

橋桁に作用する長周期津波荷重の評価

山内邦博¹・幸左賢二²

¹正会員 工修 株式会社IHI 技術開発本部基盤技術研究所（〒235-8501横浜市磯子区新中原町1番地）

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）

1. 緒言

東日本大震災では多くの橋梁構造物が津波による被害を受けた。特に上部構造の被害は甚大であったが、現行の設計基準では橋桁に津波が作用するような事態が想定されていないことが一因であり、津波荷重の指針作りが喫緊の課題となっている。津波のような周期（波長）が大きな現象を再現して荷重を評価するためには、長周期の造波実験を実施する必要があるが、既往の実施例は少ない¹⁾。

著者らは、周期の長い津波の荷重を評価する手法として、曳航装置を用いた水槽実験手法を提案し、橋桁に作用する鉛直荷重が下向きであることや、対策構造により抗力を低減可能であることを示した²⁾が、その妥当性は十分に検証されていない。本研究では、ポンプ造波装置を用いた長周期津波の再現実験を実施し、既往実験手法の妥当性を確認した。

2. 対象とする津波

深海域で発生した津波は、数十分～1時間程度の周期を保ちながら浅海域へ進行することが知られており、東北地方太平洋沖地震で発生した津波も、沿岸部で同程度の観測結果が報告されている³⁾。浅海域では、水深が小さくなるに従って津波の波長と波

速は減少して波高が大きくなり、波の峰が前傾した段波を形成するが、波高が砕波限界以上に大きくなると、波形の安定性が失われて砕波段波となる。傾斜の緩い陸上を遡上する波は、サージフロントと呼ばれる切り立った先端形状を形成する場合があります、陸上構造物に衝撃的なサージフロント波圧が作用した後は準定常的な波圧が持続することが知られている⁴⁾。幸左ら⁵⁾は高さ2m～3m程度のサージフロントと、その後続く準定常的な流れを観測している。

道路計画にあたって、道路橋示方書⁶⁾では、道路橋と交差物件との関係を考慮して、橋下（桁下）高を決定することが要求される。河川等に架橋する場合には、計画高水位や船舶通過の条件を、道路及び鉄道上に架橋する場合には、道路及び鉄道の建築限界を考慮する必要がある。例えば、道路との立体交差においては、建築限界として、4.5mの桁下空間を確保することが要求される⁷⁾。よって、沿岸部を除いた一般的な架橋位置においては、高さ2m～3m程度のサージフロントは桁下空間を通過し、その後の、水面勾配が緩やかで水深の大きな波が橋桁に準定常的に作用するケースが多いと考えられる。

本研究では、図-1に示すような、サージフロントが桁下を通過した後の、準定常的な流水荷重が橋桁に作用する状況を検討対象とする。

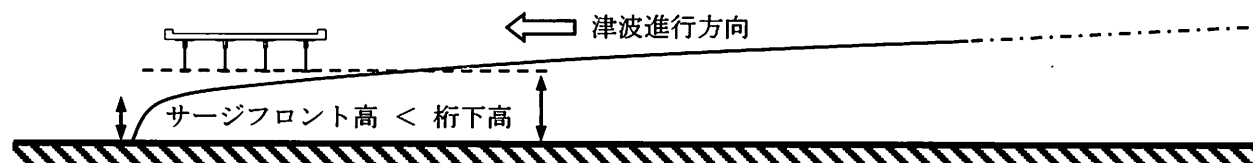


図-1 対象とする津波

3. 実験概要

(1) 曳航試験

既往実験²⁾と同様に、幅2.5m、全長44mの長水路に設置された、図-2に示す曳航装置を用いて計測を行った。台車の速度は任意に設定することができ、最大速度は2.0m/sである。曳航装置にはロードセルを介して、図-3に示す1/50縮尺の橋桁模型（アルミ製、模型長1.24m）を設置して、模型に作用する荷重を計測した。ただし、既往実験では浮力の影響を排除する目的で、模型を水中に沈めて桁内の空気を抜いた状態を初期値としたが、今回は浮力の影響を考慮するために、模型を水中に沈める前の状態を初期値とし、桁内の空気が抜けないように、模型端部にはアクリル板で蓋を施した。静水深は100mm、模型下端から床までの距離は40mmとし、模型の端部には流れの二次元性を保つ目的で隔壁を設置した。隔壁の外側に設置した流速計とカメラを模型と一緒に曳航して、模型の影響を受けない場所で模型位置の流速計測と、試験状況の撮影を実施した。治具に作用する荷重は別途計測して、計測結果から差引きした。

