

三維楔型物體落水流固耦合模型開發與分析

曾瑋展*¹ 蔡順峯*

*國立台灣海洋大學 輪機工程學系

關鍵詞：流固耦合，入水問題，楔型結構，OpenFOAM，Calculix，preCICE

摘要

本文分析三維楔形物體落水自由液面流體飛濺雙相流與結構物受衝擊負荷下之流固耦合問題。研究開發有限體積開源軟體 OpenFOAM®分析自由液面雙相流，採用 VOF 雙相流與重疊網格(Overset)方法，結構物受衝擊負荷力藉由傳遞方式，結合分區多物理場模擬之開源耦合庫 preCICE，透過開源有限元素軟體 Calculix®進行結構變形模擬分析，建立流固耦合分析模型。研究結果顯示與文獻實驗進行比較，在不同底部斜升角(Deadrise Angle)下楔型物體撞擊水面產生之受力情形吻合，足以驗證此一開發流固耦合分析模型之正確性。

前言

落水問題為造船及海洋工程中最受關注的問題之一，結構物體以高速落入水面，撞擊水面時，流體作用力在極短時間內對結構表面產生高值之壓力載荷，危害結構物全局或局部之結構安全性，其為一複雜之非線性流固耦合問題。

落水問題之分析，一般為分實驗方法和數值模擬方法，若以實驗方法進行，除了需要在結構物上裝配足夠之壓力感測器外，同時也須透過高速攝影機來捕捉其變形量，其工程極為浩大且耗費時間成本。本文採用數值模擬方式探討結構物落水之變形情形，同時為了簡化問題之複雜性，將楔形作為本文之分析對象，為落水問題最常探討之簡易船殼形狀。

落水問題涉及物體大量位移和自由液面變形等複雜因素，本文求解基於 VOF 方法之不可壓縮流之 Navier-Stoke equation，捕捉楔型結構物撞擊水面之自由液面變形，並透過重疊網格(Overset)方法，作為動網格之求解算法，同時僅考慮一個自由度下(One Dof)的物體落水問題。

數值模型

1. 幾何外型

本文採用三維楔型模型進行落水模擬分析，其長度為 1m 寬度為 0.5m，其三維外形圖如圖 1 所示。透過調整楔型模型之 Deadrise angle，如圖 2 所標示之角度，比較分析不同特徵角度下，落水過程中受到水彈性效應產生壓力峰值及週期之差異性。其楔形之質量採用參考文獻之值，假定為 241.0kg。

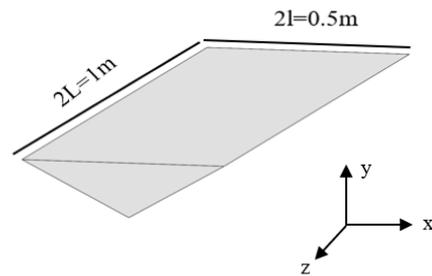


圖 1. 楔型三維圖

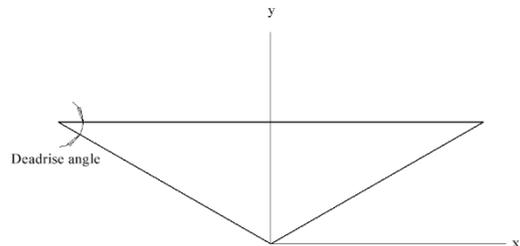


圖 2. 楔型平面圖

¹ 聯絡作者 曾瑋展 (a0926995602@gamil.com)

2. 網格劃分

本文採用重疊網格(Overset)方法，分別建立組件網格和背景網格。組件網格使用 Cutcell Mesh Method 進行網格劃分，背景網格則透過 OpenFoam 之網格生成器 BlockMesh 進行網格劃分，在透過 refineMesh 對自由液面附近之網格進行局部加密。確保網格劃分過程中，除了有效保留幾何外型之特徵外，同時確保網格質量品質良好，降低數值模擬發散和結果不準確之可能性，其組件網格和背景網格分別由圖 3 和圖 4 所示，其網格類型和網格數量如表 1 所示。

