

人工リーフの天端幅の違いによる波浪低減効果および 反射率に関する現地調査

大 中 晋*・吉 沢 央 明**

1. はじめに

近年、景観上あるいは海水交換性の理由から、これまでの離岸堤に変わり、人工リーフの建設が増えてきている。神奈川県湯河原海岸でも現在、護岸背後への越波防止対策として、人工リーフの建設が進められている。

人工リーフの波浪制御効果に関する現地調査事例は、これまで二、三報告されており（例えば浜口ら、1988；宇多ら、1990）、天端水深の違いによる波浪低減効果についてはある程度の検証データが得られている。しかしこれらは、完成後の1つの天端幅に対する結果であり、天端幅が異なる場合に、波浪制御効果に及ぼす影響について検証された事例はこれまでにない。またリーフ前面の反射率について、現地で計測された事例はない。

そこで本研究では、人工リーフの施工途中から完成後にわたる長期間の現地調査を実施し、天端幅の違いが波浪低減効果に及ぼす影響およびリーフの反射率について調べることを目的とする。また当地点のように、護岸前面に人工リーフが設置される場合、護岸からの反射波が、人工リーフ周辺の波浪場に影響を及ぼすことが予想される。そこでリーフの反射率とともに、護岸の反射率の測定も同時に行い、護岸による反射波が波浪低減効果に及ぼす影響について、検討を行った。

2. 現地調査

2.1 人工リーフの概要

湯河原海岸では現在、図-1に示すように、埋立護岸前面約100m地点に、人工リーフが一基施工されている。設置水深は約9.3mであり、堤長が170m、天端幅は70mである。ただし調査開始時点では図中の点線で示すように32mであり、これが平成4年1月にほぼ全断面が完成し、70mとなった。沖側法勾配は1:3であり、岸側法勾配は1:2である。リーフの天端高はTP-1.84mであり、HWLはTP+0.64m、LWLはTP-0.84mである。リーフ沖側斜面上および天端上の沖側から32mまでは、10t型の被覆ブロックによ

り、またそれより岸側では2t内外の被覆石で覆われている。また背後の護岸は消波ブロック（16tおよび8tのテトラポッド）で被覆されており、被覆幅は約14mである。また前面水深は約4mである。

2.2 調査期間および観測機器

波浪低減効果に関する現地調査は、平成3年7月から平成4年3月にわたる約8カ月間にかけて行った。入射波浪の測定は、リーフ沖合約600mの水深約22m地点（St.1）に、超音波波高計、水圧センサーおよび電磁流速計が一体化された4成分波高波向計を設置して行った。またリーフ沖側の、法肩より約60mの水深約10m地点（St.2）および岸側の法肩より約20mの水深約6m地点（St.3）、さらにSt.3とほぼ同水深のリーフのない地点（St.4）に水圧センサー付電磁流速計を設置した。なお、得られた水圧データから表面波に対する諸量を算定する際の精度の検討のため、超音波波高計をSt.2～St.4に適宜配置し、水圧センサー付電磁流速計との同時観測を行った。

リーフ前面反射率および護岸前面反射率の測定は、平

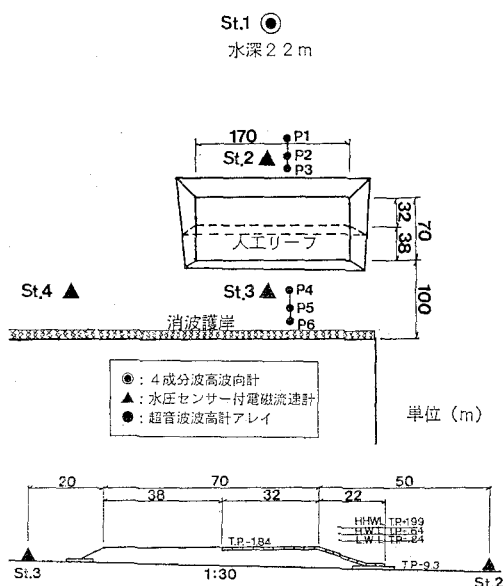


図-1 調査地点および観測機器設置位置図

* 正会員 工修 東亜建設工業(株) 技術研究所

** 正会員 神奈川県小田原土木事務所 副技官

成4年2月12日～3月15日までの約1カ月間にかけて行った。図-1に示すように、St. 2 および St. 3 の2地点に超音波波高計3台1組にした波高計アレイを設置した。

