

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

中尾尚史¹・森屋圭浩²・井上崇雅³・星隈順一⁴

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） 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）

³正会員 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）

⁴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発生した津波により、橋梁が流出する被害を受けた¹⁾。上部構造が流出することで、被災地への復旧が遅れるなどの2次的な被害も受けている。また、近い将来発生すると予想されている東海、東南海、南海地震では多くの橋梁が被害を受けると考えられ、橋梁の津波対策は喫緊の課題である。そのことを受け、水路実験^{2)~4)}や数値流体解析^{5)~7)}から、津波による上部構造の挙動や津波による力を軽減させるための検討が行われている。これらの研究は、主に津波作用力を軽減させる方法、すなわち防災に視点を置いた研究であるといえる。

一方、想定外の力が作用して上部構造が流出しても、仮橋等を架橋するところで、速やかな応急復旧を目指した考え方、すなわち減災に視点を置いた検討も東北地方太平洋沖地震の重要な教訓であると考えられる⁸⁾。その1つに、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が考えられる^{8),9)}。このようなシステムを考えるためには、津波により上部構造がどのような挙動を示すのか、上部構造流出までの挙動メカニズムを明らかにする必要がある。

現在、挙動メカニズムを明らかにするために、橋梁付近で撮影されていた津波映像から津波特性を推定し、その結果を基に、津波により上部構造に作用

する力と上部構造の抵抗力の算定と、上部構造の流出判定が行われている^{10)~12)}。しかし、これらの研究では、津波の特性や津波が上部構造に作用した直後の上部構造の挙動を把握することができても、その後上部構造がどのような挙動を示して流出したのか推測することは困難である。被災の事実関係としては、上部構造が流出したかどうかだけではなく、上部構造が水平、鉛直どちらの力を支配的に受けたのかを明らかにしておくことは、津波による橋の破壊モードを確実化させるシステムを構築するためにも重要なことである。

そこで本研究では、津波により上部構造が流出した気仙大橋を対象として、現場に残されたダンパーや支承の損傷痕跡を詳細に調査し、それらの事実関係の情報に基づき本橋の上部構造の挙動メカニズムを検証した。

2. 気仙大橋の概要

本研究で対象とする気仙大橋(図-1、写真-1)は、岩手県陸前高田市に位置し、橋長181.5m(スパン長は約36m)、幅員13.4mの3径間および2径間の連続鋼鈑桁橋である。本橋は平成17年に耐震補強工事が実施されており、鋼製支承(写真-2(a))から水平力分散型ゴム支承(写真-2(b)、図-2)に交換され、さらに減衰性を向上させるためにシリンダー系のダンパー(写真-3、図-3)が設置された。ゴム支承およびダン



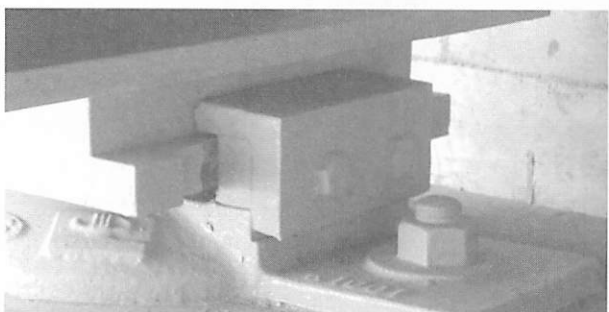
図-1 気仙大橋周辺の地図¹³⁾



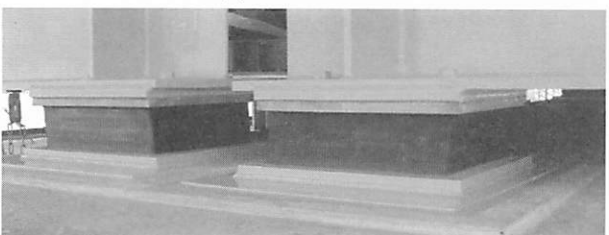
(a) 被災前(提供：東北地方整備局)



(b) 被災後
写真-1 気仙大橋全景



(a) 補強前



(b) 補強後(提供：東北地方整備局)
写真-2 支承写真

パーの設置位置および規格は図-4に示した通りである。

気仙大橋周辺は、図-1に示したように、津波により広範囲にわたって浸水し、本橋付近では15m程度浸水したと報告されている¹³⁾。また、幸左らの研究

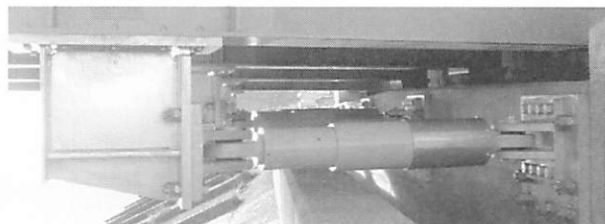


写真-3 ダンパー写真(提供：東北地方整備局)

