

## 第3章 鋼橋の解析モデル

### 3.1 鋼部材と部材接合のモデル化

#### 3.1.1 鋼部材のモデル化の方法

橋梁をモデル化する際、有限要素法のはり要素（ファイバー要素）、シェル要素、ソリッド要素等が用いられる。鋼橋を構成する鋼部材は薄板構造が多いことから、シェル要素がよく使用され、ソリッド要素を使うのは、接合部、溶接部等の詳細な応力状態を評価するときに限られる。鋼橋の耐震性能照査における耐荷力解析（Pushover 解析）や地震応答解析にはシェル要素を使うことになるが、局部座屈を直接考慮した解析を行うことは比較的少ないので、通常は、梁要素（ファイバー要素）で十分な場合が多い。

本委員会では、塑性化を許容させるブレース材に着目しているため、ここでは圧縮が支配的な鋼部材を対象とした。具体的には、4.1 で後述する鋼トラス橋ブレース材パネルの実験供試体を例にして、ファイバー要素およびシェル要素による解析モデルについて説明する。

まず、鋼部材のブレース材をモデル化する場合、要素の種類について表 3.1 に整理している。もっとも簡単な要素はトラス要素であり、2018 年制定の鋼・合成構造標準示方書〔耐震設計編〕（以下、現学会示方書）では、ブレース材を 1 要素のトラス要素でモデル化している。このトラス要素に対して、軸力と変位の非線形性を定義する。例えば、学会示方書では、「修正柴田・若林モデル」が提案されている。従来の耐震設計においては、曲げ部材を複数のはり要素で定義して、そのはり要素に対して曲げモーメントと曲率の非線形性を与える場合が多かった。本委員会が推奨するファイバー要素は、一般的なファイバー要素（1 次の変位関数、一定ひずみ要素）から、ファイバー高次要素、さらに、直応力だけでなくせん断応力を連成して塑性判定を行うファイバー連成要素までである。なお、このファイバー連成要素については、文献 1) を参照されたい。通常の解析では、ファイバー要素で十分な場合が多い。局部座屈まで直接表現しよとするとシェル要素を使用することになる。

次に、要素が決まると、材料を選定することになる。材料の種類を表 3.2 に整理している。実務では、応力-ひずみ関係（骨格曲線）を 2 直線で近似（バイリニアモデル）して、硬化則として移動硬化則を選定した「バイリニアモデル+移動硬化則」がもっとも利用されている。本報告書も、これを基本としてモデル化している。骨格曲線を 3 直線とするトリリニアモデルもあるが、繰り返し载荷に

表 3.1 要素の種類とレベル

要素レベル	内 容
E0	トラス要素
E1	はり要素
E2	ファイバー要素
E3	ファイバー高次要素
E4	ファイバー連成要素
E5	シェル要素

表 3.2 材料の種類とレベル

材料レベル	内 容
B	バイリニアモデル+移動硬化則
T	トリリニアモデル+移動硬化則
ML	高精度な材料構成則

において注意が必要である（詳細は第 2 章を参照）。最大荷重以降の挙動まで、解析精度を求める場合には、応力が上がり続けるバイリニアモデルでは限界があり、高精度な材料構成則を使用することになる（詳細は第 2 章を参照）。

最後に、解析上の鋼部材の接合の種類について、表 3.3 に整理している。現学会示方書も含めて、ブレース材は、1 要素のトラス要素によるモデル化する場合が多かった。すなわち、部材端部はピン結合の状態である。しかし、4.1 で後述するようにブレース材端部付近の変形状態から判断して、部材端部はピン接合ではなく剛接合に近いことが明らかになった。よって、本報告書では、部材接合は全て剛結合としている。また、4.2 においては、繰り返し载荷実験中に部材端部のボルトが滑る現象を示したため、表 3.3 のように接合部の種類として、ボルトのすべりを考慮する接合も含めた。なお、ボルトの接合面のすべり挙動（使用限界）や終局限界の限界状態については、9.1 で最新の研究成果も含めて解説しているので、参照されたい。

表 3.3 部材接合種類

接合種類	内容
—	剛結合
P	ピン結合
S	ボルトのすべりを考慮

### 3.1.2 各モデルの検証

4.1 の鋼トラス橋支点部対傾構の実験供試体（図 3.1）に対して、実験と同様に変位制御の繰り返し载荷（図 3.1）による実験再現解析を実施する。この再現解析を各モデルで行い、モデルの検証を行う。

