

逢甲大學學生報告 ePaper

渦流試驗

Eddy Current Testing

作者：吳念謙、周俊豪

系級：水利工程與資源保育學系 三甲

學號：D0338305、D0338629

開課老師：許少華 老師

課程名稱：流體力學試驗

開課系所：水利工程與資源保育學系

開課學年：106 學年度 第 1 學期

中文摘要

藉由操作儀器造成強制渦流與自由渦流的流況。並比較強制與自由渦流的差異，進而了解可旋性流與非旋性流之特性。

自由渦流和強制渦流最大的不同在流動是否有旋轉的發生，旋轉渦流通稱為強制渦流(Force vortex)；無旋轉渦流一般的稱自由渦流(Free vortex)。使用儀器為一透明圓筒安置在電動馬達上(以供強制轉動圓筒之用)，可透過在圓筒兩側設置兩個進水孔，可透過水管連接抽水馬達，圓筒底部有一出水口，由出水口下方之閘門控制。

其實日常中有許多自由渦流與強制渦流的真實案例，而其種類分別有強制渦流、自由渦流或同時一起發生，透過實驗讓我們可了解其中的原理及奧妙，也可以了解日常生活當中實際案例，例如：洗衣機、颱風、龍捲風或浴缸排水時，排水口出現之自由渦流。

關鍵字：自由渦流、非旋流、旋流、強制渦流、渦流試驗。



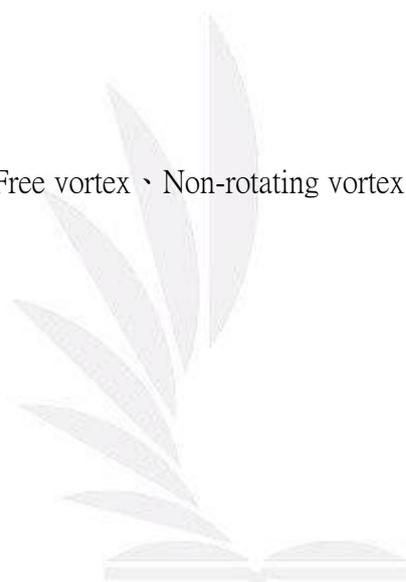
Abstract

By operating the instrument to know the Force vortex and Free vortex and compare the difference between the Force and Free vortex.

The most difference between the Free vortex and the Force vortex is whether it can rotate in the fluid. Rotating vortex is Force vortex ,and Non-rotating vortex is Free vortex. A transparent cylinder is on the electric motor. There are two water inlet holes on both sides of the cylinder to connect the water pumping motor , flow can through the water pipe, and water outlet is at the bottom of the cylinder.

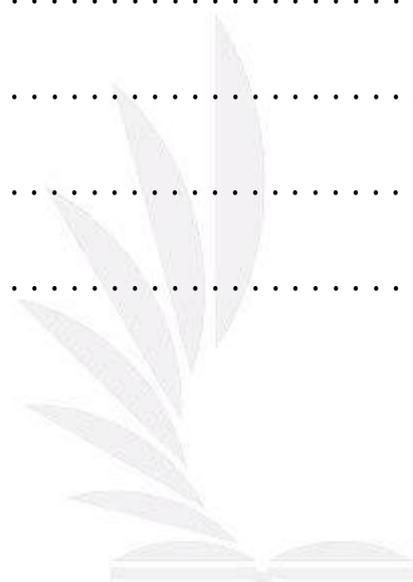
In fact, there are many real cases of the Free vortex and the Forced vortex. The types are Force vortex, Free vortex or both together. Experiments not only allow us to understand the principles and mysteries, but also make us to know actual cases in daily life such as washing machines, typhoons, tornadoes or bathtub drains.