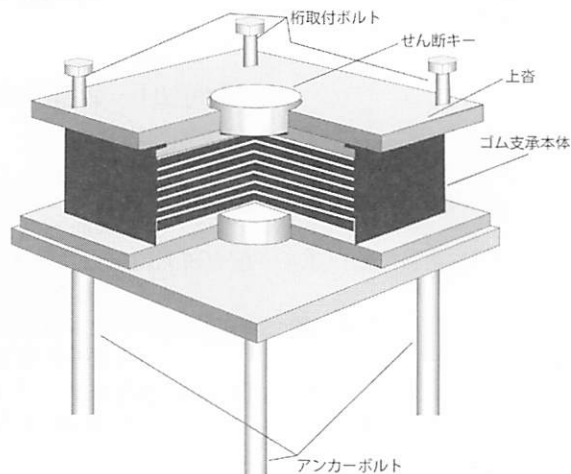


図-2 ゴム支承概略図

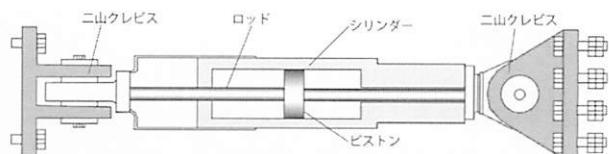


図-3 ダンパー概略図

により、本橋付近で波先端の速度が約6m/sで、徐々に水位が上昇する定常流状の流れを有する津波が発生していたことが、映像及び数値解析から報告されている¹¹⁾。

この津波により、全径間の上部構造が流出した(写真-1(b))。支承およびダンパーの損傷状況を図-5に示す。図より、支承はアンカーボルトの破断、桁取付ボルトの破断、ゴム支承本体の破断が見られている。また、ダンパーは取付け部やダンパー本体に損傷が見られている。

