

津波の影響を受ける橋に適用する損傷制御型支承の検討

森屋 圭浩¹・中尾 尚史²・星隈 順一³

¹正会員 修（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 交流研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

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）

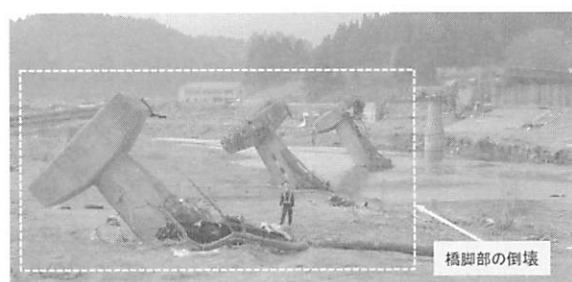
³正会員 博（工） 国立研究開発法人 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

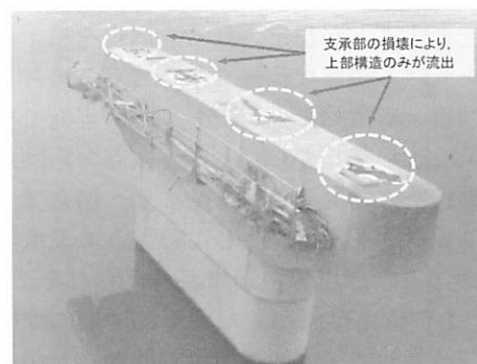
2011年東北地方太平洋沖地震では、地震後に発生した大規模な津波により橋の上部構造が流出する等の被害が生じた¹⁾。上部構造が流出した橋の中には、その橋の立地条件や構造条件によっては応急的な迂回路の仮設や応急復旧橋の架設が難しく、結果的に緊急輸送路としての機能が速やかに回復できなかった事例も生じた。

平成24年の道路橋示方書V耐震設計編²⁾では、津波に対しては、地域の防災計画をも考慮した上で橋の構造を計画することが規定されており、地域の防災計画等に基づいて設定される当該路線に求められる性能に応じて、適切な構造計画を検討することが重要と示されている。その際、最終的に橋がどう壊れていくのかを考えた上で、ハード及びソフトの両面からの対策の検討が重要である。これから新設する橋に対しては、その橋に求められる性能に応じて、路線計画や縦断計画等の計画段階における津波の影響の回避等を含め、複数の対策を組み合わせながら、防災・減災対策を講じることが可能である。その一方で、既設橋の場合は、現況の橋の立地条件、構造条件の制約下において、津波に対する対策をどのように講じていくかが課題となってきた。

津波によって橋が受ける影響としては、水位が上部構造の高さにまで達した後に上部構造に生じる作用力が代表的であり、その定量化を目的とした研究は多数行われている^{例えば3,4)}。しかしその定量化には、津波の高さや速度、方向等、橋の位置における津波そのものの特性を設定する必要があるが、その不確実性は高く、仮に設定できたとしても、常にそれを



