

The Wind Tunnel Experiment of Aeolian Sand Movement Mechanism

飛砂移動機制之風洞試驗

Long-Ming Huang ¹⁾ Lee-Wei Lu ²⁾ Tsai-Huei Chen ³⁾

黃隆明

盧力瑋

陳財輝

Abstract

This study was to explore the mechanism of Aeolian sand wind erosion. By the wind tunnel experiment, we tried to find out the Aeolian sand characteristics including density, diameter, texture, water content, shape etc. and the relationships between wind erosion amount and primary specific site characteristics of sand diameter, wind speed and water content. The study sites located at the near coast area around Houlong, Yuanli, Da-an and Da-jia in the central part of Taiwan. The densities were in the range of 2.62 and 2.67 g/cm³ and the particle size distribution mainly ranged in 0.25-0.42 mm. Since the sand content was over 96% of all the samples, the soil texture was recognized as sandy soil by USDA soil classification. The water contents of all the samples were less than 1%: the

highest observation of 0.967% in Houlong and the lowest one of 0.282% in Da-jia. After the shape analysis, Da-an sample was identified as sphere, Da-jia as flat shape and the others were between. According to the results of wind tunnel, the starting wind speeds of erosion in different diameters were as follows: 5.5-7.0 m/s of 0.15-0.84 mm and 5.0 m/s of <0.15 mm. Furthermore, when the water content below 1.22%, we had the maximum amount of wind erosion. The further study showed Aeolian wind erosion amount would be decreased from 1.22% to 1.84% and the minimum amount was exhibited of 1.84%. This study not only to demonstrate the severe wind erosion in the area but also concluded and identified several important mechanism characteristics of Aeolian sand erosion. We hope the knowledge and the research method could help our government to

-
- 1) Associate Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C., Corresponding Author. E-mail: lmhuang@nchu.edu.tw
國立中興大學水土保持學系副教授，通訊作者。
 - 2) Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C. 國立中興大學水土保持學系碩士班研究生。
 - 3) Senior Scientist, Division of Silviculture, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan, R.O.C. 行政院農業委員會林業試驗所育林組研究員。

the urgent preventive contingency process of Aeolian wind erosion.

Key words: The mechanism of sand movement, Wind tunnel, Aeolian sand amount.

摘要

本試驗為瞭解砂粒之移動機制，因而利用風洞進行不同砂粒粒徑、風速及含水率之觀測，實驗用砂取自於後龍、苑裡、大安及大甲濱海地區。砂粒物性實驗結果：各樣區土壤之質地皆為砂土，其密度介於 $2.62 \sim 2.67 \text{ g/cm}^3$ 之間；粒徑分布在 $0.25 \sim 0.42 \text{ mm}$ 者最多；而土壤含水率皆在 1% 以下，其中後龍樣區 0.967% 最高，大甲樣區 0.282% 最低；再由形狀係數得知，大安樣區砂粒接近球形，而大甲樣區則較為扁平。至於風洞實驗結果：砂粒粒徑介於 $0.15 \sim 0.84 \text{ mm}$ 時，其起始風速為 $5.5 \sim 7 \text{ m/s}$ ，又粒徑在 0.15 mm 以下之砂粒，其起始風速為 5 m/s ；當砂粒含水率低於 1.22% 時，飛砂量達到最大值；含水率由 1.24% 遞增至 1.84% 時，飛砂量急遽遞減；而含水率達 1.84% 時，對砂粒起動之抑制作用達到最大值。

關鍵詞：砂粒之移動機制、風洞、飛砂量。

前言

一般而言，砂粒在風力作用下運動的型態大致可分為三種：懸浮（或飛揚）作用（suspension）、跳躍作用（saltation）與滾動作用（rolling）⁽³⁾；發生滾動之砂粒粒徑大都介於

$0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 之間，因受重力作用影響，主要運動模式為滾動方式，Bagnold⁽¹²⁾指出滾動砂粒並非直接從氣流中獲得能量，而是砂粒間彼此碰撞，因此，砂粒在滾動過程中，藉由彼此間相互撞擊，而將能量傳遞給另一砂粒，使未移動之砂粒起動，進而增加滾動量。而粒徑介於 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ 之砂粒，因風力上揚作用及砂粒本身受重力影響，彼此碰撞後彈至空中，形成跳躍作用，砂粒之速度約為風速的 $1/2$ 或 $1/3$ ，當跳躍之砂粒撞擊質量較大之砂粒時，可能無法繼續彈跳，而是以沿著地面滾動之方式前進，若遇到道路或人工構造物則形成堆砂，將對環境品質及用路安全造成危害。至於粒徑小於 0.1 mm 以下之砂粒，其運動模式主要為懸浮，此時砂粒本身重量輕，易受風之上揚力而懸浮空中⁽¹⁵⁾，造成砂塵暴或揚塵等災害。Bagnold⁽¹³⁾根據其風洞實驗得知，滾動砂量約佔總砂量之 25%，而懸浮砂量則不足 5%；吳正⁽⁴⁾在野外觀測實驗中發現，隨著風速的增大（ $5.0 \sim 10.0 \text{ m/s}$ ），氣流所搬運的總砂量中，跳躍砂粒的數量有遞增的趨勢（69~81%），而滾動砂粒則是遞減（31~19%）。