3. ゴム支承およびダンパーの被害分析

(1) ゴム支承の被害分析

本研究では、ゴム支承の被害分析に際し、ゴム支承各部位の終局耐力を算定した。ここでゴム支承各部位の終局耐力は道路橋支承便覧¹⁴⁾を参考に、次式で計算を行った。

水平方向の終局耐力

アンカーボルト

$$H_{u1} = A_{saH} \times \sigma_{tnd} / \sqrt{3} \times n_a \quad (1)$$

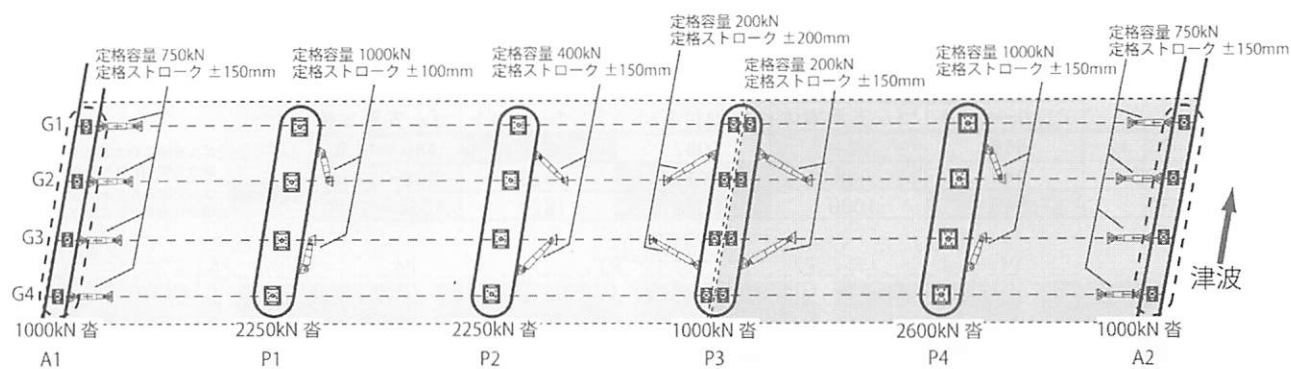


図-4 ダンパーおよび支承配置図

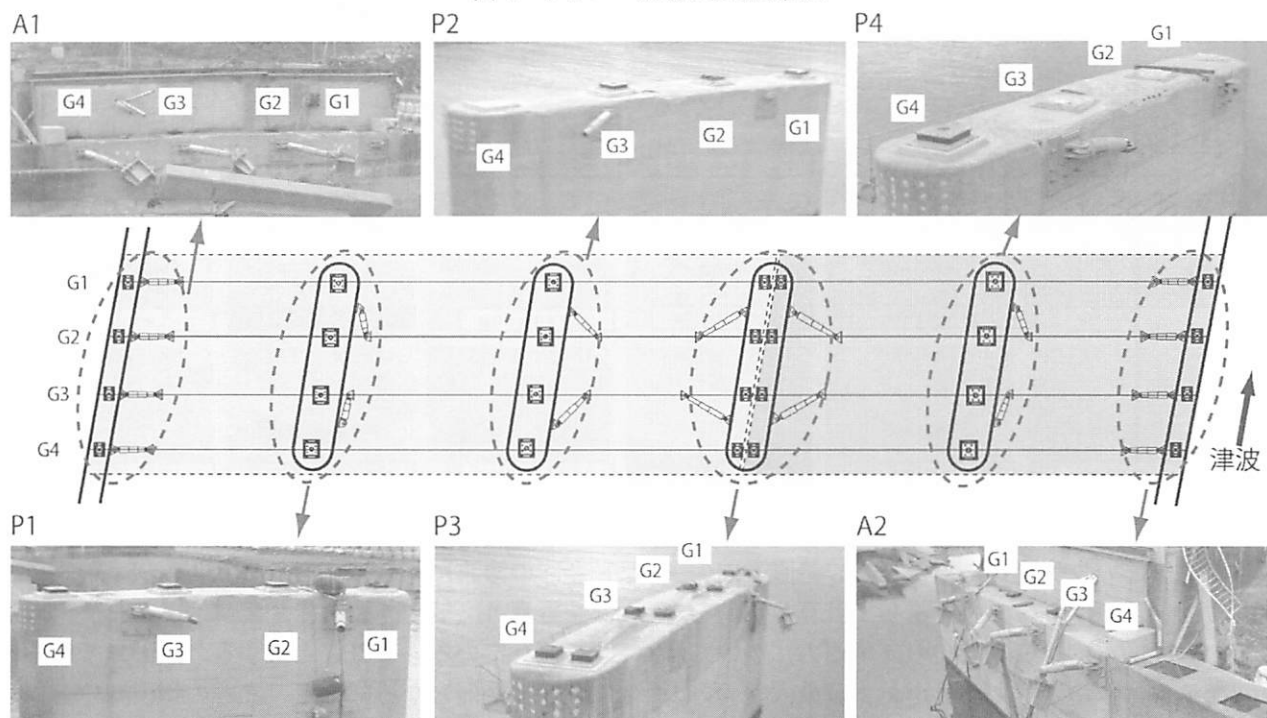


図-5 ダンパーおよび支承の損傷状況

ゴム支承本体

$$H_{u2} = A_{eH} \times G_e \times \gamma_u \quad (2)$$

鉛直方向の終局耐力

桁取付ボルト

$$V_{u1} = A_{ss} \times \sigma_{tus} \times n_s \quad (3)$$

アンカーボルト

$$V_{u2} = A_{saV} \times \sigma_{tua} \times n_a \quad (4)$$

ゴム支承本体

$$V_{u3} = A_{eV} \times \sigma_{tue} \quad (5)$$

ここで、 H_{u1} :アンカーボルトの橋軸直角方向の耐力、 H_{u2} :ゴム支承本体の水平耐力、 V_{u1} :桁取付けボルトの上向き耐力、 V_{u2} :アンカーボルトの上向き耐力、 V_{u3} :ゴム支承本体の上向き耐力、 A_{saH} :アンカーボルトのせん断に有効な断面積、 A_{eH} :ゴム支承本体の断面積、 A_{saV} :アンカーボルトの引張に有効な断面積、 A_{ss} :桁

取付けボルトの断面積、 A_{eV} :ゴム支承本体の引張に有効な断面積、 σ_{tua} :アンカーボルトの引張強さ(400N/mm²)、 σ_{tus} :桁取付けボルトの引張強さ(400N/mm²)、 σ_{tue} :ゴム支承本体の限界引張応力度、 n_a :アンカーボルトの本数、 n_s :桁取付けボルトの本数、 G_e :ゴム材料のせん断弾性係数、 γ_u :ゴム支承の破断時のせん断ひずみ(300%と仮定する)である。なお、ゴム支承は図-2で示したように、上沓の中央部にせん断キーがあり、水平力に対して、このせん断キーが力を受け持つ。そのため、桁取付けボルトには水平力はほとんど生じないため、桁取付けボルトの水平方向の終局耐力は考えていない。従って、セットボルトの破断に関しては、少なくとも鉛直力による桁取付けボルトの引張破断が始めに発生したと考えられる。

表-1は、ゴム支承各部位の終局耐力を算定した結果である。表中の色付きの枠は、最弱となる部位を示している。ゴム支承本体の限界引張応力度は文献14)によると3.0N/mm²~7.0N/mm²までの範囲でば

表-1 ゴム支承各部位の終局耐力

支承設置位置	支承耐力(kN)				
	水平方向		鉛直方向		
	アンカーボルト	ゴム支承本体	桁取付ボルト	アンカーボルト	ゴム支承本体
A1, P3, A2	569	384	1082	985	480～1120
P1,P2	940	908	1418	1629	908～2118
P4	940	1080	1082	1629	1080～2520

