

海事工程可工作日分析之探討

朱宗蔚¹ 錢樺² 高家俊³ 莊士賢⁴

摘要

工程專案中，工期的控制是施工中極其重要的一項考慮因素，其中以受天候影響之可工作日數最難以準確估算，海事工程較陸上施工要承擔更多天候影響的不確定風險。本文研究目的在建立一可工作日數分析方法，以估算海事工程可工作日數。本文應用龍洞海域實測海氣象資料，分別探討影響因素風速、波高及過繼時間對可工作日數之影響，並從其中估算得可工作日數。此分析方法可協助工程人員進行資源配置、工項調整等工作，以達到控制總工期的目標，預期可成爲日後海事施工工期規劃之參考。

The Estimation of Possible Working Days in Maritime Engineering

Zong Wei Zhu¹ Hwa Chien² Chia Chuen Kao³ Laurence Z. H. Chuang⁴

ABSTRACT

In a construction project, it is very important to control the working duration, in which the working days effected by the weather are hardly to be estimated. Maritime engineering are even more affected by the climate. In the paper, it is the purpose to establish a method of estimating the possible working days in the construction planning. In the paper, so as to gain accurate estimations of the influence of the different facts such as wind speed, wave height and the duration are discussed both separately and integrately a procedure of the possible working time from the influence of single fact is developed.

一、前言

在工程專案中，工期的控制是工程中極其重要的一項因素，一般工程合約訂有高額的逾期違約罰款，若不能準確的預估各作業的工期，將使總工期的控制非常困難。相對的，工期若能準確的預估，可減少資源閒置或放置，提高工作效率與生產力。如何使工程在預定的工期內完成是工程成功與否的主要指標，也是施工管理的主要課題。

工期是由工程排程人員根據以前工程經驗，以一般情形的資源投入情況設定工期，照這樣推算出的總工期與合約工期比較，若高於合約工期，則針對可縮短總工期的作業項目多投入些資源去縮短工期，重複排程直到預估的工期在可接受的範圍爲止。這種傳統做法存在著一個盲點，就是工程人員設定的工項工期中，包含其對天候影響的預估在內；但天候因時因地不同，此種人工推估方式誤差可能很大。這種由於工程專案的單一性及複雜性，導致工程人員的經驗不一定適用的情形，可說是營建管理上的一大挑戰。針對上述的盲點去探討，可發現其實主要的原因有二點：

1. 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士班研究生
2. 國立成功大學水利及海洋工程研究所博士班研究生
3. 國立成功大學水利及海洋工程研究所教授
4. 國立成功大學近海水文中心副主任

1. 作業項目受到天氣影響的程度大小並不一定。
2. 氣候因時(季節)因地(工地所在地)有其不確定性。

以上二點因素往往不是工程人員所能事先考慮，但又是工程實際進行所會遭受到之情形，因此施工規劃者對於施工項目中，受到天候影響之可工作日應作慮詳細。

另一方面，目前國內工程合約已漸漸採用日曆天方式定義工期，與工作天不同的是，營造廠必須承擔更多天候影響工程之不確定風險，因此在工期控制上除了管理上的問題外，必須特別注意天候之不確定因素。這種不確定的因素直接之影響可能造成營造廠對於總工期預測之錯估，間接之也就使得資源之投入情況及配置產生錯誤，以至於最後使工期無法如期完工，造成莫大之損失。

陸上工程與海事工程兩者均受天候因素影響，其中又以海事工程所受環境之影響更為強烈，因此在施工工期之估算上，更需有明確之施工天數。估算方法相對於陸上施工主要差異在海事工程之不確定因素包含了波高大小、風速大小、海流大小、降水多寡、結冰期等，而陸地施工多僅深受降水多寡此因素之影響。

本文研究目的在建立海事施工工程規劃，可工作日數分析之方法，估算各種影響因素之發生機率特性，推導出可工作日數，以利工期之規劃。期望能協助工程人員進行資源重配置、工項調整、非天候因素管理及要徑之留意等工作，以確實達到控制總工期之目標。

