

土佐湾の異常な高潮に対する防波堤の高潮低減効果

高橋 吉弘*・田辺 勇人**・柴木 秀之***・岩瀬 浩之****

台風 7010 号により土佐湾の高知港で発生した異常な高潮は, wave setup を考慮した高潮シミュレーションにより再現できる. この高潮シミュレーションモデルは, 波の発達・減衰・変形を考慮した浅海波浪推算による波浪場の推定と radiation 応力の算定を行い, これを利用して wave setup を含む潮位偏差を予測する. このモデルにより, 沖防波堤建設後の地形条件において, 台風 7010 号時の高潮シミュレーションを行い, wave setup を含む高潮に対する防波堤の高潮低減効果を予測した. 防波堤開口部を砕波帯の外側に設置することにより, 港内の高潮は数 10 cm~1.0 m 程度まで低減した. 新たな視点から, 高潮対策として防波堤が有効であることを示した.

1. はじめに

台風 5915 号 (伊勢湾台風) による大規模な高潮災害を契機として, 防波堤により背後水域の高潮を低減させるというハード対策が提案された. 実現した例に, 名古屋港の高潮防波堤が挙げられる. この高潮防波堤の効果は, 気象庁 (1960) において数値シミュレーションにより予測され, 防波堤の開口幅を 500 m に設定すると, 名古屋港奥で発生した潮位偏差の最大値 3.45 m を 0.5 m 低減することが示された. このような防波堤による高潮対策は, 背後水域の潮位偏差を低減することにより, 背後域全体を高潮災害から防護する. しかしながら, 名古屋港の事例以降, 防波堤による高潮の低減効果に関する研究はほとんどなされていない.

この理由は次のように考えられる. 高潮は, 波長が数 100 km に及ぶ大規模な波動現象である. このような規模に比べ, 防波堤背後の防護水域の規模は相対的に小さい. そのため, 防波堤の開口幅を相当量に狭めないと, 高潮を効率的に低減できない. 一方, 開口幅を狭めると, 船舶の航行に支障をきたすことは明らかである. このため, 高潮対策として防波堤を建設することは, 経済効率の面から必ずしも有効とは言えない.

これに対し, 土佐湾の高知港において, 台風 7010 号により発生した異常な高潮 (最大潮位偏差 2.35 m) は, 波による水位上昇 (wave setup) の影響を強く受けている. このような高潮は, 防波堤によって港内への侵入波浪を抑えることにより, 効率的に潮位偏差も低下させることが期待できる. この点に着目し, 本研究では, 高知港外港に建設された沖防波堤が, 港内の高潮を低減させるのに効果的なことを明らかにする. そして, 新たな視点から, 防波堤による高潮対策が有効な事例を提示する.

2. 高潮推算モデルの概要

(1) 高潮推算の手法

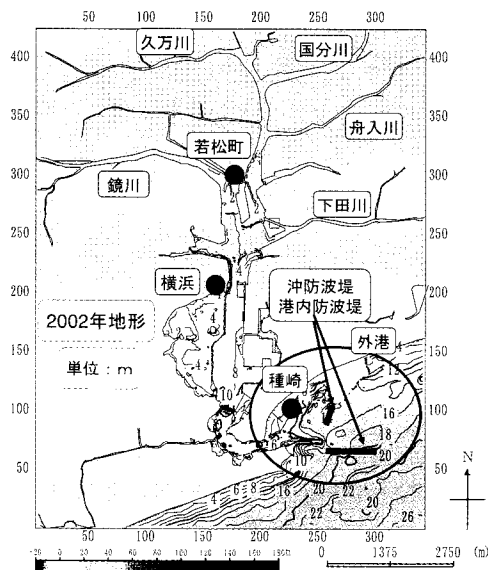
本調査において採用する高潮推算モデルは, 柴木・渡辺 (2002) において提案されたものである. ここでは, 高潮推算モデルの概要のみ記述する.

