

# 人工リーフ上の波と流れの現地観測

青野利夫\*・Eric. C. Cruz\*・大 中 晋\*\*・後藤智明\*\*\*

## 1. ま え が き

人工リーフは、離岸堤等に比較して景観を悪化させることなく波浪低減効果が得られるため、近年その建設は増加する傾向にある。

人工リーフを構成する材料は、種々のものが用いられているが、外洋に面した海域では被覆ブロックの重量が大きくなることから捨石堤を人工の被覆ブロックで覆う形式が主流となっている。この安定重量を算定する上で、リーフ上の波浪場と流速場の算定は必要不可欠である。人工リーフの被覆材に関する検討は、宇多ら (1988, 1990)、浅川ら (1992)、水谷ら (1994)、渡辺ら (1993) など多く行われており、重量算定公式なども建設省 (1992) によって取りまとめられている。ただし、これらの研究は、いずれも実験的な検討が主であり、現地での検証についてはまだ十分とは言えない。特に、人工リーフでは天端上の砕波乱れの発生、水深の急激な減少による底面粗度の影響増大、透水層での乱流抵抗等の検討を現地スケールで行う必要があるが、実際にはほとんど行われていない。

本研究では、人工リーフ周辺の局所的な波浪および流れの解明を目的として現地観測を行い、基本的なリーフ上の岸向流速の特性、リーフ上の平面的波浪特性等について検討した結果について報告する。

## 2. 現地観測の概要

### 2.1 人工リーフ

神奈川県湯河原海岸では、図-1に示すように埋立護岸前面約100 m地点に2基の人工リーフが築造されている。設置水深は約9.3 mで、堤長は170 m、また天端幅が70 mである。沖側と岸側の法勾配はそれぞれ1:3と1:2である。リーフの天端高は、TP-1.84 mでH.W.L.およびL.W.L.はそれぞれTP+0.64 m、TP-0.84 mとなっている。

人工リーフの被覆材は、リーフの沖側から天端上の32

m地点までX型ブロック(10 t)が用いられ、それより岸側では2 t内外の被覆石が用いられている。また、背後の護岸部は前面水深が4 mで、16 tおよび8 tのテトラポッドで被覆されており、その被覆幅は約14 mである。

### 2.2 観測期間および観測機器

観測は、1994年2月1日から3月31日の冬季の2ヶ月間について行った。

各観測地点は、図-1に示すようにリーフ中央部に7地点、リーフ端部に2地点の合計9地点とし、人工リーフ周辺の波浪の岸沖特性および端部を含んだ面的特性が検討できるように配置した。リーフ沖合約600 mの水深22 m地点(St.0)には、入射波観測を目的として超音波式波高計、水圧センサー付電磁流速計を設置した。また、他地点については砕波が発生しやすいことを考慮して全て水圧式波高計と電磁流速計をペアとして設置した。

リーフ端部のSt.8地点では、波高計と流速計に加えて被覆ブロックの傾斜あるいは振動状況を観測するため傾斜計を設置した。ただし、今回の観測では傾斜計の出力に有意な傾向が認められなかったため、検討は行っていない。

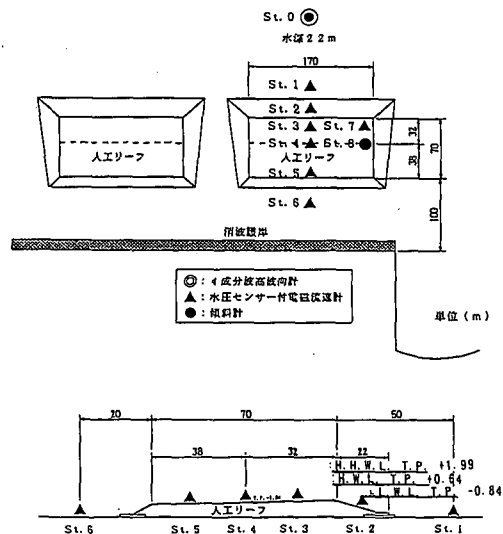
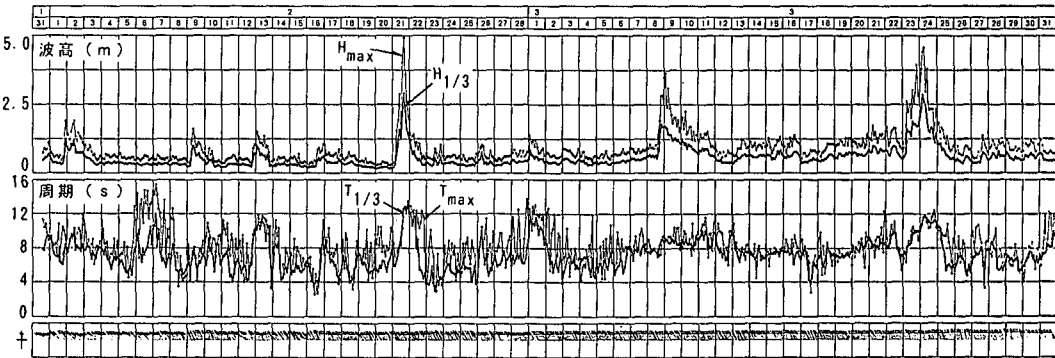


