

実スケールの衝突シミュレーションに基づく 漂流コンテナの衝突力算定式の 適用性に関する研究

APPLICABILITY OF ESTIMATION FORMULA FOR COLLISION FORCE OF DRIFTED CONTAINER BASED ON FULL SCALE SIMULATION

廉慶善¹・荒木駿²・水谷法美³

Gyeong-Seon YEOM, Shun ARAKI, Norimi MIZUTANI

¹学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 修(工) 名古屋市上下水道局(〒460-8508 名古屋市中区三の丸3-1-1)

³正会員 工博 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

In tsunami disaster, not only direct damages such as human loss and inundation or destruction of structure by run-up waves but also indirect damages caused by drifted bodies such as containers, lumbars, vessels, vehicles and destroyed debris may occur. Among the studies of the indirect damages, an estimation formula for collision force of the drifted container has been proposed, in which the formula is based on constant impulse and momentum. In this study, the formula is modified to consider the time variation of force in the relationship between impulse and momentum. Then, the validity of the modified formula is verified with hydraulic and numerical model experiments, besides applicability of proposed formula is confirmed by comparison with full scale numerical collision analyses.

Key Words : Estimation formula, collision force, container, tsunami, LS-DYNA, fluid-structure interaction

1. 序論

津波による被害を経験してきた我が国では、その対策も各地で行われてきている。しかし、防護レベルを超え、ひとたび被害が生じると、そのダメージは経済発展とともに大きくなる。特にインフラ施設が集約されている港湾に津波が来襲した場合、その被害は当該港湾の機能のみならず国内外に波及する。津波の来襲はなかったが 1995 年の阪神・淡路大震災の事例を考えると、発災時においても港湾施設のダメージを最小限にとどめることが経済損失の拡大を食い止める上で極めて重要になる。

津波による被害は遡上波による構造物の浸水及び破壊、溺死等による人命損失などのような直接的な被害と浮遊物の漂流及び背後構造物との衝突による構造物の損壊などのような間接的な被害に大別することができる。地震大国の日本では、従来から津波被害に関する研究が活発に行われており^{1), 2)}、最近では、津波そのものだけでなく、遡上波により浮遊した漂流物による間接被害にまで関心が向けられている^{3), 4), 5)}。近年、大規模港湾では多量の貨物コンテナが積まれているが、これらは津波来襲時に漂

流物となって背後構造物などに衝突し、被害をもたらすことが懸念されている。このようなコンテナの漂流・衝突に関して、水谷ら⁶⁾は力積と運動量の変化の関係に基づいた漂流コンテナの衝突力算定式を提案している。しかし、提案された算定式には改善すべき点も残されており、またこの算定式を実用的に使用するためには、模型実験による検証だけでなく、剛性の縮尺効果の影響の無い実スケールにおいてもその適用性を検証しておく必要がある。

本研究では、この算定式に修正を加えるとともに修正した算定式の妥当性を水理模型実験および数値計算との比較を行って確認する。さらに、現地構造物を被衝突体とする実スケールの数値計算を実施し、本算定式の適用性を示す。

2. 衝突力算定式

水谷ら⁶⁾は、式(1)のようにコンテナの質量だけではなく背後の水塊による付加質量まで考慮する漂流コンテナの衝突力算定式を提案している。

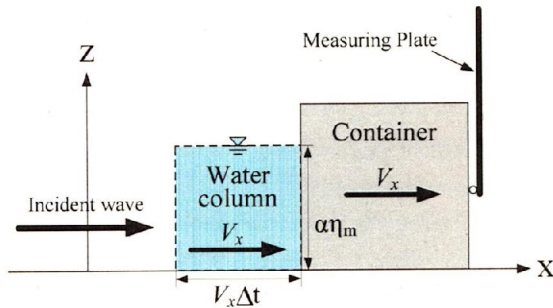


図-1 付加質量の概念

$$f_{xm}\Delta t = (m_c + \alpha\rho_w\eta_mB_cV_x\Delta t)V_x \quad (1)$$

ここで、 f_{xm} は最大衝突力、 Δt は衝突時間、 m_c はコンテナの質量、 α は打ち上げ係数、 ρ_w は水の密度、 η_m は最大遡上水位、 B_c はコンテナの幅、 V_x は衝突瞬間のコンテナの漂流速度である。