(a) 上部構造の流出と橋脚部の倒壊



(b) 上部構造のみの流出した橋脚部

写真-1 津波による橋梁部の被害例

超える津波の作用が生じることも考えておかねばならない。このような観点から、津波の影響に対して、橋の抵抗力を増していく「補強」的な発想に

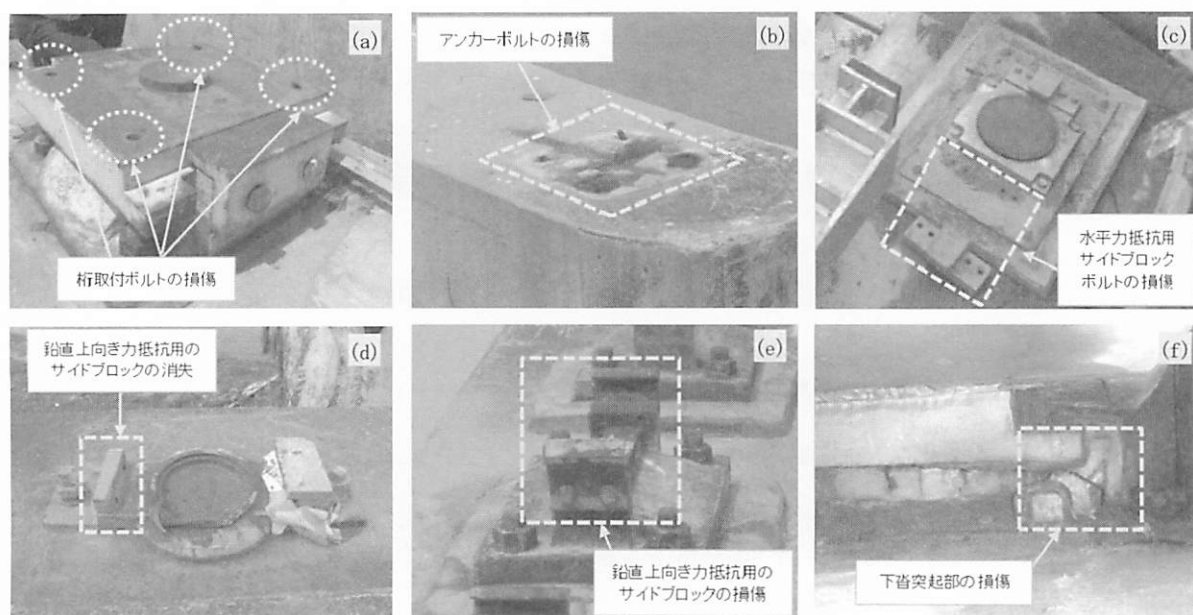


写真-2 支承部の損傷例

は限界があると考えられ、さらに想定を超える事象にも備える必要があることをも考えれば、むしろ津波の影響をやりすぎず、すなわち、津波の影響に対して「鈍感な構造」にする考え方が有用になってくると考えられる。このような津波の影響を受けにくくする対策を開発していくためには、津波の影響を受けた時に橋がどのようなメカニズムに基づいて挙動しようとするのかをまず解明し、そのメカニズムに応じた合理的な対策を生みだしていくことが重要である⁵⁻⁷⁾。

写真-1においては、津波により被災した橋の状況の例を示したものである。写真-1(a)は、津波の影響によって上部構造だけでなく下部構造にも流出や倒壊のような状態が生じた例である^{1,8)}。このような状況においては、応急的な橋の通行機能の回復にも長期間を要することが想定される。想定を超える津波の影響を受けるような状況であっても、橋としての機能の回復を応急的に少しでも早くに実施できるような対策を予め講じておくという観点からは、個々の橋の立地条件や構造条件を踏まえ、例えば、下部構造には致命的な損傷が生じないように支承部で損傷を制御する設計思想の適用が考えられる。写真-1(b)は、上部構造は流出したが下部構造には損傷が及ばず、結果的に支承部が損傷制御部材となった事例を示したものである。ただし、支承部の損傷の仕方は様々であり、損傷制御が確実に果たしているとは言えない。ダメージコントロールの設計思想では、損傷制御をする部材の耐力や破壊特性を過不足なく適確に評価できるようにすることが重要である。

そこで本研究では、津波の影響によって橋に生じ

る最終的な破壊形態として支承部を確実に損壊させ、下部構造は最後まで守る部材とする設計思想を実現できるようにするため、津波の影響によって支承部に生じる作用力に対して、支承部が所定の耐荷力に達した段階で破壊する損傷制御型支承を提案し、その構造のコンセプトを示す。そして、損傷制御型支承のプロトタイプとなる支承構造を数案検討し、その破壊特性の確実性について、水平方向及び鉛直上向き方向に対する載荷実験を通じて検証を行った。

2. 損傷制御型支承の提案

(1) 実橋における支承部の損傷

前述より、支承部に損傷制御機能を有するにあたり、まず津波による影響により支承部のどの部品に対して損傷が多いかを検証した。写真-2に、津波の影響によって生じた鋼製支承の損傷の一例を示す。

写真-2(a)は、上部構造と支承部との取付け部品である桁取付ボルトに損傷が生じている。支承上面にあるせん断キーに損傷が見られないことから、支承部には鉛直上向き方向の力を支配的に受けたことにより、ボルトが引張破断したものと考えられる。また、取付けボルトが先に損傷したため、支承本体には目立った損傷は見られない。