図-1 人工リーフの概要と観測地点

\* 正会員 工博 東亜建設工業(株) 技術研究所 数値解析研究室

\*\* 正会員 工修 東亜建設工業(株) 東京支店

\*\*\* 正会員 工博 東海大学工学部土木工学科 教授



図一2 観測期間中の入射波有義波諸元の経時変化

各データの計測は、毎偶数時の2時間毎に20分間行い、サンプリング間隔は0.5秒とした。得られた時系列データから有義波諸元と波向きを算定した。なお波の定義はゼロダウンクロス法を用いている。

2.3 観測期間中の気象および入射波浪

観測期間中の気象特性は、2月1日から2日および9日と13日に弱い低気圧が太平洋沿岸を通過し、21日から22日にかけて非常に規模の大きな低気圧の通過があった。この低気圧は、最終的に中心気圧が948 hPaにまで達し台風なみの規模を有する擾乱となった。また、3月は8日から9日にかけて太平洋沿岸で前線の通過があり、23日から24日にかけて規模の大きな低気圧の通過が見られた。

図一2は、St.0で得られた入射波の有義波諸元の経時変化を観測期間について示したものである。入射波浪は、低気圧および前線の通過に対応した変化を示し、波高・周期共に各擾乱時に増大する。観測期間内の代表的な高波浪時の波浪諸元を取り出したものが表一である。また、全観測期間を通して入射波の波向きは、人工リーフに対してほぼ直角(SE方向)に入射する波が卓越していた。

3. 観測結果

3.1 人工リーフ周辺の波高変化

図一3は、リーフ中央部であるSt.0からSt.6までの各地点の代表的な有義波高変化を低波浪時から高波浪時に

ついて示したものである。高波浪時における波高変化は、法肩付近での強制砕波による急激な波高減衰が卓越しピーク値の4割から5割に減衰する。この状況はほとんどのケースで認められる。また、低波浪時には、底面の粗度および透水層による抵抗によって減衰する傾向が認められ、入射波の周期によって異なるが5～6割程度に減衰する。また、リーフ沖側の法面における波高のピーク値は、急激に大きくなり最大で3mを越す波高値も見られる。

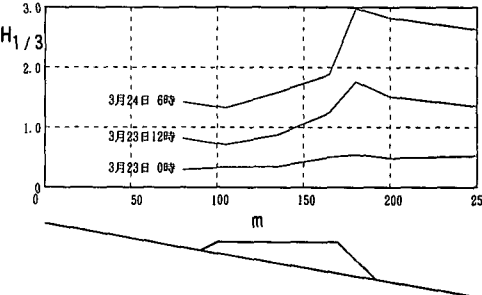
3.2 人工リーフ上の流速場

リーフ上における流速場は、人工リーフを構成する材料を決定する上で非常に重要な項目であり、特に岸向最大流速が人工リーフの安定性を支配する因子として重要であることが宇多ら(1990)によって指摘されている。ここでは、リーフ天端上の観測点であるSt.3とSt.4およびSt.5の3地点で得られた流速データを元にリーフ上の流速場について検討する。

図一4は、人工リーフ天端上の各観測点における岸向き最大流速  $U_{max}$  の空間変化を示したもので横軸の原点は、リーフの岸側法肩である。全体の変化特性は、リーフ沖側法肩部からリーフ中心部にかけて急激に減衰し、それ以降ほとんど変化しない傾向が認められる。また、岸向き最大流速は最大で4 m/sから5 m/sの間にあり

