

3.9 津波の影響を受ける橋の挙動と抵抗特性に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：星隈順一、中尾尚史

【要旨】

研究 3 年目となる平成 26 年度は、桁橋を対象として津波に対する橋の抵抗特性の評価手法の提案および津波による上部構造への作用力の軽減対策の開発を目的として、津波による橋の破壊モードを確実化させる支承の提案、線支承の破壊形態の検討、および上部構造への作用力を軽減させるフェアリングの取り付け方法の検討を行った。津波による橋の破壊モードを確実化させる支承構造の試作品に対する載荷試験の結果、損傷制御部位として予め設定した部位に損傷を誘導させることが実現できた。また、線支承の載荷実験の結果からその破壊形態の特徴を明らかにするとともに、実際に損傷を受けた線支承がどのような方向に支配的に力を受けたのかを推定した。さらに、津波の影響を軽減させるフェアリングの具体的な構造を検討するとともに、フェアリングを設置した時の橋の維持管理における課題を抽出した。

キーワード：津波、挙動メカニズム、減災、損傷制御型支承、フェアリング

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波による橋梁の被害が多数発生した¹⁾。被害の中には、支承部が破壊して上部構造が流出し、さらにその橋の架橋条件によっては応急的な措置による迂回路の仮設も難しく、緊急輸送路としての機能が速やかに回復させることが難しかった事例もあった。今後発生が予想されている、東海、東南海、南海地震においても、大規模な津波が襲来する可能性が指摘されており、大規模災害発生時においても、避難路・緊急輸送道路として道路ネットワークの機能を早期に確保することが喫緊の課題となっている。

平成 24 年に改定された道路橋示方書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、道路橋の設計においては、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。また、構造計画の考え方の例としては、津波に関する地域の防災計画等を参考にしながら津波の高さに対して桁下空間を確保すること、津波の影響を受けにくいような構造的工夫を施すこと、上部構造が流出しても復旧しやすいように構造的な配慮をすること等が挙げられている。津波により橋梁に生じる影響は、津波と橋梁との間の相互作用によって生じるものであるが、津波により橋梁が受ける影響を

評価し、さらに橋梁側での構造的な工夫により津波の影響を受けにくくする対策を講じていくためには、津波に対して橋梁がどのようなメカニズムに基づいて挙動するのか、また津波により橋梁に作用する力はどれくらいなのかを解明していくことが必要である。

このような背景から、本研究では、津波の影響を受ける橋の挙動に着目し、東日本大震災の被災経験を基に、津波による上部構造の流出メカニズムの解明をするとともに、津波に対する橋の抵抗特性の評価手法および主として既設橋を対象とした津波作用の軽減対策の開発を行っている³⁾⁴⁾。

本研究は、津波に対する橋の抵抗特性を評価する上で重要となる支承部の評価、その中でも既設橋に多く用いられている線支承に着目し、その破壊特性と耐荷力の検証を行った。また、津波の影響に対する橋の最終的な破壊モードとして応急復旧がしやすい形態に確実化させる「ダメージコントロール」の考え方を導入し、確実に支承本体を最終的な破壊部材とすることができる損傷制御型支承を提案し、その検証を載荷実験により行った。さらに、津波の影響を軽減させることを目的として、過年度までに検討してきたフェアリングによる対策について、今年度は具体的な取り付け方法について概略検討を行った。

2. 津波による損傷を受けた線支承の耐力と破壊形態

2.1 本章の概要

橋に及ぼす津波の影響に関する既往の研究では、津波の影響によって上部構造が流出するかしないかを照査する手法あるいは津波の影響に対する設計法の開発に目標を置いた研究が多いが、その中でも、津波の影響によって上部構造に作用する波力の評価手法を水路実験や数値解析、被災事例に基づいて提案する研究が多い^(例えば5-8)。津波の影響によって生じる橋への作用力を精度よく評価する手法の検討はもちろん必要であるが、照査や設計への反映という観点からは、作用力の評価だけではなく橋側の抵抗力の評価手法についても合わせて精度を高めていく必要がある。しかしながら、津波の影響に対する橋側の抵抗特性の評価に関する研究はあまりなされていない⁹⁾。

2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波により、橋の上部構造が流出する等の被害が生じたが、その流出した橋の多くは支承部の損壊による被害形態であったため¹⁾、土木研究所では津波の影響によって生じる作用に対する支承部の抵抗特性に関する研究を行っている^{9),10)}。既設橋の支承構造には様々な種類のものがあるが、支間長の短い鋼桁橋においては線支承が用い

られていることが多く、東北地方太平洋沖地震による津波の影響によっても、様々な形態の破壊性状が確認されている。そのため、線支承の抵抗特性と破壊性状を明らかにする必要があると考えられる。

線支承の抵抗特性に関しては、過去に下沓部のみを対象とした水平載荷実験や解析等により破壊形態や耐力力の検討がされた例がある^{11),12)}。これらの研究では地震時の水平方向の荷重に対する抵抗特性について検討がなされているが、津波のような鉛直方向の作用力の影響も受ける場合の破壊形態や耐力力に関する検討は行われていない。さらに、**写真-2.1**のように実橋に取付けられた状態(下沓にピンチプレートとアンカーボルトが取り付けられた状態)を想定した条件下での水平及び鉛直載荷試験による検討は行われていない。

そこで本研究では、津波の影響に対する線支承全体としての実際に近い耐力力とその破壊形態の特性を検証することを目的とし、下部構造を模したコンクリートブロックに線支承を据付けた状態で、橋軸直角方向ならびに鉛直上向き方向への一軸載荷実験を実施し、線支承における各作用方向の抵抗特性について検証を行った。さらに、これらの載荷実験の結果を踏まえ、津波の影響により実際に損壊が生じた道路橋の線支承を対象として、当該線支承に生じた作用力の方向についても考察を加えた。

2.2 線支承載荷実験の概要

2.2.1 実験供試体

実験供試体および寸法を図-2.1に示す。実験供試体は、昭和51年に(社)日本道路協会から出版された道路橋支承標準設計¹³⁾における300kNならびに750kNタイプ支承の実物大相当の2種類の線支承を使用し、橋軸直角方向、鉛直上向き方向に荷重を載荷していく実験をそれぞれ行った。実験供試体の材質は当時使用されていた材質とし、下沓部にねずみ鋳鉄品(FC250)、ピンチプレートとアンカーボルトは一般圧延鋼材鋼材(SS400)とした。下沓上部に設置されるソールプレートについてはSS400とし、十分な剛性を確保するように設定した。この実験供試体を下部構造側の橋座部を模した鉄筋コンクリートブロックに設置した。橋座部のコンクリートの設計基準強度は 21N/mm^2 とし、内部の鉄筋材の材質は異形鉄筋(SD345)とした。コンクリートブロックは、実験供試体の終局耐力に相当する荷重に対し、ひび割れが生じないように十分な耐力が確保されるように設計を行った。沓座部と箱抜き部に関しては、道路橋支承便覧¹⁴⁾に基づき設計、施工し、沓座部については無収縮モルタルにより施工した。

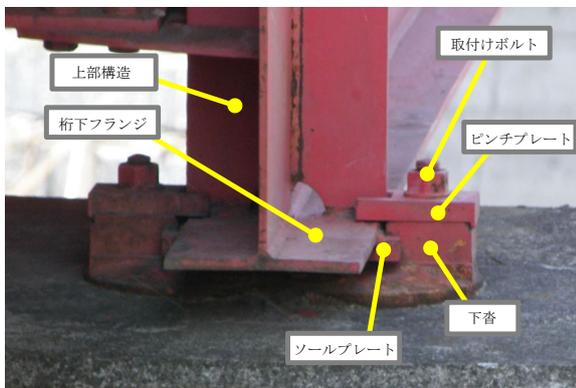
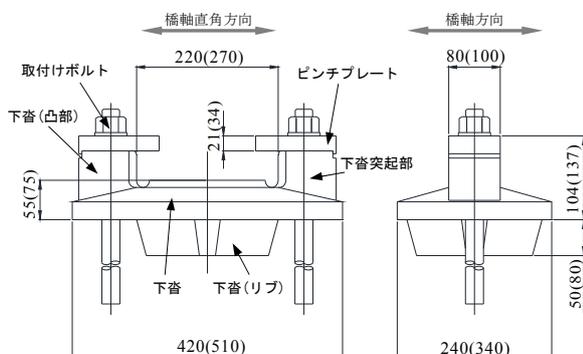


