

# 津波を受ける橋の機能回復力向上のための技術開発

中尾尚史・森屋圭浩・大住道生・星隈順一

## 1. はじめに

地震や津波は自然由来の現象であり、その特性には不確実性が伴う。その一方で、構造物の耐震設計は、一般に設計で考慮する地震動を設定した上で、求められる耐震性能を満たすかどうかの照査を行うことにより実施されている。このため、設計で考慮した外力を超える作用が生じるリスクは常に存在し、そのリスクに対して、経済的合理性を失わない範囲で構造設計の中でどういう配慮ができるかが重要な課題となっている<sup>1)</sup>。

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波により多くの橋が流出し、機能喪失する被害を受けた。また、2016年熊本地震では、斜面変状や地盤変位等の影響により、橋としての機能回復に時間を要する被害に至った事例があった<sup>2)</sup>。津波や地震の影響によって設計で想定している状態を超える状態に至ったとしても、橋の機能喪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り<sup>3)</sup>、これらの被災経験から、その教訓が得られたところである。従来考えられてきた「耐える」・「粘る」の設計思想だけではなく、「賢く壊し、賢く直す」損傷制御設計思想を導入することが重要といえる。

そのためには、橋の構造特性に応じて、致命的



(a) 上部構造が流出して機能喪失した橋



(b) 下部構造の倒壊も伴って機能喪失した橋  
写真-1 津波により橋の機能が喪失した事例

な損傷への至りにくさや機能回復のための応急復旧のしやすさの観点から、損傷シナリオや応急復旧シナリオを構築し、上記シナリオの確実性を高める構造設計法を検討する必要がある。

本報文では、津波の影響を受ける状況を対象として、上述した観点から橋の損傷制御の考え方を示すとともに、その具体的な制御方法について検討を行った一例を示す。

## 2. 津波の影響を受けた橋の破壊形態と機能回復力

### 2.1 津波の影響による橋の破壊形態

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橋梁の状況を分析すると、写真-1(a)に示すように上部構造が流出して機能喪失に至った橋、写真-1(b)に示すように、橋脚の倒壊も伴って機能喪失に至った橋の2つに大きく分類される<sup>4)</sup>。いずれも橋としての機能が喪失している点では同じであるが、最終的な破壊形態として下部構造が自立して残存しているかどうかという観点で重要な違いがある。

### 2.2 津波の影響に対する橋の機能回復力

地震後において橋の機能を回復させることの本質は、緊急車両や支援物資輸送のための車両等が通行可能な状態とすることである。応急復旧によりこの目的を早期に達成する観点からは、下部構造が自立した状態で留まっている方が、仮橋の設置等早期に応急復旧をするための選択肢も広がる。そこで著者らは、津波の影響によって上部構造から伝達される作用力に対して、橋の最終的な破壊形態として、写真-1(a)のように上部構造は流出するものの、下部構造は自立して残存させる戦略に着眼することとした。

### 2.3 津波の影響に対する橋の損傷制御

前述の考え方に際し、破壊シナリオの信頼性を高めるためには、津波の影響に伴う作用力が、橋を構成する各部材や部材間の接合部を伝達していくプロセスにおいて、各部材間の耐力の階層化を適切に行うことにより、想定を超える作用力が生

じた時に損傷を誘導する部材(損傷制御部材)が明確となっていることが重要である。

以上の観点を踏まえ、津波の影響を受ける橋の損傷制御部材として、2.2で述べたように下部構造を残存させた上で作用力の伝達経路で損傷を誘導しやすい支承部に着目した。本研究では、支承部を選定し、高い信頼性をもって損傷を制御することが可能な支承(以下「損傷制御型支承」という。)を開発することを目標とした。

### 3. 損傷制御型支承の提案

#### 3.1 損傷制御型支承の設計思想

支承部の耐震設計では、設計地震力以上の耐力を有するように支承部を構成する部品の諸元等が設定されている。損傷制御型支承に求められる性能は、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した上で、次次に示すように津波の影響によって生じる力に対する最終的な破壊が下部構造ではなく支承部に生じるようにする必要がある。

$$P_{EQ} < P_{ud} < P_{ys} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $P_{EQ}$ は耐震設計で考慮する設計地震力、 $P_{ud}$ は損傷させる部位の耐力、 $P_{ys}$ は下部構造の耐力である。

