

論文 コンクリート桁の桁位置に着目した津波被害分析

田中 将登^{*1}・幸左 賢二^{*2}・佐藤 崇^{*3}・佐々木 達生^{*4}

要旨: 本研究では、東北地方太平洋沖地震で発生した津波によって被害を受けたコンクリート桁の被害分析を実施した。その結果、断面形状が扁平であれば流出しにくい傾向にあること、桁下高が低い橋梁は準定常流を想定した桁抵抗力作用力比が大きくなることが明らかとなった。一方、桁に孤立波が作用することを想定して、同一波高のもと桁位置を変化させる水理模型実験を行った。その結果、波高に対して桁が中央に位置する場合、桁に作用する水平作用力は最大となり、桁位置が変化しても水平作用力は1割程度の減少に留まることが明らかとなった。

キーワード: 津波、孤立波、作用力特性、圧力

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、東北地方沿岸部に位置する多くの橋梁上部構造が流出した。これに伴い、著者らは橋梁の流出状況等の被害調査を実施しており、その一環として図-1[a]に示す準定常流を想定した桁抵抗力作用力比 β を用いて桁の流出被害の分析を行っている。その結果、 β 値に上部工の流出指標としての有効性を見出すとともに、 β 値と桁形状の関係を明らかにしつつある¹⁾。しかしながら、 β 値に影響を及ぼすと考えられる桁下高について、 β 値との関係性を十分に考察しておらず、検討の余地が残されている。

一方、図-1に示すように一般的な津波実験では長周期の津波を模擬した[a]準定常流の他に、段波やソリトン分裂波のような短周期の津波を模擬した一山型の[b]孤立波があり、著者らは桁に孤立波が作用することを想定して水理模型実験を行っている。例えば、津波の波高をパラメータとした実験、および橋桁側面積をパラメータとした実験²⁾から、いずれのパラメータも水平作用力と比例関係にあることが明らかとなっている。しかしながら、水平作用力に影響を及ぼすと考えられる桁下高について、水平作用力との関係性を十分に考察しておらず、検討の余地が残されている。

そこで、本研究ではコンクリート桁に着目して β 値に対する桁形状と桁下高の関係をそれぞれ分析した。また、橋梁上部構造に孤立波が作用することを想定して、孤立波を桁模型に作用させた。なお、桁位置をパラメータとし、桁位置変化に伴う水平作用力特性を分析した。

2. コンクリート桁の損傷特徴

ここでは、コンクリート桁の損傷特徴を明らかにする

ことを目的として桁抵抗力作用力比 β に対する上部構造形式と桁下高の関係をそれぞれ分析した。

図-1は著者らが調査した橋梁40橋をPC桁とRC桁、鋼桁に分類し、桁損傷度と桁抵抗力作用力比 β の相関性を検討した結果を示す。なお、調査対象は宮城県、岩手県の沿岸部の浸水範囲に位置し、なおかつ設計図書が入手可能な橋梁を対象としており、桁損傷度の定義は、Aは完全に流出、Bは桁移動(ただし橋台上に存置)、Cは軽微な損傷を意味している。また、桁抵抗力作用力比 β の算出方法を以下に示すが、詳しくは著者ら¹⁾の検討を参照されたい。

$$\beta = S/F_x \quad (1)$$

ここで $S (= \mu W)$: 抵抗力[N], $F_x (= 0.5 \rho C_d v^2 A_h)$: 流れの水

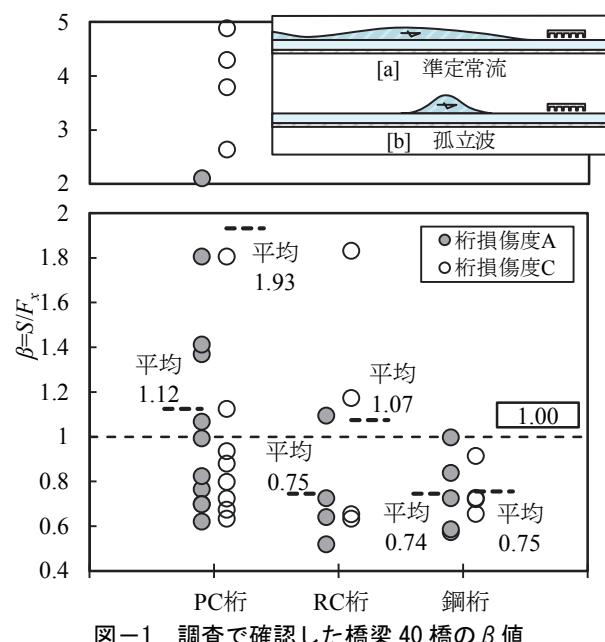


図-1 調査で確認した橋梁40橋の β 値

*1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (学生会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 Ph. D (正会員)

