

台風 0423 号による室戸の高波災害解析

Coastal Disaster Analysis at Muroto due to Typhoon 0423 (TOKAGE)

間瀬 肇*・安田 誠宏**

Hajime MASE and Tomohiro YASUDA

要旨: 台風 0423 号によって日本各地で起こった高波災害のうち、高知県室戸市室戸岬町菜生海岸の防潮堤の被災を調査した。被災解析に当たっては、気象モデルと波浪モデルにより構築した波浪予測・追算システムを用いた台風時の波浪推算と観測結果とを比較・検討し、また防潮堤に作用する波の状況、防潮堤への波の打上げ高および越波流量を主な解析対象とした。波の打上げ高に関しては、住民の目視観測に近い解析値を得ることができた。

キーワード: 台風 0423 号, 高波災害, 打上げ, 越波, 波浪解析

1. はじめに

これまでの台風の年平均発生個数は 26.7, 日本への年平均上陸個数は 2.6 である (気象庁平成 15 年資料)。2004 年は発生個数が 29 で例年とあまり変わらないが、上陸個数は 10 個と過去最高であった。2004 年の台風による人的被害は 6 月の台風 6 号から始まり、台風 16 号, 18 号, 23 号が、瀬戸内の沿岸部や太平洋沿岸部に高潮と高波による大きな被害を残した。

台風 16 号による高潮は、各地で観測史上最高の潮位を記録した。潮位が 1 年で最も高い夏の大潮と満潮が重なった時に台風が縦断し、気圧低下と吹き寄せ効果が大きかったことが原因である。宮崎県日向市細島港の沖合 2 キロの岩場にあった灯台は、高波にさらわれ消滅した。台風 18 号では、瀬戸内海沿岸、西日本から北日本にかけての日本海側沿岸などで高潮が生じた。

台風 23 号による高波では、高知県室戸市室戸岬町菜生海岸の防潮堤のパラペットが崩壊し、3 人が死亡した。高知県室戸市沖では、被災時間帯

に国内の観測史上最高の波高 13.55m が観測された。同県土佐清水市足摺岬の伊佐漁港では、台風によって漁船を移動させていた男性 5 人が高波にさらわれ 1 人が死亡した。また、同県大月町の檜ノ浦漁港では、2 人が漁船の係留中に波にさらわれ 1 人が行方不明となった。

本論文は、日本各地で起こった高波災害のうち、高知県室戸市室戸岬町菜生海岸の防潮堤の崩壊被災を対象として、気象モデルと波浪モデルにより構築した波浪予測・追算システムを用いた台風時の波浪推算と観測結果との比較・検討、防潮堤に作用する波の状況、防潮堤への波の打上げ高および越波流量を解析したものである。

2. 室戸岬町菜生海岸防潮堤の高波災害

2.1 被災状況

室戸市の高波災害は、新聞等で大きく報道された。10月20日午後2時40分ごろ(その後住民に聞き取りしたところ午後2時10分ごろ)、市営高浜団地裏の防潮堤防のコンクリート製パラペット

* 正会員 京都大学 防災研究所, ** 京都大学 防災研究所

が、激しく打ち寄せた高波により突き崩された。決壊したパラペットはばらばらになり、5mほど飛ばされて住宅の屋根や壁を突き破った。流入した海水は防潮堤と住宅との間で滞留し、屋根の上まで海水に浸かった。

写真1は、被災した防潮堤を海側からみたものである。この被災部分の前面の海岸は他の場所に比べて岩礁が若干少ないので、周辺に比べて多少は波が大きくなる状況にはなっている。防潮堤前面には、砕波して打ち寄せる波で運ばれた砂利が堆積しており、防潮堤法先部の洗掘は見られない。

なお、越波は被災箇所だけで見られたのではなく、この海岸の防潮堤全体にわたって生じていた。したがって、この被災箇所だけが特に波が大きかったわけではない。



写真1 被災した防潮堤

2.2 被災した防潮堤

今回被災した防潮堤は1967年までに菜生海岸沿いに順次完成した全長942mのもので、天端高はTP+9.8m、海に面した外側がコンクリート擁壁で、内部に5~20cm大の碎石を詰め、表面がコンクリートで覆われている。倒壊した約30mの防潮堤上部のパラペットは、すべて継ぎ目の部分から倒壊していた。

