

鉛直 2 次元場における段波とコンテナの衝突とその後の挙動に関する一考察

名古屋大学大学院工学研究科 正 会 員 川崎 浩司
 名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 ○山口 聡
 名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 袴田 充哉
 名古屋大学大学院工学研究科 正 会 員 水谷 法美

1. はじめに：

周知のとおり，将来起こりうる東海地震，東南海地震，南海地震等による津波の被害が懸念されている．また，津波による直接被害だけでなく，木材，車両，コンテナなどの漂流物が港湾周辺施設に衝突して被害が拡大化する二次被害も危惧されている．水谷ら(2005)は，エブロン上に配置されたコンテナを対象に，津波の遡上水位，コンテナの作用波力などを計測し，津波力を Morison 式で評価できることを明示した．しかし，水理実験では，漂流するコンテナの作用波力，遡上流速の計測が困難であるといった問題点もある．一方，新しい計算手法の開発と演算処理機器の進歩により，近年，物理現象の解明に数値解析が多く利用されている．川崎・袴田(2005)は，固相・気相・液相の相互干渉を考慮した 2 次元多相乱流モデル DOLPHIN-2D を構築し，段波により漂流する構造物の動的挙動および波力特性を数値計算の面より検討した．しかしながら，水理実験との比較がされておらず，定量的に数値モデルの妥当性が検証されていない．そこで，本研究では，鉛直 2 次元場における水柱崩壊後の水塊がコンテナ模型に衝突する問題を対象に，水理実験と 2 次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を用いた数値解析を行い，段波とコンテナ模型の衝突特性とその後の挙動について検討する．

2. 2 次元固気液多相乱流モデル DOLPHIN-2D の概要

2 次元固気液多相乱流モデル DOLPHIN-2D で使用する基礎方程式は，以下に示すとおり，2 次元圧縮性・粘性流体に対する質量保存式(1)，Navier-Stokes 運動方程式(2)，圧力方程式(3)，異相関の割合を示す密度関数の移流方程式(4)，バロトロピー流体に対する状態方程式(5)から構成される．

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad \dots\dots (1) \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{f} \quad \dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p = -\rho C_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \quad \dots\dots (3) \quad \frac{\partial \phi_I}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla (\phi_I) = 0 \quad \dots\dots (4) \quad \rho = f(p) \quad \dots\dots (5)$$

ここで， ρ は流体の密度， $\mathbf{u}$ は流速ベクトル(u, w)， p は圧力， μ は粘性係数， C_s は局所音速， $\mathbf{f}$ は重力，CSF (Continuum Surface Force) モデルで評価された表面張力，LES (Large Eddy Simulation) モデルの SGS (SubGrid Scale) 応力を含む外力ベクトル， t は時間， $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$ を示す．また， ϕ_I は I 相 ($I=1 \sim 3$ ； ϕ_1 は固相， ϕ_2 は液相， ϕ_3 は気相) の密度関数であり， $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ ($0 \leq \phi_1, \phi_2, \phi_3 \leq 1$) の関係を満たす．なお，計算アルゴリズムの詳細については，川崎・袴田(2005)を参照されたい．

3. 水理模型実験

図-1 に示すアクリル製実験水槽を作製・使用し，段波とコンテナの衝突に関する水理実験を行った．なお，ゲートを上方に急開して水柱崩壊を生じさせることにより，段波を発生させた．水柱の幅は 15.0cm と一定で，その高さを 4 種類 (15.0, 20.0, 25.0, 30.0cm) とした．また，コンテナ模型は幅を 4.0cm と固定し，高さと重量を (4.0cm, 1.046N)，(4.0cm, 1.345N)，(8.0cm, 1.657N)，

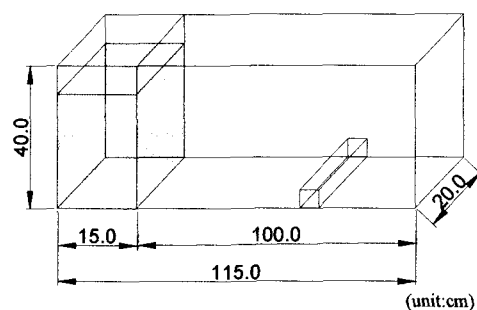


図-1 実験水槽概略図

(8.0cm, 2.128N) の 4 種類の組み合わせとした。模型の設置位置に関しては、ゲート位置から 55.0, 70.0, 85.0cm の 3 種類である。よって、模型を固定、非固定した場合も含め総計 72 ケースの水理実験を実施した。各実験を行う際、段波とコンテナ模型の動的挙動を把握するために、高速度ビデオカメラ (60 frame/s) を用いてその様子を撮影した。

