

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

海嘯波浪於廠區效應機率評估方法建置

**Development a probability model on the propagation of tsunami  
waves and its effect at nuclear power plant sites in Taiwan**

計畫編號：1042001INER035

受委託機關(構)：財團法人成大研究發展基金會

計畫主持人：胡凱程 博士

聯絡電話：(06) 237-1938 #254

E-mail address：kchu@thl.ncku.edu.tw

核研所聯絡人員：侯雨成

報告日期：104 年 12 月 15 日

## 目錄

目錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	4
一、計畫緣起與目的.....	4
二、研究項目和內容.....	6
貳、研究方法與過程.....	8
一、海嘯概述.....	8
(一) 海嘯之形成、傳播與破壞.....	8
(二) 台灣海嘯記錄.....	12
二、防海嘯設施.....	16
(一) 簡介.....	16
(二) 海嘯危害的評估方式.....	22
(三) 海嘯設施案例: 日本釜石灣口防波堤.....	24
三、數值模式適用性探討.....	42
(一) 海嘯數值模式介紹與研選.....	42

(二) 二維海嘯模式介紹 (COMCOT) .....	47
(三) 三維數值模式介紹 ( <i>FLOW-3D</i> ) .....	56
(四) 小結 .....	58
<b>參、主要發現與結論.....</b>	<b>59</b>
一、耦合模式之建置 .....	59
(一) COMCOT 模擬資料處理.....	61
(二) <i>FLOW-3D</i> 計算域邊界及程式修改.....	63
(三) 小結 .....	64
二、馬鞍山發電廠之機率式海嘯衝擊研究 .....	65
(一) 馬鞍山發電廠簡介.....	65
(二) 地形資料收集與建置.....	66
(三) 海嘯情境設置.....	74
(四) 馬鞍山發電廠之耦合數值模型之建立.....	75
(五) 耦合模式計算結果.....	77
(六) 不同地震條件及重現期之模擬.....	89
(七) 機率式海嘯波高及溯升和溢淹潛勢分析.....	107
<b>肆、結果與討論.....</b>	<b>122</b>
<b>伍、參考文獻.....</b>	<b>124</b>

## 中文摘要

台灣位於板塊之交界處且四面環海，若鄰近海域產生海嘯，可能會威脅核電廠之安全。為建立由海嘯波傳遞至核能發電廠址（核三廠）近岸之溯升機率模型，本計畫期程三年，以廠區外圍地形資料並考慮既有已預測甚至更高之海嘯波高來進行數值模擬。探討各種不同條件下的海嘯波高對於核三廠址外圍之溯升影響性，以此建立各種波高對應可能之溯升影響程度及其對應之可能發生機率，以提供核能廠防範海嘯災害決策之參考。本研究報告延續第一年的海嘯數值模式適用性評估的結果，建置一耦合模式，使得計算之結果能符合海嘯波傳遞之波高、波向和波形的特性並兼顧二維模式的計算效率和三維模式的精確度。此外，核三廠的部分廠區建物成功建置在三維模式中並完成十場海嘯情境模擬。

關鍵字：海嘯、數值模擬、核能發電廠、溯升

## **Abstract**

Taiwan is an island located in the subduction zones around the rim of the Pacific Ocean, it is important to understand how the tsunami may affect the NPPs close to the shoreline due to its potential threat. Consequently, a proposal for three-year duration is presented in order to establish a probability model on predicting the propagation and inundation of possible seaquake-induced tsunami around the area of NPPs. The possible tsunami events are simulated numerically based on the fault movements of the Manila trenches. The foci are mainly paid on evaluating the influence of tsunami faced with the Maanshan NPP.

Based on the results of the first year, the coupling model which combined two-dimensional and three-dimensional modules is built, so that the model can calculate the physical processes with more real characteristics of tsunami (i.e., wave height, wave direction and wave form) and at the same time with reasonable computational efficiency and accuracy. Then, the some important structures on the Maanshan NPP are constructed in the three dimensional model and ten tsunami scenario is successfully simulated.

**Keywords: Tsunami, Numerical simulation, Nuclear power plant**

**Run-up.**

## 壹、計畫緣起與目的

### 一、計畫緣起與目的

2011年3月11日在日本東部海域發生芮氏規模9.0的大地震，不僅導致許多建築物倒塌，也造成許多人的傷亡，同時此強震引發一場災難性的大海嘯，浪高十多公尺，日本本島東北部沿岸的區域許多城鎮和農田幾乎都被海水吞沒。除此之外，海嘯對福島的核電廠造成嚴重的破壞，引發輻射外洩且輻射量超標千倍，對人民生命和財產造成極大的損害。台灣與日本相鄰，同樣地面對到地震與颱風等天災影響，因此更不可忽視海嘯侵襲台灣的可能性。有鑒於海嘯造成福島核電廠的巨大災害，海嘯對於台灣核能發電廠的潛在威脅和影響性應當被縝密的考量。當位於深海處之斷層發生破裂所引發的海嘯波傳遞至淺水近岸區時，海嘯波高會因淺化效應而急遽增長。當海嘯前導波（leading wave）與近岸區斜坡或是海灘產生接觸時，波前會沿著坡面或是海灘向上爬升。此溯升現象很可能會造成海水侵襲核電廠房，導致廠房受損進而引發大規模的災害。

本研究擬建立海嘯波到核能發電廠（核三廠）廠址近岸溯升之數值模擬，將與機率式海嘯模型模擬的海嘯情境條件結合，以耦合

模型進行數值模擬並探討各種機率之溯升影響程度，以提供核能廠防範海嘯災害決策之參考。內容包括對海嘯給予簡單的概述、數值模式的適用性和驗證以及數值地形的蒐集和建置。最後，藉由數值模擬之結果進行分析，建立核電廠區可能發生溯升高度之機率模型。

## 二、研究項目和內容

### 第一年（民國 103 年）之研究工作項目：

#### (一)評估模式比較及研選

比較國內外適用於海嘯溯升淹水模擬之數值模式，評估選定本計畫採用之數值模式，評估內容須涵蓋控制式理論、邊界條件設定、網格解析度等資料，證明選定模式及其工具符合核能設施要求。

#### (二)地形資料收集

研究地區各種之地形資料，資料等級：重點海域 10x10m 之 DTM 資料，重點陸域 5x5m 之 DTM 資料。

#### (三)核三廠數值模型之建立

利用本計畫蒐集之地形資料，進行核三廠數值模型之建立，建立之模型包含地表以及臨海上重要之結構物在內。

#### (四)核三廠海嘯近岸溯升模擬

利用本計畫建立之數值模型，進行各種波高情況下之溯升模擬，波高設定應配合本所「海嘯浪高波傳機率模型之建置研究」所蒐集之成果，並考慮既有預測之不確定性以更高之數值執行。

## 第二年（民國 104 年）之研究工作項目

### (一)防海嘯設施資料蒐集

蒐集防海嘯設施相關資料和成效。

### (二)耦合模式建置和模擬

針對馬尼拉斷層，進行耦合模式(二維數值模式 COMCOT 和三維數值模式 *FLOW-3D* 耦合) 之建構和模擬。

### (三)以耦合模式模擬核三廠區在不同重現期下的危害

由海嘯波高機率模型考慮不同重現期之危害波高，進行耦合模式之計算，機率式海嘯波對於廠區之影響性。

### (四)分析核三廠區近岸海域和溯升的潛勢分析

進行核三廠廠區近岸海域波高以及廠區溯升高度之機率式海嘯波潛勢分析。

## 貳、研究方法與過程

### 一、海嘯概述

#### (一) 海嘯之形成、傳播與破壞

海嘯的英文為“tsunami”，是由日本詞“港口波浪”而來。他是由兩個字所組成，第一個字，津“tsu”是港口的意思，第二個字，“nami”是意指波浪。因此海嘯的日文漢字寫成“津波”。海嘯主要是由於海水受到垂直方向的擾動所形成，當海水受到突如其來的外力擾動，導致大量水體離開原本均衡的位置，這些擾動皆有可能造成海嘯。海嘯是一種能量集中的重力長波，具有長週期和長波長的特性，波長約為數十至數百公里，週期約為數十至數百分鐘間。因為能量集中的關係，在其撞擊海岸結構物或海港時，會引起海面巨大的震盪現象，造成結構物的損壞。海嘯的主要成因是海底地震、海底或陸地山崩、海底火山爆發等地質活動。海底地震主要是由板塊擠壓而成，地殼的巨大變動會瞬間造成大規模的水體擾動而形成海水的波動，海水隨即受到重力的影響，使波動的位能轉換為動能形成海嘯波，並以同心圓狀的方式向四周傳遞。此類型的海嘯發生

機率最高，約數年或十數年就會有海嘯事件發生。然而，並不是所有的海底地震都一定會引發海嘯，若地震深度小於 30 公里的淺層地震，及地震規模大於 6.5，則海嘯發生的可能性較大(徐明同，1981)。火山爆發和海底山崩而引發的海嘯的機率大約數百至千年，相較斷層錯動來的少見。然而，若是海底火山爆發噴出大量的岩漿，推擠、擾動海水也同樣會造成海嘯。另外陸地上大規模的土石(冰塊)崩落入海或巨大隕石落入海洋，傳遞大量的能量進入海洋，也會造成大量的海水擾動，進而引發海嘯。

綜合上述，海嘯可由海底地震、火山爆發，陸地或海底大規模坍塌引起海面水位突然變化，隨即受到重力作用而以波動形態向外傳播所產生的重力長波。在傳播過程中有可能因能量集中使水位升高，甚至沿著斜坡淺灘向岸推移，而造成極大的破壞(圖 1)。

當海嘯波生成後，它會因重力作用而向四面八方傳遞出去。一般來說，在水深越深處，海嘯波傳遞速度較快；水深較淺處，傳播速度較慢。因海嘯波為一重力淺水長波，其傳播速度可以公式  $c = \sqrt{gh}$  求得，其中  $g$  為重力加速度 ( $m/sec^2$ )、 $h$  為海水深度 ( $m$ )。舉例來說，太平洋平均水深約為 4000 m，海嘯在太平洋中的傳遞速度可達約 198 m/sec (713 km/hr)，相當於噴射機的速度。

當海嘯波於深海中 ( $h > 200m$ ) 形成時，其波高通常不超過 1m，

但其波長卻長達數十至數百公里，在茫茫大海中難以用肉眼辨別。以 2004 年南亞海嘯為例，在海嘯震源附近的海嘯高度約為 5 m，但傳播至深海就只有 0.5 m。

由靠近海溝的深海處所發生的地震而引發的海嘯，當他傳遞至淺水近岸區時，由於水深變小，波浪傳遞速度變慢，波長變短，導致波浪能量越來越集中，導致波高劇烈增高，使海嘯波具有強大的破壞力，可能進而導致沿岸建築物的損壞。這種由水深變淺所導致之海嘯波高變化稱為淺化效應，海嘯波的淺化效應可由下列方程式估算：

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left( \frac{h}{h_0} \right)^{-1/4} \quad (1)$$

式中， $\eta$  與  $\eta_0$  分別為海嘯在水深  $h$  以及  $h_0$  處之波高，如圖 2 所示。下標 0 表示深海某一點。舉例來說，假設在水深 4000m 處發生一海嘯，且傳播至水深 10m 處， $\eta/\eta_0 = (10/4000)^{-1/4} = 4.47$  也就是說，水深 10m 處的波高大約放大了 4.5 倍。當海嘯轉變為湧潮，接觸近岸區斜坡或是海灘時，波浪持續沿著坡面或是海灘傳動發生溯升現象。若溯升高度超過近岸斜坡或灘岸最高點則會溢淹至內陸，能量較大時甚至會深入陸地近公里遠。當波浪溯升至最大水位後，水體則會開始全面溯降，此時可能會將人畜、物品等捲入海中；此外，

在溯降的過程中，因其能量尚未完全消散，又將造成沿岸地區的二次破壞。由此可知，當海嘯發生傳遞至近岸時，所引發之近岸溯升和溢淹對於人民生命和財產之安危影響重大。此外，於地形的影響之下，沿岸所發生的溯升高度和溢淹範圍之機率皆有所不同。因此，針對此機率模型之建立，有助於災害安危上的評估。

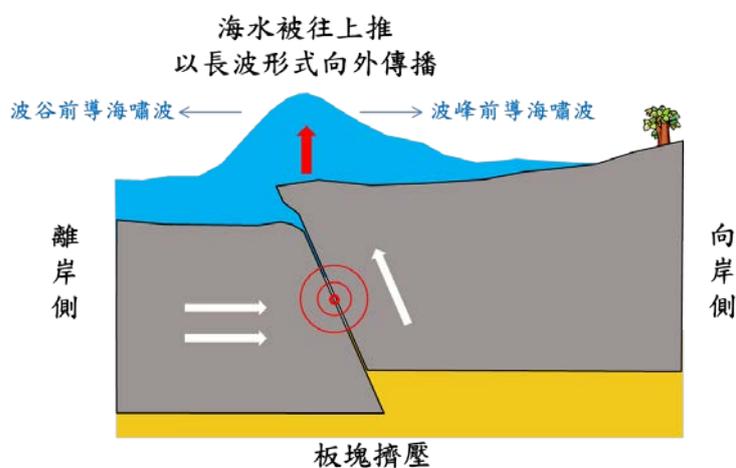


圖 1 海底地震引發海嘯生成示意圖

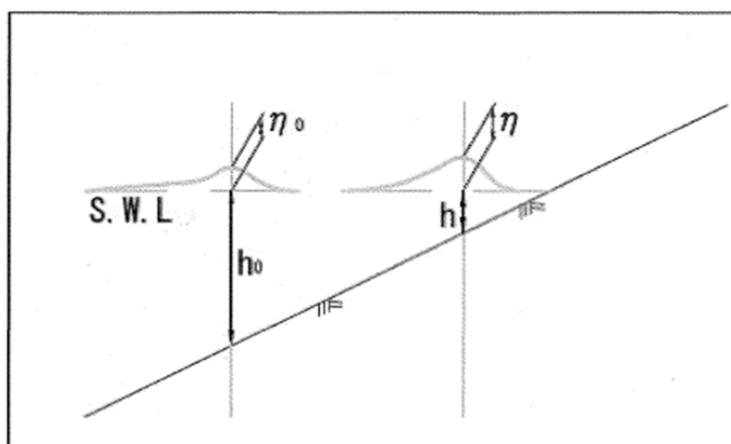


圖 2 海嘯傳播至淺水處之波形變化[1]

## (二) 台灣海嘯記錄

依據歷史文獻記載，台灣自西元 1661 至 1867 年間，疑似海嘯紀錄就有高達六次之多，次數相當頻繁，由此可發現，台灣是海嘯發生的危險區域，因此事先建立完善的海嘯預警系統，對於減輕海嘯對台灣的災害影響是相當重要。以下為海嘯侵襲台灣的歷史資料：

### 1. 1661 年 1 月 8 日於安平

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」。此日，發生地震的震級為 6.4，震央為東經 120.1°、北緯 23.0°(台南)。災情記述為「台灣安平大海嘯。海潮至，淹廬舍無算」；另外鄭世楠等(1989)關於此次地震之記述為「地裂，餘震達六週，房倒 23」。另外，德人海卜脫(Herport)著旅行記稱：「1661 年 1 月某日晨 6 時開始地震，約歷 30 分，居民均以為地將裂開。安平房屋倒塌 23 棟，海地(今安平)城破裂多處。大震之後仍不斷有輕微地震，使人如置身舟中，約 3 小時，無一人能站穩。其時適有 3 船入港，在水中亦激烈震動，一若即將覆沒者。此次地震中，有一事最可驚奇，即海水曾被捲入空中，其狀如雲。此次地震，無論海中，在陸上，人身均能感覺，共歷 6 星期。」

## 2. 1721 年 1 月 5 日於台南

王必昌，重修台灣縣志「雜誌·祥異」：「12 月庚子（1721 年 1 月 5 日），又震，凡震十餘日，日震數次，房屋傾倒，壓死居民。」。明清史料戊編載朱一貴供詞有云：「因地震，海水冷漲，眾百姓合夥謝神唱戲。」。由上述的「因地震，海水冷漲」看來，海水上漲可能與地震有關，有地震海嘯的可能。

## 3. 1754 年 4 月於淡水

包澄瀾等（1991）引述楊華庭（1987）之「中國海嘯歷史年表」。災情記述只提及「許多房屋被海嘯破壞」，並無其他詳細災情之描述。

## 4. 1781 年 4-5 月於高雄

包澄瀾等（1991）引述楊華庭（1987）之「中國海嘯歷史年表」。5 月 22 日，台灣地震，災情記述為「台灣海峽地震海嘯持續 1-8 小時，共死 5 萬多人」；另外日本海嘯歷史學家鳥羽德太郎也提及「台灣海峽海嘯。海水暴吼如雷，水漲持續 1 至 8 小時。海嘯吞沒村庄，無數人民在海嘯中喪生」；此次海嘯前蘇聯科學院通訊院士 Soloviev 和 Go 也根據 1952 年來自荷蘭及英國的資料「影響所及台灣全島的地震，且伴隨橫掃台灣西南沿海的海嘯，造成了巨大的破壞。幾乎

全島海水溢 120 公里。地動與海嘯持續達 8 小時。該島的三個重鎮和二十餘個村莊，先是被地震破壞，隨後又為海嘯浸吞。海水退去後，在那些原是建築物的地方，充其量只剩下一堆瓦礫。幾乎無一人生還。40,000 多居民喪生。無數船沉沒或被毀……。安平鎮（即蘭遮）及赤崁城堡（台南市赤崁樓舊址）連同其坐落的山包均被沖跑了」。

#### 5. 1792 年 8 月 9 日於彰化

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」。此日，發生地震的震級為 6.75，震央為東經 121.7°、北緯 23.6°。徐泓(1983)引述「台灣采訪冊」「祥異，地震」中災情記述為「……郡城地震，西定坊新街折一亭，隕一命。次日，聞嘉城地大震，店屋、民房倒壞，而繼之以火。一城惶恐無措，民房燒損過半，死者百餘人。壬子，將赴鄉闈，時六月望，泊舟鹿耳門，船常搖蕩，不為異也。忽無風，水湧起數丈，舟人曰：『地震甚。』又在大洋中亦然，茫茫黑海，搖搖巨舟，亦知地震，洵可異也。……」。

#### 6. 1866 年 12 月 16 日於高雄

徐泓(1983)引述 Alvarez 著 Formosa 書中提及「晨 8 時 20 分，發生地震，約歷一分鐘，樹林、房舍及港中船隻，無不震動，河水

陡落三尺，忽又上升，似將發生水災」。

#### 7. 1867 年 12 月 18 日，基隆

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」。

此日，發生地震的震級為 7，震央為東經 121.7°、北緯 25.5°。災情記述為「台灣北部地震，是日有 15 次連續地震，基隆（雞籠頭，金包里）沿海山傾，地裂，全島震動，基隆全市房屋倒壞，死者數百人，基隆港海水向外海流出，港內海底露出，瞬間巨浪捲進，船隻被沖上市內，釀成重大災害，處處發生地裂，山腹大龜裂，噴湧泉水，淡水也有地裂，海嘯，數百人被淹死，房屋部分倒壞。」。

#### 8. 1917 年 5 月 6 日於基隆

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」。

此日，發生地震的震級為 5.8，震央為東經 121.6°、北緯 23.2°。並且記述「基隆海嘯 1 米，周期 26 分」，並無其他災情相關之描述。

#### 9. 1951 年 10 月 22 日於花蓮

徐明同(1981)將此次芮氏地震規模定為 7.3，震央為東經 121.7°、北緯 23.8°。並且書中提及災情為「死者 68 人，傷者 856 人，房屋損害 2382 戶，花蓮驗潮儀有海嘯記錄，波高幾十公分而已。」

## 二、防海嘯設施

### (一) 簡介

#### 1. 防海嘯牆 (Tsunami seawalls)

一般而言，防波堤皆的主要功能是為了保護內陸地區，使其免於天文潮、風暴潮以及海嘯之侵襲，而防海嘯牆（圖 3 和圖 4）就是以避免海嘯侵襲為主要用途而建造的設施，多沿著海岸線建造。為了防止海嘯溢流及侵犯內陸地區，防海嘯牆的高程會大於設計海嘯波高。當設計海嘯波高增加時，堤頂高程也就必須隨之增加。如此一來，海嘯牆的整體結構就會變得非常巨大。反而導致其他問題，舉例來說，由海濱通往內陸地區的路徑就會相當不便，且民眾的視野會被海嘯牆阻擋。由於海嘯的侵襲機率頗低，因此在減災設施的規劃上，就必須把海嘯牆後方地區的生活環境與遊憩納入考量。

理論上，海嘯波高是有可能超過海嘯牆建造時設計的高度，在此情況下，海嘯波會溢流過堤頂並導致溢淹。在規劃防海嘯牆時，也需考慮海嘯牆後方的排水系統是否能有效運作。另外，對海嘯牆本身結構而言，需審慎評估其結構強度是否足以承受海嘯波與地震之作用力[1]。

## 2. 防波堤 (Tsunami breakwaters)

防波堤 (圖 5) 通常建造於海灣之開口 (mouth of a bay)，主要是減少在海嘯侵襲時進入海灣內的海水流量，故可有效減低海灣內因海嘯波浪而上升的水位。然而，防波堤的建造仍需考慮許多因素，比如防波堤的功用會因為海灣形狀、建造位置、防波堤開口的寬度、海嘯波之週期或其他因素而有所改變。另外，因為防波堤會反射部分之海嘯波浪於海灣外，反射之波浪對鄰近海岸的影響也需先評估。最後，防波堤一般屬於在外海建造的大尺度結構物，其建造價格可說相當高昂，所以防波堤之有效使用年限也是必須考量的因素[1]。

## 3. 防水門與禦潮閘 (Water gates)

防水門 (圖 6) 通常建造在距離河口不遠處，其用途是為了防止海嘯來襲時沿著河道溯升而上。假如海嘯超過河岸而溢流的話，溢淹就會發生，但這種類型的洪水可藉由阻止海嘯沿河溯升來防範。於此情況下，防水門之設計必須足以承受海嘯的波浪作用力。另外，因為防水門也會反射波浪，在工程設計上仍需考慮反射波浪的波高與來襲的海嘯波高之疊加效應[1]。

#### 4. 禦潮閘 (Inland locks)

當防海嘯牆建造完成時，禦潮閘（圖 7、圖 8）會被建置於各段海堤之間，如此就可提供由內陸地區至海岸的路徑。一般來說，禦潮閘平時是開放的，但若有海嘯侵襲的可能性，禦潮閘就會關閉以避免海水由這些閘門衝向內陸地域。禦潮閘通常是由鄰近的政務機關人員負責關閉，但在緊急狀況時，也可經由受過適當訓練的志工人員負責此項工作。考慮到這些人員在關閉閘門時的安全，有些防水門及禦潮閘採用了當偵測到地震發生時，可以自動關閉或是經由遙控關閉的設計方式。



圖 3 日本岩手縣宮古市的防海嘯牆

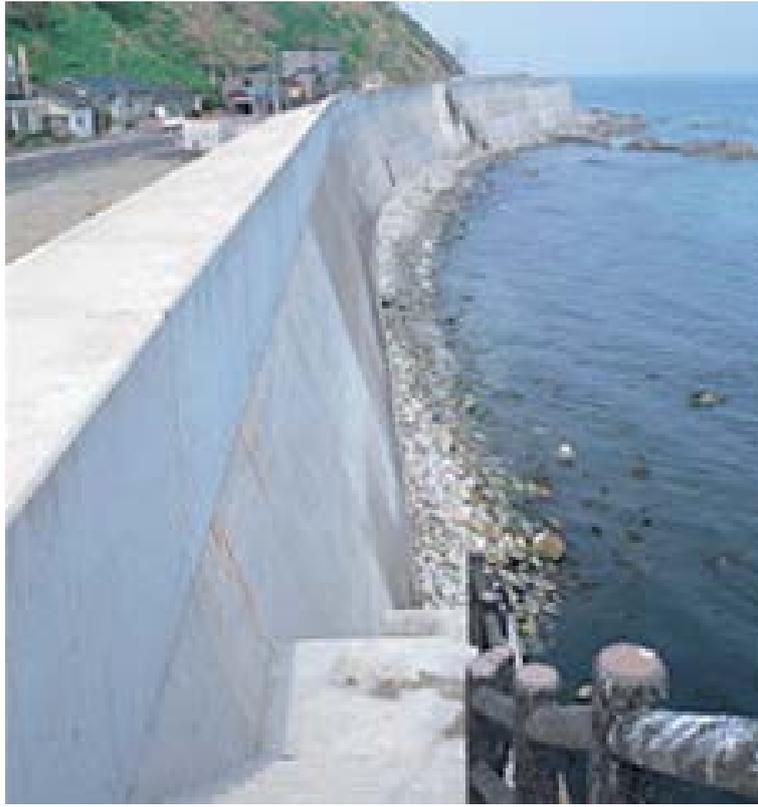


圖 4 日本奧尻島長達 14 公里的防海嘯牆



圖 5 日本釜石灣口防波堤[2]

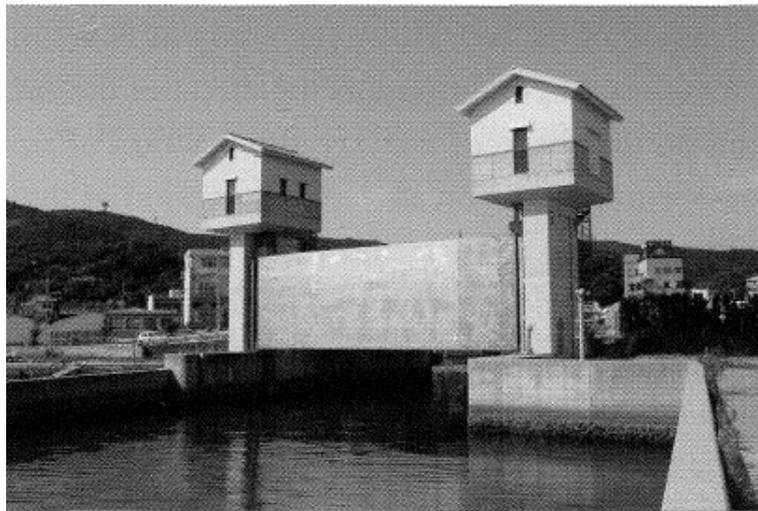


圖 6 日本兵庫縣南淡路市福良港之防水門[1]

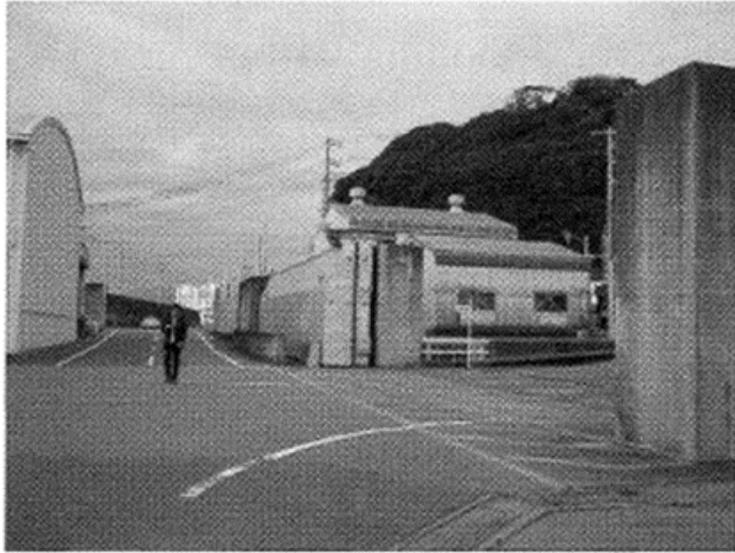


圖 7 日本沼津市靜內町漁港之禦潮閘[1]



圖 8 西伊豆町仁科漁港之禦潮閘[1]

## (二) 海嘯危害的評估方式

### 1. 歷史海嘯

建設防海嘯設施時，首先需要評估的是結構物的設計高程，需評估的海嘯危害程度與預測波高，日本為重視防海嘯設施的國家，多有建設海嘯牆、防波堤、防水門與禦潮閘，其海嘯的危害評估多以過去發生重大災害的歷史海嘯為參考依據(表 1)，釜石灣防波堤設計波高是參考 1896 年的明治海嘯，該海嘯地震規模達 8.5、造成兩萬多人死亡，而同樣位於日本本州東北地方岩手縣的田老町防波堤也是以 1896 明治海嘯和 1933 昭和海嘯為設計考量[3]。

表 1 日本三陸地區之歷史海嘯與災害列表[4]

時間	名稱	地震規模	災害	最大海嘯波高(m) /位置
869年7月9日	貞觀地震	> 8.3	> 1000人死亡	
1611年12月2日	慶長地震	> 8.1	> 5000人死亡	
1896年6月15日	明治地震	8.5	21959人死亡 > 10,000房屋毀壞	83.2/大船渡市
1933年3月3日	昭和地震	8.1	3,064人死亡 1810房屋毀壞	28.7/大船渡市
1960年5月22日	智利大地震	9.5	日本142房屋毀壞	
2011年3月11日	日本大地震	9.0	19,000人死亡 > 836,500房屋毀壞	40.5/宮古市

### 2. 定值法

除了歷史海嘯為外，區域性的評估以定值法作為參考，在發生

2011 年的日本大地震之前，宮城縣海域從 1835 年以來已有五次規模 7.5 左右的地震紀錄，地震回歸期約為 37 年，估計 2002 年至 2032 年有百分之九十九的機率會再發生規模 7.5 到 8.0 的大地震(表 2)。因宮城縣高頻率的地震周期，對此區域的研究與震源了解較多，常被拿來做災害評估的定值模擬。其中西元 869 年九月的貞觀地震也屬於宮城縣海域的歷史地震，地震矩規模約有 8.4-8.9，因地震規模大於宮城縣地震紀錄的平均值、有較長的回歸期與大於 4 公里的溢淹範圍，而被忽略為異常值，沒有算在危害評估的模擬中，但 2011 年的 311 日本大地震卻和 869 年的貞觀地震頗為相似，值得我們探討災害的發生機率與危害評估的關係[3]。

表 2 日本宮城縣海域地震紀錄[4]

時間	延滯時間	規模
1973年2月17日		8.2
1835年7月20日	42.4年	7.3
1861年10月21日	26.3年	7.4
1897年2月20日	35.5年	7.4
1936年11月3日	39.7年	7.4
1978年6月12日	41.6年	7.4
2011年3月11日 之前	延滯時間平均為37.1年，已經過33年，未來有99%的地震發生率。	7.5-8.0

### (三) 海嘯設施案例：日本釜石灣口防波堤

岩手縣位於日本的北東部，東西約有 122 公里，南北約 189 公里，呈一長橢圓形，面積為 15,378 平方公里。釜石港(Kamaishi Port)是一個工業港，位於岩手縣東部沿海，緊鄰太平洋，如圖 9 所示。釜石港有兩條平行的棧橋碼頭，北棧橋碼頭長 2,230 m，可供 5,000 噸級以下的船隻停靠，南棧橋碼頭可供 9 萬噸級以下的船隻停靠。因此，釜石港成為了鋼鐵、礦石、煤礦、石油...等貨物的重要港口。

釜石灣為布袋型海岸出口，容易產生海嘯波高放大效應，鑒於過去多次的災害，該堤於 1978 年開始建造至 2009 年 3 月完成（費時 31 年），造價成本約日幣 1,200 億，釜石灣口防波堤為兩段構成，北段 990 公尺、南段 670 公尺、以及供大船進出的開口潛堤 300 公尺，總長約達兩公里、深 63 公尺，為世界最深的防波堤[5]。防波堤由三個部分組成，分別是北堤、開口部和南堤。北堤長達 990 公尺，南堤則為 670 公尺，開口部則有 300 公尺以確保大型船隻可順利出入釜石港，如圖 10 所示。

防波堤的斷面構造如圖 11 和圖 12 所示，由多個沈箱構成，南堤有 22 個（深水處 19 個，淺水處 3 個），北堤有 44 個（深水處 22 個，淺水處 22 個），開口部則有 13 個，如圖 13 所示。防波堤的堤身構造主要為沉箱，大部分浸沒在海面下，沉箱底部的基礎為消波

