

從樹木生物力學看樹木之安全係數、破壞及危險樹木之判定

◎林業試驗所森林利用組·黃彥三(退休研究員) ◎林業試驗所森林化學組·許富蘭

前言

樹木為多年生木本植物，終其一生固定一處無法移動，為適應環境與競爭陽光，必需藉頂芽及伸長區產生高生長。然而，若樹木僅進行高生長會使其無法承受風壓或自重而傾倒，因此，亦必須利用莖部外周之形成層對內產生次生木質部，形成直徑生長(肥大生長)，使樹幹獲得足夠的強度來承受風壓。

經歷長久演化的結果，樹木的高生長與直徑生長間存在著巧妙的比例。樹木在面對外在動態風壓時，若某部位強度較弱，則易於此處先行破斷，而成為該樹強度的瓶頸。由於樹冠葉部行光合作用所生合成之碳水化合物及所能轉換的木質材料有限，因此樹木必須妥善運用直徑生長所產生之次生木質部，使其各部位對外在風力具相同的抗風強度(即相同的安全係數)，而不致浪費其有限的資源(木材)，使達充分的經濟效益。此概念可簡要表示如圖1，樹木上至樹冠下至根盤，可視為一串承受均等荷重的鏈環，亦即樹幹上下各部位及根盤對外在動態風壓具有相等的抗風強度。

早於西元1893年，德國森林學家Metzger發現，雲杉呈尖梢狀之樹幹對風壓受均勻的表面彎曲應力，此一尖梢外型可視為樹木生物力學上最適化設計。其力學關係如圖2所示：假設有一風力(F)作用於樹冠中心，以此荷重中心為零點往下任意垂直

高度h處之樹幹直徑為D，則該處之斷面係數為 $\pi D^3/32$ ，且承受有 $F \times h$ 之風力彎矩。由於樹幹上下各部位之表面最大彎曲應力(σ_0)相同，依照公式一所示，當 σ_0 為一定值，則有 $h \sim D^3$ 的關係，此即為「均等應力假說」(constant stress hypothesis)的闡述。

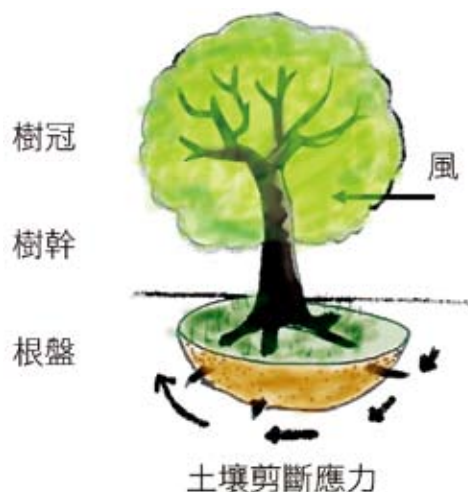


圖1 樹木從樹冠至根盤可視為一串承受均等荷重的鏈環 (許富蘭 製圖)

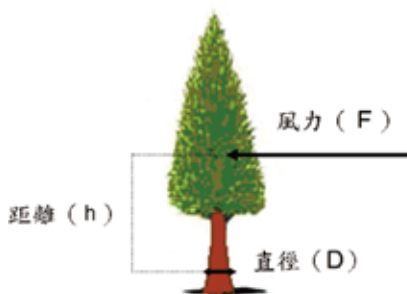


圖2 樹幹之尖梢外型(黃彥三 製圖)

