

波形状に着目した桁への作用力評価

田中将登¹・幸左賢二²・佐藤崇³・佐々木達生⁴・付李⁵

¹非会員 九州工業大学 工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

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

³正会員 工修（株）長大 福岡構造技術部（〒810-0014 福岡市中央区渡辺通1-1-1サンセルコビル6F）

⁴正会員 大日本コンサルタント（株） 技術統括部（〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1）

⁵学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

1. はじめに

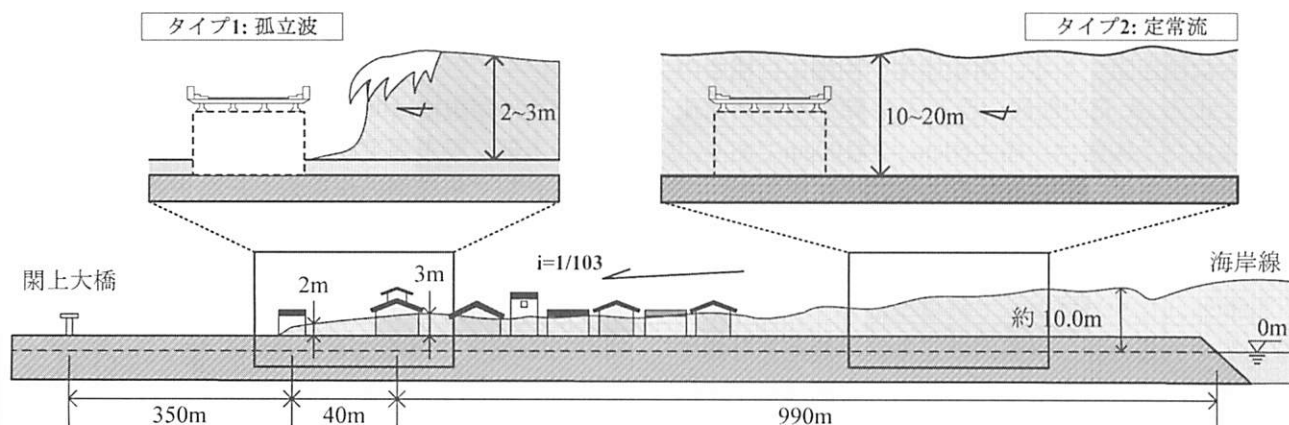
2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（ $M_w=9.0$ ）に伴う津波により、東北地方太平洋沿岸部の浸水域で甚大な被害が生じた。今回の津波により、建築物ばかりではなく、橋梁や道路盛土等の道路構造物の被害が多数生じている。著者らは地震発生後、東北地方太平洋側沿岸の被害調査を実施し、桁流出等の多数の橋梁被害を確認している。

近年の研究成果から、今回の巨大地震では2種類の津波が発生していた事が明らかとなりつつある。図-1は仙台市若葉区および名取川を遡上した際の、海岸線から約1kmの範囲の津波形状の概略図¹⁾である。津波全体の形状は1/103と小さい水面勾配であった。波先の形状をみると、2m～3mの小さな孤立波性状（タイプ1）となっている一方、津波が堤防を越流した沿岸付近では、10m～20mの水深で、水面勾配は非常に小さな定常流性状（タイプ2）の津

波形状であった。一般的に橋梁にはこれら2種類の津波が作用していたと考えられる。

耐津波設計において、上記2種類の波形状の津波に対する適切な設計法は未だ確立されていない。孤立波性状の津波に対して、著者らは水理実験²⁾³⁾から橋桁における津波外力の定式化を提案している。一方、定常流性状の津波に対して、橋桁に対する作用力特性に関する研究は、例えば山内⁴⁾等が散見されているが、その数は極めて限られている。

そこで本研究では、橋梁を対象に定常流性状の津波による橋桁への作用力を評価するための水理実験を実施した。水理実験では、回流装置を用いることで、長水路内で定常流状態を再現し、定常流の流速および桁下高を変化させ、水平波力、鉛直波力、波高、流速の測定を行い、得られた計測結果から、津波外力の橋桁に対する作用特性についての検討を行った。なお、本論文では、水平波力に着目した考察を行った。



