

建物群に作用する津波波力に関する水理実験

Experimental Study on Tsunami Forces Acting on Structures

チャルレス シマモラ¹・嶋原良典²・藤間功司³

Charles SIMAMORA, Yoshinori SHIGIHARA and Koji FUJIMA

If a gigantic tsunami attacks in coastal area, most kinds of structures such as residential houses, industrial plant and cargo transporter would be broken down. Since the best way to preserve the human life from the tsunami is that people run away to a higher place as much as possible, a refuge building in coastal region may exert great effect for saving life. In order to evacuate people safely in the buildings, structure of the building must hold against the gigantic tsunami load. Therefore, it is necessary to estimate the tsunami force on the structure accurately. The objective of this study is to investigate tsunami forces on the structures in coastal area. Hydraulic experiment is carried out to clarify the characteristics of tsunami force, especially the relationship to the agreement of houses and the distance from seawall.

1. はじめに

2004 年インド洋津波のタイ・ブーケットでは、段波状となった津波が沿岸の構造物に衝撃的な力を及ぼしたものの、その背後では勢いが衰えた津波が市街地を氾濫流として流れる映像が残っている。すなわち、沿岸に構造物を配置することは津波からの一時的な避難施設として有効であるだけでなく、波力を減勢させる目的でも防災上有効であると考えられる。そのため、構造物に作用する津波波力の評価方法が盛んに議論されている（有川ら, 2005; 2006, Yeh, 2006）。しかし、複数の家屋群に対する津波波力の関係はわかっておらず、沿岸に構造物があることでその背後における波力の減勢効果がどの程度となるかは定量的にはわかっていない。

そこで本研究では、水理実験から建物模型に作用する津波波力を直接計測することで、建物群に作用する津波波力とその近傍の水位や流速、護岸からの距離の関係について把握することを目的とした。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験には、防衛大学校構内の幅 7 m, 長さ 11 m の平面水槽を用いた。水槽の一片にはピストン式造波装置があり、他の 3 辺は鉛直壁で覆われている。図-1 に実験装置の概要を示す。1/200 スケールを想定し、津波の沿岸における浅水変形から陸上での遡上までを再現する。沖合の水平床の水深は 60 cm であり、水路床から水位を増幅させるために 1/3 勾配斜面を設け、水深 3 cm の

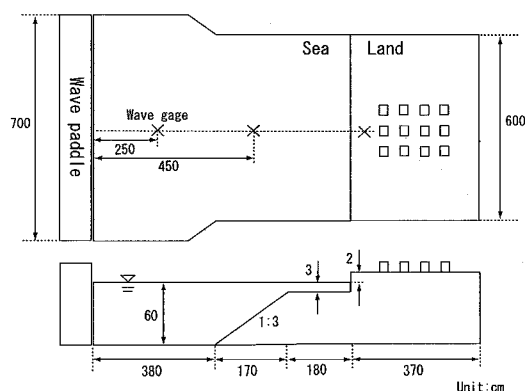


図-1 実験装置

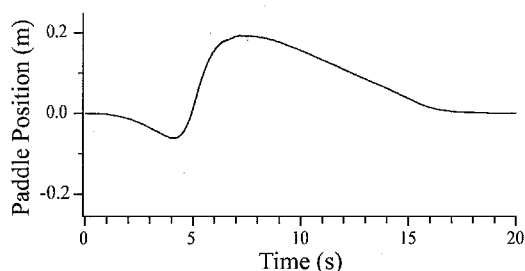


図-2 造波板の位置の時間変化

浅海域に繋げた。直立護岸の背後は平坦な陸域であり、津波波力を測定するため 10 cm 角の木材で作成した建物模型群を配置した。建物群の配置パターンや波力測定の模型の詳細については後述する。

