

傾斜円柱に働く衝撃砕波圧と砕波巻き込み率

谷本勝利*・高橋重雄**・金子忠男***・塩田啓介****

1. ま え が き

海岸・海洋構造物の円柱部材に作用する衝撃砕波力は、モリソン式で表される抗力および慣性力に比べて極めて大きくなる場合があるため、設計外力として重要であるが、その特性は十分解明されていない。

著者らは昨年¹⁾の海講において、急勾配海底斜面上の傾斜円柱に働く砕波力実験の結果を報告し、全波力および円柱の傾斜角の基本的な影響を明らかにした¹⁾。本研究では、急勾配海底斜面上における円柱周囲の局所的な波圧を測定する実験を行い、衝撃砕波圧の特性、特に円柱の傾斜角との関係を検討した。また、海底勾配が異なる場合の全波力実験を行い、円柱の傾斜角および海底勾配が全波力に及ぼす影響を総合的に検討した。さらに、砕波巻き込み率を導入した傾斜円柱に働く衝撃砕波力算定モデルを誘導し、全波力および波圧実験によってモデルの妥当性を検討した。

2. 模型実験の方法

(1) 波 圧 実 験

実験は長さ 35 m、幅 1 m、深さ 0.94 m の二次元造波水路で実施した。造波板から 18.5 m 離れた位置より 1/10 勾配の斜面を設け、水深 $h=25$ cm の位置に波圧測定装置を設置した。波圧測定装置は、図-1 に示すように、両端を固定した外径 $D=4.86$ cm の鋼管製模型円柱の周囲に波圧計を取り付けたもので、円柱の傾斜角 θ を 0° , $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$ に設定できる。波圧計は受圧面の直径が 6 mm、固有振動数が 7 kHz であり、円柱の前面に 8 個 (P1~P8)、前面から 45° および 90° の方向にそれぞれ 1 個 (P9 および P10) 取り付けた。また、円柱前面が静水面と交差する位置および沖側に 50 cm 離れた位置に波高計を設置した。波の周期 T は 1.5 s とし、波高は砕波波高を中心として 7 種類に変化させた。

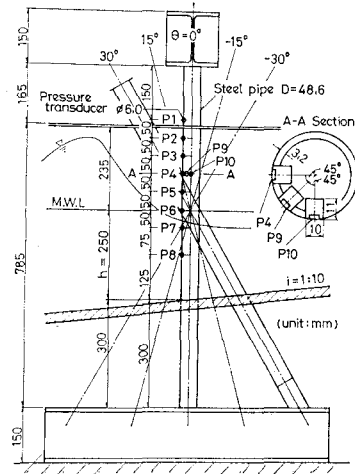


図-1 波圧測定装置

波圧および水位の記録は、データレコーダにテープスピード 19 cm/s で収録し、サンプリング間隔 2.5×10^{-4} s でデジタル化して解析を行った。

(2) 全波力実験

実験に使用した水路は波圧実験のものと同一であり、斜面勾配 i を 1/30 および 1/100 に変化させた。ただし、後者の場合は最初の 3.5 m 区間に 1/10 勾配斜面を設けている。波力測定装置は前報で述べた 1/10 勾配斜面上の実験¹⁾と同一で、直径 $D=4.8$ cm の硬質塩化ビニル製の模型円柱と幅 5 cm、厚さ 25 mm の鋼製アームから成る片持ちばり式のものである。円柱の傾斜角および水深は (1) の波圧実験の場合と同一で、波の周期 T を 0.5, 2.0 および 2.5 s とし、波高を漸変させた。解析は前回実施した $i=1/10$ の場合の実験結果も含めて行った。また、波力測定装置の衝撃応答特性を有限要素法によって予じめ検討した¹⁾。

3. 実験結果

(1) 波圧実験結果

ここでは、一波一波の波圧の時間的なピーク値を p_m とし、測定した 6 波についての p_m の平均値を $\bar{p}_m$ で表すこととする。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長
 ** 正会員 M.S 運輸省港湾技術研究所水工部波エネルギー研究室長
 *** 正会員 工博 川崎製鉄(株)エンジニアリング事業部研究開発センター主任研究員
 **** 正会員 工修 川崎製鉄(株)エンジニアリング事業部研究開発センター研究員