4. 計算・実験結果の考察

図-2 と図-3 はそれぞれ実験結果と計算結果であり、段波が底面に固定されたコンテナ模型に段波が衝突する様子を示す。ここで、水柱の高さは 25.0cm, コンテナ模型の高さと設置位置はそれぞれ 4.0, 70.0cm である。また、計算領域は水平方向に 1.15m, 鉛直方向には気相領域への水塊の影響を考え水柱高さの 2 倍の 0.5m とした。x, z 方向の格子間隔は $\Delta x = \Delta z = 0.005\text{m}$, 時間ステップ間隔 Δt は $1.0 \times 10^{-5}\text{s}$ である。流体の物性値に関しては、水と空気密度 ρ_w, ρ_a をそれぞれ $998.8, 1.20\text{kg/m}^3$, 表面張力係数 σ を $7.2 \times 10^{-2}\text{N/m}$, 重力加速度 g を 9.80665m/s^2 , 初期大気圧 P_a を 1013hPa と設定した。

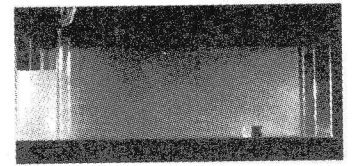
図-2 と図-3 の比較より、コンテナ模型への段波の到達時間に関しては計算結果の方が実験結果より若干早いことがわかる。この原因として、数値計算ではゲートを瞬間的に開放するため計算開始直後に水柱が崩壊し始めるが、水理実験ではゲートを上方に急開して段波を発生させているため崩壊する水塊はゲートの移動によるせん断力を受けていることなどが挙げられる。Shigematsu et al.(2004)によると、ゲート開放の影響を数値計算に考慮することにより同問題は改善されると報告されているが、本研究においては今後の検討課題である。ついで、水塊の最大打ち上がり時を示す図-2(d)と図-3(c)より、実験結果の方が水塊の打ち上がり規模が大きいようにみえる。これはビデオ撮影上の問題で、実験水槽の奥行き全体が映し出されているためである。しかし、水理実験と数値計算ともに、水塊の打ち上げ高さが約 25cm であり、また数値計算は水理実験でみられる水塊の先端が水しぶきとして分離する様子まで再現していることが確認される。以上のことから、本研究で使用した 2 次元固気液多相乱流モデル DOLPHIN-2D の妥当性をある程度定量的に検証される。

5. おわりに

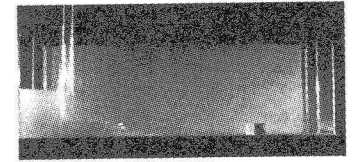
本研究では、2 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を段波とコンテナ模型の衝突問題に適用し、水理実験との比較よりモデルの妥当性を検証した。本論では、紙面の制約上、コンテナ模型が固定された場合のみを記述したが、講演時では段波とコンテナ模型の衝突後の水塊およびコンテナの動的挙動についても発表する予定である。最後に、本研究の一部は平成 17 年度財団法人前田記念工学振興財団研究助成（代表：川崎浩司）を受けていることを付記し、深甚なる謝意を表する。

[参考文献]

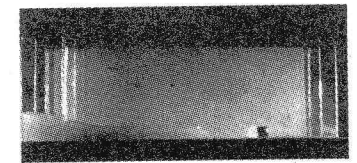
- 水谷ら(2005): 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.741-745.
 川崎・袴田(2005): 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.726-730.
 Shigematsu, T. et al.(2004): J. Hydraulic Research, Vol.42(2), pp.183-195.



(a) $t=0.0\text{s}$



(b) $t=0.2\text{s}$

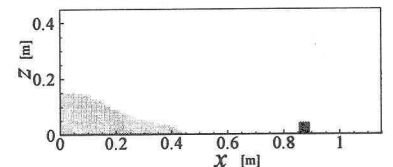


(c) $t=0.42\text{s}$

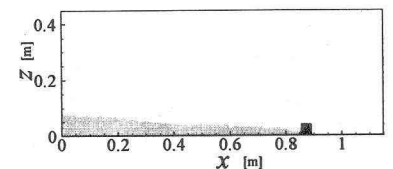


(d) $t=0.61\text{s}$

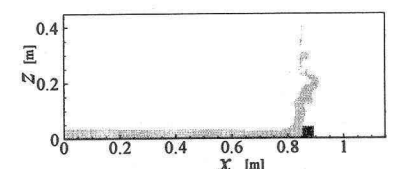
図-2 水理実験結果



(a) $t=0.2\text{s}$



(b) $t=0.37\text{s}$



(c) $t=0.63\text{s}$

図-3 数値計算結果