

卒業論文

エレベータ用ワイヤロープの
径方向圧縮試験と
簡易解析手法の開発

平成 30 年 2 月 5 日 提出

指導教員 泉 聡志 教授

160227 中谷 起也

目次

第1章	序論	7
1.1	研究背景	8
1.2	先行研究	9
1.2.1	ワイヤロープの解析モデルと疲労試験	9
1.2.2	ブーミング解析	10
1.2.3	ストランド径方向圧縮試験	11
1.3	本研究の目的	12
1.4	本論文の構成	12
第2章	径方向圧縮試験	13
2.1	緒言	14
2.2	試験材料	14
2.3	試験装置	16
2.4	試験手順	19
2.5	試験結果	20
2.5.1	荷重・変位曲線	20
2.5.2	断面の変形の様子	23
第3章	有限要素法解析	26
3.1	緒言	27
3.2	ワイヤロープ簡易モデル解析	27
3.2.1	材料特性	27
3.2.2	接触の定義	29
3.2.3	解析モデル	29
3.2.4	境界条件	31
3.2.5	荷重条件	31
3.2.6	解析条件	32
3.2.7	解析結果	33
3.2.8	試験結果との比較	39
3.3	ワイヤロープ詳細モデル解析	41
3.3.1	材料特性	41
3.3.2	解析モデル	41
3.3.3	解析条件	43
3.3.4	解析結果	43
第4章	結論	47
4.1	結論	48

4.2	今後の展望	48
4.2.1	心綱のモデル改善	48
4.2.2	詳細モデルの素線形状の改善	48
	謝辞	50
	参考文献	51

図目次

図 1-1	ワイヤロープの構成[3]	8
図 1-2	簡略化ストランド	10
図 1-3	ワイヤロープ簡略化モデル	10
図 1-4	詳細ストランド	11
図 1-5	一部を詳細ストランドに置換したモデル	11
図 2-1	ワイヤロープ断面図	14
図 2-2	ロープのより方とより方向[3]	15
図 2-3	試験模式図	16
図 2-4	試験の様子	17
図 2-5	ワイヤロープ圧縮試験用の治具	17
図 2-6	治具の構造	18
図 2-7	ワイヤロープの径方向荷重・変位曲線	20
図 2-8	負荷時のサイクルごとの荷重・変位曲線	21
図 2-9	除荷時のサイクルごとの荷重・変位曲線	21
図 2-10	断面撮影の様子	23
図 2-11	径方向荷重がかかっていないときのワイヤロープ断面の様子	24
図 2-12	5kN の径方向荷重がかかったときのワイヤロープ断面の様子	24
図 2-13	9kN の径方向荷重がかかったときのワイヤロープ断面の様子	25
図 3-1	解析モデル全体図	30
図 3-2	ワイヤロープ簡易モデル CAD 形状	30
図 3-3	ワイヤロープ端面の境界条件	31
図 3-4	径方向の荷重条件	32
図 3-5	解析中のロープ断面の様子(F=2[kN])	34
図 3-6	2kN の荷重を加えたときのワイヤロープ径方向変位と時間の関係	35
図 3-7	径方向荷重と変位の関係(ワイヤロープ)	36
図 3-8	異方性モデルの荷重 8kN での断面の接触荷重コンター図	37
図 3-9	等方性モデルの荷重 8kN での断面の接触荷重コンター図	37
図 3-10	変位出力点	38
図 3-11	径方向荷重と変位の関係(ストランド)	38
図 3-12	ワイヤロープ簡易モデルの解析結果と実験結果の比較	40
図 3-13	解析モデル全体図	42
図 3-14	ワイヤロープ詳細モデル CAD 形状	42
図 3-15	解析中のロープ断面の様子(F=4[kN])	44
図 3-16	ワイヤロープ詳細モデルの解析結果と実験結果の比較	45

- 図 3-17 荷重 0kN のときの詳細モデルおよび実際のワイヤロープの断面の様子 ... 46
- 図 3-18 荷重 8kN のときの詳細モデルおよび実際のワイヤロープの断面の様子 ... 46
- 図 4-1 モデルおよび実際のワイヤロープのストランド 1 本の断面の拡大図..... 49

表目次

表 2.1	S(19)ストランドの構成.....	14
表 2.2	使用した実験装置	17
表 2.3	サイクルごとの荷重 0.5kN,9.5kN の時の変位	22
表 3.1	等方性材料として与えた材料特性値	28
表 3.2	心綱, 治具の材料特性	29
表 3.3	解析規模.....	30
表 3.4	ロープ形状のパラメータ	30
表 3.5	荷重条件の詳細	32
表 3.6	解析条件	32
表 3.7	径方向荷重と変位の関係(ワイヤロープ).....	36
表 3.8	径方向荷重と変位の関係(ストランド).....	39
表 3.9	素線の材料特性値	41
表 3.10	解析規模.....	42
表 3.11	ストランド形状のパラメータ	42
表 3.12	ロープ形状のパラメータ	43
表 3.13	解析条件	43

第1章 序論

1.1 研究背景

ワイヤロープを構成する最小単位である素線は、引き抜き加工(伸線)、熱処理、めっき加工を施されて製造されており高い引張強度を有している。この素線を数十本程度撚り合わせて作られるストランドと呼ばれる束を、さらに繊維製のロープ芯のまわりに一定のピッチで6から8本程度固く巻きつけることで、ワイヤロープは構成されている。(図 1-1)

この複雑な構造によってワイヤロープは一般的な鉄鋼製品と比べて引張強度が高く、耐衝撃性に優れていて、長尺物を得ることができる。また、柔軟性にも富んでいるという長所もあり、ワイヤロープの用途は現在クレーン、エレベータ、ケーブルカー、橋梁など多岐に渡っており、これに応じて様々な種類のロープが製造されている。

本研究ではこのうちエレベータを駆動する際に使用されているワイヤロープを対象とするが、この複雑な構造ゆえワイヤロープは内部の状況を観察することができず、明確なメンテナンス基準がないことが問題となっている。エレベータ用のワイヤロープについては、引張強度は運用時の静止荷重に対して安全率10以上という大きな値になるよう建築基準法で定められているのも、内部破断についての定量的な評価ができないでいるからである。しかしそれでも内部破断の進行によるワイヤロープの破断が原因とされる事故が、2011年東京メトロ有楽町線平和台駅のエレベータ[1]や、2013年東京タワーの大展望台・特別展望台間エレベータ[2]などで実際に発生しており死傷事故につながっている。そこでワイヤロープが損傷する際の挙動を解明し定量的な評価を行うことが必要となっている。

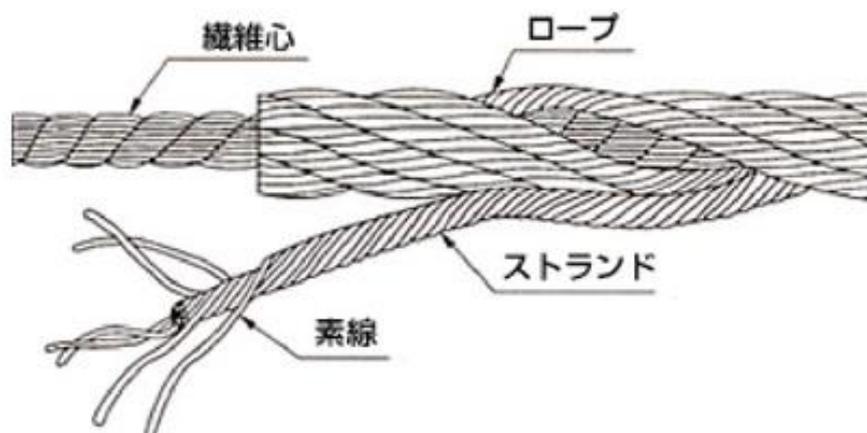


図 1-1 ワイヤロープの構成[3]

1.2 先行研究

1.2.1 ワイヤロープの解析モデルと疲労試験

ワイヤロープの寿命などの機械的特性を把握するためにこれまで様々な理論やモデルが開発されてきた。初期の研究としては、Hruskaにより引張のみを考慮して素線の曲げ剛性やねじり剛性を無視したモデルが発表された[4][5]。続いて、引張に加えて Love の曲がり梁の理論[6]を用いることによって、ワイヤロープの曲げとねじりまで考慮された理論が Knapp によって発表された[6][7]。その後 Costello らがこのモデルにポアソン比の影響による素線径の変化や、素線の変形による螺旋角の変化などの影響を考慮したモデルを作成し、「Theory of Wire Rope」を出版した[8]。これらの解析モデルは実際のワイヤロープと特性がよく一致しており、ワイヤロープの設計において目安として活用されている。しかしその一方で、ワイヤロープ破断の原因とされる接触応力や摩擦、塑性までは考慮することができないという欠点が存在している。

これらの理論、モデルが考えられていた一方で、ワイヤロープの繰り返し曲げ疲労試験や引張試験を行い、疲労寿命の推定や断線特性を解明することが試みられてきた[9][10][11][12]。しかし、疲労試験においてはワイヤロープ内部での素線破断場所や破断時刻などの過渡的な現象を観察できないことや、内部での接触応力や摩擦などの測定法が確立されていないことから、これらの疲労試験の結果を用いても、素線の断線メカニズムを解明するには不十分であった。

そこで、試験などでは直接観察することができない内部状況まで把握する手段として、シミュレーションが近年は活用されている。シミュレーションは試験では計測不能である内部の接触応力の計測や変形量の計測が可能となるだけでなく、疲労試験と比べて大幅に低コストで結果を得られ、様々な条件における解析も短時間で行うことができるというメリットもある。構造が非常に複雑で、接触や摩擦による非線形性に大きく支配されるワイヤロープの解析は困難ではあったが、近年の有限要素法の技術発展と計算機性能の向上により、ワイヤロープの有限要素法解析に関する研究が行われるようになった[13][14][15][16]。ただ、計算機性能が向上したといえども、素線 1 本 1 本をすべ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困難となるため、これまでの解析の多くは 1 本のストランドのみを対象とした解析や、荷重条件を単軸引張にするなど簡略化されたモデルに対する解析に留まっていた。素線すべてを実際のロープに忠実に再現したモデルの解析や、実際の使用環境に合わせた詳細な解析はまだ研究として進んでおらず、その手法の開発が求められていた。

1.2.2 ズーミング解析

そこで、寺田によってズーミング解析を導入したワイヤロープの有限要素法解析が行われた[17]。ズーミング解析とは、そのままのモデルで計算すると計算負荷が大きすぎるような場合に簡略化したモデルでの解析をまず行い、その結果として得られる変位値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という解析方法である。これにより、計算付加を抑えつつ一定の精度が保たれた解析を行うことができる。寺田は以下のような手順でワイヤロープのズーミング解析を行った。

1. 素線によって構成されているストランドを、一塊の素材としてモデル化して簡略化ストランド(図 1-2)を作成する。
2. 簡略化ストランドをロープ芯のまわりに 6~8 本撚り合わせたものを、ワイヤロープの簡略化モデル(図 1-3)とし、このモデルを用いてワイヤロープ全体に関する解析を行う。
3. ワイヤロープ簡略化モデルの一部のストランドを素線 1 本 1 本から構成されている詳細ストランドモデル(図 1-4)に置き換える。
4. 一部を詳細ストランドに置き換えたワイヤロープモデル(図 1-5)に 2.で行った解析で得られた変位値を強制変位として与える解析を行い、詳細部の情報を得る。

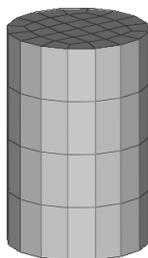


図 1-2 簡略化ストランド

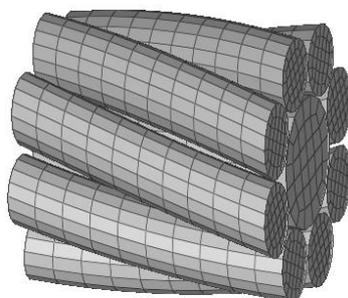


図 1-3 ワイヤロープ簡略化モデル

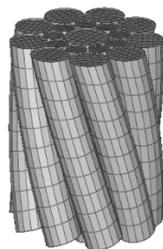


図 1-4 詳細ストランド

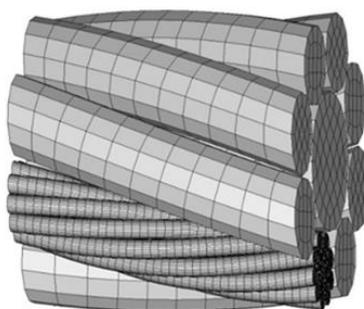


図 1-5 一部を詳細ストランドに置換したモデル

2.でワイヤロープ簡略化モデルの解析を行う際に、ストランドを一塊の素材とみなした時の材料特性値が必要となる。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ので、ストランドを一塊の素材とみなした時の見かけのヤング率、ポアソン比を考慮する必要がある。ここで寺田は国内で一般的にエレベータに用いられているワイヤロープについてストランドの軸方向に強制変位を与えそのときの応力を解析することによって、ストランドの軸方向の見かけのヤング率を導出し、その値を径方向に対しても適用して解析を行っている。しかし、ストランドは素線を撚り合わせてできているという構造上、軸方向と比較して明らかに径方向に変形しやすいという特性があり、等方性材料として設定された簡略化ストランドで行われた寺田の解析結果は現実のワイヤロープの挙動に則していない可能性が考えられた。

