

陸前高田地区で見られた波形状に着目した 橋桁作用力特性の検討

佐藤崇¹・幸左賢二²・佐々木達生³

¹正会員 （株）長大 福岡構造技術部（〒810-0004福岡県福岡市中央区渡辺通1-1-1サンセルコビル6F）

²正会員 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科（〒804-8550福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）

³正会員 大日本コンサルタント株式会社 技術統括部（〒170-0003東京都豊島区駒込3-23-1）

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（ $M_w=9.0$ ）に伴う津波により、東北地方太平洋沿岸部に橋梁上部構造の流出被害が数多く生じた。

橋梁上部構造に作用する津波作用力については2004年スマトラ沖津波を契機に、段波性状および孤立波性状の津波に着目した研究は多方面で行われている。東北地方太平洋沖地震では河川を遡上し橋桁に津波が作用する状況が観測されており、その津波の形状は波高1m～2mの砕波段波状の先端を有し、これに準定常的な持続流が続くことが明らかとなっている¹⁾。これに対して著者らは、上述した段波性状の津波の作用力特性²⁾および、準定常的な持続波の作用力特性³⁾について水理実験より個別に評価を行い、橋桁の津波作用力評価式を提案している。

一方、東北地方太平洋沖地震により発生した河川や陸上を遡上する津波において、準定常的な持続流の水面上に擾乱が生じている津波が多数観測されている。例えば、気仙沼港を進行する津波においては、水面の大きなうねりが移動しながら遡上する津波⁴⁾が観測されており、また、気仙川を遡上する津波においては、河床の不陸によると思われる水面形の乱れが観測されている。仙台空港では水位の上昇とともに、構造物に作用した津波が反射したことが原因と考えられる重複波のような鉛直振動を生じている乱れが観測されている。これらを総じて擾乱と表現すれば、擾乱の発生には様々な要因が考えられる一方、擾乱によって橋桁に与える影響を検討した例は極めて少ない。

そこで、本研究では準定常的な持続流を模擬した定常流の作用状態下で、擾乱を模擬した孤立波を造

波させた水理実験を実施し、橋桁に作用する津波作用力特性についての検討を行った。また、上記の擾乱の影響を簡易的に考慮した設計式についての検討も行った。

2. 陸前高田地区で見られた波形状

(1) 観測された波形状

ここでは、観測された擾乱の代表例として津波襲来時の模様を撮影した多数の写真画像の資料が得られている陸前高田地区の気仙川を遡上する津波の写真画像から分析を行う。

図-1に示すのは、15時26分17秒に撮影された、津波先端が気仙大橋を超えた模様の写真である。この時には波の先端が砕波状であり、その後の流れには大きな波の乱れは見られないことがわかる。

次に、図-2に示すのは、図-1から1分38秒（撮影時刻15時27分55秒）および1分47秒（撮影時刻15時28分04秒）経過した時の同様の位置での津波の遡上状況である。まず、15時27分55秒における津波状況は気仙大橋の桁下まで水位が上昇しており、既往の研究¹⁾で述べられているように、この時の遡上する津波の流速は5m/sである。また、画像中央部に着目すると、水位差が3m程度ある孤立波に似た水面形の流れが見られ、この水面形は河川断面方向に一様に発生しておらず、ある特定の位置で発生していることが分かる。図-1に示す、津波が遡上していない状態での河床の状況からは、図-2の水面形が生じている位置に砂州が堆積しており、この河床状況により発生したと考えられる。次に、15時28分04秒における津波状況は、孤立波性状の水面形を確認した9秒前の15時27分55秒の水面形とほぼ同一であり、こ



図-1 気仙川を遡上する津波状況（気仙大橋周辺）



図-2 気仙川を遡上する津波に見られる波形状

の水面形は水平移動しておらず、ある特定の位置で時間的に変化せず発生していることが分かる。

図-3に示すのは、図-1～図-2に示す気仙大橋周辺から約600m上流に位置する姉齒橋周辺で撮影された津波の遡上状況である。同図に示すように、姉齒橋周辺においても、先に述べた同様の波形状が確認でき、その水位差は2m程度、水面形の波長は18mである。しかし、ここで見られた水面形は、時々刻々と波形状が変化しており、気仙大橋周辺で見られた水面形の乱れとはまた異なる要因で発生したと考えられる。

以上より、陸前高田地区で見られた河川を遡上する津波は、準定常的な持続流に加え、孤立波性状の水面形の流れが発生しており、架橋地点の河床条件によっては橋桁への衝突も考えられる。この様な波形状に比較的近い現象として、急流河川において洪水時に非常に波高が高く三角状に尖った水面形の連なり（三角状水面波列）が挙げられる。この水面形は、長谷川ら⁵⁾、井上ら⁶⁾の研究によれば、河床条件とフルード数により発生条件が変化することが明らかとなっているものの、構造物に作用した際の影響に関する研究については、著者の知るかぎり極めて少ない。

