

美國作業單位暴潮模式之評介

陳 傑

美國氣象局

摘 要

近年來美國暴潮的作業模式已進入成熟的階段，模式簡稱 SLOSH (Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricane)，有刻畫實際淹水景況的能力，包括了海灣海水倒灌、河道、堤防越頂與漫灘等等。由過去多年來暴風過後資料的分析，亦證實其計算的可靠性。然而，由於今日在風暴過境前，暴風參數的預報仍欠精確，暴潮的預報不宜僅賴單一的暴風的路徑預報。因此，SLOSH 模式已轉用於疏散計畫研究的工具，便於有關單位在暴風來襲前有效的完成防災作業。

一、前 言

美國氣象局採用數值模式作熱帶風暴潮預報已有廿餘年。在 70 年代，模式計算僅限於海岸線外的水域 (Jelesnianski, 1972)，就是假定有一高牆立在海岸線上，海水能堆上牆前，但不能穿透。這樣的模式如用於合於條件的海岸線上，對最高水位值增加的估計仍頗有價值，這是由於暴潮的動力仍以大陸坡上的淺水效應為重。建立暴潮模式首要有風力場模式。傳統上，熱帶氣旋仍採用參數模式；即是決定於中心氣壓，最大風速半徑與進行速度。美氣象局風力場的一未定係數是用了一組歷史最高水位的觀測值來調整。這是由於在 60 年代，氣象局曾在暴潮觀測資料上作了一番努力 (Harris, 1963)。如此之下，風力場模式與暴潮模式變成相互不可分割，否則不能保持預測值的穩定性。

到了 80 年代，氣象局推動海灣與內陸漫灘的模式，尤其是針對於重點海灣與較低的近海陸地，因為 70 年代的模式無法獲得正確的估計值。這模式簡稱 SLOSH (Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes) (Jelesnianski, et al, 1992)。此模式可以對複雜的海灣與陸地上作精細的運算。由於採用了連續性變化的網格，可由小網格間距用於內陸，延伸至大網格間距至大陸坡邊界，達成灣內灣外雙方向的交互作用的計算。

但是，目前熱帶氣旋的路徑預測精確度有限，登陸點在廿四小時內預測，平均誤差仍在 ± 100 海哩 (依據國家暴風中心的正式預報)。如用 SLOSH 模式以“單一”的路徑預報作暴潮預報是很不明智的。因為，根據 SLOSH 的計算，少許的路徑錯誤，可以造成

極不同的結果。譬如，氣旋在港灣左側或是右側登陸，灣內有些地區暴潮值是天遠之別，1989 年的 Hugo 暴風即是一實例。由此緣故，模式的應用方式改為疏散計畫的研究工具。利用多種假想風暴的模擬，模式可以推算出對某地區精細的資料庫，模擬可依路徑、強度、進行速度分類，以探討出不同淹水的嚴重性，加上沿海人口的分佈，交通狀況研究，更可供防災人員全盤防災計畫的參考。

二、變化網格

爲了考慮灣內、灣外的交互作用，變化網格間距的計算網格是不可避免的。現今有許多熱門的變化網格間距的方法，譬如有限元素法（Finite Element Method），套網格（Telescoping Grids）等。但是爲了顧慮到複雜的淹水程序，SLOSH 保守的選擇了極簡單的極坐標扇形網格，後來繼續延伸成橢圓與雙曲線網格，如圖 1。轉換方程由複變函數表示如下：

$$Z = R \left(W + \frac{r}{W} \right), \quad W = e^{\zeta}, \quad Z = x + i y, \quad \zeta = P + i Q$$

$$R > 0, \quad -1 \leq r \leq 1.$$

當 $r = 0$ ，爲極坐標， $-1 < r < 1$ ， $r \neq 0$ ，爲橢圓坐標； $r = \pm 1$ ，爲雙曲線坐標。 ζ 是計算平面， $P = m \Delta \theta$ ， $Q = n \Delta \theta$ ， $\Delta \theta = \text{常數}$ 。 Z —平面爲定義在一正切於地球上一點（某灣口附近）的平面。網格由不斷調整 R 、 r 值而定。設計網格不僅要考慮精細的淹水計算，更要顧到外海邊界條件影響的問題。如果資料來源爲水深圖或地貌圖，製網格的軟體可幫助取值工作的繁累。目前已完成的區域網格含蓋所有墨西哥灣與大西洋在美國的海岸線，如圖 2。

