

以有限元素分析樹木枝幹結構力學的探討

彭奕森¹⁾ 劉東啟²⁾

關鍵字：枝幹結構、應力集中、髓心錐、有限元素分析、模擬

摘要：本研究以枝幹結構為對象，了解樹木降低破壞的力學策略。從三個部份進行探討：幾何，拓撲和疊層結構。分別是枝幹結構幾何改變對應力的影響、以枝幹結構為單元在主幹上的配置對主幹的影響和一般的枝條和潛伏芽枝條的年輪排列方式對應力分布的影響。建立一系列比較模型，在靜力分析下用有限元素分析法進行模擬。結果發現夾角 90 度所承受最大的應力，應力集中在鞍點上。分析結果發現在夾角特徵為 90 度所承受的應力最大 (30 度的 511%) 應力集中在鞍點上。在許多特徵中，最大的應力發生在缺乏平滑的連接，與樹木安全檢測中 "V 字夾角" 發生破壞的情況吻合。拓撲結構的模擬中，輪生層數增加使主幹的剛性提高但相對使應力集中會在輪生上側發生，這樣的好處是當風吹斷樹木時使樹體縮短小樹體，而不是從主幹的基部斷裂而造成更嚴重的危害來降低整體危險度。枝幹結構中應力集中區域所形成的薄殼圓錐狀與樹木縱剖時枝幹結構上深色區域重疊，也與枝幹腐爛後剩下的硬化髓心錐形狀相符。

前 言

枝幹結構透過許多方式使抗斷裂強度增加，本文著重在力學研究。植物獲取能量的來源和動物不同，動物的能量來源是機物有，植物的能量則是來自光能，植物中又以喬木，又常稱為「樹木」，具有穩固的大型木質化骨架。樹木和動物所面對的力學課題不同，樹木在生存的過程中基本上無法移動來躲避風等災害，過程中也必須支撐每年不斷加粗變重的枝條，那什麼樣的優化策略來解決木樹結構的力學問題是本研究所關心的。樹木的樹形和幾何形狀因光能的獲取而做出適應的對策 (Brooks, 1978)，因為木質化的骨架所及之處成為葉子行光合作用的部位，使光合作用的葉子在更有利空間位置上獲取光能。

1) 國立中興大學園藝學系碩士班研究生。

2) 國立中興大學園藝學系副教授，通訊作者。

為了充分的使用光線，部分枝條生長到樹冠的外圍或更高的位置來獲取陽光，光線需求使枝條的伸長導致結構上支撐的問題，枝條的延長並非是無止境的擴張而是受到結構強度的限制，所以樹木的形狀受到生理需求和物理限制疊代影響。

結構的穩定對於機械能正常的運作是重要的，所以在結構當中何處會發生破壞並要如何解決是工程中關切的課題，對於巨大的結構樹木而言也是。力矩的大小等於作用的力的力臂長度乘上作用力，為了光合作用增長的枝條導致枝條作用力質心遠離支點使力臂增長，隨著枝條的增長質量也相對變重。另外除了自己重量以外，風力等作用時也因著長力臂使力矩變大讓結構更容在地球上估計有 10^{14} 個枝幹結構存在 (Müller *et al.*, 2015)，但對於枝幹結構的力學研究，以機械性試驗的統計結果為主 (Gilman, 2003)，對於幾何與力學關係或背後力學機制與幾何如何影響力學強度的研究在 1990 後才漸漸開始有研究出現。樹木透過許多方式不讓枝條斷掉，其中一種優化的方法是改變幾何形狀來補強結構的強度 (Mattheck *et al.*, 2015)。枝幹結構是樹木的堆疊的基本單元，也是受力時應力集中的位置，樹木的枝幹結構上如何透過幾何改變解決應力集中的問題，並且在幾何改變後結構上應力的分布變化是本文所研究的，不管是什麼樹種都存在枝與幹所形成的枝幹結構且結構的幾何形狀具有高度的變異，主幹與側枝的幾何外型並非是兩個圓柱直接相連的結果，而是有許多幾何的特徵在其中。所以對於樹木的型態變化以幾何結構、拓撲結構 (topology) 和疊層結構三個部分來進行研究。將這些變化特徵分成三個尺度，分別為幾何變化、拓撲組成和疊層排列，透過比較枝與幹之間的外型特徵研究在力學上的意義。

