橋梁への津波作用力に関する実験的検討

Experimental examination concerning tidal wave action power to bridge

二井伸一*, 幸左賢二**, 庄司学***, 木村吉郎**** Shinichi Nii, Kenji Kosa, Gaku Shoji, Kichiro Kimura

*株式会社ウエスコ 岡山支社設計部構造設計課 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)
** 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)
****工博 筑波大学大学院講師 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
**** Ph.D. 九州工業大学准教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

To evaluate the wave force to the bridge by the tidal wave, the experiment was executed. We measured the wave force, the lift force and the wave pressure in the experiment. We compared the equation of the wave force drived Goda or Asakura with the measured wave force. The wave pressure drived the measured wave force greatly exceeded the wave pressure drived Goda or Asakura by the situation. The lift force was 3.0 times as large as the wave force, and we should consider the lift to the design of the bridge.

Key Words: tsunami, bridge, wave force, wave pressure, lift force, キーワード: 津波, 橋梁, 波力, 波圧, 揚力

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日, インドネシア西部スマトラ島北西 沖のインド洋でマグニチュード 9.3 の地震が発生し, こ の地震により巨大津波が発生した.この津波はインド洋 諸国に甚大な被害をもたらし,既往最大の津波災害とな った.災害の特長として,建築物ばかりでなく,社会基 盤施設である橋梁や道路盛土等の道路構造物も崩壊に 至った.

一方,我が国においても津波災害は例外ではなく,東海・東南海地震による津波被害が懸念されている.我が国の津波に対する安全対策として,数値解析シミュレーションを用いて,海岸地点に押し寄せる津波の津波高,流速等を予測し,ハザードマップ作成等のソフト面の充実を図っている.ハード面については,防波堤等の港湾施設,発電所等の直壁構造物を対象とする模型実験が行われ,津波外力に対する設計手法が提案されている.

しかし,橋梁は木造構造に比べ,比重や強度が大きい 鋼やコンクリート材料で構成されるため,従来の津波に よる損傷が比較的軽微であったこともあり,現在まで津 波に対する検討は極めて限られている.

研究対象とする橋梁は、橋台・橋脚の下部構造と桁の 上部構造から構成され、直壁構造物に比べ複雑な形状と 言える.また,桁下や桁上,橋脚の前面や背面に空間を 有することから,直壁構造物のように面的な抵抗ではな く,線的な抵抗を示すものと考えられる.さらに,桁は 支承によって支えられており,作用力に対しては変形し ながら抵抗すると考えられ,その抵抗挙動も十分に評価 する必要がある.

そこで本研究では、道路構造物のうち橋梁を対象に、 津波による桁への作用力を評価するための実験を実施 した.具体的には分力計と波圧計を用いて、波力、揚力 及び波圧の計測を行い、得られた実験結果から、直壁構 造物を対象とする波力算定式の適用性の検証を行った. なお、実験はスマトラ島に実在する津波被害橋梁をモデ ルとし、津波高及び桁下高をパラメータとしている.

2. 既往の波力算定式を踏まえた実験計測上の着目点

橋梁への津波作用力には,波圧・波力,掃流,洗掘, 揚圧力,浮力,衝突力が想定される.本研究で着目する 津波外力は波力,揚力,波圧である.図-1は,既往の 研究及び実務で使用されている波力算定式の波圧分布 状の概念図であり,各算定式を概説する.

図中 a) は港湾構造物の設計に採用されている 合田 式¹⁾と呼ばれる波力算定式である.合田式では、津波高



図-1 既往の設計式に想定される波圧分布

(a_H)の津波に対し,津波高 (a_H) の3倍を頂点とし,かつ, 津波高 (a_H) の 2.2 倍を底辺とする三角形状の波圧分布 が構造物に作用する想定である. 図中 b) は津波被害が 想定される津波避難ビルに対する波力算定式であり、朝 倉式²⁾と呼ばれる式である.朝倉式では,三角形波圧分 布の頂点及びその底辺部分についても津波高 (au)の3 倍として想定しており、合田式よりも若干大きな波力と なる. 図中 c) は原子力発電所に対する津波評価式³⁾であ り、これについても三角形波圧分布の頂点は津波高 (a_H) の3倍としている.ただし、作用する津波形状が砕波し ない場合とする場合で区分し、砕波しない場合は津波高 (a_H) の 2.2 倍, 砕波する場合は津波高 (a_H) の 2.2 倍にさ らに係数α(最大で1.36)を掛け、砕波時は通常より大き な波力が発生することを考慮した算定式となっている. 最後に, 図中d) は道路橋示方書⁴⁾に示される広井公式に 基づく波力算定式である.対象構造物は、橋梁の橋脚で ある. 波圧分布形状は先に示したものとは大きく異なり, 三角形状ではなく、四角形状となっている.静水面上の 分布高は津波高 (au) の 2.5 倍とし、底辺部分は津波高 (a_H) の 3.0 倍としている.

