

波力による重力式構造物の滑動と転倒

Sliding and Overturning of Caissons by Storm Waves

関口秀雄*・大槻正紀**

Hideo Sekiguchi and Seiki Ohmaki

ABSTRACT This paper concerns the stability of caissons during wave loading. The damages induced to Stretches B and C of the Shin-Nagasaki South breakwater during Typhoon 8712 are outlined. This is followed by a theoretical discussion of the overturning behaviour of caissons, with the inertial resistance being properly allowed for. The expression for the lower bound of driving moments sufficient to overturn a given caisson is derived. The limiting driving moments obtained for Stretches B and C are then converted to the destructive wave heights, with the aid of Goda's (1974) wave-pressure formulae.

Key Words: breakwater; caisson; overturning; wave loading

1. はじめに

1987年台風12号による高波によって、完成間近の新長崎漁港南防波堤（ケーソン式混成堤）は、甚大な被害を受けた¹⁾。本研究では、同混成堤の被災状況を先ず概観し、両工区のケーソン被災形態に明瞭な違いのあることを指摘する。このことを受けて、本論文の第4節では、波力によるケーソン後趾まわりの運動解析を行う。そのポイントは、ケーソンの転倒に必要な超過荷重係数と来襲波浪の周期、及びケーソン断面諸量との関係を理論的に明らかにすることにある。第5節では、同結果を既往の波圧公式と結びつけることにより、工区B、Cの被災形態に適合する来襲波高を推定する。

2. ケーソン標準断面

新長崎漁港南防波堤（延長 1090m）は、工区B（延長690m）と工区C（延長400m）から成り立っている。復旧前の代表標準断面によると、工区Bのケーソン下端からパラペット天端までの高さは、20.0 mである。前者の標高は L.W.L. -12.0 m、後者の標高は、L.W.L. +8.0 mである。ケーソン本体部の幅は11.0 mであるが、ケーソン下端では幅1.0mのフーチングが港外側と港内側の両側に有るため、その全幅は13.0m となっている。工区Cのケーソン下端の設置深度は L.W.L. -13.0m、パラペットの設置高さは L.W.L. +8.8m である。本体部の幅は 12.5m、フーチングを含むケーソン下端の全幅は 15.5m となっている。したがって、工区Bのケーソンの方が工区Cのそれよりも、ややほっそりしていることがわかる。

3. ケーソン被災の特徴

ケーソン被災平面図を図-1に示す。同図中には被災前のケーソンの配置も合わせて示してある。図中の破線で示したケーソンは、転倒によって完全に水没したケーソンを表わしている。ケーソンの転倒が工区Bのみに生じていることに注目したい。その総数は23函である。他方、工区Cではケーソンの滑動、傾斜被害は著しいが、転倒したケーソンはない。

