

輪胎濕抓地力之研究

丁元翔¹、陳明彥²、鄭榮和³

¹ 國立台灣大學機械工程學系(碩士生)

² 國立台灣大學機械工程學系(博士後研究員)

³ 國立台灣大學機械工程學系(教授)

¹Email: kevin6986939k@hotmail.com

²Email: netpenicilin@gmail.com

³Email: jhcheng@ntu.edu.tw

摘要

本研究是利用有限元素輪胎模型估算濕抓地力指標，並探討輪胎在不同行駛工況及各種結構設計參數對輪胎濕抓性能的影響，最後使用分析結果提出高濕抓性能輪胎的設計建議。本研究利用有限元素軟體Abaqus對規格205/55 R16的輻射胎建立有限元素模型，並參考ISO-23671輪胎濕抓地力的測試規範，建立一套濕抓地力分析流程，進行排水煞車模擬，藉此計算濕抓地力，模擬結果與試驗報告相當吻合，此結果顯示本研究之有限元素模型是合理的。

利用所建立的模型探討輪胎在不同行駛工況以及各種結構設計參數對於輪胎濕抓地力的影響，如負載、胎壓、行駛速度、黏彈性質、胎紋類型等，並建立濕抓分析工具，提出設計上的建議。

關鍵字：輻射胎、濕抓地力、有限元素法、黏彈性質

ABSTRACT

This study uses finite element tire model to estimate wet grip index and discuss the influence of driving conditions and structural design parameters on wet grip performance. Based on the results, high wet grip performance tire designs are proposed. This study creates finite element model for the 205/55 R16 radial tire by the finite element software Abaqus. In order to calculate grip force on brake, the tire model refer to ISO-23671 of tire's wet grip test regulation that is established a wet grip analysis procedure. The result is identical with the experiment, and it shows that the Finite Element model in this study is reasonable. Then the tire model is used to discuss the influence of driving conditions and structural design parameters on grip force, such as load, inflation pressure, driving velocity, viscoelasticity, tread pattern, etc. According to the result of wet grip analysis tools, we can give suggestions on it.

Keywords: radial tire, wet grip performance, finite element method, viscoelasticity

一、緒論

自從輪胎發明以來，輪胎的水漂現象與打滑就成為輪胎廠商關心的課題，如何讓輪胎在濕地上行駛時維持操控性，以及遇緊急狀況時能有好的煞車性能更是格外重要的。

然而隨著環保意識的抬頭，歐盟、美國、日本與韓國等國家陸續開始要求輪胎的

滾動阻力與輪胎噪音，然而在輪胎的產品性能上滾動阻力與濕地抓地力是相互牽制[1]，趨勢上提高濕地抓地力可能使輪胎噪音變高[2]，此三項特性與材料及胎紋設計等又互相關聯，因此設計上也必須同時考量。

為了避免輪胎廠過度追求低滾動阻力與輪胎低噪音等環保訴求而忽略安全性能之要求，歐盟在2009年2月起以強制所有乘

用車輪胎在申請認證同時必須量測濕地抓地力，其濕地抓地力指標(G)值必須大於0.9~1.1以上[3]，若達不到要求將無法在歐洲販售，因此因應法規之基本要求，也應累積研發能量以提升競爭力。

目前國內外研究大多針對輪胎的水漂現象，也就是輪胎排水性能這部分，鮮少對輪胎濕地上的抓地力進行探討並應用分析結果於設計上，除此之外，因為大多使用試驗方法得到濕抓地力指標，但國內沒有標準的濕抓測試場地，新設計出的輪胎須委託國外公司進行測試，才能得到其濕抓地力指標。本研究目的為建立一套計算濕抓地力分析工具，減少設計上修改的時間，並藉由所建立之工具探討不同行駛工況下與各個結構設計參數對濕抓地力之影響，並以量化方式說明原因與統整，探討各參數之影響，最後由分析結果提供設計高濕抓力輪胎的方向。

