

卒業論文

エレベーター用ワイヤロープのズーム
ング解析手法の開発

平成 28 年 1 月 28 日 提出

指導教員 泉 聡志 教授

140205 佐野 良輔

目次

第1章	序論	6
1.1	研究背景	7
1.2	先行研究	8
1.2.1	ワイヤロープの解析	8
1.2.2	ブーミング解析手法	8
1.3	本研究の目的	9
1.4	本論文の構成	9
第2章	ストランド圧縮試験	10
2.1	緒言	11
2.2	試験材料	11
2.3	試験装置	13
2.4	試験手順	17
2.5	試験結果	19
2.5.1	ガイドによる影響	19
2.5.2	S(19)ストランド	21
2.5.3	Fi(25)ストランド	26
2.5.4	両ストランドの比較	31
第3章	有限要素法解析	32
3.1	緒言	33
3.2	ストランド詳細モデルの解析	33
3.2.1	解析モデル	33
3.2.2	解析条件	37
3.2.3	ペナルティ法	39
3.2.4	境界条件	39
3.2.5	荷重条件	39
3.2.6	解析中の様子と解析結果	40
3.3	簡略化ストランドモデルの解析	49
3.3.1	解析モデル	49
3.3.2	境界条件	49
3.3.3	荷重条件	51

3.3.4	オーダーエスティメーション.....	52
3.3.5	解析結果.....	52
3.4	試験結果と解析結果の違いの考察.....	53
第4章	結論.....	54
4.1	結論.....	55
4.2	今後の展望.....	55
参考文献	56
付録A	ストランド引張試験.....	58
A.1	緒言.....	59
A.2	試験概要.....	59
A.2.1	試験対象.....	59
A.2.2	試験手順.....	59
A.3	試験結果.....	60
A.4	試験結果の考察.....	61
謝辞	62

目次

図 1.1	ワイヤロープ（ストランドロープ）の構成	7
図 2.1	対象ロープ及びストランドの構成	12
図 2.2	試験模式図	13
図 2.3	試験機画像	14
図 2.4	治具構造	15
図 2.5	治具実物画像	15
図 2.6	滑車付近模式図	18
図 2.7	滑車付近実物画像	18
図 2.8	ガイドの有無による結果の違い	20
図 2.9	S(19)ストランド試験結果	22
図 2.10	S(19)ストランド除荷時	23
図 2.11	S(19)ストランド断面画像	24
図 2.12	S(19)ストランド断面画像差分	25
図 2.13	Fi(25)ストランド試験結果	27
図 2.14	Fi(25)ストランド除荷時	28
図 2.15	Fi(25)ストランド断面画像	29
図 2.16	Fi(25)ストランド断面画像差分	30
図 2.17	試験結果比較	31
図 3.1	S(19)ストランド詳細モデル	34
図 3.2	Fi(25)ストランド詳細モデル	35
図 3.3	S(19)ストランド詳細解析 半径方向の様子	41
図 3.4	S(19)ストランド詳細解析 軸方向の様子	42
図 3.5	S(19)ストランド詳細解析 解析前後の差分	43
図 3.6	Fi(25)ストランド詳細解析 半径方向の様子	44
図 3.7	Fi(25)ストランド詳細解析 軸方向の様子	45
図 3.8	Fi(25)ストランド詳細解析 解析前後の差分	46
図 3.9	詳細ストランドモデル解析結果	47
図 3.10	ストランド詳細解析 試験結果との比較	48
図 3.11	簡略化ストランド解析モデル	50
図 3.12	簡略化ストランドモデル解析結果	52
図 A.0.1	ストランド引張方法	59
図 A.0.2	ストランド引張試験結果	60

表目次

表 2.1 ストランドの形状	12
表 2.2 試験機仕様	14
表 2.3 変位計仕様	16
表 3.1 S(19)ストランド詳細解析モデル解析規模	34
表 3.2 Fi(25)ストランド詳細解析モデル解析規模	35
表 3.3 ストランドの形状パラメータ	36
表 3.4 詳細モデル解析 解析条件	38
表 3.5 簡略化モデル解析条件	50
表 3.6 ストランド変位の推測	53
表 A.0.1 有効ヤング率計算結果	61

第1章 序論

1.1 研究背景

ワイヤロープは、一般的な鉄鋼製品と比べて柔軟性に優れ高い破断強度も併せ持つことから、長年に渡り様々な範囲の機械部品に用いられてきた。その用途はクレーン、エレベータ、ケーブルカー、橋梁など多岐に渡り、それぞれの製品において重要視される特性が異なることから、それらの用途に合わせた様々な種類のワイヤロープが存在する。その中でもロープ式エレベータに用いられる最も一般的なロープは、ワイヤロープを構成する最も小さい素材である素線を数十本程度撚り合わせて構成されるストランドを、さらにロープ芯の周囲に 6 から 8 本程度撚り合わせたストランドロープと呼ばれるものである (図 1.1 参照)。

このワイヤロープの設計基準、メンテナンス基準には十分な根拠がないのが問題となっている。メンテナンス基準に至っては、通常の見査は目視で行われるため外部断線しか把握できず、仮に内部で断線が進んでいた場合は摩損を見逃しロープが取り替えられないまま断線するおそれがある。ワイヤロープの破断が原因とされるエレベータ事故も複数発生しており [1][2]、エレベータの信頼性向上のためには、ワイヤロープの設計基準およびメンテナンス基準に十分な理論的根拠がなければならない。そのためワイヤロープが損傷する際の挙動を解明し、より定量的な評価を与える必要がある。

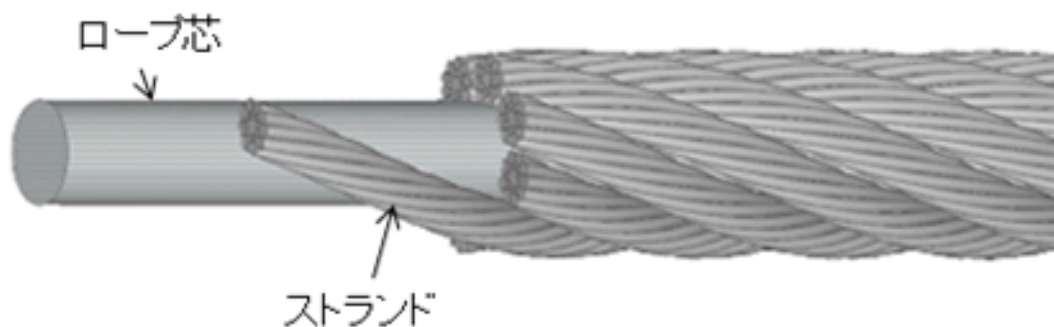


図 1.1 ワイヤロープ (ストランドロープ) の構成

1.2 先行研究

1.2.1 ワイヤロープの解析

これまで古くより、ワイヤロープの機械的特性を把握するために数多くの理論やモデルが開発されてきた[3][4][5]。しかしモデルの構築においてはロープの損傷を考察する上で重要な接触応力や摩擦を考慮できず、解析的に損傷特性を解明するには限界がある。また、ワイヤロープの疲労寿命や断線特性を推定するために繰り返し曲げ疲労試験[6][7]および引張試験[8][9]が行われてきたが、この疲労試験においても素線破断の発生位置やタイミングなどの過渡的な現象が観察できないこと、また応力の計測法が確立されていないことから、素線の断線メカニズムを解明するには実験だけでは不十分だと言える。

ワイヤロープの素線破断特性を理解するためには、実験ではわからない内部の構造を解明しなければならない。そのための手段としてシミュレーションがある。シミュレーションならば様々な条件下でのワイヤロープの内部状態を短時間かつ低コストで解析し可視化できる。そのうえ接触や塑性変形などの非線形挙動についてもモデル化することが可能である。ワイヤロープの構造は非常に複雑であり、接触や摩擦による非線形性に大きく支配されることもあって解析は困難であったが、近年になって有限要素法が発展し、計算機性能が飛躍的に向上したことにより、ワイヤロープの有限要素法解析に関する研究が多く行われるようになった[10-15]。

1.2.2 ズーミング解析手法

計算機性能が向上したにも関わらず、ワイヤロープの構造は非常に複雑で非線形性に大きく支配されているため、素線を1本ずつ全て詳細にモデル化すると計算負荷が膨大となり、事実上解析が不可能となる。この問題を解決するため、寺田[16]によりズーミング解析を導入した有限要素法解析が行われた。

ズーミング解析とは、あらかじめ簡略化したモデルについて解析を行い、そこから得られた変位情報を部分的な詳細モデルの解析に境界条件として適用することで、計算負荷を抑えながら一定の精度が保障された解析を行うことができるという手法である。解析手順はワイヤロープの場合以下のようなになる。

1. まず素線を数十本程度撚り合わせて構成されるストランドを一塊の素材としてモデル化し、簡略化ストランドを作成する。
2. 簡略化ストランドを6から8本撚り合わせることでワイヤロープをモデル化し、このモデルを使ってワイヤロープ全体に関する解析を行う。
3. その後ワイヤロープモデルの一部のストランドを素線から構成された詳細なモデ

ルに置換する。

4. 詳細モデルに置換したワイヤロープモデルに強制変位として前回の解析の変位情報を与え、詳細部の解析を行う。

この手順の際、ストランドを一塊の素材としてモデル化した際の材料特性が必要である。厳密にはストランドは素線の集合体でありヤング率が存在しないため、以降この論文ではストランドの簡略化モデルにおける材料特性値を有効ヤング率、有効ポアソン比などと表現する。

寺田の論文においては、国内で広く使用されている2種類のエレベータ用ワイヤロープについて、まっすぐな状態のストランド1本をモデル化し、それに軸方向への引張りの強制変位を与えてストランドにかかる応力を解析することでストランドの有効ヤング率を求めている。しかし寺田の解析においてはストランドの変形時の異方性が考慮されておらず、軸方向有効ヤング率が半径方向にも適用されている。ストランドはその構造上、軸方向引張りに比べ明らかに半径方向に圧縮されやすく、等方性材料で構成された簡略化ストランドを解析に用いると、解析に齟齬が生じている可能性が高い。これを解決するには、ストランドの半径方向有効ヤング率を求め、解析に適用する必要がある。

1.3 本研究の目的

本研究では、寺田の論文で使用されたのと同じ2種類のワイヤロープ、 $8 \times S(19)$ と $8 \times Fi(25)$ に使用されているストランド $S(19)$ と $Fi(25)$ について、半径方向に荷重が加わった時の挙動を調査するため、ストランドを半径方向に圧縮させる試験とストランドの有限要素法モデルを半径方向に圧縮する解析を行う。その結果をもとに、ズーミング解析の際にストランドの異方性を導入する手法について考察する。

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」では、本研究の背景、先行研究、目的について述べた上でズーミング解析についての説明を行った。

第2章「ストランド圧縮試験」では、本研究で用いるストランドの構造を示し、その挙動を見るための圧縮試験について概要と結果を説明する。

第3章「有限要素法解析」では、素線まで詳細にモデリングしたストランドモデルおよび均質な連続体として簡略化したストランドモデルについて、試験の結果をもとに有限要素法解析を行い試験と比較する。

第4章「結論」では、本研究における結論と今後の展望について述べる。

第2章 ストランド圧縮試験

2.1 緒言

本章では、国内で広く使用されている 2 種類のエレベータ用ワイヤロープを構成するストランドについて、ストランド圧縮試験を行う。

2.2 試験材料

今回試験に使用したのは、エレベータ用ワイヤロープとして広く普及している $8 \times S(19)$ 、 $8 \times Fi(25)$ を構成する 2 種類のストランド（以下、 $S(19)$ ストランド、 $Fi(25)$ ストランド）である。それぞれのストランドの内部構成と構成素線の直径、及びストランドの断面積をストランドの直径と等しい直径を持つ円の面積で除した値である充填率を図 2.1、表 2.1 に示す。

$S(19)$ ストランドは、芯をなす素線の周りに 9 本の内層素線、さらにその周りに 9 本の外層素線が巻きつけられて構成されている。内外層の素線数が同数で、内層素線の凹みに外層素線が完全に納まっているため、シール形 (Seale) と呼ばれる。シール形ロープは外層素線が太いので、耐摩耗性に優れているのが特徴である。

$Fi(25)$ ストランドは、芯の周りの内層素線が 6 本、最外層素線が内層の 2 倍の 12 本あり、その隙間を埋める形でフィラー線と呼ばれる細い素線が 6 本巻きつけられて構成されている。細い素線により素線同士の隙間を埋めることからフィラー形 (Filler) と呼ばれる。フィラー形ロープは柔軟性、耐疲労性、耐摩耗性のバランスが良いのが特徴で、エレベータ用に限らず広範囲に使われている。

両種のロープはともにロープ芯の周りにストランドが 8 本巻きつけられることで構成されており、その公称径は 10mm、ロープピッチ (ストランドがロープ芯周りに 1 周するのに要するロープ軸方向の長さ) は 65mm である。ストランドは直径 2.7mm、ストランドピッチ (素線がストランド中心周りに 1 周するのに要するストランド軸方向の長さ) は 18mm である。

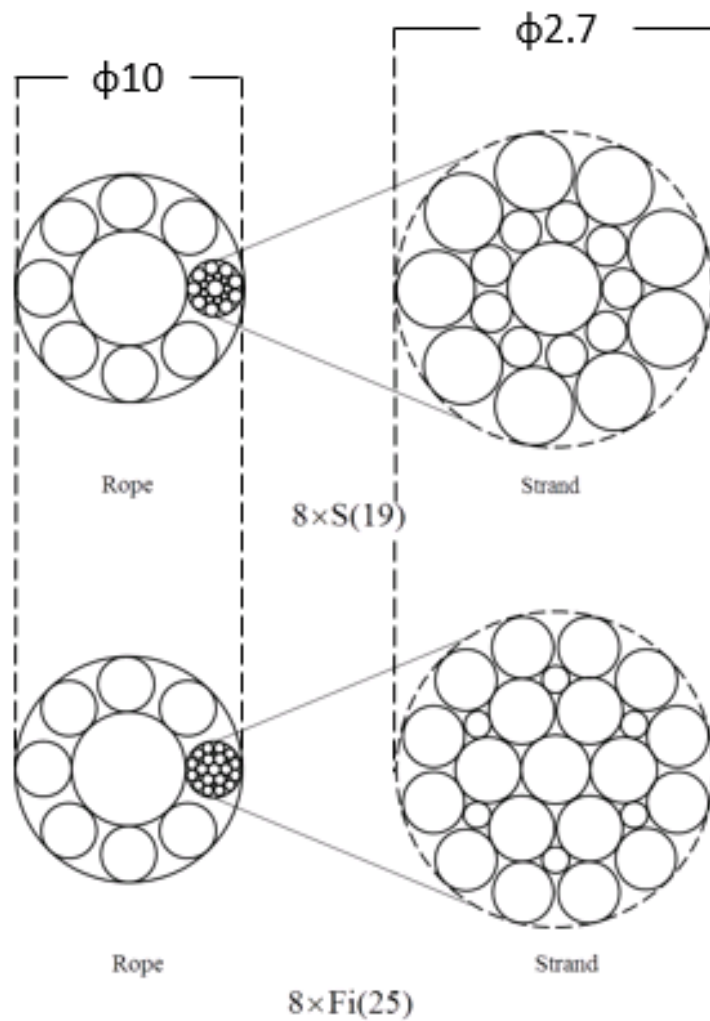


図 2.1 対象ロープ及びストランドの構成[16]

表 2.1 ストランドの形状 [17]

	S(19)ストランド		Fi(25)ストランド	
	本数	素線径[mm]	本数	素線径[mm]
中心素線	1	0.80	1	0.59
2層目	9	0.35	6	0.56
3層目	9	0.66	6	0.23
4層目	—	—	12	0.52
φ 2.7mm の円に 対する充填率	77.68 %		79.45 %	

2.3 試験装置

試験の模式図を図 2.2 に示す。ストランドの圧縮には島津製作所の微小強度評価試験機，マイクロオートグラフ MST-I を用いた。試験機画像を図 2.3 に，試験機の仕様を表 2.2 に示す。

また，治具の構造を図 2.4 に示す。上下に分かれた治具には中央部分に小さな溝があり，上下とも貫通する形で 4 本の穴を開けている。溝は試験中ストランドが横にずれないようにするためにストランドを置くための場所で，その大きさはストランド直径 2.7mm を覆う大きさの R1.4mm である。上下の穴は治具そのものの横ずれを防ぐための 4 本のガイドを通すための穴であるが，ガイドがあると後述する理由により変位が正しく計測できず，ある程度荷重をかけた状態では横ずれも起きないために試験では使用しない。

