

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

中尾 尚史¹・張 広鋒²・炭村 透³・星隈 順一⁴

¹正会員 博（工） 独立行政法人土木研究所 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 博（工） 合肥工業大学教授 土木与水利工程学院 道路与桥梁工程系
（〒23009 安徽省合肥市屯溪路193号）

³正会員 修（工） 独立行政法人土木研究所 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） 独立行政法人土木研究所 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、津波により多くの橋梁が流出する被害を受けた¹⁾。また、今後予想される東海・東南海・南海地震を始めとする津波の発生の切迫性が指摘されており、橋梁の津波対策が喫緊の課題となっている。

これまでに、多くの機関で橋梁に及ぼす津波の影響に関する研究が行われており²⁾⁴⁾、津波外力の評価方法が検討されている。その多くは、津波の高さから津波外力を静的な力に置き換えて検討されている⁵⁾。この考えは、港湾構造物の津波設計に倣っているように考えられる⁶⁾。

一方、風工学の分野では、流体力については流速から外力が評価されており、橋梁の耐風設計に関しては、流速から外力を算出する方法が規定されている⁷⁾⁸⁾。この評価方法を津波にも応用させようとした場合、流体力の式 ($p=0.5C_D\rho U^2$, p : 圧力, ρ : 水の密度) を用い、抗力係数 C_D を実験的に決めることができれば、津波速度 U から津波外力を静的な力に置き換えることで、津波外力を評価することができると考えられる。

そこで本研究では、この風工学の考え方を参考にして、津波作用時の津波速度の違いが、上部構造の挙動にどのような影響を与えるのか、また、津波速度と橋梁部材に作用する圧力との関係について、水理実験により検討した。

2. 水路実験の概要

(1) 実験装置および実験方法

実験装置は図-1に示すような長さ30m、幅1mの水路を用いて実験を行った。これまでに著者らは、初期水位が低くて、比較的大きな津波が作用した場合を想定して実験を行った⁹⁾。しかし、東日本大震災において津波により被災した構造物の分析に関する幸左らの研究から¹⁰⁾、少なくとも橋が流出した地点での津波速度は6.0m/sから8.0m/s程度と推定されている。そこで本研究では、このように推定されている津波速度を水理実験で再現できるように、寸法の縮尺スケールは1/20で設計した。本研究では、実験装置は貯水槽に一定量の水をため、水槽と水路の間に設けたゲートを倒すことで、段波状の津波を発生させる仕組みになっている。

橋桁模型はゲートから7.5m離れた位置で、床版から0.2mの高さに設置した。また橋桁模型から1.0mおよび2.5m離れた位置に波高計を設置して、波高を計測した。実験のサンプリング間隔は0.002秒で行い、実験により得られたデータは模型の固有振動数以上の成分をカットするため、5.0Hz以上の成分をカットするローパスフィルタをかけた。同時にハイスピードカメラを用いて、橋桁周辺の流況を撮影した。波速は、2つの波高計の津波が到達した時間差から算出した。本論文では、この波速を津波速度と呼称する。