：ゴム支承本体の耐力が最小の場合に最弱となる部位
 ：ゴム支承本体の耐力が最大の場合に最弱となる部位

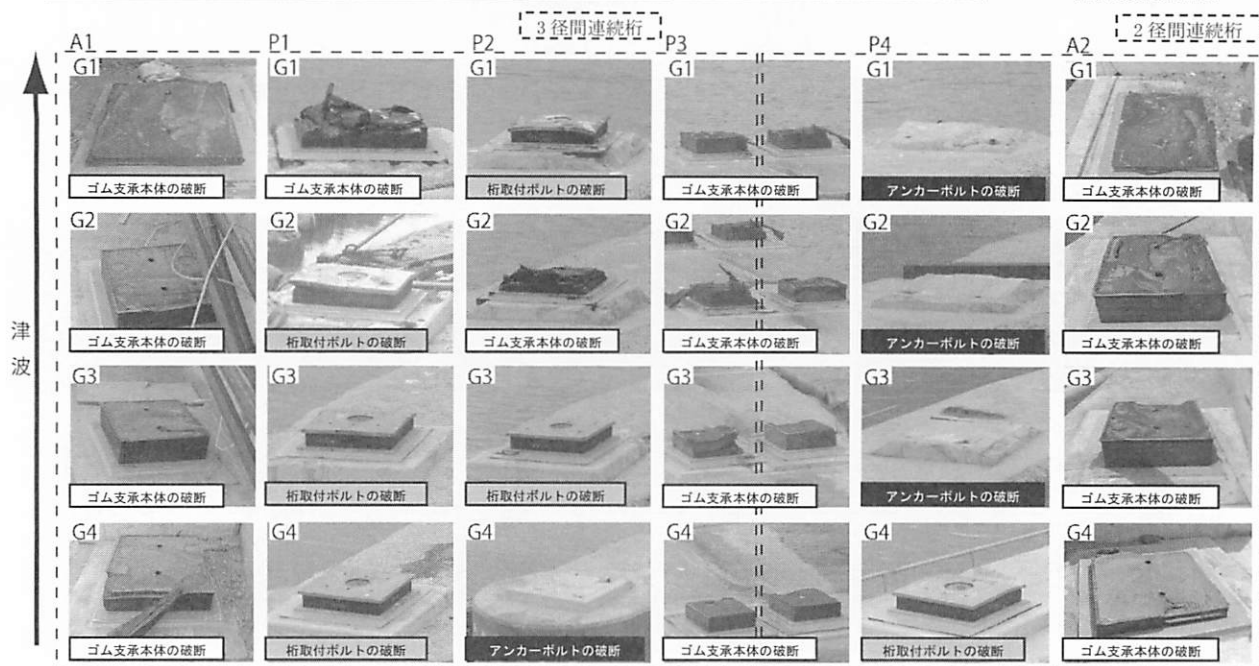


写真-4 支承損傷状況

つきがあるという報告があるため¹⁴⁾、鉛直方向の支承耐力は上記のばらつきを考慮して計算した値を示している。従って、鉛直方向の支承耐力については、ゴム支承本体の鉛直耐力が最小および最大の両方のケースを想定し、それぞれのケースに対して最弱となる部位を色付きで表中に示している。

表より、P1およびP2橋脚の支承は水平方向はゴム支承本体、鉛直方向は桁取付ボルトまたはゴム支承本体が最弱になっている。従って、ゴム支承本体が損傷している場合はどちらの力が支配的であったかは特定できないが、桁取付ボルトが損傷している場合は鉛直力が支配的に作用した結果であることが考えられる。P4橋脚は、水平方向はアンカーボルト、鉛直方向は桁取付ボルトまたはゴム支承本体が最弱となっており、アンカーボルトが損傷しているときは水平力、桁取付ボルトまたはゴム支承本体が損傷しているときは、鉛直力が支配的に作用した結果であると考えられる。A1、A2橋台やP3橋脚の支承は水平方向はゴム支承本体、鉛直方向はゴム支承本体またはアンカーボルトが最弱になっているため、アンカーボルトで損傷しているときは鉛直方向の力が支配的に作用していたと特定できるが、ゴム支承本体が損傷しているときは、どちらの力が支配的に作用していたかは、支承耐力からは特定できない。

今回の津波により被害を受けたゴム支承の損傷状況を写真-4に示す。図中で、津波は下から上に向かって流れている。表-1と比較すると、計算で得られた各部で最弱となる部位と、実際の損傷部位と概ね一致している。

