

砂粒運移特性與含水率關係之研究

黃隆明⁽¹⁾ 蔡易衡⁽²⁾

摘要

本研究為瞭解砂粒運移特性與含水率之關係，選定大安溪鄰近出海口處，飛砂及揚塵危害嚴重地點，採集現地砂粒樣本後，攜回實驗室進行砂粒物性分析，並於風洞從事砂粒起動風速與含水率之觀測；物性分析結果顯示，大安溪土壤質地為級配不良的砂土，自然風乾時含水率約為 0.5%，平均粒徑為 0.313mm，密度為 2.72g/cm³，形狀係數為 0.9794。

在風洞試驗方面，當含水率為 0.13%時，砂粒之起動風速隨粒徑遞減而遞降，粒徑在 2~0.84mm、0.84~0.42mm、0.42~0.25mm、0.25~0.15mm 及 0.15mm 以下之砂粒，其起動風速分別為 13~14m/s、7~8m/s、6~7m/s、4~5m/s 及 4m/s 以下；又當各粒徑之砂粒在起動風速分別為 14m/s、8m/s、7m/s、5m/s 及 4m/s 時，砂粒之起動含水率隨粒徑遞減而遞增，粒徑在 2~0.84mm、0.84~0.42mm、0.42~0.25mm、0.25~0.15mm 及 0.15mm 以下之砂粒，其起動含水率分別約為 0.475%、0.730%、2.045%、2.115% 及 2.255%。

(**關鍵詞**: 砂粒含水率、飛砂、風洞)

A Study on the relation between sand movement and moisture content

Long-Ming Huang⁽¹⁾ *Yi-Heng Tsai*⁽²⁾

Associate Professor⁽¹⁾, Graduate Student⁽²⁾ Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

This study was planned to investigate the relations between sand movement and moisture content in the sand. The estuary of Da-an river, an area full of severe hazards of aeolian sand and fugitive dust, was chosen as the study site. A soil experiment was conducted in laboratory to determine the physical properties of the sand sample collected from the site. Besides, a wind tunnel experiment was carried out to measure the starting threshold of wind velocity and the moisture content of the sand. According to the soil experiment results of the physical properties of the sand, the soil texture

(1)國立中興大學水土保持系副教授 (通訊作者 e-mail: lmhuang@dragon.nchu.edu.tw)

(2)國立中興大學水土保持學系研究生

of Da-an river was sorted as poorly graded sandy soil, the moisture content of natural dried sand was about 0.5%, the average particle size was about 0.313mm, the density of sand was 2.72 g/cm³, and the shape coefficient of sand was 0.9794.

As to the wind tunnel experiment, the results showed that when moisture content of sand was 0.13%, the starting threshold of wind velocity of the sand particles decreased with different diameters were respectively as follows: 13-14m/s for the sand with 2-0.84mm, 7-8m/s for the sand with 0.84-0.42mm, 6-7m/s for the sand with 0.42-0.25mm, 4-5m/s for the sand with 0.25-0.15mm, and less than 4m/s for the sand smaller than 0.15mm. According to the other results, the starting threshold of moisture content for the sand particles increased with different diameters at different starting wind velocities were respectively as follows: 0.475% for the sand with 2-0.84mm at a speed of 14m/s, 0.730% for the sand with 0.84-0.42mm at a speed of 8m/s, 2.045% for the sand with 0.42-0.25mm at a speed of 7m/s, 2.115% for the sand with 0.25-0.15mm at a speed of 5m/s, and 2.255% for the sand smaller than 0.15mm at a speed of 4m/s.

(Key words: soil moisture content, aeolian sand, wind tunnel)

前言

本研究係以風力作用所造成之砂粒運動為探討主題，一般在風力作用下砂粒運動型態主要可分為：懸浮(suspension)、跳躍(saltation)與滾動(rolling)等三種。粒徑介於0.5~2mm 間之砂粒，因為受重力作用影響較大，故其運動型態主要以滾動為主；Bagnold(1941)在研究中指出，砂粒滾動時，主要藉由彼此間的碰撞來傳遞能量，使未起動之砂粒移動，而非直接由氣流獲得移動能量。當砂粒粒徑介於0.1~0.5mm 時，除了本身之重力影響外，亦受風力上揚作用，彼此間相互碰撞後彈跳至空中，其運動型態以跳躍作用為主，運動速度大約為風速的1/2~1/3；當跳躍之砂粒撞擊較大質量之砂粒時，可能停止彈跳，並改以滾動方式前進，遇到阻礙時則形成堆砂。又砂粒粒徑小於0.1mm 時，其運動型態以懸浮作用為主。

