

強降雨對橋梁側向風力影響之探討

張景鐘^{1*} 王怡琳²

^{1*} 國立臺灣海洋大學河海工程學系教授

² 國立臺灣海洋大學河海工程學系研究生

摘要

台灣四面環海，位於西太平洋熱帶氣旋盛行地區，每逢夏秋兩季之時，常受到颱風的強風暴雨侵襲，其中雨滴會受到強風所影響而產生橫掃作用，風速越大則雨滴橫掃方向越趨近於水平，使得降雨強度對建築結構物造成一定的影響，但目前台灣對於雨滴衝擊力的部分並未加以規範，因此本研究將對風雨相互作用加以探討。

風的部分，本研究將以不同截面狀的風壓當對照組，計算雨滴衝擊力相對風壓影響程度的大小。雨的部分，雨滴衝擊力由受風橫掃的水平雨量搭配動量守恆定理得到，其值會受到風速、降雨強度、雨滴粒徑分佈、雨滴速度與風速比值、雨滴終端速度等左右。

前人已針對高樓與風力發電機受強風之動力行為作探討，本研究針對橋梁建築受風雨共同作用與作討論，範例一；以橋梁不同構材截面形狀風壓與雨滴衝擊力作比較，了解到一般情況下，阻力係數較小時，雨滴衝擊力需要被重視。範例二；以現行橋梁風力規範值與雨滴衝擊力比較，了解到一般跨距小於150公尺的橋梁受到雨滴衝擊力影響較小。

關鍵字：雨滴橫掃效應、雨滴粒徑分佈、強降雨、形狀阻力

Keywords: Wind driven rain, Raindrops size distribution, Heavy rainfall, Drag coefficient

1. 前言

台灣處多颱風地帶，逢秋夏之際，颱風肆虐頻繁，根據歷史資料顯示，平均每年受到三到五個颱風侵襲。颱風強烈的風勢並夾帶著大量的水氣，碰上台灣地形總是有驚人的雨量出現，造成台灣的嚴重迫害，台灣本島雨量觀測極端值發生在2003年的杜鵑颱風；時雨量達每小時281.5mm，瞬間風速極端值發生在2000年的碧利斯颱風；瞬間最大風速為78.4m。

風的部分，台灣建築技術是依據內政部發布的建築物耐風設計規範，其中針

對風速回歸期、空氣密度、地況等有詳細的規定。橋梁的部分是依據交通部發布的公路橋梁設計規範，其提供設計風速為每小時 200 公里、最大跨度不超過 150 公尺者，針對橋梁不同構材有不同風壓規範。

雨的部分，在颱風侵襲台灣時，雨滴會受到強風所影響而產生橫掃作用，風速越大則雨滴橫掃方向越趨近於水平，使得降雨強度對建築結構物造成一定的影響，然而雨滴的衝擊壓會受到風速、降雨強度、雨滴粒徑分佈、雨滴速度與風速比值、終端速度等所左右。

因此本文針對颱風之風雨同時作用進行初步的研究以及探討，建築方面考慮到建築形狀影響，與建築物的風速形狀阻力做比較，橋梁方面則與規範值做比較，探討雨滴衝擊力的影響是否需要重視。