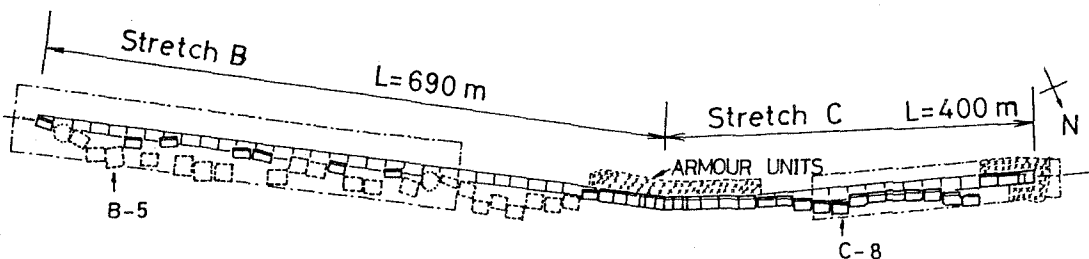


図-1 新長崎漁港南防波堤の被災平面図

* 正会員 京都大学防災研究所（〒611 宇治市五ヶ庄）

** 正会員 水産庁水産工学研究所

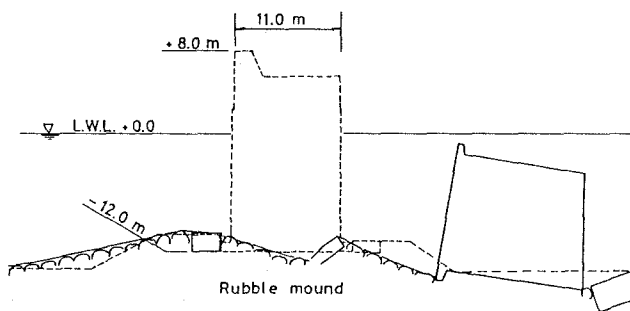


図-2 ケーソン B-5の転倒状況

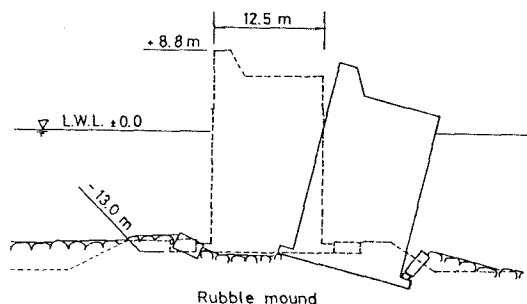


図-3 ケーソン C-8の変状

当防波堤の中央付近には浅瀬部がある。碎波の影響を避けるため、あらかじめ同区間の前面には消波工が設置されていた。また、工区Cの端部にも消波工が、あらかじめ設置されていた。これらの区間では、ケーソンの変状はほとんどみられない。

図-1中の一点鎖線で囲まれた領域は、軟弱なシルト層が海底に厚く堆積しているため、それを締固め砂杭工法（SCP）で処理したところである。ケーソンの被災は、地盤の比較的良好なところ（無処理区間）でも、SCP処理区間と同様に生じているので、地盤処理の影響は、以下の検討からは省いている。

ケーソンの変状例

ケーソン B-5 の転倒状況を例として、図-2に示す。同図では、二つの根固めブロックの変状の違いと、それらの間の捨石マウンド表面の形に特に注目したい。すなわち、ケーソン後趾側の根固めブロック付近の盛上がりは、転倒直前に同ケーソンが大きな受働抵抗を受けていたことを示唆している。換言すると、相対的に同ケーソンは滑動しにくくなっていたようである。また、根固めブロック間の捨石マウンド表面の形状によると、同ケーソンは転倒に至るまでに、既に港内側に約 15° 傾いていたようである。もし、そうであるならば、ケーソン後趾を回転中心とする転倒の可能性は、元々の状態（ケーソンが直立していた状態）に比べて、極めて高まっていたといえる。

ケーソン C-8の変状も興味深い（図-3）。このケーソンは、波力によって 14° 傾くとともに、その後趾は、捨石マウンドへ著しく、めり込んでいる。また、ケーソン後趾付近の捨石マウンドの変状は、前出のケーソン B-5の場合と類似している。これらのことより、ケーソン C-8は、辛うじて転倒を免れたとみてよいであろう。

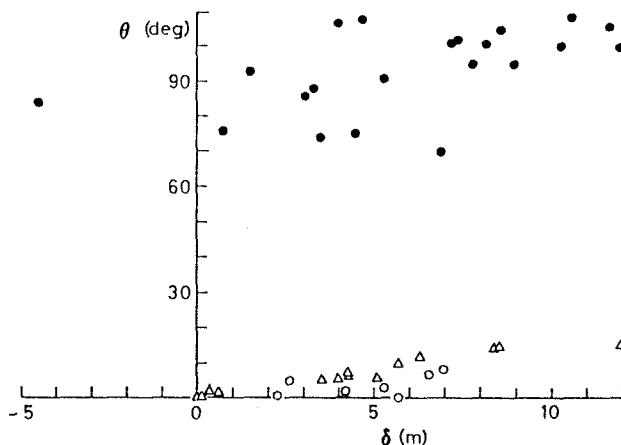
ケーソン後趾の側方変位とケーソン傾斜角の関係

ケーソンの滑動量とケーソン傾斜角との関係を図-4に示す。同図中には、浅瀬部など消波工を有するケーソンと全壊した2箇のケーソンを除く、全ケーソンのデータをプロットしてある。転倒したケーソンの傾斜角は、当然ではあるが、 90° 付近に集まっている（●印）。側方変位の方向は、一例（ケーソン B-15）を除いて港内側である。

非転倒ケーソンについては、工区Bのケーソン（○印）と工区Cのケーソン（△印）を区別している。図-4の結果によると、両工区を通じて、ケーソン傾斜角とケーソンの側方変位の間には正の相関が認められる。

非転倒ケーソンの傾斜角の最大値は、工区Bでは 8.6° である。工区Cのそれは 14.7° である。これらの値自体は大きなものであるが、転倒ケーソン（工区Bのみに生じている）と比べると、そこには歴然とした差がある。著者は、この特性に着目することにより、来襲波浪の強さを推定しうる可能性があると考えている。その理論的な手がかりについては、次節で述べる。