$$\sigma_0 = \frac{Fh(D/2)}{\pi D^4 / 64} = \text{constant}$$

$$h = \frac{\pi \sigma_0}{32F} D^3$$

$$h \propto D^3$$

公式一：「均等應力假說」之推導

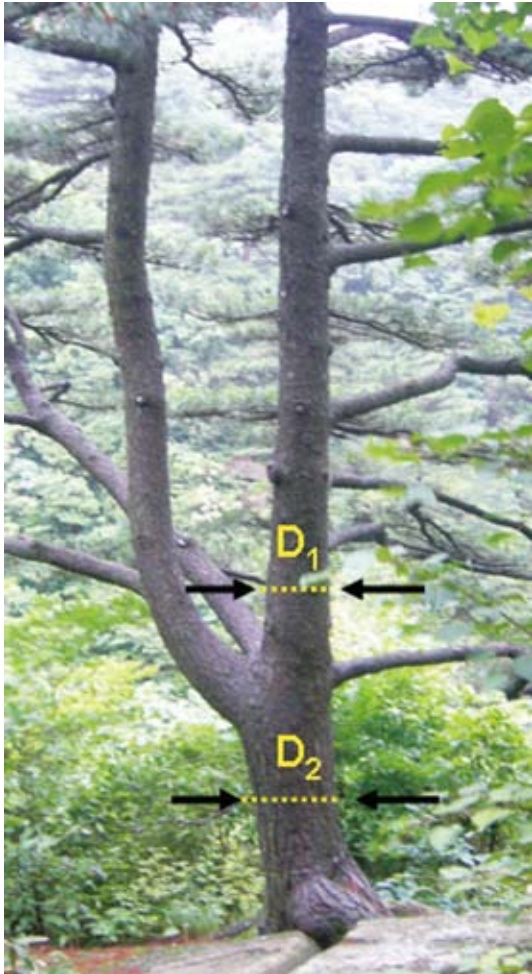


圖3 樹枝基部上下直徑急速之變化之現象符合均等應力假說(許富蘭 製圖)

圖3是我們在生活周遭很容易觀察到的景象：即樹枝下方樹幹直徑(D_2)遠大於上方之直徑(D_1)，此直徑急速變化之現象乃「均等應力假說」的實證，因為枝條上方之樹幹少了該枝條受風壓所引起之彎曲應力，故枝條上方樹幹所需之直徑較小。

同樣地，樹根面積亦符合「均等應力假說」，即地面的剪斷強度與剪斷表面的壓力成比例地增加，此增加可視為是剪斷表面相

互間的摩擦力隨壓力之增加而增加。以圖4為例，風的荷重由樹冠承受，再經主幹傳入土地。風下側之地面被壓縮，風上側地面被抬起，雖然風下處的剪斷強度增加而風上處減少，然而較弱側的地面幾乎必須耐受等強的應力。剪斷抵抗較小的風上側地面，雖必須靠擴張的長根來強化，但此擴張的長根在剪斷抵抗大的風下側也未必看不到。風上側的根因曝露在大的荷重，其斷面的剛性幾乎均較風下側者大。

樹木之安全係數(factor of safety, S) 及其測定方法

一構件之之安全係數乃其破壞應力(σ_{max})與設計應力(或稱承受應力， σ_0)之比值(公式二)。其中，破壞應力係由材料本身強度來決定；而設計應力則由所受的外部荷重來決定。對樹木而言，通常以樹木經年所承受的強風下，樹幹表面之最大彎曲應力為設計應力。

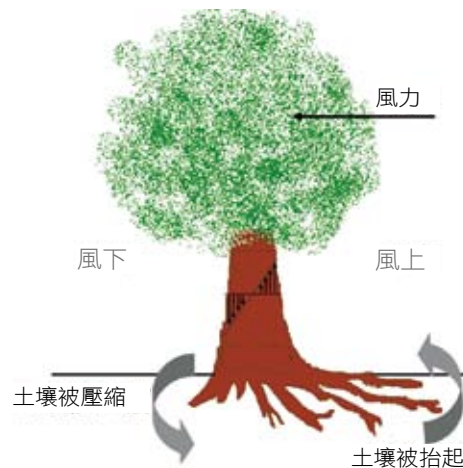


圖4 樹木根盤分佈亦符合「均等應力假說」(許富蘭 製圖)

$$S = \sigma_{\max} / \sigma_0$$

公式二：安全係數的定義

Mattheck於1993年就野外不同樹種及直徑的樹木進行試驗，結果發現樹幹的安全係數(≥4.5)略大於樹枝的安全係數(4.0)。對樹木整體而言，樹幹的安全係數略大於樹枝是十分恰當的，因為安全係數較小的樹枝在強風下會先行破壞，猶如一安全閥而發揮保護樹幹的效果，藉由樹枝折斷以減少樹冠的擋風面積，使樹幹表面的最大彎曲應力隨之減小。只要樹幹不破斷，樹木便還有生存的機會，而枝條則可視為為保全樹木而犧牲。然而樹枝與樹幹的安全係數亦不可相差過遠，否則小小的風力便使行光合作用之樹枝折斷，對樹木的生長反而不利。相對地，哺乳動物因具有移動性可以逃離危險等不適環境，因此所需之安全係數較低，約在3~4之間。若安全係數過大則骨骼太重，反而會降低逃逸速度有被獵殺的危險，因此對動物而言，體重成為計算安全係數之有效設計荷重。