2. 風、雨基本特性

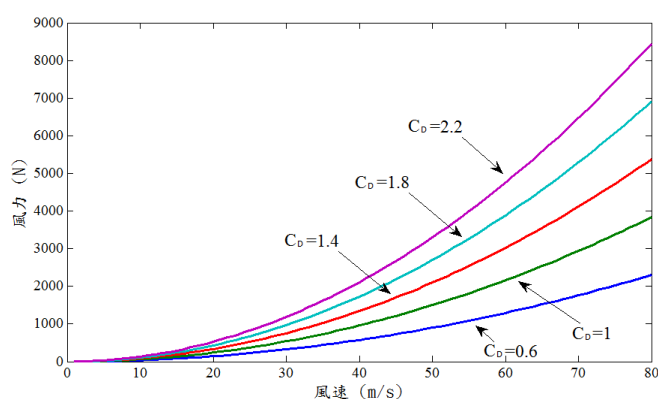
2.1 風之形狀阻力

物體受風作用力可依來源來分成兩種：表面黏滯阻力(Viscous drag)與形狀阻力(form drag)，黏滯阻力來自於作用在物體表面的剪應力，進而導致拖曳效應；形狀阻力來自物體迎風面與背風面的壓力差異。而由於橋梁形狀為鈍形體，鈍形體的形狀阻力會遠大於表面黏滯阻力，因此本研究主要討論形狀阻力。

無因次的阻力係數(Drag coefficient)為求得阻力的關鍵值，其可由數值方法解出或風洞試驗得到，但事實上因為通過物體的尾流速度剖面不易獲得，因此目前大多是由風洞試驗來取得阻力係數值：

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (1)$$

C_D ：阻力係數(無因次的係數)



圖一：不同阻力係數之風速、單位面積風力關係示意圖

2.2 降雨強度與雨滴粒徑分布關係

早期 Best(1950)就有針對降雨強度和雨滴大小有深入的研究，在近年 Mualem 以及 Assoulin 也對各地區的降雨資料來推算出雨滴在不同強度時，雨滴的粒徑大小分佈情形。分別來介紹各學者對雨滴粒徑分佈的研究：

- Best 雨滴粒徑分佈：

二十世紀中期 Best(1950)運用加拿大、英國以及美國的氣象資料來推導出降雨強度和雨滴粒徑分佈情形，由下式可得累積分佈機率，亦可了解當降雨量不同時，其雨滴粒徑也不盡相同(圖二)：

$$F(r) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{r}{a}\right)^n\right] \quad (2)$$

$F(r)$ ：雨滴半徑分佈機率

$$A = B_1 I^P$$

$$W = B_2 I^P$$

I ：降雨強度 (mm/h)

W ：單位體積空氣裡的水之含量 (kg/m³)

B_1 ：常數 1.30

B_2 ：常數 67

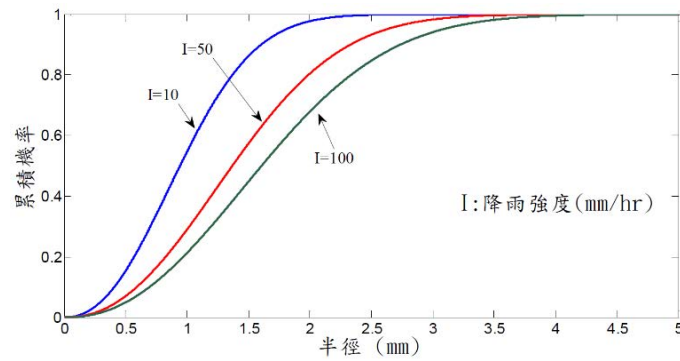
P ：常數 0.232

q ：常數 0.846

n ：常數 2.25

將式(2)對半徑微分即可得雨滴粒徑分佈機率 $p(r, I_h)$ 如圖二：

$$p(r, I_h) = \frac{F(r)}{dr} \quad (3)$$



圖二：不同降雨強度時的雨滴粒徑分佈機率(Best1950)

3. 風力驅動雨滴撞擊力

本文將雨滴視為個別物體，作用力於建築物表面，首先參考 E.C.C. Choi(1994) 提出的水平雨量強度公式，搭配 A.C. Best (1950)提出的雨滴粒徑分布公式；與 Y. Mualem (1986)出的雨滴終端速度經驗公式，求得降雨水平方向的理論強度，再參考 E.C.C. Choi(2001)提出的雨滴速度觀測值與觀測風速的比值，求得較接近實際值的水平降雨強度，最後使用動量守恆定理得到風力驅動雨滴衝擊力，其結果與形狀阻力比較可得雨滴衝擊力與不同形狀建物的比值，藉以觀察雨滴衝擊力的重要性。