表一 代表的な擾乱による波浪諸元

| 日 時        | 期間中最大有義波          |                   | 期算中最大波    |           | 要 因  |
|------------|-------------------|-------------------|-----------|-----------|------|
|            | $(H_{1/3})_{max}$ | $(T_{1/3})_{max}$ | $H_{max}$ | $T_{max}$ |      |
| H6.1/21-22 | 2.90              | 12.6              | 4.91      | 12.6      | 低気圧  |
| H6.3/8-9   | 1.79              | 9.0               | 3.64      | 9.1       | 前線通過 |
| H6.3/23-24 | 2.87              | 11.6              | 4.59      | 11.6      | 低気圧  |



図一3 リーフ上の有義波高変化

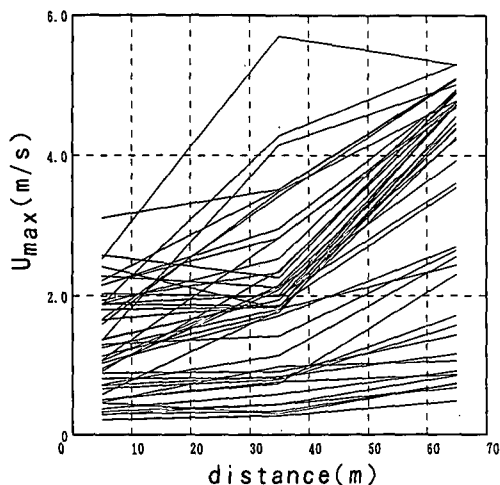


図-4 岸向最大流速の分布

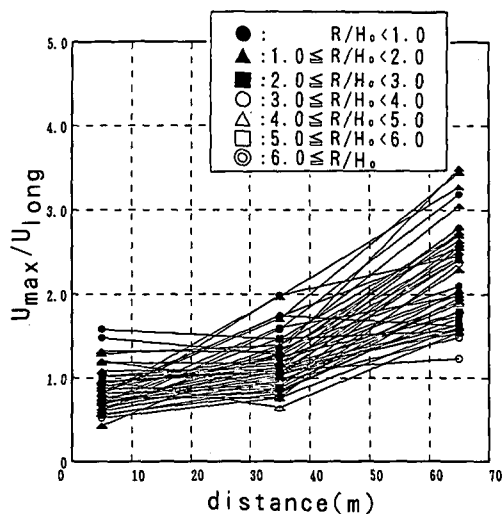
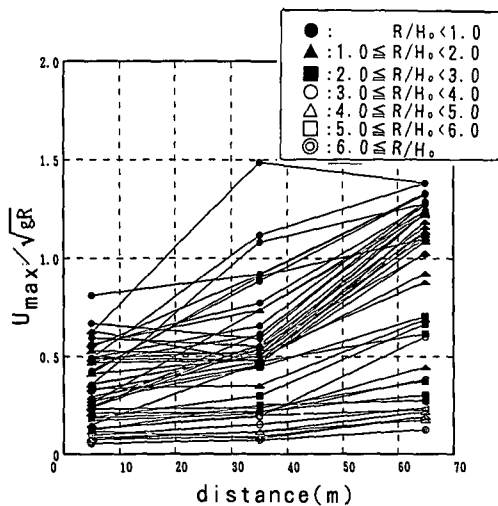
図-6  $U_{\max}/U_{\text{long}}$  の分布

図-5 無次元岸向最大流速の分布

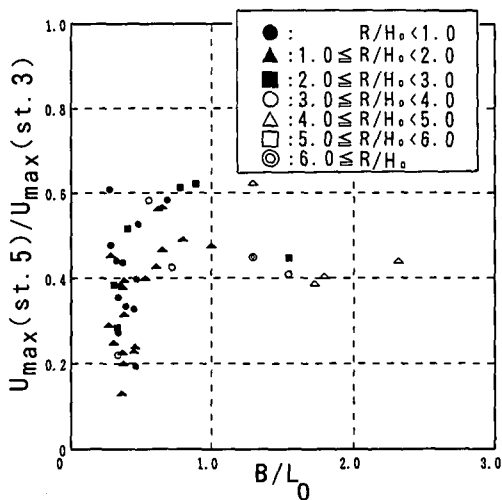


図-7 岸向き最大流速の減衰特性

非常に早い流速が発生しているのが認められる。

リーフ天端上の岸向き最大流速は、長波理論が成立する範囲にあるので、無次元岸向き最大流速  $U_{\max}/\sqrt{gR}$  ( $R$ : リーフ天端の水深) が定義されている。また、相対天端水深  $R/H_0$  と岸向き最大流速との相関関係が建設省土木研究所において指摘されており、ブロックの移動との関係が示されている。図-5は、 $U_{\max}/\sqrt{gR}$  の空間分布を示したもので図中の記号は無次元相対水深  $R/H_0$  ( $H_0$ : 換算有義沖波波高) を示している。図-5から無次元岸向き最大流速は、相対天端水深に応じて変化する傾向が認められるがデータのばらつきが非常に大きい。