(2) 設計作用力式

上述した擾乱を有するの津波が橋桁に作用した際の作用状況の模式図を図-4に示す。孤立波性状の水面形の作用力は、孤立波が橋桁に作用する場合と同様であると仮定し、準定常的な持続流により生じる作用力と簡易的に足し合わせることにした。

a) 水平方向作用力

著者らは、準定常的な持続波によって上部構造に作用する水平波力 F_{xf} の算定式（式(2)）と、段波に



図-3 気仙川を遡上する津波状況（姉齒橋周辺）

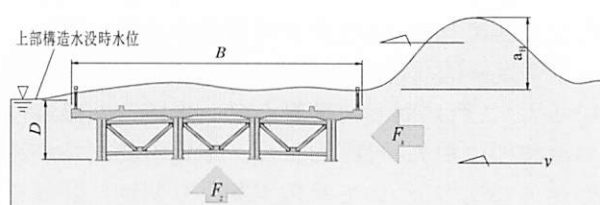


図-4 津波作用状況の模式図

より生じる水平波力 F_{xw} の算定式（式(4)）を、水理実験からそれぞれ提案している。実際の設計時に用いる津波荷重としては、前述した不規則な波が作用した場合を想定し、準定常的な持続波力と段波波力を簡易的に足しあわせた水平荷重 F_x （式(1)）を用いることで安全側の設計となると考えられる。以下にその作用力算定式および設計作用力式を示す。

$$F_x = F_{xf} + F_{xw} \quad (1)$$

$$F_{xf} = \frac{1}{2} \rho C_d v^2 A_h \quad (2)$$

$$C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & (1 \leq B/D < 8) \\ 1.3 & (8 \leq B/D) \end{cases} \quad (3)$$

