コンテナ固縛評価手法の研究 — II. — 新コンテナ固縛計算モデルの開発 —

中村朋宏*・安部浩二*・坂本宗彦*・太田 進**

Study on Method for Evaluating Securing Arrangements of Containers on Deck — II. — Development of New Numerical Model for Container Lashing Arrangements —

Tomohiro NAKAMURA, Koji ABE,
Munehiko SAKAMOTO and Susumu OTA

Abstract

As previously reported, we developed a two-dimensional numerical model for calculating the forces acting on containers and lashing rods under the given acceleration conditions, to establish the practical method for evaluating securing arrangements of containers on deck. However, the tension calculated based on this model did not agree with the tension measured. To improve the accuracy of the calculated tension, we developed a new numerical model taking the nonlinear behavior of lashing rods and the interaction between Door end and Closed end of the container into consideration. It is confirmed that the new model can provide better results than the former one.

1. 緒 論

国際海事機関(IMO)は貨物の固縛不備による事故防止を目的として、船舶に貨物固縛マニュアル(Cargo Securing Manual)の搭載を義務づけている。各船級協会はマニュアル作成に必要な貨物固縛の安全評価手法を提示しているが、未だ国際的に統一された評価手法は確立されていない^{(1)~(8)}。そこで、「物理的に明確な根拠に基づいた」、「さまざまな固縛方式に適用可能な」貨物の新固縛評価手法の構築を目的として、日本造船研究協会に第234研究部会(SR234)が設置された⁽⁹⁾。

著者らは、SR234の研究の一貫として、二次元コンテナ固縛計算モデルを開発し、大型動揺台を用いた傾斜実験およびコンテナ船による実船実験により計算モデルの妥当性を検証した⁽¹⁰⁾。その結果、すべて

の固縛ロッドが一定の張力を有する場合には、張力に関する実験結果と計算結果とが良く一致し、張力が零に達するほど横加速度が大きい場合には、実験結果と計算結果とが異なることがわかった。この原因は、前報で提案した二次元固縛計算モデルの仮定が、「固縛ロッドが線形なばねである」、「コンテナの前後端はそれぞれ独立である」ことによると考えられる。そこで、固縛ロッドの非線形挙動を考慮し、コンテナの前後端の相互作用を考慮した固縛計算モデルを開発した(以下、この計算モデルを三次元非線形固縛計算モデルと呼ぶ)。そして、三次元非線形固縛計算モデルの妥当性の検証を目的として、計算結果と傾斜実験結果および実船実験結果とを比較した。

コンテナの固縛の安全評価は、固縛ロッドの張力、コンテナ支柱に作用する力、ラッキング力に基づい

* 正会員 (株)NYK輸送技術研究所 (〒253-0033 横浜市磯子区杉田5-32-84)

**正会員 船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川6-38-1)

ておこなわれる。そして、実際のコンテナの固縛においては、ほとんどの場合、固縛ロッドの張力よりコンテナ支柱に作用する力により固縛の適否が判定される。そこで、三次元非線形固縛計算モデルを用いて、従来、評価が困難であった特殊な固縛方法で固縛されたコンテナに関して、コンテナ支柱に作用する力などの計算をおこない、三次元非線形固縛計算モデルを用いて固縛評価を試みた。

2. 三次元非線形コンテナ固縛計算モデル

2.1 計算モデルの仮定および座標系

前報で報告した二次元固縛計算モデル⁽¹⁰⁾と同様に、本研究で開発した三次元非線形固縛計算モデルの入力は、各コンテナに作用する加速度、コンテナおよび固縛ロッドの諸特性(重量、寸法、剛性など)、その出力は固縛ロッドの張力、コンテナ支柱に作用する力、ラッキング力である。本計算モデルの仮定を以下に示す。

- ① コンテナの天板・床板は変形せず矩形を保ち、コンテナはTransverse方向およびLongitudinal方向のラッキングにより変形する。また、コンテナ支柱の圧縮変形は無視する。
- ② 固縛ロッドは、張力を受け持ち、圧縮力を受けもたない非線形なばねとする。また、張力が作用する範囲では線形なばねの挙動を示すものとする。
- ③ ツイストロックの厚さは無視でき、積み重ねられたコンテナは各々接触し、コンテナ間のずれ、浮き上がりは無視する。

