

風沙現象研究—以苗栗苑裡海岸風沙為例

Aeolian Sand Phenomena – A Case Study of Miaoli Yuanli Shoreline

逢甲大學
水利工程學系
助理教授
許 盈 松*
Yin-Sung Hsu

逢甲大學
水利工程研究所
研究生
洪 振 豪
Chen-Hao Hung

逢甲大學
營建及防災研究中心
研究助理
周 湘 俊
Hsiang-Chun Chou

經濟部水利署
副總工程司
陳 清 茂
Ching-Mao Chen

經濟部水利署
第二河川局
課長
朱 家 興
Jia-Sin Jhu

經濟部水利署
第二河川局
副工程司
林 大 港
Ta-Kang Lin

摘 要

風沙現象是一複雜多變，且運動尺度範圍極大的自然現象，多發生於沙漠地區或沙岸發達之海岸地帶。因其物理現象觀察不易掌握，理論描述亦有其侷限；故往往需要蒐集歸納研究區域之完整地文地貌條件與現地風沙觀測資料，並配合適當風沙運動模式，方能適當評估風沙運動尺度與活動趨勢。苗栗苑裡沿海皆為海岸平原，海岸線平直、沙灘非常發達，並受東北季風衝擊。遇有強風則飛沙群起，造成苑裡海岸地區每逢東北季風便吹起強烈的風沙，經年累積之沙丘甚至將鄰近房舍完全淹沒。本文針對風沙機制、風沙輪移及風沙觀測方法進行回顧分析，並以苗栗苑裡海岸為探討案例，評估探討風沙現象成因及機制、風沙觀測方法及風沙輪移公式適用性。研究結果顯示苗栗苑裡海岸風沙現象成因，並以 Chepil 輪沙公式推估量較接近觀測值。本文成果將有助於瞭解海岸風沙現象及運動機制，並可提供風沙觀測及輪移量推估研究及實務工作之參考。

關鍵詞：風沙，躍移載，集沙效率，輪沙量。

*通訊作者，逢甲大學水利工程學系助理教授，407 台中市西屯區文華路 100 號，yshsu@fcu.edu.tw

ABSTRACT

The behavior of aeolian sand motion is characterized by complex mechanism and multiple mechanics characteristics scales existing in an erosion desert and along the sandy coasts of shoreline. It was difficult to describe the aeolian sand phenomena theoretically in detail without field data. Where the surface consists of fine sand in the Miaoli Yuanli shoreline, such as wind-blown sand phenomena is active driven by a strong wind in winter. The formation of sand dunes and wind-blown sand usually obscure the roads and buildings near the coast. There are some issues of the phenomena of aeolian and prevention method from blown sand has so far been forthcoming. Field measurements of wind velocity and blown sand were conducted and the results of that compared with several typical empirical formulas in this study. The MWAC catchments were adopted to estimate the flux of wind-blown sand. The present results show the process of aeolian sand and characteristics of blown sand in Miaoli Yuanli shoreline. It is concluded that the estimate of Chepil's formula is reasonable than that of other formulas in this study.

Keywords: Aeolian sand, Saltation load, Trap efficiency, Wind-blown sand flux.

一、前言

風飛沙現象是一複雜多變，且運動尺度範圍極大的自然現象，往往需要蒐集地文地貌與現地風飛沙觀測資料，並配合適當之風沙運動模式，方能適當模擬評估風飛沙運動尺度與活動趨勢。苗栗苑裡地區海岸線沙灘非常發達，遇有強風則飛沙四處飛走。造成苑裡漁港、苑港漁港間海岸地區，每逢東北季風便吹起強烈風沙；風沙現象除影響當地空氣品質，風沙淤積長年作用下甚至將房舍完全淹沒，足見苗栗苑裡海岸地區風沙災害之嚴重。本文將探討此風沙現象成因及風力、風沙觀測分析，分析苗栗苑裡海岸風速、風沙特性，同時探討風沙輸移公式之適用性。

二、文獻回顧

2-1 風沙躍移現象

根據吳正、凌裕泉(1965)野外觀測成果，躍移運動(saltation motion)泥沙約佔全部輸沙量的3/4左右，地表蠕移質(surface creep)約佔1/4。根據 Bagnold(1941)的研究，懸移質(suspension material)佔整個輸沙量尚不到5%。所以在風沙運動的三種基本形式中，以躍移運動最為重要(錢

寧，1983)。故在風沙研究中常以躍移運動現象為主要研究對象。

2-2 風沙試驗及現地觀測

近代風沙的研究起始於 Bagnold(1941)的風洞試驗與現地觀測。Bagnold 利用風洞試驗觀察風沙運動的現象，並以力學的觀點描述風沙運動的各種特性，如剪切速度、風速剖面及起動速度等。並利用風沙躍移時氣流與顆粒間動量守恆的觀念，推導出輸沙公式，Bagnold 的研究為風沙研究領域奠定良好的基礎。White and Schultz (1977)以高達 2,000 frame/s 之高速攝影技術(high speed photographic technique)進行風洞試驗，觀測風沙躍移顆粒運動軌跡、速度、旋轉速率及加速度，並推估出顆粒之馬格納斯升力(Magnus lift force)。許盈松等(2003)進行風洞試驗並提出顆粒躍移運動模式，可對已知起跳條件下之躍移顆粒進行模擬預測。

