

93-56-790

MOTC-IOT-92-H1BA03-3

貨櫃碼頭出租最適規模之研究



交通部運輸研究所

中華民國九十三年四月

93-56-790

MOTC-IOT-92-H1BA03-3

貨櫃碼頭出租最適規模之研究

著 者：朱金元

交通部運輸研究所

中華民國九十三年四月

貨櫃碼頭出租最適規模之研究

著 者：朱金元

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：台北市敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw/chinese/lib/lib.htm

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國九十三年四月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 150 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價： 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

三民書局重南店：台北市重慶南路一段 61 號 4 樓•電話：(02)23617511

三民書局復北店：台北市復興北路 386 號 4 樓•電話：(02)25006600

國家書坊台視總店：台北市八德路三段 10 號 B1•電話：(02)25787542

五南文化廣場：台中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

新進圖書廣場：彰化市中正路二段 5 號•電話：(04)7252792

青年書局：高雄市青年一路 141 號 3 樓•電話：(07)3324910

貨櫃碼頭出租最適規模之研究

交通部運輸研究所

GPN:1009301268

定價 元

交通部運輸研究所出版品摘要表

出版品名稱：貨櫃碼頭出租最適規模之研究			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號
	1009301268	93-56-790	92-H1BA03-3
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：朱金元 研究人員：謝幼屏、羅建明 聯絡電話：04-26587111 傳真號碼：04-26564418			研究期間 自 92 年 01 月 至 92 年 12 月
關鍵詞：船席使用率、船席最適能量、無因次指標 IND、等待因子法、擁擠度、碼頭規模、效益、效益比值、船席營運績效			
摘要： 本研究利用與等待系統有關之等待因子法($AWT/AST = 20\%, 30\%$)及與船舶成本、船載貨物時間成本、碼頭建設維護成本、裝卸機具購買維護成本等有關而又便於不同港埠間營運績效相互比較之無因次指標 IND，來計算分析不同船席規模時增加船席數對於相關效益指標之影響。效益分析指標分別採用：船席使用率變化量、使用率變化量百分比、船席能量、服務之船舶數、貨物減少之在港總成本等。 研究結果顯示：當船席規模由一座增加為二座時，其所獲得之效益最大；其次是由二座增加為三座；而在船席規模由三座增加為四座時，剛好為效益轉折曲線之頂點；當船席規模達到六或七座以上時，其每增加一座船席之效益增加有限並且趨於穩定。利用等待因子法與 IND 法所得出來之結果頗為一致。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
93 年 4 月	116		凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 限閱 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密【限】條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Optimal number of berths in container terminal operation			
ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009301268	IOT SERIAL NUMBER 93-56-790	PROJECT NUMBER 92-H1BA03-3
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chin-Yuan Chu PROJECT STAFF: Yu-Ping Hsieh, Chien-Ming Lo PHONE: 04-26587111 FAX: 04-26564418			PROJECT PERIOD FROM Jan. 2003 TO Dec. 2003
KEY WORDS: optimal berth occupancy, AWT/AST, optimal berth capacity, IND, operation performance, operation performance ratio			
ABSTRACT: This paper aims at studying the suitable operation scale number of berths in container terminal by adopting Performance Indicator (AWT/AST equals 20% and AWT/AST=30%, respectively) on the basis of queuing theory and on the IND indicator that comprises ship cost, cargo cost, construction cost and crane procurements and etc. Then the variance of berth occupancy, variance ratio of berth occupancy, berth capacity difference, number of ships served, savings of cargoes, etc., are calculated to determine the operation performance of expanding the number of berths. The results reveal that the expansion from one-berth scale to two-berth scale reflects the largest benefit of operation performance. The expansion from two-berth scale to three-berth scale shows the second largest benefit of operation performance. The turning point occurs at the expansion from three berths to four berths situation. If the number of berths in the terminal is over six or seven, the benefits of berth expansion would become more stable, and the variance of indicators comes to insignificant. In other words, the container terminal will reach the economic scale of operation when there are no fewer than seven berths in the terminal. The results based on performance indicator and the IND indicator is similar.			
DATE OF PUBLICATION April 2004	NUMBER OF PAGES 116	PRICE	CLASSIFICATION ☐ SECRET ☐ CONFIDENTIAL ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

貨櫃碼頭出租最適規模之研究

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
圖目錄.....	V
表目錄.....	X
第一章 前 言.....	1-1
第二章 等待理論.....	2-1
2.1 等待線系統結構.....	2-1
2.2 等待系統之表示方法.....	2-3
2.3 等待模式主要隨機變數間之關係.....	2-4
2.4 顧客到達數目之 Poisson distribution 及到達時間間隔之 Exponential distribution.....	2-4
2.4.1 單線 Poisson distribution 到達.....	2-4
2.4.2 到達時間間隔指數分佈.....	2-5
2.5 顧客服務時間分佈及服務率.....	2-7
2.6 (M/M/1：FCFS/ ∞/∞) 系統狀況.....	2-7
2.7 Gamma distribution 及 Erlang Distribution.....	2-13
2.7.1 Gamma distribution.....	2-13
2.7.2 Erlang distribution.....	2-15
2.8 貨櫃碼頭適用之等候模式分析.....	2-17
第三章 港埠系統評估指標.....	3-1
3.1 等候系統之參數.....	3-1
3.2 不同等候系統之評估指標比較.....	3-4
3.3 成本函數所構建之評估指標及其特性.....	3-18

3.3.1 成本函數的類型	3-19
第四章 碼頭營運績效分析	4-1
4.1 碼頭營運規模效益分析(等待因子法)	4-1
4.2 碼頭營運規模效益分析 (無因次指標 IND)	4-23
4.3 IND 計算案例	4-27
4.4 碼頭經營績效分析	4-43
第伍章 結論與建議	5-1
參考文獻	6-1

圖 目 錄

圖 2.1 單條等待線多條服務線系統.....	2-1
圖 2.2 等待系統主要變數關係圖.....	2-4
圖 2.3 指數分佈機率密度函數	2-6
圖 2.4 Gamma distribution 之機率密度圖形.....	2-14
圖 2.5 耳朗 (Erlang) 分佈隨 K 值增加的演變過程	2-16
圖 2.6 系統別與 Erlang distribution K 值關係圖	2-18
圖 2.7 高雄港各系統別貨櫃船到達 Erlang distribution K 值 演變過程.....	2-18
圖 3.1 不同船席規模(N)時使用率(ρ)與擁擠度(DC)之關係 ($M/E_k/N$) ; $k=1$; $N=1, 2, 3, 6, 10, 15, 20, 25$	3-6
圖 3.2 不同使用率(ρ)時船席規模(N)及擁擠度(DC)之關係 ($M/E_k/N$) ; $k=1$; $\rho=0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$	3-6
圖 3.3 $K=1$ 時使用率(ρ)與平均等待時間(W_q)之關係 ($M/E_k/N$) ; $k=1$; $N=1, 2, 3, 6, 10, 15, 20, 25$	3-7
圖 3.4 不同使用率(ρ)時船席規模(N)與平均等待時間(W_q)之關係 ($M/E_k/N$) ; $k=1$; $\rho=0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$	3-8
圖 3.5 $K=2$ 時使用率(ρ)與平均等待時間(W_q)之關係 ($M/E_k/N$) ; $k=2$; $N=1, 2, 3, 6, 10, 15, 20, 25$	3-9
圖 3.6 $K=\infty$ 時使用率(ρ)與平均等待時間(W_q)之關係 ($M/E_k/N$) ; $k=\infty$; $N=1, 2, 3, 6, 10, 15, 20, 25$	3-10
圖 3.7 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係($K=1$) ($M/E_k/N$) ; $k=1$; $N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$	3-11
圖 3.8 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係($K=2$)	

(M/E _k /N) ; k=2; N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	3-12
圖 3.9 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係(K=3)	
(M/E _k /N) ; k=3; N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	3-13
圖 3.10 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係(K=4)	
(M/E _k /N) ; k=4; N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	3-14
圖 3.11 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係(K=5)	
(M/E _k /N) ; k=5; N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	3-15
圖 3.12 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係(K=6)	
(M/E _k /N) ; k=6; N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	3-16
圖 3.13 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係(K=∞)	
(M/E _k /N) ; k=∞; N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	3-17
圖 3.14 各成本函數(TC _i)及年運量關係圖	
(M/E _k /N) ; k=3; N=8	3-24
圖 3.15 TC _i / ($\lambda \cdot U_s \cdot V$) 及年運量關係圖	
(M/E _k /N) ; k=3; N=8	3-24
圖 4-1a 船席使用率變化量分析(K=1)	4-4
圖 4-1b 使用率變化百分比(K=1)	4-4
圖 4-1c 船席能量倍數分析 (K=1)	4-5
圖 4-1d 船席數增加總效益比分析 (K=1)	4-5
圖 4-2a 船席使用率變化量分析 (K=2)	4-6
圖 4-2b 使用率變化百分比 (K=2)	4-7
圖 4-2c 船席能量倍數分析 (K=2)	4-7
圖 4-2d 船席數增加總效益比分析 (K=2)	4-8
圖 4-3a 船席使用率變化量分析 (K=3)	4-9
圖 4-3b 使用率變化百分比 (K=3)	4-9

圖 4-3c 船席能量倍數分析 ($K=3$)	4-10
圖 4-3d 船席數增加總效益比分析 ($K=3$)	4-10
圖 4-4a 船席使用率變化量分析 ($K=4$)	4-11
圖 4-4b 使用率變化百分比 ($K=4$)	4-12
圖 4-4c 船席能量倍數分析 ($K=4$)	4-12
圖 4-4d 船席數增加總效益比分析 ($K=4$)	4-13
圖 4-5a 船席使用率變化量分析 ($K=5$)	4-14
圖 4-5b 使用率變化百分比 ($K=5$)	4-14
圖 4-5c 船席能量倍數分析 ($K=5$)	4-15
圖 4-5d 船席數增加總效益分析 ($K=5$)	4-15
圖 4-6a 船席使用率變化量分析 ($K=6$)	4-16
圖 4-6b 使用率變化百分比 ($K=6$)	4-17
圖 4-6c 船席能量倍數分析 ($K=6$)	4-17
圖 4-6d 船席數增加總效益比分析 ($K=6$)	4-18
圖 4-7a 船席使用率變化量分析 ($K=\infty$)	4-19
圖 4-7b 使用率變化百分比 ($K=\infty$)	4-19
圖 4-7c 船席能量倍數分析 ($K=\infty$)	4-20
圖 4-7d 船席數增加總效益比分析 ($K=\infty$)	4-20
圖 4-8 使用率變化量比較($AWT/AST=20\%$).....	4-21
圖 4-9 使用率變化量百分比比較($AWT/AST=20\%$).....	4-21
圖 4-10 船席能量倍數比較($AWT/AST=20\%$).....	4-22
圖 4-11 總效益比較分析($AWT/AST=20\%$)	4-22
圖 4-12 總效益比值比較($AWT/AST=20\%$)	4-23
圖 4-13 港埠能量與 IND 關係圖($K=1$)	4-29

圖 4-13a	港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=1,2,3$)	4-30
圖 4-13b	港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=2,3,4$)	4-30
圖 4-13c	港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=3,4,5$)	4-31
圖 4-13d	港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=4,5,6$)	4-31
圖 4-13e	港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=5,6,7$)	4-32
圖 4-13f	港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=6,7,8$)	4-32
圖 4-13g	港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=7,8,9$)	4-33
圖 4-13h	港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=8,9,10$)	4-33
圖 4-14	港埠能量與 IND 關係圖($K=2$)	4-34
圖 4-14a	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=1,2,3$)	4-34
圖 4-14b	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=2,3,4$)	4-35
圖 4-14c	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=3,4,5$)	4-35
圖 4-14d	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=4,5,6$)	4-36
圖 4-14e	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=5,6,7$)	4-36
圖 4-14f	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=6,7,8$)	4-37
圖 4-14g	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=7,8,9$)	4-37
圖 4-14h	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=8,9,10$)	4-38
圖 4-15	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$)	4-38
圖 4-15a	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=1,2,3$)	4-39
圖 4-15b	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=2,3,4$)	4-39
圖 4-15c	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=3,4,5$)	4-40
圖 4-15d	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=4,5,6$)	4-40
圖 4-15e	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=5,6,7$)	4-41
圖 4-15f	港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=6,7,8$)	4-41

圖 4-15g 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=7,8,9$)	4-42
圖 4-15h 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=8,9,10$)	4-42
圖 4-16 港埠最適能量壽命所定義之三點示意圖.....	4-45
圖 4-17 擴建船席效益分析概念圖.....	4-45
圖 4-18a 船席最適能量分析($K=1$)	4-48
圖 4-18b 船席規模與 IND 關係分析($K=1$)	4-48
圖 4-18c 增加船席規模之效益分析($K=1$)	4-48
圖 4-19a 船席最適能量分析($K=2$)	4-49
圖 4-19b 船席規模與 IND 關係分析($K=2$)	4-49
圖 4-19c 增加船席規模之效益分析($K=2$)	4-49
圖 4-20a 最適船席能量分析($K=\infty$)	4-50
圖 4-20b 船席規模與 IND 關係分析($K=\infty$)	4-50
圖 4-20c 增加船席規模之效益分析($K=\infty$)	4-50
圖 4-21 不同 K 值之船席能量比較分析.....	4-51
圖 4-22 不同 K 值之 INDmin 比較分析.....	4-51
圖 4-23 不同 K 值之船席效益比較分析.....	4-51

表 目 錄

表 2.1 Poisson distribution 與二項式分佈計算比較.....	2-5
表 2.2 等候線系統有 n 個顧客之狀態分析.....	2-8
表 2.3 等候線無顧客之系統狀態分析.....	2-10
表 3.1 國內船舶到達分佈相關研究彙整表.....	3-2
表 3.2 船席規模(N)船席使用率(ρ)與擁擠度(DC)關係表.....	3-5
表 3.3 船席規模(N)船席使用率(ρ)與等待時間(W_q)關係表.....	3-7
表 3.4 船席規模(N)船席使用率(ρ)與等待時間(W_q)關係表.....	3-8
表 3.5 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表.....	3-9
表 3.6 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表.....	3-10
表 3.7 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表.....	3-11
表 3.8 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表.....	3-12
表 3.9 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表.....	3-13
表 3.10 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表.....	3-14
表 3.11 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表.....	3-15
表 3.12 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表.....	3-15
表 4.1 增加船席規模(N)之效益分析 ($M/E_k/N$, $k=1$).....	4-3
表 4.2 增加船席規模(N)之效益分析 ($M/E_k/N$, $k=2$).....	4-6
表 4.3 增加船席規模(N)之效益分析 ($M/E_k/N$, $k=3$).....	4-8
表 4.4 增加船席規模(N)之效益分析 ($M/E_k/N$, $k=4$).....	4-11
表 4.5 增加船席規模(N)之效益分析 ($M/E_k/N$, $k=5$).....	4-13
表 4.6 增加船席規模(N)之效益分析 ($M/E_k/N$, $k=6$).....	4-16

表 4.7 增加船席規模(N)之效益分析 ($M/E_k/N$, $k=\infty$)	4-18
表 4.8 貨櫃船建造成本（單位：百萬美元）	4-28
表 4.9 貨櫃船營運成本比較（單位：萬美元）	4-29
表 4.10 船席規模 N 之最適能量區間特性分析 ($K=1$).....	4-46
表 4.11 船席規模 N 之最適能量區間特性分析 ($K=2$).....	4-46
表 4.12 船席規模 N 之最適能量區間特性分析 ($K=\infty$).....	4-47

第一章 前言

港埠之興建最主要的目的就是服務航商與貨主，因此任何一個港埠想要在競爭激烈之市場中脫穎而出，就不能忽略航商及貨主之需求。自貨櫃化運輸導入海運市場以來，整個海運經營環境有了很大之變動，航商與航商之間，以及港埠與港埠之間之競爭都越來越激烈。而為了確保本身之競爭能力，增加市場佔有率，航商與港埠也都各自朝向更大經營個體及擴大經營業務範圍之方向發展。

航商之策略非常明確，除了不斷的透過結盟、合併、收購形成更強大的個體，擴大其業務營運範圍，涉足物流供應鏈配銷管理，以改善它們的營運效率、強化財務體質外，而且為了進一步達到規模經濟、降低營運成本，航商也持續的興建大型及專業化之船舶以增加其船舶總載運能量。如果這些船舶花大部分之時間滯留在港埠，則將造成航商營運上很大之損失，而且為了滿足貨主要求增加戶及戶運送頻率之需求，所以航運公司必須採取不同之方法去訂定它們的航線、減少灣靠之港埠以及加速貨物裝卸速度來達到這個目的。短期內航商將會要求貨櫃中心之績效，提高其裝卸效率從現在國際標準的每小時 65 個櫃，提高至每小時 100 個櫃；而就長期而言，則要達到每小時 150 個櫃之裝卸效率。因此，航商與貨櫃中心經營者間之契約協定有越來越嚴格之傾向，航商要求能夠更緊密的控制貨櫃中心經營者之作業流程，以確保其貨櫃船都能以最低之費率在預定之作業時間，完成裝卸作業而出港。如果貨櫃中心經營者不能滿足其各種營運效率之要求，則航商將會進而希望自己來經營貨櫃中心，以充分掌握物流配銷作業每一環節之管理，以確保廠商貨主能在既定之時間及地點得到契約數量之貨品。

面對航商組織結構變動、提供垂直整合之服務、貨櫃船大型化、灣靠港口數目減少、灣靠頻率增加等，為了提高港埠之競爭力，除了地理位置以外，港埠當局必須投資建設大得足以容納數條主要航線及

它們的接駁航線同時到達、裝卸及儲存相當大量貨櫃之樞紐貨櫃中心 (mega-terminal)。並且以最低費率提供航商貨主最高品質服務以及最高之滿意度。

可是港埠之資源非常珍貴有限，不能無限制之開發擴建。貨櫃中心之經營，到底至少要幾座才能達到經濟規模？在不同之既有船席規模狀況下，是否增建船席之效益都是一樣的？例如以台北港貨櫃儲運中心 BOT 之興建，是一次興建兩座？四座？六座？還是更多？高雄港各航商其承租專用碼頭之船席數是否達到經濟規模？在航商有朝自己擁有貨櫃碼頭經營之需求，港埠當局又為了提高競爭力有興建更多更大型貨櫃中心之壓力下，因此，相關之碼頭營運績效課題必須廣泛又深入研究。

本研究將從最基本之港埠系統特性開始探討，討論其船舶到達時間間隔分佈，船席服務時間分佈，不同碼頭經營型態適合之等待模式。接著分別以不含成本函數之評估指標以及包含船舶及碼頭各種成本項之無因次 IND 指標來分析不同貨櫃碼頭規模之營運績效，其獲致之結果，將可作為港埠當局經營及規劃貨櫃中心之參考。

第二章 等待理論

等待理論(Queuing theory)之概念為擁擠問題之發生係由於某交通流受阻撓而造成遲滯現象，此種交通流通常為一種不連續性（discrete）之型態，與船舶之到港、停靠船席接受裝卸服務，然後出港之型態非常類似，因此相關之等待模式（queuing model）就被廣泛應用於探討港埠擁擠狀況及船舶滯港時間分析之研究。有關港埠等待系統之影響因素大概有：1.船舶到達時間間隔其機率分佈到底為何？2.船舶來源是否限量？3.等待線長度是否有限？4.船舶靠泊船席接受服務，其服務原則為何？先到先服務？大船先服務？某種船舶有優先權？或者其它服務準則？5.船席數量多寡？6.船舶在船席接受裝卸服務其裝卸時間分佈為何？影響因素不同，則其適用之等待模式自然也不相同。

2.1 等待線系統結構

等待線問題之形成主要係由於設備能量不足以供應需要所造成，而不足以應付需要之主要原因，係由於顧客（船舶）到達之時間間隔以及顧客個別所需服務時間並非一致，而是有相當變化之緣故。換言之，有時服務人員（船席）空閒無事可作；而有時因顧客大批到達，服務設施不足而大排長龍。所以等待理論所要探討者，主要係因為到達時間分佈與設施服務時間分佈參差變化所引起之問題。一般之等待線系統可以圖 2.1 來表示。

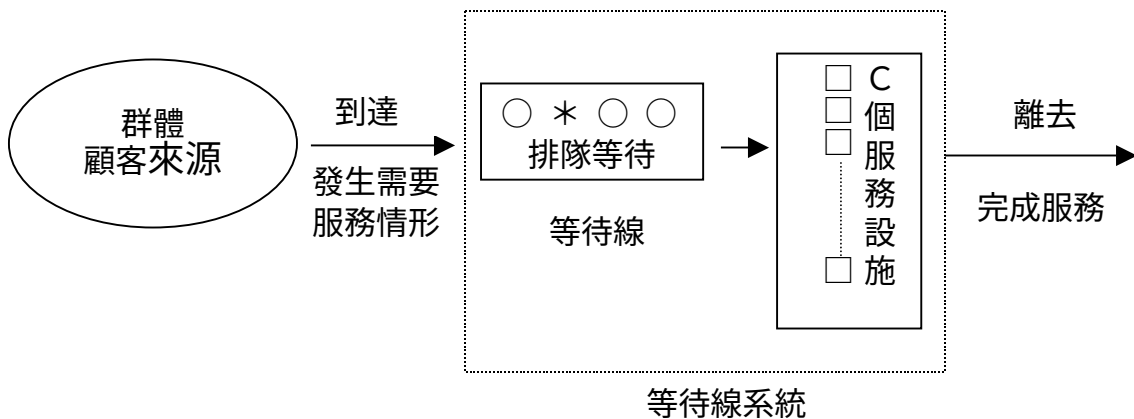


圖 2.1 單條等待線多條服務線系統

由圖 2.1 可知，等待線模式主要由下列因素所構成：

1.顧客（船舶）到達型態：

如顧客按某一固定時間到達，則等待問題可以避免；但是實際情況並非如此，顧客到達情況往往是陸陸續續，且受外在因素之影響與控制。所以對於此一無規律之到達，為了尋求其規律性，有些學者假設顧客之到達數目呈波依松分佈（Poisson distribution），也就是彼此到達之時間間隔呈指數分佈（Exponential distribution）；亦有研究假設到達之時間間隔呈不同相位之耳朗分佈（Erlang distribution）。

2.顧客被服務或離開之型態：

因為每一個顧客被服務之時間並不固定，且各個服務設施（服務人員）之服務效率亦不相同，故顧客在系統中被服務之時間實在難以估計，因而任一時間在系統中被服務之顧客數亦難以確定。為了尋求統計之規則性，乃假設每個顧客被服務之時間呈指數分佈，亦即任何時間被服務人數呈 Poisson distribution，或是 Erlang distribution，亦或是其他之分佈。

3.服務設施（船席、機具）數：

在一個系統中，服務設施個數可能為單一個或 C 個平行服務設施之系統。

4.服務設施之服務方式：

到達顧客可按先到先服務（First come first serve, FCFS），後到先服務（Last come first serve, LCFS），隨機服務（Service in random order, SIRO），或者按某種優先順序服務（Priority）（如最短或是長服務時間者）。在實務上，非中斷性（Nonpreemptive）服務情況較多，而採取中斷性（Preemptive）優先服務則較少。非中斷性服務準則表示被服務之顧客必須完成服務後，優先者才准予進入服務系統被服務；

而中斷性優先服務準則則是只要優先者一到，正在被服務者馬上暫予忍讓，直到完成優先者之服務後，才再繼續為完成之服務。

5.系統中最大容納個數：

整個等待系統之容量是由等待系統之容量及服務設備之容量所構成，例如船席數目為有限個，錨地及浮筒之數目亦為有限個，則整個系統所能容納之個數亦必為有限之數目。

6.顧客來源：

顧客來源可能為一有限群體，亦可能為一無限群體。於港埠系統中，假定船舶之來源為一無限群體。

2.2 等待系統之表示方法

由上節等待系統之構成因素所述，可知一個等待系統之結構可以由下列六個不同特性來描述： $(a / b / c) : (d / e / f)$

- a：表到達船舶數目之分佈或任何兩艘船到達時間間隔之分佈，當船舶到達數目為 Poisson distribution，而彼此到達時間間隔分佈為 Exponential distribution 時，以 M 表示；若為 Erlang distribution 則以 E_k 表示，k 為 Erlang distribution 之相位；固定時間到達以 D 表示。
- b：表被服務或離開之船舶數目分佈，或被服務船舶之服務時間分佈。可能為 M， E_k ，或 D。
- c：服務設施（服務人員）數目，港埠系統中之船席數目。
- d：服務系統（設施）之服務方式。
- e：整個系統所能容納之最大個數（包含等待及正在接受服務之顧客數目）。
- f：顧客來源之群體。

2.3 等待模式主要隨機變數間之關係

各變數之關係可由圖 2.2 來說明：

λ ：單位時間顧客平均到達率

$1/\lambda$ ：顧客到達平均時間間隔

μ ：單位時間顧客平均服務率

$1/\mu$ ：顧客平均服務時間

L_q ：等候接受設施服務之顧客數目

L_s ：正在接受服務之顧客數(當有等待發生時與服務設施數相等)

W_q ：顧客等待被服務之等待時間

W ：顧客在整個系統之時間

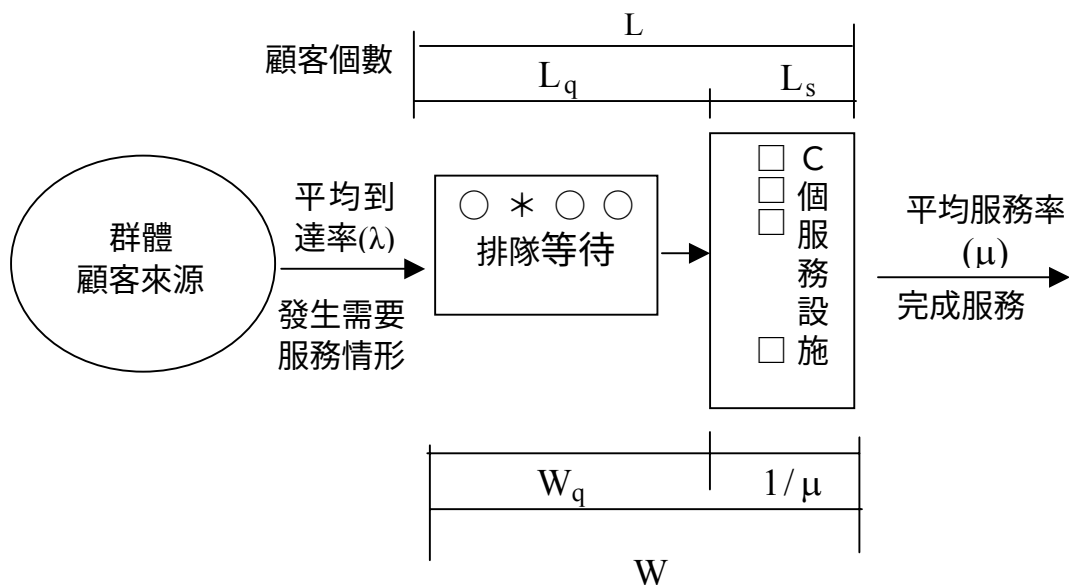


圖 2.2 等待系統主要變數關係圖

2.4 顧客到達數目之 Poisson distribution 及到達時間間隔之 Exponential distribution

2.4.1 單線 Poisson distribution 到達

Poisson distribution 係基於下列假設而得：

- 1.事件可以隨意發生在時間上或空間上一點。
- 2.某已知時間或空間內，該事件發生與否，並不影響與該區間不相重疊之其它區間內，該事件是否發生之或然率。
- 3.在小區間 Δt 裡，事件發生之或然率與 Δt 成正比，可用 $\lambda \Delta t$ 表示，此處 λ 為該事件平均發生率（可設為常數）。而在小區間內事件發生兩次或兩次以上之或然率因其太小（為 Δt 的高階項），可略而不計。

若 X_t 代表在時間或空間區 t 內某事件發生之次數，則：

$$P(X_t = x) = \frac{(\lambda \Delta t)^x e^{-\lambda \Delta t}}{x!} \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

例如：已知於 8 分鐘內平均到達人數 0.08，則在此區間內到達人數之機率，利用 Poisson distribution 公式計算與利用二項式分佈將時間分成不同數目之區間計算之比較如下表 2.1 所示：

表 2.1 Poisson distribution 與二項式分佈計算比較

到達 人數 x	Poisson dist. $p(x) = \frac{(0.08)^x e^{-0.08}}{x!}$	4 個 2 分鐘區間 $\binom{4}{x} 0.02^x 0.98^{(4-x)}$	8 個 1 分鐘區間 $\binom{8}{x} 0.01^x 0.99^{(8-x)}$	16 個 0.5 分鐘區間 $\binom{16}{x} 0.005^x 0.995^{(16-x)}$
0	0.9231	0.9224	0.9227	0.9229
1	0.0738	0.0753	0.0746	0.0742
2	0.0030	0.0023	0.0026	0.0028
3	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000

由上表可知，當分區 Δt 無限小，亦即區間數 $n \rightarrow \infty$ 時，到達人數分佈可以以 Poisson distribution 來表示。那麼如果到達之人數分佈呈 Poisson distribution，到達之時間間隔又是何種函數分佈呢？在討論這項問題前，首先需瞭解指數分佈(Exponential distribution) 之性質。

2.4.2 到達時間間隔指數分佈

指數分佈之圖形如圖 2.3 所示。

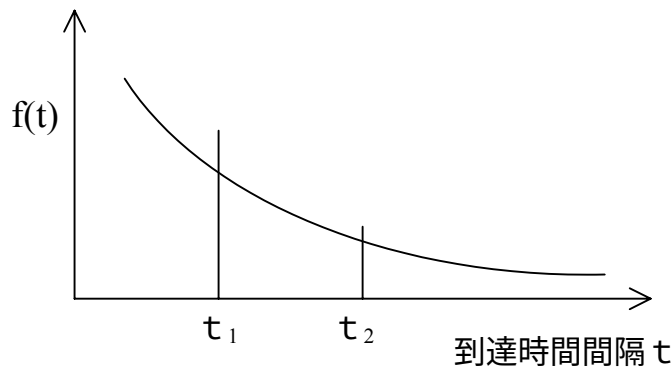


圖 2.3 指數分佈機率密度函數

指數分佈機率密度函數 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ (2.2)

分佈函數 $F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\lambda t}$ (2.3)

故可到達時間間隔 t 之平均或期望值 $E(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) = \frac{1}{\lambda}$ (2.4)

於 t_1 與 t_2 間隔時間內發生一次到達之機率：

$$P(t_1 \leq t \leq t_2) = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2} \quad \text{.....(2.5)}$$

依據指數分佈之性質，可以求得在下一時間段 T 內將無任何到達之機率（亦即到達時間間隔 $t > T$ ）為

$$P(t > T) = 1 - (1 - e^{-\lambda T}) = e^{-\lambda T} \quad \text{.....(2.6)}$$

而就 Poisson distribution 而言，於下一時間段 T 無任何顧客到達之機率為：

$$P(x = 0) = \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^x}{x!} = e^{-\lambda T} \quad \text{.....(2.7)}$$

由以上之敘述可知：於一等待系統中，若於一段時間之顧客到達數目符合 Poisson distribution，則其顧客到達時間間隔可以指數分佈來表示。

2.5 顧客服務時間分佈及服務率

分析顧客服務時間之方式，與分析顧客到達之情形相同，亦即將時間劃分為許多相等之小時間段，然後分析顧客接受完服務後離去之機率分佈及顧客接受服務時間長短之分佈，因此可以得到與分析顧客到達情形時相似之推論：

1. 於某特定時間段內完成服務之機率與該特定區段時間之長度呈正比例，此一比例稱為平均服務率（mean service rate）以 μ 來表示。
2. 在任何長度之時間 T 中，完成服務之次數（或顧客離去之個數）係以平均值為 μT 之 Poisson distribution 型態產生。
3. 完成服務或顧客離去之時間間隔，係以平均服務時間為 $1/\mu$ 之指數分佈型態產生。
4. 服務完成或顧客離去時間之長短，係一隨機之現象。亦即每一顧客完成其所需之服務而離去，與以前之顧客完成服務離去之時間並無直接關聯，並不受到已經發生之服務完成時間影響。

2.6 (M/M/1：FCFS/ ∞/∞) 系統狀況

等待系統狀態通常係以在系統中被服務以及在等待中之顧客數目 (n) 來表示，例如在港埠等待系統中，即是指停靠在船席正在裝、卸貨，以及排隊等待靠泊船席之船舶數。遇有其他不同系統情況時只需改換顧客之單位即可，並無實質上之不同。一般常用之符號及其意義概述如下：

λ ：平均到達率，即於一單位時間內到達之顧客數目或單位時間內發生一次之機率（例如 8 分鐘內到達 0.08 人，則 1 分鐘內到達 0.01 人；或 1 分鐘內到達 1 人之機率為 0.01，所以 $\lambda = 0.01$ ）。

$\lambda \Delta t$ ：於時間 t 到 $t + \Delta t$ 之間，有一位顧客到達之機率（8 分鐘到達 1 人之機率為 0.08）。

$1 - \lambda \Delta t$ ：於 Δt 時間內，無一次或更多次到達之機率。

μ ：平均服務率，即於一單位時間內完成服務後離去之顧客數目或單位時間內發生一位顧客完成服務而離去之機率。

$\mu \Delta t$ ：於時間 t 到 $t + \Delta t$ 之間，有一位顧客完成服務而離去之機率。

$1 - \mu \Delta t$ ：於 Δt 時間內，無一次或更多次服務完成之機率。

n ：系統狀態之單位數，係指在 t 時間內，於系統中被服務以及在等待中之顧客數目。

$P_n(t)$ ：於時間 t ，系統中有 n 個顧客之機率（包含被服務以及在等待中之顧客數目）。

$P_{n+1}(t)$ ：於時間 t ，系統中有 $n + 1$ 個顧客之機率。

$P_{n-1}(t)$ ：於時間 t ，系統中有 $n - 1$ 個顧客之機率。

$P_n(t + \Delta t)$ ：於時間 $t + \Delta t$ ，系統中有 n 個顧客之機率

為瞭解等候線系統狀態之性質，必須要先求解 $P_n(t)$ 以獲得系統中之期望顧客數目。為求解 $P_n(t)$ ，有必要先分析 $P_n(t + \Delta t)$ 之意義。若 $n > 0$ ，則 $P_n(t + \Delta t)$ 係包含四種互斥與完全之事件，亦即四種事件必須發生一種，而且若其中任一事件發生，則其他三種事件皆不發生，如表 2.2 所示。

表 2.2 等候線系統有 n 個顧客之狀態分析

事件	於時間 t 系統中有 n 個顧客之機率	於 t 到 $t + \Delta t$ 顧客到達數目	於 t 到 $t + \Delta t$ 完 成服務顧客數目	於時間 $t + \Delta t$ 時系統 中顧客數目
I	P_n	0	0	n
II	P_{n+1}	0	1	n
III	P_{n-1}	1	0	n
IV	P_n	1	1	n

$$P(I) = P_n(t)(1 - \lambda\Delta t)(1 - \mu\Delta t)$$

$$P(II) = P_{n+1}(t)(1 - \lambda\Delta t)(\mu\Delta t)$$

$$P(III) = P_{n-1}(t)(\lambda\Delta t)(1 - \mu\Delta t)$$

$$P(IV) = P_n(t)(\lambda\Delta t)(\mu\Delta t)$$

由於為相斥事件，所以

$$\begin{aligned} P_n(t + \Delta t) &= P(I) + P(II) + P(III) + P(IV) \\ &= P_n(t)(1 - \lambda\Delta t - \mu\Delta t) + P_{n+1}(t)(\mu\Delta t) + P_{n-1}(t)(\lambda\Delta t) \\ &= P_n(t) - P_n(t)(\lambda\Delta t + \mu\Delta t) + P_{n+1}(t)(\mu\Delta t) \\ &\quad + P_{n-1}(t)(\lambda\Delta t) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.8)$$

上式已省略 Δt^2 項。

當系統達到穩定狀態時，系統狀態之機率已不隨時間之進行而有所改變，亦即以時間為函數之系統狀態機率變化率為零。也就是：

$$\frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = 0 \dots\dots\dots(2.9)$$

將 $P_n(t + \Delta t)$ 代入可求出

$$P_n(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} P_{n+1}(t) + \frac{\mu}{\lambda + \mu} P_{n-1}(t) \dots\dots\dots(2.10)$$

當在穩定狀態時 $P_n(t)$ 可逕以 P_n 表示，而不受時間影響，所以上式可表為：

$$P_n = \frac{\mu}{\lambda + \mu} P_{n+1} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} P_{n-1} \dots\dots\dots(2.11)$$

(2.11)式中之 $n - 1$ 必須 ≥ 0 ，否則不合等待線系統狀態之要求，故需另外求解 $P_0(t)$ 之值。

求解 $P_0(t)$ 之方式與求解 $P_n(t)$ 之方式相同，亦係自 $P_0(t + \Delta t)$ 著手。分析 $P_0(t + \Delta t)$ 之可能狀況，計有下列兩種，如表 2.3 所示：

表 2.3 等候線無顧客之系統狀態分析

事件	於時間 t 系統中有 n 個顧客之機率	於 t 到 t+△t 顧 客到達數目	於 t 到 t+△t 完 成服務顧客數目	於時間 t+△t 時 系統中顧客數目
V	P_0	0	---	0
VI	P_1	0	1	0

$$P(V) = P_0(t)(1 - \lambda\Delta t)$$

$$P(VI) = P_1(t)(1 - \lambda\Delta t)(\mu\Delta t)$$

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - \lambda\Delta t) + P_1(t)(\mu\Delta t) \quad (\text{省略 } \Delta t^2 \text{ 項})$$

當系統達到穩定狀態時，系統狀態之機率已不隨時間之進行而有所改變，亦即以時間為函數之系統狀態機率變化率為零。也就是：

$$\frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = \frac{P_0(t)(1 - \lambda\Delta t) + P_1(t)(\mu\Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) = 0$$

$$\therefore P_1(t) = \frac{\lambda}{\mu} P_0(t) \text{ 或 } P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda} P_1(t) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\text{當系統狀態達到穩定時，(2.13) 式可化為 } P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0 \dots\dots\dots(2.14)$$

由 (2.11) 式，當 $n = 1$ 時

$$P_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} P_2 + \frac{\mu}{\lambda + \mu} P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} P_2 + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right) P_1 \dots\dots\dots(2.15)$$

$$= \frac{\mu}{\lambda + \mu} P_2 + \frac{\mu}{\lambda + \mu} P_1$$

$$\Rightarrow P_2 = \frac{\lambda}{\mu} P_1 = \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^2 P_0$$

同理，當 $n = 2$ 時

$$\Rightarrow P_3 = \frac{\lambda}{\mu} P_2 = \frac{\lambda}{\mu} \left(\frac{\lambda}{\mu} P_1 \right) = \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^2 P_1 = \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^3 P_0$$

$$\text{依此類推 } P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0, n \geq 0 \dots\dots\dots(2.16)$$

$$\because \sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1 \dots\dots\dots(2.17)$$

將 (2.16) 代入 (2.17) 式

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0 = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n = 1 \dots\dots\dots(2.18)$$

$\because \mu$ 必須大於 λ ，即 $\lambda / \mu < 1$ 等待線系統才不至於無限擴展， $\therefore$ 為收斂級數。

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0 = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n = P_0 \left(\frac{1}{1 - \frac{\lambda}{\mu}} \right) = 1$$

$$\Rightarrow P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu} \dots\dots\dots(2.19)$$

將 (2.19) 代入 (2.16) 式 $\Rightarrow$

$$P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \left(1 - \frac{\lambda}{\mu} \right), n \geq 0$$

$$\text{令 } \rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

$$\text{則 } P_n = \rho^n (1 - \rho) \dots\dots\dots(2.20)$$

整個系統中顧客數目（包括等待及接受服務） L ：

$$L = E(n) = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \rho^n \cdot (1-\rho) = (1-\rho) \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \rho^n$$

$$= (1-\rho) \frac{\rho}{(1-\rho)^2} = \frac{\rho}{1-\rho} \quad 0 < \rho < 1 \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

$$V = \text{Var}(n) = \sum_{n=0}^{\infty} [n - E(n)]^2 = \frac{\rho}{1-\rho^2} \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

在穩定狀態下，系統中平均在等待之顧客數 L_q ：

$$L_q = \begin{cases} 0, & L=0,1 \text{ (單線到達單一服務設施); (若為多個服務設施則 } L=0,1, \dots C) \\ L-1, & L \geq 2 \text{ (單線到達單一服務設施); (若為多個服務設施則 } L \geq C, L_q = L-C) \end{cases}$$

$$\text{令 } \phi(\gamma) = P(L_q = \gamma), \quad \gamma = 0, 1, 2, \dots\dots$$

$$\text{則 } \phi(0) = P(L_q = 0) = P(L=0) + P(L=1) = P_0 + P_1 = (1-\rho) + \rho(1-\rho) = 1-\rho^2$$

$$\phi(\gamma) = P(L-1=\gamma) = P(L=\gamma+1) = P_{\gamma+1} = (1-\rho) \rho^{\gamma+1}$$

$$\therefore \phi(\gamma) = \begin{cases} 1-\rho^2, & \gamma=0 \\ (1-\rho) \rho^{\gamma+1}, & \gamma \geq 1 \end{cases}$$

$$L_q = E(\gamma) = \sum_{\gamma=0}^{\infty} \gamma \cdot \phi(\gamma) = \sum_{\gamma=1}^{\infty} \gamma \cdot (1-\rho) \rho^{\gamma+1} = \frac{\rho^2}{1-\rho} \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

每位顧客於系統中之平均等待時間 W_q ：

設隨機變數 T_q 為顧客在等待系統中所費之時間，而 $W_q(t)$ 為等待時間之機率分佈函數，則 $W_q(0) = P(T_q = 0) = P_0$ （到達顧客發現系統無人） $= 1 - \rho_0$ 。而如果有一位顧客到達時發現已有 n 人在系統中，則這位顧客必須等到此 n 個顧客之總服務時間 $T_q = \sum_{i=1}^n S_i$ 才能進入服務系統。因為每一個 S_i 都是獨立且一致之指數分佈，故 T_q 呈 Gamma

distribution, 其機率密度函數為：

$$f(t) = \mu e^{-\mu t} \frac{(\mu t)^{n-1}}{(n-1)!}, \quad t \geq 0, n \geq 1$$

$$\therefore W_q(t) = P(T_q \leq t) = P(T_q = 0) + P(0 < T_q \leq t) = 1 - \rho \cdot e^{-\mu(1-\rho)t}, \quad t > 0$$

$$W_q = E(T_q) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \dots\dots\dots (2.24)$$