今回ストランドを試験機で圧縮する際に荷重と変位をそれぞれ計測する。しかし治具と試験機の土台の間に滑車のための土台を挟んでいることや治具そのものの変形を考慮すると，試験機で計測する変位では不十分なことが予想される。そのため，上下それぞれの治具の側面にねじ穴を開け，そこに差し込んだねじ同士の距離の変化を外部の変位計で測定することでストランドの変形量とした (図 2.5)。変位の測定にはキーエンス株式会社の寸法測定器，LS-7000 シリーズを用いた。仕様を表 2.3 に示す。

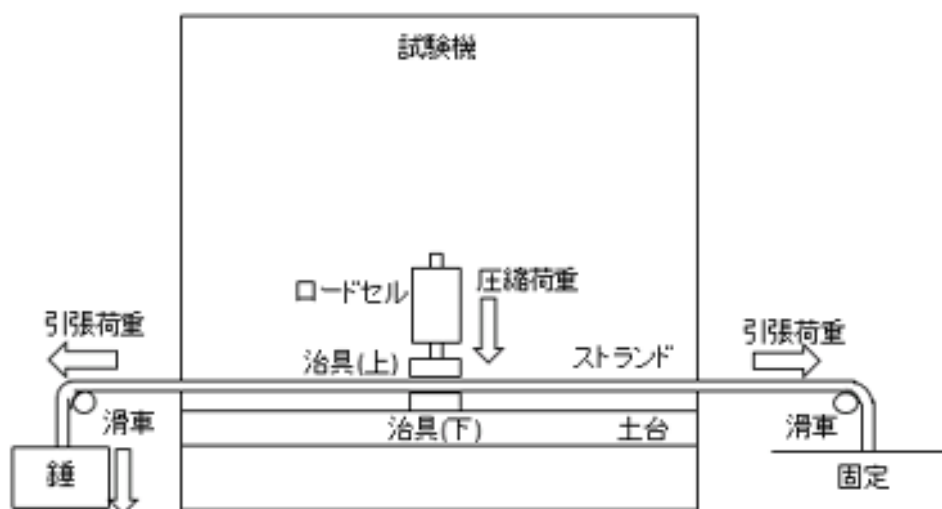


図 2.2 試験模式図

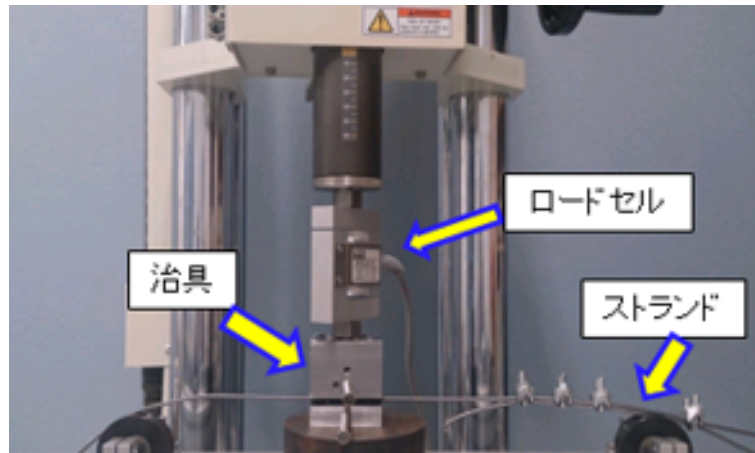


図 2.3 試験機画像

表 2.2 試験機仕様

型名	MST-I typeHR
負荷容量	±500mN～±2kN (今回はロードセル容量として 2kN を選択)
試験力測定精度	ロードセル容量の 1/250 まで読み値の±1%
ストローク	±60mm
試験速度	0.0012～30mm/min
変位表示分解能	0.02 μm
変位測定精度	5mm まで±0.2 μm, 5mm 以上±0.5 μm
試験力信号出力	アナログ (DC0～5V) 分解能 : 1/2048 (約 2.5mV) 出力レート : 10msec

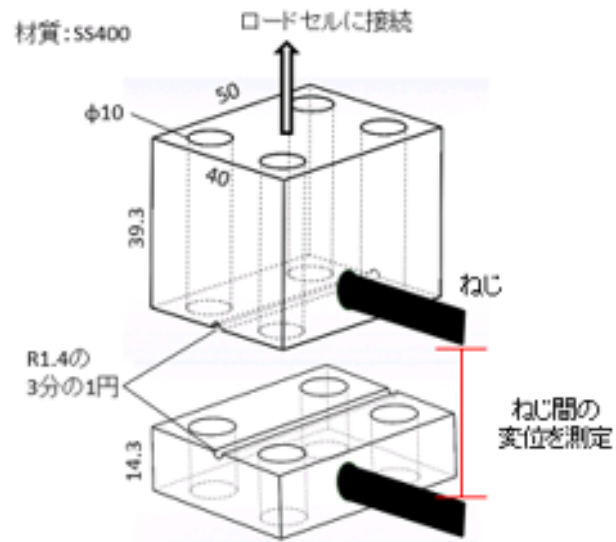


図 2.4 治具構造

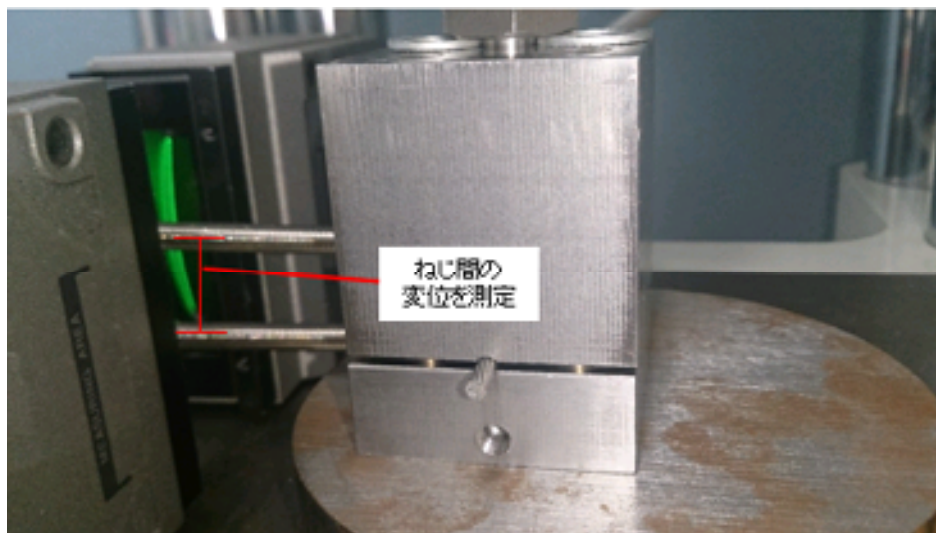


図 2.5 治具実物画像

表 2.3 変位計仕様

コントローラ部	
型式	LS-7600
最小表示単位	0.1 μ m を選択
表示範囲	$\pm 99.99999 \sim \pm 9999.9$ mm
アナログ入力	± 10 V $\times 2$ 出力
測定部	
型式	LS-7030M
測定範囲	0.3 ~ 30 mm
最小検出物体	0.3mm
投受光間距離	160 ± 40 mm
CCD 操作範囲	約 33mm
測定位置精度	$\pm 2 \mu$ m
繰り返し精度	$\pm 0.15 \mu$ m
サンプリング回数	2400 回/秒

2.4 試験手順

事前準備として、ストランドの端をワイヤクリップで止めて輪を作り、滑車を通して市販のワイヤロープでぶら下げたバケツに繋ぐ(図 2.6, 図 2.7)。これはストランドの軸方向に荷重を与えることでストランド内部の素線同士の隙間を埋め、ワイヤロープの実際の使用状況に即した実験を行うためである。公称径 10mm のエレベータ用ワイヤロープの最大許容荷重は 4000N であるので、ロープ芯も合わせて考えると 1 本のストランドに与えられる荷重は 500N にも満たないと考えられる。そのため今回は軸方向に与える荷重として 0 と 500 の中間である約 250N を選択した。

まずストランドを軸が地面に平行になる向きにし、滑車を通したバケツに錘を入れることで軸方向に 25kg (約 250N) の荷重を与える。次にストランドを治具に挟み込み試験機を用いて圧縮荷重を与える。試験機が 10N を示した位置を変位 0 とし、試験機を用いてストランド半径方向に 2000N まで圧縮していく。試験条件には荷重制御を用い、250N/min と 700N/min の 2 種類の荷重速度で試験を行った。2000N に到達後 2000N のまま 30 秒維持し、その後同じ速度で除荷する。試験機の仕様により荷重制御では 100N までしか除荷できないため、以降は試験機による表示が 10N を示すまで変位制御により 10N まで除荷した。試験は同じストランドについて 4 回ずつ行った。ストランドのひずみ速度は 700N/min が 250N/min のおよそ 2.5 倍となった。

また、本試験とは別に半径方向圧縮荷重のかかった状態でのストランド断面の画像を撮影した。ストランドを長さ 50mm 強に切断し、引張荷重をかけない状態で半径方向に圧縮荷重を加え、手動で変位を動かし設定した荷重に合わせてストランドの断面を撮影した。撮影には株式会社ライカマイクロシステムズのデジタルマイクロスコープ、Leica DVM5000 を用いた。

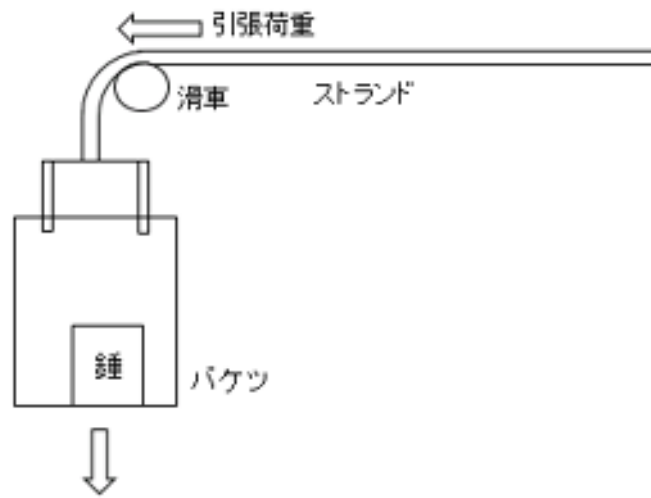


図 2.6 滑車付近模式図



図 2.7 滑車付近実物画像

2.5 試験結果

2.5.1 ガイドによる影響

ガイドを付けると正確な測定ができない理由を以下で説明する。ガイドを付けた状態で試験を行った結果、図 2.8 のように荷重を加えた際に変位が減少、つまり治具が離れる現象が起きた。他にも変位の増加や減少が不安定になった。これは試験機から治具の上にかかった荷重がストランドを通さずガイドを通して下の治具へ伝わった可能性が大きいと考えた。上下の治具間の微小な傾きによりガイドと治具の間に強い摩擦が生じているとすると、ストランドが受ける荷重が不安定になり図のような変位の軌跡になりうる。

そこでこれを解決するためにガイドを取り外した状態で試験を行ったところ、荷重をかければ変位が増加し除荷すれば減少するという、想定される荷重—変位曲線を描いた。懸念された治具の横ずれについても起こらなかったため、以降の試験では全てガイドを取り外している。

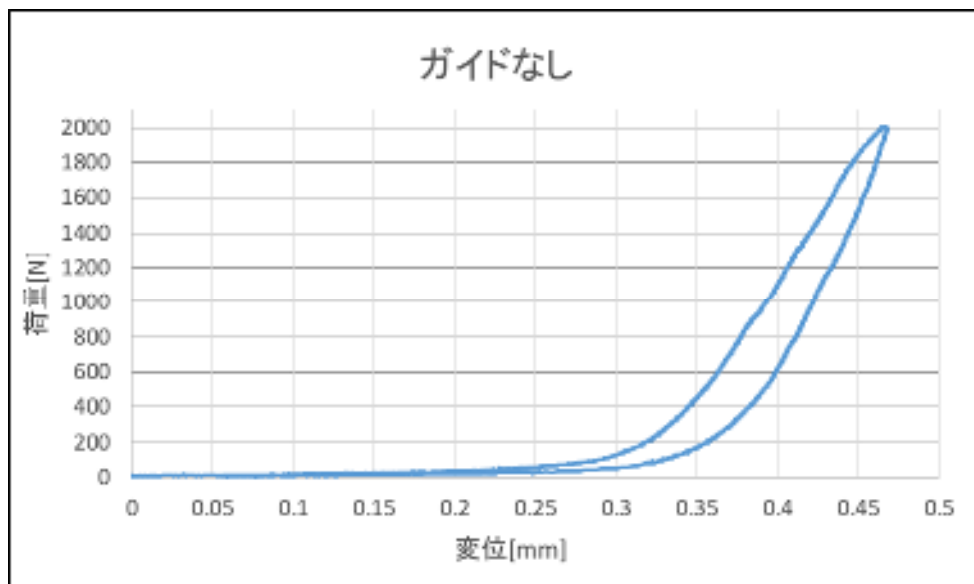
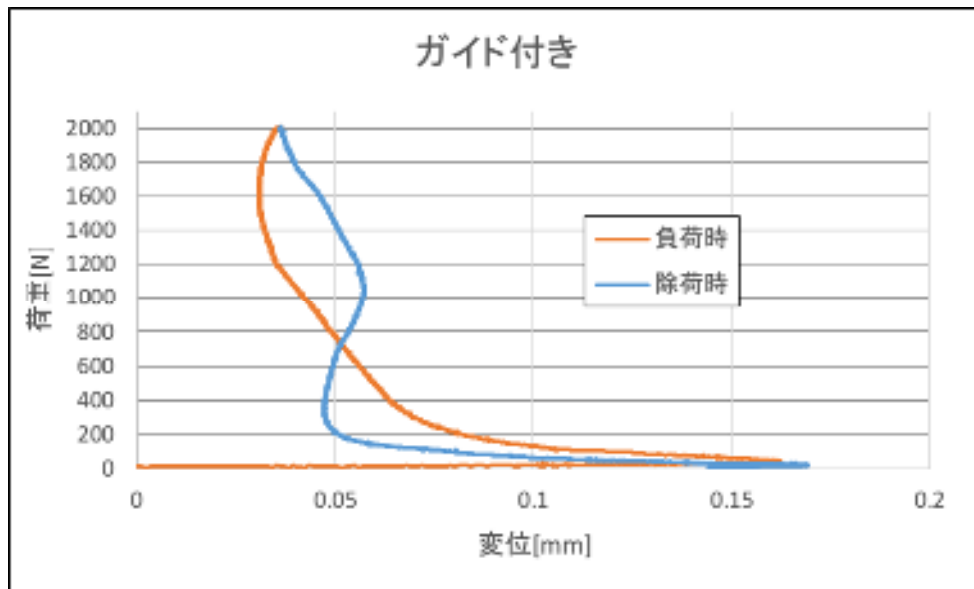


図 2.8 ガイドの有無による結果の違い

2.5.2 S(19)ストランド

S(19)ストランドでの試験結果を図 2.9 に示す。

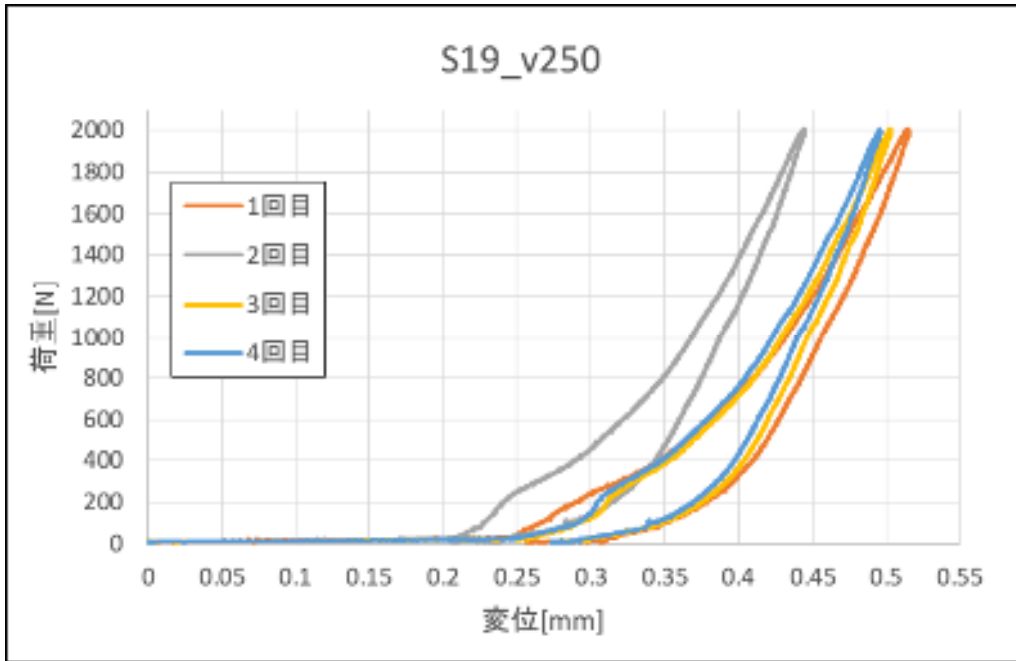
全ての試験に共通して変位に対する荷重の増加傾向が非線形的である。これは初期ではストランド内部の素線同士に隙間があり、荷重が大きくなると隙間の一部が埋まることで摩擦力と接触反力が増加するためと考えられる。