三次元非線形固縛計算モデルの仮定と二次元線形固縛計算モデルの仮定との相違点は、「コンテナの前後端の相互作用を考慮していること」、「固縛ロッド

を非線形なばねとしていること」である。

本固縛計算モデルの概要を図1に示す。本計算モデルは、図1に示すようなばね定数 $k_{ti,j}$, $k_{li,j}$, $k_{ri,j}$ のばねによりコンテナ天板が支持されている計算モデルである。コンテナの端部は扉の有る側をDoor End、扉の無い側をClosed Endと呼ぶ。積み重ねられたコンテナは下から順に番号で呼び、コンテナの番号は各記号の下付きの添字であらわす。また、コンテナの支柱の位置も番号で区別し、下付きの添字であらわす。また、船舶がUp RightかつEven Keelであり、コンテナが固縛されていない状態を「基準状態」、固縛されている状態を「初期状態」と呼ぶ。

2.2 計算モデルの定式化

ばね定数 $k_{ti,j}$, $k_{li,j}$, $k_{ri,j}$ のばねで構成される n 段のコンテナが外力を受ける場合を考える。この系全体のばねのひずみエネルギーは、以下の式であらわせる。なお、最下段のコンテナ下端と船体甲板上との間のずれは無いと仮定しているため $\Delta x_{0,j} = \Delta y_{0,j} = 0$ とする。

$$U = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2} k_{ti,j} (\Delta x_{i,j} - \Delta x_{i-1,j})^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{li,j} (\Delta y_{i,j} - \Delta y_{i-1,j})^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{ri,j} (\gamma_{xi,j} \Delta x_{i,j} + \gamma_{yi,j} \Delta y_{i,j})^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

n : コンテナの積付け段数

$k_{ti,j}$: i 番目コンテナ、 j 番目コンテナ支柱の上端を支持するTransverse方向のばねの剛性

$k_{li,j}$: i 番目コンテナ、 j 番目コンテナ支柱の上端を支持するLongitudinal方向のばねの剛性

$k_{ri,j}$: $i+1$ 番目コンテナ、 j 番目コンテナ支柱の下端に固定される固縛ロッドの剛性

$\Delta x_{i,j}$, $\Delta y_{i,j}$: i 番目コンテナ、 j 番目コンテナ支柱の上端の基準状態からの x , y 方向の変位

$\gamma_{xi,j}$, $\gamma_{yi,j}$: $i+1$ 番目コンテナ、 j 番目コンテナ支柱下端に固定される固縛ロッドの方向余弦

また、各コンテナ支柱の上端の基準状態からの変位は、を微小と仮定すると以下の式であらわされる。

$$\begin{cases} \Delta x_{i,j} = \Delta x_{Gi} - (y_{0i,j} - y_{G0i}) \Delta \theta_i \\ \Delta y_{i,j} = \Delta y_{Gi} - (x_{0i,j} - x_{G0i}) \Delta \theta_i \end{cases} \quad (2)$$

ここで、

Δx_{Gi} , Δy_{Gi} : i 番目コンテナの重心の基準状態からの変位

図1 三次元非線形固縛計算モデルの概要

$\Delta\theta_i$: i 番目コンテナの z 軸周りの回転角度

x_{G0i}, y_{G0i} : 基準状態における i 番目コンテナの重心の座標

$x_{0i,j}, y_{0i,j}$: 基準状態における i 番目コンテナ、 j 番目コンテナ支柱の上端の x, y 座標

ひずみエネルギー U はポテンシャルエネルギーである。したがって、各コンテナの釣り合いの式は、仮想仕事の原理より、式(1)(2)を用いて以下の式であらわせる。

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial (\Delta x_{Gi})} = F_{xi} = \{(1-\alpha)m_i + \alpha m_{i+1}\} A_{xi} + \sum_{j=1}^4 \gamma_{xi,j} T_{pr,i,j} \\ \frac{\partial U}{\partial (\Delta y_{Gi})} = F_{yi} = \{(1-\alpha)m_i + \alpha m_{i+1}\} A_{yi} + \sum_{j=1}^4 \gamma_{yi,j} T_{pr,i,j} \\ \frac{\partial U}{\partial (\Delta \theta_i)} = M_{\theta i} = \sum_{j=1}^4 \{\gamma_{xi,j} T_{pr,i,j} (x_{0i,j} - x_{G0i}) - \gamma_{yi,j} T_{pr,i,j} (y_{0i,j} - y_{G0i})\} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、