文獻回顧

從結構來看，樹木的結構必須能夠承受重力和風力二者所引起負載和彎矩的合力結果，並使其結構穩定來抵抗如風、雨、地震、雪等外力所造成的影響。然而在面對環境的脅迫時，樹木無法如同動物一般移動。必須發展多樣化的方式來面對所遭遇的問題，形狀改變是其中一個很重要的策略。樹木是一個自我優化 (self-optimization) 樹形的結構 (Mattheck and Burkhardt, 1990)。樹木的生長分成頂芽分生組織的一次生長 (身長生長) 和形成層的二次生長 (肥大生長)。一次生長中莖幹和所有分枝上的頂芽分生組織的使枝條抽長使結構拉長。二次生長中木質部與韌皮部間單層形成層細胞分別向內向外分裂，使結構隨時間不斷的改變的透過改變二次生長。自我優化的生長後接觸力 (外力) 沒有改變，但增加接觸面積降低接觸應力 (Mattheck and Betzer, 1989)。樹木由於各種原因而使結構扭曲：光驅性、地面傾斜彎曲生長、潛伏芽的冒出和主幹上側枝的生長。這些幾何的不平滑性使樹木結構產生問題，應力集中點發生在突然的轉既幾何上不平滑，換句換說結構的不平滑處減少了構造的承載能力。

談樹形結構之前要先了解結構所產生的方式。樹主結構分成四部份是根、幹、枝、葉。

樹根一般在地下，而生長分為一次生長與二次生長。一次生長來自於莖頂的分生組織具有保持分裂與分化的能力，分泌生長素使莖伸長使樹木樹伸長，而二次生長中是為維管束形成層進行分裂，它會向內長出木質部，向外長出韌皮部，過程中讓莖逐漸加粗長胖。樹木在一次和二次生長的交互作用下長出能夠支撐本體的巨大結構。在樹幹的部分分為五層。第一層是樹皮。樹皮是樹幹的表層，可以保護樹身，並防止病害入侵。在樹皮的下面是韌皮部。這一層纖維質組織把糖分從樹葉運送下來。第三層是形成層。這一層十分薄，是樹幹的生長部分，所有其他細胞都是自此層而來。第四層是邊材。這一層把水分從根部輸送到樹身各處，此層通常較心材淺色。第五層就是心材。心材是老了的邊材，二者合稱為木質部。成熟的樹幹中絕大部分的重量都來自心材。樹木結構為了要達成獲取資源的需求，必須先使其結構穩定。

風是常常造成樹折斷與倒伏的主要原因。風的荷載下預測分析樹木的動態表現 (Mayer, 1987)，實體樹木的風洞實驗 (Aly *et al.*, 2013)、人造樹木的風洞實驗 (Brüchert and Gardiner, 2006)。雪荷載的研究 (Fourcaud and Lac, 1996)，另外對樹木的機械性實驗 (Pallardy and Kozlowski, 2008)來了解樹木的機械抗性。在 Moore 和 Maguire (2004)與 Niklas (1992)的研究中，枝條對於樹木在風壓下是有助於減少主幹晃動的，有研究將每個枝條當做一個質量阻尼。在風荷載下，樹木具有枝條防止了主幹的結構潛在危險的搖擺運動 (Mayer, 1987；Niklas, 1992)。結構的基本功能必須在環境變動正常使用並維持良好的工作性能、受到週期性的外力也有足夠的耐久性、遇到衝擊荷載下能保持穩定。風的路徑在固定情況下，樹枝的尖頂向被風處產生彎曲使受到的拖曳力降低，而過程中彎曲的枝條儲存彈性能，產生一個想要抵抗彎曲的力，最後隨彎曲逐漸降低的拖曳力和逐漸增加的彈性抗力達到力平衡。為了了解花旗松的自然頻率，將結構特徵透過模型建立透過電腦模擬出來荷載下的動態行為 (Moore and Maguire, 2004)。最近研究都顯示出更精準的方法是採用有限元分析法進行模擬，其顯示需要更精細的研究去更完全描述風荷載對樹的影響 (Moore and Maguire, 2004；Moore, 2002；Sellier *et al.*, 2006, Sellier and Fourcaud, 2009)。

材料與方法

一、研究對象

研究分析的對象為枝幹結構。枝幹結構不管從其外型還是內部的纖維排列型態來看都並非只是兩個圓柱以某角度嵌合的結果，而是具有某些變化的幾何特徵存在，Shigo (1989)說明了枝幹結構中枝與幹的關係，枝與幹的生長是由兩者交互包覆所形成的，見圖 1。枝的部份在生長季前期二次生長 (secondary growth)加粗枝條的直徑，其次加粗的部份往主幹向下延伸。在生長際後期換主幹二次生長包覆。

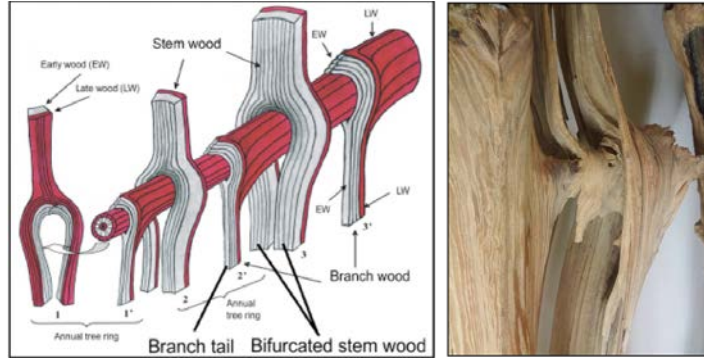


圖 1. Shigo, A.枝與幹的交互生長模型示意圖和真實枝幹結構。

Fig. 1. Intergrown branches model by Shigo, A. and real structure of branche-stems' structure.

