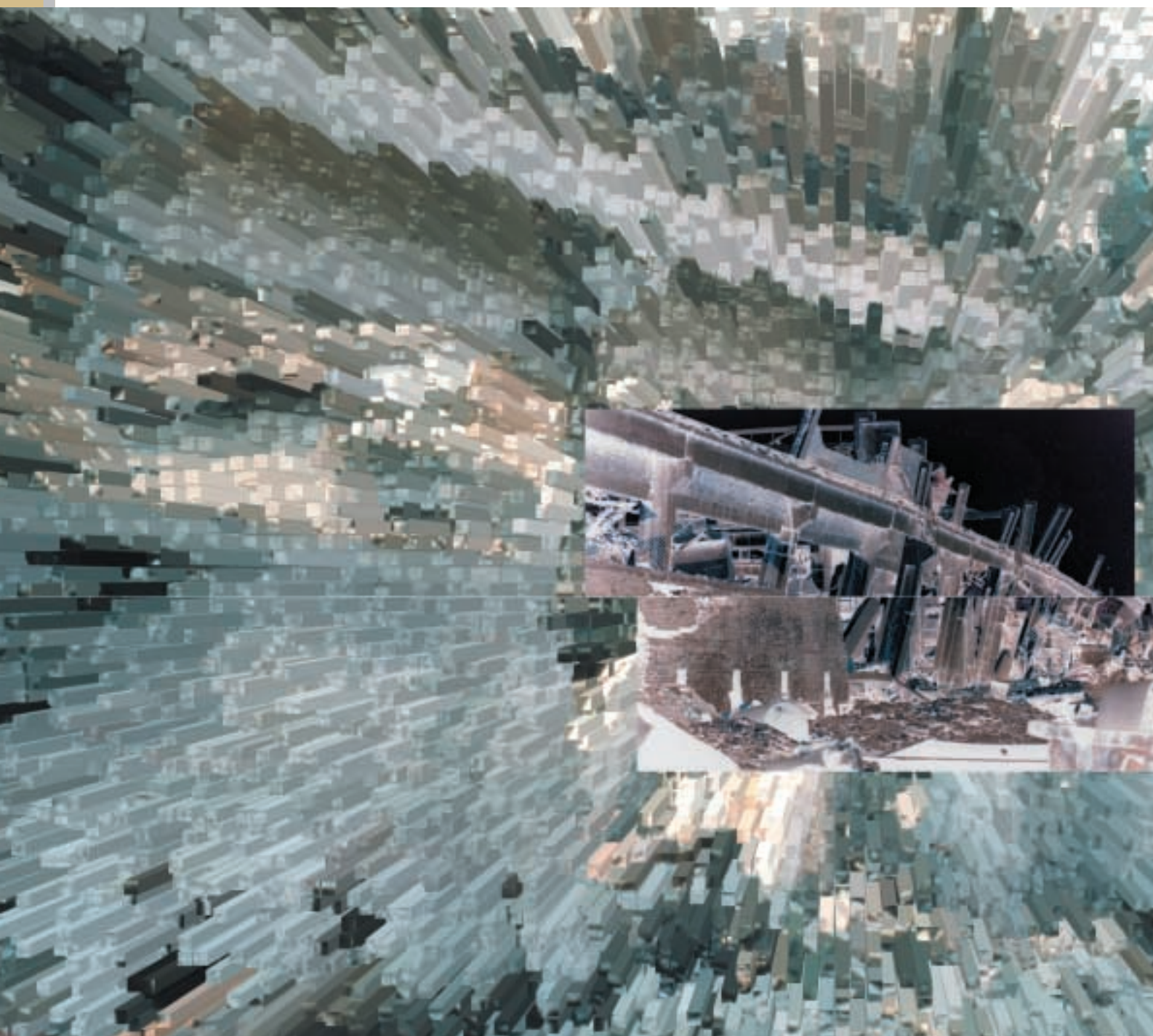



為什麼會發生大地震？

以四個世界著名的大地震為例



發生於一九七六年七月二十七日的唐山大地震，完全摧毀了這個城市，光是死亡人數就至少高達六十五萬五千人，全城的建築物幾乎無一倖免。

生活在台灣地區的民眾大概早就對發生地震這件事見怪不怪了。這可是有科學觀測數據來加以佐證的話喔！就拿一九九五到一九九八這四年為例，中央氣象局地震測報中心平均每年在台灣附近都測到規模大小不一的地震約一萬五千多次，其中規模5以上的地震共九十九次，平均每個月發生兩次！即使是規模大於6



