

伊勢湾海岸保全施設の越波量を指標とした安全性の点検

佐藤 清*・柴木秀之**・鈴山勝之***

現在、設計外力等の評価指標には、波の打ち上げ高さに変わり越波量が多く用いられており、その算定方法および算定精度についての検討が必要になっている。通常、越波量を用いた設計外力の評価では、最大潮位偏差および最大有義波高を用いた最も厳しい条件で越波量の算定が行われる。しかし、本論文では潮位偏差と波浪の時間変化を考慮した越波量の算定を行い、両者の違いが相当量あることを明らかにし、今後の経済的な防災投資のあり方に関する指標を提示する。

1. はじめに

伊勢湾台風から40年あまり経過した現在、伊勢湾沿岸域では、埋立地の整備、沿岸域の利用状況等、海岸保全施設を取り巻く環境が大きく変化し、防護水準および防災投資のあり方についての再検討が必要となっている。これまでの設計外力等の検討では、波の打ち上げ高による評価が主として用いられてきた。それに対し、現在では、越波量による評価が行われるようになり、伊勢湾の海岸保全施設においても、越波量を用いた統一的な点検の必要性が課題となっている。伊勢湾における従来の設計外力は、伊勢湾台風時の最大潮位偏差と最大有義波高（以降、最大波高と呼ぶ）を用いた、最も厳しい条件で越波量の算定が行われている。しかし、この条件により、防災投資効果の検討を行うと、過大な投資を行う可能性がある。

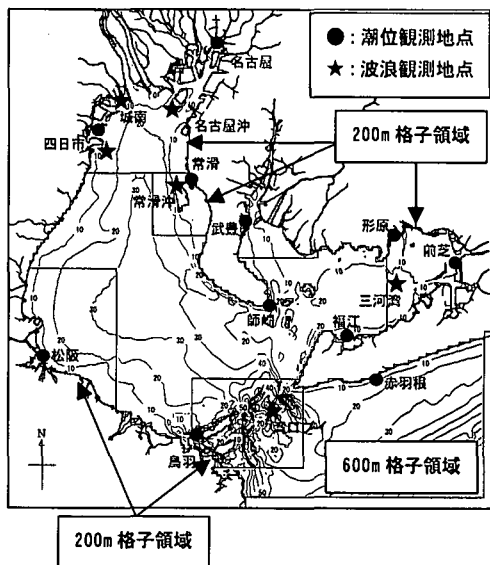
台風通過時の潮位偏差と波高は、時々刻々と変化しており、潮位偏差が最大値の時に、必ずしも波高が最大値となるわけではない。このため、最大潮位偏差と最大波高を用いて越波量を算定した場合、各海岸保全施設の越波量を過大に評価し、被害額を過大に算定することになる。そこで、潮位偏差と波高の時間的変化を考慮した越波量の算定が必要になる。

本論文では、伊勢湾の全沿岸において推算された、最大潮位偏差と最大波高を用いて算定された越波量と、潮位偏差と波高の時間変化を考慮して算定された越波量より、両者の違いが相当量あることを明らかにする。そして、今後の経済的な防災投資のあり方に関する指標を提示する。

2. 推算モデルの検証

(1) 推算値の検証地点

越波量算定の外力条件を計算するための、高潮シミュレーションおよび波浪シミュレーションに用いる推算モ



図一1 伊勢湾の地形近似と潮位および波浪の観測地点

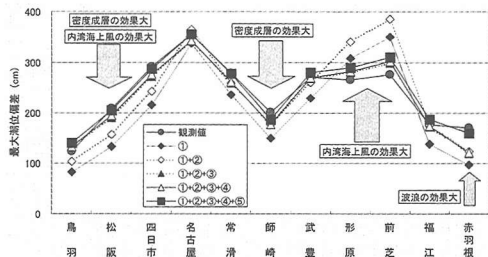
デルの検証を行う。図-1 は伊勢湾沿岸における潮位および波浪の観測地点を表す。図中の●印が潮位の観測地点を、★印が波浪の観測地点を表す。潮位観測点は、伊勢湾湾口から中央部にかけての鳥羽・松阪・常滑と伊勢湾湾奥部の四日市・名古屋、三河湾湾口部の福江・師崎、三河湾湾奥部の武豊・形原・前芝、湾外の赤羽根の 11 地点である。波浪観測地点は、伊勢湾内に位置する四日市・城南・名古屋沖・常滑沖・三河港および湾口ブイの 6 地点である。これら 17 地点の潮位偏差および波浪の観測値を用いて、高潮推算および波浪推算のモデルの検証を行う。

