

# 樹木之抗風力與臨界風速

◎林業試驗所(退休)·黃彥三 (yansanhuang@ntu.edu.tw)

◎林業試驗所森林化學組·許富蘭

◎林業試驗所森林利用組·李金梅

由於地球暖化造成氣候變遷，我們所處之亞熱帶地區，颱風的頻度與強度可能增加，這將增加對樹木的危害，同時也威脅到人們生命財產的安全。事實上，公園或道路旁常見樹幹呈空心狀態之老樹或巨木，其抗風能力或有不足之疑慮，可透過補強或伐除等措施加以改善，但因民眾環保觀念增強，而往往傾向於保存樹木，不伐倒樹木。其實，合理而可行的作法應是結合工程人員與樹藝師的專業技術，以達到經濟有效的風險管理。

## 樹木抗風能力之評估

風力為造成樹木受損的主要外力。風力作用在樹冠及樹幹上，一般而言，作用於樹幹之風力遠小於作用在樹冠，因此，通常僅考慮風力作用於樹冠即可。假設樹冠靜風的迎風面投影面積為 $A_c$ ，風速為 $V$ ，則作用於樹冠的風力( $F_w$ )，可以下式表示

$$F_w = 0.5C_w A_c \rho V^2 \quad (1)$$

式中 $\rho$ 為空氣密度(常溫時約 $1.2\text{kg/m}^3$ )， $C_w$ 為風阻係數。其中，樹幹之 $C_w$ 可視為1；而樹冠之 $C_w$ 則非定值。因樹枝及樹葉具可撓的柔軟性，故當風力增大時，樹冠的風帆面積變小，但樹冠的迎風面投影面積( $A_c$ )係指靜風時的面積，故 $C_w$ 之值會隨風速之增加而減小，且隨樹種而異，一般而言是小於1，在12

級颶風(34m/s)時之 $C_w$ 值可略估為0.3。由上式可知，風力與風速之平方成正比。

樹木因風力所造成的破壞可分為幹折(含枝折)與根拔倒伏(圖1)兩大類，其中，幹折又可分為由風力彎矩造成的彎曲破壞(圖2)與由風力扭矩所造成的扭曲破壞(圖3)兩種，樹木對幹折的抵抗力取決於生材抗彎強度、剪斷強度及樹幹直徑等因素。樹木對根拔的抵抗力決定在根盤的強度，而根盤的強度則決定於根盤的大小及土壤的剪斷強度。根盤半徑愈大或土



圖1 樹木在颶風下的根拔倒伏。(黃彥三 攝)



圖2 樹木之彎曲破斷。(黃彥三 攝) (a)幹折 (b)枝折



圖3 樹木之扭曲破斷-幹折。  
(取自<https://www.researchgate.net/publication/293014719>)

壤剪斷強度愈大，則樹木對根拔的抵抗力也愈大。設風力作用在樹冠中心，如圖4(a)所示，風力彎矩( $Mb$ )與距離樹冠中心之高度( $h$ )成正比，故在距離高度為 $h$ 的斷面，其所能承受的最大風力-即破斷風力( $F_w$ max)，可依下式表示

$$F_w \max = \frac{\pi R^3 MOR}{4h} \quad (2)$$

上式中 $R$ 為樹幹半徑， $MOR$ 為生材破壞係數。由公式(2)可見樹木發生彎曲破斷時之風力有隨破壞係數之增大而增加之趨勢，並

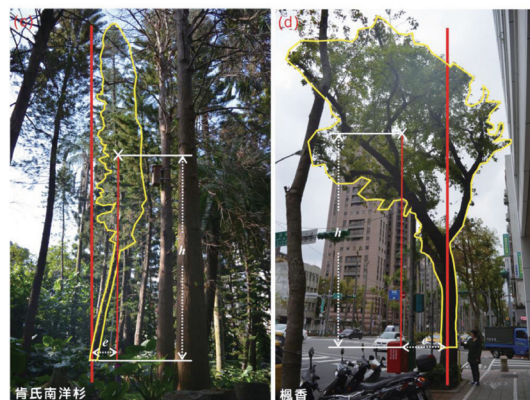
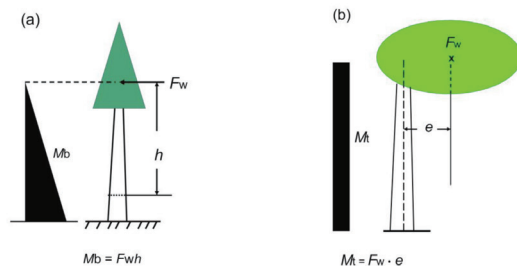


