長周期波を用いた橋桁作用力特性の評価

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)

E-mail: sato-tks@chodai.co.jp

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)

E-mail: kosa@civil.kyutech.ac.jp

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)

E-mail: tatsuo@ne-con.co.jp

本研究では衝撃波力を伴わない長周期の津波が橋梁上部構造に作用することを想定し、同じ寸法の橋桁模型を用い、準定常的な成分を模擬した定常流実験と水位上昇を模擬した長周期の孤立波実験を実施し、両実験を比較することで橋桁の津波作用力特性の検討を行った。実験結果より、橋桁に作用する水平作用力は定常流実験および長周期波実験ともにモリソン式に道路橋示方書に準拠した抗力係数を用いて評価が可能であることが明らかとなった。一方、鉛直作用力は水位上昇の影響により定常流実験に比べ長周期波実験では下向きの波力は減少するものの、両実験で上向きの波力は生じず、鉛直作用力は浮力が支配的であることが明らかとなった。

Key Words : tsunami, bridge girder, steady flow, long period wave

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

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。また、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¹⁾、その津波の形状は波高1～2mの碎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。この様な、河川を遡上する津波を模擬した水理実験としては、水路内の流量を一定とした定常流実験^{2)~5)}が行われている。一方、図-1に示すように、気仙大橋近傍で観測された河川を遡上する津波では、橋脚天端に津波が到達した時点で2m/minの速度で水位が上昇しており、橋桁には準定常的な流れの成分に加え水位上昇の影響も把握する必要があると考えられる。しかし、水位上昇を伴う定常流実験を行うことは難しく、橋桁の作用力特性に水位上昇がどの程度影響するかは明らかとなっていない。

そこで、本研究では水位上昇を伴う準定常的な持続波が橋梁上部構造に作用することを想定し、準定常的な成分を模擬した定常流実験と、水位上昇の影響を押し波初動の長周期波の水位変動として模擬した長周期波実験を

図-1 観測された河川を遡上する津波の波形状

実施し、両実験を比較することで橋桁の津波作用力特性の検討を行った。

2. 定常流実験

(1) 実験概要

a) 実験装置

図-2に定常流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、長さ41m、幅0.8m、造波装置位置で1.25m、桁模型位置で0.95mの高さを持つ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。なお、発生させた回流の流速は、ポンプの回転数で制御する。

橋桁模型周辺部は、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。対象とした橋桁は、著者ら⁹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。橋桁模型図を図-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とし、圧力計を桁側面、床版上・下面に設置している。

b) 計測機器

計測機器は前述の図-2に示したように定常流によって橋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 (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、同図中のV1, V3に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た。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。V1流速計は橋桁と同一の高さに設置し、橋桁に作用する流速を計測している。

c) 相似則と実験ケース

本実験における相似則は、一般的な水理実験では重力の作用が卓越する流れであるため、フルード数 Fr による相似則を用いた。

図-4に実験ケースを示す。設定した水槽内の平均的な水平流速 V (回流流速) は50cm/s, 75cm/s, 100cm/sの3ケースとし、それぞれCase1, Case2, Case3とした。Case3の流速は実橋換算すると7m/sの値であり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。3ケースのフルード数 $Fr (=v/(ga)^{0.5})$ の範囲は0.2~0.6となることから水槽内の流れは常流である。なお、本実験では Fr 数の等しい流れ場における水深方向の作用力特性を把握することを目的に、桁中心位置 Z は、水平流速のケース毎に水面から7cmピッチで桁位置を変化させた。

(2) 実験結果

a) 代表ケースの実験結果

まず、計測データの処理方法の説明として、Case3のケースで桁中心位置 $Z = -7\text{cm}$ を代表例として示す。図-5は、水平流速 V_x (V1流速計) と水平作用力 F_x の時刻歴波形である。同図の時刻歴波形は電気ノイズを除去するため、計測生データを1/10sの間隔で移動平均した平滑化データ処理を行った。平滑化した波形データは、流速および水

図-2 定常流実験概要図

図-3 桁模型図

図-4 実験ケース (定常流実験)

