コンテナの耐風に関する模型実験—II.

堀 富士男*

Model Experiments on the Effect of Wind upon Container —II.

Fujio HORI

Abstract

In order to investigate the wind-action containers, by making use of a wind generator closed-type, the author carried out the model test on a container and the simulation of stacked containers in the PC-11 Container Yard (Kobe Port Island). Models for getting the wind force coefficient are 1/20 scale of 20 feet dry container and simulation models are 1/40 scale of 40 feet dry container.

The results of experiments were as follows:

- (1) As compared with results of another methods, I could confirm the wind force coefficients.
- (2) When the wind blows at right angles to the front surface of container ($\theta=0^\circ$), these values are drag coefficient (C_d)=1.025, lift coefficient(C_l)=0.581 respectively.

The result by the simulation tests showed that in the range of $\theta=15^\circ$ to 30° stacked containers started to slide by lower wind velocity.

1. はじめに

コンテナ・ヤードに蔵置された空コンテナの強風による飛散の問題について、先の報告⁽¹⁾は、神戸商船大学の開放型風洞において行ったものであるが、それ以後本校の密閉型風洞において、先の実験とは異なった方法によって、主に風圧係数を求める基礎実験を行ってきた。その間に日本海上コンテナ協会もこの問題を取り上げて報告書⁽²⁾が出された。これらの基礎実験の結果を比較検討することによって、風圧力係数を確認すると同時に、その結果をもとにして、神戸ポートアイランドのPC-11ヤードから資料の提供を載き、同ヤードをモデルにして、縮尺 1/40 のコンテナ及びコンテナ・ヤードの模型を作製して、15度毎に全風向にわたるコンテナの滑動・転倒の限界風速に関してシミュレーションを行い、それらの結果をまとめたものである。

2. 実験方法

2.1 供試模型

本実験に使用したコンテナ模型は、風圧力測定用に20フィートドライコンテナ ($L \times B \times H \times W = 6.06\text{m} \times 2.44\text{m} \times 2.44\text{m} \times 1.0\text{ton}$) の縮尺 1/20 のアクリル板製模型 ($L \times B \times H \times W = 0.30\text{m} \times 0.12\text{m} \times 0.12\text{m} \times 0.213\text{kg}$) と、シミュレーション用には40フィートドライコンテナ ($L \times B \times H \times W = 12.19\text{m} \times 2.44\text{m} \times 2.44\text{m} \times 3.0\text{ton}$) を基準にした縮尺 1/40 の塩化ビニール板製模型 ($L \times B \times H \times W = 0.30\text{m} \times 0.06\text{m} \times 0.06\text{m} \times 0.06\text{kg}$) を多数作製しそれぞれにコーナーポストを取り付けた。シミュレーションは、3.6m×2.7mの実験台上にPC-11ヤードの1/40縮尺の建物模型を作製して上記供試模型を配置して行った。

2.2 実験装置及び要領

弓削商船高専の密閉式吸い込み型風洞装置(吹出し口 6.6m×0.5m, 最大風速 8m/sec)を使用し、風圧力測定には定格負荷 ($F_x \times F_y \times F_z = 1.0\text{kg} \times 1.0\text{kg} \times 0.4\text{kg} \cdot \text{m}$) の三分力検力計を使用した。風速測定は熱線風速計で直読すると同時にピトー管に小型差圧変換器を取り付けて、三分力と共にデータをマイコンで処理した。

* 正会員 弓削商船高等専門学校(愛媛県越智郡弓削町下弓削)

(1) 風圧力測定

風圧力測定用模型は、縮尺 1/20 の 20フィートドライコンテナの 1 段、2 段積み連結及び 3 段積み連結を用い、その内部の長さ及び高さの中央に図 1 の様に三分力計を取り付けて、多ペンレコーダーとマイコンに接続して、 F_x (揚力)、 F_y (抗力) 及び F_z (モーメント) とピトー管の差圧を同時に読み取った。上記の模型を風洞吹出し口前面に設けた実験台上にセットして 1 段積み、2 段積み上段、2 段積み連結、3 段積み最上段及び 3 段積み連結のそれぞれの場合について、風速を 2m/sec から