三、漫灘與海水倒灌

這部份也是模式最複雜的一環，資料的結構與程序的串寫往往是相互關聯，並且又與數值差分法不可分割，簡單的描述如後。

當陸地開始被淹或防洪堤被越頂，新網格點系統就開始引進，普通稱之移動邊界（Moving Boundary）。模式採用質量不變原則，而動量方程極度簡化，由於太多複雜的地貌是無法一一考慮，風應力須急速降低，以避免產生薄片流（Sheet flow），由於不規則陸地，河川資料產生的雜訊，也必須平滑掉。

設計模式用的地貌 (Terrain features) 以圖 3 為例：(a) 梯階式的地面，(b) 阻擋水的堤防，(c) 缺口的牆，(d) 單網格的河道，(e) 次網格的河道。阻擋水的牆高，河道水深，岸高皆需輸入。設計這些資料不需過煩，以考慮主要與外海有交互作用的重點為要。

陸地上如有密集的樹林，譬如南佛羅里達的海岸線上的 Mangrove 叢林，對風有很大的消滅力，如此，淹水就被重力流所控制。淹水又受風暴移動快慢影響，由於重力流較風力影響為緩。模式以經驗參數印證觀測資料而調整。

這些資料要逐年更新，因為許多人為的建設與天然改變，所以維護與更新的工作相當煩雜，但是不可缺少的工作。

四、基準面的問題 (Datum Planes)

要作漫灘計算，首先要統一海水與陸地資料的基準面，在美國，水深與陸地面高度的參照基準面是不一致。水深一般採用平均低潮面 (MLW)，而陸地上採用國家地面垂直基準面 (National Geodetic Vertical Datum of 1929)，或稱 NGVD，沿海水位站都可以訂正至 NGVD。SLOSH 因以計算淹水為重，故採用 NGVD 為統一化的基準面。雖然如此，許多地區抽用地下水之故，以至地面下陷，許多參考點 (Bench Mark) 已失去原來的作用，自然決定淹水及越頂與否成了問題，正確高度須靠重新測量而定。海陸的基準面相關性表示如圖 4。

五、風暴模式與海面風力場

SLOSH 海面風場分兩部份：(一) 用於海岸線以外的水域稱“海風”，(二) 用於海灣內與淹水地區稱“湖泊風”。“海風”來自早期外海模式 (SPLASH, Special Program to List the Amplitudes of Surges from Hurricanes)(Jelesnianski, 1972)。熱帶氣旋海面風場由數個氣象參數而定：1. 中心氣壓與外圍氣壓之差 (Pressure Drop)，2. 最大風速半徑，3. 中心運動速度。最大風速位於運動方向的右側，海面風應力以下的公式

$$C_D \frac{\rho_a}{\rho_w} \left| \vec{w} \right| \vec{w}$$

$\vec{w}$ 是風向量； ρ_a ， ρ_w 是空氣與水的密度； C_D 是“ Drag Coefficient ”。模式選取一經驗數值， $C_D (\rho_a / \rho_w) = 3 \times 10^{-6}$ 。這數值是取自 43 個歷史暴風的“最高”暴潮觀測值與計算比較 Best-Fit 方式 (Jelesnianski, 1972)。所以這個常數連接風場模式與暴潮模式以達成作業模式的守恆性，尤其是在控制最高暴潮值上。

在海岸線內的水域，暴風的軌跡部份遭受陸地的干擾，而使風速減低，夾角加大，稱之為”湖泊風”。此風的調整對灣內潮漲與漫灘計算很重要。圖 5 是以訂正外海風模式的摩擦參數作為”湖泊風”模式。資料調整來自 1949 的風暴路徑佛羅里達州的 OKeechobee 湖北方，正巧在一年前美國陸軍工程部設立了一風與潮位觀測網，其密度與暴風的相對位置，至今仍不易獲得，由模式對此事件對風與水位共同的模擬，定下”湖泊風”的參數。詳細比較，請見 Jelesnianski, et al (1992)。

由於 SLOSH 風場模式調整的參數，都與暴潮觀測值有關，我們無法分割兩個模式，否則就必須重新調整參數。依過去經驗，替換風場對暴潮計算值的改變是相當可觀的，而固定風場，替換暴潮模式造成計算值的不同是遠比前者為小。所以如果要進一步的改進風場模式，必須先要具有一個充足的暴潮觀測資料，否則 SLOSH 模式的守恆性就被破壞了。