*3 株式会社 長大 (正会員)

*4 大日本コンサルタント株式会社 (正会員)

平作用力[N], $v : 6[m/s]$ (現地の映像計測結果の平均流速)である。

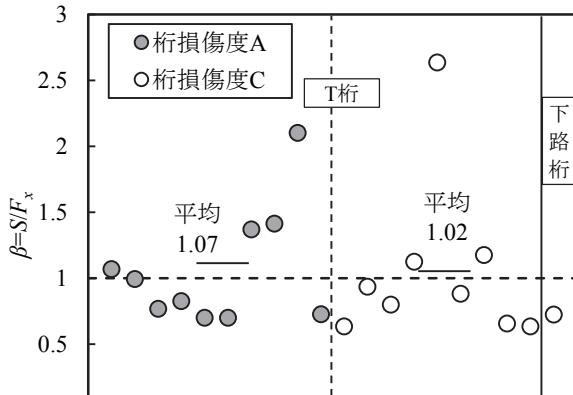
同図より、先ず、PC 枠の枠損傷度 A では、 β 値は 0.62 から 2.10 まで分布するものの比較的 1.00 付近に多く分布し、平均値は 1.12 となる。一方、PC 枠の枠損傷度 C では、 β 値は 0.63 から 4.88 まで分布し、平均値は 1.93 となる。同様に RC 枠ではそれぞれの平均値は 0.75, 1.07 である。さらに、鋼枠ではそれぞれの平均値は 0.74, 0.75 である。このことから、コンクリート枠では枠損傷度と β 値の相関性が高いことが確認された。ここで、コンクリート枠に着目をして、上部構造形式ごとの枠損傷度と β 値の相関性を分析した。

図-2 にコンクリート枠の β 値を上部構造形式ごとに分類し、枠損傷度ごとに平均値を示した。なお、中空床版枠と H 埋込枠は断面形状が同様であるため、合わせて示す。同図(a)より、T 枠では枠損傷度 A, C の β 平均値はそれぞれ 1.07, 1.02 と枠損傷度間で大きな差はない。

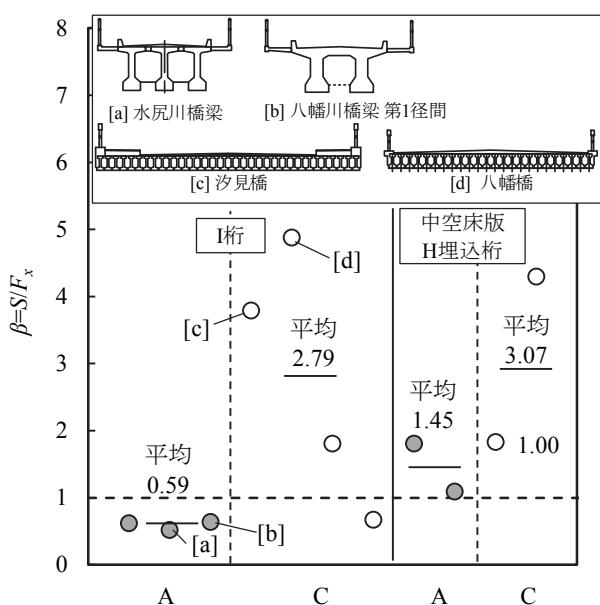
一方同図(b)より、I 枠ではそれぞれの平均値は 0.59, 2.79 であり、中空床版および H 埋込枠ではそれぞれの平均値は 1.45, 3.07 と枠損傷度間で大きな差となる。このことから、I 枠や中空床版のような枠形式では橋梁毎に被圧面積の違いが明瞭となるため、 β 値と被害程度は相関があることが確認された。

