

親水性防波堤上の手すりの耐波設計法

菅原邦彦* ・ 遠藤秀則** ・ 高橋重雄***
遠藤仁彦****・ 高野聖三*****

1. まえがき

親水性防波堤は、他の港湾施設より海に近づくことができる反面、危険性も増加するため、一般市民に解放する際には十分な安全対策が必要となる。手すりは、最も基本的な安全施設の一つであり、ほとんどの既存の親水性護岸や防波堤で設置されている。

現在、手すりを設計する際の外力は、橋梁の高欄に用いられている群集荷重 250 kgf/m を用いることが多い。しかしながら、防波護岸や防波堤に設置した手すりには、碎波的な大きな波力が作用することが多く、現行設計で作られた手すりは被災を受けることも考えられる。こうした碎波的な場合には、越波時に多量の波しぶきを含むなど越波水の運動が複雑であり、手すりに作用する波力はもちろん、そのような越波水の運動特性もわかっていないのが現状である。また、親水性防波堤の堤体には、直立堤よりも越波を減少させることのできるスリットケーソン堤が採用されることが多く、堤体形状の違いによる越波水の運動特性もわかっていない。

本研究では、水理模型実験に基づいて各種防波堤上の越波水の運動モデルを構築し、手すりの耐波設計法を検討している。越波水の運動モデルは、高橋ら (1991) が直立堤を対象にした比較的波高の小さい領域での基本的な考え方に基いているが、これを波高の大きい条件でも適用できるようにしている。本報告では、主に以下の項目について考察している。

- ① 堤体形状の違いによる越波水の運動特性
- ② 非碎波領域と碎波領域の越波水の運動特性
- ③ 手すりに作用する波力特性と算定法

なお、港湾環境整備施設技術マニュアル (沿岸開発技術研究センター, 1991) では、本研究の算定式を簡潔にまとめており、ここでは紙面の都合上すべての式は示していない。

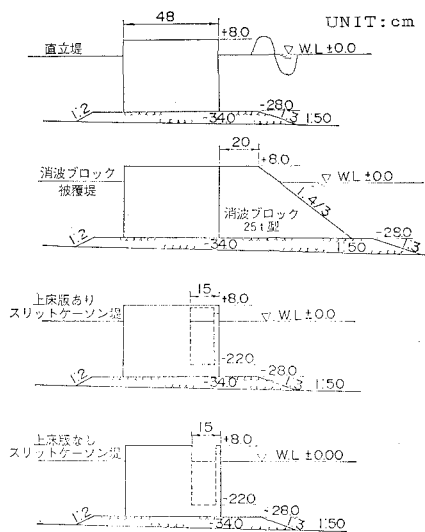


図-1 各防波堤模型の断面

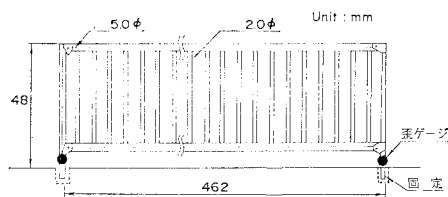


図-2 手すり模型

2. 実験の概要

(1) 実験水路および模型

実験は、長さ 38.0 m、幅 1.0 m、深さ 1.5 m の長水路で行った。図-1 は、実験で用いた堤体模型を示したものであり、防波堤構造として混成堤 (ただしマウンドが低く、ここでは直立堤と呼ぶ)、消波ブロック被覆堤、スリットケーソン堤 (上床版ありおよび上床版なし) の 4 種類を対象とした。なお、スリットの開口率は 0.25 である。また、天端高さは、 $h_c/h=0.24$ と 0.47 の 2 種類である。各模型の天端上には、港外側端と港内側端の 2 箇所に手すり模型を設置することができる。手すり模

* 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所
** 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所
*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部
**** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部
***** 正会員 日本海洋コンサルタント株式会社