在相關前人研究方面國內目前對於合理工期計算之研究並不充裕，目前工期耽延與計算上之爭議，通常是以仲裁的方式，或是經由業主與承包商彼此之間的妥協與退讓來解決。基於工程上合理工期計算之懷疑，前人研究多著重於合理工期於施工之推算即責任歸屬之探討。例如：國內學者王慶煌（1992）曾對於工期與成本之間進行最佳工期的推理演算，郭斯傑（1998）對所有權及工程進度耽延之責任歸屬進行探討，姚乃嘉（1997）則以專家系統的方式進行建築工程之進度排程研究。徐（1977）利用 Markov Chain 的理論和時間數列的分析方法，統計海上作業的非工作天數，並求出其機率極值，以提供未來三年內之非工作天月總數之預測值。郭（1998）指出天候對工期影響之層面，分直接影響與間接影響兩方面考量：

（一）直接影響：直接影響指的是直接造成生產力降低的現象，而其影響力則持續到天候因素結束後停止。（二）間接影響：間接影響指的是天候因素停止後，許多作業生產仍然無法完全回復正常，其影響力甚至可以持續至數天，造成這種現象的原因主要有：（1）天候因素造成的影響造成人員或機具移位施作不便。（2）天候因素造成的積水、潮濕使得作業項目無法施作。（3）進行中的作業或材料受潮或受損使得作業無法進行。

本文僅就天候直接影響方面提出海事工程可工作日數之分析方法。

二、影響海事施工的因素

台灣四面環海，人類與海的接觸日漸頻繁，各種的海上施工日漸增加，施工工期日求考量精細化。海事施工項目大致可分陸地施工與海上施工兩部分（湯麟武,1996）：

（1）陸地施工：包含了採砂敞開闢、工程用地整地、施工道路、通棧與堆貨場、道路與排水系統、給水設施…等。（2）海上施工：包含了工作船渠興建工程施工工程、沉箱渠工程、浚填覆蓋工程、挖泥工程、拋時堤工程、沉箱合成堤工程、防砂堤工程、基樁施工工程、棧橋式碼頭工程、沉箱式碼頭工程、外廓工程…等。

海上施工與陸地施工主要差異在於施工機具的不同。海上施工所使用均屬大型機具，且並無穩定的基礎可供架設，機具多安置於船舶上，例如：吸管式挖泥船、抓斗船、鏟杓挖泥船、鑿岩船、水中岩盤開炸船…等等。由於船舶傾斜、伏仰的運動直接影響施工機具操作的穩定度，是造成海上施工作業困難的主要原因。此點可由兩個方面加以說明：一、船舶耐海性：在海上施工時，有大小不同的施工船舶，每一艘船舶對於海況條件的承受程度不同，因此船舶本身是否能耐得住海況，是施工與否的重要因素。二、施工精度考量：另一方面，即便是船舶能承受風浪的侵襲，但不可避免地必定搖晃不穩定，只要船舶受影響，對於施工精度就會受到影響，尤其在拖放沉箱作業等等。歸納上述兩點，船舶施工時的穩定性，會受到不同船舶的承受力，以及施工精度的要求，而決定是否能施工。

依據港灣指出，船舶受到風連與波浪過大時，其施工的過程應予以停止。譬如：船舶在海上拋石時，其波高條件為小於 1m 以下；在整平、整波、吊方塊、填充沉箱波高時，其波高條件就必須小於 0.8m，風速條件就必須小於 6 級；拖放沉箱時波高需小於 0.5m，風速條件就必須小於 6 級。不同的海況，會影響船舶的施工情況。前人文獻中，曾對波高對於海上施工的影響，做出可工作日數的推算，而本文所考量的因素除了針對波高影響之外，亦針對兩項長期同時影響的因素，探討可工作日數所受的影響。當考慮海事施工時間延時，本文進一步應用條件機率原理加入探討不同過繼時間對可工作日的影響。