Keyword : Force vortex 、 Free vortex 、 Non-rotating vortex 、 Rotating vortex



目 次

一、前言	4
二、試驗原理	5
三、試驗儀器	8
四、試驗步驟及流程.....	11
五、試驗數據	13
六、問題與討論	16
七、心得	19
八、參考文獻	19



流體力學試驗報告

第四章 — 渦流試驗



一、前言

藉由操作儀器造成強制渦流與自由渦流的流況。並比較強制與自由渦流的差異，進而了解可旋性流與非旋性流之特性。

二、試驗原理

● 強制渦流：

1. 基本假設：

在定量流、非可壓縮流場下，假設徑向、鉛垂向方向之速度為 0，且軸對稱($\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$)，流速僅有 θ 的分量且只是徑向 r 的函數，繞著 Z 軸旋轉。

2. 理論公式推倒：

由 Navier-Stokes 方程式之圓柱座標在 θ 方向上可表示如下式：

$$0 = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV) \right] \quad (4-1)$$

如此上式積分可得

$$v = \frac{c_1 r}{2} + \frac{c_2}{r} \quad (4-2)$$

因為在 $r=0$ ； V 唯有限值；因此 $C_2 = 0$ ，代入邊界條件 $r=R$ ； $V = R\omega$ ； $C_1 = 2\omega$ ， ω 為試驗儀的轉速(徑度)，單位為 **r. p. s**，因此流場的速度 = ωr 。又

Navier-Stokes 方程式之 r 、 z 分量為

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho \frac{v^2}{r} \quad (4-3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{p}{h} = -\rho g \quad (4-4)$$

$$dp = \frac{\partial P}{\partial r} dr + \frac{\partial P}{\partial h} dh = \rho \omega^2 r dr - \rho g dh \quad (4-5)$$

(4-5)是積分可得

$$P = \rho \frac{\omega^2 r^2}{2} - \rho g h + C_3 \quad (4-6)$$

代入邊界條件

$$r=0, \quad h=h_0, \quad P = P_0 \quad (4-7)$$

可得

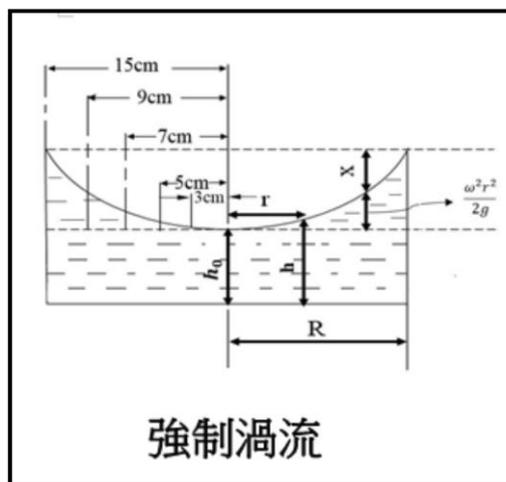
$$P - P_0 = -\rho g (h - h_0) + \frac{\rho \omega^2 r^2}{2} \quad (4-8)$$

水面之 $P = P_0$ ，代入(4-8)式可得強制渦流水面線方程式

$$h(r) = h_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g} = h_0 + \frac{v^2}{2g} \quad (4-9)$$

3. 結論：

強制渦流的水面高度增加率與半徑的平方成正比，也與轉速的平方成正比。 $h(r)$ 為不同半徑 r 的水面高度， h_0 為中心點之水位高， ω 為儀器轉速 ($V=\omega r$)， r 為半徑。



● 自由渦流：

1. 基本假設：

在定量流、非可壓縮流場下，假設徑向、鉛垂向方向之速度為 0，且軸對稱 ($\frac{\partial}{\partial \theta}=0$)，流速僅有 θ 的分量且只是徑向 r 的函數，繞著 Z 軸旋轉

2. 理論公式推倒：

由 Navier-Stokes 方程式之圓柱座標在 θ 方向上可表示如下式：

$$0 = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV) \right] \quad (4-10)$$

如此(4-10)式積分可得

$$V = \frac{C_{\theta} r}{2} + \frac{k}{r} \quad (4-11)$$

因為無線大，因此且帶入邊界條件，因此

$$rv = \text{constant} = k \quad (4-12)$$

又 Navier-Stokes 方程式之 r 、 z 分量為

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{V^2}{r} = \rho \frac{k^2}{r^3} \quad (4-13)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial h} = -\rho g \quad (4-14)$$

$$dp = \frac{\partial p}{\partial r} dr + \frac{\partial p}{\partial h} dh = \rho \frac{k^2}{r^3} - \rho g dh \quad (4-15)$$

(4-15)式積分可得

$$P = -\rho \frac{K^2}{2R^2} - \rho g h_1 + C \quad (4-16)$$

$$C = P_0 + \rho \frac{K^2}{2R^2} + \rho g h_1$$

代入(16)式得

$$P - P_0 = \rho g(h - h_1) - \rho \frac{k^2}{2} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) \quad (4-17)$$

