

草本植物在強風下之破壞行為評估

Assessment of Herbaceous Plant Failure in High Winds

國立台灣大學生物環境系統工程學系
助理教授

張 倉 榮

Tsang-Jung Chang

國立台灣大學生物環境系統工程學系
碩士

李 昌 益

Chung-Yi Li

摘 要

本研究藉由基本力學理論進行植物二質量系統破壞模式之發展，探討草本植物在強風下之破壞行為，瞭解草本植物因強風造成莖部伏倒、根部伏倒及連根拔起等之原因，以改良目前廣泛使用的植物懸臂樑力學系統僅能模擬莖部伏倒之限制。本研究利用模式計算強風下草本植物之彎曲力矩，評估彎曲力矩與莖部及根部破壞力矩，求得植物破壞時之風速及部位。伏倒過程中植物之特性及土壤性質影響最鉅，包括植物之受風面積、重心高度、振動頻率、枝幹數量、莖部直徑、莖部厚度、莖部破壞應力、根盤直徑、根盤深度、土壤基本性質及根盤系統質量等；另外氣象條件亦是影響伏倒之原因，尤其是風速與降雨這兩項重要因子。本研究並與前人之水稻風洞實驗結果進行比較與驗證，其平均相對誤差在 16% 以下。本研究以最常見之草本植物一小麥及水稻為例，分別探討並比較其破壞時之風速及部位。就風速而言，小麥及水稻破壞時之風速各為 21 m s^{-1} 及 18 m s^{-1} 。而就其破壞部位而言，水稻之莖部破壞力矩比小麥高出許多，主要原因是水稻之底部莖部較為粗壯所致；水稻大多由根部先行破壞之原因是其土壤含水量較高，造成土壤剪應力降低所致。

關鍵詞：植物破壞，伏倒，強風，草本植物，小麥，水稻。

ABSTRACT

A mechanical model based on a two-mass system for herbaceous plants is developed for assessment of plant failure in high winds. The model enables us to investigate the possible plant failure modes like stem failure, root failure, and uprooting, and is better than the commonly used plant failure model in terms of a cantilever beam system. The model is used to investigate the behavior of isolated herbaceous plants in high winds by

calculating base bending moments. The result is then used in stem base and root failure criteria to estimate failure wind speeds. The plants and soil parameters are of great importance in lodging process, including the plant's ear area, shoot's center of gravity height, dry natural frequency, plant's shoot number, stem base radius, wall thickness, failure yield stress, root plate diameter, structural rooting depth, soil characteristic and root-soil plate mass. The meteorological factors influencing lodging are wind speeds and rainfalls. The simulated results show that the relative error is within 16%, which is in good agreement with the published experimental data of rice failure in wind tunnels. The present research further conducts a series of assessment for commonly seen herbaceous plants such as wheat and rice. It is concluded that the failure wind speeds for wheat and rice are 21 and 18 m s⁻¹, respectively. The stem bending moment of rice is higher than that of wheat because the rice stem is sturdier. The root failure of rice, however, may occur since the higher soil water content in rice field causes the soil shearing stress to be reduced.

Keywords: Plant failure, Lodging, High winds, Herbaceous plants, Wheat, Rice.

一、前言

台灣地區受自然環境及氣候之影響，天災頻繁，平均每年三次以上的颱風及多次的強風豪雨，而每次颱風及強風豪雨的襲擊都造成生命財產及植物嚴重破壞之損失。在農業作物方面，以水稻之損失最為嚴重，其破壞之方式以莖部伏倒與根部伏倒最為常見，這是降低水稻收成量之主要原因之一，且有愈來愈嚴重之趨勢。由於國內對於植物伏倒相關之研究資料不多，因此本研究之目的為透過植物破壞行為評估模式之建立與分析，以較精確之方式計算植物破壞時之風速、彎曲力矩及其破壞時的部位，以用評估植物之區域破壞損失程度。

植物伏倒(lodging)是由於偏離莖部之中心產生永久性之位移(Pinthus, 1973)。總體而論，植物伏倒以其原因而言大致可區分為三大類，包括莖部伏倒(stem failure)、根部伏倒(root failure)及連根拔起(uprooting)，而其破壞的部位不外是在莖部及根部兩處。植物遭受破壞之過程中，主要取決於植物之根莖性質及氣候狀況，破壞時由植物之弱面先行破壞。一般而言，草本植物之伏倒以莖部伏倒與根部伏倒較為常見，木本植物則以莖

部伏倒與連根拔起居多。因此，探討植物伏倒應要考慮氣候狀況、植物的力學性質及所生長區域之土壤條件等因素；氣候狀況包括風力強度、吹風持續時間、亂流變動頻率及降雨強度等；而植物及土壤參數則包括植物重心高度、自然振動頻率、莖部直徑、破壞應力、植物枝幹數量、根盤直徑、根系植入土壤深度、根盤系統質量、土壤黏土含量等。研究植物抵抗風力之能力須綜合以上之影響因子加以探討，方能掌握植物破壞之原由。