写真-2.1 線支承設置状況



※()内寸法は700kNタイプ支承を示す。単位はmmとする。

図-2.1 実験供試体寸法

2.2.2 実験方法

水平荷重実験のセットアップ状況を図-2.2 に、鉛直荷重実験のセットアップの状況を図-2.3 に示す。セットアップにおいては、1000kN まで荷重可能なジャッキとロードセルを 2 基用いて、実験供試体を挟み込むような形で左右 1 点ずつ設置した。また、荷重治具の傾きを防止するために、ジャッキ設置部の延長線、または近傍に変位計を 1 点ずつ設置し変位計測による確認を行った。荷重用横梁と実験供試体との間には、実橋に近い構造とするため、下沓上部にソールプレートとピンチプレートはソールプレートに引っ掛かるように設置した。

実験供試体のひずみゲージと変位の計測は、図-2.4 に示す位置とした。前述の線支承の損傷状況を元に、水平荷重実験用の実験供試体には、下沓突起部の隅角部周辺と基部、及び下面部のリブの終端部周辺に取り付けた。

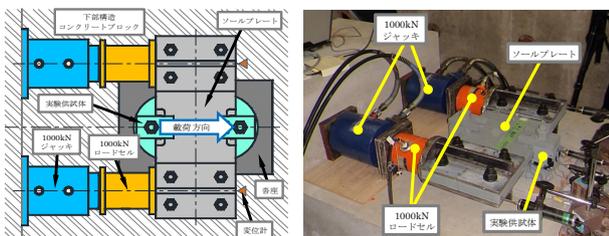


図-2.2 水平荷重実験セットアップ図

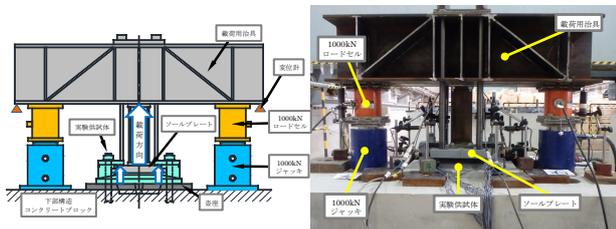


図-2.3 鉛直荷重実験セットアップ図

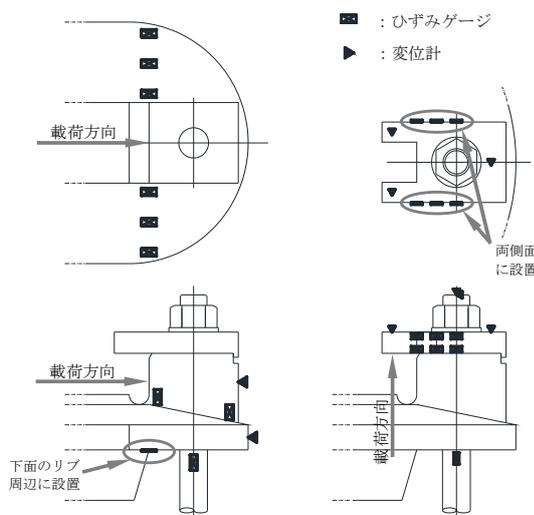


図-2.4 ひずみゲージ・変位計の設置位置
(左：水平荷重用、右：鉛直荷重用)

実際の線支承の損傷状況より、下沓突起部とアンカーボルトが橋軸直角方向に曲げ変形が生じていることから、下沓突起部側面には変位計、アンカーボルトにはひずみゲージを設置した。

鉛直上向き荷重実験用の実験供試体については、ピンチプレートとアンカーボルトに着目し、ピンチプレートの側面部とアンカーボルトの下沓下面と沓座部の境界にひずみゲージを設置した。また、ピンチプレートの切欠き部と外側に箇所に変位計を設置し、ピンチプレート本体の変位を計測した。アンカーボルトは、鉛直上向き方向に変形しながら橋軸直角方向へと曲がるように変形することを予測し、ボルト頂部において鉛直上向きと橋軸直角方向の 2 点の変位を計測した。

水平荷重実験は、橋軸水平方向の一方向の漸増荷重とし、ソールプレートを介して下沓突起部の側面部から荷重を与えた。鉛直荷重実験は、鉛直上向き方向の一方向の漸増荷重とし、ソールプレートをピンチプレートの切欠き部に接触させて荷重を与えた。

荷重に関しては、支承部の荷重支持機能が失うまで行った。荷重速度に関しては、手動のジャッキによる荷重のため、ゆっくりとした速度で荷重を与えた。また、図-2.2 および図-2.3 に示すように荷重中にジャッキ付近に設置した変位の計測を行い、加圧毎に 2 点の変位が同値となる様にジャッキ荷重を調整し、荷重が偏荷重することがないように行った。

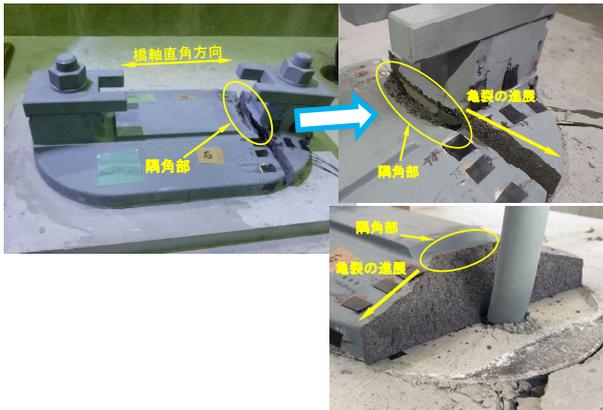
2.3 線支承の破壊形態および耐力評価（水平荷重）

2.3.1 破壊形態

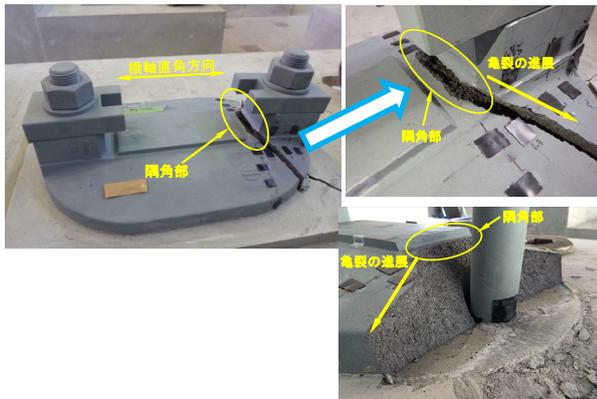
橋軸直角方向に相当する向きへの荷重実験終了後の線支承の状況を写真-2.2 に示す。300kN タイプ支承と 750kN タイプ支承ともに、下沓突起部の隅角部から亀裂が入り始め、下沓下面のアンカーボルト穴部に向かって生じた。亀裂が入り始めた直後に急速に進展し割れるような挙動を示したことから、脆性的な破壊に近い現象が生じたと考えられる。これは、損傷部の下沓に脆性破壊を起こしやすい鉄材料（FC250）による影響と考えられる。下沓突起部の隅角部が損傷した後は、下沓突起部とアンカーボルトが同時に橋軸直角方向(支点中心から外側)へ曲げ変形する挙動を示した。なお、荷重方向と反対に位置する下沓突起部の隅角部やアンカーボルトに関しては損傷は見られなかった。

2.3.2 損傷のメカニズム

図-2.5 は水平荷重—水平変位の関係を示したものである。300kN タイプ支承は 431.1kN、750kN タイプ支承は 569.8kN に相当する水平荷重（最大水平荷重 P_{max} ）に



(a) 300kN タイプ支承



(b) 750kN タイプ支承

写真-2.2 水平載荷実験後の供試体損傷部

達した直後に荷重の低下し変位の増大が見られる。水平荷重—ひずみの関係を図-2.7 に示す。両支承ともほぼ同じ傾向であったため、ここでは 300kN タイプ支承の結果を示した。下沓上面および下沓底面突起部の基部に着目すると(図-2.6(a),(b)), 最大水平荷重に達したと同時に下沓突起部の隅角部の近傍部(グラフ線番号(2),(3),(5),(7))において引張ひずみが最も卓越していることから、最大水平荷重に達したと同時に下沓突起部の隅角部において亀裂が入り始め、下沓下面のアンカーボルト穴まで急激に損傷したものと考えられる。