三、可工作日數之估算

3.1 單一因素的影響

考量單一因素對於可工作日數之影響時，本文視可工作日數為總工期與可工作機率的乘積。如式 (1)。

$$N_w = N_T \times P_w \quad (1)$$

式中 N_w ：可工作日數， N_T ：總工期日數， P_w ：可工作機率。可工作日數的決定可由可工作機率的大小決定，以下將針對可工作機率之計算進行說明。其可工作機率的推得，為經由累積機率推算得，在本文中所考量的累積機率是指所有小於某一單一因素門檻下的累積值，當所考慮的單一因素為風速時，其累積機率可由表示式 (2) 中算出。

$$P_w(U) = \sum_0^U P_v(U) \quad (2)$$

可工作機率=風速小於某一給定風速下的機率。

$P_w(U)$ ：任意風速小於某一給定風速下的機率。
 $\sum_0^U P_v(U)$ ：所有小於給定風速的累積機率推算式子。
 U ：任意風速， U' ：某一給定門檻風速。

可工作機率亦可從而得到。將可工作機率與總工期相乘時，即可算出可工作日數的多寡。相同地，若考慮的單一因素是波高時，其可工作日數可由表示式 (3) 得到，其可工作日的估算與風速的求法相同。

$$P_w(H) = \sum_0^H P_n(H) \quad (3)$$

可工作機率=波高小於某一給定波高下的機率。

$P_w(H)$ ：任意波高小於某一給定波高下的機率。
 $\sum_0^H P_n(H)$ ：所有小於給定波高的累積機率。
 H ：任意波高， H' ：某一給定門檻波高。

3.2 受波高與風速同時影響

由現場施工情形與施工船舶、機具使用限制得知，事實上，海上施工進行時，施工與否不是單純只受風速或波高的影響，而是受到風速與波高兩者同時的影響。在考量兩因素對可工作日數的影響前，可工作日數之計算為風速與波高的聯合機率。此聯合機率之計算如表示式 (4)。

$$N_w = N_T \times P_w \quad (4)$$

式中 N_w ：可工作日數， N_T ：總工期日數， P_w ：可工作機率。要先計算出單一因素的累積機率，在此累積機率與前文考慮單一因素所計算的方法一樣，得到個別累積機率，再加上兩單一因素之共變異係數與其個別標準差乘積的商數。

在此本文考量風速和波高影響，可先計算某一給定風速下的累積機率如表示式 (5)。

$$P_w(U) = \sum_0^U P_v(U) \quad (5)$$

$P_w(U)$ ：任意風速小於某一給定風速下的機率。
 $\sum_0^U P_v(U)$ ：所有小於給定風速的累積機率推算式子。
 U ：任意風速， U' ：某一給定門檻風速。
 與某一給定波高下的累積機率如式 (6)。

$$P_w(H) = \sum_0^H P_n(H) \quad (6)$$

$P_w(H)$ ：任意波高小於某一給定波高下的機率。
 $\sum_0^H P_n(H)$ ：所有小於給定波高的累積機率推算式子。
 H ：任意波高， H' ：某一給定門檻波高。

再計算風速與波高個別均低於某一門檻下，求得兩者交集之機率如表示式 (7)，利用此機率乘上總工期則可得到可工作日數。

$P_w(U) \cap P_w(H)$ 之決定：

$$P_w(U) \cap P_w(H) = P_w(U) \times P_w(H) + \frac{\text{cov}(u(U), w(H))}{\sigma_w(H) \times \sigma_u(U)} \quad (7)$$

