

地震的地球物理環境

王克林

加拿大地質調查局太平洋地球科學中心

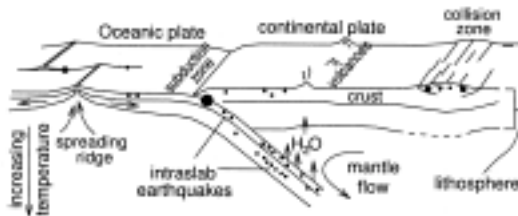
高弘

中央研究院地球科學研究所

一. 引言

地球就像是一個熱機(heat engine)。現在的主要熱源是放射性元素(主要是鈾, 鈾, 鉀的一些同位素)衰變釋放的能量。這些熱造成地幔物質的對流, 而對流將熱能轉化為機械能。地幔最外層加上地殼形成約一百公里厚的岩石圈(lithosphere) (圖一), 是對流的邊界層(boundary layer)。岩石圈由於地幔的對流而變形。在變形過程中岩石圈淺層某些部份會產生局部彈性變形, 從而積累彈性應變能。由於斷層滑動或岩石破裂, 這些應變能有時在幾秒到幾十秒之內突然釋放, 如同一個壓縮的彈簧被突然放開。這就是地震。所有的地震都釋放彈性應變能。一部份能量以彈性波的形式輻射開, 造成地震災害。

地震大小的最基本度量是地震矩 $M_0 = GSA$,



圖一 地震的大地構造環境。世界上最大的地震發生在隱沒帶(subduction zone), 但碰撞帶(collision zone)和板塊(包括隱沒板塊)內部也會發生較大的地震。岩石性質, 斷層面特性, 和岩石圈(lithosphere)壓力狀態是地震發生的基本要素。

此處 G 是岩石的剪切模量(shear modulus, 約 1011 Pa), A 是發震斷層的面積, 而 S 是斷層在地震中的平均滑動距離。地震以彈性波形式釋放的能量的大小用地震規模 M 來描述。地震規模有幾種計量方式, 但現在最常用的是 MW , 叫地震矩規模(moment magnitude)。 MW 與地震矩 M_0 (單位是 newton-meter)的關係是 $MW = 0.69 \log_{10} M_0 - 6.4$ 此式的推導牽涉到一些經驗關係。依此式和地震矩的定義, 一個面積 1000km² 的斷層面錯動 1m, 即相當於一個 $MW = 7.4$ 級的地震。注意規模 M 並不代表地震釋放的全部能量。全部能量還包括斷層高速滑動時摩擦生熱耗散的能量和其它一些次要的能量形式。一個地區(或全球)每年規模 M 以上的地震總數 N 與 M 有這樣一個關係: $\log_{10} N = a - bM$, 其中常數 a 和 b 隨地區而變。按全球統計, a 大約是 9.53, b 大約是 1.18。也就是說, 7.4 級以上的地震, 全球每年平均有六個。

中國最早的地震記載大概是<<呂氏春秋>>所述“周文王八年地動”。漢代張衡製成“候風地動儀”以探測遠震的震源方向。系統的地震研究在歐洲始於十九世紀中葉, 而現代地震學實際上約一百年前由日本東京大學的英籍教授 Milne 開創。我們現在對於彈性地震波的傳遞過程已經有了比較詳細

的了解。地球的結構主要就是通過對地震波的分析而得知的。相比之下，我們對地震的具體形成環境卻知之甚少，甚至對最基本的問題如一個斷層面上震前與震後的應力大小都沒有形成共識。

二. 地震的大地構造環境

岩石圈被中洋脊(mid-ocean ridge)和一些巨大的斷層分成若干個板塊，浮在地幔之上如同水面上大冰塊，互相錯動和擠壓(圖一)。大陸地殼密度較小，所以大陸板塊長期浮在地球表面。新的海洋板塊在中洋脊(亦稱 spreading center)由上湧地幔物質形成，先是浮在地幔之上，由於自身的冷卻逐漸增加密度，最終又隱沒回地幔。海洋板塊因此不斷地毀滅和再造。地球年齡大約是 45 億年。最老的大陸岩石約 37 億年，而現代海洋地殼最老的部份不過兩億年。岩石圈板塊隱沒回地幔的地方是一種板塊邊界，稱為隱沒帶(subduction zone)(圖一)。太平洋沿岩有許多隱沒帶。

