

護岸・陸上構造物に対する津波力の大規模実験

有川太郎*・池辺将光**・山田文則***・下迫健一郎****・今村文彦*****

比較的周期が長く波高の大きな波を造波できる水槽がなかったため、巨大津波においては、一部の設計には用いられているものの汎用的な耐津波設計にまで至っていない。そこで、大規模波動地盤総合水路を用い、周期20 s 以上で波高0.5 m 程度までの津波を造波させ、斜面勾配が1/50もしくは1/30に続く護岸および陸上構造物に作用する津波力の計測を行った。護岸・陸上構造物に作用する最大津波波圧は、構造物前面の波高に比例すること、さらに、本実験条件内では、構造物の前面に強固な構造物がある場合は、無い場合の7割程度に波高および津波波圧が減衰することがわかった。

1. はじめに

1960年のチリ津波の被災以降、津波波圧に対してこれまで多くの研究・実験がなされており、その成果を用いて一部では耐津波設計を行っているものの、汎用的な耐津波設計にまで至っていない。その要因として、①比較的周期が長く波高の大きな波を造波させることが物理的に困難であったため、ゲート急開流れなど様々な工夫をして擬似的な津波を用いてきたものの設計波としての整理が困難であること、②想定されている波高の大きさに足る実験が行われていないこと、③実験条件が不足していること、の3つ程度が考えられる。そこで、大規模波動地盤総合水路を用いて防波堤、護岸、陸上構造物に作用する津波力を測定し、設計マニュアル作成のための基礎情報としてまとめることを目標とする。

2. 既往の研究

(1) 防波堤・護岸に作用する津波波圧の分類

津波による防波堤・護岸に作用する波圧は、水谷・今村(2002)にまとめられており、まず、津波先端部の碎波もしくはソリトン分裂変形することにより生じる段波波圧、次に、入射波の連続的な到達により著しい水位上昇が発生する際に生じ、津波の平均的な高さに対応する重複波圧(持続波圧、遡上波圧)、そして、もし護岸に傾斜がある場合に、斜面から戻ってくる波(反射波)と入射波後部が衝突することによって生じる重複衝突波圧となっている。そして、それぞれの最大値を衝撃段波波圧、最大重複波圧、衝撃重複衝突波圧と呼ぶこととする(図-1)。これらに関する既往の研究について、そのときに使用した造波方法とともに図-2に示す。

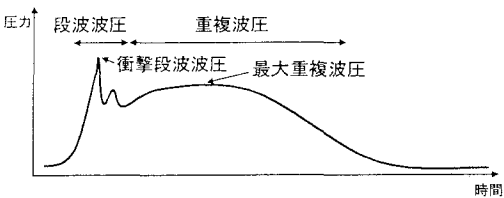


図-1 津波波圧の時系列サンプル

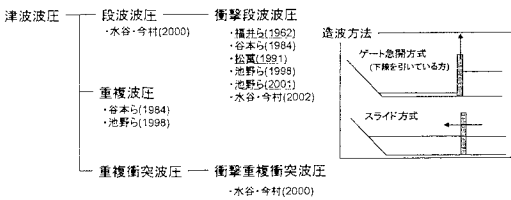


図-2 津波波圧の分類表と造波方法

(2) 各波圧の算定式

a) 段波波圧

福井ら(1962)のゲート急開方式の実験に始まり、谷本ら(1984)、松富(1991)、池野ら(1998, 2001)、および水谷・今村(2000, 2002)により研究されている。

池野ら(1998)は、1/200勾配を用い、造波板をスライドさせ、入射波高2 cm、周期20 sの津波等を用いて実験を行い、ソリトン分裂した津波先端部が防波堤に作用する際には、 a_I を入射津波の静水面から上の高さ、 ρ を流体密度、 g を重力加速度としたとき、衝撃段波波圧 p_I は、

$$p_I = 3.5 \rho g a_I \dots \dots \dots (1)$$

となることを示している。また、鉛直分布は最大到達高 η^* を $\eta^* = 6.0 a_I$ としている。ただし、谷本ら(1984)の1/200勾配を用いた実験結果からは、 $p_I = 2.4 \rho g a_I$ 程度であるが明確に定めてはいない。