また、負荷時と除荷時で曲線の傾きが異なるヒステリシス現象が起こっている。そのため 10N での変位が負荷時と除荷時で違い、次の試験の変位に影響を及ぼしている。荷重 2000N の時の変位にばらつきがあるのは、変位 0 の点として考えた 10N の地点が回によって違うためと考えられる。一方で最大変位の違いを除けば各回の挙動がほぼ同じと判断できるため、荷重を取り除けば同じ状態に戻ることが言える。

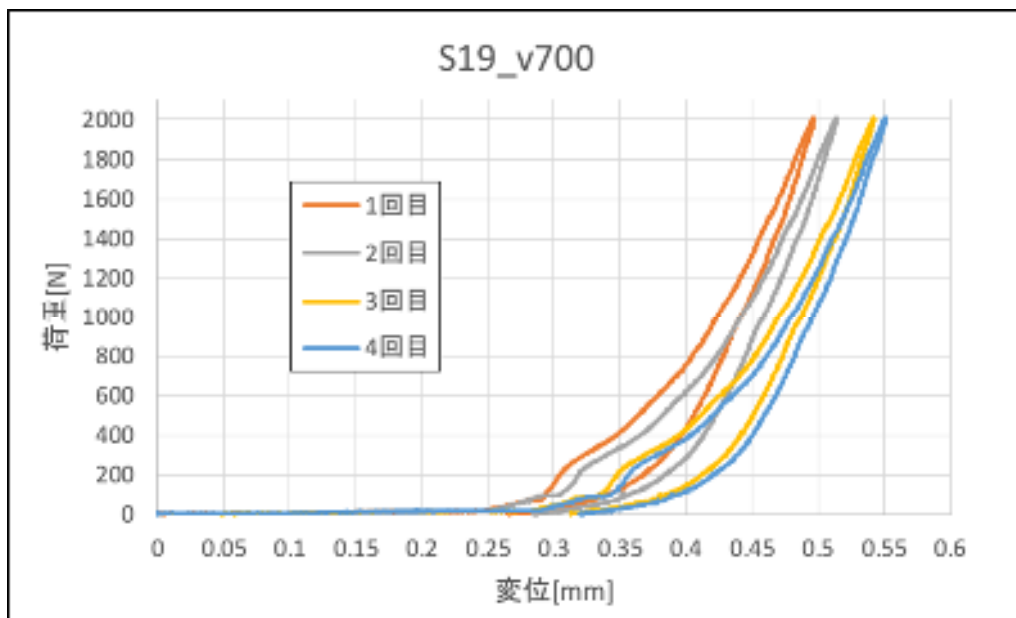
荷重 10N における変位による影響を取り除くために、試験の各回において 2000N における変位を改めて 0 とし、除荷時の荷重と変位の間を取った。すると図 2.10 に示すように、試験の各回および各荷重速度においてほぼ挙動が一致した。このことから、最大変位がばらけた理由は前述の通り変位 0 の取り方によるもので、ストランドの挙動に関してひずみ速度による影響はないことがわかる。

負荷時において 200N 付近で 1 度曲線ががたついている。後述する Fi(25)ストランドの結果にはこのがたつきはないため、これはストランドの構造に起因することが考えられる。図 2.1 に示すように S(19)ストランドは最外層素線の数が 9 本と奇数であり、上下の治具に同時に接触する素線の数は特定の角度でのみ同数になる。一方 Fi(25)ストランドは最外層素線が 12 本と偶数でありどの断面でも治具に接触する素線の数は上下で同数である。そのため S(19)ストランドは接触が不安定になりやすく、曲線のがたつきを引き起こしたと考えられる。

マイクロスコープにより撮影したストランド断面の様子を図 2.11 に示す。また図 2.12 は 0N と 2000N の画像を重ね合わせて比較したものである。下の外層素線が治具によって押しつぶされていることが確認できる。しかし荷重をかける前に 0N の時点でも、中心素線が周囲の素線によって押し潰され凹んでいるのが見て取れる。これは製造過程でストランドやロープがほどけないように、荷重をかけて締めるプレフォームやプレテンションの過程で素線が押し潰されているためと考えられる。



(a) 荷重速度 250N/min



(b) 荷重速度 700N/min

図 2.9 S(19)ストランド試験結果

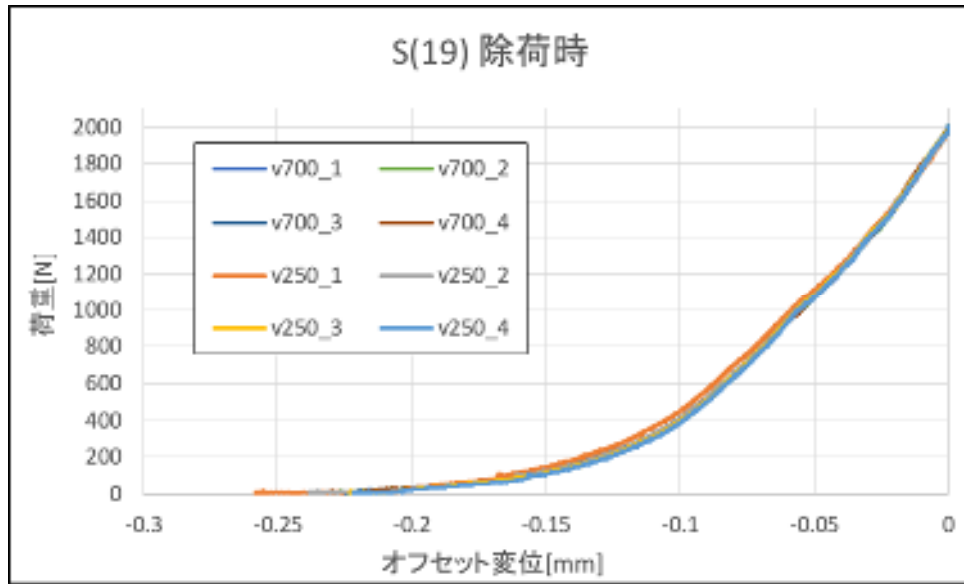
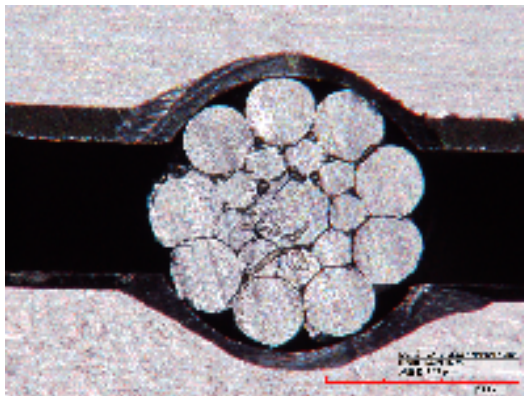
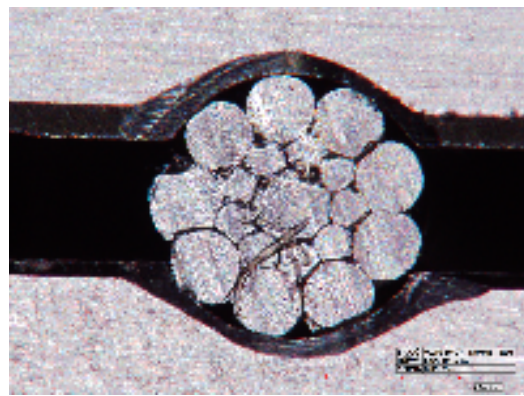


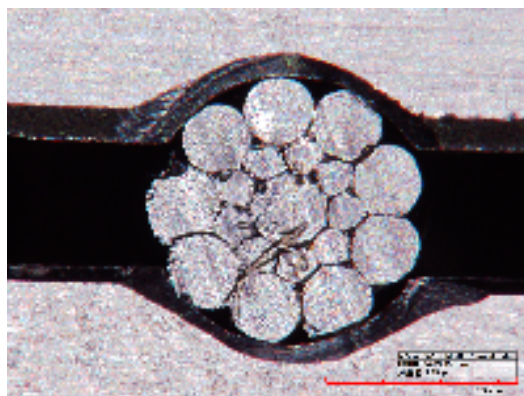
図 2.10 S(19)ストランド除荷時



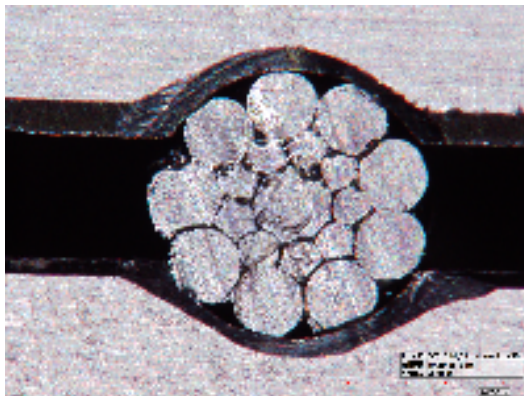
(a) 荷重 0N



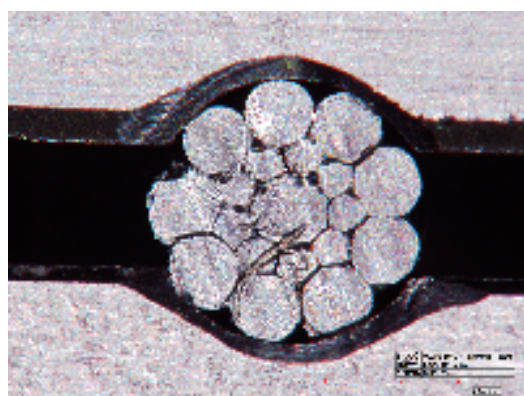
(d) 荷重 400N



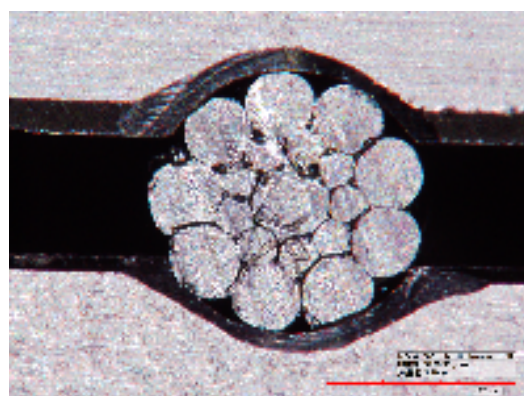
(b) 荷重 100N



(e) 荷重 1000N



(c) 荷重 200N



(f) 荷重 2000N

図 2.11 S(19)ストランド断面画像

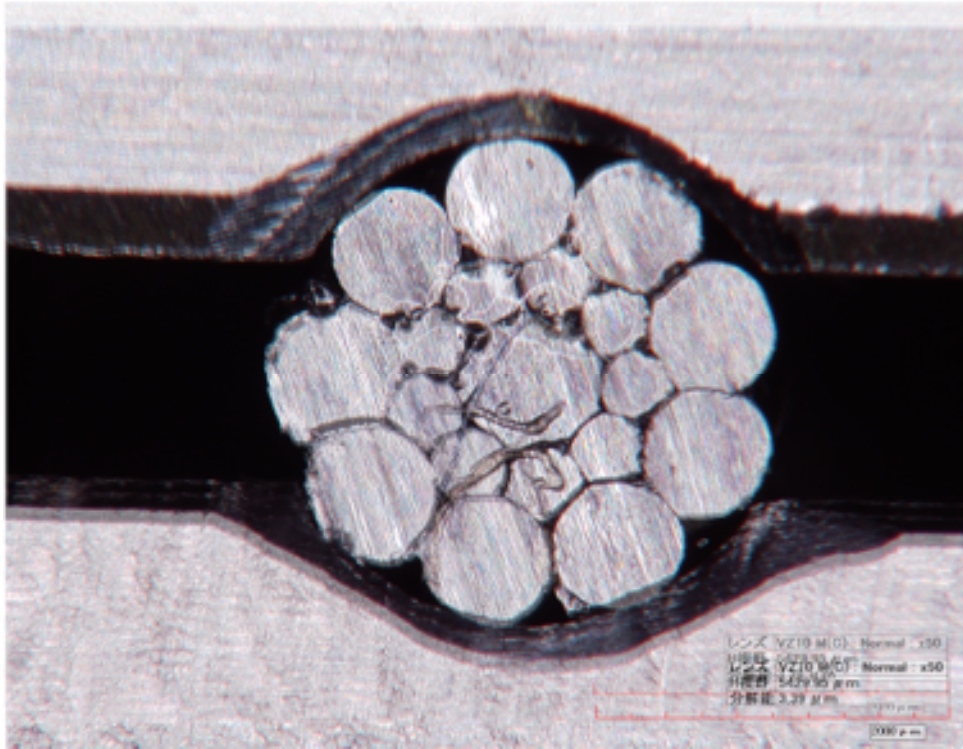


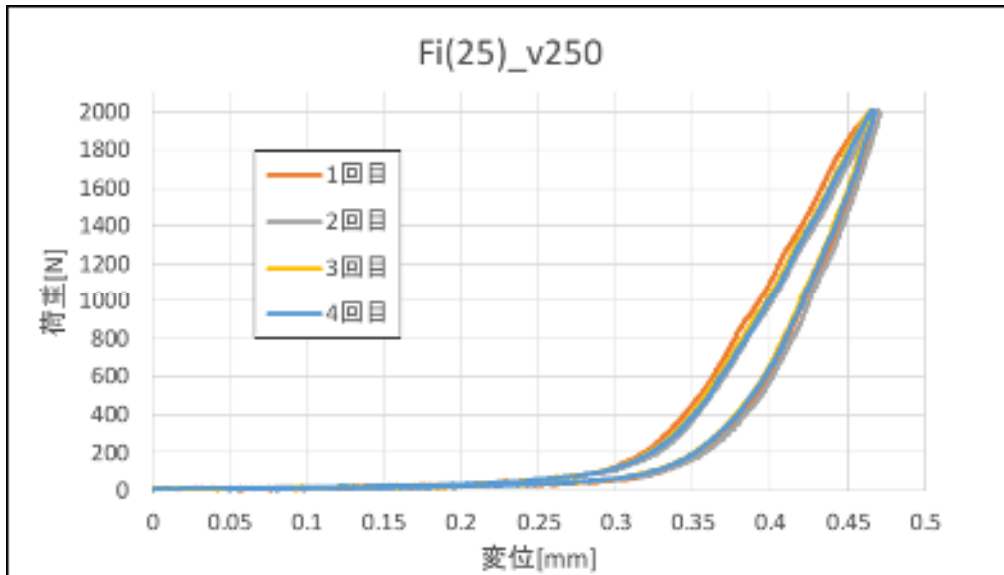
図 2.12 S(19)ストランド断面画像差分

2.5.3 Fi(25)ストランド

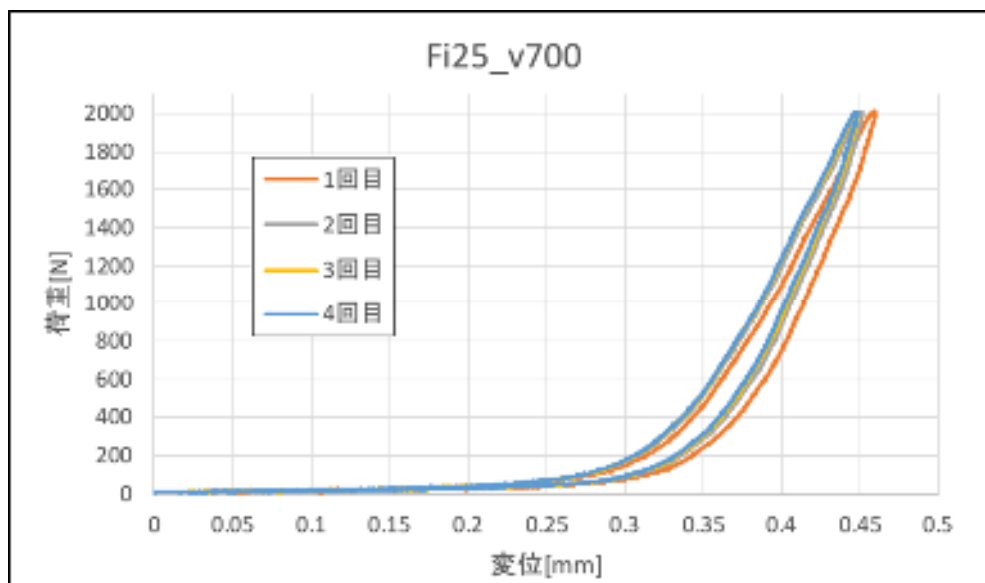
Fi(25)ストランドでの試験結果を図 2.13 に示す。また、試験の各回において 2000N における変位を 0 とした場合の除荷時の荷重と変位の関係を図 2.14 に示す。