二、實驗設計

(一)、枝幹結構的測量特徵

以目前計算機技術用電腦模擬枝幹的骨架結構與枝幹結構外型建模是使是容易的，從簡單的骨架上附加許多幾何特徵，達成形成與真實結構相同的形狀，見。但樹木結構改變的成因受到許多因子影響非常複雜。大量的幾何特徵因子參入使各個幾何特徵因子和力學的關係難以判斷，所以本文分析時參考前人在樹木機械性質測量和樹形建模時所用的測量特徵和設定定義作為模擬分析的幾何特徵使用，將許多能測量的幾何特徵拆解，特徵的改變對樹木的應力將會如何產生影響，也能夠了解哪些樹木幾何或分布的改變能有效降低應力進而推測該特徵的生成可能是受力學的影響。

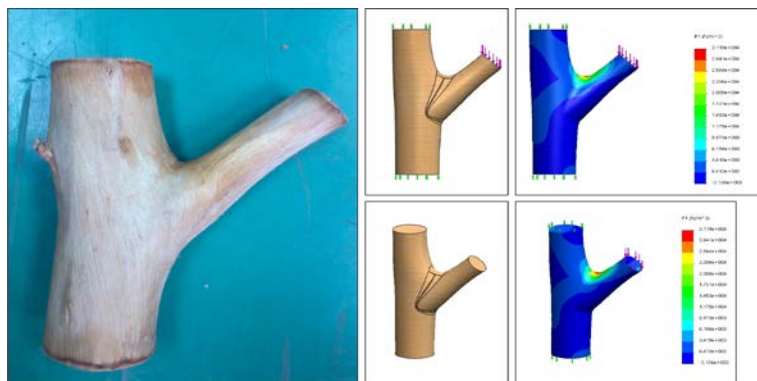


圖 2. 枝幹結構、數學模型和模擬枝條受力的應力分布。

Fig. 2. Branches-stems' structure, mathematical model and simulation of stress distribution of branch by force.

石等 (2008)說明了樹木的形態的結構包括兩部分：

1. 組成結構：如主幹、分枝、葉、花和果實等基本元素，這些元素分別具有各自的幾何特徵,如生長位置、長度、粗細、紋理等。
2. 拓撲結構：描述上述基本元素間的關係，包括分布、密度、空間關係和從屬關係。

對於枝幹而言，枝幹的組成結構為幾何上的變化，受不同幾何特徵參數的所影響，所以本文用「幾何結構」代替「組成結構」。研究中幾何和拓撲是兩個不同的研究，幾何學所研究的是物體局部 (local)的特性，研究的對像是點、線、面之間的位置關係以及它們的度量性質。拓撲則是物體宏觀 (global)的特性，研究對象的長短、大小、面積、體積等度量性質。以下就幾何結構、拓撲結構兩個方向進行討論：

1. 幾何結構：幾何與拓撲分類來對於樹木的形態改變的研究，幾何研究是樹木中枝幹結構的幾何改變對於為應力的影響，樹木的結構形狀雖然隨著種類、環境各有不同，但在面對力學結構時樹形本身的支撐結構與優化改變時仍具有某些固定的可測量特徵。
2. 拓撲結構：拓撲討論枝幹結構所構成的更大系統對應力所造成的影響，也透過簡化的模型欲理解結構枝條與非結構枝條再排列上對於應力分布的差異。

陶和趙 (2013)在樹木建模中將整棵樹的結構當中給予各個枝條特徵參數作為設定，以單一支條為單元列出分支夾角、分支直徑、分支基徑、分支高度進行建模，見圖 3。石等 (2008)的研究則是增加對「彎曲度」的特徵定義，詳細的樹的結構模型及主要特徵部位定義見圖 4。

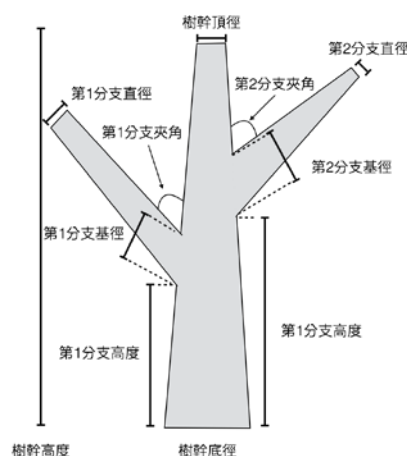


圖 3. 枝條和主幹間的拓撲特徵。

Fig. 3. Topological characteristics between the branches and trunk.



圖 4. 樹的結構模型及主要特徵部位定義 (改自石等，2008)。

Fig. 4. Tree structure model and define the main features of parts.