一方で、ゲート急開方式で造波した場合の段波波圧に対する式は、波速を c とした場合、

$$p_I = 0.25 \frac{\rho g c^4}{g^2 a_I} \dots \dots \dots (2)$$

となることを、水谷・今村(2002)は示している。こ

* 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 特任研究官
** 非 会 員 シンバ工業(株) (元港空研 研修生)
*** 学生会員 工修 長岡技術大学大学院
**** 正 会 員 (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室長
***** 正 会 員 王博 東北大学大学院 教授

で、波速 c は、静水深を h_I 、段波の進行に伴うかく乱と底面粗度の程度を示す抵抗を ξ としたとき、

$$c = \sqrt{\frac{g(a_I + h_I)(a_I + 2h_I)}{2(a_I + h_I - \xi)a_I}} \dots\dots\dots (3)$$

である。よって、式(2)は

$$p_I = \chi \rho g a_I$$

$$\chi = \frac{1}{16} \left[\frac{(1 + \gamma_h)(1 + 2\gamma_h)}{(1 + \gamma_h - \xi)} \right]^2, \quad \gamma_h = \frac{h_I}{a_I} \dots\dots\dots (4)$$

となる。この式は ξ の値次第で χ の値が変化するため、 ξ を決定する方法が必要である。

b) 重複波圧

谷本ら(1984)は、水深1mの1/200の模型縮尺実験を行い、防波堤に作用する津波力の算定法を提案した。最大重複波圧 p_s は、

$$p_s = 2.2 \rho g a_I \dots\dots\dots (5)$$

としている。また、鉛直分布は最大到達高を $\eta^* = 3.0 a_I$ とした三角形分布としている。池野ら(1998)も同様の結果を得ている。水谷・今村(2000)は、式(2)の係数を0.12としたものを提案している。

(3) 陸上構造物に作用する津波波圧

松富・大向(1999)はゲート急開方式による段波遡上する津波波圧を研究し、朝倉ら(2000)は護岸を越波する津波波圧を、水谷・今村(2002)は台形せき護岸を越流する際の津波波圧を、池野ら(2003)は平坦な陸上に遡上する段波の波圧式をそれぞれ提案している。

朝倉ら(2000)によると、周期が非常に長くなった場合は、準定常として扱い静水圧近似でき、周期が短くなるにつれ、最大波圧が

$$p_I = 3.0 \rho g a_I \dots\dots\dots (6)$$

に近づくとしている。また、係数はフルード数に依存するとしている。池野ら(2003)は係数の最大値を4.0とした式を提案している。

(4) 本研究の目的

既往の研究から、構造物に作用する津波波圧に関する算定式はいくつか提案されているものの、海岸に続く護岸に対する波圧や、それに続く陸上構造物に作用する津波波圧の算定手法は提案されていないことがわかる。また、全体的には波高が小さく、スマトラ沖地震や、東海・東南海・南海地震で想定されている規模の巨大津波に対して適用可能かどうかかわからない。

そこで本研究では、海岸に続く護岸や、陸上構造物に作用する津波波圧に関する大規模実験を行い、その結果をまとめることを目的とする。

3. 実験装置概要

(1) 水槽の特性

実験は、大規模波動地盤総合水路を用いて行った。大

規模波動地盤総合水路は、基本水路の長さが184 m、深さ12 m、幅3.5 mであり、最大8 mのストロークを持ち、比較的長い周期においても大きな波高を造波できる水路である。図-3は水路の全体を示す。

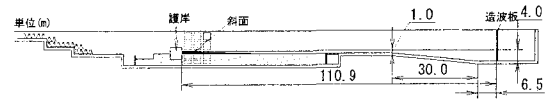


図-3 大規模波動地盤総合水路

(2) 造波方法

造波方法は、正弦波が造波できるように行い、ストロークと造波時間によって波高を変化させる。図-4で示すように、押し波初動時は一旦ゆっくりと後ろ側に引き(3分間)、その後静まるのを待ち(3分間)、造波板を正弦的に押し、最後にゆっくりと戻してくる。一方で引き波初動の場合は、図-5のように引く時間と押す時間を同じとして造波している。

