

國立臺灣大學理學院海洋研究所

碩士論文

Graduate Institute of Oceanography

College of Science

National Taiwan University

Master thesis

以砂箱實驗探討增積岩體的前緣增積作用

Frontal Accretion of Accretionary Wedges Based on
Sandbox Experiments



Chang-Chih Pan

指導教授：喬凌雲 博士 盧佳遇博士

Advisor: Ling-Yun Chiao, Ph.D. Chia-Yu Lu, Ph.D.

中華民國 98 年 1 月

January, 2009

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書


以砂箱實驗探討增積岩體的前緣增積作用

Frontal Accretion of Accretionary Wedges Based on
Sandbox Experiments

本論文係潘昌志君 (R95241313) 在國立臺灣大學海洋研究所完成之碩士學位論文，於民國九十八年一月十三日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

 盧佳遇 (簽名)

葉恩年 (指導教授) 

系主任、所長

 (簽名)

誌謝

終於完成了，跟許多人一樣，一本論文的完成，不光光只是我自己的努力，還有許多人在這兩年半以來的協助、支持及鼓勵，讓我能夠順利的完成這本論文，在此我對你們敬上最高的謝意。

首先，我必須要感謝我的指導老師喬凌雲老師，雖然老師十分的忙碌，卻仍在我需要幫助時抽空幫忙，並且包容我幾乎是在地質系完成我的研究。而另一位指導教授盧佳遇老師，給了我許多研究及課業上的指點，在實驗室中有最充足的資源，讓我用自己的腳步去獨立學習如何做研究。而葉恩肇學長無論在什麼時候，只要一開口，都能即時解決我許多論文及研究上的問題，並且在我趕論文時頻頻給我建議。另外，也謝謝張國楨老師，在我當初困惑的時候，給我適時的提點，指引我努力的方向。在尋求地質系的共同指導時，感謝胡植慶老師的幫助並帶我進入盧老師的研究室。在美國參加年會時，感謝李建成老師的照顧，並適時的鼓勵及關懷。而也要感謝李元希老師，在大學時期讓我進入實驗室接觸構造地質的領域，因而累積更多的實力進入研究所。

在海研所時，受到了許多學長姊們照顧，給我許多寶貴經驗。包括在我準備考研究所時就給我考前指點的國峰學長，以及總是給我正面鼓勵的佳人學姊；而和我一樣到地質所做研究的芳琳學姊，無論在學業及心情上都能相互分享。而信宏、書安、阿美、淑榕、松稜等海上實習的戰友們，還有許多海研所的同學們，很榮幸能和你們成為同學，一起度過這兩年。

而在地質系，由於研究領域的相近，有更多幫助我的學長姊們。尤其是佳漢學長在我剛進來時，指導我入門PIV的軟體；孟涵學長在口試時寶貴的建議與討論，讓我發現許多問題；黃鐘學長、宜蓉學姊以及許多地質系的學長姊在地質領域的討論，以及在地質系生活上的各種疑難排解。

在研究所的兩年，實驗室的伙伴們都是我的好戰友。特別是隨查隨用的地質百科外加專有名詞英漢字典的致同，熱心助人並教我所有砂箱實驗準備及流程的旺旺，後來協助我做砂箱且常和我五四三閒聊的阿賢。也謝謝阿凱、乙君和建宏，伴我在實驗室中做研究及趕論文的的日子，還有現在搬到全變 308 的伙伴們，很高興能與你們成為朋友。

最後，感謝我親愛的家人們，我最想跟爸爸說，我做到了！真的希望你能看到並且以我為榮，也謝謝媽媽在我從小到大陪我的成長，對我付出的關心，給我支持及面對的勇氣，還有大姊二姊一直都這麼的愛我疼我。感謝恬恬總是想辦法幫我，總是在我脆弱的時候支持我，一直到現在；還有恬爸、恬媽的關心，謝謝倫倫、咪咪、涵涵、大寶、小寶，讓我在覺得辛苦的時候，還能開懷的大笑。從今之後，我會懷著感恩的心，去看待所有願意幫我的人，謝謝你們。

中文摘要

利用物理模型來進行地質構造模擬，能即時觀察到構造的型貌及構造的演化，而由於顆粒狀流體的特性，砂箱模型可以用來模擬非線性變形過程及岩層破裂前後的變形。本研究主要針對增積岩體的前緣增積行為進行分析，增積岩體為板塊聚合作用中重要的地質作用區域，在不同的地質條件下，存在影響增積岩體的變形行為不同的因素。經由實驗室尺度的模型設計，本研究更改部分參數以進行模擬，包括底部摩擦係數(μ_b)、傾角(β)以及原始弱面存在深度等參數；本研究並利用 PIV(Particle Image Velocimetry, 質點影像測速儀)技術分析砂箱實驗過程中的顆粒動態位移場，並將前緣的增積變形行分成逆衝斷層初始(thrust initiation)階段、俯衝(underthrusting)階段及再活化(re-activation)階段，結合傳統的砂箱實驗分析方法探討各個參數主要的作用結果。本研究使用之底部摩擦係數為 0.55 及 0.31，底部摩擦係數對於前緣增積行為的影響，最大差異發生於斷層俯衝階段。低底部摩擦係數時，底部滑脫作用不易將逆斷層下盤物質帶入增積岩體內，而使得背衝斷層漸次向後方發展，以維持臨界錐角，主要抬升區域集中於前緣；高摩擦係數時，底部互鎖作用造成逆衝斷層下盤物質受俯衝作用帶入楔形體，造成主要抬升區域分布於後方。傾角的變化在本研究中分別由 0 度測試至 8 度，傾角的增加直接加強了重力平行於滑脫面之作用，造成斷層俯衝作用顯著；而傾角加上摩擦係數影響，則由底部摩擦係數高低決定是否有疊瓦狀構造或是大型背衝斷層，例如，高摩擦係數下易形成疊瓦狀構造，低摩擦係數下則易形成大型背衝斷層。本研究使用之砂層厚度為 4 公分，並利用較弱之玻璃微珠層模擬原始弱面，深度則由 1.5 公分至 3.5 公分。深度於 1.5~2.5 公分時，由主要前衝斷層前端之玻璃微珠層形成小型逆衝斷層，造成俯衝作用的間斷，並且此小型逆衝斷層屬於主要斷層之分支，而造成間斷後俯衝作用的加強；而深度於 3~3.5 公分時，則由玻璃微珠層形成新的一組滑脫面，整體變形特性受到玻璃微珠層的摩擦係數影響，屬於含有背衝斷層

之低底部摩係數特性。因此，整體而言，摩擦係數可被認為是否有背衝斷層及決定主要抬升區域之指標，傾角則直接反映重力作用，原始弱面於淺部可產生斷層分支作用並加強俯衝作用，於深部會成為滑脫面。綜合此三種參數分析結果可以發現，俯衝作用的階段為不同參數在前緣增積循環中造成最主要差異之部分，因此日後我們可以利用研究此作用階段的特性，當作定義不同參數影響之重要階段。



英文摘要

Simulation of geological structures by physical modeling provides real-time observations on the geometry and evolution of deformed structures. Based on the granular flow characteristics of quartz sand, sandbox experiments are frequently used to model non-linear deformation behavior and rock failure in the upper crustal deformation. This study focuses on the deformation behavior of frontal accretion in accretionary wedges using sandbox experiments. In order to investigate the influence of different parameters on the development of accretionary wedges, including basal friction coefficient (μ_b), basal detachment dip (β) and the depth of inherited weak layer, a series of sandbox experiments with proper scaling are performed. Particle Image Velocimetry (PIV) analysis is applied to the images of sandbox results to visualize the spatial and temporal deformation patterns for each experiment. Combined with conventional analysis method of sandbox experiments, the influences of the tested parameters are discussed. The frontal accretion cycle observed in the sandbox analogue experiments of accretionary wedges can generally be divided into three stages: thrust initiation, underthrusting and reactivation.

In this study, basal friction coefficients are designated 0.31 and 0.55 by using plastic and sandpaper belt, respectively. The main difference between the contrasting basal frictions is the deformation within the underthrusting stage. When basal friction is lower, the footwall material beneath the frontal thrust can not be easily displaced into wedge due to low coupling between sands and basement. This leads to reterowedge-directed development of backthrusts backwards to maintain critical taper and main uplift is located in the deformation front. In contrast, when basal friction is high, footwall material is underthrust into wedge due to strong basal coupling and

main uplift located in the rear wedge. The detachment dip is designed with 0, 3, 6 and 8 degree. With increasing β angle, the underthrusting process becomes more dominant because of increasing gravity component parallel to the basal detachment. In high β angle cases, the value of basal friction determines whether imbricate structure or large-scale backthrust is dominant. For example, imbricate structures are always observed in high basal friction cases and large-scale backthrusts in the low basal friction cases. To investigate the difference of varying depths of inherited weak horizon, experiments are set with 0.1 cm glass microbeads layer as weak layer are added into the 4cm sand layer. The depth of weak layer ranges from 1.5cm to 3.5cm. For cases of layer depth in 1.5cm, 2cm and 2.5cm, the main thrust event is paused in the underthrusting stage when the external small thrusts are generated from the glass microbeads layer. However, the development of external thrusts will increase the degree of later underthrusting when the main thrust becomes reactivation. For the cases of weak layer level in 3.0 and 3.5 cm, the glass microbeads layer becomes a detachment, in stead of detachment in the base on other experiments. The deformation features within these cases are similar to that within low basal friction cases.

In summary, basal friction is the factor to influence the existence of imbricate thrust or large-scale backthrust and the location of uplift region. The β angle has a direct influence on gravity component. The shallower weak layer would be the location to generate external small thrusts and enhance the role of later underthrusting. The deep weak layer would become a shallower detachment, not in the base. Comprehensive results of influences from these three parameters indicate that underthrusting is the most important stage to evaluate the parameter effects in the context of frontal accretion cycle. Consequently, in the future we can focus on studying the differences of deformation patterns and behaviors induced by parameter change in the underthrusting stage to evaluate the impact of different factors to the development of accretionary wedge.

目錄

口試委員審定書	I
誌謝	II
中文摘要	III
英文摘要	V
目錄	VII
圖目錄	XI
表目錄	XIV
一、前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究背景	2
1.3 研究目的	10
1.4 本文內容	11
二、研究方法	12
2.1 砂箱模擬簡介	12
2.1.1 主要的影響條件：	12
2.1.2 實驗砂的性質：	13
2.1.3 實驗的相關器材介紹	14
2.1.4 實驗的記錄方式	14
2.2 PIV 分析	22
2.2.1 PIV 軟體介紹：	22
2.2.2 PIV 軟體處理過程：	22



三、模型設定	27
3.1 模型基本設定	27
3.2 參數—底部摩擦係數	29
3.3 參數—滑脫面傾角	30
3.4 原始弱面深度	30
3.5 實驗名稱設定	30
四、實驗結果	32
4.1 砂箱實驗影像結果(定性分析)	32
4.1.1 實驗 HF0B	32
4.1.2 實驗 HF3B	34
4.1.3 實驗 HF6B	34
4.1.4 實驗 HF8B	34
4.1.5 實驗 LF0B	38
4.1.6 實驗 LF3B	38
4.1.7 實驗 LF6B	38
4.1.8 實驗 LF8B	42
4.1.9 實驗 M15L	42
4.1.10 實驗 M20L	42
4.1.11 實驗 M25L	46
4.1.12 實驗 M30L	46
4.1.13 實驗 M35L	46
4.2 砂箱實驗統計結果(定量分析)	50
4.2.1 表面坡度分析	50
4.2.2 變形帶前緣分析	50



4.3 PIV 影像分析結果(定量分析).....	54
4.3.1 實驗 HF0B	56
4.3.2 實驗 HF3B	56
4.3.3 實驗 HF6B	59
4.3.4 實驗 HF8B	59
4.3.5 實驗 LF0B.....	59
4.3.6 實驗 LF3B.....	63
4.3.7 實驗 LF6B.....	63
4.3.8 實驗 LF8B.....	66
4.3.9 實驗 M15L	66
4.3.10 實驗 M20L.....	69
4.3.11 實驗 M25L.....	69
4.3.12 實驗 M30L.....	72
4.3.13 實驗 M35L.....	72
五、討論與結論	75
5.1 底部摩擦係數	75
5.1.1 構造演化過程	75
5.1.2 前緣加積循環過程	75
5.1.3 參數影響討論	76
5.2 滑脫面傾角	82
5.2.1 構造演化過程	82
5.2.2 前緣加積循環過程	82
5.2.3 參數影響討論	83
5.3 原始弱面深度	90



5.3.1 構造演化過程	90
5.3.2 前緣加積循環過程	90
5.3.3 玻璃微珠與剪應變之關係	91
5.3.4 參數影響討論	91
5.4 斷層面傾角探討	99
5.5 結論	102
參考文獻	103



圖目錄

圖 1.1	增積岩體的主要構造及作用。.....	2
圖 1.2	推土機模型及臨界狀態(critical state)示意圖。.....	5
圖 1.3	利用砂箱實驗觀測臨界錐度並繪製關係圖。.....	6
圖 1.4	增積岩體於砂箱實驗中分區之變形特性。.....	6
圖 1.5	砂箱實驗中前緣增積循環之特性。.....	7
圖 1.6	砂箱實驗中加入一原始弱帶之示意圖。.....	7
圖 1.7	砂層強度隨深度之變化示意圖。.....	8
圖 1.8	原始弱帶存在對於前緣增積循環之影響。.....	9
圖 2.1	實驗材料之顯微鏡照片。.....	15
圖 2.2	實驗用砂之摩擦試驗結果。.....	16
圖 2.3	Klinkmuller et al(2008)利用電子顯微鏡得到石英砂於顯微鏡下的照片。.....	16
圖 2.4	Hubbert-type 摩擦係數測試儀。.....	17
圖 2.5	傾斜式摩擦係數測試儀。.....	17
圖 2.6	底部摩擦係數測試儀。.....	18
圖 2.7	本實驗使用之砂箱模型示意圖。.....	19
圖 2.8	砂箱影像處理及 PIV 分析流程圖。.....	24
圖 2.9	以本研究中實驗為例解釋搜尋視窗及取樣間隔。.....	25
圖 2.10	PIV 計算精確度與搜尋視窗尺寸的關係。.....	26
圖 3.1	實驗模型設定圖。.....	28
圖 3.2	標記層及玻璃微珠層實際影像。.....	29
圖 4.1	實驗 HF0B 砂箱影像。.....	33
圖 4.2	實驗 HF3B 砂箱影像。.....	35
圖 4.3	實驗 HF6B 砂箱影像。.....	36

圖 4.4	實驗 HF8B 砂箱影像。	37
圖 4.5	實驗 LF0B 砂箱影像。	39
圖 4.6	實驗 LF3B 砂箱影像。	40
圖 4.7	實驗 LF6B 砂箱影像。	41
圖 4.8	實驗 LF8B 砂箱影像。	43
圖 4.9	實驗 M15L 砂箱影像。	44
圖 4.10	實驗 M20L 砂箱影像。	45
圖 4.11	實驗 M25L 砂箱影像。	47
圖 4.12	實驗 M30L 砂箱影像。	48
圖 4.13	實驗 M35L 砂箱影像。	49
圖 4.14	坡度及變形前緣統計示意圖。	50
圖 4.15	PIV 計算及顯示分量值示意圖。	55
圖 4.16	實驗 HF0B 影像 PIV 分析結果。	57
圖 4.17	實驗 HF3B 影像 PIV 分析結果。	58
圖 4.18	實驗 HF6B 影像 PIV 分析結果。	60
圖 4.19	實驗 HF8B 影像 PIV 分析結果。	61
圖 4.20	實驗 LF0B 影像 PIV 分析結果。	62
圖 4.21	實驗 LF3B 影像 PIV 分析結果。	64
圖 4.22	實驗 LF6B 影像 PIV 分析結果。	65
圖 4.23	實驗 LF8B 影像 PIV 分析結果。	67
圖 4.24	實驗 M15L 影像 PIV 分析結果。	68
圖 4.25	實驗 M20L 影像 PIV 分析結果。	70
圖 4.26	實驗 M25L 影像 PIV 分析結果。	71
圖 4.27	實驗 M30L 影像 PIV 分析結果。	73
圖 4.28	實驗 M35L 影像 PIV 分析結果。	74

圖 5.1	不同底部摩擦係數之構造分布。	77
圖 5.2	背衝斷層擴展示意圖。	78
圖 5.3	不同摩擦係數下變形前緣隨拉動量之變化。	79
圖 5.4	不同摩擦係數下坡度隨拉動量之變化。	80
圖 5.5	不同階段不同摩擦係數剪應變量比較圖。	81
圖 5.6	不同摩擦係數之前緣增積循環模型。	81
圖 5.7	高底部摩擦係數下不同滑脫面傾角之構造分布。	84
圖 5.8	低底部摩擦係數下不同滑脫面傾角之構造分布。	85
圖 5.9	疊瓦狀構造示意圖。	85
圖 5.10	不同滑脫面傾角下變形前緣隨拉動量之變化。	86
圖 5.11	不同滑脫面傾角下表面坡度隨拉動量之變化。	87
圖 5.12	實驗室得到之維度與世界上之實例比較。	88
圖 5.13	高摩擦係數下不同滑脫面傾角不同階段之垂直速度分量比較圖。	88
圖 5.14	低摩擦係數下不同滑脫面傾角不同階段水平速度分量比較圖。	89
圖 5.15	滑脫面傾角對於俯衝作用的影響。	89
圖 5.16	由玻璃微珠層發育之小型逆衝斷層。	92
圖 5.17	不同玻璃微珠層存在深度之構造分布。	93
圖 5.18	有無存在玻璃微珠層之構造分布。	94
圖 5.19	不同玻璃微珠存在深度時變形前緣隨拉動量之變化。	95
圖 5.20	不同玻璃珠存在深度在不同階段時期的剪應變比較圖。	96
圖 5.21	含玻璃珠及玻璃珠層深度位於 1.5 公分處不同階段的剪應變比較圖。	96
圖 5.22	不同原始弱面深度之前緣增積循環模型。	97
圖 5.23	剪應變量統計區域示意圖。	98
圖 5.24	剪應變量隨拉動量變化統計圖。	98
圖 5.25	不同玻璃微珠層深度下剪應變量延伸速率。	99

表目錄

表 2.1	本實驗使用石英砂之化學組成。.....	20
表 2.2	石英砂之 ASTM 通過粒徑分布表。.....	20
表 2.3	Klinkmuller et al(2008)利用實驗及電子顯微鏡得到石英砂的粒徑、球度及淘選度等性質。.....	20
表 2.4	Klinkmuller et al(2008)利用環剪實驗及直接剪力實驗(Karen, et. al., 2002)測得之強度性質。包括內聚力、摩擦係數等。.....	21
表 2.5	底部摩擦性質表。利用本研究使用之底部摩擦係數測試儀求得。.....	21
表 3.1	砂箱實驗變因參數對照表.....	31
表 4.1	砂箱實驗表面坡度統計表。.....	51
表 4.2	變形帶寬度統計表。.....	52
表 4.3	變形帶寬度統計表(續)。.....	53
表 5.1	所有實驗不同階段之逆衝及背衝斷層之傾角。其中 M15Ls、M20Ls 及 M25Ls 代表由玻璃微珠發育之小型短週期逆衝斷層。.....	101

一、前言

1.1 研究動機

增積岩體(accretionary wedge or accretionary prism, 圖1.1)為聚合板塊邊界重要的地質特徵，也是許多地質學者研究的重要目標，因此累積了不少相關研究；然而，在過去的研究中，仍有許多的影響增積岩體形成的參數尚未被研究清楚。王芳琳(2007)指出六項主要影響參數，包括底部摩擦係數(basal friction)、內部摩擦係數(internal friction)、底部滑脫面傾角(dip angle of the rigid base; β)、侵蝕(erosion)、孔隙流體壓力(pore fluid pressure)及沉積物的輸入及輸出，而其中控制增積岩體演化行為最重要的參數則是底部摩擦係數(Burbidge and Braun, 2002; Konstantinovskaia and Malavielle, 2005)。而由堆土機模型及臨界增積楔形體理論(critical taper theory)(Davis et al., 1983; Dahlen 1984; Dahlen et al., 1984; Dahlen, 1990)得知，其底部滑脫面傾角與滑脫面強度亦有直接關係。除此之外，未變形前之地層中存在的原始弱面，可能亦會影響增積岩體的變形行為，以921集集地震滑動之車龍埔斷層為例，錦水頁岩為一地質弱帶，而許多滑動面位於錦水頁岩中，而不在于一般所認為之更深的基底滑脫面上(Yue, et. al., 2005; Heermance and Evans, 2006)，雖然過去砂箱實驗中亦有加入類似參數條件分析此因素(Hoth, et al., 2007)，但僅探討其存在與否之影響，本實驗則擬探討其存在深度及作用範圍、作用程度及變形特性等。因此，在本研究中，將針對底部摩擦係數、滑脫面傾角及原始存在弱面深度進行實驗，探討各項參數之影響程度並進行量化分析。近年來，質點影像分析技術(Particle Image Velocimetry, PIV)開始應用於砂箱實驗影像之分析(Adam, et. al., 2004; Bernard, et. al., 2007; Hoth, et. al., 2007)，本研究將利用此技術的優點，分析影像中細微的變化，並利用量化及圖像化的影像分析結果討論各實驗結果的差異。

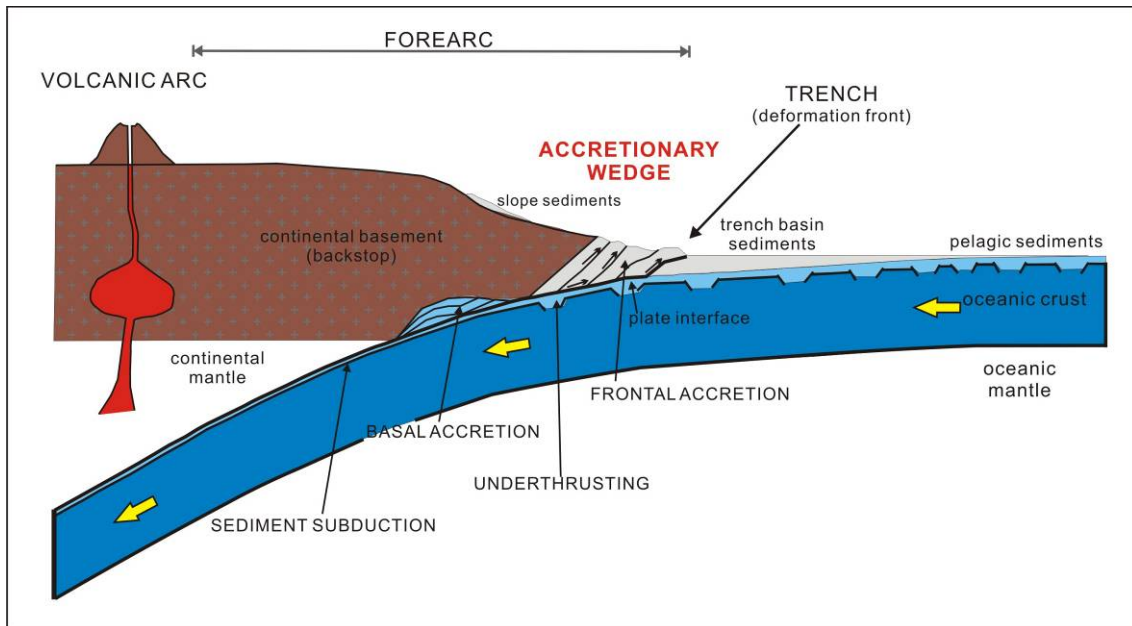


圖 1.1 增積岩體的主要構造及作用(修改自 Lorhmann et al., 2003)。



1.2 研究背景

聚合板塊邊界是由滑脫面(décollement or detachment)將沉積物分離成隱沒及加積的部分，並且後方存在一個後阻體(backstop)，增積岩體主要是在後阻體前及滑脫面上形成，所以，增積岩體為板塊聚合邊界重要的地殼變形特徵之一(圖1.1)。在典型的定義上，Chapple(1978)指出，增積岩體的特徵包含：其基底的表面分離或滑脫，滑脫面向內部或造山帶傾沒，而位於滑脫面之下無顯著的變形行為；而大量的橫向壓縮位於底部滑脫面之上；並且由外觀上可以觀察到，整體呈楔形，尖端向造山帶反方向分布。堆土機模型，為一種類比於增積岩體的模型(圖1.2，Dahlen, 1990)，與上述三項提到的定義(Chapple, 1978)有相同的特徵，但規模較小，此模型指出，當推土機移動時，前緣的物質會形成一臨界的坡度(critical taper)，並

且會保持相同的坡度自我相似的增積。其表面坡度(α)、底部滑脫面傾角(β)以及錐度(taper, $\alpha+\beta$)和底部滑脫面強度與內部岩體強度有相當的關係(Davis et al., 1983), Dahlen(1990)將其整理為一方程式(式1.1)如下：

$$\alpha + \beta \approx \frac{(1 - \rho_w / \rho) \beta + \mu_b (1 - \lambda_b) - S_b / \rho g H}{(1 - \rho_w / \rho) + 2(1 - \lambda)(\sin \phi / 1 - \sin \phi) + C / \rho g H} \quad (\text{式1.1})$$

此方程式中 ρ 為楔形體的材料密度， ρ_w 為海水密度(在海水以下部分)， λ 和 λ_b 為Hubbert-Rubey定義內部及底部之孔隙流體壓力(Hubbert and Rubey, 1959)， C 和 S_b 分別代表內部及底部的內聚力， H 則為楔形體厚度。因此由式1.1我們可以得知當增加底部滑脫面的摩擦係數(μ_b)及傾角(β)可以增加其錐度($\alpha+\beta$)，而增加內部的強度，則錐度下降。

Suppe(2007)將式1.1再簡化成式1.2並且進行以下的推導：

$$\alpha + \beta = \frac{\beta [1 - (\rho_f / \rho)] + F}{[1 - (\rho_f / \rho)] + W} \quad (\text{式1.2})$$

在式2.2中， ρ_f 為流體密度，而 F 代表滑脫面斷層強度， W 則為楔形體內部的強度，並可再將式1.2推導成式1.3以求得其表面坡度與滑脫面傾角之關係：

$$\alpha = \frac{F}{[1 - (\rho_f / \rho)] + W} + \frac{W}{[1 - (\rho_f / \rho)] + W} \beta \quad (\text{式1.3})$$

並且，可以將表面坡度及滑脫面傾角的關係，製作成關係圖來表示(圖1.3)，可得到一趨勢線及其斜率 $-s$ ，其關係式可得到式1.4：

$$\alpha = \alpha_{\beta=0} - s\beta \quad (\text{式1.4})$$

將式1.4代回式1.3可得到式1.5：

$$W = \frac{s}{1-s} [1 - (\rho_f / \rho)] \quad (\text{式1.5})$$

並由式1.6得到滑脫面斷層強度與楔形體內部的強度之間的關係：

$$F = \beta_{\alpha=0} W \quad (\text{式1.6})$$

因此，由上述式子中，可以發現，在均質的楔形體模型中，滑脫面強度、以及內部強度可由觀測表面坡度及滑脫面傾角求得，亦可得知滑脫面傾角、滑脫面及楔形體內部強度為控制楔形體幾何形貌主要的參數。

在前人的砂箱實驗中，亦有不少研究針對增積岩體的變形行為，並將其分類為許多區域及階段(Lorhmann et al., 2003; Hoth et al., 2007)。由於增積過程中，沉積物會慢慢的由前緣向上抬升並向後移動，並繼續向前發育新的前緣，因此，在無數次的前緣循環發育之後，可以將整體分為前緣變形區域(frontal-deformation zone)、前緣疊積區域(frontal-imbrication zone)及內部變形區域(internal-accumulation zone)(圖1.4)。在不同之區域，有不同之變形特性，前緣變形區域為前緣逆衝斷層發育之區域，並存在一條初始之前緣逆衝斷層(initial thrust)，代表在當時瞬間壓縮量最集中之區域，且此區域坡度屬次臨界狀態(sub-critical state)，因此壓縮及抬升作用皆會快速增加以達到臨界狀態；而前緣疊積區域，為一連串先前所形成的逆衝斷層所造成之疊瓦狀(imbricate)構造，並且於此處的坡度已達臨界坡度，因此，抬升作用則屬於自我相似的增加，並維持一定坡度；內部變形區向前緣的邊界則為主要脫序斷層(lead out-of-sequence thrust)，而由於主要脫序斷層為再活動作用發育之邊界，此處之變形特徵為內部變形，此內部變形代表斷層不再活動，而以類似內部流動的方式變形，無論壓縮量或是物質抬升作用皆為變形帶中最小的區域(Lorhmann et al., 2003)。Hoth等人(2007)針對前緣增積循環進行分析，提出前緣增積作用(frontal accretion)在前緣的變形特性上，是具有重覆性及週期性的行為，而變形前緣逆衝斷層的前緣增積作用可分為初始發育(thrust initiation)階段、俯衝階段及再活化(re-activation)階段(圖1.5)，因此利用此分類原則可以針對斷層滑動的週期及變形帶內部行為之分類作詳盡的分析。

在921集集地震中，主要的破裂帶為車籠埔斷層，然而許多的滑動的現象，則

沿著錦水頁岩發生(Yue, et. al., 2005; Heermance and Evans, 2006)，錦水頁岩為一地質弱帶，而車籠埔斷層則為一大型之逆衝斷層，因此在前緣的變形中，沉積作用造成的地質弱帶為一重要的影響參數。在砂箱實驗中，若加入一原始弱面(圖1.6)，對於強度則會產生一個不連續之現象(圖1.7)，而這樣一個弱面，則可能會產生其它斷層的分支或延伸，壓縮及滑移量則短時間內局部的集中在分支斷層中，對於斷層在俯衝作用過程中的滑移量變化造成不連續之現象，並且亦可見於自然界的觀察中(圖1.8，Hoth et al., 2007)。然而，此變形特性之作用範圍及影響程度，則尚未有適切的說明。