図-6は、線形長波理論の最大水粒子速度  $U_{\text{long}}$  を用いて無次元流速とした場合の空間分布で、無次元岸向き最大流速は、沖側法肩部では長波水粒子速度の2倍から3

倍となっているのに対しリーフ中央部から岸側法肩部ではほぼ1程度となっており、線形長波理論に近い結果となっている。

次に、各観測点における流速値といくつかの無次元パラメータとの比較から流速値の減衰特性を検討する。

図-7は、沖側法肩部 (St.3) とリーフ岸側端部 (St.5) の流速値の比と相対天端幅 ( $B/L_0$ ) との関係を示したものである。パラメータとして相対天端水深を用いている。この図から、相対天端幅が0.4前後で急激に減衰する傾向が認められる。

#### (1) 岸向き最大流速の経験式との比較

人工リーフの表面を被覆する被覆材の所要重量に関しては、岸向き最大流速の経験式に基づいて定める方法が

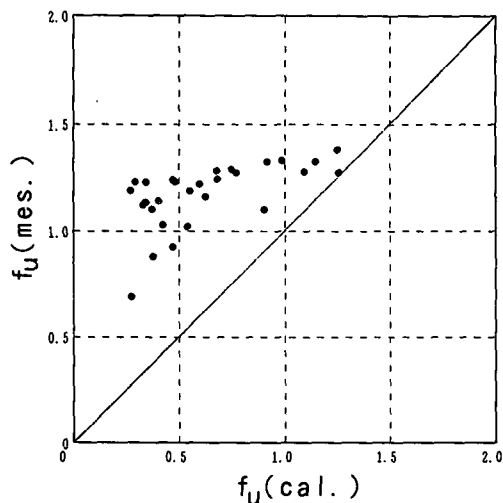


図-8 無次元岸向最大流速の観測値と経験式の相関

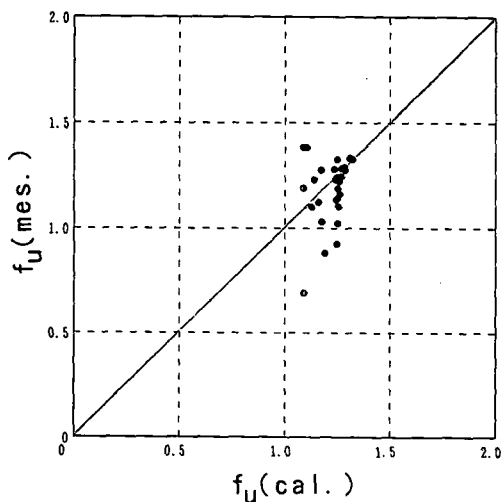


図-9 補正後の相関

建設省土木研究所において提案されている(建設省, 1992)。

図-8は、無次元岸向き最大流速( $f_u = U_{\max}/\sqrt{gR}$ )の観測値と経験式との比較結果である。図-8から、観測値は最大で計算値の2倍程度となっているのが認められる。ただし、定性的な傾向は観測値と経験式が一致していることから、経験式は以下のように補正できる。

現地の不規則波浪において、最大の流速を発生させる波浪が最大波となることを考慮し、経験式に与える沖波波高として合田式からの類推から、 $H_0 = 1.8H_{1/3}$ として算定し観測値と比較した結果が図-9である。まだ、誤差はあるものの、図-8の係数に比較して相関が高くなっているのが確認できる。

### 3.3 人工リーフ端部における波浪特性

現地での人工リーフの形状は当然ながら3次元的であり、海岸線方向に端部を有する。そのため、リーフ端部では波の屈折・回折等の効果が現れ、中心部に比較してより高波浪を受ける可能性がある。ただし、人工リーフの平面的な検討は現在ほとんど行われておらず、実際にどのような現象が発生しているのか良くわかっていないのが現状である。

ここでは、リーフ端部に近い観測点であるSt.7とSt.8およびそれら平行な位置にある中央部のSt.3との比較から海岸線方向のリーフ天端上に発生する波浪特性の違いを検討する。