S(19)ストランドと同様に変形は非線形的であり、負荷時と除荷時の傾きが違うヒステリシスが見られた。2000N を基準とした場合も S(19)と同様に各回、各荷重速度で挙動がほぼ一致した。

マイクロスコープにより撮影したストランド断面の様子を図 2.15 に示す。また図 2.16 は 0N と 2000N の画像を重ね合わせて比較したものである。0N から 2000N までの間に、ストランドが回転して素線が新たに治具と接触しているのがわかる。ストランドが半径方向に圧縮されると軸方向へ伸びるため、素線が撚られた形状であるストランドはそれに伴ってほどける方向に回転していると考えられる。



(a) 荷重速度 250N/min



(b) 荷重速度 700/min

図 2.13 Fi(25)ストランド試験結果

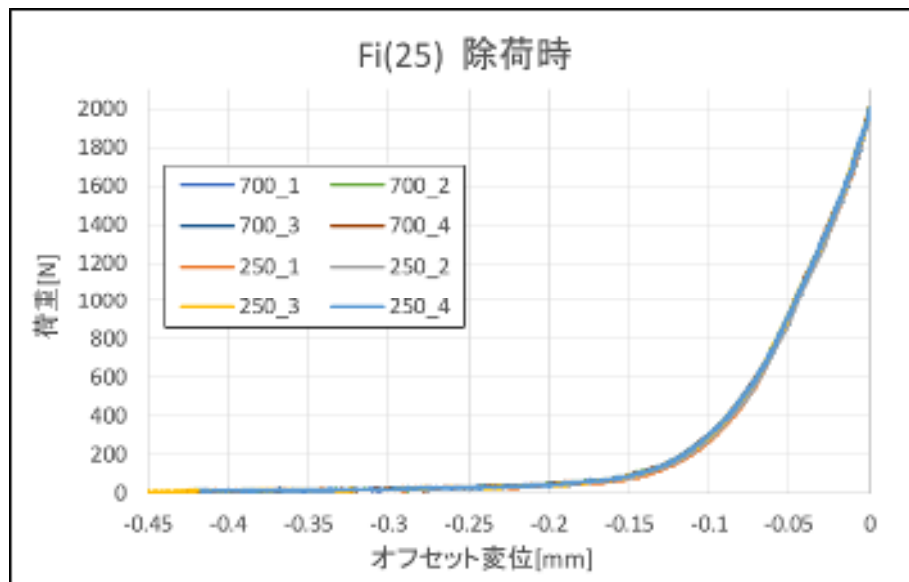
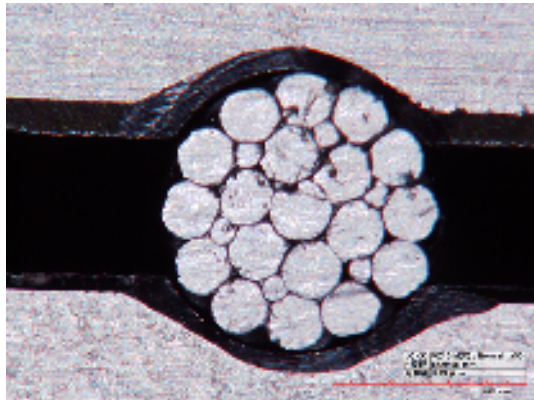
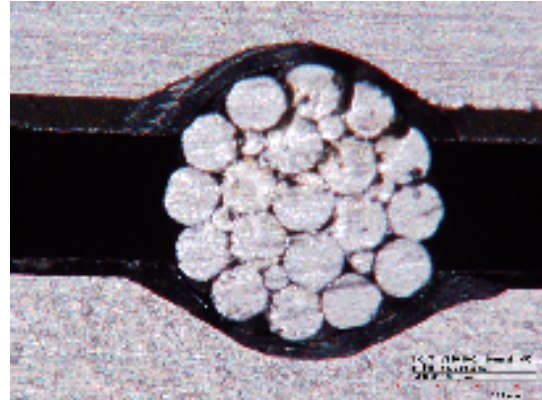


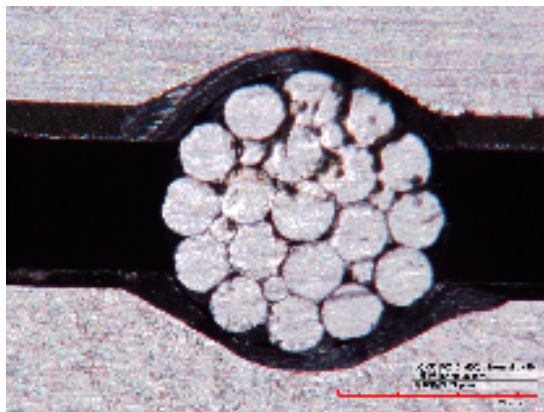
図 2.14 Fi(25)ストランド除荷時



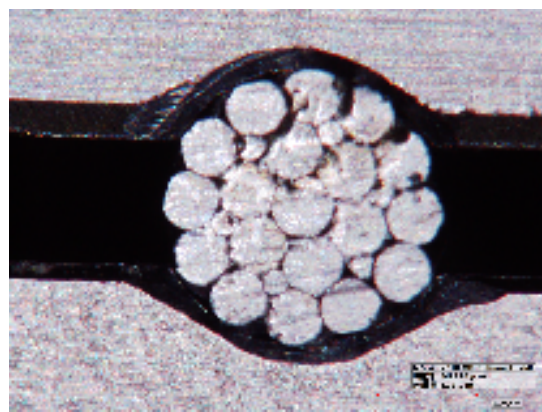
(a) 荷重 0N



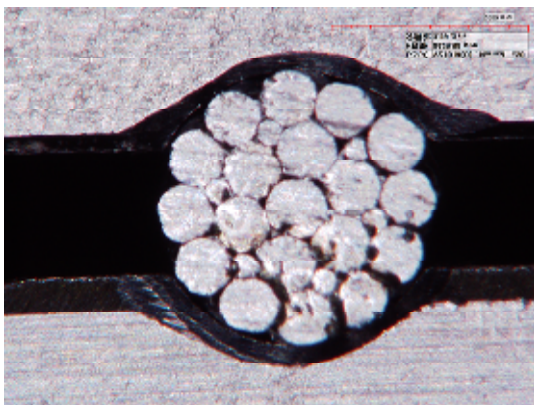
(d) 荷重 400N



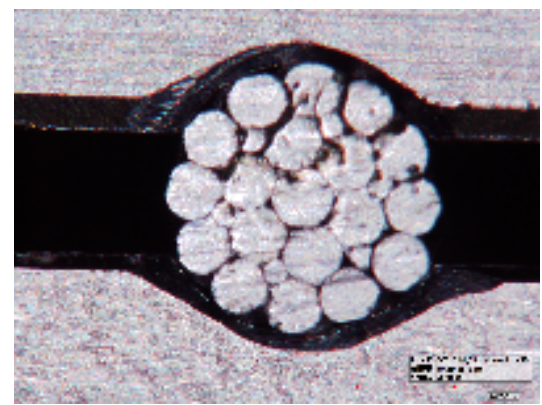
(b) 荷重 100N



(e) 荷重 1000N



(c) 荷重 200N



(f) 荷重 2000N

図 2.15 Fi(25)ストランド断面画像

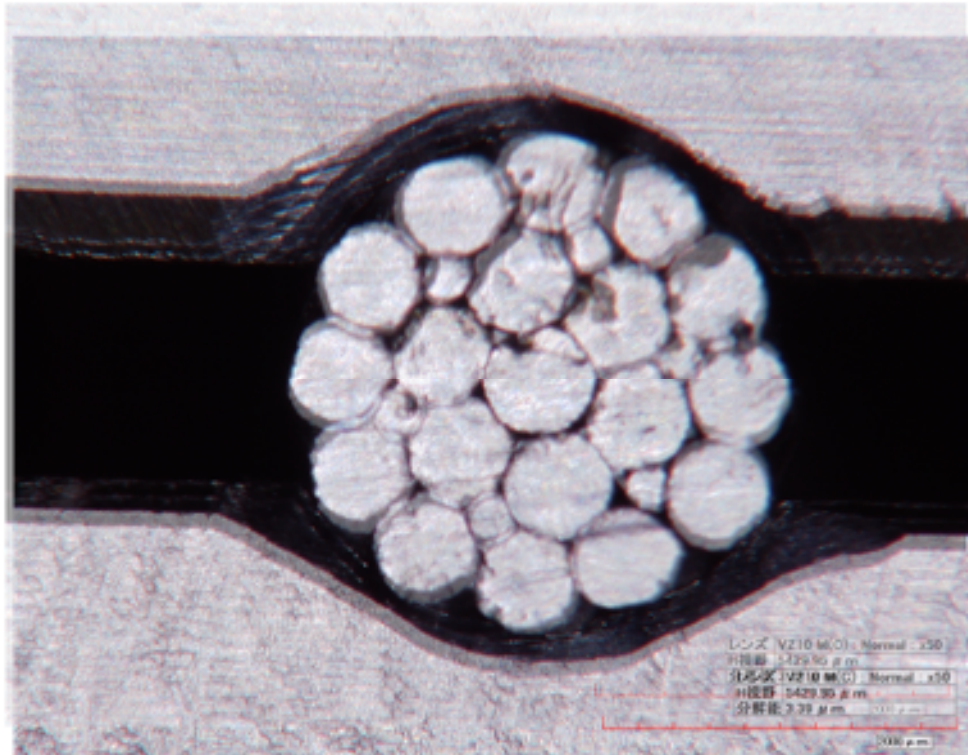


図 2.16 F1(25)ストランド断面画像差分

2.5.4 両ストランドの比較

両ストランドについて比較する。それぞれのストランドにおいて、各試験でストランドの挙動がほぼ一致したため、代表して荷重速度 700N/min の 4 回目のデータを取り出したものを図 2.17 に示す。変位が 0mm と-0.05mm での荷重差を各ストランド間で比較すると、S(19)ストランドが 923N、Fi(25)ストランドが 1070N となり、Fi(25)の方が 15%程度剛性が大きいことがわかる。

ストランドの材料である素線の材料特性は等しいので、この違いはストランドの構造によるものである。表 2.1 に示した通りストランドの充填率は Fi(25)ストランドの方が 1.8%高く素線がより詰まっているため、S(19)に比べ同じ荷重に対して変位が少なくなった、つまり剛性が大きくなったと考えられる。

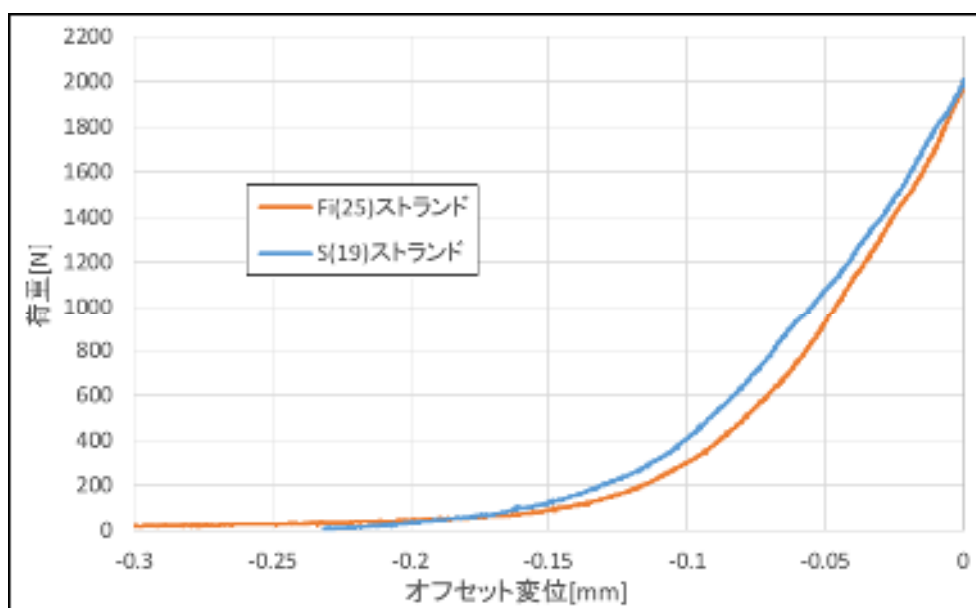


図 2.17 試験結果比較

第3章 有限要素法解析

3.1 緒言

本章では、実験に使用した 2 種類のストランドについて、詳細なモデルを作成し半径方向に圧縮する解析を行い、第 2 章の試験結果と比較する。また簡略化モデルについても作成し同様に解析および比較を行い、簡略化ストランドの材料特性値として妥当な値を算出する。

解析には Altair Engineering 社の CAE ソフトウェアプラットフォーム、Hyperworks 内の有限要素法解析ソフトウェア RADIOSS[18]を使用した。本解析は接触による非線形性が非常に強く、陰解法では計算が収束しないことが予想されるため、準静的陽解法を用いた。

3.2 ストランド詳細モデルの解析

S(19)ストランドおよび Fi(25)ストランドのそれぞれについて詳細モデルを作成し、真直な状態のストランドに対して半径方向圧縮解析を行った。

3.2.1 解析モデル

それぞれのストランドの解析モデルを図 3.1, 図 3.2 に示す。また各モデルの解析規模について表 3.1, 表 3.2 に示す。実験と条件を近づけるため、R1.4 の 3 分の 1 円の溝を持つ長さ 50mm の治具を想定したモデルに 51mm 分のストランドを挟み込んでいく。治具間の距離は溝の中心同士の距離が Fi(25)の場合 2.75mm, S(19)の場合 2.76mm となるようにストランドに対して対称に配置した。

ストランドのモデルについては寺田と同様の手法でストランドの描く螺旋の座標を解析的に導出し、求めた 3 次元スプライン曲線に沿って Dassault Systèmes 社製の 3 次元 CAD 設計ソフトウェア SolidWorks を用いて素線断面の円をスケッチする方法で CAD 形状を作成した。ストランドの形状パラメータを表 3.3 に示す。素線径については表 2.1 に掲載した測定データをそのままパラメータとした。

