

津波防災のための基礎的平面津波実験

出口一郎* ・小竹康夫** ・金澤剛***
松村章子**** ・藤原隆一*****

津波は通常の波浪と構造物への作用形態が異なることが指摘されてきたが、これまでは被災後の調査結果の取りまとめが中心であった。そこで本研究では津波対策の第一歩として、荒天時の波浪と津波の構造物に作用する特性の違いを検討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。平面水槽に波向きに対して法線がやや斜め方向となる複数の突堤や栈橋を有する港湾形状を再現し、擬似津波を造波することで、津波波高分布を測定した。その結果、高波浪に比べて津波では小規模な構造物の影響を受けにくく、護岸前面や特に隅角部における波高比の増大が顕著であり、越波量も増大する傾向にあることが分かった。

1. はじめに

昨年末のインド洋大津波では甚大な被害が発生した。日本では東海地震を始め、特に西日本では南海、東南海地震津波への対策が急務である。津波は通常の波浪とは構造物への作用形態が異なることが従来より指摘されてきたが、これまでは被災後の調査結果の取りまとめが中心であり、被害発生の瞬間を様々な角度から映像として捉えたのは、インド洋大津波が初めてに近いといえる。これらの映像には、津波が濁流となって陸地に押し寄せてくるなど、波浪との相違が鮮明に捉えられており、津波実態調査の貴重な資料とされている。また津波発生直後から始められた被災地調査の結果なども数多く報告されており（たとえば今村ら, 2005）、津波防災において、津波の特性を住民がよく理解し、避難行動につなげていくことの重要性が指摘されている。

一方、津波のシミュレーション手法としては、解析分野において津波発生から伝播、陸域への遡上や浸水シミュレーションなど様々な研究成果が報告されており（たとえば河田ら, 2004; 阿部・今村, 2004）、富田ら（2004）は三次元流動モデルを用いて津波防波堤周辺および背後地の数値計算を行い、模型実験と比較検討している。そしてそれらを可視化したアニメーションは直感的な理解を深める上で非常に有意義な手段となっている。水理実験の分野では、円形状の島を回り込んで遡上する津波を対象とした平面水槽実験（Briggs ら, 2005）や、津波が構造物に作用する圧力を測定するための大規模水路実験（Shimosako ら, 2005）が報告されているものの、それほど多くは実施されていないようである。

そこで本研究では津波防災の第一歩として、荒天時の

高波浪と津波の違いを直感的に把握し、構造物に作用する特性の違いを確認することを目的として、平面水槽に波向きに対して法線がやや斜め方向となる複数の突堤や栈橋を有する港湾形状を再現し、津波を模擬した孤立波を造波することで、津波波高分布を測定し、高波浪との相違について検討した。

2. 平面水槽実験

実験では、反射波吸収制御式多方向不規則波造波機能をもつ平面水槽（幅 19 m × 長さ 30 m × 高さ 1.5 m、東洋建設株式会社鳴尾研究所、兵庫県西宮市）に、模擬港湾を再現し、擬似津波および高波浪を作用させた場合の港内各点における波高分布の測定を行った。模型配置および水位変動の測定位置を図-1 に示す。模型規模は縮尺 1/100 を想定し、津波作用時と高波浪時とで波高分布特性の差を明確とするため、突堤は波向きに対して法線をやや斜め方向とし、小規模な波除堤や栈橋を設置した。

実験時の造波板前面の水深は 21 cm とした。港湾模型は水路の中央付近に設置し、その前面岸沖方向に測線 1 ～ 10 を設定した。このうち測線 1 ～ 5 は護岸が陸側に奥まった部分の沖側で、測線 1 の造波板から 17 m 付近には小さな波除堤が設置されている。また測線 6 ～ 8 は突

