

越波による位置エネルギーの効率的な獲得に及ぼす 斜め入射波の影響

岡田 知也* ・ 小松 利光** ・ 松永 信博***
樋田 操**** ・ 藤田 和夫***** ・ 浦上由紀子*****

1. 緒 言

人々の地球環境への意識の高まりや親水志向の高揚に伴い、沿岸海域の水環境の保全ならびに改善が強く望まれるようになってきた。特に閉鎖性の内湾や港内では、沿岸海域が静穏であるため多くの場合人々に親水空間として提供しているが、その反面都市域からの多量の負荷の流入や海水交換率の低さにより水質の悪化を招いている。著者らはその改善策として、波浪エネルギーを越波構造物を用いて効率良く位置エネルギーに変換し、そのエネルギーを用いて一方向流れを発生させたり、比較的にきれいな外海水を内湾や港内の閉鎖性海域に導入したり、貧酸素化した底層部に溶存酸素の豊富な表層水を送り込んで生物作用を活発化させたりして、水質の改善を図ることを提案している(小松ら, 1992)。また波浪エネルギーを用いた他の水質改善策としては透過堤(小田ら, 1995)や潜堤(山本ら, 1994)等が現在検討されている。

ところで越波構造物とは効率良く越波量と水位差を獲得するための一様法面勾配をもった越波堤と、広範囲に分布している波浪エネルギーを集めるためのV字状の集波堤からなる構造物のことをここでは指す。そもそも越波構造物は発電を行う為に波浪エネルギーを位置エネルギーに変換しようとして考案された構造物であるが((財)エンジニアリング振興会, 1993)、波浪エネルギーの供給の不安定さと波高のせいぜい数倍程度の水位差しか得られないということが実用化の大きな障害となっていた。しかしながら越波構造物を水質改善に用いる場合、例えば表層水を底層部に送り込むためにはそれほど大きな水位差や安定した越波量の供給は要求されず、波浪エネルギーは十分利用可能であると思われる。

これまでの著者らによる越波構造物の基礎的研究により、構造物に対して垂直に入射する規則波及び不規則波

に対しては越波量の定量的評価が可能となっている(小松ら, 投稿中)。さらに適正な水質改善効果の予測を行うためには、常に必ずしも波が構造物に対して垂直に入射するとは限らない実海域での長期間にわたる精度良い越波量の算定が要求されることから、また波の入射角度の変化が大きい海域に対して最適な構造物形状を決定するためにも、斜めに波が入射する場合の越波量の定量的評価が是非とも必要である。直立堤における斜め入射波の越波量については規則波に対しては井上ら(1971)により、また不規則波に対しては高山ら(1984)によってすでに明らかにされているが、本研究が対象としている構造物は越波堤と集波堤から構成される独特の形状をしているため新たな検討が必要となっている。

本研究では、まず、集波堤を有せず一様勾配斜面のみから成る構造物(以下、2次元越波構造物と呼ぶ)に波が斜め入射する場合の越波量の減少係数について考察している。次に2次元越波構造物にV字状集波堤を取り付けた構造物(以下、3次元越波構造物と呼ぶ)に対して越波量の減少係数の定量化を行っている。

2. 実験装置及び実験方法

(1) 2次元越波構造物

実験は長さ40m、幅20m、深さ1mの大型平面造波水槽を用いて行った。水槽中央部に2次元越波構造物を設置し、二次元規則波を入射させた。波の入射角 α は入射波の波向きと構造物の法線のなす角度であり、構造物の向きを変化させることにより定めた。図-1(a)に実験装置の概要及び代表諸量の定義を示す。 H , L , h , h_c 及び θ は、それぞれ入射波の越波堤設置位置での波高、波長、越波堤の法先水深、静水面からの天端高及び法面勾配である。越波堤の造波板に近い側の端部を原点として、構造物の幅方向にX軸($X=0\sim 400$ cm)を取った。越波量の測定は、入射波が安定してから消波工からの反射波の影響が入射波に現れるようになるまでの波群中の約10波に対して行った。越波量の採取は、越波堤の全幅4mを25cm間隔に等分した16区間で行った。この測定を3回～5回繰り返して、各区間の1波当りの越波量を求めた。単位幅、1波当りの越波量 Q_{R20} ($\text{cm}^2/\text{波}$)は、

