

津波の影響を受ける橋に対する損傷制御型支承の提案

森屋 圭浩¹・中尾 尚史²・星隈 順一³

¹正会員 修(工) 株式会社 川金コアテック 技術部（前 国立研究開発法人土木研究所 交流研究員）
（〒332-0015 埼玉県川口市川口2-2-7）

²正会員 博(工) 国立研究開発法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

³正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 橋梁研究室 室長
（前 国立研究開発法人土木研究所 上席研究員）
（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波で、多くの橋梁が上部構造が流出する等の被害を受けた¹⁾。また、近い将来発生されると予想される、東海・東南海・南海地震では津波により多くの橋梁が被害を受けると考えられ、橋梁の津波対策は重要な課題となっている。これを受け、平成24年に改定された道路橋示方書²⁾では、津波の影響を受けにくいような構造的工夫を施すことが例示されている。

これまでに、津波により上部構造や支承部に作用する力については、水路実験³⁾⁻⁵⁾や数値解析⁶⁾⁻⁸⁾、映像による分析⁹⁾⁻¹¹⁾から検討が行われている。そして、これら得られた知見を基に、フェアリングを用いて津波による力を軽減させる方法^{12),13)}や、支承部をPCケーブルや緩衝ピンなどで補強し、耐力を向上させる方法¹⁴⁾について検討が行われている。

これらの対策は、上部構造を流出させないようにする方法、すなわち大きな被害を生じさせないという視点からの対策である。しかし、2011年の東日本大震災における経験から、地震や津波の影響によって設計で、想定している状況を超える状況が生じたとしても、写真-1に示すように機能損失による社会的影響を最小化できるように予め配慮しておくことが、減災対策上重要である¹⁵⁾。そのため、津波による橋の挙動の特性に応じて、相対的に機能回復力の高い破壊シナリオを選択し、その上で確実に当該破壊シナリオとなるように各部材の設計を行うことがポイントとなる。この破壊シナリオを確実化するためには、想定を超える作用力が生じた時に破壊を誘



(a) 橋脚の倒壊も伴って機能損失した橋



(b) 支承部の破壊により機能損失した橋

写真-1 津波による橋の機能損失

導する部材（損傷制御部材）が明確となっていることが重要である。

そこで本研究では、上述の観点を踏まえ、津波の影響を受ける桁橋の支点部（支承部）を損傷制御部材の1つとして選定し、耐力と損傷形態のコントロールを高い信頼性をもって行うことが可能な損傷制御型支承を試作し、その機能を載荷実験により検証した。

2. 損傷制御型支承の概要

(1) 損傷制御型支承の設計思想

2011年東北地方太平洋沖地震による津波で致命的な被害を受けた桁橋の状況を見てみると、写真-1に示すように支承部が破壊して致命的な状態に至った橋、橋脚の倒壊も伴って致命的な状態に至った橋等があり、破壊シナリオが複数あることはこれらの被害事例からも確認できる¹⁶⁾。いずれも上部構造が流出しており、橋としての機能が損失している点では

同じであるが、これらの状態からの機能回復のしやすさという観点で考えると、写真-1(a)のように下部構造が倒壊している状態よりも、写真-1(b)のように下部構造は倒壊せずに鉛直方向の力だけでも支持できる状態に留まっている方が望ましい¹⁷⁾。

本研究で提案する損傷制御型支承は、上記の考え方を踏まえ、地震力に対して支承の機能を確保し、津波による力に対しては、必要とする耐力を確保しつつ、津波の影響により想定外の力が作用した場合でも、下部構造に損傷が生じないように支承を確実に損傷させようという考え方の構造である。最終的な破壊シナリオとして、下部構造が倒壊に至る前にあえて上部構造を流出させようという考え方のもとである。

(2) 損傷制御型支承の構造コンセプト

既往の研究では、ゴム支承に用いるサイドブロックを高い変形能を有するように改良した研究はあるが¹⁸⁾、本研究で考案している損傷制御型支承は、既設道路橋において広く使われているBP-B支承（密閉ゴム支承板支承）の一部を損傷制御部品に改良したものである。すなわち、支承本体に損傷を制御する部品を取り付け、支承と一体化させていることが、本研究で提案する支承の大きな特徴である。

これまでに著者らは、桁取り付けボルトやサイドブロック取り付けボルトを破断させて損傷を制御する構造と、サイドブロックを曲げ変形させることで損傷を制御する方法を提案¹⁹⁾し、その検証を行っている。これらより得られた知見やボルトの載荷試験に関する研究^{20), 21)}から、ボルトを破断させて損傷を制御する方法は、ボルトが想定耐力以上の荷重で破断する等、破断耐力がばらつくことから、損傷を制御する部品としては適していないと考えた。そこで、本研究で提案する損傷制御型支承は、サイドブロックを損傷制御部品とし、この部品を曲げ変形させて損傷を制御する構造を採用した。

サイドブロックは、著者らのグループが過年度に実施した従来タイプのBP-B支承の載荷実験²²⁾により検証されている同支承の損傷メカニズムを踏まえ、図-1に示すような鉛直上向き力に抵抗する逆L型サイドブロックとし、サイドブロックの一部を窪ませて（図-1中のA部で、「損傷部」と呼ぶ）、その部分において曲げ損傷させる構造とした。また、損傷部が確実に曲げ損傷を生じさせるため、損傷制御部品全体が回転しないように下沓のB部（図-1）に損傷制御部品を引掛けるように設置している。

