

非砕波領域におけるサーフビートの現地観測

関本恒浩*・清水琢三**・鵜飼亮行**
坂野雅人**・近藤浩右***

1. はじめに

港湾構造物の安定性や砕波帯内における漂砂現象にサーフビートが大きな影響を及ぼすことが指摘され、ここ数年サーフビートに関する研究が盛んに行われている(例えば佐藤ら, 1988; 喜岡ら, 1990a; 合田ら, 1990; 日野ら, 1990; 関本ら, 1990a, 1990b). 特に砕波帯内におけるサーフビートについては、平均量の方程式を数値的に解くモデルが提案され、その水位振幅のみならず底面流速振幅をある程度定量的に評価することができるようになっている。

一方、砕波帯近傍から砕波帯外のサーフビートは、波群に拘束された set-down 波であるとの見方が強いが、これを現地で実証した例は関本ら (1990a) の現地観測を除いてほとんどない。また、構造物周辺のサーフビートの性質については Agnon・Mei (1985), 喜岡 (1988) および喜岡ら (1990b) によって数値的な検討が行われているものの、実験値や現地観測データによる検証は十分であるとは言えない。そこで本研究では砕波帯の外側(水深 10~15 m 程度)におけるサーフビートに着目して、入射するサーフビートの特性と防波堤前面でのサーフビートの挙動に関する現地観測を実施し、検討・考察を行った。

2. 現地観測

現地観測は、茨城県大洗港沖防波堤の周辺で、1990 年 11 月 8 日から 12 月 2 日にわたって実施した。大洗港沖防波堤は延長 800 m の消波ブロック被覆堤である。図-1 に示すように、防波堤中央部前面の No. 1~No. 5 および防波堤延長方向約 500 m 地点の No. 6, No. 7 に計測器を配置した。

図-2 は計測器の配置状況を示したもので、防波堤法線直角方向の No. 1~No. 5 (水深 12~16 m) に同期した超音波波高計と水圧センサー付き電磁流速計を設置するとともに、最も防波堤よりの No. 1 には後述する長

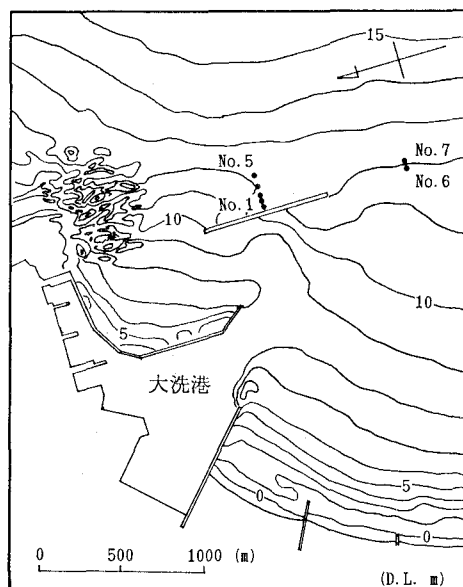


図-1 観測地点位置図

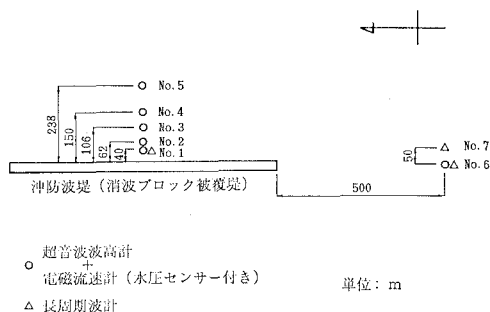


図-2 計測器配置状況図

周期波計を設置し、防波堤前面における反射波を観測した。また防波堤延長方向約 500 m の位置の No. 6 には同期した超音波波高計および水圧センサー付き電磁流速計と長周期波計を、No. 6 より 50 m 沖側の No. 7 には長周期波計のみをそれぞれ配置して、入射後の観測を行った。各地点に設置した超音波波高計および水圧センサ