發生於一九七六年七月二十七日的唐山大地震，完全摧毀了這個城市，光是死亡人數就至少高達六十五萬五千人，全城的建築物幾乎無一倖免。

高 弘

以上的地震也高達十一次之多。因此，雖然我們還稱不上是時時刻刻活在「天搖地動」中，但我們腳下的大地不時地發出咆哮卻是一件不爭的事實。

一九九九年九月二十一日的凌晨，是這一代生活在台灣的人們永難磨滅的驚恐回憶！在台灣的中部發生了自現代地震觀測網建立以來最大規模的一次地震，這次地震的震央在台灣中部山區小鎮集集附近，因此被稱為「九二一集集大地震」。氣象局最初利用區域地震網的觀測資料訂出這個地震的規模為7.3，事後地震學家再利用全球地震網的資料將這個地震的規模訂為7.6。九二一集集大地震的發生，固然造成生命財產的龐大損失，重創中台灣的各項經濟及交通建設，但在某種程度上，也喚起了民眾對地球科學的認識與重視。地震過後，大家除了忙於救災重建外，一個心中非常疑惑且很想知道答案的問題是：為甚麼會在台灣中部發生大地震？到底發生大地震的條件是什麼？

其實即使是規模7以上的地震，在世界上也不算是多麼稀罕的事。根據美國地質調查所（U.S. Geological Survey）的全球地震資料，在一九七七至一九九九這二十三年間，地球上共發生了超過二百次規模大於7的地震！其中，僅一九九五年一年內就發生了十八次，可見地球內部是多麼地活躍。

然而真正令人可畏的不是地震的規模大小，而是地震所造成的破壞與死傷。從過去的經驗中，我們知道地震引起的破壞與死傷並不一定與規模的大小成正比，反而和人類本身的生活型態息息相關，尤其是近代大都會的形成，造成人口大量集中、各種建築物及設施密布於城市帶。因此，一個發生於人口密集都會區附近的中規模地震，往往會比發生於人煙稀少的大規模地震造成更大的災難。無論如何，地震的生成畢竟有其一定的條件與過程，我們若是能掌握地震發生的根本原理，那麼在都市發展的規劃過程中便可加入地震防災的考量，在某種程度上達到預先防止地震災難的效果。

本文純粹從自然科學的角度探討大地震發生的原因。首先簡單介紹地震究竟是個什麼樣的物理現象？它的發生有那些條件？它的動力來源為何？然後以幾

個世界著名的大地震為例，特別針對它們發生的地質構造背景加以解釋，從大地應力分布及板塊運動分析來看它們個別不同的發震型態。最後從現代地震學及地體構造學的發展趨勢出發，勾勒出未來可能的地震研究課題及方向。

地震的成因與條件

地震是一種自然現象，有其生成的原因，當然也有一定的生成條件。其實要發生地震必須滿足許多條件，而且缺一不可，其中最重要的幾個控制因素為：物質的力學性質、溫度與壓力狀態，以及適當的應力來源。在此，我先分別就生成地震的條件與過程加以說明。

首先談物質的力學性質，地球的物質當然以岩石為主，不同的岩石表現出不同的力學性質，總括說來，可分為「脆性」及「塑性」兩種。脆性物質在受到應力時，最初是以彈性的方式變形，也就是說一旦應力消失，物體會恢復原來的形狀。但是當受到的應力強度逐漸增加，最後超過物質本身的強度時，物體就會破裂，藉此釋放累積的應力。塑性物質在受到應力時，則是以連續變形的方式來釋放，並沒有累積、破裂的過程。