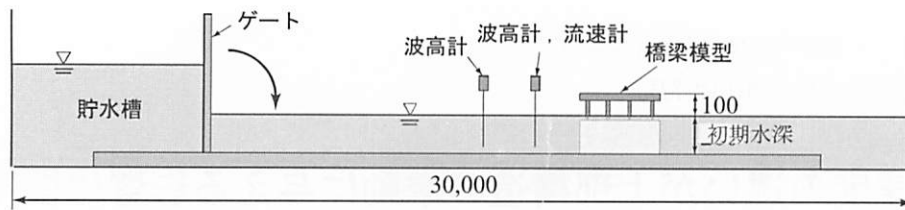


図-1 実験装置

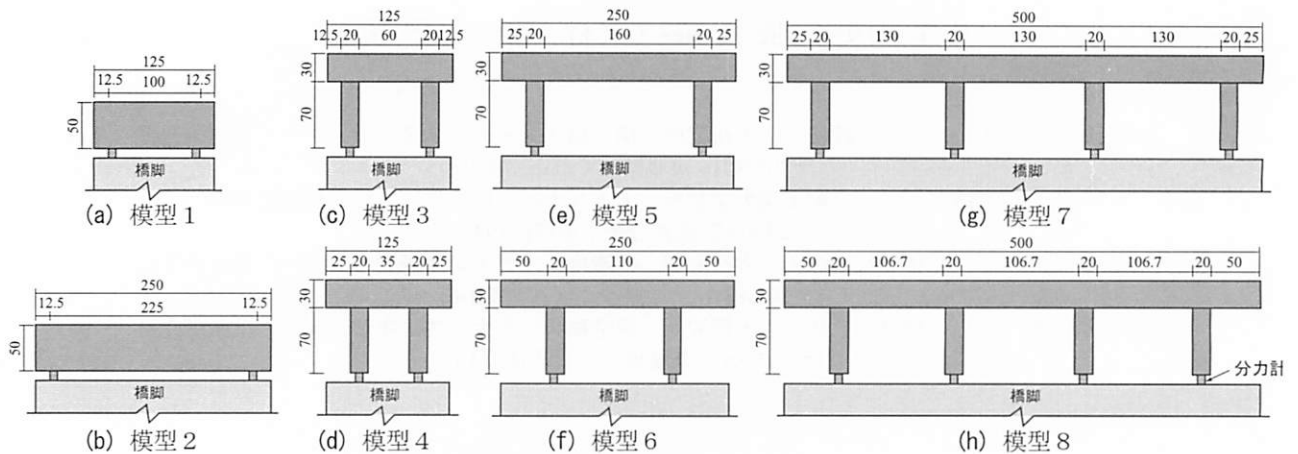


図-2 上部構造模型

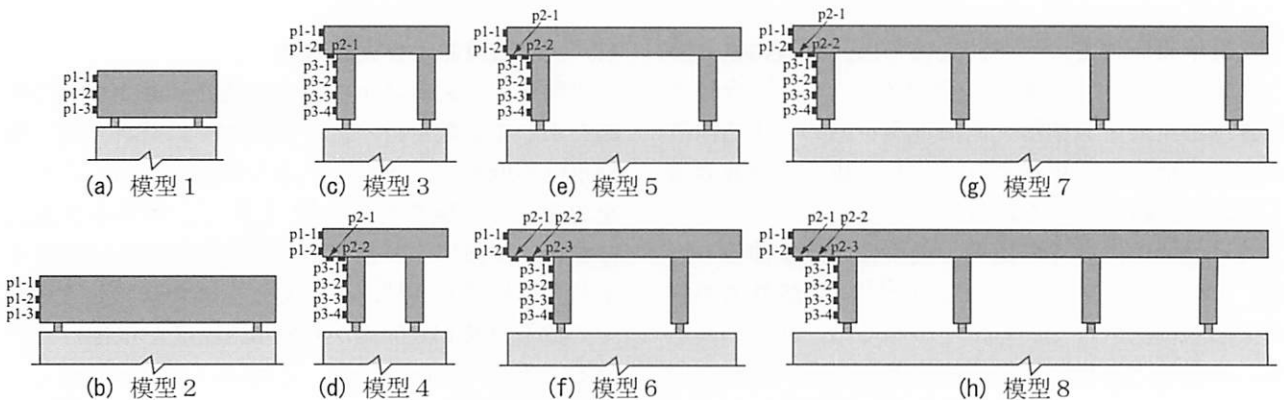


図-3 圧力の計測位置

(2) 上部構造模型

図-2に示すように、それぞれ模型幅および床版の張出し長が異なる、長方形断面、4主桁断面および4主桁断面模型を用いた。

なお、本実験で用いた上部構造の模型質量は、実橋梁で想定している質量と相似にできていない。しかし、本実験では、津波からの作用に対して、支承に生じる水平反力と鉛直反力を把握することを目的としており、また上部構造の模型の重さによる支承の変形は生じないようにしているため、本実験では、上部構造の模型の質量が相似則に則した値でないことの影響は小さいと考えた。

上部構造の模型は橋脚と連結材で連結し、連結材に分力計を設置することで、津波が橋桁に作用したときの水平および鉛直方向の支承反力を計測した。

表-1 発生される津波特性の条件

初期水深(m)	目標津波高(m)	理論式による 目標津波速度 (m/s)
0.15	0.10	8.1
0.15	0.15	9.4
0.20	0.05	7.4
0.20	0.10	8.6
0.20	0.15	9.7
0.30	0.05	8.6

圧力は、各模型の側面および底面に数カ所圧力計を取り付けて計測した。本論文では、図-3に示した津波作用側の張出部側面、張出底面、および主桁に作用する圧力について述べる。

