

津波到達水位と橋梁に生じる津波外力との関係に関する研究

Relation between tsunami wave height and tsunami external force for bridges

中尾尚史*・野阪克義**・伊津野和行***・小林紘士****

Hisashi NAKAO, Katsuyoshi NOZAKA, Kazuyuki IZUNO and Hiroshi KOBAYASHI

*工博 立命館大学ポストドクトラルフェロー, 総合理工学研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

** Ph.D. 立命館大学准教授, 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

*** 工博 立命館大学教授, 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

****工博 立命館大学チエアプロフェッサー, 総合理工学研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Bridges have not yet designed in consideration of tsunami force. This paper shows relation between tsunami wave heights and tsunami forces using hydraulic experiment. When wave height was 44mm, a peak time of tsunami force was about 1.0 second after tsunami arrived at the bridge. However, in case of wave height was 78 mm, a peak time of tsunami force was half time to that of 44 mm. Tsunami wave heights and tsunami forces showed linear relation. The force coefficients were almost constant when wave height was more than 50% of the girder height.

Key Words: tsunami, bridge, flow regime, reaction force, force coefficient

キーワード: 津波, 橋梁, 流況, 支点反力, 分力係数

1. はじめに

2004年に発生したスマトラ沖地震による津波により橋梁等に甚大な被害を受けたことから, 各種構造物の津波への対策が行われてきている。我が国においても, 近い将来に起こるとされる東海・東南海・南海地震により10mを越える津波が発生すると予想される。橋梁構造物や家屋などの建造物に対する津波対策は重要である。

堤防などの構造物やビル等の建造物については, 津波が与える影響について, 現在さまざまな研究が行われてきており^{例えは1)}, 津波に対する基準がガイドライン等で設定されている²⁾³⁾。しかし, 津波が橋梁構造物に与える影響についての研究は始まったばかりであり⁴⁾⁵⁾, 津波に対する設計基準は定められてないのが現状である。

著者らはこれまでに長方形断面やみぞ形断面など基本的な断面に対する津波の影響を実験および解析により検討してきた⁶⁾⁷⁾。しかし, 実際の橋梁ではこれらの基本的な断面と異なり, 床版の張出し部に津波が衝突することにより, 橋梁に上揚力やモーメントが作用することが予想される。そのために, より実橋梁に近い断面に対する津波外力の特性について検討を行う必要があり, 特に支承部の浮き上がりについても検討する必要があると考えた。

本研究では津波外力を設計するための資料や橋梁の安全性を評価するための資料を得ることを目的として, 実橋梁に近い断面を有する模型を対象とした津波作用時に関する模型実験を行う。そして津波外力と水位, 流速との関

係について検討するとともに津波が支点反力に与える影響についても検討する。港湾構造物などでは, 一般に津波外力は波高を基に計算されており³⁾, これまでに行われてきた研究でも波高と津波外力の関係について検討されている⁴⁾⁵⁾。一方, 同じ流体力学でも風工学の分野では橋桁に作用する流体力は, 流速と3分力係数を基に計算されている⁸⁾。3分力係数による流体力の無次元化表示は, 実験結果をスケールの異なるケースに適用する際便利である。このことから, 本研究では津波水位と津波外力との関係を3分力係数の形で評価することも試みる。

2. 水理実験による津波外力の計測

本章では津波作用時に橋梁に生じる津波外力を水理実験により計測し, 橋梁断面および津波高の違いによる津波外力の影響を検討する。

2.1 実験概要

本実験は図-1に示す全長6000mmの実験装置を用いる。貯水部はゲートより左側で長さ2000mm, 幅600mm, 高さ35mm。水路部はゲートより右側で長さ4000mm, 幅200mm, 高さ300mmである。本研究では流下方向の水平成分はx, 鉛直成分はz, 流下直角方向の水平成分はyである。

