

実海域における新型人工リーフの水理特性

福本 正* ・土橋吉輝**・高村浩彰***
二木 涉****・安田孝志*****

2002 年に手取川右岸の石川海岸美川 2 工区で採用されたトラップ式ダブルリーフは、2 つのステップで形成された複断面構造によって反射率を抑えながら所定の消波性能を確保する新しい人工リーフである。小断面で従来型人工リーフと同等の消波性能を有し、セットアップ抑制効果が高いことが水理模型実験結果等で得られており、これらの水理特性が実海域でも確保できることを検証するために冬期風浪時の追跡調査を実施した。その結果、要求された消波性能を確保するとともに、セットアップ量が小さいことも明確になった。また、前面の洗掘が少なく、かつ背後地は堆積傾向にあることが施工前後の深浅測量結果から確認された。

1. はじめに

石川海岸美川 2 工区（以降、美川海岸）で、初めて施工されたトラップ式ダブルリーフは、海岸空間の総合的管理・保全という社会的ニーズに対応すべく開発された新型人工リーフである（安田，2000；東川，2002）。

この人工リーフの特徴は、2 つのステップを持つ複断面構造によって反射率を抑えながら砕波の規模を増大させると同時に、スリット構造を有する 2 段目リーフで砕波による水塊を捕捉することで、相反する事象である高消波とセットアップ抑制の両立が可能なことである。また、景観への配慮といった従来型人工リーフの利点を引継ぎ、海浜保全に不可欠な低反射かつ高消波でセットアップ低減などの特長に加え、魚礁・魚巢機能を持つなど海浜環境の保全・回復に優れた機能を有している（東川・安田，2003）。さらに、従来型人工リーフに比べ天端幅を短縮でき、2 段目リーフの主体である RC 中空構造物のプレキャスト化によって、コスト縮減と工期短縮を図れることが大きな特色となっている（高村・服部，2003）。

これらの有益な特徴が、新型人工リーフの検討を進めていた金沢河川国道事務所に注目され、なぎさリフレッシュ事業の候補となり、2002 年度に試験施工が行われた。ここでは、2002 年度冬期に行われた追跡調査によって、トラップ式ダブルリーフがこれまで実験室で実証された優れた消波性能とセットアップ抑制機能（安田ら，1996，1997，1998）に加えて堆砂機能も有していることが確認されたので、その結果を報告する。

2. 追跡調査の概要

（1）調査背景

図-1 に示すように美川海岸で採用されたトラップ式ダブルリーフの天端幅は約 24.0 m で既設の従来型人工リーフ（天端幅 50.0 m）と同等の消波性能を確保できることが設計時の移動床模型実験で確認されていた。しかしながら、模型実験を含めた机上検討では高い性能を確保できる各種構造物が、実海域では多様な海象条件に阻まれて要求性能を満足できない場合も数多く存在する。したがって、実海域でも要求性能が確保できるか否かが大きな課題であった。そこで、トラップ式ダブルリーフの水理特性検証のために追跡調査を実施した。

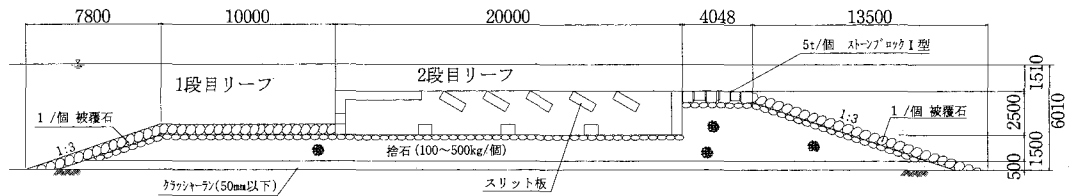
（2）調査方法

図-2 に示す St.1 から St.3 に海象計を設置した。人工リーフに作用する沖波入射波を計測する St.1 は、離岸距離約 1500 m、水深約 20.0 m の地点である。砕波の影響が少なく精度の高い観測を要求されることから、超音波式および水圧式波高計を併用する海象計（DL-2：協和商工社製）を用いた。トラップ式ダブルリーフおよび既設の従来型人工リーフの透過波と流況変化を計測し、両者の性能比較を行うための St.2 および St.3 は、それぞれの構造物の背後水深約 4.5 m の地点である。これらの地点には水圧式波高計を備えた海象計（Wave Hunter 94：アイオーテック社製）を設置した。