また、 β 値と枠損傷度の相関が高い I 枠において枠損傷度 A での β 値が特に低い [a], [b] 点、枠損傷度 C での β 値が特に高い [c], [d] 点に着目をして、それぞれの上部構造断面形状を同図(b)に示す。断面形状より、[a], [b] 点では枠高が高いのに対して、[c], [d] 点では比較的枠高が低く、枠高に対して枠幅が広い扁平な形状を呈する。このことから、枠高が高ければ流出しやすい傾向にあり、断面形状が扁平であれば流出しにくい傾向にあると考えられる。

図-3 は横軸を β 値、縦軸を各橋梁の水面から枠下までの距離とし、コンクリート枠における枠損傷度 A, C の β 値と枠下高の関係を示す。同図より、枠損傷度 A, C ともに枠下高が 5m より高い場合には β 値が 1.00 付近に位置し、一方で 5m より低い場合には枠下高が減少するとともに β 値が増加することがわかる。ここで、枠下高が減少するとともに β 値が増加することについて考察を加える。図中に示す [c], [d] 点は図-2(b)で述べたケースであり、このケースの断面形状は前述した通り扁平な形状を呈する。また、[e], [f] 点の断面形状を図-3 に示しており、両者ともに図-2(b)で述べた [a], [b] ケースと比較すると扁平な形状を呈する。 β 値が増加した要因としては、枠下高が減少することとあわせて、扁平な形状であることによって被圧面積が小さくなり式(1)中の作用力 F_x が減少するためと考えられる。なお、枠下高が低い



(a) T 枠, 下路枠



(b) I 枠, 中空床版, H 埋込枠

図-2 上部構造形式ごとに分類した β 値

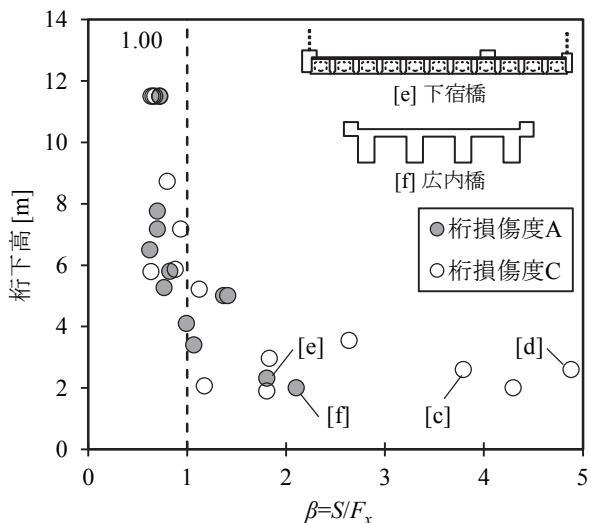


図-3 β 値と枠下高の関係

と桁断面形状が扁平である傾向となるのは桁下空間を確保するためと考えられる。

3. 実験概要

ここでは、橋梁上部構造に孤立波が作用するとの想定から孤立波を桁模型に作用させ、その結果から作用力について分析を行った。なお、孤立波の作用力特性は橋梁架橋位置によって異なると考え、同一の津波に対して鉛直方向に桁位置を変化させたパラメータ実験を行った。

3.1 実験装置

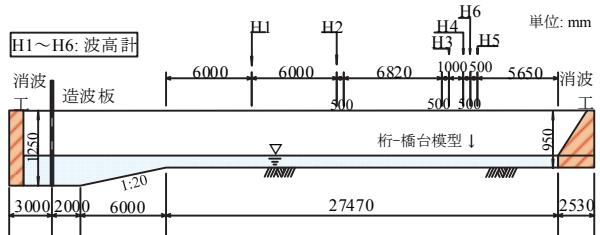
使用する長水路は、図-4(a)に示すように長さ41m、幅80cm、橋桁模型位置での水路深さ95cmの片面ガラス張りの水路である。同図の左端の造波装置は、ピストン型造波装置である。パソコン制御で、指令波高と実験時の初期水深(水槽の底から静水面までの高さ)を入力する。

図-4(b), (c)はそれぞれ桁模型位置付近の断面図、側面図を示す。橋梁模型の両端には3次元的な波の乱れを排除するために側壁を設けており、側壁は、高さ60cm、幅100cmであり、橋桁模型が側壁の中心となるように設置した。