型は、3種類の単柱（直径 15 mm の角柱と直径 10 mm および 20 mm の円柱）と、図-2 に示す実際の手すりの形状に近いもので行った。

(2) 測定方法

実験は規則波を用いて、波高水深比 0.43~1.17 で行い、越波水の水面形、天端上の流速、波高、手すりに作用する波力を測定した。特に、碎波領域での越波状況は複雑であるので、越波水の水面形は毎秒 200 コマ撮影できる高速ビデオを用いて測定している。単柱に作用する波力は、同一形状の 3 本の単柱を 3 分力計に支持させて、合力として測定している。実際の手すり形状に近いものでは、支柱の下端に貼った歪ゲージにより波力を測定している。

3. 越波水の運動特性

(1) 越波水の水面形状

図-3 の左側は、非碎波条件における各堤体の越波状況を示したものであり、周期 3 s で波高 27.3 cm の場合である。直立堤の場合、堤体前面の水位が上昇し天端より越波水が打ち上がると、しだいに越波水が天端に倒れ込んで落下していく。その後、越波水は天端上で一方向の流れになって、港内側に落水している。また、2 種類のスリット堤は直立堤の越波状況と似ているが、消波ブロック被覆堤は堤体前面での打ち上げ高さが小さくなっており、他の構造形式と水面形の特徴が異なっている。

図-3 の右側は、碎波条件での越波状況を示したものであり、周期 2.2 s で波高 24.7 cm の場合である。非碎波条件に比べて、越波水が天端上に飛び込んでくる状況が顕著になり、多量の波しぶきを含んでいるのが特徴である。ただし、堤体前面で越波水が打ち上がり、天端上に落下後、港内側に流れるという基本的な現象は非碎

波条件でも同一である。そこで、越波現象は、高橋らの方法によって以下の 2 つの現象に分けることにより、非碎波条件から碎波条件まで連続的に考えることができる。

- ① 打ち込み時の現象：越波水が天端より打ち上がった後から天端面に落下するまでの現象
- ② 越流時の現象：越波水が天端上に落下した後、一方向の速い流れになる現象

(2) 打ち込み時における越波水の運動特性

打ち込み時における越波水の運動を考える際には、天端面から越波水先端の飛び出す際の鉛直速度 V_{sf} と水平速度 U_{sf} が重要であり、 V_{sf} や U_{sf} から越波水の軌跡が説明できる。なお、直立堤およびスリット堤における打ち込み時の越波状況は、堤体形状による相違が小さく、主に碎波と非碎波の違いについて検討している。ただし、消波ブロック被覆堤は、ブロック上で打ち込み時の現象が生じるが、防波堤天端上ではほとんど越波水が流れる越流時の現象となり、防波堤上の越波水の運動を考える際には打ち込み時の現象を考えなくてよい。

図-4 は、天端位置における越波水の飛び出す鉛直速度 V_{sf} の実験値を示したものである。なお、図中の記号に斜線が入っているものは碎波領域でのデータであり、それ以外は非碎波領域のものである。非碎波領域では堤体に重複的に波が作用し、波高とともに V_{sf} も上昇する傾向がある。また、碎波領域では波速程度の水平流速を持った水塊が堤体に衝突し、堤体前面で速度が上方に変わるような波の作用状況になる。このときの V_{sf} は、水深波高比 0.7 以上の碎波領域になるとほぼ頭打ちの傾向となり、上限値は波速の 0.9 倍程度となっている。

高橋ら (1991) は、天端面における越波水の飛び出し速度 V_{sf} を有限振幅重複波 2 次近似的解を基本に表している。しかしながら、碎波領域では非碎波領域と波の作用状況が異なっており、堤体前面の状況を有限振幅重複波として考えることができない。ただし、ここでは簡便に式を表すために、重複波領域を対象としている高橋らの式に補正係数 α_s を導入し、非碎波領域から碎波領域までを式 (1) で表すことにした。図中の線は式 (1) による計算値 V_{sf}' を示したものであり、全体的に計算値が実験値のほぼ上限となっていることがわかる。

$$V_{sf}' = \alpha_s V_{sf} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_s &= 1.0 && H/h_m < 0.4 \\ &= 1.4 - H/h_m && H/h_m \geq 0.4 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 H ：波高、 h_m ：マウンド高さを考慮した堤体前面水深