(2) 高潮推算モデルの検証

高潮シミュレーションに用いる計算範囲は、台風の通過経路を含む太平洋の広域とし、伊勢湾沿岸は、図-1に表したように600 m、200 m 格子による地形近似を行う。湾外の地形は、600 m 以上の大格子により地形近似を行い、サイズの異なる格子間で水位と流量の結合を行うことにより、広域から湾内までの同時計算を行う。

高潮の再現は、柴木ら(2002)の最新の知見に基づき、

・ 国土交通省 中部地方整備局 海洋環境・海岸課長
 ・ 正会員 工修 (株)エコー 環境水工部
 ・ 工修 (株)エコー 環境水工部



図一 各効果を考慮した推算値と観測値の最大潮位偏差の比較

①気圧場の効果, ②密度成層の効果(多層化の効果), ③内湾海上風の効果(陸上地形の影響を受ける海上風の効果), ④河川からの出水の効果および⑤波浪による効果(Wave Setup の効果)の5つの効果を考慮した高潮推算モデルを用い, 各効果の妥当性の検証を行ったものである。要約すると次のようにまとめられる。

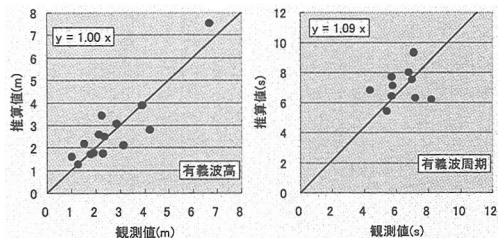
検証は, 伊勢湾台風(台風5915号)を用いた高潮シミュレーションによる推算潮位偏差と, 図一に表した伊勢湾周辺の潮位観測地点の観測潮位偏差を比較することで行った。図二は前述した①~⑤の高潮の再現に重要な各効果の影響について, 湾口から湾奥にかけての潮位観測地点における推算値と, 観測された最大潮位偏差の比較を表すものである。図では各効果毎の影響を見るために, ①~⑤の各効果を1つずつ考慮していき, 最終的に■印で表す①~⑤の全ての効果を考慮したモデルが, ●印で表す観測値との比較より, 最も再現性が良好であることを述べている。

図より, 密度成層による効果は, 湾全体で20~30 cm程度の一様な潮位偏差の増幅となる。さらに, 内湾海上風の効果は, 形原・前芝の三河湾湾奥において潮位偏差を60~80 cm程度低下させ, 逆に, 鳥羽・松阪・四日市・名古屋の伊勢湾西岸における潮位偏差を30 cm程度増加させる。また, 外洋に面する地点である赤羽根では, 波浪の効果により潮位偏差が60 cm程度増加する。

また, 河川からの出水の効果は, 図中の△印で表すように, あまり見られない。これは, 木曽三川が流域面積の大きな河川であるために, 最大潮位偏差の発生時刻より河川の最大流量発生時刻が数時間遅れ, 河川からの出水の効果が, 潮位偏差に影響を及ぼさないためと考えられる。

(3) 波浪推算モデルの検証

波浪シミュレーションは, 高潮シミュレーションと同様の計算範囲にならない, 伊勢湾内で発生する湾内発生波と, 外洋で発生し, 伊勢湾口から湾内に侵入する外洋侵入波を同時に計算可能な波浪推算モデルを用いる。また, このモデルでは, 屈折, 浅水, 回折, 碎波等の各種変形



図三 8台風における推算値と観測値の相関解析結果

も考慮する。検証は, 伊勢湾台風と近年発生した8台風を用いた波浪シミュレーションによる推算波高および周期と, 図一に表した伊勢湾周辺の波浪観測地点の波高, 周期を比較することで行う。