写真2は、倒壊したパラペットが市営住宅に突っ込んだ様子を示している。パラペットは、継ぎ



写真2 崩壊したパラペットが飛び込んだ住宅

目部分から外れているのがわかる。

防潮堤をほぼ毎日散歩する近所の住民によれば、盛土部分に穴が開いたり、ひびが入ったりはしていなかったそうである。

図1は、防潮堤の断面を示したものである。被災時の潮位はTP+2.4mであり、既往最大潮位TP+2.2mとほぼ同じであった。防潮堤前面には砂利が堆積しており、その平均勾配は1:5である。また、計画断面は1:50となっている。被災時には、汀線はwave setupによる水位上昇を考慮しても法先から10mほど海側に離れていたと推察された。解析に当たっては、図2に示した海底勾配や潮位を用いた。

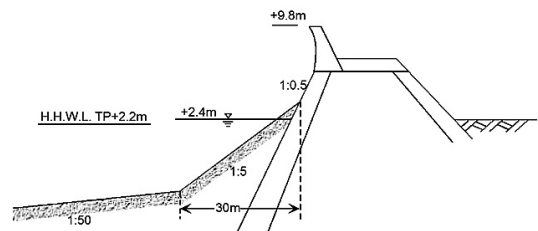


図1 防潮堤と前面地形の断面

2.3 被災時の波浪

防潮堤が決壊した室戸岬町の被災地から約2km西の室津沖で、被災時間帯に観測された波は観測史上最高の13.55m、周期は15.8sであった。過去

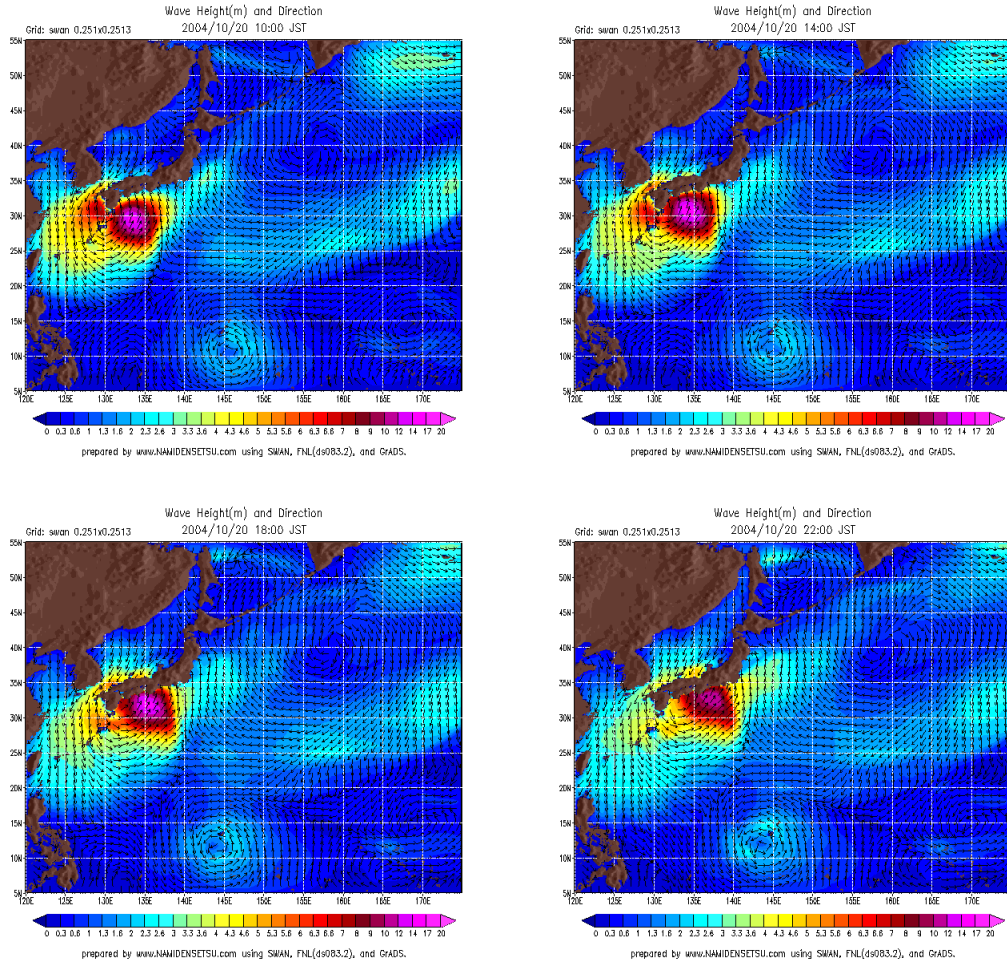


図2 日本近海の波浪予測結果

の最高値は、2004年8月30日に台風16号が通過中に宮崎県細島沖で観測された11.05mであった。

ここでは、気象モデルと波浪モデルを用いて、台風時波浪の推算を行った。構築したモデルは、以下のように、気象モデルであるGFS¹⁾(Global Forecasting System)とWRF²⁾(Weather Research Forecast)、波浪モデルであるSWAN³⁾(Simulating Waves Nearshore)で構成される。