* 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所

** 正会員 工修 五洋建設(株)土木設計部

*** 正会員 工修 五洋建設(株)技術部技術企画課

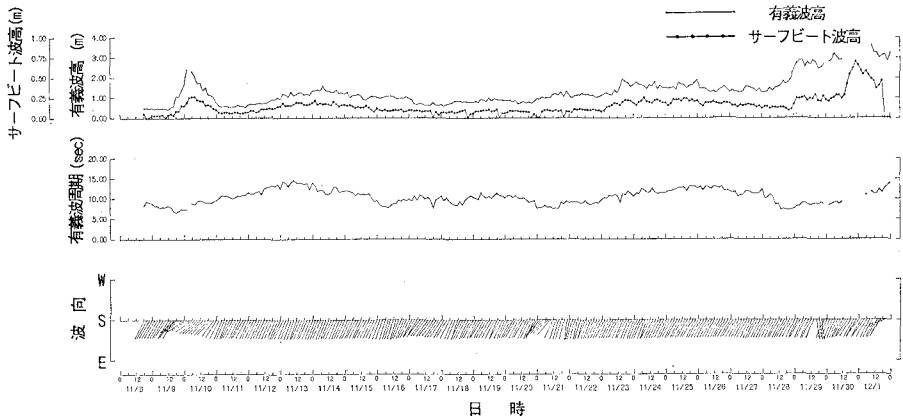


図-3 観測期間中の波浪の経時変化

一付き電磁流速計により水位、水圧および水平2成分流速変動を0.5秒のサンプリングインターバルで2時間毎に約17分間、長周期波計により水圧および水平2成分流速変動を0.5秒のサンプリングインターバルで2時間毎に40分間それぞれ計測した。

長周期波計は、長周期波の観測における観測データの信頼性を高めることを目的として長時間かつ長期間の観測を可能とした水圧センサー付き水平2成分電磁流速計であり、2時間につき0.5秒のサンプリングインターバルで40分間の計測モードに設定した場合には32日間の観測ができるようになっている。また、観測間隔、サンプリングインターバルおよび観測時間の設定に自由度があり、目的に合わせて観測モードの設定が可能である。

データの取得状況は概ね良好であったが、No. 1の水位データが超音波の受波不良のため欠測となった。また、No. 2では流速計が流出したため水圧および流速データが欠測となった。取得したデータは数値フィルターによって波浪成分とサーフビート成分に分離・解析し、入射波のサーフビート特性を明確にするとともに防波堤前面におけるサーフビート水位の変動について種々の検討を行った。なお、数値フィルターのカットオフ周波数は観測データのパワースペクトル形状を参考に0.04 Hzとした。

3. 入射サーフビートの特性

3.1 入射波浪特性

図-3は、観測期間中の波浪およびサーフビートの経時変化を示したものである。観測開始直後の11月9日には前線の通過に伴って波高が急激に増加し、有義波高で約2.5 mまで発達した。しかしながら、波の発達が急であったため、有義波周期は6 sから10 sに発達するにとどまった。その後波高は1 m以下に減衰したが波はうねりとして来襲し、11月11日～11月27日にわたって

波高1 m～2 m、周期10 s～15 s程度の波浪が続いた。この間の11月21日にも前線を伴う低気圧の通過がみられたが、低気圧の規模が小さかったため波向きがSEからSSEに振れただけで波高、周期に大きな変化はみられなかった。11月28日以降は季節外れの大型の大風の通過により波高が2 mから4 m程度へ発達した。周期は台風来襲直前に一旦7 s程度に落ち込んだが、波高の増加とともに周期も増大し15 s程度まで発達した。

当然のことながらサーフビートは入射波高に依存し、入射波高の大きいときにサーフビートの波高も大きくなっている。また、サーフビートの波高は入射波の周期に対しても依存性を示しており、入射波周期が長い場合にはサーフビート波高も相対的に大きくなる傾向がみられ、サーフビートが入射波の非線形性に関連している様子がうかがわれる。

