

應用 RANS 計算評估氣象塔之風場

陳冠臻*¹ 吳凱洋* 林正文*

*中國驗船中心

關鍵詞：計算流體力學，氣象塔

摘要

氣象塔為經常用來評估風場能力的重要工具。設計者可以利用氣象塔來記錄地面或海平面的風速及風向資料，並根據這些數據來設計合適的風車性能及強度。一般而言，氣象塔紀錄風場的週期至少必須超過五至十年。因此在這期間，氣象塔就必須要能夠承受各種極限的條件，如颱風的影響。本研究主要目的為應用黏性流 RANS 計算來評估流場受到氣象塔干擾後，其風場測量的影響及準確性。同時，也藉由分析來決定風速計安裝在橫向懸臂上，所需距離塔架的最小長度。最後，文中也將黏性流 RANS 計算氣象塔之受力結果與現行審核結構強度的標準做一比較。

緒論

對於評估風場之經濟價值而言，氣象塔往往是最直接、最有用的評估工具。藉由氣象塔觀測及記錄風場特性，設計者將能利用這些數據設計適當的風車性能及強度。因此，當氣象塔的紀錄失真時，將嚴重影響評估風車的產能，甚至無法達到預期的經濟效益。與風車產能最直接相關的因子即為風速，如何掌握風速計測量的結果就顯得十分重要。本文主要目的為評估風速計在安裝位置時，可能量測到的風速值，該量測值最可能受到塔架及懸臂的干擾而與原風速產生誤差。IEC 61400-12-1 [1](International Electrotechnical Commission)標準即針對此干擾程度提出適當的建議，並且提供數值模型來預測氣象塔周圍之風速。此外，為考慮颱風氣候之影響，計算結果將比較在不同風速下，塔架所承受之風力，並將結果與 BS 8100-Part I [2](British Standard)及 DNV-RP-C205 [3]規範互相比較。

網格建立與流場計算

本文使用商業軟體 STAR-CCM+ 預估氣象塔之周圍風場，計算方法將藉由網格建立來離散計算流場，以有限體積法及適當的紊流模型求解納維爾史托克之方程組(Navier-Stokes equations)。計算域大小及邊界條件設定如圖 1 所示，流域大小以塔架底端的三角形邊長為單位，入流面距離氣象塔為 4 倍長，出口面為 10 倍長，上下邊界則各為 4 倍及 2 倍

長，至於兩側為考慮懸臂的延伸，邊界距離氣象塔設為 6 倍長。邊界設定上，除了流體入口為速度入流，出口為壓力出口邊界及物體表面為無滑移的壁面邊界外，其餘邊界皆為對稱面邊界。

為了準確模擬計算問題，使用者應注意網格建立的品質及紊流模型的選用。文中共測試了三組紊流模型：standard two-layer $k-\epsilon$ 、realizable two-layer $k-\epsilon$ 及 SST $k-\omega$ 。在比較三種紊流模型之計算結果後，發現不同紊流模型對於風速預測影響並不大(如圖 2)，因此文中將應用 realizable $k-\epsilon$ 進行模擬。在網格的測試上，採用軟體提供的非結構網格之卡式座標體積網格(Trimmer 網格)來自動化生成計算網格(如圖 3)，於壁面周圍佈置柱狀網格(prism layer mesh)，並配合軟體之壁函數來有效模擬物體周圍的流場。為了確認網格之穩定性，計算過程也對網格做獨立性測試。在維持一定的壁面網格下，對周圍流場的網格逐漸加密(如圖 4)，不同網格之比較結果如圖 5。從結果可以看出速度場在不同網格下，所預測之速度分布差異並不大，故考量計算效率，本文將以最少網格數探討及分析問題。

¹ 陳冠臻 (kcchen@crclass.org)