計測は、反射率の測定については2時間毎に10分間のデータを、その以外の測定については20分間のデータを取得した。なおサンプリング間隔は0.5秒である。

3. 天端幅の違いによる比較

3.1 波浪低減効果について

天端幅の違いによる波浪低減効果を調べるために、天端幅 B が 32m 時と 70m 時において、それぞれ高波浪の出現した約1カ月間のデータを用いて解析を行った。

はじめにリーフ前面の St. 2 における有義波高とリーフ背面の St. 3 およびリーフのない St. 4 の有義波高との関係を示したものが図-2である。図中の□印が St. 4、△印が St. 3 の実測結果であり、実線はこれらの値を近似する回帰直線である。 $B=32$ m 時には有義波高で 4m 近い高波浪が得られているが、 $B=70$ m 時には 2m 程度であった。St. 4 の波高は水深変化に伴う浅水変形の影響のため、St. 2 に比べて波高の増加が見られる。一方 St. 3 は、いずれの天端幅においても高波浪時のみならず、波高の比較的小さい場合でも波浪低減が見られる。

つぎに天端水深と波浪低減効果との関係を示したものが図-3である。ここで横軸は天端上水深 R を入射波高より算定された換算沖波波高 H_0' で無次元化した相対天端水深を、縦軸はリーフ背面の St. 3 の波高とリーフ前面の St. 2 の波高との比を表す。また図中の実線は、実測結果を近似する4次曲線である。当然ながら、 R/H_0' が小さくなるほど低減効果が高い結果となっている。天端幅の違いについてみると、 R/H_0' がほぼ3以上の範囲では、 $B=70$ m の結果は $B=32$ m に比べて1割程度、また R/H_0' が 1.5～2.5 の範囲では2割程度の低減効果の向上が見られる。さらに R/H_0' が小さくなると、 $B=32$ m の結果は急激に波高の低下が見られ、 $B=70$ m の結果に近づく傾向が見られる。これらの違いはリーフによる強制碎波および透水層内および表面でのエネルギー逸散の影響により生じていると考えられる。はじめに R/H_0' が小さい範囲 (1～1.5

以下) については、沖側法面上での強制碎波が支配的であると考えられる。これまでの実験結果においても (例えば永井ら, 1975; 樫木ら, 1989), R/H が 1.5～1.6 より小さいところで強制碎波が生じている。したがってこの範囲では、天端幅の違いが波浪低減効果に及ぼす影響は小さいと考えられる。つぎに R/H_0' が大きい範囲 (3～4 以上) では透水層内および表面でのエネルギー逸散の影響が支配的であると考えられる。透水性による波高変化は、

$$H(x) = H e^{-\beta x} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表される。ここで、 β は波高減衰率、 x は透水層長さである。そこで x としてそれぞれの天端幅をとり、 R/H_0' が4付近の平均的な波高比を用いて β を求めたところ、両者とも 0.003 程度となった。これより両者に生じている1割程度の低減率の違いが、透水性で説明できることが示された。つぎに R/H_0' が 1.5～2.5 付近においては、天端幅が小さい場合には生じない天端上での碎波が、大きい場合には生じていると考えられる。これは永井ら (1977) の実験結果からも明らかにされている。これらの要因と透水性により、両者に2割程度の違いが生じたものと考えられる。