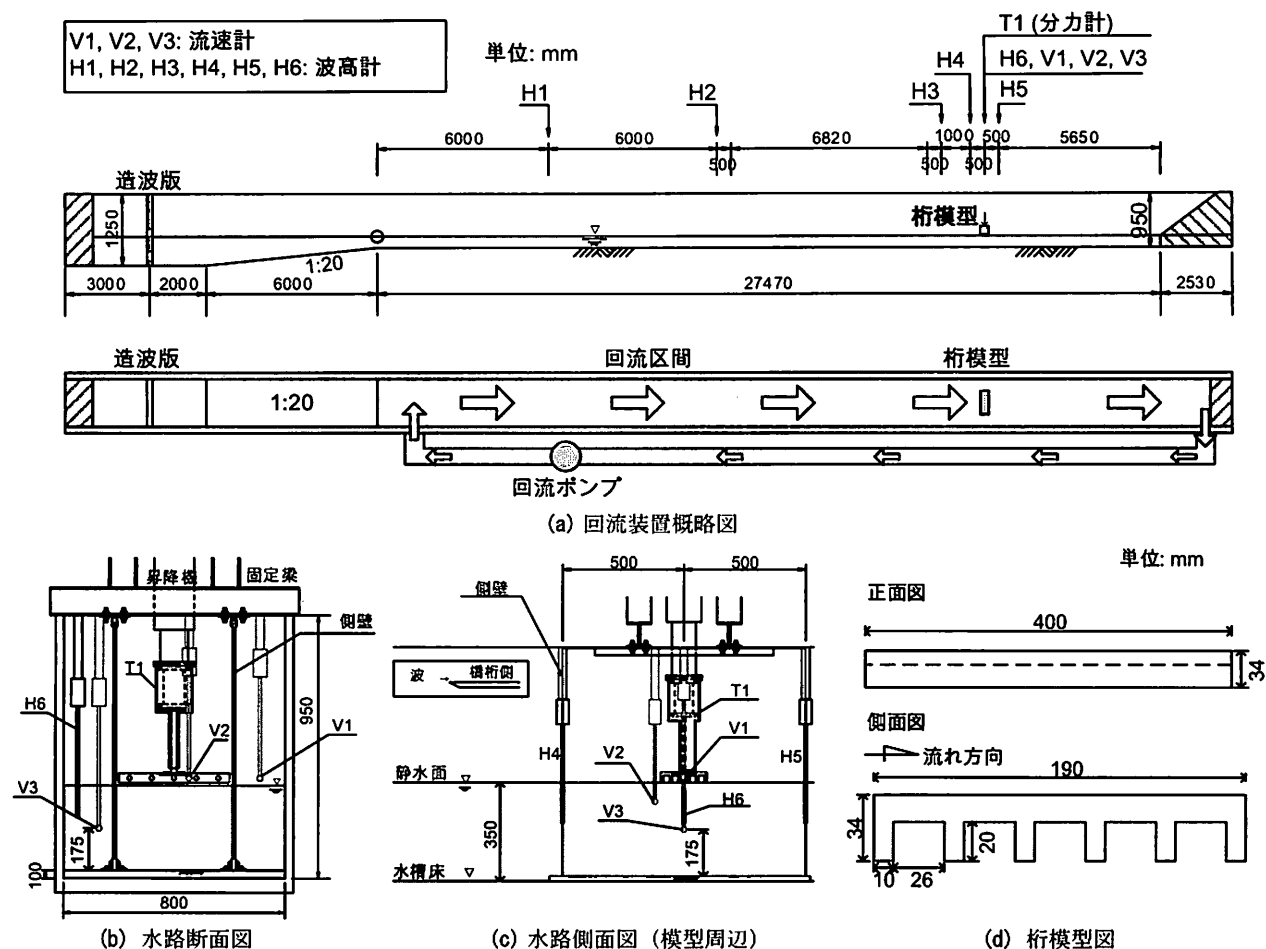


図-5 実験装置概略図

$$F_{xw} = 1.9 \rho g a_H A_h \quad (4)$$

ここに、 F_x ：設計水平作用力、 F_{xf} ：準定常的な持続波による水平作用力、 F_{xw} ：段波による水平作用力、 ρ ：海水の密度、 g ：重力加速度、 C_d ：式(4)で求める抗力係数、 B ：桁の総幅、 D ：桁の総高、 v ：流速、 a_H ：波の高さ、 A_h ：有効鉛直投影面積

b) 鉛直方向作用力

水平作用力同様に、鉛直作用力においても準定常的な持続波による鉛直波力 F_{zf} の算定式(式(6))と、段波による鉛直波力 w の算定式(式(7))を、水理実験からそれぞれ提案しており、設計荷重としては両算定式を足しあわした鉛直荷重 F_z (式(5))とする。以下にその作用力算定式および設計荷重算定式を示す。

$$F_z = F_{zf} + F_{zw} \quad (5)$$

$$F_{zf} = \rho g V \quad (6)$$

$$F_{zw} = \rho g (0.53 a_H) A_v \quad (7)$$

ここに、 F_z ：設計鉛直作用力、 F_{zf} ：準定常的な持続

波による鉛直作用力、 F_{zw} ：段波による鉛直作用力、 ρ ：海水の密度、 g ：重力加速度、 V ：桁の体積、 a_H ：波の高さ、 A_v ：有効水平投影面積

以上の設計式に対して準定常的な持続波を模擬した定常流および擾乱を模擬した孤立波を組み合わせた水理実験を定常流を伴う孤立波実験と称し、実験から得られた作用力特性を分析し、設計式の妥当性の検討を行う。

3. 実験概要

(1) 実験装置

図-5に本実験で用いた長水路と桁模型、計測機器類の設置状況図を示す。同図(a)に示すように、用いた長水路は長さ41m、幅800mmの片面ガラス張りの水路である。水路脇に設置されている鋼管は水路に直接つながっており、この鋼管を介して回流ポンプを回転させることで水路内の水を流入、流出させて水路内に定常的な流れを発生させることで、準定常的な持続流を模擬した。前述の擾乱を模擬した孤立波は、図中左側の造波装置はピストン型造波装置を用いて、桁模型位置で目標とする波高となるよう

パソコンで造波波高を制御した。

(2) 桁模型と計測機器

図-5 (b), 並びに図-5 (c)に示すように、橋梁を模擬した桁模型の両端に、桁の影響による3次元的な波の乱れを排除する目的でアクリル版で作成した側壁を設けた。橋梁模型の対象は、著者ら (2010) が行った孤立波性状の津波に対する桁への作用力実験で用いた1/50スケールの模型と同様とし、実被害を受けたインドネシアの橋梁とした。図-5 (d)に示すように桁模型の寸法は橋長は400mm, 幅員190mm, 構造高34mmである。

計測機器は図-5 (b), (c)に示したように桁模型に発生する作用力を計測する分力計, 水路内の流速を計測する流速計, 波形状を捉える波高計である。分力計は水平波力 (Fx), 鉛直波力 (Fz) と回転モーメント (My) が計測できる3分力計で、仕様規格は980Nである。同図に示したように水槽上部に梁を固定し、そこに分力計を設置し、治具を介して桁模型の作用力を計測する。流速計は、水平方向の流速を測定できるプロペラ式流速計を使用し、V1とV3は模型への衝突による乱れのない流速の計測を行うために側壁の隣とし、それぞれ桁模型位置、静水面以下の高さに設置した。特にV3流速計は定常流内の平均的な流速を捉えることを目的として静水深中央に設置するとともに、このV3流速計で得られる流速を管理流速として、回流ポンプの回転数を調整して水路内の流速管理に用いている。