目前廣泛使用的植物懸臂樑力學系統係將植物模擬成一懸臂樑系統(谷, 1963; Coutts 及 Grace, 1994)，如圖 1 所示，假設植物為一固定端剛體支承(fixed rigid end)，破壞之行為不會在支承處發生，而僅會在懸臂樑上發生，故只能模擬莖部之伏倒破壞而無法探討根部伏倒及連根拔起之破壞行為。但實際上植物的根盤生長於土壤中，可分為深根性及淺根性，若為淺根性之植物，如草本植物或都會區街道之木本植物，其受風吹襲後容易產生根部伏倒或連根拔起之破壞行為；而植物之根部如為深根性，多為熱帶森林中之木本植物，其受風吹襲後容易產生莖部伏倒之破壞行為。由於草本植物與木本植物在莖部的

二、模式理論分析

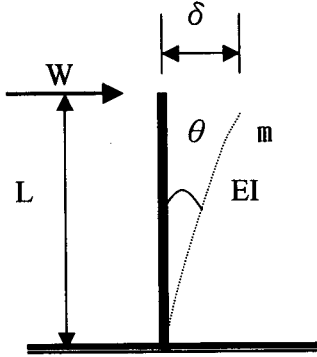


圖 1 懸臂樑力學系統示意

力學性質及根部的錨定結構有明顯的不同 (Niklas, 1992; Coutts 及 Grace, 1994), 很難在有限的章節中將之一併討論, 因此本研究以草本植物為研究對象, 改良植物懸臂樑力學系統僅能模擬莖部伏倒之限制, 採用植物二質量系統之概念 (Baker, 1995), 將草本植物區分為上部之冠部系統及下部之根部土壤系統, 兩質量系統間以一無重量之彈性莖連接, 並假設影響伏倒之力學因素取決於風所引致之彎曲力矩, 而非剪力, 再依據草本植物之根、莖、土壤性質參數來發展草本植物破壞行為評估模式, 計算其伏倒之可能性。同時針對風速探討其是否會對根莖部位造成伏倒, 然後再加以比較彎曲力矩之關係, 並由此來預測評估植物伏倒之風速及部位。

本研究以最常見之草本植物一小麥及水稻為例, 分別探討並比較其破壞時之風速及部位。本研究並將模式計算之數據與現有之風洞實驗數據(米高, 1968)加以比較, 以求將誤差降至最低。本研究之目的有:

1. 由基本力學理論進行植物二質量系統破壞模式之發展。
2. 分析造成草本植物破壞之影響因子, 由現有之實驗資料中加以比較驗證。
3. 藉由草本植物之破壞評估得知草本植物受風引致之彎曲力矩及莖部和根部之破壞力矩, 進而推估遭受風害時之破壞部位, 並得知破壞時之風速。
4. 提供植物伏倒行為之基本定量預測。

草本植物在強風下之二質量系統破壞模式, 主要之重點是針對土壤、根、莖等影響因子進行模擬考量, 從植物之性質及土壤之特性計算出根、莖伏倒之破壞力矩, 並針對不同風力計算植物伏倒之彎曲力矩, 用此來預測植物發生伏倒之位置, 同時對於同類不同品種之植物來加以比較其抵抗風力及降雨量之強度及能力。本章節旨在探討根、莖伏倒之可能發生部位, 其中植物之基本性質包括如下, 植物之受風面積、形狀阻力係數、莖之重心位置、風吹之自然振動頻率、植物莖底部之半徑、莖部之應力、植物莖幹之數量、根盤直徑大小、根盤植入土壤深度、根排土壤系統質量及土壤之剪力強度, 尤其是土壤中黏土的含量會影響植物之堅固穩定性。而植物伏倒區分為三大類, 包括有莖部伏倒、根部伏倒、連根拔起等, 而一般將其破壞分為兩處, 包括莖部破壞及根部破壞。因此, 二質量系統破壞模式包括風所引致之彎曲力矩模式、莖部破壞力矩模式及根部破壞力矩模式等三大部份構成, 將於本章第(二)、(三)及(四)節中說明。在針對本模式三大部份進行探討之前, 首先說明本模式之假設。

(一) 模式假設

植物二質量系統破壞模式為了計算方便, 做了些許假設, 而這些假設會與實際植物之基本性質產生些許之差異而造成誤差, 這些誤差須經過實驗驗證後方可證明是否在容許範圍之中, 本研究將在下一章中進行模式驗證。本節先闡明模式的假設如下:

