

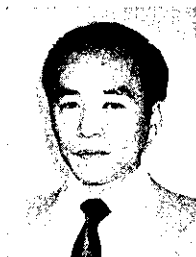
Wind Tunnel Experiment of Container Crane



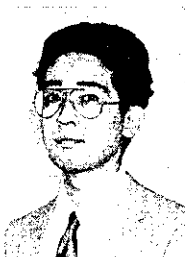
近江 宗作
Sousaku Ohmi
川鉄鉄構工業(株) 水
島工場エンジニアリン
ググループ グループ
長・部長



越山 佳明
Yoshiaki Koshiyama
川鉄鉄構工業(株) 水
島工場エンジニアリン
ググループ 荷役機械
担当副部長



亀田 修
Osamu Kameda
川鉄鉄構工業(株) 水
島工場エンジニアリン
ググループ 設計主幹



冨田 博
Hiroshi Tomita
川鉄鉄構工業(株) 水
島工場エンジニアリン
ググループ 設計担当

要旨

クレーンの設計に当たっては、種々の外力を組み合わせて作用させ構造部分の強度検討が行われる。各外力の取扱についてはクレーン構造規格および JIS B8821 に明記されているが、風荷重についてはいずれも集散的に規定されており、構造物の形状によっては、極めて安全側に設計されるケースが少なくない。そこで今回コンテナクレーンをモデルとした風洞による全体、および部分模型実験を実施し、固有の断面形状をもつ立体構造物としての風力係数を全体および部分的に算定した。さらにその結果を規格値と比較することにより、規格による計算は安全側に行われることを確認した。

Synopsis:

Crane structural members are calculated with due consideration to various loading combinations induced by the dead loads, hoisting load, horizontal load, wind load, seismic load, etc. Of these, the effects of the wind load under a storm condition can be considered the most important factor in determining the size of main structural members as well as safety against overturning, especially where the crane is of the outdoor-operating high-towered type. It becomes essential, therefore, to study the influence of the wind load on the crane structure as a whole. The paper reports the results of a wind tunnel experiment conducted on a 1/120 scaled-down model of a super-large-sized container crane. The data analysed, with due reference to the Japanese Industrial Standards now in force, would be of use for formulating values and coefficients for the practical design of the similar crane construction.

1 緒 言

近年、飛躍的なコンテナ貨物量の増大につれて、ますます大型化する船舶に対応して、海上輸送と陸送の接点に位置するコンテナクレーンも高速化、大型化の傾向が著しい。クレーンの大型化は当然構造物に対する風荷重の増大をもたらす、風荷重が構造物強度決定の要因となることが多くなってきた。さらにコンテナクレーンは、建築物・橋梁とは異なり、その機能上、基礎には固定されず軌道上を移動する構造となっているため、風による逸走、転倒といった問題も抱えている。

風がクレーン構造物に与える影響は設計上非常に重要であるが、実機についてその影響を調査することは困難である。このため今回コンテナクレーンの縮小模型での風洞実験によって実機に近い形でのデータを収集し、併せて規格による風荷重との比較を行い、風に対する安全性確認の一助とした。

2 風荷重計算方法

一般に風荷重 F は式 (1) により計算される。

$$F = \frac{1}{2} C_p \rho v^2 A \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 C : 風力係数
 ρ : 空気密度
 v : 風速
 A : 受圧面積

一方クレーンを設計する場合の風荷重は、クレーン構造規格¹⁾あるいは JIS B8821²⁾ に準拠して計算される。式 (2) はその基本式である。

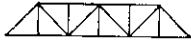
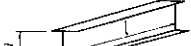

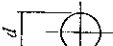
$$F = qCA \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 q : 速度圧

式 (1) および (2) の比較から $q = \rho \cdot v^2 / 2$ の関係であることがわかるが、 q には受圧面積の高さによる風の速度分布を考慮した係数³⁾が含まれている点で異なった意味をもつ。また風力係数および風に対して重なった受圧面の取扱については Table 1 および Fig. 1 に示すとおり規定されている。

