

津波の桁への水平作用力評価式の適用性検討

幸左賢二¹・佐々木達生²・田中将登³・佐藤崇⁴

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

²正会員 工博 大日本コンサルタント（株）（〒541-0058 大阪府大阪市中央区南久宝寺町 3-1-8）

³正会員 阪神高速道路（株）（〒552-0007 大阪市港区弁天 1-2-1-1900）

⁴正会員 工博 （株）長大（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730番地）

1. はじめに

筆者らは津波実験を実施し、橋梁上部構造に対する段波先端部の作用力が津波の最大波高と桁模型の被圧面積、桁下高の関数である式を提案している。

すなわち、再現性の高い一山孤立波性状の津波を桁模型に作用させる実験から、津波の作用力は波高または桁模型の被圧面積の増加とともに線形的に増加することを明らかにした。

本研究では提案した水平方向の段波性状の津波作用力評価式の適用性を明らかにすることを目的として、他機関の実験と九州工大の実験結果の比較を行った^{1)～7)}。

2. 九州工大の既往の研究

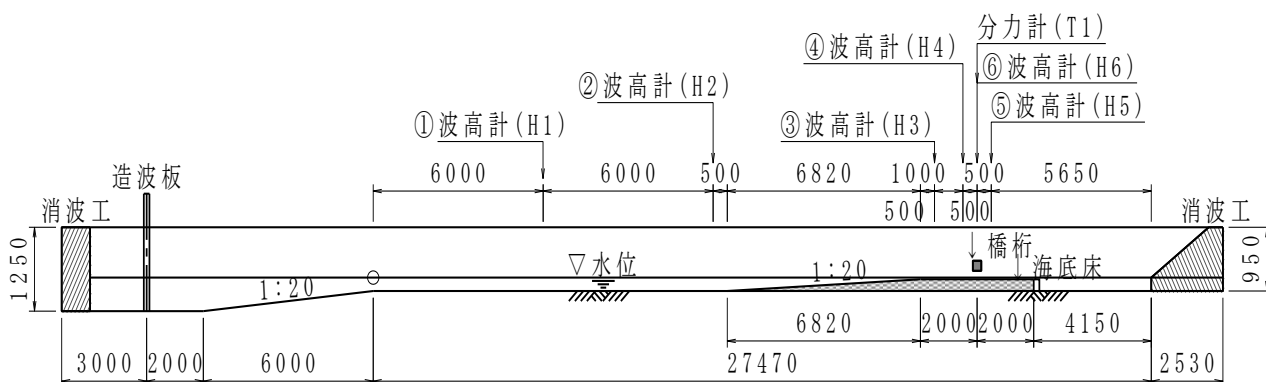
ここでは九州工業大学で実施された水理模型実験の概要を示す。実験では段波先端部による橋梁上部構造への作用力を評価するために水理模型実験を実施した。実験の具体的内容は津波の波高と桁下高をパラメトリックに変化させ、分力計を用いて水平作用力、鉛直作用力の計測を行い、得ら

れた実験結果から橋梁上部構造に作用する津波作用力評価式の提案を行った。

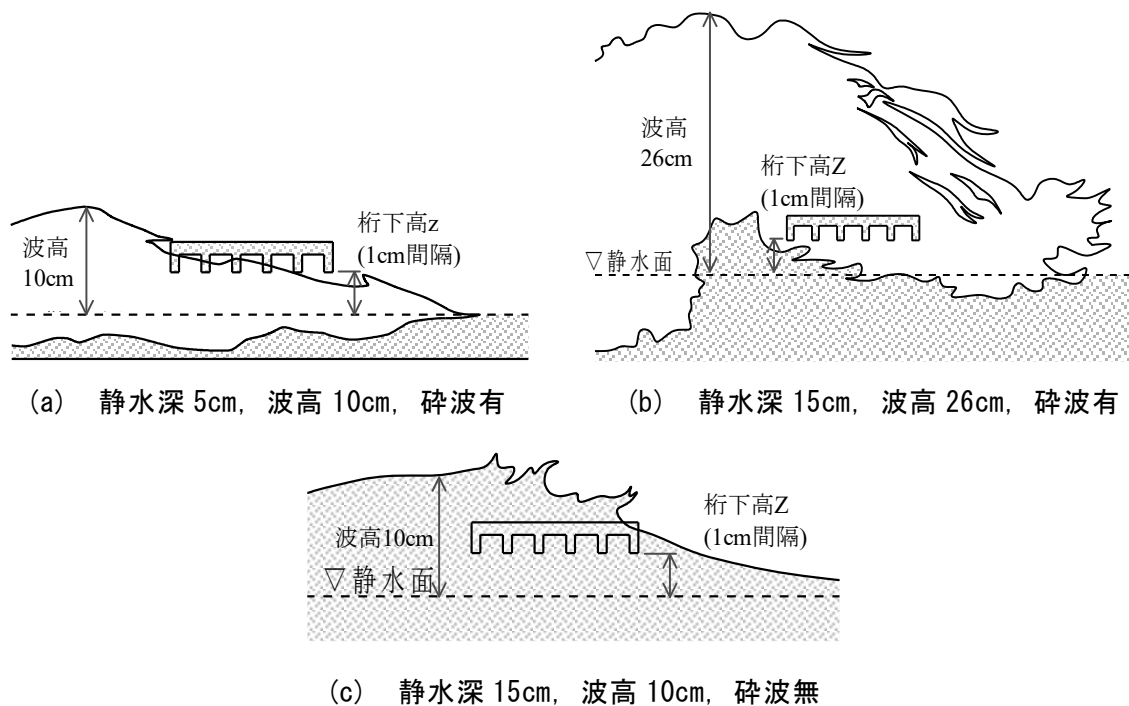
使用した長水路は図－1に示すように長さ 41m、幅 80cm、橋桁模型位置での水路深さ 95cm の片面ガラス張りの水路であり、津波の造波には左端のピストン型造波装置を用いている。また、水路に沿って波高計と流速計、分力計を設置しており、津波の波形や流速、津波が桁模型に作用する際に生じる作用力を計測した。