図-2 は、傾斜角 $\theta=15^\circ$ の場合について、円柱前面の波圧計 P1~P8 によって記録された $\bar{p}_m$ と波高・水深比 H'/h の関係を示したものである。ここに、 H' は仮想通過波高である。図中に矢印で示した H_b は合田による砕波指標²⁾から読み取った砕波波高を表す。波高 H' が H_b に達すると、まず波頂付近に位置する P3 に衝撃砕波圧が働くようになり、 $\bar{p}_m$ が急に大きくなる。このとき、P3 より下方にある P4~P8 の値は P3 に比べて非常に小さく、衝撃砕波圧の作用は認められない。 H' がさらに大きくなり、砕波直後の波が円柱に衝突する場合には、P3 より下方の波圧計にも衝撃砕波圧が働くようになり、 $\bar{p}_m$ の場所的なピーク位置が次第に下へ移ってゆく。そして、 H'/h が 1.3 程度になると静水面以下にある P6 および P7 にも衝撃砕波圧の作用が認められるようになる。

この場合の砕波形式は巻き波型であり、図-2 で述べたようなピーク波圧の変化傾向は砕波の進行状態から説明できる。すなわち、砕波の初期には波頂部分が急速に前方へ移動し、この部分の波面の進行速度が最大となるため、局所的に最も大きい衝撃砕波圧が発生する。次の段階では、波の前面がわん曲した状態で円柱に衝突するため、波面が円柱前面の傾斜と一致する静水面と波頂の中間部の波圧が最大となる。砕波の後期には、波頂が前方に崩れ落ちるため、静水面付近でも衝撃的な波圧が働くようになる。

図-3 は、傾斜角 $\theta=0^\circ$ で、砕波直後の条件である $H'/h=1.0$ の場合における水位 η および波圧 p の時間 t による変化を示すものである。波の前面が円柱に激しく衝突する位置にある P3 および P4 に衝撃的な波圧変化が顕著に認められる。静水面より下方にある P7 および P8 には、水位変化と類似した波圧の時間変化が記録されている。また、P4 と同じ高さにあり、円柱前面より 45° の位置にある P9 にも衝撃的な波圧が認められるが、そのピーク値は P4 のそれに比べてかなり小さい。