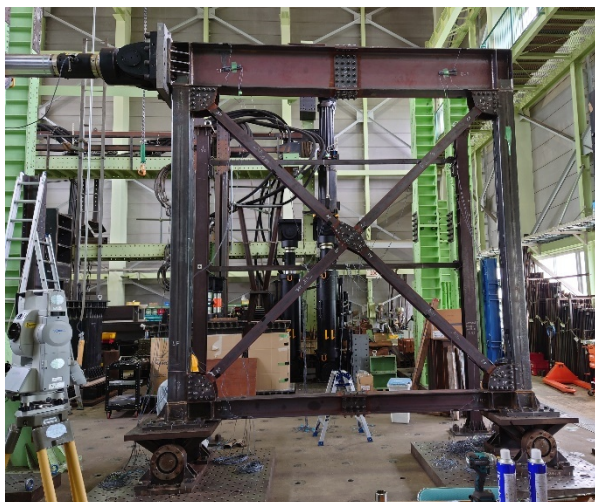


図 3.1 実験供試体

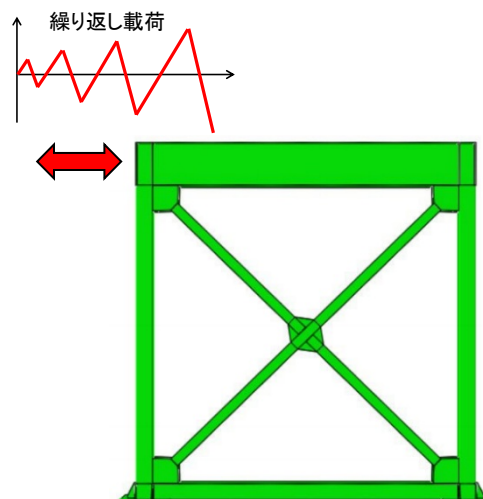


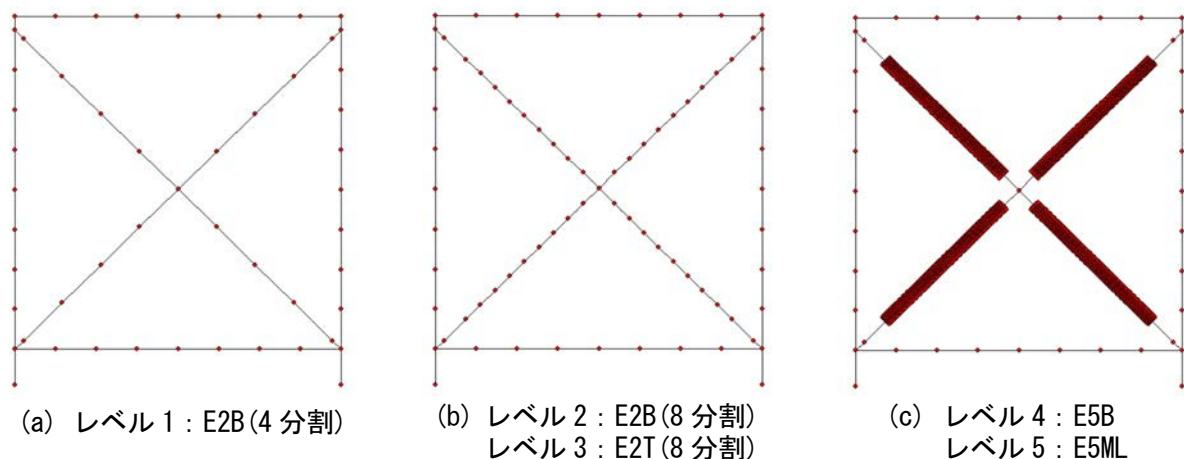
図 3.2 荷重条件

モデルの種類は、表 3.1～3.3 から代表的なものを組み合わせて、図 3.3 に示すようにレベル 1～レベル 5（計算精度の低いモデルから高いモデルまで）の 5 種類とした。ファイバーモデルについては、要素分割を 4 分割と 8 分割の 2 種類とした。なお、着目しているブレース材以外は、ファイバー要素とし全モデル共通である。実験結果（载荷点の荷重－変位関係）と各解析モデルの解析結果を比

較して、**図 3.4** に示す。なお、解析の種類は、材料非線形性以外に幾何学的非線形性も考慮した弾塑性有限変位解析である。

この図から、次のことがわかる。

- ①同図**(b)**から、ファイバー要素でバイリニアモデル+移動硬化則（E2B）8分割が、概ね実験結果を再現できている。
- ②要素分割を同図**(b)**の8分割から4分割にした同図**(a)**から、最大荷重以降が実験結果と異なることから、8分割程度の要素分割は必要である。
- ③同図**(c)**から、ファイバー要素でバイリニアモデルからトリリニアモデルへ変更すると、バイリニアモデルの2次勾配の応力上昇を抑えるため、結果的に実験結果と近くなる。ただし、**第2章**で解説したようにトリリニアモデルの移動硬化則の使用は、避けた方がよい。
- ④同図**(d)**から、ファイバー要素からシェル要素に変更すると、さらに、実験結果とよい精度で一致してくる。それは、実験終了付近で局部座屈が起きており、シェルモデルではそれが表現できるからである。
- ⑤同図**(e)**から、シェルモデルの材料構成則をバイリニアモデル+移動硬化則から多軸マルチリニアモデルへ変更すると、さらに、実験結果と一致してくる。これは、**第2章**で解説したが、多軸マルチリニアモデルが繰り返し塑性履歴を考慮できるからである。