伊勢湾台風が発生した当時の波浪観測地点は, 名古屋港付近の1地点のみであり, 2時間毎に波高, 周期の観測が行われていた。ここで, 再現性の検証は, 観測最大波高と推算最大波高および同時刻の周期を比較し行う。波浪の再現計算結果より, この地点の推算最大波高は2.5 m程度, 周期は8.5 s程度となる。観測最大波高が2.4 m, 周期が6.5 s(伊勢湾台風復旧工事誌(中部地方整備局))であることから, 推算周期が若干長めとなっているものの, 波高に関しては良好な再現性が確認できた。

さらに, 近年, 伊勢湾に来襲し, 沿岸部に高波をもたらした8台風についても波浪再現計算を行い, 推算値と観測値を比較する。近年8台風発生時の観測地点は, 図一の★印で表した名古屋沖を除く5地点であり, 最大波高, 周期が得られている。ここでは, 推算最大波高と観測最大波高の相関解析より再現性の検証を行う。図三は各台風における推算最大波高, 周期と, 観測最大波高, 周期の相関解析結果を表す。図より波高および周期ともに回帰係数が1.0程度となっており, 推算値と観測値は概ね致する結果となった。

以上より, 本論文で用いる波浪推算モデルによる再現計算結果が, 観測値を良好に再現していることが確認され, 推算モデルの妥当性が検証された。

3. 予測計算

(1) 想定台風の設定

越波量算定の際の外力条件となる, 想定台風時の高潮, 波浪の予測計算を行うにあたり, 事前に様々な台風コースを設定した予備計算を行い, 伊勢湾内に大きな影響を及ぼすと考えられる想定台風コースの選定を行う。予備計算で設定する台風条件として, 台風規模は伊勢湾に甚大な被害をもたらした既往最大級の台風である伊勢湾台風とし, 次の3タイプのコースを想定する。①伊勢湾台風コースを0.2刻みで東西方向に平行移動させたコー