図-1 は算定式(1)における付加質量(最大衝突力に寄与する背後水塊の質量)の概念を示しており、同式では付加質量はコンテナと一体となって衝突するという概念から流速をコンテナの漂流速度で近似している。また、式(1)は左辺が単純な衝突力と衝突時間の積になっているが、これは衝突の間、衝突力が f_{xm} で一定であることを仮定したものである。しかし、実際にはコンテナの衝突する瞬間から衝突力が最大となるまでにはある程度の時間を要し、その時間内の衝突力の時間変化は無視できないため、本研究では式(2)のように力の時間変化を考慮することで力積を評価することとした。なお、コンテナが防潮堤などの壁状の構造物に衝突する際には、コンテナ前面に回り込んだ遡上波がコンテナと構造物の間で緩衝効果をもたらし衝突力が減少するという指摘があるが⁷⁾、ここでは安全側の立場から緩衝効果を考慮していない。また、打ち上げ係数 α は、背後の水塊が慣性力として衝突後に打ち上がることから、 $\alpha\eta_m$ の代わり実際の背後水位 η を用いることとした。

$$\int_{t_1}^{t_2} f_x(t)dt = (m_c + \rho_w\eta B_cV_x\Delta t)V_x \quad (2)$$

ここで、 t_1 は衝突瞬間の時刻、 t_2 は衝突力が最大となる時刻である。

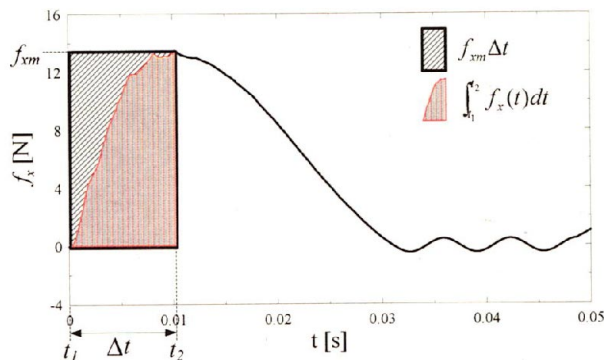


図-2 力積の概念図

図-2 は一様に最大衝突力を用いる既往の式(1)の力積と本研究の時間変化を考慮する力積の概念を示している。ここで、 $\Delta t = t_2 - t_1$ である。

いま、積分係数 β を式(3)のように積分形の力積に対する最大衝突力で表した力積の比として定義し、式(2)に代入すると式(4)が得られる。これを最大衝突力 f_{xm} に対する式に変形すると式(5)のようになる。

$$1/\beta = \int_{t_1}^{t_2} f_x(t)dt / f_{xm}\Delta t \quad (3)$$

$$\frac{1}{\beta} f_{xm}\Delta t = (m_c + \rho_w\eta B_cV_x\Delta t)V_x \quad (4)$$

$$f_{xm} = \beta(m_cV_x/\Delta t + \rho_w\eta B_cV_x^2) \quad (5)$$

以下に、この式(5)の妥当性や現地構造物への適用性について水理模型実験や数値計算結果に基づいて検討する。

3. 算定式の妥当性に関する検討

修正した漂流コンテナの衝突力算定式(5)の妥当性を確認するため、水理模型実験及び数値計算との比較を行った。

(1) 水理模型実験との比較

修正算定式の妥当性を確認するために図-3 のような縮尺 1/75 の水理模型実験を行った。入射波は表-1 に示すように 4 種類の長周期波と 2 種類の孤立波である。ここで、周期(T)は造波板が最後端から最先端まで移動する時間として定義しており、入