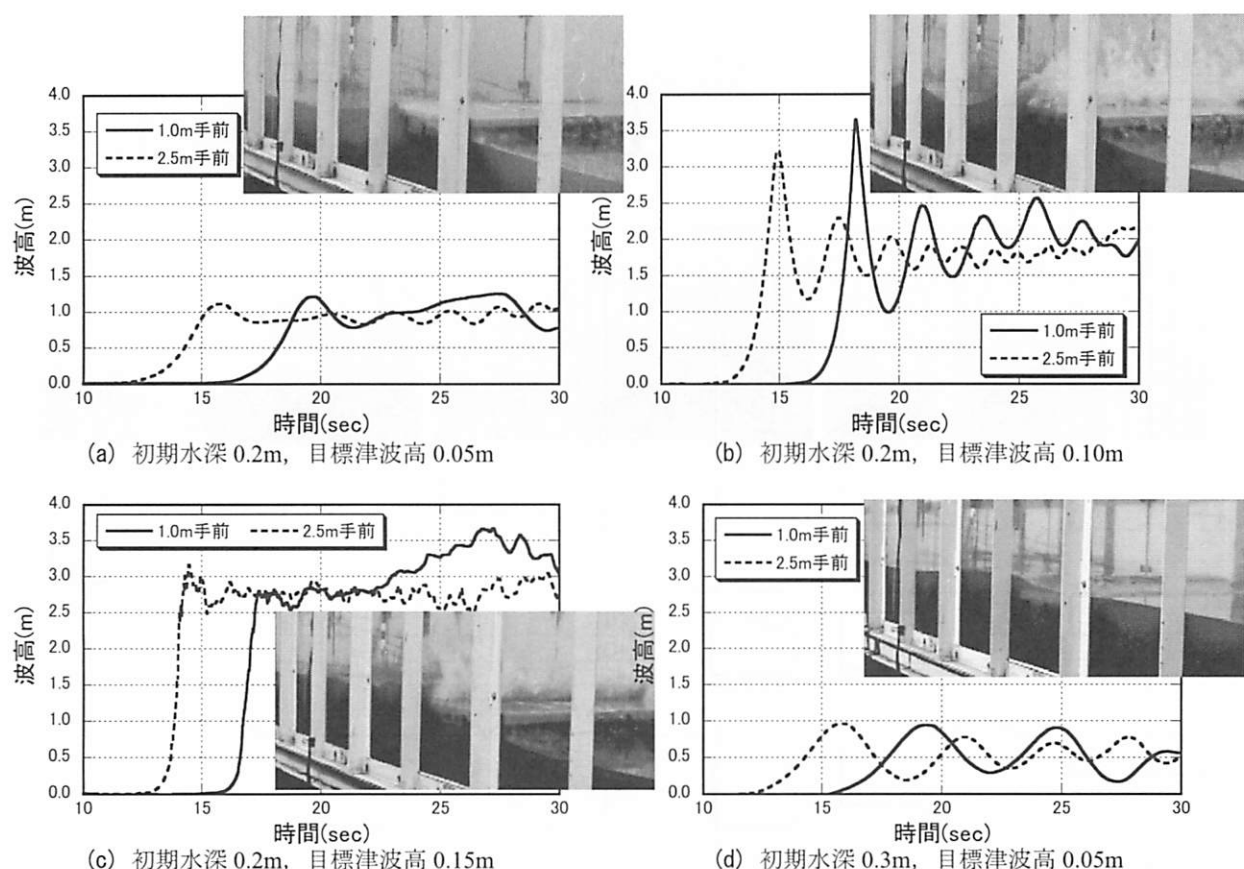


図-4 波高の計測結果

(3) 本実験で発生させる津波特性の条件

本実験で設定した津波は、前述したように、発生したと推定される津波速度を再現するために、表-1で示したように初期水深および目標津波高を設定した。なお、表で示した目標津波速度は、段波の理論式より算出した。また、初期水深が0.3mのケースは、模型8（4主桁断面）のみ行った。

3. 計測結果

(1) 波高および津波速度

図-4は各設定条件における水位の計測結果である。ここでは、初期水深が桁下まで（0.2m）の結果と、初期水深が橋面まで（0.3m）の結果を示した。なお、本論文で示した計測値は、全て実物換算した値で示している。

初期水深が高く、目標津波高の小さい結果（本実験では、初期水深が0.2mで、目標津波高が0.05mおよび0.10m、初期水深が0.3mで、目標津波高が0.05m）は、波が上下に振動する段波（波状段波）が発生している。一方、設定した津波高が大きい段波は、波の先端が砕ける段波（砕波段波）が発生している。また、波状段波が発生すると、第1波目の最大波高は、設定した津波高よりも大きくなり、本

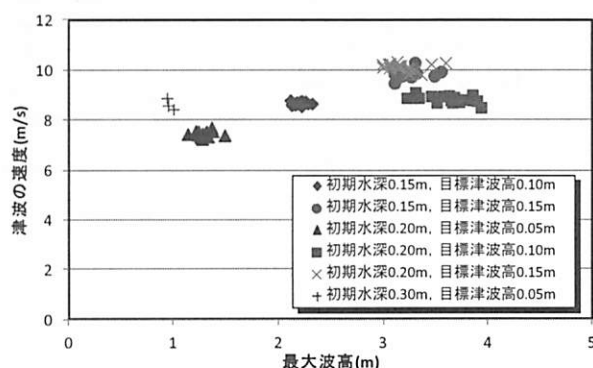


図-5 波高と津波速度の関係

実験では、目標津波高を0.15mで、砕波段波が発生したケースよりも波高は大きくなっている。

図-5は実験により得られた最大波高と津波速度の結果である。図より、本研究により得られた実験範囲では、波高と津波速度には線形的な傾向になっている。また、津波速度は7.0m/sから10.0m/sとなっている。また、波状段波が発生すると、砕波段波に比べて津波速度は小さいが、波高は大きくなっている。