(二)、幾何結構分析特徵建立

參考 Kane (2008) 與拉斷側枝實驗的獨立因子：連接處的角度、枝幹直徑和枝幹直徑比率。連接處應力破壞相關的因子：直徑、側枝直徑連接處寬、主幹連接處寬與粗糙側枝直徑連接處寬 (側枝角度)。圖 5 和圖 6 中可以看到枝幹結構的幾何外形具有固定的特徵存在，依主幹和側枝的關係將幾何特徵分成：主幹和側枝共同產生的特徵、主幹上的獨立特徵和側枝上的獨立特徵。主幹和側枝共同產生的特徵為交互生長的枝幹相交處的環枝主組織。受主幹上的幾何特徵為主幹下側的肥大和枝與幹的直徑比例。在側枝上的幾何特徵中則包含了側枝基部的肥大、側枝的長度與側枝與主幹的夾角，各個特徵所代表的符號，見表 1。

模型的建構透過 SolidWorks 來達成，運用其內建軟體進行 CAD 模型建立與分析。幾何結構的分析中共有五個幾何特徵類別的數學模型，為了分析特徵間對於枝幹結構的重要性，分析時以最簡單的兩個圓柱相接為基本架構，而在其上加上一個控制變因，透過對特徵幾何上、尺寸上的改變來對比當特徵改變時對於結構應力的分佈變化。這五個特徵分別是枝幹夾角、夾角曲率、主幹直徑比和側枝直徑比。枝幹結構的幾何外型是由許多測量特徵所構成的，主幹和側枝為直徑不同的兩個圓柱，並在兩者接合處不做任何連續的處理。在只有重力的情況和重力與水平受力同時存在的情況下進行靜力分析，其中水平的受力模擬枝幹受到橫向風力時的情況。



圖 5. 幾何結構中的特徵變化，由左上順時針分別為整個枝幹結構、環枝組織上側、環枝組織下側、縱軸剖面環枝組織上側與縱軸剖面環枝組織下側。

Fig. 5. Geometry characteristic variation, clockwise from the top left are whole branches structure, the upside of branch collar, the downside of branch collar and upside and downside vertical cross-section of branch collar.

表 1. 影響枝幹結構幾何特徵的種類。

Table. 1. Effect of geometric characteristics of the types of branches.

幾何特徵的種類	可測量的特徵	對應圖 7 中的數學符號
主幹-側枝共有特徵	環枝組織 ^a	B
	夾角角度	A
	枝與幹直徑比	D1:C1
主幹特徵	主幹下側肥大 ^b	C1:D1
側枝特徵	側枝肥大 ^c	D1:D2
	側枝長度 ^d	N/A

^a枝幹夾角曲率半徑。

^b主幹上下直徑比。

^c側枝上下直徑比。

^d側枝長度雖然為影響幾何外型的特徵之一，但對於應力的分佈沒有影響，而是在 SCR 最大值的差異，所以在模擬分析中不列入考慮。

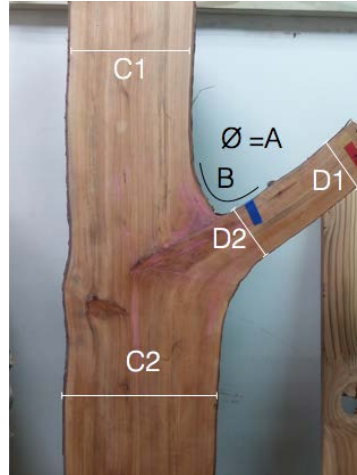


圖 6. 枝幹中幾何結構特徵與對應的符號。

Fig. 6. Geometry feature corresponding symbol in branch-stems' structure.

結 果

一、結果探討

分析結果為可視化應力分布。當中從兩個部分進行探討，一個是應力的分布來討論應力的集中，分為整體模型的應力集中，和區域性的應力集中，二是應力的大小。在從對比結果的應力最大值中取百分比互相比較。

二、幾何結構

(一)、枝幹夾角分析

在重力下還是附加橫向風力模擬的所建立的所有模型都是相同的，將主幹與側枝視為圓柱並平行 y 軸（頂端為正），直徑分為 0.04 m，0.03 m，圓柱高分別為 0.20 m，0.10 m，已此為「原形模型」在後續的各個分析中作為基本模型進行特徵上的變化分析使用。兩個圓柱以分別以 30 度、60 度、90 度、120 度和 150 度夾角接合，部分的側枝沒入主幹。對於邊界條件的設定，對主幹圓柱底面在固定所有任何方向的自由度，即無法在固定處任意方向平移甚至分離或。重力為分析中唯一的作用力，為 -9.81 m/s^2 ，方向與 y 軸同向。分析結果中顯示第一主應力的應力分析，紅色部分為拉伸應力較高的區域。在各個分析中，其應力分析結果的可視化示意顏色隨著該次分析的極值做調整，為了能夠在各個分析中進行對比，應力值能在對比中在一個相同的標準下顯示色彩以利比較，設定紅色最大值上限為 $2.000\text{e} + 3 \text{ N/m}^2$ ，藍色最小值為 $0.000\text{e} + 0$ ，見圖 7。