二、文獻回顧

2.1 輪胎模型建立

輪胎主要由橡膠、簾布層及鋼絲所組成，其中橡膠在大變形下仍保持彈性且為非線性，屬於超彈性材料(Hyperelastic)，可藉由應變能函數描述橡膠變形，如Marlow Model、Ogden Model、Yeoh Model等[4]；簾布層由橡膠與尼龍線所組成，為一種複合材料，用薄膜元素建立鋼絲層、鋼絲層固定層和簾布層，並以Rebar方式定義加強層；鋼絲的部分，與橡膠相較起來硬非常多，通常以線彈性來描述。水的力學行為用Us-Up狀態方程式描述。

2.2 濕抓性能研究

過去輪胎的臨界水漂速度常藉由實車測試所得到，而隨著電腦硬體的發展，運用數值分析計算水漂速度的方法持續發展當中。

在有限元素或數值分析計算滾動阻力方面，Seta[5]提出滾動輪胎模型，模擬時流體保持不動，而輪胎滾動前進；T. Okano[6]提出水流模型，模擬時輪胎在原地繞輪胎中心滾動，透過使流體和地面以反方向的速度前進，來實現輪胎在濕路面上的滾動，之後對於濕抓性能的相關研究，J. R. Cho[7]、C. W. Oh[8]、陳海榮[9]、張彬[10]等人皆以此

兩種模型對濕抓性能進行探討。

2.3 規範與測試

目前歐盟、美國、日本、韓國皆以ISO-23671 (2013)測試的輪胎濕抓地力指標(G)為濕抓地力進行分級[3]此規範也詳細定義測試方法與注意事項，而台灣也參考了ISO-23671訂定出CNS 15655 K61202來量測轎車胎的濕抓地力指數。

ISO-23671主要有兩種測試方法，拖車或測試專用車法與標準M1類車法，如表一，分成試驗前的輪胎與場地的準備，試驗進行的方式，試驗後的各種數據處理，而除了試驗胎要測試以外，還需要有另外一顆作為對照組的參考胎，在ISO-23671中所使用的參考胎是SRTT 16³⁷(Standard Reference Test Tire 225/60R16 97S)，其詳細的資料規定在ASTM F2493-14[11]中。

表一：ISO-23671濕抓地力測試方法。

		以拖車或測試專用車	以標準M1類車
測試方法		車速67-63 km/h，載重0.2-0.5 秒連續最大抓地力，量測輪胎胎面抓地力與垂直負載最大比值(ppbfc)。	車速87-83 km/h 載重，在80km/h 前啟動ABS，量測由80至20 km/h 的煞車距離S，mfdd=231.48/S。
準備	測試場	1. 輪胎需於測試場2小時以上，使溫度與路面一致。 2. 測試場需水深半小時以上，水深0.5-1.5 mm；或測試場附噴水系統。 3. 以非測試車胎煞車至少10次，調節路面狀況。	
	胎壓	SRTT：180 kPa；測試胎：180/220 kPa	SRTT：220 kPa；測試胎：220 kPa
	負載	SRTT：445-508 kg 測試胎：最大負載 70%-80%	SRTT：381-572 kg 測試胎：最大負載 60%-90%
預測試	全新輪胎預測試2次，確認儀器但不併入結果計算。		
測試	測試順序	R1、R2 或 R1、T1、T2、R2 或 R1、T1、T2、T3、R2。 R1/R2：以SRTT 標準胎會測試3次；SRTT 之bpfc 應介於0.6-0.8。 T1/T2/T3：測試輪胎，每型至少測6次。	
	結果確認	若 R2 三筆變動率>5%，則全部Fail。 T1/T2/T6 各自六筆變動率≤5%	若 R2 三筆變動率>3%，則全部Fail。 T1/T2/T6 各自六筆變動率≤3%

