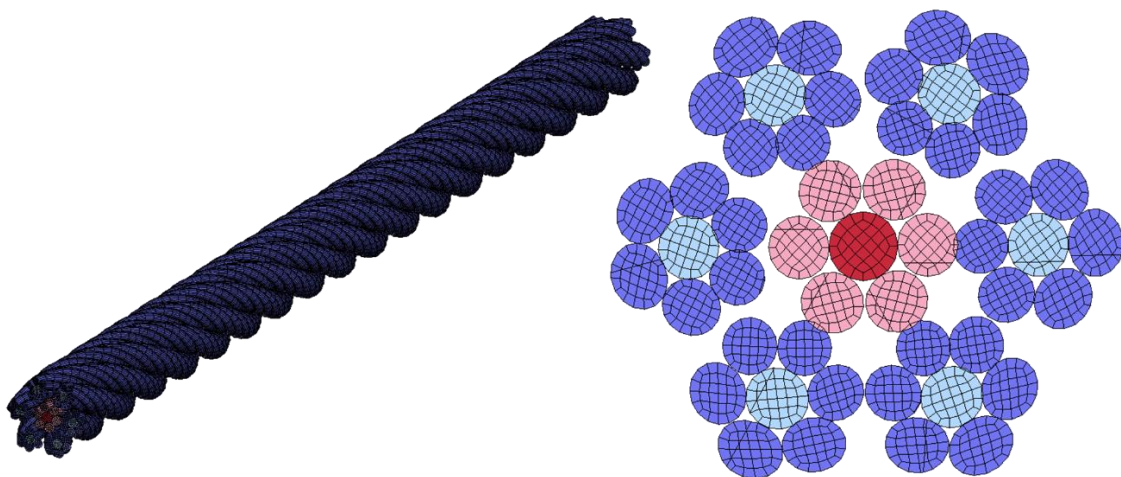
CT スキャン画像を参考に異位相鋼心モデルの各 I_{out} の位相を決定した。二つのモデルにおける各 I_{out} の位相を表3-2に示す。ただし、 $z = 0$ における x_s 軸の向きを $\phi = 0$ とする。また、それぞれのモデルの断面と全体形状を図3-7に示す。

表 3-2 $z = 0$ における各 I_{out} の θ と ϕ の関係

		θ					
		0	60	120	180	240	300
Identical phase IWRC model	ϕ	0	0	0	0	0	0
Different phase IWRC model		0	-20	10	-20	0	5



(a) 同位相鋼心モデル



(b) 異位相鋼心モデル

図 3-7 鋼心の3次元メッシュ形状

3.3 軸方向引張試験

東京製綱株式会社で行われた鋼心軸方向引張試験についてその概要と結果を述べる．鋼心が破断するまで引張力を与え続け，規長 500 mm として伸びを測定した．得られた引張力・伸び曲線を図 3-8 に示す．これより，引張力 15 kN まで引張力と変位は線形の関係で，それ以降では非線形な挙動を示しており，引張力 15 kN 以降で素線が塑性変形していると考えられる．

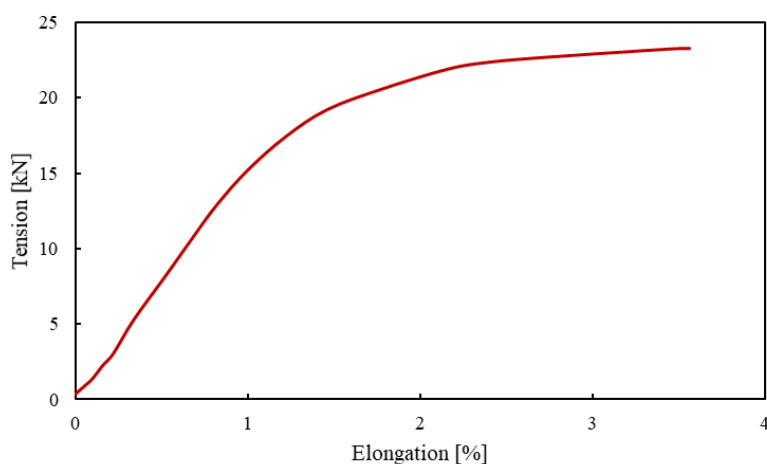


図 3-8 鋼心引張力・伸び曲線

3.4 軸方向引張解析

3.4.1 解析条件

3.3 の試験と同様の条件で解析を行い，結果を比較することでモデルの軸方向の力学的特性の妥当性を検討する．解析は，同位相鋼心モデルと異位相鋼心モデルの二つについて，同様の条件で行う．同位相鋼心モデル解析全体図を図 3-9 に示す．鋼心モデルの長さはいずれも 110 mm である．鋼心軸方向が z 軸と一致するよう座標軸を設定しており，鋼心軸方向中心部を $z=0$ としている．異位相鋼心モデルについても同様である．解析規模を表 3-3 に，解析条件を表 3-4 に示す．

境界条件を述べる．引張力により鋼心の撓りが戻るのを防ぐため，鋼心両端 3 mm における全節点について，各鋼心端中心節点に剛体拘束し，z 軸方向の回転を拘束した．

荷重条件を述べる．各鋼心端中心節点に 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 3-10 の通りである．



図 3-9 鋼心軸方向引張解析全体図

表 3-3 鋼心軸方向引張解析規模

Identical phase IWRC model	Nodes	379701
	Elements	294784
Different phase IWRC model	Nodes	379701
	Elements	294784

表 3-4 鋼心軸方向引張解析条件

Analysis software	LS-DYNA R9.0.1 (Quasistatic explicit method)	
Element	Solid element	
Contact algorithm	Penalty method	
Analysis time [s]	0.1	
Time step [s]	Identical phase IWRC model	9.1×10^{-8}
	Different phase IWRC model	9.1×10^{-8}
Friction factor	0.1	

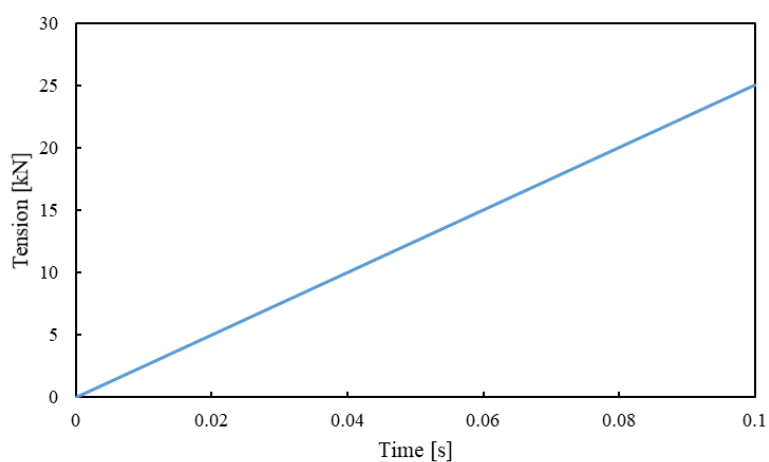


図 3-10 鋼心軸方向引張解析荷重曲線

3.4.2 解析結果

二つの鋼心モデルの引張状態について、軸方向剛性及び素線応力状態の可視化とそれらに対する考察を行う。各解析にかかった時間は表 3-5 の通りである。

表 3-5 鋼心軸方向引張解析時間

Identical phase IWRC model	CPU cores	12
	Running times [h]	47
Different phase IWRC model	CPU cores	12
	Running times [h]	33

(1) 引張力・変位曲線

解析から得られた軸方向の引張力と伸びの関係と試験との比較を図 3-11 に示す。二つのモデルは軸方向引張に対する挙動にほぼ差がないことが分かる。またストランド同様、試験に対して両モデル共に 83.7% という小さい引張力で破断している。試験破断力 23.3 kN に対して実働引張力を考慮し 4～5 kN の範囲で算出したヤング率は表 3-6 の通りであった。よって、モデルの低引張力の範囲における軸方向剛性は実験値と概ね一致していると言える。

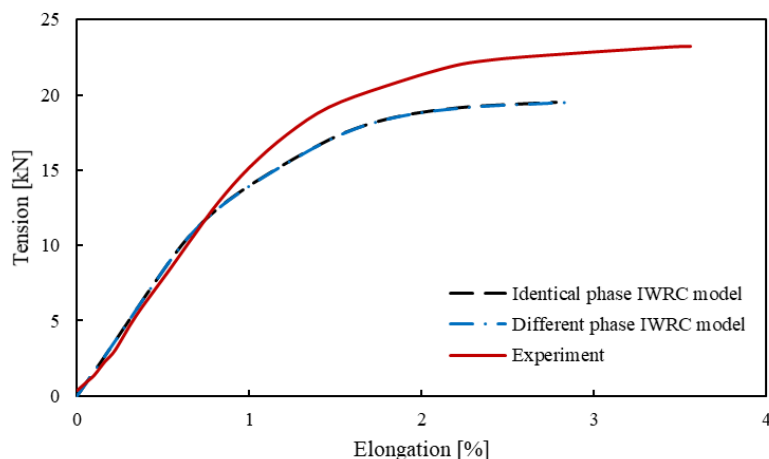


図 3-11 解析，試験における鋼心引張力・伸び曲線の比較

表 3-6 鋼心軸方向ヤング率 [GPa]

Analysis	Identical phase IWRC model	67.8
	Different phase IWRC model	67.7
Experiment		63.8

(2) 応力状態

二つのモデルにおける応力状態の違いを述べる．図 3-13, 図 3-13 に, $t=0.06$ (引張力 15 kN) の $z = 0, 20$ でのそれぞれのモデルの鋼心断面の最大主応力コンター図を示す．図中のストランドに振られた①～⑥は, 同じ数字同士同一のストランドであることを示している．同位相鋼心モデルは中心に対し点対称な素線配置であるから, それに従って応力分布も点対称となっている．異位相鋼心モデルにおいては, I_{in} は同位相鋼心モデルと同様の応力分布であるが, I_{out} は素線配置状態により異なることが分かる．図に示した, I_{out} の中で $\phi = 0$ (同位相鋼心モデルから位相をずらしていない) である①, ⑤は, 同位相鋼心モデルの I_{out} ①, ⑤と同様の応力分布となっている．つまり, 各 I_{out} の応力状態は他の I_{out} に依存しないと言える．これは I_{out} 同士がほぼ接触しないことから予想できる．したがって, 各 I_{out} の引張力に対する応答は独立しており, 軸方向全体でみればどれも等しいことから, 両モデルの引張力に対する挙動は一致すると考えられる．

図 3-14 に $t = 0.06$ (引張力 15 kN) の $z = 0$ 近傍における最大主応力ベクトル図を示す．最大主応力は, 各素線軸方向に働いていることが分かる．

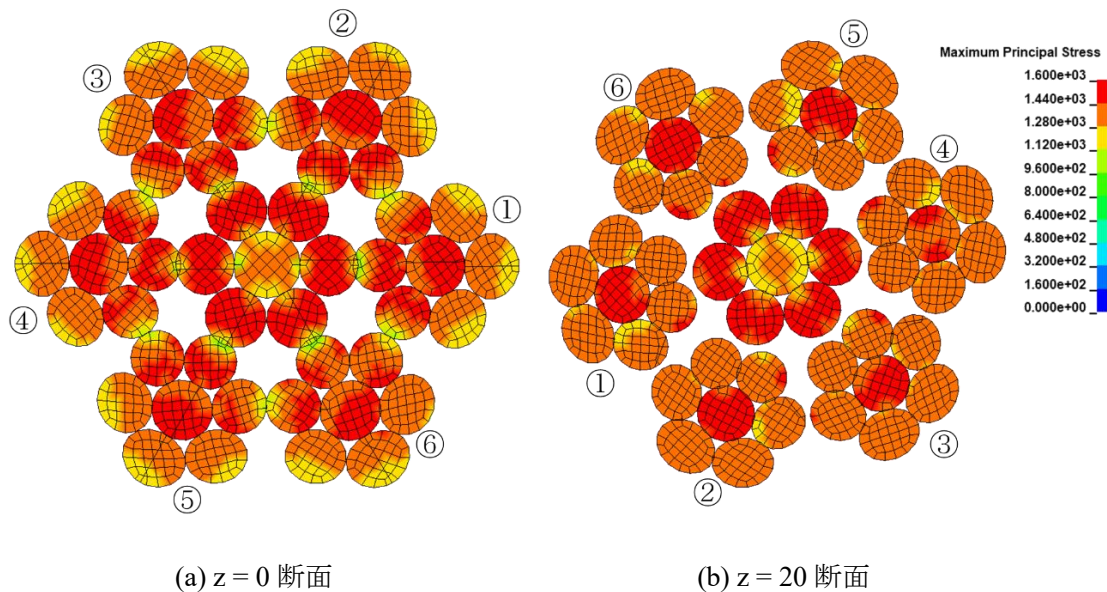


図 3-12 同位相鋼心モデル軸方向引張解析最大主応力コンター図 [MPa]
($t = 0.06$, 引張力 15 kN)

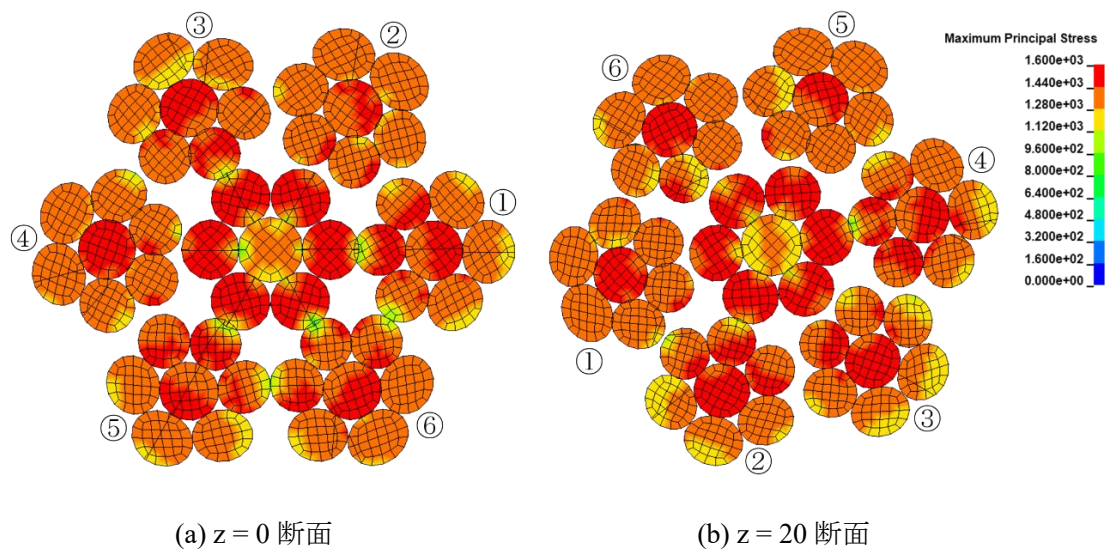


図 3-13 異位相鋼心モデル軸方向引張解析最大主応力コンター図 [MPa]
($t = 0.06$, 引張力 15 kN)

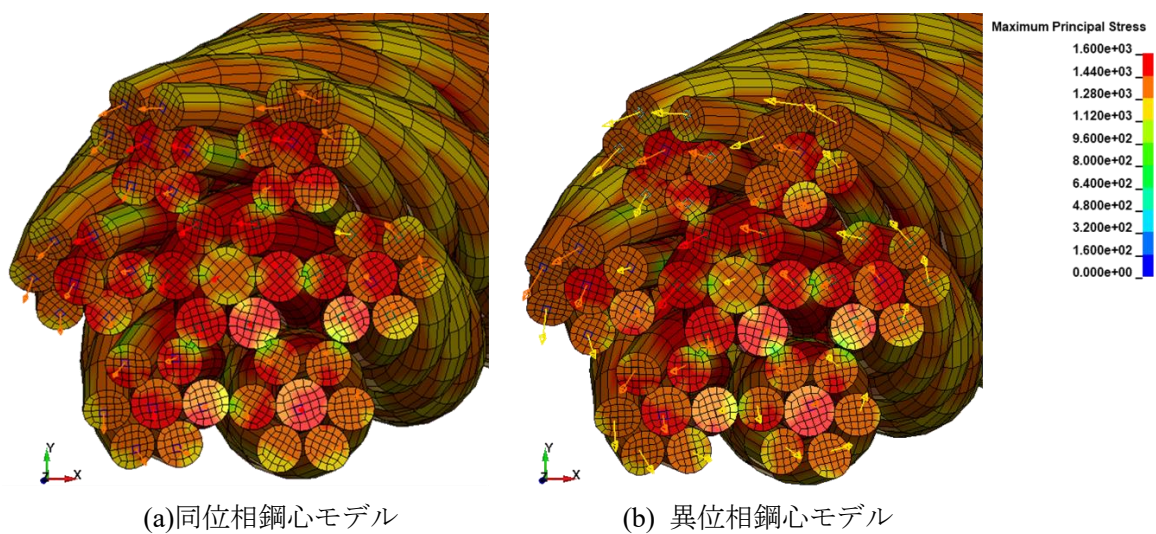


図 3-14 鋼心軸方向引張解析最大主応力ベクトル図
($t = 0.06$, 引張力 15 kN, $z = 0$ 近傍)

3.5 径方向圧縮試験

3.5.1 試験条件

ストランドと同様に，鋼心を上下の治具で挟み，引張力を加えた状態で上側の治具に圧縮力を加えて径方向変位を計測することで，圧縮力と変位の関係を求めた．試験装置は表 2-8 と同様のものを使用し，図 2-15 の構成で行った．治具のみ，鋼心の径に合わせて $\Phi 6\text{ mm}$ の溝が彫られたものを用いた．治具の構造は図 3-15 の通りである．

荷重条件を述べる．圧縮力は最小値 $0.5\sim$ 最大値 9.5 kN の $\sin$ 波とし，1 周期 100 s で 20 サイクル行った．引張力は 200 N である．圧縮力を加える範囲が被らないよう， 300 mm の間隔をあけて 3 回試験を行った．

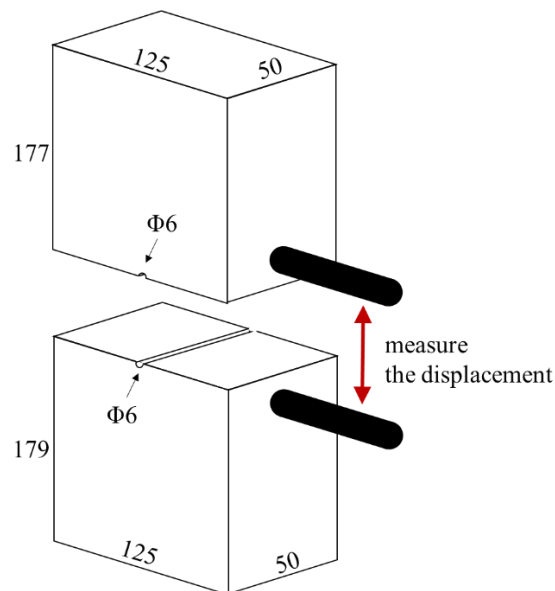


図 3-15 鋼心径方向圧縮試験治具

3.5.2 試験結果

全3回の試験について、各20サイクル分の圧縮力・変位曲線を図 3-16 に示す。変位は、初めに 0.5 kN 負荷したときを基準としている。これより、ストランド同様 1 サイクル目の変位が試験によってばらつきがあるが、2 サイクル目以降の挙動は同じ傾向を示している。サイクルを経るごとにグラフが右へシフトしており、圧縮を繰り返すごとに鋼心内の隙間が埋まっていると考えられる。また負荷時には圧縮力が大きくなるほど変位の幅が徐々に小さくなる傾向を示している。ストランドとの相違点を挙げると、同程度の径であるにも関わらず鋼心ではストランドの 3 倍程度の変位が出ている。これは、鋼心はコアの周りにストランドを撚り合わせた構造であることから、コア、ストランド間に隙間があるためだと考えられる。

図 3-17 に、各試験の 20 サイクル目の圧縮力・変位曲線を示す。変位は、サイクルの初めに 0.5 kN 負荷したときを基準としている。サイクル内の最大変位は、2 回目と 3 回目で 9% のずれがあった。鋼心軸と治具溝中心軸が平行でなかったことが原因として考えられる。

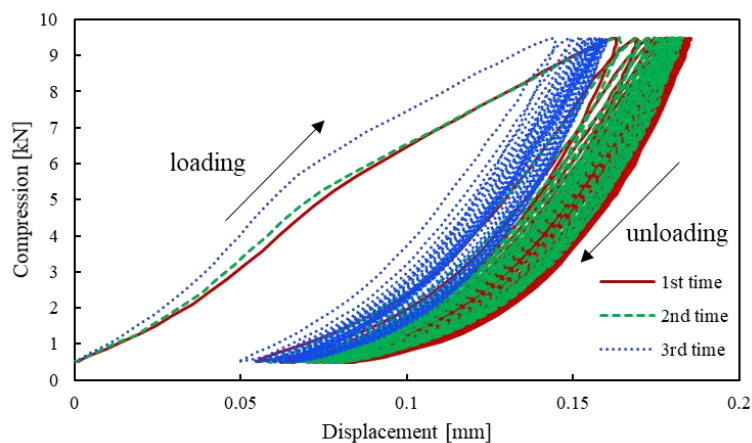


図 3-16 鋼心圧縮力・変位曲線（全サイクル）

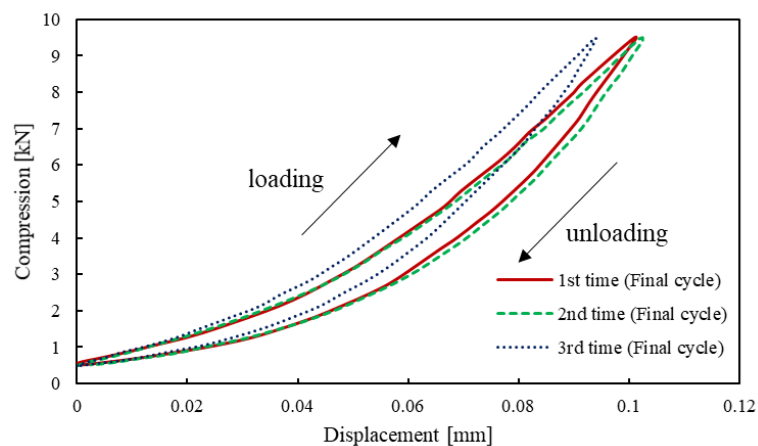


図 3-17 鋼心圧縮力・変位曲線（最終サイクル）

3.6 径方向圧縮解析

3.6.1 解析条件

3.5 の試験と同様の条件で解析を行い，結果を比較することでモデルの径方向の力学的特性の妥当性を検討する．同位相鋼心モデル解析全体図は図 3-18 に示した通りで，鋼心モデルの長さは 67 mm である．鋼心軸方向は z 軸と一致させ，治具の上面に垂直となる方向を y 軸とした．座標軸の原点は，鋼心軸方向中心部における鋼心断面の中心点である．異位相鋼心モデルについても全て同様である．治具の材料特性は表 2-9 の通りである．解析規模を表 3-7 に，解析条件を表 3-8 に示す．