また $B=70$ m の波浪低減は、 $B=32$ m ほどの明確な変化が見られない。これは前述のように、天端幅の小さ

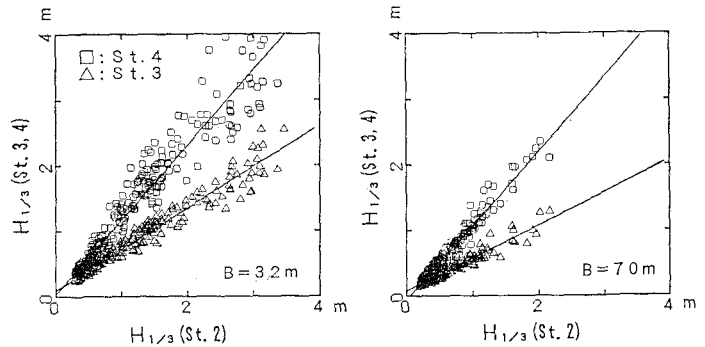


図-2 St. 3 と St. 2 および St. 4 と St. 2 の波高の関係

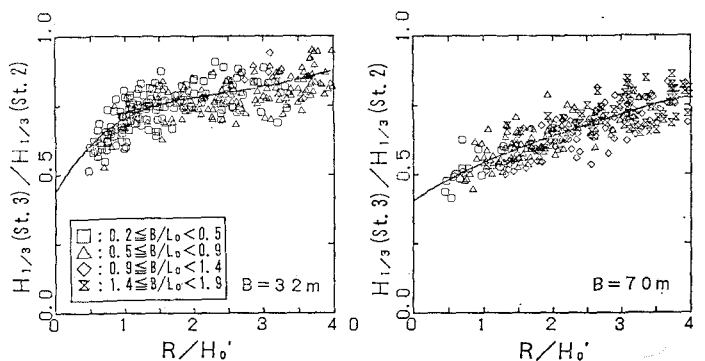


図-3 相対天端水深と波浪低減率との関係

い $B=32\text{m}$ の場合は、リーフ沖側法面での plunging 碎波が主となるため、ある天端水深からの急激な波高低下が生じる。一方 $B=70\text{m}$ の場合は、天端水深により、リーフ沖側法面での plunging 碎波からリーフ上での spilling 碎波に緩やかに移行していくために、急激な変化が生じないためと考えられる。

3.2 周期の低下について

波別解析結果より、リーフ背面において周期が低下する傾向が見られた。これはリーフ上での強制碎波と関係があるものと考え、 R/H_0' と周期変化との関係を示したものが図-4である。縦軸は、St. 3 と St. 2 との有義波周期の比を示している。 $B=32\text{m}$ の場合、 R/H_0' が 1.5~2 付近で周期の急減な低下が見られ、 R/H_0' が 1 以下では St. 2 の約半分程度となっている。これは 3.1 で述べたように、碎波していると考えられる範囲であることから、リーフ上で強制碎波された波が分裂現象を生じているためと考えられる。 $B=70\text{m}$ の場合も、 R/H_0' が 1.5 より小さいところで顕著な周期の低下が見られるが、 $B=32\text{m}$ ほどの急激な変化は見られない。

3.3 スペクトル変化について

つぎにリーフ前背面でのスペクトル変化について調べた。スペクトルは、得られた水圧変動のスペクトルに、微小振幅波理論による伝達関数を乗じ、表面波形に対するスペクトルに変換している。また $B=32\text{m}$ と 70m とでは観測時期が異なるため、ここでは同様の波浪条件に近い数ケースを抽出し、その平均を用いている。

図-5(1)は、低波浪時 ($H_{1/8} \div 0.7\text{m}$, $T_{1/8} \div 8\text{s}$) におけるパワースペクトルを示したものである。図中の太線がリーフ前面、細線がリーフ背面の結果である。 $B=70\text{m}$ の場合は、全周波数帯にわたりパワーの低下が見られる。一方、 $B=32\text{m}$ の場合は、背面でパワーが低下しているものの、 $B=70\text{m}$ の場合に見られるほどの顕著な低下は見られない。またリーフ前面でのピークが存在する周波数の 1/2 付近の周波数に、もう 1 つの顕著なピークが存在している。つぎに図-5(2)は、高波浪時 ($H_{1/8} \div 2\text{m}$, $T_{1/8} \div 10\text{s}$) におけるスペクトルを示したものである。これより背面では、低波浪時に比べてピーク付近のパワーが前面に比べて大きく低下している。また両者とも波の非線形性の影響と考えられる、主ピークに対する倍周波数付近に顕著なピークが見られる。