図-5 F_x , V_x 時刻歴波形 ($V=100\text{cm/s}$, $Z=-7\text{cm}$)

平作用力のいずれも、最大値と最小値の誤差は10%程度あり、ほぼ一定値であることから、評価には同図破線で示す平均値を用いることとした。

図-6は分力計から得られた鉛直作用力 F_z と、桁模型に設置した圧力計の計測結果から得られた圧力積分値の時刻歴波形である。同図も水平作用力と同様に平滑化データ処理を行っている。同図より、計測時間30秒間において若干のばらつきは見られるものの、水平作用力と同様に評価には同図破線で示す平均値を用いることとした。なお、橋桁に作用する鉛直作用力の正の値が上向き、負の値が下向きに力が作用していることを表しており、図-6のケースにおいては下向きの作用力が生じていることとなる。

図-7は橋桁周辺の波形状と床版上下面に設置した波圧の分布である。図-6に示すように、床版上下面に設置した圧力計から得られた波圧の積分値は分力計で得られた鉛直波力と同様の波形であることから、鉛直作用力は床版上下面に生じる波圧によるものと考えられる。図-7に示す波圧分布は床版上面で正圧が生じており、下面の波圧は下流側で負圧、上流側で波圧はほぼ生じておらず、床版上面の波圧が支配的である。波形状とあわせて波圧分布形状を分析すると、床版上面では桁側面に衝突した流れが越流することで、床版上面には上から下向きに流れが作用しており、これにより床版上面では正圧が生じていると考えられる。一方、床版下面では下流側の各桁間で残存していた気泡により渦が生じていることが確認でき、これにより負圧が生じたと考えられる。

b) パラメータ実験結果

図-8に示すのは、Case1からCase3の全ケースの水深方向の水平作用力分布である。同図の値は3分力計から得られた値をそれぞれ前述した1/10s移動平均した後の平均値をプロットしている。同図より水平作用力分布は、流速の速いケースにおいて水位面付近では若干、他の桁位置に比べ小さいものの、深さ方向に概ね一定である。

図-9に示すのは、図-8同様に整理した水深方向の鉛直作用力分布である。同図より、鉛直作用力は流速が遅い場合は深さ方向に概ね一定の値を示すものの、流速が増加するにつれ水面に近くなるほど下向きの作用力が増加することがわかる。これは、図-7に示すように、桁側面に衝突した流れが越流することで床版上面に上から下向きに作用する流れが、流速に応じて増大するためである。定常流中の橋桁には波力に加え浮力も生じており、ここで整理した鉛直作用力には浮力も含まれている。計測された鉛直作用力は最大で概ね浮力相当であり、水面の影響が小さい水深の深い所では、流れがより定常状態に近くなったことから、流速に影響なく鉛直作用力は浮力相当の値となったと考えられる。

図-6 F_z , $\Sigma p \times A$ 時刻歴波形 ($V=100\text{cm/s}$, $Z=-7\text{cm}$)

図-7 波形状と波圧分布 ($V=100\text{cm/s}$, $Z=-7\text{cm}$)

図-8 水平作用力分布

図-9 鉛直作用力分布

3. 長周期波実験

(1) 実験概要

図-10に長周期波実験で用いた長水路と計測機器類の設置状況図を示す. 同図に示すように, 長さ44m, 幅2.5mの水路を貯水部(17m)と計測部(21m), 排水部(6m)に分割し, 水中ポンプのモータ回転数を正弦波インバータで制御して貯水部に水を汲み上げ, 整流区間を通じて計測部に供給した. 計測部には海底床を模擬した傾斜区間と地表面を模擬した平坦部を有する仮床を設置し, 仮床の背後には排水のための区間を設け, 水流は模型に作用した後に, 模型背後で反射すること無く排出される仕組みとなっている.

長周期波実験に用いた桁模型は, 定常流実験で用いた桁模型と同じ模型であり, 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. 計測器は波高計, 流速計, 3分力計を用い, 桁位置の流速計および波高計は, 側壁外に設置することで桁模型の影響のない, 流速および水位変動を計測した. なお, 流速計の高さ方向の設置位置は桁位置と同様の高さとしている. 計測器のサンプリング周期は1/100sであり, 計測波形にノイズが見られなかったため, 計測データの後処理を行っていない.