此外，影響飛砂運動的因素包括有風速、砂體性質、砂體含水量及砂粒粒徑等，據此本研究依防風定砂原理，於風洞中進行飛砂相關起動機制之試驗。吳正⁽⁴⁾曾在新疆和田地區進行砂土及土壤風蝕試驗觀測，獲得不同砂粒粒徑（ $0.1 \sim 1.0 \text{ mm}$ ）之啟動風速（ $4.0 \sim 6.7 \text{ m/s}$ ）；王穎釗等⁽¹⁾於野外從事不同類型農田地表粉塵起動摩擦阻抗風速的觀測發現，當地表粉塵粒徑越大，其啟動摩擦阻抗風速亦越大。林信輝等⁽⁶⁾指出，砂粒間之孔隙會隨砂粒彼此之排列

不同而有所差異，相較於其他質地土壤，其孔隙為最大，以至水分容易滲入及排出，部分未排出之水份則會附著於砂粒間孔隙，增強砂粒間結合力，造成不易受風吹而分開，亦即飛砂啟動需克服水體結合力，達到砂粒間附著之水體完全斷裂為止，而砂粒開始分離至水體斷裂所需之距離依水份含量多寡而定；Johnson⁽¹⁷⁾在研究中也指出，當砂粒含水量大於 1% 時，起動風速就開始受到較大影響。

本研究為了能夠深入瞭解飛砂移動之相關機制，提供作為爾後研擬飛砂防治對策之依據，因而於西海岸勘選飛砂危害較為嚴重的地區，除了進行現地砂粒採樣調查之外，並於室內從事風洞試驗，觀測不同砂粒粒徑、含水量及風速對飛砂移動機制之影響，所得成果對於濱海地區飛砂治理將有貢獻。

試區概況

本研究試區選定在苗栗縣苑裡鎮、後龍鎮濱海地區及大安溪、大甲溪出海口處等易造成飛砂災害地區，初步於現地展開砂粒採樣調查，再於室內從事飛砂移動機制之風洞試驗，各試區詳細採樣點位座標係經由掌上型 GPS 定位後求得，如圖 1 所示；試區概況如下所述：

一、苗栗縣後龍鎮濱海地區

砂粒採樣點介於 17 號大排與外埔大排之間，砂源主要來自於後龍溪，而後龍溪之泥沙來源則是由於 921 地震後土體鬆動以及近年不斷開發所致，經由颱風豪雨將中上游大量砂石往下游輸送至出海口附近堆積，又因潮汐作用，形成廣大的砂灘地，適逢東北季風來臨，產生嚴重飛砂危害。

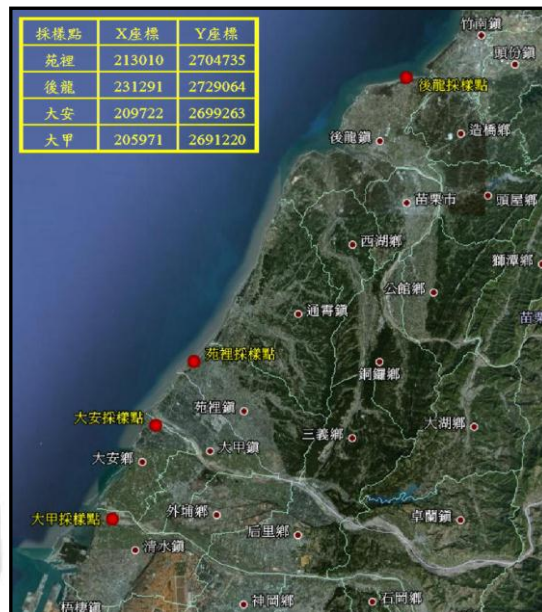


圖 1. 各試區採樣點位置圖 (資料來源：Google Earth, 2003.11.25)

Fig. 1. The location of sampling spots in each sample area (Source: Google Earth, 2003.11.25)

二、苗栗縣苑裡鎮濱海地區

砂粒採樣點介於苑裡溪與房裡溪之間，據當地居民描述，從前苑裡很少發生飛砂，但近年來飛砂危害日益嚴重，分析其原因與前述相同；為減緩飛砂危害，該試區於民國 94 年開始逐年設置堆砂籬，南側堆砂籬延伸至海岸漁港之北岸堤防，由於每年皆有新設堆砂籬，使得海岸邊呈現新、舊籬綜合錯雜之風貌。

三、台中縣大安溪出海口

砂粒採樣點位於大安溪橋至出海口間，砂源主要來自於大安溪，溪床兩岸堤防附近大多為自然植生及農作物所覆蓋，而裸露的砂地則是分佈於河川中央；由於大安溪南岸堤防下風面之安田莊與下大安等村莊向縣府反映，每當冬季枯水期，東北季風盛行期間的吹襲，嚴重影響居民生活品質，因而選定此區進行採樣。

四、台中縣大甲溪出海口

砂粒採樣點位於大甲溪橋至出海口間，砂源主要來自於大甲溪，大面積裸露砂地分佈於出海口處，溪床兩岸堤防附近大多為礫石與少數自然植生所覆蓋，並有少數農耕地存在於堤防與出海口間。

材料與方法

本研究於現地四個試區採集砂粒時，為取得完整砂體結構，因此，在容易產生飛砂之區域，參考環保署環境檢測所⁽¹⁰⁾公告編號 S102.61B 之土壤採樣法，以簡單隨機採樣方式，採集地表以下 5 cm 內，半乾半濕尚未起砂

