

準定常的な持続波力が桁流出に及ぼす影響に関する研究

佐藤 崇¹・幸左 賢二²・中尾 尚史³

¹正会員 博士（工学） （株）長大 第二構造技術部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

²正会員 Ph.D. 九州工業大学名誉教授（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）

³正会員 博士（工学） 国立舞鶴高等専門学校講師 建設システム工学科
（〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋234番地）

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震津波により、海岸沿岸部に位置する橋梁以外に、内陸部に位置する橋梁においても河川を遡上する津波により多くの流出被害が生じた。これまで著者らはこのような津波を準定常的な持続波であると考え、回流装置を用いた水理実験をもとに桁への作用力特性に関する検討¹⁾を行ってきた。これらの一連の研究は水平方向の流速変化が小さいことを前提とした定常流による実験を対象としていたが、実際に河川を遡上する津波は水位の上昇を伴っており、鉛直方向の水面変化が桁の作用力に及ぼす影響について確認する必要がある。桁に作用する準定常的な持続波に関する研究は、有川ら²⁾が実験による評価を試みている。水位上昇を伴う流れを対象とした研究は、長周期の津波を対象とした佐藤ら³⁾の実験や、比較的長周期の津波を対象とした四條ら⁴⁾が実験的検討を行っているが、いずれも具体的な水位上昇の影響までは明らかとなっていない。

一方、2017年には福岡県や大分県を中心とする九州北部で発生した集中豪雨により、河川の氾濫による人的被害のみならず多くの橋梁が洪水により流出した。また、2020年には熊本県の球磨川流域で同様の洪水被害が生じており、避難活動や地域経済に大きな打撃を与えた。河川を遡上する津波との大きな違いは、洪水は水位上昇が非常に遅いことであるがそれを除けば洪水も水平流速の時間的変化が遅い流れであり、準定常的な持続波力として作用力を評価できると考えられる。

以上より、本研究では河川を遡上する津波と洪水の両方の作用力に共通する準定常的な持続波の評価

手法について、これまで未解明であった水位上昇の影響を実験的に確認するとともに、これまで行われた準定常的な持続波力に関する研究成果を取りまとめる。さらには、河川を遡上する津波、洪水の作用を想定した橋梁支承部の評価方法について、実橋を例に従来から考慮されている地震に対する作用とあわせて概説する。

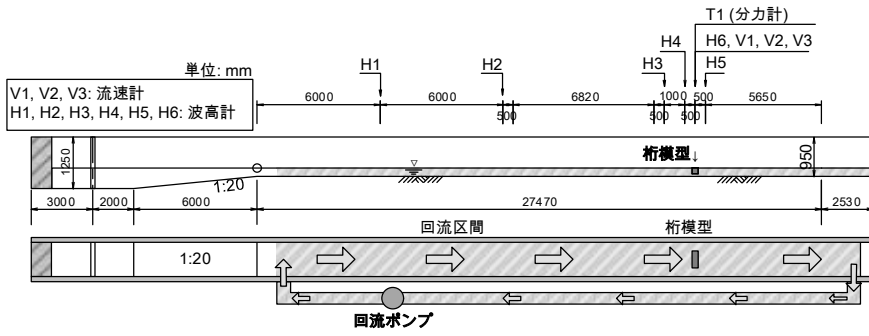
2. 水理実験概要

(1) 実験装置

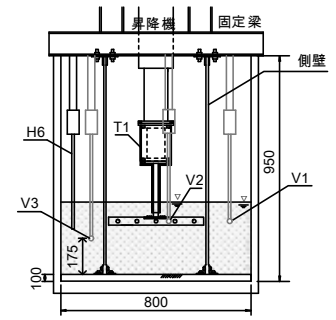
使用する長水路は、著者ら¹⁾のこれまで研究で使用した水路と同一であり、長さ41m、水路幅80cm、模型設置位置での水路高さ95cmの片面ガラス張りの水路である。実験装置全体図を図-1(1)に示す。水路脇に設置されている鋼管は、水路に直接つながっており、この鋼管を介して回流ポンプで水路内の水を流入・流出させて水路内に定常的な流れを発生させ、準定常的な持続波を模擬した。桁模型（1/50スケール）および計測機器の配置も著者ら¹⁾のこれまで研究と同様であることから詳細は割愛するが、図-1(2)に示す3つの流速計と桁模型に取り付けた分力計から実験データを取得した。

(2) 水平流速の設定

水平流速は東北地方太平洋沖地震において撮影映像より求めた河川を遡上する津波の平均的な流速が6m/s程度⁵⁾であったことをふまえ、水平流速 V_x （水槽内の平均的な回流流速）が50cm/s、75cm/s、100cm/sである3ケースを設定した。この流速の値は、実橋換算すると3m/s～7m/sの値である。なお、洪水



