

# 台灣的地震觀測：漫談地震觀測的趣味與挑戰

中央研究院地球科學研究所 梁文宗博士

2025/11/11

## 壹、緒論：講座的核心價值與報告架構

本報告的目的，是根據「台灣地震學」講座所呈現的內容，重新整理其核心知識，並在此基礎上提出個人的理解與反思。台灣位於菲律賓海板塊與歐亞板塊的聚合帶上，地殼活動始終旺盛，使得地震成為這片土地的常態。這樣的環境雖伴隨長期風險，但也提供了難得的研究條件，使台灣成為地球科學家得以深入觀察板塊動力的現地實驗室。因此，對地震現象的仔細分析，不只是研究者的興趣所在，更與國家安全與永續發展密切相關。

本報告將依講座的脈絡逐步展開。首先，討論必須從地震的物理基礎開始，以釐清能量釋放與破裂過程的本質；接著，回顧台灣在地震監測上的技術發展。這並非單純的儀器更新，而是資料解析度逐步提高後，研究範式隨之轉變的歷程。隨後，本報告會進一步探討這些監測資料如何協助我們描繪台灣地震活動的整體圖像，使一些原本難以觀察的構造行為得以被辨識。之後，將面對一項至今仍充滿挑戰的議題：地震預測。講座提到，科學界已從精準預測的理想轉向更務實的做法，強調風險評估與預警系統的建置，以降低災害可能造成的衝擊。

## 貳、地震的物理學基礎：從理論到觀測

本章的重點在於釐清地震最基本的物理概念。只有把成因、能量釋放的方式，以及震波在地球內部的傳遞特性掌握清楚，後續的監測技術、資料判讀與相關的防減災工作才算有穩固的基礎。這些原理看似抽象，卻是理解地底訊號的必要前提；缺少這些概念，許多觀測到的變化就會像沒解答的謎語。本章將以此為起點，從最核心的物理現象開始搭起之後分析的框架。

### 2.1 地震的成因：彈性回跳理論

講座中的核心理論基礎，源於美國地球物理學家 Harry Fielding Reid 於 1906 年舊金山大地震後提出的「彈性回跳理論 (Elastic Rebound Theory)」<sup>1</sup>。此理論以精闢的物理模型，描述了斷層活動引發地震的完整循環，其核心概念可解構成以下四個階段：

- 原來位置：斷層處於未受應力作用的初始狀態。
- 累積應變：板塊運動導致地殼岩石持續承受剪切應力，斷層面因摩擦力而被鎖定，能量以彈性應變的形式逐漸累積。
- 滑移錯動（地震）：當累積的應變能超過斷層面的摩擦阻力與岩石強度時，斷層發生瞬間的、劇烈的滑移錯動，釋放累積的能量。此即為地震。
- 應變釋放：斷層錯動後，岩層回彈至應力較低的狀態，完成一次應力釋放的循環。

## 2.2 地震波的類型與特性

地震發生時，釋放的能量會以彈性波的形式向四面八方傳播，稱為「地震波」。這些波根據其傳播路徑與振動方式，可主要分為四種類型，其特性對比如下表所示：

波的類型	振動方式	關鍵特性
P 波 (Pwave)	縱波（壓縮舒張）	實體波，可穿透固體與流體 傳播速度最快，是地震預警系統的基礎
S 波 (Swave)	橫波（上下或左右剪切）	實體波，僅能在固體中傳播 速度次於 P 波，但振幅通常較大
雷利波 (Rayleigh Wave)	表面波（橢圓形滾動）	沿地表傳播，造成地表上下起伏 速度最慢，但振幅大、持續時間長
洛夫波 (Love Wave)	表面波（水平剪切）	沿地表傳播，造成地表左右搖晃 速度略快於雷利波，破壞性極強

分析顯示，表面波（雷利波與洛夫波）通常是造成建築物嚴重破壞的主因。其物理機制在於，表面波的能量被侷限在地表附近傳播，不易隨距離衰減，且其低頻、長週期的晃動特性，極易與中高樓層建築的自然振動週期產生共振，從而引發毀滅性的結構破壞。

## 2.3 地震的重複性：黏滑運動模型

講座中展示的「彈性回跳模擬器」（或稱地震機器），生動地演示了斷層的「黏滑運動行為 (StickSlip Behavior)」。此模型揭示了斷層系統在長時間尺度下的循環過程：

