

ファイバー要素を用いた橋梁上部構造の解析手法に関する検討

井上 一磨¹・木下 幸治²

¹学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

²正会員 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 准教授（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

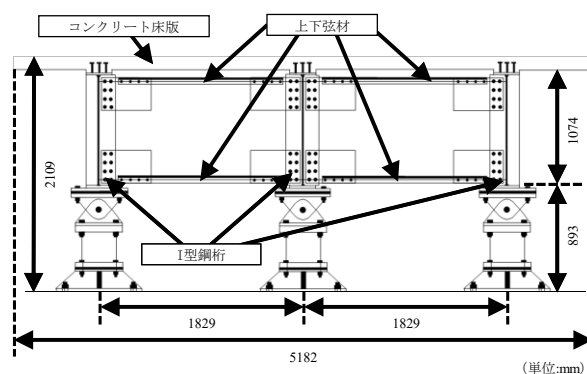
1. はじめに

巨大地震に対する橋梁構造物の安心・安全の要求を背景に、国内外において震動台実験や載荷実験に基づき、橋梁構造物の解析技術の高度化や高耐震性能化が図られている。それら既往の研究の内、橋梁上部構造を対象とした研究震動台実験や載荷実験では、上部構造の解析技術の高度化のみならず、上部構造への地震エネルギー吸収部材であるダンパー・ブレースの適用性が検証されてきている¹⁾。上部構造へのダンパー・ブレースの適用は、橋梁下部構造が負担する地震エネルギーの低減に繋がり、橋梁構造物の高耐震性能化を実現できると考えられ、更なる研究の進展が望まれる。一方、上部構造を対象とした既往の解析技術は、多主桁の橋梁形式や橋梁床版の剛性が、正確には反映できていない簡易な解析モデルか、シェル要素やソリッド要素などを組み込んだ高精度な解析モデルの提案に留まっている²⁾。このため、今後の上部構造へのダンパー・ブレースの適用性を検証可能な簡易でかつ高精度な実用的な解析技術の開発が必要と考えられる。

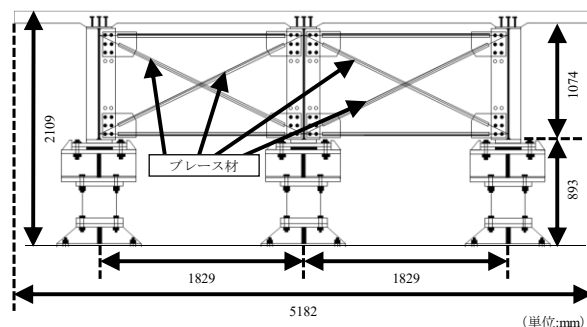
本研究では、ファイバー要素を用いたダンパー・ブレースを含む上部構造の解析手法の提案を最終目標として、ここでは、既往の上部構造大型試験体の載荷実験¹⁾と解析との比較を通じて、解析手法の妥当性を検証した結果の一部を報告する。

2. 既往の実験概要

図-1に既往の実験で使用された実大橋梁の0.42スケールの大型試験体を示す¹⁾。この試験体は、典型的な橋梁上部構造の一部を再現したもので、コンクリート床版を有する鋼I型断面3主桁である。各桁間に上下弦材が設置されており、主桁と上弦材、下弦材はガセットで結合されている。主桁上部とコンクリート床版の結合部には、



(a) ブレースなし試験体



(b) ブレースあり試験体

図-1 既往研究の試験体¹⁾

ずれ止めとしてスタッドが用いられており、主桁下部はピン支点である。また、この試験体（図-1 (a)）を基準とし、さらに各桁間にブレースを適用した試験体（図-1 (b)）による実験も行われた。ブレース交差部とブレース端部とガセットは溶接で接合されている。この試験体の主桁下部にはゴム支承が用いられている。

