

陸上構造物に作用する津波波圧の 時空間変動特性

SPATIO-TEMPORAL VARIATION OF TSUNAMI WAVE PRESSURE ACTING ON A LAND STRUCTURE

池谷毅¹・朝倉良介²・藤井直樹³・大森政則³・入谷剛⁴・柳沢賢⁵
Tsuyoshi IKEYA, Ryosuke ASAKURA, Naoki FUJII, Masanori OHMORI,
Takeshi IRIYA and Ken YANAGISAWA

¹フェロー会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

³正会員 東電設計株式会社 第二土木本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

⁴工修 東京電力株式会社原子力技術・品質安全部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

⁵正会員 工修 東京電力株式会社原子力技術・品質安全部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

To reduce the damage of structures caused by tsunamis, it is essential to know the characteristics of tsunami load. In the present study, a three dimensional hydraulic experiment was performed to investigate the spatio-temporal variation of the tsunami wave pressure acting on a land structure. The followings were found out.

- (1) Wave pressure can be regarded as the sum of the average component and the random component of pressure.
- (2) The spatial distribution of wave pressure for 3-D experiment case is similar to that of 2D case.
- (3) Wave pressure distribution depends on not only run-up depth but also water surface steepness.
- (4) Random component of tsunami wave pressure is impulsive.

Key Words : *Tsunami, wave pressure, land structure, spatio-temporal variation*

1. はじめに

津波による建築物や構造物の被害を低減するためには、作用外力の特性を明らかにすることが第一歩である。近年、津波荷重に関する研究^{1), 2), 3)}が活発になりつつある。これらの研究では、最大波圧分布や波力の評価方法が導かれている。しかしながら、構造物の安定性、部材の変形を評価する観点からみると、津波波圧の特性に関する知見は必ずしも十分ではない。従来、波圧計測点の最大値の空間分布が議論される場合が多く、部材に働く応力や変形に直接対応しておらず、波圧の時空間の変動特性、津波外力特性を把握することが求められる。

そこで、本研究では、護岸の背後にある直方体構造物に作用する津波波圧を例に、津波波圧の時空間変動特性を水理実験による詳細な計測データにより明らかにして、構造物の安全性を評価するための合理的な荷重の評価方法について考察する。

2. 水理実験

水理実験は、鹿島技術研究所の大型水路（幅2m、長さ62m、深さ2m）の中に、一様斜面の海底地形、護岸、陸上地形の模型を設置し（図-1参照）、水路に付属するピストン型造波装置により、表-1に示す6種類の長周期波を発生させ行った。津波の変形・遡上実験、波圧特性実験の2種類の実験を実施した。一様斜面の勾配は、1/200、1/100の2通りに変化させている。また、ピストン型造波装置と水路側壁、底版との間の隙間は、しゅう動可能な止水板により止水されている。

(1) 津波の変形・遡上実験

変形・遡上実験では、図-1に示す海上、陸上の地点における水位変動を容量式波高計により計測し入射波特性を把握した。

表-1 実験波一覧表

実験波番号	波の種類	周期(s)	一様水深部波高 (cm)
wave1	孤立波	—	7.1
wave 2		—	9.6
wave 3		—	14.9
wave 4	正弦波初動押し	30	2.5
wave 5		30	3.8
wave 6	正弦波初動引き	30	5.4

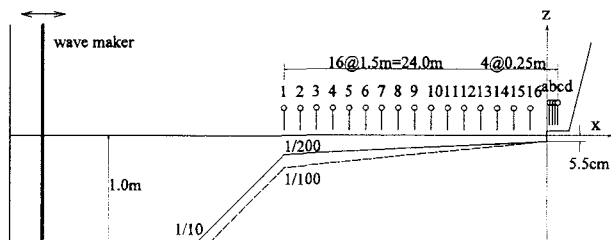


図-1 水理実験のセットアップ

(2) 波圧特性実験

波圧特性実験は、図-2示すように、護岸背後の陸上部に設置した直方体構造物に作用する波圧、波力を同時に計測する3次元実験である。波力の計測には、水中6分力計を、波圧の計測には、セラミックコンデンサー型波圧計(φ10mm)を用いた。図-3に示すように、分力計は、構造物模型の下部に設置し、治具などが波力に影響を及ぼさないよう考慮した。また、構造物沖側壁に作用する波圧の計測位置は、構造物基礎周辺の横断分布、構造物中心での鉛直分布を計測できるように、図-3に示す逆T字型に配した15点とした。波圧データの収集は、衝撃的な荷重の発生を考え1,000Hzとした。また、実験のばらつきを把握するため、実験は同一条件で3回繰り返した。さらに、海底面勾配1/200の場合には、構造物の護岸からの距離を、0.25m、0.5m、0.75m、1.0mの4通りに変化した。