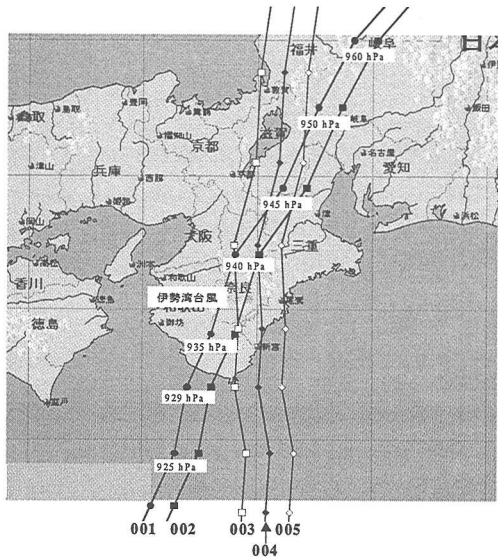


図-4 予測計算に用いる想定台風コース

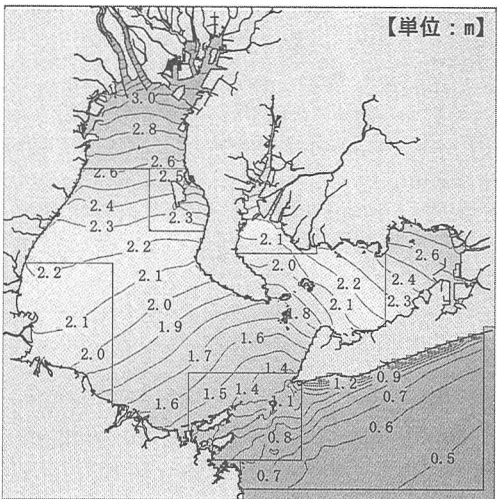


図-5 伊勢湾台風再来時の最大潮位偏差の分布

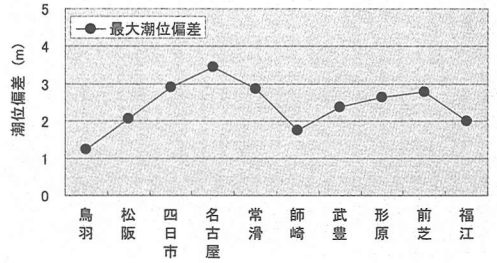


図-6 伊勢湾台風再来時の代表地点の最大潮位偏差

ス、②伊勢湾台風コースを反時計回りに22.5°回転させ、さらに0.2°刻みで東西方向に平行移動させたコース、③伊勢湾南西部に既往最高潮位を発生させた台風5313号の台風コースを、0.2°刻みで東西方向に平行移動させたコースの計33の想定台風条件である。図-4は33の台風コースから、湾内の各点で発生する高潮の規模を基に選定された、伊勢湾台風を含む5つの想定台風コースを表す。図中のコース001が伊勢湾台風コースである。

(2) 高潮予測計算

高潮予測計算は、2000年時の計画地形を用い、天文潮の設定条件は、潮位が最も高い条件となる朔望平均満潮位とする。その結果を用いて、各海岸保全施設で最大潮位偏差が発生する想定台風コース（この時の台風を、各海岸保全施設に対する想定最悪台風と呼ぶ）において結果の抽出を行う。図-5は予測計算結果のうち、伊勢湾台風が再来した場合（コース001）の最大潮位偏差の分布を例示するものである。

さらに、図-6は、図-5の高潮予測結果を基にして、図-1で表した潮位観測地点における最大潮位偏差を抽出したものである。図より、伊勢湾湾口の鳥羽で1.0 m程度、湾口付近の松阪、福江で2.0 m程度の潮位偏差が発生し、伊勢湾湾奥の名古屋で3.5 m程度、三河湾湾奥の前芝において3.0 m程度の潮位偏差が発生することがわかる。

(3) 波浪予測計算

波浪予測計算は、高潮予測計算と同様2000年時の計画地形で行う。ただし、波浪は高潮と比較して地形的な影響を受けやすいことから、港湾周辺について、さらに100

m格子領域を設定する。図-7は、伊勢湾台風が再来した場合の最大波高の分布を例示するものである。図より、伊勢湾内の波浪特性として以下のことが言える。

伊勢湾台風再来時の外洋の波高は、12.0～14.0 m程度となり、湾内においても3.0～4.0 m程度となる。伊勢湾湾口から湾内に侵入する波は、湾口の複雑な地形の遮蔽効果により減衰する。湾口から侵入するSE系の波浪により、知多半島先端および松阪から四日市にかけての三重県沿岸において波高が相対的に大きくなる。外洋侵入波の影響が大きい知多半島沿岸および三河湾湾口付近、松阪から四日市にかけての三重県沿岸では、湾内の他の地域と比較して波高、周期ともに大きくなる。伊勢湾は外洋に向かって湾口が開いた形となっているため、外洋侵入波が進入しやすい地形となっている。

さらに、図-8は、図-7に示す波浪予測結果を基にして、図-6と同様の地点における最大波高、周期の抽出結果を表す。図中の●印が最大波高を、○印が最大波高発生時の周期を表す。図より、鳥羽は湾口付近に位置するものの、地形的な遮蔽域に入っているため、波高が小さくなっている。港内に位置する松阪、四日市、名古屋お