(1) 実験水路



(2) 水路断面

図-1 実験水路

の流速は6m/s程度であることが実際の洪水被害の再現解析⁶⁾より明らかとなっている。

(3) 水位上昇の設定

本実験では水位上昇の影響を考慮する方法として、図-3に示すように定常流状態の流れ場に、ある一定の速度で桁を降下させることで影響を模擬することとした。本実験装置には図-1に示すように分力計の上部に昇降装置が設置されており、この装置を用いて分力計と桁模型を降下させていき桁模型下面に水面が接地し桁が完全に水没するまでの状態の作用力を計測した。図-2に示すのは写真データを用いて推定した、東北地方太平洋沖地震津波による気仙大橋付近の気仙川における津波遡上状況を表した図である。同図に示すように、上部構造に津波が作用する際の水位上昇速度 V_z は2.0m/minである。また、中野ら⁷⁾の分析によれば伊万里川を遡上する津波の水位上昇速度は2.3m/min、Zhengら⁸⁾の分析によれば志津川を遡上する津波の水位上昇速度は平均で2.2m/minであった。以上をふまえ、2m/minの水位上昇速度を有する持続波を想定し、模型スケールで30cm/minの水位上昇速度のケースを設定した。また、さらに水位上昇速度が速いケースを想定し、実橋で6m/minとなる90cm/minの水位上昇速度のケースも水平流速100cm/sとした場合のみ行った。実験ケースは表-1に示す水平流速 V_x と水位上昇速度 V_z が異なる4ケースとした。なお、本実験を以降は桁降下実験と称する。

3. 実験結果

(1) 水平作用力の計測結果

図-4～図-6に分力計より得られた水平作用力 F_x と桁位置の関係を示す。同図は水深が0となる位置と桁模型下面が水面に着水した時刻で同期させている。

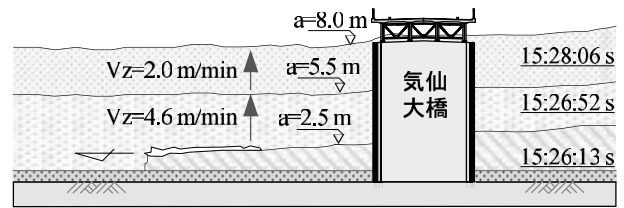


図-2 映像より得られた津波の水位上昇速度

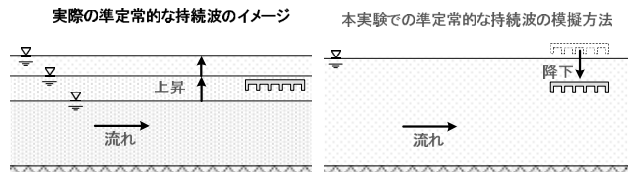


図-3 水位上昇の影響の模擬方法

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	水平流速 V_x		水位上昇速度 V_z	
	模型(cm/s)	実橋(m/s)	模型(cm/min)	実橋(m/min)
Case1	50	3.5	30	2.1
Case2	75	5.3	30	2.1
Case3	100	7.1	30	2.1
Case4	100	7.1	90	6.4

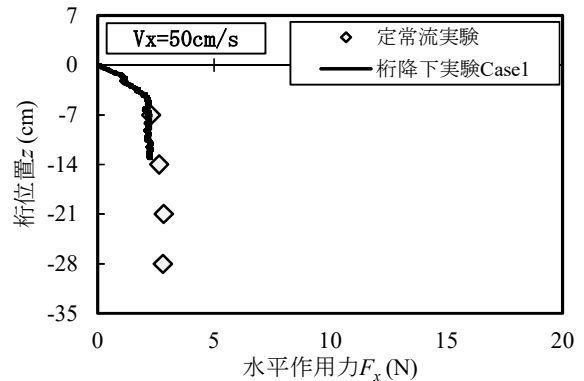


図-4 Case1の桁位置と水平作用力の関係

また、同図には既往の定常流実験¹⁾における、各桁位置の水平作用力の計測結果を合わせて示す。この定常流実験の結果は、本実験と同一の桁模型に同一の水平流速 V_x が作用した際の結果を示しており、水位上昇の影響以外は全て同じ条件である。なお、Case1およびCase2は計測器の都合上、水深-14cm以下が計測できていない。

まず、各流速で定常流実験と桁降下実験の結果比較すると、水平流速 V_x が速くなるにつれ桁降下実験の方が水平流速は小さくなる傾向がみられる。これは、桁が降下することにより桁模型周辺の流れの変化によるものと考えられる。図-7は桁位置が-7cmの際の定常流実験と桁降下実験における桁模型周辺の流れの状況であるが、桁降下実験では桁前面の水位は定常流実験の水位に比べ低いことがわかる。佐藤ら³⁾の研究でも指摘されているように、本実験においても桁の前面と後面の水位差に起因する圧力差が作用力にも影響していると考え、本実験では桁前面側の水位は定常流実験よりも低いため、水位差による水平作用力が小さかったと考えられる。なお、深さ方向の作用力分布は定常流実験と桁降下実験で有意義な違いはみられない。