- (1) 假設植物為一線彈性體, 且為一均質材料, 彈性係數 E 值由植物之頂端至莖底部皆相同, 慣性矩 I 值亦相同(EI 值愈大即代表愈不容易產生變形), 並且不考量非線性之破壞, 如圖 2 所示, 只考慮符合虎克定律(Hook's law)彈性階段(elastic stage)範圍以內之破壞行為; 在此階段範圍之施力若釋放掉時則其變形就會回復至原點, 不會有永久變形(permanent elongation)產生。

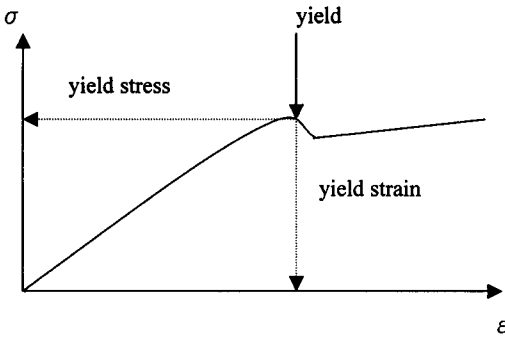


圖 2 韌性材料(草本植物)應力應變關係圖

- (2) 假設以彎矩破壞考量為準，而非剪力破壞。
- (3) 假設本研究所計算之植物為區域邊緣迎風處之植物，主要是因為區域邊緣之植物其風場較為容易計算，而區域內部之風場較為混亂而無法正確預測。

(二) 風所引致之彎曲力矩模式

圖 3 為 Baker(1995)所提出之草本植物二質量系統，此為兩質量所構成，假設上部為草本植物之冠部系統，下部為草本植物之根部土壤系統，兩質量以一無重量之彈性莖連接。圖 3 中使用兩個座標， $x-y$ 代表以根部土壤系統為原點的座標系統， $X-Y$ 代表二質量系統間之垂直與水平距離。二質量系統各部所承受之力量包括下列各項：

- (1) 植物冠部之重量以 mg 表示。
- (2) 擺動之風力作用在莖之頂端，以 P 表示。
- (3) 在地平面上 x 處，水平位移為 y 處之莖部力矩，可由 Euler Bernoulli Beam 理論得到 $EI d^2y/dx^2$ ，其中 E 為莖部彈性係數， I 代表莖部斷面積之二次彎曲力矩。
- (4) 植物冠部之慣性力以 $-md^2Y/dt^2$ 表示。
- (5) 根球質量之旋轉抵抗彎矩表示為 $k(dy/dx)_{y=0}$ ， k 為稜度抵抗彎矩，其中 k 為穀類作物所求得之常數(Crook 及 Ennos, 1993)。
- (6) 根球質量之旋轉慣性力 $Hd^2(dy/dx)/dt^2_{y=0}$ ， H 為根球之慣性彎矩。

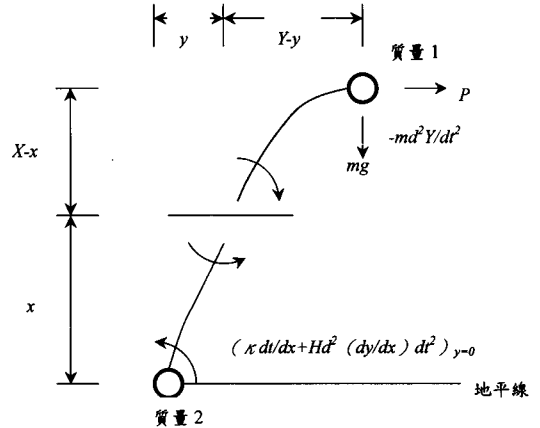


圖 3 二質量系統力學模式示意

(質量 1 為植物冠部之質量，質量 2 為植物根部之質量)

假設考慮植物上半部之力學平衡方程式可表示如下：

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = mg(Y - y) + P(X - x) - m \frac{d^2Y}{dt^2}(X - x) \dots\dots\dots(1)$$

假設風力為簡諧載重 $Pe^{j\omega t}$ ， P 為搖動之力量， ω 為其搖動頻率，二質量系統之水平距離 Y 與水平位移 y 亦為簡諧位移 $Ye^{j\omega t}$ 與 $ye^{j\omega t}$ ，其力學平衡方程式可改表示如下：

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = mg(Y - y) + P(X - x) - m\omega^2 Y(X - x) \dots\dots\dots(2)$$

此二質量系統之邊界條件為

- (a) $y = 0$ at $x = 0$
- (b) $y = Y$ at $x = X$
- (c) $EI \frac{d^2y}{dx^2} \Big|_{x=0} = k \frac{dy}{dx} - Hd^2 \left(\frac{dy}{dx} \right) / dt^2$