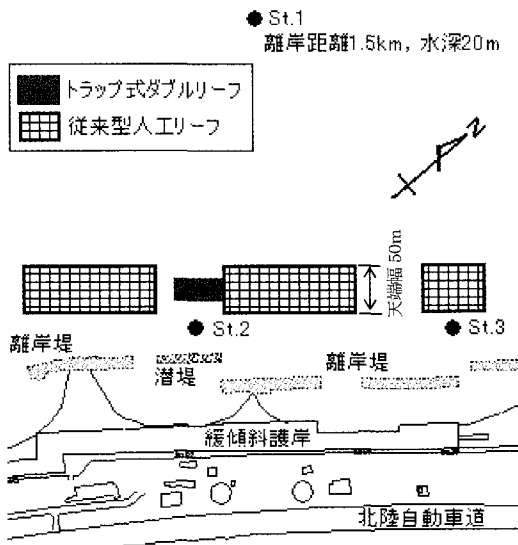
（3）調査期間

美川海岸におけるトラップ式ダブルリーフ設計時の外力条件は冬期風浪であった。そこで、対象外力を把握するため、平成 15 年 1 月 23 日 14 時から 2 月 25 日 11 時までの約一ヶ月間に波浪観測を実施した。データはサンプリング間隔 0.5 秒で、毎正時前後 10 分の計 20 分間（2400 データ）を記録した。なお、観測期間中はすべての海象計を同期させた。

* 博(工) 西松建設(株)技術研究所
** 正会員 西松建設(株)技術研究所
*** 正会員 博(工) 西松建設(株)技術研究所
**** 国交省北陸地整金沢河川国道事務所
***** 正会員 工 博 岐阜大学教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻



図一 美川海岸で採用されたトラップ式ダブルリーフの断面 (単位: mm)



図二 石川海岸美川2工区追跡調査地点

3. 追跡調査結果

(1) 沖波および透過波の特性

図-3にSt.1で観測された沖波の有義波高 H_0 および有義周期 T_0 を示す。1月28日4時から1月30日15時までは H_0 が4.0mを超え、2月20日12時から15時までは H_0 が3.5mを超えていた。 H_0 が2.0~3.0mの時 T_0 は7.0~8.0s, 4.0m以上の時 T_0 は10.0s程度となっている。設計対象の冬期エネルギー平均波および年数回来襲波が精度よく観測されている。

なお、観測期間において北西の波向きが卓越しており、各人工リーフに対してほぼ直角に作用していたことがSt.1の波向別の波高頻度分布から確認されている。

図-4にSt.2の有義波高 H_2 および有義周期 T_2 の観測結果を示す。 H_2 が1.0mを超える期間は少なく、 H_0 が4.0mを超えた期間においても、 H_2 が1.5mを超えていない。観測期間中の平均伝達率は0.26となり、74%以上波高が減衰していることが確認された。