モデルにおいて考慮されている高潮の発達過程は, 気圧低下による水位上昇, 海上風による吹き寄せ, 密度成層による高潮増幅, 波による水位上昇, 河川流入による高潮増大である. また, 台風 7010 号時の高潮により生じた高知市街地への浸水についても, 海域の高潮を低下させる要因として考慮する. この高潮モデルは, 3 層に層分割した連続式と運動方程式を基礎式とし, 運動方程式は気圧・水位・密度の 3 成分の水平勾配を含む圧力勾配項と radiation 応力散逸項を考慮する. 密度は水温と塩分を変数とする状態方程式により計算し, 水温と塩分の 3 次元分布は, 各々の拡散方程式を, 連続式及び運動方程式と同時に解いて求める. Radiation 応力は, 時間変化する波浪場から計算する. 波浪場は, 波の発達・減衰・変形を同時に考慮した浅海波浪推算法により計算する. 砕波波高は, 合田 (1970) の砕波限界波高式を波高上限値として用いることにより推定する. 波浪場から推定される 3 層の radiation 応力は, Longuet-Higgins・Stewart (1964) の鉛直分布式を層別に積分して求める. 河川の流入は, 浦戸湾に流入する 5 河川を考慮する. 河川の流入位置は図一1 に併記する. 陸域への浸水計算は, 津波シミュレーションと同じ方法を用いる. 気圧と海上風の空間分布は, 台風モデル (Myers モデル) から推定する.

台風 7010 号により発生した土佐湾の異常な高潮の再現シミュレーションにおける条件設定は, 柴木ら (2001) により報告されたものを基本的に採用する.

本研究では, 1970 年地形の陸域浸水あり・なしの増合の高潮の再現シミュレーションと, 高知港外港の沖防波堤建設後の 2002 年地形における高潮の予測シミュレーションを行う. そして, これらの潮位偏差を比較することにより, 浦戸湾を含む港内の高潮低減効果を定量的に

・	国土交通省	四国地方整備局	港湾空港整備課
**	国土交通省	四国地方整備局	高知港湾・空港整備事務所
*** 正会員	博 (工)	(株) エコー	沿岸デザイン本部 環境水工部
**** 正会員		(株) エコー	沿岸デザイン本部 環境水工部



図一 高知港外港周辺と浦戸湾の地形及び水深分布(防波堤建設後の2002年地形)

予測する。

(2) 防波堤建設後の地形条件

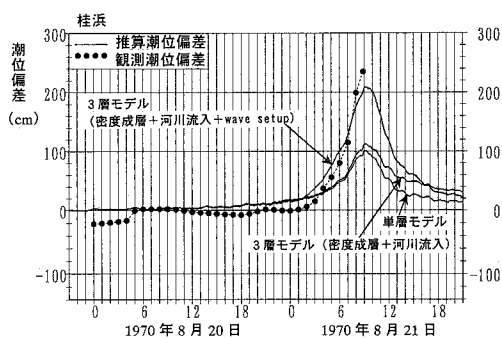
高潮シミュレーションは、台風7010号来襲当時の1970年地形と2002年地形の2種類について行う。図一1は2002年地形における水深分布と25m格子による海岸地形の近似状況を表す。陸域は、地盤高を格子データ化し、海岸線に存在する防潮堤については、1970年当時と現在の施設条件を設定する。図中に、浦戸湾内へ流入する5河川と代表点の位置を併記する。なお、高潮シミュレーションは、台風の通過経路を含む広域について行い、外洋域は最大32.4km格子により地形近似を行う。一方、高知港周辺の領域については、25m格子による詳細な地形近似を行う。格子間隔の異なる複数領域は、水位と流量を接続し、同時計算を行う。

1970年当時の地形に比べると、2002年地形は、外港の沖防波堤が新設され、埋立地も建設されている。これにより、施設に囲まれた港内水域が形成されている。また、外港から浦戸湾の湾口にかけて航路の浚渫が行われ、港内の水深が深くなっている。