境界条件を述べる．鋼心両端部をそれぞれ端面の中心節点に剛体接続し，z 軸方向の回転を拘束した状態で両端に引張力 200 N を加えつつ，上側の治具中心点に y 軸方向下向きに圧縮力を負荷した．上側の治具上面は剛体拘束し，y 方向以外の変位と回転を拘束している．下側の治具底面は，全方向の変位を拘束した．引張力と圧縮力の荷重曲線は図 3-19 の通りである．0.015 ~ 0.045 s は最大値 9.5 kN，最小値 0.5 kN，周期 0.02 s の sin 波である．

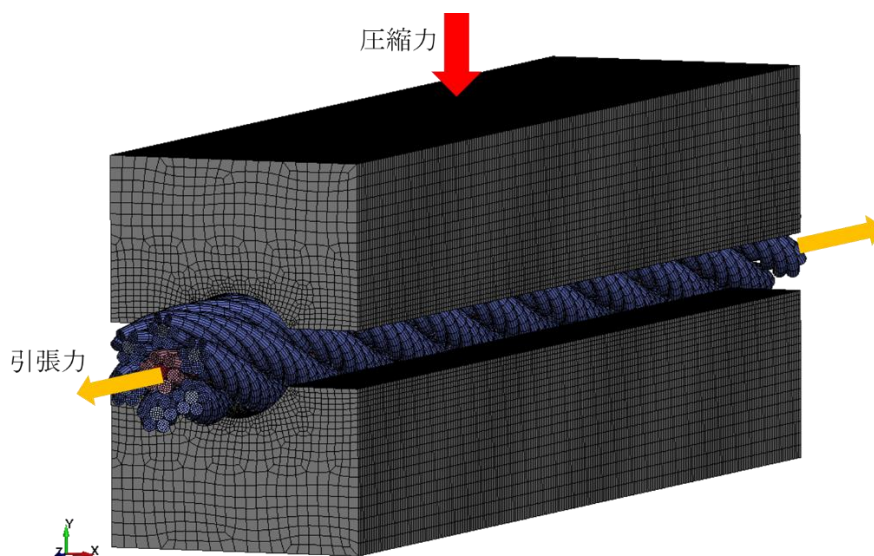


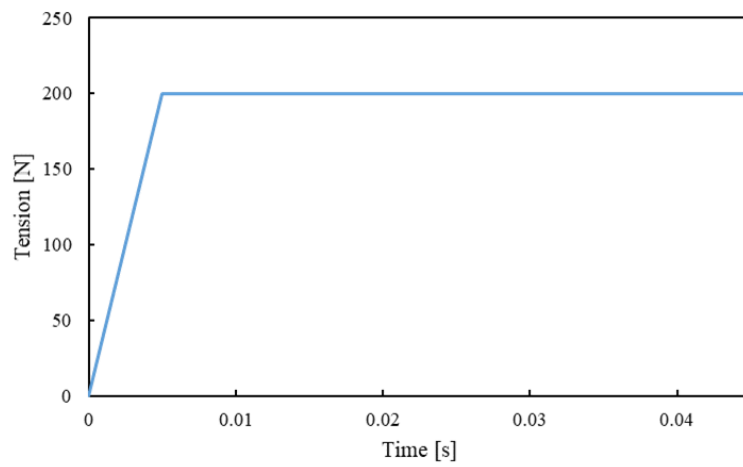
図 3-18 鋼心径方向圧縮解析全体図

表 3-7 鋼心径方向圧縮解析規模

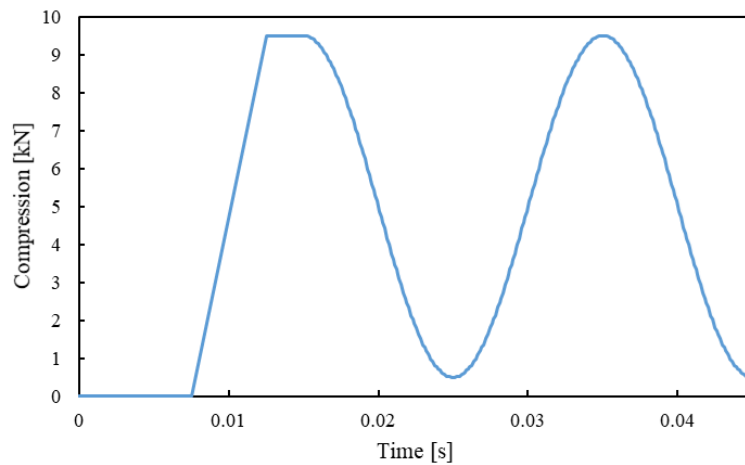
Identical phase IWRC model	Nodes	538163
	Elements	457552
Different phase IWRC model	Nodes	524961
	Elements	447248

表 3-8 鋼心径方向圧縮解析条件

Analysis software	LS-DYNA R9.0.1 (Quasistatic explicit method)	
Element	Solid element	
Contact algorithm	Penalty method	
Analysis time [s]	0.045	
Time step [s]	Identical phase rope model	7.1×10^{-8}
	Different phase rope model	7.1×10^{-8}
Friction factor	0.1	



(a) 引張力



(b) 圧縮力

図 3-19 鋼心径方向圧縮解析荷重曲線

3.6.2 解析結果

二つの鋼心モデルの圧縮状態について，径方向剛性及び素線応力状態の可視化，接触状態の考察を行う．各解析にかかった時間は表 3-9 の通りである．

表 3-9 鋼心径方向圧縮解析時間

Identical phase IWRC model	CPU cores	16
	Running times [h]	47
Different phase IWRC model	CPU cores	16
	Running times [h]	68

(1) 圧縮力・変位曲線

解析から得られた圧縮力と径方向変位の関係と，試験 3 回分との比較を図 3-20 に示す．また，見やすさのため，解析結果と試験 1 回目とのみの比較を図 3-21 に示す．試験結果は最終サイクルの変位を，解析結果は 0.025~0.045 s の 1 サイクルを表示している．変位は，試験同様上側の治具上面の変位を出力しており，サイクルにおいて最初に 0.5 kN 負荷したときを基準としている．図 3-20 より，サイクル内の最大変位は，異位相鋼心モデルは試験 3 回分のばらつきの中に収まっているのに対し，同位相鋼心モデルは試験 2 回目に対し 8 % 大きい結果となった．これより，位相によって径方向剛性は変化することが分かった．その理由について(2)で考察する．また図 3-21 より，二つの解析モデルは共にヒステリシスを再現している．さらに，ストランド同様負荷時の高圧縮力域の傾きが試験に比べ小さく，特に同位相鋼心モデルはその傾向が顕著である．

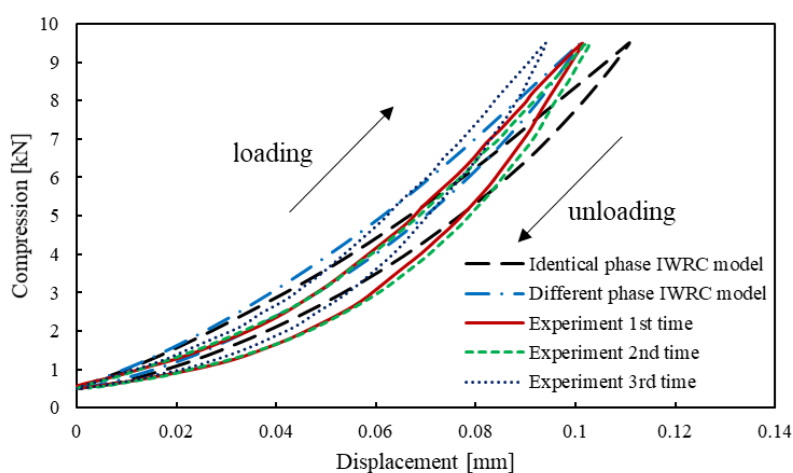


図 3-20 解析，試験における鋼心圧縮力・変位曲線の比較

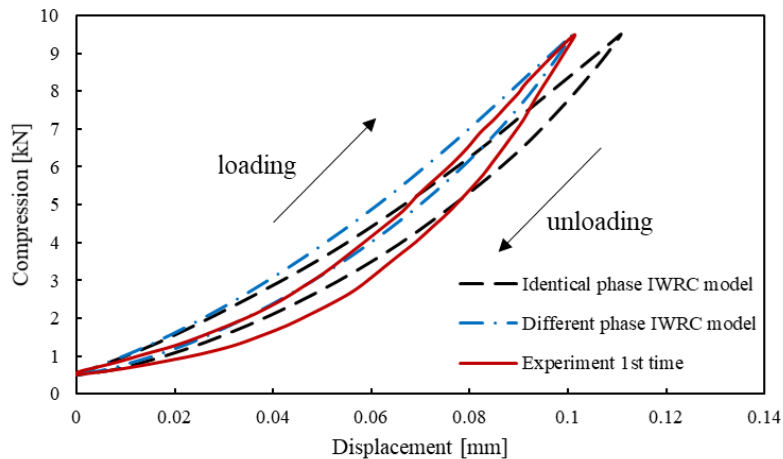
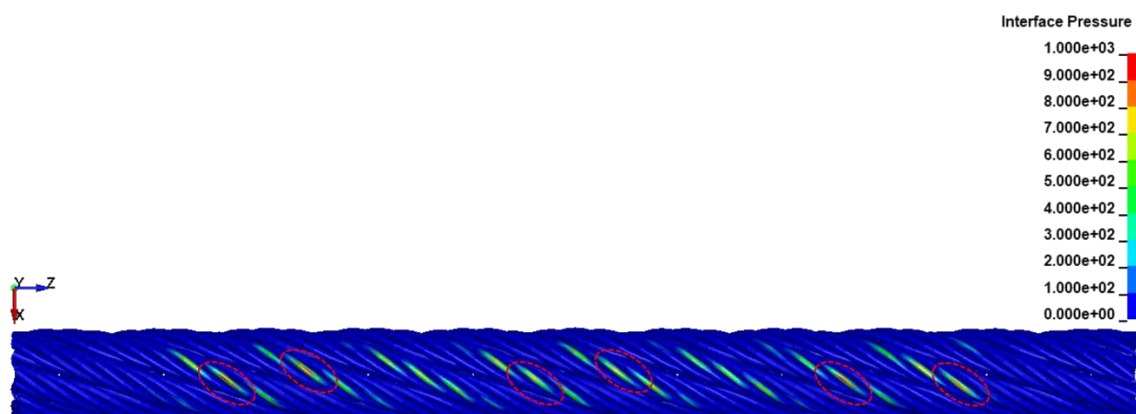


図 3-21 解析，試験 2 回目における鋼心圧縮力・変位曲線の比較

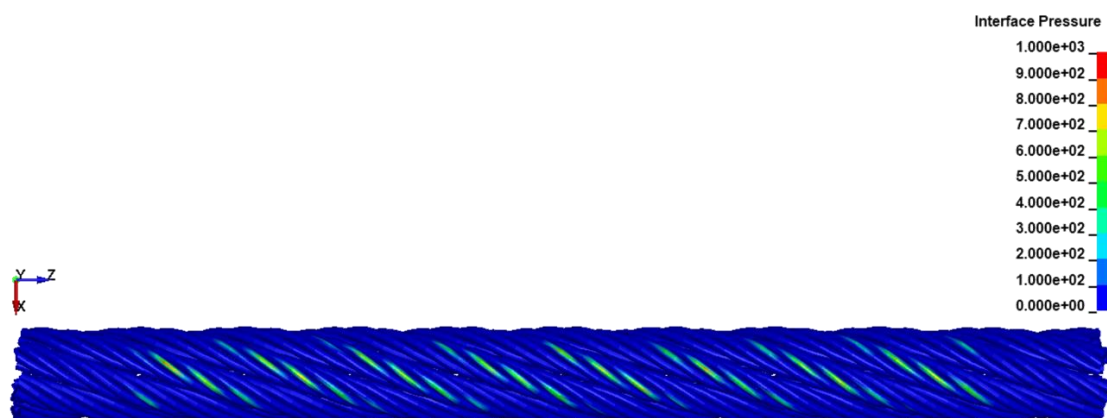
(2) 応力状態，接触状態

図 3-22 に，両モデルの $t=0.035$ （圧縮力 9.5 kN）の，治具との接触により I_{out} に発生した接触面圧コンター図を示す．また，このとき各要素に発生している接触面圧のヒストグラムを図 3-23 に示す．これより，同位相鋼心モデルでは異位相鋼心モデルに比べ，接触面圧が 1000 MPa 以上の高い要素が多く，600 MPa 以下の低い要素が少ない．接触面圧が 1000 MPa 以上の要素は，図 3-22 に示したように，治具との接触部において見られる．つまり，同位相鋼心モデルの治具との接触箇所における面圧は異位相鋼心モデルより高くなっている．ここで，図 3-24 に，両モデルの $t=0.035$ （圧縮力 9.5 kN）の $z=7.7$ 断面でのミーゼス応力コンター図を示す．これより，同位相鋼心モデルの治具との接触箇所は断面内で 2 ヶ所なのに対し，異位相鋼心モデルでは 3 ヶ所で治具と接している．このように，同位相鋼心モデルは I_{out} の位相の対称性により，治具との接触面積が小さくなっている．よって 1 ヶ所の接触部にかかる圧力が高まり，径方向変位が大きくなったと考えられる．



(a) 同位相鋼心モデル

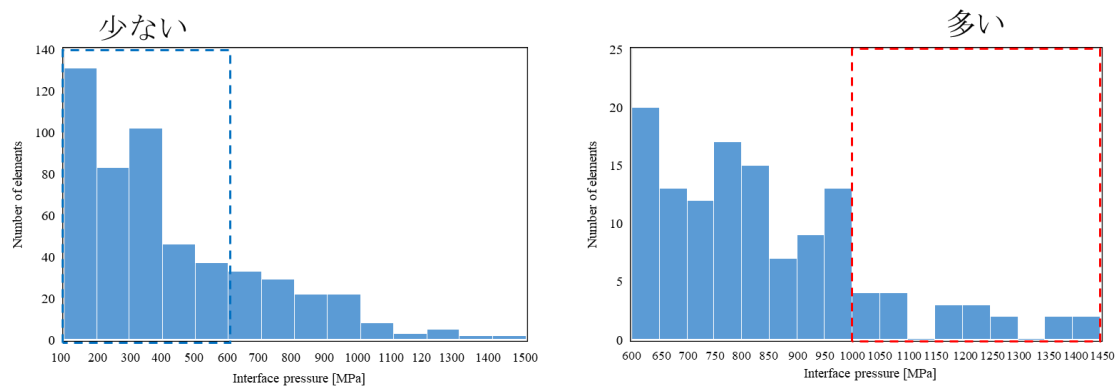
赤点線枠内において 1000 MPa 以上の高い接触面圧が発生している。



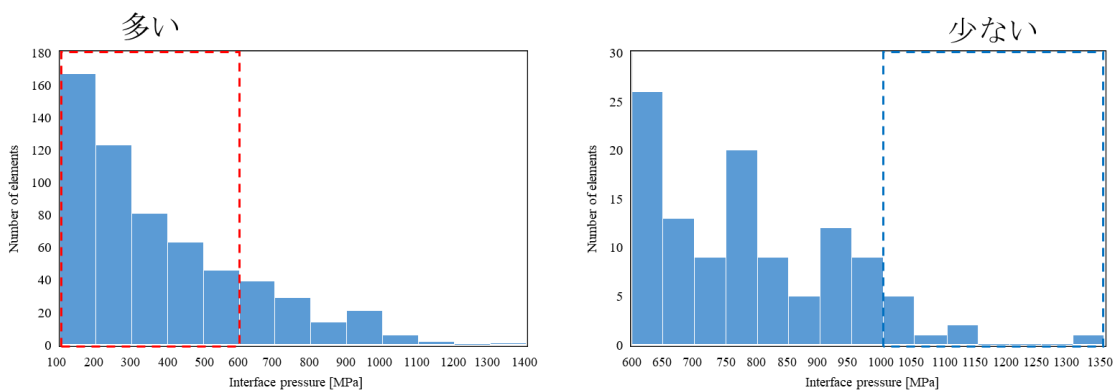
(b) 異位相鋼心モデル

図 3-22 鋼心径方向圧縮解析 I_{out} 接触面圧コンター図 [MPa]

($t = 0.035$)



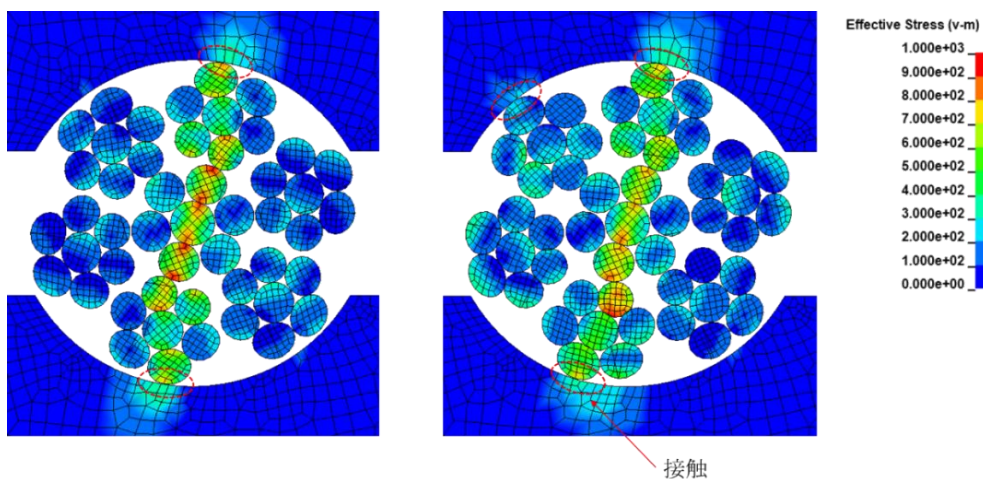
(a) 同位相鋼心モデル



(b) 異位相鋼心モデル

図 3-23 鋼心径方向圧縮解析 I_{out} 接触面圧ヒストグラム

($t = 0.035$)



(a) 同位相鋼心モデル

(b) 異位相鋼心モデル

図 3-24 鋼心径方向圧縮解析ミーゼス応力コンター図 [MPa]

($t = 0.035$, $z = 7.7$ 断面)

3.7 結言

3.4, 3.6 より, 両モデルとも軸方向剛性は概ね再現するが, 同位相鋼心モデルは, I_{out} の配置の対称性から径方向剛性が異位相鋼心モデルより低くなった. 実際の使用状況では高圧縮力域において素線のずれが発生し得ることから, その挙動の再現のために高圧縮力域の剛性の再現性は重要であると考えられる. よって, ロープモデルの作成にあたって, 軸方向, 径方向剛性共に妥当性のある異位相鋼心モデルを採用する.

