

る。本構造物の様に、張力を導入したケーブル構造を、張力導入方向への大きな軸力が作用する部分に適用した事例は少ない。

2. ケーブルトラス構造の概要

25 m の方立を例として、ケーブルトラス構造の概要を図-3 に示す。曲げ、軸力に抵抗するマリオン主材とこれを補強するテンション架構で構成されており、上部はリブ補強した正方形の鋼板で大屋根肩パイプに固定されている。下部は、ケーブルへのプレテンション導入のための緊張機構を兼ねており、リブ補強された大きい三角形鋼板（固定板）と、緊張用の三角形鋼板で構成されている。

テンション架構は、2組のケーブル、7組の束材およびテンションロッドから構成されている。ケーブルは、室内方向の水平力に抵抗するように室内側に凸に配された2本1組のケーブル（正圧側ケーブル）と、室外方向の水平力に抵抗するように室外側に凸に配された2本1組のケーブル（負圧側ケーブル）で構成されている。これらのケーブルには、方立に外力としての軸力や水平力が作用してもケーブル張力が失われないように、1本当たり18 tf（破断荷重の23%）のプレテンションが導入されている。束材は、ケーブルの配置形状を保持すると同時に、マリオン主材からの応力をケーブルに伝達する。

各束材は2つの部材で構成されている。テンションロッドは、各束材利の頂部をつないでおり、各束材間の間隔を保持する。テンションロッドの端部は、トラス上・下端部の鋼板に緊結されている。

束材と正圧側ケーブルおよび負圧側ケーブルとの接点の状況を、それぞれ写真-1と写真-2に示す。正圧側ケーブルは、2つの部材で構成される束材の外側を通り、負圧側ケーブルは束材の内側を通る取り合いになっている。各ケーブルは、ケーブル受け金物を介して束材に支持されている。ケーブル受け金物は、すべり板（四フツ