Bagnold (1977)，曾以風洞試驗，推算

砂粒之臨界摩擦速度，即砂粒飛揚之臨界風速；並由實驗得知，砂粒臨界風速與粒徑及密度成正比。林信輝(1979)等指出，砂粒孔隙較其他質地的土壤大，水份滲入及排出亦較容易，但隨著砂粒間排列的不同，孔隙亦有差異，進而影響水份的移動；吸附在砂粒孔隙間之水份，會增加砂粒間的結合力，使其不易受風吹散，因此，砂粒起動必須克服水體之結合力。Johnson(1965)在研究砂粒之起動風速時發現，當砂體含水率大於1%，砂粒之移動開始受到較大的影響。游繁結等(1987)在濁水溪河口飛砂量調查中發現，溪床飛砂主要發生在含水率小於0.5%的條件下。黃隆明等(2010)以大甲溪床砂粒從事飛砂移動機制之風洞實驗發現，當砂粒含水率低於1.22%時，飛砂量達到最大值；而含水率從1.24%遞增至1.84%時，飛砂量急遽減少；又當含水率達到1.84%時，對砂粒起動之抑制作用達到最大值。

由於影響砂粒運移機制的因子包含有粒

徑、密度、質地、形狀係數、含水率及風速等(前人研究),在各種不同條件狀況下其所產生之飛砂量亦不相同;本研究中砂粒樣本係來自大安溪單一様區,因此,對於砂粒密度、質地及形狀係數,僅從事物性分析,而對於粒徑、含水率及風速,則深入探討其對砂粒運動之影響。

本研究為了能夠更進一步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,主要觀測不同砂粒粒徑、含水量及風速對飛砂移動機制之影響,研究流程如圖 1 所示,所得成果對於充實濱海地區飛砂治理資料庫將有貢獻。

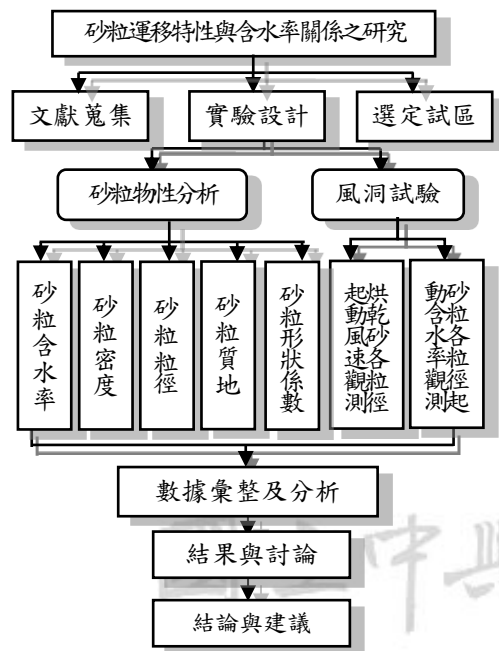


圖 1 研究流程圖

Fig. 1 The study flow chart

材料與方法

一、試區概況

本研究所選定之大安溪,位於台中市及苗栗縣境內,南臨大甲河流域,為中部揚塵及飛砂災害主要河川之一,發源於雪山山脈之大霸尖山,河流長度約 95.76 公里,流域面積 758.47 平方公里,年輸砂量約 4.94×10^6 公噸。每逢冬季乾旱期來臨時,分佈於河床中央的裸露砂地,係大量飛砂主要來源,伴隨著東北季風的吹襲,對南岸堤防下風處之村莊,造成極大危害,當地居民經常向市府反應,期盼能夠早日獲得改善。

有鑑於此,本研究選定此區進行採樣,採樣點位在大安溪橋至出海口間,如圖 2 所示;由於現地屬於容易產生飛砂之區域,為取得較完整之砂體結構樣本,因此,參考環保署環境檢驗所 102 年 2 月 18 日公告,同年 4 月 15 日實施,編號 S102.62B 之土壤採樣法,以隨機採樣方式,在現地選取五個採樣點,採取地表以下 15cm 之乾砂、半乾半濕及濕砂等三種樣本,攜回室內進行物性分析及風洞試驗。

二、試驗方法

將所採集之砂粒樣本風乾後,進行砂粒之含水率、密度、粒徑、質地及形狀係數等物理量分析,並於風洞從事粒徑、含水率及風速變化對飛砂量影響等試驗;相關之分析及實驗方法如下所述:

(一) 砂粒含水率分析

本項實驗依據 Walter H. Gardner (1986) 之土壤水分試驗方法,採用烘乾秤重法分析,以求得砂粒含水率(W)及水份係數(MF)。



圖 2 試區之採樣點位圖(資料來源:Google earth,2010/05/01)

Fig 2 The location of sampling spot in sample area(Source: Google earth,2010/05/01)