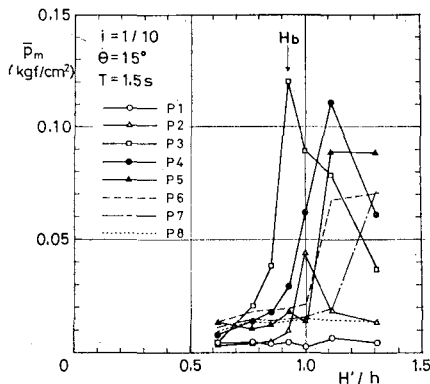


図-2 ピーク波圧の波高による変化

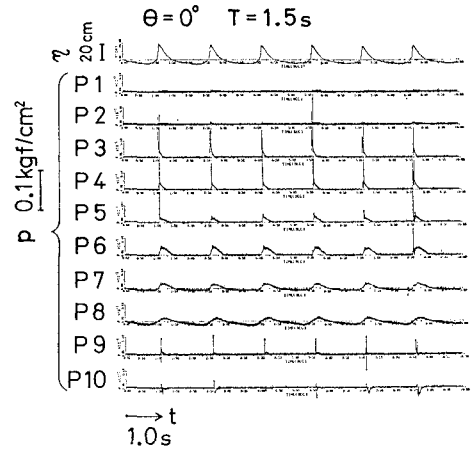


図-3 砕波時の波圧の時間変化

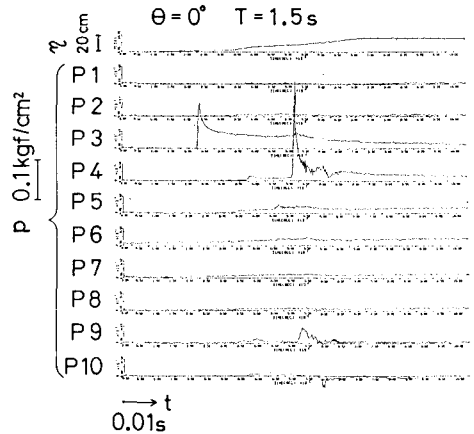


図-4 衝撃砕波圧の時間変化

円柱前面より 90° の位置にある P10 においては、波面の通過時に若干圧力が上昇し、その直後に負の圧力がみられる。

図-4 は、図-3 の 4 番目の波について、衝撃砕波圧の時間変化を詳細にみたものである。P3 および P4 の衝撃的な波圧の時間差は 0.028 s である。P4 の衝撃波圧の立ち上がり時間は 0.001 s であるのに対して、P4 と P9 の衝撃砕波圧の立ち上がり点の時間差は 0.0015 s であり、円柱前面より 45° 方向の面に衝撃波圧が働く時には、前面ではすでにピーク値を過ぎている。この図から、円柱に働く衝撃砕波力の実態は、局所的に作用する立ち上がり時間が極めて短い衝撃波圧が円柱の軸方向および円周方向に短時間に移動することによるものであることがわかる。

図-5 は、傾斜角 $\theta=0^\circ$ の場合で、砕波波高付近の $H'/h=0.85\sim 1.0$ における円柱前面のピーク波圧 p_m の分布を示すものである。横軸は p_m を水の単位体積重量 w_0 および砕波波高 H_b で無次元化して表示してある。

また、縦軸は静水面を基準として、円柱軸に沿う座標 z を砕波指標²⁾から読み取った砕波の波頂高 η_b で除した値で表してある。衝撃砕波圧は $z/\eta_b=0.5\sim 1.0$ の範囲にある波頂部に顕著に働いていることがわかる。これは、砕波波高付近では波頂部の波面が直立し、進行速度も最大となって円柱に激しく衝突するためと考えられる。また、 p_m は最大で $12w_0H_b$ にも達しており、円柱が波の進行を妨げない透過性に富んだ構造部材であるにもかかわらず、その前面においては非常に大きい衝撃波圧が作用することがわかる。

図-6 は、図-5 と同じ場合について、 $z/\eta_b=0.61$ の高さにおける円周方向のピーク波圧分布を示している。 p_m の最大値は、円柱前面では約 $10w_0H_b$ であるのに対し、前面より 45° および 90° の位置ではそれぞれ $2w_0H_b$ および $1w_0H_b$ であり、前面に比べて著しく小さい。すなわち、円柱全体に働く衝撃砕波力は、円柱前面近傍の極めて狭小な部分に作用する衝撃的な波圧によって支配されていることがわかる。したがって、円柱のある断面に働く衝撃砕波力の時間変化は図-4 に示した円柱前面の衝撃砕波圧と同様な急峻な波形であると推測される。図-6 の結果は、円柱表面に対する波面の衝突角が衝撃波力の大きさに著しく影響することを裏付けている。

