

應用 GPS 在測波之初步研究

饒國清¹ 鄭志維¹ 林演斌² 施孟憲³ 高家俊⁴

¹成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生

²成功大學近海水文中心副理

³成功大學近海水文中心研究助理

⁴成功大學水利及海洋工程學系教授

摘要

本文依據張(2007)自 GPS 量測之浮標運動訊號中直接分離出波浪運動訊號，推求波浪位移變合理論，進一步延伸探討 GPS 測波之可行性，將 GPS 測波計加裝在鵝鑾鼻、七股、龍洞資料浮標與其加速度計加以比較，並考慮安裝載台及位置等因素，逐一探討 GPS 之作業化可行性。經現場測試結果，整體而言 GPS 測波計與加速度計測波儀示性波高相關性良好，其相關係數皆達 0.97 以上，而平均週期相關性略受到使用測計不同影響，其相關性約在 0.88~0.92，當安裝載台不同時，兩種測計平均週期相關性受影響程度變大，其相關性約在 0.79，而波浪超過 3m 時，兩種測計相關性略受影響，其相關性約在 0.85~0.86，但是 GPS 安裝位置不同時，則波浪量測數據影響不大。由分析比對結果，初步證實以 GPS 採用本文分析理論在海上測波之有其可行性。

關鍵詞：GPS、資料浮標、相關性

Preliminary study on application of GPS for Wave Measurement

Kuo-Ching Jao^{*} Chih-Wai Cheng Yen-Pin Lin Mon-Shen Shi Chia-Chueng Kao

^{*}Ph. D student, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

This paper applies the method of Chang's(2007) GPS analysis wave to discuss the possibility of GPS to measure wave. The GPS sensors and accelerometers are used on the data buoys, including Eluanbi, Cigu and Longdong 2.5m data buoy and Cigu 1.8m data buoy. We use correlation to consider the following factors, including sensor category, wave height, data buoy size and sensor height. We get the preliminary results, average wave period is affected by sensor category, wave height and data buoy size, and significance wave height is only affected by wave height. Because their correlation values are exceeding 0.79, so the correlation of these results are still high. According above-mentioned, we get the preliminary results, GPS is a good tool to apply on wave measurement.

Keywords: GPS; Data buoy; Correlation

一、前言

氣象對於日常生活有著密不可分關係，海上氣象則是對四面環海的台灣更是值的重視課題，而波浪資訊是海上氣象中尤為重要研究對象之一，舉凡海洋工程之規劃、施工、營運與維護、離岸資源調查、海水遊憩活動進行與航行安全等皆需波浪資訊。現場觀測是得到波浪資訊最直接的方法，常見波浪觀測儀器設備有資料浮標、水壓式波浪計及超音波波高計等，而資料浮標測波是目前國際上最普遍使用海洋波浪觀測載台，且主要多以加速度測波為主，但是此法在數據分析上頗為複雜，是否有更好的波浪觀測方法一直是一個重要的課題。

1967 年美國政府將全球定位系統 (Global Positioning System, 簡稱 GPS) 解密釋出，提供民間使用後，立即引起大地測量學者的研究與應用(曾清涼等, 1999)[5]。在 GPS 定位技術上，不論是軟體或硬體的開發，都有著迅速的發展，尤其是應用於精密大地測量的數據採集上，使得測量方法有了極大的變革(王廣運等, 1988)[1]。經由這幾年的研究及實測數據證實，在一般的控制測量應用方面，能滿足公分等級的需求(曾清涼等, 1988)[2]。

將 GPS 技術應用於海上波浪觀測，是否能夠達到觀測精度為一值得探討的議題，就國際上的研究概況而言，應用 RTK-GPS 量測海嘯之水位變化，與當地潮位站量測資料進行比較，從分析結果可知 GPS 水位測值與潮位站資料的趨勢一致(Kato, 2001)[9]；(Fujita, 2004)[12]。以 RTK-GPS 浮標觀測沿海波浪、潮與海嘯(Nagai, 2003)[10]；用 RTK-GPS 與加速度計推算之波高進行比較，兩者推算之波高具有高度相關(Jean, 2003)[11]。然 RTK-GPS 有其限制，當 GPS 基準站與接收器之間的距離增加，大氣誤差影響增加，使得接收器與基準站距離約 6-10 公里之內才能達到公分級精度(楊名, 1997)[4]，使 RTK-GPS 測波系統只能應用於沿海海域，將此技術應用於深海區域，量測精度將大幅下降而不符合實際需求。

