

遡上津波力に関する大規模実験

有川太郎¹・大坪大輔²・中野史丈²・下迫健一郎³
高橋重雄⁴・今村文彦⁵・松富英夫⁶

巨大津波の破壊力は, 2004 年末のスマトラ沖地震津波において目の当たりにしているが, 陸地に遡上した津波の持つ力の性質については未解明な部分が多く, 避難ビルの耐津波評価をする際の基準や人に対する危険度は明確ではない。そこで, 構造物・人体に対して大規模実験を行い, サージフロント波圧特性や破壊特性を調べた。その結果, 衝撃津波力が発生する場合は既存の式では過小評価につながることを, 少なくとも斜流でない衝撃津波波圧は生じないことがわかった。さらに, 遡上津波と人体に作用する津波力の関係を示し, 成人男性ならびに女性に対する滑動・転倒する目安を示した。

1. はじめに

津波による防波堤・護岸に作用する波圧は段波波圧と呼ばれ, 陸上部の構造物など, 水が無いところに浸入した津波が及ぼす波圧をサージフロント波圧と呼ばれる(松富, 1991)。段波波圧の研究に関しては, 多くの研究成果が報告されており, 谷本ら(1984), 池野ら(1998)において計算式が提案され, 有川ら(2005)が行った大規模実験でその妥当性が確認されている。

一方でサージフロント波圧に関しては, 未解明な点が多く, 特に避難ビルの建設や, 耐津波評価をする際の基準が明確でない。また陸上部においては, 構造物だけでなく, 人に対しても安全性を考慮する手法についても検討しておく必要がある。

巨大津波の破壊力は, 2004 年末のスマトラ沖地震津波において目の当たりにし, そのような巨大津波のもつ性質を正確に把握するためには, サージフロント波圧の解明が急務である。

そこで本研究では, 大規模実験施設により, 巨大津波力による構造物・人体への影響を明らかにすることを目的とした。

2. 既往の研究

朝倉ら(2000)は, 護岸を越波する津波段波の波圧 P_H を, 静的な三角形分布としてとらえ,

$$P_H = \gamma_w (3h_c - z) \cdots \cdots (1)$$

としている。ここで, z は陸上地面を基準とした上向き正の座標である。また, ソリトン分裂の影響を考慮し,

$$P_H = \gamma_w (\max(5.4h_c - 4z, 3h_c - z)) \cdots \cdots (2)$$

と定義している。岡田ら(2004)は, 式(2)を用いて陸上構造物に対する建築物の構造設計手法の提案している。

飯塚・松富(2000)は, 津波力を流速の自乗に比例するとし, 家屋に作用する津波力 F_D を前面の浸水深 h_c を用いて式(3)の様に定義した。

$$F_D \cong 0.61 \gamma_w C_D h_c^2 B \cdots \cdots (3)$$

ここで, γ_w は海水の単位体積重量, C_D は抗力係数(1.1~2.0), B は津波方向の家屋幅である。

3. 造波水路の特徴

大規模波動地盤総合水路の造波板を最大 13.8 m まで動くことが可能となるように改良した。それにより最大高さ約 2.5 m の津波力の再現ができるようになった。

図-1 は水路の断面図を示す。造波板から 1/10 の勾配が 26 m あり, その後, 96 m の一様水深部が続いている。

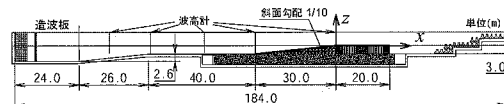


図-1 水路断面図 (1/10 斜面勾配設置時)

本研究では, 図に示すように一様水深部に 30 m の 1/10 勾配斜面ならびに 20 m の水平陸上部を設置した。1/10 勾配斜面に続く陸上部の先端を中心として, 水平方向に x 軸, 鉛直方向に z 軸と定義する。

陸上部すれすれまで水を入れると造波板の前での水位は 5.6 m, $x = -30.0$ m 地点での水位は, 3.0 m となる。造波方法は, 有川ら(2005)に示す通りである。ストロークの長さを S , 造波板を片側に押し出す時間を T_D と定義する。

図-2 は, T_D ならびに S を変えた押し波時における, $x = -30.0$ m 地点 (1/10 勾配の始まり地点) での静水

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 特任研究官
2 (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室
3 正会員 (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室長
4 正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所 研究主監
5 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科付属災害制御研究センター
6 工博 秋田大学教授 工学資源学部土木環境工学科