図 1 (写真) 風圧力測定模型

図 2 神戸港 PC-11 ヤード

6m/sec の範囲で 6 段階に変化させて風圧力を測定した。次にコンテナの受ける風の角度を長手方向に直角に当る風を $\theta=0^\circ$ として 75 度まで 15 度毎に変化させて 2 段階の風速で同様の実験を行った。

(2) ヤード模型実験

図 2 に示す神戸港ポートアイランドの南埠頭 C-11 ヤードの縮尺 1/40 の模型を作製して実験台に配列して、ヤード自体を 15 度ずつ 360 度回転させて全方向からの風に対するコンテナの挙動を観測した。その模様を図 3 に示す。PC-11 ヤードは図 4 に示す配置になっており、コンテナを蔵置するブロックを A、B 及び C ブロックとして、各風向において風速を徐々に増加させて、いずれのブロックでどの位置のコンテナが滑動を開始するか目視観測すると同時にビデオに収録し、滑動した瞬間の風速を熱線風速計で測定した。実験は 1 段積みと 3 段積みフリーで行い、風速計の高さは段積みの高さの中央にセットした。各ブロックのスタッキングエリアに実際の数のコンテナを配列することは困難で、滑動するのは風に対して最前面のコンテナであることから、周辺には供試模型を配し中央部にはダミーとしてベニヤ板製のコンテナ模型を配した。

図 3 (写真) シミュレーション装置

図4 PC-11 ヤード配置図

3. 実験結果とその検討

3. 1 風圧力測定

風圧力を測定するに先立ち、風速の垂直分布を熱線風速計を用いて測定しその結果を図5に示す。密閉型風洞のため天井と実験台の両方で境界層が出来る。3段積みの高さが縮尺 1/20 の模型で 36.6cm であり、天井の影響が及ばないように可動式底板を調節して天井と実験台までの高さを 70cm とした。上下の風速分布が対称でないのは、アクリル板の天井とベニヤの実験台ということと、風洞の吹出し口の高さが 50cm で実験台上にやや吹き下し気味であることが原因と思われる。各段積み形状において、三分力計で得た抗力 (P_d) と揚力 (P_l) より、 $P = 1/2 C \cdot \delta \cdot A \cdot V^2$ の式から風圧力係数を求めて、抗力係数 (C_d) と揚力係数 (C_l) とした。またモーメントも、 $M = 1/2 \delta \cdot C_m \cdot A \cdot L V^2$ の式からモーメント係数 (C_m) を求めてその結果を図6～図10に示す。低風速部分では風圧力が小さいため特に1段積みでは値が乱れているが、風速の高い部分では一定とみなすことができる。これらの結果と前報及び日本海上コンテナ協会の結

図5 風速の垂直分布

図6 1段積み風圧力係数

図7 2段積み上段風圧力係数

図8 2段積み連結風圧力係数

図9 3段積み上段風圧力係数

図10 3段積み連結風圧力係数

図11 風向別揚力係数

図12 風向別抗力係数

表1 風圧力係数

段積み形状	風圧力係数	本実験	前報	コンテナ協会
1段積み		Cd 1.025	1.001	1.051
	Cl	0.581	0.631	0.179
2段積み 上段		Cd 1.235	1.404	1.071
	Cl	0.465	0.727	0.027
2段積み 連結		Cd 1.155	1.230	1.065
	Cl	0.541	0.727	0.110
3段積み 連結		Cd 1.215	1.452	1.114
	Cl	0.365	0.862	0.064
3段積み 上段		Cd 1.580		
	Cl	0.241		

果とを比較して表1に示した。コンテナ協会の値は、三菱長崎研究所の大型風洞において、六分力天秤を使用して求めたものである。密閉型風洞と開放型風洞の違いがあり、一般に密閉型の方が風圧力が実際より大きく、開放型は小さいといわれているが⁽⁸⁾、その傾向が出ているのか本実験の値が大きく現われている。特に揚力係数についてはその差が大きく検討の余地がある。風向を変化させて得られた抗力係数と揚力係数を表2に示す。これらを図示すると、本実験の揚力係数は図11、抗力係数を本実験とコンテナ協会の結果と合わせて表わすと図12となる。コンテナの滑動に大きく影響する抗力係数についてみると、両実験結果と