図-5 は、天端面より打ち上がった越波水が落下する範囲 l_3 を示したものである。波高とともに落下する範囲も大きくなっており、ほぼ波高の大きさと同程度にな

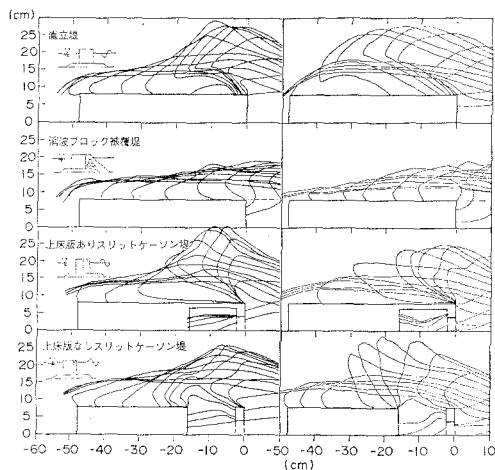


図-3 非碎波と碎波条件での越波状況

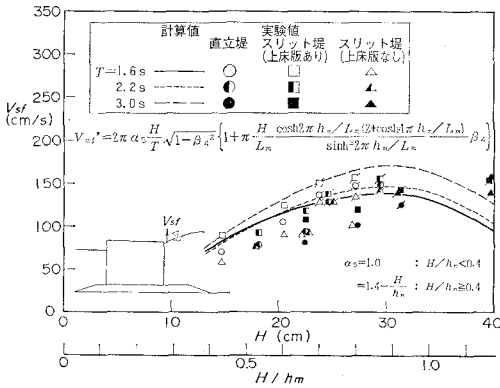


図-4 天端位置における越波水の飛び出す鉛直速度

っている。落下距離 l_3 は、天端位置での飛び出す際の鉛直速度 V_{sf} と水平速度 U_{sf} が主要なパラメータとなっている。重複波領域において U_{sf} は、上方に打ち上がった越波水が天端上に落下するときを生じ、波速の 0.3 倍程度となる。しかしながら、非碎波領域でも比較的波高の大きい条件や碎波領域では、越波水が直接天端面に波速に近い速度で飛び込んでくる状況となり、 U_{sf} は重複波領域よりも大きくなる。したがって、水平速度 U_{sf} が波高とともに大きくなる傾向を式 (4) の補正係数 α_6 で表し、天端位置で鉛直速度 V_{sf}' と水平速度 $\alpha_6 U_{sf}$ で飛び出す質点の自由落下運動を考えると l_3' は式 (3) となる。図中の線は補正後の計算値 l_3' を示しており、計算値が実験値のほぼ上限となっていることがわかる。

$$l_3' = 2(\alpha_6 U_{sf}) V_{sf}' / g = \alpha_6 l_3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_6 &= 1.0 && : H/h_m < 0.4 \\ &= (10H/h_m - 1.0)/3 && : H/h_m \geq 0.4 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 g ：重力加速度

図-6 は、打ち込み時における天端上の水平水粒子速度 U_i を示したものであり、港外側端の位置で周期 2s の条件である。重複波領域の越波状況では、打ち込み時の流速が越流時の流速に比べて小さいが、比較的大きな波高になると越波水の飛び込んでくる状況が顕著となり、打ち込み時の流速も越流時の流速に比べて大きくなる。実験値は、波高とともにやや大きくなり、波速との相関が高い。したがって、打ち込み時の流速は、波速と波高をパラメータにした式 (5) の実験式で表した。図中の実線は、式 (5) の計算値を示しており、実験結果とおおむね一致していることがわかる。

$$U_i = \begin{cases} 0 & : H/h_m < 0.4 \\ 0.8C_m(1.67H/h_m - 0.67)^{1/3} & : H/h_m \geq 0.4 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C_m ：水深 h_m における波速