(2)式中之風力 P 可由下式表示

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_D \bar{V}^2 \dots\dots\dots(3)$$

其中 ρ 為空氣密度， A 為植物受風面積， C_D 為植物阻力係數， \bar{V} 為平均風速。

若彎曲力矩亦呈簡諧函數關係 $Be^{i\omega t}$ ，則可將邊界條件代入(2)式求得下式：

$$\frac{B}{PX} = \frac{(1 - \beta\omega^2)}{\alpha - (1 - \alpha + \beta)\omega^2 + (1 - \gamma)\beta\omega^4} \dots\dots\dots(4)$$

其中， ω 是 $\omega(X/g)^{0.5}$ 之無因次頻率。另外， α 、 β 及 γ 可由下三式得知

$$\alpha = \frac{\left(\frac{mgX^2}{EI}\right)^{1/2}}{\tan\left(\frac{mgX^2}{EI}\right)^{1/2}} - \frac{mgX}{k} \dots\dots\dots(5)$$

$$\beta = \frac{Hg}{kX} \dots\dots\dots(6)$$

$$\gamma = \alpha + \frac{mgX}{k} \dots\dots\dots(7)$$

由前人的實驗研究(Baker, 1995)可得知 β 值大多非常地小，其值幾乎趨近於 0，將 β 為 0 代入(4)式時，可得到底部彎曲力矩與風力兩者之關係如下：

$$\frac{B}{PX} = \frac{1}{\alpha - (1 - \alpha)\omega^2} \dots\dots\dots(8)$$

其中(8)式之無因次自然頻率解 ω_n ($\omega_n = 2\pi n_n$)，可由下式求得

$$\omega_n^2 = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \dots\dots\dots(9)$$

將(8)式配合(9)式可改寫成以下形式之二階常微分方程式

$$\frac{1}{\omega_n^2} \left(\frac{X}{g}\right) \frac{d^2B}{dt^2} + B = PX \left(\frac{1 + \omega_n^2}{\omega_n^2}\right) \dots\dots\dots(10)$$

另外，將(3)式之風力關係式代入(10)式，並增加考慮整個二質量系統的阻尼效應(damping effect)， δ 為系統之阻尼參數，則(10)式可再寫成

$$\frac{1}{\omega_n^2} \left(\frac{X}{g}\right) \frac{d^2B}{dt^2} + \frac{2\delta}{\omega_n} \left(\frac{X}{g}\right)^{1/2} \frac{dB}{dt} + B = \frac{1}{2} \rho AC_D V^2 X \left(1 + \frac{1}{\omega_n^2}\right) \dots\dots\dots(11)$$

當模式中阻尼參數 δ 值加大時，也就是植物之樹葉長得非常茂密，阻力亦加大，其振動之頻率就會變小，相對的風所引致之彎曲力矩亦會隨之變小。(11)式為二階常微分方程式，可以分離變數法解得以下之解析解 (Baker, 1995)

$$\frac{B}{\frac{1}{2} \rho AC_D \bar{V}^2 X_x} = \left[1 + \frac{g}{(2\pi n_n)^2 X_x}\right] \times \left[1 + e^{-\pi\delta} \frac{\sin(\pi/4)}{\pi/4}\right] \dots\dots\dots(12)$$

其中， X_x 為植物重心高度， n_n 為植物自然振動週期， δ 為系統之阻尼參數。

最後必須說明的是，(12)式係採用平均風速值 \bar{V} 為計算之依據，若採用瞬間最大陣風 V_g ，則須將(12)式改爲

$$\frac{B}{\frac{1}{2} \rho AC_D V_g^2 X_x} = \left[1 + \frac{g}{(2\pi n_n)^2 X_x}\right] \times \left[1 + e^{-\pi\delta} \frac{\sin(\pi/4)}{\pi/4}\right] \dots\dots\dots(13)$$

瞬間最大陣風可由平均風速與瞬間最大陣風風速兩者間之關係式來換算，本研究以 Greenway (1979) 及 Wood (1983) 對空曠的麥田所做的研究成果以求得瞬間最大陣風與平均風速之關係

$$V_g = \bar{V} \left(1 + \frac{\sigma_V}{\bar{V}} L\right) \dots\dots\dots(14)$$

其中

$$L = J_1 g_v \dots\dots\dots(15)$$

$$g_v = \sqrt{2 \ln(J_2 n_n T_1)} + 0.577 / \sqrt{2 \ln(J_2 n_n T_1)} \dots\dots(16)$$

$$J_1 = 1 - 0.1925 \left\{ (n_n^x L_v / \bar{V}) (n_n \mu)^{-1} + 0.1 \right\}^{-0.6792} \dots\dots\dots(17)$$

$$J_2 = (n_n^x L_v / \bar{V})^{-1} \left\{ 0.0066 + 0.2130 (n_n^x L_v / \bar{V})^{-1} (n_n \mu) \right\}^{-0.6543} \dots\dots\dots(18)$$