図－2には実験パラメータを示す。同図より実験で考慮したパラメータは、桁下高(z)、波高(a_H)である。また、波高の変化により、「砕波する波」と「砕波しない波」と波形状が変化するため、これを区分して評価した。

図－3に桁下高、波高をパラメータとした実験結果を示す。同図によれば水平作用力は水深 5cm、波高 10cm、砕波有りの実験結果（○プロット）が全実験結果を包括する。そこで、橋梁の桁に津波によって、作用する水平作用力の算定式を、すべての実験条件を包括する 1 次近似直線で算定した。図の水平波力は波高の 1.3 倍の位置を頂点として



図－1 実験水路



図－２ 実験状況模式図と実験パラメータ

三角形の分布形状となり、 $Z/a_H = 0.5$ から波高の 1.9 倍の波圧が静水面まで一様に分布する形状となる。

図で水平作用力/桁側面面積は m^2 当りに作用する波圧と考え、 q_x とすると横軸は $q_x / \rho g a_H$ となり、近似式は(1)、(2)式ようになる。津波波高と桁下高が既知であれば、この式により津波作用時の波圧分布を算定することが可能となる。

【水平力】

$Z/a_H \geq 0.5$ の場合、

$$q_x = \rho g (3.10 a_H - Z / 0.42) \quad (1)$$

$Z/a_H < 0.5$ の場合、

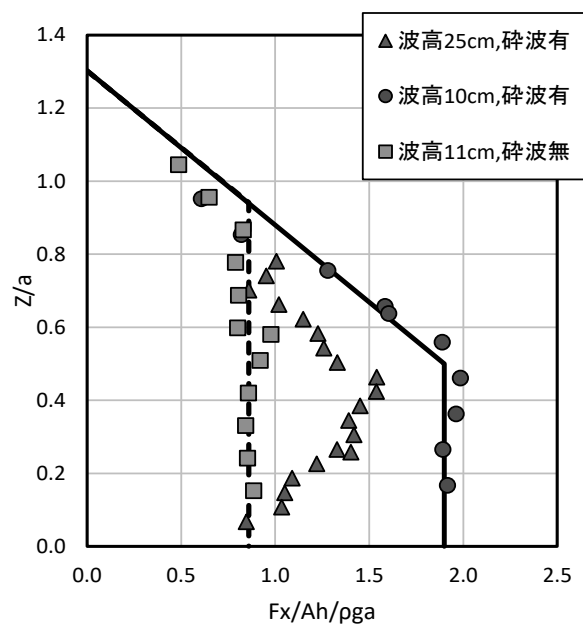
$$q_x = 1.90 \times \rho g a_H \quad (2)$$

ここで Z : 桁中心位置 z : 桁下高 a_H : 波高
 $\rho g a_H$: 波高 a_H から得た水圧
 q_x : 水平作用力/桁側面面積

3. 他機関の実験

(1) 庄司らの実験

表－１に比較に用いた他機関の実験概要を示す。このうち、図－４に示す庄司らの実験では①碎波段波状の波②波面勾配の緩やかな波③橋桁が水没した状態での進行波の３種類の津波を対象として、



図－３ 桁下高，波高をパラメータとした実験結果

造波ゲートの急開の速度をコントロールすることで、波の周期、波高および波面鋼材をパラメトリックに変化させ、実験ケースを増やし、橋桁に作用する津波荷重と水位及び流速との関係を定式化している。実験は模型位置 (5500, 1500mm)、貯水部水位 (445, 430mm)、静水深 (40, 0mm)、波高 (50, 45mm) としている。

表-1 実験の一覧

No.	著者	実験概要						計測方法	
		造波装置	波形状	模型形式	縮尺	静水深	計測対象	波高	流速
1	庄司ら ¹⁾	チャンバー式	段波	張出無6主桁	1/79.2	0,10,20,25,30 ,35,40,45,50cm	波高,分力 ,流速	桁位置において桁が無い状態で計測	
2	中尾ら ²⁾	チャンバー式	段波	矩形 張出有2主桁 張出有4主桁	1/20	10cm	波高,分力 ,圧力	模型から1m前	模型から1m前
3	荒木ら ³⁾	ピストン型	孤立波	矩形	1/40-1/50	17~19cm	波高,分力 ,圧力	模型から10cm前	—
4	四條ら ⁴⁾	ピストン型	孤立波	PC箱桁橋	1/50	20,25,40,50 ,55cm	波高,分力 ,流速	桁位置において桁が無い状態で計測	
5	有川ら ⁵⁾	ピストン型	孤立波	張出有7主桁	1/10	133,143,153 ,163,173cm	波高,分力 ,圧力	不明	—
6	中村ら ⁶⁾	ピストン型	長周期波 (T=16s~32s)	張出有4主桁	1/50	9cm	波高,分力 ,流速	側壁を介して桁横で計測	
7	幸左ら ⁷⁾	ピストン型	孤立波	張出無6主桁	1/50	5~35cm	波高,分力 ,圧力,流速	側壁を介して桁横で計測	