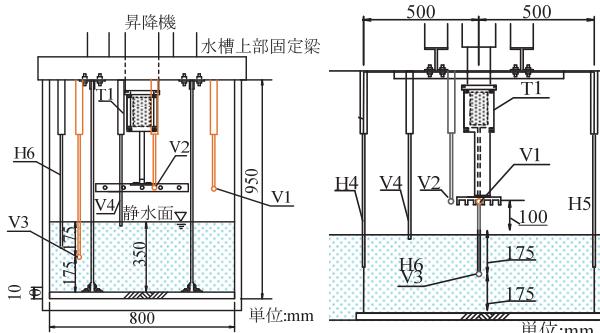
3.2 計測方法と橋梁模型

図-4(b), (c)に示すように、設置した計測器は、孤立波性状の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), 水路内の桁模型周辺の流速を計測する流速計(V), 波形状をとらえる波高計(H)である。分力計は水平作用力(F_x), 鉛直作用力(F_z)と回転モーメント(My)が計測できる3分力計で、仕様規格は980Nである。同図より、水槽の上部に梁を固定し、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。治具に津波が作用しないように、鞘管構造で分力計と治具を覆い、模型のみに作用する力の抽出に配慮した。波高計は図-4に示すように、6基使用し、主に指令波高との差異の検証用である。H6は側壁の隣の桁模型横に設置することで、模型への作用による乱れのない、桁中心位置を通過する波高を計測する。

図-5は本実験で用いた橋梁模型を示す。桁模型の対象は、2004年スマトラ沖地震津波で実被害を受けたコンクリート桁である。縮尺は1/50で、模型の橋長は40cm、幅員19cm、構造高3.4cm(実橋換算で橋長19.1m、幅員10.2m、構造高1.7m)である。橋長、幅員、構造高は、我が国でも多く存在する単純桁の橋梁に類似する形状であり、過去に行った段波状の津波に対する桁への作用力実験³⁾で用いた模型と同じ形状としている。波形状のディテールの違いによって生じる作用力特性の比較をしている。なお、高欄等の付属物については津波に対する抵抗が小さく、なおかつ付属物自体の耐力も小さ



(a) 実験装置概略図



(b) 実験装置断面図 (c) 実験装置側面図

図-4 実験装置全体図

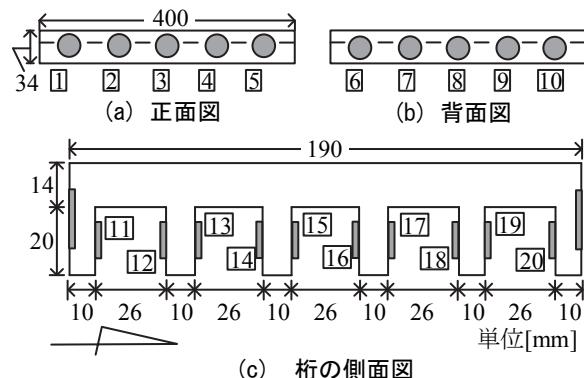


図-5 橋桁模型と圧力計設置状況

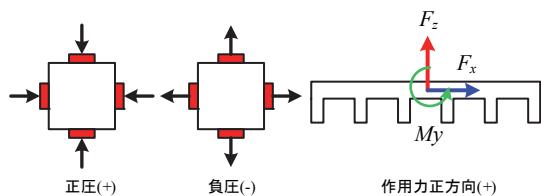


図-6 圧力計および分力計の符号の定義

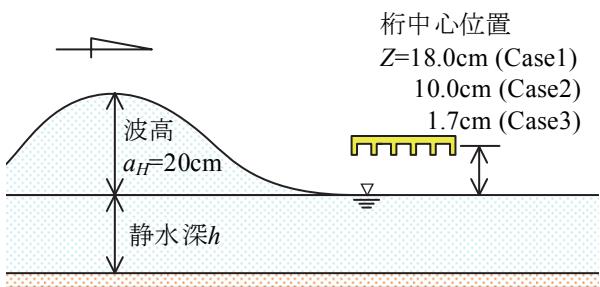


図-7 実施ケース概要図

いため、主として津波に対して桁本体が抵抗すると考え、モデル化を省略した。

桁模型には作用力分析用の圧力計設置位置を示す。同図より、桁に20個の圧力計を設置し、桁周面に生じる圧力を詳細に計測した。これらの計測器は全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おり、計測サンプリング周期は全て1/1000secである。なお、後述する圧力計および分力計の計測結果の符号の定義は図-6に示す通りである。計測回数は同一条件のもと各ケース3回であり、再現性の確認を行っており、平均値に対して5%以内のばらつきであった。