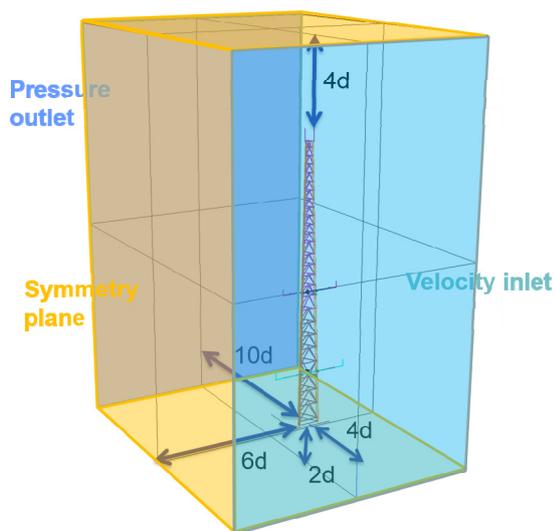


圖 1 邊界條件設定示意圖

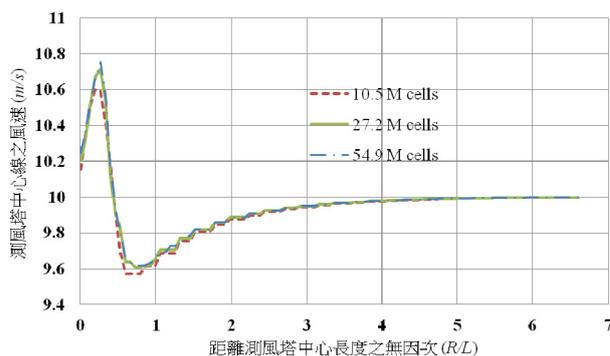


圖 5 不同網格密度之風速比較結果

計算結果討論

計算結果將分風速與風力兩部分來探討，前者風速結果將與 IEC 61400-12-1[1]標準進行比較與討論，而後者風力與 BS 8100-Part I[2]及 DNV-RP-C205[3]規範互相比較，並考量在台灣地區可能出現颱風等激烈的氣候情況，數值計算條件也將由一般風速 10 (m/s)提升至 50 (m/s)的風速。

1. 風速分析

為避免風速計量測受到塔架干擾的影響，設計者應根據 IEC 標準之分析結果或數值方法之模擬來合理設計風速計的擺放位置。IEC 建議在安裝風速計時，必須與氣象塔保持適當距離，並且至少安放在高於懸臂直徑之 15 倍，如此才能使風速計不受塔架尾流的干擾，導致量測結果失真及無法準確預測風機之功率。

決定風速計擾動之程度及不確定性大多還是取決於使用者，而 IEC 建議風速計所量測之干擾程度分別為受塔架影響小於 1%及懸臂影響小於 0.5%。圖 6 為本研究模擬風速計所量測之結果，從圖可看出主風速計將受到 0.67%的干擾，此干擾包含了塔架及懸臂幾何之擾動，而三隻測風速計受到的干擾將不大於 1.5%。

對於格狀氣象塔流場之預測，IEC 標準結合了驅動盤及納維爾史托克理論來分析預估風速場(如圖 7)。受到氣象塔干擾之風速場則與推力係數(C_T)有密切的關係。 C_T 係數取決於氣象塔構造之空洞程度 (solidify ratio, ϕ)與個別構件之阻力，亦為單位長度塔架之總阻力除以動壓及表面寬度 L (如圖 7)。對於三角形截面之塔架，IEC 標準也以下列公式來計算 C_T 值：