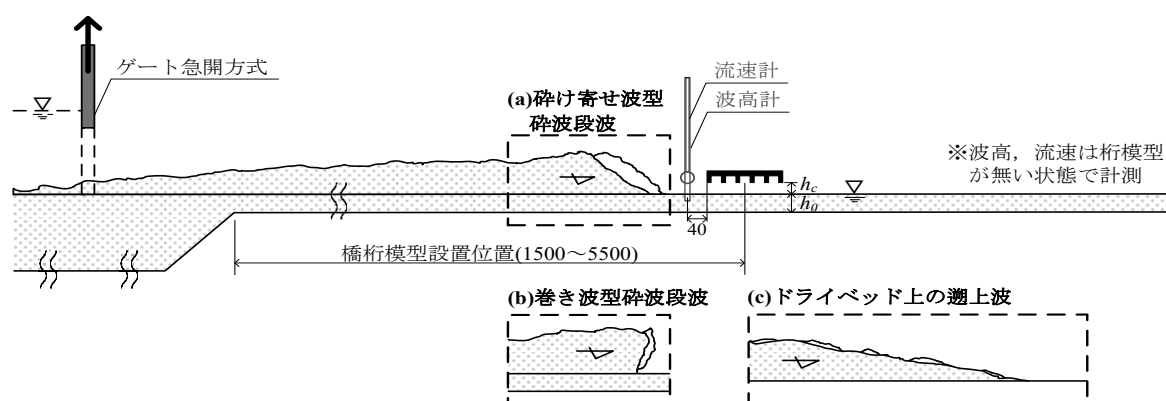


図-4 庄司らの実験波形状

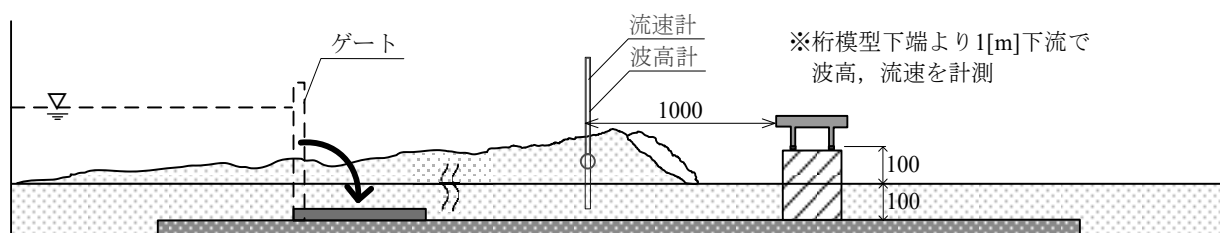


図-5 中尾らの実験波形状

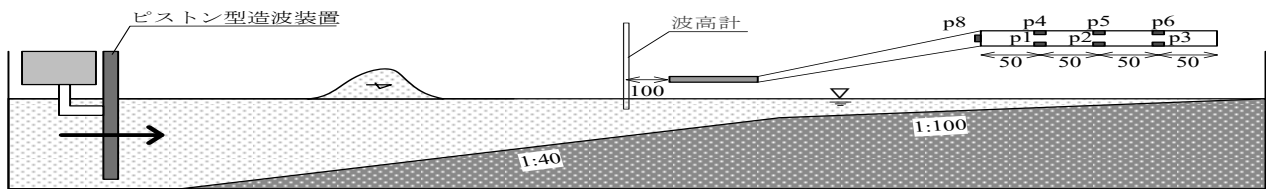
(2) 中尾らの実験

図-5に中尾らの実験波形状を示す。津波作用時の橋桁支点部に作用する力や橋桁に作用する圧力を実験および数値解析によって確認している。実験は静水深(100mm)、波高(15, 20mm)、桁中心位置(125mm)、桁下高(100mm)とし、模型形状をパラメータとしている。