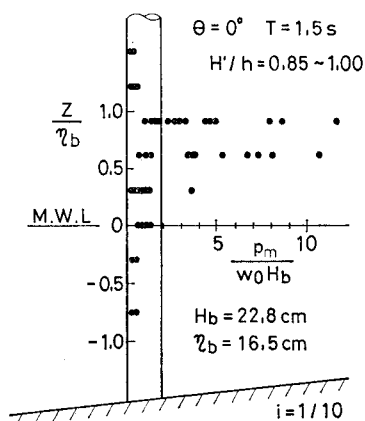


図-5 衝撃砕波圧の円柱軸方向分布

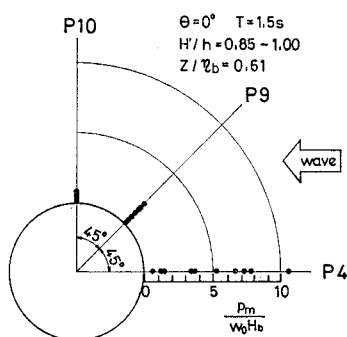


図-6 衝撃砕波圧の円周方向分布

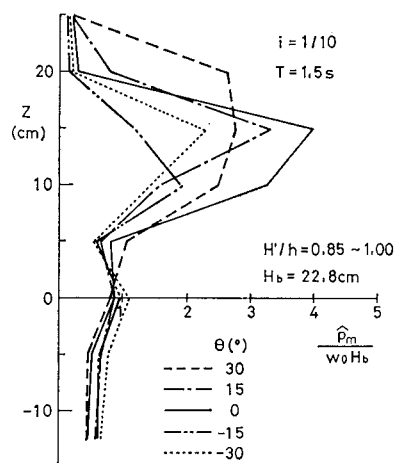


図-7 衝撃砕波圧に及ぼす円柱の傾斜角の影響

図-7 は、円柱の傾斜角 θ が衝撃砕波圧に及ぼす影響をみるため、 $\bar{p}_m$ をさらに $H'/h=0.85\sim 1.0$ にわたって平均した値を $\bar{p}_m$ で表わし、その円柱軸 z に沿う分布を比較したものである。直円柱である $\theta=0^\circ$ の場合に比べて、円柱が沖方向に 30° 傾斜した場合には、衝撃砕波圧の場所的なピーク値はやや減少するものの、作用範囲は広がっている。逆に、 $\theta=-15^\circ$ および -30° のように円柱が岸方向に傾斜した場合は、ピーク値および作用範囲ともに減少している。これは、円柱が沖方向に傾斜した場合には、波面の進行速度の円柱と直角方向成分が直円柱の場合の $\cos\theta$ 倍になるため、ピーク値は低下するものの、砕波直前における直線的できり立った波面の長い部分が円柱前面に激しく衝突するため、作用範囲が広がることによると考えられる。円柱が岸方向に傾斜した場合には、進行速度の円柱と直角方向成分が減少するとともに、砕波直後における巻き込んだ波面のごく一部が衝突することによって衝撃波圧が発生し、そのうえ進行速度そのものが低下しており波面の乱れも著しいため、ピーク値および作用範囲ともに小さくなるものと思われる。この結果は、前回実施した 1/10 勾配斜面上の全波力実験結果の考察と一致するもので、直円柱の場合に比べて沖方向に傾斜した円柱に働く衝撃砕波力は増大し、岸方向に傾斜した場合には減少することを説明している。

(2) 全波力実験結果

図-8 は、傾斜角 $\theta=0^\circ$ 、波の周期 $T=1.5$ s の場合において、一波一波の等価波力の時間的なピーク値 F_{em} に及ぼす斜面勾配 i の影響をみたものである。ここに、 F_{em} は円柱と直角方向に働く力の合力で、波力測定系の動的応答を含んでいる。なお、波力測定装置の衝撃応答係数を有限要素法を用いて調べたところ、前傾三角形パルスでは約 1.25、対称および後傾三角形パルスでは約

0.95 である¹⁾。図中の実線、破線および一点鎖線はそれぞれ $i=1/10$, $1/30$ および $1/100$ の場合について F_{em} の最大値の波高 H' による変化を示す。また, L_0 は沖波波長である。この図より, 斜面勾配 i が等価ピーク波力 F_{em} に及ぼす影響は顕著であり, 特に碎波波高 H_b 付近では $i=1/30$ および $1/10$ の場合の F_{em} は $1/100$ の場合に比べてそれぞれ約 2 倍および 3 倍になっていることが知られる。このことは, 碎波力が碎波波高のみならず碎波形式によって大きく影響されることを示すものである。すなわち, 斜面が緩勾配から急勾配に変化するにつれて, 碎波波形は崩れ波型から巻き波型へと移行し, 波の前面の巻き込み部分が大きくなるため, 衝撃碎波力が著しく増大すると考えられる。

図-9 は, すべての波高に対する F_{em} の最大値と円柱の傾斜角 θ , 斜面勾配 i および水深・沖波波長比 h/L_0 の関係を総合的に示したものである。ここに, $h/L_0=0.0712$, 0.0401 および 0.0256 はそれぞれ $T=1.5$, 2.0 および 2.5 s に対応する。同図より, F_{em} は斜面勾配 i の影響を顕著に受けるとともに, 傾斜角 θ によっても大きく増減し, いずれの場合も円柱が沖方向に傾斜するほ