4. 反射率について

人工リーフ周辺の波向は、護岸に対してほぼ直角方向

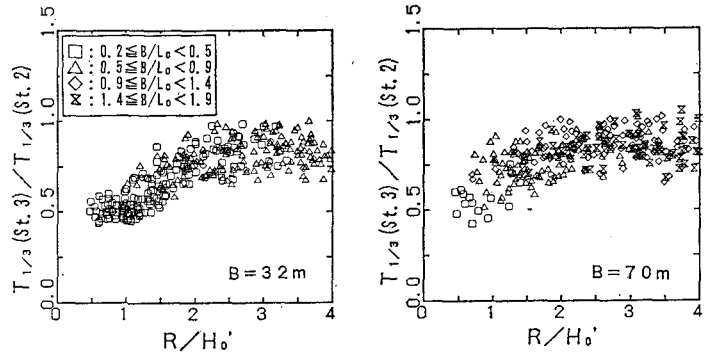
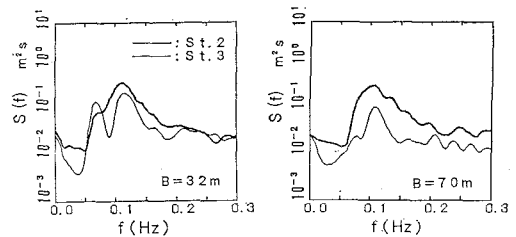
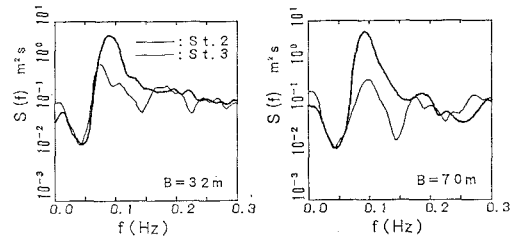


図-4 相対天端水深と周期との関係



(1) 低波浪時 ($H_{1/8} \div 0.7\text{m}$, $T_{1/8} \div 8\text{s}$)



(2) 高波浪時 ($H_{1/8} \div 2\text{m}$, $T_{1/8} \div 10\text{s}$)

図-5 リーフ前背面のスペクトル変化

であることが確認されている。そこで $B=70\text{m}$ 時における P1~P6 の表面波形データより、合田の入反射分離法を用いて反射率の推定を行った。

図-6は、リーフ背後に設置された P4~P6 のデータから得られた護岸前面反射率およびその近似曲線を示したものである。なお各反射率は、波のパワーのピーク周波数付近の平均的な反射率を示している。横軸は護岸の消波ブロックの被覆幅 B' を沖波波長 L_0 で無次元化したものを示す。これより反射率としては 0.5 程度となっており、周期が長くなるほど若干高くなる傾向が見られる。また図-7は、リーフ前面に設置された P1~P3 のデータから得られた反射率を、相対天端水深との関係で示したものである。人工リーフ沖側の反射率は、通常天端水深が浅くなるほど大きくなる。しかし今回得られた結果は逆の傾向を示しており、 R/H_0' が大きいほど

反射率が増加している。これは、 R/H_0' が大きくなると、リーフによる反射波よりも、むしろ護岸からの反射波の影響が卓越することによる、見掛け上の反射率を示していると考えられる。

5. リーフによるエネルギー逸散

4. より、当地点におけるリーフ周辺の波浪場は、護岸からの反射波の影響が無視できないことが明らかとなった。そこでこの影響を取り除き、リーフのみによる反射波エネルギー、伝達波エネルギーならびにリーフにより逸散されるエネルギーを抽出する。

いま入射波の位相干渉が無視でき、エネルギー的な重ねあわせが可能であるとする。また護岸反射波がリーフ岸側法面で再反射されるエネルギー成分は無視できるとすると、リーフ周辺でのエネルギー成分は図-8に示すようになる。ここで E_I : 入射波エネルギー, E_R : リーフによる反射波エネルギー, E_R' : 護岸反射波のリーフ沖側への伝達波エネルギー, E_T : リーフ伝達波エネルギー, E_{TR} : 護岸反射波エネルギーである。また K_{R1} , K_{T2} , K_{R1} , K_{T2} は、それぞれリーフの①断面および②断面における反射率および伝達率, K_R' は P4~P6 より得られる護岸の反射率, K_R^* は P1~P3 より得られるリーフ沖側での見掛け上の反射率, α は伝達波が護岸に到達するまでに碎波等により失われるエネルギー減衰率である。ここで、

$$K_{R1} \doteq K_{R2} = K_R, K_{T1} \doteq K_{T2} = K_T, \alpha \doteq 1 \dots (2)$$