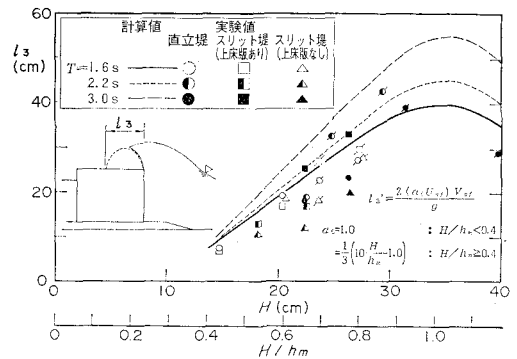


図-5 越波水の落下する距離

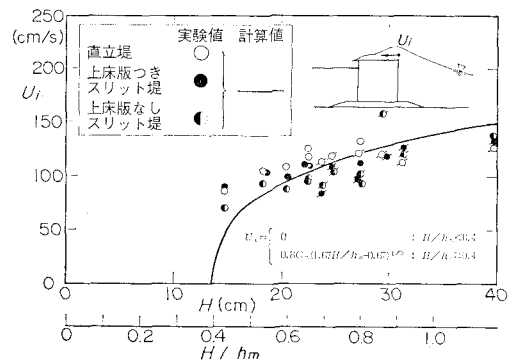


図-6 打ち込み時における天端上の流速

(3) 越流時における越波水の運動特性

越流時における越波水の運動では、堤体前面での打ち上げ高さが重要なパラメータであり、打ち上げ高さが大きいほど越波量や天端上の水位、流速が大きくなる。越流時では、打ち込み時に比べて堤体形状による相違があり、碎波領域での波しぶきの影響も大きいので、堤体形状および碎波と非碎波の違いについて検討している。

図-7 は、静水面を基準にした打ち上げ高さ R を波高 H で無次元化した波頂高比 $K(=R/H)$ を示したものであり、 $h_c/h=0.24$ の条件である。直立堤では波頂高比が 1.2 程度であるが、 $H/h_m=0.6\sim 0.7$ で 1.4 程度の大きな値になっている。ただし、その場合の打ち上がっている越波水は比較的少量であり、越波水の実質部分で考えるとそれほど大きくならない。上床版つきスリットケーソン堤は波頂高比が平均 1.1 程度であり、直立堤と傾向が類似している。上床版なしスリットケーソン堤は波頂高比が 1.0 程度であり、3 種類の中で最も打ち上げが小さいことがわかる。また、非碎波領域では波頂高比がほぼ一定になり、碎波領域になると波頂高比が低下する傾向がある。

$$K = \begin{cases} 1.0 + \alpha_1 \frac{H}{h_m} & : \frac{H}{h_m} < \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c/h_m}}{2\alpha_1} \\ 1.0 + \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c/h_m}}{2} & : \frac{H}{h_m} \geq \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c/h_m}}{2\alpha_1} \end{cases} \quad (6)$$

ここでは、堤体形状による違いを表す補正係数 α_1 を導入し、式(6)で波頂高比を示している。図中の線は各構造形式の波頂高比の計算値を示しており、 H/h_m が 0.8 以下でおおむね実験値と傾向が一致している。

ここに、 h_c : 天端高さ、 h_c' : 換算天端高さ、 h_s : スリット部上端の静水面上の高さ、 α_1 : 防波堤の構造による補正係数であり、直立堤の場合 $\alpha_1=1.0$ 、上床版なしのスリット堤の場合 $\alpha_1=0.5$ 、上床版ありのスリット堤の場合

$$\alpha_1 = \begin{cases} 0.5 & : H/h_s < 1.0 \\ 1.0 - \frac{H/h_m}{(H/h_m)^{1.5} + 1.0} & : H/h_s \geq 1.0 \end{cases}$$

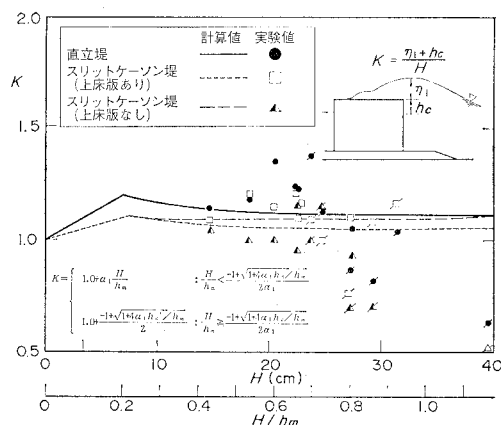


図-7 波頂高比

図-8 は、越流時における天端上の水平水粒子速度 U_s を示したものであり、越流時の流速が卓越している港内側端において $h_c/h=0.24$ の場合である。直立堤とスリット堤による違いは少なく、波高が大きくなると越流時の流速も大きくなる傾向がある。重複波領域での越流時の流速は、越波流量と天端上の水位から連続の式で算定することができる。比較的波高の大きい条件では、かなりの越波水が波しぶきとなるために、越流時の流速に関係する実質的な越波流量は重複波領域に比べて減少する。したがって、波しぶきの影響を考慮するために式(8)に示す補正係数 α_4 によって越波流量を補正し、越流時の流速を式(7)で表している。図中の線は式(7)の計算値 U_s' を示しており、実験値とはほぼ一致している。