3.1 雨滴水平方向速度與風速之比值

接近地表面的水平風速隨著高程降低會劇降，其減少的幅度會遠大於雨滴水平方向速度減少的幅度，因此靠近地面的雨滴其水平速度通常會大於風速，本研究參考 E.C.C. Choi 在新加坡實驗測得不同雨滴半徑之雨滴速度實際值 U_R 與風速 U_W 間的關係，如表一。

表一：雨滴水平速度與水平風速的比值

雨滴半徑(mm)	0.25	0.5	1.0	2.0	5.0
$U_R(r)/U_W$	1.0	1.2	1.6	1.7	1.9

本研究為了方便計算，令

$$R(r) = \frac{U_R(r)}{U_W} \quad (4)$$

3.2 降雨水平方向強度

根據 E.C.C. Choi 提出的公式，雨滴半徑為 r 時，其降雨水平強度(I_{dr})可表示為

$$I_{dr}(r) = I_h p(r) dr \frac{U_R(r)}{V_R(r)} \quad (5)$$

$I_{dr}(r)$ ：半徑為 r 的雨滴之水平強度(mm/hr)

$p(r)$ ：雨滴半徑為 r 的機率

U_R ：雨滴水平速度(m/s)

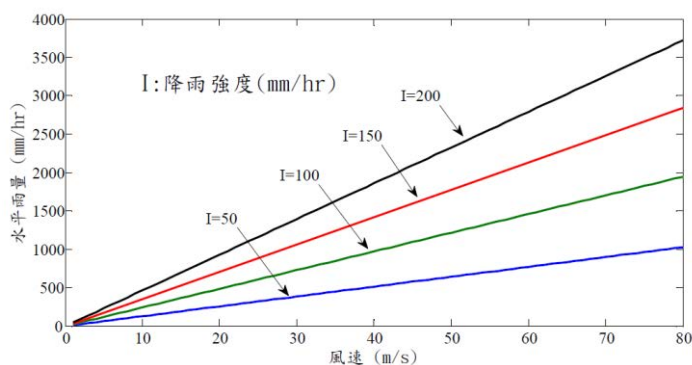
V_R ：雨滴垂直速度(m/s)

當雨滴高程低於兩百公尺時，其垂直速度會達到終端速度(V_T)，又結構物場址通常都接近地表，因此雨滴垂直速度使用終端速度代入，本節中的雨滴水平速度 $U_R(r)$ 使用 $U_{WR}(r)$ 代入， $V_T(r)$ 試用 Y. Mualem (1986) 提出的雨滴終端速度； $p(r)$ 試用 A.C. Best (1949) 提出的雨滴粒徑分布公式，其機率亦與雨強有關，因此可改寫成 $p(r, I_h)$ ，得下式

$$I_{dr}(r) = I_h p(r, I_h) dr \frac{U_{WR}(r)}{V_T(r)} \quad (6)$$

將各個半徑的水平強度 I_{dr} 積分即可得降雨水平雨量 I_d 如下式，不同降雨強度時風速、水平雨量關係如圖四。

$$I_d = \int I_{dr}(r) = I_h U_W \int \frac{p(r, I_h) R(r)}{V_T(r)} dr \quad (7)$$



