

反射波吸収式造波装置で励起される潜堤背後の 長周期流速変動

LONG PERIOD OSCILLATION OF FLUID VELOCITY BEHIND SUBMERGED
BREAKWATER CAUSED BY ABSORBING WAVE GENERATOR

山城 賢¹・吉田明德²・入江 功³・越智宏充⁴

Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA, Isao IRIE and Hiromitsu OTI

¹学生会員 工修 九州大学大学院工学研究科 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究科 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究科 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴学生会員 九州大学工学部 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

In the previous experiments on a submerged breakwater, a very long period of oscillation of fluid velocity at the bottom is observed behind the breakwater in a two-dimensional wave flume. The period of the oscillation is far larger than the period of seiche in the wave tank, and thus the oscillation may influence the estimation of the mean water level and steady flow velocity. To clarify the effect of this long period oscillation, we conducted two-dimensional wave tank experiments with a submerged breakwater and also with a constantly sloped beach for comparison. Water surface oscillation, horizontal fluid velocity at the bottom and the motion of the paddle of the wave generator were measured. The time variations of the mean water level, the steady flow velocity, the amplitudes of wave harmonics were calculated.

Key Words : Long period oscillation, submerged breakwater, absorbing wave generator, steady flow, wave setdown

1. まえがき

著者らは、潜堤背後の海域における波動場および流速場について、解析的および実験的に研究をおこなってきた^{1), 2), 3)}。その過程で、潜堤直後の水底において冲向きの強い定常流が発生する領域では、図-1に示すような極めて長い流速変動が大きな振幅で現れる場合があることがわかった。この長周期変動の周期は実験水槽内に生じ得る静振よりもさらに長い周期で、場合によっては平均水位や定常流速等の測定結果に大きく影響するものと思われる。このような長周期変動の発生原因については明確には分らないが、一つの仮定として、図-2に示すように、近年広く普及している、造波板前面の水位の情報を基に制御される反射吸収機能を有する造波機を実験に用いる場合、潜堤のような大きな質量輸送が生じる構造物を対象とすると、造波開始直後に造波板前面の平均水位が急激に低下し、これを補償するために造波板の中心位置が大きく移動する。このため極めて長い周期の変動が実験水槽内に発生するのは

