

構造物の平面配置が沿岸部での 津波挙動に与える影響について

EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF SHAPE OF SHORE PROTECTION ON TSUNAMI BEHAVIOR

小竹康夫¹・荒木進歩²・松村章子³

Yasuo KOTAKE, Susumu ARAKI and Akiko MATSUMURA

¹正会員 博(工) 東洋建設株式会社 主任研究員 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

²正会員 博(工) 大阪大学 准教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

³東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

The behavior of tsunami near the coast is similar to that of flow rather than high waves such as typhoons. Therefore, the stability and hydraulic functions against tsunami of coastal and harbor structures have to be investigated because several kinds of coastal and harbor structures are designed only for high waves. In this study, hydraulic experiments in a wave basin are conducted to investigate the influence of the configurations of the structures on the tsunami height. In the experiments, the time series of water surface elevation, water particle velocity and wave pressure acting on the structures are measured. The authors show that (1) the distribution of tsunami height along the coast is not corresponding to that of the water surface elevation. (2) Rapid increase in flow velocity is measured at an area where the configuration of the structures is complicated. The results obtained in this experiment are useful for verifying numerical models.

Key Words : *Wave basin experiment, tsunami height, water surface elevation, wave pressure, water particle velocity*

1. はじめに

津波は水位変動を伴う非常に周期の長い流れとして沿岸部に到達するため、護岸などの構造物周辺での挙動が台風などの高波浪と大きく異なることが従来から指摘されている。例えば島田ら¹⁾は、1946年南海道地震津波波を用いた、大阪湾沿岸部の埋立地などを対象とする数値計算を行い、局所的に津波波高や流速が増大する危険性を指摘している。そのため高波浪を対象に設計された構造物では、津波に対する安定性や機能を定量的に評価しておく必要がある。その手法の一つとして、大規模水路実験による波力測定など実施されており、例えば加藤ら²⁾は、斜面上での遡上波の影響を受ける海岸堤防に作用する波圧が、波高の4倍程度になり得ることを示している。また池野ら³⁾は、ソリトン分裂やそれに伴う砕波などを考慮した詳細な検討から、分裂波が砕波直前あるいは砕波点で構造物に衝突する場合、津波本体による重複波圧の1.2倍程度の波圧が作用することを指摘している。ただし平面実験は、津波を対象とした場合に、縮尺や境界の影響を受けやすく、実施例が少ない。そこで、数値解析と既往津波の調査結果を総合評価する手法が用いられており、

高橋ら⁴⁾は、1960年チリ津波の気仙沼湾での挙動を航空写真と数値解析から検討し、津波被害に対する流速の重要性を指摘している。最近では波浪観測網を駆使した実測波形による数値解析の検証なども可能となりつつあるが、いくつか課題も見られる。

そこで本研究では、構造物周辺での津波の挙動を把握するとともに、数値解析の検証データを得ることを目的として、平面水槽に1/100スケールの埋立地模型を設置し、造波板により擬似津波を発生させることによって、堤前での水位変動、波圧および流況を測定した。

2. 平面水槽での津波造波実験

(1) 実験概要

実験には幅19m×長さ30mの平面水槽を用い、幅50cm、最大ストローク60cmの造波板30枚から構成される波造装置により、縮尺1/100を想定した埋立地模型に擬似津波を作用させた。擬似津波の造波は、出口ら⁵⁾と同様に、30枚の造波板を同時に中立位置から冲向きにゆっくり引き込み、瞬時に岸向きに押し出すことで、段波状の津波を発生させる

