

対傾構を有する鋼上部構造縮小試験体の静的載荷試験

岩田 隆弘¹・木下 幸治²

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）

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⁾。橋梁構造物全体の高耐震性能化を実現する上で、エネルギー吸収効果が期待できるダンパー・ブレースの二次部材である鋼上部構造の対傾構などへの適用により、上部構造の慣性力低減に繋がると考えられる。これに伴い、橋梁下部構に作用する地震力を低減することができ、橋梁構造物全体の高耐震性能化に進むと考えられる²⁾。この実現のためには、対傾構に許容できる塑性変形性能、並びに鋼上部構造に設置するための主構造とそれらの耐力的なバランスなどについて、詳細に明らかとする必要がある。

本研究では、著者らが構築した鋼上部構造を対象とした縮小試験体載荷試験システム³⁾を用いて、対傾構を設置した縮小試験体の載荷実験を実施し、対

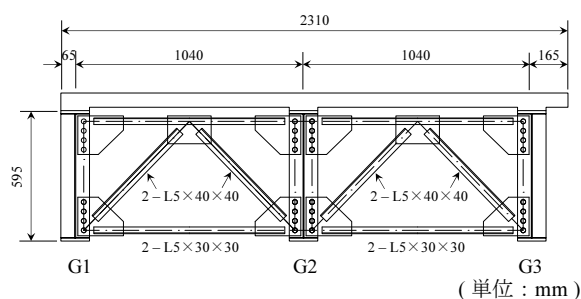
傾構の降伏程度までの力学特性の把握と解析モデルの検証を行った。また、鋼上部構造の耐力計算が可能な力学モデルの検討も行い、ダンパー・ブレースの設計計算手法を検討した。

2. 縮小試験体を用いた載荷実験

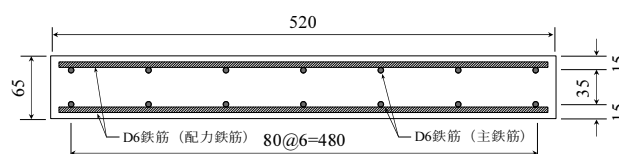
本章では、対傾構を設置した鋼上部構造の縮小試験体の試験システムの概要と、実施した載荷試験の結果から得られた力学特性について示す。

(1) 試験システムの概要

図-1、図-2に縮小試験体の図面と試験システムを示す。ここでは、載荷部から最も遠い桁からそれぞれG1、G2、G3とする。載荷実験には、これまでに著者らがこれまでに構築した鋼上部構造を対象とした縮小試験体載荷試験システムを用いることとした。縮小試験体は、文献1)の大型試験体を基に作成され、実大の0.24スケールの縮小試験体であり、コンクリート床版を有する鋼I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



(a) 全体図



(単位：mm)

(b) 配筋図（橋軸直角断面）

図-1 試験体図面



図-2 試験システム

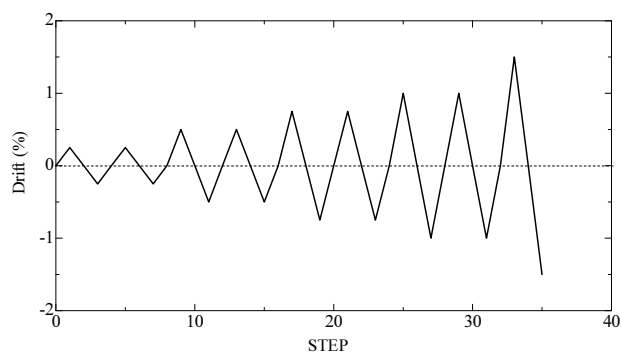


図-3 載荷サイクル

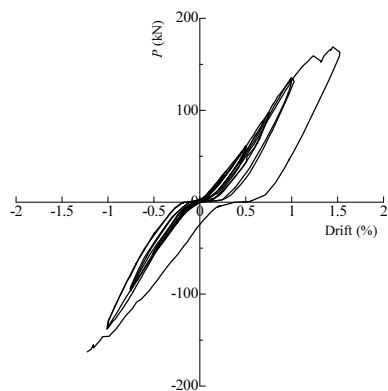


図-4 荷重変位関係

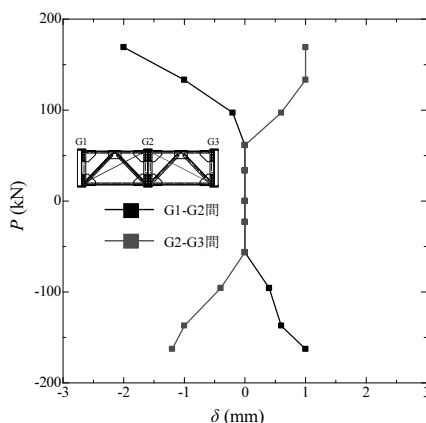


図-5 鋼桁間の斜め変位

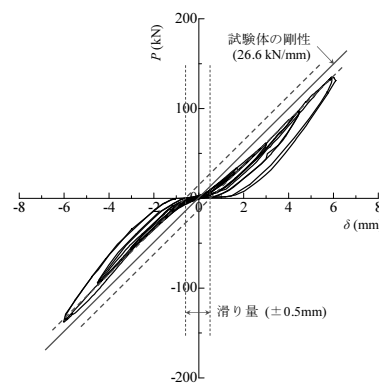


図-6 試験体の剛性

てスタッドが用いられている³⁾。本研究では上記の縮小試験体に対し、対傾構を設置している。対傾構の寸法は、道路橋示方書⁴⁾に基づき、縮小試験体の設計基の諸元から決定した。