1.2.3 ストランド径方向圧縮試験

ストランドの軸方向の見かけのヤング率については東京製綱でストランドの引張試験が行われており数値が求められていたが、径方向の見かけのヤング率については試験からは求められてはいなかった。そこで五十君によってストランドの径方向圧縮試験が行われた[18]。圧縮試験に用いられたのはS(19)ストランドとFi(25)ストランドの2種類であり、径方向圧縮試験から得られた荷重変位曲線の傾きと、有限要素法解析から得られた丸棒のヤ

ング率と径方向荷重変位曲線の傾きの関係を比較することにより、S(19)ストランドの径方向の見かけのヤング率は約 18GPa、Fi(25)ストランドの径方向の見かけのヤング率も同じく約 18GPa という結論が得られた。

1.3 本研究の目的

本研究は、異方性を導入したワイヤロープ簡易モデルの作成を目的に行う。ワイヤロープの径方向圧縮試験の結果と、昨年の五十君の研究で得られたストランドの径方向の見かけのヤング率を用いて作成された、異方性を考慮した簡略化ストランドを用いたワイヤロープ簡易モデルの径方向圧縮解析の結果とを比較することでモデルの妥当性を評価する。

ここで試験内容を径方向の圧縮試験としたことについてだが、今回作成するワイヤロープの簡易モデルが今までのものと最も異なる点が、軸方向に対して径方向につぶれやすいという異方性を導入している点であり、その特性の違いが解析結果によく現れると考えられるという理由で径方向の圧縮について試験結果と解析結果を比較することにした。

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、先行研究としてズーミング解析とストランド圧縮試験について、そして本研究の目的について述べた。

第 2 章「径方向圧縮試験」では試験で用いるワイヤロープに触れ、軸方向の引張を加えて上での径方向の圧縮試験の概要と結果について説明する。

第 3 章「有限要素法解析」では異方性を考慮したワイヤロープ簡易モデルおよびワイヤロープ詳細モデルの径方向圧縮解析の概要と結果について説明し、解析結果を第 2 章の試験結果と比較する。

第 4 章「結論」では、本研究で得られた結果を総括し、今後の展望について述べる。

第2章 径方向圧縮試験

2.1 緒言

本章では，エレベータ用に一般的に用いられているワイヤロープのひとつである $8 \times S(19)$ ストランドを用いて行った径方向圧縮試験の概要と結果について説明する．

2.2 試験材料

本研究で試験対象としたのは東京製綱で製造されている，国内で広く普及しているエレベータ用ワイヤロープ $8 \times S(19)$ である．ワイヤロープの断面図，およびワイヤロープを構成する $S(19)$ ストランドの断面図を図 2-1 に， $S(19)$ ストランドを構成する素線の径，本数，中心からの距離を表 2.1 に示す．

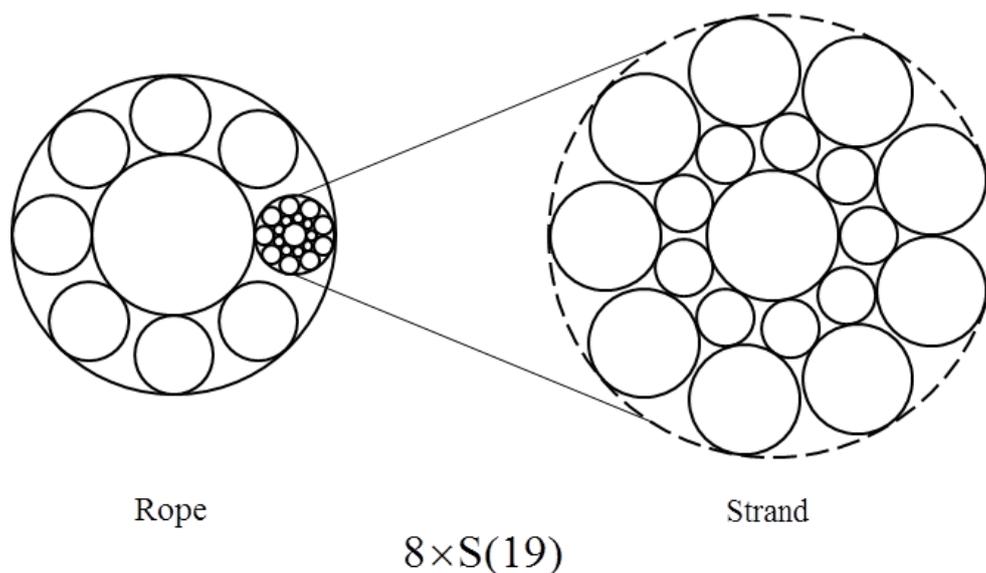


図 2-1 ワイヤロープ断面図

表 2.1 $S(19)$ ストランドの構成

	本数	中心からの距離[mm]	直径[mm]
一層目	1	0	0.773
二層目	9	0.575	0.363
三層目	9	1.02	0.66

このワイヤロープはロープ芯の周りに S(19)ストランドを 8 本撚り合わせることで構成されている。ロープの公称径は 10mm, ストランド公称径は 2.7mm で, ロープピッチ(ストランドがロープ芯の周りを 1 周するのに要するロープ軸方向の長さ)は 65mm, ストランドピッチ(素線がストランドの中心素線の周りを 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。

S(19)ストランドはシール形(Seale)と呼ばれ, 内外層の素線数が等しく, 内装素線の凹みに外層素線が完全に収まった構造をしている。S(19)ストランドでは内外層素線の本数が共に 9 本となっている。この構造ゆえ他のストランドと比べて外層素線が太いため, 特に耐摩耗性に優れており, 主にエレベータ用として使用されているストランドである。

ワイヤロープのより方には 4 通りが存在する。より方向が Z よりと S よりの 2 種類があり, さらに, ロープのより方向とストランドのより方向が逆の場合を普通より, 同一である場合をラングよりと呼ぶ。それぞれのより方を図 2-2 に示す。より方向については通常のワイヤロープでは Z よりが使用されており, S よりは 2 本のワイヤロープで荷物を持ち上げる際に荷物が回転するのを防ぐために Z よりのロープと合わせて使用するなど特別なときにしか使われていない。また, 普通よりとラングよりを比較すると, 普通よりは張力がかかると自然とよりが締まり, ねじれや形くずれに強く取り扱いやすい特徴があるのに対し, ラングよりは表面に現れている素線が長く耐摩耗性に優れているという特徴がある。本研究で対象とするのは, エレベータ用として使用されている普通 Z よりのワイヤロープである。

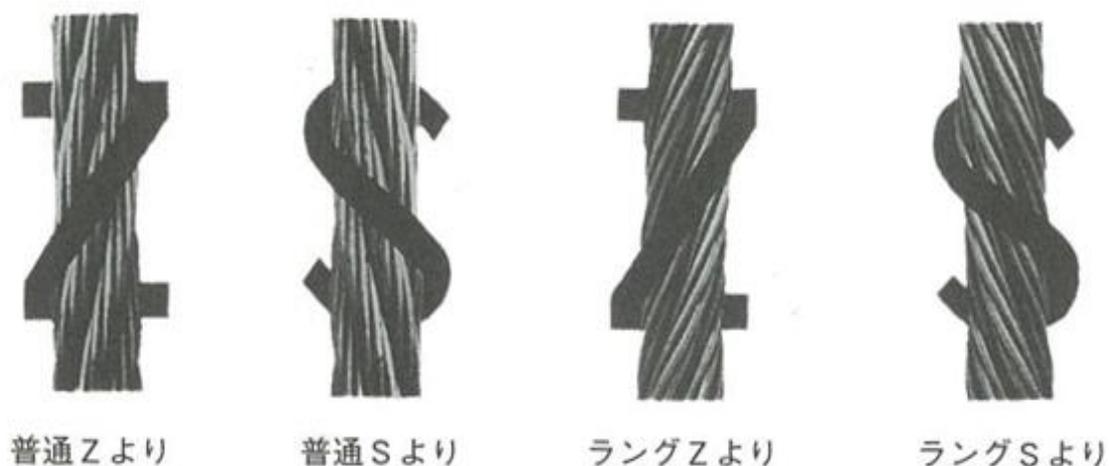


図 2-2 ロープのより方とより方向[3]

2.3 試験装置

試験の模式図を図 2-3 に、実際の試験の様子を図 2-4 に示す。そして本試験で使用した試験装置を表 2.2 に示す。

設計した治具の構造を図 2-5 に示す。この治具でワイヤロープの上下からはきんで圧縮荷重をかける。材質は SS400 である。上下の治具には圧縮試験中にワイヤロープが左右にずれないように、深さ 3mm、直径 11mm の溝が入っている。そしてそれぞれの治具にあいている 4 つの穴は、上下の治具を貫くようにこの穴に SS400 でできた丸棒を通しておくことで、試験中に治具が回転しないように固定するためのものである。

本試験ではこの治具の調達の日程の都合上、五十君のストランドの圧縮試験で使用した治具[18](図 2-6)を利用して圧縮試験を行った。この治具の溝は深さ 1.4mm、径 2.8mm である。

径方向変位の計測には、治具から出ている 2 本のボルト間の距離の変化をセンサを用いて測定することによって求めた。これは、ロードセルの位置情報を用いて求めると圧縮荷重による試験機や治具のひずみまで含んでしまうため、ワイヤロープ自体の変位を正確に求められない可能性が考えられたからである。

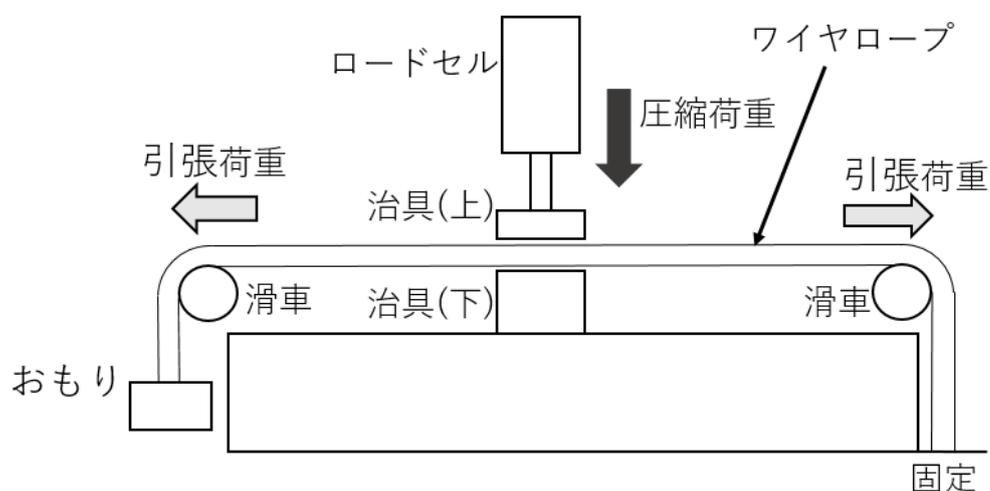


図 2-3 試験模式図



図 2-4 試験の様子

表 2.2 使用した実験装置

圧縮機	25kN 電気油圧サーボ疲労試験機
ロードセル	インストロン 8872 型試験機用ロードセル
センサヘッド	KEYENCE 社 LS-7030MR
SENSOR INTERFACE	KYOWA 社 PCD-320A, PCD-331B-F
HIGH-ACCURACY CCD MICROMETER	KEYENCE 社 LS-7600

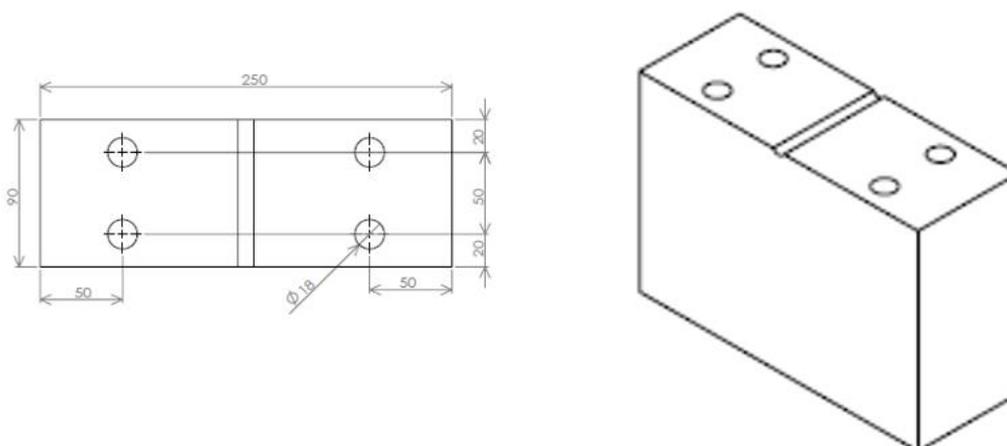


図 2-5 ワイヤロープ圧縮試験用の治具

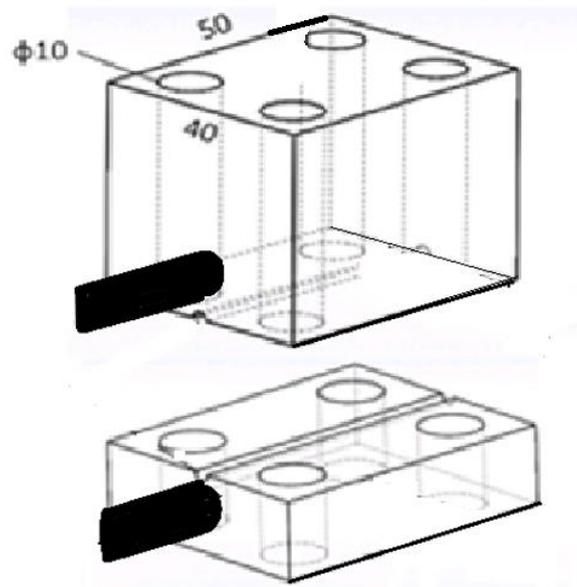


図 2-6 治具の構造

2.4 試験手順

まず、実験の事前準備としてワイヤロープの片端を地面に固定するために、地面に置かれた固定用のおもりにワイヤクリップを用いて接続する。そしてもう片方の端は、試験機につながれた治具の間を通るように滑車に沿わせ、30kgのおもりをつるしておく。おもりをつるすことによってワイヤロープに引っ張り荷重を加え、実際の使用状況に近づけている。