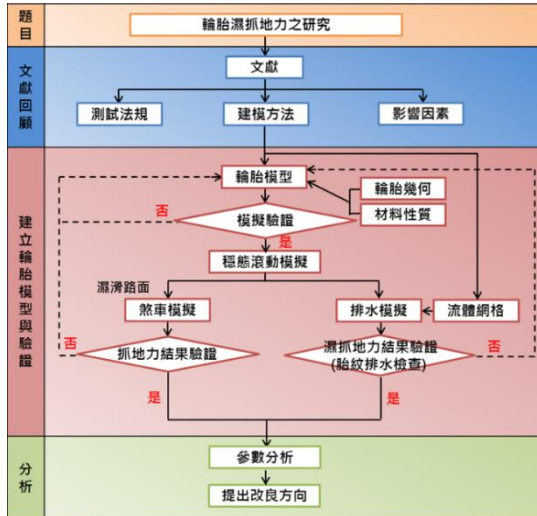
三、研究方法

本研究之流程如圖一，可分為三大部分。

第一部分文獻回顧，針對輪胎相關基礎知識以及水漂現象與濕抓地力分析相關文獻進行整理與探討，並歸納出如何建立輪胎模型及濕抓地力計算方法，瞭解輪胎研究進展，作為本研究在建立模型與分析時的參考。

第二部分建立輪胎模型與驗證，使用有限元素軟體Abaqus對規格205/55 R16的輪胎建立有限元素模型，給予適當之邊界條件模擬輪胎充氣壓地與並進行穩態滾動，而輪胎各部分之材料性質則藉由實驗量測取得。輪胎模型的準確性先由充氣壓地及縱向、橫向剛性等模擬結果與實驗做初步的驗證，接著用規格的濕抓地力測試報告結果來驗證模型所得到抓地力之準確性。

第三部份分析與設計，在驗證模型能夠預估濕抓地力之準確性後，使用此模型探討在不同行駛工況與不同結構設計參數下對其排水與抓地力的影響，最後由分析結果提出設計方向。



圖一：研究流程圖。

四、輪胎模型建立與驗證

本研究分析輪胎規格為 205/55 R16 91V 的轎車胎，究目的在於探討各結構設計參數與不同行駛工況對輪胎排水與濕抓地力之影響，為了降低問題複雜性與節省電腦計算時間，對模型做以下假設：

- (1) 成品尺寸與設計圖尺寸相同。
- (2) 橡膠為等向、均質、不可壓縮體，並呈超彈性與黏彈性。
- (3) 簾布層之尼龍為等向、均質、線彈性，成品簾布層角度與原設計角度相同。
- (4) 地面與胎面之摩擦係數為 0.7。
- (5) 鋼圈與胎唇緊密貼合，不產生滑動。
- (6) 地面、轉鼓與鋼圈為剛體。
- (7) 輪胎穩態滾動時，胎體溫度均勻分布。
- (8) 計算濕抓地力時不考慮環境溫度的影響。

4.1 材料性質

輪胎是由橡膠、簾布層與鋼絲圈所組成，而簾布層包含橡膠與尼龍。本節將說明如何進行實驗量測，並藉由實驗結果計算輪胎各個部分之材料常數。

4.1.1 超彈性Hyperelastic

橡膠試片之尺寸與規範參照 ASTM D41214，藉由 MTS 810 進行拉伸實驗取得數據。本研究只進行單軸拉伸實驗求取橡膠彈性變形行為，無雙軸拉伸及平面拉伸之數據，不適合使用 Ogden、Arruda-Boyce、Yeoh 等應變能函數，因此選擇 Marlow Model 來描述胎面膠 T101 的變形。

4.1.2 黏彈性 Viscoelastic

橡膠之黏彈性測量使用儀器為 RPA 2000，其量測原理為對試片給予一個固定周期的負載，此以應變來做控制，試片會回應一個固定周期的應力，由於橡膠為黏彈性材料，兩條曲線之間會有一個相位角 δ ，藉由測量到的相位角和應力應變振幅，經過計算可以得到儲存模數 G' 、損失模數 G'' 以及損失正切 $\tan \delta$ ，若材料的損失正切越大，代表材料越接近黏性。