実験では貯水部に一定量の水を溜め, ゲートを一気に引

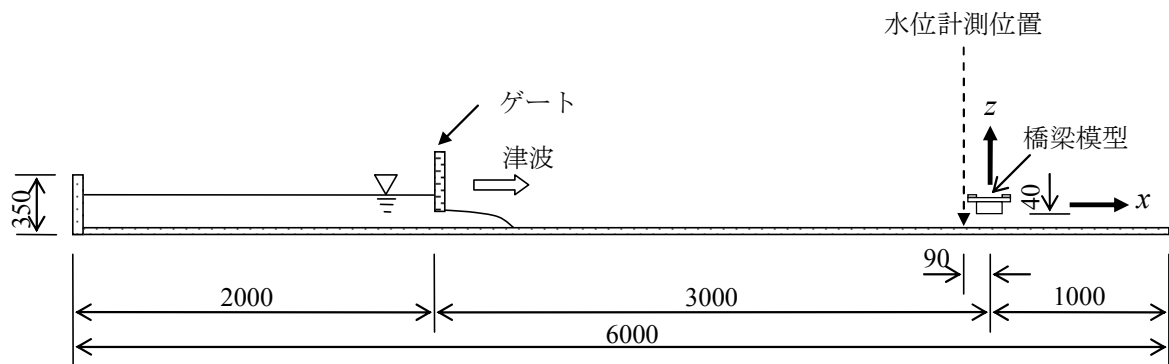


図-1 実験装置

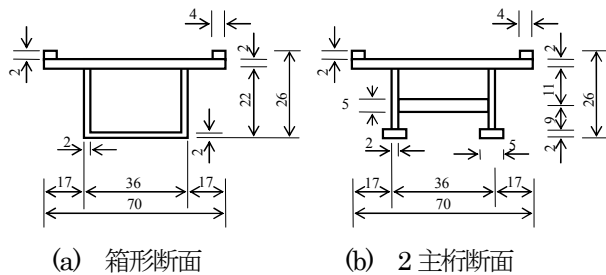
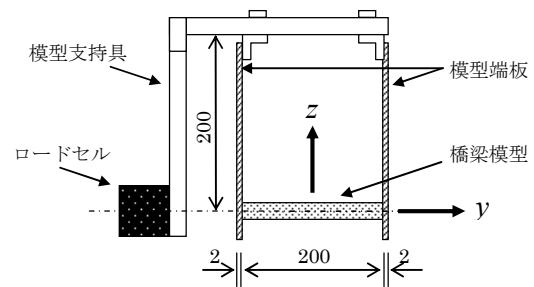
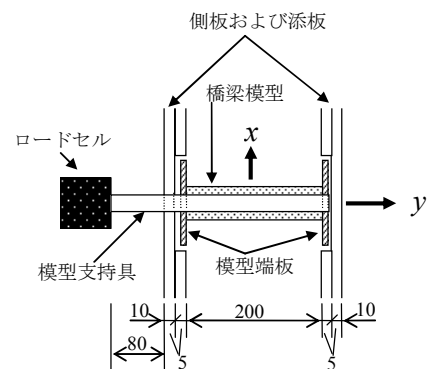


図-2 橋梁模型



(a) 側面図



(b) 平面図

図-3 模型支持図

き上げるによりゲート急開流れを発生させる. 本論文ではこの流れを津波と表現する. 発生した津波はゲートから 3000mm 下流に設置した模型に作用し, それによって生じる津波外力 (水平方向の津波外力 F_x , 鉛直方向の津波外力 F_z , 流力モーメント M_y) をロードセル (AMTI 社製 MC3A-X-100) により計測した. 橋軸は水平方向には桁の中央とし, 鉛直方向は模型下面から 13mm の高さに設定し, ロードセルの軸と一致させた.

同時に津波の水位を模型中央から 90mm 上流側に設置した抵抗線式の水位計により計測した.

橋梁模型は箱形断面および 2 主桁断面を模擬して作成した (図-2). 図-3 のように模型支持具を用いて, 片持ち梁形式で模型を支持した.

本実験では 60 秒間 (サンプリング間隔 0.01 秒) 計測を行った. 橋梁模型の固有振動数はいずれの模型も, いずれの方向の振動についても 35Hz 程度であった. ここでは津波作用時のインパルス的な波形をできるだけ潰さないように, 8Hz から成分を徐々にカットしていき, 16Hz 以上の成分を完全にカットするようなローパスフィルタをかけた. 今回は貯水高を 15cm から 30cm まで変えた 7 ケースを行った. また計測は各 3 回行い, 津波外力の最大値が中間の値となった測定データを利用した.

本研究では同時に模型中央から 3.0m 離れた位置にハイスピードカメラ (CASIO:EX-FH25 および EX-F1) を設置して橋梁周辺の流況を撮影し, 津波が模型に作用したときの流況について検討した.

2.2 計測結果

(1) 津波外力の計測波形

図-4 に津波の水位の計測波形の一例を示す. 赤線で示

した水位は図-1 で示した水位計測位置での模型を設置していないときの水位であり, 最大の水位を本論文では到達水位と定義する. 横軸は時刻, 縦軸は水位である.

模型を設置していない場合, 水位は最大で約 78mm になる (到達水位). 模型を設置すると水位は約 140mm になり, 2 倍近く高くなる. 河床から模型下までの高さは 40mm であるため, 図より約 15 秒間模型に津波が作用したことがわかる.

津波作用時の橋梁模型に生じる津波外力の計測波形を図-5 に示す. 横軸は経過時間, 縦軸は上から水平方向の津波外力 F_x , 鉛直方向の津波外力 F_z , 流力モーメント M_y である. ここでは一例として到達水位が 44mm および 78mm の結果を示す.

到達水位が 44mm の場合, 津波が作用してから計測波形がピークに達する時間は 1 秒程度である. 逆に到達水位が 78mm と 2 倍近くなると, 津波が模型に作用してから 0.5 秒後に計測波形はピーク値に達する.

鉛直方向の津波外力は、到達水位 78mm で箱形断面の場合、津波作用直後にごく短時間に小さな下向きの力が作用する。それに伴い、流力モーメントも反時計回りのモーメントが生じる。これは津波作用時に箱形断面では、上流側の断面下部から剥離したことで発生する負圧により下向きの力が作用したと考えられる。しかし、2 主桁断面においては箱形断面と同様に上流側の断面下部から剥離して負圧が発生するが、模型内部に水が流入することで負圧が緩和され、下向きの力が生じなかったと考えられる⁶⁾。その後、両橋梁ともに上向きの力が数秒生じた後に下向きの

