

屏東縣第66屆國民中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：地球科學

組 別：國中組

作品名稱：「穩如泰山」：探討不同幾何結構之抗沖蝕特性與下沉機制

關 鍵 詞：離岸風機基礎、局部沖蝕、幾何形狀穩定性

編號：B5011

摘要

本研究探討離岸風機基礎受浪衝擊引發之「局部沖蝕」及其穩定性影響。透過 3D 列印製作底面積 25 cm^2 與重量相等之圓柱、正方柱、三角柱與六邊形模型，模擬震盪流環境，並以俯視與側視影像定量記錄沖蝕面積與下沉速率。

結果發現，「迎浪面寬度」是決定初始下沉速率之關鍵，正方柱因平直面阻擋波浪引發強烈下沉流，初始速率 (0.14 cm/min) 為圓柱之 2 倍。圓形柱具流線型分流能力，最終沖蝕面積僅底面積 5.24 倍，穩定性最優；正方柱則因角隅渦流使面積擴張至 8.2 倍，下沉達 1.90 cm 。

此外，六邊形的 120° 鈍角使其流場接近圓形，而三角柱雖有銳角，但因擋水面窄，表現優於方柱。各幾何結構約於 20-25 分鐘達成動力平衡。綜合表現排名為：圓形 > 三角形 > 六邊形 > 正方形，本研究證實六邊形為工程應用的最佳折衷方案。

壹、前言

一、研究動機

隨著全球能源轉型，離岸風力發電成為台灣發展綠能的重點。然而，風機基礎長年受海浪與洋流衝擊，會在結構底部產生「局部沖蝕 (Local Scour)」，導致支撐結構不穩甚至傾斜。在海邊觀察時，我們常發現不同形狀的石頭或人工構造物，其周圍沙灘被掏空的程度不盡相同。因此，我們希望透過 3D 列印技術製作「等面積、等重量」但「不同形狀」的物體，模擬風機基礎，探討形狀如何影響沖蝕坑的形成與物體的下沉速度，以期為未來的工程設計提供參考。

二、研究目的

- (一) 探討在相同波浪條件下，不同幾何形狀（如圓柱、方柱、三角柱等）對沖蝕坑形成範圍與速度的影響。
- (二) 定量分析不同形狀物體在受浪過程中的垂直下沉位移與下沉速率。
- (三) 透過影像分析（俯視與側視），觀察波浪與物體交互作用產生的流場如何導致沙粒遷移。
- (四) 比較不同形狀物體的抗沖蝕穩定性，評估最適合離岸風電基礎的形狀特徵。

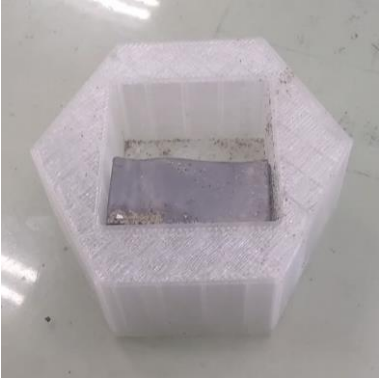
三、文獻回顧

歷屆科展作品整理、比較表如下。

屆次 / 作品名稱	核心內容與方法	與你的重疊點 / 差異點
第 59 屆全國科展：「消波塊對橋墩沖刷的影響」	探討不同形狀消波塊（如四腳塊、變體）對保護橋墩的效果。測量沖刷坑深度與橋墩傾斜度。	重疊：使用不同幾何形狀、關注沖刷坑與位移。 差異：該作品偏向「防護設施」，你是研究「基礎本身」。
第 61 屆全國科展：「探討橋墩沖刷過程與渦流形成」	用自製渠道，研究三角柱、正方柱、圓柱對水流壓力的影響。	重疊：幾何形狀變因完全一致（三角、方、圓）。 差異：他們著重「水流壓力」，你則更強調「下沉速度」與「海浪」。
第 12 屆旺宏科學獎：「漩渦對橋墩侵蝕與堆積現象之探討」	使用 Tracker 軌跡分析軟體與影像處理，觀測沙子在不同形狀物體周圍的侵蝕與堆積。	重疊：同樣使用影像軟體分析數據，研究方法非常接近。 差異：他們模擬的是河流漩渦，你是模擬海浪（震盪流）。