第4章 ロープのモデリング

4.1 諸言

本章では，第 2 章で作成したストランドモデル，第 3 章で作成した異位相鋼心モデルを組み合わせることでロープ全体のモデリングを行う．異なる組み合わせ方法により，「同位相ロープモデル」，「異位相ロープモデル」の 2 種類のモデルを作成する．それぞれの手法で作成したモデルの軸方向・径方向剛性を確認する解析と，同様の条件で行われた試験について，その概要と結果を説明する．得られた試験結果と解析結果を比較し，二つのモデルの妥当性の評価を行いその内一つのモデルを採用する．

4.2 ロープのモデリング

4.2.1 解析対象

本章で解析対象とするのは，IWRC 6×Fi(29) $\phi 14$ 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．表 4-1 にロープを構成する螺旋 Fi(29)ストランドのパラメータを示す．

表 4-1 螺旋 Fi(29)ストランドの幾何学的パラメータ

Wire type			Curve shape	Pitch length [mm]	Number of strands
Outer strand of wire rope	S _{out}	$\delta 0$	Helix	88	6
		$\delta 1$	Double helix		
		$\delta 2$	Double helix		
		$\delta 3$	Double helix		

4.2.2 ロープモデル形状作成

ロープモデルを幾何学的計算により作成する．鋼心には第 3 章で作成した異位相鋼心モデルをそのまま用いる．Fi(29)ストランドは，素線径，ストランドピッチといった表 2-1 のパラメータはそのままに，ストランド全体を螺旋構造とする．よって，I_{out}- $\delta 0$ は螺旋形状，I_{out}- $\delta 1 \sim 3$ は二重螺旋形状となる．これらは 3.2.2(2)の I_{out}モデルと同様の考え方で各素線の中心曲線を座標表示することが出来る．

2.2.2 と同様の手順で Fi(29)螺旋ストランドモデルの 3 次元 CAD 形状作成し，メッシングを行う．ここで，六つの Fi(29)螺旋ストランドに対して 3.2.2(3)と同様に位相を考慮する．

各ストランドの位相を全て同じ値にしたモデルと、それぞれ異なる値を用いたモデルの2種類を作成し、前者を「同位相ロープモデル」、後者を「異位相ロープモデル」と呼ぶこととする。ここで、3.2.2(3)でX線CT装置を用いて撮影したロープ断面を観察する。図4-1に、 $z=4$ におけるX線CT画像を示す。これより、一断面において I_{out} と接触部を持つストランド、持たないストランドの両方が存在し、各ストランドの位相は一致していないことが分かる。

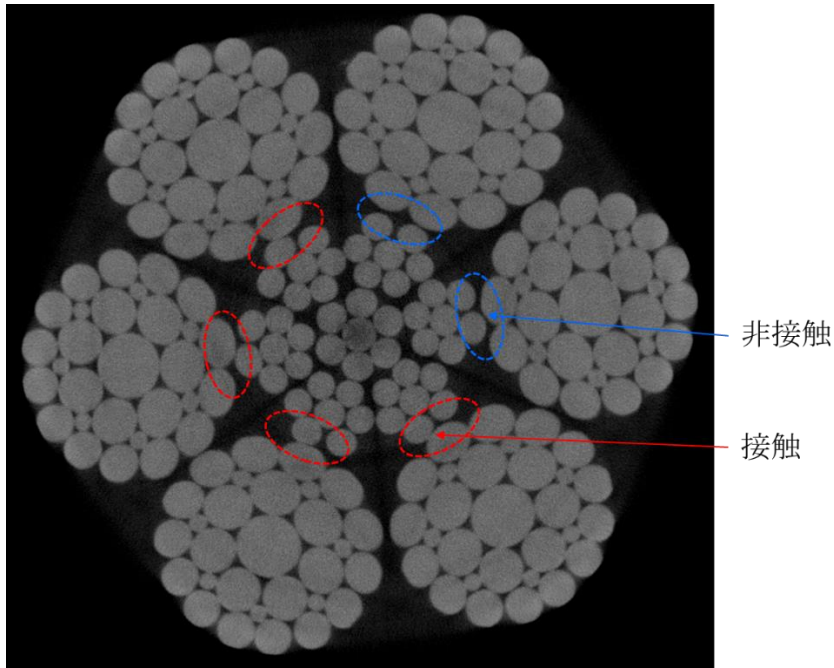
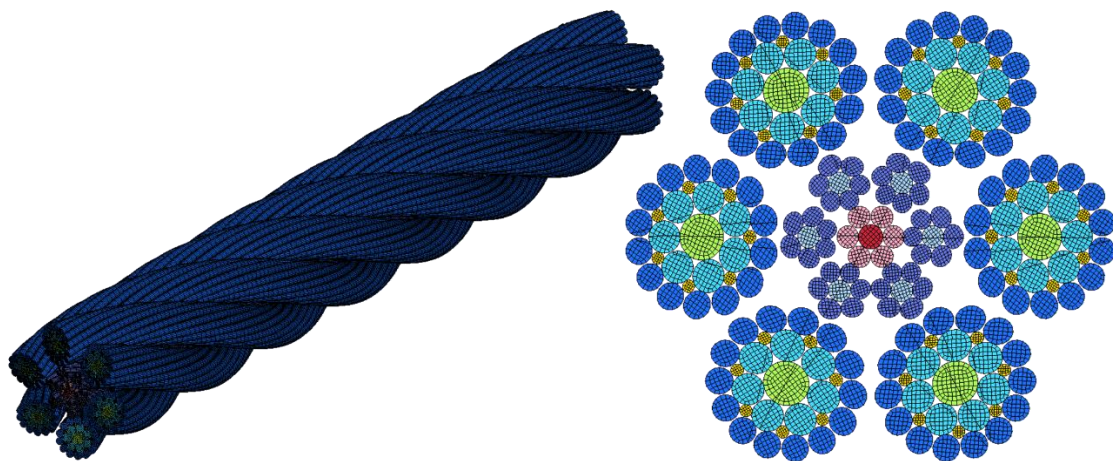


図 4-1 ロープ断面 CT スキャン画像

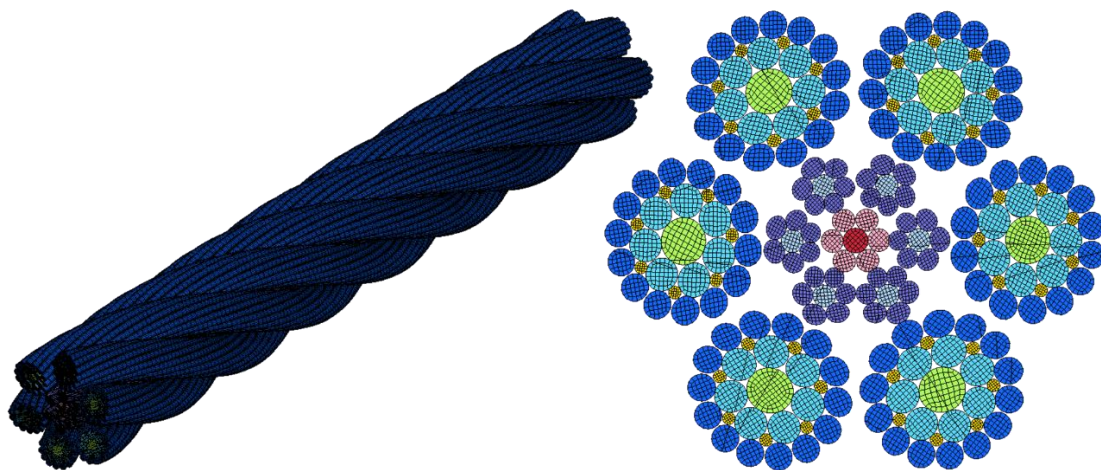
CT スキャン画像を参考にし、異位相ロープモデルの各ストランドの位相を決定した。二つのモデルにおける各ストランドの位相を表4-2に示す。また、それぞれのモデルの断面と全体形状を図4-2に示す。

表 4-2 $z = 0$ における各ストランドの θ と ϕ の関係

		θ					
		0	60	120	180	240	300
Identical phase rope model	ϕ	0	0	0	0	0	0
Different phase rope model		0	120	48	60	0	96



(a) 同位相ロープモデル



(b) 異位相ロープモデル

図 4-2 ロープの3次元メッシュ形状

4.3 軸方向引張試験

東京製綱株式会社で行われたロープ軸方向引張試験についてその概要と結果を述べる。ワイヤロープが破断するまで引張力を与え続け、規長 500 mm として伸びを測定した。得られた引張力・伸び曲線を図 4-3 に示す。これより、引張力 90 kN まで引張力と伸びは線形の関係で、それ以降では非線形な挙動を示しており、90 kN 以降で素線が塑性変形していると考えられる。

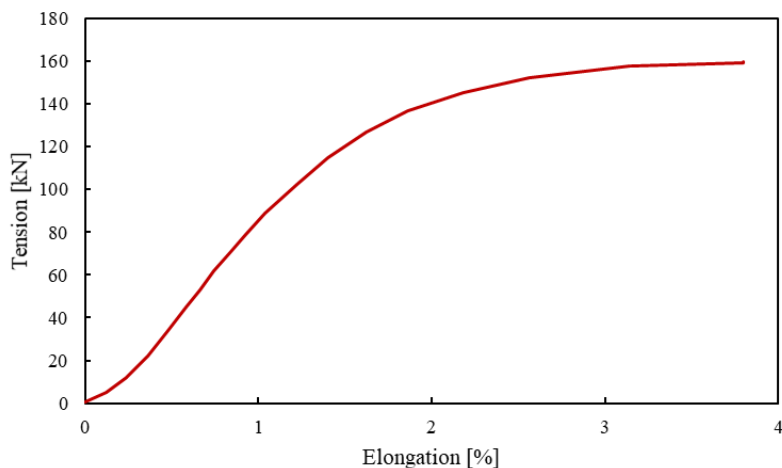


図 4-3 ロープ引張力・伸び曲線

4.4 軸方向引張解析

4.4.1 解析条件

4.3 の試験と同様の条件で解析を行い、結果を比較することでモデルの軸方向の力学的特性の妥当性を検討する。同位相ロープモデルの解析全体図を図 4-4 に示す。ロープモデルの長さは 110 mm である。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、ロープ軸方向中心部を $z=0$ としている。異位相ロープモデルについても全て同様である。解析規模を表 4-3 に、解析条件を表 4-4 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 3 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。

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 4-5 の通りである。



図 4-4 ロープ軸方向引張解析全体図

表 4-3 ロープ軸方向引張解析規模

Identical phase rope model	Nodes	1769157
	Elements	1385888
Different phase rope model	Nodes	1751395
	Elements	1368224

表 4-4 ロープ軸方向引張解析条件

Analysis software	LS-DYNA R9.0.1 (Quasistatic explicit method)	
Element	Solid element	
Contact algorithm	Penalty method	
Analysis time [s]	0.1	
Time step [s]	Identical phase rope model	3.9×10^{-8}
	Different phase rope model	3.9×10^{-8}
Friction factor	0.1	

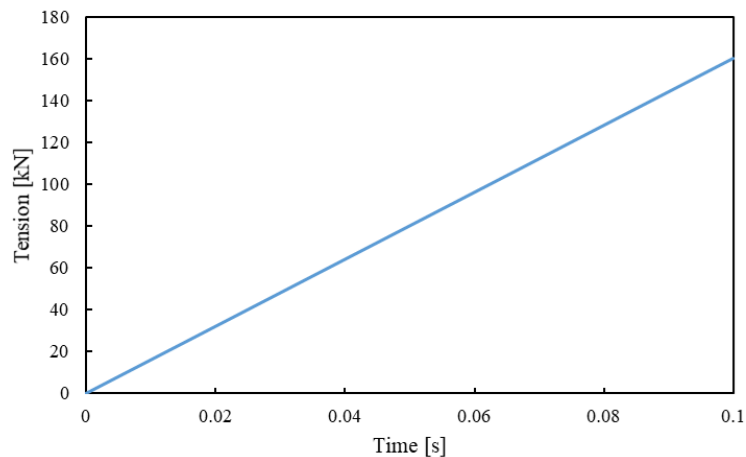


図 4-5 ロープ軸方向引張解析荷重曲線

4.4.2 解析結果

二つのロープモデルの引張状態について、軸方向剛性及び素線応力状態の可視化とそれらに対する考察を行う。各解析にかかった時間は表 4-5 の通りである。

表 4-5 ロープ軸方向引張解析時間

Identical phase rope model	CPU cores	20
	Running times [h]	211
Different phase rope model	CPU cores	12
	Running times [h]	491

(1) 引張力・変位曲線

解析から得られた軸方向の引張力と変位の関係と試験との比較を図 4-6 に示す。鋼心同様、二つのモデルは軸方向引張に対する挙動にほぼ差がないことが分かる。またストランド、鋼心と同じように、試験に対して両モデル共に 87 % という小さい引張力で破断している。試験破断力 160 kN に対して実働引張力を考慮し 30 ~ 35 kN の範囲でのヤング率を算出すると、表 4-6 の通りであった。よって、モデルの低引張力の範囲における軸方向剛性は実験値よりやや低い、概ね一致していると言える。

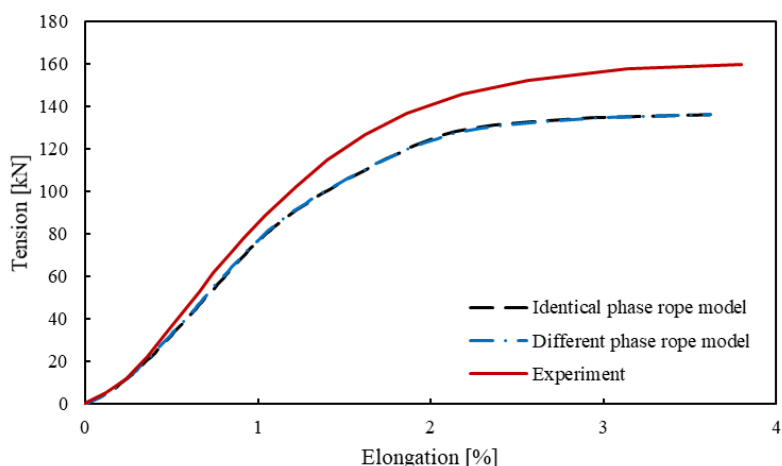


図 4-6 解析，試験におけるロープ引張力・伸び曲線の比較

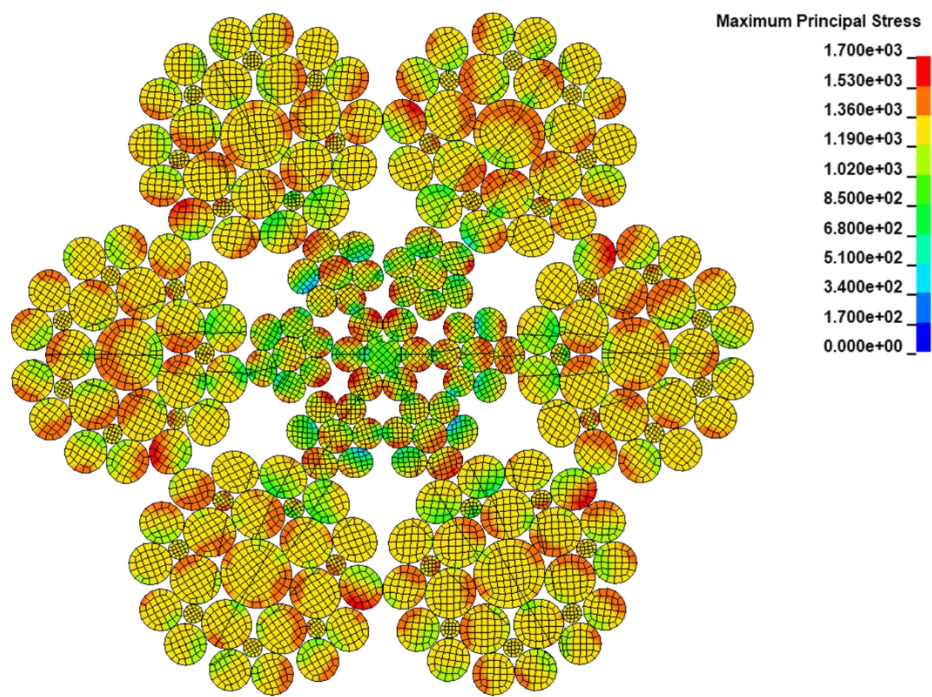
表 4-6 ロープ軸方向ヤング率 [GPa]

Analysis	Identical phase rope model	52.0
	Different phase rope model	52.6
Experiment		62.5

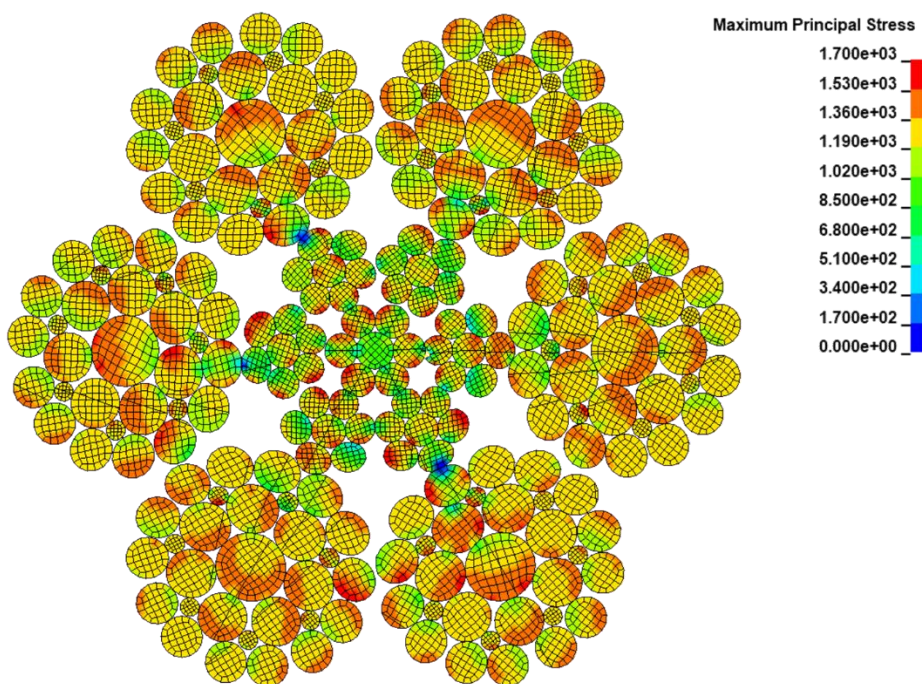
(2) 応力状態

二つのモデルにおける応力状態の違いを考察する．図 4-7 に， $t = 0.07$ （引張力 112 kN）の $z = 0$ 断面でのそれぞれのモデルの最大主応力コンター図を示す．これより，鋼心との接触状態により各ストランドの応力分布は異なることが分かる．同位相ロープモデルは，ストランドは中心に対し点対称な配置であるが，鋼心が異位相となっているため接触がランダムとなっており応力分布も点対称ではない．ストランド同士はほぼ接触しておらず，鋼心同様，各ストランドの応力状態は他のストランドに依存しないと言える．よって，各ストランドの引張力に対する応答は独立しており，軸方向全体でみればどれも等しいことから，両モデルの引張力に対する挙動は一致すると考えられる．

図 4-8 に，異位相ロープモデルの $t = 0.07$ （引張力 112 kN）の $z = 0$ 近傍における最大主応力ベクトル図を示す．各素線軸方向に引張応力が働いていることが分かる．同位相ロープモデルにおいても同様であった．



(a) 同位相ロープモデル



(b) ランダムロープ鋼心モデル

図 4-7 ロープ軸方向引張解析最大主応力コンター図 [MPa]

($t = 0.07$, 引張力 112 kN, $z = 0$)

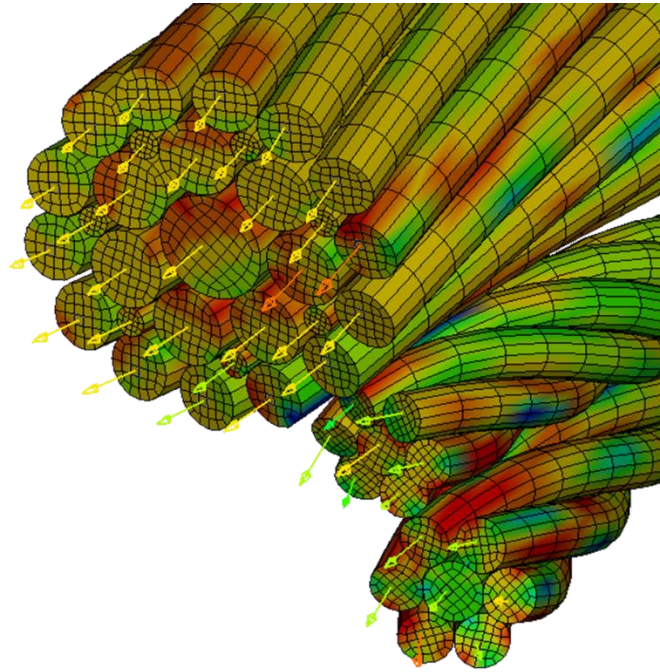


図 4-8 異位相鋼心モデル最大主応力ベクトル図
($t = 0.07$, 引張力 112 kN, $z = 0$ 近傍)

4.5 径方向圧縮試験

4.5.1 試験条件

ロープに引張力を加えた状態で上下の治具で挟み込み、上側の治具に圧縮力を加えて径方向変位を計測することで、圧縮力と変位の関係を求めた。試験装置は表 2-8 と同様のものを使用し、図 2-15 の構成で行った。治具のみ、ロープ径に合わせて $\Phi 15\text{ mm}$ の溝付きのものを用いた。治具の構造を図 4-9 に示す。

荷重条件を述べる。圧縮力は最小値 0.5～最大値 9.5 kN の sin 波とし、1 周期 100 s で 20 サイクル行った。引張力は 1 kN である。圧縮力を加える範囲が被らないよう、300 mm の間隔をあけて 3 回試験を行った。

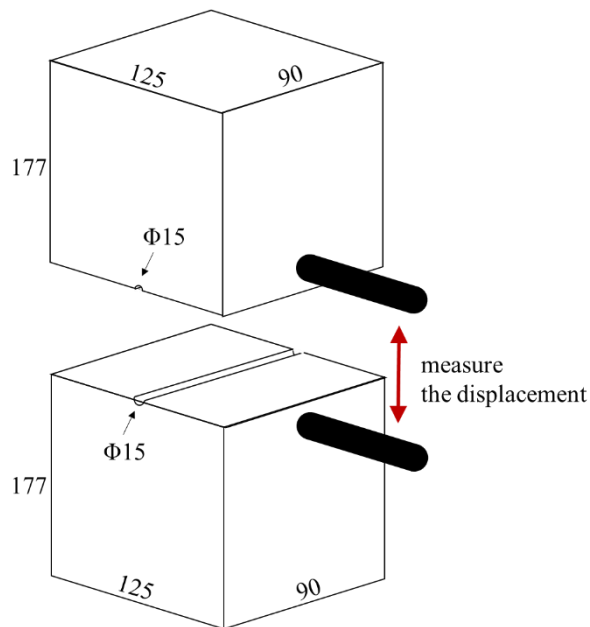


図 4-9 ロープ径方向圧縮試験治具

4.5.2 試験結果

全3回分の各20サイクルのロープの圧縮力・変位曲線を図4-10に示す。変位は、初めに0.5kN負荷したときを基準としている。これより、1サイクル目の変位が試験ごとに異なっているが、その差は小さい。その後サイクルを経るごとにグラフは右へシフトしており、ストランド、鋼心同様隙間が徐々に埋まっていっていると考えられる。ただ、シフトする量はストランド、鋼心と比べて小さくなっている。また、ストランド、鋼心と比べヒステリシスのループが大きくなっている。

各試験の20サイクル目の圧縮力・変位曲線を図4-11に示す。1回目と3回目の最大サイクルは、7%の差があった。ロープ軸と治具溝中心軸が試験ごとにわずかに異なる角度で傾いてあっていることが原因として考えられる。