(2) 造波方法および入射波の伝播・変形・遡上

本研究では、浅海域で碎波段波状になった津波が、陸上の建物群に作用するような状況を検討するため、以下に説明する条件により、造波を行った。図-2 に造波板の位置の時間変化を示す。まず約 4 秒間で 5 cm 程後ろに引き、その後、中立位置から 20 cm の位置まで約 4

1 学生会員 防衛大学校理工学研究科博士前期課程
2 正 会 員 博(工) 防衛大学校助教システム工学群建設環境工学科
3 正 会 員 工博 防衛大学校教授システム工学群建設環境工学科

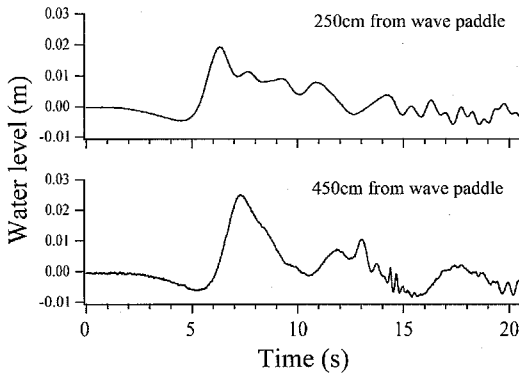


図-3 沖での水位の時刻歴

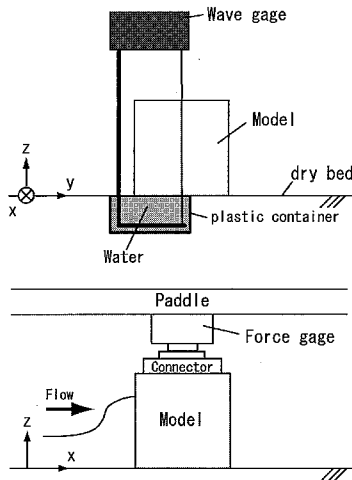


図-4 遡上水深と波力の計測方法

秒間前方に押す。そして造波開始から17秒後に中立位置に戻る。以上の過程で造波させた波は、陸側に向かって伝播する。

図-3は沖側での水位の時間変化であり、それぞれ計測地点は図-1中に示した位置に対応している。水平床での水位変化から(図-3上段)、造波させた波は引きから始まる1山の波となっており、ゼロアップクロスからダウンクロス間の時間は約7秒、波高は2.5cmである。その後、波は斜面部を伝播するにつれ、水位が増幅し、非線形効果によって波形の前傾化が生じる(図-3下段)。そして、浅海域では波は碎波し、波形前面が切り立った状態で護岸を越波する。

(3) 計測方法

本実験では建物群に作用する波力、陸上での浸水深、そして各建物模型の前面での浸水深の時刻歴を測定した。波力は3分力計(以下、力計)により、浸水深の測定には容量式波高計を用いた。陸域での力計と波高計の設置方法を図-4に示す。波高計については、床面にプラス

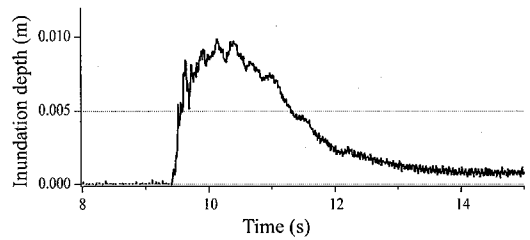


図-5 遡上水深の時刻歴(護岸から20cm)