利用 RPA 對輪胎各部分之橡膠在測試條件為溫度 60°C 內進行掃頻實驗，振幅為 0.1% Strain。

然而輪胎在滾動過程，滾動半徑隨著速度不同而變化，在此定義滾動半徑為未充氣之輪胎半徑 312.5mm，若行駛速度是在 20~100km/h，相對應之頻率為 2.83~14.15Hz，實驗取頻率 3~15Hz 對不同膠料進行量測，最後得到不同頻率下所量測之損失正切 $\tan \delta$ 。

由於模擬時要考慮黏彈性，因此需要一個模型來描述橡膠的黏彈，在此使用 Prony Series 來描述黏彈材料的 shear modulus 隨時間的變化，如式(1)：

$$g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i^P (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (1)$$

一般輪胎行駛至穩定，溫度約在 50°C~70°C，在此選擇 60°C 之實驗數據，並以傅立葉轉換將實驗數據由頻域轉換為時域與最小平方方法進行擬合，求取膠料的 g_i^P 、 τ_i 、 N 等 Prony series 常數。

而輪胎煞車過程是相當高頻的行為，胎面部分的材料性質也會應此改變，然而實驗機台通常不好量測也不容易量準確材料在高頻時的行為，故常使用在低溫的材料性質去等效其高頻的材料性質，因此這邊對胎面膠料的試驗是在溫度 0°C 下進行掃頻實驗，而其他量測條件維持不變。

4.1.3 簾布層 Ply & 環帶層 Belt & 環帶層固定層 Belt Cover

簾布層為輪胎的骨架，由橡膠與尼龍纖維所組成，輪胎充氣後之定形主要是靠簾布層支撐，維持輪胎構造，輻射胎之簾布層與滾動行駛方向成水平。

環帶層和環帶層固定層是以強韌的鋼絲製成，主要目的在於防止輪胎遭受外部異物穿刺，並加強胎面的抗壓力，增加胎面的堅固性能，進而保護胎體，兩層環帶層分別與滾動行駛方向夾 65° ，環帶層固定層則夾 90° 。

簾布層、環帶層和環帶層固定層以Membrane element來建立橡膠部分，而其中的尼龍纖維和鋼絲以Rebar layer來定義，定義Rebar layer之參數有四種，分別為尼龍線截面積、每兩根尼龍線之距離、與元素局部座標的夾角、與元素中心面距離。

4. 2模型驗證

本研究的模型是參考濕抓地力測試法規中的拖車或測試專用車法，模型建立參考試驗流程如圖二，一開始利用二維軸對稱模型進行輪胎充氣模擬，使用Abaqus的指令將二維模型轉換為三維模型，並進行壓地模擬，接著使用*STEADY STATE TRANSPORT指令進行輪胎穩態滾動模擬，取得自由滾動(Free Rolling)下的結果，接著將輪胎穩態滾動的結果匯到Abaqus/Explicit中，進行排水煞車模擬，本研究使用的是水流模型。



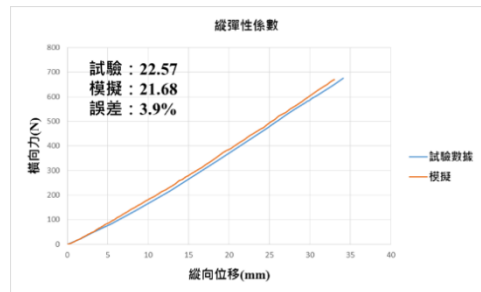
圖二：拖車或輪胎試驗用車法簡易測試流程圖。

模型之準確性以充氣壓地、橫向剛性等實驗與濕抓地力指標數據進行驗證，使用機台為輪胎綜合試驗機。

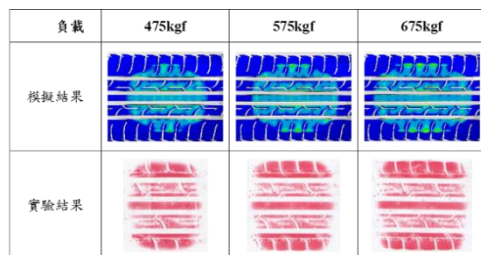
充氣壓地為對輪胎施以固定充氣壓後，地面以位移方式對輪胎進行施載，此過程擷取地面向上之位移量與地面所受之反作用力，此數據稱為縱向剛性，同時也擷取胎面與地面接觸之壓地應力分布，實驗與模擬結果比對如圖三、圖四；橫向剛性為輪胎進行充氣壓地後，給予輪圈向下475kgf負載，