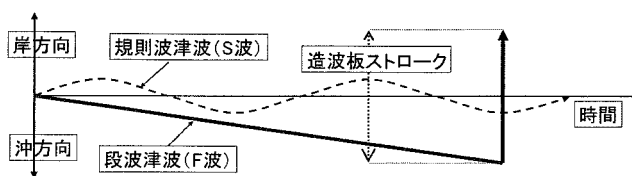


図-1 擬似津波造波時の造波板の動き

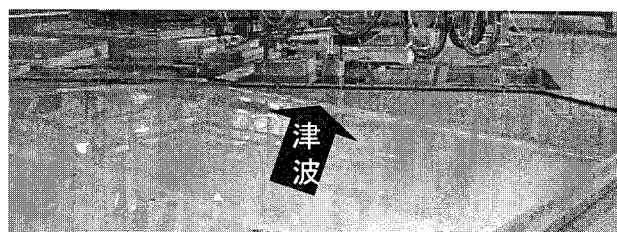


図-3 擬似津波の作用状況

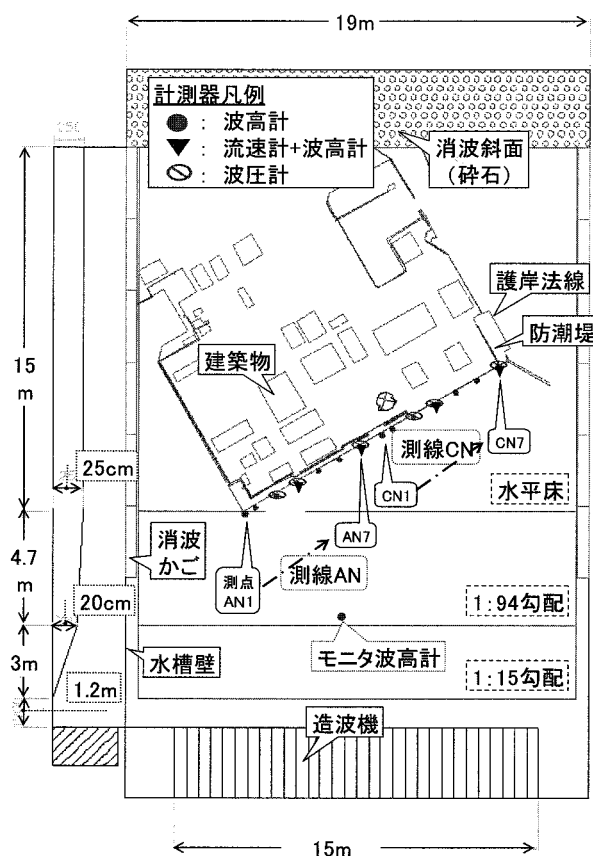


図-2 模型および計測機材の配置

方法 (F 波) と周期 20 秒の規則波 (S 波) を用いた。擬似津波造波時の造波板軌道の概念図を図-1 に示す。F 波、S 波ともに、関数発生装置から出力される電圧信号により造波板を駆動し、造波板のストロークは、入力する電圧に比例する。

埋立地模型は水平床上に護岸法線を津波の進入方向に対して 30 度に設置し、その沖側に 1/94 勾配と 1/15 勾配の斜面を設けた。測定項目は、護岸前面での水位変動、流速および護岸法面に作用する波圧とし、計測器を図-2 に示す位置に配置した。実験水深は、護岸前面で 8.5 cm とし、護岸の天端高さは静水面から 1.0 cm、護岸上に設置された防潮堤の天端高さは静水面から 3.6 cm とした。流速の測定には電磁流速計を用いたが、引き波時に検出部が干出することを避けるため、底面上 1 cm の位置に取付けた。また波圧の測定は、静水面上の防潮堤法面 (Pu)、護岸法面の静水面下 (Pm) および底面近傍 (PI) の同一鉛直線上の 3 点に取付けた波圧計により行った。実験での擬似津波の作用状況を図-3 に示す。

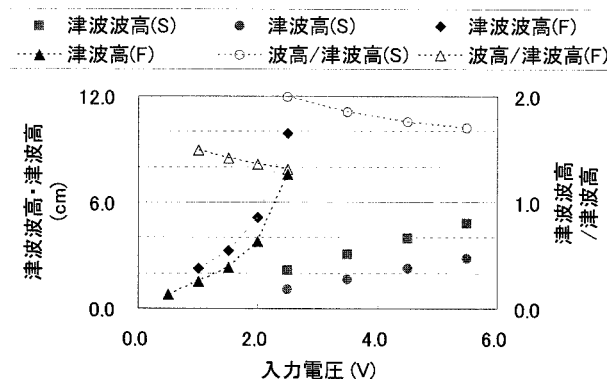


図-4 造波装置入力電圧と津波波高・波高の関係

(2) 波浪検定

モニタ用の波高計を 1/94 斜面上の水深 10 cm 部に設置し、繰返し実験における擬似津波諸元の再現性確認に用いた。造波装置に入力した電圧とモニタ波高計で測定した津波波高 (H_m) および津波高について、模型を設置しない状態で検定した結果を図-4 に示す。図の横軸は入力電圧で、縦軸は左軸が津波波高あるいは津波高、右軸が津波波高と津波高の比率を示す。凡例では F 波と S 波を各々 F, S で表示しており、以下の図でも同様の表記とする。ここで、津波波高は、最高水位と最低水位の水位差、津波高は静水位からの水位上昇量で定義した。

