

津波の影響を受ける橋への損傷制御型支承の 適用とその耐荷力特性

中尾 尚史¹・森屋 圭浩²・星隈 順一³

¹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)

²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)

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年の東日本大震災で発生した津波で、多くの橋が流出等の被害を受けた¹⁾。また東海・東南海・南海地震により発生する津波への対策は喫緊の課題となっている。これを受け、多くの研究機関で、津波による力を軽減させる方法や、支承部を補強する方法などの津波対策が検討されているが²⁾⁻⁵⁾、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、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、減災対策上重要となっている⁶⁾。

このような観点から、著者らは「耐える」設計や「粘る」設計思想だけでなく、「賢く壊し、賢く直す」設計思想に着目している。その具体例として、津波の影響を受ける橋に対して、耐力のコントロールを高い信頼性で行うことが可能な損傷制御型支承を提案しており^{7),8)}、想定した部位および耐力で損傷を高い信頼性で制御できるか、損傷制御型支承単体の載荷実験により検証を行っている⁸⁾。

しかし、既設橋の津波対策に際して、支承部の耐力を高め過ぎてしまうと、津波の影響による最終的な損傷が支承部から橋脚や基礎に移ってしまうことになる。上部構造が流出した後の機能回復の観点からは、従来よりも支承部の耐力を高めつつも、最終的な損傷が下部構造に移行することのないよう、支承部の耐力を制御する必要がある。そのため、上記

を満足するような損傷制御型支承を設計するためには、損傷制御型支承単体での検証だけではなく橋全体系で考えた場合、橋全体として津波の影響に対する抵抗力が向上しているかという視点とともに、下部構造に損傷を誘発させないかという視点での検証が必要である。

そこで本研究では、橋全体系としての破壊形態および耐力特性を検討するために、著者らが過年度に実施したBP-B支承の載荷実験⁹⁾で使用した橋脚模型を用いて、損傷制御型支承を1支線上に設置した場合の載荷実験を行った。

2. 損傷制御型支承

本研究では、写真-1および図-1に示すような損傷制御型支承を設計および製作した⁸⁾。この支承は、図-2に示すように、BP-B支承のサイドブロックを損傷制御部品として、一定の鉛直上向き荷重が作用す