* 昭和63年3月30日原稿受付

Table 1 Shape coefficient C

Type of structure	Conditions of exposure (%)	C
Truss of rolled sections 	$\phi < 0.1$	2.0
	$0.1 \leq \phi < 0.3$	1.8
	$0.3 \leq \phi < 0.9$	1.6
	$0.9 \leq \phi$	2.0
Plate girder 	$l/h < 5$	1.2
	$5 \leq l/h < 10$	1.3
Box girder 	$10 \leq l/h < 15$	1.4
	$15 \leq l/h < 25$	1.6
Cylindrical member or truss of cylindrical member 	$d\sqrt{q} < 1.0$	1.2
	$1.0 \leq d\sqrt{q}$	0.7

Note ϕ : The ratio of the projected area of the faces to receive wind to the area enclosed by the outline
 q : Wind pressure

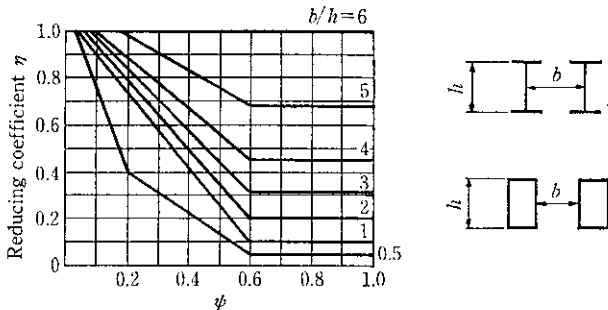


Fig. 1 Relationship between ϕ and η

3 風洞実験

3.1 実験概要

本実験では、コンテナクレーンの全体模型および部分模型による三次元風洞実験を実施している。全体模型実験では抗力を測定しクレーン全体としての風力係数を求めた。また部分模型実験では横行桁部に着目し風力係数を求めるとともに、風向に対して重なった2枚の桁について風荷重の低減率を求めた。

3.2 実験模型

3.2.1 全体模型

実験モデルとしては、当社が神戸港六甲アイランドに納入した(財)神戸港埠頭公社向けのコンテナクレーン⁹⁾を採用した。これは本クレーンが、現在、国内最大級のコンテナクレーンであり、今後このような大型コンテナクレーンの需要が増加の傾向にあることと、その規模が多様なクレーン構造物の中にあっても大型の部類に属することから、最も有効な設計資料となり得ると判断したからである。実機の概要をFig. 2に示す。

模型は縮尺を1/120としPhoto 1に示すとおりブーム水平、起立の姿勢に変更可能な真鍮製の剛体模型とした。

3.2.2 部分模型

実験モデルとしてコンテナクレーンの横行桁部を取り上げた。これは、この部分の受圧面積が構造物全体の中でも大きな比率を占め、高所に位置するため風荷重による転倒モーメント等への影響が大きいことのほか、桁の形状がクレーン構造物として数多く採用さ

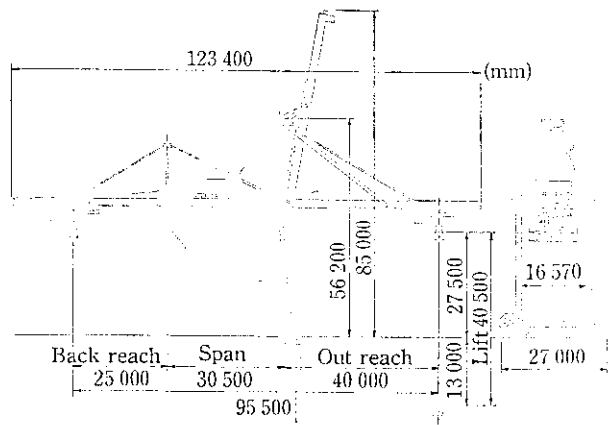
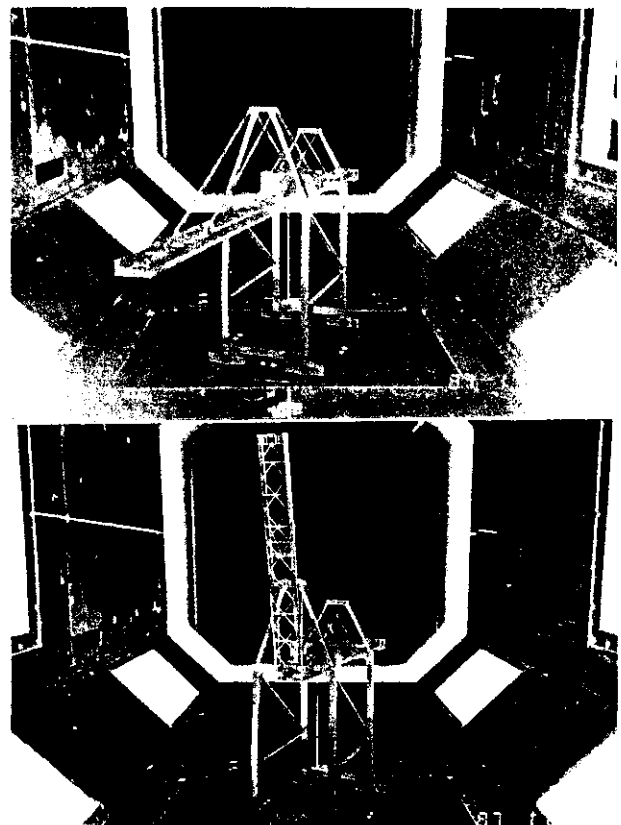