上列各式中， n_n (Hz) 為自然振動頻率， $^x L_v$ (m) 為亂流範圍， V ($m s^{-1}$) 為植物冠部中心頂部之風速， μ (秒) 為陣風週期， g_v 為 \bar{V} 之陣風係數，

T_l (秒) 為觀察時間, σ_V 為 \bar{V} 之標準偏差值。舉例說明, 當 n_n 為 1 Hz, V 為 10 m s^{-1} , xL_V 為 1 m, μ 為 0.3 s, T_l 為 3600 s, σ_V 為 5 之時, 由上列之實驗值可求得固定風速與變動風速兩者相差約 1.625 倍。

(三) 草本植物莖部之破壞力矩模式

根據材料力學原理 (Gere 等, 1984), 莖部之破壞力矩 B_S 可由圓柱體結構分析標準方程式解得, 其運算方式如下:

$$\sigma = \frac{B_S a}{I} \dots\dots\dots(19)$$

其中, σ 為莖部降伏破壞應力(yield stress), a 是莖底部外側半徑, I 代表面積的慣性矩二次力矩 $\pi(a^4 - (a-t)^4)/4$, t 為莖部厚度。因此, (19)式可改寫為下式:

$$B_S = \frac{\sigma \pi a^3}{4} \left\{ 1 - \left(\frac{a-t}{a} \right)^4 \right\} \dots\dots\dots(20)$$

σ 為張力造成之降伏破壞應力, 由圖 2 韌性材料 (草本植物) 應力應變關係, 可以觀察出韌性材料達到降伏破壞應力時, 不會馬上產生斷裂之現象, 而會產生形變, 然後慢速的斷裂, 故降伏破壞應力為較保守的應力值。

(四) 草本植物根部破壞力矩模式

根據 Crook 等 (1993) 之研究, 根之破壞力矩 B_R , 應先求解土壤之剪力強度後, 再利用根部破壞力矩方程式代入求解, 其運算方式如下:

$$B_R = k_5 S d^3 \dots\dots\dots(21)$$

其中

$$S = S_D - \frac{i}{\frac{\rho_s}{\rho_w} (f - w) l} (S_D - S_w) \dots\dots\dots(22)$$

其中 d 是代表根盤直徑, k_5 是根盤土壤系統常數, S 為土壤剪應力。土壤剪應力可由(22)式計算而得, 其中 i 為日降雨量, f 為田間容水狀況下之土壤含水量, l 為根系深度, W 為永久枯

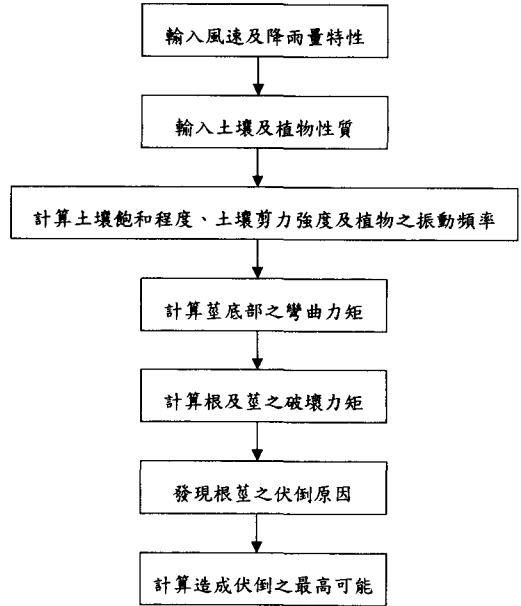


圖 4 草本植物破壞行為評估步驟

萎點之土壤含水量, ρ_s 是土壤的密度, ρ_w 是水的密度, S_D 為永久枯萎點之土壤剪應力, S_w 為田間容水狀況下之土壤剪應力。降雨量高的話土壤之剪力強度就會降低, 跟隨著根部的錨定力就會減低。另外, Griffin(1998)利用沖洗根結構之方式分析得知, k_5 取 0.43 較為合理。

(五) 破壞行為評估步驟

植物破壞行為為評估之步驟如圖 4 所示, 依據其步驟輸入植物特性參數、氣象特性參數及土壤特性參數, 再經由模式之計算後, 即可得知風所引致之彎曲應力及根、莖破壞時之力矩大小。然後將上述計算所得的風所引致之彎曲力矩、莖部破壞力矩及根部破壞力矩三者加以比較分析, 即可得知植物破壞時之風速大小與部位。以下為模式破壞部位評估之方法。