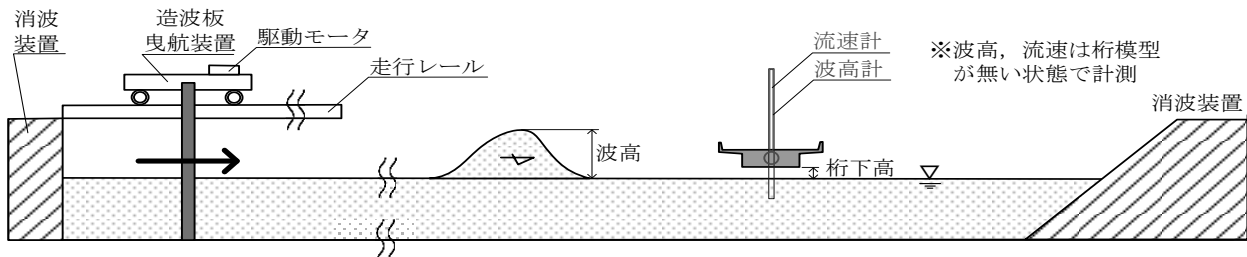
(3) 荒木らの実験

図-6に荒木らの実験波形状を示す。単純化した橋桁モデルとして水平版を用い、水平版（橋桁型）に作用する津波波力の基本特性を検討している。

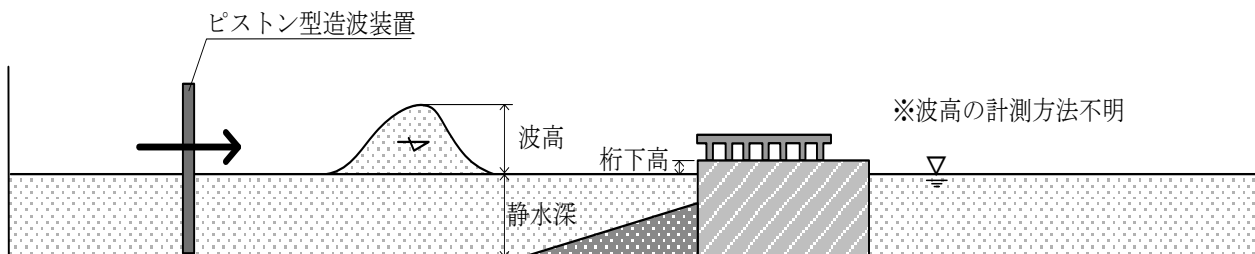
実験は、静水深(170~190mm)、波高(89, 102mm)、桁中心位置(62, 82mm)、桁下高(50, 70mm)の条件で実施している。



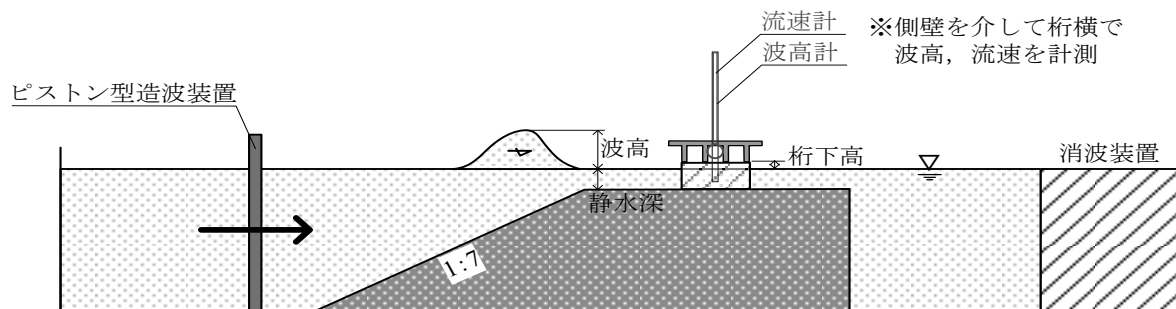
図－6 荒木らの実験波形状



図－7 林・四条らの実験波形状



図－8 有川らの実験波形状



図－9 中村らの実験波形状

(4) 林・四条らの実験

図－7に林らの実験波形形状を示す．水路実験による波力の計測および汎用の流体解析コードとVOF法を用いた数値解析を行い，実験と解析の整合性を確認し，高速道路橋に採用されている標準的な上部構造に作用する津波波力を把握することを目的としている．実験は静水深(200～550mm)，波高(110～200mm)をパラメータとしている．