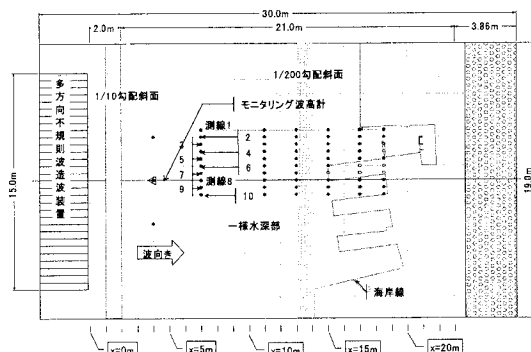


図-1 模型配置及び測定位置

* 正会員 工博 大阪大学大学院教授
** 正会員 博(工) 東洋建設(株)鳴尾研究所 主任研究員
*** 正会員 工修 東洋建設(株)鳴尾研究所 主任研究員
**** 東洋建設(株)鳴尾研究所
***** 正会員 博(工) 東洋建設(株)鳴尾研究所 水城環境研究室長

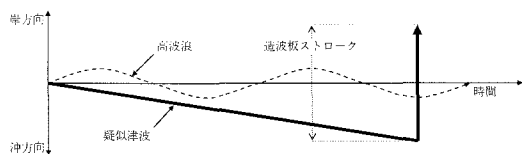


図-2 造波板の制御イメージ

堤の沖側、測線 9・10は突堤と突堤に挟まれた部分の沖側とした。また水槽の側壁に近い領域は波浪を安定させるための緩衝領域として十分な空間を確保するものとした。

擬似津波は、図-2に示すとおりピストン駆動式の造波板を、水面を乱さない程度にゆっくり引き込み、一気に岸方向に押し出す方法で孤立波を発生させるものとした。発生した津波波高をさらに増幅させるため、造波板前面より1.0～2.0 m離れた区間に1/10勾配斜面、また造波水深を確保するために13.0～15.0 mの区間に1/200勾配斜面を設け、それ以外は一様水深部とした。

3. 実験結果

(1) 波浪検定

津波波高は、静水面から孤立波の最大水位で定義するものとし、波高は造波板ストロークにより調整するものとした。モニタリング波高計で測定した水位変動の一例を図-3に示す。縦軸は水位変動、横軸は測定開始からの時間であり、各ストロークで孤立波の到達時刻が異なるのは、造波時刻から測定開始までの時刻が各々で一致していないためである。実際の津波に対して、水位が上昇している継続時間が短い、これは実験では水道水を用いているために、レイノルズ数を考慮した実験となっており、縮尺の影響によるものと考えられる。このことは、津波が構造物に与える影響を検討する上で、今後の課題となる。

またこれらの図より、ストローク 5 cm～15 cm の条件では、津波波高はストロークにほぼ比例して増大し、ストローク 20 cm では、15 cm とほぼ同じ津波波高となっていることがわかる。これは、造波板前面の一様勾配斜面上で碎波するためと考えられ、斜面勾配や造波板からの距離と津波波高の関係について、さらに検討の必要がある。

次に各測線での測定波高およびその平均値と造波板ストロークの関係を図-4に示す。

図の横軸は造波板のストローク、縦軸は測定波高である。構造物位置における津波波高の検定は、港湾模型を設置した状態で実施したため、測線 1～10のうち比較的構造物の影響が少ないと考えられる測線 2～4の平均値を採用することにした。この図より今回の条件で構造物