仙台市若林区の津波形状
図-1 津波形状の概要

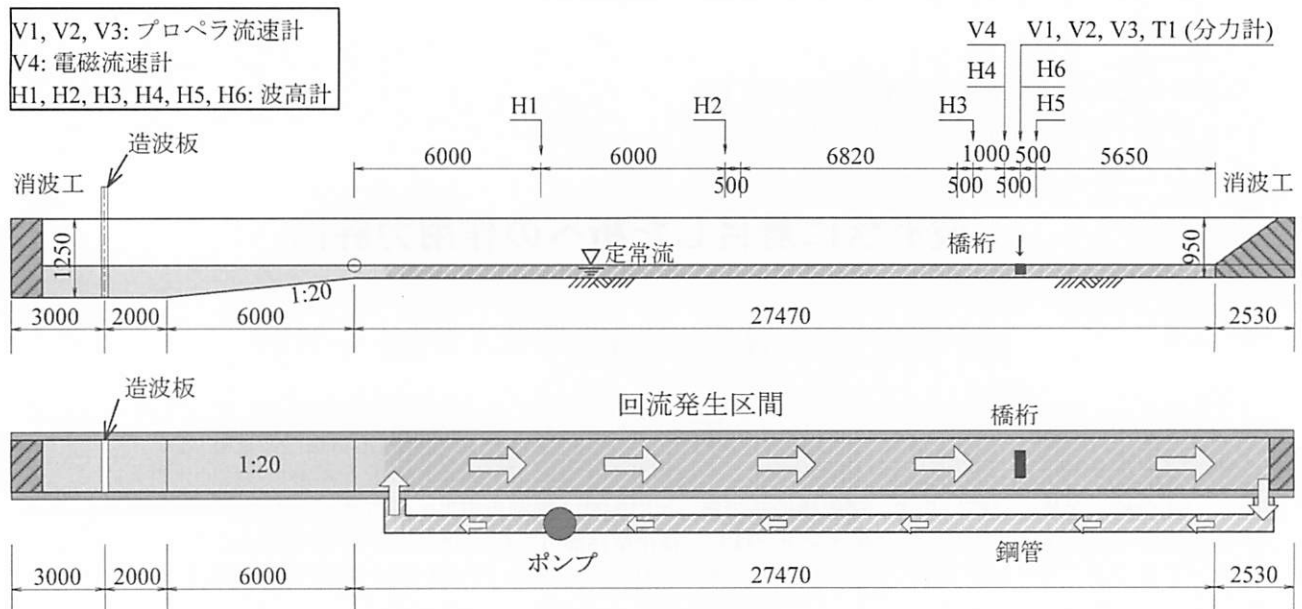


図-2 実験装置概略図

2. 実験概要

(1) 実験装置

使用する長水路は、長さ41m、幅80cm、橋桁模型位置での水路深さ95cmの片面ガラス張りの水路である。実験の全体図および平面図を図-2に示す。長水路に設置されている鋼管は水路に直接つながっており、この鋼管に介した回流ポンプを回転させて水路内の水を流入、流出させて水路内に定常的な流れを発生させることで定常流状の波を模擬した。

橋梁模型の対象は、著者ら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。桁模型図を図-3に示す。縮尺は1/50で、模型の橋長は40cm、幅員19cm、構造高3.4cm（実橋換算で橋長19.1m、幅員10.2m、構造高1.7m）とした。今回模擬した定常流状の津波の作用を受けた橋梁上部構造に対して模型の縮尺は、桁高で1/65、桁幅で1/58であり、概ね模型の縮尺は等しい。

模型位置付近の状況を図-5に示す。図中左は前面図で右は側面図である。橋梁模型の両端には橋台の影響による3次元的な波の乱れを排除するために側壁を設けた。側壁は、高さ60cm、幅100cmであり、橋桁模型が側壁の中心となるように設置した。

(2) 計測方法

計測器は定常流によって桁模型に発生する作用力を計測する分力計、水路内の定常流の流速を計測する流速計、波形状をとらえる波高計を図-5に示す位置に設置した。分力計は、水平波力 (F_x)、鉛直波力 (F_z) と回転モーメント (M_y) が計測できる3分

モデル寸法 (1/50)

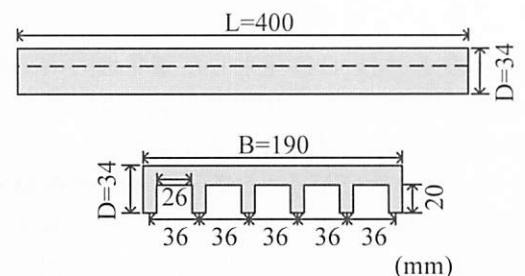


図-3 桁模型図

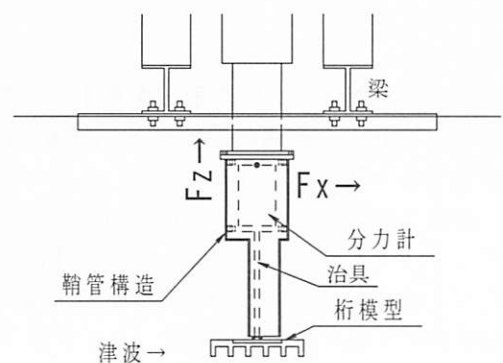


図-4 分力計設置図

力計で、仕様規格は980Nである。図-4に示す通り、水槽の上部に梁を固定し、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。治具に津波が作用しないように、鞅管構造で分力計と治具を覆い、模型のみに作用する力の抽出に配慮した。なお、事前に治具と分力計の剛性検証を行い、固有周期が30Hz程度であることを確認した。V1,V2,V3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、V4流速計は水平方向と鉛直方向の流速を測定できる電磁流速計を使用した。V3流速計は定常流内の

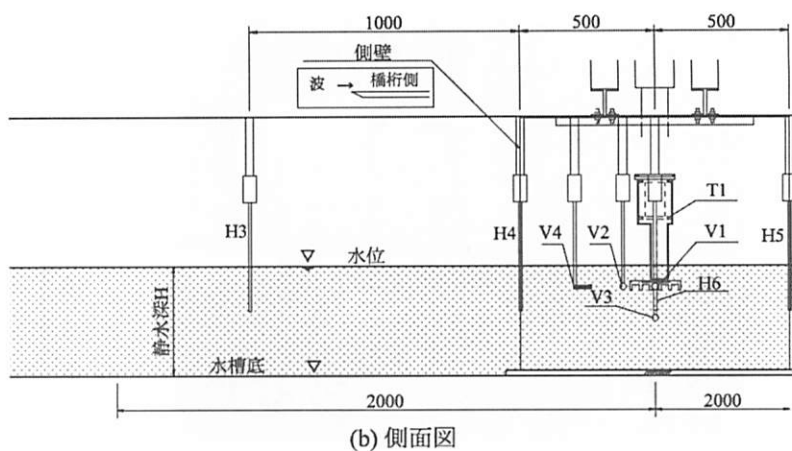
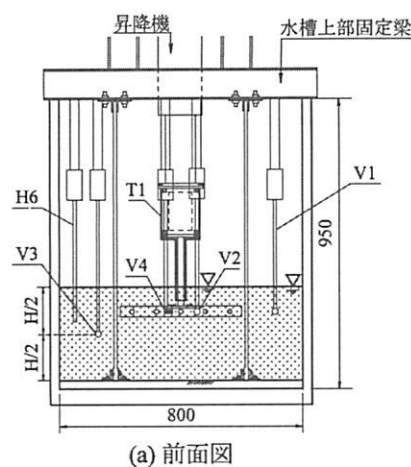