**図 3.3** ブレース材パネルのモデル化

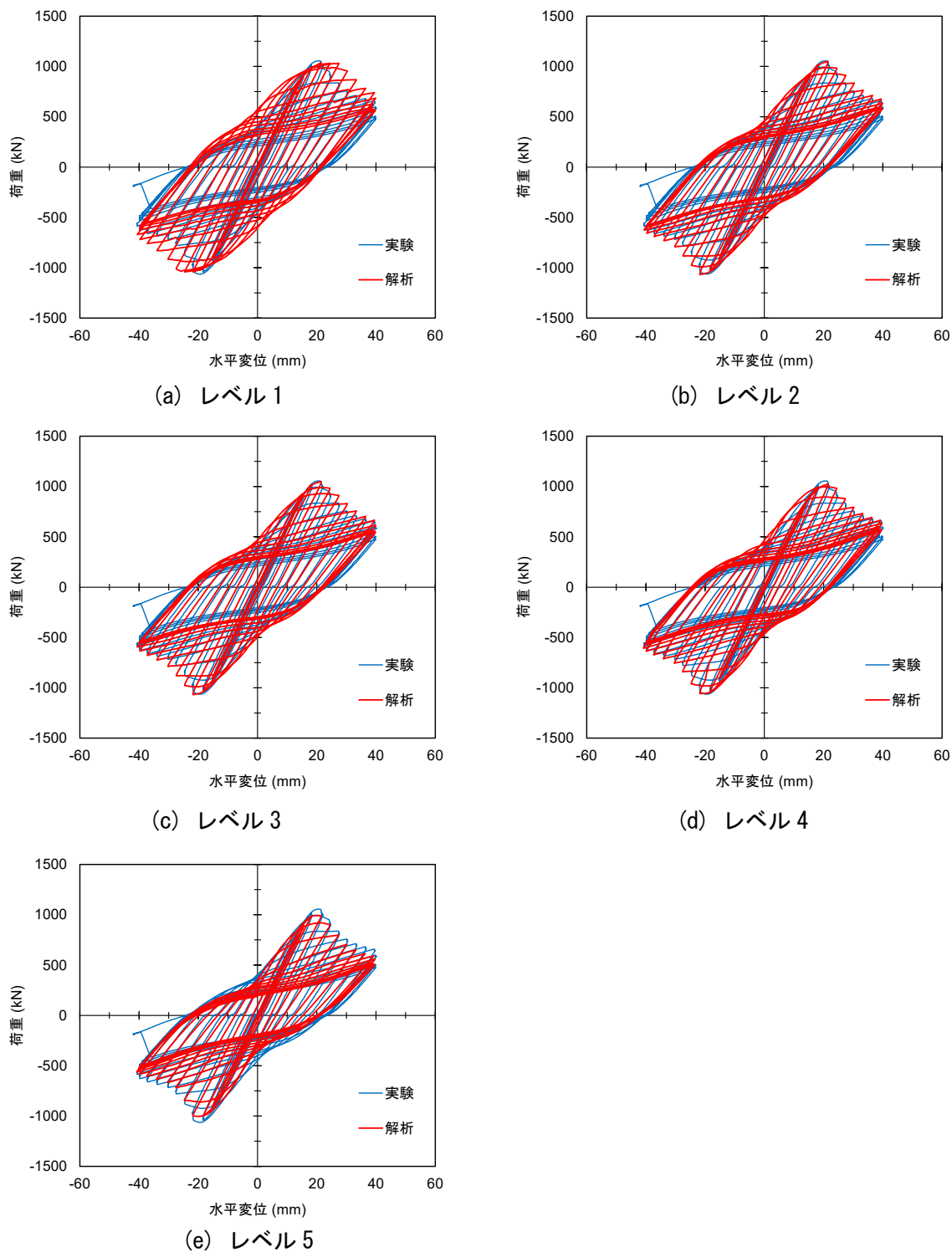


図 3.4 荷重－変位曲線における各モデルと実験結果の比較

次に、ブレース材の変形状態について、実験と解析を比較する。図 3.5(a)に、実験終了時の実験供試体を示している。この写真から、ブレース材が部材座屈しているのが確認できる。前述したファイバーモデル（レベル2）の解析結果を同図(b)に示している。この解析結果から、ブレース材を8分割程度で実験の部材座屈が表現できているのがわかる。なお、本解析は、初期不整は与えていない。部材端部からのわずかな曲げにより、実験と同様な方向に部材座屈が発生した。シェルモデル（レベル5）による解析結果についても同図(c)に示している。シェルモデルも、よい精度で実験の