Fig. 2 General view of the container crane



Upper: Boom down
 Lower: Boom up

Photo 1 Overall model

れているタイプであることによる。とくに今回の実験では、桁の断面形状よりも受圧面の長さとの比に注目して風力係数との関係⁹⁾を実状に即した条件で調べるため三次元模型とした。

模型は、断面形状をプレートタイプとボックスタイプの2種類に分け、すべて長さを同一として高さを変えることで受圧面の長さとの比が異なる9種類を鋼板およびアルミ板で製作した。縮尺は実機に対して1/50程度であり、Photo 2に示すように両端には翼形断面の支持金具を取り付け測定胴外側で模型を支持した。

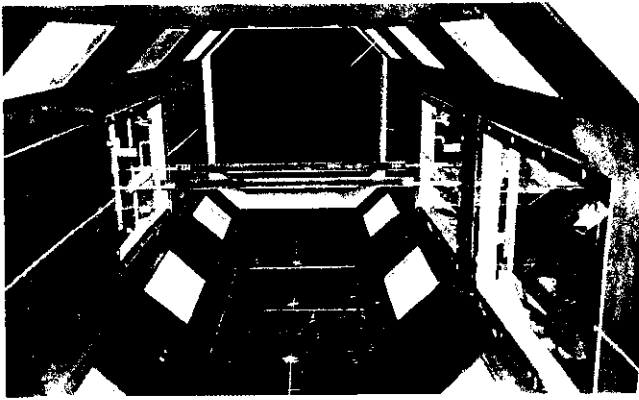


Photo 2 Partial model

3.3 使用風洞

本実験は、大阪大学工学部風洞実験棟の水平回流式風洞を使用して実施した。その仕様を Table 2 に示し、平面図を Fig. 3 に示す。測定胴については最大風速を高く設定することができる測定胴 B を使用した。

Table 2 Specifications of the wind tunnel

Wind tunnel	
Type	Rotational flow
Test tunnel	B
Size	1.2 m × 1.2 m × 3.5 m L
Wind velocity	5 ~ 50 m/s
Velocity deviation	±1.0%
Flow deflection angle	±1.0°
Flow turbulence	0.5%
Blower	
Type	Single stage axial blower
Caliber	2 mφ
Rotor blade	8-piece fixed pitch
Capacity	72 m³/s (760 rpm)
Total pressure	70 mmAq (760 rpm)
Motor	
Type	DC shunt motor
Nominal rating	DC 220 V 75 kW
Revolution control	Thyristor leonard
Control range	50 ~ 760 rpm

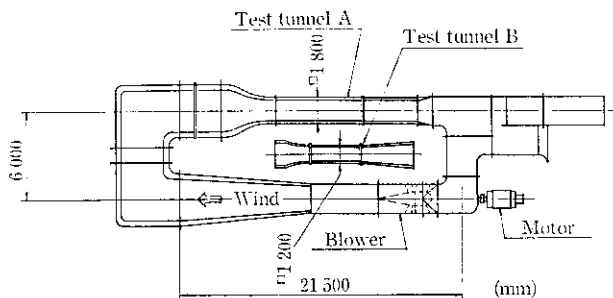


Fig. 3 Plan view of the wind tunnel

3.4 測定方法

3.4.1 全体模型実験

模型は測定胴に Fig. 4 の要領で取り付けられた。測定胴の床面下で模型の 4 本の脚に検力計を取り付け、さらにその下にターンテーブルを設置することで測定胴の外から模型の風向角度を変えられる構造とした。

