

リーフ上における不規則波の変形と波高出現分布特性に関する実験的研究

関本 恒浩¹・中嶋 さやか²

¹フェロー 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2711 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Tsunehiro.Sekimoto@jmail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2711 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Sayaka.Nakajima@mail.penta-ocean.co.jp

関本ら(2011)による急勾配斜面を有するリーフ地形に対する水理模型実験データを用い、リーフ上における不規則波の変形と wave set-up について解析を行った。本研究では、波高の出現確率特性について調べるとともに最高波高、有義波高、rms波高等の波浪統計量について詳細に調べた。波高分布は、リーフ上の波の分裂の影響が見られるものの、砕波により失われる波高の大きな部分の確率が残存する確率に再配分されることが確認した。また、不規則波の統計量は最高波高を除き、比較的安定していることを確認した。さらに、リーフ上における波の再生条件を検討するとともに、リーフ上の最高波高は、孤立波の砕波限界波高によって評価できることも確認した。

Key Words : wave set-up, wave deformation, wave energy, wave breaking, reef with steep slope

1. はじめに

リーフ周辺は複雑かつ急峻な地形と非常に浅いリーフフラットがあり、複雑な波浪場、流れ場を形成する。特に設計波クラスの大きな波浪が来襲すると、リーフエッジが干出するなど非線形性の強い波浪場となっていることが知られている。

リーフ地形における不規則波の変形については、最近では数値解析を中心として研究が進められている¹⁾²⁾。関本ら³⁾はエネルギー平衡方程式を、平山・平石²⁾はブシネスク方程式を用いてリーフ上の不規則波の変形を検討している。また、本多・間瀬⁴⁾はリーフエッジが干出するような場合にも解析が可能なモデルとしてKP方程式を用いた周波数領域の解析法を新たに提案し、高山ら⁴⁾の実験結果や現地観測結果との比較により計算精度の高い手法であることを明らかにしている。一方、リーフ上における不規則波の変形に関する実験的研究としては、高山ら⁴⁾、磯部ら⁵⁾、津嘉山ら⁶⁾、池谷ら⁷⁾によって実施されている。これらの研究の多くは、リーフ地形における砕波変形について、パワースペクトルの変化特性、有義波高の砕波変形特性と wave set-up の評価が行われているものの、設計で必要となる最高波高の特性や波高の出現確率分布特性等については、十分に議論されていないのが現状である。

そこで本研究は、急勾配斜面に接続する水深の浅いリーフ地形を対象として、設計波クラスの大きな波浪が来襲した場合の不規則波の変形に関する実験結果にもとづき、波高の出現分布の特性や波浪統計量の空間分布などについて詳細に検討を行った。

2. 水理模型実験

(1) 水理模型実験

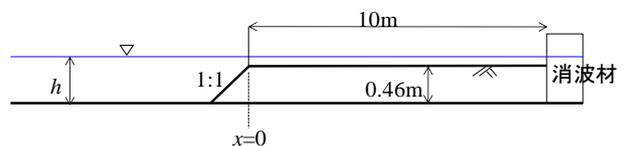


図-1 解析対象としたリーフ模型地形

表-1 実験条件

Case番号	斜面勾配	水深 h (m)	波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)
L3	1:1	0.50 (LWL)	0.12	1.4
L4				1.6
L5				1.8
H3				1.4
H4				1.6
H5	0.53 (HWL)	1.8		

水理模型実験は、関本ら¹⁾によって実施された2次元断面水槽実験であり、長さ10mのリーフフラットへ続く斜面勾配が1:1の条件のデータを用いた。実験に用いた地形を図-1に示す。実験において、容量式波高計24本を用いて水位変動を計測した。容量式波高計は、沖側一様水深部に3地点、斜面上に3地点、リーフ上に18地点とした。また、実験条件は表-1に示すように潮位2種類、波高1種類、周期3種類の6ケースである。作用させた不規則波は、Bretschneider—光易型スペクトルを有するものであり、約8分30秒間の水位変動データを取得した。すなわち、各ケース約300~350波の波浪データを計測し、波浪統計解析に供した。