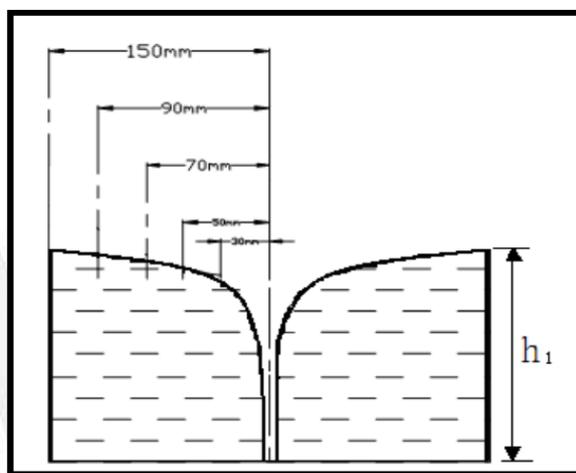
令 $P = P_{0+} + \rho \frac{k^2}{2r^2} = P_0^*$ 代入(4-17)式得

$$P - P_0^* = \rho g(h - h_1) - \rho \frac{k^2}{2r^2} \quad (4-18)$$

令水面之 $P - P_0^*$, 代入(4-18)式可得自由渦流水面限方程式

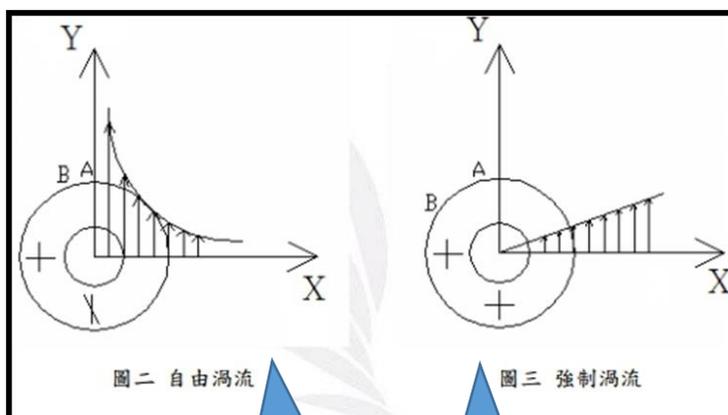
$$h(r) = h_1 - \rho \frac{k^2}{2gr^2} \quad (4-19)$$

其中 $h(r)$ 為半徑 r 處的水位高, h_1 為儀器邊壁的水位高, 為 r 半徑, k 為環流量(Circulation)用以表示渦流強度($k = \Gamma / 2\pi$)。



● 強制與自由渦流之原理總結

自由渦流和強制渦流的原理乃是大同小異, 最大的不同在流動是否旋轉的發生。假設小桿放於流暢 A 位置, 隨著流動至 B, 類似剛體旋轉的流動屬於旋轉流, 因此無法使用速度式表示, 此種旋轉渦流通稱為強制渦流(Force vortex); 無旋轉渦流一般的稱自由渦流(Free vortex); 無旋轉渦流一般的稱自由渦流(Free vortex)。