この図に示す通り、F 波は S 波に比べて小さな入力電圧で大きな津波を発生することが可能である。津波波高と津波高の関係では、S 波の場合、波高が小さい場合には、津波波高が津波高の約 1/2 となるが、波高が増大するにつれて峰が高く谷の浅い水面形状に遷移していく様子が分かる。一方 F 波では、今回の設定ではすべての条件で峰が高く谷の浅い段波状の水面形状となっている。

なお最大入力電圧は、F 波では駆動モーターへの負荷を考慮して 2.5V、S 波では造波装置の受容最大電圧を考慮して 5.5V に設定した。最大電圧入力時の波の状態は、F 波の場合、モニタ波高計岸側の斜面上で碎波、S 波は非碎波である。

3. 実験結果

(1) 水位変動特性

図-5 は、護岸前面で測定した水位変動の一例と

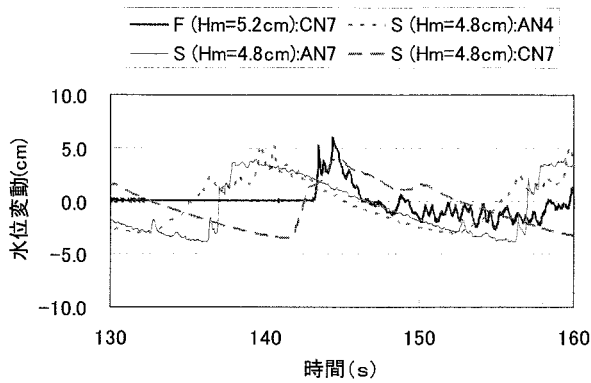


図-5 水位変動例

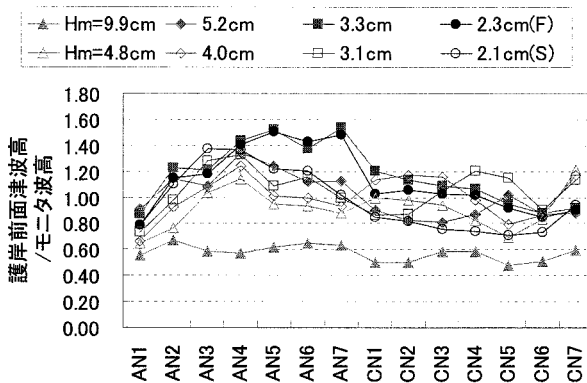


図-6 モニタ位置に対する護岸前面での津波波高増幅率

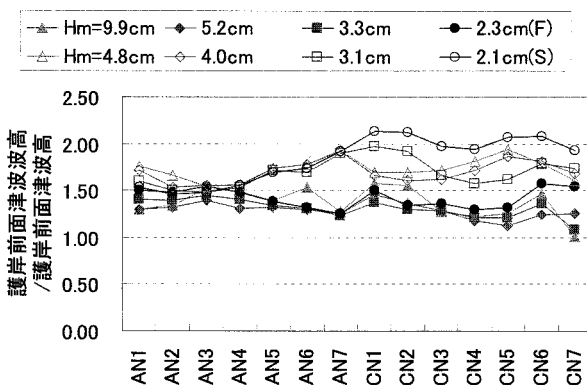
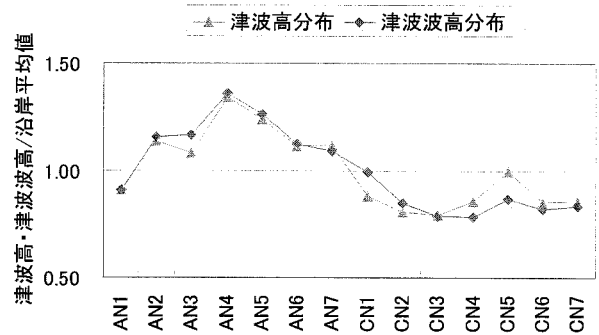