なお、地盤模型と構造物模型との間には2mmほどの隙間があいているため、構造物に作用する波圧が接地している場合に比べて小さくなる可能性がある。そこで、構造物を接地させた場合と2mm程度の隙間を空けた状態で波圧を計測し、隙間が水平波圧に与える影響は十分に小さいことを、別途確認している。

3. 津波の変形特性

波圧の評価に大きく関係すると考えられる波高および波面の傾斜角の変化、および、ソリトン分裂の有無、碎波の有無を調べた。また、構造物設置位置における波形データから、入射時の最大水深および波面傾斜を求め、波圧を評価する上での入射波条件とした。

(1) 海域部の特性

典型的な海域部での水位変動のデータとして、底面勾

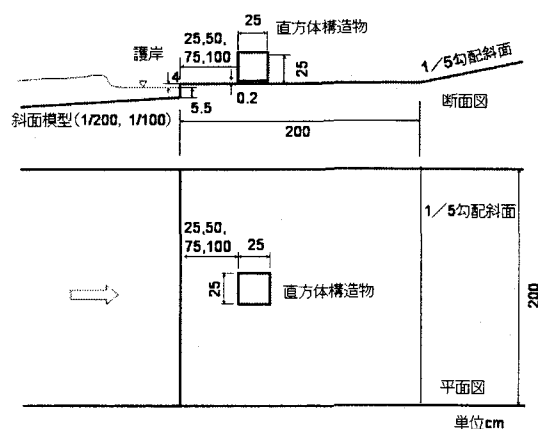


図-2 直方体構造物の設置位置

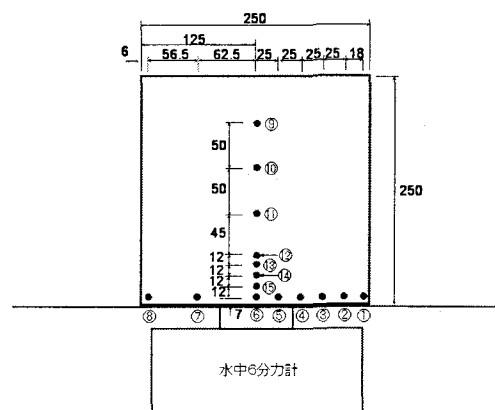