以上、波力算定式について概説したが、歴史的に古い のは広井公式であり、1919年に提案されている.本公式 は、波圧を津波高に直接結びつけて掲示した最初の式で ある.対象は直壁構造物であり、港湾工事の実務に取り 入れられるまでには時間を要した模様である. その後, 系統的な波圧実験データやその他の波圧分布・強度の値 を検討し、1973年に発表されたのが合田式である.なお、 この合田式で示した3又は2.2の係数は、谷本らにより 直壁構造物に対する日本海中地震津波の再現実験 5)が行 われ、その妥当性が検証されており、静水面以下では静 水圧の 2.2 倍の波圧が計測され,静水面以上は津波高 3 倍となる津波作用位置で波圧が0となるような波圧分布 を計測している. 谷本らの検討対象は津波で、かつ実験 結果に基づく提案であるという点は、合田式を谷本式と 言い換えて用いる方が妥当と考えられる. ただし, 既往 の設計式との検証ということで、港湾基準である合田式 を表記する.

以後,研究及び実験が重ねられ,合田式の三角形波圧 分布の底辺を朝倉式では3.0や原子力発電所の津波評価







式では波形状に応じた係数の考慮といった改良により, 各構造物に応じた波力算定式が提案されている.ただし, いずれも対象構造部物は直壁構造物であり,橋梁の上部 工への適用性には以下に述べる検証内容を含んでいる.

図-2 は、合田式で想定される波圧分布を橋梁上部工 に適用したものであり、図の着色部分は橋梁上部工に作 用する想定波圧である.実験により得られる波圧分布形 状が、図に示す通りであれば、水平波力の算定は合田式 の適用が可能と判断できる.しかし、直壁構造物に比べ 橋梁上部工は被圧面積が小さく、想定される波圧分布と 突発的な波圧の大きさに差が生じる可能性がある.また、 津波高の3倍を頂点とする波圧分布を想定することを 考え難いことや、波高と静水面からの上部工の位置(以 降、桁下高と呼ぶ)が波圧と波力に大きく影響すること 等が考えられる.



そこで、橋梁上部工に対する波圧と波力を把握するため、橋梁模型を用いた実験を行う.実験計測の方法としては、図-3 に示すように、桁下高を変化させ、各条件による波圧と波力の測定を行う.また、同図の右に示す グラフは、計測結果を無次元化し整理を行う方法を示したものである.同グラフには合田式と朝倉式で設定されている波圧分布を、無次元化し併記したものである.なお、詳細説明は実験結果とともに後述するが、同グラフ の作成により、津波高と波圧作用位置の関係性及び、既 往の設計式の適用性評価が可能となる.

3. 津波による橋梁の被害概要

3.1 橋梁被害概要

筆者らは、津波被害発生後、スマトラ島の最北端の都市であるバンダアチェから南下し、ムラボーまでの約250kmの区間の橋梁調査を行った.その間、橋梁が存在したと確認できるものは34橋であった.図ー4は、その34橋について分析した結果である.そのうちの過半数である18橋について桁の流出等の被害で使用不可能となり、6橋が桁移動等の比較的軽微な損傷であった.被害にあった全24橋の橋梁種別は、鋼トラス橋が10橋と多く、続いて RC 桁橋が6橋、PC 桁橋が6橋と橋種に関係なく広範囲に甚大な被害を受けたことが分かった.また、津波高が10m前後の津波により被害にあったと推定される橋梁は、桁移動が発生するものの橋台被害は軽微であり、20mを超える津波により被害にあった橋梁は桁流出に加え橋台裏の盛土が洗掘されたものが多く、津波高が被害の程度に影響すると推察された.

3.2 「Lueng le 橋」橋被害状況

本実験では、コンクリート構造の単純橋梁である 「Lueng Ie 橋」を対象とした.以下に諸元を示す.

橋梁形式は、単純PCT桁橋(橋長19.1m,橋梁幅10.2m, 構造高1.7m)である. 図-5は、「Lueng le 橋」の周辺の 地形状況である. 渡過する河川は、橋梁から海岸線まで の間に大きく蛇行している. 海岸線と橋梁までの直線距 離は約500mで平坦な地形である. 以上の状況から、津



図-5 「Lueng le 橋」周辺地形状況



図-6 「Lueng Ie 橋」の推定津波高



波は河川を遡上したのではなく,海岸側から直接陸に浸水し,橋梁を越流したものと推測する.実験ではこの状況を踏まえ,津波が橋梁に直接作用すると想定した.図-6は架橋状況である.桁下高は2.4mで,河川の水深は2.5mである.また,周辺の津波痕跡から,津波高9.5mの津波が来襲したと推定される.次に被害状況を図-7に示す.上部工が約3m横移動し,高欄が崩壊した.上流側(津波作用と逆側)の桁2本は橋台から逸脱しているものの倒壊には至らず,調査時には橋梁の中央より下流側の部分を自動車が走行していた.