(2) 支承反力及び圧力の計測波形

図-6および図-7は支承反力および上部構造の各部位に作用する圧力の計測波形である。ここでは一例

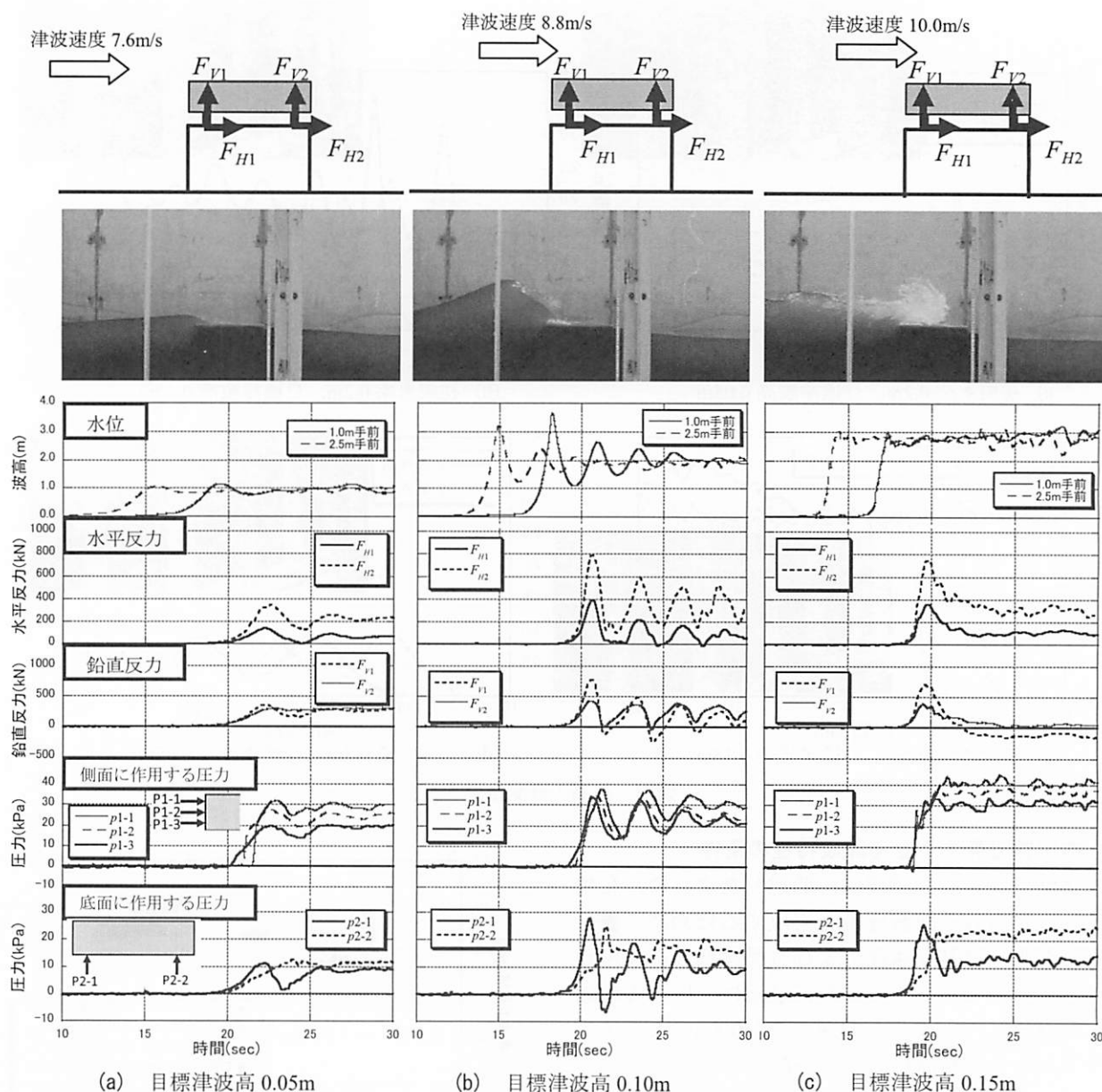


図-6 上部構造の各部位に作用する圧力の計測波形および橋梁周辺の流況（長方形断面，初期水深 0.2m）

として，長方形断面（模型 2）および 4 主桁断面（模型 8）で，桁下まで水位がある条件で，津波高を変化させた場合の結果を示した。また，各ケースで津波作用直後の橋梁周辺の流況を示した。

a) 長方形断面の挙動

目標津波高を 0.05m に設定したケースでは，津波速度が小さいため，模型側面に作用する圧力の作用時間は，各高さによりズレが生じている。そして，模型側面に作用する圧力は，側面上部（ $p1-1$ ）にゆくほど大きくなっている。底面に作用する圧力は，津波作用側（ $p2-1$ ）に作用する圧力が先にピーク値になってから，遅れて右部に作用する圧力がピーク値になっている。その後，津波作用側（ $p2-2$ ）の圧力は波の変動にあわせて低下している。これは，支承反力も同様に，波の上下変動にあわせて，反力の

増加，減少が見られる。特に，水平方向の支承反力はこの影響が顕著に表れている。鉛直方向の支承反力は，両支承共に上向きの力が生じている。よって，全体的に上向きで若干の上下振動をする挙動を示していると考えられる。

目標津波高が 0.10m の場合，側面に作用する圧力は，わずかであるが，圧力の作用時間は各高さによりズレが生じている。各高さの圧力は大きな差は見られない。模型底部に作用する圧力は，津波作用側（ $p2-1$ ）では，ピーク値に達してから，減少してゆき，一部負圧が生じる。支承反力は目標津波高が 0.05m の時と同様に，波の上下振動に合わせて，支承反力が大きく増減している。よって，このような波が上下に振動する波が長方形断面に作用すると，波の上下振動にあわせて，支承反力も大きく増加減