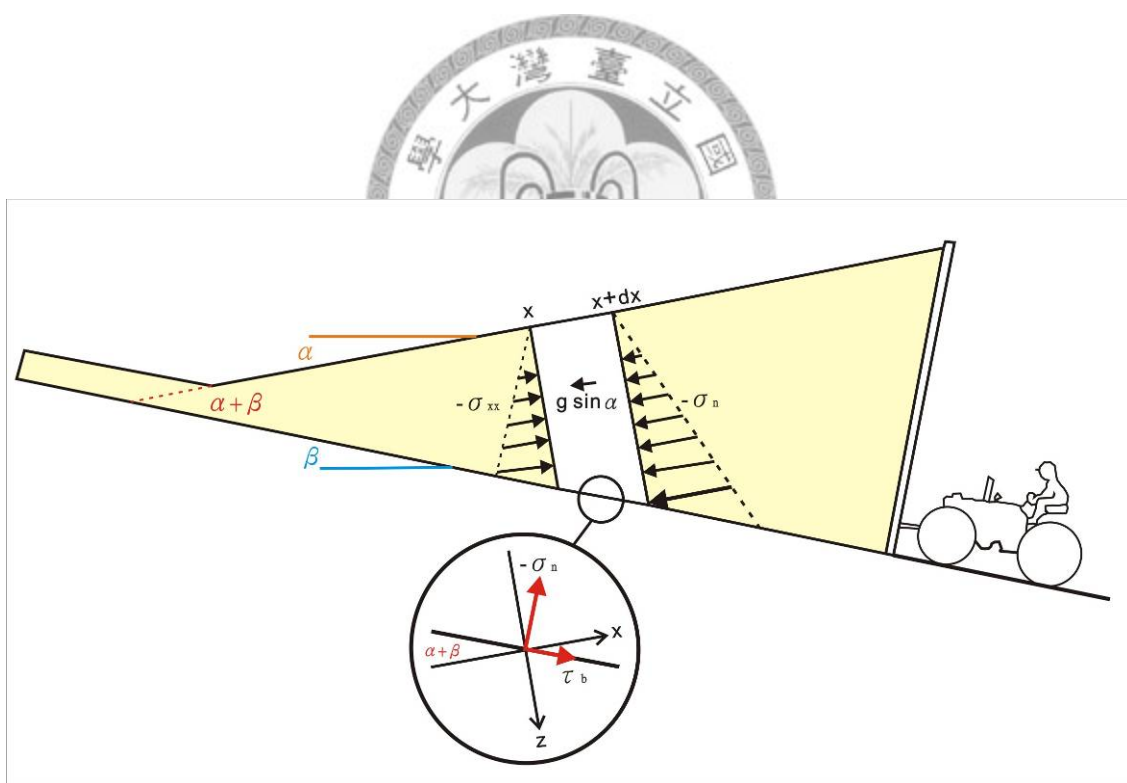


圖 1.2 推土機模型及臨界狀態(critical state)示意圖(Dahlen, 1990)。

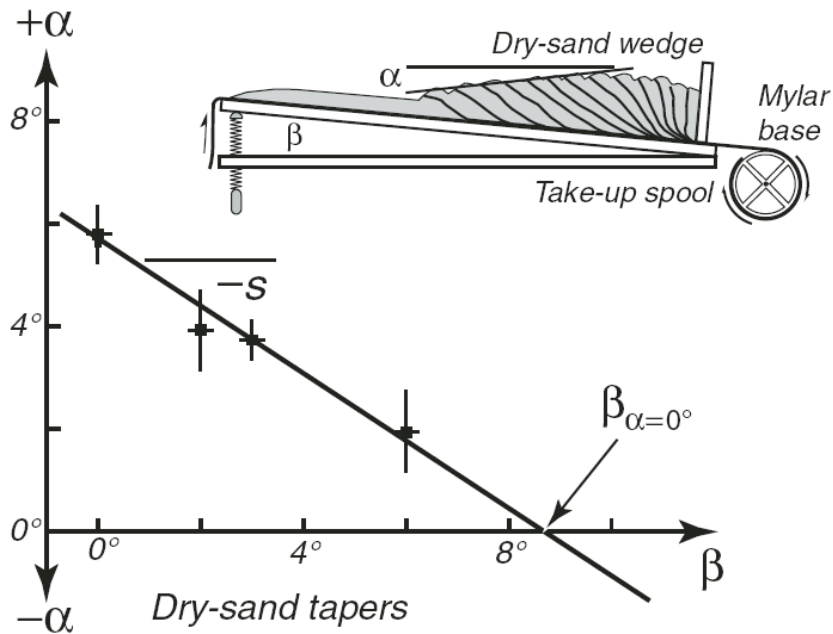


圖 1.3 利用砂箱實驗觀測臨界錐度並繪製關係圖。-s 為斜率(Suppe, 2007)。

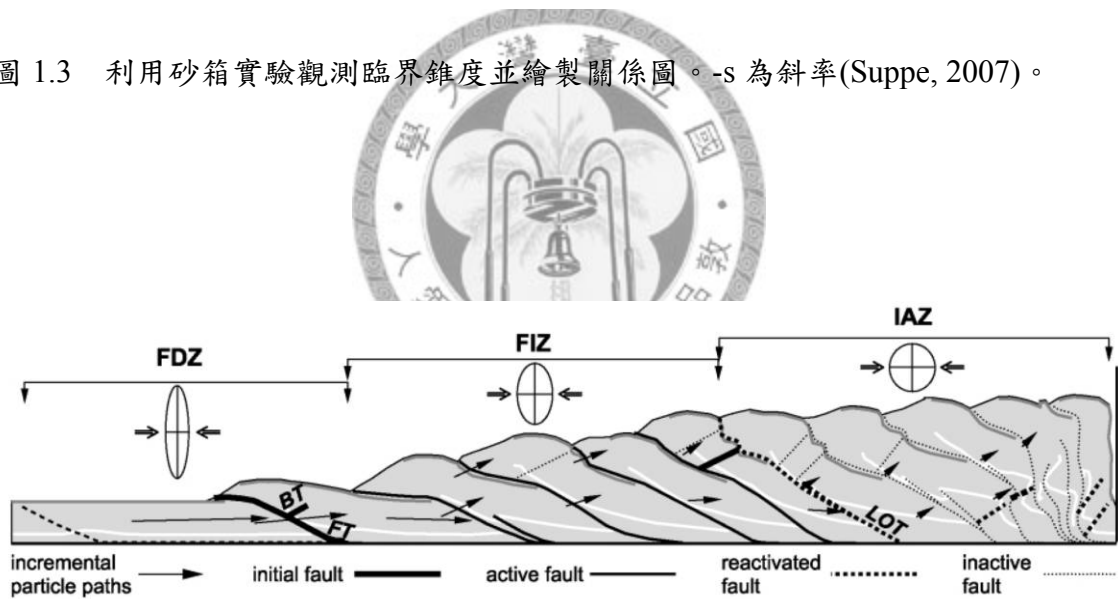


圖 1.4 增積岩體於砂箱實驗中分區之變形特性。FDZ 為前緣變形區域 (frontal-deformation zone)，FIZ 為前緣疊積區域(frontal-imbrication zone)，IAZ 為內部變形區域(internal-accumulation zone)，FT 為向前逆衝斷層 (forethrust)，BT 為背衝斷層(backthrust)，LOT 為主要脫序斷層(lead out-of-sequence thrust)，上面應變橢圓所表示之變形行為，為該區域瞬間的應變行為，由前緣向內部遞減(Lorhmann et al.,2003)。

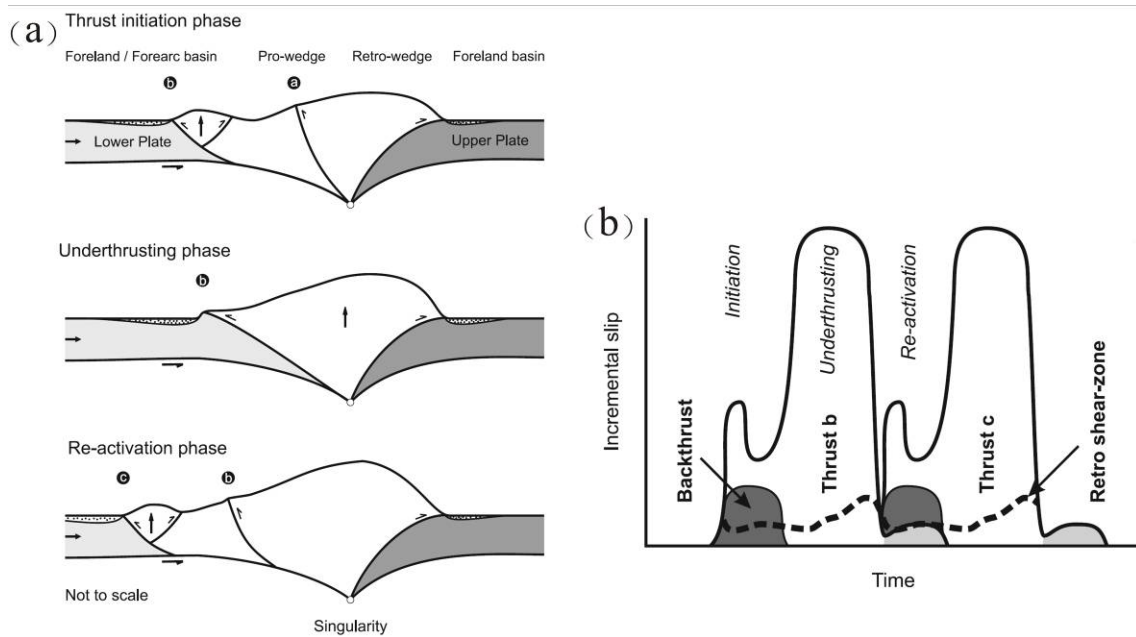


圖 1.5 砂箱實驗中前緣增積循環之特性。(a)增積循環示意圖。(b)增積循環中斷層內部滑移量隨時間變化(Hoth et al., 2007)。

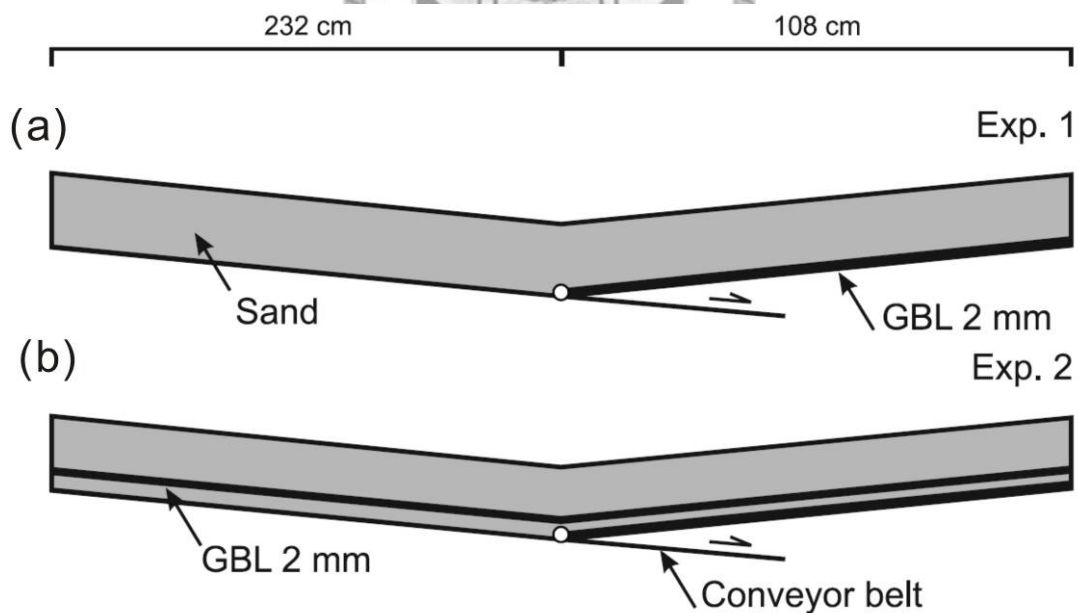


圖 1.6 砂箱實驗中加入一原始弱帶之示意圖。(a)僅鋪設砂層(b)砂層中加入一玻璃珠層(glass bead layer)，砂層整體厚度為 6 公分，而玻璃珠層則僅為 2 公釐之弱帶，對比於自然世界上可視為一較弱之岩層(Hoth et al., 2007)。

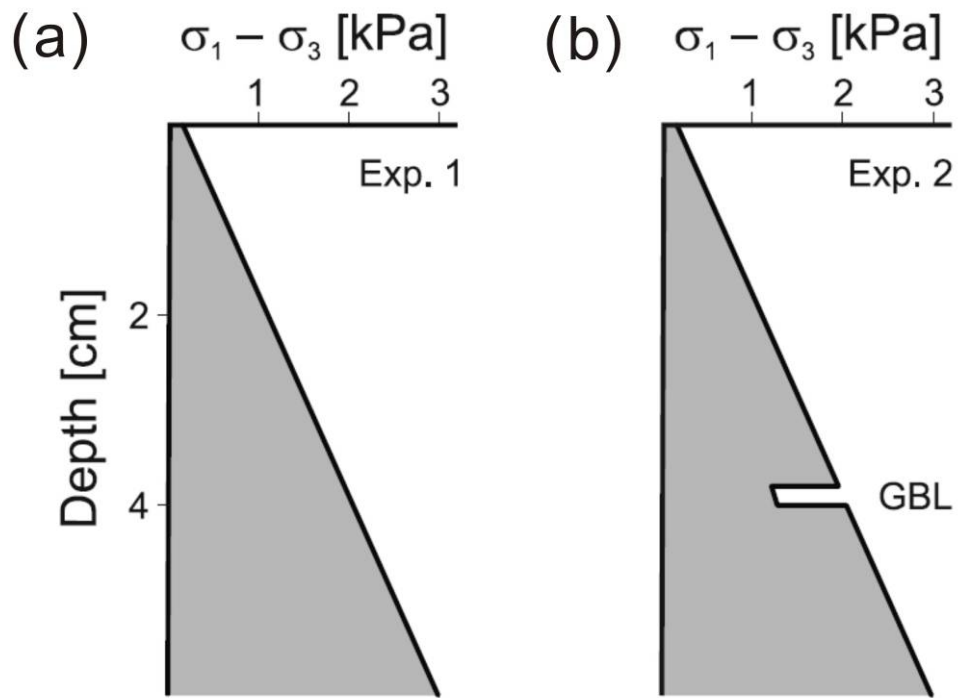


圖 1.7 砂層強度隨深度之變化示意圖。(a)僅均一砂層。(b)含有玻璃珠層。橫軸為破裂時之軸差應力，縱軸為深度(Hoth et al., 2007)。



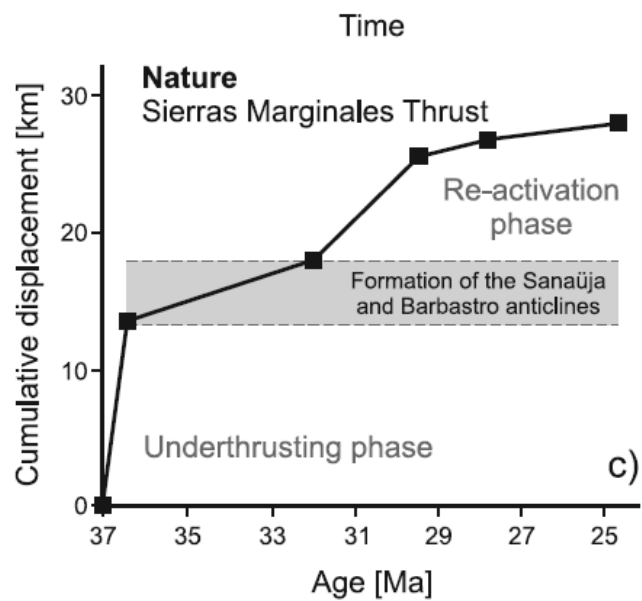
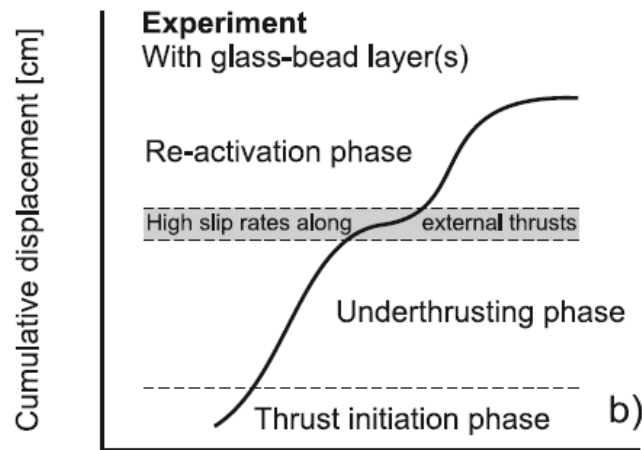
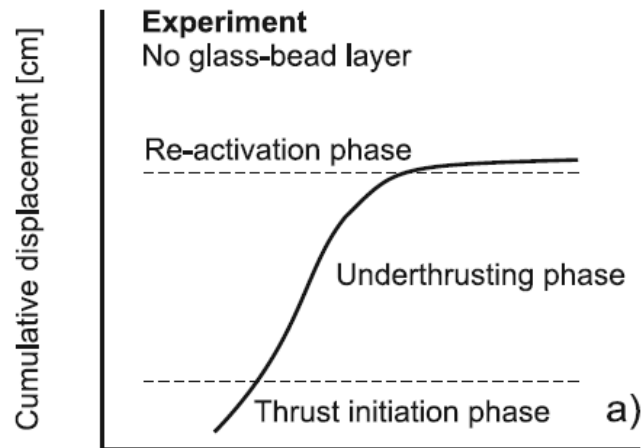


圖 1.8 原始弱帶存在對於前緣增積循環之影響。(a)砂箱中不含弱帶。(b)砂箱中含一弱帶。(c)自然界中含一弱帶(Hoth et al., 2007)。

1.3 研究目的

在增積岩體的演育與前緣增積作用中，有許多的參數及其影響程度未能完全明瞭，在此本研究將藉由砂箱物理模型模擬及PIV影像分析來探討：

1. 底部摩擦係數對於增積岩體前緣構造發育的影響。
2. 底部滑脫面傾角對增積岩體變形影響之機制，並對比於增積楔形體理論。
3. 原始地質弱帶對於逆衝斷層作用的存在深度範圍及影響程度比較，並探討其可能作用機制。
4. 利用一系列定量之單一變異參數及混合變異參數的砂箱實驗，以得到單一參數影響增積岩體演育的特性及不同參數加入時相互之關係。
5. 應用PIV影像分析技術，針對前緣加積循環、變形帶內部微小之變形作用，提供高解析度的分析之結果。
6. 藉由本研究，希望能提供數組變異參數特性之參考，以利於觀察變形行為時，能以各單一參數不同之影響來探討。
7. 藉由觀察砂箱物理模型的動態演育過程，用以瞭解各構造作用在增積岩體演育上所扮演的角色，並補足增積楔形體理論只能探討靜態穩定狀況的不足。

1.4 本文內容

本文之內容綱要如下：

第二章 主要介紹砂箱實驗中使用設備、使用材料之參數，以及PIV影像分析之簡介、軟體使用方法及處理過程。

第三章 本研究之砂箱實驗主要模型設定及施作方式，包括參數變異上所使用之材料及設備，及實驗名稱之設定。

第四章 本研究所有實驗之結果展示及敘述、PIV影像分析結果的展示以及實驗上可量化之統計結果。

第五章 變異參數的分析及討論，提出各參數在前緣增積循環上之概念模型，並且定義出本實驗中統計的參數主要影響程度，作出結論。



二、研究方法

2.1 砂箱模擬簡介

2.1.1 主要的影響條件：

砂箱模擬實驗是利用地質環境之邊界條件，並且透過對地質環境的了解，進而選擇適合的模擬材料及模擬方法所進行的室內類比實驗。砂箱模擬實驗最大的優點在於實驗操作者可以即時、方便地利用立體的模型進行觀察，以瞭解所模擬之地質構造的演變過程和機制，並且透過攝影記錄，可以比對各種模擬的過程及結果。

地質砂箱已廣泛利用於模擬部分微觀及廣域之地質構造，且已獲至相當不錯的成果(Dahlen and Suppe, 1988; Lallemand et al., 1994; Lohmann et al., 2003; Konstantinovskaia and Malavieille, 2005)。在模擬過程中，最常利用將原色及染色之石英砂分色分層鋪設，再透過各種不同的實驗設計，模擬岩層在各種應力狀態之下之力學行為機制。由於石英砂層在地質砂箱的實驗過程中，其摩擦性質符合庫倫破壞準則(Davis et al., 1983; Malavieille, 1984)，並且具有低內聚力、力學行為不隨時間變化的特性，故其適合用來模擬脆性變形行為，如上部地殼的脆性變形(Malavieille, 1984; Lallemand et al., 1994; Marone, 1998; Schellart, 2000; Adam et al., 2005; Konstantinovskaia and Malavieille, 2005)。

本研究探討目標為增積岩體的淺部變形行為，增積岩體的形成主要是由於隱沒作用時，隱沒板塊上覆的沉積物受到未隱沒板塊的擠壓向上增高增積而成的楔形體(Davis, et al., 1983; Dalhen, 1990)。因此，在此區域的變形行為主要以脆性變形為主，故本研究以石英砂為模擬材料，然而在物理模型中，必需選擇最重要的相似性及尺度因子，在砂箱實驗中，動力學的相似性為最主要的模擬的目標(張國楨，1998)，因其涵蓋了幾何及運動的相似性，並且固定作用力的大小比值。在尺度因子的選取上，基於時間上的考量，必需在實驗室一天之內的尺度下，模擬自然界中百萬年之地質作用，並由石英砂的內聚力及顆粒尺寸所得到的尺度因子為 10^5 (Hubbert, 1937; Kukowski et al., 2002)，故模型所設定之初始未變形之沉積物為4公分，對比於自然界相當於4公里的厚度，一般而言在此深度之內其主要的變形

行為仍以脆性變形為主。

2.1.2 實驗砂的性質：

本研究中之實驗用砂為澳洲風成砂，主要成份為石英佔 99.5%(表 2.1)，而粒徑和球度方面，除了使用顯微鏡直接觀測(圖 2.1a)，其結果顯示粒徑約為 0.2~0.3mm，顆粒形狀以次稜角形(subangular)為主，亦可由 ASTM 標準篩網通過百分比得知(表 2.2)，大部分顆粒粒徑於 106 μm 至 212 μm 之間，可知本實驗用砂淘選度佳，實驗鋪設上較不受粒徑可能會分布不均之影響；此外，其它參數性質可參考由 Klinkmuller et al(2008)對本實驗使用材料之分析結果 (圖 2.2、圖 2.3、表 2.3、表 2.4)。本研究亦使用玻璃微珠(glass microbeads)來模擬地層中的弱帶，其粒徑球度可由顯微鏡觀測得知(圖 2.1b)，粒徑小於 0.1mm，顆粒形狀為圓形(rounded)的顆粒，由本研究使用之摩擦係數測試儀得到玻璃微珠與塑膠布間摩擦係數為 0.19。

在底部界面摩擦係數的實驗方面，為顧及實驗的泛用性及便利性，本研究綜合 Hubbert-type 摩擦係數測試儀(圖 2.4)及傾斜式測試儀(圖 2.5)，製作一摩擦係數測試儀(圖 2.6)。主要針對傾斜式測試儀加以變化，將底拖帶置放並固定於一可改變傾角的載台上，此載台並裝置有傾斜儀，可以測量傾角，並且利用一質輕的中空台車，內置實驗用的試體，而此台車底部存在一空隙，此空隙宜越小越好，以防試體直接由此空隙漏出，但以不接觸底拖帶為主，增加此空隙原因旨在使台車輪子以外的部分盡可能不要接觸到載台。在實際施作方面，先於水平狀態下置入試體於台車之中，再緩慢傾斜，當開始滑動的瞬間，傾角即為最大靜摩擦角。由於 Hubbert-type 摩擦係數測試儀需利用計算水平及正向應力來決定摩擦係數，而本實驗使用之傾斜測試儀則省去此步驟，並減少台車本體和底拖帶之間摩擦力影響，因此可直接測得摩擦角，以求得摩擦係數。本研究測量之石英砂及玻璃微珠與底部摩擦性質的結果見於表 2.5。

2.1.3 實驗的相關器材介紹

本研究使用二維長形砂箱(圖 2.7)，長寬高分別為 300 cm × 10 cm × 30 cm，利用機械馬達拉動底拖帶的方式，模擬板塊運動在滑脫面上的作用，底拖帶的上覆砂層可視為滑脫面上可變形的區域。所以，利用背推板及底拖帶對砂層的作用，可以模擬板塊聚合邊界受擠壓作用變形的岩體。針對不同的地質作用或邊界，我們可以利用改變模擬儀器本身的設定以符合真實情況，例如底拖帶的性質、砂箱的傾角等；此外，亦可改變鋪砂的方式或砂層的形狀來建立模型，例如弱面、基盤等設定。此外，在本實驗中，除了使用長砂箱來模擬長時間增積作用下的結果，亦將砂箱分成兩部分，分別針對單一參數的改變來直接進行對比。

2.1.4 實驗的記錄方式

本研究當中，為配合 PIV 影像處理需求，因此採用縮短量每公釐一張數位影像，所以其相對的縮短速率為每分鐘 1.2 公分的速率，而拍照的速率為設定為每 5 秒一張數位影像。而本研究中，像素與實際長度的關係則為每公釐長度約等於 4 個像素(pixel)。而由於石英砂平均粒徑(約 0.2mm)和像素的大小接近，因此，可監測至粒徑尺度的微小變化。

而將 PIV 影像偵測之尺度，對比於自然界的實際情況，在 PIV 影像對中每 1 公釐的拉動量，代表 100 公尺的板塊聚合縮短量，以台灣為例，約為數千年左右的尺度，而由像素大小的監測尺度則可對比到 20 公尺的位移，因此，與現今所能觀察到自然界的變化尺度相近。

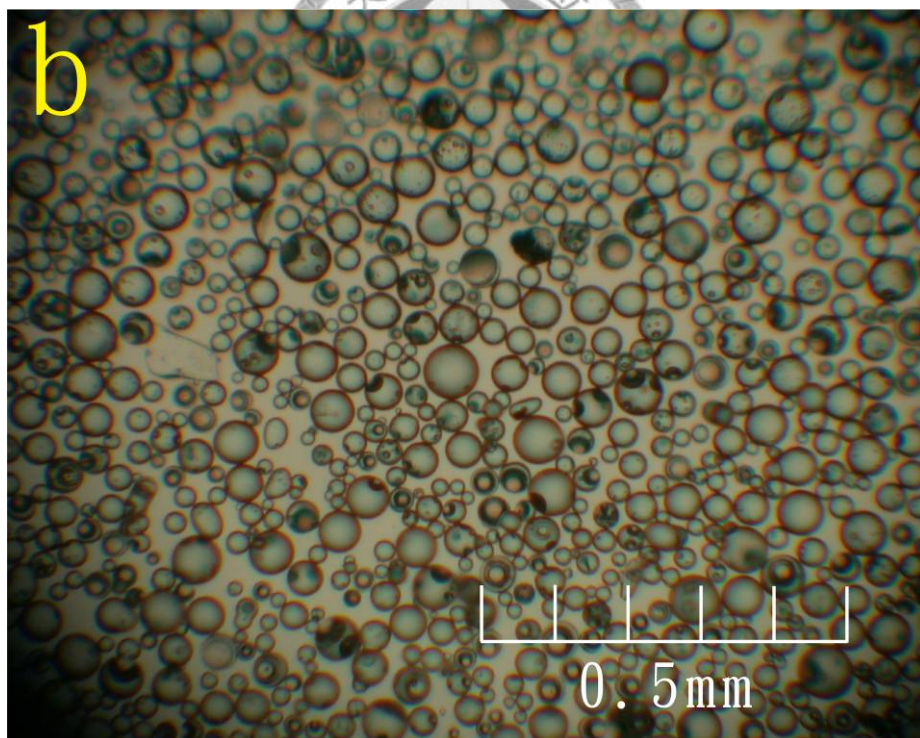
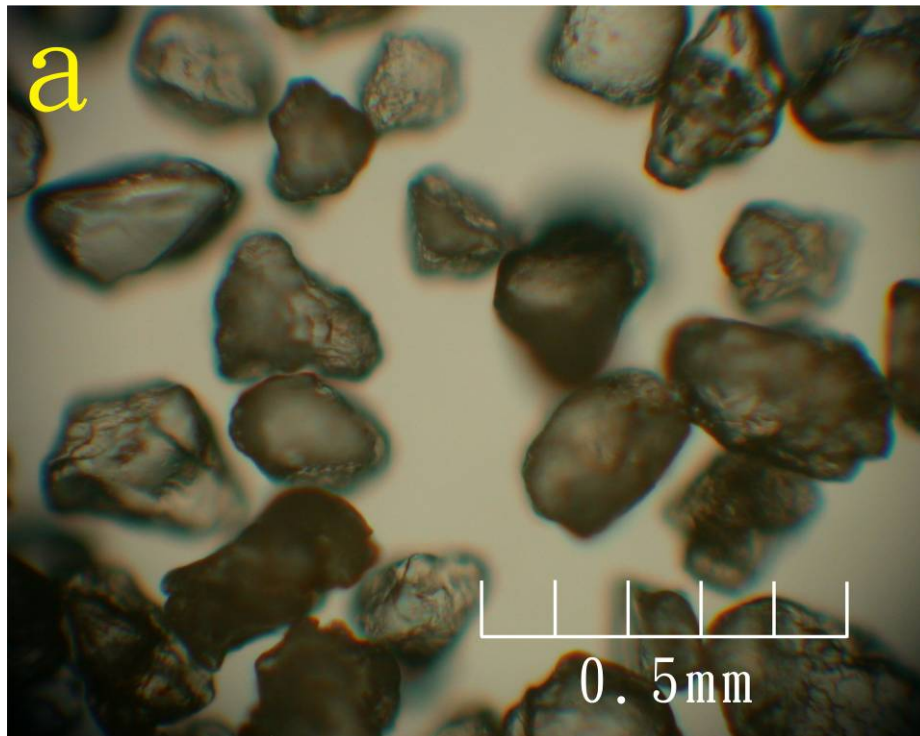


圖 2.1 實驗材料之顯微鏡照片。(a)石英砂於顯微鏡下之照片，粒徑約為 0.2 至 0.3 mm，球度大致上屬次角形至次圓形。(b)實心玻璃微珠於顯微鏡下之照片，粒徑皆小於 0.1mm，球度大致上接近於 1。

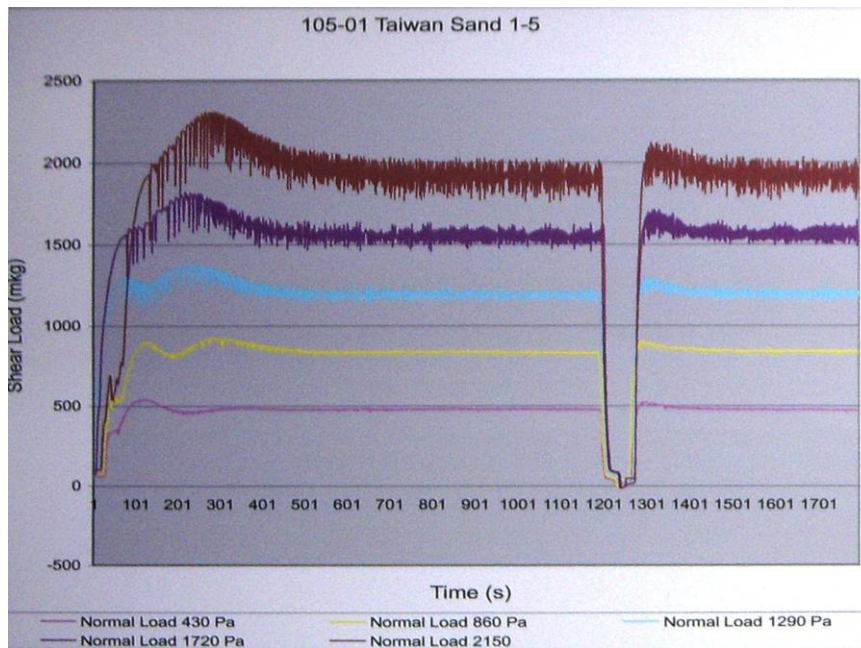


圖 2.2 實驗用砂之摩擦試驗結果。Klinkmuller et al(2008)針對本實驗用砂進行的測試實驗，不同顏色表示不同的正向壓力之下砂體強度的變化，可以發現當正向壓力增加時，滯滑現象(stick-slip)較為明顯。

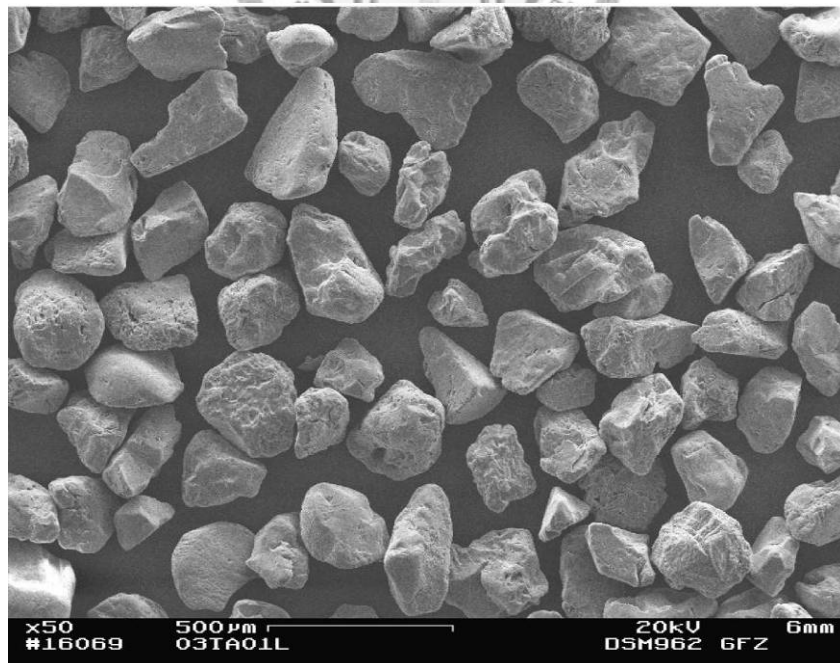


圖 2.3 Klinkmuller et al(2008)利用電子顯微鏡得到石英砂於顯微鏡下的照片。平均粒徑約為 182 μm 。

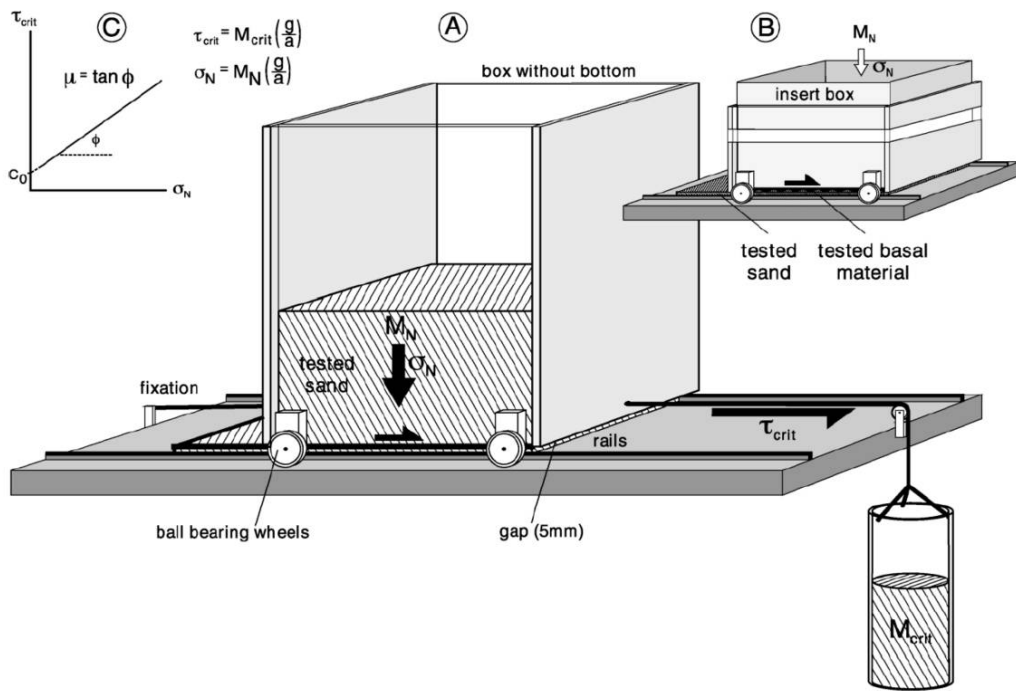


圖 2.4 Hubbert-type 摩擦係數測試儀。利用最大靜摩擦力(M_{crit})及砂體重量的正向力(M_N)來推算最大靜摩擦係數 $\mu = \tan \phi$ 。而 ϕ 為最大靜摩擦角(Lorhmann et al., 2003)。