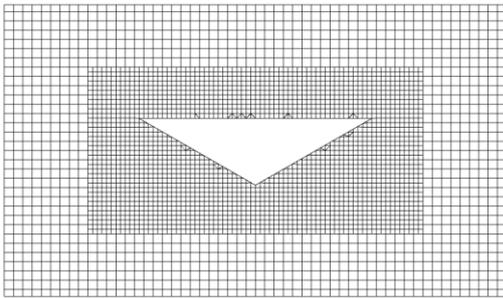


圖 3.組件網格

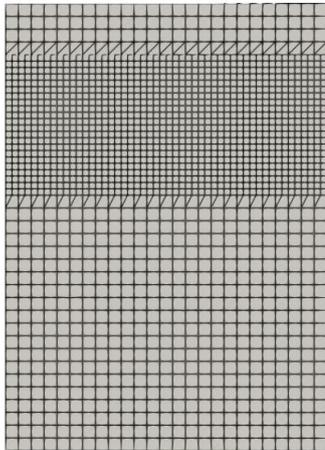


圖 4.背景網格

	網格數	節點數
30 度之楔形	354256	378352
45 度之楔形	436396	466342
背景網格	84000	90897

表 1.網格數及節點數

3. 統御方程式

本文求解不可壓縮之 Navier-Stoke equation，其方程式如下所示：

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \mathbf{g} \quad (1)$$

式中 \vec{u} 為流體速度於座標方向之向量， ρ 為流體密度， μ 為流體動力黏度， P 為流體壓力項， \mathbf{g} 為重力項。

流體體積法(VOF)，用於計算自由液面，此方法根據流體體積分數來定義，其定義如下：

$$\alpha = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 < \alpha < 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\alpha = 1$ 表示其網格單元被水填滿； $\alpha = 0$ 表示其網格單元被空氣填滿； $0 < \alpha < 1$ 表示網格單元形成兩個相之自由液面。

流體密度和黏度等流體性質由兩相體積分數之加權平均值所定義，其定義如下：

$$\rho = \alpha \rho_{water} + (1 - \alpha) \rho_{air} \quad (3)$$

$$\mu = \alpha \mu_{water} + (1 - \alpha) \mu_{air} \quad (4)$$

其中 ρ 為流體密度， μ 為流體黏度。

4. 邊界條件設定

楔形表面設定為 Wall 邊界條件，組件網格外圍邊界 Sides 設置為 Overset 邊界條件，建立組件網格和背景網格之插值，背景網格頂面 Top 設置為壓力出口條件，假定為一大氣壓，剩餘背景網格之邊界為 Wall 邊界條件。其邊界條件設定如下表 2 所示：

Name	Boundary condition
Interface	Wall
Top	Outlet
Boundary	Wall
Sides	Overset

表 2.邊界條件設定

5. 六自由度方程

對於計算楔型物體入水之六自由度運動問題，使用 OpenFOAM 中的 sixDoFRigidBodyMotion solver 求解器進行求解。根據計算物體表面上的壓力、剪切力及重力所產生之合力及力矩，求解物體運動情形，物體之平移加速度 \mathbf{a} 及旋轉加速度 $\boldsymbol{\psi}$ 則基於線動量和角動量守恆方程式獲得，其方程式如下所示：

$$\mathbf{a} = \mathbf{F} / m \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{I}^{-1} \cdot \mathbf{M} \quad (6)$$

其中 m 為物體質量， \mathbf{I} 為物體之慣性矩。

求解物體之六自由度方程時，透過加速度鬆弛係數來提高求解器之穩定性，其如下所示：

$$a_n = \chi a + (1 - \chi)a_0 \quad (7)$$

其中 a 由方程式(5)所獲得， a_n 及 a_0 分別代表新的時間步及舊的時間步，依據線性加速度 a_n ，可透過Newmark 方法計算其線性速度及位移，其方程式如下所示：

$$v_n^{k+1} = v_0 + \Delta t(\gamma a_n^k + (1 - \gamma)a_0) \quad (8)$$

$$I_n^{k+1} = I_0 + (v_0 \Delta t + \gamma(\Delta t)^2(\beta a_n^k + (0.5 - \beta)a_0)) \quad (9)$$

其中 v 為物體移動速度， I 為旋轉中心， β 和 γ 分別為0.5和0.2，代表 constant average acceleration 方法， k 代表在一個隱式迭代方法下的子迭代步。