為改進 RTK-GPS 測波系統與基準站之間距離的限制，Hou 提出 Velocity Integration GPS，簡稱 VI-GPS 法(Hou, 2006)[13]，其方法係將衛星速度與位置資料輸入進行繁雜的計算，自 GPS 訊號中去除衛星運動的因素，然而衛星速度資料無法即時取

得，僅能進行事後追算，且尚未解決低頻雜訊的影響，並不很實用。為克服這項缺點，張(2007)依據海面上波浪頻率範圍的特性，應用數據分析技巧，發展一套新的方法，自 GPS 量測之浮標運動訊號中直接分離出波浪運動訊號，推求波浪位移變化。但是其觀測波浪僅止於 2.63m 以下波浪，本文將引用研究方法，延伸其 GPS 現場測波可行性範圍研究，探討主題包括大波與小波、不同觀測載台及不同觀測位置等因素對於 GPS 在波浪觀測方面之影響。

二、GPS 測波理論

本文引用張(2007)測波理論，利用衛星為等速運動的物體，與波浪在水氣交界面上呈週期性運動的特性明顯不同原理，將卜勒頻率偏移時系列作頻譜轉換，在頻率域上二者的能量範圍是完全分開的，運用高通濾波(high pass filter)的技巧可在頻譜上濾除衛星運動的低頻能量，從而獲得波浪的資訊。

頻譜由衛星與接收器的相對速度之自相關函數的傅立葉轉換求得，自相關函數如下式表示：

$$R_{ii}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} V_i(t) V_i(t + \tau) dt \quad (1)$$

$V_i(t)$ 是衛星與接收器的相對速度時系列， $i = 1, 2, 3$ ，數字分別代表垂直、東西及南北向。將式(6)經傅立葉轉換可得下式：

$$C_{ii}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ii}(t) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (2)$$

$V_{ii}(f)$ 為衛星與接收器之相對速度譜，其為相對速度在某頻率範圍內所含之能量，運用高通濾波(high pass filter)保留波浪運動速度的能量，如下式表示：

$$C_{ii}(f) = V_{ii}(f) \cdot H(f), \quad H(f) = \begin{cases} 0 & f > B, f < A \\ 1 & A \leq f \leq B \end{cases} \quad (3)$$

$C_{ii}(f)$ 為波浪速度譜， $H(f)$ 為 high pass filter function， A 、 B 分別為頻率的上下限，本文引用美國國家海洋暨大氣總署的標準，海洋波浪能量頻率範圍為 0.03~0.4Hz， $A = 0.03$ 、 $B = 0.4$ 。

以波浪水粒子之垂直、東西與南北向速度計算交錯譜，配合有限傅立葉級數法計算方向波譜如式(4)：

$$S(f, \theta) = a_0(f) + \sum a_n(f) \cos n\theta + b_n(f) \sin n\theta$$

(4)
一維波譜 $S(f)$ 可由方向波譜對方向積分求得：

$$S(f) = \int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) d\theta = C_{11}(f) / (2\pi f)^2 = a_0(f) \pi \quad (5)$$

三、數據分析流程

根據 GPS 輸出之垂直速度推算波浪資訊之分析流程如下：

1. 資料品管

當衛星發生偏移或訊號無法接收時，GPS 輸出之時序列出現一整段往上或往下偏移的現象（GPS Signal Loss）。海上實際觀測亦發生 GPS Signal Loss，此現象為 GPS 與加速度器推算之示性波高的差異來源之一。偵測與濾除 GPS Signal Loss 時段，將發生的時段濾除，保留真正屬於波浪垂直速度的訊號，進行波浪資訊的分析。