#### a) 波高変化特性

図-10は、横軸に中央部(St.3)の有義波高値、縦軸に

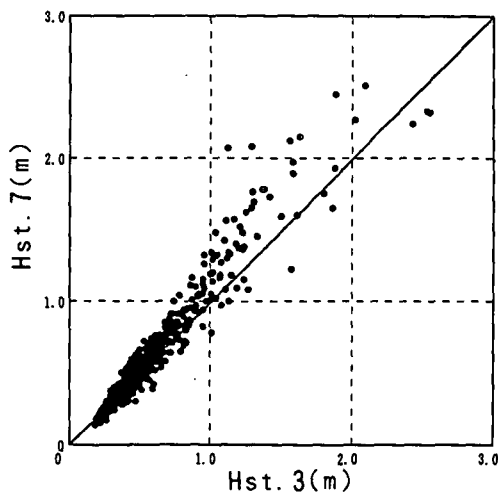


図-10 リーフ中央部と端部の波高値の相関

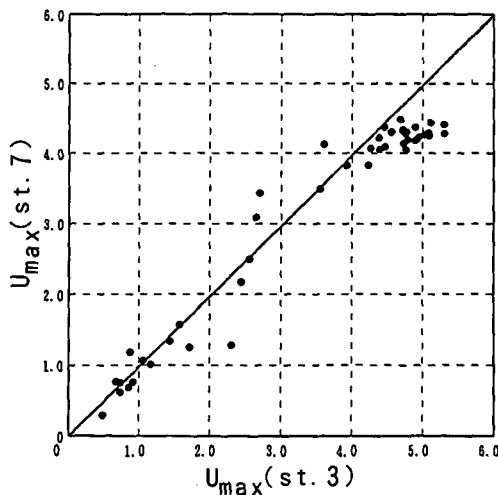


図-11 リーフ中央部と端部の岸向最大流速の相関

表-2 リーフ中央および端部の波向別波高出現頻度

| (St.3)     |             |             |   | (St.7)     |             |          |     | (St.8)     |             |            |     |
|------------|-------------|-------------|---|------------|-------------|----------|-----|------------|-------------|------------|-----|
| 波高<br>波高 m | SE          | SSE         | S | 波高<br>波高 m | SE          | SSE      | S   | 波高<br>波高 m | SE          | SSE        | S   |
| ~<br>0.24  |             |             |   | ~<br>0.24  |             |          |     | ~<br>0.24  |             |            |     |
| 0.25       | 45          | 83          |   | 0.25       |             | 95       |     | 0.25       |             | 105        | 8   |
| ~<br>0.49  | 11.6        | 21.4        |   | ~<br>0.49  |             | 24.5     |     | ~<br>0.49  |             | 27.1       | 2.1 |
| 0.50       | 89          | 79          |   | 0.50       |             | 176      | 3   | 0.50       |             | 140        | 24  |
| ~<br>0.74  | 22.9        | 20.4        |   | ~<br>0.74  |             | 45.4     | 0.8 | ~<br>0.74  |             | 36.1       | 6.2 |
| 0.75       | 32          | 18          |   | 0.75       |             | 51       |     | 0.75       |             | 39         | 10  |
| ~<br>0.99  | 8.2         | 4.6         |   | ~<br>0.99  |             | 13.1     |     | ~<br>0.99  |             | 10.1       | 2.6 |
| 1.00       | 17          | 8           |   | 1.00       |             | 27       |     | 1.00       |             | 18         | 5   |
| ~<br>1.24  | 4.4         | 2.1         |   | ~<br>1.24  |             | 7.0      |     | ~<br>1.24  |             | 4.6        | 1.3 |
| 1.25       | 5           | 3           |   | 1.25       |             | 16       |     | 1.25       |             | 9          | 1   |
| ~<br>1.49  | 1.3         | 0.8         |   | ~<br>1.49  |             | 4.1      |     | ~<br>1.49  |             | 2.3        | 0.3 |
| 1.50       | 6           |             |   | 1.50       |             | 9        |     | 1.50       |             | 7          | 5   |
| ~<br>1.74  | 1.5         |             |   | ~<br>1.74  |             | 2.3      |     | ~<br>1.74  |             | 1.8        | 1.3 |
| 1.75       | 1           |             |   | 1.75       |             | 4        |     | 1.75       |             | 1          | 1   |
| ~<br>1.99  | 0.3         |             |   | ~<br>1.99  |             | 1.0      |     | ~<br>1.99  |             | 0.3        | 0.3 |
| 2.00       | 1           | 1           |   | 2.00       |             | 4        |     | 2.00       |             | 1          | 1   |
| ~<br>2.24  | 0.3         | 0.3         |   | ~<br>2.24  |             | 1.0      |     | ~<br>2.24  |             | 0.3        | 0.3 |
| 2.25       |             |             |   | 2.25       |             | 2        |     | 2.25       |             |            |     |
| ~<br>2.49  |             |             |   | ~<br>2.49  |             | 0.5      |     | ~<br>2.49  |             |            |     |
| 2.50       |             |             |   | 2.50       |             | 1        |     | 2.50       |             |            |     |
|            |             |             |   |            |             | 0.3      |     |            |             |            |     |
| 計          | 196<br>50.5 | 192<br>49.5 |   | 計          | 385<br>99.2 | 3<br>0.8 |     | 計          | 320<br>82.5 | 55<br>14.2 |     |