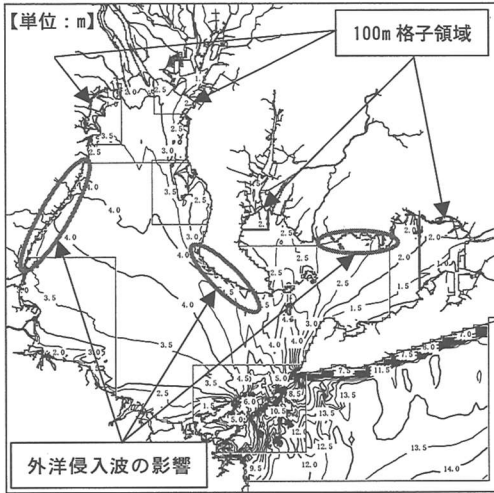


図-7 伊勢湾台風再来時の最大波高の分布

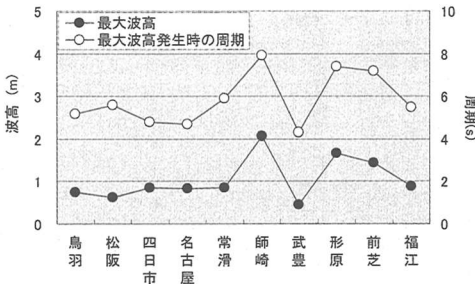


図-8 代表地点における最大波高および周期

よび武豊は、構造物によって波が遮蔽されるため、他の代表地点と比較して波高が小さい。

4. 越波量を用いた安全性の点検

越波量を算定する外力条件として、前述した高潮、波浪の予測結果を5分間隔で抽出して用いる。越波量の算定は、合田（1975）の越波流量推定法を基本とする。ただし、現地海岸への適用を考え、広い計算条件での越波量の算定を可能にするために、合田の越波流量推定図に示される既存の推定曲線を、あらかじめ外挿することで、推定曲線の追加補足をを行う。

図-9は、伊勢湾内の各海岸保全施設における最大潮位偏差の発生時と最大波高の発生時の時間差を表す。図中に太線で表す縦軸0の位置が、最大潮位偏差の発生時刻であり、この太線の上に丸印がある場合は、最大波高が最大潮位偏差より後に発生することを表し、下方に丸印がある場合は、最大波高が最大潮位偏差より前に発生することを表す。また、図中の点線は、最大潮位偏差発生時の ± 120 分を表す。図より、最大潮位偏差と最大波

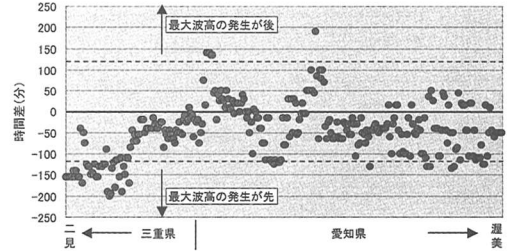


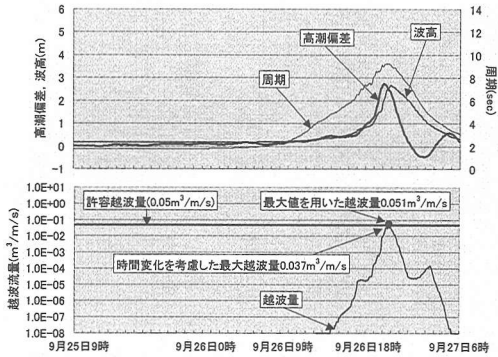
図-9 最大潮位偏差と最大波高の発生時間差

高の発生は同時ではないことがわかる。その傾向を見ると、三重県沿岸では、ほぼ全ての地点で最大波高が最大潮位偏差より早く発生しており、その差は50～200分程度となる。また、愛知県沿岸でも、多くの地点で最大波高が最大潮位偏差より50～100分程度早く発生する。ただし、地点によっては、最大波高が最大潮位偏差より50分～200分程度遅れて発生する箇所もある。このように最大潮位偏差と最大波高の発生時間には地点によってバラツキがある。

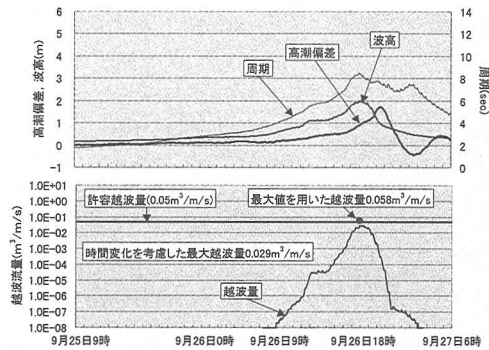
図-10は、伊勢湾沿岸の海岸保全施設Aにおける伊勢湾台風発生時の潮位偏差、有義波高、有義波周期と越波量の時間変化を表す。図の上段に、潮位偏差、有義波高、有義波周期、下段に、それらを入力条件として算定される越波量の時間変化を表す。また、下段の太線は、コンクリート三面巻き堤防の被害限界越波量である、許容越波量 $0.05 \text{ m}^3/\text{m/s}$ を表す。この施設において最大潮位偏差と最大波高を用いた越波量の算定を行うと、越波量 $0.051 \text{ m}^3/\text{m/s}$ となり、許容越波量を満足することができない。しかし、時間変化（この地点の最大潮位偏差と最大波高の発生時の時間差は50分）を考慮した越波量最大値は $0.037 \text{ m}^3/\text{m/s}$ となり、許容越波量を満足する。