m_i : i 番目コンテナの質量

α : コンテナに作用する水平力のうちラッキング力として作用する力の割合

$T_{pr,i,j}$: 初期状態における、 $i+1$ 番目コンテナ、 j 番目コンテナ支柱の下端に固定される固縛ロッドの張力（以下、初期張力と呼ぶ。）

F_{xi}, F_{yi} : U から導かれる力（すなわち、コンテナのラッキング力、固縛ロッドの張力変動）以外の外力の x, y 方向成分

$M_{\theta i}$: U から導かれる力以外の外力による z 軸周りのモーメントである。

式(3)から求められた各コンテナ支柱の上端の変位を用いて、各固縛ロッドの張力は以下の式により計算できる。

$$\begin{aligned} T_{i,j} &= k_{r,i,j} (l_{i,j} - l_{n,i,j}) \\ &= T_{pr,i,j} - k_{r,i,j} (\gamma_{xi,j} \Delta x_{i,j} + \gamma_{yi,j} \Delta y_{i,j}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

$l_{i,j}$: $i+1$ 番目コンテナ、 j 番目コンテナ支柱の下端に固定される固縛ロッドの長さ

$l_{n,i,j}$: $i+1$ 番目コンテナ、 j 番目コンテナ支柱の下端に固定される固縛ロッドの自然長

もし、計算した固縛ロッドの張力が負ならば、その固縛ロッドの剛性を零として、再度、式(3)より各コンテナ支柱の変位を計算し、固縛ロッドの張力を計算する。複数の固縛ロッドの張力が負の場合には、最も張力の小さい固縛ロッドの剛性を零として張力を計算する。以上の計算を、すべての固縛ロッドの

張力が正になるまで繰り返し計算する。

また、ラッキング力もコンテナ支柱の上端の変位から容易に計算することができる。さらに、式(4)による固縛ロッドの張力を外力とした各コンテナの6自由度の釣り合いの式から、各コンテナ支柱の上端および下端に作用する力を計算することができる。

3. 実験による三次元非線形固縛計算モデルの評価

大型動揺台（大型輸送環境再現装置）を用いたコンテナ傾斜実験およびコンテナ船による実船実験により、本研究で開発した三次元非線形固縛計算モデルの評価をおこなった。各実験の詳細については、前報⁽¹⁰⁾を参照のこと。

3.1 コンテナ傾斜実験による計算モデルの評価

動揺台を用いて、2段積みコンテナを横傾斜させ、その際の各コンテナに作用する加速度および固縛ロッドの張力を計測した⁽¹⁰⁾。実験は、2番目のコンテナ下端と船体甲板とを固縛するSingle Cross Lashing⁽¹⁰⁾で以下の2条件に関しておこなった。

- ・実験条件-1：Single Cross Lashingで固縛。初期張力を約30 kNに設定。
- ・実験条件-2：Single Cross Lashingで固縛。初期張力を約10 kNに設定。

各実験条件における、傾斜実験による実験結果、二次元線形固縛計算モデルおよび三次元非線形固縛計算モデルによる計算結果を図2,3に示す。図の横軸

図2 横方向加速度と固縛ロッドの張力との関係（初期張力：30kN）

図3 横方向加速度と固縛ロッドの張力との関係
(初期張力: 10kN)

は横方向加速度、縦軸は固縛ロッドの張力である。図中の記号は実験結果、実線は二次元線形固縛計算モデルによる計算結果、破線は三次元非線形固縛計算モデルによる計算結果である。