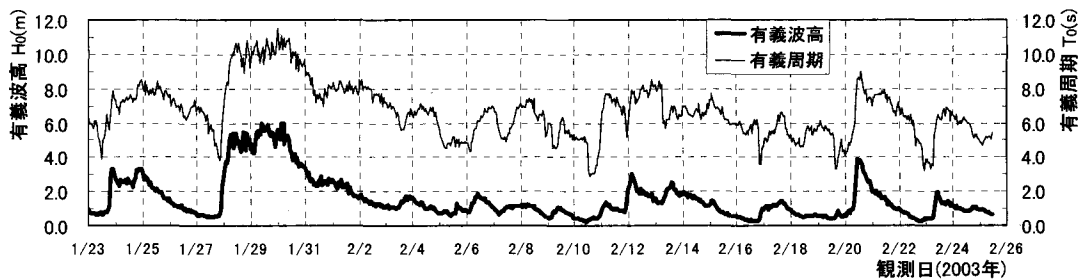


図-3 St.1における有義波高および有義周期の経時変化

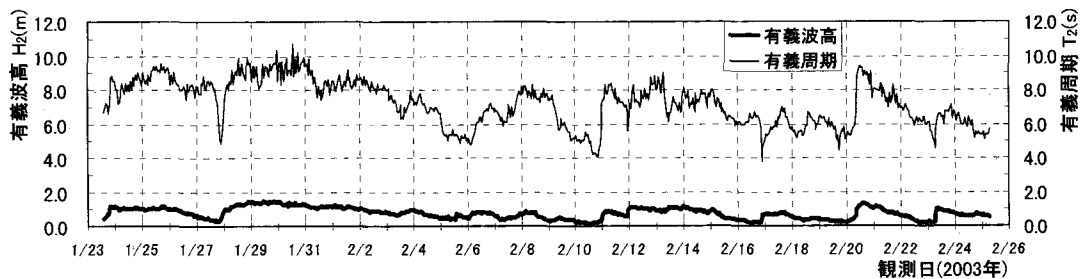


図-4 St.2における有義波高および有義周期の経時変化

(2) 要求性能の確認

消波性能を確認するために、St.1の有義波高 H_0 と St.2の有義波高 H_2 を比較した結果を図-5に示す。縦軸には H_2 を、横軸には H_0 を取っている。また、確認のために沖波波長 L_0 (m) ごとに整理している。 H_0 が1.0 m 以下の場合約30%、 H_0 が2.0 m 程度の場合は約50% H_0 が減衰した。 H_0 が4.0 m 以上の場合、 H_2 は1.5 m 以下となり60%以上 H_0 が減衰した。平均的には、伝達率 $K_t (= H_2/H_0)$ は0.35より小さくなる事が分かる。

一方、目標伝達率としての要求は、年数回来襲波 (波高4.0 m, 周期10.0 s) で伝達率0.36 (透過波高1.44 m)、冬期エネルギー平均波 (波高2.5 m, 周期7.0 s) で伝達率0.44 (透過波高1.10 m) であった。図中の×印がこれらの値を示したものである。冬期エネルギー平均波帯の観測結果は多少のパラツキがあるものの、設計時の目標伝達率とほぼ同等の値となり、要求性能をおおむね確保していることが分かる。年数回来襲波帯の観測結果は、全て要求性能を上回っていることが確認される。

観測結果をより明確に評価するため、St.1において冬期エネルギー平均波帯を有義波高2.0~3.0 m, 有義周期6.5~7.5 sの範囲、年数回来襲波帯を有義波高3.5~4.5 m, 有義周期9.5~10.5 sの範囲と設定し観測値を整理した。これらの範囲でSt.1の波浪と時間的に対応するSt.2の波浪を抽出し平均伝達率を求めた。この結果を表-1に示す。この表から図-5と同様に要求性能を満たすことが再確認される。

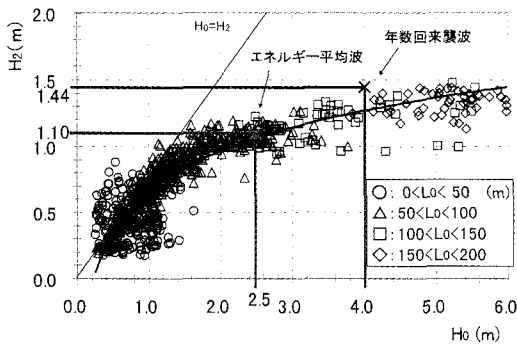


図-5 透過波高と沖波波高の関係

表-1 要求性能と観測値の伝達率比較

		波高 (m)	周期 (s)	伝達率
年数回来襲波	要求	4.0	10.0	0.36
	観測	3.5-4.5	9.5-10.5	0.32
エネルギー平均波	要求	2.5	7.0	0.44
	観測	2.0-3.0	6.5-7.5	0.42

(3) 消波性能の比較

トラップ式ダブルリーフと従来型人工リーフの透過波高を比較したものが図-6である。ここで、縦軸はSt.2の H_2 をSt.3の H_3 で除した結果である。図中の値が $H_2/H_3 < 1.0$ であればトラップ式ダブルリーフの消波性能が高いことになる。 H_0 が1.0 m 以下では、 $H_2/H_3 < 1.0$ の分布が多く、 H_0 が1.0~3.0 mの間では、 $H_2/H_3 < 1.0$ となる傾向が確認される。冬期エネルギー平均波帯 ($H_0 = 2.5$ m) では、両人工リーフとも同程度の消波機能を有している。 H_0 が3.0 m 以上の高波浪時 (沖波波長 L_0 が長い場合)、 $H_2/H_3 < 1.0$ の分布が再び多くなる。観測結果全体の約60%が $H_2/H_3 < 1.0$ となっている。