図-7 護岸前面での津波波高/津波高の分布

して、F 波は $H_m=5.2\text{cm}$ で、津波進行方向奥側の測点 CN7、S 波は $H_m=4.8\text{cm}$ で、手前から測点 AN4→AN7→CN7 の 3 点について示したものである。これらの測点では、護岸からの反射の影響が含まれるが、モニタ波高計での通過波検定時と同様の傾向として、F 波は急激な水位上昇を伴い、水位上昇の継続時間が短い段波状であるのに対し、S 波は継続時間が相対的に長く、緩やかな水位変動を伴う波形を有することが確認できる。

また、S 波の測点 AN7 と CN7 では、水位上昇量として定義される津波波高では CN7 が大きい、水位差として定義される津波波高では、逆に AN7 が大きい。そこで次に、護岸前面での津波波高あるいは津波高の分布について整理した。

津波高・津波波高分布(F5: $H_m=5.2\text{cm}$)



津波高・津波波高分布(Sin20: $H_m=4.8\text{cm}$)

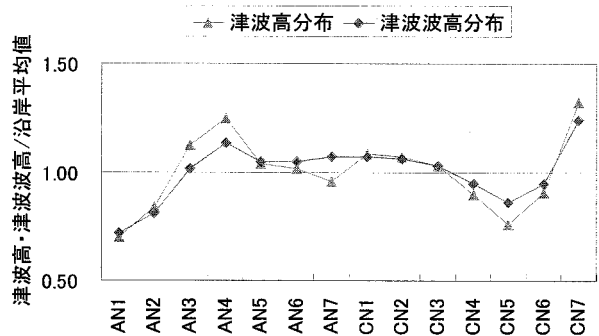


図-8 護岸前面での津波波高および津波高の分布

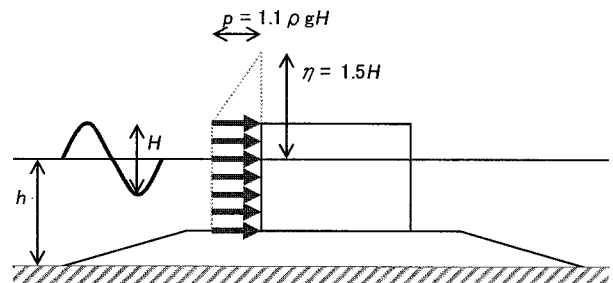


図-9 従来の設計法による津波波圧分布

まず図-6 は、モニタ位置に対する護岸前面での津波高の増幅率を示したもので、横軸は測点、縦軸は増幅率である。凡例ではモニタ位置での津波波高を示しており、中黒の記号は F 波、白抜きの記号は S 波を表す。F 波で $H_m=9.9\text{cm}$ の増幅率が小さいのは、護岸到達前に碎波しているためである。その他の波浪については、模型端部の測点 AN1 に到達した津波が、護岸に沿って測点 CN7 方向に伝播する過程で、一旦波高が増大し、碎波の後に減少する傾向があることが分かる。また、測点 CN7 で波高が再び増加傾向を示すのは、埋立地模型から突き出した突堤の影響と考えられる。

次に図-7 では、護岸前面での津波波高と津波高の関係を示す。模型端部到達から図-6 に示す増幅率が最大となる直前までは、多少のばらつきはあるが、津波波高は津波高の約 1.5 倍の値を示す。その後は F 波と S 波で傾向が異なり、F 波では、1～1.5 倍の範囲で伝播するのに対し、S 波では、約 2 倍と