抗力の測定は、ブーム水平、起立のそれぞれの姿勢について風向角度 0° から 180° まで 10° ピッチで変化させながら模型下部に取り付けた三分力検力計で各分力を検出した。

測定分力については Fig. 5 に示すようにクレーンの長軸を基準とし、長軸方向の分力 (F_x) と短軸方向の分力 (F_y) で表している。流体力学分野では、風の方向を基準軸として、抗力 (F_D) と横力 (F_L) により分力を表すのが通例ではあるが、クレーンの強度設計に適用する場合は、前者の方が便利である。

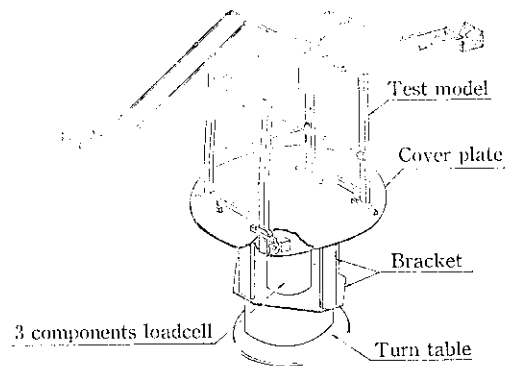


Fig. 4 Fixing of the test model on the turn table

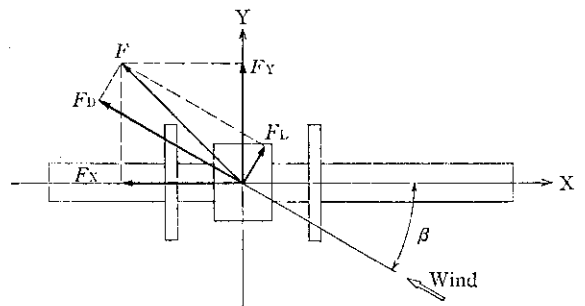


Fig. 5 Components of the wind force with respect to the wind direction

3.4.2 部分模型実験

模型は測定胴に Fig. 6 の要領で取り付けられた。模型の両端に取り付けた支持金具は、測定胴側面のスリットを通して外側で検力計に固定した。この検力計は、ガイドレールにボルトで固定することに

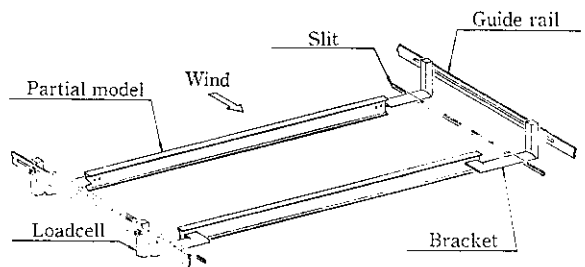


Fig. 6 Fixing of the partial models on the guide rails

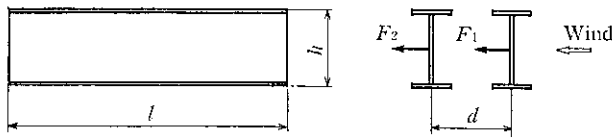


Fig. 7 Direction of the wind and the load measured (partial model)

より測定胴の外から模型を風向方向にスライド可能な構造とした。測定は、各部分模型を単体で取り付けられた状態または同一形状のものを2枚同時に取り付けられた状態で間隔を変化させながら、両端の検力計から抗力を検出した。測定分力および本報告書での表示記号をFig. 7に示す。

3.5 データ処理

模型に作用する風荷重は検力計により測定した。検力計から発信されるアナログ信号は、リニアコーダで出力すると同時にA/D変換器によりデジタル出力も行った。一方、各実験ごとに、測定値と実荷重の関係を求めるために予備実験を行った。予備実験では模型に静荷重のみを加え、この時の荷重値と測定値から補正係数を求めた。実荷重は式(3)により求めた。

$$F = kV \dots\dots\dots (3)$$

ここで、*k*: 補正係数
V: 出力電圧

また風速については、測定胴内の動圧、温度、気圧を測定し空気密度を求めて式(4)により算出した。

$$v = \sqrt{\frac{2Q}{\rho}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、*Q*: 動圧
 これらの数値を式(5)に代入して風力係数を求めた。

$$C = \frac{2F}{\rho v^2 A'} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、*A'*: 投影面積

