

水面変動記録を用いた不規則変動波圧の算定法

斎藤武久¹・岩田秀樹²・宮下雄太³・石田 啓⁴

本研究では、不規則な波動場における内部の変動波圧の算定法として、水面の変動記録から変動波圧を予測する手法を構築する。具体的には、線形波動理論に基づく水面変動と変動波圧との間の周波数応答関数を用い、不規則波動場における内部流速の計算方法として利用されている線形フィルター法を拡張する。さらに、2次元断面水槽を用いた室内実験により、進行波および重複波を対象とした水面変動および変動圧力の計測を行い、変動波圧の時間変化および波別解析に基づく有義値等の実験結果と本研究で提案する算定手法によって計算された計算結果との比較から本手法の有効性を確認する。

1. 緒 論

波の場の運動に関して、波形に限らずその内部の流速や圧力を正確に記述することは、多くの海岸工学上の問題において基本的かつ重要な課題である。これに関連して、不規則波の内部流速特性の解明を目的に、水面変動記録から内部の水粒子速度を算定する線形フィルター法(Raid, 1957; 岩垣ら, 1972)が提案されている。この手法は、線形波動理論に基づき、入力値となる水面変動記録の重み付きの線形重ね合わせによって、出力値となる内部流速を予測するものである。算定法の構築では、入力関数の線形重ね合わせの結果から陽に現れるフィルター関数と、入力関数に対する出力関数の周波数応答関数との一致が要求される。この手法を用いて、一様水深のもとで進行する合成波および不規則波の内部流速が水面変動記録から良好に再現されている(岩垣ら, 1972)。さらに、碎波帯付近など、緩勾配斜面上における不規則波の水粒子速度の算定では、長周期波の影響が大きい周波数領域において、部分重複波の周波数応答関数を導入するなどの改善が試みられている(磯部・大中, 1984; 佐藤ら, 1988)。

一方、線形フィルター法を発展させた場合、水粒子速度の算定に限らず、変動波圧の効率的な算定への応用が期待できる。特に、護岸や防波堤などの直立堤に作用する不規則変動波圧が水面変動記録から算定可能となることは、背後砂の吸出しや堤体端部における洗掘問題で重要な課題となっている変動波圧の伝播特性を、入射波諸元と関連させて解明するために必要不可欠である。加えて、水面下における変動波圧の計測技術の観点からも実用的に極めて有効と言える。

以上を踏まえて、本研究では、不規則な水面変動記録から内部の変動波圧を効率的に予測できる算定手法の開発を目的に、その第一段階として、上述の線形フィルター法を不

規則変動波圧の算定へと拡張する。さらに、進行波および重複波を対象とした不規則変動波圧の計測実験を実施し、実験結果との比較から、本算定法の有効性について検討する。

2. 不規則変動波圧の算定方法

本研究で用いる線形フィルター法の概要を岩垣ら(1972)に倣い以下に示す。

一様水深を h とし、 x 軸を波の進行方向、 z 軸を鉛直上向きにとり、原点を静水面上の波高計測位置とする。このとき、波高計測位置での不規則波の水面変動 $\zeta(t)$ を式(1)の線形重ね合わせで表現した場合、水面下における変動波圧 $p(t)$ は微小振幅波理論に基づき、式(2)で表すことができる。

$$\zeta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} M(\sigma) \cos(\sigma t - \theta(\sigma)) d\sigma \cdots \cdots (1)$$

$$p(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R_p(\sigma) M(\sigma) \cos(\sigma t - \theta(\sigma)) d\sigma \cdots \cdots (2)$$