部材座屈が表現できている。さらに、シェルモデルについては、図 3.6 に示すように局部座屈まで、概ね表現できているのもわかる。

以上から、本報告書におけるブレース材のモデル化は、合理的なモデル化を重要視して、ファイバー要素でバイリニアモデル+移動硬化則 (E2B) の 8 分割 (レベル 2) を基本とすることにした。

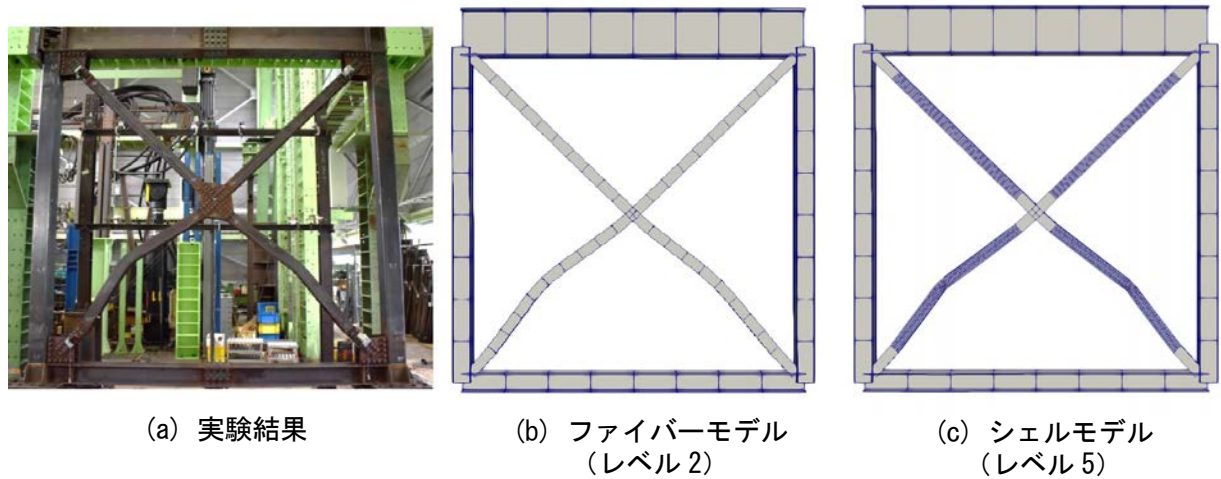


図 3.5 実験結果 (終了時) と解析結果の変形状態の比較

最後に、報告書の解析はすべて有限変位解析であるが、あえて微小変位理論で解析すると解析結果がどうなるかをここで示す。概ね実験を再現できたレベル 2 (E2B(8)) すなわち、ファイバー要素+バイリニアモデル+移動硬化則、8 要素分割のモデルに対して微小変位解析を行い、その結果を示すと図 3.7 のようになる。この図から、荷重が増加し続け低下しないことがわかる。前述した有限変位解析の図 3.4 (b) と比較して、明確に異なっていることから、ブレース材の座屈を伴う塑性化を考慮する場合には、有限変位理論で解析する必要がある。

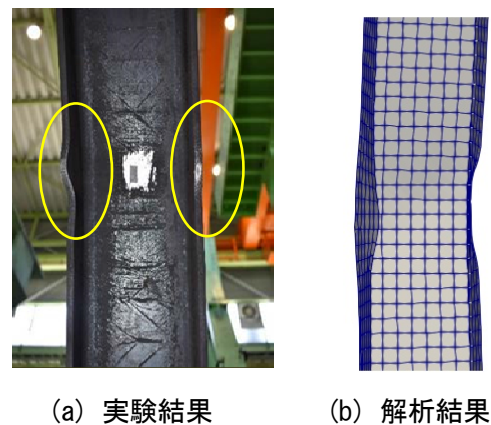


図 3.6 実験終了時の局部座屈の比較

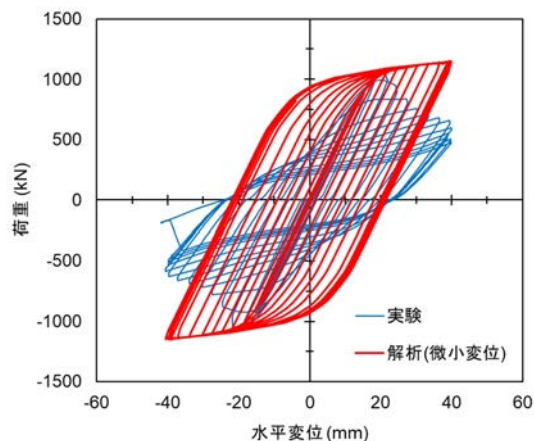


図 3.7 ファイバーモデル (E2B(8)) の微小変位解析結果

### 3.1.3 ボルト接合面すべり挙動のモデル化

前述したブレース材パネルの部材端部の接合は、剛結合であった。実際の挙動としては、ボルトが接合面ですべること十分に予想される。そこで、前述したファイバーモデル（レベル 2）において、ブレース材端部のガセット部に対して、次のようなモデル化が考えられる。