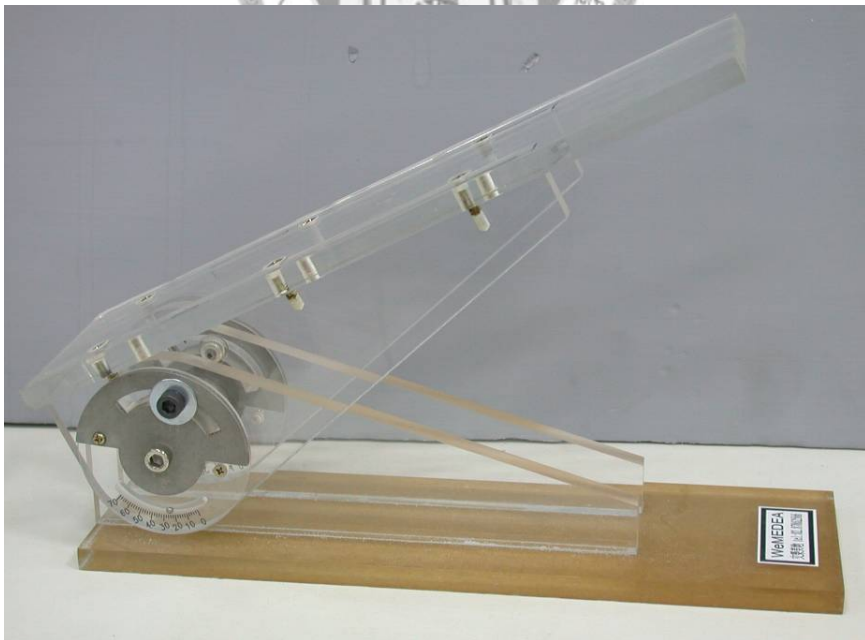


圖 2.5 傾斜式摩擦係數測試儀。利用一可傾斜並固定之平台，以及可測量平台傾角之儀器，改變不同底部材質及砂的性質，利用不斷改變傾角可測量不同材料之間的最大靜摩擦角。

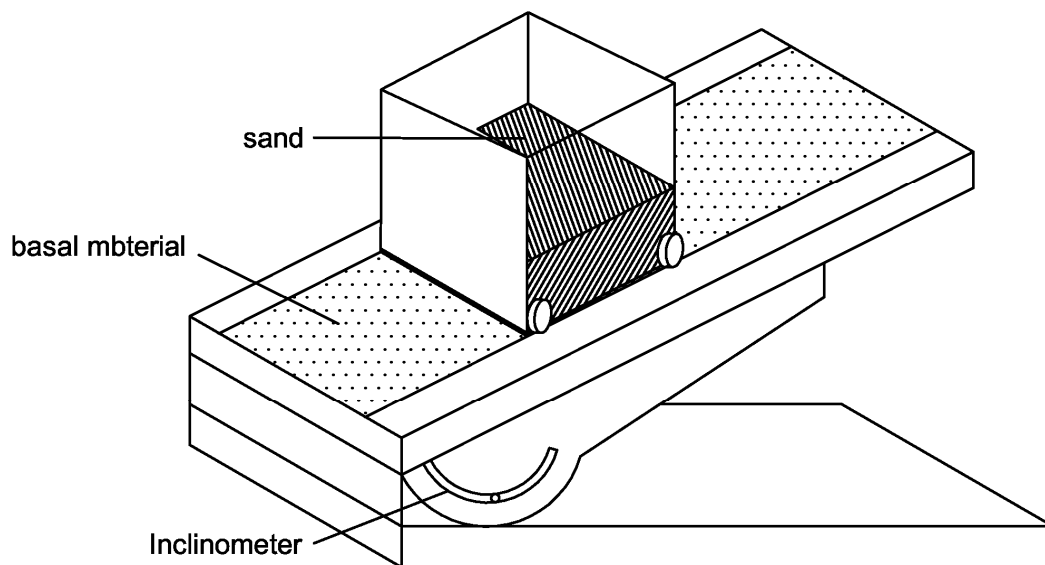


圖 2.6 底部摩擦係數測試儀。結合 Hubbert-type 及傾斜式測儀儀，利用台車輪子低摩擦的特性，為可兼顧便利性及精確性之做法。



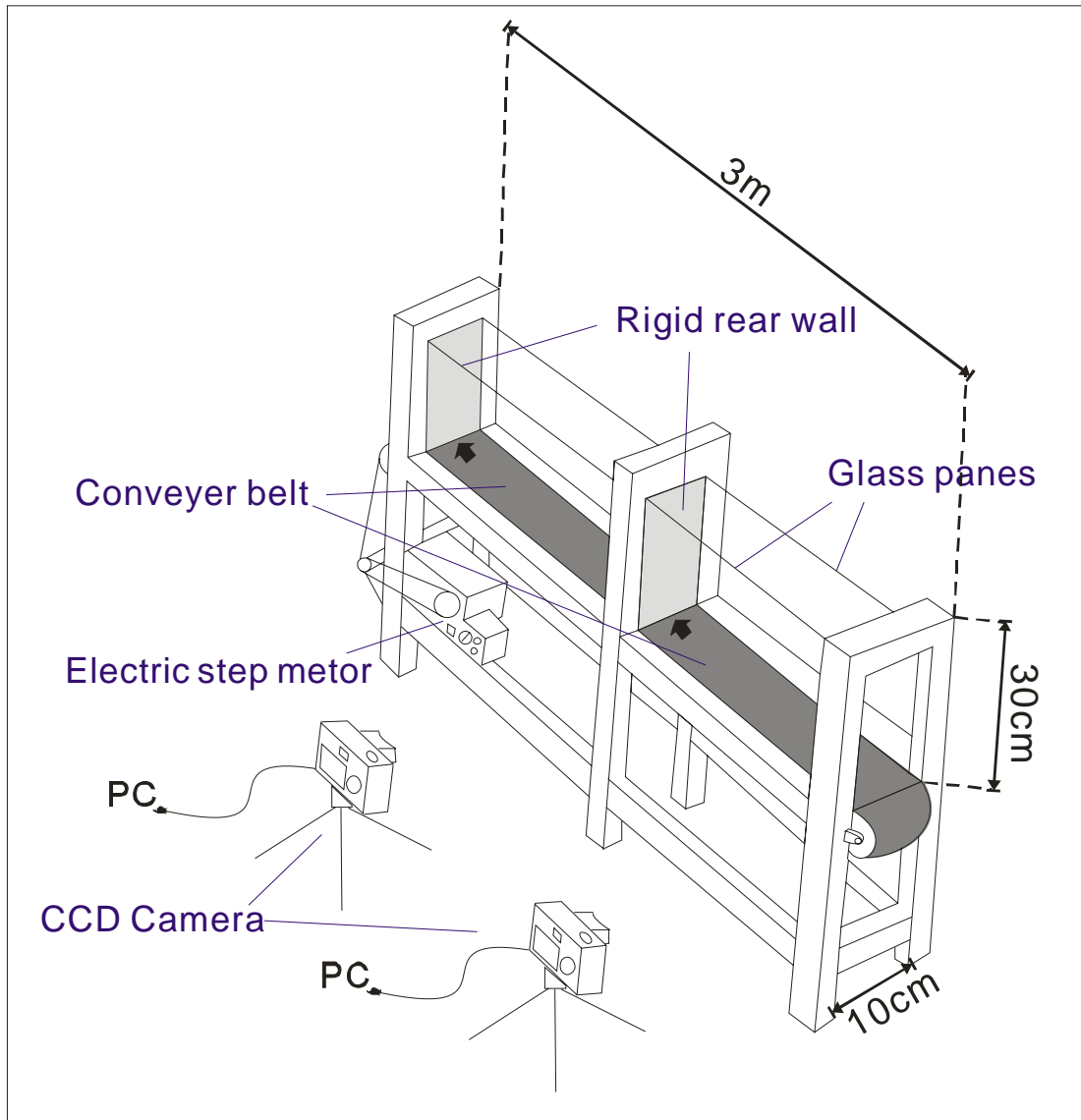


圖 2.7 本實驗使用之砂箱模型示意圖。所有的隔板皆為可拆式，以依不同需求之實驗，本圖所示為兩組對照實驗之施作方式。利用電動馬達可固定速率拉動底拖帶。

表 2.1 本實驗使用石英砂之化學組成。

化學組成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	雜質
百分比(%)	99.5	0.05	0.02	0.02	0.01	微量	微量	微量	0.15

表 2.2 石英砂之 ASTM 通過粒徑分布表。

ASTM 篩網號	篩網孔徑(μm)	通過百分比(%)
60	250	5.0
70	212	16.2
100	150	61.1
140	106	16.9
<140	<106	0.8

表 2.3 Klinkmuller et al(2008)利用實驗及電子顯微鏡得到石英砂的粒徑、球度及淘選度等性質。

Grain characteristics

Sieve analysis / SEM	Grain size	Category	Sorting Category	Grain shape	angular	sub angular	rounded
4hours	Mean (mm)	1=fine/2=medium/3=coarse	1=good/2=bad	Aspect ratio	(%)	(%)	(%)
Taiwan	182	1	1	1.441	33.3	59.1	7.5
Taiwan(color)	185						

表 2.4 Klinkmuller et al(2008)利用環剪實驗及直接剪力實驗(Karen, et. al., 2002)測得之強度性質。包括內聚力、摩擦係數等。

Strength

RST	430-2150Pa	Taiwan Internal	Taiwan (color) Internal	Taiwan Basal	Taiwan(color) Basal
	Exp.-No.	105	106	119	120
Peak Density	(g/cm ₃)	1.63	1.52		
	(+/-)	0.01	0.01		
Peak Friction		0.734	0.612	0.283	0.407
	(+/-)	0.012	0.005	0.008	0.025
Cohesion	(Pa)	34	55	166	103
	(+/-)	17	7	11	36
Static Friction		0.657	0.501	0.28	0.45
	(+/-)	0.006	0.003	0.007	0.022
Cohesion	(Pa)	65	87	136	93
	(+/-)	8	4	10	31
Dynamic Friction		0.53	0.53	0.253	0.297
	(+/-)	0.006	0.006	0.008	0.018
Cohesion	(Pa)	96	96	128	175
	(+/-)	9	9	11	20

表 2.5 底部摩擦性質表。利用本研究使用之底部摩擦係數測試儀求得。

材質	摩擦角	(+/-)	摩擦係數	(+/-)
石英砂/砂紙	29	1	0.55	0.01
石英砂/塑膠布	17	1	0.31	0.01
玻璃微珠/塑膠布	11	2	0.19	0.03

2.2 PIV 分析

PIV 為一種流場量測技術，利用兩個連續觀測影像的對比分析，針對像素粒子追蹤，並計算粒子的位移量，進而得到分析範圍內的位移場。此技術廣泛應用在流場監測上 (White, et al., 2001)，有些研究將其應用在航照或衛星影像來了解山崩的空間隨時間的演化(Dominguez et al., 2003; Tseng et al., 2007)，用於砂箱實驗上，則可提供高解析度的位移監測(Adam, et al., 2002; Adam et al., 2005; Hoth, et al., 2007)，對於岩層破裂前後其瞬變行為的觀察，可以提供動力學的機制分析。

本研究利用 PIV 技術，將砂箱實驗影像給予固定的質點位移搜尋範圍，搜尋並分析實驗過程中砂體內部的變形，可得到搜尋範圍中平均的位移值，並利用整體位移的向量場分布，推求 2 維平面的剪應變量化結果，以上的分析結果有助於在相同的控制變因下，探討不同的參數對於增積岩體造成的影響效應，並且可以使用影像表示，便於觀察微小位移量以及局部的變形行為。



2.2.1 PIV 軟體介紹：

本研究使用德國 PivTEC 所研發之商用套裝軟體 PIVview2C Demo3.0 進行 PIV 的分析，雖然此軟體為試用版，有輸出格式及無法批次處理大量資料的限制，但仍可輸出 PDF 及 JPEG 等影像格式，且分析對比的技術和商用版相同，並不受限，依然可以計算位移及應變，因此已足夠本研究之分析目的，本研究使用此軟體是於微軟視窗平台下執行，另有相容於麥金塔系統之版本以供下載。

2.2.2 PIV 軟體處理過程：

本實驗的 PIV 分析處理流程如圖 2.8。首先，先將所有的砂箱影像分為構造演化分析及 PIV 分析，本研究使用色砂作為標記，所以，將砂箱影像製作成動畫可進行構造演化分析，此外其它連續影像則需重新命名及裁切等前置作業以供 PIV

影像分析使用。由於 PIV 軟體的條件限制，需將數位影像先行轉換成灰階影像。PIV 軟體需將兩張連續影像輸入之後方可開始進行處理。為求取兩張影像關聯度，PIV 利用交叉相關分析(cross-correlation analysis)將影像對比，以求取每個像素質點的位移。其詳細步驟如下：將連續影像分成許多組正方形的搜尋視窗(interrogation window)，每一個搜尋視窗大小(window size)為 $L \times L$ 像素(圖 2.8)，透過對同一查詢視窗內不同時間的交叉對比，可以求得該視窗內所涵蓋像素的平均位移向量。因此，我們可以透過所有查詢視窗位移向量結果得到連續影像間的位移場。此外，此軟體亦可依不同需求，改變搜尋視窗大小及取樣間隔(step size)(圖 2.9)。

在 PIV 的分析中，搜尋視窗大小會影響交叉關聯分析的計算結果。較大的搜尋視窗其精度較高(圖 2.10, White et. al., 2003)。而軟體使用說明書上亦提到，其間隔尺寸宜為視窗大小之 50%，以達到一半的重覆涵蓋率，以確保一定的取樣精度，因此，較大的搜尋視窗亦意味著取樣間隔的提高及取樣數目的減少。所以，除了由估算的位移量來定義查詢視窗，仍需經由實際運算的結果來評估合適的查詢視窗大小。由於砂箱實驗的位移區域及數值可以預先估計，因此可以很容易從運算結果來測試查詢視窗及取樣間隔是否符合所需。本研究中實驗的位移在 5.2 像素以下，故查詢視窗必須至少大於 6 個像素，但由於視窗增大亦能減少誤差，因此本研究經由測試顯示將搜尋視窗增加至 32 像素，而取樣間隔為 16 像素，其分析結果最好。而 PIV 軟體亦可將最大位移量以及標準差加以限制，以避免由於增加搜尋視窗尺寸而增加較大的雜訊，亦可提高精度。

本研究透過 PIV 的軟體分析，則可得到較細微的變形過程，並有助於變形行為及階段的分析(Hoth, et. al., 2007)。

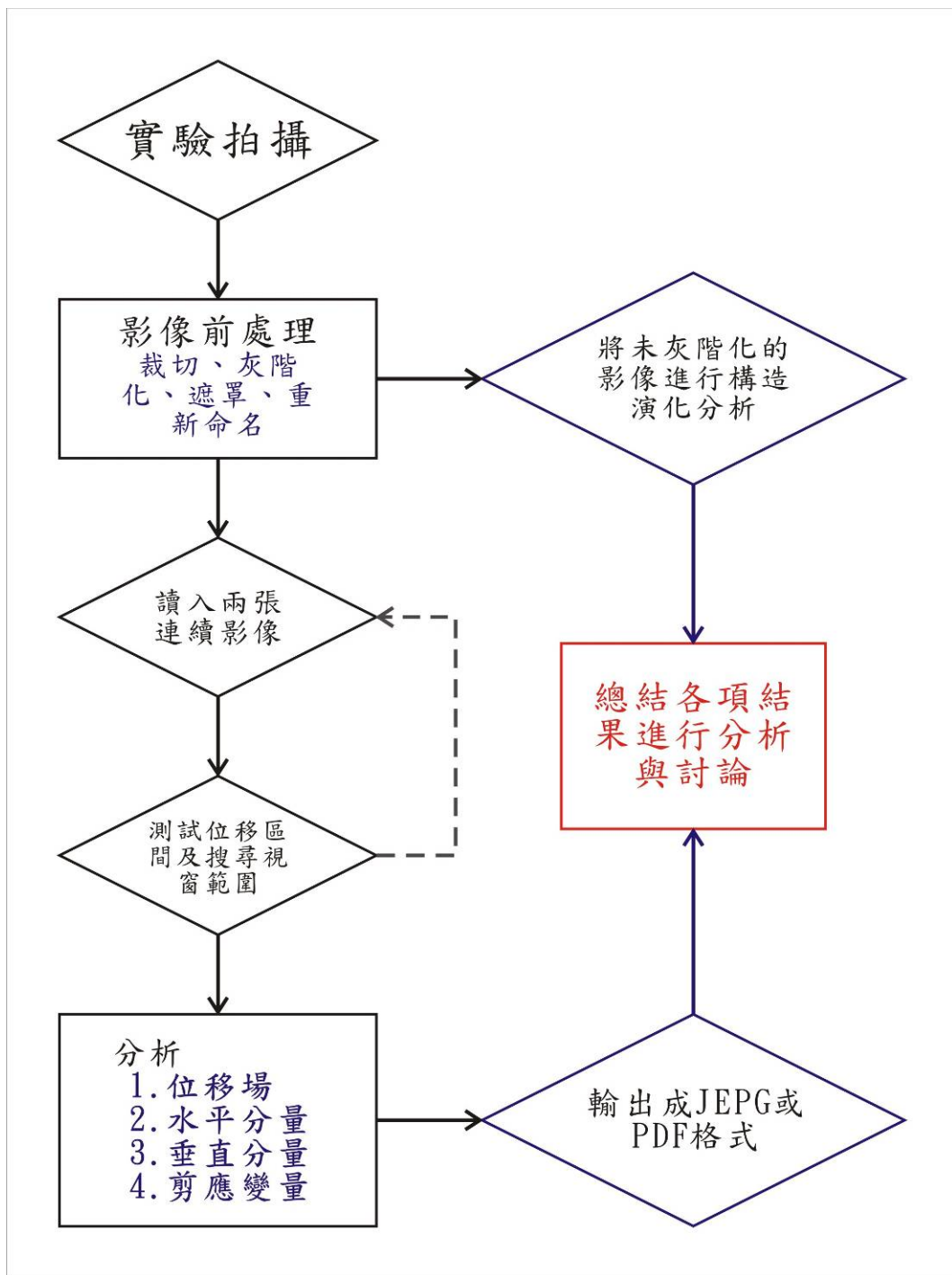


圖 2.8 砂箱影像處理及 PIV 分析流程圖。

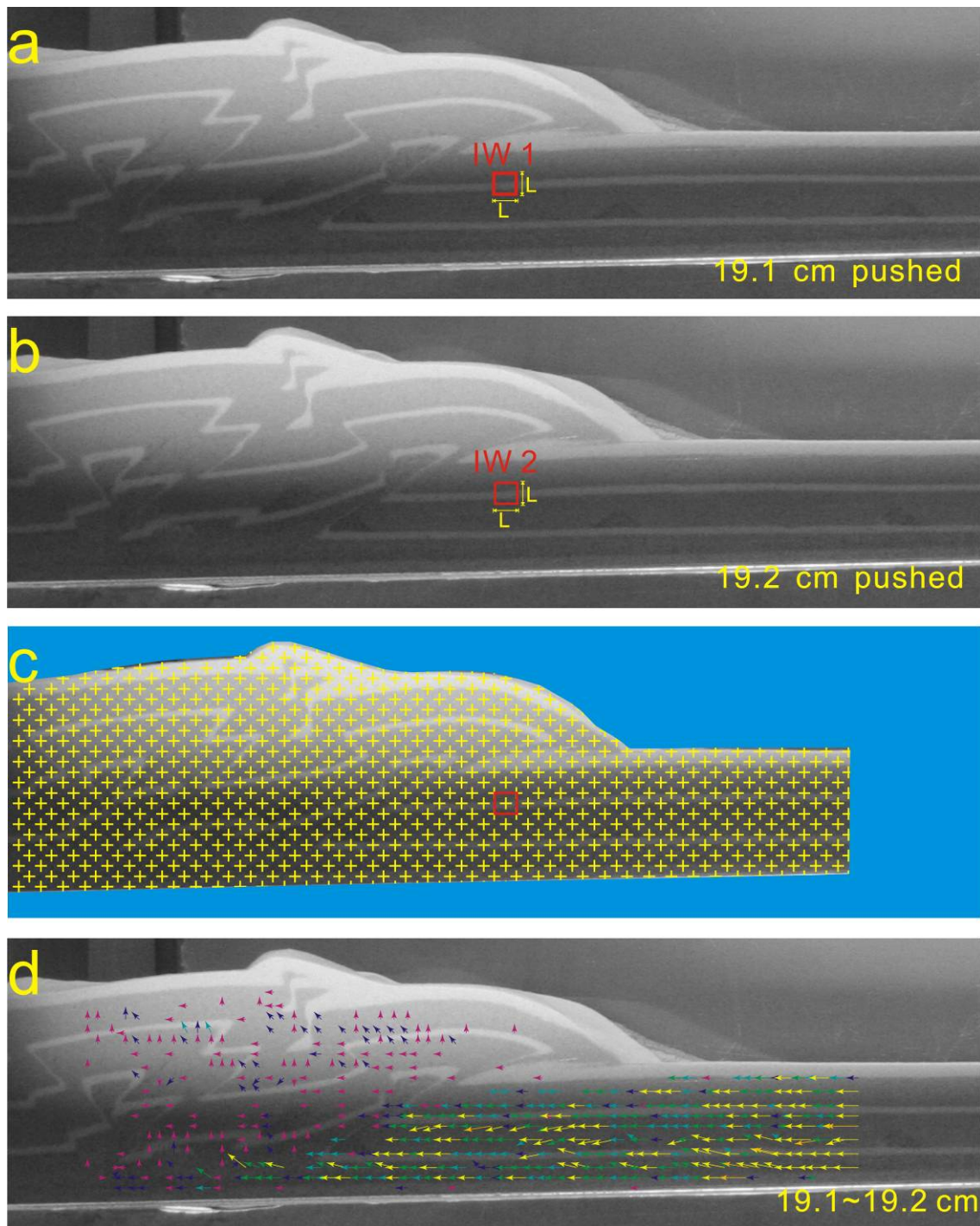


圖 2.9 以本研究中實驗為例解釋搜尋視窗及取樣間隔。(a)(b)19.1~19.2cm 的連續照片，使用 $L \times L$ 為搜尋視窗大小。(c)黃色十字間距即為取樣間隔，為搜尋視窗邊長的 $1/2$ ，並利用遮罩將需要計算的範圍加以限制。(d)計算出兩張連續影像之結果。

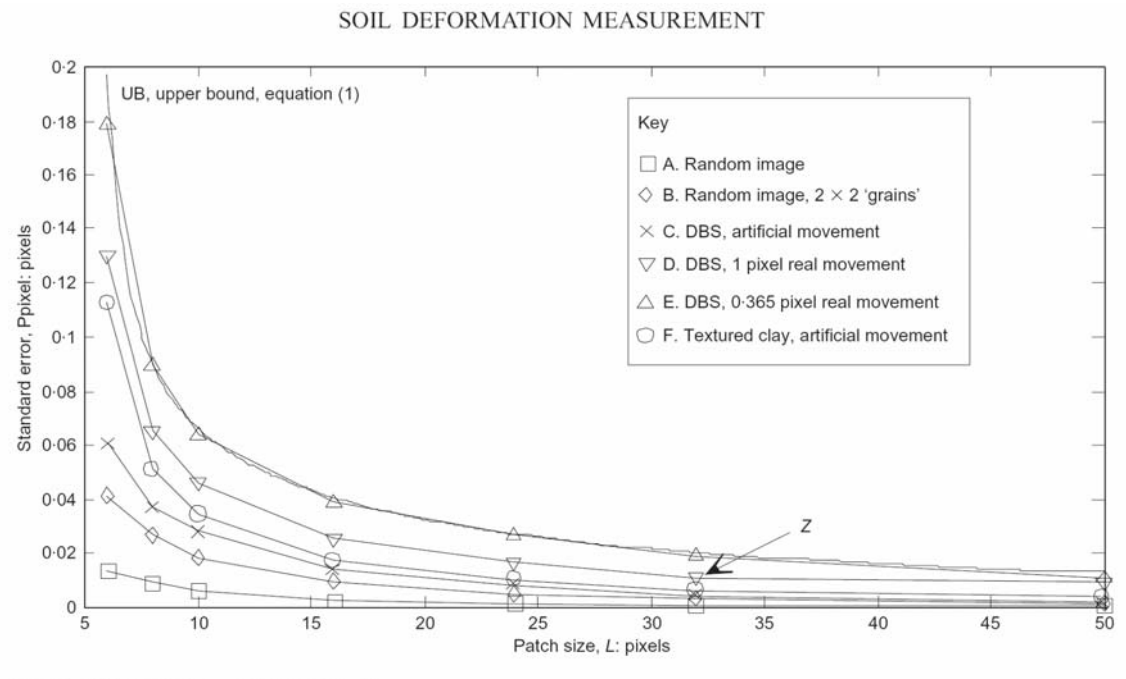


圖 2.10 PIV 計算精確度與搜尋視窗尺寸的關係(White et. al., 2003)。DBS 為愛爾蘭島的狗海灣砂(Dog's Bay Sand)。



三、模型設定

3.1 模型基本設定

本研究利用乾石英砂利於模擬淺部地殼脆性變形的特性，來研究增積岩體以及褶皺逆衝帶中的變形行為。在本實驗中，利用二維的底拖式砂箱來進行各項實驗(圖 2.7)，而本實驗中所使用砂層的厚度皆為 4 公分厚度，主要是參考前人對砂箱尺度因子的研究 (Hubbert, 1937; Kukowski et al., 2002)，自然界增積岩體尺度縮尺到實驗室尺度的比例大約是 10 萬分之 1，因此 4 公分厚的砂層，對比到自然界約為 4 公里的厚度，代表位於隱沒帶前緣沉積物的厚度。雖然，實際上自然界中各隱沒帶的沉積物厚度並不一定，範圍從 1 公里以下至數公里，但本研究為了探討其它因素的影響，故統一砂層厚度，並使用水平堆疊以代表原始未變形的水平地層分布，以減少各因素間相互影響。在增積岩體的模擬研究中，許多研究使用兩個伸向之楔形體(double-vergent wedge)的模型設定方式(McClay and Whitehouse, 2004; Hoth, et al., 2007)，如圖 1.4，亦有探討單一伸向之楔形體(Lohrmann, et al., 2003)，本實驗主要探討位於增積岩體前部楔形體(pro-wedge)變形之特性，因此統一利用背推板固定於背後，形成單一伸向之楔形體(圖 3.1)。

本研究使用染上不同顏色之石英砂以便於肉眼觀察砂層內部的變形(圖 3.1)。石英砂的染色方式，參考張國楨(1998)對於石英砂的染色方式，主要為利用酒精及油漆色母對石英砂染色，接著讓其自然風乾，待其乾燥後攪拌並過篩以避免結塊現象以及去念雜質。而對於石英砂染色，並不改變其物理性質(張國楨，1998)。雖然，照片需轉換成灰階，但是色砂分層為 0.1~1 公分的尺度，其尺度與 PIV 偵測之像素等級的變形相距甚遠(每 1 像素=0.32 公釐)，因此亦不影響 PIV 分析之結果。在實驗砂層鋪設方式，使用賈降法鋪砂，使石英砂均勻平鋪於砂箱內，依不同之需求鋪設，先鋪上底拖帶、設定完傾角之後方可鋪設砂層，具有傾角之實驗，則

平行底部鋪設；此外，本研究原先擬在實驗使用標記點及較薄之標記砂層來幫助外觀上的辨識，但實際上並無顯著效果，並且易與含有玻璃微珠薄層之實驗混淆，因此大部分試驗取消了標記點及標記薄砂層之設計(圖 3.2)。

一般而言，進行砂箱實驗時，許多參數未必能完全依自然界的環境加以設定，因此，對於模型尺度關係以及如何簡化的原則，一直以來為砂箱實驗重要的研究課題 (Hubbert, 1937)。且自然界之中，不同的隱沒系統之間變異因素繁多，無法一一比對，故本研究僅針對底部摩擦係數、滑脫面傾角及原始水平弱面存在深度對於增積岩體變形行為的影響進行探討，並將每一個變因固定分開進行實驗，以提供各個因素可能影響的特性及程度。