を仮定すると、リーフ前面での入射分離より E_I と $E_R + E_R'$ が分離され、

$$K_R^{*2} = (E_R + E_R')/E_I \\ = K_R^2 + K_T^2 K_R'^2 K_T^2 \dots (3)$$

が得られる。またリーフ背面での入射分離より E_T , E_{TR} が分離され、

$$K_R'^2 = E_{TR}/E_T \dots (4)$$

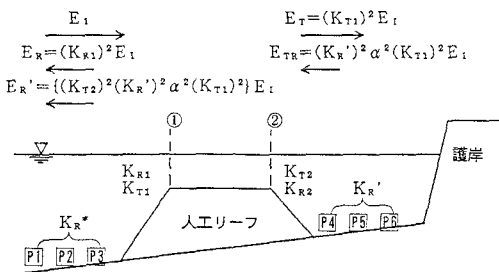


図-8 リーフ周辺のエネルギー成分

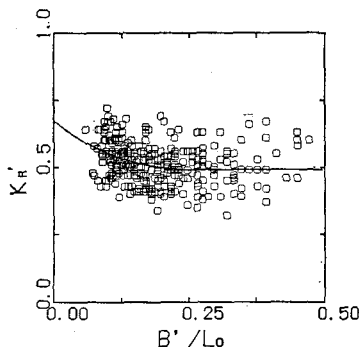


図-6 護岸前面反射率

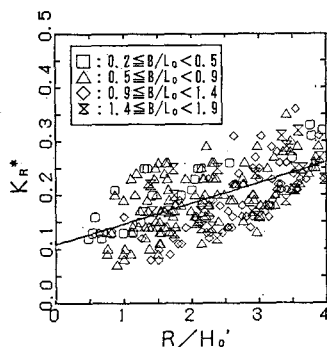


図-7 リーフ前面反射率

を得る。また分離されたリーフ前背面の E_L , E_T より、

$$K_T^2 = E_T/E_I \dots (5)$$

を得る。したがって式(4), (5)より得られる K_R^{*2} , K_T^2 を式(3)に代入することにより K_R^2 が求まり、リーフの反射波および伝達波エネルギーが算定される。またリーフの逸散エネルギー E_L は、次式により算定される。

$$E_L = E_I - E_R - E_T = (1 - K_R^2 - K_T^2) E_I \dots (6)$$

図-9 (1)~(3) は、このようにして得られた各エネルギーを、入射波エネルギーで無次元化した値を示す。図-9 (1) では反射波エネルギーが0以下の値も多く見られるが、これは式(2)の仮定が成立していないことや測定誤差によるものと考えられる。しかしこれより反射波エネルギーは極めて小さく、リーフで失われるエネルギーは伝達波エネルギーでほぼ決定されることがわかる。またこれよりリーフのみによる反射率としては、0.1~0.15 程度となった。

6. 反射波成分を取り除いた場合の波浪低減率

図-3 は、護岸あるいはリーフによる反射波成分も含めた状態での波高比である。そこでこれらの反射波成分の影響を取り除いた上で、数値計算結果との比較を行う。

5. で述べたように、リーフ前背面のそれぞれ進行波成分のみを抽出し、その波高比をとることにより、反射波成分を取り除いた真の波浪低減率が得られる。ここでリーフ前面反射率および護岸反射率としては、P1~P6のデータが全期間計測されていない関係上、図-6, 7の図中に示される近似曲線を用いて算定した。また数値計算は、磯部(1986)による不規則波に拡張された放物型方程式を用いて行った。ただし人工リーフは水深変化として与えているので不透過堤としての取り扱いとなっている。これらの結果を示したものが図-10である。また参考のため、田中(1976)による実験結果も示す。実