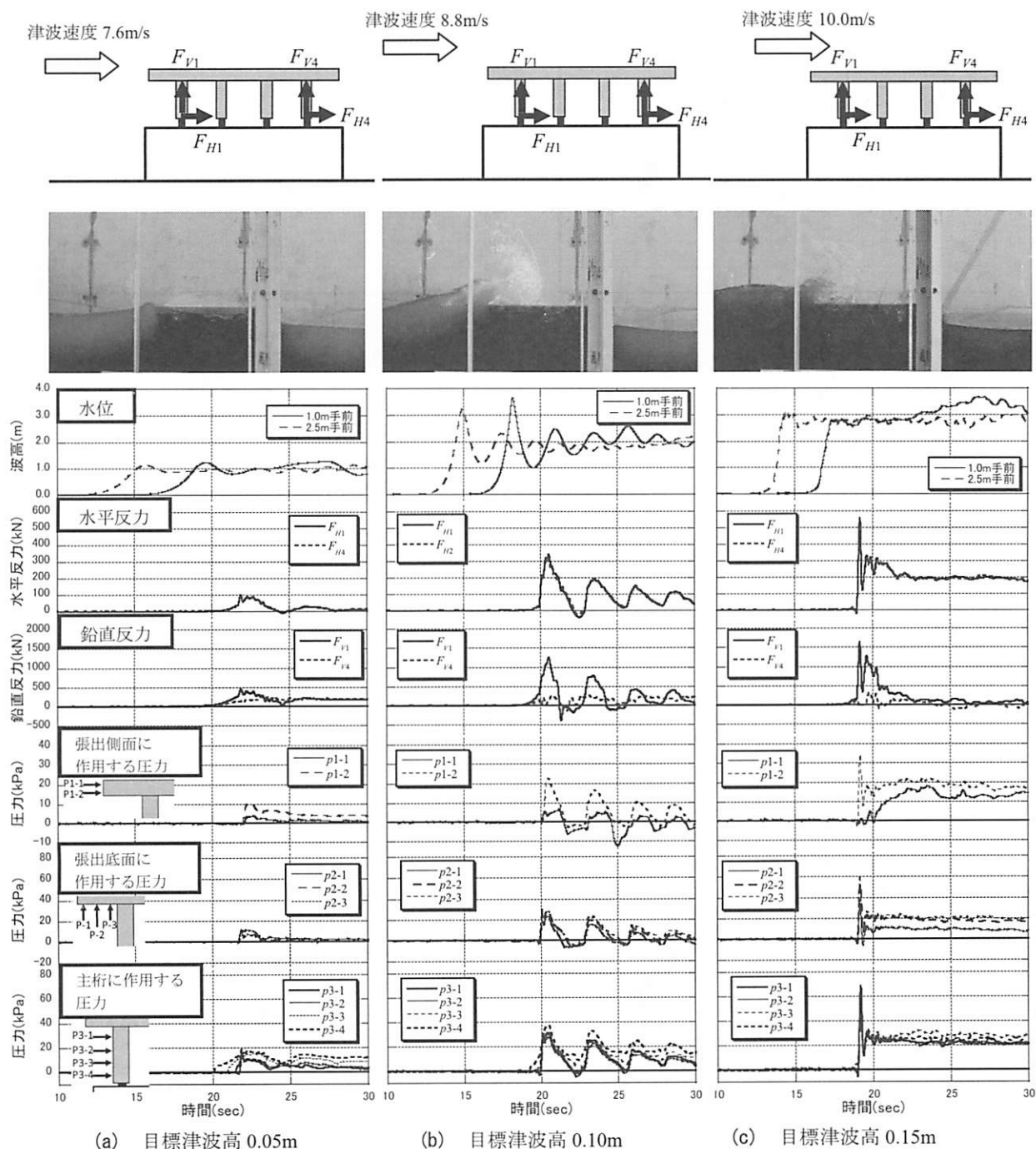


図-7 上部構造の各部位に作用する圧力の計測波形および橋梁周辺の流況（模型 8，初期水深 0.2m）

少を繰り返していることがわかる。さらに、大きく上下および左右に振動するような挙動を示していると考えられる。波状段波の場合、津波速度が約 1.0m/s 大きくなると、支承反力は水平および鉛直方向ともに約 2.0 倍になっている。

波の上下振動が見られない目標津波高が 0.15m の場合、模型側面に作用する圧力は、ほぼ同時に作用している。また、ピークになる時間も比較的早くなっている。また圧力の増減は繰り返さない。これは、模型底面に作用する圧力、支承反力も同様である。

