

多方向不規則波による港内副振動の解析

名古屋工業大学 学生員 平谷和記

名古屋工業大学 正会員 柏原謙爾

名古屋工業大学 正会員 喜岡 渉

1. はじめに

外洋に面した漁港、マリーナなど比較的小規模な港湾や細長い湾では、台風、低気圧の通過や冬春季節風による高波浪時に港内で平均水位の上昇および周期数分の副振動が顕著に現れることがあり、これまでも八丈島八重根漁港における冷蔵庫等の陸上施設の冠水¹⁾や苫小牧東漁港における船舶の係留索の切断²⁾など多くの被害例が報告されている。また、高波浪を伴う高潮発生時には、副振動による長周期水面振動が越波量を増大させ災害を助長する可能性もある。

著者ら³⁾は、すでに副振動を引き起こす原因を来襲波浪の成分波間の非線形干渉によって生じた2次長周期波を考え、非線形回折波理論に基づく湾内副振動の予想モデルを開発し、矩形港湾の共振特性を明らかにしている。しかし一方で、港外での来襲波の伝播変形過程においては波群に拘束される2次長周期波と位相の異なる自由長波が混在することがあり、また来襲波の多方向性が長周期波の副振動にも大きく影響を与える可能性があることが指摘されている⁴⁾。本研究は、Boussinesq方程式に基づく多方向不規則波動場の計算モデルを開発し、それを用いて来襲波の多方向性が副振動に与える影響を具体的に評価しようとするものである。

2. 数値波動水槽

数値波動水槽に用いる波動方程式はNwogu⁵⁾による分散性の精度を向上させた次の式(1)、(2)である。

$$\zeta_t + \nabla \cdot [(h + \zeta) \mathbf{u}_\alpha] + \nabla \cdot \left[\left(\frac{1}{2} z_\alpha^2 - \frac{1}{6} h^2 \right) h \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) + \left(z_\alpha + \frac{1}{2} h \right) h \nabla (\nabla \cdot (h \mathbf{u}_\alpha)) \right] = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_t + \mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla \mathbf{u}_\alpha + g \nabla \zeta + \left[\frac{1}{2} z_\alpha^2 h \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha t}) + z_\alpha \nabla (\nabla \cdot (h \mathbf{u}_{\alpha t})) \right] = 0 \quad (2)$$

ここに、 ζ は水面変動、 h は静水深、 z_α は任意水深（静水面基準、上向き正）、 $\mathbf{u}_\alpha$ は任意水深 z_α における水平方向流速ベクトル、 g は重力加速度である。また、 ∇ は水平方向微分演算子ベクトル、添字 t は時間による微分を表している。この方程式は、代表流速を任意の水深で定義することにより相対水深をパラメータとして4次の分散性の精度を見かけ上得ることができる。

数値計算は有限差分法により行う。水面変動、水平方向流速は同一格子点上で評価するよう離散化した。Nwoguの方程式における分散性に対する精度改善は結果的に方程式中に空間に対して3階の導関数を含むこととなっており、このため空間方向には従来より高精度の離散化が必要とされる。本研究では中央5-point差分近似により導関数の離散化を行った。連続式(1)は ζ について陽的に離散化が可能であるのに対し、運動量方程式(2)は $\mathbf{u}_\alpha$ について陰的となる。計算効率の面から $\mathbf{u}_\alpha$ についてはADI法のような手法が有効であり、ここでもそれに準じた方法を用いる。具体的には、以下に示すとおりである。まずStep 1として、連続式(1)を用いて ζ を陽的に計算し、次にStep 2では、 x 軸方向の運動量方程式(2)について、 x 軸方向の水平方向流速成分 u_α を陰的に y 軸方向の水平方向流速成分 v_α を陽的に離散化し u_α を陰的にもとめる。つづいてStep 3では、 y 軸方向について u_α 、 v_α を入れ替えStep 2と同様の操作をおこなう。最後に得られた解を予測子として用い、修正計算としてStep 1～Step 3の過程を繰り返す。時間積分には4次のRunge-Kutta法を用いる。

入射境界での ζ 、 $\mathbf{u}_\alpha$ は、方向かつ周波数の異なる正弦合成波で与えた。 ζ についてのみ示すと式(3)のとおりである。

$$\zeta = \sum_n a_n \sin(k_n \cdot x - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (3)$$