このように引っ張り荷重を加えた状態になったら、試験機を用いてワイヤロープの径方向に荷重制御で圧縮荷重を加え、荷重と変位の関係を計測した。圧縮荷重が 0.5kN 加わった状態を変位の 0 点として、試験機を用いて 9.5kN まで径方向に圧縮荷重をかける。圧縮荷重のかけ方については、1 回の試験で最小 0.5kN、最大 9.5kN の sin 波を 1 周期 100 秒でかけて、5 周期分連続して荷重を加えていく。1 周期に 100 秒かけて荷重を加えるのは、ワイヤロープがヒステリシスを持つことが予想され、準静的に試験を行う必要があったためである。そして、sin 波 5 サイクル分の荷重を連続して加えているのは、ワイヤロープがストランドをより合わせた構造をしていてストランド間にすき間が存在していることから、径方向に荷重を加えると断面が変形、回転する性質を持ち、サイクルを経る毎に得られる荷重・変位曲線の波形がずれることが予想され、波形が収束するまで圧縮のサイクルを繰り返す必要があったからである。

2.5 試験結果

2.5.1 荷重・変位曲線

今回の試験で得られたワイヤロープの径方向荷重・変位曲線を図 2-7 に示す。また、サイクルごとの荷重が 0.5kN と 9.5kN の時の変位の値を表 2.3 に示す。

サイクルを繰り返すごとに、曲線が右のほうにずれていくことが確認できる。そして、荷重を増やしていく段階ではグラフは直線に近い形状になっているのに対し、減らしていく段階では下に凸な形状になっていて、挙動が異なっていることも確認できる。それぞれのサイクルにおける、負荷時と除荷時の実験結果をそれぞれ図 2-8、図 2-9 に示す。

サイクルを繰り返すごとにグラフが右にずれているのは、径方向に圧縮するたびにワイヤロープの内部の素線間に存在するわずかなすき間が埋められていくためと考えられる。また、圧縮するほど素線間に塗られていた油が押し出されていたことが実験で観察されたが、そのことも影響していると考えられる。

負荷時と除荷時でグラフの波形が異なっているのは、繊維でできた心綱の「圧縮するほど弾性率が大きくなる」という性質によるものだと考えられる。

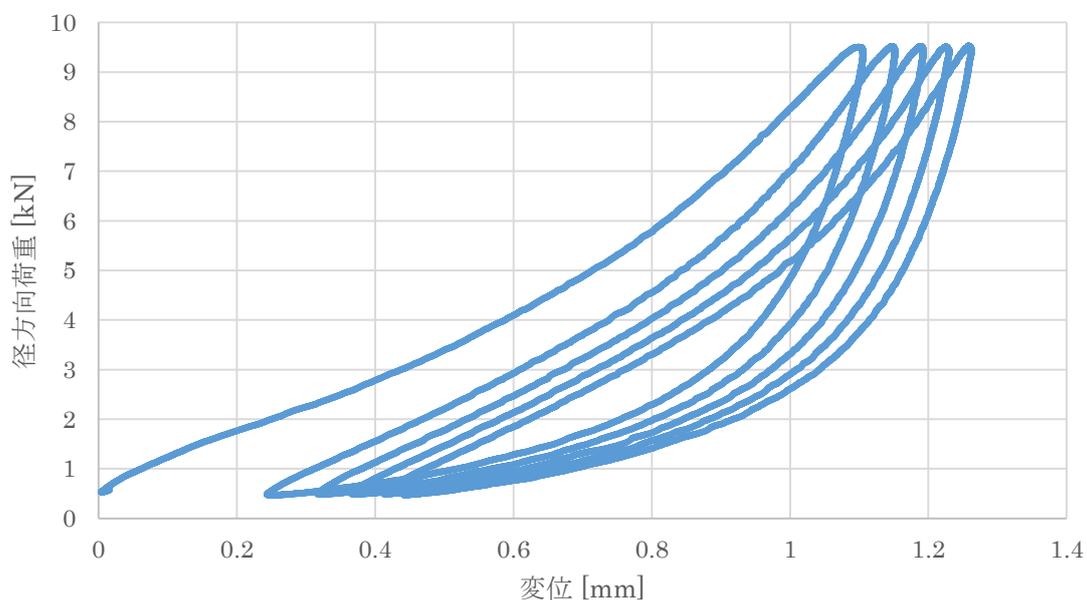


図 2-7 ワイヤロープの径方向荷重・変位曲線

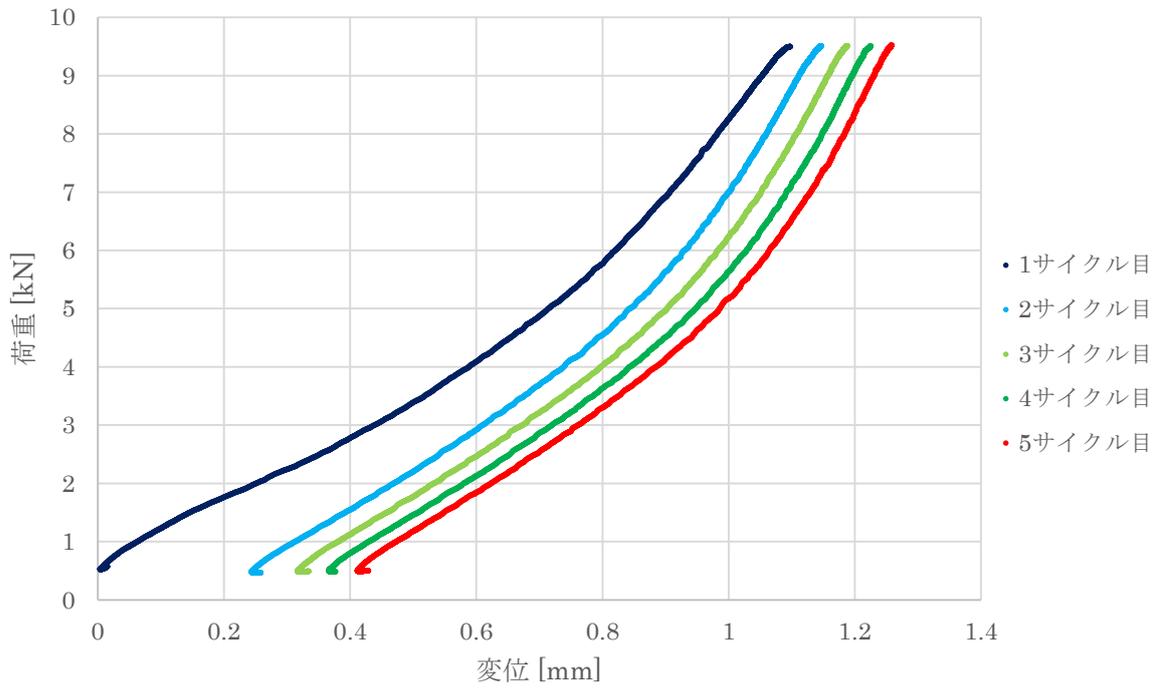


図 2-8 負荷時のサイクルごとの荷重・変位曲線

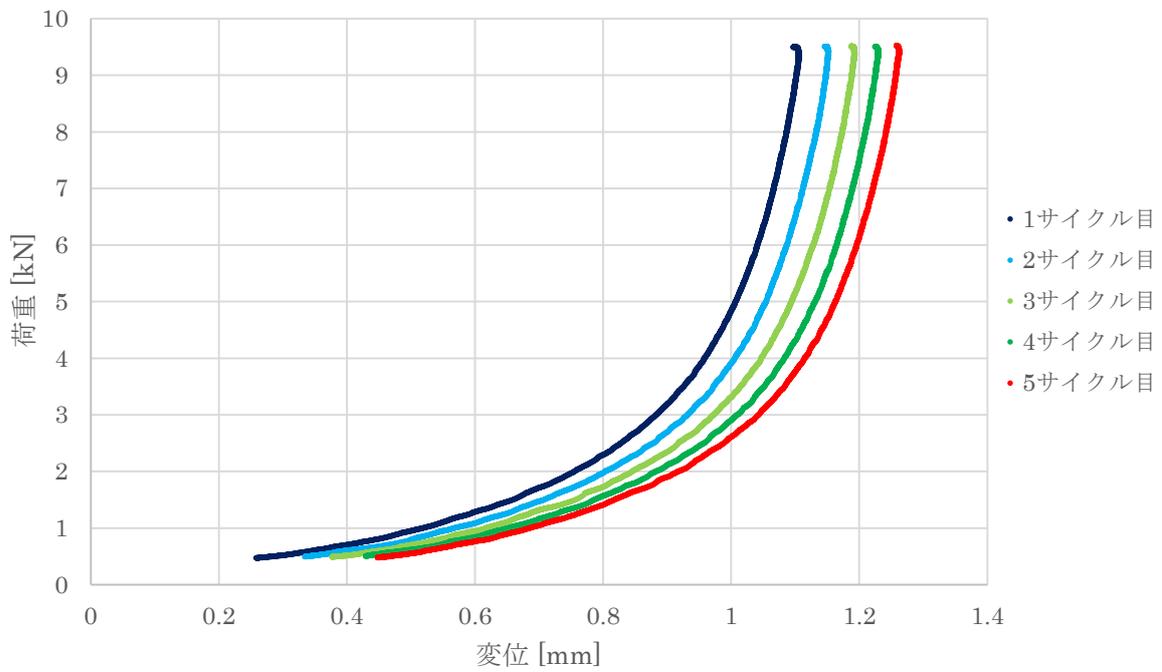


図 2-9 除荷時のサイクルごとの荷重・変位曲線

表 2.3 サイクルごとの荷重 0.5kN,9.5kN の時の変位

サイクル	変位 [mm]	
	荷重 0.5kN 時	荷重 9.5kN 時
1	0	1.097
2	0.258	1.146
3	0.334	1.188
4	0.376	1.224
5	0.429	1.258

2.5.2 断面の変形の様子

径方向に荷重がかかったときの素線のずれ方を観察するために、ワイヤロープ断面の撮影も行った。その様子を図 2-10 に示す。ワイヤロープ端面が治具の側面と同じ平面上にくるようにワイヤロープを治具にはさみ、その端面を測定顕微鏡を用いて撮影している。使用した測定顕微鏡は日本光器製作所の型式 N.O.W.-D2XZ-KSH/CAM である。この撮影においては撮影する端面をワイヤロープ軸方向に動かないように固定することができないため、引張荷重がかかっていない状態で圧縮を行っている。

ワイヤロープに径方向荷重がかかっていないときの断面の写真、5kN および 9.5kN の荷重がかかっているときの写真をそれぞれ図 2-11、図 2-12、図 2-13 に示す。圧縮荷重が大きくなっていくにつれて、治具に接しているストランドの素線が大きくずれていくことが確認できる。それに対して、治具に接していない4本のストランドはほぼ変形せずに円形を保っていることが確認できる。ただ、この撮影ではワイヤロープ端部の断面の様子を撮影しているため、内部の断面と違って片側からしか拘束されておらず、内部の断面の素線の実際の挙動は今回撮影したものよりも小さくなると考えられる。



図 2-10 断面撮影の様子



図 2-11 径方向荷重がかかっていないときのワイヤロープ断面の様子



図 2-12 5kN の径方向荷重がかかったときのワイヤロープ断面の様子

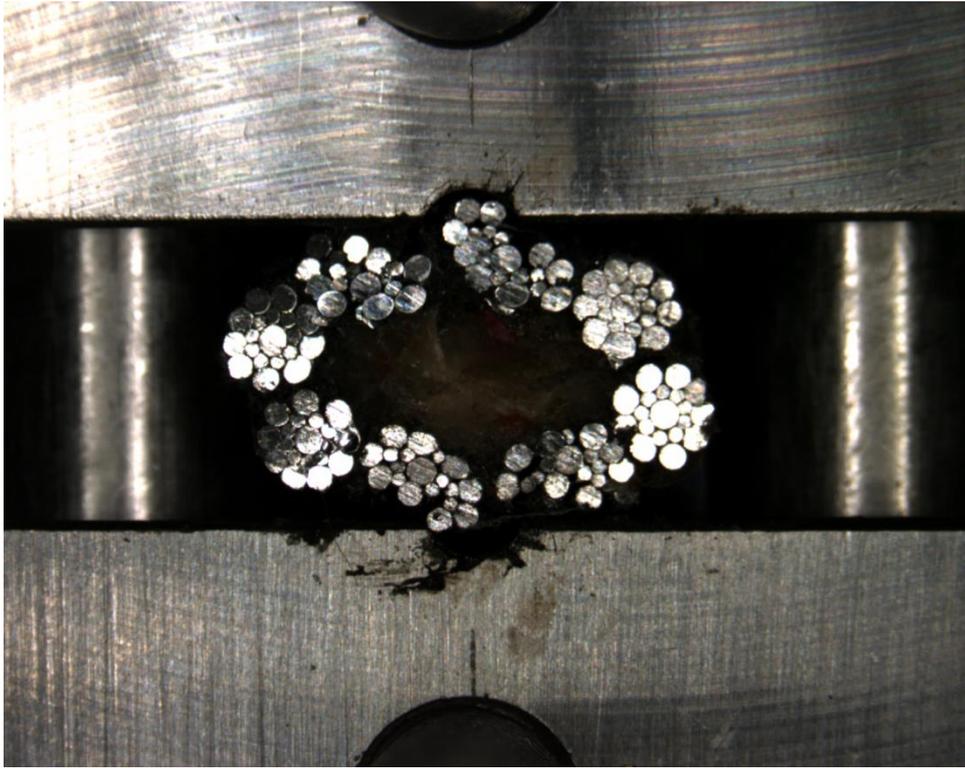


図 2-13 9kN の径方向荷重がかかったときのワイヤロープ断面の様子

第3章 有限要素法解析

3.1 緒言

本章では、異方性を導入したストランド簡略化モデルを使用したワイヤロープの簡易モデル、および、素線 1 本 1 本から構成されるワイヤロープの詳細モデルの径方向圧縮解析の概要と結果を説明する。そして、得られたそれぞれの解析結果と第 2 章の試験結果を比較し、解析モデルの妥当性について評価する。