塊與七百萬立方公尺的巨大拋石塊，拋石塊上再鋪設寬 30 公尺的消波塊，防波堤的設計考量 1896 年的明治海嘯（100 年重現期）[5]。



圖 9 釜石灣口防波堤（資料來源：Google Map）



圖 10 釜石灣口防波堤俯視圖[6]



圖 11 釜石灣口防波堤標準斷面圖[5]

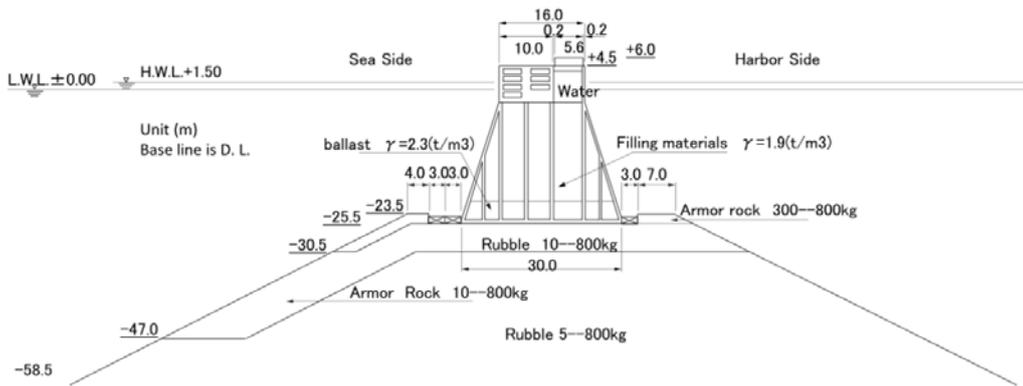


圖 12 釜石灣口北段防波堤側面圖[6]

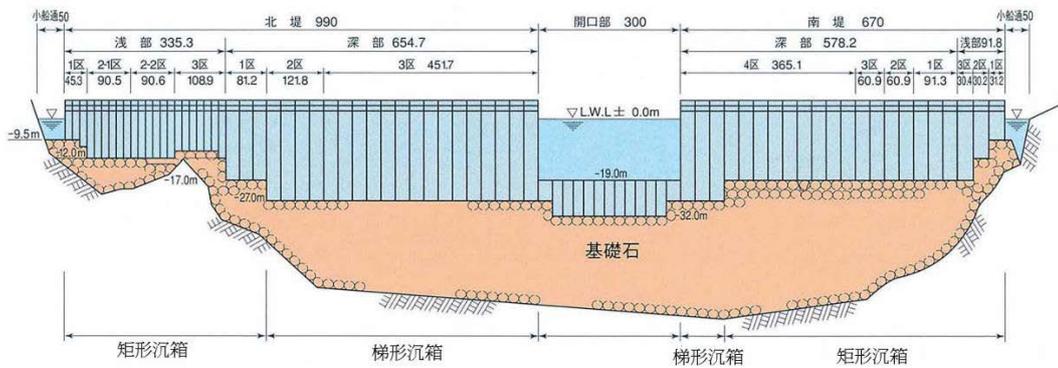


圖 13 釜石灣口防波堤斷面展開圖[5]

## 1. 防波堤的損害情形

2011 年規模 9.0 的日本大地震所引發之海嘯，使防波堤沉箱多傾倒或滑移，從災後的幾張現地照片（圖 14 - 圖 16），可明顯發現到北堤的損害情形最為慘重，隨處可見防波堤被海嘯波衝散，甚至是傾倒；相對地，南堤有相當大的部分是完好的。北段深水處共 22 個沉箱，只有一個保持完好，14 個傾斜、7 個下滑，淺水處的狀況要比深水好，共有 6 個沉箱保持完好、5 個傾斜、11 個下滑；開

口潛堤的部分只有 1 個完好，其他 12 個沉箱皆傾斜；南段的狀況比北段要好，深水處有 10 個保持完好，1 個傾斜、8 下滑，淺水處則有 1 個沉箱傾斜、2 個下滑，如圖 17 所示[6]。



圖 14 釜石灣口防波堤損壞情形（全景）[2]



圖 15 釜石灣口防波堤損壞情形（北堤）[2]



圖 16 釜石灣口防波堤損壞情形（南堤）[2]

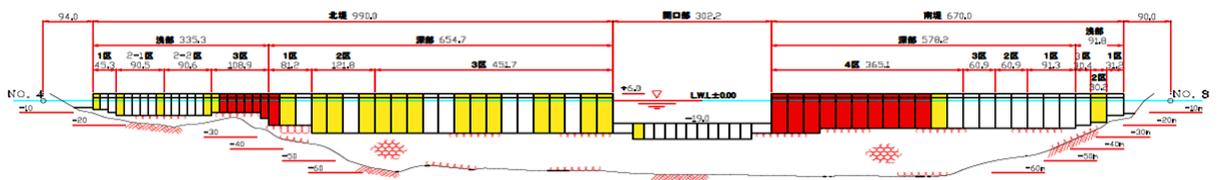


圖 17 釜石灣口防波堤損壞情形(紅色：完好、黃色：傾斜、白色：  
下滑)[6]

## 2. 防波堤的破壞機制

Arikawa et al. [6]研究釜石灣口防波堤的破壞與以下幾種力量

有關：水動壓力與波浪的水平推力、堤前後的水位高低差、對基礎平台的沖刷、沉箱縫隙間強烈射流，以及因承載力下降引起的孔隙水壓力。以 1 比 20 的模型進行模擬 (CADMAS-SURF/3D)，發現防波堤後方的靜水壓力相對於前方降低百分之十，而堤後的溢流掏刷對摩擦係數有很大的影響。

Arikawa et al. [6]認為防波堤前後的水位差是造成破壞的主要原因，高低落差形成跌水沖刷、堤後靜水壓力減低，造成沉箱和土堆的不穩定、產生縫隙間的射流以及對平台基礎的掏刷。

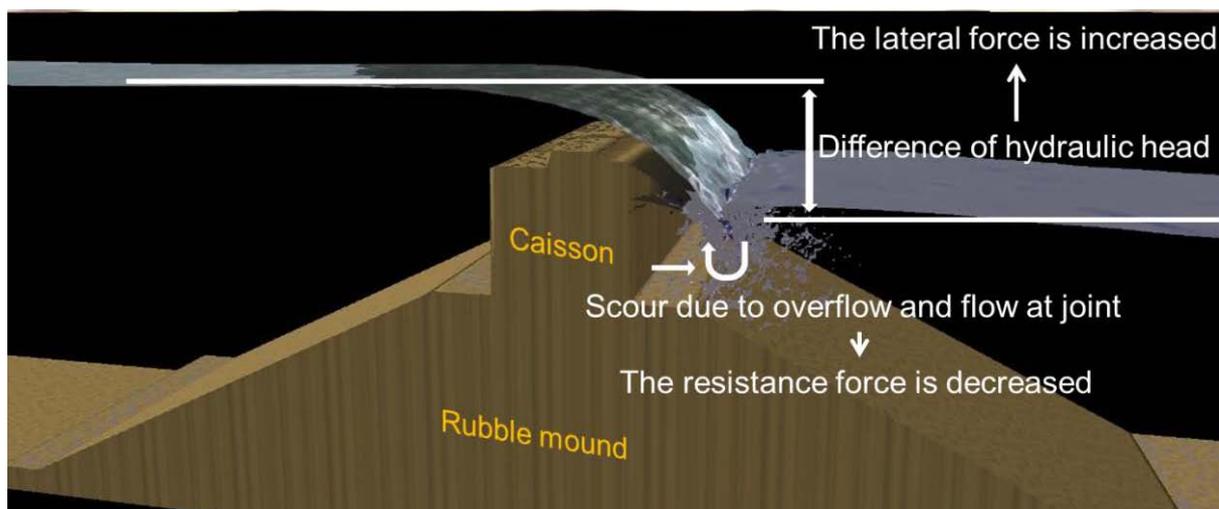


圖 18 釜石灣口防波堤破壞機制[6]

### 3. 防波堤效能分析

港灣空港技術研究所[2]以 STOC-ML 模式探討釜石灣口防波堤的成效，模擬 311 海嘯對於釜石港口地區所造成的影響，並探討建

設防波堤前、建設完成和防波堤部分毀損，三種不同狀況下的海嘯波高和傳遞延時的差異。STOC-ML 使用多重的巢狀網格，如圖 19 所示，圖 20 則是 STOC-ML 最內層的模擬範圍以及數值測站的位置。

圖 21 是模式模擬防波堤建設前、完成後和部分毀損時，分別受到日本 311 海嘯時的最大波高分布，其中藍色虛線是實際已確認的淹水範圍。在缺少防波堤的阻擋之下，海嘯波從外海長驅直入傳遞至內陸，造成相當大面積的溢淹，沿岸的海嘯波高皆在 10 m 以上。當防波堤建設完成之後，海嘯波傳遞至釜石港內的能量明顯減少了，尤其是在防波堤後的部分，由原本的 10 m 降為 5 m 左右。然而，受到淺化效應的影響，海嘯波於岸邊仍有波高放大的現象。當防波堤受到海嘯波衝擊而部分毀損時，海嘯波傳遞至港內的程度明顯增加，但仍舊小於未建設防波堤之前。從實際的溢淹範圍來看，防波堤無論破壞與否皆與實際的情況類似，顯示釜石灣口防波堤成功地阻擋了一部份海嘯波的侵襲。雖然沒有完全阻擋海嘯波，但很明確地發揮了減災的效果。

從不同數值測站的時序列資料可發現到建設防波堤後的海嘯波浪傳遞現象，如圖 22 所示。在釜石港外，無論有無防波堤皆會得到相同大小的最大海嘯波高。而在有防波堤後，最大的差別在於最大波高之後，受到防波堤的阻擋，40-45 分出現了相當大的反射波，

顯示相當大的海嘯波能被反射回外海。而在釜石港內、平田漁港和白浜漁港處，最大海嘯波高有明顯降低的現象。除此之外，前導波之外的後續幾個波浪的波高也有下降。

藉由比較不同測站的第一個海嘯波高、海嘯前導波抵達時間和波高超過 4 m 的時間，可以更明確量化防波堤的成效。表 3、表 4 和表 5 分別是釜石灣口防波堤建設前、完成和破壞後的結果。以建設前的數據作為參考值，可得到完成和破壞後的波高下降百分比和時間延遲的大小。由於釜石港外海象計位於防波堤的外側，建設完成後，第一個海嘯波的波高差異不大。有趣的是，波高超過 4 m 的發生時間甚至有提前的現象。這主要是因為防波堤造成大部分的海嘯波反射回去，使得入射波和反射波疊加，故 4 m 以上的海嘯波高反而是較早發生。當防波堤部分破壞後，由防波堤產生的反射波減少了。因此，波高超過 4 m 的時間點略晚於防波堤完整的情況。其餘的數值測站，則充分反應出釜石灣防波堤之成效，第一個海嘯波高明顯降低，且前導波和超過 4 m 的波高皆有明顯的延遲作用。最大溯升高度的變化，如表 6 所示。在防波堤建設完成之後，須賀、平田和白浜地區的最大溯升高度最多減少一半，即便防波堤破壞後最少也降低了二成以上。

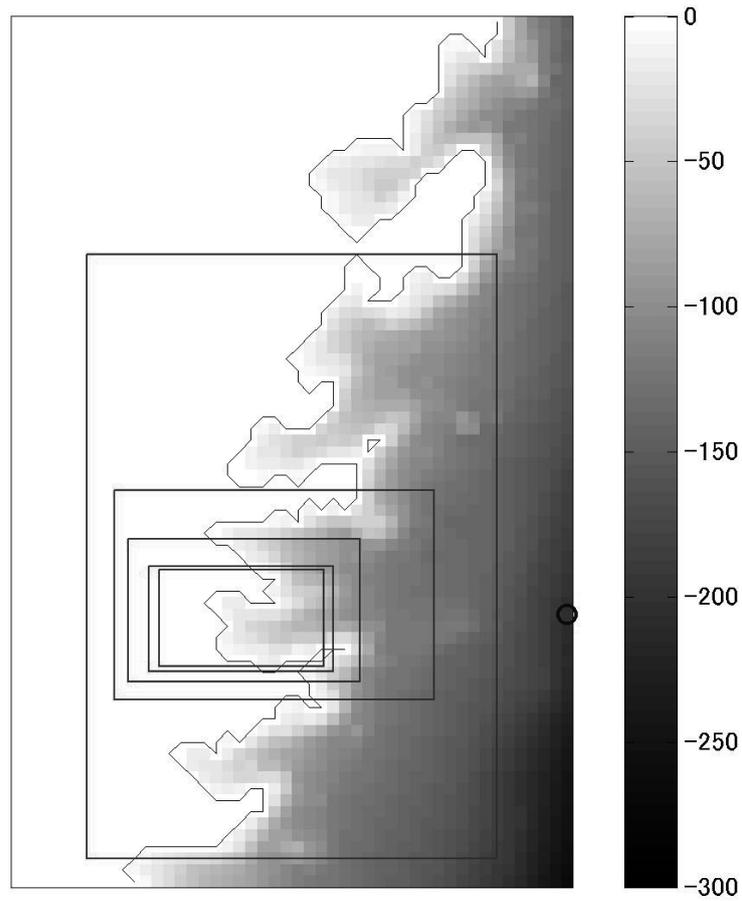


圖 19 STOC-ML 模式所使用的六層巢狀網格[2]

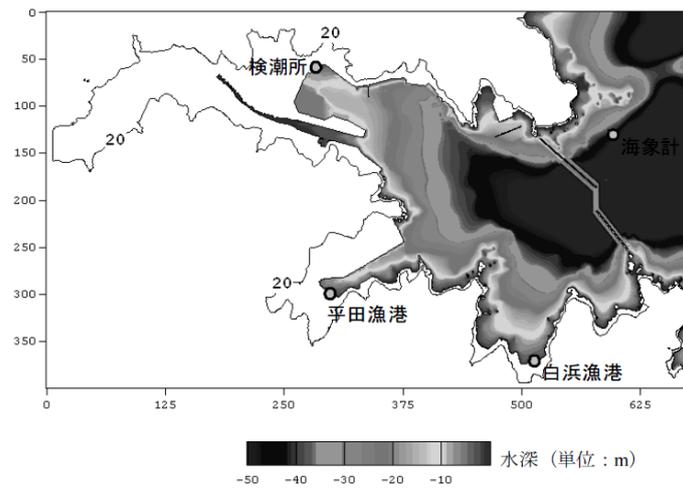


圖 20 STOC-ML 模式最內層網格大小 12.5 m 的計算範圍[2]

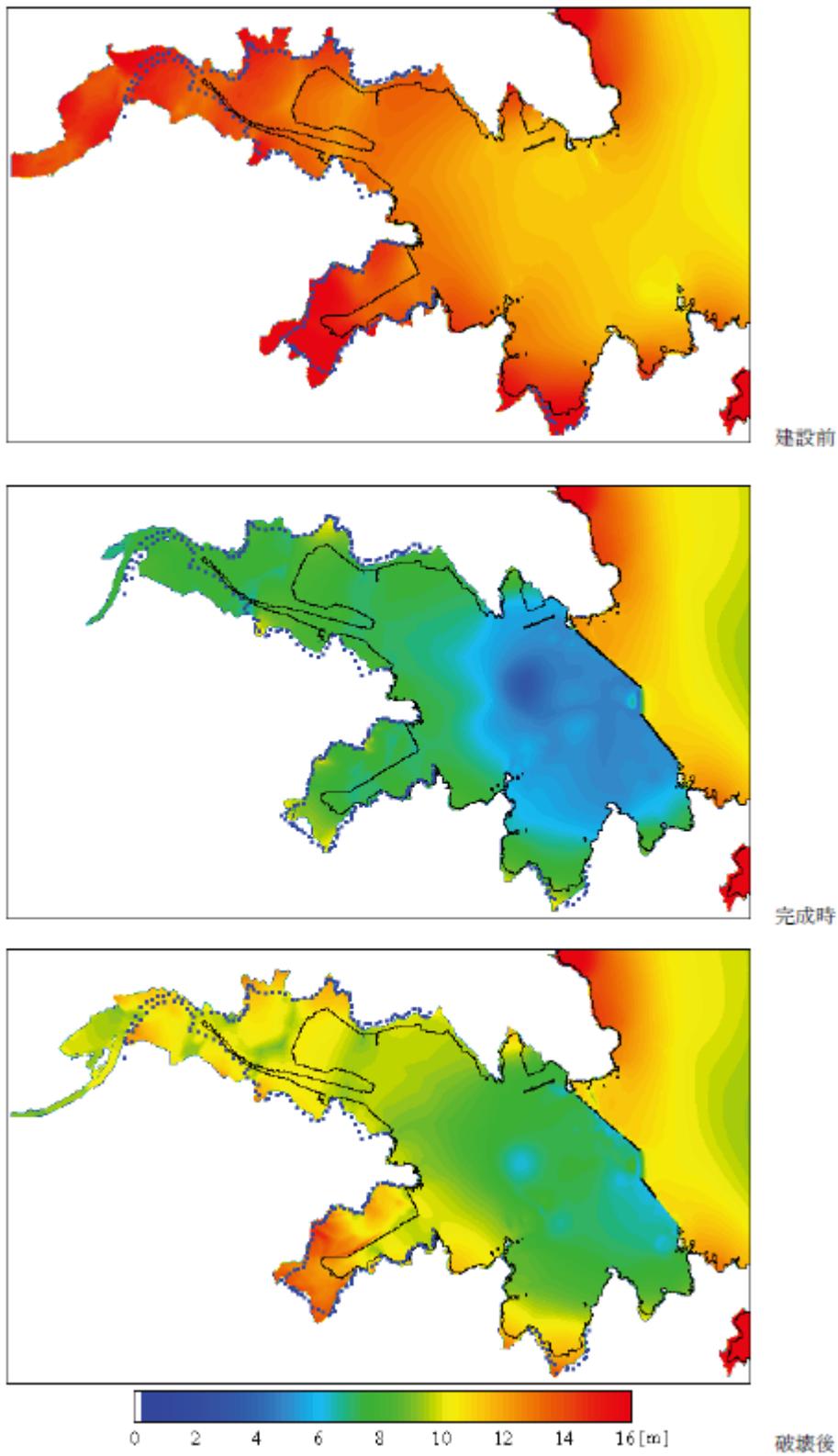


圖 21 最大海嘯波高[2]

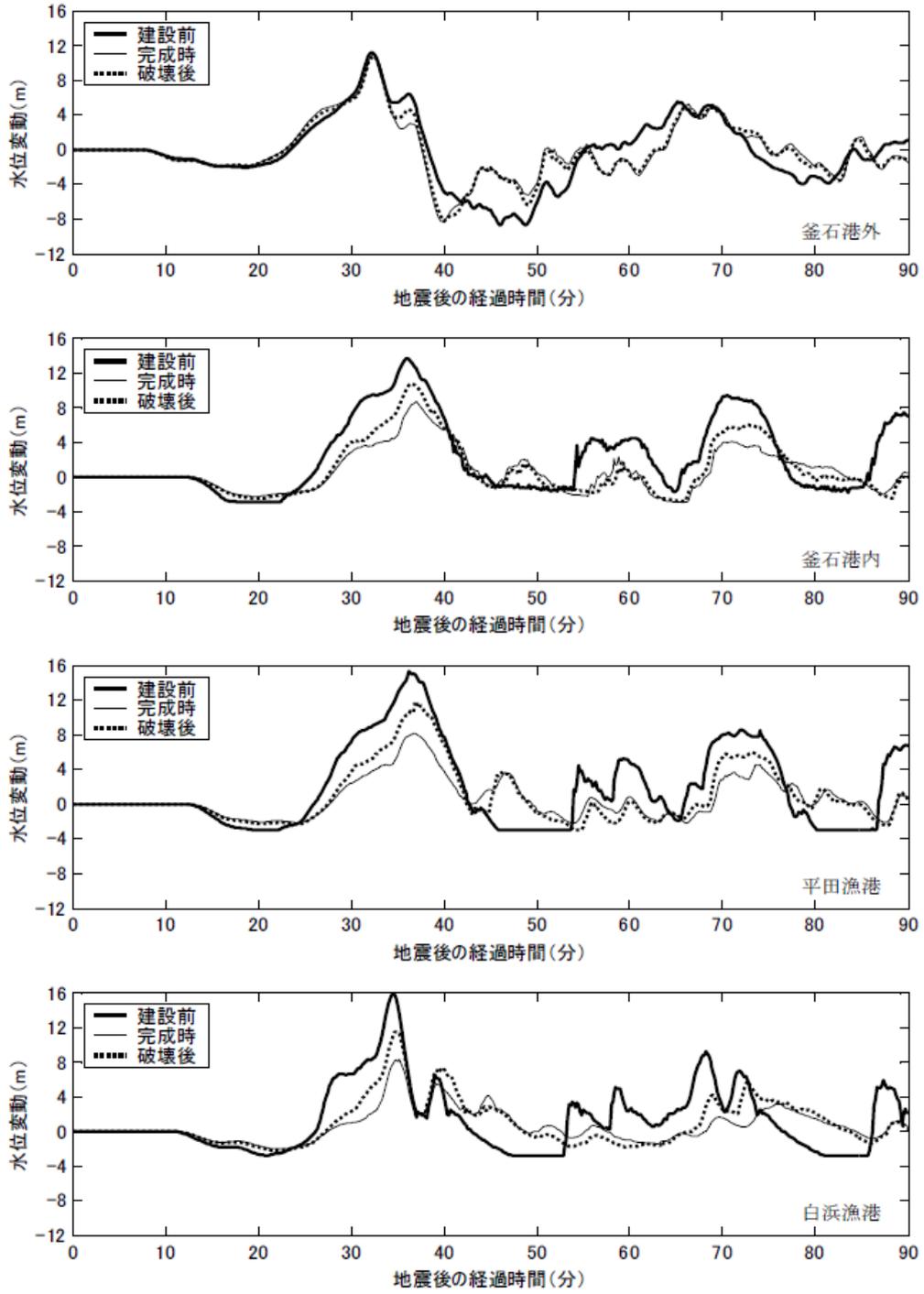


圖 22 水面的時序列變化[2]

表 3 釜石灣口防波堤建設前[2]

	第一個海嘯波 高 (m)	海嘯前導波抵 達 (分)	波高超過 4 m (分)
釜石港外海象 計	11.17	23.5	27.8
釜石港內檢朝 所	13.66	25.7	28.0
平田漁港	15.30	26.0	28.2
白浜漁港	15.84	25.2	27.3

表 4 釜石灣口防波堤建設完成[2]

	第一個海嘯波 高 (m)	海嘯前導波抵 達 (分)	波高超過 4 m (分)
釜石港外海象 計	11.01 (99%)	23.0 (-0.5 分)	26.2 (-1.6 分)
釜石港內檢朝 所	8.67 (63%)	27.7 (+2.0 分)	33.2 (+5.2 分)
平田漁港	8.14 (53%)	27.8 (+1.8 分)	32.7 (+4.5 分)
白浜漁港	8.34 (53%)	27.5 (+2.3 分)	33.5 (+6.2 分)

表 5 釜石灣口防波堤破壞後[2]

	第一個海嘯波 高 (m)	海嘯前導波抵 達 (分)	波高超過 4 m (分)
釜石港外海象 計	10.74 (96%)	23.0 (-0.5 分)	26.5 (-1.3 分)
釜石港內檢潮 所	10.74 (79%)	27.5 (+1.8 分)	30.0 (+2.0 分)
平田漁港	11.84 (77%)	27.7 (+1.7 分)	30.2 (+2.0 分)
白浜漁港	11.48 (72%)	27.3 (+2.1 分)	31.3 (+4.0 分)

表 6 釜石灣口防波堤建設前，建設完成和破壞後的最大溯上高度[2]

	建設前的最大溯上高度 (m)	建設完成的最大溯上高度 (m)	破壞後的最大溯上高度 (m)
須賀地區	20.21	11.00 (54%)	13.29 (66%)
平田地區	20.78	10.46 (50%)	15.61 (75%)
白浜地區	18.14	12.28 (68%)	14.21 (78%)

#### 4. 小結

從數值模擬的結果和實際的調查結果可得知釜石港口防波堤的成效是相當顯著的，無論是海嘯高度、海嘯抵達時間和淹水面積，皆顯示釜石港口防波堤的存在（無論毀損與否）減低了一定程度的海嘯災害。圖 23 是釜石灣口防波堤效能分析的總結：

1. 海嘯最大波高之降低：13.7 m → 8.0m（減低 4 成）
2. 海嘯最大溯升高之降低：20.2 m → 10.0m（減低 5 成）
3. 水位超過防潮堤的遲延時間約 6 分
4. 港區陸地淹水面積由 141 公頃 → 25 公頃

防波堤的建設可保護海岸地區、減低海嘯波的破壞力、增加民眾逃脫時間，但卻阻擋人民接觸海洋環境，也無法直接看到近海的狀況，如 2011 年日本海嘯時，約 60 人駕駛於近岸沒有感受到地震、又因海嘯牆而阻擋視線不能辨認海嘯波的來襲，沒有緊急逃跑而喪命。防海嘯設施並不能完全阻止所有可能的海嘯災害，也有民眾因防海嘯的建設過於安心，認為防波堤或海嘯牆可完全阻擋海嘯波而疏忽逃跑[3]。

防海嘯設施有相當高的建設成本，海嘯的發生率又比一般然災害低（如：颱風地震、火山爆發），長時間阻擋民眾與海洋的接觸，若是不能阻擋大部分可能的海嘯波，將失去其重要功能，因此防海嘯設施的設計依據與效能是需要且重要的評估。

從釜石灣口防波堤於日本 2011 年 311 海嘯的分析報告可知防波堤有達到一定程度的減災效果，除了爭取到更多寶貴的撤離時間之外，海嘯波高降低、溢淹範圍減少都證明釜石灣口防波堤有發揮其功用。

然而，假若防波堤受到海嘯波衝擊而未毀損，從模擬結果可知其減災效果是更為理想的。由於防波堤的毀損與海嘯波直接的作用力和其引發的基礎掏刷等現象有關，故針對防波堤本身的結構加強或是以保護工的方式避免基礎被掏刷。除此之外，對於震源位置、斷層長度、斷層寬度、滑移量、地震規模...等條件的不確定性也是

導致防波堤毀損的可能原因之一。

釜石灣口防波堤是以 1896 年的明治海嘯作為設計的依據，此種作法忽略了震源參數的變異度。然而，震源參數的不確定性，可能直接導致海嘯波的波高、波速和波向的不同。因此，若只以歷史海嘯作為設計的依據，當發生與該歷史海嘯特性相差甚遠的情況時，可能導致低估或是高估的結果。因此，未來若能採用機率式海嘯危害度的方式作為設計的依據，考量不同的震源參數，得到不同重現期的機率式波高，將可能設計出更符合需求且的防波堤且降低建設成本。

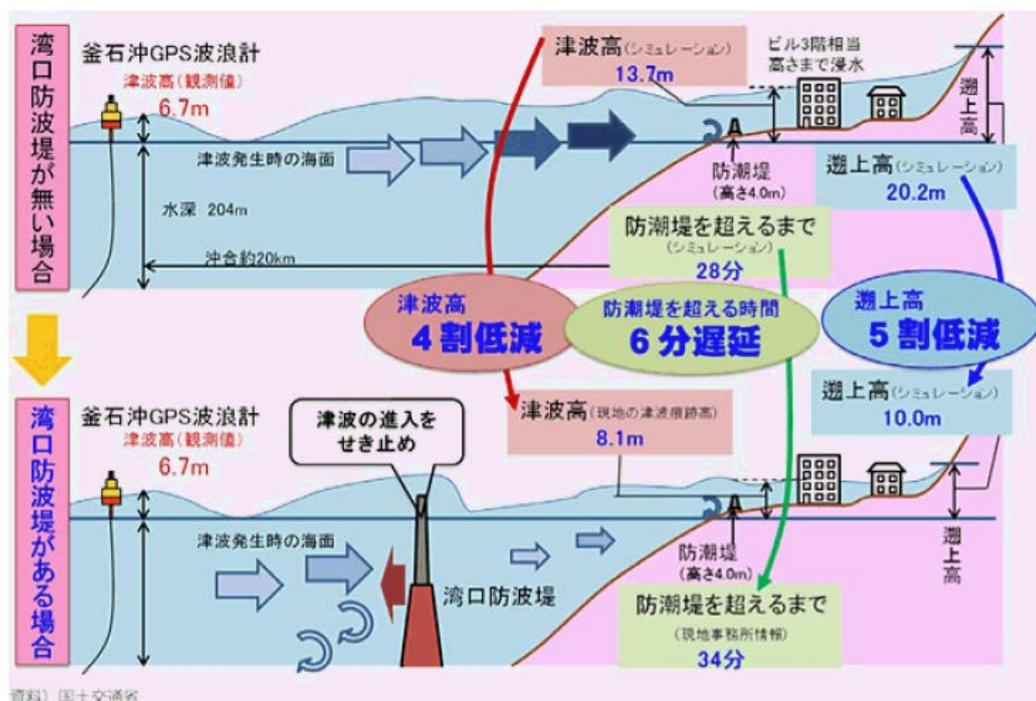


圖 23 釜石灣口防波堤效能分析[7]

### 三、數值模式適用性探討

本研究計畫將利用數值模式模擬不同海嘯波高情境下，其海嘯波傳遞至核能設施周圍時，可能之溯升高度和溢淹範圍。以下以三種海嘯數值模式來做評估比較，並針對本計畫所使用的二維及三維數值模式做介紹和適用性的評估。

#### (一) 海嘯數值模式介紹與研選

由大型海底地震所引發的海嘯，會因為地殼的大規模變動(large spatial scale of seismic source)而具有極長的波長。這些海嘯的波長可長達數十至數百公里。與海洋的水深比較起來，海嘯波長是相當大的(海洋的最深處位於太平洋的馬里亞納海溝，其深度為 10.9 公里)。因此，海嘯波浪又被稱為長波(long wave)或者是淺水波(shallow water wave)，而後者是指水深跟波長比較起來極小。海嘯波的傳遞過程是相當複雜的，需要依靠數值計算才能得到整體的海嘯波傳遞過程。然而海嘯傳遞是由遠域(水深大於 200m)至近域(水深小於 200m)，含括範圍非常廣，因此數值求解需要相當的計算時間。

二維海嘯數值模式在進行尺度較大的模擬上有較佳的計算效率，同時能準確的計算海嘯波傳遞過程。JSCE [10]整理了二維海嘯

模式常用的兩種演算方法，分別為 Goto 法和 Tanaka 法，詳細的比較如表 7 所示。本研究計畫評估常用的二維海嘯數值模式包含 MOST、TUNAMI 和 COMCOT，分別屬於 Tanaka 法和 Goto 法。以下，概述這三種模式的特性並做一評估。

## 1. MOST

MOST (the Method of Splitting Tsunami) 是由南加州大學所發展的數值模式[11, 12]，之後由 NOAA 的海洋環境實驗室維護與改良[13]。MOST 是一個可以模擬海嘯因地震發生而生成、在海洋中傳遞與溯升的模式。此模式使用 Okada [14]的斷層模組模擬海嘯生成；採用球座標表示的非線性淺水波方程式，並考慮科氏力之影響；以 Shuto [15]建議之內含數值頻散效應的有限差分法離散。

## 2. TUNAMI

TUNAMI-N1、TUNAMI-N2 與 TUNAMI-N3 模式用於模擬近域的海嘯；TUNAMI-F1 與 TUNAMI-F2 則用於遠域海嘯[16]。這些模式被廣泛的應用在海嘯模擬，並且經由現有的海嘯資料做了進一步的修正與改良。此數值模式分別使用可模擬近域以及遠域海嘯的模組進行計算，這些模組在 UNESCO [17]及 Imamura et al. [16]有較詳盡的描述。此模式中，近域海嘯模組使用卡氏直角座標系統，而遠

域模組使用球座標系統。這兩個模組的控制方程式與 MOST 相似，皆是以非線性淺水波方程式為基礎；遠域模組中考慮了科氏力之效應。另外，近域以及遠域海嘯模組皆使用有限差分法進行計算。