ガセット接合部（図 3.8 内の赤線）については、ブレース材と同様にファイバー要素でモデル化するが、この部分の発生する軸力によって、接合部のすべり挙動を表現することとした。接合部に発生する軸力が、すべり耐力以上になった場合、ボルト接合部のすべりを表現するために、接合部に微小要素を入れ、図 3.9 に示すような非線形ばねを設定した。発生軸力がすべり耐力以上になるとすべりが発生し、軸力と変位の関係がバイリニアの骨格曲線で履歴ループを描くモデルになっている。さらに、支圧接合への移行を再現するため、すべりが進展し、変位が事前に設定した限界すべり量に達した時点で、剛性が急増するモデルとした。ボルトのせん断破壊の判定は、軸力がボルトせん断耐力に達したかどうかで行うこととする。すべり耐力は 910 kN(すべり係数  $\mu = 0.5$ )程度と予想されるが、4.1 の実験ですべりが発生しなかったことから、すべり挙動が明確に発生するように、すべり耐力を 300 kN( $\mu = 0.17$ )まで低減させた。図 3.9 に示した限界すべり量は、ボルト孔径から、1.5 mm とした。

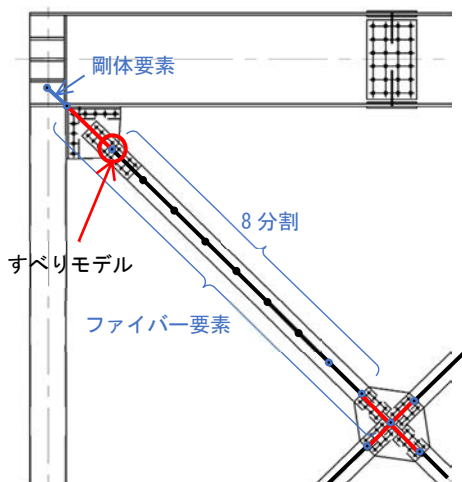


図 3.8 ブレース材+すべり特性

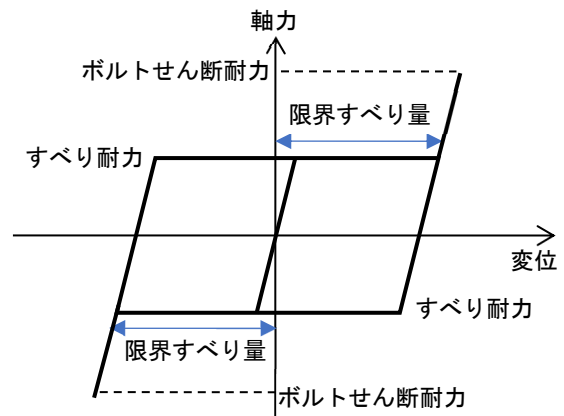


図 3.9 すべり挙動を表現したモデル

### 3.1.4 ボルト接合面すべりの解析結果

図 3.10 にパネル供試体全体の荷重-変位関係、図 3.11 にブレース材の軸力と伸縮量の関係を示す。これらの図は比較のため、すべりの有無の 2 ケースの解析結果を重ねて示す。図 3.10 より、すべりが発生した場合、最大荷重に到達する変位が 10 mm 程度大きくなっていることがわかる。最大荷重値についてはすべり無しの場合と比較して同等の値となっている。また、履歴ループの形状は、最大荷重の到達変位が大きくなったことで、膨らみの大きな紡錘型となりエネルギー吸収量が増加する結果となった。また、図 3.11 に示すように、ブレース材の軸力についても最大値はほぼ同じ値となり、接合部のすべりにより伸縮量が圧縮側にシフトしていることが確認できる。本解析結果から、接合部のすべりと支圧接合を繰り返すことによって、結果的に荷重-変位曲線だけから判断した耐震性能はすべらない場合と同等かそれ以上になった。しかし、パネルの変形量が大きくなることから、すべりを許容する設計は好ましくないと考えられる。特に新設橋梁においては、レベル 2 地震動においてもすべらないような接合部の設計をすべきである。ただし、既設橋梁については、すべりが発生した後も支圧接合で力を伝達することが確認できれば、すべりを許容しても構わないと考えられる。

