



地震學期末總報告

地球的重低音、震測實驗與國震中心參訪學思錄

地生二 U11310007 楊廂甯

University of Taipei

2026年6月9日



1. 地震學研究範疇

「地球正在開派對，我們負責聽它的重低音！跟我一起探索腳底下的秘密吧。」

地震學是研究彈性波在地球內部的「旅遊筆記」，這門學問主要關注三大核心：

震源 (Source)

是誰在製造噪音？
推算地震發生的物理機制。

路徑 (Medium)

波傳過的石頭好走嗎？
探索地底下的岩石與介質結構。

接收器 (Receiver)

我們收到了什麼悄悄話？
地震儀觀測到的地表震動波形。



2. 核心觀測模型 (圖 1.1-1 ~ 1.1-5)

- ▶ **波傳遞全景圖 (圖 1.1-1)**：地震學的基礎。透過地表的震譜推算地下的震源與介質。這就像透過門縫聽房間裡的對話來猜誰在吵架。
- ▶ **走時曲線 (圖 1.1-2)**：斜率越緩代表波速越快。P 波永遠領先 S 波，這就是我們能做「地震預警」的物理本錢！
- ▶ **振幅衰減 (圖 1.1-3)**：能量隨距離散開（幾何擴散），離得越遠，聲音越小。
- ▶ **時域與頻域魔法 (圖 1.1-4 & 1.1-5)**：傅立葉轉換能把混亂的震波拆解成規律的週期訊號。頻譜圖告訴我們哪些頻率最有力，這對耐震工程至關重要！

3. CH 4.1 彈性回跳理論：地震的誕生



經典物理機制 (Elastic Rebound Theory)

地殼岩石就像被強行折彎的「塑膠尺」，在能量逼近極限後瞬間爆發：

1. **初始狀態**：岩層未受外力，斷層兩側構造平穩。
2. **能量累積與變形**：受到板塊擠壓或拉張，岩石發生微小彈性形變，應變能持續累積。
3. **極限與破裂**：應力超越岩石能承受的摩擦極限，瞬間產生斷層錯動，將應變能轉化為「震波」釋放。

核心總結

地震不是無中生有，而是岩石變形後，恢復原狀時甩出的「彈性鞭擊」。

媒體對照：詳見理論步驟圖 (4.1-3.png) 與著名的加州聖安地列斯斷層 (San Andreas Fault) 實際空拍照片 (4.1-1.png)。

4. CH 4.2 震源機制球：地底的密碼



如何閱讀解碼「沙灘球」？(Focal Mechanism)

地震學家利用球體投影，將地底斷層的立體運動濃縮在 2D 圓圈中：

▶ 第一步：推與拉的幾何

P 波初動方向決定顏色。受到壓縮為「推（黑）」，受到膨脹為「拉（白）」。

▶ 第二步：下半球立體投影

將 3D 球體的下半球透過「立體網投影 (Stereographic Projection)」投影到 2D 平面，交界弧線即為節面。

經典斷層辨識口訣

- ▶ 正斷層：像「奧利奧餅乾」
→ 外黑內白（受張力）
- ▶ 逆斷層：像「貓眼」
→ 外白內黑（受擠壓）
- ▶ 平移斷層：像「西瓜皮」
→ 黑白相間十字（受剪切力）

進階物理意義：通過球上的應力軸（P 軸、T 軸）分布，結合周邊實際地質環境，即可精準分辨哪一條才是真正的斷層面。

5. 巨震實戰分析：堪察加半島強震



個案解讀：2025 年堪察加 M 8.8 巨震（深度 21.5 km）

透過真實地震數據與手繪震源機制球，判讀隱沒帶強震的斷層型態。

觀測數據條列：

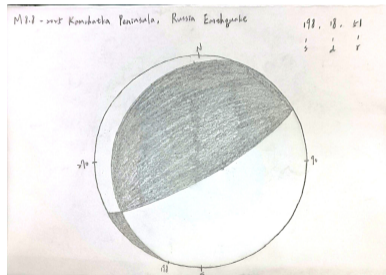
- ▶ 應力主軸：P 軸方位角 139° 。
- ▶ NP1：走向 198° / 傾角 18° / 滑移角 51° 。
- ▶ NP2：走向 58° / 傾角 76° / 滑移角 101° 。