2-3 躍移理論模式

河村(1951)對風沙運動力學進行了較全面性的風洞與野外驗證，其將風沙現象視為沙粒的群體運動，利用統計理論方法推得躍移層內沙量密

度隨高度的分布公式：

$$\phi(x) = \frac{2G_0}{\sqrt{gh}} K_0 \sqrt{\frac{2z}{h}} \dots\dots\dots(1)$$

式中： $\phi(x)$ 為高度 x 處的單位體積含沙量； G_0 為單位時間內落到單位床面面積的沙量； h 為沙粒最大跳躍高度的平均值； K_0 為 Bessel 係數。Tachikawa (1988)利用風洞試驗研究不同形狀平板，在不同釋放角度下的旋轉軌跡，並與數值解加以比較。

Anderson and Haff (1988)以單一顆粒衝擊床面所引起其他顆粒反彈的數量和速度關係，提出一計算輸沙率的數學模式。Sorensen(1991)因使用解析方式推求，所以必須對許多問題進行簡化。Nalpanis et al.(1993)以重複曝光技術量測在風洞中顆粒躍移運動特性。Holmes(2004)延續參考 Tachikawa(1988)的軌跡預測模式，建立一個只考慮阻力係數影響之簡化模式，並探討加上垂向阻力以及紊流所造成的影響。

2-4 飛沙機制研究

有關飛沙機制之研究主要在探討影響飛沙發生之因子，Chepil(1945)、林信輝、江永哲(1979)曾對泥沙含水率與輸移強度關係探討，亦有許多研究對風速分佈特性及沙粒移動臨界條件加以探討。有關風速之垂直分佈理論大都以 Prandtl 之對數法則為依據，即：

$$U = (U_* / \kappa) \ln(Z / Z_0) \dots\dots\dots(2)$$

式中 U_* 為剪切速度， Z_0 為粗糙係數， κ 為 von Karman 常數 ($\kappa=0.4$)，沙面之粗糙係數與沙粒粒徑關係常以下式表示：

$$Z_0 = 0.081 \cdot \log d / 0.18 \dots\dots\dots(3)$$

2-5 飛沙量公式研究

飛沙量推估乃為飛沙研究之重要目的，期能由影響飛沙運動之各因子間，尋求相互關係，從而建立適用之公式，有關此方面之研究較具代表性者有：

(1) Bagnold 公式

Bagnold(1941)依動量守恆定律導出飛沙量公式為：

$$Q_s = C_1 (d / D)^{1/2} (\rho_a / g) (U_*)^3 \dots\dots\dots(4)$$

其中， Q_s 為輸沙率(kg/m/sec)， d 是沙粒中值粒徑(mm)， D 是參考標準粒徑(0.25mm)， ρ_a 是空氣密度(1.226kg/m³)， g 是重力加速度(9.8m/sec²)， C_1 為沙粒淘選度相關經驗係數，海灘沙常取為 1.8。

(2) Chepil 公式

Chepil(1945)對耕地風蝕特性加以研究，得土壤之風蝕量公式為：

$$Q_s = C_2 \cdot (\rho_a / g) (U_*)^3 \dots\dots\dots(5)$$

式中， C_2 為常數($C_2=1.0\sim3.1$)，雖原公式係以耕地土壤為主，但其公式之形態基本上與 Bagnold 公式一致。

(3) 河村公式

河村(1951)以剪力理論推導飛沙量公式：

$$Q = C_3 \cdot (\rho_a / g) (U_* - U_{*t}) \cdot (U_* + U_{*t})^2 \dots\dots(6)$$

式中， $C_3=2.78$ 為實驗常數， U_{*t} 則為起動剪切速度。起動剪切速度可以下式來求得：

$$U_{*t} = A \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \right) \cdot g \cdot d} \dots\dots\dots(7)$$

式中， A 為集沙儀管徑面積、 ρ_s 為沙粒密度。游繁結(1986)研究認為河村公式之飛沙量推估值有較 Bagnold 公式推估值小之趨勢，且河村公式較適用對低剪切速度情況下之飛沙量推估。

三、風沙環境及季風特性調查

3-1 風沙環境調查

苗栗地區每年晚秋以後，冷鋒過境且盛行東北季風。由於台灣海峽呈喇叭口型，每年冬季強勁的東北季風往往將大量海沙由潮間帶往內陸吹送，再加上鄰近原有近廿公頃的防風林與生態環境遭到破壞，助長冬季飛沙惡化之情況。

根據本研究田野調查，經訪談當地居民及進

行相關資料蒐集分析結果，顯示此區海岸之飛沙災害僅始於十數年前，且並非因氣候之變遷所造成。本文將不同年份航照圖影像進行比對分析，以瞭解區域內沙灘、沙丘長期淤積消長變遷趨勢。綜合研判苑港漁港至苑裡漁港間海岸二十年間之變化，風沙現象可能成因如下：