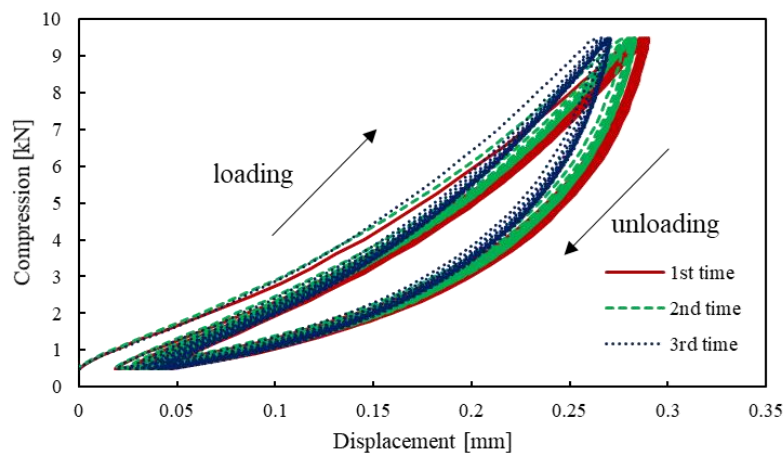


図 4-10 ロープ圧縮力・変位曲線（全サイクル）

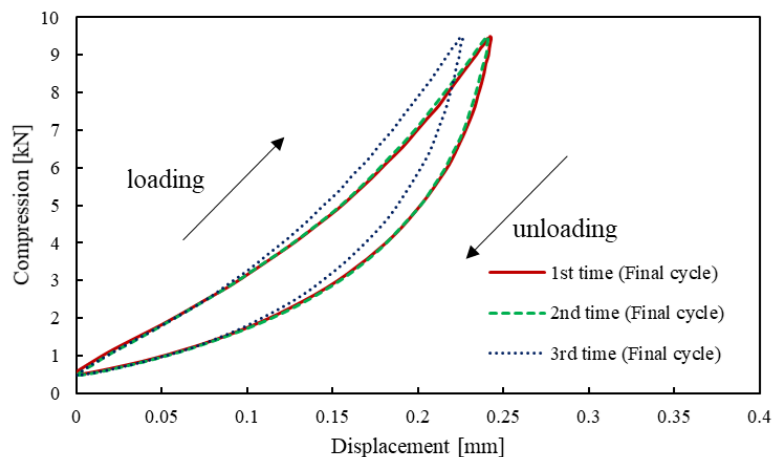


図 4-11 ロープ圧縮力・変位曲線（最終サイクル）

4.6 径方向圧縮解析

4.6.1 解析条件

4.5 の試験と同様の条件で解析を行い，結果を比較することでモデルの径方向の力学的特性の妥当性を検討する．同位相ロープモデル解析全体図は図 4-12 に示した通りで，ロープモデルの長さは 110 mm である．ロープ軸方向を z 軸と一致させ，治具の上面に垂直となる方向を y 軸とした．座標軸の原点は，ロープ軸方向中心部におけるロープ断面の中心点である．異位相ロープモデルについても全て同様である．治具の材料特性は表 2-9 と同様である．解析規模を表 4-7 に，解析条件を表 4-8 に示す．

境界条件を述べる．ロープ両端部をそれぞれロープ端面の中心節点に剛体接続し，z 軸方向の回転を拘束した状態で両端に引張力 1 kN を加えつつ，上側の治具中心点に y 軸方向下向きに圧縮力を負荷した．上側の治具上面は剛体拘束し，y 方向以外の変位と回転を拘束している．下側の治具底面は，全方向の変位を拘束した．引張力と圧縮力の荷重曲線は図 4-13 の通りである．0.025 ～ 0.115 s は最大値 9.5 kN，最小値 0.5 kN，周期 0.06 s の sin 波である．

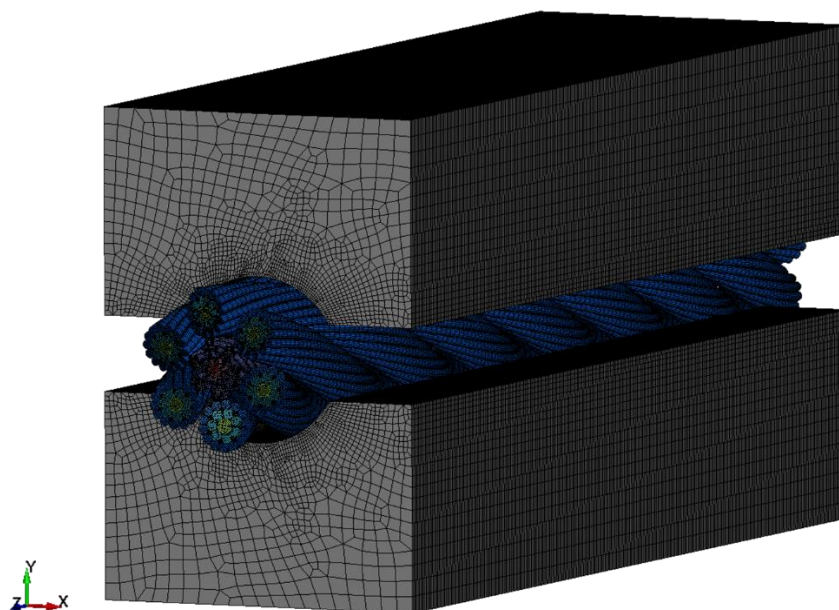


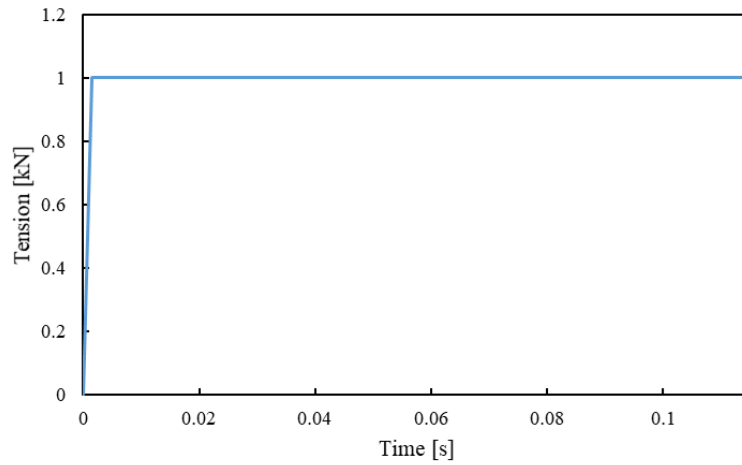
図 4-12 ロープ径方向圧縮解析全体図

表 4-7 ロープ径方向圧縮解析規模

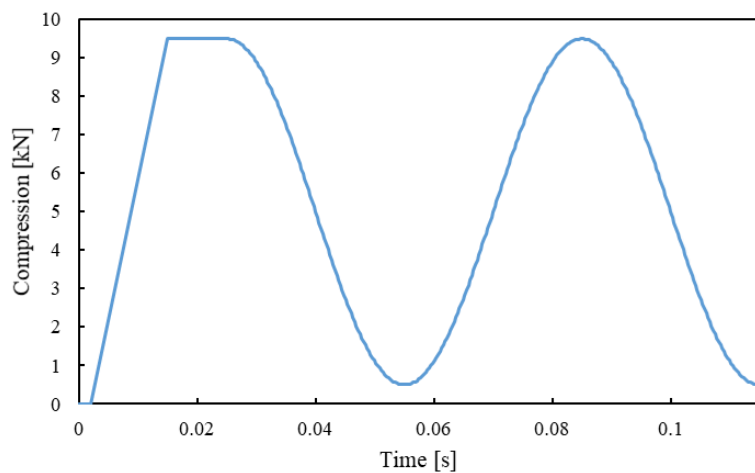
Identical phase rope model	Nodes	2852877
	Elements	2396768
Different phase rope model	Nodes	2835117
	Elements	2379104

表 4-8 ロープ径方向圧縮解析条件

Analysis software	LS-DYNA R9.0.1 (Quasistatic explicit method)	
Element	Solid element	
Contact algorithm	Penalty method	
Analysis time [s]	0.115	
Time step [s]	Identical phase rope model	3.9×10^{-8}
	Different phase rope model	3.9×10^{-8}
Friction factor	0.1	



(a) 引張力



(b) 圧縮力

図 4-13 ロープ径方向圧縮解析荷重曲線

4.6.2 解析結果

二つのロープモデルの圧縮状態について、径方向剛性及び素線応力状態の可視化、接触状態の考察を行う。各解析にかかった時間は表 4-9 の通りである。

表 4-9 ロープ径方向圧縮解析時間

Identical phase rope model	CPU cores	32
	Running times [h]	78
Different phase rope model	CPU cores	32
	Running times [h]	129

(1) 圧縮力・変位曲線

解析から得られた圧縮力と径方向変位の関係と、試験との比較を図 4-14 に示す。変位は、試験同様上側の治具上面の変位を出力しており、サイクルにおいて最初に 0.5 kN 負荷したときを基準としている。試験結果は、最終サイクルの変位を表示している。グラフより、二つの解析モデルは共にヒステリシスを再現していることが分かる。また、ストランド、鋼心同様、負荷時において試験に比べ高圧縮力域の傾きが小さくなっており、同位相ロープモデルはその傾向が顕著である。サイクル内の最大変位は、異位相ロープモデルは試験ばらつきの中に収まっているのに対し、同位相ロープモデルは試験 1 回目と比べて 2% 大きく、鋼心と比較すると二つのモデルの径方向剛性の差は小さかった。鋼心が異位相となっていることから、同位相ロープモデルにおいてもストランドの対称性に関わらず鋼心との接触が各ストランドで異なるためだと考えられる。また、鋼心と同じ圧縮力域であることからロープの方が面圧が低くなり、差が出にくかったと予想される。よって、位相により剛性の差が生まれることが確認できたが、両モデルとも径方向剛性を概ね再現している結果となった。

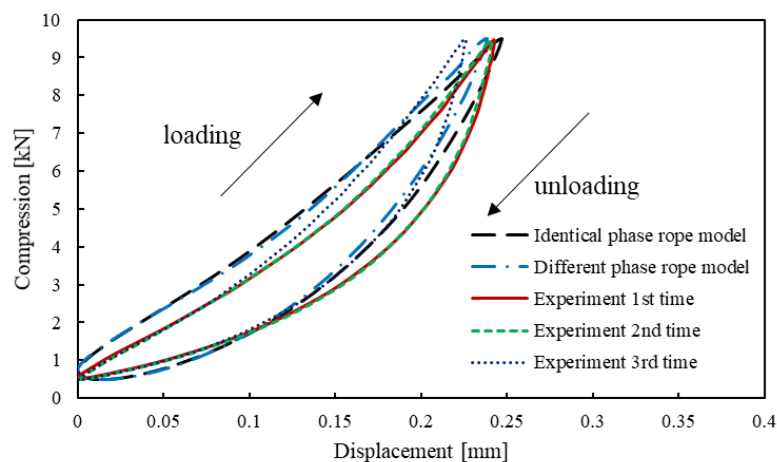


図 4-14 解析，試験におけるロープ圧縮力・変位曲線の比較

(2) 応力状態

図 4-15 に、 $t = 0.085$ （圧縮力 9.5 kN）における同位相ロープモデルの $z = -20$ 断面，異位相ロープモデルの $z = 10$ 断面のミーゼス応力コンター図を示す．治具に接触しているストランドと I_{out} が接触する場合に， $S_{out} - \delta 1$ ， $S_{out} - \delta 3$ ， $I_{out} - \delta 11$ で応力が高くなっている．同位相ロープモデルでは，ストランドの対称性から治具間で素線が一直線状に並びやすく，より多くの素線で高い応力が発生している．

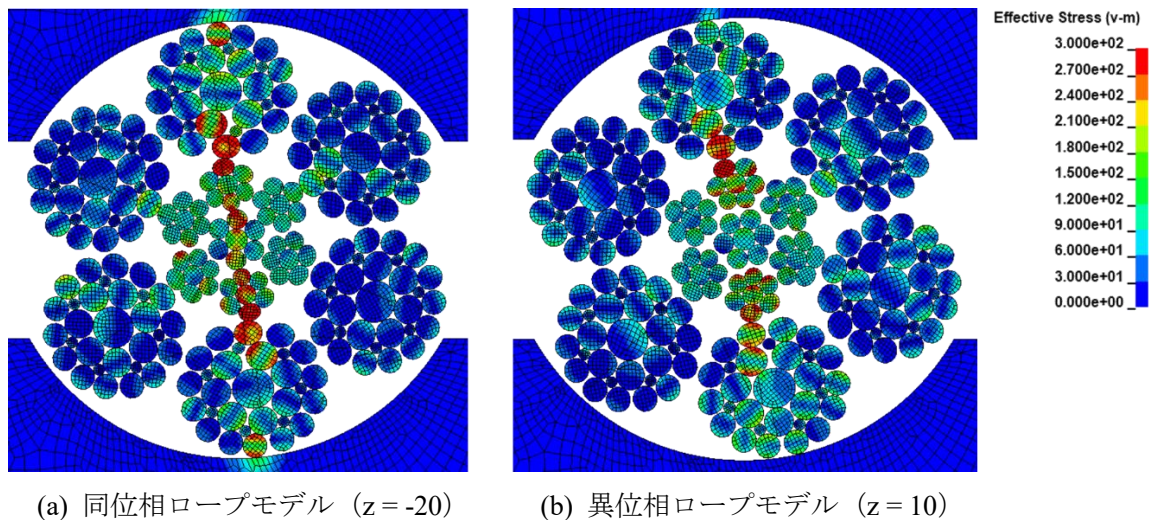


図 4-15 ロープ径方向圧縮解析ミーゼス応力コンター図 [MPa]
($t = 0.085$)

4.7 結言

両モデルとも，軸方向，径方向剛性共に概ね再現することが分かった．ただし，同位相ロープモデルは異位相ロープモデルに比べ高圧縮力域の径方向剛性が低かった．ロープ内部で素線のずれが大きくなる高圧縮力域におけるモデルの挙動の再現性が重要視されることから，より実際の接触状態を再現していると考えられる異位相ロープモデルを採用する．

第5章 引張曲げ解析

5.1 諸言

本章では，引張曲げ解析の解析条件と解析結果及びその妥当性確認のため行った引張曲げ試験における素線ひずみ計測，引張曲げ疲労試験について述べる．この解析では，第4章で作成した異位相ロープモデルをシーブに沿って曲げた状態で引張力を加えることで引張曲げ状態を再現し，ロープ内部応力状態の可視化と疲労評価を行う．

5.2 素線ひずみ計測

引張曲げ解析の妥当性を確認する材料とするため，ロープの引張曲げ状態における素線ひずみ計測を行った．試験条件と試験結果について述べる．

5.2.1 試験条件

試験装置全体の模式図を図 5-1 に示す．ロープは，駆動ユニットで両端を固定し，テストシーブ 1 個とテンションシーブ 2 個を用いて環状にかけられている．テストシーブは $\phi 224$ mm で，ロープの曲げの厳しさを表す D/d （シーブ径/ロープ径）が運用上最も厳しい 16 となるようにした．油圧アクチュエータでテンションシーブを引くことによりロープに張力を負荷する．張力は，駆動ユニットのロードセルで任意の値に制御できる．ロープ張力負荷後，サーボモータで駆動ユニットを往復動させることで，ロープがテストシーブ上を往復動し引張曲げ負荷を受ける．

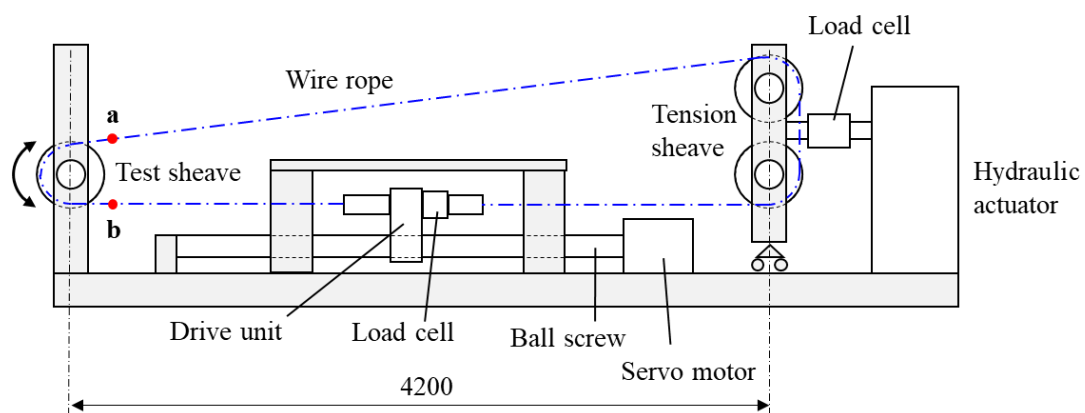


図 5-1 U 字曲げ試験機模式図

ロープ最外層素線 ($S_{out} - \delta_3 : \phi 0.81 \text{ mm}$) 上に、素線に平行かつ曲げの外側となるようにひずみゲージを3つ貼る。使用したひずみゲージの概要を表 5-1 に示す。曲げの外側とは、図 5-2 のように、シーブ上をロープが通過する際ゲージがシーブの反対側に位置することを示す。また、ひずみゲージは、1 ストランドおきに貼る。実際にひずみゲージを貼り付けたロープの様子を図 5-3 に示す。試験を2回行うため、1回目と2回目で曲げを行う部分が被らないよう、十分間隔を空けたロープの別の部分に同様にひずみゲージを3つ貼り付けた(図 5-3 (a)における A と B)。ひずみゲージは、ロープに 1 kN の張力をかけて貼り、その状態におけるひずみを 0 とした。

表 5-1 ひずみゲージ概要

Strain gage	KFGS-1N-120-C1-11 L3M2R (KYOWA)
Gage length [mm]	1
Gage width [mm]	0.65
Film length [mm]	4.2
Film width [mm]	1.4

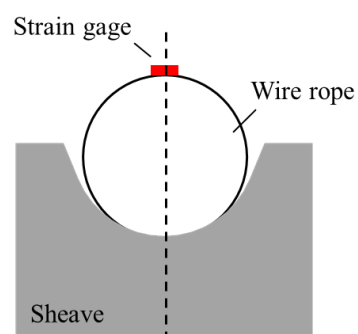
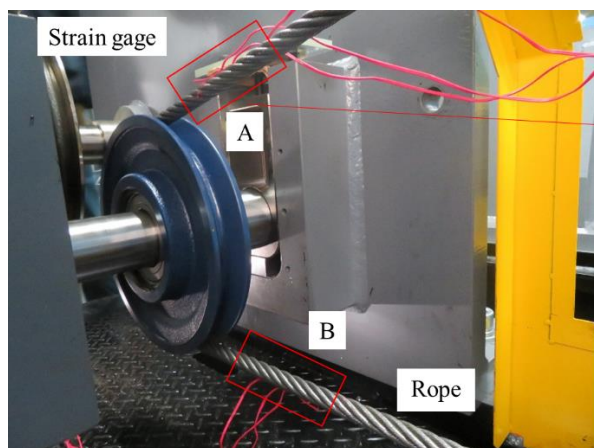


図 5-2 ロープ・シーブ断面模式図



(a) シーブにロープをかけた様子



(b) ひずみゲージ貼付部拡大図

図 5-3 引張曲げ試験の様子

ここで、ひずみゲージを貼り付けた全 6 か所について、それぞれが力学的に完全に等価ではないことを説明する．ひずみゲージを貼り付けたロープ断面の模式図を図 5-4 に示す．図に示したように、

- ① 断面ごとにストランド内素線配置が異なることから、ひずみゲージを貼り付けた素線がロープ中心線上にあるとは限らない
- ② ストランドと I_{out} のピッチが違うことから、断面ごとにストランドと鋼心の接触状態が異なる
- ③ 断面ごとにストランド内素線配置が異なることから、シーブとの接触状態が異なることから、ひずみゲージを貼り付けた各素線は力学的に等価ではない．よって、各ひずみゲージの値は同一ではないと予想される．また、図 5-4 のように、実際にひずみゲージを貼り付けた場所の断面状態を非破壊で把握することは難しいのが現状である．

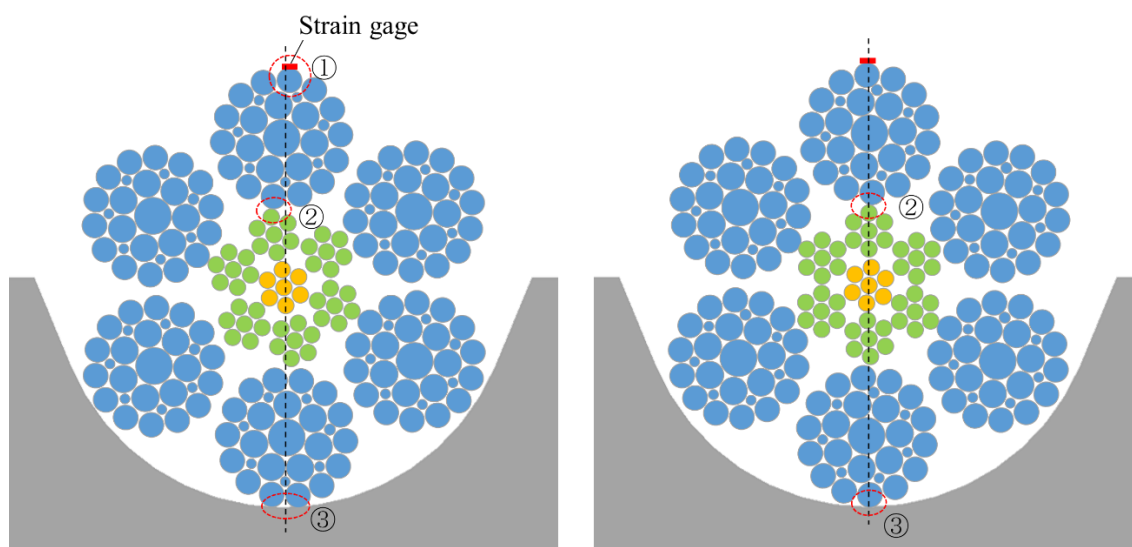


図 5-4 ひずみゲージ貼付部のロープ断面模式図

試験手順は次の通りである．

- ① 試験機に 1 kN でロープをかけた初期状態から、1→5→10→15→20→25→30→32 kN（試験ロープ破断力 160 kN の 20 %）と段階的に張力を上げていく．
 - ② ひずみゲージを貼った部分が、図 5-1 に示した a 点を始点として、テストシーブを通過し b 点に到達したら一度ロープを止める．次に逆向きにロープを動かして、再度 a 点まで戻して止める．この一連の動作を全 3 回繰り返す．（ロープ送り速度：25 mm/s）
 - ③ ①の逆の手順でロープの張力を下げ、終了する．
- ①～③の工程を 2 ヶ所についてそれぞれ行った．試験条件をまとめて表 5-2 に示す．

表 5-2 引張曲げ試験条件

Test sheave diameter [mm]	224
Test speed [mm/s]	25
Rope tension [kN]	32
Number of cycles	3

5.2.2 試験結果

(1) 1 回目

図 5-5 に、試験 1 回目における素線ひずみの時刻歴を表す。これより、段階的に張力が上がっていき、ゲージが a→b→a→b→a→b→a と通過し張力が下がっていくという各挙動に対して、ひずみが発生していることが分かる。シーブを通過する際には単純引張状態に比べて大きなひずみが出ており、引張曲げ状態に大きな応力が発生することが読み取れる。特に、曲げが始まる最初と最後には瞬間的に大きなひずみが発生することが分かった。この曲げ始めと終わりを除いた曲げ状態を定常引張曲げ状態と呼ぶこととすると、定常引張曲げ状態における 3 つのひずみゲージの値は、2000～3000 $\mu\epsilon$ の範囲であった。