以上のことから、トラップ式ダブルリーフは従来型人工リーフに比べ、小断面で設計されているにもかかわらず同等の消波性能を有することが検証された。図より両者の消波性能はほぼ同等であることが確認される。

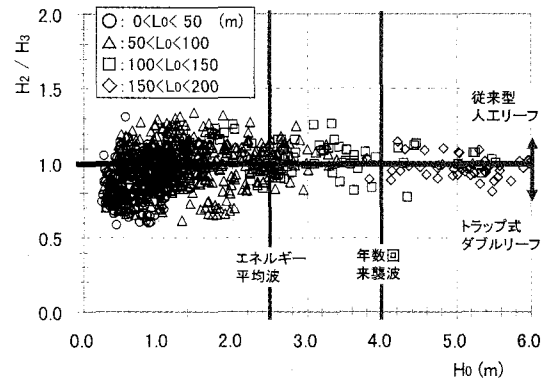


図-6 消波性能比較

(4) セットアップの評価

a) 系時変化と解析 (江頭ら, 1985; 加藤ら, 1989)
St.2の水位変動を次式のように仮定する。

$$\eta_{\text{prot}} = \eta_{\text{atom}} + \eta_{\text{wind}} + \eta_{\text{wave}} + \eta_{\text{tide}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η_{prot} はSt.2の水位の実測値、 η_{atom} は気圧変動による水位上昇量、 η_{wind} は風の吹き寄せによる水位上昇量、 η_{wave} は波浪による水位上昇量、 η_{tide} は潮汐変動による水位上昇量である。

一方、St.1は離岸距離1500.0 m, 水深約20.0 mであるため、風による吹き寄せや波浪による水位変動は生じていないと仮定できる。また、気圧や潮汐のような長周期の変動が水位上昇に及ぼす影響は、観測海域においては同様であると仮定できる。美川海岸での風速計測が実施されていないため、解析には徳光の記録を用いた。

徳光の計測地点は、美川海岸から北東に約5 km離れた地点であるが、風速場としての差が無いと仮定した。

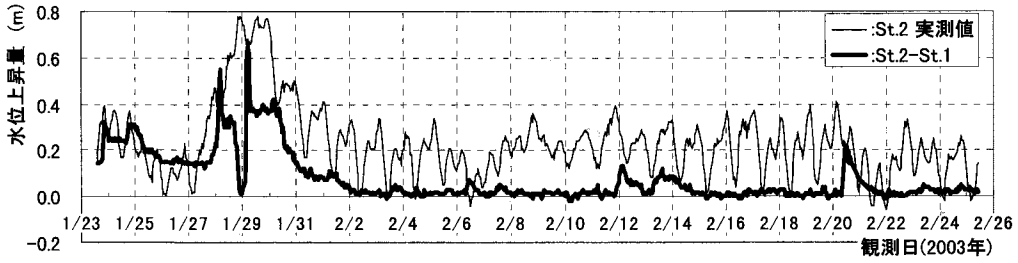


図-7 St. 2 における水位の経時変化

これらの仮定に従い、以下のような手順で St. 2 における各成分を分離した。

- ① 気圧成分 η_{atm} 、および潮汐成分 η_{tide} は St. 1 の値を St. 2 から差し引くことで取り除く。
- ② 徳光風速値と H_0 を用いて重回帰分析を行う。
- ③ 波浪成分 η_{wave} と風成分 η_{wind} を分離する。