* 学生会員 工修 九州大学大学院 工学研究科博士課程水工土木学専攻 (日本学術振興会特別研究員)

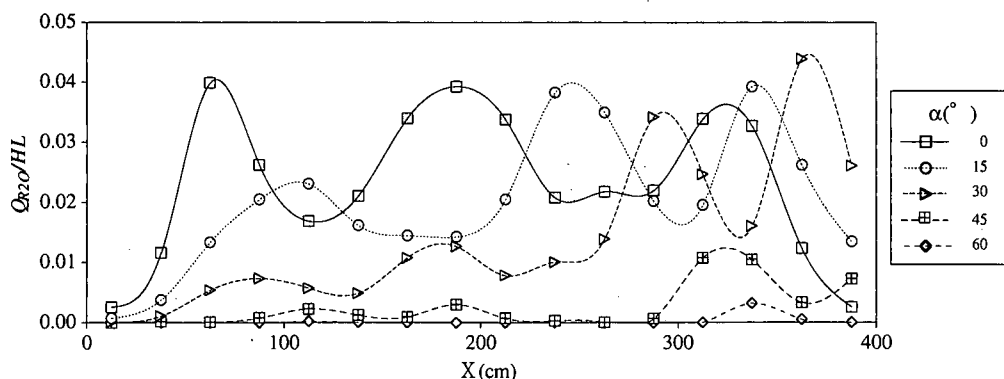
** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

*** 正会員 工博 九州大学助教授 大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

**** 正会員 工修 日本文理大学教授 工学部土木工学科

***** 正会員 九州大学技官 工学部建設都市工学科

***** 学生会員 九州大学研究生 工学部建設都市工学科

図-2 Q_{R20}/HL と幅方向の位置 X の関係 ($H/L=0.052$, $h_c=1.00$)

$K_{3\alpha}$ は (6) 式で示す 4 つのパラメータに依存するものとした。それぞれのパラメータを表-1 に示す実験条件のもとで変化させて実験を行った。小松らの知見に従いその他の無次元パラメータは $h/L=0.22$, $\theta=30^\circ$, $B_0/l=0.2$ に設定した。また本実験では越波堤と集波堤の波の進行方向長さを一致させているため $l=0.81\text{ m}$ ($l/L=0.35$) に固定されている。

3. 実験結果とその考察

(1) 2 次元越波構造物

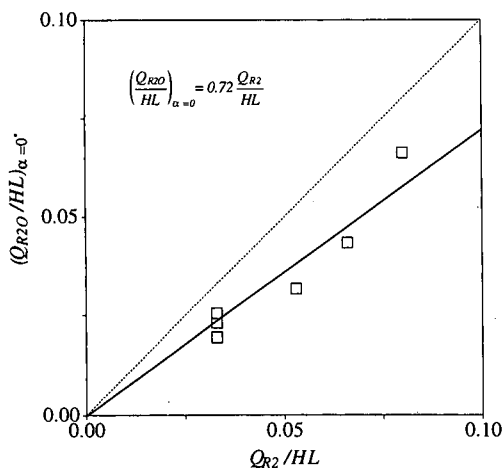
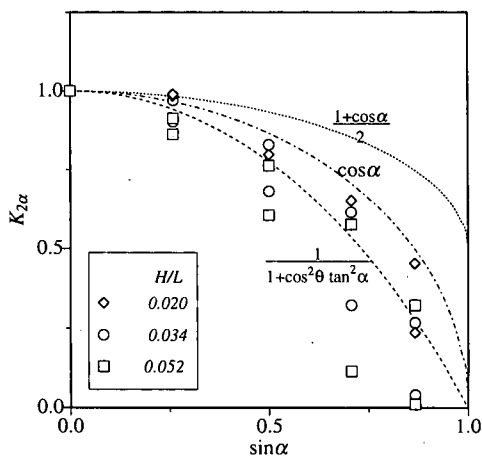
図-2 は $H/L=0.052$, $h_c/H=1.00$ における Q_{R20}/HL と幅方向の位置 X の関係を入射角 α をパラメータとして示したものである。それぞれの α に対して、 Q_{R20}/HL は X 方向に非一様な分布形を示す。 $\alpha=0^\circ$ の場合には、越波堤中央部とその両側の対称位置の 3 箇所にて極大値が現れている。 α が大きくなると、極大値の位置は X の正の方向に移動し、極大値の数も 3 箇所から 1 箇所へと減少する。また極大値の大きさは、 $\alpha=15^\circ$ では若干小さくなる程