載荷試験では、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返し水平力を与えた。繰返し載荷は、著者らがこれまでにを行った載荷実験と同様に漸増型繰返し載荷で、各2サイクル載荷を行う³⁾。試験中の載荷は、変位制御で行い、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 $\pm 0.25\%$ ずつ増加させ、それ以降は $\pm 0.5\%$ ずつ変動させた (図-3)。

(2) 荷重変位関係

載荷実験結果として、図-4に荷重-変位関係を示す。この時、水平変位 δ はDrift率 (%) としている。図-4より、Drift率1.0%までは線形挙動を示しているが、それ以降は剛性が低下しており、この時に、対傾構が降伏していると考えられる。なお、載荷実験は、Drift率1.5%時に対傾構の降伏判定が行えたため、Drift率1.5%で載荷を終了した。ここで、図-4に示すように、初期剛性は非常に低く、載荷初期段階からスリップ型の挙動を示した。この原因は、図-5に示

すように鋼桁間の斜めの変位が ± 50 kN付近 (Drift率における $\pm 0.5\%$) まで0 mmであったことから、載荷初期段階において荷重伝達が確実にされていなかったと考えられる。そのため、ここでは図-6に示すように、滑り区間を過ぎて剛性が高くなり、一定となった区間の剛性を試験体の剛性 (26.6 kN/mm) として取り扱った。

(3) 各部材のひずみ値と損傷状態

1) 対傾構

図-7に載荷時における対傾構のひずみ計測結果を示す。図-7の横軸がひずみ (μ)、縦軸が荷重 (kN) を示している。なお、ここでは、ひずみゲージにより対傾構中央部分の軸方向ひずみを測定した。図-7より、1500~2000 μ 程度に達しており、端対傾の降伏ひずみ (1600 μ 程度) に達していることがわかる。また、図-8に示すように載荷終了時の対傾構中央部では、リューダース線が発生し、X字状に黒皮が剥離していることから塑性化しているのではないかと考えられる。以上より、本研究で想定した対傾構の降伏程度までの載荷が行えたといえる。

2) コンクリート床版

図-9にコンクリート床版の鉄筋のひずみ量を示す。

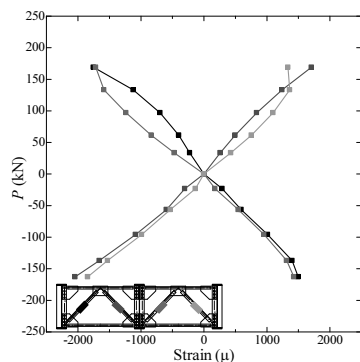


図-7 対傾構のひずみ



図-8 対傾構の黒皮の剥離

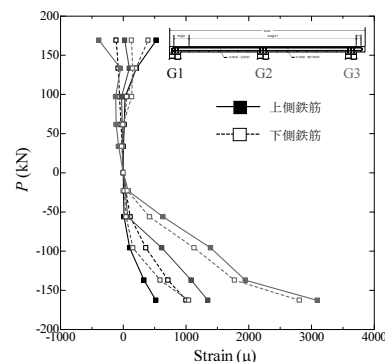
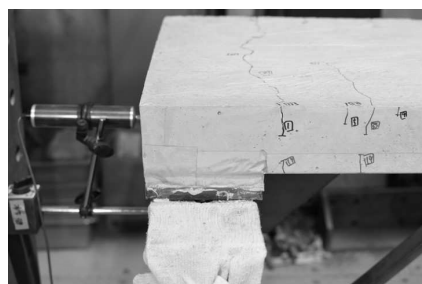
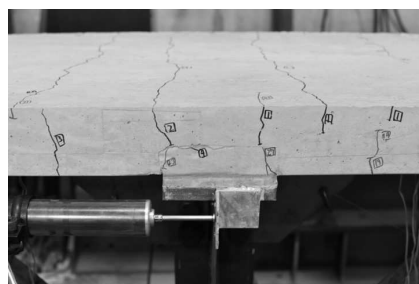