P1橋脚の支承は写真より、G1はゴム支承本体、G2～G4は桁取付ボルトが破断している。表-1より、P1橋脚はG1は特定できないが、G2～G4は鉛直力が支配的であったと推定できる。P4については、G1～G3はアンカーボルト、G4は桁取付ボルトが破断していることから、G1～G3は水平力、G4は鉛直力が支配的に作用していたと推定できる。一方、P2橋脚の支承の損傷状況を見ると、G1とG3は桁取付ボルト、G2はゴム支承本体、G4はアンカーボルトが破断している。表-1より、G1およびG3は鉛直力が支配的に作用していたと推定できるが、G2はゴム支承本体で破断、G4は計算では最弱ではない部位で損傷しているため、どちらの力が支配的に作用していたかは推定できない。また、A1、A2橋台とP3橋脚についても、全てゴム支承本体で損傷しているため、水平および鉛直のどちらの力が支配的に作用していたかは特定できない。

以上のことから、一部のゴム支承の損傷状態から、どちらの力が支配的に作用していたかは推定するこ

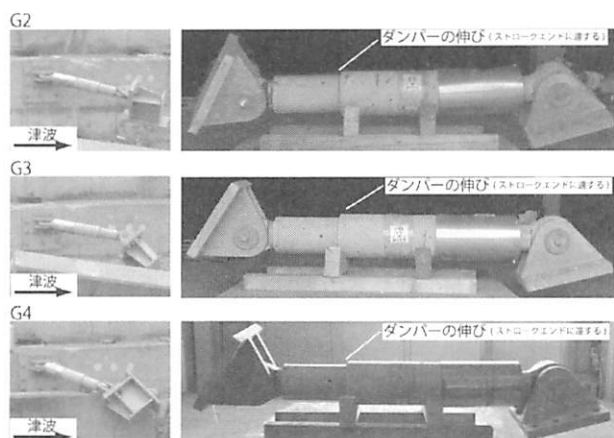


写真-5 ダンパーの損傷状況 (A1)

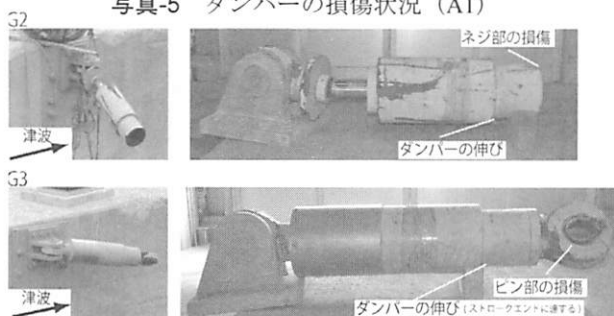


写真-6 ダンパーの損傷状況 (P1)

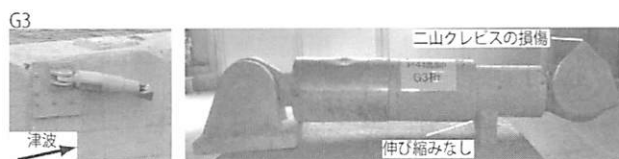


写真-7 ダンパーの損傷状況 (P4)



写真-8 ダンパーの損傷状況 (A2)

とができた。しかし、支承の損傷状態は各位置でばらつきがあり、上部構造がどのような挙動を示していたかまで、推測することはできない。そのため、ダンパーの損傷状態を分析し、支承の損傷状況の分析結果と併せて、上部構造がどのような挙動を示していたかを検討する。

(2) ダンパーの被害分析

前述したように、支承は桁取付ボルト、ゴム支承本体、アンカーボルトでの破断が見られ、損傷部位はばらついており、桁取付ボルトでの破断以外の支承の損傷状況から、水平、鉛直のどちらの力が支配的となって破壊したのかを特定することは困難である。そこで、気仙大橋で損傷を受けたダンパーを回収し、残存したダンパーの損傷から、ダンパーの挙動として明確な痕跡が残っていたA1G2～G4、P1G2およびG3、P4G3、A2G1からG4の10基のダンパーに着目して調査を行った。写真-5から写真-8は回収したダンパーの損傷状況である。なお、気仙大橋で使用されていたダンパーは、図-3で示したようなシリンダー型のダンパーであり、一定以上の力が生じなければ、引張および圧縮方向にストロークが動かない仕組みになっている。そのため、回収時の作業や運搬時等に伴ってストロークが動くことはないと考えられる。

まず始めに、3径間連続桁部のA1G2～G4のダンパ

ー（写真-5）に着目すると、これらのダンパーは向きは全て上流側に向いており、またストロークは全て引張方向のストロークエンドに達していた。この損傷状況から、A1側の上部構造端部は最終的には上流側に移動する挙動を示したことになる。一方、写真-6で示したP1G2およびG3のダンパーのストロークは引張方向に動いており、G3のダンパーではストロークエンドに達していた。これらのダンパーの取付け部は、図-3に示したように鉛直軸まわりに回転可能な構造となっているものの、クレビスに設けられた遊間の範囲で上向きにも動くことができる構造である。このような事実関係から、P1橋脚の支点位置では、上部構造が上向きに変位し、これに伴ってダンパーもストロークが伸びた状態となったが、クレビスの遊間が閉じ、ダンパー本体に曲げが作用するようになり、P1G2のダンパーはストロークが引張の状態のままネジ部で破壊したものと考えられる。また、P1G3のダンパーはその後上部構造が上流側に流れようとする動きの中で引張方向にストロークエンドに達し、最終的にクレビス部のピンで破損したのではないかと考えられる。