實戰判讀技巧

隱沒帶板塊界面通常較平緩，因此兩組節面中，**低傾角的 NP1** (18°) 較可能是真正的板塊交界斷層面。

判讀重點

不只看沙灘球圖形，也要結合區域地質背景與板塊隱沒方向。



手繪震源機制球：

對照 NP1 / NP2 參數與黑白象限分布。



6. 互動教學系統：動態斷層模擬器

在數位互動學堂中，我們利用後端技術將抽象的斷層幾何錯動化為「肉眼可見」：

Gradio 前端互動設計

提供一組下拉式選單 (`gr.DropDown`)，讓操作者能自由切換三種地殼受力模式：

1. 拉張力 → 觸發【正斷層】模擬
2. 擠壓力 → 觸發【逆斷層】模擬
3. 剪切力 → 觸發【平移斷層】模擬

後端即時渲染機制

當使用者點選切換時，系統即時調用後端 `update_fault_sim` 函數：

- ▶ 即時回傳：輸出對應的 **SVG 向量動畫碼** 與 **Markdown 文本**。
- ▶ 視覺展現：網頁上同步動態顯示地殼岩盤（上盤與下盤）沿著斷層面滑動的動態軌跡。

7. 進階沙盤推演：互動機制球繪製器



即時自訂模擬工具 (Playground)

為了建立空間幾何感，系統提供三個獨立的滑動拉桿 (gr.Slider)，讓學生動態繪製專屬的沙灘球：

1. 走向 (Strike)

$0^{\circ} \sim 360^{\circ}$

控制斷層線在
水平面上的地圖方位。

2. 傾角 (Dip)

$0^{\circ} \sim 90^{\circ}$

控制斷層面與
地表水平面的夾角坡度。

3. 滑移角 (Rake)

$-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$

控制上盤岩盤
在斷層面上的滑動方向。

學習綜效：任意拖動拉桿，2D 沙灘球圖形與 3D 斷層模型即時同步重繪，完美破譯空間幾何盲點。



8. Hazard vs Risk：天災與人禍

Seismic Hazard (地震危害)

大自然的肌力：某個地方搖晃的可能性。人類拿它沒轍，它是上帝擲骰子的結果。

Seismic Risk (地震風險)

口袋的錢與人命：如果大地震搖在沒人的南極，Risk = 0。

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{曝險} \times \text{脆弱度}$$

大師隨堂考

Q：如果在斷層帶上蓋一棟紙糊的醫院，這會影響 Hazard 還是 Risk？

A1. 會讓 Hazard 變大 / A2. 會讓 Risk 變大，因為損失會非常慘重 / A3. 只會被大師罵

解析：你不能控制地震晃多大 (Hazard)，但你可以決定醫院蓋在哪裡跟多強 (Risk)。

9. 能量衰減與社會影響



震波的「過路費」：能量衰減機制

1. **幾何擴散 (Geometric Spreading)**：波像氣球越吹越大，表面積增加，單位面積分配到的能量變少。此為「物理規律」。
2. **內在衰減 (Intrinsic Attenuation)**：岩石並非完美彈性，分子摩擦會轉化為「熱能」。公式中的品質因子 Q (Quality Factor) 越高，代表岩石越硬派，能量消耗越少。

地震與社會 (圖 1.2-3, 5, 6)

透過災損分布與死亡統計發現：**有錢國家賠錢多 (東西貴)**，**窮國家賠命多 (房子差)**。這就是現實的殘酷。



10. 房子、建材與致命共振

建材耐震排排站

- × 土石牆：地震學家的惡夢，一晃就垮。
- ! 磚牆：有硬度但缺乏韌性，易碎裂。
- ✓ RC (鋼筋混凝土)：目前主力，兼具承重與彈性。
- ★ SS (鋼骨)：晃得兇但韌性強，不易折斷。

為什麼矮房也會倒？

當地震波的頻率剛好對上房子的「自然頻率」，就會發生共振。

- ▶ 高樓：怕慢晃（低頻地震波）
- ▶ 矮房：怕快晃（高頻地震波）

並非房子越高越慘，而是看哪種建築跟地震波「對上眼」！



11. 土壤液化：陸地上的流沙

液化三部曲

1. 鬆散砂土 + 2. 水填滿縫隙 + 3. 地震猛搖

物理原理說明：

這就像把一碗混了水的砂糖拿去震動，水會把砂糖顆粒擠開，整碗沙土在瞬間失去剪力強度，轉變成流體狀態。

原物穩固地基上的建築物，此時就會像船隻失穩一樣，直接沉陷或傾倒。

易液化環境

- ▶ 海邊與河岸沖積平原
- ▶ 舊河道或海埔新生地
- ▶ 地下水位較高的砂質高風險區



12. 預測 vs 預報 (圖 1.2-14)