図-7 に St. 2 の水位の経時変化（実測値）と①の処理を施した結果を示す。1月27日までの変動、1月28日から2月1日までの変動、2月2日以降の変動がそれぞれ異なっていることが分かる。1月28日以前の観測値は、St. 1 の変動の影響を受けているため、高波浪でないにもかかわらず水位が高くなっている。太平洋側のような長周期的な水位変動（柳嶋ら、1989）が美川海岸近傍では確認されておらず、現段階では St. 1 での長周期変動の原因（計測器の沈下等観測施設に問題ないことは調査済みである）を特定するに至っていない。1月28日から1月31日までの4日間は低気圧由来の高波浪によるものであり、2月2日以降は比較的安定している。そこで、水位基準については、波浪、風および潮位差といった外的要因が小さい2月6日前後とした。また、以降の解析では長周期変動の影響を含んだ1月28日以前の観測値は考慮しない。

b) 重回帰分析結果

図-8 は、上述の①および②の解析結果から算定したセットアップ量と、St. 2 のセットアップ量（気圧と潮汐の変動は削除）を比較した結果である。セットアップ量が大きくなるにつれて（0.3 m 以上）、バラツキが大きくなるものの、解析結果は観測結果をよく再現している。

そこで、③として②の解析結果から得られた風速に関する値を、①の結果から差し引くことで、 η_{wave} の値を得る。実際には、St. 2 のセットアップに対する η_{wind} の寄与率は非常に小さく、結果はほとんど変わらない。したがって、St. 2 の記録から St. 1 の記録を差し引くだけで、St. 2 の η_{wave} を評価できるものと判断される。

c) 水理模型実験結果との比較

縦軸に得られた η_{wave} を H_0 で除して無次元化した値を、横軸に相対天端水深 R/H_0 を取った結果が図-9 であ

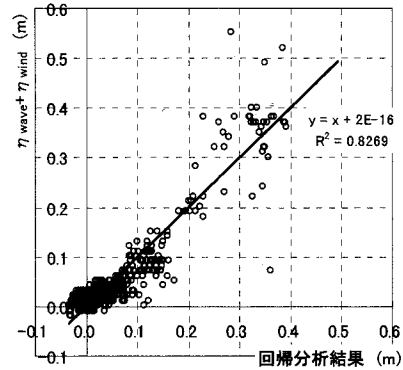
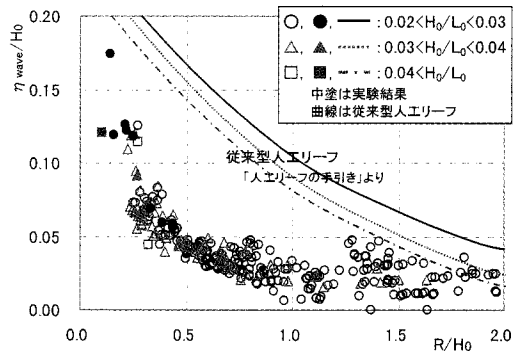


図-8 観測値および解析値のセットアップ量の比較

図-9 η_{wave}/H_0 と R/H_0 の関係（全国海岸協会，2004）

る。図中の中途は設計時の2次元水理模型実験から得られた結果である。 η_{wave}/H_0 と R/H_0 の相関が高いことが分かる。また、観測は3次元性の高い結果であるが、実験結果とほぼ同様な傾向となっている。このことから実海域でのトラップ式ダブルリーフのセットアップ抑制効果は、実験結果を用いて評価できるものと判断される。

d) 従来型人工リーフとの比較

St. 3 における水位の観測記録に対して St. 2 と同様な解析処理を行った。縦軸に St. 2 の無次元セットアップ量を、横軸に St. 3 の無次元セットアップ量を取り整理した結果が図-10 である。観測海域は前出の図-2 に示すよ

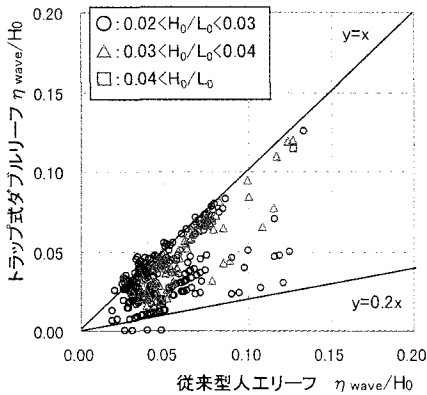


図-10 St. 2 および St. 3 の水位比較

うに、

- ① St. 2 は隣接する既設の従来型人工リーフの影響を受けること。
- ② St. 3 は対象とする従来型人工リーフの延長が短いため、既設の従来型人工リーフによるセットアップが生じ難いこと。