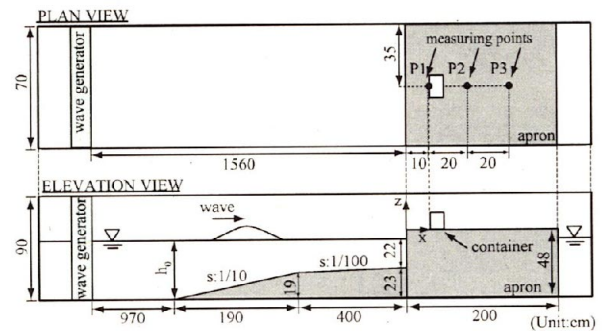
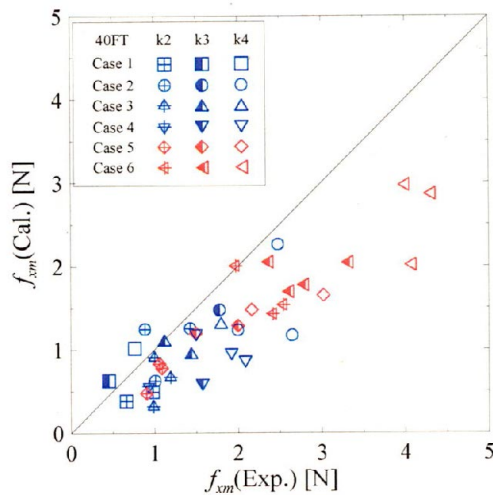


図-3 水理模型実験の概要

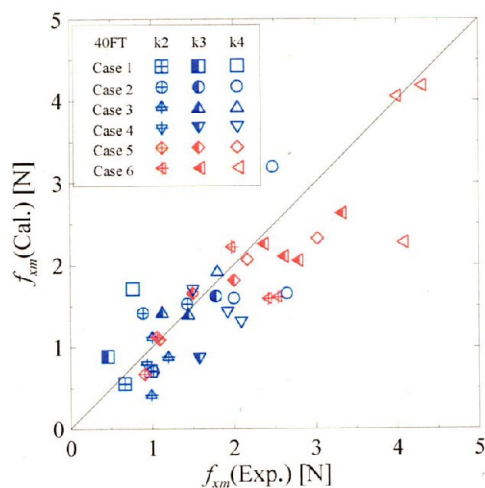
表-1 水理模型実験の入射波条件

Run	Wave	T [s]	H [cm]
Case 1	L	12.5	2.8
Case 2	L	10.0	3.5
Case 3	L	10.0	3.1
Case 4	L	7.5	2.6
Case 5	S		2.8
Case 6	S		3.5

※ L: Long period wave; S: Solitary wave



(a) 既往の算定式



(b) 修正した算定式

図-4 最大衝突力の実験値と計算値の比較

射波峰高(H)は造波板から5mの位置で測定した値である。静水深(h_0)は45.0cmで一定とした。コンテナには質量22.9~132.7g(G1~G6)の40ftコンテナ模型($3.2 \times 3.5 \times 16.3 \text{ cm}^3$)を使用し、上端固定の亚克力製受圧板(幅2.4cm, 高さ8.3cm)へ衝突させた。

図-4(a)は実験値と既往の算定式(式(1))の比較を、図-4(b)は実験値と修正した算定式(式(5))の比較を示している。ここで、図中のk2, k3, k4はそれぞれ受圧板の厚さが2, 3, 4mmであることを示す。両図ともに横軸は実験値を、縦軸は算定式による値であり、両図からわかるように本研究で修正した算定式が既往の算定式より実験値をより良好に再現していることがわかる。

(2) 数値模型実験との比較

既述のように水理模型実験の結果との比較より修正した衝突力算定式の妥当性は確認できたが、同算定式を実用面で使用するためには、実スケールにおけるコンテナの衝突力の算定への適用についても検討しておく必要がある。しかし、実ス

ケールの漂流コンテナの衝突実験を行うには莫大な施設とコスト、時間などを要する。そのため、本研究では非線形動的構造解析ソフトLS-DYNAを用いた数値計算を行って実スケールの衝突力への算定式の適用性を検討することとした。しかし、LS-DYNAのみで津波の遡上、コンテナの漂流、衝突までの一連のプロセスを解析するには非常に大きな計算負荷を要する。そこで、本研究では廉ら⁸⁾と同様に造波からコンテナの漂流まではIB(Immerged Boundary)法に基づいた漂流計算を実施し、その結果を初期条件として衝突解析に使用することにより効率的にLS-DYNAを用いた衝突解析を実施することとする。