さらに、図-2.6(c)で示した下沓下面と下沓突起部の隅角部の真下に位置する下沓下面部に着目すると、最大水平荷重に達するまで圧縮ひずみが生じていることが分かる。したがって、ひずみ分布の関係から損傷した断面部においては曲げによる影響が支配的となり損傷したものと考えられる。

また、図-2.6(b)に示す下沓突起部の基部に位置するひずみにおいても、隅角部近傍(グラフ線番号(5),(7))に引張ひずみ、外側に位置する部分(グラフ線番号(6),(8))に圧縮ひずみが生じていることから、下沓突起部の基部においても曲げによる損傷が支配的となる可能性が高いと考え

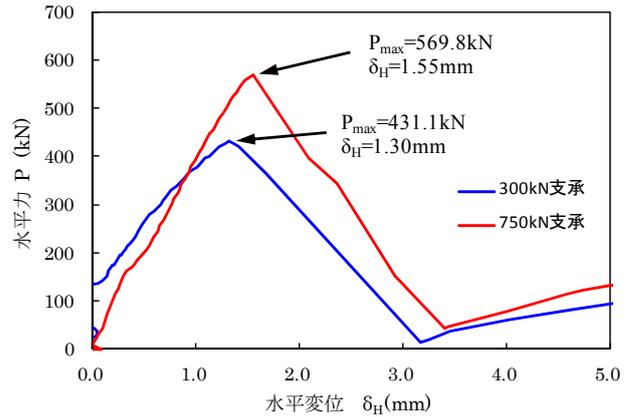
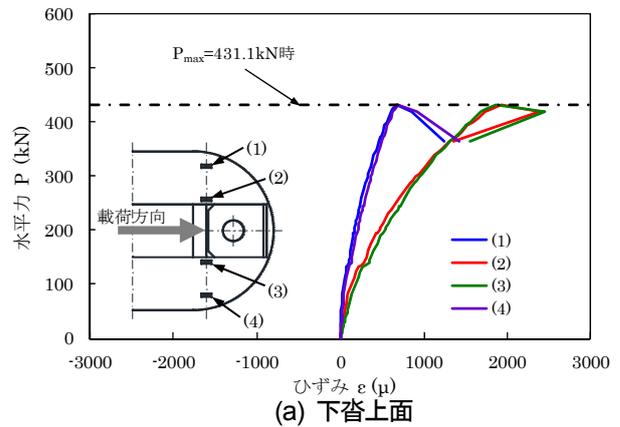
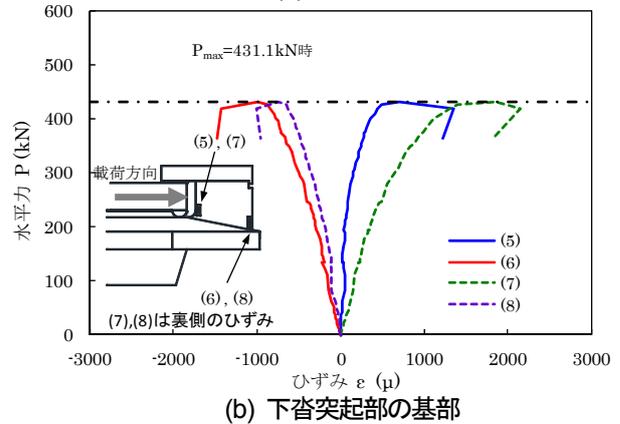


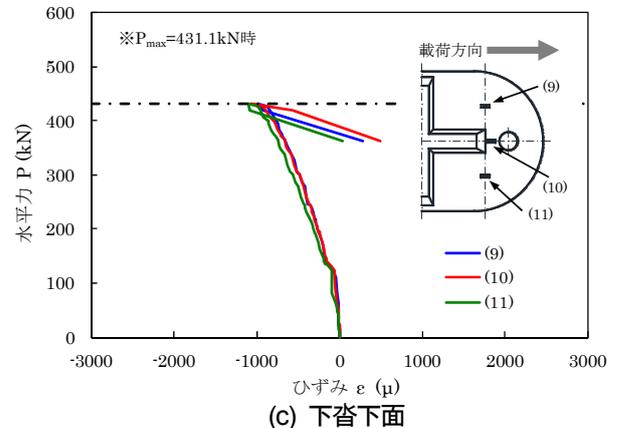
図-2.5 水平載荷試験 荷重—変位図



(a) 下沓上面



(b) 下沓突起部の基部



(c) 下沓下面

図-2.6 水平載荷試験 荷重—ひずみ図 (300kN タイプ支承)

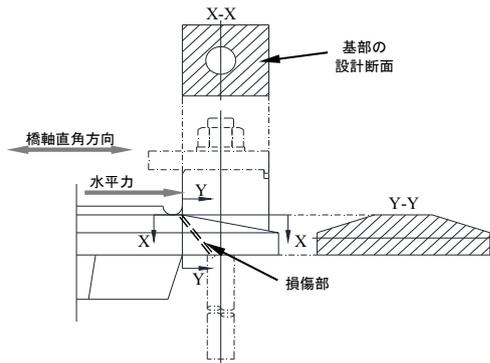


図-2.7 下沓突起部の設計断面

表-2.1 下沓突起部周辺の断面部の断面二次モーメント

支承タイプ	$1 \times 10^6 (\text{mm}^4)$	
	X-X断面	Y-Y断面
300kN	4.73	1.31
750kN	12.8	5.42

られる。

2.3.3 耐力の評価

文献 13)に規定されている設計法(許容応力度法)においては、水平終局耐力が最も低いと予想される断面部は、図-2.7に示す下沓突起部の基部の断面部 (X-X 断面部)とされている。しかし、今回の载荷実験の結果より、下沓突起部の隅角部から下面の取付けボルト穴に向かって損傷が生じる結果となったことから、これは、線支承の耐力の評価を行う場合には、許容応力度法による設計の時と同じ X-X 断面部で一律に耐力の算定を行うという考え方は適用できないことを示唆するものである。

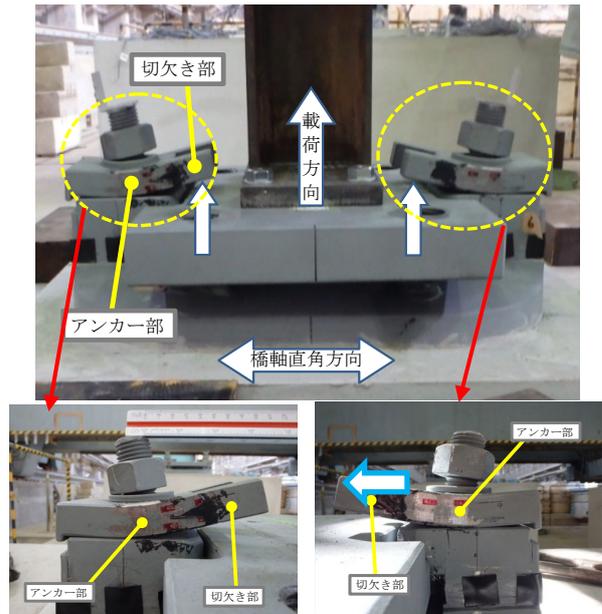
また、線支承には、図-2.1に示すように、下沓下面に水平力を下部構造に伝達させるリブが設けられている。しかし、アンカーボルトの位置の関係上、下沓突起部の隅角部位置を境にそのリブが途切れた構造となっており、結果的にこの部分においては極端な曲げ剛性の変化が生じている。表-2.1に示すように、実験供試体の X-X と Y-Y 断面部との断面二次モーメントの比較を行なった結果、Y-Y 断面部の方が小さい傾向を示している。

したがって、線支承の水平終局耐力の評価にあたっては、下沓突起部の隅角部近傍の断面領域(X-X 断面、Y-Y 断面部)において曲げ剛性の比較を行い、津波によって作用する水平力に対して最弱部となる断面を特定し耐力の評価を行う必要があると考えられる。