$$C_T = 2.1(1 - \phi) \phi \quad (1)$$

ϕ 定義為結構一側垂直風向面之投影面積與總暴露面積的比例，且適用(1)式範圍為 $0.1 < \phi < 0.3$ 。

搭配上式 C_T ，以下公式可以預估氣象塔周圍的風速場(如圖 8)：

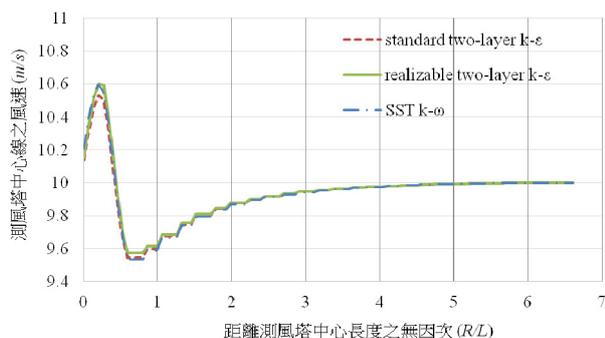


圖 2 不同紊流模型之風速比較結果

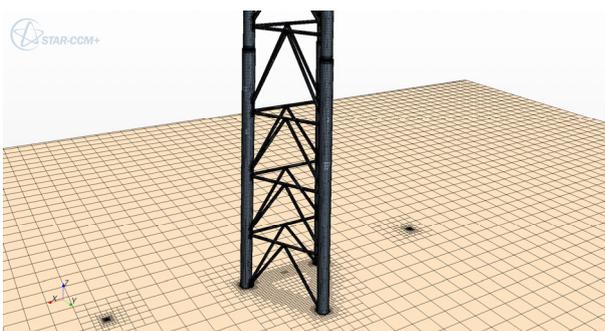


圖 3 trimmer 網格示意圖

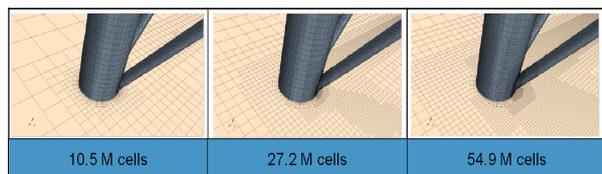


圖 4 網格加密比較圖

$$U_d = 1 - \left(0.062C_T^2 + 0.076C_T\right) \left[\frac{L}{R} - 0.082\right] \quad (2)$$

U_d 表示風速減損的多寡， $U_d=1$ 即風速不受塔架的干擾。 R 為距離氣象塔中心之長度， L 則為三角形截面之邊長(如圖 7 所示)。

文中氣象塔空洞係數 $\phi=0.3316$ ，代入(1)式後，可得到 $C_T=0.47$ 。圖 9 為黏性流計算與 IEC 標準公式(2)預估風速分佈之比較，將結果與 Fabre[4] 利用 OpenFOAM 計算空洞係數 $\phi=0.35$ ， $C_T=0.47$ 之結果比對後，得到兩者預估的風場非常相似，證實本文計算結果具有一定的合理性。然而，若參考文獻 [5] 計算空洞係數 $\phi=0.17$ ， $C_T=0.3$ 之結果(圖 8 的 CFD results)，會發現該黏性流的計算結果卻與 IEC 預測非常接近。由此得知，IEC 標準僅適用於範圍 $0.1 < \phi < 0.3$ 的情況，若非於此範圍之氣象塔，使用 IEC 來預測將可能與實際狀況大相逕庭。

觀察圖 9 可以了解到 IEC 預測風速的能量損失率比黏性流預測結果還來得大許多，故推測 IEC 標準在預測風速分佈時，應是利用層流理論來推算的。並且，文獻[4]也指出 IEC 標準為基於層流理論之計算方法。因此，若用 IEC 標準來設計風速計擺放的位置，設計值將會比真實狀況來得保守許多。而應用 IEC 速度分佈圖來設計懸臂距離塔架距離之方法，主要是以圖 8 決定風速計擺放的位置，但一般風速計擺放位置多位於塔架迎面風之兩側(如圖 10 驅動盤之兩側延伸)，並非放置塔架前方的停滯區。因此，由氣象塔前方流場來判斷風速計擺放的位置，實為保守的評估方法。對於實際流場評估或模擬風速計測量，以三維黏性流計算來設計風速計擺放的位置(圖 11)應較 IEC 的方法更為準確與可靠。然而，對於 IEC 保守預估的方法來看，可能是考慮了各種風向的情況而訂定的，因此未來計算將延伸於不同風向對周圍流場的分析，並與 IEC 方法進一步比較，以了解 IEC 標準之精準度。

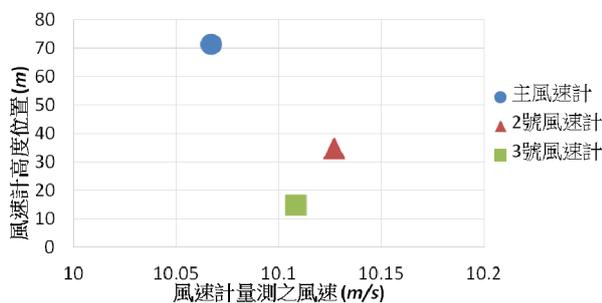


圖 6 模擬氣象塔之風速計測量的結果

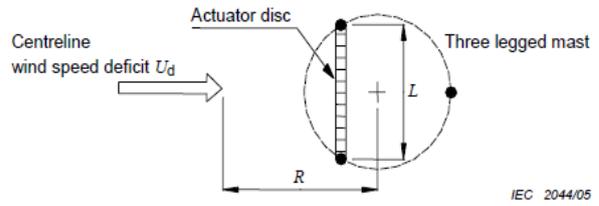


圖 7 IEC 標準之計算模型[1]