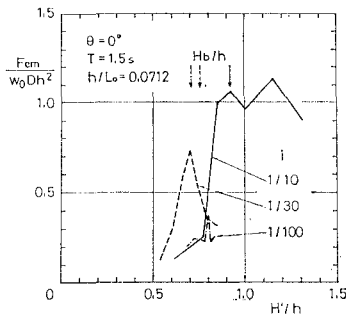


図-8 等価ピーク波力に及ぼす斜面勾配の影響

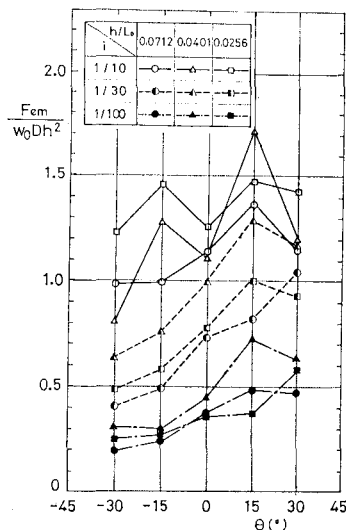


図-9 等価ピーク波力の最大値と各種パラメータの関係

ど F_{em} が大きくなることがわかる。 θ による F_{em} の増減程度は i によって異なり, $\theta=0^\circ$ のときの F_{em} に対する $\theta=\pm 30^\circ$ のときのそれは, $i=1/30$ および $1/100$ の場合では約 $\pm 40\%$ 増減しているのに対し, $i=1/10$ の場合は約 $\pm 20\%$ と小さい。

4. 碎波巻き込み率を用いた衝撃碎波力算定モデルの検討

合田らは, 直円柱に衝突する碎波波形を前面が直立した高さ $\lambda\eta_b$ の水面とみなして, 衝撃碎波力の計算式を導いている³⁾。ここに, λ は碎波巻き込み率である。この方法を拡張し, 傾斜円柱に働く衝撃碎波力の算定モデルを誘導する。

図-10 に示すように, 傾斜角 θ , 直径 D の円柱に, 水深 h , 波高 H_b , 波速 C_b の碎波が衝突する場合を考える。波頂高 η_b のうち $\lambda\eta_b$ の高さの波面が θ と等しい角度を有する直線で表され, この部分が円柱に衝突することによって衝撃力が働くものとする, 合田らの理論を適用することによって次式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} F_I &= \frac{\pi}{2g} w_0 C_n^2 D \delta \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \\ \delta &= \frac{\lambda \eta_b}{\cos \theta}, \quad C_n = C_b \cos \theta, \quad \tau = \frac{D}{2C_n} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここに, F_I : 円柱と直角方向に働く衝撃碎波力, g : 重力加速度, C_n : 円柱と直角方向の波速成分, δ : 衝撃碎波力が働く部分の長さ, t : 時間, τ : 作用時間。

式 (1) は前傾三角形の衝撃パルスを表し, そのピーク値 F_{Im} は次式で与えられる。

$$F_{Im} = \frac{\pi}{2g} w_0 D C_b^2 \lambda \eta_b \cos \theta \dots (2)$$

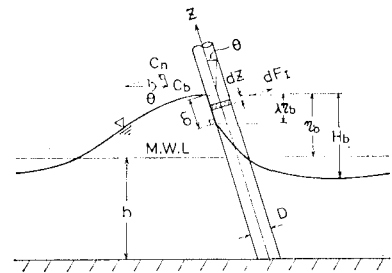
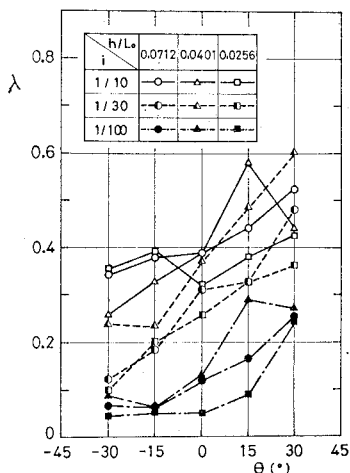


図-10 碎波巻き込み率を用いた碎波のモデル

式 (2) を用いて, 全波力実験結果から碎波巻き込み率を逆算することができる。

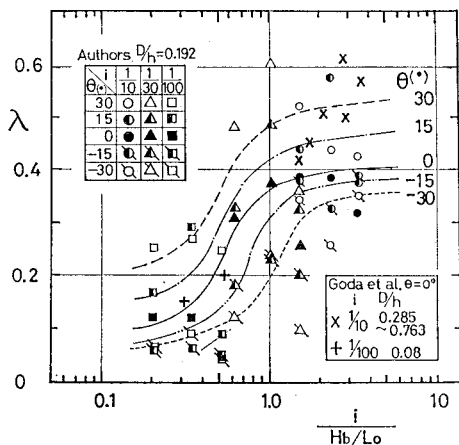
図-11 は, 全波力実験結果から碎波が円柱に衝突する瞬間に発生する等価波力の急な立ち上がり部分の大きさを読み取り, これを前傾三角形パルスに対する波力測定装置の衝撃応答係数で除して衝撃碎波力のピーク値 F_{Im} を求め, 式 (2) を用いて逆算した λ の最大値を示したものである。なお, C_b は $\sqrt{g(h+\eta_b)}$ として計算し



