

リーフ地形海岸における Bore 状サーフビートに関する研究

日野 幹雄*・仲座 栄三**・与儀 実和***

1. はじめに

最近、リーフ地形海岸における Surf-beat (平均海面の長周期変動) に関する研究が幾つか行われるようになってきた (Seelig, 高山ら, 日野ら). Seelig (1988) は、リーフ地形海岸における波の遡上に Surf-beat が大きく関係していることを示した. また, 高山ら (1987) はリーフ上の護岸に対する波の越波量に Surf-beat が関係していることを指摘している. Seelig は、リーフ内の礁池における Surf-beat の振幅に対する算定図を与えたものの、リーフ上に形成される長周期波の振動モードを重要視していないため結果の整理が不十分である. 高山らの研究においても、リーフ上の Surf-beat については、その振幅を合田の式と比較するだけでその実態は何等検討されていない.

Symonds・Bowen (1984) は、バー型海岸における平均海面が来襲波群によって共振応答を引き起こすことを理論的に指摘した. その後、筆者ら (1988 a, b) はリーフ地形海岸においても波群による平均海面の共振応答が引き起こされることを理論及び実験によって示した. また、こうして発生した Surf-beat (長周期波) は汀線近傍に Bore 状になって来襲すること等も指摘した. しかしながら、筆者らの実験においては、これまで規則的な波群 (例えば、2 成分合成波) が用いられており、現地観測及び不規則波群を用いたより詳細な検討が必要とされてきた.

リーフ地形海岸における上述の水理現象は、最近話題の大規模な人工リーフを有する海岸においても発生する可能性があり、海岸工学的に興味ある問題である. また、南西諸島における海岸構造物の設計の面からは解明の急がれる研究課題と言える.

本研究においては、リーフ地形海岸における Bore 状 Surf-beat の実態を現地観測および室内実験によって検討する.

2. 現地海岸における Bore 状 Surf-beat の発生限界

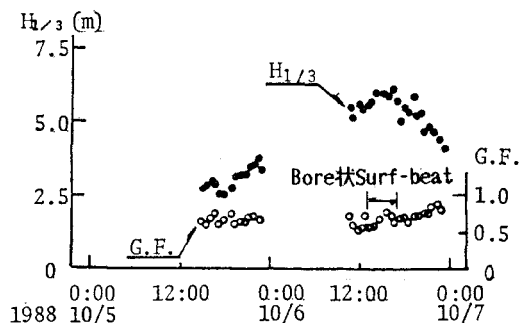
(1) 現地観測位置及び時間

現地観測は、沖縄県南部の東海岸 (港川, 大度海岸) で行った. 観測対象とした波浪は、台風 T8824 に伴う“うねり”である. 台風 T8824 は、1988 年 10 月 5 日沖縄本島に接近し 10 月 6 日沖縄本島東海岸を通過後北上した. 沖波の観測は、沖縄気象台の沿岸波浪観測装置から信号の分岐を行うことによって、10 月 5 ~ 7 日の 3 日間行った. リーフ上の波及び Surf-beat の観測には、ビデオカメラと 35 mm カメラを用いて目視的に行った.

(2) 現地海岸における Bore 状 Surf-beat の発生限界

図一は、沖波の有義波高及び波群係数 (Groupiness Factor) の経時変化を示している. 図中、●印が有義波高であり、○印が波群係数に対応している. 沖波の有義波高は台風の接近と共に上昇し、10 月 6 日の満潮時頃にはピークに達し 6 m を越えた. 一方、波群係数は、多少の変動はあるもののほぼ一定値をとり、 $G.F. = 0.75$ である. このことは波群係数が台風の位置及び沖波の波形勾配等に比較的鈍感であることを意味しており、観測当時、当海岸にはうねり性の波浪が来襲していたことが分かる.