(2) データ解析

砕波をともなう不規則波による波浪変形実験では、wave set-upと長周期の水面変動が発生する。そこでここでは、5s以上の長周期成分を通過する数値ローパスフィルターを用い移動平均によって長周期波成分を抽出した。本研究で用いた数値フィルターは水口⁹⁾と同様の性質を有するものである。通常波浪成分の水位変動については、抽出した長周期波成分を除いた平均0の水位変動時系列として計測した全水位変動から分離した。個々波の波高は、この水位変動時系列からゼロダウクロス法によって算出した。その結果をもとに波高の出現確率密度関数および代表波高の空間変化を求めた。また、数値フィルターによって抽出した長周期成分に対し解析の対象とした全データの平均値としてwave set-upを算出した。長周期水面変動の平均値と標準偏差の空間分布も求め詳細に検討を行った。

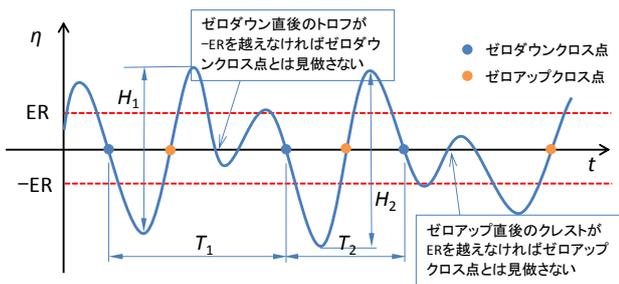


図-2 ゼロダウクロス法による最小振幅の定義

なお、ゼロダウクロス法を適用する場合、水面の乱れなどを波高として定義しないために、ある値より小さい波高の波をととしてとカウントしないことが多い。本実験では、リーフ上の波の再生域では波の分裂が見られたため、波と定義しない最小の水位振幅値±ERを水位のrms値 η_{rms} の5%と30%の2種類について分布を調べた。なお、本研究において採用したゼロダウクロス法における最小振幅値±ERと個々波の関係についての定義を図-2に示す。また、ここで示したゼロダウクロス法にもとづき、個々波を定義した例を図-3に示す。

3. データ解析結果

(1) 波高の出現分布の空間特性

図-3および図-4は、波高の出現分布として確率密度関数の空間分布の例を示したものである。図-3は有義波高12cm、有義波周期1.8s、HWLの結果であり、図-4は同じくLWLの結果である。また、図ではゼロダウクロス法による最小水位振幅ERが0.05 η_{rms} と0.3 η_{rms} の場合についてそれぞれ示している。図は沖から岸に向かう空間変形を示しており、図中には最高波高 H_{max} 、有義波高 $H_{1/3}$ 、平均波高 H_{m0} も併せて示している。これらの図から、まず沖合 $x = -1.25m$ の位置において、波浪統計量がもっとも大きくなるとともに、波高の確率密度関数の分布幅が広がることがわかる。すなわち、この付近に砕波点があるものと言える。関本・中嶋⁹⁾による同じ地形を用いた規則波実験の解析結果では、砕波点はほぼリーフエッジに固定されていることが報告されており、不規則波の方が規則波に比べて早く砕波が開始することが確認できた。 $x = -1.25m$ の位置よりも岸側では、砕波に伴い沖側の波高の大きな領域の出現頻度が減少し、急激に分布が狭帯化していることがわかる。一方、波の再生域では波高の小さい領域の出現頻度が増加していることがわかる。これは先に述べたように波の分裂の効果である。波の再生域では波高の小さい部分の出現頻度の増加がみられるものの、砕波後は波高の出現分布形状が概ね保存されていることから、砕波によって失われた波高の高い領域が、砕波の影響のない部分に分布として再配分されたと見る