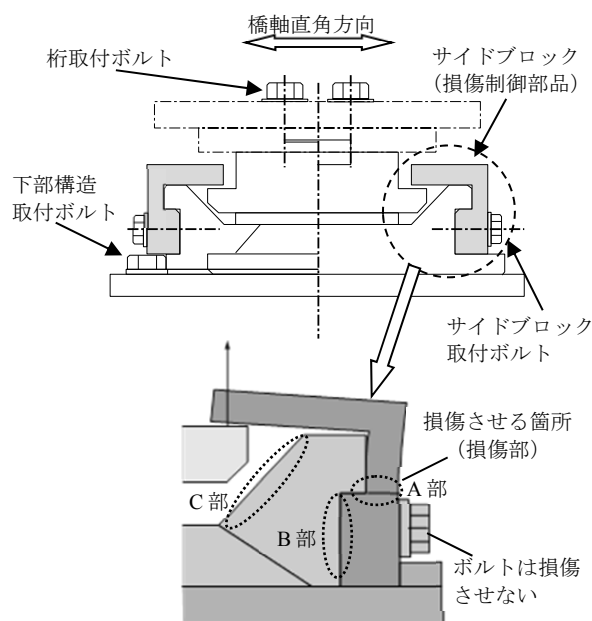


図-1 損傷制御型支承の概要図

(3) 損傷制御型支承の損傷制御メカニズム

損傷制御型支承の損傷イメージは図-2に示したとおりである。支承部に鉛直上向き方向ならびに斜め方向の力が作用した場合に対しては、上沓が左右の損傷制御部品（サイドブロック）の張出し部に接触した後、損傷部を曲げ変形させて上沓と損傷制御部品の張出し部との引掛りが外れることにより支持機能が損失する仕組みとなっている。

また、橋軸直角方向に対しては下沓突起部に傾斜部を設けることにより（図-1，C部），上沓が下沓傾斜部に接触した後に傾斜面に沿って鉛直上向き方向へ移動させ、損傷制御部品の損傷部を曲げ変形させて上沓と損傷制御部品の張出し部との引掛りが外れることにより支持機能が損失するメカニズムとなっている。

3. 損傷制御型支承の設計

(1) 損傷制御型支承の材料

前述した構造コンセプトおよび設計思想に基づいて、損傷制御型支承を設計する。本研究では、400kNタイプのBP-B支承を使用した。

損傷制御型支承各部品の材料は、図-3に示すように、上沓は溶接構造用圧延鋼材（SM490）、下沓は溶接構造用鋳鋼品（SCW480）、セットボルト（上、下）と損傷制御部品取り付けボルトは強度区分8.8とし、一般のBP-B支承で使用されている材料を用いた。また、損傷制御部品であるサイドブロックは、コンパクト化が図れること、降伏後の2次剛性が小さい、

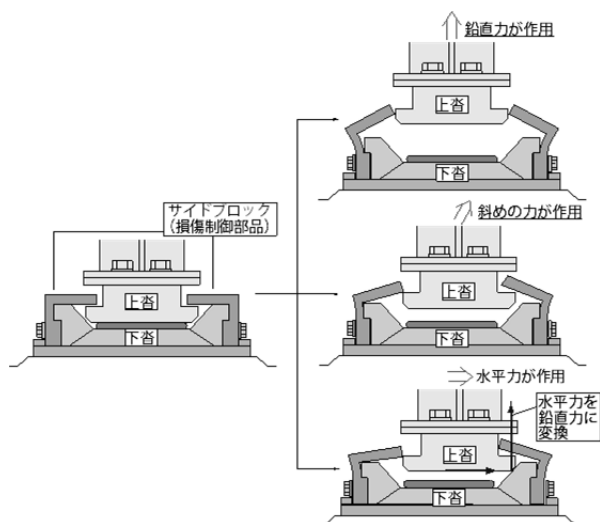


図-2 損傷制御型支承の制御メカニズム

すなわち降伏後の挙動において変形能を発揮できることを考慮して高強度鋼材（SM520）を用いた。

(2) 損傷制御型支承の構造設計

前章で述べた損傷制御型支承の設計思想より、損傷制御型支承は、耐震設計で考慮する設計地震力に対して支承の機能を確保すること、津波の影響による作用力に対しては、最終的には下部構造に損傷が生じさせず、支承が確実に損傷するように設計する必要がある。したがって、図-4 に示すように設計においては、確保すべき耐力の順序を低い方から、①耐震設計で考慮する設計地震力（ $Pc1$ ）、②損傷制御部品損傷部の設計耐力（ $Pc2$ ）、③損傷部を除く損傷制御支承の設計耐力または下部構造の設計耐力（ $Pc3$ ）の順となるように各部品の設計を行うものとしている。設計地震力および設計耐力は、以下のように設定した。

①耐震設計で考慮する設計地震力（ $Pc1$ ）に対しては、損傷制御型支承を構成する全部品において設計地震力に対して弾性限界を超えないように設計を行うものとした。

②損傷制御部品損傷部の設計耐力（ $Pc2$ ）は、前章で述べた損傷制御部品の損傷メカニズムを踏まえ、損傷制御部品と上沓との引掛りが外れることによって荷重支持機能が損失されるとき荷重としている。上記のとおり、 $Pc2$ は耐力値の範囲が定められており、より確実性の高い耐力値の評価が必要となる。すなわち、 $Pc2$ の算出においては、損傷部の荷重-変位の関係性、また、損傷部の材料強度の頻度によるばらつき²³⁾や材料の塑性域における二次剛性の影響を考慮した上で算出している。したがって、本研究では、それらの影響を踏まえた上で、 $Pc1$ と $Pc2$ と