面からの津波高さ (H_T) を示したものである。 $S=13.8$ m 時には、 T_D が 40 s のときでも、0.7 m 程度の高さの津波を生じさせることができる。ストロークを変えると、津波高さはほぼ線形に変化していくことがわかる。既存の 8 m のストロークでは、 $T_D=10$ s としても、1.4 m の津波高さであることがわかる。ただし、この結果は、地形によって変化すると考えられるため、他のケースで行う場合は、波高検定が必要である。

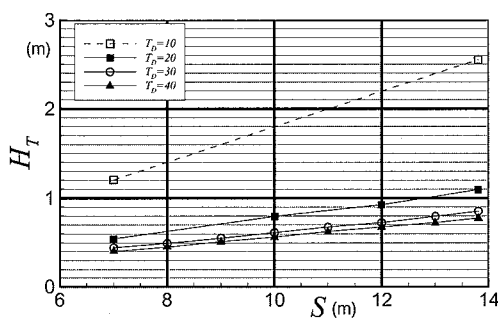


図-2 津波高さ ($x=-30.0$ m 地点)

4. 遡上津波力の検討

(1) 陸上構造物に対するサージフロント波圧の検討

a) 実験条件

汀線より 6 m の位置に、大きさ 80 cm 角の箱を 4 つ設置した。図-3 に実験断面を示す。

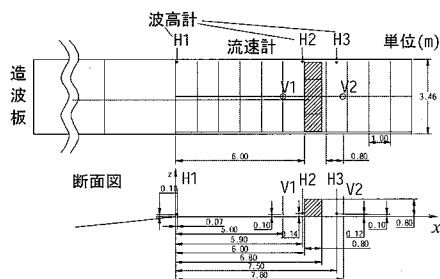


図-3 陸上構造物実験断面

圧力計は、各箱の中央部の 10 cm, 40 cm, 70 cm の高さにそれぞれ設置した。10 cm の高さには 196 kN/m^2 、他は 19.6 kN/m^2 の定格容量を用いた。流速計は定格容量 8.0 m/s のプロベラ式流速計を用い、箱の 1 m 手前と 0.8 m 背後に設置した。波高計は容量式波高計を箱の前後に設置した。サンプリング間隔は 400 Hz とした。

実験は、押波と引波の 2 種類、 $S=7.0, 9.0, 10.0$ m の 3 種類、 $T_D=20, 25, 30, 40$ s の 4 種類を変化させ、計 17 ケースを行った。具体的な組み合わせを表-1 に示す。水深は $x=-30.0$ m 地点で 2.9 m とした。

表-1 実験ケース (陸上構造物)

初動	H_T (m)	T_D (s)
押波	0.4 m ~ 0.8 m	20 s, 25 s, 30 s, 40 s, 60 s
引波		

b) 浸水津波高さと浸水流速との関係

まず、構造物の設置無しで、6.0 m (構造物設置場所) における浸水高さ (H_{sv}) と浸水流速 (v_{sv}) の関係を調べた(図-4)。ここで、浸水高さは突入時における波の分裂を無視した高さを言い、浸水流速も同じとする(図中参照)。それによると本実験は、1.5 程度の Froude 数まで行っていることがわかる。

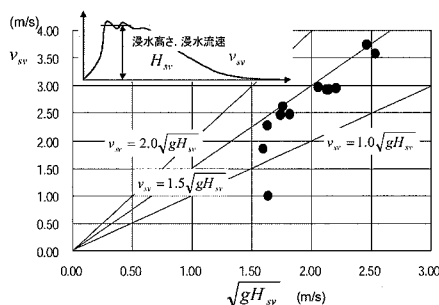


図-4 浸水高さと浸水流速との関係

c) 時系列データ

写真-1 は、引波初動時に $H_T=0.8$ m、 $T_D=20$ s の条件のときにおいて遡上した津波が衝突する直前 (51.1 s) と直後 (51.6 s) を示している。ここで 0 s は造波開始時間の約 15 s 前となる。この時には、遡上した津波は、構造物の手前で碎けたため、大きな水しぶきが立ち上がった。

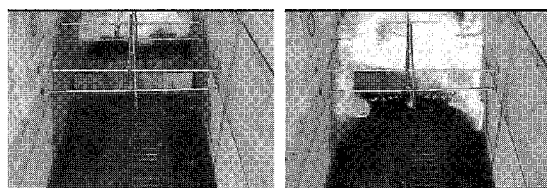


写真-1 構造物に衝突する遡上津波の様子 (51.5 s 付近)