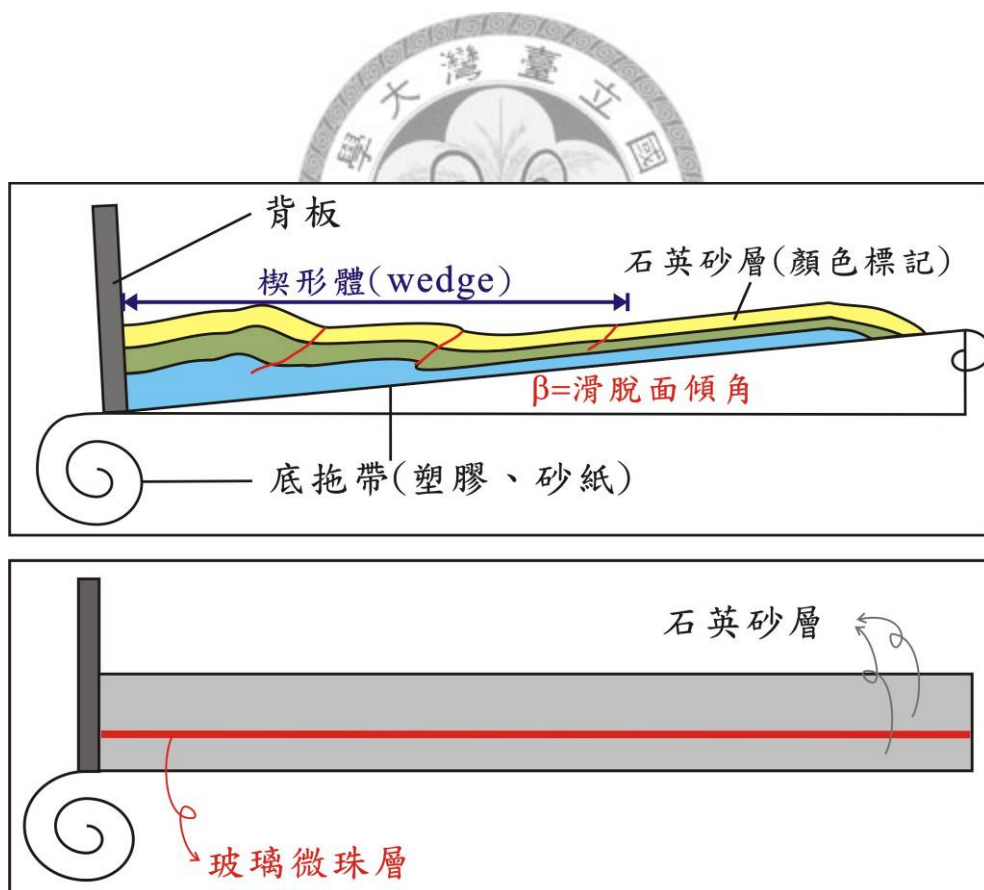


圖 3.1 實驗模型設定圖。上圖為本研究定義楔形體區域，紅色細線為逆衝斷層，下圖為含玻璃微珠層之設定，底拖帶採用砂紙。

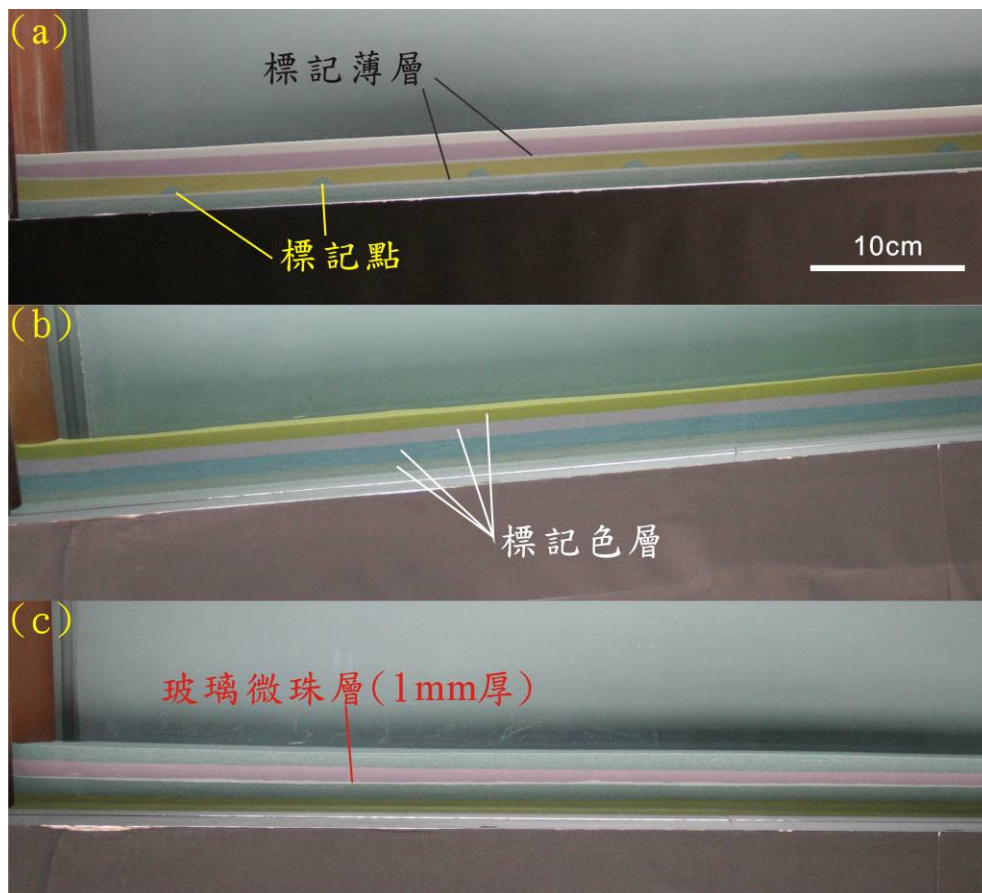


圖 3.2 標記層及玻璃微珠層實際影像。(a)含有標記點及標記薄層之實驗。(b)只有單純標記色層實驗。(c)含有玻璃微珠層之實驗。

3.2 參數—底部摩擦係數

本研究中，利用不同材質，改變底部的摩擦係數，代表增積岩體中底部滑脫面強度的不同；能加以利用的材質包括石英砂、玻璃珠、砂紙底拖帶、塑膠布底拖帶，參數性質見表 2.5。本研究使用石英砂與砂紙底拖帶測試摩擦係數為 0.55，而石英砂與塑膠布底拖帶測試摩擦係數為 0.31。然而，前兩者皆以石英砂為砂層，因此，若將玻璃微珠鋪於底部，則可能增加不確定之變因，如玻璃微珠之厚度而造成弱面可能發育於玻璃內，或是於砂層、砂紙與玻璃珠層間的可能性，因此直接改變底拖帶性質為較直接之方法。

3.3 參數—滑脫面傾角

將砂箱的一端(無背板端)抬起，即形成一傾斜角度，惟砂層設定仍為平行於底部滑脫面，以不改變其它變因為原則。抬起時均測量平台兩端及中間是否均為相同之度數，並給定 0°、3°、6°、8°等傾斜角度。在模型的縮尺上，角度並無因次關係(Hubbert, 1937)，因此無論在設定上及量測上，均與自然界尺度相同。

3.4 原始弱面深度

本研究對於不同原始弱面深度的探討，旨在研究原始存在一更淺的不連續面，其強度比底部滑脫面強度更弱時，會有什麼樣的影響，其表現的行為是否會類似底部滑脫面的作用，或是有無脫序逆衝斷層的發育。因此，本研究鋪設一層玻璃珠層位於砂層中，並改變玻璃珠層的存在深度，用以模擬較淺且強度較低的不連續面。雖然，砂層與玻璃珠之間的摩擦係數難以直接測量，但是由底部摩擦係數實驗的結果中指出相較於石英砂，玻璃珠為較低底部摩擦係數之材質(表 2.5)。各實驗中玻璃珠層約 0.1 公分厚(圖 3.2c)，以模擬自然界中尺度更小之地質弱帶，砂層及玻璃珠層的總厚度仍保持為 4 公分厚，以固定沉積物厚度的影響。

3.5 實驗名稱設定

綜合以上三項主要變數，本研究設計一系列實驗，來探討各項變因的影響程度(表 3.1)，實驗名稱的命名法，分為兩系列，第一是底部摩擦係數及滑脫面傾角，以 HF 和 LF 分別代表摩擦係數 0.55 及 0.31，而 0B~8B 分別代表傾角 0 度至 8 度之間，因此 HF0B 為摩擦係數=0.55，滑脫面傾角為 0 度，LF6B 則為摩擦係數=0.31，傾角為 6 度，以此類推；第二部分為原始弱面深度實驗，M15L 代表為玻璃微珠層所在之深度為 1.5 公分處。

表 3.1 砂箱實驗變因參數對照表

實驗名稱	底部摩擦係數	滑脫面傾角(°)	原始弱面深度(cm)	實驗總推移量(cm)
HF0B	0.55	0		49
HF3B	0.55	3		29
HF6B	0.55	6		50
HF8B	0.55	8		50
LF0B	0.31	0		49
LF3B	0.31	3		29
LF6B	0.31	6		50
LF8B	0.31	8		50
M15L	0.55	0	1.5	50
M20L	0.55	0	2	50
M25L	0.55	0	2.5	50
M30L	0.55	0	3	50
M35L	0.55	0	3.5	50

四、實驗結果

4.1 砂箱實驗影像結果(定性分析)

本研究將前面章節所考慮之因素進行數組實驗，實驗名稱及其相關變數見表 3.1，其代號定義已於第三章敘述過，為考慮單一變因以及二種以上變因之交叉分析，本研究將底部摩擦係數及滑脫面傾角實驗同時改變進行，以便釐清兩種變因各自對變形特性的影響，並比較其影響程度。各實驗影像結果將一一展現(圖 4.1 至 4.13)，而圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。

4.1.1 實驗 HF0B

本實驗變因為摩擦係數=0.55，底部滑脫面傾角=0°，在此組實驗(圖 4.1)的過程中，一開始在底拖帶拉動 10 公分之內先形成兩組逆衝斷層，當初期之楔形體形成之後，接下來的逆衝斷層(thrust)發育時皆會伴隨生成數組背衝斷層(back thrust)，其背衝斷層並切過前一組構造之前緣，背衝斷層發育週期短，數量多，呈漸次發展，且斷層間距較逆衝構造斷，逆衝構造則以底拖帶移動約每 10 公分發育一組漸次發展；前緣逆衝斷層形成後其斷層的深部傾角會逐漸減少，並在底部產生俯衝作用(underthrusting)，而楔形體的抬升作用亦集中於此階段。



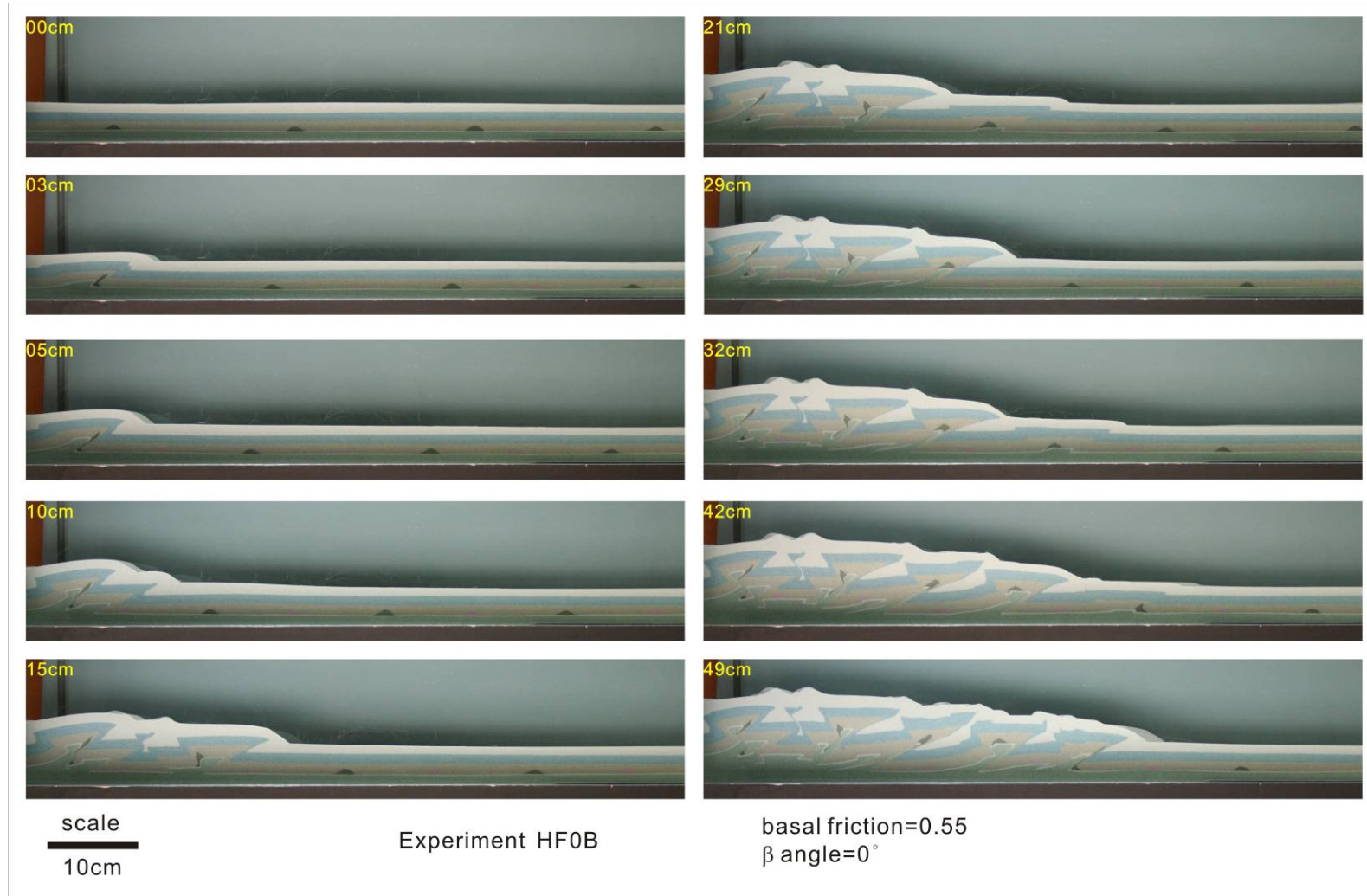


圖 4.1 實驗 HF0B 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

4.1.2 實驗 HF3B

本實驗變因為底部摩擦係數=0.55，底部滑脫面傾角=3°，並與實驗 LF3B 同時進行。由於此組實驗(圖 4.2)在拉動 29 公分處發生底拖帶接合處斷裂，因此此兩組實驗僅拉至 29 公分。此實驗過程中，在拉動 10 公分時已經開始發育第三組逆衝斷層，較 HF0B 早 1 公分處開始發育，並且伴隨一組背衝斷層而形成隆起構造；而當初期楔形體形成後，逆衝斷層的發生週期亦為拉動約 10 公分發育一組，而俯衝作用及抬升量較 HF0B 更多。

4.1.3 實驗 HF6B

本實驗變因為底部摩擦係數=0.55，底部滑脫面傾角=6°，與實驗 LF6B 同時進行(圖 4.3)。在此實驗過程中，拉動量 10 公分之前與 HF3B 實驗類似，而拉動量於 21 公分至 40 公分處背衝斷層發育十分顯著，與 HF0B 類似，前緣加積作用快速進行，後期的逆衝斷層成覆瓦狀排列，楔形體整體呈穩定抬升。

4.1.4 實驗 HF8B

本實驗變因為底部摩擦係數=0.55，底部滑脫面傾角=8°，與實驗 LF8B 同時進行(圖 4.4)。拉動量 7 公分後已形成第三組逆衝斷層，至 10 公分處開始俯衝作用，背衝斷層發育較少，例如拉動量 29 公分處及 42 公分處時前緣僅有逆衝斷層，並無背衝斷層產生，俯衝作用十分顯著。

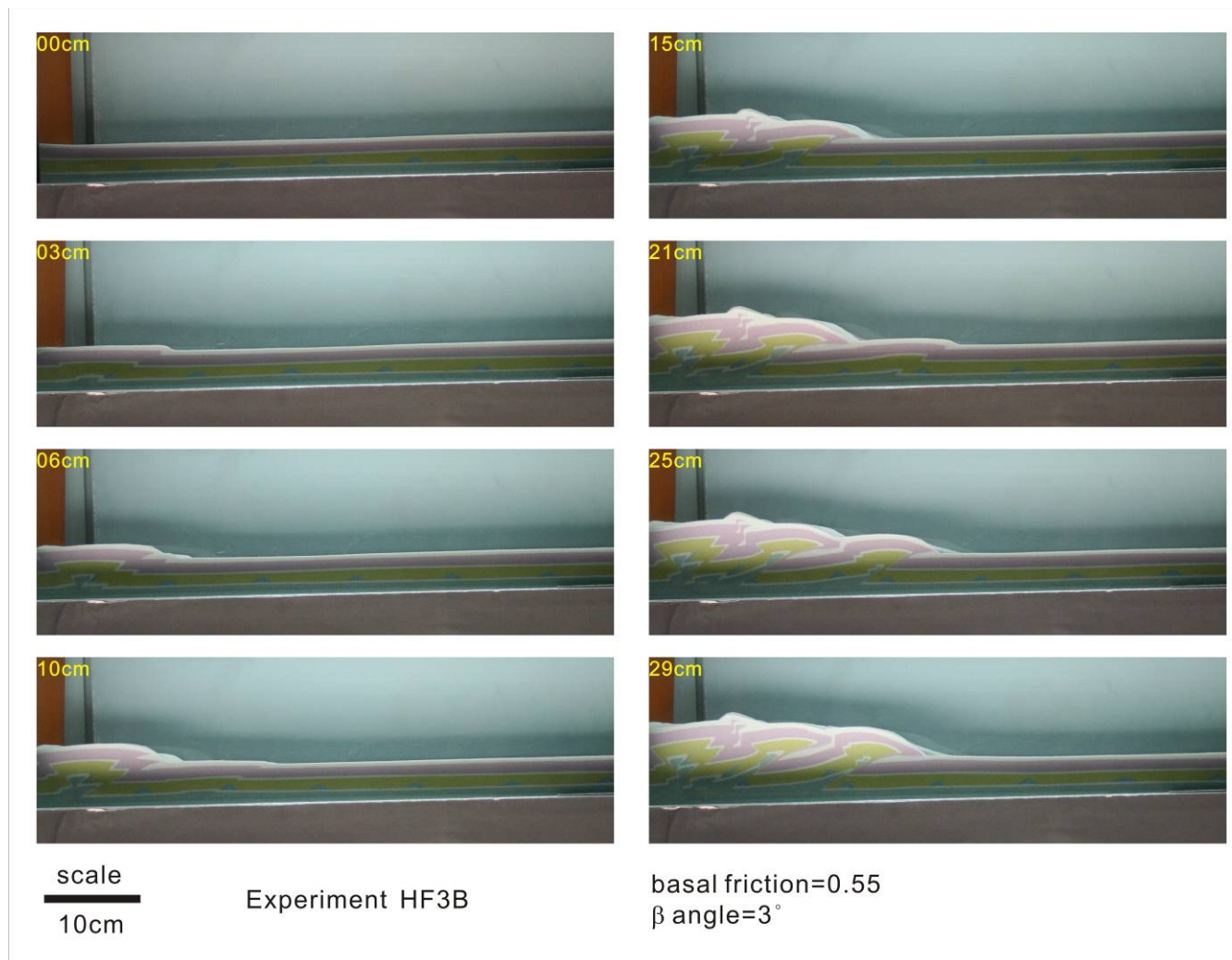


圖 4.2 實驗 HF3B 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

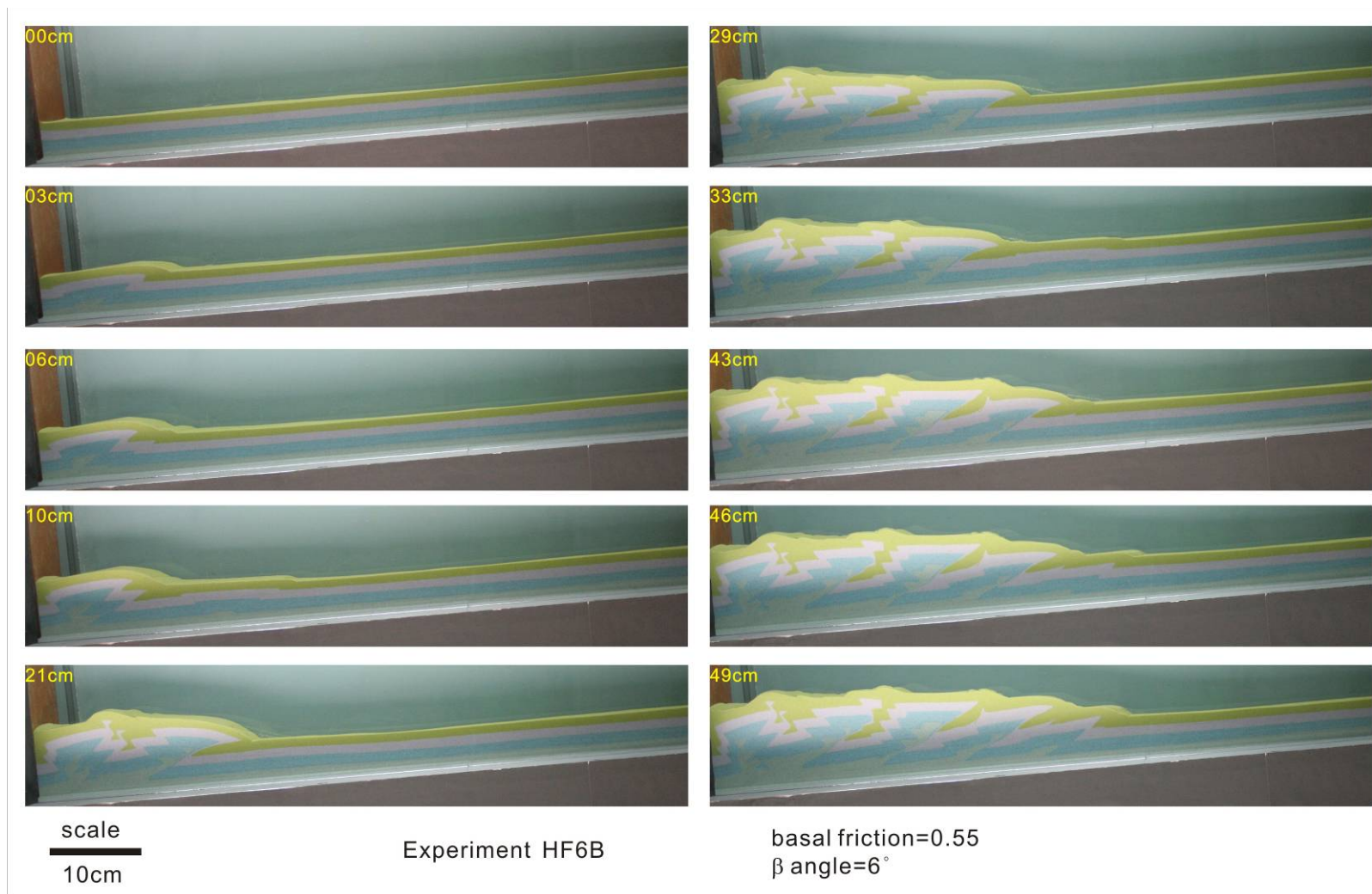


圖 4.3 實驗 HF6B 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

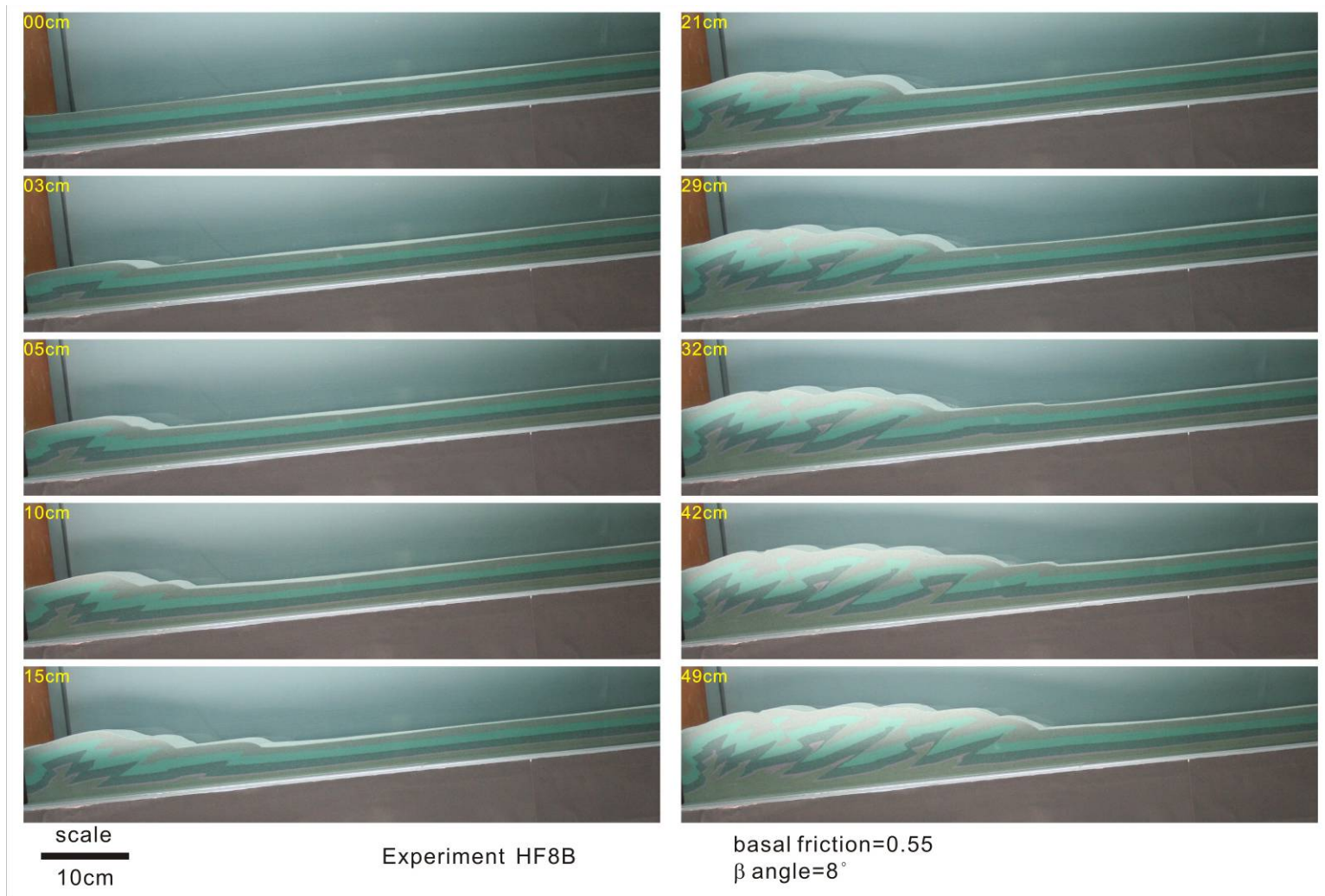


圖 4.4 實驗 HF8B 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

4.1.5 實驗 LF0B

本實驗變因為底部摩擦係數=0.31，底部滑脫面傾角=0°，與實驗 HF0B 同時進行(圖 4.5)。拉動量 5 公分時即形成第二組構造，且為伴隨著背衝斷層發育的隆起構造，背衝斷層通常亦會向後漸次發育；初期背衝斷層切過前一組逆衝斷層的狀況並不顯著，在拉動 29 公分之後則有數組背衝斷層再活動(re-activation)，楔形體坡度較 HF0B 緩，變形範圍較 HF0B 寬，因此抬升高度也較 HF0B 低。

4.1.6 實驗 LF3B

本實驗變因為底部摩擦係數=0.31，底部滑脫面傾角=3°，與實驗 HF3B 同時進行(圖 4.6)。拉動量 10 公分之前，其構造與 HF3B 接近，而構造數目也較 LF0B 多，坡度較陡，而拉動量 15 公分時由前緣逆衝斷層的俯衝作用而伴隨生成許多背衝斷層，之後亦有類似的循環，前緣抬升之後產生連續的背衝斷層並沿背衝斷層抬升。

4.1.7 實驗 LF6B

本實驗變因為底部摩擦係數=0.31，底部滑脫面傾角=6°，與實驗 HF6B 同時進行(圖 4.7)。拉動量 10 公分時，可以觀察到其變形範圍較 LF3B 較為集中，且與 HF6B 接近，而後期前緣形成覆瓦狀前緣逆衝斷層的序列，與 HF6B 最大不同處在於背衝斷層與變形帶寬度，LF6B 所發育之背衝斷層較為分散，且各自錯動量較大，變形帶寬度亦較大，因此整體坡度較 HF6B 緩。