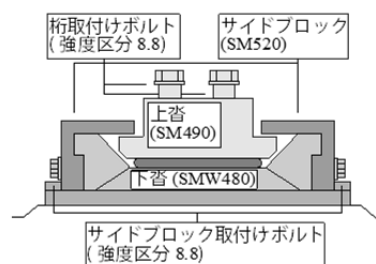


図-3 損傷制御型支承の使用材料

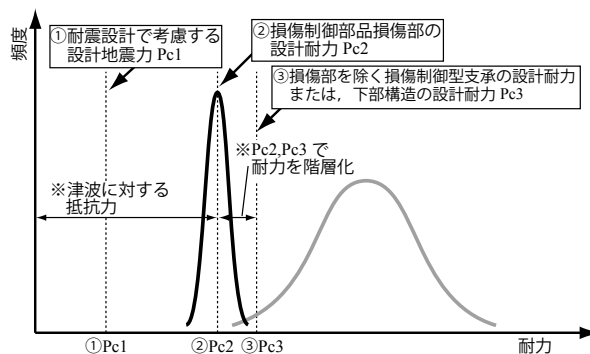


図-4 損傷制御型支承の耐力の考え方

の間では 1.5 倍程度の耐力差が生じることを想定して設計を行った。なお、 $Pc2$ と後述する③損傷部を除く損傷制御支承の設計耐力（ $Pc3$ ）との間には階層化を図るべきであるが、 $Pc3$ による設計耐力を考慮した場合において、支承形状が一様になる可能性を考慮し、本研究では $Pc2 \leq Pc3$ となるように設計耐力を設定した。

③損傷部を除く損傷制御型支承の設計耐力（ $Pc3$ ）は、本研究では最弱となる部品（損傷部を除く）の耐力とし、 $Pc2$ に対して弾性限界を超えないように設計を行った。なお、 $Pc3$ を算出するとき使用する材料強度については、材料の実強度の平均値ではなく、JIS規格に記載のある材料強度（下限値）とした。

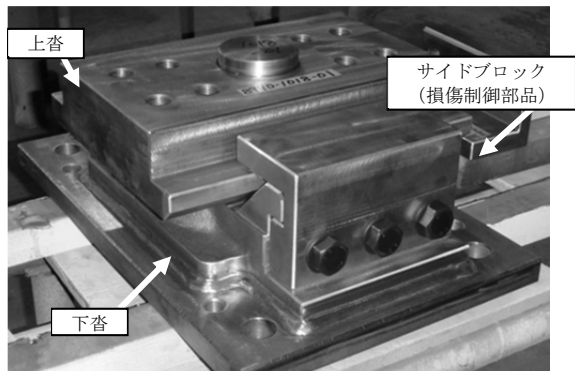
4. 損傷制御型支承の検証実験

(1) 損傷制御型支承の試作

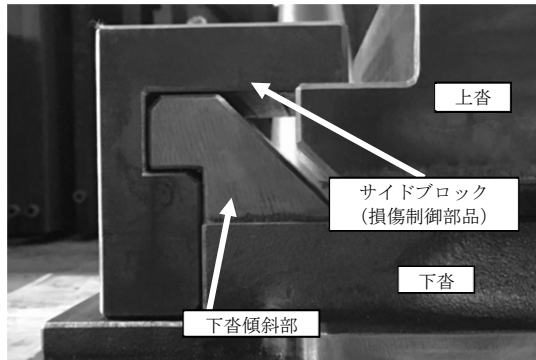
設計した損傷制御型支承に対して、想定通りの損傷形態および耐力となるかどうかについて、静的な載荷実験により検証を行った。損傷制御型支承は図-4に示した考え方に基づいて試作した。試作した損傷制御型支承を写真-2に示す。

(2) 載荷方向および載荷方法

載荷実験は、高速2軸試験機を用いて実験を行った。本実験では、写真-3に示すように、水平方向（橋軸直角方向）、鉛直上向き方向、斜め方向について、それぞれ一方向の漸増載荷実験を行った。試