3.2 サーフビートの特性

図-4は関本ら(1990a)にならって入射波の波高とサーフビート波高の関係を調べたものである。図中には関本らと同様に数値シミュレーションによって求めた2次の非線形干渉理論による関係と合田(1975)による実験式を同時に示している。これによると観測された入射波高とサーフビート波高はほぼ比例関係にあって合田の実験式と良い対応を示しており、サーフビート波高は入射波高の2乗に比例するという非線形拘束波の特徴は見られない。そこで観測期間中の波高とサーフビート波高の関係の経時変化特性を調べた。

図-5は、観測期間中の代表的な3期間(a)1990年11月9日20時～10日22時、(b)1990年11月23日0時～24日22時および(c)1990年11月27日0時～30日12時について入射波高とサーフビート波高の関係を示したものである。図中で、最も早い時刻のデータと最も遅い時刻のデータを黒抜きにし、その間のデータを時間順に直線で結ぶことによって入射波高とサーフビート波

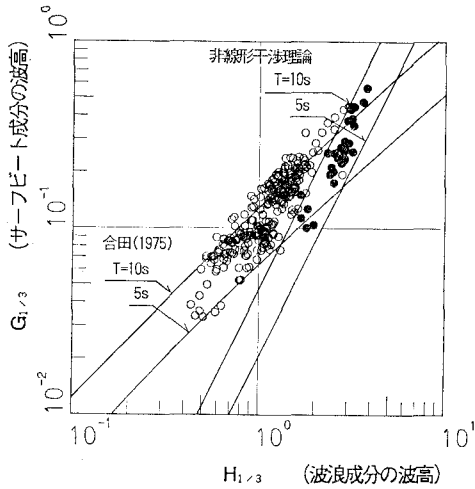


図-4 入射波高とサーフビート波高の関係

高の関係の時間的変化がわかるようにした。また、図中の実線は、水深 13 m, 周期 10 s に対して求めた入射波高とサーフビート波高に対する経験的な関係式

$$G_{1/3} = 0.046 H_{1/3}^2 \dots\dots\dots (1)$$

を示したものである。式 (1) の関係は、まずスペクトルピーク先鋭度パラメータ γ を 3 とした JONSWAP 型スペクトルを有する不規則波を作成し、これを用いて単一方向の非線形拘束波としてシミュレートしたサーフビートと入射波高を比較することによって求めた。ただし、この関係は波を構成する成分波の位相に依存するため、成分波の位相として与える乱数を 24 種類に変化させ、それぞれについて得られたものの平均により式 (1) における比例定数を求めた。

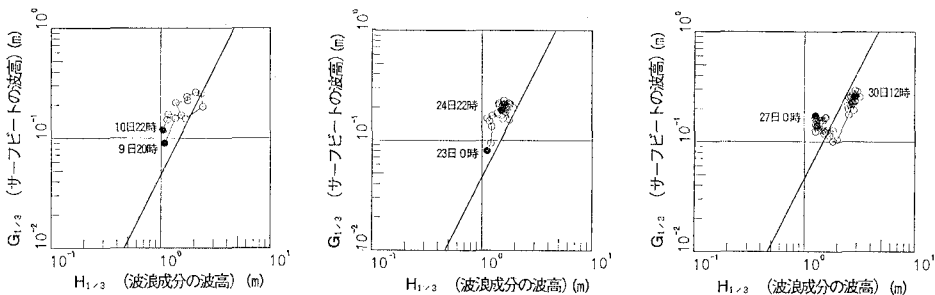
ここで対象とした 3 期間は、(a) 波の急激な発達と急激な減衰をとらえた期間 (11 月 9 日～10 日)、(b) やや大きな波が継続して来襲する期間 (11 月 23 日～24 日) および (c) 波高が連続的に発達する期間 (11 月 27 日～30 日) にそれぞれ対応する。