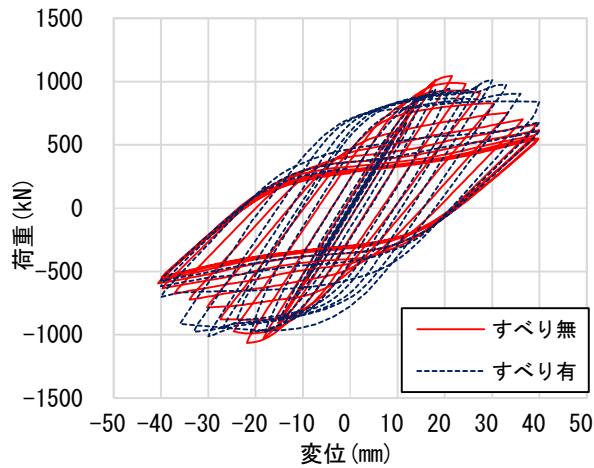


図 3.10 パネル全体の荷重－変位関係

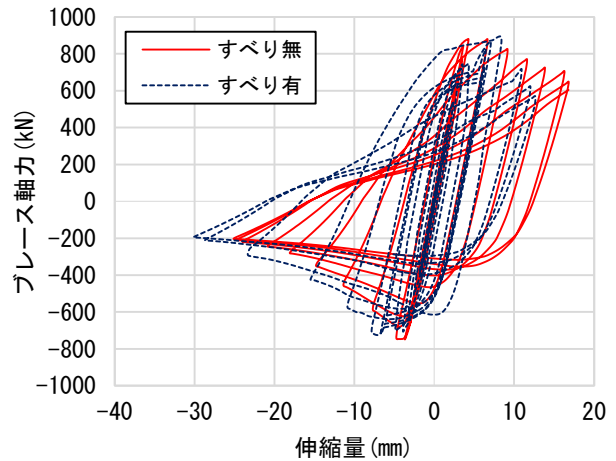


図 3.11 ブレース材の軸力と伸縮量

### 3.1.5 ボルト接合面すべりモデルの検証

鋼トラス橋のブレース材パネルの繰り返し荷重実験においては、参考文献3)でも実施している。この実験は荷重ステップ 60 までを予定していたが、トラブル発生により図 3.12 内の最後の荷重ステップ 18 の途中で終了した。しかし、途中で終了したが、荷重ステップ 16～18 の 1 ステップ内でボルトの接合面ですべりが発生した。実験終了後のブレース材とガセットの接合部の状態を、図 3.13 に示す。この写真から、荷重荷重前、ガセットとブレース材の接地面に白ペンで描いた線にすき間が生じていることが確認でき、確実にボルトがすべってブレース材が動いたことになる。また、実験結果の荷重荷重と荷重点の変位の関係を図 3.14 に示す。この図から、圧縮側および引張側約±500kN でボルトのすべりが発生していることがわかる。特に、圧縮側では-500kN ですべった直後に荷重が-400kN に低下しその後すぐに増加していることから、明確にすべっていることが確認できる。

本実験のすべり現象が再現できるかどうか前述した解析モデルにて再現解析を試みた。すべり係数  $\mu$  は、ここでは 0.5 と仮定した。ここでは、ボルトすべりを考慮したモデルだけでなく、比較のためにすべりを考慮しない通常モデルの解析も行い、両解析結果と実験結果を合わせて図 3.15 に示す。すべりを考慮した解析結果からは、実験のようにすべった直後の荷重低下までは表現できていないが、荷重が一定になりすべり挙動は表現できているとみてよい。これに対してすべりを考慮しない解析結果は、ほぼ直線的な挙動を示し実験と大きく異なった。これらの比較結果から、図 3.8、図 3.9 で提示した解析モデルは、ボルト接合面のすべり挙動が概ね表現できるモデルといえる。