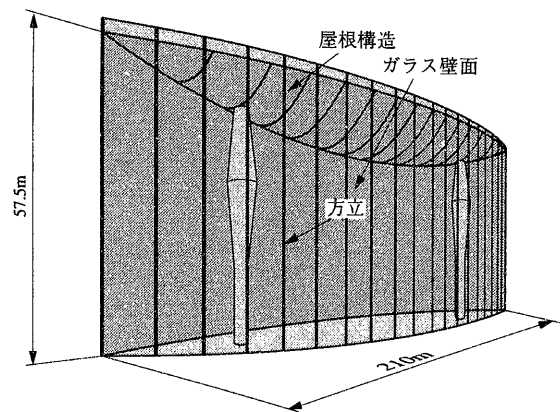


図-1 ガラス棟の構造概要

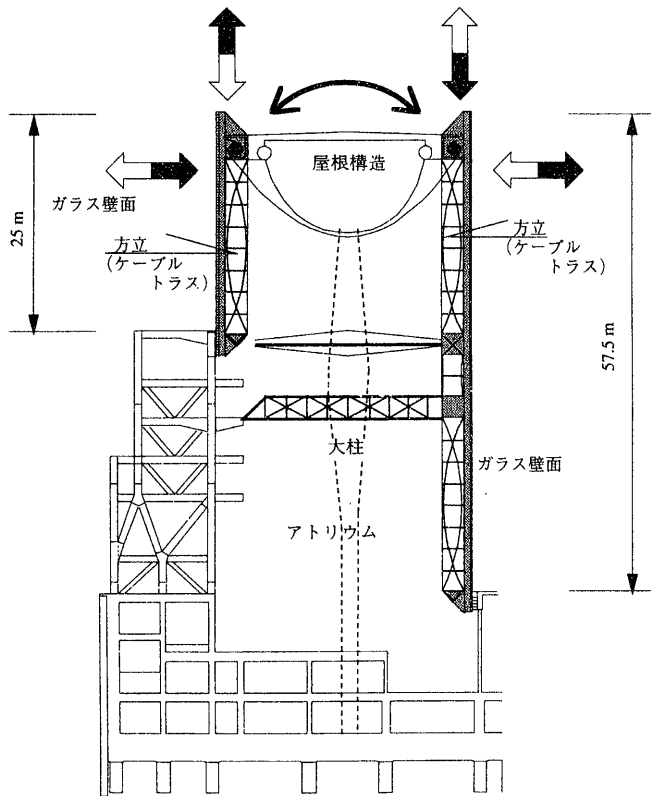


図-2 ガラス棟の断面

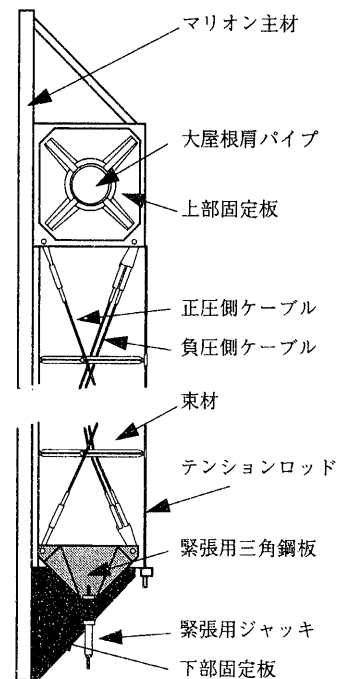


図-3 ケーブルトラスの構造概要

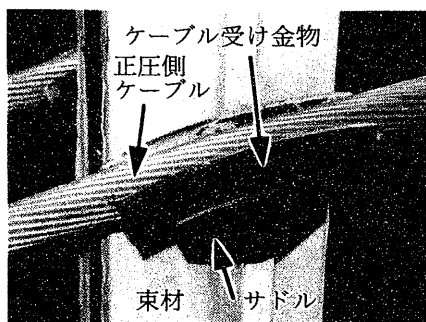


写真-1 ケーブル支持部
(正圧側ケーブル)

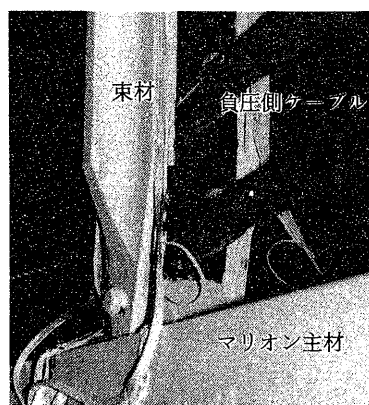


写真-2 ケーブル支持部
(負圧側ケーブル)

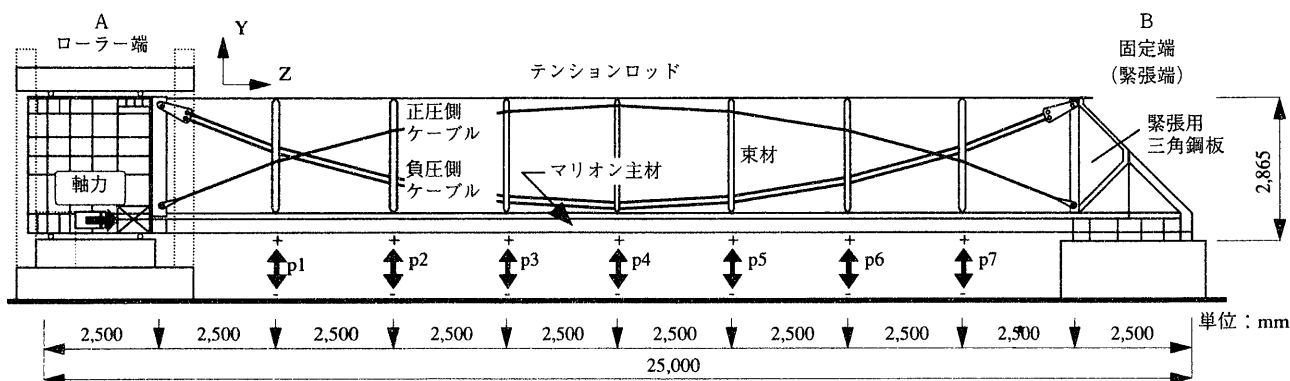


図-4 試験体支持・構造性能確認実験時加力の概要

化エチレン樹脂)を介してサドルに取り付けられている。さらに、サドルはピンを介して束材に取り付けられており、回転することができる。ケーブル受け金物の断面形状は、接触係数(ケーブル接触幅のケーブル直径に対する比)¹⁾が1.0のU形溝である。また、ケーブル屈曲に対する形状は、ケーブル屈曲の曲率半径(R)のケーブル直径(d)に対する比(R/d)で示せば10である。

ケーブルへのプレテンションの導入は、次の手順に従う。まず、ケーブルの上端部をトラス上部の鋼板に、下端部を緊張用の三角鋼板にそれぞれ結合し、方立上部から4本のケーブルで緊張用三角鋼板を吊り下げた状態とする。次いで、この三角鋼板を下方方向にジャッキで引き下げることにより、4本のケーブルに同時に張力を導入する。ケーブル張力が所定の値に達した後に、緊張用三角鋼板を下部固定板に緊結・固定して完了する。プレテンションの導入時には、ケーブル受け金物はストッパーによりサドルに固定されている。したがって、プレテンション導入時には、ケーブルとケーブル受け金物との間で滑動が生じる。プレテンション導入完了後は、ストッパーを取り外し、以後はケーブル受け金物とサドルとの間で滑動が生じる。

3. 張力導入実験

3.1 実験目的

2章で述べた緊張方法では、ケーブルとケーブル受け金物との間の摩擦や、緊張用三角鋼板と下部固定板との間の摩擦により荷重損失が生じる。そのため、ケーブル内の張力分布が一様でない、緊張力をジャッキの荷重により管理できないなどの問題点がある。実物大のケーブルトラス試験体を使用して、次の点を明らかにする。