(a) に着目すると波の発達期においては、サーフビートは非線形拘束波理論によく対応していることが認められる。しかしながら、波の減衰期においてはサーフビートは発達期にたどった経路を戻らず、理論より大きいエネルギーの状態が減衰する。この場合、波が発達する直前は静穏で、サーフビートの波高も 10 cm 以下となっていた。

一方、(b) は、波高が周期とともに穏やかに増加し、それに伴い、サーフビートも徐々に増加傾向を示している。波の周期が理論計算に用いた周期より若干長いことを考慮しても、サーフビートの観測波高は、理論値より比較的大きめとなっており、非線形拘束波以外の成分が含まれている可能性が示唆される。

このように、静穏でサーフビートがあまり顕著でない状態から波が発達する場合にはサーフビートは非線形拘束波としてよく表現でき、波浪の減衰期や波浪の発達が穏やかに進行する場合は、非線形拘束波としては表現できないことがわかる。なお、前出の 図-4 には静穏状態から波が発達する条件のものを図中●に印で示しているが、●印が非線形干渉理論とよく一致していることがこれから確認できる。砕波帯の外において、サーフビートが発達期のみに非線形拘束波の特徴を表す理由として、波浪の減衰期や波浪の発達が穏やかに進行する場合は、それ以前に来襲したサーフビートのエネルギーがトラップされ、これが波による拘束波と重なり合うために非線形拘束波の特徴が表面に現れないものと考えられる。エネルギーがどのようにトラップされるかについては、地形の影響や大洗港の影響等が考えられるが、今回の調査では明確にできなかった。

(c) は入射波高 1.5 m 程度の波浪が 5 日間継続して来襲した後、波高が急激に増大したときの模様を示したものである。一時的な周期の減少とともにサーフビート波高が一度減衰し、その後の波高が増大するにつれサーフビート波高も非線形拘束波理論にしたがって増加する様子がわかる。つまり、ほぼ同じ波高の波が長時間継続し



(a) 11月9日20時～10日22時

(b) 11月23日0時～24日22時

(c) 11月27日0時～30日12時

図-5 代表期間における入射波高とサーフビート波高の関係

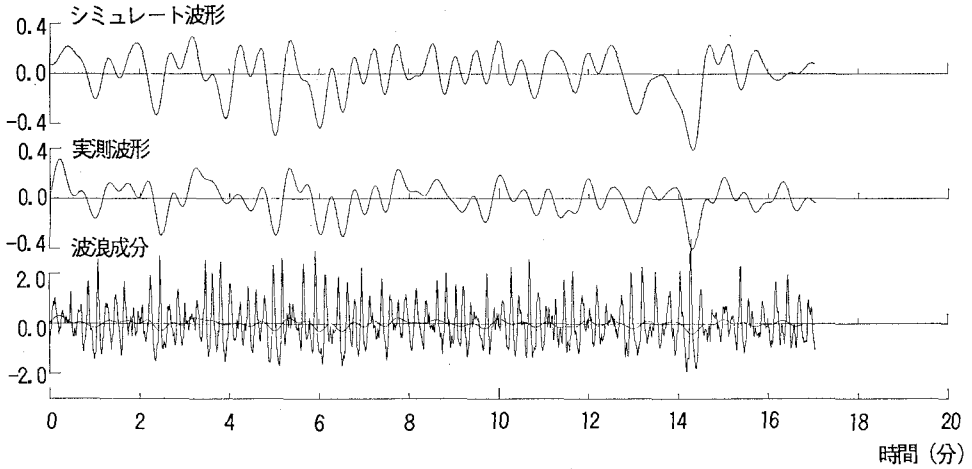


図-6 サーフビート波形の実測値と計算値の比較

て来襲していても、途中で周期が短くなるとトラップされたサーフビートのエネルギーは急速に減少し、サーフビートはほぼ拘束波成分だけになることが確認できる。このことから、トラップされたエネルギーの供給源は非線形性の強い現象であることが推測され、前述のサーフビートのエネルギーがトラップされるという考えの裏付けとなるものと思われる。