(二) 砂粒密度分析

本項實驗依據 Blake, G.R. & K.H. Hartge (1986)之實驗方法，採用比重瓶法分析，以求得砂粒之顆粒密度。

(1986)之方法，採用吸管法分析。

經由吸管法求得砂粒、粉粒及粘粒含量百分比後，即可對照美國農業部土壤質地三角圖，如圖 4 所示，查得砂粒之質地。

(三) 砂粒粒徑分析

為瞭解樣區砂粒粒徑分布之趨勢，依據 Gee G.W. & J.w. Bauder (1986)之方法，將砂粒樣本放入排序好之美國標準篩內，經由搖篩機過篩分析，如圖 3 所示。

過篩後將殘留於各篩網上之砂粒重量，轉換為百分比，繪製成粒徑分布曲線圖。並分別求取其平均粒徑、中值粒徑 d_{50} 、曲率係數 C_c 及均勻係數 C_u ，用以判別砂粒之級配狀況。



圖 3 美國標準篩

Fig 3 U.S.A Standard sieves

(四) 砂粒質地分析

本項實驗依據 Gee G.W. & J.w. Bauder

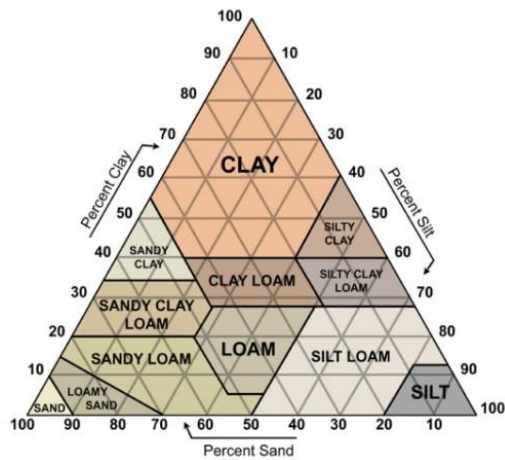


圖4 美國農業部土壤質地三角圖(資料來源：
San Diego Edible Garden Society)
Fig 4 The Soil Texture Triangle(Sorce: San
Diego Edible Garden Society)

(五) 砂粒形狀係數分析

以 10 號及 40 號之潤滑油充分攪拌混合後，調出黏滯度係數為 0.5poise 之油體供試驗用，此等油體主要在使砂粒沉降時之雷諾數符合層流假設。將此油體注入高 20cm、直徑 5.0cm 之量筒中，然後將各粒徑等級之砂粒(砂粒粒徑以美國標準篩號各篩網間之平均值表示，依序分別為 3.38mm、1.42mm、0.63mm、0.335mm、0.2mm、0.127mm、0.09mm)，一次一個放入量筒中，令其自然落至量筒底，而其所需之時間為(t')；再依 stock's Law 求出同粒徑理想球體在靜止流體中之沉降時間(t)，則各粒徑等級之(t/t')值，即代表該粒徑之形狀係數；當形狀係數愈接近 1 時，代表愈接近 Stoke's Law 之基本假設，即顆粒為鋼體、球形且光滑；依據量測所得，探討樣區砂粒之形狀特性是否影響飛砂型態與飛砂量。

(六) 砂粒粒徑與起動風速之關係

將所採集之砂粒分成 5 組粒徑級距，分別為 2~0.84mm、0.84~0.42mm、0.42~0.25mm、0.25~0.15mm 及 0.15mm 以下；再分別探討不同粒徑，在 12 種風速：4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14 及 15m/s 下，砂粒起動狀況之差異，據以評估砂粒起動風速之範圍，實驗時由細顆粒低風速開始，而後風速每次調升 1m/s，逐漸增強至 15m/s 為止。

此外，為了排除砂體含水率對起動風速之影響，本項研究將試驗用砂，放入 60℃ 烘箱烘乾 48 小時，再進行相關試驗，以避免土體殘餘水分影響試驗結果，並防止 100℃ 高溫致使砂粒乾裂及物性改變等情形。

風洞試驗段砂粒之鋪設係參考黃隆明等(2011)，鋪設總長 200cm，H₂ 水平集砂盒放置於 100cm 處，試驗時間經評估，為了避免砂源不足與累積之飛砂量超出集砂盒容量而影響實驗結果，故設定以 3 分鐘為基準；依照上述方法進行本項試驗，收集每次試驗之飛砂量，再將所得之資料彙整後列表分析。

(七) 砂粒粒徑與起動含水率之關係

由於前人研究砂粒之起動含水率，皆使用混合粒徑從事試驗，而本研究為了進一步獲得含水率對不同砂粒粒徑之抑制效果，以提供作為飛砂防治效率之評估及預警系統之建置，因此，比照前項試驗，將砂粒分成 5 組粒徑級距，又為了設定合理的試驗風速，故參考前項試驗所得，將試驗風速設定為各粒徑起動風速及現地平均風速 10m/s。