表-1 に試験体の寸法を示す。ブレースと上弦材、下弦材はアングル材を用いている。ブレースと上弦材、下弦材の鋼種は A36 (ASTM) であり、降伏強度は 245N/mm^2 である。主桁とガセットの鋼種は A572 (ASTM)、降伏強度は 345N/mm^2 である。また、コンクリート床版の圧縮強度は 34.1N/mm^2 である。

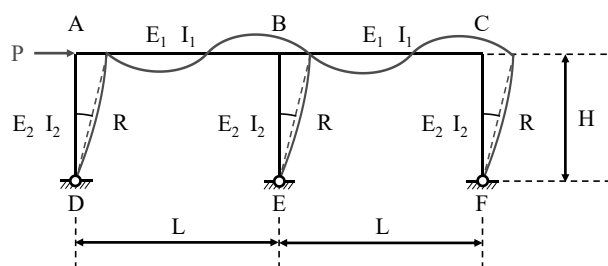
表-1 試験体寸法

	長さ(mm)
全長	5182
高さ	2109
幅	914
支承間	1829
張り出し床板	762
床板厚	114.3
フランジ	228.6×25.4
ウェブ	990.6×7.9
補剛材厚さ	22.2
ブレース材長さ	2083
ブレース アングル材	L 25.4×25.4×3.2
上下弦材 アングル材	2L 31.8×31.8×4.8
支柱高さ	893

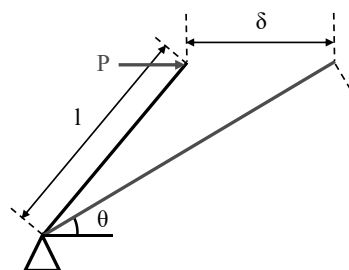
3. 初期剛性に関する力学モデルによる検討

図-2 (a) に、力学モデルで仮定したフレームの変形挙動を示す。本研究では、たわみ角法³⁾を用いてフレームの初期剛性を求めた。床版は全断面を考慮した場合と引張側を無視した場合の 2 通りの剛性を計算した。ただし、ここでは再現性の高かった床版の全断面を考慮した場合のみ掲載する。また、ブレースを適用する試験体との比較を行うためにブレースの初期剛性を計算した。図-2 (b) に仮定したブレースの変形挙動を示す。ブレースの初期は軸力のみが作用する軸方向部材として求めた。ブレースあり試験体全体の剛性はフレームとブレースの剛性の和として求めた。

力学モデルより求めたブレースなし試験体の初期剛性は 13.1kN/mm であり、実験結果の 13.0kN/mm と良く一致する結果となった。力学モデルより求めたブレースあり試験体の初期剛性は 55.5kN/mm であり、実験結果の 61.2kN/mm と比較すると 9.3%程度小さな値であった。ブレースあり試験体の力学モデルの結果と実験結果に差がみられた要因として、ブレース接合部の剛な領域について考慮していないことが考えられる。そこで、図-3 のように、ガセットと補剛材とが重なる領域に剛域を設定し、ブレースの長さからこの領域の長さを差し引いた値を用いて再度計算を行った。この結果、初期剛性は 61.5kN/mm となり、実験値と比較すると 0.5%程度の差となり良く一致できた。



(a) フレームの変形挙動



(b) ブレースの変形挙動

図-2 力学モデルの変形挙動

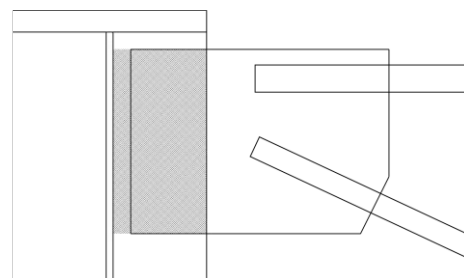


図-3 剛域の設定

4. 解析モデル

図-4 にブレースなし試験体のファイバー要素を用いて作成した解析モデルを示す。このモデルでは橋軸直角方向にファイバー要素を用いている。鋼 I 桁は補剛材を考慮した断面とし、コンクリート床版は鉄筋を考慮したファイバー断面とした。各桁の下部はピン支点としてモデル化し、変位測定位置は中央の桁の上部とした。図-5 にブレースあり試験体の解析モデルを示す。この解析モデルは、ブレースなし試験体のモデルを基準としてブレースを加えたモデルである。ブレース交差部は接合されており、ブレース端部のガセットと補剛材とが重なる領域には剛体要素を用いた。

