

水面変動記録を用いた不規則変動波圧の算定に関する一考察

金沢大学大学院 ○宮下雄太 金沢大学 正会員 斎藤武久 金沢大学 フェロー 石田 啓

1.はじめに 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。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。本研究では、水面変動記録から内部の変動波圧を算定する2つの算定方法を提示し、実験結果との比較によりそれぞれの算定法の有効性について考究する。

2.線形フィルタ - 法 従来、水面変動記録から内部の水粒子速度の算定に有効な手法とされている線形フィルタ - 法^{1),2),3)}を拡張し、内部の変動波圧の算定を可能とするものである。その概要は以下のようなものである⁴⁾。

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。

$$\zeta(t) = \int_0^\infty M(\sigma) \cos(\sigma t - \theta(\sigma)) d\sigma \quad \cdots (1) \quad p(t) = \int_0^\infty R_p(\sigma) M(\sigma) \cos(\sigma t - \theta(\sigma)) d\sigma, \quad R_p(\sigma) = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \quad \cdots (2)$$

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、 $R_p(\sigma)$ は周波数応答関数であり、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 k は波数を表す。ここで、水面変動を入力値 $y(t)$ とし、 $y(t)$ の重み付き線形重ね合わせにより、出力値 $G_s[y(t)]$ を算定する対称線形フィルタ - $G_s[y(t)] = a_0 y(t) + \sum_{n=1}^N a_n [y(t+n\tau) + y(t-n\tau)]$ を導入する。このとき、 $G_s[y(t)]$ の $y(t)$ に式(1)の $\zeta(t)$ を代入して整理した式(3)において、

$$G_s[\zeta(t)] = \int_0^\infty [a_0 + 2 \sum_{n=1}^N a_n \cos n\sigma\tau] M(\sigma) \cos(\sigma t - \theta(\sigma)) d\sigma \quad \cdots (3)$$

$[a_0 + 2 \sum_{n=1}^N a_n \cos n\sigma\tau]$ と式(2)の応答関数が一致するように、フーリエ逆変換によって $a_n (n=0 \sim N)$ が決定された場合、 $G_s[y(t)]$ 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、 $N\tau$ は入力値の対象時刻前後におよぶ影響時間 (τ は入力値デ - タ間のサンプリング時間間隔) を表す。

3.局所近似法 波圧式波高計による水面変動算定の際、周波数領域での解析を踏まえた従来のスペクトル法に加えて、時間領域で変動波圧から水面変動を算定する局所近似法^{5),6)}が提案されている。この中で、周波数応答関数を用いる手法と準経験関数を用いる二つの手法が紹介されているが、ここでは、準経験関数を用いる手法を拡張し、水面変動記録から変動波圧を算定する算定手法を構築する。その概要は以下のようなものである。

一般に、水面変動記録 $\zeta(t)$ の任意の3点により正弦関数 $\zeta(t) = A_n \sin(\omega_n t - \varphi_n)$ が定義され、式中の A_n 、 ω_n および φ_n が任意の3点による局所パラメータとなる。このとき、局所周波数 ω_n は、 $\zeta_n / \zeta = \omega_n^2$ の関係を利用して、近似的に $\omega_n^2 = (-\zeta_{n-1} + 2\zeta_n - \zeta_{n+1}) / (\tau^2 \zeta_n)$ によって評価される。なお、 $n(=1, 2, \dots)$ は水面変動記録のサンプリング時刻を表す。ここで、Nielsen^{5),6)}に従い、水面変動と波高計測位置水底での変動波圧との関係は、水面変動の周波数 ω と単位水塊のもつ固有振動数 $(g/h)^{1/2}$ との比に依存するとし、 $\zeta/(p/\rho g) = F(\omega^2 h/g)$ からなる物理モデルを仮定する。さらに、平均水位から水表面までの変動量を考慮し、 $\zeta/(p/\rho g) = F(\omega^2 (h+\zeta)/g)$ と拡張する。ここで、 ω^2 として、局所周波数 $\omega_n^2 = (-\zeta_{n-1} + 2\zeta_n - \zeta_{n+1}) / (\tau^2 \zeta_n)$ を用い、準経験関数 F を、規則波での実験⁴⁾に基づく波峰位置での $\zeta/(p/\rho g)$ および $\omega_n^2 (h+\zeta)/g$ の関係から、指数関数を用いた最小自乗近似により検討することで、次式の算定式が得られる。

$$p_n = \rho g \zeta_n \exp \left[-B \left(\frac{z_p}{h} \right) \frac{-\zeta_{n-1} + 2\zeta_n - \zeta_{n+1}}{\zeta_n g \tau^2} (h + \zeta_n - z_p) \right] \quad \cdots (4)$$