地震預測 (Prediction)

- ▶ **定義**：試圖提前幾天或幾個月，精準預報明確的地點、時間與規模。
- ▶ **現況**：這是人類的夢想，但以目前的科學技術仍**極不可靠**。

地震預警 (Warning)

- ▶ **定義**：利用 **P 波**（速度快、破壞小）比 **S 波**（速度慢、破壞大）快的物理現象。
- ▶ **現況**：地震發生後，在破壞性強波抵達前爭取 10 幾秒黃金時間。**這對救命最有感！**



13. 地震空區與前兆觀測

Seismic Gap：補考預定地 (圖 1.2-15/16)

這就像是一群人在跳大繩，如果整條斷層帶的其他地方都動了，唯獨中間某一截長期沉寂沒動，那一截遲早會累積足夠應變並突然爆發，這就是「地震空區」。

科學家如何尋找地震的「前兆」？

1. 動物行為

傳聞與異象多，但科學上難以重複驗證。

2. 地球化學

監測地下水中的氫氣，看地殼壓力是否釋放氣體。

3. 地殼變形

利用高精度 GPS 連測斷層兩側的微小位移。

4. 電磁異常

觀察震前地表壓力激增引發的電離層異常波動。



14. 地震儀抓核試爆 (圖 1.2-18/19)

地震學在國防安全與國際核武監測上扮演關鍵角色：

爆炸 vs 地震震波大 PK

- ▶ **地下核爆 (Explosion) :**
屬於「點源擴張」，向四周推擠，因此 **P 波特強、S 波極弱**。
- ▶ **自然地震 (Earthquake) :**
屬於「斷層剪力破裂」，兩側錯動，因此 **S 波與表面波超大**。

mb vs M_s 判別法

mb 是體波規模， M_s 是表面波規模。
由於核爆發生在地下深處的一個點，其體波極強但表面波很弱。如果觀測到某個震動的 mb 比 M_s 大很多，那八成就是有人在偷偷進行地下核試爆！

結論：爆炸是「向外推」，地震是「兩側錯動」，此本質差異會完美呈現在震波比例上。



15. 實地觀測特別篇：黑森林震測實驗

將理論化為實踐！地科組就是要親近大自然、用身體觸摸感受一切。

野外採集與架設歷程

- ▶ **挖土安放**：於黑森林挖掘適當土坑安放儀器。最累的是用鏟子與雙手挖土。
- ▶ **水平校正**：觀察頂端精緻的「小氣泡窗口」，確認氣泡落在中心。
- ▶ **指北定位**：以指北針定位正面朝北，精準捕捉 E、N、Z 三分量數據。
- ▶ **磁吸啟動**：用「強力磁鐵」觸碰開機，減少物理按鍵耗損，隨即填土掩埋。

微震紀錄器 (Seismic Recorder)

人機介面巧思與規格：

- ▶ **三分量感測**：同時捕捉垂直 (Z)、南北 (N)、東西 (E) 三向震動。
- ▶ **磁吸式開關**：免除傳統按鍵，防漏水且具互動感。
- ▶ **氣泡觀測窗**：可愛且直觀的精緻設計。

16. 資料前處理與時頻分析結論



利用 Python 的 **ObsPy** 函式庫，對擷取的 SAC 格式地震檔案建立 Stream 物件，進行時域與時頻熱圖 (Spectrogram) 批量分析。

分析策略與設定

- ▶ **專注核心區段：**
選擇排除人為干擾的第 3 至 30 分鐘，聚焦於穩定的背景與潛在震動。
- ▶ **8 張訊號報表：**
成功產出 8 個地震事件之時頻特徵。

重大發現：人造雜訊 (Anthropogenic Noise)

規律的週期性高頻干擾：

- ▶ **特徵：**每隔大約 200 秒，時頻圖上就會穩定出現集中在 **40 Hz** 左右的高能量亮點。
- ▶ **推論：**強烈暗示為周邊環境的人造干擾（如鄰近馬路紅綠燈週期的車流）。