全体模型実験では、風向角度を変化させながら測定しているため、これにともなう模型の投影面積も変化していく。しかし測定角度ごとに投影面積を求めることは非常に困難であり、設計時の資料としては有効でないことから本報告書では各分力方向の投影面積を固定して、投影面積の変化を風力係数に包含するものとして算出した。

各実験とも風速を変化させて測定を行ったが、*Re*数は全体模型で $1 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$ 、部分模型で $7 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ の範囲であり、風速が変化しても風力係数に変化を与えるものでないことから本報告書では風速 30 m/s での結果を報告する。また本実験モデルのような断面に角をもつ構造物の限界レイノルズ数は低く、実験レイノルズ数が 4×10^5 以上であるから相似則は成り立っている。

4 実験結果および考察

4.1 全体模型実験

全体模型実験による風向角度と各分力の関係を Fig. 8 に示し、風向角度と風力係数の関係を Fig. 9 に示す。また、風力係数について実験値と計算値を比較した結果を Table 3 に示す。この結果は以下のとおりである。

(1) 今回の実験モデルは多数の矩形が集めた立体骨組構造であ

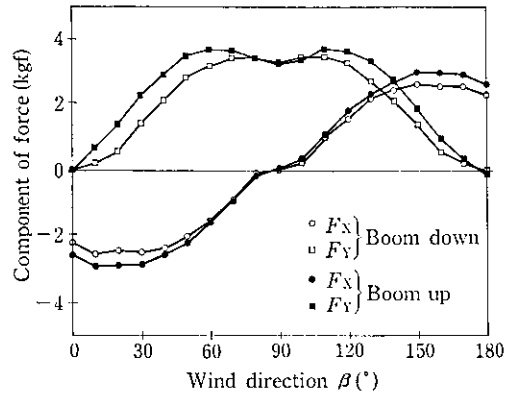


Fig. 8 Change in the drag with respect to the wind direction

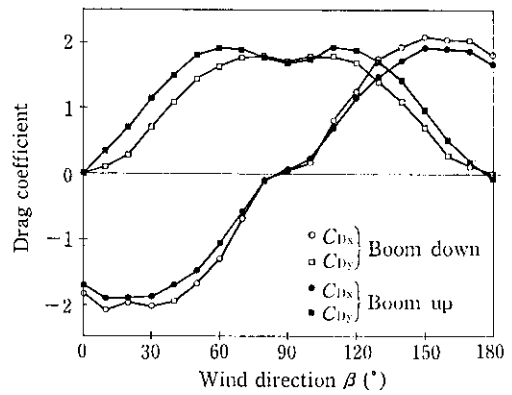


Fig. 9 Change in the drag coefficient with respect to the wind direction

Table 3 Shape coefficient comparison between observed values and calculated values

	Boom down		Boom up	
	Test	Calculation	Test	Calculation
$C_{Dx} (\beta=180^\circ)$	1.81	2.29	1.69	2.25
$C_{Dy} (\beta=90^\circ)$	1.71	2.13	1.68	2.14

るが、その投影面積が同じ(例えば 30° と 150°)で風荷重は等しい。

- (2) ブーム水平、起立状態のどちらも斜風の時に風荷重が最大となっているが、これは風に対して重なった面が露出し投影面積が最大になったためと考えられる。
- (3) ブームを起立した場合、水平状態に比べて風荷重は 13% 程度大きくなる。
- (4) 風力係数について規格による計算値と実験値を比較すると、X方向の計算値はブーム水平で 26%、起立状態で 32% 大きく、またY方向の計算値は共に 28% 大きくなっている。この結果、規格による風荷重の算定は安全側であるといえる。

4.2 部分模型実験

部分模型実験による、*l/h*と風力係数の関係を Fig. 10 に、*b/h*と抗力の低減率の関係を Fig. 11 に示す。また参考として実績コンテナクレーン横桁部の各寸法比を Table 4 に示す。この結果は以下