地面開始橫向移動，紀錄地面橫向位移量以及地面所受之橫向力，直到胎面與地面之間產生滑動而停止，實驗與模擬結果比對如圖五。

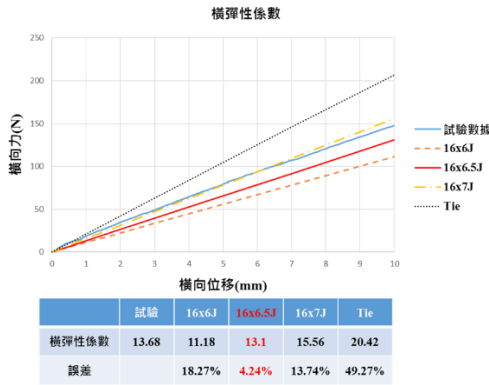
由模擬結果與實驗數據比對可看到，縱彈性係數試驗與模擬結果非常接近；接地壓印的部分，接地寬非常接近，但接地長有很大的差異，這是輪胎在硫化過程，因為膨脹而使尺寸改變，這個過程會使輪胎內的鋼絲層夾角有變化，而鋼絲層夾角的改變則對於接地壓印的輪廓會有很大的變化。橫向剛性則會因為ABAQUS設定上而有很大的差異，當在ABAQUS中利用Tie取代輪圈時，將會大幅提升橫向剛性，使用寬度6.5的輪圈的模擬結果最好，縱向剛性、接地壓印與橫向剛性之實驗數據與模擬比對結果還算吻合。



圖三：縱向剛性。



圖四：不同負載下之接地壓力分佈。



圖五：橫向剛性。

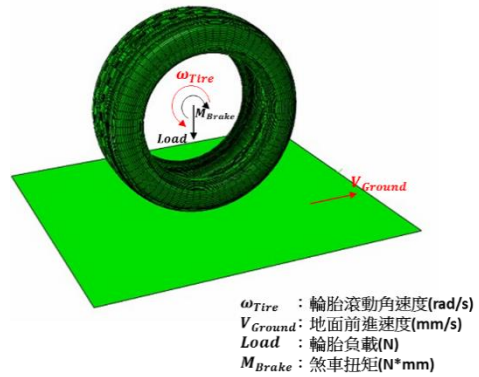
濕抓地力指標量測是參考ISO-23671規範進行，採用拖車或測試專用車法進行測試，由於無法正確取得參考胎的數據，無法計算濕抓地力指標，所以這邊是以試驗胎的煞車力係數峰值當作標準，如表二為模擬結果。

表二：試驗胎之試驗與模擬結果。

	試驗胎煞車力係數峰值	濕抓地力指標
試驗結果	0.86	1.293
模擬結果	0.859	1.291
誤差	0.1%	0.1%

五、輪胎各參數抓地分析

影響輪胎抓地力之因素非常多，以行駛工況來說，有負載、胎壓、行駛速度、溫度等，在結構設計參數則有胎面曲率和胎紋類型等，以及膠料配方和摩擦係數，而為了降低計算分析上的成本，先不考慮水的影響建立煞車模型，如圖六，在此說明負載、行駛速度、胎面曲率、胎紋類型和膠料配方對抓地力之影響。

