風応力を考慮した漂流物モデル

Debris Model Including Wind Load

富田孝史¹・廉 慶善²

Takashi TOMITA and Gyeong-Seon YEOM

This study improved the debris model (STOC-DM) including wind load to trigger the debris drift in typhoon attack. Through the model tests with considering the drag and inertia forces due to water current and the drag force due to wind, the influence of the wind drag force was confirmed and the drift velocity was verified theoretically. Prototype numerical simulations with freight containers as debris of Mikawa port in typhoon 0918 were implemented, and the containers were moved to the wind direction not to the water flow direction. This phenomenon was also confirmed in actual site, Mikawa port. From the results, considering wind load as the external force is necessary to grasp behavior of the drifting debris in a strong wind.

1. はじめに

2009年の台風0918号は、日本各地に大きな被害をもたらした。10月8日に愛知県知多半島付近に上陸した台風0918号は、北東向きに移動し三陸海岸沖に抜けた。東海・関東地方では、強風や高潮の影響により浸水、土砂崩れ、護岸施設の破損などの大きな被害が発生し、三河港神野ふ頭の7号及び8号岸壁では多くの貨物コンテナがふ頭上に漂流する被害があった。この時、『コンテナが浮上し風に押されて移動した』という目撃報告がある(港湾海岸防災協議会, 2010)。これまでに、津波による漂流物の移動に関する研究は活発に行われていた(例えば、池谷ら, 2005; 熊谷ら, 2006; 廉ら, 2008)。しかし、これらのほとんどは、津波を外力として物体が漂流する事象を対象としているため、風による影響は考えていない。高潮による漂流物を対象とする場合には、高潮を起こさせる強風も漂流物に作用すると考えられる。例えば、高さ1.0m、喫水0.5mの漂流物に高潮による水流速1.0m/s、風速40.0m/sが作用するとき、水流による抗力と風による抗力の比は1.0:1.9(海水の密度1,026kg/m³、空気密度1.2kg/m³)であり、漂流物に作用する風の影響は小さくない。

本研究では、港湾空港技術研究所による高潮津波シミュレータ(STOC)のうちの漂流物移動解析モデルであるSTOC-DM(本多ら, 2009)を対象にモデル改良を行い、数値水槽におけるテスト計算及び台風0918号による

三河港でのコンテナ漂流を対象にした実地形での計算を実施し、高潮時のコンテナの漂流挙動における風の影響を明らかにする。

2. 数値計算モデル

(1) 高潮計算モデル

高潮の計算はSTOCのうちのSTOC-MLにより実施する。STOC-MLは連続式と静水圧近似を適用したNavier-Stokes方程式を用いて、広領域の高潮や津波を計算するモデルであり、表層において大気圧や風応力の変化を考慮することが可能である。

(2) 既往の漂流物モデル

STOC-DMには、漂流物が水の流れから受ける抗力及び慣性力モデルが組み込まれている。このモデルは、池谷ら(2005)に基づいてモリソン式を拡張したものであり、式(1)に示すように、漂流物長軸方向の力 F_X 、長軸垂直方向の力 F_Y およびヨウモーメント M_Z の3成分を評価するものである。

$$\left. \begin{aligned} F_X &= (1-\omega)F_{DX1} + \omega F_{DX2} + F_{MX} \\ F_Y &= (1-\omega)F_{DY1} + \omega F_{DY2} + F_{MY} \\ M_Z &= (1-\omega)M_{DZ1} + \omega M_{DZ2} + M_{MZ} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、右辺第1項は、流体が物体の鉛直方向に流れることに起因した抗力、右辺第2項は流体が平面方向に流れることによって生じる抗力、右辺第3項は慣性力である。式中の ω は、水深と喫水の比に基づいた重み関数(池谷ら, 2005)である。

(3) 修正漂流物モデル

本研究では、漂流物に作用する抗力として水流による抗力に加えて、風による抗力を考慮した。漂流物の水面上に作用する風による抗力は、既存の漂流物の水面下に作用する水流による抗力と同じ方法により算出する。た

1 正会員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所 太平洋沿岸防災研究センター	アジア・ 上席研究官
2 正会員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所 太平洋沿岸防災研究センター	アジア・ 任期付研究官