ここに、 z_p は鉛直上向き z 軸における水底をゼロとしたときの波圧計測位置を示し、 $B(z_p/h)$ は、最小自乗近似により決定される係数である。なお、変動波圧記録から水面変動を算定する場合、 B は z/h の増加とともに線形的に比例することが分かっている。

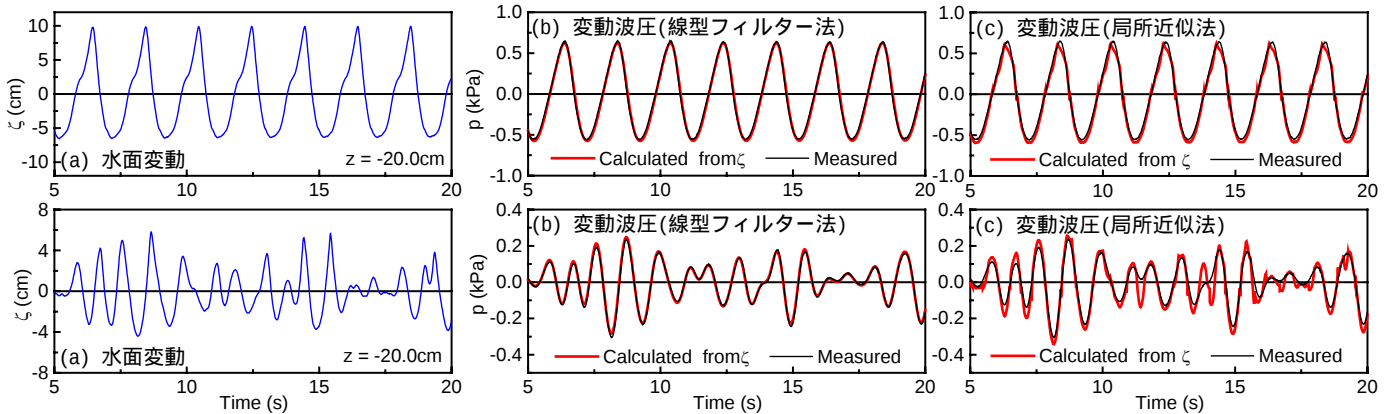


図-1 水面変動および変動波圧の時間変化(上段 規則波: $H_0=14.7\text{cm}$, $T=2.0\text{sec}$. 下段 不規則波 $H_{1/3}=8.6\text{cm}$, $T_{1/3}=1.12\text{sec}$.)

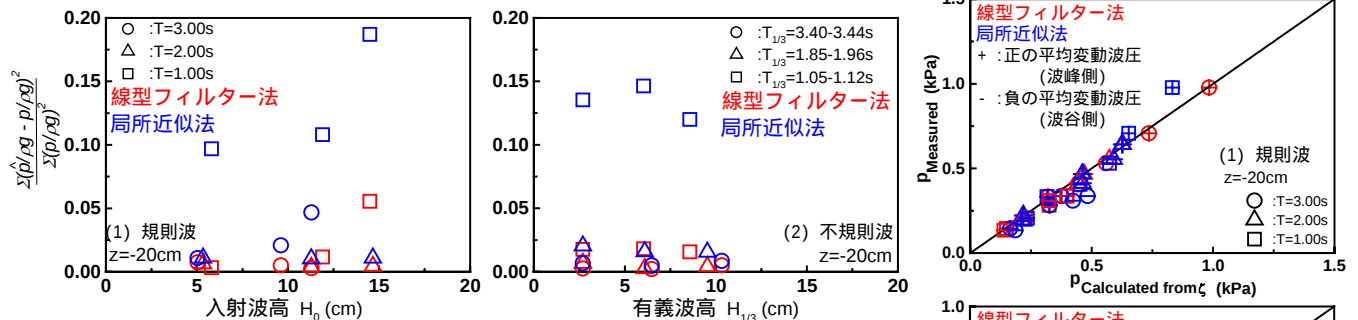


図-2 変動係数 ($\hat{p}$: 変動波圧計算値, p : 変動波圧実測値)