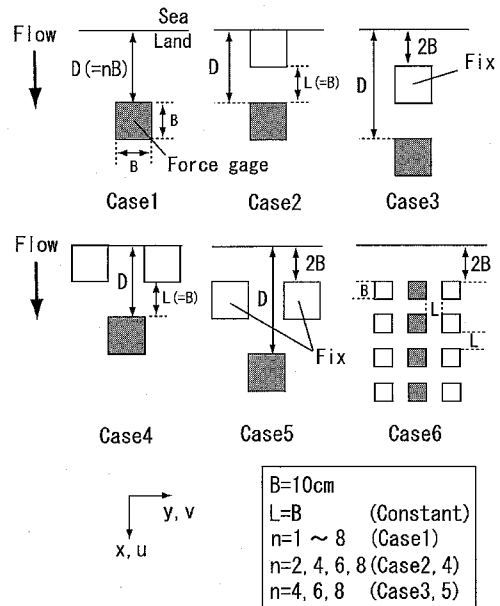


図-6 建物模型の配置と波力の計測位置

チック製の容器を護岸から10cm毎に8箇所埋め込み、波高計を設置した。水面を床面に一致させることで遡上時における床面からの水深が測定できる。これにより、建物前面での浸水深や構造物なしの状態での床面からの浸水深の計測を行った。計測結果の一例として、護岸から20cm陸側での遡上水深の時刻歴を図-5に示す。津波の先端が到達してから最大遡上水深(1cm)になるまでの時間は約0.7秒であり、その後、水深は緩やかに減少してゆく。一方、力計は発泡スチロール製の建物模型をアルミニウム製の繋ぎ手で力計の測定部に接続した(図-4)。

サンプリング間隔は力計では1/100(s)、波高計は1/200(s)とした。1ケースごとに3回ずつ行い、その平均値を用いた。本実験は非定常性が強い流れであるため、波力・遡上水深ともに測定値にばらつきがあるが、各ケースとも平均値から約5%の誤差の範囲内に収まっている。

(4) 建物群の配置パターン

建物が受ける波力は建物群の配置や護岸からの距離に

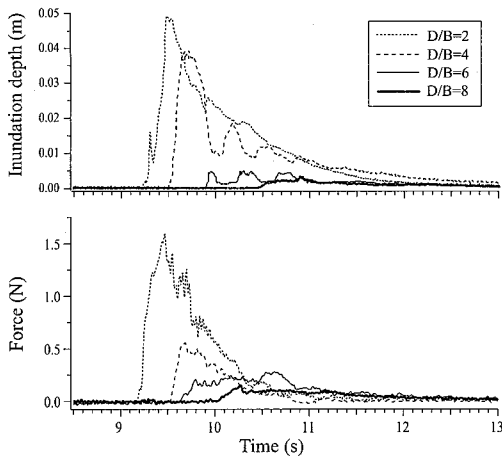


図-7 建物前面での浸水深と津波波力の時刻歴 (Case6)

大きく依存することが考えられる。建物群に作用する流体力に関する研究例としては福岡ら (1997) の実験があるが、既往の研究は洪水氾濫流を想定しており、流れ場を定常として扱っている。一方、本研究のように非定常性が強い津波を想定した検討例はない。

本研究では、陸域での建物模型の配置のパターンとして図-6 に示すような6 ケースを設定した。全てのケースについて、護岸からの距離を 10 ～ 80 cm の範囲で変化させている。Case1 は模型 1 つで周りに何もない場合である。Case2 と Case3 は津波来襲方向の前面側に建物模型がある場合であるが、Case2 では計測対象模型と護岸側の建物模型との間隔が一定であり、Case3 では護岸側の建物模型の位置を固定している。Case4 と Case5 は護岸側に建物模型があるが、斜めに配置され前面が開けている場合であり、両者の条件の違いは Case2, 3 の場合と同様である。そして、Case6 は建物群が密集した場合であり、中央の列の建物模型の波力を測定した。なお、本実験において力計は平面 2 方向の計測をしているが、建物群の配置が流れ方向 (x 方向) に関して対称であるため、y 方向の波力は x 方向に比べ十分に小さい。よって本研究で議論する波力は x 方向のみを考える。

以下の議論において Case2 ～ 5 において護岸に近い方の建物模型を「前列」、遠い方を「後列」と称し、Case6 のみ、護岸に近い方から遠い方へ「1 列目～4 列目」と称することにする。