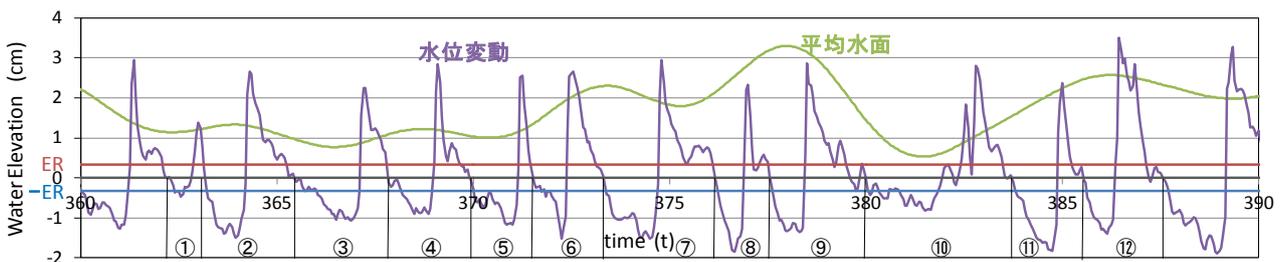


図-3 ゼロダウクロス法による波の定義の例 (CASE H3)

ことができる。なお、最小波高のとり方により分布の違いは見られるものの、その差はそれほど大きくないことがわかる。

次に、図-4と図-5を比較すると、リーフ上である程度

砕波が進行した後では、両者に波浪統計量の違いはあまり見られないものの、水深の大きい図-4の方が、水深の浅い図-5に比べて波の出現分布幅が広いことがわかる。この中には波の分裂の影響が含まれると考えられるもの