(3) 実験パラメータ

実験パラメータは、図-6に示すように定常流の定常流速Vと孤立波の入射波高 a_H をパラメータとした。なお、静水深は35cmで全ケースで一定とした。桁位置に関しては、桁上面が水面位置となるように桁を設置した場合 (水没した状態) と、桁下面が水面位置となるように桁を設置した場合の2ケースの実験を実施したが、本論文で後述するケースは桁作用力がより大きく発生した桁下面が水面位置としたケースを代表として詳述する。波高と定常流速のパラメータは、表-1に示すように波高は10cmと5cm, 定常流速は50cm/sから100cm/sまで変化させた計6ケースの実験を行った。なお、波高10cm, 定常流速100cm/sのケースは、実スケールでそれぞれ5m, 7cm/sに相当し、このケースを標準ケースとする。また、作用状況の変化を分析するために、定常流が作用していない孤立波のみの実験も合わせて行った。

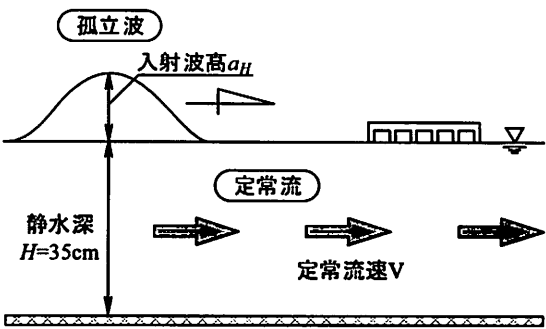


図-6 実験ケース概要

表-1 実験ケース一覧

Case	a_H [cm]	V [cm/s]	
A0	10	-	孤立波
A1		50	定常流 + 孤立波
A2		75	
A3		100	
B0	5	-	孤立波
B1		50	定常流 + 孤立波
B2		75	
B3		100	

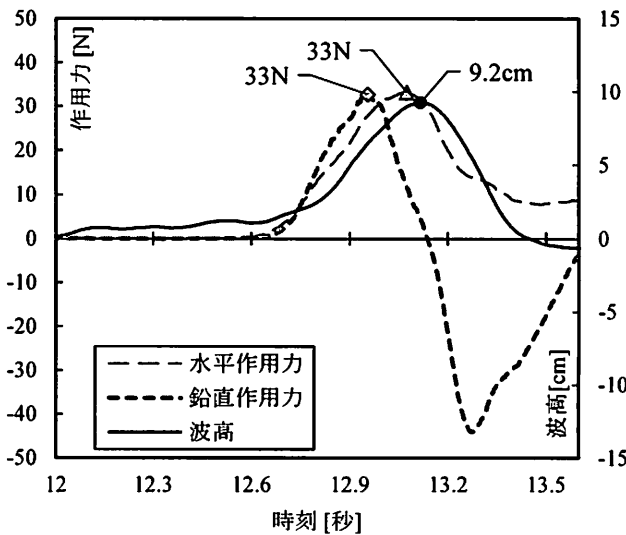


図-7 入射波高と作用力の時刻歴波形

4. 実験結果

(1) 標準ケースの作用力特性

ここでは、波高10cmの孤立波と定常流速100cm/sとなる定常流を組み合わせた標準ケースであるケースA3の実験結果を代表例として示す。

a) 波高

図-7に側壁を介して桁横に設置したH6波高計の時刻歴波形を示す。H6波高は桁に衝突した際の波の乱れの影響が無い波高であり、ここでは入射波高 a_H として考える。同図より、目標波高10cmに対して若干

の誤差は生じているものの、ほぼ目標波高の孤立波が桁に作用していることが分かる。

b) 水平作用力

図-7に桁模型に設置した分力計で計測された水平作用力の時刻歴波形を示す。同図の時刻歴波形は著者らの実験²⁾と同様に、治具の共振の影響を排除するために1/10秒の移動平均処理を行っている。同図より、水平作用力は桁横に設置した波高の増加に伴い増大し、波高が最大となる時刻とほぼ同時刻で最大33Nとなる。

c) 鉛直作用力

図-7に桁模型に設置した分力計より計測された鉛直作用力の時刻歴波形を示す。鉛直作用力の時刻歴も水平作用力同様のデータ処理を行っている。同図より、鉛直作用力は水平作用力と同時に作用し始め、水平作用力が最大時となる時刻より0.1秒早く、上向きの鉛直作用力が最大33Nとなる。その後、桁側面に衝突し上昇した水の流が下向きに流れを変え桁模型上面に流が作用することで、下向きの作用力が上昇し始める。

d) 水平流速

図-8に側壁を介した桁横に設置したV1流速計、および静水深中央に設置したV3流速計の時刻歴波形を示す。まず、V3流速計の時刻歴波形は、造波から12.5秒までは静水深中の定常流の流速を計測しており、その定常流速は概ね100cm/sである。12.5秒以降に造波した孤立波が桁模型に到達するため、V3流速が増加し始め、最大178cm/sまで増加する。同様にV1流速の時刻歴波形は、桁模型に孤立波が到達すると流速が増加し始めて最大167cm/sに増加し、V1とV3の最大流速はほぼ同一となる。