GFS¹⁾は、アメリカ環境予報局(NCEP: National Centers for Environmental Prediction)によって構築された全球気象予報モデルである。気象予報に関しては3時間、追算に関しては6時間毎に経度・緯度方向にそれぞれ1度間隔で、1日4回(00,

06, 12, 18UTC) 384時間先までのデータがweb上にアップロードされる。解析データは1年間無料でダウンロードすることができる。

WRF²⁾は、アメリカ大気研究局(NCAR: National Center for Atmospheric Research)によって開発された局地気象予測モデルであり、GFSのデータを取り込んでメソスケールの気象予測計算ができる。

SWAN³⁾は、デルフト工科大学で開発された第3世代波浪推算モデルである。

波浪予測は、広領域に対しては最新のGFSの風データ、狭領域に対してはGFSデータを用いたWRFの実行結果である風データを用いて、SWANによって計算を行う。

波浪追算に関しては、必要な過去の気象データをダウンロードする。そのデータを用いて、上と同じように波浪追算計算を行う。

台風 0423 号については、室戸に台風が襲来する前の 10 月 19 日の時点で GFS の気象データをダウンロードした。また、その後の再解析データもダウンロードした。これらのデータを用いて、波浪予報と波浪追算を行った。

図 2 は 10 月 20 日 10:00, 14:00, 18:00, 22:00 の日本近海の波高分布図を示したものである。また、図 3 は室津で観測された有義波高の観測値、予測値および追算値を比較したものである。取得した GFS データは 1 度間隔の風データであるが、SWAN を用いて波を計算する際は、0.25 度 (15 分) 間隔の地形データを用い、また、風のデータは 0.25 度毎に内挿される。ここでは、ネスティングは行っていない。

台風は当地のほぼ上を通過しており、観測結果に見られるように波の発達・減衰が急であるが、時間間隔や空間格子間隔が粗い気象データを用いた予測値や追算値では変化が滑らかで、ピークも若干小さくなっている。しかし、台風モデルをまったく使わない気象データだけから推算した結果としては、良い結果である。

著者らは当初、新聞等報道や被災に関するコメント等によって、近年ない大波が打ち寄せて、そうした大波が防潮堤に衝突したため、波力によってパラペット部分が破壊されたものと推測していた。しかし、現地調査によって、その防潮堤は汀線より上に位置しており、沖での大波がそのまま衝突するのではなく、砕波後の波が打ち上がる状態になっていたことがわかった。また、波が特に集中するとか、洗掘によるものでないことがわかった。

住民にヒアリングしたところ、越波は午後 1 時より始まっていたが、パラペットを倒壊させ住民に被害を与えた波は、午後 2 時 10 分ごろの 1 波の大きな打上げ波であったことがわかった。

2.4 打上げ波

今回被災した防潮堤高を設計するに当たって、波の打上げ高については、規則波を対象にした算定法が用いられていたと考えられる。当時不規則波の取り扱い (波の不規則性) に対する研究は始まっていたが、十分な成果がまだ得られていなかった時期である。