### 3. COMCOT

COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) 數值模式為美國康乃爾大學土木與環境工程學系劉立方教授團隊所研發。採用球座標與卡氏座標；利用巢狀網格之優點，可同時合併求解線性和非線性淺水波方程式，提升計算效率；以移動邊界的方式計算海嘯溢淹範圍。該模式已被使用於重現許多海嘯事件，如 1992 Flores Islands tsunami[18]、2003 Algeria Tsunami[19]和 2004 Indian Ocean tsunami[20]，均顯示 COMCOT 有可靠之準確性。

在海嘯波的計算上，非線性和頻散性的效應都必須含括在內才能較準確並完整的計算海嘯波由遠域至近域的演變和傳播行為。由上述各模式簡介知，相較於其他模式 COMCOT 模式具有較完整功能與適用性。因此，本計畫以 COMCOT 模式做為本計畫模擬海嘯波之傳遞模式。以下，針對 COMCOT 模式做更進一步說明。

表 7 二維海嘯模式採用之數值方法[10]

		Goto method	Tanaka method
Governing equation	Advection term	Conservation type	Non-conservation type
	Friction term	Manning type	General friction type
	horizontal eddy viscosity term	Introduced if necessary	Introduced

表 7 二維海嘯模式採用之數值方法 (續)

		Goto method	Tanaka method
Numerical scheme	Alignment of variables	Staggered scheme	Staggered scheme
	Pressure term	Leapfrog	Leapfrog
	Advection term	1st-order upwind difference scheme with accuracy of 1st order	Lax-Wendroff scheme with accuracy of 2nd order
	Friction term	Approximated implicitly	Approximated explicitly (time forward)
	Horizontal eddy viscosity term	-	Approximated explicitly (time forward)

## (二) 二維海嘯模式介紹 (COMCOT)

### 1. 模式簡介

本計畫使用 COMCOT (COrnell Multigrid COupled Tsunami model) 模式作為模擬海嘯運動行為的數值工具。COMCOT 是由美國康乃爾大學土木與環境工程學系劉立方教授團隊所發展出，以 COMCOT 為研究工具的研究成果常見於國內外期刊，廣受學界採用，且其經由 1986 Hua-lien tsunami[21]、1992 Flores Islands (Indonesia) tsunami[18]、2003 Algerian tsunami[19]、2004 Indian Ocean tsunami[20]等實例驗證，所模擬出的海嘯波高、抵達時間、溢淹範圍等結果，與潮位資料及衛星影像比對均有相當高的準確性。

COMCOT 模式具有以下特點：

- (1) 可依模擬範圍，選擇使用線性淺水波方程式或非線性淺水波方程式為統御方程式，如此可計算海嘯波由外海傳遞至近岸的情形。
- (2) 可依模擬範圍，選擇使用球座標或卡式座標作計算，如此可同時解析大尺度及小尺度的海嘯波。
- (3) 巢狀網格，可節省計算時間並維持準確性。
- (4) 移動邊界，可以處理海嘯波溯升時乾濕邊界的問題，精確計算

海嘯波於陸地上所造成之溢淹範圍。

- (5) 可選擇不同生成初始波形的方式，如：地震、海底山崩、人工造波……等。

## 2. 統御方程式

根據波浪理論定義，當  $kh < \pi/10$  為淺水波， $kh > \pi$  為深水波，而  $\pi/10 \leq kh \leq \pi$  則為中間性波，其中， $h$  為海水深度、 $L$  為波浪長度，其海嘯波波長遠大於海水深度，可視為一淺水長波，因此可以淺水長波理論描述海嘯之運動情形，而本計畫所使用的 COMCOT 模式所求解的統御方程式為淺水長波方程式。一個完整的海嘯模擬須包含非線性及頻散性效應，如此才能準確計算海嘯波從大洋傳播至近岸的演變過程，由於淺水長波方程式假設流場於垂直方向為均勻分布且不考慮頻散效應，COMCOT 透過數值方法的改進[18, 22, 23]，由數值方法產生的頻散效應仿效實際上的頻散效應。

海嘯波在深海中，海嘯振幅相對於海水深度相當小，此時淺水波方程式中，可不考慮非線性項的影響，也可忽略底床摩擦力的作用，在大尺度範圍模擬下，須考慮科氏力及地球曲面效應，線性淺水波方程式以球形座標表示為：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \psi} (Q \cos \varphi) \right\} = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fp = 0 \quad (4)$$

其中為 $\eta$ 波高， $P$ 、 $Q$ 為 $x$ 、 $y$ 方向的體積通量（ $P = Hu$ ， $Q = Hv$ ）， $u$ 、 $v$ 分別為 $x$ 、 $y$ 方向平均深度的速度， $h$ 為水深， $g$ 為重力加速度， $R$ 為地球半徑， $\varphi$ 、 $\psi$ 為經緯度， $f$ 為科氏力係數（ $f = \Omega \sin \varphi$ ）， $\Omega$ 為地球自轉速率。

當海嘯波由深海傳播至近岸後，因為淺化效應，始得波高增大、波長減小，非線性效應變大，因此不可忽略非線性項的影響，且因水深變小，底床摩擦力影響增大，應將摩擦力納入計算中。在小尺度範圍模擬下，科氏力及地球曲面效應相對較小，可不考慮，此時非線性淺水波方程式可以卡式座標表示為：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \psi} (Q \cos \varphi) \right\} = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fp = 0 \quad (7)$$

其中， $H$ 為總水體高度（ $H = \eta + h$ ）， $\tau_x$ 、 $\tau_y$ 為底部摩擦項中的剪應力，可由曼寧公式得， $n$ 為曼寧相對粗糙係數：

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{7/3}} P (P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$\tau_y = \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (9)$$

### 3. 數值方法

#### (1) 有限差分法

COMCOT 利用顯性蛙跳有限差分法 (explicit leap-frog finite difference method) 求解線性及非線性淺水波方程式[24]，離散式為：

$$\frac{\eta_{i,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1} - Q_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + gH \frac{\eta_{i,j+1}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{P_{i+1/2,j}^{n+1} - P_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} + gH \frac{\eta_{i+1,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0 \quad (12)$$

在程式中波高 $\eta$ 及水深皆位於網格中心， $P$ 、 $Q$ 為位於網格線上的體積通量，如圖 24 所示。其中， $\eta_{i,j}^{n+1}$ 表示在格點 $i$ 、 $j$ 上，且時間步為 $n+1$ 的波高， $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 為 $x$ 、 $y$ 方向上空間間格大小， $\Delta t$ 為時間間格大小。

#### (2) 巢狀網格系統

在計算海嘯波於深海中傳播時，因波形變化不大，為節省計算

時間，以粗網格描述即可，當海嘯波逐漸傳遞至近岸，為了瞭解海嘯波侵襲陸地時的溯上高及溢淹範圍，須採用較細網格加以分析，以便得到更精確的資訊。示意圖如圖 25。

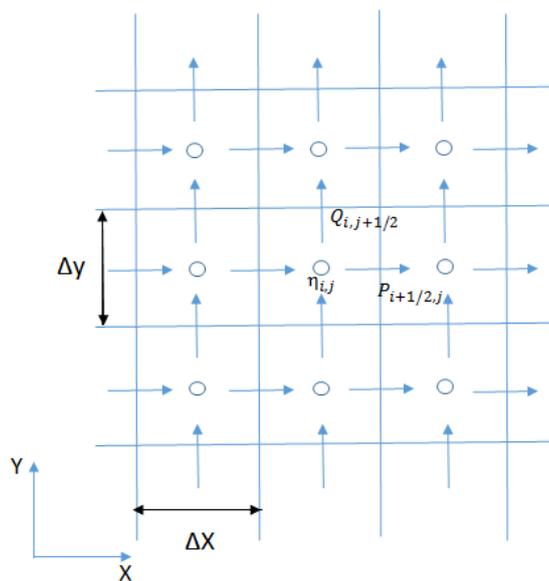


圖 24 交錯式有限差分網格系統

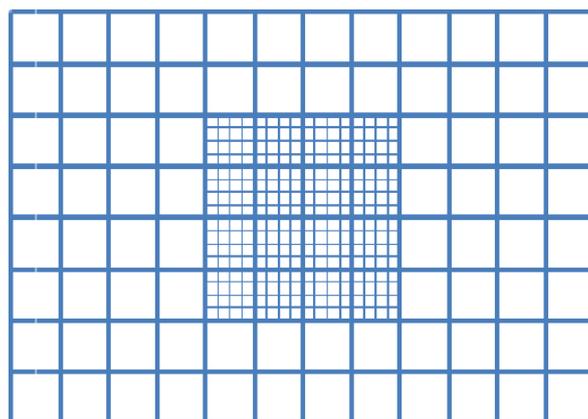


圖 25 巢狀網格示意圖

### (3) 移動邊界

為了闡述移動邊界法處理過程，以一維階梯代表真實地形來描述移動邊界條件的運算（圖 26），圖中 MWL 為平均海水面，代表洪氾高度， $\zeta$  為平均海平面至陸地的高度。當網格點在乾陸地上時， $\zeta$  定為正值，總水深（ $H = h + \zeta$ ）為負值，而在有水溢淹的濕網格中， $\zeta$  定為負值，總水深為正值，位於乾網格與濕網格的交界則定義為海岸線。波由外海計算到近陸地區，當遇到定義的海岸線，即  $H_i > 0$  及  $H_{i+1} \leq 0$  的條件成立，則開始使用移動邊界計算。以下的計算是用來判斷海岸線是否該移動，其先決條件是  $H_i > 0$ ，可能的情況如下：

- 當  $H_{i+1} \leq 0$  且  $h_{i+1} + \zeta_i \leq 0$ ，則海岸線仍位於第  $i$  與  $i+1$  個格點之間，體積通量  $P_{i+1/2}$  仍為零。
- 當  $H_{i+1} \leq 0$  且  $h_{i+1} + \zeta_i > 0$ ，則海岸線會移到第  $i+1$  與  $i+2$  個格點之間，體積通量  $P_{i+1/2}$  此處不等於零， $P_{i+3/2}$  值於零，洪氾高度為  $H_f = h_{i+1} + \zeta_i$ 。
- 當  $H_{i+1} > 0$ ，則海岸線會移到第  $i+1$  與  $i+2$  個格點之間，體積通量  $P_{i+1/2}$  此處不等於零，而  $P_{i+3/2}$  值於零，洪氾高度為  $H_f = \max(h_{i+1} + \zeta_i, h_{i+1} + \zeta_{i+1})$ 。

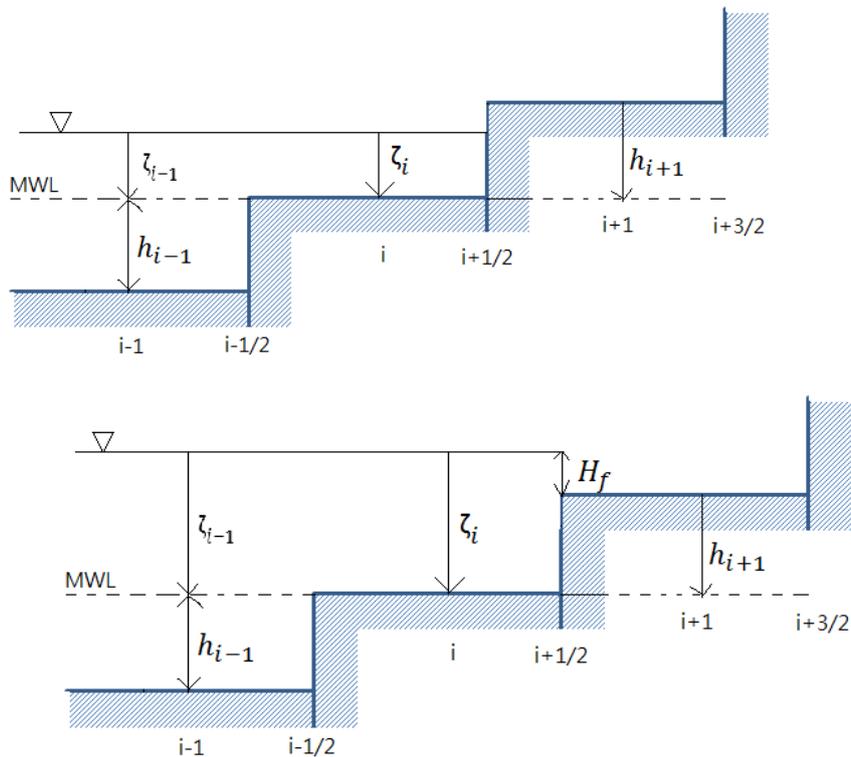


圖 26 移動邊界示意圖

#### (4) 海嘯初始波生成

Okada [14]的理論模型經由計算海底位移量，由海底斷層錯動產生各方向之位移分量，來計算海水面變化以求得海嘯初始波形。此方法已廣泛應用在目前的海嘯模式之中。[23, 25-27]使用此模型（圖 27）需給定以下參數，一般是透過地質調查所得的資料（如：USGS（United States Geological Survey，美國地質調查局））；或由專家學者所提出的情境條件。

1. 震央（epicenter）：地震發生時，地震震源向上垂直投影至地面的位置，即地面距震源最近的地方。

2. 破裂深度 (focal depth,  $h$ ): 震央至震源垂直距離。
3. 斷層長度 ( $L$ ): 平行於走向角的斷層長。
4. 斷層寬度 ( $W$ ): 垂直於走向角的斷層長。
5. 滑移量 (dislocation,  $D$ ): 將已決定之地震矩規模  $M_w$  轉換為地震矩  $M_0$ , 再透過同一系列之地震定比定律[28], 可決定斷層之滑移量。
6. 走向角 (strike angle,  $\theta$ ): 斷層走向 (沿海溝破裂為主) 與北方的順時針夾角。
7. 傾角 (dip angle,  $\delta$ ): 若該海溝曾有詳細之地質結構調查, 則可採用其傾角。如: 南海海槽, 其 35 公里深度內之傾角為 10 度。馬尼拉海溝則為 20 度。若無詳細資料, 則以 20 度取代。一般而言, 隱沒帶於 35 公里以內之傾角多介於 10 度至 20 度之間。
8. 滑移角 (rake angle,  $\lambda$ ): 滑移方向與斷層走向之夾角。

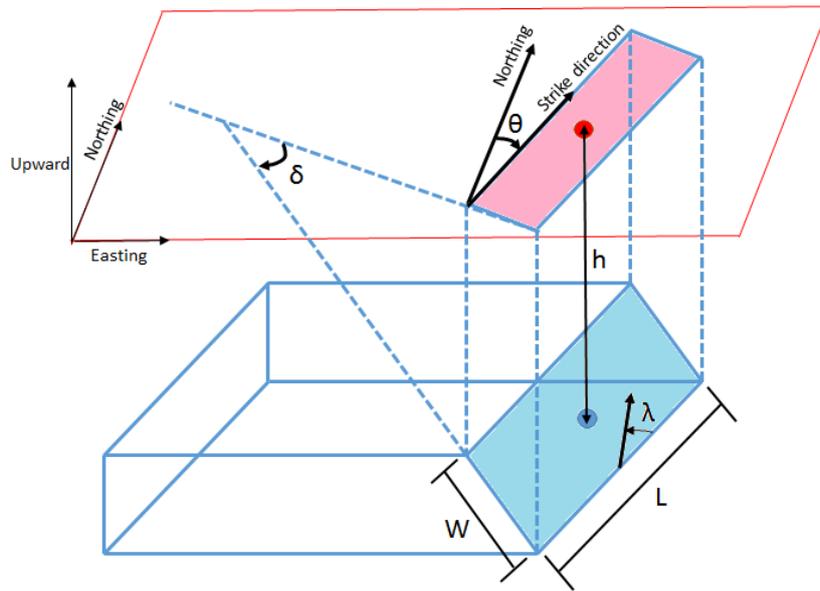


圖 27 參數示意圖[29]

表 8 彈性斷層模型所需參數

參數	單位
震央 (經度、緯度)	度
破裂深度 (h)	公尺
斷層長度 (L)	公尺
斷層寬度 (W)	公尺
滑移量 (D)	公尺
走向角 ( $\theta$ )	度
傾角 ( $\delta$ )	度
滑移角 ( $\lambda$ )	度

### (三) 三維數值模式介紹 (*FLOW-3D*)

於前一節可知 COMCOT 平面二維數值模式能夠有效率的計算，模擬海嘯由海洋遠域傳播至近域的過程。然而，當海嘯波傳遞至近岸區時，若要考慮更詳細的溯升點位置、碎波情況、紊流效應、結構物受力和特殊地形（例如：陡峭斜坡和低窪地形）影響時，則需要更為完整的流場描述來作分析。此時，可透過求解完整的 Navier-Stokes 的三維數值模式來獲得更詳細的流場資訊，進一步分析更複雜的海嘯相關問題[30]。

求解 Navier-Stokes 方程式相較於二維的水深積分模式需要更多的計算時間及硬體容量，隨著電腦計算速度的提升，模擬波浪與複雜底床及結構物互制的水動力行為已屬可行。本報告將文獻整蒐所推估之波浪條件當作邊界條件，計算作用在結構物上之剪應力及正向力，透過面積分可進一步求得作用力。再者，此方法不僅適用於波浪碎波之模擬，波浪作用在海岸結構物之衝擊力亦可相當準確的描述。

*FLOW-3D* 是一套三維的 CFD (Computational Fluid Dynamics) 商業軟體[31]。其控制方程式為連續方程式和 Navier-Stokes type 方程式，如式(13)~(16)所示。在結構物的邊界上，以 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 法區分出結構物和流體；在自

由液面上，以流體體積法區分出液體和氣體。

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (16)$$

其中， $\rho$  代表流體密度， $u, v, w$  代表流體速度， $G_x, G_y, G_z$  為重力項， $f_x, f_y, f_z$  為黏滯項， $V_f, A_x, A_y, A_z$  是 FAVOR 中的參數，分別代表流體可自由通過的體積及面積分率。

在數值上，要直接以 Navier-Stokes 方程式求解紊流場，需要相當龐大的計算量。因此常會採用紊流模式，以避免直接求解 Navier-Stokes 方程式。*FLOW-3D* 共有五種不同的紊流模式，較廣泛使用的有三種，分別為  $k-\varepsilon$ ，RNG (Renormalization Group) 和 LES (Large Eddy Simulation)。本計畫依據不同的條件，選用適當的紊流模式。值得注意的是，一旦選定紊流模式，上述方程式之變數代表的是不同的平均值(時間或空間)，而動力黏滯係數則為分子動力黏滯係數及紊流黏滯係數之總和。

$$u_{i,j,k}^{n+1} = u_{i,j,k}^n + \quad (17)$$

$$\delta t^{n+1} \left[ -\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho\delta x)_{i+1/2,j,k}^n} + G_x - FUX - FUY - FUZ + VISX \right]$$

$$v_{i,j,k}^{n+1} = v_{i,j,k}^n +$$

$$\delta t^{n+1} \left[ -\frac{p_{i,j,k+1}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho\delta y)_{i,j+1/2,k}^n} + G_y - FVX - FVY - FVZ + VISY \right] \quad (18)$$

$$w_{i,j,k}^{n+1} = w_{i,j,k}^n +$$

$$\delta t^{n+1} \left[ -\frac{p_{i,j,k+1}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho\delta x)_{i,j,k+1/2}^n} + G_z - FWX - FWY - FWZ + VISZ \right] \quad (19)$$

其中， $FUX$ 、 $FUY$  和  $FUZ$  為  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的對流項； $VISX$ 、 $VISY$  和  $VISZ$  為  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的黏滯項。上述這幾項會依據不同的數值方法而有不同的離散型態，在此不予闡述。

#### (四) 小結

由前述之模式介紹和評估，本研究計畫將使用 COMCOT 模擬海嘯波的生成和傳遞，再利用  $FLOW-3D$  三維數值模式進一步計算廠區複雜的流場變化。

## 參、主要發現與結論

### 一、耦合模式之建置

COMCOT 平面二維數值模式能夠有效率的計算，模擬海嘯由海洋遠域傳播至近域的過程。然而，當海嘯波傳遞至近岸區時，若要考慮更詳細的溯升點位置、碎波情況、紊流效應、結構物受力和特殊地形（例如：陡峭斜坡和低窪地形）影響時，則需要更為完整的流場描述來作分析。此時，可透過求解完整的 Navier-Stokes 方程式的三維數值模式來獲得更詳細的流場資訊，進一步分析更複雜的海嘯相關問題[30]。

Kim et al. [32] 耦合美國普林斯頓大學海洋模式（POM）和 *FLOW-3D* 計算日本 311 海嘯，日本海域附近的三維流場變化，發現使用更高精度的三維模式可得到與實際波高資料更為吻合的結果。然而，受限於目前 *FLOW-3D* 與外部資料銜接的方式，Kim et al. [32] 化了 *FLOW-3D* 的邊界流場資訊，將 POM 得到的時序列空間資料做空間平均的處理，造成同一平面的計算域邊界，流體的速度和水面在邊界上失去了空間變化。

求解三維 Navier-Stokes 方程式相較於二維的水深積分模式需要

更多的計算時間及硬體容量，故以高精度的三維模式計算整個海嘯發生的過程，並非適宜的作法。因此，為了兼顧計算的精度和效率，本計畫建置一個耦合二維海嘯模式 (COMCOT) 和三維高精度模式 (*FLOW-3D*) 的耦合模式。海嘯的生成和傳播以 COMCOT 進行模擬演算，再以 *FLOW-3D* 計算近岸或是感興趣的區域，如圖 28 所示。COMCOT 和 *FLOW-3D* 之間的銜接需要經過繁複的步驟：

- (1) COMCOT 資料的轉換
- (2) *FLOW-3D* 計算域座標的轉換
- (3) 計算域邊界資料的處理
- (4) 程式碼的修改

除此之外，由於 COMCOT 產生的資料相當龐大，所以如何有效率地處理資料亦是另一個需要克服的問題。因此，本節將以高階程式語言，MATLAB 作為資料處理的平台，並詳述資料處理的流程，供相關研究參考。

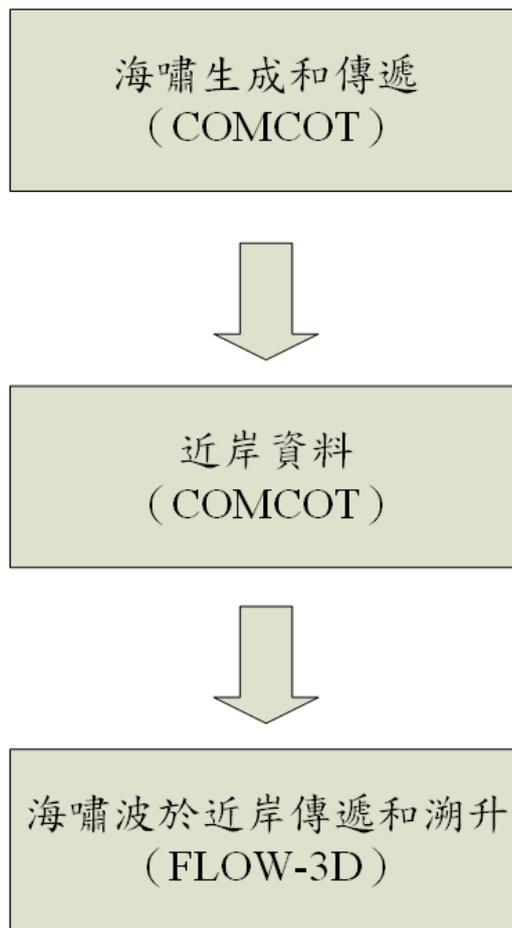


圖 28 耦合模式建置之流程

### (一) COMCOT 模擬資料處理

為了模擬海嘯自深海處生成並傳播至近岸的過程，需先針對欲計算之範圍建立網格、地形資料、模式參數和震源參數之設定，完成一場情境海嘯的模擬演算。接著，本研究針對模擬資料進行額外的處理，以提高後續處理資料之效率，並減少資料所佔之硬碟空間。

原始 COMCOT 的模擬資料是以 ASCII 的型態儲存資料，此類型的檔案在儲存上需要較多的硬碟空間，並且讀取時需要較長的作

業時間。為了減少儲存資料所需的空間並提高資料讀取的速度，本研究團隊以 MATLAB 開發程式，將資料改以 '.mat' 格式儲存。'.mat' 格式是 MATLAB 專屬之資料儲存方式，可有效的壓縮純數值資料，並可快速的存取。

COMCOT 輸出的資料，主要分為水位、流體在 x 方向上的動能通量和流體在 y 方向上的動能通量。以起始步 ( $t = 0$  s) 為例：檔案名稱分別為 z\_01\_000000.dat、m\_01\_000000.dat 和 n\_01\_000000.dat。上述的資料格式，第一個英文字母代表儲存的物理變數，接著的兩位數是代表巢狀網格的編號（如：01 代表第一層巢狀網格），最後的六位數代表計算的時間步數。

由於 COMCOT 並非直接輸出速度場資料，故需將動能通量除以總水深，才能獲得流體速度。一般而言，所需要知道的是速度的分布並非是動能通量。因此，在儲存資料的同時，本研究一併將動能通量轉換成流體速度，以利於後續資料的處理。為了避免檔案名稱上的混淆，檔案命名的方式遵循 COMCOT 的規則。以前述的檔案名稱為例：水位、流體在 x 方向上的速度和流體在 y 方向上的速度會分別儲存在 z\_01\_000000.mat，u\_01\_000000.mat 和 v\_01\_000000.mat。完整程式碼將附於期末報告的光碟資料中，主程式 (comcot2mat.m) 和副程式一 (sub\_comcot2mat.m)、副程式二 (comcot\_load\_data.m)、副程式三 (comcot\_save\_zi)、副程式四

(comcot\_save\_ui) 和副程式五 (comcot\_save\_vi)。

## (二) *FLOW-3D* 計算域邊界及程式修改

*FLOW-3D* 原廠開發的銜接外部資料模組，本單位所購買之 10.3 版只能在四個計算域的邊界上給予相同的速度和水位。因此，若流場在通過該計算域邊界時，空間上呈現均勻分布，則誤差較小；反之，若計算域邊界的流場在空間上呈現不均勻分布，則此方法的可行性將隨著不均勻程度的提高而下降。所幸，*FLOW-3D* 開放部分的副程式供使用者修改。因此，本研究團隊自行開發模組，在空間上完整銜接 COMCOT 計算之結果，以符合實際海嘯波浪傳遞通過 *FLOW-3D* 計算域邊界之情形。

除此之外，*FLOW-3D* 本身具有一個耦合模組，混和淺水和三維流模式 (Hybrid Shallow Water/3D Flow model)，流場資料在淺水模式和三維模式間會互相傳遞，有助於提升模式的穩定性及準確度，屬於雙向耦合 (two way coupled)。然而，*FLOW-3D* 的淺水波模式目前正處於發展的階段，與 COMCOT 相比，缺少對於碎波的考量、波浪頻散性的改良和海嘯波的生成。雖然 *FLOW-3D* 的淺水波模式目前不能直接用來模擬海嘯波的生成傳遞和溯升，卻可扮演二維海嘯模式 (COMCOT) 傳遞至三維模式 (*FLOW-3D* 的 Navier-Stokes type model) 的橋樑，即 COMCOT 的資料以單向耦合 (one-way coupled)

的方式進入 *FLOW-3D* 的淺水波模式，再透過 *FLOW-3D* 內部的雙向耦合模式傳遞給三維的高精度模式。

因此，本團隊自行開發耦合所需的邊界模組，使 COMCOT 的計算資料能傳遞至 *FLOW-3D* 的混和淺水和三維流模式中的淺水波模式之邊界。

### (三) 小結

本章節詳述本研究團隊耦合高精度三維模式 (*FLOW-3D*) 和二維海嘯模式 (COMCOT) 之流程，包含 COMCOT 模擬資料的處理和優化以及 *FLOW-3D* 邊界修改。本團隊除了成功修改 *FLOW-3D* 程式使能夠與 COMCOT 結合之外，更撰寫一系列的 MATLAB 程式，大幅提升前處理的效率並節省大量的硬碟儲存空間。耦合模式做為海嘯波浪對核能廠區影響之研究模式，使得廠區複雜的水動力行為可以更真實的描述，以提供機率式海嘯危害度模型所需之水位，以及相關的流場資訊。

## 二、馬鞍山發電廠之機率式海嘯衝擊研究

評估地震所造成的海嘯危害，一般以定值法的方式計算特定地震情境所引發的海嘯溢淹。本研究以機率式的方式評估海嘯的危害度，以提供決策者做防災規劃時的參考。在深水區時，由於海嘯長波的特性，可以淺水長波模式模擬計算。相對地，當波浪傳遞至近岸時，地形的變化導致波浪非線性增加，使得淺水長波模式在描述沿岸水位變化和流速時會略有不足。故，本計畫建置耦合模式，結合機率式的情境條件，利用三維 Navier-Stokes type 模式描述在近岸較為複雜的流場變化，除了可提供更為精確的海嘯溯升高度和溢淹範圍，得到核三廠區周圍的機率式海嘯危害度波高和溯升高，更可進一步提供決策者更詳細的資訊。

### （一）馬鞍山發電廠簡介

台灣第三座核能發電廠，建立於 1978 年為台灣的十二大建設之一，簡稱「核三廠」，鄰近馬鞍山，故亦稱為馬鞍山發電廠。核三廠位於屏東縣恆春鎮南灣路 387 號（圖 29），占地約 354 公頃，廠址與恆春鎮直線距離約 6 公里，是台灣南部唯一的一座核能發電廠。

核三廠沿海地形平緩且鄰近馬尼拉海溝，若海溝斷裂引發大規模的海嘯將對核三廠造成威脅。核三廠外海具有防波堤，對於日常

的波浪、潮汐和湧浪……等，具有一定的防護效果。然而，對於不同情境的海嘯波高是否皆足以抵擋，仍是未知數。



圖 29 核三廠位置圖（資料來源：Google map）

## （二）地形資料收集與建置

為了計算波浪通過真實地形之變化，需要先建置地形資料。本研究先以二維海嘯模式（COMCOT）模擬海嘯波傳遞至近岸，再以

三維數值模式計算海嘯波進入廠區之演化。因此，本章節將介紹地形資料於二維（COMCOT）和三維（*FLOW-3D*）模式中之建置方法。

## 1. 地形資料於二維數值模式中之建置

海嘯波於不同水深會產生不同之傳遞速度與波形，因此模擬海嘯傳播之精確度仰賴高解析度之數值地形與適當之邊界條件。地形包含水深（bathymetry）與陸地（topography）。當海嘯於相對深海中傳遞時，因海嘯波長極長，此時水深地形解析度不需太高。U.S.NRC [33]建議使用 2 或 5 arc-minute（ETOPO2 or ETOPO5）即可，ETOPO 系列地形涵蓋全球並可由 NOAA（National Oceanic and Atmosphere Administration，美國海洋暨大氣總署）網站下載。但當海嘯傳遞至相對淺海時（如：大陸棚區，水深小於 200 公尺），水深變淺導致波長變短且底床摩擦力影響漸劇。此時，任何忽高忽低變化之地形均會影響海嘯傳遞。因此，模擬海嘯於相對淺海區傳遞時需要較高解析度之水深地形資料，以提高數值計算之準確性。U.S.NRC [33]於近岸區模擬海嘯傳遞時使用之地形，最小可達 1/3 arc-second（約 10 公尺）。當海嘯前導波（leading wave）與近岸區斜坡或是海灘產生接觸時，波前會沿著坡面或是海灘向上爬升，稱為溯升（run-up）；而進入內陸之海嘯則會以洪水形式傳遞，稱為溢

淹 (inundation)，溢淹之距離可達數公里 (如：2011 日本東北 311 海嘯，海嘯發生 20 分鐘後入侵內陸約 5 公里)。在此區域，陸地地形精確度則需更加精準，如建築結構物與河川均需精準地描述。U.S.NRC [33]使用之陸域地形，最小可達 1 公尺。