(1) 海岸地形變遷

本段海岸於民國 66 年以前，除通霄處有些許沙洲外，其餘海岸坡度均較今日為陡，且灘線亦較現今後退。民國 66 至 74 年間之灘線大幅向外延伸，且坡度亦開始變緩，即潮間帶開始變大，尤其在苑裡溪出海口，即現今苑港漁港之舊址處之淤沙最大。而 74 年至 82 年間僅計畫區之灘線有較明顯的外移現象。

(2) 海岸大型結構物建造

本段海岸近年興建之大型構造物包括通霄火力發電廠之擴建、苑港漁港及苑裡漁港。通霄火力發電廠位於通霄鎮海濱，南勢溪出海口北岸，北鄰通霄海水浴場與浴場漁港，電廠佔地約 46 公頃，屬築堤海埔新生地，而約於民國 68 年起進行大規模的填海造陸。苑港漁港位於苑裡鎮苑裡溪出海口南側，緊鄰計畫區北側，於民國 62-68 年僅有曳船道 130m，供附近漁船避風停泊，而大規模的建造時間約為民國 68 年。苑裡漁港位於規劃區南側，房裡溪出海口北側。苑裡漁港開始建造時間為民國 78 至 80 年。根據當地居民的訪查結果顯示，計畫區內之海岸原屬礫石海岸，在各種大型構造物興建後淤沙日增，冬季風沙現象才趨明顯。

(3) 防災保安林分布

本區附近之海岸防災保安林，北從通霄海水浴場，南至苑港漁港之沿岸，除通霄電廠附近之零星地區外，其餘都有種植防災保安林，然而大部分的林帶厚度均普遍不足，並無法發揮防風定沙功能。

(4) 供沙河川及海埔地利用

本區域之河川共四條，由北而南分別為南勢溪、番仔寮溪、苑裡溪及房裡溪，如圖 1 所示。由於通霄電廠之阻隔效應，初步判斷由北而來之漂沙應屬微量，而房裡溪之出海口在本區段的南

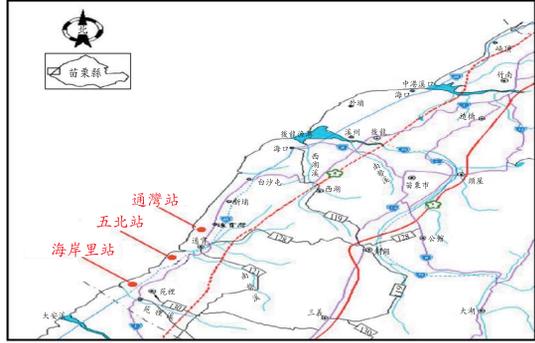


圖 1 研究區域位置分佈

方，研判供沙河川可能為南勢溪、番仔寮溪及苑裡溪。

3-2 季風特性分析

風沙搬運作用需要有足夠風力、充分沙源及輸送路徑通暢等基本要件相互配合。故海岸風沙現象形成需要有充足沙源、開闊地形或潮間帶及長時間作用之起動風力。苑裡地區為典型西海岸地區，具有多風的氣候屬性。每屆冬春季東北季風盛行，夏秋期之強風，僅限於熱帶性低氣壓或颱風過境前後，平時風力不大。風之特性有著許多的不確定性，特別是接近地表的部分，其與地形、地物等有著極為相關的局部性，亦與時間序列上有著不甚穩定的擾動性，因此亟需獲得長期且測站密集的風速量測資料。通霄火力發電廠於本段海岸設有五座長期環境監測站，其中通灣站、五北站及海岸里站分別座落於通霄海水浴場北側海岸、五北里海岸及苑裡漁港北側海岸，各站相對位置分布如圖 1 所示。

因通灣站距研究區域太遠，故其資料較不具代表性，而五北里及海岸里環境監測站分別位於研究區域之北方及南方海岸，故選取此兩站歷年之逐時資料進行分析。五北里站所選取的記錄時間為自民國 90 年 1 月 5 日至 93 年 12 月 5 日，共 32,726 筆資料的風速風向逐時資料。海岸里站所選取的記錄時間為自民國 89 年 1 月 5 日至 93 年 12 月 6 日，共 41,488 筆資料的風速風向逐時資料。將五北站及海岸里站歷年之風速、風向資料繪製玫瑰圖如圖 2 至圖 7 所示。由圖 2 及圖 3