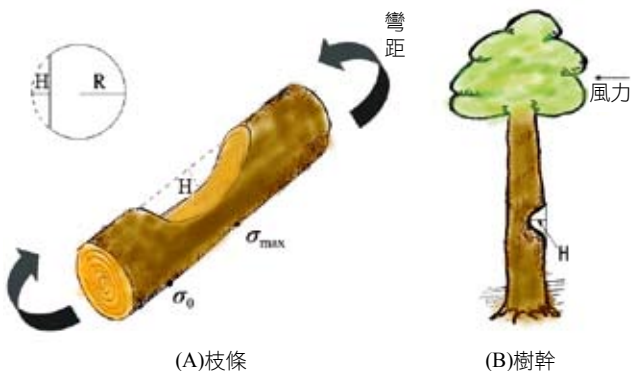


圖5 單側缺刻法求取樹木的安全係數示意圖(黃彥三 製圖)

樹木的安全係數的試驗應如何進行呢？對不同直徑及樹種的樹枝或樹幹單側以人工方式由淺至深製作不同深度的缺陷，紀錄在強風下樹體破壞時刻缺之深度，再以樑內應力之理論計算可以求得安全係數。以圖5為例，在一個半徑為R的完整枝條上(斷面係數為 $0.79 R^3$)，挖掘不同深度(H)的人工刻缺，假設當人工刻缺深度達枝條直徑之一半(斷面係數為 $0.19 R^3$)時枝條發生破壞，則安全係數 $S = 0.79 / 0.19 = 4.1$ 。不同缺刻深度(H/R)與安全係數($S = \sigma_{\max} / \sigma_0$)之關係如圖6所示。

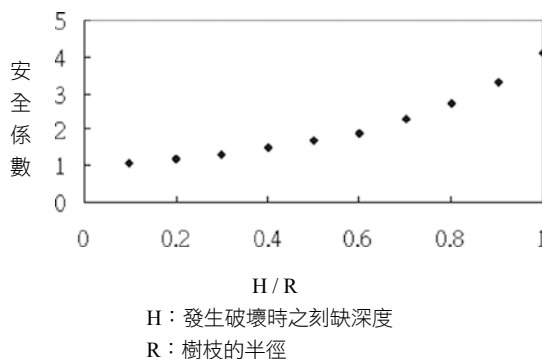


圖6 不同缺刻深度(H/R)與安全係數之關係(許富蘭 製圖)

安全係數除如上述可由單側刻缺法求得，亦有學者在樹幹外周由外往內製造人工缺陷之方法求得(圖7)。其應用如下：將半徑為



圖7 立木外周缺刻法求取樹木的安全係數示意圖(黃彥三 製圖)

R的樹幹由外逐漸向內削細，假設樹幹在半徑減至 R_1 時(斷面係數 $0.79 R_1^3$)受強風而折斷，且樹幹之安全係數為4.5，則可推知在 R_1 達0.61 R時，樹幹會發生破壞($R_1/R=1/4.5^{1/3}=0.61$)。

樹木之破壞

木材之縱向引張強度約為壓縮強度之3倍，故壓縮強度為樹幹遭受風壓時強度之瓶頸。所幸，樹幹外周通常存有縱向引張生長應力，可抵消一部分由風壓所引起樹幹外周風下側之最大彎曲壓縮應力，因而提高樹幹之抗風強度。另一方面，樹幹外周之圓周方向通常具有壓縮生長應力，此應力可防止樹幹表面因彎曲應力或霜害等所引發之開裂，藉以防止昆蟲或腐朽菌之入侵。至於徑向之引張生長應力可能引起的輪裂，則可利用髓線的抗張能力予以牽制。是故樹木在演化過程中，對外力之危害已有相當周全的設計。在經年強風下篩選的結果，樹體多具有4.5的安全係數，除非遭遇強大的颶風，樹幹是不致於輕易折斷的。