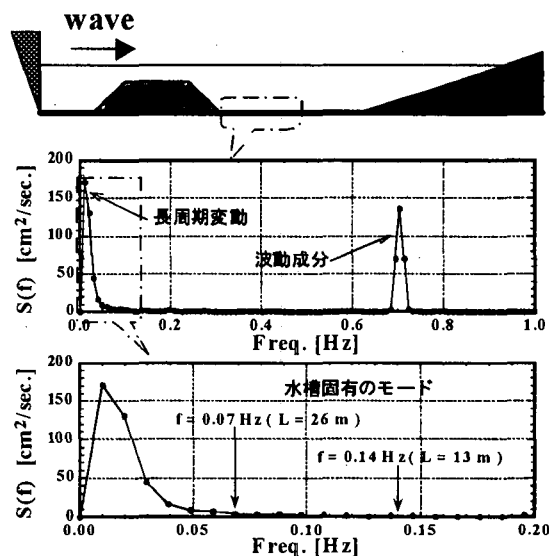


図-1 底面流速のパワースペクトル

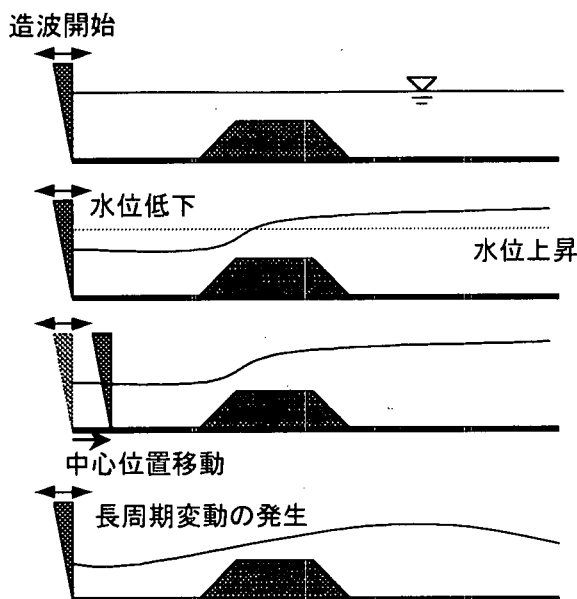


図-2 長周期変動の発生原因の仮定

ないかと考えた。この仮定の下、本研究は、造波板の挙動に着目し、一様傾斜海浜と潜堤構造物を対象に、両者の違いによる長周期変動の発生と測定結果への影響の程度について検討したものである。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験には、反射波吸収制御機能を備えた造波装置を有する幅30cm、深さ50cm、長さ28mの2次元造波水路を、末端に消波装置を設置して用いた。この造波機における吸収制御の方法は造波板に取り付けられた波高計により水位を検出し、その情報から反射波成分を算出し、造波板での再反射が生じぬよう造波板の運動を制御する、いわゆる波面検出型の吸収制御である^{4),5)}。図-3に実験水槽の概略図を示す。

(2) 実験条件

水深(h)は38cmに固定し、入射波は規則波で周期(T)を1.43sec. ($kh=1.0$), 1.79sec. ($kh=0.75$), 波高(H)を2.0cm, 4.0cmと変化させた。潜堤模型は法面勾配が1:1の台形型不透過潜堤で、天端水深(qh)を0.1hに固定し、天端幅(B)を水深の2倍($B/h=2.0$)と4倍($B/h=4.0$)とし造波板から12mの位置に固定した。また、潜堤を設置せずに水路末端に1/8勾配の不透過斜面を設置し潜堤を設置した場合との比較をおこなった。潜堤模型および不透過斜面を図-3に示す。また実験条件を表-1に示す。

(3) 計測

造波板の運動をレーザー変位計で、水面変動を容量式波高計で、さらに流速変動を超音波流速計で測定した(図-3)。測定は造波開始直前の静止状態からこれらの諸量を同期させておこない、サンプリング間隔0.1秒で、データ個数18000個(データ長30分)を

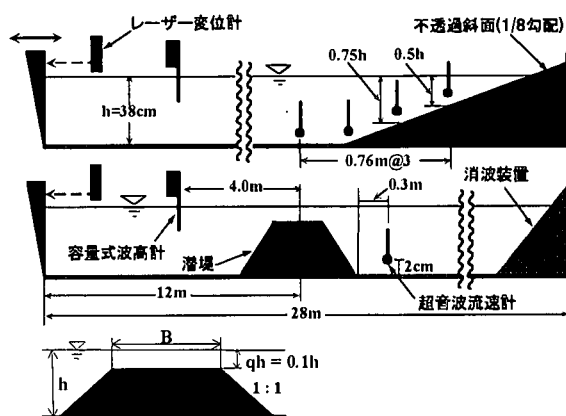


図-3 実験装置の概略図

表-1 実験条件

Case No.	入射波		潜堤	
	周期 (T) sec.	波高 (H) cm	天端水深 (q)	天端水深 (B/h)
0	1.43	4.0	一様傾斜海浜 (1/8)	
1	1.43	2.0	0.1	2.0
2		4.0		4.0
3		2.0		
4		4.0		
5	1.79	2.0		2.0
6		4.0		4.0
7		2.0		
8		4.0		

$h = 38\text{cm}$

データレコーダに記録した。

3. 結果と考察

(1) 造波板の挙動

周期、波高、天端幅についてそれぞれ2通りに変化させた8ケースの造波板の時間変位(E)を造波開始直後より200秒間について図-4に示す。図の縦軸は入射波の振幅(A_i)で無次元化した造波板の変位(E/A_i)を示しており、 $-$ は岸向き、 $+$ は沖向きの変位を表している。Case 0は不透過斜面の場合で造波板の中心位置が造波開始直後から約30秒の周期で変動しているのがわかる。しかし、時間が経つにつれ、この変動の振幅は小さくなっている。造波開始直後の約30秒間の変動は造波開始による造波板近傍の平均水位の低下によるものと思われるが、それ以降の微小な振動は、水槽固有の基本モード($T=27\text{sec.}$)に対応しており、それを吸収するための振動と思われる。Case 0以外は潜堤を設置した場合の結果で、不透過斜面のCase 0の場合と異なり、造波開始後約15秒から20秒で急激に中心位置が岸側に移動している。その後徐々に沖側に移動し、造波開始後約100秒程で初期位置に戻りそれ以降造波板の中心位置は一定である。また、造波板の中心位置の移動の様子は実験の条件で異なり、明らかに波高が大きい4.0cmのケースが2.0cmのケースに比べて