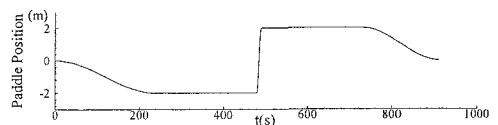


図-4 押し波初動の場合の造波板の動き

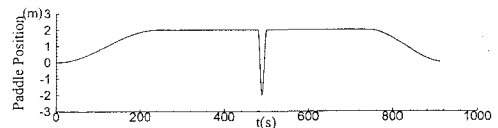


図-5 引き波初動の場合の造波板の動き

4. 護岸に作用する津波力の実験結果

(1) 実験概要

実験断面は図-6に示すように斜面の終端部に護岸を設置し、そこに作用する津波力を測定した。斜面終端部までの水深が水位1.0 mである。実験の計測項目は沖合波高に相当する造波装置前から勾配部および護岸や陸域構造物の前面まで間の10カ所の波高と護岸と陸域構造物前面に作用する波力ならびに波速とした。本論文の沖合波高 a_I は護岸から88 m 沖側に設置した波高計の値を意味する。また、津波の波高は初動に関わらず静水位からの上昇波高部としている。

各計測項目のサンプリング周期は衝撃的な津波力の計測することを考慮し400 Hzとした。波圧計は図-7に示すように、最下部が地形より0.015 m 上であり、そこから鉛直方向に0.025~0.08 mの間隔で全11個ほど設置し、最上部は地形より0.735 mの位置とした。実験ケースは、

表-1のように勾配1/30・50, 水位 (0.8~1.2 m), 沖合波高 (0.05~0.8 m), 周期 (14~60 s) ならびに押し波・引き波初動を組み合わせ, 全272ケースを行った. 本実験のスケールは全て1/10とした.

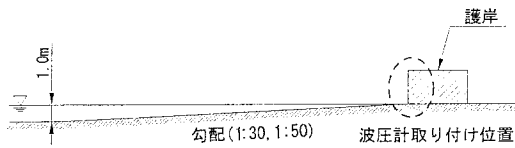


図-6 護岸設置断面図

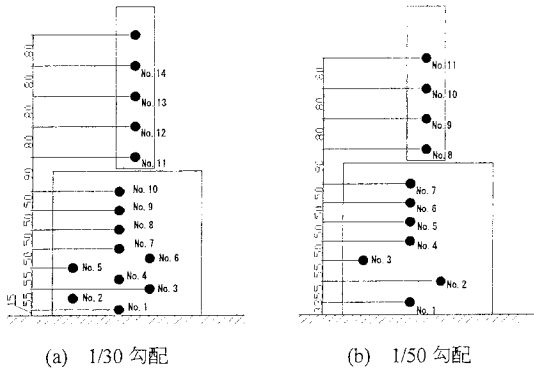


図-7 波圧計取り付け位置 (護岸正面)

表-1 実験ケース

津波の初動	海底勾配	水深(m)	波高(m)	周期(s)
押し波 引き波	1/30	0.8	0.1~0.8 (1~8)	14
		0.9		20
		1.0		30
	1/50	1.1		40
		1.2		60
		1.8 (8~18)		(44~190)

()内は現地スケールに換算した値

(2) 波高と津波波圧の関係

図-8に1/30および1/50勾配の沖合波高 a_1 および護岸前面波高 a_c と重複波圧 p_s の関係を示す。水深1.0m以上 (護岸前面水深が0 m以上) の場合は, 谷本らが提案した $p_s=2.2 \rho g a_1$ の関係と一致していることがわかる。水深が1.0 m以下の場合では, 算定式から得られる値の高さ位置と実験の計測位置に違いがあるので, 1.0 m以上と同様に比較を行うために $p_s=2.2 \rho g a_1$ に鉛直波圧分布 $\eta^*=3.0 a_1$ を用いて, 水位差分の補正を行った。以上から, 水深1 m以下の場合でも沖合波高と重複波圧が直線上的関係を示した。また, 図より重複波圧は周期に依存しておらず, 波の初動も引き波の波高を静水深からの水位上昇部の高さとする事で無関係となることがわかった。