不過樹幹若因腐朽或動物之侵擾而受損，則在經常強風下仍有破斷之可能。樹幹可視為圓柱狀之垂直懸臂樑，其破斷應力主要起因於風壓所引起的樑內彎曲應力及樑內水平剪斷應力。心腐而呈中空之樹幹其斷面係數及剪斷面積較未腐朽樹幹小，故在相同的風壓下，所承受之彎曲應力及剪斷應力隨之增加。此外，此種樹幹相當於空心管柱，在承受彎曲應力時，其斷面會隨著彎矩的增大而扁平化(圖8)，使斷面係數更為減小而應力更為增加，大大增加樹幹破斷的危險。

都市行道樹生長空間有限，樹根生長往

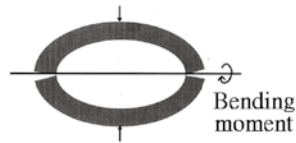


圖8 空心樹幹因受力而壓扁化(黃彥三 製圖)

往受限於各種道路況，一旦樹木根盤強度不足以承受樹冠風壓所產生的彎矩時，則有發生根拔的危險。根據德國學者對風倒木自然臨界點的野外實地調查結果顯示，根拔木根盤直徑(D)有隨樹幹直徑(d)之增大而增大的趨勢，例如當d分別為5, 10, 20, 30, 40, 50cm時，D分別約為75, 100, 140, 150, 180, 200cm等。

此外，公園樹木或行道樹常移植自成長的樹木，此種樹木之樹根在運送前通常被截切，導致根盤直徑明顯過小，因此樹根與土壤間的保持力不足。根盤直徑不足會成為樹木抗風強度之瓶頸，颶風來襲時常發生樹木根拔而倒伏的現象(圖9)，常需以外接支架作為補強(圖10)。但長期使用支架的結果可能導致支架支點以下樹幹之直徑生長緩慢，導致支點上部直徑較下部大的外觀型態，而且一旦卸除支架後，下部樹幹易呈現抗風強度不足的情況。



圖9 根盤直徑不足成為樹木抗風強度之瓶頸，颶風來襲時常發生樹木根拔倒伏的現象(許富蘭 製圖)



圖10 根盤直徑不足時常外接支架作為補強(許富蘭 攝)

危險樹木之判定

到底樹幹空洞多大時會對樹體結構產生危害？根據德國學者對眾多樹木進行田野調查之結果顯示，關鍵在於樹幹原半徑(R)與樹幹發生孔洞後殘餘厚度(t)之比值(t/R)，而與樹木的種類或直徑大小無關。當此比值越小表示空洞越大實心部分越少。當t/R比值小於0.3時，樹木易發生破斷；當比值大於0.3，樹木仍能維持直立(圖11)，此值意味著對於一個內含空洞的樹幹而言，樹幹厚度只要仍保有半徑之30%，則樹木不會有破斷的危險。

筆者(黃)於1997年期間曾進行風折木相關之研究，其中，發生於台大校園內之杜英風折木樹幹斷面如圖12所示。斷面處扣除外

樹皮後長徑為46cm，短徑36cm；心腐中空部分長徑為33cm，短徑22cm，計算其t/R值分別為長徑0.28與短徑0.39，此值證實空洞大小已達危及樹體結構的程度。

當然，一棵樹可以容忍多大的空洞，除了透過田野調查的方式獲致答案外，亦可以透過理論解析的方式來推定。若在僅考慮彎曲應力的情況下，一個半徑為R且安全係數為4.6的樹幹，應可容忍空心部分達94%之空洞(此時剩餘厚度之斷面係數為 $0.17 R^3$ ，t/R為0.06)，樹幹於此情況下仍不會因強風而折斷。然而，此推算結果與野外實地調查之結果不符，依上述野外實地調查之結果，在t/R為0.3(空心部分達70%)之情況下，樹幹已發生折斷，而此狀態之斷面係數為 $0.6 R^3$ ，安全係數為 $S=0.79/0.6=1.32$ ，此一安全係數遠小於前面所述之4.5。由此可以推想在t/R=0.3時樹幹倒折之原因應不完全出於彎曲應力。若考慮到樑內中立面之最大水平剪斷應力(τ)，則t/R=0.3時之剪斷應力(τ_{max})與在同樣風力下實心斷面之剪斷應力(τ_0)為 $\tau_{max}/\tau_0=2.88$ ，此值可視為以剪斷應力為基準之安全係數。若t/R=0.2