風洞試驗段砂粒之鋪設以及每次試驗時間，與前項試驗相同；至於砂粒鋪設時之含水率，需經由噴水攪拌達到 3.5%，此數值則是參考前人混和粒徑及本研究粗細粒徑前期試驗結果而定；又為了能精準控制噴灑水量，使砂粒含水率為 3.5%，因此，在試驗前必須先率定加壓噴水器之灑水時間及出水量。

由於每次在吹風試驗過程中，砂體含水率會不斷變化，故需採集試驗前及試驗後樣本，進行烘乾稱重，並以其平均值代表此次試驗之含水率；試驗時由高含水率開始，經由水分損失，逐漸往低含水率進行，以求得精確而連續之測點。

最後將每次試驗所收集之飛砂量數據資料彙整，並繪製成砂粒含水率與飛砂量關係之分佈圖，據以探討含水率對不同砂粒粒徑運移的抑制效果。

結果與討論

一、砂粒物性分析

(一) 砂粒含水率分析結果

將砂粒樣本風乾後，採三重複方式進行烘乾稱重，以減少實驗誤差，分析結果顯示，三次試驗之砂粒含水率分別為 0.6%、0.43% 及 0.47%，平均值為 0.5%，水分係數為 1.005。由於砂粒含水率係影響砂粒運移之重要因素，砂粒在低含水率時，因受水體結合力束縛小，運動型態主要為懸浮及跳躍；當含水率增高時，運動型態逐漸改為跳躍及滾動，甚至停止。故含水率高低，直接影響飛砂量多寡，研究結果顯示，大安溪砂粒在自然風乾的狀態下，含水率約為 0.5%，此結果說明該地區

砂粒運動型態主要為懸浮及跳躍，且有助於後續風洞試驗之進行。

(二) 砂粒密度分析結果

砂粒密度分析同樣採三重複方式，經比重瓶法實驗分析結果，三次試驗之砂粒密度分別為 2.70 g/cm³、2.73 g/cm³ 及 2.74 g/cm³，平均值約為 2.72 g/cm³。砂粒密度亦為影響砂粒運動之主要因素，在相同的體積下，若密度越大則重量越重；當砂粒越重，吹動砂粒所需之能量及風速就越強，因此，砂粒密度將會直接影響砂粒之起動風速和飛砂量，故實驗結果能夠做為爾後不同試區飛砂量比對說明之依據，亦可提供砂粒質地及形狀係數分析之所需。

(三) 砂粒粒徑分析結果

利用搖篩機將砂粒樣本過篩後，再將停留於各篩網上之砂粒稱重，本項實驗同樣採三重複方式，經平均後把所得之數據依重量百分比，繪製成粒徑分佈圖，結果如圖 5～圖 7 所示；由圖 5～圖 7 得知，粒徑分佈在 0.25mm～0.42mm 者最多，0.149～0.25mm 次之，而 0.84mm 以上及通過 0.074mm 之砂粒最少。茲將粒徑分佈曲線圖中，所獲得之砂粒特性分析結果，列於表 1 中，由表 1 得知，大安溪砂粒之平均粒徑為 0.313mm、中值粒徑為 0.174mm、曲率係數 C_c 為 0.905、均勻係數 C_u 為 1.769，綜合研判為級配不良之砂土。

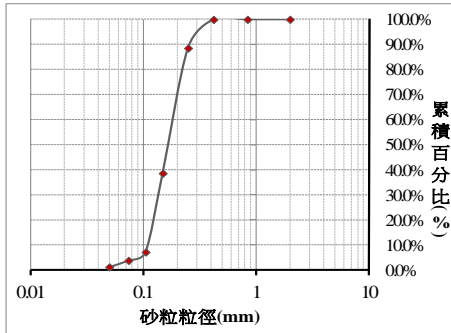


圖 5 試驗樣本一之粒徑分佈曲線

Fig 5 The distribution curve of particle size of sample one

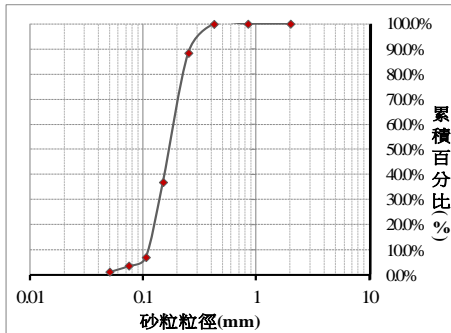


圖 6 試驗樣本二之粒徑分佈曲線

Fig 6 The distribution curve of particle size of sample two

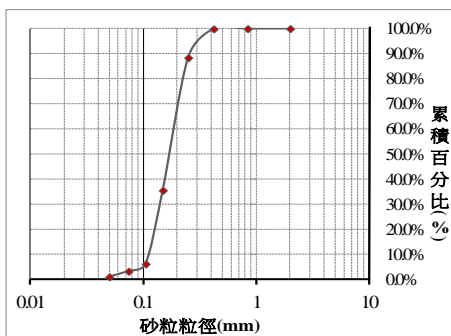


圖 7 試驗樣本三之粒徑分佈曲線

Fig 7 The distribution curve of particle size of sample three

表 1 砂粒之中值粒徑、曲率係數及均勻係數

Table 1 The median diameter, curvature coefficient and uniformity coefficient of sand