圖 4 樹幹之風力彎矩(a)及扭矩(b)示意圖，(c)和(d)為實測圖； $F_w$ ：風力， $Mb$ ：風力彎矩， $h$ ：距離樹冠中心的高度， $Mt$ ：風力扭矩， $e$ ：偏心距。(黃彥三 繪，李金梅 攝)

與樹幹半徑的立方成正比，且與樹冠中心高度 $h$ 成反比。

當樹冠呈現偏心，如圖4(b)所示，樹冠中心與幹軸之垂直距離-即偏心距為 $e$ ，設風力 $F_w$ 垂直作用於圖面，此時風力對樹木幹軸所產生的扭矩為 $Mt = F_w e$ ，此一扭矩在樹幹上下皆為定值，此時樹幹所能承受之最大偏心風力，可以下式表示

$$F_w \max = \frac{\pi R^3 \tau_s}{2e} \quad (3)$$

上式中 $\tau_s$ 為生材剪斷強度，其值約為破壞係數之1/8。由公式(3)可見破斷風力有隨剪斷強度之增大而增加之趨勢，並與樹幹半徑的立方成正比，且與偏心距 $e$ 成反比。

至於推算樹木抵抗造成根拔的最大風力，在理論上雖可利用根盤半徑與土壤剪斷強

度求得，但因根盤半徑與可靠之土壤剪斷強度皆不易取得，故在實用上有其難度。所幸，造成根拔之最大風力，可藉拉樹試驗(圖5)獲得之根拔最大彎矩( $M_R$ )加以推定，以下式表示

$$F_w \max = \frac{M_R}{h_B} \quad (4)$$

上式中 $h_B$ 為樹冠中心至幹基之高度，由公式(4)可見最大風力與 $h_B$ 成反比。式中之 $M_R$ 可以破壞試驗方式求得，或在進行拉樹試驗時，在幹基裝設傾斜角測定器，以非破壞試驗方式測定幹基產生 $0.25^\circ$  傾斜角時的拉力彎矩( $M_{0.25}$ )，利用公式(5)的經驗式來推算 $M_R$ 。

$$M_R \approx 2.5M_{0.25} \quad (5)$$

### 臨界風速之推算

臨界風速( $V_{cri}$ )係指使樹木發生破壞的最低風速。如上所述，樹木因暴風所造成的破壞可分為彎曲破壞、扭曲破壞與根拔倒伏三種，故臨界風速亦可分為彎曲破壞臨界風速( $V_{criB}$ )、扭曲破壞臨界風速( $V_{criT}$ )與根拔臨界風速( $V_{criR}$ )三種。其中彎曲破壞臨界風速可結合(1)式與(2)式，而以下式求出

$$V_{criB} = \sqrt{\frac{\pi R^3 MOR}{2C_w A_c h \rho}} \quad (6)$$

上式中 $A_c$ 為樹冠面積，公式(6)可知，若將 $C_w$ 與 $\rho$ 視為定值，則 $V_{criB}$ 隨抗彎強度( $MOR$ )與樹幹半徑 $R$ 之增加而增大，隨樹冠面積與樹冠中心高度之增大而減小。



圖5 拉樹試驗實況。(許富蘭 攝)