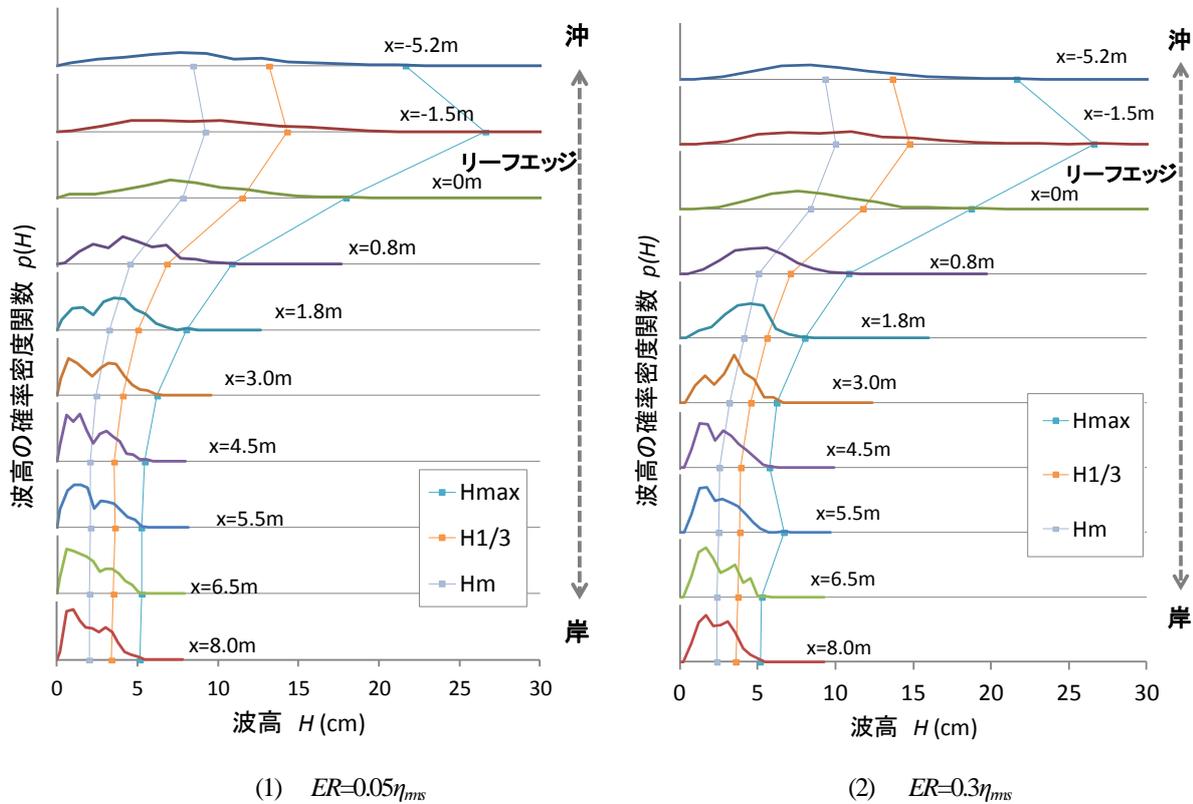


図-4 確率密度関数の空間分布の例 (CASE H5)

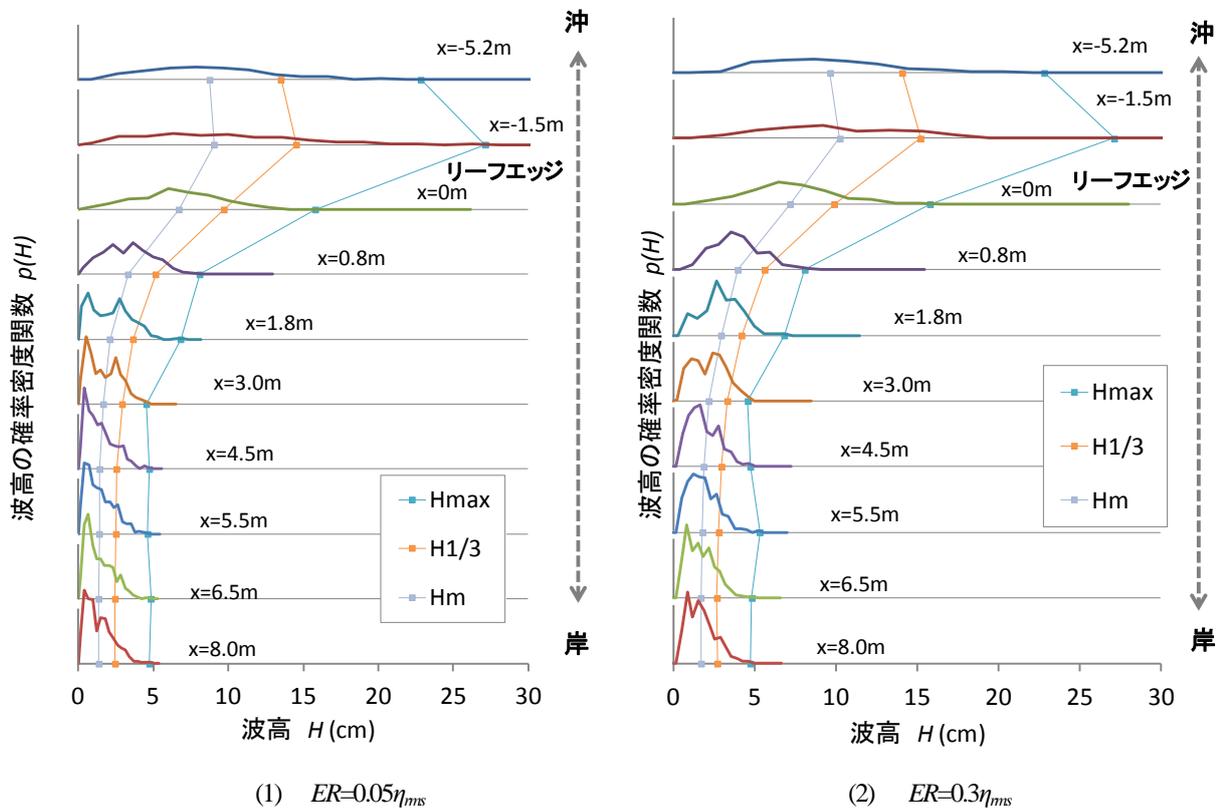
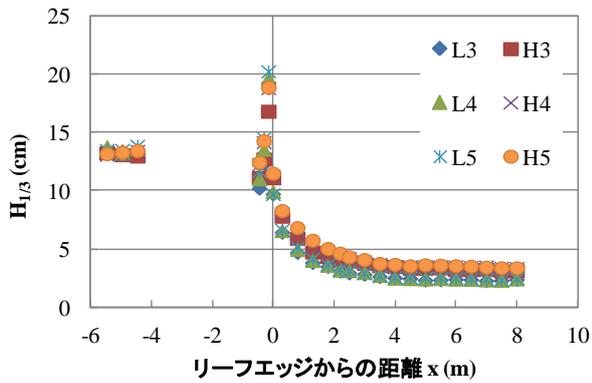
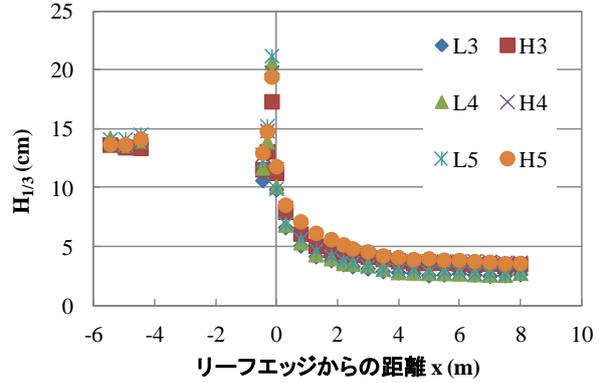


