

宮古橋周辺での津波の特性と橋に及ぼした影響の評価

中尾 尚史¹・森屋 圭浩²・榎本 武雄³・星隈 順一⁴

¹正会員 独立行政法人土木研究所専門研究員 構造物メンテナンス研究センター
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: nakao55@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所交流研究員 構造物メンテナンス研究センター
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: y-moriya44@pwri.go.jp

³正会員 株式会社ビービーエム 開発本部 (前 独立行政法人土木研究所 交流研究員)
(〒103-0027 東京都中央区日本橋3-11-1 HSBCビルディング3階)
E-mail: t-enomot@mgb.gr.jp

⁴正会員 独立行政法人土木研究所上席研究員 構造物メンテナンス研究センター
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: hosikuma@pwri.go.jp

本論文は、岩手県宮古市の閉伊川の河口付近に架かる宮古橋付近での津波の状況を基に、その津波に対して宮古橋の上部構造が流出しなかったメカニズムを明らかにすることを目的として、周辺で撮影されていた映像の分析及び数値解析により検討を行った。その結果、宮古橋付近には波先端の勾配が非常に小さな波が発生し、その波が徐々に上昇することで宮古橋に作用したことがわかった。また、数値解析からは、津波が上部構造に作用した直後に、床版張出部底面、津波作用側の耳桁、および桁間に生じる圧力により、水平方向の力および鉛直方向の力が最大になるが、それらの力は上部構造を流出させるに必要な値以下であったことがわかった。

Key Words : tsunami, Miyako bridge, hydrodynamic pressure, tsunami-induced force

1. はじめに

2011年に東北地方で発生した地震による津波は多くの橋梁に被害を与えたり、また、橋梁が流出したことにより、緊急輸送路としての機能回復に時間を要する等の支障が生じ、橋梁の津波への対策が緊急の課題になっている。

津波の影響によって橋に生じる挙動のメカニズム等については、著者らはこれまでに、水路実験や数値解析により津波が作用したときの上部構造の挙動メカニズムを研究し、段波状の津波の場合、主桁側面に作用する水平方向の圧力と床版張出部底面に作用する鉛直上向きの圧力が支配的となって主桁を支持している支承部に作用力が生じること、水位が漸増する津波の場合には浮力が支配的となって支承部に鉛直上向きの作用力が生じることについて報告してきているところであるが²⁾³⁾、メカニズムの検証にあたっては、実橋での上部構造の流出の有

無や損傷状況等のフィールドデータが極めて重要な情報となる。このようなフィールドデータを活用する場合には、当該橋の位置においてどのような特性の津波が生じたのかを推定する必要があるが、地震動のような既存の観測ネットワークシステムもないため、対象とする橋の周辺でたまたま撮影されていた映像を収集し、これら进行分析することにより、その付近で発生した津波特性や、津波が上部構造に作用したときの挙動について検討がされているのが実情である⁴⁾⁵⁾。

ただし、偶然に撮影されていた映像であっても、津波が橋の上部構造に作用する前後の様子を鮮明な映像で記録できている事例はほとんどない。また、このような映像に基づく検討も、津波により流出した橋を対象としており、流出しなかった橋について検討された例はない。このように、津波により流出を免れたメカニズムを検討することは、今後の対策を考える上でヒントになる可能性もあり、有用なことであると考えられる。

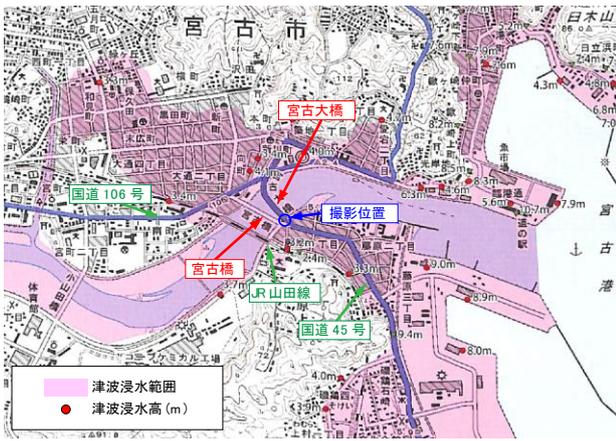


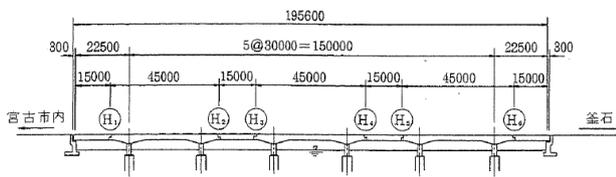
図-1 宮古橋周辺の地図⁹⁾



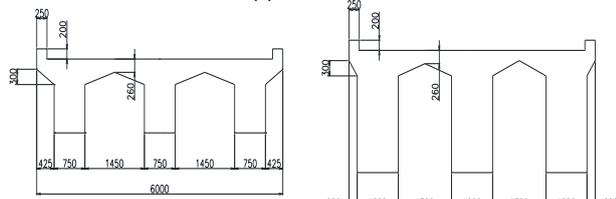
(a) 全景



(b) 地震発生時の宮古橋
写真-1 宮古橋



(a) 側面図



(b) 断面図
(支間部)