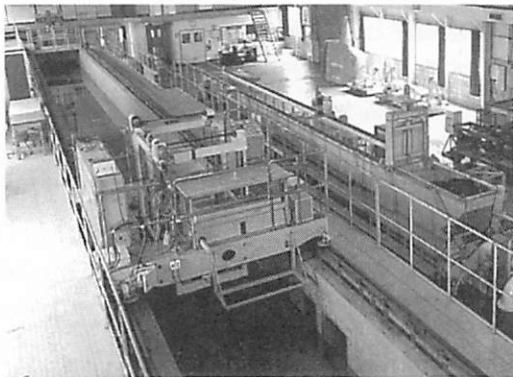


図-2 曳航装置

(2) ポンプ造波試験

装置の概要を図-4に示す。曳航試験に用いた全長44mの長水路を、①貯水部（17m）、②計測部（21m）、③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の水を汲み上げ、整流区間を通じて計測部に供給した。造波周期は任意に設定可能で、今回は150秒（正弦波の1/2波長で、実橋に換算するとおよそ18分）とした。計測部には、海底床を模擬した傾斜区間（1/10×6m区間及び1/100×8m区間）と、地表面を模擬した平坦部（2.4m区間）を有する仮床を設置し、模型を設置する平坦部の床面高さは0.84m、初期水深はゼロ（dry bed）とした。仮床の背後には排水のための区間を設けてあり、水流は模型に作用した後に、模型背後で反射することなく排水され、図示しないサージタンクを介して貯水部に還流される仕組みになっている。曳航試験と同様に、模型下端から床までの距離が40mmとなるようにロードセルを介して模型を設置した。模型の端部には隔壁を設置して、隔壁の外側の、模型の影響を受けない場所で模型位置の流速計測と、試験状況の撮影を実施した。