まず、模型スケールでこの一連の計算を行って衝突力の計算値と算定式の値を比較する。その後、漂流計算結果をフルードの相似則によって実スケールに換算し、それを初期値として用いることにより実スケールの衝突解析を行う。その結果と算定式の比較を通じて式(5)の適用性を検討することとする。

図-5 に漂流計算を実施した数値波動水路の概略

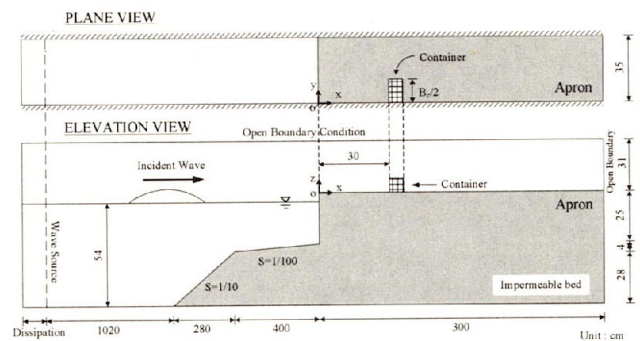


図-5 数値波動水路の概略図

表-2 数値計算の入射波条件と計算結果

T_i [s]	H_i [cm]	Class	Direction	Weight	η [cm]	V_s [cm/s]	No.
10.5	4.0	40ft	Lateral	Empty	0.74	49.10	1
				Half	1.40	27.69	2
				Full	1.77	16.80	3
		Longitudinal		Empty	1.40	13.78	4
				Half	-	-	5
				Full	-	-	6
	20ft	Lateral		Empty	0.81	44.23	7
				Half	1.57	18.11	8
				Full	1.79	3.42	9
		Longitudinal		Empty	1.10	22.58	10
				Half	-	-	11
				Full	-	-	12
9.0	40ft	Lateral		Empty	0.87	141.69	13
				Half	1.51	119.01	14
				Full	1.89	105.25	15
	20ft	Longitudinal		Half	3.31	66.04	16
				Half	1.83	105.00	17
				Half	1.80	186.03	18
21.0	9.0	40ft	Lateral	Half	1.53	94.33	19
31.5	9.0	40ft	Lateral	Half	1.56	75.60	20

を示す。このエプロン前面から 30cm の地点にコンテナを設置して計算を行った。計算は入射波を 5 種類、コンテナを国際規格⁹⁾に基づいて縮尺した 20ft と 40ft の 2 種類変化させ、さらにコンテナの初期設置方向や質量を変化させて実施した。計算条件とそれぞれに対するコンテナの漂流速度や背後水位の計算結果を表-2 に示す。同表のうち、No. 5, 6, 11, 12 はコンテナが漂流しないケースであり、他のケースにおいては漂流速度が最大になった時の漂流速度(V_x)や背後水位(η)を衝突解析に採用することとした。また、ほぼ全てのケースにおいて、図-6 に示すようにコンテナが最大漂流速度に達した時のコンテナ背後の遡上波の流速と水位がほぼ空間的に一様であることが確認できたため、衝突解析ではコンテナ背後の遡上波を直方体の水塊としてみなして衝突計算を行なった。修正算定式と衝突解析との比較では上述の漂流計算結果の内、入射波及びコンテナの質量の影響に着目し、No. 13~15, 18~20 の結果を用いて衝突解析を行った。被衝突体としてはアクリル製受圧板を採用しており、その厚さを

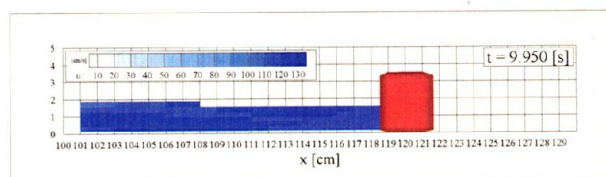


図-6 漂流計算結果の一例(最大漂流速度の時)