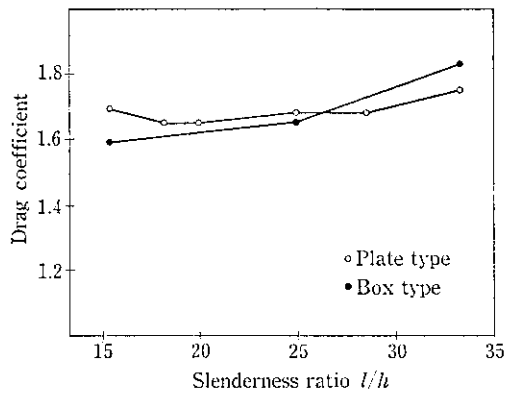


Fig. 10 Relationship between slenderness ratio and drag coefficient

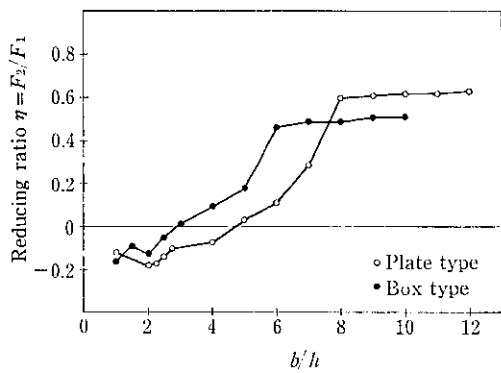


Fig. 11 Relationship between b/h and reducing ratio

Table 4 Ratios of l/h and b/h in the existing container cranes

Container crane	l/h (Girder)	l/h (Boom)	b/h
A	17.6	19.9	2.33
B	17.0	19.6	2.18
C	13.9	21.3	2.60
D	16.2	18.0	2.27
E	32.9	24.8	2.60

のとおりである。

- (1) 規格で規定されていない $l/h > 25$ の場合、プレートとボックスタイプ共に風力係数は増加する傾向がある。増加の割合につ

いてはプレートタイプに比べボックスタイプの方が大きいことから、このような条件の場合、プレートタイプの方が有利であるといえる。

- (2) 規格で規定されている範囲での風力係数は、プレートタイプで 0.1 程度、ボックスタイプで 0.05 程度規格値に比べて大きい。これは模型端部に取り付けた支持金具の影響であると考えられる。
- (3) 風に対して重複した桁の場合 $l/h \leq 3$ であれば、下流側の桁には風向と逆方向の力が作用する。これは、上流側の桁で剝離した空気の流れが下流側の桁に到達するまでに回復せず、2枚の桁の間で気圧が低下し互いに引き付け合う力が作用するためと考えられる。このため上流側の桁の抗力は下流側の桁がない時より大きくなっている。この結果、コンテナクレーンの横行桁部の風荷重を規格に準拠して計算すると実験値に比べ 20% 以上大きくなる。
- (4) 下流側の桁に作用する風荷重は規格で規定されているよりも回復が遅い。とくに $b/h=6$ の場合、規格によれば下流側の風荷重は、上流側と同じにまで回復することになるが、実験によるとプレートタイプで 60%、ボックスタイプで 50% 程度まで回復するだけであり、さらに間隔を大きくしても急激に回復する傾向はない。

5 結 言

コンテナクレーン風荷重に対する安全性を確認するために神戸港埠頭公社向けのコンテナクレーンの模型を用いて、大阪大学工学部の水平回流式風洞で風洞実験を実施した。この結果は以下のとおりである。

- (1) クレーン構造物全体としてみた場合、ブーム水平、起立状態ともに規格による風荷重の計算は 25% 以上安全側であることを確認した。
- (2) 従来の風荷重の計算では正面風、側面風の場合しか行われていないが、斜風についても検討の必要がある。この場合、受圧面積等の計算は非常に困難となるから、風洞実験を行うことは、斜風に対する検討に有効な手段である。
- (3) 風に対して重なった面で、その間隔を拡げた場合の下流側での風荷重の回復は、規格で規定されているよりも遅い。これは、立体構造物において風荷重の計算が安全側に行われる要因の一つであると考えられる。

最後に、今回の風洞実験においてご指導、ご助言をいただきました大阪大学工学部世古口教授、五十嵐技官に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 労働省: 「クレーン構造規格」
- 2) JIS B8821, 「クレーン鋼構造部分の計算基準」
- 3) 塩谷正雄: 「強風の性質」, (1979), 26~50
- 4) 遠藤伸一, 近江宗作, 寺田雄一, 鈴木 征, 亀田 修: 「埠頭用超大型高速コンテナクレーン」, 川崎製鉄技報, 18 (1986) 1, 82-89
- 5) 本州四国連絡橋公団: 「耐風設計基準 (1976)・同解説」, 14-15