「海岸施設設計便覧」や「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」における「波のうちあげ高」

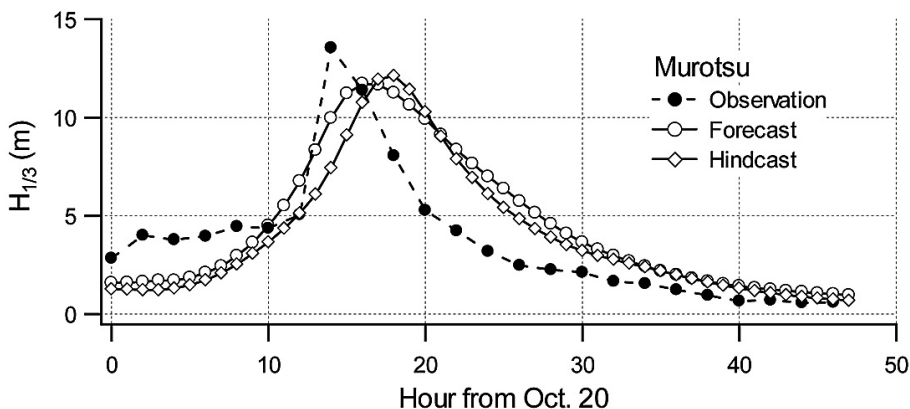


図3 室津における有義波高の観測値、予測値および追算値の比較

においても、汀線近傍に設置された堤防に対する不規則波の打上げ高を評価する場合に適用可能な算定方法は、明確に示されていない。規則波の打上げ高を対象とした算定法としては、不透過な一様斜面におかれた堤防への打上げ高が示されている豊島らの結果^{4) 5)}が示されており、当時の設計ではこの結果が使われたものと思われる。この方法によって、被災時の波諸元を用いて打上げ高を算定してみる。

- 1) 換算沖波波形勾配を $H'_0/L_0 = 0.035$ ，海底勾配を 1/30（計画断面は 1/50 であるが，算定図が 1/30 までしかないため 1/30 の図を使う），堤防勾配を 1:0.5，堤防設置水深を $h/L_0 \sim 0$ とすると，無次元打上げ高は $R/H'_0 = 0.28$ ，すなわち， $R = 3.9\text{m}$ となる。
- 2) 換算沖波波形勾配を $H'_0/L_0 = 0.035$ ，海底勾配を 1/20，堤防勾配を 1:0.5，堤防設置水深を $h/L_0 \sim 0$ とすると $R/H'_0 = 0.46$ ，すなわち， $R = 6.4\text{m}$ となる。

一方，防潮堤の高さは $Rc = 7.4\text{m}$ であるため，安全であると判定される。

複雑な海浜断面については，Saville⁶⁾の仮想勾配法や中村ら⁷⁾の改良仮想勾配法があり，複雑な断面を有する海岸で広く使われているが，波の不規則性は考慮されていない。そこで，間瀬ら⁸⁾および Mase et al.⁶⁾は，汀線近傍に設置される海岸堤防への不規則波の打上げ高に対して，改良仮想勾配法を用いて算定した打上げ高は不規則波の打上げ高のどのような代表量に対応するか，あるいは，仮想勾配法が適用できるかを検討した。

改良仮想勾配は，図 4 に示すように，実際の複雑な海底断面を打上げ高と砕波水深地点からなる一様勾配で代用させるものである。Saville⁶⁾の仮想勾配は砕波点と打上げ高地点を直線で結んだ一様勾配で代用するものである。図 5 は，改良仮想勾配を横軸にとって，波の打上げ高を算定する中

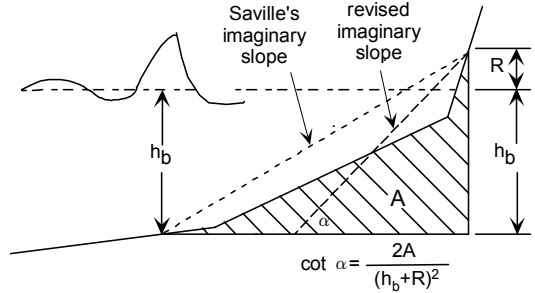


図4 仮想勾配の定義

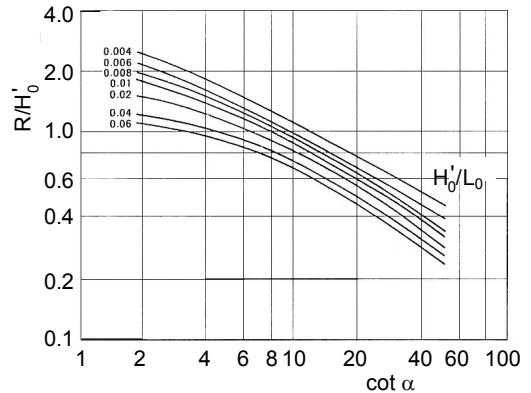


図5 改良仮想勾配に対する波の打上げ高

村ら⁷⁾の結果を示したものである。

図 6 は，従来の改良仮想勾配法の算定手順に基づいて求めた打上げ高を横軸にとって，縦軸に 2%超過打上げ高，1/3 最大打上げ高および平均打上げ高をプロットした Mase et al.⁹⁾の結果を示したものである。算定値は 1/3 最大打上げ高の下限値に対応していること，平均的には算定値を 1.25 倍すれば 1/3 最大打上げ高，および 1.7 倍すれば 2%超過打上げ高に対応すること，2.0 倍した値は 2%超過打上げ高の上限値に対応することがわかる。