写真一は、10 月 5 日の満潮時 (15 時) における Surf-beat を捉えたものである. 写真に示すように、この時点では Bore 状 Surf-beat は発生していない. この時の

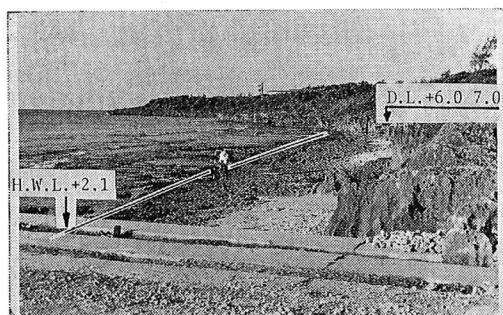


図一 有義波高及び波群係数の経時変化 (T8824)

* 正 会 員 工 博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

** 正 会 員 工 修 琉球大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 琉球大学大学院工学研究科

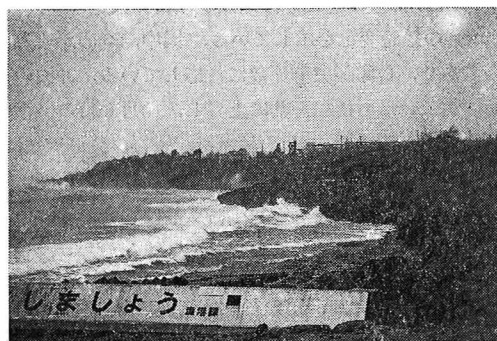


(a) H.W.L. 時汀線位置



(b) 小規模 Surf-beat

写真—1 台風 T8824 に伴う小規模 Surf-beat (1988・10・5)



(a) Bore 状 Surf-beat の来襲



(b) 20 秒後

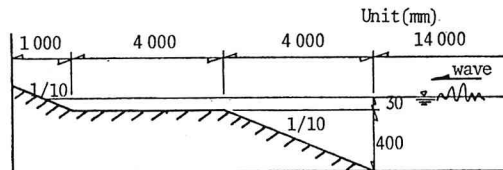
写真—2 台風 T8824 に伴う Bore 状 Surf-beat (10・6)

Surf-beat の波高は 1 m 以下であった。一方、6 日の 12~18 時にかけては、Bore 状 Surf-beat が発生した (図—1 において、Bore 状 Surf-beat と記した時間帯)。写真—2 は、17 時 45 分に発生した Bore 状 Surf-beat が汀線へ向け進行し、岸壁に激しく衝突するまでの約 20 秒間を捉えたものである。なお、この時間帯には、Bore 状 Surf-beat が約 10 分間隔で発生した。

以上の結果から、当海岸における Bore 状 Surf-beat の発生限界は、沖波の有義波波高が約 5.0 m であると判断される。

3. 実験装置及び実験方法

実験は、長さ 27 m、幅 0.7 m の二次元不規則造波水槽で行った。海岸のモデルには、上述の沖縄本島南部東海岸を対象として、1/100 に縮尺した鋼製のものを用いた。実験装置の概要図を図—2 に示した。入射波には、JONSWAP ($\gamma=3.3$) 及びプレットシュナイダー型のスペクトルを有し、有義波周期が 0.8~1.6 秒、有義波波高が 3~10 cm の不規則波を用いた。沖波の波群係数は現地とほぼ同じ 0.7~0.76 である。また、生データから Surf-beat (長周期波) と個々波 (短周期波) への分離は、生データに入射波のピーク周波数の 2 倍に対応する時間で Smoothing をかけることによって分離した。



図—2 実験装置概要図

4. 実験結果及び考察

(1) Surf-beat 及び個々波の波形

図—3 は、リーフ沖から汀線近傍までの水面の時間変動を示している (沖波の諸元は、周期 $T=1.2$ sec、波高 8 cm である)。X の値は、リーフ先端からの距離を示しており、横軸は時間である。図中、短周期で振動しているのが個々波の波形であり、滑らかに振動しているのが Surf-beat の波形である。リーフ上の Surf-beat は、筆者らがすでに規則波群を用いた実験結果から指摘したように、Bore 状になって汀線へ来襲している。黒の矢印で示す位相は、汀線へ進行する Surf-beat のフロントであり、白抜きの矢印で示す位相は反射波に対応している。

Surf-beat の引き波時にリーフ奥へ進行する個々数は、リーフ沖へと向かう強い流れによってその進行を妨げられ、ゆっくりとリーフ上を汀線方向へ進行する。その結果、個々波の周期は長くなる。逆に、Surf-beat のフロ