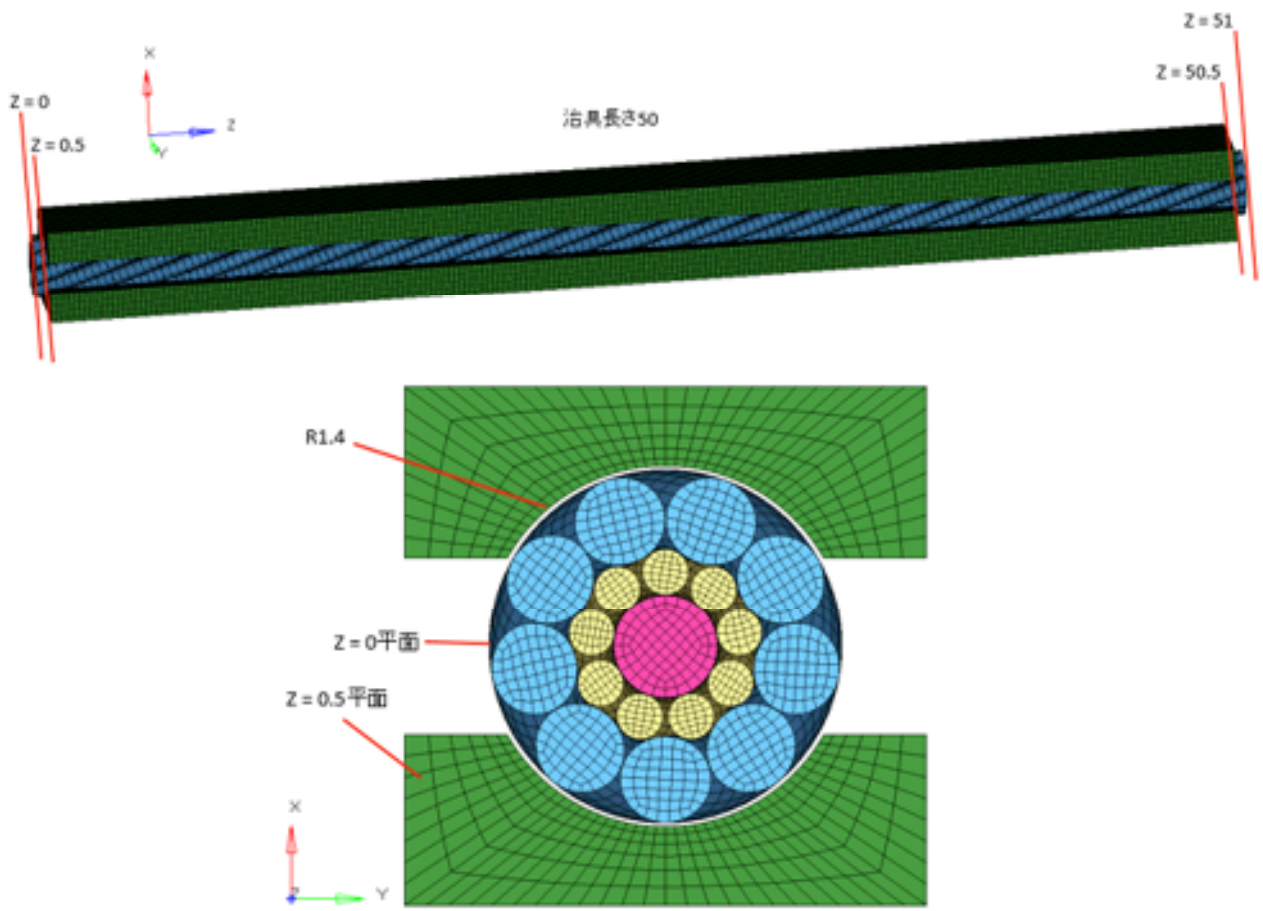


図 3.1 S(19)ストランド詳細モデル

表 3.1 S(19)ストランド詳細解析モデル解析規模

	節点数	要素数
モデル全体	319691	260420
ストランド部	175617	140420

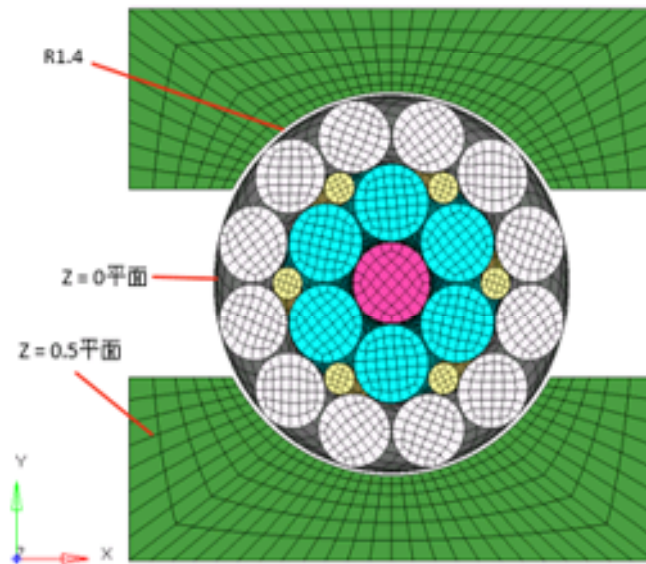
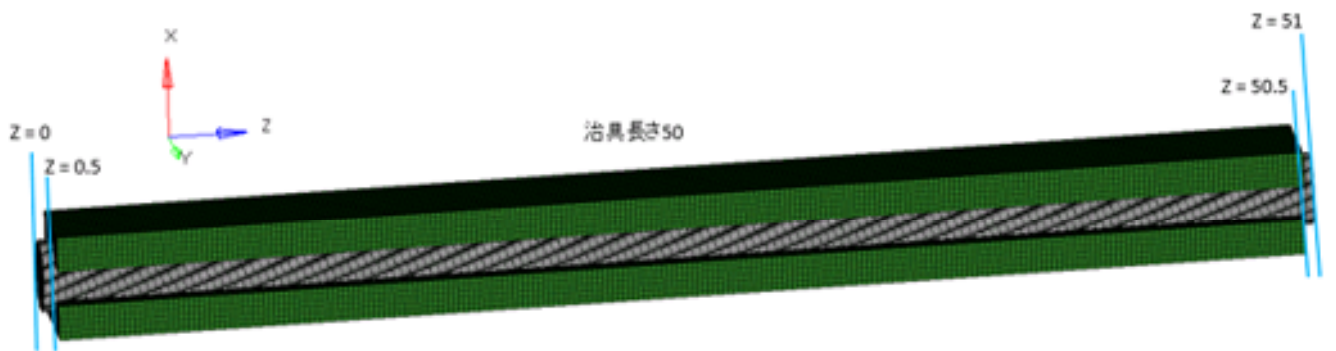


図 3.2 Fi(25)ストランド詳細モデル

表 3.2 Fi(25)ストランド詳細解析モデル解析規模

	節点数	要素数
モデル全体	346538	279630
ストランド部	202464	159630

表 3.3 ストランドの形状パラメータ

	S(19)ストランド			Fi(25)ストランド		
	本数	ストランド中心からの距離[mm]	素線径 [mm]	本数	ストランド中心からの距離[mm]	素線径 [mm]
中心素線	1	0	0.8	1	0	0.59
2層目	9	0.575	0.35	6	0.58	0.56
3層目	9	1.02	0.66	6	0.792	0.23
4層目	—	—	—	12	1.09	0.52

3.2.2 解析条件

本モデルの解析条件や素線の材料特性値について表 3.4 に示す。素線のヤング率については東京製綱で行われた素線引張試験のデータを用いた。解析には前述の通り RADIOSS を用い、陽解法で計算を行った。

本解析では素線に塑性を導入している。塑性ひずみに対応する応力は以下の式で表される。

$$\sigma = Y + C(\epsilon_p)^n$$

ϵ_p : 塑性ひずみ Y, C, n : パラメータ

今回は素線引張試験で得られた引張応力が 1600MPa であったことから $Y = 1500$, 線形硬化塑性体と仮定して $n = 1$, $C = 200$ とした。

また、準静的な解析であることから計算時間短縮のためマススケーリング法を用い、密度は実際の素線に比べて 100 倍大きい値を入力している。これは数値解析においてステップ当たりの時間増分がある値以下でなければならないというクーラン条件に基づいている。以下のクーラン条件式によれば解析の時間増分には要素のエッジ長さ、弾性率、密度が関わるが、材料の質量が影響しない準静的な解析では密度を実際の値から変化させても解析結果に影響しない。よって密度を大きくすることで解析の精度を保ちつつ計算時間を短縮することができる。

$$\Delta t \leq L_{min} \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$

Δt : 解析のステップ当たりの時間増分 E : 要素の弾性率

L_{min} : 要素の最小エッジ長さ ρ : 要素の密度

表 3.4 詳細モデル解析 解析条件

解析ソフト	HyperWorks RADIOSS 準静的陽解法
要素	ソリッド要素
素線材料特性値	密度： 8.0×10^{-7} [t/mm ³] ヤング率：196.0 [GPa] ポアソン比：0.3
素線の塑性域での 応力-ひずみ関係	$\sigma = 1500 + 200\varepsilon_p$ [MPa]
治具材料特性値 (SS400)	密度： 7.8×10^{-7} [t/mm ³] ヤング率：206.0 [GPa] ポアソン比：0.3
摩擦係数	0.1
接触アルゴリズム	ペナルティ法
解析時間	0.01 秒

3.2.3 ペナルティ法

前述の通り，接触アルゴリズムにはペナルティ法を用いている。

ペナルティ法にはマスター及びスレーブという考え方が用いられる。接触する2要素のうち片方をマスター，もう片方をスレーブとし，スレーブに属する点要素がマスターの面要素（ここではソリッド要素の表面）と接触した場合，マスターとスレーブの間に弾性バネが追加されマスターとスレーブが繋がれる。これによって2要素間に反力が発生し，スレーブの節点はマスターの面から遠ざかることになる。接触がなくなると弾性バネは除去され通常の状態に戻る。

節点と面が接触しているかどうかの判定にはギャップ距離を用いる。2要素間の距離が設定したギャップ距離以下になると接触しているとみなし，反力によってギャップ距離以上に離れると接触が終わったとみなす。

3.2.4 境界条件

ストランドの片方の端面 ($z=0$) 内にある全ての点の z 方向の変位を固定する。治具についてはストランドの固定した面と同じ側にある片方の端面 ($z=0.5$) で z 方向の変位を固定し，そのうち $y=0$ を満たす点について治具の上下から1点ずつ選び， y および z 方向の並進と全方向の回転を固定した。

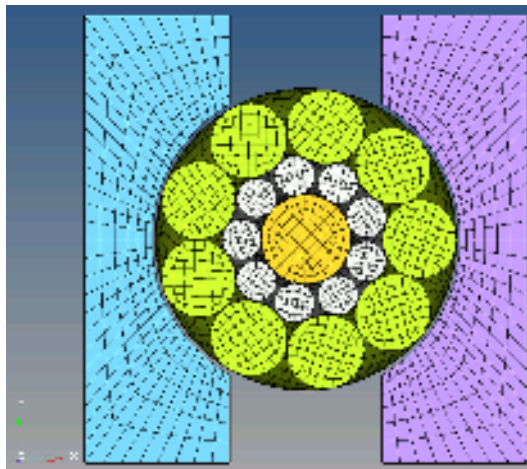
3.2.5 荷重条件

上下の治具の外側の点全てにそれぞれ逆方向の x 方向強制変位を速度 10mm/s で与え，ストランドを圧縮した。解析開始時においては治具の溝の中心は 2.75mm から 2.76mm 離れているので， 0.01 秒間の解析でストランドは 0.14mm から 0.15mm 圧縮されることになる。

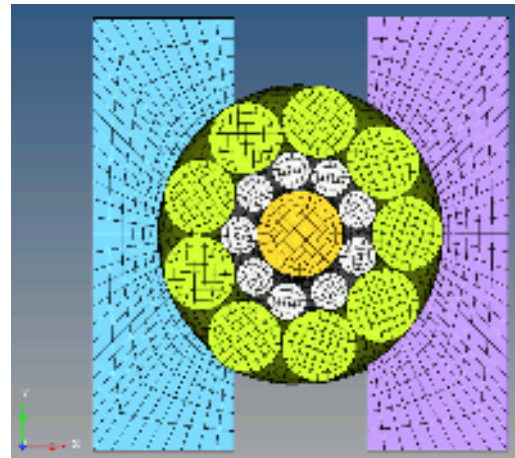
3.2.6 解析中の様子と解析結果

解析中のストランドの様子を図 3.3 から図 3.8 に示す。

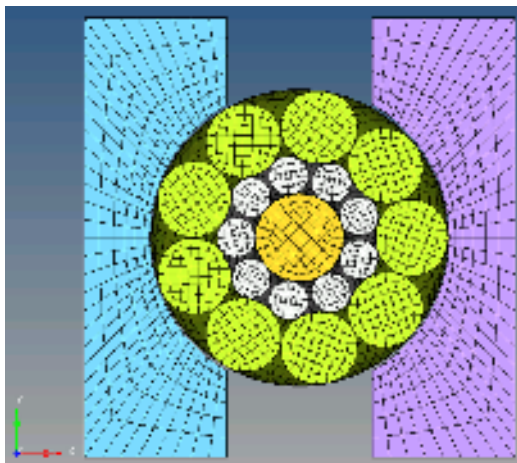
ストランドが半径方向に圧縮されると同時に軸方向に伸びているのがわかる。また、半径方向の様子を見ると治具の隙間に素線がはみ出ようとしている。この傾向は **S(19)**の方が顕著であった。ストランドの回転については **Fi(25)**ではストランドが締まる方向にわずかに回転するのを確認できたが、**S(19)**では回転と言えるほどの移動は確認できなかった。