本研究報告於二維海嘯傳播模擬上，採用五層巢狀網格。五層網格區域皆搭配不同之數值地形，以符合海嘯數值模擬之地形適用性。第一層地形資料由 NOAA 提供，精度為 1 minute (圖 30)，經緯度範圍為 110.00E ~ 130.00E，10.00N ~ 30.00N。第二層範圍涵蓋台灣本島陸域和周邊海域，地形資料向行政院國家科學委員會海洋學門資料庫進行申請購買，精度為 500 公尺 (圖 31)，經緯度範圍為 117.00E ~ 125.00E，18.00N ~ 27.00N。第三層範圍包含台灣全島陸域台灣沿海海域，也是由行政院國家科學委員會海洋學門資料庫購得，精度為 200 公尺 (圖 32)，經緯度範圍為 119.00E ~ 123.00E，21.00N ~ 26.00N。第四層範圍包含台灣南部陸域和沿海海域，此層是由第三層內插而得，精度為 50 公尺，經緯度範圍為 120.65E ~ 120.90E，21.85N ~ 22.00N。第五層則是由核能所提供的陸域 (DEM) 和海域數值高程資料 (精度為 10 公尺) 合併而成 (圖 33)，經緯度範圍為 120.70E ~ 120.88E，21.88N ~ 21.96N，涵蓋台灣南部陸域和沿海海域。相較於第四層所使用的地形解析度，第五層的精度更高，因此能更完整地描繪出核三廠周圍陸域和海域的地形。第一層至第

五層資料屬於大尺度範圍，本計畫模擬所需地形資料的精確度均滿足規範的要求。

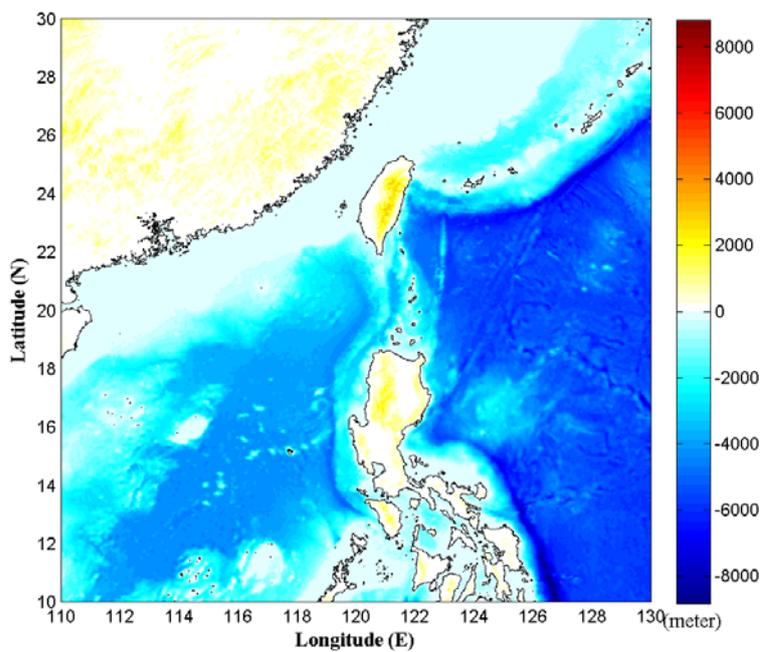


圖 30 第一層計算範圍和地形高程

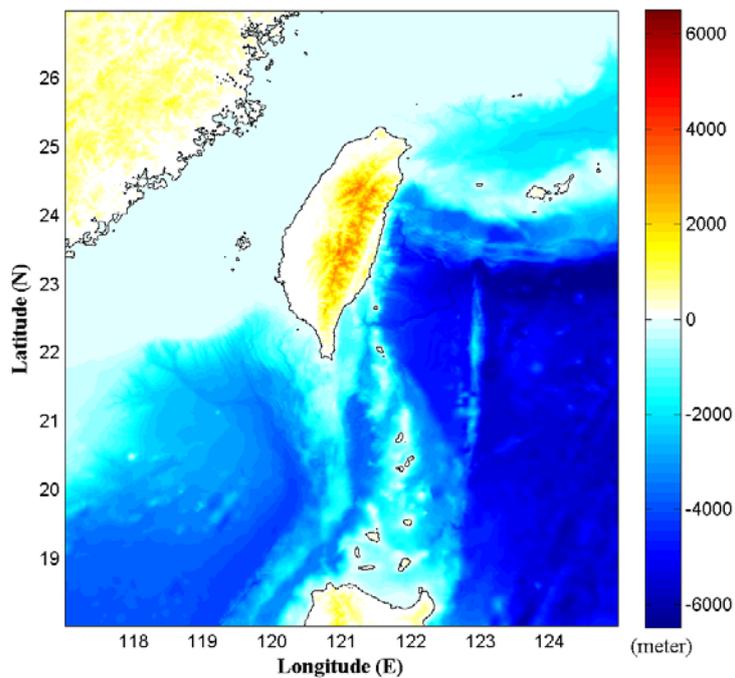


圖 31 第二層計算範圍和地形高程

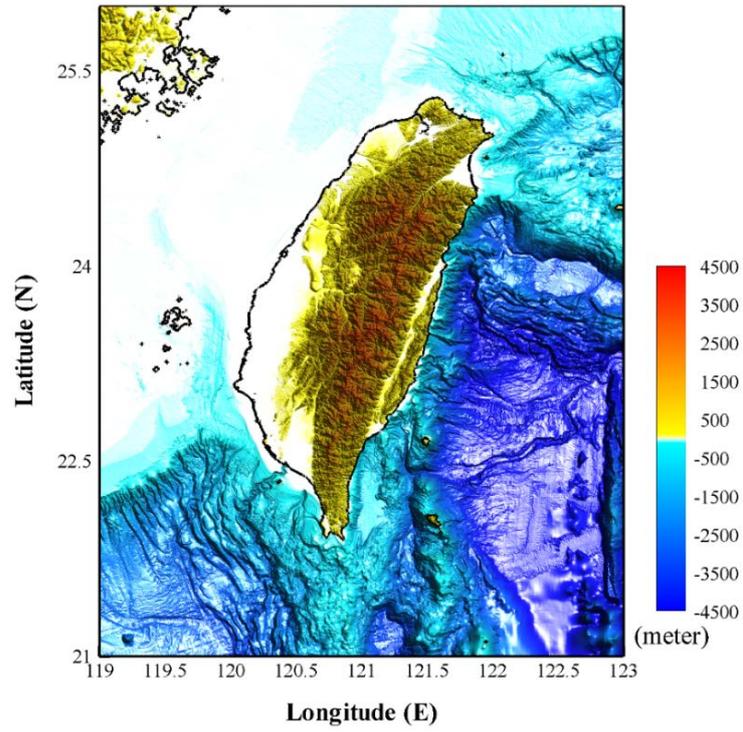


圖 32 第三層計算範圍和地形高程

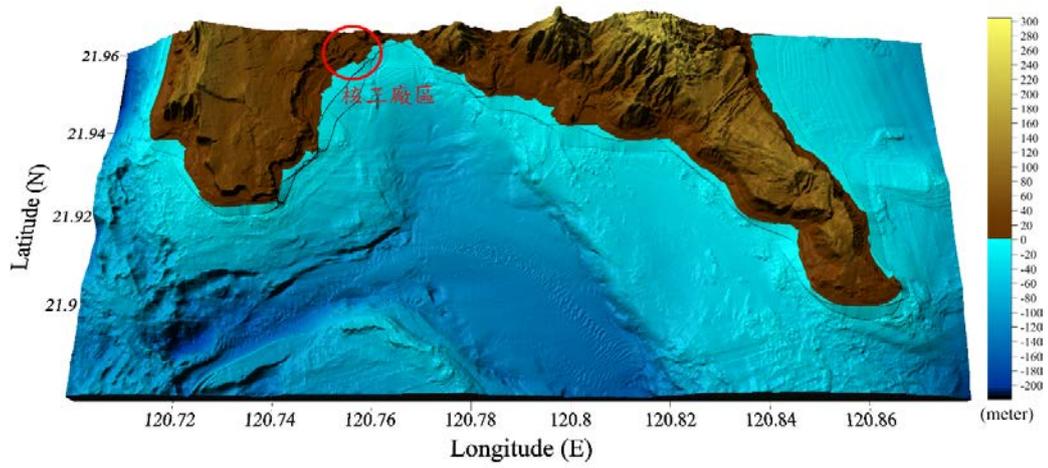


圖 33 第五層計算範圍

## 2. 地形資料於三維數值模式中之建置

經由二維數值模式模擬海嘯波生成和傳遞後，能夠得到台灣全島周圍海域和南部局部海域的海嘯流場資料，再以此當作三維數值模式的邊界資料，進而計算海嘯波侵襲廠區所造成的溯升高度和溢淹範圍。為了能夠得到更準確和細部的模擬結果，在三維模式中需使用高精度網格，並配合高解析度陸域和海域數值地形。核能所提供核三廠區周圍高解析數值地形資料（圖 34），海域資料精度為 5 公尺，陸域數值地形資料（DEM）精度為 5 公尺。藉由高解析度的陸域和海域數值地形資料的蒐集和結合，可建構三維模式所需的精細地形資料。

由於 *FLOW-3D* 是利用 STereoLithography (STL) 檔案建構結構物以及地形，故須把地形高程轉換成 STL。*FLOW-3D* 內建有 Topo2STL 的程式（圖 35）可將地形高程轉換成 STL 的形式，能夠便利地在模式中建構地形，轉換之結果如圖 37 所示。除了地形資料之外，廠區的建物可能會影響海嘯波的溢淹範圍和溯升高度。因此，本計畫利用核能所提供的資料、陳子宇 [34]和 Google earth 建立數棟重要的沿岸建築物，如表 9 和圖 36 所示。結合地形資料和建物資料，即可得到核三廠廠區於 *FLOW-3D* 的模型（圖 37）。

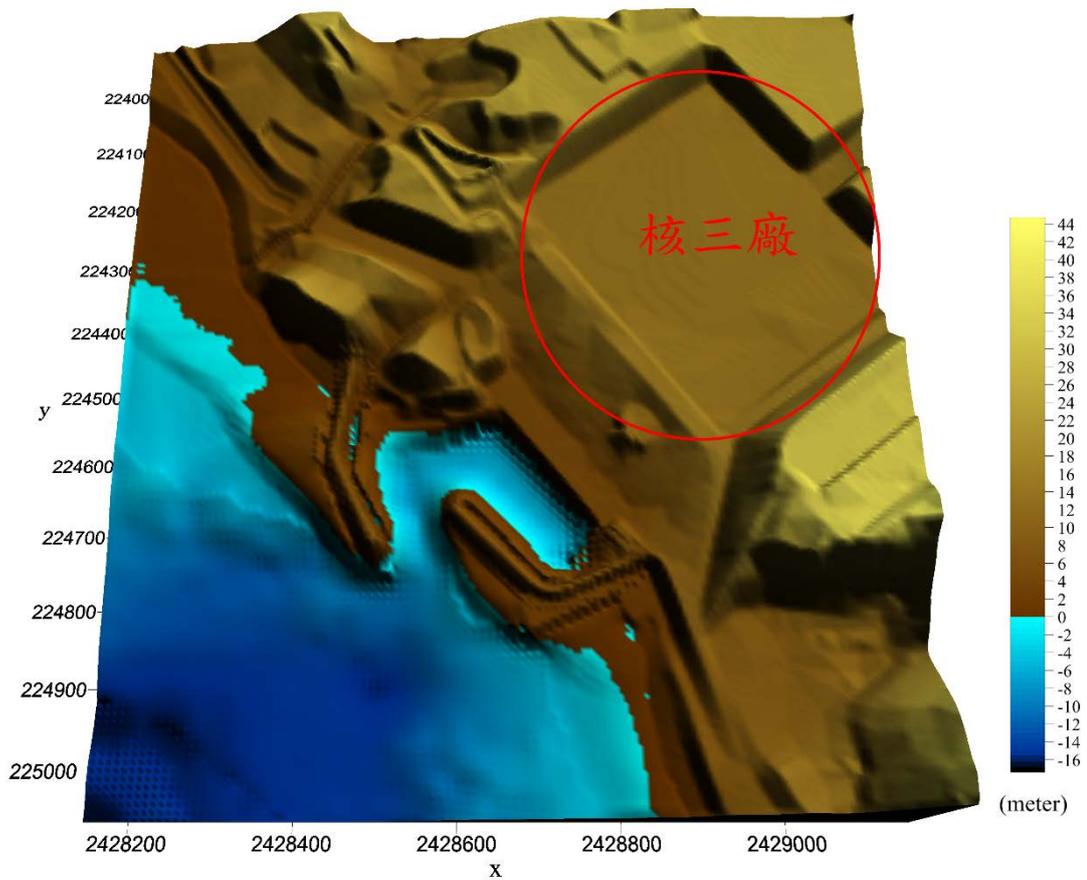


圖 34 核三廠區海域和陸域地形資料

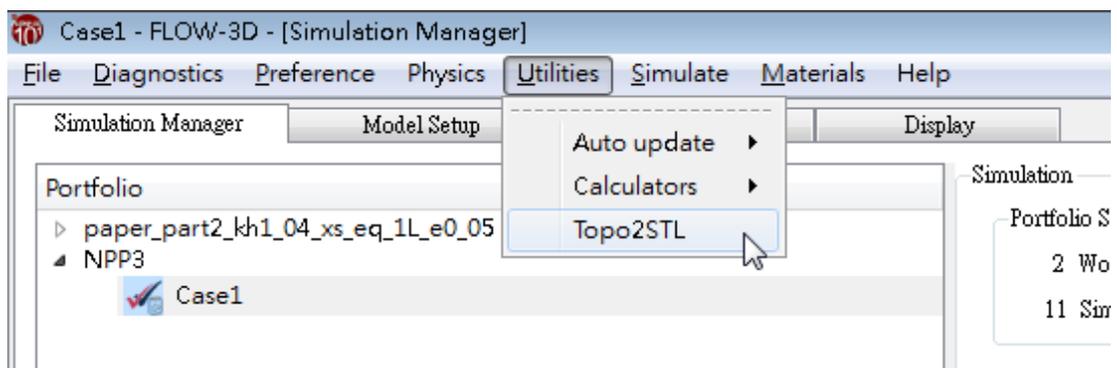


圖 35 Topo2STL 程式

表 9 核三廠建物之高程 (0 m 位於海平面)

	A	B	C	D
名稱	抽水機房	滅火設備	海水淡化廠	緊急海水泵室
建物高程	24.06 m	12.60 m	17.80 m	9.01 m



圖 36 核三廠區 Google earth 影像資料

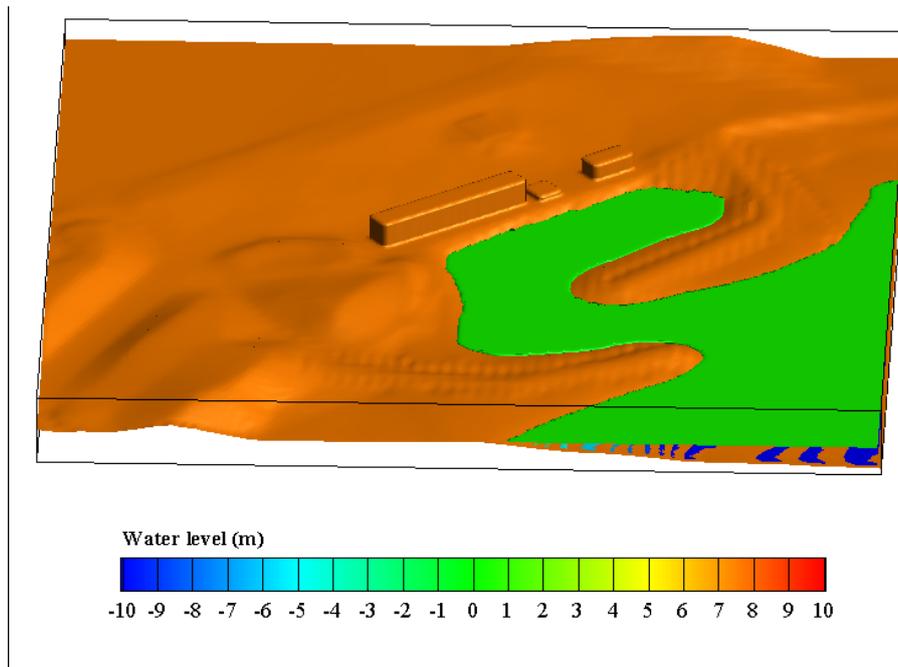


圖 37 核三廠區建物之建置結果

### (三) 海嘯情境設置

為配合同期的核能所計畫-海嘯浪高波傳機率模型之建置研究 (利用機率式海嘯危害度模型分析核三廠區的海嘯危害波高), 本計畫採用該計畫邏輯樹狀圖的其中一組情境條件進行模擬, 進一步分析核三廠區的溯升和流場變化, 地震參數如下所述。

本次所採用的情境海嘯之震央共有四個, 分別位於 119.678E, 22.012N、119.842E, 21.622N、119.987E, 21.239N 和 120.111E, 20.833N, 走向角分別為 158.3247 度、158.3247 度、164.0922 度和 164.0922 度, 如圖 38 所示。地震規模為 8.0  $M_w$ , 震源深度為 10 km,

每一個震央的斷層長度和寬度皆為 50 km，斷層傾角 20 度，滑移量 4.1964 m，滑移角 90 度，重現期為 23 年（根據馬尼拉海溝的 Gutenberg–Richter relation）。

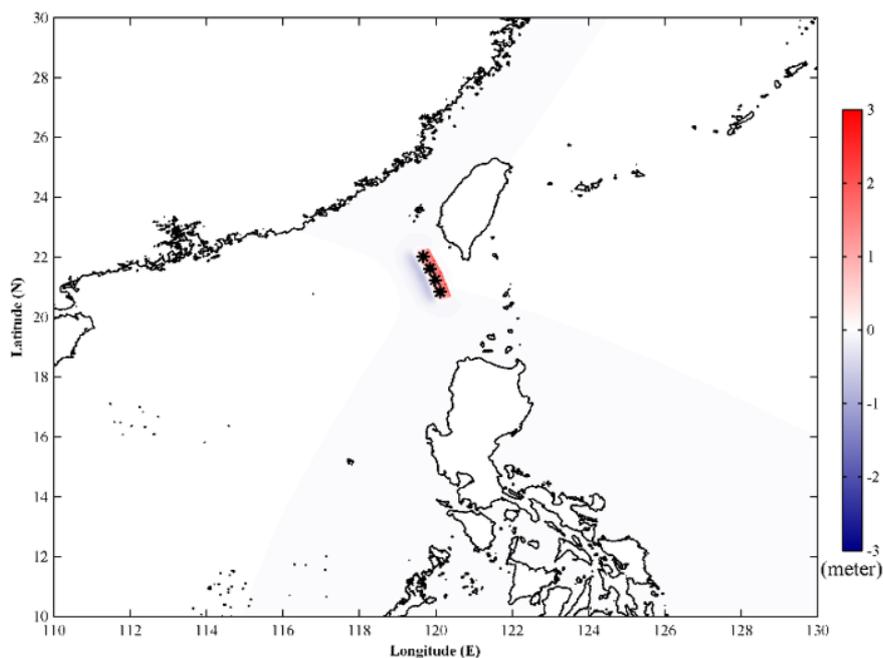


圖 38 馬尼拉海溝海嘯情境條件的震源位置和導致的初始海嘯波高

#### (四) 馬鞍山發電廠之耦合數值模型之建立

##### 1. 二維數值模型之建立

本研究報告中，關於二維海嘯數值模式巢狀網格所需考慮的範圍和各層的地形解析度，都已在地形資料收集與建置中有詳細的說明。目前的模擬案例中，採用五層的巢狀網格來做模擬計算，摩擦

係數則以 MLIT [35]所提出之建議值 0.025 來進行設定。

## 2. 三維數值模型之建立

三維模式採用三層巢狀網格，第一層使用非線性淺水波模式計算，模擬範圍 ( $x*y$ ) 為 16.00 km\*8.15 km，網格大小 ( $dx*dy$ ) 為 10 m\*10 m，共 1,304,000 個網格；第二層使用三維 Navier-Stokes 模式，模擬範圍 ( $x*y*z$ ) 為 990 m\*900 m\*50 m，網格大小 ( $dx*dy*dz$ ) 為 5 m\*5 m\*2 m，共 891,000 個網格；第三層同樣使用三維 Navier-Stokes 模式，模擬範圍 ( $x*y*z$ ) 為 600 m\*600 m\*50 m，網格大小 ( $dx*dy*dz$ ) 為 2.5 m\*2.5 m\*1 m，共 2,880,000 個網格，總網格數為 5,075,000。以 Navier-Stokes equations 模式的精確度來分：依序為 DNS、LES 和 RANS ( $k-\varepsilon$  和 RNG)。由於 DNS 為直接求解完整的紊流場，以目前的電腦計算效率而言，只能用於非常小尺度的問題。因此，LES 和 RANS 之數值模式皆廣泛應用在海洋海岸的工程問題。為了獲得更好的精確度，本計畫選用大渦模式 (Large-Eddy Simulation) 模擬。模擬時間為海嘯波傳遞至 *FLOW-3D* 模擬邊界後的 48 分鐘 (即海嘯發生後的第 12 分鐘至 60 分鐘)。

## （五）耦合模式計算結果

四個震源位置距離台灣島最近約 100 公里，是核能所提供之邏輯樹狀圖中最靠近台灣的一組情境條件，其錯動所造成之初始波高約為 3.0 m，地震發生後往兩側傳播，波峰前導海嘯波往台灣南部傳播，而波谷前導海嘯波則往南海傳播。

圖 39 為海嘯波傳遞至近岸的模擬結果，左右兩邊分別為 COMCOT 第五層和 *FLOW-3D* 第一層的模擬結果。可以發現，當海嘯波傳遞至近岸的初期，*FLOW-3D* 的波高分布和 COMCOT 的結果相當一致，顯示耦合模式的建構相當成功。由於淺水波方程式在數值處理上 *FLOW-3D* 和 COMCOT 之間的差異性以及 *FLOW-3D* 以 Navier-Stokes type 模式計算核三廠區，導致兩者的結果會有些微的差異。

於圖 40 中可以發現由於核三廠西南和東南方的地形較低且平緩，海嘯波會先在此沿海地形上溯升，接著侵襲防波堤，甚至在外側的防波堤上有越波的現象。接著海嘯波導致整體的水面抬升，造成沿海建物的溢淹。圖 41 為水深平均速度在空間上的變化，從中可發現由於防波堤的阻擋，造成通水斷面積的減少，海嘯波在防波堤的開口處產生相當大的流速，可能造成防波堤結構上的破壞以及地基的掏刷。

圖 42 和圖 43 則為沒有考慮沿岸建物的結果，可以發現到，除了在沿海建物的溢淹高度及流速有不同之外，整體而言並無明顯的差異。這主要是因為此情境海嘯所造成的溢淹本身並不大，因此有無建物的差異並無法突顯出來。然而，為了符合更真實的廠區地形，後續皆會以有建物的地形進行模擬。

由於目前的情境條件會造成核三廠沿岸溢淹（最大溯升高度約 5 m），可能影響抽水機房、滅火設備和海水淡化廠之安全性。由於反應爐等設施位於較高之地面高程(15 m)，因此溯升行為並不至於直接對其造成危害。

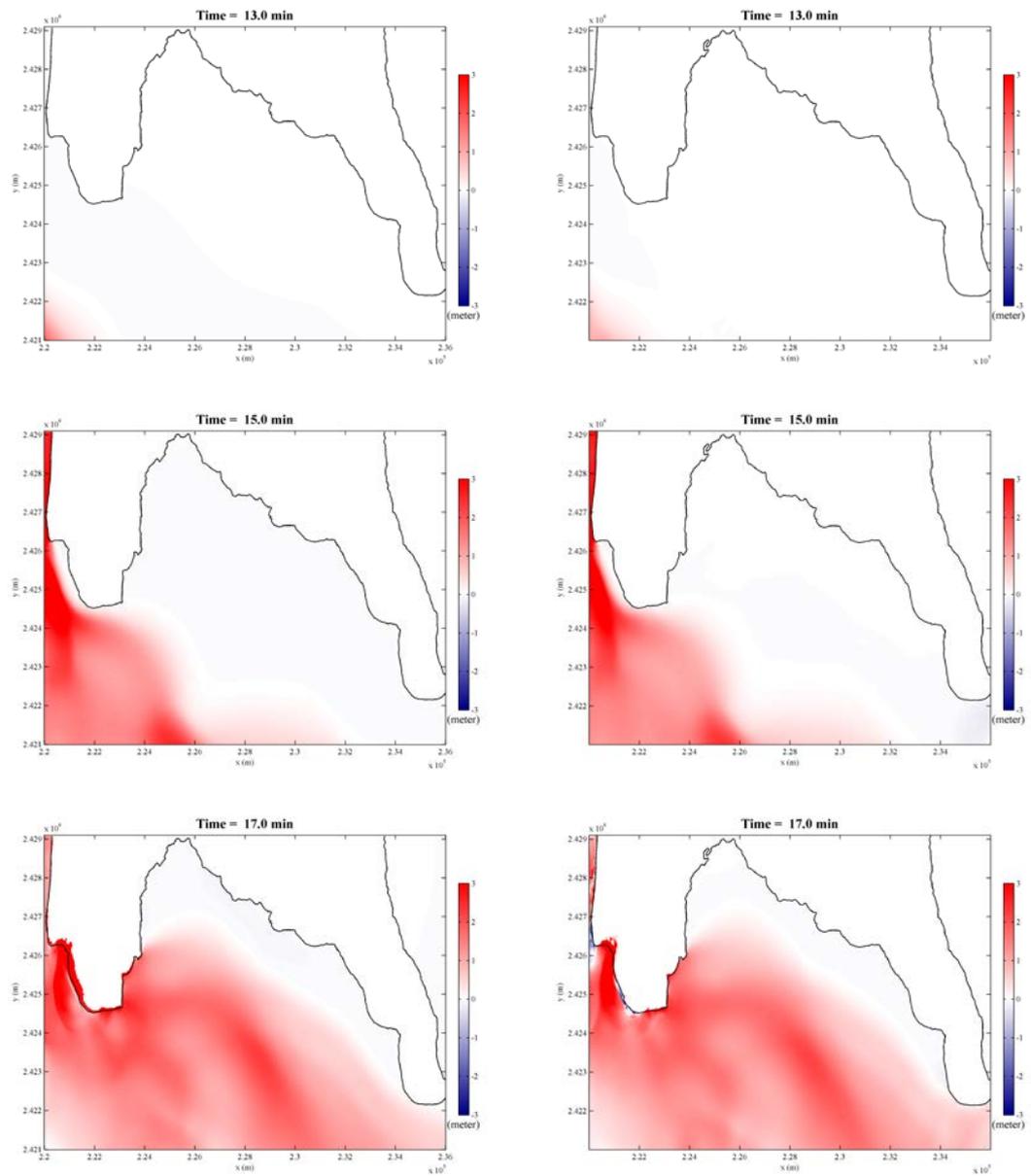


圖 39 海嘯波傳遞至核三廠區外海的水位分布（左邊：COMCOT，  
右邊：耦合模式）

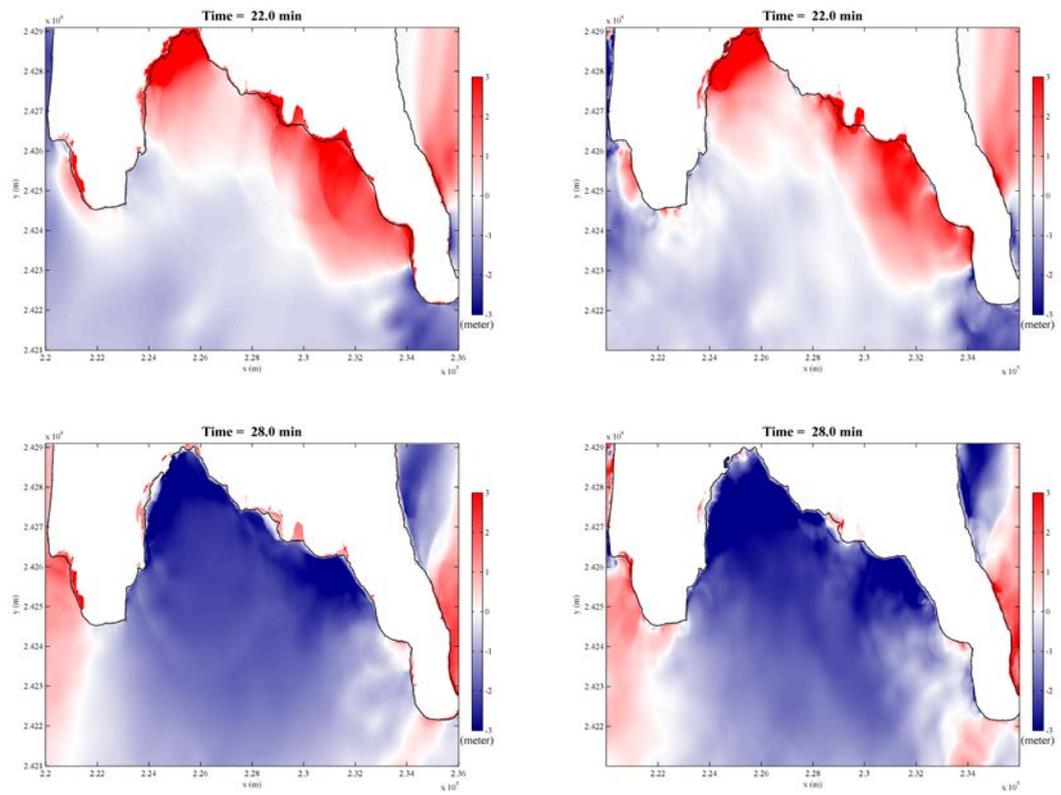


圖 39 海嘯波傳遞至核三廠區外海的水位分布（左邊：COMCOT，  
右邊：耦合模式）（續）

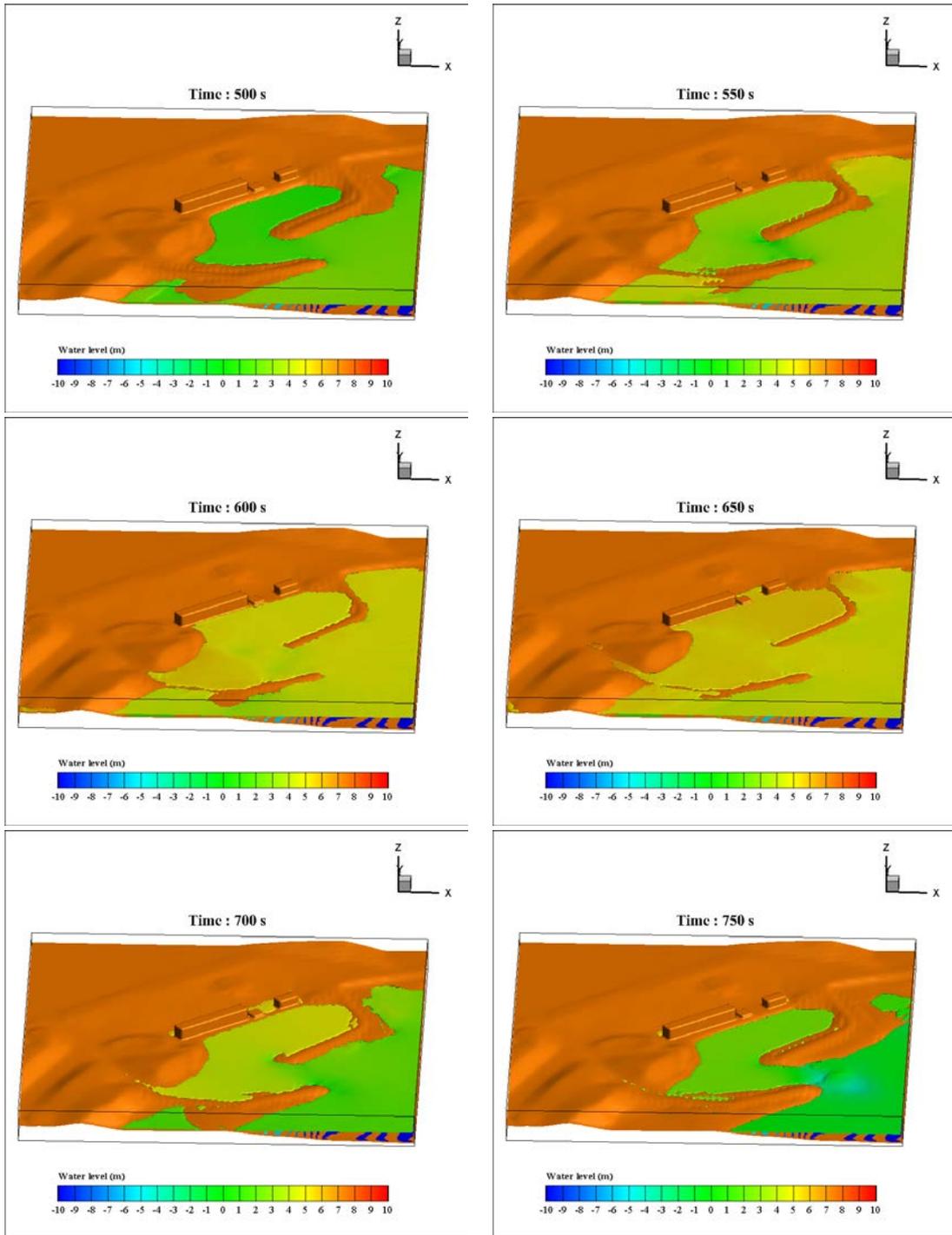


圖 40 核三廠水位變化

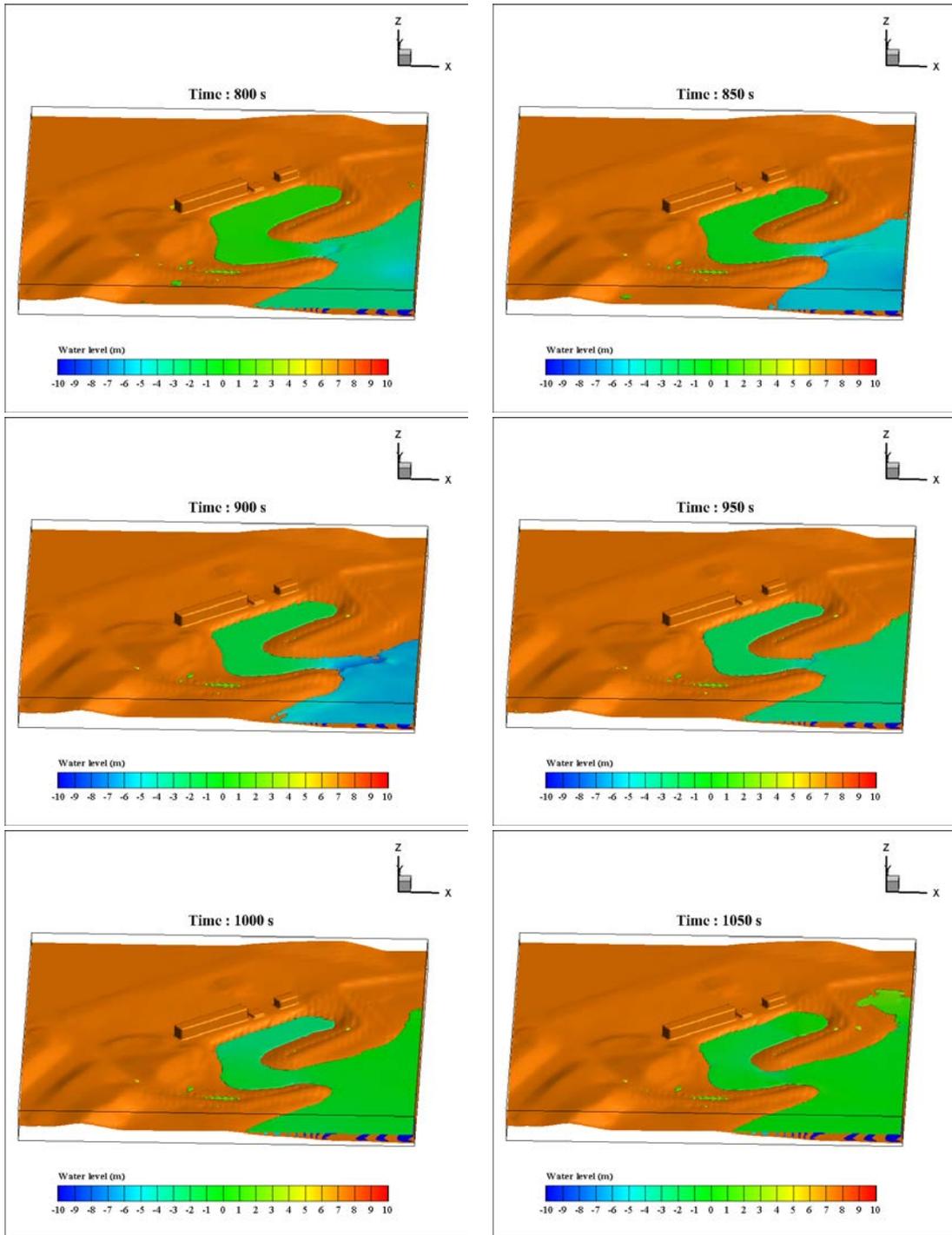


圖 40 核三廠水位變化 (續)