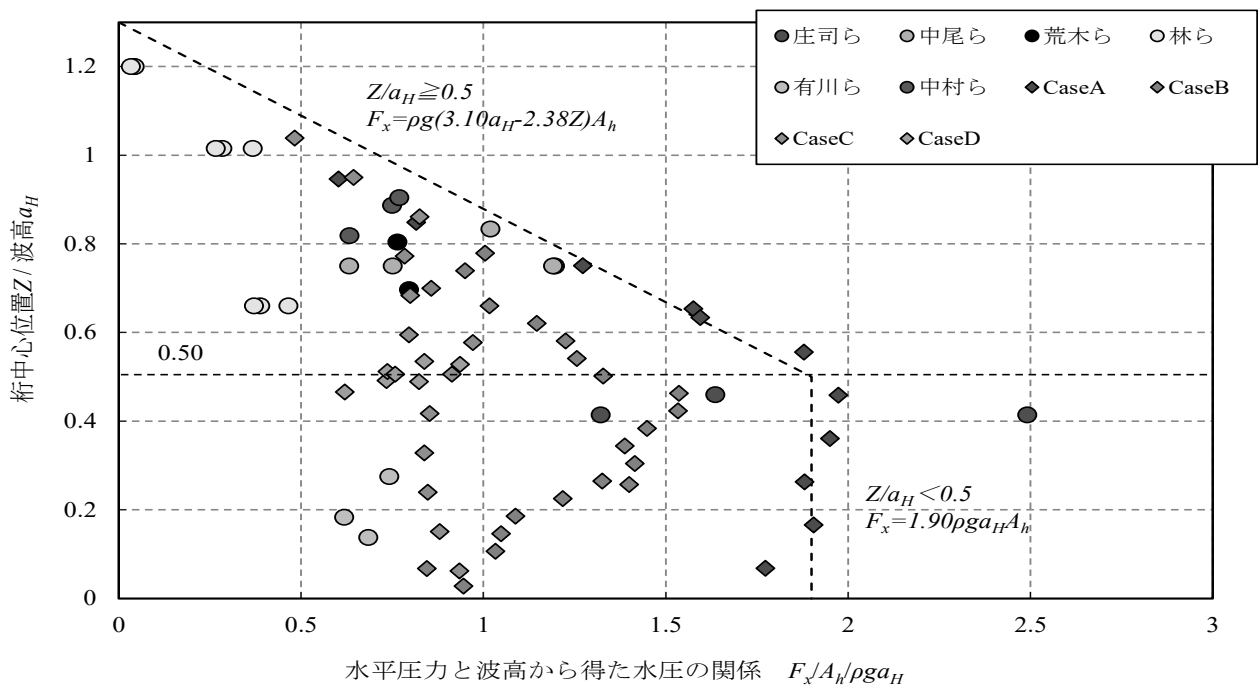
(5) 有川らの実験

図－8に有川らの実験波形形状を示す．津波に対

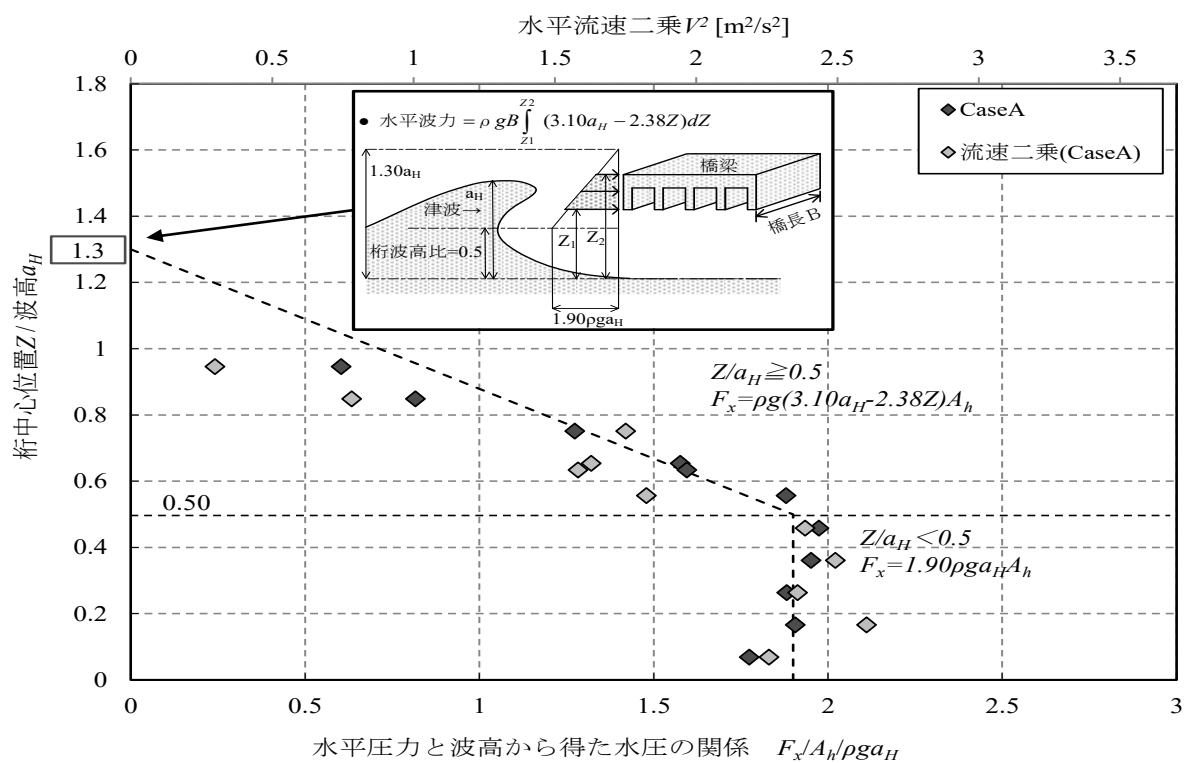
する橋桁流出のメカニズムを沼田跨線橋を例として1/10スケールの水理模型実験および数値解析を実施している．実験は静水深(1220mm)，波高(200, 300, 400mm)，桁中心位置(55mm)，桁下高(0mm)の条件で実施している．

(6) 中村らの実験

図－9に中村らの実験波形形状を示す．桁移動の有無を確認するための固定していない移動可能な桁に，碎波を伴わない津波を同時に作用させる水理実験を実施し，桁に作用する津波力の特徴を検