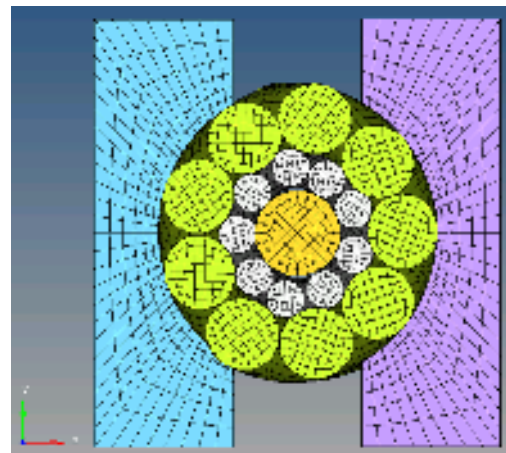
(a) 解析時間 0 秒



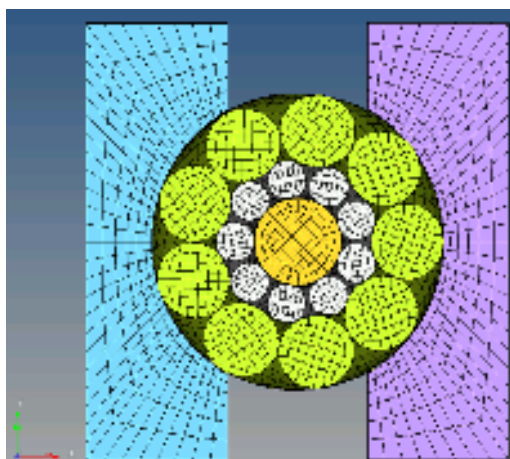
(d) 解析時間 0.006 秒



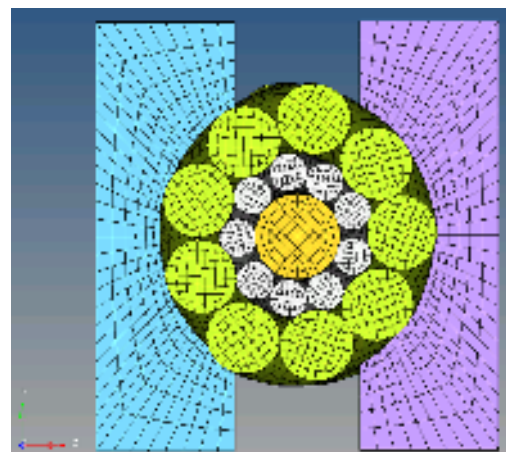
(b) 解析時間 0.002 秒



(e) 解析時間 0.008 秒

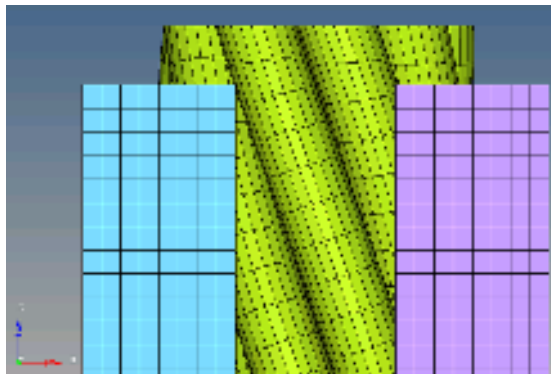


(c) 解析時間 0.004 秒

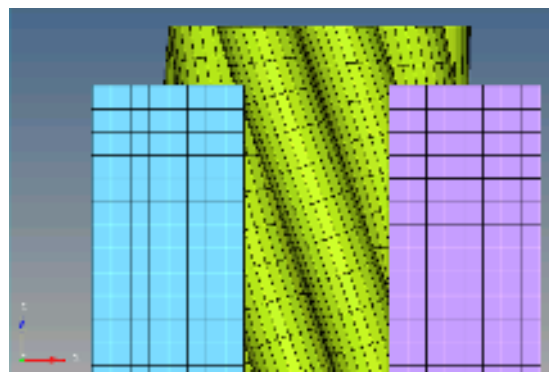


(f) 解析時間 0.01 秒

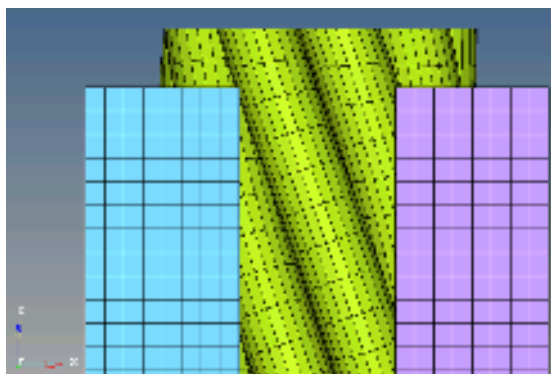
図 3.3 S(19)ストランド詳細解析 半径方向の様子



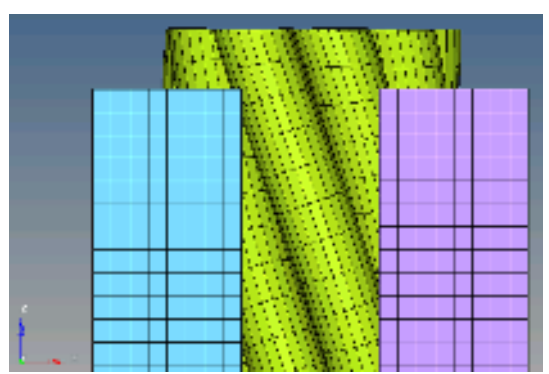
(a) 解析時間 0 秒



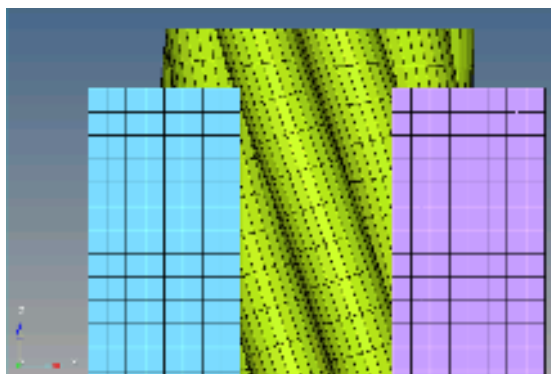
(d) 解析時間 0.006 秒



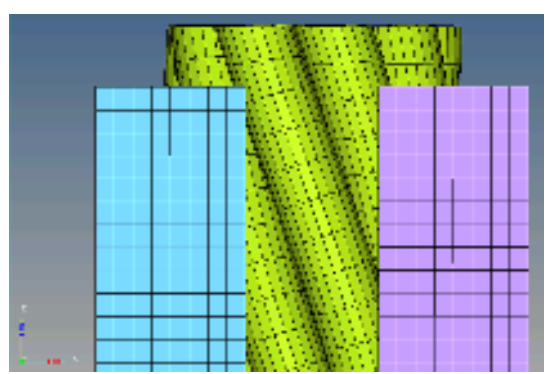
(b) 解析時間 0.002 秒



(e) 解析時間 0.008 秒

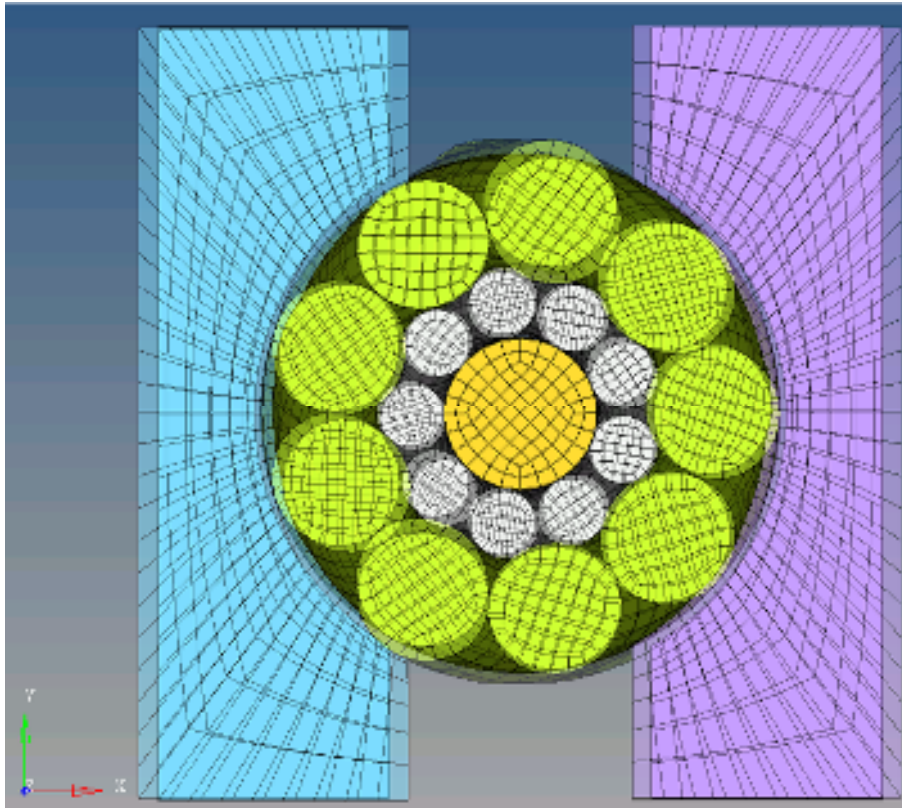


(c) 解析時間 0.004 秒

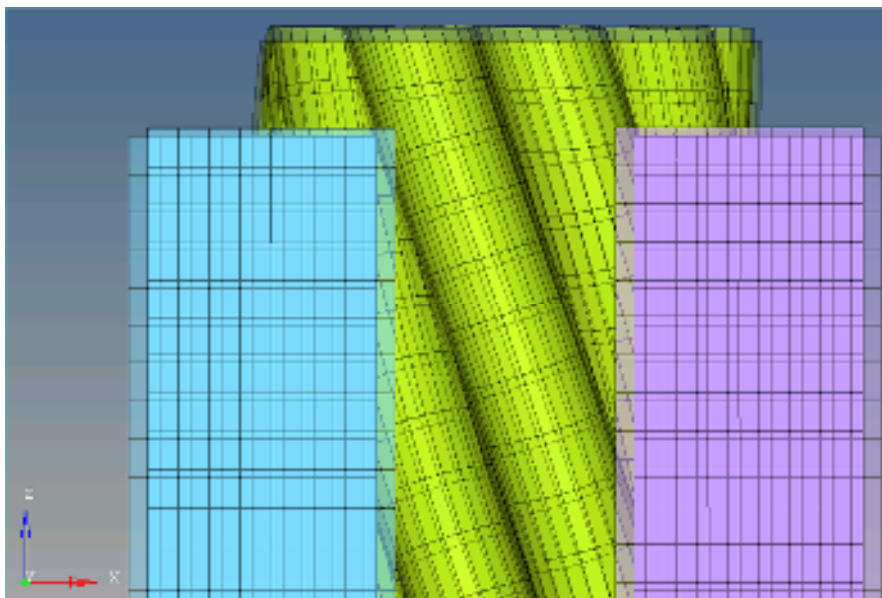


(f) 解析時間 0.01 秒

図 3.4 S(19)ストランド詳細解析 軸方向の様子

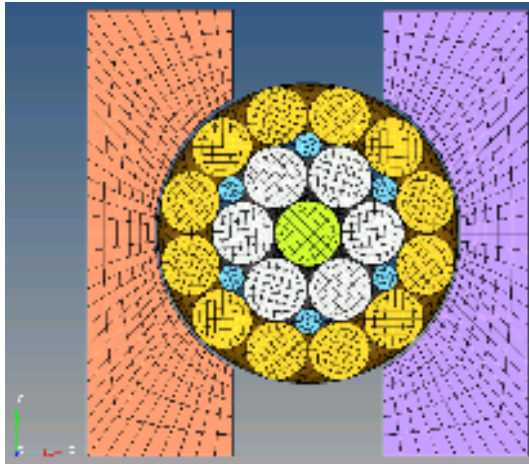


(a) 半径方向

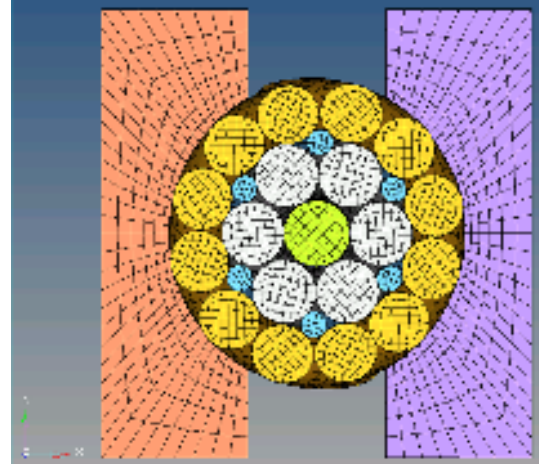


(b) 軸方向

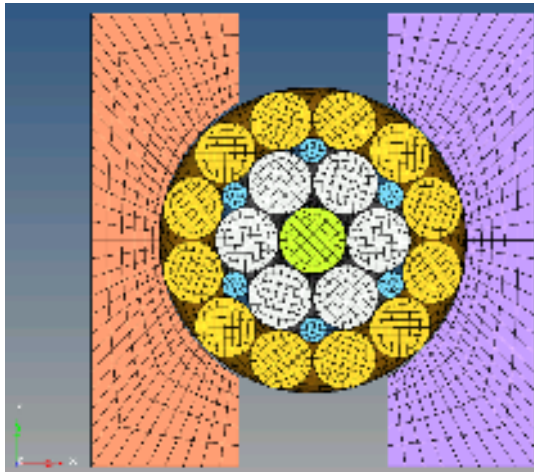
図 3.5 S(19)ストランド詳細解析 解析前後の差分



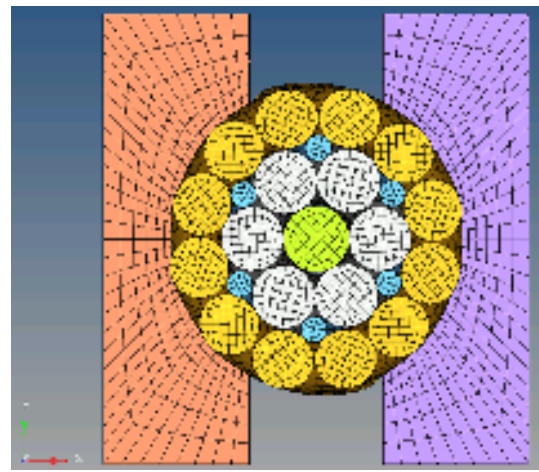
(a) 解析時間 0 秒



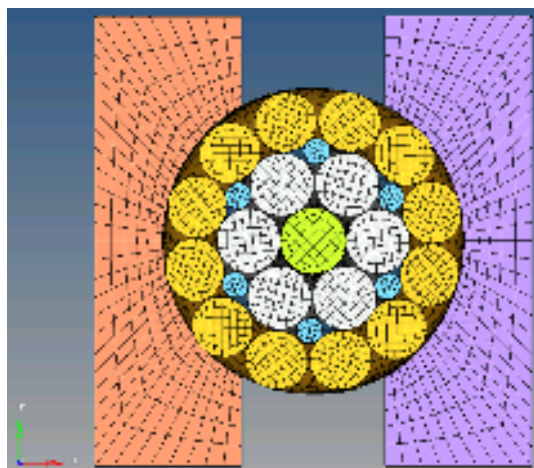
(d) 解析時間 0.006 秒



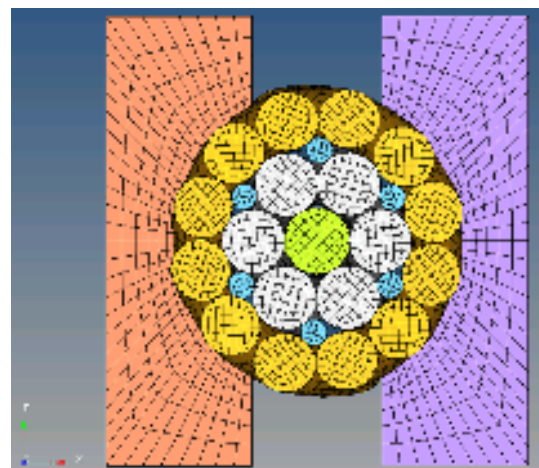
(b) 解析時間 0.002 秒



(e) 解析時間 0.008 秒

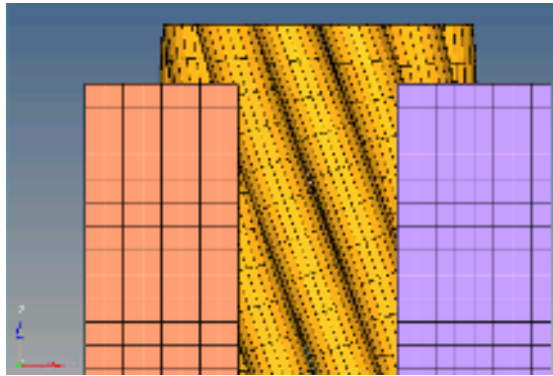


(c) 解析時間 0.004 秒

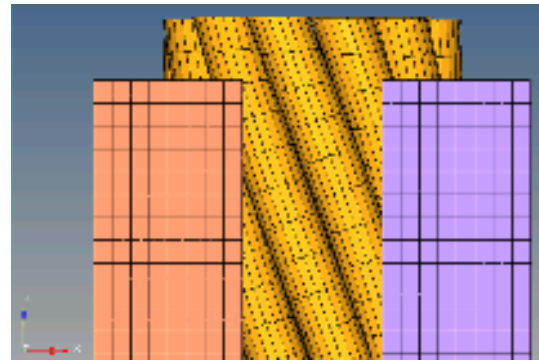


(f) 解析時間 0.01 秒

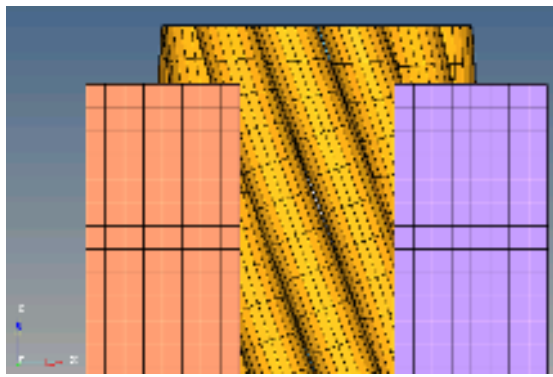
図 3.6 Fi(25)ストランド詳細解析 半径方向の様子



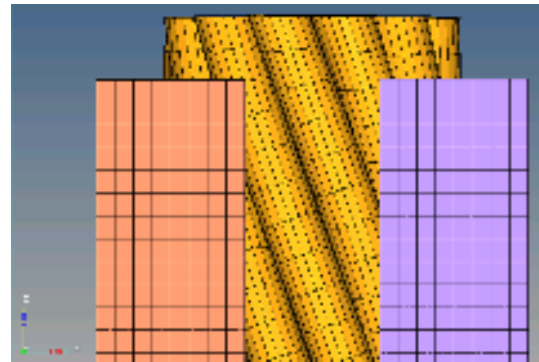
(a) 解析時間 0 秒



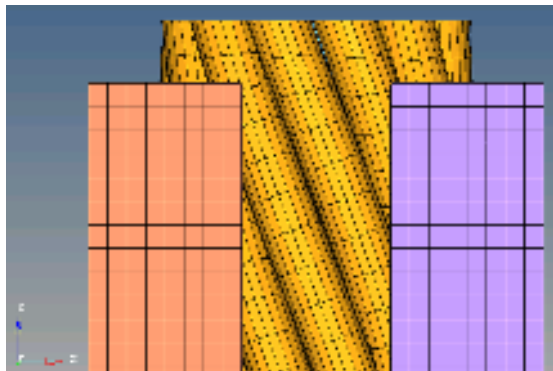
(d) 解析時間 0.006 秒



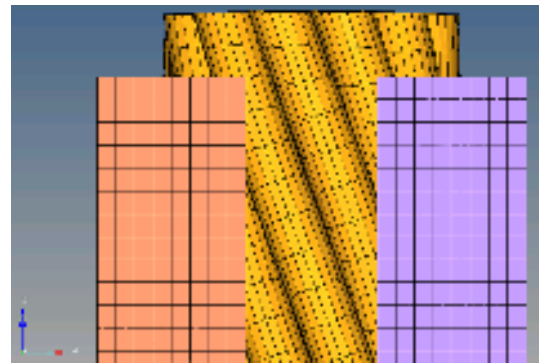
(b) 解析時間 0.002 秒



(e) 解析時間 0.008 秒

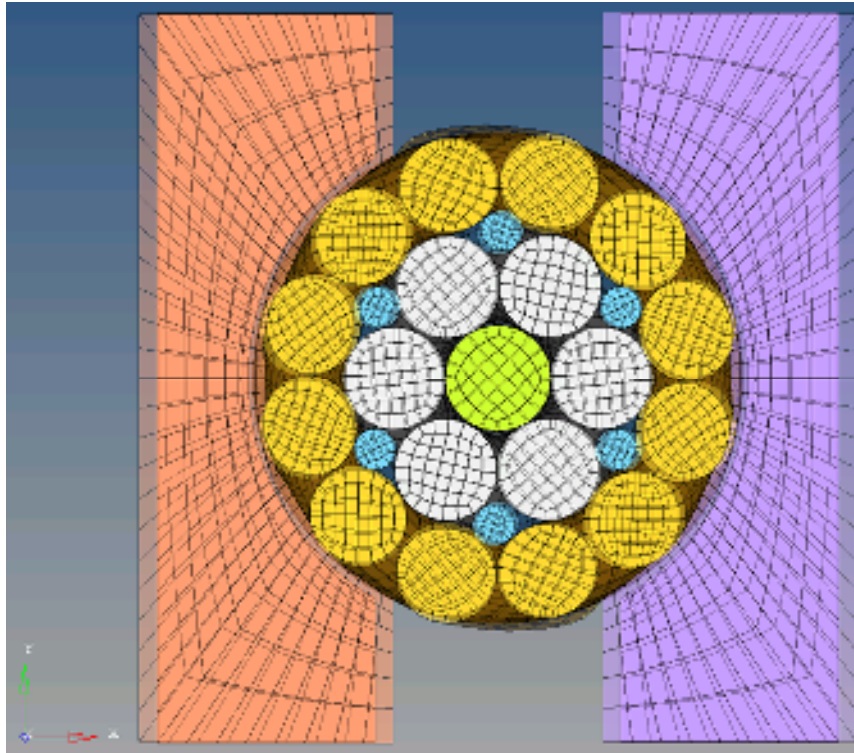


(c) 解析時間 0.004 秒

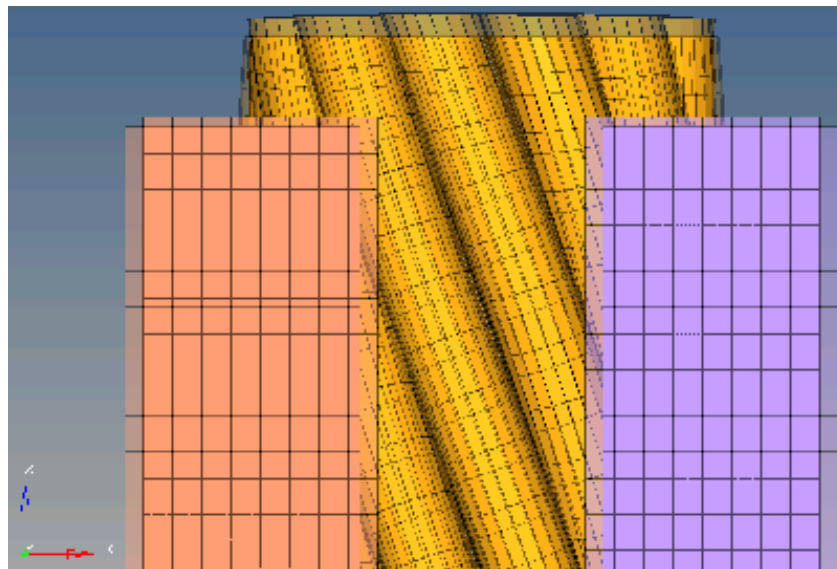


(f) 解析時間 0.01 秒

図 3.7 Fi(25)ストランド詳細解析 軸方向の様子



(a) 半径方向



(b) 軸方向

図 3.8 Fi(25)ストランド詳細解析 解析前後の差分

この解析の荷重と変位の関係を図 3.9 に示す。荷重は片側の治具にかかる y 方向の総荷重であり、変位は治具の溝の中心同士の距離が 2.7mm となった瞬間を 0 とした。Fi(25)の方が S(19)より変位に対する荷重の増加が大きい、つまり剛性が大きくなっており、試験結果と一致する。ただし、解析結果は試験と比較してストランドの剛性がおよそ 10 倍になっている。

また、試験と同様に荷重 2000N 時点での変位を 0 とオフセットした場合の試験結果との比較を図 3.10 に示す。この場合でも S(19)、Fi(25)ともストランドの剛性は試験に比べて 5 から 10 倍になっていることがわかる。この大きな差の原因については 3.4 項で考察する。

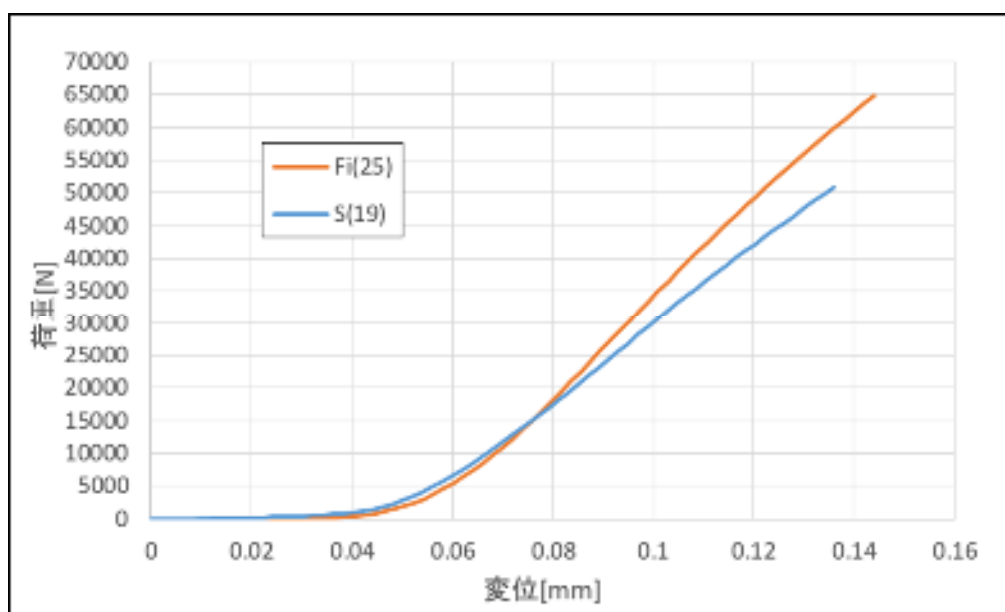


図 3.9 詳細ストランドモデル解析結果

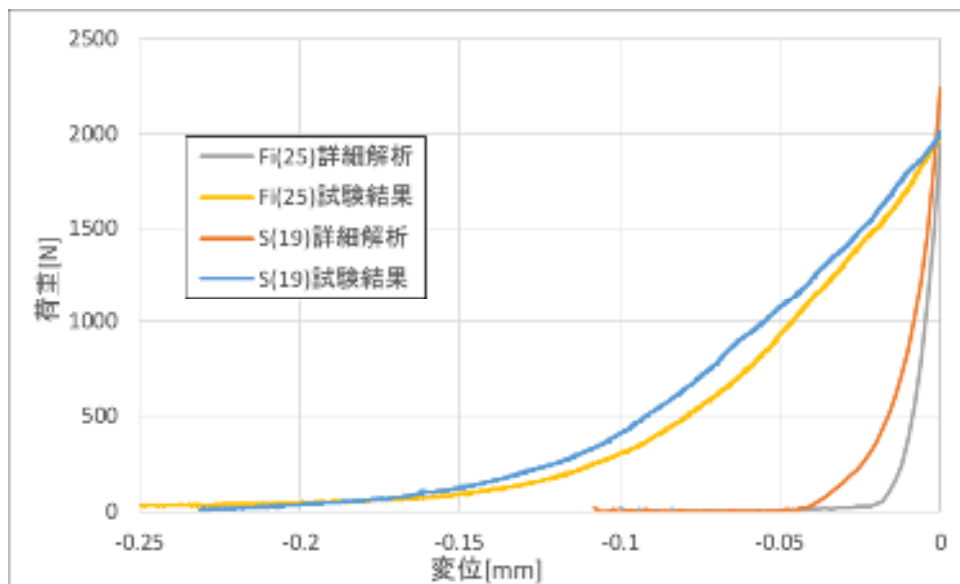


図 3.10 スtrand詳細解析 試験結果との比較

3.3 簡略化ストランドモデルの解析

ストランドを均質とみなすことによって簡略化したモデルを半径方向に圧縮させる解析を行い、試験結果と比較して簡略化モデルの半径方向ヤング率をフィッティングする。

3.3.1 解析モデル

S(19), Fi(25)を同じ形のモデルで簡略化する。解析モデルを図 3.11 に示し、解析条件を表 3.5 に示す。均質化したモデルにおいては荷重と変位がストランドの中心を挟んだ上下側で対称性を持ち、さらに軸方向に均一であると考え、直径 2.7mm, 厚さ 1mm の円柱の 4 分の 1 としてモデル化した。