17. 心得感想總結：穿梭時空的記憶

「從精準定位的歡呼，到舊地重遊的感慨，這一切都讓地震學的學習之路更加豐實。」

跨越時空的情感連結

在翻開黑森林泥土的那一刻，不自覺讓人聯想到大一普生實驗結束後，大家同樣在黑森林挖洞埋下實驗生物遺體的情景。

科學與溫暖回憶的結合

同樣的地點、同樣的挖掘動作，在嚴肅的科學實驗中帶來了跨越時間流轉的情感，為這份報告增添了開心的回憶。

數位互動展演

歡迎前往瀏覽體驗互動式網頁與 8 張分析報表的動態切換：

[Hugging Face Space: 震測實驗報告](#)

18. 國震中心參訪篇：大型實驗設施與觀測網



於 2026 年 4 月 17 日實地參訪國家地震工程研究中心 (NCREE)，見證頂尖防震科技。

核心地震工程實驗設施

- ▶ **地震模擬振動台 (5m × 5m)**：真實模擬各類強震波，測試實體結構。
- ▶ **多軸強迫位移試驗系統 (MATS)**：提供精準的多軸高載重剪力與軸力測試。
- ▶ **雙軸高速度動態測試系統 (BATS)**：用於高性能消能元件與防震零件的動態高頻率測試。

火山與地球物理觀測網絡

- ▶ **大屯火山觀測站 (TVO)**：緊密監測大屯火山群之微震與地球化學變量。
- ▶ **Formosa Array / Taiwan Array**：全台廣泛佈設多達 146 個微震觀測站，建構高密度的三維地底構造與地震危害度分析網絡。

19. 國震中心參訪篇：結構耐震與工程物理



結構安全不能只靠運氣，工程學的核心在於掌握「共振」與「應變」。

關鍵物理規律：房屋振動週期

經驗公式：房屋自然週期 \approx 總樓高 / 10

- ▶ **3層樓矮房**：自然週期約 **0.3秒**（容易與地盤高頻運動吻合）。
- ▶ **10層樓大廈**：自然週期約 **1.0秒**（容易與地盤低頻慢晃共振）。
- ▶ 當地震地盤運動的主導週期與建物週期吻合，便會觸發致命共振，使搖晃劇烈放大！

921 大地震的血淚教訓

1999年集集大地震 (M_L 7.3) 揭示了傳統建物的致命脆弱點：

- ▶ **軟弱層 (Soft Story)**：一樓常因騎樓、牆面少而流於崩塌起點（如常見的NG結構）。
- ▶ **缺乏韌性 (Ductility)**：未落實135度耐震箍筋，柱體瞬間粉碎脆斷。

20. 國震中心參訪篇：現代防震科技與總結



現代耐震工程已從「硬碰硬」演進為智慧型的消能與隔震補強。

三大現代防震策略

1. **結構耐震與韌性**：提高構件變形能力，搖晃而不輕易折斷（追求結構的高韌性）。
2. **消能減震 (Energy Dissipation)**：如台北 101 的調諧質量阻尼器 (TMD)，利用質量塊慣性吸收、抵消大樓能量。
3. **隔震設計 (Base Isolation)**：於基礎裝設隔震墊，直接「隔離」絕大部分地表剪力。

老舊建物結構補強 (Retrofitting)

透過科學診斷，免拆除即可提升既有建物耐震力：

- ▶ **擴大柱斷面、增設剪力牆**。
- ▶ **碳纖維貼片 (CFRP) 補強**：大幅提升老舊柱體的剪力包覆圍束力。

動態參訪展演平台

歡迎瀏覽動態 3D 監測網頁：

<https://huggingface.co/spaces/Icon826/NCREE>

21. Hugging Face 互動式報告：整體架構



從靜態簡報到互動網頁

本報告同步建立一份 Hugging Face Gradio 互動式網頁，將「地震學概念、堪察加案例、震源機制球、地震風險與微型地震儀」整合成可操作、可展示的數位成果。

主要檔案結構

```
app.py
requirements.txt
README.md
assets/
  handdrawn_beachball.jpg
  raspberry_pi_demo.mp4
```