(c) 断面図
(中間支点部)

図-2 宮古橋構造一般図

そこで本研究では、津波が橋の上部構造に作用する前後の様子が鮮明な映像で記録されていた宮古橋（岩手県宮古市）に着目し、この周辺で発生した津波の特性と津波が上部構造に作用したときの上部構造の挙動メカニズムの検討を行った。そして、得られた結果から、上部構造が流出しなかった主な要因を推定した。



(a) 欄干の流出



(b) 盛土の流出



(c) 単管の流出



(d) 上部構造の流出 (JR山田線)

写真-2 宮古橋およびその周辺の被害状況 (2011.3.12撮影)

2. 宮古橋周辺の映像分析

(1) 宮古橋とその周辺の被災状況

図-1⁹⁾は宮古橋の立地条件と周辺の地形条件を示したものである。宮古橋は、旧国道45号にあり、閉伊川の河口部に近い位置に架かっている橋である。宮古橋のすぐ下流側には宮古大橋、上流側にはJR山田線の橋梁がある。図中の赤色の範囲は、津波により浸水した範囲であり、赤色のプロットはそのときの津波の浸水高である。宮古橋周辺は3m～4m程度の津波浸水高であったことがわかる。

宮古橋の全景および構造図を写真-1、図-2に示す。宮古橋は、全長195.6m、全幅員7.6mのRCゲルバーT桁橋であり、昭和9年に架設されている。重量は1径間あたり

4361.2kNである。架設年次や支承部付近の構造の状況から、本橋の支承部は、鉛直力伝達機能のみが確保されるように設計されていたと想定されるが、上部構造の慣性力が下部構造に伝わるような構造となっているかどうかは詳細に調査をしないとわからない。

東北地方太平洋沖地震が発生した時は、宮古橋は側道橋の補修工事のため、下流側の側道橋と本橋の欄干を撤去しており、単管が組まれている状態であった(写真-1(b))。

津波による宮古橋とその周辺の被災状況を写真-2に示す。2011年東北地方太平洋沖地震により発生した津波では、上部構造および上流側の側道橋への被害はほとんど見られなかったが、左岸側2径間分の欄干および盛土が流出した(写真-2(a), (b))。また、工事により設置していた単管は津波により流されている(写真-2(c))。左岸側の欄干の流出および上部構造に残された単管の残骸状況より、左岸側に漂流物が欄干および単管に引っかか

ったために流出したと考えられる。また、上流側に架設されているJR山田線の鉄橋は、津波により左岸から5径間分が流出する被害を受けている(写真-2(d))。

(2) 宮古橋周辺での津波の特性

実際に宮古橋にどのような津波が作用したのか、その特性を明らかにするため、撮影された写真を基に分析を行った。写真-3は宮古橋付近で発生した津波を写真撮影したものである。撮影位置は、図-1で示した宮古大橋の上から撮影されている。

地震発生後の津波が来襲する前(15:12)は、河床が一部見えており、水深はほぼ0に近いくらい低かったことがわかる(写真-3(a))。この撮影から約3分後(15:15, 写真-3(b))、津波の先端を見ることができる。この写真から、宮古橋付近の位置では、段波状の津波ではなく、波勾配が小さい波が到達したことがわかる。

そこから1分も経たないうちに、波の先端は宮古橋の



(a) 15:12撮影



(b) 15:15撮影



(c) 15:15撮影



(d) 15:17撮影



(e) 15:19撮影



(f) 15:22撮影

写真-3 宮古橋へ津波が作用している様子



(a) 船の衝突 (15:16撮影)



(b) 上部構造の上を通過している船 (15:19撮影)

写真4 船の衝突および上部構造を通過している様子 ((a), (b)の船は異なる船)

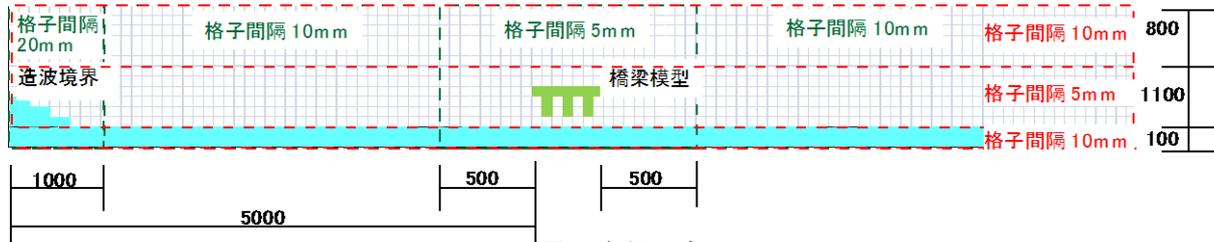


図-3 解析モデル

下を通過している (写真-3(c))。分単位までしか撮影時間は特定できないが、図-1で示した地図より波先端の移動距離を求めた結果、最低でも分速50m以上はあったと推測される。