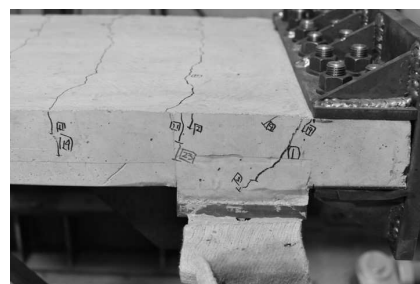
図-9 床版鉄筋のひずみ



(a) G1



(b) G2



(c) G3

図-10 床版の損傷状態

図-9の横軸がひずみ (μ)、縦軸が荷重 (kN) を示している。ここでは、G1~G3直上における中央の主鉄筋の軸方向ひずみを計測した。図-9より、G3部のひずみは、-50kN付近 (Drift率における-0.5%) に至ると急激に引張側に増大し、载荷終了時には降伏ひずみ程度まで達する結果となった。これは、静的载荷の負側 (引き側) の際に、载荷部近傍であるG3付近の鉄筋に局所部分的な変形が作用したことによるものと考えられる。一方、G1、G2ではひずみ量は小さく、降伏程度に達していない。

図-10に载荷終了のコンクリート床版の損傷状態を示す。G1およびG2直上のコンクリート床版の損傷は、比較的軽微であり断面が急変するハッチ部の応力集中部から床版厚さ方向にひび割れが発生している程度であった。一方、G3では、载荷治具より斜め方向にひび割れが発生している。このことを踏まえ、前述した様にG3では局所的な変形が集中したためと考えられる。

3) 上下弦材

図-11に上下弦材のひずみ量を示す。横軸がひずみ (μ)、縦軸が荷重 (kN) を示している。ひずみゲージは、山形鋼の板厚部に軸方向に貼付している。また、各測定位置は、G2の両端に設置されたガセットプレートと上下弦材の結合部、すなわち山形鋼の端部を計測している。結果より、いずれの計測箇所においても最大1000~1500 μ まで上昇しているが、図

-11(b)のひずみゲージの値が-150kN付近以降 (Drift率における-1.0%以降) において、急激に上昇しており、この区間において降伏したと考えられる。

以上より、設置した対傾構はコンクリートおよび上下弦材の損傷に先行して降伏することが明らかとなった。また、対傾構の降伏により水平剛性が低下し、エネルギー吸収が期待できることも明らかとなった。次章では、本実験結果を基に解析モデルの検証を行うとともに、解析的にも各部材の損傷順序について明らかとする。

3. ファイバー解析モデルの検討

本章では、前章で行った実験を基に、対傾構を設置した解析モデルの検討を行なう。また、解析結果から損傷順序を解析的にも明らかとする。

(1) 解析モデル

図-12に解析モデルを示す。解析モデルは著者らがこれまでに構築した鋼上部構造のファイバー要素解析モデル³⁾をベースとする。コンクリート床版のファイバー断面の要素分割は、床版厚および床版幅ともに30分割としている。また、コンクリート床版内の鉄筋は、主鉄筋のみモデル化し、配力鉄筋についてはモデル化を行っていない。