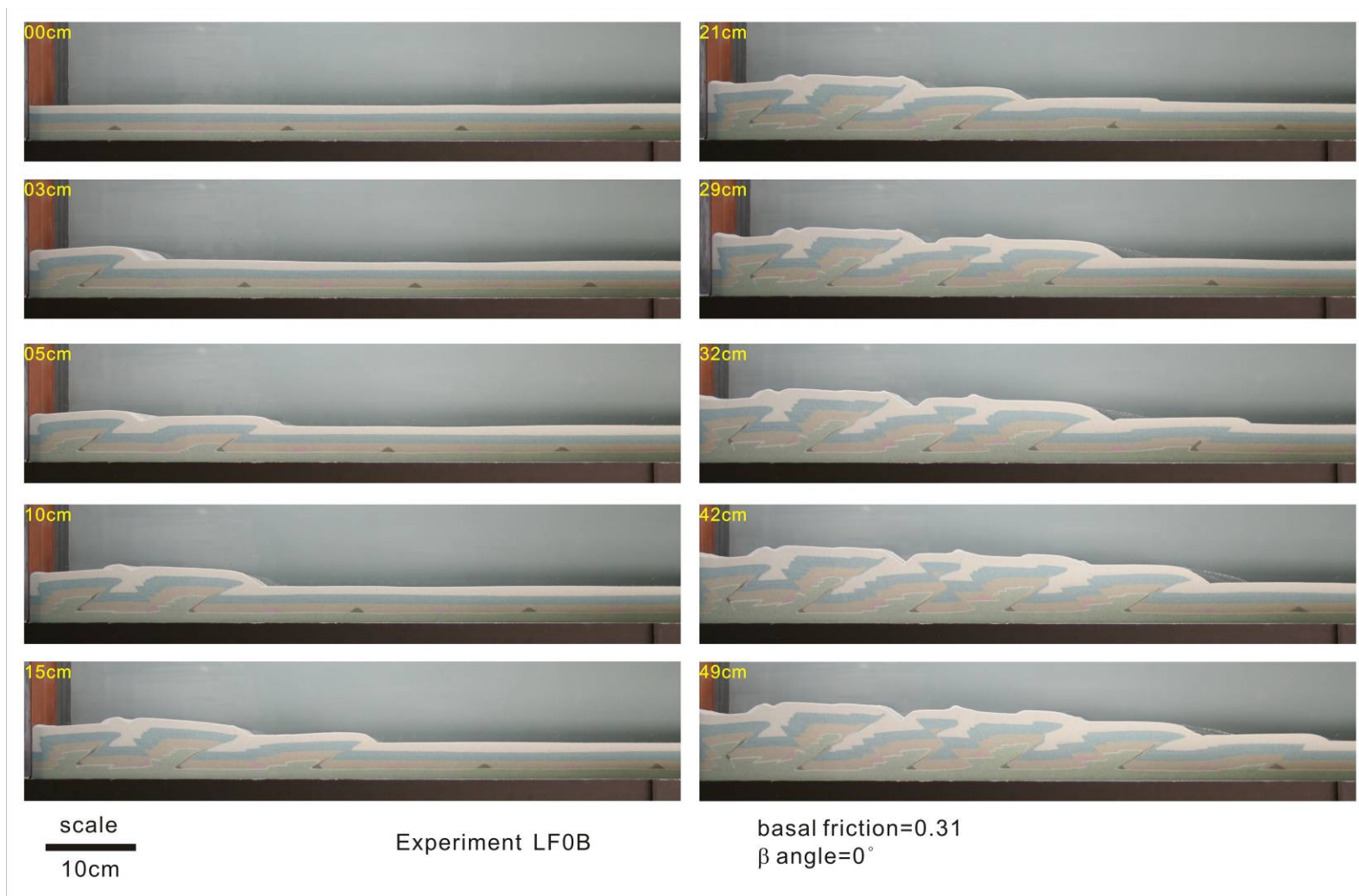


圖 4.5 實驗 LF0B 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

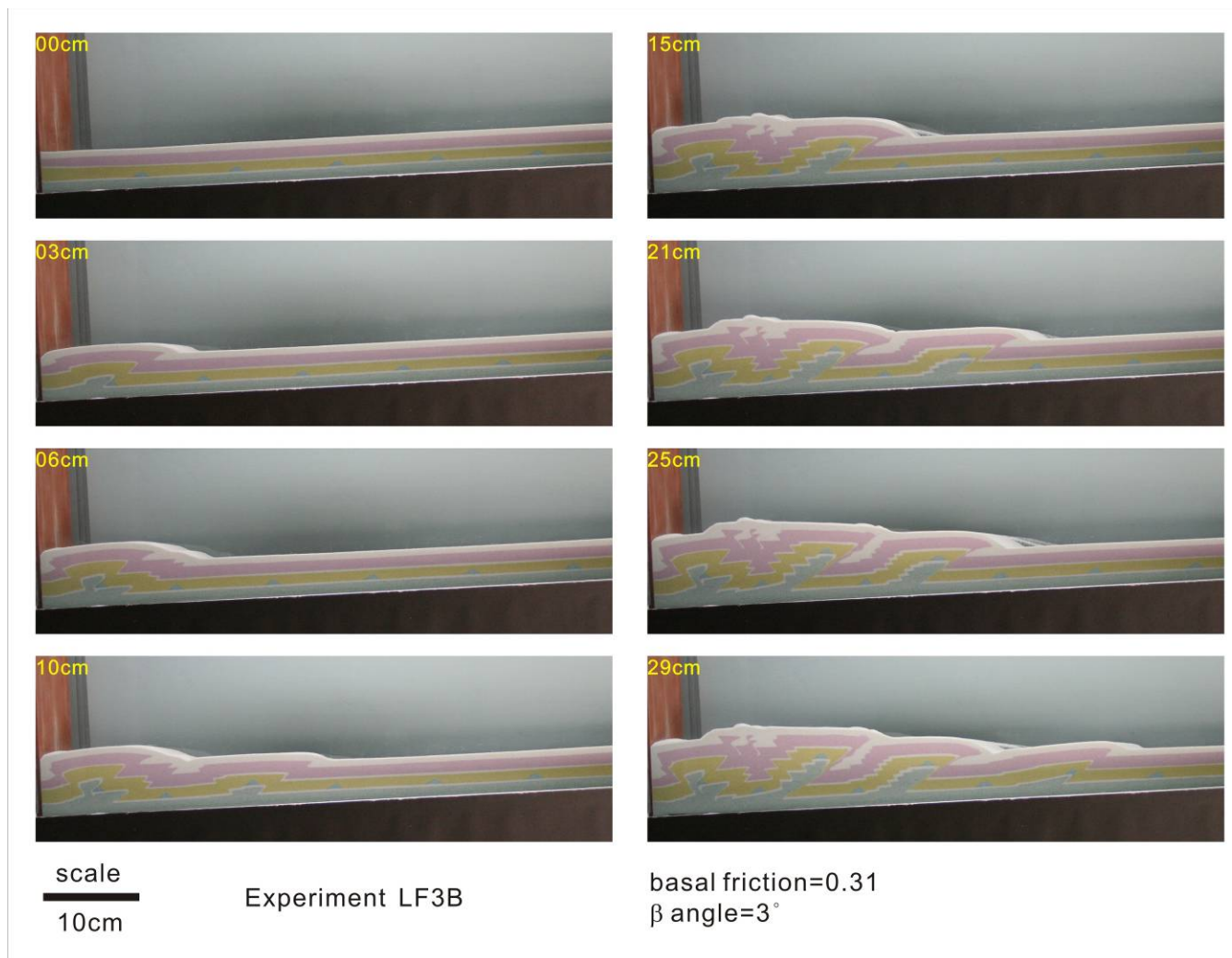


圖 4.6 實驗 LF3B 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

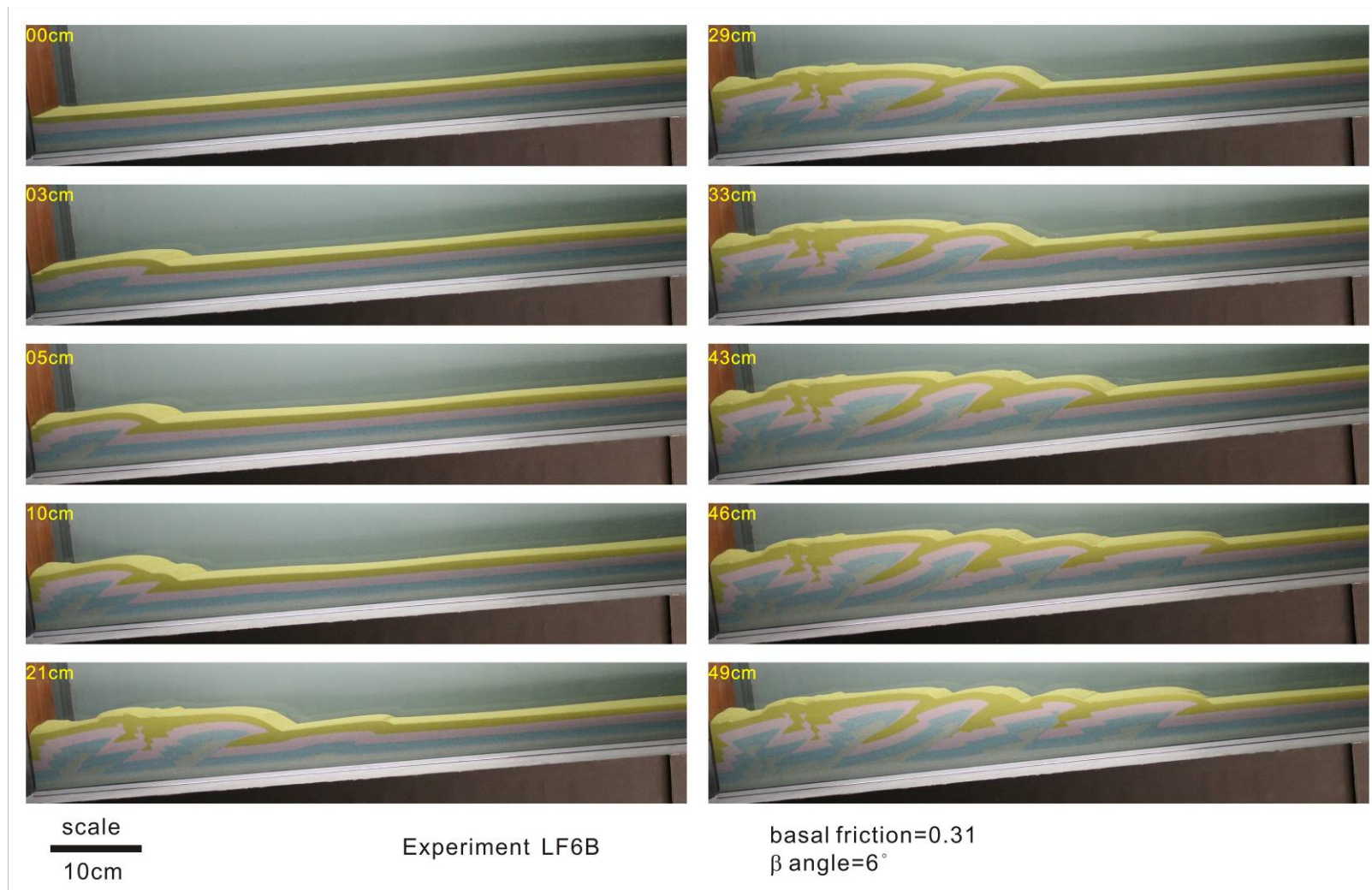


圖 4.7 實驗 LF6B 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

4.1.8 實驗 LF8B

本實驗變因為底部摩擦係數=0.31，底部滑脫面傾角=8°，與實驗 HF8B 同時進行(圖 4.8)。本實驗背衝斷層主要是在楔形體大致外觀發育完成之後，約 29 公分拉動量之後，方發育背衝斷層，並切穿先前的逆衝斷層，與 LF6B 的 21 公分拉動量時產生連續之背衝斷層接近，但在 LF8B 實驗中之背衝斷層較為集中，少有向後漸次發展的情況，而背衝斷層比例亦較 HF8B 實驗多，變形範圍也較廣，整體坡度較 HF8B 緩。

4.1.9 實驗 M15L

本系列實驗(M15L~M35L)一致性參數為底部摩擦係數=0.55，底部滑脫面傾角=0°，另外主要變因為玻璃微珠薄層位於深度 1.5 公分處(圖 4.9)。由開始至拉動量 10 公分處大多和無玻璃微珠層時接近，唯於拉動量 7 公分處由玻璃微珠層(白色薄層)產生一組小型逆衝斷層，此小型逆衝斷層發育周期短，開始抬升至結束拉動量僅 1~2 公分，而此類小型斷層間斷地發生於主要逆衝斷層間；逆衝斷層傾角較無玻璃微珠層時低，而背衝斷層較高，背衝斷層則隨俯衝作用造成抬升而漸次發育，隆起構造呈不對稱抬升，前緣抬升量較少，地層向前緣傾斜；主要斷層雖然由底部滑脫面開始發育，但主要斷層前方則發育分支的小型斷層，如拉動量 28 公分處。

4.1.10 實驗 M20L

本實驗變因為玻璃微珠薄層位於深度 2.0 公分處(圖 4.10)，本實驗從拉動量 10 公分之後才出現由玻璃層開始發展之小型逆衝斷層(17 公分處前緣)，其發育特性為間斷發生，當拉動量 23 及 28 公分時分別形成 1 組小型逆衝斷層，而於 35 公分處則由底部滑脫面形成主要逆衝斷層，並且伴隨之背衝斷層切過前兩組小型逆衝斷層，而抬升不對稱情形不再出現。

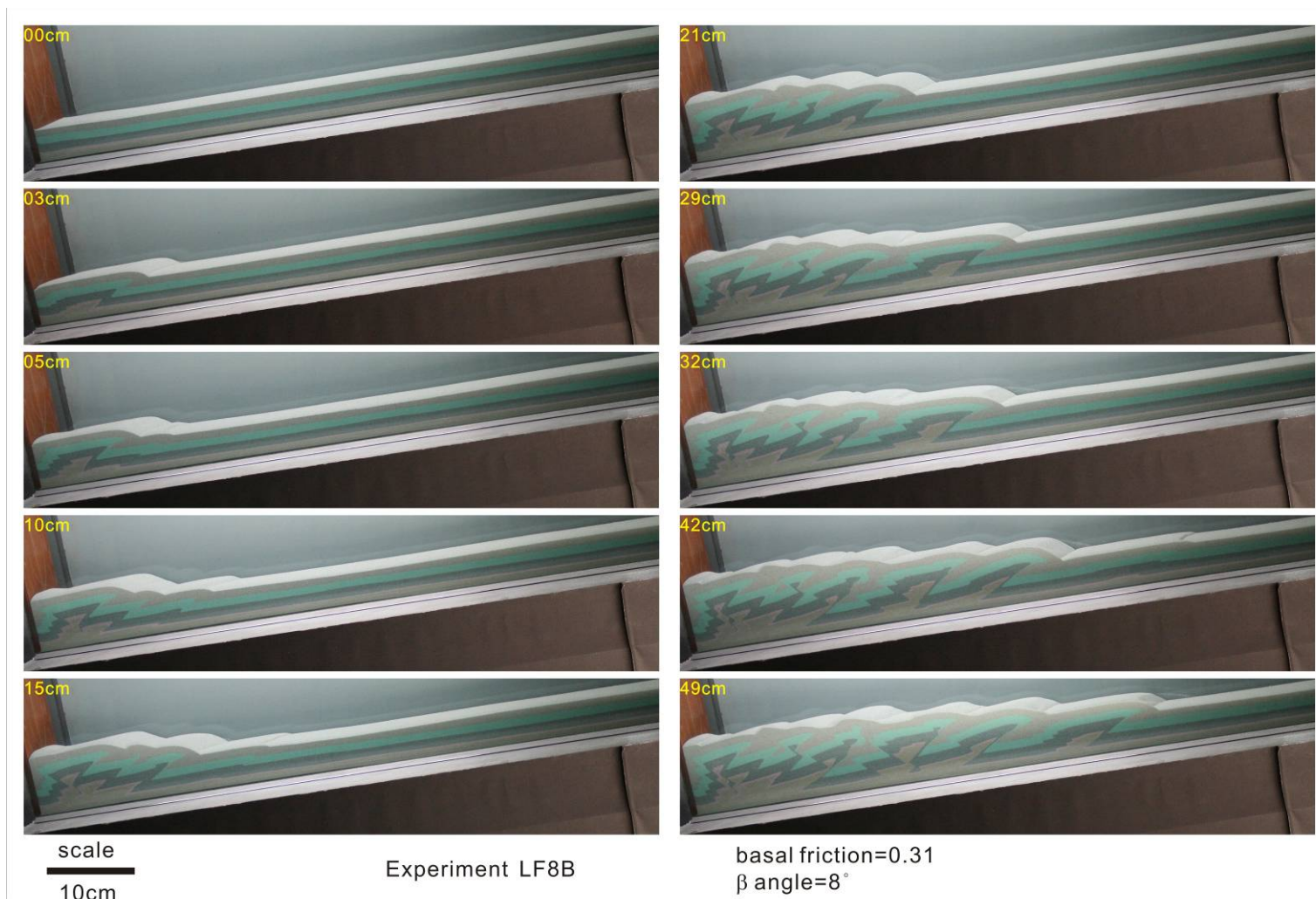


圖 4.8 實驗 LF8B 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

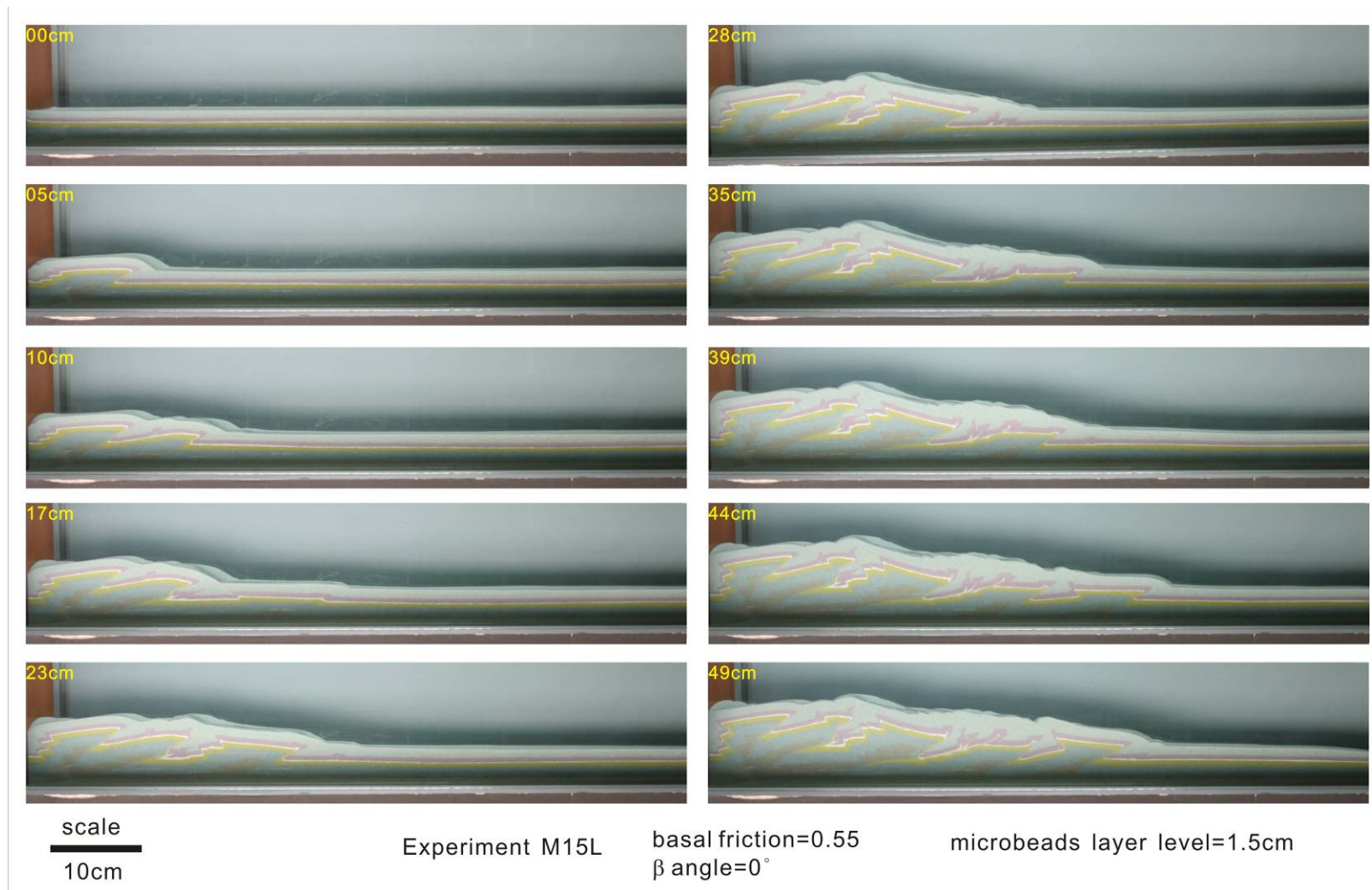


圖 4.9 實驗 M15L 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

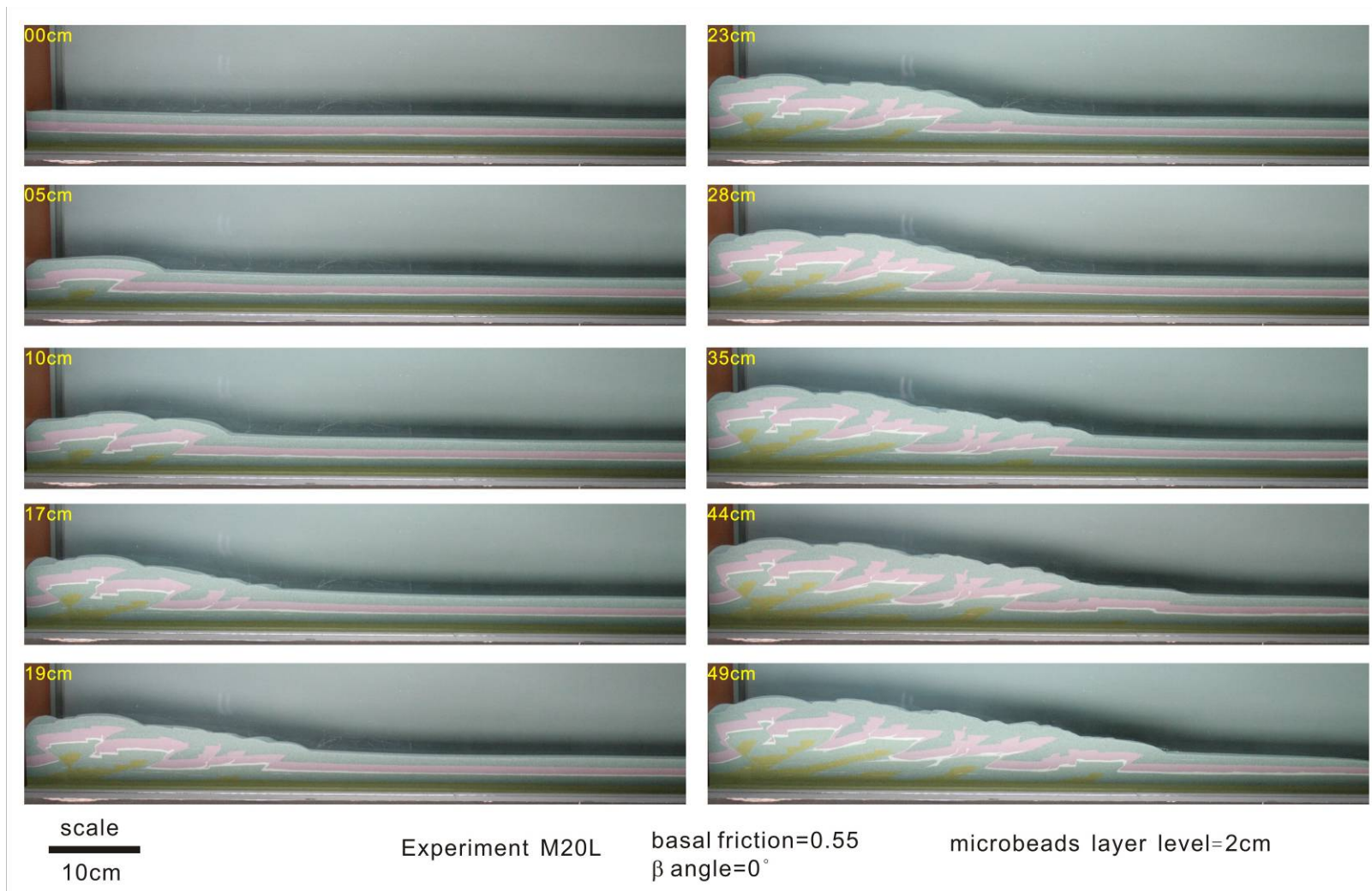


圖 4.10 實驗 M20L 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

4.1.11 實驗 M25L

本實驗變因為玻璃微珠薄層位於深度 2.5 公分處(圖 4.11)，本實驗亦有部分小型逆衝斷層發育，主要斷層夾帶玻璃微珠層現象亦有；此實驗中小型斷層發育週期較長，變形區域較大，且於拉動量 28~35 公分發生斷層分支現象，大致上整體構造分布與 M20L 接近。

4.1.12 實驗 M30L

本實驗變因為玻璃微珠薄層位於深度 3 公分處(圖 4.12)，本實驗於拉動量 10 公分之後主要斷層幾乎由玻璃微珠層為滑脫面發育，斷層面會夾帶玻璃微珠，而拉動量 40 公分之後，亦有部分短週期小型逆衝斷層發育，而主要斷層皆伴隨發育數組背衝斷層而形成隆起構造，穩定向前緣發展，而玻璃微珠層以下之砂體並無顯著之變形，唯有近背板處受擠壓而抬升，逆衝斷層間距約為 10 公分左右。

4.1.13 實驗 M35L

本實驗變因為玻璃微珠薄層位於深度 3.5 公分處(圖 4.13)，本實驗亦由拉動量 10 公分後由玻璃微珠層為滑脫面發育，斷層面亦會夾帶玻璃微珠，並且背衝斷層會伴隨發生而隆起，而短週期小型逆衝斷層已不復見；本實驗斷層分布大致上與 M30L 接近，唯變形帶較 M30L 廣，而逆衝斷層間距約為 15 公分左右。

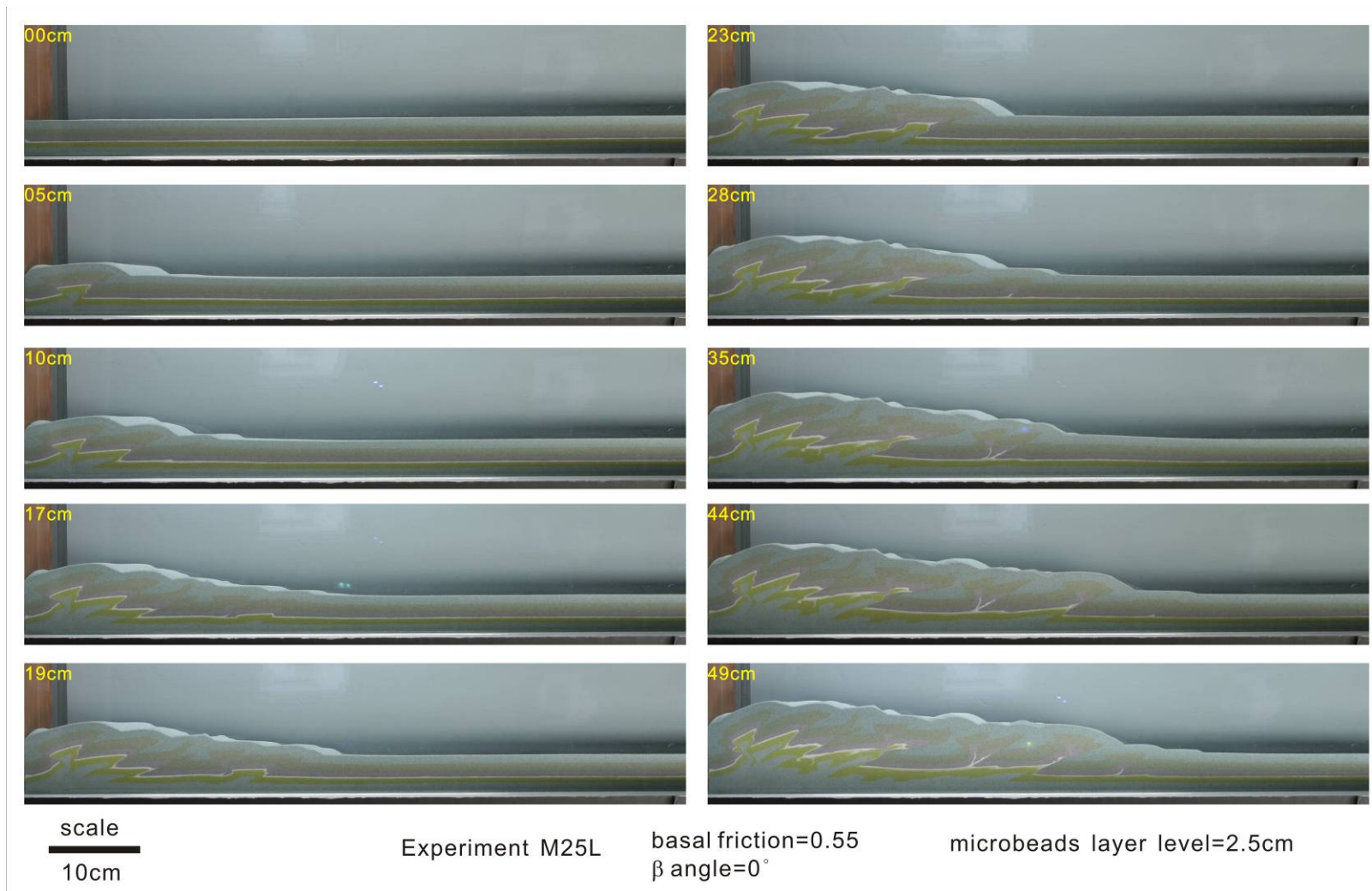


圖 4.11 實驗 M25L 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

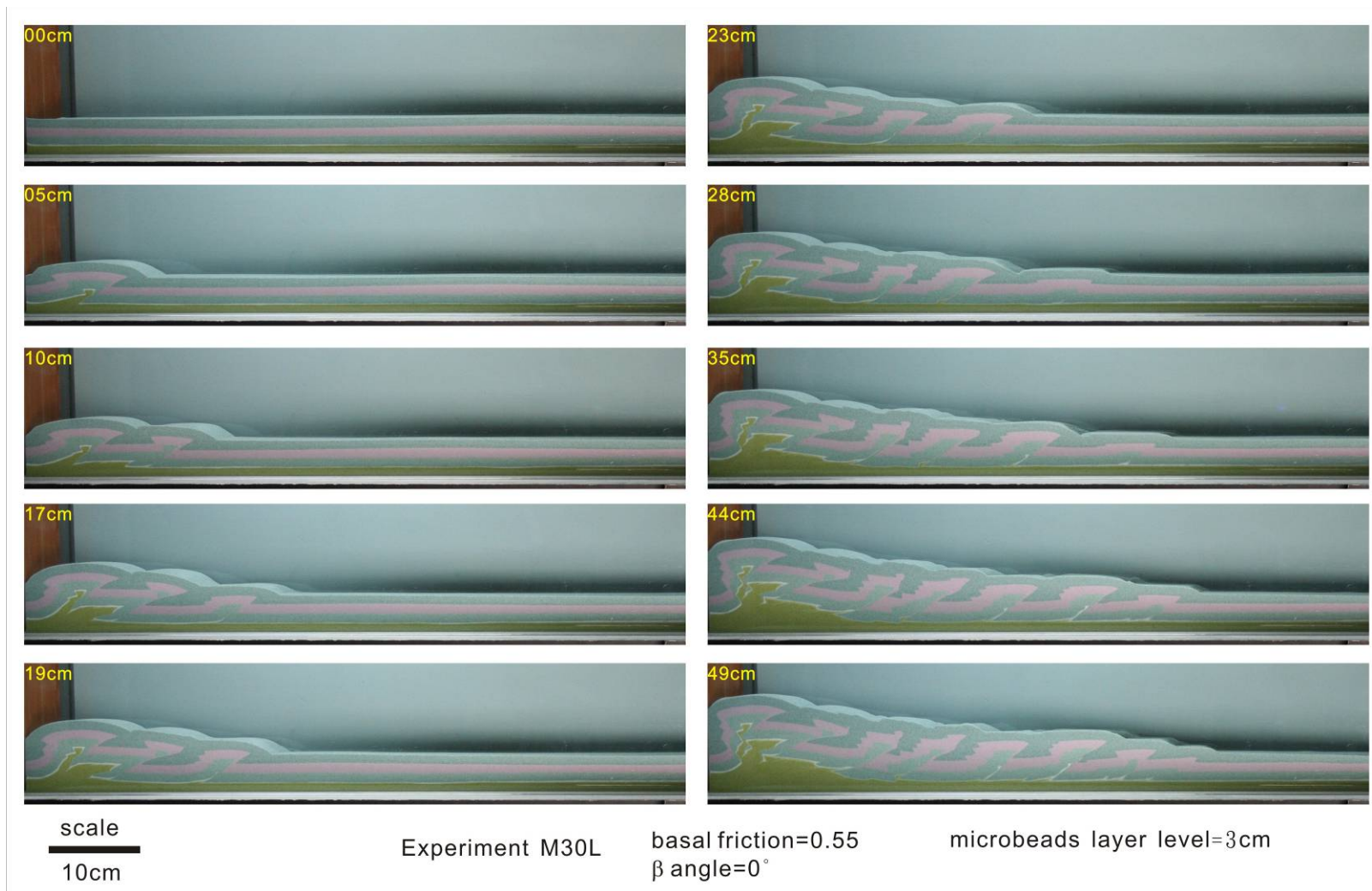


圖 4.12 實驗 M30L 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

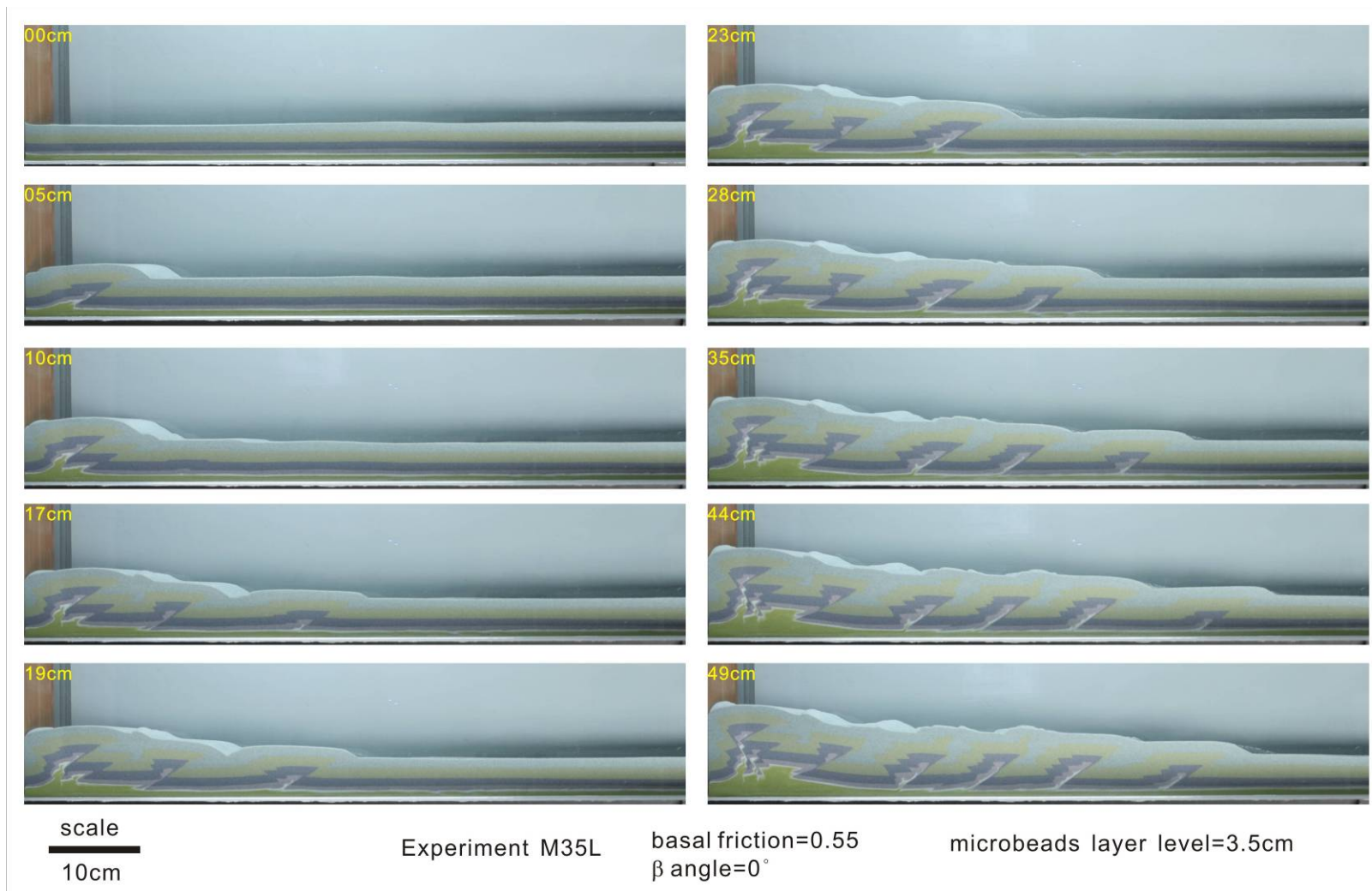


圖 4.13 實驗 M35L 砂箱影像。圖中左上方黃色公分數值為影像拍攝時底拖帶之拉動量。比例尺如圖中左下角之黑線。

4.2 砂箱實驗統計結果(定量分析)