図-4 ケーソン後趾の側方変位量と
ケーソン傾斜角の関係



4. 波力によるケーソン後趾まわりの運動解析

上述のことをふまえ、本節では、波力によるケーソン後趾まわりの運動解析を行なう。ケーソンの慣性抵抗に打ち克ってケーソンを転倒させるのに必要な起動モーメントの下限に関する表現を求めるのが、その目的である。

さて、既に θ_0 なる角度だけ港内側に傾斜しているケーソンを考える(図-5)。次に来襲する波に対するケーソンの安定を論じようというわけである。

運動方程式とその解

運動方程式は次のようになる。

$$I d^2\theta / dt^2 = M_d(t) - M_r(t) \quad (1)$$

ここに、 I はケーソン後趾まわりの慣性極モーメント、 M_d は起動モーメント、 M_r は復元モーメント、 t は時間である。

簡単のために、波力として周期 T の正弦の変動を考える。すなわち、起動モーメントとして次式を導入する。

$$M_d(t) = A \sin(\omega t) \quad (2)$$

ここに A は振幅、 $\omega = 2\pi/T$ は円振動数である。波圧合力 F と揚圧力の合力 U を用いると、起動モーメントの振幅 A を、 $A = F \cdot d + U \cdot a$ のように表わすこともできる。ただし本節の理論展開では、この関係は直接には用いない。5節で、モーメント振幅 A の値に対応する波高値 H を求める際に、はじめて同関係が必要になる。換言すると、本節の理論は、波圧公式とは独立である。

さて、超過荷重係数 α を導入し、モーメント振幅 A を、次式のようにケーソンの初期復元モーメント $W' \cdot b \cdot f(\theta_0)$ と関係づける。

$$A = (1 + \alpha) W' \cdot b \cdot f(\theta_0) \quad (3)$$

ここに W' はケーソンの水中重量、 b はケーソン後趾からケーソン重心点までの距離をケーソンの底面に投影した長さ、 $f(\theta)$ は Geometry Change による復元モーメントの劣化を表わす関数、 θ_0 はケーソンの初期傾斜角である。

劣化関数 $f(\theta)$ の具体的な表現は次のようである。

$$f(\theta) = \cos \theta [1 - (h/b) \cdot \tan \theta] \quad (4)$$

上式はまた、次のように線形近似することができる(図-6参照)。

$$f(\theta) = 1 - \theta / \theta_u \quad (5)$$

ここに、 $\theta_u = \arctan(b/h)$ である。

以下の解析では、運動方程式に対する解を closed form で得る便宜上、式(5)の表現を用いることにする。

正弦的な波力変動によるケーソンの傾斜の増加は、 $M_d(t) \geq M_r(t)$ となる時間領域($t \geq t_0$)において生じると考えてよい(図-7参照)。時間 t_0 に達するまでは、ケーソンは、初期値 θ_0 を保つと仮定することができる。

以上のことを念頭において、運動方程式を解くと、傾斜角 θ に関する次式の表現を得る。

$$[\theta(\tau) - \theta_0] / (\theta_u - \theta_0) = 1 + [\beta / (1 + \beta^2)] [C \sinh(\omega \tau / \beta) - \beta \cosh(\omega \tau / \beta)] - [1 / (1 + \beta^2)] [C \sin(\omega \tau) + \cos(\omega \tau)] \quad (6)$$

ここに、 $\tau = t - t_0$ 、 $\beta = \omega / \omega_{st}$ 、 $C = [\alpha(\alpha + 1) + 2]^{1/2}$ である。