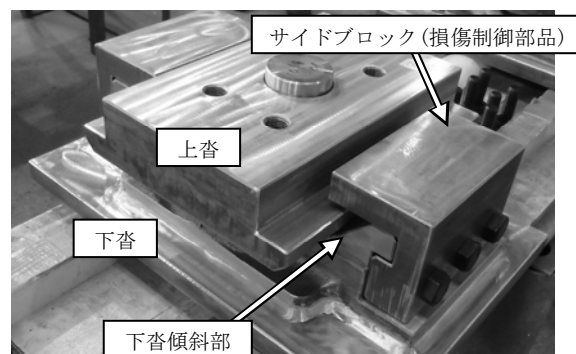


写真-1 損傷制御型支承

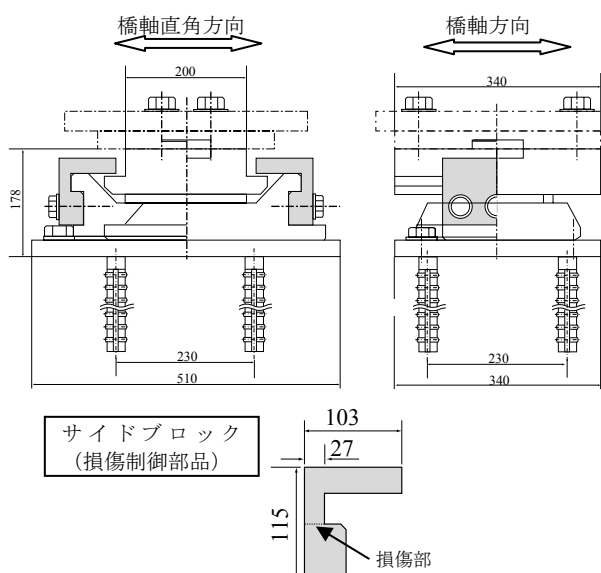


図-1 損傷制御型支承の外形図

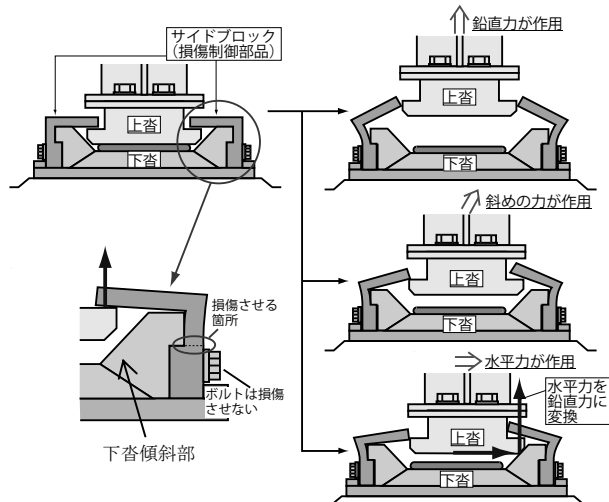


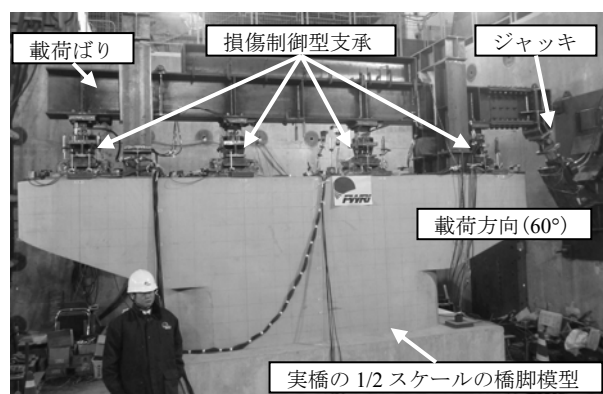
図-2 損傷制御型支承の挙動イメージ

ることで、この部位を曲げ変形させて損傷を制御するものである。また、水平力が作用した場合は、下査両端に設けた傾斜部により、水平力を鉛直力に変換することができる。サイドブロック(損傷制御部品)には高強度鋼材(SM520)を用いることで、サイドブロックのコンパクト化を図っている。損傷制御型支承の設計思想等は文献8)を参考されたい。

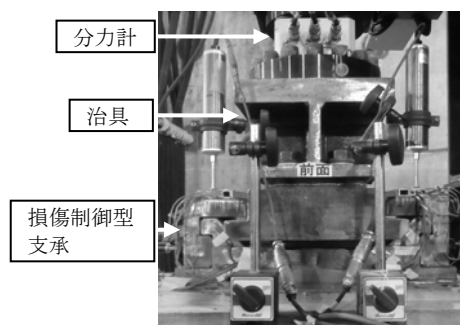
3. 損傷制御型支承を設置した支承-橋脚系における耐荷力特性の検証

(1) 実験供試体

本研究では、過年度に実施した従来タイプのBP-B支承の荷重実験⁹⁾で使用した橋脚模型を使用した(写真-2および図-3)。橋脚模型は、東日本大震災において実際に津波の影響により被災した橋の約1/2縮尺に相当する橋脚を検討対象としている。