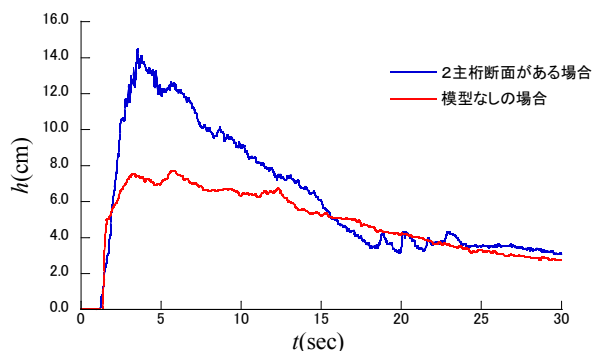


図-4 水位の時刻歴

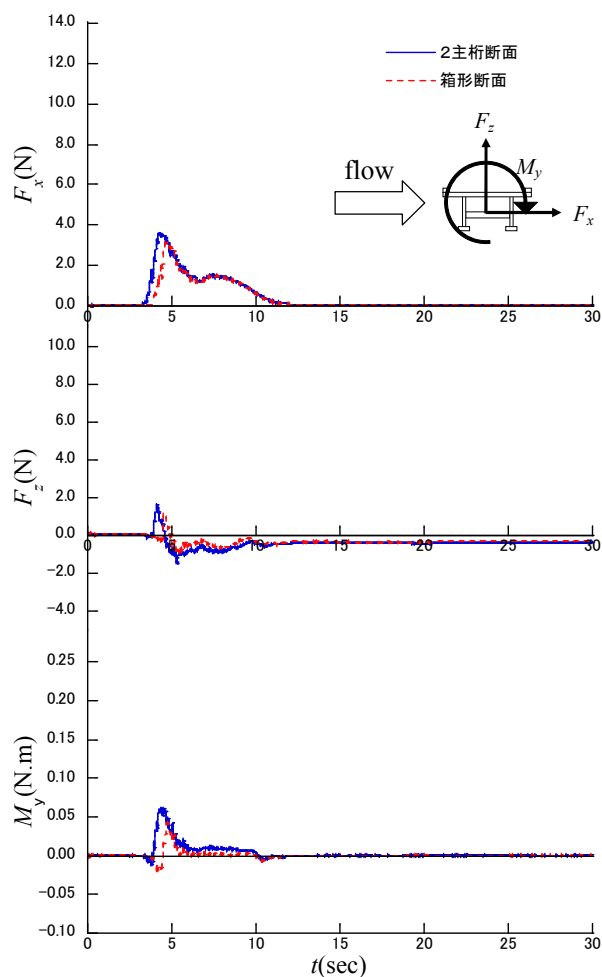
力が生じる。この上向きの力は、断面の上流側張り出し部の下面に作用する津波により生じたものである。過去に実験した長方形断面の場合⁶⁾このような上向きの大きな津波外力は発生しなかった。回転方向は津波作用直後にごく短時間わずかの大きさの反時計回りのモーメントが作用するが、それ以降は時計回りのモーメントが作用する。

橋梁周辺の流況を写真-1 および写真-2 に示す。ここでは 2 主桁断面の流況を示した。津波外力がピークになる時の橋梁周辺の流況は、模型を越波するときであるが、到達水位が 44mm では津波の到達水位は模型の下部わずか 20% 程度の津波高さであるが、津波の作用後は、波は模型の高さの 2 倍程度まで上方に達している。到達水位が 78mm になると模型高の 3 倍以上の越波高さとなる。

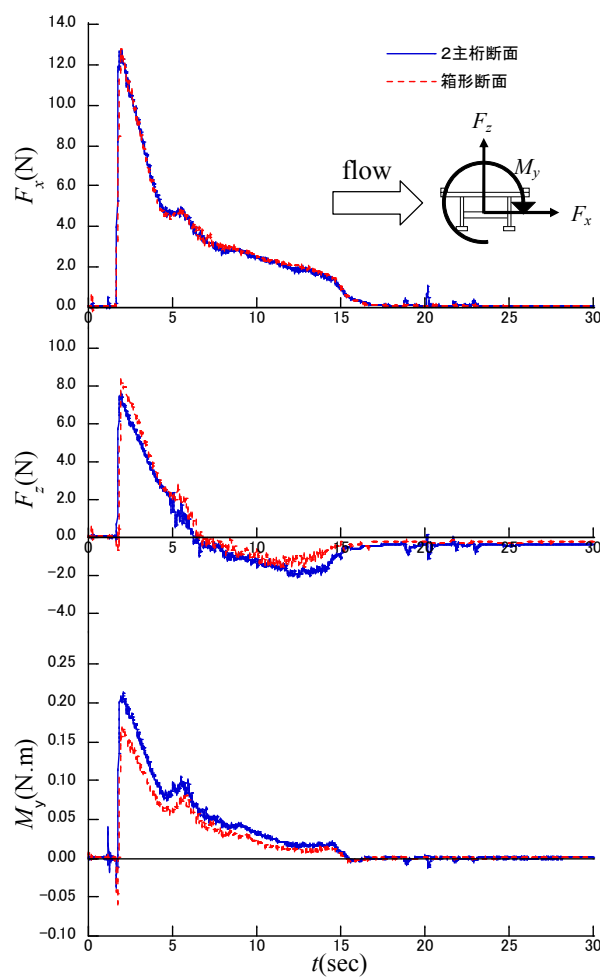
津波通過時は到達水位が 44mm では模型下部に剥離流が見られる。到達水位が 78mm になると模型上部にも剥離流をはっきりと見ることができる。