図-5 確率密度関数の空間分布の例 (CASE L5)



(1) $ER=0.05\eta_{rms}$



(2) $ER=0.3\eta_{rms}$

図-6 有義波高の空間分布

の、水深の浅い方が碎波の影響を受ける波の頻度が多いことに起因する結果であると考えられる。

(2) 有義波高の分布特性

図-6は有義波高の出現特性を示したものである。ここでもゼロダウクロス法を実施する際の最小波高のとり方を変えている。潮位によって再生する波高値自体は異なるが、碎波後は比較的急速に再生波高に収束することがわかる。また、この図から有義波高は統計量として安定なものであることもわかる。なお、関本・中嶋⁹⁾の規則波実験の結果によれば、規則波の場合リーフエッジから3m程度の地点で碎波が完了したが、不規則波の場合碎波が完了するまでにリーフエッジから4m程度の距離を要した。不規則波の場合、概ね波高の大きい部分から碎波が始まり、波高の小さい部分の碎波が遅れるためである。なお、最小波高のとり方による有義波高の差異は若干あり、最小水位振幅を小さく取った方が有義波高も小さくなるが、その差異は小さいことから、これ以降は最小水位振幅 ER を水位のrms値の5%としてデータ解析を行う。

図-7は有義波高を式(1)で示す全水深 d で無次元化したものの空間分布を示したものである。

$$d = \bar{\eta} + h \tag{1}$$

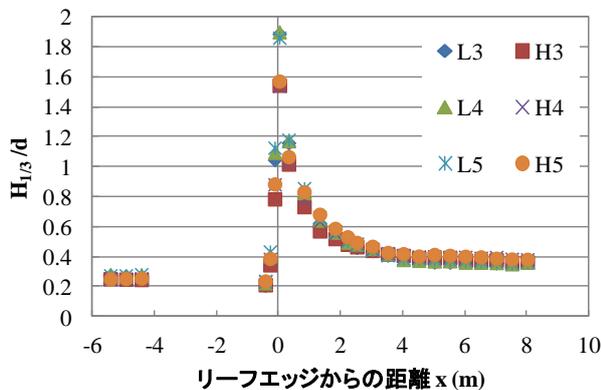


図-7 全水深 d で無次元化した波高 $H_{1/3}$ の空間分布

ここで、 $\bar{\eta}$ はwave set-upを含む長周期変動、 h は静水深である。図-6では、潮位によって再生領域での波高値は変化したがる、このように評価することで潮位の影響なく再生領域における有義波高を評価できることがわかる。