図-5 計測装置設置位置

平均的な流速を捉えることを目的として、静水深中央に設置した。このV3流速計で得られる流速を管理流速とし、回流ポンプの回転数を調整して定常流内の流速を管理した。V2流速計は桁前面に設置し、V1流速計はV2流速計と同じ高さで、桁に衝突する際の乱れがない流速を計測するため、側壁とガラス板の中心に設置した。V4流速計は、定常流内の鉛直方向の流速を計測するために橋桁模型300mm前面に設置した。計測のサンプリング周期は全ての計測器において1/1000sとした。

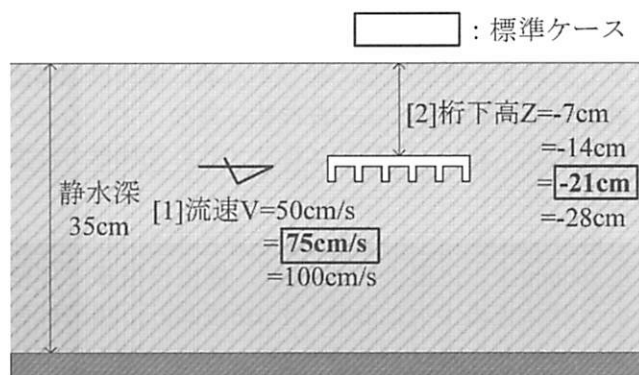


図-6 実験パラメータ

(3) 実験パラメータ

パラメータを設定する前に、基本ケースの設定を行った。まず、基本ケースの定常流速Vは75cm/sとした。この流速の値は、実橋換算すると東北地方太平洋沖地震において観測された河川を遡上する津波の流速6m/sに概ね該当する。次に桁下高Zは、過去の孤立波実験と比較を行うことを目的に、静水面から-21cm（海底床から14cm）の位置を基本ケースとした。静水深も同様に、過去の孤立波実験と比較するために35cmとした。

図-6に本実験のパラメータ模式図を、表-1にパラメータの値を示す。パラメータは[1]水深中央部における定常流の平均的な流速、[2]静水面から桁下までの距離を示す桁下高の2つである。パラメータ[1]の流速Vについては、前述のようにV3流速計で管理した。流速の違いによる桁への影響を確認することを目的として、基本ケースである75cm/sから ± 25 cm/sとした3ケースを作用させた。表-1に示すように、各流速のパラメータに対するフルード数は、定常流速50cm/s、75cm/s、100cm/sに対し、それぞれ0.27、0.40、0.54となる。パラメータ[2]の桁下高は、定常流内の高さ方向の水平流速分布と、それに応じて作用力分布を確認するため、7cmピッチで設定した。

表-1 実験パラメーター一覧

パターン	静水深 [cm]	定常流速V [cm/s]	桁下高Z [cm]	フルード数
パターン 1	35	50	-7 -14 -21 -28	0.27
パターン 2		75	-7 -14 -21 -28	0.40
パターン 3		100	-7 -14 -21 -28	0.54

なお、各ケースの再現性を確認するために同じ条件でパターン1は2回、パターン2、3は3回実験を行った。

3. 代表的な計測結果

(1) 計測結果

ここでは標準ケースである定常流速75cm/s、桁下高を水面から-21cmとした実験の計測結果を示す。

写真-1は、標準ケースの実験状況である。写真は

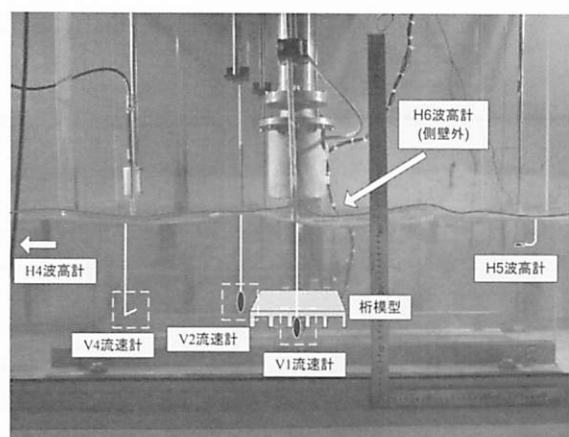


写真-1 実験状況

左側から右側に向かって定常流が流れている様子を示していて、橋桁模型に衝突する前、橋桁模型側面、橋桁模型に衝突した後の波形状は異なっていることがわかる。また、写真内に後述する計測機器の位置関係を示す。