だし、水流による抗力の評価には、式(1)の右辺第1項及び第2項のように水深と喫水の比により、流れが鉛直または平面的に変化することによって生じる抗力に分けているが、風による抗力においては、大気と水面上の漂流物の高さの比が極めて大きいことから風の流れが鉛直的に変化することによって生じる抗力のみを考慮した。風による抗力を考慮すると、式(1)は次式ようになる。

$$\left. \begin{aligned} F_X &= (1-\omega)F_{DX1} + \omega F_{DX2} + F_{MX} + F_{WX} \\ F_Y &= (1-\omega)F_{DY1} + \omega F_{DY2} + F_{MY} + F_{WY} \\ M_Z &= (1-\omega)M_{DZ1} + \omega M_{DZ2} + M_{MZ} + M_{WZ} \end{aligned} \right\} \cdots (2)$$

ここに、各式の右辺第4項が風による抗力である。それら詳細を式(3)～(5)に示す。

$$F_{WX} = \frac{\rho_a}{2} H_u \int_{sm} C_{DX1,sm} U_{r,sm} |U_{r,sm}| dY + \frac{\rho_a}{2} H_u \int_{sn} C_{DX1,sn} U_{r,sn} |U_{r,sn}| dY \cdots \cdots (3)$$

$$F_{WY} = \frac{\rho_a}{2} H_u \int_{ps} C_{DY1,ps} V_{r,ps} |V_{r,ps}| dX + \frac{\rho_a}{2} H_u \int_{sb} C_{DY1,sb} V_{r,sb} |V_{r,sb}| dX \cdots \cdots (4)$$

$$M_{WZ} = -\frac{\rho_a}{2} H_u \int_{sm} C_{DX1,sm} U_{r,sm} |U_{r,sm}| Y dY - \frac{\rho_a}{2} H_u \int_{sn} C_{DX1,sn} U_{r,sn} |U_{r,sn}| Y dY + \frac{\rho_a}{2} H_u \int_{ps} C_{DY1,ps} V_{r,ps} |V_{r,ps}| X dX + \frac{\rho_a}{2} H_u \int_{sb} C_{DY1,sb} V_{r,sb} |V_{r,sb}| X dX \cdots \cdots (5)$$

ここに、 H_u は漂流物の水面上に出た部分の高さ、 ρ_a は空気の密度、 U_r 及び V_r はx及びy方向の風に対する漂流物の相対速度、 $C_{DX1,sm}$ 、 $C_{DX1,sn}$ 、 $C_{DY1,ps}$ 及び $C_{DY1,sb}$ は抗力係数であり、水流による抗力のモデルと同様に漂流物の面から離れる向きに風が吹いている場合は0.4、面につく向きに風が吹いている場合は0.8とした。これらの係数の値は建物に作用する風圧分布などを参考にした値(池谷ら, 2005)である。smは船首、snは船尾、psは左舷、sbは右舷を表している。

3. テスト計算

漂流物移動に及ぼす風の影響を確認するためにテスト計算を行った。長さ4,000m、幅500m及び水深10.25mの数値水槽において、40m/sの様の風を水面上に吹かせた。風によって発生する吹送流が、静止状態から十分に発達して定常に達するまでの36,000秒間の計算を行った。そのうちの吹送流が定常に達した後の吹送流及び風速のデータを使って漂流物の移動計算を実施した。漂流物は、長さ3.0m、幅1.2m、高さ1.0m、喫水0.5m(密度

図-1 漂流物のx方向の移動速度

513kg/m³)であり、水及び空気の密度はそれぞれ1,026kg/m³及び1.2kg/m³である。計算は、漂流物に作用する外力を①水流による抗力と風による抗力の両方を考慮する場合と②水流による抗力のみを考慮する場合の2ケースについて行った。

定常時の流量及び運動量の保存条件によると、風速40m/sが生じする吹送流の流速は1.27m/sであり、本テスト計算においても吹送流の流速は1.19m/sであったので吹送流は再現できている。図-1は、漂流物の風に沿った向きの移動速度の時間変化を示したものであり、実線が風応力を考慮する場合、点線が風応力を考慮しない場合である。風応力を考慮しない場合の漂流物の移動速度は吹送流の流速に漸近する。一方、風応力が作用する漂流物の移動速度は、定常状態のときには作用力としての水流による抗力と風による抗力との合力和が零になるときを表現する式(6)より算出される。

$$1026 \times (u_d - 1.0) |u_d - 1.0| + 1.2 \times (u_d - 40) |u_d - 40| = 0 \cdots (6)$$