4. 模型実験

4.1 造波津波の留意点

既往の津波特性を知る研究では、観測された伝播・変 形特性について数値解析を用いて議論するものが多く、 標準的な解析手法としては、沖合で線形長波理論、沿岸



図-9 模型周辺の設置状況図

で非線形長波理論が採用されている.

本実験の着目点である沿岸部の津波特性を整理する と、津波が遠浅の海岸を伝播する場合、その波峰が分裂 する.これはソリトン分裂や波状段波と呼ばれ、1983 年 日本海中部地震津波において初めて確認された事例で ある.また、陸棚斜面上における津波は、捕捉現象によ りしばしば予想外の波高増幅をもたらす.この現象は、 一様勾配斜面上において励起されるエッジ波の理論に 基づき議論されている.以上のように、沿岸部に作用す る津波の特徴としては、地形の影響を受け様々な形状に 変化し、それが持続的に続くといえる.既往の実験にお いては、この分散された波の1波分を模擬した実験が多 く、造波する波としては、一山入射波や定常正弦入射波 がある.なお、このような波を沖合の波として用いた場 合でも、各実験の斜路勾配等の影響により、模型位置で はソリトン分裂や波状段波になる.

橋梁と津波に関する実験に着目すると、片岡・日下部 ら[®]らは急開式ゲートを使用し、周期 10s 程度の孤立波 を用いた実験を行った. 杉本・運上ら[¬] は急開式ゲート を使用し、段波性状の波を用いた実験を行った. また、 家村ら[®] や荒木ら[®]は、造波板をスライドさせ、孤立波 性状の波を用いた実験を行った. このように、津波形状 を個々に設定し、その条件に応じた報告はされている.

本実験では、砕波等の波形状の変化が少ない一山入射 波を用いることで、津波高、流速、入射角等の波の再現 性を高め、桁へ作用する波圧及び波力の整理を行った. なお、一山入射波はソリトン分裂波等の津波の1波目を イメージしたものである.ソリトン分裂波については2 波目の影響が構造物に大きいとの知見もあるが、実験の 初段階としてその1波目に着目する.

4.2 実験諸元

使用する長水路は,長さ41m,幅80cm,模型設置位 置での水路深さは120cm,片面ガラス張りの水路である. 実験の全体図を図-8 に示す.図中左端の造波装置は, スライド式造波板である.パソコン制御で,指令波高値 と実験時の静水深を入力する.なお,事前に模型や海底 床の無い状態で波浪実験を行った結果,指令波高値に対 して図中の模型位置でほぼ指令値通りの津波高が得ら れることを確認している.

模型位置付近の設置状況を図-9 に示す. 図中左は正 面図を示す. 橋梁模型の両横に側壁を設け,上部工への 作用力のみを抽出する 2 次元性実験に留意した. なお, 側壁は波が作用する先端部分を鋭角にカットし,波と側 壁の衝突を緩和する処理を行っている. 同図中に,模型 位置周辺の側面図も示す.地形状況を模擬するため,1/20 勾配の斜面を有する海域と,水槽底からの高さ35cm,全 長 4m (模型設置中心位置より前後 2m)の水平区間の陸 域を有する海底床を作成した.

図-10に使用した橋梁模型を示す.本実験で対象とす る津波の流れ場では、粘性の影響よりも重力の影響が卓 越すると考え、実物と模型間ではフルード数を相似させ



る. 縮尺は 1/50 で, 橋長は 40cm, 橋梁幅 19cm, 構造高 3.4cm (実橋長は 19.1m, 橋梁幅 10.2m, 構造高 1.7m) と した. なお, 計測を容易にするため, 実橋にある地幅, 歩道部, 床版張出し部の詳細なモデル化を行っていない.

また,今回実施した実験ケースを表-1に示す.「Lueng le橋」の実橋状況に近い実験ケースを標準とし,桁下高 と津波高をパラメータとする実験を行った.桁下パラメ ータ実験は,津波高を固定条件で,桁下高を-3から9cm の範囲で2cmピッチに変化させる6ケースを設定し,津 波高パラメータ実験は,桁下高を固定条件で津波高を 17cm,24cmとする2ケースを設定した.