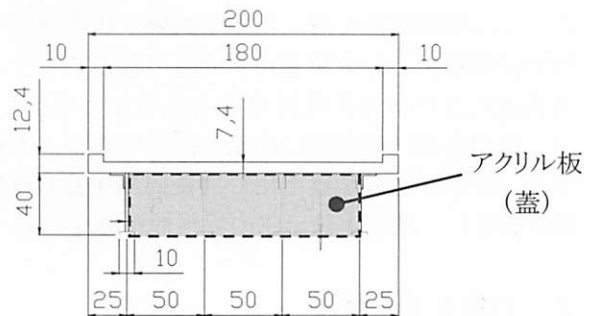


図-3 1/50縮尺模型断面

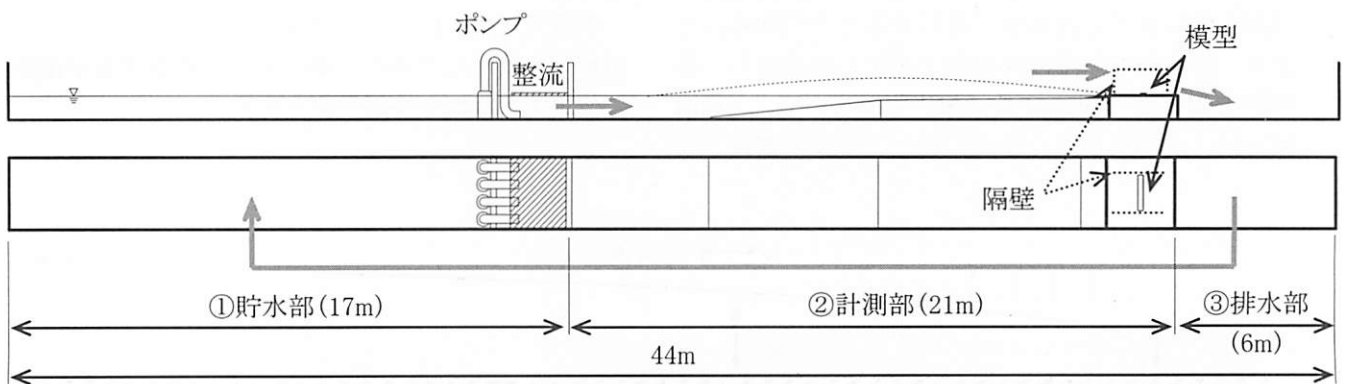
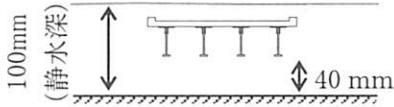
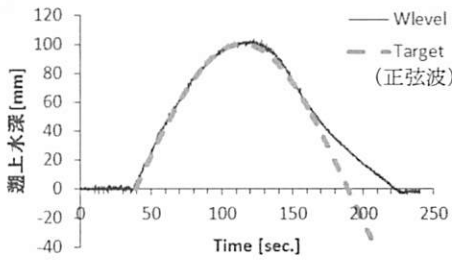
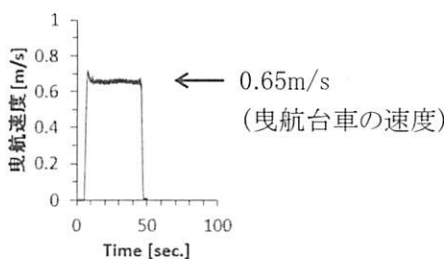
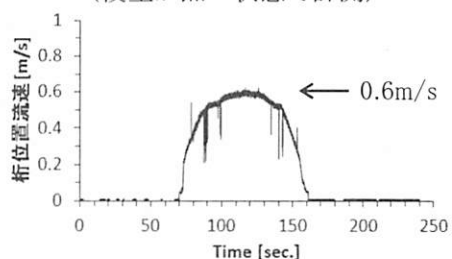
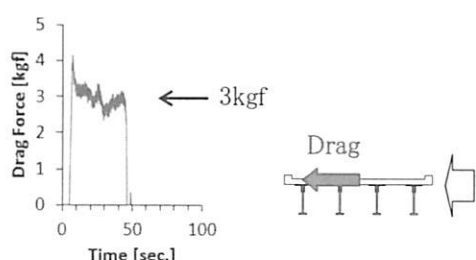
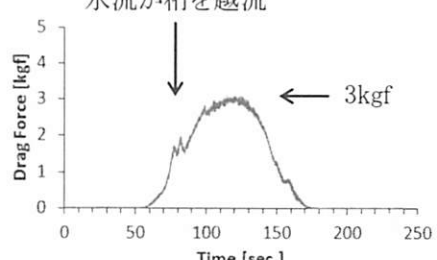
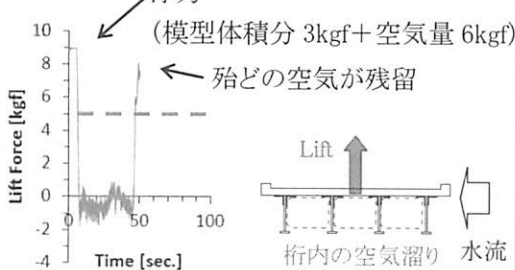
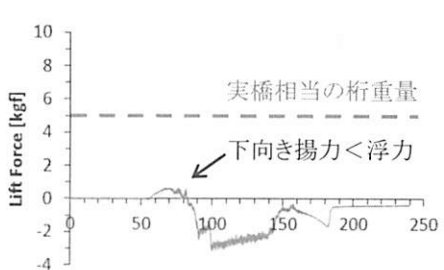
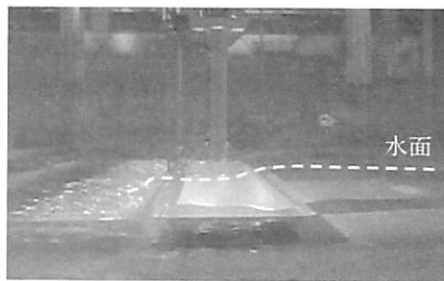


