

鋼上部構造の縮小試験システムの構築と ファイバー要素解析モデルの検討

岩田 隆弘¹・木下 幸治²・井上 一磨³

¹学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科環境社会基盤工学専攻
(〒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)

³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)

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、国内外において振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。それらの既往の研究の内、橋梁の鋼上部構造を対象とした研究では、鋼上部構造の解析技術の高度化のみならず、鋼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⁾。鋼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、橋梁構造物全体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、鋼上部構造を対象とした既往の解析技術は、多主桁の橋梁型式や橋梁床版の剛性が正確に反映されてない簡易な解析モデル²⁾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¹⁾。このため、今後の鋼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。更に、その解析方法の妥当性を検討可能であり、今後の鋼上部構造へのダンパー・ブレースの適用性を検討する上で実構造との再現性の高い縮小試験システムの構築は効率化に繋がると考えられる。

本研究は、今後の鋼上部構造に関する研究を進める上で不可欠となる大型構造物の再現性の高い縮小試験体と解析モデルを構築することを目的とし、既往の研究¹⁾の大型試験装置を基に作成した鋼上部構造縮小試験体の再現性とファイバー要素を用いた鋼上部構造の解析手法、具体的には各部材の要素分割

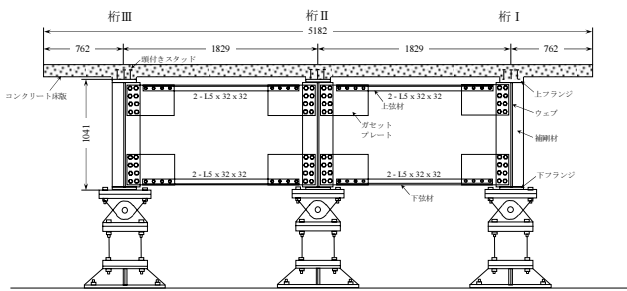
などについての提案を行った。その上で、提案した解析手法を縮小モデルにも適用し、縮小試験体の実験と解析の比較より、縮小試験体への提案解析方法の適用性を検討した。

2. 試験システムの概要

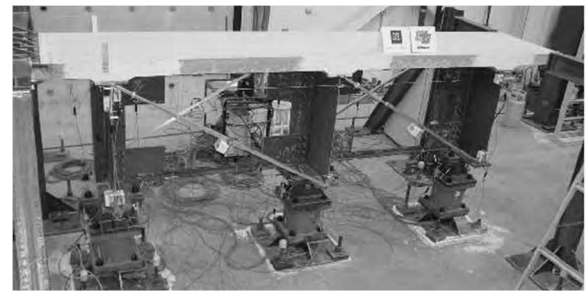
図-1に既往の実験¹⁾で使用された実大橋梁の0.42スケールの大型試験体を示す。この試験体はコンクリート床版を有する鋼1桁断面3主桁から一部を抜き出したものである。試験体下端はピン構造とされ、主桁上部とコンクリート床版の結合部にずれ止めとしてスタッドが用いられている。図-1に示す大型試験体を参考に、その縮小試験体を作成した。

図-2に縮小試験体の図面と試験システムを示す。縮小試験体は、実構造との再現性を出来る限り高めるため、相似則に従い、大型試験体¹⁾を縮小した試験体（実大の0.24スケール、大型試験体の0.57スケール）を作成した。鋼桁高さは595mm、桁間隔は1040mm、床版厚65mm、床版の橋軸直角方向長さは2310mm、橋軸方向は520mmとした。また、載荷部近傍の桁からそれぞれ桁Ⅰ、桁Ⅱ、桁Ⅲとする。

試験方法は、鋼製フレーム内に試験体を設置し、油圧ジャッキにより繰り返し水平力を与える。繰り返し載荷は、既往の研究¹⁾の大型試験体の実験と同様に漸増型繰り返し載荷で、各2サイクル載荷を行う。載荷は変位制御で行われ、主桁高さに対する水平変位 δ (mm) の割合をDrift率 (%) とし、1.0%までは $\pm 0.25\%$ ずつ、2.0%までは $\pm 0.5\%$ ずつ、それ以降は $\pm 1.0\%$ ずつ変動させた（図-3）。