図2より実験条件-1において、実験結果と各々の計算モデルによる計算結果とは、おおむね一致していると言える。また、三次元非線形固縛計算モデルによる計算結果と実験結果との差は、二次元線形固縛計算モデルによる計算結果と実験結果との差より小さい。図3より実験条件-2においては、横加速度が大きく一部の固縛ロッドの張力が零に達する場合を除いて、各計算モデルによる計算結果と実験結果とおおむね一致している。また、横加速度が大きい場合には、固縛ロッドの張力に関する三次元非線形固縛計算モデルによる計算結果と傾斜実験結果との差は、二次元線形固縛計算モデルによる計算結果と傾斜実験結果との差より小さい。これは、三次元非線形固縛計算モデルが固縛ロッドの非線形挙動を考慮したモデルであることによる。以上より、固縛ロッドの張力に関して、三次元非線形固縛計算モデルは二次元線形固縛計算モデルより優れていると言える。

3.2 実船実験による計算モデルの評価

三次元非線形固縛計算モデルを用いて、固縛ロッドの張力に関する計算結果と実船実験結果とを比較した。なお、実船実験は冬季北太平洋を航海中のコンテナ船において、船橋後方中心線付近に Single

図4 加速度、固縛ロッドの張力およびコンテナ支柱の下端に作用する力の時系列

Cross Lashingで固縛したコンテナを積付けておこなった。そして、船体運動、各コンテナに作用する加速度、各固縛ロッドの張力を計測した⁽¹⁰⁾。

1 番目のコンテナに作用する加速度、固縛ロッドの張力および1番目コンテナ支柱下端に作用する力の時系列を図4に示す。図4は、本実船実験における横方向加速度の大きい計測結果の一例である。図中の加速度は計測結果である。固縛ロッドの張力に関して、実線は計測結果、破線は計測した加速度を入力とした張力の計算結果である。コンテナ支柱の下端に作用する力に関しては、実線は張力の実船実験結果に基づいて計算したコンテナ支柱の下端に作用する力、破線は三次元非線形計算モデルによる張力の計算結果に基づいて計算したそれである。なお、図1で定義したとおり、コンテナ支柱の下端に作用する力は、 z 方向の下向きを正とする。

図4より本計算モデルによる固縛ロッドの張力の計算結果は、おおむね実船実験結果と一致している

ことがわかる。しかしながら、横方向加速度の大きい場合には、張力の計算結果は実験結果より小さい。すなわち、「固縛ロッドの非線形挙動」および「コンテナ前後端の相互作用」を考慮した固縛計算モデルを用いても、固縛ロッドの張力の計算結果は実船実験結果と一致しない。この計算結果と実験結果との不一致の原因としては、たとえばコンテナ間のずれ、浮き上がりなどが考えられる。なお、実船実験に関しては、三次元非線形計算モデルによる張力の計算結果と前報に示した二次元線形計算モデルによるそれとの差は有意ではなかった。

前述したように、固縛ロッドの張力の計算結果と実船実験結果が異なり、その差は最大で35%である。一方、張力の実験結果に基づいたコンテナ支柱の下端に作用する力の計算結果と三次元非線形計算モデルによる張力の計算結果に基づいたそれとの差は、最大で3%である。これは、支柱に作用する力がコンテナ重量と固縛ロッドの張力の鉛直成分、水平成分による力を含んだものであることによる。以上より、三次元非線形固縛計算モデルは、固縛ロッドの張力に関して実験結果より小さい値を与えるものの、コンテナ支柱に作用する力に関しては、妥当な結果を与えると言える。

4. 三次元非線形コンテナ固縛計算モデルの適用例

三次元非線形コンテナ固縛計算モデルの種々の固縛方法への適用性を検討するため、図5に示す3種類の固縛条件に関して、固縛ロッドの張力、コンテナ支柱に作用する力などを計算した。コンテナは7段積みとし、1~4番目のコンテナの質量は 1.0×10^4 kg、その他のコンテナは空コンテナの質量に相当する 5.0×10^3 kgとした。なお、固縛ロッドの張力の初期張力は30 kNとした。

