

台灣西部斷層帶附近岩體同震變形行為之研究（Ⅱ）

A Study on Coseismic Deformation near Fault Zone in Western Taiwan（Ⅱ）

計畫編號：91-2211-E-002-048

執行期限：91/8/1-92/7/31

主持人：林銘郎 台灣大學土木工程學系 副教授

一、摘要

921 集集大地震時，由於車籠埔斷層錯動所引發大幅地表變形與破裂，導致變形帶上的建築物嚴重損毀及破壞，並造成近 100 公里斷層地表破裂帶，近年來許多學者於車籠埔斷層地表破裂沿線，以開挖槽溝的方式進行古地震研究，因此能夠直接觀察斷層擴展褶皺的剖面，對於研究靠近地表褶皺構造的變形特徵與變形機制，實為一難得的機會。本研究之分析分為運動學模式及連續體力學數值分析二部分，第一部份嘗試利用三角形剪切帶運動學模式模擬斷層錯動引致之地層變形型態，結果顯示：三角形運動學模式可以描述自然界斷層擴展褶皺的特徵，由集集地震後槽溝開挖剖面之反算分析，可以了解地表下方盲斷層的可能位態與深度，與可能的古地震次數；第二部分以連續體力學數值分析結果顯示，利用連續體之力學分析，引入界面元素以模擬斷層的存在，可以模擬盲斷層向上擴展的過程，為一破裂穩定發展的過程，抬升基盤的力量需要一直增加，斷層面才會繼續向上擴展。而所得之變形與三角形剪切帶運動學模式所描述相似。

Abstract（英文摘要）：

During the 1999 Chi-Chi earthquake, the movement of the Chelungpu fault caused large deformation of the surface of the earth, and destruction of buildings nearly along the Chelungpu fault trace. Trench excavations of the monoclinical structure were taken, and provide a good chance to study the deformation features and mechanisms of the natural monoclinical folds. This study includes two parts: the kinematic modeling and continua numerical simulation. In the first part, for the purpose of understanding the deformation of monoclinical folds induced by faulting events, the numerical modeling is done by choosing trishear kinematical model which firstly suggested by Erslev (1991). In the inverse analysis of monoclinical folds of Shijia trench profile in Nantou, the results are: (1) the ramp angle of blind fault is about 30° , and (2) the depth of fault tip now is about 7.4m beneath the hanging wall surface, and

(3) there are at least two more faulting events beside Chi-Chi earthquake, and the rigid body motion of hanging wall along the fault plane are about 5, 2, 0.5 meters individually from young to old events. In the second part, in order to understanding the rationality of trishear kinematical model, the numerical simulation of the process of fault propagation is taken by running FLAC (continua numerical software) and the fault is simulated by using interface. The results are: (1) there is a triangular shear zone observed in front of the fault tip, and (2) the displacement vectors of particles rotate and decrease from hanging wall to footwall. The results are in agreement with the assumptions of trishear model. But, according to the numerical simulation, the parameters of trishear model do not keep constant in the process of fault propagation, which should be considered when kinematical modeling is taken. Otherwise, fault propagation is a process of stable fracture propagation. If the force for basement uplift does not increase continuously, the propagation of fault plan will stop.

二、研究目的與方法

集集地震時，車籠埔斷層發生錯動，東側土地相對於西側抬升隆起，產生一系列大致呈南北向線狀分佈的陡崖。據現地觀察，除了沈積物厚度

較薄的河床有斷層切穿地表外，多數形成陡崖的地面並未被斷層切穿，而是形成一向下彎曲、朝向西的不對稱褶皺，可稱為單斜褶皺陡崖。前述單斜褶皺陡崖，應為地下之盲斷層向上擴展時，使得斷層尖端上面地表的沈積物變形所成。由於盲斷層的地下形貌與活動性較難了解，因此斷層錯動時的變形影響範圍、地震規模與回歸週期等重要資訊難以取得，對於地震防災對策的擬定是一大考驗。像台北盆地之土壤沖積層下方就有金山、崁腳、台北、新店等斷層通過。因此對於台灣西部斷層帶附近岩體同震變形行為之研究成果，將可應用於評估盲斷層可能的地震危害度，將有利於了解斷層尖端前緣之地表變形範圍，與斷層的滑動歷史。