一個顧客花費在整個等待系統之平均時間（包括等待及接受服務）W：

由於 Exponential distribution 服務時間之期望值為 $\frac{1}{\mu}$

$$\therefore W = W_q + \frac{1}{\mu} \dots\dots\dots (2.25)$$

2.7 Gamma distribution 及 Erlang Distribution

若某事件的發生構成 Poisson 過程, 則該事件發生到第 K 回所經歷之時間, 可用 Gamma 或然率分佈來描述 Erlang distribution 是 Gamma function 之特例, 當 Gamma function 中之形狀參數 k (shape parameter) 為正整數時, 即為 Erlang distribution。反之, 若參數 k 為非整數值, 則定義為一般的伽瑪分配。

2.7.1 Gamma distribution

Gamma distribution 常被廣泛使用為隨機變數的或然率分佈。隨機變數 X, 若其機率密度函數 (p.d.f.) 為

$$f(x) = \frac{x^{k-1} e^{-x/\beta}}{\Gamma(k)\beta^k}, \quad x > 0, \dots\dots\dots (2.26)$$

其中 $k, \beta > 0$ 為二正數, 便稱為有參數 k, β 之 gamma 分佈 (gamma distribution), 以 $\Gamma(k, \beta)$ 表之, 在此 gamma 函數 (gamma function) 之定義

為

$$\Gamma(K) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt, k > 0, \dots\dots\dots(2.27)$$

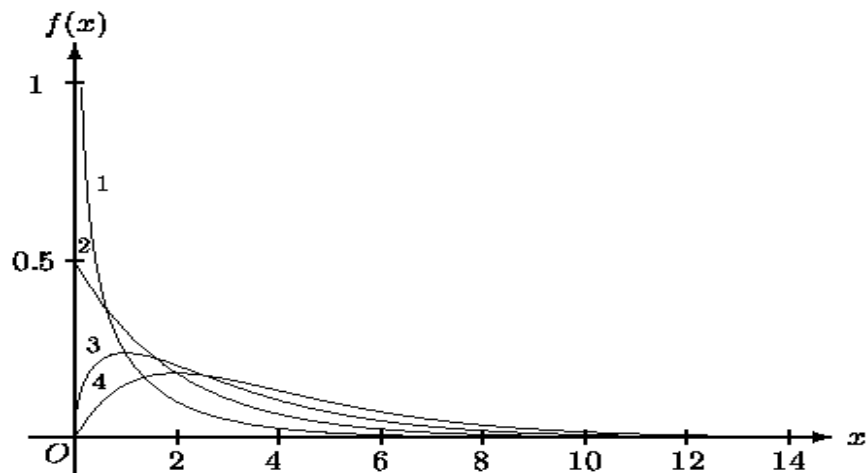
Gamma 函數為應用數學中一重要的函數，它有不少性質。例如：

$$\Gamma(k+1) = k\Gamma(k), k > 0, \dots\dots\dots(2.28)$$

$$\Gamma(1) = 1, \dots\dots\dots(2.29)$$

$$\Gamma(n) = (n-1)!, n \text{ 為正整數} \dots\dots\dots(2.30)$$

Gamma 分佈中的參數 k ，稱為形狀參數 (shape parameter)， β 稱為尺度參數 (scale parameter)。此因 k 影響 p.d.f. 圖形之陡峭程度，而 β 影響散佈程度。不同形狀參數之 gamma 分佈圖形如圖 2.4 所示：



Gamma 分佈 p. d. f. 之圖形，1,2,3,4 分別對應
 $K = 0.5, 1, 1.5, 2, \beta$ 則皆為 2

圖 2.4 Gamma distribution 之機率密度圖形

$\Gamma(k, \beta)$ 分佈之期望值與變異數分別為

$$E(X) = k\beta, \dots\dots\dots(2.31)$$

$$\text{Var}(X) = k\beta^2 \dots\dots\dots(2.32)$$

若不考慮尺度參數 β ，則 Gamma distribution 之機率密度函數可表示如下：

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(k)} (\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t}, \quad t > 0, \quad \lambda > 0, \quad k > 0 \dots\dots\dots(2.33)$$

$$\text{其中, } \Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt, \quad k > 0 \dots\dots\dots(2.34)$$

$$\text{若 } k \text{ 為一正整數, 則 } \Gamma(k) = (k-1)! \dots\dots\dots(2.35)$$

其累加機率密度函數如下：

$$F_t(t) = 1 - e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}, \quad t > 0, \quad k \text{ integer} \dots\dots\dots(2.36)$$

$$\text{平均數} = \frac{k}{\lambda} \dots\dots\dots(2.37)$$

$$\text{變異數} = \frac{k}{\lambda^2} \dots\dots\dots(2.38)$$

2.7.2 Erlang distribution

Erlang distribution 之機率密度函數為：

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{(k\mu)^k}{(k-1)!} \cdot t^{(k-1)} \cdot e^{(-k\mu t)}, \quad 0 < t < \infty \\ &= \frac{(k\mu)^k}{\Gamma(k)} \cdot t^{(k-1)} \cdot e^{(-k\mu t)} \end{aligned} \dots\dots\dots(2.39)$$

其中, t 為船舶停靠船席之時間； k 為 Erlang number 為正整數； μ 為在穩定狀態時，平均每一船席在單位時間內，所服務之船舶數目。當服務時間為 Erlang distribution, $k=1$ 時，

$$f(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad t \geq 0 \dots\dots\dots(2.40)$$

即為指數分佈 (Exponential Distribution) 之機率密度函數，即到

達次數為 Poisson distribution；Erlang distribution 的特性為當 K 增加時，耳朗（Erlang）分佈會逐漸變為對稱。當 $K \geq 30$ 時，耳朗（Erlang）分佈為一相當近似常態分佈之機率分佈。而當 $K \rightarrow \infty$ 時，耳朗（Erlang）分佈則變為均勻分佈（Uniform Distribution）。而耳朗機率密度函數隨 K 值增加的演變過程（由指數分佈→常態分佈→均勻分佈）可以圖 2.5 表示，由圖即可清楚觀察出其變化的情形。

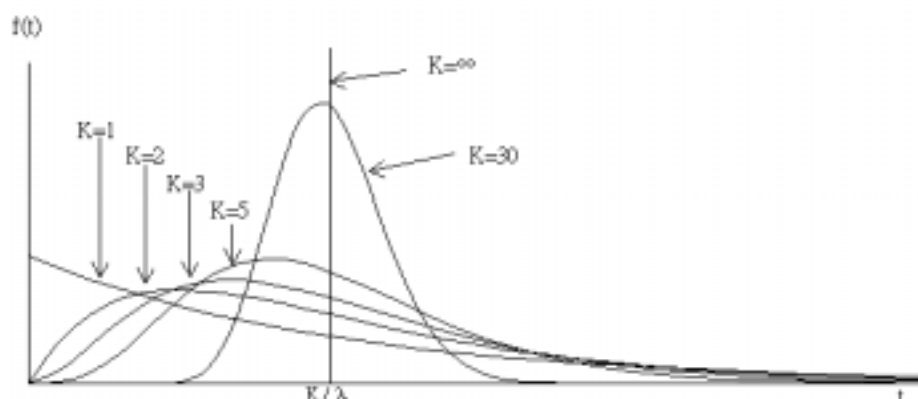


圖 2.5 耳朗（Erlang）分佈隨 K 值增加的演變過程

$(M/E_k/1)$ 之各主要參數可表示如下：

1. Erlang distribution 之平均服務時間為 $1/\mu$
2. 服務時間之變異數 $\sigma^2 = 1/(k\mu)^2$
3. 由平均服務時間 $1/\mu$ 及變異數 $\sigma^2 = 1/(k\mu)^2$ 即可以求得 Erlang distribution 之 Erlang number k 。
4. 服務站空閒之機率 $p_0 = 1 - p$, ($p = \lambda / \mu$)
5. 等待時間 $W_q = \frac{(k+1)\rho}{2k\mu(1-\rho)}$ or $W_q = \frac{k+1}{2k} \cdot \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)}$ 。
6. 在等待線系統上之時間（包括等待及服務） $W = W_q + \frac{1}{\mu}$ 。
7. 在等待線系統上之所有顧客數目（包括等待及服務） $L = \lambda W$ 。

$$8. \text{排隊等待服務之顧客數 } L_q = \lambda W_q = \frac{k+1}{2k} \frac{\lambda^2}{\mu(\mu-\lambda)}。$$

2.8 貨櫃碼頭適用之等候模式分析

近年來，由於定期船之盛行(尤其以貨櫃船為最具代表性)，使得長久以來各界廣泛使用等候理論之相關模式(M/M/N, M/E_k/N 等)之適用性受到了質疑。船舶到港時間分佈影響整個港埠等候系統之結構，從而影響依據此類模式所計算出來之相關變數結果。台灣地區之港口，在過去以公營方式為主之營運型態，其船舶到港時間分佈，根據相關之研究，可以 Poisson dist.來表示。但是近年來，隨著貨櫃船席之出租專用，以及大宗散貨業者陸續與港務局以約定方式興建碼頭在不同之各別航線上，其船期之運作，可能是以定期船之方式出現。可是一個船公司並不只有經營一條航線而已，在所有之航線合併起來以後，其船舶到港時間分佈到底是呈現何種統計分佈，則有待進一步之分析與驗證。此外，就單一碼頭營運者之船舶到港時間分佈，可能呈現某種統計分佈，但如果同類碼頭，各不同航商之船舶到港時間分佈，加總起來可能又是呈現另一種統計分佈。但是到底呈現何種分佈也有待驗證。郭塗城等人於「定期貨櫃船舶到達時間分佈之研究」(民國 89 年)中，就高雄港各貨櫃碼頭依：(1)單一貨櫃碼頭(2)定期航線(3)數個碼頭、貨櫃中心及整體港埠等各系統別來分析貨櫃船舶到港之時間間距或單位時間之到港艘數並作統計適合度檢定與分析，探討其船舶到達分佈之形態隨各觀察系統別之變化情形。結果發現貨櫃輪定期到達的特性於單一碼頭時其定期的性質即不明顯，當以單一碼頭為到達分佈之檢定對象時其耳朗分佈分配係數 K 值趨近於 2 且依碼頭的營運制度為公用或出租專用有別；公用碼頭其耳朗分佈分配係數 (K 值) 變動較大且其值較專用碼頭小。以貨櫃中心及全港為系統單位來進行船舶到達時間間隔檢定時其分佈通過耳朗分佈分配係數 K 值為 1 之檢定，即是呈隨機到達 Poisson distribution 形態。租用單一座貨櫃專用碼頭之貨櫃船到達情形，則近似 K = 2 之 Erlang distribution。由上述現象

可以瞭解定期貨櫃輪如何由定期（ $K=\infty$ ）因船期提前或延誤的變動及觀察系統別的不同漸漸演變為隨機到達分佈（ $K=1$ ）的過程如圖 2.6 及圖 2.7 所示。

(Erlang distribution Erlang number K 越往右隨機程度越低K越大)

→

	全港	貨櫃中心	公用碼頭	專用碼頭
K值	(1)	(1)	(0.175~1.798)	(1.35~2.096)

圖 2.6 系統別與 Erlang distribution K 值關係圖

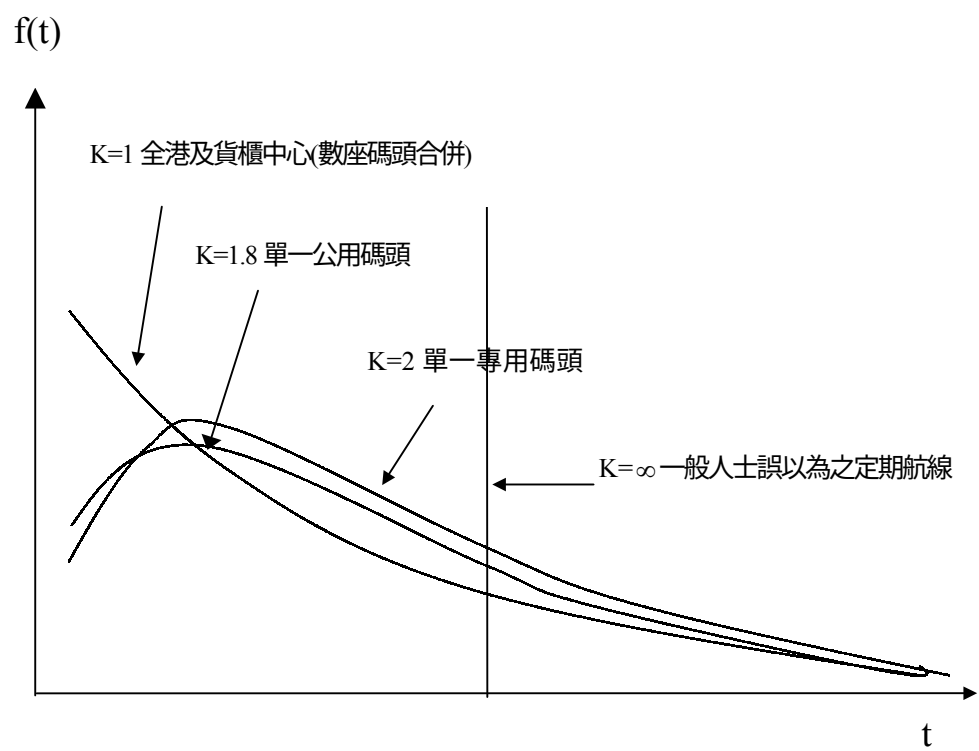


圖 2.7 高雄港各系統別貨櫃船到達 Erlang distribution K 值演變過程

第三章 港埠系統評估指標

船舶進港、靠碼頭、裝卸貨及(貨櫃)場站等作業，皆宜有各別的評估指標。一般而言，航商若使用公用碼頭，船舶進港時，有空船席則可以直接靠碼頭進行裝卸作業，若無空的浮筒或船席靠泊，則必須在外港等候，即以擁擠度(DC)、船舶在港等待時間(W_q)指標等來衡量港口擁擠與船席作業效率之程度。船舶靠泊後，在裝卸作業方面，則有裝卸機具的作業效率(γ_g, γ_n)與船舶平均服務時間($1/\mu$)等指標，以衡量船舶在船席之作業效率。貨物卸下之後，通常會存放於貨櫃場站(MY, CY, CFS)，以等候拖車或鐵路運輸將貨交給貨主。貨櫃場站中，需考量貨櫃裝卸效率、貨櫃取出率、場站土地使用率、貨櫃搬運能力及貨櫃處理能力等場站內的各種指標，以衡量貨櫃場站的運作情形。

3.1 等候系統之參數

有關港埠運輸系統之評估指標，從 1960 年代初期各式各樣的評估指標陸續被提出。一般而言，港埠運輸系統之作業流程可以等候系統來描述。國內外文獻中探討船舶到達接受港埠設施服務完畢後再離開之之相關等待模式研究眾多，其中，(M/M/N)及(M/Ek/N)兩者等候系統模式最常被用來描述其系統狀況。Mettam (1967)，Jones & Blunden (1968)，Agerschou & Korsgaard (1969)，De Weille & Ray (1974)，Noritake & Kimura (1983) 認為最能夠描述船舶在港移動之等待模式是 M / M / S(∞)和 M / Ek / S (∞) ($k = 2$ or 3)。王慶瑞 (1972)，Kenneth & Nilsen (1977)，UNCTAD (1978) 證明隨機到港之船舶其服務時間以 Erlang distribution 最為適當。郭塗城等人(1990)將歷年來國內有關船舶到達時間分佈之重要文獻及其研究成果彙整如表 3.1 所示，由表 3.1 中可知，除了曾安源(1991 年)、盧坤信(1997 年)外，早期文獻大都以統計學上之卡方 (χ^2) 適合度檢定來驗證船舶到達時間分佈。而檢定結果只有黃承傳(1988)、曾安源(1991 年)、盧坤信(1997 年)之研究中檢定出船舶

到達時間分佈不符合 Poisson 分佈的現象。因此，吾人可利用各模式所推導出來的各種系統狀態來作為港埠運輸系統之評估指標。服務時間為 Erlang 分佈時， $k=1$ 即為指數分佈， $k=\infty$ 則為均勻分佈 (Uniform Distribution)，因此，本文以 (M/E k/N) 系統來探討其特性。

表 3.1 國內船舶到達分佈相關研究彙整表

文獻作者	檢定港埠	檢定對象及種類	抽樣年度	檢定方式	檢定結果*
王慶福	基隆港	全港各類船舶	1970	卡方適合度檢定	符合
林肇光	基隆港	全港貨櫃船	--	卡方適合度檢定	符合
	台中港	全港各類船舶	--	卡方適合度檢定	符合
	高雄港	全港貨櫃船	--	卡方適合度檢定	符合
蘇立恆	基隆港	全港各類船舶	1978	卡方適合度檢定	符合
汪進財	高雄港	全港貨櫃船	1978	卡方適合度檢定	符合
			1979	卡方適合度檢定	符合
		全港散雜貨船	1978	卡方適合度檢定	符合
	台中港	全港各類船舶	1978	卡方適合度檢定	符合
劉森添	高雄港		1979~1983	卡方適合度檢定	符合
黃承傳	基隆港		1987	卡方適合度檢定	不符合
朱金元	花蓮港	全港各類船舶	1988	卡方適合度檢定	符合
曾安源	基隆港	全港商船	1987~1989	K-S 檢定	不符合
盧坤信	高雄港	定期貨櫃船	1995	K-S 檢定	不符合
		不定期貨櫃船	1995	K-S 檢定	符合

註：“*”表到達時間間隔檢定結果是否符合指數分佈

茲將等候系統之評估指標定義如下：

1. 擁擠度(DC)

擁擠度為船舶到港時，必須等待船席停靠之機率。

$$DC = \sum_{j=N+1}^{\infty} P_N(j) \dots\dots\dots (3.1)$$

2.使用率，船席佔有率(ρ)

使用率為船席實際使用之總時間與全年可供使用時間的比值。換言之，使用率亦即為船舶佔有船席程度的一種指標。

$$\rho = 1 - \left(\sum_{j=0}^{N-1} (N-j) P_N(j) / N \right) \dots\dots\dots(3.2)$$
$$= \left(\sum_{j=1}^N j P_N(j) / N \right) + DC$$

3.平均在港艘數(L)

T 時間內，平均在港之船舶艘數。

$$L = \sum_{j=0}^{\infty} j P_N(j) \dots\dots\dots(3.3)$$

4.平均在港等待船席之艘數(L_q)

T 時間內，平均在港等待船席靠泊之艘數。

$$L_q = \sum_{j=N+1}^{\infty} (j-N) P_N(j) = L - (\lambda / \mu) \dots\dots\dots(3.4)$$

5.平均等待時間(W_q ；AWT)

T 時間內，船舶等待船席之平均等待時間。

$$W_q = L_q / \lambda \dots\dots\dots(3.5)$$

6.等待時間因子($W_q \cdot \mu$)

等待時間因子為船舶等待船席之平均等待時間(AWT； W_q)與船舶於船席之平均服務時間(AST； $1/\mu$)之比值。

$$W_q \cdot \mu = AWT / AST \dots\dots\dots(3.6)$$

3.2 不同等候系統之評估指標比較

1.(M/M/N)型等候系統模式

(M/M/N)型等候系統在穩定狀態下系統之狀態機率及等候系統的各種特性可以記為：

$$\begin{aligned} P_N(j) &= P_N(0)(\lambda/\mu)^j/j! \quad (0 \leq j \leq N) \\ &= P_N(0)(\lambda/\mu)^j/(N! \cdot N^{(j-N)}) \quad (j \geq N) \end{aligned} \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\text{其中, } P_N(0) = 1/\left[\sum_{j=0}^{N-1} (\lambda/\mu)^j/j! + (\lambda/\mu)^N/(N! \cdot (1-\rho)) \right] \dots\dots\dots(3.8)$$

而將(3.7)式代入(3.1) ~ (3.6)式，則可得出：

$$DC = 1 - \sum_{j=0}^N P_N(0)(\lambda/\mu)^j/j! \dots\dots\dots(3.9)$$

$$\rho = 1 - \sum_{j=0}^{N-1} (N-j)P_N(0)(\lambda/\mu)^j/(j! \cdot N) \dots\dots\dots(3.10)$$

$$L_q = P_N(0)(\lambda/\mu)^j \rho / (j!(1-\rho)^2) \dots\dots\dots(3.11)$$

$$W_q = L_q/\lambda = P_N(0)(\lambda/\mu)^j \rho / (j!(1-\rho)^2 \cdot \lambda) \dots\dots\dots(3.12)$$

$$W_q \cdot \mu = P_N(0)(\lambda/\mu)^j / (j!(1-\rho)^2 \cdot N) \dots\dots\dots(3.13)$$

2.(M/E_k/N)型等候系統模式

W_q 係等待模式中重要之參數之一，她是根據等差系統所採用之模式計算出來的。對於(M/E_k/N)型等候系統模式，其 $P_N(0)$ 與(3.8)式相同，系統之狀態機率($P_N(j)$)不易計算。但是就平均等待時間 W_q 而言，卻有兩種近似解可以求得(Noritake & Kimura 1983)。其一為Lee-Longton 氏之公式，即

$$W_q = \left\{ (P_N(0) \cdot \rho (\lambda / \mu)^N) / (\lambda \cdot N! \cdot (1 - \rho)^2) \right\} \cdot [(1 + K) / 2K] \dots\dots\dots(3.14)$$

另一則為 Cosmetatos 氏之近似解，

$$W_q = \left\{ (P_N(0) \cdot \rho (\lambda / \mu)^N) / (\lambda \cdot N! \cdot (1 - \rho)^2) \right\} \cdot \left[(1 + K) / 2K + (1 - 1/K)(1 - \rho)(N - 1)((4 + 5N)^{0.5} - 2) / 32N\rho \right] \dots\dots(3.15)$$

當 $\rho \geq 0.2$ 時，Cosmetatos 氏之近似解較 Lee-Longton 氏之近似解與 Hillier(1981)經由模擬所得之理論值比較時其誤差較小(黃文吉 1990)。

由 $(M/E_k/N)$ 等候系統所推導之系統評估指標，其優點為具有無因次化之特性，簡單明瞭；但是卻因未考慮成本因素，因此無法判別各項指標之最適化基準值。

根據 (3.7) ~ (3.15) 式，可以計算、製表、繪圖各類指標在不同船席規模時之狀態及變化趨勢，如表 3.2 ~ 3.12 及圖 3.1 ~ 3.13 所示。

表 3.2 船席規模(N)船席使用率(ρ)與擁擠度(DC)關係表

($M/E_k/N$; $K=1$) 單位：%

$\rho \backslash N$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1	1.0%	4.0%	9.0%	16.0%	25.0%	36.0%	49.0%	64.0%	81.0%	100.0%
2	0.2%	1.3%	4.2%	9.1%	16.7%	27.0%	40.4%	56.9%	76.7%	100.0%
3	0.0%	0.5%	2.1%	5.6%	11.8%	21.3%	34.5%	51.8%	73.5%	100.0%
6	0.0%	0.0%	0.3%	1.6%	5.0%	11.8%	23.5%	41.4%	66.6%	100.0%
10	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	1.8%	6.1%	15.5%	32.7%	60.2%	100.0%
11	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	1.4%	5.2%	14.1%	31.1%	58.9%	100.0%
15	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.6%	2.9%	9.9%	25.5%	54.2%	100.0%
20	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	1.4%	6.5%	20.5%	49.6%	100.0%
25	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.7%	4.4%	16.7%	45.7%	100.0%

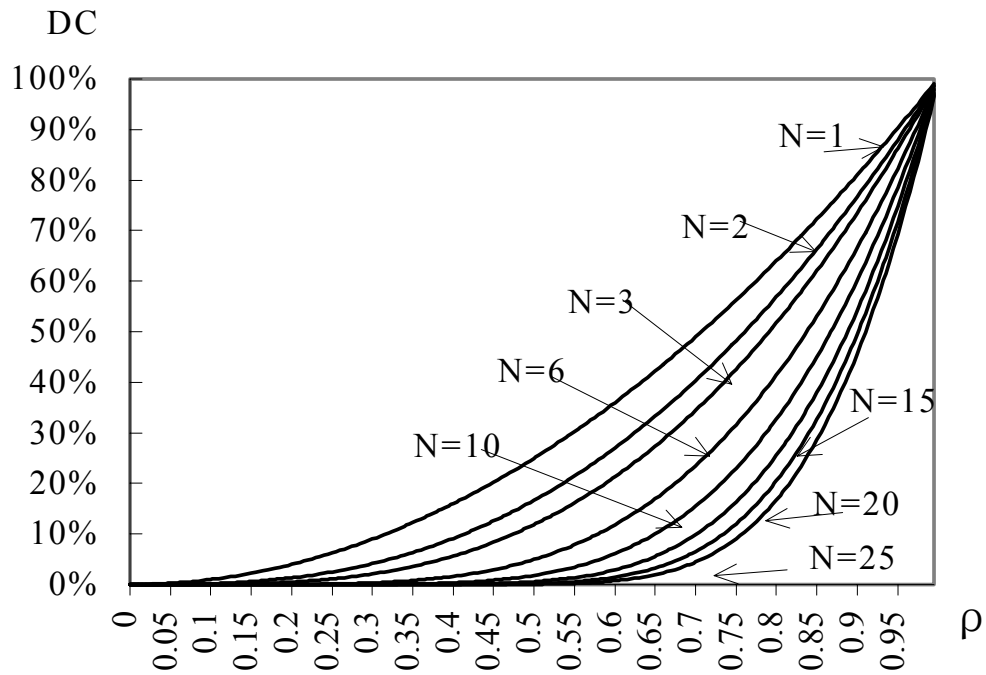


圖 3.1 不同船席規模(N)時使用率(ρ)與擁擠度(DC)之關係
($M/E_k/N$) ; $k=1$; $N=1, 2, 3, 6, 10, 15, 20, 25$

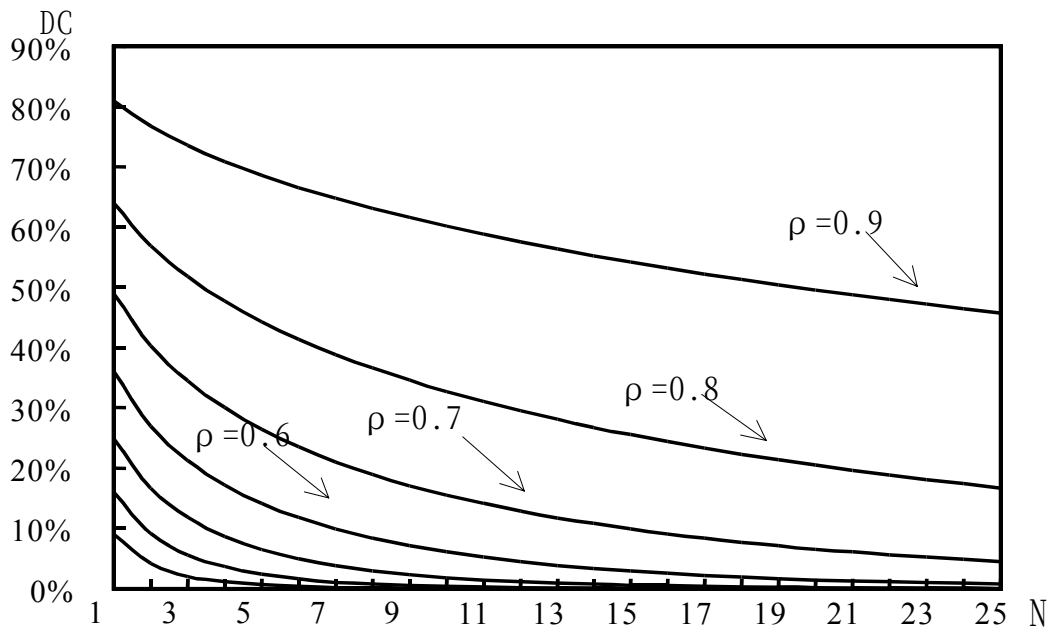


圖 3.2 不同使用率(ρ)時船席規模(N)及擁擠度(DC)之關係

$(M/E_k/N)$; $k=1$; $\rho=0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$

表 3.3 船席規模(N)船席使用率(ρ)與等待時間(W_q)關係表

$(M/E_k/N ; K=1)$ 單位：hr

$N \backslash \rho$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
1	2.7	6.0	10.3	16.0	24.0	36.0	56.0	96.0	216.0	456.0
2	0.2	1.0	2.4	4.6	8.0	13.5	23.1	42.7	102.3	222.2
3	0.0	0.2	0.8	1.9	3.8	7.1	13.1	25.9	65.4	145.1
6	0.0	0.0	0.1	0.3	0.8	2.0	4.5	10.4	29.6	69.2
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	1.8	4.9	16.0	39.6
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.8	2.6	9.6	25.2
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.5	6.6	18.1
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.0	4.9	14.0

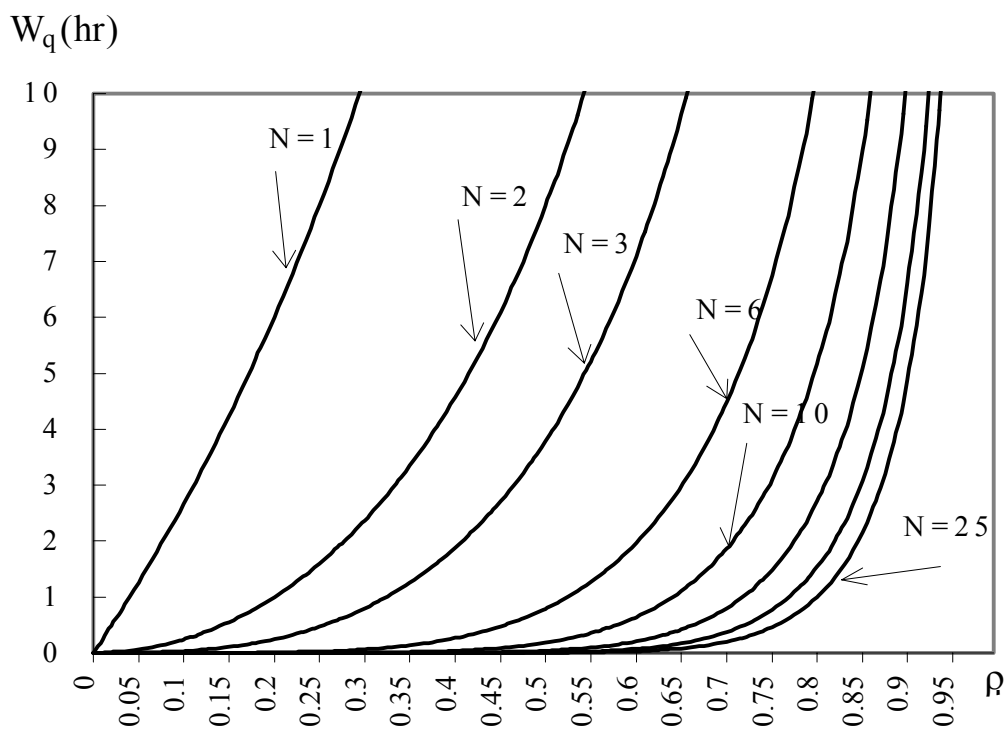


圖 3.3 $K=1$ 時使用率(ρ)與平均等待時間(W_q)之關係

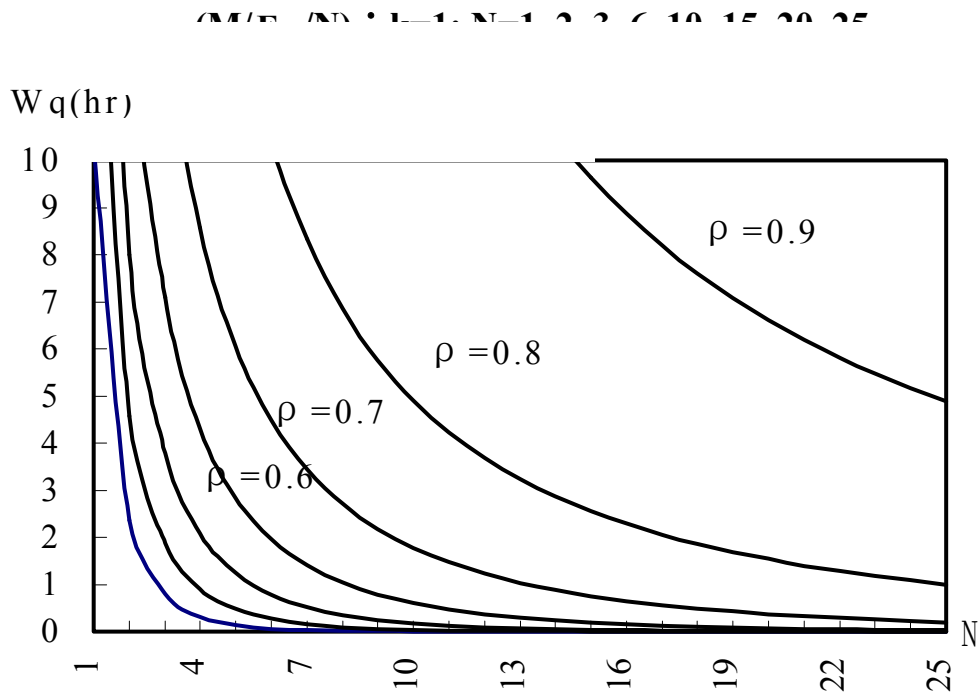


圖 3.4 不同使用率(ρ)時船席規模(N)與平均等待時間(W_q)之關係
 $(M/E_k/N) ; k=1; \rho=0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$

表 3.4 船席規模(N)船席使用率(ρ)與等待時間(W_q)關係表

($M/E_k/N ; K=2$) 單位：hr

$N \backslash \rho$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
1	2.0	4.5	7.7	12.0	18.0	27.0	42.0	72.0	162.0	342.0
2	0.2	0.8	1.9	3.5	6.1	10.2	17.4	32.1	76.9	166.8
3	0.0	0.2	0.6	1.5	2.9	5.4	10.0	19.6	49.2	109.0
6	0.0	0.0	0.1	0.2	0.6	1.5	3.5	7.9	22.4	52.1
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	1.4	3.8	12.2	29.9
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	2.0	7.3	19.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	1.2	5.0	13.7
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.8	3.7	10.6

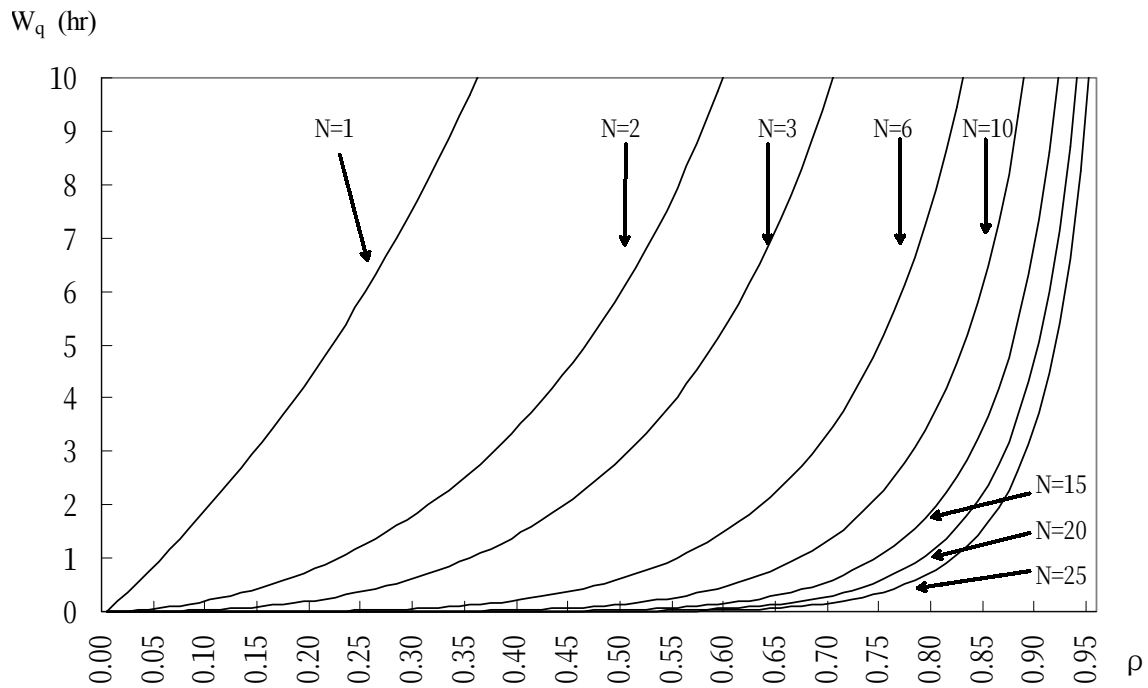


圖 3.5 $K=2$ 時使用率(ρ)與平均等待時間(W_q)之關係
($M/E_k/N$) ; $k=2$; $N=1, 2, 3, 6, 10, 15, 20, 25$

表 3.5 船席規模(N)船席使用率(ρ)與等待時間(W_q)關係表

($M/E_k/N$; $K=\infty$) 單位：hr

$N \backslash \rho$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
1	1.3	3.0	5.1	8.0	12.0	18.0	28.0	48.0	108.1	228.2
2	0.2	0.6	1.3	2.5	4.2	7.0	11.8	21.6	51.5	111.5
3	0.0	0.2	0.5	1.1	2.1	3.8	6.8	13.3	33.1	73.0
6	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	1.1	2.4	5.4	15.1	35.0
10	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.4	1.0	2.6	8.3	20.1
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.4	5.0	12.9
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.9	3.5	9.3
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6	2.6	7.2

$W_q(\text{hr})$

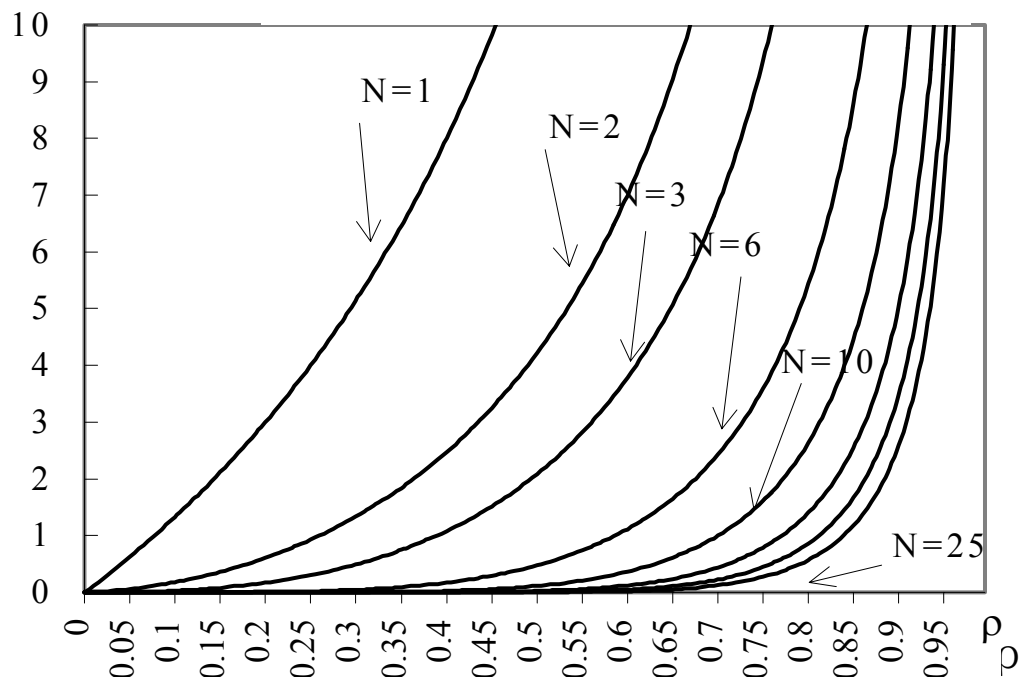


圖 3.6 $K=\infty$ 時使用率(ρ)與平均等待時間(W_q)之關係
($M/E_k/N$) ; $k=\infty$; $N=1, 2, 3, 6, 10, 15, 20, 25$

表 3.6 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表

($M / E_k / N$; $k=1$)

AWT/AST N	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
1	0.050	0.091	0.130	0.167	0.200	0.231	0.259	0.286	0.310	0.333
2	0.218	0.301	0.361	0.408	0.447	0.480	0.509	0.534	0.557	0.577
3	0.344	0.433	0.492	0.537	0.573	0.602	0.628	0.650	0.669	0.686
4	0.432	0.518	0.574	0.616	0.648	0.675	0.697	0.716	0.733	0.747
5	0.495	0.579	0.631	0.669	0.699	0.723	0.743	0.760	0.775	0.788
6	0.544	0.624	0.673	0.708	0.736	0.758	0.776	0.791	0.805	0.816
7	0.582	0.659	0.705	0.738	0.764	0.784	0.801	0.815	0.827	0.837
8	0.614	0.687	0.731	0.762	0.786	0.805	0.820	0.833	0.844	0.854
9	0.640	0.710	0.752	0.782	0.804	0.822	0.836	0.848	0.859	0.867
10	0.662	0.730	0.770	0.798	0.819	0.835	0.849	0.861	0.870	0.878