樣本	平均粒徑	中值粒徑	曲率係數 C_c	均勻係數 C_u
試驗一	0.310	0.172	0.895	1.765
試驗二	0.313	0.175	0.907	1.775
試驗三	0.316	0.177	0.914	1.767
平均值	0.313	0.174	0.905	1.769

(四) 砂粒質地分析結果

本項實驗使用吸管法分析砂粒樣本，同樣採三重覆方式，結果如表 2 所示，將實驗結果比對美國農業部之土壤質地三角圖，則可得知試區樣本之土壤質地分佈。由表 2 之分析結果比對顯示，大安溪砂粒質地為砂土，其砂粒含量高於 94%，表示其石英(quartz)等初生礦物含量極高，而矽酸鹽(silicate)等次生礦物含量極低，故土壤之空隙大，保水性差。

表 2 土壤質地

Table 2 The texture of soil

樣本	重量(%)			質地
	砂粒	粉粒	黏粒	
樣本一	96.13	3.53	0.33	砂土
樣本二	96.97	2.37	0.67	砂土
樣本三	94.77	4.73	0.50	砂土

(五) 砂粒形狀係數分析結果

依據 Stoke's Law 進行沉降試驗後，則可求得實測沉降時間 t' 及沉降速度，據此計算摩擦阻力，而後再求得各砂粒粒徑之慣性力，將慣性力除以摩擦阻力即可獲得沉降運動之

雷諾數；本研究粗顆粒至細顆粒之雷諾數分別為 1.394、1.343、1.084、1.009、1.008、0.929、0.884。

茲將不同砂粒粒徑之沉降時間與形狀係數，如表 3 所示，由表 3 得知，砂粒粒徑越小，其沉降運動越不穩定，導致其沉降時間增加，符合 Stoke's Law。

又由表 3 得知，粒徑 0.2 mm 以上之砂粒，實測沉降時間較理論沉降時間為長，因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，故其沉降軌跡之長度，比垂直下降之距離長，致使沉降較久。

然而粒徑在 0.2 mm 以下之砂粒，實測沉降時間較理論時間短，係由於篩分過程中，小粒徑且細長形之砂粒，可能於振動跳躍過程中，較易以長軸之方向通過篩孔；此等細長形砂粒之重量較之同粒徑之圓球砂粒為重，且在沉降運動時，易以長軸方向沉降，此時砂粒所受抵抗力較小，故較理論沉降時間為短。

將表 3 中不同粒徑之形狀係數，加權平均後之結果得知，大安溪砂粒之形狀係數為 0.9794，由於不同形狀之砂粒，受風之作用而移動時，其運動型態亦有所不同，此實驗結果亦能做為爾後不同試區飛砂運移型態比對說明之依據。

由於本研究雷諾數平均值為 1.093，雖然無法使所有顆粒雷諾數皆小於 1，但由於形狀係數近似 1，表示實測值與理論值極為接近，故應可符合 Stoke's Law 之基本假設。

表 3 大安溪砂粒之形狀係數

Table 3 The shape coefficient of sand 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)	百分率 (%)	形狀係數	加權平均
3.380	1.3	0.9	0.02	0.7173	
1.420	7.1	5.3	0.06	0.7441	
0.630	29.1	26.8	11.47	0.9224	
0.335	95.8	94.9	51.44	0.9909	0.9794
0.200	268.4	266.3	30.24	0.9923	
0.127	613.8	660.5	3.22	1.0761	
0.090	1163.2	1315.3	2.52	1.1307	

二、風洞試驗

(一) 砂粒粒徑與起動風速之觀測結果

本項試驗採用烘乾砂，有別於前人研究使用風乾砂，係進一步考量土體殘餘水分將會影響試驗結果，但又必須防止 100°C 高溫會使砂粒乾裂及物理特性改變等情形，因此，將試驗用砂，放入 60°C 烘箱烘乾 48 小時，再進行相關試驗；由分析結果得知，土體經上述處理後，含水率僅存 0.13%，對試驗結果之影響，比風乾土平均含水率 0.5% 為低。

研究中試驗砂粒之粒徑級距分為五組，風速由 4m/s 至 15m/s 共十二種，相關試驗方法如前所述，茲將各粒徑在不同風速下所收集之飛砂量，列於表 4。

由表 4 得知，粒徑 2.00~0.84mm 之砂粒，其起動風速為 13~14m/s；粒徑 0.84~0.42mm 之砂粒，其起動風速為 7~8m/s；粒徑 0.42~0.25mm 之砂粒，其起動風速為 6~7m/s；粒徑 0.25~0.15mm 之砂粒，其起動風速為 4~5m/s；粒徑 0.15mm 以下之砂粒，

