

2004年台風による高波災害の被災パターンについて

平山克也*・平石哲也*・南 靖彦**
奥野光洋**・峯村浩治***

2004年には西日本を中心に多くの台風が来襲し、日本各地の沿岸部で高潮および高波による港湾・海岸構造物の被災が数多く発生した。本稿では、その中で高波に起因すると思われる被災施設に限定して可能な限り直接現地調査を実施し、現地データや数値解析を基に被災状況の解析を行った。これらの被災パターンを考察した結果、①高潮位時の波力算定の考え方、②地形の影響による波力の集中的作用、③短時間における越波集中、④漂流船舶の衝突、等が主な被災要因になっていることがわかった。ただし、港湾・海岸構造物の被災は、複合的な要因で発生すると考えられるため、被災施設の今後の復旧や防災計画を立案する際には、本稿に加えさらに詳細な検討が必要となる。

1. はじめに

2004年は西日本を中心に、合計10個の台風が上陸し、多くの地点で甚大な高潮および高波による被災をもたらした。その中でも台風16, 18および23号は台風規模も観測史上最大級に相当し、広い範囲で市街地浸水、護岸・堤防の破壊、防波堤滑動などの災害を発生させた。これらの災害状況を分析し、被災原因を分類しておくことは今後の復旧や防災計画を立てる上で重要である。

近年の大規模な高潮・高波災害の例として、1992年の台風19号、1999年の台風18号がある。このうち99年18号による大規模な浸水被害の要因については、現地調査をもとに、詳細な解析が進められており（例えば、平石ら、2000；光永ら、2004）、高潮偏差推定法の改良（河合ら、2003）や内湾での波浪推算モデルの改良（例えば、川口ら、2000）等の研究を促す要因となっている。ただし、台風18号による被災は、八代海および周防灘沿岸に集中し、海岸堤防・護岸のパラベット部崩壊が主な被災形態であった。したがって、多くの被災パターンが出現した2004年の台風災害は非常に稀な現象であったと推測される。

そこで、全国の台風被災現場を調査し、台風来襲時の潮位・波高に関するデータを収集すると共に、被災状況の推定を試みた。被災に至った過程は複雑であるものの、全国の代表的な被災地10カ所での調査から被災原因を分類し、それぞれの被災形態について適切な対策方針を提案することにした。なお、瀬戸内海に面する高松港などでは、台風来襲時に海水が氾濫し、広範囲に渡って浸水被害が生じた。ただし現地調査によれば波浪の影響は小さく、主要な被災要因は高潮による水位上昇であったと考えられている（富田ら、2005）。しかし、本研究では、

このような被災形態は調査対象外とし、高潮発生の有無に関わらず、台風による高波に起因すると考えられる港湾・海岸構造物の被災パターンに着目することにした。

幾つかの被災地では、被災原因対策委員会を設置して被災原因の究明および復旧対策の策定を行っている（例えば、国土交通省北海道開発局、2004）。本研究で活用したデータの大部分は対策委員会でも採用され、被災原因解明に大きな役割を果たしている。その中には、著者の一人が委員として参加し、委員会における報告書作成に中心的な役割を果たしているものもあるが、それらの委員会では、他の委員の意見も参考にして被災要因がまとめられている。

本研究で用いた海象データは委員会で用いられた数値と同じであるが、作用外力の計算においては一部手法が異なるため、記述内容は必ずしも委員会における結論と同じではない。さらに、本研究で対象とした被災地は、著者が直接調査を実施した場所に限定しており、全国すべての被災例を示すわけではない。また、ある被災施設について、全ての被災原因を網羅的に示したわけではなく、限られたデータの範囲で考え得る対策案を提示しているに過ぎない事を考慮していただきたい。