15:17頃 (写真-3(d)) になると、水位が徐々に上昇していることがわかる。写真から津波の上昇速度を算定するのは困難ではあるが、各地点における上昇距離を求めて上昇速度を算定すると、平均で分速1.1m程度になる。水位上昇により左岸側の桁に船が衝突している。この衝突よりも少し前にも別の船が衝突しており (その後、この船は桁下を通過したと思われる)、この箇所には複数の船が衝突したと考えられる (写真-4(a))。

津波が宮古橋の下を通過し始めてから4分程度で、津波は宮古橋の桁下に衝突し、左岸側で波が越波している (写真-3(e))。波が越波したことにより、先ほど桁に衝突した船 (写真-3(d)) は、上部構造の上を通過している (写真-4(b))。この船が上部構造の上を通過したことで、欄干および単管に船が衝突し、欄干と単管が流出したと考えられる。一方、右岸側は波が越波していない。

このような津波の特性となった要因としては、河川が左岸側に湾曲していること、右岸側脇にある道路に津波が遡上したことで、津波が分散したことなど考えられる。津波が上部構造に衝突した後も (15:22頃、写真-3(f))、左岸側は越波している状態である。

このことから、宮古橋の付近に到達した時の津波は、波の勾配が小さい波であったことがわかった。そして、波の先端が桁下を通過した後、遡上しながら徐々に水位が上昇し、上部構造に作用したと考えられる。

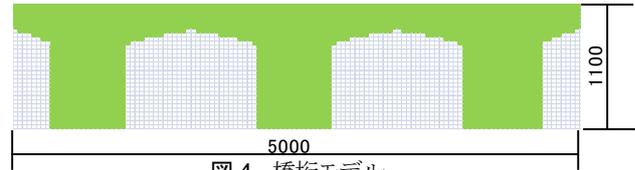


図-4 橋桁モデル

3. 数値解析による津波作用時の宮古橋の挙動メカニズム

前章の映像分析により、波の勾配が小さい波が上部構造に作用したことがわかった。本章ではこの知見を基に、宮古橋に津波が作用したときの挙動メカニズムについて数値解析により検討する。

(1) 解析概要

本研究では、解析ソフトCADMAS-SURF/3Dを用いて解析を行った¹⁰⁾。本解析ソフトは、著者らが別途実施した水路実験の再現解析において、一定の精度が得られていることが確認されている⁴⁵⁾。

解析モデルを図-3に示す奥行きを単位長さとする2次元モデルで解析を実施した。水平方向の格子間隔は、造波境界から1mまでを0.02m、模型から前後0.5mの範囲を0.005mそれ以外を0.01m、鉛直方向の格子間隔は、河床から0.1mの範囲を0.01m、そこから1.1mの範囲を0.005m、それ以外の範囲を0.01mに設定した。

本研究での解析モデルは、宮古橋の径間中央部の断面 (図-2(b)) を図-4に示すように1/10スケールでモデル化し、造波境界から5m、河床から0.5m離れた位置に設置した。また、主桁と床版の接合部はハンチがとられた形

