

近年の異常気象を踏まえた設計に用いる波の見直し

北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 ○宗村 大成
北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 志賀 守
北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 中村 俊之

1. 近年の異常気象による災害の頻発化・激甚化

港湾は日本の貿易量の99.6%を占め、人口と資産の約5割が集中する港湾及びその背後地が、異常気象による高潮・高波・暴風等で被災した場合、人流や物流が停止し、経済活動に甚大な被害を及ぼすことになる。

1) 近年の港湾・空港災害事例

a) 平成30年台風第21号

暴風や高潮の影響で、神戸港ではコンテナが散乱し、トンネルでは冠水する被害を受けた(図-1)。

関西国際空港では走錨したタンカーが連絡橋へ衝突、空港内は浸水による被害を受けた(図-2)。

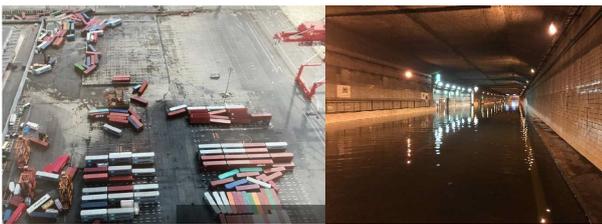


図-1 (左) コンテナの散乱, (右) 道路トンネルの冠水



図-2 (左) 走錨による連絡橋衝突, (右) 関西国際空港の浸水

b) 令和元年房総半島台風、令和元年東日本台風

房総半島台風では、横浜市の護岸上部工が断続的に約600m倒壊し、一部では護岸の陥没も確認された。また、背後の工業団地一体へ浸水する被害を受けた。

東日本台風では、川崎港の栈橋岸壁では波が下から突き上げる揚圧力の影響でエプロンが破壊された。

2) 近年の異常気象を踏まえた波の見直し

このように異常気象による災害が多発する中、従来の想定を超えた高波・高潮・暴風を含む最新の観測データを活用して、最新の推算手法により

北陸管内港湾(新潟港～敦賀港)の設計沖波を更新したので、その算定方法と結果について報告する。

2. 北陸管内港湾施設の被災状況

北陸管内でも被災が発生している。港湾施設が老朽化していることも考えられるが、建造時に設定した設計波浪よりも大きな波の作用により被災したと思われる。

1) 2018年冬季風浪による被災

a) 新潟港(西港地区)西突堤

方塊3段積みの構造物に冬季風浪が作用し、中段の方塊が抜け落ちる被害を受けた(図-3)。

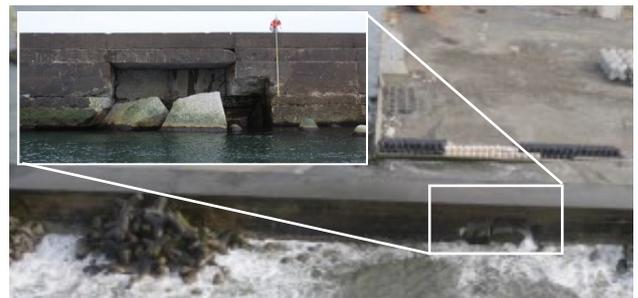


図-3 新潟港(西港地区)西突堤被災状況

2) 2021年冬季風浪による被災

a) 直江津港(港口地区)沖防波堤

防波堤の上部工に高波が作用し、上部工が欠損する被害を受けた(図-4)。



図-4 直江津港(港口地区)沖防波堤被災状況

b) 金沢港(金石地区)西防波堤

本施設は、防波堤本体に波浪が繰り返し作用し、冬季風浪により本体が決壊する被害を受けた(図-5)。

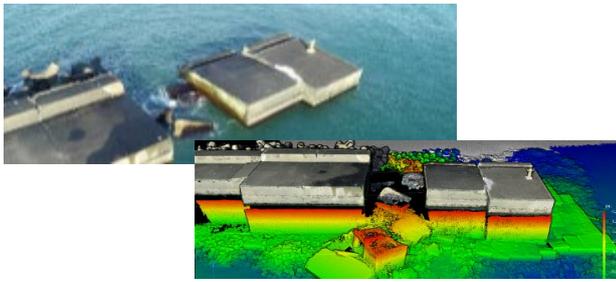


図-5 金沢港(金石地区)西防波堤被災状況