以上より、異なる高さ方向に流速の増加傾向と最大値は概ね同様であり、このことから高さ方向の流速分布はほぼ一様であるといえる。

(2) パラメータ実験結果

ここでは、波高10cmのケースの作用力の実験結果を示す。なお、波高5cmのケースは傾向が同様であったので省略する。

図-9、図-10は、作用力の時刻歴波形である。同図の時刻は、各ケースH6波高が最大となる時刻で同期をとっている。まず、水平作用力は孤立波実験であるA0は最大で約9Nの作用力であるのに対して、定常流を伴う孤立波実験では定常流速の増加に伴い、作用力が増加し、定常流速100cm/sであるA3では33NとA0に比べて4倍程度作用力が増加する。一方、鉛直作用力はA0で最大33Nであるのに対して、定常

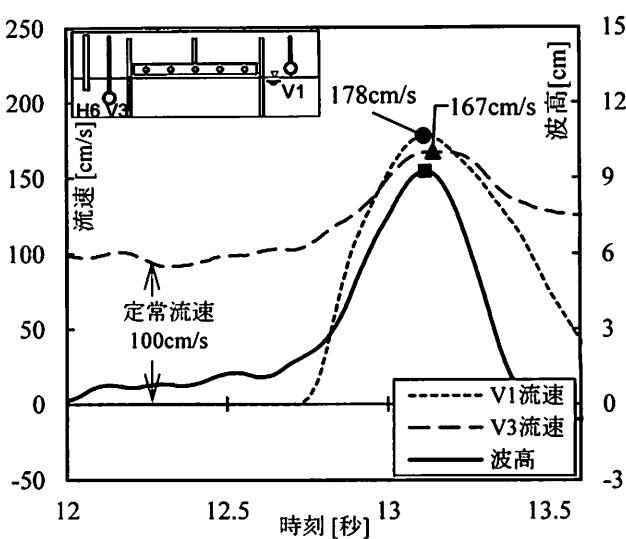


図-8 水平流速の時刻歴波形

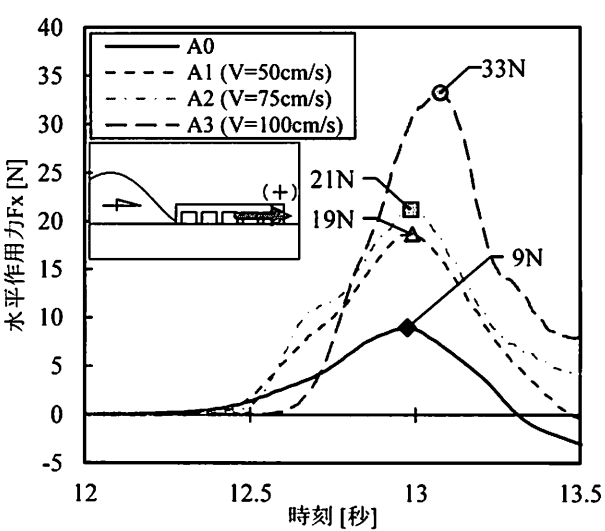


図-9 水平作用力の時刻歴波形

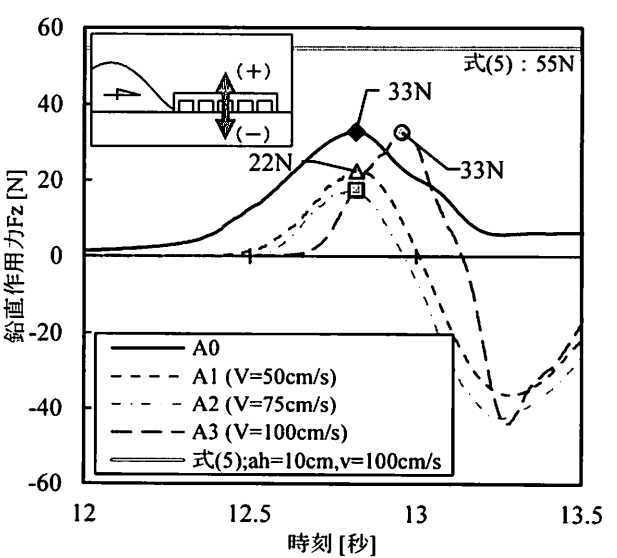


図-10 鉛直作用力の時刻歴波形

流を伴う孤立波実験では定常流速が増加すると上向きの鉛直作用力は減少するものの、定常流速100cm/sであるA3では再び上向きの鉛直作用力が増加し最大33Nとなる。2章において提案している鉛直方向の設計作用力式である式(5)を同図に合わせて示す。波高10cmとして式(5)より算出した鉛直作用力は55Nであり、段波による作用力と持続波による作用力（浮力）を足し合わせることで安全側の評価となることが分かる。