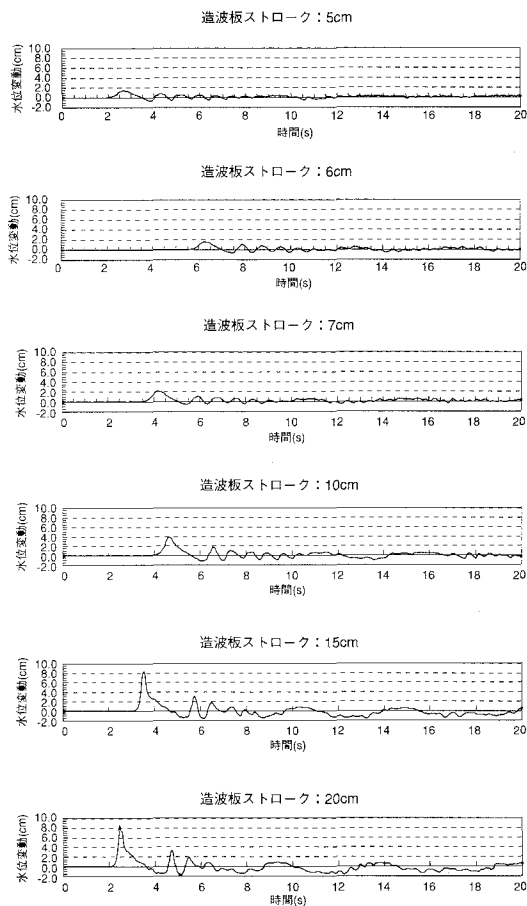


図-3 モニタリング波高計で測定した擬似津波(孤立波)の水位変動

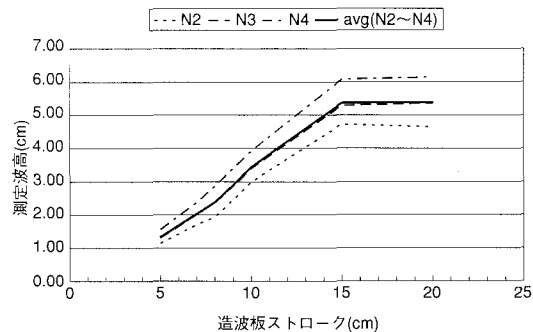


図-4 津波波高検定結果

位置における津波波高の最大値は5.5 cm 程度であることがわかる。なお、同一ストロークによる繰り返し実験では、水位変動の再現性は比較的良好であった。波浪検定の状況を図-5に示す。

(2) 波高分布

実験では、モデル地域を設定し、モデル地域で昨年観

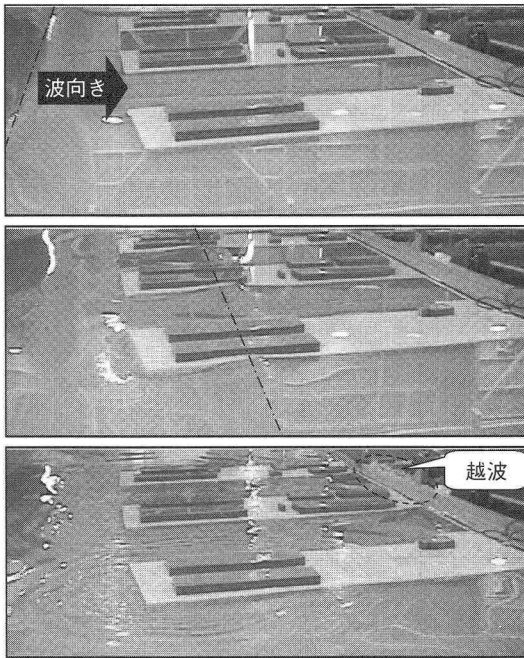


図-5 波浪検定の状況(ストローク 15 cm)

測された大型台風および、それより有義波高、有義波周期ともにやや大きく、モデル地域での50年確率波に相当する不規則波を荒天時の高波浪とし、津波波高がそれら高波浪にほぼ等しい擬似津波を用いるものとした。実験スケールでの擬似津波および高波浪の諸元を表-1に示す。なお、中央防災会議「東南海、南海地震に関する専門調査会」(2003)では、南海、東南海地震に伴う平均潮位時でのモデル地域における津波高さを1～2mと想定しており、模型縮尺を考慮すると、ほぼ同程度の擬似津波を用いた実験となっている。