これまでに得られた知見から図-4中の●印のデータを対象に2次の非線形干渉理論によるシミュレート波形と実測波形を比較した。図-6はその比較結果を示したものであり、シミュレート波形と実測波形の対応が良好であることが確認される。

以上より水深13mの地点におけるサーフビートの発生原因は非線形拘束波であると結論される。

4. 防波堤前面のサーフビートの特性

4.1 防波堤前面の波浪特性

図-7は沖防波堤前面の波浪特性を調べたもので、横

軸に入射波の波長で無次元化した堤体前面壁からの距離をとり、縦軸に堤体前面における有義波高 (No. 2~No. 5) と入射波高 (No. 6) の比をとっている。当防波堤は延長が800mあり、観測地点に対しては、防波堤両端からの散乱波の影響が小さく、反射波の方向分散による波高の低下は少ないと考えられる。防波堤前面の観測値については、データに多少のばらつきが見られるものの、波高比は1に近く堤体の反射率が非常に小さいことがわかる。なお、堤体の反射率は、方向スペクトル解析から0.3程度と推定された。

4.2 防波堤前面のサーフビートの特性

図-8は、図-7同様に波浪成分の波長で無次元化した防波堤からの距離を横軸にとり、入射波観測位置でのサーフビート波高に対する防波堤前面におけるサーフビート波高を示したものである。サーフビートの水位振幅は、堤体近傍 (入射波浪の0.5波長以内) で急に増加する傾向が見られる。また、通常の重複波に見られるような明確な腹や節が、サーフビート水位振幅には見られな

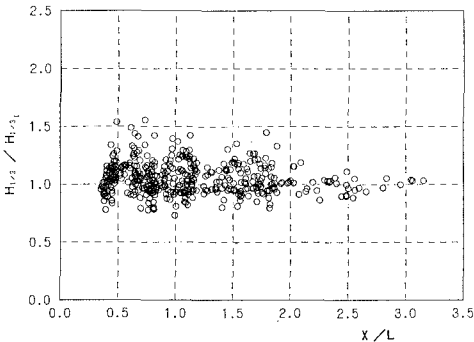


図-7 防波堤前面の波高比の分布

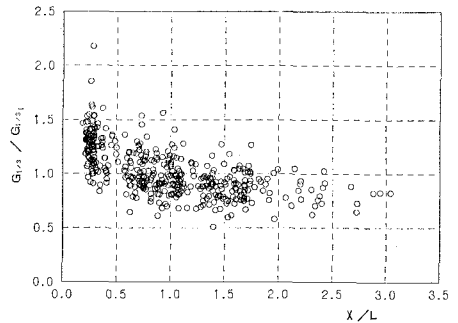


図-8 防波堤前面のサーフビート波高比の比較

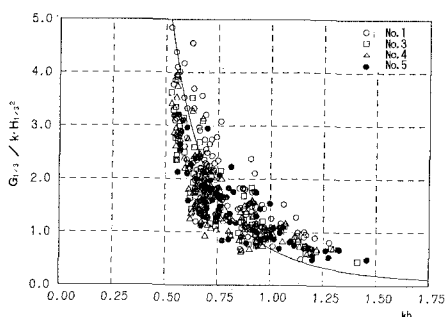


図-9 相対水深と無次元サーフビート波高の関係

かった。このことは、水位と水粒子速度のクロススペクトル解析からも確認されている。

図-9 は、入射波高と波数によって無次元化されたサーフビートの波高 $G_{1/3}/(kH_{1/3}^2)$ を相対水深 kh に対して示したものである。図中の実線は Longuet-Higgins・Stewart (1962) の表示式を波高で置き換え、反射を考慮して2倍としたものである。

$$G_{1/3} = \frac{gH_{1/3}^3}{2(Cg^2 - gh)} \left(\frac{2Cg}{C} - \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $G_{1/3}$ はサーフビートの波高、 $H_{1/3}$ は入射波高、 C は位相速度、 g は群速度である。