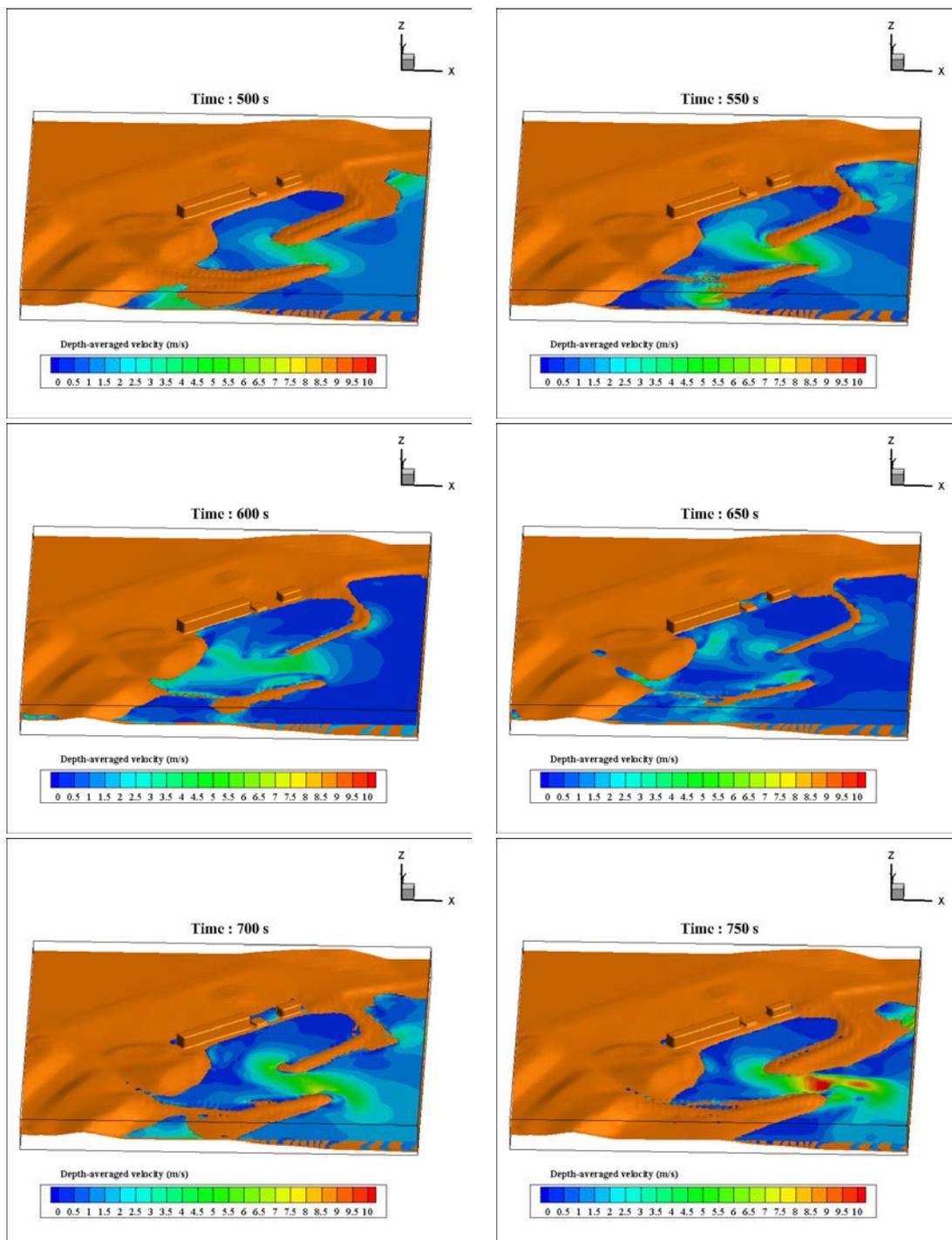


圖 41 核三廠水深平均速度變化

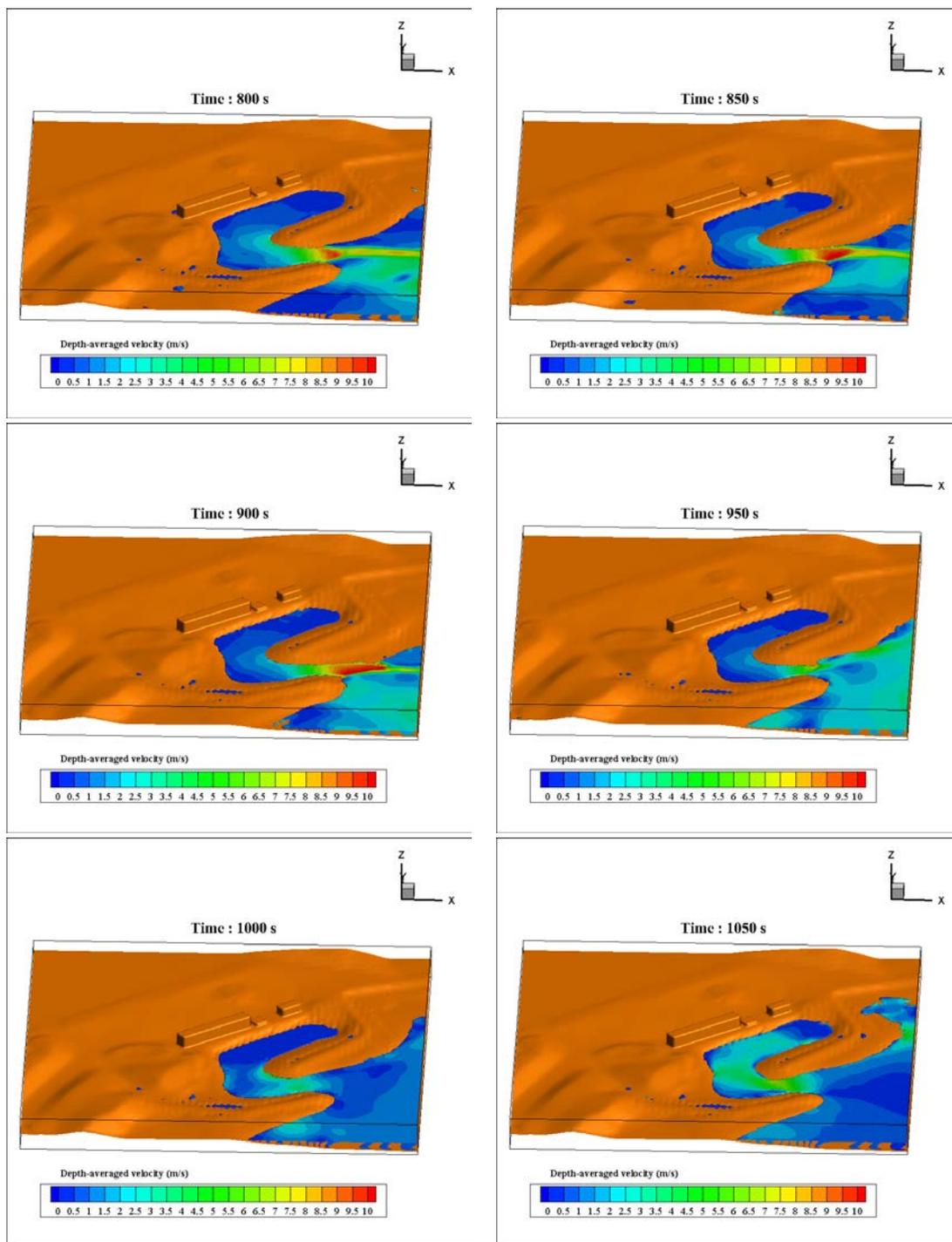


圖 41 核三廠水深平均速度變化 (續)

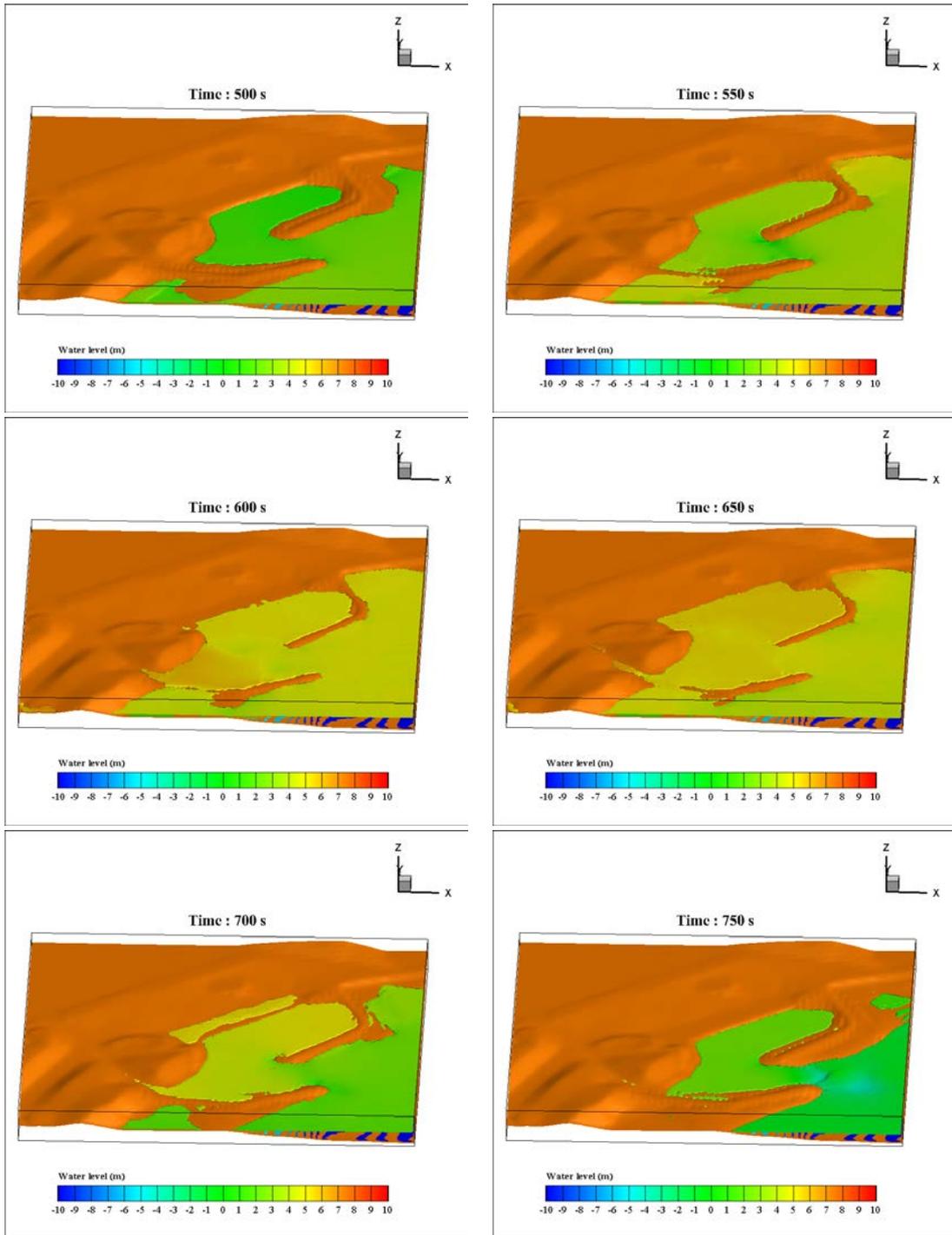


圖 42 核三廠水位變化（無建物）

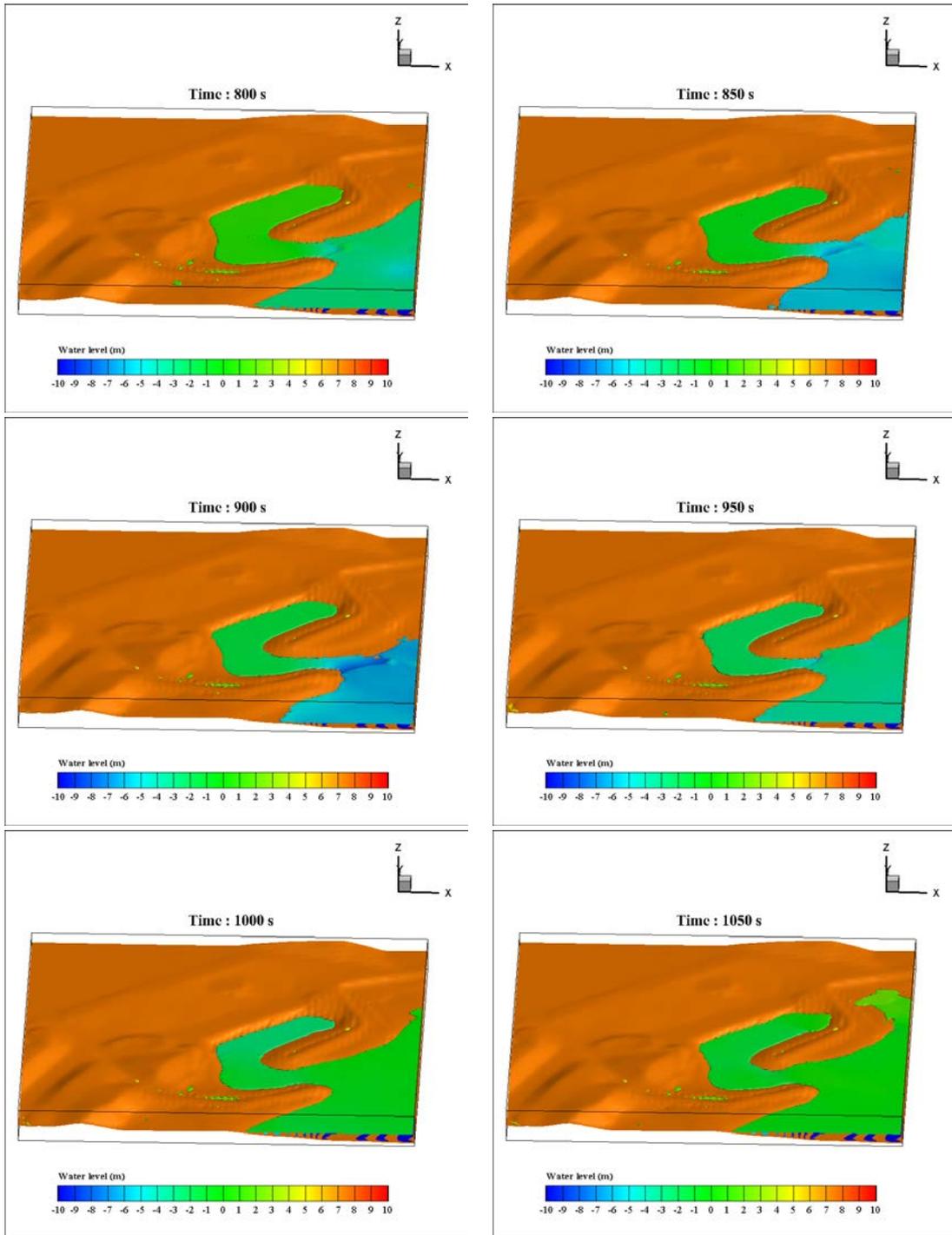


圖 42 核三廠水位變化 (無建物) (續)

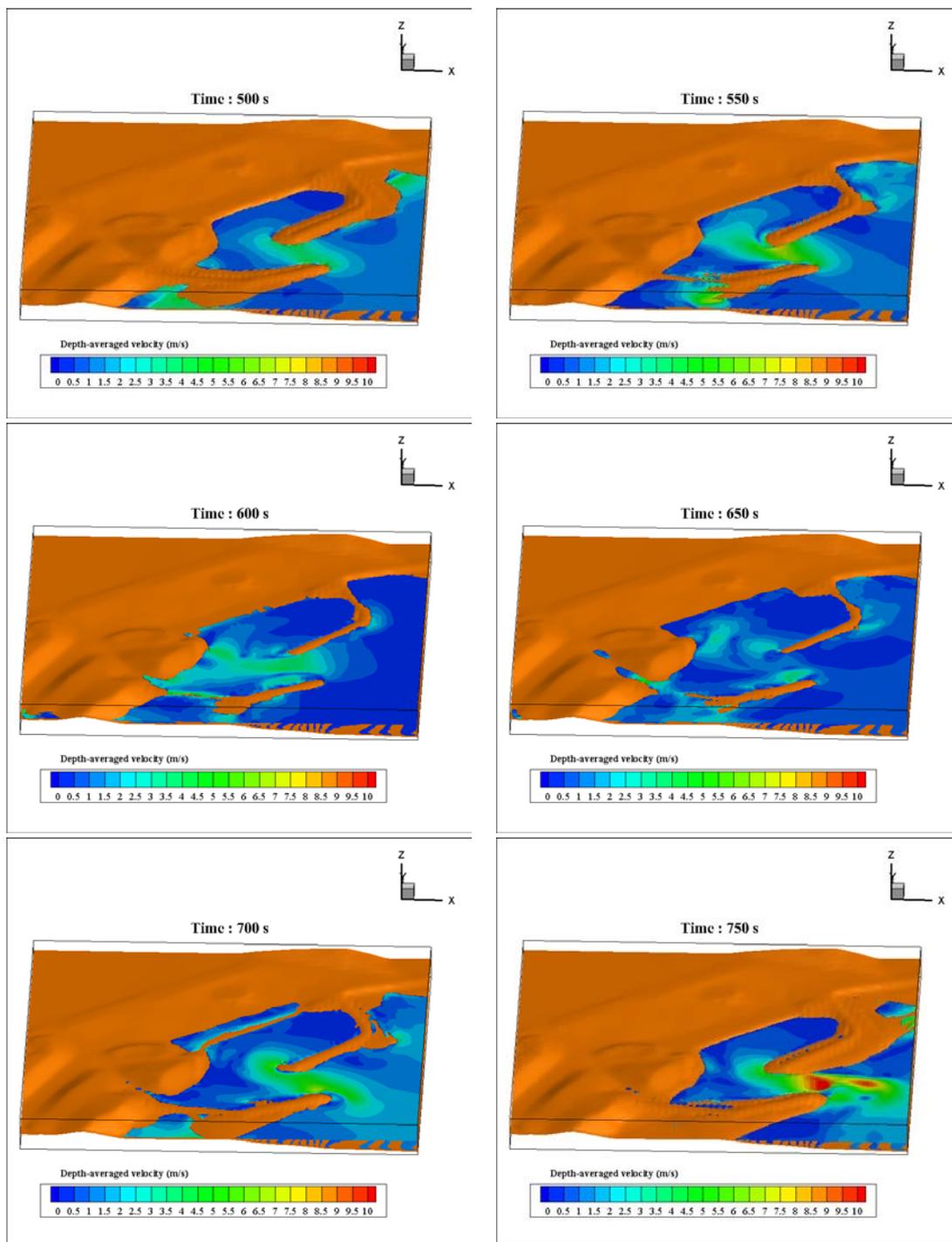


圖 43 核三廠水深平均速度變化（無建物）

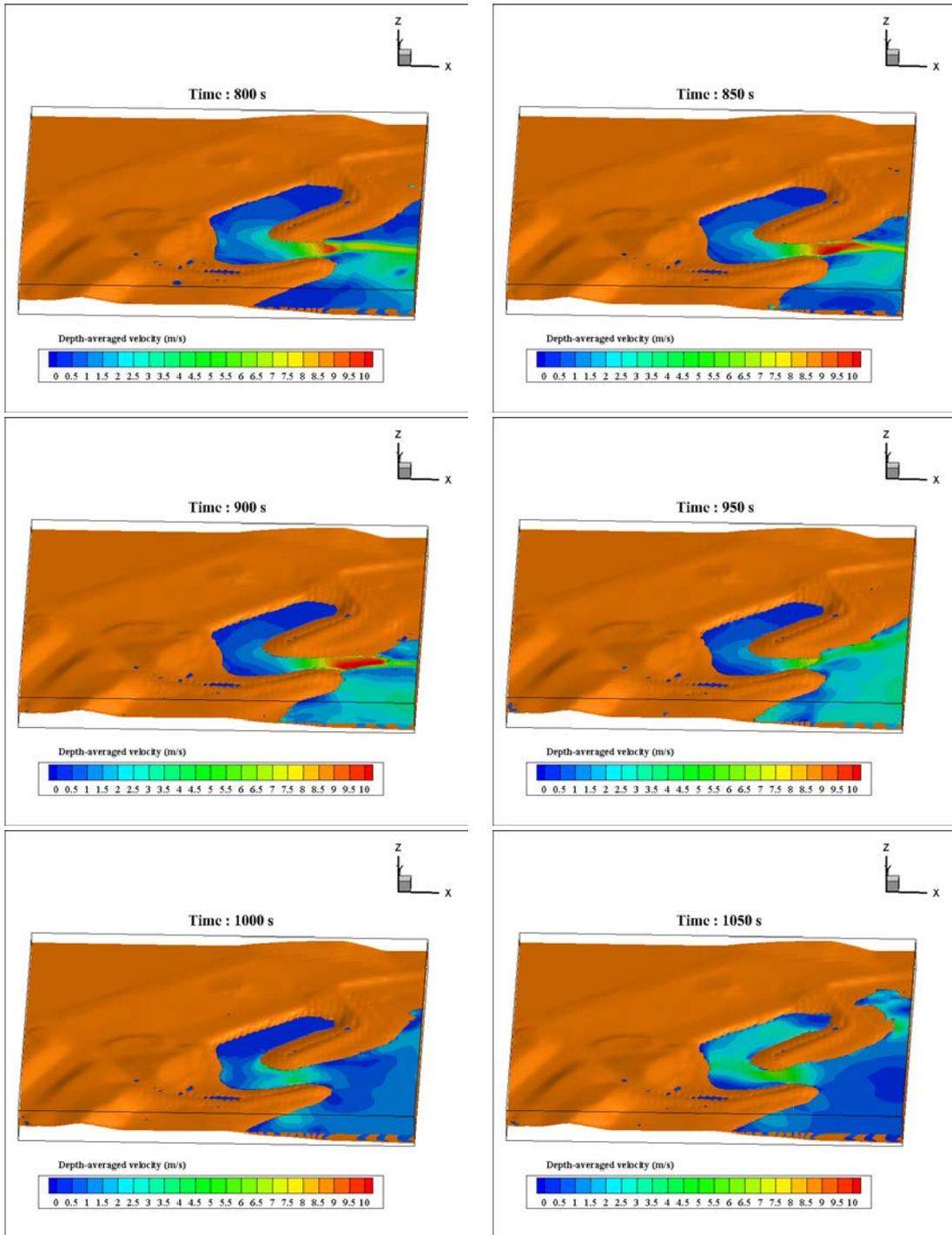


圖 43 核三廠水深平均速度變化（無建物）（續）

## (六) 不同地震條件及重現期之模擬

在前一節中，已證實本研究所建置的耦合模式能適用於馬鞍山發電廠的海嘯模擬。接著，為了進行建置廠區之海域波高及溯升之機率式海嘯潛勢模型，將依照核能所提供的馬尼拉海溝斷層之地震邏輯樹狀圖進行二維模式的海嘯模擬，並以三維模式進一步計算廠區之海域波高和溯升。

由於海底地震之震央位置、破裂面大小、破裂深度、斷層滑移量...等不確定性，故文獻上採用邏輯樹狀圖的方式考量機率式海嘯波高。本研究報告的地震相關參數採用核能所提供之馬尼拉海溝斷層地震邏輯樹狀圖，並透過二維海嘯模式 (COMCOT) 計算海嘯波從震源至核三廠外海之傳遞和演化，再進一步透過高精度三維數值模式 (*FLOW-3D*) 完成海嘯波傳遞至核三廠周圍海域之海域波高及陸域溯升。

由於本研究所同時使用兩套數值模式模擬海嘯，故完成一組模擬需要相當長的時間。雖然二維海嘯模式之計算較為迅速 (約 4 天可完成一次模擬)，而將其資料轉換成三維模式可使用之邊界條件需要約 1 天的資料處理時間；三維模式需要更長的計算時間 (約 5 天) 才能完成，計算完成後的龐大資料輸出以及分析處理需要再 3 天的處理時間，總計完成一次模海嘯的模擬約需要 13 天的時間。由於計

畫前期主要著重在建置並確保二維模式和三維模式耦合之正確性，故本年度只能完成邏輯樹狀圖中的前 10 組模擬（總共有 104 組）。若需建構完整的邏輯樹狀圖，勢必得於計畫第三年利用多台的電腦，以便分工計算。然而，受限於 *FLOW-3D* 商業軟體的使用授權，本單位只能在一台電腦上進行計算。因此，屆時需要更為妥善的分工給不同電腦處理、採用更高等級的電腦或添購 *FLOW-3D* 的授權。

核能所提供之邏輯樹狀圖共考慮 22 個震央（表 10），而本報告所模擬的是其中的 10 組條件，分佈位置如圖 44~圖 48 所示，參數如表 11 所示。各個震央所造成的斷層破裂面長寬皆為 50 公里，斷層傾角為 20 度，滑移量除了地震規模最大（ $M_w = 8.16$ ）的 case 7 和 case 8 為 5.8340 公尺之外，其餘皆為 4.1964 公尺。

從這 10 組的斷層分布可知，雖然同為地震規模 8.0 的海嘯，震央可能離核三廠很近（最近的為 No. 2，約 100 公里），亦可能很遠（最遠的是 No. 13，約 550 公里）。因此，對於核三廠所造成的危害將可能有著相當大的差異（如：case 1 和 case 9）。然而，現今的科技並無法正確預測斷層的破裂位置以及破裂的相關參數，這正是機率式海嘯危害度分析之重要所在。機率式海嘯並非只考量極端的幾個海嘯事件，而是站在統計的觀點上，以機率式的方式呈現海嘯所造成的危害。因此，不容易受到極端事件的影響，造成人民的恐慌或是沿海地區過度的防衛。然而，極端事件的評估仍然不可或缺，