AWT/AST

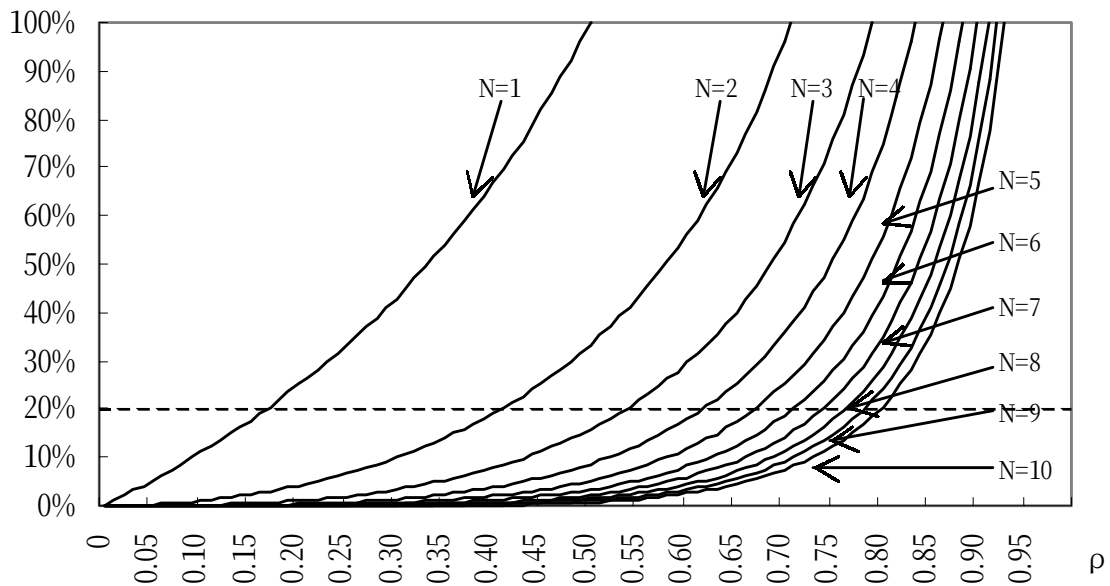


圖 3.7 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係($k=1$)
($M/E_k/N$) ; $k=1$; $N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

表 3.7 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表
($M/E_k/N$; $k=2$)

AWT/AST N	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
1	0.062	0.118	0.167	0.211	0.250	0.286	0.318	0.348	0.375	0.400
2	0.244	0.338	0.404	0.455	0.497	0.531	0.561	0.587	0.610	0.630
3	0.372	0.469	0.532	0.579	0.616	0.647	0.672	0.694	0.712	0.729
4	0.460	0.553	0.612	0.654	0.687	0.714	0.736	0.754	0.770	0.784
5	0.523	0.611	0.666	0.704	0.734	0.758	0.777	0.794	0.808	0.820
6	0.571	0.654	0.705	0.741	0.768	0.789	0.807	0.822	0.834	0.845
7	0.608	0.688	0.735	0.769	0.793	0.813	0.829	0.842	0.854	0.863
8	0.639	0.715	0.759	0.790	0.813	0.832	0.846	0.859	0.869	0.878
9	0.664	0.737	0.779	0.808	0.830	0.847	0.860	0.872	0.881	0.890
10	0.685	0.755	0.795	0.823	0.843	0.859	0.872	0.882	0.891	0.899

AWT/AST

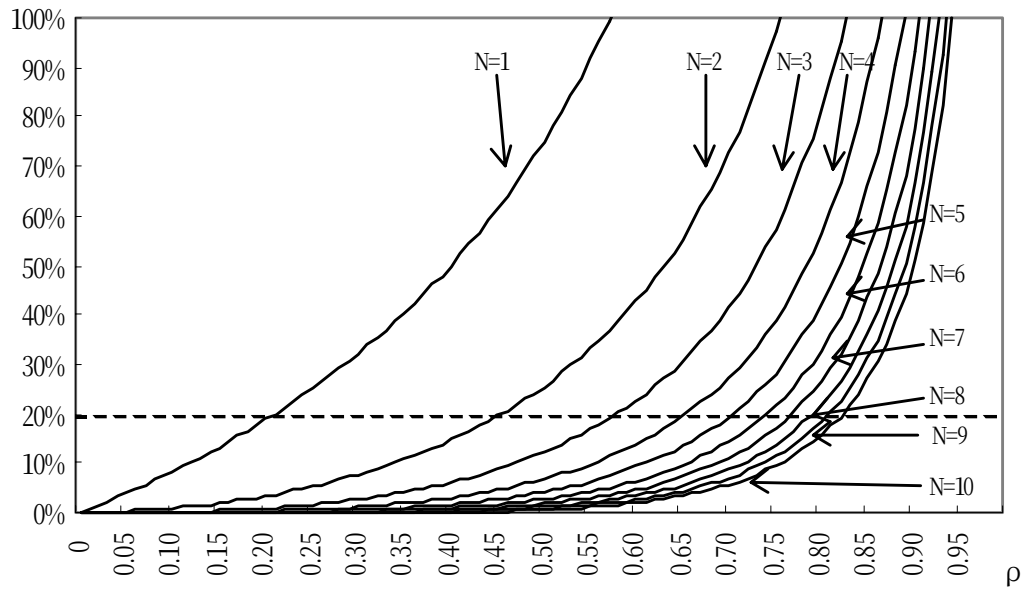


圖 3.8 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係($k=2$)
($M/E_k/N$) ; $k=2$; $N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

表 3.8 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表

($M / E_k / N$; $k=3$)

AWT/AST \ N	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
1	0.070	0.130	0.184	0.231	0.273	0.310	0.344	0.375	0.403	0.429
2	0.255	0.354	0.422	0.475	0.517	0.553	0.583	0.609	0.632	0.652
3	0.384	0.484	0.549	0.597	0.634	0.665	0.690	0.711	0.730	0.746
4	0.472	0.567	0.627	0.670	0.703	0.729	0.751	0.769	0.785	0.799
5	0.534	0.625	0.680	0.719	0.748	0.772	0.791	0.807	0.821	0.832
6	0.582	0.667	0.718	0.754	0.781	0.802	0.819	0.833	0.845	0.856
7	0.619	0.700	0.748	0.781	0.805	0.825	0.840	0.853	0.864	0.873
8	0.649	0.726	0.771	0.802	0.824	0.842	0.857	0.868	0.878	0.887
9	0.674	0.747	0.790	0.819	0.840	0.857	0.870	0.881	0.890	0.898
10	0.695	0.765	0.806	0.833	0.853	0.868	0.881	0.891	0.899	0.906

AWT/AST

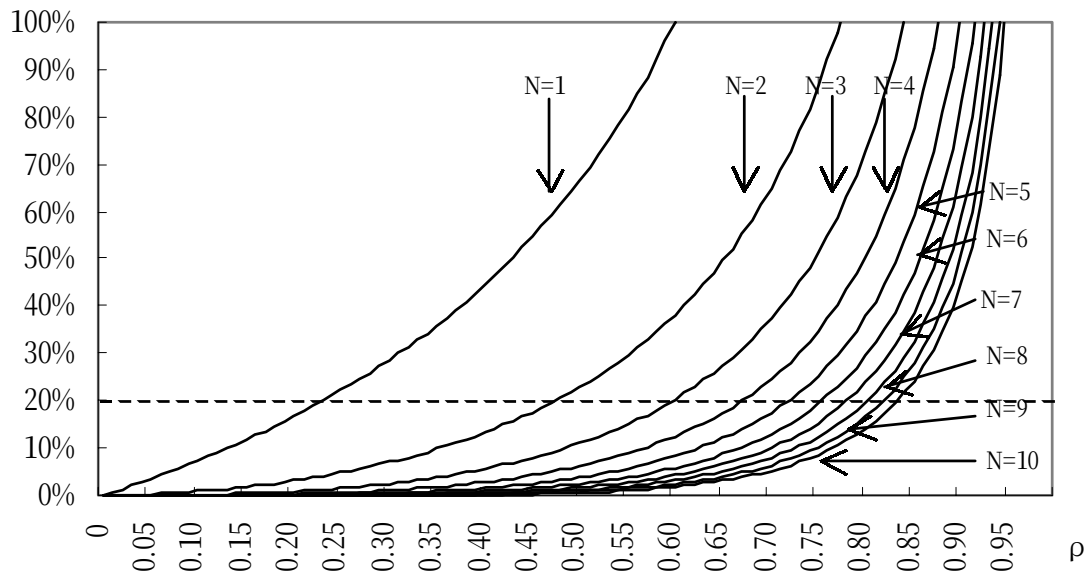


圖 3.9 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係($K=3$)
($M/E_k/N$) ; $k=3$; $N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

表 3.9 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表

($M/E_k/N$; $k=4$)

AWT/AST N	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
1	0.074	0.138	0.194	0.242	0.286	0.324	0.359	0.390	0.419	0.444
2	0.261	0.362	0.432	0.486	0.529	0.565	0.595	0.621	0.644	0.664
3	0.391	0.493	0.559	0.607	0.644	0.674	0.700	0.721	0.739	0.755
4	0.478	0.575	0.635	0.679	0.712	0.738	0.759	0.777	0.793	0.806
5	0.541	0.632	0.688	0.726	0.756	0.779	0.798	0.814	0.827	0.839
6	0.588	0.674	0.725	0.761	0.788	0.809	0.826	0.840	0.852	0.862
7	0.625	0.706	0.754	0.787	0.812	0.831	0.846	0.859	0.870	0.879
8	0.655	0.732	0.777	0.808	0.830	0.848	0.862	0.874	0.883	0.892
9	0.680	0.753	0.796	0.824	0.845	0.862	0.875	0.885	0.894	0.902
10	0.700	0.771	0.811	0.838	0.858	0.873	0.885	0.895	0.904	0.911

AWT/AST

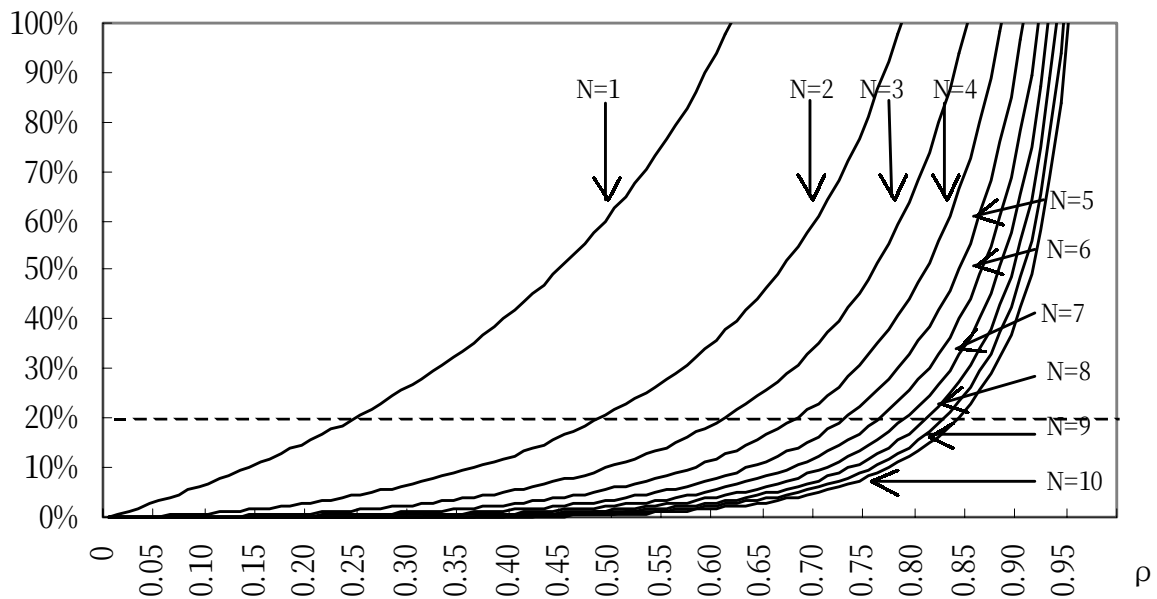


圖 3.10 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = \text{AWT/AST}$)之關係($k=4$)
($M/E_k/N$) ; $k=4$; $N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

表 3.10 席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表

($M / E_k / N$; $k=5$)

AWT/AST N	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
1	0.077	0.143	0.200	0.250	0.294	0.333	0.368	0.400	0.429	0.455
2	0.265	0.368	0.439	0.493	0.536	0.572	0.602	0.628	0.651	0.671
3	0.395	0.498	0.565	0.613	0.651	0.681	0.706	0.727	0.745	0.761
4	0.482	0.580	0.641	0.684	0.717	0.743	0.765	0.783	0.798	0.811
5	0.545	0.637	0.692	0.731	0.761	0.784	0.803	0.818	0.832	0.843
6	0.592	0.678	0.730	0.765	0.792	0.813	0.830	0.844	0.855	0.865
7	0.629	0.711	0.758	0.791	0.816	0.835	0.850	0.862	0.873	0.882
8	0.658	0.736	0.781	0.812	0.834	0.852	0.865	0.877	0.886	0.895
9	0.683	0.757	0.799	0.828	0.849	0.865	0.878	0.889	0.897	0.905
10	0.704	0.775	0.815	0.842	0.861	0.876	0.888	0.898	0.906	0.913

AWT/AST

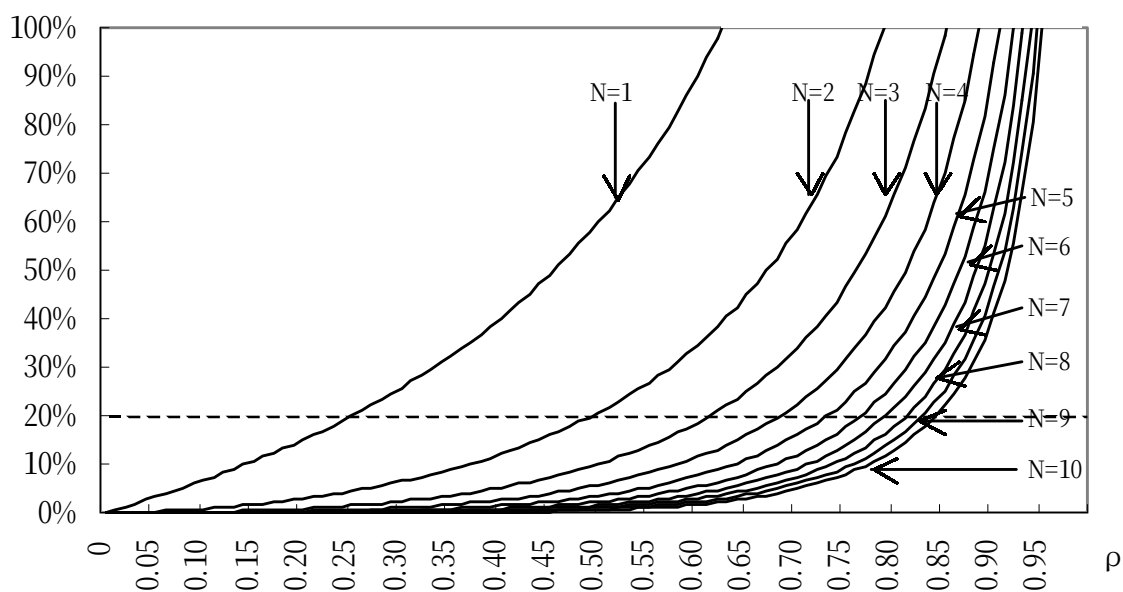


圖 3.11 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = \text{AWT/AST}$)之關係($k=5$)
($M/E_k/N$) ; $k=5$; $N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

表 3.11 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表

($M/E_k/N$; $k=6$)

AWT/AST N	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
1	0.079	0.146	0.205	0.255	0.300	0.340	0.375	0.407	0.435	0.462
2	0.268	0.372	0.444	0.498	0.541	0.577	0.608	0.634	0.656	0.676
3	0.398	0.502	0.569	0.617	0.655	0.685	0.710	0.731	0.749	0.765
4	0.485	0.584	0.645	0.688	0.721	0.747	0.768	0.786	0.801	0.814
5	0.548	0.640	0.696	0.735	0.764	0.787	0.806	0.821	0.835	0.846
6	0.594	0.682	0.733	0.769	0.795	0.816	0.832	0.846	0.858	0.868
7	0.631	0.713	0.761	0.794	0.818	0.837	0.852	0.865	0.875	0.884
8	0.661	0.739	0.784	0.814	0.837	0.854	0.868	0.879	0.889	0.897
9	0.685	0.760	0.802	0.831	0.851	0.867	0.880	0.891	0.899	0.907
10	0.706	0.777	0.817	0.844	0.863	0.878	0.890	0.900	0.908	0.915

AWT/AST

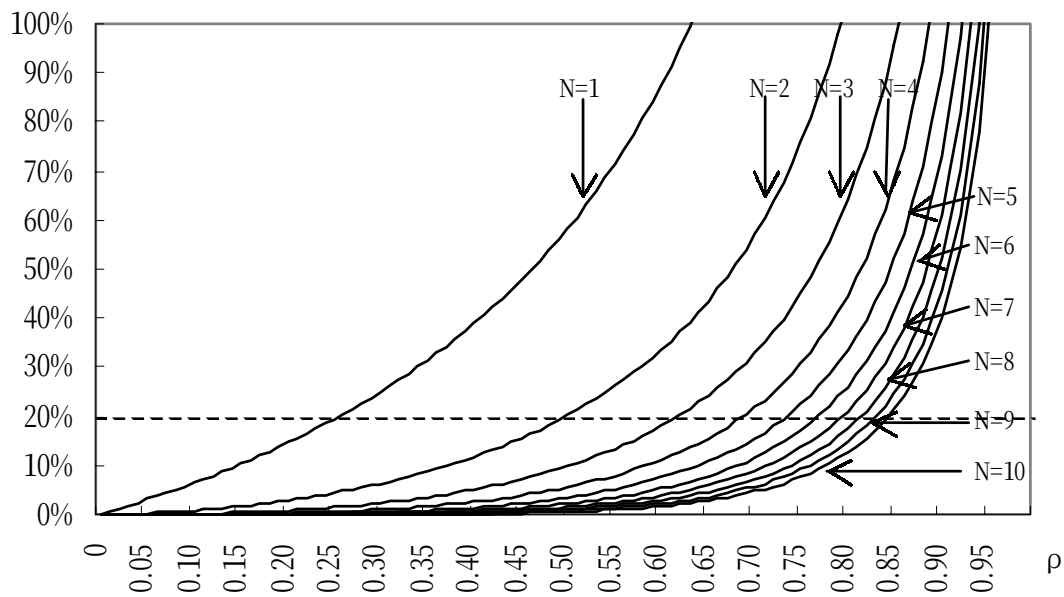


圖 3.12 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係($K=6$)
($M/E_k/N$) ; $k=6$; $N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

表 3.12 船席規模與 AWT/AST 指標及合理使用率(ρ)對照表

($M/E_k/N$; $k=\infty$)

AWT/AST N	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
1	0.091	0.167	0.231	0.285	0.333	0.375	0.412	0.444	0.473	0.500
2	0.284	0.395	0.469	0.525	0.569	0.605	0.636	0.661	0.683	0.703
3	0.415	0.523	0.591	0.641	0.678	0.708	0.733	0.753	0.771	0.786
4	0.502	0.603	0.665	0.708	0.741	0.766	0.787	0.804	0.819	0.832
5	0.563	0.658	0.714	0.753	0.782	0.804	0.822	0.837	0.850	0.861
6	0.609	0.698	0.750	0.785	0.811	0.831	0.847	0.861	0.871	0.881
7	0.645	0.729	0.777	0.809	0.833	0.851	0.866	0.877	0.887	0.896
8	0.674	0.753	0.798	0.828	0.850	0.867	0.880	0.891	0.900	0.907
9	0.698	0.774	0.816	0.844	0.864	0.879	0.891	0.901	0.910	0.916
10	0.719	0.790	0.830	0.856	0.875	0.890	0.901	0.910	0.917	0.924

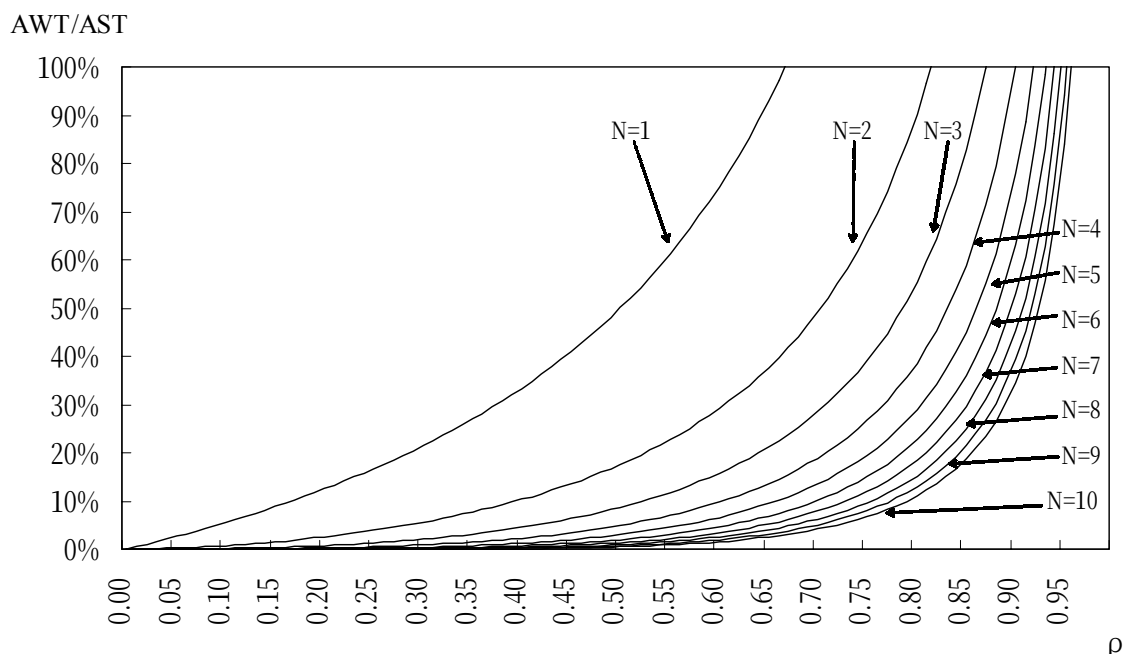


圖 3.13 使用率與平均等待因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)之關係($K=\infty$)
($M/E_k/N$) ; $k=\infty$; $N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

由圖可知：各種等候系統評估指標的值，受到港埠運輸系統之設施規模、服務時間之機率分佈形態、使用率等之變動而有相當程度的差異與變化。就擁擠度（DC）而言，對同一船席規模(N)，對應於使用率(ρ)愈高，則擁擠度也隨之上升；而當使用率(ρ)維持相同時，隨著船席規模(N)之增加，擁擠度會隨之下降。大體而言，DC 與 ρ 兩評估指標只能顯示船舶在港埠系統之狀態，對於船舶在港等待之狀況卻難以具體、直接的表示出來。

就平均等待時間(W_q)而言，當使用率(ρ)與船席規模(N)維持相同時，隨著 Erlang number k 之增加，圖中之曲線有向右移動之趨勢；而且當使用率(ρ)相同時，隨著船席規模(N)的增加，船舶之平均等待時間會下降。相同席規模及等待時間，隨著 Erlang number k 之增加，船席使用率(ρ)也增加。

就使用率(ρ) 與等待時間因子 ($W_q \cdot \mu = AWT/AST$) 之關係而言，當 k 值愈大，則圖中之曲線向右移動之趨勢愈顯著。例如：船席數為 3，當

使用率為 70%之場合， $k=1$ 及 $k=\infty$ 時，等待時間因子分別為 54.7%及 28.5%。況且，當船席規模愈大時， $(W_q \cdot \mu = AWT/AST)$ 與使用率(ρ)間之變化也隨之變小；而當等待時間因子與船席規模維持相同時，隨著 Erlang number k 之增加，船席使用率(ρ)也越大。大體而言，平均等待時間及等待時間因子兩評估指標，易受到船舶之種類、船型大小及在船席服務時間長短等之時間價值之不同而變動，而且平均等待時間及等待時間因子之最適基準值，其標準也不容易定出來。

在等候系統之各種評估指標中，經比較結果(黃文吉等人 1997)：以時間因子($W_q \cdot \mu = AWT/AST$)這項指標較為穩定，擁擠度(DC)與平均等待時間(W_q) 次之。

3.3 成本函數所構建之評估指標及其特性

1960 年代初期以前所提出之系統評估指標，多數未考慮經濟面之成本問題，是一大缺失。其後，則陸續有相關文獻提出各種不同的成本函數來探討港埠運輸系統之最適化課題。雖然，不同的研究所提出成本函數所考量之因素有所差異，但基本上，乃係運用相關之等候模式求解相關參數，而以港埠使用者（船方）及港埠供給者（港埠當局）雙方總費用最小化之概念為追求之目標。

Plumlee (1966) 及 Nicolau (1967) 以船舶等待成本及船席閒置成本最小化來做目標函數。Wanhil (1974)、則武 (1978)、Hiller (1981) 等人之研究，以船席閒置及作業之總時間成本加上船舶之等待成本作為目標函數來計算，吉川 (1978) 則增加了貨物利息及裝卸費用之成本，其後，Schonfeld (1985) 又把裝卸作業之機具費用及操作人員費用，船上貨物之成本，堆積場費用等考慮進去，使得成本函數更為精緻 周延。可是，在不同的研究中，考量了許多不同的成本因素，卻無法對以下兩問題有明確的交代：(1)是否對最適化求解有影響(2)各參數代入成本函數後對最適解影響的程度有多大。

3.3.1 成本函數的類型

各文獻所提出之成本函數，可以歸納為三種類型，意即：1960 年初期(Plumlee1966)，以船舶等待成本(SWC)及船席閒置成本(BWC)最小化，而提出之成本函數（TC₁）：

$$TC_1 = U_s \cdot \lambda \cdot W_q + U_b \cdot N (1 - \rho) \dots\dots\dots(3.16)$$

U _s ：船舶之單位時間成本	U _b ·N：船席成本(BC)
λ：船舶到達率(艘/日)	1-ρ：船席閒置率(%)
W _q ：船舶平均等待船席時間	N：船席數
L _q = λ · W _q ：平均等待船舶數目	L：平均在港船舶數目

此後， Nicolau (1967)對船席方面考慮閒置成本(BWC)與作業成本(BSC)。船舶方面則只計算等待船席之成本(SWC)。而形成 TC₂ 之成本函數：

$$TC_2 = U_s \cdot \lambda \cdot W_q + U_b \cdot N \dots\dots\dots(3.17)$$

1974 年前後，又有學者(Wanhil 1974，則武 1978，吉川 1978) 將船舶在港服務時間之成本(SSC)加入 TC₂，而形成目前各界所廣泛使用之成本函數 TC₃：

$$TC_3 = U_s \cdot \lambda \cdot (W_q + \frac{1}{\mu}) + U_b \cdot N \dots\dots\dots(3.18)$$

$\frac{1}{\mu}$ ：船舶之平均服務時間 = Q / SH / R = V / R

$$BWC + BSC = BC$$

Q：全年貨物裝卸量	BWC：船席閒置成本
SH：全年到港船舶艘數	BSC：船席服務成本

V：每船平均之裝卸量

SSC：船舶作業成本

R：船席每小時之平均裝卸作業量

船舶在港成本函數通常可區分為船舶及貨物之成本 C_1 與碼頭之服務成本 C_2 兩大項目。其中 C_1 係碼頭使用者（船公司等）所支付的費用，包括船舶成本 (1) C_s ：船舶之建造費用、維修費用以及營運管理費用及 (2) C_{cg} ：船上所承載之貨物及其相關配備之利息成本。碼頭之服務成本 C_2 則包括：港埠設施（包括碼頭在內）之建設費用、維修費用及營運管理費用、裝卸機具及其相關費用以及堆貨場費用。因此：

$$C_1 = C_s + C_{cg} \dots\dots\dots(3.19)$$

$$C_2 = C_{pf} + C_{po} + C_{bf} + C_{bo} + C_{cm} + C_{co} + C_{yd} \dots\dots\dots(3.20)$$

其中，

C_{pf} , C_{po} ：碼頭以外港埠設施之建設費用及其營運管理費用。

C_{bf} , C_{bo} ：碼頭之建設費用及其營運管理費用。

C_{cm} ：裝卸機具成本及維修費用。

C_{co} ：裝卸機具作業者費用。

C_{yd} ：堆貨場之費用。

將各項費用導入等候模式之各項指標公式計算可得：

1. C_s 及 C_{cg}

依據 M / E_k / N 等候模式，港埠系統之期待在港船舶數(L)可寫成：

$$L = \lambda / \mu + L_q \dots\dots\dots(3.21)$$

因此，假設在港船舶一艘之單位時間成本為 U_s (\$ / (hr · ship))，則港內船舶之單位時間船舶成本為：

$$C_s = U_s (\lambda / \mu + L_q) \dots\dots\dots(3.22)$$

此外，假設單位貨物 (Ton, TEU) 單位時間之貨物及其相關配備之利息成本為 $U_{cg} (\$/(\text{hr} \cdot \text{Ton}))$ ，則單位時間船上貨物及相關配備之成本 C_{cg} 為：

$$C_{cg} = U_{cg} \cdot X \cdot (\lambda / \mu + L_q) \dots\dots\dots(3.23)$$

其中， X 為船舶平均承載貨物量(Ton, TEU)

2. C_{pf} , C_{po} , C_{bf} , C_{bo}

茲將碼頭以外之港埠建設費用 (C_{pf}) 及其營運管理費用(C_{po})；碼頭之建設費用 (C_{bf}) 及其營運管理費用 (C_{bo}) 等四項，均以一個船席之單位時間成本來計算，則其單位成本分別為 U_{pf} ， U_{po} ， U_{bf} 及 U_{bo} 。再分別乘上船席數 N ，則港埠設施及其相關費用均可求得如下：

$$\begin{aligned} C_{pf} &= U_{pf} \cdot N \\ C_{po} &= U_{po} \cdot N \\ C_{bf} &= U_{bf} \cdot N \\ C_{bo} &= U_{bo} \cdot N \end{aligned} \dots\dots\dots(3.24)$$

3. C_{cm} , C_{co}

假設一個碼頭平均安裝之裝卸機具組數為 AC ，則 C_{cm} 及 C_{co} 可分別求得如下：

$$\begin{aligned} C_{cm} &= U_{cm} \cdot N \cdot AC \\ C_{co} &= U_{co} \cdot AC \cdot T \cdot \lambda \end{aligned} \dots\dots\dots(3.25)$$

其中，

$T = V / (AC^f \cdot \gamma)$ ：每艘船舶平均裝卸時間 (hr)

V ：船舶每艘平均裝卸量 (Ton, TEU)

γ ：裝卸機具之作業效率 (Ton, TEU/(hr · crane))

f ：一座船席多台裝卸機具作業時之干擾係數

U_{cm} ：裝卸機具及其維修之單位時間之費用

U_{co} ：裝卸機具作業員單位時間費用

4. C_{yd}

單位貨物 (Ton, TEU) 單位時間之堆貨場費用如以 U_{yd} 來表示，則堆貨場之費用為：

$$C_{yd} = U_{yd} \cdot V \cdot H \cdot \lambda \dots\dots\dots(3.26)$$

其中， H ：單位貨物平均放置時間 (小時)

將(3.21) (3.26)式代入(3.19)及(3.20)式，則船舶在港總成本函數 (TC)可表示為：

$$\begin{aligned} TC &= C_1 + C_2 \\ &= (U_s + U_{cg} \cdot X) \cdot (\lambda / \mu + L_q) + (U_{pf} + U_{po} + U_{bf} + U_{bo}) \cdot N \dots\dots(3.27) \\ &\quad + U_{cm} \cdot N \cdot AC + U_{co} \cdot T \cdot AC \cdot \lambda + U_{yd} \cdot V \cdot H \cdot \lambda \end{aligned}$$

圖 3.14 為 $k=3$ ，船席數 $N=8$ 時，年營運量 Q ，對應於三類型成本函數各成本項之表示圖。圖中顯示： $TC_3 > TC_2 > TC_1$ ，船舶作業之成本 (SSC)、船舶的等待成本(SWC)、船席之作業費用(BSC)隨著年營運量 Q 之增加而呈現發散又不一樣之趨勢。但是將各成本函數除以 $(\lambda \cdot U_s \cdot V)$ 後所畫之圖形，如圖 3.15 所示，顯示經轉換後， TC_1 、 TC_2 及 TC_3 三種評估指標均變成同樣的形狀，只是上下平行移動之關係。其意義為：雖然是不同的三類型成本函數評估指標，但基本上是由船舶的等待成本 (SWC/ $(\lambda \cdot U_s \cdot V)$)及船席之總成本(BC/ $(\lambda \cdot U_s \cdot V)$)兩項因素來決定。其餘，當 μ 為固定時，船舶作業之成本(SSC/ $(\lambda \cdot U_s \cdot V)$)，船席之作業費用 (BSC/ $(\lambda \cdot U_s \cdot V)$)等則與 X 軸承平行關係為定值，對於各作業項最小點位

置似乎不會影響。因此，黃文吉等人（1997）經研究後認為：在從事港埠能量分析或最適船席規劃時，雖然是三種不同的評估指標(成本函數)，服務率如無特別的考量則可能得到同樣的結果。

各成本函數除以 $(\lambda \cdot U_s \cdot V)$ 稱為無因次化評估指標（IND），其定義為：單位貨物在港總成本與單位時間每艘船舶成本之比值，IND 值越低，表示其單位貨物總成本越低，而其港埠績效將越高。IND 可作為衡量港埠營運績效的依據 可以做為(1)同一港埠不同時期營運績效之比較(2)國內各港埠間營運績效之比較(3)國際各港埠間營運績效之比較，而且讓物價波動、通貨膨脹以及幣值變動等因素所造成之影響儘量減少，而且其計算結果與其他成本函數評估指標比較有較穩定之傾向。將(3.27)式除以 $(\lambda \cdot U_s \cdot V)$ 轉換為無因次化評估指標 (IND)，則單位貨物(Ton, TEU)在港總費用與船舶單位時間成本比值之 IND 定義為：

$$\begin{aligned} \text{IND} &= \text{TC} / (\lambda \cdot U_s \cdot V) \\ &= \left[(1 + R_{cg}) \cdot (1 / \mu + W_q) + (R_{pf} + R_{po} + R_{bf} + R_{bo}) \cdot N / \lambda \dots\dots(3.28) \right. \\ &\quad \left. + R_{cm} \cdot AC \cdot N / \lambda + R_{co} \cdot T \cdot AC + R_{yd} \cdot V \cdot H \right] / V \end{aligned}$$

其中， W_q ：船舶每艘之平均等候時間 (hr)

$1 / \mu = T + DT$ ， DT ：船舶靠岸、等候裝卸、等待車輛、等待補給、等候離岸等之延誤時間(小時)

R_{cg} , R_{pf} , R_{po} , R_{bf} , R_{bo} , R_{cm} , R_{co} , R_{yd} 分別為 $U_{cg} \cdot X$, U_{pf} , U_{po} , U_{bf} , U_{bo} , U_{cm} , U_{co} , U_{yd} 與 U_s 之比值。

$$(3.28)\text{式 IND 之因次分析如次: } \text{IND} = \frac{\text{TC}}{\lambda \cdot V \cdot U_s} = \frac{\$/\text{hr}}{\text{ship/hr} \cdot \text{TEU/ship} \cdot U_s} = \frac{\$/\text{TEU}}{U_s}$$

也就是單位貨物在港總費用與船舶單位時間成本比值，由於分子與分母均為錢幣單位所以為無因次。

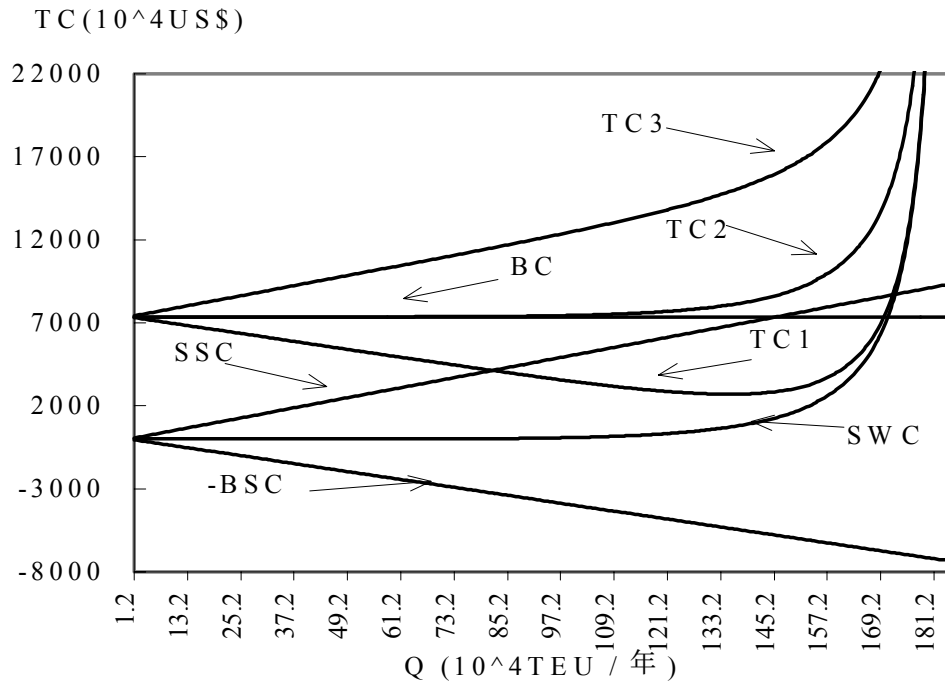


圖 3.14 各成本函數(TC_i)及年運量關係圖
($M/E_k/N$) ; $k=3$; $N=8$

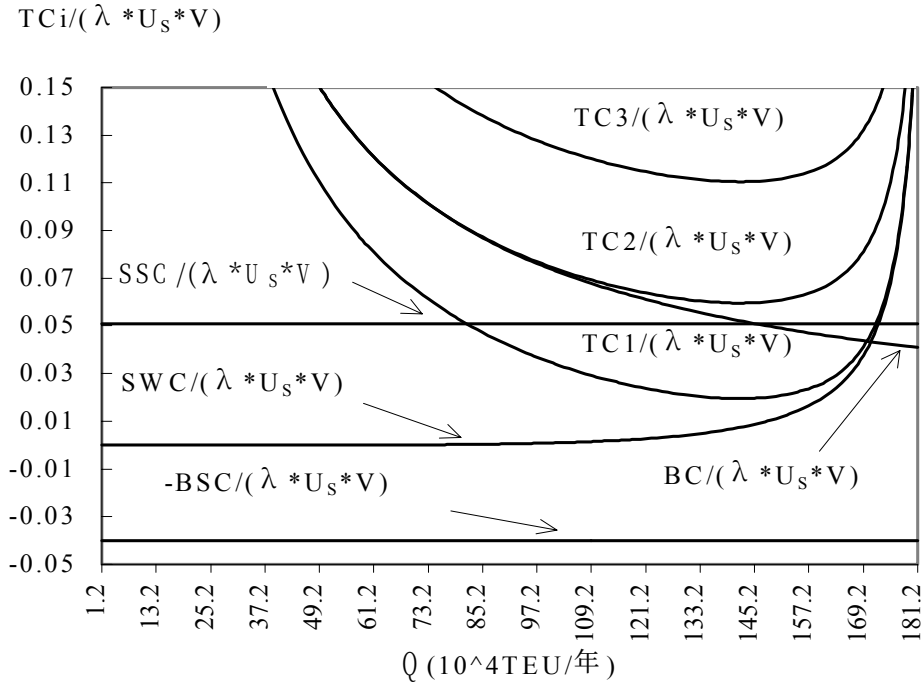


圖 3.15 $TC_i / (\lambda \cdot U_s \cdot V)$ 及年運量關係圖
($M/E_k/N$) ; $k=3$; $N=8$

第四章 碼頭營運績效分析

碼頭經營績效之良窳，具體反映於其所能產出之船席能量，以及相關成本之節省上。影響船席能量之因素眾多，例如：船舶因素、碼頭因素、岸上前線作業因素、碼頭後線配合因素、碼頭經營方式、裝卸作業方式、實際機具使用數、全年實際作業數、碼頭使用率、船席數等。其中，合理船席使用率(ρ)之決定，實為計算船席作業能量之關鍵所在。決定合理使用率(ρ)之方法，可分為與等候系統有關之擁擠度法(DC)、平均等待時間法(W_q)、等待因子法($AWT/AST = W_q \times \mu$)及結合等待理論相關模式與成本函數最適化建立評估指標之分析方法。各種指標之特性以及其使用時之優缺點，在前面章節已有敘述。本研究則基於操作之簡便性，以及不同港埠、不同期間成本之比較性，分別採用等待因子法及無因次指標 IND 來進行相關營運規模分析。

4.1 碼頭營運規模效益分析（等待因子法）

聯合國出版之「Port Development」曾說明在利用等待因子法來決定合理使用率於港埠規劃時， AWT/AST 指標介於 10%~20%範圍是可以被接受的，但一般以不超過 30%為準。另外根據「Port Performance Index」之定義： AWT/AST 指標不超過 10%為不擁擠；介於 10%~20%範圍為臨界擁擠；超過 20%為嚴重擁擠；台灣地區國際商港整體規劃則以 $AWT/AST=20\%$ 求得船席使用率 ρ ，再進行船席能量推估。本研究分別以 $AWT/AST=20\%$ 及 $AWT/AST=30\%$ 時之各種指標來做比較。

在碼頭服務率(μ)固定之狀況，船席能量可以交通強度($a = \lambda / \mu$)來定義；當服務率變動時，以到達率(λ)表示之年間船舶到達數來定義；如果已知船舶之平均裝卸量(V)，則可以年裝卸作業能量(Q)來定義。由於船席使用率 $\rho = \lambda / (N \cdot \mu)$ ，所以上述各定義可列式如下（夏力生，

1998)：

$$a = N \cdot \rho \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\lambda = N \cdot \rho \cdot \mu \quad (\text{艘/年}) \dots\dots\dots(4.2)$$

$$Q = N \cdot \rho \cdot \mu \cdot V \quad (\text{TEU/yr}) \dots\dots\dots(4.3)$$

利用等待因子法來評估增加船席規模之效益時，首先找出不同 K 值，在不同船席規模(N)，當 AWT/AST=20%及 30%時其船席使用率 ρ ，分別計算 ρ 變化量 ($= \rho_n - \rho_{n-1}$)、 ρ 變化量百分比 ($= (\rho_n - \rho_{n-1}) / \rho_1$)、船席能量增加倍數 ($= \lambda_n / \lambda_1$)、總效益 ($\lambda_n - \lambda_{n-1}$)、總效益比 ($\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$) 等。式中 ρ_n, λ_n ：分別為船席數 N 時之合理船席使用率及船舶到達率； $\rho_{n-1}, \lambda_{n-1}$ ：分別為船席數 N - 1 時之合理船席使用率及船舶到達率； ρ_1, λ_1 ：分別為船席數 N= 1 時之合理船席使用率及船舶到達率。計算結果如表 4.1 ~ 4.7，並將之繪製成圖 4 - 1 (a,b,c,d) ~ 4 - 7 (a,b,c,d)。由圖可看出來，無論 K 值為何，各項指標都是以船席數由 1 增加為 2 時最大，也就是增加船席時效益最顯著；船席數由 2 增加為 3 時次之；而在船席數為 3、4、5 時曲線趨於緩和；而在船席數大於 6 或 7 時，其變化較不顯著，換句話說，當船席規模大於 6 或 7 時，增加船席規模雖然總效益仍然增加，惟其效益增加程度，已不若船席規模小時增加船席之效益來得顯著。