ここで，間瀬ら⁸⁾および Mase et al.⁹⁾の結果を用いて，被災時の打上げ波を算定する。防潮堤前面の海底断面は，図 1 を用いるものとする。被災時波浪は $H'_0 = 14\text{m}$ ， $T_{1/3} = 16\text{s}$ とする。砕波水深は $h_b = 21.3\text{m}$ となり，改良仮想勾配法で打上げ高を算出すると，仮想勾配は約 1/25，打上げ高は

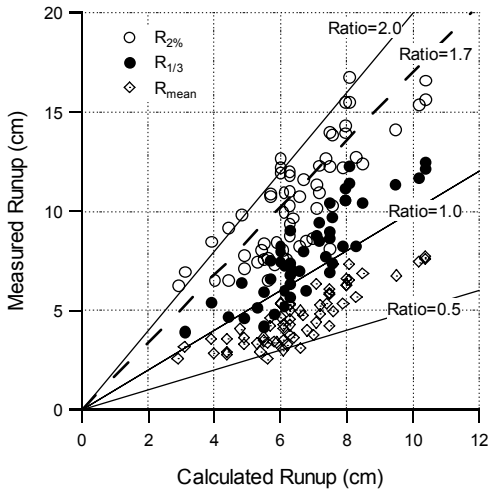


図6 打上げの実測値と従来算定法による予測値との比較

$R=5.7\text{m}$ となる。この $R=5.7\text{m}$ に 1.25 倍した 1/3 最大打上げ高は 7.1m となり、これはほぼ被災時の防潮堤天端高に対応する。2%超過打上げ高の上限値は 2.0 倍して 11.4m となる。これは天端高を 4m 越えた値となるが、住民のヒアリングによる 2 階建ての家ぐらいの高さの波という感覚値と一致する。

2.5 打上げ波の数

打上げ波は、海底勾配および入射波の条件によって、沖での波の数に比べて減少する。Mase and Iwagaki¹⁰⁾ および Mase¹¹⁾ は、surf similarity parameter によって、打上げ波が沖での入射波に比べてどの程度の割合で減少するかを調べ、その結果を図 7 のように整理した。被災時の $H_0'/L_0 = 0.035$ および仮想勾配 1/25 を用いると、surf similarity parameter は 0.21 となる。これを用いれば、打上げ波数の入射波数に対する割合は 0.25 となる。

いま、被災時の波の周期を 16s とすれば 1 時間に 225 波が岸に向かって打ち寄せることになるが、防潮堤に打ち上がる波の数は 56 波と算定される。

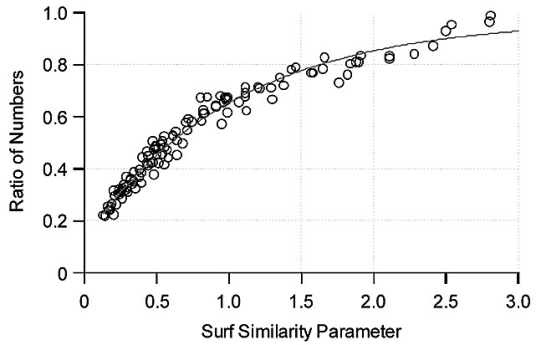


図7 打上げ波数の入射波数に対する比

この打上げ波のうち打上げ高が大きな 2%を超える波は約 1 波となる。これが、防潮堤天端上を 4m 越す打上げ波に対応する。なお、1/3 最大打上げ高はほぼ天端高に対応するが、この 1/3 最大打上げ高を越える打上げ波の数は約 9 波 (= $56/3/2$) となり、おおよそ 10 分に 1 波は越波する。最も大きかった打上げ波によって、パラペット部がなぎ倒されたのではないかと推察される。