其起動風速為 4m/s 以下；綜合得知自當砂粒粒徑小於 0.15mm，因起動風速較低，在風速 6m/s 以上，即有大量飛砂產生，其餘粒徑則分別在 7m/s、9m/s 及 12m/s 以上之臨界風速時，飛砂量才急遽增加。

又由表 4 得知，砂粒粒徑小於 0.42mm 時，在高風速 15m/s 時，雖然粒徑逐漸變小，大粒徑的飛砂量反而多於較小粒徑的飛砂量，然而在低風速 7m/s 時，所得結果卻又恰好相

反，究其原因，係由於高風速時小粒徑之懸浮量較多所致；故初步研判，當砂粒粒徑大於 0.25mm 時，其運動型態多以滾動及跳躍為主，而粒徑小於 0.25mm 時其運動型態則逐漸轉變為懸浮型態移動。再者，當風速達到 7m/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，而當風速增強至 15m/s 時，總飛砂量則遞增約 20 倍。

表 4 不同粒徑及風速下之飛砂量

Table 4 The aeolian sand amount of different sand diameters and wind velocity

飛砂量 (g/m ² -s)	風速(m/s)											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.84~2.00mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04
0.42~0.84mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.29	0.50	1.44	35.92	41.84	65.25	70.23
0.25~0.42mm	0.00	0.00	0.00	0.54	4.38	47.03	69.62	74.57	83.41	110.31	128.60	144.07
0.15~0.25mm	0.00	0.10	3.00	31.03	67.00	89.68	101.79	112.64	119.83	125.16	131.49	136.93
0.15mm 以下	1.02	6.43	21.37	51.82	69.48	79.29	85.66	96.74	103.87	112.49	120.89	127.55

(二) 砂粒粒徑與起動含水率之觀測結果

本試驗亦將砂粒之粒徑級距分為五組，以減少混合粒徑對飛砂量所造成之誤差，實驗風速以各粒徑之起動風速及現地平均風速 10m/s 分別測試，據以獲得各粒徑之起動含水率，以及在現地平均風速下，含水率對飛砂量之影響。

將實驗收集到之數據，繪製成飛砂量與含水率之關係圖，如圖 8~18 所示。由圖 8~18 得知，大顆粒粒徑 2.00~0.84mm 之砂粒，在風速 14m/s 時，其起動含水率約為 0.475%；粒徑 0.84~0.42mm 之砂粒，在風速 8m/s 及 10m/s 時，其起動含水率分別約為

0.730% 及 2.485%。

粒徑 0.42~0.25mm 之砂粒，因粒徑較小較輕，表層砂粒容易被帶動，在風速 7m/s 及 10m/s 時，其起動含水率分別為 2.045% 及 2.755%；粒徑為 0.25~0.15mm 之砂粒，在風速 5m/s 及 10m/s 時，其起動含水率分別為 2.115% 及 2.80%；粒徑 0.15mm 以下之砂粒，在風速 4m/s 及 10m/s 時，其起動含水率分別為 2.255% 及 2.885%。

由上述結果得知，當砂粒在起動風速時，砂粒之起動含水量，隨粒徑之遞減而遞增，且當風速提高時，亦有相同之趨勢；究其原因，可能因為顆粒越細，其排列越接近開放

型，故孔隙度大於封閉型排列之顆粒，因此顆粒越細保水性越佳，加上粒徑越小重量越輕，使表層細粒較易被帶動，但整體水分損失較少，因而起動含水率越高；此外在相同粒徑下，當風速增強時，起動含水率亦隨之增高，可能係因風能增加，因而能夠克服較大之水體結合力，致使砂粒在較高含水率下，即能起動。本研究結果將可作為爾後研擬飛砂防治對策及預警機制建立之參考依據。

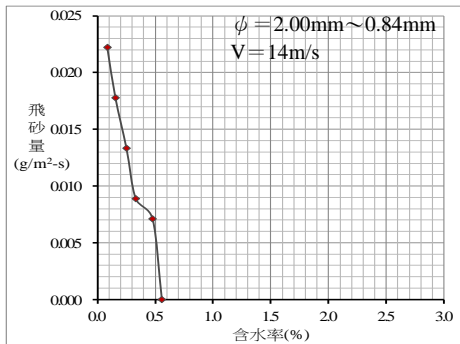


圖 8 砂粒含水率與飛砂量之關係(1)

Fig 8 The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount(1)