図－１０ 桁位置と水平圧力/波高から得られた水圧の関係



図－１１ $F_x/A_h/\rho g a_H$ と V^2 の関係

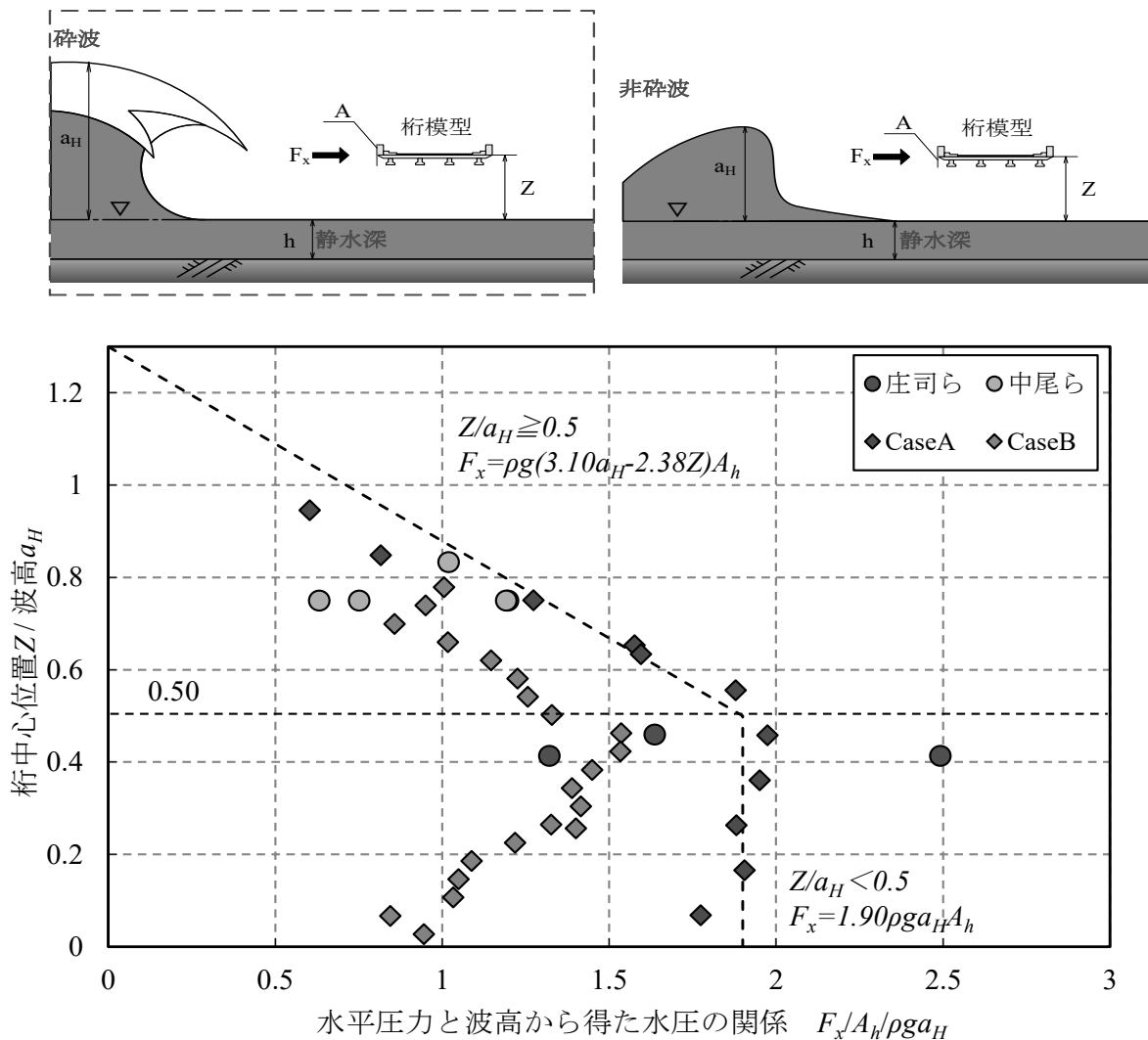
討するとともに、桁の流出限界との関係を検討した．実験は波高 (36.5～40.3mm) をパラメータとしている．

４．水平作用力評価式の適用性検討

ここでは水平作用力に着目して、九州工大と他機関の実験結果の比較を行う．実験ケースは九州

工大 52, 他機関は 25 である．九州工大の実験ケースは以下の４ケースである．

- (1) CaseA: 静水深 5cm, 計測波高 10cm, 桁中心位置 0.7～9.7cm, 砕波有
- (2) CaseB: 静水深 15cm, 計測波高 25cm, 桁中心位置 0.7～19.7cm, 砕波有
- (3) CaseC: 静水深 15cm, 計測波高 10cm, 桁中心位



図－１２ 桁位置と水平波圧/波高から得た水圧の関係

置 0.7～11.7cm, 碎波無

(4)CaseD : CaseA～C を基に, 桁形状 (桁高D, 床版幅B) をパラメータとした孤立波実験

図－１０は各機関で計測された作用圧力と桁位置の関係を示す. 横軸には単位面積あたりの作用力/静水圧をプロットしている. 縦軸には桁模型中心位置までの高さを最大波高で除したものを示している.

同図より 1 点を除いて, CaseA の直線で包括することができる. すなわち, 提案した津波の水平作用力評価式はほぼ段波性状の津波の水平作用力を安全側に見積もることができる. ここで, 水平作用力評価式で包括されるものの, 実験結果は直線から離れるものが多い. このことについて以下に検討を加える.