図-11に長周期波実験の実験条件を示す. 本実験での目標周期は120sの正弦波とし, 実際の周期に換算した際には14minとなる孤立波を造波させた. 目標とする最大水位は15cmとし, 桁位置は目標水位の高さ中央である $Z = -7.5\text{cm}$ とした. これは, 定常流実験における桁中心位置 $Z = -7\text{cm}$ のケースと水面から桁中央までの距離がほぼ同一条件になるよう設定した.

(2) 長周期波実験結果

a) 入射津波特性

図-12は長周期波実験における桁横で計測された水位変動の時刻歴波形である. 同図より, 入射波の最大水位は14.1cm, 周期 T は120s, 最大水位までの水位上昇速度は28cm/minであり, 実橋換算した場合, 東北地方太平洋沖地震において気仙大橋で観測された遡上津波の2m/minの水位上昇速度と概ね一致する. なお, 事前に実施した桁模型を撤去した際の造波試験において, この時の桁位置での水位変動と, 図-12に示す桁横で計測された水位変動が同一であることを確認している.

b) 作用力特性

図-13は, 橋桁に取り付けた分力計から得られた水平作用力 F_x および鉛直作用力 F_z の時刻歴波形である. 同図より, 定常流実験同様に時刻歴波形に短い周期での振動はみられるものの, 津波作用時から作用後までの作用力の増減は, 水位変動の時刻歴波形と同様に緩やかな山な

図-10 長周期波実験概要図

図-11 長周期波実験概要図

図-12 長周期波実験の水位変動時刻歴波形

図-13 長周期波実験の作用力時刻歴波形

りの形状を示している。また、最大水位付近では、作用力は一定の値となっており、定常状態に近い津波作用状況であることが分かる。水平作用力、鉛直作用力の最大値はそれぞれ11.1N、13.8Nであり、鉛直作用力は上向きに力が作用している。

(3) 定常流実験との比較

a) 水平作用力

水平作用力はモリソン式から慣性力項を省いた式(1)を用いて、定常流実験と長周期波実験の両実験結果を比較する。

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

ここで ρ_w : 水の密度 (1000(kg/m³)), C_d : 抗力係数, v : 流速(cm/s), A : 被圧面積である。

また、抗力係数 C_d は道路橋示方書に準拠し、下記に示す桁高と桁幅を用いた式 (2) より、本桁模型形状から算出した1.54を用いた。

$$C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & (1 \leq B/D < 8) \\ 1.3 & (8 \leq B/D) \end{cases} \quad (2)$$

ここで B : 桁幅, D : 桁高である。

図-14は、横軸に分力計より得られた水平作用力 F_x を、縦軸には実験より得られた桁模型横で計測された水平流速を用いて算出した計算作用力 F_{xcal} の関係を示す。同図より、定常流実験では水平作用力は流速の二乗に比例して増加することが分かり、式(1)、式(2)から算出した計算水平作用力は概ね2割以内の範囲で計測作用力を評価できている。同様に、長周期波実験では桁模型横で計測された流速 V_x は91cm/sであり、計測作用力と計算水平作用力の関係は定常流実験と同様な傾向である。以上より、水位上昇の影響を模擬した長周期波実験においても、実験ケースは少ないものの定常流実験と同様の傾向であることから、橋桁に作用する準定常的な水平方向の持続波力はモリソン式に道路橋示方書に準拠した抗力係数を用いて評価が可能である。

b) 鉛直作用力

鉛直作用力は、定常流実験および長周期波実験ともに桁模型は水没している状態であるため、計測された作用力 F_z から模型の浮力 U (=15.4N) を差し引いた鉛直波力 F_z' により評価を行う。