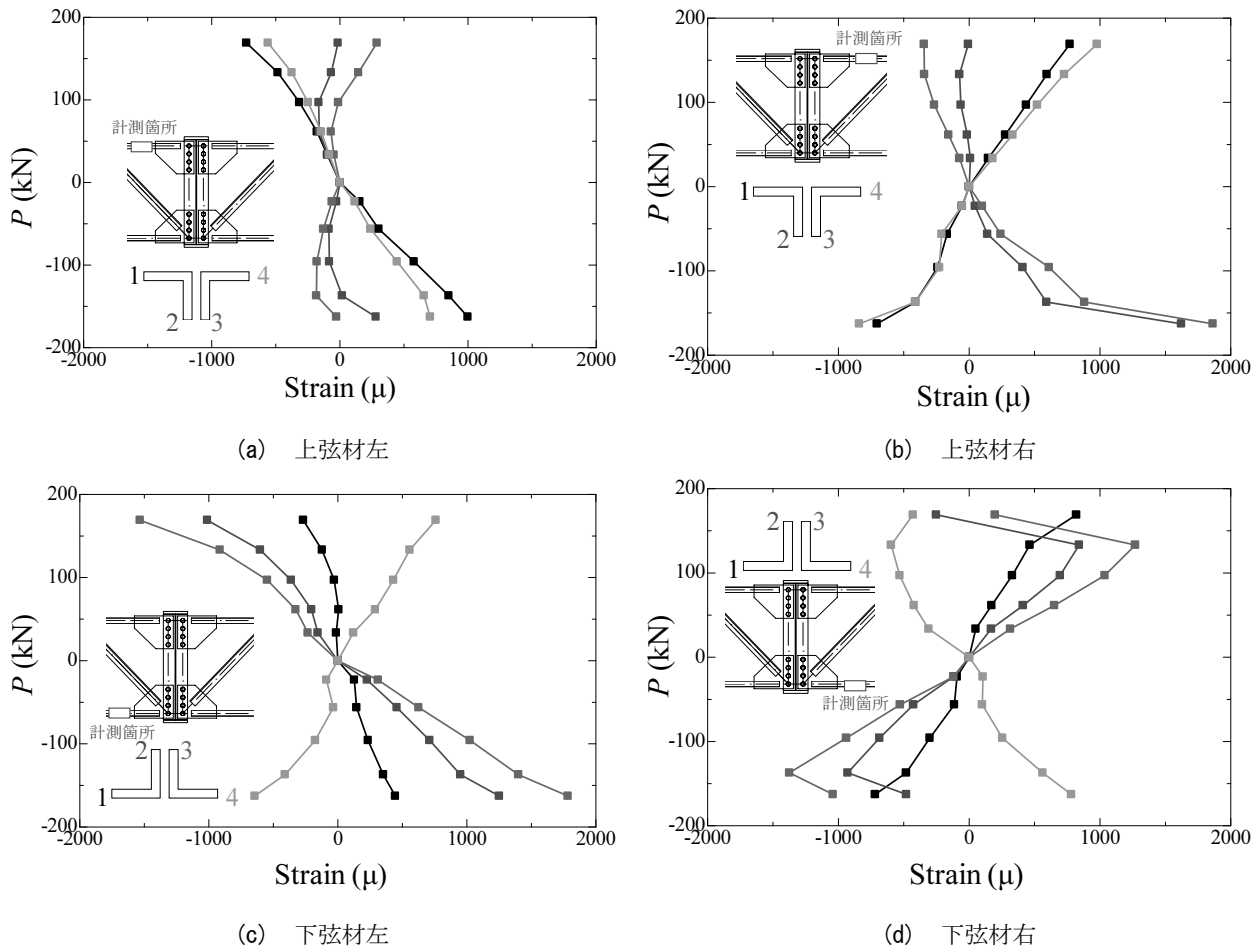


図-11 上下弦材のひずみ

図-13(a)にスタッドのモデル化の概念図と材料特性を示す。スタッドのモデル化には、ばね要素を使用し、コンクリート床版の下面と鋼桁上フランジ上面の間に取り付けられた水平ばねと鉛直ばねでモデル化している。鋼桁ひとつあたり鋼桁上フランジ中央部に9本、外縁に6本とスタッドが取り付けられている。また、スタッドは鋼桁ひとつあたりに対して、橋軸方向に3列で配置されているため、コンクリート床版の下面のノードおよび鋼桁上フランジのノードから左右に剛体要素を設け、ひとつあたりの鋼桁に3つのばね要素でモデル化した。図-13(b)に鉛直ばねの材料特性を示す。鉛直ばね特性は、引張側をスタッド、圧縮側をコンクリートが抵抗するモデルとし非対称のトリリニアモデルとした。スタッドの初期勾配 k_{vs} およびコンクリートの初期勾配 k_{vc} には次式より算定した。

$$k_{vs} = \frac{E_s A_s}{L_s} \quad (1)$$

$$k_{vc} = \frac{E_c A_c}{2d_c} \quad (2)$$

ここで、 E_s はスタッドの弾性係数、 A_s はスタッドの

総断面積、 L_s はスタッドの長さ、 E_c はコンクリートの弾性係数、 A_c はコンクリート床版と接する部分の鋼上フランジの面積、 $2d_c$ は床版厚である。図-13(c)に水平ばねの材料特性を示す。文献5)では押し抜き試験結果より、スタッドの剛度を決定しているが、本研究では、スタッドの断面積 A_s 、スタッドの長さ L_s をパラメータに文献5)で示されている値を換算し、剛度を決定した。

また、各部材の材料特性を図-14に示す。コンクリートは、コンクリートの圧縮側の材料特性には、Hoshikumaモデル⁶⁾を用い、圧縮側の軟化勾配 E_{des} は10000N/mm²とした。引張側は考慮せずゼロとして、弾性係数 E_c は28000N/mm²とした。鉄筋の材料特性には降伏棚を考慮したトリリニアモデルとし、鋼板はバイリニアモデル⁷⁾とし、二次勾配を弾性係数 E_s の1.0%としている。

対傾構のモデル化は、文献³⁾で構築したXブレースが設置された鋼上部構造の解析モデルと同様に、ガセットプレートとブレース材の結合部を剛体要素としてモデル化している。