次に、水位上昇速度 V_z の違いを比較すると、桁位置が-14cm程度まで水平作用力は両者ほぼ同一の履歴を描いており水位上昇速度の影響は小さいことが分かる。

以上より、水平流速が遅い場合は水位上昇の影響は小さく、水平流速が速い場合は幾分、桁降下実験の方が作用力は小さくなる傾向がみられる。設計用の作用力評価としての観点からは、水位上昇の影響を考慮しない方が安全側の評価となる。なお、水位上昇速度の影響は本実験では非常に小さかった。

(2) 鉛直作用力の計測結果

図-8～図-10に分力計より得られた鉛直作用力 F_z と桁位置の関係を示す。結果の整理方法は前述した水平作用力と同様である。鉛直力は上向きに作用している場合はプラス、下向きに作用している場合はマイナスを示す。また、桁の浮力は桁間の隙間に空気が含まれていない状態で15.4Nであり、同図に合わせて示す。

まず、各流速で定常流実験と桁降下実験の結果比較すると、水平流速が50cm/sおよび75cm/sでは桁降下実験の方が定常流実験に比べ若干上向きに大きく生じている。ただし、桁が深部に位置するにつれ定常流実験の結果と等しくなりほぼ浮力程度となる。水平流速が100cm/sのケースは、桁が着水した直後

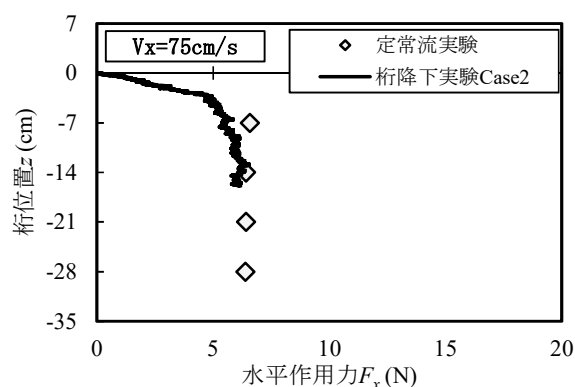


図-5 Case2の桁位置と水平作用力の関係

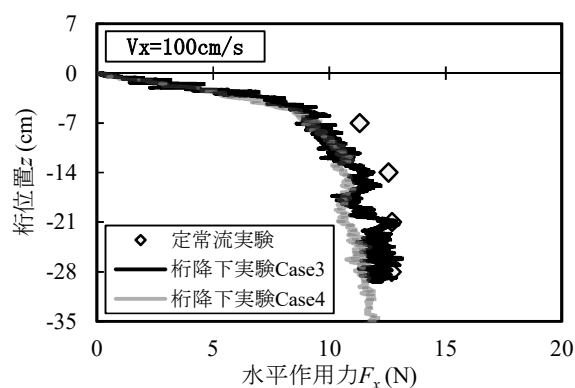


図-6 Case3,4の桁位置と水平作用力の関係

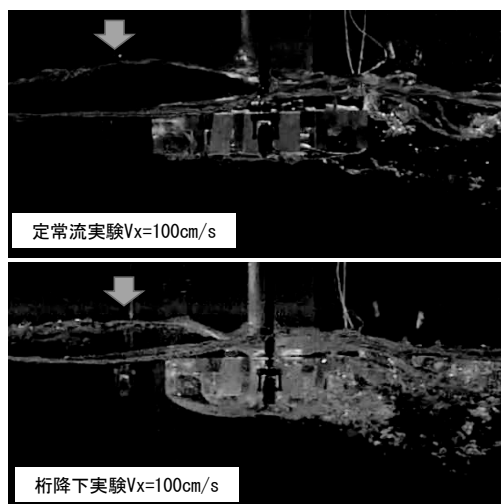


図-7 流れ作用状況の比較 ($V_x=100\text{cm/s}$)

から下向きの鉛直作用力が定常流実験の結果と比べ小さくなっており、桁が-28cm程度まで水没した状態になると定常流実験の結果と等しくなりほぼ浮力程度となる。

次に、水位上昇速度 V_z の違いを比較すると、水位上昇速度が速い場合は、桁位置が-14cm程度までは下向きの鉛直作用力は小さくなるが、それ以深では水位上昇速度の影響はみられない。既往の研究結果からも明らかのように、水面近くに桁が位置し水平

流速が速い場合は桁側面に作用した流れが桁上面からダウンフォースとして働くため、下向きの鉛直作用力が大きくなる。しかし、桁降下実験の場合、図-7に示すように、桁周りの流れ方が変化したことで、ダウンフォースが小さくなり、水面近くで定常流実験と比べ下向きの鉛直作用力が減少したと考えられる。

図-11に水面近くの鉛直作用力を全実験結果と水路に流れを生じさせない状態で桁を降下させて計測した結果を比較したものを示す。水位上昇は水面着水時など上向きの鉛直力を増幅させると考えられるが、Case3やCase4のように水平流速が速い場合は、その影響と浮力より大きな下向きの鉛直力が作用していることから、上向きの鉛直力は作用しない。一方、流速が比較的遅いCase1やCase2ではダウンフォースに比べ浮力が大きくなることから、桁着水時から上向きの鉛直力が作用する。水平方向の流れがない場合は、水位上昇の影響と浮力により上向きの鉛直作用力となるが、水深-5cm程度で鉛直作用力が最大となり、それ以深ではほぼ浮力程度の鉛直作用力となる。この鉛直作用力の最大値は22Nであり、概ね桁間の隙間を考慮せず矩形とした求めた浮力25Nと概ね一致することから、水面付近では桁内に空気が含まれていたが、水深が深くなるにつれ空気が抜けることで想定した浮力程度に収束したと考えられる。