また, 護岸前面 a_c と重複波圧 p_s にも直線上的関係が見られ, その関係は両勾配ともに $p_s=1.0 w_0 a_c$ とほぼ静水

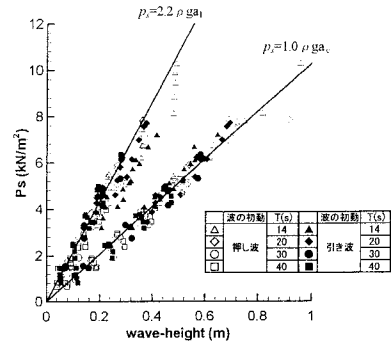


図-8 波高と重複波圧の関係 (1/30 勾配)

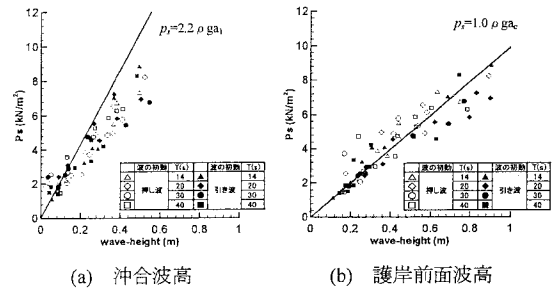


図-9 波高と重複波圧の関係 (1/50 勾配)

圧であることがわかる。また, 沖合波高と重複波圧の関係と同様に周期や波の初動に依存しないことがわかる。

(3) 重複波圧と最大津波波圧の関係

各勾配における護岸に作用する重複波圧と最大津波波圧の関係を図-10示す。ここでいう最大津波波圧とは段波波圧と重複波圧を含めた全体の最大値を表す。左図は1/30勾配における護岸底部から0.015 mの高さに取り付けられた波圧計の結果である。図より重複波圧と最大津波波圧には $p_p=1.27 p_s$ の関係を示す。水深1.0 m以上 (護岸前面水深が0 m以上) の場合は, 谷本らが提案したの関係が成り立っていることがわかる。この関係は他の高さ波圧計においても同様であり, 全体で1.25~1.35の範囲を示した。また, 波高と津波波圧の関係と同様に, 周期や波の初動に依存していないことがわかった。さらに,

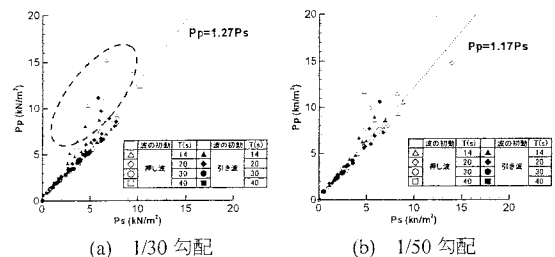


図-10 重複波圧と最大津波波圧の関係

1/50勾配と比較しても大きな差は見られなかった。図中の点線部は、重複波圧と最大津波波圧の関係が1.23以上を示したもので、最大で $p_p = 2.34 p_s$ の関係となった。

(4) 津波波圧の鉛直分布

各勾配における同一の実験条件における津波波圧の鉛直分布を図-11に示す。図中のcal値は2章で述べた谷本らの(1984)に示す算定式より求めた津波波圧の鉛直分布を示したものである。実験全般的に段波波圧が生じないケースでは算定式と実験値が十分に整合しているが、最大津波波圧を対称とする場合では、それでは不足なことが多い。津波による家や建物の破壊を念頭におくと、最初の衝撃的な力を算定するかが重要であり、今後これらの結果を踏まえた算定式を提案していくこととなる。