1. 黏滯期 (Stick)：斷層被鎖定，應力持續累積（震間期）。

2. 滑動期 (Slip)：應力超過摩擦力，斷層瞬間滑動，釋放能量（地震期），應力水平隨之下降。

這個模型為理解特定斷層的「地震重複性」提供了重要的理論框架。若能準確掌握應力累積的速率與斷層的摩擦力特性，理論上將有機會預測地震的重複週期。

對這些物理基礎的深刻理解，是解讀地震儀所記錄複雜波形的先決條件。正是基於對不同震波的辨識，科學家才得以定位地震、分析震源機制，進而一步步勾勒出台灣地震活動的全貌。

## 參、台灣地震監測的演進與現代化

對台灣地震科學觀測發展歷程的嚴謹分析，揭示了一個核心趨勢：監測能力的演進不僅是科技進步的縮影，更是一部數據解析度不斷提升、從而根本性地改變了科學家所能探究問題深度的歷史。

### 3.1 觀測的濫觴：從歷史文獻到儀器記錄

台灣地震科學觀測的歷史可追溯至日治時期。在此之前，我們對地震的認知僅能依賴史料文獻的記載，這些被稱為「歷史文獻地震」或「儀器觀測前地震」。科學家需根據文獻中對災情的描述，間接推估可能的震央與規模，其不確定性極高。

劃時代的轉變發生在 1897 年 12 月 19 日，當時的台北測候所（現中央氣象署位置）裝設了台灣第一部地震儀——「格雷米爾恩 (GrayMilne)」型地震儀。此舉標誌著台灣正式進入「儀器觀測地震」的時代，從此，地震的發生擁有了客觀、可量化的科學數據記錄。

### 3.2 監測網絡的擴展與升級

單一測站的觀測能力終究有限，建立密集的觀測網絡才是有效掌握全島地震活動的關鍵。台灣的地震監測網絡發展，歷經了數個關鍵的里程碑：

1. 初步網絡（1935 年後）：全台擴建至包含台北、台中、阿里山、台南、高雄、恆春、澎湖、台東、花蓮，加上鄰近的日本石垣島，共 10 個地震站，初步形成了區域性的觀測網。
2. 電子化時代（1973 年）：中央研究院地球科學研究所建立了「台灣遙記式地震觀測網 (TTSN)」，引入電子化與遙測技術，大幅提升了數據傳輸的即時性與觀測品質，是台灣地震學研究邁入現代化的重要轉捩點。

3. 現代化即時觀測網（1991 年）：中央氣象署（時為中央氣象局）推動監測系統現代化，將原有的「中央氣象署地震觀測網 (CWASN)」升級。透過增建 31 個新站，並整合中研院 TTSN 的 25 個站，將總站數提升至 75 站，建構了覆蓋更為綿密的即時監測體系。

### 3.3 當代多元化的監測技術：一個協同作戰的體系

現今的台灣地震監測已進入一個多元技術整合的時代，其核心價值在於不同系統間的協同互補，從而提供一個遠超單一技術所能及的、更全面的地殼活動圖像。

- 策略協同分析：當代監測體系是一個精心設計的策略組合。由中央研究院維運的寬頻地震觀測網 (BATS)，測站雖較稀疏，但儀器靈敏度極高、頻帶極寬，對於分析遠處大地震的詳細破裂過程與研究地球深部構造至關重要。與之互補的，是由氣象署維運的強震網 (TSMIP) PAlert 強震觀測網，後者以約 800 個低價位強震儀構成高密度網絡，專注於捕捉強烈地動，為地震預警、即時震度報告及地震工程應用提供了不可或缺的數據。
- 跨維度觀測整合：地震學研究早已超越傳統的地震儀。雷達衛星干涉測量 (InSAR) 技術利用衛星影像，能以公分級精度大範圍監測震間期與同震的地表變形，為分析斷層活動與應變累積提供了空間維度的強力工具。
- 多機構合作框架：台灣的地震監測是由氣象署、中研院、國家地震工程研究中心等多個單位共同維運的龐大體系。這種跨機構的合作確保了數據的多元性與可靠性，不同觀測網各司其職，從不同頻段與面向捕捉地動訊號，共同構成一個無縫且具備高度韌性的監測體系。

這些日益精密的監測基礎設施，為我們提供了前所未有的海量數據。正是這些數據，為深入分析台灣複雜的地震活動特性、解構其深部構造奠定了堅實的基礎。

## 肆、數據驅動的洞察：解構台灣的地震活動圖像

### 4.1 地震定位的基本原理

地震定位是所有後續分析的基石，其核心原理建立在 P 波與 S 波的物理特性之上：

- 到時差與距離的關係：由於 P 波的傳播速度快於 S 波，兩者抵達同一測站的時間存在一個差值，即「到時差 (TsTp)」。
- 這個時間差與測站到震央的水平距離（震央距）呈現穩定的正比關係。