次に左岸側の2径間連続桁であるが、写真-7で示したP4G3のダンパーは、ストロークがほぼ中央位置のままで、二山クレビス部において損傷が生じた。このダンパーも上向きの変位が生じたと考えられるが、ダンパーの面外方向へ追従可能な範囲を超えた

ために、ストロークが引張側に伸びる前に、クレビス部に曲げが作用して、損傷に至った可能性が考えられる。写真-8で示したA2G1のダンパーは、ストロークが圧縮方向に縮み、ストロークエンドに達していた。さらに、A2G2～G4のダンパーは引張方向に伸び、ストロークエンドに達していた。このような損傷状態から、2径間連続桁は上向きへの変位と鉛直軸まわりの回転挙動が生じ、最終的に上流側に移動したと推測される。

4. 損傷状況から推測される上部構造の挙動

本章では、情報が得られた支承およびダンパーの損傷状況の事実関係から、津波による上部構造の挙動を推測した。なお、本研究では、上部構造は剛体と仮定している。

(1) 3径間連続桁の推測される挙動

図-6は3径間連続桁部の上部構造の挙動イメージである。推定される上部構造の挙動は以下の通りである。

- ①津波が津波作用側耳桁および床版張出部底面に作用する
- ②上向きの力により、津波作用側が浮き上がるような挙動を示す（P1G3ダンパー、P1G4支承の損傷状況より）

このとき、G4主桁全体が浮き上がるような挙動を示したのか、P3橋脚部が主として持ち上がるような挙動を示したかは、得られた情報からは特定できない。また、桁が持ち上がるような挙動を示したことで、A1G4およびP3G4の支承についても、鉛直力でゴム支承本体が損傷したと考えられる（ただし、A1G4の支承は、G4主桁全体が浮き上がるような挙動を示した場合）。

- ③上部構造が上流側に水平移動するような挙動を示す（A1G2～G4ダンパーの損傷状況より）

この挙動により写真-9に示したように、上部構造が上流側に水平移動（下向きに押されるような挙動も同時に作用している可能性もある）したことで、下フランジにより橋台天端が削られた痕跡が見られる。

(2) 2径間連続桁の推定される挙動

図-7は2径間連続桁部の上部構造の挙動イメージである。推定される上部構造の挙動は以下の通りである。

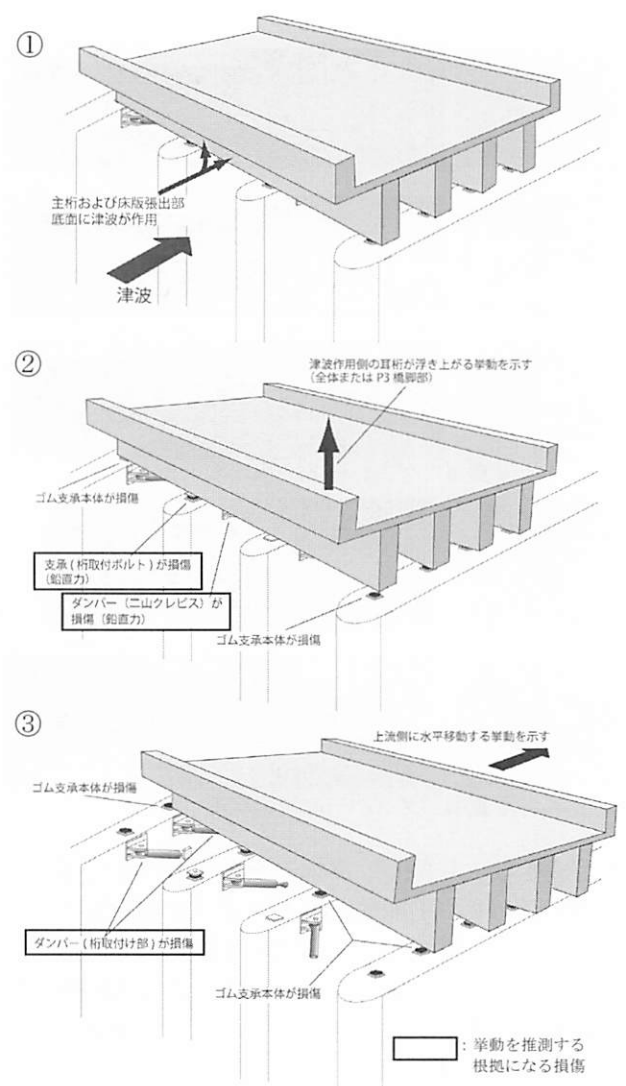


図-6 推測される上部構造の挙動(3径間連続桁)