また、全ケース共に、模型側面の下部に作用する

圧力がピークになる時刻で、支承反力が最大値になっている。

b) 4 主桁断面の挙動

目標津波高が 0.05m の場合、津波速度が小さいために、主桁下部に圧力が生じてから、主桁上部に圧力が作用するまでに、2 秒程度の誤差が生じている。また、床版側面に作用する圧力がピークになる時間と、主桁に作用する圧力がピークになる時間に若干の誤差も生じている。

目標津波高が 0.10m の場合、作用する津波が前述のように波が上下に振動しており、この波によって、

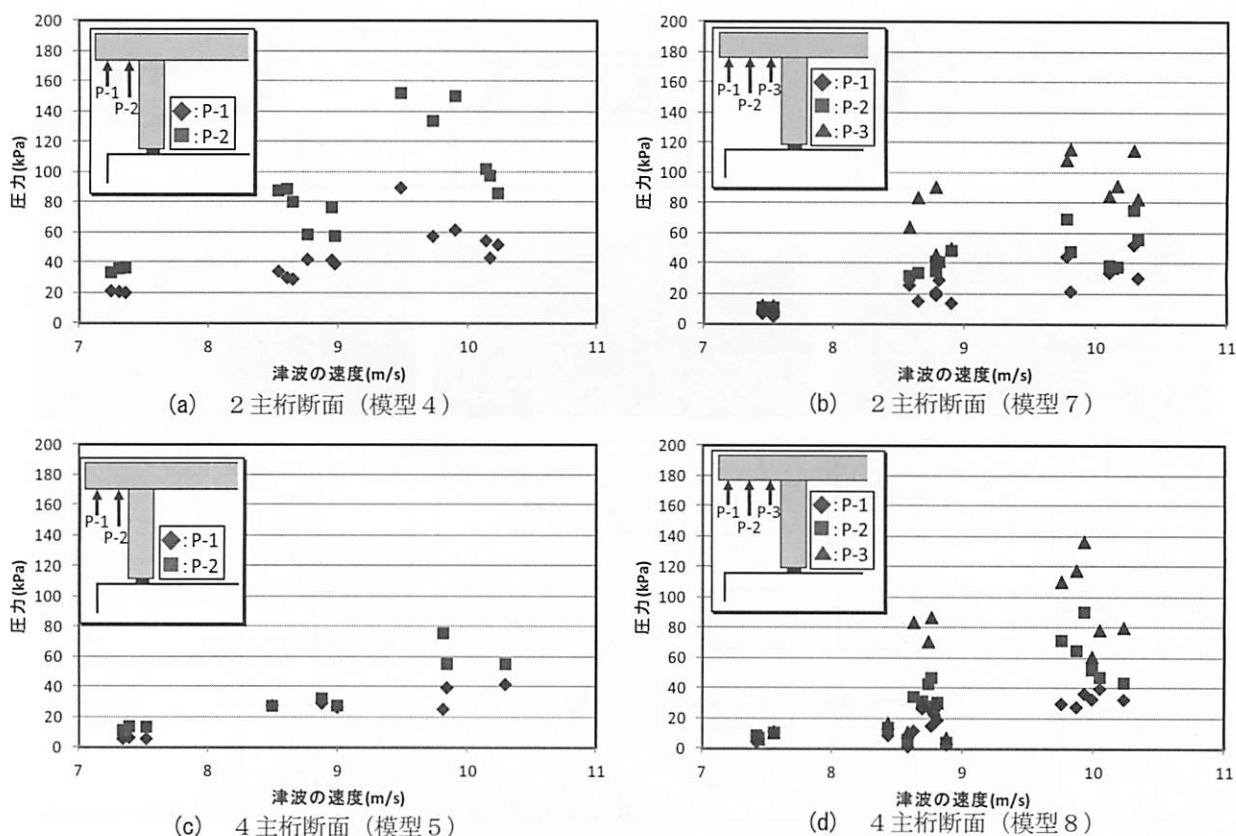


図-8 張出底面の各計測位置に作用する圧力

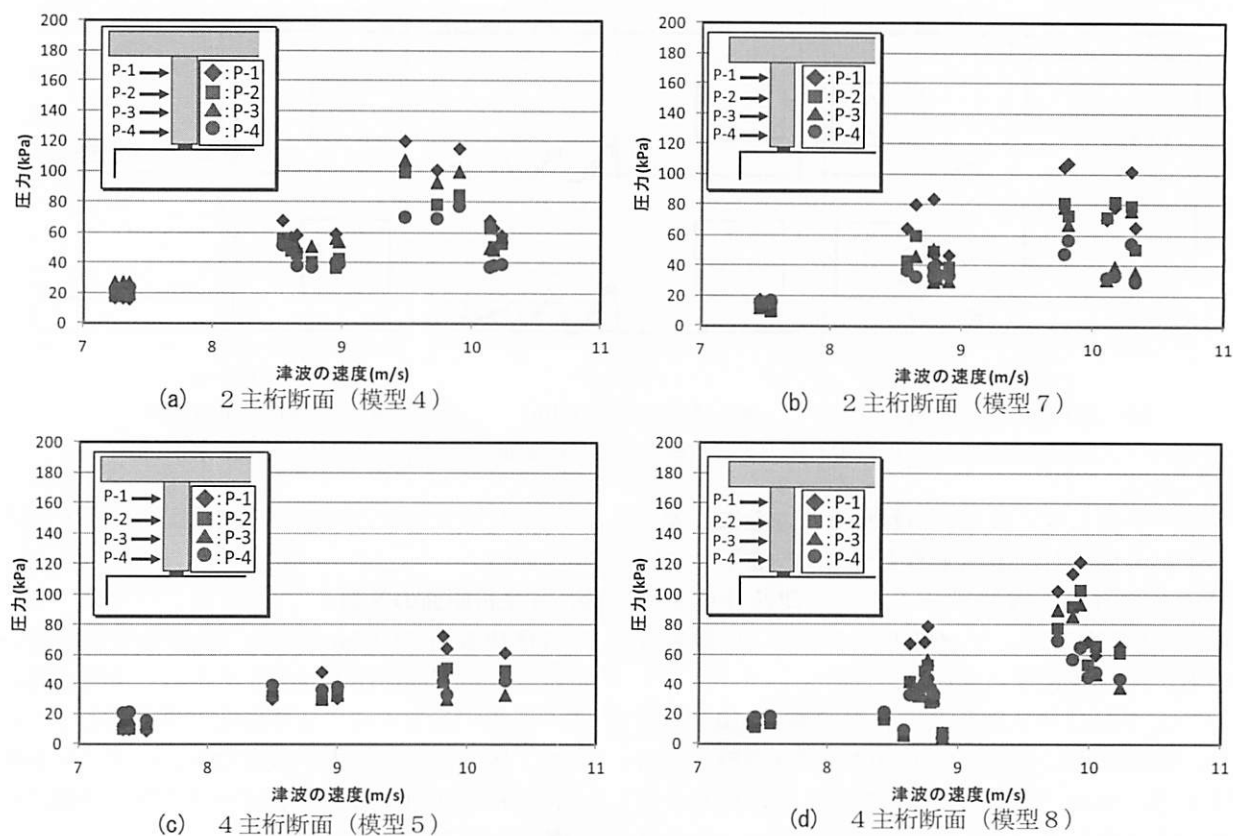
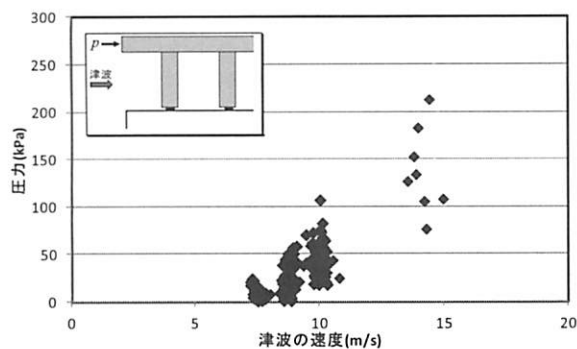
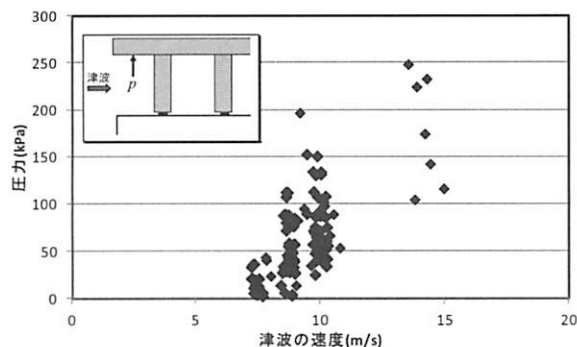