六、模式的驗證

為比較暴潮觀測值與模式計算，首先要考慮風暴參數資料的可靠性，由於不同地區資料收集，在風暴過後仍然有不同精確度。今日美國在暴風登陸前，仍以飛機穿眼資料 (air reconnaissance) 最佳，登陸後可用地面資料分析，中心氣壓的觀測值誤差不超過數毫巴 (mb)。而路徑，如採用 Best-fit 路徑往往在登陸點上有不少的誤差，這是根據氣象偵察機、雷達與地面資料總結的分析。(Ho, 1986)。其次是最大風速半徑，目前最方便使用雷達顯示的雲帶 (Cloud Band) 決定，假定最大風速約在最強對流圈的外圍。目前也可由氣象偵察機在飛行高度測出的風速決定。如果風暴參數無法精確的定出，自然無法過度要求暴潮驗證的精確，否則失去客觀性。

暴潮的觀測資料主要要賴兩種：(一) 潮位站的連續測值，(二) 靜水位最高記號 (Still High Water Mark)。這兩種都能把高頻率的波浪影響除去。下一步即是如何將天文潮自總潮位中除去，定義為暴潮。此處驗證資料採用大部份為墨西哥灣的風暴，因當地天文潮潮差僅在一兩呎上下，雖第一種在一定點觀測到連續的時間的變化，然而第二種資料可以表達暴潮隨空間的分佈 (尤其可找出最大增水位的地區)。靜水位最高記號來自於風暴後的現場測量，譬如在被水淹的屋內牆上可找到水跡，然後訂正至水平面，缺點是這數值往往包含了當時的天文潮，而無法被除去。

SLOSH 模式曾為每一區域作驗證，不在此詳細討論。僅以總括性的比較結果顯於圖 6。比較根據於 570 個觀測值，包括十二個風暴 (DONNA 算兩次，由於登陸不同地點)，九個模式區域的計算。其中潮位站資料僅占 10 % 左右，模式本身參數不是每一區域作單獨調整，此為統一化的參數模式。根據圖 6 中，顯示誤差均在 20 % 以下。

七、總結

美國暴潮作業模式採用參數化風場是相當仰賴經驗性的調整，由於利用了充裕的岸上暴潮觀測值。雖然此法不能幫助論研究作進一步突破，但仍能在作業上有效的發揮其功能。一般看來，熱帶暴風參數預報的精確度，在短期內難有極大的改進，暴潮預報技術也會滯留不進。另觀溫帶氣旋所造成的暴潮，因為近日海面風場的模式預報開始突飛猛進，暴潮預報可望得到技術上的突破。換言之，就是暴潮模式可直接採用模式供應的風場預報作預報。

參考文獻

- Jelesnianski, C. P., 1972 : SPLASH (Special program to list the amplitudes of surges from hurricanes) : I. Landfall storms. NOAA Technical Memorandum NWS TDL-46, National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce.
- Jelesnianski, C. P., Jye Chen, and W. A. Shaffer, 1992 : SLOSH : Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes, NOAA Technical Report NWS 48, National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce.
- Harris, D. Lee, 1963 : Characteristics of the hurricane storm surge, Technical Paper No. 48, U. S. Weather Bureau, U. S. Department of Commerce.
- Ho, F. P., R. W. Schwerdt, and H. V. Goodyear, 1975 : Some climatological characteristics of hurricanes and tropical storms, Gulf and East coasts of the U. S., NOAA Technical Report NWS 15, National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce.