4.3 計測計画

図-8に示す通り、波高計は全6基使用した.H1(図 -8 中の①) 及びH2 (図-8 中の②) 波高計は,海底床 の影響が無い部分を伝播する波と、指令波高との差異の 検証用に使用した. その後, 波は海底床上を伝播し, 増 幅又は減衰する. H3 (図-9中の③), H4 (図-9中の④) の波高計はその津波高を計測し、H1、H2 波高計と同様 に指令波高との差異の検証に使用した.H5(図-9中の (5) 波高計は、衝突直後の津波高変化の検証用に使用し た. H6 (図-9 中の⑥) 波高計は、 図-9 の正面図に示 す通り側壁の隣で、かつ、同図側面図に示すように橋梁 模型の中心位置に設置した、側壁の隣にする理由は、波 が模型に衝突すると反射波が発生し、波高計測値に影響 する可能性がある. そこで、模型が緩衝しない波高計測 値を得るため、上記の位置に設置した. なお、以後のデ ータ整理で使用する津波高は、この H6 波高計の計測値 を用いる.

図-11に波圧センサーの設置状況と波圧分布の模式

a) 側面の水平方向波圧分布



c) 下面の鉛直方向波圧分布

	波圧	センサー
No10	No9	No8
4	4	4

図-11 波圧センサー設置状況と波圧分布



図を示す、桁に設置した波圧センサーは全10基である。 まず, 図中 a) は, 桁側面の作用する水平方向波圧を計 測するため、桁の中心位置に No.1 から No.5 の計5 基の センサーを一列に設置した.5 基の波圧センサーの計測 結果を平均し、それによる検証を行うことで、検証精度 の向上を図った.また、5 基の波圧センサーの仕様は、 桁中心部に設置する No.3 のみ突発的な波圧にも対処で きるように98kPaとし、残りの4基は24.5kPaとした. 図中 b) は、桁側面に作用する波圧の鉛直分布を把握す るためのセンサー (図中 No.6, No.7) である. センサー の仕様は両基とも49kPaである.なお、可能な限り模型 の上下端部に設置できるよう、小型(感知部の直径 10mm)の波圧センサーを用いた. 図中 c) は,桁の下面 に作用する波圧分布を把握するために、No.8 は陸側、 No.9 が中央部, No.10 が沖側と間隔を空けて, 計3 基設 置した. センサーの仕様は, 全て 49kPa である.

設置した分力計は, 波力 (Fx), 揚力 (Fz) と波力に 対するモーメント (My) が計測できる3分力計で, 仕様 規格は980N である. 図-12 に示す通り, 水槽の上部に 梁を固定し, そこに分力計を設置し, 冶具を介して桁



模型の作用力を計測する. なお, 事前に冶具と分力計の 合成検証を行い, 固有周期が 30Hz 程度と, 高い剛性を 有していることを確認した. また, 冶具に津波が作用し ないように, 鞘管構造で分力計と冶具を覆い, 模型のみ に作用する力の抽出に配慮した.

計測のサンプリング周期は全て1/1000sとした.なお, 本文では特筆しない限り実験計測値の生データを用い て検証を進める.

5. 実験標準ケースの結果

5.1 標準ケースの設定条件

スマトラ島に実在する「Lueng Ie 橋」の状況に留意し, 実験の標準ケースを設定する.設定した標準ケースは図 -13の通りで,桁下高は5.0cm (実橋スケール2.5m)と し,現橋の桁下高 2.4m をほぼ再現した.なお,桁下高 は本実験のパラメータであり,その結果は後述する.

次に実験に使用した波について記す、スマトラ島現地 では、津波高7から20mといった範囲の広い津波が来襲 しており、津波高の差による波力を検証するため、津波 高をパラメータとする実験も行った.波浪試験によれば、 指令波高が大きいと砕波して橋梁模型に作用し、小さい と砕波せずに作用した. そこで、日本の道路状況も踏ま え,海岸線沿いの橋梁で,津波が砕波せずに直接作用す る状況を想定し、かつ、比較的起こり得る可能性のある 橋面からの浸水高 1m程度(実スケールで津波高 5m 程 度,模型スケールで10cm程度)の一山入射波を標準ケ ースとした.また、この波は再現性が良く、計測値のバ ラツキが少ないという点にも着目した.波浪実験の結果, 指令波高値を 7cm とした場合,模型位置での津波高は 11cm 程度の波となることを確認した. 図-14 は実験 1 回目の H1 波高計計測結果である。同図より、波形状が 一山入射波であることが分かり,指令波高値7cmに対し, 最大津波高 7.014cm を記録する. H1 波高計と H2 波高計 を通過し、波は海底床斜路へ進入する、本実験で使用す る波の特長として、海底床斜路を通過中に津波高が増幅 する. そのため, 図-15 に示す H6 波高計の計測結果で は,最大津波高 11.109cm を記録する.また,海底床の影



①津波作用直前



響により,若干形状の変化が見られるが,波の凸部分の 前傾や砕波する状態には至らない.なお,標準ケースは 4回繰り返して実験を行った.4回分のH6波高計計測値



は、1回目11.109cm、2回目10.882cm、3回目11.070cm、 4回目11.187cmと再現性の良いことを確認した.