図-5 は、構造物の手前の波高計、流速計、波圧計、ならびに、波圧から算定した波力を示す。波力は、圧力の分布から板の面積を割り振り積分して、時刻ごとに算出した。これを見ると、始めの衝突において大きな衝撃力が生じ、次に 52 s を越えたあたりから反射が始まり、重複波的 (持続的) な波圧が生じていることがわかる。

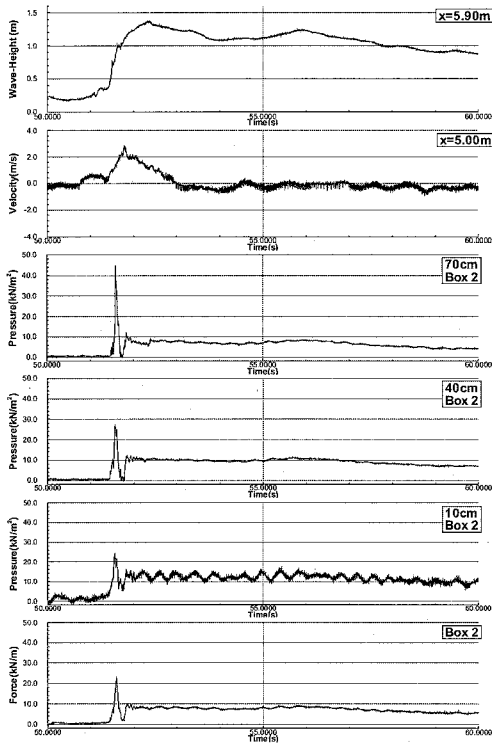


図-5 各物理量の時系列例 ($H_T=0.8\text{m}$, $T_D=20\text{s}$)

d) 浸水高さと津波波圧

最大重複津波波圧 (P_s), 衝撃津波波圧 (P_b) との関係調べた。津波波圧の定義は、有川ら (2005) にならうものとする。

図-6 は、縦軸に z/H_{sv} の無次元鉛直高さを、横軸に $P_s/\rho g H_{sv}$ の無次元最大重複波圧をとったものである。ここで H_{sv} とは、b) で記述したものである。この実験の範囲内では朝倉ら (2000) の算定式の範囲内で収まっていることがわかる。

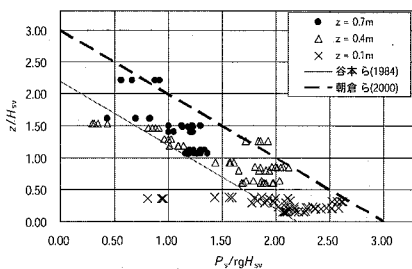


図-6 無次元最大重複波圧の無次元鉛直分布

一方で、 $z=0.1\text{m}$ 地点における無次元最大重複波圧と Froude 数の関係を図-7 に示す。これを見ると、最大重複波圧は Froude 数と関係があることを示唆するも

のであり、最大では、 $P_s/\rho g H_{sv} \div 2.0 F_r$ であった。

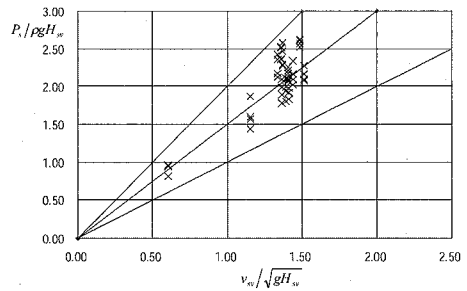


図-7 無次元最大重複波圧と Froude 数の関係

次に無次元衝撃津波波圧の無次元鉛直分布を図-8 に示す。実線は朝倉ら (2000) による式 (1) を示したものである。これによると、浸水高さとはほぼ同程度の高さにおいてピークを持つような分布になる場合があり、この場合は、明らかに朝倉ら (2000) では過小評価になる。