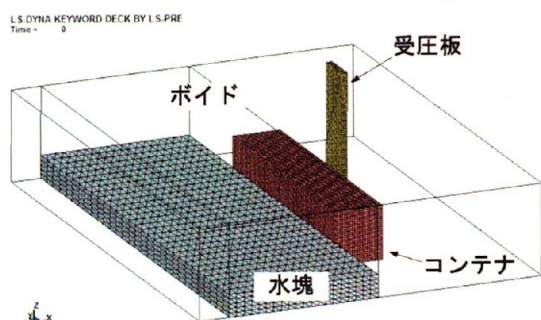


図-7 模型衝突計算の初期配置の一例

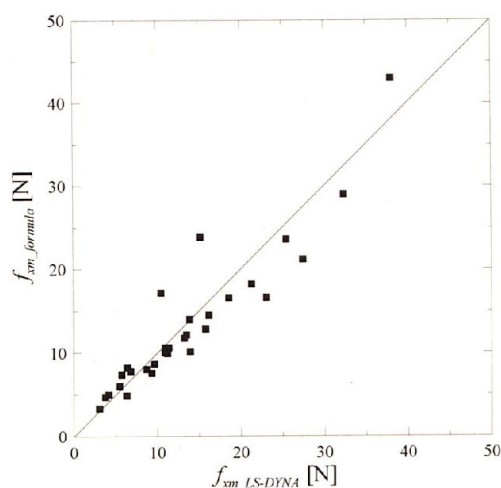


図-8 数値模型実験と修正算定式による最大衝突力

を 2~6mm(k2~k6)の 5 種類変化させることで被衝突物の剛性を変化させた。この衝突解析では ALE 法¹⁰⁾を用いて流体・構造連成解析を行っており、ラグランジュ要素の受圧板やコンテナだけではなく、オイラー要素の水塊とボイドも考慮している。その初期配置の一例を図-7 に示す。本研究で用いた漂流・衝突の計算手法や検証については廉ら⁸⁾や Nakamura et al.¹¹⁾を参考されたい。

図-8 に上記の条件で計算したコンテナ模型の漂流衝突力の結果と修正算定式による結果の比較を示す。若干のばらつきはあるものの両者は概ね良く一致していることが確認できる。したがって、本研究で修正した漂流コンテナの衝突力算定式(式(5))の模型実験に対する妥当性が指摘できる。

4. 現地への適用性

実スケールにおける衝突力算定式の有用性を示すためには実際に実験を行って検証するのが理想的であるが、そのためには前述したように施設面での制約やコスト、時間などの様々な困難がともなう。そこで本研究では、数値解析を用いて実スケールの衝突解析を行い、得られた計算値と算定値を比較することで実スケールの現象に対する衝突力算定式の適用性について考究することとする。

(1) 大規模縮尺実験結果の検証

実スケールにおける衝突力算定式の適用性について本数値解析で検討するため、まず有川ら³⁾による 1/5 スケールの衝突実験結果を使用し、実スケールに近い規模の現象に対する衝突解析の適用性について検討する。漂流衝突の計算結果を利用するためには漂流衝突実験と比較するのが望ましいが、ここでは文献から入手可能な空中衝突実験の結果との比較