図-7は、静水時を35cmとした波高であり、橋桁模型500mm前方位置のH4波高計、橋桁模型横で側壁とガラス板の中央に設置したH6波高計、橋桁模型500mm後方位置のH5波高計の3つの時刻歴波形である。波高の計測結果は、流速および水平波力の波形に比べ電気ノイズがほとんど生じていないため、1/1000s間隔で取られたデータをそのまま用いている。橋桁模型500mm前方での波高平均値は34.1cm、橋桁模型横では32.3cm、橋桁模型500mm後方では32.8cmとなった。なお、この波高では写真-1に示した側壁間における水面の波形状は捉えていない。

図-8は、側壁とガラス板の中央位置にあるV1流速計から得られた水平流速の時刻歴波形である。図内の時刻歴波形は、高周波のノイズを除去するために1/10sの移動平均処理を行っている。また、その波形から求めた平均値、最大値、最小値をあわせて示す。このV1流速計で計測した流速値は、最大値、最小値、平均値でそれぞれ86.7cm/s、66.3cm/s、76.3cm/sであった。図-9は、橋桁模型300mm前面位置にあるV4流速計と橋桁模型前面位置にあるV2流速計から得られた水平流速の時刻歴波形である。V4流速計で計測した流速値は、最大値、最小値、平均値でそれぞれ81.1cm/s、60.3cm/s、72.8cm/sである。同様にV2で計測した流速値は、最大値、最小値、平均値でそれぞれ59.9cm/s、39.2cm/s、52.0cm/sである。

図-10は、橋桁模型に設置しているFx分力計から得られた水平波力の時刻歴波形である。図内の時刻歴波形は流速と同様に1/10sの移動平均処理を行なっている。この分力計から得られた水平波力の最大値、

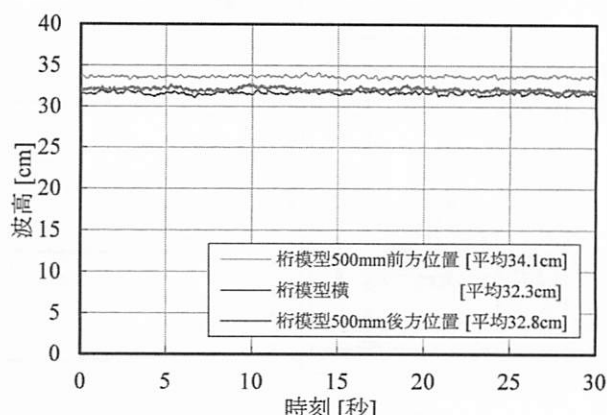


図-7 波高時刻歴波形

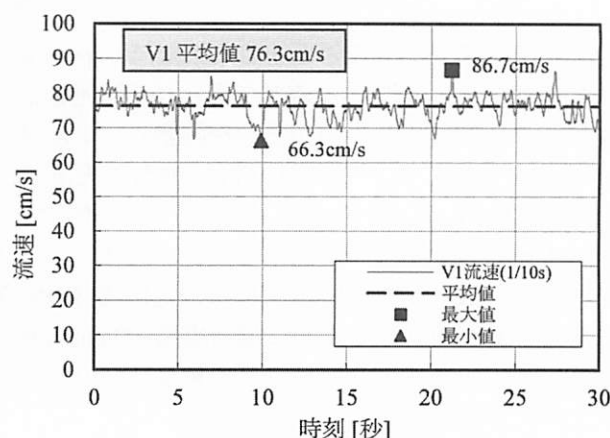


図-8 水平流速時刻歴波形 (V1 流速)

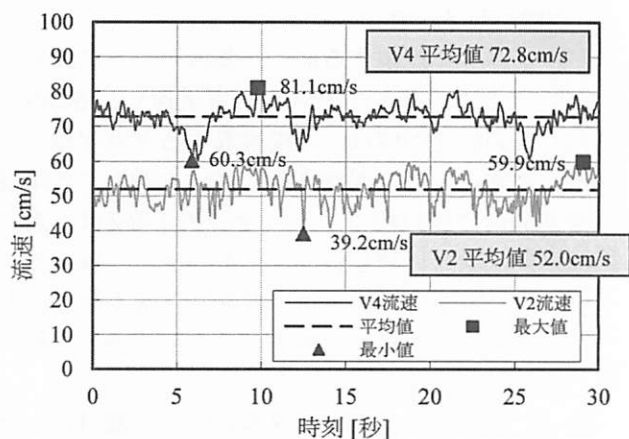


図-9 水平流速時刻歴波形 (V2, V4 流速)

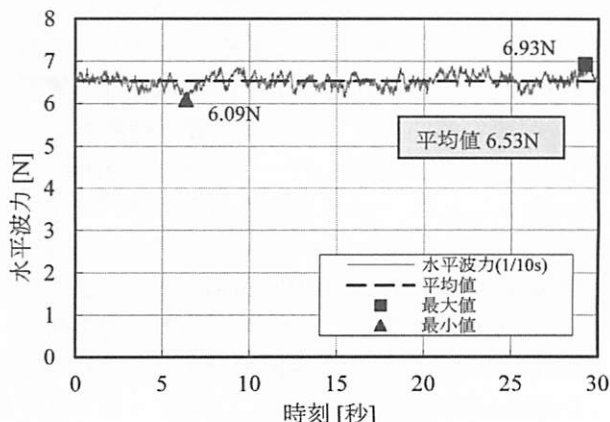


図-10 水平波力時刻歴波形

最小値，平均値でそれぞれ6.93N，6.09N，6.53Nであった。

(2) 考察

まず，波形状について考察をする。図-11に写真-1で計測した波形状の概略図を示す。図-7，図-11に示すように，側壁に波が衝突することで水面が乱れ，側壁縁端より前面にあるH4波高計の値に比べH6波高計，H5波高計の値は約2cm下がっており，さらに時刻歴波形が大きく変動してないことから，継続してその波形状が生じていることがわかる。次に水面の影響が，橋桁模型位置にどの程度影響しているかを確認する。