2. 現地調査と波浪解析

高波による越波や護岸の破損などが生じた被災施設を抽出して、以下のような現地調査を行った。現地では護岸の破壊状況、越波による浸水と背後地の被害、消波工や前面海浜の有無、岸壁エブロンや防波堤の変形、パラベット崩壊状況などの被災状況を調べ、できるだけNOWPHAS（永井・里見、2005）を用いて、潮位や沖波波高・周期を整理した（平山ら、2005）。浅海域に位置し複雑な波浪場が想定される対象海域においては、被災護岸・堤防に対する作用波を確定するために、エネルギー平衡方程式法（高山ら、1991）による波浪変形計算、あるいはNOWT-PARI（平山、2003）による非線形波浪解析を行った。

* 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
** (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
*** 上修 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部 研修生

(1) 台風16号について

2004年の代表的な台風として、本稿で調査対象とした台風16, 18, 23号の経路を図-1に示す。台風16, 18号は、ほぼ同様な経路を経て、九州西部を縦断した後に、日本海を高速で進み、20数時間後に北海道に再上陸している。また、台風23号は、やや南よりのコースを東西に進み四国に上陸したあと、近畿、東海を横断している。これらの台風により、台風16号および台風18号では、西日本および北海道で既往最大値を更新する波高が観測され、台風23号では四国南岸の室津港沖でNOWPHAS 観測史上最大となる有義波高値が観測された。

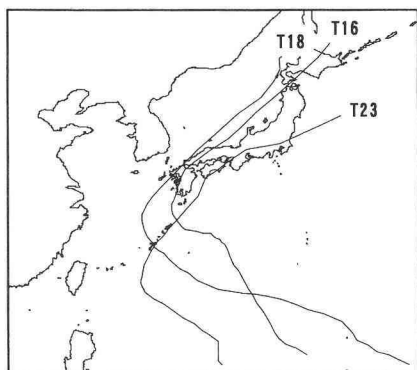


図-1 台風経路図(台風16,18,23号)

台風16号は8月30日～31日にかけて九州・中国地方を縦断した。長崎県島原港では、海岸に面するホテル南風荘敷地周辺の護岸が崩壊し、ホテル本館および背後の民家が浸水した。現地調査で計測された市街地での最大浸水深は約75 cmであった。被災時の波浪状況を推定するため、島原港での観測最大風速17 m/s および有明海におけるフェッチ20 kmとして、SMB法による波浪推算を実施した。そして、エネルギー平衡方程式法を用いて推定された護岸前面の作用波高は有義波高1.6 mであった。

宮崎県細島港では、港口部の鉄筋コンクリート製のイクイバエ灯台が高波によって流出した。灯台は設置から50年以上経過しており、高波に加え、構造物そのものの劣化による強度低下が、被災の一因と考えられる。

また同県宮崎港では、台風16号通過後に南防波堤堤頭部においてケーソン壁の損傷、中詰砂の流出(写真-1)が確認されると共に、堤体前面の消波ブロック破損や沈下が発生する被害があった。被災当時、堤頭部は施工途中であったため、最先端部のケーソンには消波工による巻止めが行われていない状態であった。被災時の波浪状況は潮位 D. L.+0.60 m、沖波波高11.05 mであり設計波よりは小さかった。図-2は、NOWT-PARIによる解析の結果得られた、ケーソン側壁が損傷した堤頭部周辺の有義波高分布である。これによると、堤頭部付近では

マウンドによる波高増大がみられ、特に直立壁となっている防波堤先端部では最大で有義波高14 mに達している。

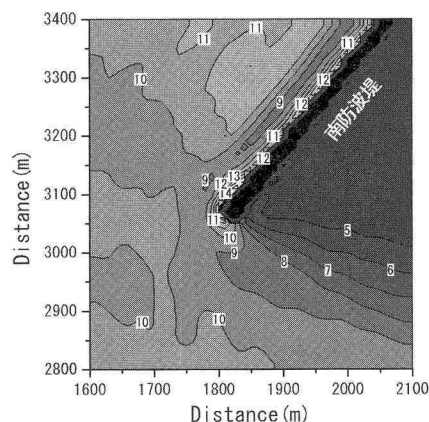
写真-1 ケーソン側壁の破壊状況
(国土交通省 宮崎港湾・空港整備事務所 提供)