4. 算定結果および考察 変動波圧の算定に際して, 本研究では, 既往の2次元造波水槽を用いた水面変動および変動波圧の同時計測結果⁴⁾を利用した. なお, 実験条件は $h=40\text{cm}$, $z_p=20\text{cm}$ であり, 不規則波に先行して行った規則波の場合, 入射波高 $H_0=5.3 \sim 14.7\text{cm}$, 周期 $T=1.00 \sim 3.00\text{s}$, 不規則波の場合, 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 $T_{1/3}=1.06 \sim 3.48\text{s}$ の範囲である. 図-1に水面変動と変動波圧の実験値および二つの算定法による計算結果を例示する.

規則波の場合, 両者の算定手法ともに変動波圧を概ね良好に再現しているが, 不規則波の場合, 局所近似法による計算結果では実験結果を良好に再現できていない箇所がみられる. 計算結果と実験結果との誤差を議論するため, まず, 図-2に実験結果に対するそれぞれの計算結果の変動係数を示す. 図より, 変動係数は規則波と不規則波の全ての実験条件で0.2を下回り, それぞれの算定法により変動波圧を良好に算定できている. ただし, 局所近似法を用いた計算結果は, 入射波が高周波の場合, 線形フィルター法に比べて誤差が大きくなっていることが分かる. 次に波別解析による変動波圧振幅の平均値および有義値に関する比較結果を図-3に示すが, 誤差に関して上述の傾向を図より確認することができる.

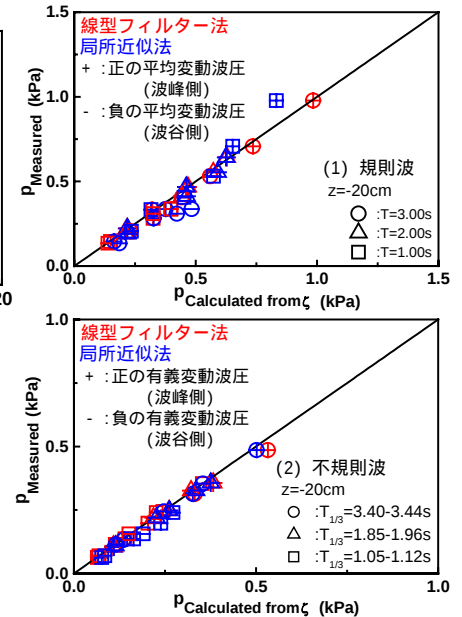


図-3 変動波圧の実測値と計算値の比較

5. まとめ 本研究では, 水面変動記録から内部の変動波圧を算定する二つの算定方法を提示し, それぞれの算定法の有効性について考究した. 実験結果との比較から, 本研究の実験条件範囲では, 算定された変動波圧の変動係数, 規則波の場合の平均振幅波圧, さらに, 不規則波の場合の有義振幅波圧とともに, 両者の算定法で概ね良好に変動波圧を再現できることが分かった. ただし, 高周波領域では線形フィルター法が局所近似法に比べ, より精度良く変動波圧を算定できている. この点に関して適用限界も含めて現在検討中である.

参考文献

- 1) 岩垣・酒井・石田: 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, 1972.
- 2) 磯部・大中: 砕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, 1984.
- 3) 佐藤・諫山・柴山: 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, 1988.
- 4) 斎藤・岩田・宮下・石田: 水面変動記録を用いた不規則変動波圧の算定法, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.781-785, 2006.
- 5) Nielsen P.: Local approximations: A new way of dealing with irregular waves, *Proc. 20th Int. Conf. Coastal Eng.*, pp. 633-646.
- 6) Nielsen P.: Analysis of natural waves by local approximations, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.115, No.3, pp. 384-396, 1989.