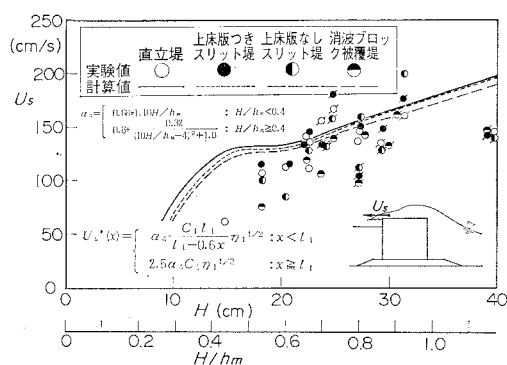


図-8 越流時における天端上の流速

$$U_s' = \alpha_4 U_s \quad (7)$$

$$\alpha_4 = \begin{cases} 0.68 + 1.10 H/h_m & : H/h_m < 0.4 \\ 0.8 + \frac{0.32}{(10 H/h_m - 4)^2 + 1.0} & : H/h_m \geq 0.4 \end{cases} \quad (8)$$

なお、消波ブロック被覆堤は、堤体形状による補正係数 α_1 を 0.5 とした波頂高比を用い、天端上の水位を他の堤体と同様に前面最大水位の 0.4 倍として考えている。

4. 手すりに作用する波力特性

(1) 防波堤天端上手すりに作用する波力の考え方
越波時において柱状の手すりに作用する波力は、越波水が衝突したときに生じる衝撃的な波力と、越波水の流速に依存する抗力があると考えられる。ただし、本検討では、比較的簡単な抗力の式を中心に検討し、衝撃的な波力も含めて抗力係数で評価する。柱状部材に作用する抗力は、水位と流速、抗力係数から算定でき、式(9)で表すことができる。なお、流速 $U_{\max}$ は手すり設置位置で式(5)、(7)により計算した打ち込み時と越流時の大きな方を用いる。

$$F = C_D \frac{w_0}{2g} A U_{\max}^2 \quad (9)$$

$$U_{\max} = \max\{U_i, U_s\} \quad (10)$$

ここに、 A : 流れ中における手すりの水平投影面積

(2) 単柱に作用する波力

図-9 は、3 種類の単柱に作用する波力の実験値と計算値との比 $F_{\text{exp}}/F_{\text{cal}}$ を示したものであり、港外側端と港内側端に設置した場合である。ここでの計算値は、式(9)で $C_D=1.0$ として求めており、 $F_{\text{exp}}/F_{\text{cal}}$ によって抗力係数を評価している。2 種類の円柱の $F_{\text{exp}}/F_{\text{cal}}$ は港外側端で 0.6~1.0、港内側端で 0.7~2.0 が多く、平均で 1.0 程度である。また、角柱の場合は港外側端で 1.0~2.0、港内側端で 2.0~3.0 と円柱よりもやや大きくなり、平均で 2.0 程度であった。そこで、単柱の場合、一般的な定常流中の抗力係数(円柱で 1.0、角柱で