度であるが、 $\alpha \geq 45^\circ$ になると急激に小さくなるのがわかる。場所による非一様性については、直立堤の越波量 (井上ら, 1971) や傾斜堤のうちあげ高 (細井ら, 1962) に関する研究においても示されている。

なお、高田 (1970) は傾斜堤に波が垂直に入射する場合の越波量とうちあげ高の関係には良い相関があることを示している。従って、以下では、うちあげ高の減少係数も参考となり得るものとして併せて考察する。

図-3 に $(Q_{R20}/HL)_{\alpha=0^\circ}$ と Q_{R2}/HL の関係を示す。両者はほぼ比例関係にあり、比例定数 a は 0.72 である。これから大型水槽の無次元越波量 $(Q_{R20}/HL)_{\alpha=0^\circ}$ は 2 次元水槽の無次元越波量 Q_{R2}/HL の約 7 割であることが分かる。これは大型水槽の場合は横に自由度があり、入射波の一部が構造物を越えずに横に逃げるためであると思われる。

図-4 は減少係数 $K_{2\alpha}$ と $\sin \alpha$ との関係 H/L をパラメータとして示したものである。図中の実験値については h_c/H が異なるものも同じ記号で示されている。また、

図-3 $(Q_{R20}/HL)_{\alpha=0^\circ}$ と Q_{R2}/HL の関係図-4 減少係数 $K_{2\alpha}$ と入射角 $\sin \alpha$ の関係

図中の点線は Wassing (1958) のうちあげ高についての減少係数 $(1+\cos \alpha)/2$ であり、破線はシドローバのうちあげ高についての減少係数 $1/(1+\cos^2 \theta \tan^2 \alpha)$ (細井ら, 1962) で法面勾配 $\theta=21.6^\circ$ とした場合である。本研究の実験結果は $\sin \alpha > 0.7$ の範囲において多少のばらつきが見られるものの H/L にほとんど依存せず、シドローバの曲線と良く一致する。

一方、直立堤の越波量に関する井上らの研究によると、 $K_{2\alpha}$ は $\cos \alpha < K_{2\alpha} < (1+\cos \alpha)/2$ となることが示されている。著者らの実験値は井上らの範囲を下回って分布していることから、傾斜堤の越波量の入射角度による減少率は直立堤に較べ大きいといえる。また、傾斜堤のうちあげ高に関する細井ら (1962) の研究によると、 $K_{2\alpha}$ は $1/(1+\cos^2 \theta \tan^2 \alpha) < K_{2\alpha} < (1+\cos \alpha)/2$ の範囲を取り、 H/L に依存する結果を示している。このことは、細井らの実験は $\cot \theta = 2.0$ に固定しているのに対し、著者らの実験では H/L に応じて $\alpha = 0^\circ$ の場合に最も越波し易い最適法面勾配 $(\cot \theta)_{\max}$ で得られた越波量を用いているために、細井らの場合よりも $K_{2\alpha}$ が小さくなったと考え

られる。また、 H/L に応じて $(\cot \theta)_{\max}$ を変化させたことが、 $K_{2\alpha}$ の H/L への依存性が強く現れなかった理由と考えられる。

(2) 3次元越波構造物

図-5 は $H/L=0.034$, $h_c/H=0.75$ の条件の下での Q_{R30}/HL と $\sin \alpha$ の関係を B_l/B_0 をパラメータとして示したものである。図中の曲線は各々の B_l/B_0 値に対して施された近似曲線である。 Q_{R30}/HL は $\sin \alpha$ の増加に伴い減少傾向を示すが、その減少傾向は B_l/B_0 値に対して異なり、 B_l/B_0 が大きいほど $\sin \alpha$ が小さくても強い減少傾向を示している。従って $\alpha=0^\circ$ では越波量を最大にする条件である $B_l/B_0=12$ は $\sin \alpha > 0.5$ では逆に越波量を最小にする条件となっている。図-6 に $K_{3\alpha}$ と $\sin \alpha$ の関係を B_l/B_0 をパラメータとして示す。 $K_{3\alpha}$ は Q_{R30}/HL の実験値を図-5 の近似曲線の $\sin \alpha=0$ における値で割ることにより求められているため、 $K_{3\alpha}$ は Q_{R30}/HL と $\sin \alpha$ の関係と同様に、 B_l/B_0 が大きいほど $\sin \alpha$ が小さいところから強い減少傾向を示すことになる。しかしながら、強い減少傾向を示し始める $\sin \alpha$ の値に差はあるものの、各々の近似曲線はほぼ類似した形状を示している。そこで $K_{3\alpha}$ と $\sin \alpha$ の関係を普遍表示するために図-7