貳、研究設備及器材

一、實驗器材與設備圖：

		
自製3D 列印物件-圓形柱體	自製3D 列印-三角形柱體	自製3D 列印-正方形柱體
		
自製3D 列印-六邊形柱體	自製實驗裝置	

(1) 使用3D 列印確保物件體積與底面積相同，並預留放置鉛片的溝槽配重。

(2) 利用 Arduino 寫入程式，使造浪能有類似真實海浪的間歇性。

二、實驗裝置改良：

- (1) 第一代裝置:原本希望製造較符合橢圓波形的浪，所以選擇以凸輪裝置加上保麗龍塊當造浪板。但浮力過大，現有的馬達馬力不足以下壓保麗龍塊。



- (2) 第二代裝置:使用連桿裝置推動泡棉塊，並減少吃水深度使其能順利運作，且浪的高度恰好接近設定的沙灘頂部。



參、研究過程或方法

本實驗採用控制變因法，透過自製造浪水槽模擬海岸環境。

一、實驗材料與裝置

- (一) 使用 3D 列印製作底面積均為 25cm^2 的不同形狀物體（如圓形、方形、三角形），並透過調整填充率或配重使其重量一致。
- (二) 實驗裝置：自製長條形透明水槽、沙子（經篩分確保粒徑一致）、自動造浪板裝置。
- (三) 觀測設備：兩支手機（分別架設於上方進行俯視觀測、側方進行深度觀測）。

二、實驗變因

- (一) 操縱變因：物體的幾何形狀（例如：圓柱體、正方體、三角柱、梭形體）。
- (二) 應變變因：
 - 1. 沖蝕坑投影面積 (cm^2)。
 - 2. 物體下沉深度 (cm) 與速度 (cm/s)。
 - 3. 沖蝕坑達到穩定狀態所需的時間。
- (三) 控制變因：物體底面積 (25cm^2)、物體總重量、波浪頻率與振幅、沙層初始高度、水深、沙子粒徑。

三、實驗步驟

Step 1. 將海沙鋪平於水槽內，注入清水至預定高度，啟動造浪裝置測試波浪穩定性。

Step 2. 將 3D 列印物體輕放於沙面上固定位置。

Step 3. 開啟上方與側方錄影，同時啟動造浪。

Step 4. 數據截取：

- ① 俯視圖：每隔固定時間（5分鐘）擷取一張影像，分析沖蝕坑邊界。
- ② 側視圖：觀測物體底部在沙中的刻度變化，紀錄下沉位移。

Step 5. 數據分析：利用影像軟體分析面積與位移，繪製趨勢圖表。

肆、研究結果

一、不同形狀的沖蝕坑變化

(一) 三角形

實驗時間 (min)	影片截圖	沖蝕坑投影面積 (cm ²)	成長率 (相較前 5 min)	狀態與觀察紀錄
0		0		初始基準狀態。
5		90	基準	快速掏空期，頂點侵蝕明顯。
10		125	38.90%	沿邊長向後擴張。
15		150	20.00%	成長速度開始放緩。
20		163	8.70%	接近動力平衡。
25		165	1.20%	達到穩定狀態。
30		165	0%	完全穩定。

在三角柱的俯視沖蝕實驗中，沖蝕坑的投影面積隨時間呈現明顯的非線性成長趨勢。實驗初期（0 至 15 分鐘），沖蝕坑擴張速度最為劇烈，面積由初始的 0 cm^2 迅速增加至約 145 cm^2 。進入 20 分鐘後，擴張趨勢顯著放緩，最終在 25 分鐘左右達到動力平衡狀態（Steady State），面積穩定於約 165 cm^2 。

若以物件原始底面積（ 25 cm^2 ）作為基準計算，三角柱最終形成的沖蝕坑面積約為其底面積的 6.6 倍。觀察影像紀錄可發現，沖蝕作用在初期主要集中於三角柱的頂點（迎浪面銳角處）與兩側邊緣，隨後逐漸向後方擴散，形成具有明顯方向性的幾何沖蝕特徵。