3.2 ワイヤロープ簡易モデル解析

ブーミング解析の全体解析で使用するためのモデルとして、異方性を導入したストランド簡略化モデルで構成されたワイヤロープの簡易モデルを作成し、実験と同じ状況で径方向に圧縮する解析を行う。また、比較のためストランド簡略化モデルを等方性材料として材料特性を設定したモデルについても同様の解析を行う。そしてこれらの解析と圧縮試験の結果を比較する。

3.2.1 材料特性

3.2.1.1 簡略化ストランドの材料特性

ワイヤロープの簡易モデルでは、本来素線を撚り合わせて構成されているストランドを、一塊の素材としてモデル化する。このときに今回作成するモデルでは、軸方向に対して径方向に変形しやすいという異方性を反映する。今回の解析では簡略化ストランドは直交異方性材料と考える。すると、モデルにおける応力・ひずみ関係は数式 3-1 のように表せる[20]。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{数式 3-1}$$

そしてさらに、xy 平面内(軸と垂直な平面内)では等方で、z 方向(軸方向)にのみ異方性を持つため、数式 3-1 は数式 3-2 のように変形できる。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{13} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(Q_{11} - Q_{12}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{数式 3-2}$$

ここで今回の解析では有限要素法解析ソフトウェアの RADIOSS を用いるが、簡略化ストランドモデルの材料則として直行異方性を持つもののなかで「ハニカム材料」の材料則を使用することとする。すると、 $Q_{12} = Q_{13} = 0$ が代入できて応力・ひずみ関係は数式 3-3 のようになる。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(Q_{11} - Q_{12}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{数式 3-3}$$

ここで東京製綱株式会社のストランド単軸引張試験のデータより求められた S(19)ストランドの軸方向の見かけのヤング率 125[GPa]と、五十君の研究で得られた径方向の見かけのヤング率 18[GPa]の二つの値を用いることで、 $Q_{11} = 18$ 、 $Q_{33} = 125$ と設定できる。また Q_{44} 、つまり yz 平面と xz 平面の横せん断係数については、素線の材料である線材の値 100GPa を用いて $Q_{44} = 100$ とした。以上より、本解析での簡略化ストランドの応力ひずみ関係は数式 3-4 のように設定する。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 18 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 125 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{数式 3-4}$$

また、密度については素線の値 8×10^{-9} [ton/mm²]と設定する。

そして、このように異方性材料として材料特性を与えてモデルとは別に、比較のために等方性材料として表 3.1 のように簡略化ストランドの材料特性を設定したモデルについても同様の解析を行う。

以下、異方性材料として簡略化ストランドの材料特性を与えてモデルを「異方性モデル」、等方性材料として材料特性を与えたモデルを「等方性モデル」と表現する。

表 3.1 等方性材料として与えた材料特性値

ヤング率[GPa]	196
ポアソン比	0.3
密度[ton/mm ²]	8×10^{-9}

3.2.1.2 その他の材料特性

心綱と治具の材料特性は表 3.2 のように設定して解析を行った。

心綱については、今回の試験で用いたエレベータ用ワイヤロープの心綱は麻製の繊維心であり、そのヤング率は三菱電機株式会社の実験データによると約 150MPa であり、この値を設定した。また、ポアソン比は一般的な繊維の材料特性として、0.4 と設定した。

治具については、SS400 の材料特性として、ヤング率を 206GPa、ポアソン比を 0.3 と設定した。

表 3.2 心綱，治具の材料特性

	ヤング率[GPa]	ポアソン比	密度[ton/mm ²]
心綱	150MPa	0.4	1.5×10^{-9}
治具	206GPa	0.3	7.8×10^{-9}

3.2.2 接触の定義

本解析では接触による反力の計算にはペナルティ法を用いている。ペナルティ法は接触要素の食い込み量に比例した反力を発生させる計算方法で、マスターとスレーブの概念を用いている。まず、マスターとなる面要素にスレーブの節点が接触しているかどうかの判定を行うためにギャップ距離を定義し、スレーブの節点がマスターの面要素に近づいて両者の距離がギャップ距離以下になると、接触していると判定される。すると、マスターとスレーブの間に仮定の弾性バネが追加され反力が発生し、スレーブ節点をマスター面要素から遠ざけるように働く。そして、再度スレーブ節点がギャップ距離以上にマスター面要素から離れるとこのバネは取り除かれ、反力は働いていない状態となる。

3.2.3 解析モデル

解析で用いたワイヤロープ簡易モデルと治具の全体図を図 3-1、解析規模を表 3.3 に示す。座標軸は初期状態のワイヤロープの軸方向が z 方向に平行となるように設定してある。

ワイヤロープ簡易モデルについては寺田の作成したワイヤロープ作成ソフトと Dassault Systèmes 社製の 3 次元 CAD 設計ソフトウェア SolidWorks を用いて 3 次元 CAD 形状(図 3-2)を作成している。ロープ形状を作成するために用いたパラメータを表 3.4 に示す。

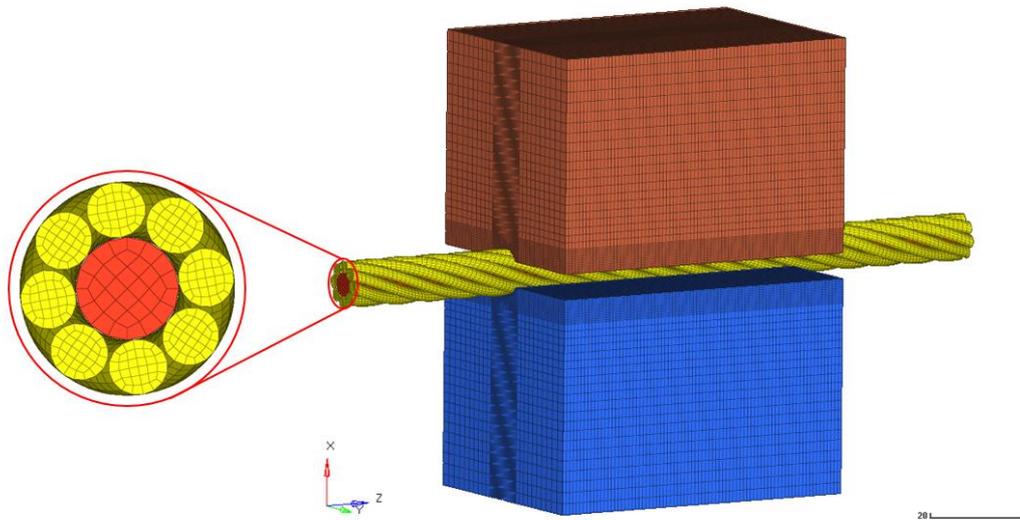


図 3-1 解析モデル全体図

表 3.3 解析規模

節点数	373487
要素数	339521

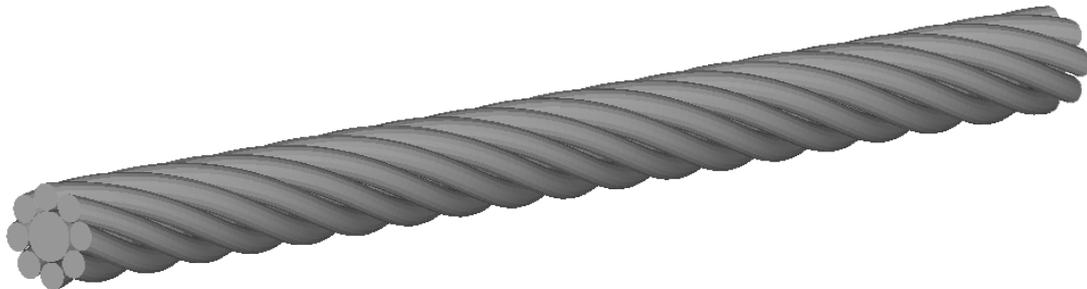


図 3-2 ワイヤロープ簡易モデル CAD 形状

表 3.4 ロープ形状のパラメータ

ストランド数	8
簡略化ストランドの直径[mm]	2.7
心綱の直径[mm]	4.9
ロープの長さ[mm]	70

3.2.4 境界条件

まず治具の境界条件について説明する。上側の治具の上面は実験では圧縮機で固定されているので x 方向の移動のみ許すため y,z 方向の移動と x,y,z 方向の回転を拘束する。下側の治具については実験では試験台の上で動かないように固定してある。よって解析では下面の中心の一点を並進・回転ともに完全に拘束し、他の点については y,z 方向の変形を許すため x 方向のみについて移動を拘束し、 x,y,z 方向の回転を拘束した。

続いてワイヤロープの境界条件について説明する。ワイヤロープの境界条件を図 3-3 に示す。片方の端面については x,y,z 方向の移動と回転を拘束し、もう片方の端面についてはワイヤロープに引っ張り荷重が加わった状態を再現するために端面全体を剛体接続した上で、中心の1点の x,y 方向の移動と、 x,y,z 方向の回転を拘束し、 z 方向の引っ張り荷重を加えた。

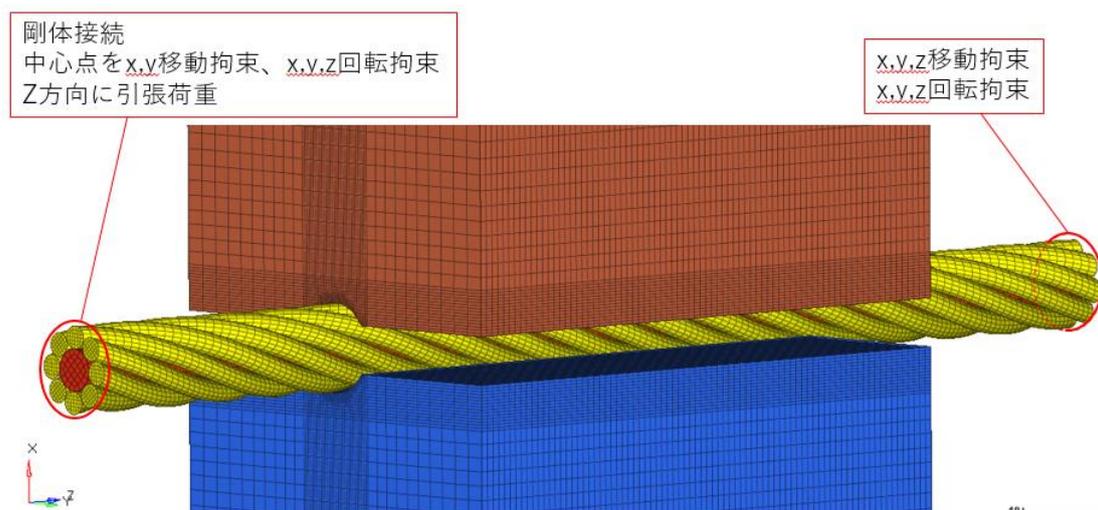


図 3-3 ワイヤロープ端面の境界条件

3.2.5 荷重条件

ワイヤロープの軸方向の引張荷重については解析開始から終了まで一定の力を加えた。治具の上面にかける荷重については図 3-4、表 3.5 のようにかけた。この解析により、治具上面に F [kN] の等分布荷重がかかっているときのワイヤロープの径方向変位を求め、 F の値を $1\sim 10$ [kN] の間で変化させて複数回解析を行うことにより、それぞれの荷重での変位を求め、ワイヤロープの荷重・変位曲線を予測する。0 秒から治具に荷重をかけるようにしなかったのは、ワイヤロープに軸方向の引張が加わった状態から径方向に圧縮するためである。

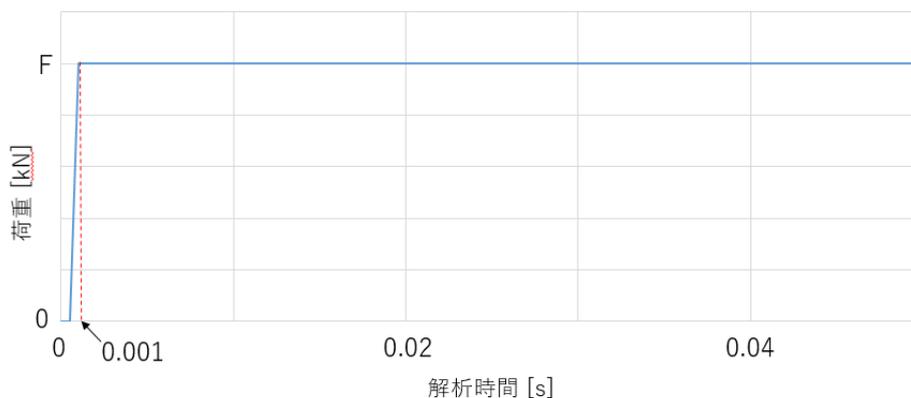


図 3-4 径方向の荷重条件

表 3.5 荷重条件の詳細

解析時間 [s]	荷重 [kN]
$0 \sim 5 \times 10^{-4}$	0
$5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	$F \times (t - 5 \times 10^{-4}) / (5 \times 10^{-4})$
$1 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-2}$	F

3.2.6 解析条件

本モデルの解析条件を表 3.6 に示す. 3.2.1 でも触れたように, 今回の解析には Altair Engineering 社の CAE ソフトウェアプラットフォームである HyperWorks の有限要素法解析ソフトウェア RADIOSS を用いた. また, 本解析はモデルの構造が複雑で接触箇所が非常に多く, 陰解法では計算の収束が困難となるため, 陽解法による計算を行った. この後 3.3 で述べるワイヤロープ詳細モデル解析においても同様の理由で陽解法によって計算を行っている.