今回は治具モデルを用いず荷重を直接ストランドモデルにかけて解析を行うため、接触は不要である。またこの解析は半径方向の荷重と変位の関係を確認するための解析のため、簡略化ストランドは等方性とし一般的な等方性金属材料を参考にポアソン比を 0.3 とした。密度については素線密度に表の充填率をかけたものを、と同じく 100 倍して求めた。解析はヤング率を 100MPa 刻みで 300 から 1000MPa まで 8 通りに分けて行った。

3.3.2 境界条件

モデルの端にあり、荷重がかかる方向と平行な向きの面 ($x=0$ 平面) 内にある全ての点について x 方向変位と全方向回転を固定し、同じくモデルの端にあり、荷重がかかる方向と垂直な向きの面 ($y=0$ 平面) 内にある全ての点について y 方向変位と全方向回転を固定した。また、円弧上の x 座標が等しい各点について、解析中 y 方向の変位が等しくなるように拘束をかけた。

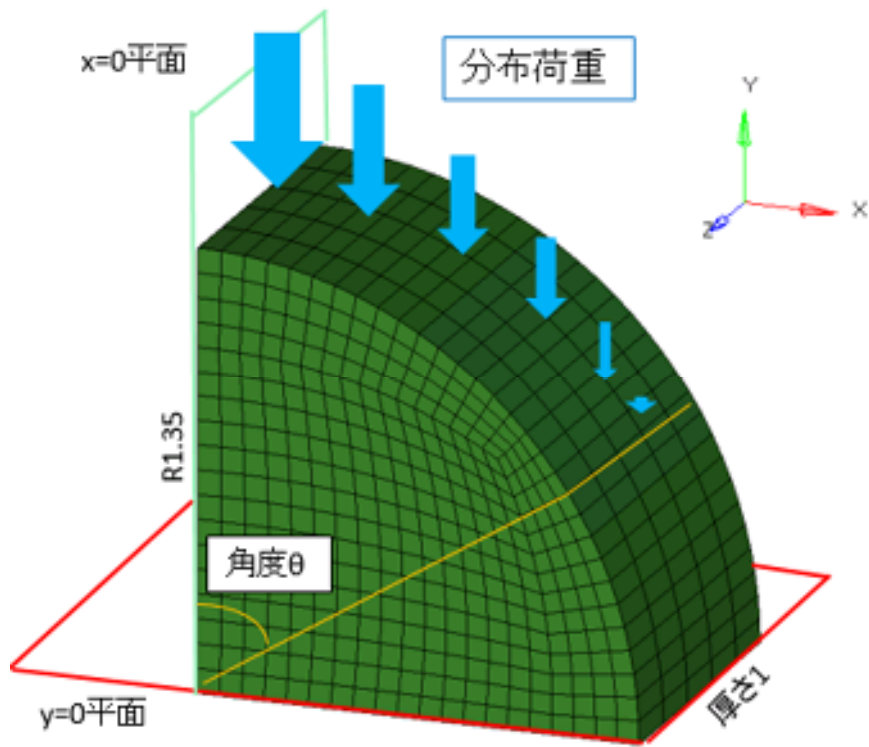


図 3.11 簡略化ストランド解析モデル

表 3.5 簡略化モデル解析条件

解析ソフト	HyperWorks RADIOSS 準静的陽解法
要素	ソリッド要素
簡略化ストランド 材料特性値	密度： (S19) 6.21×10^{-7} [t/mm ³] (Fi25) 6.36×10^{-7} [t/mm ³] ヤング率：300～1000[MPa] ポアソン比：0.3

3.3.3 荷重条件

この解析では治具モデルを使用せず、ストランドモデルの円弧上の点に直接 y 方向荷重をかける。各点での荷重は均一でないため、分布荷重のかけ方を決定する必要がある。

治具の溝は上の図に示すように 3 分の 1 円なので、治具とストランドの接触点で中心面から最も離れた点は $\theta=60^\circ$ の点である。そのため治具からストランドにかかる応力として、 $\theta=0^\circ$ で P、 $\theta=60^\circ$ で 0 となるよう線形な分布応力を考える。すなわち、

$$\text{応力 } P_0(\theta) = \left(1 - \frac{3}{\pi}\theta\right)P$$

この応力の垂直方向成分を円弧に沿って $\theta=0$ から $\theta=\pi/3$ まで線積分すると、

$$\int_0^{\pi/3} P_0 \cos \theta \, d\theta = \frac{3}{2\pi}P$$

モデルがストランドの上側半分だけであることと厚さを考慮すると、総荷重 F と分布応力 P の関係は以下の式で表される。

$$F = \frac{3rPt}{\pi}$$

r : 円弧の半径 t : 厚さ

r=1.35, t=50 の条件下で総荷重 F=2000 の時、 $P=31.03[\text{N}/\text{mm}^2]$ となる。これから

各 θ における分布荷重の y 方向成分 $P\left(1 - \frac{3}{\pi}\theta\right)\cos\theta$ が求まり、さらにこれに各 θ の点を含む要素の面積をかけることで分布荷重を算出した。ただし $\theta=0$ の点は今回モデルにおいて省略したもう片側の要素にも含まれているため、求めた荷重を 0.5 倍して入力した。

また、解析においては時間に対して線形に荷重を増加させ、0.01 秒間の解析で上で求めた分布荷重に到達するようにした。

3.3.4 オーダーエスティメーション

解析を行う前に結果の概算を行う。半径 1.35mm の 4 分の 1 円のうち、荷重がかかっている表面を 1mm×1mm の正方形に近似し高さも 1mm と近似すると、この表面全体に 20N の荷重がかかった時の変位は以下の式で見積もれる。

$$\frac{\text{荷重 } 20 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]}{\text{面積 } 1} = \text{ヤング率 } E[\text{MPa}] \times \frac{\text{変位 } \delta [\text{mm}]}{\text{基準長さ } 1[\text{mm}]}$$

すなわち、荷重を変位で除した値はヤング率におよそ等しくなることが推測できる。これを元のストランドの大きさに拡張すると、解析モデルに比べて荷重が 100 倍、変位が 2 倍となるので、荷重を変位で除した値はヤング率の 50 倍程度になると推測できる。

3.3.5 解析結果

S(19)と Fi(25)ストランド間でのモデルの違いは密度のみであるので、両者での簡略化ストランドモデルの解析結果は等しくなった。また、荷重は線形に変化しているので、荷重—変位曲線は直線となる。この直線の傾きを y 軸、ヤング率を x 軸に取ったグラフを図 3.12 に示す。元の大きさのストランドに合わせるため、グラフの y 軸の値は解析結果から得られた値を 50 倍している。

各ヤング率において荷重を変位で除した値がヤング率の 30 倍程度となり、推測したオーダーと一致している。この結果から各ヤング率において 2000N の荷重をストランド半径方向にかけた場合の変位を推測できる。