影像分析方面，本研利用可觀測之數值，包括坡度(angle)、變形帶前緣(deformation front)寬度來進行觀測及分析，此分析結果可用來進行初步比較，並可進一步和 PIV 分析結果交叉比較討論。

4.2.1 表面坡度分析

本研究利用測量及統計的方式來直接量化影像結果，將不同滑脫面傾角之實驗的表面坡度(圖 4.14)進行統計分析，以利討論其演化過程變化，以及計算其臨界加積楔形體(critical taper)，其結果見表 4.1。於後章節繪製成圖以比較討論。

4.2.2 變形帶前緣分析

除了表面坡度之外，變形帶前緣的變化為一重要測量指標，本研究另將所有實驗的變形前緣分布(圖 4.14)進行統計分析，其結果見表 4.2、表 4.3。於後章節繪製成圖以比較討論。

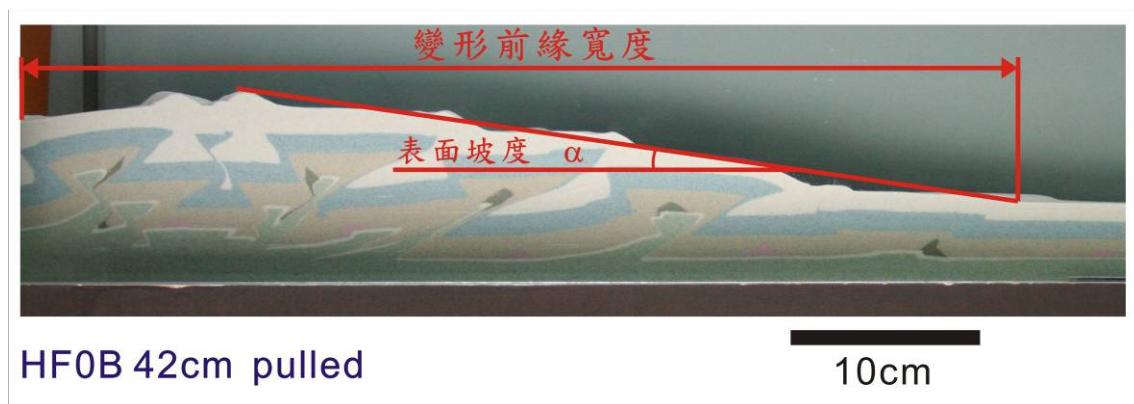


圖 4.14 坡度及變形前緣統計示意圖。

表 4.1 砂箱實驗表面坡度統計表。

實驗名稱	HF0B	LF0B	HF3B	LF3B	HF6B	LF6B	HF8B	LF8B
拉動量 (公分)	坡度 a(°)							
5.0	20.0	3.5	11.0	11.0	10.0		2.0	18.0
6.0	12.0	3.0	12.0	14.0	12.0	15.0	1.0	8.0
7.0	12.0	1.5	14.0	15.0	13.0	10.0	4.0	9.0
8.0	13.0	2.0	16.0	4.0	15.0	11.0	4.0	12.0
9.0	13.0	2.0	16.0	4.5	3.0	14.0	3.0	4.0
10.0	14.0	3.0	6.5	5.0	3.0	2.0	3.0	5.0
11.0	8.5	4.0	6.5	5.0	3.0	2.0	2.0	6.0
12.0	8.0	6.5	7.0	5.5	4.0	2.0	2.0	7.0
13.0	7.0	6.0	8.0	6.0	5.0	2.5	2.0	8.0
14.0	7.0	5.5	8.0	8.5	6.0	2.5	1.0	8.0
15.0	7.0	5.0	11.0	9.0	6.5	2.5	1.0	3.0
16.0	7.0	4.0	13.0	10.0	7.0	3.0	1.0	3.0
17.0	8.0	4.5	14.0	5.0	7.0	3.0	3.0	3.5
18.0	9.0	4.5	15.0	5.5	8.0	3.5	4.0	4.0
19.0	9.0	6.0	15.0	5.0	10.0	5.0	4.0	4.0
20.0	10.5	6.0	8.0	5.5	10.5	6.0	2.0	4.0
21.0	9.5	5.0	8.0	6.0	3.5	1.5	2.0	7.0
22.0	9.5	4.5	8.5	6.5	3.5	1.5	4.0	7.0
23.0	9.0	4.5	9.5	6.5	3.5	1.5	3.0	2.0
24.0	9.0	4.0	10.0	7.0	4.0	2.0	3.0	1.0
25.0	9.0	4.5	10.5	8.0	4.5	2.0	3.0	1.5
26.0	10.0	4.0	10.5	8.0	4.5	2.5	4.0	1.5
27.0	10.0	4.0	10.5	4.0	5.0	2.5	4.0	1.5
28.0	10.5	4.0	10.5	5.0	5.0	3.0	4.0	1.5
29.0	11.0	4.0	10.0	5.5	5.0	4.0	2.0	2.5
30.0	12.0	3.5			5.5	4.0	4.0	2.5
31.0	12.0	7.0			5.5	4.0	2.0	3.0
32.0	10.0	6.0			4.5	5.0	3.0	3.0
33.0	9.0	5.0			2.5	2.0	3.0	0.0
34.0	9.0	4.0			2.5	1.0	4.0	1.0
35.0	9.0	4.0			2.5	1.0	4.0	0.0
36.0	10.0	4.0			3.0	2.0	2.0	1.0
37.0	10.0	4.5			3.0	2.0	2.0	-1.0
38.0	10.0	4.5			3.5	3.0	2.0	-1.0
39.0	10.0	5.0			5.0	3.0	2.0	0.0
40.0	11.0	5.0			5.5	3.5	2.0	1.5
41.0	17.0	5.5			6.0	3.5	3.0	2.0
42.0	10.0	5.5			5.5	4.0	3.0	0.0
43.0	10.0	5.5			5.5	0.5	4.0	0.0
44.0	10.0	5.5			5.5	0.5	4.0	-0.5
45.0	10.0	5.5			4.0	0.5	4.0	0.0
46.0	9.0	6.0			4.5	0.5	4.0	0.0
47.0	9.5	6.0			4.5	0.5	4.0	0.0
48.0	10.0	5.5			4.5	1.0	4.0	0.5
49.0	11.0	5.5			4.5	1.0	4.0	0.5
50.0	11.0	5.0			5.0	2.0	4.0	0.5

表 4.2 變形帶寬度統計表。

實驗名稱	HF0B	LF0B	HF3B	LF3B	HF6B	LF6B	HF9B	LF9B
拉動量 (公分)	變形帶寬度(公分)							
3	13.887	13.220	14.209	13.865	14.380	15.178	13.046	13.289
4	13.531	29.612	13.750	13.726	13.863	14.900	12.535	12.932
5	13.166	29.002	14.956	16.296	15.530	14.460	14.421	12.712
6	18.107	28.634	14.752	16.144	15.186	14.281	14.182	16.128
7	17.943	28.205	14.448	15.774	14.942	16.931	14.150	15.826
8	17.490	27.749	14.121	29.526	14.876	16.717	13.781	15.551
9	17.120	27.380	13.948	29.432	14.659	16.511	13.635	20.713
10	16.841	26.866	24.688	29.037	28.473	31.135	18.429	20.676
11	29.937	26.325	23.969	28.615	28.019	30.661	18.363	20.563
12	29.646	41.397	23.575	28.059	27.513	30.429	17.892	20.168
13	29.126	40.911	23.379	27.366	27.129	29.921	17.805	19.792
14	28.558	40.531	22.636	26.961	26.482	29.757	17.673	19.510
15	28.011	40.130	22.264	26.475	26.293	29.373	27.036	27.376
16	27.679	39.642	21.893	26.098	25.729	29.219	26.738	27.216
17	27.307	39.012	21.675	25.647	25.606	29.136	26.298	26.891
18	26.958	38.525	21.392	39.527	25.378	28.860	26.283	26.786
19	26.627	38.123	21.086	39.296	24.589	28.151	26.027	26.723
20	38.962	37.435	32.375	38.753	24.256	27.837	25.627	26.530
21	38.456	52.571	32.069	38.206	23.989	39.932	25.338	26.157
22	37.873	52.001	31.628	37.605	37.476	39.558	25.008	25.988
23	37.329	51.667	31.195	37.089	37.220	39.186	24.687	25.657
24	37.042	51.057	30.540	36.300	36.656	38.643	32.048	40.768
25	36.560	50.224	30.191	35.806	36.347	38.223	31.737	40.449
26	36.074	49.779	29.713	35.147	35.779	37.711	31.371	39.803
27	35.801	48.735	29.532	34.589	35.268	37.105	31.035	39.418
28	35.311	48.218	29.309	48.428	34.722	36.566	30.586	38.834
29	34.918	47.643	28.677	48.035	34.401	36.283	29.925	38.083
30	34.504	47.118			34.091	35.780	29.620	37.554
31	47.232	62.256			33.532	35.616	29.276	36.921
32	46.900	62.143			34.911	35.488	41.188	36.479
33	46.410	61.537			45.691	48.243	40.962	46.614
34	45.961	61.167			45.054	47.808	40.507	46.388
35	45.431	60.566			44.459	47.392	39.938	45.975
36	44.777	59.995			43.743	46.942	39.322	45.411
37	44.206	59.499			43.265	46.450	38.807	44.997
38	43.634	58.955			42.649	45.823	38.129	44.625
39	43.226	58.348			42.163	45.179	37.634	44.298
40	42.614	57.852			41.517	44.686	37.154	43.832
41	54.051	57.574			40.920	44.186	42.902	43.531
42	52.819	57.517			40.522	43.632	42.588	58.192
43	52.410	57.243			42.311	58.287	42.168	57.816
44	51.798	57.191			41.995	57.890	42.000	57.440
45	51.390	57.155			46.656	57.373	41.389	56.876
46	50.778	57.079			46.401	56.858	41.056	56.326
47	50.328	56.894			46.009	56.433	40.919	55.857
48	50.043	70.957			45.577	55.797	40.801	55.185
49	49.512	70.566			45.522	55.128	40.664	54.546
50	49.144	70.181			45.461	54.604	40.270	54.056

表 4.3 變形帶寬度統計表(續)。

實驗名稱	M15L	M20L	M25L	M30L	M35L
拉動量 (公分)	變形帶寬度(公分)				
3	14.826	15.785	12.219	13.740	14.017
4	14.408	15.376	11.762	13.498	13.698
5	12.418	15.117	11.605	13.258	13.456
6	16.948	14.880	17.485	13.018	13.250
7	16.553	23.438	17.300	22.177	13.043
8	22.187	23.034	17.141	21.460	15.047
9	22.402	22.608	21.851	21.120	14.866
10	22.001	22.115	21.476	20.798	23.839
11	23.926	27.090	21.084	20.493	23.367
12	23.632	26.358	20.768	20.256	23.077
13	23.046	25.729	21.796	20.078	22.748
14	22.594	25.153	28.169	19.938	22.442
15	22.108	24.579	27.627	28.665	38.141
16	21.871	27.188	27.242	28.116	37.662
17	35.312	26.623	33.783	27.685	37.127
18	34.992	31.195	33.084	27.177	36.551
19	34.722	30.933	32.695	26.768	35.999
20	34.156	30.697	32.271	36.672	35.440
21	33.729	30.452	32.084	36.271	34.912
22	36.958	35.949	31.792	35.856	34.463
23	36.408	35.658	31.590	35.503	33.954
24	36.168	35.251	31.382	34.846	44.847
25	35.738	34.373	40.220	34.461	44.321
26	35.089	33.810	39.232	34.067	43.760
27	36.558	36.515	38.732	44.614	43.381
28	36.138	36.204	37.794	43.995	42.713
29	35.822	35.816	37.176	43.343	42.247
30	44.832	35.485	36.370	42.752	41.787
31	45.598	35.044	40.260	42.306	41.366
32	45.443	38.361	42.429	41.743	54.238
33	44.852	43.432	42.021	41.323	53.649
34	44.173	42.997	41.375	51.964	53.173
35	43.565	42.534	40.848	50.726	52.648
36	42.986	42.161	48.743	50.143	52.133
37	45.222	41.933	48.576	49.625	51.501
38	45.212	41.761	48.810	49.012	50.843
39	44.422	45.671	48.079	48.395	50.324
40	52.997	44.935	47.812	47.942	49.672
41	52.316	44.317	47.442	55.367	49.356
42	51.908	43.829	47.179	54.983	62.305
43	51.268	53.549	53.778	54.372	61.803
44	50.869	52.878	53.323	53.862	61.473
45	50.269	52.605	52.768	53.279	60.536
46	51.408	51.949	51.905	52.570	60.140
47	50.950	51.406	51.131	51.953	59.816
48	50.449	50.778	50.771	56.155	59.425
49	49.889	50.303	54.249	55.771	59.171
50	51.648	49.855	53.907	55.326	58.746

4.3 PIV 影像分析結果(定量分析)

本研究使用 PIV 影像處理軟體來進行量化以及微小變化偵測之工具，由 PIV 軟體所得到之結果可由不同方式呈現，如速度向量場、水平分量、垂直分量以及剪應變量(圖 4.15)，本章節將分別展示實驗經由 PIV 軟體所計算之結果。

由於本研究中所採用之 PIV 影像分析軟體為套裝軟體，可直接將計算所得到的向量場分別繪製成水平及垂直分量的等值圖，並且經由水平方向向量場的梯度計算，來得到剪應變量，而其應變計算之原理，可參考圖 4.15 之示意圖，雖然應變的計算上並無單位及正負值，然而此軟體為了方便等值圖繪製及顯示，將右剪方向設為正值，而左剪方向為負值，因此得到之剪應變等值圖，以此三種量值圖有助於分析各區域的主要行為，以及變形集中區域，而惟有部分區域會有雜訊，可能為影像拍攝時如光線等系統誤差。

實驗結果所得到之 PIV 影像結果資料量十分龐大，為求展示方便，並更有效率的進一步比較，因此，本研究列出所有實驗的其中一段前緣逆衝斷層的前緣增積循環，並且具有相似之重覆性及可預測性(frontal accretion cycle)(圖 1.4, Hoth, et. al., 2007)，其中包括了從初始發育期、斷層俯衝期及再活化期等完整的發育歷史；由於增積岩體的砂箱實驗中大致上是由數組前緣增積循所組成，因此，藉由一組的結果進行完整的分析，亦可得知該實驗的變形特性。本研究利用水平、垂直的速度分量，以及剪應變量，比較不同階段的變化。本節將變化比較結果加以敘述，以利比較。

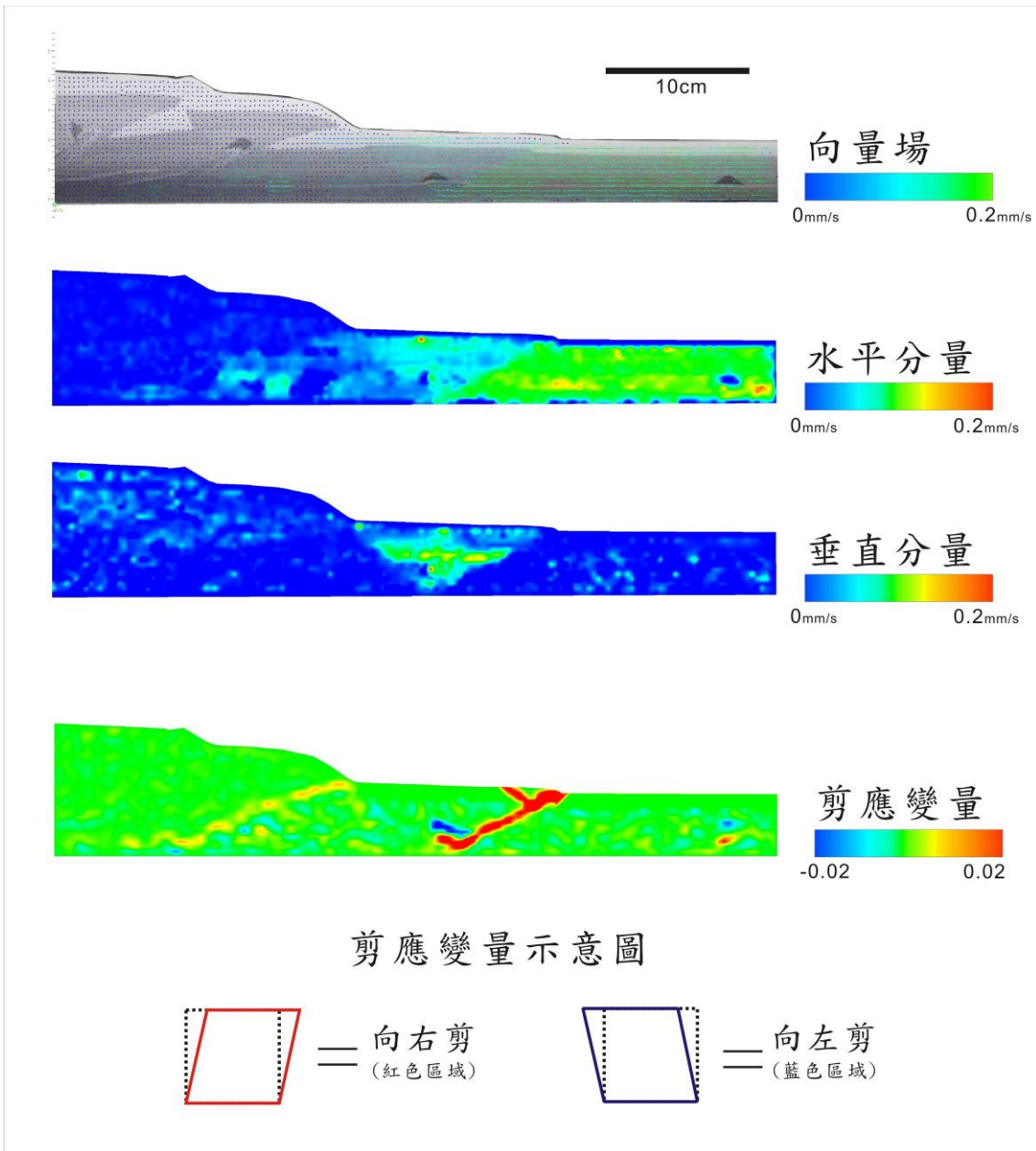


圖 4.15 PIV 計算及顯示分量值示意圖。包括向量場、水平分量、垂直分量及剪應變量(下方為剪應變原理示意圖)。

4.3.1 實驗 HF0B

本實驗採用拉動量 31 公分至 44 公分間前緣斷層的變化(圖 4.16)，拉動量 31.3 至 33.1 間為前緣初始發育階段，抬升量集中於前緣隆起區域，垂直位移呈倒三角形分布於前緣。水平位移於 31.3 公分時亦於逆衝斷層及背衝斷層形成兩個不連續面，而於 33.1 公分時原先的前一組逆衝斷層有再活化的現象，由剪應變量可以觀察到主要剪應變集中於前緣逆衝斷層，而第二組逆衝斷層亦可觀察到剪應變量的分布。當拉動量 39.6 公分時，由水平位移分量及剪應變量可觀察到俯衝構造作用以及伴隨發生的背衝斷層，抬升作用則不再集中於前緣，拉動量至 41.2 公分時，此俯衝作用繼續進行。而拉動量至 43.2 公分時，雖然先前的俯衝作用仍進行但已減緩，同時，前緣形成一組新的逆衝斷層並且抬升，轉變如同 31.3 及 33.1 公分時的第二組逆衝斷層般再活化的作用。

4.3.2 實驗 HF3B

本實驗採用拉動量 10 公分至 24 公分間前緣斷層的變化(圖 4.17)，拉動量 10.1 公分時，為前緣增積作用，逆衝斷層初始發育階段，抬升量集中於前緣隆起區，垂直位移呈倒三角形分布，由水平位移及剪應變量觀測，前一組斷層並未產生變化。當拉動量至 16.4 及 19.3 公分時，垂直位移顯示抬升量分布於整個楔形體，而水平及剪應變量則顯示俯衝作用的進行。而拉動量 20.2 公分時產生一組新的逆衝斷層，原先斷層已不再活動，直至 23.2 公分處由水平及剪應變才觀察到少許活動。



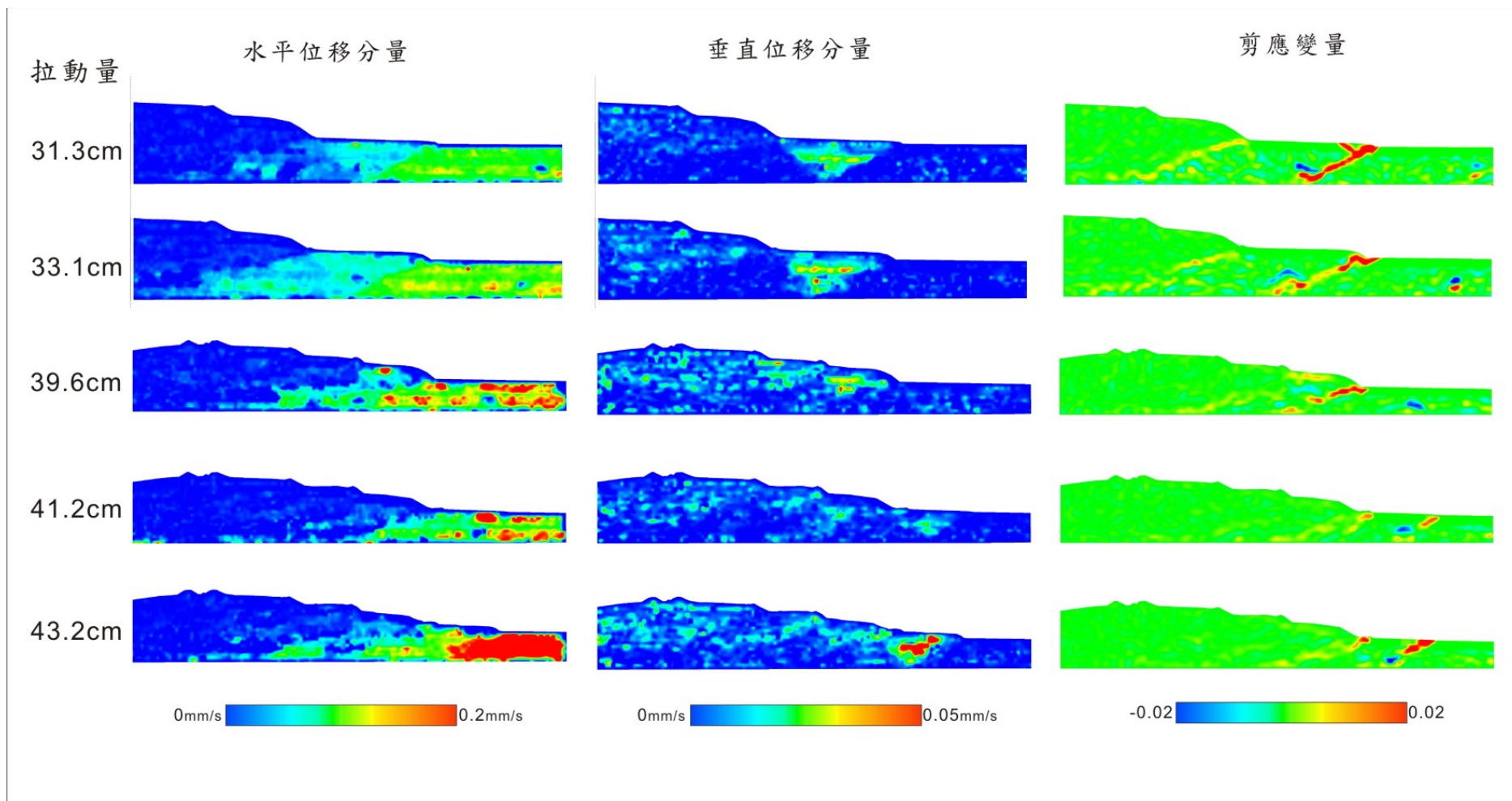


圖 4.16 實驗 HF0B 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

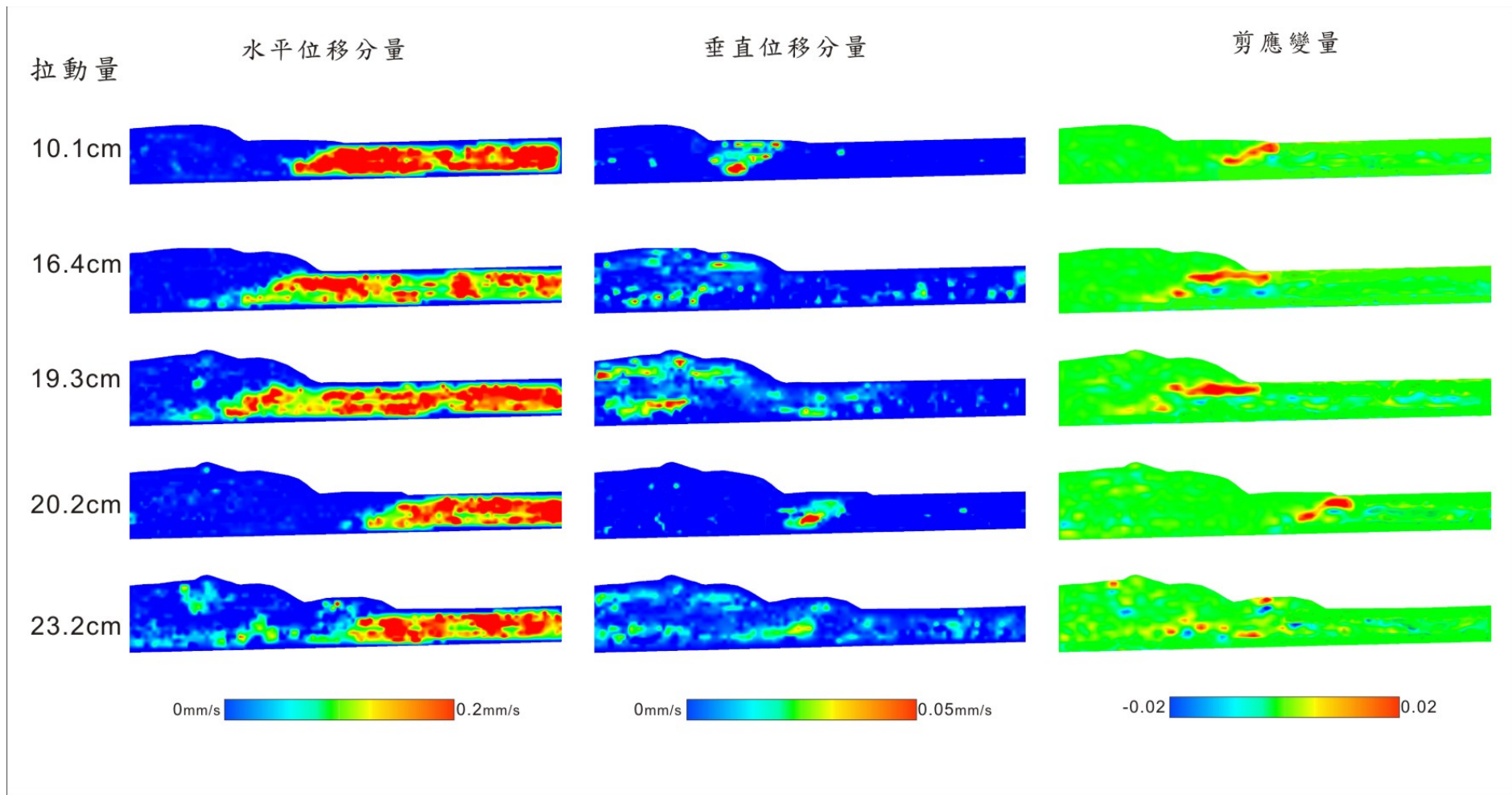


圖 4.17 實驗 HF3B 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

4.3.3 實驗 HF6B

本實驗採用拉動量 21 公分至 33 公分間前緣斷層的變化(圖 4.18)。拉動量 21.9 公分時，前緣斷層為初始發育階段，大部分抬升量集中於前緣，而水平及剪應變量則顯示背衝斷層發育較顯著。而由拉動量 28.2、29.2 及 30.3 的剪應變量連續變化顯示，俯衝作用的現象不顯著，大致上是間斷的發生，當拉動量 29.2 時，可觀察到俯衝作用，而抬升量相對減少了。由抬升量來觀察，可發現抬升由整體逐漸集中至前緣的趨勢。至拉動量 32.1 公分處，再度發育新的前緣，由水平的速度來看，除了背衝斷層較明顯亦有部分的俯衝作用發生。

4.3.4 實驗 HF8B

本實驗採用拉動量 23 公分至 32 公分間前緣斷層的變化(圖 4.19)。當拉動量 23.1 公分時，前緣雖然是初始階段的加積作用，但抬升範圍較大，延伸至楔形體內部，前一組斷層有再活化之現象。拉動量至 28.5 作用時，已進入了俯衝作用的階段，抬升量集中於楔形體底部，前一組斷層亦有再活化之現象。至 30.4 公分時，俯衝作用較為集中於前緣逆衝斷層，而至 31.7 時，新的斷層已發育，而原先的斷層雖減少但仍亦繼續活動。

4.3.5 實驗 LF0B

本實驗採用拉動量 33 公分至 50 公分間前緣斷層的變化(圖 4.20)。當拉動量 33.2 公分時，前緣形成隆起構造，抬升作用明顯的形成倒三角形集中抬升，由水平分量可以觀察到前緣逆衝斷層及較低角度的背衝斷層。而拉動量 39.3 公分至 43.4 公分處，由水平分量來看，俯衝作用除了前緣逆衝斷層，先前的兩組逆衝斷層亦有滑動及俯衝作用的行為，因此在垂直分量上，是整體同時沿各逆衝斷層面上盤抬升的作用。至 49.2 公分處，前緣形成新的逆衝斷層，增積作用在前緣進行。