ただし、相対振動数 β の表現に含まれるパラメタ ω_{st} は、ケーソンの断面特性を反映した特性円振動数である。その具体的な定義は次のようである。

$$\omega_{st} = [W' \cdot b / (I \theta_u)]^{1/2} \quad (7)$$

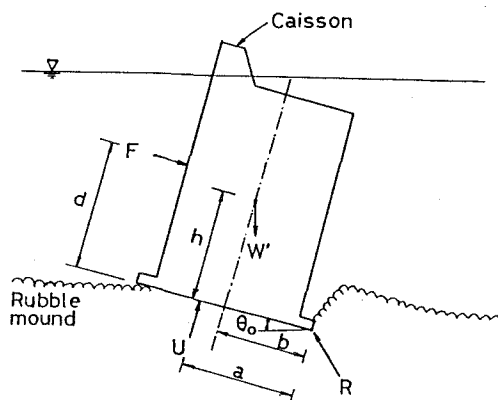


図-5 ケーソンの転倒を検討するためのスケッチ

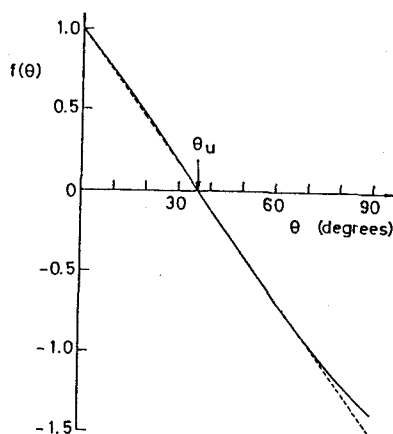


図-6 劣化関数 $f(\theta)$ とその線形近似

傾斜速度に関しては次の結果を得る。

$$d\theta/dt = D \cdot [C \cdot \{ \cosh(\omega\tau/\beta) - \cos(\omega\tau) \} - \{ \beta \sinh(\omega\tau/\beta) - \sin(\omega\tau) \}] \quad (8)$$

ここに、 $D = \omega(\theta_u - \theta_o) / (1 + \beta^2) > 0$ である。

超過荷重係数の下限値 α_{lim}

ケーソンが一周期の波力変動の間に転倒するには、この間に傾斜角が単調に増加していけばよいように考えられる。換言すると、傾斜速度が非負となるような超過荷重係数 α の下限値を求めればよい。すなわち、式(8)より、次式の表現を得る。

$$C \geq \max [\{ \beta \sinh(\omega\tau/\beta) - \sin(\omega\tau) \} / \{ \cosh(\omega\tau/\beta) - \cos(\omega\tau) \}] \quad (9)$$

ここに、上式右辺の評価は数値的に行えばよい。

なお、式(9)中に含まれる関数の性質に着目すると、 α_{lim} に関する次式の近似的表現を得ることができる。

$$\alpha_{lim} = (\beta^2 + 1)^{1/2} - 1. \quad (10)$$

超過荷重係数 α_{lim} と相対振動数 β の関係を、式(9)と式(10)に基づいて図示すると、図-8のようになる。式(10)による近似度は、かなり広い範囲で良好であることがわかる。

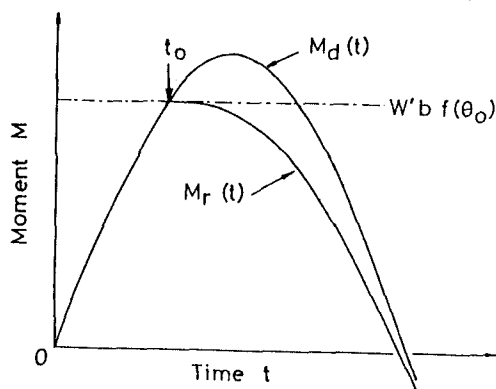


図-7 転倒開始時間 t_o

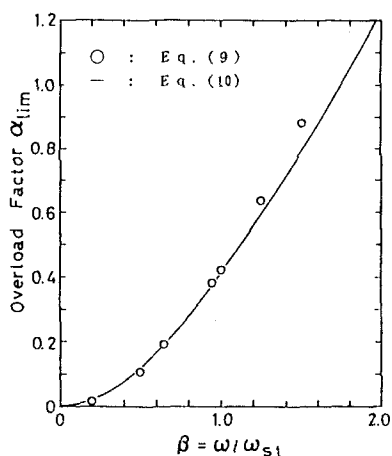


図-8 超過荷重係数の下限値 α_{lim} と相対振動数 β の関係

ケーソンの傾斜-時間曲線の例

本理論によって得られたケーソンの傾斜-時間関係を、工区Bのケーソンを対象として図示すると、図-9のようになる。先ず図-9(a)に着目する。この場合の波力の周期は10 sであるので、式(9)より、 α_{lim} の値は0.386となる。超過荷重係数 $\alpha > \alpha_{lim}$ の場合、 $\theta-t$ 曲線は、初期の加速過程を経た後に、ほぼ直線的に 90° まで増加している。他方、 $\alpha < \alpha_{lim}$ の場合には、傾斜角 θ の値は一時的に増加した後に、元の値にまで戻る特性がある。