#### 3.2 損傷制御型支承の損傷メカニズム

著者らは、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)に対し、損傷を制御するための部品(損傷制御部品)としてサイドブロック(上揚力止め)に工夫を施した損傷制御型支承を提案している<sup>5)</sup>。この損傷制御部品は、別途実施した実験<sup>6)</sup>を基にサイドブロックを曲げ変形させて損傷を制御する構造とした(図-1)。

図-1は、橋軸直角方向、鉛直上向き方向および

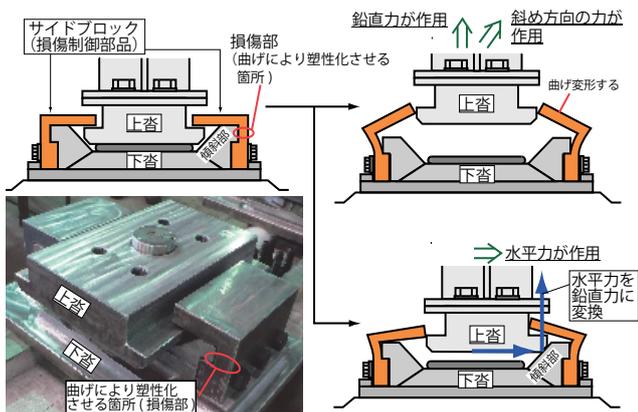


図-1 損傷制御型支承と損傷制御メカニズム

斜め上向き方向の力に対する、損傷制御型支承の損傷メカニズムを示したものである。まず、鉛直上向き方向および斜め方向の力が作用した場合に対しては、上咨が左右の損傷制御部品(サイドブロック)に接触した後、図-1に示した損傷部が曲げ変形し、上咨と損傷制御部品との引掛りが外れることにより支持機能が喪失する仕組みとなっている。また、水平方向に力が作用した場合は、下咨部に傾斜部を設けることにより、上咨が下咨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し、損傷制御部品に接触した後、図-1に示した損傷部を曲げ変形させて上咨と損傷制御部品との引掛りが外れる仕組みとなっている。

#### 3.3 損傷制御型支承の構造設計

損傷制御型支承は、3.1で示した設計思想に基づくことが重要である。ここで、損傷制御部品の耐力は、下部構造の耐力を考慮して設定した。

損傷させない部品は、耐力階層化の観点から、損傷制御部品よりも先に損傷する確率をできるだけ小さくすることが重要である。そのため、本研究では、損傷制御部品の耐力が、損傷させない部品の耐力を上回る確率(図-2の緑色で示した範囲であり、以下「超過確率」という)を小さくすべく、両部品間に耐力差を設けることにより、損傷させない部品に求められる耐力を設定した。

ここで、損傷制御部品と損傷させない部品に使用する材料の材料強度のばらつきとしては、文献7)に示されている正規確率密度分布を適用した。

### 4. 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

#### 4.1 実験の概要

前述のように提案した損傷制御型支承が、津波の影響によって橋に最終的な破壊が生じる状況において、設計思想と通りの破壊モードと破壊耐力が得られるかを検証するため、写真-2に示すよう

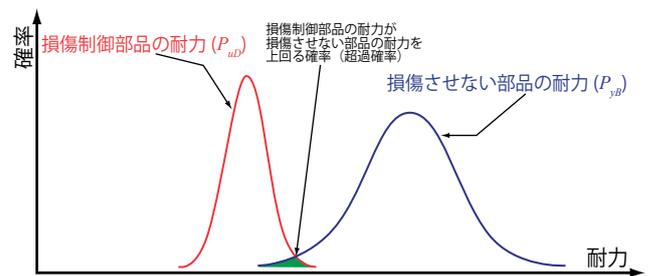


図-2 損傷制御型支承の各部品の耐力の考え方

なRC橋脚を含めたセットアップにより載荷実験を行った。本実験では、1支承線上に4基の損傷制御型支承を設置した。また、載荷方法については、津波の影響により上部構造に作用する力を模擬するため、既往の水路実験で計測した支承反力の分力特性<sup>9)</sup>に基づき、水平軸に対して60°上向きにジャッキを用いて載荷することとした(写真-2)。