2. 利用傅立葉轉換分析法計算浮標速度譜

將品管後垂直速度資料利用傅立葉轉換分析法計算浮標速度譜，參考第二節公式(2)所示。

3. 原始速度譜平滑

由步驟(2)得到的是譜的粗值，通常採用 f_r 左右各 p 個（共 $2p+1$ 個）粗譜值的算術平均值代表頻率 f_r 處的譜值，即取

$$S(f_r) = \frac{1}{2p+1} \sum_{i=-p}^p S_p(f_{r+i}) \quad (6)$$

其中 p 的選取是個複雜的問題，一般建議採用（俞，1999）

$$p = N/80 \sim N/160$$

4. 計算一維水位譜

速度譜保留波浪能量後計算一維水位譜：由於實際海浪波譜在高頻部份之能量甚小，以美國國家海洋暨大氣總署資料浮標中心標準擷取 0.03-0.4Hz 頻率範圍能量計算一維水位譜，每 0.01Hz 儲存一個值，共計 40 個值。

5. 計算示性波高與平均週期

示性波高推算採用 $H_s = A\sqrt{m_0}$ ，其中 A 選擇 3.8（Goda，1970）；平均週期推算 $\bar{T} = 2\pi\sqrt{m_0/m_2}$ 。 m_0 與 m_2 分別為一維波譜能量之零次矩與二次矩。

6. 推算方向波譜

由 GPS 三軸速度推算方向波譜

四、海上測試與分析

為探討 GPS 海上觀測之可行性，本文將 GPS 掛載於直徑 2.5m 碟型資料浮標及直徑 1.8m 小型浮標上進行測試。碟型資料浮標呈如圖 1，其載台較大除了波浪觀測外上能提供其他海氣象觀測，如海流、風速風向、氣壓、氣溫及水溫等，本類型浮標在垂直及側傾方面均具有較高的隨波性（鄧，1991）[3]，浮標內原測波裝置為加速度計，加速度計量測波面水體的垂直加速度變化與傾角計量測波面的傾度變化，分析後可得到波浪資訊（Chuang, Z. H., et.al., 1998）[8]；（邱，2001）[6]。小型浮標如圖 2，由於載台較小，只要是以波浪觀測為主。波浪觀測作業每一小時乙次，每次觀測時間 10 分鐘。

資料浮標為中央氣象局及水利署之測站，說明如下：

1. 鵝鑾鼻浮標(2.5m 碟型)設置於屏東縣恆春鎮墾丁香蕉灣南方 3 公里水深 40 公尺處(如圖 3)。本文收集自 96 年 9 月 20 日至 97 年 3 月 31 日，浮標加速度計量測之波高、週期、波向與 GPS 量測速度資料，總共 3918 筆。
2. 龍洞浮標(2.5m 碟型)設置於台北縣貢寮鄉龍洞遊艇港外海，離岸約 1.0 公里，水深約 30 公尺處。(如圖 3) 本文收集自 96 年 10 月 26 日至 97 年 4 月 30 日，浮標加速度計量測之波高、週期、波向與 GPS 量測速度資料，總共 2753 筆。
3. 七股浮標(2.5m 碟型)設置於台南縣七股鄉七股頂頭額沙洲外海約 2.5 公里水深約 18m 處。(如圖 3) 本文收集自 96 年 11 月 14 日至 96 年 11 月 27 日，浮標加速度計量測之波高、週期、波向，總共 231 筆。
4. 七股小型浮標設置於七股浮標旁水深約 18m 處(如圖 3)。本文收集自 96 年 11 月 14 日至 96 年 11 月 27 日，浮標兩組 GPS 量測速度資料，各總共 231 筆。