また,模型位置での水深は15cmとした.その理由は, 本実験の留意点として砕波を生じない一山入射波によ る作用力の抽出であり,波浪試験による砕波限界を検証 した結果,水深15cmという条件が必要であった.

5.2 津波の作用状況

図-16は、津波が桁模型に作用する瞬間をトレースした図である. 図中左より波が押し寄せ、作用直前には桁下の波が隆起する様子が分かる(図では 3cm 隆起). 波は隆起をしながら左から右へ進行し、桁への接触は沖側の桁下から始まる. その後、津波高 11cm の頂点部分が通過する手前で局所的な砕波が生じる(図によれば、沖側桁側面の津波高 9cm の時に、桁全体を波が覆う). しかし、波形状に大きな崩れはなく、津波高 11cm の頂点と一山入射波として凸形状を保ったまま通過する.

5.3 波力と揚力

本実験ケースはデータの信頼性を向上させるため,4 回の計測を行った.図-17は、計測回数1回目の分力計 計測値の波力である.図-18は同ケースの揚力である. 横軸は計測開始からの時間を示している.両図によると、 波力と揚力は、収録開始から11.8秒後のほぼ同時刻に最 大値を記録する.なお、津波が作用する手前で安定した 負の波力が確認できる.これは、計測機に生じるノイズ の影響であり、以降のデータ整理では、最大値を抽出す る場合は、このノイズによる波力の平均値を考慮する. 揚力は、11.9秒以降に負の値を示す.これは、桁に衝突 し、桁上を通過する波が桁への上載荷重として作用した ためと考えられる.

ただし、図-17の最大波力は 1/1000s の瞬間的に発生 した計測値である.ここで、その瞬間的な値に対し、実 橋の状況を踏まえて考察を行う.図-19 は、図-17 の 1/1000s 刻みの実験計測データに対し、1/100s、1/10s 間隔 で平滑化したデータを併記したものである.平滑化した データの場合、各最大波力は、1/100s のものが 20.2N、 1/100s のものが 14.4N、1/10s のものが 10.0N となる.



これらの数値の意味は、実験スケール1/50に対してフル ードの相似則に従い実橋の状況に換算すると、各時間間 隔は√50倍となるため、0.071秒の間に平均14.4Nの波 力が持続し、また、0.71秒の間に平均10.0Nの波力が持 続することとなる、津波流速と橋梁の移動流速の関係性 についてはさらなる検証が必要であるが、ここで、次の ような状況を仮定し、津波作用時間と橋梁への影響につ いて整理する、まず、一般的な流速5m/sを有する津波が 桁へ作用したとする、次に、その作用により、単径間の コンクリート橋でよく用いられるゴムパット支承が同 等の速度で5cm変形したとする、この変形に要する時間 は0.01秒(1/100s)である、つまり、橋梁への影響はあ る持続した時間に発生する作用力で評価することが実 挙動に近いものと考える.



次に,波力と揚力の比を検証する. ここでは, 1/1000s の実験計測データと、1/100s 平滑化データの最大値を用 いる. 結果を図-20 に示す. 図-20 には、標準ケース の4回分の実験結果と、後述する桁下をパラメータとす る実験結果より、桁下高1cmとしたケースと桁下高-3cm としたケースを併記する. 結果によれば、刻み幅を大き くするにつれて、最大波力及び揚力が減少する. 桁下高 が静水面より離れると、瞬間的な波力と持続する平均波 力に差が生じることが分かる.この要因は、桁の位置が 静水面に近いと、津波は局所的な砕波もなく桁を通り過 ぎるため、砕波に伴って発生する衝撃的な波力が作用し なかったためと考えられる.また、揚力が波力に比べ2 から3倍程度大きいことが分かる.橋梁の場合は、直壁 構造物と違い、桁下に発生する揚力を無視できないこと が分かる.また、揚力は波力に対して2から3倍という 結果からも、今後、揚力に着目した設計及び対策を図る 必要があると考えられる.

5.4 桁側面に作用する波圧

桁側面に作用する波圧について整理する.図-21 は, 桁側面に設置した No.1 から No.5 の波圧センサー計測値 である.横軸は,収録を開始してからの時間を表す.実 験結果によると,5 基の波圧センサーの計測値はほぼ同 じ傾向を示しており,波力と揚力が最大となる 11.8 秒か ら 11.9 秒の間で瞬発的な波圧を計測しながら,500 から 700Pa を計測し推移する.また,5 基の波圧センサーの 計測値にバラツキはなく,同じ傾向を示している.