兩種評估方式的結果應同時呈現，供決策者擬定策略。

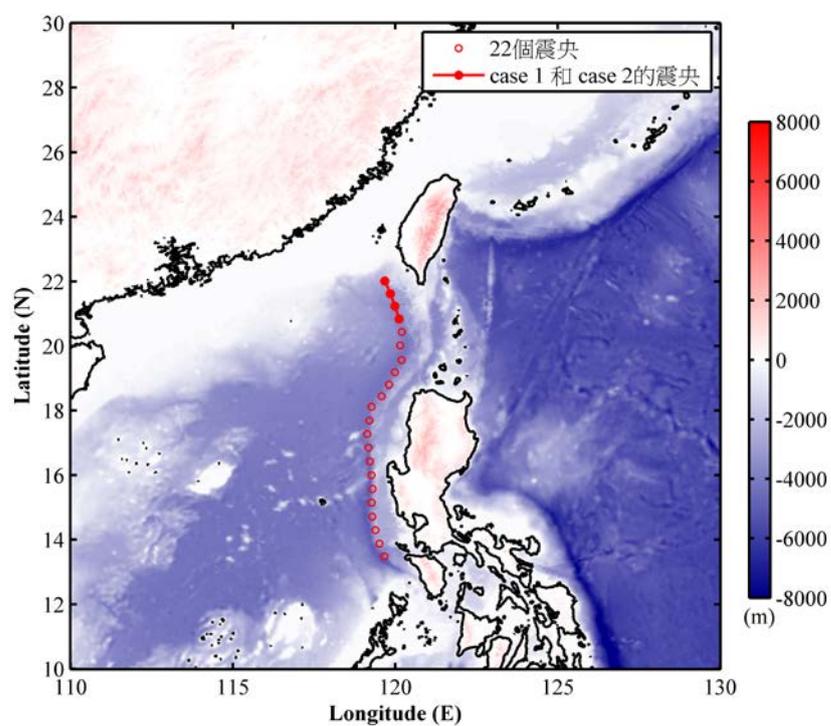


圖 44 case 1 和 case 2 的震央位置

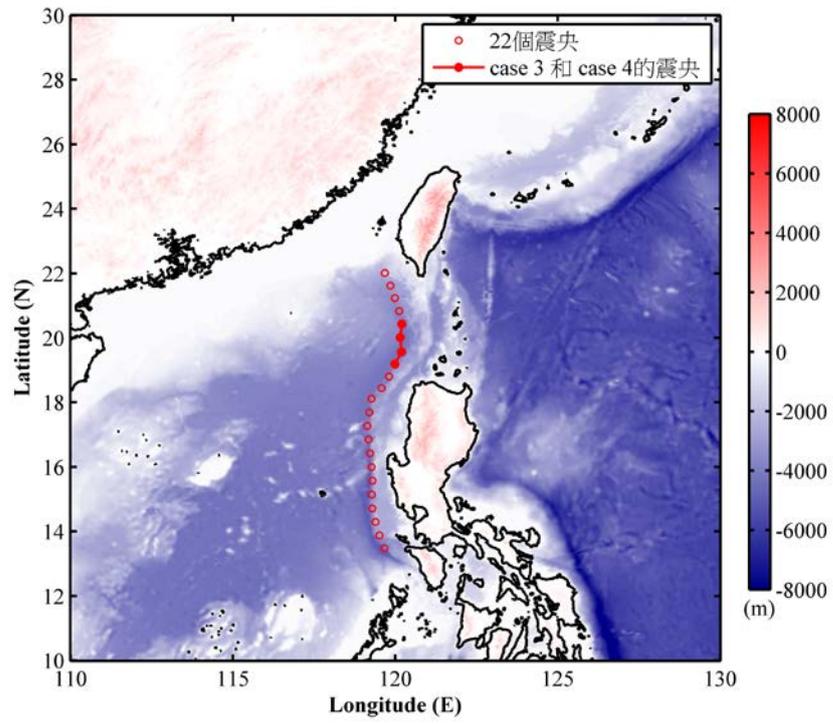


圖 45 case 3 和 case 4 的震央位置

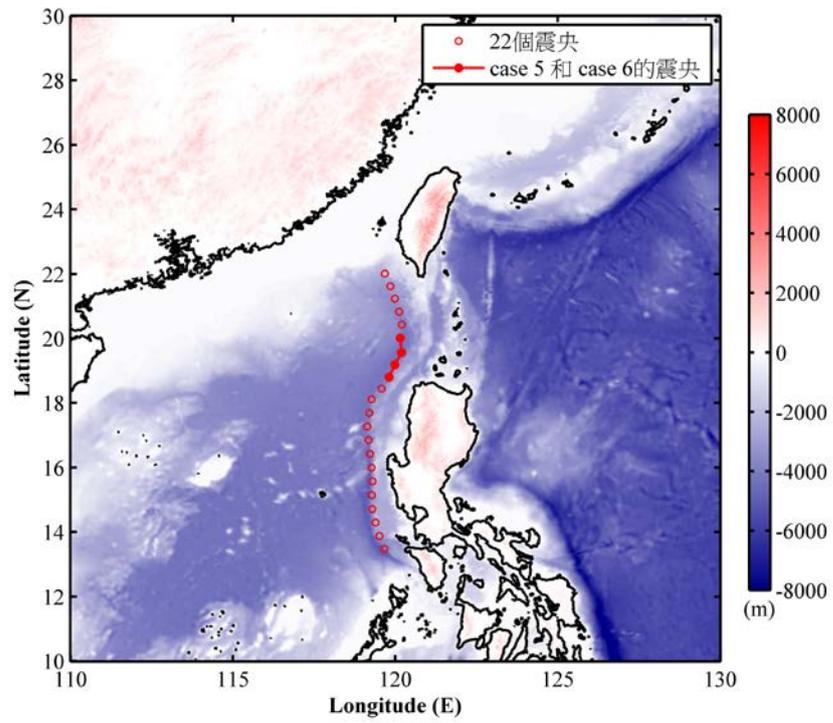


圖 46 case 5 和 case 6 的震央位置

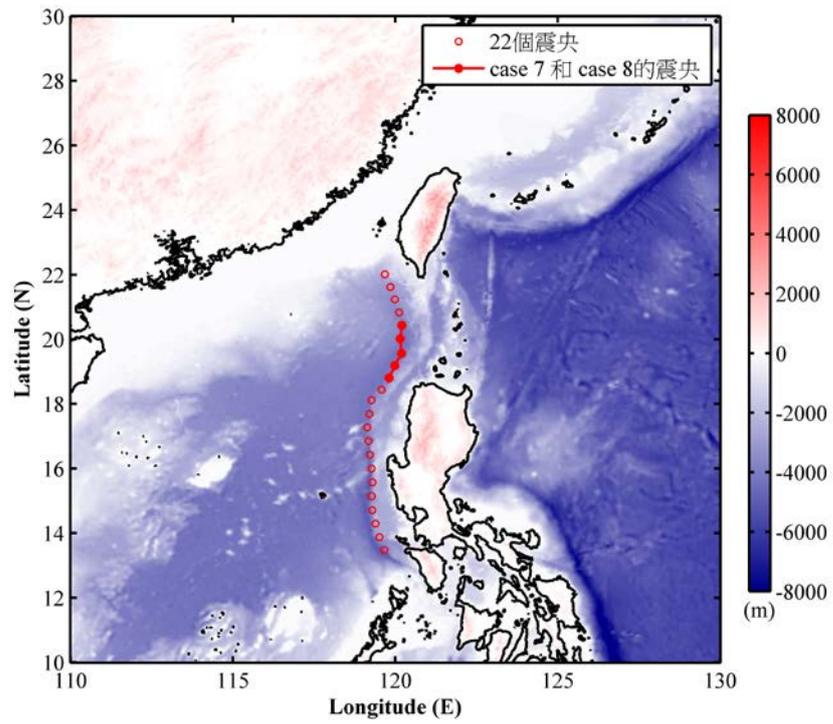


圖 47 case 7 和 case 8 的震央位置

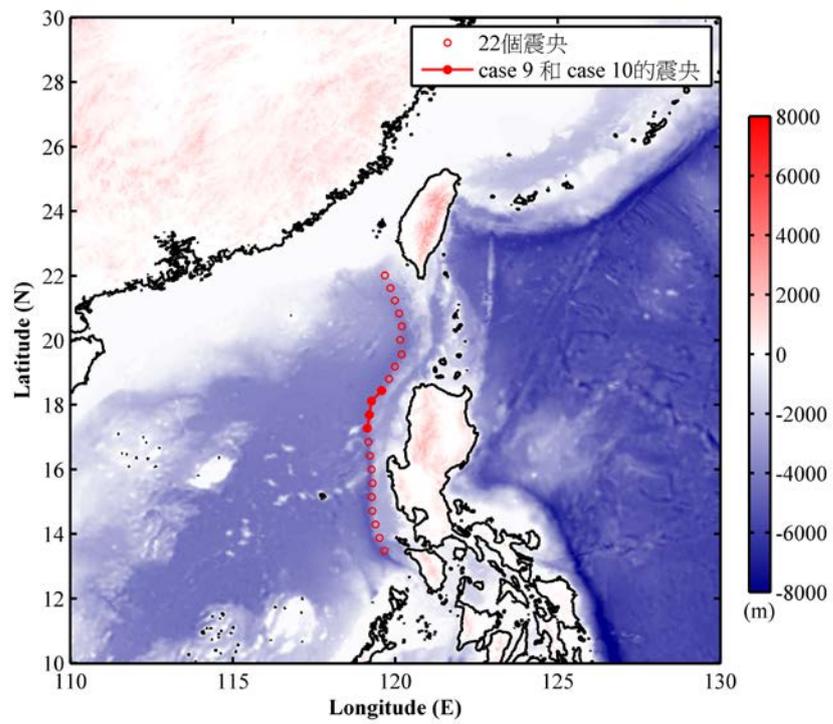


圖 48 case 9 和 case 10 的震央位置

表 10 斷層震央

震央編號	經度 (度)	緯度 (度)	走向角 (度)
No. 1	119.675	22.012	158.3247
No. 2	119.842	21.622	158.3247
No. 3	119.987	21.239	164.0922
No. 4	120.111	20.833	164.0922
No. 5	120.194	20.435	185.3818
No. 6	120.151	20.013	185.3818
No. 7	120.188	19.565	206.4058
No. 8	119.987	19.190	206.4058
No. 9	119.801	18.806	210.5089
No. 10	119.573	18.446	210.5089
No. 11	119.260	18.120	187.5328
No. 12	119.201	17.697	187.5328
No. 13	119.133	17.276	174.5733
No. 14	119.176	16.851	174.5733
No. 15	119.218	16.426	174.5733

表 10 斷層震央 (續)

震央編號	經度 (度)	緯度 (度)	走向角 (度)
No. 16	119.261	16.001	174.5733
No. 17	119.295	15.577	182.9353
No. 18	119.272	15.150	182.9353
No. 19	119.288	14.717	167.0528
No. 20	119.389	14.301	167.0528
No. 21	119.511	13.880	161.5047
No. 22	119.654	13.477	161.5047

圖 49~圖 58 是模擬不同條件的地震所引發之海嘯所造成的最大水位抬升 (波高)、水位降低和水深平均流速分布圖。當震央越靠近核三廠，所造成的廠區波高、溯升和溢淹就越大。然而，這幾個地震條件皆沒有造成 15 公尺以上的溯升，故對於廠區的主要建物 (如：反應爐) 並無大礙。而海嘯所造成的堤防附近水位降低約有 2~4 公尺，有可能使廠區無法取得海水冷卻反應爐。

除了水位的直接影響之外，海嘯所造成的流速變化亦是相當重要的。在不同的海嘯情境條件下，最大的流速皆是在堤防開口附近。

很明顯地，這主要是受到兩堤防開口處通水面積相對小於外海所致，過大的流速可能造成堤防結構的受損或是底床沖刷等問題。倘若如日本 311 的釜石港防波堤破堤，將會對於廠區造成更大的危害，故防波堤的安全性評估亦是相當重要的議題。

表 11 海嘯情境條件

海嘯 情境	地震規模	震央編號	震源深度 (公里)
case 1	8.0	1, 2, 3, 4	10
case 2	8.0	1, 2, 3, 4	15
case 3	8.0	5, 6, 7, 8	10
case 4	8.0	5, 6, 7, 8	15
case 5	8.0	6, 7, 8, 9	10
case 6	8.0	6, 7, 8, 9	15
case 7	8.16	5, 6, 7, 8, 9	10
case 8	8.16	5, 6, 7, 8, 9	15
case 9	8.0	10, 11, 12, 13	10
case 10	8.0	10, 11, 12, 13	15

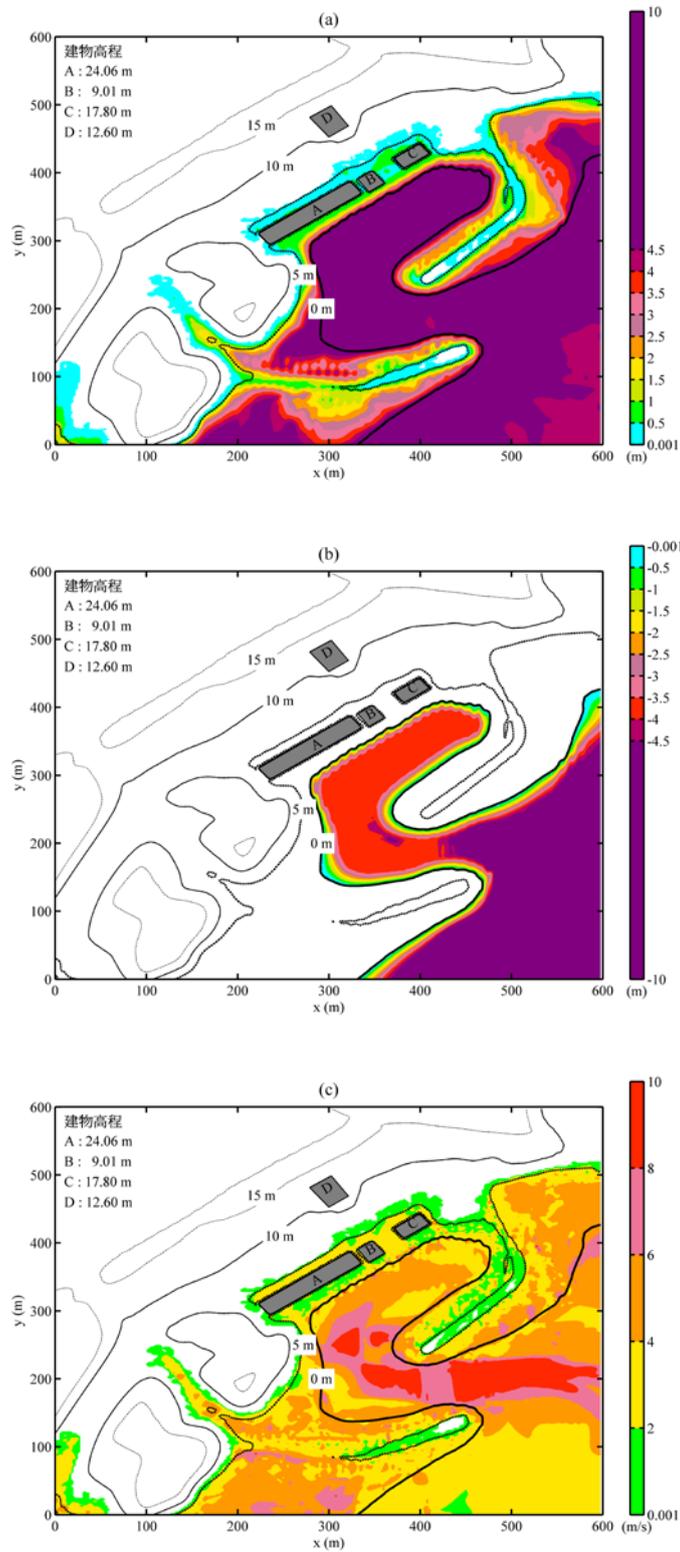


圖 49 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 1;  $M_w = 8.0$ )

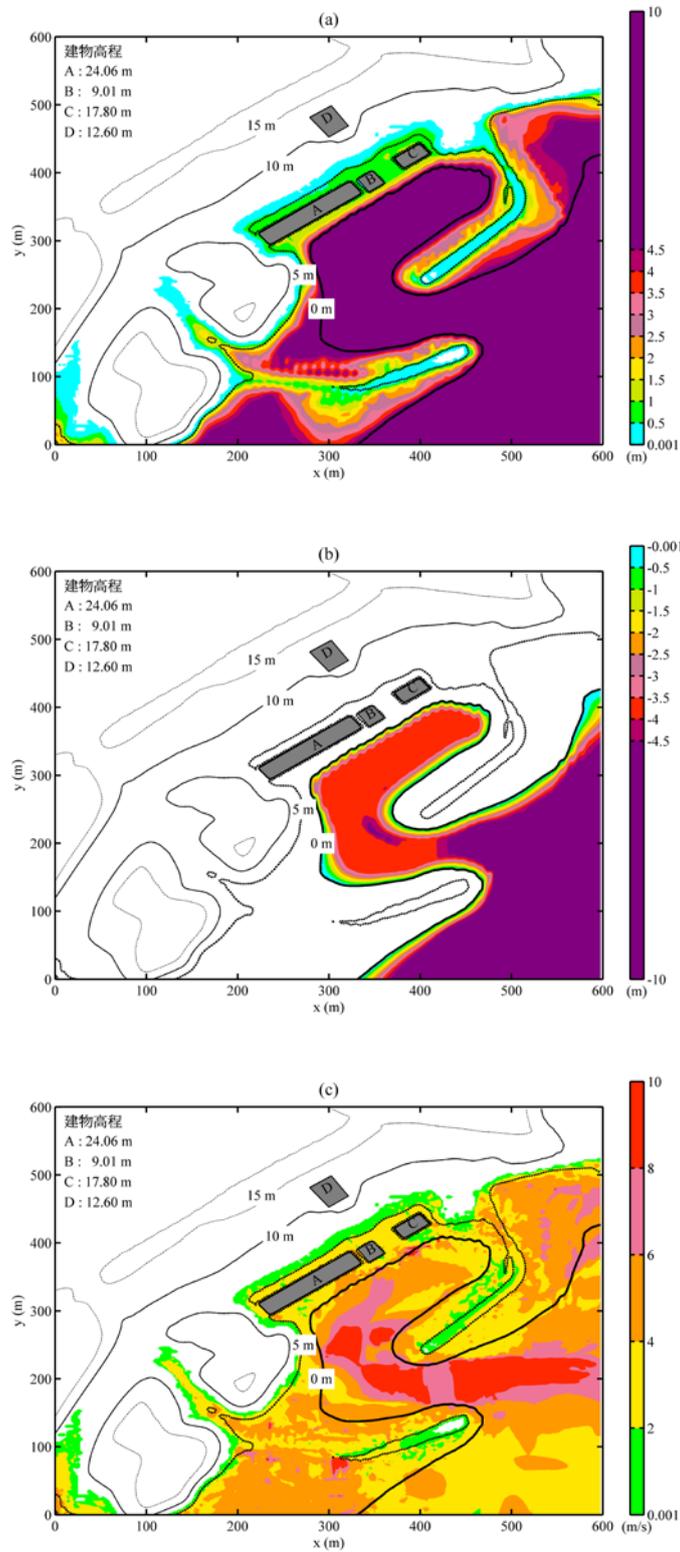


圖 50 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 2;  $M_w = 8.0$ )

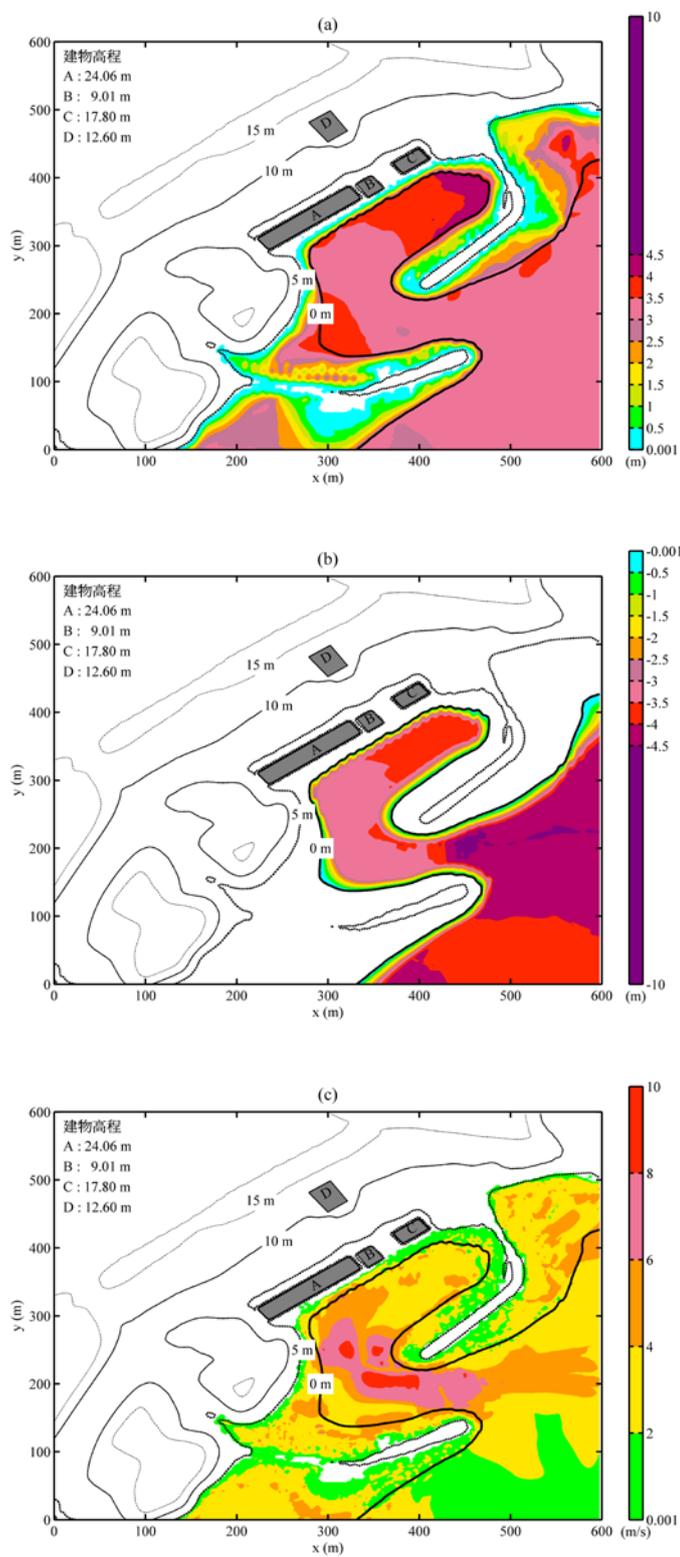


圖 51 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 3;  $M_w = 8.0$ )

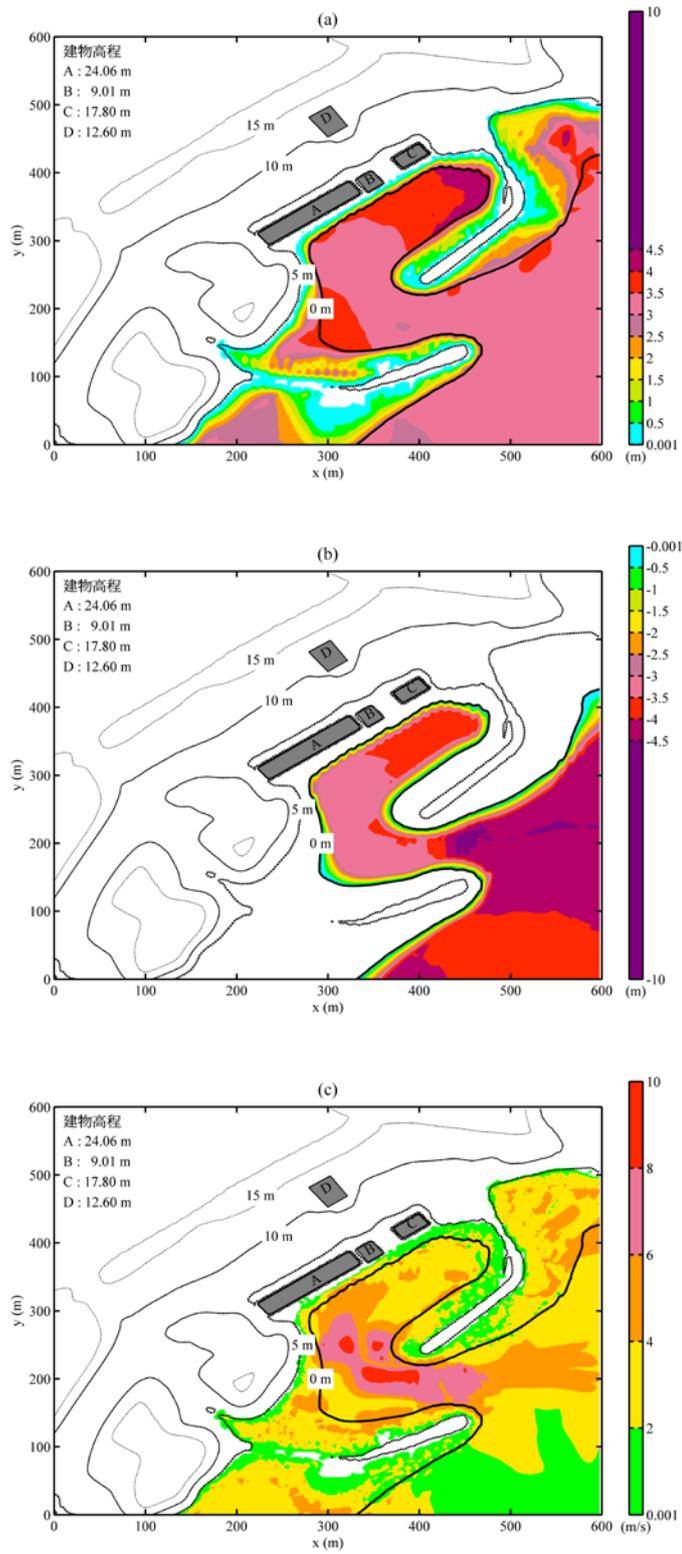


圖 52 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 4;  $M_w = 8.0$ )

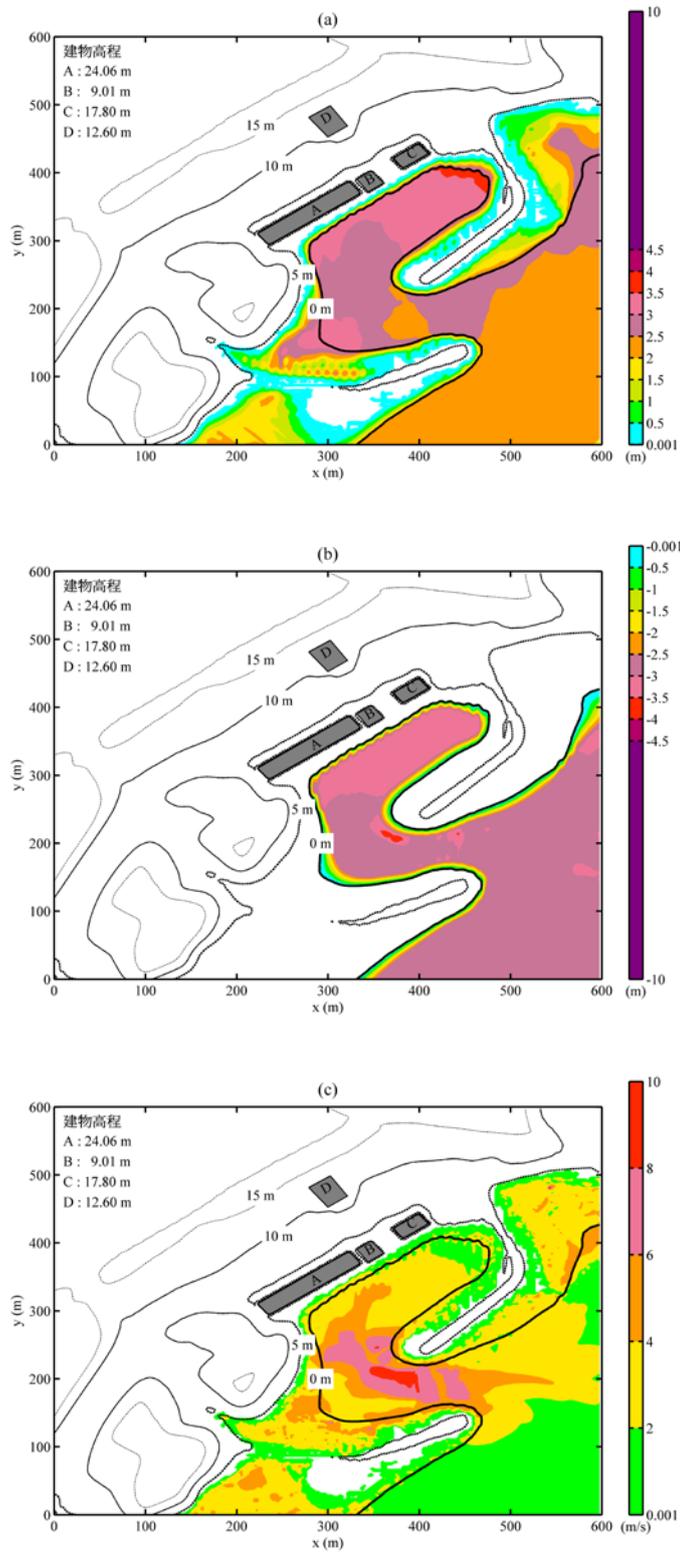


圖 53 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 5;  $M_w = 8.0$ )

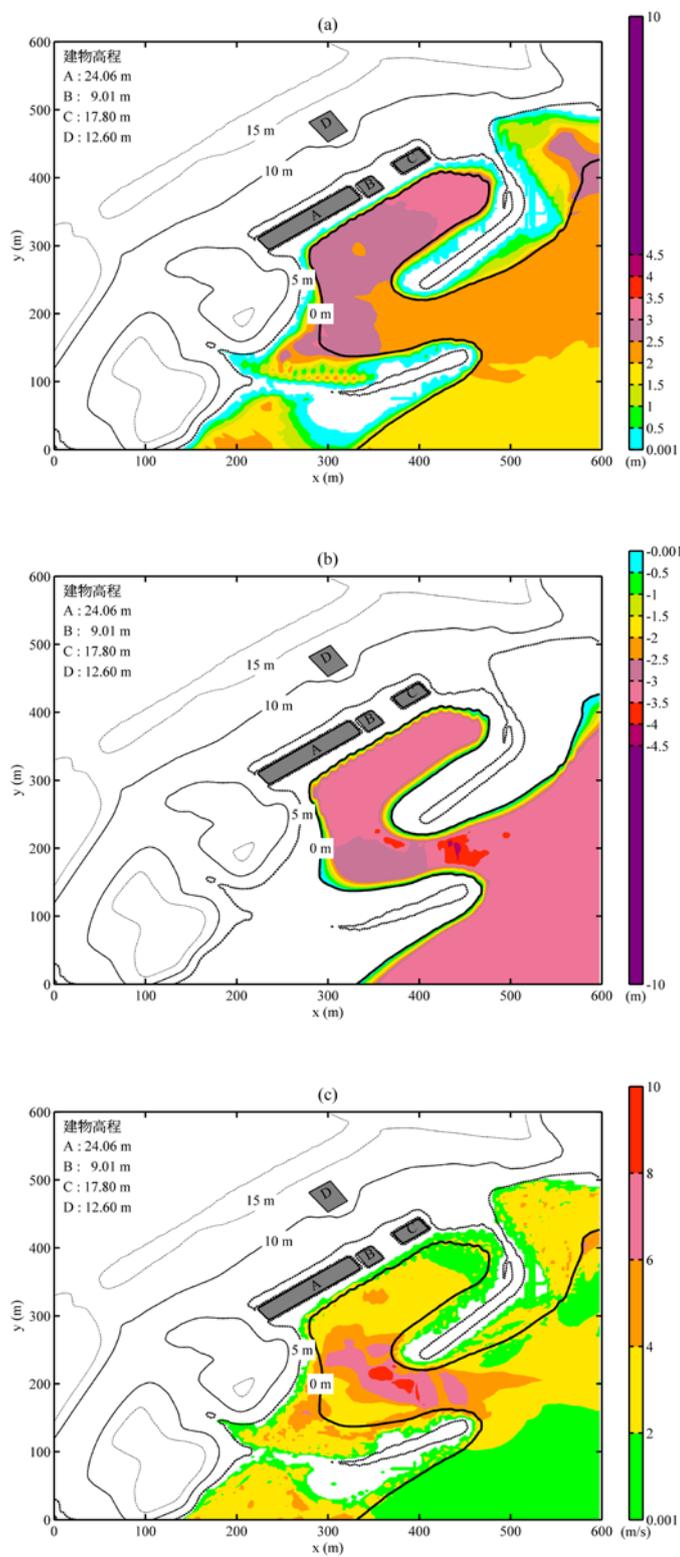


圖 54 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 6;  $M_w = 8.0$ )