図-12は，模型設置から500mm前方に設置したH4波高計の値と，模型設置から300mm前方に設置したV4流速計から得られた鉛直流速と水平流速との比を時刻歴で示した図である。なお，V4流速計は深さ方向には橋桁模型位置と同じ-21cmに設置している。同図において鉛直流速/水平流速の値は，プラス側は上向きの成分，マイナスは下向きの成分であり，この値が1となる場合は，水平流速と鉛直流速は同じ値であり， $\tan^{-1}(1/1)=45^\circ$ となることから，2方向の合成した流速の向きは上向きに45度の角度に生じていることを意味する。同図より橋桁模型位置から300mm前方の桁下高-21cmの位置では，流速の向きは平均で4度($\tan^{-1}(4.6/73)=4^\circ$)上向きに生じている。各波形の最大値および最小値の発生時刻をみると，2つの波形では大きく差異が生じている。また，波形状を比較すると，2つの波形には相関は見られない。つまり定常流速75cm/sのケースの場合，側壁内に流入してくる水面の波形状の影響は，水深の深い位置では大きく影響していないことがわかる。

次に，水平流速と水平波力に関して考察する。まず，図-8と図-9に示す各流速の時刻歴波形を見ると，V2流速計はV1，V4流速計の平均値と大きく値が異なっていることが分かる。これは桁に衝突した際に橋桁模型前で波が跳ね返ることによって負の流速が発生したことによるものと考えられる。次に，図-9に示す桁前面のV2流速計と300mm前面のV4流速計の時刻歴波形と，図-10に示す水平波力時刻歴波形の波形状を比較すると，大きな波形状は一致している。また，流速と水平波力の時刻歴波形のばらつきは，流速に比べ水平波力のばらつきは小さい。

図-13は，実験より得られた水平波力と流速より，算出した抗力係数Cdと抗力係数の理論値を比較したものである。流体による作用力を算定する式として，以下の式(1)があげられる。

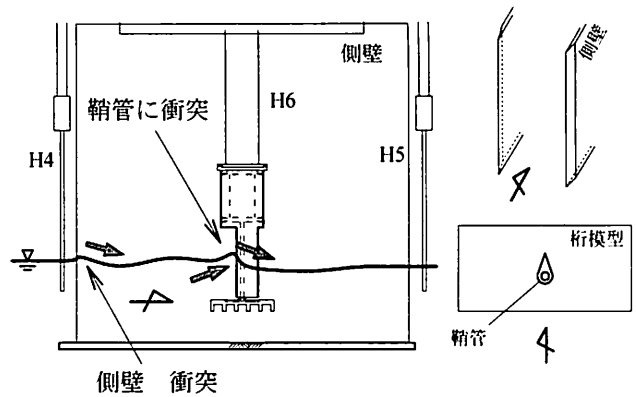


図-11 側壁間の波形状

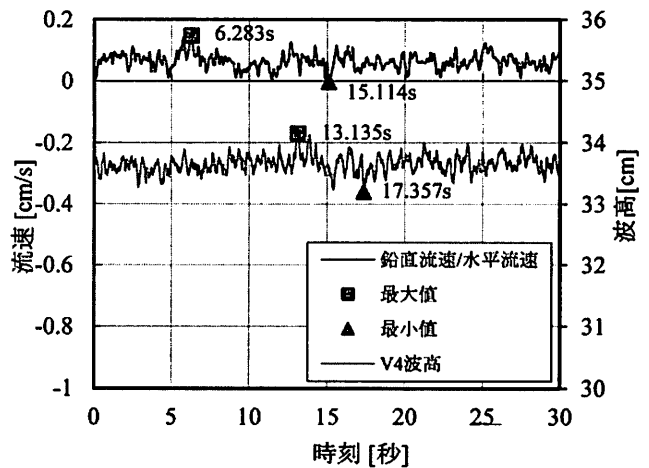


図-12 水面の乱による水中への影響

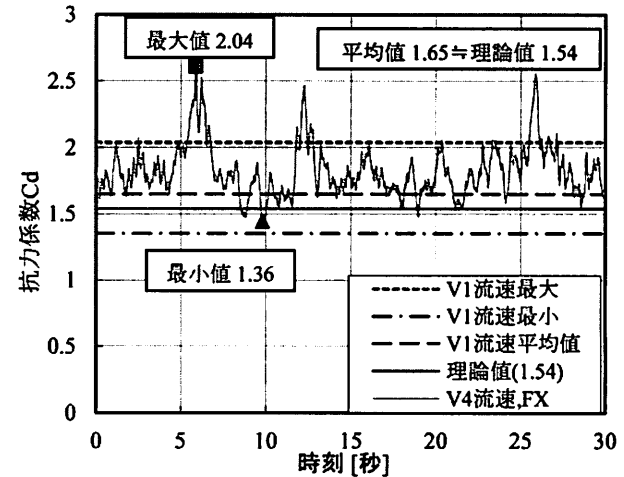


図-13 ばらつきの評価

$$F_x = \frac{1}{2} \rho_w C_d v^2 A \quad (1)$$

ここで ρ_w ：水の密度 (1000kg/m^3)， C_d ：抗力係数， v ：流速 (cm/s)， A ：被圧面積である。図内の抗力係数 C_d のラインは，実験より得られた水平波力 F_x とV1流速の最大値および最小値，平均値の値を用いて式(1)を変形させた以下の式より算出した。なお，図中の理論値とは，道路橋示方書⁵⁾に準拠し，式