図-2 防波堤周辺の波高分布

神戸市中央区新港町・海岸通付近は、高潮・越波によって1 m近く冠水し、国道が遮断され、商店街が浸水した。また神戸沖で稼働する大阪湾広域臨海環境整備センターの神戸沖埋立地では、南側護岸上部工および西側護岸被覆工の破壊・滑落が発生した。写真-2は、神戸港中央突堤付近の状況写真であり、潮位が岸壁天端高に迫り、越波により浸水している事が判る。台風16号による被災時の神戸港沖での波浪観測値は、最高潮位 K. P.+2.66 m、有義波高3.6 m、周期7.6 sであり、また同様の被害を及ぼした台風18号の時は最高潮位 K. P.+2.54 m、有義波高3.8 m、周期7.5 s (K. P.は神戸港基準面)であった。写真の岸壁天端高は K. P.+3.00 mであり、撮影された状況から神戸港内での潮位は観測潮位より高く、ほぼ K. P.+3.0 m に近かったと考えられる。つまり、高潮に加えて波浪による越波浸水が生じた事が神戸市内の浸水被害の要因であると考えられる。なお、現在 K. P.+4.1 m の胸壁工事が進捗中である。

神戸沖埋立地での施設設計波は50年確率で有義波高3.7 mであり、観測波高より大きいため、越波に対して



写真-2 神戸港の浸水 (9/7 18:00)
(神戸海洋博物館 提供)

は、十分な安全性を有している。しかし、上部パラベットの安定性計算には、H. W. L. (K. P.+1.70 m) が採用されていたため、被災時潮位はそれより1m 高い。また、消波工天端は満潮位に対応しているの、水面が消波工天端より上昇した場合には、衝撃碎波力が作用する可能性が高くなる。したがって作用波が設計波より小さいにも係わらず、護岸被災が生じた要因となっている。一方、西側護岸は、外側へ押し出されるように被災していることから、高潮によって裏込め層内の水位が上昇したことが、何らかの影響を及ぼしている可能性がある。

関西国際空港では南西側護岸および南東側護岸にかけて、セキュリティフェンスおよび場周道路舗装が破損した (写真-3) ほか、高波浪の越波により空港内が浸水するなどの被害が生じた。このとき MT 局で観測された暫定海象データの最大値は、最大波高5.6 m、有義波高3.7 m、潮位 D. L.+2.4 m であり、設計波よりも小さかった。それでも、被災が生じた原因の一つとしては、空港島の長期的な沈下の進行により所要の天端高を満足できていない状態で、高潮位、高波浪が来襲したため、衝撃的に大きな波力が作用したことが考えられる。

(2) 台風 18 号について

台風18号は9月8日～9日にかけて、北海道のほぼ全

域を暴風域に巻き込みながら日本海沿岸を北上し、道内各地に大きな被害をもたらした。函館市付近では75 km/h (約21 m/s) という高速で北東に進んだため、台風進路の東側に当たる道内各地では猛烈な強風が吹き荒れ、8日7:45には函館市で瞬間最大風速41.5 m/s (風向SSW) を観測した。この台風に伴う高波浪により、函館港では沖合の島防波堤 (全長400 m) がケーソン2函だけを残し370 m 以上にわたって転倒するなどの被害がみられた (図-3)。その被災状況は多様で、台風来襲時に複雑な波浪外力が作用したものと考えられる。

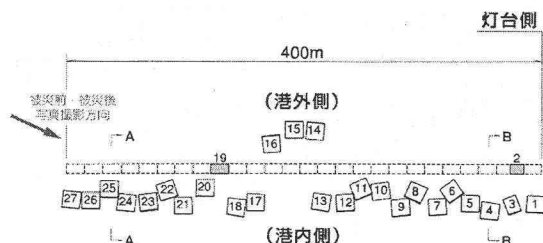


図-3 台風18号による島防波堤被災状況
(国土交通省北海道開発局函館開発建設部提供)