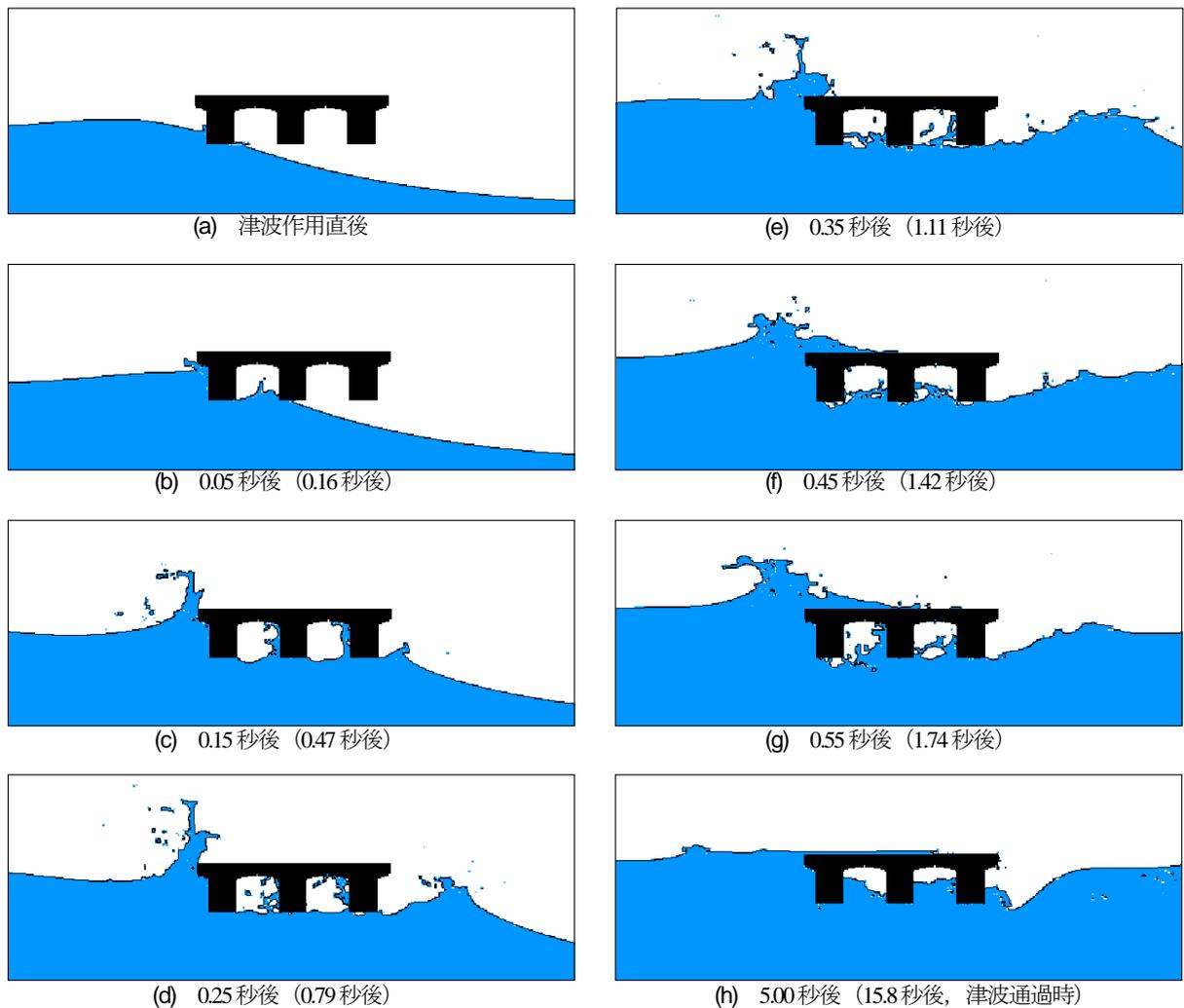


図-5 橋梁周辺の流況

状となっていることから、この特性を反映するために積み木型の形状でモデル化した。ハンチの影響を比較検証するため、ここではハンチのない3主桁断面についても解析を行った。なお、本解析では空気圧の影響も考慮している¹⁰⁾。

解析で発生させる波は、これまでに著者らが実施した既往の解析を参考にして⁹⁾、徐々に津波高を増加させて、一定の時間の後に目標とする津波高および津波速度（流速）に達し、それ以降は一定になるような波を発生させた。流速は以下の式により算出した。

$$U = \frac{\zeta}{h + \zeta} \sqrt{\frac{g(h + \zeta)(2h + \zeta)}{2(h + \zeta - \eta\zeta)}} \quad (1)$$

式中の h は初期水位(m)、 ζ は目標津波高(m)、 η は抵抗係数であり、ここでは1.03に設定した¹⁰⁾、 g は重力加速度(9.8m/s^2)である。本研究では、右岸側での津波の作用状況を再現できるように、初期水深と津波高を調節し、初期水深を0.4m、津波高を0.3m、目標とする津波高にする

時間を2秒にして解析を行った。なお、津波が上部構造に作用した直後の挙動メカニズムに着目しているため、上部構造に作用する前の流れの状況は再現していない。

(2) 津波作用時の上部構造の挙動メカニズム

a) 上部構造周辺の流れの様子

図-5は津波が橋桁に作用したときの流れの様子を示している。ここでは津波が上部構造に作用してから5.0秒（実際の時間に換算すると約15.8秒）までを示した。

津波が上部構造に作用してから0.05秒後（図-5(b)）に床版張出部底面に津波が作用している。そして0.15秒後（図-5(c)）に上部構造に作用した津波が上昇し、同時に桁間に水が流入している。その後0.35秒から0.45秒あたりに（図-5(e),(f)）、飛び跳ねが水が床版部に着水している。またこの辺りになると、主桁下部からの剥離が見られる。津波通過時（5.00秒後、図-5(h)）になると、越波する水量はほとんどなくなっている。