表 3.6 解析条件

解析ソフト	Hyper Works RADIOSS 陽解法
要素	ソリッド六面体一次要素
接触アルゴリズム	ペナルティ法
摩擦係数	0.1
解析時間	0.05 秒

3.2.7 解析結果

3.2.7.1 解析中の挙動

異方性モデルの解析中($F=2$ [kN])のワイヤロープ断面の様子を図 3-5 に示す。ワイヤロープの軸方向の中心の断面を表示している。それぞれの状態は、

0.005[s] : ワイヤロープの軸方向引張力により、ストランドと心綱が接触

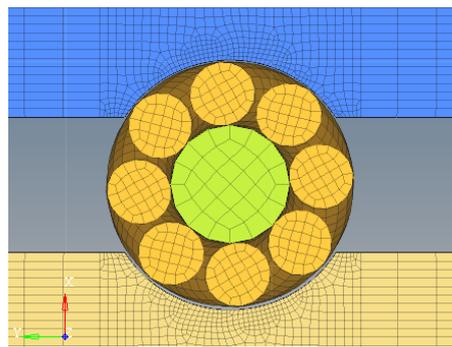
0.015[s] : 上側の治具とロープが接触

0.021[s] : 下側の治具とロープが接触

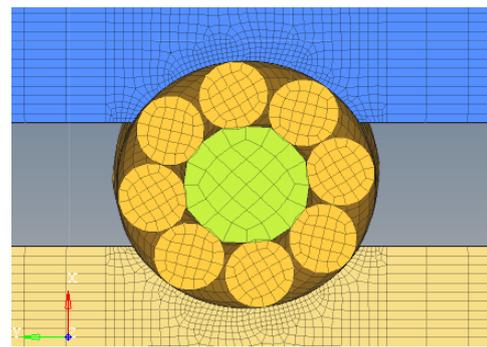
0.025[s]~0.040[s] : ロープが圧縮されている過程

0.050[s] : 解析終了時の状態

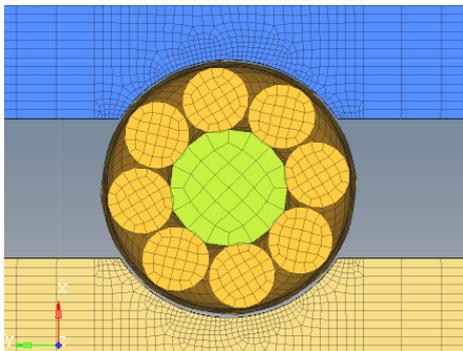
となっている。



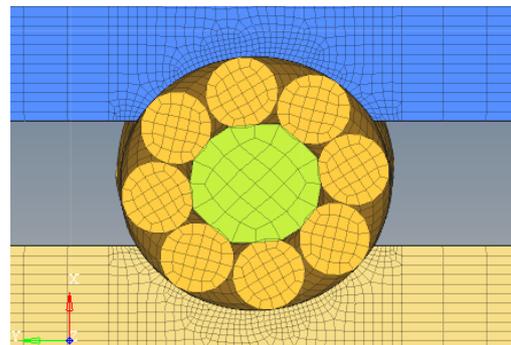
0[s]



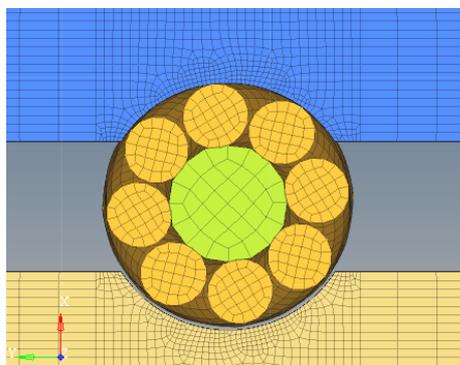
0.025[s]



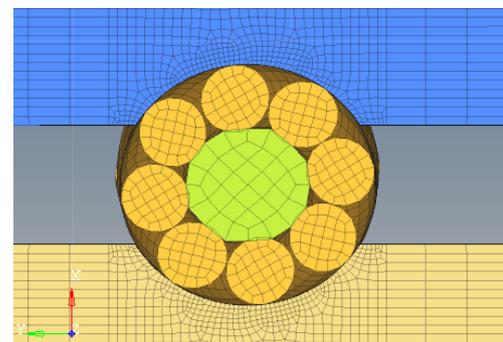
0.005[s]



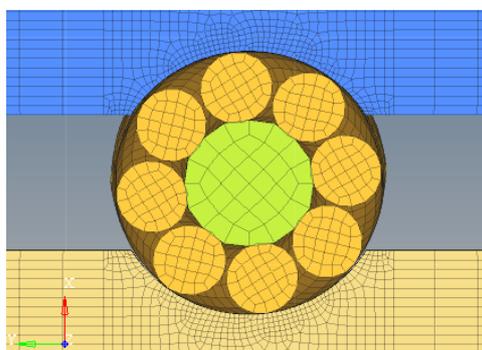
0.03[s]



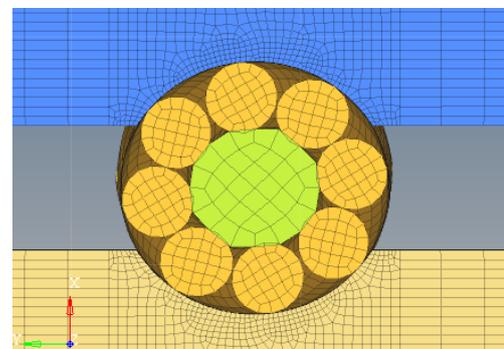
0.015[s]



0.04[s]



0.021[s]



0.05[s]

図 3-5 解析中のロープ断面の様子(F=2[kN])

3.2.7.2 ワイヤロープの径方向変位

まず、径方向の荷重 $F=2\text{kN}$ の時のモデルの径方向の変位の解析結果を図 3-6 に示す。変位は試験同様、上側の治具の変位を出力している。この解析の収束値を $F=2[\text{kN}]$ のときの径方向変位とする。

径方向の荷重 F を変化させて解析を行った結果を図 3-7、表 3.7 に示す。また、0 点は試験に合わせて 0.5kN の径方向荷重を加えたときの変位としている。図 3-7 より、同じ荷重における径方向変位は等方性モデルに比べて異方性モデルが大きくなっていることが確認でき、これはストランドの径方向のヤング率が小さく径方向につぶれやすいという異方性モデルの材料設定を反映している結果と言える。

また、それぞれのモデルの荷重 8kN におけるワイヤロープ断面の接触荷重圧力カウンター図を図 3-8、図 3-9 に示す。この図を見ると異方性モデルではストランド同士の接触部分がつぶれて接触面積が広がっているのに対し、等方性モデルではストランド同士の接触部分が異方性モデルと比べて変形しておらず、接触面積が小さくて点で接触しているような状態になっていることが分かる。また、等方性モデルではストランドの変形量が小さく円の形状を保っているので上下の治具に接するストランドが隣接するストランドに阻まれて心綱に大きく近づけず、心綱とストランドの接触荷重が異方性モデルに比べて小さくなってしまっていることも分かる。これは等方性モデルでは、治具からの上下方向の荷重がワイヤロープ内部では、ストランドと心綱の上下方向の接触荷重ではなく、ストランド同士の接触荷重として表れているということであり、ストランド同士の図 3-7 において異方性モデルはグラフがほぼ直線になっているのに対し、等方性モデルは荷重が大きくなるにつれて変位が大きくなりにくくなっていることにもつながっていると考えられる。

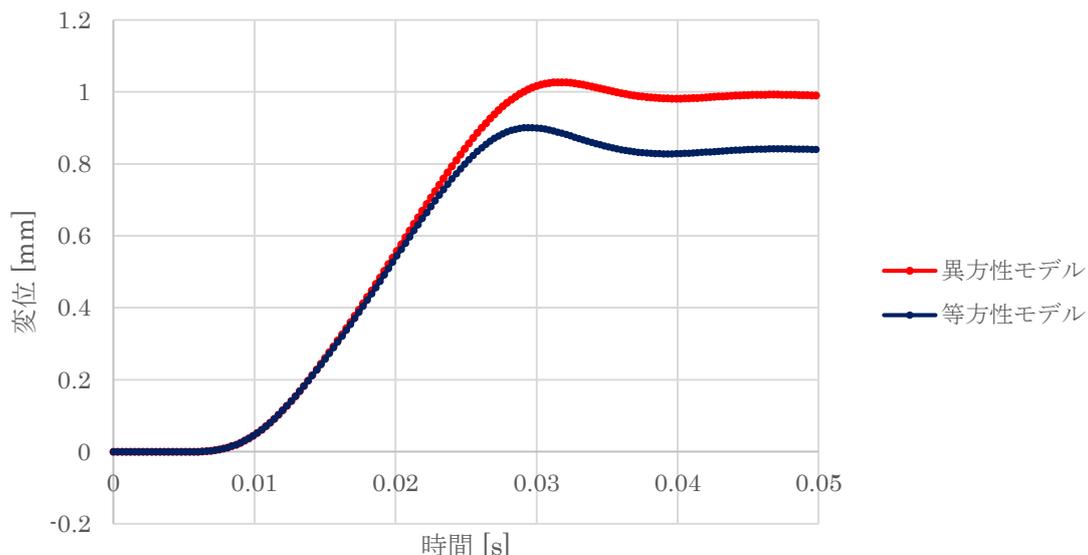


図 3-6 2kN の荷重を加えたときのワイヤロープ径方向変位と時間の関係

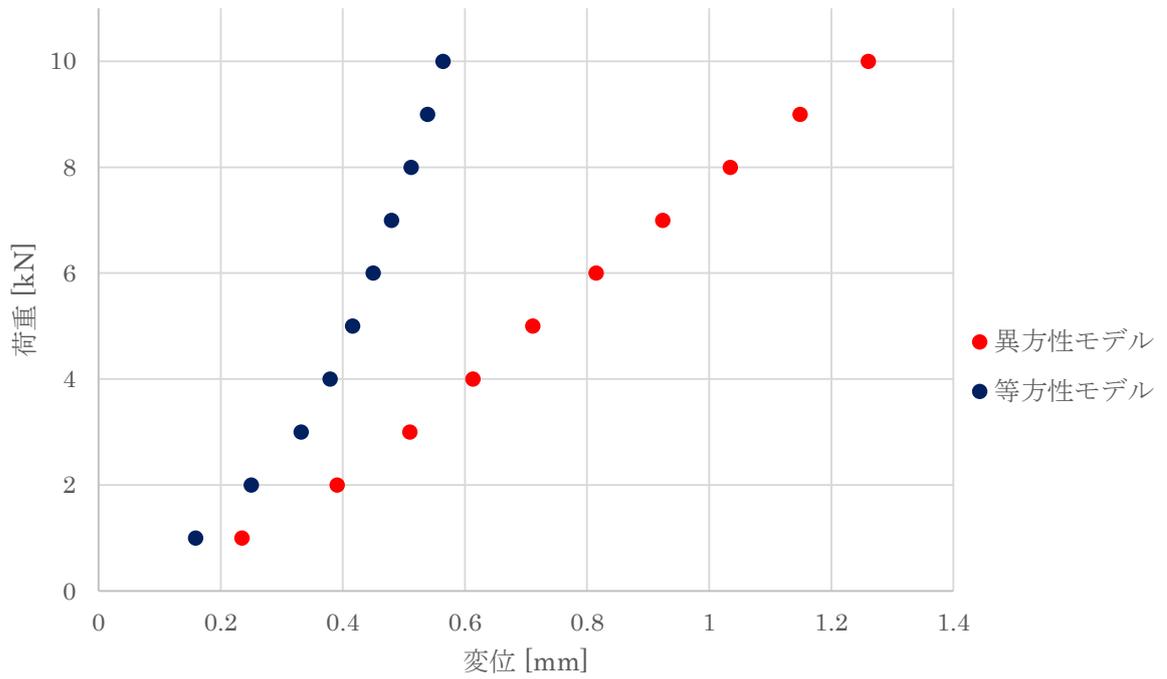


図 3-7 径方向荷重と変位の関係(ワイヤロープ)

表 3.7 径方向荷重と変位の関係(ワイヤロープ)

径方向荷重[kN]	変位[mm]	
	今回のモデル	旧モデル
1	0.235	0.159
2	0.391	0.250
3	0.510	0.332
4	0.613	0.379
5	0.711	0.416
6	0.815	0.450
7	0.924	0.480
8	1.035	0.512
9	1.149	0.539
10	1.261	0.564