扭曲破壞臨界風速可結合(1)式與(3)式，而以下式求出

$$V_{criT} = \sqrt{\frac{\pi R^3 \tau_s}{C_w A_c e \rho}} \quad (7)$$

由上式可知， $V_{criT}$ 隨 $R$ 與 $\tau_s$ 之增大而增大，隨樹冠面積與 $e$ 之增大而減小。

為計算樹木之彎曲破壞臨界風速及扭曲破壞臨界風速—以肯氏南洋杉(圖4c)與楓香(圖4d)為例—分別量測2樹之基本資料，並將計算結果彙整如表1：肯氏南洋杉之彎曲破壞臨界風速及扭曲破壞臨界風速分別為91與137 m/sec；楓香之彎曲破壞臨界風速及扭曲破壞臨界風速分別為123與133 m/sec。此二計算例顯示扭曲破壞較彎曲破壞不易發生。另一方面彎曲破壞臨界風速亦相當大，其原因在高度( $h$ )與樹冠面積( $A_c$ )相對較小，而樹冠面積較小則與行道樹及公園樹木常被修枝，造成風阻減小有關。

另一方面，根拔臨界風速可結合(1)式與(4)(5)式，而以下式求出



表1 肯氏南洋杉與楓香之風力彎矩及扭矩彎矩之計算例

樹種	$H$ (m)	$R$ (m)	$MOR$ (MPa)	$\tau_s$ (MPa)	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	$e$ (m)	$h$ (m)	$V_{criB}$ (m/s)	$V_{criT}$ (m/s)
肯氏南洋杉	14	0.175	33.6	4.2	12	0.86	7.9	91	137
楓香	11	0.265	31.2	3.9	26	1.37	6.4	123	133

$$V_{criR} = \sqrt{\frac{2M_R}{C_w A_c h_B \rho}} \approx \sqrt{\frac{5M_{0.25}}{C_w A_c h_B \rho}} \quad (8)$$

由上式可知， $V_{criR}$ 隨 $M_R$ 之增大而增大，隨 $h_B$ 之增大而減小。

以筆者等對香楠(樹冠面積27.6 m<sup>2</sup>、樹冠中心至幹基高度9.4 m)進行根盤強度試驗之結果為例，在拉樹試驗傾斜角0.25°時，其拉力彎矩為17.3 KNm，帶入公式(8)，可得根拔臨界風速為30.2 m/sec。

透過上述計算例與測試例的結果，我們可以獲得“行道樹及公園樹木的根盤強度較弱”之初步概念。此一現象可由歷次颱風來襲時發現行道樹及公園樹木的破損大部分來自根拔，獲得佐證。

臨界風速應以上述三種風速中最低者作為破壞認定的標準。但樹冠若無明顯偏心則可排除扭曲破壞情況之發生，亦即不考慮臨界風速 $V_{criT}$ 。但一般現實情況通常是未能進行拉樹試驗，而僅考慮因彎曲破壞而造成的幹折破斷。從以上各公式看來，無論是破斷風力或臨界風速，均僅與木材強度性質、土壤剪斷強度、根盤大小、樹高、直徑及樹冠面積等有關，但均與彈性係數無關。

### 危險樹木判斷之誤謬案例

上述有關樹木之抗風力與臨界風速之公式與推算，可以在危險樹木判斷時有具體的

依據。然而，在沒有嚴謹的評估的情況下，往往有誇大或錯誤的結果出現，以下僅提供2案例，供大家引以為鑑。

其一為日本北海道大學研究團隊為了解北海道區域之楊樹在颶風下的抵抗力，曾借助樹木醫之專業以目視法及鑽孔阻抗儀(resistograph)進行調查，診斷出其中12株楊樹(胸徑85~123 cm，樹高21~30 m，殘存壁厚為8~20 cm)在颶風下可能會破斷倒伏，且可能破斷之高度為0.6~1.5 m。為驗證樹木醫診斷危木之正確性程度，該研究團隊於2005年，將此12株楊樹砍伐，取下可能破壞位置之樹幹圓盤，以數位相機拍下斷面之空心及殘存壁厚，再以數值分析法精確計算不規則斷面之斷面係數。同時取出正常木材，測得生材之抗彎強度及壓縮強度，以計算其破壞彎矩。再利用測得之樹冠側面投影面積與中心高度，進而以類似公式(6)反推樹幹所能承受之臨界風速。測試結果顯示，與實心樹幹相較，空心樹幹之斷面係數減少率約36~56%，臨界風速範圍為32~78 m/sec，其中僅3株臨界風速約32~33 m/sec，略小於12級颶風之風速34 m/sec，可視為危險樹木。由此可見，本案樹木醫對危木診斷之準確率僅約25%，意即預測過於誇大。在此，筆者建議有關單位應更客觀地看待評估結果，並聽取多方意見。上述楊樹若係實木而無空心，則臨界風速將增加25~50%。一般言之，樹木醫對樹病之診斷與處理技術具有較佳之學識及經驗，但較缺