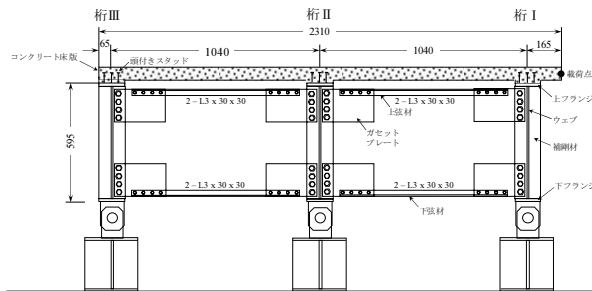


(a) 図面

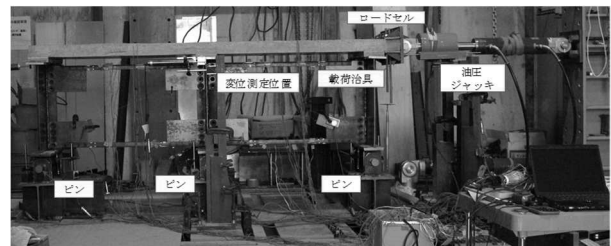


(b) 実験前写真

図-1 大型試験体¹⁾



(a) 図面



(b) 実験前写真

図-2 縮小試験体

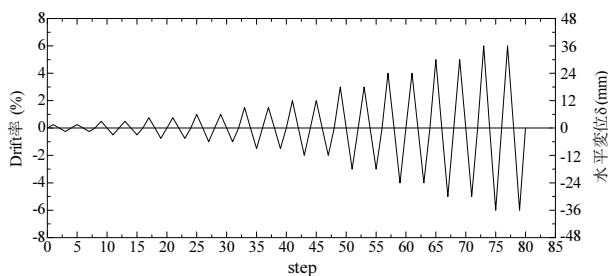


図-3 載荷サイクル

3. 縮小試験体の実験結果

(1) 損傷状況

図-4, 5に縮小試験体と大型試験体¹⁾の試験終了時の損傷状況を示す。また、図-6, 7に鋼桁と床版の結合部の縮小試験体と大型試験体¹⁾の損傷状況を示す。縮小試験体では、桁Ⅰ, Ⅱではハンチ部と床版部が交差する応力集中部からの横方向へのひび割れが確認でき、桁Ⅲでは応力集中部から斜め方向のひび割れや縦方向のひび割れが確認された。一方で、大型試験体¹⁾では、桁Ⅰ, Ⅱでは斜め方向のひび割れが発生し、床版の一部が剥離し、桁Ⅲでは、損傷が非常に軽微となっていた。以上の様に、縮小試験体と大型試験体では、ハンチ部の勾配の有無によりハンチ部周辺の損傷状況が異なる結果となった。

次に、試験終了後の縮小試験体のコンクリート床

版をコンクリートハンマーで研り、スタッドの変形・損傷について確認した。スタッドの変形状況をを図-8に示す。桁Ⅰと桁Ⅱは、最終ステップの載荷方向にスタッドが変形しているのに対し、桁Ⅲは逆方向に変形しているのが分かる。この時、桁Ⅲが逆方向に変形している要因は、桁Ⅲ部直上のコンクリート床版は他の桁より損傷が大きく、他のスタッドより変形が小さかったためと考えられる。この為、試験終了後に、試験体の変位をゼロに戻した際に、逆方向に変形したと考えられる。なお、スタッド細部を観察したところ、低サイクル疲労によるき裂発生は確認されなかった。