ここに、 u_d は漂流物の移動速度である。上式を満足する u_d は約2.3m/sであり、テスト計算においても漂流物の移動速度はそれに一致している。

4. 現地適用

台風0918号時の高潮による三河港のコンテナ漂流を対象に、コンテナに作用する風応力を考慮するケースと考慮しないケースについて計算を実施した。

(1) 計算方法及び条件

a) 計算領域

高潮現象を再現するため、図-2のような8段階の計算領域を設定し、各計算領域において計算格子サイズを12,150m、4,050m、1,350m、450m、150m、50m、10m及び2mの順に段階的に小さくすることにより計算精度の向上と計算負荷の軽減を図った。水深データの作成にはGEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans)、海図及び港湾計画図を使用した。第7～8領域の地形データの作成には、航空レーザ測量成果、国土基本図及び海岸保全施設台帳を使用した。

(a) 第1～7領域

(b) 第7～8領域

図-2 計算領域

b) 台風による気圧及び風の計算

台風0918号の第1～2計算領域における気圧場及び風場は、気象モデルMM5より計算した。計算は、10月6日15:00から10月8日15:00までの48時間について実施した。台風のコース及び中心気圧は気象庁のベストトラックデータに基づいている。

c) 高潮の計算

潮位条件は、三河港において最大潮位が観測された10月8日6時20分の推算天文潮位T.P.+0.56mを適用した。高潮計算で対象とした期間は、気圧・風の計算と同じである。計算モデルはSTOC-MLであり、b)で得られた気圧及び風の時・空間変動データを外力として使用した。第3～8領域における気圧及び風は第2領域の気圧及び風データから補間した。

d) 漂流の計算

コンテナの初期位置、規格、寸法、積載有無、積み上げ段数及び質量を表-1にまとめる。

台風0918号が来襲した時、2段積み以上のコンテナは、ブーメラン形の金具で転覆しないように上下が固定されていたことから数値計算においても2段積み及び3段積みのコンテナは崩れなく一緒に動くものとして扱った。

表-1 漂流計算に考慮したコンテナの詳細

規格	寸法(m) (L*B*H)	積載 有無	積み上げ 段数	質量 (t)	喫水 (m)
20ft	6.0*2.4*2.6	空	1	2.3	0.156
			2	4.6	0.312
			3	6.9	0.467
		実入り	1	7.0	0.474
			2	14.0	0.949
			3	21.0	1.423
40ft	12.0*2.4*2.6	空	1	3.8	0.129
			2	7.6	0.257
		実入り	1	13.0	0.440
			2	26.0	0.881

2段積み及び3段積みのコンテナを一つのコンテナとして扱い、合計491個のコンテナを漂流対象として考慮した。現地調査では、コンテナが地面に引きずった跡が確認できたが、数値計算上ではコンテナが地面に当たると着低したとみなし漂流が停止するように処理しており、漂流物と地面の間の摩擦については今後検討する予定である。

STOC-DMでは漂流物内外の水位差及び隙間の面積により漂流物内への侵入流量を求め、沈降計算が可能である。しかし、本研究で対象物としたコンテナは、熊谷ら(2008)によると、完全水没するには24時間がかかることから、本計算ではコンテナは水没しないこととした。

MM5で計算した風は平均潮位(M.S.L.)から10m上の風速(海上風)である。一方、風応力を計算するための風の作用点をコンテナの鉛直方向の中心(地面から1.3m地点)に作用すると仮定すると、神野ぶ頭8号岸壁を対象にした場合にはM.S.L.+4.184m上の風速が必要になる。海上風からコンテナに作用する風に変換するため、式(7)を用いて風速の鉛直補正を行った。

$$U_{10} = U_z \left(\frac{10}{z} \right)^{1/7} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 U_{10} は海面上10mでの風速、 U_z は任意地点の風速、 z は任意地点の海面からの高さである。式(7)の z に4.184mを代入することにより

$$U_{4.184} = 0.88U_{10} \dots\dots\dots (8)$$

が得られ、これをコンテナの漂流計算に適用した。

(2) 計算結果

a) 高潮の計算結果

図-2(b)に示す検潮所で観測された潮位記録から天文潮位を除去して得られた潮位偏差との比較を図-3に示す。細実線が観測値、太実線が計算値である。計算値は観測値よりも小さい。そこで、浸水現象の再現において