- 經驗公式與歷史應用：根據大量的觀測數據，科學家總結出一個簡便的經驗公式：
- 三邊測量法：僅有單一測站的到時差，只能確定地震發生在以該測站為圓心、 $\Delta$  為半徑的圓周上。因此，理論上至少需要三個測站的觀測數據，透過繪製三個相應的圓，其交會點即為震央的近似位置。這就是經典的「三邊測量法 (Triangulation)」。

#### 4.2 台灣地震活動的空間分佈特徵

- 天然的地球科學實驗場：講座中展示的 1973/01/01 至 2025/11/05（依講座資料來源所示）期間規模( $M$ ) $\geq 4$  的地震分佈圖，清晰地揭示了地震活動高度集中於台灣東部及東北部外海。此一空間分佈形態，直接反映了菲律賓海板塊與歐亞板塊在此處的劇烈碰撞與隱沒作用，是台灣作為「天然地球科學實驗場」最直觀的證據。
- 描繪深部地體構造：地震不僅是地表現象，其震源深度可達數百公里。透過分析不同深度的地震分佈，特別是將震源投影至剖面圖上，科學家能夠清晰地描繪出隱沒板塊的輪廓與幾何形態。講座中的「隱沒帶地震剖面圖」即直觀地展示了板塊向西北方向俯衝的深部構造影像。

#### 4.3 統計分析及其背後意涵

對地震目錄進行宏觀統計分析，可以揭示地震活動的長期規律性。講座中引用的  $M \geq 4$  地震規模與數量關係圖顯示，地震規模越小，發生的頻率越高，呈現明確的指數關係。

根據 1973 年以來的數據統計，講座總結出一個關鍵結論：在台灣，規模( $M$ ) $\geq 4$  的地震平均每週約有 5 個。此數據在地震危害度分析中具有深遠意義，它為評估特定區域在未來一段時間內遭遇一定強度地震的機率提供了基礎數據率，是制定建築耐震規範、進行國土規劃的重要科學依據。

儘管我們能夠如此精確地描繪已經發生的地震，但預測未來特定時間、地點和規模的地震，其挑戰依然巨大。

## 伍、 地震預測的挑戰與防災減災策略

本章節將深入探討地震科學中最具挑戰性、也最受公眾關注的議題——地震預測。一項成熟的科學論述，必須坦誠其能力的邊界。我們將分析在準確的短期預測極其困難的現實下，學術界與防災單位如何將研究重心轉向以風險評估、長期預報與即時預警為核心的務實防災策略。

### 5.1 預測的困境：為何如此困難？

講座明確指出，準確的短期地震預測「非常困難」。儘管我們已經掌握了地震發生的基本物理過程（如彈性回跳理論），但地殼內部的細節卻是一個高度非線性的複雜系統，充滿了難以量化的不確定性。其主要困難點包括：

- 應力累積速率隨時間而異：板塊運動並非均速，且一個區域的大地震可能會改變周遭斷層的應力狀態，導致應力累積速率的變化。
- 斷層強度並非定值：斷層面的強度受到孔隙流體壓力、礦物相變化等多種因素影響，這些因素會隨時間動態改變，使得斷層的「觸發門檻」難以捉摸。
- 每次應力降的程度也不同：每次地震釋放的應力比例並非固定，斷層可能只釋放了一部分累積的應變，使得下一次地震的發生時機與規模更難預測。

### 5.2 從「預測」到「預報」：機率式風險評估

面對短期預測的巨大挑戰，科學界轉向了更具實用價值的長期「預報」——機率式地震危害度分析 (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)。此方法的核心思想是：雖然無法確定下一次大地震的確切時間，但可以根據地質構造、歷史地震活動、地殼變形速率等數據，科學地評估未來特定時間內（如 50 年），某一地區可能遭遇的最大地動強度及其發生機率。

講座中以「台灣地震模型 (TEM)」為例，展示了此類長期預報的策略價值。TEM 整合了台灣各地斷層的活動潛勢，繪製出台灣未來數十年的發震機率圖。這類成果是國家防災減災規劃的關鍵科學依據，其應用領域廣泛，包括：

- 國土安全規劃與國家建設
- 建築物耐震設計規範的修訂
- 都市更新與老舊建築物檢核
- 地震保險的費率釐定

### 5.3 地震預警系統 (EEW)

在無法準確預測的前提下，如何於地震發生後、災害抵達前，為民眾爭取寶貴的應變時間？答案就是地震預警系統 (Earthquake Early Warning, EEW)。

其核心原理是利用不同地震波的速度差：

1. 地震發生後，速度最快的 P 波（初步、振動較小）首先被震央附近的地震儀偵測到。
2. 系統迅速解算地震的位置、規模等資訊。
3. 在破壞性較強的 S 波（主要、搖晃劇烈）與表面波到達距離較遠的都會區之前，透過通訊網絡發出警報。