將上述測試資料討論如下：



圖 1. 2.5m 碟型浮標測計裝置



圖 2. 1.8m 小型浮標測計裝置

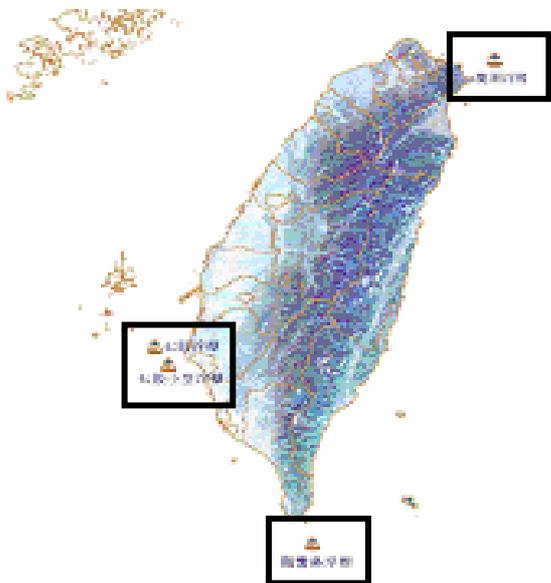


圖 3. 本文所分析的測站之分布位置

4.1 大波與小波觀測探討

本節依據波高大小來探討 GPS 與加速度觀測波高之相關性及差異性，波浪在 3m 為分界，3m 以下為一般性波浪範圍，3m 以上(含)為大波範圍，研究海域台灣西南近海之鵝鑾鼻浮標及東北角海域之龍

洞浮標，其中鵝鑾鼻浮標資料收集的波高未滿 3m 有 3866 筆，超過 3m 有 52 筆，大波發生在 96 年 10 月 4 日至 7 日柯羅莎颱風影響期間，龍洞浮標資料資料收集的波高未滿 3m 有 2613 筆，超過 3m 有 140 筆，大波主要發生在 96 年 11 月 26 日至 28 日米塔颱風影響期間。

鵝鑾鼻浮標測試期間由加速度計與 GPS 所測到之示性波高相關性達 0.97，平均週期相關性達 0.88；龍洞浮標測試期間由加速度計與 GPS 所測到之示性波高相關性達 0.98，平均週期相關性達 0.92，所以此兩種不同觀測方法波高相關性很高，而週期相關性雖仍是接近 0.9 高相關標準，但已略有受到觀測儀器不同影響。此外從兩種測計比較其差異比，鵝鑾鼻浮標上之示性波高及平均週期差異值分別為 9.5%、10.1%，龍洞浮標上之示性波高及平均週期差異值分別為 5.9%、6.6%所以此結果也應證平均週期受到不同測計影響較大。

進一步分析此兩海域在大波時相關性，鵝鑾鼻浮標測試期間 3m 以上(含)為大波之波高由加速度計與 GPS 所測到之示性波高相關性達 0.85，其差異比 7.0%；龍洞浮標測試期間 3m 以上(含)為大波之波高由加速度計與 GPS 所測到之示性波高相關性達 0.86，其差異比 5.4%。所以在 3m 以上(含)為大波之適性波高相關性仍是接近 0.9 高標準，而其差異比均較小波時略小，整體而言在大波時略受到觀測儀器略不同影響測值。

4.2 不同載台觀測探討

本節將依據 GPS 搭載浮標載台不同來探討 GPS 觀測波浪之相關性及差異性，載台分為兩種類型，一種是 2.5m 碟型浮標，一種是 1.8m 發泡材質小型浮標，本節研究海域台灣西南近海之台南縣七股海域，由圖 10 可知七股浮標加速度計與七股小型浮標 GPS 之示性波高相關達 0.98，其差異比 7.7%，圖 11 可知示性波高相關達 0.79，其差異比 6.7%，所以觀測載台不同所測得示性波高相近，但平均週期會受到載台不同而略有影響。

4.3 不同安裝位置觀測探討

本節將依據 GPS 安裝浮標高度位置不同來探討 GPS 觀測波浪之相關性及差異性，本節探討例子是安裝在七股小型浮標上之兩組 GPS，其中第一組 GPS

高度 40cm (如圖 2)，而第二組 GPS 高度為 130cm，較接近 2.5m 浮標 GPS 高度(如圖 2)。

比對結果兩組之示性波高相關達 0.99，平均週期相關性達 0.96，所以 GPS 安裝位置不同並不會造成對波浪觀測結果影響。

表 1. GPS 與加速度計推算之測值的差異

比較測站/測計	示性波高的差異比(%)		平均週期的差異比(%)	
	3m 以下	3m 以上(含)	3m 以下	3m 以下(含)
鵝鑾鼻資料浮標 GPS 與加速度計	9.5%	7.0%	10.0%	7.1%
龍洞資料浮標 GPS 與加速度計	6.0%	5.4%	6.5%	8.2%
七股資料浮標加速度計與小型浮標 GPS	7.7%	-	6.7%	-