$P_w(U) \cap P_w(H)$ ：任意風速小於某一給定風速下的機率與任意波高小於某一給定波高下的機率，兩者

交集之機率。 $w(U)$ ：可工作為某一給定風速之函數， $w(H)$ ：可工作為某一給定波高之函數。若假設 $A=w(U)$ ， $B=w(H)$ 時，A、B 兩者的共變異係數如式 (8)：

$$Cov(A,B)=E[(X_A-\mu_A)(X_B-\mu_B)]=E(AB)-E(A) \times E(B) \quad (8)$$

其中 $E(AB)$ 表示隨機變數 A、B 之積 AB 的期待值(或稱 A、B 之結合 2 次動差， $E(A)$ 、 $E(B)$ 表示 A 與 B 個別之期望值。式子中 $Cov(w(U), w(H))$ 除以 $\sigma_{w(U)} \times \sigma_{w(H)}$ 為無因次 $Cov(w(U), w(H)) / (\sigma_{w(U)} \times \sigma_{w(H)})$ 就統計觀點表示 $w(U)$ 、 $w(H)$ 相對程度之表現。

3.3 過繼時間的影響

基於海事施工需考慮工作連續性，只考慮風速與波高的聯合機率仍明顯不足。根據(Lawson & Abernethy, 1975)提出平均過繼時間(D)之觀念與計算，文中對於過繼時間之敘述為持續超過某一給定值時間的長短，在此本文考慮了風速和過繼時間以及波高和過繼時間，兩者對可工作日數的影響。考量風速之過繼時間和波高之過繼時間對可工作日數之影響，故決定可工作日數時，可工作機率的決定為某一給定風速值過繼時間的累積機率其表示式子如 (9)。

$$P_w(B)=P(U < U' | t_2=t') \quad (9)$$

U =任意風速， U' =某一給定風速。

t_2 =任意延時， t' =某一給定過繼時間。

與某一給定波高值過繼時間的累積機率如式 (10) 的聯合機率如式 (11b)，利用此聯合機率大小乘上總工期則可得到可工作日數如式 (12)。

$$P_w(A)=P(H < H' | t_1=t') \quad (10)$$

H =任意波高， H' =某一給定波高。

t_1 =任意延時， t' =某一給定過繼時間。

$$P_w = P_w(A) \cap P_w(B) \quad (11a)$$

$$P_w(A) \cap P_w(B) = P_w(A) \times P_w(B) + \frac{cov(A,B)}{\sigma_A \times \sigma_B} \quad (11b)$$

$P_w(A)$ ：任意波高小於某一給定波高 H ，發生時間超越過繼時間 t 的機率。

$P_w(B)$ ：任意風速小於某一給定風速 U ，發生時間超越過繼時間 t' 的機率。

$$N_w = N_T \times P_w \quad (12)$$

N_w ：可工作日數， N_T ：總工期日數， P_w ：可工作機率。

由於單獨討論過繼時間之影響，對於工程並無幫助，所以在討論兩者之交集前，需先認知過繼時間與風速和波高之交集的意義，以統計觀點而言，當樣本空間 S 含有 E_1 、 E_2 兩事件時，在 E_1 發生了(或發生事件已被保證)之前提下，同時 E_2 發生之機率，亦即 E_1 事件發生情況下， E_2 發生之機率，稱為條件機率。

過繼時間與風速、波高兩者均屬於條件機率的關係，因此可先計算風速、波高與過繼時間的條件機率，可表示如下：

$$Cov(A,B)=E[(X_A-\mu_A)(X_B-\mu_B)]=E(AB)-E(A) \times E(B) \quad (13)$$

其中 $E(AB)$ 表示隨機變數 A、B 之積 AB 的期待值(或稱 A、B 之結合 2 次動差， $E(A)$ 、 $E(B)$ 表示 A 與 B 個別之期望值。式子中 $Cov(A,B)$ 除 $\sigma_A \times \sigma_B$ 主要因機率為無因次，其次 $Cov(A,B) / \sigma_A \times \sigma_B$ 就統計觀點表示 A、B 相對程度之表現。

因此當考慮海事施工可工作日的大小時，其可工作機率會隨著所考量因素的多寡，分為單一影響因素、兩因素同時影響以及多考量過繼時間三者，其可工作日數的大小，可由所考量的因素，應用上述估算方法求得。