写真-2(b)は、下部構造と支承部との取付け部品であるアンカーボルトに損傷が生じている。杓座の損傷痕を見ると、橋軸直角方向に向かって削られている跡がある。これは、支承下面に設けてあるリブによるものと考えられる。したがって、支承部には橋軸直角方向の荷重が支配的に受けていたものと考

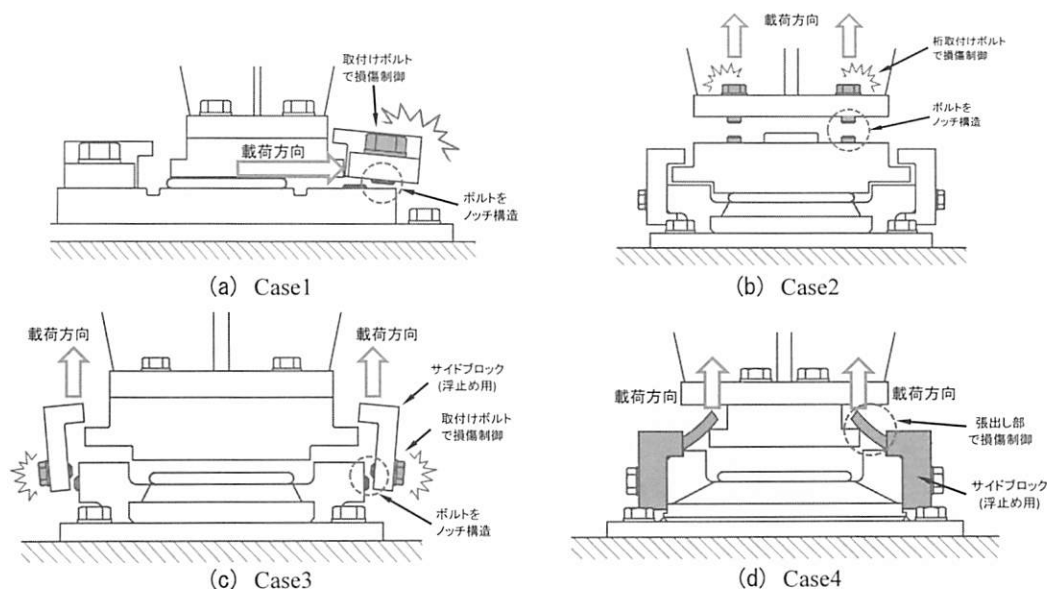


図-1 損傷制御型支承のイメージ図

えられ、アンカーボルトはせん断破断したものと考えられる。

写真-2(c)は、水平方向に抵抗するサイドブロックの取付けボルトに損傷が生じている。片側のサイドブロックのみが損傷していることから、橋軸直角方向の荷重が支配的であったと考えられ、取付けボルトは、せん断破壊による損傷を受けたものと考えられる。

写真-2(d),(e)は、鉛直上向き方向に抵抗するサイドブロックと、それを取付けるボルトに損傷が見られる。双方の支承部ともに鉛直上向き方向の荷重が支配的であったと考えられる。また、双方の支承のサイドブロックは、同じ構造形式であるが、(d)では取付けボルトが損傷、一方(e)ではサイドブロック本体が曲げ上がるような損傷が生じており、破壊形態に違いが見られた。

写真-2(f)は、支承部本体の下沓突起部に損傷が見られる。この部分は、水平方向の荷重に対して抵抗する機能を持ち合わせている。損傷部の下沓突起部が橋軸直角方向へ変形していることから、橋軸直角方向の荷重が作用したものと考えられる。

支承部の損傷の傾向として一例ではあるが、上下部構造の取付部やサイドブロックなど支承本体に取り付けている部品、また、支承本体の水平抵抗用の突起部において損傷が確認されている。なお、損傷部の位置によっては、支承部がすべて残存、また、一部が残存、あるいは支承部全体が損失する傾向も見られる。

(2) 損傷制御型支承の構造

損傷制御型支承に要求される機能は、ある一定荷

重に達した時点において、設定した支承部の損傷制御部を確実に損傷させ、支承部全体の支持機能を喪失させることができる機能である。様々な部品等で構成されている支承部において損傷を制御する場合、制御に適している部品としては、当該部品に作用する力が単純であり、かつその力に対する破壊耐力の品質管理がなされやすく、その結果として、破壊耐力を過不足なく評価でき、ばらつきも小さくすることができる部品が適している。また、常時の機能に悪影響を与えないことも要件となる。