2.6 越波流量

越波流量の算定に当たり、まず合田¹²⁾ の一様勾配斜面に置かれた直立護岸の越波流量推定図を用いる。海底勾配 1/30、無次元設置水深 $h/H_0' = 0$ 、無次元天端高 $Rc/H_0' = 0.5$ の算定図を用いると、 $0.01\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ 以上の値が得られる（算定図の範囲外となるので外挿値）。この値は、背後地の重要度から見た許容値（背後に人家、公共施設等が密集しており、特に越波・しぶき等の侵入により重大な被害が予想される地区）を超える。

間瀬ら¹³⁾ は、護岸天端高が非常に大きい場合に越波流量は 0 となり、天端高が 0 の場合に越波流量が有限値となる物理的制約条件を満足する、波の打上げを考慮した傾斜護岸に対する越波流量算定式を提案した。その式を示せば、以下の通りである。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_0^3}} = \begin{cases} A \left(\frac{R_{max}}{H_0} \right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{R_c}{H_0} \right) \left(\frac{R_{max}}{H_0} \right)^{-1} \right\}^B & ; 0 \leq R_c < R_{max} \\ 0 & ; R_{max} \leq R_c \end{cases}$$

適用範囲外になるが外挿することにする。防潮堤の勾配は 1:0.5，打上げ高の算定結果から $R_{max} = 11.4m$ ，天端高 $R_c = 7.4m$ とすると，越波流量は $0.047m^3/m/s$ となる。英国のマニュアル CIRIA/CUR¹⁴⁾に記載されている越波による被害を示した図 8 によれば，この場合，防潮堤の水たたき部や裏法面が補強されてないときに，構造的な被害が起こるレベルになっている。

以上の解析から，被災のシナリオを以下のように推定する。国内観測史上最大の波が打ち寄せ，沖で砕波しながら岩礁部と砂利海岸を遡上し，防潮堤に打ち上がり越波が生じた。被災時には 1 時間当たり 225 波が岸に向かって打ち寄せ，そのうち防潮堤には約 56 波打ち上がる。このうち，約 9 波（おおよそ 10 分に 1 波）が越波して水たたき部に落下した。その後，防潮堤天端高より 4m 高い打上げ波によって，パラペット部がなぎ倒され，多量の海水が侵入した。

3. まとめ

台風 0423 号によって日本各地で起こった高波災害のうち，高知県室戸市室戸岬町菜生海岸の防潮堤の被災を調査・解析した。

菜生海岸の防潮堤被災解析では，気象モデルと波浪モデルを用いて構築した波浪予測・追算システムによる台風時の波浪追算，防潮堤に作用した波の状況，波の打上げ高の算定，および越波流量の解析を行った。特に，波の打上げ高の算定結果は，住民にヒアリングした結果と整合性の良いものであった。

謝辞

本研究を実施するにあたり，独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室平石室長および平山主任研究官には，多大なご尽力を賜りました。国土交通省四国地方整備局高知港湾・空港整備事務所，高知県港湾空港局海岸課および室戸土木事務所関係各位には，現地調査にご協力いただき，被害状況に関する貴重な資料を提供していただきました。また，京都大学防災研究所高山教授には，本研究に対する貴重なご意見をいた