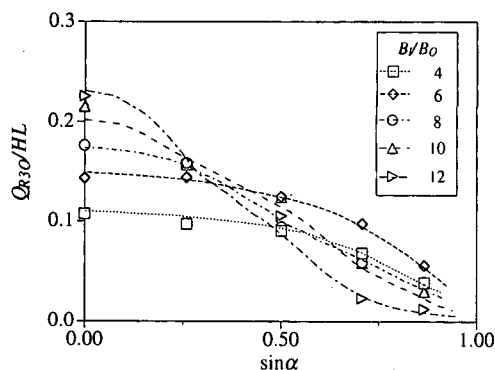


図-5 Q_{R30}/HL と $\sin \alpha$ の関係
($H/L=0.034$, $h_c/H=0.75$)

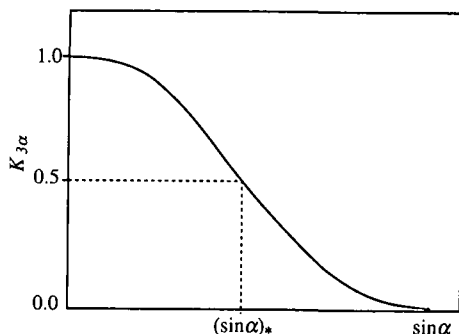


図-7 $K_{3\alpha}$ を普遍表示するための代表量

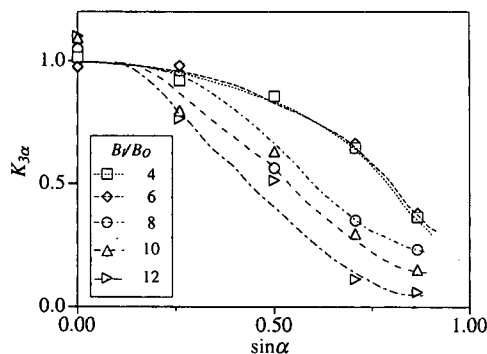


図-6 $K_{3\alpha}$ と $\sin \alpha$ の関係
($H/L=0.034$, $h_c/H=0.75$)

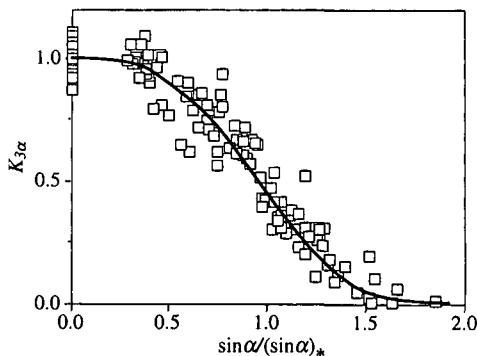


図-8 $K_{3\alpha}$ の普遍表示

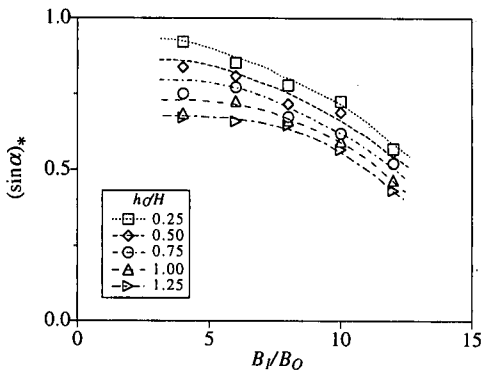


図-9 h_c/H をパラメータとした $(\sin \alpha)^*$ と B_1/B_0 の関係

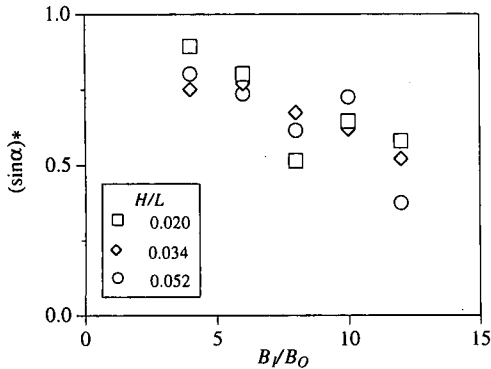


図-10 H/L をパラメータとした $(\sin \alpha)^*$ と B_1/B_0 の関係

で示される代表量 $(\sin \alpha)^*$ を定義する。 $(\sin \alpha)^*$ は $K_{3\alpha} = 0.5$ における $\sin \alpha$ の値である。