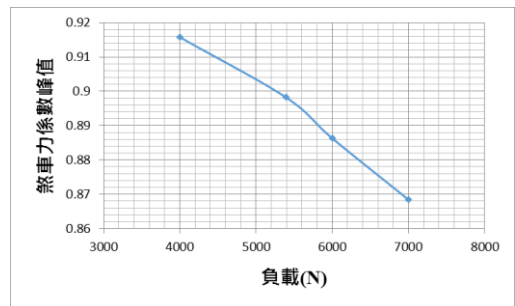


圖六：負載v.s.煞車力係數峰值。

5.1 負載

分析的輪胎邊界條件是胎壓為0.21MPa，行駛速度為65km/h，探討不同負載對於輪胎抓地力的影響。

圖六為輪胎在不同負載下之煞車力係數峰值，可明顯看到隨著負載的上升，煞車力係數峰值會下降。



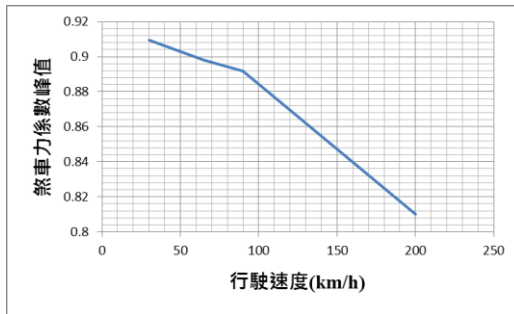
圖七：負載v.s.煞車力係數峰值。

5.2 行駛速度

分析的輪胎邊界條件是胎壓0.21MPa，負載5392N，探討不同行駛速度於30, 65, 90, 200km/h對於輪胎抓地力的影響。

圖七為輪胎在不同行駛速度下之煞車力係數峰值，分析結果顯示隨速度上升至90km/h時煞車力係數峰值有下降的趨勢，且幾乎是線性的關係，而加速到200km/h的煞車力係數峰值下降的幅度增大。

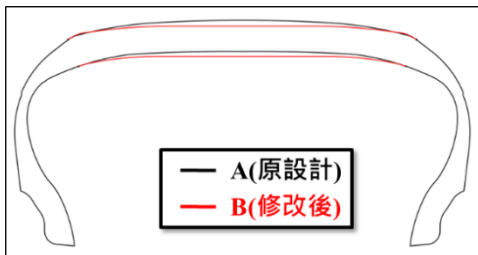
而抓地力隨速度上升而下降的原因在於速度與物體慣性成正比關係，速度越高則產生的慣性越大，慣性對於輪胎的影響會使輪胎半徑增大，進而使接地面積減少，抓地力下降。



圖八：行駛速度v.s.煞車力係數峰值。

5.3 胎面曲率

由原輪胎設計的幾何進行胎面曲率的修改，將輪胎其胎面部分修改成較為平坦，其餘輪胎部分之幾何則不更動，如圖八為示意圖，原設計的幾何叫胎面A，修改後的設計叫胎面B。



圖九：胎面曲率示意圖。

接著探討輪胎在胎壓0.21MPa，負載5392N，行駛速度65 km/h的工況下，胎面曲率的改變對於輪胎煞車力係數峰值的影響，其模擬結果如表三，可看出胎面B，也就是當輪胎的胎面曲率較為平坦，接地面積會較高，而煞車力係數峰值也接地面積的上升而跟著提升。

表二：不同胎面曲率的煞車力係數峰值與接地面積。

胎面曲率	煞車力係數峰值	接地面積(mm ²)
A	0.8982	5809.44
B	0.9185	6345.18

5.4 胎紋類型

先前對於探討輪胎在不同工況以及不同結構設計參數下之模擬分析皆為使用縱溝胎，也就是沒有考慮到細溝這部分，這邊則將胎紋因素考慮進來，而除了比較擁有複

雜胎紋的輪胎與縱溝胎之間的差異以外，也會將完全沒有胎紋的光頭胎放進來做比較，如圖九分別光頭胎、縱溝胎與複雜胎紋輪胎。



圖十：胎面花紋示意圖。

接著探討胎壓0.21MPa，負載5391N，行駛速度65 km/h下胎面花紋對於抓地力的影響，結果如表三為不同胎面花紋的煞車力係數峰值與接地面積，可以看出煞車力係數峰值與接地面積呈正相關，而光頭胎因為接地面積較大，煞車力係數峰值也較大。