(2) 履歴曲線

図-9に大型試験体の載荷実験結果¹⁾と本研究で実施した縮小試験体の載荷実験の結果を示す。この時、水平変位 δ はDrift率とし、水平荷重 P は最大耐力 P_{max} にて除している。なお、大型試験体の最大耐力 P_{max} はDrift率4.0%時に134.6kNであり、縮小試験体の最大耐力はDrift率3.0%時に38.6kNである。この結果より、Drift率が $\pm 2.0, 3.0, 4.0\%$ の時の大型試験体と縮小試験体の履歴挙動を比較したものを図-10に示す。大型試験体、縮小試験体の両者は $\pm 3.0\%$ まで耐力、履歴曲線の形状は良く一致している。しかし、 $\pm 4.0\%$ 以降になると、耐力はよく一致しているが、縮

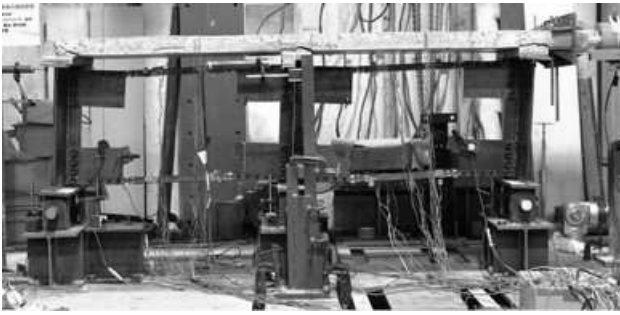
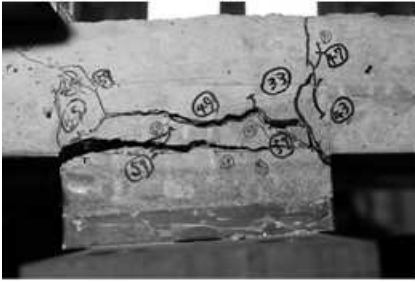


図-4 載荷終了時の縮小試験体



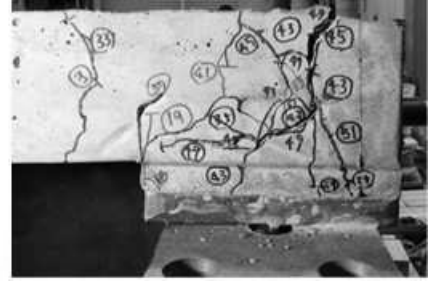
図-5 載荷終了時の大型試験体¹⁾



(a) 桁I



(b) 桁II



(c) 桁III

図-6 縮小試験体の載荷終了時のコンクリート床版の損傷状況



(a) 桁I



(b) 桁II



(c) 桁III

図-7 大型試験体のコンクリート床版の損傷状況¹⁾



(a) 桁I



(b) 桁II



(c) 桁III

図-8 縮小試験体のスタッドの変形状況

小試験体の履歴曲線の形状が大型試験体と比べて逆S字型の挙動を示すことが分かった。履歴挙動が逆S字型となる原因としては、横方向のひび割れ面を境に、それより上側のスタッドのみで水平力を受けて変形し、下側はそれに遅れて変形していたためと考

えられる。

以上より、作成した縮小試験体では最大耐力を迎えるDrift率 $\pm 3.0\%$ までは大型試験体の耐力を良く再現できたが、Drift率 $\pm 4.0\%$ 以降では、耐力は良く一致するが履歴曲線の形状が異なる結果となった。