図-6 にコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。圧縮強度の 10 分の 1 程度の引張強度を考慮した Hoshikuma モデルのコンクリートの応力-ひずみ関係を用いた⁴⁾。コンクリートの圧縮強度は既往の研究の材料試験の結果¹⁾より 34.1 N/mm^2 とした。図-7 に鋼材の応力-ひずみ関係を示す。全ての鋼材は 2 次勾配を弾性係数の 1% 程度とするバイリニアモデルとした。鋼材の降伏強度は、既往の実験で用いられた鋼種の規格より、鉄筋は 295 N/mm^2 、ブレースと上下弦材は 245 N/mm^2 、その他の鋼材は 345 N/mm^2 とした。

図-8 に、繰返し载荷のサイクルを示す。繰返し载荷は、桁高さに対する水平変位 δ の割合を Drift (%) とし、 $\pm 0.50\%$ までは $\pm 0.25\%$ ずつ、 $\pm 1.00\%$ までは $\pm 0.50\%$ ずつ、 $\pm 6.00\%$ までは $\pm 1.00\%$ ずつ増加させ各 2 サイクル载荷した。

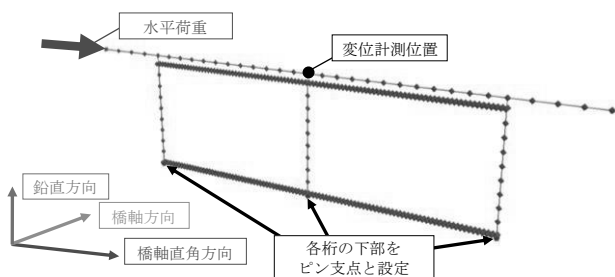


図-4 ブレースなし試験体の解析モデル

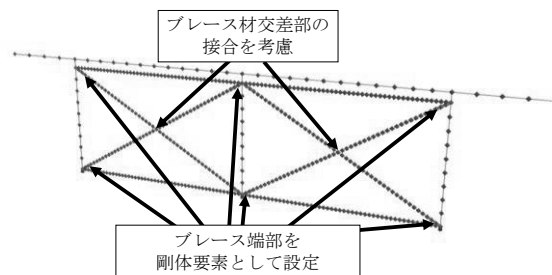


図-5 ブレースあり試験体の解析モデル

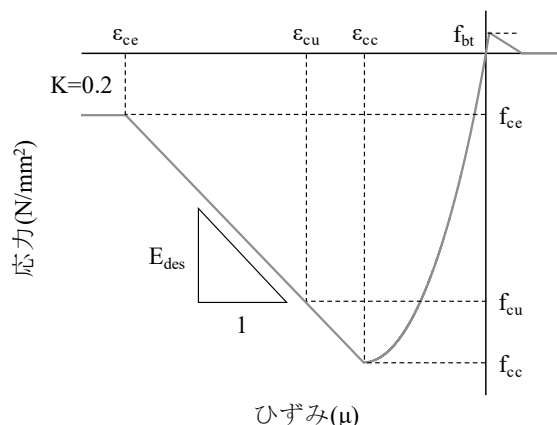