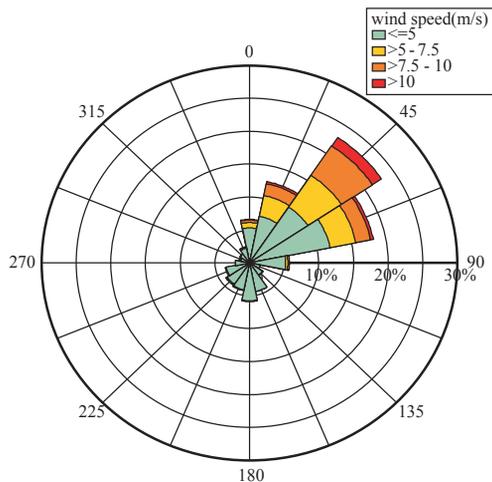


圖 2 五北站年平均風速風向玫瑰圖

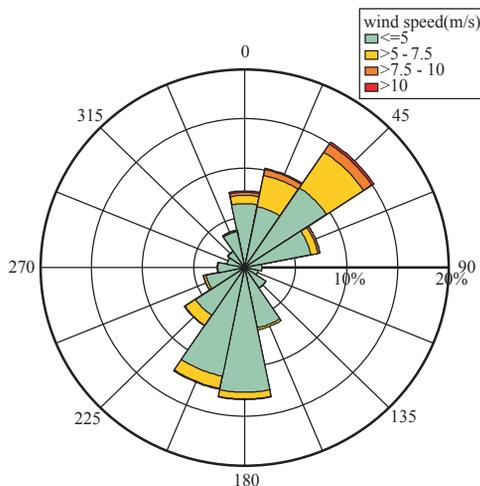


圖 5 海岸里站年平均夏季風速風向玫瑰圖

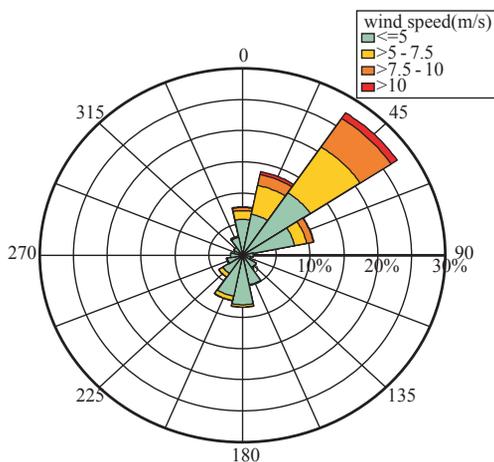


圖 3 海岸里站年平均風速風向玫瑰圖

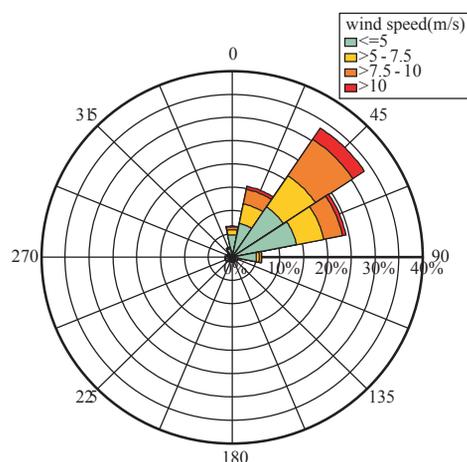


圖 6 五北站年平均冬季風速風向玫瑰圖

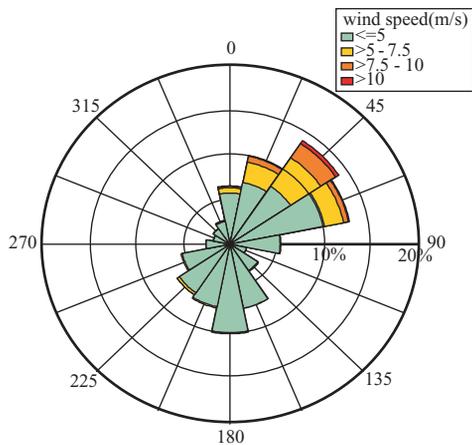


圖 4 五北站年平均夏季風速風向玫瑰圖

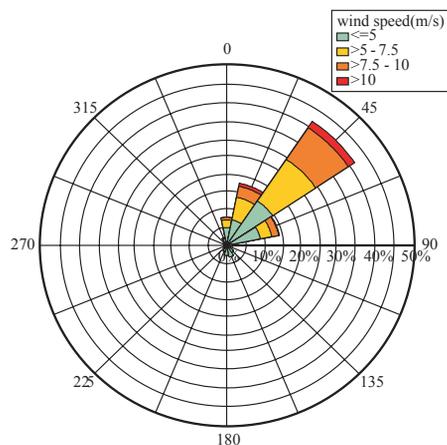


圖 7 海岸里站年平均冬季風速風向玫瑰圖

表 1 五北站及海岸里站年平均風速、風向統計

月份	五北站			海岸里站		
	平均風速(m/s)	風向	最大風速(m/s)	平均風速(m/s)	風向	最大風速(m/s)
1月	5.1	NE	18.0	4.7	NE	14.7
2月	4.5	NE	20.8	4.7	NE	13.7
3月	3.7	ENE	13.0	4.1	NE	12.4
4月	3.2	ENE	12.4	3.3	NE	10.6
5月	2.7	NE	11.6	2.7	NE	10.1
6月	2.7	S	10.9	2.9	SSW	8.9
7月	2.1	S	11.7	2.4	S	13.2
8月	2.1	NE	11.0	2.1	S	16.8
9月	3.5	NE	15.5	3.2	NE	14.4
10月	5.1	NE	14.2	4.6	NE	13.6
11月	5.2	NE	13.4	4.8	NE	13.9
12月	4.0	NE	14.3	4.6	NNE	12.7