下沓突起部など支承本体においては、一つの部品に対して様々な機能を持ち合わせ、それらを網羅する構造とするために、非常に複雑な形状となっている。さらに、損傷制御部を設けることは、より複雑な構造形式となり、他の機能に阻害が生じるものと考えられる。桁取付けボルトやサイドブロックなど、支承部材の取付け部や支承本体に取り付けられる部品に関しては、支承本体の機能を阻害しないように取り付けるため、損傷制御機能を付加しやすいと考えられる。したがって、損傷制御させる部品に関しては、上下部構造の取付け部や、サイドブロックなどの付属部品に限定した支承構造を考案していく。

提案した損傷制御型支承の概略図を図-1に、損傷部の詳細図を図-2に示す。今回、取り扱う支承の種類としては、日本道路協会から発刊されている道路橋支承設計⁹⁾の密閉型ゴム支承板支承（略称：BPB）とし、支承部の一部品を損傷制御部品に変更した構造とした。使用する支承の反力タイプは400kNのものを使用した。

図-1(a)に示す損傷制御型支承(Case1)は、水平方向の荷重に対して損傷制御される供試体である。損

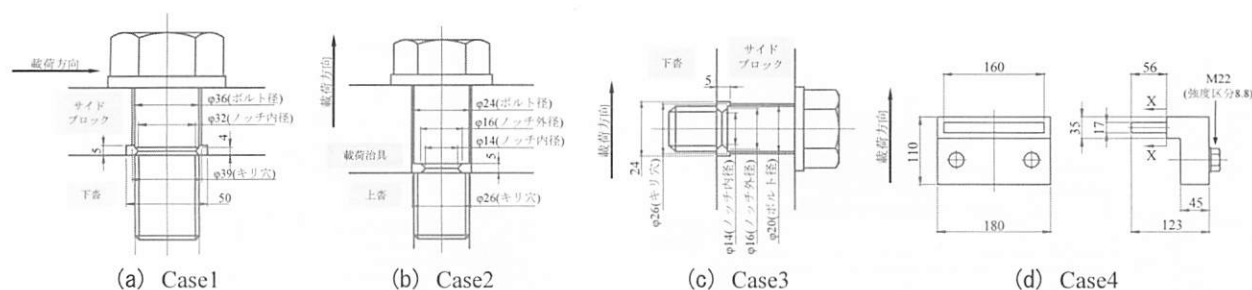


図-2 損傷制御部品 詳細図

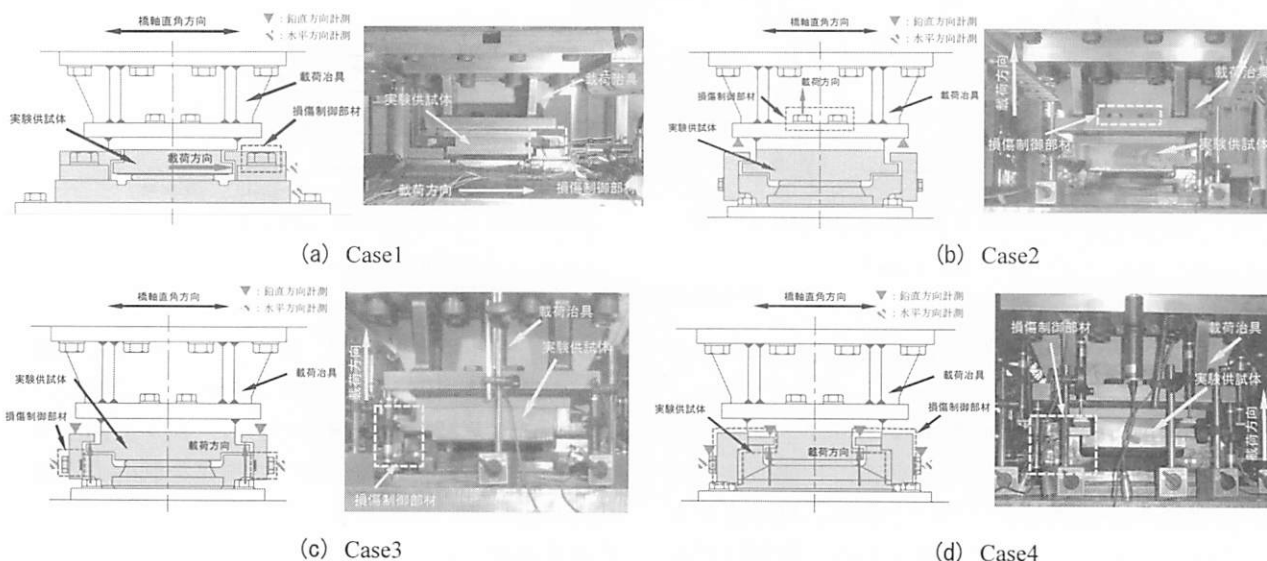


図-3 セットアップ図

傷制御部品については、サイドブロックの取付けボルトである。図-2(a)に示すように、取付けボルトには、ボルトの軸径部にノッチ構造を用いた構造とし、ノッチ部においてせん断破壊させる方法となっている。また、サイドブロック本体に関しては、構造高さを低く設定することにより、橋軸直角方向の作用高さを低く設定し、取付けボルトに作用する曲げの影響を低減した。

図-1(b)に示す損傷制御型支承(Case2)は、鉛直上向き方向に対して損傷制御される供試体である。損傷制御部品については、桁取付けボルトである。図-2(b)に示すように、桁取付けボルトは、軸径の途中にノッチ構造を用いた構造とし、ノッチ部において引張破断させる方法となっている。