6. 離散及求解方法

6.1 離散方法

本文採用之離散方法，在時間項上為Euler一階隱式方法，空間項離散為 leastSquares 二階方法，對流項皆為二階迎風法，兩相流求解之離散方法為 Intercompression vanLeer 方法，以定義其有界性，由於在 OpenFoam 中 Overset Hole Cutting 為顯式方法，造成在物體邊界上的挖孔及網格類型上會有模糊情形發生，因此在 oversetInterpolation 上使用 leastSquares 二階準確方法，並透過 holeLayers 和 useLayer 指定其遠離挖孔邊界之網格，確保挖孔之清晰，避免重疊網格插值問題。

6.2 求解方法

本文採用 OpenFoam 中的 PIMPLE Method 進行求解，其基於 PISO Method，在 PISO 循環結束後，在進行外部循環計算，直至達到收斂標準條件，其有助於增加求解兩相流問題的穩定性及可靠性，其流程圖如下圖 5 所示。

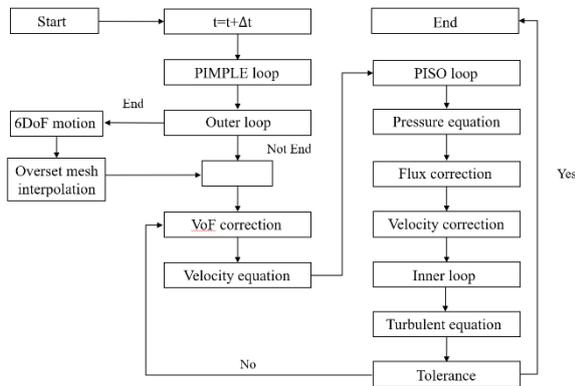


圖 5.PIMPLE 循環圖

流固耦合方法

1.單向流固耦合和雙向流固耦合

流固耦合一般分為單向流固耦合和雙向流固耦合，其差異性在於單向流固耦合僅考慮流體作用力造成固體之變形，雙向流固耦合則將上者和固體變形造成流場變化考量其中。本文採用分區多物理場模擬之開源耦合庫 preCICE 進行流固耦合之資料交換，考量到在進水過程中，其變形量微小，對流場之影響可被省略，因此本文採用單向耦合方式進行模擬分析。

2.資料映射方法

PreCICE 中提供了兩種資料映射方法，包含 Consistent constraint 方法及 Conservative constraint 方法考量到流體網格其網格尺寸一般小於結構網格，在此情況下須確保粗節點的總耦合值和細節節點的總耦合值是相同的，這對於物理保守量例如受力、質量等是必須的，本文採用 Conservative constraint 方法進行節點上的資料映射，其方法如下圖所示：

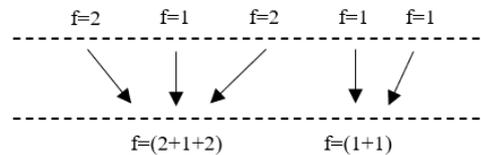


圖 6. Conservative constraint method

3.投影方法

preCICE 中提供多種資料投影方法，包含 Nearest Neighbor 一階準確方法、Nearest Projection 二階準確方法、全局投影法和局部投影法等。本文參考 preCICE 參考論文提供之不同投影法的準確性，以及全局搜尋投影法和局部搜尋投影法的計算時間下，採用 rbf-compact-tps-c2 method，給定其一個搜尋半徑 h ，其 h 為網格尺寸，確保流體網格映射到固體網格時包含足夠的實體節點，避免造成映射過程中，局部節點受力過大之不合理性，其投影方法示意圖如下圖 7 所示。不同資料投影方法準確性比較測試結果如圖 8 所示。