這短短數秒至數十秒的預警時間，足以讓民眾採取緊急避難措施、讓高速行驶的列車減速、讓醫院暫停正在進行的手術、讓工廠關閉重要設備，從而大幅降低災害損失。然而，必須科學地認識到，此系統存在其物理限制與不確定性。其預警效果受到測站密度、地質、地震破裂型態（方向性）、速度模型等條件的差異影響，尤其對於震央附近的「預警盲區」，能提供的預警時間極為有限。

### 陸、心得總結與學術反思

#### 6.1 關鍵知識與啟發

在眾多精彩的內容中，以下三點對令我印象十分深刻：

1. 台灣作為天然實驗場的獨特性與使命：講座反覆強調台灣獨特的板塊碰撞環境。這使我深刻體會到，身處台灣的研究者擁有一種得天獨厚的優勢與責任。我們研究的對象就在腳下，每一次地震都是一次珍貴的觀測機會，我們的研究成果能直接回饋社會，這賦予了學術工作更深層的意義。
2. 地震統計的物理意義局限性：講座中提到「地震統計不一定帶有物理意義，安靜期與活躍期都是馬後炮」，這句話發人深省。它提醒我們在面對海量數據時，不能僅僅滿足於描述性的統計規律，更要警惕過度解讀。真正的科學洞察來自於理解數據背後驅動地震循環的物理機制，而非單純的模式識別。
3. 現代多元觀測技術的整合應用：從傳統地震儀、PAlert 密集陣列，到 GPS 地表變形監測與雷達衛星干涉測量(InSAR)，講座展示了一個「多兵種聯合作戰」的現代地球科學觀測體系。這啟示我，未來的重大科學突破，極可能來自於跨技術、跨領域數據的融合分析，單一觀測手段的時代已經過去。





## 6.2 理論與實務的連結：科學的社會價值

這次講座讓我更直接地看見地震科學與社會需求之間的連動。從「台灣地震模型 (TEM)」影響建築相關法規，到地震預警系統 (EEW) 在每一次地動時爭取關鍵的反應時間，都顯示基礎研究其實深刻牽動著公共安全與國家基礎建設的韌性。這也促使我重新思考學術工作的方向——研究並不該只停留在論文與數據，更重要的是能否把成果化為社會能理解、能使用的知識與工具。防災教育的推廣、風險意識的提升，都是研究者無法迴避的責任。從這層意義上看，科學工作與公共利益並不是兩條平行線，而是彼此扣合的同一道路。

## 6.3 未來研究方向的思考

基於講座內容的啟發，我構思了三個認為具有潛力且值得深入探討的未來研究課題：

1. 機器學習在即時地震矩張量(RMT)解算與預警系統中的潛力：地震預警的精度與速度，高度依賴於對震源參數的快速解算。傳統方法有其物理極限，而機器學習與人工智慧擅長從複雜的波形數據中快速識別模式。未來或可發展一個深度學習模型，直接從地震初至波形中，即時反演地震的矩張量與破裂方向性，從而更精準地預估不同區域的震度，提升預警系統的效能。
2. 陣列地震學於特殊波源的解析潛力：講座提及的「地震測站陣列地震學 (Array Seismology)」技術，為高精度訊號分析提供了新途徑。未來的研究可利用此技術，透過分析微小的時間延遲來辨識波的傳播方向與速度，從而極大地提升信噪比。此方法不僅能用於偵測微弱的構造性地震，更可用於解析非傳統的地震波源，例如火山活動引發的震顫、或大型山崩滑動過程中的訊號，為災害監測提供更精細的物理圖像。
3. 行星地震學的比較研究對理解地球的啟示：講座最後提及了「行星地震學」，包括月震(Moonquake)與火星震(Marsquake)。月球與火星是與地球截然不同的「單一板塊」星球，其地震活動主要由熱脹冷縮、隕石撞擊或內部冷卻收縮所引發。透過比較這些星球的地震波傳播特性與地球的差異，或能反過來幫助我們更深刻地理解板塊構造在地球地震機制中所扮演的獨特角色，為地球動力學研究提供全新的視角。

總結來說，這場「台灣地震學」講座不僅讓我把原本零散的知識重新整理，也拓展了我對地震研究更完整的視野。講座提醒我，地震科學始終與台灣的生活環境緊密相連，許多研究並不是抽象的理論，而是直接影響這片土地的安全與韌性。作為後進，我明白自己還有不少需要補強的地方，但也因此更確信持續深入這個領域的重要性。希望未來能在研究上累積足夠的能力，為台灣的地震防災做出一些實際貢獻。