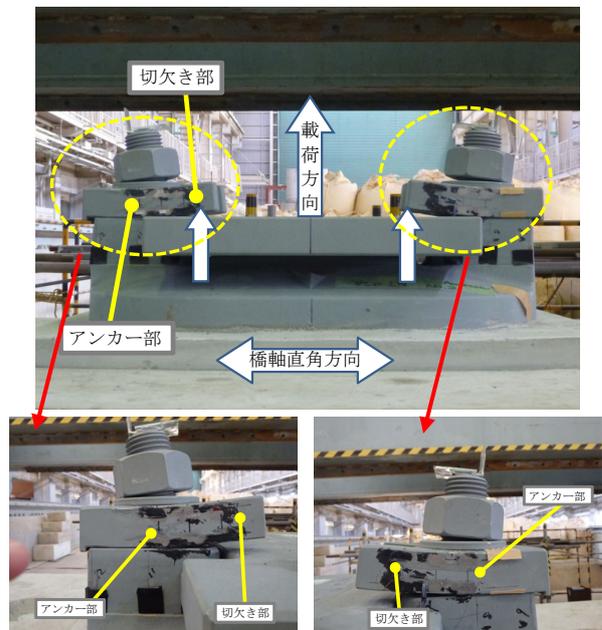
2. 4 線支承の破壊形態および耐力評価 (鉛直载荷)

2.4.1 破壊形態

鉛直上向きへの载荷実験終了後の線支承の状況を写真



(a) 300kN タイプ支承



(b) 750kN タイプ支承
写真-2.3 鉛直载荷実験後の供試体の損傷部

-2.3に示す。300kN、750kN タイプ支承ともに、ピンチプレートのアンカーボルトが設置されている位置(アンカー部)を支点とし切欠き部にかけて鉛直上向き方向に曲げ上がる挙動を示した。アンカーボルトは、ピンチプレートの曲げ上がる変形により、同様に曲げと引張に相当する反力を受けている。

载荷初期においては、ピンチプレートのみに変形が生じていたが、荷重を载荷していくにつれピンチプレートとともにアンカーボルトが鉛直上向き方向に引張られながら橋軸直角方向(支承中心に対し外側方向)へ曲がる挙動を示した。また、下沓部には損傷は見られなかった。

2.4.2 損傷のメカニズム

図-2.8 に鉛直上向き荷重-変位の関係を示す。300kN タイプ支承は鉛直上向き力が 120kN、750kN タイプ支承は鉛直上向き力が 250kN 程度になるまで載荷した後から、鉛直剛性が小さくなる挙動を示した。剛性が低下した後、荷重が急激に落ち込むような挙動は示さず、変位の増加に合わせ荷重も漸増する傾向を示している。実験終了時、変位が 25mm に達した時点の鉛直上向き荷重は、300kN タイプ支承では 166.0kN、750kN タイプ支承では 450.5kN であった。

図-2.9,10 に鉛直上向き荷重-ひずみの関係を示す。300kN タイプ支承においては、図-2.9(a),(b)に示すピンチプレートとアンカーボルトの荷重-ひずみ分布に着目すると、ピンチプレートが先に引張降伏ひずみに達し、後にアンカーボルトが引張降伏ひずみに達する傾向を示した。図-2.9(c)のピンチプレート本体の断面部に着目した荷重-ひずみ分布によると、アンカー部の断面部が先に降伏引張ひずみに達し、後にアンカー部の近傍(グラフ線(2),(5))、切欠き部の順番に引張降伏ひずみに達する傾向を示している。また、鉛直剛性が低下した 120kN 付近には、アンカーボルトとピンチプレートのアンカー部付近の断面部が引張降伏ひずみに達することから、双方の部品が降伏ひずみに達したことが要因と考えられる。

750kN タイプ支承においては、図-2.10(a),(b)に示すピンチプレートとアンカーボルトの荷重-ひずみ分布に着目すると、ピンチプレートとアンカーボルトの双方が約 150~200kN の鉛直上向き力に達した時点で降伏ひずみに達する傾向を示した。図-2.10(c)のピンチプレート本体の荷重-ひずみ分布に着目すると、アンカー部(グラフ番号(3),(6))が先に引張降伏ひずみに達し、アンカー部付近(グラフ番号(2),(5))は、鉛直上向き力が 220kN に達した時に引張降伏ひずみに達している。鉛直上向き力が 250kN に達した時に鉛直剛性が低下した要因としては、

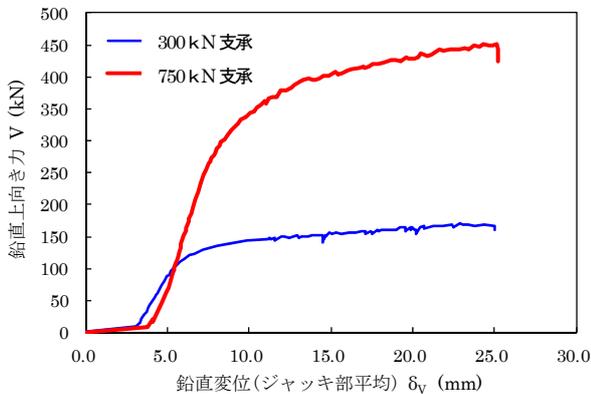
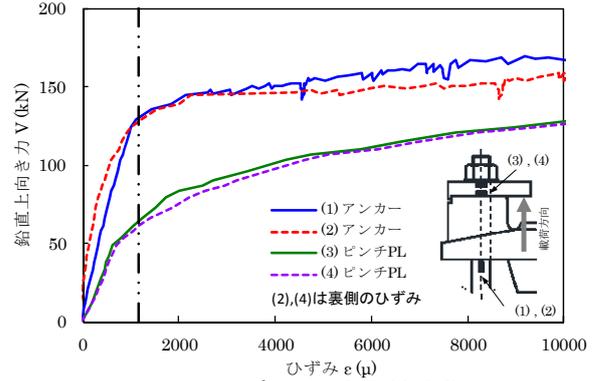
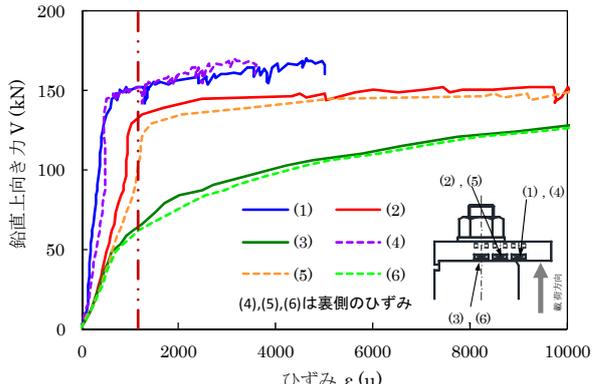


図-2.8 鉛直載荷試験 荷重-変位図

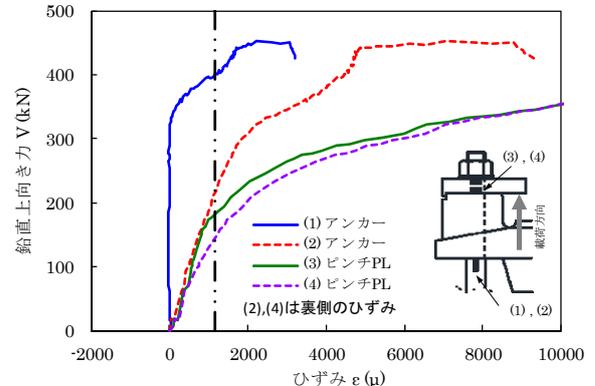


(a)ピンチプレートと取付けボルト

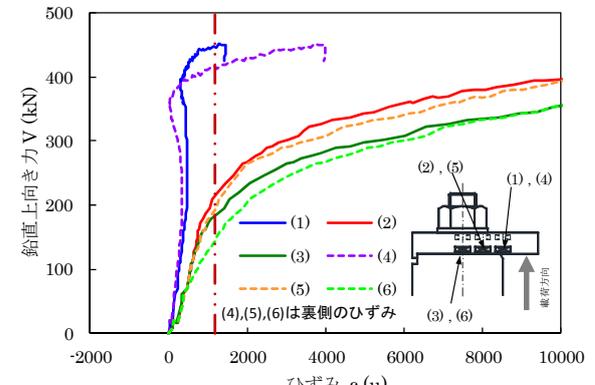


(b)ピンチプレート本体

図-2.9 鉛直載荷試験 荷重-ひずみ図 (300kN タイプ支承)