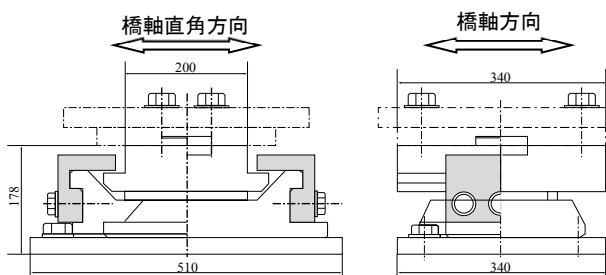


(a) 損傷制御型支承全体

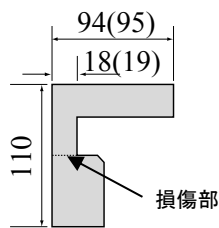


(b) 損傷制御部品とその周辺

写真-2 試作した損傷制御型支承



(a) 全体

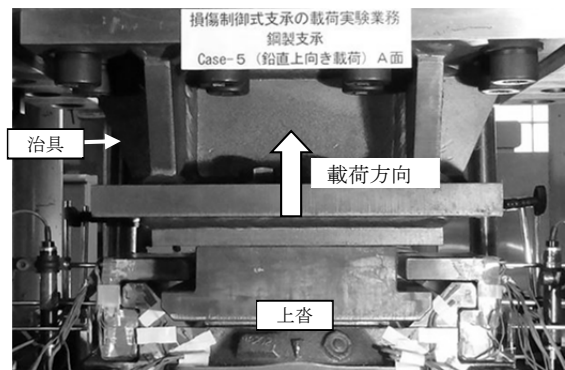


※ () 内は、鉛直上向き载荷用の寸法

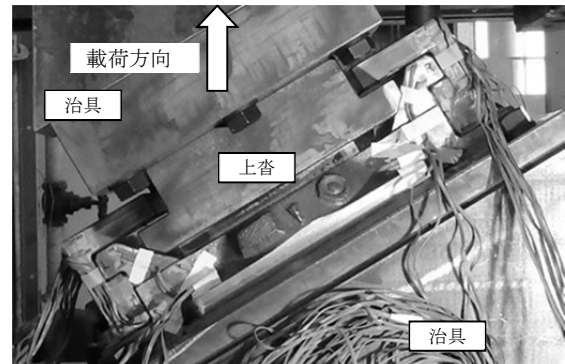
(b) サイドブロック(損傷制御部品)

図-4 損傷制御型支承の外形図

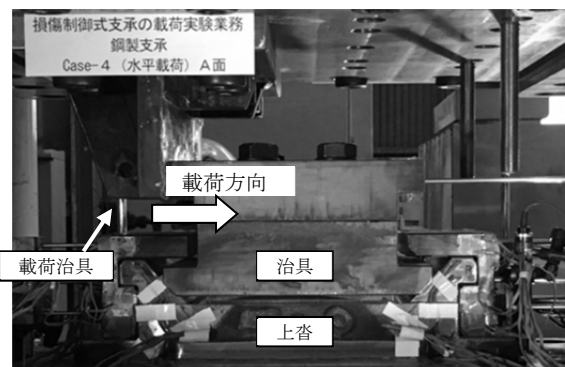
験機は2方向同時に载荷させることができない．そのため、水平方向については、製作した载荷用治具で上沓に取り付けている治具（この治具は载荷試験機には取り付けしていないため、自由に動くことが可能）を水平方向に押すことで、上沓とそれを取り付けている治具が鉛直方向に移動できるようにした（写真-3(c)）．斜め方向の载荷については、治具を用いて損傷制御型支承を斜めに設置することで、鉛直上向き方向の载荷で斜め方向の力が与えられる



(a) 鉛直方向载荷試験



(b) 斜め 60°方向载荷試験



(c) 水平方向(橋軸直角方向)载荷試験

写真-3 損傷制御型支承の载荷実験セットアップ

ようにした（写真-3(b)）．なお斜め方向については、著者らグループが過年度に実施した従来タイプのBP-B支承の载荷実験²²⁾を参考に60°とした．载荷方法は変位を漸増させる方式とし、上沓がサイドブロックから外れるか、载荷試験機の限界ストロークに達するまで载荷を行った．载荷速度は0.1mm/sとした．

(3) 計測項目および計測位置

本研究では、損傷制御型支承の水平および鉛直方向の荷重、および損傷制御型支承各部品の変位およびひずみを計測した．損傷制御型支承の荷重は、载荷試験機で計測した．また、支承各位置の変位は、変位計により計測した．損傷制御型支承の各部品のひずみは、損傷制御部品で損傷が制御できているか、