乏樹木生物力學及工程學的素養，遇到颱風來襲時，針對樹木是否幹折或根拔等問題較難有正確的判斷力。

另一個有關樹木幹折破斷之臨界風速案例是哈佛研究團隊Viroet等人發表“樹木斷裂與其性質—高度、直徑、彈性等無關”及“風速達到42 m/sec，幾乎所有樹木都會斷裂”等錯誤之論述，且此成果已獲國內研究人員參考引用。筆者(黃)對此甚感驚訝，經詳閱原文後，得知此文係法國國立科學研究中心(CNRS)研究團隊Viroet等5人於美國物理學會出版的物理學期刊Physical Review E(Feb. 2016)所發表，Viroet等人利用材料力學及破壞力學之原理，誘導臨界風速計算式，此觀念雖屬創新，但他們在重要的參數-破斷韌性(K1c)-所用之數據 $1.0\text{MPam}^{1/2}$ 是從參考書中的不同參數刻意拼湊而來的，亦即為人為加工之假數據。且該論文以格利菲斯(1921)就極小規格(直徑為數micron，micro-scale)的玻璃纖維的觀察結果應用在大規格(macro-scale)的樹幹上，根本不符合破壞力學在木材科學上的實証結果。該論文目的只是為解釋法國一針葉樹(松樹)林地和一闊葉樹(橡樹)林地受颶風侵襲的受損情況，卻以山毛櫸乾燥材(樹木應用生材才對)之直圓棒為試材，假定樹枝及樹葉在颶風中均已脫落，風力僅平均作用在圓棒(假想樹幹)上。以這樣偏離實際的模式，來誘導臨界風速公式，必然獲致不合理的結果(即臨界風速與樹木性質、直徑、高度無關之謬論)。這個研究可說是先射箭後畫標靶，筆者曾兩度以e-mail向Viroet提出指摘，Viroet亦坦然承認缺失。難怪該論文亦引起Gardiner等十八位來自七個國家研究機構(含法國)的著名

樹木生物力學學者的強力批判，此十八位學者具名發文反駁表示“從我們的經驗及試驗數據，皆無法支持Viroet等人於本篇的假說，且Viroet等人使用的理論不符合樹木生物力學”，該文可說是一篇誤導學術界及讀者的謬論。由於近年來國內學術界發生不少被質疑為假論文的事件，在此更期盼國內不熟習樹木生物力學的研究者勿僅憑該篇不當論文的摘要，做出錯誤判斷甚或推廣，以致誤導社會大眾。

## 樹木之抗風力與臨界風速之重要性

近來，颱風對公園及道路兩旁的樹木所造成的損害愈趨嚴重，樹木的風險管理亦愈受關切與重視。國外有許多類似例子，如德國之專家學者從工程學的角度，將超過4,800株的拉樹試驗資料，建立12級颶風為基準的靜態整體評估法SIA(Static integrated assessment)及靜態整體法SIM(Static integrated method)樹木抗風能力評估系統。另德國著名樹木力學學者Mattheck則以樹木生長應力為出發點，藉漫畫圖說方式來呈現樹木肢體語言，以生動有趣的方式介紹樹體的破斷機制，有助於危險樹木的判定；Mattheck更依樹木外觀評估法VTA(Visual tree assessment)於野外實地觀察逾千株腐朽中空樹幹之破斷狀況，並倡導以殘留壁厚(t)與樹幹半徑(R)的比值(t/R)低於0.3視作為危木判定之概略基準，上述成果與結論皆是我們建立樹木風險管理系統時的重要參考。由於風是樹木損害的重要因子，本文從樹木生物力學之觀點，探討樹木之抗風能力，進而推算造成樹木破斷的臨界風速，供樹木風險評估用，提供有志於樹木風險管理者的參考。⊗