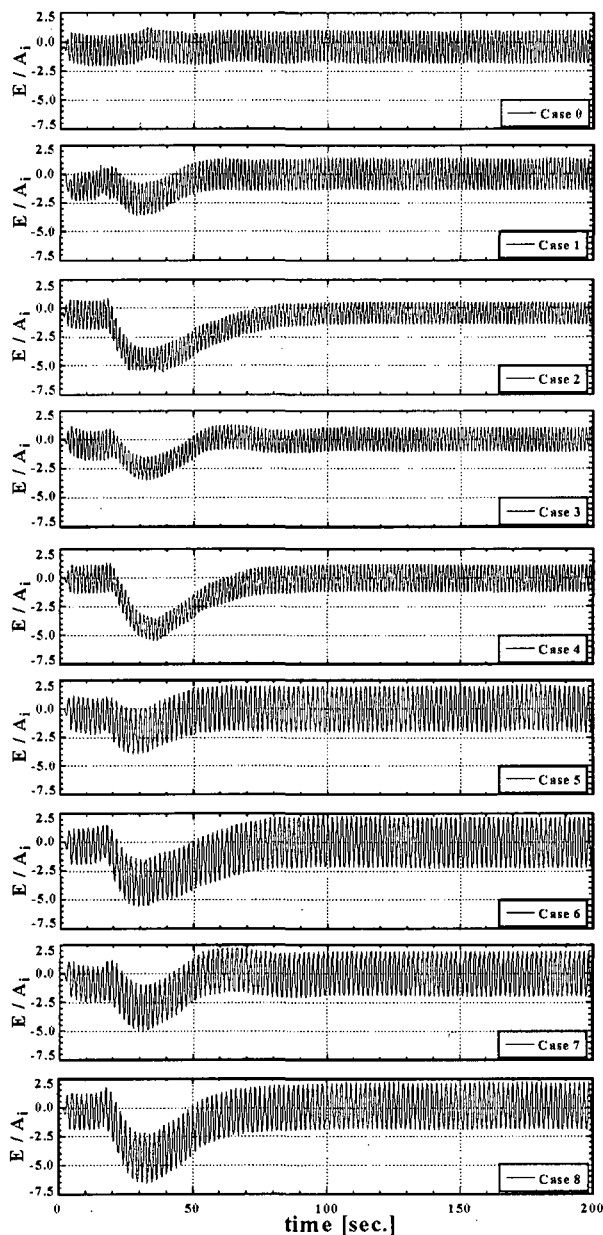


図-4 造波板の変位の時系列

移動距離が大きい。さらに入射波が等しく潜堤の天端幅のみが異なるケース(例えばCase 2とCase 4)で比較すると、造波板の変動の様子はほぼ等しいと言える。周期が異なるケース(例えばCase 4とCase 8)で比較すると、周期が異なるため波動成分の振幅の大きさは異なるが、中心位置の変動はほぼ等しいと言える。図-5に潜堤沖側の水位低下量を示す。測定位置は図-3に示す位置である。図の横軸は測定ケースの番号を示し、縦軸の水位低下量は測定した水面変動の時系列データを全測定時間について算術平均して求めたもので、入射波の振幅で無次元表示している。Case 0の不透過斜面の場合についてみると、平均水位の低下はほとんどない。これに対し、潜堤の場合は全て不透過斜面の場合に比べ平均水位が低下しており、特に入射波高の大きい($H=4.0\text{cm}$)ケースで顕著である。さらに、平均水位の低下量は入射波の周期および潜堤の天端幅には関わらず、入射波高が同じケースで概ね等しい結果となっている。こ