3. 波が発達する条件

1) 波が発達する条件

波は海上で風が吹くと、海面に波が立ち始め、たち始めた波は風の吹く方向に進んでいく。波が進む早さ（以下、波速）より風速が大きければ、波は風に押されて発達を続ける。このように、海上で吹いている風によって生じる波を「風浪」と呼び、風浪は発達過程の波に多く見られ、個々の波の形状は不規則で尖っており、強風下ではしばしば白波が立つ。発達した波ほど「波高」が高く、「周期」と「波長」も長くなり、「波速」も大きくなる。

一方、風浪が風の吹かない領域まで進んだり、海上の風が弱まったり風向きが急に変わるなどして、風による発達が無くなった後に残される波を「うねり」と呼ぶ。うねりは減衰しながら伝わる波で、同じ波高の風浪と比較すると、その形状は規則的で丸みを帯び、波の峰も横に長く連なっているためゆったりと穏やかに見えることがあるが、うねりは風浪よりも波長や周期が長いために水深の浅い海岸付近では海底の影響を受けて波が高くなりやすい性質を持っている。そのため、沖合から来たうねりが海岸付近で急激に高波になることもある。

a) 最高波，最高波周期

ある観測期間中にみられる個別波の中で、波高が最も高い波を最高波高（Hmax），この波の周期を最高波周期（Tmax）と呼ぶ。

b) 有義波，有義波周期

ある観測期間中に記録された個別波を、波高の高い方から順に全体の1/3の個数の波を選び、これらの波高および周期を平均したものをそれぞれ有

義波高（H1/3），有義波周期（T1/3）と呼ぶ。

c) 平均波，平均波周期

ある観測期間中に記録された全ての個別波の平均でその波高を平均波高（Hmean），周期を平均波周期（Tmean）と呼ぶ。

4. 北陸管内の観測状況

1) 北陸管内の波浪・潮位観測施設

北陸管内の各港湾の沖、8箇所に波高計が設置され、港湾事業（計画・設計・施工・災害）の実施に活用している。

2) 北陸管内の近年の観測結果

観測されたデータを用いて管内の波浪の変化を整理した。

a) 波浪観測結果

例として新潟沖で観測された一番古い観測データ(1975年)から最新の観測データ(2020年)を比べてどれだけ高波が増えているのかをまとめた。結果として、3m以上の波の発生率が3%から3.6%と1.2倍に増え、5mや6m以上の波も観測されるようになっていたことが分かった(図-6)。



図-6 新潟沖の波の変化

b) 観測平均結果

2010年を基準に1.0とした場合の北陸全体の最大波高、有義波高の経年変化は以下のグラフに示すとおりである。

相関式は最大波高、有義波高ともに高くなる傾向を示した(図-7)。



図-7 北陸管内の平均最大波高，有義波高

観測結果による気象条件の変化は、高波の発生率が上がり、観測される波は若干高くなっている傾向を示した。

5. 推算沖波の見直し

推算沖波とは、過去に高波をもたらした台風や冬季風浪等の気象擾乱を選定し、その気圧配置等を再現してシミュレーションにより求めた波が変形（浅水、屈折、回折）の影響を受けない地点の波高と周期のことである。