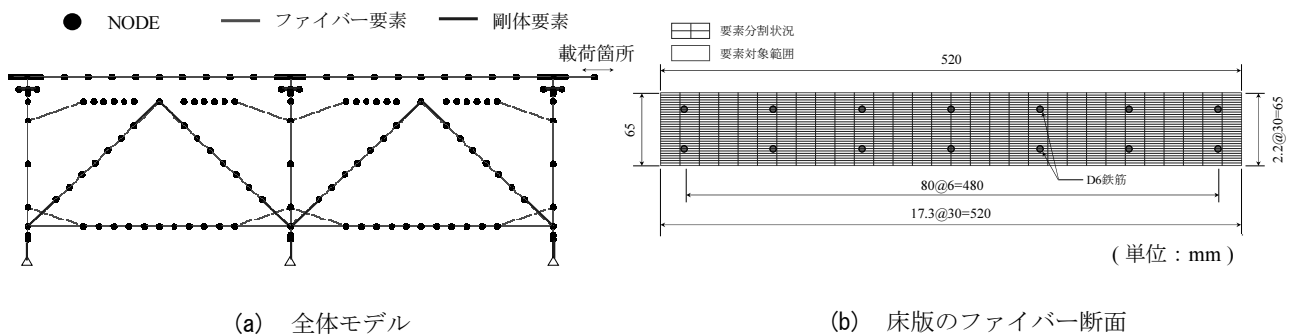


図-12 ファイバー要素解析モデル

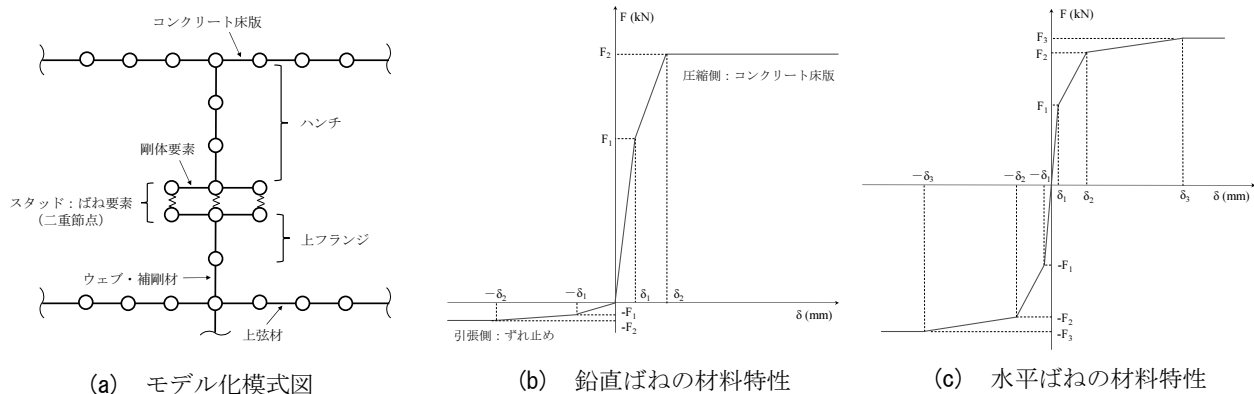


図-13 ばね要素によるスタッドのモデル化

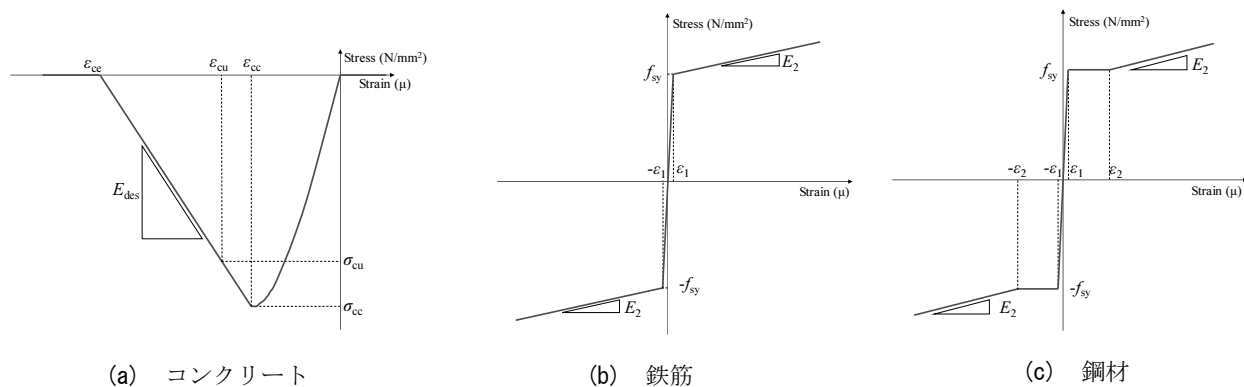


図-14 各部材の材料特性

(2) 解析結果

図-15に解析結果を示す。図より、前述したように実験における初期載荷時の滑りから初期剛性は一致しない。一方で、Drift率が1.0~1.5%区間では耐力が概ね一致し、除荷時の剛性もよく一致する結果となった。

次に、各部材の損傷順序は、Drift率が0.5%時に対傾構の端部より降伏が開始し、0.75%に達すると中央部の腹部すなわち実験時のひずみゲージ測定箇所が降伏した。その後、コンクリート床版に圧縮による軽微な損傷が確認され、1.0%に達すると上下弦材の端部より降伏が開始、その後コンクリートのG3部

分の鉄筋が降伏した。以上の結果より、Drift率が1.0~1.5%区間では耐力一致し、除荷時の剛性もよく一致している。また、解析においても対傾構が他の部材に先行して降伏していることも解析的にも明らかとなった。