3. 台風7010号による異常な高潮の再現

(1) 波による水位上昇の効果

柴木ら(2001)は、台風7010号により発生した土佐湾の異常な高潮のシミュレーションを行い、wave setupを考慮すると、宮崎・岡田(1975)に代表されるような従来型のモデルにより表現できなかった観測潮位偏差(最大値2.35m)の再現が、2.0mを超過する程度まで可能



図二 各効果を考慮した潮位偏差の推算値と観測値との比較(桂浜の観測地点)

であることを明らかにした。

図二は、台風7010号時に発生した高潮の再現結果の一部であり、桂浜における観測潮位偏差と推算値の経時変化の比較を表す。図中の推算値は、wave setupを考慮しない従来型の単層モデル、密度成層を考慮した3層モデル、wave setupも考慮した3層モデルの3種類である。これら推算値を比較することから、どの条件が潮位偏差の再現に重要であるかが明らかになる。

図によれば、密度成層の効果は0.1m程度とわずかであり、河川流入の効果もほとんど見られない。それに対し、wave setupによる水位上昇量は、潮位偏差が最大となる時刻において1.0m程度となる。Wave setupによる水位上昇量は、従来型モデルによる潮位偏差とほぼ同程度の値となり、これを考慮すると、観測値と同程度の潮位偏差が表現できる。

(2) 背後地への浸水状況

図一3は背後地への浸水を考慮した場合と考慮しない場合に予測される最大潮位偏差の分布の比較である。両者の比較から、浸水を考慮することにより、浦戸湾内の潮位偏差は数10cm程度低下すると予測される。

湾奥に位置する若松町における観測潮位偏差の最大値(1.86m)との比較を見る限り、陸域への浸水を考慮することにより、湾奥の再現性は向上している。一方、湾中央の横浜における観測潮位偏差の最大値(1.95m)との比較を見ると、陸域への浸水を考慮することにより潮位偏差は過少となる。このような湾内潮位偏差の再現が不十分な要因は、河川流の流入条件と1970年当時の防潮堤天端高の条件に関して、情報が不十分なことによると判断している。これら条件の再調整により、湾内潮位偏差の再現性は向上すると考える。なお、浸水の有無にかかわらず、浦戸湾の湾口より外海側で発生する潮位偏差に大きな差異は見られなかった。

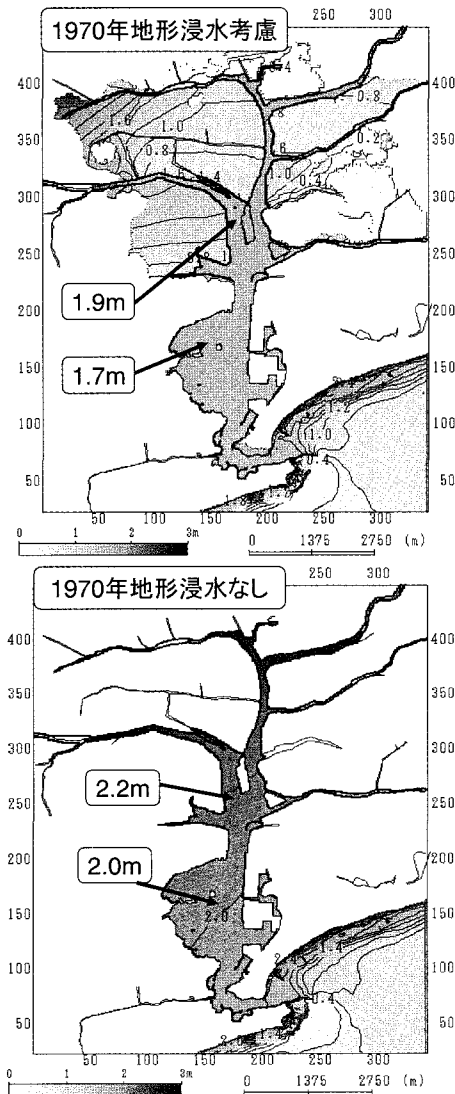


図-3 台風7010号来襲時の最大潮位偏差の分布と陸域への浸水状況図(浸水の影響を表示)