由車籠埔斷層沿線槽溝開挖的結果，仔細觀察此種單斜褶皺的內部構造，研判三角形剪切帶(trishear zone)運動學模式可以解釋上述單斜褶皺的特徵，也可以在應變諧合(stain-compatible)的條件下，進行褶皺型態的回復。因此本研究可分為以下二部份：第一部份嘗試利用三角形剪切帶運動學模式，對槽溝開挖所觀察的褶皺變形特徵進行反算，以了解其變形機制，並得到盲斷層之位態、深度及地震時滑移距離等參數。第二部份以 FLAC 為分析工具，模擬盲斷層向上擴展的過程，比較動力學分析與運動學模擬之結果，以了解運動學模式假設的合理性與模擬參數之適當範圍與控制變因。

三、研究成果

(1)運動學模式之反算分析：

觀察現地槽溝開挖之剖面，主要的觀察項目為受到彎折變形的地層層面。在回復褶皺型態的反算分析中，有四個假設：

1. 地層剛沈積時，層面皆成水平狀態。
2. 斷層沿著原來的斷層面持續滑移(slip)與擴展(propagation)，即斷層無分岔之情形。
3. 斷層活動主要為逆衝型態，忽略平移分量之影響。
4. 斷層於持續活動的過程中，斷層系統的參數保持不變(斷層傾角 θ 、剪切帶範圍 ϕ 、P/S ratio)。

由上述之假設，可將反算分析分為下列四個步驟，以回復褶皺型態為原來之水平地層狀態，得到斷層尖端位置、滑移量與斷層系統參數，流程如下：

1. 以斷層活動前已沈積之地層為關鍵地層(key bed)，進行反算。
2. 以第一步所得之模擬參數進行正算，與原來剖面比較。
3. 以同樣之斷層系統參數，對地表面和每一層超覆沈積之地層進行反算。
4. 對剖面進行逐次滑移量之回復。

本研究引用之槽溝剖面，為台灣大學地質所陳文山教授開挖之釋迦園槽溝，位於南投縣中寮鄉包尾（圖一）。

由反算分析結果推測下方斷層之傾角約 30° ，斷層尖端深度約位於上盤地表下方 7.4 公尺處，而地層之滑移量分佈顯示，除了集集地震以外，應還有兩次斷層錯動事件，上盤之剛體滑移量分別約為 5、2、0.5 公尺。逐次回

復之結果如圖二、圖三。

(2) 動力學模式之分析成果

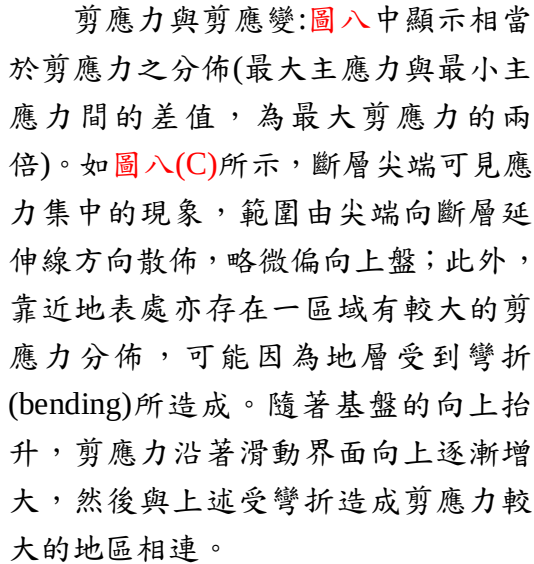
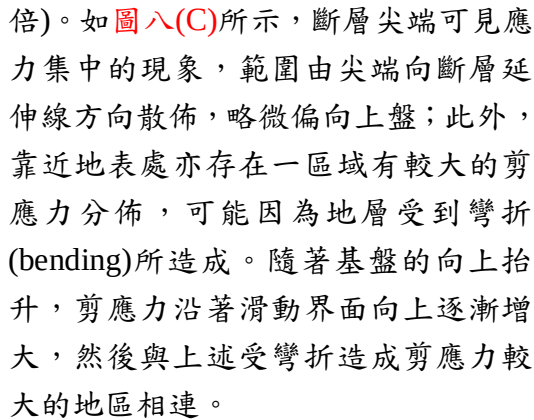
基本案例為斷層基盤位於地表下 10 公尺、斷層傾角 30° 的情況，基盤以上為軟弱土層(圖四)。利用沿斷層面向上抬升基盤的方式，可以了解上覆沈積物受到彎折而產生褶皺的過程。模擬過程可以分為五個步驟：1.重力平衡，2.設定水平向大地應力，3.移除上盤下部之部份土體，並設定固定邊界以模擬剛性基盤之存在，4.釋放斷層延伸線之界面元素，5.利用固定邊界之剛性位移模擬基盤之抬升(圖五)。