在古老的傳說中，人類總是賦與地震一種神祕的色彩，其實地震現象就是地球的物質在受到應力狀態下的一種脆性破裂行為。這個現在看來再簡單不過的推論，卻一直到大約一個世紀前才逐漸被人類了解。西元一九〇六年舊金山大地震過後，地球科學家根據地震前後的地表變形，提出了劃時代的「回彈學說」。當一個斷層系統受到外加剪應力時，沿斷層面的摩擦

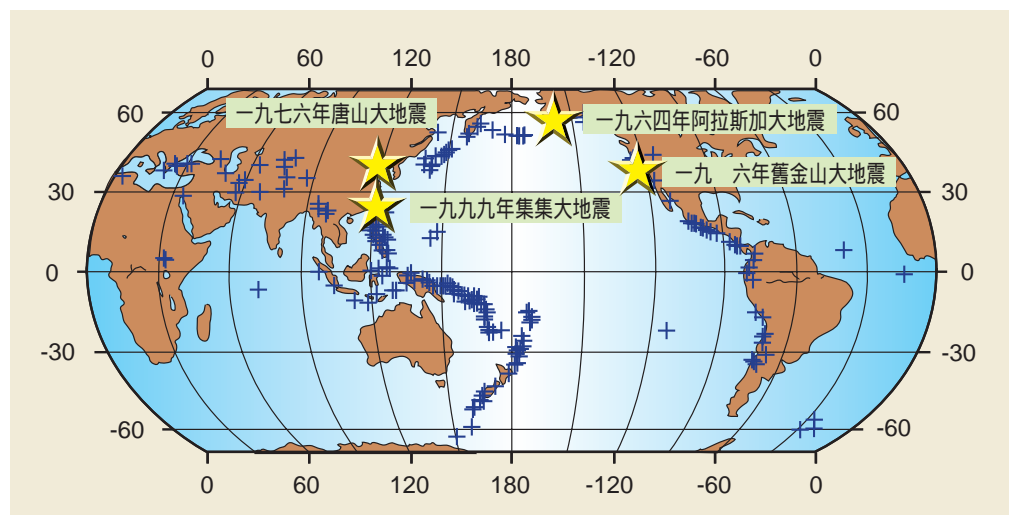
力會阻止斷層面錯動，因此所有的變形起初都以彈性的方式表現。一旦剪應力超過斷層面的最大摩擦力，斷層面就會發生瞬間錯動，這就是地震。這個學說最大的貢獻是從地質構造（斷層）及大地應力的角度去解釋地震現象，從而開啟了往後對地震的科學研究。

接近地表的岩石大都表現脆性行為，而位於較深處的岩石則反而以塑性的方式釋放大地應力，這其中的差別就引導我們到第二個控制地震生成的重要因素，那就是岩石所在位置的溫度與壓力條件。當物質受熱或受壓時，會改變分子的排列型態，就像冰加熱後會變成水一樣，這種改變進一步變更物質的力學行為，也直接決定了物質是否能承受剪應力，亦即地震是否能發生。

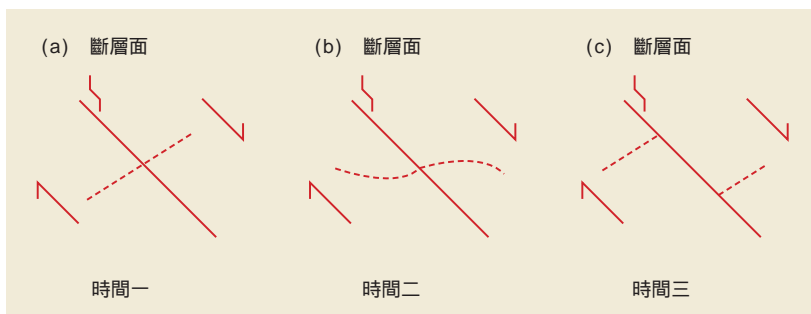
地震要發生當然要先產生變形，而變形源自於應力的增加，因此，另一個非常重要的因素就是要有適當的應力來源。大自然中存在著各種應力來源，但是有什麼力量大到足以震撼大地，引起地動天搖呢？答案就是「板塊運動」。

