波圧に着目した孤立波の水平作用力評価

Evaluation of Bore Wave Horizontal Force on Bridge Girder with Use of Pressure Gauges

田中将登¹・幸左賢二²・佐藤 崇³・佐々木達生⁴

Masato TANAKA, Kenji KOSA, Takashi SATO and Tatsuo SASAKI

In order to find out the mechanism of tsunami bore wave on bridge girder, the bore wave experiment was carried out with a bridge girder model. As a result, the measured maximum horizontal force on bridge girder by force transducer was found close to the calculated maximum force by the integration from the wave pressures on girder front surface. Thus, the horizontal force is dominant to the wave pressure on girder front surface. Besides, from the parameter study of wave height, it is noted that both horizontal force and the wave velocity of girder location are proportional to wave height. Thus, it is concluded that bore wave horizontal force has a high correlation with wave height.

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震で発生した津波により、東北地方の太平洋沿岸部では壊滅的な被害を受けた。著者らは東北地方沿岸部の橋梁の流出状況等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が、緊急輸送路上に位置する橋梁は、流出によって道路が寸断されると救援物資の輸送等に遅れが生じるなどの影響を与えるおそれがある。従って、津波流出対策の実施が望まれるが、そのためには津波が橋梁に作用した際の作用力特性を把握することが必要となる。

2004年12月のスマトラ沖地震を契機に、段波性状の津波を模擬した桁模型実験に基づく種々の検討が行われている。荒木ら(2008, 2013)は、橋桁模型に作用する作用力と圧力を計測し、津波の作用力特性を検討した。中尾ら(2013)は、橋桁模型に作用する作用力と圧力の発生過程を実験と解析の両側面から検討した。林ら(2014)は、橋桁模型に作用する作用力と圧力を測定し、波高と流速、模型の横断勾配を変化させ、それに伴う作用力特性を検討した。これらの実験から作用力発生メカニズムは明らかにされつつあるが、一方で、津波が橋梁に作用した際に生じる作用力を波高や波形状をパラメータとした定式化には至っていない。

そこで本研究では、上部構造の流出評価や対策工を講じる上で必要と考えられる津波形状に応じた作用力のメカニズムを明らかにすることで、津波が橋梁に作用した際に生じる作用力の定式化を目的とする。具体的には津波先端部に見られる段波状の波が橋梁に作用することを

想定し、これを模擬した孤立波を作用させた。この孤立波の波高をパラメータとして、水平作用力、鉛直作用力、波高、流速、圧力の測定を行い、それぞれの計測値の関係を作用力を支配する物理量の観点から分析した。なお、本論文では水平方向の作用力特性に焦点をあてて分析と考察を行っている。

2. 実験概要

(1) 実験装置

使用する長水路は、図-1に示すように長さ41[m]、幅80[cm]、橋桁模型位置での水路深さ95[cm]の片面ガラス張りの水路である。同図の左端の造波装置は、ピストン型造波装置である。

模型位置付近の状況を図-2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60[cm]、幅100[cm]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

計測器は孤立波によって桁模型に発生する作用力を計測する分力計(T)、津波の流速を計測する流速計(Vi)、波形状をとらえる波高計(Hi)を図-2に示す位置に設置した。

分力計は、水平作用力(Fx)、鉛直作用力(Fz)と回転モーメント(My)の3分力が計測でき、規格は980Nである。同図に示す通り、治具に津波が作用しないように、簡管構造で分力計と治具を覆い、模型にのみ作用する力の抽出に配慮した。V1とH6波高計は桁位置での桁の影響を受けないように側壁を介して桁の隣に設置した。

これらの計測器はすべてパソコンで制御することで計測開始時間が同期されている。計測のサンプリング周期はすべての計測において1/1000sとした。

1 学生会員	九州工業大学大学院 工学部建設社会工学専攻
2 正会員	九州工業大学教授 工学部建設社会工学科
3 正会員	(株)長大 九州支店
4 正会員	大日本コンサルタント(株)技術統括部

図-1 計測機器設置位置図

図-2 計測機器設置位置図

図-3 実験パラメータ

(3) 実験パラメータと桁模型

図-3に本実験のパラメータの模式図と一覧を示す。表中に示すように、静水深を35[cm]とし、波高は10, 15, 20, 25[cm]とした。いずれの波においても、桁中心位置Zは、波高 a_H の半分の高さ($Z/a_H=0.5$)に設定した。これは、過年度の幸左ら(2011)の水理実験において、 $Z/a_H=0.5$ の位置で水平作用力が最大となることが確認されたためである。

橋梁模型の対象は、幸左ら(2011)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、桁模型図を図-4に示す。縮尺は1/50で、模型の橋長は40[cm]、幅員19[cm]、構造高3.4[cm] (実橋換算で橋長19.1[m]、幅員10.2[m]、構造高1.7[m])とした。これは、我が国でも多く存在する単径間の橋梁に類似する形状であることに加え、過去に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することで、波形状のディテールの違いによる作用力特性の変化の比較を可能とする。また、水平作用力の分析用として、図中に示すように桁の側面に圧力計を5つ設置した。