圖二 自由渦流
無旋轉

圖三 強制渦流
有旋轉

三、試驗儀器



主儀器：

渦流實驗儀

游標尺

透明圓筒





進水孔



碼表



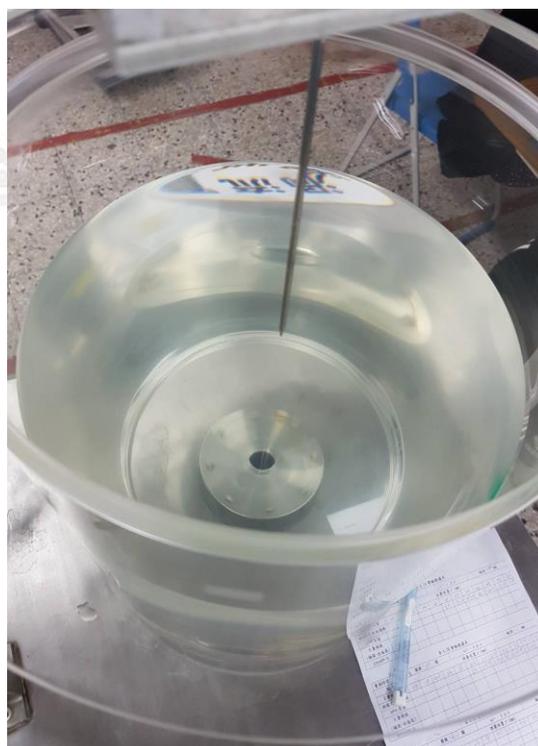
電源開關與馬達轉速控制



水準氣泡儀

四、試驗步驟及流程

1. 強制渦流實驗流程



2. 自由渦流實驗流程



五、試驗數據

1. 強制渦流實驗數據

表一：第一次實驗

量測時間： 40.36 sec	圈數： 50 圈				$\omega = 7.78$ r.p.s				桶深：273.2 mm			
NO.1	測量位置r (mm)											
X量測位置	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420
游標尺水面讀數	17.8	28.6	34.2	38.4	41.3	44.1	41.4	39	34.7	28.3	18.4	6.8
h*計算值	260.0	248.8	240.2	234.0	230.3	229.1	230.3	234.0	240.2	248.8	260.0	273.5
h量測值 (桶深-水面高)	255.4	244.6	239	234.8	231.9	229.1	231.8	234.2	238.5	244.9	254.8	266.4
$\Delta h = h^* - h$	4.6	4.2	1.2	-0.8	-1.6	0.0	-1.5	-0.2	1.7	3.9	5.2	7.1

表二：第二次實驗

量測時間： 36.03sec	圈數： 50 圈				$\omega = 8.72$ r.p.s				桶深： 273.2 mm			
NO.1	測量位置r (mm)											
X量測位置	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420
游標尺水面讀數	18.3	32.1	41.5	46.9	51.7	53	51.6	47.4	40.7	30.7	17.8	1.9
h*計算值	259.0	245.0	234.2	226.4	221.8	220.2	221.8	226.4	234.2	245.0	259.0	276.0
h量測值 (桶深-水面高)	254.9	241.1	231.7	226.3	221.5	220.2	221.6	225.8	232.5	242.5	255.4	271.3
$\Delta h = h^* - h$	4.1	3.9	2.5	0.1	0.3	0.0	0.2	0.6	1.7	2.5	3.6	4.7

表三:第三次實驗

量測時間： 31.25 sec	圈數： 50 圈				$\omega = 10.05$ r.p.s				桶深：273.2 mm			
NO.1	測量位置r (mm)											
X量測位置	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420
游標尺水面讀數	17.6	33.9	48.1	58.3	62.7	65	63.9	57.7	48.6	34.5	18	0
h*計算值	259.7	241.1	226.7	216.4	210.3	208.2	210.3	216.4	226.7	241.1	259.7	282.3
h量測值 (桶深-水面高)	255.6	239.3	225.1	214.9	210.5	208.2	209.3	215.5	224.6	238.7	255.2	273.2
$\Delta h = h^* - h$	4.1	1.8	1.6	1.5	-0.2	0.0	1.0	0.9	2.1	2.4	4.5	9.1