至於 K 值對於各項指標之影響則可以由圖 4 - 8 ~ 4 - 12 顯示出來，圖 4 - 8 顯示船席規模相同時，雖然隨著 K 之增加， ρ 變化量有減少之趨勢，但 $K=\infty$ 之 ρ 變化量與其他 K 值之 ρ 變化量相比較，差異並不是很顯著。如果以變化量百分比來比較，圖 4 - 9 顯示，隨著 K 之增加， ρ 變化量百分比有減少之趨勢，其中以 K=1 增加至 K=2 時，減少情況比較明顯。至於增加船席規模對於能量之影響程度，以 K=1 時之能量增加倍數最大，其情況也是以 K=2 減少至 K=1 時最為顯著，如圖

4-10 所示，顯示由單一專用貨櫃碼頭之營運，轉變為包含數個貨櫃碼頭之貨櫃中心營運型態，對於增建船席之效果最為明顯。不同 K 值時增加船席規模之總效益以 $K=\infty$ 較大， $K=1$ 時最小，而在船席規模數大於 3 座時，增加船席數之總效益趨於穩定，且不同 K 值間之總效益差異不大，如圖 4-11 所示。經轉換成總效益比值時，可以由圖 4-12 表示，K 值越大其增加之總效益比值有越小之趨勢，其中也以 $K=2$ 減少為 $K=1$ 時較為顯著。

表 4.1 增加船席規模(N)之效益分析 ($M/E_k/N$, $k=1$)

船席數 (N)	AWT/AST = 20%				AWT/AST = 30%			
	ρ 變化量	ρ 變化量 百分比 (%)	船席能 量增加 倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$	ρ 變化量	ρ 變化量 百分比 (%)	船席能 量增加 倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$
1								
2	0.241	144.3%	4.886	3.886	0.249	107.8%	4.156	3.156
3	0.129	77.2%	9.647	4.760	0.122	52.8%	7.818	3.662
4	0.079	47.3%	14.754	5.108	0.073	31.6%	11.688	3.870
5	0.053	31.7%	20.030	5.275	0.048	20.8%	15.649	3.961
6	0.039	23.4%	25.437	5.407	0.035	15.2%	19.688	4.039
7	0.030	18.0%	30.934	5.497	0.026	11.3%	23.758	4.069
8	0.024	14.4%	36.503	5.569	0.021	9.0%	27.872	4.114
9	0.020	11.9%	42.133	5.630	0.017	7.2%	32.006	4.135
10	0.016	9.7%	47.788	5.655	0.013	5.9%	36.149	4.142

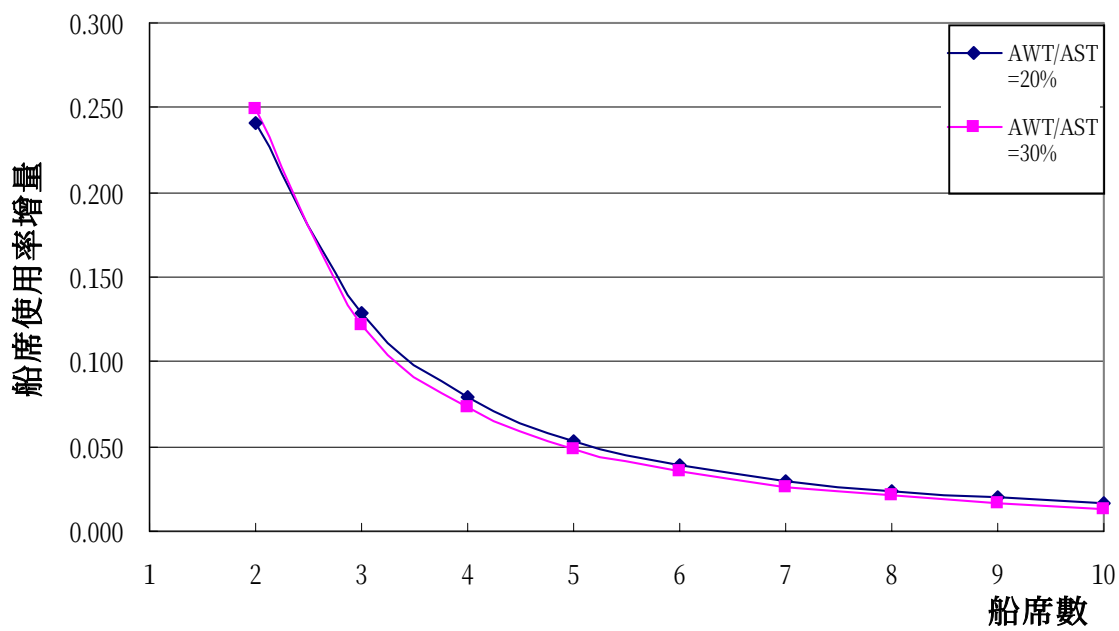


圖 4-1a 船席使用率變化量分析(K=1)

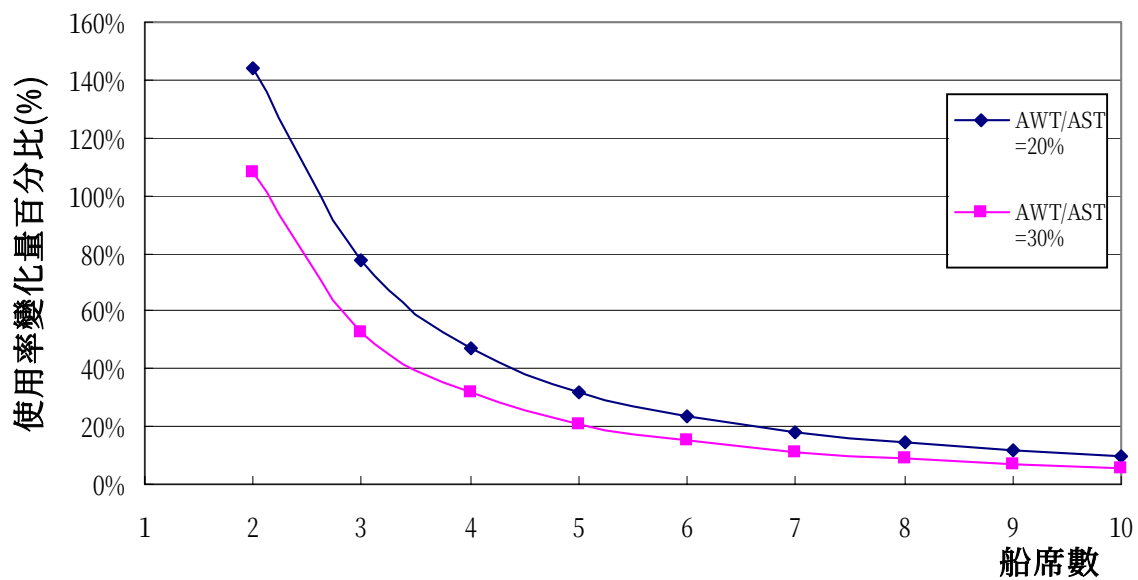


圖 4-1b 使用率變化百分比(K=1)

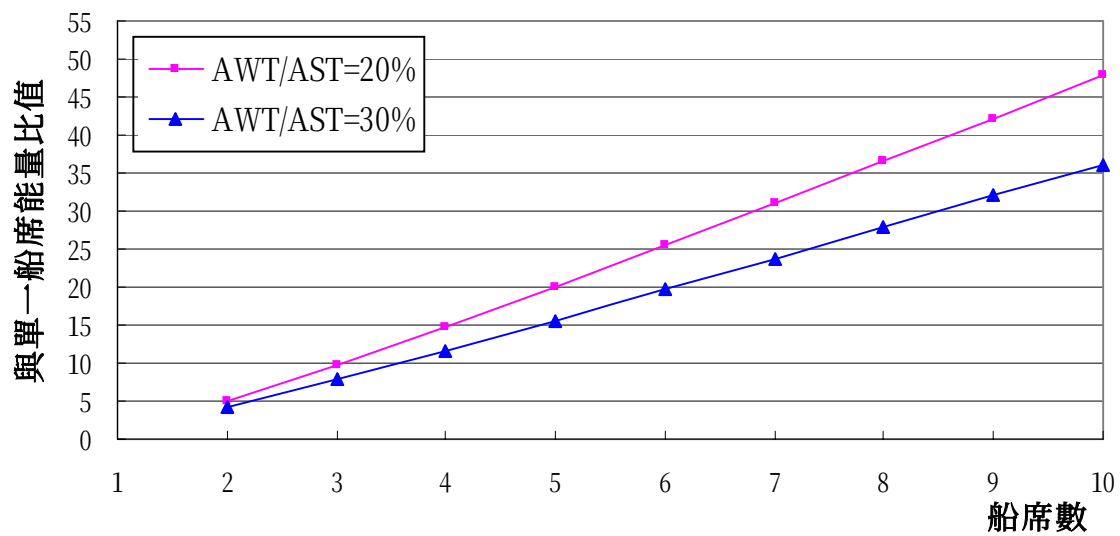


圖 4-1c 船席能量倍數分析 (K=1)

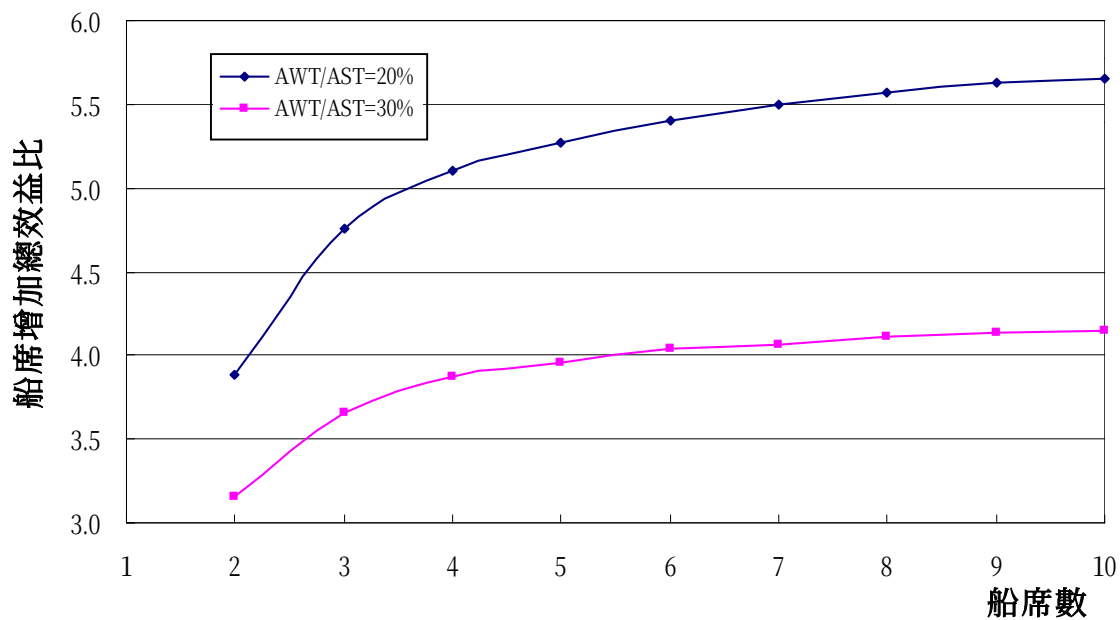


圖 4-1d 船席數增加總效益比分析 (K=1)

表 4.2 增加船席規模(N)之效益分析 (M/E_k/N, k=2)

船席數 (N)	AWT/AST = 20%				AWT/AST = 30%			
	ρ 變化量	ρ 變化量 百分比 (%)	船席能 量增加 倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$	ρ 變化量	ρ 變化量 百分比 (%)	船席能 量增加 倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$
1								
2	0.244	115.6%	4.313	3.313	0.245	85.7%	3.713	2.713
3	0.124	52.8%	7.753	3.919	0.116	36.1%	6.435	3.073
4	0.075	31.6%	11.602	4.166	0.067	20.6%	9.406	3.199
5	0.050	21.2%	15.563	4.284	0.044	13.9%	12.452	3.266
6	0.037	15.2%	19.584	4.389	0.031	9.7%	15.523	3.301
7	0.028	11.7%	23.667	4.441	0.024	7.3%	18.622	3.346
8	0.021	9.1%	27.775	4.464	0.019	5.7%	21.739	3.374
9	0.018	7.4%	31.909	4.493	0.015	4.6%	24.872	3.381
10	0.015	6.1%	36.061	4.536	0.012	3.8%	28.013	3.388

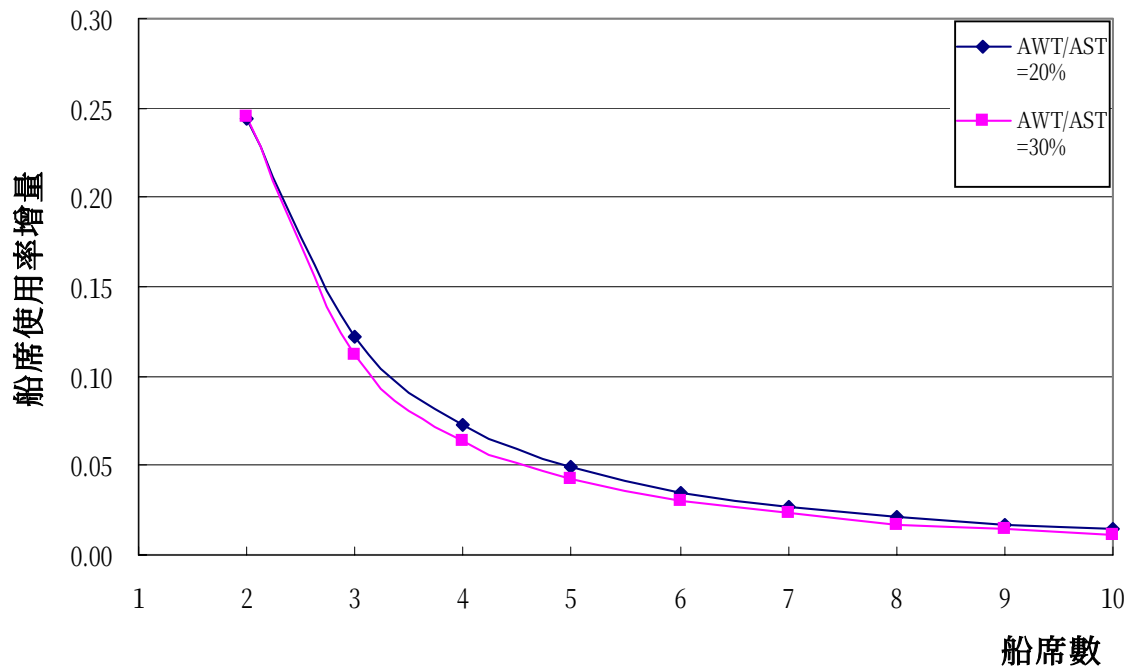


圖 4-2a 船席使用率變化量分析 (K=2)

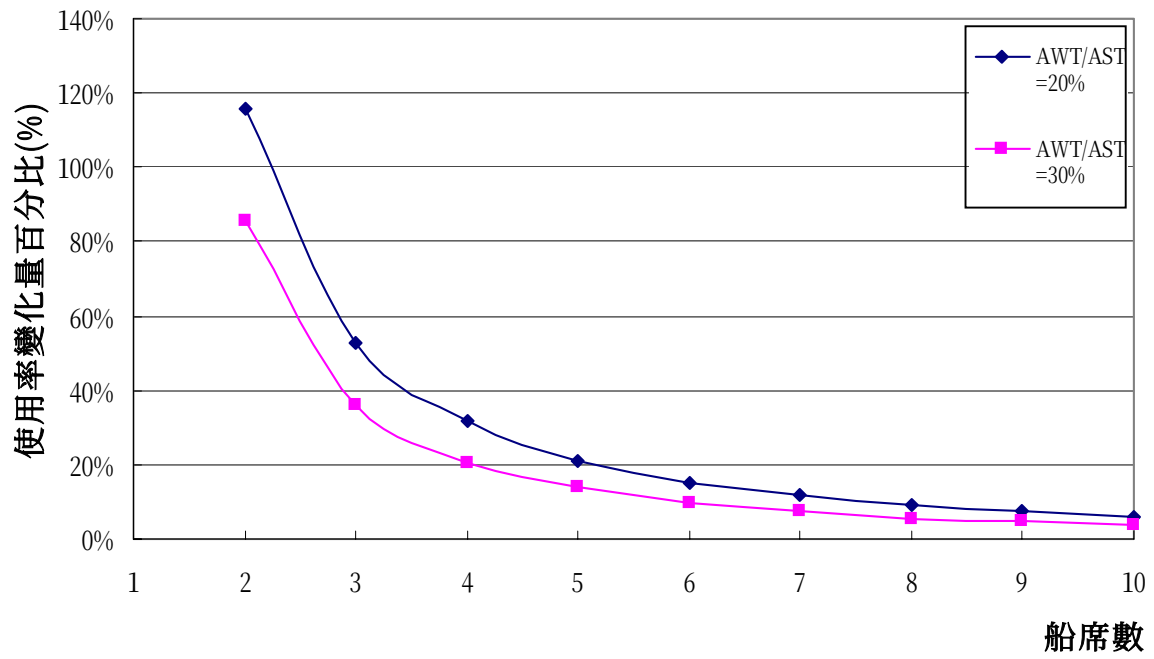


圖 4-2b 使用率變化百分比 (K=2)

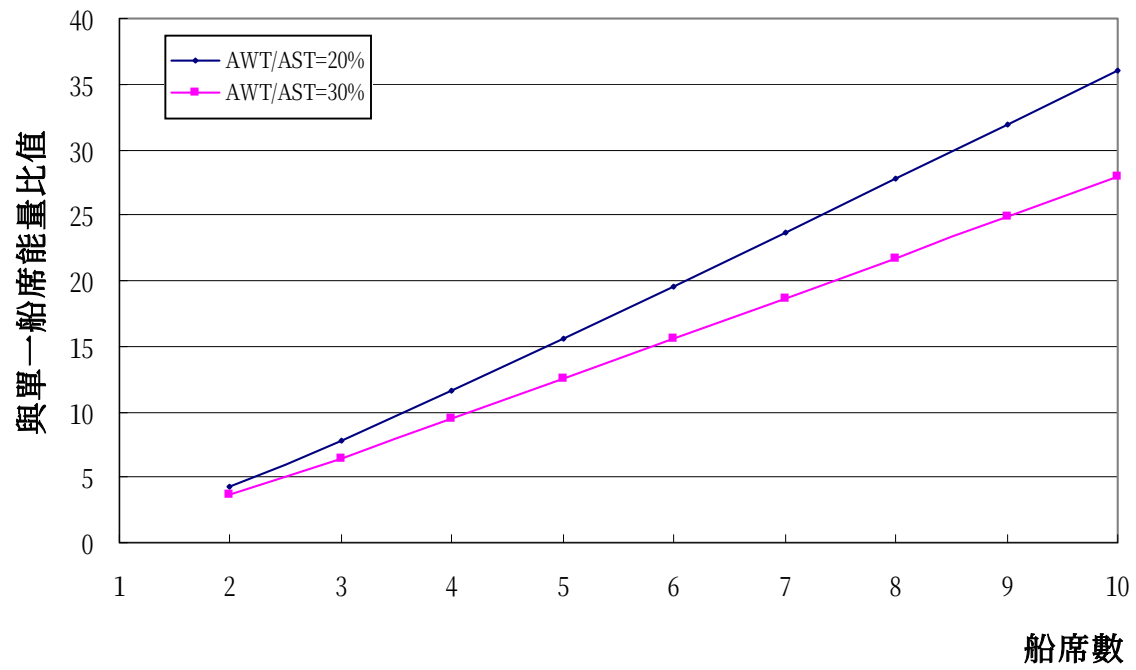


圖 4-2c 船席能量倍數分析 (K=2)

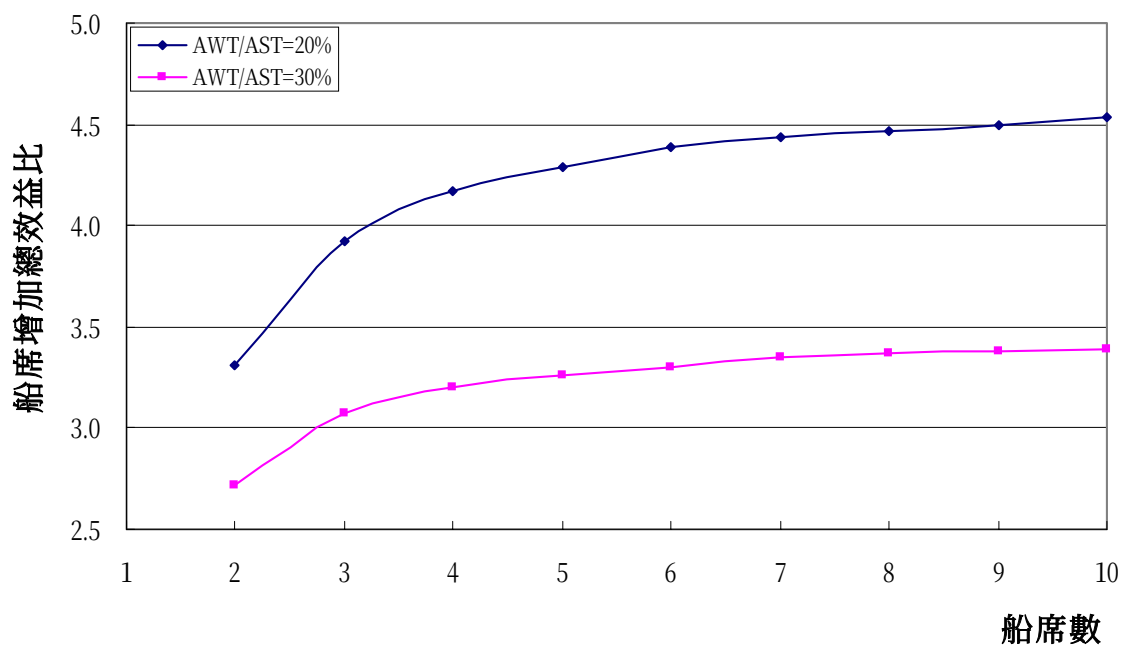


圖 4-2d 船席數增加總效益比分析 (K=2)

表 4.3 增加船席規模(N)之效益分析 (M/E_k/N, k=3)

船席數 (N)	AWT/AST = 20%				AWT/AST = 30%			
	ρ 變化量	ρ 變化量百分比 (%)	船席能量增加倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$	ρ 變化量	ρ 變化量百分比 (%)	船席能量增加倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$
1								
2	0.244	105.6%	4.113	3.113	0.243	78.4%	3.568	2.568
3	0.122	52.8%	7.753	3.641	0.112	36.1%	6.435	2.868
4	0.073	31.6%	11.602	3.848	0.064	20.6%	9.406	2.971
5	0.049	21.2%	15.563	3.961	0.043	13.9%	12.452	3.045
6	0.035	15.2%	19.584	4.022	0.030	9.7%	15.523	3.071
7	0.027	11.7%	23.667	4.082	0.023	7.3%	18.622	3.106
8	0.021	9.1%	27.775	4.108	0.017	5.7%	21.739	3.117
9	0.017	7.4%	31.909	4.134	0.015	4.6%	24.872	3.133
10	0.014	6.1%	36.061	4.152	0.011	3.8%	28.013	3.141

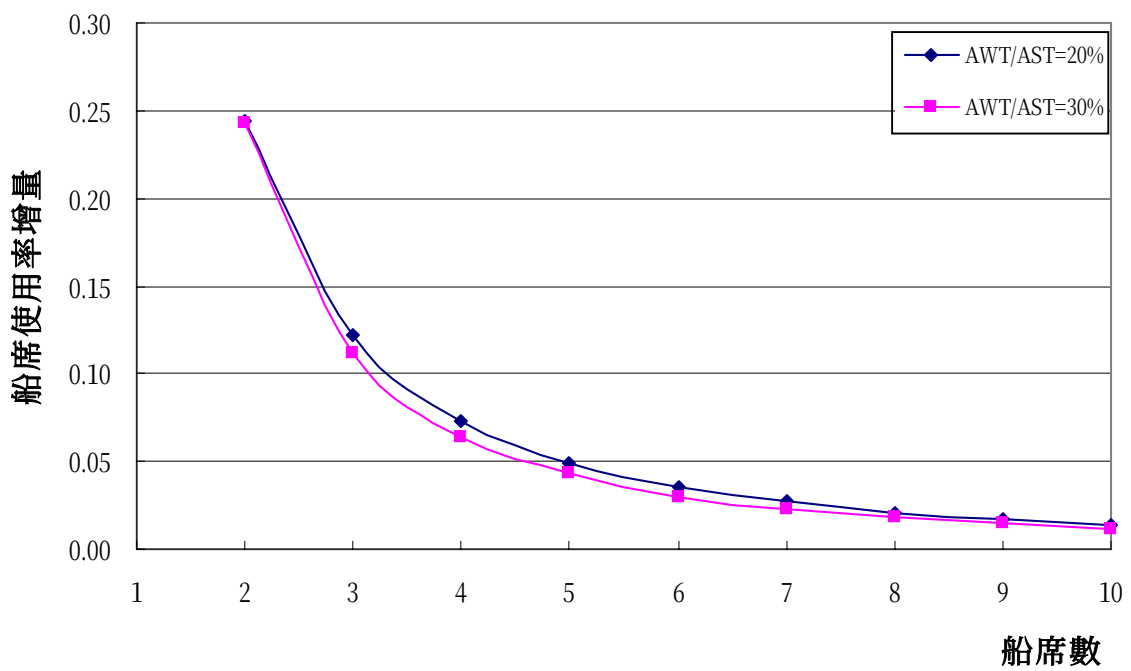


圖 4-3a 船席使用率變化量分析 (K=3)

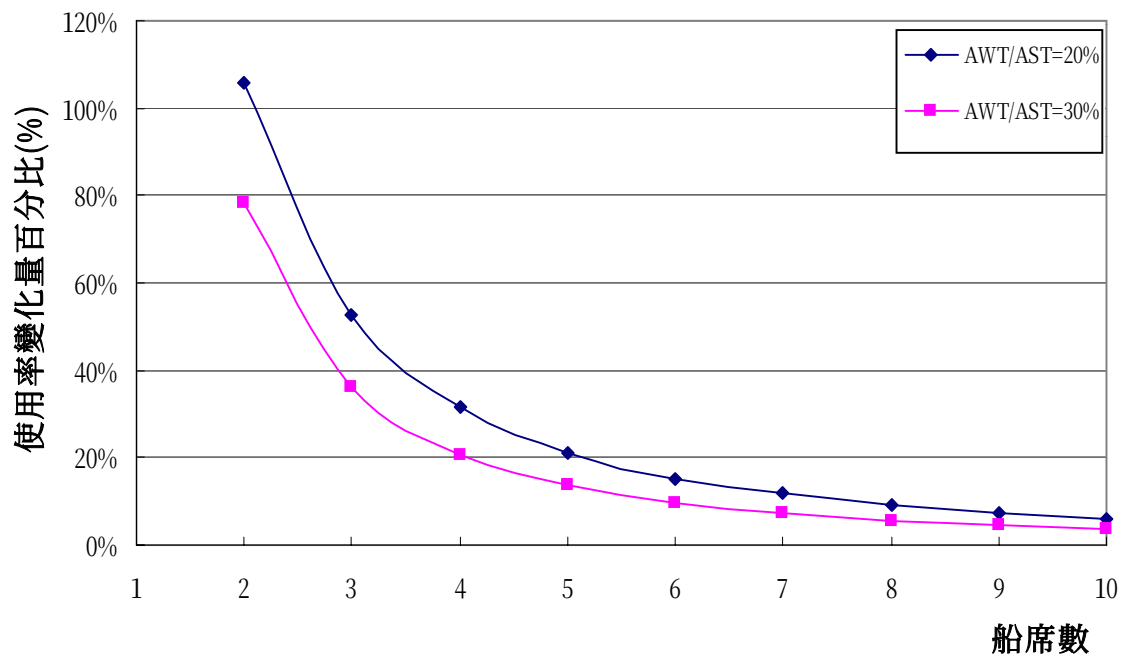


圖 4-3b 使用率變化百分比 (K=3)

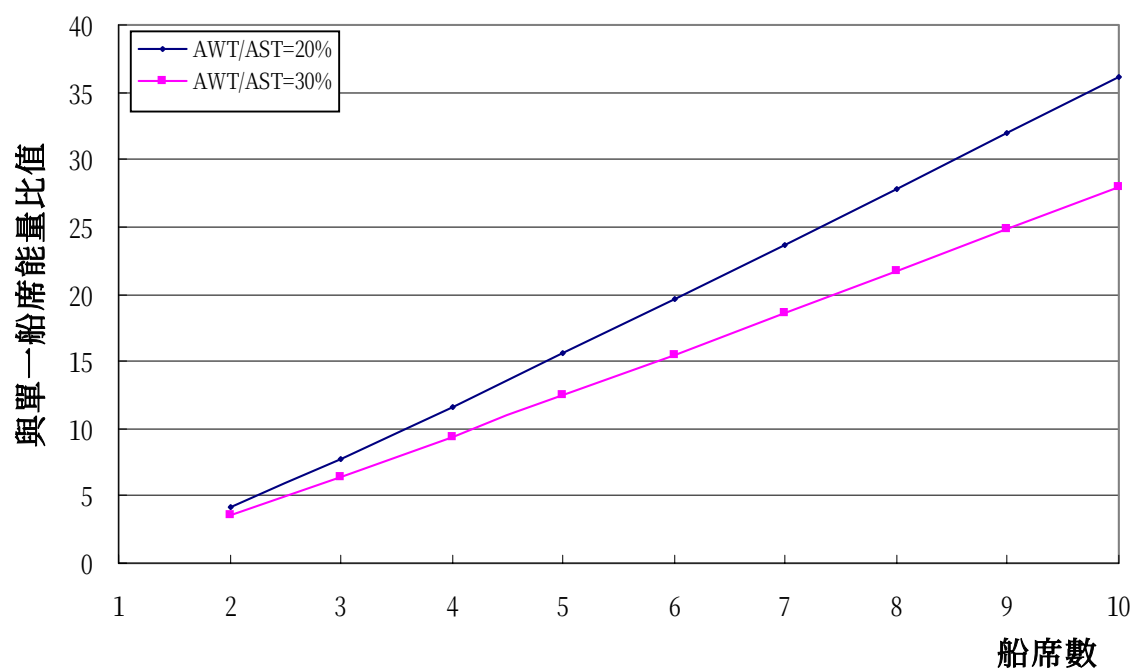


圖 4-3c 船席能量倍數分析 (K=3)

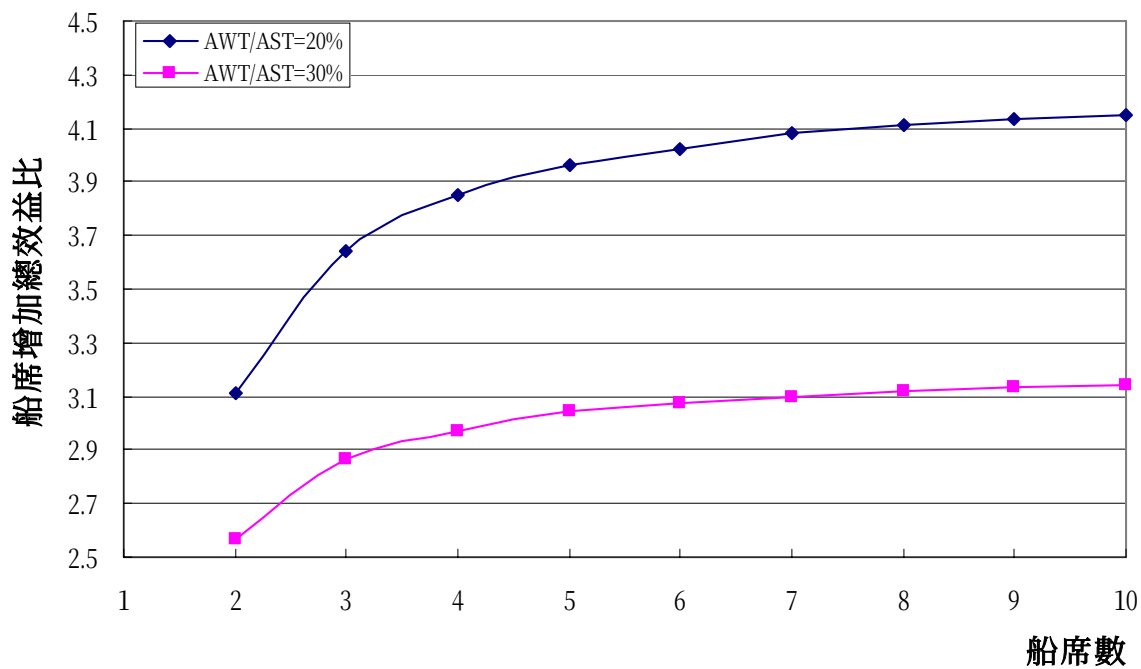


圖 4-3d 船席數增加總效益比分析 (K=3)

表 4.4 增加船席規模(N)之效益分析 (M/E_k/N, k=4)

船席數 (N)	AWT/AST = 20%				AWT/AST = 30%			
	ρ 變化量	ρ 變化量 百分比 (%)	船席能 量增加 倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$	ρ 變化量	ρ 變化量 百分比 (%)	船席能 量增加 倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$
1								
2	0.244	100.8%	4.017	3.017	0.241	74.4%	3.488	2.488
3	0.121	50.0%	7.525	3.508	0.109	33.6%	6.241	2.753
4	0.072	29.8%	11.223	3.698	0.064	19.8%	9.111	2.870
5	0.047	19.6%	15.008	3.785	0.041	12.8%	12.029	2.917
6	0.035	14.3%	18.868	3.860	0.030	9.1%	14.981	2.953
7	0.026	10.7%	22.764	3.897	0.022	6.8%	17.954	2.972
8	0.021	8.6%	26.704	3.940	0.017	5.2%	20.938	2.985
9	0.016	6.9%	30.660	3.955	0.014	4.3%	23.944	3.006
10	0.014	5.6%	34.628	3.969	0.011	3.4%	26.944	3.000

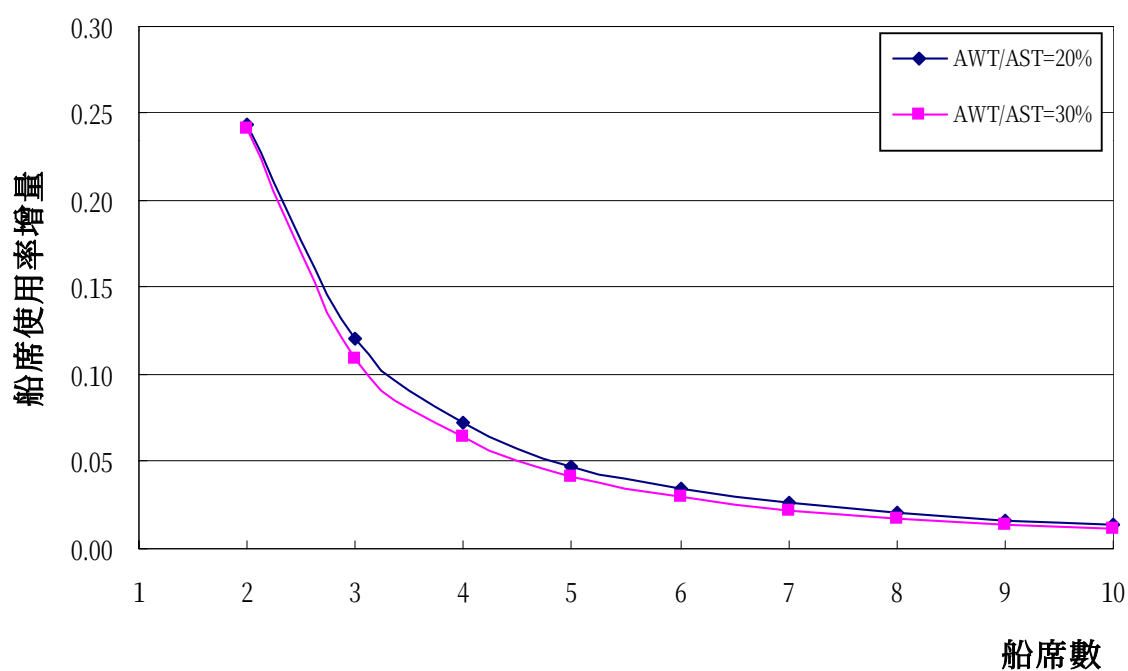


圖 4-4a 船席使用率變化量分析 (K=4)

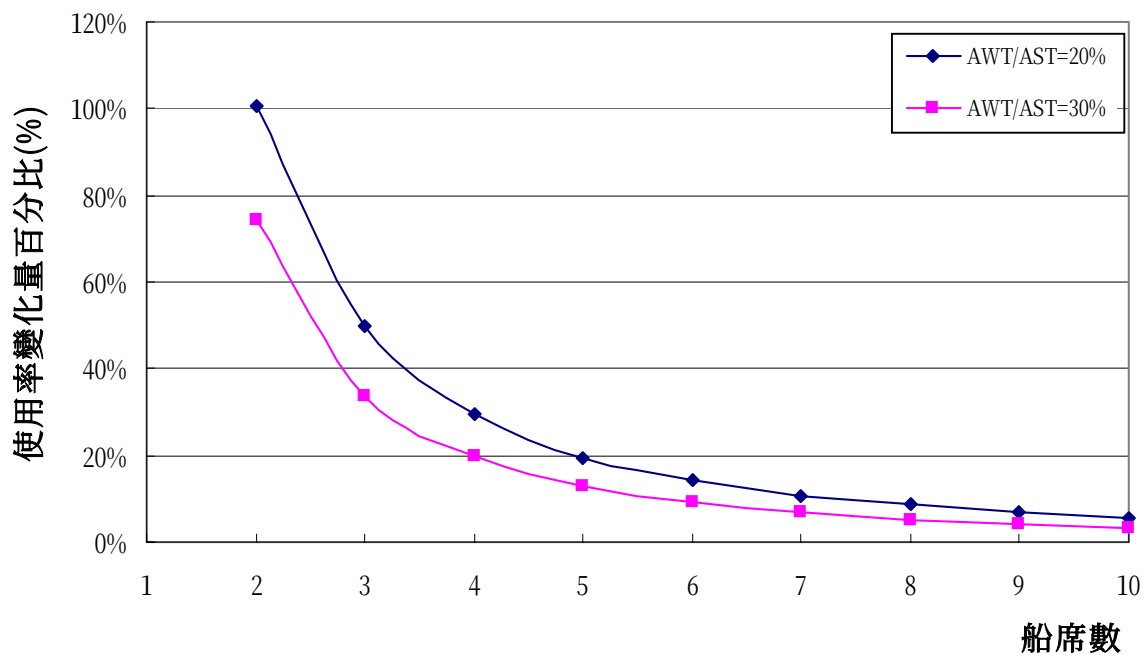


圖 4-4b 使用率變化百分比 (K=4)

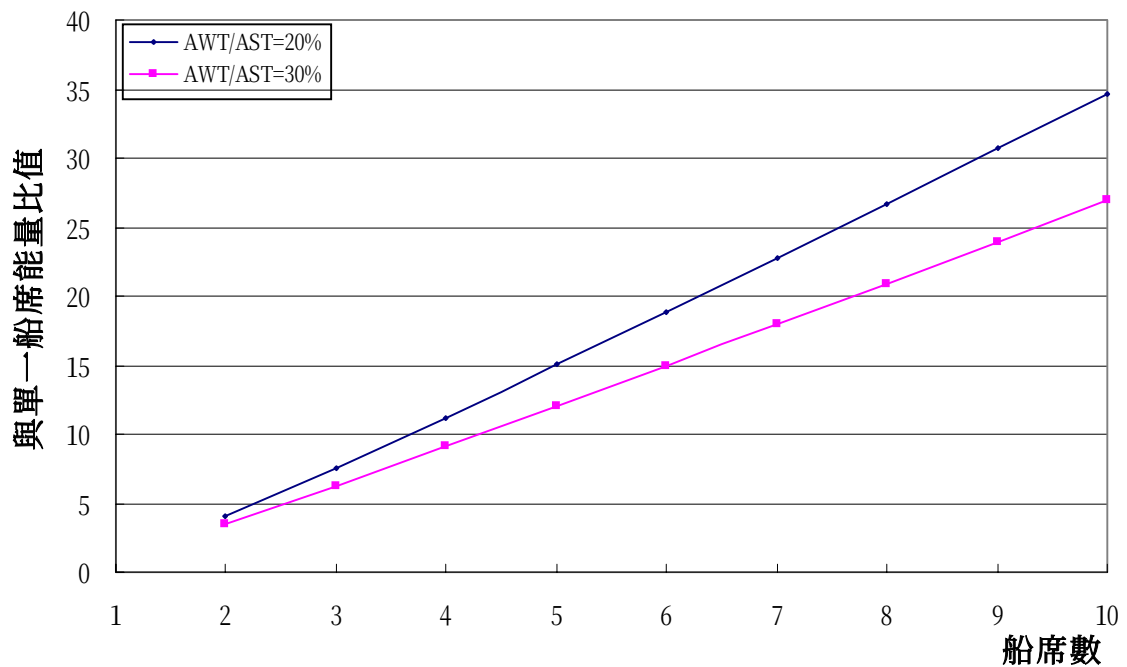


圖 4-4c 船席能量倍數分析 (K=4)