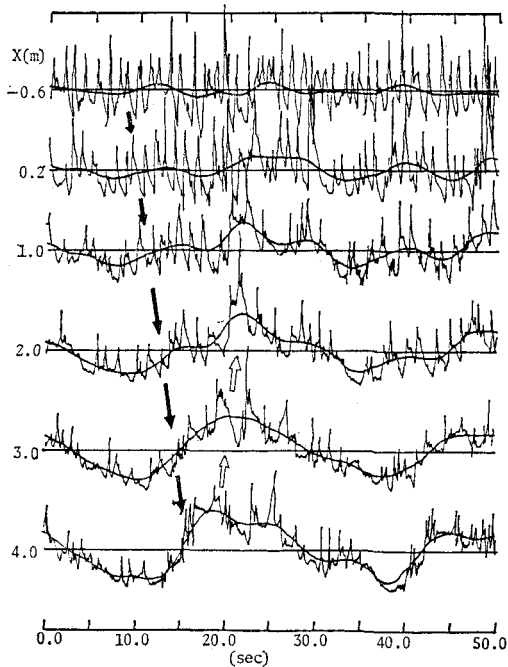


図-3 リーフ上の水面変動

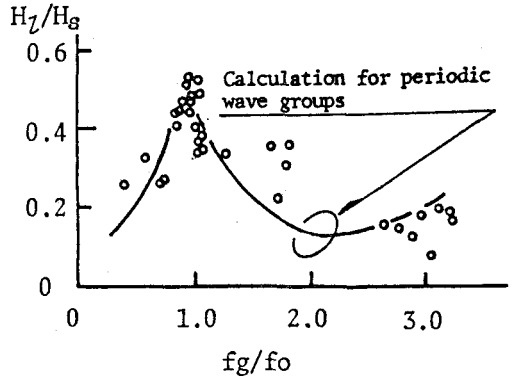


図-4 不規則波群による平均海面の共振応答

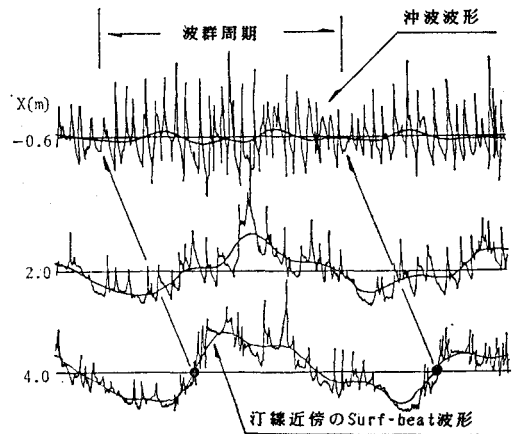


図-5 来襲波群の定義方法

ント前面の個々波は、先行するゆっくりとした個々波の後に Bore 状の Surf-beat を伴って進行するので、その周期は短くなる。しかし、波の周期を統計処理する場合、上述の現象が互いに相殺し合うので、リーフ上の個々波の有義波周期等は、ほぼ一定値を取るようになる（津嘉山ら, 1989）。

(2) 平均海面の共振応答

筆者ら(1989)は、リーフ上の平均海面が、来襲波群によって一次モードに対応する共振応答を引き起こすことを指摘した。しかし、前述したようにこれまでの実験では規則的に繰り返される波群が用いられており、一過性の波群あるいは不規則に変化する波群の条件下においても、リーフ上に平均海面の共振応答が引き起こされるかどうかは今後の検討課題として残したままであった。以下においては、不規則波群下における平均海面の共振応答について述べる。

図-4 は、不規則波群によって引き起こされた平均海面の共振応答を示している。横軸は来襲波群の振動数 f_0 をリーフ上に定常長周期波が形成されるとした時の平均海面の固有振動数 f_0 （以下、海岸の固有振動数と言う）による無次元振動数であり、縦軸は汀線近傍における Surf-beat の波高 H_1 を来襲波群の平均波高 H_0 で無次元化した値である。ここで、不規則に来襲する波群列の中から、リーフ上に Surf-beat を引き起こした波群をどのように定義すれば良いのかが問題となるが、本研究においては、図-5 で示すように定義した。即ち、汀線近

傍における Surf-beat の一波々を Zero-up-cross 法で定義し、それに対応する区間の入射波を一つの波群として定義した。図-4 において、実線は数値計算によって得られた平均海面の共振応答曲線である（1988a）。図示のように、実験値及び数値計算値は、一次のモードに対応する振動数付近で共振応答を引き起こしており、不規則波群が来襲する場合（すなわち、現地海岸）においても、リーフ上には平均海面の共振応答が引き起こされることが理解される。