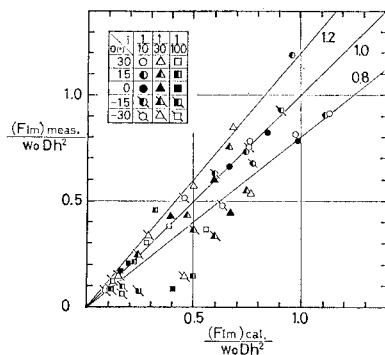
図—11 砕波巻き込み率の逆算値

た。図—9 に示した等価ピーク波力の場合と同様に，斜面勾配が急なほど，また，円柱が沖方向に傾くほど λ の値は大きくなっており，3. (2) で考察した砕波形式が衝撃砕波力に及ぼす影響および 3. (1) で考察した円柱の傾斜角と衝撃砕波圧分布の関係が砕波巻き込み率に明瞭に現われている。

図—12 は，砕波形式⁴⁾を支配するパラメータ $i/(H_b/L_0)$ に対して 図—11 に示した λ をプロットし， θ ごとの傾向を曲線で示したものである。 λ はいづれの θ についても $i/(H_b/L_0) = 0.5 \sim 0.1$ の領域で急に大きくなっており，崩れ波型から巻き波型への砕波形式の遷移が衝撃砕波力に及ぼす影響が明らかである。同図には，1/10 および 1/100 勾配斜面上の直円柱を対象とした合田ら³⁾の実験結果をそれぞれ $\times$ および $+$ 印で示した。これらは， $i = 1/100$ の場合には今回の実験結果と良く一致しているが， $i = 1/10$ の場合にはやや大きい値をとっている。これは，両方の実験がともに衝撃砕波力に対して動的応答



図—12 砕波形式を支配するパラメータと砕波巻き込み率の関係



図—13 衝撃砕波力の計算値と実験値の比較

が顕著に現われる波力測定装置を使用しており，衝撃応答係数を用いて衝撃砕波力のピーク値を推定していること，および円柱の直径と水深の比 D/h が合田らの実験の方が大きいことに起因している可能性が考えられる⁵⁾。

図—13 は，図—12 の曲線から λ を算定し，式 (2) を用いて計算した衝撃砕波力のピーク値 F_{Im} と実験値を比較したものであるが，両者はかなり一致しており，本計算モデルによって衝撃砕波力を精度よく算定できるといえる。

5. あとがき

円柱周面に働く衝撃砕波圧を測定し，円柱前面の波頂付近に最大値が約 $10w_0H_b$ で立ち上がり時間が極めて短い衝撃波圧が働くことを明らかにすると同時に，円柱の傾斜角が衝撃砕波圧の分布に影響を与えることを示した。また，斜面勾配が異なる場合の全波力を測定し，斜面勾配が急で円柱が沖方向に傾斜するほど砕波力が大きいことを示した。さらに，傾斜円柱に働く衝撃砕波力算定モデルを誘導し，モデルに含まれる砕波巻き込み率を実験結果から逆算して砕波形式および円柱の傾斜角との関係を明らかにした。

今後は不規則波による砕波力の特性，砕波力に対する構造物の応答特性等について検討する予定である。

最後に，本実験に多大な御協力をいただいた東亜建設工業株式会社の諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷本勝利・高橋重雄・金子忠男・塩田啓介：傾斜円柱に働く衝撃砕波力の実験的研究，第 31 回海岸工学講演会論文集，610～614，1984。
- 2) 合田良実：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，第 180 号，pp. 39～49，1970。
- 3) 合田良実・原中祐人・北畑正記：直柱に働く衝撃砕波力の研究，港研報告，第 5 巻，第 6 号，pp. 1～30，1966。
- 4) 土木学会：水理公式集，pp. 510，1965。
- 5) 樫木 亨・後野正雄・岩橋哲哉：浅海域における円柱構造物の砕波局部衝撃波力特性と全体波力について，第 30 回海岸工学講演会論文集，pp. 376～380，1983。