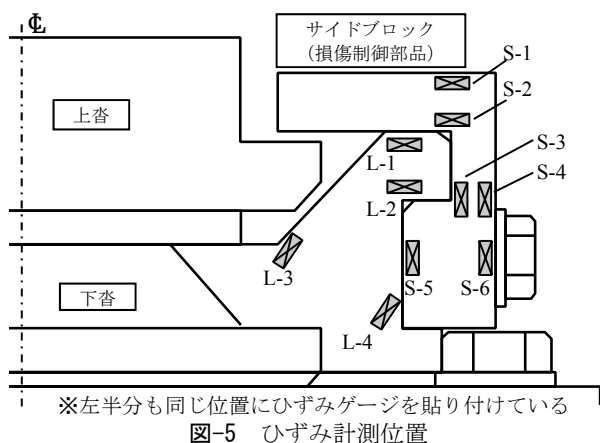


図-5 ひずみ計測位置

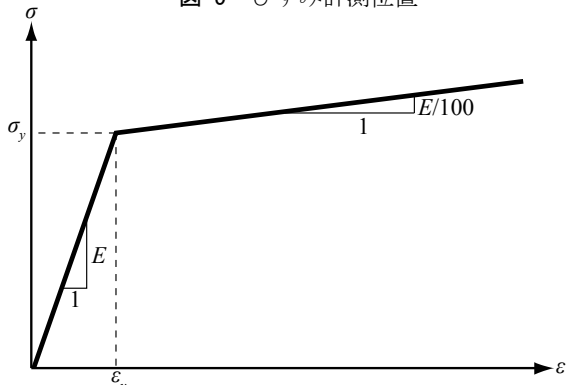


図-6 損傷制御部品の非線形モデル

また、それ以外の部品が損傷していないか確認することができるように、図-5に示す位置にひずみゲージを貼り付けて計測した。

(4) 損傷制御部品の簡易解析

サイドブロック（損傷制御部品）が載荷時にどのような挙動を示すのか把握するために解析を行った。本研究では、簡易的にサイドブロックの損傷部を固定点とした片持ち梁モデルとして、ファイバー要素を用いた解析とした。ファイバー要素に適用する材料特性は、図-6に示すように弾塑性モデルとした。図中の初期剛性 E は、高強度鋼材の弾性係数（210GPa）とし、降伏後の剛性は初期剛性の1/100という小さな剛性を設定した。また、初期降伏点の応力度（ σ_y ）については、土木研究所資料に示されているSM520材の実降伏強度の頻度分布²³⁾を基に、発生頻度の最も大きい実降伏強度（頻度分布の平均値）を用いることとした。降伏ひずみは、初期降伏応力度を初期剛性で割ることで算出した。以上の条件より解析を行い、サイドブロックの挙動を求めた。

(5) 載荷実験の結果

a) 損傷制御型支承の損傷形態

実験終了後の損傷制御型支承の状況を写真-4に示す。各ケースとも損傷制御型支承全体と左右のサイ

ドブロック部の拡大写真を示している。

鉛直上向き方向に載荷したケースは写真-4(a)に示すように、左右のサイドブロックが損傷部で曲げ変形している。また、その変形量も左右同程度である。斜め60°方向に載荷したケースでは、写真-4(b)に示すように、斜めに載荷しているので、支承に対して上向きと右側のサイドブロック側に上脊が移動しているため、左側のサイドブロックから上脊が外れている。両ケースとも、図-2に示した損傷形態となっている。また、その他の部品や取付けボルト等に損傷は見られなかった。

一方、水平方向（橋軸直角方向）に載荷した結果、写真-4(c)に示すように、図-2に示した損傷形態とは異なり、上脊の側面が右側のサイドブロックと下脊突起との間で引っ掛かり、そこが回転中心となって上脊全体が回転する挙動となった。最終的には、想定した右側のサイドブロックに曲げによる損傷は生じず、左側のサイドブロックの損傷部に曲げ変形が生じ上脊が外れる結果となった。実橋では支承部の補剛リブや横桁等により、上脊が橋軸回りに回転する挙動が生じにくい構造になっている。しかし、本実験では、実橋のように上脊が橋軸回りに回転しにくくなるような拘束条件にできなかったために、上脊全体に回転挙動が生じたことが考えられる。なお、その他の部品や取付けボルト等の損傷は、写真から発見できなかった。

b) 荷重－ひずみの関係

図-7および図-8は、損傷制御部品であるサイドブロックと下脊の荷重－ひずみの関係について示したものである。横軸はひずみ、縦軸は鉛直荷重である。斜め方向の載荷ケースは、支承に対して鉛直成分に換算した値である。なお、水平方向（橋軸直角方向）は、前述したように、橋軸回りの回転が生じないように上脊を拘束できなかったために、上脊が橋軸回りに回転してしまい、想定した損傷制御のメカニズムと異なる挙動となった。そのため、ここでは、想定したとおりの損傷制御のメカニズムとなった鉛直上向き方向と斜め60°方向の結果を示す。図-7,8より、サイドブロックの損傷部（S-3およびS-4）で降伏しているのがわかる。損傷部以外の箇所では、ほとんどひずみは発生していない。したがって、試作した損傷制御型支承は想定通りの箇所で損傷を制御できている。また、下脊にはほとんどひずみが発生していないことから、下脊に力が伝達していないこともわかる。