(a)ピンチプレートと取付けボルト



(b)ピンチプレート本体

図-2.10 鉛直載荷試験 荷重-ひずみ図 (750kN タイプ支承)

ピンチプレートのアンカー部付近の断面が降伏ひずみに達したものと考えられるが、ピンチプレートのアンカー部周辺の断面とアンカーボルトの降伏ひずみに達する荷重が近い傾向を示していることから、750kN タイプ支承においても 300kN タイプ支承と同様に、ピンチプレートアンカー部とアンカーボルトの双方が降伏ひずみに達したことにより鉛直剛性が低下したものと考えられる。

2.4.3 耐荷力の評価

本載荷実験において、損傷が確認された部位については、文献 13)において考慮されている設計断面と一致する傾向を示しているが、設計上、最弱部となるのは、写真-2.3 よりピンチプレートのアンカー部となる。

津波により被災した橋梁部の線支承部の損傷を見ると、ピンチプレートの曲げによる損傷は少なく、アンカーボルトの鉛直上向き方向や橋軸直角方向への曲げ変形、アンカーボルトの破断により、ピンチプレートと上部構造との引掛りが外れている傾向が多く見られている。本実験においても、ピンチプレートの曲げ変形が確認されているが、同時にアンカーボルトの曲げ上がる変形も大きく出ておりことから、実際の損傷と似た傾向を示すと考えられる。

したがって、このような挙動特性を踏まえると、線支承の鉛直上向き耐力を精度よく評価するためには、アンカーボルト本体の引張や曲げ耐力だけでなく、アンカーボルトの変形に伴うピンチプレートの抵抗機能の低下の影響についても考慮していく必要がある。

2. 5 津波の影響による線支承の損傷状況との比較

本研究で実施した線支承に対する載荷実験により得られた破壊性状を踏まえ、津波の影響により実際に損壊が生じた道路橋の線支承を対象として、当該線支承に生じた作用力の方向について検討する。ここで、作用力の方向に着目したのは、当該橋の上部構造が津波の影響によってどのように挙動しようとしたのかを支承部に残された破壊性状の痕跡から分析する際に重要な情報となるためである¹⁵⁾。

まず、写真-2.4 に示す水尻橋（宮城県南三陸町）に設置されていた線支承に着目する。本橋は、橋長 31.95m (10.7m+10.6m+10.45m) の 3 連鋼単純桁橋であり、上部構造は桁高 700mm の H 型 3 主桁橋である。支承部の損傷状態から、すべての支承線で水平方向の作用力に抵抗する下沓突起部の近傍部に損傷が確認され、下沓突起部とアンカーボルトが橋軸直角方向へ曲げ変形している。実験結果と比較すると、本線支承では橋軸直角方向の水平力による影響を支配的に受けたものと考えられる。

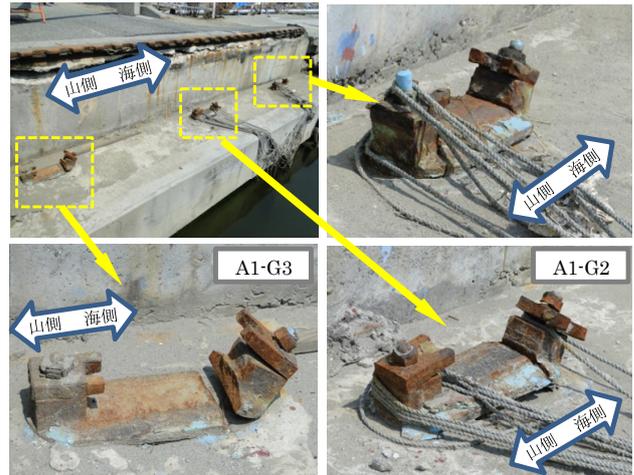


写真-2.4 水尻橋の損傷した支承部

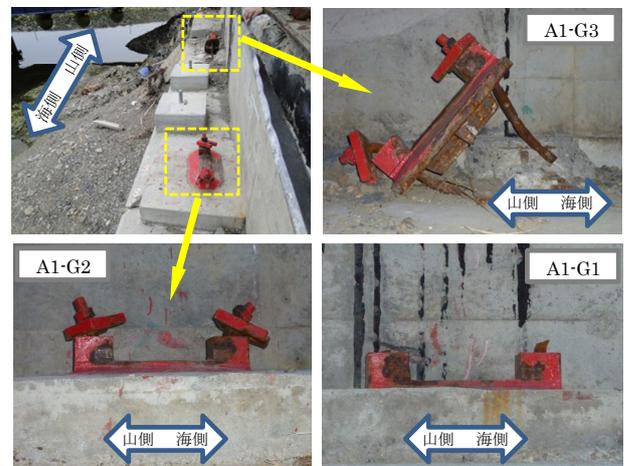


写真-2.5 横津橋の損傷した支承部

次に、写真-2.5 に示す横津橋（宮城県南三陸町）に設置されていた線支承に着目する。本橋梁は、橋長 32.4m (2 × 16.2m) の 2 連鋼単純合成桁橋であり、上部構造は桁高 850mm の H 型 3 主桁橋である。支承部の損傷状態から、鉛直上向き方向に抵抗する部品であるピンチプレートの曲げ変形や損失、ピンチプレートを取付けているアンカーボルトの曲げ変形や破断、下部構造からの抜けによる損傷が多く見られる。前述した実験結果と比較すると、アンカーボルトによる損傷状態と似た傾向を示していることから、線支承は鉛直上向き方向の荷重による影響の方が支配的であったと考えられる。

3. 津波の影響に対する橋の最終的な破壊モードを確実化させる損傷制御型支承の検討

3. 1 本章の概要

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



(a) 上部構造の流出とともに下部構造にも損傷が及んだ橋



(b) 支承部が損壊して上部構造のみが流出した場合における支承部の様々な損傷パターン



写真-3.1 津波の影響によって橋に生じた損傷のパターン

ている(例えば¹⁶⁾,¹⁷⁾。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、常にそれを超える津波の作用が生じることも考えておかなければならない。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、その上で、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¹⁸⁾²¹⁾。その上で、減災の観点から、津波の影響に対する橋の最終的な破壊モードとして応急復旧がしやすい形態に確実化させる「ダメージコントロール」の考え方を導入することも重要である。写真-3.1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-3.1(a)のように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ると¹⁾²¹⁾、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-3.3(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、支承部の損壊のしかたは様々であり、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り、支承部においてそれを具現化することができるような損傷制御型支承の研究を行うことが必要である。

そこで、ここでは、津波の影響に対する橋の最終的な破壊モードを確実化させる損傷制御型支承を提案し、その構造の一例を示し、損傷を制御させる部位で確実に破壊するか実験により検証した。