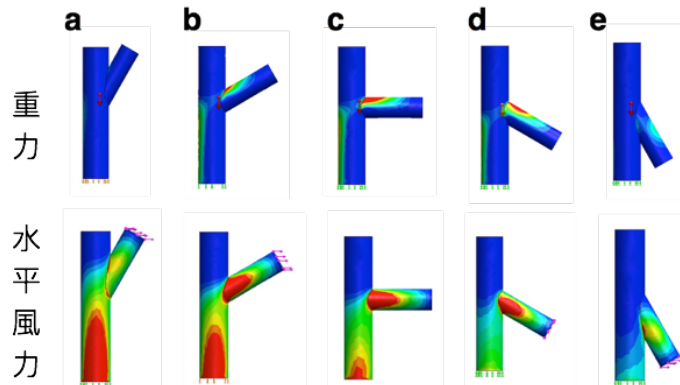


圖 7. 夾角 30~150 度枝幹結構的應力 (P1)，上排在外力為重力;下排外力為水平風力。
 Fig. 7. Angle from 30° to 150° of BSS stress (P1), up side is force by gravity; down side is force by horizon wind.

表 2. 枝幹夾角與應力大小。

Table. 2. The angle between branch and stem and stress values.

夾角	最大應力(Pa)	相對比例
30 度	1033.58	100%
60 度	4280.52	414%
90 度	5281.2	511%
120 度	2517.82	244%
150 度	817.555	79%

註：相對比例以 30 度時最大應力為 100% 作計算，相對比例 = a 最大應力/30° 最大應力 × 100%，a 為模型夾角。

角度方面在 90 度時有最大應力產生，其最大應力值為夾角 30 度應力的 511%，其他比較見，表 2。角度從 90 度往 30 度與 150 度變化時，最大應力值向兩端遞減。枝幹夾角的結果說明了，樹木在不同的角度下所承受的應力大小是不同的，90 度生長角度對於結構的破壞性最強，相對的在各個角度中也較容易斷裂。重力是垂直負載，而風力是橫向負載，其分析所使用的模型和固定位置與”枝幹角度-重力”相同。在自然環境下，樹體受垂直和橫向負載所影響，為了解橫向負載對於結構應力的影響，將分析單純化取消重力的給予。

(二)、夾角處曲率分析

改變之與幹之間的曲率來模擬主幹與側枝夾角的平滑程度在重力下對結構應力的影響。控制變因為曲率的半徑，變化從 0.03 m 到 0.04 m，變化間距為 0.002 m 進行分析一次使枝幹間夾角從 V 字夾角到 U 字夾角，共有六組分析結果。分析結果應力集中於側枝上側靠近主幹處和側主幹有枝連結的背側，分布的區域集中在結構的表面，越往內應力越低。隨曲率越大，SCR 逐漸往側枝移動，並 SCR 逐漸從點散佈成片狀。在樹木安全的結構上來分析，若發生超過材料的抗力時，主幹的部份結構將遭到破壞，對於骨架枝幹將造成研究的傷害，導致樹木主幹的腐朽，但當曲率不斷變大時，破壞點從原本的枝幹相合處往側枝移動而遠離主幹。即使在側枝斷裂時，其傷口的位子將在側枝的斷面上，使入侵主幹的距離加長讓樹木有更多的時間來對於從傷口入侵的微生物進行抵禦。圓角曲率和最大應力值的關係。在工業中，對於幾何不平滑處會採用圓角 (fillets) 的處理來降低應力的集中，與枝與幹相連處產生的曲率半徑降低應力，而非兩個圓柱直接相連類似。另外，黃 (2010) 說明了 V 字夾角為危險結構，也印證了分析結果。

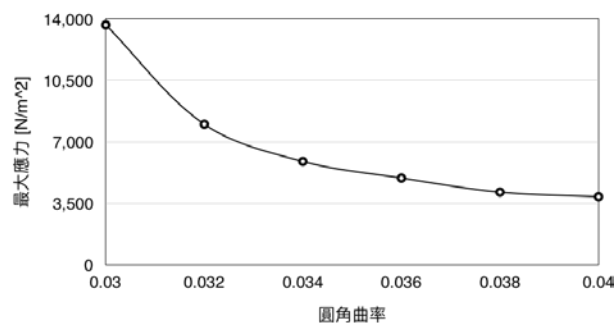


圖 8. 圓角曲率和最大應力值的關係。

Fig. 8. Relationship between rounded curvature and maximum stress.