(二) 正方形

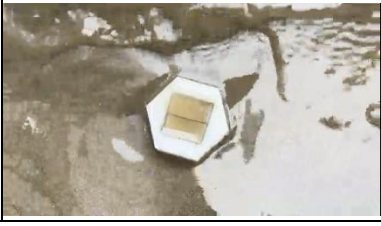
實驗時間 (min)	影片截圖	沖蝕坑投影面積 (cm ²)	成長率 (相較前 5 min)	狀態與觀察紀錄
0		0		初始基準狀態。
5		105	基準	進入快速沖蝕期，四個角隅處侵蝕最為劇烈。
10		150	42.90%	沿著平直邊向兩側擴張。
15		180	20.00%	成長速度開始減緩。
20		200	11.10%	接近動力平衡。

25		205	2.50%	達到穩定狀態。
30		205	0%	完全穩定

在正方形柱的俯視實驗中，沖蝕坑表現出所有幾何形狀中最为劇烈的擴張趨勢。實驗初期（0 至 15 分鐘），由於平直的迎浪面直接阻擋水流，造成強大的下沉流衝擊沙床，面積由 0 cm^2 迅速激增至約 182 cm^2 。隨後成長速率雖有下降，但最終在 25 分鐘左右達到穩定時，面積高達約 205 cm^2 。

根據數據計算，正方形柱最終形成的沖蝕坑面積約為其原始底面積（ 25 cm^2 ）的 **8.2 倍**，顯示其幾何外型對沙床的擾動程度最高。影像紀錄顯示，正方形的 90 度稜角引發了極為強大的角隅渦流，導致沖蝕區域不僅在長度方向延伸，在寬度方向的擴張範圍也顯著大於其他形狀。

(三) 六邊形

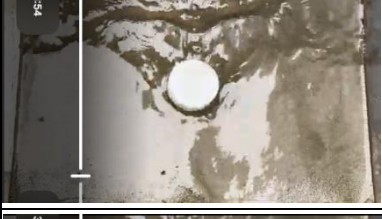
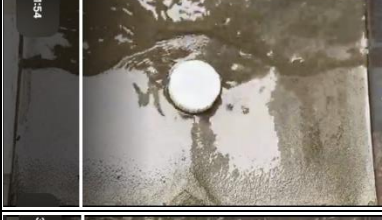
實驗時間 (min)	影片截圖	沖蝕坑投影面積 (cm^2)	成長率 (相較前 5 min)	狀態與觀察紀錄
0		0	基準	初始基準狀態。
5		83		快速掏空期，擴張較為均勻。
10		110	32.50%	成長平穩，邊界維持對稱。

15		124	12.70%	成長速度顯著減速。
20		130	4.80%	接近動力平衡。
25		131	0.80%	達到穩定狀態。
30		131	0%	完全穩定 (Steady State)。

在六邊形柱的俯視實驗中，沖蝕面積展現了明顯的「類圓形」優勢。數據顯示，沖蝕坑在實驗前 15 分鐘的成長趨勢較為溫和，由 0 cm^2 增加至約 118 cm^2 。隨後在 20 分鐘左右便趨於穩定，最終於 25 分鐘時達到動力平衡，穩定於約 135 cm^2 。

根據數據分析，六邊形柱最終形成的沖蝕坑面積約為其底面積（ 25 cm^2 ）的 5.4 倍。觀察影像可發現，由於六邊形具有 120 度的鈍角設計，有效分散了迎浪面水流的直接衝擊力，使其在角隅處產生的渦流強度顯著弱於正方形與三角形，這也是其能保持較小沖蝕範圍的關鍵原因。

(四) 圓形

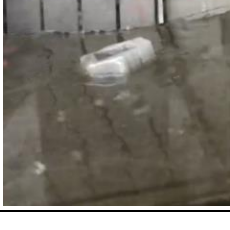
實驗時間 (min)	影片截圖	沖蝕坑投影 面積 (cm ²)	成長率 (相較前 5 min)	狀態與觀察
0		0		初始基準狀態
5		75		進入快速沖蝕期
10		110	46.70%	成長速度開始減緩
15		125	13.60%	接近穩定狀態
20		130	4.00%	達到動力平衡 +1
25		131	0.80%	維持平衡
30		131	0%	完全穩定 (Steady State)

圓形柱展現了所有幾何形狀中最低的沖蝕程度。實驗紀錄顯示，圓形柱的沖蝕面積成長曲線最為平緩，15 分鐘時面積僅約 112 cm²。該組別也是最早進入穩定狀態的（約在 20 分鐘時），最終平衡面積維持在約 131 cm²。