以上より、水位上昇は桁が水面に近い位置にあり水平流速が遅い場合に鉛直作用力に影響を及ぼすが、その影響は小さく上向きの鉛直作用力としては最大でも浮力相当である。ただし、浮力を評価する場合は鉸桁橋のように床版と桁で囲まれた部分には空気が含まれる可能性もあるため、閉塞断面として浮力に含むことで安全側の評価となる。

4. 作用力評価手法の概要

ここでは著者らの実験だけではなく、他機関で行われた研究成果もあわせて作用力評価手法について概説する。対象とした実験は数値データが入手できた実験もしくは論文からデータの確認ができた実験とし、長周期の孤立波を対象とした四條ら⁴⁾の実験、定常流を対象とした有川ら²⁾の実験を対象とした。これらの実験のうち、四條らの実験は同一の波高および流速の津波に対して桁位置を変化させた7ケースの実験、有川らの実験は初期水位（桁位置）と定常流速を変化させた20ケースの実験を対象とした。

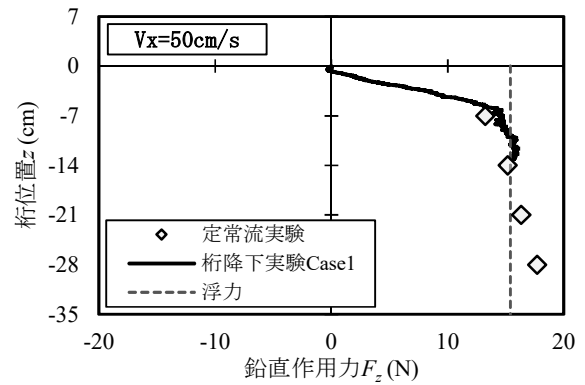


図-8 Case1の桁位置と鉛直作用力の関係

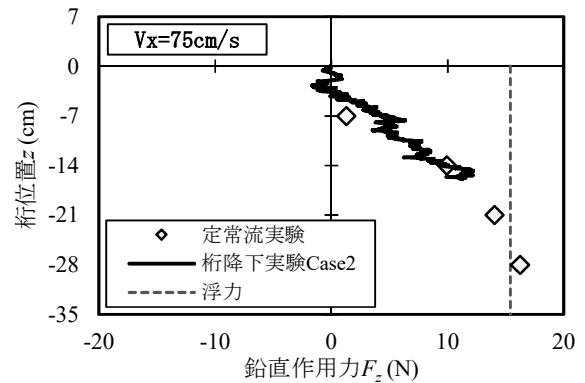


図-9 Case2の桁位置と鉛直作用力の関係

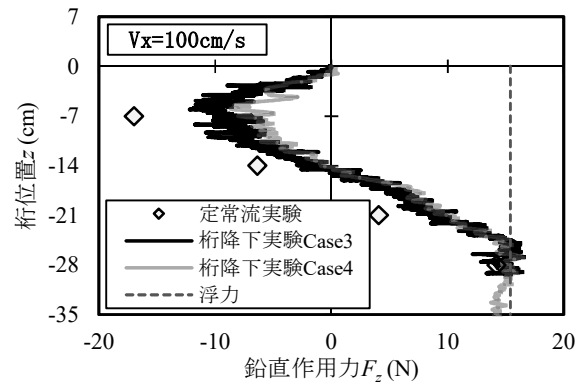


図-10 Case3,4の桁位置と鉛直作用力の関係

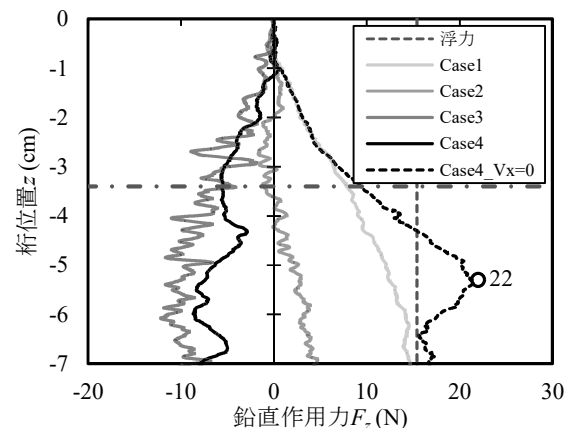


図-11 着水時の鉛直作用力

なお、四條らの実験結果は、流れがほぼ定常状態となる時刻における作用力を抽出したものの、流速については最大値を用いている。また、実験結果は全て実況換算した値を用いて評価している。