表 2 風移輸沙量推估結果

剪切速度 U_* (m/s)	0.2813	
粗糙高度 Z_0 (m)	6.57×10^{-9}	
試驗值 Q_s (g/m.sec)	0.001403	
Bagnold	C1=1.8(公式建議值)	0.00501
	C1=0.535(率定值)	0.001490
Chepil	C2=1.0(公式建議值)	0.00278
	C2=0.504(率定值)	0.001402
河村	C3=2.78(公式建議值)	0.00463
	C3=0.846(率定值)	0.001409

可看出全年中五北站及海岸里站的風向皆以東北向為最多，且風速亦為最大。而由圖 4 及圖 5 可看出在夏季(4-9 月)的風向較為平均，主要風向以東北和西南為主，東南和西北的風向較少且風速亦小。其中以東北方向為最多及最強，五北站及海岸里站夏季東北風方向的比率分別佔夏季風向的 13.9%及 15.2%。由圖 6 及圖 7 可看出在冬季(10-12 月及 1-3 月)的風向主要以東北為主，且風速亦最大，且五北站及海岸里站冬季時東北、北北東及東北東三個風向佔冬季風向的 73.2%及 73.3%，可看出冬季時研究區域主要受到東北方向的風力所影響。

將歷年之月平均風速、當月出現最多的風向及最大風速整理如表 1 所示，可看出在區域內冬

季的風速大於夏季的平均風速且風向集中於東北、東北東及北北東之間，且最大風速可達 20.8 m/s，風力已達 9 級。由以上分析顯示苑裡地區於東北季風期間，形成風飛沙現象所需風營力十分充沛，且廣大沙灘的沙源豐富，加上冬季時雨量稀少，沙粒含水率小，故沙灘極易起動形成風沙現象。表 2 為五北站及海岸里站風速、風向統計。

四、風速及輸沙量觀測

野外風沙觀測是瞭解沙害狀況，取得治沙工程設計基本參數的主要方法。隨著風沙理論的發展，一些基本問題可以藉由風洞試驗獲得解決。但自然界的風沙運動是極複雜的現象，風洞模型與自然界環境條件有很大的差距。另一方面是自然環境下的風沙運動沒有邊界問題，而風洞尺度效應則有明顯侷限；不易重現自然界風沙運動的真實機制，即風洞試驗中相似性的問題無法解決。因此亟需要靠野外風沙觀測資料輔助。

4-1 觀測設備

1. 風向風速儀

為測得完整風速剖面變化，以推得剪切速度，擬以高約 7m 不鏽鋼製風速儀支架進行觀測工作。風速儀支架上分別於 0.25、0.5、1、3、4 及 7 m 高度處，各架設一組風速風向儀，如圖 8 所示。風速儀測速輸出訊號由資料擷取器自動記錄存取，待量測結束後取回資料進行分析。

2. 風沙觀測儀

近代風沙觀測及集沙研究工作始自 Bagnold (1941)，觀測技術經長期之應用及改良，集沙技術已臻成熟。國外相關研究中，集沙器常採用 Fryrear (1986)研製的 BSNE(Big Spring Number Eight)集沙器，如圖 9 所示。BSNE 最初是設計用來收集空氣中的塵埃，但現已廣泛應用於風沙觀測。BSNE 採樣器原型箱體是以鍍鋅金屬構成，並有二道金屬格網過濾。採樣時風沙流由 20mm×50mm 的口門進入，在採樣器中風速會減弱，泥沙會落淤沉積室中。風沙流通過第一道隔網，第二道隔網可減少沉積室中沉積物質的移動