枝幹結構的幾何變化會影響應力的分佈。為了解每個不同的量化的特徵對於應力分布的影響，進行了綜合性的應力比較。將模型上先把簡單兩個圓柱所形成的枝幹結構還原成真實樹形模樣。在「各個幾何特徵間比」的分析中抑制其中一項特徵，即使其一個部分與簡單圓柱模型相同，如「缺乏主幹肥大」中抑制主幹圓柱下側半徑的增加、「角度 90°」為抑制角度的優化，而選擇應力最大的 90° 角度進行模擬分析，分析結果見圖 9。分析結果中各個結構中的最大應力都集中在枝幹結構的鞍點上或其附近。當中缺乏導角 (即抑制枝幹曲率) 時，所產生的應力最大 (25450 N/m²) 比原形的最大應力相比為 260%。本文「枝幹夾角」的分析中原本 90° 與 30° 的最大應力不同 (90° 的最大應力值為 30° 時 511%)，但

在「各個幾何特徵」，90°的最大應力與原形分析中並無明顯差距，而且還略微低點。「缺導角」在重力的分析中，缺乏曲率的結構與其缺煩其他特徵相比具有最大的應力值，在缺乏平滑的幾何連接導致應力集中而易在彎曲處破裂。驗證了 VTA 中 U 型夾角和 V 型夾角強度上的差異，其中以 V 型夾角有較大的應力值。

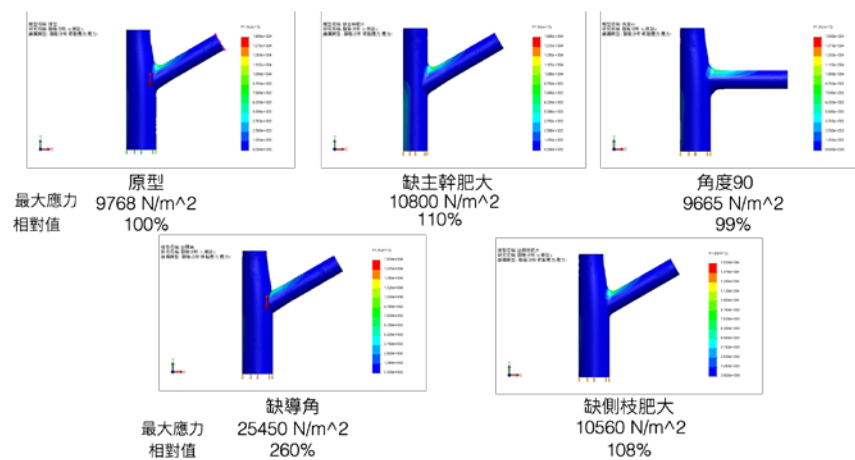


圖 9. 原型 (包含所有特徵)與缺乏幾何特徵在重力下的應力分布 (P1)。

Fig. 9. Stress distribution (P1) of prototype (contains all the features) and lacking geometrical characteristics under gravity.

三、拓撲結構

拓撲結構分析是理解了解樹木整體巨觀特性下力學探討，樹是由枝幹結構重複組合所構成的結構。樹木整體的骨架分布是複雜情況的結果，真實樹形建模分析常會因為幾何過於複雜，導致無法有效的歸納出不同變化對於應力的影響。拓撲結構受枝條群組類型 (互生、輪生或對生)、總共的層數、各層間的枝條數量、各層與主幹的夾角和層與層之間的間距等特徵影響。為了對於枝幹結構在主幹中不同位置對於主幹的影響，將以枝幹結構為單元，在相同的條件下，只改變單一變因作為比較，以輪生枝條的配置方式再對枝幹的夾角、在主幹上進行各個模型的建置。枝條間距 (1 m, 0.2 m)、主幹夾角 (45°, 90°)。這些特徵變化是否會提高主幹的剛度而在受風下減少位移量，或是分散應力集中是分析中欲了解的部份。對「輪生間距對主幹穩定的影響」進行分析。

對於輪生層樹為變因的分析當中發現，輪生層數增加在分析中，輪生層數的增加在主幹頂端受到側向模擬風力拉扯時具有穩定的效果，輪生層數增加同時也增加了重量，使在相同的風力下更能推動。間距的拉長使該段的剛性降低，但是輪生層數越少時，間距對位移沒有影響。輪生層數的增加讓主幹剛性提高，彎曲現象降低，但同時也提高結構的應力，

尤其是在枝條輪生處的應力值有明顯的提高，在橫向風力模擬中較不容易產生位移，在此同時應力也集中在主幹的輪生結構上，輪生處受到材料抗性無法承的外力時發生在斷裂，上半部的主幹則隨之捨棄斷裂，見圖 10。上側：在橫向風力模擬下，單幹的 SCR 在基部 (實心箭頭)，輪生結構在輪生位置 (虛線箭頭)。下側：輪生的樹發生破壞在輪生結構上部 (Mattheck *et al.*, 2015)，與拓撲結構模擬分析中應力集中位置 (黑色箭頭)相符。圖片呈現的是 P1 的 iso-stress，顯示 $9.337e003$ 以上的應力。樹體因著枝條捨棄後變小使所受到的風壓降低，或許為一種樹木在降低風壓時的力學生存策略。