(1) 水平作用力

一般的に建築構造物等の3次元構造物に作用する波力の評価式としては、海水中にある杭に作用する波浪荷重を評価するために提案されたモリソン式（抗力式）⁹⁾がよく知られており、その評価式は流体力を加速度に比例する慣性力項と、流速の2乗に比例する抗力の和として表現したものである。通常、準定常的な流れに対しては一定流速下であれば慣性力項は省略でき以下の式となる。なお、河川断面の高さ方向の流速分布が求まる場合は、水位と桁位置の関係からその範囲での最大流速を求め式（1）より作用力を算出することとなる。

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

ここに、 F_x ：水平方向の作用力、 C_d ：抗力係数、 ρ_w ：水の密度(1000kg/m³)、 v ：津波の水平流速、 A_h ：桁模型の側面積である。なお、抗力係数 C_d は以下に示す道路橋示方書・同解説I共通編¹⁰⁾で提案されている上部構造に作用する風荷重を求める際に用いる抗力係数を準用することとした。この式は、橋梁上部構造を対象とした風洞試験結果を包括するよう定められた式である。式（2）から求めた本実験で用いた標準桁形状の C_d は1.54、四條らの実験では1.73、有川らの実験では1.3となる。

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

ここに、 B ：桁幅、 D ：桁高である。

図-12は、各実験における水平流速と F_x/F_{xcal} の関係を比較した図である。 F_{xcal} は各実験で得られた最大流速および定常流速を用いて式（1）から算出した水平作用力であり、 F_x は分力計で計測した水平作用力である。同図より、 F_x/F_{xcal} のばらつきは大きいものの全データの平均値は0.92となり概ね1となる。なお、四條らの実験において、別途、対象とした桁模型の抗力係数（1.26）を風洞試験より求めておりその抗力係数を用いた場合、 F_x/F_{xcal} の値は1近傍に分布する。

以上より、多機関の実験結果を含めた準定常的な持続波を対象とした水平方向の作用力の評価式とし

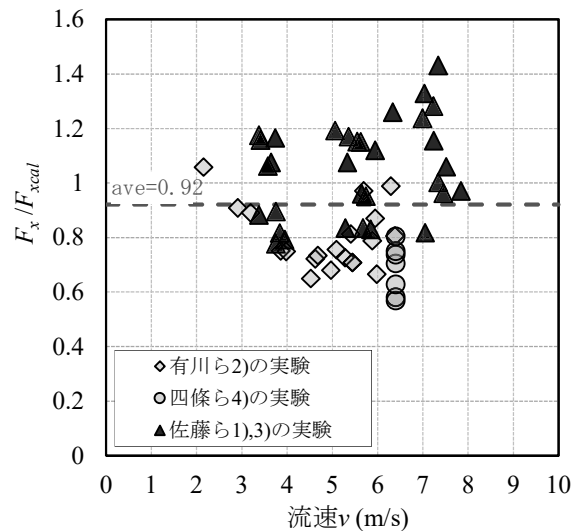


図-12 流速 v と F_x/F_{xcal} の関係

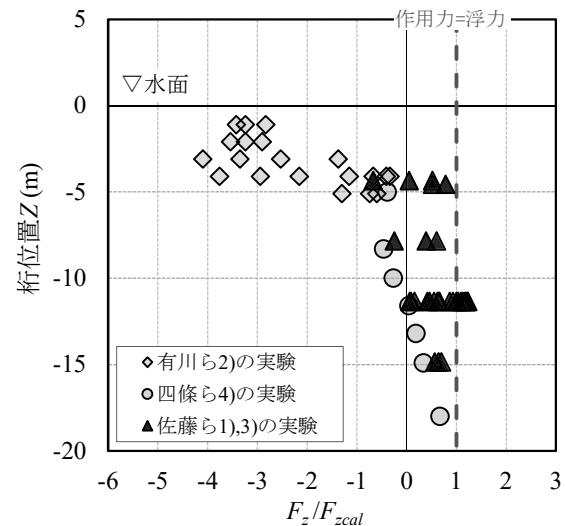


図-13 F_z/F_{zcal} と桁位置の関係

ては、式（1）および式（2）を用いることで種々の実験結果を近似した評価となる。今後はこれら結果のばらつきの評価手法を検討していく。

(2) 鉛直作用力

準定常的な持続波力に対する鉛直方向の作用力の評価式としては、流速や水面と桁位置の関係によって作用力は変化するものの、桁には浮力相当の上向きの力が作用するとし式（3）を評価式として提案する。

$$F_z = \rho_w g V \quad (3)$$

ここに、 F_z ：鉛直方向の作用力、 ρ_w ：水の密度、 g ：重力加速度、 V ：橋桁の体積である。なお、ここに示す鉛直方向の作用力は上向きを対象としており、下向きの作用力に対しては、一般的に上部構造を支