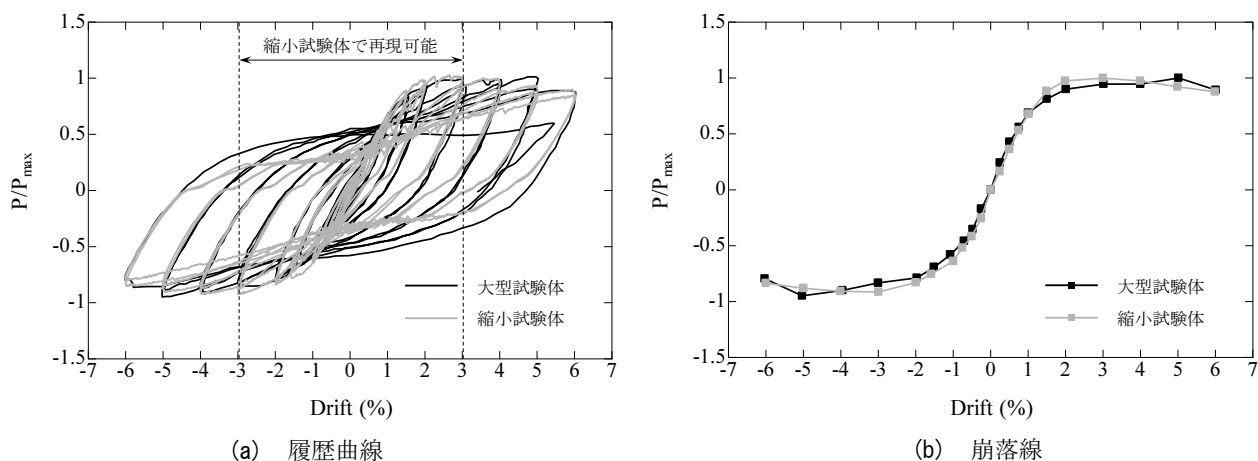


図-9 大型試験体実験と縮小試験体実験の比較

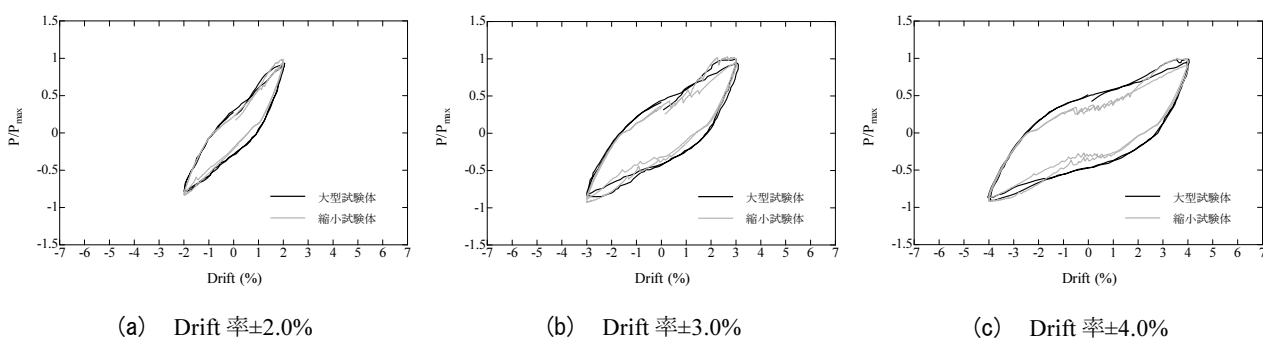


図-10 無次元化した各 Drift 率時の大型試験体と縮小試験体の履歴曲線

4. ファイバー要素解析モデルの検討

(1) 大型試験体の解析モデル

図-11にファイバー要素を用いて作成した解析モデルを示す。一般的に、ファイバー要素で上部構造をモデル化する場合、橋軸方向にファイバー要素を用いる^{2), 3)}が、本解析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。また、各桁の下部はピン支点としてモデル化している。

図-12にコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。コンクリートの材料特性には非線形性を考慮でき、圧縮強度の10分の1程度の引張強度を考慮したHoshikumaモデルを用いた⁴⁾。コンクリートの圧縮強度は既往の材料試験の結果¹⁾より 34.1N/mm^2 とした。

図-13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1.0%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 295N/mm^2 、上下弦材は 245N/mm^2 、その他鋼材は 345N/mm^2 とした。繰返し載荷は、縮小試験体の載荷実験と同様に、