図-7に実験ケース概要図を示す。同図より、静水深を35cmとし、波高は20cm(実橋換算で10.0m)とした。実験のパラメータは桁中心位置Zとし、桁が津波頂部に位置する $Z/a_H=0.9$ のケース(Case1)、津波波高の中央に位置する $Z/a_H=0.5$ のケース(Case2)、静水面付近に位置する $Z/a_H=0.1$ のケース(Case3)を実施した。

4. 代表ケースの実験結果

4.1 津波の作用状況と計測波高

図-8にH1、H2、H6波高計の時刻歴図を示す。同図より、H1、H2、H6のそれぞれの距離と時間の関係から求められる指令波高20cmの孤立波の伝播平均速度は、H1からH2では232cm/s、さらにH2からH6では231cm/sと若干の減少傾向をみせる。一方で波高はH1、H2でそれぞれ17.4cm、19.0cmと徐々に増幅し、桁模型位置のH6で指令波高と同等の波高20.3cmを記録する。この進行に伴う波高の増幅傾向は、波速の若干の減少によってもたらされる結果と考えられるが、桁模型位置では指令波高で設定した波高が再現される。

4.2 代表ケースの実験結果

ここではCase2を代表ケースとし、水平作用力発生メカニズムについて、桁模型周面に設置した圧力計を用いて分析を行う。

図-9は分力計で計測された水平作用力 F_x と圧力の計測値を積分することで作用力として表した F_{xp} の時刻歴波形である。 F_{xp} は式(2)に示す式(3)～式(5)に示す作用力を足し合わせた作用力であり、 F_{xp} は下記の式(3)に示す桁前面圧力(p_1 ～ p_5)、 F_{xb} は式(4)に示す桁背面圧力(p_6 ～ p_{10})、 F_{xin} は式(5)に示す内桁前背面圧力(p_{11} ～ p_{20})で算出した作用力である。

$$F_{xp} = F_{xf} + F_{xb} + F_{xin} \quad (2)$$

$$F_{xf} = \sum_{i=1}^5 A_i p_i \quad (3)$$

$$F_{xb} = \sum_{i=5}^{10} A_i p_i \quad (4)$$

$$F_{xin} = \sum_{i=11}^{20} A_i p_i \quad (5)$$

ここで、 p_i :図-5に示す桁前背面で計測された圧力[Pa]、 A_i :各圧力の被圧面積[mm²]