本項では、波力が最大値を示す時刻の波圧センサーの 計測値に着目し考察を行う. 図-22 は、図-21 におけ る 11.75 から 12.10 秒間の No.1 と No.2 の波圧センサーを 代表例として示した図である. 波力の最大値は、11.859 秒であり、その時刻における No.1 波圧センサーの計測値 は 545.8Pa, No.2 波圧センサーの計測値は 506.7Pa であっ た. また、同図では示していない No.3 から No.5 の波圧 センサーの計測値は、それぞれ、595.9Pa、592.7Pa、632.3Pa であり、No.1 から No.5 の平均波圧 (Pave) は 574.7Pa であった.



この結果を用いて,波圧と津波高による作用位置の無 次元化図を作成する.図-23は、標準ケースの1回目の 波圧センサーが計測した最大値を模式的に示す.これを 用いて無次元化の算定方法を記す.図中の津波高(a)は, H6波高計で計測した津波高の最大値であり,桁位置(Z) は桁下 5cm に桁の中心位置 1.7cm を足したものである. 津波高による作用位置の無次元化は,桁位置(Z)を津波



高(a)で除すことで行う. 波圧の無次元化は, 前述した平 均波圧 574.7Pa を, 津波高(a)に対する静水圧(ρga)で除 すことで行う.

以上の要領で、無次元化波圧及び作用位置の関係を図 -24 に示す. 同図には, 桁下高 1cm と桁下高-3cm の結 果も併記する. また, 図中には合田式, 朝倉式の各波力 算定式の関係も示す.両式とも、波圧分布の最大値は作 用する津波高に対する3倍値としているため、縦軸(Z/a) は3となる.静水面以下の波圧分布は、合田式は、静水 波圧の2.2倍,朝倉式は3.0倍と考えられているため,静 水面以下を示す縦軸(Z/a)が0以下の部分は、横軸(Pave/ ρga)は2.2 又3となる.一方,実験式は次の点を考慮し 設定している. 橋梁の場合, 桁下高と津波高が一致する と(Z/aがほぼ1となる状況),津波力は桁に作用するこ となく通り抜けることが考えられる.よって、波力及び 波圧は0であり、横軸(Pave/ pga)は0となる.また、桁 の位置が静水面以下の場合(Z/a が 0 以下となる状況)で は、衝突的な作用を考慮せず、静水圧相当の波圧が作用 すると仮定し、横軸(Pave/ρga)は1と設定する.

同図より、本実験で使用した波形状では、突発的な波 圧が生じず、静水圧分布に近い状態で波圧が作用したこ とが分かる.以上より、橋梁に砕波が生じない一山入射 波が作用した場合、津波高を1辺とする二等辺三角形分 布を想定することで、各桁下高に応じた、桁中心に作用 する波圧を算定することができる.

5.5 桁側面及び桁下面に作用する波圧分布

No.3, 6, 7 の波圧センサーの計測結果を整理する. 図 -25 は実験回数1回目の計測値であり, 図中の数値は最 大波力を記録した 11.859 秒時の波圧センサー値である. 各計測値は, 桁上端部に設置した No.7 が 162.4Pa, 桁中 央部の No.3 が 595.9Pa, 桁下端部の No.6 が 761.1Pa であ った. 以上3 基の波圧センサーの平均値は 506.5Pa であ り, 前項の No.1 から No.5 の平均波圧 574.7Pa と比べる と1 割程度の差であることから, 桁中央部に設置した No.1 から No.5 の波圧センサーは桁に作用する波圧の



代表値として扱えると考える.

次に、No.8、9、10の波圧センサーの計測値について 整理を行う.図-26は、前述と同様に実験回数1回目の 計測値であり、図中の数値は最大揚力を記録する11.826 秒時の波圧センサー値である.各計測値は、沖側(津波 作用側)のNo.10が502.5Pa,桁中央部のNo.9が426.7Pa, 陸側のNo.8が23.8Paであった.陸側に設置したNo.8の 計測値が極端に小さく、桁下面の波圧形状には大きな偏 りが生じている.これにより、最大揚力を発生させる波 圧は、桁下面の沖側に作用するものが寄与すると考えら れる.なお、一部の実験ケースでは、図-25、図-26の ように波が桁に衝突した後に大きな振動が確認された. これは、ノイズや衝突後に顕著となる共振の影響が要因 と考えられる.

以上をまとめると,最大波力時の桁側面中央に作用す る波圧は桁の上端と下端に作用する波圧の平均値相当 で,かつ,桁全体に作用する波圧の代表値として扱える と考えられる.一方,最大揚力時の波圧分布は,陸側の 波圧は小さく,桁下面の波圧形状には大きな偏りがある 結果となった.