4. 高潮の予測計算

(1) 波浪場の予測

図-4の左図は、1970年当時の地形において、台風7010号により発生したと推定される最大有義波高の分布である。図によれば、沖側で10m程度の波高が発達し、浦戸湾湾口の海岸部に沿って、砕波に伴う波高の減衰が確認できる。それに対し、2002年地形の波高分布を見ると、外港に建設された沖防波堤と埋立地から延びる港内防波堤により、その背後水域に侵入する波高は減少し、海岸の到達波高は2.0～2.5m程度になる。また、波高分布を見る限り、港内で砕波による波高の減少は確認

できない。

(2) Radiation 応力の分布特性

予測された波浪場から、高潮の最盛期である1970年8月21日9時のradiation 応力発散項ベクトルの空間分布を求める。図-5は、1970年当時の地形において推定されるradiation 応力発散項ベクトルの分布と2002年地形における分布を表す。外港の沖防波堤がない1970年地形においては、海岸に強い波浪応力が作用する。この力は海岸における水位上昇に寄与すると予想される。それに対し、沖防波堤が建設された2002年地形においては、海岸への波浪応力の作用はほとんど見られない。一方、沖防波堤による波浪の遮蔽効果のため、防波堤の外海側から港内にかけて波高が減少し、波浪応力が作用する。

砕波帯外への防波堤の建設に伴い、波浪場が変化し、それに伴いradiation 応力の分布状況も変化する。特に、港内水深の浅い海岸において、wave setupの発生要因となる波浪応力が減少し、これに伴い水位上昇量も減少すると推定できる。

(3) 潮位偏差の分布特性

Radiation 応力を用いた高潮シミュレーションを行う。図-6の左図は1970年地形、右図は2002年地形において予測される最大潮位偏差の分布を表す。ここで、1970年地形の予測結果は、2002年地形との比較のために、背後地への浸水を考慮しない予測結果である。図によれば、浦戸湾の湾口部の海岸において2.0m以上あった潮位偏差が、外港の沖防波堤建設により、1.2m程度まで減少し、それに伴い浦戸湾内の潮位偏差も減少している。

5. 防波堤による高潮の低減効果

防波堤による高潮の低減効果を定量的に見積もるために、2002年地形で予測された最大潮位偏差から、1970年地形で予測された最大潮位偏差を差し引き、潮位偏差の差の分布を求める。図-7は潮位偏差の変化量の分布であり、図中の負値が潮位偏差の減少量を表す。図によれば、沖防波堤の先端から埋立地の港内防波堤にかけて潮位偏差は数10cm程度増加するものの、それよりも港内側の遮蔽海域から浦戸湾の湾口及び湾内にかけて、逆に数10cm程度減少する。特に、海岸における減少量は顕著になると予測される。このように、外港の沖防波堤建設は、港内の高潮を低減することが期待できる。

さらに、図-6に表す港内代表点における潮位偏差の経時変化についても比較する。図-8は種崎・横浜における潮位偏差の経時変化を表す。2002年地形の潮位偏差は、1970年地形の潮位偏差に比較し、外港の種崎において最大値が約1.0m減少し、高潮発達期の時間帯からその傾向が見られる。一方、横浜も同様の傾向にあり、種崎ほど顕著ではなく、最大値の発生時刻近傍に限定され