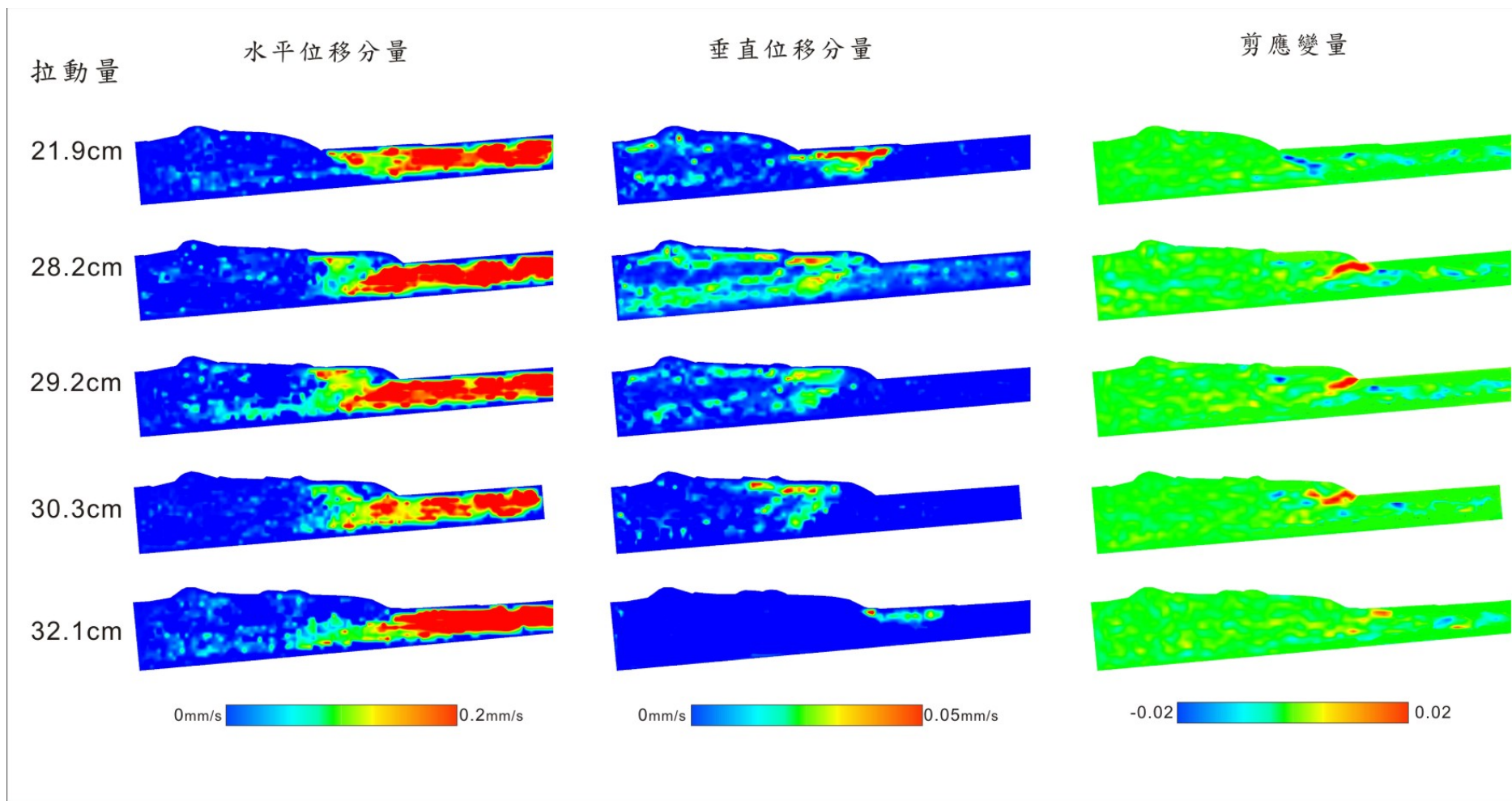


圖 4.18 實驗 HF6B 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

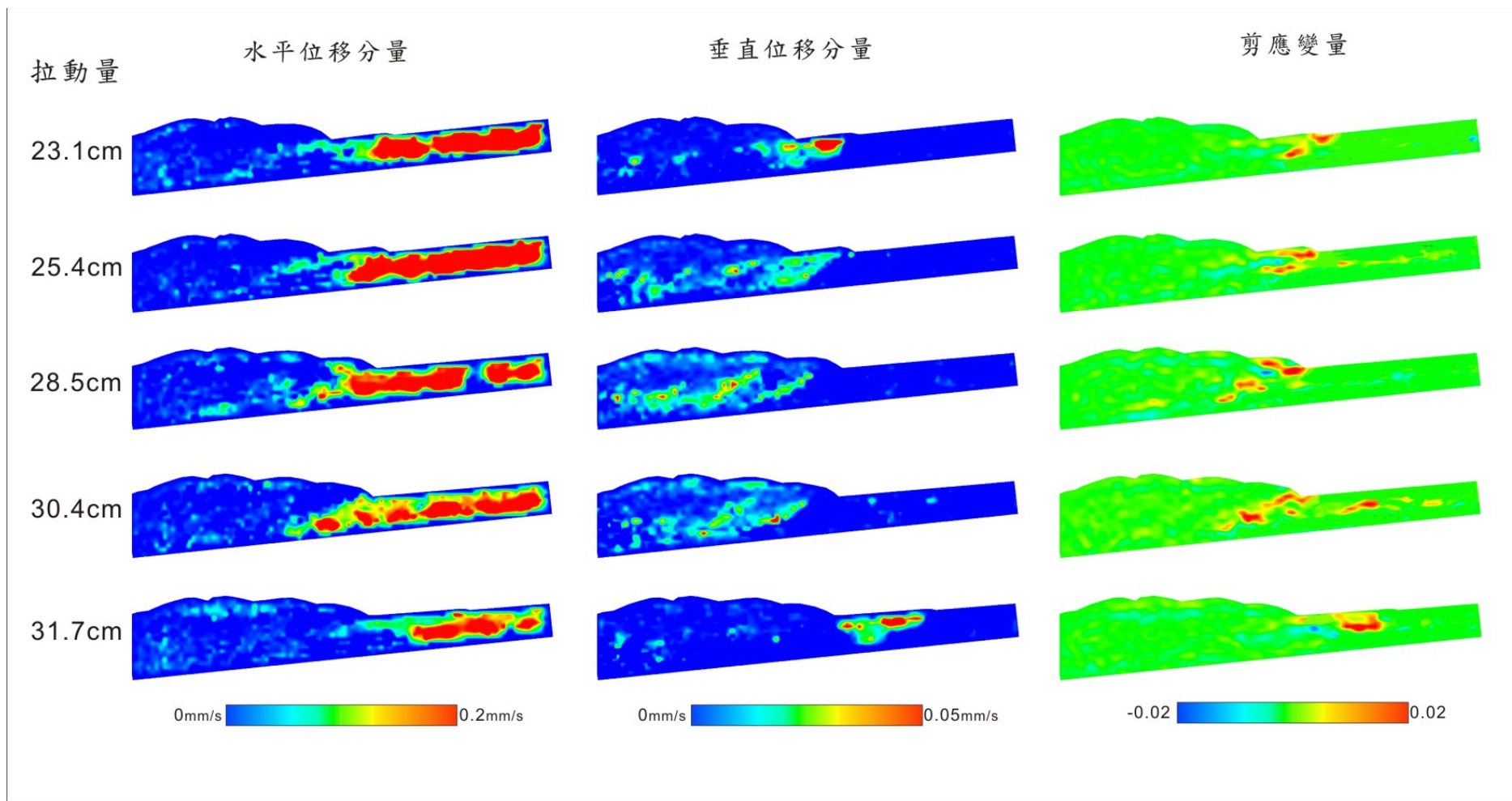


圖 4.19 實驗 HF8B 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

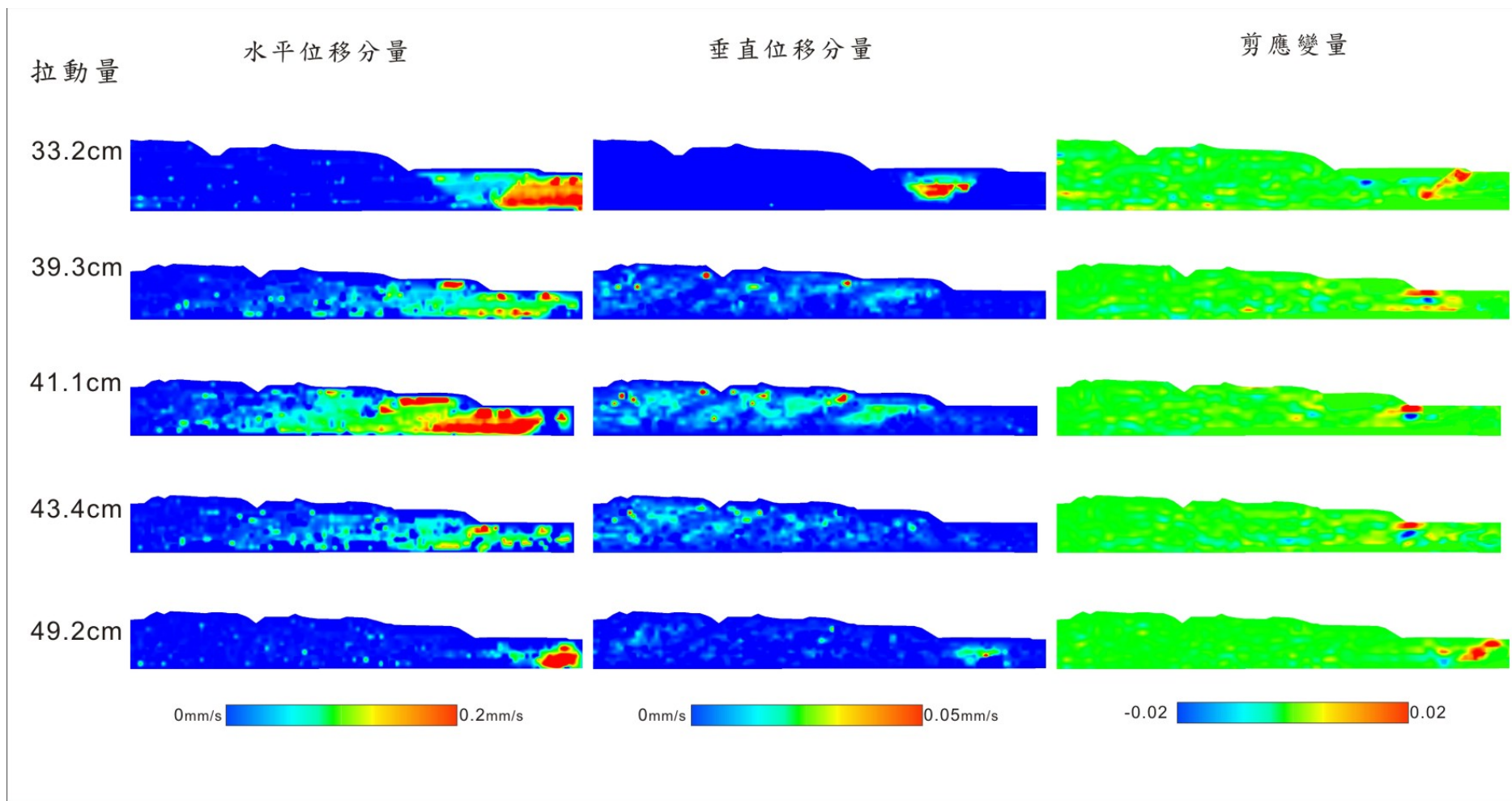


圖 4.20 實驗 LF0B 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

4.3.6 實驗 LF3B

本實驗採用拉動量 17 公分至 28 公分間前緣斷層的變化(圖 4.21)。當拉動量 17.4 公分時，前緣形成一組隆起構造，抬升作用明顯呈倒三角形分布，由水平分量、剪應變量得知背衝斷層作用較顯著。至 20.2 公分處，由水平分量得知俯衝作用開始進行，背衝斷層向後平移，抬升區域增加。至 23.4 公分處，背衝斷層繼續向後平移，抬升區域增加，由水平及剪應變量得知，俯衝作用發展至前一組逆衝斷層，前一組斷層再活化。至 25.3 公分處，除了前一組斷層再活化，抬升作用亦改變為集中於楔形體後半段。最後，至 27.4 公分處，再度轉變為前緣增積、沿逆衝及背衝斷層隆起之作用。

4.3.7 實驗 LF6B

本實驗採用拉動量 21 公分至 33 公分間前緣斷層的變化(圖 4.22)，當拉動量 21.1 公分時，前緣逆衝斷層有隆起構造，雖然抬升區域分布接近倒三角形，但背衝斷層發育較不顯著。而當 28.4 公分時，由水平分量及剪應變量可以觀察到，俯衝作用及斷層再活化的作用在整個楔形體中同時進行，而抬升區域亦分布於整體。至 30.2 及 31.4 公分處，由水平分量及剪應變量得知，其俯衝作用以前緣斷層為主，近前緣的第二條斷層亦有部分再活化，抬升分布亦較接近前緣。至 32.7 公分處，發育新的逆衝斷層，前緣增積及抬升作用移至新的前緣附近。

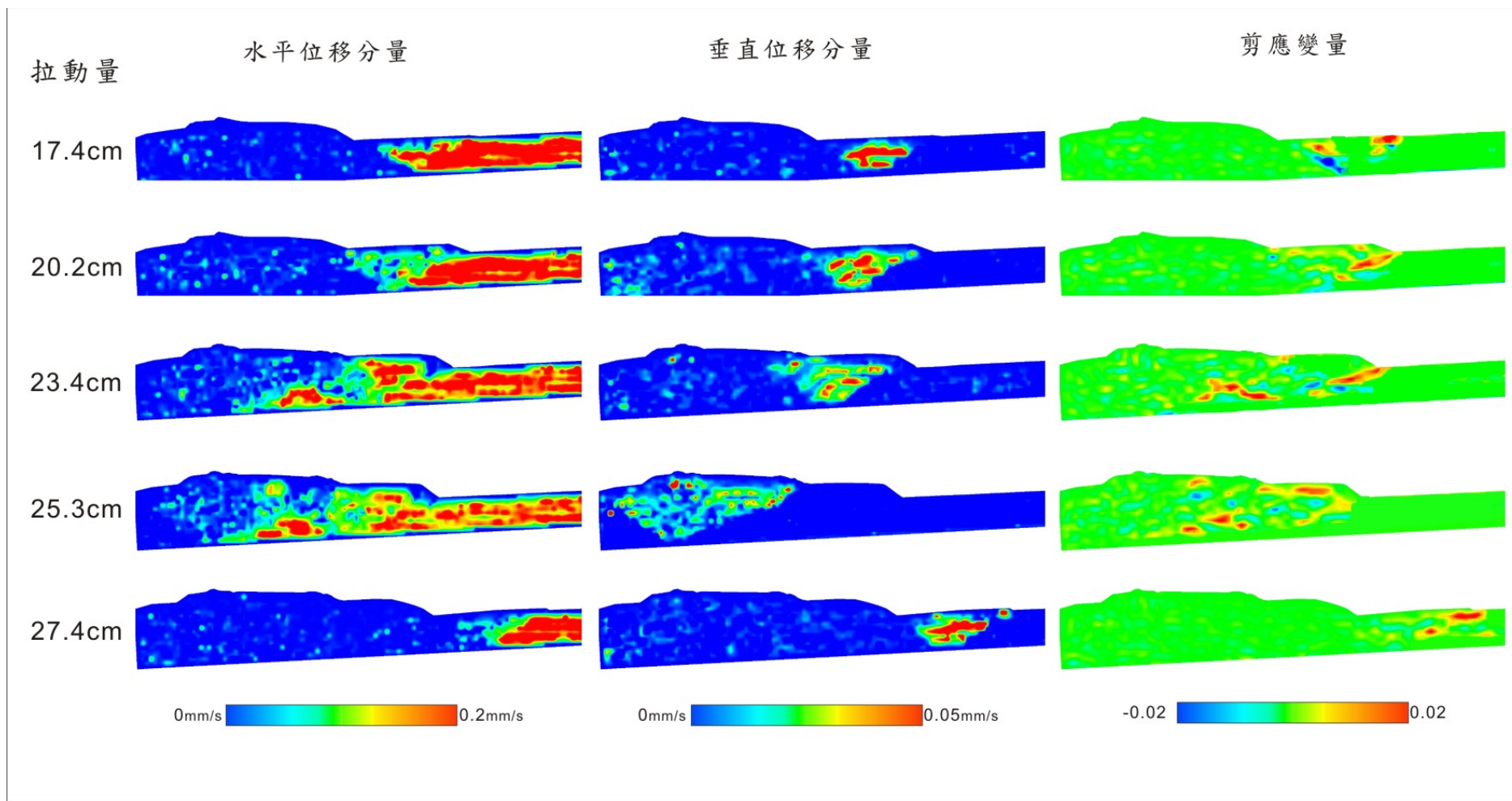


圖 4.21 實驗 LF3B 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

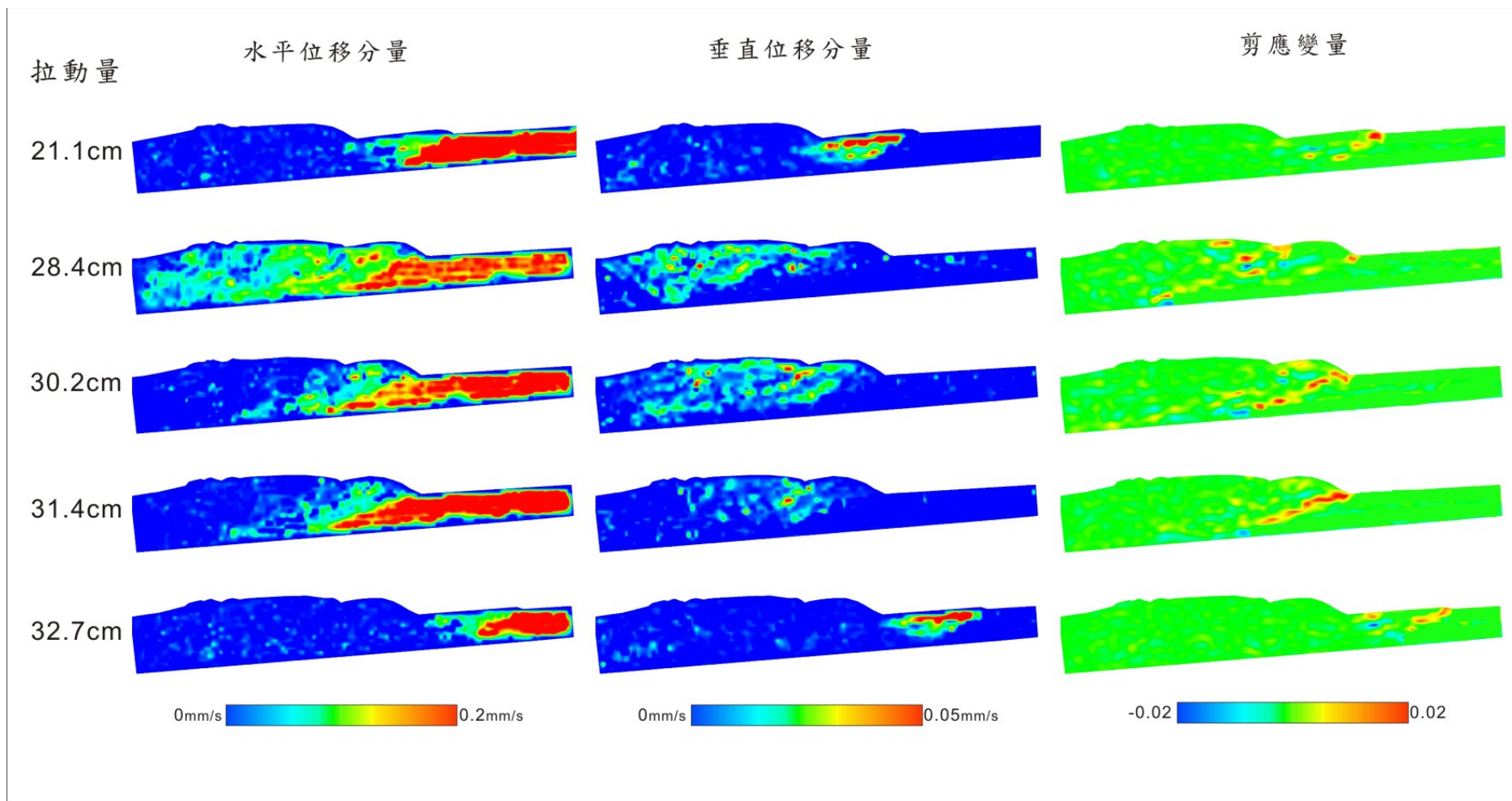


圖 4.22 實驗 LF6B 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

4.3.8 實驗 LF8B

本實驗採用拉動量 23 公分至 33 公分間前緣斷層的變化(圖 4.23)，當拉動量 23.4 及 24.4 公分時，前緣隆起構造以逆衝斷層為主，抬升區域仍為倒三角形，但前緣抬升量較高，為不對稱分布。當 28.5 及 35.4 公分時，由水平分量、剪應變量可觀察到俯衝作用及背衝斷層分布，抬升區域則分布於整體。至 32.9 公分處，前緣發育新的不對稱隆起，整個階段中並無原先斷層再活化的跡像。

4.3.9 實驗 M15L

本實驗採用拉動量 16 公分至 32 公分間前緣斷層的變化(圖 4.24)，當拉動量 16.1 公分時，前緣隆起構造是以逆斷層為主，伴隨背衝斷層發育，抬升區域為倒三角形稱分布，但主要分布於淺部。19.2 公分時，抬升及背衝斷層向後擴展，剪應變仍集中於前緣。而至 22.2 公分處，抬升轉為整體分布，由剪應變分布得知，前緣斷層有向前分布及分支的現象，並且不是由底部發育，而是由玻璃微珠層附近開始發育。至 27.3 公分處，剪應變量集中於斷層分支處的前緣部分及更內部。至 30.1 公分處，前緣形成新的逆衝斷層，剪應變及水平分量則有延伸至楔形體中央，沿玻璃微珠附近分布，而抬升量則分布於前緣及楔形體表面附近。

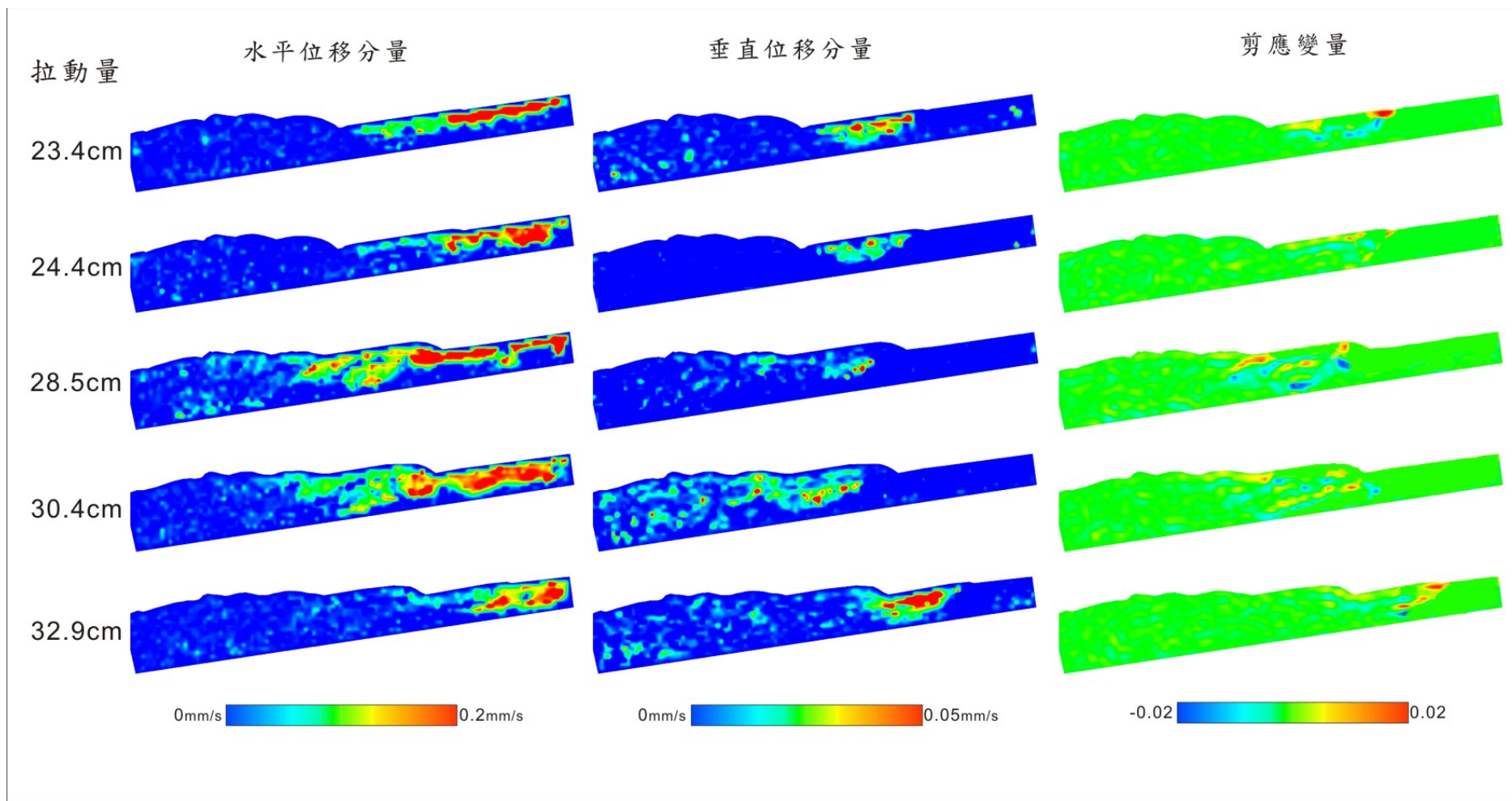


圖 4.23 實驗 LF8B 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

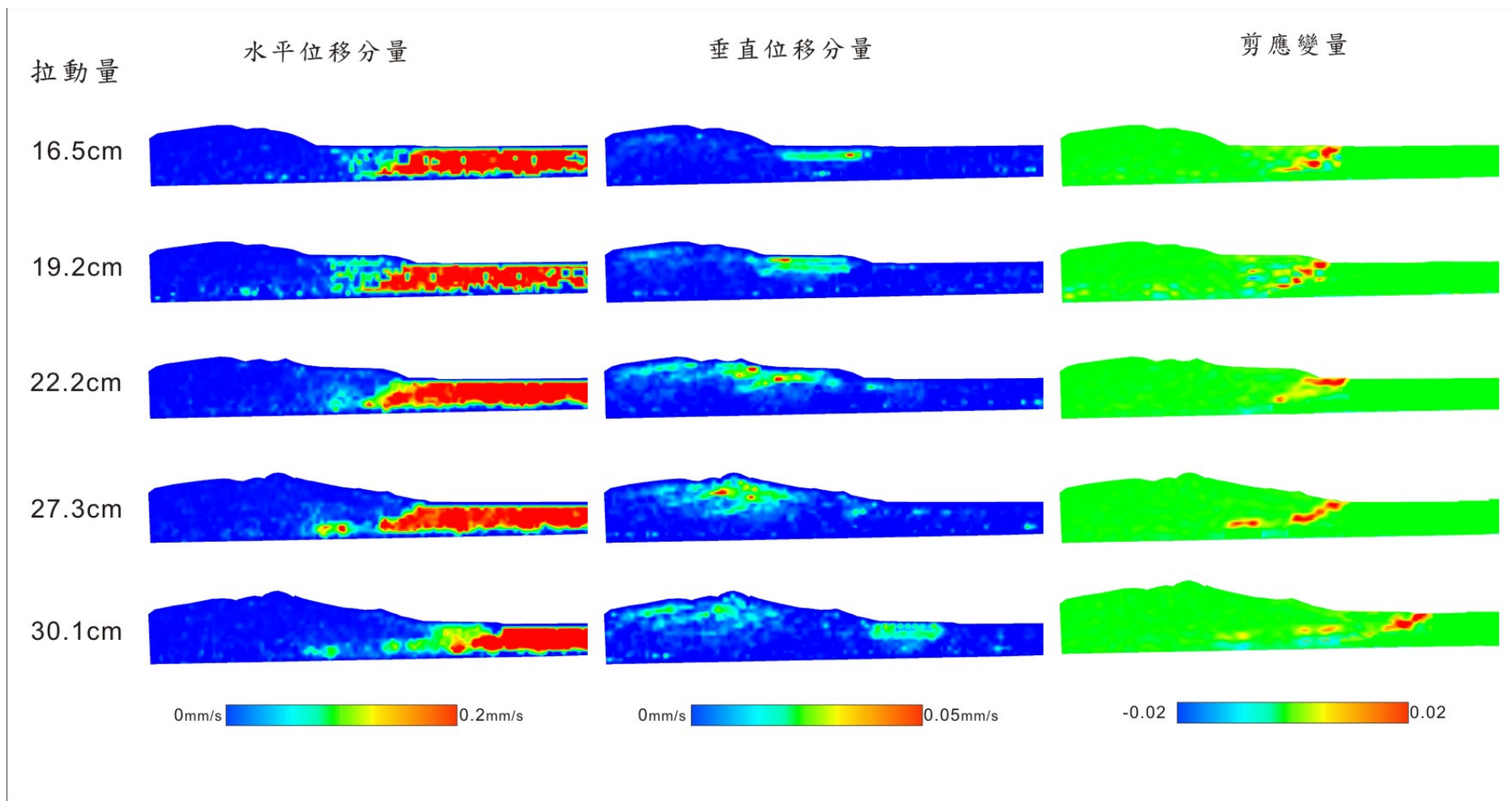


圖 4.24 實驗 M15L 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

4.3.10 實驗 M20L

本實驗採用拉動量 22 公分至 35 公分間前緣斷層的變化(圖 4.25)，當拉動量 22.2 公分時，前緣雖然發展新的斷層，但抬升大多分布於楔形體中央，由水平分量觀察到前一組斷層有俯衝作用的現象，剪應變集中於玻璃微珠深度，延伸至楔形體中央。至 25.1 公分處，抬升分布於整體，水平分量仍顯示前一組斷層之俯衝作用，剪應變除了延伸至楔形體中央，在淺部出現了分支現象，前一組斷層有再活動現象。至 30.3 公分處，水平分量的俯衝及剪應變延伸至深處。至 32.5 公分及 34.2 公分處，水平分量顯示玻璃微珠深度以下仍有俯衝作用，剪應變亦集中在此深度但較接近前緣，抬升量則集中於前緣淺部的隆起。

4.3.11 實驗 M25L

本實驗採用拉動量 14 公分至 25 公分間前緣斷層的變化(圖 4.26)，當拉動量 14.0 公分時，由水平分量可以看出在玻璃微珠層以下俯衝的情形，抬升量則分別分布前緣及楔形體中心，剪應變量則可以看出前緣逆衝斷層是由玻璃微珠層發育出來的，剪應變並延伸至前一組斷層，但前一組逆衝斷層則是有底部發育出來的，而其俯衝作用並延伸至底部。至 16.2 公分處，由水平分量觀測，前緣發育新的小型逆衝斷層，俯衝作用發生在楔形體內部，而由垂直分量則顯示前緣隆起域則向前緣擴張，剪應變則轉移至前緣新的小型逆衝斷層。至 19.5 公分處，主要的俯衝作用轉移至前緣。至 22.2 公分處，俯衝作用持續進行，抬升區域向後擴張，剪應變量在玻璃微珠層略有不連續現象，但仍向內部延伸。至 25.0 公分處，前緣由玻璃微珠層發育新的逆衝斷層，抬升區域分別分布於楔形體中央及前緣隆起區域，而剪應變量主要為前一組斷層繼續延伸之作用。