図-3 分力計と波圧の計測位置

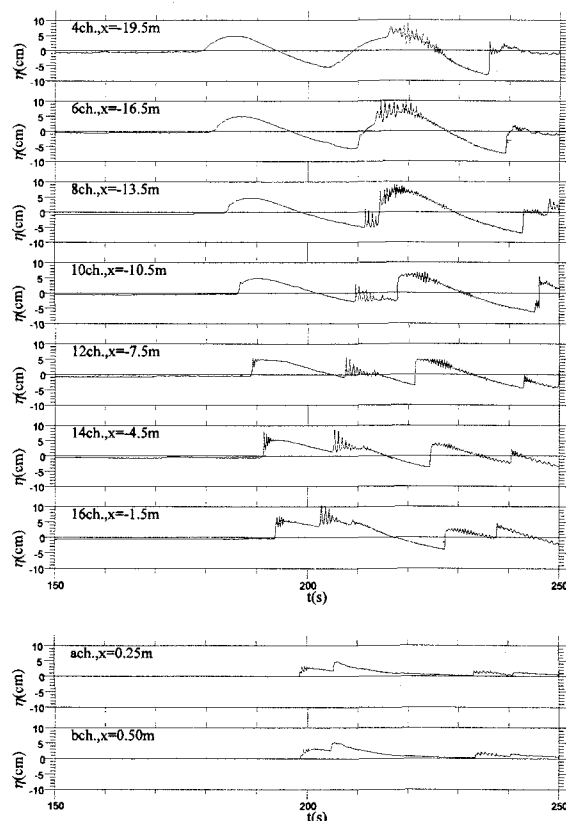
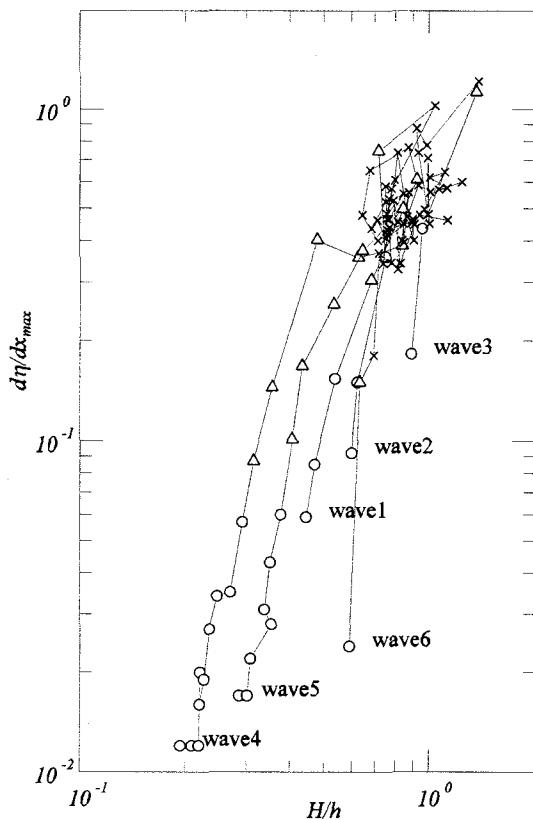
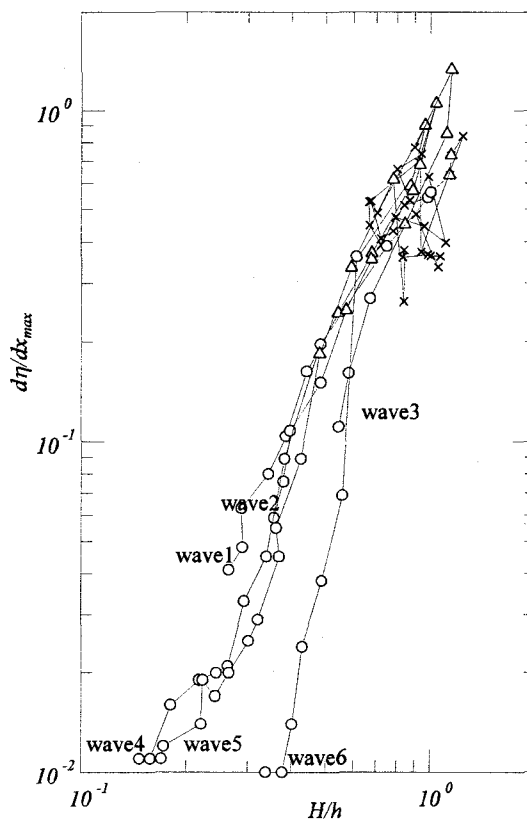


図-4 計測された水位変動の例
(実験波wave5, 勾配1/200)



a) 海底勾配1/200



b) 海底勾配1/100

図-5 波高水深比および波面勾配による津波形態の分類

配1/200, 実験波wave5 (初動押し波, 周期30s, 波高3.8cm) の場合の海域部, 陸上部の代表点における水位変動を図-4に示す. この図から, 水深が減少するに従い, 波面勾配が増大し, さらにソリトン分裂が発生すること, 護岸からの反射波は, 波峰の分裂を発生させながら, 沖合向きに進行することが明瞭に示されている.