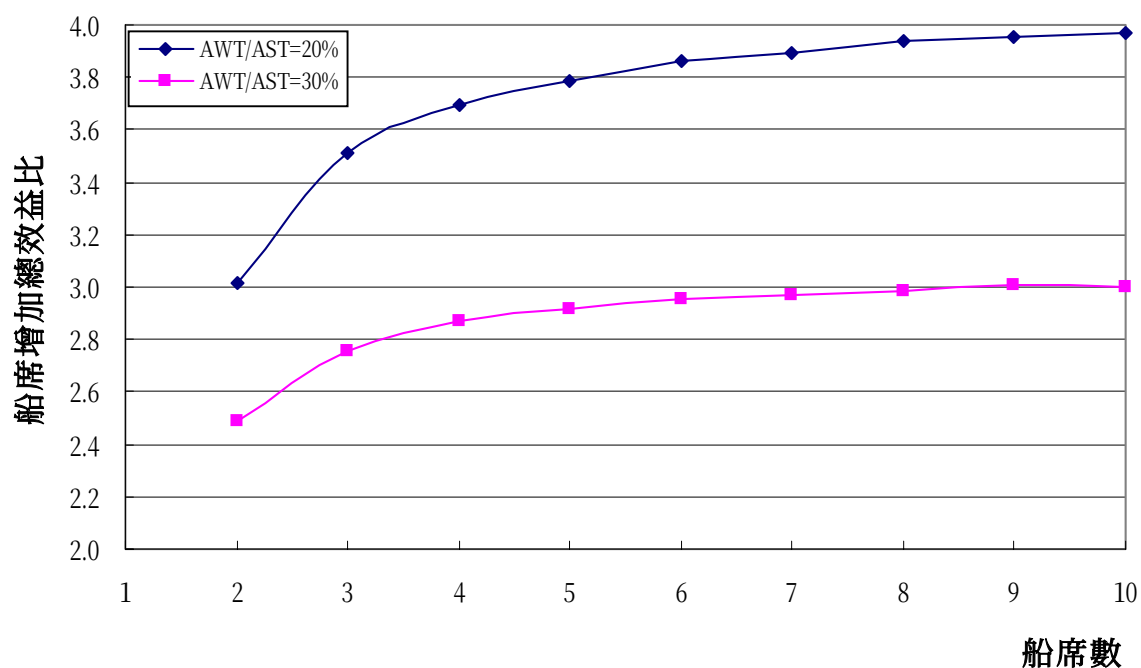


圖 4-4d 船席數增加總效益比分析 (K=4)

表 4.5 增加船席規模(N)之效益分析 (M/E_k/N, k=5)

船席數 (N)	AWT/AST = 20%				AWT/AST = 30%			
	ρ 變化量	ρ 變化量百分比 (%)	船席能量增加倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$	ρ 變化量	ρ 變化量百分比 (%)	船席能量增加倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$
1								
2	0.243	97.2%	3.944	2.944	0.239	71.8%	3.435	2.435
3	0.120	48.0%	7.356	3.412	0.109	32.7%	6.135	2.700
4	0.071	28.4%	10.944	3.588	0.062	18.7%	8.927	2.792
5	0.047	18.8%	14.620	3.676	0.041	12.3%	11.772	2.844
6	0.034	13.6%	18.360	3.740	0.029	8.7%	14.649	2.877
7	0.026	10.4%	22.148	3.788	0.022	6.6%	17.553	2.904
8	0.021	8.3%	25.974	3.826	0.017	5.1%	20.468	2.916
9	0.016	6.7%	29.824	3.850	0.013	4.0%	23.391	2.922
10	0.014	5.4%	33.680	3.856	0.011	3.3%	26.318	2.928

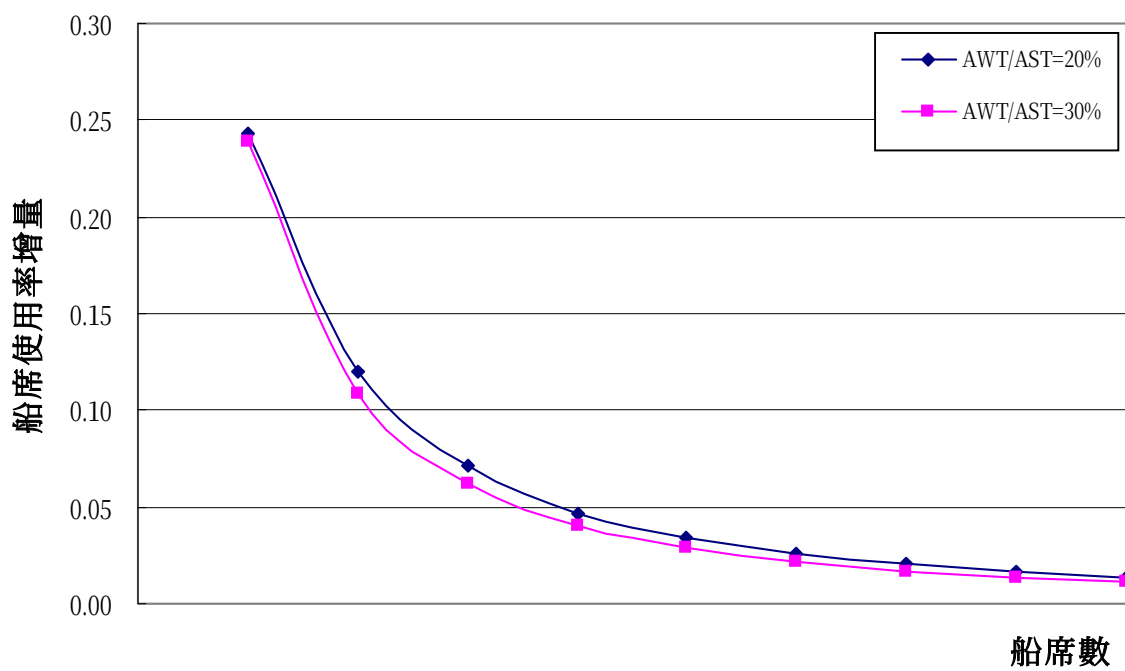


圖 4-5a 船席使用率變化量分析 (K=5)

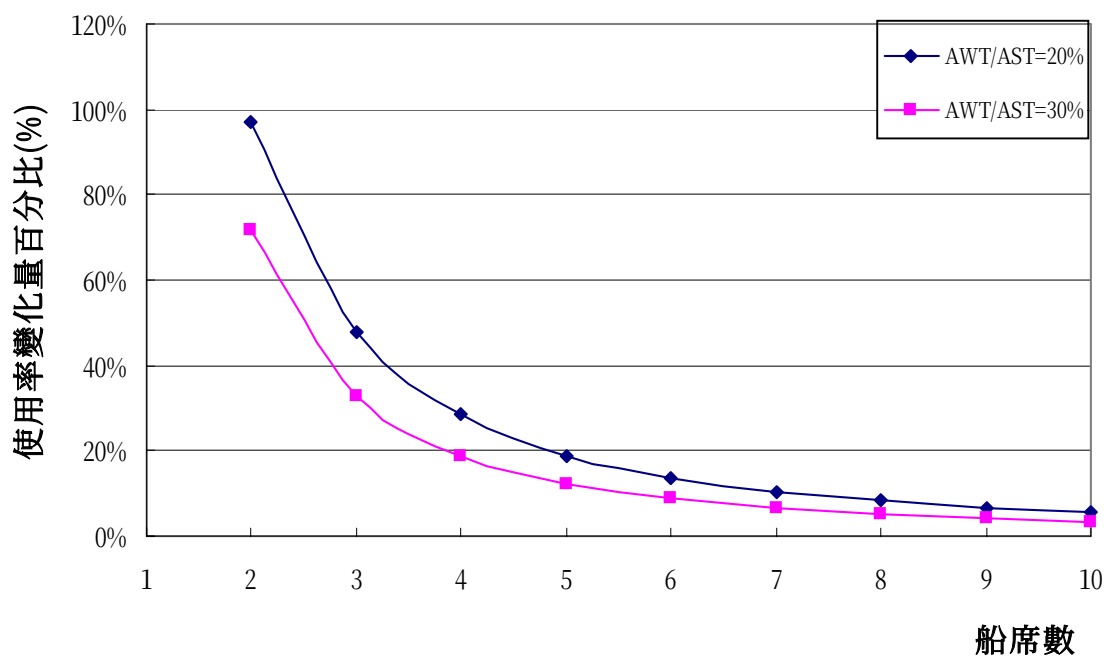


圖 4-5b 使用率變化百分比 (K=5)

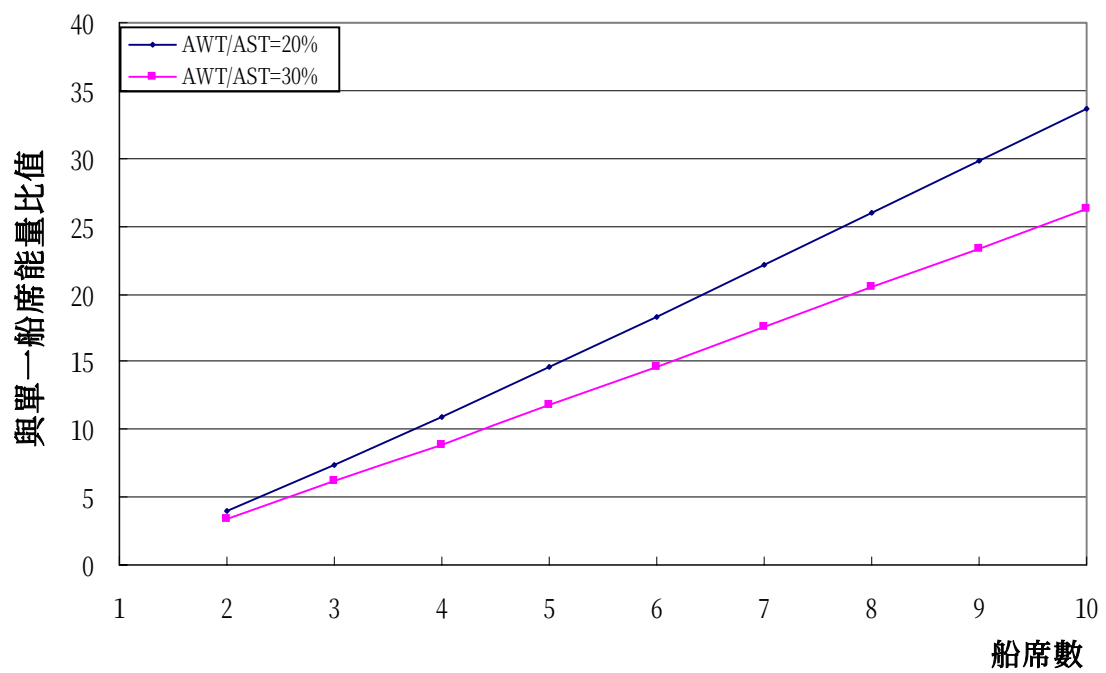


圖 4-5c 船席能量倍數分析 (K=5)

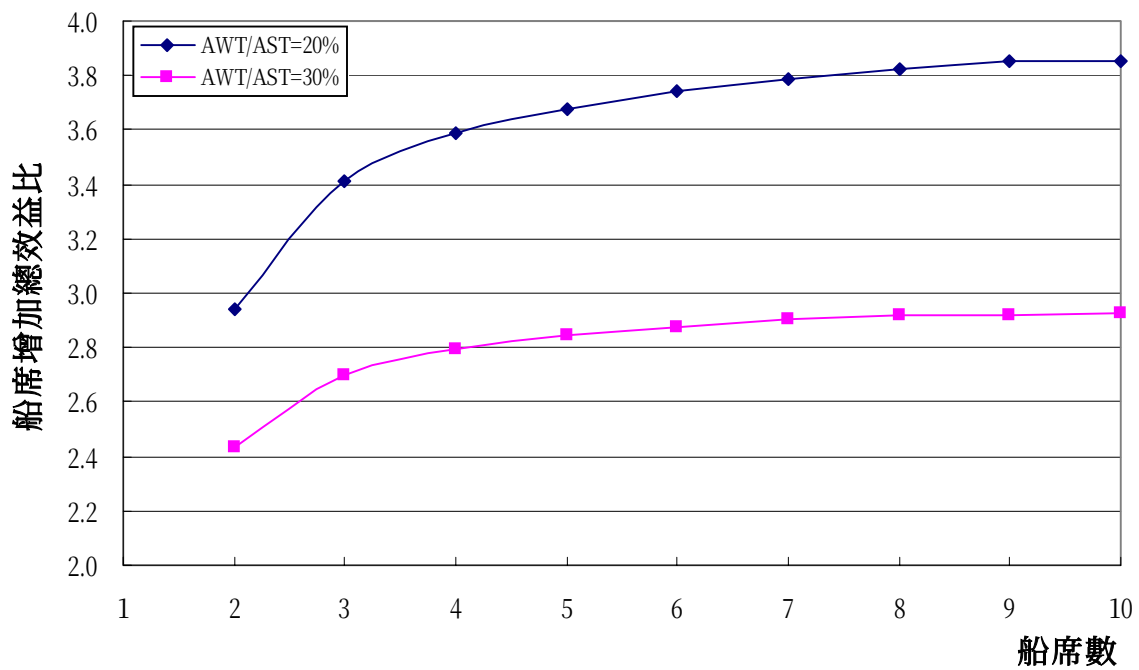


圖 4-5d 船席數增加總效益分析 (K=5)

表 4.6 增加船席規模(N)之效益分析 (M/E_k/N, k=6)

船席數 (N)	AWT/AST = 20%				AWT/AST = 30%			
	ρ 變化量	ρ 變化量 百分比 (%)	船席能 量增加 倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$	ρ 變化量	ρ 變化量 百分比 (%)	船席能 量增加 倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$
1								
2	0.243	95.3%	3.906	2.906	0.237	69.7%	3.394	2.394
3	0.119	46.7%	7.259	3.353	0.108	31.8%	6.044	2.650
4	0.071	27.8%	10.792	3.533	0.062	18.2%	8.788	2.744
5	0.047	18.4%	14.412	3.620	0.040	11.8%	11.574	2.785
6	0.034	13.3%	18.094	3.682	0.029	8.4%	14.393	2.819
7	0.025	10.0%	21.809	3.715	0.021	6.3%	17.232	2.839
8	0.020	7.8%	25.550	3.741	0.017	4.9%	20.085	2.852
9	0.017	6.5%	29.329	3.780	0.013	4.0%	22.955	2.871
10	0.013	5.3%	33.114	3.784	0.011	3.3%	25.835	2.880

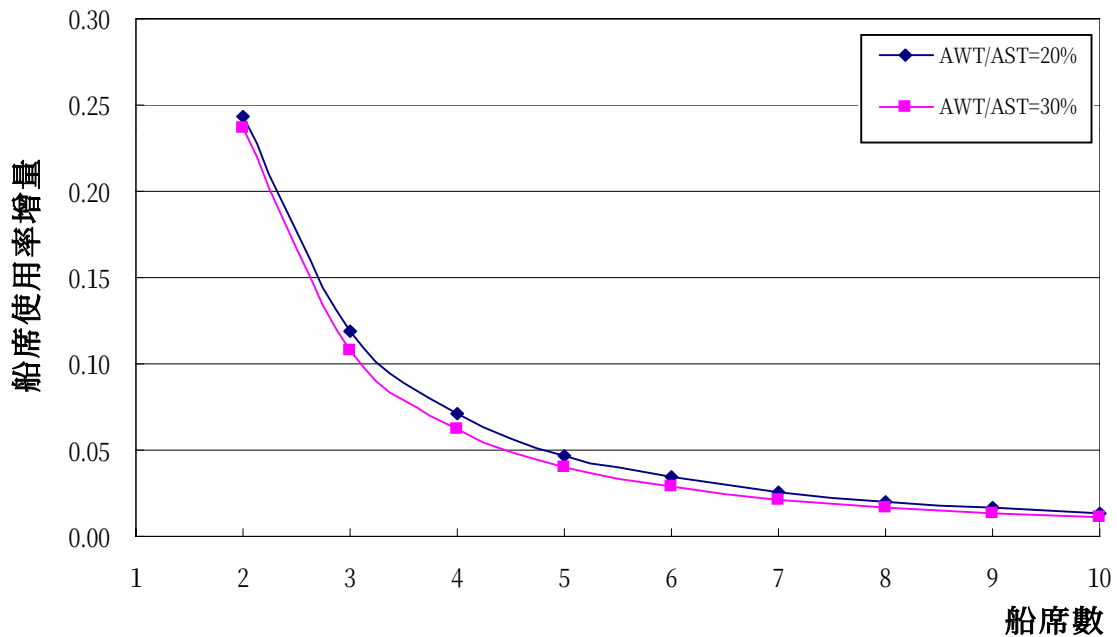


圖 4-6a 船席使用率變化量分析 (K=6)

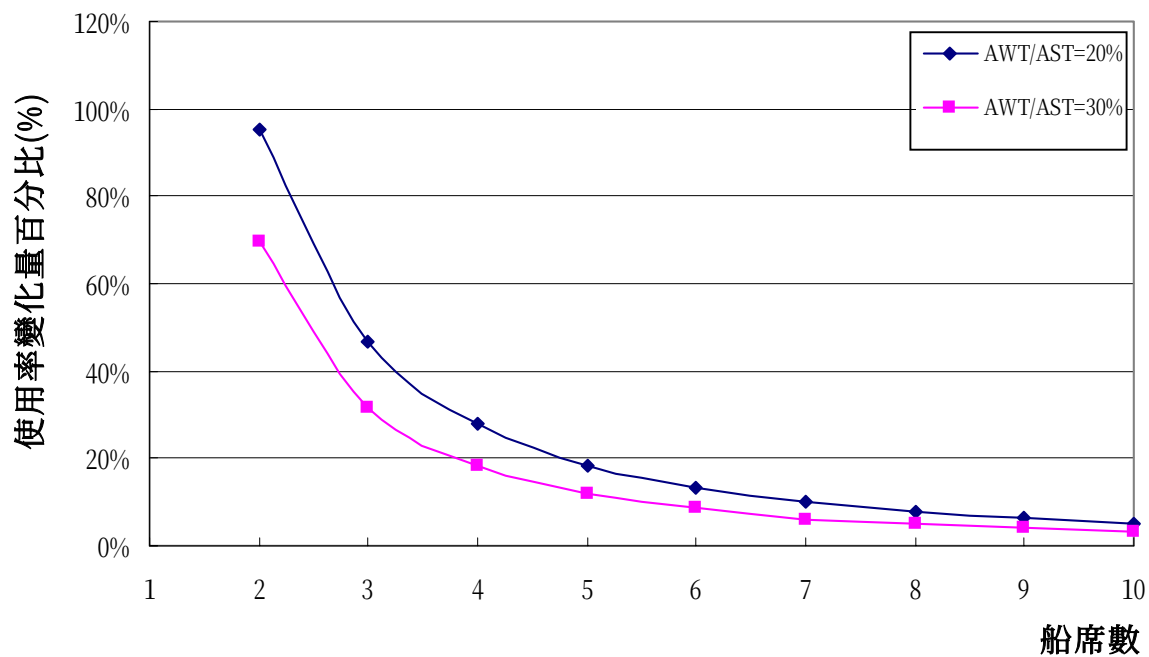


圖 4-6b 使用率變化百分比 (K=6)

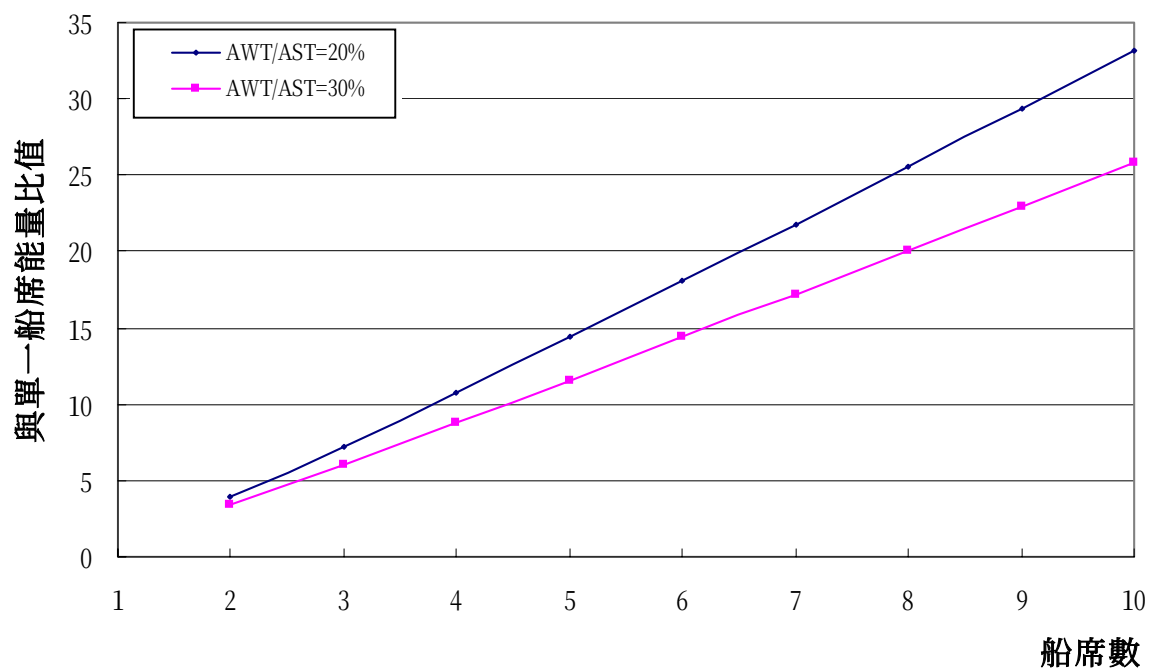


圖 4-6c 船席能量倍數分析 (K=6)

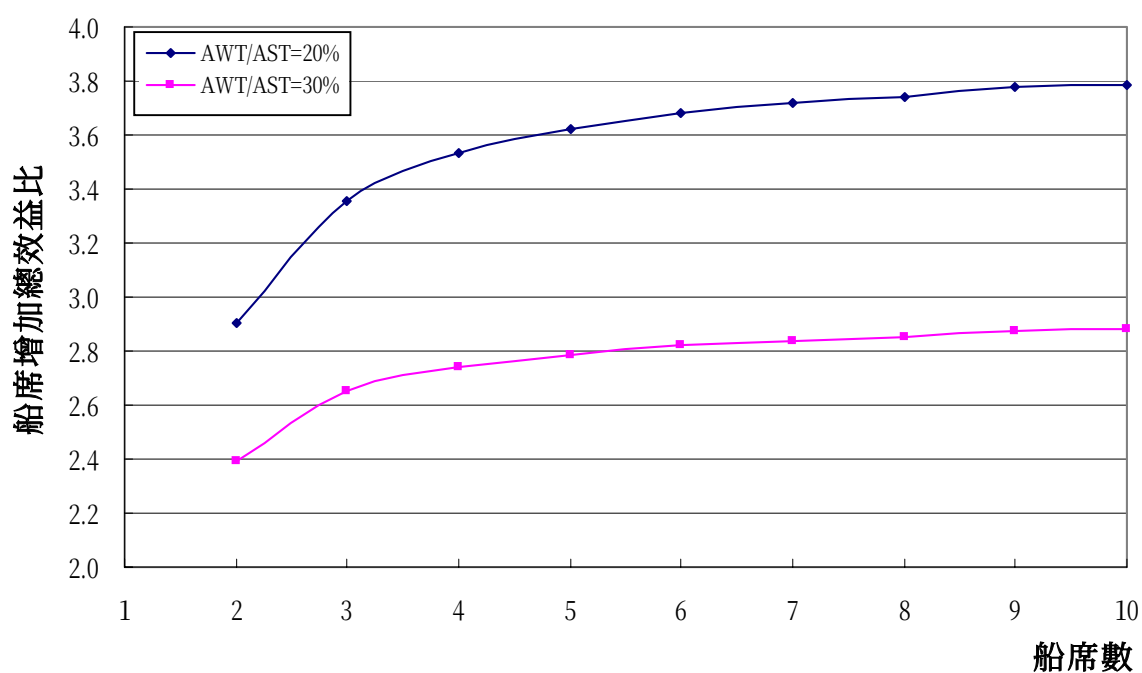


圖 4-6d 船席數增加總效益比分析 (K=6)

表 4.7 增加船席規模(N)之效益分析 ($M/E_k/N$, $k=\infty$)

船席數 (N)	AWT/AST = 20%				AWT/AST = 30%			
	ρ 變化量	ρ 變化量百分比 (%)	船席能量增加倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$	ρ 變化量	ρ 變化量百分比 (%)	船席能量增加倍數	總效益比 $\frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_1}$
1								
2	0.240	84.2%	3.684	2.684	0.230	61.3%	3.227	2.227
3	0.116	40.7%	6.747	3.063	0.103	27.5%	5.664	2.437
4	0.067	23.6%	9.941	3.194	0.058	15.5%	8.171	2.507
5	0.045	15.7%	13.211	3.269	0.038	10.1%	10.720	2.549
6	0.032	11.2%	16.526	3.316	0.027	7.2%	13.296	2.576
7	0.024	8.4%	19.870	3.344	0.020	5.3%	15.885	2.589
8	0.019	6.7%	23.242	3.372	0.016	4.2%	18.487	2.602
9	0.016	5.4%	26.637	3.395	0.012	3.4%	21.101	2.613
10	0.012	4.4%	30.035	3.398	0.011	2.7%	23.720	2.619

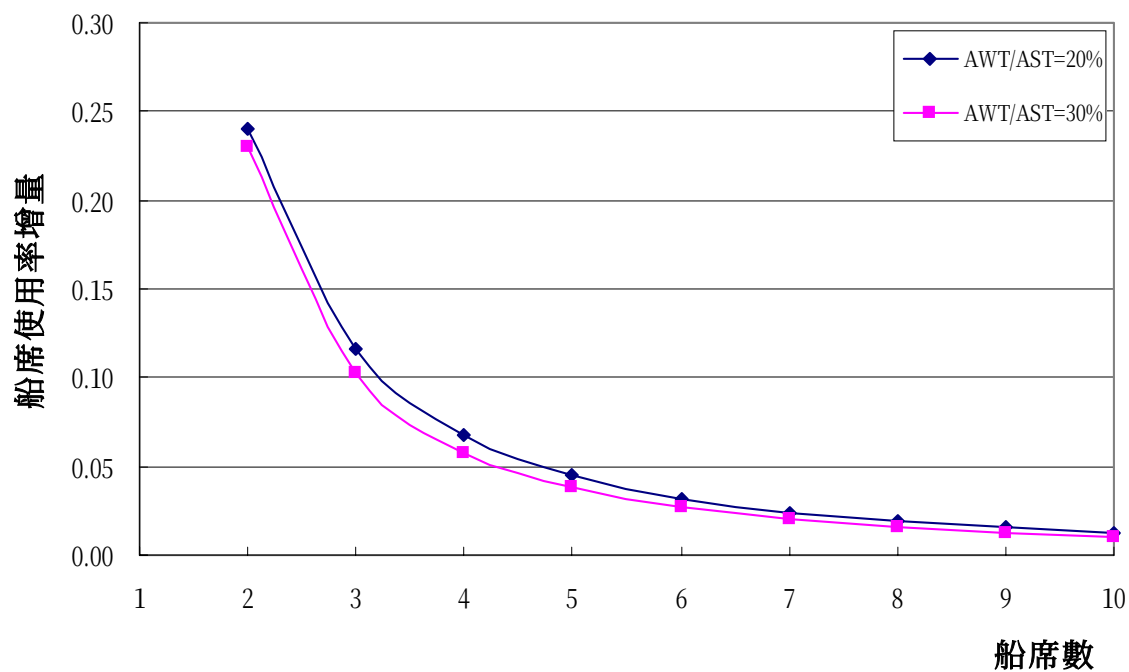


圖 4-7a 船席使用率變化量分析 ($K=\infty$)

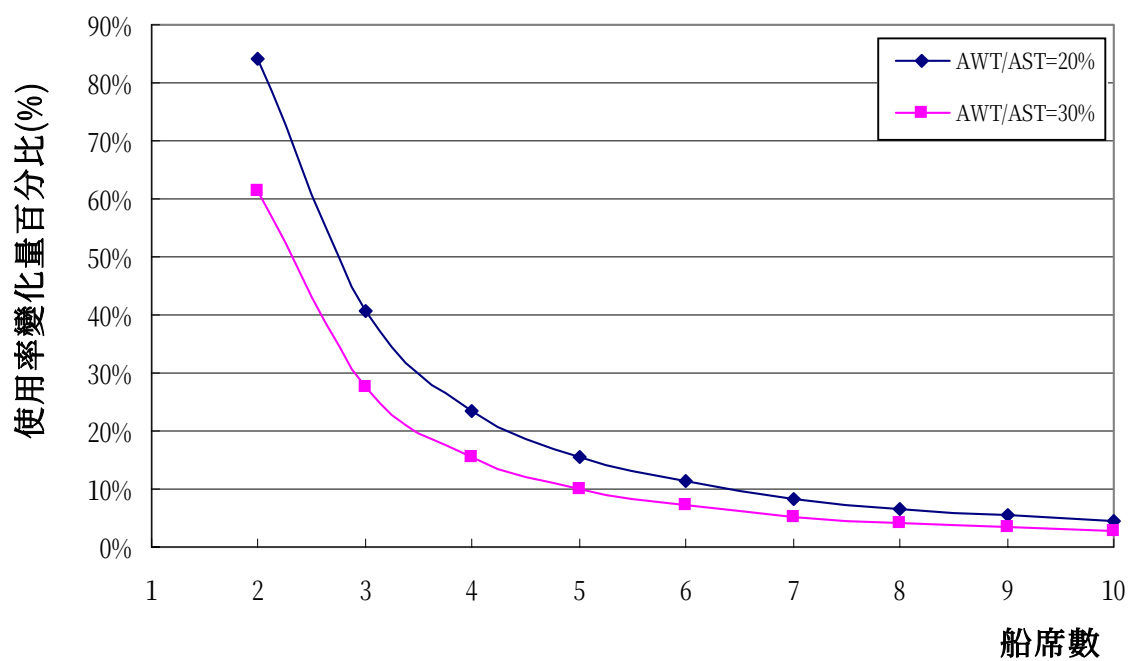


圖 4-7b 使用率變化百分比 ($K=\infty$)

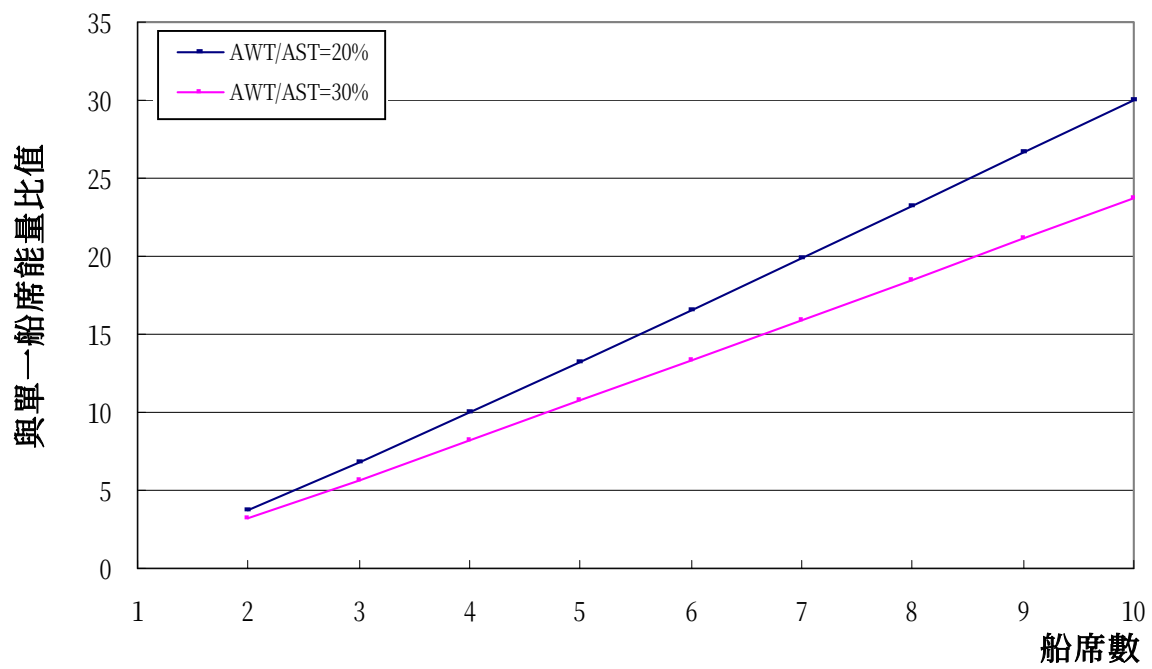


圖 4-7c 船席能量倍數分析 ($K=\infty$)

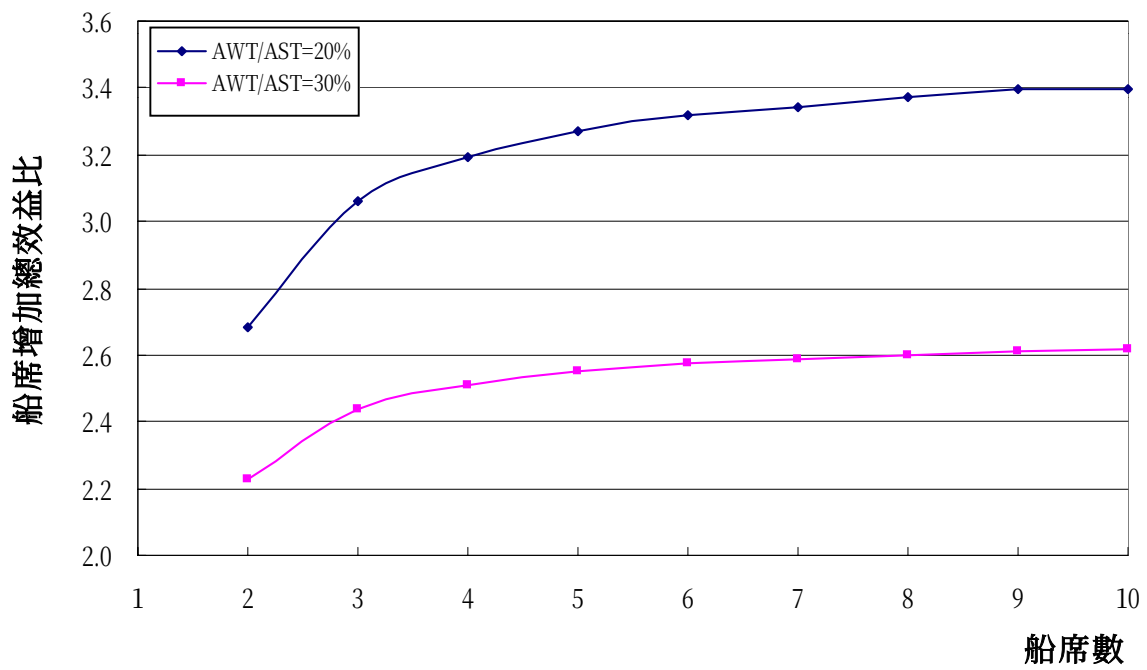


圖 4-7d 船席數增加總效益比分析 ($K=\infty$)

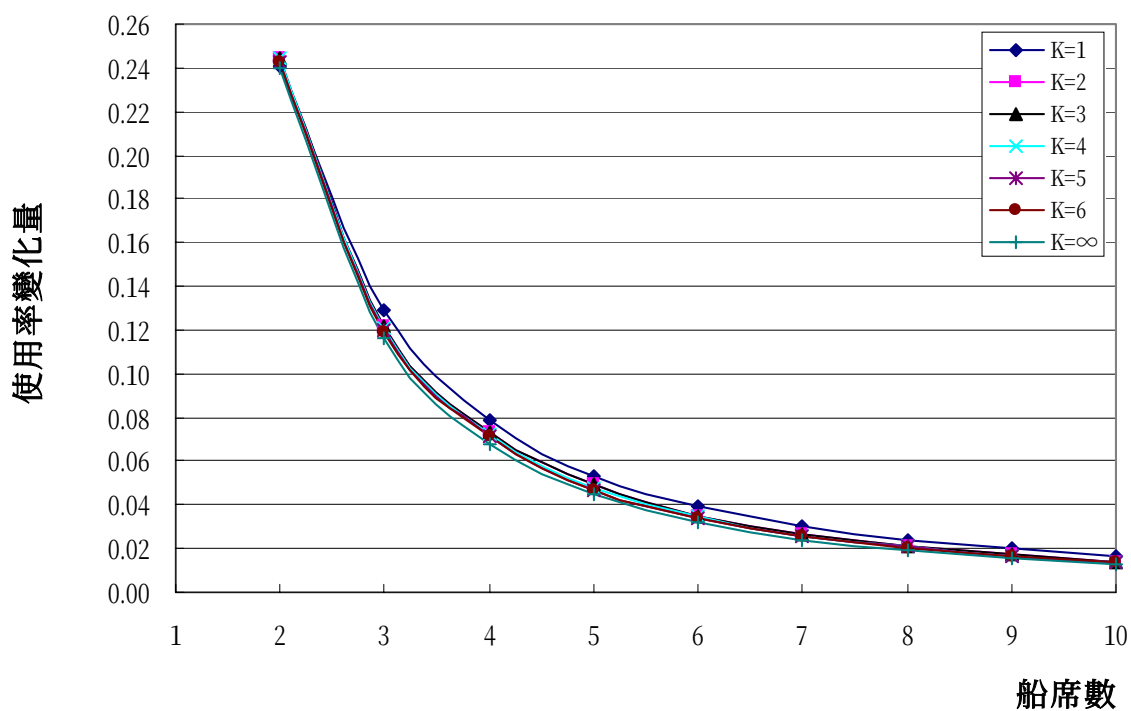


圖 4-8 使用率變化量比較(AWT/AST=20%)

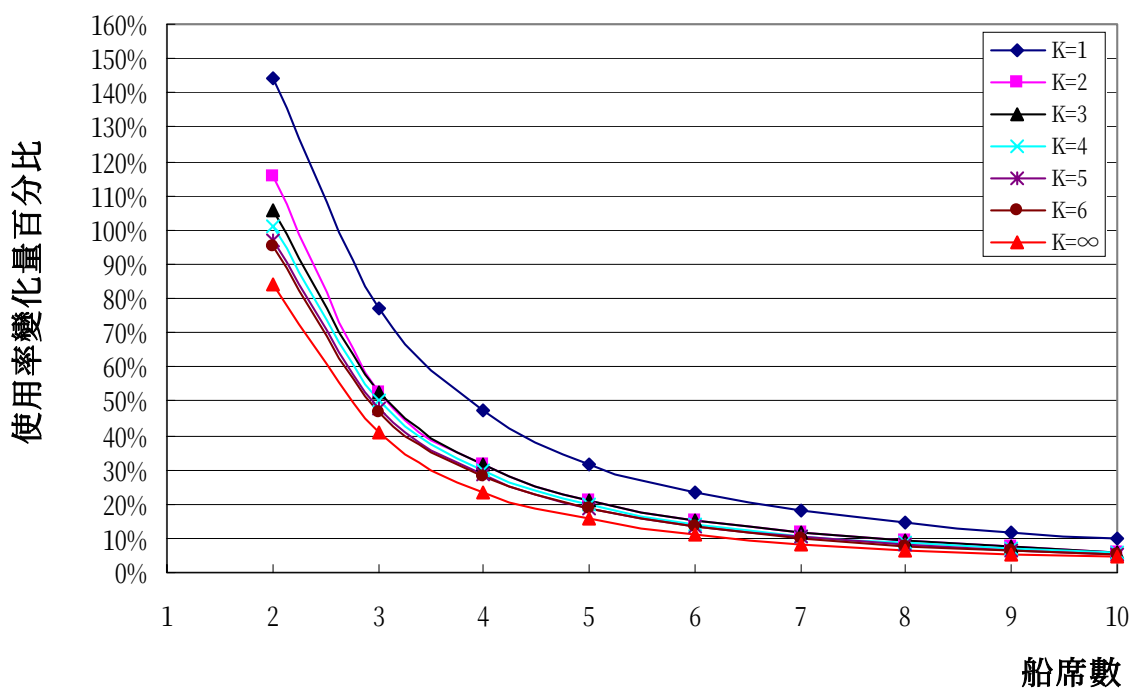


圖 4-9 使用率變化量百分比比較(AWT/AST=20%)

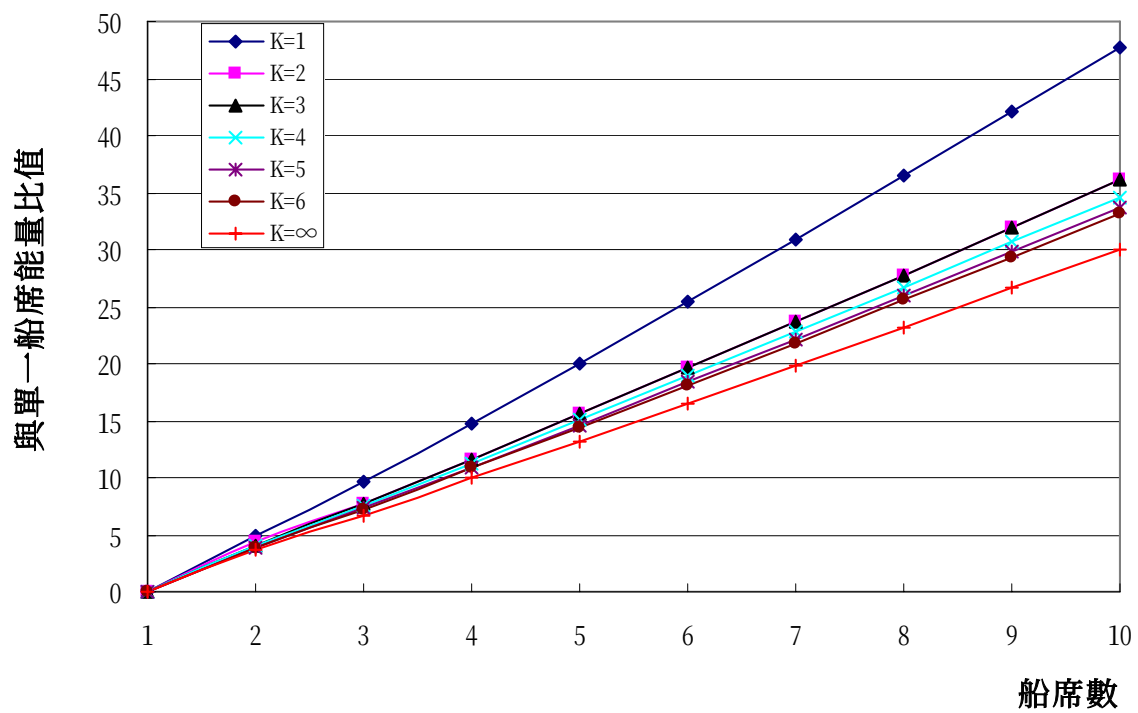


圖 4-10 船席能量倍數比較(AWT/AST=20%)