3. 津波波力の減勢効果

図-7 に Case6 における建物前面での浸水深と津波波力の時刻歴を示す。津波波力の時刻歴を見ても明らかにように、1 列目の津波波力は 2 列目と比べて 3 倍以上の値を示しており、3 列目以降の波力はさらに小さくなる。

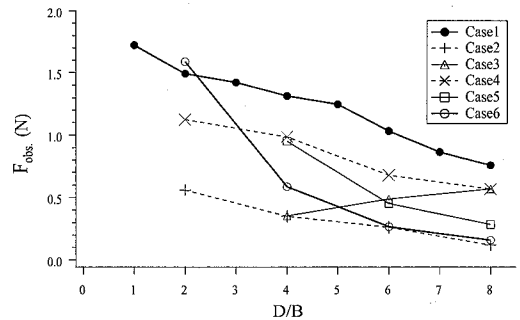


図-8 護岸からの距離と津波波力の最大値との関係

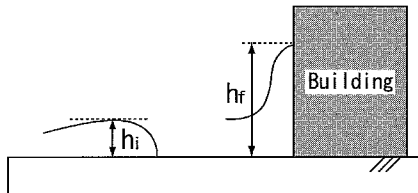
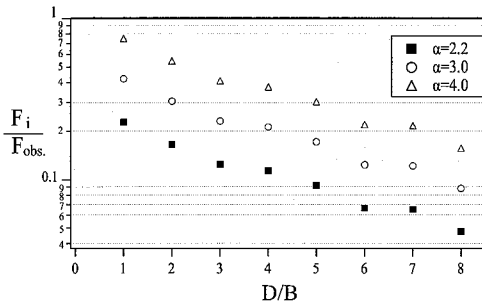
このことから、前列に建物があることで、背後の建物に働く津波波力は大きく減勢させることができる。

次に、各ケースにおける津波波力の減勢効果を調べるため、護岸からの距離を建物幅で正規化した値に対し、全ケースでの津波波力の最大値をプロットしたのが図-8 である。この図から、前列に建物がない場合、すなわち Case1 の波力が最も大きく、また、Case3 を除き護岸からの距離が大きくなるにつれて波力は小さくなっていることがわかる。ここで Case1 の $D/B=8$ の値と Case2 の $D/B=2$ の値を比較すると前者の方が大きく、また、Case4 の $D/B=2$ の値は Case1 の $D/B=6$ の値と同程度である。このことから、護岸からの距離よりも前列に建物が存在した方が、減勢効果には大きく影響することがわかる。

図-8 より、特に Case2 のように前列と後列の配置間隔が小さく、津波の進行方向の真正面にある場合、前列の建物が流れをせき止めるため背後の流速は小さくなり、津波波力は大幅に低減される。しかし、Case3 のように護岸から遠ざかるにつれて建物間隔が大きくなる場合、波力は逆に大きくなる。これは、前面の建物によりせき止められた流れは 2 方向に分かれて後方に流れてゆくが、遡上するにしたがいこれらの流れは中心部に集まり、背後の建物に到達するまでに流速が回復するためであると考えられる。

また Case4 と Case5 では、前列が斜め配置により開けているため、建物間の配置間隔が小さい Case4 は縮流効果によって波力が大きくなっている。一方、配置間隔が大きくなる Case5 では逆に波力は小さくなる。前列の建物間を通過した波が前列建物背後に集まることにより、Case5 の後列建物への接近流速が減少するためと考えられる。このことは Case3 の逆を意味しており、建物の配置の違いで働く波力の特性が異なってくるといえる。なお、今回は前面の開度とその背後の建物における波力の関係については調べておらず今後の課題である。

最後に Case6 では、周囲が建物に囲まれているもの

図-9 最大遡上水深 h_i と最大前面水深 h_f 図-10 護岸からの距離に対する h_i による Case1 の推定波力と測定波力の比較

の, Case2 よりも波力は大きい。これは, 側面方向での水深が大きくなるためであると考えられる。

以上から, 津波波力の減勢効果には護岸からの距離よりも津波の来襲方向における建物の有無に大きく影響することが確認でき, いずれの配置においても, 前列に建物が存在しない場合よりも津波波力が減勢することがわかった。このことは, 津波防災対策としての防浪ビル建設の有効性を示すものである。