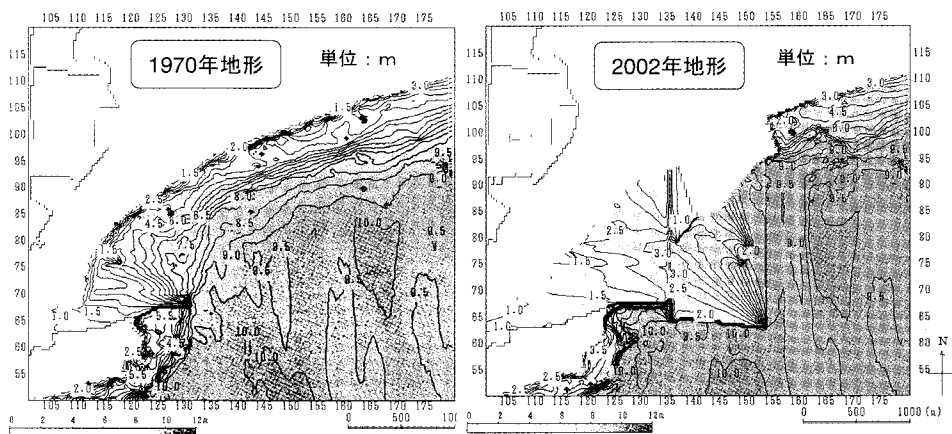


図-4 台風7010号時の最大有義波高分布の比較

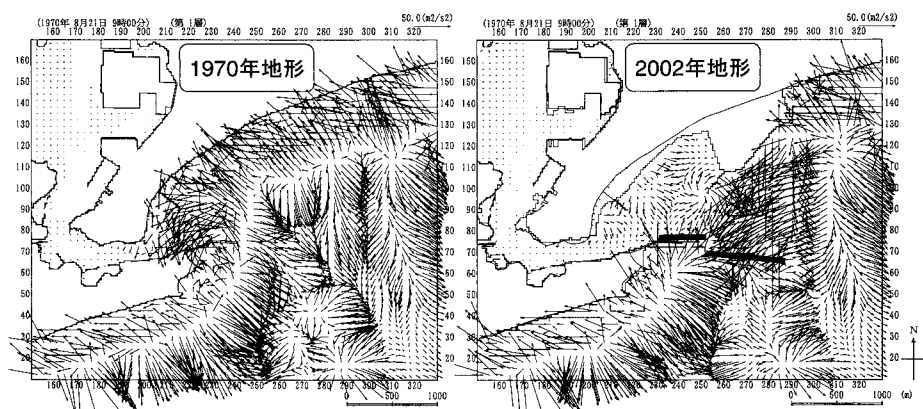


図-5 Radiation 応力発散項ベクトル分布の比較

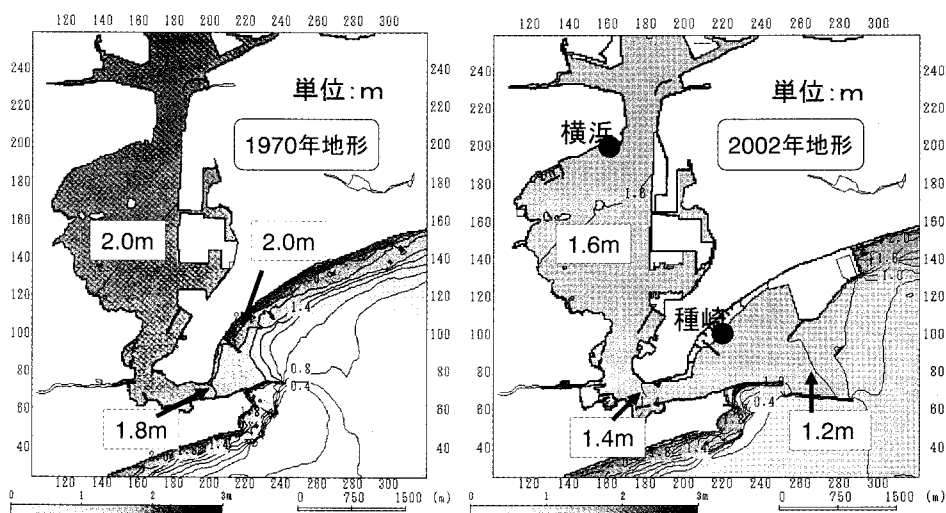


図-6 台風7010号時の最大潮位偏差分布の比較

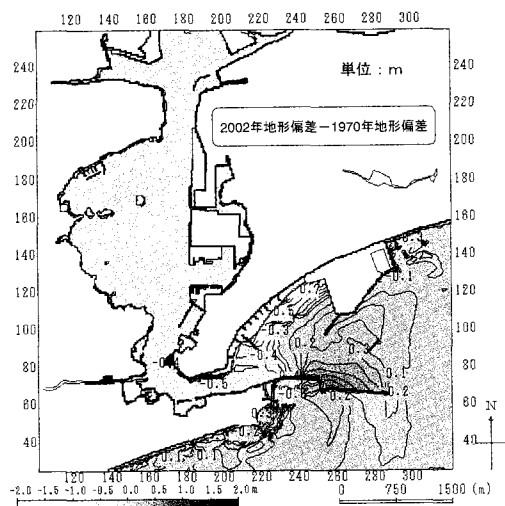


図-7 外港防波堤等の建設に伴う潮位偏差の減少量

るものの、0.4 m 程度の潮位偏差の減少が予測される。

6. おわりに

本研究は、土佐湾の高知港で発生した異常な高潮を事例として取り上げ、防波堤による高潮低減効果について検討を行ったものである。主要な成果を以下にまとめる。

- ① 1970 年当時の防波堤が未整備の地形において、台風 7010 号来襲時に浦戸湾の湾口から湾内で発生した高潮時の最大潮位偏差を再現した。Wave setup が、高潮の再現に重要であることを再確認した。
- ② 砕波帯外への沖防波堤建設後の地形では、外海から港内に侵入する波高が減少するため、港内の海岸における wave setup は確認できない。浦戸湾湾口の海岸において wave setup が生じないため、浦戸湾全体の潮位偏差も減少する。
- ③ 沖防波堤の建設により、特に、外港の海岸（種崎）における潮位偏差の減少は 1.0 m に及び、浦戸湾内（横浜）の潮位偏差も 0.4 m 程度減少する。
- ④ 土佐湾の異常な高潮のように、wave setup が主成分となる場合は、砕波帯の沖側に防波堤開口部を計画すると、効率的に港内の高潮を低減できる。