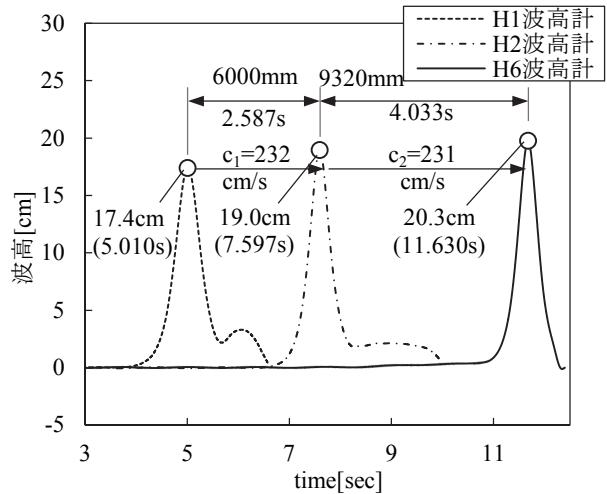


図-8 波高の時刻歴波形

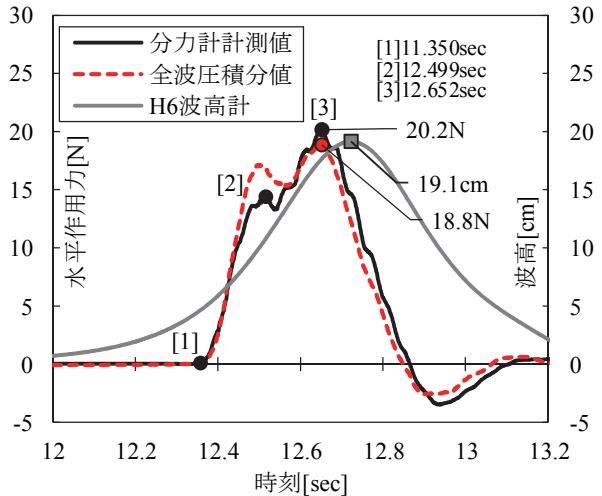


図-9 波高と水平作用力の時刻歴波形

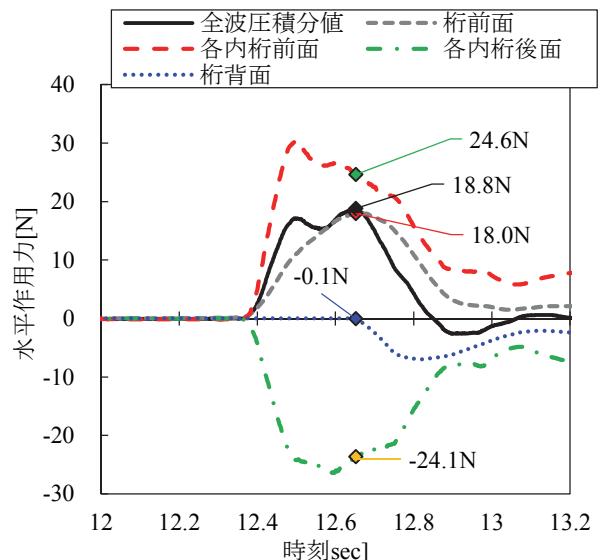


図-10 桁の各位置に作用する作用力の時刻歴波形

同図より、全圧力積分値と分力計測値を比較すると、図中の[1], [2], [3]に示す、それぞれ作用力の発生、波形の突出部、水平作用力の最大値の発生時刻が一致し、特に[3]に示す全圧力積分値と分力計測値はそれぞれ18.8N, 20.2Nと7%程度の差異で一致する。このことから、水平作用力を分析する上で用いる圧力計の計測結果の信頼性は非常に高いと判断できる。

さらに図-10に、圧力計と被圧面積から評価した全圧力積分値に加え、この全圧力積分値を桁前面、内桁前面、内桁背面、桁背面に分解した作用力を示す。なお、津波の進行方向に対して前面側で計測された圧力の積分値は圧力と同様の符号で表示し、背面側で計測された圧力の積分値は正圧が作用している場合は負、負圧が作用している場合は正として表示している。同図より、水平作用力の最大値発生時刻における桁前面、内桁前面、内桁背面、桁背面に生じる作用力は、それぞれ18.0N, 24.6N, -24.1N, -0.1Nである。つまり、本ケースでは内桁前面と背面に作用する作用力が等しく打ち消しあうとともに、桁背面に作用力が発生しないため、桁に発生する水平作用力は、桁前面に発生した圧力によって生じる作用力が支配的であるといえる。

4.3 桁位置と水平作用力の関係

図-11に、各ケースの水平作用力最大時点における分力計で計測された水平作用力の3回の計測値の平均値と全圧力の積分値、並びに桁前面、桁背面、内桁間それぞれの圧力積分値を示す。

まず、Case1では、前面圧力から積分した作用力は12.1Nであり、また、内桁に発生する作用力は5.2Nと、他の2ケースと比較して大きい。桁背面側に作用力は発生しておらず、これらの合計は17.3Nであり、分力計で計測された作用力17.1Nと概ね一致している。

次に、Case2では、前面圧力から積分した作用力は18.0Nとなり、Case1の12.1Nに比べて1.5倍となる。内桁に発生する作用力は0.5Nと前述のCase1に比して小さい値となるものの桁背面側に作用力が発生しない傾向はCase1と同様である。これらの作用力の合計は18.5Nである。