ここでは, 波浪の変形の特性を表現するために, 各点で計測された波形データから, 第1波の波高 (最大水位-最低水位) と水深の比 (H/h), および, 第1波の波面の最大勾配 ($\partial\eta/\partial x_{\max}$) を求め, これらをパラメータとして, 波形の特徴を分類することを試みた. なお, 波面最大勾配については, 水位の上昇速度の最大値 ($\partial\eta/\partial t_{\max}$) から, 次式で計算した.

$$\frac{\partial\eta}{\partial x_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{gh}} \frac{\partial\eta}{\partial t_{\max}} \quad (1)$$

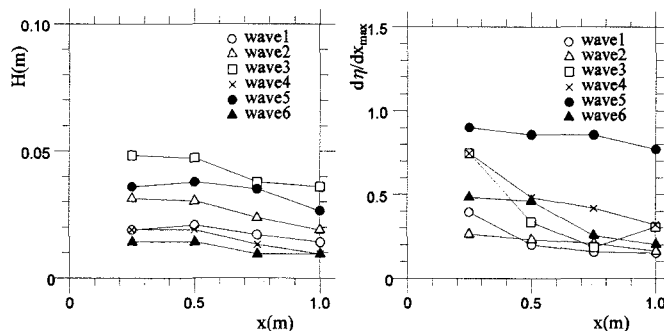
図-5に海底面勾配1/200の場合, および, 1/100の場合の形態分類図を示す. 波の形態の種類としては, 非碎波非分裂 (○), 非碎波分裂 (△), 碎波 (×) を考えた.

この図をみると, 一様勾配斜面を岸向きに進行するのに伴い, 津波の第1波は, 波高水深比, 波面最大勾配とも碎波が発生するまで増大し, 碎波が発生すると漸減し, 波高水深比で1.0程度, 波面最大勾配で0.3程度の値となる. 碎波が発生する条件は, 長波の場合は, 海底勾配と波高水深比により規定されると考えられるが, 波面最

大勾配が0.6程度を超えると碎波するとしてもよさそうである. また, ソリトン分裂する条件も同様に, 波面最大勾配が0.1程度を超えるとソリトン分裂が発生する.

(2) 陸上部の津波の変形特性

陸上部に遡上した津波については, 波高 (= 遡上水深 = 最大水位 - 地盤高) と波面勾配の護岸からの距離に応じた変化特性を調べた. 図-6に結果を示す. これをみると, 遡上水深は, 護岸から離れるにつれて殆ど変化しないのに対して, 最大波面勾配は, 護岸直後で大きな値をとり, 進行に伴い減少し, wave5を除き1m程度進行すると0.2~0.3の値に落ち着くことがわかる. wave5は, 最大波面勾配が大きく, 進行に伴い変化しない. これは, 図-4にみられるように, wave5の遡上波が短い波峰に強く分裂していることが原因と思われる.



a) 遡上水深

b) 最大波面勾配

図-6 陸上部の遡上水深および最大波面勾配の変化

4. 津波波圧の時空間特性

(1) 津波波圧の平均成分と乱れ成分

計測された波圧の時系列の例を同一条件で繰り返した3回それぞれについて図-7に示す。これをみると波圧の時系列は、毎回ほぼ同一の波形を示す波圧成分と毎回発生が異なる衝撃的な変動成分にわけて考えることができる。ここでは、乱流理論に習い、前者を平均成分、後者を乱れ成分と呼び、それぞれ、 p_a 、 p_r と書く。この記号を用いれば、構造物の表面に作用する圧力は、

$$p(x, y, z, t) = p_a(x, y, z, t) + p_r(x, y, z, t) \quad (2)$$

と書ける。乱れを定義する方法としては、アンサンブル平均をとるのが理想的であるが、実験を多数繰り返さなくてはならないので、現実的ではない。そこで、ここで

は周波数フィルターを用いて、平均成分と乱れ成分を分離することにした。周波数フィルターとしては、以下の関数形のものを用いた。

$$G(f) = \begin{cases} 1 & f < f_l \\ 1 - (f - f_l)/(f_h - f_l) & f_l \leq f < f_u \\ 0 & f_u \leq f \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 f_l 、 f_u は、それぞれ、下限周波数、上限周波数である。下限周波数、上限周波数の値は、系統的に変化させて圧力の変動偏差を計算し、有意に変化しない周波数として、 $f_l = 50\text{Hz}$ 、 $f_u = 60\text{Hz}$ を用いている（図-8参照）。