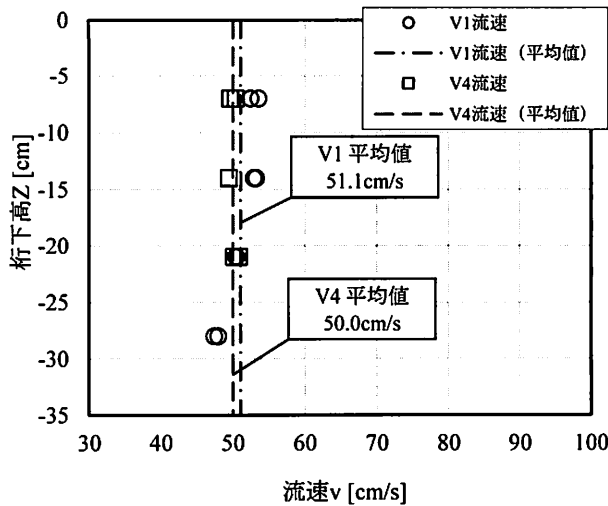


図-14 水平流速分布 (パターン1)

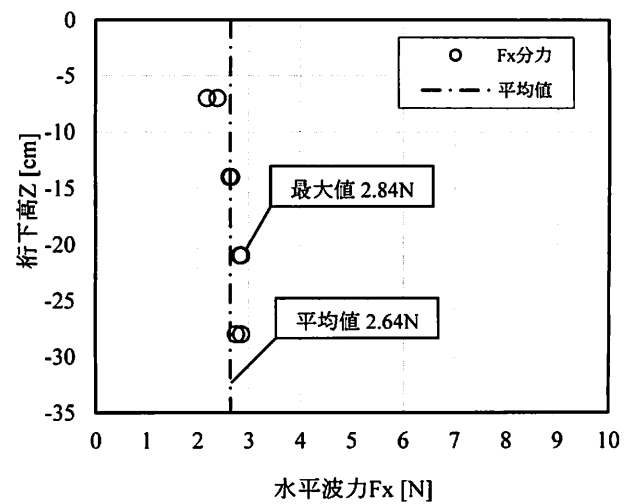


図-15 水平波力分布 (パターン1)

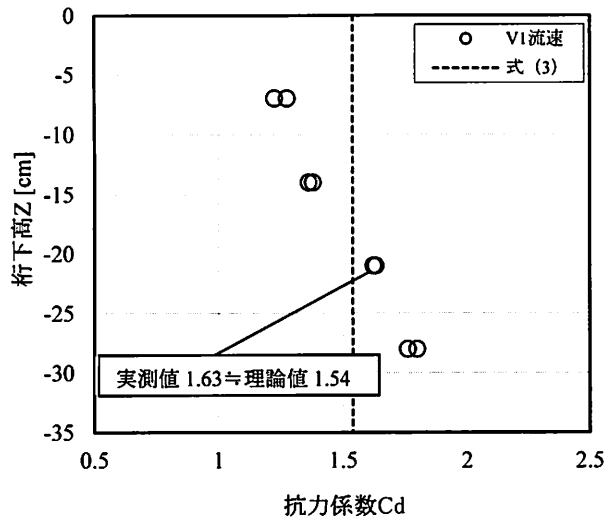


図-16 各桁下高における抗力係数

(3) より算出した値であり、1.54となる。

$$C_d = \frac{2F_x}{\rho_w v^2 A} \quad (2)$$

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

図内の時刻歴波形は、波形分布に相関が見られたV4流速計と水平流速を、各時刻ごとに式(2)から C_d を算出した結果であり、時々刻々と C_d の値が変化していることがわかる。また、式(2)を用いて平均値から C_d を算出した場合、 C_d の理論値との誤差は7%程度であり、基本ケースの計測結果では式(3)を用いて式(1)から水平波力を算出可能であると考えられる。また、V1流速の最大値と最小値から同様に C_d を算出すると、最大値に対しては理論値

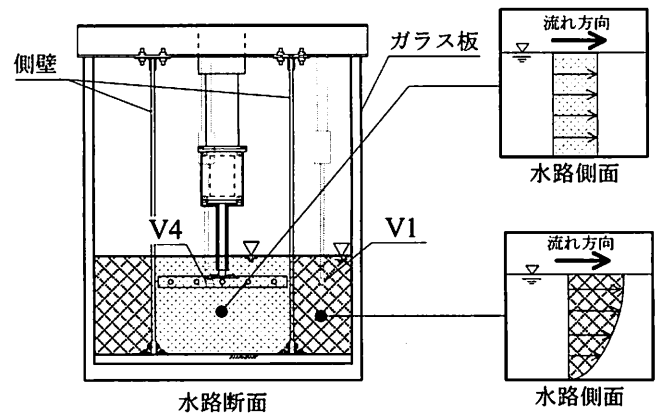


図-17 計測位置の違いによる流速分布の違い

と32%，最小値に対しては12%の差異が生じる。また、水平波力のばらつきは、流速のばらつきの2乗で大きく影響してくるにも関わらず、水平波力の波形のばらつきのほうが小さいことから、瞬間的な流速の変動に水平波力は影響していないことがわかる。すなわち、流速は平均値を用いて評価が可能であると考えられる。

