

從樹木生物力學看榕樹氣根之機能

◎林業試驗所森林利用組(退休)·黃彥三 (yansanhuang@ntu.edu.tw)

◎林業試驗所森林化學組·許富蘭

樹木終其一生固定於一處，無法移動，為適應環境與競爭陽光，必需藉由樹木的頂芽及伸長區產生高生長。目前，世界上最高的樹達112 m，而理論上樹木之最高生長高度應可達122 m。除高生長以外，就長期演化的結果，樹木亦可採取枝幹橫向擴張來爭取生長空間，榕樹便屬此類。

美國哈佛大學McMahon教授(1976)依彈性理論就樹形進行模式解析，發現樹木為使其主幹及各側枝所形成的樹冠，都能獲得充分空間吸收陽光進行光合作用，皆發展出許多避免主幹上下方樹枝互相競爭、彼此削弱抵制之機制，藉以對本身有限的資源作最經濟而有效的運用，也因此使樹枝與主幹間產生一定的角度，形成完美一致的樹形。

樹木之自我調適設計

依Mattheck之理念，樹木對環境有適應生長(Adaptive growth)之能力，基本上遵行以下五個法則：(1)懸臂最短化的原理：樹木利用縮短承重的懸臂長度，使外部彎矩最小化。長度最短化可藉樹木堅硬部分的自主彎曲(反應材)或柔軟部分的被動彎曲來達成。針葉樹在傾斜樹幹下側產生抗壓材，闊葉樹則在上側產生抗張材，此等反應材所產生的不同生長應力會使樹幹回復朝上垂直生長，呈現背地性而達成懸臂最短化的目標。(2)均等應力的原理：樹木對表面不可迴避的應力會作均一分布，表面應力在時間上呈均一分布，因此一旦產生缺陷時，不致發生缺陷應力。(3)剪斷應力最小化：樹

木之木纖維或年輪會沿著軸向或弦向的力流(Force flow)而配置。(4)木材之強度視樹木承受外力時其內部之應力分布而定：樹木之外形或木材之局部內在性質，對荷重的程度或種類能作最適化的適應。(5)樹木所遭遇不可迴避的弱點，由樹木所產生的生長應力來抵消：生長應力將可能產生破壞的危險應力加以抵消，生長應力之分布與程度是受到控制的。

樹枝之彈性自我相似性(Elastic self-similarity)

位於主幹側面之樹枝，其構造類似懸臂樑(Cantilever)，位在下方之樹枝其長度較位於上方者為長。為使長短不同的樹枝在自重下所形成的彎曲形狀相同，依McMahon之理論，由枝梢至樹枝上任意點之長度(L)與該點之直徑(D)間須有 $D \sim L^{1.5}$ 之關係，此即所謂之彈性自我相似性。由此關係得知，樹枝愈長則基部直徑愈大。其橫向伸展樹枝之長度與直徑之尖梢形變化，基本上可藉彈性自我相似性來瞭解。

樹枝之自重彎矩(Self-weight bending moment)

樹枝在與主幹之分叉點承受最大自重彎矩，相同長度之樹枝，其彎矩以樹枝呈水平伸展時為最大。公園中之榕樹其樹枝常呈接近水平狀態之伸展，其基部(分叉點)承受巨大彎矩是可想而知，一旦遭遇巨風，此基部有發生斷裂之風險。然而榕樹在長久的演化過程，已能產生適應性生長，克服此種天候逆

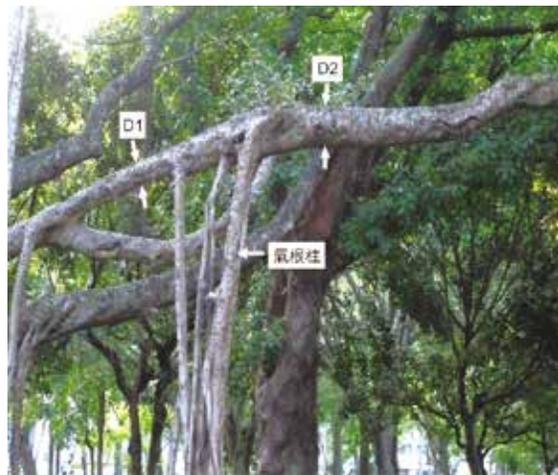


圖1 臺北市大安森林公園之榕樹 左：全貌；右：局部放大(黃彥三 攝)

境，其策略即發展氣根。

依樹木生物力學觀點，氣根便屬於一種適應性生長。現以公園榕樹氣根之生長實例作說明：圖1為臺北市大安森林公園內之一棵榕樹，其橫向伸展的樹枝下方有一垂直之氣根柱作為支撐，使其分叉基部免於因自重彎矩而斷裂。這裡可以發現一有趣現象：即氣根柱與樹幹分叉點間的側枝直徑(D1)遠較氣根柱右方自由端之直徑(D2)小，有 $D2 > D1$ 之特殊現象，此有違一般我們觀察到樹枝在基部最粗，愈末端越細的自然現象。此乃因為氣根柱支持了右側懸臂樑自由端之自重與彎矩，使得氣根柱與分叉點間之樹枝因不必承擔懸臂側枝之重量，導致其肥大生長陷於停頓，最終形成榕樹樹