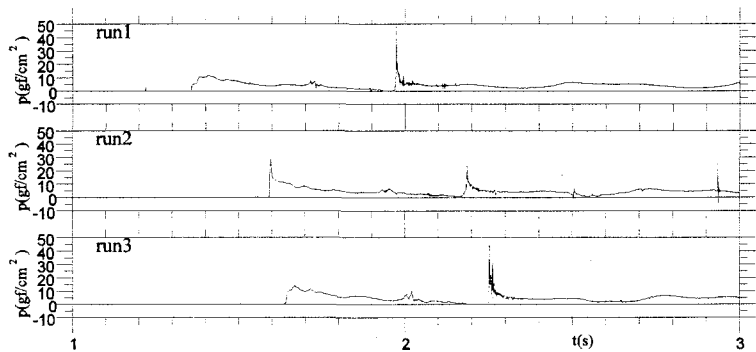


図-7 波圧データのばらつき

(津波条件wave5, 海底勾配1/200, d=50cm, 波圧計測点④)

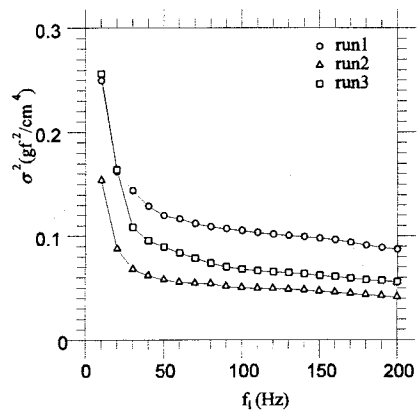
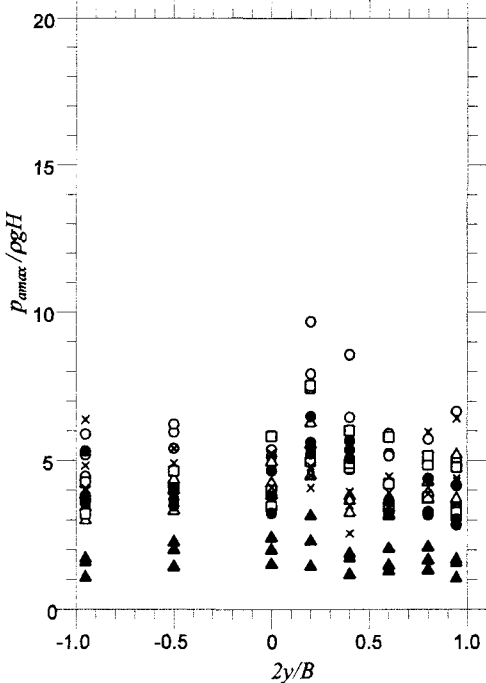
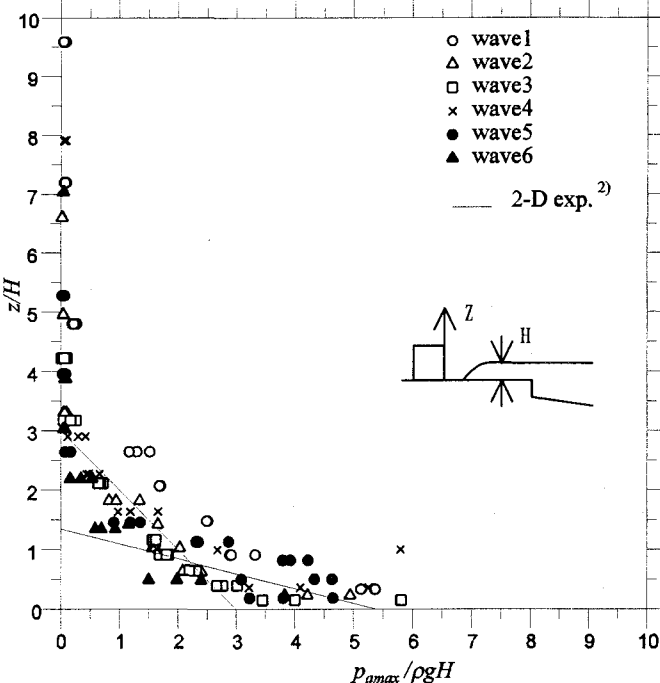