世界上最大的地震發生在隱沒帶斷層上，例如 1960 年智利大地震(MW = 9.5)。水平錯動即走滑(strike-slip)形的板塊邊界斷層，如美國加州的聖安地列斯斷層(San Andreas fault)，也會產生 8 級以上的大地震。板塊之間的相對運動一般是平均每年幾個厘米，但板塊邊界斷層常常是處於被鎖住(即沒有相對滑動)的狀態，導致彈性應變能在斷層附近的岩石內積累。一個板塊邊界斷層在鎖住一、二百年之後便有潛力突然錯動幾米。這些斷層也容易大面積錯動。如智利大地震時，約 800 公里長的斷層同時滑動。所以板塊邊界斷層可以產生很大的地震。

有的板塊邊界是包括若干斷層和折皺的碰撞帶(collision zone 或造山帶)(圖一)，如喜馬拉雅山和台

灣。在這些地方，板塊相對位移不是集中出現在一條斷層上，斷層面的幾何形態也不太規則，使 S 和 A 都較小，所以這些地方的地震不會像 1960 年智利地震那麼大。但這些地震也會造成巨大危害，如去年台灣的集集地震(MW = 7.5)。

板塊內部的地震一般小一些。板內應變積累不像板塊邊界那麼快，但下一個地震在哪裡發生極難預測。有時它們突然發生在數百年甚至上千年沒有過強震，因此地震防範措施較為薄弱的地區，造成震驚寰宇的大災難，如 1976 年中國唐山大地震(M = 7.8，死亡人數 20 多萬)和 1995 年日本神戶大地震(M=7.1)。這些板內地震活動帶往往與處於萌芽狀態的新板塊邊界的形成有關。

板塊在隱沒之後也產生地震(圖一)。這些地震叫隱沒板塊內(intraslab)地震。前面所述的板內地震一般不超過 20 公里深，隱沒帶地震一般不超過 50 公里，而隱沒板塊內地震最深可達 700 公里。在隱沒板塊內地震中，最為奇特的是某些隱沒板塊中的雙層地震帶現象。許許多多的地震在靠近隱沒板塊內的頂面形成一個層狀的地震帶，而另一些地震在其下二、三十公里的地方形成另一個層狀地震帶。對隱沒板塊內地震有多種不同的解釋，但一般認為它們與板塊隱沒之後的岩石相變與脫水有關^[1]。許多隱沒板塊內地震，特別是其中淺源地震，顯然與板塊在隱沒時的折曲作用(bending)和反折曲作用(unbending)有關。

三. 地震的物理環境

地震形成有三個要素:岩石性質，斷層面性質，應力狀態。

岩石性質：要產生地震，岩石必須有能力積累

和釋放彈性應變能。岩石性質的主要影響因素是溫度。溫度高時，岩石容易發生塑性變形。此時，岩石雖仍為固體，但變形規律如同流體。若給定應力，岩石的流體應變率隨 $\exp(-C/T)$ 變化，此處 T 是溫度， C 是取決於岩石種類的常數。花崗岩一類的岩石一般在 $300-400^{\circ}\text{C}$ 以上不會產生地震。而玄武岩一類岩石一般在 $600-700^{\circ}\text{C}$ 以上不會產生地震。因地球深部熱，淺部冷，地震只發生在靠近地表面幾十公里呈“脆性”的地方或在尚未被完全加熱的隱沒板塊中(圖一)。海洋板塊經數百萬年的冷卻後返回熾熱的地幔，在隱沒過程中被逐漸加熱。但因岩石的熱傳導是一個緩慢的過程，有些板塊在達到很深的地方時內部仍然保持低溫，因此仍可產生地震。越老的海洋板塊經歷過越長時間的冷卻，越可能把低溫內部(cold interior)帶到深處。在溫度較高時，岩石的性質還取決於加載過程。一般來說，高頻加載時，這些岩石是彈性體，所以可以傳遞彈性地震橫波(剪切波)。低頻加載時，這些岩石表現似流體，所以並不積累足夠的彈性應變能以造成地震。而地球外核(深度 $2900-5100\text{km}$)則完全是液態，只能夠傳遞縱波(壓縮波)。

斷層面性質：岩石圈中到處都是斷層。絕大多數地震都是由這些已存在的斷層上的錯動所產生。如果一個斷層可以任意滑動，它週圍的介質便無法積累彈性應變能。要形成地震，斷層必須被鎖定一段時間，然後突然錯動。再鎖定一段時間後再錯動。這種性質叫鎖定—錯動行為(stick-slip behavior)。大量的實驗室觀測結果被總結為一種摩擦“定律”。這種定律是人所共知的摩擦定律 $\tau = \mu \sigma n$ 的一種複雜化，此處 τ 與 σn 分別為正在滑動的界面上的剪應力與正應力， μ 是摩擦係數。依這種定律， μ