今後の高潮対策施設を計画する上で、波による水位上

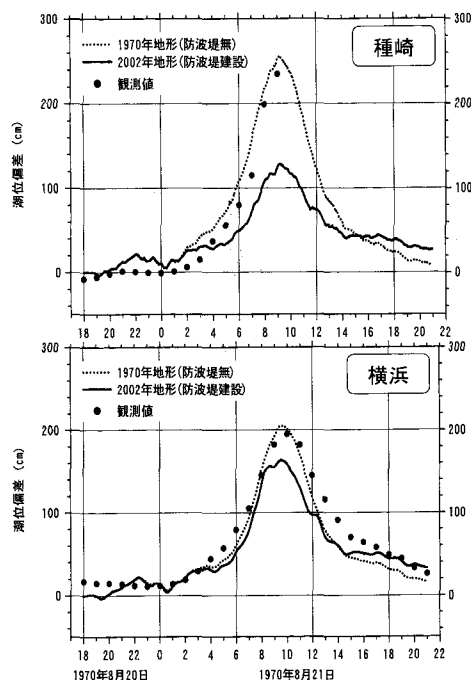


図-8 潮位偏差の経時変化の比較

昇を含む高潮に対しては、防波堤による高潮低減効果が期待でき、新たな高潮対策の視点が提示できた。

参考文献

- 気象庁(1960): 伊勢湾高潮の総合調査報告書, 気象庁技術報告, 第4号, 286 p.
- 合田良実 (1970): 砕波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第180号, pp. 39-49.
- 柴木秀之・渡辺 晃 (2002): 密度成層と Wave Setup を考慮した多層高潮推算に関する研究, 土木学会論文集, No. 719, II-61, pp. 47-66.
- 柴木秀之・加藤史訓・山田浩次 (2001): 密度成層と wave setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 286-290.
- 宮崎正衛・岡田正美 (1975): 土佐湾高潮の数値計算, 気象研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 55-62.
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. (1964): Radiation stresses in water waves: A physical discussion with applications, Deep-Sea Res., Vol. 11, pp. 529-562.