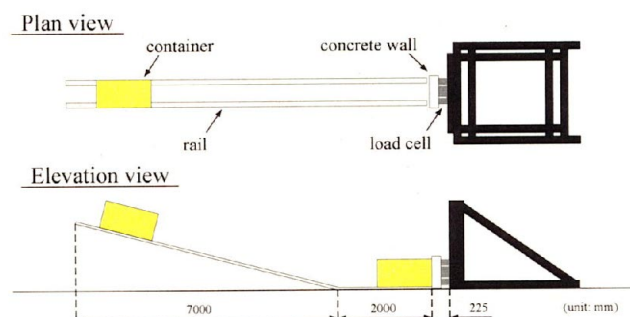


図-9 自由落下衝突実験の概略図³⁾

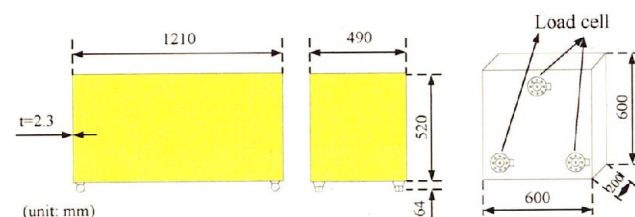


図-10 コンテナ模型とコンクリート壁³⁾

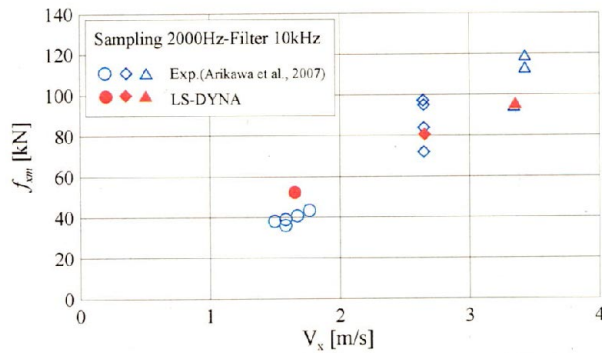


図-11 大規模実験結果³⁾とLS-DYNAの比較

を通じて妥当性の検証を行う。

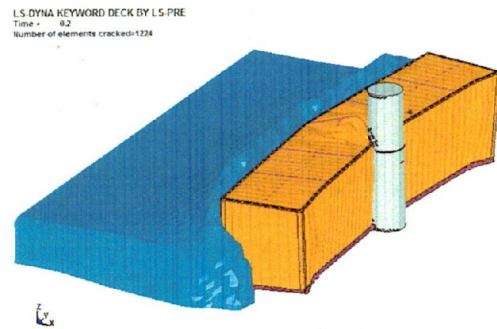
図-9に有川ら³⁾の1/5スケールのコンテナの大規模衝突実験の概略を示す。また、図-10に示すように、コンテナ模型は国際規格⁹⁾の20ft貨物コンテナが想定されており、被衝突体としてはコンクリート壁が使用されている。コンテナの衝突速度は、その落下高さを50cm、75cm、100cmに変化させて制御されており、衝突力は図-10のように設置されたロードセルにより計測されている³⁾。

以上の条件及び衝突直前のコンテナの速度を初期値として衝突解析を行った。図-11は衝突直前のコンテナ速度 V_x と最大衝突力 f_{xm} の関係について、大規模実験と衝突解析の結果を共に示したものである。同図より、衝突解析による計算値は実験値を良好に再現していることが確認できる。この結果より、本数値計算で用いるLS-DYNAの大規模衝突への適用性が確認できる。

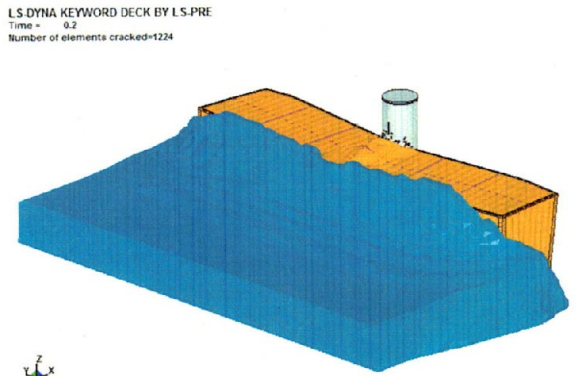
(2) 実スケールにおける衝突力算定式の検討

上述のようにLS-DYNAによる衝突解析が1/5スケールの模型実験にも適用できることを確認したので、ここではLS-DYNAを用いて実スケールコンテナの衝突解析を行って、修正算定式の実スケールの衝突現象への適用性について検討する。実スケールの衝突解析では、既述の模型スケールの数値解析と同様に、IB法による漂流計算から得られたコンテナ漂流速度や背後水位、流速を初期値として用いた(表-2)。ただし、漂流計算が1/75スケールで行っていることから、ここではフルードの相似則に従って実スケールに換算することで初期値を用いている。なお、本論文では、被衝突体として北海道奥尻町に建設された津波避難人工地盤の支柱部を想定したコンクリート柱(直径1m、高さ4m)と港湾の照明タワーの支柱部を想定した鉄材柱(直径1m、高さ4m、厚さ2cm)を用いた衝突解析結果を示すこととする。