(a) 全体のセットアップ状況



(b) 損傷制御型支承のセットアップ状況

写真-2 荷重実験セットアップ状況

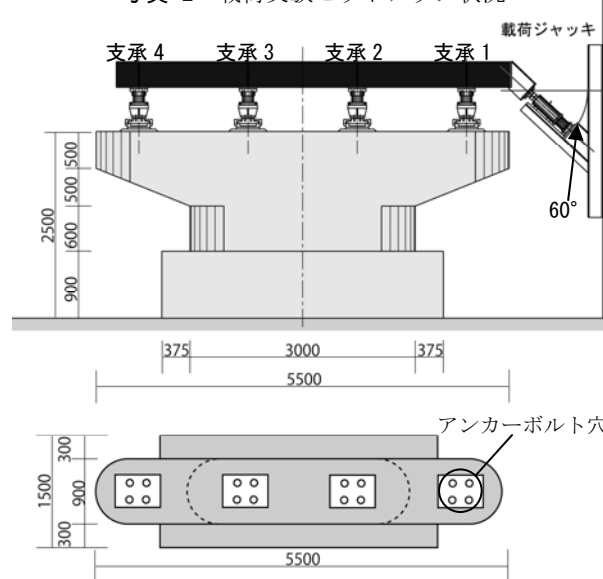


図-3 橋脚模型の外形図

損傷制御型支承は、津波の影響により支承から伝達されてくる作用力に対して、下部構造に生じる応力が厳しい条件となる張出し横梁部下端(支承1-2間)の断面力を基に設定した。すなわち、支承から伝達される力によりこの断面に生じる曲げモーメントが曲げ耐力を上回らないように、損傷制御部品の降伏耐力を設定した。計算した結果、従来タイプのBP-B支承の降伏耐力(別途実施した荷重試験⁹⁾より降伏耐力は220kNを約1.63倍まで向上させても、横梁部下部の断面の曲げモーメントは曲げ耐力を上回らないことが分かった。したがって本研究で使用する

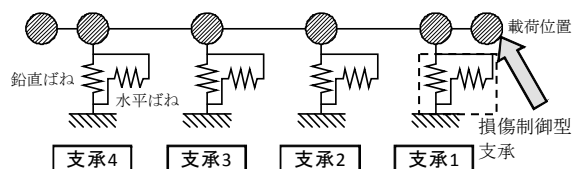


図-4 解析モデル

る損傷制御型支承の損傷制御部品は、従来タイプのBP-B支承の降伏荷重⁹⁾に対して1.6倍(350kN)の降伏荷重になるように設計した。この製作した損傷制御型支承を橋脚模型に取り付けた。なお、損傷制御型支承の取り付け位置は、過年度の載荷実験⁹⁾において従来タイプのBP-B支承を取り付けていた位置と同じである。

(2) 載荷及び計測方法

従来タイプのBP-B支承の載荷試験⁹⁾と比較検討ができるように、上部構造の張出し部に載荷点を設け、載荷ばりとジャッキの軸線を60°と設定して、支承が破壊するまで載荷を行った（図-3）。

計測項目は、載荷ジャッキの荷重と変位、支承の反力と変位とした。ジャッキの荷重はロードセル、変位はジャッキの両側に設けた変位計を用いて計測した。支承の反力は、支承と載荷ばりの間に3分力計を設置し（写真-2(b)）、鉛直、水平（橋軸、橋軸直角方向）方向の反力を計測した。また、各支承近傍に変位計を設置し、各支承位置の鉛直変位を計測した。

(3) 解析による支承－橋脚系の挙動分析

設計した損傷制御型支承が支承－橋脚系でどれくらいの耐力を有するのか、予め解析により検討した。

損傷制御型支承の単体としての損傷制御の設計思想は文献8)のとおりであるが、橋脚との耐力階層化を図るため、一支承線全体としての支承部の鉛直耐力は、図-4に示すような載荷ばりと損傷制御型支承をばり－ばねにモデル化して解析を行った。

床版張出し部を有する構造形式の場合、津波の影響により支承部に作用する力としては水平方向の力よりも鉛直方向の力が支配的であることが、水路実験や数値解析により確認されていることから^{10),11)}、ここでは支承本体の鉛直ばねにのみ非線形特性を与えた。非線形特性は、損傷制御型支承単体に対する検証実験で得られた変位－荷重関係の結果⁸⁾を参考に、図-5に示すように非線形モデル化した。実験条件と合わせるために、60°上向き方向に強制変位を与えた。