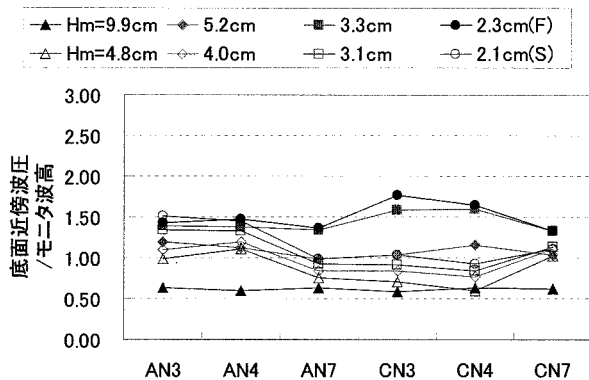
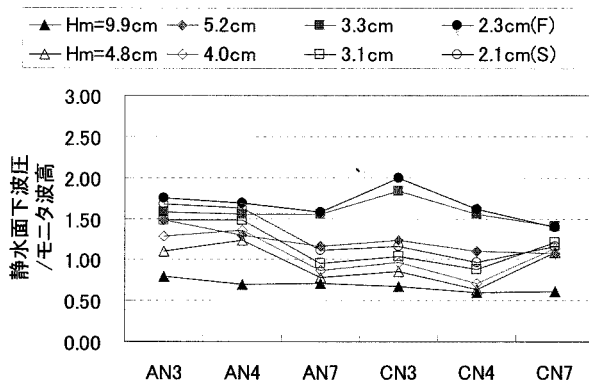
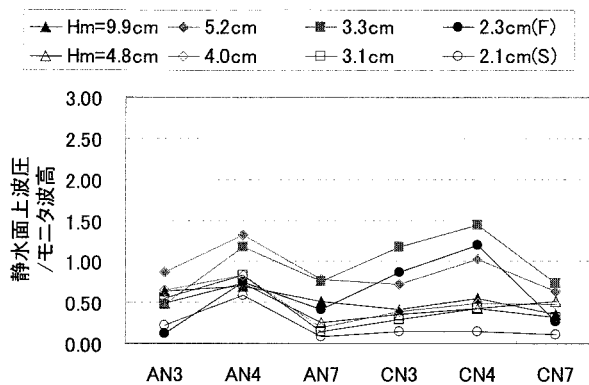


図-10 高さ別の波圧の沿岸分布
(モニタ波高による無次元化)

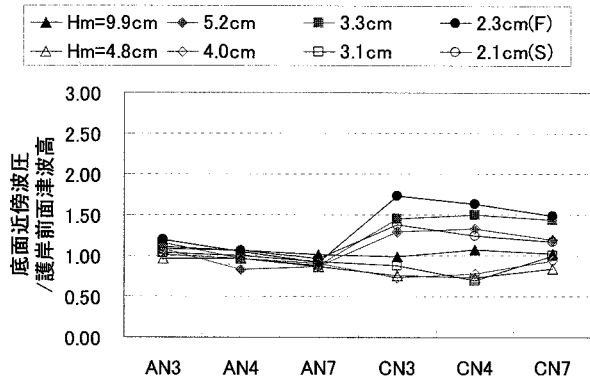
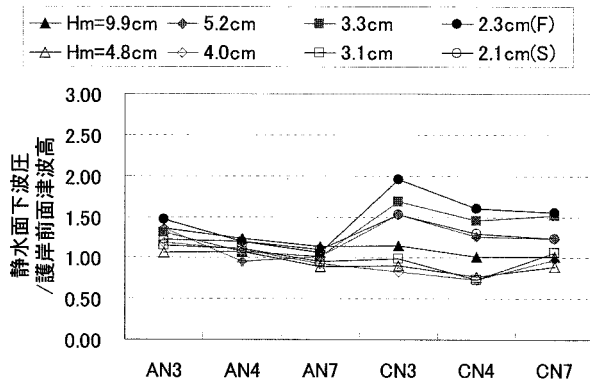
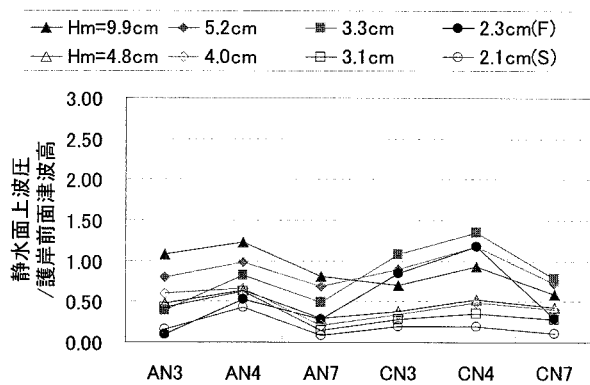


図-11 高さ別の波圧の沿岸分布
(護岸前面津波高による無次元化)

なっている。これより、波形の違いが津波波高と津波高の関係に影響することがわかる。

また図-8 は、図-5 で例示した津波波高と津波高の場所による逆転について確認するため、各測点での津波波高あるいは津波高を、各々、沿岸全測点の津波波高、津波高平均値で無次元化し、護岸法線方向の分布を示したものである。上が F 波、下が S 波の場合である。F 波、S 波ともに、津波波高分布と津波高分布の曲線が交差しており、局所的に大小関係が逆転する場合もあるが、両者の分布傾向は概ね一致している。