そこで、越波と遡上を考慮した NOWT-PARI (平山・平石, 2005) を用いて、函館港におけるピーク波浪時の波浪変形計算を実施し、島防波堤に作用した波浪外力の推定を試みた。全国54箇所で波浪観測を行っている NOWPHAS では、残念ながら函館港での観測は行っていないため、WAM の波浪推算結果 (橋本ら, 2005) を参考に、有義波高6.68 m、周期10.88 s、波向 SW とした。図-4 は、台風18号による高波浪来襲時の函館港島防波堤周辺において、計算開始777.5 s 後にみられた水面波形のスナップショットである。これをみると、西防波堤および北防波堤の前面では、沖からの入射波と壁面での反射波が重畳し三角波が形成されていることがよくわかる。

また、沖波の主波向に対してほぼ垂直な島防波堤の前



写真-3 南西側護岸セキュリティフェンスおよび場周道路破損 (関西国際空港株式会社 提供)

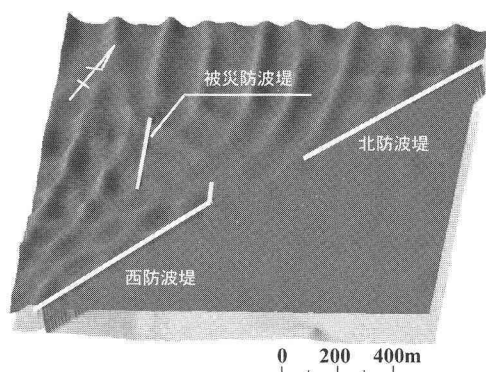


図-4 島防波堤周辺の水面波形 (計算開始777.5 s 後)

面では、沖からの入射波と壁面からの反射波による重複波に西防波堤からの反射波が重畳していることがわかる。

(3) 台風23号について

10月20日に高知県土佐清水市に上陸した台風23号により、西日本各地で土砂崩れ、河川堤防の決壊、雨水による市街地浸水等の甚大な被害が生じた。高知県室戸市の菜生（なばえ）海岸では20日3:00頃、来襲した高波によりの堤防延長100 mにわたって被災が生じ、そのうち30 mでは上部工およびパラペットが倒壊して背後の住宅が壊れ、死者3名、負傷者2名という被害が生じた（写真-4）。このとき、沖合1.5 kmの地点でNOWPHAS（永井・里見，2005）により観測された来襲波は有義波高13.55 m，周期15.8 s，観測潮位はD.L.+5.08 mであり，風向等から推測される波向はSSWであった。

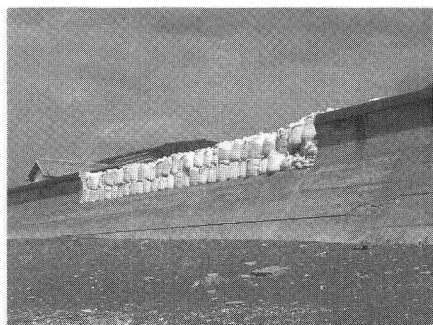


写真-4 室戸市菜生海岸堤防の被災状況
(上部の補修部分が、破壊されたパラペットに相当)

また、菜生海岸堤防の中央付近および隣接する室戸岬漁港の護岸では、越波の痕跡が確認できる。実際、現地におけるこれらの箇所では越波による被災がみられ、それぞれ上部パラベットの崩壊や護岸内緑地の損壊が生じていた。写真-5に室戸岬漁港における荷揚げ場の舗装破壊を示す。また図-5には、被災断面の模式図と潮位の関係を示す。海岸堤防に作用する波圧は、富永・久津見の式(土木学会, 2000)で近似できる。 $H_0' = 14 \text{ m}$, $T_0 = 16 \text{ s}$, 護岸の被災時汀線からの距離 $x = 10 \text{ m}$ とすると、波圧分