3.2 損傷制御型支承の提案

3.2.1 実橋における支承部の損傷

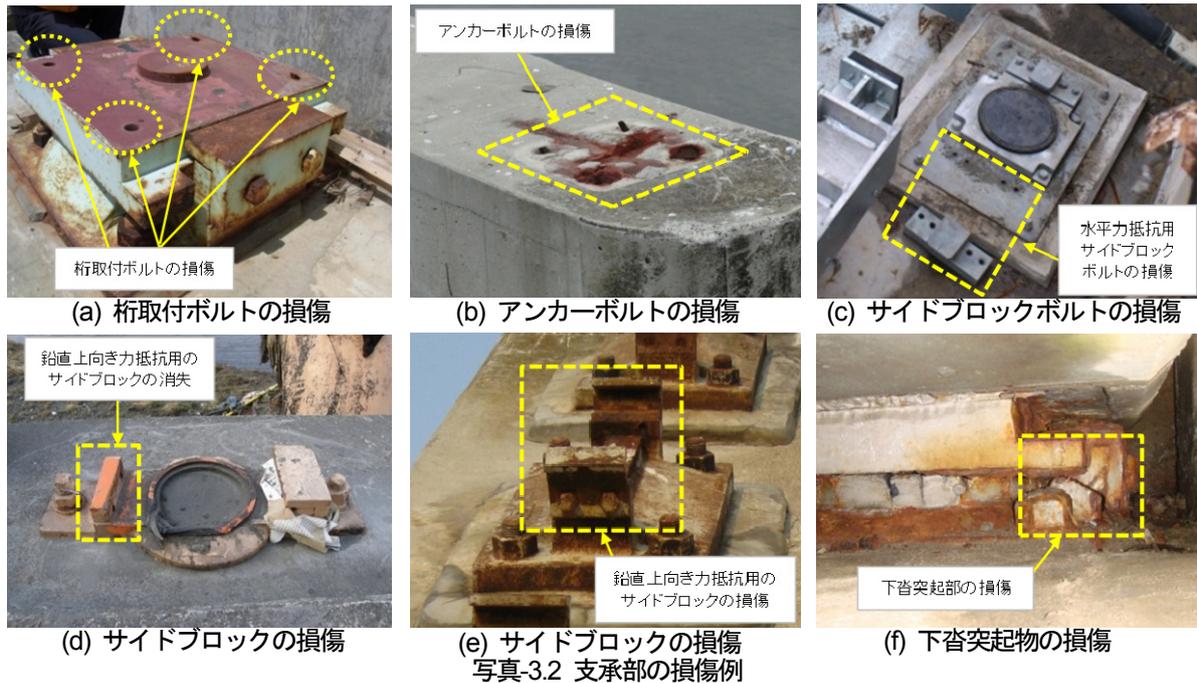
前述より、支承部に損傷制御機能を有するにあたり、まず津波による影響により支承部のどの部品に対して損傷が多いかを検証した。写真-3.2に、津波の影響によって生じた鋼製支承の損傷の一例を示す。

写真-3.2(a)は、上部構造と支承部との取り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、取り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-3.2(b)は、下部構造と支承部との取り付け部品であるアンカーボルトに損傷が生じている。沓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-3.2(c)は、水平方向に抵抗するサイドブロックの取り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、取り付けボルトは、せん断破壊による損傷を受けたものと考えられる。

写真-3.2(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、写真-3.2(d)では取付けボルトが損傷、一方、写真-3.2(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-3.2(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。

3.2.2 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-3.1に、損傷部の詳細図を図-3.2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²²⁾の密閉型ゴム支承板支承(略称:BP-B)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-3.1(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-3.2(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

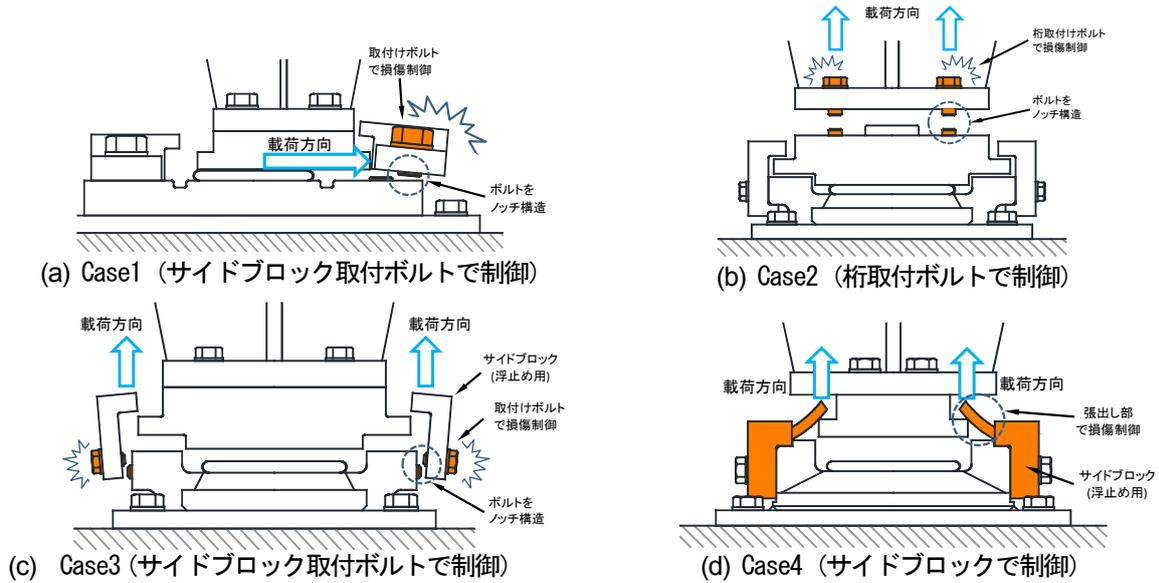


図-3.1 損傷制御型支承のイメージ図 (Case1：水平方向, Case2~4：鉛直方向)

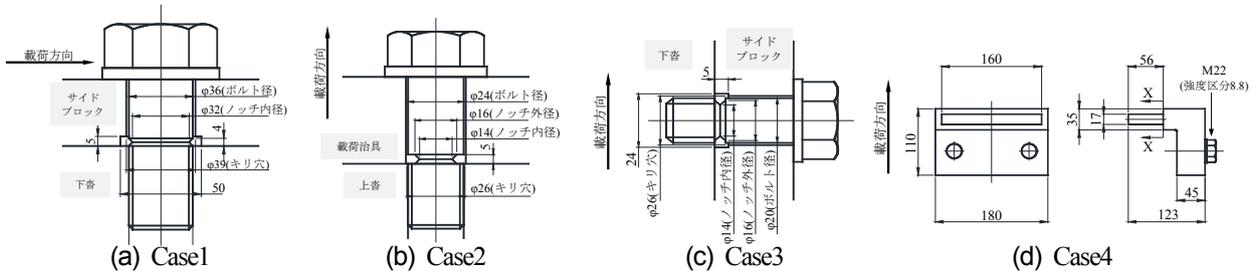


図-3.2 損傷制御部品 詳細図

作用する曲げの影響を低減した。

図-3.1(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-3.2(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-3.1(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-3.2(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-3.2(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-3.1(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-3.2(d)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。

3.3 損傷制御型支承の検証実験

3.3.1 載荷実験の概要

前節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-3.3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、一軸方向のみ漸増載荷試験と

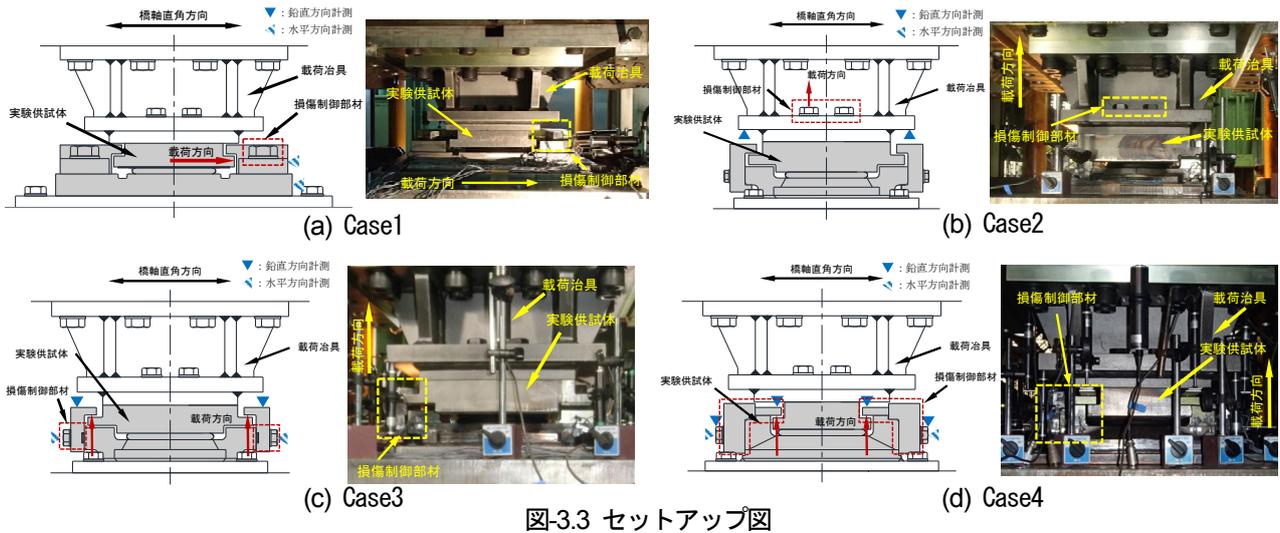


図-3.3 セットアップ図

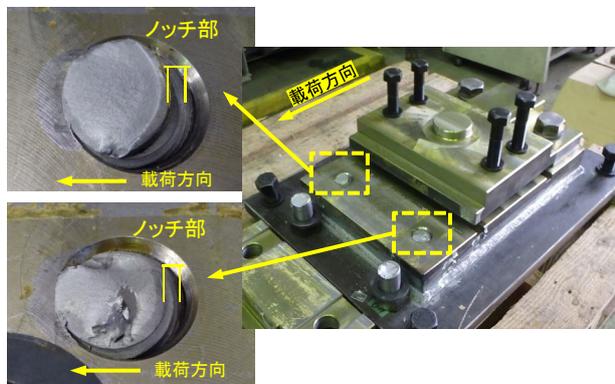


写真-3.3 実験後の損傷制御部品 (Case1)