(3) 最高波高の空間分布特性

図-8は、最高波高の空間分布を示したものである。有義波高と同様の分布傾向を示すが、有義波高に比べてそのバラツキは大きい。これは統計的な変動と考えることができるが、関本・中嶋⁹⁾が指摘するようにリーフ上で

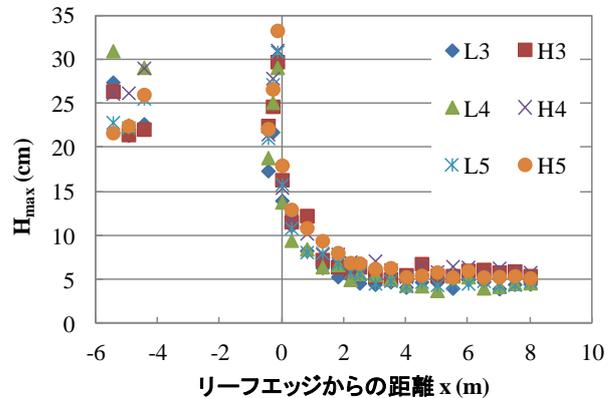


図-8 H_{max} の空間分布

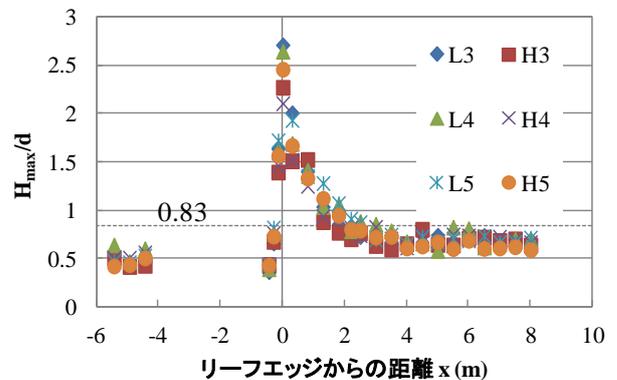


図-9 全水深 d で無次元化した波高 H_{max} の空間分布

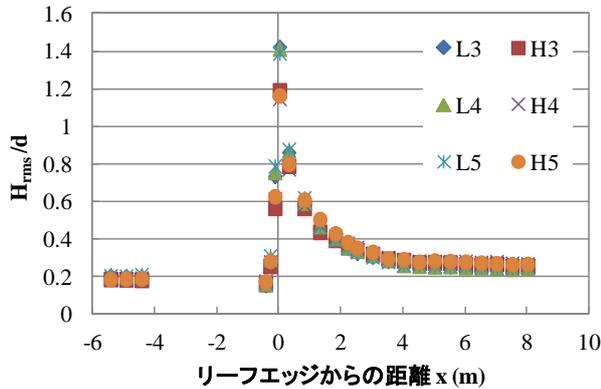


図-10 全水深 d で無次元化した波高 H_{rms} の空間分布

は、再生波高よりも大きい部分は、砕波による大規模な乱れに移行すると考えられるため、最高波高の変動の中には大規模渦の変動成分も含まれるものと考えられる。

図-9は、最高波高を全水深 d で無次元化したものを示したものである。このような整理をすることで有義波高の場合と同様に最高波高も比較的データとしてまとまりが良くなったと考えられる。なお、図中には孤立波の砕波限界を示しているが、最高波高はこれを上限として存在していることがわかる。したがって、リーフ上の最高波高は孤立波の砕波限界とすることで通常の設計に用いることができると考えられる。

(4) rms波高の空間分布特性

rms波高 H_{rms} の空間分布を図-10に示す。ここでも全水深 d で無次元化している。波高の空間分布はかなり安定しており、エネルギーで波高を評価することの妥当性を示すものと考えられる。再生領域における値としては、規則波を対象とした関本・中嶋⁹⁾の研究によれば 0.28 ± 0.1 となっているが、ここでは 0.24 程度となった。これは不規則波の場合、波群の中に砕波しない小さな波も含まれるためと考えられる。