大きな影響を及ぼす最大潮位偏差において計算値が観測値に一致するように、風速の強度を図-3に代表的に示す破線のように変化させた。その結果、風速を1.47倍すると計算値は観測値に一致したので高潮計算に使用する海上風を1.47倍することにした。

図-4は、上記の風速を使って計算した高潮による神野ふ頭の最大浸水深の分布を示している。7号及び8号岸壁において約40cmの浸水深となっている。

図-5は、高潮によって海水が陸上に満ちるときと陸上から引くときの水流の向きを示したものである。高潮に伴った海水の移動方向は場所によって異なるが、例えば、7号岸壁では南から（図の下側から）海水は陸上に遡上し、遡上水は再び南側から海に戻る。

一方、浸水が生じている時刻における風は図-6に示すように概ね南風である。図-6は、浸水が生じる時刻138,180~142,620秒のうちの時刻138,600秒と140,400秒における風ベクトルを示したものである。

b) 漂流の計算結果

風抗力を考慮しない場合では、図-7に示すように高潮による水流に伴ってコンテナは漂流し、特に7号岸壁では一部のコンテナは海に転落した。一方、風抗力を考慮する場合では、図-8に示すように、高潮による水流の方向（図-5）とは異なりコンテナは全体的に北向きに移動する傾向にある。この移動には南風が影響していると考えられる。今回の計算におけるコンテナの喫水の平均値

図-3 潮位偏差の観測値と計算値の比較

図-4 浸水分布（第8領域）

0.2m、コンテナの喫水上の高さ3.7m、コンテナに作用する高潮による流速の代表値約0.5m/s、コンテナに作用する風速の代表値約24.0m/sの場合、水流による抗力と風による抗力の比は1:50となる。実際のコンテナの漂流においても海に落下するものはなく、図-8に示す楕円で囲んだ範囲に多くのコンテナが漂着していた。これらのことから、高潮及び強風時には高潮による水流に加えて風も考慮することの重要性が指摘できる。

5. おわりに

本研究では、高潮による漂流物の移動計算において、風による抗力を考慮するモデル改良を行い、テスト計算及び実地形での漂流物の移動について検討した。本研究で得られた主な結果を以下に要約する。

- 1) 既存の高潮津波シミュレータ（STOC）のうち、漂流物移動解析モデル（STOC-DM）に漂流物が受ける外力として水流による抗力に加え、風による抗力を考慮するモデル改良を行った。
- 2) 風抗力を考慮する場合と考慮しない場合のテスト計算を行い、漂流物の移動において風の影響は小さくなかった。さらに、その値は理論値と良く一致した。
- 3) 台風0918号時の三河港のコンテナを対象とした漂流計算を行い、風抗力を考慮する必要性を明らかにした。

図-5 コンテナ漂流時の浸水状況

(a) 138,600 秒

(b) 140,400 秒

図-6 浸水時の風場（第8領域）

図-7 風応力考慮しない時のコンテナの挙動

図-8 風応力考慮する時のコンテナの挙動

謝辞：本研究の実施にあたり，国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所，三河港湾事務所及び愛知県三河港務所からデータや情報の提供を受けた。また，実地形を用いた計算において国土地理院地理調査部から海岸における3D電子地図に関する資料の提供を受けた。ここに深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

池谷 毅・朝倉良介・藤井直樹・大森正則・武田智吉・柳沢賢 (2005)：浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案，海岸工学論文集，第52巻，pp.761-765。

熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹 (2006)：津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションモデルの適用性，海岸工学論文集，第53巻，pp.241-245。

熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹 (2008)：コンテナ沈没挙動測定の実地実験と港湾における漂流数値シミュレーション，海岸工学論文集，第55巻，pp.271-275。

港湾海岸防災協議会 (2010)：波となぎさ，No.183，pp. 7-9。

本多和彦・富田孝史・西村大司・坂口 章 (2009)：多数の津波漂流物を解析する数値モデルの開発，海洋開発論文集，第25巻，pp.39-44。

康 慶善・中村友昭・宇佐美敦浩・水谷法美 (2008) 流体・構造連成解析による漂流コンテナの衝突力の算定に関する研究，海岸工学論文集，第55巻，pp.281-285。