發生地震的主要動力來源：板塊運動

為什麼有板塊？我們知道，地球的表面溫度平均在攝氏零度至三十度之間，地球的主要組成物質在這個溫度範圍內的力學性質是以脆性為主，因此形成所謂的「岩石圈」。另一方面，在較深處的溫度增高，壓



全球於一九七七年到一九九九年間發生規模超過7的地震震央分布圖，圖中每個十字表示一個地震，本文中特別說明的四個大地震位置則以星號表示。



「回彈學說」的示意圖，(a) (b) (c) 分別代表地震發生前後的地表變形狀態，大部分地震的發生其實就是沿斷層面上的瞬間錯動。

力也增大，地球的主要組成物質則以塑性行為為主，形成所謂的「軟流圈」。我們可以想像岩石圈就是一個雞蛋的蛋殼，而軟流圈就是其下的蛋清。若是這個雞蛋的蛋殼有裂紋，那麼每片蛋殼就是一個板塊。

但是為什麼表面會有裂紋呢？這是因為地球內部的溫度較高，外部溫度較低，這種內外溫度的差異促使地球內部的物質產生對流現象，也就是說，極高温度的地球內部物質由深處向地表湧出，而近地表較冷的物質也會沈降回地球內部，類似一壺煮沸的熱水。至於這些物質湧出或沉降的地方就是裂紋所在，也就是所謂的「板塊邊界」。板塊邊界大致分為三種型態，基本上，地球內部的高溫物質從「伸張型邊界」湧出，通常稱之為「中洋脊」。反之，「聚合型邊界」則是地表較冷的物質重新返回地球深部的地方，最常見的例子為「隱沒帶」。若是板塊相互之間沒有伸張或聚合，而是一左一右的錯動，這種邊界稱為「轉型邊界」。所謂的板塊運動學說，簡單而言，就是認為地球內部物質由中洋脊湧出，冷卻後形成新的岩石，這些岩石被緩慢的帶向隱沒帶，最後隨著隱沒板塊又返回地球深部，像是一個超大形的輸送帶。這種由熱而產生的運動便是造成地震的主要動力來源。

地震的發生型態

絕大部分的地震肇因於斷層的錯動，而斷層的錯動有三種最基本的型態，分別為正斷層、逆斷層、及走滑斷層（又稱平移斷層）。

正斷層是由於地層受到水平伸張力而產生，斷層的上盤（也就是斷層面之上的物質）沿斷層面向下滑

動，因此岩層的總長度在地震後會變長。在板塊的伸張型邊界（如中洋脊）最容易發生正斷層地震。

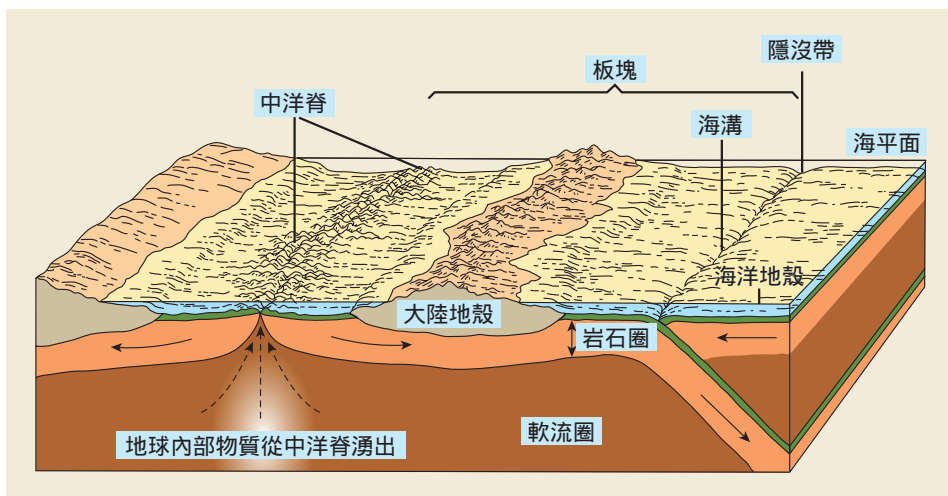
顧名思義，逆斷層則是斷層的上盤沿斷層面向上滑動，這大都是因為岩層受到水平壓縮力而產生。逆斷層地震發生過後，岩層的總長度會變短，但岩層的位置會升高。在聚合型邊界可以觀察到許多逆斷層地震。