式中の σ は角振動数、 θ は初期位相、 $M(\sigma)$ は振幅スペクトルに相当し、 $R_p(\sigma)$ は、式(3)で与えられる。

$$R_p(\sigma) = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdots \cdots (3)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 k は波数を表す。なお、 $R_p(\sigma)$ は水面変動 $\zeta(t)$ に対する周波数応答関数であり、実測値として水面変動および変動波圧のパワースペクトル $S_\zeta(\sigma)$ および $S_p(\sigma)$ が取得できた場合、 $R_p(\sigma)$ は実験的に式(4)を用いて求めることができる。

$$R_p(\sigma) = \sqrt{\frac{S_p(\sigma)}{S_\zeta(\sigma)}} \cdots \cdots (4)$$

ここで、水面変動を入力値 $y(t)$ として、変動波圧が出力値 $Gs[y(t)]$ となる対称線形フィルター(Raid, 1957)を式(5)のように導入する。

$$Gs[y(t)] = a_0 y(t) + \sum_{n=1}^N a_n [y(t+n\tau) + y(t-n\tau)] \cdots \cdots (5)$$

式(5)は、水面変動の時間変化記録の重み付きの線形重ね合わせによって、出力値が算定できることを表している。

1 正会員 博(工) 金沢大学大学院助教授 自然科学研究科
2 正会員 修(工) 株式会社本間組 土木部
3 金沢大学大学院 自然科学研究科
4 フェロー 工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科

る。このとき、式(5)の $y(t)$ に式(1)の $\zeta(t)$ を代入して整理した式(6)において、

$$\begin{aligned} Gs[\zeta(t)] &= a_0 \zeta(t) + \sum_{n=1}^N a_n [\zeta(t+n\tau) + \zeta(t-n\tau)] \\ &= \int_0^\infty a_0 M(\sigma) \cos(\sigma t - \theta(\sigma)) d\sigma \\ &\quad + \int_0^\infty a_n M(\sigma) \{2 \cos(\sigma t - \theta(\sigma)) \cos n\sigma\tau\} d\sigma \quad \cdots (6) \\ &= \int_0^\infty [a_0 + 2 \sum_{n=1}^N a_n \cos n\sigma\tau] M(\sigma) \cos(\sigma t - \theta(\sigma)) d\sigma \end{aligned}$$

$[a_0 + 2 \sum_{n=1}^N a_n \cos n\sigma\tau]$ と式(3)が一致するように、フーリエ逆変換によって a_0 ($n=0 \sim N$) が決定された場合、式(5)は水面変動を入力値とし、変動波圧を出力値とする線形フィルタとなる。なお、入力値の対象時刻前後におよぶ影響時間の最大値 $N\tau$ (τ は入力値データ間の時間間隔)や、逆フーリエ変換の離散化時における周波数間隔の選定方法には、利用可能な実験データの確保と算定精度の向上に関係して多くの議論がある。本研究では、岩垣ら(1972)の結果を参考に、 $N\tau$ として $2s$ ($\tau=0.01s$) を採用し、逆フーリエ変換では周波数間隔として 0.01 Hz を採用した。

ところで、式(1)および式(2)ともに、波高計の計測位置を $x=0$ と固定し、余弦関数によって時間変化が記述されている。余弦関数の特徴として、波高計の計測位置を固定した場合、波の進行方向が正 ($\cos(kx - \sigma t)$) および負 ($\cos(kx + \sigma t)$) の場合に加えて、両者の重ね合わせ ($\cos kx \cdot \cos \sigma t$) の場合にも、符号の反転を伴うことなく同様の表記で時間変化が記述される。以上の特徴を利用することで、上述の算定手法では、進行波に限らず重複波動場における変動波圧の算定が水面変動記録より可能となる。

3. 実験装置および実験方法

実験には、両端に吸収式造波機が装備された長さ 14 m 、幅 80 cm 、高さ 1 m の2次元造波水槽を用いた。水深 h を 40 cm に固定し、水槽中央部において、容量式波高計と小型水圧計を用いて水面変位と変動波圧の同時計測を行った。なお、変動波圧の計測は、静水面下 $z=-10 \text{ cm}$ より底面方向に 10 cm 間隔の4点とした。計測では、水面変位および変動波圧ともに、計測時間間隔を 0.01 s として、造波開始から 60 s 経過後の 100 s 間のデータを取得した。この際、電気的なノイズ除去のため、 30 Hz のローパスフィルターを用いる以外に、特別なデータ処理は行っていない。