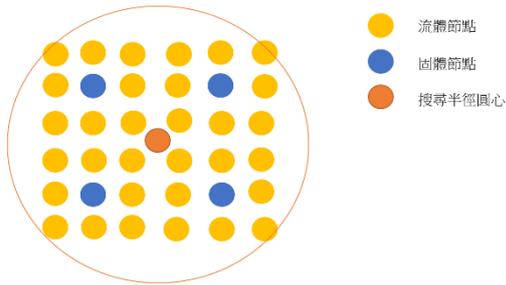


圖 7. rbf 映射概念圖

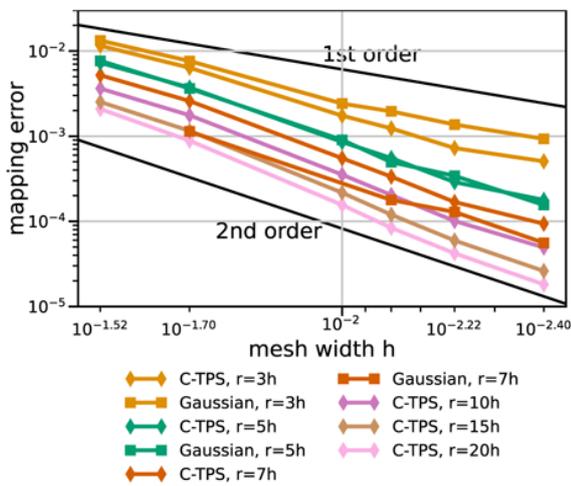


圖 8. 投影方法準確性比較

結構計算方法

1. 結構幾何

本文結構分析模型，為了避免 Calculix 中以 2 維表面進行厚度增長造成之網格崎嶇情形發生，因此以 3 維殼體模型進行模擬分析，其假定厚度為 5mm，其幾何外型如圖 9 所示，其材料屬性如表 3 所示。

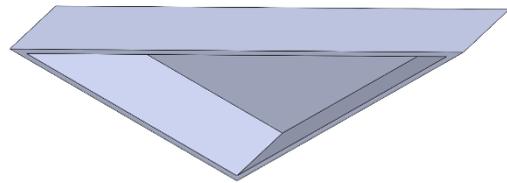


圖 9. 結構幾何外型

Density	7850	kg/m^3
Young's modulus	206	Gpa
Poisson ratio	0.3	-

表 3. 材料屬性參數

2. 網格劃分

本文採用開源軟體 Calculix 進行結構變形之分析計算，將楔型物體繪製成 5mm 厚之殼狀結構，透過開源軟體 Salome 進行網格劃分，生成四面體網格，其網格生成為二階準確方法，其網格如圖 10 所示，網格數及節點數如下表 4 所示。

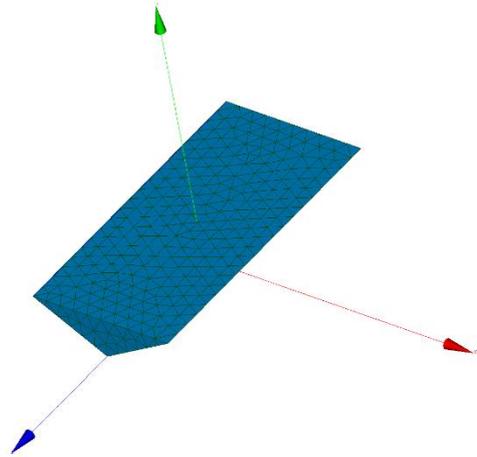


圖 10. 結構網格劃分

	網格數	節點數
30 度之楔形	2884	5776
45 度之楔形	3573	7148

表 4. 結構網格數及節點數

3. 求解方程式

Calculix 為基於 FEM 方法之開源結構程式碼，用於對彈性體結構變形之分析，其動量守恆方程式如下所示：

$$\rho_s \frac{D^2 U_s}{Dt^2} = \nabla \cdot \sigma_s + \rho_s f_s \quad (5)$$

式中 ρ_s 為固體密度； U_s 為位移向量； σ_s 為柯西應力張量； f_s 為單位質量之體積力。

線彈性各向同性材料之應力和應變之關係式如下所示：

$$\sigma_s = 2\mu\epsilon + \lambda tr(\epsilon)\delta \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2}(J^T + J) \quad (7)$$

其中 ϵ 為無窮小之應變張量； $tr(\epsilon)$ 為無窮小之應變之量的軌跡； J 為變形梯度； δ 為單位張量； μ 和 λ 為 Lamé 的參數，其可透過楊氏模量 E 和泊松比 ν 計算獲得，其公式如下所示：