コンテナの物性値は密度 7.861 t/m^3 、ヤング率 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 、降伏応力 355 MPa であり、コンクリートは密度 2.4 t/m^3 、ヤング率 $3.1 \times 10^4 \text{ MPa}$ 、降伏応力は圧縮側及び引張り側でそれぞれ 40 MPa と 4 MPa である^{12), 13), 14)}。なお、鉄材柱の物性値はコンテナと同様のものを用いた。本衝突解析でもALE法¹⁰⁾に基づいた流体・構造連成解析を行っている。図-12



(a) 前面から見た様子



(b) 背面から見た様子

図-12 40ftコンテナとコンクリート柱の衝突の一例

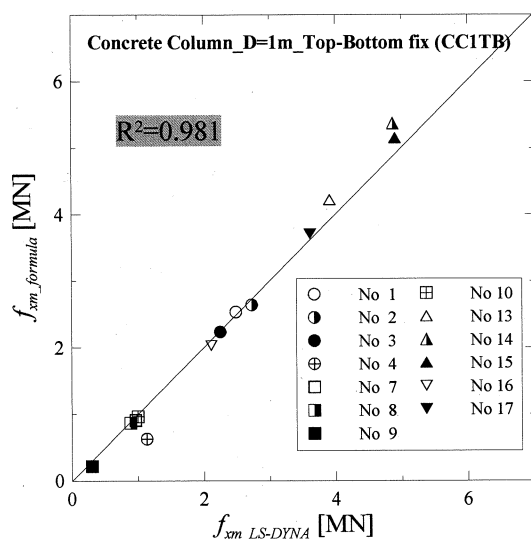
は漂流コンテナがコンクリート柱に衝突した場合の計算結果を例示したものであるが、同図に示すように、流体と構造物の間で良好に連成ができていることが確認できる。なお、本モデルは有限要素モデルであるため、同図に示されるように、コンテナの変形やコンクリートの亀裂まで計算可能である。

ところで、図-12に示すように、実スケールの衝突では被衝突体の大きな剛性によりコンテナに塑性変形が発生する。この塑性変形によりコンテナの速度が各要素によって異なるため、最大衝突力発生時にコンテナの速度が零にならない。さらに、背後水塊の流速との差が発生し、本研究で改良を加えた式(5)の仮定と異なる状況が生じていることになる。したがって同式をそのまま適用することは困難であることが想定される。そこで、式(5)を次のように再度修正し、塑性変形が発生しても適用できるように変形することとした。すなわち、式(5)を式(6)と式(7)のコンテナによる衝突力と水塊による衝突力に分け、その和を式(8)のように最終の衝突力とする。

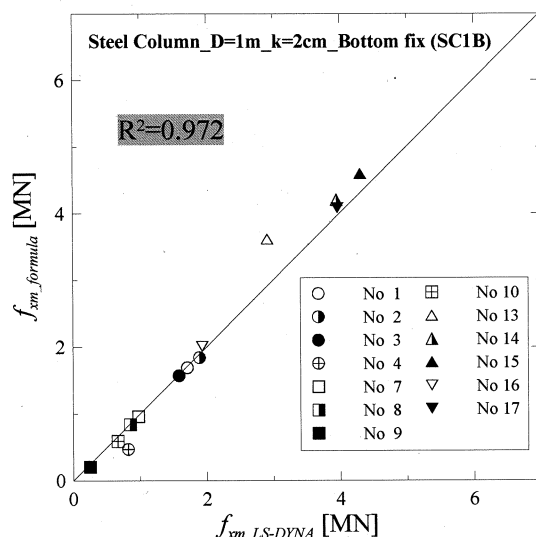
$$f_{xnm} = \beta_n m_c \Delta V_{xn} / \Delta t_n \quad (6)$$

$$f_{xwm} = \beta_w \rho_w \eta_w B_c V_{xi} \Delta V_{xw} \quad (7)$$

$$f_{xm} = f_{xnm} + f_{xwm} \quad (8)$$



(a) コンクリート柱



(b) 鉄材柱

図-13 数値計算と修正算定式による最大衝突力

ここで、 ΔV_x は衝突時間内の速度変化、 V_{xi} は初期速度、下付き n は水塊を考慮しない場合、下付き w は水塊を考慮する場合の値を表す。そのため、数値計算も水塊を考慮しない場合と考慮する場合に分けて計算し、必要な値を別途求める。