- (1) 莖部伏倒
 $B > B_S$ 且 $NB < B_R$
- (2) 根部伏倒
 $B < B_S$ 且 $NB > B_R$
- (3) 莖部與根部同時伏倒
 $B > B_S$ 且 $NB > B_R$

表 1 水稻出穗後底部彎曲力矩與風速之風洞實驗關係(米高, 1968)

出穗後天數	水稻底部之彎曲力矩(Nmm)	破壞平均風速(m s ⁻¹)	
		固定風速	瞬間陣風
0	109.76	29.4	20.8
7	108.88	28.3	20.0
14	100.65	25.7	18.2
21	88.69	22.1	15.7
28	85.95	21.2	15.0
35	84.57	21.1	14.9
42	85.26	22.4	15.8
49	77.03	20.0	14.1

表 2 水稻破壞行為實驗基本資料

Day	M (g)	Y (cm)	X_X (cm)	A (cm ²)	C_D	T (s)	n_n (Hz)
0	8.3	7	30.0	0.0018	0.20	1.04	0.97
7	8.5	7	31.6	0.0018	0.20	1.06	0.94
14	8.9	7	33.2	0.0018	0.20	1.11	0.90
21	9.1	8	35.0	0.0019	0.21	1.27	0.78
28	9.0	8	36.6	0.0019	0.21	1.28	0.78
35	8.5	8	38.2	0.0020	0.21	1.24	0.81
42	8.2	8	40.0	0.0020	0.21	1.22	0.82
49	7.6	8	41.6	0.0020	0.22	1.16	0.86

其中 B 為風所引致之莖部彎曲力矩, B_s 是莖部破壞力矩, B_R 代表根部破壞力矩, N 代表植物枝幹之數量。另外, N 值經過 Easson 等 (1993) 之調查統計分析結果, 依據不同植物其值界於 1 至 9 這個區間, 而一般在計算時都會取其標準值來代入計算, 在本研究中水稻與小麥的 N 值均取 3 來代入計算。

三、模式驗證

由於植物破壞行為之實驗研究困難度高, 故其相關文獻資料非常少, 本研究在過去兩年收集到日本學者米高 (1968) 對水稻做破壞性風洞實驗之資料。表 1 詳細分析水稻出穗天數與破壞風速、彎曲力矩之關係, 而本文利用此風洞實驗資料與模式分析計算出來之資料加以比較驗證。表 2 則為破壞性風洞實驗中水稻之各項基本性質, 植物之高度 l 為 80cm, 植物之全重 m 、上部之極端變位 Y 、重心高度 X_X 、植物受風面積 A 、阻

力係數 C_D 、振動週期 T 及振動頻率 n_n 隨著生長之天數而改變。表 2 亦可看出隨著水稻重量之增加, 植物之振動週期也跟著增加, 振動之頻率隨之減小。經由出穗天數之增加而產生影響參數之變化, 將這些參數經計算定量後, 將其代入植物破壞評估模式中, 可求得彎曲力矩及風速之關係。

將表 1 中由實驗求出水稻出穗後第 4 節彎曲力矩與風速之實測值與本模式所求出之風速與彎曲力矩之關係加以比較, 圖 5 為固定風速情形下水稻彎曲力矩之實驗值與模式數值之比較圖, 可看出實驗值與模式數值兩者相當吻合, 其平均相對誤差為 10% 以內。而圖 6 為變動風速情形下之破壞情況, 由此圖可看出變動風速下之模式值與實驗值誤差較大, 其平均相對誤差為 16%, 主要是米高 (1968) 的水稻破壞風洞實驗並無交代變動風速與其平均風速之關係, 故本研究以 Greenway (1979) 及 Wood (1983) 對空曠