波力の周期が14.5 sの場合の傾斜-時間曲線を図-9(b)に示す。この場合の α_{lim} の値は、式(9)より、0.195となる。この値は、周期 $T=10.0$ sの場合に比べてかなり小さくなっている。傾斜-時間パターンについては、図-9(a)の結果と本質的には同じである。

5. 来襲波高の推定

前節の理論によると、ケーソン転倒に必要な起動モーメント振幅の下限値を、 $A_{lim} = (1 + \alpha_{lim})$ として求めることができる。ここでは、合田²⁾による波圧公式を援用して、同限界値を波高値 H_{lim} に変換する。

工区Bのケーソンに対する M_d-H 関係を図-10に示す。同図中には、静的抵抗限界 $M_d = W'b$ を破線で示している。また、各周期に対応する動的抵抗限界も合わせて示してある。ここで、設計波の周期が10.0 sであ

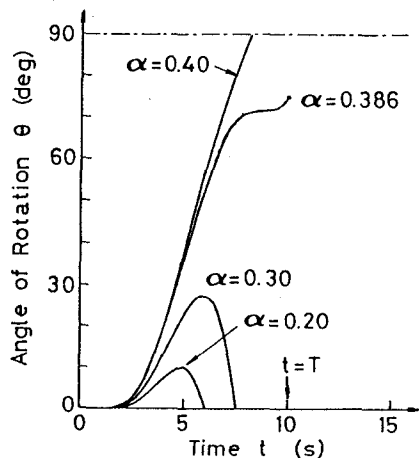


図-9 (a) 傾斜-時間曲線 ($T=10.0$ s)

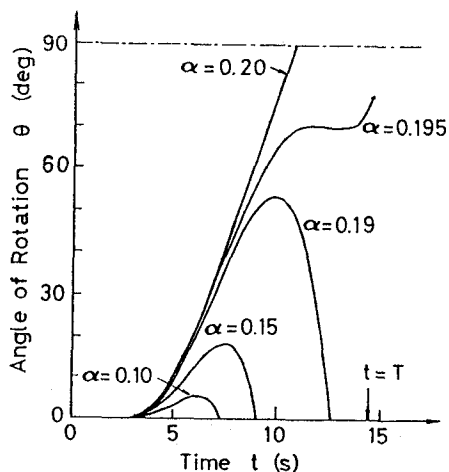


図-9 (b) 傾斜-時間曲線 ($T=14.5$ s)

るのに対し、実際の気象条件を考慮した波浪推算による来襲波の周期は 14.5 s 前後であること¹⁾に、留意しよう。図-10に示した結果によると、後者の周期に対する H_{lim} の値は 9.0 m となる。この値は、設計波周期 $T=10.0$ s に対応する H_{lim} の値 12.3 m よりも、かなり小さい。ここに、これらの値は最大波高表示であることに注意しよう。

工区 C のケーソンに対する起動モーメント M_d と最大波高 H の関係を、図-11に示す。工区 C のケーソンは工区 B のケーソンよりもやや大きい。その影響が、ケーソンを転倒させるのに必要な波高の下限 H_{lim} の値に如実に反映されていることがよくわかる。

なお図-10と図-11において、波高 H の値を固定したときに、起動モーメント M_d の値が $T=14.5$ s の場合に、 $T=10.0$ s の場合よりも大きくなっているのは、周期 T の伸びに対して波長 L が伸びることを反映している³⁾。

以上は、ケーソンの初期傾斜角がゼロの場合に対する解析結果であった。ケーソンの初期傾斜角がゼロでない場合も含めて、工区 B と工区 C のケーソンを転倒させるのに必要な波高の下限 H_{lim} の計算結果をまとめると、図-12のようになる。ここに、先述の理由により、来襲波の周期として 14.5 s を採用した場合の結果を取り上げている。

工区 C では、ケーソンの転倒は生じていない。したがって、図-12の結果によると、来襲波の波高 H は、 $H < 11.9$ m なる関係を満足しなければならない。また、工区 C ではケーソンの傾斜は著しいので、来襲波の強さは、静的抵抗 $M_d = W'b$ を上回るようなものでなければならない。すなわち、 $H > 10.1$ m となる（図-11参照）。

他方、工区 B では大多数のケーソンが転倒していることからして、来襲波の波高は、 $H \geq 9.0$ m となる。もし、工区 B と工区 C における波浪条件が実質的に同等であると仮定することができれば、以上の結果より、両工区のケーソンの被災形態に適合する来襲波高（ただし最大波高表示）は、次のようになる： $10.1 \text{ m} < H < 11.9 \text{ m}$ 。