図-6 コンクリートの応力-ひずみ関係

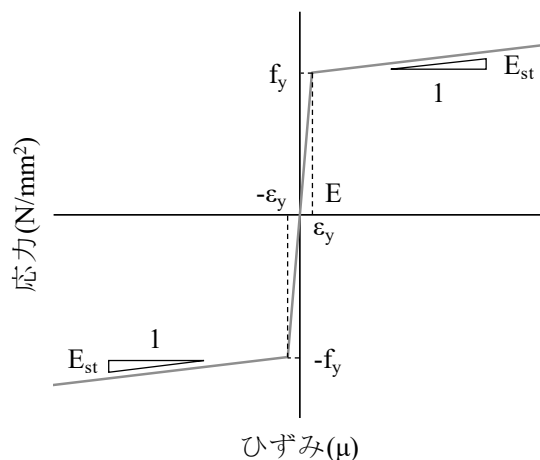


図-7 鋼材の応力-ひずみ関係

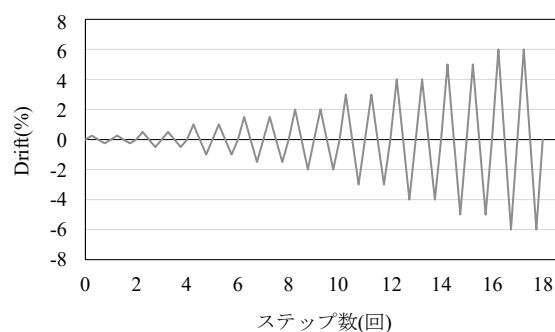


図-8 载荷サイクル

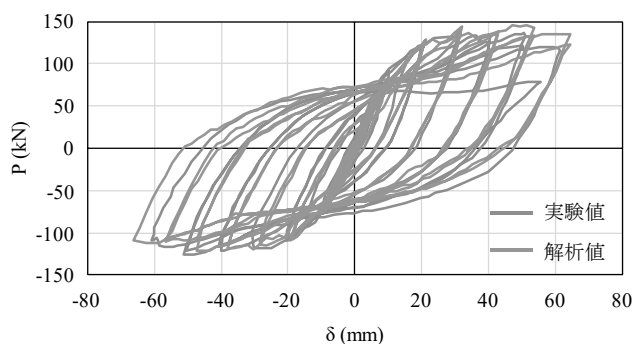
5. 解析結果

図-9 (a) に載荷履歴曲線のブレースなし試験体の解析値と実験値との比較を示す。解析の初期剛性 13.4kN/mm は、実験の初期剛性 12.6kN/mm と比べて 6.3% 程度の差であった。解析の最大耐力 146kN は実験の最大耐力 136kN と比べて 7.4% 程度の差であった。これらの差より、ブレースなし試験体の解析では実験値の初期剛性および最大耐力は良く再現できていることが分かる。

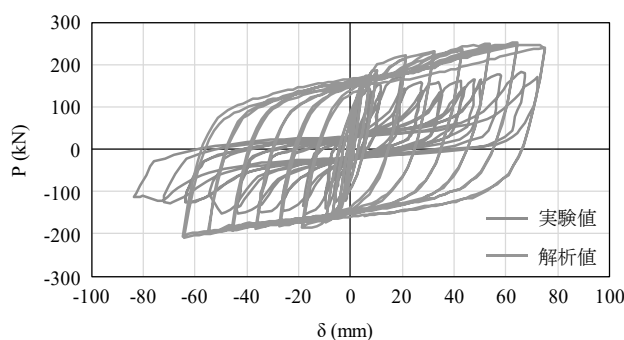
図-9 (b) に、ブレースあり試験体の解析値と実験

値の比較として載荷履歴曲線を示す。解析の初期剛性 56.6kN/mm は、実験の初期剛性 61.2kN/mm と比べて 7.5% 程度の差であった。解析の最大耐力 242kN は、実験の最大耐力 183kN と比べて 32.2% 程度の差であった。これらの差より、ブレースあり試験体の解析では実験値の初期剛性は良く再現できているが、最大耐力は再現できていないことが分かる。