(3) 鉛直作用力の分析

ここでは定常流速の変化に伴う鉛直作用力の作用状況の変化について分析する。

図-11は定常流を伴う孤立波実験において、定常流速が異なる2ケースの上向きの鉛直作用力が最大となる時刻、および桁位置の波高が最大となる時刻で桁の津波作用状況を比較した図である。まず、図-11(a)に示す、定常流速75cm/sであるA2の津波作用状況をみると、実線で示す鉛直作用力最大時の波形状は桁側面に津波が衝突し越流した流れが、桁模型上面下流側に作用し始めていることが分かる。また、破線で示す0.22秒後の波形状からは、越流したその流れは桁模型上面中央部から上流側の面にかけて作用していることがわかる。一方、図-11(b)に示す、定常流速100cm/sであるA3の津波作用状況をみると、実線で示す鉛直力最大時の波形状は流速が速いことから、桁を越流した流れは桁模型上方に大きく越流し、破線で示す0.12秒後の波形状からは桁模型背面に越流した流れが周り込み、桁模型上面には流れはほとんど生じていないことが分かる。以上より、定常流速が遅い場合は、越流した流れが早期に桁模型上面に作用し下向きの作用力が増加し、桁の鉛直作用力は減少する。一方、定常流速が速い場合は、桁模型上面に作用する下向きの作用力が生じないため、桁の鉛直作用力は増加したと考えられる。

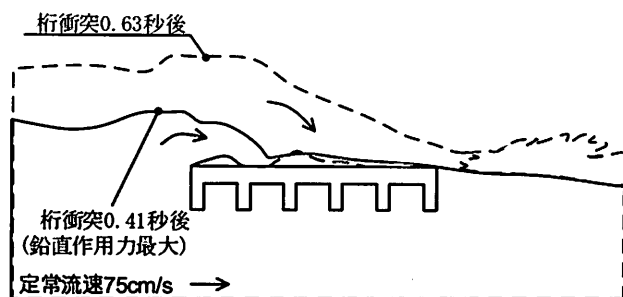
(4) 水平作用力の分析

1) 既往の実験結果との比較

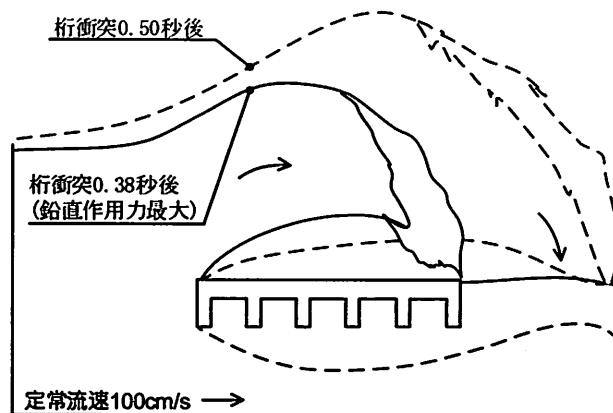
水平作用力の分析には、先に述べた設計作用力式に含まれる、孤立波実験から得られた評価式である式(4)を、下記に示す式(8)の様に1.9の定数を波圧係数 α とした式として用いる。

$$F_{nw} = \alpha \cdot \rho g a_H A_h \quad (8)$$

図-12に示すように、既往の実験³⁾によれば碎波の発生の有無により無次元波圧の定数 α が異なることが分かっており、式(4)に示す $\alpha=1.9$ は碎波および碎波を生じない孤立波の全てを包括する係数としている。



(a) ケース A2 (V=75cm/s)



(b) ケース A3 (V=100cm/s)

図-11 床版上面の流れ状況

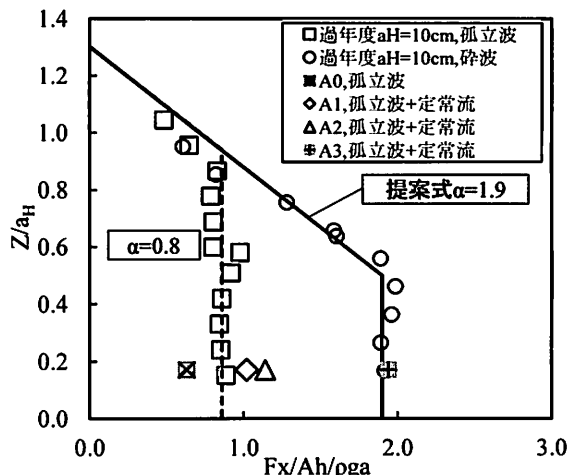


図-12 桁位置の流速の変化

定常流を伴う孤立波実験も同様に、式(9)に示すように、実験結果から定常流による作用力を差し引いた作用力から波圧係数 α を算出する。

$$\alpha = \frac{F_x - F_{sf}}{\rho g a_H A_h} \quad (9)$$

ここで、 α : 波圧係数、 F_x : 実験結果より得られた水平作用力

図-12に示す無次元波圧分布に本実験結果をプロ

ットすると、孤立波のみのケースA0および定常流速が最も速いケースA3の α はそれぞれ0.68, 1.94となり、前者は砕波を生じない孤立波と、後者は砕波の実験結果から得られた α に近似する。また、ケースA3の定常流速より遅いケースはケースA3とA0の間にプロットされており、定常流を伴う孤立波実験の水平作用力は波高が同一であることから流速による影響が大きいと考えられる。