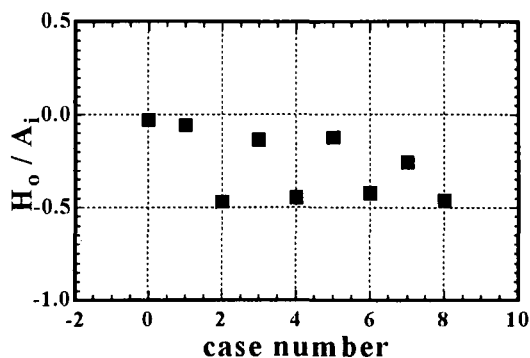


図-5 平均水位低下量

の結果を考慮し図-4の造波板の変動を考察すると、平均水位の低下が顕著なケースほど造波板の中心位置の移動距離が大きく、造波板の中心位置の変動は潜堤前面の平均水位の低下を補償するために生じるという当初の仮定を裏付けている。しかも、入射波高が等しければ入射波の周期や潜堤の天端幅に関係せず平均水位の変化量が等しいという結果も造波板中心位置の変動の大きさが入射波高が等しければほぼ等しいという結果と合致する。

(2) 水面変動

図-6に全てのケースについて入射波の振幅(A_i)で無次元化した水面変動(η/A_i)の時系列を示す。入射波の周期により水面変動の振幅の大きさが異なるが、潜堤からの反射により部分重複波が形成されるためである。また、入射波が等しいCase 5とCase 7およびCase 6とCase 8でも振幅の大きさが異なるがこれは測定位置を潜堤の中心を基準としているため潜堤の天端幅が広くなることで周期が1.79sec.の波の場合、測定位置が部分重複波の節の位置から腹の位置へ相対的に変化したことによる。

不透過斜面のCase 0は造波開始から常に安定した波形を示している。一方、潜堤のケースも、波動成分はほぼ一定の振動を示しているが、水面が振動を始めると徐々に平均水位が低下している様子が確認できる。さらに水位低下の程度は図-5の結果に示されるように、入射波の波高が大きいほど顕著である。しかし、振動開始から最大でも50秒程で平均水位の低下は収まり、その後平均水位の顕著な変動は無いように思われる。

そこで、平均水位の時間的な変動を定量的に評価するため、以下の処理をおこなった。

図-7に示すように、測定した18000個(1800秒)のデータから1024個のデータ(102.4秒)を512個(51.2秒)ずつずらしてランニングスペクトルを算定し、そのスペクトルから平均水位を表す定常成分(A_0)、基本周波数成分(A_1)および潜堤との非線形干渉で生じた2倍、3倍周波数成分(A_2 , A_3)の振幅を求め、各成分の振幅値の時間変化について考察する。

図-8はCase 2における水面変動の各成分の振幅値の時間変化を表したもので、横軸は取り出したデータの取得時間の中心値である。また、各振幅値は入射波の振幅(A_i)で無次元表示している。図より全て