(2) 波圧特性

護岸など構造物の設計に際して、従来の手法では、構造物に作用する波圧分布を図-9 に示すモデル化により仮定してきた³⁾。すなわち、静水面より下は津波波高 H の 1.1 倍に相当する水圧が鉛直方向に一

様に分布し、静水面上は波高の 1.5 倍の高さで水圧がゼロとなる分布を仮定する。ここで津波波高とは、進入波の波高であり、護岸部では重複波となって水位が増大することから、護岸部での水位上昇量すなわち津波高か、護岸部での津波波高の 1/2 として設定される。そこで、実験で測定された各条件における波圧の最大値を、モニタ波高、護岸前面で測定された津波高および津波波高の 1/2 で無次元化した結果を図-10～図-12 に示す。各図ともに上段は防潮堤に設置した静水面上の波圧 (P_u)、中段は静水面下に設置した護岸前面波圧 (P_m)、下段は底面近傍の波圧 (P_l) である。

まず図-10 は、水深 10cm (想定現地換算 10m) 位置に設置したモニタ波高で無次元化した結果である。F 波の $H_m=9.9\text{cm}$ は砕波後の波であるため、非砕波で最大の F 波 $H_m=5.2\text{cm}$ と S 波 $H_m=4.8\text{cm}$ に着目すると、静水面下の 2 点では概ね分布傾向が一致してお

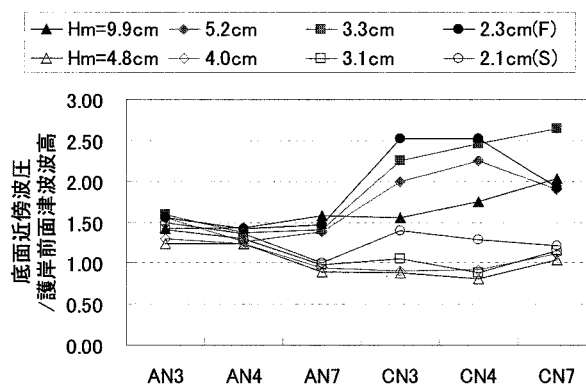
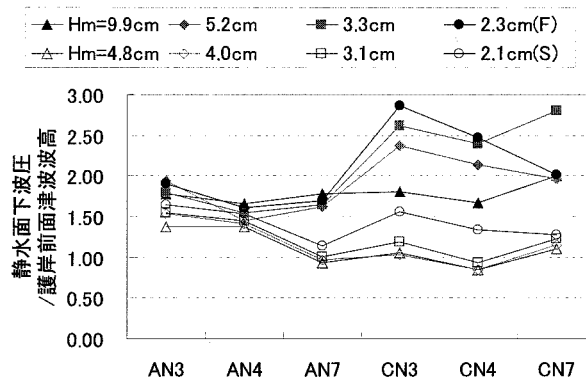
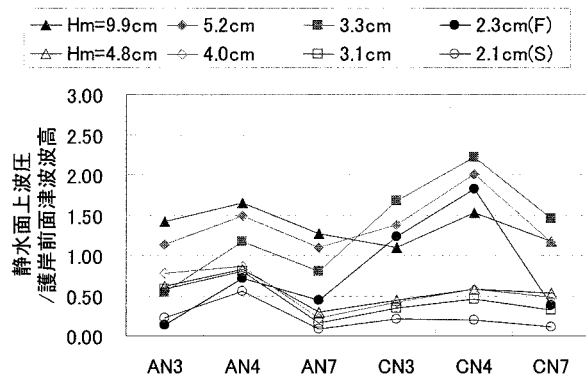


図-12 高さ別の波圧の沿岸分布
(護岸前面津波波高の 1/2 による無次元化)

り、 P_m が P_I より若干大きな値を示すが、水圧分布はほぼ一様である。ただし、モニタ波高の約 1.5 倍であり、測点 $CN3$ では P_m が約 2 倍の値を示すなど、設計時にモニタ波高を用いる場合には、従来の手法では波圧を過小評価してしまう危険性がある。

次に護岸前面津波高で無次元化した結果を図-11 に示す。護岸前面に沿った津波の伝播過程で、砕波以前の区間では、静水面下の 2 点で、モニタ波高で無次元化した場合に比べてデータのばらつきが小さい。これは、各点の波圧を、その近傍の水位変動で無次元化しているためと考えられるが、砕波後にはばらつきが大きくなる。無次元波圧は、砕波以前には P_m が P_I より若干大きいものの、1~1.5 程度の範囲で遷移しているが、砕波後には 1.5~2 程度に増大している。平面実験では縮尺の制約からソリトン分裂など詳細な現象の再現は困難であるが、平面的な構造物配置の影響によっても、設計値を上回る