コンテナに作用する加速度の計算に関して、IGC Code⁽¹¹⁾に基づく加速度の計算方法が、固縛評価に適用可能であることが示されている⁽⁹⁾。そこで、表1に示すように各軸方向の加速度の長期予測値を設定した⁽⁹⁾。そして、各軸方向の加速度の長期予測値を径とする加速度楕円体を作成し、その楕円体上の加速度について、コンテナおよび固縛ロッドに作用する種々の力を計算した。各固縛条件における、コンテナおよび固縛ロッドに作用する種々の力の最大値を表2に示す。なお、あわせてコンテナ強度などの制限値を表2に示す。各々の力の最大値がこれらの制限値を超えた場合に、その固縛条件は不適切な固縛方法であるとする。

表2より、固縛条件-1の固縛方法は、コンテナ上端に作用する張力が制限値を超えているため、不適切な固縛方法であることがわかる。一方、固縛条件-2,3の固縛方法は、すべての力が制限値内であり、適切な固縛方法であると言える。以上より、三次元非線形固縛計算モデルを用いて、さまざまなコンテナ固縛条件に関して固縛の安全評価を試みた。

図5 固縛条件

表1 コンテナに作用する加速度の長期予測値

Container No.	Longitudinal acceleration	Transverse acceleration	unit: G
			Vertical acceleration
1	0.122	0.686	0.526
2	0.135	0.690	0.526
3	0.146	0.693	0.526
4	0.158	0.696	0.526
5	0.170	0.701	0.526
6	0.183	0.704	0.526
7	0.195	0.708	0.526

表2 固縛条件が異なる場合における、コンテナおよび固縛ロッドに作用する種々の力の最大値

Lashing Condition	Tension	Racking force		Vertical force			
		Longitudinal Direction	Transverse Direction	Top of container		Bottom of container	
				Compressive Force	Tensile Force	Compressive Force	Tensile Force
1	79	42	77	513	166	583	171
2	67	40	54	395	79	474	79
3	87	39	47	375	82	433	82
Limit	226	75	150	848	150	983	—

5. 結 論

本研究では、「固縛ロッドの非線形挙動」および「コンテナ前後端の相互作用」を考慮した三次元非線形コンテナ固縛計算モデルを開発し、計算モデルによる計算結果と傾斜実験および実船実験による実験結

果とを比較した。さらに、これまで安全評価が困難であった特殊な固縛方法に関して、本計算モデルの適用の可能性を確認した。以下に本研究により得られた結論を示す。

- (1) 固縛ロッドの張力に関する、三次元非線形固縛計算モデルによる計算結果と傾斜実験結果との差は、二次元線形固縛計算モデルによる計算結果と実験結果との差より小さい。
- (2) 三次元非線形固縛計算モデルによる、固縛ロッドの張力の計算結果は、実船実験結果より小さい。
- (3) 固縛ロッドの張力に関する計算結果と実船実験結果との差が、コンテナ支柱に作用する力の計算結果におよぼす影響は有意ではない。

謝 辞

本研究は、日本財団の支援を得て実施した日本造船研究協会第234研究部会「船舶のカーゴセキュアリングシステムの研究」の一環である。東京大学藤野正隆教授、影本浩教授をはじめとする第234研究部会関係者各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) International Maritime Organization: International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, Chapter VI, Regulation 5.
- (2) Lloyd's Register of Shipping: Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part3, Chapter14, Freight Container Securing Arrangements, 1996.
- (3) 日本海事協会：貨物の積付けと固縛に関する指針, pp77-84, 1988.
- (4) American Bureau of Shipping: Guide for Certification of Container Securing Systems, 1988.
- (5) Bureau Veritas: Securing of Containers on Board Ships, 1984.
- (6) Det Norske Veritas: Strength Analysis of Container Securing Arrangements, 1983.
- (7) Germanischer Lloyd: Rules for Classification and Construction I - Ship Technology Part 4 Special Marine Technology Chapter 3 Stowage and Lashing of Containers, 1933.
- (8) 日本造船学会造船設計委員会：コンテナ等の積付け装置設計指針, 造船技術, 80.4, pp99-108.
- (9) (社)日本造船研究協会: 第234研究部会, 船舶のカーゴセキュアリングシステムに関する研究, 平成11年度報告書, 2000.
- (10) 中村朋宏 他：コンテナの固縛評価手法の研究, 日本航海学会論文集, 第101号, 平成12年3月.
- (11) International Maritime Organization: International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code), 1933.