若是沿著斷層走向產生錯動，則稱為走滑斷層。這種錯動方式是因為壓縮力與伸張力均為水平方向，且相互垂直（例如壓縮力為東西向而伸張力為南北向，那麼斷層面則可能為東北 - 西南向或西北 - 東南向）。當然在板塊的轉型邊界最容易觀察到走滑斷層地震。

雖然正斷層、逆斷層、及走滑斷層分別會在伸張型、聚合型、及轉型邊界觀察到，但並不表示它們只會發生在那些地方。舉例來說，在隱沒帶附近是可以觀察到各種不同型態的地震，經過地球科學家多年來的研究，我們現在逐漸了解，這是由於不同的地區受到不同的區域應力，再加上區域地質構造的變化所造成。這些都是我們在企圖洞悉地震發生原因方面的具體進步。



在崑崙山北面所拍攝的一張岩石露頭，其中岩層有明顯的褶皺，可見曾產生塑性變形。



板塊、板塊邊界、板塊運動的示意圖，岩石圈由板塊組成，其下為軟流圈，地球內部物質在中洋脊湧出形成新的岩石圈，最後在隱沒帶返回地球內部。

相對位移量。由於地處轉型板塊邊界，因此，幾乎沒有任何垂直於斷層線方向的錯動，所有觀察到的垂直相對位移量均小於1公尺。

一九六四年阿拉斯加大地震

我們知道兩個板塊由於相互之間的擠壓，會在聚合型邊界形成隱沒帶，沿著隱沒帶，其中一個板塊

會隱沒至另一個板塊之下，而在隱沒的過程中，隱沒板塊與上覆板塊之間的交界面稱為「板塊界面」，根據統計，全球的地震活動約有七成是由於隱沒板塊與上覆板塊在板塊界面的擠壓作用所造成。一九六四年阿拉斯加大地震就是這類地震的典型例子。

這個地震發生於一九六四年三月二十七日，規模估計為9.2。它破裂的板塊界面長約700公里、寬約180公里，平均錯動量高達14公尺，估計至少有二十萬平

四個世界著名的大地震

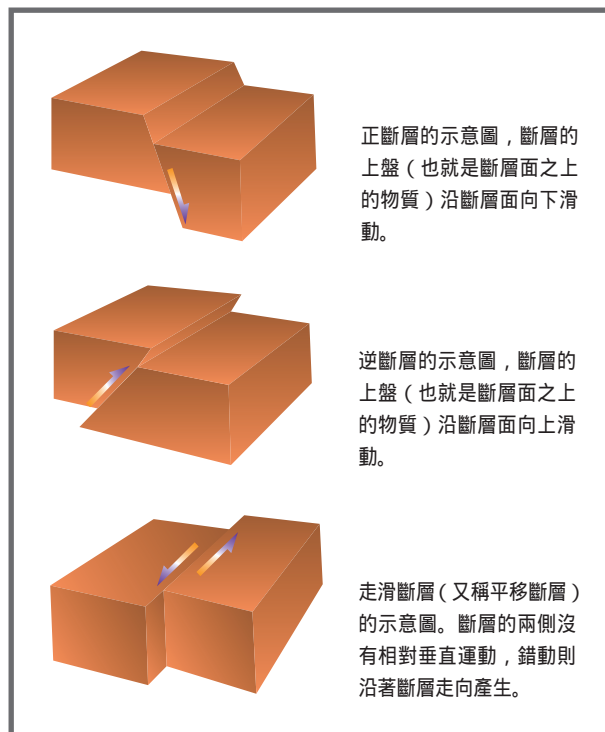
我們現在從地體構造學的角度來看幾個世界著名大地震的發生原因，並進而說明它們的背景及動力來源。它們分別是一九六六年舊金山大地震、一九六四年阿拉斯加大地震、一九七六年唐山大地震、及一九九九年集集大地震。