(2) 到達水位と津波外力の関係

津波作用時の橋梁模型に生じる最大および最小の津波外力を図-6 から図-8 に示す。縦軸は最大および最小津波外力（水平方向は最大値のみ）および流力モーメント、横



(a) 到達水位 44mm

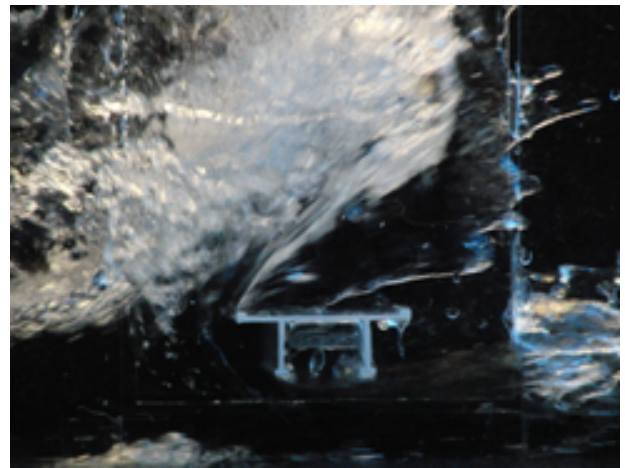


(b) 到達水位 78mm

図-5 計測波形（上から水平方向の津波外力、鉛直方向の津波外力、流力モーメント）



(a) 到達水位 44mm

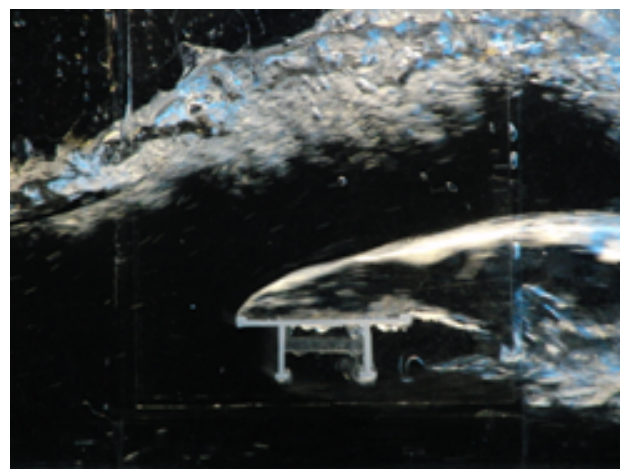


(b) 到達水位 78mm

写真-1 津波外力が最大となるときの2主桁断面周辺の流況



(a) 到達水位 44mm



(b) 到達水位 78mm

写真-2 津波通過時の2主桁断面周辺の流況

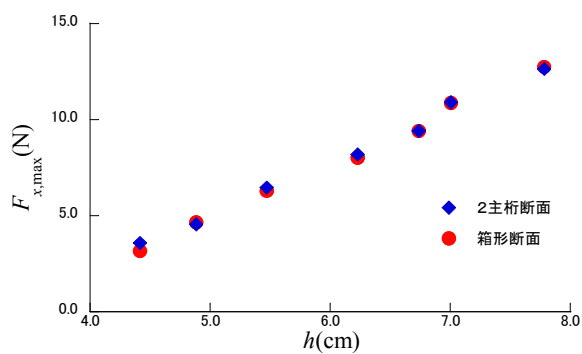


図-6 到達水位と水平方向の津波外力の最大値との関係

軸は到達水位 h である。

水平方向の津波外力が模型に作用する面積が同じのため、箱形断面および2主桁断面ともに水平方向の津波外力はほぼ同じである(図-6)。到達水位と水平方向の津波外力とは線形的な関係がある。

鉛直方向の津波外力の最大値(上向き)および最小値(下向き)を同時に図-7で示した。

最大値は到達水位が 50mm よりも大きい場合には約 10%、最小値は 10%から 20%程度箱形断面の方が2主桁

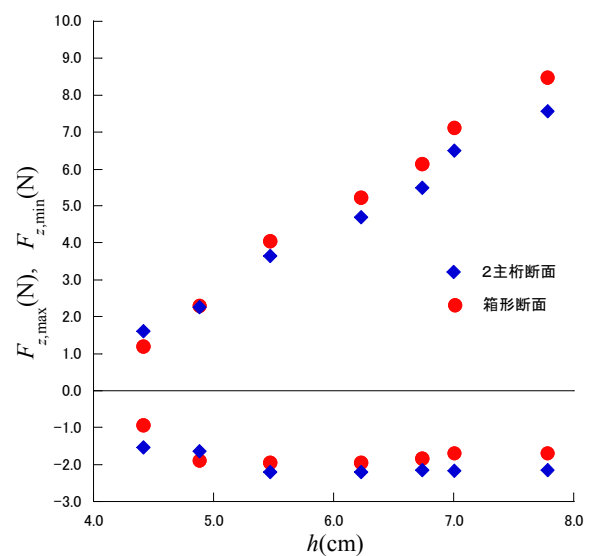


図-7 到達水位と鉛直方向の津波外力の最大値と最小値との関係

断面に比べ、プラス側に(上向きの方に)シフトした値をとる。また最大値と到達水位は線形的な関係があり、到達

水位の増加につれて最大値も増大している。上向きの力は主として、津波衝突直後に上流側張り出し部に作用する流体力により生じたものと考えられる。最小値は、到達水位が50mmよりも大きくなると、ほぼ一定の値になる。

流力モーメントの測定結果を図-8に示す。流力モーメントの最大値（時計回り）および最小値（反時計回り）はともに2主桁断面の方が箱形断面に比べてプラス側に（時計回りに）シフトした値をとっている。箱形断面の場合、底面上流側隅角部の剥離により、その周辺の底面に生じる低圧が負の流力モーメントを起こすので、このような傾向が生じたものと思われる。