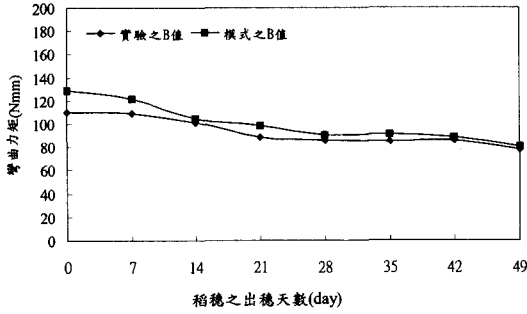


圖 5 固定風速下水稻破壞彎曲力矩之實驗值（米高，1968）與模式模擬結果之比較

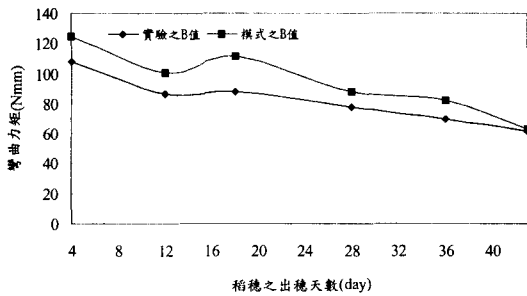


圖 6 變動風速下水稻破壞彎曲力矩之實驗值（米高，1968）與模式模擬結果之比較

的麥田所做的實際量測關係式取代之，才會引致較大之誤差。

四、結果與討論

本研究以草本植物之水稻、小麥做為草本植物在強風下之破壞行為評估的討論對象。本研究蒐集文獻中水稻與小麥破壞參數相關資料(谷，1963；米高，1968；Graham，1985；Baker，1995；Berry等，2000)，並將之整理於表3。將表3之個參數值代入模式中，可得知植物破壞時之彎曲力矩及風速大小，並用以評估植物產生破壞時之部位，求解過程分別以風所引致之彎曲力矩、莖部破壞力矩、根部破壞力矩、破壞風速等。

(一) 小麥破壞行為評估

小麥因風所引致之彎曲力矩 B 值的計算，係依據表3中植物參數之統計平均值及(12)式之分析運算，即可解得風所引致之彎曲力矩值。經過

表 3 小麥及水稻各參數統計平均值

	小麥	水稻
B 值之參數		
ρ (kgm^{-3})	1.226	1.226
A (m^2)	0.001	0.00225
C_D	0.3	0.25
V (ms^{-1})	0-30	0-30
X_x (m)	0.5	0.45
n_n (Hz)	1	1.1
δ (cm)	0.05	0.05
B_S 值之參數		
σ (Mpa)	40	30
a (mm)	1.5	2.25
t (mm)	0.5	0.5
B_R 值之參數		
f (gg^{-1})	0.27	0.27
w (gg^{-1})	0.15	0.15
S_D (Nmm^{-2})	51	51
S_w (Nmm^{-2})	6	6
i (mm)	3	5
l (mm)	30	30
ρ_s (gcm^{-3})	1.4	1.4
ρ_w (gcm^{-3})	1	1
k_5	0.43	0.43
d (mm)	35	35

運算分析之結果，風所引致之彎曲力矩會隨著風速增加而變大，在風速 30 m s^{-1} 時之莖部彎曲力矩為 126 Nmm ，而根部彎曲力矩為 377 Nmm 。

莖之破壞力矩 B_S 的計算可依據表3中植物參數之統計平均值代入(20)式計算而得，其值為 64 Nmm 。根之破壞力矩 B_R 之計算，亦是以表3中植物參數之統計平均值代入(21)式計算而得，其值為 516 Nmm 。

小麥破壞行為評估，經由上列小麥之彎曲力矩、莖部之破壞力矩、根部之破壞力矩之分析計算結果，即可得知圖7風力與小麥彎曲力矩及莖之破壞力矩 B_S 與根之破壞力矩 B_R 之關係圖。由圖中可看出當小麥達到莖部破壞時 ($B_S=64 \text{ Nmm}$)，其對應風速為 21 m s^{-1} ；同理若達到根部破壞 ($B_R=516 \text{ Nmm}$)，其對應風速為 35 m s^{-1} ，所以可得知小麥是由莖部先行破壞。

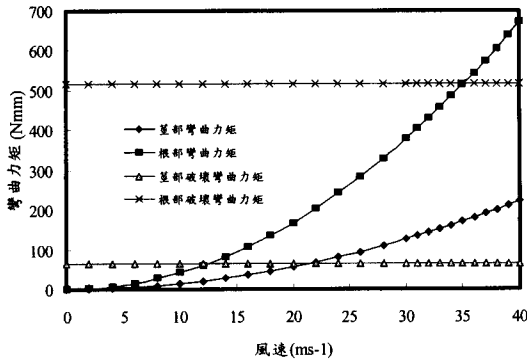


圖 7 小麥之破壞彎曲力矩與破壞風速之關係

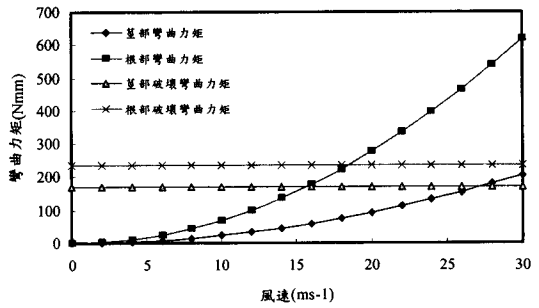


圖 8 水稻之破壞彎曲力矩與破壞風速之關係

(二) 水稻破壞行為評估

水稻因風所引致之彎曲力矩 B 的計算亦與小麥類似，依據表 3 及(12)式之分析運算可得。再將表 3 中植物參數之統計平均值代入(20)式及(21)式，可得水稻莖部破壞力矩 B_S 與根部破壞力矩 B_R ，各為 170 Nmm 與 234 Nmm。