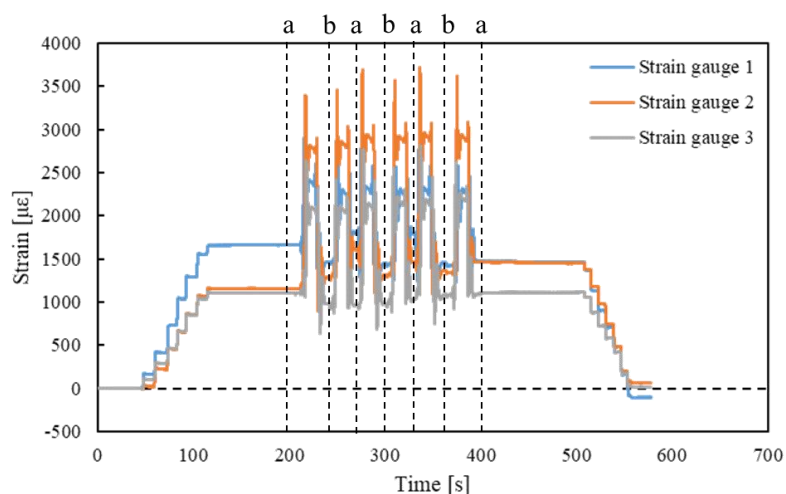


図 5-5 素線ひずみの時刻歴 (1 回目)

(2) 2 回目

図 5-6 に、試験 2 回目における素線ひずみの時刻歴を表す。この試験では、定常引張曲げ状態における 3 つのひずみゲージの値は、2500～3500 $\mu\epsilon$ の間となっている。

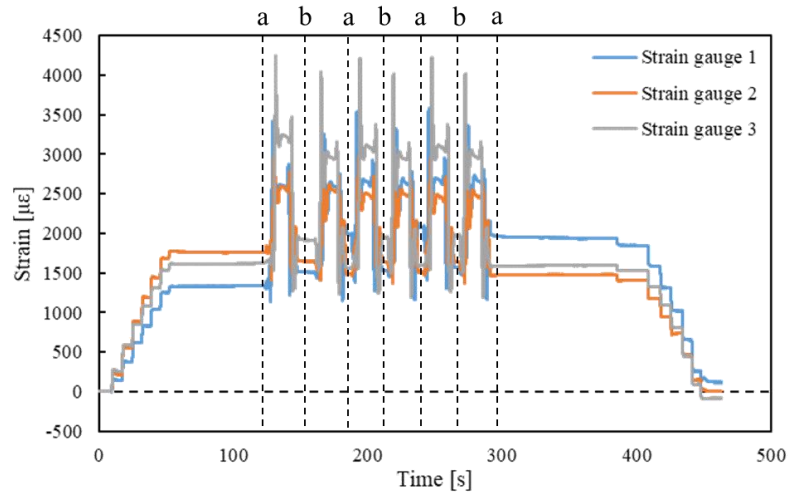


図 5-6 素線ひずみの時刻歴（2 回目）

(3) 考察

試験全 2 回分の定常引張曲げ状態におけるひずみゲージの値は 2000～3500 $\mu\epsilon$ の間であった。ここで、径 δ の素線を曲率半径 $D/2$ で曲げたときの素線のひずみの近似値は、

$$\frac{\delta}{D} = \frac{0.81}{224} = 3.6 \times 10^{-3} \quad (5-1)$$

と概算することができる。よってひずみの値は材料学的に妥当性のある値であると言える。

値の大きさに差がある要因の一つ目として、先述した通り、ひずみゲージを貼った全 6 か所は力学的に等価ではないことが挙げられる。二つ目に、ひずみゲージが素線中心軸からずれて貼られているといった、貼り付けの仕上りの影響が出ていると予想される。このように、各ひずみゲージで同じ値を出すのは困難であることが分かった。よって、解析との比較では、ひずみの値は幅を持つことを考慮して行う必要がある。

また、1 回目と 4 回目に a を通過する時の値が異なる、試験終了時に値が 0 に戻らないひずみゲージが存在するが、これらはロープ内部の素線接触状態が変化しているためだと考えられ、試験結果に差し支えない事象だと言える。

5.3 引張曲げ疲労試験

労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所で行われた，引張曲げ疲労試験とロープの分解調査について述べる．

5.3.1 試験条件

試験構成は図 5-1 と同様である．試験対象として，5.2 の素線ひずみ計測を終えたロープを用いた．テストシーブ径は 224 mm，ロープ張力は 32 kN（ロープ試験破断力の 20 %），ロープ送り速度は 32 m/min，ストロークは ± 800 mm としてロープを往復動させた．10000 サイクルで試験を終了した．テストシーブによる曲げ負荷を受けた領域の中央部約 2 ピッチ（176 mm）について，1 ピッチずつ二つのロープ試験片を切り出した（図 5-7 参照）．疲労試験条件をまとめて表 5-3 に示す．

表 5-3 引張曲げ疲労試験条件

Test sheave diameter [mm]	224
Rope tension [kN]	32
Test speed [m/min]	32
Rope stroke [mm]	± 800
Number of cycles	10000

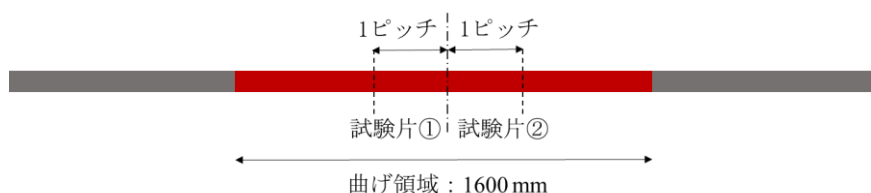


図 5-7 試験対象ロープにおける試験片切り出し方

5.3.2 試験結果

1 ピッチの長さで切り出した試験片の様子を図 5-8 に示す．二つのロープ試験片を分解し，断線箇所を調査した．素線断線は，鋼心素線である $I_{out} - \delta 10$ ， $I_{out} - \delta 11$ の 2 種類においてのみ確認された．各素線における断線の様子を図 5-9 に，各試験片での断線本数の分類を表 5-4 に示す． $I_{out} - \delta 11$ の断線箇所は，全てストランド (S_{out}) との接触箇所であった．

一般的な疲労試験では、 $I_{out} - \delta 10$ 、 $I_{out} - \delta 11$ の他に $S_{out} - \delta 3$ 、 $S_{out} - \delta 1$ 、 $I_{in} - \delta 00$ においても断線が多く確認されるが、本試験ではサイクル数が少なかったため確認されなかった。これより、ストランド素線より I_{out} 素線が先に断線することが明らかになった。

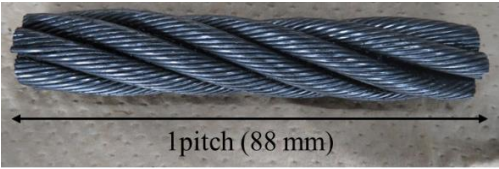
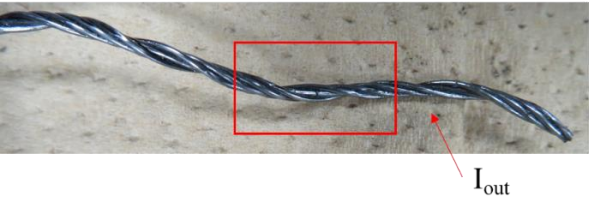
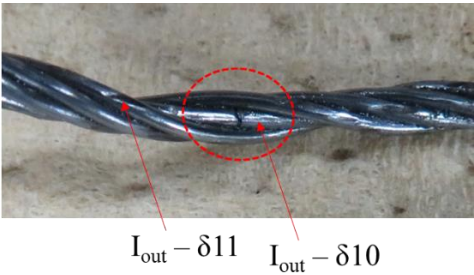


図 5-8 ロープ試験片



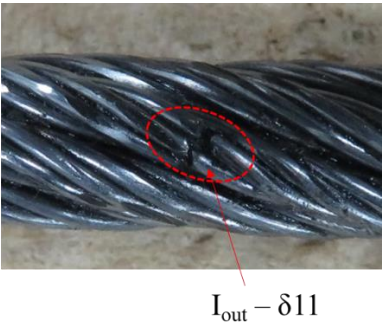
(a) $I_{out} - \delta 10$ 断線箇所



(b) $I_{out} - \delta 10$ 断線部拡大



(c) $I_{out} - \delta 11$ 断線箇所



(d) $I_{out} - \delta 11$ 断線部拡大

図 5-9 ロープ試験片断線の様子

表 5-4 素線断線本数の分類

	I_{out}	
	$\delta 10$	$\delta 11$
試験片①	2	3
試験片②	3	2

5.4 引張曲げ解析

5.4.1 解析モデル

本解析では、引張曲げ状態を再現するにあたってロープモデルに長さが必要となるため、一部簡略化したロープモデルを用いて計算負荷の減少を図る。ロープモデルの簡略化には、ロープの軸方向剛性を適用したビーム要素を使用する。第 4 章で作成した全素線をソリッド要素を用いて再現した詳細モデルの両端に、ビーム要素で作成した簡略化モデルを直列に繋ぐことで作成する。詳細モデルの長さは 176 mm（ロープ 2 ピッチ分）、簡略化モデルの長さはそれぞれ 264 mm（ロープ 3 ピッチ分）である。ロープモデルの全体図を図 5-10 に示す。簡略化モデルの材料特性は、4.3 のロープ軸方向引張試験で得た引張力・伸び曲線を真応力・真ひずみ曲線に変換し、これを三直線近似する（図 5-11 参照）ことで値を算出した。直径はロープと同一とする。また、シーブは一般的な炭素鋼であると想定し弾塑性体として材料特性を定義した。ロープ詳細モデル、ロープ簡略化モデル、シーブの材料特性をまとめて表 5-5 に示す。

初期状態のロープ軸方向を z 軸，シーブ側面に垂直となる方向を x 軸とした。座標軸の原点はシーブ中心点である。解析モデルの全体図を図 5-12 に，解析規模を表 5-6 に示す。

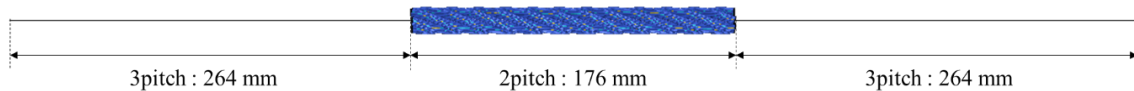


図 5-10 ロープモデル全体図

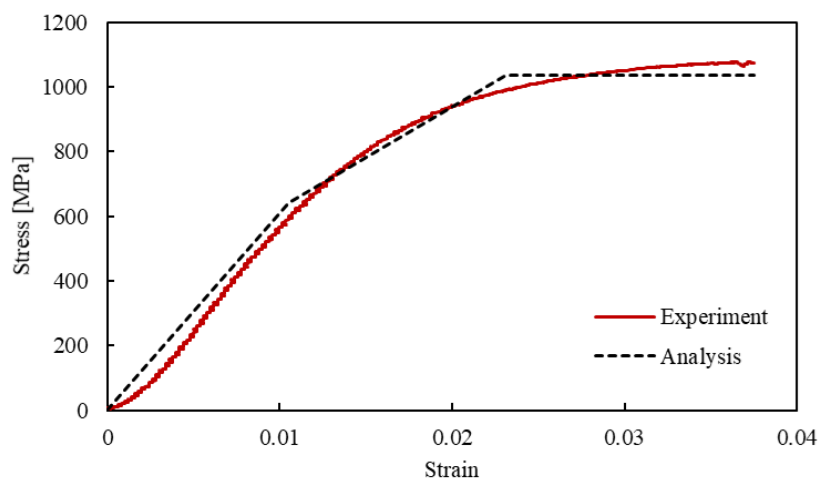


図 5-11 ロープ簡略化モデル応力・ひずみ曲線

表 5-5 引張曲げ解析モデル材料特性

Detailed rope	Solid element	Density [ton/mm ³]	8.0×10^{-7}
		Young's modulus [GPa]	205
		Poisson's ratio	0.3
Simplified rope	Beam element	Density [ton/mm ³]	8.0×10^{-7}
		Young's modulus [GPa]	60.7
		Plastic factor [GPa]	31.5
		Poisson's ratio	0.3
		Yield stress [MPa]	641
Sheave	Solid element	Young's modulus [GPa]	200
		Plastic factor [MPa]	200
		Poisson's ratio	0.3
		Density [ton/mm ³]	8.0×10^{-7}
		Yield stress [MPa]	1500

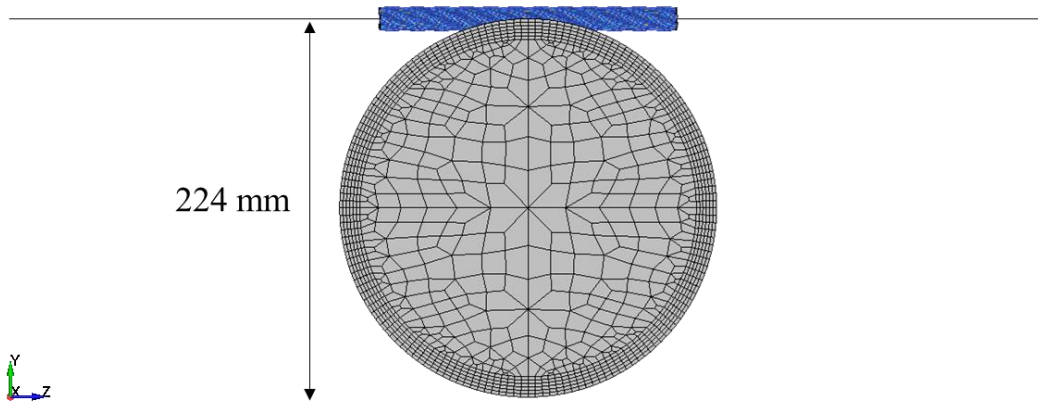


図 5-12 引張曲げ解析全体図

表 5-6 引張曲げ解析規模

Nodes	2853082
Elements	2230344

5.5 解析条件

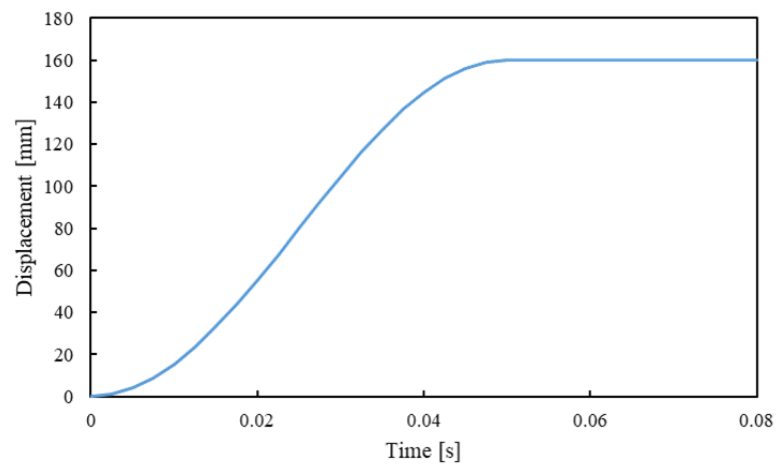
主な解析条件を表 5-7 に示す。摩擦係数は、詳細モデル部素線間は 0.1、ロープ・シーブ間は 0.3 と設定した。詳細モデル部素線間については、グリースを介した金属同士の一般的な摩擦状態を想定した。ロープ・シーブ間は、引張曲げ試験においてロープはシーブに対してほぼすべらず往復動することから、摩擦係数が高いと推察した。

境界条件を述べる。シーブを y 軸方向に上昇させて、ロープを上を持ち上げることで曲げた状態をつくるため、0 ~ 0.05 s の間シーブの全節点に y 方向強制変位を与える。変位曲線は図 5-13 (a) の通りである。急激な加速度の変化がロープモデルに生じるとロープがシーブから飛び跳ねる現象が起きることから、これを防ぐため 0 ~ 0.05 s は振幅 80 mm、周期 0.1 s の sin カーブとした。ロープ詳細モデル両端部 3 mm は、全節点を各端面中心節点に剛体拘束し、毎時間ステップごとに更新されるロープ端部におけるロープ軸方向を z 軸とする局所座標系を用いて局所 z 軸周りの回転を拘束した。また、詳細モデル、簡略化モデル間で引張力が伝達するよう、ロープ詳細モデル端面中心節点とロープ簡略化モデル端点を剛体接続した。シーブ中心部の要素（図 5-14 参照）は x 方向変位を拘束し、シーブが z 軸に対して傾くのを防いだ。

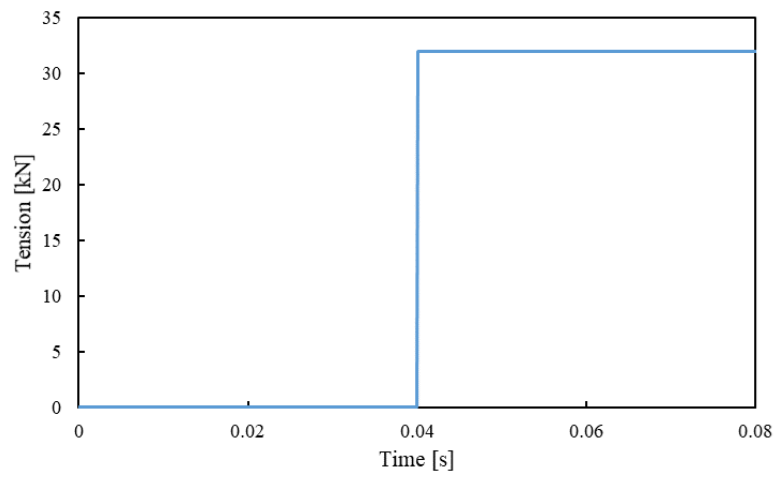
荷重条件を述べる。シーブとロープを一緒に上昇させる途中、0.04 s 以降に簡略化モデル両端点に引張力 32 kN（ロープ試験破断力の 20 %）を y 軸方向下向きに与えることで引張曲げ状態を再現した。荷重曲線は図 5-13 (b) の通りである。

表 5-7 引張曲げ解析条件

Analysis software	LS-DYNA R9.0.1 (Quasistatic explicit method)	
Element	Detailed rope Sheave	Solid element
	Simplified rope	Beam element
Contact algorithm	Penalty method	
Analysis time [s]	0.08	
Time step [s]	1.6×10^{-8}	
Friction factor	Detailed rope - Detailed rope	0.1
	Detailed rope - Sheave	0.3
	Simplified rope - Sheave	



(a) シープ変位



(b) 引張力

図 5-13 引張曲げ解析荷重曲線

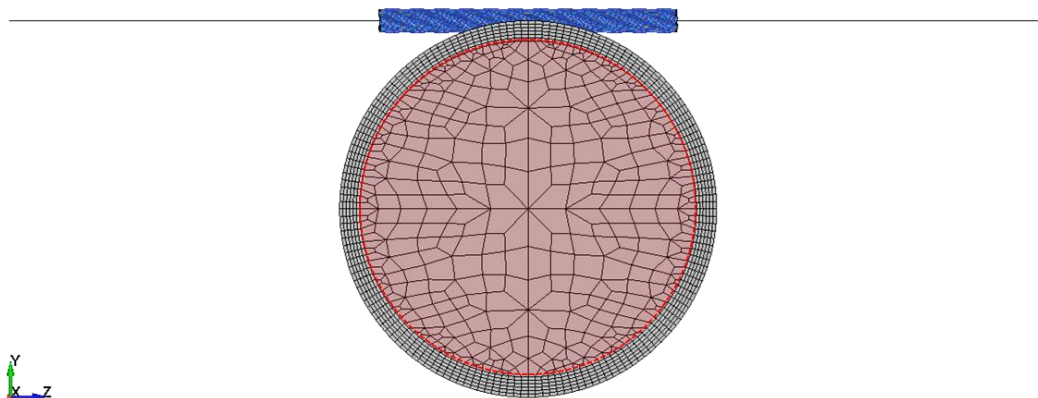


図 5-14 引張曲げ解析シープ x 方向変位拘束部

5.6 解析結果

引張曲げ状態について、モデルの挙動及び素線応力状態の可視化、疲労評価を行う。解析にかかった時間は表 5-8 の通りである。

表 5-8 引張曲げ解析時間

CPU cores	40
Running times [h]	214

5.6.1 ロープモデルの挙動

各時刻歴におけるモデルの挙動を図 5-15 に示す。

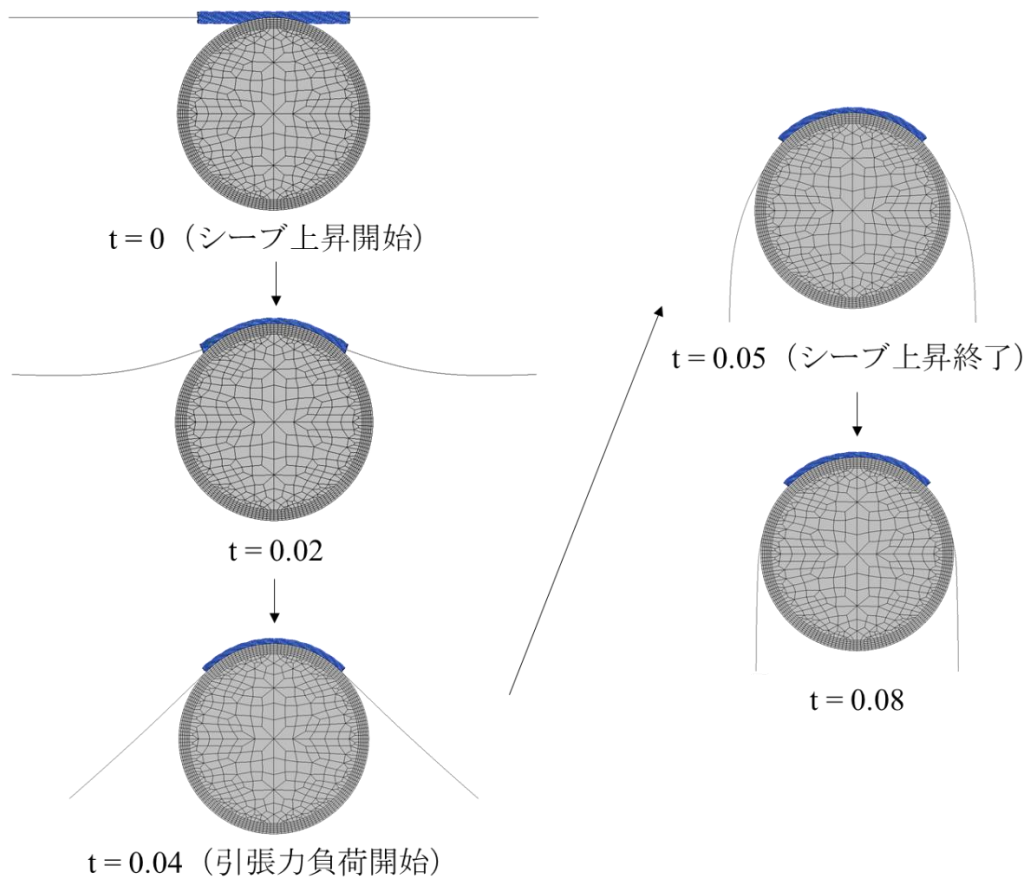


図 5-15 引張曲げ解析におけるモデルの挙動

図 5-16 に、ロープとシーブの接触部断面模式図を示す．本論文では、以下、ロープのシーブ側を曲げ内側、その反対側を曲げ外側、シーブ側面側を曲げ横側と呼ぶこととする．