損傷部のひずみ(S-3)に関して、前述した解析と比較した結果を図-9に示す。

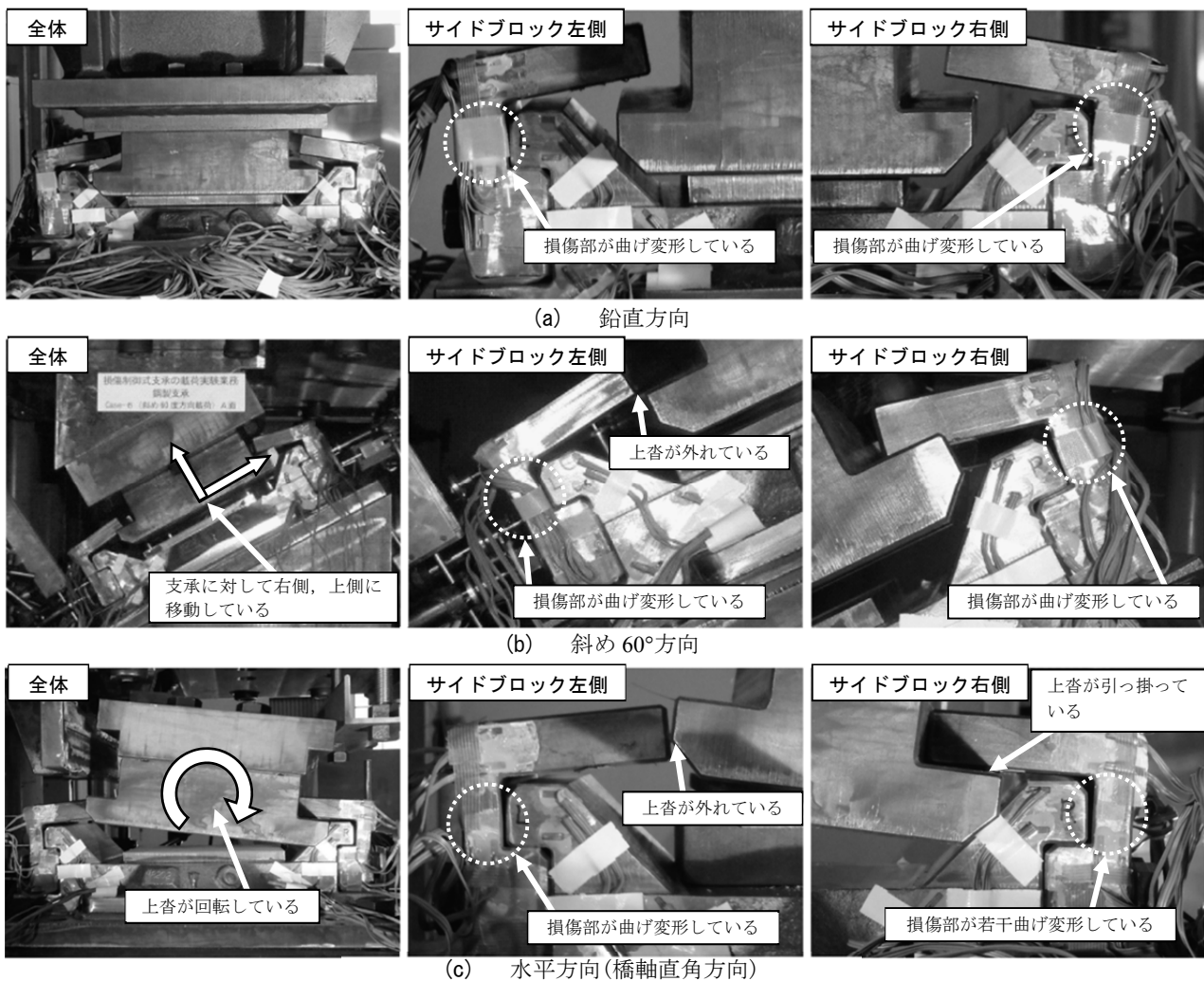


写真-4 実験終了後の損傷制御型支承の状況

荷重－ひずみの関係は、解析値と実験値ともほぼ一致している結果となった。このことから、試作した損傷制御部品（サイドブロック）を簡易的なファイバー要素モデルで評価することにより、想定した荷重におけるひずみ（変形量）を精度よく評価できているものと考えられる。

c) 鉛直変位－鉛直荷重の関係

図-10は損傷制御部品の損傷部の変位－荷重の関係を示したものである。横軸は上脊の鉛直変位、縦軸は鉛直荷重である。斜め60°方向に載荷したケースは、支承に対して鉛直成分に換算したものである。

各載荷方向に用いたサイドブロックの厚さが異なるため、降伏荷重に違いがみられるが、降伏荷重に達した後の2次勾配は、0ではなく若干の勾配をもっていることがわかる。斜め方向に載荷したケースでは、上脊の鉛直変位が17mm程度に達すると、左側のサイドブロックが上脊から外れるため、鉛直荷重が下がっている。鉛直方向に載荷したケースでは、20mm（ストローク限界）まで変位を与えたが、サイドブロックが上脊から外れなかったために、鉛直

荷重の低下は見られなかった。

5. まとめ

本研究では、耐力と損傷をコントロールすることが可能な損傷制御型支承を提案し、試作した損傷制御型支承に対して一方向の漸増載荷実験を行い、その機能を検証した。本研究の範囲ではあるが、得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 鉛直上向き方向と斜め60°方向に載荷したケースに対しては、損傷部で損傷しており、また、損傷部以外の部品には損傷は見られなかった。これらの実験条件下では、本研究で提案する損傷制御型支承は、想定した思想とおりの損傷形態を呈することが確認できた。
- 2) 損傷部をファイバー要素モデルとした解析方法を使用し、さらに材料の弾塑性特性や材料の実強度の発生頻度を考慮した上で評価を行うことにより、試作した損傷制御型支承の実際の耐力を精度よく評価できることが確認できた。