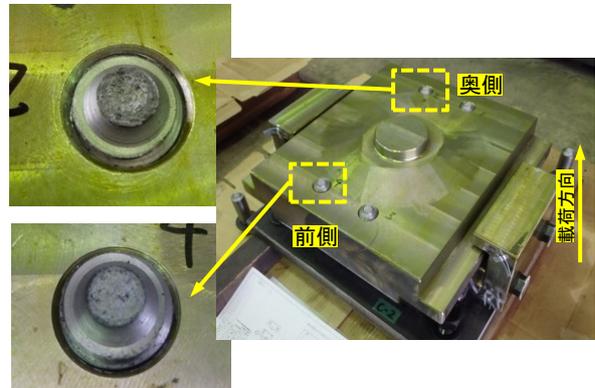


写真-3.4 実験後の損傷制御部品 (Case2)

した。

3.3.2 載荷実験の結果

水平抵抗用サイドブロックの取付けボルトにより損傷制御した支承 (Case1)

Case1の載荷実験後の供試体の状況を写真-3.3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、ボルトの変形が載荷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、ネジ部に曲げ変形が生じた跡がある。これは、図-3.2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。

桁取付ボルトにより損傷制御した支承 (Case2)

Case2の載荷実験後の供試体の状況を写真-3.4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ものではなく、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。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。

鉛直抵抗用サイドブロックの取付けボルトにより損傷制御した支承 (Case3)

Case3の載荷実験後の供試体の状況を写真-3.5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。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面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いるが、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。

サイドブロック本体により損傷制御した支承(Case4)

Case4の载荷実験後の供試体の状況を写真-3.6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、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。

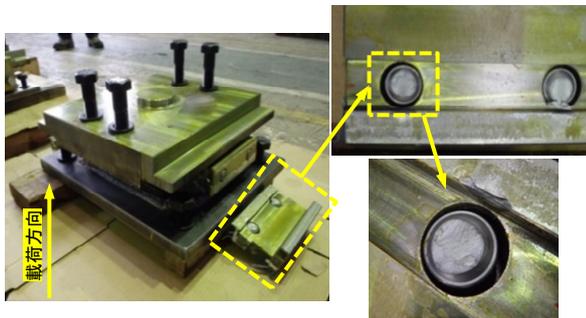


写真-3.5 実験後の損傷制御部品 (Case3)

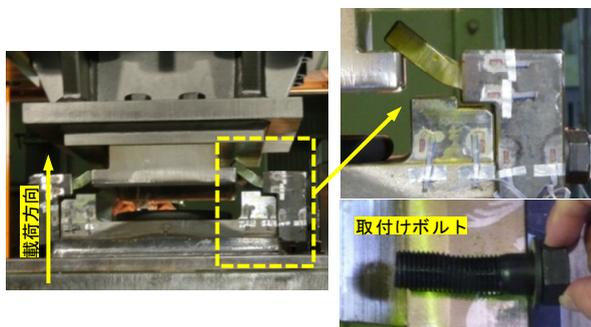


写真-3.6 実験後の損傷制御部品 (Case4)

4. 津波の影響を受ける橋の上部構造へのフェアリングの取り付け方法の検討

4.1 本章の概要

本章は、上部構造に作用する津波の影響を低減させる工法の構築を目的として、これまでに水路実験や数値解析で検討したフェアリングの上部構造への取り付け方法および取り付けに伴って生じる課題について検討する。

4.2 フェアリング装置および取り付け構造の検討

4.2.1 対象モデル

本研究では4主桁の鋼橋を対象とし、この橋梁へのフェアリングの取り付け方法について検討を行う。フェアリングは別途実施^{3,4)}した水路実験および数値解析より、段波状の津波が作用した場合に上部構造に作用する力を軽減させる効果が見られた半円形のフェアリングを対象として検討した。

4.2.2 フェアリングの設置方法

本研究ではフェアリングの設置方法に際し、図-4.1に示すように、フェアリングを橋梁本体に直接取り付ける方法を検討対象とした。この方法は、フェアリングは橋梁本体が支持するため、橋梁本体の自重増加により橋梁本体が所定の性能を満足しなくなる場合には、別途の対策が必要となる点に留意する必要があるが、既設の上部構造物に直接取り付けるため、用地や河川条件等の制約条件を受けにくい。

図-4.2は、鋼桁におけるフェアリングの設置構造の例を示したものである。本研究では、フェアリングの外形をなす「外装板」と、それを支持および本体へ接続する「骨組構造」からなる構造で、主桁にはボルトで接合する。また、フェアリングが鉛直方向に変位しないように、斜材を取り付けている。なお、コンクリート部位へ取り付けをする場合には、津波の影響を受ける橋が主に沿岸