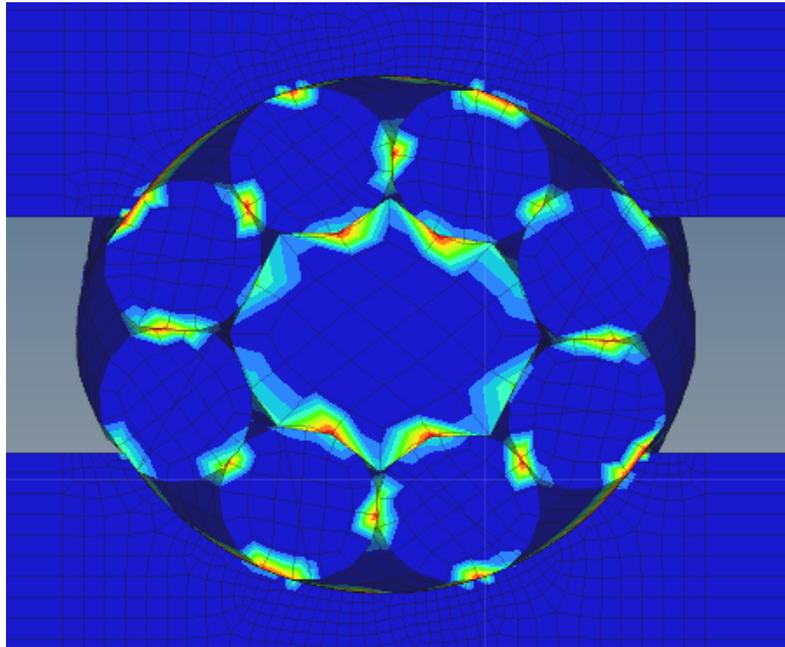


図 3-8 異方性モデルの荷重 8kN での断面の接触荷重コンター図

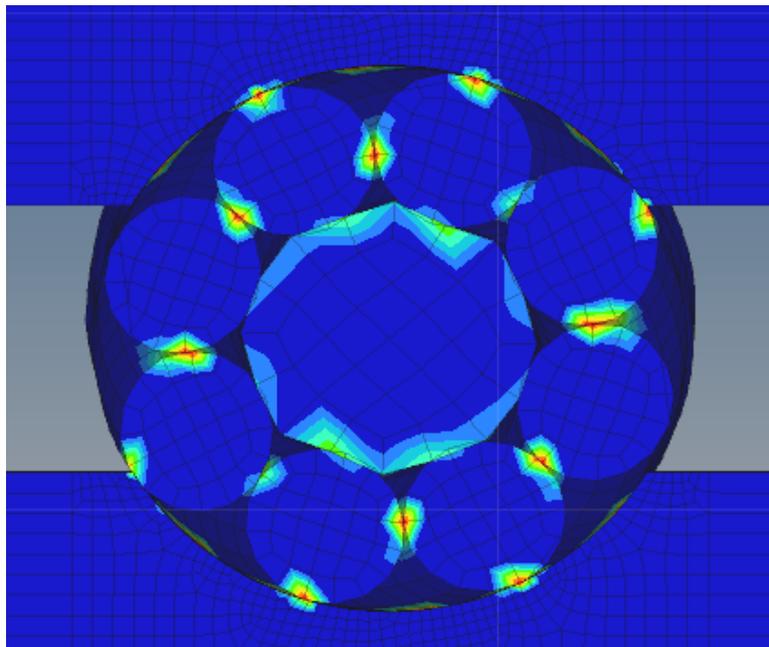


図 3-9 等方性モデルの荷重 8kN での断面の接触荷重コンター図

3.2.7.3 ストランドの径方向変位

ストランド1本に注目して、その径方向変位についても出力した。出力したのは図 3-10 に示すように、ワイヤロープの軸方向中央部の一番下に位置しているストランドの上下の2節点の解析開始時と終了時の距離の変化である。

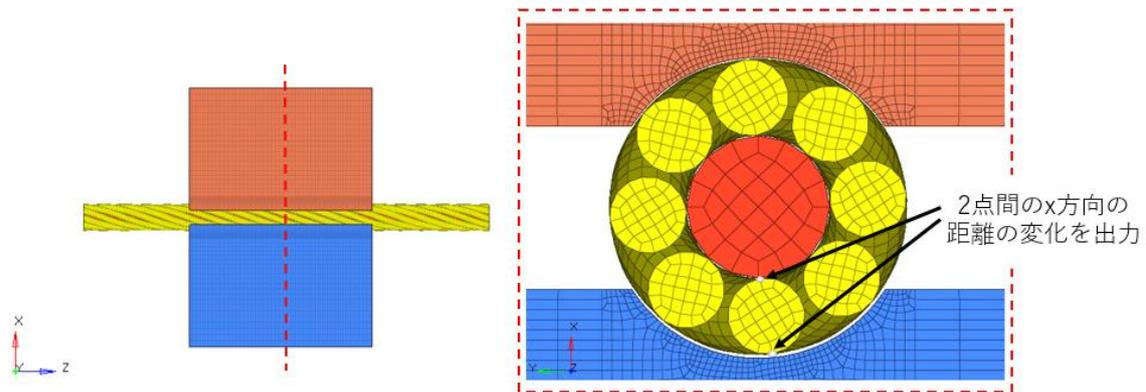


図 3-10 変位出力点

図 3-11、表 3.8 に径方向荷重とストランドの径方向変位の関係を示す。等方性モデルでは荷重が大きくなっても変位はほぼないのに対し、異方性モデルは荷重の上昇とともに変位も大きくなっていることが確認できる。このことから、3.2.7.2 で示した異方性モデルのロープの径方向の変位が心綱の変形によるものだけでなくストランド自体の変形も含まれていることが分かる。それに対して、等方性モデルはロープの径方向変位はほぼ心綱の変形によるものだと分かる。

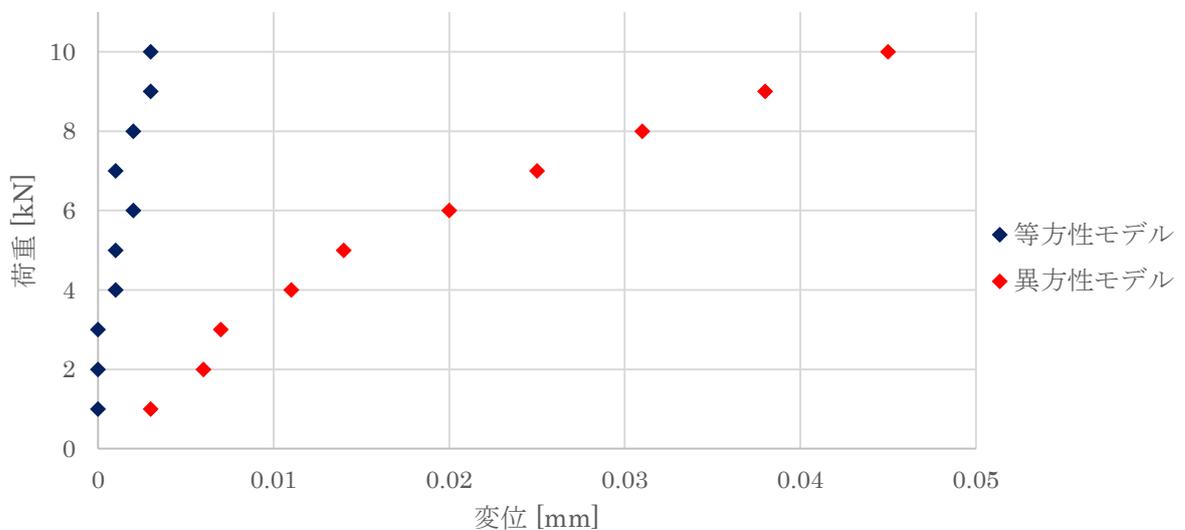


図 3-11 径方向荷重と変位の関係(ストランド)

表 3.8 径方向荷重と変位の関係(ストランド)

径方向荷重[kN]	変位[mm]	
	異方性モデル	等方性モデル
1	0.003	0
2	0.006	0
3	0.007	0
4	0.011	0.001
5	0.014	0.001
6	0.020	0.002
7	0.025	0.001
8	0.031	0.002
9	0.038	0.003
10	0.045	0.003

3.2.8 試験結果との比較

異方性モデル, 等方性モデルのワイヤロープ径方向圧縮解析の結果と 2.5 の試験結果を比較する. それぞれのグラフの比較を図 3-12 に示す. 試験結果については, 5 サイクル目の結果をサイクル開始時の変位を 0 点にして表示している. 解析では径方向荷重を 0 から加えることによって変位を求めているので負荷時の試験結果と比較すると, グラフの傾きに注目すると等方性モデルに比べて異方性モデルのほうが実験値に近い波形になっていることが確認できる.

等方性モデルはグラフの傾きが大きく, 荷重が大きくなるにつれて実験値よりも変位が小さくなっている. そして異方性モデルは荷重 6kN 付近までは変位は実験値よりも大きくなっているがグラフの傾きはほぼ一致しており, 6kN 以上の荷重では試験値のグラフの傾きは大きくなり変化しているのに対し, 異方性モデルはそのままの傾きを保っていることが確認できる.

異方性モデルが実験値のグラフと異なった点について考察する. まず, 6kN までの範囲で異方性モデルのほうが変位が大きくなったことについては, モデルでは初期状態において心綱とストランドの間, ストランド同士の間にある実際のロープよりも大きなすき間が存在しており, そのすき間が埋まった分だけ変位が大きい結果が得られたと考えられる. そして, 6kN 以上の荷重を加えたときのグラフの傾きの違いについては, モデルにおいては心綱を弾性体として材料特性を設定しているが, 実際のロープの心綱(繊維心)は荷重が大きくなるほど弾性率が大きくなるという性質があり, この心綱の材料特性の違いが結果に表れていたと考えられる.

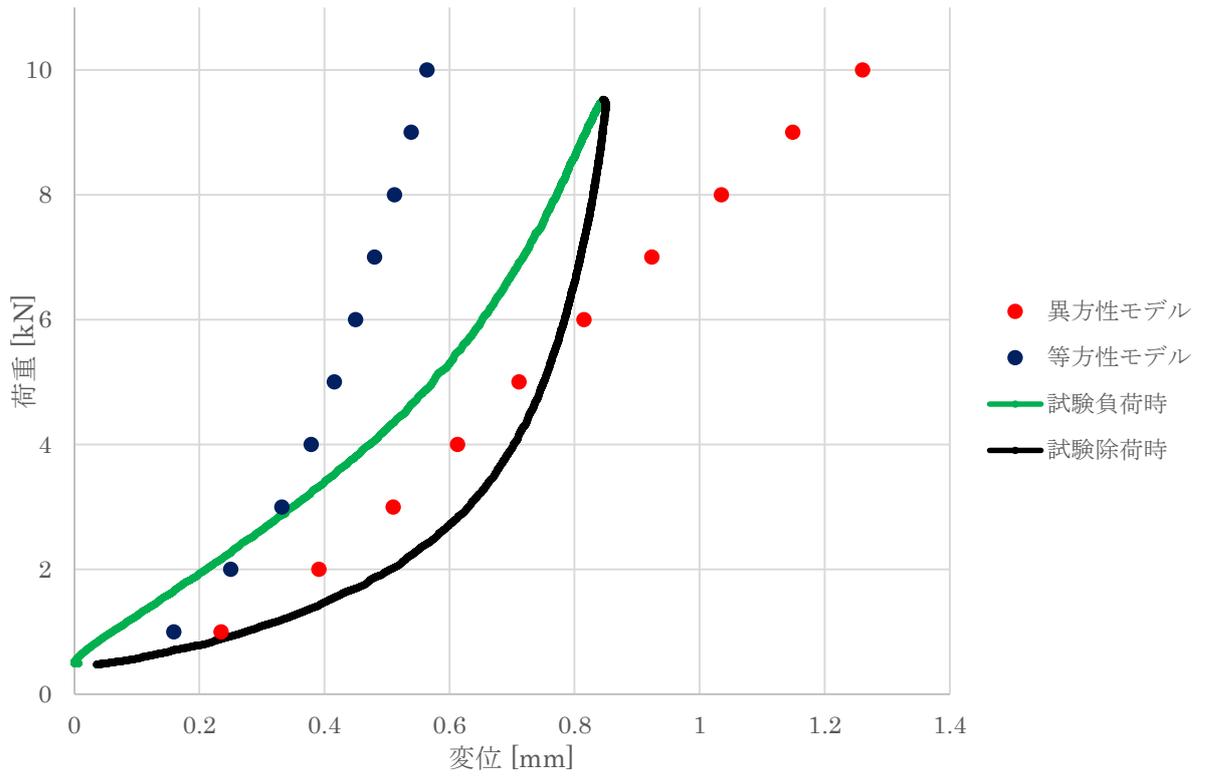


図 3-12 ワイヤロープ簡易モデルの解析結果と実験結果の比較

3.3 ワイヤロープ詳細モデル解析

ストランドを簡略化せず，素線 1 本 1 本まで再現したワイヤロープ詳細モデルについても径方向の圧縮解析を行い，詳細モデルにおける応力・変位曲線を求めた。

3.3.1 材料特性

素線の材料特性値は表 3.9 のように設定した。ヤング率については東京製綱株式会社で行われた素線引張試験のデータを用いている。また，素線には塑性を導入している。塑性ひずみに対応する応力は数式 3-5 のように表される。

$$\sigma = Y + C(\epsilon_p)^n \quad \text{数式 3-5}$$

ここで， ϵ_p は塑性ひずみ， Y, C, n はパラメータであり，今回は素線引張試験で得られた引張応力が 1600[MPa]であったことから $Y = 1500$ ，線形硬化塑性体と仮定して $n = 1$ ， $C = 200$ と設定した。