また、図-11は、最大潮位偏差と最大波高の発生時の時間差が155分である、別の施設における越波量の時間変化を表す。この施設においても最大潮位偏差と最大波高を用いた越波量は $0.058 \text{ m}^3/\text{m/s}$ となり、許容越波量を満足しない。しかしながら、時間変化を考慮することで、越波量は最大でも $0.029 \text{ m}^3/\text{m/s}$ となり、許容越波量を満足する。このように、最大潮位偏差と最大波高の発生時間の時間差が大きくなるほど、越波量は小さくなる傾向がある。

図-12は、伊勢湾全海岸において、最大潮位偏差と最大波高を用いた越波量と、時間変化を考慮した越波量の比較を行った結果である。○印が最大値を用いた越波量、●印が時間変化を考慮した越波量であり、灰色網掛け部分は、許容越波量 $0.05 \text{ m}^3/\text{m/s}$ 以上を表す。図より、時間変化を考慮することで、伊勢湾全域の各海岸で、越波量が減少する傾向が見られる。特に、最大値発生時間



図一10 潮位偏差、波高、周期および越波量の時間変化 (最大潮位偏差と最大波高の発生時間差 50 分)

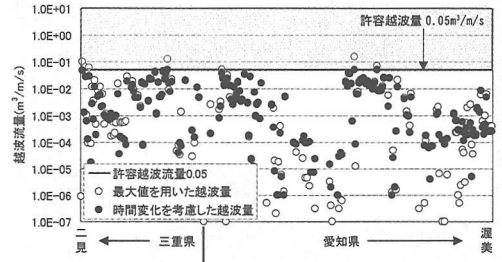


図一11 潮位偏差、波高、周期および越波量の時間変化 (最大潮位偏差と最大波高の発生時間差 155 分)

差が大きい海岸や、外洋侵入波により波浪の影響が大きくなる海岸において越波量の減少が顕著である。

以上の結果から、時間変化を考慮した越波量は、最大値を用いた越波量の 5～9 割程度となり、最大値発生時の時間差が大きいほど、越波量が小さくなる傾向がある。

この結果より次のことが言える。①時間変化を考慮した外力に基づく越波量を指標とすることは、計画天端高を低下させることにつながる。これは、図-4 で想定した 5 台風全てについて成立する。②本論文で提示した結果は、想定 5 台風の中の 1 条件である、伊勢湾台風時の外力のみを想定している。したがって、安全性に充分配慮



図一12 伊勢湾全域の各海岸における算定方法の違う越波量の比較

した結果とは言えない。しかしながら、③本論文で提示した、時間変化を考慮した越波量の算定方法は、実際の現象に即したものであり、経済的な施設計画に寄与する可能性がある。

5. おわりに

- ① 外洋侵入波を考慮した波浪予測結果より、外洋侵入波の影響を受ける知多半島および三河湾湾口付近、松阪から四日市の三重県沿岸の波高、周期は、他の海岸と比較して大きくなることが確認できた。
- ② 時間変化を考慮した越波量は、最大値を用いた越波量の 5～9 割程度となり、最大値発生時の時間差が大きいほど、越波量が小さくなる傾向が確認できた。
- ③ 時間変化を考慮した越波量の算定方法は、実際の現象に即したものであり、経済的な施設計画に寄与する可能性がある。

参考文献

- 合田良實 (1970): 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 9 巻, 第 4 号, pp. 1-41.
- 合田良實・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 4 号, pp. 3-44.
- 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.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波工による越波量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第 21 巻, 第 2 号, pp. 151-205.