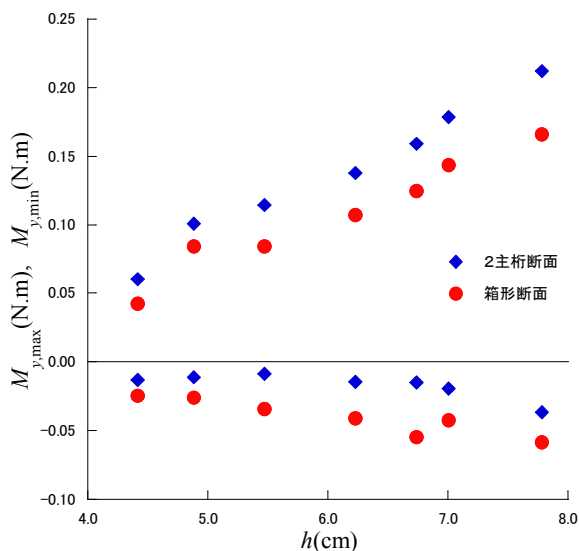


図-8 到達水位と流力モーメントとの関係

3. 支点反力の検討

津波作用により生じる支点反力が支承の耐力を上回ると、橋梁は流失する可能性がある。

本章は津波が作用したことで生じる鉛直方向の支点反力を実験で得られたデータを基に算出する。そして水位の増加が支点反力にどのような影響を与えるか検討する。

3.1 支点反力式の誘導

津波が橋桁に作用した場合、津波外力や流力モーメントにより支点部に力が作用する。図-9のように津波外力および流力モーメントを考えた場合、鉛直方向の支点反力は以下のように表すことができる。

$$R_A = -\frac{F_x \times d + F_z \times (B-b) + M_y}{B} \quad (1)$$

$$R_B = \frac{F_x \times d - F_z \times b + M_y}{B} \quad (2)$$

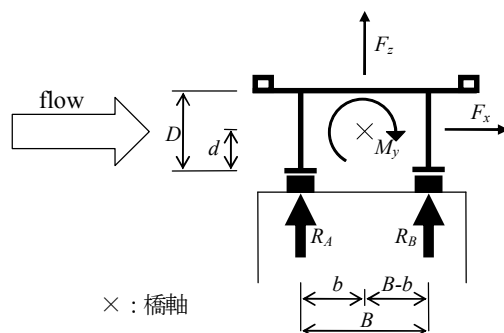


図-9 津波外力、支点反力の作用位置

ここでは上流側の支点反力を R_A 、下流側の支点反力を R_B と設定した。また式中 b は上流側の支点から橋軸までの距離(17mm)、 d は桁下部から橋軸までの高さ(13mm)、 B は支点間隔(34mm)である。津波外力(F_x , F_z)および流力モーメント(M_y)は計測波形を使用した。

3.2 到達水位と支点反力の関係

到達水位と上流側の支点反力との関係を図-10に示す。縦軸は支点反力であり、ここでは最大値と最小値を示した。横軸は到達水位である。

津波が作用したとき、上流側の支点では図-10に示すように、負の反力の絶対値が大きくなる。その大きさは到達水位が増加すると支点反力は線形的に増加する。2主桁断面と箱形断面を比較すると、2主桁断面のほうが最大で10%程度負の反力の絶対値が大きくなる。負の反力の絶対値が最大になる時刻は図-11から津波作用直後であることがわかる。また上流側の支点反力はほぼ全体的に負の反力が作用する。模型側面部に衝突した津波が、上流側の橋梁の張り出し部下面に作用するために、時計回りのモーメントが生じたためと考えられる。

図-12に下流側の支点反力と到達水位の関係を示す。下流側の支点反力は上流側の支点反力とは逆に正の反力が大きくなり、到達水位の増加とともにほぼ線形的に増加する。

下流側の支点反力の時刻歴波形を図-13に示す。下流側の正の反力が最大になる時刻も上流側の支点反力と同様に、津波外力が最大になる時刻である。また下流側の支点反力はほぼ全体的に正の反力が作用し、負の反力はほとんど作用しない。

津波が橋梁に作用すると、上流側の支点は負の反力を受ける。耐震設計では支承は負の反力に対して死荷重反力の-0.3倍の耐力を持つように設計されている⁹⁾。今後はこの耐力が津波によって生じる支点反力に耐えることができるか評価する必要がある。

本論文では鉛直方向の支点反力について検討を行ったが、実際には水平方向にも津波による力は作用する。水平方向の支点反力についてもどれくらい力が作用し、支承耐力に対する安全性を評価する必要がある。