著者らが別途行った徐々に水位が上昇した津波が発生したときの上部構造に作用するときの上部構造の挙動についての水路実験により、桁間が開いている構造では、

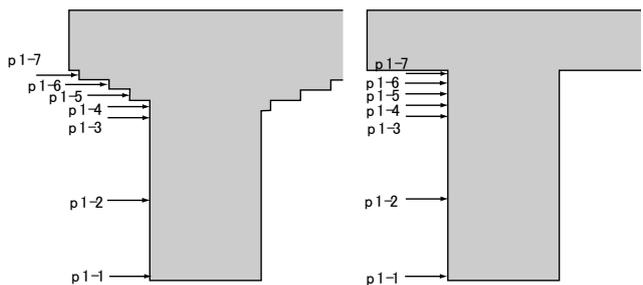
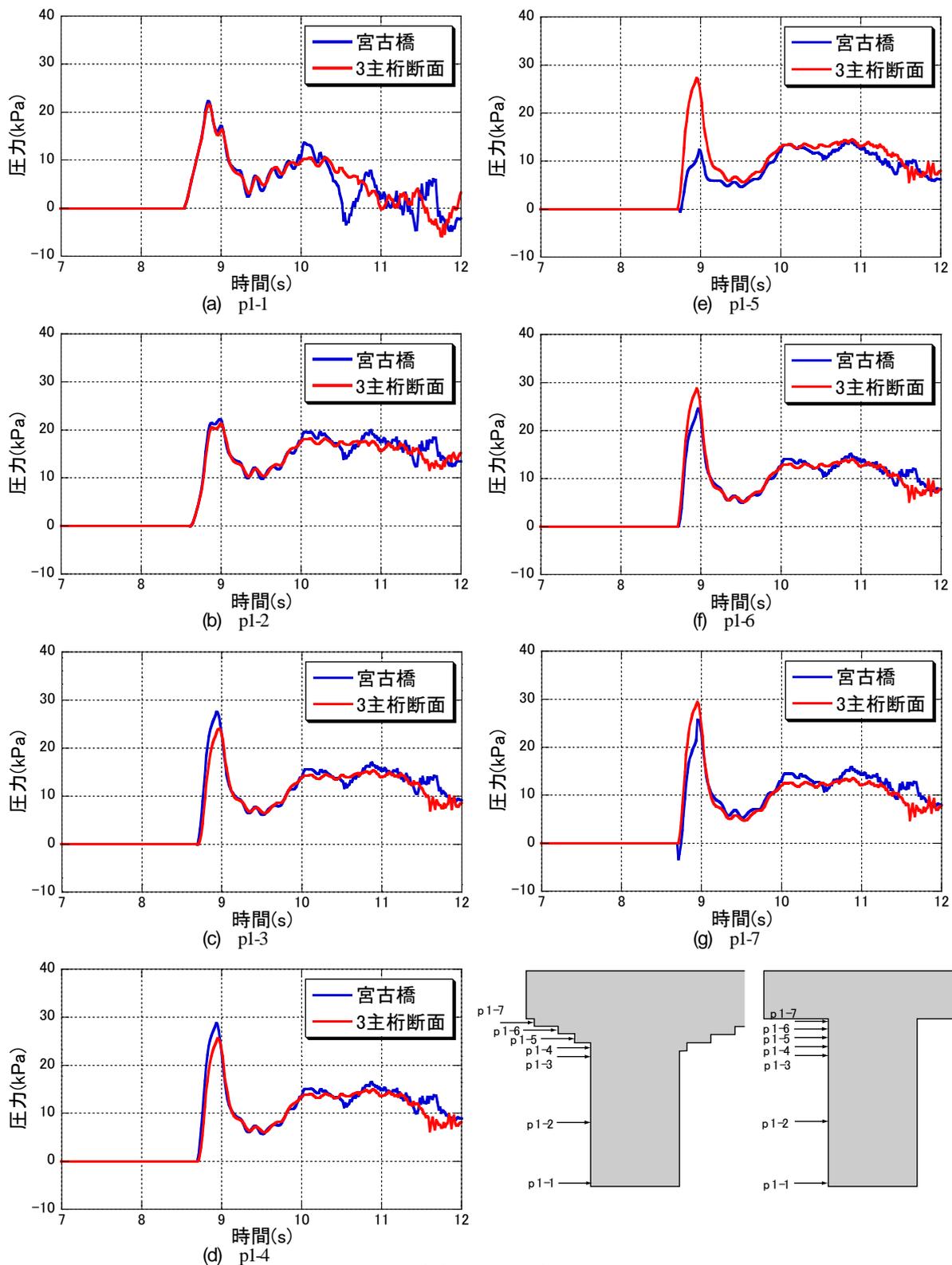


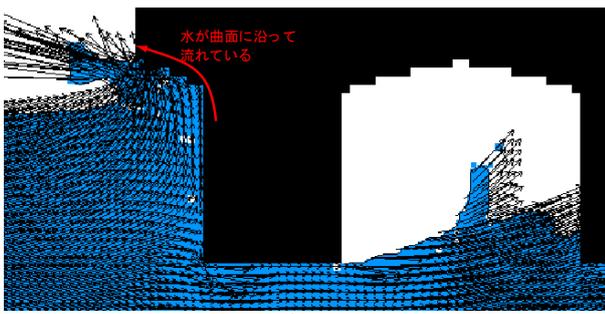
図-6 津波作用側の主桁に生じる圧力

空気たまりが発生するため、上部構造に生じる浮力が増大することがわかっている。しかし、今回発生した、波の勾配が小さい波では、桁間が開いていても、桁間に水が流入するため、空気溜りはほとんど発生しないことがわかった。この結果として、上部構造に生じる浮力も小さくなったと考えられる。そのため、たとえ桁間が開いている構造でも、桁間に水が流入するような対策を施

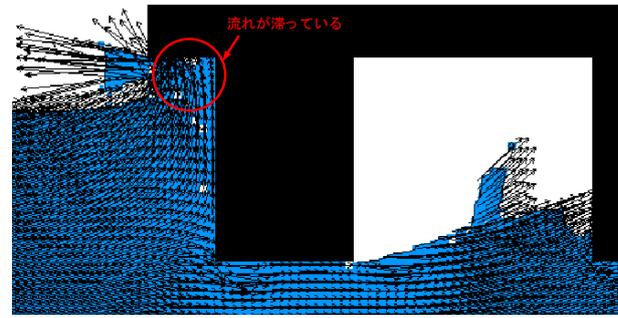
すことができれば、津波により生じる浮力を軽減させる効果があると考えられる。

b) 橋梁各部位に生じる圧力

図-6および図-7は、上部構造の各部位に生じる圧力の時刻歴波形である。横軸は時間、縦軸は圧力である。著者らがこれまでに別途実施した水路実験により、支承反力に最も影響を与える位置が、津波作用側の主桁およ