図-15は両実験結果の鉛直波力と桁中心位置 Z との関係を表した図である。同図より前節で述べたように鉛直波力は橋桁が水面に近い位置にある場合は下向きの波力となり、桁位置が水面から下方に位置するにつれ波力は0へと漸近していく。なお、浮力が15.4Nであるのに対して上向きの最大波力は $Z = -28$ cmで2.6Nであり、浮力に対して非常に小さい波力である。同様に、長周期波実験における鉛直波力は、-1.9Nであり、上向きの波力は生じ

図-14 モリソン式による水平作用力の評価

図-15 桁位置と鉛直波力の関係

図-16 波形状と波圧分布 (鉛直作用力最大時)

ていないことが分かる。また、長周期波実験と流速および水面から桁位置までの距離 Z が概ね同一条件であるCase3の $Z = -7$ cmの定常流実験の鉛直波力を比較すると、定常流実験と長周期波実験の鉛直波力は下向きにそれぞれ-32N、-1.9Nであり、約30N下向きの波力が減少してい

る。図-16は、鉛直作用力最大時の橋桁周辺の波形状および、その際の定常流実験同様に桁上下面に設置した圧力計の計測結果を図示した桁に作用する波圧分布である。図-7に示す定常流実験における作用状況と比較すると、床版上面の波圧分布は波形状に応じた正圧を示す傾向は定常流実験と同様であるものの、床版下面の波圧分布は定常流実験では負圧が生じていたが、長周期波実験では大きな正圧が生じている。これは、水位が上昇し鉛直上向きの流体運動が生じることで、桁間の空間で圧力が遮蔽されて正圧が増加したと考えられる。

よって、床版上面に作用する波圧に比べ、水位上昇の影響で床版下面に作用する波圧が増大したため、図-15に示す下向きの鉛直波力が減少したと考えられる。

4. まとめ

準定常的な持続波を模擬した定常流実験および長周期波実験を実施し、両実験の作用力特性を比較することで、準定常的な持続波が橋桁に作用した際の作用力特性について得られた知見を以下に示す。

- (1) 定常流実験における水平作用力は、流速と桁側面積の関数で概ね評価でき、長周期波実験においても作用力は流速に依存し定常流実験と同程度の値であった。
- (2) 定常流実験における下向きの波力は橋桁側面を越流する流れの影響で水面付近で最大-32Nであり、長周期波実験では水位上昇を伴うことで床版下面に生じる正圧が増大し下向きの波力は-2Nと大きく減少する。

- (3) 上向きの鉛直波力は、定常流実験において水深が深い位置で最大2N程度生じるものの、浮力(15N)と比較して小さい値である。また、長周期波実験では上向きの波力は生じず両実験で同様の傾向であり、準定常的な持続波が橋桁に作用した際の鉛直作用力は浮力が支配的である。

謝辞：本研究の水理実験の実施にあたっては、株式会社IHI・山内邦博氏の協力を得たことを記して、謝意を表する。

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) 有川太郎, 渡邊政博, 窪田幸一郎：津波による橋梁の安定性に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_911-I_915, 2013.
- 3) 渡辺健, 河村佳英, 大野又稔, 織田幸伸：一様流作用下におけるコンクリート鉄道橋りょうに働く流体力に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_856-I_860, 2014.
- 4) 監物希美, 丸山久一, 田中泰司, 工藤進平：橋梁に作用する津波流体力の解析的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_846-I_850, 2014.
- 5) 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
- 6) 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.

(2015.3.18 受付)

EVALUATION OF THE WAVE FORCE ON BRIDGE GIRDER UNDER LONG PERIOD WAVE

Takashi SATO, Kenji KOSA and Tatsuo SASAKI

As it supposed that tsunami of long period wave has flowed to the bridge without shock-wave force on the superstructure, steady flow experiment simulating quasi-steady flow form and long period solitary wave experiment simulating water level raising has been conducted based on the girder model established. Characteristics of wave force acting on bridge girder can be evaluated by the comparison between these two experiments. With the experimental data obtained, it has been made clear that the solved drag coefficient can be used to evaluate both steady flow and long period wave. Besides, it is obtained that vertical force has been controlled by the buoyancy as water level raising in long period wave experiment has caused the decreasing of downward vertical force.