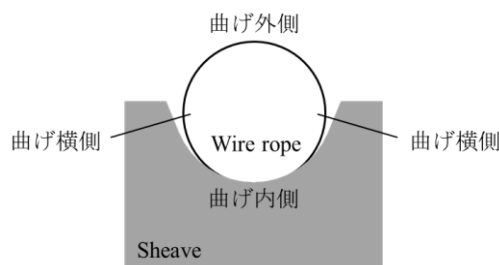
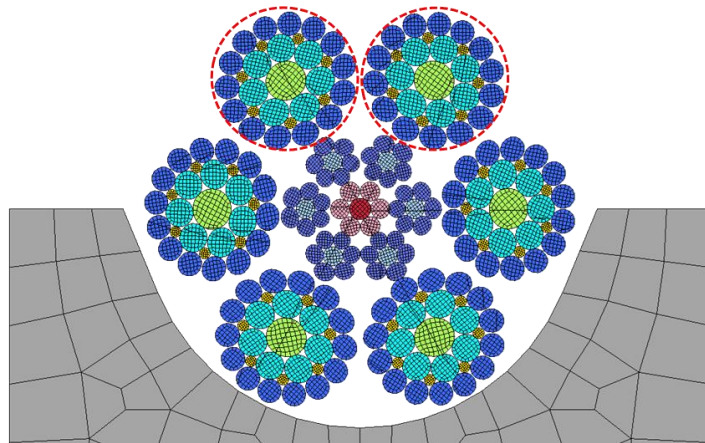


図 5-16 ロープ・シーブの接触部断面模式図

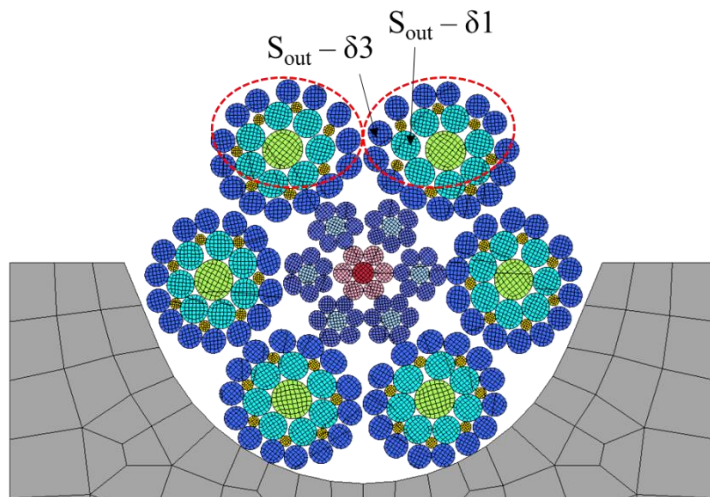
引張曲げ過程における素線の様子を考察する．図 5-17 は $t=0$, 0.03 , 0.08 における $z=0$ でのモデル断面である． $t=0$ では、曲げ外側のストランドにおいて素線同士互いに接触していて隙間が見られない．これに対し、引張力が無くただシーブに沿って曲げられた状態である 0.03 s において、曲げ外側のストランドでは $S_{out}-\delta 0$ から $S_{out}-\delta 1$, $S_{out}-\delta 2$, $S_{out}-\delta 3$ が離れて浮いた状態となっていることが分かる．その後 0.08 s では引張力が加わったことによりストランド内の素線は互いに接触しているが、初期状態の 0 s に比べ曲げ外側の $S_{out}-\delta 3$ では素線間に隙間ができている．図 5-18 に、ロープモデルを y 軸方向上から見た様子を示す．これより、 $S_{out}-\delta 3$ 間に大きな隙間が生まれたことで、その隙間から $S_{out}-\delta 1$ が見えていることが分かる．

ここで、実際の $\Phi 14$ mm ロープに 32 kN の張力が加わった状態と、張力 32 kN でシーブ ($\Phi 224$ mm) に沿って曲げられた状態を撮影した写真を図 5-19 に示す．これより、いずれの状態でも $S_{out}-\delta 3$ は隙間無く並んでおり、内部素線は見えていない．

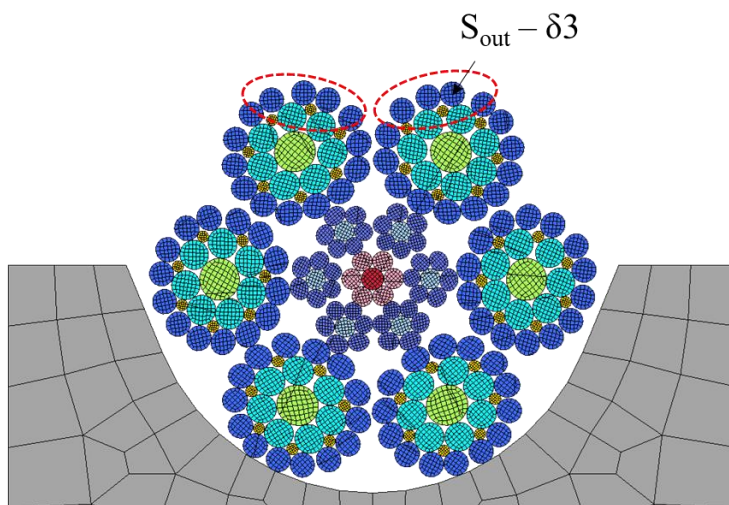
したがって、ロープモデルのストランド内部の素線が実際より型崩れしやすくなっている可能性が明らかになった．現実と比べ極めて短時間 (0.08 s) で解析を行っていることから、モデルの変形が非常に高速となり静的な引張曲げ状態を再現できていないことが原因として考えられる．この現象を緩和するためには、より低速でモデルを動かしロープの状態を安定させることが有効であると推察されるが、現実的な計算時間で行うのは難しいのが現状である．本論文では、この型崩れが結果に及ぼす影響を考察しながら評価することとする．



(a) $t = 0$: 曲げ外側 S_{out} 内部素線は詰まっており互いに接触状態である.

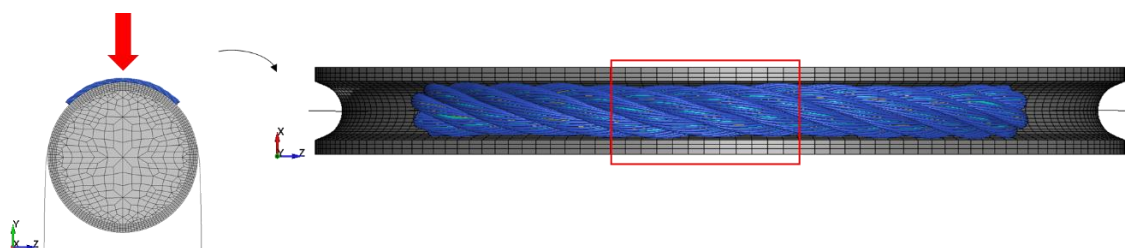


(b) $t = 0.03$ (曲げ状態) : 曲げ外側 S_{out} において $\delta 1$, $\delta 3$ が S_{out} 中心から浮いて離れている.

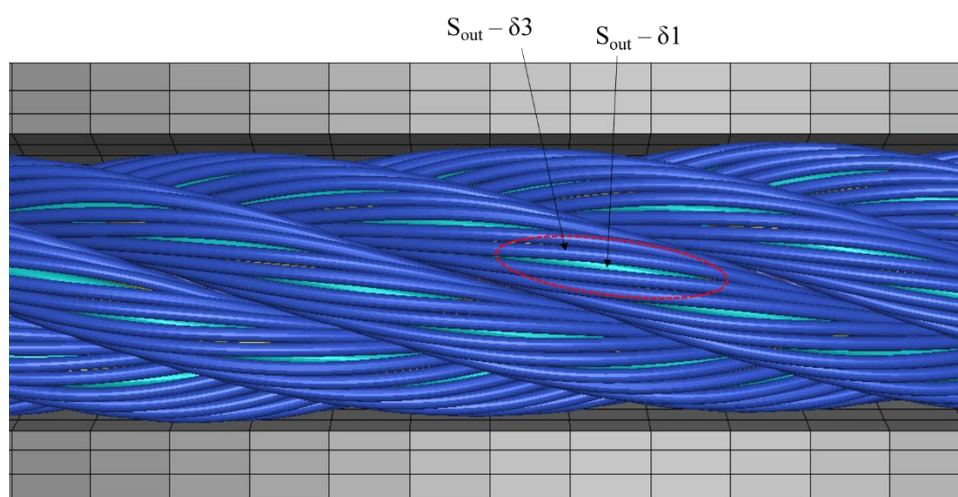


(c) $t = 0.08$ (引張曲げ状態) : 曲げ外側 S_{out} において $S_{out} - \delta 3$ 間に隙間ができている.

図 5-17 引張曲げ状態のモデル断面図 ($z = 0$ 断面)



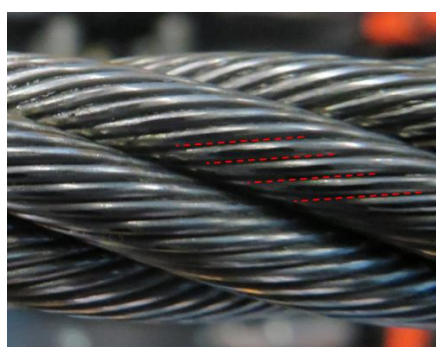
(a) y 軸方向上からのモデル概観



(b) (a)の赤線部拡大図： $S_{out} - \delta 3$ 間に大きく隙間が空き， $S_{out} - \delta 1$ が見えている．

図 5-18 引張曲げ状態のロープ全体図

($t=0.08$)



(a) 単純引張状態 (32 kN)



(b) 引張曲げ状態 (32 kN)

赤点線は，隣り合う $S_{out} - \delta 3$ の境界を示している．

(a)，(b)どちらも隙間なく $S_{out} - \delta 3$ が並んでいる．

図 5-19 単純引張状態，引張曲げ状態のロープ

次に、ロープ全体の挙動について述べる．ロープとシーブの接触状態を見るため、図 5-20 に $t = 0.08$ （最終状態）における y 軸方向下側から見た、シーブとの接触によりロープに発生した接触面圧のコンター図を示す．これより、 $-30 \leq z \leq 30$ ではロープ底面全体でシーブと接触しているのに対し、 $z \leq -30$, $30 \leq z$ ではロープとシーブの接触が曲げ横側に偏っていることが分かる．図 5-21 より、ロープ端付近における断面中心が $z = 65$ であるロープ軸に垂直な断面を見ると、ロープがシーブ溝に片当たりの状態となっている．

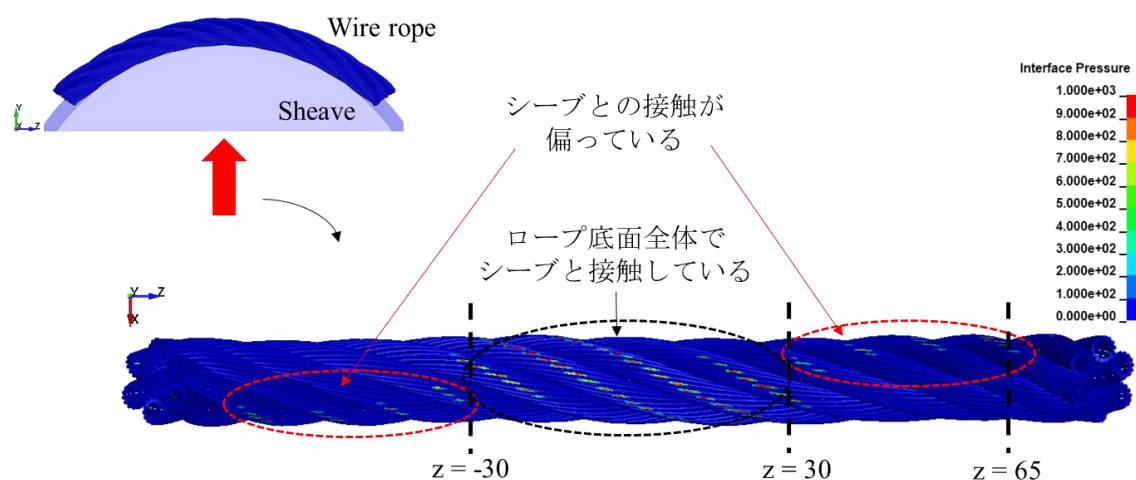


図 5-20 ロープ接触面圧コンター図 [MPa]
($t=0.08$)

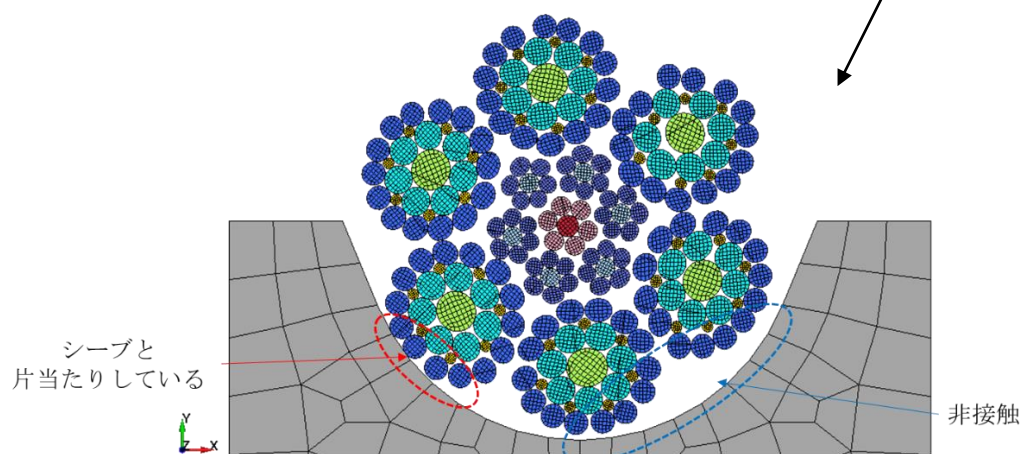


図 5-21 ロープ端付近のロープ断面図
($t=0.08$, 断面中心 : $z = 65$)

図 5-22 にロープ中心線 (I_{in} - 800 中心線) の $t = 0.08$ での z 座標と x 座標の関係を示す。これより、ロープ中心線が x 軸と平行ではないことが読み取れる。 x 座標の絶対値の最大値は $z = 67, -64$ において $|x| = 0.43$ で、ロープ径の 3.1% である。これは、ロープ両端節点についてロープ軸周りの回転を拘束したことに起因すると考えられる。ロープは引張力が加わるとストランドがほどける方向に自転する。すなわち、ロープ軸周りのトルクが発生するが、ロープ両端節点の動きが制限されているために、ロープ端部の x 軸方向変位が発生してしまった。よって、ロープ端部はシーブと片当たりになっていたと考えられる。

図 5-22 より $-30 \leq z \leq 30$ では中心軸の x 軸方向変位は端部に比べて小さく、 x 座標の絶対値の極大値は $z = 20, -19$ において $|x| = 0.21$ で、ロープ径の 1.5% である。またこの範囲では図 5-20 よりシーブとの接触状態も適切である。よって $-30 \leq z \leq 30$ における素線の挙動再現性は高いとして、以降はこの範囲について素線ひずみ及び応力状態、接触状態を論じる。

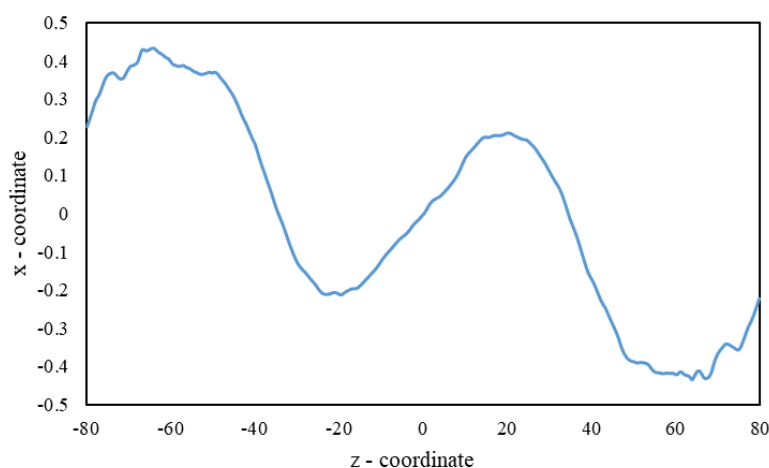


図 5-22 ロープ中心線の z 座標と x 座標の関係 ($t = 0.08$)

5.6.2 素線のひずみ

図 5-23 に示したシーブ頂点付近の 4 ストランド①～④について、曲げ外側の最外層素線の素線軸方向ひずみを出力した。各ストランドについて、ひずみが最大であった素線 (b) とその両隣の素線 (a, c) におけるひずみの値と、曲げ外側からの角度の関係を表 5-9 に示す。ただし、曲げ外側からの角度は、図 5-24 に示すように、ロープ中心点を通る x' 軸とシーブ溝中心を通る y' 軸の交点を原点としたときの、 y' 軸からの角度としている。また、各ストランドにおいて、素線 b のひずみが最大となるロープ断面を図 5-25 に示す。

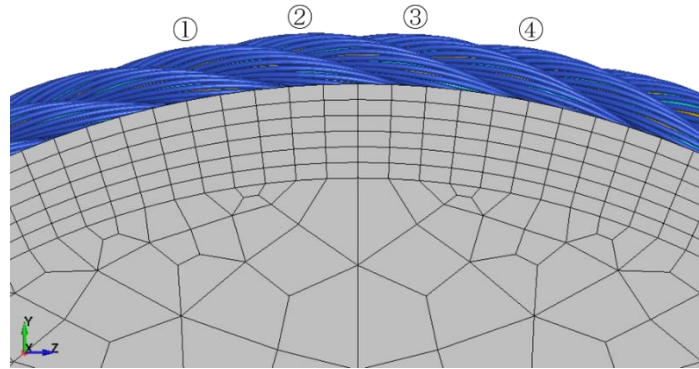


図 5-23 シープ頂点付近のストランド ($t=0.08$)

表 5-9 ストランド最外層素線の素線軸方向ひずみと曲げ外側からの角度

Strand	①			②			③			④		
Wire	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Strain [$\mu\epsilon$]	6700	6900	5800	6600	6700	2200	4100	6300	4400	4900	6500	4200
Angle from the y' axis [$^\circ$]	7.0	-4.7	-12	12	4.4	-5.7	1.6	-7.9	-16	7.1	-1.2	-8.0

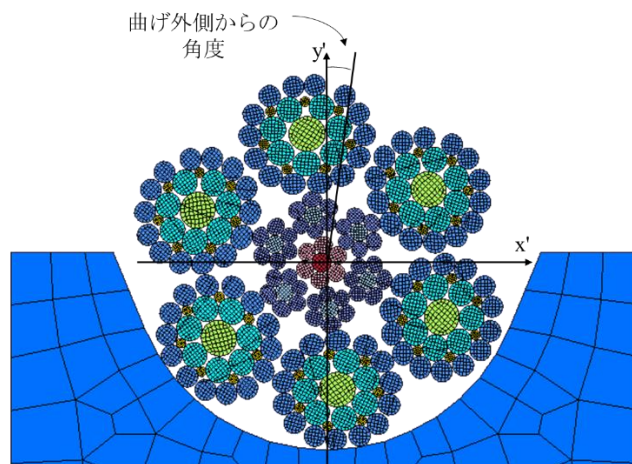


図 5-24 ロープ断面における x' y' 座標系

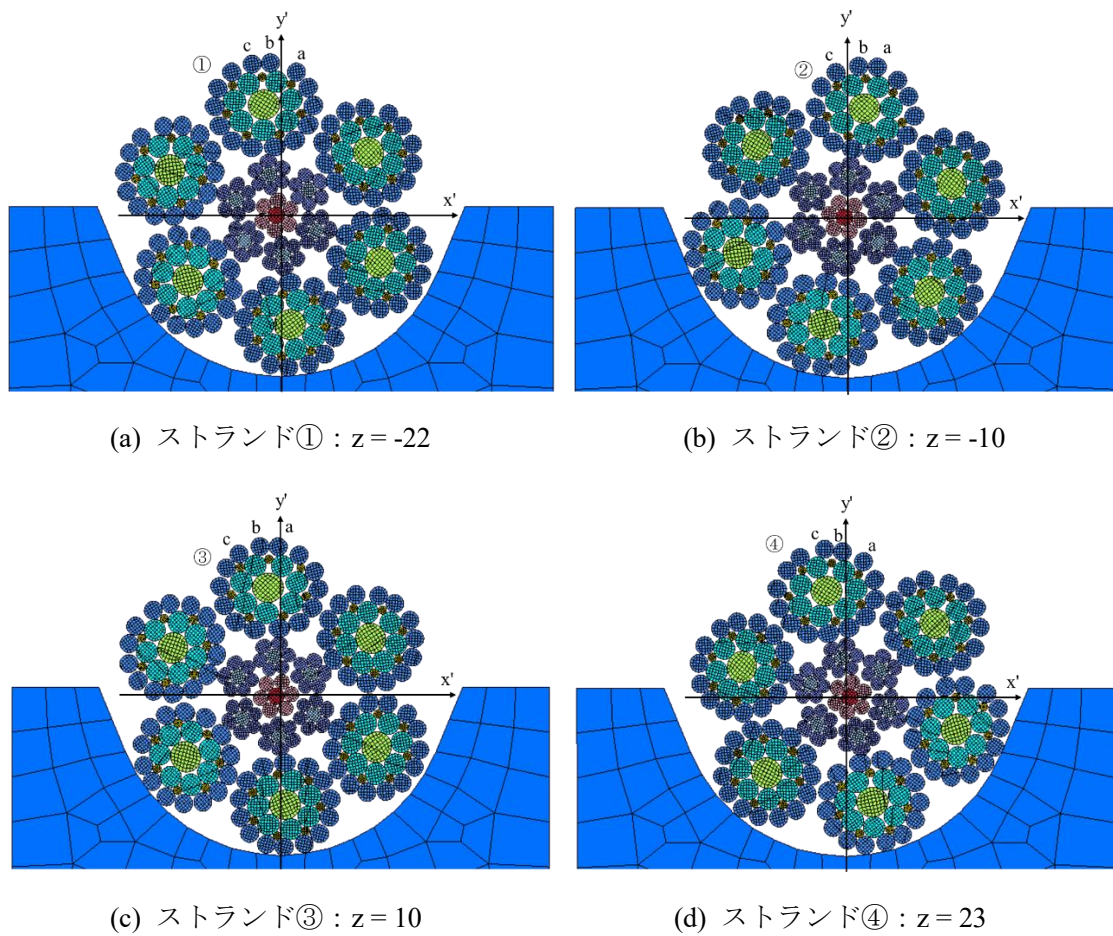


図 5-25 ストランド①～④で素線 **b** のひずみが最大となるロープ断面

ストランド①, ②, ④では曲げ外側に最も近い素線 (b) で最大ひずみが発生しているのに対し, ストランド③では最も曲げ外側に近い素線 (a) の隣の素線 (b) でひずみの最大値が発生している. これより, 素線のひずみは曲げ外側からの角度だけでなくロープ断面の接触状態からも影響を受けることが推察できる. また, ストランド②c, ③a, c, ④a, c では同じストランド内の素線 **b** に比べひずみの値が 25 ~ 67 %小さかった. よって, 試験での素線ひずみ計測において曲げの外側からずれた位置にひずみゲージを貼ると, ひずみの値が大きく減少する可能性がある.