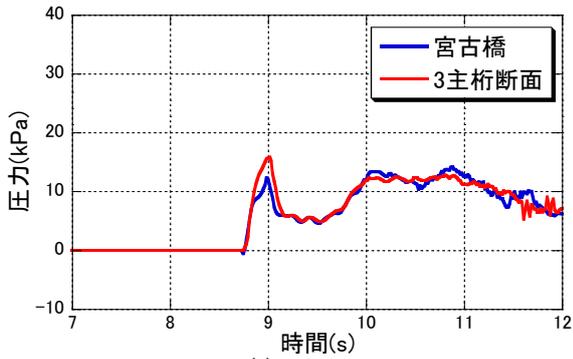


(a) 宮古橋

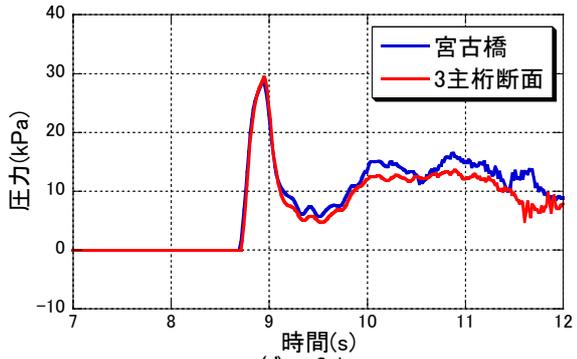


(b) 3主桁断面

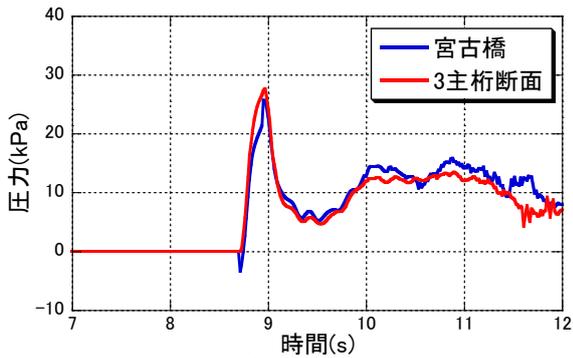
図-7 主桁に生じる圧力が最大になるときの流れの様子



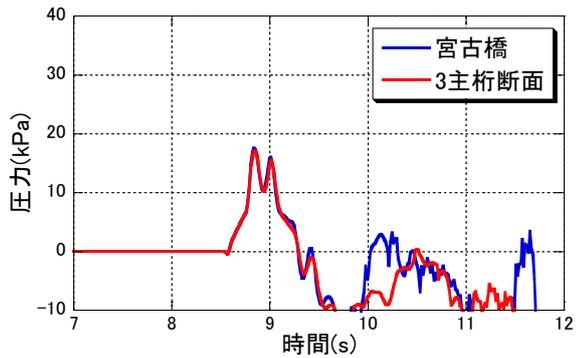
(a) p2-1



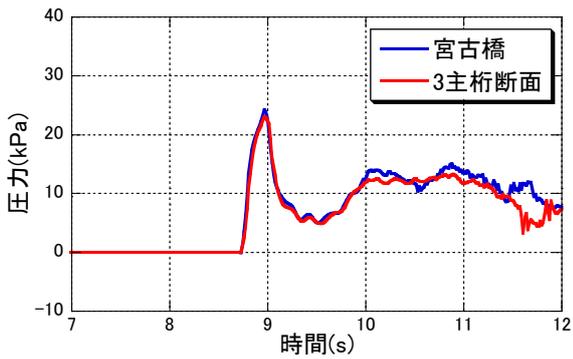
(d) p2-4



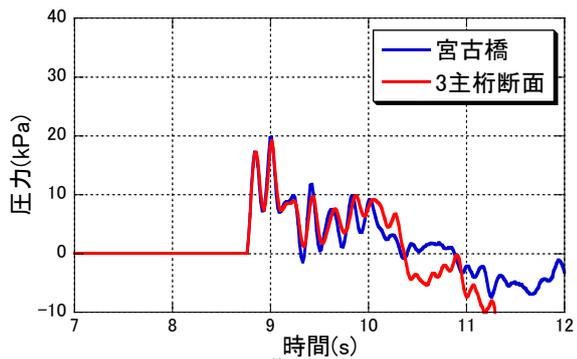
(b) p2-2



(e) p2-5



(c) p2-3



(f) p2-6

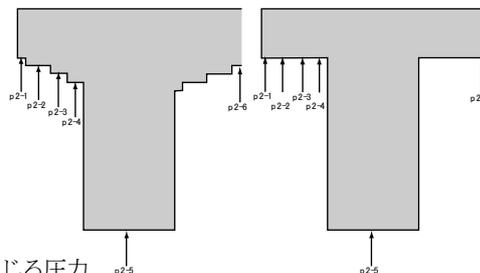


図-8 床版張出部底面に生じる圧力

び床版張出部底面であったため⁸⁾、本論文でもこの位置に生じる圧力を示した。ここでは、主桁と床版接合部にあるハンチの有無の影響を比較できるように図示している。

図-6に津波作用側の主桁に生じる圧力の時刻歴波形を示す、主桁下方に生じる圧力 (p1-1) は、宮古橋の上部構造の断面と3主桁断面としてモデル化した場合との間で有意な変化はない。主桁中央付近 (p1-2) から曲面部すぐ下 (p1-4) 辺りになると、宮古橋の断面の方が3主桁断面よりも若干大きくなっている。逆にハンチ部に生じる圧力 (p1-5~p1-7) は3主桁断面の方が大きくなっており、特に3主桁断面のp1-5地点に生じる圧力は、宮古橋の断面の場合に生じる圧力の約2.5倍になっている。主桁に生じる圧力が最大となる時刻の流況を示したのが図-7である。図には流れのベクトルも示している。宮古橋の断面の場合、ハンチ部があることで、流れが曲面に沿って流れている。一方、3主桁断面の場合は、主桁と床版張出部の接合部辺りの流れが滞っている。そのためにこの箇所が生じる圧力が宮古橋よりも大きくなったと考えられる。また、宮古橋の断面におけるp1-4地点付近にも一部流れが滞っている箇所があり、これにより、3主桁断面よりも圧力が大きくなったと考えられる。