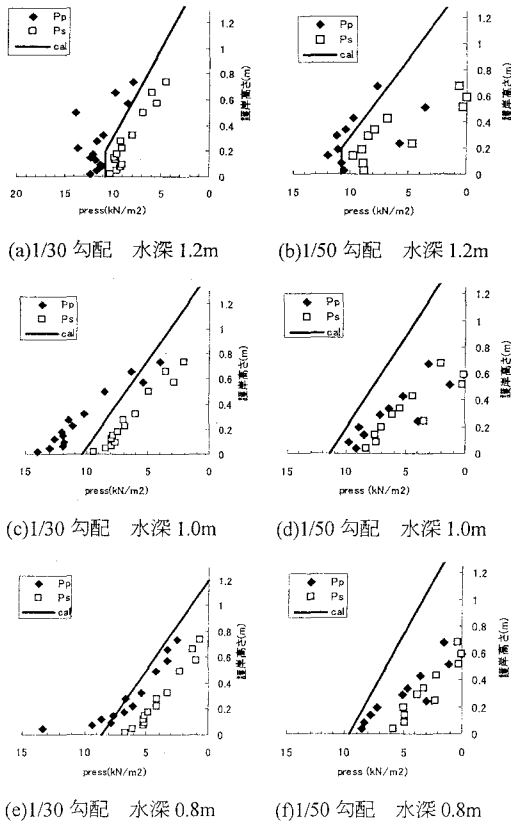


図-11 最大津波波圧と波形勾配の関係

5. 陸上構造物に作用する津波力の実験結果

(1) 実験概要

津波被災地に見られる波の痕跡高より、現地の陸上構造物にどの程度の津波力が作用したかを求めることは、家屋等の破壊状況の検証に必要であり、各種構造物の設

計参考値としても重要である。そこで、1/50の斜面終端部より平坦な陸上部設け、図-12示す家屋模型を設置し、家屋前面の波高と流速および家屋に生じる津波力の計測を行った。縮尺を1/10とし、実験条件の波高等の範囲は3章と同様であり、全72ケースの実験を行った。

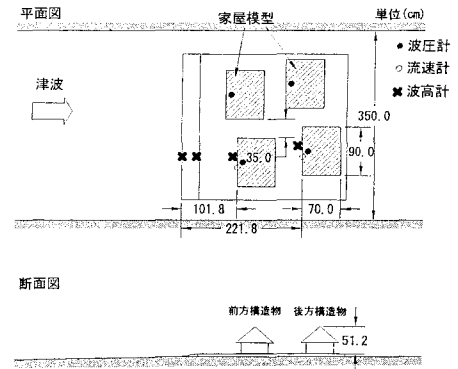


図-12 陸上構造物の設置図

(2) 津波波圧と構造物前面波高の関係

図-13は、沖側に設置した家屋の前面波高と p_s の関係を示したものである。図より、海岸線付近に家屋がある場合は、 $p_s = 0.84 p_{ga_c}$ となり、護岸に作用する津波力の約7割程度であることがわかった。これは、家屋模型を図-12に示す後方の位置に設置してもほぼ変化はなかった。これより、現地において汀線位置付近の家屋に対しては、実験結果とほぼ同程度の最大重複波圧が作用すると考えられる。

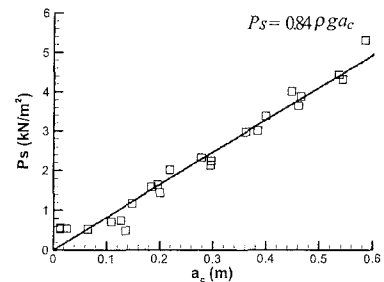


図-13 構造物前面波高と重複波圧の関係

津波により家屋等の構造物が破壊するメカニズムは明らかとされていないが、構造物の破壊は、重複波圧の持続的な圧力よりも津波が段波状になることで生じる衝撃的な衝撃段波波圧によるものと推測される。また、本実験のような比較的汀線位置に近い範囲では、漂流物が少ないと考えられ、構造物に作用する外力は津波波圧が主要となる。図-14に陸上構造物に作用した重複波圧と衝撃段波波圧を含む最大津波波圧の関係を示した。図よ