５. 碎波に対する分析

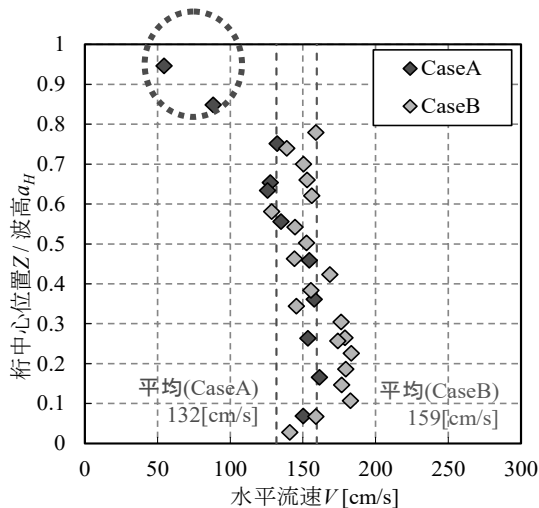
ここではまず図－１０において, CaseA より得

た水平作用力評価式の直線が紡錘形となることに対して, 流速との関係性を整理し, その理由は明らかにする. 図－１１は縦軸は Z (静水面から桁中心位置までの距離) を a_H で除したものである. 第一横軸は $F_x/A_h / \rho g a_H$ (最大水平作用力を桁模型の側面積と波高から得られる静水圧で除して無次元化したもの) である.

第二横軸を側壁を介して桁模型の横に設置した流速計より得た最大水平流速の 2 乗 (V^2) を示す. 同図より縦軸 $Z/a_H < 0.5$ の範囲では $F_x/A_h / \rho g a_H$ と V^2 は概ね一定の値になるのに対して, $Z/a_H \geq 0.5$ の範囲では, 桁模型設置位置が高くなるにつれて, 徐々に $F_x/A_h / \rho g a_H$ と V^2 は減少していく.

これらの結果より, 水平作用力評価式の直線が紡錘形を形成するのは, 流速の二乗の変化によって水平作用力が変化するためと考えられる.

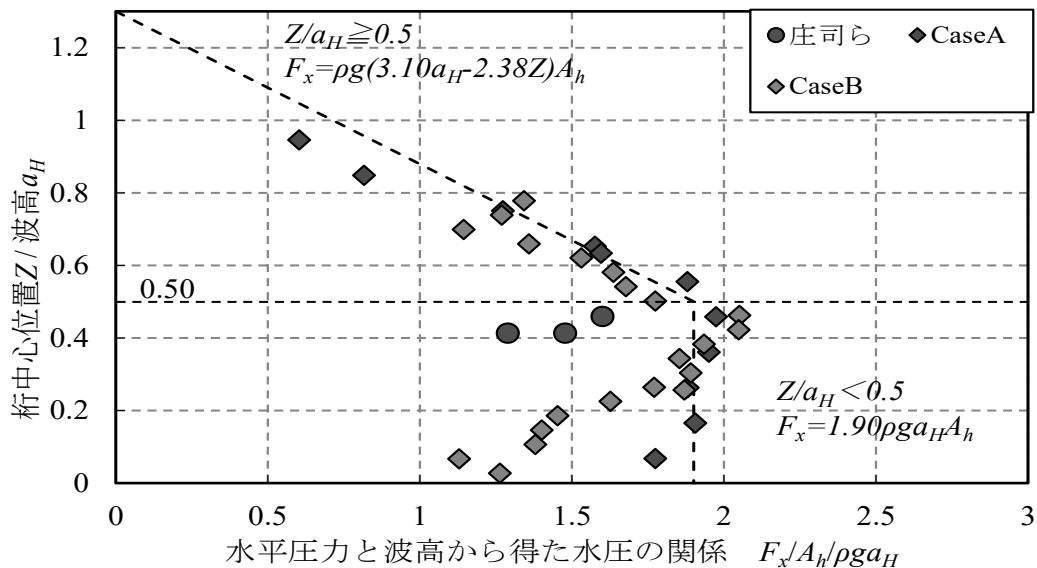
ここで作用力評価式と縦軸が交わる点が 1.3 となる理由について説明を加える. 図に示すように



図－１３ 流速分布

表－３ フルード数の算出

		スケール	静水深	波高	流速	Fr	Fr/Fr(CaseA)
			[cm]	[cm]	[cm/s]		
九工大	CaseA(基準)	1/50	5	10	131	1.07	1.00
	CaseB	1/50	15	25	159	0.80	0.75
庄司ら	(a)砕け寄せ波型	1/79.2	4	5	90	0.96	0.89
	(b)巻き波型	1/79.2	4	4.5	100	1.10	1.02
	(c)ドライベッド	1/79.2	0	5	145	2.07	1.93
中尾ら	砕波(模型1)	1/20	10	15	-	-	-
	砕波(模型2)	1/20	10	20	-	-	-
	砕波(模型3)	1/20	10	20	-	-	-
	砕波(模型4)	1/20	10	20	-	-	-
	砕波(模型5)	1/20	10	20	-	-	-



図－１４ 桁位置と水平波圧（補正後）

桁波高比 1.30 は波高 a_H に桁高（D）を加えた位置にはほぼ対応している．従って，桁波高比が 1.3 となるのは，津波が桁模型の一部のみに作用するケースに対応していると考えられる．