枝生長之特殊外觀。樹幹在結構學上一般屬於靜定構造，但氣根柱與主幹間形成非靜定構造(Statically indeterminate structure)，如此可增加樹枝與主幹間之結構穩定性。

相同的現象如圖2在臺北市青年公園內之一株榕樹，其橫生樹枝跨越屋頂，其氣根柱盤踞屋牆，而出現與圖1相同的 $D2 > D1$ 關係；圖3為臺北市景美河濱公園之一榕樹，同樣亦有 $D2 > D1$ 之現象。可見榕樹氣根柱之生成乃其適應環境的演化產物，對增強橫向伸展樹枝的抗風能力具有莫大助益，這是榕樹在適應環境的演化過程所呈現的美妙肢體語言(Body language)。但公園內或道路旁的榕樹，其橫展樹枝所生成的下垂氣根，常因不太雅觀或造成



圖2 青年公園之榕樹氣根(黃彥三 攝)



圖3 景美河濱公園之榕樹氣根(黃彥三 攝)

行走不便，而在氣根落地前便已被清除，因而無法發揮其獨特的生理機能，橫展樹枝因而變成危險樹枝。其實，公園內不影響行人安全的榕樹，應賦予其自然產生氣根柱的環境，而這可提供為生態教育的範例。至於公園內道路旁跨越道路的榕樹或他種樹木的無氣根柱之橫展樹枝，若不切除，則宜利用鋼索一端固定在橫展樹枝之長度約中點處，另一端繫於主幹，並使鋼索與樹枝間形成約45度角，較能發揮補強作用；而大型橫展樹枝下方，應避免設置涼椅，亦應避免停車，以策安全。

均等應力假說(Constant stress hypothesis)之另類佐証

此假說為德國森林學家Metzger所提出(1893)，他發現歐洲雲杉呈尖梢狀之樹幹對風壓而產生由上而下均勻的表面彎曲應力，此一尖梢外形可視為生物力學上的最適化設計。簡而言之，以樹冠中心作為風力作用點，以此點往下任一長度 h 點之樹幹直徑設為 D ，在一定的風力與均等的應力下，則有 $h \sim D^3$ 的關係。此即均等應力假說的說明。依據此假說，樹幹或樹枝外周之形成層在受到應力時會加速對內產生新的木質部，亦即使新的年輪層加寬，促進肥大生長，藉以緩和所承受的額外應力，而達到均等應力之目的。例如依靠在圍牆或鐵欄桿上的樹幹，在樹幹與圍牆或欄桿之接觸部位，會因應力集中而加速肥大生長，而形成所謂的象腳構造，藉以消解集中之應力而達到均等應力的目的。樹幹外表受創傷時，會在傷口周圍產生隆起的癒傷組織(Callus)，藉以消解傷口所引起的應力集中現象等，這些都是均等應力假說的

佐證。然而，在移植成樹時，常因根部被切除，造成根盤保持力不足，一旦颱風來襲有根拔倒伏的危險，故常以三腳架作為補強(圖4)，而與主幹間形成非靜定構造，來增加主幹與根盤的抗風力，但腳架在樹幹上過度緊綁時，若時間持續5~6年，則可能呈現圖4右圖支架上方樹幹直徑較下方者為大之不合理的現象，此乃因支架下方樹幹原本所應承受的風力彎矩轉為支架所承受，此處樹幹變成不需要繼續肥大生長所致。而上述榕樹氣根柱所引起樹幹在支柱前後直徑變化之特異現象，顯然亦是均等應力假說之另一明證。

結語

樹木生物力學乃新興生物科學，我們可從樹木外形觀察到樹木對環境的神奇適應能力，氣根柱便是非常生動有趣的樹木肢體語言，是有價值的自然生態教學題材。⊗

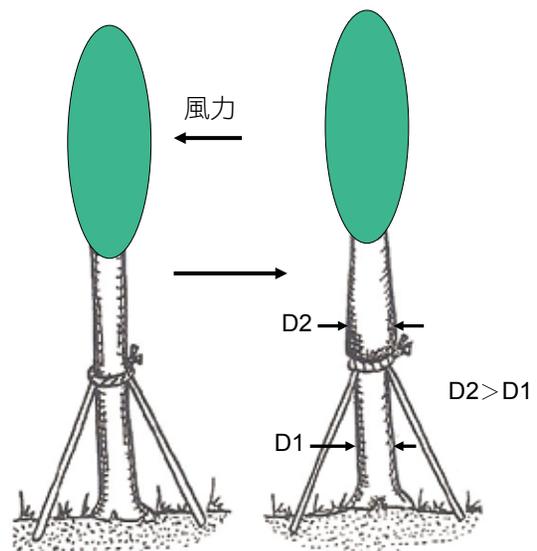


圖4 支架對樹幹生長之影響(黃彥三 製圖)