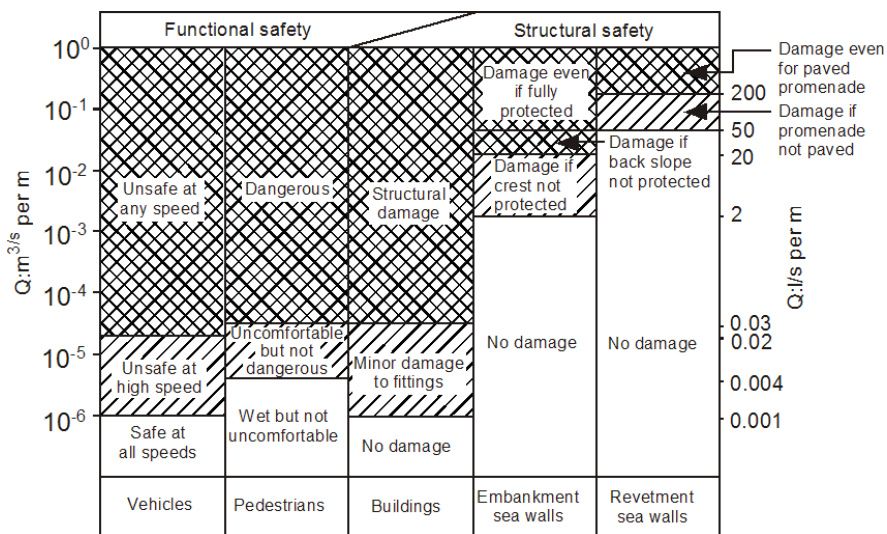


図8 越波による被害算定図¹⁴⁾

きました。ここに謝意を表します。

最後に、今回の災害で亡くなられた方々のご冥福をお祈り申し上げます。

引用・参考文献

- 1) GFS (Global forecasting System): A medium range synoptic forecasting system developed and processed, NCEP (the National Centers for Environmental Prediction), <http://www.emc.ncep.noaa.gov/modelinfo>.
- 2) WRF (Weather Research and Forecasting): A mesoscale numerical weather prediction model, NCAR (the National Center for Atmospheric Research), <http://wrf-model.org/>.
- 3) SWAN (Simulating Waves Nearshore): A numerical wave model for obtaining realistic estimates of wave parameters in coastal areas, lakes and estuaries from given wind-, bottom-, and current conditions, Delft University of Technology, <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/default.htm>.
- 4) 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏：海岸堤防への波のうちあげ高 -1/30-, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp.260-265, 1964.
- 5) 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏：海岸堤防への波のうちあげ高 -1/20-, 第 12 回海岸工学講演会講演集, pp.180-185, 1965.
- 6) Saville, T., Jr.: Wave run-up on composite slopes, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.691-699, 1958.
- 7) 中村 充・佐々木康雄・山田穰二：複合断面における波の打上げに関する研究, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp.309-312, 1972.
- 8) 間瀬 肇・宮平 彰・桜井秀忠・井上雅夫：汀線近傍の護岸への不規則波の打上げに関する研究—算定打上げ高と不規則波の代表
- 打上げ高の関係—, 土木学会論文集, No.726/II-62, pp.99-107, 2003.
- 9) Mase, H., Miyahira, A. and Hedges, T.S.: Random wave runup on seawalls near shore-lines with and without artificial reefs, Coastal Eng. Jour, Vol.46, No.3, pp.247-268, 2004..
- 10) Mase, H. and Iwagaki, Y.: Run-up of random waves on gentle slopes, Proc. 19th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.593-609, 1984.
- 11) Mase, H.: Frequency down-shift of swash oscillations compared to incident waves, Jour. Hydraulic Res., Vol.33, No.,3, pp.397-411, 1995.
- 12) 合田良実：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 号, 第 4 号, pp.3-44, 1975.
- 13) 間瀬 肇・Hedges, T.S.・Shareef, M.・永橋俊二：波の打上げを考慮した傾斜護岸に対する越波流量算定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.636-640, 2003.
- 14) CIRIA/CUR: Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, Construction Industry Res. and Information Assoc., London, 1991.

著者紹介

間瀬 肇 (正会員)

京都大学防災研究所(京都府宇治市五ヶ庄), 昭和 28 年生まれ, 昭和 52 年京都大学工学部土木工学科卒, 昭和 54 年京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修了, 昭和 54 年京都大学工学部勤務, 平成 8 年京都大学防災研究所, 現在京都大学防災研究所助教授, 工学博士。アメリカ土木学会会員, 日本土木学会会員。

安田誠宏

京都大学防災研究所(京都府宇治市五ヶ庄), 昭和 48 年生まれ, 平成 9 年関西大学工学部土木工学科卒, 平成 11 年関西大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程修了, 平成 14 年京都大学大学院工学研究科土木工学専攻博士後期課程認定退学, 平成 14 年独立行政法人港湾空港技術研究所勤務, 平成 16 年京都大学防災研究所, 現在京都大学防災研究所助手, 博士(工学), 日本土木学会会員。

Coastal Disaster Analysis at Muroto due to Typhoon 0423 (TOKAGE)

Hajime MASE and Tomohiro YASUDA

ABSTRACT : This paper describes results of field surveys and analyses for coastal damages, occurred in Muroto city, due to the Typhoon 0423 (TOKAGE). In Muroto city, concrete parapets of a seawall were broken by a large run-up wave and plunged into the houses, resulting in three persons•death. In this study, wave prediction system was constructed to estimate typhoon-generated waves. Concerning with wave characteristics in front of the damaged seawall, wave run-up and overtopping were analyzed. In particular, analytical results of run-up agreed well with the witness information by residents.

KEYWORDS : *Typhoon TOKAGE, coastal disaster, seawall, breakwater, run-up, overtopping, caisson sliding*