之砂樣約 5 kg，將所採集之砂樣攜回實驗室，根據萬鑫森⁽⁹⁾及林俐玲、董小萍⁽⁵⁾之試驗方法，從事砂粒密度、粒徑、質地、含水率及形狀係數等物理量之分析，並於室內風洞進行不同砂粒粒徑與風速之飛砂量及不同砂粒含水率之飛砂量實驗，相關分析與實驗方法如下所述：

一、砂粒密度分析

採用比重瓶法分析砂粒密度，由於砂粒比重 G_s 為砂粒單位重 γ_s 與 4°C 水單位重 γ_w 之比值，如式①所示：

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{\gamma_w V_s} \dots \dots \dots \text{①}$$

W_s ：乾土重 (g)

V_s ： W_s 所對應之土壤體積 (cm^3)

由於 W_s 與 γ_w 易知，故可由比重瓶法進一步分析求得 W_s 所對應之土壤體積 V_s ，再將 W_s 除以 V_s 即可求得砂粒密度 (g/cm^3)。

二、砂粒粒徑分析

將現地所採集之砂樣風乾後，取適量土砂倒入美國標準篩號 #4、#10、#20、#40、#60、#100、#140、#200 內 (孔徑大小為 4.76、2.00、0.84、0.42、0.25、0.149、0.105、0.074 mm)，使用搖篩機過篩，如圖 2 所示；經由篩分析後，可獲得殘留於各篩網上砂粒之百分比，進而求得砂粒粒徑分布曲線；將各篩網之砂粒百分比乘粒徑大小，將之累加，即為平均粒徑；而以各粒徑等級之平均值代表該粒徑等級之大小，以供分析計算。利用粒徑分布曲線，找出累積過篩百分率為 50 所對應之粒徑，再用對數計算法求出砂粒之中值粒徑 d_{50} 。此外為了判別土



圖 2. 美國標準篩

Fig. 2. U.S.A. Standard Sieves

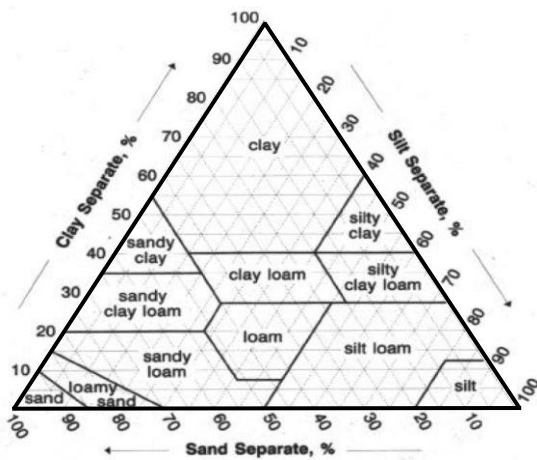


圖 3. 美國農業部之土壤質地三角圖 (資料來源：Soil Survey Staff, 1998)

Fig. 3. The Soil Textural Triangle (Source: Soil Survey Staff, 1998)

粒級配是否良好，一般常用曲率係數 C_c 做為代表，曲率係數計算如式②所示：

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}} \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

三、砂粒質地分析

土壤機械分析是評定量化土壤質地之正確

方法，本試驗採用吸管法。首先，秤 30 g 乘以水份係數 MF ($MF = 1.0 + \text{含水率}/100$) 之風乾土，放置於 250 ml 之塑膠燒杯內，並加入 100 ml 蒸餾水及 5% 之 50 ml 偏磷酸鈉，利用超音波分散器分散 10 分鐘。接著用 #325-mesh (0.045 mm) 之篩網將懸浮液中之砂粒濾出，並送至烘箱烘乾後秤重，此即為砂粒含量重；而

過篩後之懸浮液，用 1000 ml 量筒承接，再根據 Stokes' Law 計算不同粒徑下降 10 cm 所需時間，取樣時間到時，利用吸管吸取 10 cm 處之懸浮液 20 ml，並送至烘箱烘乾後，秤重再乘 50，此即為黏粒含量重。由實驗測得砂粒、黏粒及粉粒含量百分比後，再對照美國農業部土壤質地三角圖，如圖 3 所示，即可查得各試區砂粒質地分級。

四、砂粒含水率分析

將現地所採集之砂土經自然風乾後，取約 50g 風乾砂土，置入 105°C 之烘箱內，烘乾 24 至 48 小時，使砂土空隙水份完全蒸散後，再取出秤重，求風乾砂土重量與烘乾砂土重量之差值，即為砂土水分含量。

五、砂粒形狀係數分析

有關砂粒形狀數量之表示方法很多，如所謂球狀率、圓狀率、丸狀率或以砂粒之長、中、短所表示之形狀係數等⁽¹¹⁾。本試驗為了解砂粒形狀是否影響飛砂型態與飛砂量，因而依 Stokes' law 之理論，測定各試區砂粒之沉降時間(t)，粒徑大小則是以美國標準篩號各篩網間之平均值來表示，分別為 3.38 mm、1.42 mm、0.63 mm、0.335 mm、0.2 mm、0.127 mm 及 0.09 mm，而後再由式③求得靜止流體中同等粒徑球體之理論沈降時間 (t)，則各粒徑等級之 (t/t) 值，則可作為代表各試區砂粒之形狀係數⁽¹³⁾。而 Stokes' law 之理論基本假設為：(1) 顆粒夠大不受流體分子熱運動之影響、(2) 顆粒為剛體、球形及光滑的、(3) 所有顆粒都具有相同之密度、(4) 懸浮液較稀，顆粒不致互相