以上の条件で解析を行い、得られた変位-荷重関係を図-6に示す。横軸は載荷位置における鉛直変位、

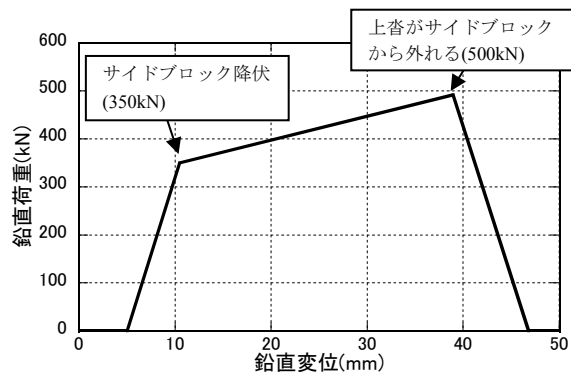


図-5 鉛直ばねの非線形モデル

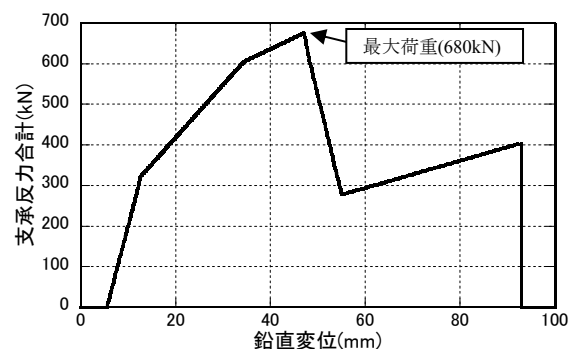


図-6 解析による鉛直変位－鉛直荷重関係

縦軸は鉛直荷重で、ここでは4基の支承反力を合計した値である。この解析の結果、本載荷条件における載荷位置での荷重の鉛直方向成分の最大値は680kNと評価された。

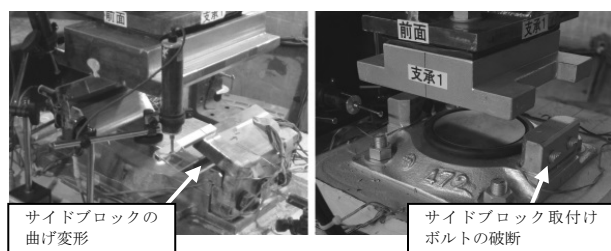
4. 載荷実験の結果

(1) 損傷制御型支承の破壊モード

写真-3は、損傷制御型支承と従来タイプのBP-B支承の破壊モードを示したものである。従来タイプのBP-B支承は、サイドブロック取付けボルトで破断しているのに対し、損傷制御型支承は、サイドブロック取付けボルトでは破断せず、損傷制御部品であるサイドブロックで損傷(曲げ変形)している。また写真-4に示すように、支承1~3は損傷制御部位であるサイドブロックで損傷し、上沓がサイドブロックから外れている。したがって、設計思想通りの破壊モードとなっている。なお、支承4は後述するとおり、今回の載荷条件下では下向きの力が作用する状態となるため、他の支承のようなサイドブロックでの損傷は生じていない。

(2) 変位－荷重関係

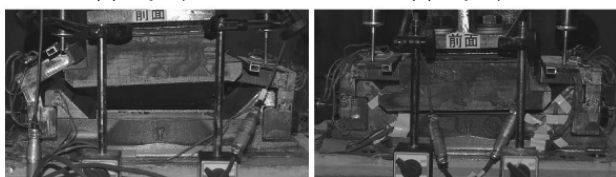
図-7は支承1(載荷側)における鉛直変位と鉛直荷重の関係を示したものである。横軸は支承近傍で計測した鉛直変位、縦軸は支承反力である。比較のため、過年度に実施した従来タイプのBP-B支承の結果