4. せん断型ダンパー・ブレースの設計計算手法の検討

ここでは、前章で構築したファイバー要素解析モデルと、著者らがこれまでに構築した鋼上部構造の

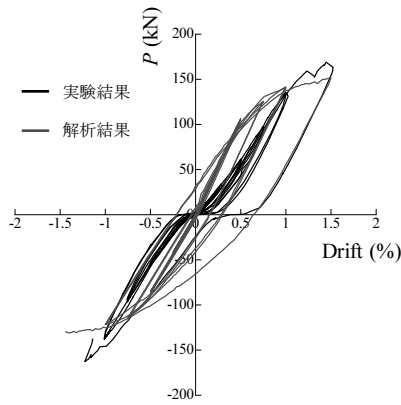


図-15 解析結果

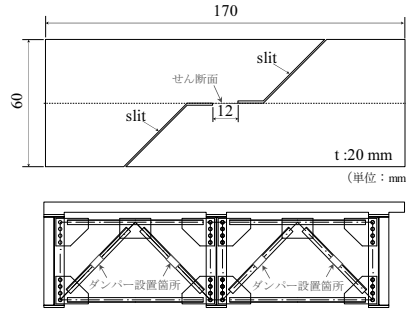


図-16 既往の研究の試験片⁸⁾と設置箇所

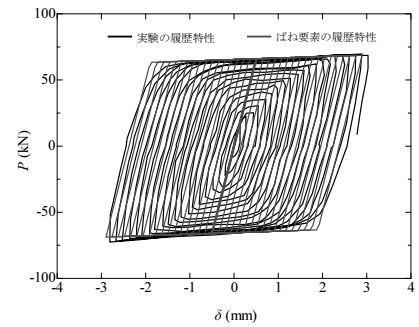


図-17 試験片の履歴特性⁸⁾とばね要素の履歴特性

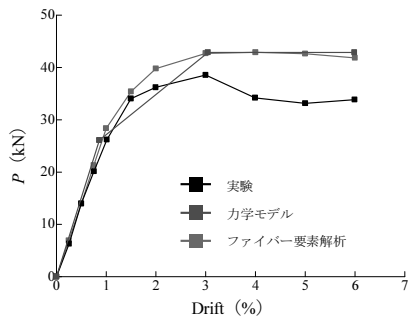


図-18 フレームの骨格曲線

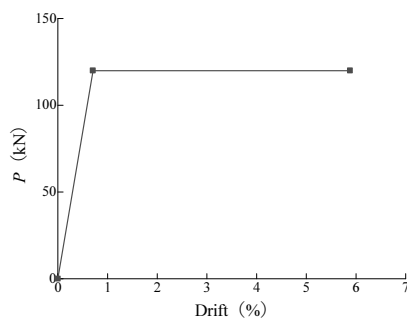


図-19 対傾構の骨格曲線

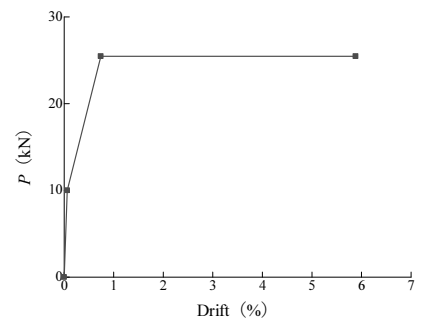


図-20 ダンパー・ブレースの骨格曲線

力学モデル³⁾を用いて、鋼上部構造の耐力計算手法を検討し、せん断型ダンパー・ブレースの設計計算方法について検討する。

(1) せん断型ダンパー・ブレース

ダンパー・ブレースとしては、座屈拘束ブレース等がこれまでに研究されているが、部材長の短い対傾構への適用はその効果を十分に発現できるとは言い難い。一方、軸方向力をせん断力に変換するダンパー（以下、せん断型ダンパー・ブレース）が既往の研究⁸⁾で検討されている。せん断型ダンパー・ブレースの対傾構への適用は、これらの課題を解決できると考えられ、また既設構造物への適用も容易であると考えられる。そこで本章では、鋼上部構造の対傾構へのせん断ダンパー・ブレースの設置効果について検討を行う。図-16に既往の研究で提案された試験片⁸⁾と上部構造のダンパーの設置箇所を示す。この試験片は、試験片中央部に向かいスリットを設けることにより、せん断変形を発現させる仕組みとなっている。この試験片を、対傾構の長手方向中央部に設置し、軸力作用下でせん断変形を発現させる。既往の研究では、この試験片で漸増繰返し载荷を行っており、図-17に示す様に、非常に安定し

た履歴ループを描いている。この時、せん断応力 τ は荷重 P をせん断変形部の断面積 A_d で除した値で求め、また、せん断降伏応力は、Von Misesのせん断ひずみエネルギー説より、降伏応力を $\sqrt{3}$ で除した値で求まる。本論では、この試験片をダンパー部としたダンパー・ブレースについて検討を進め、ダンパーの荷重変位関係は既往の実験結果（図-17）を基に解析を行う。

(2) 力学モデルを用いた鋼上部構造の耐力計算

ダンパーの耐力計算には、これまでに著者らが構築した力学モデル³⁾を用いて計算を行う。力学モデルでは、対傾構をトラス構造と仮定して軸方向の変形、鋼上部構造をラーメン構造と仮定してたわみ角法⁹⁾により対傾構およびダンパー・ブレースを加味した鋼上部構造の剛性計算を行う。また、各部材の降伏、終局判定を行うことで鋼上部構造の耐力計算を行う。