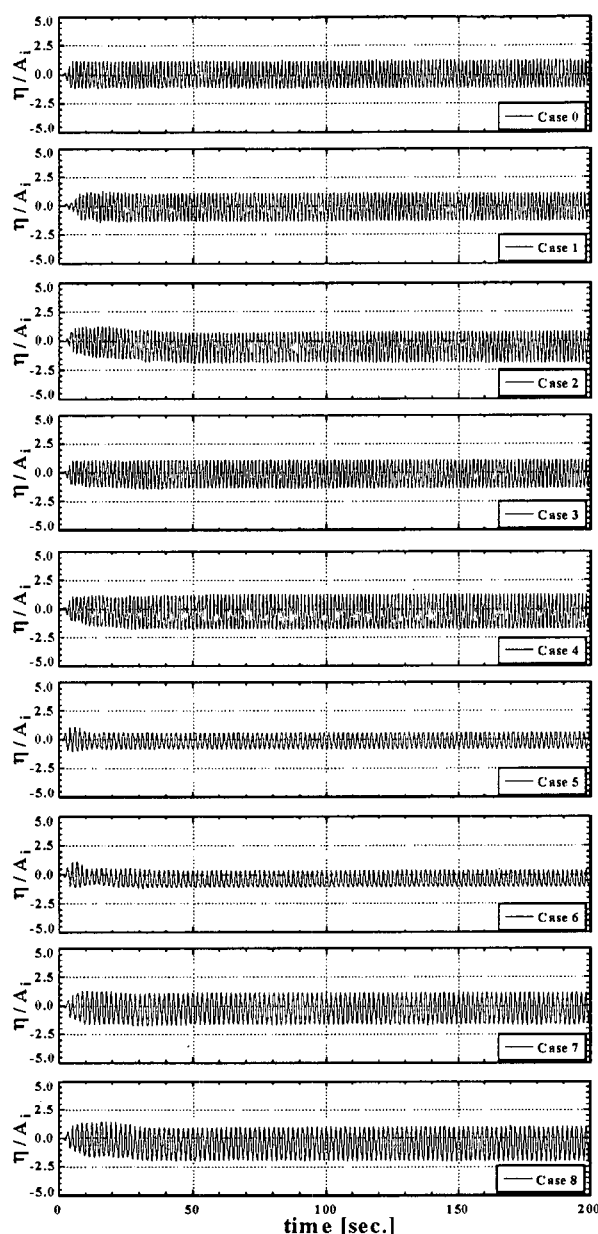


図-6 水面変動の時系列

の成分で、最初の一点が若干ずれた値となっているが、これはデータの最初の部分が静水状態であることによる。基本周波数成分(A_1)、2倍周波数成分(A_2)、3倍周波数成分(A_3)の各波動成分に加え平均水位を表す定常成分(A_0)も造波板中心位置の移動の影響は無く時間的にほぼ一定である。

図-9に測定した全ケースについて、平均水位の時間変化を示す。前述のように最初の一点のみがずれた値となっているがその点を除けば、全測定時間を通じて平均水位の算定値はほぼ一定であり、造波板中心位置の移動による長周期変動は平均水位にはほとんど影響しないと言える。

(3) 底面流速

図-10に全てのケースについて底面における水平流速の時系列を示す。なお、流速変動(U)は+が岸向き、-が沖向きの変位を表しており、入射波の底面における水平流速振幅(U_i)で無次元化している。

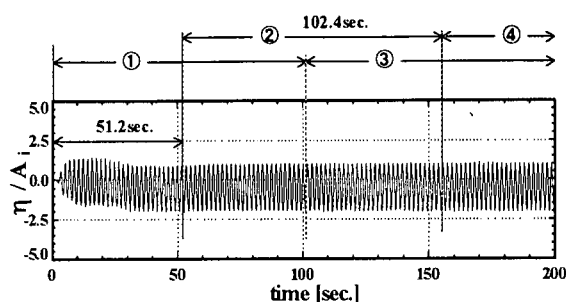


図-7 ランニングスペクトルの算定に用いたデータ長の定義

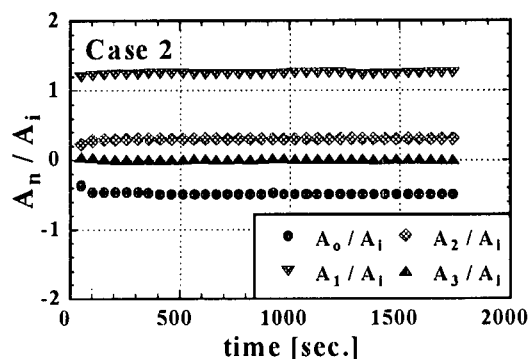


図-8 各周波数成分の振幅値の時間変化 (水面変動)

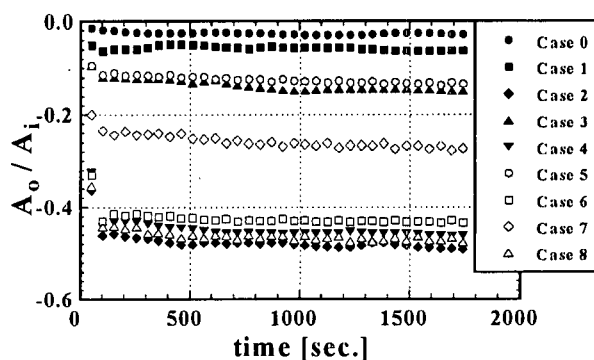


図-9 平均水位の時間変化

また、Case 0については不透過斜面上の水深が1/2となる位置での測定結果である。

Case 0を除く潜堤を設置した場合の結果は、潜堤による波浪減衰のため、波動成分の振幅が非常になくなっていく。また、Case 0が比較的安定した状態であるのに対し、潜堤のケースは流速変動に非常に長い変動が含まれていることがわかる。特に、入射波高が大きなCase 2, 4, 6, 8は顕著で、振動の開始直後からおよそ100秒程の変動が明らかに認められ、この変動の様子は図-4に示した造波板の変動の様子に酷似している。しかし、流速変動は造波板の変動とは異なり、振動開始後100秒以上経過した後も周期数10秒程度の変動が存在している。