在一定條件下隨界面滑動速度增大，稱速度強化，而在另外的條件下卻隨速度減小，稱速度弱化，與連續介質中應變強化與應變弱化現象十分相似^[2]。速度強化的界面穩定滑動，不會造成地震。而速度弱化是一種不穩定現象，導致斷層面高速滑動，即為地震。在外力作用下，速度弱化的性質與週圍介質的剛度相結合，使斷層的摩擦係數間歇性改變，產生鎖定—錯動行為。有限的實驗數據顯示，決定速度強化或弱化的一个重要條件是溫度。低溫導至速度弱化。對於花崗岩，強化與弱化的轉折大約是在 350°C 。另外一個極為重要的影響斷層面性質的因素是岩石孔隙中水的壓力。前述簡單摩擦定律在斷層沒有滑動時實際上定義了一個斷層的“強度”。正應力越大，斷層越不易滑動。但孔隙水壓力 p 抵消了一部份正應力，使得斷層強度 $\tau = \mu_0 (\sigma n - p)$ ，此處 μ_0 是 μ 在剛開始滑動時的值。若 p 高達正應力值，則斷層完全失去強度。水庫注水誘發地震就是這個原因。原來處於臨界狀態的斷層由於 p 的提高，降低了強度，開始滑動，再因速度弱化而高速滑動產生地震。孔隙水壓力現在也被認為是誘發隱沒板塊內地震的一個因素：隱沒板塊中的含水礦物在地幔壓力下脫水，加大了岩石孔隙水壓力而引起地震。由於斷層帶內物質的複雜性，實際斷層的性質比實驗室中的岩石界面要複雜的多。斷層帶內斷層泥顆粒大小和礦物成分，某些礦物隨應變的溶解與沉析，都會影響斷層面的性質。在動力(有慣性力)情況下，斷層滑動的觸發(nucleation)，破裂面沿斷層面的傳播(propagation)，和最終的停止(capture)又是一個極為複雜的過程。

應力狀態：由於地下巨大的圍壓(confining pressure)，拉張形破裂幾乎不會發生。地震的發生是

由於剪應力的存在。在沒有大地構造力的理想狀態，岩石只承受靜態岩石壓力(lithostatic pressure)，如同一池靜水，沒有剪應力。主要是由於岩石圈板塊互相作用，不同地區實際上處於不同的應力狀態。例如在集集地震的地區，菲律賓板塊與歐亞板塊在台灣碰撞，造成地殼近東西向的最大壓應力，而垂向應力(基本上是岩石自重)是最小壓應力。其他一些地球物理過程也會帶來剪應力，如岩石的不均勻熱漲冷縮，隱沒板塊內物質脫水相變時體積縮小^[3]，冰川進退造成的地表負載變化，岩石風化剝蝕和沉積造成的地表負載變化等等。最大剪應力方向夾在最大和最小主應力方向之間，並與它們都成 45° 角，但地震未必一定在這個面上發生。有的斷層強度很低，儘管不受最大剪應力，卻會在較小的剪應力作用下先發生破裂，造成地震。應力狀態決定了所有斷層的可能滑動方向。至於到底地震斷層面上的剪應力有多大，目前尚無定論。一個比較可靠的結論是地震造成的斷層面剪應力的變化，即應力降，一般不大於 10MPa，與岩石圈壓力相比是一個極小的數字^[4]。但這應力降是總的剪應力的一小部份呢還是全部的剪應力？多數人認為，至少對於板塊邊界斷層來說，這基本是全部的剪應力^[5]。也就是說每一次大地震把斷層面上一般不到 10MPa 的剪應力降至大約 0。如要再產生一個大地震，還需上百年的時間把應力重新積累至 10MPa。也有人認為總應力實際上比這要大得多。也就是說今天一個大地震可以把應力從 100 降到 90MPa，明天還可能有大地震把它從 90 降到 80，換言之，地震活動並無週期性可言。總剪應力的大小決定一個地震通過斷層摩擦釋放多少熱能，因斷層摩擦單位面積的產熱率是 $E = \tau V$ ，此處 τ 是總的剪應力， V 是斷層在地震

時的平均滑動速度。而應力降 $\Delta \tau$ 主要影響一個地震通過彈性波釋放多少機械能。到底一個地震的“效率”(即機械能與全部能量之比)有多高，取決於到底總的背景剪應力 τ 是多大。所以斷層上的絕對應力值是一個重要的問題。