5. Surf-beat の振幅の算定式の提案

従来、Surf-beat の振幅の算定には、合田(1975)によって提案された経験式が用いられている。しかしながら、合田の算定式には平均海面の振動モードが考慮されておらず、バー型海岸やリーフ地形海岸のような明確な固有周期を有する海岸においては適用出来ない。例えば、リーフ上では水深が一定であることから、合田式によると Surf-beat の振幅はどの地点においても一定となる。

ここでは、リーフ上の Surf-beat が定常長周期波の基本モードに従うという実験的事実を基に、二通りの

Surf-beat の振幅の算定式 (法) を提案する。

(i) 合田式の拡張

この方法は、一様斜面海岸では合田式が比較적으로適合するという経験を基に、合田式を沖からリーフフラット先端部まで適用し、リーフ上では $\sin$ 関数的に、あるいは予め数値計算によって求めた平均海面の振動モード曲線 (汀線近傍における値で正規化された曲線) をリーフフラット先端で合田式と一致させるように接続する方法である。

(ii) 汀線近傍における Surf-beat の統計量を用いた予測

この方法は、汀線近傍の Surf-beat の振幅に関する統計量から (i) と同様な方法で、岸から沖方向を求める方法である。

上述の $\sin$ 関数による方法は、次式によって求められる。

$$\zeta_l/\zeta_s = \begin{cases} \frac{0.04}{\sqrt{H_0/L_0(1+h/H_0')}} & (x/l < 0, \text{ Goda's formula}), \\ A_0 \cdot \sin \left\{ \frac{\pi}{2(1+\tau)} \cdot (x/l + \tau) \right\} & (x/l \geq 0). \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 ζ_l : Surf-beat の振幅 (r.m.s.), ζ_s : 沖波の振幅 (r.m.s.), H_0' : 換算沖波, L_0 : 沖波波長, h : リーフ上の水深であり, l : リーフ礁原幅, x : リーフフラット先端から岸方向 (正の方向) にとった距離である。また, τ は、リーフ上の定常長周期波がリーフフラット先端からわずかに沖側で節を有する事を考慮した補正係数であり、実験結果から、 $\tau=0.2$ である。

式 (1) における係数 A_0 は、(i) の方法では $x=0$ (リーフ先端) における合田式の値と式 (1) とを一致させるように求められ、(ii) の方法では汀線近傍の Surf-beat の振幅で置き換えられる。

図-6 は、リーフ上に $\sin$ 関数を用いた場合における計算値と実験値との比較を示している。(i) の計算結果は、リーフ上で過大評価となっている。(ii) の方法は、リーフ上及び沖側とも実験値とよく一致している (実用的には、この方法で良い)。しかし、原点近傍で計算値の不連続が存在する。

一方、図-7 は、数値計算によって求められる定常長波の正規化された基本モード曲線を用いて、汀線近傍の Surf-beat の振幅を一致させたものであり、リーフ上及びリーフ沖共に実験値と良く一致している。

図-8 は、汀線近傍の Surf-beat の振幅を沖波の波形勾配および相対波高からなるパラメーターで整理したものである。このパラメーターは、合田式のパラメーターと若干異なっているが、これまでの筆者らの実験結果からここで示すようなパラメーターがより適切であるとの