表2 風向別風圧力係数

段積み形状		1段積み	2段積み 上段	2段積み 連結	3段積み 連結
風向 角度	風圧力 係数
0°	Cd	1.025	1.235	1.155	1.215
	Cl	0.581	0.465	0.541	0.365
15°	Cd	1.010	0.836	0.677	0.983
	Cl	0.495	0.387	0.779	0.580
30°	Cd	0.922	0.738	0.654	0.864
	Cl	0.344	0.537	0.621	0.408
45°	Cd	0.804	0.821	0.665	0.819
	Cl	0.240	0.751	0.785	0.725
60°	Cd	0.481	0.570	0.536	0.741
	Cl	0.297	0.553	0.479	0.650
75°	Cd	0.173	0.220	0.197	0.296
	Cl	0.268	0.296	0.460	0.395
90°	Cd	0.365	0.194	0.085	0.105
	Cl	0.225	0.225	0.311	0.381

も同じ傾向を示している。これによると風向角が大きくなると C_d は二次曲線にそって減少し、 $\theta=0$ 度の時が最も滑動し易く、角度が大きくなる程滑動開始風速も二次曲線的に大きくなる。シミュレーションを行う予備実験で単体の場合と、5個のコンテナを横に並べた場合について角度を変えて滑動開始風速を測定した結果、40 ft コンテナの縮尺 1/40 のものを単体で行った時は図13で、20 ft コンテナの縮尺 1/40 のものを5個横に並べた時を5個並列として図14に示す。この結果をみると最も滑動し易いのは15度から30度付近の風を受けた時でこの付近で最小値を取る二次曲線の形であるがその変化率は小さく、図12の抗力係数から試算した滑動開始風速より低い風速で滑動し、角度の増加とともにその差は大きくなる。また図13と図14は 20 ft と 40 ft の違いがあるが、ブロック化すると滑動開始風速も大きくなっている。以上のことを考え合わせると、本実験ではローリングモーメントを測定して高さ方向の風圧力中心位置は求まるが、ヨーイングモーメントを測定して長さ方向の風圧力中心位置を求める必要がある。ブロック化については前報でも少し触れた縦横比による抗力係数の変化を知る必要がある。以上については今後の課題としたい。

図13 風向別滑動開始風速
(40 ft, 1/40 単体)

図14 風向別滑動開始風速
(20 ft, 1/40, 5個並列)

図15 1段積みシミュレーション

図16 3段積みシミュレーション

3. 2 ヤード模型実験

1 段積み及び3 段積みフリーの場合の全風向の滑動開始風速を同じスケールで図15と図16に示す。図4に示したPC-11ヤードのレイアウトから、コンテナが南北方向に配列されているので東西の風に対して滑動し易いのは容易に想像できる。ここでも先に述べたシミュレーションの予備実験の結果と同様に、東西の軸を中心にして北に15度から30度、南に15度から30度の範囲で滑動し易いことがわかる。風向と滑動開始場所をみてゆくと、東寄りの風では1 段、3 段ともAブロックの東端が滑動する。西寄りの風では1 段積みではCブロック、3 段積みではAとBブロックが滑動する。1 段積みの場合風の前面のBブロックより後面のCブロックが滑動するのは、Bブロックで乱された流れがゲートやコントロールオフィスの影響を受けてCブロックの西端が滑動すると思われる。北寄りの風ではAとBブロックが滑動するが、真北の風の場合1 段、3 段とも後面のCブロックが低風速で滑動している。これも建造物の影響と思われるが、ヤードの現場での説明でもゲート付近のコンテナがよく滑動するとのことであった。南寄りの風ではほとんどBブロックが滑動するが、滑動開始風速が大きいのは、ヤードの南側に道路を隔てて7~8mの防波堤があるためである。3 段積みの場合北の風から反時計回りに南西の風の範囲にかけてAとBブロックが非常に滑動し易いといえる。上記の結果をもとにして実物換算をしなければならぬが、基礎実験で得た単体のコンテナの風圧力係数を使って滑動開始風速を求めると25m/secになる。前述の様に実際にはもっと低い風速で滑動し、上の風速値で対応することは危険である。供試模型と実物との相似条件を比較すると、縮尺1/40であるから模型重量=実物重量 $\times 1/40^3$ で供試模型重量が0.06kgであるから3.8tonの実物コンテナとなり、摩擦係数はコンテナとコンテナで模型が0.387で、実物はコンテナ協会が測定した値が0.36で、ほぼ同じとみてよい。風洞風速から実風速への換算は風速倍率 $=\sqrt{40}$ となる。以上の結果を3 段積みシミュレーションに適用すると図16の風速は実物換算では、3m/secが19m/sec、4m/secが25m/secとなる。コンテナ協会の報告の中に各ターミナルへのアンケート調査で20m/sec未滿で滑動した例がいくつかある。