一九六六年舊金山大地震

規模8.3的舊金山大地震，發生於一九六六年四月十八日，因劇烈搖晃間接引發的大火延燒了三天，使得舊山市幾乎全毀。舊金山大地震在地震研究史上留下了輝煌的紀錄！將地震現象解釋為沿地質斷層構造上之瞬間錯動的「回彈學說」，就是根據這個地震的研究而提出的。

造成這次大地震的元凶是綿延美國西部海岸的「聖安第列斯斷層」(San Andreas Fault)，這個斷層系統是北美板塊與太平洋板塊的轉型邊界，也就是說，在這個斷層的東面屬於北美板塊，而西面屬於太平洋板塊。聖安第列斯斷層基本上是一個垂直斷層，太平洋板塊在此相對於北美板塊向西北方平行於聖安第列斯斷層運動，因此，在斷層面上觀察到的是右移的走滑錯動。

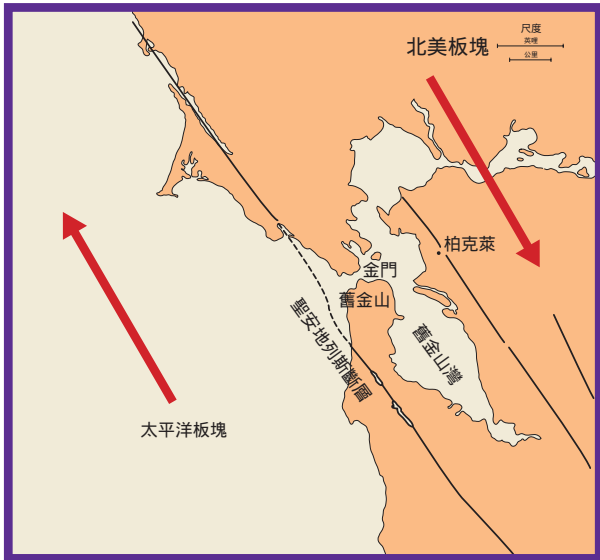
根據大地測量的結果，造成一九六六年舊金山大地震的斷層破裂面達430公里長，沿斷層面有6公尺的



正斷層的示意圖，斷層的上盤（也就是斷層面之上的物質）沿斷層面向下滑動。

逆斷層的示意圖，斷層的上盤（也就是斷層面之上的物質）沿斷層面向上滑動。

走滑斷層（又稱平移斷層）的示意圖。斷層的兩側沒有相對垂直運動，錯動則沿著斷層走向產生。



美國加州聖安第列斯斷層系統附近的板塊分布及相對運動，斷層的東面屬於北美板塊，而西面屬於太平洋板塊，太平洋板塊在此相對於北美板塊沿西北方向平行聖安第列斯斷層運動，因此，在斷層面上觀察到的是右移的走滑錯動。

方公里的地區受到這個地震的影響而產生變形。

一九六四年阿拉斯加大地震是發生在阿留申隱沒帶的最東端，太平洋板塊在此沿阿留申海溝向西北隱沒至北美板塊之下，但是為什麼這個地震的規模會如此大呢？目前最廣為接受的說法是，在板塊界面上的剪應力（或是摩擦力）強度並不均勻，換言之，各個不同位置的板塊界面能承受的摩擦力大小並不相同，而這個地區隱沒帶的板塊界面有特別高的剪應力強度。因此，雖然隱沒板塊與上覆板塊有相對位移，沿著板塊界面卻因為特別高的摩擦力而鎖住，沒有任何滑動，因而累積了特別大的相對位移量。等到累積的相對位移量超過板塊界面上的剪應力強度，才引發瞬間錯動而造成地震，如此所產生的地震自然也具有非常大的規模，不論破裂面、錯動量、或是影響範圍都相當驚人。

一九七六年唐山大地震

唐山市位於中國華北、北京市東方160公里處，是一座工業城市。發生於一九七六年七月二十七日的唐山大地震，完全摧毀了這個城市，光是死亡人數至少高達六十五萬五千人，全市的建築物幾乎無一倖免。這個地