持する支承や橋脚の鉛直下向きの力に対する耐力は上向きの力に対する耐力に対して非常に大きいことから、ここでは評価式として表していない。

図-13に示すのは、縦軸に桁位置を、横軸に式(3)から求めた鉛直作用力 F_{zcal} に対する計測結果 F_z の比率として各実験結果をプロットした図である。同図に示すように、桁位置と F_z / F_{zcal} の関係は桁位置が深部にいくほど線形的に F_z / F_{zcal} の値が大きくなる傾向にあり、深部で1近くになる。河川堤防と上部構造位置の関係にもよるが、河川の流れが堤防を越流すると考えた場合、10m以上も水没する状況は非常に少ないと考えられる。そのため、水面近傍に着目すると、 F_z / F_{zcal} が1より大きい実験結果は確認できないことをふまえると、実験結果を式(3)により評価が可能であるといえる。

鉛直作用力の評価方法としては、揚力係数 C_l を用いた水平流速に応じた作用力の算定方法もあるが、ここでは揚力係数の傾向を把握するために、本実験結果から式(4)を用いて揚力係数を求めた。

$$C_l = \frac{2F_z'}{\rho_w v^2 A} \quad (4)$$

F_z' ：鉛直方向の作用力 (F_z - 浮力 U) , ρ_w ：水の密度, g ：重力加速度, C_l ：揚力係数, v ：水平流速, A ：被圧面積(底面)である。なお、 F_z' は準定常流状態では橋桁が既に水没しているため、橋桁の浮力 U を除く作用力のみで生じた力である。

図-14は各実験結果の桁位置と揚力係数の関係をプロットした図である。揚力係数は桁位置によって変化するが、水面近傍では揚力係数は負の値を示していることから、水平流速に関わらず上向きの揚力は生じないことがわかる。すなわち、上向きの鉛直力として浮力以外の作用力は生じていないことがわかる。

5. 支承部の損傷評価

(1) 概要

ここでは現行の設計基準を用いて設計された実際の橋梁に対して、津波もしくは洪水の作用を考慮した場合について前述した評価手法を用いて支承部の損傷評価を行う。

対象橋梁は平成24年道路橋示方書に準じて設計した、橋長37mのPC単純ポストテンションT桁橋とした。対象橋梁の構造および設計条件を表-2、図-15

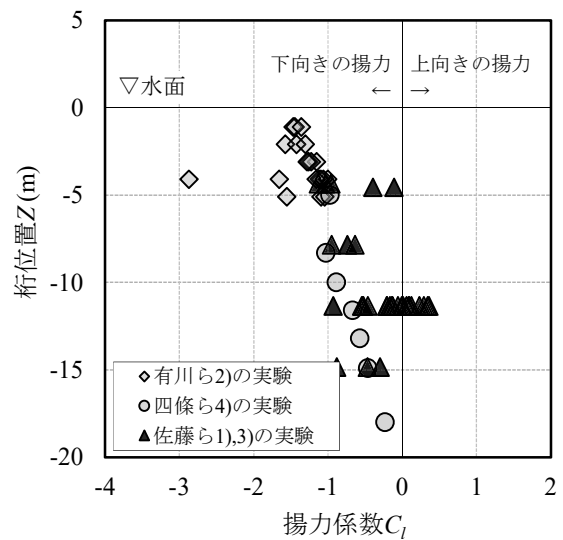


図-14 揚力係数 C_l と桁位置 Z の関係

表-2 対象橋梁諸元

橋長	37.00m	
有効幅員	10.51m	
全幅員	11.40m	
上部構造	形式	PC単純ポストテンションT桁橋
	支承	固定可動式支承
下部構造	形式	逆T式橋台
	基礎形式	場所打ち杭φ1200
設計水平震度	設計震度	kh=0.21, khc=0.79
	地域区分	A2
活荷重	B活荷重	
適用示方書	道路橋示方書・同解説(平成24年3月)	