(a) 損傷制御型支保 (b) 従来タイプのBP-B支保
写真-3 支保損傷状況の比較



(a) 支保1 (b) 支保2



(c) 支保3 (d) 支保4

写真-4 各支保の支保損傷状況

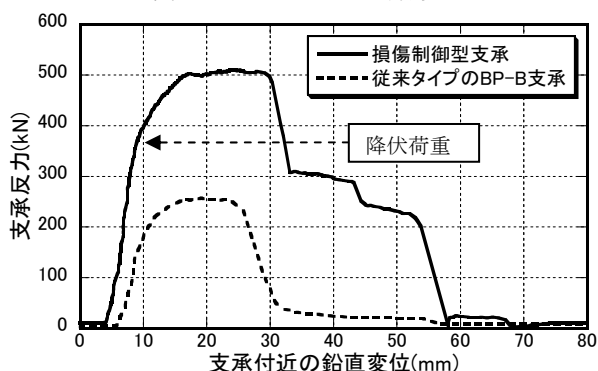


図-7 支保単体における変位-荷重の関係

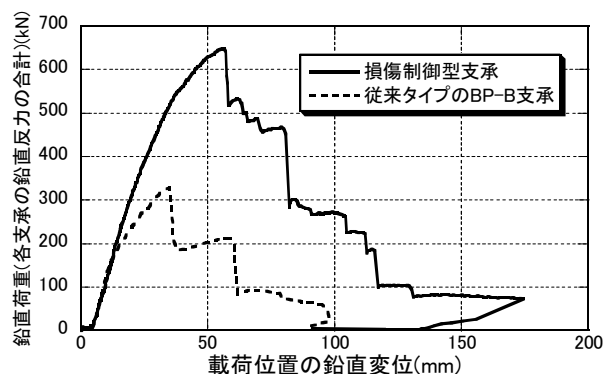


図-8 支保-橋脚系における変位-荷重の関係

も図中に示した⁹⁾。支保の鉛直反力が約350kNで損傷制御型支保は降伏し、約500kNで上査がサイドブロックから外れた。このように、降伏荷重は従来タイプのBP-B支保の降伏耐力の1.6倍程度となっており、支保-橋脚系においても、設計思想通りの過不足が小さい耐力向上が得られている。

支保-橋脚系における載荷位置の鉛直変位と鉛直

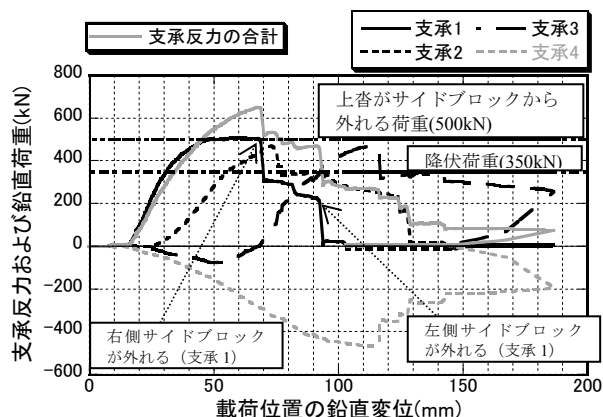
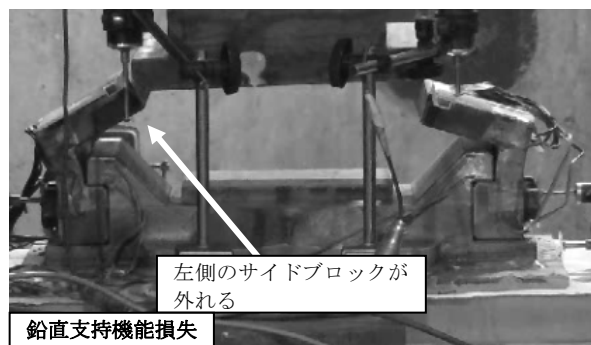


