

# 地震學探索之旅

## Seismology Learning Portal

學號：u11310021 何宣樂

2026 年 6 月

# 簡報大綱

- 1 第一章：地震學基礎知識
  - 研究範疇與基本概念
  - 地震波能量衰減
  - 社會影響與工程防災
  - 預報與核爆監測
- 2 第三章：地球內部結構
  - 震測折射與反射法
  - 球狀地球波傳與速度不連續
  - 地核構造與走時研究
  - 地球非均向性與衰減
  - 地函與地核成分
- 3 第四章：互動式震源機制球
  - 震源機制與展示

# 地震學研究範疇

地震學 (Seismology) 是地球物理學的重要分支，主要研究範疇包含：

- **觀測地震學**：利用地震儀記錄地面震動，測定地震時間、震央、深度與規模。
- **物理地震學**：研究斷層破裂機制、地殼應力累積與釋放的物理過程。
- **內部構造與探勘**：解析地球內部構造；利用人工震源探勘石油與礦產。
- **工程地震學**：評估地震危害度，為建築法規與耐震設計提供科學依據。

## Seismic Hazard 與 Seismic Risk 的區別

- **Seismic Hazard (地震危害)：**
  - 指「自然現象本身」帶來的潛在威脅（如地震動、斷層錯動、海嘯、山崩）。
  - 屬於自然界客觀存在，人類無法消除。
- **Seismic Risk (地震風險)：**
  - 指「人類社會可能遭受的損失」。
  - 公式為： $\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Exposure} \times \text{Vulnerability}$
  - 人類可以藉由防災手段降低風險（如提升建築耐震度）。

## 地震波能量衰減的原因

地震波振幅隨距離衰減的數學模型可表示為：

$$A(r) = A_0 \cdot \frac{1}{r} \cdot e^{-\alpha r}$$

- **幾何擴散 (Geometrical Spreading)**：地震波由震源向外以球面輻射。隨著距離  $r$  增加，波前表面積增大，單位面積能量下降，振幅成反比 ( $\frac{1}{r}$ ) 減少。
- **內在衰減 (Intrinsic Attenuation) 與散射**：岩石非彈性碰撞將機械能轉化為熱能消散，或因地層不均勻使主要能量偏離原路徑，以指數項  $e^{-\alpha r}$  表示 ( $\alpha$  為衰減係數)。

## 建材與建築高度（共振效應）

- 不同建材之抗震能力：
  - 鋼骨 (SS)：韌性極佳，能承受大變形而不崩塌，多用於高層建築。
  - 鋼筋混凝土 (RC)：具備剛性與一定韌性，台灣最常見。
  - 磚造/砌體：抗壓不抗拉，受側向剪力時極易倒塌，耐震最差。
- 共振效應 (Resonance)：建築越高，自然結構週期越長。硬地盤易放大短週期波（矮房易損）；軟弱地盤（如盆地泥層）易放大長週期波，高樓大廈搖晃最劇烈。

# 土壤液化 (Soil Liquefaction)

- **發生環境**：充滿地下水、且以鬆散飽和砂土為主的區域。
- **發生機制**：
  - ① 強烈震動使砂土顆粒傾向排列得更緊密。
  - ② 震動過快導致地下水來不及排出，「孔隙水壓」瞬間急遽上升。
  - ③ 當水壓大於或等於有效應力時，顆粒被水頂開，土壤失去承载力。
- **災害現象**：地表噴砂、噴水，建築物發生不均勻沉陷或傾斜。

## 地震預報、預測與空窗期

- **地震預測 (Prediction)**：精確指出震前時間、地點與規模（目前科學技術尚無法實現精準短期預測）。
- **地震預報 (Forecasting)**：分析活動歷史，推估未來數十年內發生地震的「長期機率」。
- **地震空窗期 (Seismic Gap)**：活躍板塊邊界上異常長時間未發生大地震的區域，累積了大量應變能，未來發生大地震的風險極高。
- **觀測前兆**：前震、地下水變化、地殼變形 (GPS)、氦氣釋放、電磁異常。

## 如何用地震學方法監測核子試爆

核子試爆與天然地震在波形上有顯著差異：

- **震源深度**：核爆通常位於極淺層；天然地震多數較深。
- **P 波初動方向**：核爆為向外膨脹的爆炸源，所有測站記錄到的初動皆**向上（壓縮波）**。天然地震則因斷層錯動有向外也有向內。
- **波形比例**：核爆瞬間釋放能量，體波 (*P* 波) 極強，表面波與 *S* 波微弱；天然地震則擁有發達且強烈的表面波。
- **餘震特徵**：核爆為單一事件，幾乎沒有伴隨的餘震系列。