2) 桁に作用する流速の変化

図-13は、桁横に設置したV1流速計の時刻歴波形を各ケースで比較した図である。同図より定常流を伴う孤立波実験の定常流速が50cm/sであるケースA1では最大流速は102cm/sとなり、孤立波実験であるケースA0における最大流速が51cm/sであることをふまえると、桁に作用する流速は、定常流による流速と孤立波による流速を足し合わせた結果と概ね一致する。すなわち、定常流実験結果と孤立波実験結果を足し合わせた式(1)が成り立つことを示している。同様に、定常流速75cm/sであるケースA2も最大流速が131cm/sであり、定常流による流速と孤立波による流速を足し合わせた結果と概ね一致する。一方、定常流速が100cm/sであるケースA3においては最大流速が178cm/sであり、足し合わせに対して1.2倍程度大きい流速となり、またA0ケースに比べ3.5倍程度流速が増加していることがわかる。

3) 水平作用力とフルード数の関係

桁に作用する流速が水平作用力に影響していることから、ここでは水平作用力を表す波圧係数 α と流速の関係を把握するため、フルード数 Fr を用いて水平作用力を評価する。式(9)にフルード数の定義を示す。なお、流速は代表流速として、桁位置のV1流速を用いることとする。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g(H+a_H)}} \tag{10}$$

ここに、 v ：桁横に設置したV1流速、 g ：重力加速度、 H ：静水深、 a_H ：入射波高

図-14に、式(9)から算出したフルード数 Fr と、実

験より得られた作用力から逆算して得られた波圧係数 α の関係を示す。同図より、過年度の実験結果においては、非砕波のケースではフルード数は0.5、砕波のケースでは1程度であり、フルード数の増加に伴い α が0.8から1.9に増加する。同様に、定常流を伴う孤立波実験では、A0とA3ではフルード数はそ