- ① 張力導入時の摩擦による張力ロスの測定および摩擦低減材の効果
- ② 実施工時の張力確認方法

3.2 実験概要

4章で後述する構造性能確認実験で使用する試験体の組立時に、上記の検討を行った。試験体は、25 mのケーブルトラス1スパンの実大モデル一体とした。試験体の設置状況を図-4に示す。実構造物では、ケーブルトラスは鉛直部材であるが、実験ではマリオン主材が下になるように水平に設置した。試験体の支持条件は、A端側は、z軸方向の移動のみ可能なローラー支持、B端側は固定である。構造性能確認実験にて中間荷重が加えられる

表-1 鋼材の機械的特性

	降伏応力 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	伸び率 (%)	使用部位
PL-70	35.72	54.38	34.2	マリオン主材
PL-65	37.69	55.41	33.9	マリオン主材
PL-60	37.50	55.22	33.9	マリオン主材
PL-50	37.52	54.72	34.1	マリオン主材
PL-32	39.99	58.29	21.9	マリオン主材
A	41.53	60.29	20.7	マリオン主材 (熱押形鋼)
B1	36.46	58.70	22.1	束材 (熱押形鋼)
B2	34.73	59.77	22.2	束材 (熱押形鋼)
B3	36.13	59.43	21.3	束材 (熱押形鋼)

表-2 摩擦係数の平均値

	低摩擦 対策	μの平均値				平均
		正圧側		負圧側		
		奥側	手前側	上側	下側	
TEST1	5510のみ	0.118	0.144	0.124	0.139	0.131
TEST2		0.078	0.148	0.130	0.149	0.126
TEST3		0.102	0.151	0.133	0.147	0.134
平均		0.099	0.148	0.129	0.145	0.130
TEST4	5510 + PTFE	0.123	0.100	0.086	0.068	0.094
TEST5		0.122	0.122	0.094	0.066	0.101
TEST6		0.120	0.121	0.092	0.066	0.100
TEST7		0.117	0.105	0.074	0.073	0.097
平均		0.120	0.112	0.086	0.068	0.097

束材位置では、y軸方向、z軸方向にのみスライド可能なローラーで支持し、トラス面外（紙面直交方向）への変位を拘束した。

試験体を構成する部材、部品はすべて実設計で使用されているものと同じディテール、材料、仕様とした。ただし、上部固定板と下部固定板は、構造性能確認実験での所定の境界条件を得るため、形状を変更している。すなわち、実トラスの上部側に相当する端部（ローラー端）には、実験時の支持条件を確保するために、鋼板をリブ補強したブロックと、軸力加力のためのアームが一体となるように製作されている。また、実トラスの下部側に相当する端部（固定端）には、実験時に試験体を反力床に固定するためのブロックが一体となるように製作されている。ケーブル張力導入のための三角形の鋼板など、緊張端のディテールは実物と同じとした。