圖 8 為風力與水稻彎曲力矩及莖破壞力矩 B_S 與根破壞力矩 B_R 之關係圖，由圖中可看出水稻莖部發生破壞時，其對應風速為 27 m s^{-1} ；而水稻根部達到破壞時，其對應風速為 18 m s^{-1} 。因此可得知水稻是先由根部破壞，其破壞風速為 18 ms^{-1} 。

五、結 論

由以上之分析計算與結果比較，可得知下列幾項結論

1. 就莖之破壞力矩(B_S)而言，以本研究所設定之參數值，小麥之 B_S 為 64 Nmm，而水稻之 B_S 為 170 Nmm，比小麥之 B_S 高出 2 至 3 倍。以小麥及水稻之根莖比較的話，水稻之莖部破壞力矩比小麥的高出許多。
2. 根之破壞力矩需由當地之土壤條件而定，以本研究所設定之參數值，如以含水量較低之土壤參數計算，因土壤較為堅硬，根部之抓地力就會比較強，所以根部破壞力矩就會比較大。就生長環境之條件，水稻生長之土壤其含水量較高且較為濕軟，所以在相同風速之下，水稻會比小麥先行由根部破壞。

3. 就強風所引致之彎曲力矩而言，在相同風速下，水稻之彎曲力矩較小麥之彎曲力矩強大，主要是受限於植物之受風面積、形狀係數及振動頻率之影響。因為水稻莖部較為粗大，所以在相同風速及土壤條件下，小麥要水稻比先行破壞。小麥是由莖部先行破壞伏倒，水稻因為其生長在含水量高之土壤中，所以其根盤系統之強度較低，其破壞時就會由根部先行破壞。
4. 本研究假設草本植物為一線彈性體，只探討植物線性變化範圍以內之行為，而不去考慮非線性變化階段之受力破壞行為。實際上植物之破壞為一非線性之破壞，但植物的非線性破壞模式之發展極為複雜，目前尚無研究能完整解決，往後能針對此課題做更深入之探討。
5. 本研究所計算之草本植物為區域邊緣迎風處之植物，往後能針對區域內之植物破壞行為進行研究。

謝 誌

本文研究期間承蒙國立台灣大學研究發展委員會經費補助，使得研究得以順利完成，僅致謝忱。

參考文獻

- 谷信輝 (1963)，耕地風相關之研究，農業技術研究所報告，A(物理統計)第 10 號，東京，日本，42-51。
- 米高信雄 (1968)，水稻之伏倒與損害之發生機構相關研究報告，農業技術研究所報告，A(物

- 理統計)第 15 號, 東京, 日本, 1-156。
- Baker, C. J. (1995). The development of a theoretical model for the windthrow of plants. *J. Theoretical Biology*. 175, 355-372.
- Berry, P. M., Griffin, J. M., Sylvester-Bradley, R., Scott, R. K., Spink, J. H., Baker, C. J. and Clare, R. W. (2000). Controlling plant form through husbandry to minimise lodging in wheat. *Field Crops Research*. 67, 59-81.
- Coutts, M. and Grace, J.(eds) (1994). *Wind on Trees*. Cambridge: Cambridge University Press, UK.
- Crook, M. J. and Ennos, A. R. (1993). The mechanics of root lodging in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Experimental Botany*. 44, 1219-1224.
- Easson, D. L., White, E. M. and Pickles, S. J. (1993). The effects of weather, seed rate and cultivar on lodging and yield in winter wheat. *J. Agric. Sci. Cambridge*. 121, 145-156.
- Gere, J. M., Timoshenko, S. P. (1984). *Mechanics of Materials*. Second SI Edition, Van Nostrand Reinhold Company Ltd, USA.
- Greenway, M. (1979). An analytical approach to wind velocity gust factors. *J. Ind. Aerodyn*. 5, 61-91.
- Graham, J. (1985). Crop lodging in British wheats and barleys. Ph. D. Thesis, University of Reading, UK.
- Griffin, J. M. (1998). "Assessing lodging risk in winter wheat". Ph. D. Thesis, University of Nottingham, UK.
- Niklas, K. J. (1992). *Plant Biomechanics*. The University of Chicago Press, Chicago, USA.
- Pinthus, M. J. (1973). Lodging in wheat, barley and oats: the phenomenon, its causes and preventative measures. *Adv. Agron*. 25, 209-263.
- Wood, C. (1983). A simplified calculation method for gust factors. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 12, 385-387.

收稿日期：民國 90 年 8 月 3 日
修正日期：民國 90 年 11 月 5 日
接受日期：民國 90 年 11 月 8 日