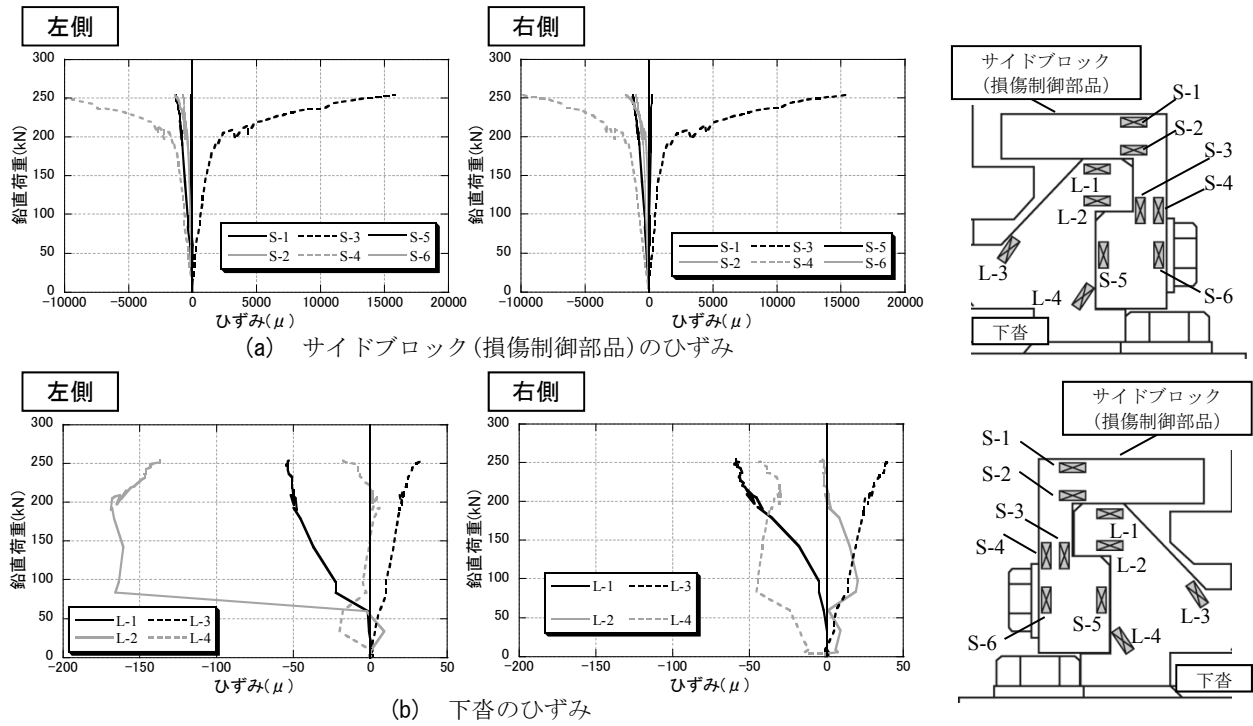


図-7 サイドブロックおよび下査の荷重-ひずみ関係 (鉛直方向)

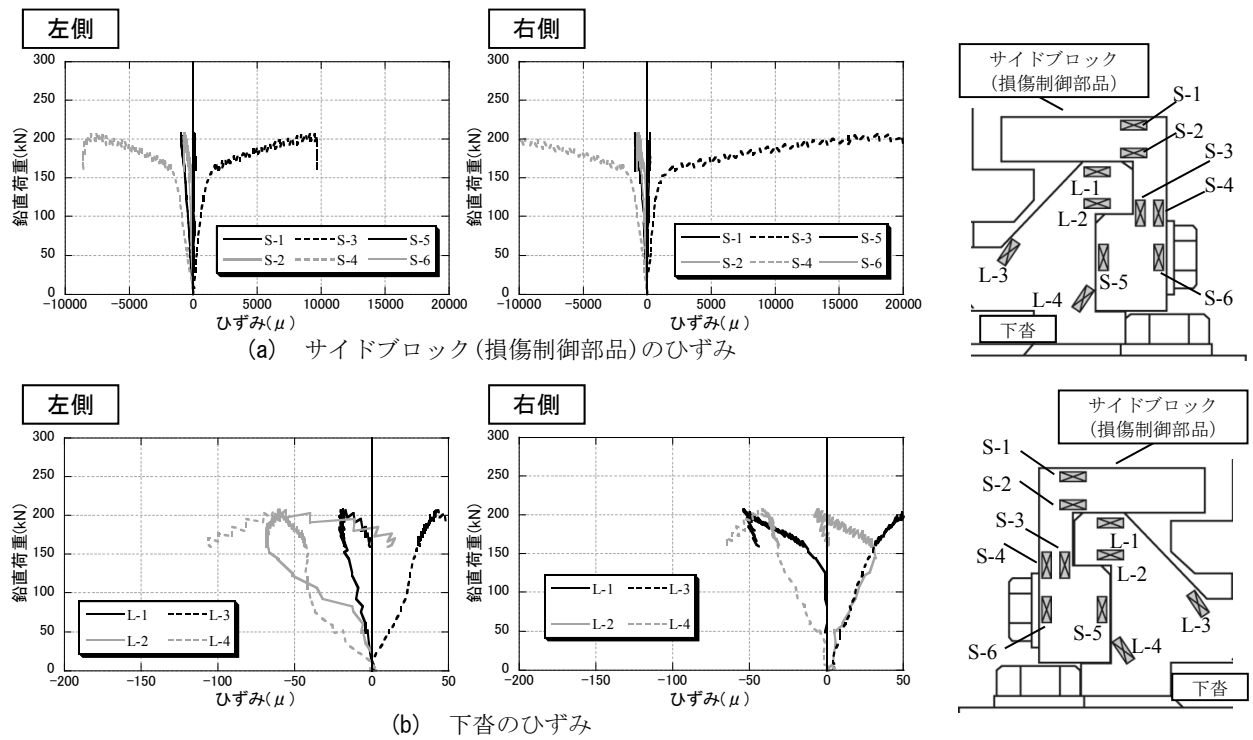


図-8 サイドブロックおよび下査の荷重-ひずみ関係 (斜め 60°方向)