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (9)$$

透過 FEM 之方法對結構計算域進行離散；將控制方程式離散為線性代數方程；其公式如下所示：

$$[K]\{U_s\} + [M]\frac{D^2}{Dt^2}\{U_s\} = \{F\} \quad (10)$$

其中 $[K]$ 代表全局鋼度矩陣； $[M]$ 代表全局質量矩陣； $\{F\}$ 代表全局力向量。其時間向之離散方法為 α 方法。

結果分析與討論

1. 驗證案例：

本文模擬分析採用預測落水速度進行分析，其假定落水速度為 $6.15m/s$ ，模擬結果對比 Zhao 等人的實驗結果以及 Xueliang Wen 等人的模擬結果，其模型為 1/4 楔型物體，Deadrise angle 為 30 度，在落水過程 0.015 秒時刻，比較其表面受力及物體落水速度，物體表面受力與實驗誤差約為 6.2%，落水速度與實驗誤差約為 0.8%，其詳細數值比對如下圖 10 所示。

	Force at 0.015s	Error	Speed at 0.015s	Error
Experimental result of Zhao et al.	5127N	-	5.385m/s	-
Simulation result of Xueliang Wen et al.	4985N	2.8%	-	-
Present result using prescribed speed	5444N	6.2%	5.338m/s	0.8%

圖 11. 模擬結果誤差比較

2. 不同 Deadrise angle 下受力情形分析

對比兩種不同 Deadrise angle 之楔型，Deadrise angle 為 30 度時，其楔型表面受力之壓力峰值較高，在 0s 至 0.007 秒之間受力變化急遽。Deadrise angle 為 45 度時，其楔型變面受力雖也成逐漸增加之趨勢，但其受力變化量較為平緩，且壓力峰值較小，如圖 11 所示。

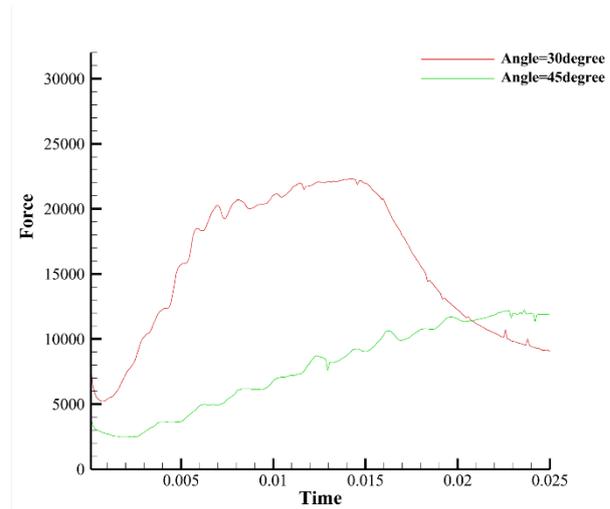


圖 11. 不同 Deadrise Angle 下受力情形

3. preCICE 資料傳遞之準確性

對比 OpenFOAM 計算之受力值，和 preCICE 傳遞至結構求解器之外力值，兩者曲線貼和，其誤差甚小，如下圖 12 所示，驗證 preCICE 資料傳遞之可靠性。

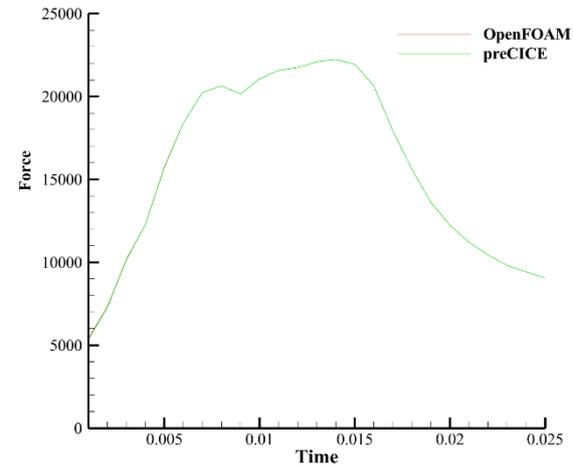


圖 12. OpenFOAM 與 preCICE 資料差異

4. 自由液面與結構應力變形分析

圖 13 和圖 14 顯示其楔型入水過程中，兩相流之飛濺情形；圖 15 至圖 18 顯示其結構應力及結構變形情形。由圖 13 和 14 中可以看出當 Deadrise angle 為 30 度時，其物體入水造成流體分離的情形較