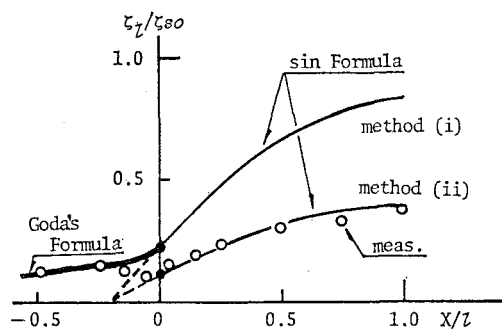


図-6 計算値と実験値との比較

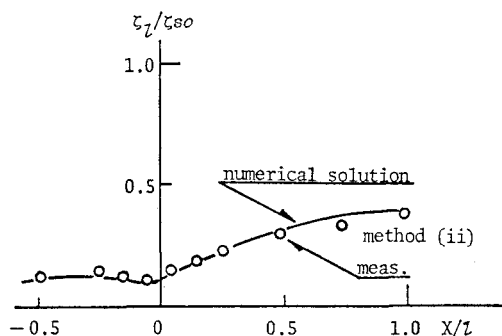


図-7 計算値と実験値との比較

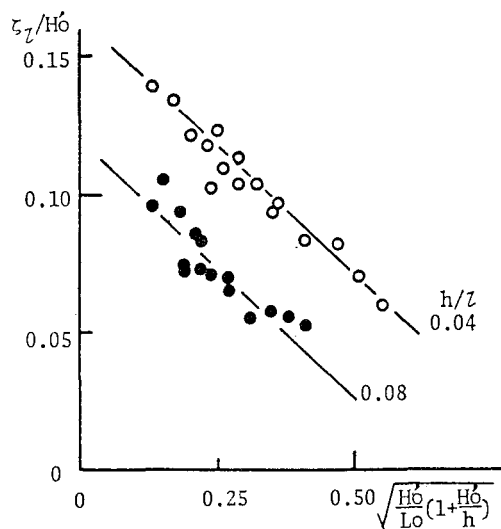


図-8 汀線近傍における Surf-beat の振幅

結論を得た。図示のように、汀線近傍の Surf-beat の振幅はこのパラメーターで統一した整理ができることが分かる。なお、汀線近傍の Surf-beat の振幅は、海浜における波浪痕跡値からも求め得る (仲座ら, 1989)。

図-9 は、Surf-beat の振幅の標準偏差値と最大波高及び平均波高の関係を示したものである。図中、○印は平均波高を示しており、●印は最大波高を示している。また、△印は現地観測によって得られた平均波高である

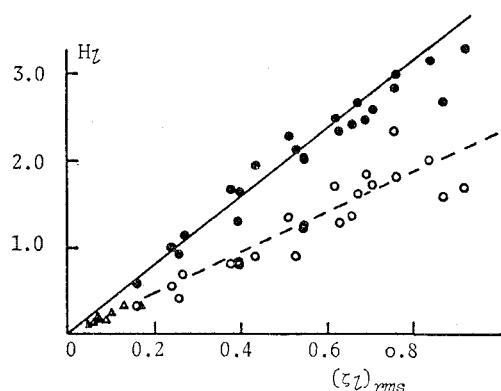


図-9 汀線近傍の Surf-beat の波高と標準偏差値との関係

(沖縄県農林水産部漁港課提供)。リーフ上の Surf-beat の波高と振幅の標準偏差値 (η_{rms}) との関係は、それぞれ、 $H_{max}=3.8 \times \eta_{rms}$ 及び $H_{mean}=2.3 \times \eta_{rms}$ の関係にある。

6. おわりに

本研究では、リーフ地形海岸に不規則波群によって引き起こされる Surf-beat の実態を現地観測及び室内実験によって検討した。その結果、現地観測の対象とした海岸において Bore 状 Surf-beat が発生する限界は、沖波の有義波波高が約 5 m 以上であること、また不規則波群によっても平均海面の共振応答が引き起こされることなどの知見を得た。更に、リーフ上の Surf-beat は、定常長周期波の基本モードに従う事を得、その基本モードを考慮した Surf-beat の振幅の算定式を提案し、実験値

との比較によってその妥当性を検証した。

謝辞：本研究で述べた沖波の現地観測においては、沖縄気象台の全面的な協力を得た。また、琉球大学土木工学科水工学研究室の皆さんには現地観測及び実験に際し、多大な協力を得た。ここに記して心から感謝申し上げます。

最後に、この研究の一部は文部省科学研究費奨励研究(代表：仲座栄三)の援助を受けていることを付記する。

参考文献

- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59~106.
- 高山知司・神山 豊・菊池 治 (1977): リーフ上の波の変形に関する研究, 港湾技研資料, No. 278, pp. 1~32.
- 高山知司・古川正美・立石義博 (1987): 複断面海岸における護岸越波流量に関する模型実験, 港研資料, No. 592.
- 津嘉山正光・仲座栄三・我喜屋邦浩 (1989): 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.
- 仲座栄三・日野幹雄・大城 勉 (1988b): 波群津波による津波力に関する研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 597~601.
- 仲座栄三・日野幹雄・津嘉山正光・松田和人 (1989): 波浪痕跡値による汀線近傍の波の推定, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 824~828.
- 日野幹雄・仲座栄三・與那覇健次 (1988a): 波群によって引き起こされる Bore 状サーフビートに関する研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 197~201.
- Seelig, W. (1983): Laboratory Study of Reef-Lagoon System Hydraulics, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 4, pp. 380~391.
- Symonds, G. and Bowen, A. J. (1984): Interaction of near-shore bars with incoming wave groups, J. Geophysical Research, Vol. 89, No. C2, pp. 1953~1959.