ここで、損傷制御型支承は、津波の影響により上部構造から伝達されてくる力に対して、下部構造の降伏耐力を上回らないように設計した。本実験における損傷制御型支承の配置条件で、水平軸に対し60°上向きに載荷する系においては、下部構造の中で最初に破壊が生じる断面は張出し横梁の付け根部(写真-2中の対象断面)となった。したがって、損傷制御部品の耐力は、この張出し横梁部の耐力を超えないように設定した。また、損傷させない部品の耐力は、前述したように超過確率が小さくなるように、各部品の材料強度のばらつきを考慮して、損傷制御部品との耐力差を設定した。ここで、超過確率の設定方法については求められる信頼性の水準によって変わるが、本研究においては、10%と仮定した。

本研究で提案する損傷制御型支承は、BP-B支承のサイドブロックを損傷制御部品に交換し、支承本体と一体化させる構造である。ここで、損傷制御型支承の設計を合理的に行う観点からは、損傷制御部品の強度のばらつきは小さいほうが望ましい。そこで、支承部を構成する部品のうち、上沓、下沓等の損傷させない部品については、従来からBP-B支承に用いられているSM490(降伏強度の標準偏差0.11<sup>7)</sup>)とした上で、損傷制御部品については、材質のばらつきがSM490よりも小さいSM520(同0.08<sup>7)</sup>)を用いることとした。そして、これらのばらつきを考慮し、超過確率が10%となるように損傷させない部品に求められる耐力(損傷制御部品の耐力の平均値 $\overline{P_{uD}}$ の約1.3倍)を算定した(図-3)。

#### 4.2 解析の概要

上述した考え方により、設計した損傷制御型支承の耐力について、予め解析を行った<sup>9)</sup>。ここで、載荷ばりは剛体、支承は鉛直ばねと水平ばねでモデル化し、鉛直ばねのみ別途実施した支承載荷実験<sup>9)</sup>で得られた結果を基に、非線形特性を設定し

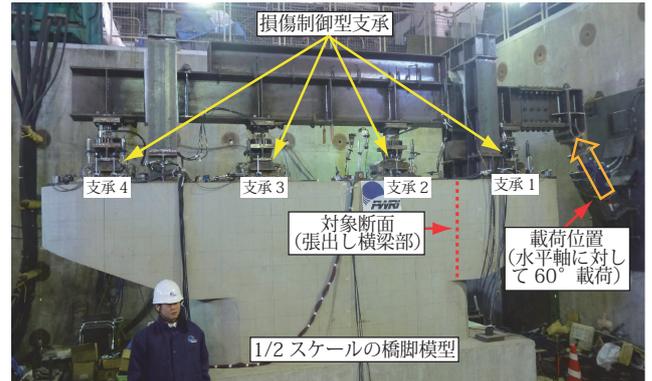


写真-2 実験模型

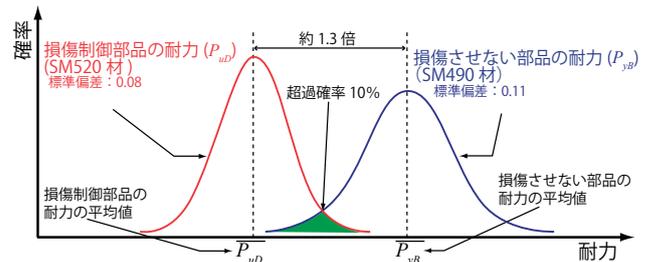


図-3 設計した損傷制御型支承の各耐力の関係



写真-3 実験後の損傷制御型支承の状況(支承1)

た<sup>9)</sup>。本載荷実験と条件を合わせるために、水平軸に対して60°上向きに強制変位を与えて解析を行った結果、図-4に示すように、支承反力の合計値は、最大で約680kNと評価された。