図-11にCase 2における流速変動の各成分の振幅値の時間変化を示す。算定方法は前述の水面変動の場合と同様で、時系列データのランニングスペクトルを算定しそれを基に各成分の振幅を求めた。なお、各成分($U_0 \sim U_3$)は入射波の水底水平流速振幅(U_i)で無次元表示しており、図の横軸は取り出したデータ

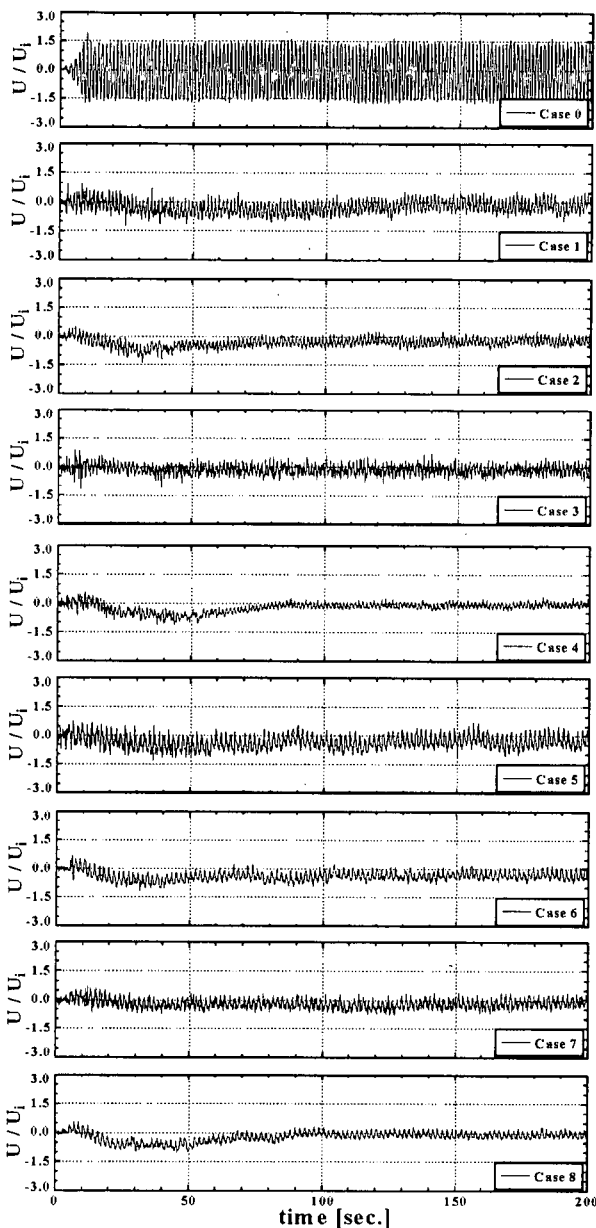


図-10 底面流速の時系列

幅の中心の時間を示している。

波動成分である基本周波数成分(U_1)、2倍周波数成分(U_2)、3倍周波数成分(U_3)は水面変動の場合と同じく時間的にほぼ一定であるが、定常流速を表す定常成分(U_0)は時間的に大きく変動しており、長周期変動が大きく影響していると言える。これは、長周期変動は水面振動自身は小さくても水平方向の水粒子軌道が長いこと水平流速に大きく影響するものと考えられる。

図-12に測定した全ケースについて、定常流速の時間変化を示す。全てのケースにおいて最初の2点は時系列データにおいて大きく変動する部分($0 < t < 100 \text{ sec.}$)を含むため、冲向きに非常に大きな値となっている。さらにその後も時間的に大きく変動しており、その変動の幅はCase 4が最大で入射波の水底水平流速のおよそ38%にも達している。また、各測定ケースは測定の条件(入射波、潜堤)が異なるため直接定常流自身の大きさでは比較できない。そ

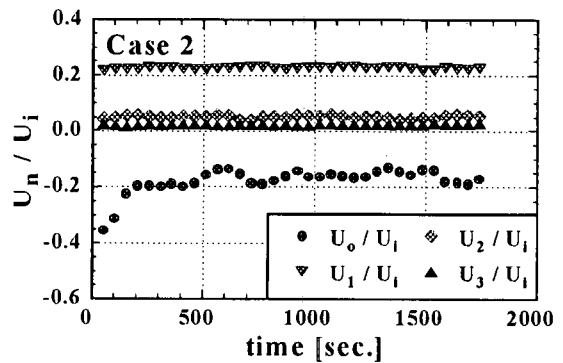


図-11 各周波数成分の振幅値の時間変化 (底面流速)