図-4 ポンプ造波装置

表-1 水槽実験結果

	曳航試験	ポンプ造波試験
水深	 100mm (静水深) 40 mm	(模型が無い状態で計測)  面上水深 [mm] Time [sec.]
流速	 曳航速度 [m/s] Time [sec.] 0.65m/s (曳航台車の速度)	(模型が無い状態で計測)  桁位置流速 [m/s] Time [sec.] 0.6m/s
水平荷重 (抗力)	 Drag Force [kgf] Time [sec.] 3kgf Drag	水流が桁を越流  Drag Force [kgf] Time [sec.] 3kgf
鉛直荷重 (浮力+ 下向き揚力)	 Lift Force [kgf] Time [sec.] 浮力 (模型体積分 3kgf+空気量 6kgf) 殆どの空気が残留 Lift 桁内の空気溜り 水流	 Lift Force [kgf] Time [sec.] 実橋相当の桁重量 下向き揚力<浮力
試験状況	 水面 水流	 水面

4. 実験結果

水深（曳航試験においては静水深，ポンプ造波試験においては最大遡上水深）及び流速（曳航試験においては台車の曳航速度，ポンプ造波試験においては模型位置の流速）が同程度となる条件で曳航試験及びポンプ造波試験を実施し，両者を比較した結果を表-1に示す。

(1) 水平荷重

ポンプ造波試験において，水平方向の荷重（抗力）は水深とともに増加し，最大水深付近で最大となり，曳航試験と同程度の値を示した．津波作用直後には，サージフロント波圧のような衝撃的な荷重は作用していない。

水平方向の荷重に関しては，長周期の津波が作用した際の準定常的な荷重の最大値は，曳航試験で概ね評価できるものと考えられる。

(2) 鉛直荷重

浮力の影響を排除した既往実験²⁾によれば，純粋な流体力としての鉛直荷重（揚力）は下向きに作用する．浮力は鉛直上向きに作用するため，鉛直方向の荷重は上向きの浮力と下向きの揚力との合算値で評価されることになる。

曳航試験の場合，模型を水中に沈めた際に桁内が空気で満たされて大きな浮力（模型体積分の3kgf＋桁内空気量分の6kgf＝9kgf）が作用し，曳航中には下向きの荷重が作用した．浮力ぶんを差引くと，実橋の桁重量の2倍程度の下向き揚力が作用したことになる．試験完了後には，1kgfの浮力に相当する空気量が失われた程度で，桁内には大部分の空気が残留した。

ポンプ造波試験の場合，流水が作用した初期に小さな鉛直上向きの荷重が作用した．これは，流体力のもつ下向き揚力よりも大きな浮力が作用したためであると考えられる．（結果は割愛するが，模型位置の流速が0.9m/sの条件では初期の下向き揚力が大きくなり，鉛直上向きの荷重は生じなかった．）その後，下向きの揚力は水深とともに増加し，曳航試験よりも大きな値を示した．桁内に溜まった空気量及び浮力の値は定かではないが，曳航試験と同様に，大きな浮力と，下向き揚力が作用したのと考えられる。

曳航試験とポンプ造波試験とで鉛直荷重の結果に差異が生じた主な要因は，桁内に溜まる空気量（浮力）の違いであると考えられる．鉛直荷重を正しく

評価するためには，桁内に溜まる空気量を正しく評価する必要がある。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ・橋桁に作用する，周期の長い津波の水平方向の荷重（抗力）の最大値は，曳航試験で概ね評価することができる。
- ・橋桁に作用する，周期の長い津波の鉛直方向の荷重は，上向きの浮力と下向きの揚力との合算値で評価される。
- ・流速が小さい場合には，津波が作用した初期に，下向き揚力よりも大きな浮力が作用する場合がある。
- ・鉛直荷重を評価する際には，桁内に溜まる空気量を正しく評価する必要があるが，曳航試験では空気量（浮力）を過大評価してしまう可能性がある。

参考文献

- 1) 岩瀬，朝倉ら：“ポンプ式津波造波装置の開発”，土木学会年次学術講演会，vol.56，pp.564-565，2001
- 2) 山内，上島，幸左：“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”，土木学会年次学術講演会，vol.67，pp.949-950，2012
- 3) 気象庁：平成23年3月 地震・火山月報（防災編），ISSN 1343-4977
- 4) 首藤，今村，越村，佐竹，松富：津波の事典，朝倉書店，2007年，ISBN 978-4-254-16050-5 C3544
- 5) 田中，幸左ら：“波形状に着目した桁への作用力評価”，第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.281-288，2013
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成14年3月
- 7) (社)日本道路協会：道路構造令の解説と運用，昭和58年2月