端部 (St.7) の有義波高値を示したもので、図から 1 m 程度までは両者の相関はかなり高いが、波高値が高くなるに従ってリーフ端部付近が中央部より高くなる傾向が認められる。その関係は、ばらつきはあるものの最大で中央部の 5 割増程度となっている。

#### b) 流速値と波向の特性

図-11 は、St.3 と St.7 の岸向き最大流速の比較をそれぞれ行ったものである。これらの図の結果を見ると両者は高い相関を示し、波高値の比較で見られた高波浪時の端部付近での波高増大効果のような傾向は認められない。この原因は、中央部と端部における波向が異なっているためと考えられる。表-2 は各地点の波向別の波高頻度分布をリーフ中央部 (St.3)、端部 (St.7, St.8) について示したものである。図中の数値は、上段が出現頻度で下段が出現率 (%) である。表-2 から明らかなように、中央部の波向が SE から SSE であるのに対し、端部では St.3 と水平な位置にある St.7 は SSE が卓越し、岸側に設置されている St.8 では SSE から S となっている。このことは、端部の波向は局所的な屈折により斜め入射となることを示している。

## 4. 結 論

本研究から得られた結論は、以下の通りである。

① 岸向き最大流速は、天端法肩付近で最大となり、線形長波理論式の 2 から 3 倍程度になる。そして、リーフ天端上を進行するに従って線形長波理論とほぼ同程度の流速値に変化する。

② リーフ上の無次元岸向き最大流速に関する観測結果と経験式 (宇多ら, 1990) との関係は、沖波換算値をそのまま用いると大きく異なる。しかし、観測有義波高の沖波換算値を 1.8 倍したものをを用いることにより、経験式の現地適応がある程度可能となることが示された。

③ リーフ端部では沖から入射する波浪と沿岸方向から急激に屈折してくる波浪との重合によって中央部より大きな波高値を示している。この傾向は、高波浪時により顕著に表れ、最大で中央部の波高値に対して 5 割程度大きくなる。このことは、リーフ端部における被災が多い原因となっていると考えられ、端部における被覆ブロックの重量算定についても別に考慮する必要があることを示している。

④ リーフ上での波高は大きく変化し、碎波が発生するような高波浪の場合、碎波減衰と透水層の抵抗とによって最大で 6 割程度減衰する。波高の減衰特性は、碎波形式と碎波位置に関係しリーフの沖側法肩部で碎波する場合の減衰が最も大きい。

謝辞：本研究は、神奈川県小田原土木事務所の協力の下で行われたものである。ここに謝意を表する。また、観測および解析を実施するに当たって東亜建設工業小田原作業所の田中所長以下全所員の協力を得たことに謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 浅川 勉・佐藤弘和・口ノ町 誠・野口正昭 (1992): 人工リーフ被覆材の安定性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 656-660.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第 2696 号, 71 p.
- 宇多高明・小俣 篤・斉藤友信 (1990): 人工リーフ被覆材の所要重量算定法, 土木研究所資料, 第 2893 号, 48 p.
- 建設省河川局海岸課監修 (1992): 人工リーフの設計の手引き, (社)全国海岸協会, 94 p.
- 水谷法美・岩田好一郎・Teofilo M. Rufin Jr.・戸塚奈津子・倉田克彦 (1994): 幅広潜堤の被覆捨石の安定重量の算定法に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 781-785.
- 渡辺増美・河島宏治・佐藤公己・喜岡 渉 (1993): 移動限界波高および移動限界流速による潜堤被覆材の安定性評価, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 786-790.