さらに、静水面付近に位置するCase3では、前面圧力から積分した作用力は23.7NとCase1の12.1Nに対して2.0倍となる。内桁に発生する作用力は0.3Nと、他の2ケースに比してさらに小さくなるが、桁背面に-8.4Nの桁前面とは逆向きの作用力が発生し、これらの作用力の合計は16.3Nである。

以上の結果より、波高に対して桁が中央に位置する場合、桁に作用する水平作用力は最大となり、桁位置が変化しても水平作用力は1割程度の減少に留まる。

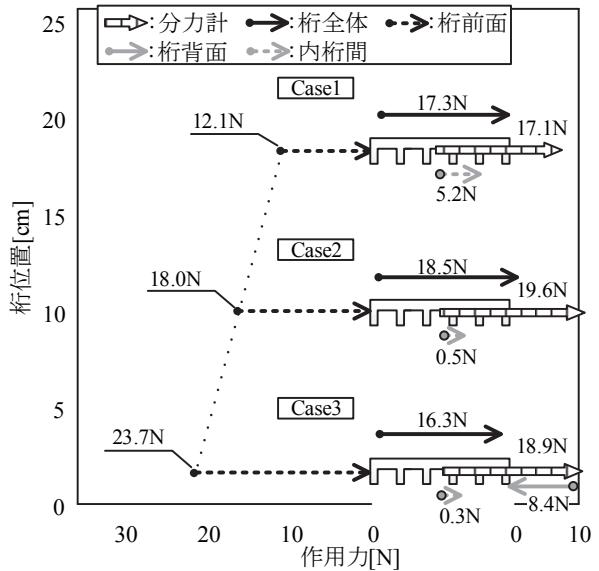


図-11 各桁位置で発生する作用力の関係

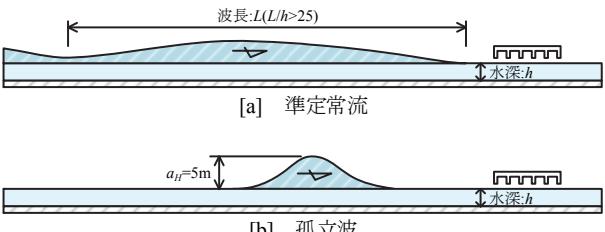


図-12 2種類の波形状模式図

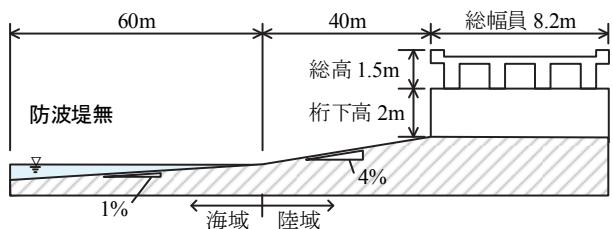


図-13 広内橋周辺の地形的特徴

5. 波形状ごとの水平作用力

図-12に示すように、津波を大別すると[a]準定常流と[b]孤立波があり、各波が桁に作用する際に生じる作用力特性にはある程度の差異があると考えられる。本章では上部構造に孤立波が作用すると考えられる橋梁を挙げた上で、各波がその橋梁に作用する際に生じる水平作用力の差異を明らかにすることを目的として、各波の水平作用力を簡易的に算出した。

先ず、2章で前述した40橋の中で孤立波が橋梁上部構造に作用すると考えられる広内橋について述べる。図-13に広内橋上部工の断面形状と周辺の地形的特徴を模式的に示す。同図より、広内橋上部工は総高1.5m、総幅員8.2m、橋長28.4mのPCT桁である。地形的特徴として同橋梁は河床から桁下面までの距離は2mであり、海

岸線から架橋位置までの距離は約40m、地形勾配は海岸線から海域に向かって1%、海岸線から陸域に向かって4%である。さらに、沖側に向かって防波堤は設置されていない。これらの地形的特徴より、橋梁から沖側に向かって防波堤が設置されておらず、地形勾配が急であることから海岸線付近に到達した津波は防波堤に阻害されることなく進行し、津波先端部は急激に水位が上昇し、盛り上がることによって孤立波が発生する可能性がある。また、河床から桁下面までの距離が2mと低いことから発生した孤立波は橋梁上部工に作用すると考えられる。