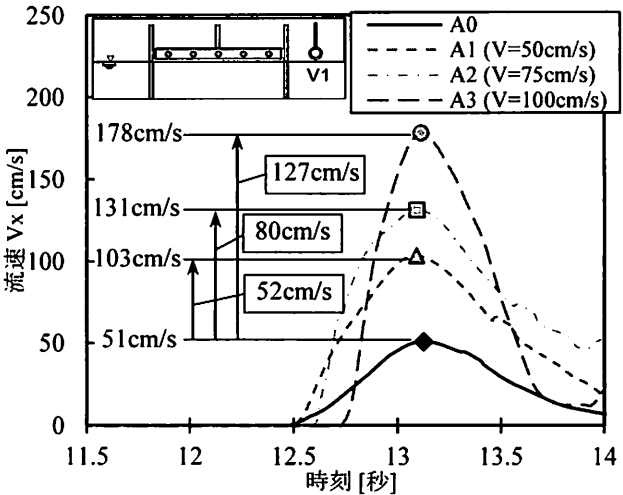


図-13 桁位置の流速の変化

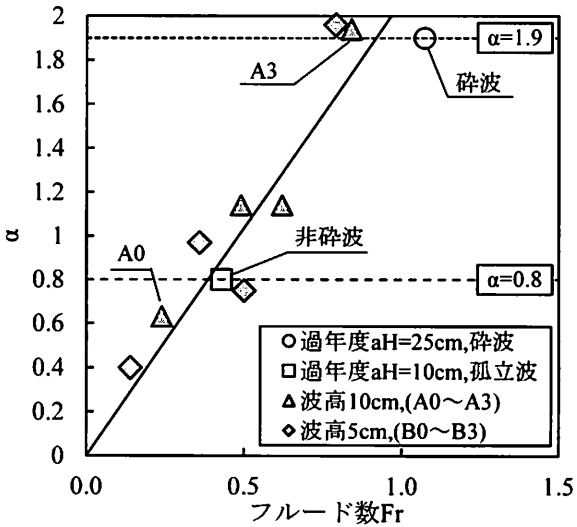


図-14 流速およびフルード数と α の関係

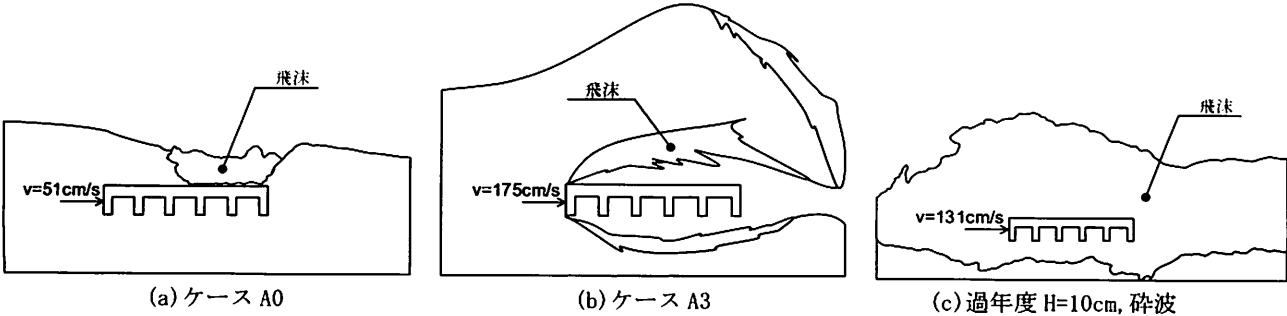


図-15 水平作用力最大時波形状の比較

れぞれ0.3, 0.9となり、フルード数の増加に伴い α が0.6から1.9に増加する。よって、水平作用力の特性は過年度実施した孤立波実験結果と砕波実験結果のフルード数と α の関係と概ね一致することから、ケースA3はフルード数の増加により、砕波実験に近い作用状態になったと考えられる。

図-15は、最も定常流速の速いA3ケース、孤立波実験であるA0ケース、および過年度実施した砕波の水平作用力最大時の波形状をビデオ映像よりトレースした図である。まず、ケースA0は定常流は流れておらず孤立波のみの実験であり、桁側面に衝突後に桁を越流した流れが若干飛沫となっているものの、孤立波の形状は概ね保ったままである。一方、過年度実施した砕波実験では桁位置に津波が到達した時点で津波先端は破碎しており、桁に衝突することで、さらに大きな飛沫が生じ白波が立っている。ケースA3は流速100cm/sの定常流が流れている状態で孤立波が作用しており、桁に衝突することで桁上面、下面および背面で多くの飛沫が発生し白波となっており、より砕波実験に近い津波の衝突状態であることが分かる。

以上より、定常流速の速いA3ケースの作用状況は設計式に用いられている砕波実験結果に近い状況であったことから、A3ケースの作用力は、設計式より得られた作用力と同程度の力になったと考えられる。

5. まとめ

準定常的な持続波を模擬した定常流と擾乱を模擬した孤立波を組み合わせた水理実験から、橋桁に擾乱が衝突した際の作用力特性を分析した。

以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 擾乱の代表例として陸前高田地区で観測された河川を遡上する津波を分析した結果、流速5m/s程度の準定常的な流れに加え、擾乱高が3m程度である孤立波性状の水面形が確認でき、この水面形は架橋地点によっては橋桁への衝突も考えられる。
- (2) 準定常的な持続波に生じる擾乱が橋桁に衝突した場合を想定し、定常流を伴う孤立波実験を行った。実験結果から、橋桁に作用する鉛直作用力は桁模型上面に越流した流れが作用することで、孤立波実験での作用力33Nに比べ上向きの鉛直作用力は17Nまで減少するものの、定常流

速が100cm/sと速い場合は越流した流れが桁模型上面に作用することなく桁背面に周り込むため、再び33Nまで作用力は増加する。しかし、その作用力は孤立波実験程度であることふまえると、擾乱が鉛直作用力に及ぼす影響は孤立波実験で得られた作用力を準定常的な持続波による作用力に足し合わせることで簡易的に考慮できると考えられる。

- (3) これに対して橋桁に作用する水平作用力は、本来の孤立波が持つ流速51cm/sに加え定常流速が加わり、桁に作用する流速は最大で178cm/sまで増幅するため、定常流速が速い場合は砕波実験結果に近い作用状態となり波圧係数 α が1.9程度になると考えられる。以上より、擾乱が水平作用力に及ぼす影響は、定常流速が100cm/s程度（実橋換算6m/s）であれば、砕波実験で得られた作用力を準定常的な持続波による作用力に足し合わせることで簡易的に考慮できると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 幸左賢二, 秋吉秀一, 二井伸一, 木村吉郎: 津波による橋梁への水平作用力に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.57A, pp. 442-453, 2011.
- 3) 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, pp.I_876-I_880, 2014.
- 4) 土木学会: 土木技術映像配信サイト, 東日本大震災アーカイブプロジェクト・震災関連映像, 2015年6月15日閲覧, <http://jsce.metamovics.jp/category/44/view/1044>
- 5) 長谷川和義, 山口甲, 伊賀久晃, 辻珠希: 急勾配河川における三角状水面波列の発生条件について, 土木学会北海道支部論文報告集第66号, 2009.
- 6) 井上卓也, 清水康行, 木村一郎, 川村里実: 1次元ブシネスク方程式モデルを用いた豊平川における三角状水面波列の数値計算, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.4, pp.I_997-I_1002, 2011.