3. 代表的なケースの実験結果

(1) 作用力と波高の関係

図-5は、造波開始を0秒として、分力計から測定された水平作用力と鉛直作用力に加え、H6波高計の時刻歴波形を示す。図中の水平作用力と鉛直作用力の時刻歴波形は、幸左ら(2011)と同様の目的で、1/10秒間の移動平均処

図-4 桁模型図

図-5 作用力と波高

理を行っている。

また、桁模型側面に作用する圧力を後述する図-6, 7の模式図で説明するために、図中 (a), (b) で示した2点に着目した。(a) は水平作用力の波形において最大値発生直前の1つ目の山が生じる地点、(b) は水平作用力が最大を生じる地点である。

まず、同図より、水平作用力は (a) まで上昇を続け、その後若干減少するものの、再度上昇して (b) で最大を迎える。水平作用力の最大値は津波が桁模型に作用し始めてから約0.30秒後に発生しており、その値は19.1 [N] である。その後、水平作用力は減少して0に戻る。H6波高は12.298[s]で最大となり、ほぼ同時刻で水平作用力も最大となる。上向きの鉛直作用力は、波高と水平作用力が上昇する過程で最大値を迎えており、同時刻から水平作用力の増加量は減少する。このことから鉛直作用力が減少に転じても水平方向の流れは継続して桁に作用していることがわかる。さらに、波高が最大となる時点で水平作用力も最大値を迎えるため、波高と水平作用力は密接な関係にあると考えられる。

(2) 桁模型側面に設置した一圧力計

図-6は、横軸を、造波開始を0秒として、桁模型側面橋長方向に設置している5つの圧力計から測定された圧力の時刻歴波形を示す。併せて、図-5の水平作用力の時刻歴波形において、着目した地点 (a), (b) を示す。同図より、水平作用力で見られて (a) の山は同図から確認されない。また、5つの圧力は、立ち上がりからほぼ同時刻において最大値を生じている。

図-7に、(a), (b) 地点両者の桁側面における圧力分布を示す。まず、図-7 (a) では橋長方向に圧力が等しく分布していることが分かる。同様に、図-7 (b) でも左右の橋長方向の圧力は等しく分布している。

(3) 作用力と圧力、水平流速の関係

図-8は、桁に作用する水平作用力と桁模型の横に設置したプロベラ式のV1流速計から得られた流速、上述した桁側面の平均圧力に側面積A (136[cm²]) を乗じて算出した水平作用力の時刻歴波形である。

同図から、圧力から得られた水平作用力と流速の立ち上がりとは最大値は若干のずれはあるが、ほぼ同時刻で発生していることが確認できるとともに、両者の波形は良く近似する。このことから桁模型側面に生じる圧力は桁模型横の流速に依存していると考えられる。また、水平作用力と圧力から得た水平作用力の立ち上がりとは最大値は若干のずれがあるが、ほぼ同時刻で発生していることが確認できる。圧力から得た水平作用力の最大値は15.1Nであるのに対して、水平作用力の最大値は19.1[N]と2割程度の差が生じ、算出水平作用力が水平作用力の時刻歴波形をよく再現できていないが、これは、中尾ら

図-6 圧力計時刻歴

(a) 10.9秒後

(b) 11.0秒後

図-7 圧力分布

図-8 水平作用力、圧力によるFx、水平流速

(2013)の実験でも観測されるように、橋桁模型の各桁の側面に生じる圧力を今回の桁側面に設置した圧力計ではとらえていないことが要因として考えられる。

これらの結果より、桁側面の圧力が、水平作用力の80%程度を占め、最大値が概ね同時刻であることから、水平作用力は桁模型側面に作用する圧力に支配されており、さらには、水平方向に進行する波が、桁模型に衝突することによって発生する圧力は流速によって生じると考えられる。

4. 波高の変化に伴う抗力係数の傾向

前述の通り、本実験では10[cm]から25[cm]まで、5[cm]毎に変化させた4つの波高ケースを実施している。本章では、孤立波の波高の変化に伴う抗力係数の傾向について考察する。

(1) 抗力係数

抗力係数の分析に際して、流体力で表される水平作用力の式(1)を変形し、式(2)から抗力係数を算出した。また、前章の通り、流速の増加に伴って水平作用力は増加し、最大を迎えることから、最大水平作用力を評価する代表的な値として最大流速を用いた。

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

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

ここで ρ_w : 水の密度 (1000[kg/m³]), C_d : 抗力係数, v : V1流速[m/s], A : 被圧面積[m²]である。

本実験では再現性の確認のため、各波高につき3回実施している。

図-9に示すのは上述の通り算出した抗力係数 C_d と計測水平作用力 F_x の関係である。同図より、得られた抗力係数の平均値は3.41と求められるものの、抗力係数は水平作用力の増加に伴って右肩下りの傾向となる。ここで、平均値に対する最大値と最小値の誤差は30%以内となる。