4. 浸水深による津波波力の推定

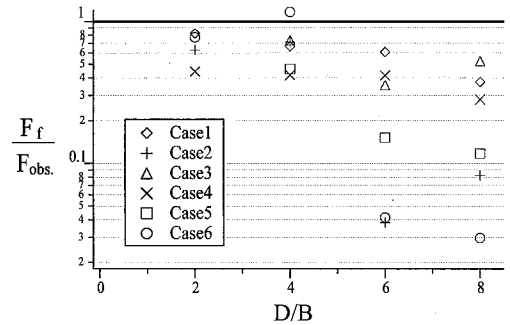
(1) 津波波力の算定式

実験によって得られた津波波力を陸上での浸水深から推定する。構造物に働く波力の評価については, 波圧の評価式として谷本ら (1984) や朝倉ら (2000) によって提案されている。朝倉らは, 護岸を越流して構造物に働く波圧分布は, 構造物が存在しない場合の遡上水深のみで評価することが可能であり, 遡上水深に基づく静水圧分布の相似形で表現できるとしている。すなわち,

$$p = \rho g \alpha h_i \dots \dots \dots (1)$$

と表される。ここで g は重力加速度, ρ は密度, h_i は図-9 で示すような建物が存在しない場合の陸上での最大遡上水深である。さらに係数 α については, 谷本らは 2.2 を, 朝倉らは 3.0 を提案している。

これより, 構造物にはたらく水平波力 F_i は直線分布の圧力を水深方向に積分して得られるので,

図-11 護岸からの距離に対する h_f による推定波力と測定波力の比較

$$F_i = \frac{\rho g}{2} (\alpha h_i)^2 B \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで, B は津波の進行横断方向の建物幅である。

また, 建物が存在する場合において前面水深の最大値を h_f とし (図-9), 同様に静水圧分布を仮定すると, 推定される水平波力 F_f は以下の式で表すことができる。

$$F_f = \frac{\rho g}{2} h_f^2 B \dots \dots \dots (3)$$

(2) 最大遡上水深 h_i による推定波力の評価

図-10 は護岸からの距離に対する, 最大遡上水深 h_i から求めた Case1 の推定波力と測定波力との比較である。図より, 全ての点において推定波力は測定波力よりも過小評価であり, 護岸からの距離が大きくなるにつれ, 測定波力との差が大きくなる。朝倉らの式 ($\alpha=3.0$) で最も護岸に近い $D/B=1$ の場合においても推定波力は実測波力の 4 割程度であり, $\alpha=4.0$ の場合でも, $D/B=8$ では実測波力の約 2 割である。

このように推定波力と測定波力の差が大きくなる要因として, 本実験のフルード数が考えられる。代表流速 u は, 各波高計を通過する時刻を遡上水深の時刻歴から求め, 波高計間の距離 (10 cm) から各区間での流速を算出し, 空間的に平均することで $u=1.026$ (m/s) となる。よって, フルード数は $F_r = u / (g h_i)^{0.5} = 3.5$ 程度となり, 静水圧よりも動圧が卓越した条件下にあることがわかる。

(3) 最大前面水深 h_f による推定波力の評価

建物の最大前面水深 h_f で全ケースの波力を推定し, 測定波力と比較したのが図-11 である。全体的に推定波力は過小評価であるが, 式 (2) による結果よりも比較的誤差は小さい。しかし, $D/B=6 \sim 8$ の範囲において Case2, 5, 6 の波力が計算できていない。この理由として, これらの波力を計算するには建物の前面水深のみでは不十分であることが挙げられる。例えば Case6 において, 図-7 での浸水深の時刻歴を見ると, 1・2 列目に