写真-5 室戸岬漁港における荷揚場舗装破壊

布は図の右下にある三角形分布で近似できる。 $R_0=22\text{ m}$ で堤防天端高よりも大きくなるので、破壊面より上方のパラペットに作用した波力だけを算定したところ、約 $P=500\text{ kN/m}$ であった。この値は、幅 62 cm のコンクリート面のせん断耐力 $P'=365\text{ kN/m}$ よりも大きく、被災に大きな影響を与えた可能性がある。また、NOWT-PARIを用いた被災時の波浪場推定結果（平山・平石, 2005）においても、海底地形による屈折変形によって、多方向波が次第に一方向化し、海岸を遡上していく様子を確認されている。これらの事から被災海岸堤防には、大きな波力が繰返し作用していたものと考えられる。

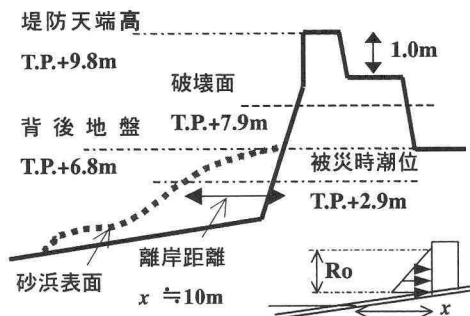


图-5 菜生海岸堤防被災断面

富山県伏木富山港（伏木地区）では、台風23号来襲時に観測開始以来最大の波高（10/20 22：00 潮位 D. L. +0.8 m、有義波高6.53 m、周期8.4 s）を記録し、さらに瞬間最大風速では観測史上2位の40.6 m/sが観測された。そのため伏木地区では万葉ふ頭緑地公園の親水護岸でアルミ製柵や舗装の破損が発生したほか、写真-6に示すように伏木万葉1号岸壁（-7.5 m 岸壁）ではロシア籍貨客船が係留中、係留索が破断し、岸壁との衝突により浸水・転覆した。この衝突により上部工およびスリット部の一部が剥離し鉄筋が露出している状態であった。



写真-6 万葉ふ頭1号岸壁 ロシア船転覆
(国土交通省 伏木富山港湾事務所 提供)

3. 被災パターンの分類と対策

被災現場の状況と作用波高・潮位を検討して被災パターンを分類した。ただし、被災要因は単独な原因ではなく複合的な要因であることが多いので、1つの被災事例が2つ以上のパターンに分類されている場合もある。

(1) 高潮位による波力算定式が導入されていない場合

港湾の技術基準(日本港湾協会, 1999)では、越波の算定は高潮偏差を加えた設計潮位を用いることが一般的である。一方、波力の算定では、満潮位に対して適切な再現年を用いた確率波が来襲するものとしている。したがって、パラベットの設計波力は、満潮位に対して設定されている場合が多い。神戸港沖合埋め立て地や関西空港では、高潮による潮位上昇時に設計波が作用し、消波工がパラベット上部まで設置されていなかったために、衝撃的な碎波力が作用したものと考えられる。したがって、重要な施設に対しては、波力計算時の潮位としても高潮偏差を満潮位に加えた水位を用いることが重要で、コストが大きくなるときは潮位設定に際して確率的な考え方を導入する(光永ら, 2003)等の対策が考えられる。

(2) 地形の影響による波力集中

隣接防波堤や防波堤延長方向の波高変化により、防波堤の沖側と内水側で水位差が生じ、滑動安定性に影響を与えた例(函館港)や前面海浜が短く、波力減衰効果が局所的に小さくなったと考えられるケース(菜生海岸)では、局所的な波浪の作用状況の差が被災の有無に関係している。このような海域においては、非線形波浪変形モデルを活用した詳細な波浪予測が重要になる。

(3) 短時間越波の増大と消波効果の低減

平均越波流量に比べ、短時間越波流量は数倍になるので(関本ら, 1992)、瞬間的な越波により背後の舗装面破壊が生じたり(関西空港)、係留していた作業船が破損を受ける(大間港)場合がある。また、消波工が沈下すると、越波量が設計値よりも増加し、許容値を大きく超え、背後に浸水被害を招く恐れがある。対策としては、透水性を有し、うねりに対しても反射率が低くなる新しい護岸構造の導入などが有効である(平石, 2004)。