図-9 に示した防波堤前面におけるサーフビートの波高は、入射サーフビート波高を2倍したものと非常によく対応していることがわかる。喜岡ら (1990b) は入射サーフビートを式(2)の1/2で与えられるとしたとき、堤長が比較的短い離岸堤(直立堤)周辺のサーフビート振幅を理論値に求めたが、離岸堤前面中央部では入射サーフビートの2倍を超える振幅となっている。当防波堤のように堤長が比較的長い場合は、さらに振幅が大きくなることが予想される。しかしながら、周期が短く相対水深 kh が大きい波を除けば、防波堤前面 40m 地点でのサーフビート波高は、入射サーフビート波高の2倍程度であり、喜岡らの理論をそのまま用いたのでは、現地観測結果を過大に評価することが予想される。これは堤体前面を被覆する消波ブロックによって波浪成分が重複波を形成しないことおよび水位自身の消波ブロックによる損失が生じるためと考えられる。したがって、喜岡らの理論にこれらの効果を考慮することにより、防波堤前面のサーフビート波高を適切に算定することが可能と考えられる。

5. おわりに

防波堤周辺のサーフビートに関する現地調査を実施し以下のことが明らかになった。

静穏な状態から波が発達する場合には、サーフビート

は非線形拘束波の特徴を示し、波浪の減衰期や波浪の発達が進む場合には、それ以前に襲撃したサーフビートのエネルギーがトラップされ、これが波による拘束波と重なり合うために非線形拘束波の特徴が表面に現れないことがわかった。

消波ブロック被覆堤前面におけるサーフビートの実測値は喜岡ら (1990b) の理論値に比べて小さい値となることが予想される。これは堤体前面を被覆する消波ブロックによって波浪成分が重複波を形成しないことおよび水位自身の消波ブロックによる損失が生じるためと考えられる。

本研究を実施するに当たり、東京大学磯部雅彦助教授には有益な助言をいただいた。また、東京理科大学小林智尚助手 (当時東京大学助手) および東京大学横木裕宗助手には現地観測の際にお骨折りいただいた。ここに記して謝意を表する次第である。また、長周期波計はアイオーテック社製であり、現地観測に使用した計測器の準備に際して、アイオーテック社井戸輝彦氏および大谷明氏にご協力いただいた。併せて感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 喜岡 渉 (1988): 波群に伴う長周期変動波力の解析, 土木学会論文集, 第399号, II-10, pp. 157-164.
- 喜岡 渉・川合正恭・田村真一 (1990a): 非線形変調波に伴う長周期水位変動について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 91-95.
- 喜岡 渉・飯田耕三・水谷隆夫 (1990b): 離岸堤まわりの長周期水位変動の変形特性, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 609-613.
- 合田良実・諫山太郎・佐藤慎司 (1990): 砕波帯内の長周期波の発達機構に関する実験と現地観測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 96-100.
- 佐藤慎司・諫山太郎・柴山知也 (1988): 緩勾配斜面における不規則波の底面変動特性に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 78-82.
- 関本恒浩・清水琢三・窪 泰浩・今井澄雄・島津昌央 (1990a): 港内外のサーフビートの発生・伝播に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 86-90.
- 関本恒浩・近藤浩右・藤谷昌弘・今井澄雄・黒田輝夫 (1990b): 波群特性とサーフビートを考慮した防波堤堤頭部の設計波力について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 624-628.
- 日野幹雄・仲座栄三・与那覇健次 (1988): 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.
- 日野幹雄・仲座栄三・野中雅彦・武若 聡 (1990): リーフ性海岸における波群性サーフビートの発生と個々波の変形, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 81-85.
- Agnon, Y. and C. C. Mei (1985): Slow-drift motion of a two dimensional block in berm seas, J. Fluid Mech., Vol. 151, pp. 279-294.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats', J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 480-504.