図-9 各支保の鉛直変位と鉛直荷重の関係



(a) 右側のサイドブロックが外れた状況

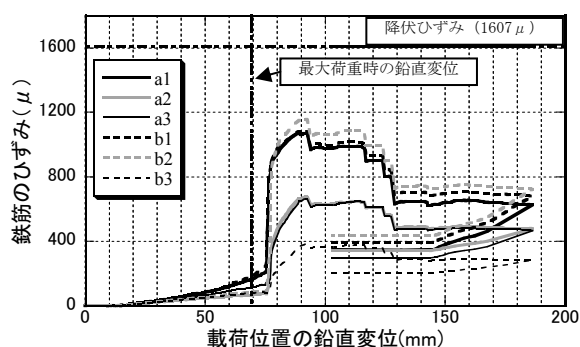


(b) 左側のサイドブロックが外れた状況

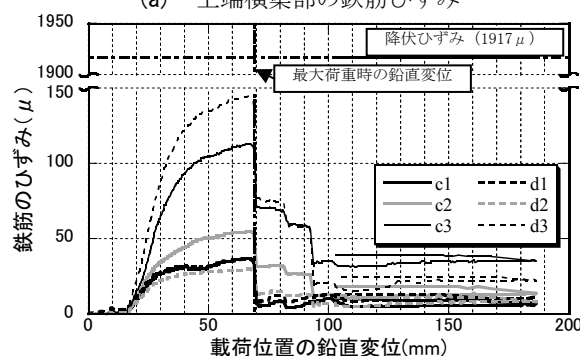
写真-5 支保1の損傷状況

荷重の関係を図-8に示す。横軸は載荷位置の鉛直変位、縦軸は鉛直荷重(各支保部で計測された鉛直反力の合計値)である。図中には、先ほどと同様に従来タイプのBP-B支保を設置した場合の載荷実験⁹⁾により得られた結果も示している。損傷制御型支保の最大鉛直荷重は約650kNで、従来タイプのBP-B支保の約2倍の耐力を有している。これは、前述した解析で得られた最大鉛直荷重(680kN)とほぼ一致している。したがって、本研究で設計した損傷制御型支保は、過不足の少ない耐力向上となっている。

図-9は各支保の鉛直変位と鉛直反力の関係を示したものである。横軸は載荷位置の鉛直変位、縦軸は鉛直反力である。解析で図-5に示した鉛直ばねの降伏荷重(350kN)と、サイドブロックが上査から外れるときの荷重(500kN)も併記した。支保1~3を見ると、解析で設定したサイドブロックの降伏荷重で損



(a) 上端横梁部の鉄筋ひずみ



(b) 下端横梁部の鉄筋ひずみ

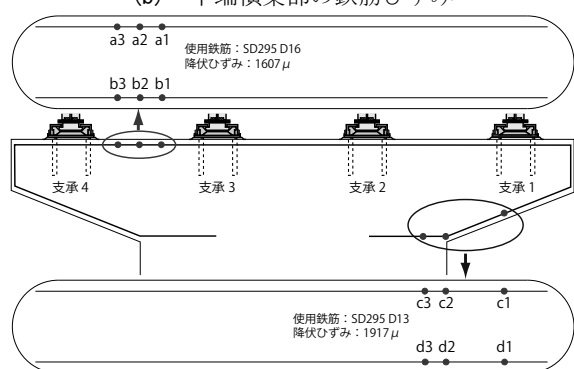


図-10 張出し横梁部の鉄筋ひずみ

傷制御部位であるサイドブロックが降伏し、上沓がサイドブロックから外れる荷重で、上沓が外れているのがわかる。支承1を見ると、鉛直変位が70mmのとき、写真-5(a)のように右側のサイドブロックが上沓から外れている。90mm程度変位すると、左側のサイドブロックも上沓から外れて、完全に支持機能を失っている(写真-5(b))。解析では、上沓がサイドブロックから外れる荷重で両サイドブロックが同時に上沓から外れて支持機能を失うような非線形モデルにしている。そのため、図-6で示した最大荷重に達した後の挙動は実験値と異なっている。