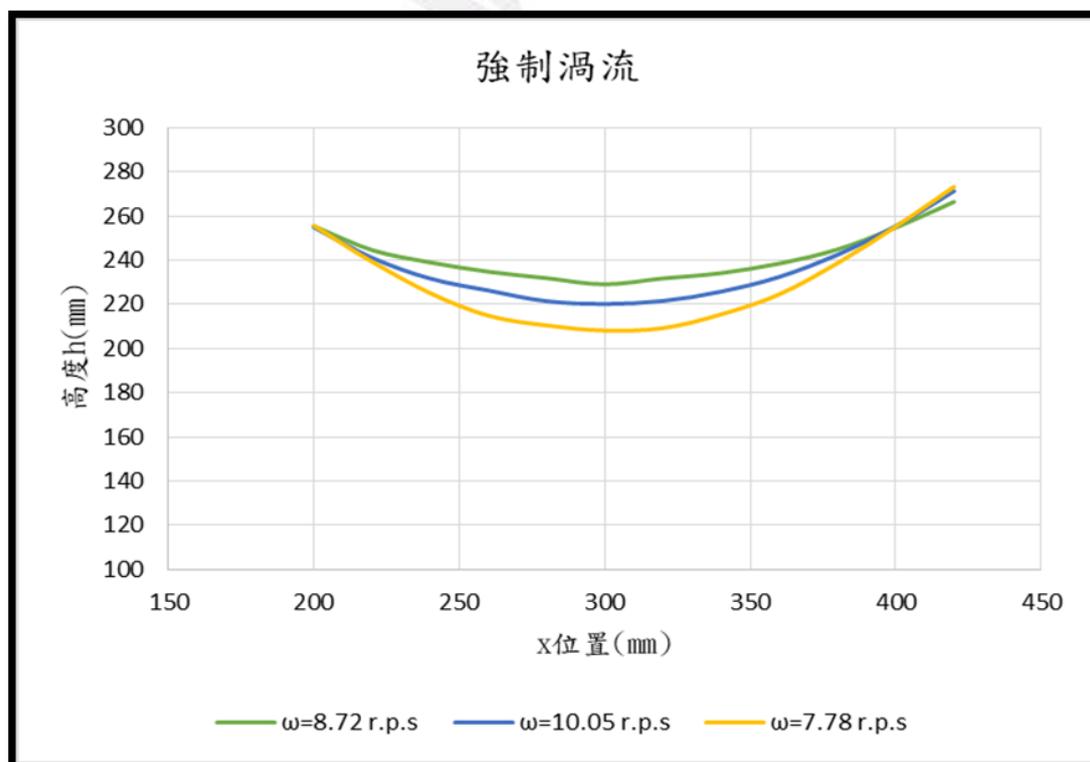
註：

$$1: h(r) = h_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g} = h_0 + \frac{v^2}{2g} r$$

2: 由水面量測器中心量起。

3: 計算時 ω 需為徑度，1 圈= 2π 。

4: $\omega = (\text{圈數} \times 2\pi) / \text{秒}$



2. 自由渦流實驗數據

表四：第一次實驗

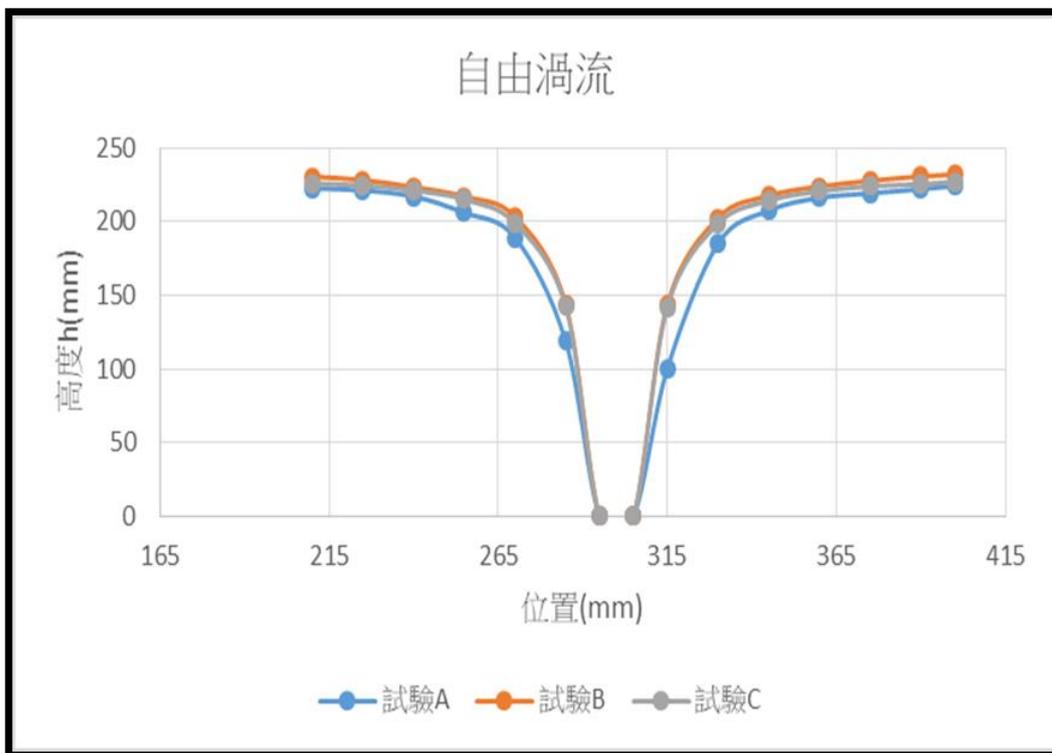
NO. 1	測量位置r (mm)										桶深： 273.2 mm			
X量測位置	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	375	390	
游標尺水面 讀數	50.5	51.9	56.1	67	84	154.5	273.2	173.1	88.2	65.6	57	53.9	51	
h量測值 (桶深-水面 高)	222.7	221.3	217.1	206.2	189.2	118.7	0	100.1	185	207.6	216.2	219.3	222.2	