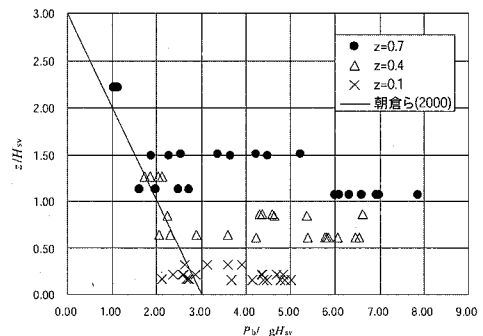


図-8 無次元衝撃津波波圧の無次元鉛直分布

Froude 数との関係を示すと、図-9 のようになる。Froude 数が 1.15 のケースにおいて、衝撃津波波圧が発生しなかったために、その点に線を引いたものの、ここから言えることは、平均的な浸水高さと流速を用いた Froude 数と衝撃津波波圧の大きさは関係がないものの、少なくとも斜流 ($F_r > 1.0$) でない衝撃津波波圧は生じないことがわかる。また、上記のような鉛直分布を持つケースは、構造物の前面近くで碎波しており、これは松富 (1991) に述べられているとおり、波面の傾き等、波面の形状の再現が衝撃津波波圧の予測には重要であることを示唆している。つまり、陸上遡上部の衝撃津波波圧を予測するためには、長波成分だけでなく、周期の短い成分の予測が必要となる。ただし、図-5 からわかるように衝撃津波波圧の作用時間は短く、そのため、構造物側の固有周期により、構造物に及ぼす影響が変化することを念頭におかなければならない。

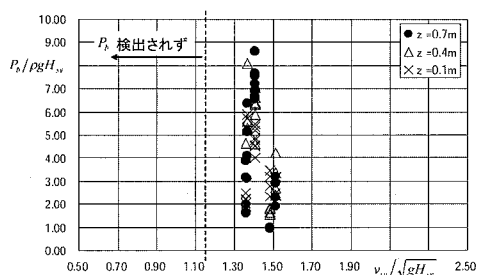


図-9 無次元衝撃津波波圧と Froude 数と関係

(2) 木造壁破壊の検討

衝撃津波波圧による破壊過程を確認するために、木造家屋の壁面(高さ 2.7 m, 幅 2.7 m, 全体総厚は柱を含め約 140 mm)を設置した(図-10)。津波の条件は, $H_T = 2.5$ m, $T_D = 10.0$ s とした。

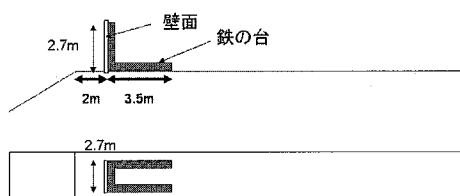


図-10 壁面破壊実験の陸上設置状況



写真-2 壁面の破壊の様子

津波は壁面前で碎波し、高さ約 2.0 m の遡上津波となって衝突した(写真-2)。鋼材に設置した底から 25 cm の場所にある圧力計によると、衝撃津波波圧として約 120 kN/m²が作用していた。水塊が衝突した瞬間に壁面が壊されていることがわかる

(3) 遡上津波による人体流下の検討

どの程度の流れで人体が流されるかを調べるため、実際に人を水路に立たせ、安全を確保したうえで津波を遡上させ、そのときの挙動を観察した。次に、直径 10 cm の丸太を設置し、同程度の津波を作用させ、その津波力を測定し、人体に作用する津波力の推定を行う。

a) 人体流下実験

人を水路中央に立たせて ($x=7.0$ m 付近) 津波を作

用させた。被験者は成人男性 10 名, 女性 7 名とした。男性の平均体重は 73 kg, 女性の平均体重は 49 kg であった。写真-3 は、実験の様子を示したものである。津波条件は男性・女性ともに小・中・大を順に試し、倒れはしないものの足がずるずる滑るパターン(滑動)と、一瞬で足下がすくわれるパターン(転倒)に分類することとした。結果は後述する。

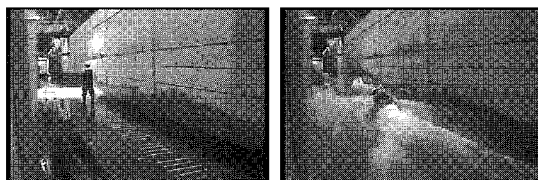


写真-3 人体流下実験の様子(転倒パターン)

b) 丸太に作用する津波力

高さ 1.5 m, 直径 10 cm の丸太を 1 本だけ水路中央に設置した。丸太を設置した位置は $x=7.5$ m とした。

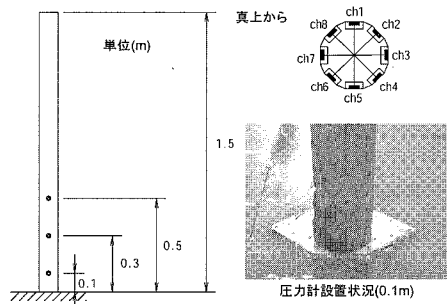


図-11 丸太実験における圧力計取り付け位置

表-1 実験ケース(丸太実験)

初動	H_T (m)	T_D (s)
押波・引波	0.4 m~0.6 m	20 s, 25 s, 30 s,

圧力計は、8 方向に対して、高さ 0.1 m, 0.3 m, 0.5 m の位置に設置した。ただし、計測器の数の問題から、1 ケースにつき同じ高さの 8 個のみに取り付けている。実験ケースは表-2 に示す通りである。