図-6(a)および図-6(b)は、各測点における津波波高および有義波高を、モニタリング波高計位置における波高で規格化し、波高比として岸沖方向の分布を示したものである。図の縦軸は波高比、横軸は造波板前面から計測位置までの距離であり、凡例に示すとおり◆が擬似津波、■が大型台風相当波、▲が50年確率波相当波である。

測線1～5の岸側は、護岸が陸側に奥まった平面形状となっており、高波浪では造波板から13～15m地点の1/200勾配斜面で波高比が若干低下するものの、10m地点より岸側では1.0以下のほぼ一定値を示す。これに対して、津波では波高比が1.0以上で、構造物前面では急激に増大する。これは孤立波の波長が非常に長いので、構造物からの反射の影響がこの地点にまで及んでいるものと考えられることができる。

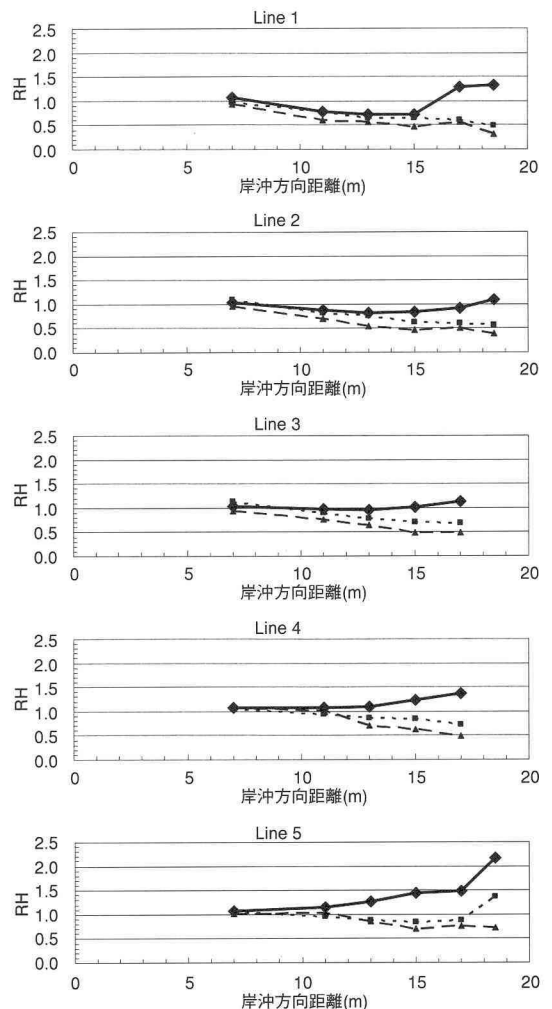
このうち測線1では、17m地点付近に小規模な波除堤を設けた結果、高波浪はその岸側で波高比が低減する

のに対し、津波は乗り越えて伝播している様子がわかる。また測線5の岸側端は隅角部に位置するため、特に津波の波高比が大きく、今回の測定点の中で最大値を示している。これは隅角部にエネルギーが集中したためと考えられ、高波浪においても共通の現象と言えるが、津波ではその傾向が顕著となることがわかる。

測線6・7は、沖から突堤先端部に向けた測線であり、測線1～5と同様に津波は構造物に近づくにつれ波高比

表-1 実験ケース

種別	波高(cm)	周期(s)	凡例表記
津波	1.7	—	津波
波浪 (不規則波)	1.3	7.7	大型台風
	1.8	8.7	50年確率波

図-6(a) 岸沖方向の波高比分布(測線1～5)
(◆擬似津波, ■大型台風, ▲50年確率波)