為明顯，且流體飛濺的情形劇烈；Deadrise angle 為 45 度之楔型，其流體分離及飛濺過程則較為平緩。造就其物體表面受到流體作用力，在 Deadrise angle 為 30 度，受力在短時間內驟增；Deadrise angle 為 45 度時，其受力則呈現較為平緩的增長。圖 15 至圖 18 則為物體結構變形及其 Cauchy stress tensor 變化情形，並放大 200 倍以助於觀測。

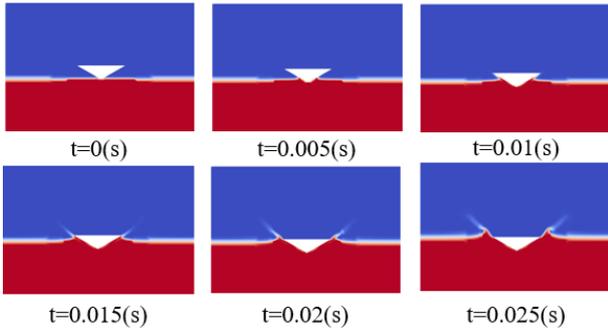


圖 13.30 度之楔型自由液面飛濺情形

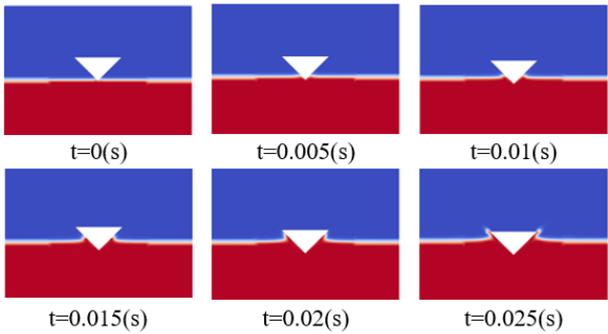


圖 14.45 度之楔型自由液面飛濺情形

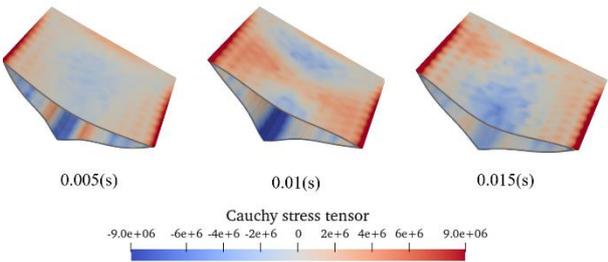


圖 15.角度 30 度之楔型變形情形正視圖(200 倍)

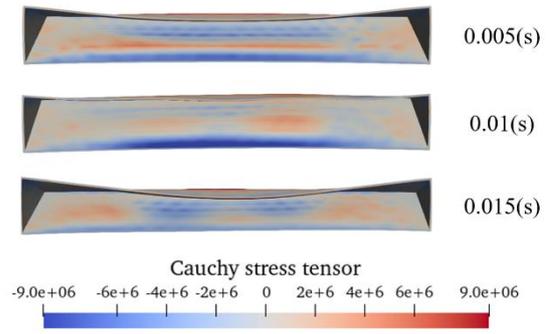


圖 16. 角度 30 度之楔型變形側視圖(200 倍)

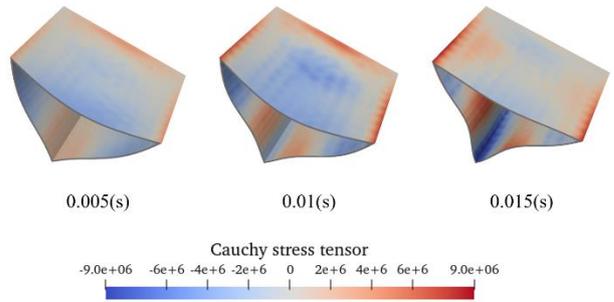


圖 17.角度 45 度之楔型變形正視圖(200 倍)