図-1(c)に示す損傷制御型支承(Case3)は、鉛直上向き方向に対して損傷制御される供試体である。損傷制御部品については、サイドブロック取付けボルトである。図-2(c)に示すように、取付けボルトは、軸径の途中にノッチ構造を用いた構造とし、ノッチ部においてせん断破断させる方法となっている。また、サイドブロック本体の構造は、写真-2(d),(e)に示すサイドブロック構造と同様であるが、張出し部を短くすることにより、ボルトにはせん断力による作用が支配的になるように設定している。

図-1(d)に示す損傷制御型支承(Case4)は、鉛直上向き方向に対して損傷制御される供試体である。損傷制御部品については、サイドブロック本体である。図-2(b)に示すように、サイドブロック本体の張出し部に板厚の差を設け、板厚が低く設定されている張出し部を、鉛直上向き方向に曲げ変形させることにより、鉛直上向き方向の支持機能を失わせる方法となっている。

3. 載荷実験の概要

前章で提案した損傷制御型支承の効果を検証するために、水平方向および鉛直上向き方向への載荷試験を行った。試験機については、水平方向と鉛直上向き方向に載荷可能なものを用いた。

各支承のセットアップ状況を図-3に示す。実験供試体の上面にはソールプレートに模したブラケット型の載荷治具を設けた。載荷治具に関しては、載荷荷重による変形が生じないように、十分な剛性を有するように設計した。

載荷方法については、水平方向及び鉛直上向き方向の一軸方向の漸増載荷方式とし、各載荷方向における支承部の支持機能が失うまで行った。載荷の速度については、衝撃力が生じないようにゆっくりと

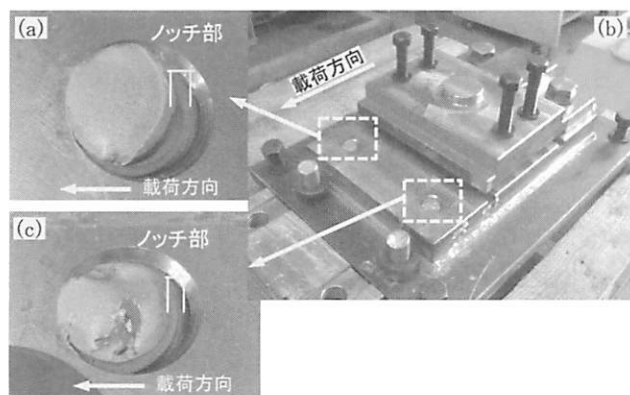


写真-3 実験後の損傷制御部品(Case1)