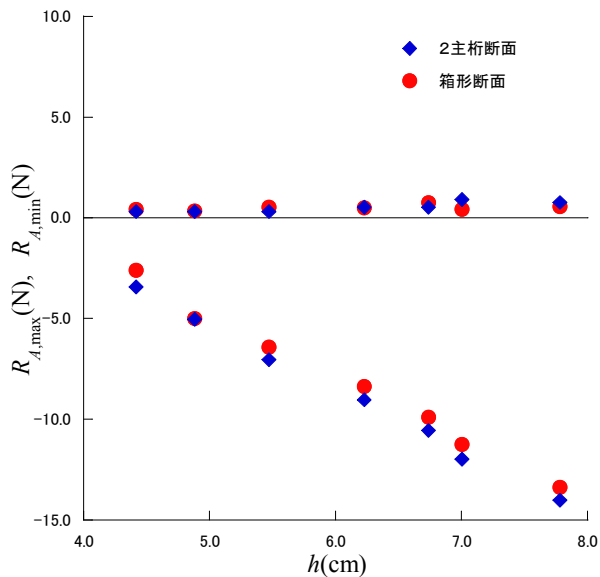


図-10 到達水位と支点反力の関係（上流側支点）

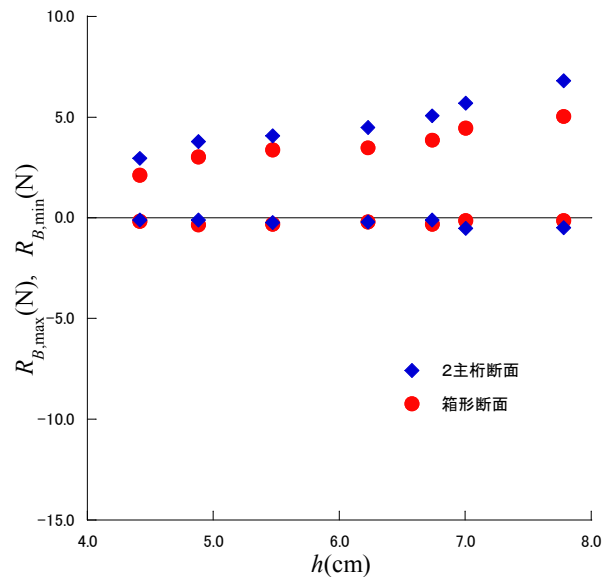
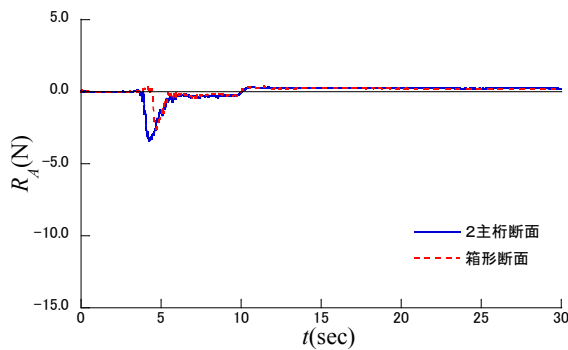
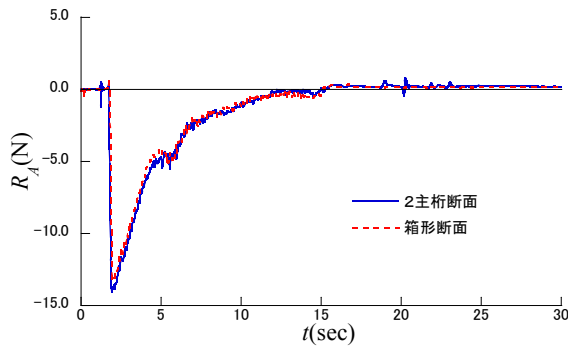


図-12 到達水位と支点反力の関係（下流側支点）

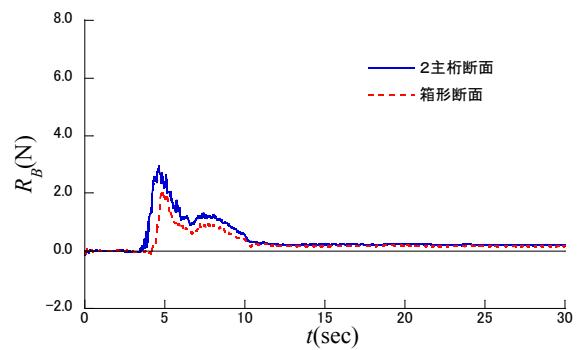


(a) 到達水位44mm

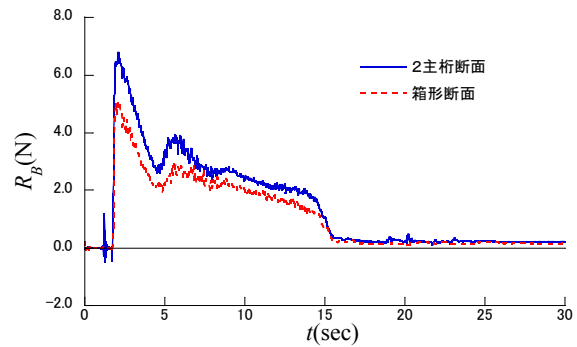


(b) 到達水位78mm

図-11 上流側支点反力の時刻歴



(a) 到達水位44mm



(b) 到達水位78mm

図-13 下流側支点反力の時刻歴

4. 3分力係数の評価

堤防やビルなどに対する津波外力は、津波高によって算定することが考えられている¹⁰⁾。橋梁の風による流体力は3分力係数で捉えられていることから⁸⁾、津波による外力も3分力係数で捉えることができれば、耐風設計と同様の設計法を採用できる。

津波の速度が推定できれば、津波流速から津波外力を算定することもできる。本章では津波流速を考慮した津波外力の算定を試みる。

4.1 到達水位と流速の関係

到達水位と流速の関係を図-14に示す。ゲートから水位計までの距離（2910mm）をゲート開扉から水位計に到達するまでの時間（0.8秒から2.0秒、100Hzのサンプリングで測定）で除し、波頭の進行速度の平均値を津波の流速としてとらえた。到達水位が40mmから80mmの範囲では、到達水位 h と流速 U には、ほぼ線形的な関係がある。