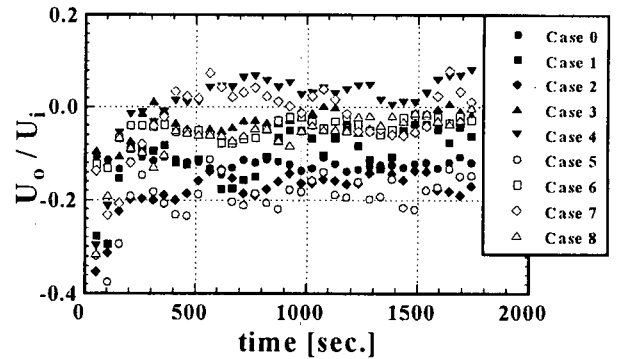


図-12 定常流速の時間変化

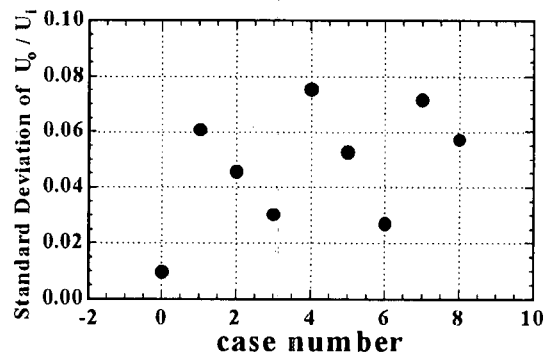


図-13 定常流速の時間変動の標準偏差

ここで各ケースについて時間変動の標準偏差を算定し定常流速の時間変動の程度を比較した。図-13に結果を示す。横軸は測定ケースの番号である。明らかに不透過斜面のCase 0に比べ潜堤を設置したケースが標準偏差値が大きく、定常流速の時間変動が大きいと言える。また、潜堤を設置したケース(Case 1～Case 8)について比較すると、入射波や潜堤の条件による標準偏差値の傾向は確認できず、入射波高が小さく造波板中心位置の変動が小さいケース(Case 1, 5, 7)でも定常流速の時間変動の標準偏差は大きな値となっている。以上の結果から、潜堤を対象とした実験に吸収制御方式の造波装置を用いると、データ取得時間の違いにより定常流速の算定値が大きく異なると言える。