続いて、準定常流と孤立波それぞれの水平作用力を簡易的に算出した。以下に各波形状の水平作用力算出方法を示す。

先ず、準定常流の水平作用力は式(1)中における F の算出式から算出されている。次に、孤立波の水平作用力は3章で前述した孤立波実験の結果を用いて算出した。図-14は、横軸に水平作用力 F_x を波高から得た圧力 $\rho g a_H$ と桁模型側面積 A_h で除した値 α 、縦軸に桁中心位置 Z を波高 a_H で除した値とし、図-11で前述した分力計から得られた水平作用力をプロットした図である。同図より、 α 値の最大値、最小値はそれぞれ0.74、0.64と両者の差は小さいことから、桁位置が変化しても α 値は概ね一定である。ここで、危険側を考慮するために、桁が波高の中央に位置するケースでの $\alpha=F_x/\rho_w g a_H A_h=0.74$ を用いて水平作用力算出式(6)を導出した。

$$F_x = 0.74 \rho_w g a_H A_h \quad (6)$$

ここで $a_H: 5\text{m}$ (各地で観測される孤立波の想定最高波高)、 $A_h: 42.6\text{m}^2$ (広内橋上部構造の側面積)である。

同図に広内橋を例として算出された準定常流と孤立波それぞれの水平作用力を示す。同図より、準定常流と孤立波の水平作用力はそれぞれ1227kN、1591kNとなり、前者に比べて後者の水平作用力は1.3倍となることが確認された。

6. まとめ

本研究では、著者らが津波による被害調査を実施した40橋の中のコンクリート桁に着目して損傷特徴を明らかにした。また、孤立波が橋桁に作用した際の作用力特性を把握することを目的に、波高に対する桁位置をパラメータとした水理実験を行った。本研究より得られた知見を以下に示す。

(1) 津波の浸水域に位置するコンクリート桁に着目して、各上部構造形式で桁抵抗力作用力比 β と桁損傷度の関係を検討すると、I桁や中空床版桁、H埋込桁では β と桁損傷度の相関が高い。また、桁高が高ければ流出しやすく、断面形状が扁平であれば流出しにくい傾向にあると考えられる。

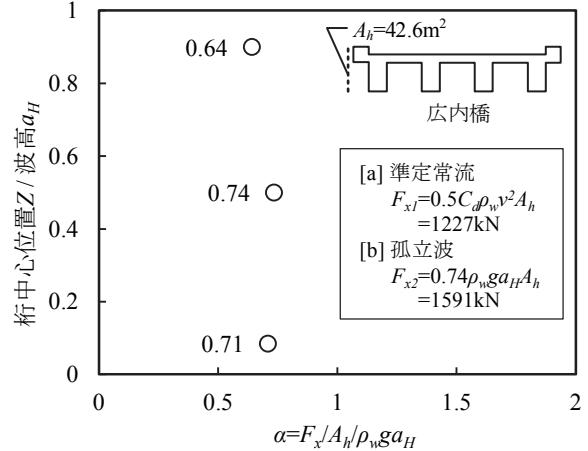


図-14 2種類の波形状の水平作用力

- (2) コンクリート桁に着目して β 値と桁下高の関係を検討すると、桁下高が低い橋梁は β 値が大きくなる。これは桁下空間を確保するために桁が扁平となることによって被圧面積が小さくなり桁抵抗力作用力比における作用力が減少して β 値が増加したと考えられる。
- (3) 波高20cmの孤立波に対して桁位置を変化させる条件のもと実験を行った。その結果、波高に対して桁が中央に位置する場合、桁に作用する水平作用力は最大となる。また、桁位置が変化しても水平作用力は1割程度の減少に留まる。
- (4) 広内橋周辺の地形的特徴より孤立波が上部構造に作用する可能性が考えられる。また、広内橋を例として準定常流に対する孤立波の水平作用力の差異を簡易的に検討した結果、流速6m/sの準定常流の水平作用力は1227kNであるのに対して波高5mの孤立波の水平作用力は1591kNと1.3倍になることが確認された。

参考文献

- 1) 佐々木達生、幸左賢二、鄭玉龍：桁抵抗力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.
- 2) 田中将登、幸左賢二、佐々木達生、佐藤崇：橋梁に作用する孤立波の水平作用力評価、構造工学論文集、Vol.61A, pp. 246-255, 2015.
- 3) 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.