干擾，使每一顆粒得以獨立地沉降、(5) 顆粒四周流體流動為層流，即無一顆粒有超出開始紊流之界限沉降速度。因此，當形狀係數等於 1 時，表示實測時間與理論時間相同，即符合 Stokes' law 之基本假設之一：顆粒為剛體、球形及光滑的。

$$t = \frac{h}{u_t} = \frac{18h\eta}{d^2g(\rho_s - \rho_f)} \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

t：顆粒降落高度 h 所需時間 (s)

h：顆粒降落高度 (cm)

u_t：球體落下之末速度 (cm/s)

η：流體黏滯度(poise)

d：顆粒直徑(cm)

g：重力加速度(cm/s²)

ρ_s：砂粒密度(g/cm³)

ρ_f：流體密度(g/cm³)

六、不同粒徑與風速之飛砂量實驗

為避免因為砂粒粒徑分佈範圍太窄，而使實驗所需不同粒徑之組數不足，因此，本項實驗由粒徑分析所得結果中，選擇各試區粒徑分佈範圍較廣的砂粒，進行不同砂粒粒徑與飛砂量之風洞實驗。實驗風速係參考邱盈達⁽⁷⁾及現地風速概況，採用七種風速，分別為 5.5 m/s、6 m/s、7 m/s、9 m/s、11 m/s、13 m/s 及 15 m/s，吹風時間經評估為避免砂源量不足，影響實驗結果，選擇以 5 分鐘為基準，每項實驗重複 3 次，再將所得數據列表分析。

七、不同含水率之飛砂量實驗

為減少砂粒粒徑分佈範圍太廣，而造成因為不同粒徑對飛砂量所產生之誤差，因此，本

項實驗則是由粒徑分析所得結果中，選擇各試區粒徑分佈範圍較小的砂粒，進行不同含水率飛砂量之風洞實驗。首先使用手持噴霧槍並配合攪拌，讓砂粒與水充份混合均勻，由於在風洞試驗時，砂體表面的含水率並非保持不變，因此，為深入瞭解試驗過程中含水率的變化情形，對於試驗前、試驗後及集砂盒內所收集到的飛砂，皆分析其含水率。砂粒之含水率可由式④計算求得：

$$M_c = \frac{W_w - D_w}{D_w} \times 100\% \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

M_c ：砂粒含水率 (%)

W_w ：含水砂重 (g)

D_w ：烘乾砂重 (g)

結果與討論

一、砂粒密度分析結果

經由比重瓶法分析後得知，各試區砂粒密度介於 2.62 至 2.67 g/cm³ 之間，差異不大，分別為後龍 2.62 g/cm³、苑裡 2.67 g/cm³、大安 2.66 g/cm³ 及大甲 2.63 g/cm³，所得數值亦可提供砂粒形狀係數分析之所需。

二、砂粒粒徑分析結果

各試區砂粒經由美國標準篩分析結果其粒徑分佈曲線如圖 4~圖 7 所示，由圖 4~圖 7 得知，大安試區砂粒粒徑分佈範圍較廣，因而可以作為不同粒徑與風速之飛砂量實驗所需；而大甲試區砂粒粒徑分佈範圍較小，則可作為不同含水率之飛砂量實驗所需。進一步將所求得之砂粒中值粒徑 d₅₀、平均粒徑及曲率係數

列於表 1，由表 1 得知，後龍及大甲試區砂粒之中值粒徑最大，平均粒徑在 0.255 mm 以上；苑裡砂粒之中值粒徑次之，平均粒徑為 0.235 mm；大安砂粒之中值粒徑最小，平均粒徑僅 0.202 mm。由曲率係數得知，大安與大甲試區之砂粒含量組合較類似，而苑裡則與後龍之砂粒含量組合較類似。

Bagnold⁽¹⁴⁾ 曾經推導出臨界摩擦速度 (threshold friction velocity)，亦即能使粒狀物隨風揚起的臨界風速，如式⑤所示：

$$u = k \left(\frac{d \cdot g \cdot \rho_s}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

u ：臨界摩擦速度 (m/s)

k ：係數

d ：顆粒粒徑 (μm)

g ：重力加速度 (9.8 m/s²)

ρ_s ：顆粒密度 (kg/m³)

ρ ：空氣密度 (kg/m³)

由此得知粒狀物大小、密度與臨界風速成正比關係，換言之，粒狀物粒徑或密度越大，則揚起所需要的臨界摩擦速度越大，將試驗中所獲得之砂粒密度及平均粒徑代入式⑤，綜合得知，各試區砂粒揚起之臨界風速以大甲試區最大，後龍次之，苑裡再次之，而大安最小。

三、砂粒質地分析結果

本試驗採用吸管法，利用土壤機械分析來評定土壤質地，經分析結果如表 2 所示，各試區砂粒含量均超過 96% 以上。將實驗結果對照美國農業部之土壤質地三角圖，如圖 3 所示，四個試區土壤質地都為砂土，此結果與林信輝等⁽⁶⁾試驗結果相同。