次に各ストランドの素線 **b** について、素線軸方向を z' 軸としたとき（図 5-26 参照）のひずみの値と z' の関係を図 5-27 に示す。ただし、ひずみが最大であった場所を $z'=0$ とする。

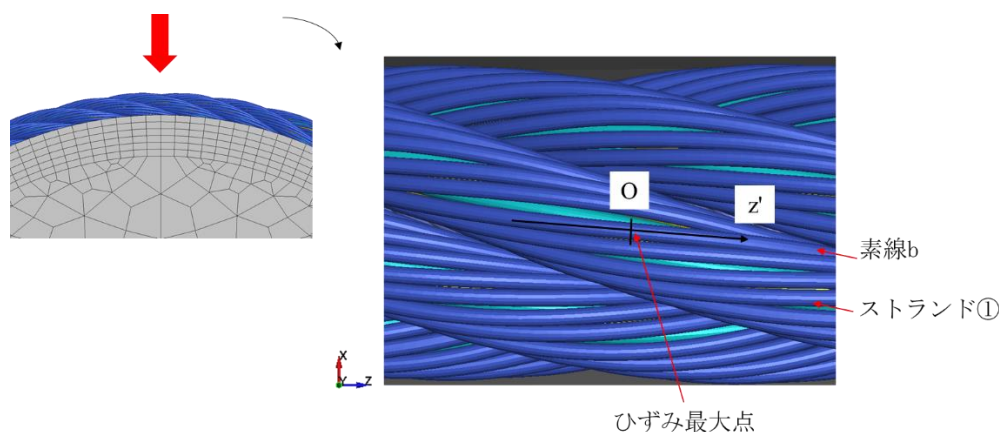


図 5-26 ストランド①における z' 座標系

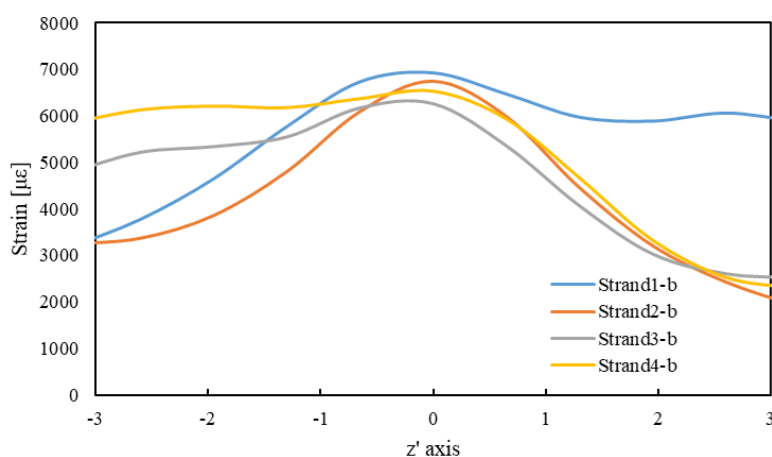


図 5-27 ストランド①～④の素線 **b** におけるひずみと z' 座標の関係

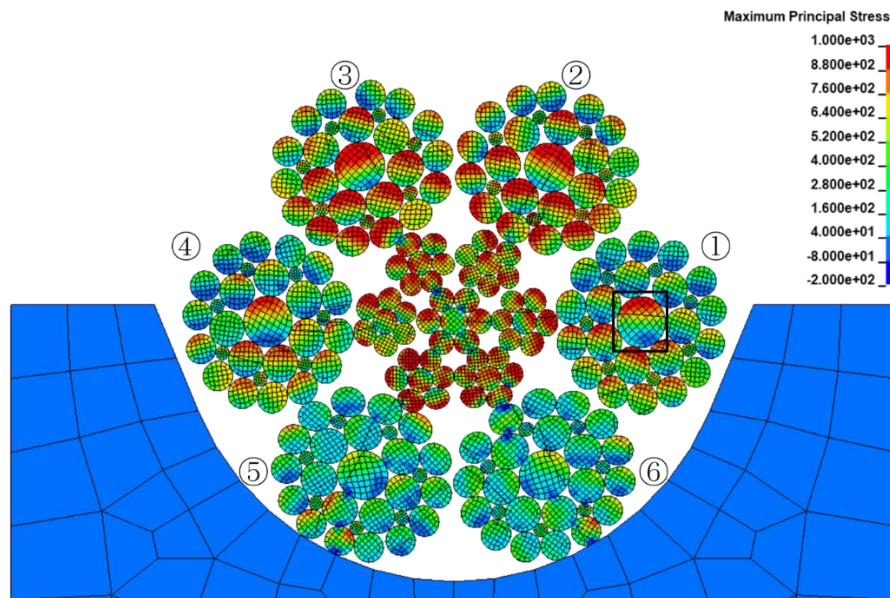
グラフより、ひずみの値は最大点から 3 mm 素線軸方向に離れた位置では 11 ~ 72 % 減少する。よって、ひずみゲージをひずみ最大点を狙って正確に貼るのは極めて困難であると言える。

以上より、解析の素線ひずみは試験値より高かったが、これは試験における素線ひずみ計測の難しさに起因すると考えられる。よって解析のひずみの値には妥当性があり、引張曲げ状態は再現性のある結果であると言える。

5.6.3 ロープ内部の応力状態

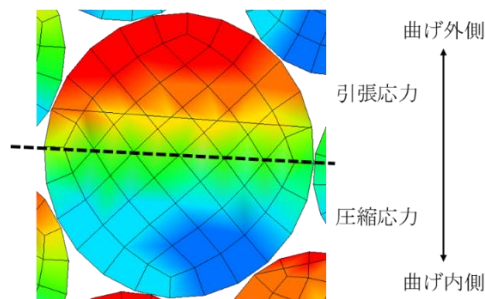
ロープ内部の応力状態を考察する．まず， $z = 0$ 断面における最大主応力コンター図を図 5-28 (a)に示す．図内に示したように，各ストランドに①～⑥の番号を振る．よって，②，③は曲げ外側，①，④は曲げ横側，⑤，⑥は曲げ内側に位置している．

図 5-28 (b)に，ストランド①の $S_{out} - \delta 0$ の拡大図を示す．このように，各素線において断面内の曲げ外側に引張応力，曲げ内側で圧縮応力が発生する傾向がある．これはロープがシーブに沿って曲げられることに起因する．また，図 5-28 (a)より，⑤，⑥（曲げ内側）→①，④（曲げ横側）→②，③（曲げ外側）と曲げ外側にいくほどストランド内部で多くの素線に高い引張応力が発生していることが分かる．これは，曲げ外側ほど曲率半径が大きいためである．



(a) $z = 0$ 断面

曲げ外側にいくほどストランド内部で多くの素線に高い引張応力が発生している．

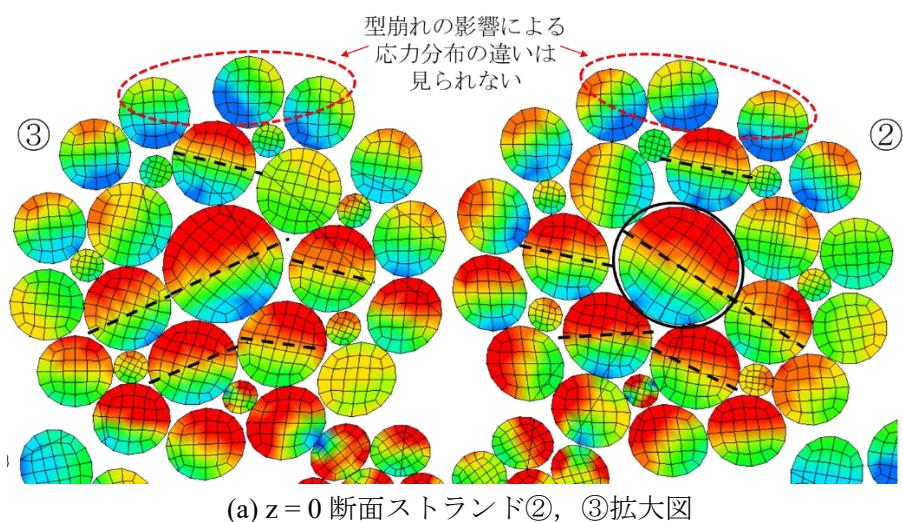


(b) ストランド① $S_{out} - \delta 0$ 拡大図

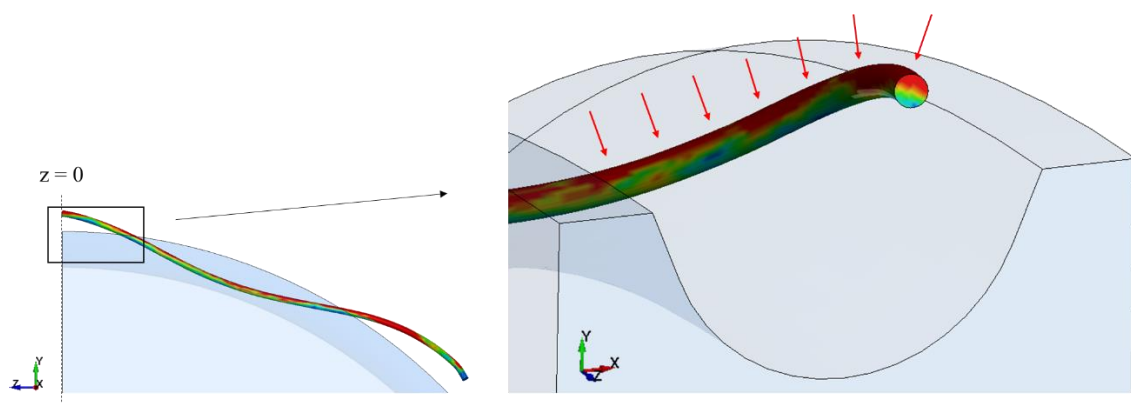
各素線において断面内の曲げ外側に引張応力，曲げ内側で圧縮応力が発生している．

図 5-28 引張曲げ解析最大主応力コンター図 [MPa]

次にストランド②, ③に注目すると, その応力分布はロープ断面中心に対して傾く傾向にあることが分かる (図 5-29 (a)参照). ストランド②, ③曲げ外側 $S_{out} - \delta 3$ の応力分布も同様に, 型崩れの影響は見られなかった. ここで, ストランド②の $S_{out} - \delta 0$ を取り出してその形状を確認すると, 図 5-29 (b)より, 素線螺旋形状に沿って, 螺旋外側に引張応力が分布していることが分かる.



ストランド②, ③内部の応力分布は, ロープ中心に対して傾いている.

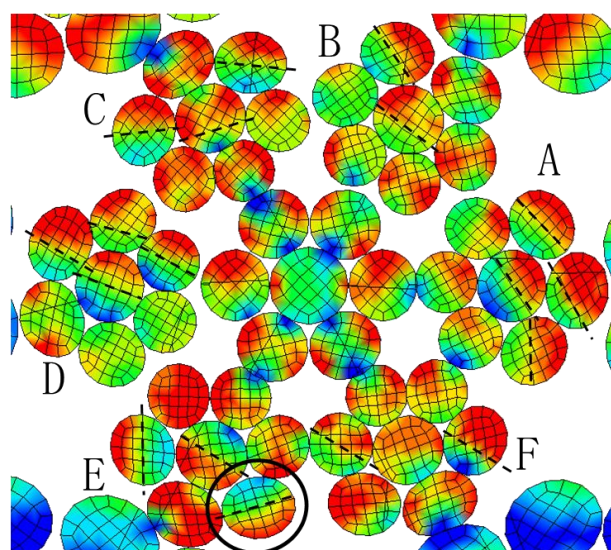


引張応力は, 素線螺旋形状に沿って, 螺旋外側に引張応力が発生している.

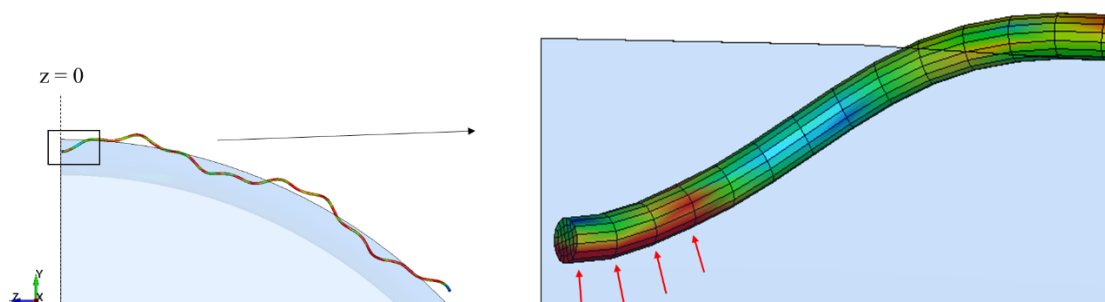
図 5-29 ストランド②, ③最大主応力コンター図 [MPa]
($t=0.08$)

鋼心ストランドに注目する．図 5-30 (a)に示すように，各 I_{out} に A ~ F と記号を振る．それぞれの I_{out} ごとに，応力分布は一定の傾きを持つ傾向があることが分かる．中でも I_{out} の E は，曲げ内側に引張応力，曲げ外側に圧縮応力が分布しており，断面全体と逆の傾向を示している．ここで，E 中の 1 本の I_{out} - $\delta 11$ (図 5-30 (a)において黒丸枠で囲んでいる) を取り出してその素線形状を図 5-30 (b)に示す．二重螺旋構造であるゆえに， $z=0$ 付近では局所的に曲げ内側に凸の螺旋形状 (ロープ曲げ形状とは逆向きの曲げ形状) となっており，螺旋外側に引張応力が発生している．

つまり， S_{out} ， I_{out} において素線螺旋形状の螺旋外側に引張応力が発生する傾向があることが明らかになった．したがって，素線応力状態は素線螺旋形状に影響を受けると言える．



(a) $z=0$ 断面鋼心拡大図



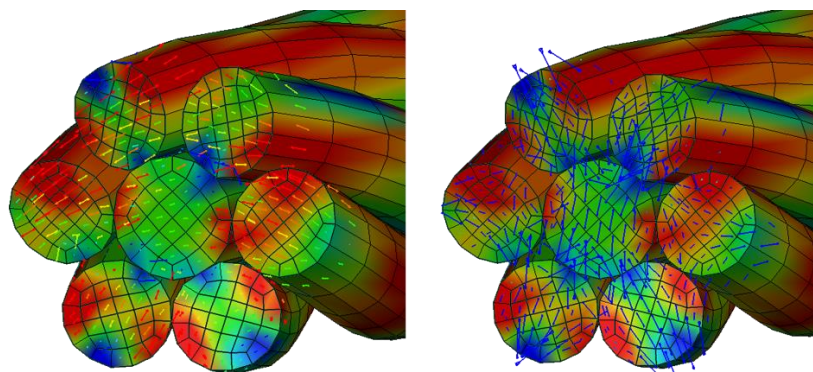
(b) 鋼心 E の中の I_{out} - $\delta 11$ の素線形状

$z=0$ 付近では曲げ内側に凸の螺旋形状で，螺旋外側に引張応力が発生している．

図 5-30 鋼心最大主応力コンター図 [MPa]

($t=0.08$)

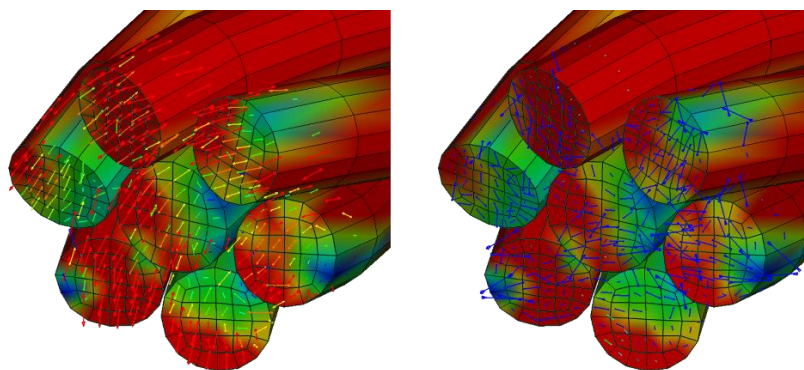
図 5-31, 図 5-32 で, $z=0$ 近傍における, I_{in} , I_{out} , ストランドそれぞれの最大主応力, 最小主応力ベクトル図を示す. 最大主応力ベクトルより, 基本的に素線軸方向に向かって引張応力が働いている. 最小主応力ベクトルより, 他の素線と接触する部分では素線径方向に圧縮応力が働いており, 局所的に非常に強い圧縮を受けていることが分かる. また, シーブ付近のストランド素線は素線径方向に特に強い圧縮を受けていることが分かる.



最大主応力ベクトル

最小主応力ベクトル

(a) I_{in}

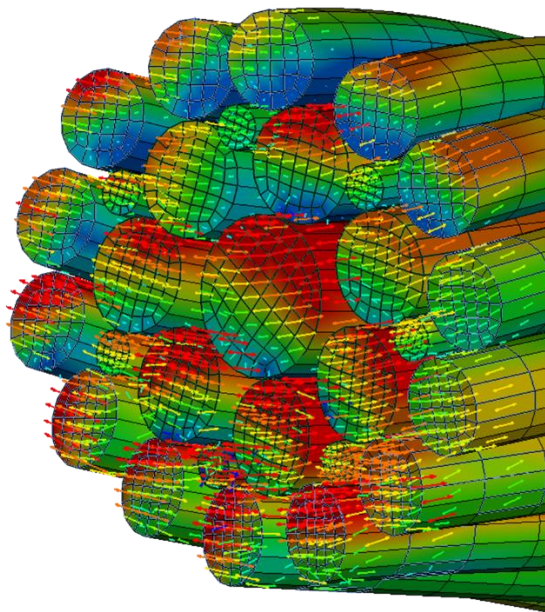


最大主応力ベクトル

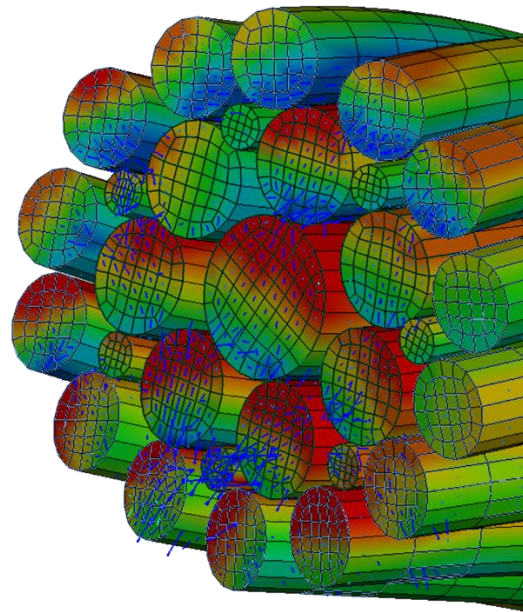
最小主応力ベクトル

(b) I_{out}

図 5-31 引張曲げ解析最大主応力ベクトル図鋼心
($t=0.08, z=0$ 近傍)

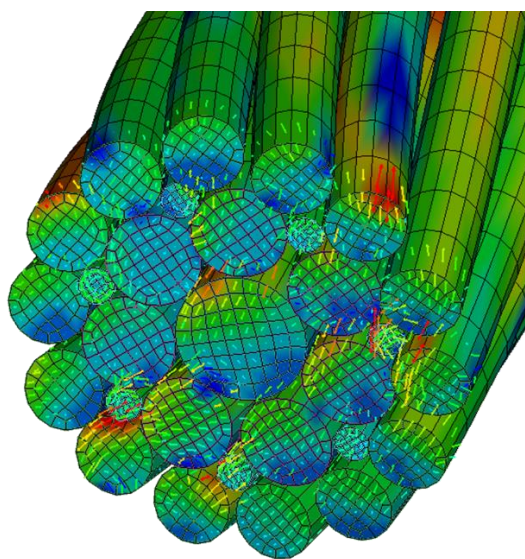


最大主応力ベクトル

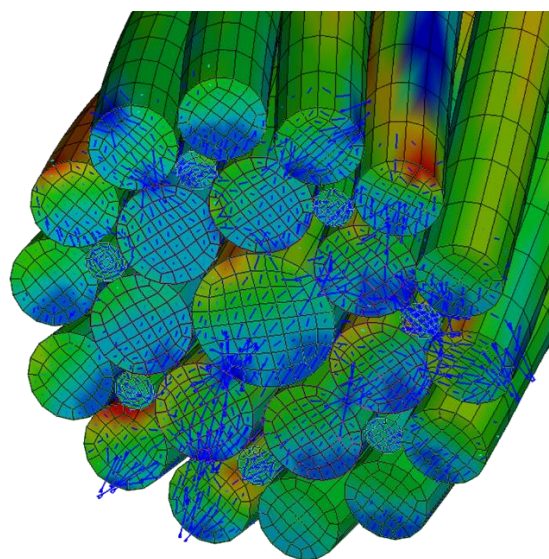


最小主応力ベクトル

(c) 曲げ外側ストランド



最大主応力ベクトル



最小主応力ベクトル

(d) 曲げ内側ストランド

シーブとの接触部付近の素線は、素線径方向に強い圧縮を受けている。

図 5-32 引張曲げ解析最大主応力ベクトル図ストランド
($t=0.08, z=0$ 近傍)