進行波を対象とした実験では、水槽一端の造波機で造波、他端で、消波モールおよび造波機による吸収制御を行った。入射波条件には、Bretschneider・光易型周波数スペクトルを有する、有義波高 $H_{1/3}=2.7 \sim 10.0 \text{ cm}$ 、有義周期 $T_{1/3}=1.06 \sim 3.48 \text{ s}$ の9種類の不規則波

表-1 入射波条件 (不規則波)

Case	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5
有義波高 $H_{1/3}(\text{cm})$	2.7	6.2	8.6	2.7	6.0
有義周期 $T_{1/3}(\text{s})$	1.06	1.06	1.12	1.94	1.94

Case	I-6	I-7	I-8	I-9
有義波高 $H_{1/3}(\text{cm})$	9.5	2.8	6.3	10.0
有義周期 $T_{1/3}(\text{s})$	1.84	3.35	3.34	3.48

表-2 入射波条件 (規則波)

Case	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
波高 $H(\text{cm})$	5.8	11.9	14.5	5.3	11.3
周期 $T(\text{s})$	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00

Case	R-6	R-7	R-8	R-9
波高 $H(\text{cm})$	14.7	5.0	9.6	11.3
周期 $T(\text{s})$	2.00	3.00	3.00	3.00

(表-1)を採用した。なお、不規則波実験に先立って、上述の有義周期にはほぼ対応させながら、高波高の入射波範囲となる、波高 $H=5.3 \sim 14.7 \text{ cm}$ 、周期 $T=1.00 \sim 3.00 \text{ s}$ の9種類の規則波実験(表-2)を行っている。重複波実験では、水槽一端の造波機で造波、他端の造波機を固定した。このとき、不規則規則波の入射波条件は、進行波の場合と同様である。ただし、規則波の場合、進行波と同様の入射波条件では、水槽内でローリングおよび碎波が発生したため、周期 $T=1.50 \sim 3.00 \text{ s}$ 、波高を 7 cm 程度までの範囲で実験を行った。

4. 実験結果および考察

(1) 進行波の場合

不規則波実験に先立って行われた規則波実験の実験結果および水面変動の時間変化記録より算定された変動波圧の計算結果を図-1に例示する。図中、上段(a)が計測地

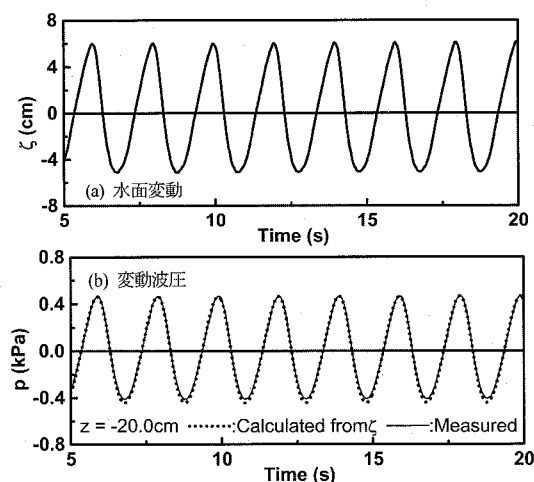


図-1 水面変位および変動波圧の時間変化 (CaseR-5; $H=11.3 \text{ cm}$, $T=2.00 \text{ s}$)