1) 気象擾乱の選定

気象擾乱の選定では、各港の観測値から、高波が発生した期間を抽出した。

結果、1986～2019年の気象擾乱は低気圧による擾乱が268個、台風による擾乱が25個選定した。

2) 推算波浪の算定

a) 海上風の推算

海上風の推算では、選定した気象擾乱に対して、波浪推算の外力条件となる海上風の推算を行った。

この結果に対し、再現精度を気象庁が観測している風データから再現性の確認を行った。

比較結果は、観測地点によって周辺が住宅街や丘陵地により観測地の方が小さい傾向の地点が存在したが、海上風の推算としての精度には問題が無いと判断した。

b) 波浪の推算

波浪推算モデルは、WAM、WAVEWATCHIII（ウェーブウォッチスリー、以降、WWIII）、SWANと第3世代波浪推算モデルがある、北陸管内では多くの実績があるWAMを基本とし、うねり性波浪が卓越する伏木富山港のみ、周期やうねりの推算精度が高いとされているWWIIIを採用した。

c) 波浪推算結果の確認

結果の検証は推算結果と観測結果の時系列比較による。

図-8の赤線が推算値、青線が観測値を示す。

推算値と観測地の間はずれが生じているものが見られるが、波高、周期、波向きの時系列的な変化傾向は概ね一致しているといえる。

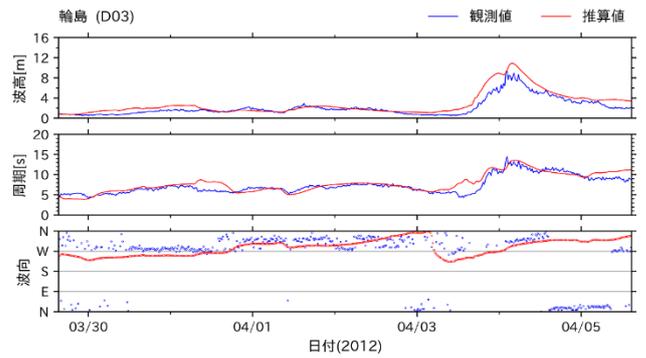


図-8 WAMによる波浪推算結果と観測結果の比較 輪島港
(2012年の日本海低気圧)

3) 波浪変形計算

これまでは主に波浪推算に関するものであった。しかし、波は水深の影響を受け、浅水、屈折変形をしながら進行することから、より精度の高い推算値を確認するため、波浪推算値を用いた波浪変形計算を行った。

a) 波浪変形計算モデル

この波浪変形計算には2つのモデルがあり、エネルギー平衡方程式モデルは一般的に開けた地形に採用し、ブシネスクモデルは、水深の起伏が大きく屈折変形による波の収斂が考えられる場合に用いる。

伏木富山港、敦賀港では、観測地点が湾奥に位置し、地形が複雑な港であることからブシネスクモデルを採用し、その他の港はエネルギー平衡方程式モデルを採用した(図-9)。

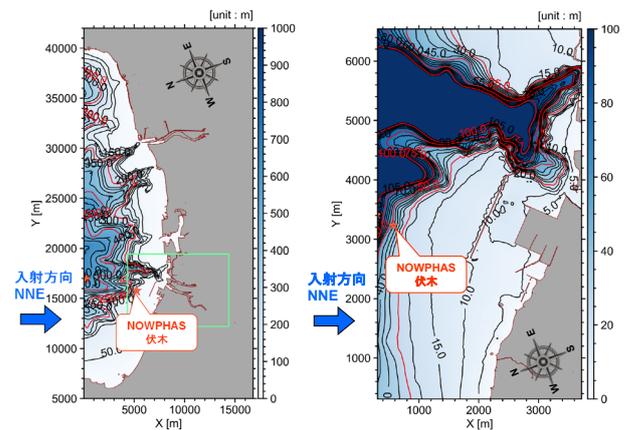


図-9 各モデルの計算メッシュ 伏木富山港

b) 波浪推算値の検証

各港の各擾乱で求めた波浪推算値から波浪変形計算を行った推算波高・周期と、観測波高・周期の相関解析結果の一例として金沢港の結果を図に

示す(図-10).