図-10、図-11 に、解析値と実験値の履歴曲線の形状の詳細な比較を示す。Drift=±2%、±4%のサイクルにおいて、ブレースなし試験体では解析値と実験

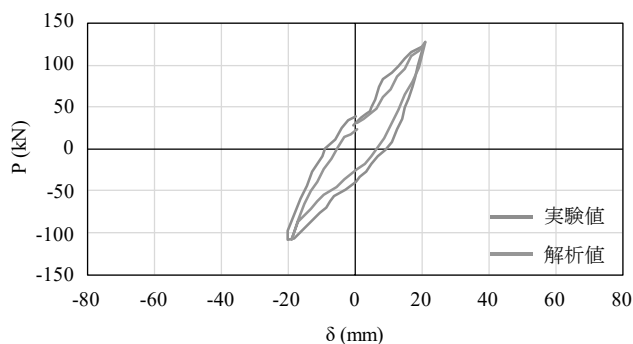


(a) ブレースなし試験体

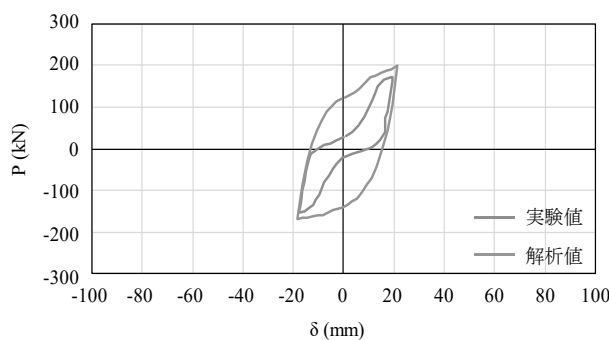


(b) ブレースあり試験体

図-9 解析値と実験値の比較

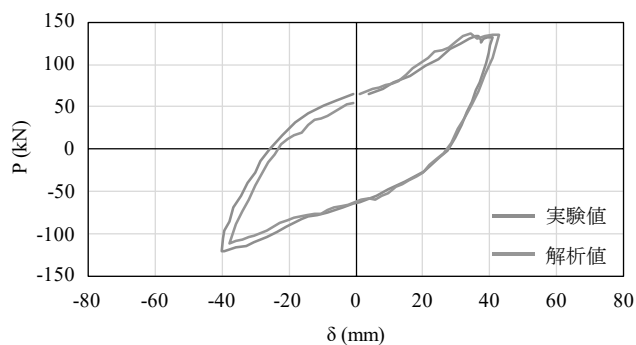


(a) ブレースなし試験体

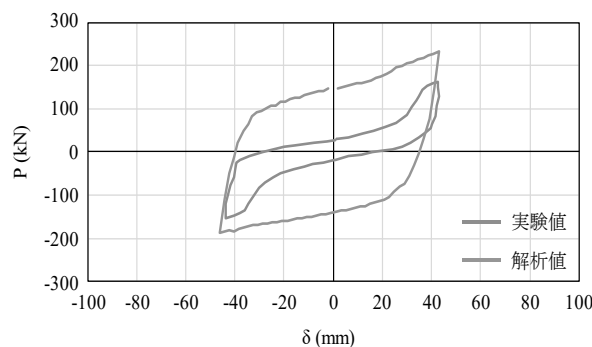


(b) ブレースあり試験体

図-10 Drift=±2%サイクル時



(a) ブレースなし試験体



(b) ブレースあり試験体

図-11 Drift=±4%サイクル時

値の履歴曲線が良く一致していることが確認できる。一方、ブレースあり試験体では、解析値の履歴曲線の実験値と比べて大きな形状となり、解析値と実験値の履歴曲線の形状が一致していないことが分かる。

これらの結果より、ブレースなし試験体の载荷実験は、本解析により実験の履歴曲線を良く再現できたが、ブレースあり試験体の载荷実験の解析では再現性が著しく低下した。ここで、ブレースあり試験体の実験の履歴曲線はスリップ型履歴曲線であるが、一般にブレースありフレームの繰返し载荷試験においてもブレースの座屈変形によりスリップ型履歴曲線の形状が現れることが知られている⁵⁾。このため、ブレースあり試験体の载荷実験の解析において再現性が低下した要因は、繰返し荷重下のブレースの座屈変形の再現性が低いことが考えられる。