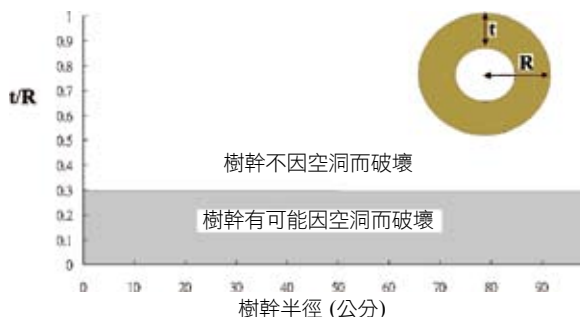


圖11 樹幹原半徑(R)及樹幹發生空洞後剩餘厚度(t)之比值(t/R)可做為危險樹木之判斷(黃彥三 製圖)

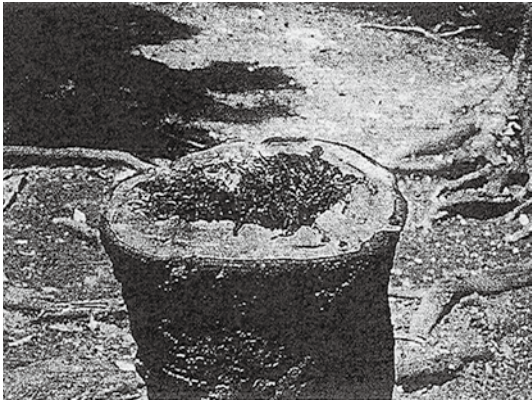


圖12 杜英風折木之斷面(黃彥三 攝)

時，則得 $\tau_{\max}/\tau_0=4.14$ ，此一數值已接近4.5。若考慮到腐朽中空之樹幹，其孔洞內部並非平滑均勻，而是呈凹凸薄厚不均狀，且空洞附近含腐朽之材質，其強度較正常材為弱，因此，有效 t/R 值可能較實測值為小，若再考慮到中空柱受彎矩下之扁平化效應，則剪斷破壞可合理視為 $t/R=0.3$ 時樹幹破斷之主因。另外常見有樹幹基部單側凹陷者，可以凹陷深度是否達樹幹半徑為危險樹木判定之基準。

公園之老樹或行道樹時有發生傾倒或折斷之意外，造成人們受到傷亡或車輛受損，故須作妥善管理以防範未然。樹幹表面之凹陷可直接加以量測，但心腐空洞程度之評估較為困難，透過樹木健康狀態外觀檢查法(visual tree assessment, VTA)、生長錐、鑽孔阻抗儀、打音法、超音波或應力波非破壞測定技術等可以協助我們有更深的了解。常用的VTA法，係透過觀察樹木外觀以判斷樹木健康狀態，一旦發現樹幹外觀有特殊之突出物，則其內部極可能已產生病灶。如圖13之樹幹中段呈一圈腫脹，可視為內部有均勻性腐朽的徵兆；若腫脹偏於一側，則腐朽孔洞



圖13 樹幹中段呈一圈腫脹可視為內部有均勻性腐朽孔洞的徵兆(黃彥三 攝)

偏於該側；若腫脹位於樹幹基部，則表示有根腐之可能。空洞周圍木質部會增生是因為樹幹產生空洞後所剩餘的部分無法承受風力等外力，需增生木材以分散應力，使達均等應力狀態。此外，樹幹外表若有突起縱線，則內部極可能發生開裂；樹木受不均等應力時，可發現受引張力側之樹皮薄且稀疏豎立，受壓縮力側樹皮厚且緊密堆疊。除了透過VTA法檢視出有病灶部分，可再配合生長錐及木材破裂強度量測儀(fractometer)檢視所取出之木條強度狀況並以顯微鏡檢測腐朽菌之侵害狀態，來評估樹木腐朽程度。

結語

樹木之安全管理在維護遊客與行人的安全是值得關注的課題。樹木安全係數與危險樹木之判定，可經由工程力學或樹木生物力學的原理加以探討，並由野外調查或試驗尋求驗證，這個領域在國內尚處於起始階段，尚待林業界持續努力。⚠