#### 4.3 検証結果

##### 4.3.1 損傷制御型支承の破壊モード

写真-3は、損傷制御型支承(支承1)の破壊モードを示したものである。損傷制御型支承は、損傷制御部品であるサイドブロックの塑性化させる箇所(曲げ変形)しており、他の部位には損傷が見られなかった。支承1、2、3の順に同様の破壊をしたところで実験を終了した。

##### 4.3.2 変位-荷重関係

図-4は、載荷位置の鉛直変位(ジャッキで与えた変位量の鉛直方向成分)と支承の鉛直反力の合計値を示したものである。図より、載荷実験により得られた支承の鉛直反力の合計値は最大で約650kNとなり、解析で推定した値(約680kN)とほ

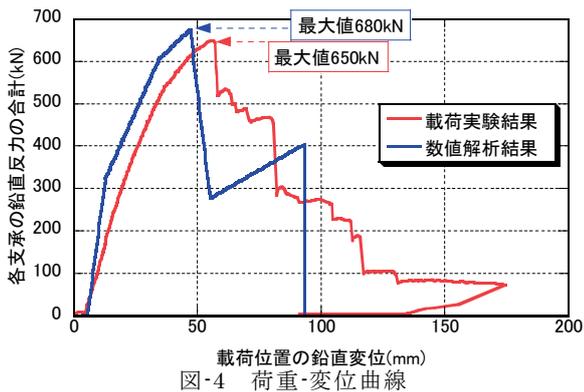


図-4 荷重-変位曲線

ば一致した。このように、本研究で提案する損傷制御型支承は、設計思想通りの破壊モードを示し、かつ、推定した支承の鉛直反力とよく一致する耐荷力特性を有していることを確認した。

#### 4.3.3 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、張出し横梁下側の付け根部など、本実験条件で鉄筋に大きなひずみが生じると推定される箇所については、ひずみゲージを取付けて鉄筋のひずみ量を計測した。その結果、該当部位での鉄筋のひずみは、降伏ひずみに達してなく、下部構造には損傷が生じなかったことを確認した<sup>9)</sup>。

### 5. まとめ

本研究では、津波の影響を受ける橋への適用を想定した損傷制御型支承を提案し、その設計の考え方と、耐荷力特性について、橋脚模型を用いた載荷実験により検証した。その結果、損傷制御型支承を用いることにより、津波の影響に対して、想定通りの破壊形態になること、予め推定した耐荷力で損傷を誘導することができた。

本研究では、鋼製支承を対象としたが、今後はゴム支承に対しても損傷を制御する方法を検討し

ていきたいと考えている。

### 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 小野潔教授より有益なご助言を頂いた。ここに謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 星限順一、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、第58巻、第4号、pp.46～47、2016
- 2) 大住道生：熊本地震の橋梁被害と課題、第9回CAESAR講演会講演資料、2016  
[http://www.pwri.go.jp/caesar/lecture/pdf09/3\\_oshumi.pdf](http://www.pwri.go.jp/caesar/lecture/pdf09/3_oshumi.pdf)
- 3) 星限順一：道路構造物の巨大地震対策－橋に起きる事象の思考と防災・減災対策－、基礎工、Vol.43、No.4、pp.14～18、2015
- 4) 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
- 5) 森屋圭浩、中尾尚史、星限順一：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、pp.511～518、2016
- 6) 森屋圭浩、中尾尚史、星限順一：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、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講演論文集、pp.265～270、2015
- 7) 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
- 8) 張広鋒、中尾尚史、星限順一：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
- 9) 中尾尚史、森屋圭浩、星限順一：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、第19回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.519～524、2016

中尾尚史



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 専門研究員、博(工)  
Dr. Hisashi NAKAO

森屋圭浩



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ交流研究員、現 (株)川金コアテック  
Yoshihiro MORIYA

大住道生



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員  
Michio OHSUMI

星限順一



研究当時 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ上席研究員、現 国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター熊本地震復旧対策研究室長、博(工)  
Dr. Jun-ichi HOSHIKUMA