図-8は床版張出部底面に生じる圧力の時刻歴波形である、主桁付近の圧力は両者とも大きな差異は見られない。しかし、張出し部先端に生じる圧力は、3主桁断面の方が大きくなっている。先ほどと同様に、宮古橋の断面ではハンチがあることで、流れが曲面に沿って流れるために、圧力が小さくなっていると考えられる。

したがって、床版張出部底面をハンチによってアーチのような曲面にすることで、今回の津波のような波先端の勾配が小さな波に対しては多少程度ではあるが、影響を軽減させる効果があると考えられる。なお、図-7に示すように、桁間部の流れの様子は、両者ともほとんど変化がない。そのため、この箇所が生じる圧力もほぼ同じになっている。

(3) 宮古橋に作用する力と抵抗力の評価

ここでは数値解析により得られた圧力を基に、津波により上部構造が受ける力と、その抵抗力を簡易的に算出することで、津波による流出評価を行った。宮古橋における各部位に生じる圧力を面積で積分することにより、水平方向および鉛直方向の力を求めた。そのときの、橋軸方向の長さはヒンジ間を1スパンとし45mで計算している。また、宮古橋は変断面であるが、ここでは簡易的に中央径間断面で統一している。

津波の影響に対する宮古橋の抵抗特性を精度よく評価するためには、その支承の構造条件を正確に把握する必要があるため、現時点では精緻な評価をすることができ

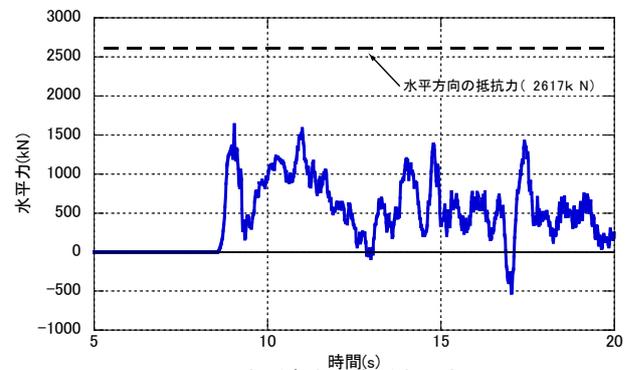
ないが、本橋の架設年次と構造条件から、上部構造は下部構造の頂部に単純に支持されているだけの構造と仮定し、津波が橋軸直角方向に作用したときの上部構造の抵抗力を推測することとした。すなわち、幸左らが提案している方法⁹⁾を参考に、水平力に対しては摩擦力、鉛直力に対しては自重で抵抗していると考えた。そのため、水平方向および鉛直方向の抵抗力は次式ようになる。

$$S_H = \mu W \quad (2)$$

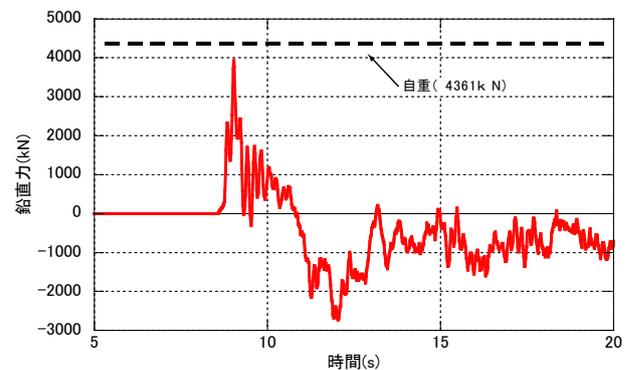
$$S_V = W \quad (3)$$

ここで、 S_H は水平方向の抵抗力、 S_V は鉛直方向の抵抗力、 W は桁重量であり、1径間あたりの重力は4361kNである。 μ は摩擦係数であり、ここでは0.6⁹⁾に設定した。実際の宮古橋は側道橋があるため、この部分が上部構造の水平の移動を抑制する効果もあったのではないかと考えられるが、ここではその影響は考慮していない。