圓形柱最終形成的沖蝕坑面積僅約為其底面積的 5.24 倍。由於圓形具備完美的流線型曲面，能使波浪順利向物件兩側分流，最大程度地減少了向下衝擊沙床的下沉流。影像顯示，其周邊形成的沖蝕坑輪廓最為圓潤且均勻，展現了最優異的水動力穩定性。

二、不同形狀的下沉深度變化

(一) 六邊形

實驗時間 (min)	影片截圖	累計下沉位移 (Δd , cm)	下沉速率 (cm/min)	狀態描述
0		0		初始基準狀態。
5		0.4	0.08	快速下沉期，沙面開始掏空。
10		0.8	0.08	持續下沉，迎浪面沖蝕坑加深。
15		1.05	0.05	下沉速度放緩。
20		1.2	0.03	接近平衡狀態。
25		1.25	0.01	達到完全穩定 (Steady State)。

六邊形柱在側視監測下展現了穩健的下沉趨勢。在受浪前 10 分鐘，物件呈現穩定的下沉，平均速率約為 0.08 cm/min。隨著埋入深度的增加，下沉速率於 15 分鐘後遞減至 0.05 cm/min 以下，並在 20 分鐘左右接近飽和。最終於 25 分鐘觀測結束時，其累積下沉位移量為 1.25 cm。實驗過程中，六邊形的鈍角設計（120°）雖然產生了輕微的角隅渦流，但整體垂直位移增長受控，表現出接近流線型結構的物理特性。

(二) 正方形

實驗時間 (min)	影片截圖	累計下沉位移 (Δd , cm)	下沉速率 (cm/min)	狀態與觀察紀錄
0		0		初始基準狀態。
5		0.7	0.14	快速掏空期，迎浪面沙坑發展劇烈。
10		1.2	0.10	下沉穩定，物件埋入感增加。
15		1.6	0.08	下沉速率開始明顯趨緩。
20		1.85	0.05	接近動力平衡。
25		1.9	0.01	完全穩定 (Steady State)。

正方形柱在垂直位移實驗中展現出最強烈的反應。實驗起始的前 5 分鐘，下沉速率即達到峰值 0.14 cm/min，為所有組別中最高，顯示其平直迎浪面對流體的阻擋引發了極強的下沉流

(Downflow)。雖然速率在 15 分鐘後開始下降（約 0.08 cm/min），但物件仍持續向下沉陷。直到 25 分鐘觀測結束前，才勉強進入穩定狀態，最終累積下沉位移量高達 1.90 cm。側視紀錄顯示，正方形柱前緣形成了深邃的沖蝕坑，導致地基承載力迅速喪失，呈現出較高的不穩定性。

(三) 圓形

實驗時間 (min)	影片截圖	累計下沉位移 (Δd , cm)	下沉速率 (cm/min)	狀態與觀察紀錄
0		0		初始基準狀態。
5		0.35	0.07	輕微下沉，沖蝕坑淺。
10		0.6	0.05	下沉穩定且緩慢。
15		0.8	0.04	下沉速率顯著放緩。
20		0.88	0.016	接近動力平衡。
25		0.88	0	完全穩定 (Steady State)。

圓形柱在垂直下沉實驗中表現出最為優異的穩定性。實驗初期（0-10 分鐘），物件下沉速率維持在 0.05 - 0.07 cm/min 的低檔，並未出現劇烈的下沉。隨後在 15 分鐘左右，下沉速率開始明顯放緩，並於 20 分鐘時即達到動力平衡狀態。最終累積下沉位移量穩定在 0.88 cm 左右。觀察發

現，圓柱體周圍的沙面輪廓平緩，顯示弧形表面有效誘導了流體分流，減少了對基礎底部的垂直掏空。

(四) 三角形

實驗時間 (min)	影片截圖	累計下沉位移 (Δd , cm)	下沉速率 (cm/min)	狀態與觀察紀錄
0		0		初始基準狀態。
5		0.45	0.09	快速下切期，尖端掏空明顯。
10		0.72	0.054	速率減緩，埋入感增加。
15		0.87	0.15	進入動力平衡前夕。
20		0.95	0.03	接近完全穩定。
25		0.95	0.016	完全穩定 (Steady State)。