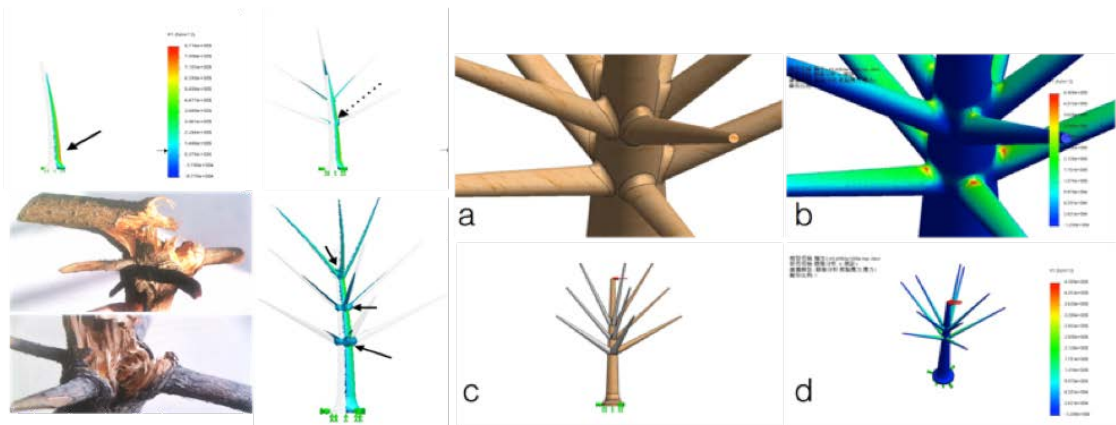


圖 10. 上側：在橫向風力模擬下，單幹的 SCR 在基部 (實心箭頭)，輪生結構在輪生位置(虛線箭頭)。下側：輪生的樹發生破壞在輪生結構上部 (Mattheck *et al.*, 2015)，與拓撲結構模擬分析中應力集中位置 (黑色箭頭)相符。

Fig. 10. Upper side: in the transverse direction of the wind simulation, alone at the base of the SCR (solid arrow), whorled structure in whorls position (dotted arrow). Lower side: whorled tree damage occurred in the upper whorls structure (Mattheck *et al.*, 2015), and topology simulation analysis of stress concentration (black arrows) match.

討 論

本研究以枝幹結構為對象，進行各個幾何變化對於應力分布影響的研究，了解應力的分佈與樹木在結構上所做的改變來降低破壞的發生。首先以田間觀察對枝幹結構的幾何外形進行分類並參考前人文獻對可測量特徵進行篩選。對於幾何特徵的變化將分析研究分成幾何結構、拓撲結構和疊層結構，然後將對幾何特徵為變因的一系列枝幹結構變化建立 CAD 模型，再以有限元素分析法將進行靜力分析，最後比較特徵變因對應力分布的權重和集中的位置。最後幾何結構的模擬分析、拓撲結構的模擬分析兩個方面來做結論。

一、幾何結構的模擬分析：

- (一) 枝幹夾角的分析中以兩種外力下進行分析，重力與橫向風力的模擬，發現在重力分析下，應力集中於兩圓柱相合處上側，夾角 90° 的最大應力值為夾角 30° 應力的 511%。在風力模擬分析中，枝幹夾角 90° 時，此時受水平風力所產生在連接處的應力最大，也比其他枝幹夾角有更大的 (P1) 應力。
- (二) 夾角曲率的分析發現隨曲率越大，SCR 逐漸往側枝移動，並 SCR 逐漸從點散佈成片狀。夾角曲率小，若從應力集中裂開主幹的部份結構將遭到破壞，對於骨架枝幹將造成研究的傷害，但當曲率不斷變大時，破壞點從原本的枝幹相合處往側枝移動而遠離主幹，其傷口的位子將在側枝的斷面上，使入侵主幹的距離加長讓樹木有更多的時間來對於從傷口入侵的微生物進行抵禦。

二、輪生結構的模擬分析：

- (一) 輪生層數的增加在主幹頂端受到側向模擬風力拉扯時具有穩定的效果，輪生層數的增加雖然讓主幹剛性提高，彎曲現象降低，但同時也提高結構的應力。樹體因著枝條捨棄後變小使所受到的風壓降低，或許為一種樹木在降低風壓時的力學生存策略。
- (二) 輪生的間距改變受側向風力時應力集中會產生在跨距最大的間距上，因為間距的拉長使該段的二次截面積矩變小，導致結構更容易發生破壞。