図-28 桁下高パラメータ実験要領図

5.6 波力と波圧の相関性

分力計による波力計測値と波圧センサーによる波圧 計測値の相関性を検証する.図-27の横軸は,No.1から No.5 の波圧センサーで計測される最大波圧値の平均値

(Pave)に、実験模型の側面の面積(A=桁高 3.4cm×橋 長 40cm)を被圧面積とし、それを掛けて算定した.縦軸 は、分力計で計測された波力の最大値である.同図に、 桁下 1cm のケースの結果と、桁が水没している桁下-3cm のケースの結果を併記する.同図によれば、静水面に近 い桁下 1cm と桁下-3cm のケースはほぼ 1:1.0 の関係にあ り、相関性の高いことが分かる.しかし、桁下が 5cm で ある標準ケースの結果は、1:2.0 の比率にあり、波圧から 算定した波力が小さいことが分かる.この傾向について は、6章の桁下高をパラメータとする実験結果において さらに追記する.

6. パラメータ実験

6.1 桁下高をパラメータとする実験概要

本項では、静水面からの桁下位置までの高さ(桁下高) をパラメータとする実験を行い、波力と波圧について考 察を行う.

図-28は、本パラメータ実験の要領図である.波形状、 津波高、水深は標準ケースと同じ条件である.変化させ るのは桁下高であり、静水面より-3から9cmの範囲で、 2cm ピッチで変化させる.桁下高が-3cmの状態は、ほぼ 桁が水面に浸かっている状態であり、桁下高9cmは津波 高11cmの一山入射波の頂点部分が桁側面の中心位置に 作用する状態である.

6.2 桁下高をパラメータとする実験の結果

図-29は、標準ケースの実験で整理したように、波力 と揚力の関係について整理した図である.波力と揚力の 比は、1:2.0から1:3.0の範囲に集約し、揚力が大きく作 用することが分かる.また、波高の頂点と桁の中心位置 がほぼ一致する桁下高9cmのケースを除けば、桁下高が 高くなり、津波高の頂点部分に近づくにつれ、津波高と 揚力は大きくなることが分かる.さらに、波力は10か ら30Nの範囲で推移するのに対し、揚力は20から70N



の範囲と、桁下高の変化は揚力に大きく影響することが 分かる.

次に,波圧について整理する.図-30は標準ケースの 実験結果で示したものと同じ方法で,波圧と作用位置の 無次元化を行ったものである.桁が水面に浸かっている 桁下高-1cm と-3cm の状態のものは,静水波圧相当であ り,桁下高が高くなるにつれ波圧は0に近づいていき,



図-32 津波高パラメータ実験要領図

図中の実験式との相関性が良いことが分かる.しかし, 図-27 に示したように,分力計で計測した波力と波圧計 計測値と桁側面の面積との積により算定した波力とで は,桁下高が静水面から離れるケースについて差が生じ ることが分かっている.

そこで、分力計で計測した波力に対し、桁側面の面積 (A=桁高 3.4cm×橋長 40cm)と静水圧(ρga)で除した 波圧と作用位置の無次元化図により考察する.図-31は その結果である.図-30と図-31を比べると、桁下が 静水面に近い、桁下高-3cm、-1cm、1cmの実験ケースは、 実験式のライン上にあり、桁下高が静水面から離れる実 験ケースは合田式のライン上にある.これは、桁下高が 水面から離れていくと、桁側面に作用する波圧のみで算 定する波力では実際に作用する波力を過小評価する場 合があることを意味する.この要因を推察すると、揚力 が計測されていることからも、桁下へ浸入する波は、桁 を持ち上げようとしながら進行する.その作用する方向 は斜め上向きであり、その水平方向成分の作用力が働い たことが考えられる.

以上をまとめると,実験計測値である波力から波力算 定式を提案する場合,桁下が静水面に近い場合は今回提 案する実験式の適用性が良く,桁下が静水面から遠い場 合は合田式の算定式の適用性が良い結果となった.また, 桁下高が静水面から離れるに従い,波圧が低下する傾向 も概ね合致する結果となった.

6.3 津波高をパラメータとする実験概要

津波高が大きくなれば、その作用力は大きくなると予 想される.そこで、津波高をパラメータとする実験を行 い、実験結果の整理を行う.図-32に実験要領図を示す. 桁下高5cm,水深15cmは標準ケースと同じ条件である. 造波機への指令津波高値は、10cmと20cmの2ケースで ある.指令波高値10cmに対する模型位置での津波高は、 実験1回目が17.768cm、2回目が17.281cm、3回目が 16.136cmであり、平均して約17cm(実津波高8.5m)程 度の津波高となった.波形状は、完全な一山入射波では なく、砕波直前では若干前傾しており、その状態で模型 に衝突する.また、指令波高値20cmに対する模型位置 での津波高は、模型位置手前で砕波する影響もあり、



実験 1 回目が 24.528cm, 2 回目が 21.275cm, 3 回目が 24.482cm と若干のばらつきが生じた.