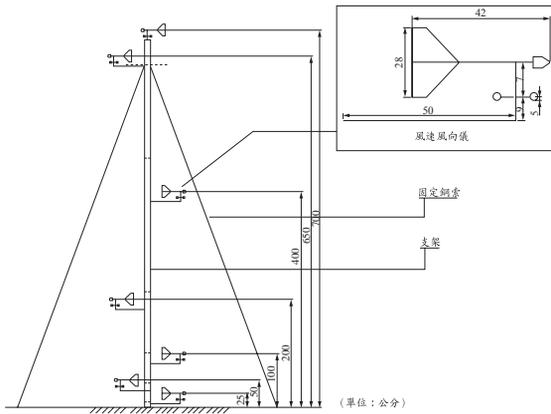


圖 8 風速儀支架及布設示意

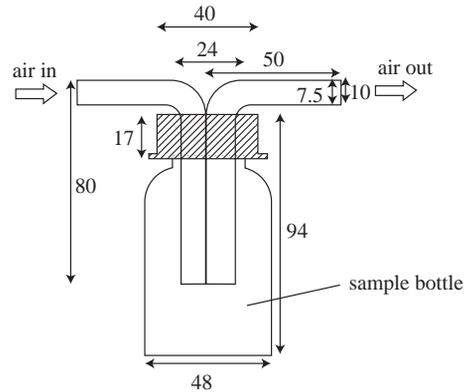


圖 10 MWAC 集沙器布設示意

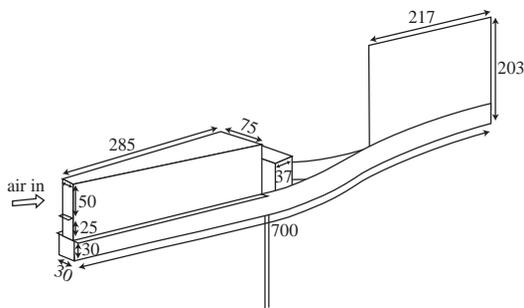


圖 9 BSNE 集沙器布設示意

率。此外集沙效率亦會隨沙粒粒徑增大而增加，這是因為較大的沙粒具有較大慣性力，不容易受風力紊動的影響。在不同沙粒粒徑情況下，MWAC 的集沙效率介於 100%至 120%之間，且集沙效率不易隨風速而改變。而不同沙粒粒徑下，BSNE 的集沙效率介於 70%至 130%之間，且集沙效率易隨風速遞減。因 MWAC 集沙器設計簡單且製作容易，加上其風洞試驗結果較佳，故選定 MWAC 集沙器進行現地試驗。

以防止集沙過程可能的損失及儀器的故障，並減少靜止顆粒從上方隔板流失。集沙器前後口門周邊需以橡膠圈封，尾翼之導流板有助於集沙口門裝置對準迎風面。

Wilson and Cooke (1980)所發展的 MWAC (Modified Wilson and Cooke)集沙器也常被採用，如圖 10 所示。MWAC 集沙器本體包括集沙室的塑膠瓶及進口管、出口管各一。採樣時瓶身需垂直安裝，進口處朝迎風面。由於壓差(Pressure Drop)和瓶身及進口管不同口徑影響，使得沉澱物進入瓶中後會自然沉積。較乾淨氣流會從出口處排出。Kuntze et al.(1990)應用集沙瓶水平放置在長杆上，並裝上尾翼平衡。把集沙器依序裝置在不同高度上，可以測得垂向的含沙分布情況。

Andrew(2000)以風洞試驗對不同集沙器的集沙效率進行探討，發現大部份集沙器的集沙效率會隨風速增加而遞減；其主要原因為風速強大時，容易在集沙器入口形成停滯點，降低集沙效

4-2 觀測規劃

本文規劃在東北季風盛行季節進行量測，量測地點擇定於苑裡漁港北防波堤北側。每次量測需超過 12 小時，以瞭解較長時間內的風速、風向變化及輸砂能力，集沙器集沙樣本並進行篩分析以瞭解樣本的粒徑組成。製作 24 組之 MWAC 集沙器，以 1.55m 高之木製樹枝狀支架為依託固定，分布於不同方位與高度。若以風口之中心點高度代表該集沙器之測點高度，則 24 個集沙器所測定之高度分別為 5cm、10cm、15cm 至 120cm 等 24 個高度位置，每個位置間格 5cm，不同高度以樹枝狀長杆交錯固定集沙器，集沙管口正對風向(註：一般苗栗冬季風向大多為東北風，故集沙以東北向為主)，以觀測不同高程位置之風沙輸移量分布情況。

五、結果分析與討論

為探討飛沙量變化，除需有效觀測現地之飛

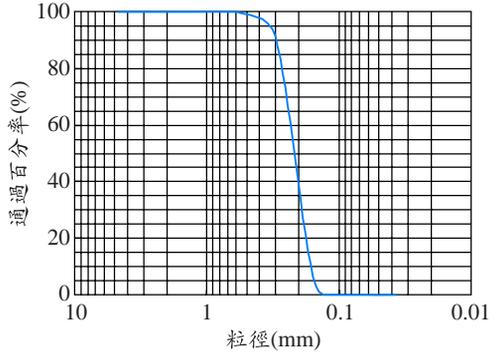
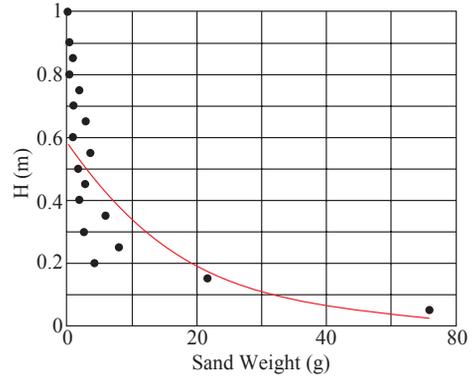


圖 11 苑裡海岸飛沙粒徑分布

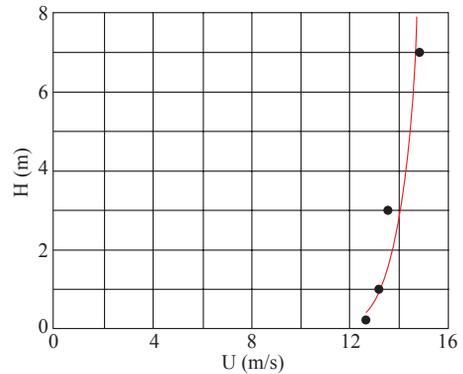
沙量以作為分析之參考外，更需瞭解掌握風速特性、沙粒密度及沙粒粒徑等因子。各因子之分析簡述如下：(1)風速之觀測：依照不同高度架設之風速儀測定之瞬時速度推估平均風速，並依(2)及(3)式求得不同高度 Z 之風速 U ，並可推估剪切速度與粗糙高度。(2)風沙搬運量：MWAC 集沙效率介於 100%至 120%之間，且集沙效率不易隨風速改變。每次集沙觀測與風速觀測同時進行。(3)飛沙粒徑分析：將集沙器捕獲之飛沙烘乾後，取各層沙樣進行篩分析，推估中值粒徑。(4)沙粒比重分析：將集沙器所蒐集沙樣，以比重瓶法分析飛沙比重，並推估沙粒密度。