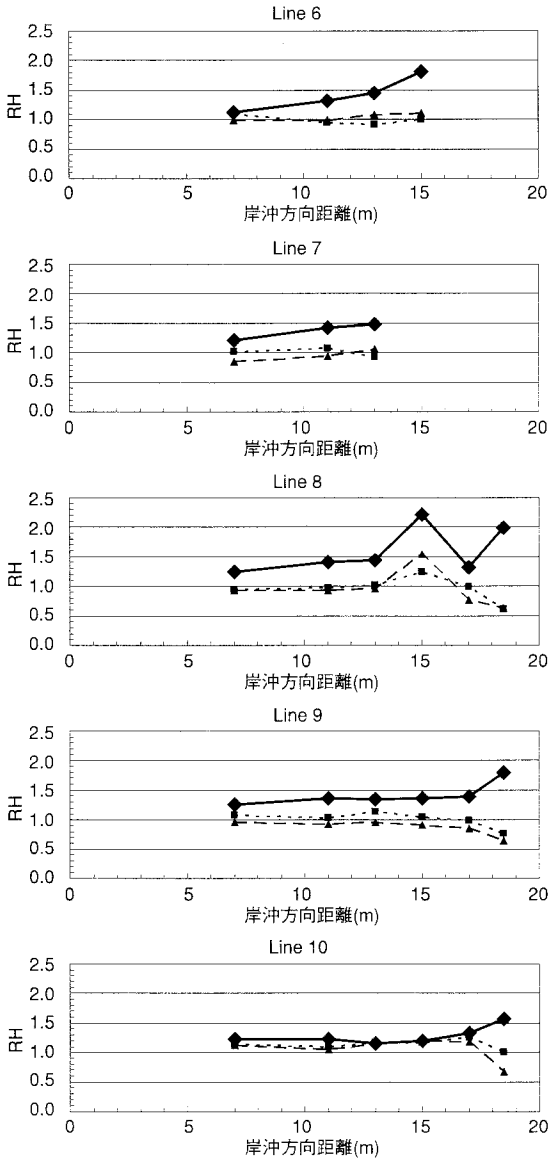


図-6(b) 岸沖方向の波高比分布(測線6～10)
(◆擬似津波, ■大型台風, ▲50年確率波)

が増大し、高波浪はほぼ一定の傾向を示す。

測線8～10は、突堤に挟まれた領域であり、このうち測線9・10は、これまで同様の傾向を示す。一方、測線8は、突堤先端にあたる15 m 地点付近で津波、高波浪ともに波高比が増大し、突堤の遮蔽域にあたる17 m 地点付近で両者とも減少するが、高波浪は減少した波高比のままで護岸まで到達するのに対し、津波は護岸前面で再び増大する様子が確認できる。これは突堤の存在により波の進行が妨げられたことで、高波浪では遮蔽域へ侵入する波エネルギーが低下したのに対し、津波の場合は、回折や越波により波エネルギーが遮蔽域に侵入したため

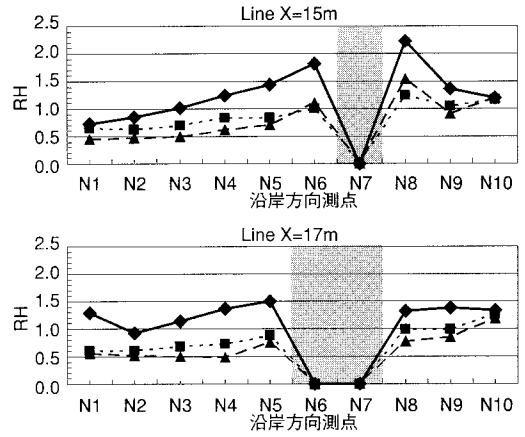


図-7 沿岸方向の波高比分布
(◆擬似津波, ■大型台風, ▲50年確率波)

表-2 越波量

種 別	波高(cm)	周期(s)	越波量(m ³ /ms)
津 波	1.7	—	4.5E-04
大型台風	1.3	7.7	1.2E-05
50年確率波	1.8	8.7	2.4E-05