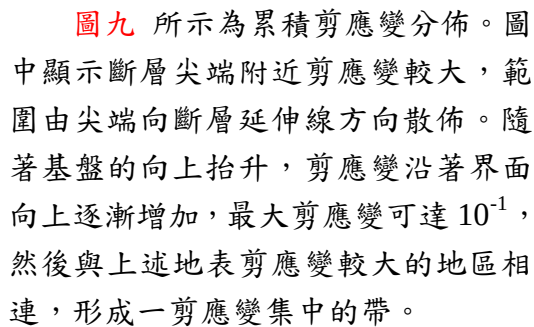
在基本案例的模擬中，斷層基盤沿斷層面的總滑移量達到 2.5 公尺，以下就 1.網格變形；2.界面滑動；3.剪應力與剪應變；4.塑性區，說明褶皺之發展過程(圖六、圖七、圖八、圖九、圖十)。

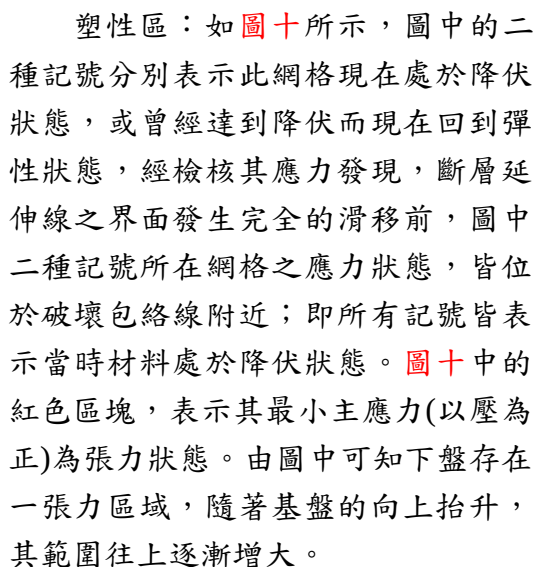
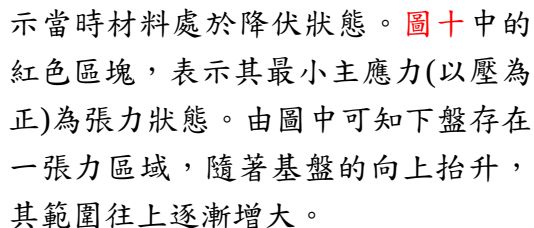
網格變形:如圖六所示，地層起初形成一和緩的單斜褶皺，隨著基盤滑移量的逐漸增加，深部的地層開始因界面的滑動而產生錯移，並向上擴展，當總滑移量達到 2.1 公尺，所有地層皆已錯移，可見上部之網格凸出地表。模擬之單斜褶皺，包含上盤部份的背斜，與下盤部份的向斜，當基盤滑移量達 2 公尺時，地表緩坡之傾角約 7° 。

界面滑動:如圖七所示，界面上之記號表示程式中判斷界面已產生滑移的位置，界面的滑動由深部開始向上發展。在基盤錯動量小於 1 公尺時，界面滑移位置均集中在基盤面上方約 1 公尺內左右；當基盤錯動量為 1.5~1.6 公尺時，界面滑移位置突然延伸至基

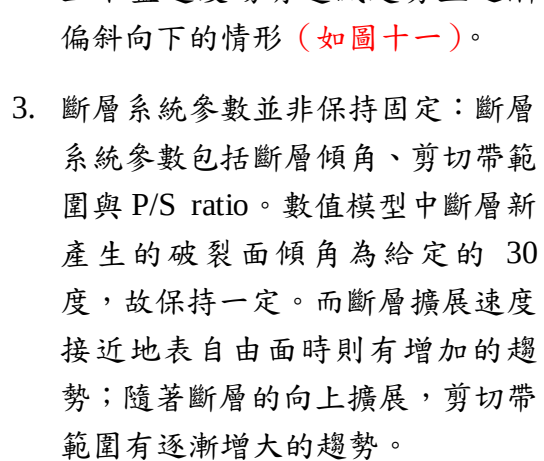
盤以上 4 公尺處；當基盤滑移量達 1.8~2 公尺時，界面滑移範圍則增加至基盤面上 8 公尺處；基盤滑移量至 2.1 公尺時，界面已完全滑移。