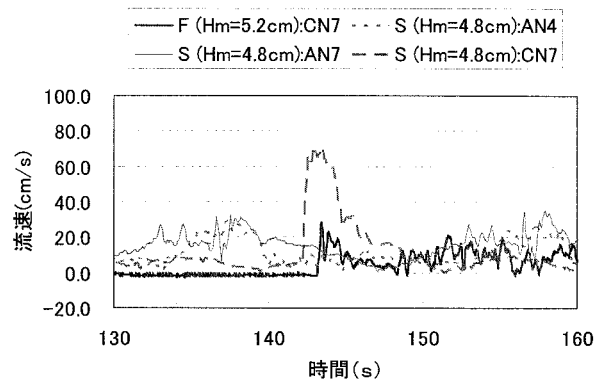


図-13 流速変動例

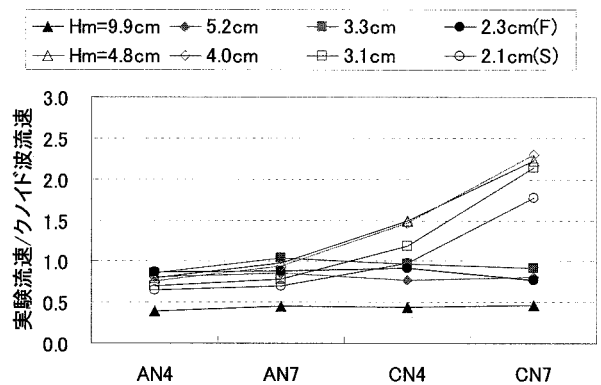


図-14 護岸前面での最大流速分布

波圧が作用する危険性が指摘できる。

また、モニタ波高あるいは護岸前面津波高のいずれの整理でも、 P_u は P_m より小さく、概ね 1.5 以下の値を示している。

最後に、護岸前面津波高の 1/2 で無次元化した結果を図-12 に示す。この整理方法では、F 波の場合、全ての水深で砕波後のばらつきが非常に大きく、最大で 3.0 程度の値を示すほか、砕波前でも 1.5~2.0 の大きな値を示す。一方、S 波の場合は、 P_m と P_I で、1.0~1.5 の比較的安定した値を示している。これは、図-7 で考察したとおり、波形勾配の比較的緩やかな S 波の場合、津波高は津波波高の約 1/2 であるのに対して、谷と峰の形状が非対称な F 波では津波高と津波波高の関係が異なるためである。そのため、設計においては、津波波高だけではなく、水面形状を考慮することが重要であることがわかる。

(3) 流速特性

図-13 は、護岸前面で測定した流速変動の一例として、F 波は $H_m=5.2\text{cm}$ で、津波進行方向奥側の測点 $CN7$ 、S 波は $H_m=4.8\text{cm}$ で、手前から測点 $AN4 \rightarrow AN7 \rightarrow CN7$ の 3 点について示したものである。ここで S 波の測点 $CN7$ で非常に大きな流速が発生しているのが特徴的である。これは測点 $CN7$ が、埋立地模型から突き出した突堤と護岸法線の隅角部に位置し、非線形性の影響が強いためと推測される。また、図-5 の水位変動で、波形勾配が急な位相で流速が大きくなっている。一方 F 波では、進行波の作用時