四、可工作日之分析方法應用於龍洞海域

4-1 資料來源

以下本文將以龍洞海域龍洞遊艇港工程為例，利用上述單一因素、兩兩因素、考慮過繼時間三種方法建立可工作日數分析。本文採用中央氣象局龍洞海氣象浮標所測得的資料，作為實測資料來源。龍洞資料浮標佈放於龍洞遊艇港外海，水深約 32 公尺處，座標為東經 121° 55' 28"，北緯 25° 05' 41"。龍洞浮標相關位置如圖 4-1 所示。

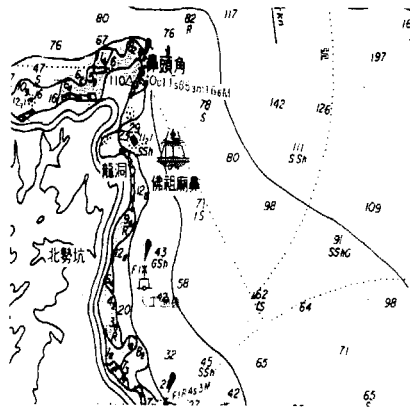


圖 4-1 龍洞海氣象資料浮標佈放位置

4.2 分析方法之應用

4.2.1 單一因素之影響

風速對於龍洞海域之影響，可由其風速月平均值和最大值如表一，表中風速有高達 24.6m/s，其次亦有 23m/s，大體而言影響可工作日的機率甚大。圖一為利用上述方法所得之風速分布機率組體圖。由上述式子中，將圖一代入(1)式中可得不同 U 的可工作機率，如圖二所示。圖二中蒲福風級 4 級時之累積機率的計算為圖十中 1 級機率加上 2 級機率加上 3 級機率加上 4 級機率而得。以實例而言，總工期日數為 100 天，當 $U=4$ 級陣風時，可工作的機率為 0.62，可工作的天數 = $100 \times 0.62 = 62$ 天。可由圖一查得 4 級陣風發生的機率頗高。

表 1 龍洞海域平均風速及最大陣風

龍 洞		
月份	平均風速值 (m/s)	最大陣風 (m/s)
88/01	9.63	17.4
88/02	6.26	8.6
88/03	8.21	18.5
88/04	7.52	17.0
88/05	6.88	15.8
88/06	5.79	24.6
88/07	5.30	16.0
88/08	5.78	17.4
88/09	7.10	21.8
88/10	7.75	23.0
88/11	9.03	20.6
88/12	10.69	19.9

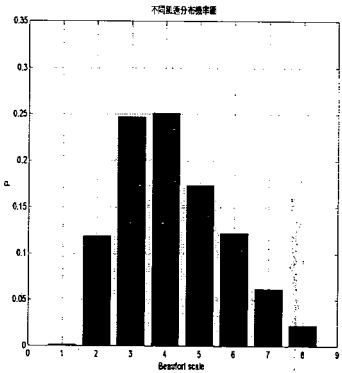


圖 1 龍洞海域風速發生機率圖

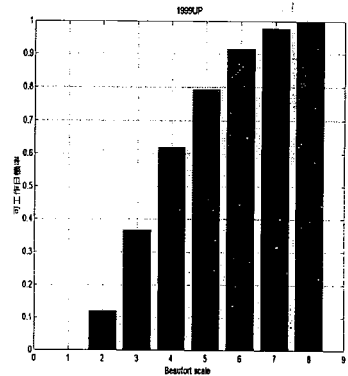


圖 2 龍洞海域可工作機率圖

考量風速影響可工作機率之後，文中亦指出具有季節性變波高。圖三為波高分布圖。

受波高影響的可工作日機率可由上述式子中，將圖三代入(3)式中可 H 的可工作機率，如圖四所示。圖中波高在小於 2 米下，可工作日數之計算是由圖三中小於 2 米的機率。以實例而言，總工期日數為 100 天，當 $H=2.5$ m 時，可工作的機率為 0.91，可工作的天數 = $100 \times 0.91 = 91$ 天。由圖四所得之圖為高斯分布，在高斯分布曲線中 $H=2.5$ 佔全部發生的機率為 0.07，期發生之機率並不高因此在考量單一影響因素波高時，設計 $H=2.5$ 時之可工作日的信賴程度高。