6. ブレースの座屈変形の再現性に関する検討

上記結果を基に、ここでは既往の研究で行われた材料試験と解析の比較を通じて、ファイバー要素解析におけるアングル材の座屈変形の再現性について検討した。図-12にアングル材の寸法を示す。アングル材とガセットは溶接により接合されている。アングル材の軸方向に荷重を作用させ、繰返し载荷を±75mm まで±5mm ずつ増加させて载荷した。

図-13 に解析モデルを示す。材料非線形および幾何学的非線形を考慮して解析を行った。境界条件はガセットの両端部を全方向拘束とした。アングル材とガセットの接合には剛体要素を用いた。アングル材とガセットの降伏強度は 245N/mm^2 とし、応力-ひずみ関係は図-7 に示すバイリニアモデルとした。

図-14 に座屈変形時の解析モデルを示す。この図より、アングル材が 1 次モードの座屈波形となっていることが分かる。図-15 に解析値と実験値の比較として载荷履歴曲線を示す。本解析では、 $\delta=\pm 35\text{mm}$ までしか収束しなかったため、この範囲までの解析結果を掲載している。解析による座屈荷重は 112kN であり、実験値 94kN と比較すると 16.1% 程度大きな値となり差異が見られた。この要因は、実際の試験体よりも解析モデルのアングル材とガセットの接続