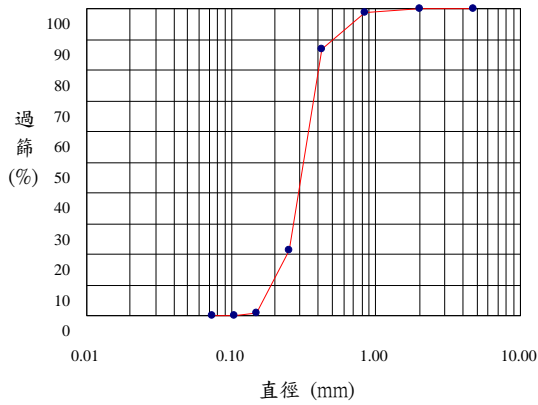


圖 4. 後龍試區粒徑分佈曲線

Fig. 4. The distribution curve of particle size in Houlong sample area

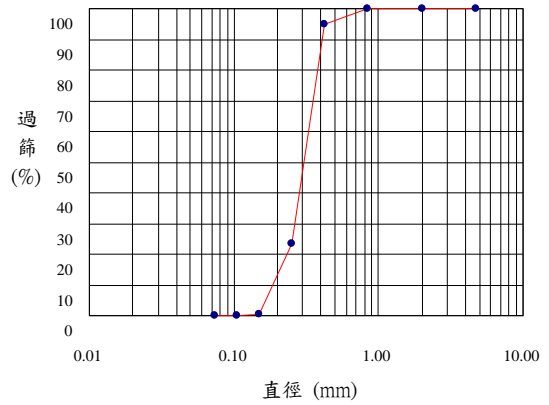


圖 5. 苑裡試區粒徑分佈曲線

Fig. 5. The distribution curve of particle size in Yuanli sample area

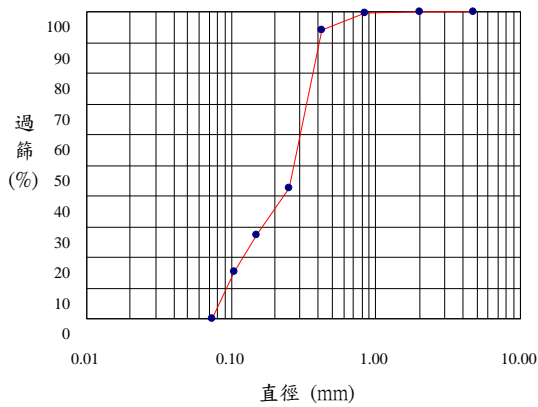


圖 6. 大安試區粒徑分佈曲線

Fig. 6. The distribution curve of particle size in Da-an sample area

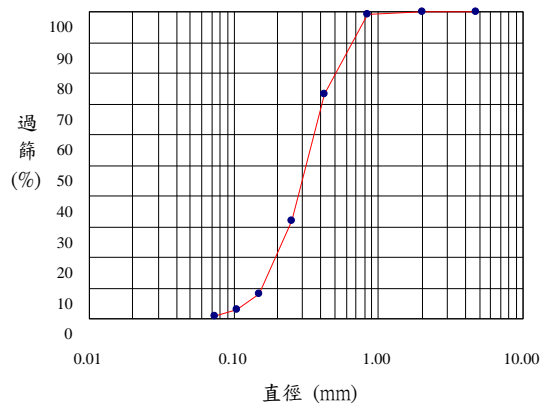


圖 7. 大甲試區粒徑分佈曲線

Fig. 7. The distribution curve of particle size in Da-jia sample area

表 1. 砂粒之中值粒徑與曲率係數

Table 1. The median diameter and the curvature coefficient of sand

試區	後龍	苑裡	大安	大甲
中值粒徑 (mm)	0.310	0.300	0.270	0.310
平均粒徑 (mm)	0.255	0.235	0.202	0.262
曲率係數	1.130	1.140	0.950	1.000

表 2. 土壤質地

Table 2. he texture of soil

試區	歷時	重量(%)			質地
		sand	silt	clay	
後龍	6 時 49 分 49 秒	97.66	2.17	0.18	砂土
苑裡	6 時 38 分 28 秒	96.64	2.70	0.66	砂土
大甲	6 時 40 分 00 秒	98.59	0.75	0.66	砂土
大安	6 時 46 分 55 秒	96.94	2.29	0.77	砂土

四、砂粒含水率分析結果

將現地所採集之土砂經由風乾及烘乾後，分析求得各試區砂粒含水率分別為後龍 0.967%、苑裡 0.825%、大安 0.441% 及大甲 0.282%。由於砂粒含水率為飛砂起動因子中重要之因素，而砂粒含水率常因潮汐變化或降雨等因素產生極大差異，進而改變砂粒搬運的行為特性，由實驗觀察得知，砂粒含水率較高時，其運動型態大致以滾動及跳躍為主；而當砂粒含水率較低時，其運動型態則以跳躍及懸浮(或飛揚)為主。

由實驗結果得知，苑裡與後龍的砂粒含水率分別為 0.825% 與 0.967%，明顯高於其他二試區，經現地複勘研判，係因潮汐作用使砂面含水率增加。林信輝等⁽⁶⁾以後龍溪之砂粒為材料，在風洞內進行不同含水率之飛砂量試驗，發現砂粒含水率少於 1.2 % 時，在相同風速條件下，飛砂量與含水率無關。由於四個試區砂粒含水量皆在 1.2% 以下，因此，極易造成嚴重飛砂。