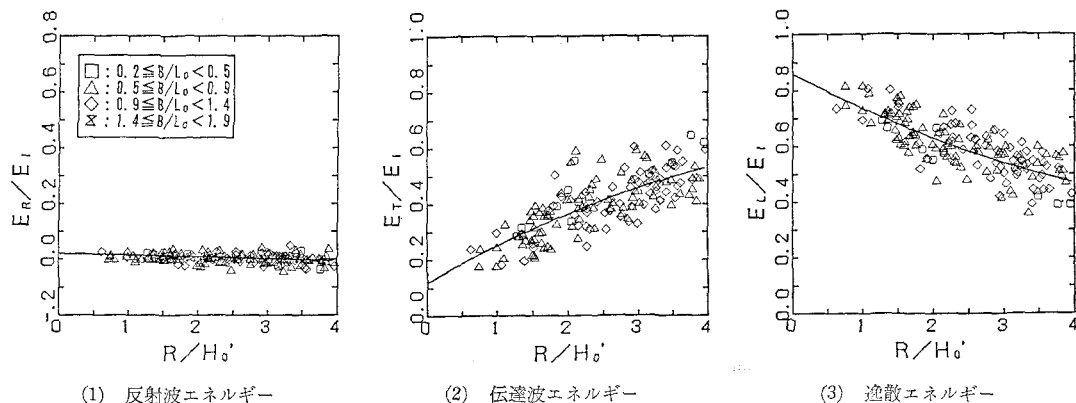
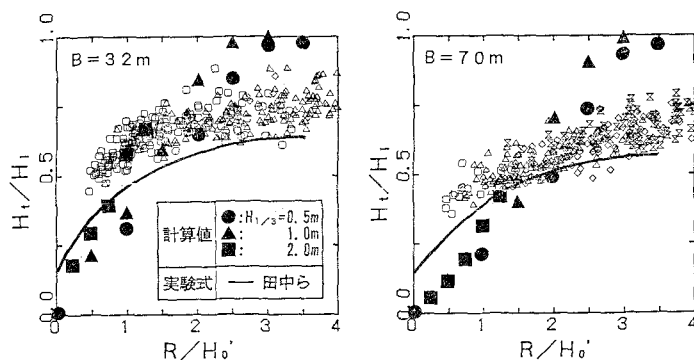


図-9 無次元エネルギー量

測結果は反射波成分を取り除くことにより、図-3 に比べて全体的に15%程度の波浪低減率の低下が見られる。 $B=32\text{m}$ の場合、 R/H_0' が小さいところで実測値と計算値との対応は良好である。しかし R/H_0' が大きいところでは両者に違いが見られる。一方 $B=70\text{m}$ の場合は、さらに実測値との一致度が悪く、天端幅が長くなるほど透水性を考慮した計算手法を用いる必要があると考えられる。



7. おわりに

護岸前面に設置された人工リーフの波浪場に関する現地調査を行い、天端幅の違いが波浪低減効果に及ぼす影響およびリーフ前面反射率について明らかにした。これよりリーフの天端幅が大きい場合は、リーフ沖側法面での碎波に加えて、天端上での碎波や透水性の影響により、広い相対天端水深の範囲での波浪低減効果が期待できる。また天端幅が小さい場合は、碎波するかしないかははっきりするために、ある相対水深を境にして急激な波浪低減が生じる。したがってこの場合に所定の低減率を得るためには、適切な天端高を設定する必要があるといえる。また前面法勾配が 1:3 の場合のリーフ前面反射率は非常に小さく、反射波が船舶等の航行上に支障をきたすことはほとんどないといえる。

本調査は東亜建設工業(株)・鈴木組(株) J. V. により行われたものである。また本論文の作成に当り、貴重な御助言を頂いた東京大学磯部教授ならびに新潟大学泉宮助教授に感謝の意を表す。

参考文献

- 磯部雅彦(1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- 宇多高明・森下 襄・早津誠一(1990): 糸魚川海岸における人工リーフ周りの波, 流れ, 漂砂の現地観測, 海岸工学論文集 第37巻, pp. 489-493.
- 榎木 亨・出口一郎・岡原義典(1989): 幅広潜堤の波浪減衰効果とその縮尺効果について, 海岸工学論文集 第36巻, pp. 633-637.
- 田中則夫(1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 152-157.
- 永井荘七郎・小田一紀・倉田克彦(1975): 大水深緩斜面捨石潜堤に関する研究, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 409-414.
- 永井荘七郎・倉田克彦・長谷川恵一(1977): 潜堤の消波効果におよぼす天端幅の影響, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 303-307.
- 浜口達男・宇多高明・井上 力・五十嵐 晃・中山 修(1988): 人工リーフの波浪制御効果に関する現地実験, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 128-132.