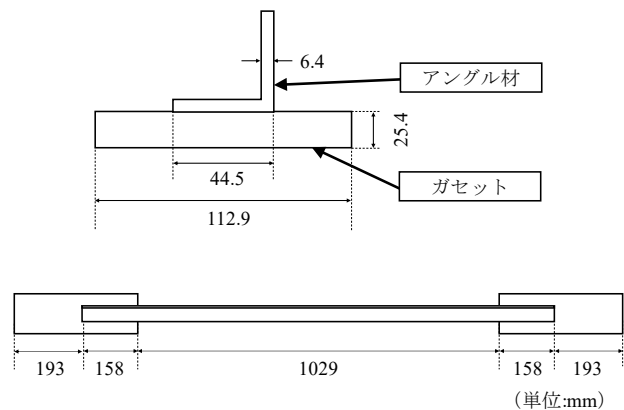


図-12 アングル材とガセットの寸法

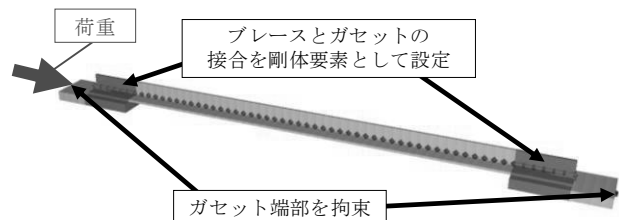


図-13 解析モデル



図-14 座屈変形時の解析モデル

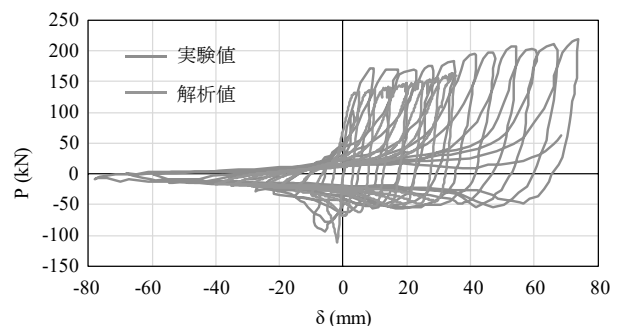


図-15 実験値と解析値の比較

部が剛であるためと思われる。ブレース端部の接合のモデルを再検討することで、座屈強度の再現性を高めることができると思われる。

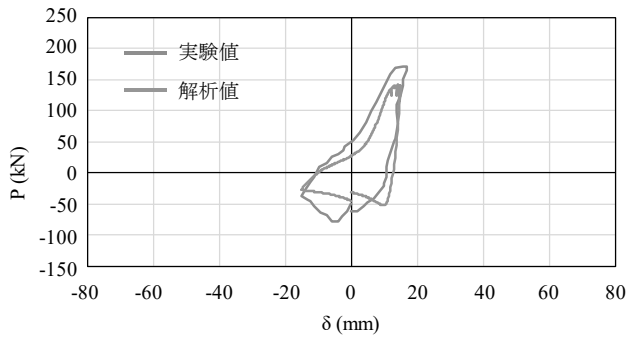


図-16 $\delta=\pm 15\text{mm}$ サイクル時

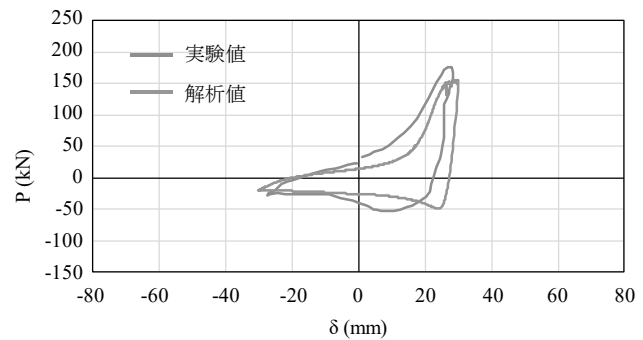


図-17 $\delta=\pm 30\text{mm}$ サイクル時

一方、図-16、図-17に、解析値と実験値の履歴曲線の形状の詳細な比較を示す。 $\delta=\pm 15\text{mm}$ 、 $\pm 30\text{mm}$ のサイクルにおいて、解析値と実験値の履歴曲線が良く一致していることが確認できる。これより、ファイバー要素解析を用いてアングル材の繰返し荷重下の履歴曲線を概ね再現することができたのではないかと考えられる。

以上の検討より、ブレースなし試験体、並びにブレースのみの載荷実験についてはファイバー要素解析による良く再現できたが、ブレースを組み込んだブレースあり試験体のスリップ型履歴曲線の再現性向上のために更なる検討が必要である。

7. まとめ

本研究では汎用的なファイバー要素を用いた橋梁上部構造の解析手法を提案することを最終目標として、ここでは既往の上部構造大型試験体の載荷実験と解析との比較を通じて解析手法の妥当性を検証した結果について報告した。本研究でこれまでに得た成果を以下にまとめる。

- 1) フレームの計算にたわみ角法を用い、ブレースの計算はトラス構造と仮定することにより、既往の橋梁上部構造の実験における初期剛性を力学モデルで再現することができた。
- 2) ファイバー要素解析を用いて、既往のブレースなしの橋梁上部構造の実験における初期剛性、最大耐力、履歴曲線の形状と大きさを再現することができた。
- 3) ファイバー要素解析を用いて、既往のブレース

ありの橋梁上部構造の実験における初期剛性は再現可能であるが、現段階では最大耐力、履歴曲線の形状と大きさの再現には至っていない。

- 4) ファイバー要素解析を用いて、既往の研究で行われたアングル材の材料試験の履歴曲線を概ね再現することができた。

参考文献

- 1) Hamidreza Bahrami : Guidelines for the seismic design of ductile end cross frames in steel girder bridge superstructures, Center for Civil Engineering Earthquake Research, UNR, Report No. CCEER 09-04, July.2010.
- 2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書，古木守靖，pp.50-63，2008.
- 3) 崎元達郎：基礎土木工学シリーズ2 構造力学[下]，森北肇，pp.184-213，1993.
- 4) 塚淳一，川島一彦：ファイバー要素を用いた鉄筋コンクリート橋脚の地震応答解析，土木学会構造工学論文集 Vol.45A，1999.
- 5) 高松隆夫，玉井宏章，加藤孝晶：ノンコンプレッションブレースによる耐震補強工法に関する実験的研究，広島工業大学紀要研究編 第42巻（2008），pp.105-111，2008.
- 6) 土木学会：座屈設計ガイドライン 改訂第2版[2005年版]，pp.67-80，2005.