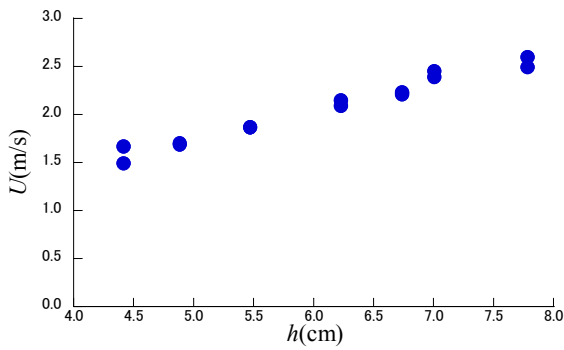


図-14 到達水位と流速の関係

4.2 3分力係数

各分力係数は次式となる。

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (4)$$

$$C_M = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho A B U^2} \quad (5)$$

C_D は抗力係数、 C_L は揚力係数、 C_M はモーメント係数、 ρ は水の密度(1000kg/m^3)、 U は流速である。 A は模型を水平方向に投影した時の暴露面積である($A=5200\text{mm}^2$)。面積は津波が作用した部分の面積にする必要があるが、写真-1で示したようにそれぞれの外力の最大値時には、流体は側面の全面積に作用していることから、側面の全面積とした。また B は模型幅($B=70\text{mm}$)である。また式中の F_x 、 F_z 、 M_y は最大および最小の津波外力を使用した。

図-15 から図-17 は水位と抗力係数、揚力係数、モーメント係数との関係を示した図である。縦軸は抗力係数、揚力係数、モーメント係数である。横軸は到達水位 h と河床から模型下までの距離 h_p の差を、模型高 D で割り無次元化したものである。 $(h-h_p)/D$ が 0 以下の場合には津波が模型に作用せず、1 よりも大きくなると、模型上端よりも高い水位の津波が模型に作用することを表している。

抗力係数は写真-1で示したように、津波外力が最大になるときの模型への作用状況によって違いが生じるため、図-15に示すように、 $(h-h_p)/D$ が0.5より小さいときは、抗力係数は増加傾向にある。 $(h-h_p)/D$ が0.5以上すなわち模型中心高さ以上の津波が作用すると、抗力係数はほぼ一定の値になる。本模型では抗力係数は0.7程度になる。

揚力係数を図-16に示す。上向きの揚力係数（最大値）も同様に $(h-h_p)/D$ が0.5より小さいと、増加傾向がある。 $(h-h_p)/D$ が0.5以上になると上向きの揚力係数は抗力係数と同様にほぼ一定となる。本模型では箱形断面では0.45、2主桁断面では0.40程度になる。下向きの揚力係数は一定

の値にならないが、その最小値は両モデルとも-0.25 程度になる。

時計回りのモーメント係数は図-17に示すように、 $(h-h_p)/D$ が0.2のとき以外はほぼ一定の値になる。箱形断面では0.13、2主桁断面では0.17程度である。また反時計回りのモーメント係数は、箱形断面では-0.05、2主桁断面では-0.03程度になる。

津波外力を3分力係数で表すと、津波高さがある程度以上の場合、ここで用いた断面の場合3分力係数は大まかに見て一定値となるとしてよいであろう。そのような観点から3分力係数の値をまとめると表-1のようになる。ただし $(h-h_p)/D$ が0.5よりも大きい場合である。

実例として、総幅員 10.7m、桁高 3.44m、スパン 50m の単径間の橋梁（Ⅱ種地盤、地域区分 A と仮定）を想定して支点反力を算定してみる。自重は 5547kN である。

流速はスマトラ沖地震により発生した津波の流速(5m/s)とすると¹¹⁾。桁全体の津波外力は、水平方向1505kN、鉛直方向860kN、流力モーメント3910.85kN・mとなる。水平方向支点反力は橋梁の桁一端で752.5kN、上流側支点の鉛直反力は-1611.7kNとなる。