以上の条件より、水平方向および鉛直方向に作用する力と抵抗力を算出した結果を図-9に示す。横軸は時間、縦軸は水平方向および鉛直方向の力であり、津波の進行方向および上向きが正である。これより、ほぼ同時刻で水平方向および鉛直方向の力がピーク値をとっていることがわかる。また、写真-9(e)や図-5に示したように、ほとんど越波していないため、水平方向の力については津波衝突時の衝撃的な力は顕著には表れていない。鉛直方向の力については、津波作用直後は上向きの力が作用す



(a) 水平方向に作用する力



(b) 鉛直方向に作用する力

図-9 津波により宮古橋に作用する力

るが、その後は下向きの力が作用する。これは、図-7(a)に示したように、津波作用側の主桁下部より剥離した流れによる下フランジの負圧や、桁間部の負圧が影響している。また、宮古橋に作用した力は、抵抗力を下回る結果になり、幸左らが提案する簡易的な方法では、宮古橋が流出する可能性は低いことがわかった。

4. 結論

本研究では、宮古橋周辺で撮影された映像から、この周辺で発生した津波の特性と津波が上部構造に作用したときの上部構造の挙動メカニズムの検討を行った。そして、得られた結果から、上部構造が流出しなかった原因を推定した。本研究で得られた範囲内ではあるが、得られた知見は以下の通りである。

- 1) 宮古橋付近で発生した津波は、波の勾配が小さい波が発生し、波の先端が桁下を通過した後、遡上しながら徐々に水位が上昇し、上部構造に作用したと考えられる。
- 2) 数値解析により、桁下空間があり、波の勾配が小さい波が上部構造に作用する時は、津波作用側主桁間への水が流入するため、今回の宮古橋の場合には、桁間には空気溜りが発生しにくいことがわかった。
- 3) 主桁と床版接合部にハンチがあると、流れがそれに沿って流れるために、流れが滞る場所がなくなり、そのために隅角部で見られるような局所的な大きな圧力の発生を抑制することができる。
- 4) 幸左らが提案する簡易手法を用いて津波による水平方向および鉛直方向に作用する力を算出すると、水平方向に作用する力は顕著なピーク値は発生していない。また鉛直方向の力は津波作用直後は上向きの力が作用するが、その後は下向きの力が常時作用する挙動となる。
- 5) 津波による力は両方向とも水平方向の抵抗力および自重（鉛直方向の抵抗力）を下回る評価となった。これは、東北地方太平洋沖地震による津波で宮古橋が流出しなかった事実関係とも整合するが、橋への影響が小さかったのは、本橋の位置における津波の特性が波先端の勾配が小さい波であったことが主因と考えられるが、これに従属的に関係して、空気溜まりが発生しにくい等の要因も加わったのではないかと考えられる。

謝辞：本研究の実施にあたり、日本鉄塔工業株式会社の堂園健志氏より津波作用時の映像を提供頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国総研資料第 646 号，土研資料第 4202 号，平成 23 年 7 月。
- 2) 中尾尚史，張広鋒，炭村透，星隈順一：側道橋による津波作用時の橋の挙動に関する研究，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.345-348，2013。
- 3) 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。
- 4) 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.
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 佐々木達生，幸左賢二，付李，田崎賢治：津波による津谷川周辺の PC 桁橋梁を含む構造物の損傷分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1117-1122，2012。
- 8) 清水英樹，幸左賢二，佐々木達生，竹田周平：道路橋の津波による被害分析，構造工学論文集，Vol. 58A, pp.366-376，2014。
- 9) 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。
- 10) 沿岸技術ライブラリー No.39 : CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発，財団法人 沿岸技術研究センター，2010。
- 11) 福井芳郎，中村充，白石英彦，佐々木泰雄：津波の研究（I）－段波津波の堤防に及ぼす影響－，第 9 回海岸工学講演会論文集，pp.44-49，1962。

ESTIMATION FOR PROPERTY OF TSUNAMI AND TSUNAMI-INDUCED EFFECT ON BRIDGE AROUND MIYAKO BRIDGE

Hisashi NAKAO, Yoshihiro MORIYA, Takeo ENOMOTO and Jun-ich HOSHIKUMA

A mechanism of the tsunami effect on Miyako Bridge which was survived from the 2011 Tohoku tsunami was discussed based on the video picture and the numerical analysis. The video picture clearly showed the tsunami was approaching to the Miyako Bridge with a slight angle of the tsunami wave front and the bridge was inundated with the tsunami. The analytical results showed that the maximum horizontal and vertical tsunami-induced forces were generated by the hydrodynamic pressure at the overhang, the girders when the tsunami wave acted to the superstructure. It was also suggested from the practical estimation that those forces could not wash-away the superstructure of the Miyako Bridge, which coincided with the actual performance of the bridge after the 2011 Tohoku tsunami.