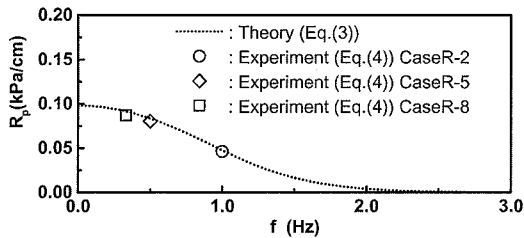


図-2 変動波圧の周波数応答関数

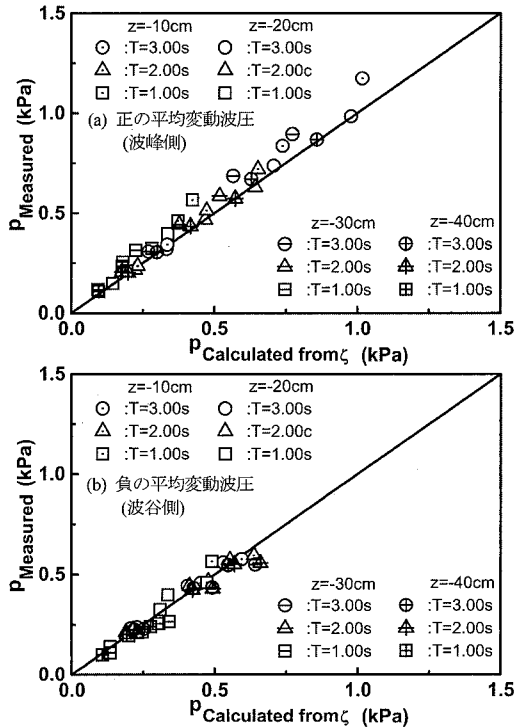


図-3 平均変動波圧に関する実験値と計算値との比較

点における水面変動記録，下段(b)が変動波圧の実測値および水面変動記録より算定した計算値を表す。図より，変動波圧の周期性および正および負の変動波圧の最大値ともに計算結果は実験結果と非常に良く一致していることが分かる。なお，図-2に，式(3)および式(4)から求めた周波数応答関数を他の実験条件(変動波圧の計測位置は $z=-20\text{cm}$)の場合と共に例示する。規則波実験であるため当然ではあるが，理論値と実験値は極めて良く一致していることが確認できる。次に，全ての実験条件について，波別解析による変動波圧の実験値と計算値の比較を図-3に示す。なお，上段(a)は，正の変動波圧振幅(波峰側)の平均値を整理したものであり，下段(b)は，負の変動波圧(波谷側)の平均値の絶対値を整理したものである。図より，計算結果と実験結果が正確に一致していないケースも見られるが，その傾向に入射波高や周期の変化に伴う明確な特徴は認められず，対象とした実験範囲