剪應力與剪應變：中顯示相當於剪應力之分佈(最大主應力與最小主應力間的差值，為最大剪應力的兩倍)。如 所示，斷層尖端可見應力集中的現象，範圍由尖端向斷層延伸線方向散佈，略微偏向上盤；此外，靠近地表處亦存在一區域有較大的剪應力分佈，可能因為地層受到彎折(bending)所造成。隨著基盤的向上抬升，剪應力沿著滑動界面向上逐漸增大，然後與上述受彎折造成剪應力較大的地區相連。

所示為累積剪應變分佈。圖中顯示斷層尖端附近剪應變較大，範圍由尖端向斷層延伸線方向散佈。隨著基盤的向上抬升，剪應變沿著界面向上逐漸增加，最大剪應變可達 10^{-1} ，然後與上述地表剪應變較大的地區相連，形成一剪應變集中的帶。

塑性區：如 所示，圖中的二種記號分別表示此網格現在處於降伏狀態，或曾經達到降伏而現在回到彈性狀態，經檢核其應力發現，斷層延伸線之界面發生完全的滑移前，圖中二種記號所在網格之應力狀態，皆位於破壞包絡線附近；即所有記號皆表示當時材料處於降伏狀態。中的紅色區塊，表示其最小主應力(以壓為正)為張力狀態。由圖中可知下盤存在一張力區域，隨著基盤的向上抬升，其範圍往上逐漸增大。

(3) 與運動學模式之比較與討論

1. 三角形剪切帶存在：由動力學分析結果顯示，上覆地層受到基盤抬升、彎折而形成褶皺的過程，累積剪應變分佈的區域與材料降伏的區域，形成一三角形分佈，由斷層初始尖端向外擴展。
2. 速度場分佈之特徵相符：動力學之分析結果之速度場分佈，與運動學模式描述之特徵相符，於上盤質點位移一致，接近剛體運動，由上盤至下盤速度場有遞減趨勢並逐漸偏斜向下的情形(如 十一)。
3. 斷層系統參數並非保持固定：斷層系統參數包括斷層傾角、剪切帶範圍與 P/S ratio。數值模型中斷層新產生的破裂面傾角為給定的 30 度，故保持一定。而斷層擴展速度接近地表自由面時則有增加的趨勢；隨著斷層的向上擴展，剪切帶範圍有逐漸增大的趨勢。

四、結論

本研究之目的為了解盲斷層之錯動與地表變形間的關係，經由斷層擴展褶皺的運動學和動力學分析，獲得以下幾點結論：

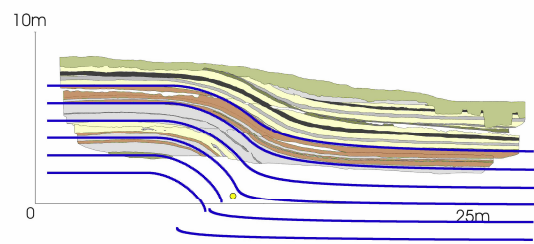
1. 三角形剪切帶運動學模式可以描述自然界中觀察之盲斷層擴展褶皺的特徵。
2. 由褶皺型態之空間分佈，可以了解下方斷層可能的位態與深度，與可能的古地震次數。本研究由集集地震後釋迦園挖溝剖面之地層褶皺型態，經由反算分析推測下方斷層之傾角約 30° ，斷層尖端深度約位

於上盤地表下方 7.4 公尺處，由地層之滑移量分佈，顯示除了集集地震以外，應還有兩次斷層錯動事件，上盤之剛體滑移量分別約為 5、2、0.5 公尺。

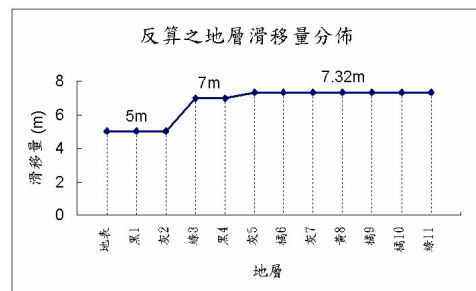
3. 利用連續體之力學分析，引入界面元素以模擬斷層的存在，可以模擬盲斷層向上擴展的過程。於模擬過程中，可觀察到斷層尖端前緣有一三角形之剪應變集中範圍，而質點之位移分佈由上盤至下盤間亦有轉向與遞減的現象，與三角形剪切帶運動學模式所描述一致。
4. 利用動力學分析結果反推得到運動學模式之相對參數，隨著基盤的抬升，P/S ratio 與剪切帶範圍(apical angle)有逐漸增大的趨勢，並非保持定值，於利用運動學模式進行模擬時應考慮此結果。