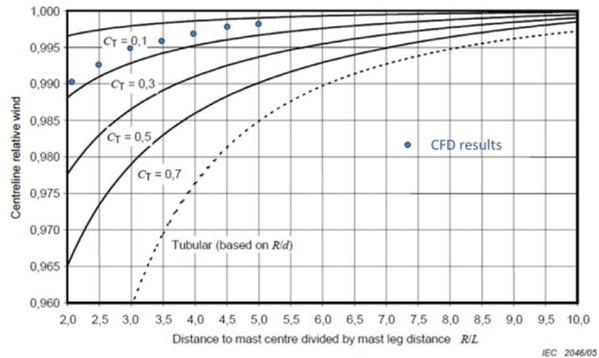


圖 8 IEC 標準與黏性流計算之速度分佈圖[5]

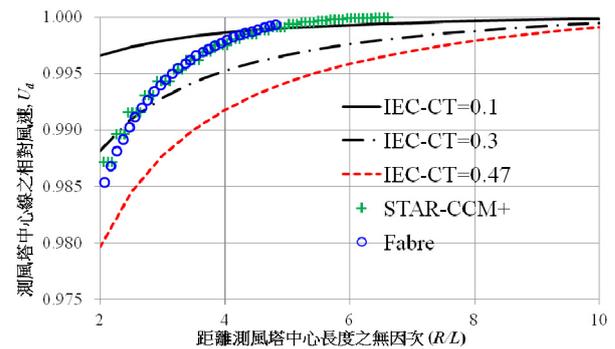


圖 9 黏性流計算與 IEC 標準之速度分佈比較

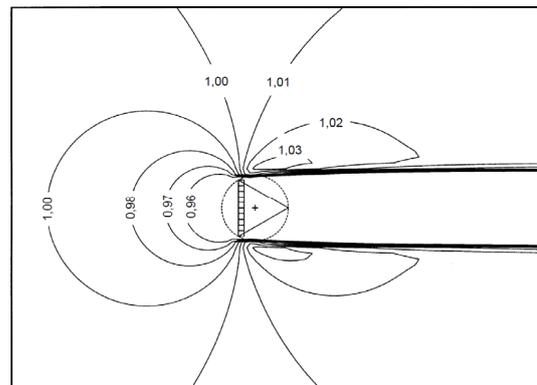


圖 10 IEC 標準預估氣象塔風速分佈圖(風由左入)[1]

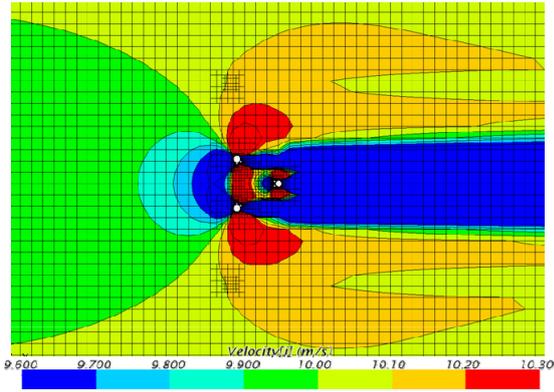


圖 11 STAR-CCM+計算氣象塔周圍風速分佈圖

2. 風力分析

2.1 黏性流計算與 BS 標準、DNV 規範比較

本節將比較黏性流的計算結果與 BS 標準及 DNV 規範之風力值。BS 8100-Part I 預測氣象塔之受力如(3)式：

$$F = \frac{\rho}{2} V^2 \sum R_w \quad (3)$$

ρ 為空氣密度(1.226 kg/m^3)， V 為風速(m/s)， $\sum R_w = K_\theta C_N S$ 為風阻係數。

K_θ 為風入射角因子， C_N 為總阻力係數(參考文獻[2]4.2.2 節)， S 為垂直風向的結構投影面積。

DNV-RP-C205 規範則將塔架的受力分為以下兩類：

單一結構構件之風力：

$$F_W = \frac{\rho}{2} V^2 \cdot C \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