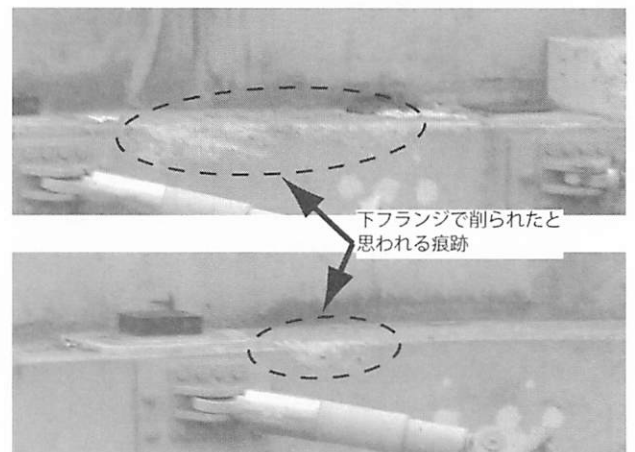


写真-9 A1 橋台天端の損傷痕

- ①津波が津波作用側耳桁および床版張出部底面に作用する
- ②上向きの力により、津波作用側が浮き上がるような挙動を示す（P4G3ダンパーの損傷状況より）

このとき、G4主桁全体が浮き上がるような挙動を示したのか、P3橋脚部が主として持ち上がるような挙動を示したかは、得られた情報からは特定

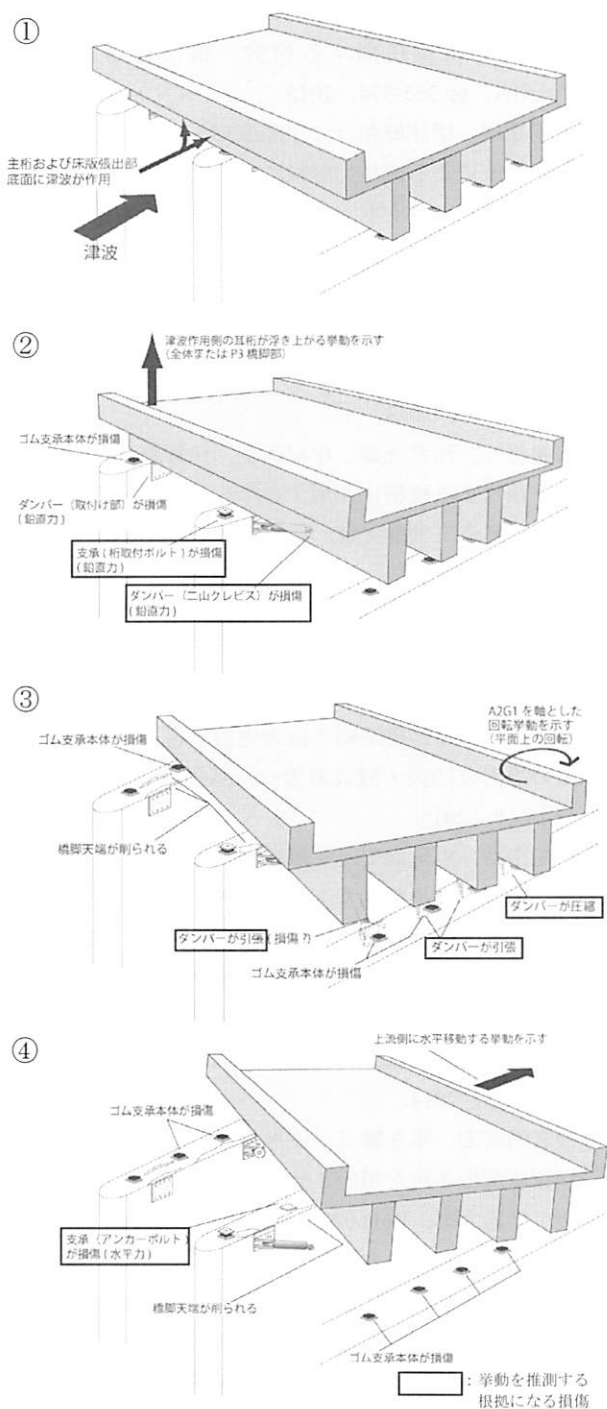


図-7 推測される上部構造の挙動(2 径間連続桁)

できない。この挙動で、P3G3ダンパーは鉛直力により橋脚取付け部で損傷したと考えられる。

③水平力により、上部構造がA2橋台上流側 (G1側) 付近を軸とする回転挙動を示す (A2G1ダンパー、P4G1～G3支承の損傷状況より)