また，心綱と治具の材料特性についてはワイヤロープ簡易モデルの解析同様，表 3.2 のように設定した。

表 3.9 素線の材料特性値

ヤング率[GPa]	196
ポアソン比	0.3
密度[ton/mm ²]	8×10^{-9}

3.3.2 解析モデル

解析で用いたワイヤロープ詳細モデルと治具の全体図を図 3-13，解析規模を表 3.10 に示す。座標軸は初期状態のワイヤロープの軸方向が z 方向に平行となるように設定してある。

ワイヤロープ詳細モデルは簡易モデル同様，寺田の作成したワイヤロープ作成ソフトと SolidWorks を用いて 3 次元 CAD 形状(図 3-14)を作成している。ストランド形状，およびロープ形状を作成するために用いたパラメータを表 3.11，表 3.12 に示す。

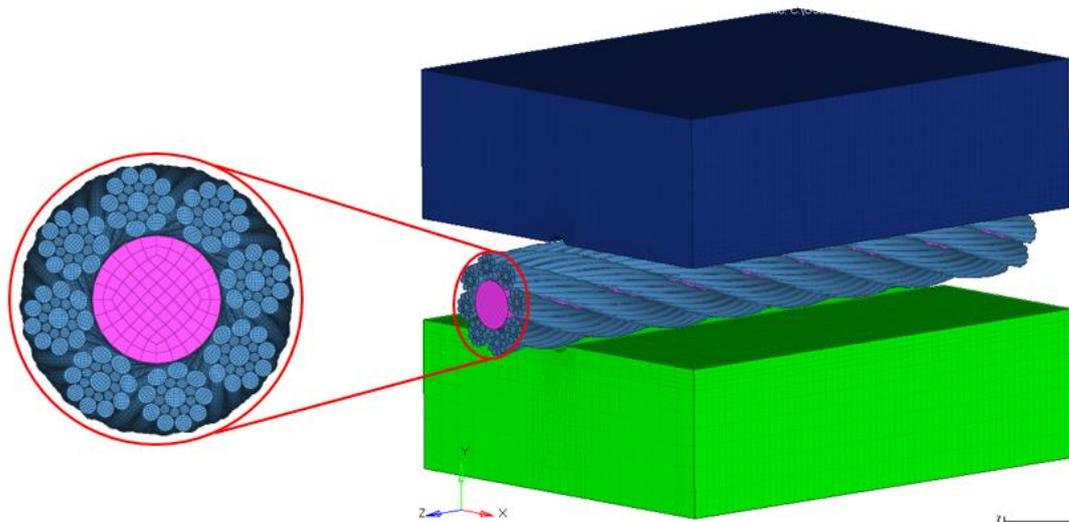


図 3-13 解析モデル全体図

表 3.10 解析規模

節点数	1159085
要素数	898801

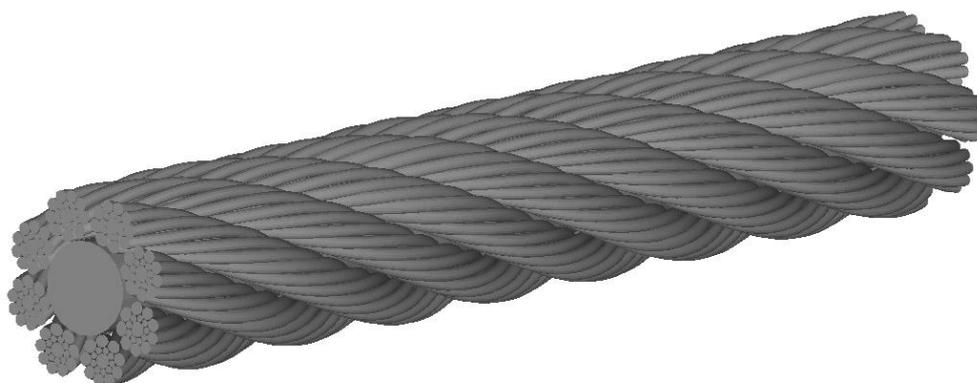


図 3-14 ワイヤロープ詳細モデル CAD 形状

表 3.11 ストランド形状のパラメータ

	本数	ストランド中心からの距離[mm]	直径[mm]
一層目	1	0	0.773
二層目	9	0.575	0.363
三層目	9	1.02	0.66

表 3.12 ロープ形状のパラメータ

ストランド数	8
心綱の直径[mm]	4.8
ロープの長さ[mm]	110

3.3.3 解析条件

本モデルの解析条件を表 3.13 に示す.

また, 境界条件, 荷重条件についてはそれぞれ 3.2.4 項, 3.2.5 項で示したワイヤロープ簡易モデルの解析と同様の条件を設定した.

表 3.13 解析条件

解析ソフト	Hyper Works RADIOSS 陽解法
要素	ソリッド六面体一次要素
接触アルゴリズム	ペナルティ法
摩擦係数	0.1
解析時間	0.05 秒

3.3.4 解析結果

3.3.4.1 解析中の挙動

本解析の解析中($F=4$ [kN])のワイヤロープ断面の様子を図 3-15 に示す. 3.2.7.1 同様ワイヤロープの軸方向の中心の断面を表示している. それぞれの状態は,

0.005[s]: ワイヤロープの軸方向引張力がかかった状態

0.010[s]: 上側の治具とロープが接触

0.015[s]: 下側の治具とロープが接触

0.020[s]~0.030[s]: ロープが圧縮されている過程

0.050[s]: 解析終了時の状態

となっている.

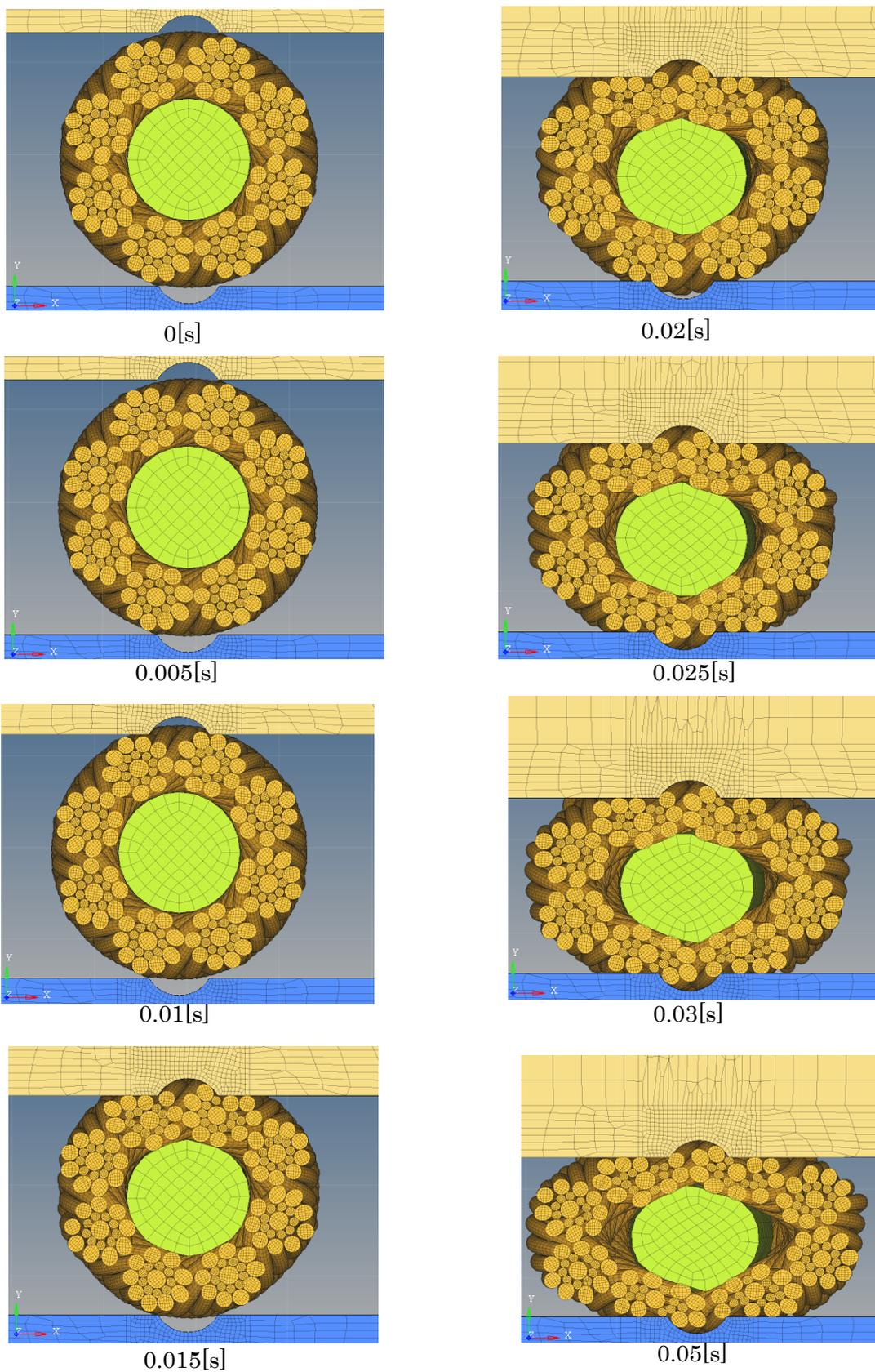


図 3-15 解析中のロープ断面の様子(F=4[kN])

3.3.4.2 ワイヤロープの径方向変位

ワイヤロープ簡易モデル同様，径方向荷重 F を変化させて解析を行い， $F=0.5\text{kN}$ のときの径方向変位を 0 点としたときの荷重と変位の関係を図 3-16 に示す．実験での 5 サイクル目の結果も合わせて示している．3.2.8 同様，詳細モデルの解析結果と負荷時の実験結果とを比較すると，同じ荷重での詳細モデルの変位は実験結果の 2 倍ほどの値となっている．

この理由としては，詳細モデルでは実際のワイヤロープと違って素線同士の接触が少なく，素線が独立に変形していること，そして心綱の形状が円柱状になっていることの 2 点が影響していると考えられる．図 3-17 に荷重がない状態の詳細モデル断面と実際のワイヤロープ断面，図 3-18 に 8kN の荷重で径方向に圧縮したときの詳細モデル断面と実際のワイヤロープ断面を示す．荷重がない状態において，実際のワイヤロープは同じストランドを構成する素線のすき間はほぼないのに対して，詳細モデルでは素線にすき間が存在しており，接触していない部分も多くあることが分かる．このため，8kN の荷重を加えたときに実際のロープでは治具に接していないストランドでは断面があまり変形していないのに対し，詳細モデルではすべてのストランドの断面が変形し，素線がほどけ変位が大きくなっていると考えられる．また，心綱の形状が実際はプレフォームによって荷重がかかっていない状態でもストランドが食い込んだような形状になっているのに対し，モデルでは断面は円になっているので，圧縮したときのストランドの動きも大きくなり，治具に接していないストランドと心綱の間に大きな空間ができてしまっていることが確認でき，このこともモデルの変位が大きくなっている原因と考えられる．