在垂直風向平面上，由許多構件組合之結構的風力：

$$F_{W,SOL} = \frac{\rho}{2} V^2 \cdot C_e \cdot S_s \cdot \varphi \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

C 為形狀參數， C_e 為有效形狀參數(參考文獻[3]5.3 節)， α 為風向與暴露構件之軸的夾角， S_s 為結構面總暴露面積。前者為風作用於單一構件之受力，後者為考慮風作用於具空洞物件之受力。而總受力為兩者之合，如(6)式：

$$F = F_W + F_{W,SOL} \quad (6)$$

另外，若物件落在其他物件之下流場時，則需額外考慮遮蔽效應(shielding effect)(詳請參考文獻[3]5.3.3 節)。以本文計算方法為例，分迎風面與背風面來計算，由於迎風面為垂直風向之平面，因此應用(5)式來分析，而背風面則應用(4)式來分析。前者為考慮空洞係數影響，後者則是視物件為單一構

件計算，且因構件位於背風處，故應額外考量遮蔽效應。風向與構件軸的角度均為接近 90° 。

黏性流計算結果與標準和規範之比較結果如圖 12 至圖 14，圖中之受力為每單位塔高之風力，從圖分佈可看出規範值預測的風力結果皆比黏性流計算高約 50%至 150%左右，而不同風速造成的總風力與總力矩的結果如表 1，計算誤差(ε)方法如下式：

$$\varepsilon = \frac{\text{rule value} - \text{RANS value}}{\text{RANS value}} \quad (7)$$

此外，從計算結果及較密網格(圖 4)之總風力值比較(如表 2)，可看出 10.5 百萬網格並非穩定的計算結果，因此對於圖 12 至圖 14 結果仍需做更進一步確認。為研究計算氣象塔之風力的網格，下面將針對塔架幾何做切割，對一部分塔架進行網格建立(如圖 15)，以進行更多的網格探討。

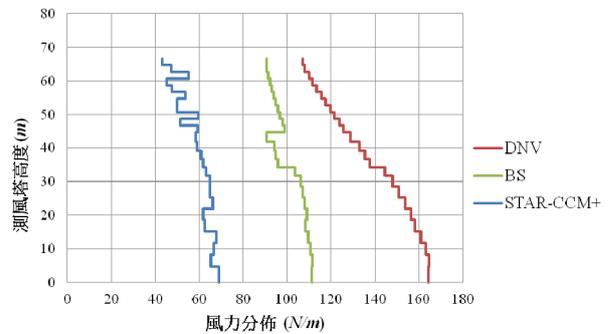


圖 12 風速 10 m/s，氣象塔風力分佈圖

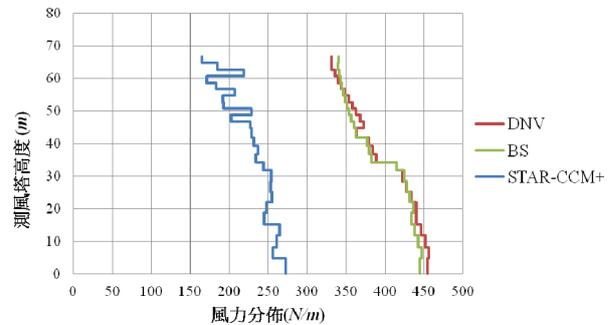


圖 13 風速 20 m/s，氣象塔風力分佈圖

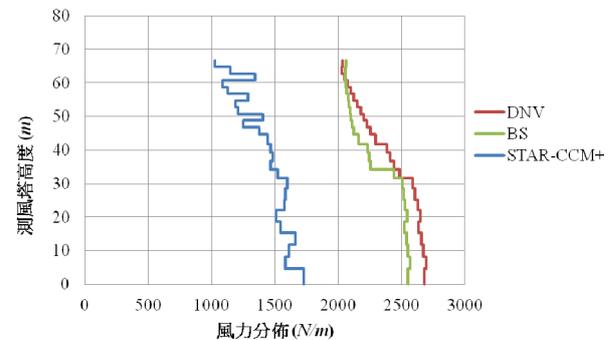


圖 14 風速 50 m/s，氣象塔風力分佈圖

表 1 不同風速對氣象塔造成之總風力及總力矩

風速 (m/s)	10	20	50
總風力 (N)			
STAR-CCM+	3962	15406	95967
DNV	9475 (+139%)	27208 (+77%)	165019 (+72%)
BS	6905 (+74%)	26946 (+75%)	158538 (+65%)
總力矩 (N-m)			
STAR-CCM+	126285	489366	3051023
DNV	296040 (+134%)	869129 (+78%)	5312376 (+74%)
BS	225336 (+78%)	864111 (+77%)	5132647 (+68%)