張力導入において、ケーブルへの張力導入は、2台の70tfセンターホール型ジャッキを用いて、2章で述べた方法に従って行った。

3.3 材料特性

マリオン主材の鋼材の機械的特性（降伏応力、引張強度、伸び率）を表-1に示す。板厚50mm以上の鋼材からは、JIS Z2201に定める4号試験片、それ以外の鋼材か

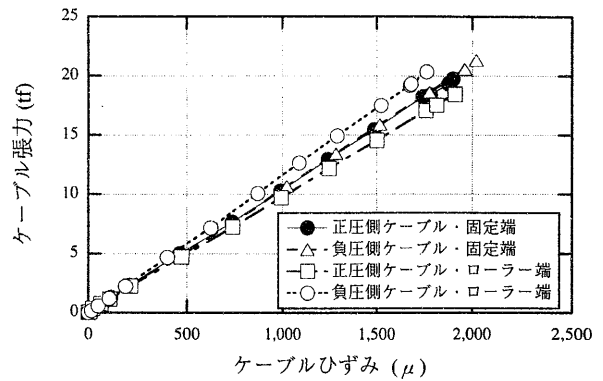


図-5 ケーブル張力-ケーブルひずみ関係

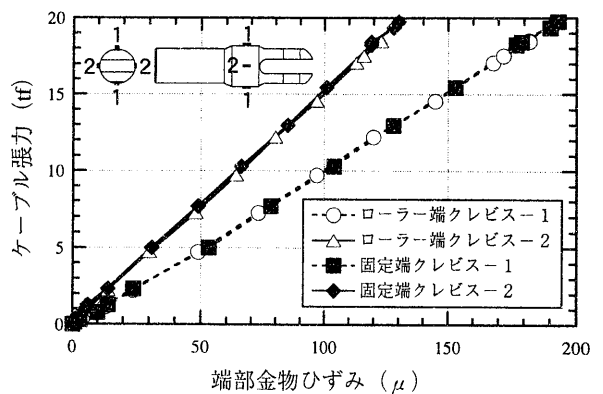


図-6 ケーブル張力-端部金物ひずみ関係

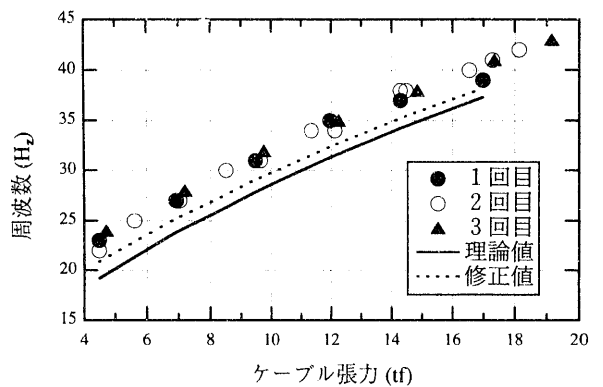


図-7 ケーブル張力-周波数関係

らは、1号A試験片を3本ずつ採取、JIS Z2241に準じて材料試験を行った。ケーブルは、構造用スパイラルロープA級2種(1×37 G/Z φ30)²⁾で、弾性係数16,000 kgf/mm²、破断荷重79.5tfである。また、テンションロッドは、KST-III φ25で、降伏応力4,500 kgf/cm²、引張強度7,000 kgf/cm²、伸び率20%以上である。

3.4 実験結果

3.4.1 摩擦低減方法と摩擦係数 一様な張力を導入するためには、できるだけ摩擦を低減する必要がある。ケーブルとケーブル受け金物の接点に、低摩擦剤として

二硫化モリブデン系乾性被膜潤滑剤 (5510) のみを施した実験を 3 回行い、その後、これと四フッ化エチレン樹脂の乾性粉末潤滑剤 (PTFE) を併用した実験を 4 回行った。結果を表-2 に示す。

この結果から、低摩擦対策として、5510 と PTFE の併用が効果的で、摩擦係数を 0.1 以下とすることができた。

3.4.2 張力管理方法の検討 直接ケーブルの張力を測定する方法として、次の 3 方法を検討した。

- ① ケーブルのひずみ測定
- ② ケーブル端部金物 (クレビス) のひずみ測定
- ③ ケーブル周波数測定

ケーブルの正確な張力は、あらかじめキャリブレーションを行い、荷重-ひずみ関係を調べた鋼棒のひずみから測定した。

(1) ケーブルひずみ ケーブルひずみとケーブル張力の関係を図-5 に示す。ケーブルひずみは、一断面につき 4 点のひずみを測定して平均した。線形性は得られているが、測定箇所により勾配が異なるため、ケーブルひずみは張力管理に適さない。

(2) ケーブル端部金物 (クレビス) のひずみ 正圧側ケーブルについて、ケーブル端部金物のひずみとケーブル張力の関係を図-6 に示す。端部金物は図中に示す形状をしているが、爪が伸びた部分に貼付したゲージの値を図中破線で、その直交位置に貼付したゲージの値を図中実線で示す。貼付位置の違いにより勾配が異なるが、貼付位置が同じであれば測定箇所が異なっても勾配が同じとなり、再現性が期待できる。したがって、あらかじめキャリブレーションを行っておけば、金物ひずみによる張力管理は可能であり、精度も高い。

(3) ケーブル周波数 図-7 にケーブル張力と周波数の測定結果を示す。図中実線は弦の張力と周波数の関係式、破線はケーブルの曲げ剛性による影響を加えた修正式によるものである。測定は 3 回行ったが再現性があり、理論値の特性を示している。理論値と測定値の誤差は、ケーブルの境界条件などの影響と考えられる。修正係数などの検討は必要だが、張力のおよその値を評価する方法として簡便である。

4. 構造性能確認実験

4.1 実験目的

本ケーブルトラスは、レベル 2 相当の地震力に対して弾性設計されている。本実験では、設計時想定荷重を超える荷重を載荷し、その耐荷能力を確認する。また、本ケーブルトラスでは、ケーブルと金物の接点で摩擦、滑動が生じる。この様な滑動、摩擦力の影響は理論上明解ではなく、モデル化が難しい。数値解析モデルの妥当性を検討するための資料とする。

4.2 実験概要

図-4 に加力の概要を、写真-3 に加力の状況を示す。軸力は、試験体ローラー端側に取り付けられた加力アームに、2 台の 300 tf ジャッキで加力する。鉛直荷重は各