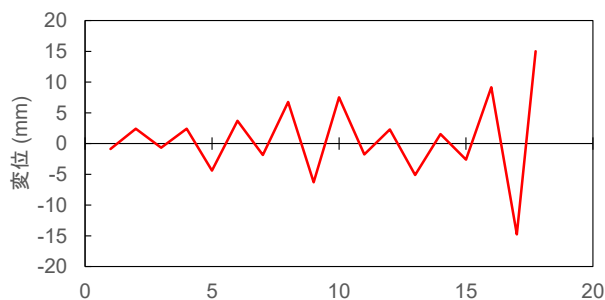


図 3.12 荷重パターン

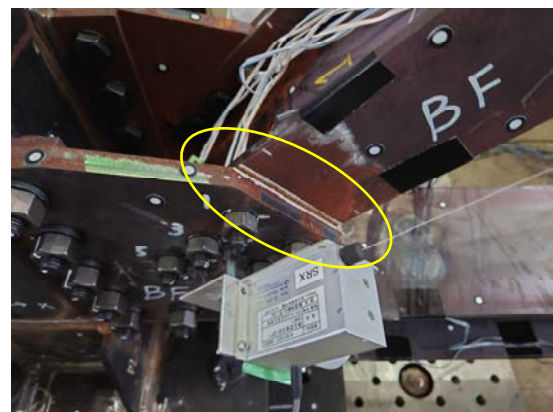


図 3.13 実験供試体

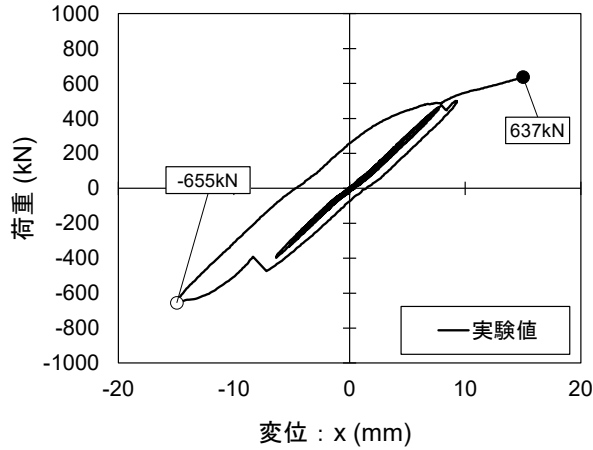


図 3.14 パネル全体の荷重－変位関係（実験）

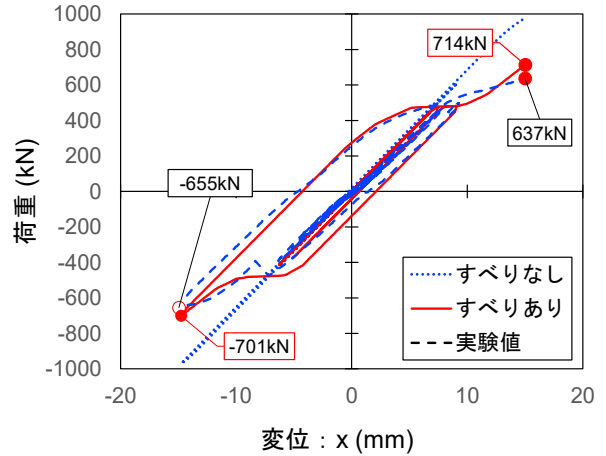


図 3.15 2種類の解析と実験の比較

## 3.2 鋼橋全体のモデル化

### 3.2.1 全体の解析モデル

鋼橋全体のモデル化は、学会示方書で提示されている解析モデルを参考に行っている。鋼トラス橋を例にすると、図 3.16 に示すように鋼部材に対して 8 分割程度の要素分割したファイバーモデルでモデル化する。

しかし、鋼トラス橋の支点部の対傾構（ブレース材パネル）については、学会示方書では図 3.17(a) のようにブレース材をひとつのトラス要素でモデル化していたのに対して、本報告書では、前述したファイバーモデル（レベル 2）、すなわち、ファイバー要素＋バイリニアモデル＋移動硬化則で、8 要素分割でモデル化してブレース材端部を剛結合（図 3.17(b)）とする。このようなモデル化することで、塑性化（座屈）が表現できる。他の部材については、学会示方書と同じようにモデル化し、部材の接合は剛結合である。