## 震測折射法與 Moho 面的發現

- **地殼與上部地函主要波相：**
  - **P<sub>g</sub> 波：**地殼上層內部的直達 P 波（較慢，約 5.8–6.2 km/s）。
  - **P<sub>n</sub> 波：**沿莫氏不連續面下方滑行折射的 P 波（較快，約 7.8–8.2 km/s）。
  - **P<sub>mP</sub> 波：**在莫氏不連續面上發生廣角反射的 P 波。
- **發現 Moho 面：**1909 年莫霍洛維奇發現遠處測站 P<sub>n</sub> 波會超越 P<sub>g</sub> 波最先到達，證實地下存在波速躍升的化學邊界。
- **全球深度分布：**大洋地殼較薄（約 5–10 km）；大陸地殼較厚（約 30–40 km，造山帶可達 70 km 以上）。

## 震測反射法 (Reflection Seismology)

- **核心原理**：利用地震波遇到地下不同聲阻抗 (Acoustic Impedance, 密度與波速的乘積) 介面時產生的反射訊號來進行高解析度成像。
- **資料處理**：包含動態修正 (NMO)、共深點重疊 (CDP Stacking) 與偏移成像 (Migration)。
- **深部應用**：利用核幔邊界反射波 (PcP) 等全球波相，可探測地函內部的精細分層構造。

## 球狀地球波傳特性

- **射線參數 (Ray Parameter,  $p$ )**：考慮地球曲率，公式為：

$$p = \frac{r \sin i}{v}$$

在球對稱模型中，同一條射線在傳遞過程中  $p$  是一個**守恆常數**。

- **三叉現象 (TriPLICATION)**：射線穿過地函相變帶等高速帶（梯度極大區域）時發生強烈向上折射，導致不同角度的射線在地表重疊，使測站觀測到多次到時。
- **陰影區 (Shadow Zone)**：當地層存在波速下降的低速帶 (LVZ) 時，射線向下彎曲偏向地心，導致地表某特定距離範圍內直達波無法到達。

## 核幔邊界 (CMB) 的發現與地核波相

- **P 波陰影區**：1914 年古登堡發現距震央  $103^\circ$  到  $143^\circ$  的地帶完全接收不到直達 P 波。因為 P 波遇到液態外核時波速驟降，發生強烈向下折射，證實了核幔邊界 (CMB) 的存在。
- **常見核心波相 (Core Phases)**：
  - **PKP**：穿透液態外核的 P 波（核心中代號為 K）。
  - **PKIKP**：穿透固態內核的 P 波（內核中代號為 I）。
  - **SKS**：在外核轉為 P 波，出外核轉回 S 波的傳播。
- **對蹠點聚焦 (Antipodal Focusing)**：穿透地核的波在距震央  $180^\circ$  的對蹠點交會，產生幾何聚焦效應，使振幅異常放大。

## 地球非均向性與剪力波分離

- **地球非向均性 (Anisotropy)**：介質波速因前進或極化方向不同而改變。主因是地函對流使橄欖石等礦物晶格產生規律排列 (LPO)。
- **剪力波分離 (Shear-Wave Splitting)**：S 波穿透非均向介質時，會分裂成偏振方向正交且速度不同的快 S 波與慢 S 波。
- **SKS 波相的優勢**：SKS 通過液態外核時為無偏振 P 波，離開外核轉回 S 波時偏振方向被嚴格限制在徑向平面，能確保觀測到的分離完全來自測站下方的地函構造。

## 能量衰減的區域性與星體差異

- **區域性差異 (以 Q 值衡量)**：美國西部（活躍區）屬於高衰減、低 Q 值，波形缺乏高頻；美國中東部（穩定地塊）屬於低衰減、高 Q 值，波形尖銳富含高頻。
- **地球與月球的散射差異**：地球地震波衰減快；月球表面極度乾燥且岩石破碎，缺乏流體吸收能量，地震波在裂隙間發生強烈的多次散射，使月震尾波能持續震盪達 60 分鐘以上。

# 地函與地核的化學組成

- **地函 (Mantle)**：主要由矽酸鹽岩石組成。
  - **上部地函**：主要成分為橄欖岩。
  - **過渡帶**：隨壓力增加，橄欖石相變為瓦茲利石與林伍德石。
  - **下部地函**：轉為橋錳礦與方鎂石結構。
- **地核 (Core)**：主要由鐵 (Iron) 與鎳 (Nickel) 合金組成。
  - **外核**：S 波無法穿透，證實為液態；其流體熱對流產生了地球主磁場。
  - **內核**：因超高壓力呈固態，且具有非均向性，代表鐵晶體順著自轉軸整齊排列。

## 震源機制球產生器 (Hugging Face Space)

- **網頁整合功能**：第四章為互動式操作介面，使用者可自由輸入斷層參數：
  - 走向 (Strike)
  - 傾角 (Dip)
  - 滑移角 (Rake)
- **即時繪製**：系統將即時計算並繪製出專屬的震源機制球 (Beachball，即斷層面解)。
- **Hugging Face Space 串接**：目前此 App 專案已在 Hugging Face 平台正常託管運作 (Running 狀態)，用於提供網頁後台強大的互動式運算支援。