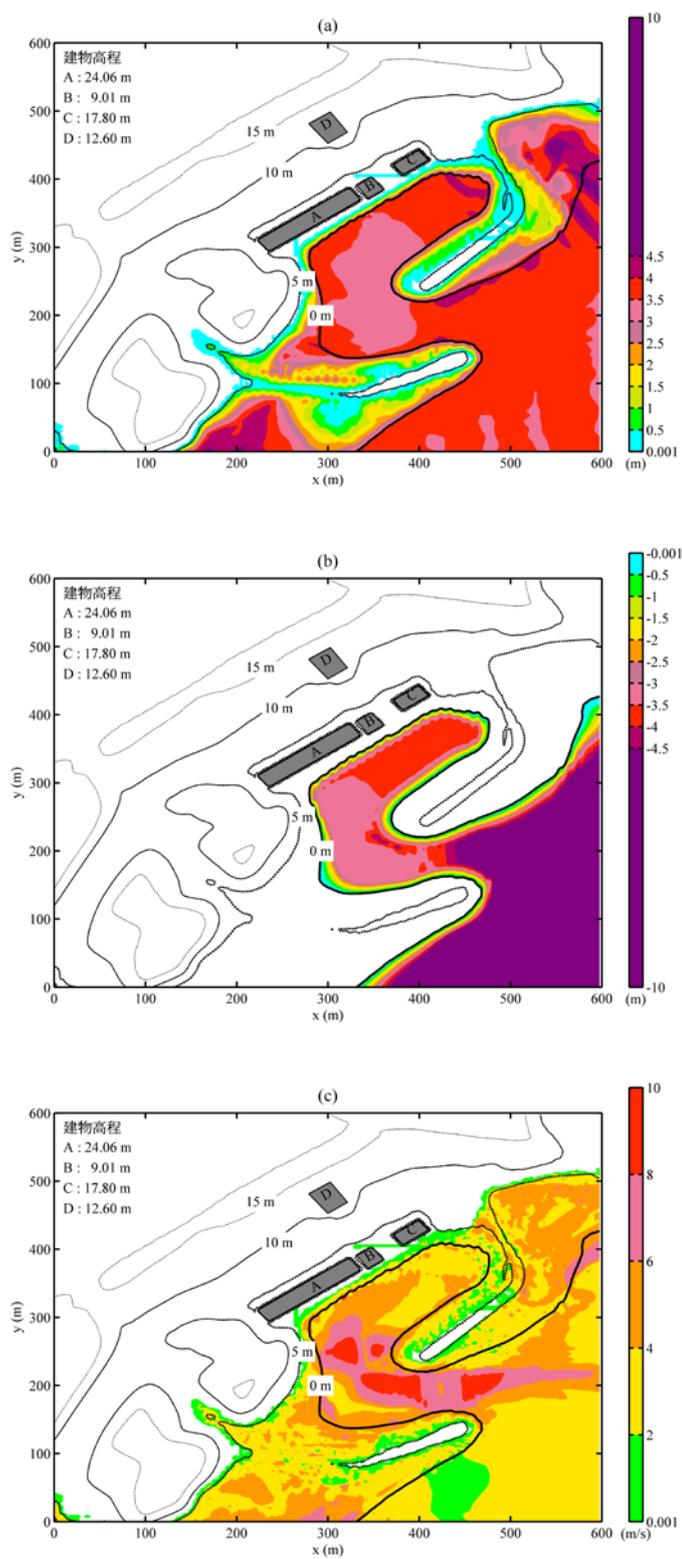


圖 55 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 7;  $M_w = 8.16$ )

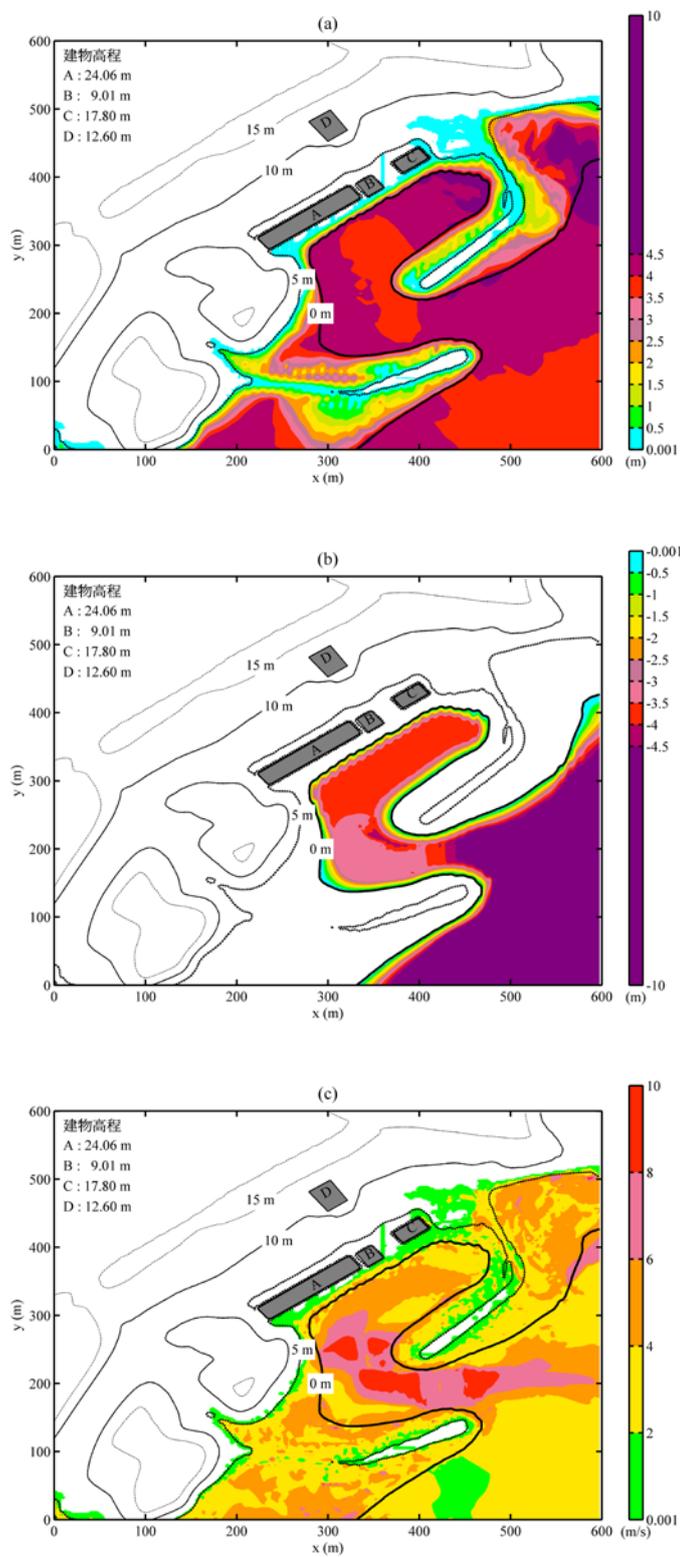


圖 56 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 8;  $M_w = 8.16$ )

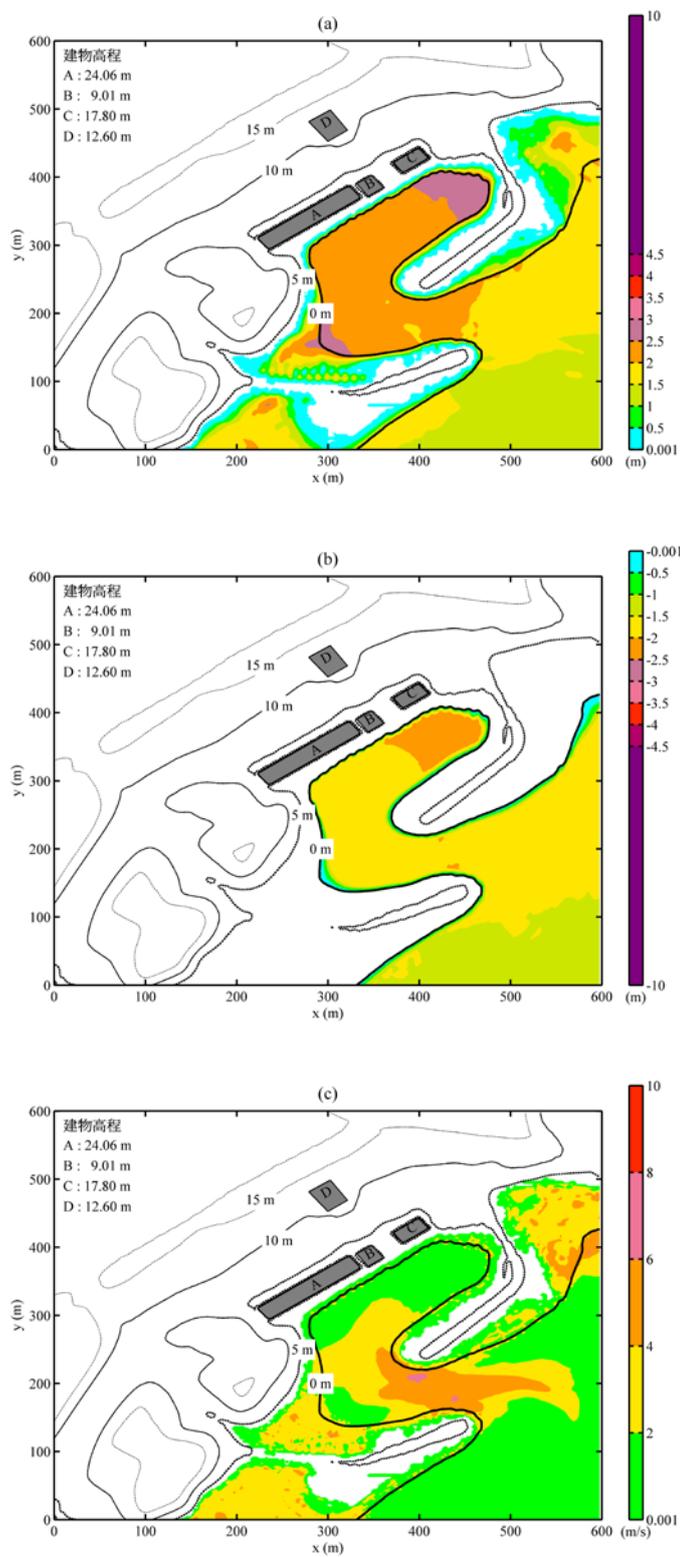


圖 57 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 9;  $M_w = 8.0$ )

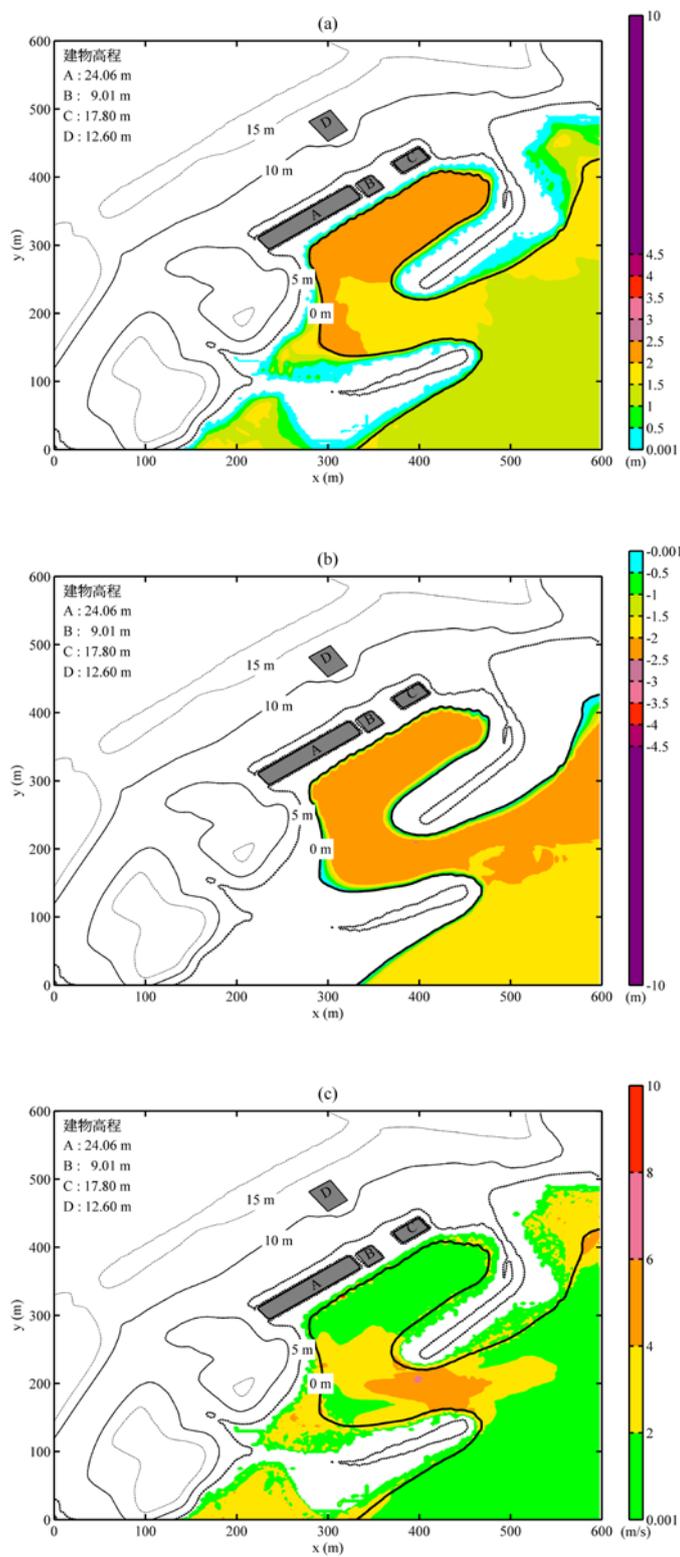


圖 58 海嘯波造成空間上最大的 (a)水位抬升、(b)水位降低和(c)

水深平均流速 (case 10;  $M_w = 8.0$ )

### (七) 機率式海嘯波高及溯升和溢淹潛勢分析

透過由本所「海嘯浪高波傳機率模型之建置研究」計畫所建置的機率式海嘯危害度模型，可得到不同年超越機率（Annual Exceedance Probability, AEP）下的波高和溢淹分布。為了凸顯不同重現期下之差異，本報告採用 50、100 和 500 年重現期繪製溯升和溢淹分布，並探討不同地震情境之間的差異性。

圖 59～圖 68 是不同海嘯情境條件的最大海嘯波高和溢淹高分布圖。當年超越機率為 2.0 % 時（相當於重現期 50 年），核三廠周圍的海域波高皆不超過 6 公尺。因此，位於海拔高度 15 公尺以上的反應爐設備皆不會受到這 10 組不同情境的海嘯波侵襲。然而，海嘯波仍可能溯升至緊急發電廠之設施（如 case 1 和 case 2）。造成的溢淹高度可達 2 公尺，對於緊急發電廠附近之設施於二樓以下的設備具有一定程度的威脅性。

當年超越機率為 1.0 % 時（相當於重現期 100 年），海嘯波高明顯增大不少，增加約 2~3 公尺。相對地，溢淹高度並無顯著的增加。當年超越機率為 0.2 % 時（相當於重現期 500 年），核三廠海域的波高則出現 10 公尺以上的巨浪。同樣地，溢淹高度並無特別顯著的增大，這來自於機率式海嘯危害度分析的先天缺點。由於機率式的計算方式並非考慮完整的流體運動行為，而是將原有之波高透過機率

的方式得到不同發生率的更大波高。然而，對於在原本考量的樣本（情境條件）中，本不溢淹（溯升）的範圍，無論外海的波高變為千年，甚至萬年重現期的波高，即便溢淹高度增加，溢淹範圍皆不會改變。因此，在利用機率式海嘯危害度分析評估陸域的溯升（溢淹）範圍時，需要特別注意。

雖然目前只完成邏輯樹狀圖 104 組中的其中 10 組海嘯模擬，但本計畫仍初步假設此 10 組的發生機率皆為相等（各為 10 %）的情況下，繪製考量認知和隨機不確定性的核三廠區海嘯危害度模型，如圖 69 所示。可以注意到，所得之結果明顯介於海嘯危害最嚴重的 case 2 和海嘯危害最輕微的 case 10 之間，充分反映出邏輯樹狀圖的特性。模擬結果顯示在年超越機率為 2 % 時，核三廠附近海域波高在 4 公尺以下，陸域溢淹在 0.3 公尺以下，溯升高度不到 6 公尺。當年超越機率為 1 % 時，核三廠附近海域波高在 6 公尺以下，陸域溢淹在 0.4 公尺以下，溯升高度亦不到 6 公尺。當年超越機率為 0.2 % 時，核三廠附近海域波高在 10 公尺以下，陸域溢淹在 0.5 以下，溯升高度同樣不到 6 公尺。

為了說明為何超越機率減小，外海波高以及溢淹高度皆增加，而溢淹範圍為增加的原因。利用另外一組年超越機率為 3.3 %（30 年重現期）的結果說明，如圖 70 所示。與更高的重現期相比（2 %、1 % 和 0.2 %），海嘯的溯升高度於建物 C 的並未看到海嘯溯升。相

對地，更高重現期的結果於該處皆有明顯的海嘯溯升。這是由於目前 10 組的海嘯模擬之地震規模為  $8.0 M_w$  和  $8.16 M_w$ ，重現期分別對應 23 年和 35 年。當欲得知的超越機率大於地震的發生機率時，該情境條件 (case 7 和 case 8) 之空間上任意一點的海嘯波高和溢淹高皆為零。因此，超越機率 3.3 % 的溯升範圍與其他更高的超越機率結果存在差異。反之，當欲得知的超越機率小於地震的發生機率時，10 組情境條件溢淹的「聯集區域」即為最終的溢淹範圍。

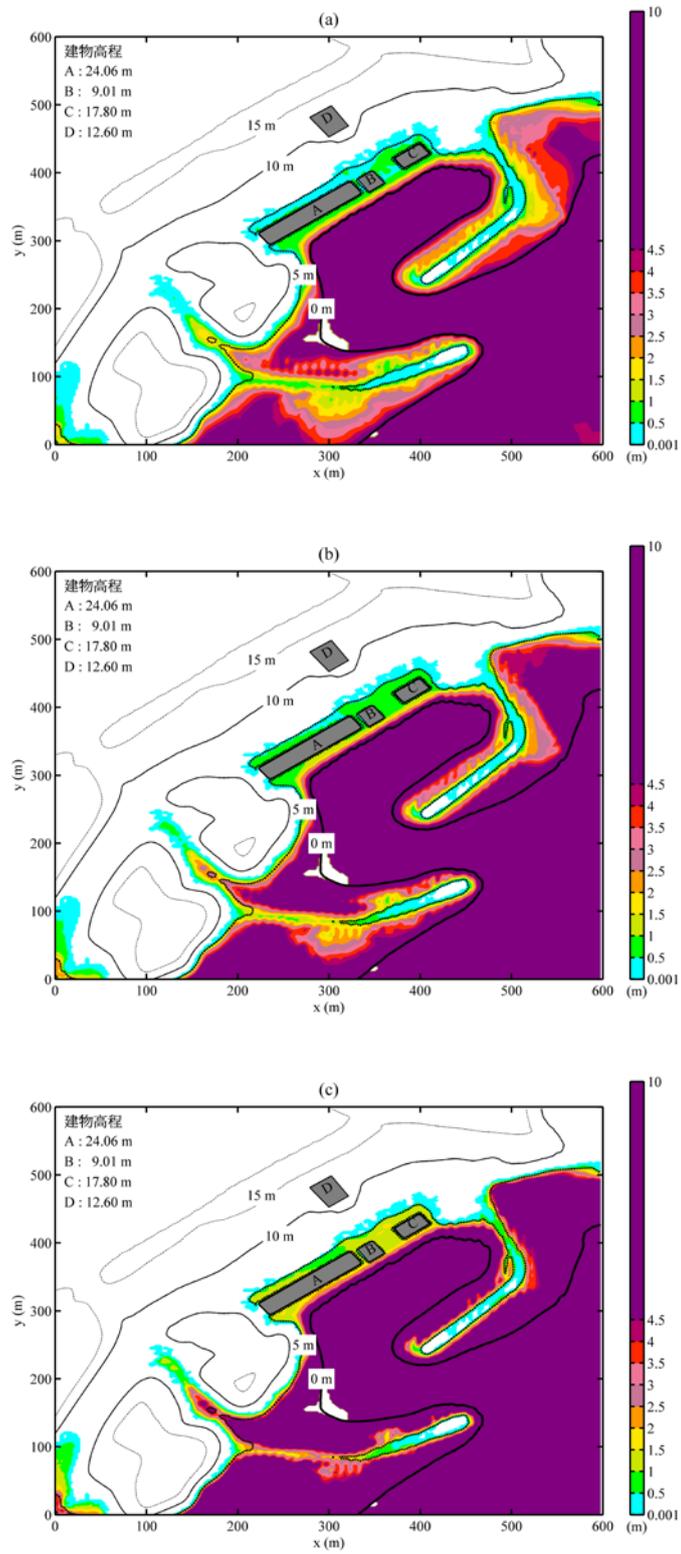


圖 59 年超越機率為 (a)2 % , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波

高和溢淹高 (case 1;  $M_w = 8.0$ )

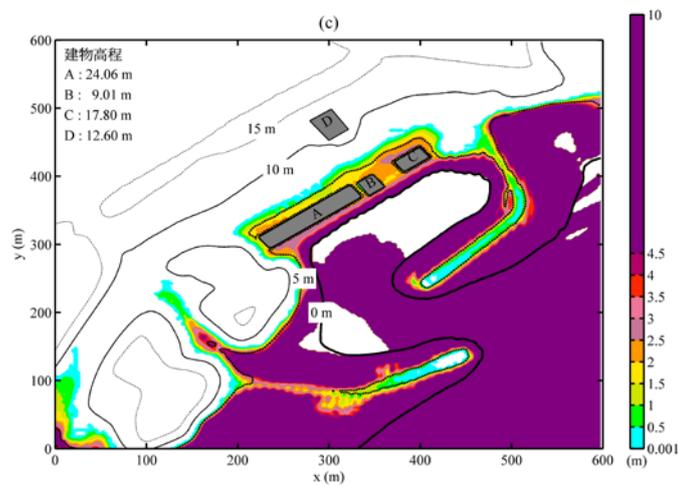
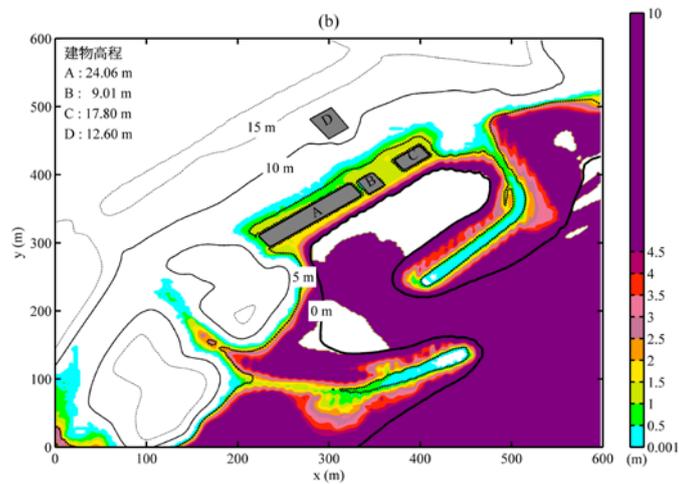
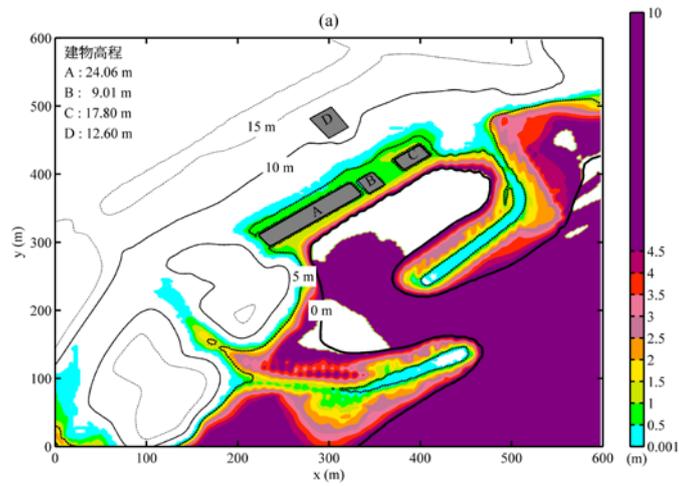


圖 60 年超越機率為 (a)2 % , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波

高和溢淹高 (case 2;  $M_w = 8.0$ )

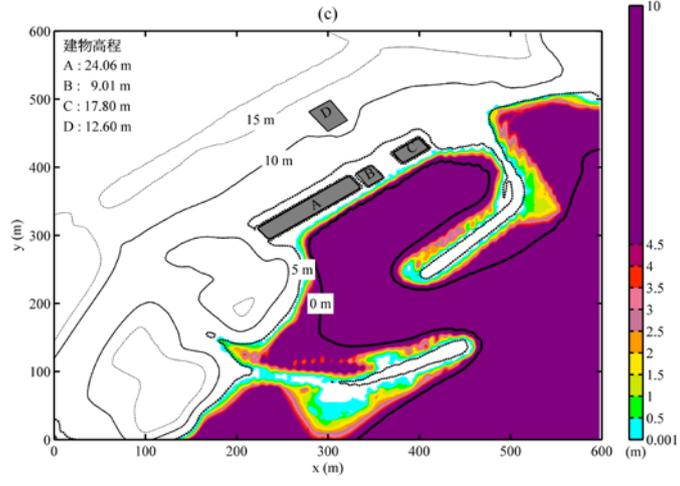
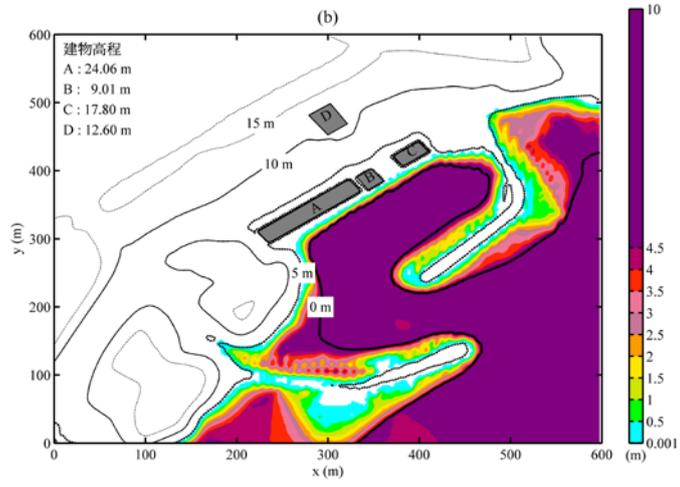
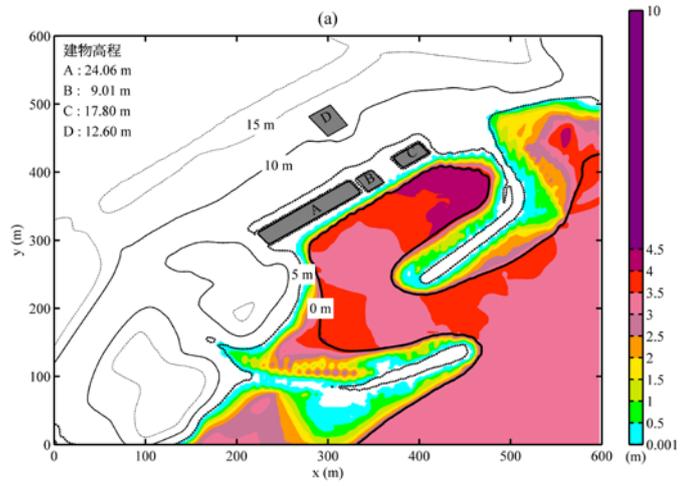


圖 61 年超越機率為 (a)2 % , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波高和溢淹高 (case 3;  $M_w = 8.0$ )

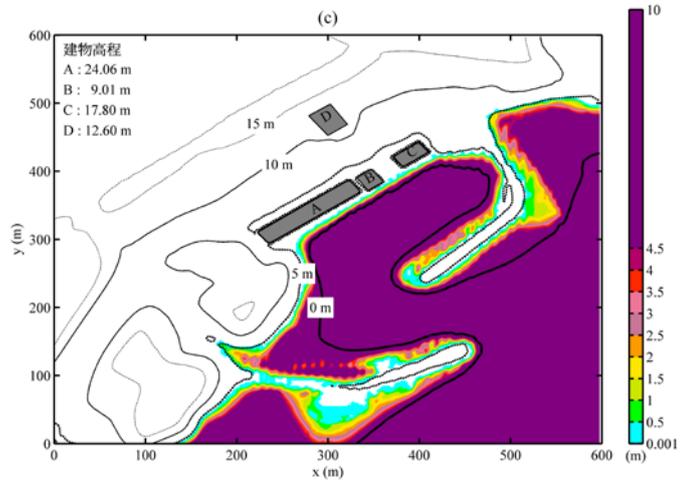
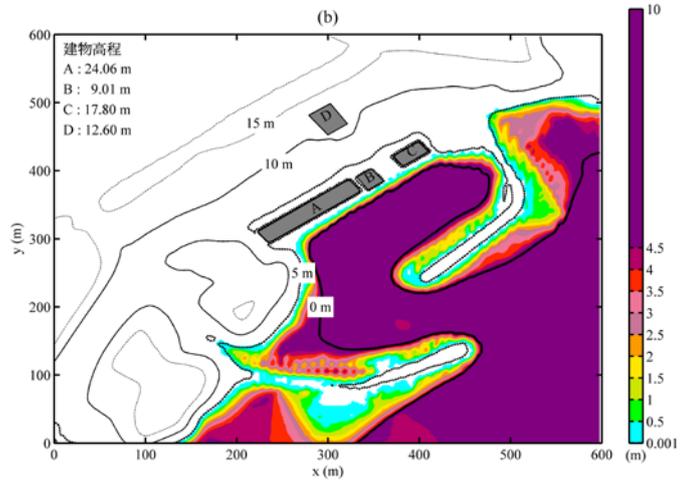
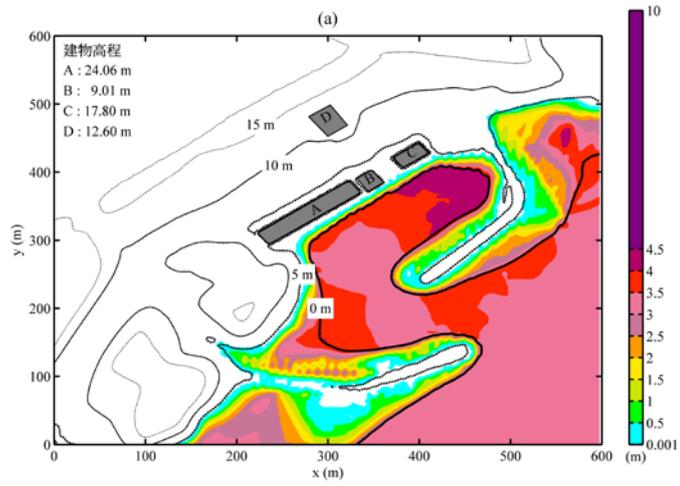


圖 62 年超越機率為 (a)2 % , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波

高和溢淹高 (case 4;  $M_w = 8.0$ )

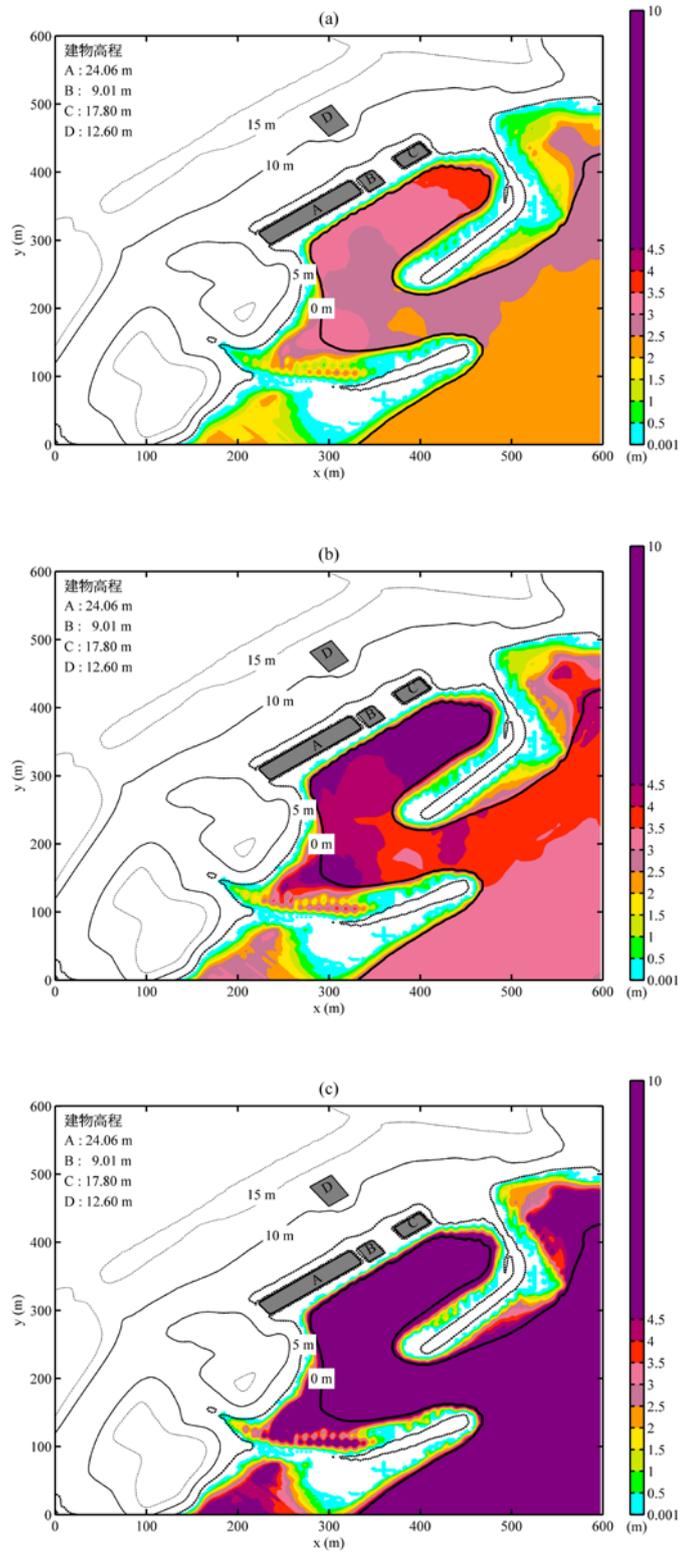


圖 63 年超越機率為 (a)2 % , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波

高和溢淹高 (case 5;  $M_w = 8.0$ )