4. パラメータ実験結果

ここでは、定常流速の違いによる水深方向の水平流速分布および、水平波力分布結果を示す。パラメータ実験では、パターン1の実験は同じケースを2回、パターン2、パターン3の実験は同じケースを3回行なっている。

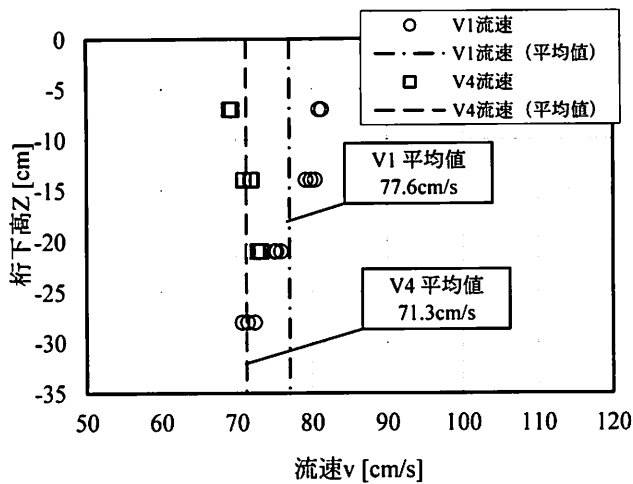


図-18 水平流速分布（パターン2）

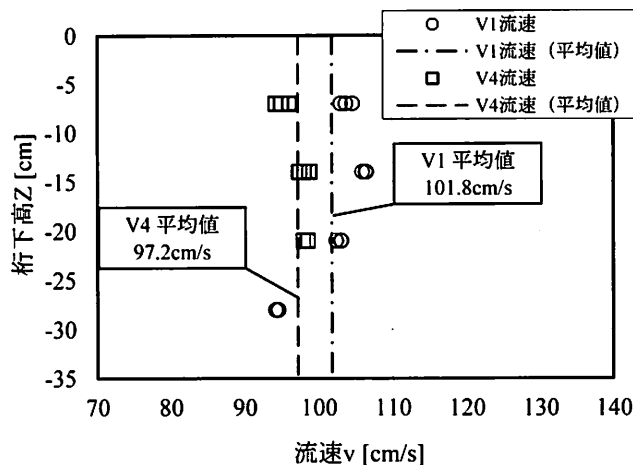


図-19 水平流速分布（パターン3）

(1) パターン1の実験結果と考察

図-14は、パターン1の水深方向の水平流速分布である。プロットした流速は橋桁模型横に設置したV1流速計の値と、橋桁模型の300mm前面に設置したV4流速計の値を用いた。計測結果は3章と同様に1/10s移動平均した波形の平均値をプロットしている。平均値は、V1、V4流速それぞれ51cm/s、50.0cm/sであった。

図-15は、パターン1の水深方向の水平波力分布である。3章と同様に分力計から得られた水平波力波形を1/10s移動平均し、その波形の平均値をプロットしている。V1流速と水平波力の分布を比較すると、水平波力の分布は、水深方向に直線的に分布しているものの、V1流速の分布は曲線的に流速が分布している。図-16はV1流速の結果から、式(2)を用いて各桁下高での C_d を算出した結果である。V1流速分布の平均値との差が小さく、水面および海底面の影響が少ないと考えられる水深中央付近の桁下高 $Z=21$ の位置での C_d は、理論値とほぼ等しい値となっている。また、流速の平均値との差が大きい位置での