表 2 風速 10 m/s，不同密度網格計算的總風力

網格數 (百萬)	總風力 (N)	誤差
10.5	4017.35	-
27.2	3295.98	-17.94%
54.9	3228.19	-19.63%

2.2 網格探討

由於目前計算電腦能夠建立網格的數量相當有限，若用之前的整體氣象塔幾何來做網格特性探討，將花費許多硬體空間及計算時間。故針對計算氣象塔風力之問題，計算模型將簡化如圖 15 之幾何，以減少計算網格的數量。圖 16 和圖 17 為探討風速 10 (m/s) 時，不同 Y+ 對預估風速及風力的影響。從圖 16 和圖 17 的結果來看，不同 Y+ 對於風速場的預測影響並不大，最大誤差僅 0.77%，但對風力預測卻有 45% 的差異。縱使將最大風力的計算結果與 DNV 規範及 BS 標準相比，黏性流計算值還是遠小於規範值(圖 17)，由此可知規範考慮的安全係數是相當大的。回顧上一節計算網格，此網格的 Y+ 約為 150 左右，與局部幾何 Y+ 為 150 之網格佈置極為相似，而兩者計算結果相比後(如表 3)，發現當計算風力時，整體塔架或局部塔架的計算結果將會一致。故若不考慮三維效應對流場的影響，在預測風力時，計算過程將可簡化為部分模型來做網格獨立性的測試，特別是對結構表面及 Y+ 作探討。最後再藉由局部幾何的計算結果來修正整體氣象塔的風力值。例如，在圖 17，Y+ =150 與 Y+ =8 之總風力值差異為 15%，故以此差異來調整全部氣象塔的風力計算結果，將結果往上修正 15%，如圖 18。

利用計算流體來分析氣象塔之風場時，應慎選紊流模型與合理建立計算網格。尤其是評估氣象塔之受力時，更應探討風力預估對網格的敏感度。此外，對於台灣夏季常見的颱風狀況，氣象塔在風速 50 m/s 黏性流計算之風力是否與此節探討風速 10

m/s 有相同的趨勢與結果，仍需要進一步研究與確認。

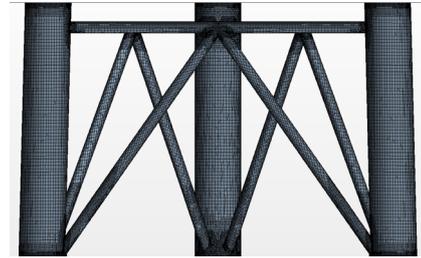


圖 15 擷取氣象塔之局部幾何

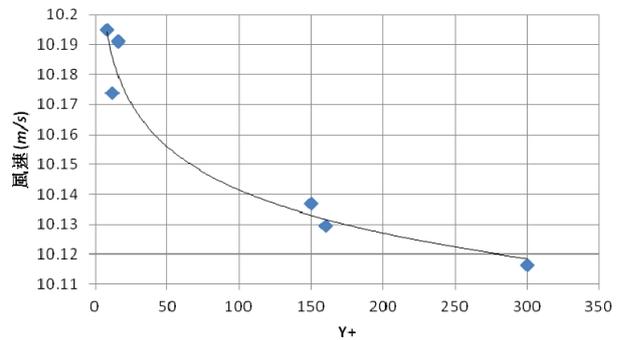


圖 16 不同 Y+ 的速度預測值 (與風速計相同懸臂長度之位置)