(4) 漂流船舶による岸壁施設破壊

伏木地区の係留船舶被害および岸壁損傷の要因として、伏木地区の第一線防波堤である北防波堤の設計波と同等以上の波が直撃し、北防波堤を越波した波がそのまま港内に進入したことや、観測史上2番目となるほどの風の影響が同時に重なったことなど、複数の要因が考えられる。

(5) 設計波を越える甚大な波力(菜生海岸)

観測値や推算値から統計的に設定した設計波を越える波浪外力が発生しており(菜生海岸)、今回の観測データをを用いた設計波の見直し等、今後必要になると予想さ

れる。また、想定を越える外力に備え粘り強い構造形式の導入が必須になる。

(6) 背後地盤の影響

越波の打ち込みによる被災例に加え、内部の裏込めの吸い出しが生じた可能性も考えられる。細島港では、物揚場のエプロン床板が10 cm 程度上昇しており、内部の揚圧力による押し出しの可能性が高い。神戸沖埋込地においても、裏込め層内の水位が高潮によって高くなり、主働土圧が設計値より大きくなって護岸が破壊されたことが指摘されている。

4. ま と め

本稿では、2004年に来襲した台風による、全国の被災状況を調査し、その被災パターンの分類を行った。しかし、複合的な要因が重なって発生した被災事例も少なくない。今後、防災計画の立案や災害再発の防止のためには、高波による被災メカニズムを明らかにし、高度な波浪推定を実施することが、ますます重要となる。

参 考 文 献

- 河合弘泰・川口浩二・橋本典明(2003): 台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築。港空研報告, Vol. 42, No. 3, pp. 85-110.
- 川口浩二・橋本典明・永井紀彦(2000): 波浪推算における非線形相互作用の働きとその精度が及ぼす影響。海工論文集, 第47巻, pp. 251-255.
- 国土交通省北海道開発局函館開発建設部(2004): 第3回函館港島防波堤被災調査検討委員会, <http://www.hk.hkd.mlit.go.jp/event/bouhatei3/index.html>, 参照2005-04-01.
- 関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷修・鹿島達一(1992): 人工島防波護岸の短時間越波特性について。海工論文集, 第39巻, pp. 581-585.
- 高山知司・池田直太・平石哲也(1991): 碎波および反射を考慮した波浪変形計算。港研報告, Vol. 30, No. 1, pp. 21-67.
- 土木学会(2000): 海岸施設設計便覧(2000年版)。土木学会, pp. 90.
- 富田孝史・本多和彦・河合弘泰・柿沼太郎(2005): 2004年台風16号による高松の高潮浸水被害。海工論文集, 第52巻(印刷中)。
- 永井紀彦・里見茂(2005): 2004年に発生した異常波の観測結果。港空研資料, (印刷中)。
- 日本港湾協会(1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 上巻, pp. 85-93.
- 橋本典明・鈴木勝之・永井紀彦(2005): 2004年に発生した台風に伴う高波の波浪推算。港空研資料, (印刷中)。
- 平石哲也・平山克也・河合弘泰(2000): 台風9918号による越波災害に関する一考察。港空研資料, No. 972, 19p.
- 平石哲也(2004): 長周期波対策護岸の効果に関する模型実験と数値計算。港空研資料, No. 1093, 21p.
- 平山克也(2003): 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究。港空研資料, No. 1036, 162p.
- 平山克也・南靖彦・奥野光洋・峯村浩治・河合弘泰・平石哲也(2005): 2004年に来襲した台風による波浪災害事例。港空研資料, No. 1098, 42p.
- 平山克也・平石哲也(2005): 平面2次元ブシネスクモデルによる碎波・遡上計算法の開発と現地適用。海工論文集, 第52巻, (印刷中)。
- 光永臣秀・平石哲也・宇都宮好博・三原正裕・大川郁夫・中川浩二(2003): 台風9918号による周防灘での高潮高波被害の特性。土木学会論文集, No. 726, II-62, pp. 131-143.
- 光永臣秀・平石哲也・宇都宮好博・三浦房紀・中川浩二(2004): 周防灘の高潮防災基準の設定。土木学会論文集, No. 775, II-69, pp. 69-80.