ミーゼス応力コンター図を図 5-33 に示す。図 5-34 に示した最大主応力コンター図とおおまかな傾向は一致しており、素線の応力は素線軸方向の引張が支配的であると言える。違いとして、曲げ内側のストランドにおいて、シーブや鋼心と接触する素線の応力が高くなっており、素線同士の接触により強い圧縮を受けていることが分かる。

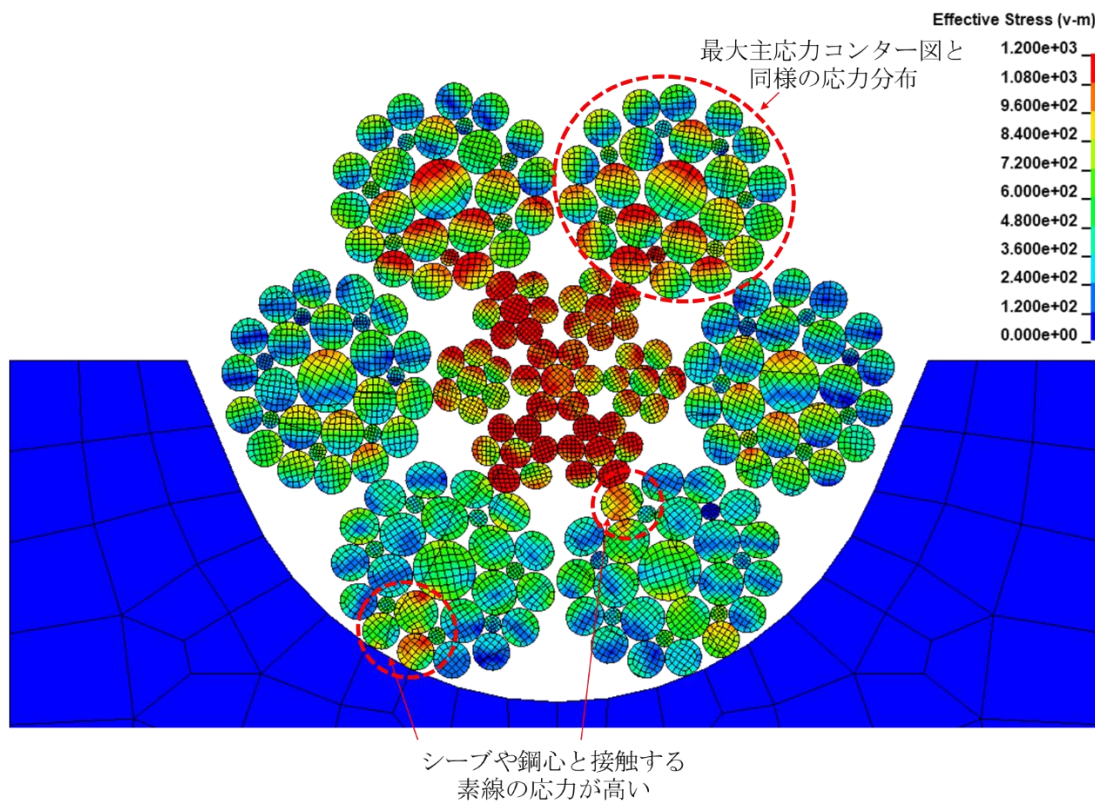


図 5-33 引張曲げ解析ミーゼス応力コンター図 [MPa]
($t=0.08$, $z=0$ 断面)

5.6.4 素線の疲労評価

ロープの実際の使用状況では、巻取り等により複数のシーブに沿って繰り返し曲げられる運用が成される。ロープにシーブによる両曲げ負荷が加わる際、ロープ断面における曲げ外側と曲げ内側が入れ替わることとなる。そこで、ロープ断面内の y 軸方向に対称な位置（図 5-34 参照）の素線軸方向応力を比較することで素線の疲労を評価する。

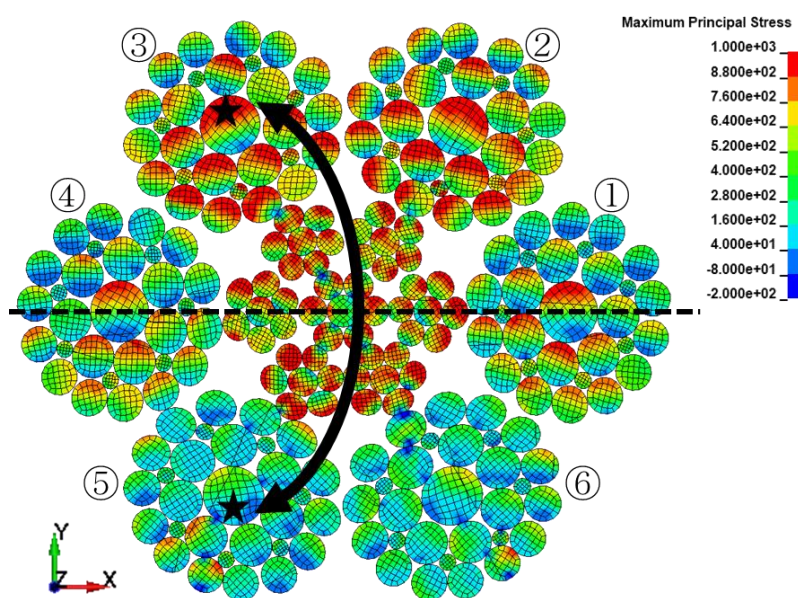


図 5-34 ロープ引張曲げ解析最大主応力コンター図 [MPa]
(引張力 32 kN, $z = 0$ 断面)

ここで、この疲労評価を先行研究[11]において同種のクレーン用ロープ IWRC 6×Fi(29) $\Phi 16$ mm を用いてシーブ径 $\Phi 256$ mm ($D/d = 16$)、張力 34.6 kN (規格破断力 170 kN の 20%)、ロープストローク ± 1000 mm の条件で S 字曲げ疲労試験を 5200 サイクル行った際のロープにおける素線断線数と比較することとする（試験条件を表 5-10 にまとめて示す）。素線断線数の計測は、疲労試験を終えたロープを 1 ピッチごとに切り出し、各試験片ごとにストランドを取り外し、ストランドにおける素線断線を目視で確認する方法で行われた。この先行研究では、図 5-35 のようにストランド内各素線を、ロープ表面側 $S_{out} - \delta 3$ を Crown、鋼心側 $S_{out} - \delta 3$ を Bed、Crown と Bed の間に位置する $S_{out} - \delta 3$ を Nip、内部素線 $S_{out} - \delta 2$ を Inner、中心素線 $S_{out} - \delta 0$ を Core と分類し、各分類における断線数を計測した。計測結果を表 5-11 に示す。これより、素線の場所によって断線数は大きく異なっていることが分かる。

表 5-10 IWRC 6×Fi(29) Φ16 mm の S 字曲げ疲労試験条件[11]

Test sheave diameter [mm]	256
Rope tension [kN]	34.7
Test speed [cycles/min]	10
Rope stroke [mm]	±1000
Number of cycles	5200

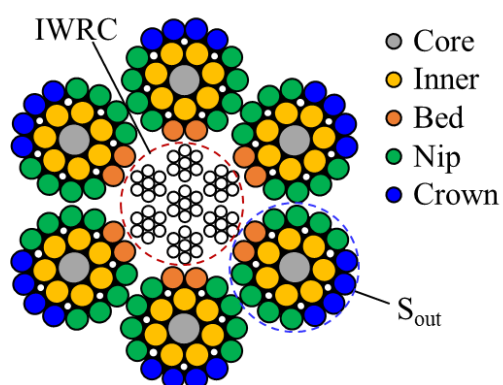


図 5-35 スtrand内素線の分類[11]

表 5-11 素線分類と断線数[11]

Wire type	Number of wire breakage
Core	6
Inner	2
Bed	22
Nip	6
Crown	0

これを受けて、先行研究の各素線分類に対応するストランド③の a ~ j の 10 点について、各点と対称な位置の 10 点（ストランド⑤）の素線軸方向応力値から平均応力，応力振幅を算出する（図 5-36 参照）。結果は，表 5-12 の通りである。ただし，各応力値から，労働安全衛生総合研究所にて測定された素線における残留応力-160 MPa を差し引いている。表より，疲労試験で断線数の多い Core, Nip, Bed の 3 種類の素線に該当する c, d, g, i では応力振幅が大きくなっていることが分かる。よって，これらの素線では疲労損傷の可能性が高いと言える。

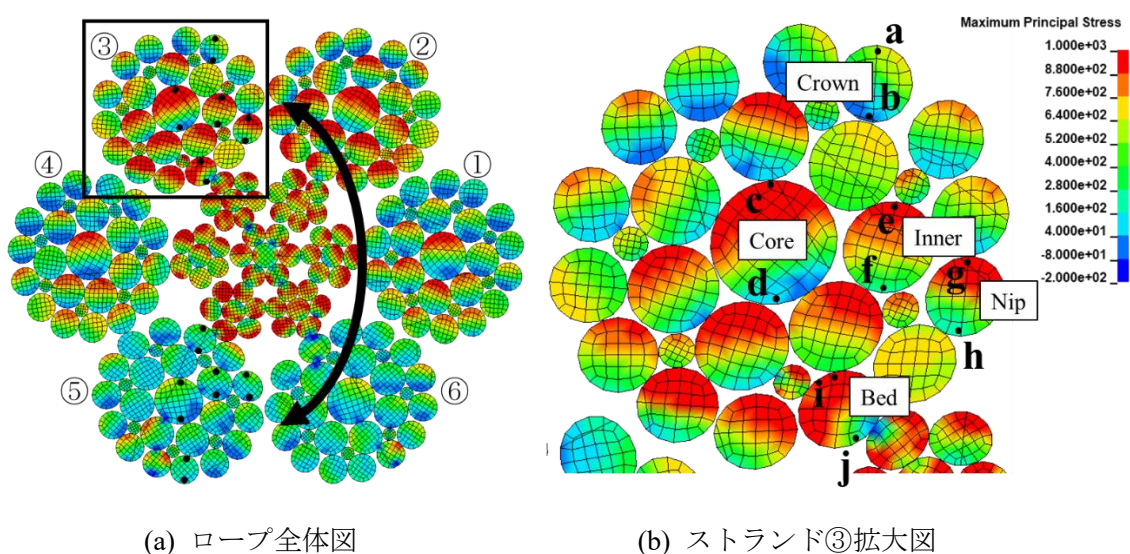


図 5-36 ロープ引張曲げ解析における応力振幅算出点

表 5-12 引張曲げ状態における曲げ外側・内側の素線軸方向応力の比較[11]

Point	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Wire type	Crown		Core		Inner		Nip		Bed	
Axial stress of strand ③ (outside of bending) [MPa]	410	-340	1100	-300	740	80	900	40	1200	180
Axial stress of strand ⑤ (inside of bending) [MPa]	-300	130	-610	620	290	530	-560	370	-200	290
Mean stress [MPa]	60	-110	250	160	520	310	170	210	500	240
Stress amplitude [MPa]	360	240	860	460	230	230	730	170	700	60
Number of wire breakage of bending fatigue test	0		6		2		6		22	

第6章 結論

6.1 結論

本研究では、クレーン用ワイヤロープ IWRC 6×Fi(29)ロープ及びストランド、鋼心の軸方向、径方向の剛性を再現する有限要素モデリング手法の開発を行った。ストランドについて、モデルの実形状再現性を CT スキャン撮影により確認した。ロープ、鋼心について、位相の非対称性を考慮することでロープ内部の接触状態を実際のロープに近付けた。これにより、径方向剛性は位相を考慮しないモデルと比べて実験値を良く再現した。

作成したロープモデルを用いて引張曲げ状態を再現し、ロープ最外層素線ひずみを実験値と比較することで、引張曲げ挙動の妥当性を確認した。得られた結果からモデル内部の応力状態、接触状態について考察した。逆曲げ状態を想定した素線における応力振幅の算出により、実際の疲労試験で断線が多く確認される素線において高い応力振幅が発生しており、疲労損傷の可能性が高いことを明らかにした。

6.2 今後の課題

6.2.1 解析モデルの改良

本研究で行った引張曲げ解析では、モデル端部における軸方向回転拘束条件により、ロープ軸がゆがみシーブとの接触状態に問題が生じた。ロープの撚りを保ちつつ適切な接触状態を再現する拘束条件の開発が必要である。さらに、モデルの挙動が高速だったために、途中でストランド素線内部がほどけてばらばらになる様子が確認された。現実に近い素線挙動の再現のためには、解析時間を長くしストランドの形を保ったまま引張曲げ挙動を行う必要があると思われる。

また、本研究では、モデルについて軸方向、径方向の剛性を確認したが、ねじり剛性の検討を行わなかった。螺旋構造であるロープにおいて、ねじり剛性の非対称性は重要な特性である。よって、実際のロープと解析モデルのねじり剛性を比較することで、素線挙動の再現性をさらに高めることが出来ると考えられる。

6.2.2 動的引張曲げ挙動の再現と摩耗予測

本研究では、静的な引張曲げ状態の解析を行った。このモデルでは、引張曲げ状態における応力状態、接触状態の確認と逆曲げ状態の想定による応力振幅の評価に留まった。実際のシーブに巻き取られる使用状況を再現するためには、引張力の加わったロープがシーブを通過する動的引張曲げ挙動を解析する必要がある。これにより、引張状態から引張曲げ状態に移行する際の過渡的な応力状態も評価することが可能となる。また、動的引張曲げ挙動において、接触している素線間のすべり量から摩耗量の評価を行うことで、内部素線の摩耗による断線メカニズムの解明に繋がると考えられる。

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), pp.1-13.
- [28] 寺田偉紀. ワイヤロープ疲労破壊メカニズムの有限要素法解析. 東京大学工学部機械工学科卒業論文. 2013.
- [29] 寺田偉紀. エレベータ用ワイヤロープ疲労損傷メカニズム解明に向けた有限要素法解析. 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士論文. 2015.

- [30] 舘祐樹. エレベータ用ワイヤロープの自己接触および損傷メカニズムを評価する有限要素法解析. 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士論文. 2016.
- [31] 向井協. エレベータ用ワイヤロープの内部接触状態を考慮した有限要素法. 東京大学工学部機械工学科卒業論文. 2017.
- [32] 辻孝仁. エレベータ用ワイヤロープの摩耗量予測手法の開発. 東京大学工学部機械工学科卒業論文. 2018.
- [33] 中谷起也. スtrand力学特性を考慮したワイヤロープの簡易解析法の開発. 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻修士論文. 2020.
- [34] 小野進. ワイヤロープの微分幾何学的考察. 日本応用数理学会論文誌, Vol.3, No.4, pp.387–424, 1993.
- [35] E Stanova, G Fedorko, M Fabian, and S Kmet. Computer modelling of wire strands and ropes part I: Theory and computer implementation. Advances in engineering software, Vol.42, No.6, pp.305–315, 2011
- [36] D Elata, R Eshkenazy, and MP Weiss. The mechanical behavior of a wire rope with an independent wire rope core. International Journal of Solids and Structures, Vol.41, No.5, pp.1157–1172, 2004.
- [37] Manuel Munoz Hardy. Geometric transformation for double helical wire rods. PhD thesis, University of Hawaii, 2004.

謝辞

本研究は、著者が泉・波田野研究室在籍中に泉教授のご指導の下行われたものです。学部生時代から3年間、大変お世話になりました。泉教授に、研究について基本的なことから細部に至るまでたくさんのご助言をいただいたことで、3年間の研究生活を終え、本論文を書き上げることが出来ました。お忙しい中のご指導、本当にありがとうございました。また波田野講師、榎間助教には、研究に関して貴重なご助言をいただき、勉強になりました。ありがとうございました。

労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所の緒方様には、全試験の実施に際してご尽力いただきました。解析に関しても多くのご意見をいただき、大きな助けとなりました。倉橋様には、試験にご協力いただき、大変お世話になりました。山際様には、解析、試験結果について非常に参考になるアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

東京製綱株式会社様には、試験で使用したワイヤロープ、鋼心、ストランド及びそれぞれの軸方向引張試験結果と素線の応力ひずみ線図等様々な有用なデータを提供していただきました。解析に関する貴重なご意見もいただきました。深く御礼申し上げます。

株式会社 JSOL の千代延様には、解析に関する質問に毎度非常に丁寧にお答えいただいたことで、研究を円滑に進めることが出来ました。深く感謝いたします。

本論文の先行研究に携わった当研究室の OB である中谷さんには、試験、解析に関して様々なアドバイスをいただきました。本当にありがとうございました。また研究室の他の皆様にも有限要素法解析に関して意見をいただき感謝しています。

最後に、本研究に関わってくださった全ての方に深く感謝申し上げ、以上を謝辞とさせていただきます。

令和4年2月7日

太田 仁衣奈

付録 A マススケーリング

ロープは、数百本の素線が複雑に撚り合わされているという構造ゆえに、各素線同士の接触箇所が非常に多く陰解法での計算の収束は難しい。よって本研究の解析は陽解法を用いた。陽解法における計算時間を短縮する手法であるマススケーリングを用いたため、これについて述べる。

ロープを動かす過程において、ロープに加わる力は応力波として部材中を伝わる。よって応力波が正しく伝播するためには、応力波が隣り合う要素を伝わる時間より解析時間のタイムステップを小さくする必要がある。これはクーラン条件と呼ばれ、数式 A-1 のように表される。

$$\Delta t \leq \Delta t_{CR} \quad \text{数式 A-1}$$

ここで、 Δt は解析時間刻み、 Δt_{CR} は応力波が隣の要素に伝播する最小時間(臨界時間増分)である。 Δt_{CR} は数式 A-2 のように表される。

$$\Delta t_{CR} = \frac{L_{min}}{C} \quad \text{数式 A-2}$$

ここで、 L_{min} は要素の最小長さ、 C は応力波の伝播速度である。 C は数式 A-3 に表される。

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{数式 A-3}$$

ここで E はヤング率、 ρ は密度である。

これより、部材の密度 ρ を大きくすることで応力波の伝播速度 C は小さくなり、臨界時間増分 Δt_{CR} は大きくなることから、解析時間刻み Δt を大きくとることができる。本研究では、各部材の密度を実際の値の 100 倍に設定することで計算時間を短縮する。

付録B セグメントベースコンタクト

本論文で行った解析の接触計算の手法として、ペナルティ法に加え、解析ソフトウェア LS-DYNA の機能であるセグメントベースコンタクトを設定した。これについて以下説明を述べる。

セグメントとは、要素の各面を指す(図 B-1 (a)参照)。セグメントベースコンタクトでは、セグメント同士の貫入をチェックする。貫入していると判定された場合は、そのセグメントに対して垂直にペナルティフォースを加えることで接触を再現する。すなわち、要素の面の中に他の要素の面があるかどうかをチェックする、面－面間接触を再現する手法である。これにより、ペナルティ法を用いた節点－面間接触では接触が認識されない要素同士の貫入チェックを行うことができる。

節点－面間接触で接触判定されない一例を図 B-1 (b)に示す。このとき、節点が相手の面上に存在していないため、通常のペナルティ法では接触処理が行われないが、セグメントベースコンタクトを設定することにより要素間の貫入を防ぐことができる。また、要素のエッジには面が存在しないため、節点のめり込みを認識できず、これも通常のペナルティ法では要素の貫入が発生するが、セグメントベースコンタクトのオプションとしてねじれセグメントチェック、エッジ－エッジ貫入も認識できるような追加の設定が可能である。要素の面－面間、面－エッジ間、エッジ－エッジ間の貫入を全て考慮する設定とすることで、有効な接触解析を行うことが可能になる。

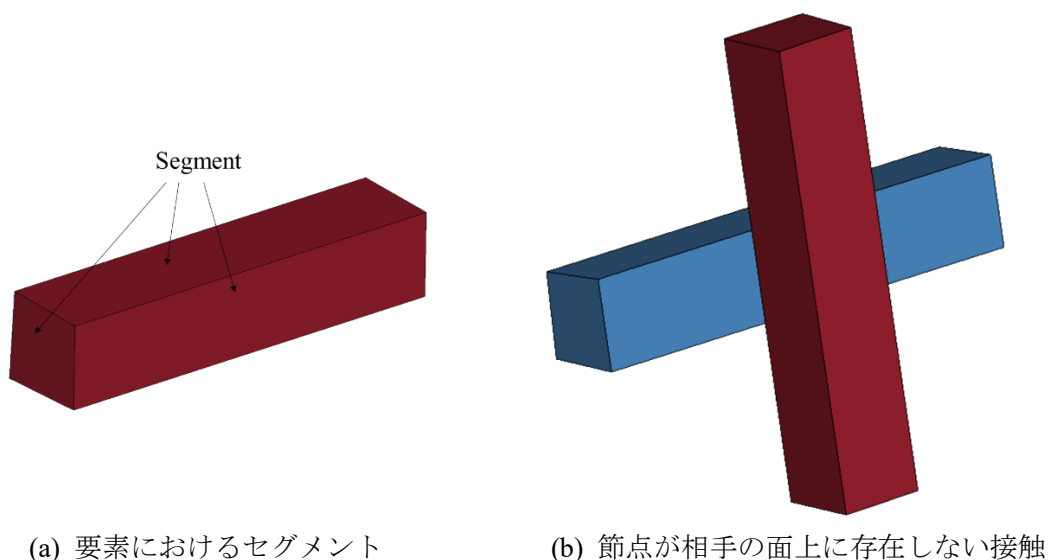


図 B-1 セグメントベースコンタクトの概要