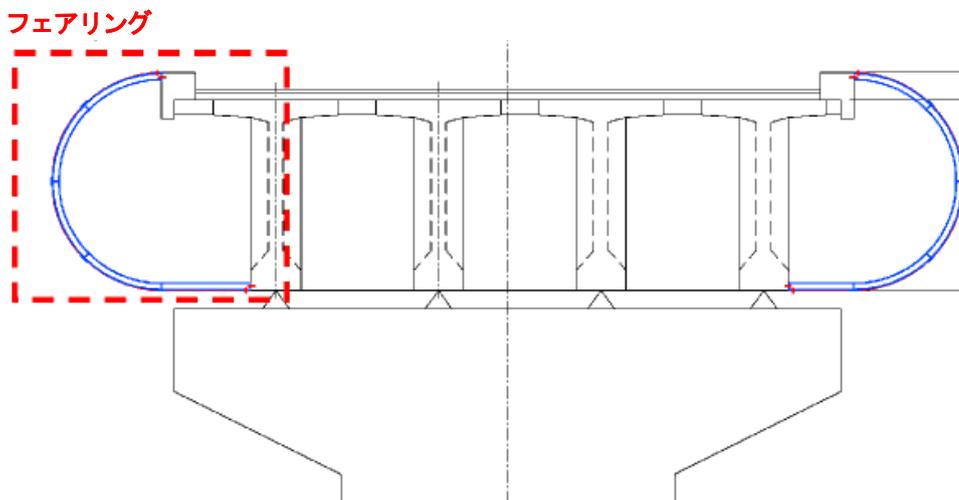


図-4.1 提案したフェアリングの設置構造

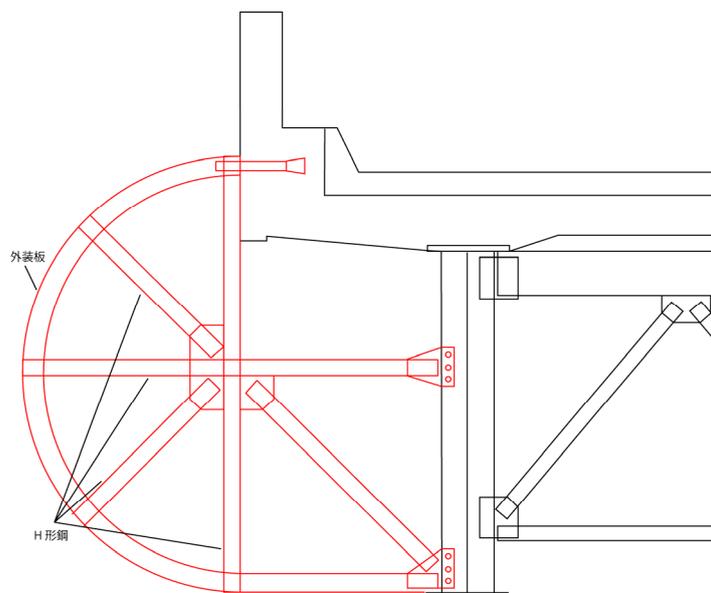


図4.2 鋼橋にフェアリングの設置した場合の例

表4.1 フェアリングへの適用が検討される材料

材料種別	名称	材質	重量 (kg/m ²)	引張強度 (Mpa)
金属系	ステンレス外装板	外皮材: SUS塗装板 芯材: ポリイノシアレートフォーム 内皮材: ガルバリウム鋼板	底面パネル w=12kg/m ² 側面パネル w=20kg/m ²	許容曲げ応力度 120MPa
	チタン外装板	外皮材: チタンパネル 芯材: ポリイノシアレートフォーム 内皮材: ガルバリウム鋼板	底面パネル w=10kg/m ² 側面パネル w=19kg/m ²	許容曲げ応力度 120MPa
	ZAM鋼板	亜鉛-6%アルミ-3%マグネシウム 前処理(プレメッキ)鋼板 +塗装コーティング	25.5kg/m ² t=3.2mm HK400-K27	400KPa(HK400)
FRP系	FRP板	ガラス繊維補強不飽和ポリエステル板	防食タイプ w=5.8kg/m ² 補強タイプ w=5.8kg/m ²	防食タイプ 60MPa以上 補強タイプ 290MPa以上
	ポリカーボネード板	ポリカーボネード	比重 4mm厚 w=4.8kg/m ²	55MPa以上
	FRP無機材料複合板	ガラス繊維FRP板 内装用オートクレープセメントボード	8.7kg/m ² FRP 1.6kg/m ² 無機 7.1kg/m ²	186MPa(FRP板)

付近にあることを踏まえ、塩害対策等の耐久性にも配慮した取り付け方法について留意する必要がある。

4.2.3 フェアリングに使用する材質の検討

フェアリングへの適用が考えられる材質を抽出し、それぞれの特性についてまとめた一覧を、表4.1に示す。

これより、構造的（強度）、耐久性、重量、経済性との観点から、鋼材系では「ZAM鋼板」、非鋼材系では「FRP無機材料複合板」の適用性が考えられる。

4.3 フェアリングを設置する場合の課題

4.3.1 構造上の課題

ここでは、フェアリングを橋梁本体に取り付けた場合の、橋梁本体に与える影響について検討を行った。

前述したように、フェアリングを取付けることで、フェアリングの重量が増加するため、橋梁本体に生じる応力度は取付け前に比べて大きくなると考えられる。

そのため、フェアリングを実際に上部構造に取り付ける場合には、フェアリングの重量を考慮して取り付けられる部位側の照査を実施し、特に張出床版付根部では許

容応力度を超過する場合には、当該部位の負担を小さくできるように、フェアリングの固定箇所を張出床版先端にしない等の対策等が必要となることに留意する必要がある。

4.3.2 維持管理上の課題

橋梁点検は近接目視により行われるが、フェアリングが桁側面に設置された場合、桁側面の近接目視ができなくなる可能性がある。このため、近接目視による点検時にフェアリングを一時撤去しなければならない場合、クレーン等の重機が必要となる等、煩雑な作業となるため現実的ではない。そのため、例えば、フェアリングを上下に開くことができるような構造としておく等の工夫が考えられる。この方法では、クレーン等の重機を使用する必要はなく、地震後の緊急点検等でも円滑に対応が可能になると考えられる。

5. まとめ

津波に対する橋の抵抗耐力の評価手法の提案、津波による上部構造への作用力の軽減対策の開発を目的として、津波による橋の破壊モードを確実化させる支承の提案、線支承の破壊形態の検証、さらにフェアリングの取り付け部の検討を行った。本研究の範囲内ではあるが、得られた知見は以下の通りである。

- ① 本実験に用いた線支承の橋軸直角方向の水平力に対する最終的な破壊形態は、下沓突起部の隅角部から下沓下面アンカーボルト穴に沿って損傷が生じるモードであった。亀裂が生じた下沓突起部の隅角部周辺においては、引張りひずみが最も卓越する結果となった。下沓突起部の隅角部の下面に位置する計測点においては、圧縮ひずみが卓越していることから、損傷部においては曲げの影響を受けているものと考えられる。
- ② 本実験に用いた線支承の上向き鉛直力に対する最終的な破壊形態は、ピンチプレートとアンカーボルトが鉛直方向に曲げ上がる状態となることにより、上部構造とピンチプレートとの引掛りが外れるモードであった。また、鉛直方向の剛性が低下した要因としては、アンカーボルトとピンチプレートのアンカー一部周辺の断面において降伏ひずみに達したことが原因と考えられる。
- ③ 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、本研究ではプロトタイプとして図-2.1 に示すような損傷制御型支承を提案した。

- ④ 損傷制御型支承の載荷実験の結果、全ての損傷制御型支承において、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。しかし、サイドブロック本体を損傷部位としたCase4では、設定したサイドブロック本体以外に、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。
- ⑤ フェアリングを上部構造側面に設置する場合、用地や河川条件等の制約条件の問題があるため、フェアリングを上部構造側面に直接取り付けする方法が橋脚を拡張する必要もなく有効であると考えられる。しかし、上部構造側面に直接設置するため、自重増加により取り付けられる側の部位に悪影響が生じないかについて検討する必要がある。
- ⑥ 上部構造側面にフェアリングが設置されていると、橋梁点検時の近接目視による調査が実施しにくくなる。この課題への対応策としては、フェアリングを上下に開く構造としておく等の工夫が必要である。

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) 炭村透, 張広鋒, 中尾尚史, 星隈順一:津波により橋に生じる作用力に及ぼすフェアリングの影響, 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.429-434, 2013.
- 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 (地震工学論文集第33巻), p.I_110-I_120, 2014.
- 5) 濱井翔太郎, 幸佐賢二, 佐々木達夫, 佐藤崇:孤立波形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.
- 6) 川崎佑磨, 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.
- 7) 田邊将一, 浅井光輝, 中尾尚史, 伊津野和行: 3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証, 土木学会構造工学論文集, Vol.60A, pp.293-302, 2014.
 - 8) 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(海洋工学), Vol.69, No.2, pp.I_821-I_825, 2014.
 - 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, pp.I_102-I_110, 2013.
 - 10) 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, 2015.
 - 11) 安原真人, 藤橋秀雄, 市川篤志, 水谷太作: 既設鋼鉄道橋の鋼製支承の水平耐力評価法に関する実験および解析的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.49A, pp.633-644, 2003.
 - 12) 中原正人, 池田学, 豊岡亮洋, 永井紘作: 鋳鉄製支承の地震時耐荷力特性と復元力モデル, 鉄道総合技術研究所報告, Vol.22, No.3, p.23-28, 2008.
 - 13) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, 1973.
 - 14) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2004.
 - 15) 中尾尚史, 森屋圭浩, 井上崇雅, 星隈順一: 気仙大橋の損傷跡から推定される上部構造の挙動メカニズム, 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, 2015.
 - 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) 野澤伸一郎, 小林将志, 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.
 - 22) (社)日本道路協会: 道路橋支承標準設計, 1994.

STUDY ON BEHAVIOR AND RESISTANCE CAPACITY OF BRIDGE UNDER TSUNAMI-INDUCED FORCE

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : Bridge and Structural Engineering
Research Group

Author : HOSHIKUMA Jun-ichi, NAKAO Hisashi

Abstract : In the fiscal year of 2014, the damage-controlled bearing for bridges subjected to the tsunami effect was proposed and the damage mode of the line bearing was discussed through the loading tests. Additionally, the connection details of the fairing with superstructure was studied.

Results of loading tests for the damage-controlled bearings showed that those bearings failed at the target element as expected in design. Results of loading tests for the line bearings clarified the failure mode for the horizontal and uplift forces. Those failure modes were compared with the damage observed at the tsunami-inundated bridges, to discuss the direction of the significant force applied to the line bearings.

Key words : tsunami, behavior mechanism, disaster mitigation, damage control bearing, fairing