表五：第二次實驗

NO. 1	測量位置r (mm)										桶深： 273.2 mm			
X量測位置	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	375	390	
游標尺水面 讀數	42.6	44.9	49.7	56.1	69.8	129.3	273.2	129.7	70.7	55.6	49.3	45.4	42.5	
h量測值 (桶深-水面 高)	230.6	228.3	223.5	217.1	203.4	143.9	0	143.5	202.5	217.6	223.9	227.8	230.7	

表六：第三次實驗

NO. 1	測量位置r (mm)										桶深： 273.2 mm			
X量測位置	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	375	390	
游標尺水面 讀數	47.3	48.6	52	58.1	74.2	130.9	273.2	131.4	74.6	58.9	52.5	49.2	47.7	
h量測值 (桶深-水面 高)	225.9	224.6	221.2	215.1	199	142.3	0	141.8	198.6	214.3	220.7	224	225.5	

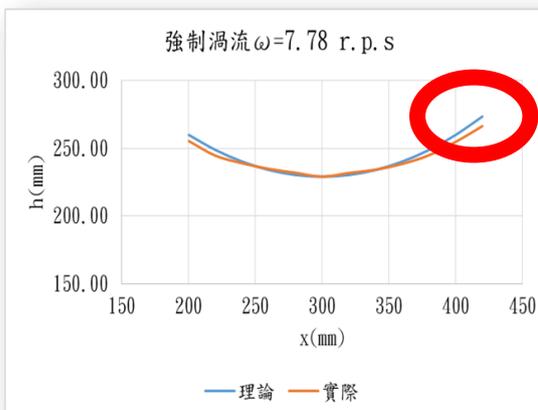


六、問題與討論

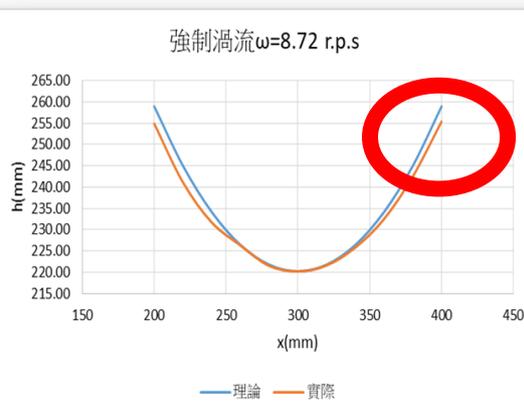
討論一

計算值，點繪其結果，並與理論值做比較

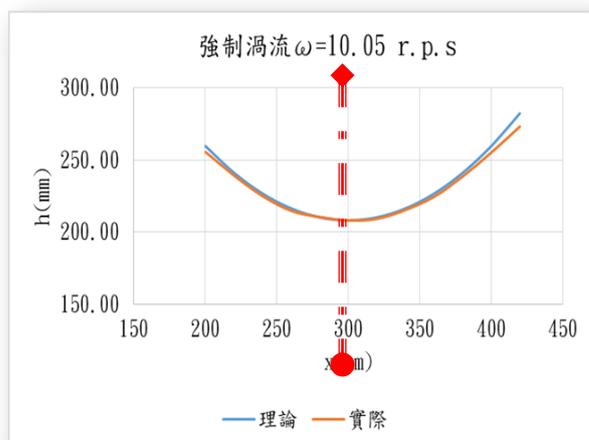
實驗一



實驗二



實驗三

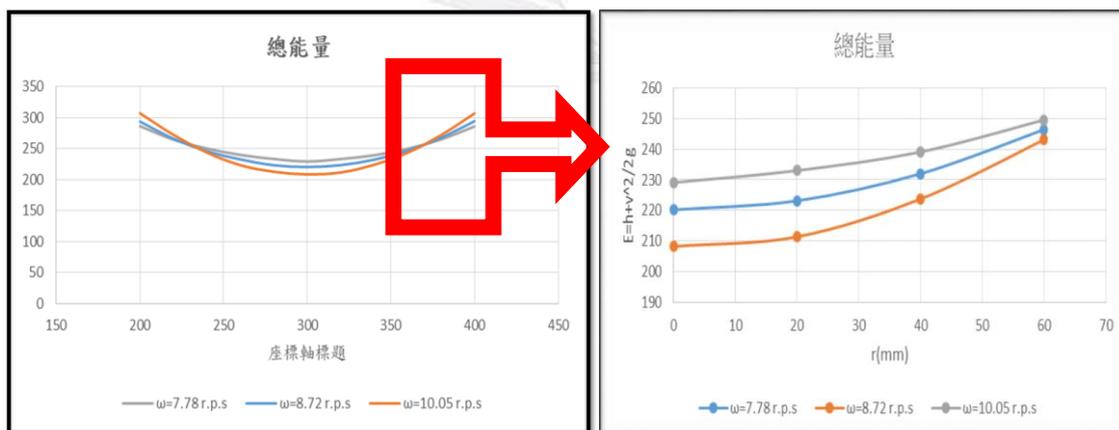


說明:

強制渦流實際值凹口較平緩，我們認為當中的誤差最大的原因，來自於實驗等待不夠久。而在第三次實驗中，可以發現左右邊不太對稱，極大可能因為故障的探針掉落所導致導致。

討論二

試問強制渦流各位置之總能量 ($P/\rho g + h + v^2/2g$) 是否為定值，試繪其與 r 值之關係



說明:

強制渦流各位置之總能量趨近於定值

討論三

液體之黏滯性對強制渦流的影響為何，試說明？

答案：

強制渦流類似剛體旋轉，一般理想化的狀態下，我們會將其視為剛體運動，在流體中每個流體質點均具有相同的加速值，則不會有變形產生，及沒有剪應力。但實際中，我們必須將黏滯性考慮進去，所以在實驗中流體液面會有剪應力的產生，當然就會有變形。

液體也會互相對邊壁有較大吸附力，所以如果物體的黏滯力較大的話，應該要再加入摩擦力的討論。

討論四

討論自由渦流與強制渦流之異同

答案：

強兩者差異最大的不同點是流動是否有旋轉的發生。

1. 有旋性的(rotational)稱為強制渦流(forced vortex)。
2. 無旋性渦流則稱為自由渦流(free vortex)。

✚ 補充:無旋性是指流體元素不旋轉，不是指元素行進的路徑。

討論五

請舉例哪些為強制渦流；舉例哪寫些為自由渦流

答案：

1. 強制渦流:果汁機攪拌時、洗衣機。
2. 自由渦流:浴缸排水時，排水口出現自由渦流、源流、沉流、龍捲風。

✚ 補充:

颱風是同時由(強制渦流及自由渦流)形成，颱風中心屬於低氣壓區，流體因為壓力差的關係，會從高壓區往低壓區流動。因此受到壓力梯度力的影響，導致空氣會由外向內流動。而外圍則由地球科勢力影響。**越外圍V小，越往內V大，颱風眼V=0**

七、心得

吳念謙：

這次的渦流實驗有滿多瑕疵的，像是其中的測量水深的探針因為故障，所以會上下移動無法固定，在數值上面的量測或許會有些許誤差。自由渦流實驗要調整出放水平衡，靜置一段時間，穩定後量測水面讀數，一定要有耐心，否則水流沒穩定會有兩邊量測不對稱的情況發生。強制渦流是把出水口和進水口關閉，量測水面的讀數，大致上不太有問題，唯一可能水曲線上面有些許波浪，量測難免有誤差。實驗一定不可能跟理論相同，頂多相近而已，就算任何細節都注意到了，還是會因理論值計算時沒把黏性算進去而有所偏差。

周俊豪：

這次的實驗過程很輕鬆，只要注意測量時不要有看錯刻度的問題。但是在等候強制渦流到達平衡很耗時間，有幾次甚至已經測量了一半才發現還未平衡。在數據的計算上比較繁複，不過，一台小儀器能製造出旋渦滿特別的。

八、參考文獻

- 流體力學試驗手冊（許少華 教授 編著）