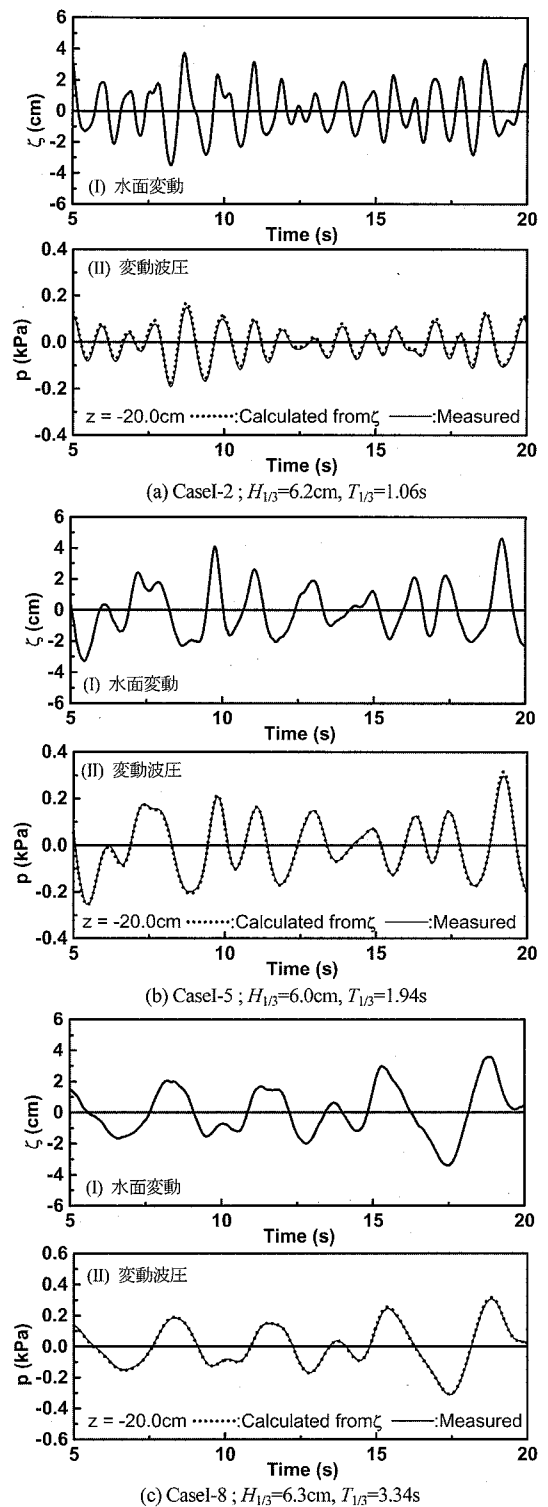


図-4 水面変位および変動圧力の時間変化

において，両者はほぼ良好に一致していることが分かる。続いて，不規則波の場合の実験結果および水面変動記

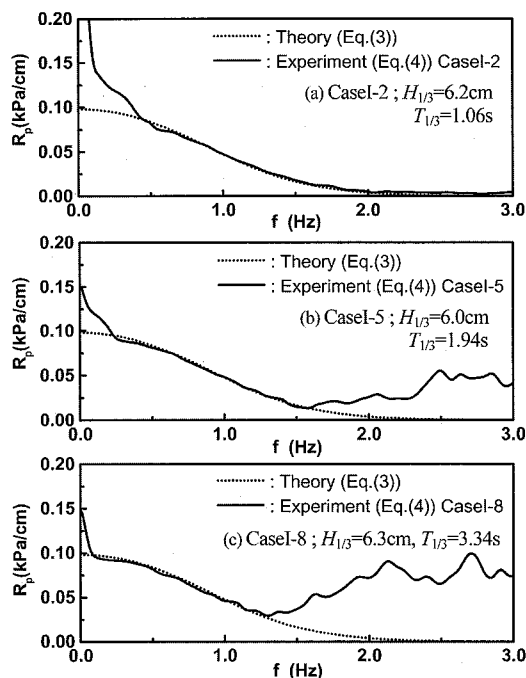


図-5 変動圧力の周波数応答関数

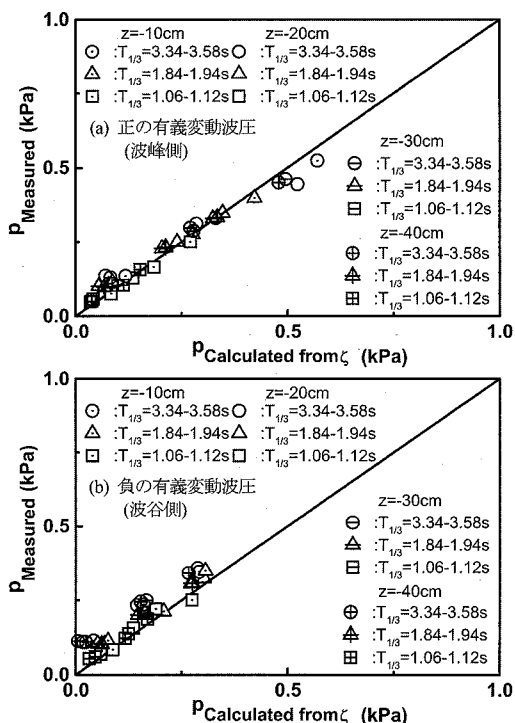


図-6 有義変動波圧の実験値と計算値との比較

録より算定された変動波圧の計算結果を図-4に例示する。ほぼ同一の入射波高で、有義周期の異なる3つのケースではあるが、不規則な変動波圧の実験結果を計算結果は非常に良く再現していることが分かる。なお、この