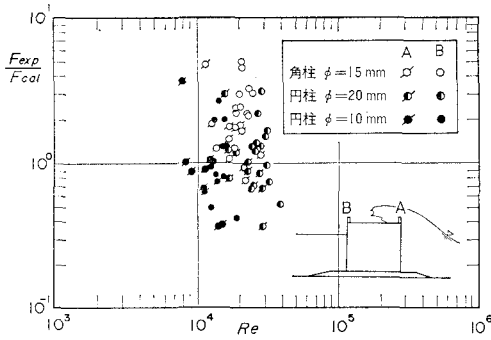


図-9 越波水により単柱に作用する力

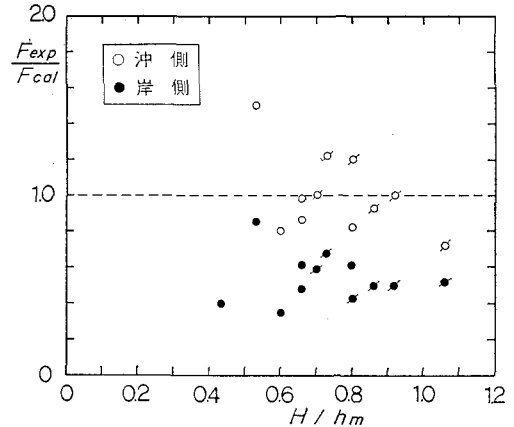


図-10 越波水によって手すりに作用する力

2.0) を用いてほぼ平均的な波力が算定できることがわかる。

(3) 手すりに作用する波力

複数の円柱が流れに対して横列に並んだ場合、Sachs (1972) の実験結果等によると円柱の隔たり距離 S が円柱の直径 D の3倍以下のときに円柱間での相互影響が生じ、抗力係数が増加する。実際の手すりの場合には、部材の径が太く間隔が狭いときに、部材間の相互影響が生じる可能性がある。ただし、本実験の部材間隔 S/D は4程度であり、相互影響が小さいと考えられる。

図-10 は、手すり模型に作用する波力の実験値と計算値の比 F_{exp}/F_{cal} を示したものである。なお、手すりはほとんど円柱部材で構成されているので、計算において抗力係数 1.0 を用いている。打ち込み時の流速が卓越する港外側端の手すりでは、 F_{exp}/F_{cal} が 0.7~1.2 となり、ほぼ実験値と計算値が一致している。越流時の流速が卓越する港内側端の手すりでは、 F_{exp}/F_{cal} が 0.4~0.7 とやや小さくなり、計算が安全側の値となっている。また、単柱の実験結果と比較すると、港内側端で手すり模型のほうが F_{exp}/F_{cal} が小さくなっており、単柱と手すり模型の測定系の動的応答が異なっていることによると考えられる。ただし、単柱と手すり模型の F_{exp}/F_{cal} は 1.0 以下のやや安全側の算定値もあるが、おおむね 1.0 程度であり、式 (9) がほぼ妥当であることがわかる。

5. まとめ

今回の検討により主に以下のことがわかった。

(1) 非碎波から碎波条件において、各種防波堤上の越波水の運動特性を把握し、越波水の運動モデルを拡張することができた。

(2) 手すりに作用する波力は、流速の2乗に比例する抗力として表すことができる。流速は打ち込み時と越流時の計算値の大きい方を用い、水中の投影面積は最大水位から計算できる。抗力係数は円柱で 1.0、角柱で 2.0 と一般的な値を用いることができる。なお、現地における越波水の流速はかなり速くなるために、レイノルズ数が大きくなり、抗力係数が低下することも考えられる。

参考文献

沿岸開発技術研究センター (1991): 港湾環境整備施設技術マニュアル, pp.54-55.

* 上記文献の一部には、以下の誤りがありますのでご注意ください。訂正箇所: pp.55-1, 下から1行目

$$\text{(誤)} \quad V_{sf} = \alpha_4 \frac{H}{T} \sqrt{1-x^2} \left\{ 2\pi + 2\pi^2 x \cdot \frac{\cosh 2\pi h_m/L (2 + \cosh 4\pi h_m/L)}{\sinh^3 2\pi h_m/L} \right\}$$

$$\text{(正)} \quad V_{sf} = \alpha_4 \frac{H}{T} \sqrt{1-x^2} \left\{ 2\pi + 2\pi^2 x \frac{H}{L} \cdot \frac{\cosh 2\pi h_m/L (2 + \cosh 4\pi h_m/L)}{\sinh^3 2\pi h_m/L} \right\}$$

高橋重雄ら (1991): 混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第31巻, 第1号, pp.3-50.

Sachs, P. (1972): Wind Forces in Engineering, Pergamon Press.