などの地形的な影響が大きい。このため、両者に明瞭な差が見られない場合もある。しかしながら、St. 2 のセットアップ量は St. 3 の値を超えることはなく、50%程度抑えられていることが確認される。

(5) 堆砂性能

施工前(2002年5月23日)および冬期風浪後(2003年3月15日)に実施した深浅測量の結果を図-11に示す。汀線近傍から法線方向に各構造物を縦断するように計測した結果であり、縦軸はT.P.基準の標高を、横軸は岸側基準点からの距離を示している。Line-1およびLine-2の比較から、従来型人工リーフ前面付近は、冬期風浪によって大きく洗掘されているものの、トラップ式ダブルリーフの前面は洗掘範囲が狭いことが確認できる。また、トラップ式ダブルリーフの施工によって、背面は堆積傾向にあり、T.P.-4.0mを確保している。これに対して従来型人工リーフの背後では、季節的な変動が小さくT.P.-5.0m程度で安定している。

これらのことから、トラップ式ダブルリーフの特徴である低反射とセットアップの抑制効果が海浜の安定に対しても有効に働くものと推察される。

4. おわりに

今回の追跡調査の結果から、トラップ式ダブルリーフ

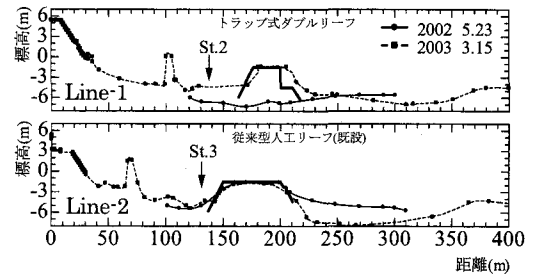


図-11 深浅測量結果

の消波性能、セットアップ抑制効果および堆砂性能などの特性が検証され、実海域でも設計時の要求性能を十分確保できることが明らかとなった。

現在、トラップ式ダブルリーフ周辺の生物調査データが蓄積されつつある。スリット付きRC中空構造物を備えていることによって、豊かな生物生息の場を創出する施設であることが今後明確になると期待されている。

参考文献

- 江頭和彦・福田 功・岸良安治・西村達郎 (1985): リーフによる波浪変形の現地観測, 第32回海工論文集, pp. 90-94.
- 加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸 (1989): 波による汀線付近の水位上昇量, 港研報告, 第28巻, 第1号, 269 p.
- 社団法人全国海岸協会 (2004): 人工リーフの設計の手引き (改訂版), pp. 18-19.
- 高村浩彰・服部信雄 (2003): 海浜の保全と回復を目指す新型人工リーフの施工, 国土交通省近畿地方整備局, 平成15年度管内技術研究発表会論文集, 技術開発部門I-24, 4 p.
- 東川 敏・安田孝志 (2003): 新型人工リーフ工法の開発と施工, 土木学会誌, Vol. 88, No. 2, pp. 37-40.
- 東川 敏 (2002): 新型人工リーフの施工, 海岸, Vol. 42, No. 2, pp. 70-72.
- 安田孝志・陸田秀実・水谷夏樹・大屋敦嗣・多田彰秀・福本 正 (1996): トラップ式ダブルリーフの消波機能(1), 海工論文集, 第43巻, pp. 786-790.
- 安田孝志・陸田秀実・大屋敦嗣・多田彰秀・福本 正 (1997): トラップ式ダブルリーフの消波機能およびセットアップの抑制効果について, 海工論文集, 第44巻, pp. 761-765.
- 安田孝志・陸田秀実・折坂瑞代・板野誠司・多田彰秀・福本 正 (1998): トラップ式ダブルリーフの不規則波に対する消波・セットアップ抑制効果, 海工論文集, 第45巻, pp. 706-710.
- 安田孝志 (2000): トラップ式ダブルリーフによる自然の営力を生かした海浜環境保全に関する研究, (財)河川環境管理財団, 第7回河川整備基金助成事業成果発表会報告書, pp. 28-38.
- 柳嶋慎一・加藤一正・磯上知良・村上裕幸 (1989): 波による汀線付近の水位上昇量に関する現地調査, 海工論文集, 第36巻, pp. 80-84.