圖四：不同降雨強度時風速、水平雨量關係圖

3.3 雨滴水平衝擊力

利用前一節提到的降雨水平方向強度，配合動量守恆定理可得雨滴對結構物的衝擊力，首先有以下幾點假設：

1. 假設所有雨滴都打在結構上
2. 假設當雨滴衝擊到結構表面時，雨滴速度會歸零
3. 假設流場為穩態流

$$\int_{t_1}^{t_2} F_r(r) dt = m(r) \vec{V}_1(r) - m(r) \vec{V}_2(r) \quad (8)$$

其中

$F_r(r)$ ：半徑 r 的雨滴對結構物的衝擊力

$m(r)$ ：半徑 r 的雨滴 t_1 到 t_2 時間內撞擊結構物的總質量

ρ_r ：水密度

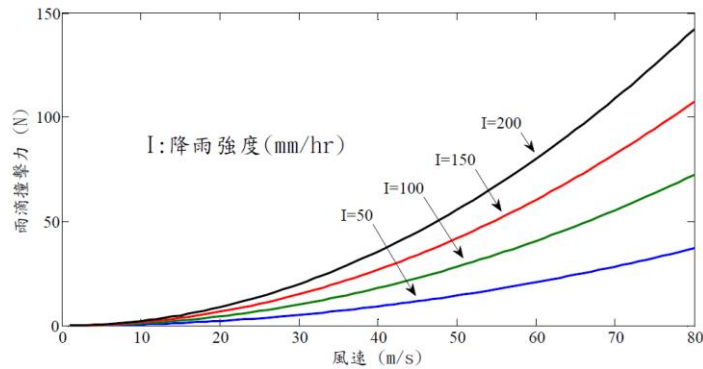
$\vec{V}_2(r)$ ：半徑 r 的雨滴衝擊至結構物後的速度，本研究假設其為零

$\vec{V}_1(r)$ ：半徑 r 的雨滴衝擊至結構物前的速度

因假設流場為穩態流，速度不會隨著時間改變，可知 $F_r(r)$ 值不會隨著時間改變，則由(8)得 $F_r(r)$ 的方程式(9)，再將 $F_r(r)$ 積分可得降雨衝擊力 F_r 方程式(10)

$$F_r(r) = m(r)V_1(r) \quad (9)$$

$$F_r = \int F_r(r) = \rho_r A I_h U^2 \int \frac{p(r, I_h) R^2(r)}{V_T(r)} dr \quad (10)$$



圖五：不同降雨強度時風速、雨滴衝擊力關係圖

3.4 雨滴衝擊力與純風力的比值

風吹至建築物上而完全靜止時，對建築物產生之壓力(q)，其與風速的關係如下式：

$$q = \frac{1}{2} \rho_w U^2 \quad (11)$$

其中，依台灣建築物耐風設計規範 ρ_w 取溫度 25°C 及一大氣壓力下之條件 $\rho_w = 1.2$ 。若再考慮形狀阻力，可得下式

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w U^2 \quad (12)$$

將上節的(10)與(12)相除，即可得雨滴衝擊力與建築形狀阻力的比值 RRW ，得以觀察雨滴衝擊力的重要性

$$R_{RW}(I_h, \rho_r, \rho_w, C_D, p, R, V_T) = \frac{F_r}{F_D} = \frac{2\rho_r I_h \int \frac{p(r, I_h) R^2(r)}{V_T(r)} dr}{C_D \rho_w} \quad (13)$$

4. 範例分析計算

將雨滴衝擊力與目前台灣公路橋梁規範中規範值做比較，其使用範圍限制為 150 公尺以下之橋梁，又風力負載規範值以設計風速每小時 200 公里為基準，設計風速如欲增減則以風速平方比增減之。

假設一：橋址位於台北地區，設計風速為每小時 200 公里，跨度不超過 150 公尺。

假設二：其風力以及雨力垂直衝擊到結構物上，不考慮其紊流效應。

● 步驟一

參閱表二 公路橋樑設計規範得規範之風壓

表二：公路橋樑設計規範得規範之風壓

構材	規範風壓(N/m ²)
桁架及拱	5680
梁	3820
直接作用於下部結構之力	3040

● 步驟二

查表 2 得台北地區回歸期雨量，利用式(10)可得雨滴衝擊力

$$F_r = \rho_r A I_h U^2 \int \frac{p(r, I_h) R^2(r)}{V_T(r)} dr = (1000)(I_h)(55.5^2) \int \frac{p(r, I_h) R^2(r)}{V_T(r)} dr \quad (14)$$

$$p(r, I_h) = \frac{dF(r)}{dr} \quad (15)$$

$$V_T = 9.5 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{2r}{1.77} \right)^{1.147} \right] \right\} \quad (16)$$