(5) wave set-upの空間分布特性

図-11にwave set-upの空間分布を示す。この図から、

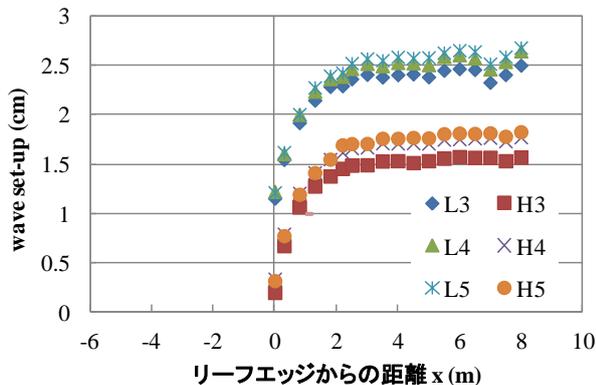


図-11 Wave set-upの空間分布

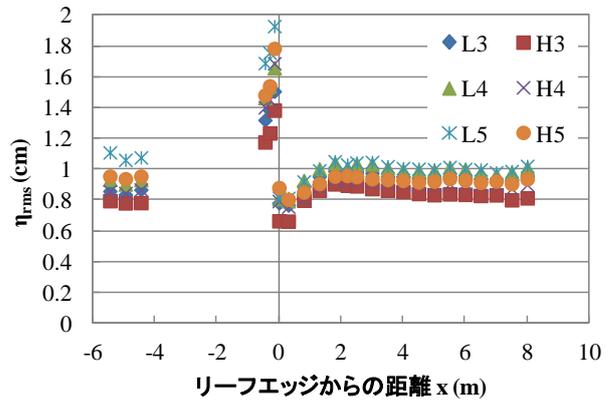


図-12 η_{rms} の空間分布

wave set-upは水深によって大きく変化するものの、周期の効果はあまり顕著でないことがわかる。当然ではあるが、これはリーフ上の水深が非常に浅いためと考えられる。また、周期や水深によらず、wave set-upの上昇についてはリーフから岸側に約3mの位置から先では安定し、頭打ちの状態になっている。これは、先に述べたようにリーフ上では、再生領域の限界波高よりも波高の大きい部分は大規模渦として減衰し、それが周期や水深に依存しないことによるためと考えられる。

(6) 長周期波の空間分布特性

図-12は長周期水位変動のrms値の空間分布を示したものである。これによると砕波が顕著な領域を過ぎると長周期水位変動のrms値は比較的安定する。これは、砕波点がリーフエッジに付近固定され、波の減衰域もリーフエッジ近くに限定されていることによる。リーフ前面で長周期水位変動のrms値が他の地点に比べ2倍近く大きくなっている。これは、長周期波が斜面前面で生成されていることによると考えられる。すなわち、斜面前面で生成された長周期波は斜面において重複波の腹となるためと考えられる。なお、沖側で長周期波のrms値があまり大きくなっていないのは、沖側では発生位置に比べ水深が深いことと岸向きの長周期波とともに生成された沖向きの長周期波と斜面から反射した長周期波が位相干渉するためと考えられる。図-12において斜面付近を詳しく見ると、斜面上で沖側に位置する場所では、長周期波のrms値が急速に減少していることから確認できる。

なお、岸に向かうにしたがって長周期波のrms値にやや減衰がみられる。今のところ原因は不明であるが、可能性としては砕波によって波群がフラット化する影響が考えられる。詳細については今後の課題である。