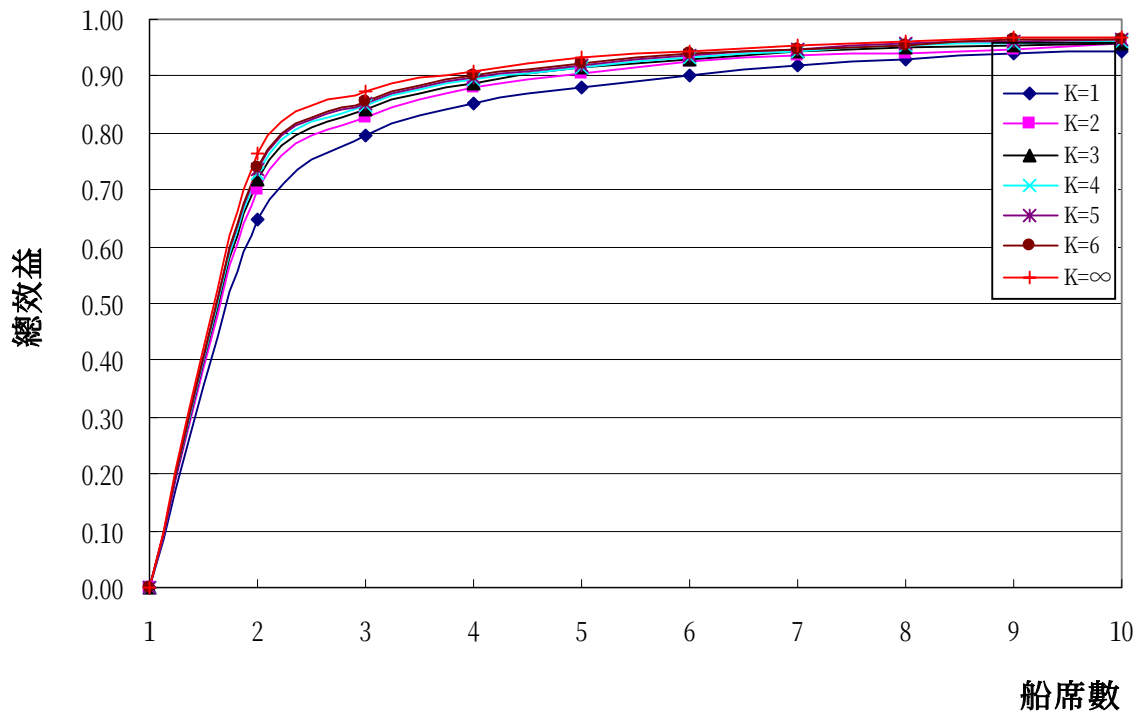


圖 4-11 總效益比較分析(AWT/AST=20%)

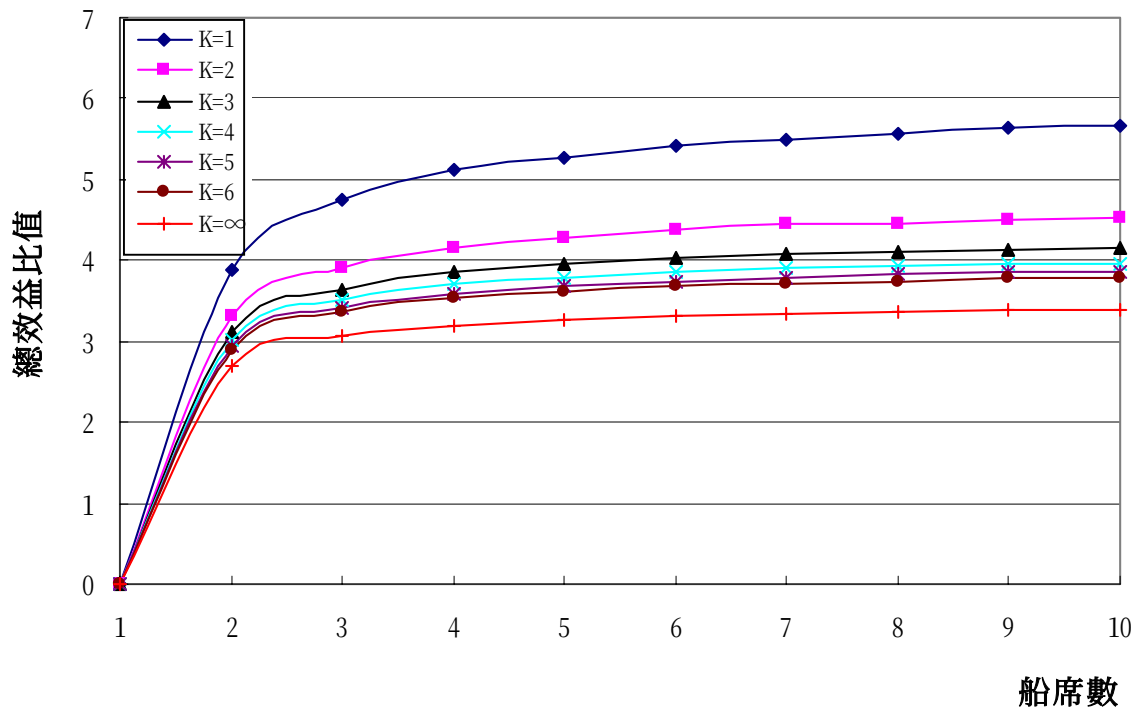


圖 4-12 總效益比值比較(AWT/AST=20%)

4.2 碼頭營運規模效益分析 (無因次指標 IND)

在利用無因次指標 IND 進行相關分析時，將以台北港貨櫃儲運中心之 BOT 興建案作為案例，考量到實際 BOT 興建方式已與原先由港埠單位興建之公用碼頭作業方式不同，而且也與港務局興建碼頭後再出租給碼頭經營者之方式不同，因此對於黃文吉(1990)所建立之 IND 成本函數將作部分修改，修改之項目包括：(1)增加相關貨櫃橋式起重機之維修費用、裝卸操作費用(2)增加貨櫃場裝卸機具之購買、維修、人事及裝卸操作費用(3)增加岸肩與貨櫃場間搬運成本(4)增加土地成本(5)減少碼頭以外之港埠建設費用及其營運管理費用(6)減少貨櫃於貨櫃場之儲櫃費用。

1. 岸邊橋式起重機作業相關費用

由於碼頭經營者所委託之裝卸承攬業者，其船席起重機裝卸作業

大多分為三班制，而且碼頭工人之費用均以按月支薪的方式處理，所以原來有關橋式起重機之相關成本項 C_{cm} 及 C_{co} ，將合併為包含購置、維修、人事費用之成本項 C_{bg} ，也就是 $C_{bg} = C_{gp} + C_{gm} + C_{gw}$ ，以及橋式起重機裝卸貨櫃之成本 C_{gh} 。

$$C_{gp} = U_{gp} \cdot N_g \cdot N \dots\dots\dots(4.4)$$

$$C_{gm} = U_{gm} \cdot N_g \cdot N \dots\dots\dots(4.5)$$

$$C_{gw} = U_{gw} \cdot N_g \cdot N \dots\dots\dots(4.6)$$

$$C_{gh} = U_{gh} \cdot V / R_r \cdot \lambda \dots\dots\dots(4.7)$$

其中，

U_{gp} ：橋式起重機單位時間之購置成本 (NT\$/hr)；

U_{gm} ：橋式起重機維修費單位時間成本 (NT\$/hr)；

U_{gw} ：橋式起重機操作人員單位時間人事費用 (NT\$/hr)；

R_r ：每個貨櫃平均相等之 TEU 數，假設每個貨櫃約相當於 1.5 TEU/unit；

U_{gh} ：橋式起重機每裝卸一個貨櫃之成本 (NT\$/unit)；

N_g ：每船席橋式起重機裝置數目；

N ：船席數。

2.貨櫃場相關費用

單位貨櫃 (TEU) 單位時間之貨櫃場儲櫃費用如以 U_{yd} 來表示，則可表示為：

$$C_{yd} = U_{yd} \cdot V \cdot H \cdot \lambda \dots\dots\dots(4-8)$$

其中，

H：單位貨櫃平均放置時間 (hr)

而貨櫃場相關軌道式門型機之成本(C_{yr})亦可分為購買(C_{rp})、維修(C_{rm})、操作人員(C_{rw})及貨櫃裝卸費用(C_{rh})。

$$C_{rp} = U_{rp} \cdot N_r \cdot N \dots\dots\dots(4.9)$$

$$C_{rm} = U_{rm} \cdot N_r \cdot N \dots\dots\dots(4.10)$$

$$C_{rw} = U_{rw} \cdot N_r \cdot N \dots\dots\dots(4.11)$$

$$C_{rh} = U_{rh} \cdot V / R_r \cdot \lambda \cdot n_h \dots\dots\dots(4.12)$$

其中，

U_{rp} ：軌道式門型機單位時間之購置成本 (NT\$/hr)；

U_{rm} ：軌道式門型機維修費單位時間成本 (NT\$/hr)；

U_{rw} ：軌道式門型機操作人員單位時間人事費用 (NT\$/hr)；

R_r ：每個貨櫃平均相等之 TEU 數，假設每個貨櫃約相當於 1.5 TEU/unit；

U_{rh} ：軌道式門型機每裝卸一個貨櫃之成本 (NT\$/unit)；

N_r ：每船席之軌道式門型機裝置數目。

n_h ：每個貨櫃在櫃場之裝卸次數（最少 2 次）

3. 岸肩與貨櫃場間之搬運費用

採用軌道式門型機系統之貨櫃場，其岸肩與貨櫃場間之搬運必須利用貨櫃拖車來作業。而這部分之工作，貨櫃碼頭經營者大多以委託貨櫃車公司經營之方式處理，貨櫃車公司需負責提供足夠之貨櫃車，以滿足裝卸作業效率之需求，其相關之司機薪資、貨櫃車營運維護均由貨櫃車公司負責；碼頭經營者則按契約單價付給貨櫃車公司搬運費，其成本 C_{ht} 可表示為：

$$C_{ht} = U_{ht} \cdot V / R_r \cdot \lambda \dots\dots\dots(4.13)$$

其中，

C_{ht} ：貨櫃岸肩與櫃場間之運輸之成本（NT\$）

U_{ht} ：一單位貨櫃岸肩與櫃場間之運輸之成本（NT\$/unit），約為 NT\$150~200。

4.土地成本

貨櫃碼頭經營者如果有自有土地，則必須負擔相關建設成本；如果土地非自有則需負擔土地租金。依照台北港之興建，航商聯盟必須在 50 年內蓋好七座碼頭投資 203.3 億元（不含裝卸機具），不須再繳土地租金，而王志成(2000)估計，碼頭、貨櫃場、附屬設施等相關設施興建不含機具約需 70 億元。所以每年每座土地成本平均約 $(203.3 - 70) / 50 / 7 = 3.8$ 千萬元。因此相關之碼頭費用，除了原來之碼頭建設費(C_{bf})及其營運管理費(C_{bo})外，可視為增加了相關之土地成本(C_{bl})。

$$C_{bl} = U_{bl} \cdot N \dots\dots\dots(4.14)$$

其中，

U_{bl} ：一座碼頭單位時間之土地成本

C_{bf} 與 C_{bo} 之定義與(3.24 式)相同。

5. 碼頭以外之港埠建設費用及其營運管理費用

碼頭以外之港埠設施（防波堤、水域設施、臨港交通設施、港灣環境設施等）是一筆龐大費用，而且估算不易，過去相關之研究多未包含此項成本。黃文吉(1990)雖然建議將其導入成本項中，但也說明可視港灣政策，而將此項成本定為 0 或某定值。由於台北港貨櫃儲運中心興建，航商聯盟並不支付此項費用，所以本研究也將 C_{pf} 、 C_{po} 視為 0。

因此，船舶在港總成本函數 (TC)可表示為：

$$\begin{aligned}
 TC &= C_1 + C_2 \\
 &= C_s + C_{cg} + C_{bf} + C_{bo} + C_{bl} + C_{bg} + C_{yr} + C_{gh} + C_{rh} + C_{ht} + C_{yd} \\
 &\quad + (U_s + U_{cg} \cdot X) \cdot (\lambda / \mu + L_q) + (U_{bf} + U_{bo} + U_{bl}) \cdot N \quad \dots\dots(4.15) \\
 &\quad + (U_{gp} + U_{gm} + U_{gw}) \cdot N_g \cdot N + (U_{rp} + U_{rm} + U_{rw}) \cdot N_r \cdot N \\
 &\quad + (U_{gh} + U_{rh} \cdot n_h + U_{ht}) \cdot V / R_r \cdot \lambda + U_{yd} \cdot V \cdot H \cdot \lambda
 \end{aligned}$$

無因次評估指標 IND 之定義可修改為：

$$\begin{aligned}
 IND &= TC / (\lambda \cdot U_s \cdot V) \\
 &= [(1 + R_{cg}) \cdot (1 / \mu + W_q) + (R_{bf} + R_{bo} + R_{bl}) \cdot N / \lambda \\
 &\quad + (R_{gp} + R_{gm} + R_{gw}) \cdot N_g \cdot N / \lambda + (R_{rp} + R_{rm} + R_{rw}) \cdot N_r \cdot N / \lambda \quad \dots\dots(4.16) \\
 &\quad + (R_{gh} + R_{rh} \cdot n_h + R_{ht}) \cdot V / R_r + R_{yd} \cdot V \cdot H] / V
 \end{aligned}$$

$R_{cg}, R_{bf}, R_{bo}, R_{bl}, R_{gp}, R_{gm}, R_{gw}, R_{rp}, R_{rm}, R_{rw}, R_{gh}, R_{rh}, R_{ht}, R_{yd}$ 分別為 $U_{cg} \cdot X, U_{bf}, U_{bo}, U_{bl}, U_{gp}, U_{gm}, U_{gw}, U_{rp}, U_{rm}, U_{rw}, U_{gh}, U_{rh}, U_{ht}, U_{yd}$ 與 U_s 之比值。

4.3 IND 計算案例

台北港貨櫃儲運中心計劃最大靠柏船型為 8 000 TEU 之超巴拿馬級貨櫃輪，參考表 4.8 新建造之貨櫃船訂單，長榮海運也已經訂購了 8 艘之 8 000 TEU 級貨櫃輪，因此本研究假定：目標船型為 8 000 TEU 級之貨櫃輪，其建造成本 7 500 萬美元；至於營運成本則參考表 4.9 假設為 1300 萬美元。

假定每艘船舶在台北港之平均裝卸量為 2000TEU，每座船席配置 4 台橋式起重機，而在進行裝卸作業時實際使用 3 台起重機，每台橋式起重機之裝卸效率為 45 TEU/hr，船舶靠岸、等候裝卸、等待車輛、等待補給、等候離案等之延滯時間 DT 平均為 4hr，起重機作業假設無干擾 $f=1$ (Chu & Huang 2002)，橋式起重機每台 NT\$200,000,000，起重

機經濟使用年限為 20 年，起重機維修費為 5 %/yr，操作員每部起重機 3 人，月薪 NT\$ 60,000/人；船舶經濟使用年限 15 年，年利率 4 %，貨櫃船平均載貨率 80 %，貨櫃平均裝卸噸數為 7 公噸/TEU，貨物價值每公噸 NT \$ 200, 000 ；貨櫃碼頭平均每座 NT \$ 900, 000, 000，碼頭及相關設施經濟使用年限 50 年，碼頭土地成本 NT \$ 40,000,000 /yr ，碼頭維修費用為 1.5 %，碼頭相關人事費 NT\$ 32,625,000 ；每座碼頭設置 12 台軌道型門式機(RMG)，每台 NT\$42,000,000，RMG 經濟使用年限為 20 年，維修費為 3 %/yr，操作員每部起重機 3 人，月薪 NT\$ 50,000/人。不同船席規模及不同 K 值之 IND 相關分析結果示如圖 4 - 13 ~ 4 - 15，為了便於估算不同船席數之 IND 值，分別再將上述各圖細分為 a ~ h 圖，以作為分析碼頭營運績效值之準備。隨著船席規模 N 之增大，各船席數所求得之 IND 與船席能量關係曲線有趨於平緩之趨勢；不同船席規模之 IND 最低點，也就是最適化規模之成本，隨著船席數之增加有趨於穩定之情況。船席規模數 N 只計算到 10 席，其原因乃是根據前節分析結果，當 N 值達到 6 或 7 席時，其各項指標之變動比率已相對的比較小，換句話說已經達到經濟規模，所以在考慮成本因素後，IND 之計算也只分析到 10 座船席。

表 4.8 貨櫃船建造成本（單位：百萬美元）

TEU capacity	No. of ships	Shipyard	Knots	Cost/vsl.	Delivery	Ordered	Operator
8 200	4	Hyundai	25	80	2006	7/2003	CMA
8 100	5	Samsung	25.9	80	2004/2005	12/2002	CSCL
8 100	8	Samsung	25	68	2005/2006	4/2003	Evergreen
7 500	5	Hyundai	25	70	2004	12/2002	Cosco
5 040	3	Samho	25	45	2004	12/2002	APL
5 600	3	Hudong-Zhonghua	24	53	2004/2005	5/2003	CSCL
5 576	3	Imabari	24	65	2005	7/2003	COSCO

資料來源：Containerisation International, Feb., Jun., Jul., Sep., 2003.

表 4.9 貨櫃船營運成本比較（單位：萬美元）

費用 \ 船型	4,000 TEU	6,000 TEU	10,000 TEU
人員	85	85	85
維修保養	90	107.5	115
保險	80	100	100
維修被料與潤滑油	25	30	30
管理	17.5	17.5	17.5
燃油	428.4	572.2	726.9
港口使用費	200	270	300
總營運成本	925.9	1182.2	1449.4
年櫃位成本	0.2315	0.197	0.1449

資料來源：航運交易公報，10月7日，2003，p13。

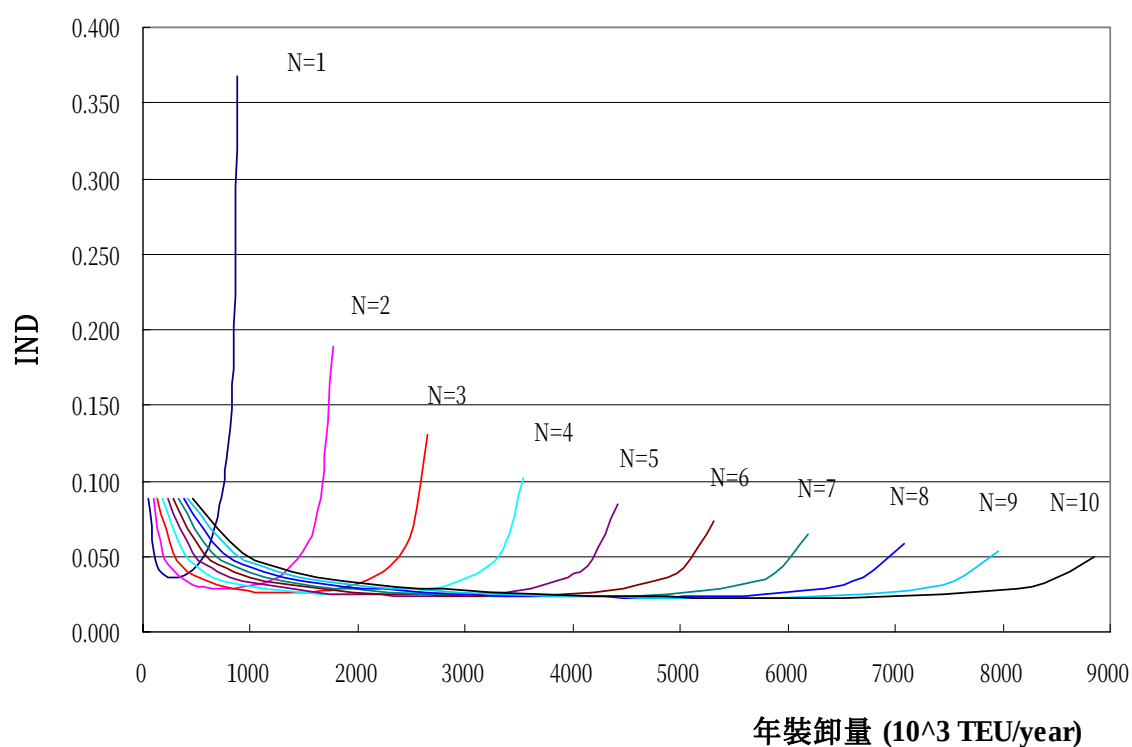


圖 4-13 港埠能量與 IND 關係圖(K=1)

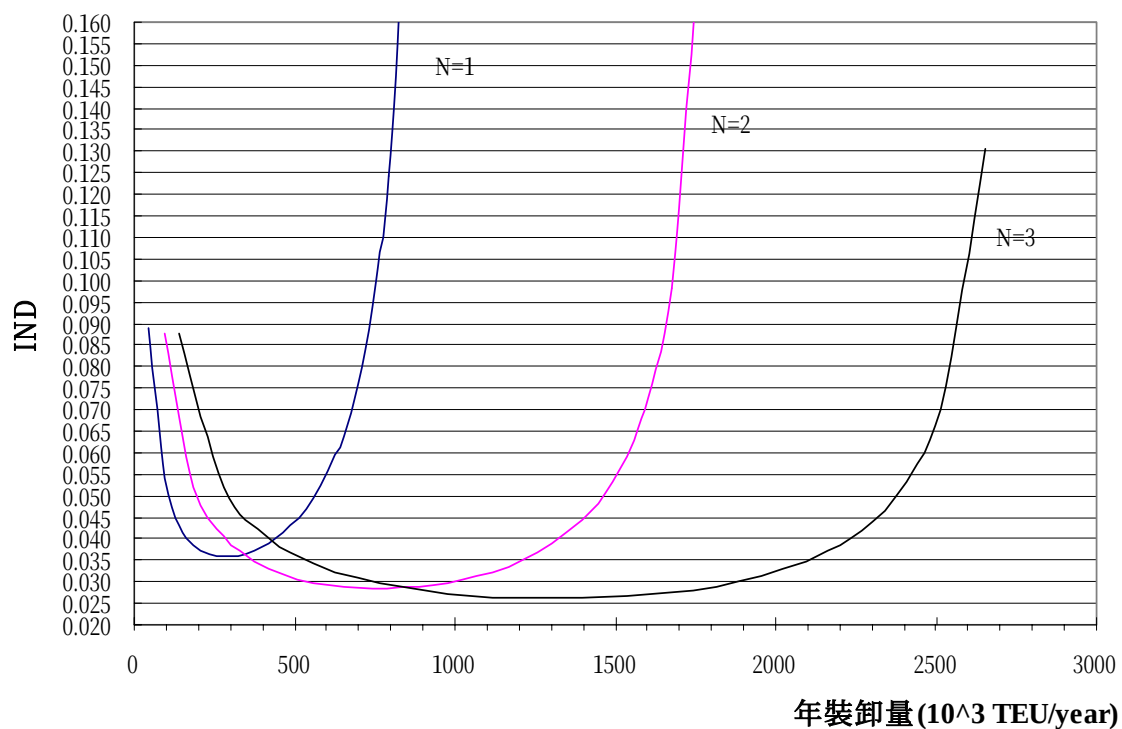


圖 4-13a 港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=1,2,3$)

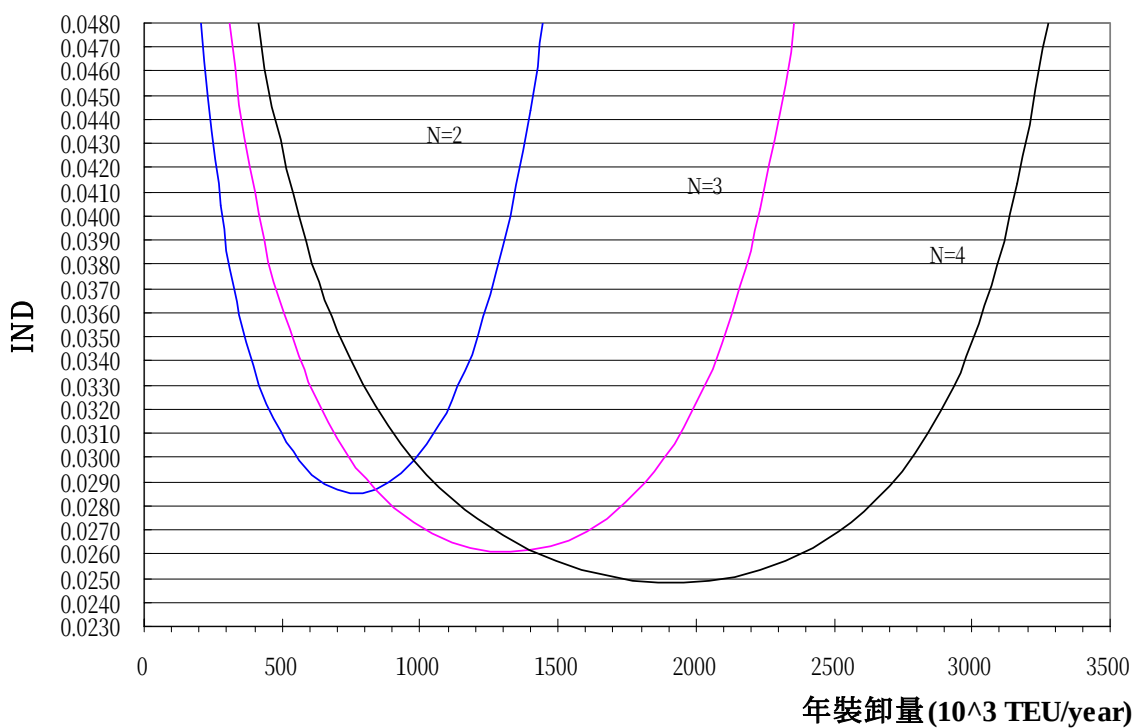


圖 4-13b 港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=2,3,4$)

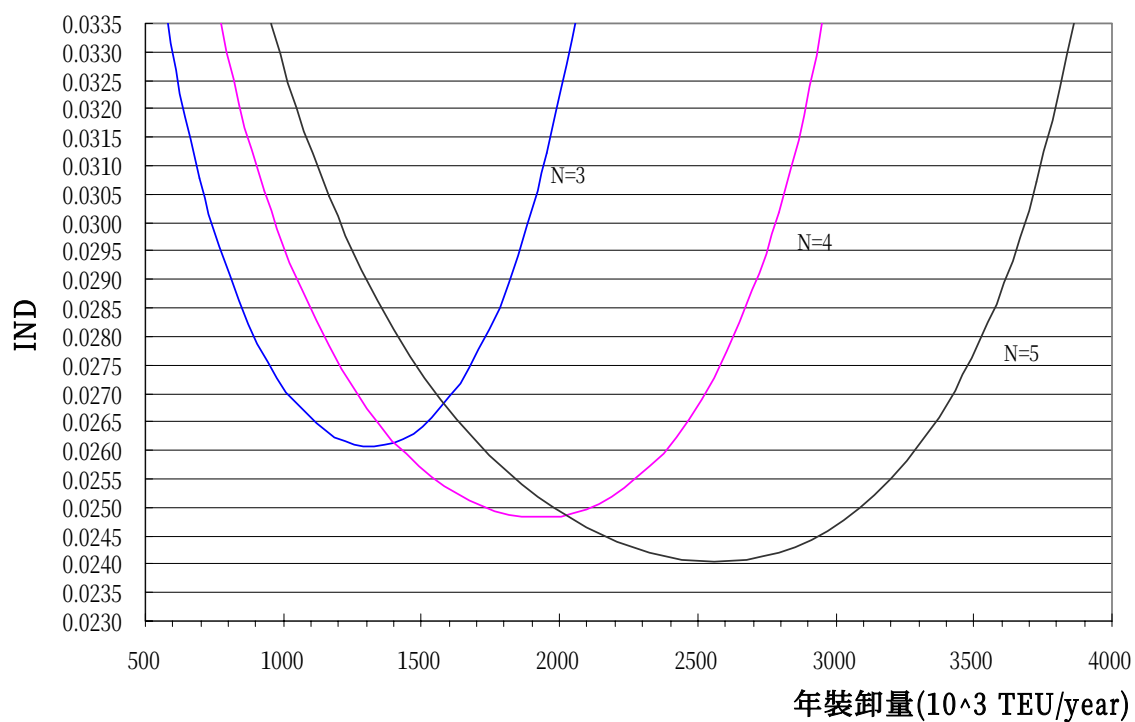


圖 4-13c 港埠能量與 IND 關係圖(K=1, N=3,4,5)

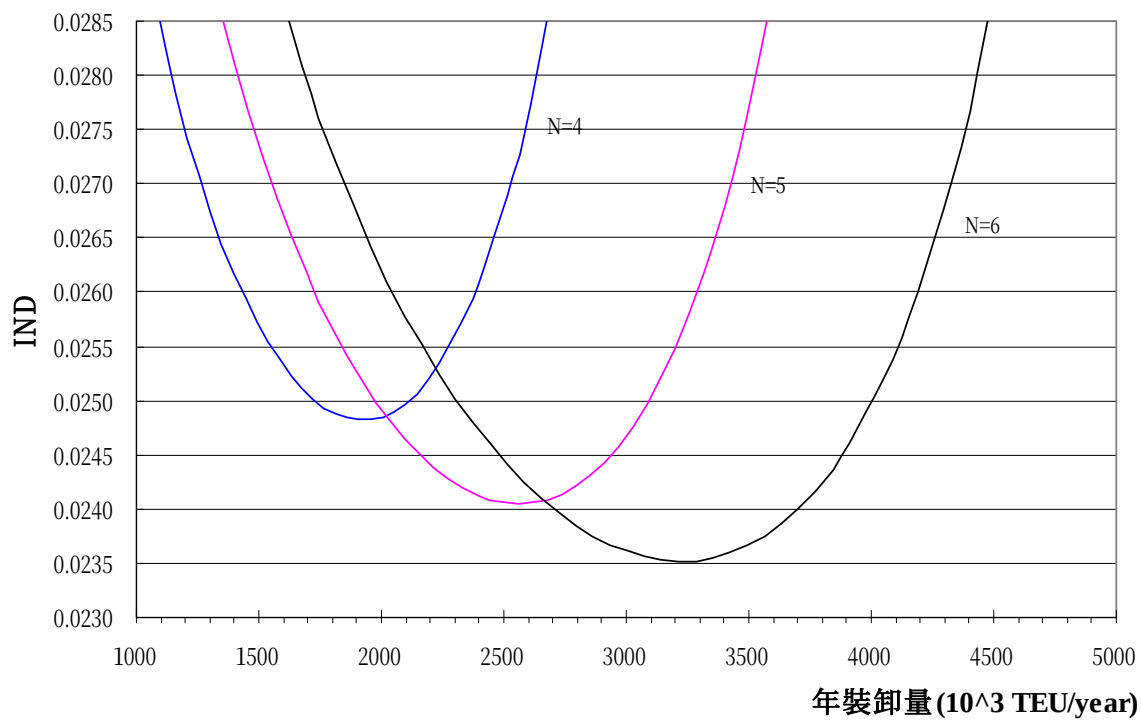


圖 4-13d 港埠能量與 IND 關係圖(K=1, N=4,5,6)

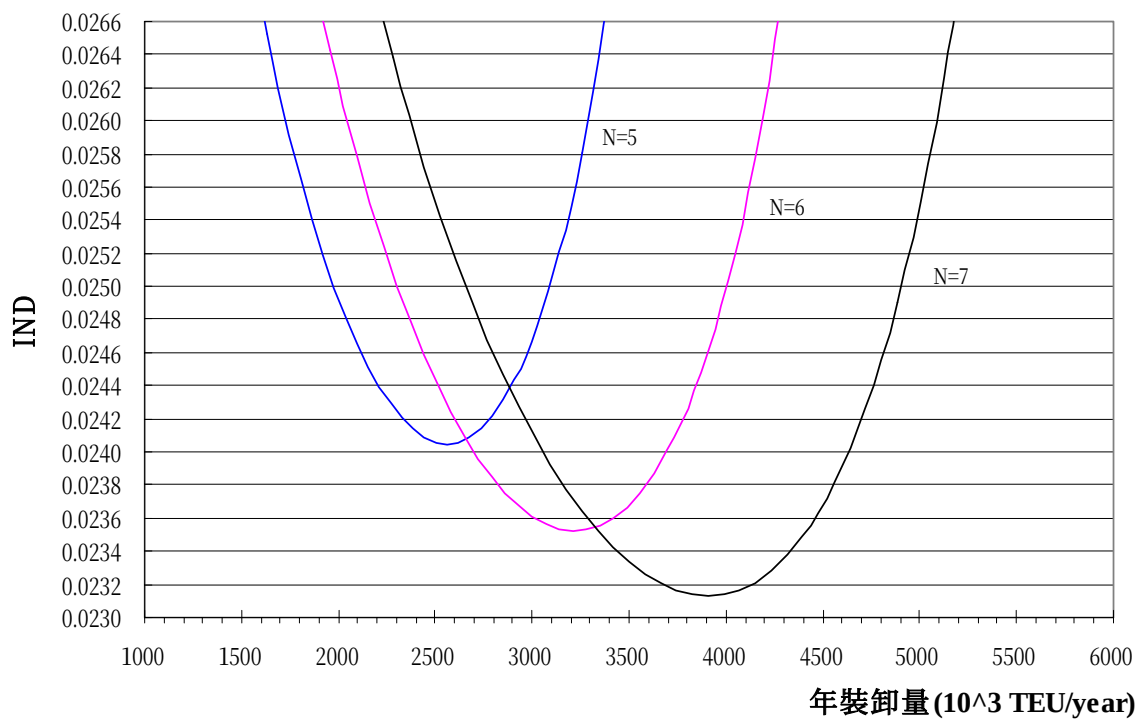


圖 4-13e 港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=5,6,7$)

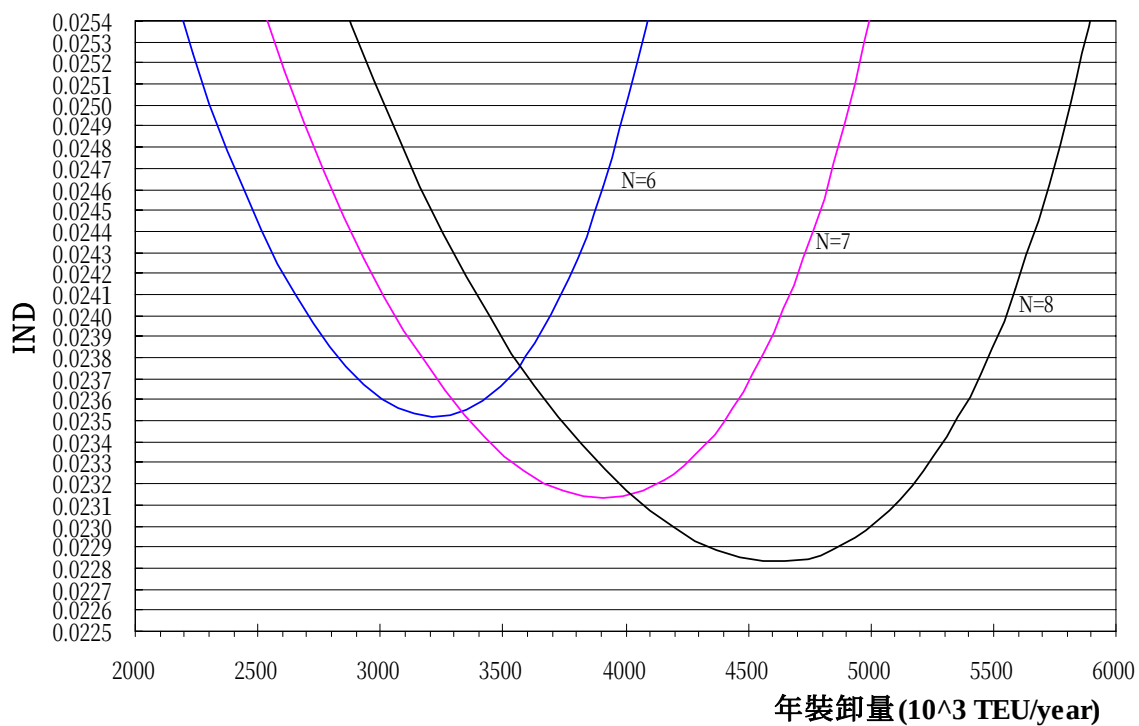


圖 4-13f 港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=6,7,8$)

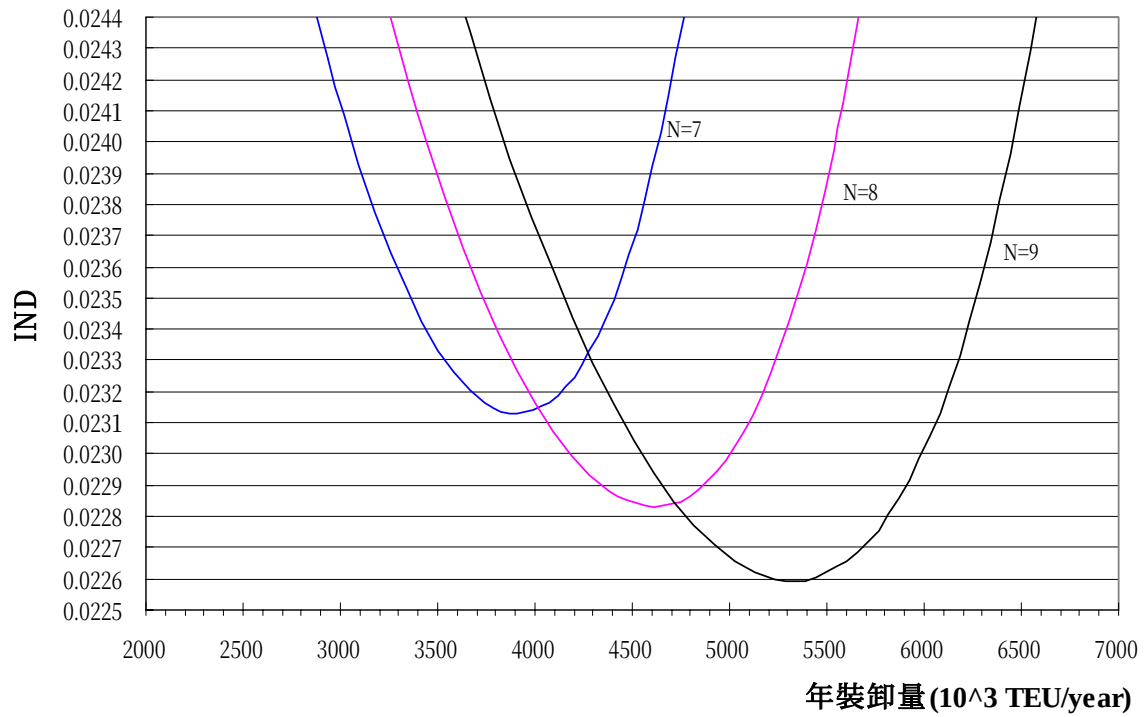


圖 4-13g 港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=7,8,9$)

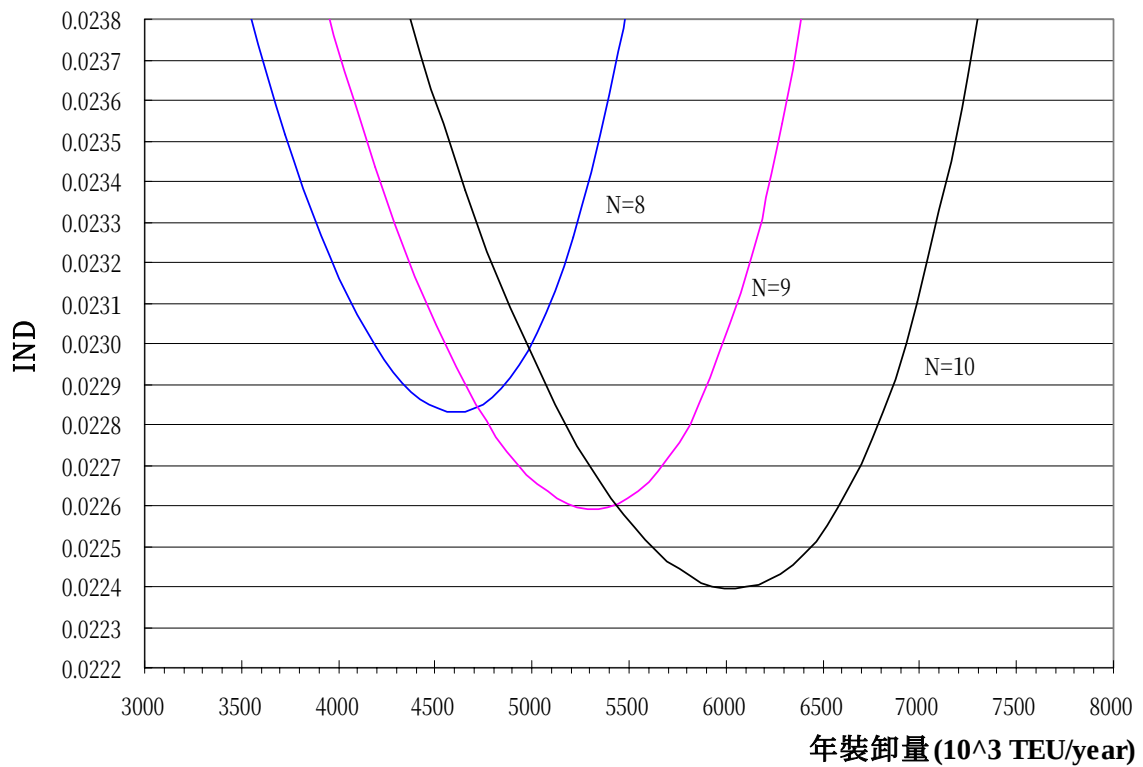


圖 4-13h 港埠能量與 IND 關係圖($K=1$, $N=8,9,10$)