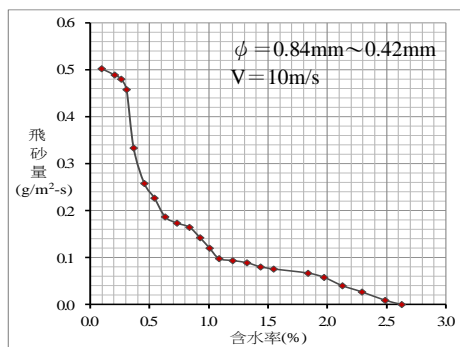


圖 9 砂粒含水率與飛砂量之關係(2)

Fig 9 The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount(2)

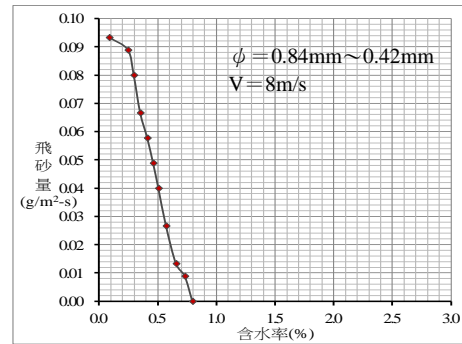


圖 10 砂粒含水率與飛砂量之關係(3)

Fig 10 The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount(3)

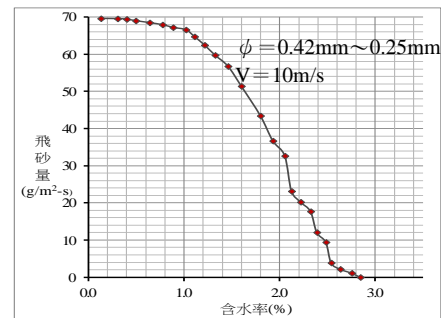


圖 11 砂粒含水率與飛砂量之關係(4)

Fig 11 The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount(4)

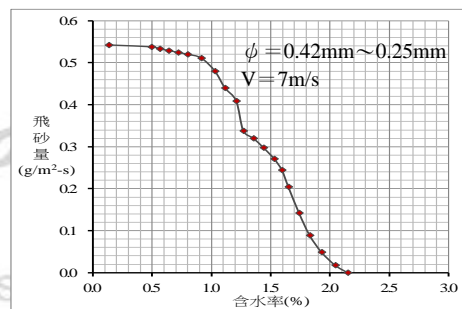


圖 12 砂粒含水率與飛砂量之關係(5)

Fig 12 The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount(5)

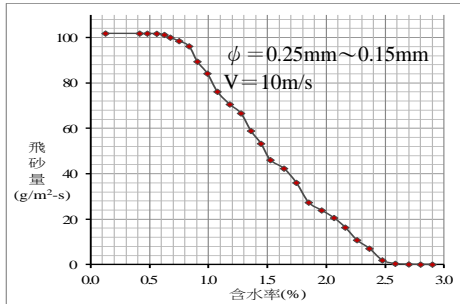


圖 13 砂粒含水率與飛砂量之關係(6)
Fig 13 The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount(6)

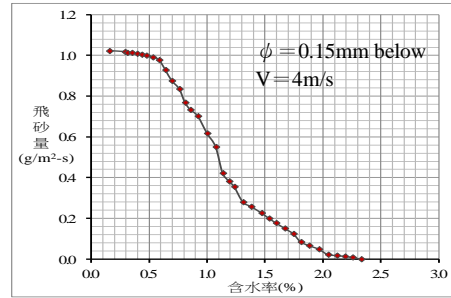


圖 16 砂粒含水率與飛砂量之關係(9)
Fig 16 The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount(9)

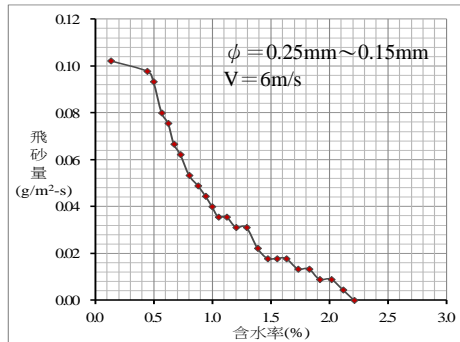


圖 14 砂粒含水率與飛砂量之關係(7)
Fig 14 The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount(7)

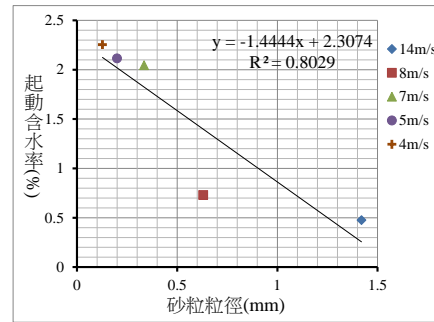


圖 17 粒徑、起動含水率與起動風速之關係
Fig 17 The relationship of sand diameters, starting threshold of sand moisture content, and wind velocity