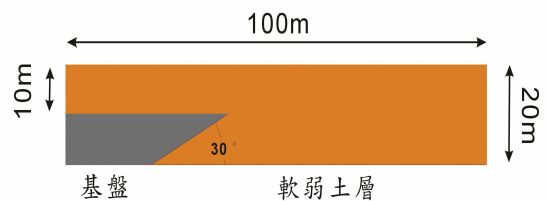
圖一 釋迦園挖溝剖面全景



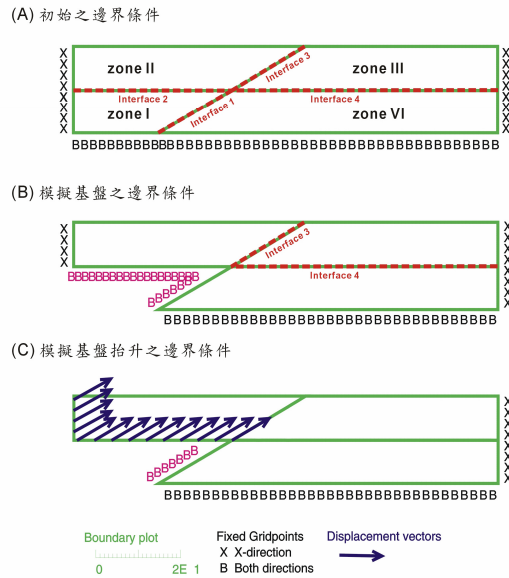
圖二 滑移量修正後之正算結果與原剖面比較圖(圖中圓點為斷層尖端所在位置)



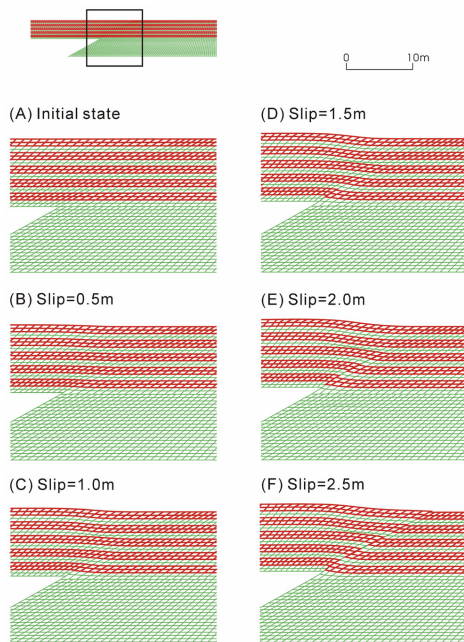
圖三 反算地層所記錄之斷層滑移量分佈(圖中最左側資料點為地表，最右側線 11 資料點為最深之地層層面)