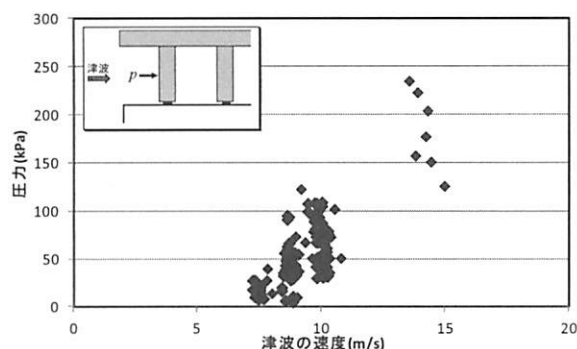
図-9 主桁の各計測位置に作用する圧力



(a) 張出部側面に作用する圧力



(b) 張出底面に作用する圧力



(c) 主桁に作用する圧力

図-10 津波速度と上部構造の各部位に作用する圧力の関係（津波作用側）

各部位に作用する圧力も波の振動に合わせて大きな変動を生じている。また、このケースでは一部の時間で負圧が生じている。各部位で圧力のピーク値をとる時間は、ほぼ同じである。波状段波の場合、津波速度が約1.0m/s大きくなると、支承反力は水平方向で約3.5倍、鉛直方向で約2.5倍になっている。

目標津波高が0.15mの場合、津波作用直後に、衝撃的な圧力が各部位に作用している。長方形断面の場合と同様に、このケースでは支承反力の増加減少は繰り返さない。また、張出部側面に作用する圧力は、各ケースともに、上部に作用する圧力は小さくなっている。