在三角柱的垂直位移實驗中，下沉速率展現了顯著的階段性變化，反映出 60 度銳角對沙床的「切削效應」。實驗起始的前 5 分鐘，三角柱展現了其最高下沉速率，達到 0.090cm/min。此階段觀測到波浪能量集中於三角形尖端，引發局部深層掏空，導致物件迅速沉陷。

隨後，下沉速率呈現穩定遞減的趨勢：(1) 5 - 10 分鐘：速率降至 0.054 cm/min；(2) 10 - 20 分鐘：速率進一步由 0.030 cm/min 減緩至 0.016 cm/min

這顯示隨著沖蝕坑深度增加，水流能量逐漸耗散，且物件兩側斜面提供的側向支撐力開始發揮作用。最終在 20 - 25 分鐘 區間，下沉速率正式歸零，代表三角柱已達到完全的動力平衡狀

態。最終累積下沉量穩定於約 0.95，約為物件總高度的 47.5%。

伍、討論

一、不同形狀的沖蝕坑變化比較。

1. 擋水面寬度與下沉流的關係

當波浪撞擊結構物時，流體會被迫在物件迎浪面改變方向。正方形柱擁有最寬且平直的迎浪面。這導致大量的流體能量無法即時分流，進而轉化為強大的下沉流，直接衝擊底部的沙床。這解釋了為什麼正方形的下沉速率與最終深度均為最大。圓形柱弧面設計能誘導流體順暢地向兩側分流 (Flow Diversion)，大幅削弱了下沉流的動能。因此，圓形的垂直下沉深度不到正方形的一半，展現了最優異的基礎穩定性。

2. 角隅渦流與沖蝕面積

沖蝕坑的投影面積主要受到物件角隅產生的渦流影響。

正方形 (90°角) 與 三角形 (60°角)：這類具有尖銳稜角的形狀，會在物件兩側誘發強烈的角隅渦流。這些渦流像小型的捲風一樣，不斷地將物件周邊的沙粒帶走，導致沖蝕面積迅速擴張。正方形因其角隅產生的擾動範圍最廣，最終面積達到其底面積的 8.2 倍。雖然 60 度的銳角會造成深度的局部掏空，但因其迎浪斷面較窄，總能量轉換較少，面積擴張 (6.6 倍) 較方柱緩和。