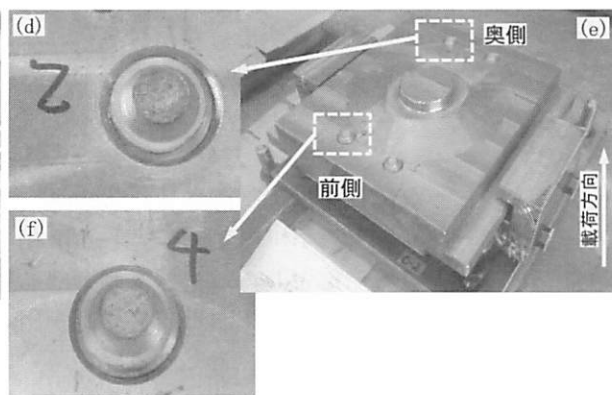


写真-4 実験後の損傷制御部品(Case2)

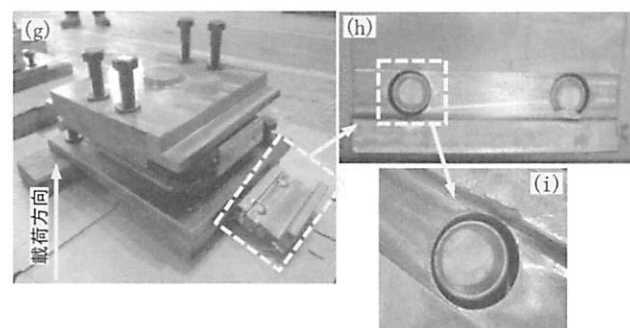


写真-5 実験後の損傷制御部品(Case3)

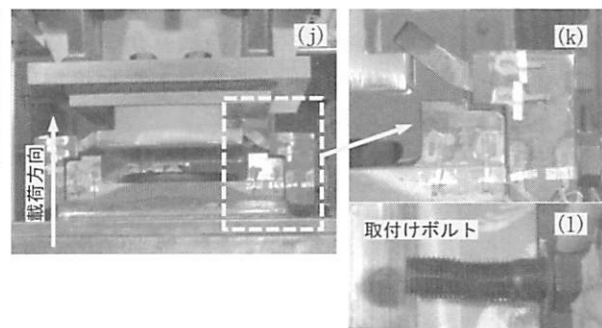


写真-6 実験後の損傷制御部品(Case4)

した速度で与えた。また、実際の津波の荷重に似た挙動を示すには、水平方向と鉛直方向の同時性による作用力を考慮すべきであるが、本研究では、基礎的な研究として、損傷制御型支承の水平方向、および鉛直上向き方向に対する抵抗特性を把握することを目的とし、一軸方向のみ漸増荷重試験とした。

4. 荷重実験の結果

(1) 水平抵抗用サイドブロックの取付けボルトを損傷制御させた支承 (Case1)

Case1の荷重実験後の供試体の状況を写真-3(a)~(c)に示す。最終的な破壊形態は、損傷制御部品であるサイドブロック取付けボルトに設けたノッチ部において破壊する結果となった。ボルトの破壊部に着目すると、ボルトの変形が荷重方向に変形している挙動を示していることから、せん断破壊に近い現象が生じているものと考えられる。また、写真-3(a),(c)に関しては、ネジ部に曲げ変形が生じた跡がある。これは、図-2に示すように、取付けボルトのノッチ部が所定の位置に設置されていることを確認するため、サイドブロック本体側の下面に5mm程度のすき間を設けている。そのすき間の中で、S字のような曲げに似た変形を引き起こしたであろうと考えられる。その他サイドブロック本体、上沓、下沓に損傷は見られなかった。

(2) 桁取付ボルトを損傷制御させた支承 (Case2)

Case2の荷重実験後の供試体の状況を写真-4(d)~(f)に示す。最終的な破壊形態は、損傷制御部品である桁取付けボルトに設けたノッチ部において破壊する結果となった。損傷部においては、すべてのボルトが同時に破壊したのではなく、写真-4(e)に示す奥側のボルト2本が先に破壊し、後に前側2本が破壊する傾向を示した。写真-4(d),(f)に示すボルトの破断面に着目すると、同様な破断面が見られることや、曲げ変形に似た損傷が生じていないことからボルトには引張方向の荷重が支配的に作用したものと考えられる。その他、上沓、下沓に損傷は見られなかった。