図-10は、波高(10, 15, 20, 25cm)の変化に伴う最大水平作用力を示す。同図の横軸は、V1流速計から得られた最大流速を2乗として、各波高に対して実施した3回分の関係を示す。同図から波高に比例して、水平作用力が増加することが分かる。また、流速を2乗とした値が増加するにつれて、水平作用力も線形的に増加していることがわかる。特に、代表として波高10[cm]と25[cm]のケースに着目して水平作用力と流速の2乗値の変化率を確認すると、それぞれ2.8倍、5倍とその増加率は異なる。このため、 F_x と v を変数に持つ抗力係数は本実験では一定にならない結果となる。

(2) 水平作用力と水平流速の関係

図-11は、波高10[cm]のケースにおける水平作用力と

図-9 水平作用力と抗力係数

図-10 $V1^2$ と水平作用力

図-11 水平作用力と流速の時刻歴(波高10cmケース)

図-12 水平作用力と流速の時刻歴(波高25cmケース)

水平流速 (V1流速計) の時系列変化の傾向を示している。同図から、水平作用力と水平流速は同時刻に立ち上がるとともに、それぞれの最大は、11.588[sec]、11.596 [sec]とほぼ同時刻に発生していることがわかる。それぞれの波形も近似することから、水平作用力は水平方向の流速の作用によって発生すると言える。

続いて図-12に、同様に波高25[cm]のケースを示した。同図から、水平作用力と水平流速のいずれの立ち上がり時間は同時刻であるのに対し、それぞれの最大値の発生時刻は11.407[sec]、11.491[sec]と約0.08[sec]の時間差が確認できる。

従って、水平作用力と流速の2乗値の変化率が異なる要因は、波高の増加によって最大水平作用力の発生時刻と最大流速の発生時刻に時間差が生じることと考えられる。

(3) 抗力係数が変化することの考察

図-13に、波高10[cm]と25[cm]のそれぞれのケースにおける、津波が桁模型に作用した際の波形状を示す。同図は、水槽側面に設置したハイスピードカメラで撮影した動画から波面をトレースした模式図である。

まず、同図 (a) に示すのは波高10[cm]の水平作用力最大時の波形状図である。同図 (c) は図中 [A] で示した範囲の拡大図を示す。これらの図から、波高10[cm]のケースでは、津波が桁模型側面に作用することで波の水平向きの流れが阻害されて桁上に越流し、最大水平作用力が発生する。さらに [A] 部を確認すると水平作用力最大時は、桁模型全てが浸水した状態で、全ての桁間にまで浸水していることが分かる。

一方、同図 (b) に示すのは波高25[cm]であり、同図 (d) は図中 [B] の拡大図である。時間点は、前ケースと同様に水平作用力が最大を示す時刻である。同図から、波は桁模型側面に衝突することで桁模型の右上に大きく跳ね上がる様子が確認できるとともに、すべての桁下空間に水が浸水していないことが分かる。

これらを比較すると、波高10[cm]のケースと波高25[cm]のケースでは最大水平作用力が発生する時点の桁模型の浸水状況が異なり、さらには桁間に浸水する範囲も異なることがわかる。このことから、3章で前述したように桁間に浸水した波の影響範囲が異なる、つまり波の作用範囲が異なることで抗力係数が変化しと考えられ、この結果は作用する波高が変化する場合に必ずしも抗力係数は一定にならないことを示す。

5. まとめ

本研究では、橋梁を対象に孤立波性状の津波による橋桁への作用力特性を評価するために波高をパラメータとした水理実験を実施した。その結果から得られた知見を

図-13 津波作用模式図

以下に述べる。

- 波高を変えた4ケースの孤立波を作用させた桁模型実験の結果から、波高の増加に伴って水平作用力は比例して増加する。これは波高が増加すると桁位置の水平流速も増加するためである。
- 津波作用側の桁側面に生じる圧力と桁側面の面積の積は、分力計で計測された水平作用力の80%を占める。さらに圧力と流速の時刻歴波形の形状が概ね一致する。これらのことから、水平作用力は主として津波作用側の桁側面の圧力抵抗であるといえる。
- 得られた抗力係数は、波高の増加に伴ってやや右肩下がり傾向を呈する。これは波高の増加に伴って、波の形状が変化し、桁への波の作用範囲に若干の変化が生じるためと考えられる。

参考文献

- 荒木進歩, 中島 悠, 出口一郎, 伊藤禎和 (2008): 河口付近の橋梁に作用する津波流体力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.866-870.
- 荒木進歩, 塚本裕太, 青木伸一 (2013): 異なる造波方法により発生させた2種類の擬似津波による桁橋への作用波力特性, 土木学会論文誌B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_836-I_840.
- 中尾尚史, 張 広鋒, 炭村 透, 星隈順一 (2013): 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, 土木学会論文誌A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4 (地震工学論文集第32巻), pp.I_42-I_54.
- 林 秀和, 青木圭一, 四條利久磨, 鈴木利光, 越村俊一 (2014): 橋梁上部構造に作用する津波波力特性に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.45-58.
- 幸左賢二, 秋吉秀一, 二井伸一, 木村吉郎 (2011): 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.