四大互動分頁

1. 報告導覽
2. 斷層與震源機制互動
3. 地震風險互動計算
4. 微型地震儀互動模擬

設計重點：用 Gradio 將課堂理論變成可以點選、拖曳、即時計算與播放多媒體的報告網頁。

22. 報告導覽：把文字報告轉為資料結構



核心資料結構

程式以 `REPORT_SECTIONS` 字典儲存各章節 HTML：

- ▶ 報告總覽
- ▶ 地震學核心概念
- ▶ 震源機制球與堪察加案例
- ▶ 地震危害、風險與防災
- ▶ 黑森林震測實驗
- ▶ 國震中心參訪
- ▶ 結論與學習心得

互動邏輯

使用者切換 `gr.Dropdown` 時，系統呼叫 `render_report_section_with_image`：

- ▶ 一般章節：只更新文字內容。
- ▶ 選到堪察加案例：同步顯示手繪震源機制球。
- ▶ 圖片使用 `gr.Image`，避免 HTML 圖片路徑失效。

多媒體放置調整

手繪震源機制球不再另外開新分頁，而是放回「報告導覽 → 震源機制球與堪察加案例」中，讓圖像直接服務該章節的個案判讀。

23. 斷層互動模擬：SVG 動態視覺化



受力模式與斷層類型

互動網頁中的 `make_fault_svg` 函式會依照下拉選單即時產生不同 SVG 圖像。

拉張力

正斷層

上盤相對下降，常見於張裂或伸張環境。

擠壓力

逆斷層

上盤相對上升，常見於隱沒帶與造山帶。

剪切力

平移斷層

以水平錯移為主，以俯視圖呈現右移平移斷層。

程式流程：`gr.DropDown` → `update_fault_sim` → `make_fault_svg` → `gr.HTML`

24. 震源機制球：從 Strike / Dip / Rake 到沙灘球



互動式震源機制球計算

程式使用 Strike、Dip、Rake 建立雙偶力矩張量，並以 P 波初動輻射型態決定沙灘球黑白分布。

核心物理式

$$R = \mathbf{x}^T M \mathbf{x}$$

其中 M 為雙偶力矩張量， \mathbf{x} 為下半球投影方向。若 $R \geq 0$ 則填黑；
若 $R < 0$ 則填白。

三個滑桿控制

- ▶ **Strike**：控制圖案旋轉與斷層走向。
- ▶ **Dip**：改變節面幾何與黑白區塊彎曲。
- ▶ **Rake**：判斷正斷層、逆斷層或平移斷層成分。

堪察加預設值：Strike 198°、Dip 18°、Rake 51°，對應隱沒帶低角度逆衝型地震。



25. 地震風險互動計算器

由危害到風險：讓公式可以被操作

網頁以三個滑桿表示地震風險的三個組成因子，讓使用者直接觀察風險值與防災建議如何改變。

互動公式

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Exposure} \times \text{Vulnerability}$$

輸入元件

- ▶ 地震危害 Hazard
- ▶ 曝險程度 Exposure
- ▶ 脆弱度 Vulnerability

輸出判斷

- ▶ 低風險：維持基本防災準備。
- ▶ 中風險：強化避難規劃與家具固定。
- ▶ 高風險：檢查老舊建物與重要設施。
- ▶ 極高風險：進行補強、土地使用檢討與防災教育。

程式流程：三個 `gr.Slider` → `calculate_risk` → 風險等級、數值條與建議文字

26. 微型地震儀互動模擬與影片整合



Raspberry Pi × MPU6050 展示邏輯

微型地震儀分頁保留原始展示邏輯，並加入實作影片，讓程式模擬能與實體操作互相對照。

互動模擬內容

- ▶ X/Y/Z 三軸加速度滑桿。
- ▶ 計算合成加速度 $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。
- ▶ 可切換簡易重力校正 |合成加速度 - 1g|。
- ▶ 依 L1/L2/L3 門檻模擬 LED、蜂鳴器與 Discord 警報。
- ▶ 即時輸出終端機文字與波形圖。

影片位置

樹莓派實作影片已放在「微型地震儀互動模擬」分頁中：

- ▶ 使用 `gr.Video` 直接播放。
- ▶ 使用 `gr.File` 提供備用下載。
- ▶ 影片檔放在 `assets/raspberry_pi_demo.mp4`。

SEISMOLOGY MASTER CLASS

感謝聆聽地球的重低音派對