図-13(a)はコンクリート柱、同図(b)は鉄材柱をそれぞれ被衝突体とした場合の実スケールの衝突解析結果と式(8)による衝突力の算定値の比較を示したものである。両図とも算定式は計算結果を精度良く再現していることが確認でき、運動量の保存則から変形した式(8)によってコンテナの漂流衝突力が算定可能であるといえる。

5. 結論

遡上津波による漂流コンテナの衝突力算定式に衝突力の時間変化を考慮する改良を加え修正を行った。

水理模型実験から得られた漂流コンテナの衝突力を修正算定式と比較し良い一致性を確認した。なお、漂流数値計算結果を用いる模型衝突数値計算と算定式との比較からも良く一致することがわかった。また、塑性変形も考慮可能に算定式を再度修正し、実スケール衝突数値計算結果と比較し算定式の現地適用性を確かめた。今後、種々な条件の実スケールの計算を行って算定式で使用している変数の値を提供し、より容易に衝突力を算定できるようにする予定である。

最後になるが本研究は科学研究費補助金（基盤研究 B 代表者 水谷法美）によって行われたことを付記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 松富英夫：流木を伴う破波段波衝突による波力について一段波高と流木径が同程度の場合一、海岸工学論文集，No. 37，pp. 654-658，1990.
- 2) 朝倉良介，岩瀬浩二，池谷毅，高尾誠，金戸俊道，藤井直樹，大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，No. 47，pp. 911-915，2000.
- 3) 有川太郎，大坪大輔，中野史丈，下迫健一郎，石川信隆：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験，海岸工学論文集，No. 54，pp. 846-850，2007.
- 4) 藤井直樹，大森政則，池谷毅，朝倉良介，入谷剛，柳沢賢：津波による漂流物の移動に関する基礎的研究，海洋開発論文集，No. 21，pp. 127-132，2005.
- 5) 松富偉夫，藤井碧，山口健：漂流物を伴う氾濫流の基礎実験とモデル化，海岸工学論文集，No. 54，pp. 226-230，2007.
- 6) 水谷法美，高木祐介，白石和睦，宮島正悟，富田孝史：エブロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究，海岸工学論文集，No. 52，pp. 741-745，2005.
- 7) 康慶善，宇佐美敦浩，水谷法美：構造物前面における津波漂流コンテナの挙動とその衝突力に関する実験的研究，海洋開発論文集，No. 24，pp. 51-56，2008.
- 8) 康慶善，中村友昭，宇佐美敦浩，水谷法美：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，No. 55，pp. 281-285，2008.
- 9) 日本工業規格：国際貨物コンテナ外りの寸法及び最大総質量，JIS Z 1614，日本工業規格，p. 4，1994.
- 10) LSTC：LS-DYNA user's manual ver. 970，Livermore Soft Technology Corporation，USA，2003.
- 11) Nakamura, T., Kuramitsu, Y. and Mizutani, N.: Tsunami scour around a square structure, *Coastal Engineering Journal*, JSCE, Vol. 50, No. 2, pp. 209-246, 2008.
- 12) Børvik, K., Hanssen, A.G., Dey, S., Langberg, H. and Langseth, M.: On the ballistic and blast load response of a 20ft ISO container protected with aluminium panels filled with a local mass-Phase I: Design of protective, *Engineering structures*, Vol. 30, pp. 1605-1620, 2008.
- 13) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，丸善(株)，1996.
- 14) 町田敦彦，関博，丸山武彦，檜貝勇：鉄筋コンクリート工学，株式会社オーム社，1997.