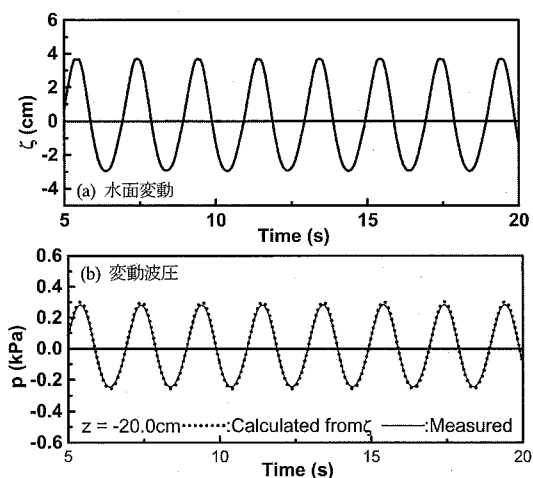
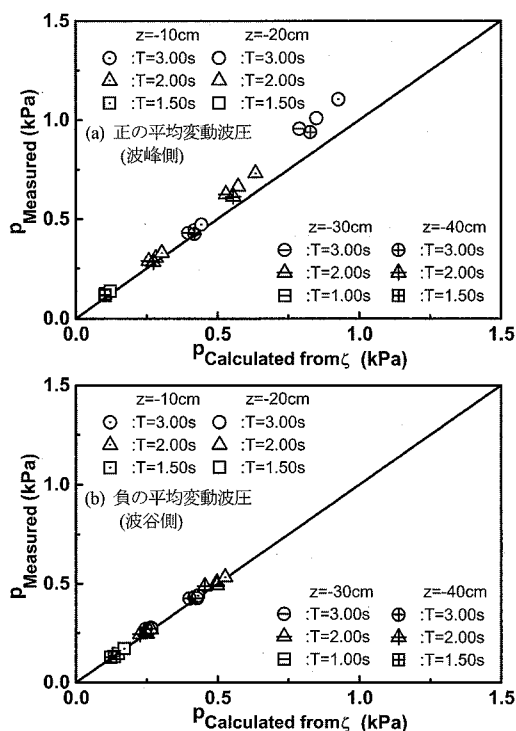
図-7 水面変位および変動圧力の時間変化 ($H=2.4\text{cm}$, $T=2.00\text{s}$)

図-8 平均変動波圧の実験値と計算値との比較

ときの周波数応答関数を図-5に示す。対象となる有義周期付近の理論値と実験値との良好な一致が、図-4に例示した変動波圧の実験結果と計算結果との良好な一致に反映されていることが分かる。さらに、図-6に、波別解析により求めた、正および負の変動波圧振幅の有義値(負の場合は絶対値で表記)を実験値と計算値で比較した結果を示す。規則波の場合と同様に、特徴的な変化傾向は見られず、比較的良好に計算値が実験値を再現し

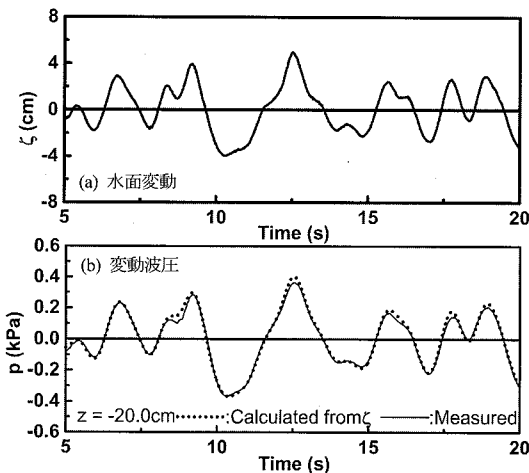


図-9 水面変位および変動圧力の時間変化
(Case I-9; $H_{1/3}=10.0\text{ cm}$, $T_{1/3}=3.48\text{ s}$)