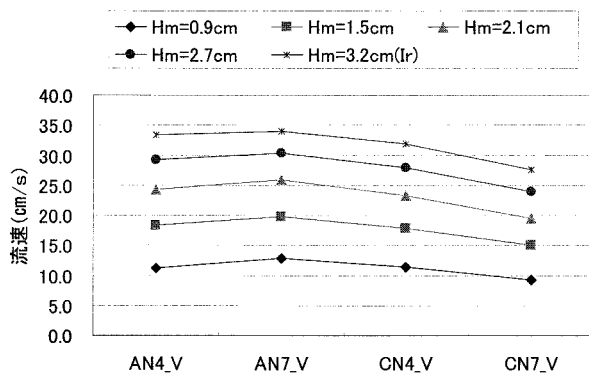


図-15 不規則波の護岸前面での最大流速分布

に急激な流速増大を伴うが、流速の最大値はS波の一般部の流速最大値と同程度である。

そこで、護岸前面での最大流速分布を図-14に示す。この図では、実験で測定された流速の最大値を、モニタ波高計設置位置に相当する水深10cm（想定現地換算10m）でのクノイド波の底面近傍流速で無次元化して表示した。F波の場合、護岸前面では各津波波高で、ほぼ一定の最大流速が伝播している。一方S波は、隅角部で急激に最大流速が増大する傾向が確認できる。なお図-15は、台風などの高波浪に相当する不規則波実験(Ir)により測定した、護岸前面での最大流速分布を示したものである。不規則波の1/3有義波周期は0.7秒、1/3有義波高は、図の凡例に示す通り $H_m=0.9\sim 3.2\text{cm}$ で変化させた。この図から、不規則波の場合、隅角部近傍で流速が低減する傾向にあり、S波の場合と傾向が異なる。以上により、津波作用下での流速分布を検討する場合、津波の水面形状に依存して、台風などの高波浪とは最大流速の分布が異なる場合があることが分かる。

4. おわりに

構造物周辺での津波の挙動を把握することを目的として、平面水槽による擬似津波造波実験を実施した。今回実験に用いた擬似津波は、水深10cm（想定現地換算10m）における津波波高が、F波で2～10cm（想定現地換算2～10m）程度、S波で2～5cm（想定現地換算2～5m）程度であり、例えば中央防災会議で取りまとめている東南海、南海地震による津波高さ⁴⁾に対応する水位上昇を再現している。

但し、津波による水位上昇の継続時間に関して、例えば十勝沖地震で測定された各地の津波波高⁵⁾は、数十分以上のオーダーであるのに対し、実験では想定現地換算で数十秒～数分のオーダーである。これは、歪み模型を用いない今回の実験では、縮尺の影響として避けることのできない現象であり、実験結果を現地に適用するためには、更に考察が必要と思われる。一方で、数値解析では、水理模型実験の条

件設定を再現することが可能であり、計算精度の検証データ取得には役立つものである。

このような制約条件の下で、今回の実験では下記の結果を得た。

まず水位変動量について、最大水位と最低水位の水位差に相当する津波波高は、静水位からの水位上昇量に相当する津波波高に対して、水面形状により1～2倍の範囲にばらつき、護岸に沿った伝播の過程でも値が変化することが分かった。

次に波圧分布について、非砕波の状態では、護岸部での津波高を用いて整理すると、その1～1.5倍に相当する波圧が作用するが、砕波後には、段波状のF波で2倍程度にもなり得ることが分かった。

最後に最大流速の分布について、台風などの高波浪とは傾向が異なる場合があり、波形勾配の緩やかなS波では、構造物の隅角部で流速が増大する傾向があることが分かった。

以上により、津波に対する構造物の安定性や機能を評価する場合には、平面的な構造物の配置を考慮した上で、鉛直方向の水位変動量だけではなく、水面の空間的な形状も考慮が必要であることが分かった。なお、今回の実験は限られた条件で実施したものであり、汎用的な結論を得るためには、異なる条件下での結果を含めた総合的な評価が必要である。

参考文献

- 1) 島田富美男, 森泰宏, 酒井哲郎: 臨海工業地帯沿岸での津波の挙動, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.228-232, 1983.
- 2) 加藤史訓, 稲垣茂樹, 福濱方哉: 津波により海岸堤防に作用する波力に関する大型模型実験, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.756-760.
- 3) 池野正明, 松山昌史, 榊山勉, 柳沢賢: ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.751-755, 2005.
- 4) 高橋智幸, 今村文彦, 首藤伸夫: 津波による流れと海底変動に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.161-165.
- 5) 出口一郎, 小竹康夫, 金澤剛, 松村章子, 藤原隆一: 津波防災のための基礎的平面津波実験, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.271-275, 2005.
- 6) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 社団法人日本港湾協会, pp.174-177, 1999.
- 7) 中央防災会議 東南海、南海地震等に関する専門調査会: 東南海、南海地震の強震動と津波の高さ(案), 東南海、南海地震等に関する専門調査会(第16回), 資料3, 2003.
- 8) 永井紀彦, 小川英明: 平成15年(2003年)十勝沖地震津波波高の特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1070, 92p, 2004.