1.0%までは $\pm 0.25\%$ ずつ、2.0%までは $\pm 0.5\%$ ずつ、それ以降は $\pm 1.0\%$ ずつ変動させた(図-3)。

(2) 要素分割数の検討

ここでは、コンクリート床版と上下弦材、鋼桁の要素分割数について検討する。まず、コンクリート床版、上下弦材の要素分割数について検討を行う。コンクリート床版は1, 5, 10分割の3パターンで行った。この結果を図-14に示す。1分割の場合、最大耐力が大型試験体の実験結果と大きく異なっている。5分割、10分割の場合、最大耐力と履歴曲線の形状がともに一致する結果となった。5分割、10分割を比べた場合、10分割の方が大型試験体の結果と近くなったため、コンクリート床版の分割数は10分割とする。

次に鋼桁の要素分割数について検討する。鋼桁の要素分割数は、1, 2, 4分割とした。その結果を図-15に示す。この結果より鋼桁の要素分割数に関しては影響が小さいことが分かる。

以上より、コンクリート床版と上下弦材の要素分割数は10分割することで、大型試験体の実験結果をよく再現できることが分かった。

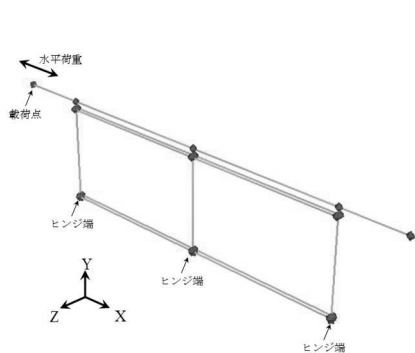


図-11 解析モデル

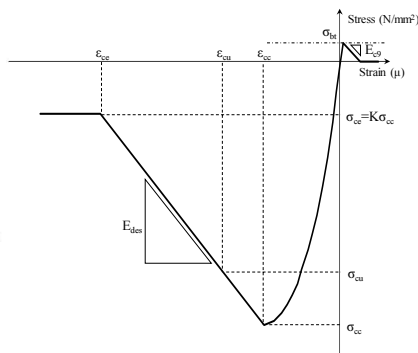


図-12 Hoshikuma モデル⁴⁾

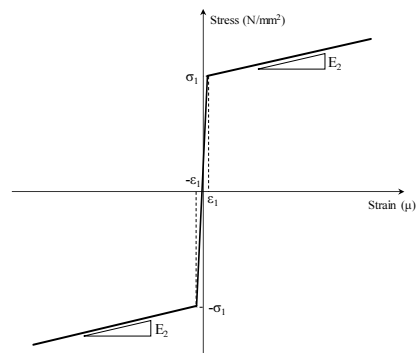
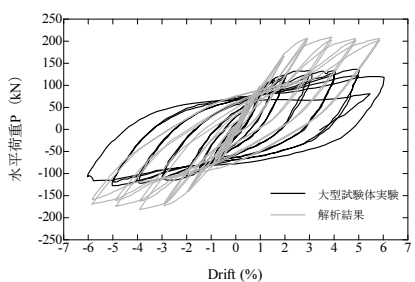
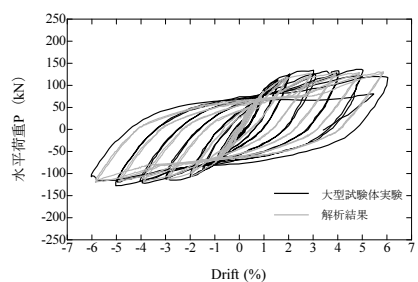