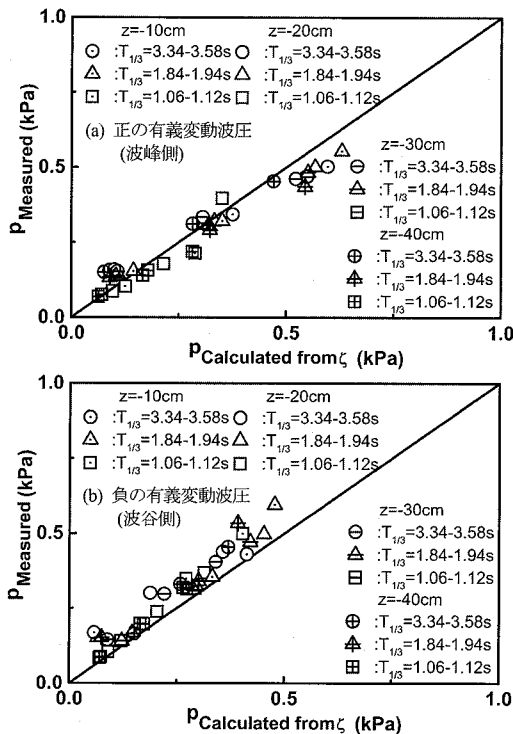


図-10 有義変動波圧の実験値と計算値との比較

ていることが分かる。ただし、より正確な算定には、図-5の周波数応答関数に見られるような実験値および理論値の乖離に関して、入射波の周波数帯域などの関係から、さらに検討する必要がある。

(2) 重複波の場合

図-7に規則波の場合の実験結果および変動波圧の計算結果を例示し、波別解析による変動波圧の実験値と計算値の比較を図-8に示す。図より、例示した変動波圧

の時間変化は、実験結果および計算結果が非常によく一致していることが分かる。一方で、変動波圧振幅の結果では、入射波が高波高の場合に、正の変動波圧振幅の計算結果が実験結果を下回る傾向にある。負の変動波圧が良好な一致を示していることから、一概に入射波の増加に伴う水面波形の非線形性による原因とは言えず、検討の余地がある。さらに、本手法の適用限界を議論する際には、本研究で行った計測位置を水槽中央部に固定した実験に加えて、腹や節の位置など、入射波条件に合わせて計測位置を移動させた系統的な実験により、結果を整理することが必要となる。続いて、図-9に不規則波の場合の実験結果および変動波圧の計算結果を例示し、波別解析による変動波圧の実験値と計算値の比較を図-10に示す。規則波の場合と同様に、例示した変動波圧の時間変化は、計算結果が実験結果を非常によく再現していることが分かる。また、変動波圧振幅の有義値は、計算結果と実験結果がおおむね良好に一致していることが確認できる。ただし、入射波高の増加に伴い、正の変動波圧振幅は計算値が実験値を上回り、負の変動波圧振幅は計算値が実験値を下回る傾向が確認できる。これらの傾向の原因の解明を含め、より精度の高い算定方法の構築に向けて、今後さらに検討を進める。

5. 結 論

本研究の主要な結論は以下のようにまとめられる。

- 1) 不規則波動場における内部流速の計算方法として利用されている線形フィルター法を拡張し、不規則な水面変動記録より内部の変動波圧の予測を可能とする効率的な算定手法を構築した。
- 2) 進行波および重複波を対象とした水面変動および内部の変動波圧の計測実験を、入射波として規則波および不規則波の場合に実施し、変動波圧の時間変化特性および波別解析による変動波圧の有義値等を整理した。
- 3) 変動波圧に関する実験結果および実験で得られた水面変動記録より算定した変動波圧の計算結果は良好に一致し、対象とした実験範囲において、本研究で提案した方法を用いることで、水面変動から内部の変動波圧の予測がおおむね可能であることが明らかになった。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・大中 晋(1984): 碎波帯付近における不規則波の水粒子速度の計算法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 39-43.
- 岩垣雄一・酒井哲郎・石田 啓(1972): 不規則波の水粒子速度と水面変動との相互関係に関する研究, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 149-154.
- 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流速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.
- Reid, R.O.(1957): Correlation of water level variations with wave force s on a vertical pile for nonperiodic wave, Proc. 6th Int. Conf. Coastal Eng., pp. 749-786.