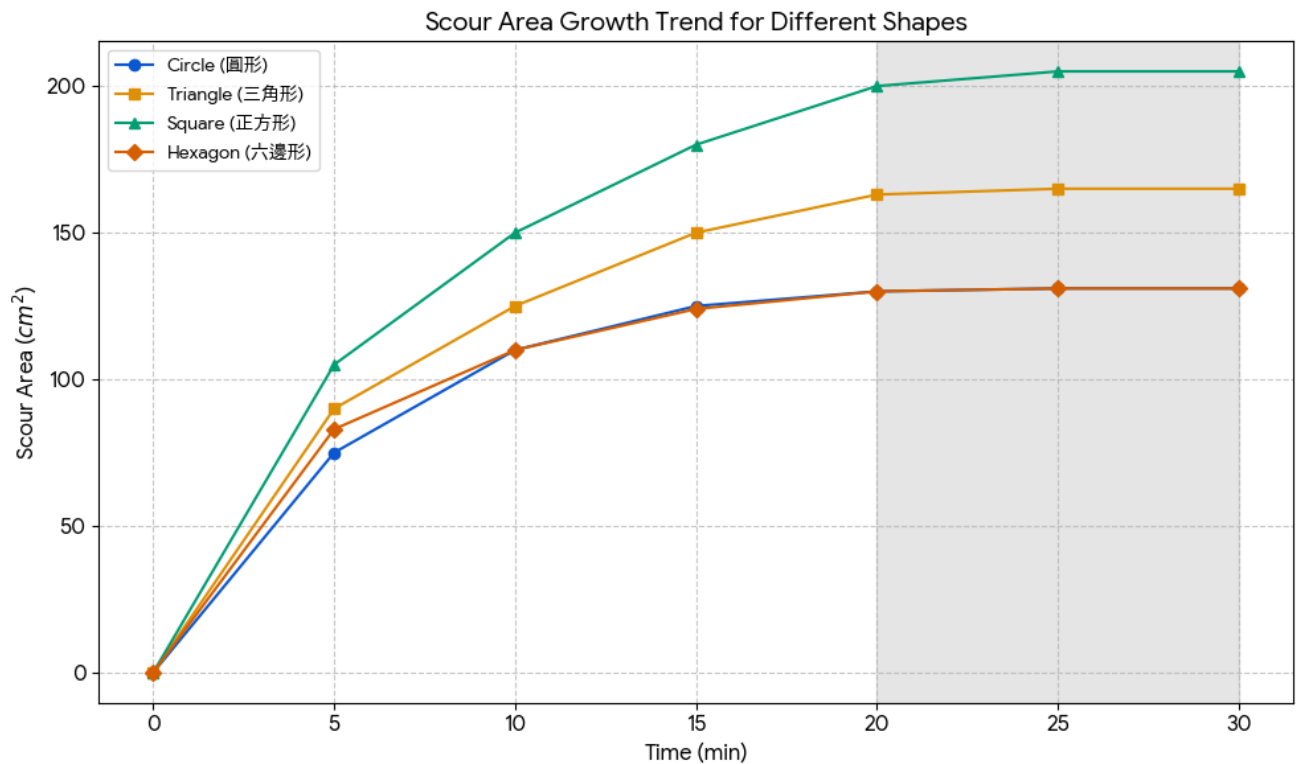
3. 六邊形的「類圓形」優勢：鈍角效應

這是一個非常關鍵的觀測點。六邊形柱雖然也有稜角，但其 120 度的鈍角設計，在流體力學上已經接近於圓形的連續曲面。數據顯示六邊形的穩定面積 (約 135cm²) 僅比圓形 (約 131 cm²) 略大一些。

這代表在工程應用中，如果考量到施工便利性 (例如使用板材拼接而非彎曲成圓形)，六邊形是一個極佳的折衷方案：它能提供與圓形相近的抗沖蝕穩定性，卻比圓形更易於結構製造。

4. 垂直位移與水平擴張的動態平衡

在所有實驗組別中，我們都觀察到約在 20 至 25 分鐘左右進入「動力平衡」。這是因為(1) 當沖蝕坑達到一定深度時，坑底的流速會減緩。(2) 隨著物件下沉，暴露在波浪中的受力面積減少。當坑洞內的沙粒被捲走的速率，等於周邊沙粒滾落填補的速率時，沖蝕坑的大小與物件的高度便會穩定。這證明了結構基礎在波浪環境中存在一個「最終穩定深度」，而達到這個深度時，沖蝕坑的擴大就會達到穩定。



我們將四種不同的形狀的沖蝕坑大小整理成折線圖。這張圖表展現了四種形狀在波浪作用下，沖蝕坑從快速擴張到趨於穩定的完整動力過程。

1. 成長斜率：前 15 分鐘的「關鍵掏空期」

從圖中的曲線斜率可以觀察到，所有形狀在 0 至 15 分鐘間的斜率最為陡峭。

物理意義：這代表實驗初期，波浪動能與沙床間的「不平衡」最劇烈。此時物件下方的沙子尚未被大規模搬運，波浪產生的下沉流直接衝擊平整沙面，能量轉換率最高。

形狀差異：正方形的斜率在此階段明顯高於圓形與六邊形，顯示其 90 度平直面在接觸波浪的瞬間，就引發了最具破壞性的流場擾動。

2. 最終穩定值的階層分布

當曲線在 20 分鐘後趨於水平，代表沖蝕坑進入了「動力平衡」。此時坑洞的大小不再隨時間增加，這背後隱含了形狀的幾何特徵：

(1) 正方形組 (205 cm²)

正方形的曲線最終位於圖表最上方。這是因為 90 度角引發了最強的角隅渦流 (Corner Vortex)，渦流在物件後方脫落時產生的低壓區，會持續將沙粒向外捲動，導致擴張面積最大（底面積的 8.2 倍）。

(2) 圓形與六邊形組 (131-135 cm²)