り、重複波圧と最大津波波圧には1.4～2.0倍の関係があることがわかり、平均的には1.6倍程度であることがわかる。

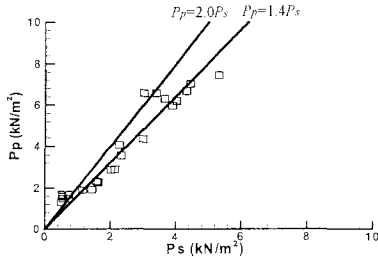


図-14 重複波圧と最大津波波圧の関係

(3) 前方構造物による津波力の違い

家屋等の陸上構造物と津波の遡上方向の間に最大津波波圧に耐えうる強固な構造物がある場合は、津波の流れは前方構造物に遮れ、前方構造物を中心に扇形状に浸水高が低くなる領域が存在する。そのため、後方の陸上構造物に作用する津波の波高は低減し、前方構造物がない場合よりも重複波圧が低下すると考えられる。また、衝撃段波波圧も前方構造物部に衝突することで波圧が低減すると思われる。そこで、図-12の前方構造物の有無により後方構造物に作用する津波波圧と波高の変化をほぼ同一の沖合波高 a_t を作用させ検討を行った。

図-15(a)に、前方構造物の有無による最大津波波圧と重複波圧の減衰、図-15(b)に波高の減衰を示す。

p_p , p_s ともに、7割程度に低減していることがわかり、低減率は波高の大小に影響されていない。波高の減衰も同様に、7割程度に低減が確認され、前面波高の低減に応じて重複波圧が弱まることがわかった。また、最大津波波圧も同様であり、重複波圧との比率のまま低減することがわかった。以上の結果から、前面に強固な陸上構造物が存在すれば、背後の構造物に作用する津波波圧を

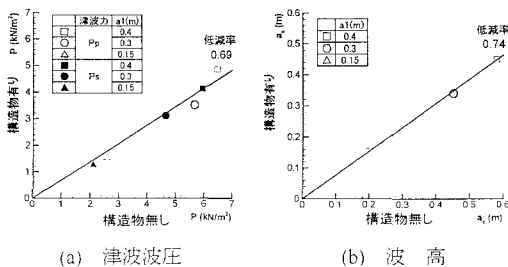


図-15 前方構造物の有無による津波波圧と波高の低減率

抑止できることがわかった。

本実験では、前面の構造物形状や大きさ、構造物間の距離は全て一様であり、波の条件による検討を中心に行っている。そのため前面の構造物の開口率や、後方との構造物間の距離などは今後の検討課題の一つである。

6. ま と め

本実験では最大周期20 s、波高0.5 mの津波を造波し、巨大津波に対する護岸・陸上構造物に対する波圧を検討した。その結果、護岸に作用する最大重複波圧に関しては、既往の算定式が適用できることがわかったものの、衝撃段波波圧に関しては、その決め方を議論する余地が残された。また、陸上構造物に作用する最大津波重複波圧と、前面の波高とは、実験の範囲内では、 $p_s = 0.84 p_{ga}$ の関係にあること、全面に強固な構造物のある陸上構造物に作用する津波波圧は、無い場合と比較すると7割程度の低減されることが確認された。今後実験ケースを増やし汎用化した算定式にまとめることが今後の課題となる。

本実験は、大橋俊樹氏（長岡技大生）ならびに中野史丈研究員に協力頂いた。ここに記し、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 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(2000)：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 911-915。
- 池野正明・松山昌史・田中寛好(1998)：ソリトン分裂津波の大陸棚上での変形とその防波堤設計波圧に関する実験的研究，海岸工学論文集，第45巻，pp. 366-370。
- 池野正明・森 信人・田中寛好(2001)：碎波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第48巻，pp. 846-850。
- 池野正明・田中寛好(2003)：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第50巻，pp. 721-725。
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋(1984)：1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 257-261。
- 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄(1962)：津波の研究(I)－一段波津波の波速について－，第9回海岸工学講演会論文集，pp. 44-49。
- 松富英夫(1991)：碎波段波衝突時の圧力分布と全波力，海岸工学論文集，第38巻，pp. 626-630。
- 松富英夫・大向達也(1999)：津波氾濫流の流体力に関する実験，海岸工学論文集，第46巻，pp. 336-340。
- 水谷 将・今村文彦(2000)：構造物に作用する段波波力の実験，海岸工学論文集，第47巻，pp. 946-950。
- 水谷 将・今村文彦(2002)：津波段波の衝撃性および越流を考慮した設計外力算定フローの提案，海岸工学論文集，第49巻，pp. 731-735。