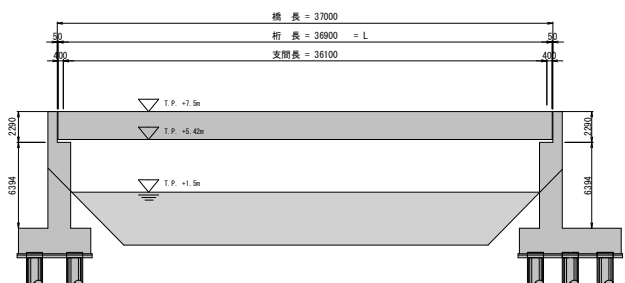


図-15 対象橋梁の全体一般図

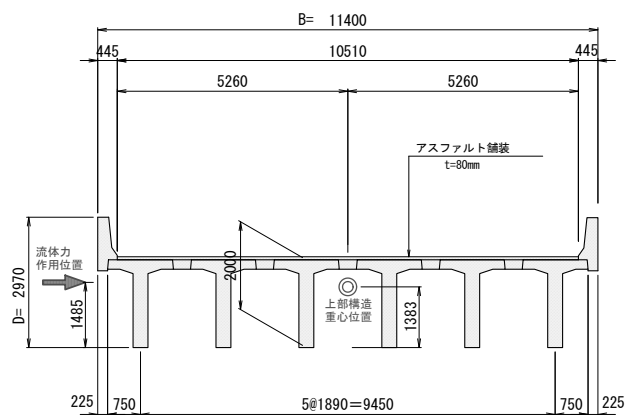


図-16 対象橋梁の桁断面模式図

表-3 作用力の算出結果

項目	記号	単位	PCT桁
河川の流速	v	m/s	6
密度	ρ	kg/m ³	1000
重力加速度	g	m/s ²	9.8
桁断面積	A	m ²	6.577
桁断面積(桁間充実と想定)	A'	m ²	20.411
桁幅	B	m	11.4
桁高	D	m	2.97
桁長	L	m	36.9
桁側面積	$A_B (=D \times L)$	m ²	110
桁体積	$V (=A' \times L)$	m ³	753
桁高桁幅比	B/D		3.84
抗力係数	C_d		1.72
【水平方向】		kN	3393
支承部作用力	F_x	kN/支承線	1697
浮力	U	kN	-7381
【鉛直方向】		kN/脊	-210
支承部の作用力	F_z		

に示す。対象橋梁は地方道としては一般的な橋梁規模であり、レベル2地震動に対して静的設計されている。なお、上部構造が両端橋台に支持されていることから、設計水平震度には許容塑性率を3として求めた構造物補正係数を掛けた値を用いており、落橋防止構造の設置は省略されている。

(2) 作用力の算出結果

本検討においては河川の流速を6m/sと想定し、水平作用力は式(1)、式(2)より求めた。鉛直作用力は道路橋示方書・V編に示される、支承部に作用する力の算出方法を準用して求めた。表-3に作用力の算出結果を示す。鉛直作用力については表-4に地震時(レベル2タイプII)の作用力算出結果と併せて詳細な算出結果を示す。本検討方法で地震時と異なる点は、水平力作用位置が異なる点と鉛直地震動は考慮せず式(3)より求めた浮力を考慮している点である。なお、浮力は桁間の空気層が抜けないことを想定して充実断面として求めている。

河川の流速が6m/sと想定して求めた水平作用力は1支承線で1697kN、鉛直作用力は1支承あたり-210kNの上向きの鉛直力が作用することとなる。

(3) 評価結果

通常、河川橋であれば計画高水より上方に上部構造位置を設定するため、上部構造に流体力が作用することは設計では想定しておらず、既設橋であれば津波・洪水の作用に対して新たに補強構造の設置、新設橋であれば津波・洪水による作用力を考慮した設計反力を用いて支承部を再設計することとなる。本対象橋梁における水平作用力については6m/sの流速の河川に桁が水没した場合は、地震時の作用力が3002kNであることから、地震時の設計作用力の方が

表-4 各支承位置の鉛直作用力

項目	単位	地震時	津波洪水時
地盤種別		II種地盤	
地域区分		A2	
対象とする地震動		タイプII	
死荷重反力	R_d	kN	633
水平力作用位置	h_s	m	1.673
設計鉛直震度	k_V		0.469
鉛直方向の地震力もしくは浮力	R_V	kN	297
設計水平力	H_B	kN	3002
設計水平力が作用した際の鉛直方向の反力	$R_{H1.6}$	kN	380
	$R_{H2.5}$	kN	228
	$R_{H3.4}$	kN	76
各支承の設計鉛直力 *G1を押し込み側と仮定	R_{U1}	kN	1115
	R_{U2}	kN	1008
	R_{U3}	kN	940
	R_{U4}	kN	327
	R_{U5}	kN	259
	R_{U6}	kN	152
上向きの設計鉛直力	R_U	kN	152
$-0.3R_d$	$-0.3R_d$	kN	-190