で、この相違は、波浪と構造物の相対的な規模に依存するものと考えられる。

そこで、沿岸方向における波浪と構造物の相互干渉を確認するため、突堤先端部の15 m 地点および港内側の17 m 地点における波高比の沿岸方向分布を図-7に示す。図の縦軸は波高比、横軸は測線位置を示し、図中の枠で囲んだ波高比0.0の部分は構造物が存在することを示す。

波高比の大きさに違いがあるものの、津波、高波浪ともに突堤先端部では、沿岸方向に構造物に近接する位置で波高比が増大し、また港内では沿岸方向にほぼ一様である傾向が確認できる。このように今回の実験では、岸沖方向の分布傾向には明瞭な差は見られなかった。

(3) 越波量

越波状況を目視観測したところ、今回の擬似津波に対しては、顕著な越波が測線8の護岸部に集中し、その他の箇所では殆ど確認できなかった。そこで測線8～10の護岸部における越波量を測定し、高波浪と比較した。津波に対する越波量は、水位変動から孤立波の継続時間を算定し、単位幅、単位時間当たりの流量で定義した。結果を表-2に示す。

今回の擬似津波は孤立波を作用させたものであり、水位上昇の継続時間など、構造物への作用状況が実際の津波とは異なると考えられることから、定量的な評価は困難であるが、実験では1オーダー程度、高波浪に比べて越波量が多くなる結果が得られた。

4. 結 論

平面水槽に、波向きに対して法線がやや斜め方向となる複数の突堤や棧橋を有する港湾形状を再現し、津波を模擬した孤立波を造波することで、津波波高分布を測定し、高波浪との相違について検討した。その結果、高波浪に比べて津波では小規模な構造物の影響を受けにくく、護岸前面や、特に隅角部における波高比の増大が顕著であることが実験で確認できた。また越波が顕著な箇所について越波量を比較したところ、今回の実験では高波浪に対して津波の越波量が1オーダー程度大きくなることがわかった。

今回は、荒天時の高波浪と津波の違いを直感的に把握し、構造物に作用する特性の違いを確認することを目的として平面水槽実験を行い、波高比と越波量をパラメタとした検討を行ったが、実際の津波は周辺地形や構造物の形状、配置などの影響を受けるため、この結果だけで全てを表現できるものではないことに注意が必要である。

今後の課題として、縮尺効果による津波継続時間とその影響について検討が必要である。また、造波装置前面の斜面勾配や設置位置などをパラメタとして、より効率的な津波造波方法を検討する必要がある。また個別の港湾を対象とした実験を行う場合には、周辺地形や構造物

などの影響を考慮した詳細な検討が必要となる。

参 考 文 献

- 阿部郁男・今村文彦(2005):並列計算によるリアルタイム津波(浸水)計算の高速化, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 251-255.
- 今村文彦・越村俊一・河田恵昭(2005):緊急記事 スマトラ地震により甚大な津波被害 三陸津波以来のわが国の津波防災対策への期待, 土木学会誌, Vol. 90, pp. 5-7.
- 河田恵昭・奥村与志弘・越村俊一・藤間功司・永井紀彦(2004):エッジ波の発生を考慮した津波予警報の改良に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 261-265.
- 中央防災会議「東南海, 南海地震に関する専門調査会」(2003):東南海, 南海地震に関する報告書(案)図表集, 中央防災会議事務局, 31p.
- 富田孝史・柿沼太郎・島田昭男(2005):3次元流動モデルによる津波防波堤の防護効果に関する数値計算, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 296-300.
- Briggs, Michael J., J.C.Borrero and C.E.Synolakis (2005): Tsunami disaster mitigation research in the United States, International Workshop on Tsunami Disaster Mitigation in Kobe 2005 Proceedings(Draft Version), Port and Airport Research Institute, pp. B-1-B14.
- Shimosako K., T.Arikawa and N.Nakano (2005): Large scale Tsunami experiment, International Workshop on Tsunami Disaster Mitigation in Kobe 2005 Proceedings (Draft Version), Port and Airport Research Institute, pp. E-1-B6.