図-8 周波数フィルターの周波数の決定
(津波条件wave5, 海底勾配1/200, d=50cm, 波圧計測点④)



(a) 水平分布



(b) 鉛直分布

図-9 波圧の平均成分の最大値の分布 (海底勾配1/200, d=0.5m)

(2) 波圧の平均成分の時空間特性

各点における波圧の平均成分の最大値の空間分布を図-9に示す。まず、波圧の水平分布についてみると、各実験ケースで、中央がやや大きくなる傾向があるが、おおむね一様な分布をしていることがわかる。次に、鉛直方向の分布については、地盤面近傍で波圧が大きく、上方に行くにつれて小さな分布となる。図中に、従来の2次元実験²⁾の平均的傾向を示しているが、最大波圧の鉛直分布について、概ね傾向を表示している。ただし、細かくみると、波条件wave3, 4, 5に対しては、地盤面近傍の波圧が2次元実験に比べて大きくなっている。

次に、波力最大時の波圧（平均成分+乱れ成分）の分布を図-10に示す。鉛直分布は、図-9に示す平均成分の最大値の分布を若干小さくした形となる。すなわち、波

圧がおおきくなる時間と最大波力となる時間は異なり、乱れ成分は、最大波力には大きな影響を持たないことを意味する。構造物を設計観点からすると、構造物全体の安定性を評価する上では、波力最大時の分布を用いることが必要と思われる。

最後に、構造物と護岸の距離（ d ）が変化した場合の波圧分布を図-11から図-13に示す。図-9, 11, 12, 13を比較すると、護岸からの距離が0.5mを超えると波圧分布は概ね似たものになるが、距離0.25mの場合は、底面近傍の波圧が特に大きくなることからわかる。図-6に示したように、波面の最大勾配が砕波や分裂の影響により護岸近傍で特に大きくなるため、波圧の発生機構として着水力を考えれば、波面の傾斜が大きいほど作用波力が大きくなることが予想され、実験での傾向と一致する。

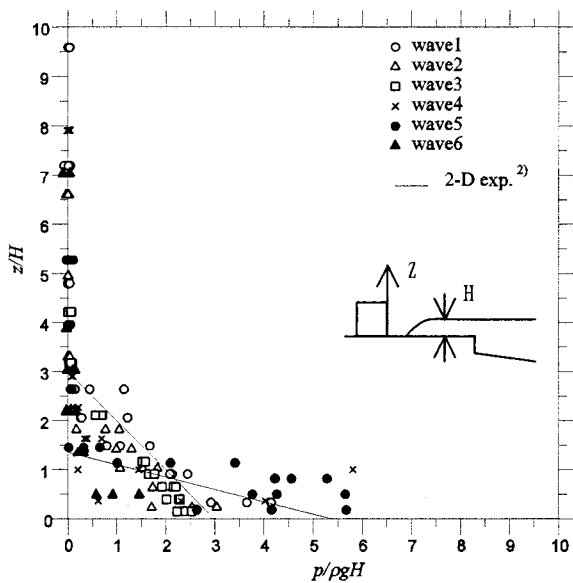


図-10 波力最大時の波圧の鉛直分布
($d=0.5\text{m}$, 海底勾配1/200)

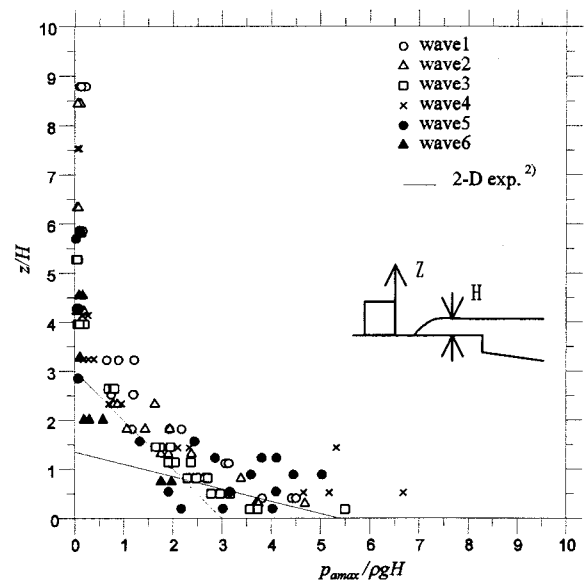


図-12 平均成分の最大値の分布
($d=0.75\text{m}$, 海底勾配1/200)