五、砂粒形狀係數分析結果

各試區砂粒形狀係數之試驗結果如表 3 至表 6 所示，由表 3 至表 6 得知，粒徑越小，沉降運動越不穩定，導致其實測沉降時間比理論沉降時間為短，粒徑較大之砂粒則反之。由於較大之砂粒在沉降之際，受流體抵抗之作用，不易垂直下沉，而是呈不規則螺旋狀軌跡下降，其沉降軌跡之長度當較垂直下降距離為長；再者，粒徑較大之砂粒，其形狀雖較接近球狀，但其表面仍呈不規則形狀，故其表面積較之理論圓球體為大，與流體接觸而產生之摩擦阻力亦大，亦即流體之黏性對砂粒之作用較之砂粒自身之重量更具影響力。

此結果與游繁結等⁽⁸⁾所得之結論相同。另外游繁結等⁽⁸⁾研究中指出，扁平形狀砂粒之形狀係數較球形砂粒為小，因此將本實驗不同粒徑形狀係數加權平均後之結果得知，大安試區砂粒形狀較接近球形，大甲試區之砂粒則較為扁平形，而苑裡與後龍試區之砂粒形狀較為類似。此種不同形狀之砂粒一旦受風之作用而移動時，其運動型態當有所不同，此對飛砂量的產生更增複雜性。

表 3. 後龍試區形狀係數加權平均值

Table 3. The weighted average of shape coefficient in Houlong sample area

粒徑 d (mm)	實測沉降時間 t' (s)	理論沉降時間 t (s)	粒徑分布 百分率	形狀係數	加權平均
3.380	1.0	0.9	0.05	0.9204	0.9655
1.420	5.8	5.2	1.08	0.8991	
0.630	29.6	26.5	12.02	0.8950	
0.335	95.2	91.0	65.48	0.9555	
0.200	253.1	262.9	20.46	1.0386	
0.127	591.2	622.2	0.81	1.0524	
0.090	1157.9	1298.1	0.10	1.1211	

表 4. 苑裡試區形狀係數加權平均值

Table 4. The weighted average of shape coefficient in Yuanli sample area

粒徑 d (mm)	實測沉降時間 t' (s)	理論沉降時間 t (s)	粒徑分布 百分率	形狀係數	加權平均
3.380	1.1	0.9	0.01	0.8134	0.9600
1.420	6.2	5.1	0.06	0.8177	
0.630	26.5	25.8	5.06	0.9719	
0.335	95.1	88.4	71.62	0.9298	
0.200	243.1	255.6	22.73	1.0512	
0.127	583.6	604.9	0.48	1.0364	
0.090	1143.9	1262.0	0.04	1.1032	

表 5. 大安試區形狀係數加權平均值

Table 5. The weighted average of shape coefficient in Da-an sample area

粒徑 d (mm)	實測沉降時間 t' (s)	理論沉降時間 t (s)	粒徑分布 百分率	形狀係數	加權平均
3.380	1.3	0.9	0.04	0.6921	0.9749
1.420	6.7	5.1	0.22	0.7609	
0.630	28.9	25.9	6.99	0.8962	
0.335	100.3	88.9	60.44	0.8866	
0.200	260.1	257.0	18.26	0.9880	
0.127	588.1	608.2	14.05	1.0343	
0.090	1107.6	1269.1	4.25	1.1458	

表 6. 大甲試區形狀係數加權平均值

Table 6. The weighted average of shape coefficient in Da-jia sample area

粒徑 d (mm)	實測沉降時間 t' (s)	理論沉降時間 t (s)	粒徑分布 百分率	形狀係數	加權平均
3.380	1.1	0.9	0.02	0.8320	0.9561
1.420	6.7	5.2	0.77	0.7739	
0.630	28.6	26.3	26.05	0.9210	
0.335	97.5	90.4	41.77	0.9276	
0.200	255.6	261.4	23.97	1.0226	
0.127	601.2	618.6	5.15	1.0290	
0.090	1198.5	1290.7	2.27	1.0770	

表 7. 不同粒徑與風速之飛砂量 (g/m-s)

Table 7. The aeolian sand amount of different sand diameters and wind speed

粒徑 (mm)	風速 (m/s)							
	5.0	5.5	6.0	7.0	9.0	11.0	13.0	15.0
Q _{#10-20} (g/m-s) (0.84~2.0mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Q _{#20-40} (g/m-s) (0.42~0.84mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	2.5	41.1	121.1
Q _{#40-60} (g/m-s) (0.25~0.42mm)	0.0	0.0	0.0	1.2	7.6	41.0	46.0	153.1
Q _{#60-100} (g/m-s) (0.15~0.25mm)	0.0	0.0	0.5	16.6	38.5	45.9	53.9	146.1
Q _{100 以下} (g/m-s) (0.15mm 以下)	0.0	1.2	9.2	30.4	33.5	38.5	40.3	75.2

表 8. 粒徑 0.15 ~ 0.84 mm 之飛砂量 (g/m-s)

Table 8. The aeolian sand amount of 0.15 ~ 0.84 mm sand diameter

粒徑	風速(m/s)				
	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0
Q _{#20-40} (g/m-s) (0.42~0.84mm)	41.1	70.8	85.8	98.9	125.1
Q _{#40-60} (g/m-s) (0.25~0.42mm)	46.0	76.8	94.2	107.1	153.1
Q _{#60-100} (g/m-s) (0.15~0.25mm)	53.9	80.6	92.2	103.5	146.1