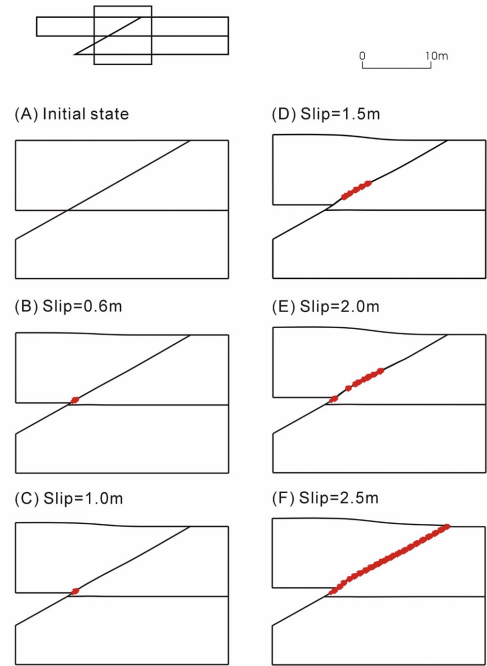
圖四 基本案例示意圖



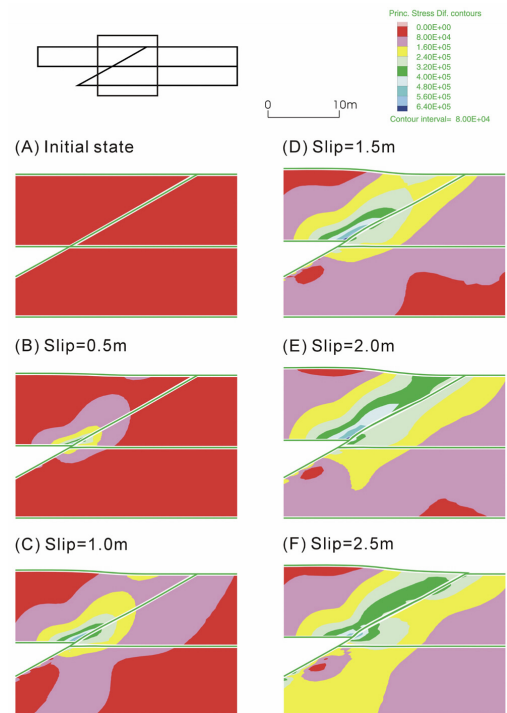
圖五 基本案例之邊界條件
(A) 初始狀態 (B) 模擬基盤之存在
(C) 模擬基盤抬升



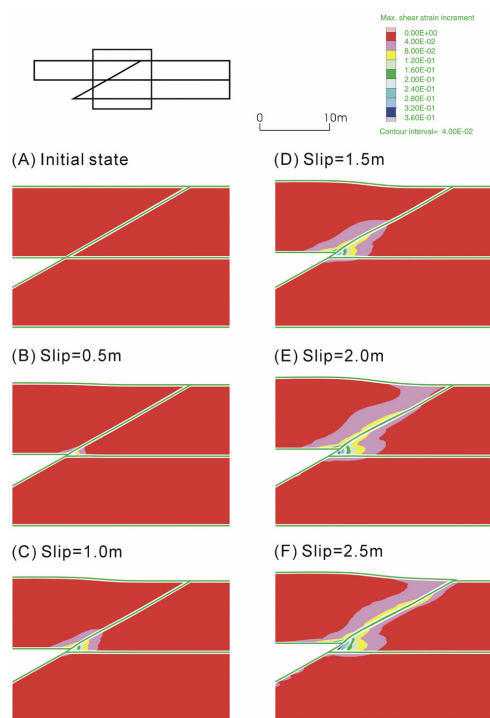
圖六 不同基盤抬升量之網格變形圖



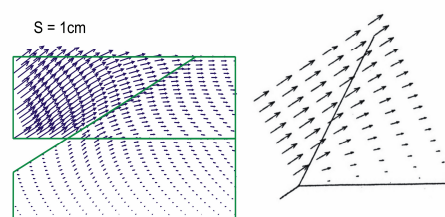
圖七 不同基盤抬升量之界面滑動分佈圖



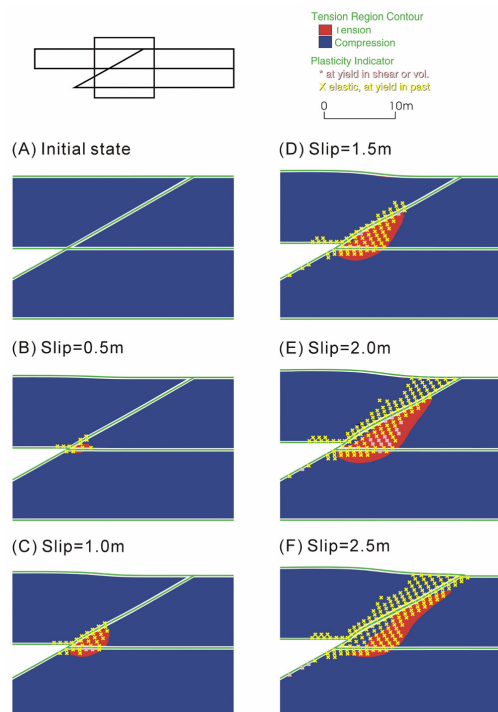
圖八 不同基盤抬升量之剪應力分佈圖



圖九 不同基盤抬升量之剪應變分佈圖



圖十一 速度場分佈比較圖



圖十不同基盤抬升量之塑性區分佈圖