(4) 長周期変動の影響

図-14はCase 2における造波板の変動の時系列(図-4参照)を、FFT解析により周波数分解し、波動成分を除いたうえで再合成した波形で、造波板中心位

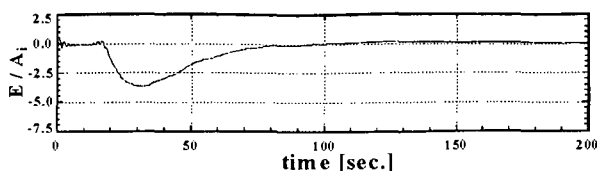


図-14 造波板中心位置の変動の時系列

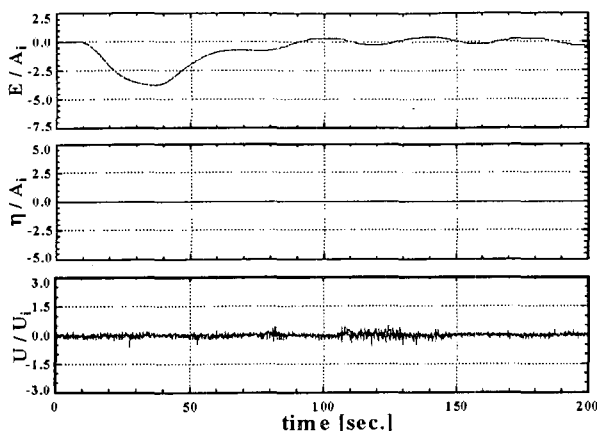


図-15 造波板の変位、水面変動および底面流速変動の時系列

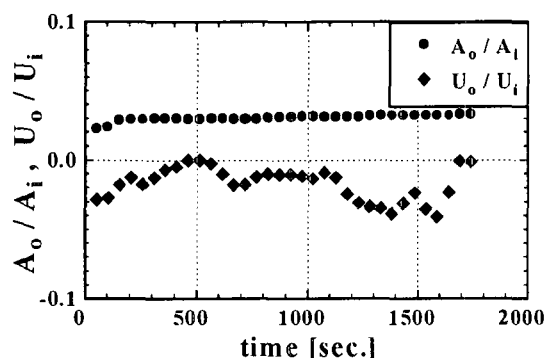


図-16 平均水位および定常流速の時間変化

置の変動を表す。まず、この波形を基にCase 2と同条件で長周期変動のみを強制的に造波し、同様の測定をおこなった。図-15に造波板の変位、水面変動および流速変動の時系列を示す。造波板はほぼ目標とする波形を描いているが、吸収制御機能による消波動作がおこなわれていることがわかる。同時刻の水面変動の時系列はほとんど変化していない。それに比べ流速変動は若干計測器の電氣的なノイズが含まれているが、僅かに長周期の変動が含まれているように思われる。

図-16に平均水位および定常流速の時間変動を示す。平均水位がほとんど変化しないのに対し、定常流速は時間的に変動している。しかし、図-12のCase 2の結果に比べ時間変動の程度は非常に小さい。この結果から、図-12の定常流速の時間変動は、造波板による長周期変動のみが原因ではなく、波動成分に長周期変動が重なることで時々刻々潜堤上での碎波の状況が変化し、それに伴い潜堤直背後の定常流の様相が時間的に変化するためではないかと推測される。

4. あとがき

2次元水槽で潜堤を対象とする規則波実験をおこなうと、潜堤背後の底面流速に極めて長周期の変動が大きく現れる場合があることに気付いた。

水槽実験においてデータの取得開始時間は、波の周期、造波板と潜堤間の距離等を勘案して決めるか、あるいは目視によって定常状態に達したことを判断して決め、造波開始後の高々数十秒間のデータを用いて解析をおこなうことが普通であると思われる。しかるに、この長周期振動は水槽内で生じうる固有振動の周期をはるかに越える長周期（100秒～数100秒）の変動であるため、データ取得の開始時間や用いるデータ長によって平均水位や定常流速の算定値が大きく変動することになりかねない。

そこで、入射波の周期、波高、および潜堤の天端幅を変化させた実験をおこなって、これらの条件の違いが、水面波形と底面流速の波動成分と定常成分の変動に与える影響について検討した。その結果、波動成分（基本周波数成分、干渉によって生じる高次の周波数成分）については長周期変動は見られないが、底面流速に大きな長周期の変動が現れ、データ取得時間とデータ長によって定常流速の算定値が大きく異なることがわかった。

著者らは、この長周期変動は、水位の低下を補償するための造波板中心位置の変動に起因するのではないかと考え、造波板中心位置の変動のみを与えた造波をおこなって底面流速の変動を調べたが有意な変動は見られなかった。今のところ原因については明らかでないが、同時におこなった一様傾斜海浜を対象とする実験ではこの様に大きな長周期変動は生じておらず、したがって、潜堤に特有の大きな質量輸送による、平均水位の造波開始直後の変動が、潜堤上での碎波のわずかな変動を引き起こし、それが潜堤背後の定常流の長周期変動の原因になっているのではないかと推測している。

参考文献

- 1) 吉田明德・村上啓介・高比良智成：2成分ストークス波と構造物の非線形干渉解析法，第41回海岸工講演会論文集，pp.736-740，1994。
- 2) 吉田明德・村上啓介・山城賢：多成分不規則波と没水構造物の非線形干渉解析，第43回海岸工学講演会論文集，pp.791-796，1996。
- 3) 山城賢・吉田明德・入江功：潜堤背後の波動場特性に関する実験的研究（その1）規則波実験，九州大学工学集報第71巻第5号 pp.515-522，1998。
- 4) 小山裕文・岩倉重行・松本勝・遠藤泰司：反射波吸収式造波システムの開発と基本特性，第35回海岸工学講演会論文集，pp.25-29，1988。
- 5) 谷本勝利・原中祐人・富田英治：無反射性造波方式の試み，第30回海岸工学講演会論文集，pp.54-58，1983。

(1999. 4. 19受付)