6.4 津波高をパラメータとする実験の結果

図-33は、波力と揚力の関係を整理した図である.標

準ケースや桁下高パラメータ実験結果とは大きく異な り、揚力より波力の方が大きいことが分かる.先の実験 で用いた津波形状は一山孤立波であり、波は水平方向か ら模型に衝突し、その波の形状を保った状態で通過した. 一方、本実験の波形状は、砕波直前の前傾状態の波と砕 波した波であり、津波は上から下へ叩きつけるように模 型へ作用する.このような波が桁衝突する場合は、波力 が卓越するという結果であり、衝突する直前の波形状や その作用方向が波力や揚力に大きく影響することが分 かる.

図-34 は、波圧と作用位置を無次元化した図である. 波力が卓越する波が作用した場合でも、合田式や朝倉式 で想定されているような、静水波圧の2から3倍の波圧 は計測されず、実験式と概ね合致している.

図-35は、波力による波圧と作用位置を無次元化した 図である.砕波傾向にある波の桁に作用する波力は大き く、波圧に換算して無次元化すると、静水圧の3から4 倍の値となる.これについても、波圧のみで算定する波 力では実際に作用する波力を過小評価する傾向にあり、 桁上又は桁下に作用する津波作用の影響と推測される. また、前項の実験結果とは異なり、合田式や朝倉式では 包括できていない状況となっている.この結果のみで言 えば、静水圧の4倍を底辺とする波圧分布の想定が必要 であり、橋梁における安全側の波力算定式を提案するた めには、今後、実験ケースを増やし、既往の波力算定式 を改良することが必要と考える.

7. まとめ

橋梁を対象に、津波による桁への作用力を評価するため、1/50 スケールの模型を用いた実験を行い、波力と波 圧の関係性の整理を行った.実験より得られた知見を以 下にまとめる.

 一山孤立波を用いて、桁下高をパラメータとする実験 結果より、分力計の計測値である波力は、桁下が静水 面に近いと桁側面に作用する波圧とそれを被圧面積と して算定する波力とほぼ合致し、桁下が静水面から離 れると、波圧のみで算定する波力は分力計の計測値で ある波力を過小評価する結果となった。この要因を推 察すると、桁下へ浸入する波は、桁を持ち上げようと しながら進行する。その作用する方向は斜め上向きで あり、その水平方向成分の作用力が働いたことが考え られる。

- 2)実験結果より、橋梁に対する直壁構造物を対象とした 波力算定式の適用性を検証すると、沖側の側面を被圧 面積とし、静水圧の数倍の波圧を考慮するという方向 性は良いものの、分力計による波力から算定した波圧 は、砕波する波が橋梁に作用する場合に静水圧の4倍 の波圧となり、合田式や朝倉式の適用範囲を超える波 圧も計測された。
- 3)実験結果より、波力と揚力について着目すると、一山入射波のように凸形状を保ったままの津波が橋梁に作用すると、揚力は波力の3倍となり、砕波傾向にある波が橋梁作用すると、揚力は波力の1倍以下となる.よって、設計においては作用する波形状と、それにより卓越する作用力を評価することが重要である.

参考文献

- 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 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),
 - http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/0207/kentoukai_3.htm l
- 3)土木学会:原子力発電所の津波評価技術,2002.
- 4)日本道路協会:道路橋示方書・同解説, 2002.
- 5)谷本勝利,高山知司,村上和男,村田繁,鶴谷広一, 高橋重雄,森川雅行,吉本靖俊,中野晋,平石哲也: 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察,港 湾技研資料,No.470, 1983.
- 6)片岡正次郎, 日下部毅明, 長屋和宏:津波衝突時の橋 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, 2006.
- 7)杉本健,運上茂樹:津波による橋梁の被災メカニズム に関する実験的研究,第11回地震時保有耐力法に基づ く橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム, pp.97-100,2008.
- 8)Hirokazu IEMURA, Mulyo Harris Pradono, Tomohiro YASUDA and Tsubasa TADA, EXPERIMENTS OF TSUNAMI FORCE ACTING BRIDGE MODELS, 地震 工学論文集, pp.902-911, 2002.
- 9)荒木進歩,中島悠ら:橋桁に作用する津波流体力に関する実験的研究,土木学会第62回年次学術講演会概要集II,pp.535-536,2007.

(2008年9月18日受付)