ρ_r ：水密度取 1000kg/m³

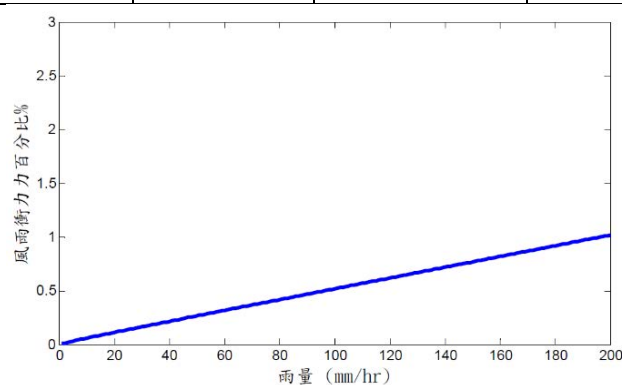
A：作用面積，取 1m² 單位面積

$p(r, I_h)$ ：本節雨滴分佈機率利用 Best 雨滴粒徑經驗分佈公式(2)

V_T ：雨滴終端速度公式

表三：雨滴衝擊力與桁架及汞規範風壓百分比計算

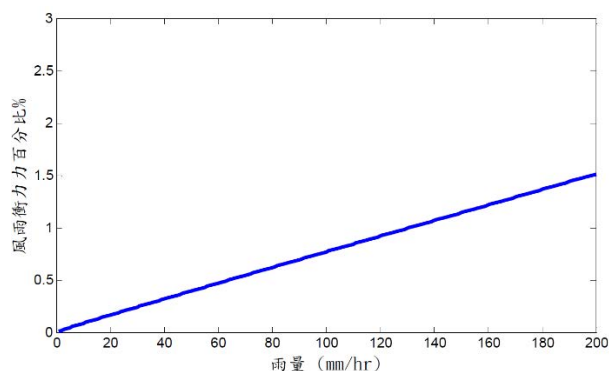
回歸期 (年)	降雨強度 (mm/hr)	規範風壓 (N/m ²)	雨滴衝擊力 (N/m ²)	風雨衝擊力百分比 (%)
5	69	5680	24.3718	0.43
10	81	5680	28.4528	0.5
25	97	5680	33.8802	0.6
50	109	5680	37.9426	0.67
100	122	5680	42.3369	0.75
200	135	5680	46.7255	0.82



圖六：雨滴衝擊力、梁之規範風壓百分比與雨量之關係圖

表四：雨滴衝擊力與橋梁規範風壓百分比計算

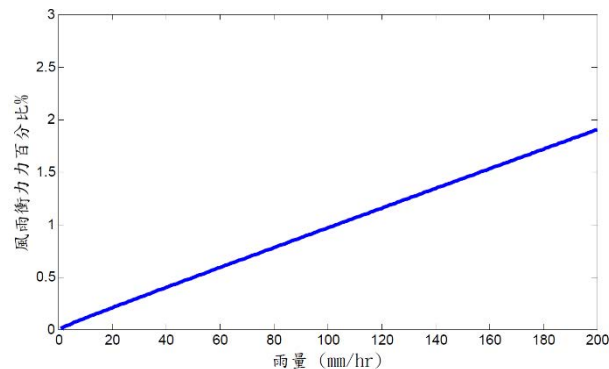
回歸期 (年)	降雨強度 (mm/hr)	規範風壓 (N/m ²)	雨滴衝擊力 (N/m ²)	風雨衝擊力百分比 (%)
5	69	5680	24.3718	0.64
10	81	5680	28.4528	0.74
25	97	5680	33.8802	0.89
50	109	5680	37.9426	0.99
100	122	5680	42.3369	1.11
200	135	5680	46.7255	1.22