(說明) 差異比 = $\frac{\text{GPS 測值} - \text{加速度計測值}}{\text{加速度計測值}}$

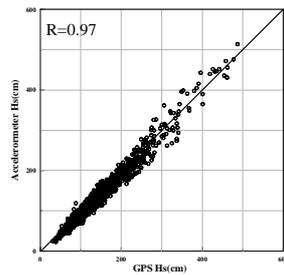


圖 4 鵝鑾鼻浮標加速度計與 GPS 之示性波高相關性比較

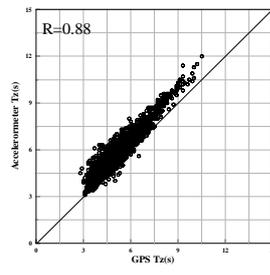


圖 5 鵝鑾鼻浮標加速度計與 GPS 之平均週期相關性比較

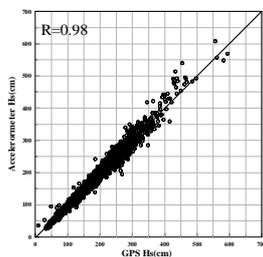


圖 6 龍洞浮標加速度計與 GPS 之示性波高相關性比較

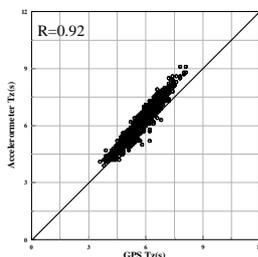


圖 7 龍洞浮標加速度計與 GPS 之平均週期相關性比較

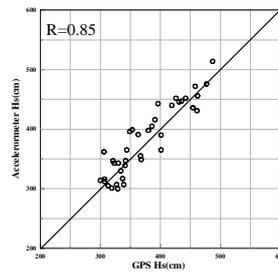


圖 8 鵝鑾鼻浮標加速度計與 GPS 之示性波高相關性比較(3m 以上大波浪)

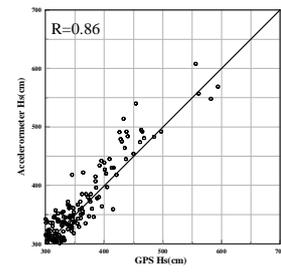


圖 9 龍洞浮標加速度計與 GPS 之示性波高相關性比較(3m 以上大波浪)

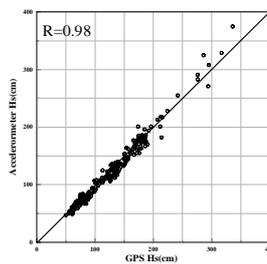


圖 10 七股浮標加速度計與七股小型浮標 GPS 之示性波高相關性比較

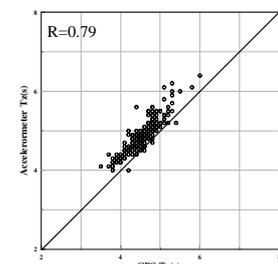


圖 11 七股浮標加速度計與七股小型浮標 GPS 之平均週期相關性比較

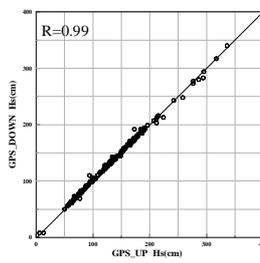


圖 12 七股小型浮標兩組 GPS 之示性波高相關性比較

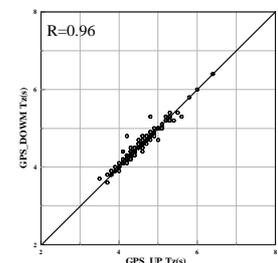


圖 13 七股小型浮標兩組 GPS 之平均週期相關性比較

五、結果與建議

本文依據張(2007)自 GPS 量測之浮標運動訊號中直接分離出波浪運動訊號，推求波浪位移變化理論，進一步探討 GPS 測波之可行性，將 GPS 測波計加裝在資料浮標與現行資料浮標普遍使用加速度計加以比較，收集時間接近半年資料，並以台灣東北及西南海域之浮標測站及七股小型浮標等測站，測試結果的到以下初步結論：