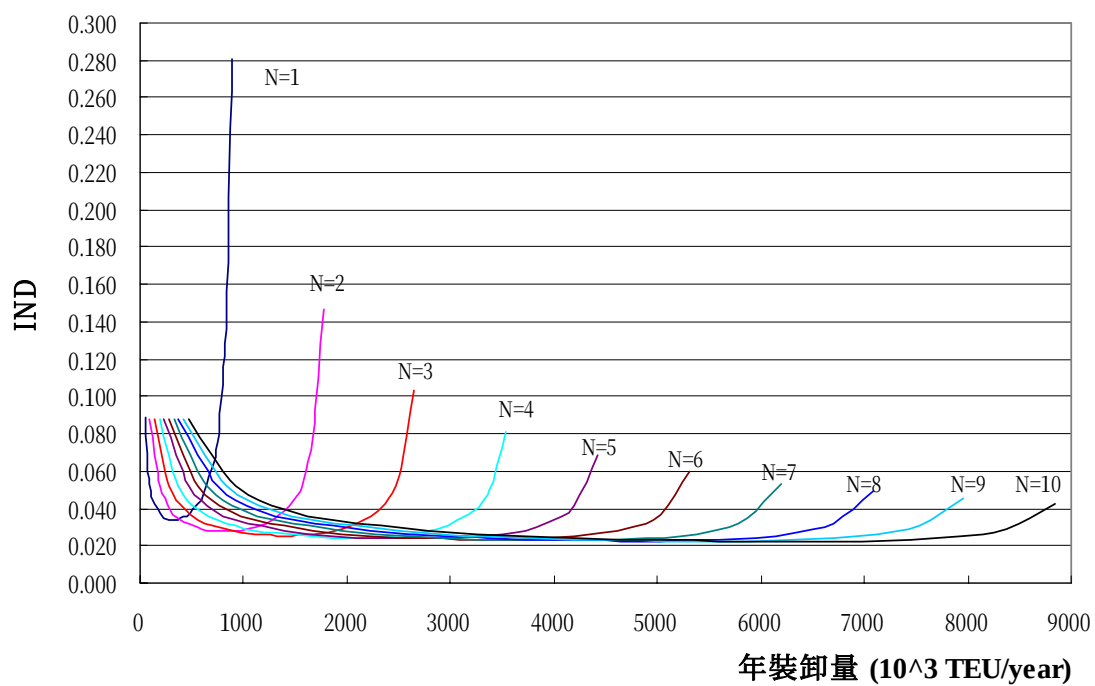


圖 4-14 港埠能量與 IND 關係圖(K=2)

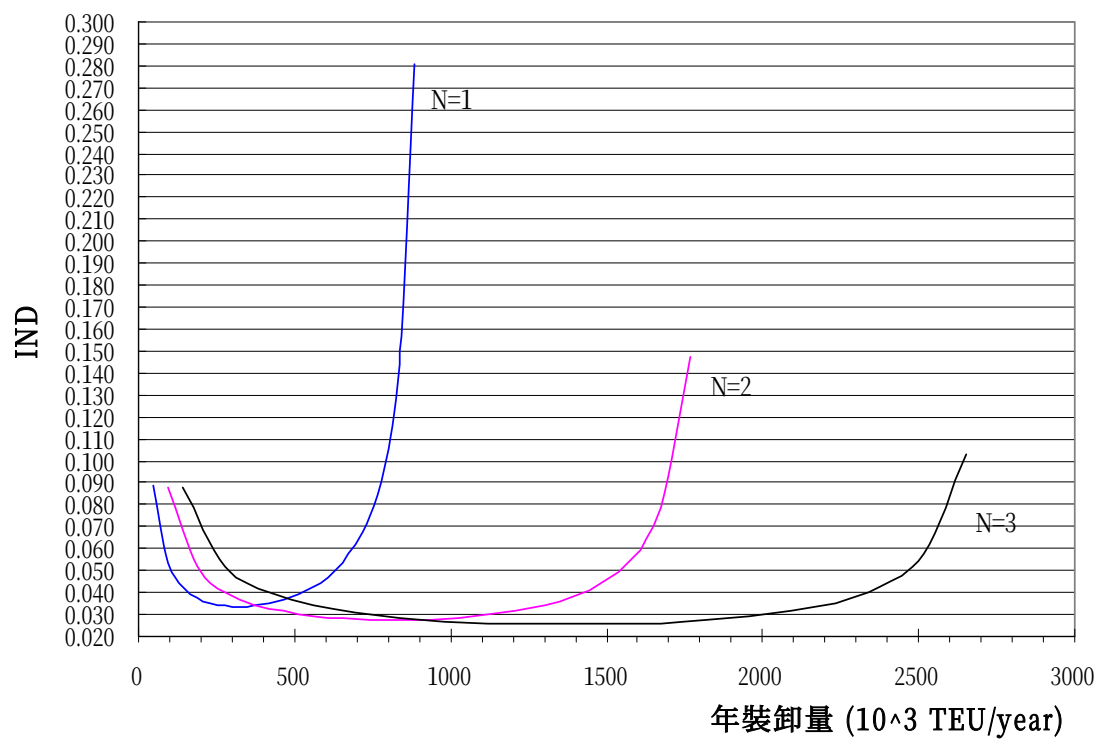


圖 4-14a 港埠能量與 IND 關係圖 (K=2, N=1,2,3)

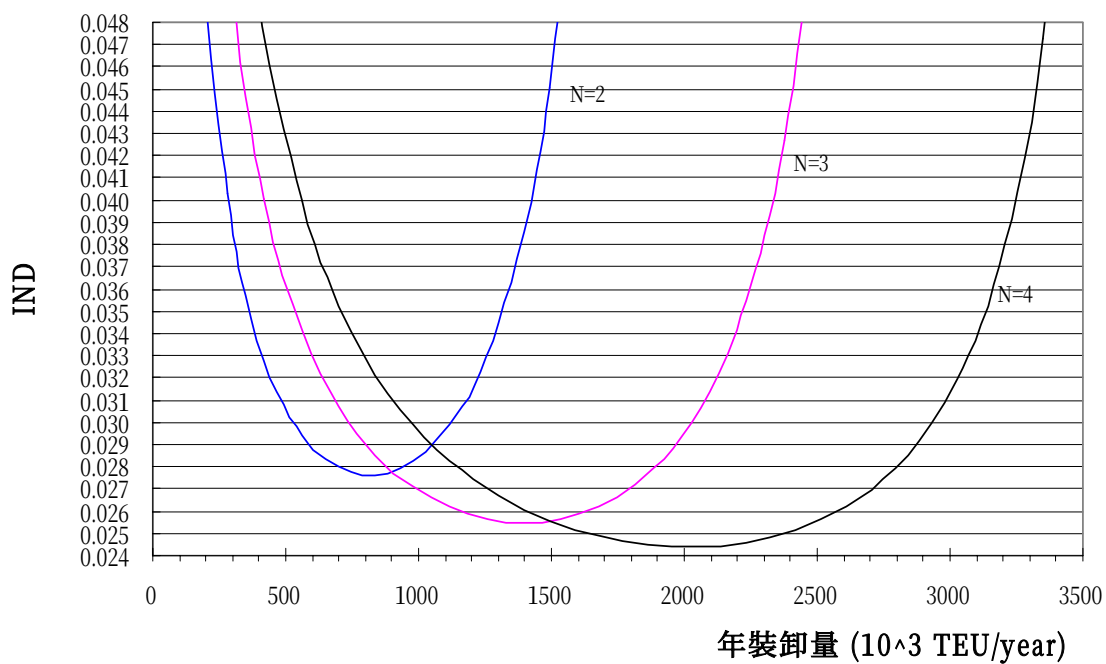


圖 4-14b 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=2,3,4$)

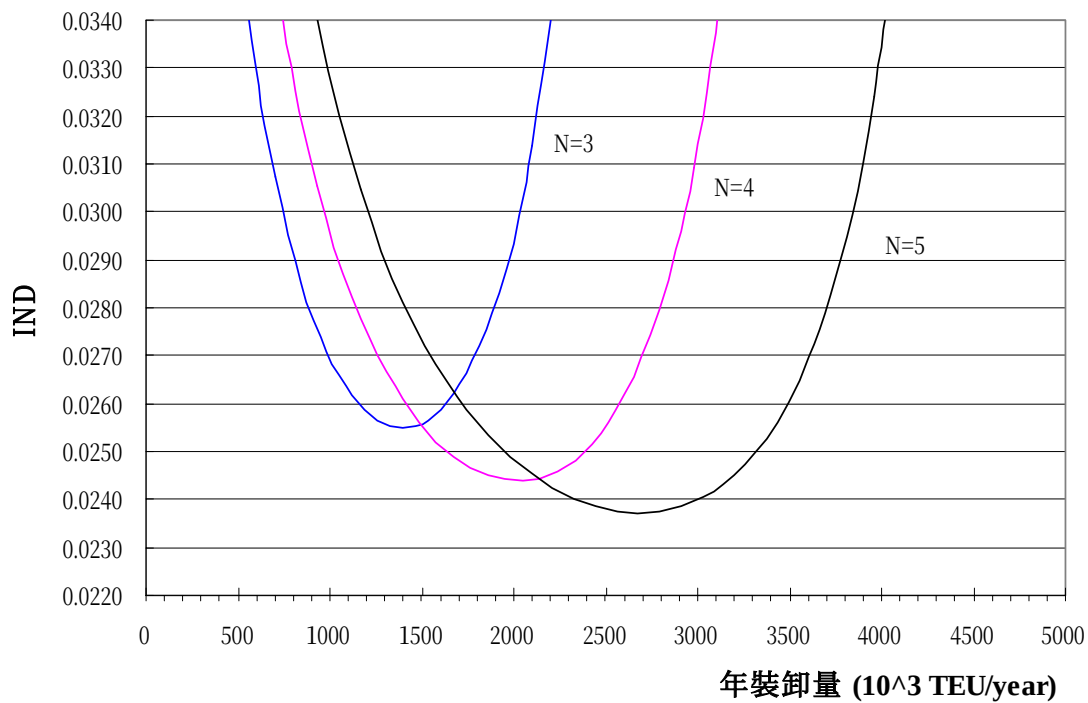


圖 4-14c 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=3,4,5$)

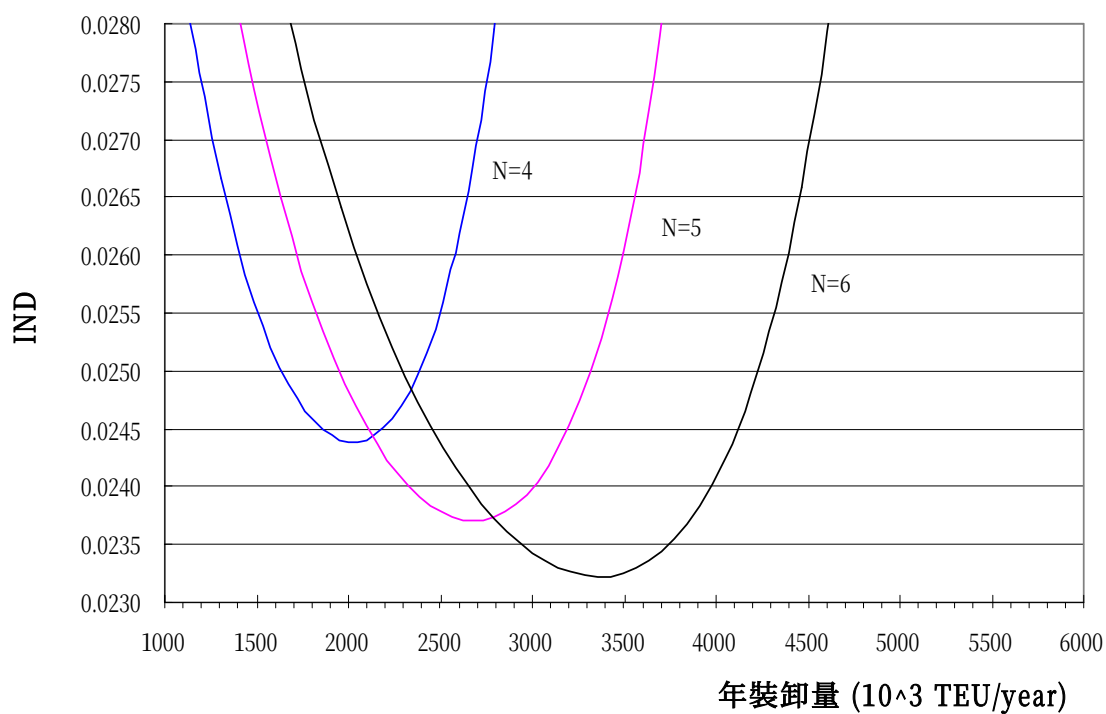


圖 4-14d 港埠能量與 IND 關係圖 (K=2, N=4,5,6)

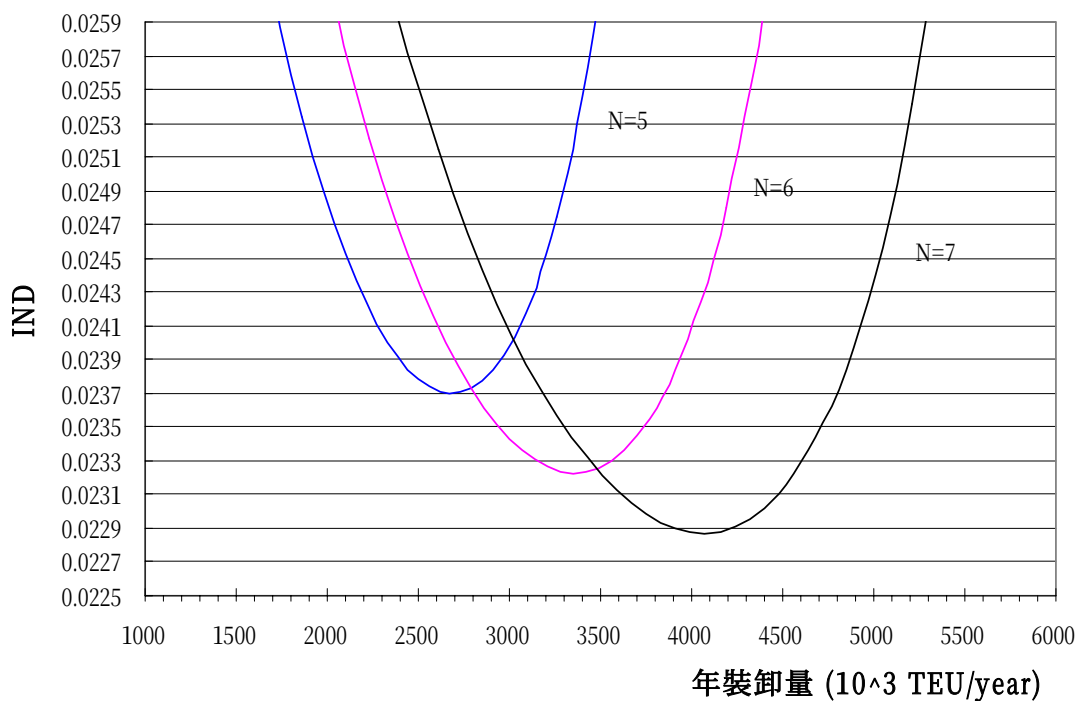


圖 4-14e 港埠能量與 IND 關係圖 (K=2, N=5,6,7)

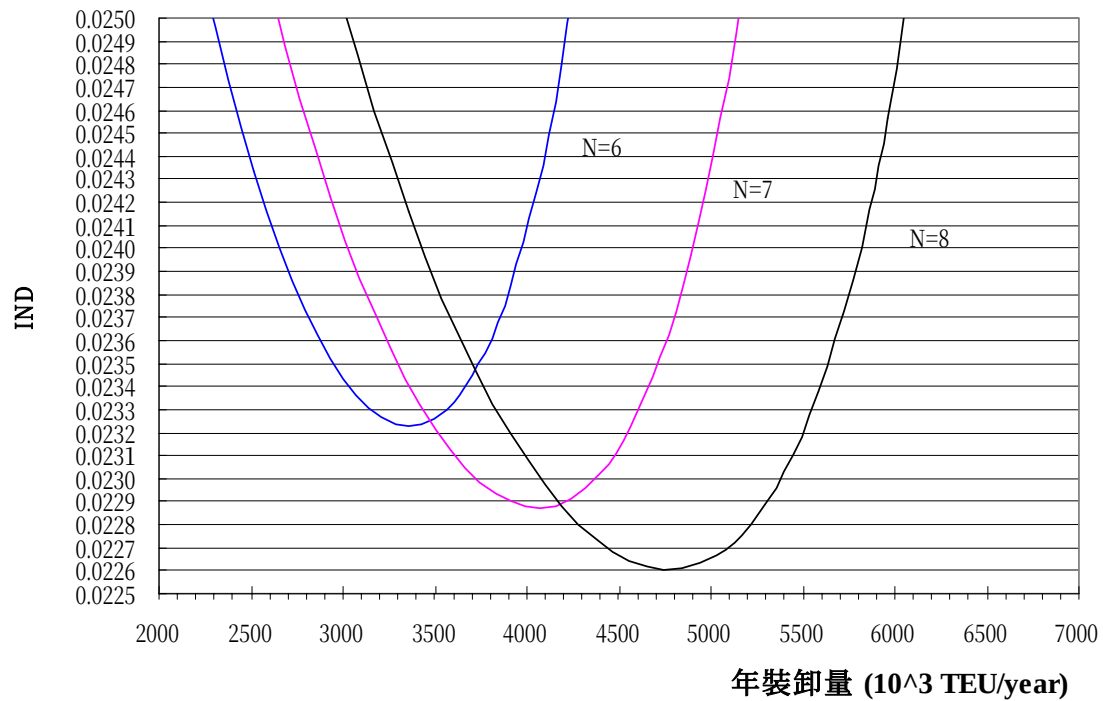


圖 4-14f 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=6, 7, 8$)

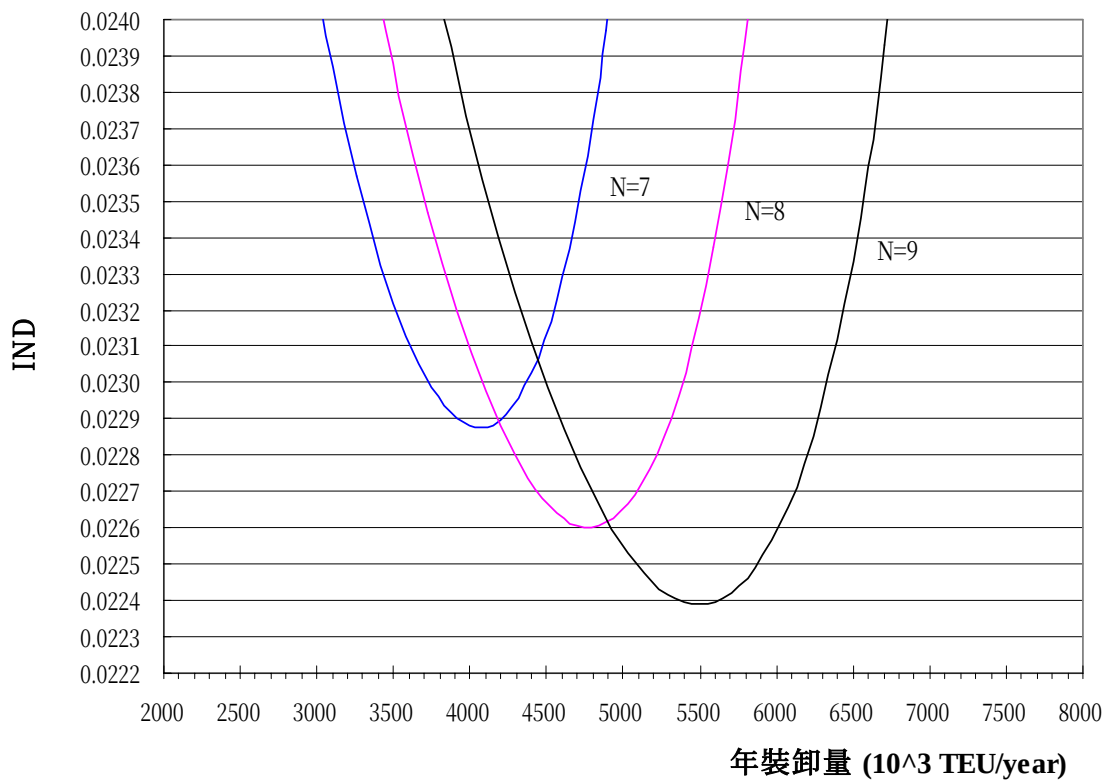


圖 4-14g 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=7, 8, 9$)

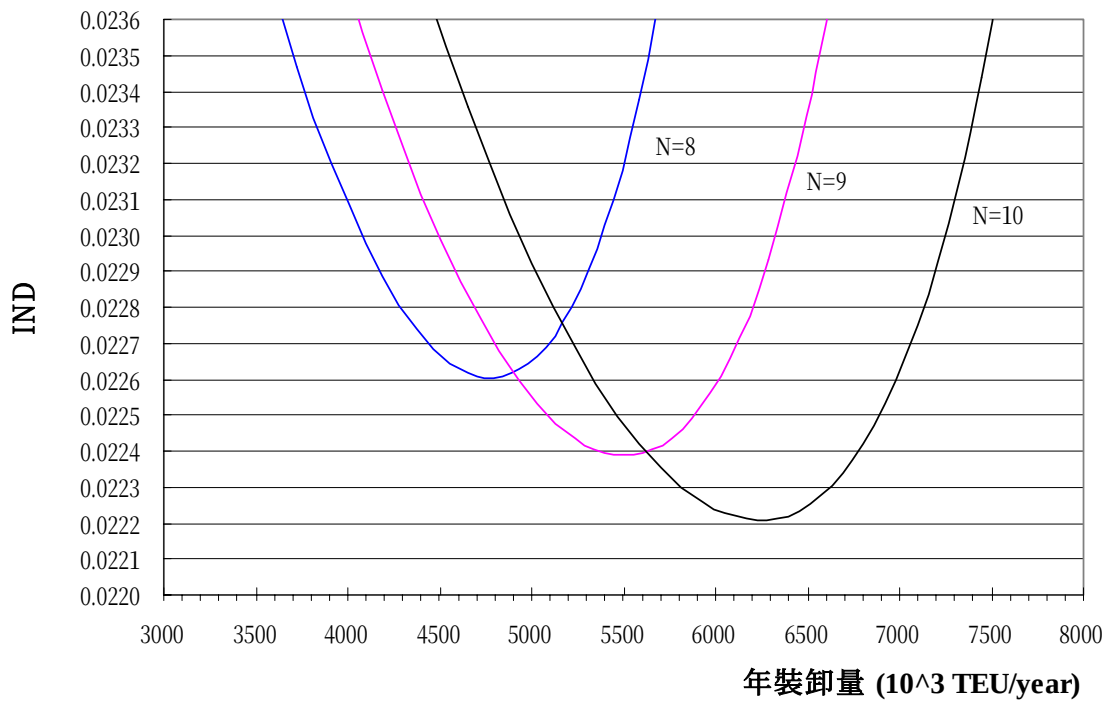


圖 4-14h 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=2$, $N=8,9,10$)

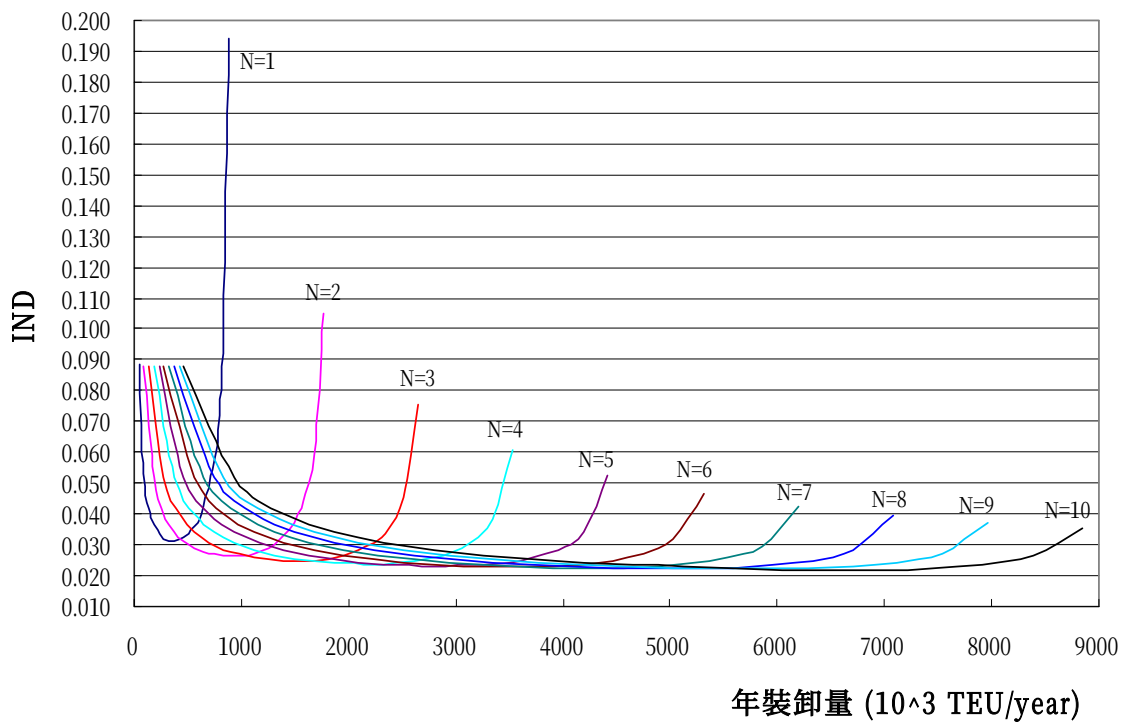


圖 4-15 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$)

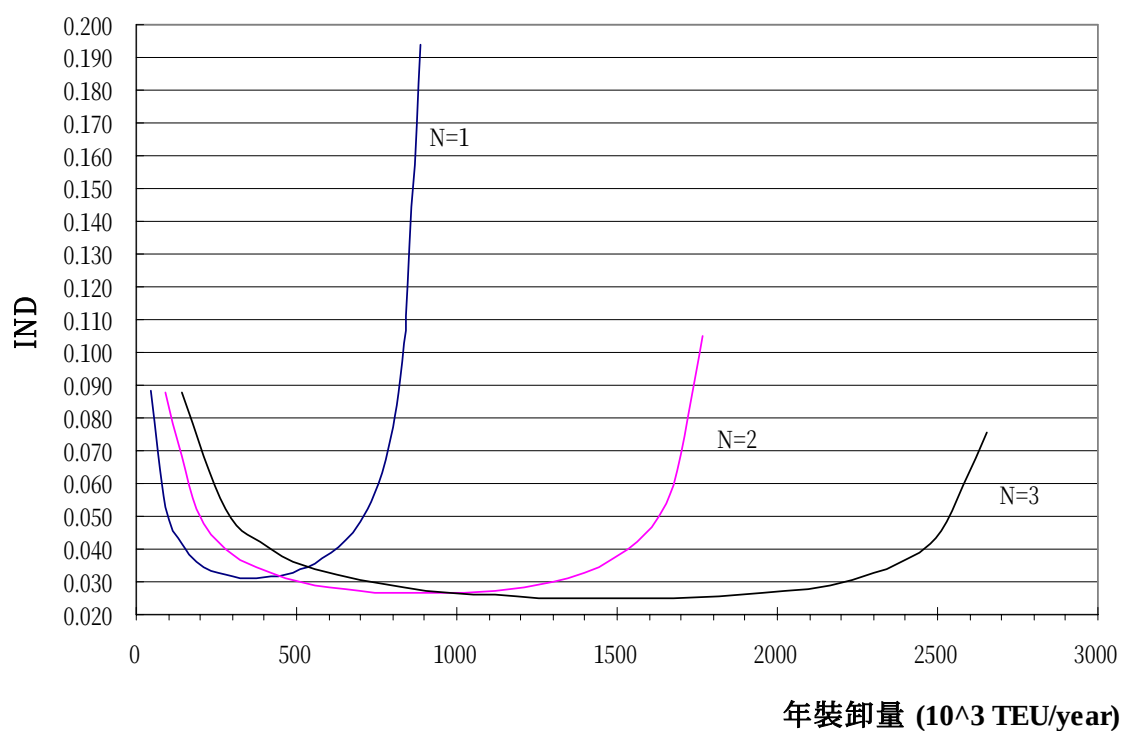


圖 4-15a 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=1,2,3$)

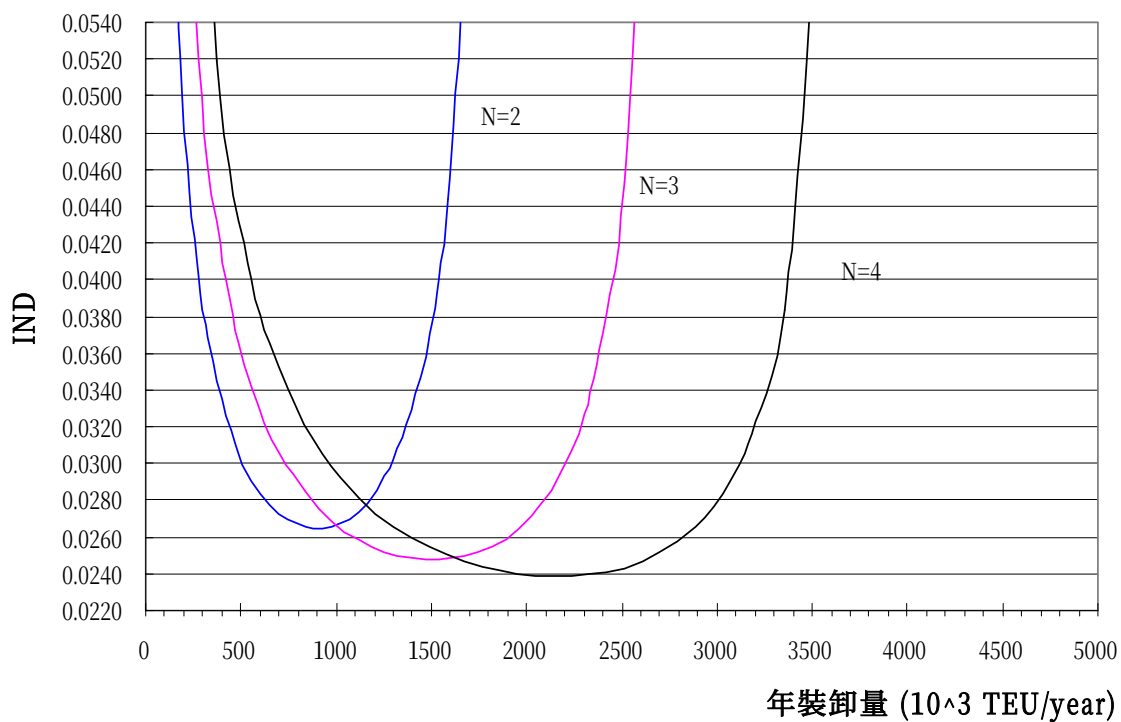


圖 4-15b 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=2,3,4$)

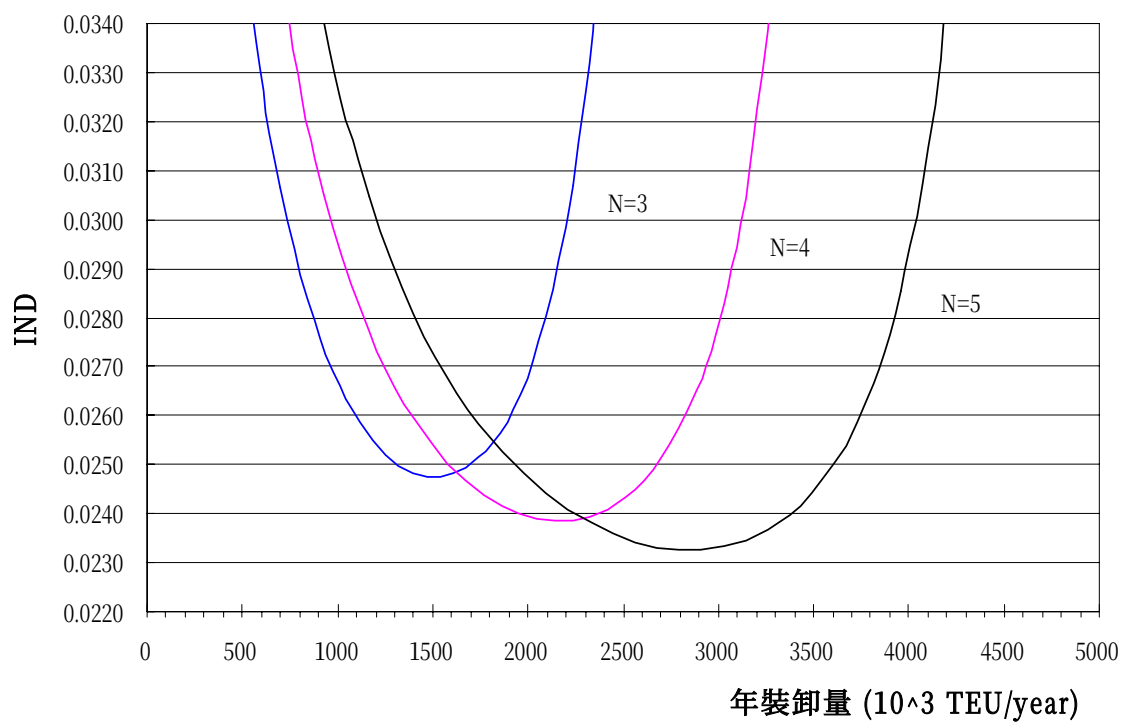


圖 4-15c 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=3,4,5$)

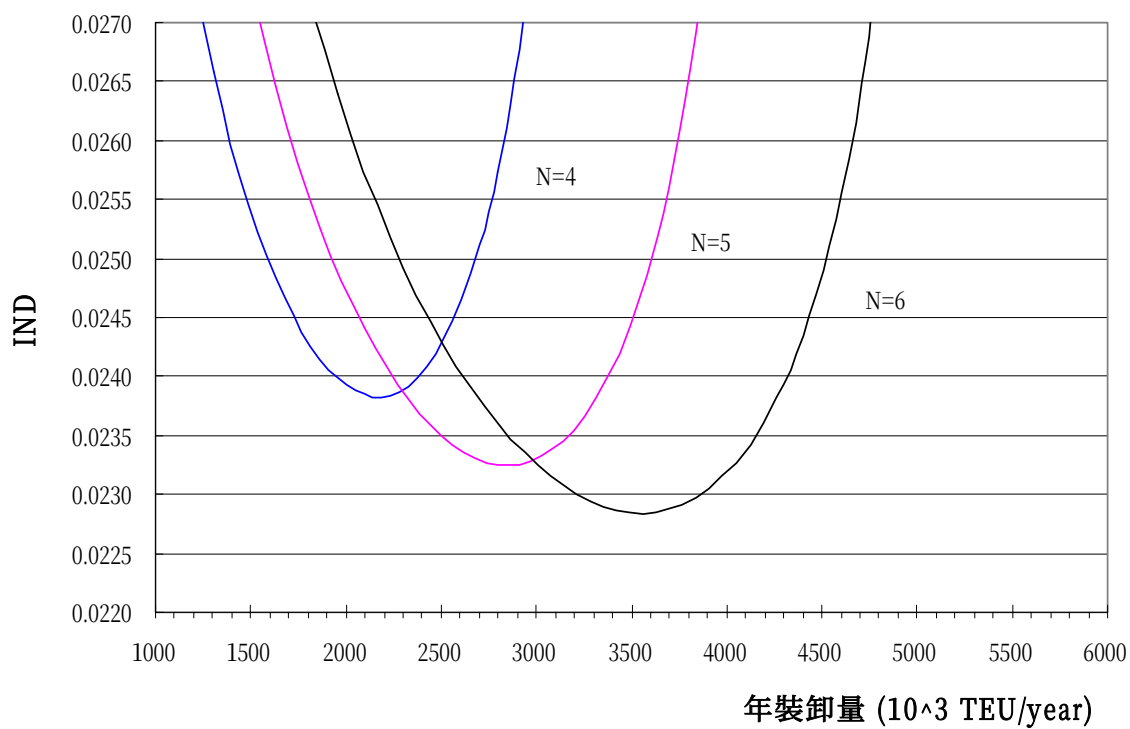


圖 4-15d 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=4,5,6$)

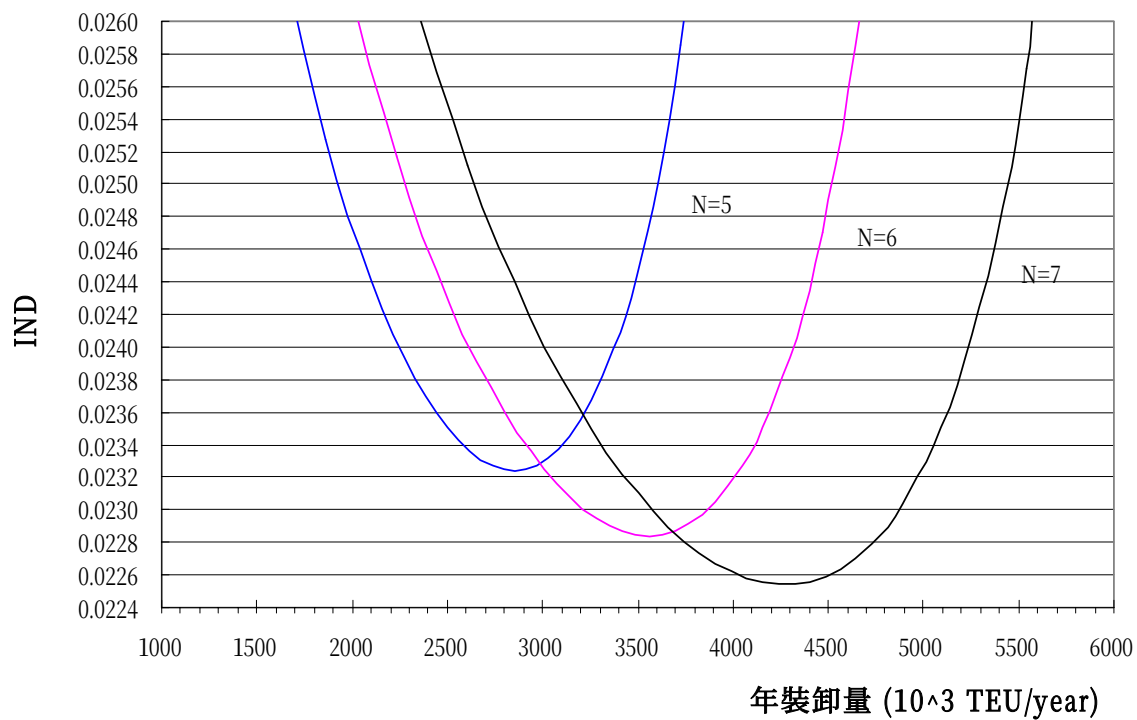


圖 4-15e 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=5,6,7$)

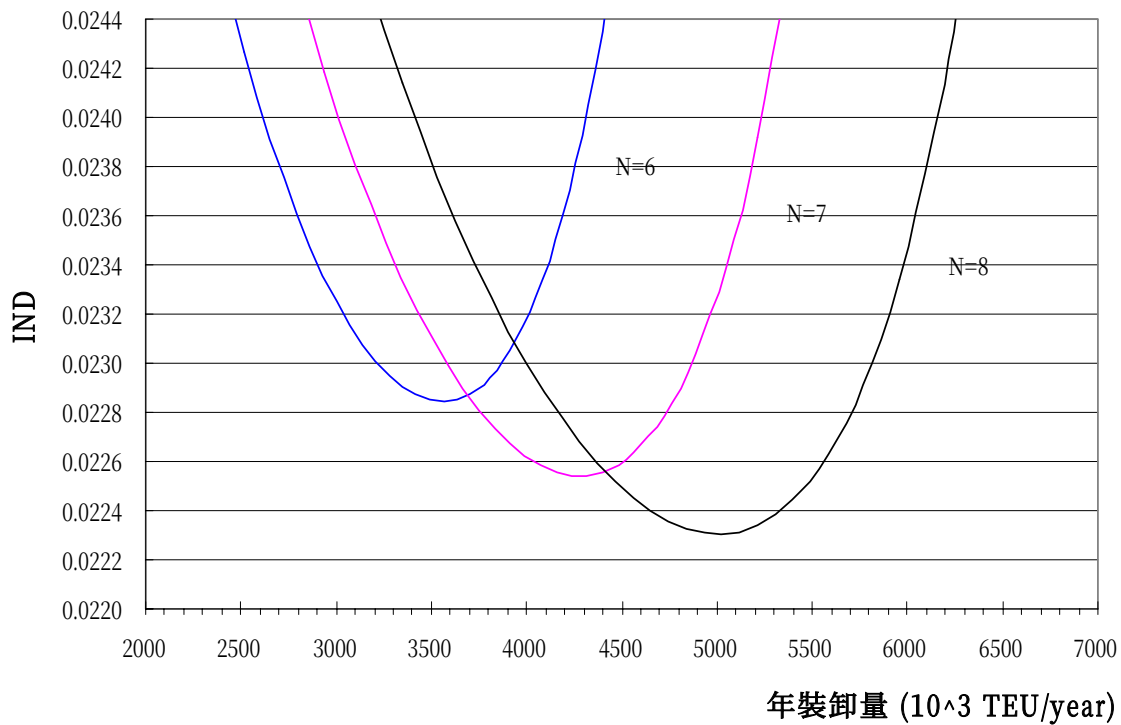


圖 4-15f 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=6,7,8$)