四. 地震過程的簡單模型

地震變形週期模型：這類模型主要用于解釋地震活動引起的大地形變。最簡單而且流行的是彈性錯動模式 elastic dislocation model。這基本是運動學模型，一般是給定斷層運動，求地表面的位移場，並假設岩石為完全彈性。但也可用它從實測的(如用 GPS)地表位移反推地震位錯和斷層面積。這類模型也常用于計算一個地震引起的應力場變化對其他斷層的影響。有時一個斷層的錯動使得另一個斷層上的剪應力增大或正應力減少，觸發新的地震。更切合實際一些的模型考慮岩石的流變性質。如前所述，深部岩石具有粘滯性，地震時(高速變形)是彈性體，而震前加載時(低速變形)又似粘性流體。每次地震給這些岩石增加一些彈性應力，但這些應力又在地震間歇中逐漸鬆弛，使得地表變形速率與時間有關。還有一種模型用摩擦定律模擬斷層的鎖定—錯動行為並解釋位移場在地震週期中隨時間的變化。這後一種模型一般假設岩石是完全彈性體。

地震宏觀特徵模型：這是一種高度抽象的模型。一般是由外力驅使一個或兩三個用彈簧連起來的塊體沿一個摩擦界面滑動。彈簧代表岩石剛度，塊體代表質量和慣性力，而摩擦面代表斷層。這些模型幫助理解地震的一些宏觀特徵，如鎖定—錯動行為，應力降，地體之間的交互作用。這些簡單模型有時會表現出驚人的複雜性，甚至出現渾沌行為

(chaotic behavior)。

自我約制(self-organized criticality)模型：這是一種更為抽象的簡單模型，用于理解地震過程作為一種自我調整的約制現象(self-organized critical phenomephon)。它用許許多多互相連繫的小單元來代表一個斷層面或地殼。這些單元同受外力(代表構造力加載)，但它們的互相作用導致十分複雜的位移過程。有時單個或幾個單元同時滑動，代表小地震。而有時許多單元同時滑動，代表大地震。總體表現即有極大的隨機性又有一定的週期性，與實際觀測到的地震發生方式十分相似。這種模型同時也符合一些地震的統計規律，如引言中提到的地震發生率 N 和地震規模 M 的關係^[6]。

五. 地震預報

現在西方很少有人研究臨震預報，因為有生之年得到成果的可能性太小。1975年中國遼寧省海城大地震預報成功，但1976年河北省唐山大地震卻沒有預報。希臘的一個研究機構不斷報告成功預報的範例，但其報告的可靠性和預報的準確性常引起爭議。以人類現在對地震形成環境的認識程度，難以將地震預報作為科學問題來討論。因而圍繞地震預報的爭論具有相當的哲學色彩。國際地球物理界對地震預報大約有三種觀點：1. 因為我們不可能完全理解地震過程，所以預報是不可能的。這種觀點是基於地震發生的隨機性。2. 我們有可能理解地震過程，所以預報還是可能的。3. 不管我們能否理解地震過程，預報總是可能的。第一、二種觀點共同認為一個可靠的科學理論是地震預報的必要條件，而第三種觀點(在亞洲特別是中國大陸十分流行)則強調觀察歸納總結地震前兆現象，依靠大量經驗來預

報地震。幾千年來中國醫學確實在不知“細胞、病毒”一類概念的情況下治癒了許多疾病，這是否給予地震預報一些啓示呢？只要有前兆，我們大概總有一天可以準確預報地震，而對地震的地球物理環境的研究有助於對前兆的識別和理解。既然地震是一種臨界不穩定現象，那麼不穩定過程的初期大概會伴隨一些地球物理和化學參數的變化。人們考慮過的前兆現象包括小地震活動頻率發生變化，地形變速率發生變化，地下水水位異常升降，若干稀有氣體增加，大地電磁活動異常等等。困難在於不是所有地震都有同樣的前兆。每一個地震似乎都有些不同的表現。出路大概在於尋找一個綜合多種因素的前兆圖象。這需要從不同學門的角度對大量地震和震前異常現象進行分析才有可能實現。

參考資料：

- [1] Peacock, S.M. and Wang, K., 1999, *Science* 286, 937-939.
- [2] Scholtz, C.H., 1990, *Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 439 pp., Cambridge University Press, New York.
- [3] Devaux et al., 2000, *Journal of Geophysical Research* 105, 13365-13373.
- [4] Ruff, L.J., 1999, *Pure and Applied Geophysics* 154, 409-431.
- [5] Wang, K. and He, J., 1999, *Journal of Geophysical Research* 104, 15191-15205.
- [6] Grasso, J. and Sornette, D., 1998, *Journal of Geophysical Research*, 103, 29965-29987.