4. む す び

現在コンテナ・ターミナルにおいて、主に台風の接近の恐れのある場合、ヤード全域にわたって以下のような飛散防止対策が行われている。

- (1) クシの齒状をならして出来るだけブロック化する。
- (2) コンテナを連結する。
- (3) 空コンテナの上に実入りのコンテナを乗せる。

等であるが、いずれも大変な作業である。しかし冬の季節風や春一番の突風でも飛散の危険は十分にあり、現に飛散の例もこの場合が多い。一連の基礎実験とシミュレーションの結果、明らかになったことは以下のとおりである。

- (1) 単体で得た風圧力係数をそのまま蔵置されたコンテナに適用するのは他の要素も考慮に入れる必要がある。
- (2) コンテナの長手方向に対して15度から30度の範囲の風向の時が滑動し易い。
- (3) シミュレーションの結果をもとに、台風の進路によってより万全な飛散防止の対策をとることができ、無防備な季節風や春一番に対して風向によって最も飛散し易い場所を把握しておくことによって、日頃から防止対策が出来る。同時に地理的条件や建造物の影響も把握しておくことが出来る。

参 考 文 献

- (1) 本田啓之輔・堀富士男：コンテナの耐風に関する模型実験，日本航海学会論文集，63号，昭和55年8月
- (2) 日本海上コンテナ協会：風洞実験によるコンテナの挙動調査報告書，昭和56年3月
- (3) 石崎潑雄：耐風工学，p. 123，朝倉書店，昭和52年

質 疑 応 答

三木 楯彦：

- (1) ストラドルキャリア方式とトランステナー方式でのコンテナ蔵置形態が大きく相違します。風洞実験結果

を両方式に適用する場合の留意点等についてお聞きしたい。

- (2) 今後の研究の方向例えば防災対策についてお聞きしたい。

堀 富士男：

- (1) 密着して蔵置できるトランステナー方式に比べストラドル方式の方が飛散の例も多いので本実験では後者のみを考えて行っております。トランステナー方式ではブロック化されておりますので滑動しにくいと思いますが今後の課題と致します。
- (2) 防災対策まで論じなければならないと思っておりますが、人手と費用のかからない方法となりますと難しい問題です。防風ネットの実験も行っておりますが現実問題としてコンテナ・ターミナルに設置出来るかどうか疑問ですし、大型台風となれば現在の飛散防止対策を取ることにしたいと思います。

久々宮 久：他機関の測得値との比較で特に揚力係数 C_L に桁違いの差が見られます。無次元化法の違いがあるのではありませんか、御検討ねがいます。

堀 富士男：無次元化の方法は同じようです。確かに差が大きいのですが、考えられますことは、境界層の厚さに対する模型の大きさがコンテナ協会の場合 30mm の厚さに対して縮尺 1/10 で 20 ft コンテナの模型の高さが 26cm です。本実験では 12cm で、境界層の厚さは測定しておりません。これは抗力係数より揚力係数に影響するそうです。もう一点は三分力計を模型の中に組み込んでコンテナの底を閉じるようにしたのですが多少風が流れ込んだ可能性もあるかもしれません。しかし一般に建築関係の資料をみますと立法体の揚力係数は 0.5 とされております。