図-8 は $K_{3\alpha}$ と $\sin \alpha$ の関係を示した全てのグラフから $(\sin \alpha)^*$ を読み取り、 $\sin \alpha$ を $(\sin \alpha)^*$ で規格化して示したものである。多少のばらつきは見られるものの図中の近似曲線で十分普遍的に示されていることが分かる。図中の普遍曲線を用いて任意の H/L 、 h_c/L 、 B_1/B_0 及び $\sin \alpha$ に対する $K_{3\alpha}$ を評価するためには、代表量 $(\sin \alpha)^*$ が H/L 、 h_c/H 及び B_1/B_0 に対して定量化されている必要がある。

図-9 は h_c/H をパラメータとして $(\sin \alpha)^*$ と B_1/B_0 の関係を示したものである。 $(\sin \alpha)^*$ は B_1/B_0 の増加に伴い減少し、 h_c/H の値が大きいくほど全体的に小さな値を示すことが分かる。このことは集波比が大きく天端高が高い越波構造物では、小さな入射角でも越波量の減少率は大きくなるということを示している。また図-10 は $h_c/H = 0.75$ に対して H/L をパラメータとして $(\sin \alpha)^*$

と B_1/B_0 の関係を示したものである。若干のばらつきはあるが、 $(\sin \alpha)^*$ は H/L にほとんど依存していないことが分かる。

4. 結 語

2 次元・3 次元越波構造物に対して、波の入射角に対する越波量の減少係数の定量的評価が可能となった。その結果、構造物に対して波が垂直に入射する場合についての従来までの研究によって定量化されている越波量を用いることにより、斜めに波が入射する場合の越波量の算定が可能となった。また、越波構造物の設置予定海域の卓越波の周期、波高および入射角度もしくは入射角度の頻度分布が与えられれば、その海域に最適な越波構造物の形状を決定することも可能となった。

最後に、本研究を行うに当たり有益な御助言を頂いた九州大学工学部建設都市工学科の朝位孝二助手、実験で多大な協力をお願いした日本文理大学土木工学科海洋環境研究室の4年生諸君に深く感謝致します。なお、本研究は文部省科学研究費（特別研究員奨励費）の補助を受けたことを付記します。

参 考 文 献

- 井上雅夫・土屋義人 (1971): 斜め入射波による鉛直堤の越波に関する実験的研究, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 259-264.
- 小松利光・松永信博・増輪一彦・植田操・藤田和夫 (1992): 二次元越波堤による越波エネルギー獲得に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 105-110.
- 小松利光・岡田知也・松永信博・植田操・藤田和夫 (投稿中): 波浪エネルギーから位置エネルギーへの効率的な変換に関する基礎的研究, 土木学会論文集.
- (財) エンジニアリング振興協会 (1993): 波の津波力変換による揚水、貯水及び定出力発電他に関する調査研究報告書, 201 p.
- 高田 彰 (1970): 波の遡上、越波および反射の関連性について, 土木学会論文集, 第182号, pp. 19-30.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦・関口忠志 (1984): 斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 542-546.
- 細井正延・首藤伸夫 (1962): 堤防に斜めに波が入射する場合のうちあげ高について, 第9回海岸工学講演会論文集, pp. 149-152.
- 小田一紀・真栄平直之・中西昭人・田中彬夫 (1995): 波浪によるパイプ式透堤の海水導入特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1116-1120.
- 山本 潤・武内智行・中山哲蔵・田畑真一・池田正信 (1994): 志賀島漁港外港の導水工による環境改善効果に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1096-1100.
- Wassing, F. (1958): Model investigation on wave run-up carried out in the Netherlands during the past twenty years, Proc. of 6th Conf. on Coastal Engineering, pp. 700-714.