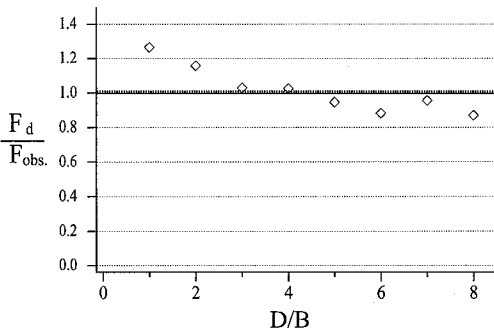


図-12 護岸からの距離に対する推定波力 F_d と Case1 での測定波力の比較

比べ3・4列目の前面水深が非常に小さくなっているため流れが到達していないように思われる。しかし、実際は前列で遮られた流れは後列の建物側面を沿って流れる。これは Case2 でもほぼ似た傾向を示す。

したがって、陸上構造物に働く津波波力を推定する際、周辺に建物がある場合は、一方向の前面水深のみから波力を推定するのは難しく、建物の側面や背後での浸水深、周辺近傍での流況（流速ベクトル）などを考慮する必要がある。

(4) 抗力係数と流速からの推定波力の評価

本実験のように、フルード数が大きい条件下では動圧が卓越しているため、従来の静水圧を仮定した提案式からの波力推定は難しい。そこで、水平波力 F_d を抗力係数 C_d と代表流速 u から以下のように仮定し、推定波力を求めた。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d B h_f u^2 \dots \dots \dots (4)$$

ここで抗力係数 C_d は測定波力から逆算し平均化した値であり、 $C_d = 3.223$ となる。式(4)によって求めた推定波力と Case1 における測定波力との比較を図-12 に示す。明らかに静水圧分布による従来の提案式よりも測定波力を表現することができている。よって、フルード数が大きい条件下で最前列の建物の波力を推定する場合は、抗力係数と流速から求めた方が精度が高いといえる。

5. おわりに

本研究では陸上の建物に作用する津波波力を計測することで、建物群の配置と護岸からの距離による津波波力の減勢効果について把握することを目的とし、平面水槽を用いて実験的研究を行った。その結果、以下の知見が

得られた。

- 1) 津波来襲方向の前面に建物が存在することで、背後の津波波力が低減されることが示された。津波波力の減勢効果は、護岸からの距離よりも前面での建物存在の有無の方が大きく影響する。
- 2) 建物間の配置間隔が小さい場合、前面の建物が流れをせき止めるため背後の流速は小さくなり、波力は低減される。間隔が大きい場合、背後の建物に到達するまでに流れが回復するため、波力は大きくなる。建物が存在しても、前面が開けている配置の場合は逆の傾向になる。建物群の配置の違いで、波力の特性が異なってくるといえる。
- 3) 最大前面水深 h_f による推定波力は $D/B = 2, 4$ の範囲で良好であるが、それよりも内陸での建物については一方向の前面水深のみから波力を推定するのは難しい。特に周辺に建物がある場合、建物の側面や背後での浸水深、周辺近傍での流況（流速ベクトル）などを考慮する必要がある。
- 4) 本実験のように、フルード数が大きい条件の場合は動圧が卓越しているため、従来の静水圧を仮定した提案式からの波力推定は難しく、最前列の建物の波力を推定する場合は、抗力係数と流速から求めた方が精度が高い。

参 考 文 献

- 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波力の大規模実験, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 746-750.
- 有川 太郎・大坪 大輔・中野 史文・下迫 健一郎・高橋 重雄・今村 文彦・松富 英夫 (2006): 遡上津波力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 796-800.
- 福岡 捷二・川島 幹雄・横山 洋・水口 雅教 (1997): 家屋群に作用する氾濫流の流体力に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 41 巻, pp. 693-698.
- 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.
- 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.
- Yeh, H. (2006): Maximum Fluid Force in the Tsunami Runup Zone, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean engineering, pp. 496-500.