4. 上部構造に作用する圧力の検討

(1) 上部構造の各部位に作用する圧力の分布

図-8および図-9は各計測位置に作用する圧力を示したものである。横軸は津波速度、縦軸は圧力である。ここでは2主桁断面と4主桁断面における、津波作用側の張出底面および主桁に作用する圧力を示した。

津波速度が小さいケースは、全体的に圧力のばらつきは小さい。そのため、一部を除きほぼ様な圧力分布になっている。津波速度が大きいケースでは、各位置における圧力に差が生じる。主に、主桁に近い位置の圧力（ $p-2$ または $p-3$ ）は大きくなっており、外側の圧力（ $p-1$ ）に対して、約1.5倍～3.0倍の大きさになっている。よって、圧力分布は、主桁側の圧力が大きくなるような台形分布になっている。

主桁に作用する圧力は、主桁上部の圧力（ $p-1$ ）が大きくなる傾向になっている。その傾向は、津波速度が大きくなるにつれて大きくなっており、主桁上部に作用する圧力は、主桁下部に作用する圧力（ $p-4$ ）の約2.5～3.0倍になっている。

また、張出底面に作用する圧力と同様に、津波速度と張出部側面に作用する圧力には、実験の範囲で線形的な傾向がある。

(2) 津波速度と上部構造の各部位に作用する圧力の関係

図-10は津波速度と上部構造の各部位に作用する圧力の関係を示したものである。横軸は津波速度、縦軸は上部構造の各部位に作用する圧力である。ここでは、著者らが既に別途実施した水路実験（初期水深が0.1mで設定津波高が0.15m, 0.20m, 0.35m, 初期水深が0.15mで設定津波高が0.10m, 0.15m, 0.35m）の結果も図中に示した⁹⁾。なお比較のため、別途実施した水路実験において計測した圧力の計測位置に近い位置の圧力（1～2点）を、代表値としてここでは示している。

津波速度と上部構造の各部位に作用する圧力との間には、相応のばらつきがあるが、実験範囲内では、ほぼ線形または2次関数の関係がある傾向になっている。また、津波作用側の張出底面に作用する圧力と主桁に作用する圧力の結果は、比較的似た傾向になっている。さらに、津波作用側の張出し側面に作用する圧力は、主桁に作用する圧力や張出し底面に作用する圧力に対して、1割程度小さくなっている。

5. まとめ

本研究は、津波速度の違いが、上部構造の挙動に与える影響と、津波速度と橋梁部材に作用する圧力との関係について実験的に検討した。本実験で実施した条件の範囲内であるが、得られた知見は以下のとおりである。

- ① 波が上下に振動するような津波（波状段波）が上部構造に作用したとき、上部構造は波の振動にあわせて、上下左右に振動する挙動を示している。
- ② 波状段波が上部構造に作用した場合、津波速度が7.6m/sから8.8m/sへと1.2m/s大きくなると、水平方向の支承反力は、約2.0～3.5倍になっている。また鉛直方向の支承反力は、約2.0～2.5倍になっている。
- ③ 津波速度が8.8m/sの波状段波、または津波速度が10.0m/sの砕波段波が上部構造に作用した場合、上部構造に作用する外力は、長方形断面では、両者とも同じ大きさ、または津波速度が8.8m/sの波状段波の方が大きい傾向がある。一方、4主桁断面では、津波速度が10.0m/sの砕波段波が、わずかに大きい傾向があった。
- ④ 張出底面に作用する圧力は、主桁側の位置の圧力が最も大きく、外部にゆくにつれて小さくなっている。主桁に作用する圧力は、桁の上部が最も大きく、下部にゆくにつれて小さくなっている。
- ⑤ 津波速度と上部構造の各部位に作用する圧力との間には、相応のばらつきがあるが、ほぼ線形または2次関数の関係がある傾向がみられる。また、津波作用側の張出底面および主桁に作用する圧力と津波速度との関係は、ほぼ類似の傾向を示している。

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，2011.
- 2) 二井伸一，幸左賢二，庄司学，木村吉郎：津波形状の違いによる橋梁への津波作用力に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.56A，pp.474-485，2010.
- 3) 糸永航，中尾尚史，伊津野和行，小林紘士：鉅桁橋に対する津波の作用力に関する実験的研究，地震工学論文集，第31-b，pp.1126-1133，2012.
- 4) 庄司学，平木雄，江面嘉之，飯高稔，藤間功司，鳴原良典：橋桁に作用する津波波力の水平成分と鉛直成分の発生メカニズムに関する実験的考察，第31回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，No.5-057，2011.
- 5) 日下部毅明，渋谷研一，片岡正次郎：津波による道路施設の被災度と経済的損失の設計手法に関する現況等の調査と基礎的検討，国土技術政策総合研究所資料，pp.35-45，2006.
- 6) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 7) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧（平成19年改訂版），2008.
- 8) 本州四国連絡橋公団：耐風設計基準（1976）・同解説，1976.
- 9) 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(2013) No. 4，地震工学論文集第32巻，p.I_42-I_54，2013.
- 10) 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.