この橋梁での耐震設計で要求される支点反力は、橋梁は両端の橋台で支えたとし、橋台の塑性化を考えずに設計し

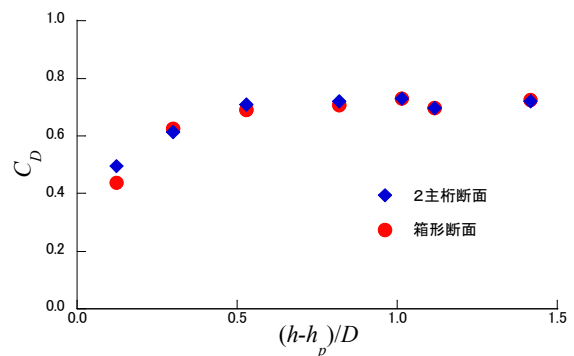


図-15 到達水位と抗力係数の関係

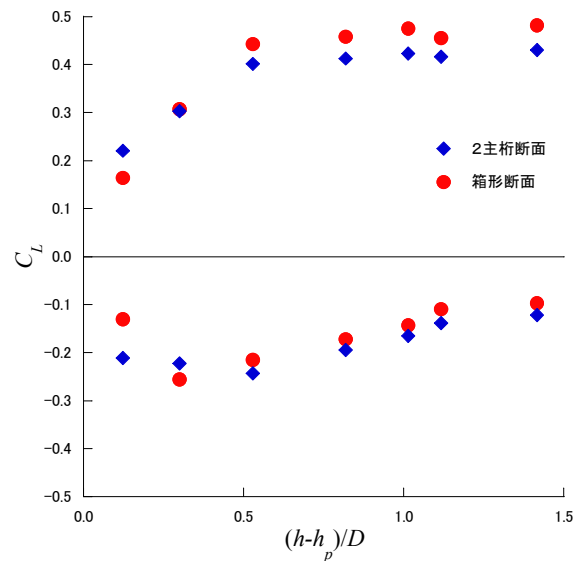


図-16 到達水位と揚力係数の関係

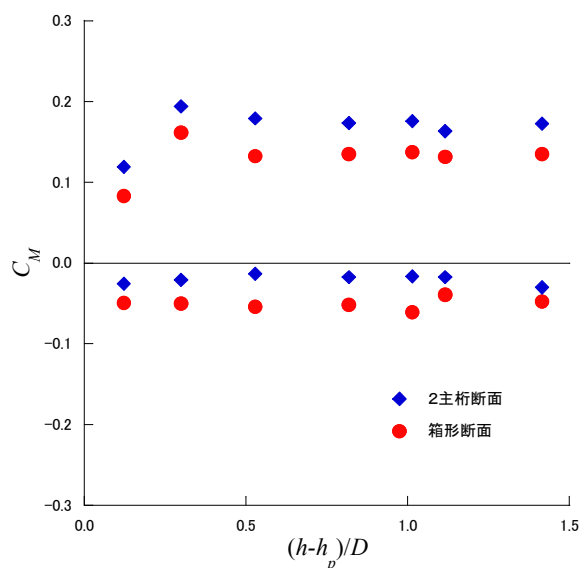


図-17 到達水位とモーメント係数の関係

表-1 3分力係数

		箱形断面	2主桁断面
C_D		0.70	
C_L	+	0.45	0.40
	-	-0.25	
C_M	+	0.13	0.17
	-	-0.05	-0.03

た場合、鉛直方向は-832.1kN、水平方向はレベル1で693.4kN、レベル2で4853.8kNとなる⁹⁾。想定した橋梁では、レベル1地震動で設計されるタイプA支承では水平鉛直とも耐力が不足し、レベル2地震動で設計されるタイプB支承も鉛直方向の耐力が不足している。

落橋防止ケーブルを設置した場合、落橋防止ケーブルの耐力は4160.2kNとなり⁹⁾、落橋防止ケーブルの作動方向が異なるが、水平方向の津波外力を上回る。

5. おわりに

本研究では箱形断面および2主桁断面を想定した橋梁モデルの津波外力を実験により求め、到達水位や流速などとの関係について検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 到達水位が44mmの場合、津波外力がピークに達する時刻は津波が作用してから約1秒後であるが、到達水位が78mmと高い場合、津波外力は急激に増加し、津波作用後0.5秒程度でピークに達する。
- ② 2主桁断面や箱形断面では張り出し部下面に津波が作用するために、津波作用直後に上向きの大きな力が作用する。
- ③ 水平方向の津波外力および上向きの津波外力、流力モーメントは到達水位の増加と線形的な関係がある。下向きの鉛直方向の津波外力は、到達水位が50mmより大きい場合（到達水位が桁高の50%以上）ではほぼ一定の値になる。

- ④ 得られた結果から支点反力を算定した場合、模型上流側の支点には負の反力、下流側の支点には正の反力が作用する。
- ⑤ 3分力係数と到達水位を無次元化した値と比較すると、 $(h-h_p)/D$ が0.5よりも大きい場合、各分力係数はほぼ一定となる。津波の速度（流速）が推定できれば、津波外力を容易に算定することができる。

謝辞

本研究の実施にあたっては、科学研究費補助金（若手研究(スタートアップ)20860078)「津波を想定した落橋防止ケーブルの設計に関する研究（研究代表者：中尾尚史）」および科学研究費補助金（基盤研究(C) (21560510)）「津波外力に対する落橋防止システムの必要性能の明確化（研究代表者：小林紘士）」による補助を得たことを付記する。

参考文献

- 1) 朝倉良介，岩瀬浩二，池谷毅，高尾誠，金戸俊道，藤井直樹，大森政則，護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，土木学会海岸工学論文集，第47巻，pp.911-915，2000。
- 2) 中央防災会議：津波避難ビル等に係るガイドライン検討会(第3回)／津波に対する構造物の構造設計法（素案），2004。
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999。
- 4) 片岡正次郎，日下部毅明，長屋和宏：津波衝突時に橋桁に作用する波力，第12回日本地震工学シンポジウム，pp.154-157，2007。
- 5) 嶋原良典，藤間功司，庄司学：橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算，地震工学論文集，土木学会，Vol.30，pp.899-904，2010。
- 6) 中尾尚史，伊津野和行，小林紘士：断面形状の異なる橋桁に作用する津波の流体力に関する実験的研究，地震工学論文集，土木学会，Vol.30，pp.892-898，2010。
- 7) 村上晋平，BUI Hong Ha，中尾尚史，伊津野和行：橋梁に作用する津波の流体力と流況に関するSPH法解析，地震工学論文集，土木学会，Vol.30，pp.914-920，2010。
- 8) 日本道路橋協会：道路橋耐風便覧，2007。
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V．耐震設計編，2002。
- 10) 日下部毅明，渋谷研一，片岡正次郎：津波による道路施設の被災度と経済的損失の設計手法に関する現況等の調査と基礎的検討，国土技術政策総合研究所資料，pp.35-45，2006。
- 11) 宮原健太・幸左賢二・二井伸一・嶋原良典：スマトラ沖地震に伴う津波による数値シミュレーション結果を用いた実橋梁被害分析，第13回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.89-96，2010。

(2010年3月9日 受付)