圖七：雨滴衝擊力、梁之規範風壓百分比與雨量之關係圖

表五：雨滴衝擊力與直接作用於下部結構之規範風壓百分比計算

回歸期 (年)	降雨強度 (mm/hr)	規範風壓 (N/m ²)	雨滴衝擊力 (N/m ²)	風雨衝擊力百分比 (%)
5	69	5680	24.3718	0.8
10	81	5680	28.4528	0.94
25	97	5680	33.8802	1.11
50	109	5680	37.9426	1.25
100	122	5680	42.3369	1.39
200	135	5680	46.7255	1.54



圖八：雨滴衝擊力、直接作用於下部結構之規範風壓百分比與雨量之關係圖

本節將空氣密度、雨滴密度假設為定值不考慮其變化，雨滴粒徑分布、雨滴水平速度與風速比值和終端速度參考使用前人的經驗公式，算出雨滴衝擊力後與台灣公路橋梁規範中規定值做比較。雨滴衝擊力相較於桁架及拱規範風壓(5680N/m²)其值極小，就算是風速每小時 200 公里的同時，有回歸期

200 年的降雨量，其雨滴衝擊力與規範值的比值亦不到 1%。雨滴衝擊力與直接作用於下部結構之規範風壓(3040 N/m²)的比值，雖然比起桁架及拱較大，但仍然算很小，風速每小時 200 公里的同時，有回歸期 50 年的雨量時雨滴衝擊力與規範值的比值只有 1.25%。

本節將暴雨、強風的回歸期個別提出討論，但若得到暴雨強風的相關係數，可以提升本研究的準確度及參考價值。

5. 結論

本研究將風與雨的作用力分別討論，在求兩作用力的比值，藉以觀察與滴衝擊力的影響程度。風的部分；考慮形狀阻力，求得不同截面形狀建築的作用力。雨的部分；考慮不同雨強時雨滴粒徑分布會不同，雨滴粒徑則會影響終端速度和雨滴水平速度，進而影響水平雨量和水平衝擊力的大小。在假設成立下，探討其

風力以及雨力對結構物之受力情形，茲將以上各章節之探討與分析結果，歸納如下：

一、阻力係數越小的建築物其雨滴衝擊力與風力比值會越大，代表雖然設計時可以降低風力的影響力，但同時應該注意雨滴衝擊力的影響，而阻力係數越大，雨滴衝擊力佔風壓比例很小，幾乎可以忽略。

二、考慮實際雨速的水平雨量會是將雨滴速度視為和風速相等的 1.4 倍以上，雨量到達 50mm/hr 以上時可達到 1.7 倍之多，雨滴衝擊力更至少差 2 倍以上，雨量到達 50mm/hr 時更甚至差到 2.7 倍，因此可知將水平雨速與風速的比值是相當重要的。

三、台灣橋梁規範的部分，靜載重構材的風雨衝擊百分比都較低，台北地區使用 50 年回歸期雨強時的風雨衝擊百分比只有直接作用於下部結構之力為 1.25%，其他都不到 1%。

四、本研究計算水平雨量和雨滴衝擊力時將雨滴水平速度納入考慮，不將其視為與風速相等，使計算出來的值更接近實際值相較於前人，略有不同。另亦考慮到結構形狀阻力的不同，不同形狀會有不同的風雨衝擊比。

6. 參考文獻

- [1] A.C. Best, "The Size Distribution of Raindrops", Quart. J.R. Meteorol.soc., 76 (1950) 6-36
- [2] Y. Mualem and S. Assouline. , "Mathematical Model for Rain Drop Distribution and Rainfall Kinetic Energy", Tran. Amer. Soc. Agric. Eng., 29 (1986) 495-500.
- [3] Edmund C.C. Choi, "Characteristics of the co-occurrence of wind and rain and the driving-rain index", Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics 53(1994)49-62
- [4] Edmund C.C. Choi, "Wind-driven rain and driving rain coefficient during thunderstorms and non-thunderstorms", Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics 89(2001)293-308