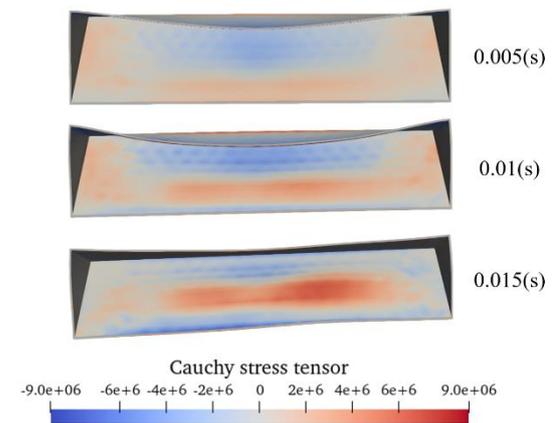


圖 18. 角度 45 度之楔型變形側視圖(200 倍)

結論

本文採用 preCICE 分區多物理場模擬之開源耦合庫，建立 OpenFOAM 和 Calculix 流固耦合分析模型，並對比文獻數據驗證其方法之可行性。其中速度項之結果與實驗近似，誤差主要發生在壓力項的

求解上，其受到 OpenFOAM 求解兩相流問題時，並非直接求解壓力項，而是透過求解 p_{rgh} 來獲得壓力值，對比其他商用套裝軟體針對壓力項之計算方法，明顯造成誤差較大，同時重疊網格的插值方法上，一階插值方法雖符合質量守恆，但精準度不足，二階插值方法則無法滿足質量守恆，在結果上較為精確，但數值較為震盪，因此透過 `useLayer` 及 `holeLayers` 的方法，除了解決挖孔模糊的問題外，也避免了插值區域離壁面太近造成較高壓力梯度問題，而導致數值震盪問題發生。同時也比較分析透過 `preCICE` 在不同映射方法下，其傳遞之受力值與 OpenFOAM 計算結果的差異性，驗證其在流固耦合分析的資料傳遞上是具有可靠性。

未來展望

流固耦合分析中，單向流固耦合方法的準確性對比雙向流固耦合方法還是有明顯劣勢存在。包含在計算過程中，僅考慮物體的作用力傳遞之情形，而忽略固體變形對流場產生之影響，此可能會造成之在資料映射上產生偏差或不穩定情形發生。本文採用 OpenFOAM 中的 `sixDoFRigidBody Solver` 作為動網格之求解器，進而無法將變形考慮其中。因此在後續研究上，將使用不同 OpenFOAM 中的動網格求解器或是透過修改 OpenFOAM 之求解器，將變形情形考慮其中，從而建立具有可靠性之雙向流固耦合分析模型。

參考文獻

1. Chourdakis, G., Davis, K., Rodenberg, B., et al. "preCICE v2: A sustainable and user-friendly coupling library [version 2; peer review: 2 approved]," *Open Res Europe*,(2022).
2. Wang, Kai., et al. "Numerical simulation of water entry of a symmetric/asymmetric wedge into waves using OpenFOAM," *Ocean Engineering*, (2021).
3. Ma,Zhihua., and Qian,Ling., " Numerical simulation of wave slamming on wedges and ship sections during water entry," *Ocean Systems Engineering*,(2018).
4. Wen, Xueliang., Ong, Muk Chen., Yin, Guang., " On the three-dimensional effects of the water entry of wedges," *Applied Ocean Research*,(2023).
5. Chen, Zhenwei, et al., " CFD-FEM simulation of water entry of a wedged grillage structure into Stokes waves," *Ocean Engineering*, (2023).
6. Wei, Zhaoyu., Hu, Changhong., " An experimental study on water entry of horizontal cylinders," *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.19,pp. 338-350(2014).
7. Shen, Zhirong., et al. "Slamming load prediction using overset CFD methods," *Offshore Technology Conference*,(2016).
8. Andersson,Josefin., Englund,Monika., "Study of a Body Subjected to a Vertical Drop into Water–Experiment and Simulations," (2018).
9. Zhao, Rong., Faltinsen, Odd., " Water entry of two-dimensional bodies," *Journal of fluid mechanics*, Vol.246,pp. 593-612(1993).
10. Xi, Kemeng, et al. ,"On the application of overset meshing to numerical studies of roll damping of hulls in complex scenarios," *Ocean Engineering*,(2023).