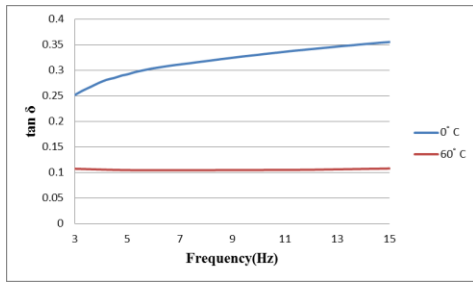
表三：不同胎面花紋的煞車力係數峰值與接地面積。

胎紋類型	煞車力係數峰值	接地面積(mm ²)
光頭胎	0.9456	7305.13
縱溝胎	0.8982	5809.44
複雜胎紋	0.849	5072.59

5.5 膠料配方

輪胎的膠料配方對於抓地力有直接的影響，而通常以胎面膠影響最大。這邊探討輪胎在胎壓0.21MPa，負載5392N，行駛速度65 km/h的工況下，不同黏彈性質對於抓地力的影響。

不同黏彈性質則以同膠料但在不同溫度下的性質為替代，圖九為胎面膠分別在溫度0°C和60°C情況下所量測到的損失正切，分析結果如表四為胎面膠料在使用不同溫度下黏彈數據的煞車力係數峰值與接地面積，可以看出用溫度0°C時的數據所得到的抓地力大於溫度60°C代表同膠料在溫度0°C和60°C時的結果差異主要是損失正切的差別，由分析結果可得到若想要增加抓地力，胎面膠料的性質為一大影響因素，藉由調整膠料配方增加損失正切 $\tan \delta$ 則能夠有效增加抓地力。



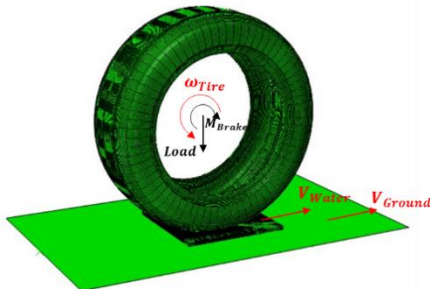
圖十一：胎面膠在溫度0°C和60°C之損失正切。

表四：胎面膠料在不同溫度下的煞車力係數峰值與接地面積。

溫度	煞車力係數峰值	接地面積(mm ²)
0°C	0.8982	5809.44
60°C	0.8473	5243.84

六、輪胎排水分析

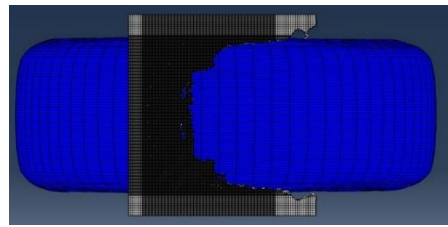
將水的因素加入模型內，如圖十二，探討不同胎紋類型對於排水與抓地力的影響，並比較和無水煞車分析的差異。



圖十二：負載v.s.煞車力係數峰值。

6.1 光頭胎

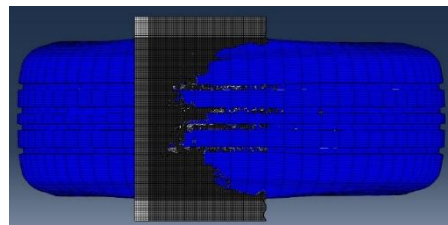
這邊探討水對於煞車分析的影響，而為了加快分析時間，水層的網格在越靠近中心部位切得越細。圖十為光頭胎在水膜厚度1.5mm的排水狀況，由於水膜厚度極薄，水的影響相當有限，可以看出就算輪胎沒有胎紋，在這積水路面上，仍然可以正常且有效的排水，所以煞車力係數峰值計算出來為0.906與之前沒考慮水的模型所計算出的0.946相當接近，相差在5%內。