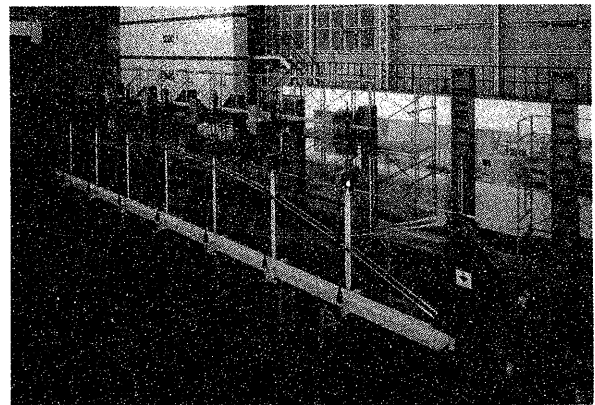


写真-3 加力状況

束材位置 (p1~p7) に反力フレームを組み、試験体上下に設置した正加力用と負加力用の 2 台の 35 tf センターホール型ジャッキで加力する。これらのジャッキ (合計 14 台) は、集中制御により連動させ、各載荷点の荷重が同じになるように加力した。

設計時に想定されているレベル 2 相当の地震に相当する載荷として、定軸力 374 tf 下で各載荷点での鉛直荷重を ± 8 tf まで静的に 2 回繰返し載荷し、弾性挙動を示すことを確認した。ここで、正圧側ケーブルの張力が増加する方向、すなわち図-4 の上方向の荷重を正方向荷重とした。次に、軸力を一定に保持したまま、各載荷点での鉛直荷重が ± 10 tf (レベル 2 水平力の 1.25 倍)、 ± 12 tf (レベル 2 水平力の 1.5 倍) となる振幅で各 1 回繰返し載荷した。その後、正方向にジャッキ、変位計のストロークが限界に達するまで加力し、除荷後、ジャッキ、変位計を設置し直して再加力という操作を 3 回繰返した。荷重が 17 tf (レベル 2 水平力の 2 倍以上) に達したことを確認した後、実験を終了した。

4.3 実験結果

実験結果として、振幅 ± 10 tf での載荷以降について、各載荷点の鉛直荷重-スパン中央部の鉛直変位関係を図-8、鉛直荷重-軸縮み関係を図-9、鉛直荷重-正圧側ケーブルと負圧側ケーブルの各 2 本の合計張力関係を図-10 に示す。

図-8 から、レベル 2 を超える荷重に対する荷重-変位関係は、非線形性を示すことがわかる。これは、マリオン材が塑性化することと、反対側のケーブル張力が失われることに起因している。図-10 に示すように正方向加力に対しては、約 10 tf で負圧側ケーブルの張力は零となり、負方向加力に対しては、約 8 tf で正圧側ケーブルの張力は零となっている。ここで、負圧側のケーブル張力が失われる荷重が低い原因は、ケーブル支持点の移動が原因である。負圧側ケーブルは、一端は固定端の緊張用三角鋼板に、他端はローラー端ブロックの上部に緊結されている。これらの点は、マリオン主材から約 2.5 m の高さであり、端部ブロックの回転、治具等の弾性変形の影響を受け易い。

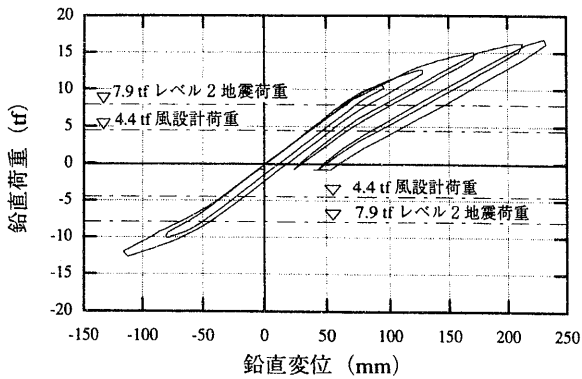


図-8 鉛直荷重-鉛直変位関係

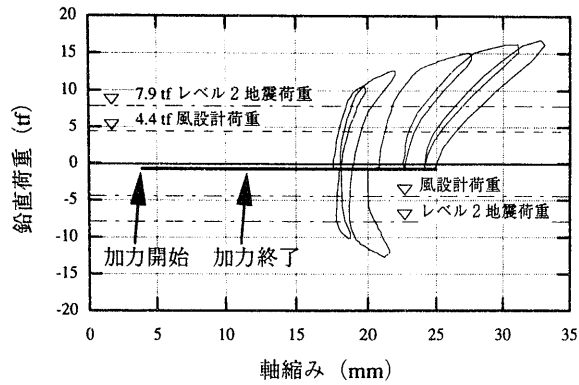


図-9 鉛直荷重-軸縮み関係

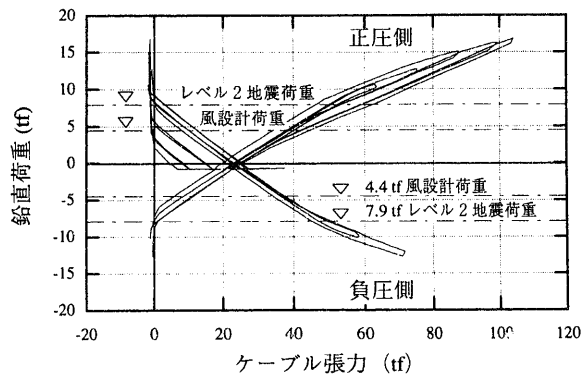


図-10 鉛直荷重-ケーブル張力関係

図-9 から塑性域での繰返し載荷が行われることにより、軸縮みが累積されることがわかる。それにより、図-10に示すように、ケーブル張力が低下し、反対側のケーブル張力が失われる荷重も低下する。そのため、正方向に加力、除荷を繰返した場合の荷重-変位関係において、剛性が低下する荷重は繰返すごとに低下している。しかし、剛性低下後も耐荷能力は十分にあり、載荷を行った範囲内では、荷重-変位関係は負勾配にはならなかった。実験終了後、マリオン主材には、中央部で約 40