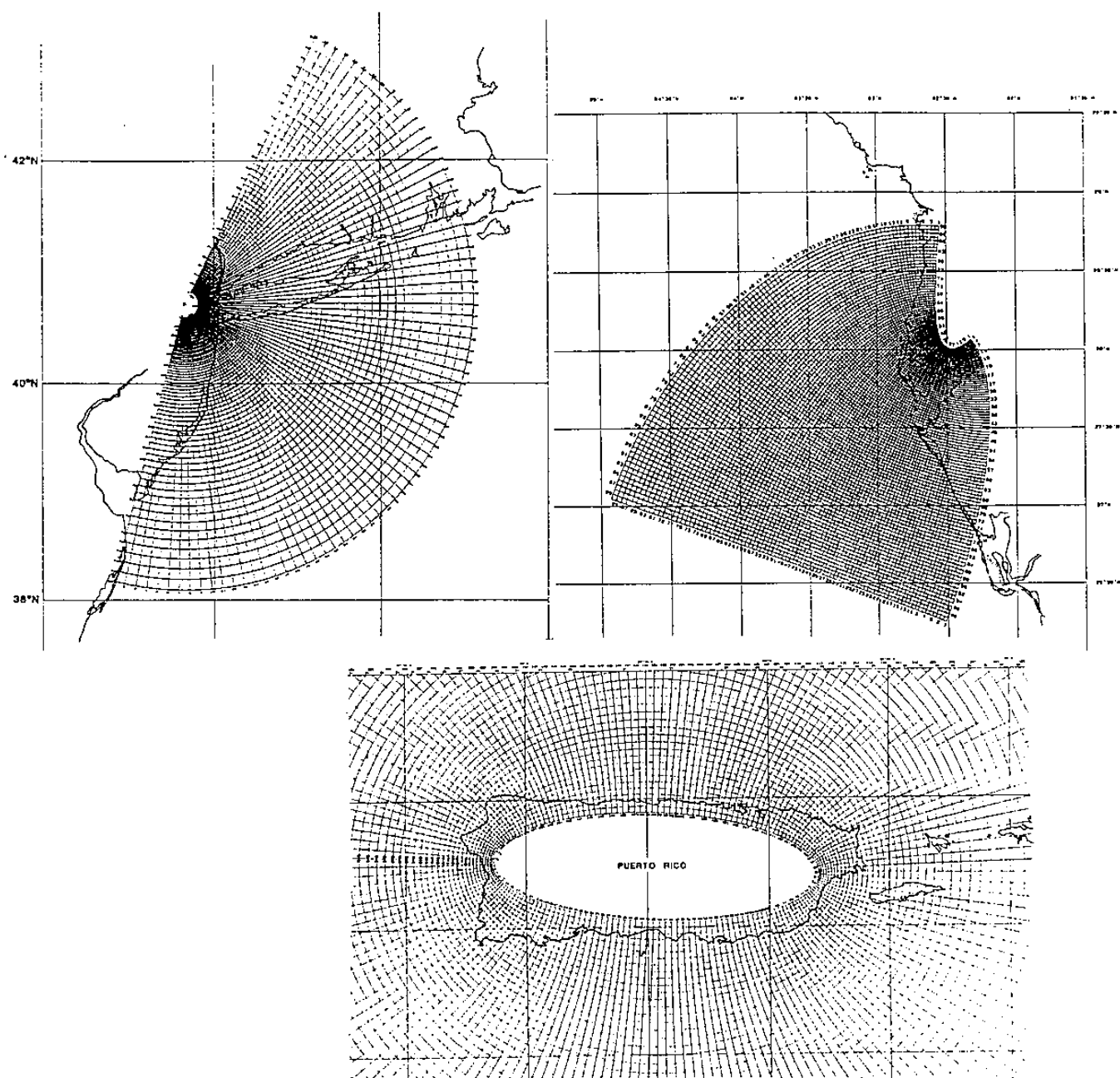


圖 1、幾種模式網格。

SLOSH BASINS

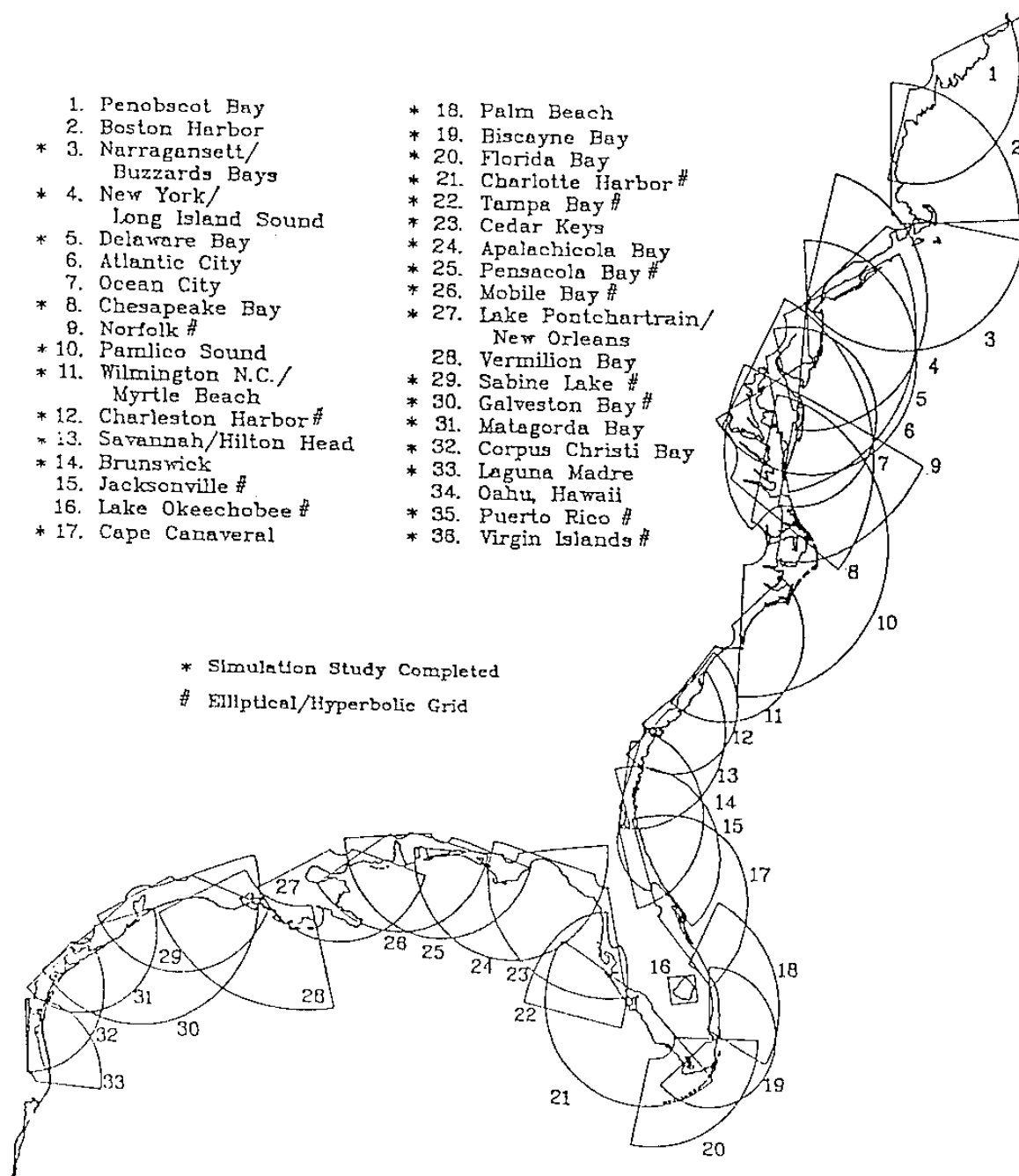


圖 2、SLOSH 作業化的區域。

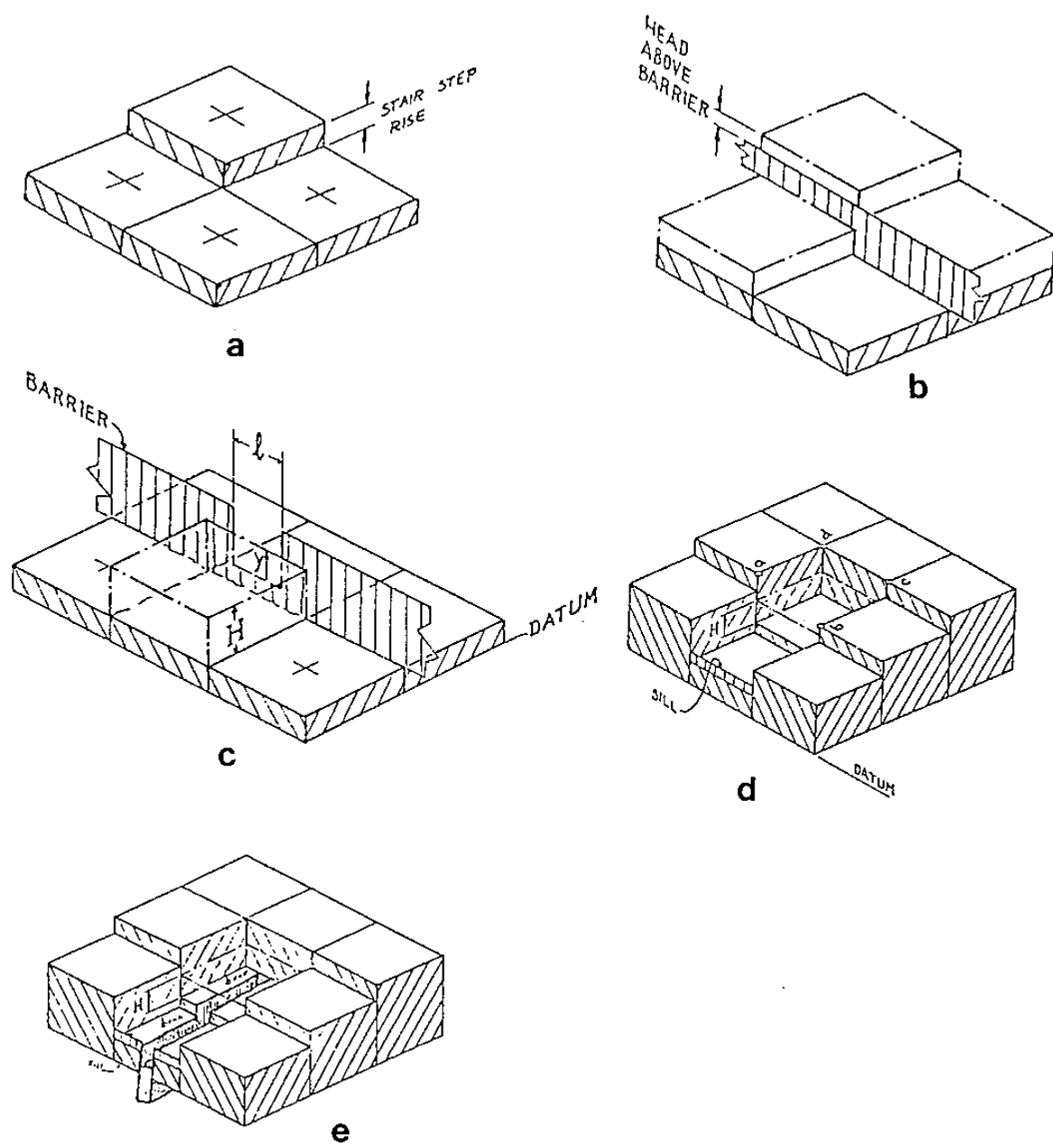


圖 3、處理漫灘、越頂、河流倒灌的地形。

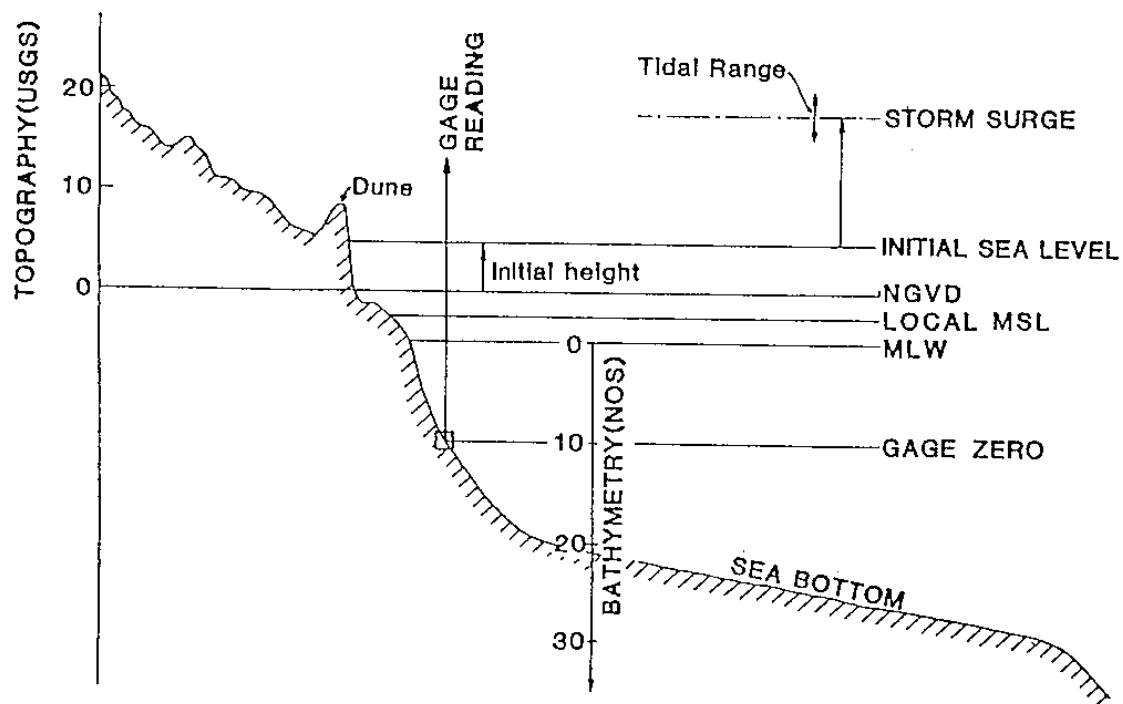


圖 4、基準面。