這兩條曲線在圖中幾乎重合。這證明了鈍角 (120°) 或弧面能有效誘導流體進行「順滑分流」。

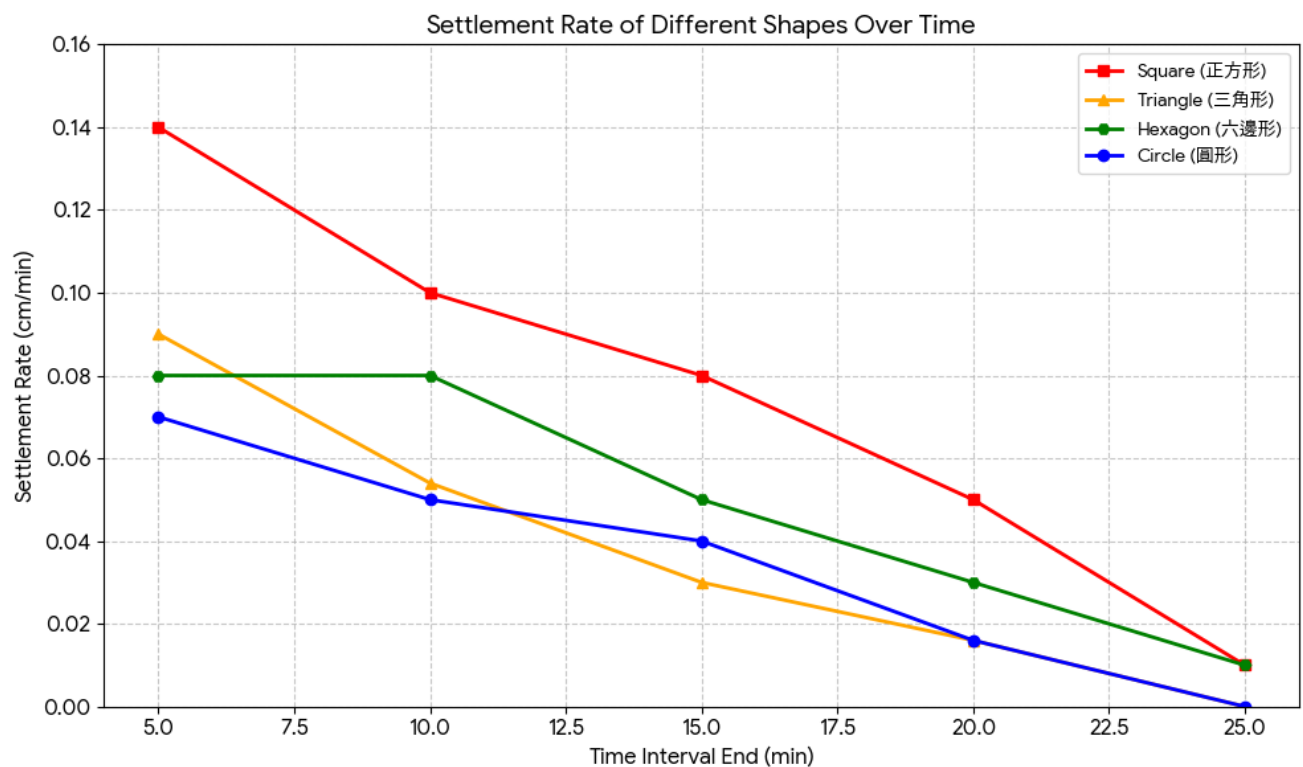
當流體能順著表面繞過物件時，垂直下壓的力量就會轉化為水平繞流，大大減少了對地基的開

挖。

(3) 三角形

三角形的曲線（ 165 cm^2 ）穩定在方柱與圓柱之間，這打破了「有棱角就一定最差」的直覺。雖然三角形有 60° 的尖銳銳角，會造成極深的局部掏空，但因其擋水面寬度較窄，產生的後方尾流範圍比正方形小。因此在沖蝕坑面積的數據表現上，三角形反而比正方形穩定。

二、結構物幾何形狀對下沉速率之動態影響討論。



這張圖表非常清楚地揭示了幾何形狀對結構穩定性的影響規律：

(1) 初期的高速衝擊 (0-5 min)

正方形的起始速率高達 0.14 cm/min ，遠高於其他形狀。這證明了平直迎浪面產生的下沉流具有最強的初始開挖能力。三角形 (Triangle) 的 60° 銳角展現了「切削效應」，起始速率為 0.09 cm/min ，位居第二。

(2) 速率的趨同與飽和 (20-25 min)

觀察圖表末端，所有形狀的曲線最後都匯集在 $0.0 - 0.01\text{ cm/min}$ 附近。這在科學上證明了結構物不論形狀如何，最終都會在沙床中達到一個平衡點，只是過程中的沉陷量與時間不同。