圖 11 所示為集沙器所蒐集之飛沙粒徑分布曲線，粒徑界於 0.15 至 0.30mm 之間，其中值粒徑為 0.26mm，顯示苑裡海岸風沙粒徑非常均勻。圖 12 為集沙觀測結果，並以不同高度位置集沙重量分布表示。由試驗結果可明顯看出，大部分風沙運動活躍高度集中於離地面約 5cm 處；高度 20cm 至 60cm 處則風沙量驟減，但沙量分布則較均勻；高度 80cm 以上風沙量已極微。風沙運動形式一般可分為接觸載(contact load)、躍移載及懸移載三種(錢寧, 1983; 吳正, 2003)。接觸載又可分為滑動(sliding)或滾動(rolling)兩種運動形式。由圖 12 集沙量不同高度之分布，顯示研究區域之風沙運動為接觸載運動所主宰，躍移載運動次之，密集運動範圍集中於躍高(saltation height)5cm 以下，此一風沙活動層亦可稱為底床層移層(*bed layer*)，為床形(*bed form*)變動作用層。高度 5-20cm 區間為躍移層活躍區，



註：觀測日期為 95.01.24。

圖 12 實測集沙分布



註：觀測日期為 95.01.24。

圖 13 實測風速觀測結果

已遠離接觸載範圍。高度 20-60cm 處則躍移載運動減弱，亦屬躍移與懸移運動交換層，沙量分布較均勻。在高度 60-80cm 以上，集沙量已極微少，顯示在研究區域懸移風沙含量占全部風沙比重極小。此外，MWAC 集沙器設計主要係蒐集躍移載，故對於接近地面運動之接觸載或蠕移運動(*creep motion*)泥沙而言，其集沙位置高度過高，且集沙效率(*trap efficiency*)偏低。故集沙試驗過程中，將可能低估蠕移質輸沙量部分。

風沙輸移量計算首先需要量測現地之地表速度剖面，進而推算地表剪切速度 U_* 及粗糙高度 Z_0 等基本參數。量測時同步進行風速觀測，觀測結果如圖 13 所示。測速最高位置 7m，以測得之風速資料為基準作正規化分析，以求得現場正規化風速剖面，再代入(2)、(3)式求得剪切速度 U_* 及

粗糙高度 Z_0 。推得測站位置之剪切速度及粗糙高度，可分別利用河村公式、Bagnold 公式及 Chepil 公式，並分別引用各原公式建議之參數值及本觀測率定值進行推估試算，並與實測值比較，如表 2 所示。實際觀測值與各公式原建議參數之推估值比較，以 Chepil 公式推估值與實際觀測值較為接近，Bagnold 公式及河村公式推估值與觀測值差距較大。本次觀測歷時約 18 小時，故風速剪切速度估算乃以長時間平均之風速剖面資料計算，風沙實測值則為長時間集沙累積平均；故公式計算與觀測結果間之物理定義原本就有差異。另可能集沙管進口面積及集沙容積有限，當蒐集風沙量到一定程度時，亦導致瓶中風速壓差不足，以致風沙無法順利進入集沙瓶中。此外，因本次集沙位置位於海岸沙丘附近，沙丘上泥沙接觸載極活躍，MWAC 集沙器主要係蒐集躍移載泥沙，所以集沙觀測結果可能錯失了接觸載或蠕移質部分之風沙輸移量。

六、結論與建議

本文就海岸風沙運動機制、風沙輸移量及風沙現地觀測方法進行回顧分析，並以苗栗苑裡海岸風沙問題為例加以探討。本文獲致以下主要結論及建議：

1. 苗栗苑裡苑港漁港至苑裡漁港間約二公里海岸線平直，受東北季風正面衝擊。強烈風沙現象主要成因為海岸地形變遷、海岸大型結構物興建、防災保安林減少及河川供沙充足，使得本區域有充足的風力、風沙沙源及風沙輸送空間條件之配合，故風沙現象十分發達。
2. 本文進行風沙現地觀測工作，利用自動化風速儀量測速度剖面，並以 MWAC 集沙器進行風沙蒐集，獲得風速特性、沙粒、密度及沙粒粒徑。飛沙粒徑分布曲線，粒徑界於 0.15 至 0.30mm 之間，中值粒徑為 0.26mm，顯示苑裡海岸風沙粒徑均勻。
3. 試驗結果可看出大部分風沙運動活躍高度集中於離地面約 5cm 處；離地 20-60cm 間風沙量驟減，沙量分布較均勻；高度 80cm