(7) 最高波高と有義波高の比の空間分布特性

海域施設の設計を行う際には、最高波高の評価が重要になる場合が多い。しかしながら既往の研究では最高波

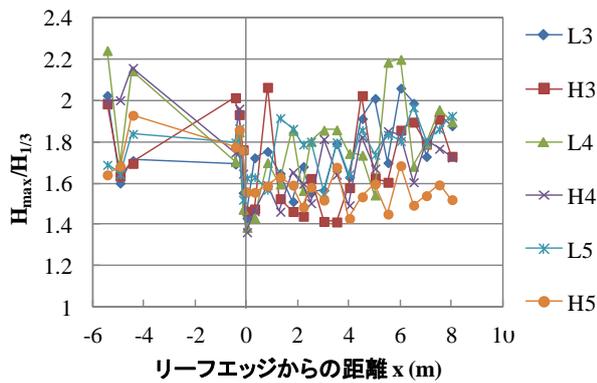


図-13 $H_{max}/H_{1/3}$ の空間分布

高の評価はあまり行われていない。一方で、最高波高は統計的な変動が大きいため、確定的に取り扱うことに困難が伴う。そこで、ここでは最高波高と有義波高の比について検討を行った。

図-13は最高波高と有義波高の比の空間分布特性を示したものである。先に述べたように最高波高の統計的な変動のため大きくばらついているが、その中で特徴的なのは、リーフエッジで概ねこの比が1.4程度となることである。その後、大きく変動しながら砕波が終了する波の再生域に達するとこの比が大きくなり回復していることがわかる。図-4および図-5に示した波高の出現分布からも、岸側に近づくにつれてやや分布の裾が広がっていることに連動するものと思われる。

4. おわりに

急勾配を有するリーフ上における不規則波の出現分布特性について調べた。

波高分布は、リーフ上の波の分裂の影響が見られるものの、波高の大きな部分の確率が残存の確率に再配分されることを確認した。また、不規則波の統計量は最高波

高を除き、比較的安定していることも確認した。さらに、リーフ上の最高波高は、孤立波の砕波限界波高によって評価できることなども確認した。

今後は、これらの知見を生かして急勾配斜面に接続する水深の浅いリーフ上における不規則波の砕波変形のモデル化を目指す予定である。

参考文献

- 1) 関本恒浩・中嶋さやか・片山裕之・高橋研也：急勾配リーフ地形における砕波減衰と実務に向けた位相平均型波浪変形モデル，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.11-15, 2011.
- 2) 平山克也・平石哲也：平面 2 次元ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法の開発と現地適用，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.11-15, 2007.
- 3) 本多和彦・間瀬肇：入・反射波の干渉を考慮した周波数領域波浪変形予測モデル，土木学会論文集 B, Vol.62, No.3, pp.284-293, 2006.
- 4) 高山知司，神山豊，菊地治：リーフ上の波の変形に関する研究，港研技研資料，No.278, 32p., 1977.
- 5) 磯部雅彦，柴田洋三，泉宮尊司，渡部晃：不規則波によるリーフ上の平均水位上昇に関する研究，第 35 回海岸工学講演会論文集，pp.192-196, 1988.
- 6) 津嘉山正光，仲座栄三，我喜屋邦浩：リーフ上の波の変形に関する研究，海岸工学論文集，第 36 巻，pp.70-74, 1989.
- 7) 池谷毅，岩瀬浩二，漆山仁，滝本邦彦，秋山義信：リーフ海岸における多方向不規則波の波浪変形実験，海岸工学論文集，第 46 巻，pp.201-205, 1999.
- 8) 水口優：砕波帯付近の長周期変動のダイナミクスについて，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp.130-134, 1982.
- 9) 関本恒浩・中嶋さやか：急勾配斜面を有するリーフ地形における wave set-up と波の変形に関する実験的研究，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.68 (投稿中)

EXPERIMENTAL STUDY ON IRREGULAR WAVE DEFORMATION AND CHARACTERISTICS OF WAVE HEIGHT DISTRIBUTION OVER SHALLOW REEF

Tsunehiro SEKIMOTO and Sayaka NAKAJIMA

Irregular Regular wave data over the shallow reef with steep slope were analyzed using data of experiments conducted by Sekimoto et al.(2011). Occurrence distribution of wave height is investigated. Statistical parameter, such as maximum wave height, Significant wave height, rms wave height, rms value of long period wave were also investigated. Condition of the reborn of waves on the reef is studied. Upper limit of maximum wave height corresponds to breaking condition of solitary wave on the reef is found.