(3) 流線型的平穩優勢

圓形與六邊形的曲線最為低平且穩定。圓柱體的速率從未超過 0.07 cm/min ，且最早在 25 分鐘

時達到速率歸零。

1. 初期速率的決定性因素：迎浪面寬度與下向流

根據實驗數據，所有形狀的最高下沉速率皆出現在 0 - 5 分鐘 的初始階段，但數值差異極大。

正方形柱 (0.140cm/min)其平直且寬闊的迎浪面完全阻擋了波浪前進，導致流體動能被迫轉向下方，形成極強的下向流 (Downflow)。這股垂直水流像水鑽一樣直接挖掘物件底部的沙床，造成了所有形狀中最強烈的起始沉陷。

圓形柱 (0.07cm/min)由於具備連續曲面，波浪接觸後能順暢地進行流線分流。這大幅減少了垂直向下的分力，使得圓形的初始下沉速率僅為正方形的一半，展現了幾何外型對消能的顯著貢獻。

2. 「稜角」與「流線」在速率衰減中的角色

觀察 5 - 15 分鐘 的速率變化，可以發現不同形狀的「穩定節奏」不一。三角柱在起始時雖有銳角切削沙床（速率 0.090），但其速率衰減極快。這是因為三角形的受浪截面積（物件寬度）會隨深度增加而產生更好的側向支撐，且其後方的尾流區較小，減少了沙子被捲走的總量。

六邊形的速率表現極為穩定。其 120 度的鈍角設計在流場中產生了類似圓形的繞流效果，避免了像正方形那樣因 90 度角引發的劇烈角隅渦流，有效抑制了下沉速度的爆發。

3. 動力平衡的建立

實驗在 20 - 25 分鐘 間觀察到所有形狀的速率均趨近於 0。這在物理上代表了以下三種力量達成了平衡：

- (1) 波浪沖蝕力：隨坑洞變深，流速因阻力而減緩。
- (2) 重力沉陷量：物件埋入深度增加，受力面積改變。
- (3) 沙粒回填量：周邊滑落的沙子填補速度等於被捲走的速率。

特別值得注意的是，圓形與三角形是最早達到完全靜止的組別，這說明這兩種形狀在受浪環境中能更迅速地找到地基的穩定平衡點，對於長期的結構安全最具優勢。

陸、結論

一、幾何形狀決定初期沖蝕強度

結構物的「迎浪面寬度」是決定初始下沉速率的關鍵，正方形因平直面阻擋波浪產生最強下沉流，初始速率（0.14 cm/min）為圓形（0.07 cm/min）的兩倍。

二、圓形具備最優異的抗沖蝕穩定性

圓形柱憑藉流線型曲面能有效分流波浪，其最終沖蝕面積僅為底面積的 5.24 倍，且垂直下沉深度（0.88 cm）為所有形狀中最低。

三、六邊形為工程應用的最佳折衷方案：六邊形的 120 度鈍角設計使其流場特性接近圓形（最終面積約 135 cm² 對比圓形 131 cm²），具備相近穩定性且更易於板材拼接與結構製造。

四、稜角形狀的區域性風險

正方形：90 度稜角會誘發強烈角隅渦流，導致沖蝕面積大幅擴張至底面積的 8.2 倍。

三角形：60 度銳角雖會產生局部深層掏空，但因擋水面較窄，其最終面積（約底面積 6.6 倍）與下沉量（0.95 cm）仍優於方柱與六邊形。

五、沖蝕與下沉存在動力平衡點

所有幾何結構在受浪 20 至 25 分鐘後皆會趨於穩定，當波浪掏空速率等於沙粒回填速率時，結構將達到最終穩定深度。

六、結構安全性排名

綜合抗沖蝕投影面積與垂直位移表現，形狀穩定性由高至低依序為：圓形 > 三角形 > 六邊形 > 正方形。

柒、參考資料及其他

- 一、國立臺灣科學教育館（2020）。*消波塊對橋墩冲刷的影響*（中華民國第 59 屆中小學科學展覽會作品說明書）。
- 二、國立臺灣科學教育館（2022）。「橋」遷之喜—探討橋墩冲刷過程與渦流形成（中華民國第 61 屆中小學科學展覽會作品說明書）。
- 三、旺宏電子（2013）。*漩渦對橋墩侵蝕與堆積現象之探討*（第 12 屆旺宏科學獎作品說明書）。