震造成的死傷人數是近代歷史上自然災害中的最高紀錄之一。

一九七六年唐山大地震的規模為7.8，震央就在唐山市，深度為10公里。唐山市在地理位置上，其實是遠離任何板塊邊界，因此這個地震是個典型的「板塊內部地震」。要了解為什麼會發生這個地震，必須先了解整個中國華北的地體構造分布：中國華北是一個複雜的盆地構造，盆地的伸張方向大致為南北向，通常在這種伸張型的盆地構造中，大多數的地震是由正斷層所引起，而且錯動的伸張軸與盆地的伸張方向一致，但是地震學家後來發現唐山地震並不符合正斷層的型態，而是一個走滑斷層。這個相互抵觸的觀測結果一直困擾著地球科學家，直到一九八七年那別列克（John Nabelek）、陳望平與葉洪提出新的解釋。他們認為整個中國華北是一個大尺度的雁形走滑構造系統，而華北盆地是位於兩個相鄰的右移走滑主斷層之間，在兩個主斷層上的相互錯動造成了這個盆地的開張。也正因為華北盆地並不是一個單純的伸張型盆地，而



中國華北大尺度的地體構造圖（由那別列克、陳望平與葉洪於一九八七年所提出），整個中國華北是一個大尺度的雁形走滑構造系統，而華北盆地位於兩個相鄰的右移走滑主斷層之間，由兩個主斷層上的相互錯動而造成。這個模型解釋了為何唐山大地震雖在華北盆地內，但卻是一個走滑斷層。



造成一九〇六年舊金山大地震的「聖安第列斯斷層」。本圖是由西北向東南方向望去，圖的右下方為美國西部海岸。斷層所在地有明顯的右移錯動，並可從樹木排列位置的突然改變觀察出來。

是由複雜的斷層系統交互作用而逐漸形成，故在盆地內可觀察到多樣的斷層型態。

唐山大地震的一個重要科學意涵，就是證明了在板塊邊界所產生的應力可以向板塊內部傳遞甚遠，並足以在板塊內部的斷層構造累積相當程度的變形而產生大地震。

一九九九年集集大地震

台灣位居菲律賓海板塊與歐亞板塊交界，在台灣之東為琉球隱沒帶，菲律賓海板塊在此向北隱沒於歐亞板塊之下，在台灣之南為呂宋隱沒帶，歐亞板塊（嚴格來說，應該是南中國海部分的歐亞板塊）沿此向東隱沒於菲律賓海板塊之下。在這兩個隱沒帶之間，菲律賓海板塊以每年約7公分的速度朝西北方相對於歐亞板塊運動，這個相對運動使得北呂宋島弧朝歐亞板塊的大陸邊緣擠壓，這就是一般所稱的「弧陸碰撞」，也就是台灣造山的主要地體構造背景（至於台灣地體構造背景之詳盡的說明，請參考本刊由鄧屬予教授所

撰之「天搖地動 - 台灣版」一文）。

在整個造山帶的發育過程中，碰撞作用一直持續提供向西北擠壓的動力來源，把原本強度較弱的大陸邊緣物質向內推擠，促使變形的最前緣不斷的向西遷徙，就像一個推土機向前推動鬆軟的沙土，使得這些鬆軟的沙土逐漸累高一樣。實際上，地層被推擠後會產生一連串的逆衝斷層，這些逆衝斷層以幾乎相同的角度向碰撞縫合帶傾斜，排列在變形前緣的後方，而這些逆衝斷層系統的綜合結果，便是地層在水平方向的長度縮短及高度上的增加，也就是水平壓縮及造山。

在台灣中部、中央山脈西側有三個南北向的大逆衝斷層系統，最西邊的是彰化斷層，最東邊的是雙冬斷層，而居中的是車籠埔斷層。這三個逆衝斷層系統都以低角度向東傾斜，深入地下至少數公里，但到目前為止，我們對它們的詳細幾何形狀及分布仍不清楚。一九九九年的集集大地震發生於車籠埔斷層系統，並引發了上萬次的大小餘震。