写真-10に示したように、A2G1に衝突痕や、せん断キーに損傷痕が見られることから、上部構造が回転したことにより生じたものと考えられる。また、A2G4ダンパーは、上部構造の回転により伸びが発生し、損傷した可能性がある。

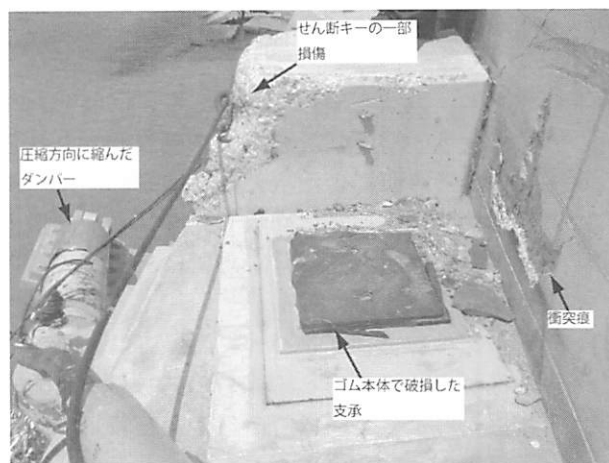


写真-10 A2 橋台の損傷痕



写真-11 P4 橋脚の損傷痕

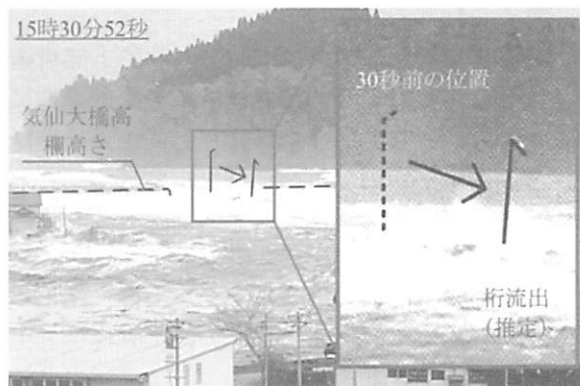


図-8 上部構造流出の様子¹¹⁾

④上部構造が上流側に水平移動するような挙動を示す (A2G2～G4ダンパー、P4G1～G3支承の損傷状況より)

写真-11に示すように、上部構造が水平移動することで、橋脚天端が削られた可能性がある。

以上のことから、上部構造は、始めは上向きの力 (鉛直力) が支配的に作用して上部構造の津波作用側が持ち上がるような挙動を示し、最終的には水平力が支配的に作用し、水平移動することで上流側に流出したと考えられる。なお、水平移動で流出したことは図-8で示したように、幸左らが映像分析した結果¹¹⁾とも一致している。

5. まとめ

本研究では、気仙大橋を対象として、回収したダンパーや、支承の損傷状況を詳細に調査し、これらの事実関係から津波による上部構造の挙動メカニズムについて検討を行った。回収したダンパーの損傷状況や支承の損傷状況(写真)からではあるが、得られた知見は以下の通りである。

- (1) 一部の支承およびダンパーについては、その損傷状況から、水平力と鉛直力のどちらが支配的に作用して生じた損傷であるのかを特定することができた。
- (2) 3径間連続桁、2径間連側桁共にまず津波作用側のG4桁を支持する支承部に上向きの力が支配的に作用し、当該桁に取り付けられていたダンパーや支承が損傷し、その後G4桁側が持ち上がるような挙動になったと考えられる。
- (3) 2径間連続桁は、A2G1付近を軸とする平面的な回転挙動となり、この時に、A2G1付近には桁衝突による衝突やせん断キの損傷が生じたと考えられる。
- (4) 津波の影響により上記(2),(3)の順に上部構造が挙動した後、最終的に両連続桁の上部構造には水平方向に支配的な力が作用し、上部構造は上流側に水平移動する挙動となって流出したと考えられる。

謝辞：本研究で検証に用いたダンパーは、国土交通省東北地方整備局道路部の御協力により提供していただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 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) 佐藤崇、幸左賢二、佐々木達生、濱井翔太郎：橋台に作用する津波作用力に関する実験的検討、構造工学論文集、Vol.61A, pp.235-245, 2015。

- 3) 山内邦博、市東素明、幸左賢二：橋桁に作用する定常的な流水荷重に関する検討、構造工学論文集、Vol.61A, pp.365-374, 2015。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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、構造工学論文集、Vol.60A, pp.293-302, 2014。
- 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.369, No.4(地震工学論文集第32巻)、I_42-I_54, 2013。
- 8) 星隈順一：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。
- 9) 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、2015。
- 10) 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, 2014。
- 11) 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。
- 12) 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(地震工学論文集第34巻)(掲載決定)
- 13) 原口強、岩松暉：改訂保存版東日本大震災津波詳細地図、pp.27-28, 古今書院, 2013。
- 14) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧、2004。