以上區域風沙量極微。顯示本區域之風沙運動為接觸載運動所主宰，躍移載運動次之，風沙運動範圍集中於躍高 5cm 以下底床之層移層。

4. 試驗中採用 MWAC 集沙器設計主要係蒐集躍移載，故對於接近地面運動之接觸載或蠕移運動泥沙而言，其集沙位置高度偏高，且集沙效率偏低。故集沙試驗過程中，有可能低估蠕移質輸沙量。
5. 利用研究區域之實測資料，對河村公式、Bagnold 公式及 Chepil 公式進行推估試算。以 Chepil 公式推估值與實際觀測值較為接近。
6. 理論計算與觀測結果間之差異，可能受限集沙管進口面積及容積，當瓶中沙量累積較多，易導致瓶中風速壓差不足，致風沙無法順利進入集沙瓶中。且本次集沙位置位於接觸載活躍之沙丘附近，且 MWAC 集沙器設計主要係針對躍移載風沙，所以觀測結果可能低估接觸載或蠕移質部分輸移量。未來亦有必要增加觀測場次，以提高試驗成果代表性。

謝 誌

本文研究期間，感謝經濟部水利署研究經費支持，研究期間諸審查委員、水利署河川海岸組、第二河川局指正協助，及參與本試驗之逢甲大學水利系學生，使本研究得以順利完成，謹致誠摯謝忱。

符號說明

A	集沙儀管徑面積；
C_1	Bagnold 公式經驗係數；
C_2	Chepil 公式經驗係數；
C_3	河村公式經驗係數；
C_D	拖曳力係數；
D	沙粒參考標準粒徑；
d	沙粒中值粒徑；
G_0	單位時間內落到單位床面面積的沙量；
g	重力加速度；
h	沙粒最大跳躍高度的平均值；

K_0	Bessel 係數；
Q_s	輸沙率；
U	風速儀平均風速；
U_*	剪切速度；
U_{*t}	起動剪切速度；
Z_0	粗糙高度；
κ	von Karman 常數；
ρ_a	空氣密度；
ρ_s	沙粒密度；及
$\phi(x)$	高度 x 處的單位體積含沙量。

參考文獻

- Anderson, R.S. and Haff, P. K., (1988), "Simulation of Eolian Saltation", *Science*, 241, 820-823.
- Andrew, Warren, (2000), "Wind Erosion on European Light Soils, European Union Commission, United Kingdom Wind", *Soil Sci.*, 60, 305-320.
- Bagnold, R. A.,(1941), *The Physics of Blown Sands and Desert Dunes*, New York.
- Chepil, W. S., (1945), "Dynamics of Wind Erosion, I Nature of Movement of Soil by Wind", *Soil Sci.*, 60, 305-320.
- Fryrear, D. W., (1986), "Field Dust Sampler", *J. of Soil and Water Conservation*, 41(2), 117-120.
- Holmes, J. D., (2004), "Trajectories of Spheres in Strong Winds with Application to Wind-borne Debris", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92, 9-22.
- Kuntze, H., Beinhauer, R. and Tetzlaff, G., (1990), "Quantification of Soil Erosion by Aeolian Sediment Trap", *Geomorphology*, 18, 333-345.
- Nalpanis P., Hunt, J. C. R., and Barrett, C. F., (1993), "Saltating Particles over Flat Beds", *J. Fluid Mech.*, 251, 661-685.
- Sorensen, M., (1991), "An Analytic Model of Wind-Blown Sand Transport", *Acta Mechanica Suppl.*, 1, 67-81.
- Tachikawa, M. (1988), "A Method for Estimating the Distribution Range of Trajectories of Windborne Missiles", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 29, 175-184.
- White, B. R. and Schulz, J. C., (1977), "Magnus Effect in Saltation", *J. of Fluid Mech.*, 81, 497-512.
- Wilson, S. J. and Cooke, R. U., (1980), *Wind erosion, in Soil Erosion*, John Wiley and Sons, 217-251.
- 河村龍馬(1951), 「飛沙的研究」, 東京大學理工學報, 5(3-4), 日本, 東京。
- 吳正、凌裕泉(1965), 「風沙運動的若干規律及防制風沙害問題的初步研究」, 治沙研究, 7, 中國大陸, 7-14。
- 林信輝、江永哲(1979), 「砂體含水量與飛砂量之關係試驗」, 中華水土保持學報, 10(2), 173-193。
- 錢寧(1983), *泥沙運動力學*, 科學出版社, 中國大陸, 北京。
- 游繁結(1986), 「台灣西海岸飛沙量推估之初步研究」, 中華水土保持學報告, 17(1), 107-117。
- 許盈松, 周湘俊, 楊錦釧(2003), 「風場中顆粒躍移研究」, 中國土木工程學刊, 4(15), 679-691。
- 吳正(2003), *風沙地貌與治沙工程學*, 科學出版社, 中國大陸, 北京, 42-44。

收稿日期：民國 95 年 4 月 14 日
 修正日期：民國 95 年 6 月 16 日
 接受日期：民國 95 年 6 月 21 日