集集大地震序列提供地球科學家一次空前的機會，來研究地震與活斷層之間的密切關係，相關的科學研究成果也陸續發表中。這次車籠埔斷層的再次錯動提醒我們一個鐵的事實：台灣地區是一個非常活躍的造山帶，而類似集集大地震這種規模的地震在未來仍有機會不斷發生。因此，我們平日對防震教育及震災防治等事前的準備工作絕不能有所鬆懈。

地震能否預測

既然大地震的發生不可避免，那麼大家會問：為什麼地震學家不能像預測颱風一樣地事先預測地震的發生？這樣不就可以大量降低因地震所造成的人員死傷及財產損失嗎？這個問題其實很複雜，無法由三言兩語解釋清楚的。基本上，一個成功的地震



一九六四年阿拉斯加大地震的震災之一。地殼因錯動而產生數米高的位移，嚴重破壞道路及其它設施。

B. J. Skinner and S. C. Porter, *The Dynamic Earth*.

預測應至少包含三個參數：何時？何地及多大的規模？自從板塊運動學說在一九六〇年代末期被廣泛接受後，地震會在何地發生這個問題至少有個初步的答案。但是當我們把尺度放小，想要確切知道地震會在那個地點發生則有困難，這是因為地震發生在斷層上，我們若是對一個地區斷層系統的分布及特性知道得不夠透徹，就不可能知道未來地震究竟會在那裡發生。因此，活斷層的調查及斷層錯動歷史的分析，成為近年來日漸受到重視的課題。換言之，我們唯有致力於了解區域地體構造，才能回答下次大地震會在那裡發生這個問題。

至於發生的地震規模會多大？這個問題目前只能有部分答案。當我們知道一個斷層系統的幾何分布範圍，再透過板塊運動學說，即可推測這個系統的長期變形速率，那麼再經過地震學的理论計算，我們可以粗略估計出在這個斷層系統上發生地震的規模。但是，因為我們並不知道下個地震會不會使整個斷層面破裂，因此，目前我們只能估出發生於這個斷層系統上地震的最大規模。實際的規模因為也受許多其它因素的控制，目前無法精確估計。

最後是地震的發生時間？這又是一個尺度的問題，若是我們以板塊運動的角度來看，地震的發生只是遲早的事。換言之，在一個活躍的地震帶（如板塊邊界），大地震在相當時間內（如未來的五十年）一定會發生。但是，如果我們想要知道大地震會不會在明天，或是一星期內的某個斷層系統發生？以目前對地震的了解是難以回答的。因為地震現象雖然是板塊運動的結果，但是二者的時間尺度相差太大，大地震的發生以秒為計算單位，錯動量在公尺這個數量級，但板塊運動的速率每年只有幾公分，因此，我們必須先詳細了解這兩種自然現象之間的交互作用，才能了解緩慢的板塊運動變形如何累積，最後成為地震的錯動。另外，我們對地震現象本身所代表的是那些物理或化學作用的了解有限，當然也限制了模擬地震現象的能力。這些工作都將是地球科學家未來致力的研究方向。

在古代，人們對地震的印象總是停留在驚懼、徬



一九七六年唐山大地震之後的唐山市，幾乎夷為平地，到處一片斷垣殘壁，人員傷亡數字為近代歷史上自然災害之冠。



一九九九年集集大地震後，碑豐大橋斷裂，河床因斷層的垂直錯動而隆起，一夕之間造成了壯觀的瀑布，這種大自然的奇景堪稱世界僅有，也活生生地說明了台灣地區地震的活躍程度。

地工技術研究發展基金會

徨無助、及否定的態度。隨著地球科學研究的逐漸發展，我們現在知道地震的發生是一種自然現象，它們反應出地球內部變形的一小部分。我們賴以生存的地球由於內熱外冷，因此在內部產生大規模的熱對流作用，這個熱對流作用造成新岩石圈，在中洋脊生成及老岩石圈在隱沒帶消失，也就是我們在地表所觀察到的板塊運動。

換個方式來看，地球就像一具引擎，以對流方式不斷地將它內部的熱能轉換成推動板塊運動所需的動能。因此，只要地球內部仍屬高溫狀態，熱對流就會存在，而板塊運動也會持續，當然大地震的發生也沒有終止的一天。

高 弘

中央研究院地球科學研究所