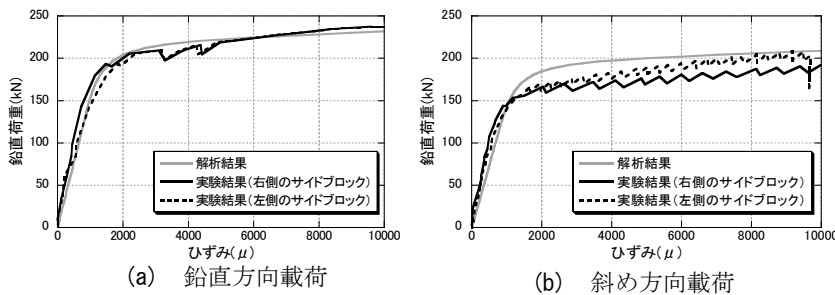


図-9 損傷部の荷重-ひずみ関係の比較

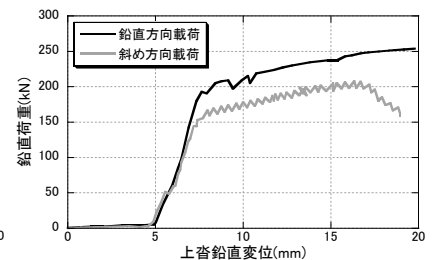


図-10 損傷制御型支承の変位-荷重の関係

3) 橋軸直角方向の力に対しては、今回の実験では思想どおりの損傷形態が得られなかった。これは、上桁が橋軸回りに回転する挙動が生じたためであり、実験での拘束条件が、実橋との拘束条件と異なっていたことが原因の一つと考えられる。

謝辞：本研究においては、早稲田大学創造理工学部環境社会工学科 小野潔教授より、損傷制御型支承の構造コンセプト等について有益なご助言を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所，土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国総研資料第814号，土研資料第4295号，2014年12月。
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012。
- 3) 濱井翔太郎，幸左賢二，佐々木達生，佐藤崇：孤立波性状の津波によって橋梁へ作用する鉛直波力の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.565-570，2014。
- 4) 清水裕文，庄司学：橋桁に作用する津波波力と津波流速の関係，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp. I_941-I_945，2013。
- 5) 張広鋒，中尾尚史，星隈順一：津波の影響を受ける橋の挙動に及ぼす上部構造の構造特性の影響に関する水路実験，第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.97-102，2012。
- 6) 中村友昭，水谷法美，Xingyue REN：津波による桁の移動に与える津波力低減対策の影響に関する研究，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.69，No.2，pp.I_359-I_363，2013。
- 7) 川崎祐磨，伊藤典昭，伊津野和行：鉸桁橋に作用する津波の圧力特性に及ぼす桁端部の影響に関する一考察，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.71，No.4，pp.I_62-I_68，2015。
- 8) Hisashi Nakao, Guangfeng Zhang, Toru Sumimura and Jun-ichi Hoshikuma：NUMERICAL ASSESSMENT OF TSUNAMI-INDUCED EFFECT ON BRIDGE BEHAVIOR, U.S.-Japan Bridge Engineering Workshop, 2013。
- 9) 佐々木達生，幸左賢二，神宮司博志，佐藤崇：東北地方太平洋沖地震による小泉地区の津波被害分析，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，pp.I_821-I_825，2013。
- 10) 神宮司博志，幸左賢二，佐々木達生，佐藤崇：画像及び数値解析手法を用いた気仙大橋の津波被害分析，構造工学論文集，Vol.60A，pp.271-281，2014。
- 11) 中尾尚史，森屋圭浩，榎本武雄，星隈順一：宮古橋周辺での津波の特性と橋に及ぼした影響の評価，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.71，No.4(地震工学論文集第34巻)，p.I_317-I_328，2015。
- 12) 川崎祐磨，伊津野和行，生島直輝，山中拓也，四井早紀：津波による流体力軽減に有効な整流板形状に関する実験的研究，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.1，pp.129-136，2014。
- 13) 中尾尚史，張広鋒，炭村透，星隈順一：フェアリングを設置した橋梁上部構造の津波の作用による挙動メカニズム，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.4(地震工学論文集第33巻)，p.I_110-I_120，2014。
- 14) 東日本大震災による橋梁等被害分析小委員会：東日本大震災最終報告書，土木学会地震工学委員会，2015。
- 15) 星隈順一：道路構造物の巨大地震対策一橋に起きる事象の思考と防災・減災対策一，基礎工，Vol.43，No.4，pp.14-18，2015。
- 16) 星隈順一，張広鋒，中尾尚史，炭村透，森屋圭浩：津波の影響に対する鋼製支承の抵抗特性に関する実験的研究，土木研究所資料第4319号，2016年1月。
- 17) 星隈順一，中尾尚史，森屋圭浩：損傷制御による橋の機能回復力の向上を目指して，土木技術資料，2016年4月。
- 18) 張広鋒，蔵治賢太郎，右高裕二，大住圭太：地震時の損傷を制御する新型支承サイドブロックに関する研究，第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，pp.1-6，2015。
- 19) 森屋圭浩，中尾尚史，星隈順一：津波の影響を受ける橋に適用する損制御型支承の検討，第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，pp.265-270，2015。
- 20) 杉岡弘一，間嶋信博，松下裕明，姫野岳彦，松村政秀：スリット型ロックオフ支承を用いた既設アーチ橋の耐震補強，構造工学論文集A，Vol.57A，pp.467-478，2011。
- 21) 本荘清司，横山和昭，前原直樹，田崎賢治，姫野岳彦：ロックオフ機能付き支承構造を用いた既設橋梁の耐震補強対策，構造工学論文集A，Vol.55A，pp.506-514，2009。
- 22) 炭村透，張広鋒，中尾尚史，星隈順一：津波によって橋に生じる作用に対する鋼製支承の抵抗特性に関する実験的検討，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.4，pp.I_102-I_110，2013。
- 23) 土木研究所：鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査，土木研究所資料第4090号，2008年3月。