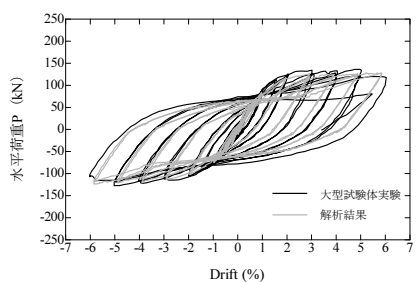
図-13 バイリニアモデル



(a) 1 分割

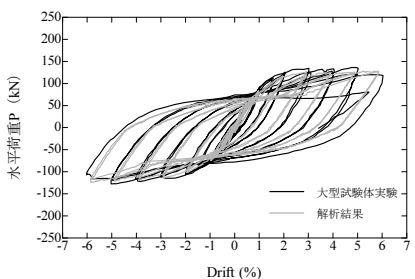


(b) 5 分割

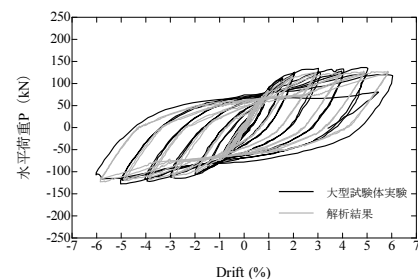


(c) 10 分割

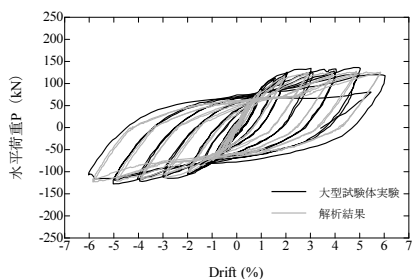
図-14 コンクリート床版と上下弦材の要素分割数の比較



(a) 1 分割



(b) 2 分割



(c) 4 分割

図-15 鋼桁の要素分割数の比較

(3) 縮小試験体の解析モデルと実験の比較

前節でパラメトリックに検討し提案した要素分割数で縮小試験体のファイバー要素解析を行った。ここでは鋼桁の要素分割数は4分割とし解析を行った。

図-16, 図-17に解析結果と縮小試験体の載荷実験の履歴曲線および包絡線と、各Drift率における履歴曲線の形状の比較を示す。解析結果と縮小試験体の実験結果を比較すると、正側の初期剛性が解析の方が大きくなったが、負側の初期剛性は一致し、Drift率が $\pm 2.0\%$ までは各Drift率に対する水平荷重Pも比較的一致した。また、Drift率 $\pm 3.0\%$ では最大耐力は異なるが履歴形状は概ね一致したが、Drift率 $\pm 4.0\%$ では履歴形状が異なり、耐力の再現も出来ていない。これは、非線形性が強く出始める最大耐力以降では、

ファイバー要素では材力特性として与えていないせん断変形が縮小試験体では発現したためと考えられる。また、縮小試験体の載荷実験ではスタッドの変形によるものと考えられる逆S字型の履歴曲線になるが、本ファイバー解析ではスタッドをモデル化しておらず、スタッドの変形を再現することが出来ないためと考えられる。

以上より、モデル化した鋼上部構造のファイバー要素解析モデルでは、縮小試験体におけるせん断変形が発現する最大耐力までは、縮小試験体のファイバー要素解析モデルで縮小試験体実験の履歴形状と耐力を再現することができた。