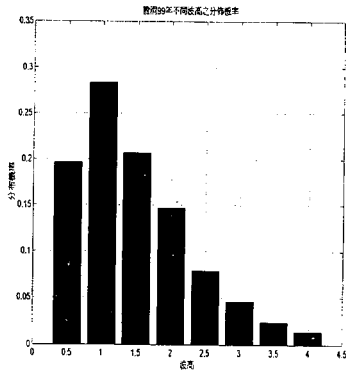


圖 3 龍洞海域波高分布機率圖

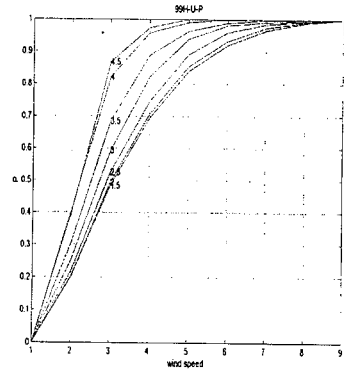


圖 5 龍洞風速波高分布機率

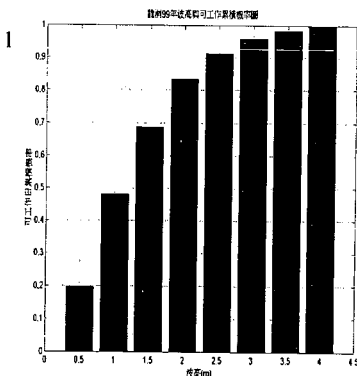


圖 4 龍洞海域可工作日機率

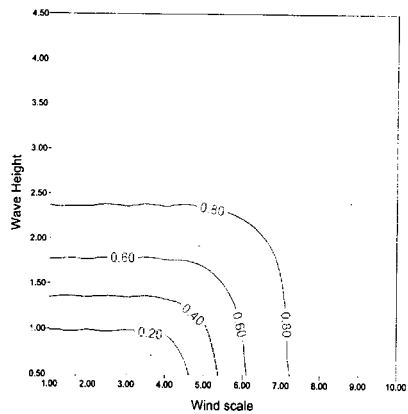


圖 6 龍洞可工作日之機率

4.2.2 風速和波高的影響

當施工進行時，不單純只受風速或波高的影響，而是受到風與浪兩者的影響，因此將龍洞資料代入上式所提之方法中，可得波高和風速的機率分布如圖五，以及可工作日之機率如圖六。

以先前所舉的例子來估算時，當 $U=4$ 級， $H=2.5m$ 時，查圖五可得其工作機率為 0.75，總工期仍是 100 時，可工作日為 $100 \times 0.75 = 75$ 天，與前面考慮單一因素影響時比較時，考慮風速之可工作天數為 62 天因此過於樂觀，而考慮波高時，可工作日數為 91 天過於樂觀，當考慮風速與波高聯合機率時，其可工作日數介於兩者之間較適用於施工工程，施工可信賴度與施工規劃較為可靠。

4.2.3 過繼時間之影響

由上述知幾乎所有的工程都需要有持續性的工作日數，才能順利完成工作進度。為了解風速過繼時間與波高過繼時間對海上施工工程的影響，將龍洞資料經由上式 (11) 和 (12) 可繪製出圖七與圖八，再經由式子 (10) 得圖九，由圖九可得龍洞遊艇港可工作日。以前文所舉的例子來估算可工作機率時， $H=1.5m$ ， $U=5$ 級， $t=24hr$ ，查圖九中過繼時間 24hr，得知工作機率為 0.6，總工期是 100 時，可工作日為 $100 \times 0.6 = 60$ 天。圖九中將海事施工時的影響因素—風速、波高兩者與過繼時間的關係繪製成一張圖，在圖中可工作機率的查得是將風速大小、波高大小以及工作連續的時數輸入，即可立刻得之，經由換算之後，可工作天數即可得到。