(3) 鉛直抵抗用サイドブロックの取付けボルトを損傷制御させた支承 (Case3)

Case3の荷重実験後の供試体の状況を写真-5(g)~(i)に示す。最終的な破壊形態は、損傷制御部品であるサイドブロック取付けボルトに設けたノッチ部において破壊する結果となった。また、Case1, 2のようにボルトが瞬時に損傷を起こす現象は見られず、徐々にボルトに破壊が進行する傾向が見られた。写真-5(h),(i)のボルトの破断面に着目すると、Case1で損傷したボルトの破断形状と同様な傾向が見られたことから、せん断による挙動が支配的と考えられる。また、Case1と同様にボルトのノッチ部の位置が確

認できるようにサイドブロック側に隙間を設けてるが、ボルトのノッチ部に曲げ変形痕などは見られなかった。その他、上沓、下沓に損傷は見られなかった。

(4) サイドブロック本体を損傷制御させた(Case4)

Case4の載荷実験後の供試体の状況を写真-6(j)~(l)に示す。最終的な破壊形態としては、損傷制御部品であるサイドブロック本体の張出し部であり、張出し部の板厚が変化する部分を起点とし、板厚が薄い部分において、鉛直上向き方向に曲げ上がる変形を示した。また、写真-6(l)に示すように、サイドブロックの取付けボルトにおいても、橋軸直角方向に変形する傾向となった。その他、上沓、下沓に損傷は見られなかった。

5. まとめ

本研究は、外力作用の評価に関する不確実性の大きい津波からの作用に対して、最終的な橋の破壊形態を制御することにより、橋としての機能回復がしやすい破壊のさせ方に確実に誘導していく観点から、支承部構造として損傷制御型支承を提案し、そのプロトタイプの試験体に対する載荷試験によりその機能の検証を行った。損傷制御型支承としてはまだ最終開発の段階にまでは至っていないが、本文に示した内容の範囲で得られた知見をまとめると以下の通りである。

1) 津波による支承部の損傷事例を分析すると、鋼製支承においては、上下部構造の取付部やサイドブロックなど支承本体に取り付けている部品、また、支承本体の水平抵抗用の突起部において損傷が生じている。また、損傷部の位置においては、支承部すべてが残存するほか、支承部全体が損失する傾向も見られる。

2) 様々な部品等で構成されている支承部において損傷を制御する場合、制御に適している部品としては、当該部品に作用する力が単純であり、かつその力に対する破壊耐力の品質管理がなされやすく、破壊耐力の評価式のばらつきも小さい部品が適している。また、常時の機能に悪影響を与えないことも要件となる。そのような観点を踏まえつつ、本文ではプロ

トタイプとして図-1に示すような損傷制御型支承を提案した。

3) 載荷実験の結果、Case1~4の実験供試体すべてにおいて、予め設定していた損傷制御部品において最終的な破壊を生じさせることができた。Case1とCase3は、サイドブロック取付けボルトがせん断破壊により損傷した。Case2は、桁取付ボルトが引張破断により損傷した。Case4は、サイドブロック本体の張出し部の途中に設けた板厚が変化する部分を起点とし、曲げ上がる変形による損傷を受けた。ただし、サイドブロック取付けボルトにも損傷の傾向が見られた。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，(独)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，国土技術政策総合研究所資料第814号／土木研究所資料第4295号，2014.12.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋支承書・同解説V耐震設計編，2012.3.
- 3) 佐藤崇，幸左賢二，佐々木達生，付李：橋桁に作用する準定常的な持続波力の実験的検討，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.70，No.2，I_876-I_880，2014.
- 4) 中尾尚史，炭村透，星隈順一：水路実験結果に基づく橋桁に作用する津波の状態と橋の挙動，第17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.119-126，2014.7.
- 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.97-102，2012.7.
- 6) 中尾尚史，張広鋒，炭村透，星隈順一：津波速度の違いが上部構造の挙動に与える影響に関する実験的研究，第16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.421-428，2013.7.
- 7) 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），I_42-I_54，2013.
- 8) 野澤伸一郎，小林將志，今井勉，友利方彦：鉄道の地震への備え，コンクリート工学，Vol.50，No.1，2012.1.
- 9) (社)日本道路協会：道路橋支承標準設計，1994.