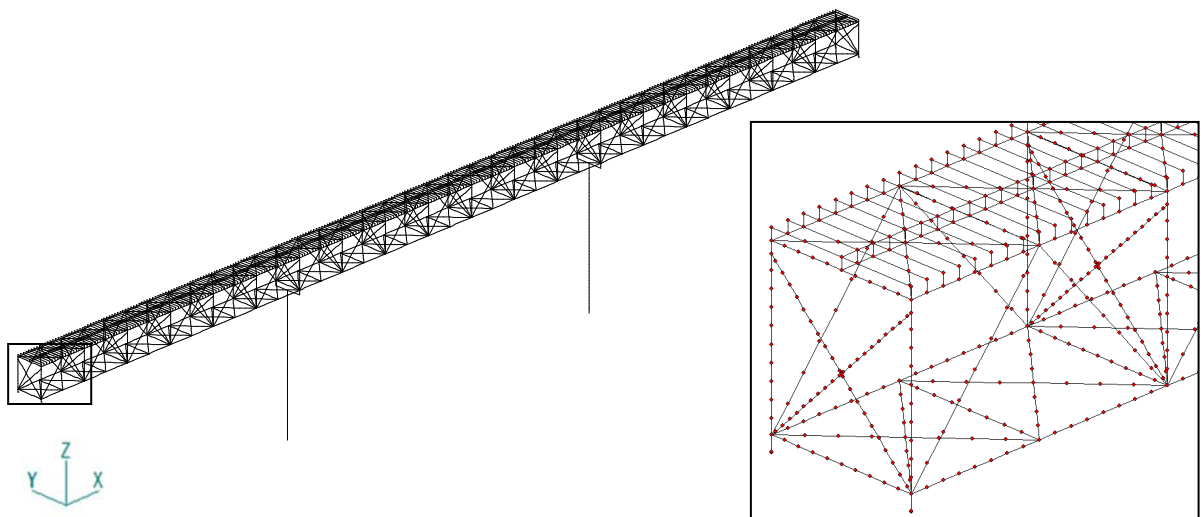


図 3.16 鋼橋全体の解析モデル



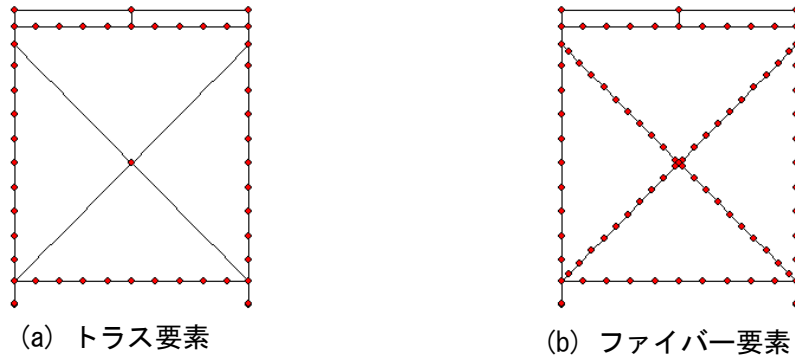


図 3.17 ブレース材のモデル化の比較

### 3.2.2 RC 床版の解析モデル

上路式鋼トラス橋や，上路式鋼アーチ橋においては，重量がある RC 床版のモデル化は重要である．RC 床版のモデル化についても，学会示方書で提示されている．しかし，RC 床版が死荷重を負担しないように（完成状態で RC 床版は無応力状態になるように）モデル化することが望ましいと記述があるが，モデル化の方法までは示されていない．そこで，そのモデル化の方法について，以下に示すことにした．この方法は，第 7 章の实在モデル橋でも実際に使用されている．

RC 床版と補剛桁や上弦材の結合は，非合成とする．そのため，スラブアンカーを図 3.18 のようにモデル化して，死荷重解析時にはそのスラブアンカーの水平剛性をゼロ（または小さい値）にして，固有振動解析および動的解析時には，その水平剛性を剛としてモデル化する．なお，死荷重解析時の死荷重は，床版ではなく桁に直接作用させる．このようにモデル化することにより，死荷重時に床版は負担せず，完成状態（動的解析の初期状態）で床版は無応力状態にすることができる．

RC 床版のコンクリートおよび鉄筋の非線形性については，道路橋示方書等で提示された一般的な応力-ひずみ曲線を使用する．

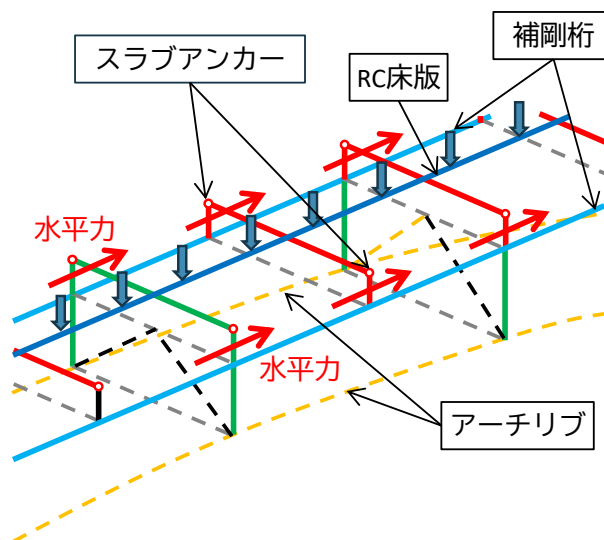


図 3.18 RC 床版と補剛桁の接合部のモデル化

## 参考文献

- 1) 長谷川秀也, 野中哲也, 森下宜明, 吉野廣一, 馬越一也, 岩村真樹: 曲げねじり弾塑性挙動が表現できるファイバーモデルの理論と逆L形橋脚への適用, 第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp. 265-272, 2022.
- 2) 嶋口儀之, 山田忠信, 野中哲也, 馬越一也, 鈴木森晶: 繰り返し荷重を受ける鋼トラス橋のブレース材の終局挙動に関する実験および再現解析, 構造工学論文集, Vol. 68A, pp. 59-68, 2022.
- 3) 日高菜緒, 橋本尚史, 中村真貴, 馬越一也, 野中哲也, 小畑誠: 点群データを活用した鋼橋の解析モデルの構築および精度検証, 構造工学論文集, Vol. 69A, pp. 637-647, 2023.