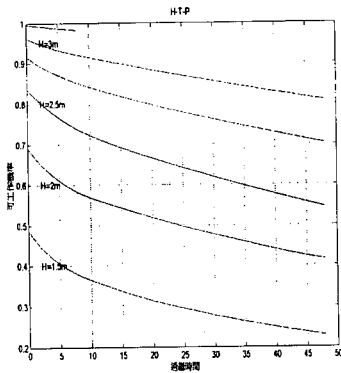


圖 7 龍洞波高過繼時間與可工作日之機率

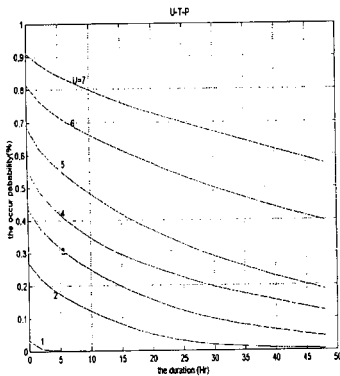
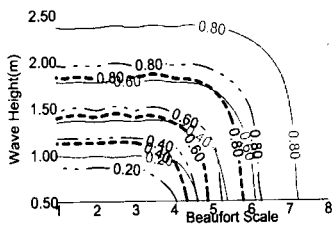


圖 8 龍洞波高過繼時間與可工作日之機率



---: 過繼時間 36hrs, ----: 過繼時間 24hrs, 實線: 過繼時間 0hrs。

圖 9 風速、波高、過繼時間三者與可工作日數機率

在海事港灣結構物設計標準中，施工的進行與當地海況條件有密切的關係，而本文中海況條件考慮風速、波高及過繼時間三者。若將現場施工情況

與此三者相互考慮時，三者對於外廓工程施工時影響的大小，可由現場海況資料推得，譬如施工的海況假定風速需小於 4 級風、波高需小於 1 公尺，而持續發生延時需大於 36 小時的發生機率時，可查圖九中延時 36hr 的虛線，即可得發生機率的大小為 0.4，當得到發生機率之後，將此發生機率和總工期（假定總工期為 100 天）相乘時，可推得在此海況下可工作的天數為 40 天。

風速、波高及所需的過繼時間長短，會因著不同的施工項目而有不同的可工作天數，將施工當時的海況與圖九使用時，可從圖九中得到工作機率的大小。查圖時，可先固定波高或風速，再代入另一風速或波高，再將兩者與過繼時間查圖，即可得到機率大小，將機率的大小乘上總工期即可得到可工作日數，可作為海上施工或其他經濟活動的參考。

五、結論與建議

為建立一海事工程可工作日數估算方法，本文分別探討風速、波高及過繼時間對海事工程可工作日數分析之影響，並以龍洞海域實測海氣象資料為例，估算其可工作日數。得到下列結論：

1. 考慮工程施工需連續進行，過繼時間是影響可工作日主要原因之一。以龍洞海域施工為例，6 小時的過繼時間，其可工作日機率之差異可達 20%，12 小時的過繼時間，其可工作日機率之差異可達 50%。
2. 本文將風速、波高和過繼時間三者，經由統計推論，建立一估算可工作日數之程序，由實測的風速、波高機率特性推得可工作日機率，並設計繪製成圖，提供專案規劃人員使用。

六、參考文獻

1. 郭斯傑(1998) "台北市公共工程合理工期計算模式之研究"，市政建設專輯研究報告第 277 輯。
2. 徐進華、梁乃匡(1977) "海上作業工作天數之統計及預測"，國立台灣大學海洋研究所碩士論文。
3. 王慶煌(1992) "編碼原則之整合評估與推廣運用"，內政部建築研究所籌備處。
4. 姚乃嘉(1997) "建造工地管理自動化作業流程之研究"，內政部營建署。
5. 湯麟武(1996) "港灣及海域工程"，中國土木水利工程學會。