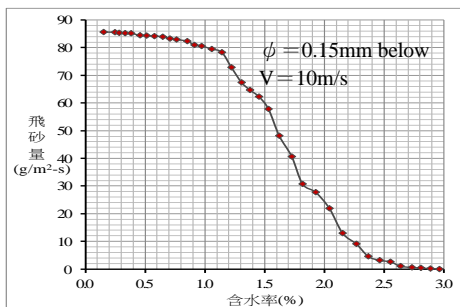


圖 15 砂粒含水率與飛砂量之關係(8)
Fig 15 The relationship of sand moisture content and aeolian sand amount(8)

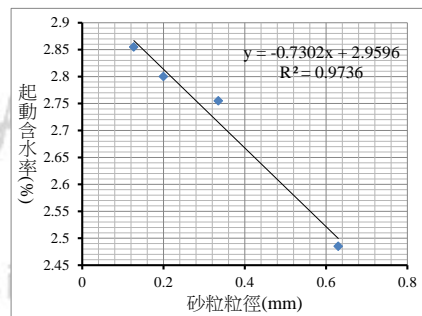


圖 18 粒徑與起動含水率之關係(V=10m/s)
Fig 18 The relationship of sand diameters and starting threshold of sand moisture content with wind velocity at 10m/s

結論

本研究經由砂粒物性分析及風洞試驗，初步獲得以下結論：

在物性分析方面：大安溪土壤質地為級配不良之砂土，自然風乾時之含水率約為 0.5%，砂粒大都分佈於 0.25~0.42mm 之間，平均粒徑為 0.313mm，密度為 2.72g/cm³，形狀係數接近球體為 0.9794。

在風洞試驗方面：當含水率為 0.13% 時，砂粒之起動風速隨粒徑遞減而遞降，粒徑在 0.84~2mm、0.42~0.84mm、0.25~0.42mm、0.15~0.25mm 及 0.15mm 以下之砂粒，其起動風速分別為 13~14m/s、7~8m/s、6~7m/s、4~5m/s 及 4m/s 以下；又當風速大於 6m/s 時，即開始有大量飛砂產生。

再者，當各粒徑之砂粒在起動風速為 14m/s、8m/s、7m/s、5m/s 及 4m/s 時，砂粒之起動含水率隨粒徑遞減而遞增，粒徑在 0.84~2mm、0.42~0.84mm、0.25~0.42mm、0.15~0.25mm 及 0.15mm 以下之砂粒，其起動含水率分別約為 0.475%、0.730%、2.045%、2.115% 及 2.255%；又粒徑 0.42~0.84mm、0.25~0.42mm、0.15~0.25mm 及 0.15mm 以下之砂粒，當風速提升至 10m/s 時，其起動含水率分別約為 2.485%、2.755%、2.80% 及 2.855%；上述研究成果將可作為爾後研擬飛砂防治對策及預警機制建立之參考依據。

參考文獻

1. 朱佳仁(2006)，「風工程概論」，科技圖書，第 241-243 頁。
2. 林信輝(1979)，「砂體含水率與飛砂量之關係試驗」，中華水土保持學報，第十卷，第二期，第 173-193 頁。
3. 黃隆明(2010)，「飛砂移動機制之風洞試驗」，國立中興大學農林學報，第五十九卷，第三期，第 199-213 頁。
4. 黃隆明(2011)，「台灣中部河口飛砂及揚塵之調查與研究」，水土保持學報，第四十三卷，第三期，第 259-276 頁。
5. 游繁結(1987)，「台灣西海岸砂粒性狀之探討」，水土保持學報第十九卷，第 37-50 頁。
6. 萬鑫森(1987)，「基礎土壤物理學」，國立編譯館，第 59-70 頁。
7. Bagnold, R.A. (1941), *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, Reprinty by Chapman and Hall, p.265.
8. Bagnold, R.A. (1977), "Wind Tunnel Observation", JAPASA.
9. Blake, G.R. & K.H. Hartge (1986), particle density, In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA. Madison, WI, USA, p.377-381.
10. Gee G.W. & J.w. Bauder (1986), Particle-size Analysis, In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA. Madison, WI, USA, p.383-385.

11. Johnson, J.W. (1965), "Sand Movement on Costal Dunes" , Proc, Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, US Dept. Agri. Misc. Publ, 970:747-755.
12. Walter H. Gardner (1986), Water Content, In A. Klute (ed.) Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA. Madison, WI, USA, p.493-541.
13. 行政院環保署環境檢驗所(2013)「土壤採樣法」,
http://www.niea.gov.tw/analysis/method/m_n_1.asp?m_niea=S102.62B。

103 年 05 月 22 日收稿
103 年 05 月 23 日修改
103 年 06 月 24 日接受

水土保持學報 47 (1): 1259–1272 (2015)

Journal of Soil and Water Conservation, 47 (1): 1259–1272 (2015)