六、不同粒徑與風速之飛砂量實驗結果

由各試區砂粒粒徑分佈曲線圖 4~圖 7 得知，四個試區的砂粒以大安試區粒徑分佈範圍較廣，砂粒粒徑分佈範圍主要為 #10~#20、#20~#40、#40~#60、#60~#100 及 #100 以上，因此，研究中採用大安試區的砂粒進行不同砂粒粒徑與飛砂量之風洞實驗。根據江永哲、張文詔⁽²⁾之試驗，茲將不同粒徑所測得之飛砂量列於表 7 中，由表 7 中得知，當砂粒粒徑大於 0.84 mm 以上，風速達 15 m/s 時飛砂量依然為 0 g/m-sec，據此可知，當粒徑大於 0.84 mm，而風速在 15 m/s 以下時，砂粒無法啟動運移；而當砂粒粒徑介於 0.42~0.84 mm，入流風速低於 9 m/s 時，僅收集到微量砂粒，飛砂量趨近於零，然而風速達 13 m/s 時，飛砂量則急遽增加，所以在此範圍內的砂粒其起始風速值介於 7 m/s~9 m/s。

由表 7 進一步觀察得知，當砂粒粒徑在 0.42 mm 以下，風速高達 15 m/s 時，較大粒徑的飛砂量反而多於較小粒徑的飛砂量，換言之，飛砂量逐漸隨粒徑變小而遞減，但在低風速 9 m/s 時，卻又有相反的結果，究其原因，高風速時小粒徑之懸浮量較多所致；又當砂粒粒徑小於 0.42 mm 時，風速在 9 m/s~11 m/s 範圍內，其飛砂量並無明顯差異。再者，由表 7 得知，砂粒粒徑介於 0.42~0.84 mm 時，其起始風速為 7 m/s；砂粒粒徑介於 0.25~0.42 mm 時，其起始風速為 6 m/s；砂粒粒徑介於 0.15~0.25 mm 時，其起始風速為 5.5 m/s；砂粒粒徑小於 0.15 mm 時，其起始風速為 5 m/s。

綜合得知，當砂粒粒徑小於 0.25 mm，因起動風速較低，在風速 9 m/s 以上，即有大量飛砂產生，其餘粒徑則分別在 11 m/s 及 13 m/s 以上時，飛砂量才急遽增加。又由風洞實驗結果與觀察得知，砂粒粒徑大於 0.25 mm 時，其運動型態多以滾動及跳躍為主，而粒徑小於 0.25 mm 時其運動型態則逐漸轉變為懸浮移動。

由於飛砂量影響空氣之品質極為嚴重，為了進一步了解此一現象，本試驗再針對飛砂量變化較為顯著之三種砂粒粒徑 0.84 mm~0.42 mm、0.42 mm~0.25 mm 及 0.25 mm~0.15 mm 等，深入觀測其飛砂量的變化情形，結果如表 8 所示。由表 8 得知，當風速達到 13.5 m/s 以上時，濱海地區的飛砂量將顯著增加，空氣品質逐漸惡劣。

七、不同含水率之飛砂量實驗結果

由各試區砂粒粒徑分佈曲線圖 4~圖 7 得知，四個試區的砂粒以大甲試區粒徑分佈範圍較小，可減少因為不同粒徑對飛砂量所產生之誤差，因此，研究中採用大甲試區的砂粒進行不同含水率之飛砂量之風洞實驗。由於在風洞試驗時，砂體表面的含水率並非保持不變，為深入瞭解試驗過程中含水率的變化情形，因而對於試驗前、試驗中及試驗後所收集到的飛砂，皆量測其含水率，所得結果如表 9 所示。

由表 9 得知，實驗前後砂體含水率之變化約介於 0.03%~0.75%之間，而不論原砂體含水率多寡，所收集到的飛砂其含水率皆低於 0.97%，又原砂體含水率愈低，則所收集到的飛砂其含水率亦愈低。在試驗過程中，於送風

表 9. 砂粒不同含水率之飛砂量

Table 9. The aeolian sand amount of different sand moisture content

試驗前砂粒 含水率 W_1 (%)	試驗後砂粒 含水率 W_2 (%)	含水率變化 (%)	集砂盒內砂粒 含水率 W_3 (%)	飛砂量 (g/m-sec)
5.96	5.21	0.75	0.97	0.01
4.35	3.78	0.57	0.81	0.04
2.96	2.52	0.44	0.69	0.52
2.69	2.31	0.38	0.63	0.59
2.16	1.84	0.32	0.54	0.65
1.99	1.72	0.27	0.50	0.81
1.84	1.63	0.21	0.47	0.86
1.64	1.49	0.15	0.41	1.56
1.58	1.41	0.17	0.40	26.49
1.24	1.12	0.12	0.32	48.92
1.22	1.09	0.13	0.31	52.61
0.83	0.73	0.10	0.29	53.15
0.24	0.21	0.03	0.11	54.65

初期，砂面並無任何砂粒移動，當持續吹風後，砂面逐漸變乾，砂體水分降至一定程度後，砂粒方才開始運移；由於飛砂起動後只是砂面極薄一層已乾之砂粒在移動，下層含水量較多之砂粒則無法被吹動，而砂體含水率愈高，砂面乾燥速度愈慢，砂粒愈不易起動，即使起動其量也極低。