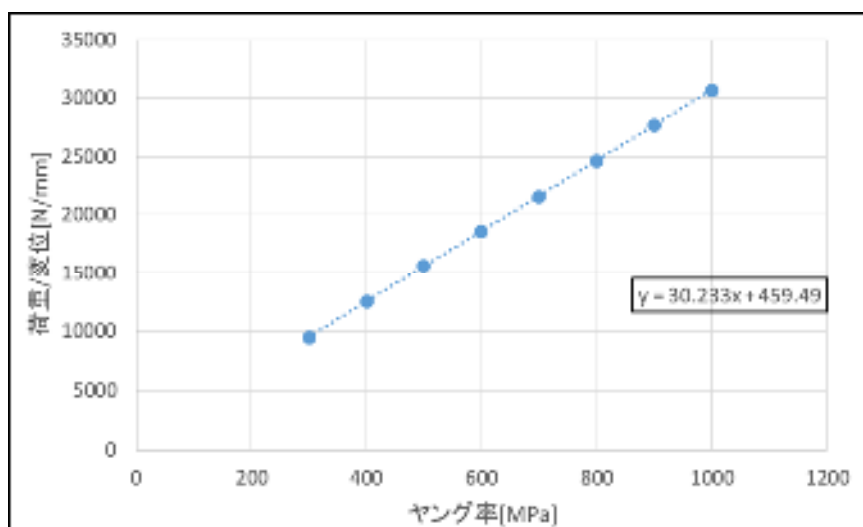


図 3.12 簡略化ストランドモデル解析結果

以下の表 3.6 は図 3.9 の近似直線の式に各ヤング率を代入し、ストランドの変位を推測したものである。

表 3.6 ストランド変位の推測

ヤング率	荷重/変位[N/mm]	荷重 1000N 時の 変位[mm]	荷重 2000N 時の 変位[mm]
10[GPa]	302×10^3	0.0033	0.0066
50[GPa]	151×10^4	0.0007	0.0013
100[GPa]	302×10^4	0.00033	0.00066
200[GPa]	605×10^4	0.00017	0.00033

ストランドを構成する素線のヤング率は 195GPa であり、ストランドは隙間があるため、ストランドの有効ヤング率は素線よりは小さいが素線の 0.1 倍よりは大きい程度と推測できる。

前項の詳細解析の結果をこの表に当てはめてストランドの半径方向有効ヤング率を推測する。図 3.9 での変位 0.1mm における荷重を図 3.9 の近似直線の式に代入し半径方向有効ヤング率を計算すると、S(19)ストランドが 99GPa、Fi(25)が 115GPa となり、上の推測に合致する。

一方上の推測に従うと荷重 2000N 時のストランドの変位は大きく見積もっても 0.002mm 以下となるはずだが、ストランド圧縮試験では図 2.10 や図 2.14 の通り荷重 1000N で 0.05mm の変位が起き、推測よりも 10 倍以上大きな値となった。

3.4 試験結果と解析結果の違いの考察

試験結果と解析結果で得られたストランドの半径方向の剛性には、10 倍以上の差があった。解析結果が推測したオーダーと一致していることから、この結果の違いは試験と解析で大きく条件が違ったために起きたと言える。

その条件として、試験側の実物のストランドにはグリスが塗られていたことが挙げられる。グリスが塗られていたために素線間の摩擦力が低くなり、同じ荷重で変位がより大きくなる。また荷重を与えて変位が発生した際、それらが素線の圧縮が起こるより前で、素線間に塗られていたグリスが染み出すことによる変位であったために、荷重に対する推測される変位よりも実際の変位が大きく上回ったのだと考えられる。別の原因として、治具とストランドの設置方法に問題があり、一見うまくいっていた試験が実は正しく行われていなかった可能性もある。この違いを解決するには、変位の測定方法を見直しより精度の高い試験を行うとともに、解析に使用するモデルの条件をより試験の条件に近づけることが必要である。

第4章 結論

4.1 結論

本研究では、エレベータ用として広く使用されている 2 種類のワイヤロープを対象として、それらを半径方向に圧縮する試験を行い、ストランドの詳細モデルを半径方向に圧縮する有限要素法解析の結果と比較した。また、ストランドの簡略化モデルを圧縮する解析を行い試験と比較した。

ストランド圧縮試験では、負荷時と除荷時でストランドの挙動が異なること、荷重に対する変位が非線形に増加することを求めた。また、同半径の円に対する充填率が S(19) ストランドに比べて 1.8% 高い Fi(25) ストランドの方が、素線が詰まっており 15% 程度剛性が大きいことがわかった。詳細モデルの解析では、Fi(25) が S(19) に比べて硬いことを解析でも確かめられたが、荷重と変位の関係に試験結果と 10 倍ほどの差が出た。簡略化モデルの解析においては、ストランドを圧縮した際の荷重を変位で除した値がストランドの有効ヤング率の 30 倍程度となることを求めた。さらにオーダーエスティメーションにより詳細解析と試験の結果の違いを比較し、詳細解析の結果の方がより正確で試験には正確性が欠けていたことがわかった。その原因として、グリスにより素線間の摩擦力が減少していたことや、変位が素線の圧縮量を表せていなかった点などが挙げられる。

4.2 今後の展望

今回行った試験にはその手法に問題があったことが推察される。さらなる試験を行うことで試験結果が大きく違った原因を探り、解決策を見出す必要がある。同時に解析モデルも試験に近い条件となるように改良し、試験の再現性を高める必要がある。

また、試験では変位と荷重の関係が非線形的な挙動を示しており、線形弾性範囲における応力とひずみの関係を表したヤング率ではストランドの半径方向の挙動を示すのに不十分である。応力とひずみの関係を自身で定義するモデルとしては例えば超弾性体があるが、これも負荷時と除荷時で違う曲線をたどるストランドでは適用できない。再現性を高めるためには、負荷時と除荷時、非線形など、様々な条件を設定できる材料モデルを使用する必要がある。

参考文献

- [1] 昇降機等事故調査部会, 平和台駅エレベーター主索破断事故調査報告書, <http://www.mlit.go.jp/common/000188107.pdf>, 2012.
- [2] 昇降機等事故調査部会, 東京都内エレベーター事故調査報告書, <http://www.mlit.go.jp/common/001058725.pdf>, 2014.
- [3] G.A. Costello, “Theory of Wire Rope”, Mechanical Engineering Series, Springer NewYork, 1997.
- [4] 小野 進, “工学の数学 ワイヤロープの微分幾何学”, アグネ技術センター, 2005.
- [5] Xiao-Yu Wang, Xiang-Bao Meng, Ji-Xin Wang, You-Hong Sun, Ke Gao, “Mathematical modeling and geometric analysis for wire rope strands”, Applied Mathematical Modelling, Vol.39, No.4, pp.1019-1032, 2015.
- [6] Marco Giglio, 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.
- [7] M. Giglio, 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.
- [8] 栗田 基, 久保山 武, 岡田 章, 斉藤 公夫, 宮里 直也, “構造用ケーブルの降伏後の材料特性の把握と評価について”, 日本建築学会 学術講演梗概集 C-1 分冊, pp.667-670, 2011.
- [9] 鈴木 恵太, 中村 俊一, Roger Q. HAIGHT, “77 年間併用された吊橋ハンガーロープの引張強度および腐食調査”, 土木学会論文集, No.728, pp.67-77, 2003.
- [10] WG Jiang, MS Yao, 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.
- [11] WG Jiang, JL Henshall, 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Gordana Kastratović, Nenad Vidanović, Vukman Bakić, Boško Rašuo, “On finite

- element analysis of sling wire rope subjected to axial loading”, *Ocean Engineering*, Vol.88, pp.480–487, 2014.
- [15] Eva Stanova, Gabriel Fedorko, Stanislav Kmet, Viero Slav Molnar, Michal Fabian, “Finite element analysis of spiral strands with different shapes subjected to axial loads”, *Advances in Engineering Software*, Vol.83, pp.45-58, 2015.
- [16] 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”, 東京大学工学部機械工学科, 修士論文, 2015.
- [17] “ワイヤロープ No.20”, 東京製綱, 2013.
- [18] Altair Engineering, Inc. *Radioss 12.0 reference guide*, 2013.

付録 A ストランド引張試験

A.1 緒言

この付録では，東京製綱で行われたストランド引張試験について概説する．

A.2 試験概要

A.2.1 試験対象

第2章と同じく，8×Fi(25)および8×S(19)のφ10mmワイヤロープに使用されているFi(25)ストランドおよびS(19)ストランドを試験対象とした．Fi(25)ストランドはストランド径2.68mm，S(19)ストランドはストランド径2.67mmである．

A.2.2 試験手順

ストランドの両端を図のように合金で止め固定する．合金間の長さは235mmである．その後100kNオートグラフを使用し両端に引張荷重をかけ，ストランドが破断するまで続けた．また，ストランドにクリップ式標点を100mm間隔で2ヶ所に取り付け，カメラでその間隔変化を追う方法で伸びを測定した．ゲージ長さは100mm，試験速度はFi(25)ストランドでの試験が20mm/min，S(19)ストランドでの試験が10mm/minである．

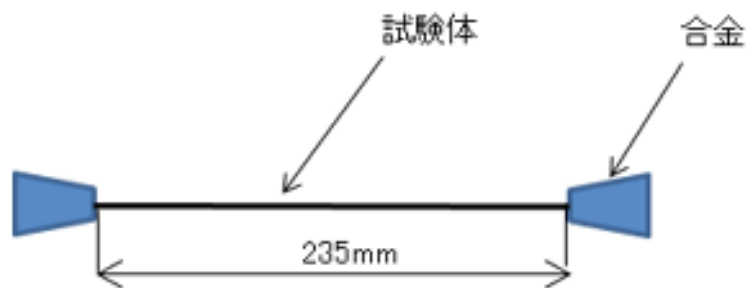
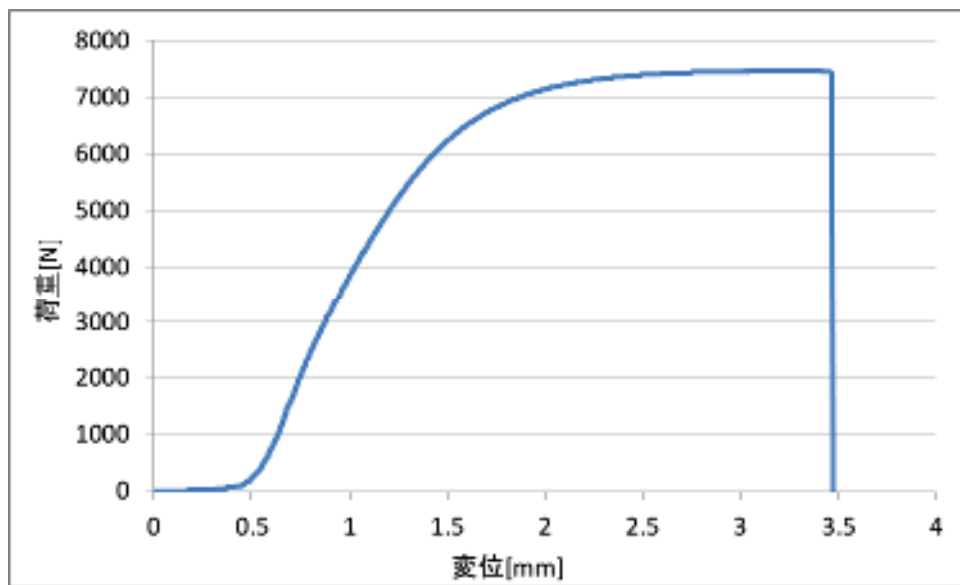


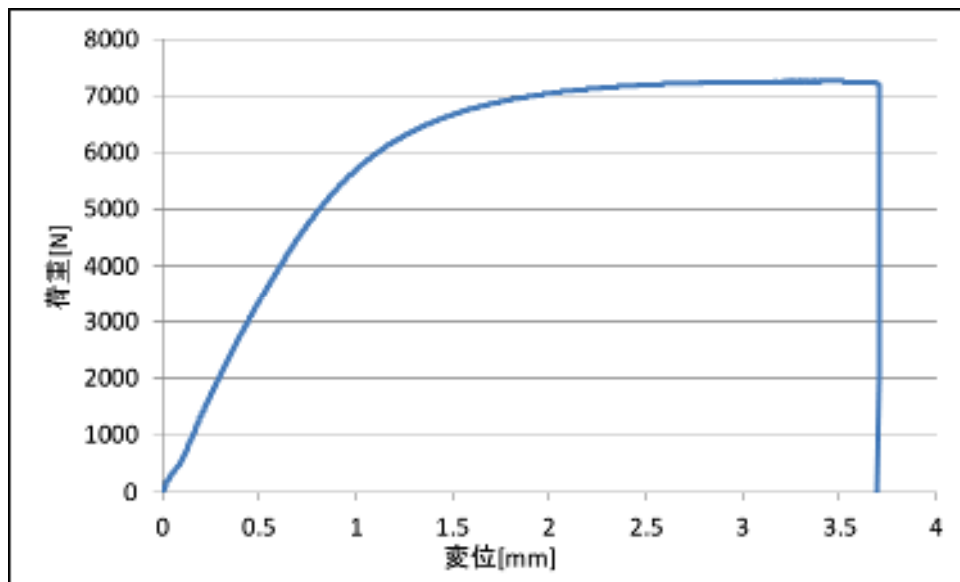
図 A.0.1 ストランド引張方法

A.3 試験結果

2 種のストランドについて，荷重—変位曲線を図 A.0.2 に示す．Fi(25)ストランドの破断荷重は 7461N で中切れ，S(19)ストランドの破断荷重は 7255N で中切れであった．



(a) Fi(25)ストランド



(b) S(19)ストランド

図 A.0.2 ストランド引張試験結果

A.4 試験結果の考察

Fi(25)ストランドにおいて載荷初期に変位が急激に上昇しているが、これはチャックのジョイントの首振りガタに起因するものだと考えられる。また、5000N 付近から非線形な挙動になるのはストランドを構成する素線が塑性変形を起こしているためと考えられる。

グラフにおける弾性変形部分の 1000N から 3000N の範囲における変位と荷重の関係から各ストランドの有効ヤング率を算出したところ、表 A.0.1 に示す通り Fi(25)ストランドが 146.8[GPa]、S(19)ストランドが 124.9[GPa]となった。破断荷重は Fi(25)ストランドの方が高く、有効ヤング率も大きい。これは表 2.1 に示すように Fi(25)ストランドの方が同じ直径の円に対する充填率が高くより素線同士が詰まっているために、素線間摩擦力が大きいからだと考えられる。

表 A.0.1 有効ヤング率計算結果

	Fi(25)ストランド	S(19)ストランド
1000N と 3000N に最も近い 点同士の荷重差[N]	1999.6	1999.8
1000N と 3000N に最も近い 点同士の変位差[mm]	0.242	0.286
ストランド直径[mm]	2.68	2.67
クリップ間距離[mm]	100	100
軸方向有効ヤング率[GPa]	146.8	124.9

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方のご指導、ご協力を賜りました。

泉教授には実験や解析に関して多くの的確なアドバイスを頂きました。心よりお礼申し上げます。

酒井教授には研究会の場で研究の方向性に関して指摘を頂きました。誠に有難うございました。

労働安全衛生総合研究所の山際様には実験に関して多大なるご支援を頂きました。実験方法に関する具体的な方策や実験器具の貸し出し、実験エラーの原因に関するアドバイスなど、数え上げるとキリがないほどに大変お世話になりました。心より感謝致します。

三菱電機株式会社の中川様、角谷様には研究所見学の機会をいただき、実験に関するヒントとなりました。またワイヤロープに関するデータを提供していただきました。ありがとうございました。

ストランドのサンプルを快く譲ってくださり、またワイヤロープに関する様々な資料を提供してくださった東京製綱株式会社の原田様、竹内様、草皆様には深く感謝申し上げます。

日頃から研究環境を整えていただいた波田野助教には、この1年間助けられ続けていました。大変感謝しています。

館さんとはワイヤロープに関する研究をこの1年間ともに行い、ソフトウェアに関する小技から研究の方針、さらに発表資料の作成に至るまで相談に乗っていただきました。大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

研究室の他の先輩方、および同期の皆とも、充実した研究室生活を送ることができました。また研究に限らず様々なアドバイスを頂きました。ありがとうございます。人の顔を覚えるのが苦手すぎてすみませんでした。

このほか、本研究活動を支えてくださったすべての皆様に深く感謝いたします。