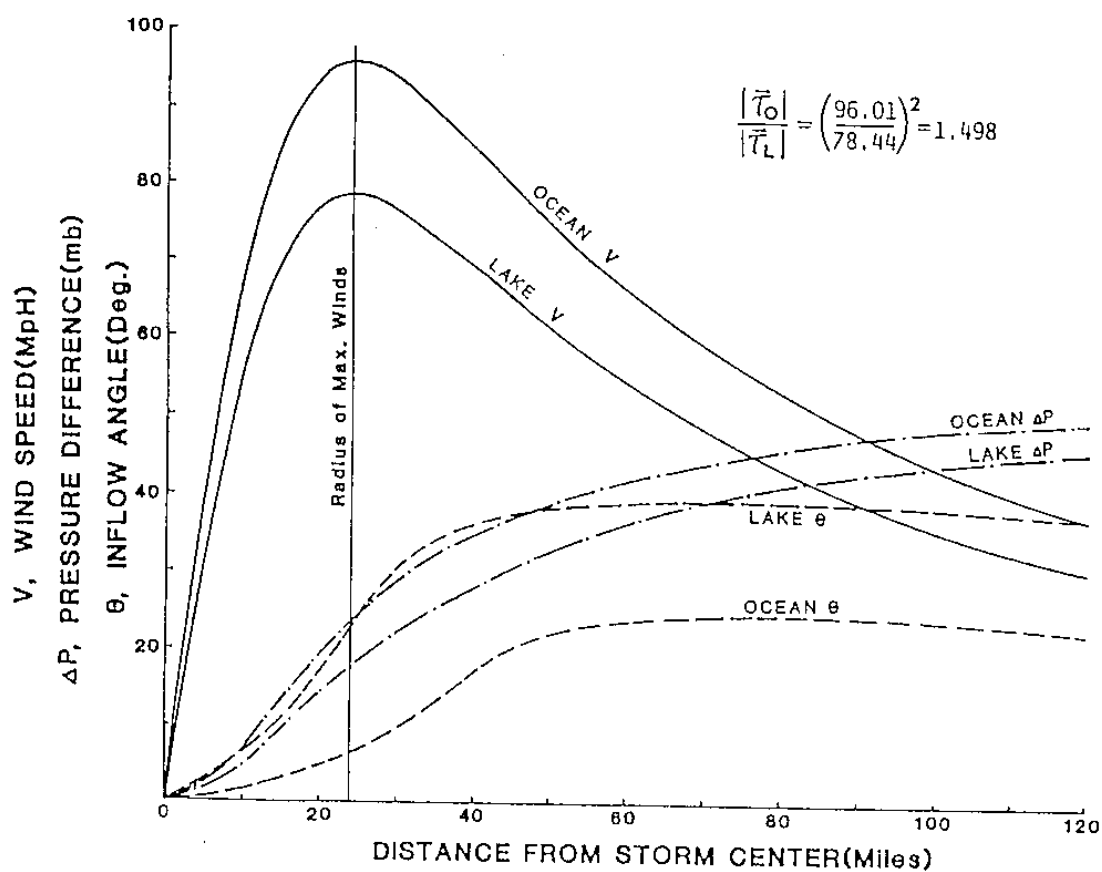


圖 5、SLOSH 模式的”外海風”與”湖泊風”。

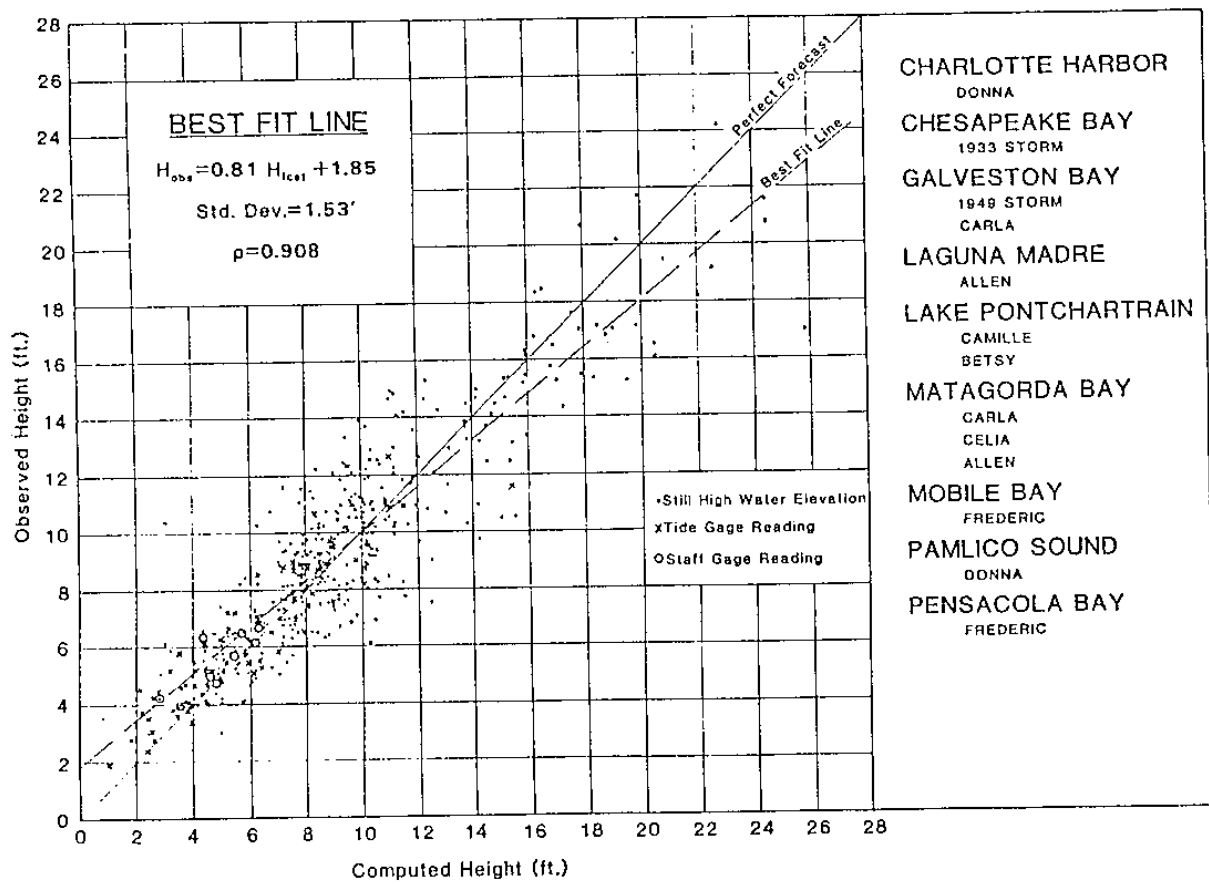


圖 6、總括的測值與計算值的比較。

On the Operational Storm Surge Model in the United States

Jye Chen

National Weather Service

Abstract

In the recent years, the operational storm surge model in U. S. has reached a mature stage. The model, referred as SLOSH (Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes) , is capable of portraying the surge flooding conditions, such as the intrusion of seawater into bays and rivers, overtopping levees, and over-land flows. From the past years, the analyzed data after the storm event has shown the model's reliability in surge computations . However, because today's storm track forecasts lack the needed accuracy, it is unwise to rely on a single track forecast for the storm surge forecast. Therefore, this model has been used as studying tool on evacuation planning instead, so that the concerned agencies can effectively perform the disaster prevention operations.