再將飛砂量與試驗前砂粒含水率(%)繪圖，如圖 8 所示；由圖 8 得知，當含水率低於 1.22% 時，飛砂量已接近穩定狀態，變化極小，其值與乾砂時並無太大差異；又含水率在 1.24% 以上時，飛砂量則急遽減少，當上昇至 1.84% 時，飛砂量降至 0.86 g/m-sec，此值僅為高峰期 (54.65 g/m-sec) 的 1.6%，由此可知，本實驗中砂體含水率對於飛砂量顯著影響的範圍介於 1.24% ~ 1.84% 之間，當砂粒含水率上

昇達到 1.24% 時，水分子即對砂粒運動開始產生抑制作用，而再上昇達到 1.84% 時，僅有微量的飛砂發生，其抑制作用亦將達到最大值。

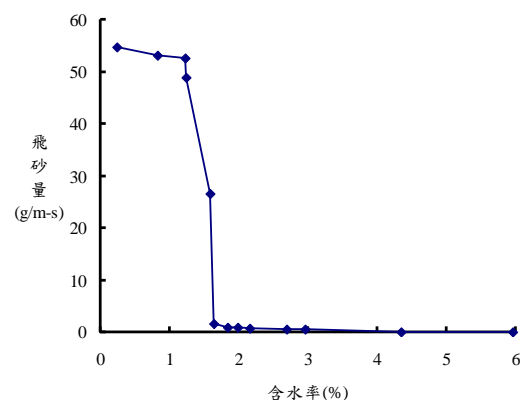


圖 8. 砂粒含水率與飛砂量之關係

Fig. 8. The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount

結論

本研究經由現地砂粒採樣調查及室內風洞試驗，對於四個試區砂粒特性及移動機制，初步獲致試驗結果：各試區土壤質地皆為砂土，砂粒密度差異不大，介於 2.62 至 2.67 g/cm³ 之間；大安試區砂粒粒徑分佈範圍較廣，其砂粒形狀較接近球形，而大甲試區砂粒粒徑分佈範圍較小，其砂粒形狀則較為扁平；由於四個試區砂粒含水量皆在 1% 以下，因此，極易造成嚴重飛砂；又由砂粒密度及平均粒徑綜合得知，各試區砂粒揚起之臨界風速以大甲試區最大，而大安試區最小。

根據風洞實驗結果，水分子開始對砂粒運動產生抑制作用之含水率為 1.22%，當含水率到達 1.84% 時，抑制作用達到最大值，由於各試區砂粒含水率皆低，因此，對於砂粒運動的抑制作用功效不佳；而實驗顯示，當砂粒粒徑介於 0.42~0.84 mm 時，其起始風速值為 7 m/s，砂粒粒徑介於 0.25~42 mm 時，其起始風速為 6 m/s；砂粒粒徑介於 0.15~0.25 mm 時，其起始風速為 5.5 m/s；砂粒粒徑小於 0.15 mm 時，其起始風速為 5 m/s。由於各試區砂粒主要粒徑分布介於 0.25~0.42 mm 之間，一旦在枯水期的冬季，適逢 13.5 m/s 以上強烈東北季風，十分容易引起漫天飛砂，影響空氣品質深遠，本研究成果對於濱海地區飛砂治理將有貢獻。

參考文獻

1. 王穎釗、張承中、高建華、劉初全、栗志豔。2009。不同類型農田地表粉塵起動摩阻風速的野外觀測。安徽農業科學期刊 37(2): 710-721。
2. 江永哲、張文詔。1978。海岸飛砂量估算之風洞實驗。中華水土保持學報 9(2): 51-81。
3. 朱佳仁。2006。風工程概論。科技圖書 pp. 241-243。
4. 吳正。1965。新疆和田地區砂土及土壤風蝕的初步研究。中國地理學會 1961 年地貌學術討論會論文摘要。科學出版社 pp. 125-127。
5. 林俐玲、董小萍。2002。土壤物理學實習。國立中興大學教材 pp. 4-20。
6. 林信輝、江永哲。1979。砂體含水率與飛砂量之關係試驗。中華水土保持學報 10(2): 173-193。
7. 邱盈達。2008。堆砂籬定砂功效之探討 pp. 31-42。
8. 游繁結、江永哲、吳約西。1987。台灣西海岸砂粒性狀之探討。水土保持學報 19: 37-50。
9. 萬鑫森。1987。基礎土壤物理學。國立編譯館 pp. 59-70。
10. 行政院環保署環境檢測所。土壤採樣方法。http://www.niea.gov.tw/niea/SOIL/S10261B.htm。
11. 河村三郎。1982。土砂水理學 1。森北出版株式會社 pp. 2-4。
12. Bagnold, R. A. 1941. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen, Reprint by Chapman & Hall pp. 265.
13. Bagnold, R. A. 1954. The physics of Blown Sand and Desert dunes. Mathuen &

Co., Ltd.

14. Bagnold, R. A. 1977. Wind Tunnel Observation. JAPASA.
15. Blanco H., Lal R. 2008. Principles of Soil Conservation and Management. Springer Science pp. 55-80.
16. Soil Survey Staff. 1998. Natural Resource Conservation Service, U.S. Department Agriculture.
17. Johnson, J. W. 1965. Sand movement on coastal dunes. Proc. Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, US Dept. Agric. Misc. Publ. 970: 747-755.

Received: March 21, 2010.

Accepted: June 16, 2010.