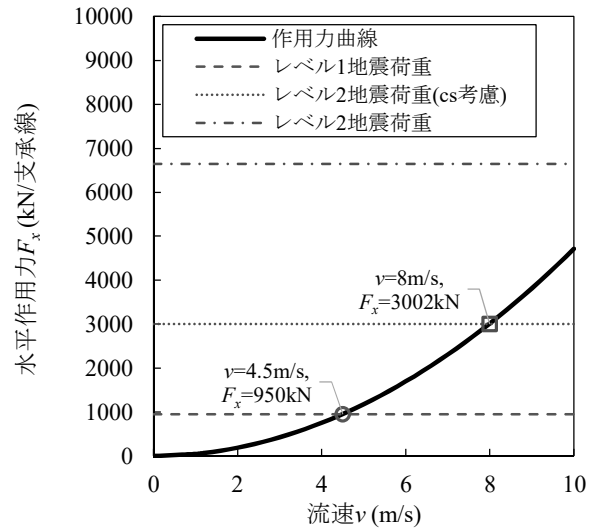


図-17 流速vと支承部の水平作用力Fxの関係

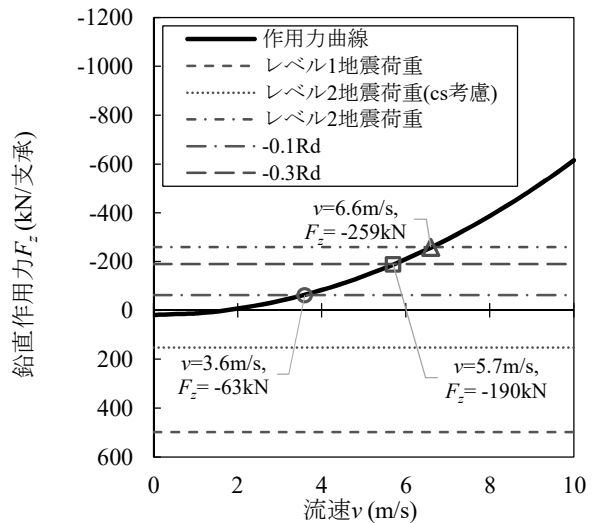


図-18 流速vと支承部の鉛直作用力Fzの関係

大きくなる。図-17は津波・洪水の流速が変化した場合の水平作用力を地震時の荷重と比較した図である。流速が8m/s以下の流速では地震時の作用力が大きくなるが、それ以上の流速が作用する場合は支承部の設計に津波・洪水時の作用力を考慮しなければならない。新設橋の場合であれば設計水平震度の上限値を用いて設計することで、津波・洪水の作用として10m/s以上の流速を想定した場合においても支承部単体で対策が講じられる。

一方、鉛直作用力については地震時に上向きの鉛直力は作用せず $-0.3R_d$ を支承部に考慮することとなるが、津波・洪水時の鉛直作用力より小さいため、別途、津波・洪水の作用を考慮する必要がある。図-18に水平作用力同様に求めた流速と鉛直作用力の関係を示す。流速が6m/sであれば、設計水平震度の上限値を用いて設計することで地震時の作用力を上回ることはないが、更に速い流速を想定した場合は、鉛直作用力のみ津波・洪水の作用力に対して支承部単体を再設計、もしくは別部材で抵抗させる構造を設置することとなる。

6. まとめ

本研究では河川を遡上する津波と洪水の両方の作用力に共通する準定常的な持続波の評価手法について、これまで未解明であった水位上昇の影響を実験的に確認するとともに、評価手法の妥当性の検証および実橋を対象とした支承部の損傷評価を行った。以下に得られた主要な結論を示す。

- (1) 水位上昇を模擬した桁降下実験と定常流実験の桁に作用する水平力の違いとしては、水平流速が遅い場合は水位上昇の影響は小さく、水平流速が速い場合は幾分、桁降下実験の方が作用力は小さくなる傾向みられる。
- (2) 桁に作用する鉛直力の違いとしては、水位上昇は桁が水面に近い位置にあり水平流速が遅い場合に鉛直作用力に影響を及ぼすが、その影響は小さく上向きの鉛直作用力としては最大でも浮力相当である。ただし、浮力を評価する場合は鉸桁橋のように床版と桁で囲まれた部分には空気が含まれる可能性もあるため、閉塞断面として浮力に含むことで安全側の評価となる。
- (3) 他機関の実験結果を含めた評価手法について検討した結果、桁の水平作用力は式(1)、式(2)を用いて実験結果を評価可能であるが、

実験結果のばらつきをどのように評価式に反映するかが課題である。

- (4) 桁の鉛直作用力は浮力を考慮することで実験結果を安全側に評価することが可能であるが、浮力の算出には十分留意する必要がある。
- (5) 提案した評価手法を用いて実橋を対象に支承部の損傷評価を行った結果、河川の流速が6m/s程度であれば、レベル2地震時の作用を考慮した設計が行われていれば支承部の設計に及ぼす津波・洪水の影響は小さかった。

参考文献

- 1) 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, I_876-I_880, 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, I_911-I_915, 2013.
- 3) 佐藤崇, 幸左賢二, 山内邦博: 東北地方太平洋沖地震津波を模擬した津波に対する橋桁の津波作用力特性評価, 土木学会論文 A1(構造・地震工学), Vol.74, No.1, pp.109-124, 2018.
- 4) 四條利久麿, 青木圭一, 広瀬泰之, 鈴木俊光, 越村俊一: 津波入射波の形状が上部構造に作用する津波波力に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.71, No.3, pp.277-294, 2015.
- 5) 佐々木達生, 幸左賢二, 佐々木達生, 鄭玉龍: 桁抵抗力津波作用力比に基づく橋梁の被害分析, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.417-427, 2013.
- 6) 大中臨, 赤松良久, 矢野真一郎, 二瓶泰雄, 山田真史, 佐山敬洋: 令和2年7月豪雨における球磨川渡-人吉地区の河川氾濫の実態解明, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.77, No.1, pp.203-214, 2021.
- 7) 中野亜美, 幸左賢二, 佐々木達生, 付李: 映像解析による歌津大橋の流出メカニズムの推定, 第15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.17-24, 2012.
- 8) Yulong Zheng, Kenji Kosa and Tatsuo Sasaki: Tsunami damage analysis for bridges in Shizugawa area, Journal of Structural Engineering, Vol.59A, pp.439-449, 2013.
- 9) Morison, J. R.; O'Brien, M. P.; Johnson, J. W.; Schaaf, S. A.: The Force Exerted by Surface Waves on Piles. Petroleum Transactions, American Institute of Mining Engineers, Vol.189, pp.149-154, 1950.
- 10) (公社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, pp.138, 2017.