高橋ら(1992)によると、式(4)のように、

$$F = \frac{w_0}{2g} A_0 \cdot C_D \cdot U^2 \dots \dots \dots (4)$$

流れの中の人に作用する力は、流速の二乗に比例する抗力として考えることができることを示している。ここで、 A_0 は投影面積, C_D は抗力係数(ほぼ 1.1), U は流速, w_0 は単位体積重量を表す。

そこで、丸太を 8 角形と見なして、時々刻々の力を計算し、最大重複波力 (F_s) と衝撃津波波力 (F_b) を鉛

直方向にプロットしたものが、図-12である。ここで、 r を半径として、 $A_0=2rH_{sv}$ とした。

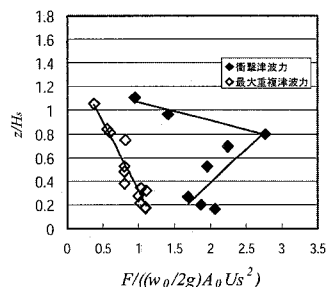


図-12 丸太実験における津波力の鉛直分布

これを見ると、重複波力は、構造物の場合より鉛直方向の高さが小さく、 $1.5H_s$ にまでしかなかった。また、突入時の衝撃的な力は、重複波的な力の2.3倍程度であった。この鉛直分布をもとにして、全波力を計算し、式(4)と比較したものを図-13に示す。衝撃波力に関しては、実験のほうが大きくており、改善が必要であるものの、全体的には、式(4)と整合している。

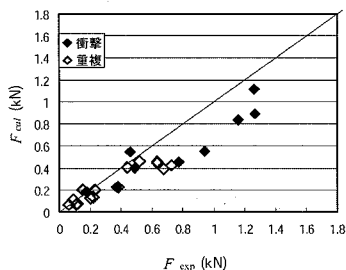


図-13 遡上津波力における計算値と実験値との違い

c) 人体に対する危険度評価に対する検討

人に対して行われた津波の条件において、式(4)を用いて津波力を計算した。足の太さは一律10cmとして計算した。計算結果を等圧線で表示すると、図-14のような曲線のように現れられた。また、そのときの人体実験の挙動の結果も同図に示す。

その結果、本実験の範囲内においては、男性では最低約147kN(15kg重)の力の作用で滑動しているケースがあり、滑動のケースの平均値は約343kN(35kg重)となった。したがって、およそ体重の半分で滑動することがわかる。一方、転倒ケースの平均は約970kN(99kg重)であり、体重の約1.3倍以上になると足をすくわることがわかる。

女性に関しては、滑動の平均は約167kN(17kg重)であり体重の0.35倍程度、転倒の平均は20kgであり

体重の0.4倍程度となった。転倒の平均が女性で圧倒的に低い理由はサンプル数が少ないことの影響もあるが、踏ん張り力等の弱さも考えられる。従って、男性、女性、また、成人、子供、老人で結果が変化すると考えられ、今後も継続的に調査する必要がある。

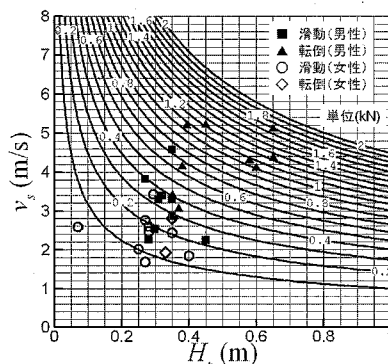


図-14 人体流下実験の結果と計算された重複津波力

5. ま と め

巨大津波に対する遡上津波力を検討するために、大規模実験を行った。その結果、衝撃津波力が発生する場合は既存の式では過小評価につながることを示した。

人体流下実験においては、遡上津波と人体に作用する津波力の関係を示し、滑動・転倒する目安を示した。今後は、衝撃的な津波力の発生条件の明確化が課題となる。

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.
- 有川太郎・池辺将光・山田文則・下迫健一郎・今村文彦(2005): 護岸・陸上構造物に対する津波力の大規模実験, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 746-750.
- 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.
- 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法に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 366-370.
- 岡田恒男・菅野忠・石川志忠・扇丈朗・高井茂光・浜辺千佐子(2004): 津波に対する建築物の構造設計法について-その2: 設計法(案)-, ビルディングレター, 日本建築センター.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室 善一郎(1992): 越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究, 第2報, 第31巻, 第4号, 港研報告, 31p.
- 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.
- 松富英夫(1991): 砕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.