參 考 文 獻

- 王清玲、石憲宗、余志儒、邱一中。2010。檬果產銷暨蟲害管理研討會專刊。
- 石松、陳崇成、王欽敏、唐銘。2008。形態結構特徵約束下的樹木參數化建模研究。計算機工程：34(24): 250-252。
- 陶嗣巍、趙東。2013。樹木幾何結構快速建模的研究。北京林業大學學報：35(2): 97-101。
- 黃敏碩。2010。以 VTA 法進行台中市綠園道行道樹之危險度評估。中興大學園藝學系所學位論文。209pp。
- Aly, A. M., F. Fossati, S. Muggiasca, T. Argentini, G. Bitsuamlak, A. Franchi, N. Longarini, P. Crespi and A. G. Chowdhury. 2013. Wind loading on trees integrated with a building envelope. *Wind Struct.* 17(1): 69-85.
- Brooks, R. 1978. Tree branch angle: maximizing effective leaf area.
- Brüchert, F. and B. Gardiner. 2006. The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (*Picea sitchensis*, Pinaceae). *Am. J. Bot.* 93(10): 1512-1521.
- Fourcaud, T. and P. Lac. 1996. Mechanical analysis of the form and internal stresses of a

- growing tree by the finite element method. In Proc. Engineering Systems Design and Analysis Conference: Bio- engineering, Montpellier, France.
- Gilman, E. F. 2003. Branch-to-stem diameter ratio affects strength of attachment. *J. arboric.* 29(5): 291-294.
- Kane, B., R. Farrell, S. M. Zedaker, J. R. Lofersky, and D. W. Smith. 2008. Failure mode and prediction of the strength of branch attachments. *Arboriculture and Urban Forestry.* 34(5): 308-316.
- Lundström, T., T. Jonas, V. Stöckli, and W. Ammann. 2007. Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root–soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiol.* 27(9): 1217-1227.
- Maco, S. E. and E. G. McPherson. 2003. A practical approach to assessing structure, function, and value of street tree populations in small communities. *J. Arboric.* 29(2): 84-97.
- Mattheck, C. and H. Huber Betzer. 1989. Die Baud-Kurve-ein allgemeines Designprinzip für biologische Krafttrager. [The Baud curve, a general design principle for biological load carriers.] *Allg. Forst Jagdztg* 160: 194-200.
- Mattheck, C. and S. Burkhardt. 1990. A new method of structural shape optimization based on biological growth. *Int. J. Fatigue* 12(3): 185-190.
- Mattheck, C., Bethge, K., and K. Weber. 2015. The body language of trees: encyclopedia of visual tree assessment. 1st ed. Karlsruhe Inst. of Technology-Campus North. 547pp.
- Mayer, H. 1987. Wind-induced tree sways. *Trees* 1(4): 195-206.
- Moore, J. R. 2002. Mechanical behavior of coniferous trees subjected to wind loading (Doctoral dissertation).
- Moore, J. R. and D. A. Maguire. 2004. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. *Trees* 18(2): 195-203.
- Müller, U., W. Gindl-Altmatter, J. Konnerth, G. A. Maier, and J. Keckes. 2015. Synergy of multi-scale toughening and protective mechanisms at hierarchical branch-stem interfaces. *Scientific reports* 5. Article number: 14522.
- Niklas, K. J. 1992. *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function.* University of Chicago press.
- Pallardy, S. G. and T. T. Kozlowski. 2008. *Physiology of woody plants.* Academic, London.
- Sellier, D. and T. Fourcaud. 2009. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds. *American Journal of Botany*, 96(5): 885-896.
- Sellier, D., T. Fourcaud, and P. Lac. 2006. A finite element model for investigating effects of aerial architecture on tree oscillations. *Tree Physiol.* 26(6): 799-806.

Analysis of Mechanism of Tree Branch-Stems' Structure by Finite Element Method

Yi-Sen Peng ¹⁾ Tung-Chi Liu ²⁾

Key words: branch-stem structure, stress concentration, finite element method, simulation.

Summary

In this study, the branch-stems' structure (BSS) as the object to understand the trees mechanics strategy to reduce the damage. Discusses two parts: geometry and topology. Study the effect on stress of changing the geometry of BSS, topology structure study the mechanical properties of configuration of BBS of the trunk. The rings arrangement of general branches and latent buds effect on the stress distribution. Establish a series of comparative model, static simulation analysis with finite element method. The results showed that when the angle of 90° is exposed the maximum stress, stress concentration at the saddle point. In many features, maximum stress occurs lacking a smooth connection, and consistent failure occurred in the case of V shape angle of visual tree assessment. Topology model, whorled layers increases the rigidity of trunk, but the upper whorls areas occurs stress concentration. The advantage is that when the wind blows off the tree let make the trees smaller to reduce the risk, rather than break from the trunk base caused more serious harm. Tree darker area of BBS on vertical cross-section overlapping the stress concentration area formed by a conical shell with BBS, in line with the stems rot even after hardening remaining pith cone shape.

1) Graduate Student, Department of Horticulture, National Chung Hsing University.

2) Associate Professor, Department of Horticulture, National Chung Hsing University.

Corresponding author.