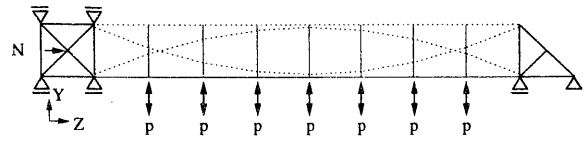


図-11 解析モデル

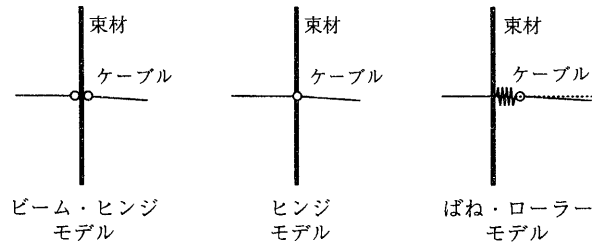


図-12 ケーブルと束材の接点のモデル化

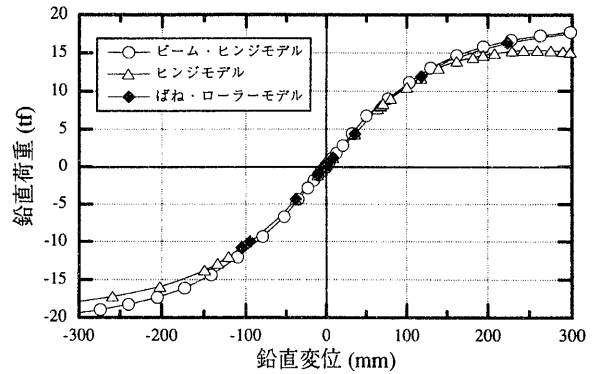


図-13 モデル化による比較 (鉛直変位性状)

mm の残留変形が生じたが、局部座屈などの損傷はなかった。

5. 数値解析モデルの検討

本ケーブルトラスを解析する上で問題となる、ケーブルと束材の接点のモデル化について検討する。

ケーブルと束材に取り付けられたケーブル受け金物との間に生じる、滑動および摩擦力を的確にモデル化するのは困難なため、ここでは3タイプのモデル化を試み、実物大ケーブルトラスモデルの構造性能確認実験結果と比較してモデル化の妥当性を検討する。

5.1 解析モデルと解析方法

構造性能確認実験の試験体を図-11に示すようにモデル化した。2本1組のケーブルおよび束材は、それぞれ1本に集約している。ローラー端のブロック、固定端の緊張用三角鋼板および下部固定板は、剛性の高いトラスに置換している。図中の破線の部材は、軸圧縮力を負担できないものとしている。解析には汎用の非線形解析プログラム「ABAQUS」を使用し、幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮している。鋼材の応力-ひずみ関係は、降伏後の第2勾配を弾性勾配の1/100とした Bi-Linear モデルを仮定した。

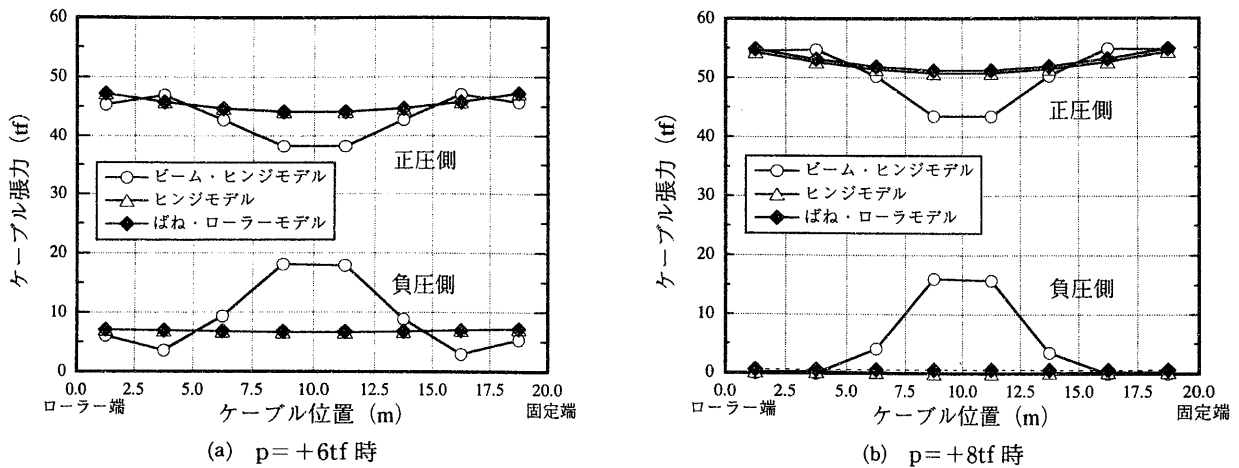


図-14 モデル化による比較 (ケーブル張力分布)