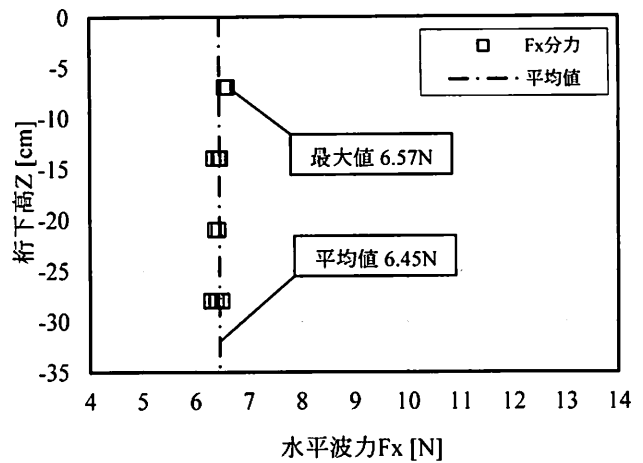


図-20 水平波力分布（パターン2）

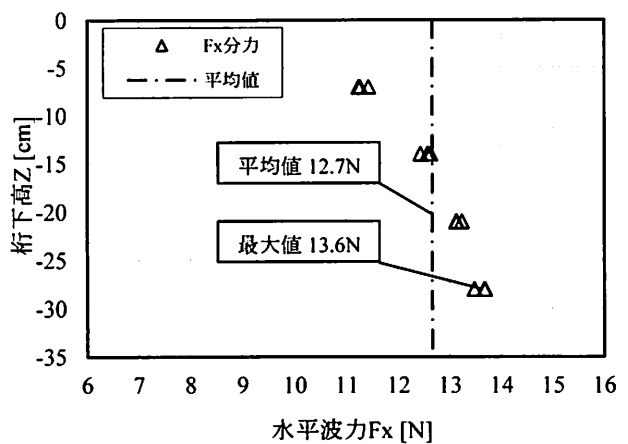


図-21 水平波力分布（パターン3）

C_d ほど、理論値との差が大きくなる傾向がある。一方、橋桁模型が設置してある側壁間の流速を計測しているV4流速計の流速分布は、水平波力同様に直線的な分布となっている。V4流速計は橋桁模型より300mm前面の流速を計測しているが、図-9に示すように、V4流速計と桁前面に設置しているV2流速計が、同様の波形状であったことから、波が橋桁模型に衝突する際の流速分布の形状は、V4流速計の流速分布と概ね等しいと考えられる。以上より、図-17に示すように、橋桁模型が設置してある、側壁間の流速分布と、側壁とガラス板間の流速分布は異なっており、それに伴い、水深方向の流速と水平波力の関係に差異が生じたと考えられる。

(2) パターン2とパターン3の実験結果と考察

図-18に定常流速75cm/sであるパターン2のV1流速計とV4流速計から得られた流速分布を、図-19に定常流速100cm/sであるパターン3のV1流速計とV4流速計から得られた水平流速分布を、図-20はパターン2の水平波力分布、図-21はパターン3の水平波力

分布である。

図-18に示すパターン2の流速分布をみると、パターン1と同様の傾向があり、水平波力分布は直線的に分布しているものの、V1流速の分布は曲線的に変化している。一方、図-19に示すパターン3の流速分布を見るとV4流速の分布も曲線的に分布し、図-21に示す水平波力分布も曲線的に分布しており、他のケースと傾向が大きく異なっている。桁下高-14cmから桁下高-21cmに橋桁模型を沈めた際の流速の変化は、V1流速は水深が深くなるにつれ流速が小さくなり、V4流速は流速がほぼ変化していないにも関わらず、水平波力が大きく増加している。写真-2は、パターン3の桁下高-14cmのケースの橋桁模型に定常流が作用した際の状況である。パターン3の実験のみ橋桁模型のウェブ間隔の気泡が、渦を巻いている状況ははっきりと確認でき、パターン1およびパターン2と、パターン3では抗力係数 C_d が変化していると考えられる。また、前章で述べた、側壁縁端に定常流が衝突することによる水面の乱れも、定常流速が100cm/sとなることで大きくなっており、長水路内が非定常流状態であったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、橋梁を対象に定常流性状の津波による橋桁への作用力を評価するために、回流装置を用いて長水路内で定常流状態を再現した水理実験を実施し、水平波力および水平流速の関係性の整理を行った。本研究より得られた知見を以下に述べる。

- (1) 基本ケースである水面から-21cm下がった位置にあるの橋桁模型に、定常流速75cm/sの定常流状態の津波が作用した際の流速と津波作用力の関係は、従来から用いられている流体による作用力の式で概ね評価できる。
- (2) パラメータ実験から得られた、定常流50cm/sであるパターン1および定常流75cm/sであるパターン2のケースでは、水深中央付近では側壁間の流速と、側壁とガラス板間の流速が概ね等しいことから、抗力係数 C_d の値は理論値とほぼ等しくなる。
- (3) 各測定位置での水深方向の水平流速分布を測定した結果、橋桁模型が設置してある側壁間の流

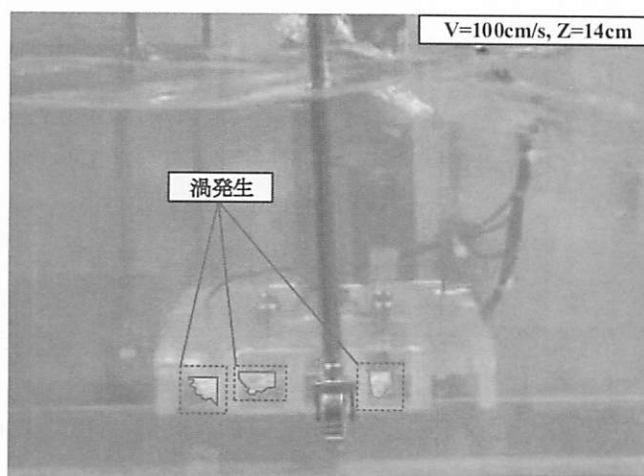


写真-2 ケース3の津波作用状況

速分布と、側壁とガラス板間の流速分布の形状は異なっており、これが水深方向の水平流速と水平波力の関係に差異が生じる原因と考えられる。すなわち、側壁とガラス板間の流速では、実際に橋桁模型に衝突する際の流速分布を捉えることができておらず、今後、より正確な流速分布を得る必要がある。

参考文献

- 1)Fu, L., Kosa, K., Shi, H., and Zheng, Y.: Damage to Structure due to Tsunami and Evaluation of Tsunami Velocity in Shizugawa, Proc. of JCI Vol.34, No.2, pp. 805-810, 2010
- 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-pp. 485, 2010
- 3)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-pp. 453, 2011
- 4)山内邦博, 上島秀作, 幸左賢二: 橋桁に作用する津波波力評価及び波力低減手法に関する検討, 第67回年次学術講演会概要集, I-475, pp. 949-pp. 950 2012. 9
- 5)社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説III コンクリート橋編, pp. 52-pp. 54, 2002. 3