1) 鋼上部構造のみの骨格曲線

図-18に鋼上部構造に対傾構を設置していない状態（以下、フレーム）の骨格曲線および実験結果と解析結果における第一象限の包絡線を示す。力学モデルでは、上下弦材の降伏により2次勾配へ移行し、

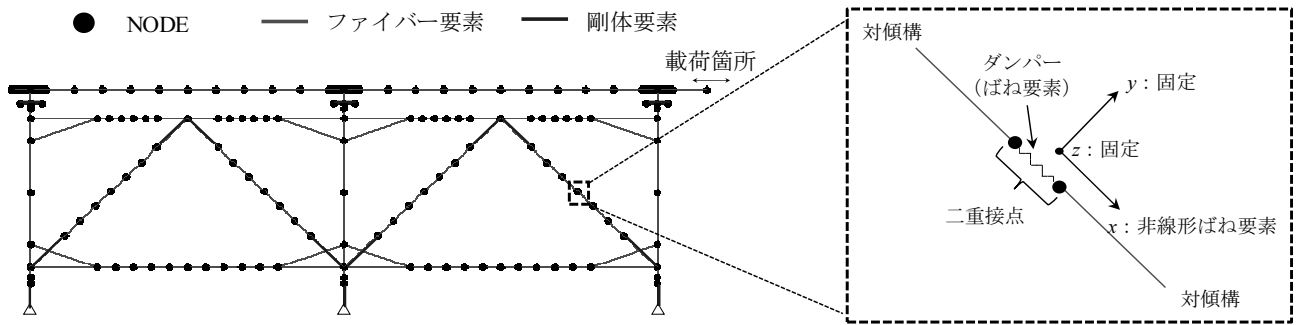


図-21 ダンパーのモデル化

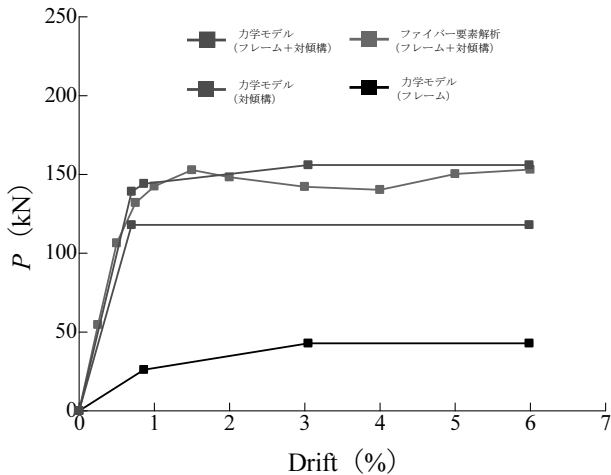


図-22 フレーム+対傾構の結果

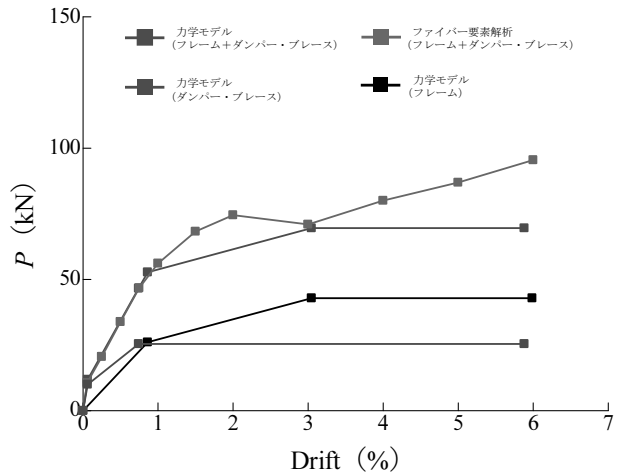


図-23 フレーム+ダンパー・ブレースの結果

その後コンクリート床版の終局により3次勾配へ移行するモデルとなっている。この時、上下弦材は降伏モーメントを、コンクリート床版は終局曲げモーメントを算出し、各部材の部材端モーメントが降伏モーメントおよび終局曲げモーメントに達した時に降伏、終局判定を行っている。

2) 対傾構の骨格曲線

図-19に対傾構の骨格曲線を示す。対傾構の水平剛性 K_b は次式³⁾より算出する。

$$K_b = \frac{EA_b \cos^2 \theta}{\ell} \quad (3)$$

ここで、 E は弾性係数、 A_b は対傾構の断面積、 θ は対傾構の設置角度、 ℓ は対傾構の部材長である。対傾構の降伏判定には、断面積 A_b と降伏強度 σ_y より降伏軸力 N_y を算出し ($N_y = \sigma_y A_b$)、設置角度から降伏水平荷重 P_y を算出する ($P_y = 2N_y \cos \theta$)。また、水平剛性 K_b および降伏水平荷重 P_y より降伏水平変位 δ_y を算出する ($\delta_y = P_y / K_b$)。対傾構の降伏後の2次勾配は0としている。