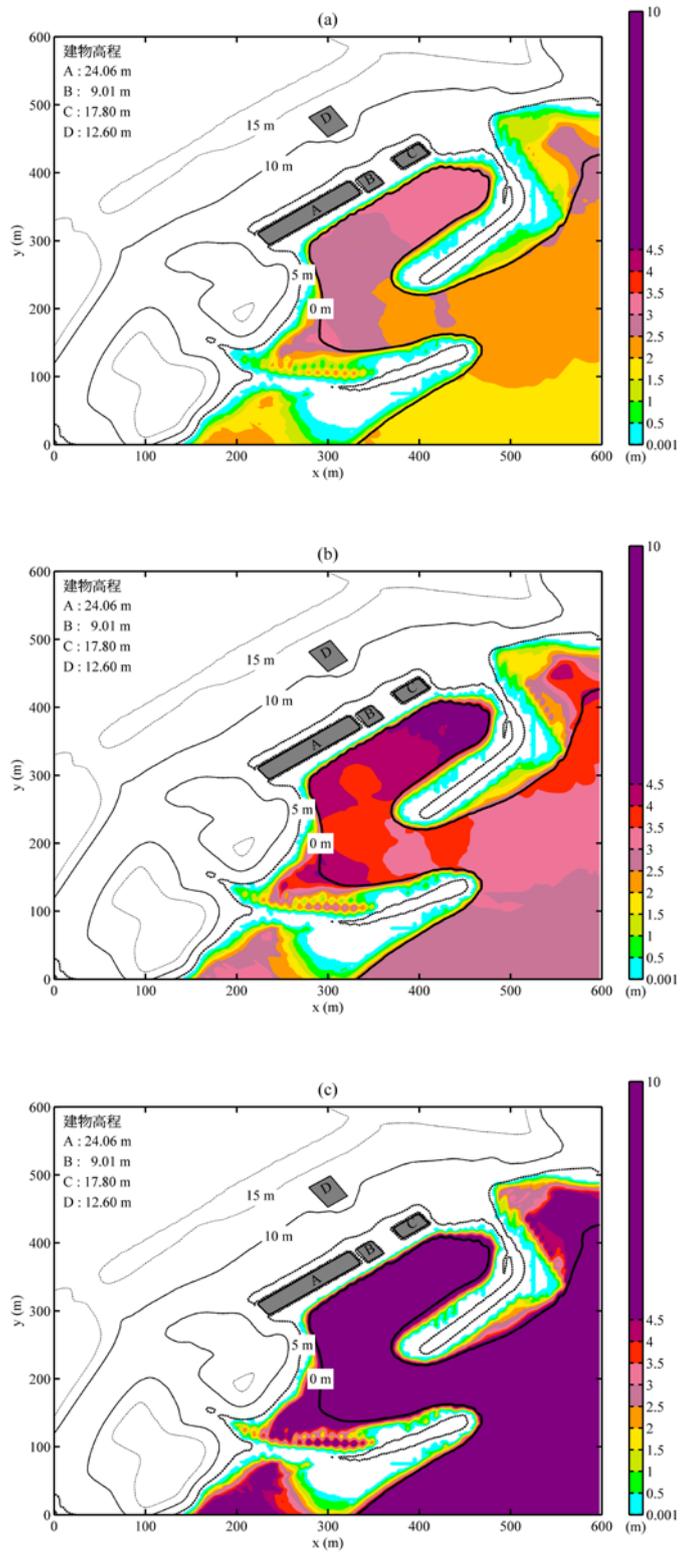


圖 64 年超越機率為 (a)2 % , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波

高和溢淹高 (case 6;  $M_w = 8.0$ )

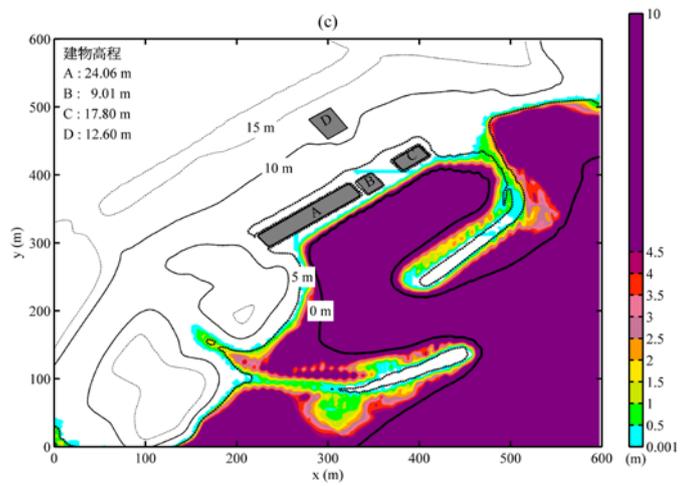
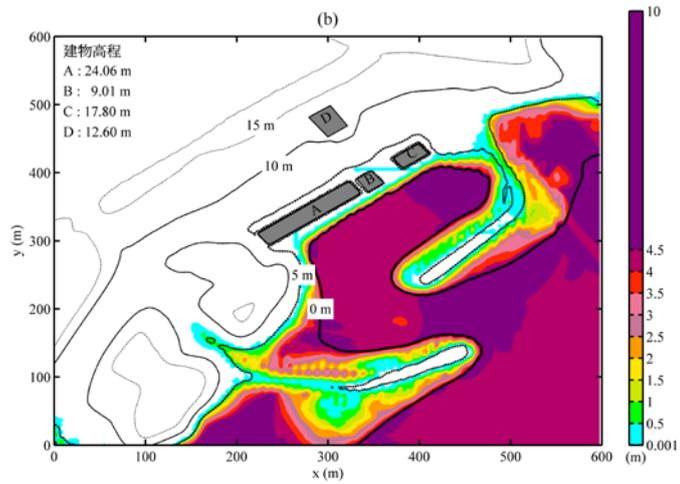
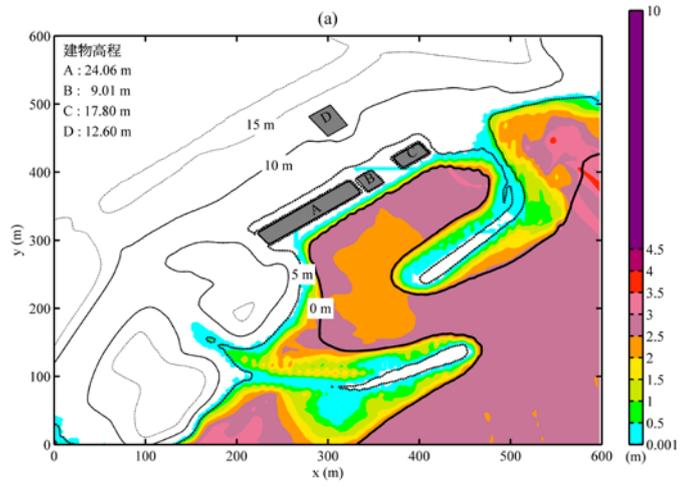


圖 65 年超越機率為 (a)2 % , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波

高和溢淹高 (case 7;  $M_w = 8.16$ )

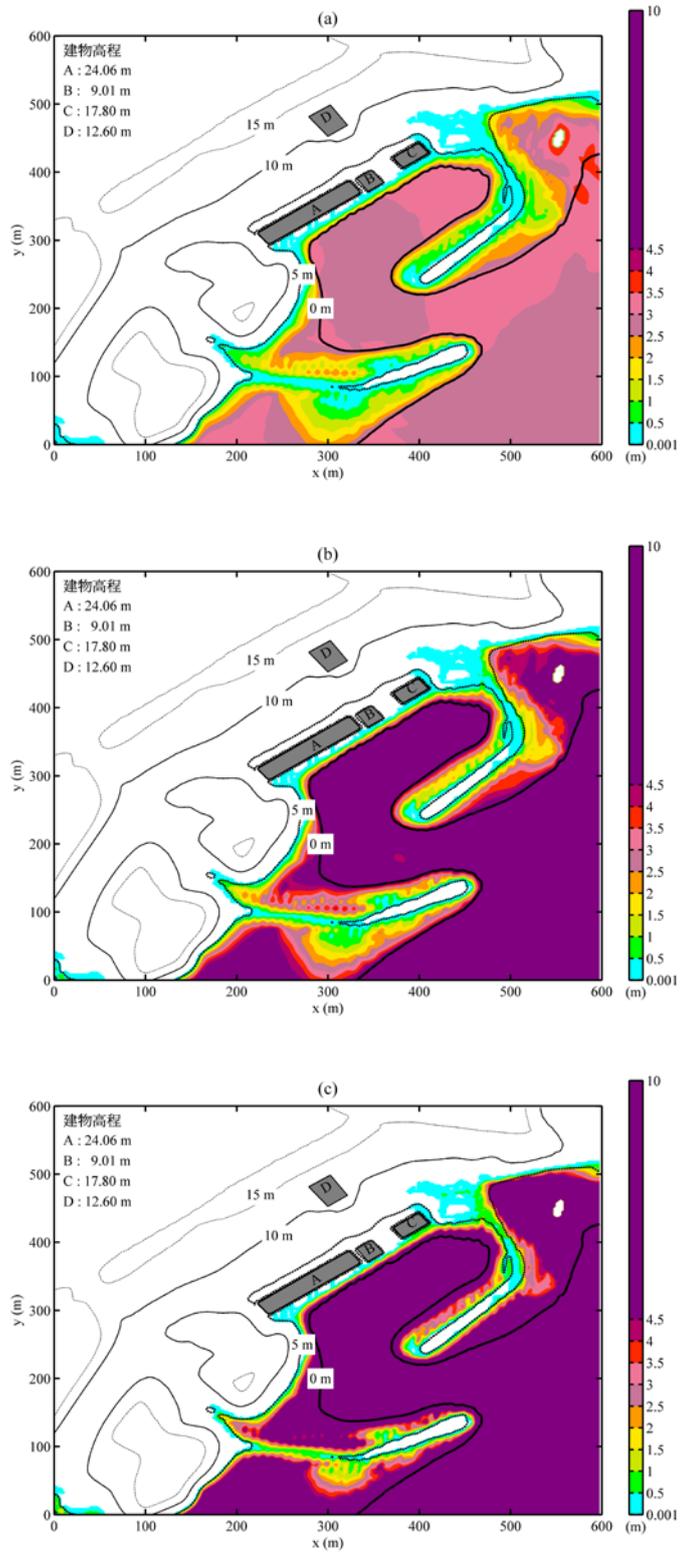


圖 66 年超越機率為 (a)2% , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波

高和溢淹高 (case 8;  $M_w = 8.16$ )

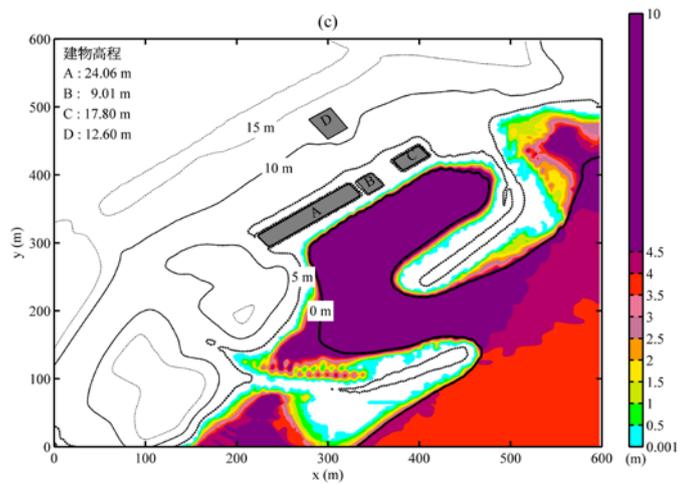
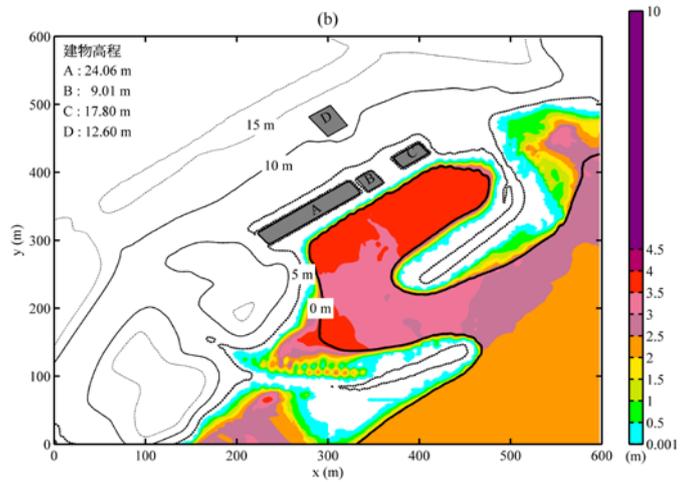
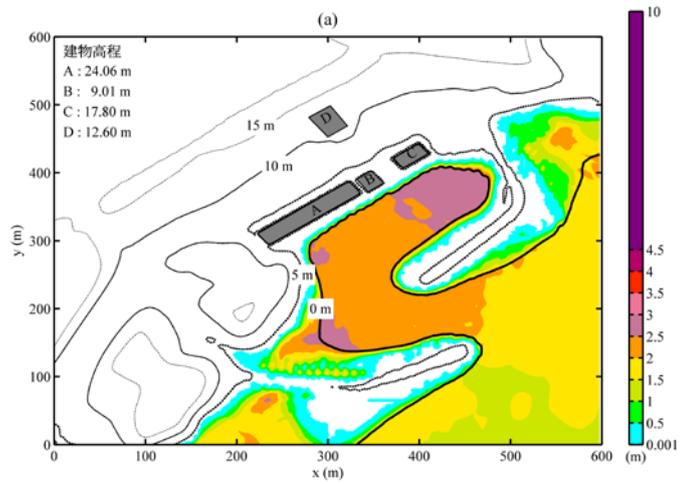


圖 67 年超越機率為 (a)2 % , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波

高和溢淹高 (case 9;  $M_w = 8.0$ )

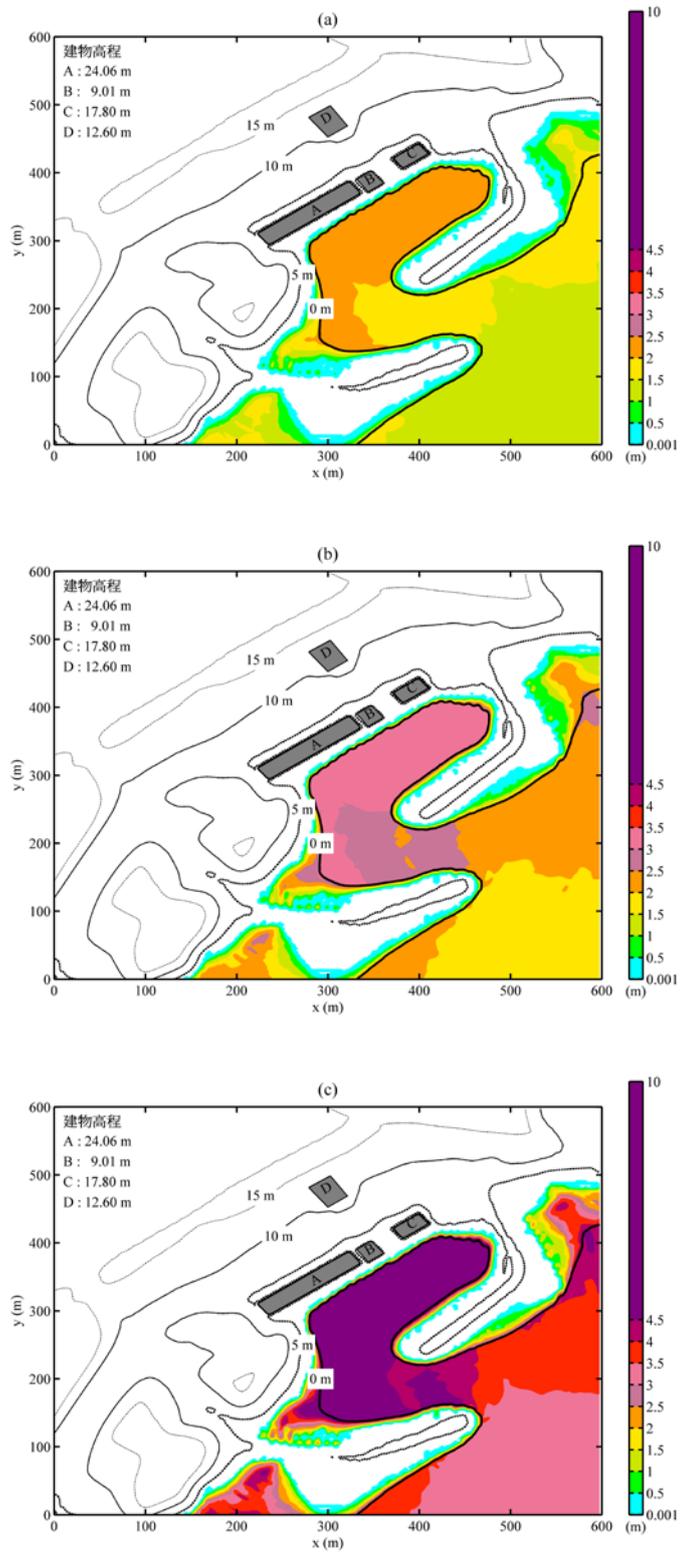


圖 68 年超越機率為 (a)2 % , (b) 1% 和 (c) 0.2% 的最大海嘯波

高和溢淹高 (case 10;  $M_w = 8.0$ )

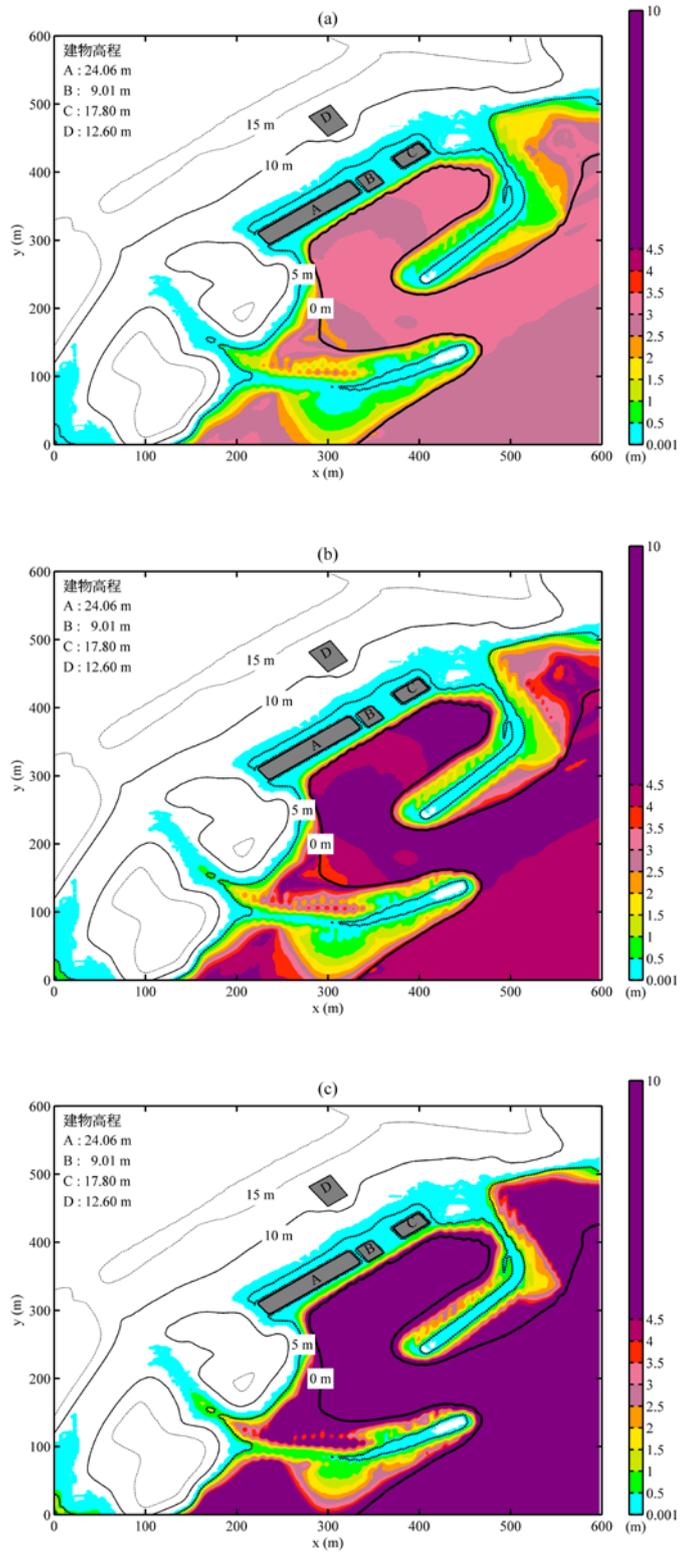


圖 69 年超越機率為 (a) 2%、(b) 1% 和 (c) 0.2% 時的最大海嘯

波高和溢淹高 (考量 case 1~10)

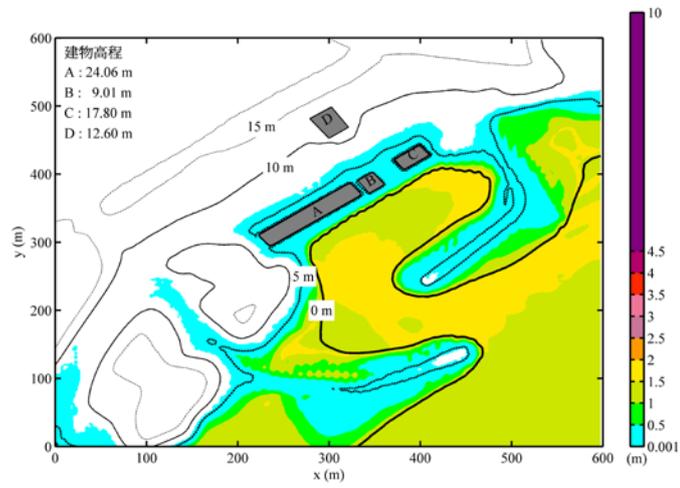


圖 70 年超越機率為 3.3 % 時的最大海嘯波高和溢淹高 (考量 case 1~10)

## 肆、結果與討論

本研究計畫使用 COMCOT 模擬馬尼拉海溝斷層破裂後海嘯波的生成和傳遞，再利用本研究團隊所建置的耦合模式，透過建立之二維淺水波模式和高精度三維模式耦合方法流程，以得到相對於二維模式更為可信的海嘯上溯和溢淹。並以此探討不同地震情境之間於核三廠區溯升和溢淹分布上之差異性。

本研究團隊耦合高精度三維模式 (*FLOW-3D*) 和二維海嘯模式 (COMCOT) 之流程已建立，包含 COMCOT 模擬資料的處理和優化以及 *FLOW-3D* 邊界修改。除了成功修改 *FLOW-3D* 程式，使其能夠與 COMCOT 結合之外，更撰寫一系列的 MATLAB 程式，大幅提升前處理的效率並節省大量的硬碟儲存空間。耦合模式做為海嘯波浪對核能廠區影響之研究模式，使得廠區複雜的水動力行為可以更真實的描述，以提供機率式海嘯危害度模型所需之水位，以及相關的流場資訊。

目前所使用的情境條件會造成核三廠沿岸溢淹 (最大溯升高度約 5 公尺)，可能影響沿岸建物 (抽水機房、滅火設備和海水淡化廠) 之安全性。由於反應爐等設施位於較高之地面高程 (15 公尺)，因此溯升行為並不至於直接對其造成危害。然而，海嘯波所造成的水

位抬升和下降以及較大的流速可能會導致抽水設備異常。

為了考量地震的認知不確定性，本計畫完成邏輯樹狀圖中的其中 10 組模擬（總共有 104 組），以此 10 組考量隨機和認知不確定性的結果顯示：模擬結果顯示在年超越機率為 2 % 時，核三廠附近海域波高在 4 公尺以下，陸域溢淹在 0.3 公尺以下，溯升高度不到 6 公尺。當年超越機率為 1 % 時，核三廠附近海域波高在 6 公尺以下，陸域溢淹在 0.4 公尺以下，溯升高度亦不到 6 公尺。當年超越機率為 0.2 % 時，核三廠附近海域波高在 10 公尺以下，陸域溢淹在 0.5 公尺以下，溯升高度同樣不到 6 公尺。然而，需要特別注意的是，在利用機率式海嘯危害度模型考量更高重現期的海嘯危害時，並無考量真實的水動力行為（更大的外海波高應導致更高的溯升和溢淹）。因此，溯升和溢淹的範圍的結果需要更仔細的審視和評估。

## 伍、參考文獻

1. Murata, S., F. Imamura, K. Katoh, Y. Kawata, S. Takahashi, and T. Takayama, *Tsunami: To survive from tsunami*. Advanced Series on Ocean Engineering. Vol. 32. 2010: World Scientific.
2. 港灣空港技術研究所資料 No.1231. Independent Administrative Institution, Port and Airport Research Institute, Japan, 2011.
3. Fraser, S., I. Matsuo, G.S. Leonard, and H. Murakami, *Tsunami evacuation: Lessons from the Great East Japan earthquake and tsunami of March 11th 2011*. 2012, GNS Science Report
4. Suppasri, A., N. Shuto, F. Imamura, S. Koshimura, E. Mas, and A.C. Yalciner, *Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Tsunami: Performance of Tsunami Countermeasures, Coastal Buildings, and Tsunami Evacuation in Japan*. Pure and Applied Geophysics, 2013. 170(6-8): p. 993-1018.
5. 陳賜賢, 日本東北大地震之海嘯災害對台灣海岸工程防護之啟示. 2011.
6. Arikawa, T., M. Sato, K. Shimosako, I. Hasegawa, G.-S. Yeom, and T. Tomita, *Failure mechanism of kamaishi breakwaters due to the great east japan earthquake tsunami*. 2012, Proceedings of the 33rd Conference on Coastal Engineering.
7. コラム 釜石港湾口防波堤の損壊と減災効果. 2015.
8. 包澄瀾, 海洋災害及其預報. 1991.
9. 徐明同, 海嘯所引起之災害. 中央氣象局氣象學報第二十七卷第一期, 1981.
10. JSCE, *Tsunami assessment method for nuclear power plants in Japan*. 2006, Japan Society of Civil Engineers (JSCE).
11. Titov, V.V., *Numerical modeling of long wave runup*. 1977, University of

Southern California, Los Angeles, California.

12. Titov, V.V. and C.E. Synolakis, *Extreme inundation flows during the Hokkiado-Nansei-Oki tsunami*. Geophysical research letters, 1997. 24(11): p. 1315-1318.
13. Titov, V.V. and F.I. González, *Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model*. 1997, NOAA technical memorandum ERL PMEL-112, Pacific marine environmental laboratory, Seattle, Washington.
14. Okada, Y., *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985. 75(4): p. 1135-1154.
15. Shuto, N., *Numerical simulation of tsunamis*. Kluwer academic publishers, Dordrecht, The Netherlands, , 1991: p. 171-191.
16. Imamura, F., A.C. Yalciner, and G. Ozyurt, *Tsunami modelling manual (TUNAMI model)*. 2006, Tohoku University, Sendai, Japan and Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
17. UNESCO, *Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme*, in *International union of geodesy and geophysics/International oceanographic commission (IUGG/IOC) Time panel, IOC manuals and guides No. 35, IOC*. 1997, United nations educational, scientific and cultural organization (UNESCO).
18. Liu, P.L.F., Y.S. Cho, M.J. Briggs, U. Kanoglu, and C.E. Synolakis, *Runup of solitary waves on a circular island*. Journal of Fluid Mechanics, 1995. 302: p. 259-285.
19. Wang, X.M. and P.L.F. Liu, *A numerical investigation of Boumerdes-Zemmouri (Algeria) earthquake and tsunami*. Cmes-Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2005. 10(2): p. 171-183.
20. Wang, X.M. and P.L.F. Liu, *An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami*. Journal of Hydraulic Research, 2006. 44(2): p. 147-154.

21. Chang, K.-T., M.-K. Hsu, P.L.-F. Liu, and S.B. Woo. *Tsunami inundation in east Taiwan in Proceedings of the 21th Ocean Engineering Conference in Taiwan, Republic of China*. 1999. National Chiao Tung University.
22. Yoon, S.B., *Propagation of distant tsunamis over slowly varying topography*. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2002. 107(C10).
23. Liu, P.L.F. and X.M. Wang, *Tsunami source region parameter identification and tsunami forecasting*. Journal of Earthquake and Tsunami, 2008. 2(2): p. 87-106.
24. Cho, Y.-S., *Numerical simulations of tsunami and runup*. 1995, Cornell University.
25. Watts, P., S.T. Grilli, J.T. Kirby, G.J. Fryer, and D.R. Tappin, *Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003. 3(5): p. 391-402.
26. Liu, P.L.F., X.M. Wang, and A.J. Salisbury, *Tsunami hazard and early warning system in South China Sea*. Journal of Asian Earth Sciences, 2009. 36(1): p. 2-12.
27. Synolakis, C.E. and E.N. Bernard, *Tsunami science before and beyond Boxing Day 2004*. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 2006. 364(1845): p. 2231-65.
28. Yen, Y.T. and K.F. Ma, *Source-Scaling Relationship for  $M$  4.6-8.9 Earthquakes, Specifically for Earthquakes in the Collision Zone of Taiwan*. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011. 101(2): p. 464-481.
29. Wang, X.M., *User manual for COMCOT version 1.7*. 2009.
30. Yoneyama, N. and M. Matsuyama, *Numerical analysis of locally high runup of the 1993 Hokkaido Nansei-oki Tsunami*. 2001, Abiko Research Laboratory Report of Central Research Institute of Electric Power Industry, U01002, pp. 17 (in Japanese).
31. *FLOW-3D user's manuals, version 10.1*. 2012, Flow Science, Inc., Santa Fe

NM.

32. Kim, K.O., B.H. Choi, E. Pelinovsky, and K.T. Jung, *Three-dimensional simulation of 2011 East Japan-off Pacific coast earthquake tsunami induced vortex flows in the Oarai port*. Journal of Coastal Research, 2013: p. 284-289.
33. U.S.NRC, *Tsunami hazard assessment at nuclear power plant sites in the United States of America*. 2009, United States Nuclear Regulatory Commission.
34. 陳子宇, 三維真實地形數值模擬之海嘯上溯研究, in *水文與海洋科學研究所*. 2011, 國立中央大學.
35. MLIT, *Guide to determining the potential tsunami inundation*. 2012, National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT, JAPAN.