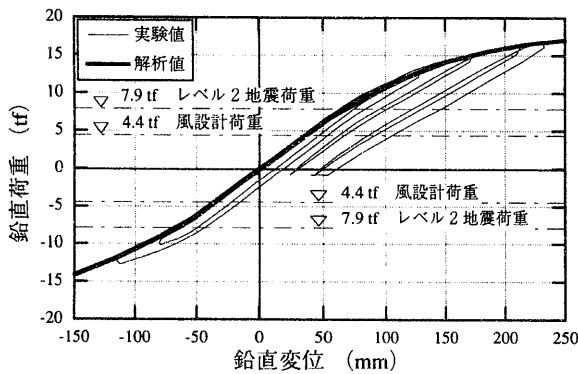


図-15 実験値と解析値の比較 (鉛直変位性状)

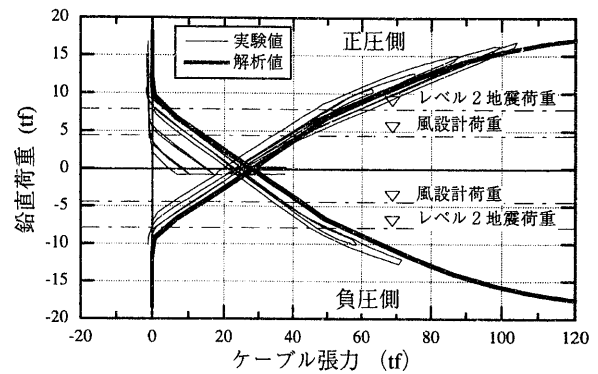


図-16 実験値と解析値の比較 (ケーブル張力変動)

5.2 ケーブルと束材との接点のモデル化と滑動・摩擦の影響

図-12に、ケーブルと束材との接点のモデルを3種類示す。

(1) ビーム・ヒンジモデル 束材を曲げに抵抗するビーム要素とし、ケーブル材は各束材にヒンジ接点を介して接合されている。このモデルは、ケーブルと束材との間の滑動は全くなく、摩擦力が無限大の場合に相当する。束材によりケーブルが拘束されているので、各束材間の張力の不均衡が大きくなる場合には実現象と良く対応しないと考えられる。

(2) ヒンジモデル 束材とケーブルとの接点をヒンジとし、束材は曲げ抵抗しないトラス要素としてモデル化している。このモデルでは、束材に曲げモーメントが生じないが、束材が曲げ抵抗しないため、各束材間のケーブル張力の不均衡が生じても接点の移動により釣り合い位置が決定され、ビームヒンジモデルよりもなめらかな張力分布になると予想される。

(3) ばね・ローラーモデル 束材はビーム要素でモデル化し、ケーブルと束材を水平方向にのみ移動できるように剛性無限小のばねで結びつけている。摩擦力が無

い場合に近いモデル化である。ただし、束材とケーブルとの接点で水平反力が生じないので曲げ材に曲げ応力が生じず、ケーブル張力分布も一樣にならない。

図-13に、ケーブルと束材との接点のモデル化の相違による、各載荷端の鉛直荷重—スパン中央部の鉛直変位関係の比較を示す。大変位域では、モデルによる差が若干見られるが、本ケーブルトラスの設計荷重の範囲内では、顕著な差は見られない。また、摩擦無限大に近いビーム・ヒンジモデルと摩擦無限小に近いばね・ローラーモデルで差がほとんど生じていないことから、荷重—変位関係に関しては滑動や摩擦の影響はほとんど無いといえる。

図-14に、各載荷点の鉛直荷重 p が $+6\text{tf}$ と $+8\text{tf}$ 時における、各束材間のケーブル張力の分布を示す。摩擦が無限大に近いビーム・ヒンジモデルでは、中央部と端部の張力の不均衡が大きい。これは、トラス効果によるものである。このように、摩擦が無限大の場合と無限小の場合では、ケーブル張力の分布に大きな相違が生じる。 $p = +8\text{tf}$ でヒンジモデルとばね・ローラーモデルの負圧側は、いずれの束材間の張力もほぼ同時に零になっており、ビーム・ヒンジモデルでも端部の張力は零になっている。