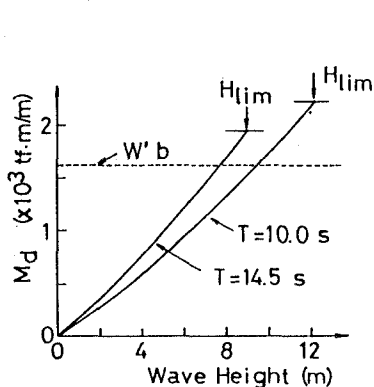


図-10 工区 B のケーソンに対する $M_d - H$ 関係

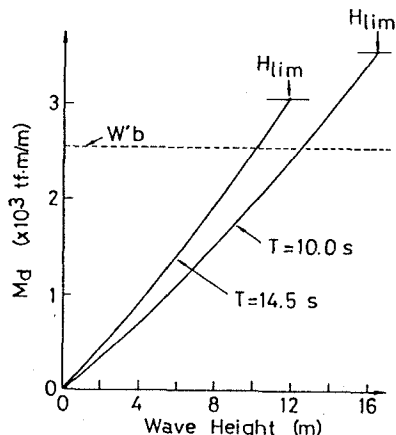


図-11 工区 C のケーソンに対する $M_d - H$ 関係

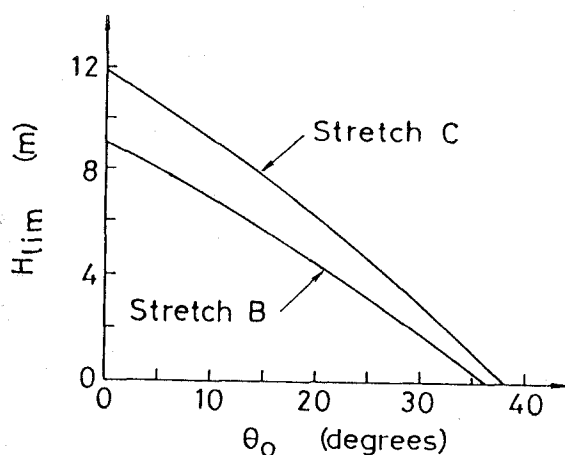


図-12 ケーソンを転倒させるのに必要な波高の下限値と初期傾斜角の関係

以上の結果は、海岸水理学的手法を用いて行われた山口ら⁴⁾の波浪推算結果： $5.5 \text{ m} < H_{1/3} < 6 \text{ m}$ （ただし、 $T=13 \text{ s}$ ）と、概ね対応するとみてよいであろう。ここに、 $H_{1/3}$ は有義波高である。

6. 結論

本研究で得られた結論をまとめると、次のようになる。

- 1) ケーソンの転倒に及ぼす慣性抵抗の寄与は、超過荷重係数 α に及ぼす相対振動数 β の効果という形で表わすことができる。具体的な表現は、式(9) または(10)のとおりである。
- 2) 同一振幅の場合、長周期の波のほうが短周期の波よりも、ケーソンの安定にとっては脅威である。その理由の一つは慣性抵抗の減少である。もう一つの理由は、波長の伸びにともなう波力の相対的な増大による。
- 3) 新長崎漁港南防波堤の工区Bと工区Cの被災形態には明瞭な違いがある。その一つの要因は、前者のケーソンの方が後者のケーソンよりも、ややほっそりしていたためである。来襲波の波高が丁度、その差を際立たせる程度であったことも、その要因と考えられる。本研究によると、両工区の被災形態に適合する波高 H は、最大波高表示で、次のようになる： $10.1 \text{ m} < H < 11.9 \text{ m}$ 。

謝辞 有益なご討議をいただいた河田恵昭、山口正隆、山本正昭の諸氏、ならびに長崎県臨海開発局の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長崎県臨海開発局(1989)： 8712長崎漁港被災誌。
- 2) Goda, Y. (1974): New wave pressure formulae for composite breakwaters, Proc. 14th Coastal Engineering Conference, Vol. 3, pp.1702-1720.
- 3) Horikawa, K. (1978): Coastal Engineering, University of Tokyo Press, pp.35-37.
- 4) 山口正隆・畑田佳男・池田章・早川淳(1989)： 台風8712号に伴う異常波浪の追算、土木学会論文集、第411号、11-12、pp. 237-246.