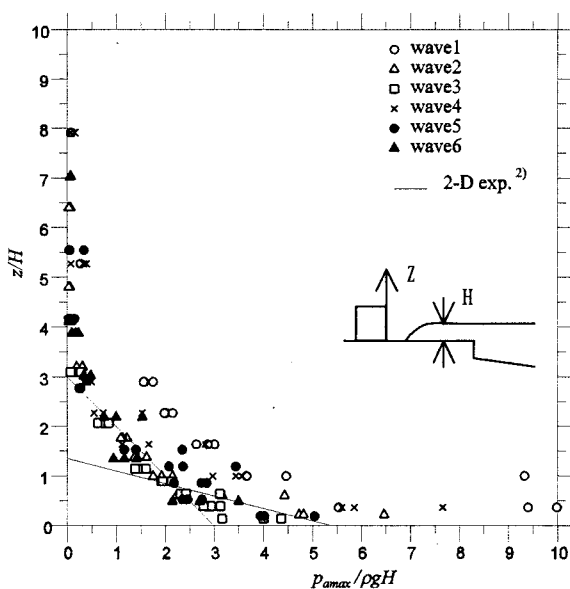


図-11 平均成分の最大値の分布
($d=0.25\text{m}$, 海底勾配1/200)

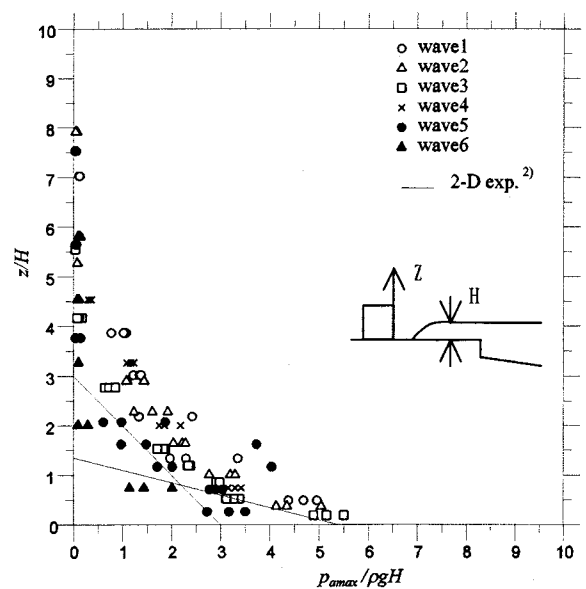
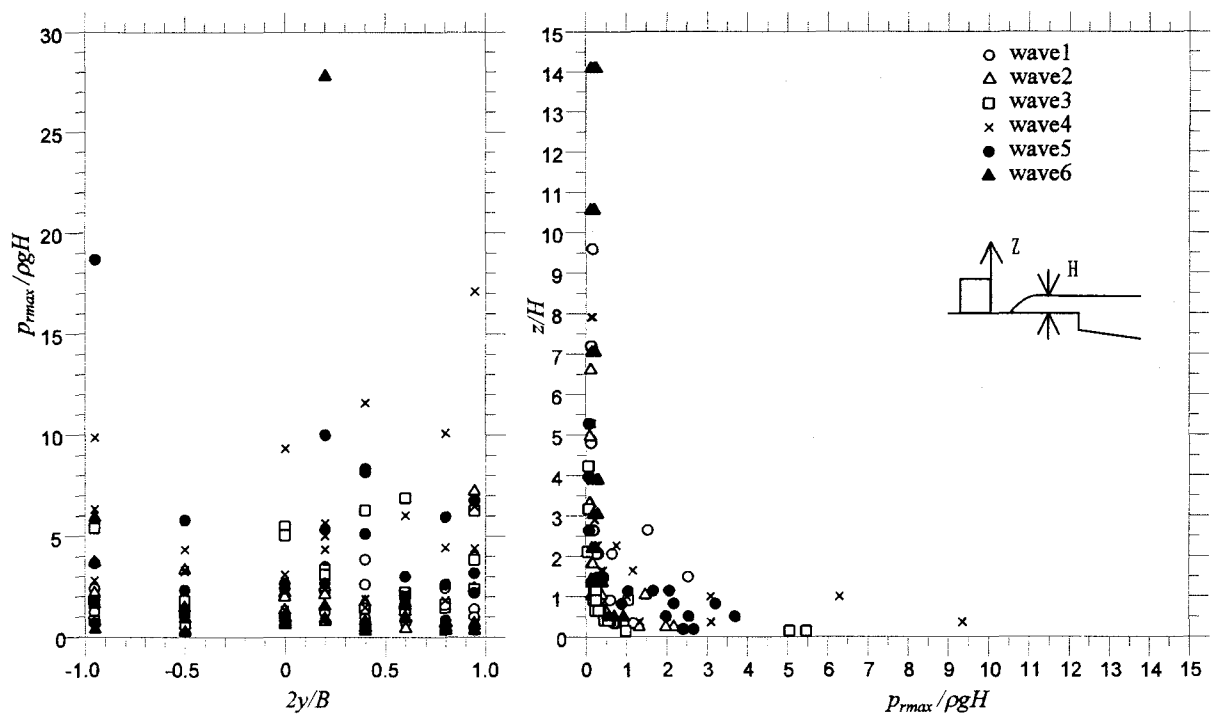