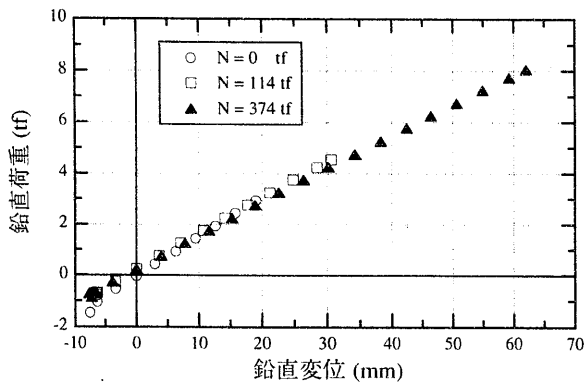


図-17 軸力による剛性低下 (実験値)

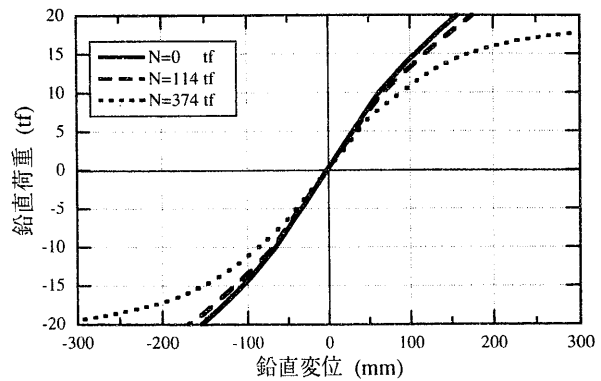


図-18 軸力による剛性低下 (解析値)

図-13の荷重-変位関係は、いずれのモデルにおいても、 $p=+8$ tf以上の荷重域から剛性低下が顕著になり始めている。全体挙動におよぼす部分的な張力分布の相違の影響は、ほとんど見られない。

5.3 実験結果との比較

ビーム・ヒンジモデルによる解析結果を実験結果と比較する。既に4.3節で述べたように、実験では負圧側ケーブルの端部支持点とマリオン主材の材端との間に相対変位を生じており、完全な固定端になっていない。この影響を考慮するために、ケーブル支持点の水平移動とケーブル張力の実測値からばね剛性をもとめ、このばねとケーブルが直列につながったものとして求めた見かけのケーブル剛性を用いて解析した。図-15に鉛直荷重-鉛直変位関係を、図-16に鉛直荷重-ケーブル張力関係を示す。荷重-変位関係の剛性、鉛直荷重の増減にともなうケーブル張力の変化率などは、実験結果に良く対応している。

5.4 幾何学的非線形性の影響

軸力 N が 0 tf, 114 tf, 374 tf の場合の鉛直方向の実験剛性の比較を図-17に、数値解析結果の比較を図-18示す。

図-17から、軸力が大きくなると明らかに剛性は低下していることがわかる。鉛直変位が 20 mm までの範囲で比較すると、 $N=374$ tf の場合の剛性は $N=0$ tf の場合の87%であった。図-18から、大変位の領域では、軸力の存在の影響のために、剛性の低下の大きいことがわかる。

本ケーブルトラスは、ケーブル張力を失うと剛性が低下し、構造性能が変化することから、ケーブル張力の損失時期の予測が重要である。 $N=374$ tf の場合について、ケーブル張力損失時の荷重を求めてみると、幾何学的非線形性を考慮しない場合は、これを考慮した場合よりも約41%高い評価となった。

6. 結語

(1) ケーブルの張力導入方法と張力管理方法 適切な低摩擦剤を選択することにより、ケーブル接点での摩擦係数は、0.1以下とすることができた。また、ケーブル張力を管理する方法としては、端部金物のひずみを測定する方法が最も信頼性が高い。

(2) ケーブルトラスの耐荷能力と安定性 本ケーブルトラスは、設計で想定されている荷重に対し、ほぼ線形な挙動を示し、設計導入張力も妥当なことが確かめられた。また、設計荷重を越える荷重に対しては、マリオン主材の塑性化、加力方向と反対側のケーブル張力の消失により剛性が低下するが、十分な耐荷能力を保持していることが確認された。

(3) 数値解析モデルの検討 本ケーブルトラスの全体挙動は、ケーブル接点での滑動および摩擦を無視した解析モデルでも把握できることが確認された。また、高軸力下では $P-\Delta$ 効果の影響が大きく、ケーブル張力の消失に起因する剛性低下を予測する上で、幾何学的非線形性を考慮した解析の重要性が確認された。

謝辞

本研究に際し、東京都財務局の関係者、東京理科大学・平野道勝教授、日本大学・斉藤公男教授、東京大学・神田順教授、神奈川大学・大熊武司教授、ラファエルヴィニオリ建築士事務所、および共同企業体の関係者にご協力頂きました。ここに関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：建築構造ケーブル設計施工指針・同解説, JSSC, Vol. 19, No. 207, (1983)
- 2) 日本鋼構造協会：構造用ケーブル材料規格, JSSC, Vol. 14, No. 149, (1978)