3) ダンパー・ブレースの骨格曲線

図-20にダンパー・ブレースの骨格曲線を示す。

対傾構にダンパーを付加させた時の水平剛性は、次式より算出する。

$$K_a = \frac{K_d}{K_d / K_b + 1} \quad (4)$$

ここで、 K_b は対傾構の水平剛性、 K_d はダンパー単体の剛性である。また、ダンパー・ブレースの降伏水平荷重 P_y および降伏水平変位 δ_y は、前節と同様に算出する。ダンパーの降伏後は、2次勾配へ移行し、(4)式を用いてダンパーの2次剛性（降伏後の剛性）と対傾構の1次剛性（降伏前の剛性）より求まる。対傾構の降伏後の3次勾配は0としている。

4) 対傾構およびダンパー・ブレースをフレームに設置した骨格曲線

対傾構およびダンパー・ブレースをフレームに設置した場合の剛性は、両者の和で決定する。また、各部材の降伏および終局より剛性を変化させる。

(3) 解析モデルの概要

本解析では、前章で検討を行った解析モデルに対し、せん断ダンパー・ブレースを付与したモデルで解析を行う。ダンパー部は、図-21に示す様にブレ

ース中央に二重節点を設け、その節点同士をばね要素で接続することにより、モデル化することとした。ばね要素の履歴特性は図-17の試験結果より、バイリニアモデルでモデル化している。なお、このバイリニアモデルでは、ばね要素の降伏耐力を既往の実験⁹⁾より高く設定しているが、これは解析ソフトのモデル制限によるものであり、履歴特性およびエネルギー吸収量を既往の実験⁹⁾と最も近くなるモデルとなっている。本解析では、図-17のモデルを基に、任意の降伏耐力になるようにばね特性を再計算した。

(4) 力学モデルによる計算結果と解析結果

図-22に上部構造に対し対傾構を設置した場合の、力学モデルの計算結果と解析結果の第1象限の包絡線を示す。加えて、著者らがこれまでに行った対傾構を付与していない鋼上部構造の実験と解析結果³⁾および力学モデルの計算結果を示す。図より力学モデルによる計算と解析の結果を比較すると、初期剛性はよく一致しており骨格曲線の形状も概ね一致している。図-23に上部構造に対してダンパー・ブレースを設置した場合の、力学モデルの計算結果と解析結果の第1象限の包絡線を示す。図より初期剛性および2次勾配はよく一致している。Drift率が3.0%以降は、解析では耐力の再上昇が見られるが、力学モデルではそれが再現できていない。これは、力学モデルではダンパーおよびブレース材のひずみ硬化を考慮していないためである。以上より、ファイバー要素解析と力学モデルの比較より同等の結果を得られたことから、力学モデルを用いて鋼上部構造の耐力計算が可能であること示した。さらに力学モデルを用いた耐力計算手法を用いることで、ダンパー・ブレースの設計計算が可能となる。

5. 結論

本研究では、著者らが構築した鋼上部構造を対象とした縮小試験体載荷試験システム³⁾を用いて、対傾構を設置した縮小試験体の載荷実験を実施し、対傾構の降伏程度までの力学特性の把握と解析モデルの検証を行った。また、検証した解析モデルを基に、力学モデルによる耐力計算手法の検討を行った。その成果を以下にまとめる。

- 1) 載荷実験においてひずみゲージによるひずみ計測結果、および対傾構表面の黒皮の状況より、本研究で想定した対傾構の降伏程度までの載荷

が行えた。

- 2) 実験結果を基に検証したファイバー要素による解析モデルは、実験時における載荷初期の滑りにより初期剛性は一致しないが、滑り区間を過ぎて剛性が高くなる区間、すなわちDrift率が1.0~1.5%区間では耐力が概ね一致し、その後の除荷剛性もよく一致する結果となった。
- 3) 対傾構をトラス構造と仮定して軸方向の変形、鋼上部構造をラーメン構造と仮定してたわみ角法によりブレースを加味した鋼上部構造の剛性評価を行う力学モデルを用いて剛性および耐力計算手法を構築し、ファイバー要素解析の結果と比較することでその有用性を示した。

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) Lyle P. Carden, Ahmad M. Itani and Ian G. Buckle :Seismic Performance of Steel Girder Bridges with Ductile Cross Frames Using Single Angle X Braces, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.329-337, March, 2006.
- 3) 木下幸治, 岩田隆弘, 井上一磨 : 鋼上部構造へのダンパー・ブレースの適用性を検討可能な縮小試験体と解析手法の構築, 地震工学論文集 (掲載予定)
- 4) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, I 共通編・II 鋼橋編, 2012.
- 5) 中島章典, 池川真也, 山田俊行, 阿部英彦 : ずれ止めの非線形性を考慮した不完全合成桁の弾塑性解析, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.97-106, 1996.4.
- 6) 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.
- 7) 堺淳一, 川島一彦 : 部分的な除荷・載荷を含む履歴を表す修正 Menogotto-Pinto モデルの提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.
- 8) 古庄龍悟, 休場裕子, 三木千尋 : 極低降伏点鋼のせん断特性に関する研究, 土木学会第 55 回年次学術講演会, I-B164-165, 2000.
- 9) 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.