図-13 平均成分の最大値の分布
($d=1.00\text{m}$, 海底勾配1/200)



(a) 水平分布

(b) 鉛直分布

図-14 波圧の乱れ成分の分布 ($d=0.5m$, 海底勾配1/200)

(3) 波圧の乱れ成分の空間変動特性

波圧の乱れ成分の最大値の空間分布を図-14に示す。水平分布をみると、ばらつきが大きくなっており、乱れ成分の発生が空間的にランダムに発生していることを示唆している。鉛直分布をみると平均波圧の分布と大変良く似ているが、特に底面近傍で大きくなっている。波圧の平均成分が大きい場所で、乱れ成分も大きいことがわかる。また、乱れ成分の絶対値は、平均成分と同等の値となっている。

図-7をみても分かるとおり、乱れ成分の最大値が発生する時間もランダムになっており、乱れ成分は、広範囲にわたり同時に発生することはない、今回の実験の結果からは、空間的な不規則性をもって発生している。さらに、乱れ成分の継続時間は0.02秒以下と短いことから、構造物全体の安定性の評価には、波圧の乱れ成分は大きな影響を及ぼさないとと思われる。しかし、部材の設計においては、平均成分のみではなく、乱れ成分の発生をも不規則な衝撃力として考慮に入れて、構造物応答解析をして変形、応力を評価することが重要と思われる。

5. おわりに

護岸の背後にある直方体構造物に作用する津波波力について、水理実験を行い以下の知見を得た。

(1) 構造物に作用する波圧は、平均成分と乱れ成分とに分離して評価することができる。

(2) 護岸背後の直方体構造物に作用する波圧分布をみると2次元実験の結果と類似しているが、遡上波がソリトン分裂している場合や、孤立波が護岸前面で碎波する場合には波圧強度は大きくなる。

(3) 波圧の乱れ成分は、ソリトン分列波に対して地盤面近傍で大きくなる。しかし、乱れ成分の発生は、時間的、空間的に不規則であり、不規則な衝撃力として取り扱うのが合理的と思われる。

謝辞：本論文を取りまとめるにあたり、東北大学大学院今村文彦教授、電力中央研究所池野正明博士から、大変有益な議論をいただきました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 漆山仁・阪東浩造・池谷毅：構造物に作用する津波波力について，土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集No.23, pp.210-211.
- 2) 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，海工論文集，第47巻，pp. 911-915.
- 3) 大森政則・藤井直樹・京谷修・高尾誠・金戸俊道・池谷毅(2000)：直立護岸を越流した津波の水位点流速及び波力の数値計算：海工論文集，第47巻，pp. 376-380.