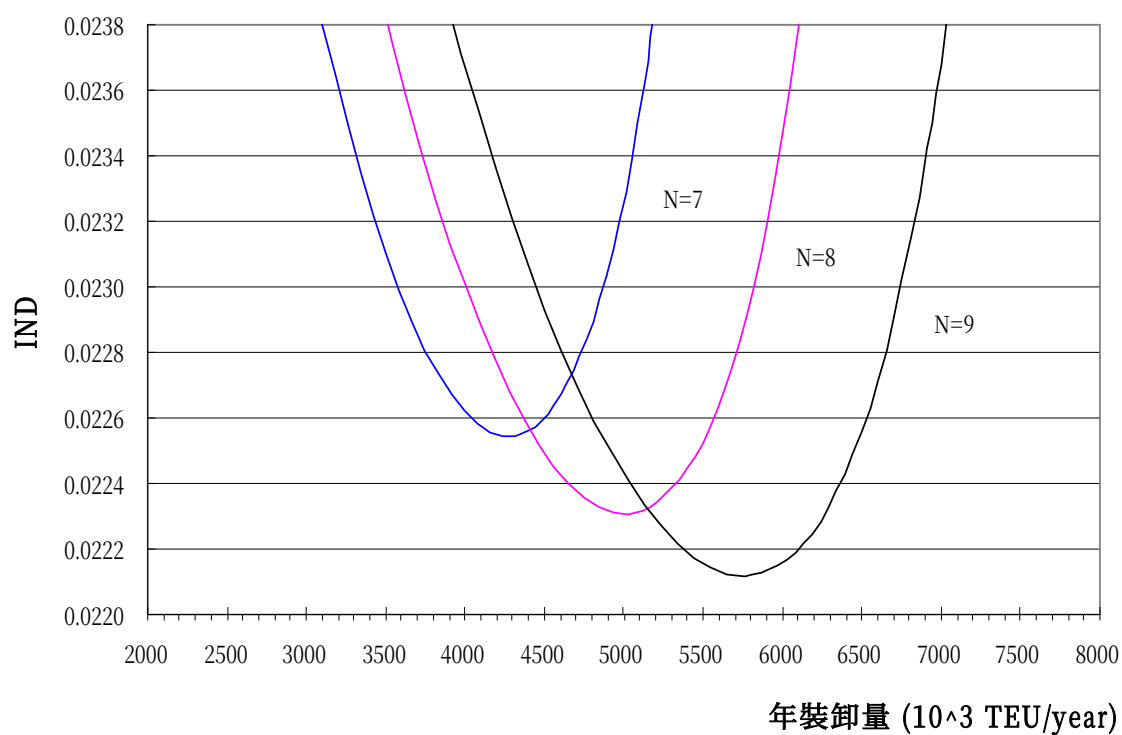


圖 4-15g 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=7,8,9$)

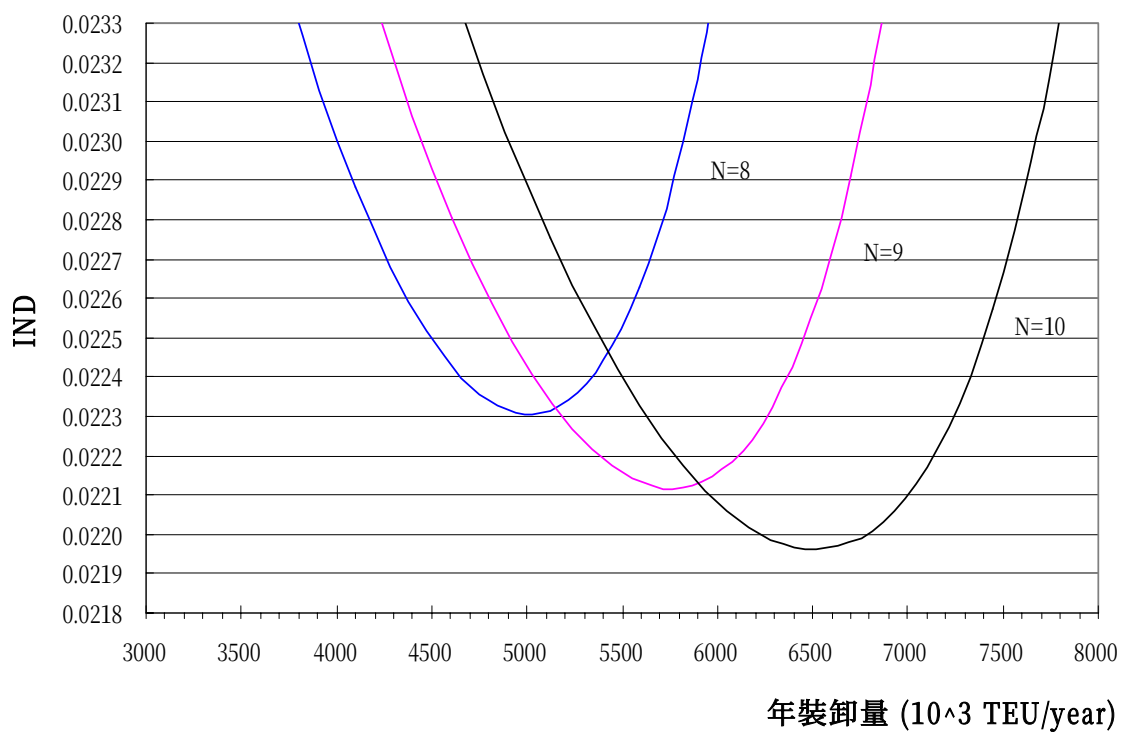


圖 4-15h 港埠能量與 IND 關係圖 ($K=\infty$, $N=8,9,10$)

4.4 碼頭經營績效分析

碼頭經營績效乃結合 IND 概念與最適能量區間概念(黃文吉等人 1996)推演而來。如圖 4-16 所示，A 點為船席數 N 時成本最低之點，B 點則為船席數分別為 $N-1$ 與 N 時成本函數曲線之交點，在 B 點之 $IND_{N-1} = IND_N$ ，此為”船席數 N 之最適能量壽命起始點”；同樣的，C 點則為船席數分別為 N 與 $N+1$ 時成本函數曲線之交點，在 C 點之 $IND_N = IND_{N+1}$ ，也就是”船席數 N 之最適能量壽命終點”，因此， $Q_{(N,B)} \sim Q_{(N,C)}$ 即為船席規模為 N 時之最適能量壽命區間。當船席規模不同時，增建船席所帶來之效益並不相同。自船席數 N 最適能量壽命區間起始點，至能量壽命終點，船席數 $N-1$ 與 N 在某一裝卸量時兩者成本之差 $IND_{N-1} - IND_N$ 與裝卸量之乘積累加起來，即為增加一座船席在該裝卸量所可能減少之成本，如圖 4-17 所示之陰影部分，即為增加船席數所能增加之總效益概念圖。

由表 4.10~ 4.12 船席數 N 之最適能量壽命區間比較可以看出：隨著船席規模之增加，最適能量區間有趨大之趨勢；而比較不同 K 值同一船席規模之最適能量壽命區間時，又可發現較大之 K 值，其最適能量壽命區間較大。換句話說，當船舶到達時間間隔越均勻，船席數規模越大時，其船席最適能量壽命區間越大。

圖 4-18 (a, b, c) ~圖 4-20 (a, b, c)分別為 $K=1, 2, \infty$ 之船席最適能量 (IND 值最低點之能量，也就是 Q_A) 分析、不同船席規模時之 IND 最低點值、效益分析。圖 4-21 ~ 圖 4-23 則將 $K=1, 2, \infty$ 之船席最適能量、不同船席規模時之 IND 最低點值、效益分析一齊比較分析。圖 4-21 顯示：船席最適能量隨著船席規模之增加而增加，但是有趨於平緩之趨勢；而相同船席規模時 $K = \infty$ 之船席最適能量比 $K=1, 2$ 之船席最適能量大，也就是 K 值越大 (船舶到達時間間隔越均勻)，船席最適能量越高。

就最低點 IND 值之變化而言，圖 4-22 顯示：IND 值隨著船席規模之增加而降低，但是有趨於平緩之趨勢；而相同船席規模時 $K = \infty$ 之 IND 值最低，也就是 K 值越大（船舶到達時間間隔越均勻），單位貨物之在港總成本越低。

至於在效益比較上，如圖 4-23 顯示，當船席數由 1 座增加至 2 座時，效益最顯著，其次是由 2 座增加至 3 座時。當船席數超過 4 座時，每增加 1 座船席，其相對之效益差異並不大。而就不同 K 值之差異性分析時，在船席數少於 3 座時， $K = \infty$ 之效益明顯高於 $K = 2$ 之效益， $K = 2$ 之效益又高於 $K = 1$ 之效益，但是當船席數多於 3 座時，不同 K 值時增加船席規模其效益差異非常有限。

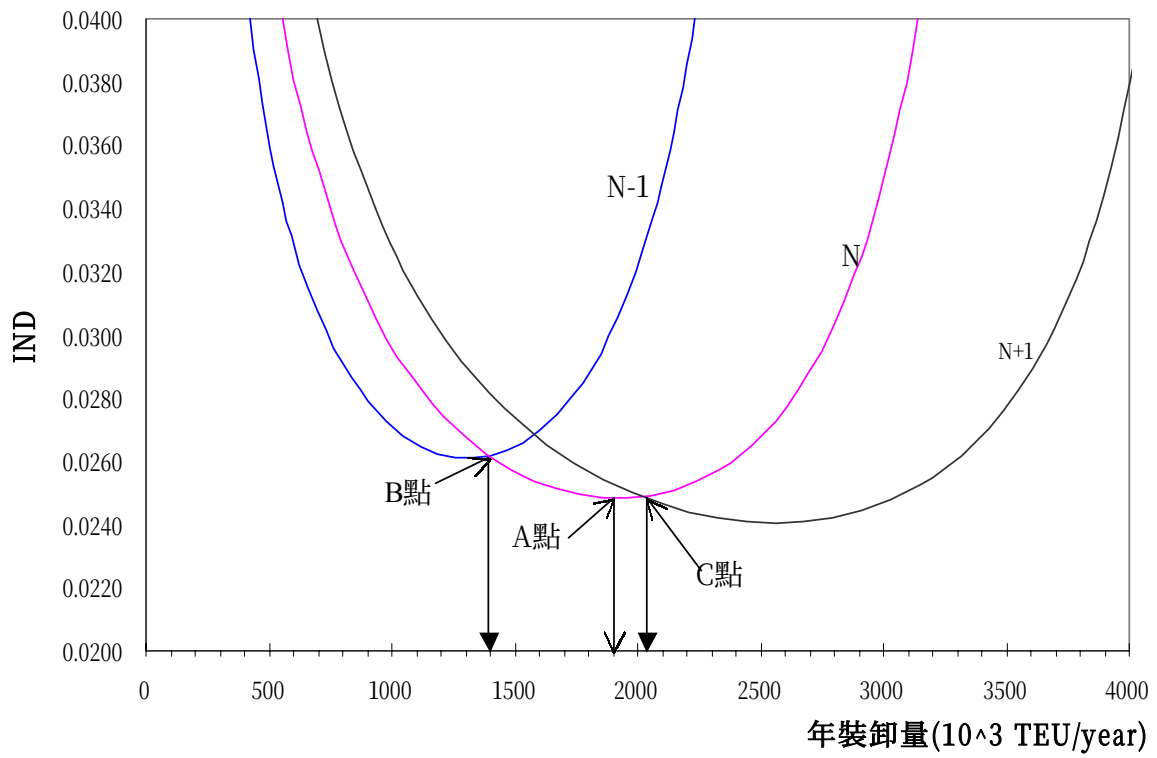


圖 4-16 港埠最適能量壽命所定義之三點示意圖

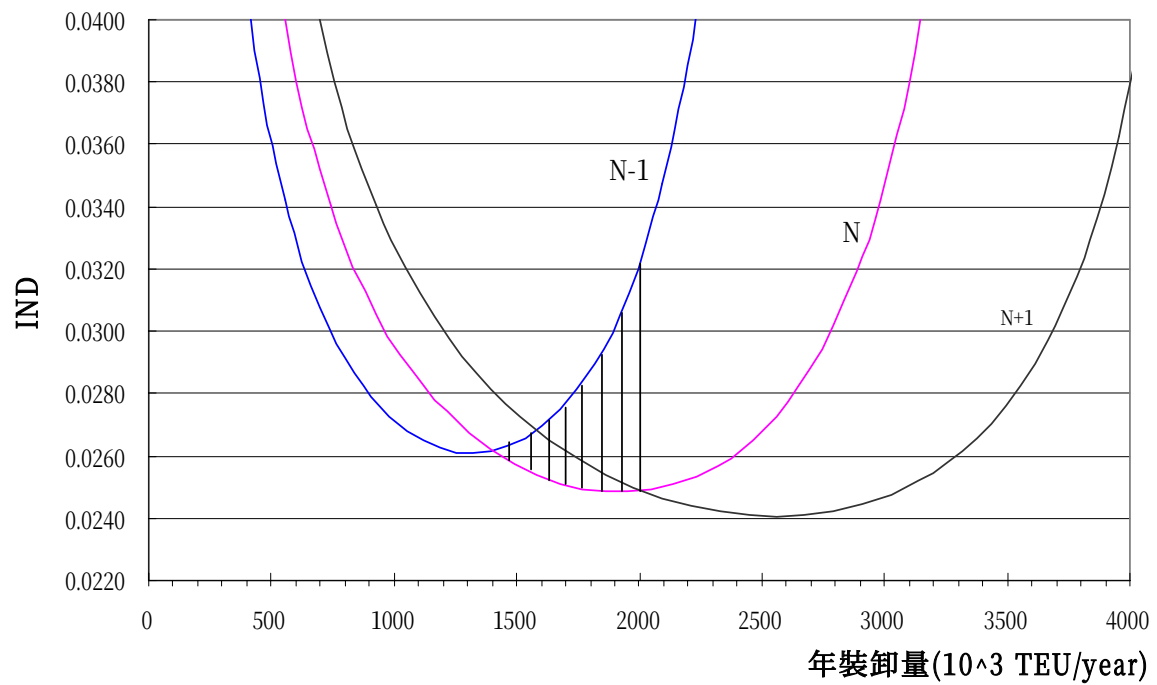


圖 4-17 擴建船席效益分析概念圖

表 4.10 船席規模 N 之最適能量區間特性分析 (K=1)

船席規模 (N)	能量壽命起點 (Q _B)	成本最低點 (Q _A)	能量壽命終點 (Q _C)	能量壽命區間 (Q _C - (Q _B))
2	341,000	750,000	834,000	493,000
3	834,000	1,280,000	1,403,000	569,000
4	1,403,000	1,920,000	2,018,000	615,000
5	2,018,000	2,560,000	2,662,000	644,000
6	2,662,000	3,260,000	3,331,000	669,000
7	3,331,000	3,950,000	4,017,000	686,000
8	4,017,000	4,650,000	4,722,000	705,000
9	4,722,000	5,336,000	5,435,000	713,000

表 4.11 船席規模 N 之最適能量區間特性分析 (K=2)

船席規模 (N)	能量壽命起點 (Q _B)	成本最低點 (Q _A)	能量壽命終點 (Q _C)	能量壽命區間 (Q _C - (Q _B))
2	380,000	820,000	903,000	523,000
3	903,000	1,400,000	1,495,000	592,000
4	1,495,000	2,020,000	2,128,000	633,000
5	2,128,000	2,691,000	2,792,000	664,000
6	2,792,000	3,350,000	3,480,000	688,000
7	3,480,000	4,050,000	4,182,000	702,000
8	4,182,000	4,780,000	4,897,000	715,000
9	4,897,000	5,500,000	5,630,000	733,000

表 4.12 船席規模 N 之最適能量區間特性分析 ($K=\infty$)

船席規模 (N)	能量壽命起點 (Q_B)	成本最低點 (Q_A)	能量壽命終點 (Q_C)	能量壽命區間 ($Q_C - (Q_B)$)
2	440,000	910,000	1,005,000	565,000
3	1,005,000	1,520,000	1,630,000	625,000
4	1,630,000	2,165,000	2,290,000	660,000
5	2,290,000	2,850,000	2,982,000	692,000
6	2,982,000	3,551,000	3,688,000	706,000
7	3,688,000	4,280,000	4,413,000	725,000
8	4,413,000	5,020,000	5,152,000	739,000
9	5,152,000	5,760,000	5,895,000	743,000

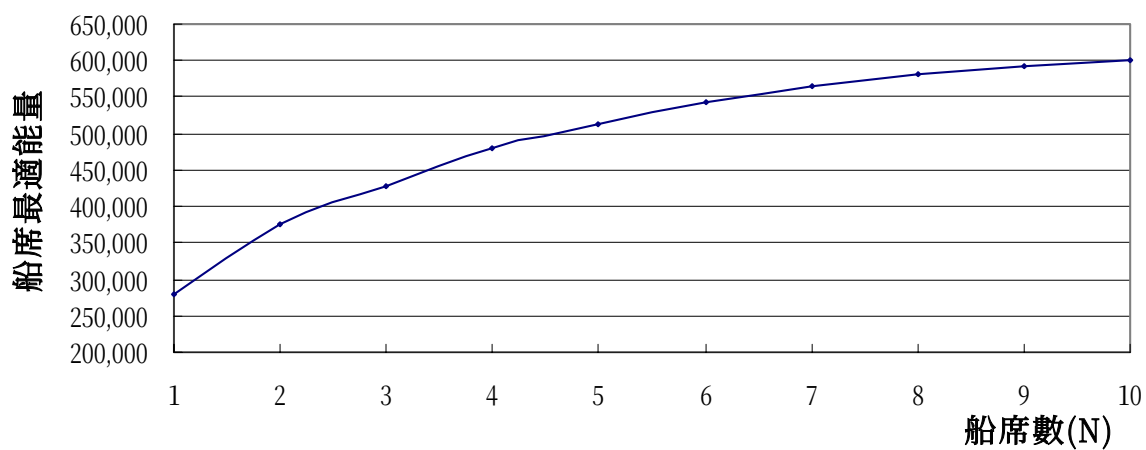


圖 4-18a 船席最適能量分析(K=1)

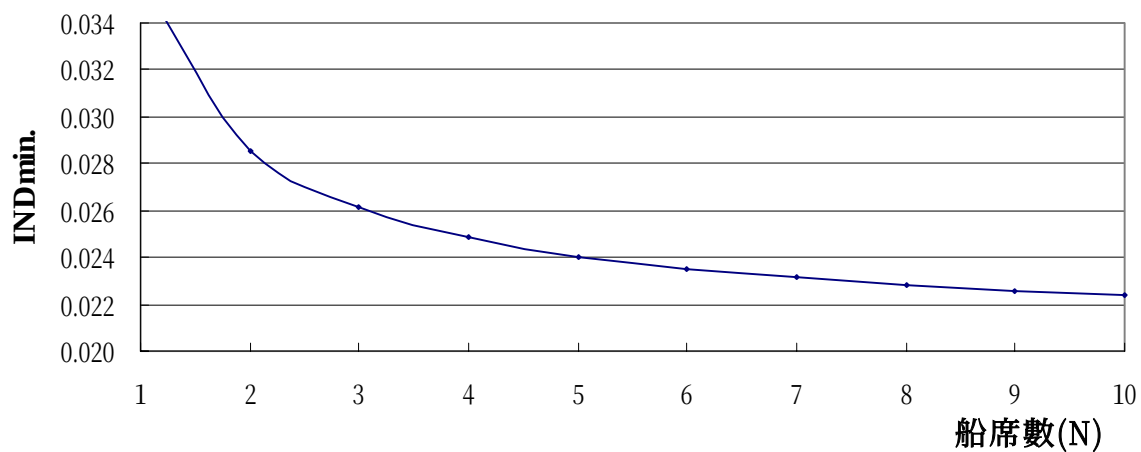


圖 4-18b 船席規模與 IND 關係分析(K=1)

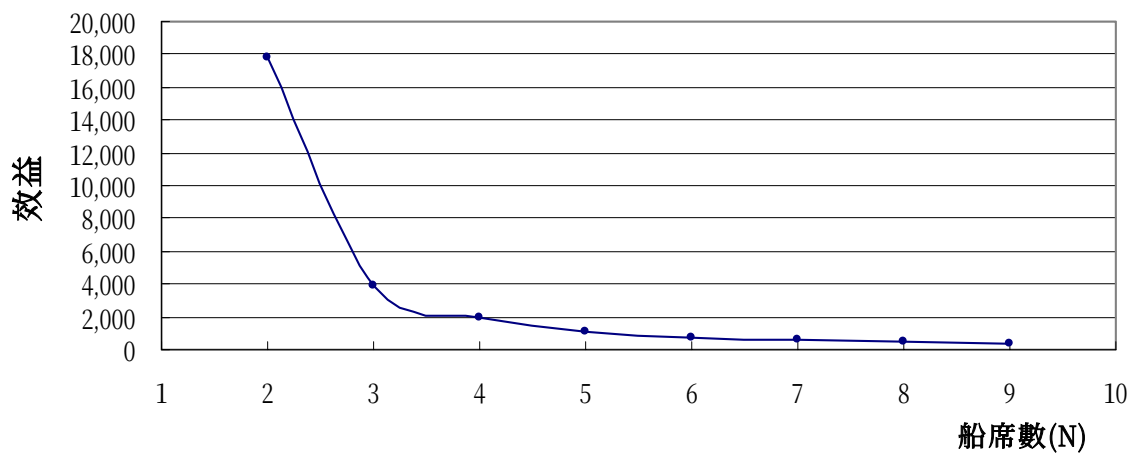


圖 4-18c 增加船席規模之效益分析(K=1)

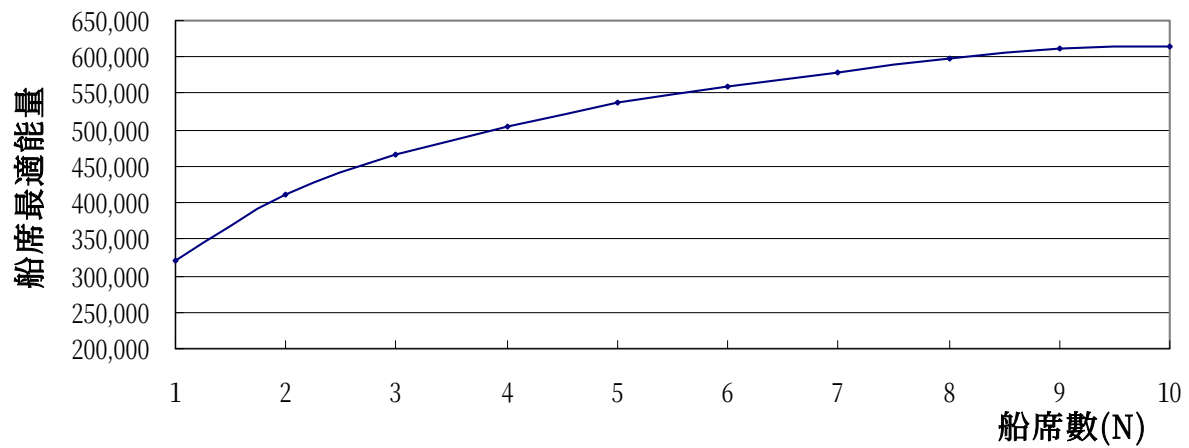


圖 4-19a 船席最適能量分析($K=2$)

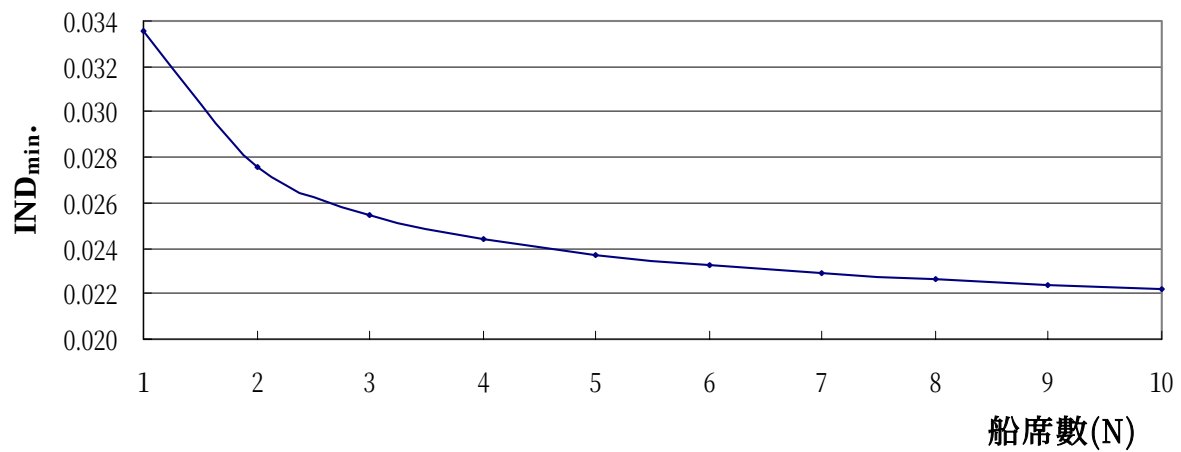


圖 4-19b 船席規模與 IND 關係分析($K=2$)

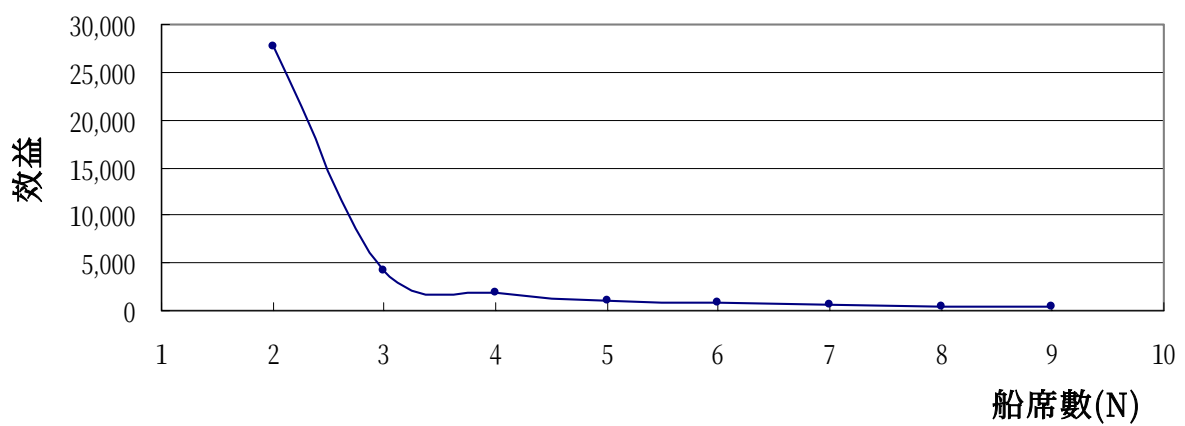


圖 4-19c 增加船席規模之效益分析($K=2$)

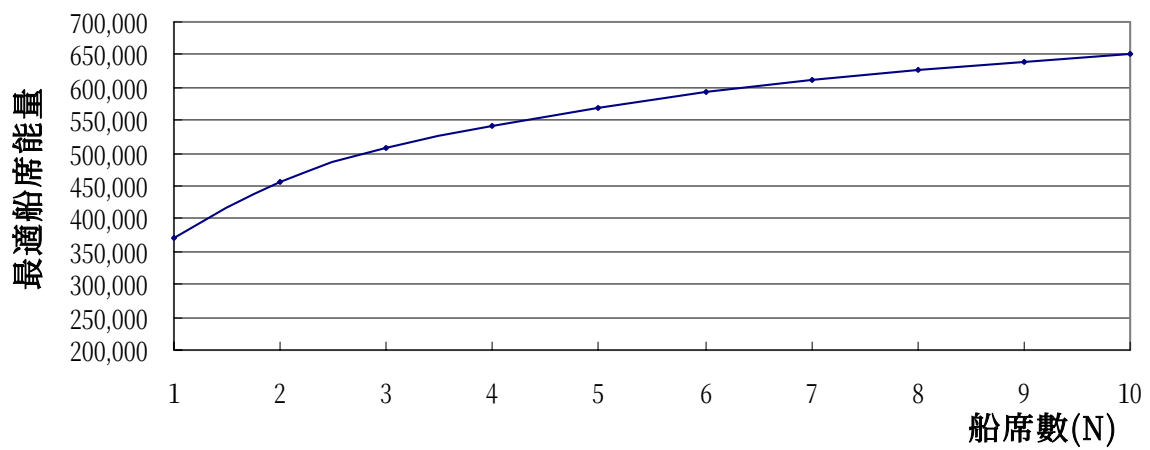


圖 4-20a 最適船席能量分析($K=\infty$)

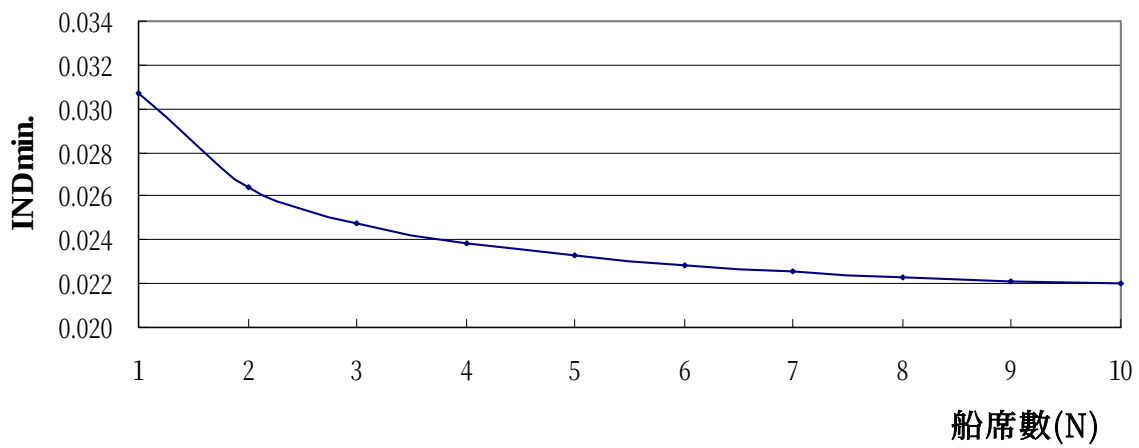


圖 4-20b 船席規模與 IND 關係分析($K=\infty$)

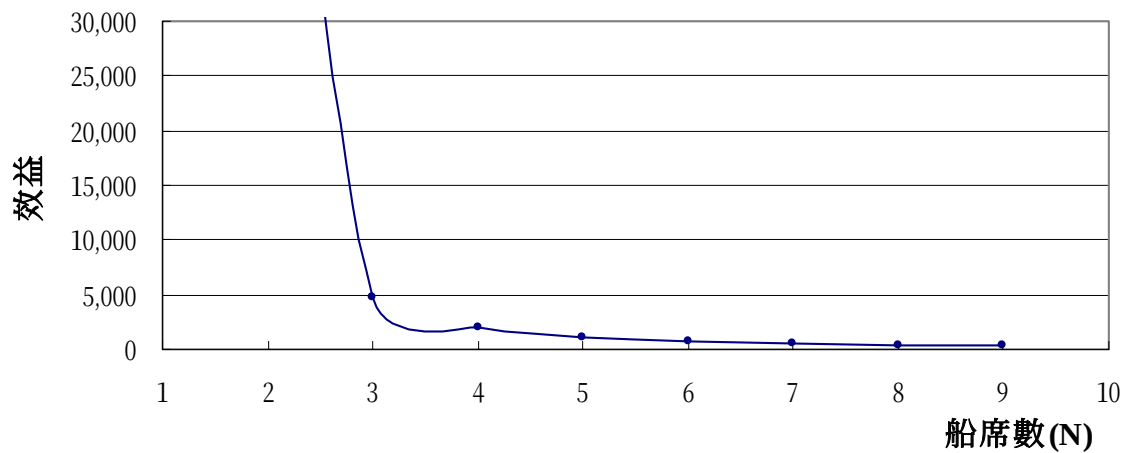


圖 4-20c 增加船席規模之效益分析($K=\infty$)

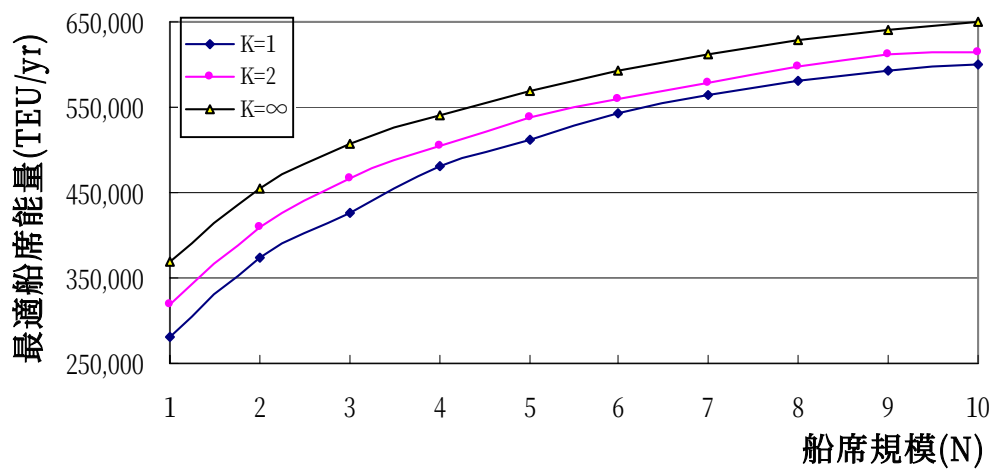


圖 4-21 不同 K 值之船席能量比較分析

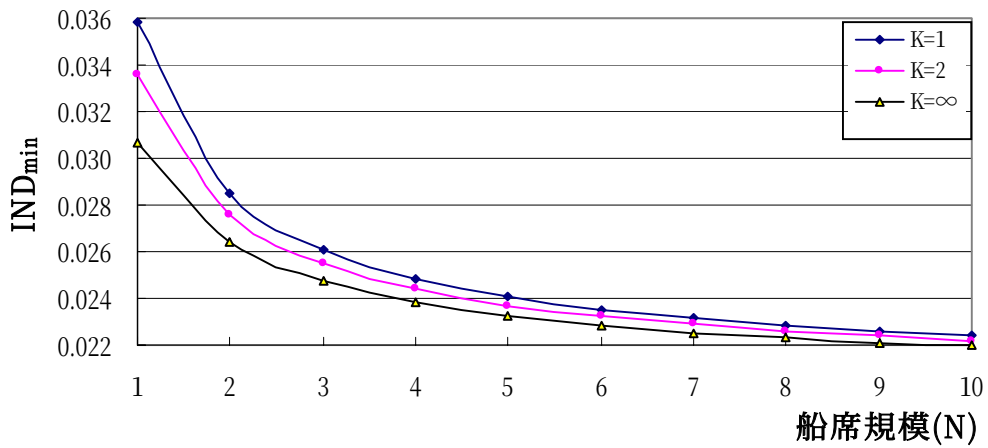


圖 4-22 不同 K 值之 INDmin 比較分析

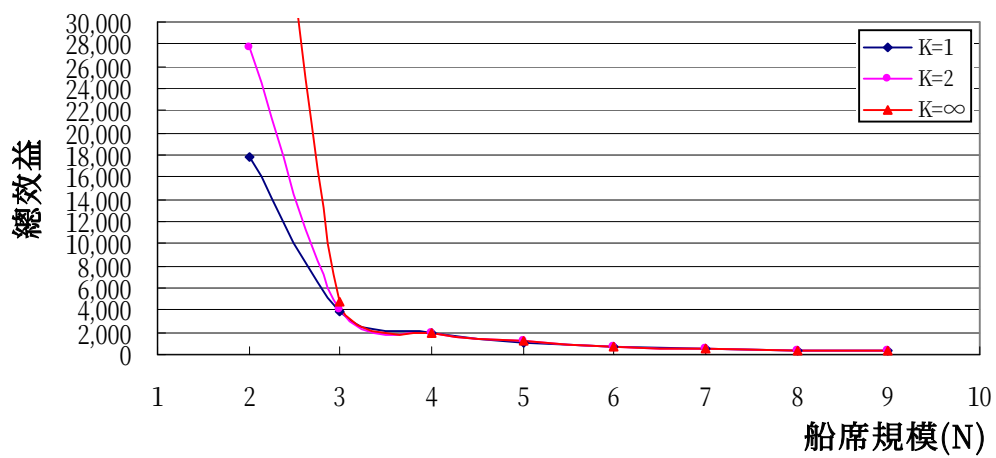


圖 4-23 不同 K 值之船席效益比較分析

第五章 結論與建議

本研究首先以根據平均等待時間與平均服務時間比值之等待因子法，求得不同相位數 K ，在不同船席規模 N ，當 $AWT/AST=20\%$ 及 $AWT/AST=30\%$ 時之合理使用率 ρ ，計算其變化量、變化量與單一船席使用率之百分比、船席能量增加倍數、總效益以及總效益百分比。發現：無論 K 值為何，當船席數由 1 座增加為 2 座時其效益最為顯著，其次是由 2 座增加為 3 座時，而船席規模由 3 座增加為 4 座時之效益，似乎剛好為在各種指標中效益變化曲線之頂點，當船席規模再增加為大於 6 或 7 座時，其增加之效益變化比較不顯著而趨於穩定。不同 K 值時增加船席數之效益以 $K = \infty$ 最大， $K = 1$ 時最小，也就是從船舶到達時間間隔非常隨機之指數分佈到達，轉變為到達時間間隔非常均勻過程，在相同船席規模時，其效益越來越好。其中以由 $K = 1$ 轉變為包含數個碼頭之貨櫃中心營運型態 ($K = 2$)，對於增加船席之效果最為顯著。

至於以包含船舶單位時間成本、船舶裝載貨物之時間成本、碼頭建設維護成本、裝卸機具設置操作維護成本之無因次指標 IND 來分析時，其增加碼頭數之營運效益與利用等待因子法分析之結果頗為相似，都是當船席數由 1 座增加為 2 座時其效益最為顯著，其次是由 2 座增加為 3 座時，而船席規模由 3 座增加為 4 座時之效益，剛好為在曲線之頂點，當船席規模再增加為大於 6 或 7 座時，其增加之效益變化比較不顯著而趨於穩定。而當船席規模超過 3 座時，其所帶來之總效益，不同 K 值之間之差異非常有限。在相同船席規模時，以 $K = \infty$ 時之 IND_{min} 最低。

因此，根據研究結果初步可以判斷，貨櫃中心營運規模其船席數至少要大於 3 座，因為在此規模其效益最為顯著。而雖然船席規模越大其每座船席之最適能量越高，但船席規模到達 6 或 7 座以上時，其效益趨於穩定，而其船舶到達時間間隔越均勻越好，單位貨物在港之總成本越低。

本研究雖然限於時間之關係，未能進一步就各項成本變動對於 IND 之影響程度，甚至對於各項效益指標之影響作敏感度分析，但是其結果已可提供港埠規劃單位之參考。

參考文獻

1. Plumlee C.H., "Optimum Size Seaport", Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol.92 No. WW 3, pp 1-24, Aug.1966.
2. Nicalau, S.N., "Berth Planning by Evaluation of Congestion and cost", Journal of the Waterways and Harbors, ASCE, Vol.93 No. WW 4, pp 107-132, Nov. 1967.
3. Wanhill S.R.C. "Further Analysis of Optimum Size Seaport", Proc. of ASCE, Vol. 100, No. WW4, pp377-383. 1974.
4. De Weille J. and Ray.A, "The Optimum Port Capacity", Journal of Transport Economics and Policy, Vol., No.3, pp 244~259.1974.
5. F. W. Steutel, "Poisson Processes and A Bessek Function Integral", SIAM Review, Vol.27, No.1, pp.73-77, 1985.
6. Richard L. Smith, "Extreme value theory based on the largest annual events", Journal of Hydrology, Vol.86, pp.27-43. 1986.
7. Huang, W.C.,Chisuaki,T., Shih,W.H.,Huang, M.J., Wu, S.C. "Optimal Determination of Berths and Cranes in Container Ports", journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2(1), pp. 55-71.
8. Chu, C.Y., Huang, W.C., Wu, S.C., Cheng, P.L." Cranes Allocation and Integrated Effectiveness Study In a Container Terminal ", Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.3, No.1, October, 2001.
9. Chu, C.Y. and Huang, W.C. "Aggregates Cranes Handling Capacity of Container Terminals: the port of Kaohsiung", MARIT. POL. MGMT., Vol.29, No.4, pp 341-350, 2002.
- 10.Containerisation International, Feb., Jun., Jul., Sep., 2003.
- 11.王慶瑞，等待原理應用於港埠問題之研究－以基隆港為例，運輸計畫季刊，第一卷第四期，民國六十一年，pp. 241-268。

- 12.郭塗城，船舶等待時間之模擬與碼頭經濟使用率分析，海洋學院航管學報 13 期，民國 71 年 5 月。
- 13.朱金元，王慶福，港埠最適能量之研究，第二屆港灣技術研討會，港灣技術研究所，民國 77 年 9 月。
- 14.朱金元，高雄港營運改善策略之模擬研究，運輸計畫季刊，第十八卷第四期，民國 78 年。
- 15.單誠基，台灣港埠最適能量之使用率研究，運輸計畫季刊，第十九卷第一期，民國 79。
- 16.曾安源，基隆港商船到達型態之研究，國立海洋大學碩士論文，民國八十年。
- 17.黃文吉，港埠系統特性之研究，運輸計畫季刊，第 19 卷第 2 期，民國 80 年 6 月。
- 18.黃文吉，盧旭美，林東容，曾浩璽，貨櫃基地船席及裝卸機具最佳配置之研究－理論及模擬解析之比較，中華民國運輸學會第 11 屆論文研討會，民國 85 年 12 月。
- 19.黃文吉，樗木武，施文雄，陳冠良，港埠能量最適化特性之研究，運輸學會第 11 屆研討會論文集，民國 85 年 12 月。
- 20.夏力生，港務管理與棧埠經營，翠柏林企業股份有限公司，民國 87 年 2 月。
- 21.朱金元，下一世代之貨櫃輪：國際港埠是否已經準備好面對挑戰，No.162 高雄港月刊，民國 88 年 12 月。
- 22.朱金元、黃文吉，「海運經營環境變動對於港埠貨櫃營運之影響研究」，航運季刊第九卷第二期，民國 89 年 6 月。

- 23.郭塗城，黃文吉，鄧振源，程培倫，吳勝傑，定期貨櫃船舶到達時間間隔之研究，運輸學會第 15 屆研討會論文集，民國 89 年 12 月，pp.709-718。
- 24.黃文吉，吳勝傑，程培倫，港埠作業能量推估簡傑法之研究，運輸學會第 15 屆研討會論文集，民國 89 年 12 月，pp.765-774。
- 25.朱金元、黃文吉，「高雄港貨櫃碼頭橋式起重機干擾係數之實證研究」，航運季刊第十卷第一期，民國 90 年 3 月。
- 26.台灣地區港埠能量調查分析與估算方式之研究，交通部運輸研究所，民國 90 年 5 月。
- 27.周和平，簡光志，吳清慈，民營貨櫃碼頭作業成本與利潤之分析，海運研究學刊第十一期，民國 90 年，pp. 65-95。
- 28.王志成，港埠 BOT 計畫案例探討---以台北港貨櫃儲運中心 BOT 案為例，第 24 屆海洋工程研討會工程技術講座，交通部運輸研究所台灣技術研究中心，民國 91 年 11 月，pp. 259-283。
- 29.貿易交易公報，船市平台，民國 92 年 7 月。