なお、支承4は図-9に示すように、载荷の全過程で、下向きの力が作用している。

(3) 下部構造への影響

下部構造への影響度合いを確認するため、本研究では、津波の影響に対して応力が厳しい条件となると考えられる張出し横梁部上端(支承3,4間)、張出横

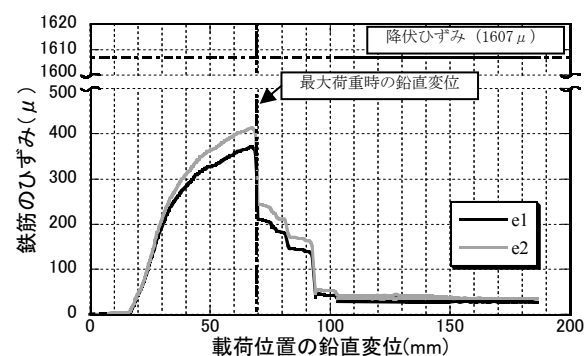


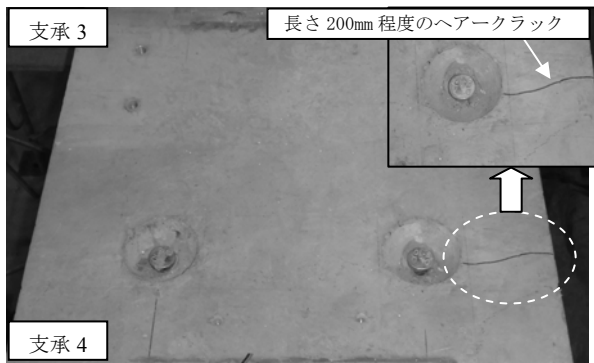
図-11 柱部の軸鉄筋ひずみ

梁部下端(支承1,2間)、及び橋脚柱部(载荷側)の断面の挙動について検証した。

張出横梁部の鉄筋ひずみと载荷位置での鉛直変位の関係を示したものが図-10である。横軸は载荷位置での鉛直変位、縦軸は鉄筋のひずみである。図中には各位置で使用されている鉄筋の降伏荷重と、最大荷重時の鉛直変位も示している。なお、張出横梁上端に使用されている鉄筋はSD295,D16(降伏ひずみ1607 μ)、張出横梁下端に使用されている鉄筋はSD295,D13(降伏ひずみ1917 μ)である。張出横梁上端の鉄筋は、最大荷重に達し、支承1の右側のサイドブロックが外れたあたりから、急激にひずみが増加し、最大で1200 μ 程度まで達する。しかし、降伏ひずみまでは達していない。張出横梁部下端の鉄筋は、支承1に上向きの荷重が加わると同時にひずみが増加し、最大で140 μ に達したが、降伏ひずみには達していない。

橋脚柱部の軸方向鉄筋の鉛直変位－ひずみ関係を図-11に示す。橋脚柱部の軸方向鉄筋(使用鉄筋：SD295,D16(降伏ひずみ1607 μ))も最大鉛直荷重に達するまでひずみが増加し、最大400 μ 程度までひずみが増加するが、降伏ひずみには達していない。最大荷重を過ぎると、ひずみは急激に低下する。

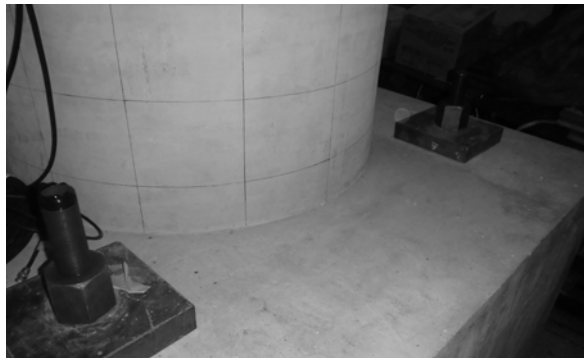
実験終了後の橋脚模型の状況を写真-6に示す。写真-6(a)に見られるように、橋脚天端の支承3,4間で長さ200mm程度のヘアークラックが生じていたが、張出横梁部下端部や柱部(写真-6(b))、基部(写真-6(c))など他の箇所で、ひび割れは見られなかった。



(a) 橋脚天端（支承 3,4 間）



(b) 下端横梁部および柱部（支承 1 側）



(c) 基礎部（支承 1 側）

写真-6 実験終了後の橋脚模型

したがって、本研究で設計した損傷制御型支承では、設計思想通り下部構造に損傷を与えることなく、支承部で損傷を制御することができた。

5. まとめ

本研究では、著者らが提案している損傷制御型支承⁸⁾を1支承線上に設置した場合の支承－橋脚系の耐力及びその破壊特性について載荷実験により検証した。今回実施した研究の範囲ではあるが、得られた知見は以下の通りである。

- 1) 今回の実験条件においては、津波の影響に対して、予め設定した損傷部でかつ過不足の少ない耐力で損傷を制御できることが確認できた。
- 2) 予め下部構造側の耐力を確認することにより、下部構造に損傷を移行させずに支承部の鉛直耐力を制御することが可能であることを確認した。

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) 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．
- 3) 山内邦博，上島秀作，幸左賢二：橋桁に作用する津波波力評価及び波力低減手法に関する検討，第67回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.949-950，2012．
- 4) 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），pp.I_110-I_120，2014．
- 5) 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．
- 6) 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．
- 7) 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．
- 8) 森屋圭浩，中尾尚史，星隈順一：津波の影響を受ける橋への損傷制御型支承の提案および検証実験，第19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，2016．
- 9) 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（地震工学論文集第32巻），pp.I_102-I_110，2013．
- 10) 中尾尚史，張広鋒，炭村透，星隈順一：上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.69，No.4（地震工学論文集第32巻），pp.I_42-I_54，2013．
- 11) 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．