圖十三：光頭胎的排水狀況。

6.2 縱溝胎

除了輪胎本身是縱溝胎以外，其他的參數設定都與光頭胎一樣。圖十一為縱溝胎在水膜厚度1.5mm的排水狀況，可以觀察到輪胎一樣能有效排水，而水流在縱溝中不連續的原因在於水膜厚度太薄，最後煞車力係數峰值計算出來的結果為0.859比光頭胎低，也比沒水的縱溝胎的煞車力係數峰值0.898低，但差異不大，跟光頭胎一樣相差也在5%內。



圖十四：縱溝胎的排水狀況。

6.3 小結

本研究參考ISO-23671輪胎濕抓地力的測試規範建立輪胎排水煞車模型，藉此模擬出輪胎的濕抓地力，然而法規的水膜厚度相當薄，只有1.5mm深，因此還不足以讓此速度下的輪胎產生打滑現象，以至於模擬結果出來，光頭胎在濕地上的濕抓地力反而是最好的，且有水與無水情況下的煞車模擬結果差異不大，但在現實生活中，輪胎的排水性能與濕抓地力必須要兩者兼具，排水性能差容易產生水漂現象而打滑，而濕抓地力不足則可能讓煞車距離過長，都可能造成危險。

七、結論與未來展望

本研究參考濕抓測試法規並利用有限元素軟體建立輪胎煞車模型計算抓地力，在煞車模型內使用Prony Series建立黏彈性質，模擬時同時考慮橡膠的黏彈性，而排水模型

內，水的狀態方程式選擇Us-Up狀態方程式來表現其力學行為，在經過驗證後，利用模型對不同行駛工況、結構設計參數、膠料配方以及摩擦係數對於抓地力的影響進行探討，並以分析結果提出設計方向。

因此對各項參數分析僅考量抓地力影響，但還有些輪胎參數並未分析到，如尺寸或胎紋深度等，除此之外，並未考慮到其他輪胎性能，如滾動阻力、輪胎噪音或磨耗等，然而改變輪胎設計，其他性能都會有所改變，而設計一顆輪胎不只考量提升濕抓地力來提高在濕地上的安全性能，其他性能也是需要考慮的，且歐盟對於輪胎的效率分級也同時要求輪胎之滾動阻力與噪音，因此不能只考慮輪胎單一性能，須對輪胎使用環境與目的進行全方面性的分析與設計。

- three-dimensional patterned tire," *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol. 25, pp. 914-926, 2006.
- [8] C.W. Oh and T.W. Kim, "Hydroplaning simulation for a straight-grooved tire by using FDM, FEM and an asymptotic method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 21, pp. 524-631, 2007.
- [9] 陳海榮，子午線輪胎滑水仿真分析，碩士論文，江蘇大學車輛工程，江蘇，2009。
- [10] 張彬，臧孟炎，周濤，黎傑，基於正交試驗設計的輪胎濕路面附着性能優化研究，*橡膠工業*，vol. 03，2014。
- [11] <http://www.astm.org/Standards/F2493.htm>。

八、參考文獻

- [1] 廖慶復，姜林靜惠，市售輪胎滾動阻力與濕地抓地力測試研究，中華民國第十七屆車輛工程學術研討會，南投，台灣，2012。
- [2] 潘國良，車用輪胎之環保與安全議題漫談，財團法人車輛研究測試中心車輛研測資訊雙月刊，vol.70，pp. 2-7，2009。
- [3] 廖慶復，黃敏祥，蘇梟群，國外輪胎標籤發展現況與檢測方法，車輛研測資訊，vol. 090，pp. 14-20，2012。
- [4] A. Ali, M. Hosseini and B. B. Sahari "A Review of Constitutive Models for Rubber-Like Materials," 2010.
- [5] E. Seta, Y. Nakajima, T. Kamegawa and H. Ogawa " Hydroplaning Analysis by FEM and FVM: Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning," *Tire Science and Technology*, Vol. 28, No. 3, pp. 140-156, 2000.
- [6] T. Okano and M. Koishi "A New Computational Procedure to Predict. Transient Hydroplaning Performance of a Tire," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 29, No. 1, pp. 2-22, 2001.
- [7] J. R. Cho, H. W. Lee and J. S. Sohn, " Numerical investigation of hydroplaning characteristics of