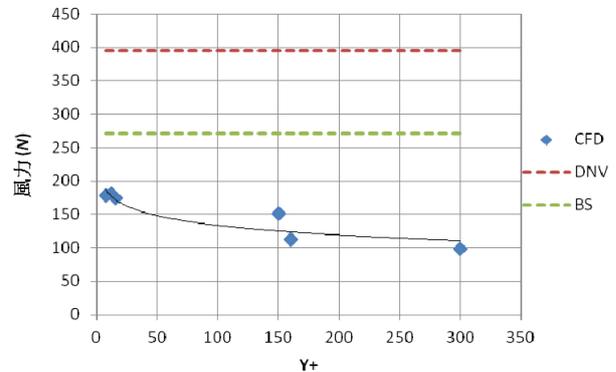


圖 17 局部塔架計算在不同 Y+ 的總風力

表 3 整體氣象塔與局部塔架計算之風力

計算模型	局部塔架之總風力 (N)
整體氣象塔計算 (圖 4 中的 10.5 M 網格)	150.87
局部塔架計算 (圖 15 網格)	150.40

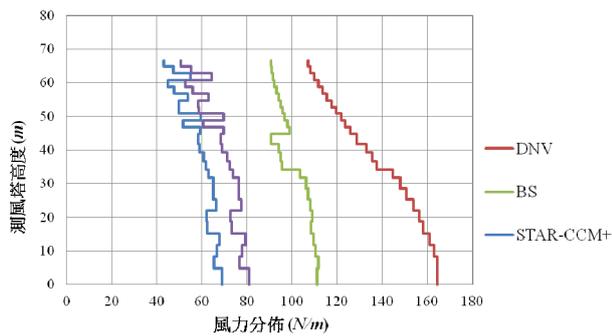


圖 18 風速 10 m/s，風力分佈修正結果

結論

本文目的為探討氣象塔對風速流場之干擾程度，計算結果顯示主風速計所量測的風速將受到塔架及懸臂擾動 0.67%，其他風速計為低於 1.5%。藉由文獻比較速度分佈後，證實文中使用的網格是合理的。並且，從結果中推測，IEC 標準應是使用層流理論來計算速度分佈，以致 IEC 預測的流場干擾程度會比黏性流計算還要大。尤其當空洞係數超過 IEC 的使用範圍時，評估結果與黏性流計算將差異更大。而 IEC 標準預測的速度場是否考慮不同風向之結果，未來將可以繼續延伸黏性流計算來探討。

風力預測上，原計算網格與 BS 標準和 DNV 規範值之差異約 50%至 150%的誤差。因此，文中針對局部幾何進行網格深入探討，發現隨著 Y+變

小，風力預測值會持續的增加，且風力預估對網格的敏感度會遠大於風速的影響。結果顯示，不論不同的計算網格或不同的入流速度，風力預測結果皆比規範值小很多，由此可知規範在評估塔架承受風力時，考量了一定的安全係數。

應用商業軟體進行氣象塔之風速及風力評估時，使用者應慎重建立計算網格與選用紊流模型，尤其是對風力的評估。

參考文獻

1. IEC, "Power Performance Measurements of Electricity Producing wind turbine", International Standard IEC 61400- Part 12-1 (2005)
2. British Standard, "Lattice Towers and Masts, Part I : Code of Practice for Loading", British Standard 8100- Part I (1986)
3. DNV, "Environmental Conditions and Environmental Loads", DNV-RP-C205 (2014)
4. S. Fabre, M. Stickland, A. Oldroyd, D. Kindler and F. Quail, "Measurement and Simulation of the Flow Field around the FINO 3 Triangular Lattice Meteorological Mast", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.130, 2014, pp.99-107
5. M. Stickland, T. Scanlon, A. Oldroyd, D. Kindler, "Measurement and simulation of the flow field around a triangular lattice meteorological mast", European Wind Energy Conference, EWEC Copenhagen 2012

Evaluation of the Wind Flow around a Meteorological Mast through RANS Computations

K. C. Chen Yann Quemener* C. W. Lin**

**CR Classification Society*

Keywords: CFD, Metmast

ABSTRACT

The design of a meteorological mast is critical for the feasibility of a wind farm project. The function of the meteorological mast is to record the wind speed and direction at various points above the ground or the sea. Those data are necessary to properly design wind turbines in terms of performance and strength accordingly to the observed wind condition of a considered site. In addition, to be significant, the wind data need to be recorded over a period of at least 5 to 10 years. Therefore, the mast strength must be sufficient to undergo extreme conditions such as typhoons. This study has for first objective to evaluate through RANS computations the wind flow distortions generated by the mast that would affect the quality of the measured data, and thus to determine the minimum length of the transverse booms at the end of which the wind gauges are installed. This study compares also the RANS wind force distribution predictions to existing Standards simplified approaches used to verify the structure strength.