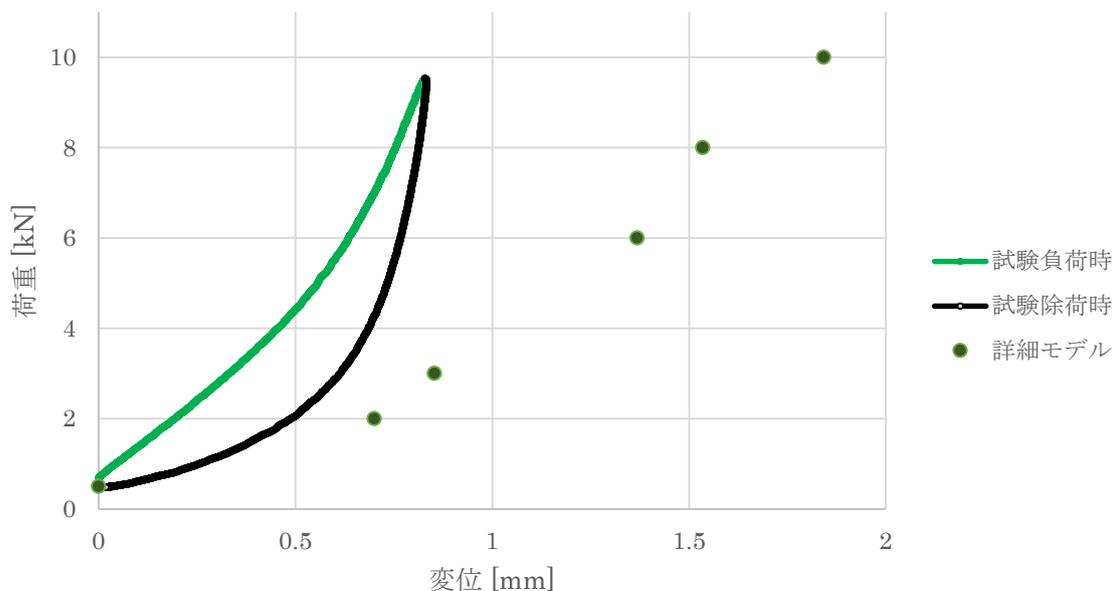


図 3-16 ワイヤロープ詳細モデルの解析結果と実験結果の比較

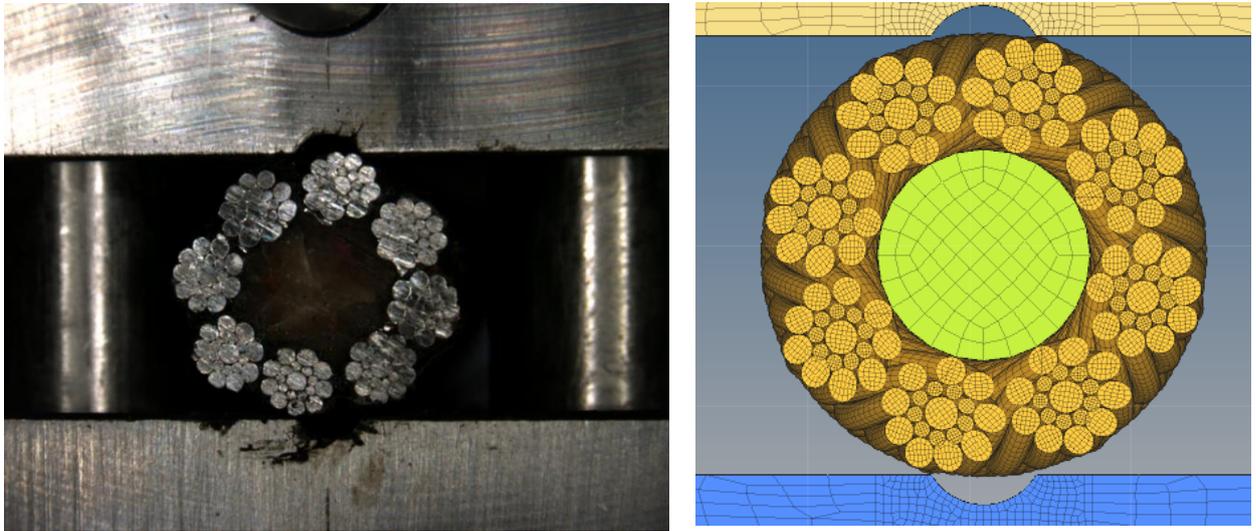


図 3-17 荷重 0kN のときの詳細モデルおよび実際のワイヤロープの断面の様子

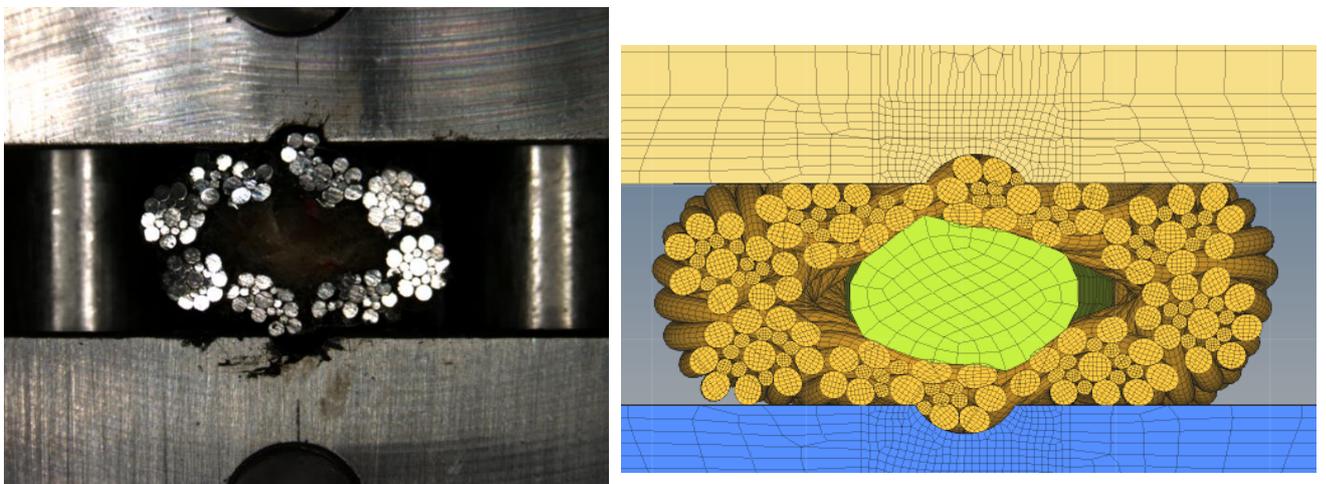


図 3-18 荷重 8kN のときの詳細モデルおよび実際のワイヤロープの断面の様子

第4章 結論

4.1 結論

本研究ではエレベータ用ワイヤロープとして広く使用されている $8 \times S(19)$ ロープの簡易解析手法として、ストランドを一介の素材としてモデリングしたワイヤロープの簡易モデルをストランドの異方性を考慮して材料特性を与えて作成し、そのモデルの径方向圧縮解析の結果と実際のワイヤロープの径方向圧縮試験の結果を比較した。その結果、ストランドの材料特性を等方弾性体として設定していたこれまでの簡易モデルと比べて、より実験結果に近い挙動を示すことが確認できた。さらに、素線 1 本 1 本まで再現したワイヤロープ詳細モデルについても同様の解析を行い、その妥当性についても評価し、改善点について考察した。

4.2 今後の展望

4.2.1 心綱のモデル改善

今回のワイヤロープ簡易モデルでは、径方向の荷重と変位の関係のグラフが直線的になっていたが、実験結果では荷重を大きくするとグラフの傾きは急になっていた。これは今回のモデルでは心綱をヤング率 150MPa の弾性体として材料特性を設定しているが、実際の心綱は荷重をかけるほど弾性率が大きくなるという性質を持っているために、異なる挙動を示す結果が得られたと考えられる。よってガスケット要素などの材料特性を設定すれば、より実験結果に近い挙動を示すモデルが作成できると考えられる。

また、実際の使用状況に合わせた解析においては径方向にかかる荷重の幅が今回の解析よりも小さいので、荷重・変位曲線が直線とみなせると考えられ、ヤング率を適切な値に設定すれば、弾性体としての材料特性の設定も有効と考えられる。ヤング率については心綱のみについての径方向圧縮試験を行い得られた荷重変位曲線のうち、実際の使用状況でかかる荷重の範囲のグラフの傾きを利用してヤング率を求めて設定する。

さらに形状に関して、今回は円柱状にしていたがプレフォームを考慮してストランドが心綱に食い込んだ形状にすることでストランドの過剰な動きが抑えられ現実に近いモデルになると考えられる。

4.2.2 詳細モデルの素線形状の改善

ワイヤロープを構成する素線は、今回は断面が完全な円になるようにモデルを作成しているが、実際はワイヤロープを製造する際にストランドを締め付けることにより素線同士が強く接触して塑性変形し素線の断面は完全な円とはなっていない。今回のモデルおよび

実際のロープのストランド1本の断面の拡大図を図4-1に示す。素線同士の接触面積が小さく、同じストランド内の素線が独立に動いてしまうため、今回のモデルでは現実のロープと解析中の断面の様子が大きく異なっていた。今後は素線の塑性変形を考慮してモデルを作成する必要がある。

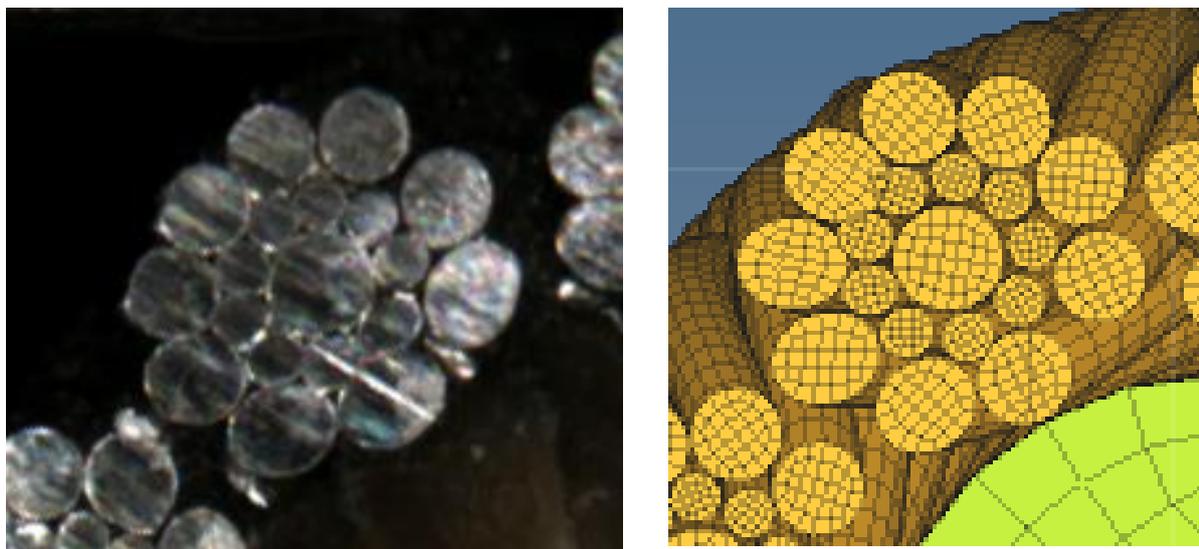


図 4-1 モデルおよび実際のワイヤロープのストランド1本の断面の拡大図

謝辞

本研究は、著者が酒井・泉研究室在籍中に泉聡志教授のご指導のもとで進められたものです。泉教授には普段の研究においてたくさんのご助言をいただき、研究に行き詰ったときにも非常に助かりました。お忙しい中ご指導してくださり、本当にありがとうございます。酒井信介教授、波田野明日可助教授には研究会での発表において、より良い研究、発表をするための貴重なご意見をたくさんいただきました。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山際様には、ワイヤロープの径方向圧縮試験を行うにあたり、実験装置の提供と治具などの必要部材の発注、そして実験の方針や結果についての考察に対するアドバイスなど、本当にたくさんの面でご指導、ご協力いただきました。心より感謝申し上げます。労安研の食堂で昼食をとりながらした雑談では、興味深い話が聞けたりして楽しかったです。

共同研究先である三菱電機株式会社の角谷様には、打ち合わせの際にワイヤロープのモデル化についてや、圧縮試験で与える荷重の大きさなどについてご助言をいただきました。僕の研究のペースが遅く、ご心配ご迷惑をおかけしてしまいましたが、それでも丁寧にアドバイスをしていただけて研究をここまで進めることができました。ありがとうございました。

Altair Engineering 株式会社様には、有限要素法解析で使用したソフトウェアプラットフォーム HyperWorks を提供していただきました。そして同社の柴田様、依知川様、阿部様には研究を始める段階で解析の進め方についてアドバイスをいただきました。特に柴田様には、研究室に来ていただいたときにも簡易モデル作成についてのご助言をいただき、とても参考になりました。ありがとうございました。

当研究室 OB の寺田さんは本研究の土台となる研究をしていただいております。寺田さんの論文はとても参考になりました。直接お会いしたことはありませんが感謝しています。ありがとうございました。同じく当研究室 OB の五十君さんは、僕が五十君さんの研究を引き継ぐということで、労安研まで来ていただいて試験機の使い方を教えてくれたり、研究の進め方に関してアドバイスをしていただきました。ありがとうございました。

研究室の先輩方には、まだ何も分からず、どう研究に着手すれば困り果てていた僕に研究の進め方、ソフトウェアの使い方、そして発表スライドの作成など様々なことをアドバイスしていただきました。特に M2 の松下さんにはご自身の研究が忙しい中でも、いくつもの質問に親切に対応していただき、とても助かりました。みなさんありがとうございました。同期の仲間も、仲良くしていただいて研究室生活を非常に楽しく過ごすことができました。ありがとうございました。

最後に本研究を行うにあたりご指導、ご協力していただいたすべての皆様に深く感謝申し上げます。以上を謝辞とさせていただきます。

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] 東京製綱株式会社. ワイヤロープの概要.
<http://www.tokyoropeco.jp/product/wirerope/outline.html>.
- [4] Federico H Hruska. Radial forces in wire ropes. *Wire and wire products*,
Vol.27,No.5 pp.459-463. 1952.
- [5] FH Hruska. Tangential forces in wire ropes. *Wire and wire products*, Vol.28, No.5,
pp.455-460. 1953.
- [6] A. E. H. Love. *A treatise on the mathematical theory of elasticity*. Dover
Publications Inc. , 1944
- [7] 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.
- [8] G. A. Costello. *Theory of Wire Rope*. Mechanical Engineering Series. Springer
New York, 1997
- [9] 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.
- [10] 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: IWRC
6 Fi (29) の場合. *材料*, Vol. 44, No. 503, pp. 1086-1091, 1995.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 五十君 信治, “エレベータ用ワイヤロープのストランドにおける径方向力学特性の解明”, 東京大学工学部機械工学科, 卒業論文, 2017.
- [19] 佐野良輔, “エレベーター用ワイヤロープのゾーミング開発手法の開発”, 東京大学工学部機械工学科, 卒業論文, 2016.
- [20] 末益 博志. 入門 複合材料の力学. pp59-64. 2009
- [21] “ワイヤロープ No.20”, 東京製綱, 2013.
- [22] Mohammed Raouf and Ivana Kraincanic. Analysis of large diameter steel ropes. *Journal of engineering mechanics*, Vol.121, No.6, pp.667-675, 1995.
- [23] 労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNIOSHI-SRR-NO.44(2014),
<https://www.jniosh.go.jp/publication/doc/srr/SRR-No44-1-1.pdf#search=%27%E3%83%AF%E3%82%A4%E3%83%A4%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%97+%E7%96%B2%E5%8A%B4%E8%A9%A6%E9%A8%93%27>
- [24] 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.
- [25] 鈴村 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.
- [26] 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.