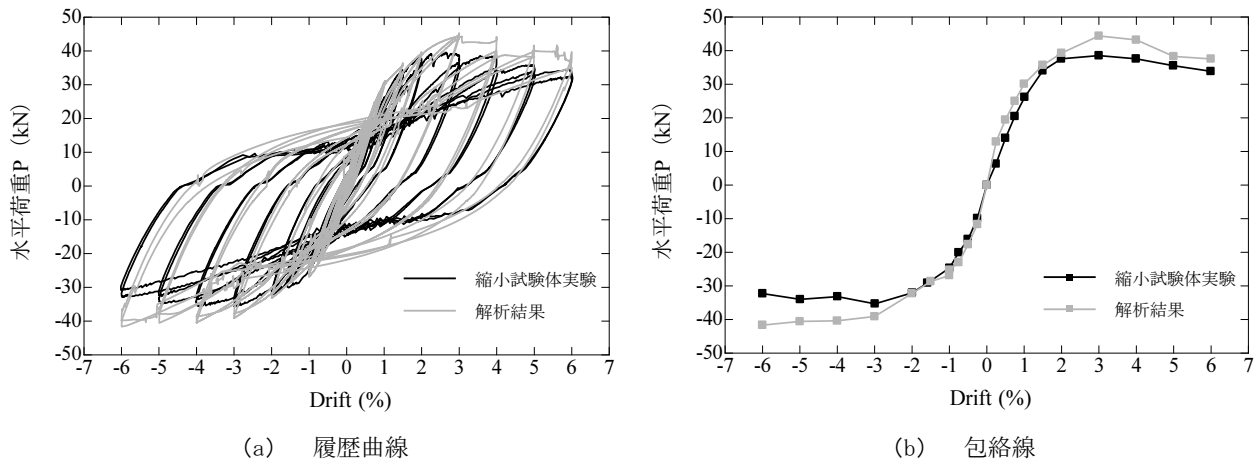


図-16 縮小試験体実験の結果とファイバー要素解析結果の比較

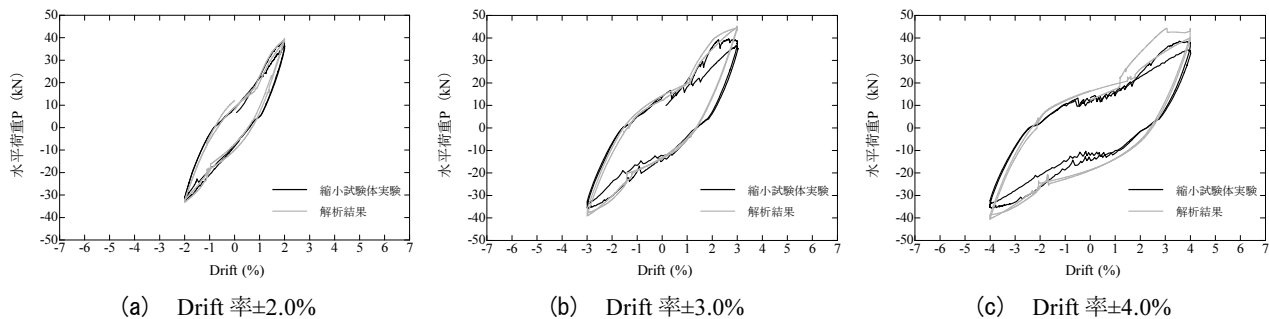


図-17 各 Drift 率時の解析と実験の履歴曲線

5. まとめ

本研究では、今後の鋼上部構造に関する研究を進める上で不可欠となる大型構造物の再現性の高い縮小試験体と解析モデルを構築することを目的とし、既往の研究¹⁾の大型試験装置を基に作成した鋼上部構造縮小試験体の再現性とファイバー要素を用いた鋼上部構造の解析手法、具体的には各部材の要素分割などについての提案を行った。その上で、提案した解析手法を縮小モデルにも適用し、縮小試験体の実験と解析の比較より、縮小試験体への提案解析方法の適用性を検討した。その成果を以下にまとめる。

1. 本研究の縮小試験体は大型試験体の最大耐力までの履歴曲線の形状を良く再現できた。また、各 Drift 時の最大耐力はよく一致した。
2. ファイバー要素解析モデルの要素分割に関するパラメトリック解析により、大型試験体の実験結果を良く再現できる鋼桁とコンクリート床版の要素分割数を提案した。

3. 提案した要素分割数を基に縮小試験体のファイバー要素解析を行い、Drift 率±3.0%までは縮小試験体の実験値を再現できることを確認した。

参考文献

- 1) Bahrami, H., Itani, A. and Buckle, I. : 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（耐震設計編），丸善，pp.50-63，2008.
- 3) 日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震設計の現状と信頼性向上，JSSC テクニカルレポート No.93，2011.
- 4) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A.W. : Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers, J. struct. Engineering, ASCE, Vol.123, No.5, pp.624-633, 1997