1. 資料浮標上安裝 GPS 測波計與現行資料浮標普

- 遍使用加速度計，在量測示性波高時整體相關性良好，其相關係數皆達 0.97 以上，但在示性波高超過 3m 大波浪波高其相關性就受到測計不同影響，測試結果其相關性約在 0.85~0.86 左右。
- GPS 測波計加裝在資料浮標與現行資料浮標普遍使用加速度計在量測平均週期時整體相關性略受到測計不同影響，測試結果其相關性約在 0.88~0.92 左右。
 - 在安裝載台不同時，比較兩種不同測計測波特性，以 GPS 測波計加裝置在七股小型浮標時，與鄰近七股資料浮標加速度計比較，示性波高之整體相關性與安裝在同一載台鵝鑾鼻資料浮標時相近，其相關係數達 0.97~0.98，而平均週期則明顯受到量測載台不同影響，鵝鑾鼻資料浮標平均週期相關性為 0.88，七股海域不同載台測得平均週期相關性為 0.79。
 - GPS 測波計安裝高度不同時，其高低不同位置所測得，示性波高及平均週期相關性皆很高，分別為 0.99、0.97，所以故以本測示為例，GPS 安裝高度不同，並不影響波浪量測結果。

由以上可了解，以資料浮標加裝 GPS 測波會與傳統資料浮標加速度計測波結果相當，其相關性皆達 0.79 以上，但差異比仍達 10%，建議後續可在進一步將 GPS 測波與傳統加速度計測波略有不同之處，再加以改善，以求得更高相關性及較小差異比，讓 GPS 測波能達到作業化程度標準內(相關性 0.9 以上及差異比 5%以內)。

六、致謝

感謝水利局及氣象局提供浮標載台及籍觀測資料，讓本研究能順利完成，特此申謝。

七、參考文獻

- 鄧中柱(1991)“浮標系統與工程”，*資料浮標研討會論文集*。
- 楊名 (1997)，公分級 GPS 衛星即時動態定位系統，*測量工程*，第三十九卷，第四期，第 1-18 頁。
- 王廣運等(1988)，「GPS 精密測地系統原理」，測繪出版社，北京。
- 曾清涼、余至義、林宏麟(1988)，「公分及精度 GPS 衛星測量研究(I)」，*行政院國家科學委員會 79 年度專題研究報告*，國立成功大學測量工程學系，台南。
- 曾清涼、儲慶美(1999)，「GPS 衛星測量原理與應用」，台南。
- 邱銘達(2001)，「資料浮標量測波高波向準確度提昇研究」，*國立成功大學碩士論文*。
- 張育璋、林演斌、林清睿、高家俊、董東瑾(2007)、「GPS 測波系統研發」，*第二十九屆海洋及海岸工程研討會論文集*，第 809-814 頁。
- Chuang, Z.H., Kao, C.C., Lee, B.C., (1998). “The Development of Operational Data Buoy System in Taiwan.” *International Conference on Marine Disaster: Forecast and Reduction. Beijing, China.*
- Fujita, T., Terada, Y., Nagai, T., and Kato, T., (2004).” A DEVELOPMENT OF GPS WAVE, TIDE AND TSUNAMI METER”, *Workshop on Wave, Tide Observation and Modelings in the Asian-Pacific Region, 2004.*
- Goda, Y., (1970). Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation, Port and Harbour Reserch Institute, Report 9, No. 3, pp. 3-57.
- Hou, D., Hamada, M., Yoo, Y., and Kouguchi, N., (2006).” Evaluation Test Result on Wave Direction Measurement Using GPS Buoy”, *Navigation(Tokyo) VOL.NO.163:44-47.*
- Jeans, G., Bellamy, I., de Vries, J.J., van Weert, P., (2003).” Sea trial of the new Datawell GPS direction waverider”, *Proc. Of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology.*
- Kato, T., Terada, Y., Itoh, T., Nagata, S., Fujita, T., Abe, T., Miwake, T., Nagai, T., Koshimura, S., and Miyazaki, S., (2001). “A new tsunami detection system using RTK-GPS in Ofunato city”, *Northeastern Japan, Proc. Of IUGG 2001*
- Nagai, T., Ogawa, H., Terada, Y., Kato, T., and Kudaka, M., (2003). “Offshore wave, tsunami and tide observation using GPS buoy”, *Proceedings of Annual Meeting of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers(2003), Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 14, 137-142*