ここに、 a_n ：成分波振幅、 k_n ：成分波波数ベクトル、 ω_n ：成分波角周波数、 ε_n ：初期位相差とする。

数値波動水槽に入射させる波の2次的な長周期波の位相をあわせるため次の式(4)によって算定される長周期成分を式(3)で得られる短周期成分の波形に合成し入射波とする。

$$\zeta^{(2)}(x, t) = a_1 a_2 G_-(\omega_1, \omega_2, \theta_1, \theta_2) \cos(k_- \cdot x - \omega_- t) \quad (4)$$

ここに、 $\zeta^{(2)}$ は2次の長周期水面変動、 θ は x 軸を基準として反時計回り方向を正とした波の方向角である。 α は z_α と h から

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{z_\alpha}{h} \right)^2 + \left(\frac{z_\alpha}{h} \right) \quad (5)$$

の関数で与えられる。

$$G_-(\omega_1, \omega_2, \theta_1, \theta_2) = \frac{\omega_1 \omega_2 (k_- h)^2 \cos \Delta \theta \left[1 - \left(\alpha + \frac{1}{3} \right) (k_- h)^2 \right]}{2 \lambda k'_1 k'_2 h^3} + \frac{\omega_- \left[1 - \alpha (k_- h)^2 \right] \left[\omega_1 k'_2 h (k_1 h - k_2 h \cos \Delta \theta) + \omega_2 k'_1 h (k_1 h \cos \Delta \theta - k_2 h) \right]}{2 \lambda k'_1 k'_2 h^3} \quad (6)$$

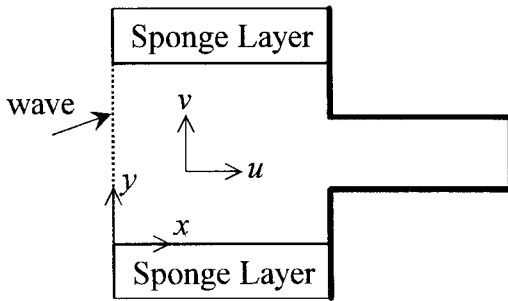
なお、式(5)、(6)中に現れる諸定数は以下のように定義している。

$$\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2 \quad (7)$$

$$k_- = |k_1 - k_2| = \sqrt{(k_1 \cos \theta_1 - k_2 \cos \theta_2)^2 + (k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2)^2} \quad (8)$$

$$\lambda = \omega_-^2 \left[1 - \alpha (k_- h)^2 \right] - g k_-^2 h \left[1 - \left(\alpha + \frac{1}{3} \right) (k_- h)^2 \right] \quad (9)$$

3. 数値計算モデル



港湾形状が湾水応答におよぼす基本的特性を調べるため壁面に長方形港湾を設けたモデルにより数値計算を行う。計算に用いた水槽の概略を図-1に示す。水深は港湾内外ともに一定とし、港湾内壁および外洋に面した壁面は全て直立壁としている。壁面については壁面に対して鉛直方向の流速成分を0とする境界条件を与えている。港外両端境界では多方向に分散した波を有効計算領域内に影響を及ぼさないよう吸収・透過させる必要がある。このため港外の両端境界前面にはスポンジ層を配し、境界位置には自由透過境界を用いた。

4. おわりに

Boussinesq 方程式を用いた多方向不規則波動場の計算法を提案し、長方形湾の副振動に及ぼす入射波の多方向性について検討を加えた。具体的な湾内応答特性についての計算結果は講演時に発表したい。

参考文献

- 1) 金山進・清水琢三・高木伸雄・服部武・二見耕左・武藤亮介(1994), 海岸工学論文集, 第41巻, pp.76-80.
- 2) 渥美洋一・菅沼史典・松良精三・宮本義憲(1994), 海岸工学論文集, 第41巻, pp.71-75.
- 3) 喜岡 渉・柏原謙爾・岩垣雄一(1993), 土木学会論文集 No.473/II-24, pp.55-64.
- 4) 喜岡 渉・石原健司(1993), 土木学会論文集 No.467/II-23, pp.75-82.
- 5) Nwogu O. (1994): J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 119, No. 6, pp.618-638.