横軸が実測値，縦軸が推算値となり， y が回帰係数， R が相関係数， n が個数である。

破線と実線が重なれば，実測値と推算値が一致しているとなり $y=1.00$ ， $R=1.00$ となる。実線が上に振れると推算値が過大，下に振れると推算値が過小といった読み取りになる。

この回帰係数 y の逆数により求められた補正係数を用いて波浪推算結果を補正する。

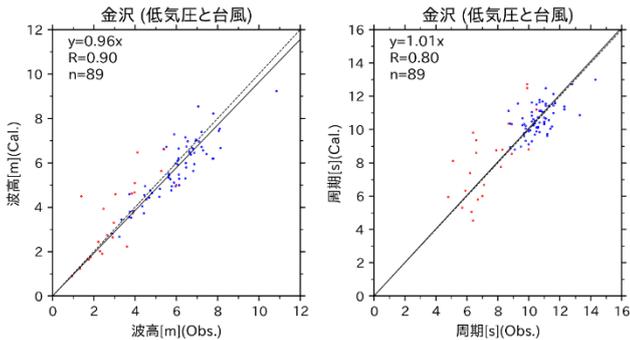


図-10 推算結果(WAM)と観測結果の相関解析結果 金沢港

6. 設計に用いる確率沖波の算定

波浪推算値の検証で得られた結果を用いて，波浪の極値データを作成し，極値統計解析を行い代表確率年10年と50年の値を算出する。

この代表確率年は，港湾施設の耐用年数が50年であること，施設が完成形になるまで概ね2～3年，場合によっては5年程度かかることから10年の確率波を用いて設計するために設定する。

1) 極値統計解析

対象擾乱全ての波浪推算結果から極大波高を波向き毎に抽出・整理し，極値統計解析用データを作成する。

このデータから，「合田の極値統計解析」を用いて最適な分布関数により設計沖波波高を算定する。

このような解析を各港，各波向きにおいて実施することで，各港沖合における10年，50年の確率波が求まることになる。

2) 設計沖波の決定

これまでの計算の過程を経て，各港の各沖波地点において，設計沖波が決定する。

結果の一例として，図-11に示す輪島港で求めら

れた新しい設計沖波と以前算定(2001年度算定)した設計沖波を比較すると，前設計沖波よりも本設計沖波の方が，波高，周期ともに大きく，波高は約20%増，周期は7%増となった(W～NEの7波平均)。

この理由として，前設計沖波算定時より，計算処理能力が向上し，計算格子が細くなったことで詳細な波の変形(屈折，回折，浅水)が再現できたこともあるが，以前算定後に北陸管内において既往最大波高が観測され，その気象擾乱を反映させたことが主な理由と思われる。

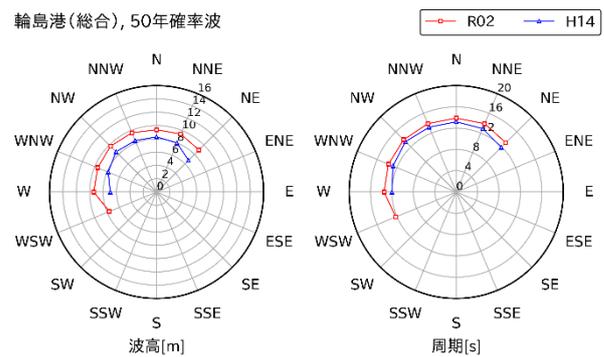


図-11 前設計沖波と新設計沖波の比較 輪島港

7. まとめ

港湾施設に作用する主な外力である波浪の算定方法について報告した。北陸管内の実測の結果から，高波の発生数が増え，管内施設で高波による災害が発生しており，設計沖波の設定では，新しい気象擾乱を反映させた結果，大きな値に更新された。

今後の設計では，求められた推算確率波を用いて設計を行うことになる。

異常気象により港湾施設が被災し，経済活動に甚大な被害を及ぼすことにならないためにも，北陸の港湾施設を自然災害に強くする設計に努めていきたい。