6. フルード数の影響

ここでは図－１０に示す横軸の無次元化値がケースによって変化する理由を，砕波のケースに着目して分析する．図－１２は図－１０から砕波を伴うケースのみを抽出したものである．同図に示すように近似直線に対して，CaseB，庄司らの２ケース，中尾らの実験が内側に，庄司らの１ケースが外側に位置するように，同じ砕波ケースにもかかわらず，横軸の値に差が生じる．このことに

関して，フルード数が正確に考慮されていないと考え，各ケースのフルード数と水平作用力の関係を整理した．

以下にフルード数の算出方法を示す．図－１３の横軸は側壁を介して桁模型の横に設置した流速計より得た最大水平流速，縦軸は静水面から桁模型中心位置までの高さを最大波高で無次元化したものとし，CaseA と CaseB の鉛直方向の流速分布を示す．同図より，CaseA において図中○印に示す２点以外は概ね水平流速が一定となる．CaseB も同様に水平流速が鉛直方向に一定となる．

ここでは津波のフルード数を算出する場合，断面平均流速を代表流速として用いれば，津波全体の評価となると考え，断面平均流速をフルード数

の算出に用いた。

また、松富らを参考にして、静水深と静水面から波の頂点までを足したものを遡上水深と考え、(3)式よりフルード数を算出した⁸⁾。

$$Fr = U / \sqrt{g(h + a_H)} \quad (3)$$

ここで、 U :代表流速、 h :桁位置での静水深、 a_H :計測波高

一方、庄司らの実験では鉛直方向の水平流速分布が確認できなかったため、フルード数の算出には桁横での最大水平流速を代表流速として用いた。

表－4はフルード数の算出に至った碎波ケース一覧である。同表よりフルード数の算出には、九州工大と庄司らの実験結果を用いた。なお、中尾らの実験は桁模型位置における流速を計測していないため、フルード数の算出には至っていない。表より砕け寄せ波型は入射波高 5cm、最大流速 90cm/s に対し、ドライベッド上の遡上波は波高 5cm、最大流速 145cm/s と同一波高であるものの、流速が約 1.6 倍となる。これらの結果より、図において評価式の直線に対して横軸の波圧/波高から得た水圧が変化するのは、同一の波高にかかわらず、桁模型位置での流速が変化するためであると考えられる。

図－13は各ケースのフルード数を合わせることを目的として、図－12の横軸を式(4)に示す式で補正を加えたものである。

$$(F_x / A_h / \rho g a_H)' = \frac{Fr(\text{CaseA})}{Fr} F_x / A_h / \rho g a_H \quad \dots (4)$$

同図より、図－12に比べ CaseB が CaseA に近づき、庄司らの全てのケースが近似直線の内側に位置する。

これらの結果より、庄司らの実験ケースにおいて非常に大きな水平作用力は、フルード数との関係から津波の流速が大きく生じているためであると考えられる。なお、ドライベッド上の遡上波のフルード数は 2.07 と極めて大きく、実現象から考えると特殊な例であるとも考えられる。

7. まとめ

本研究では著者らにより提案された段波先端部の作用力評価式の適用性を明らかにすることを目的として、九州工大の実験と他機関の実験結果と

の比較を行い、得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 九州工大における4種類の実験ケースについて、水平作用力の計測を実施し、これらを包含する水平作用力評価式を提案した。
- 2) 提案された水平作用力評価式と他機関の実験により得られた作用力を比較した。その結果概ね実験結果を提案式が包含している。よって、提案式を用いることにより概ね段波性状の津波の作用力を安全側に評価することが可能である。
- 3) 九州工大と他機関の作用力が異なる要因について検討を行った。その結果、各実験結果はフルード数の増加とともに水平作用力が増加する傾向を有し、フルード数を用いて補正することによって作用力は一致する傾向となった。

参考文献

- 1) 清水裕文，庄司学：橋桁に作用する津波波力と津波流速の関係：土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.69，No.2，I_941-I_945，2013。
- 2) 中尾尚史，張広鋒，炭村透，星隈順一：上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.69，No.4(地震工学論文集第 32 巻)，I_42-I_54，2013。
- 3) 荒木進歩，坂下友里，出口一郎：橋桁に作用する水平および鉛直方向津波波力の特性，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 66，No. 1，pp.796-800，2010。
- 4) 林秀和，青木圭一，林利久磨，鈴木利光，越村俊一：橋梁上部構造に作用する津波波力特性に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 60A，pp. 45-58，2014
- 5) 有川太郎，渡邊政博，窪田幸一郎：津波による橋梁の安全性に関する検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 69，No. 2，I_911-I_915，2013。
- 6) 中村友昭，澤祐太郎，水谷法美：橋桁への作用津波力と橋桁の流出限界に関する実験的研究，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 69，No. 2，I_335-I_340，2013。
- 7) 二井伸一，幸左賢二，庄司学，木村吉郎：津波形状の違いによる橋梁への津波作用力に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol. 56A，pp. 474-485，2010。
- 8) 松富英夫：津波氾濫流と関連課題，日本地震工學誌，No. 6，pp. 19-25，2007。