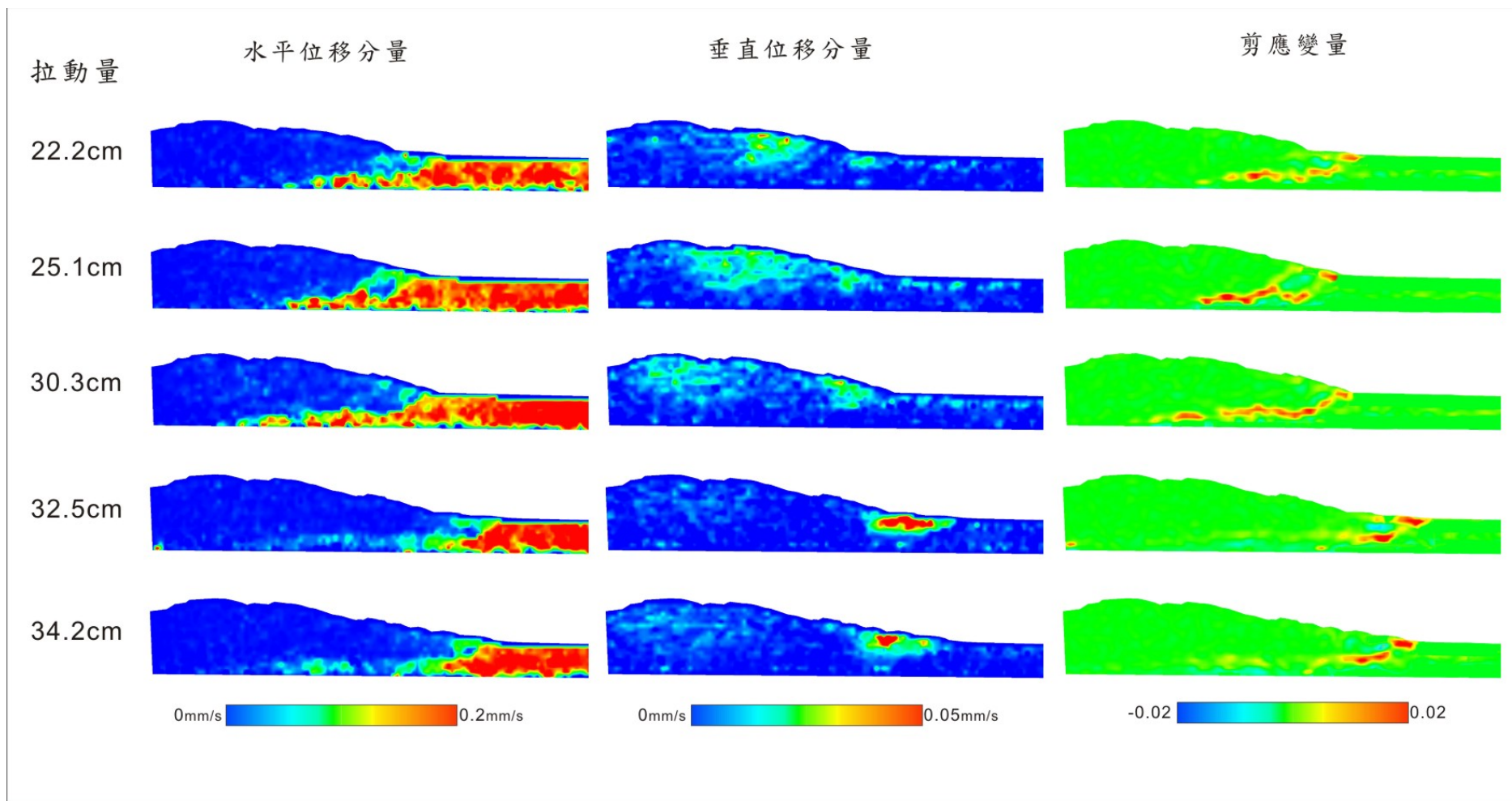


圖 4.25 實驗 M20L 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

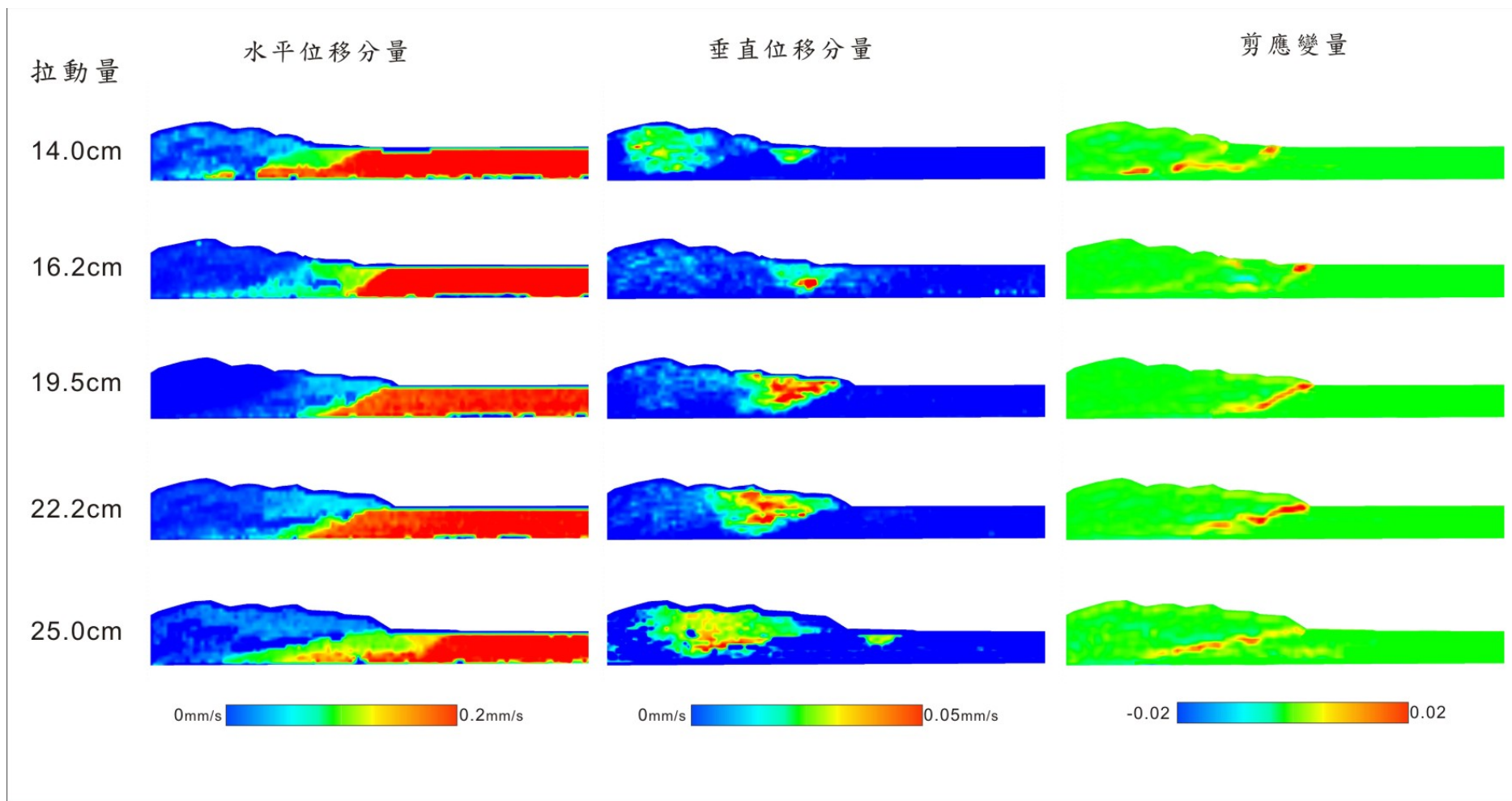


圖 4.26 實驗 M25L 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

4.3.12 實驗 M30L

本實驗採用拉動量 19 公分至 29 公分間前緣斷層的變化(圖 4.27)，當拉動量 19.6 公分時，前緣發育出斷層，水平分量及剪應變量顯示斷層玻璃微珠層以上，抬升區域集中於前緣隆起部分淺部。至 22.2 公分處，大致上與 19.6 公分處接近，剪應變在楔形體內部近玻璃微珠深度處有集中現象。至 25.2 公分處，由水平分量及剪應變量可以觀察到前緣以及前一組斷層皆有俯衝作用，抬升分布於整體楔形體中，而剪應變可以觀察到玻璃微珠層及原先斷層附近亦有集中現象。至 27.4 公分處，前緣發育新的斷層，水平分量及剪應變可以觀察到玻璃微珠層以下由前緣向內部有延伸的現象，抬升量除了主要集中於前緣之外，整體亦有抬升作用。至 28.2 公分處，水平分量及剪應變量沿玻璃微珠層延伸至楔形體內部，抬升作用集中於前緣及接近背板附近。



4.3.13 實驗 M35L

本實驗採用拉動量 15 公分至 25 公分間前緣斷層的變化(圖 4.28)，當拉動量 15.4 公分時，前緣發育逆衝斷層，抬升量集中於前緣隆起處，由剪應變量得知其伴隨逆衝斷層抬升，而楔形體內部於玻璃微珠層深度亦有剪應變集中現象。至 17.2 公分處，由水平分量及剪應變量可觀察到前一組斷層的再活動現象，抬升作用仍集中於前緣。至 18.5 公分處，抬升區域以前緣為主，而由剪應變量觀察斷層再活動現象較為明顯，玻璃微珠層附近亦有集中之現象。22.2 公分處與 18.5 公分處類似，但抬升區域分布於整體。至 24.4 公分處發育新的前緣斷層，抬升集中於隆起區域，由剪應變量得知前緣亦有背衝斷層發育，而楔形體內玻璃微珠層亦有剪應變集中之現象。

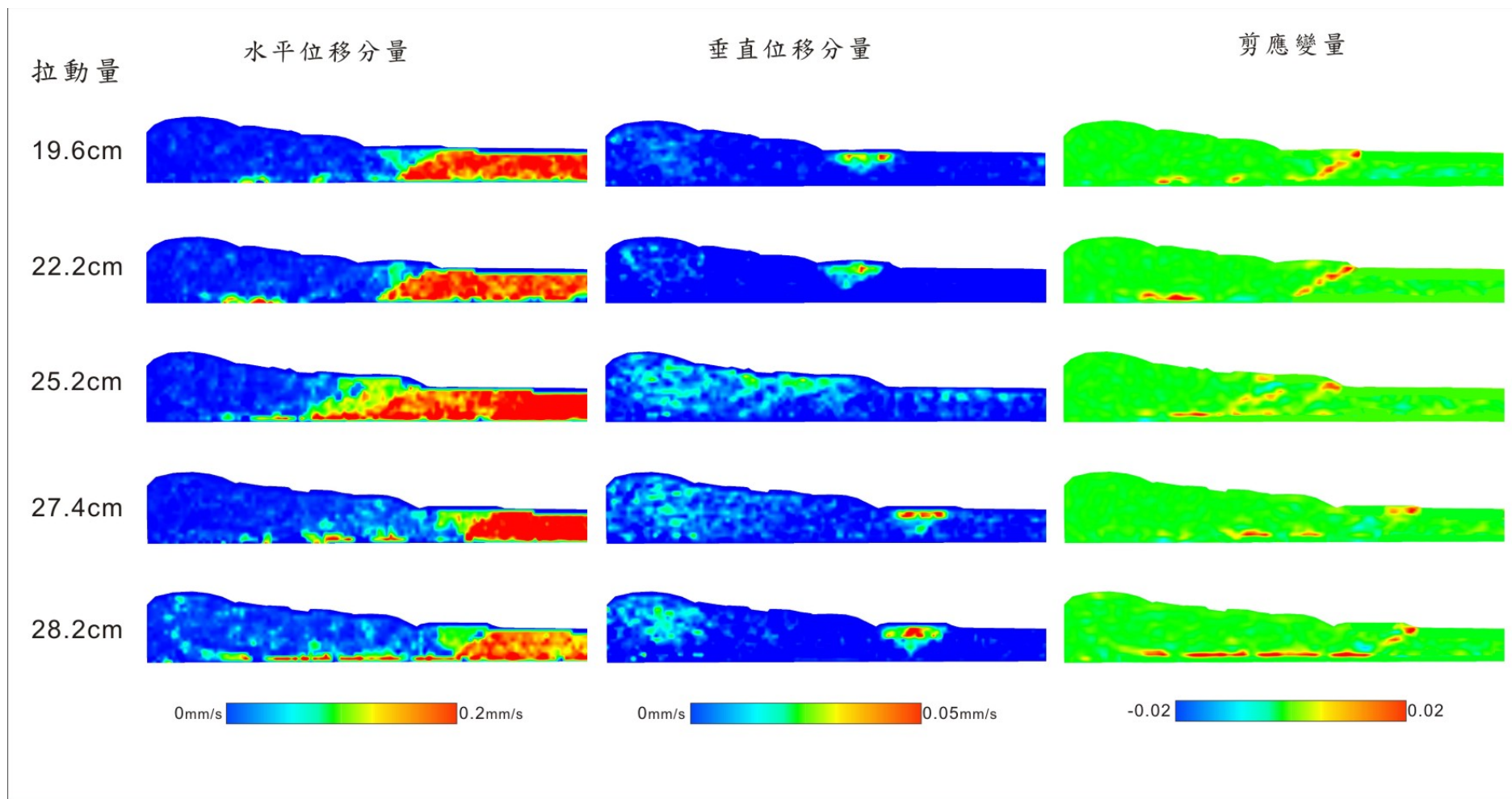


圖 4.27 實驗 M30L 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

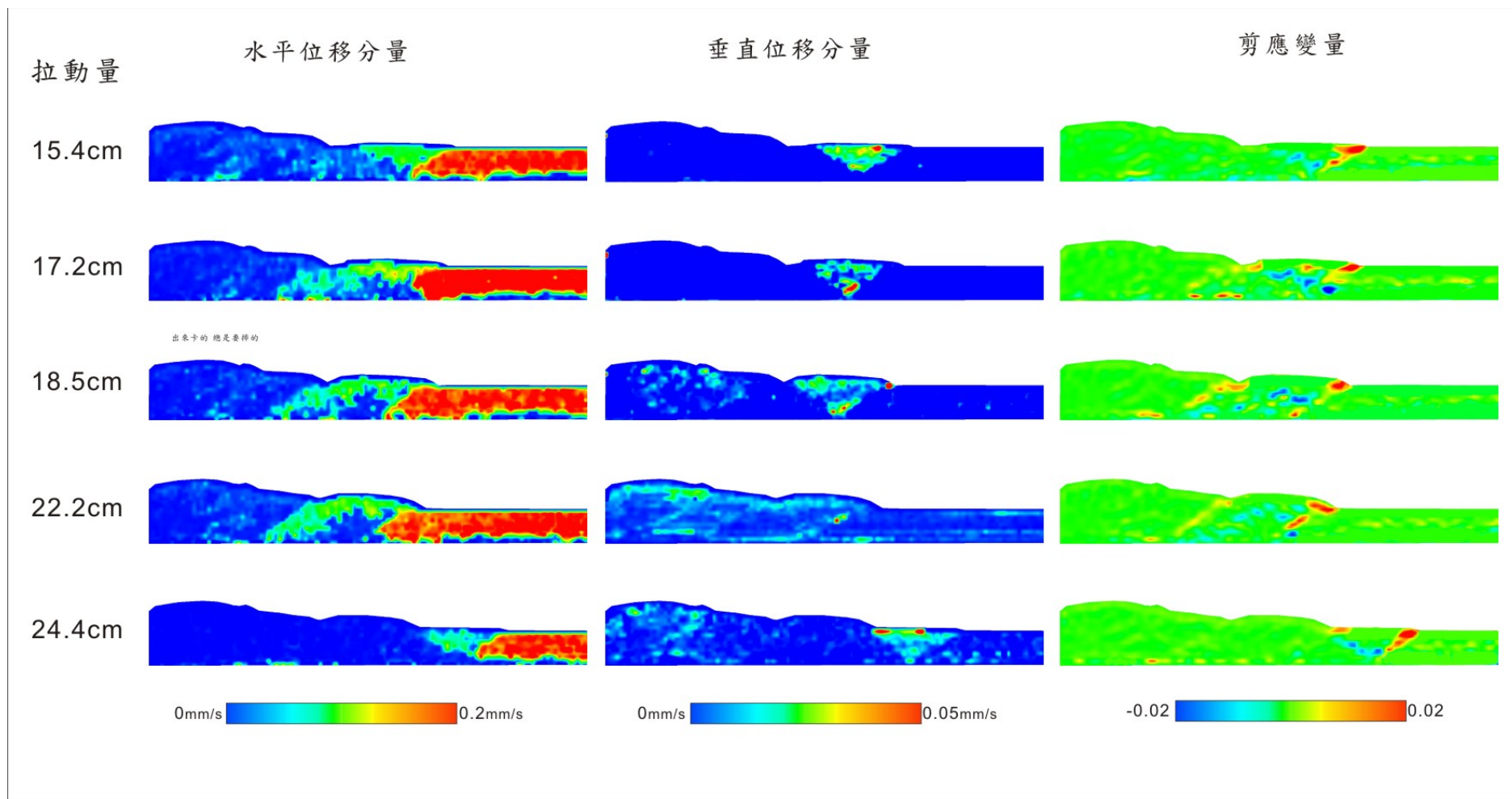


圖 4.28 實驗 M35L 影像 PIV 分析結果。分別以水平分量、垂直分量及剪應變量繪製等值圖。

五、討論與結論

5.1 底部摩擦係數

5.1.1 構造演化過程

藉由砂箱實驗影像觀察的比較結果顯示，在不同底部摩擦係數實驗中，主要的構造演化上的差異為前緣增積作用的發展情形。在高摩擦係數實驗中，當前緣斷層發育後，俯衝作用較為顯著，背衝斷層僅沿 1 至 2 條主要背衝斷層滑動，而在低摩擦係數實驗中，俯衝作用較不顯著(圖 5.1)，背衝斷層則漸次發展數條，因此抬升區域一直沿背衝斷層向後擴展(圖 5.2)。將表 4.1 及表 4.2 繪製成圖以利比較(圖 5.3、圖 5.4)，從圖 5.3 中可以發現變形前緣存在週期性發育的變化，而每次的變化都有接近之間距，變形前緣逆衝斷層的週期性大致上並不受摩擦係數影響(圖 5.3)，而摩擦係數較低時變形帶及前緣斷層的間距較寬，坡度較緩(圖 5.3、圖 5.4)。

5.1.2 前緣加積循環過程

PIV 影像分析之結果，可以將水平應變區域，以及抬升區域，作定量之分析，而第四章將 Hoth 等人，2007 所定義的前緣加積循環(frontal accretion cycle)過程，以三種不同量值的比較而得到隨拉動量之一系列的變化，包括水平分量、垂直分量及剪應變量，藉由三種量值的變化，本研究以概念上的模型，來說明量化結果在實際變形行為上的意義，由剪應變量分布的差異(圖 5.5)，可以發現底部摩擦係數較高的實驗，斷層的再活化現象較為顯著，並且有明顯的俯衝作用，楔形體內的剪應變顯著集中於原先的斷層，而低底部摩擦係數實驗中，剪應變則集中於前緣，內部並無集中的現象，俯衝作用亦不明顯。而底部摩擦係數的主要影響可經由兩種不同的模型來說明(圖 5.6)。當摩擦係數=0.55 時，前緣逆衝斷層於初始前緣

抬升為倒三角形分布，進入俯衝期階段後，前一組斷層偶有再活化之現象，而抬升量主要集中於俯衝作用階段，最後，當新的斷層發育出來時，原先斷層進入偶爾發生滑動的再活化階段；當摩擦係數=0.33 時，前緣逆衝斷層初始抬升亦為倒三角形分布，而進入俯衝階段後，抬升區域向後擴，代表背衝斷層向後的漸次發展，而再活化現象亦包括背衝斷層，因此抬升區域較廣。

5.1.3 參數影響討論

底部摩擦係數之實驗，兩者皆可觀察到三種階段的前緣增積變形(圖 5.6)，其中主要的抬升及變形於俯衝的階段，而兩者主要不同為自俯衝階段開始，會出現顯著差異：

1. 當摩擦係數較低時，背衝斷層的向後漸次發育，並且有數組背衝斷層，抬升現象則集中於前緣至背衝斷層之間，因此，相對於整個楔形體而言，前緣隆起區域為上盤，抬升集中於此處，對楔形體的錐度，是有降低的效果。背衝斷層的發育，直接受到底部摩擦係數影響，由於底部容易滑脫，下盤物質不易被帶入增積岩體內部，所以以背衝斷層型式發育，加上前緣抬升可能造成錐度低於臨界狀態，為了達到平衡，背衝斷層會向後平行漸次發育，以增加楔形體後方之抬升量。
2. 摩擦係數較高時，俯衝作用會較為顯著，少有背衝斷層之發育，僅在初期時伴隨逆衝斷層發育一組而形成前緣隆起區域。主要抬升的分布上則於俯衝作用斷層之上均勻分布，並且再活化階段會繼續抬升。俯衝作用的發育主要為前緣斷層上盤的深處物質與較高摩擦的砂紙相互鎖住，下盤帶入之物質亦鎖於深部，因此逆衝斷層會向內部俯衝，而楔形體相對俯衝作用區域為上盤，此區域的抬升作用發育於後方，對於整個楔形的錐度，則是增加的效果。因此符合增積楔形體理論指出，錐度隨底部摩擦係數增加(式 1.1, Dahlen, 1990)。

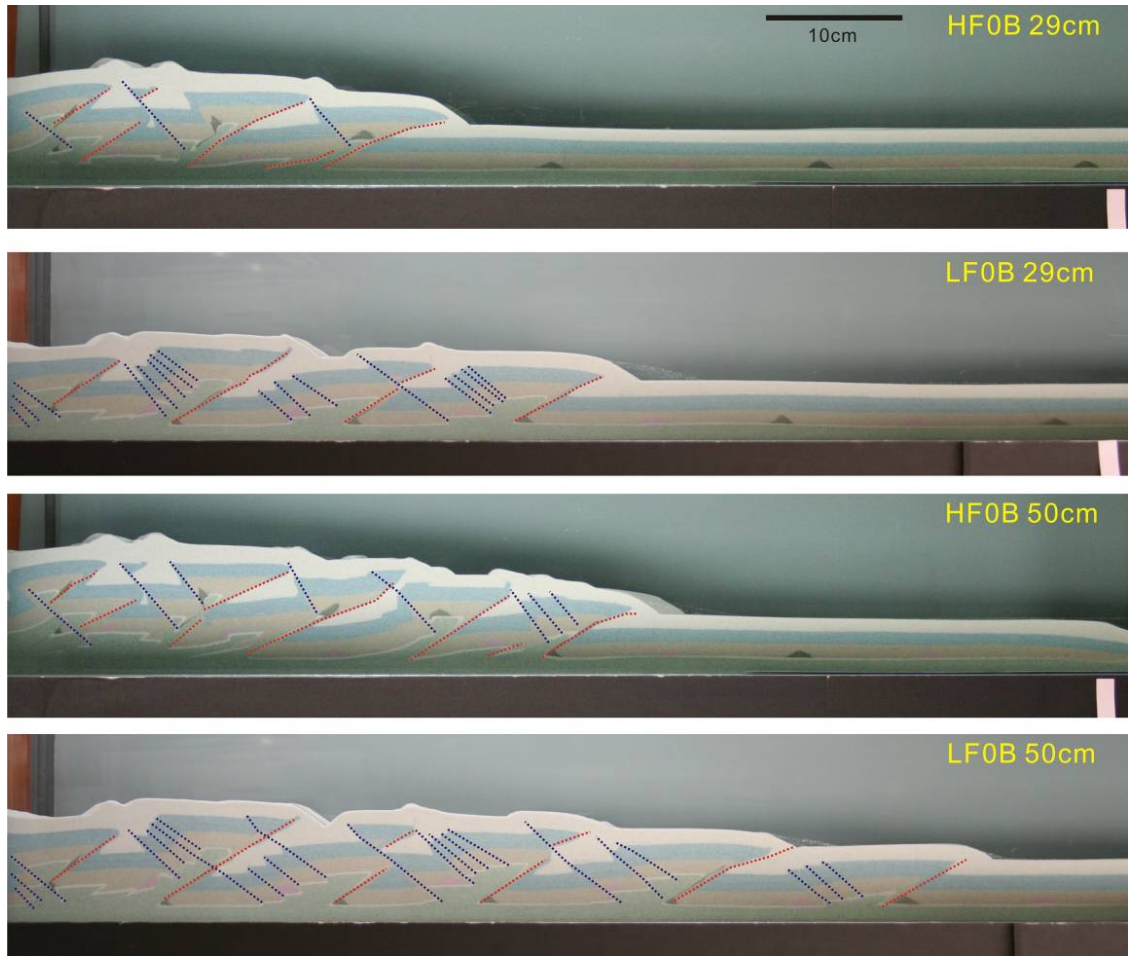


圖 5.1 不同底部摩擦係數之構造分布。HF 為高摩擦係數，LF 為低摩擦係數。

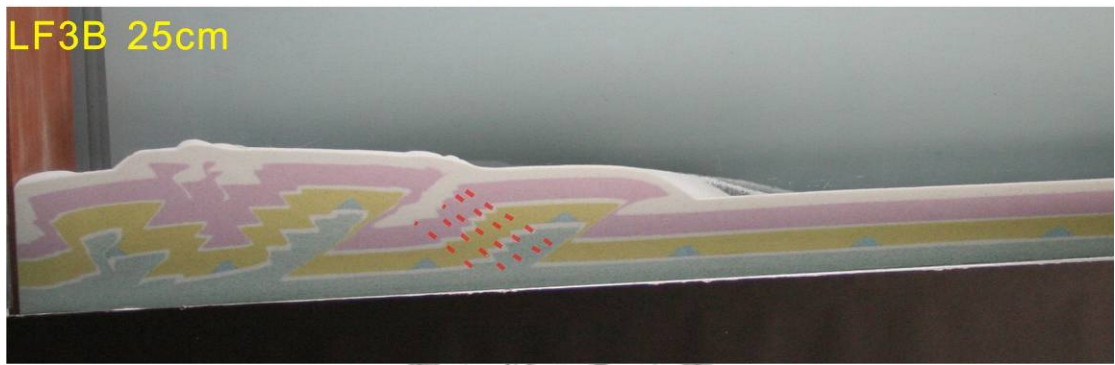
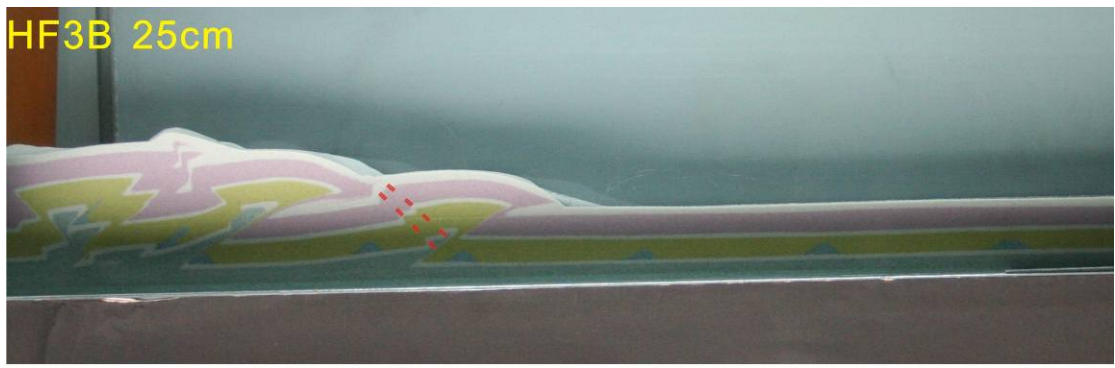


圖 5.2 背衝斷層擴展示意圖。



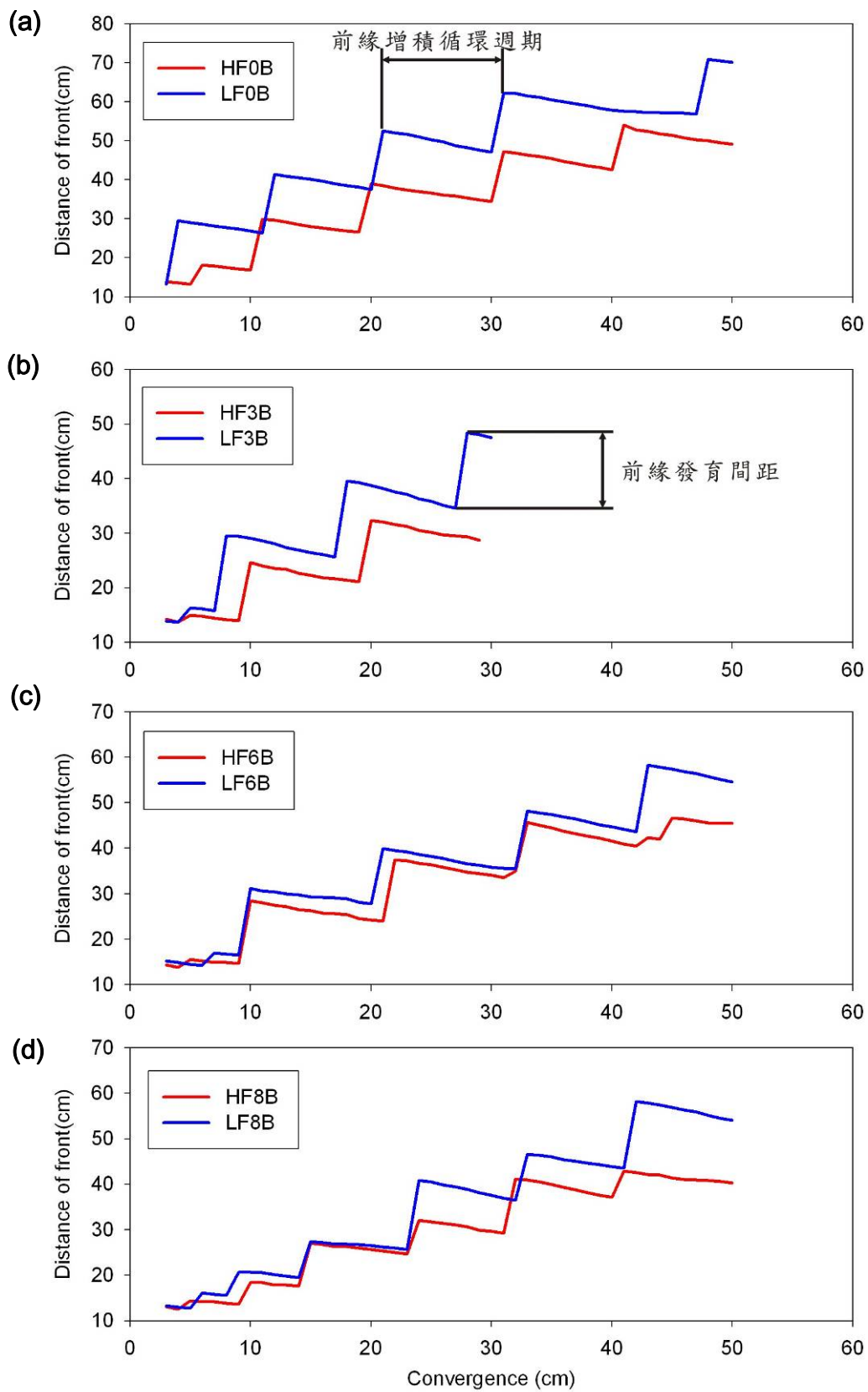


圖 5.3 不同摩擦係數下變形前緣隨拉動量之變化。(a) $\beta=0^\circ$; (b) $\beta=3^\circ$; (c) $\beta=6^\circ$; (d) $\beta=8^\circ$ 。

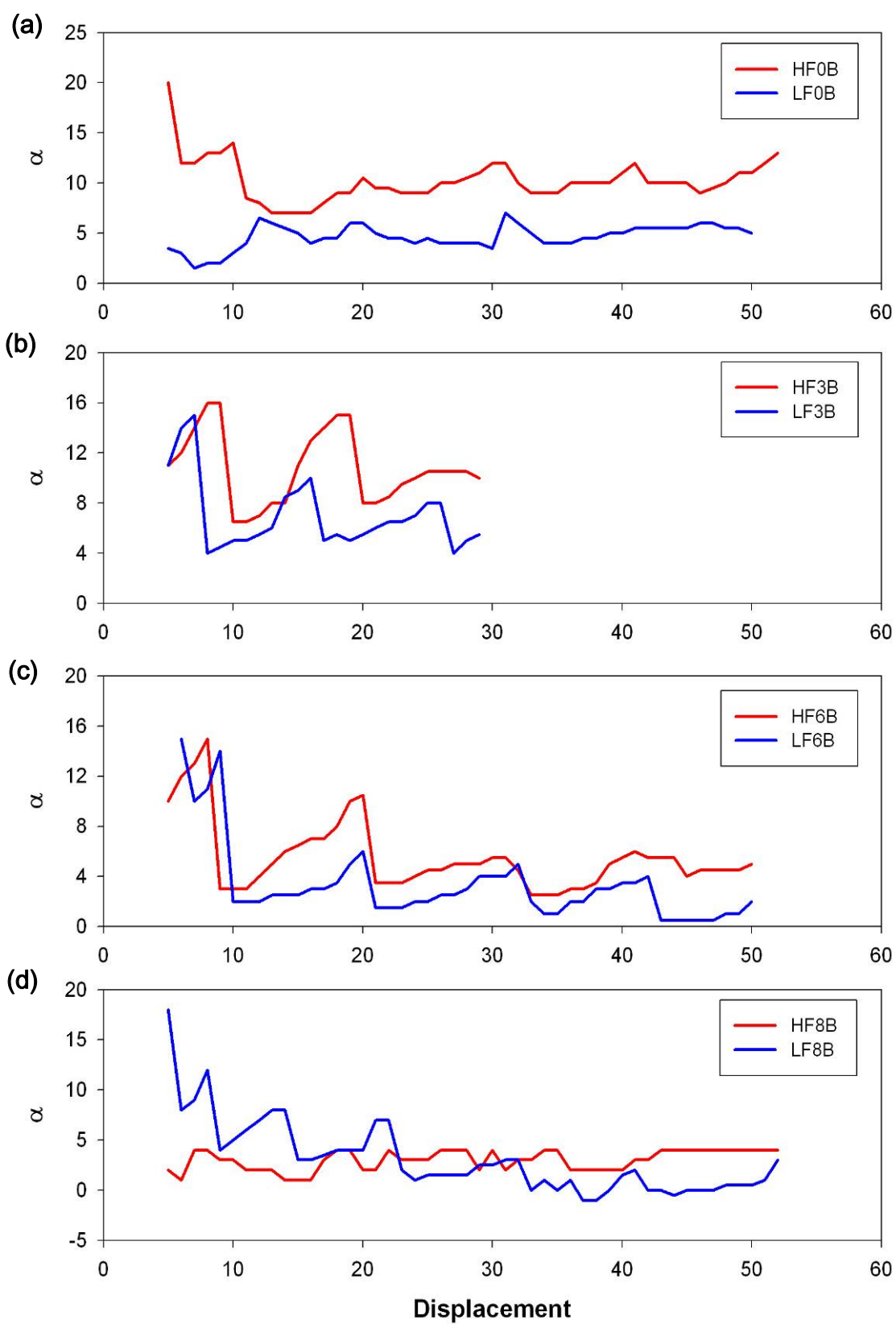


圖 5.4 不同摩擦係數下坡度隨拉動量之變化。(a) $\beta=0^\circ$ ；(b) $\beta=3^\circ$ ；(c) $\beta=6^\circ$ ；(d) $\beta=8^\circ$ 。

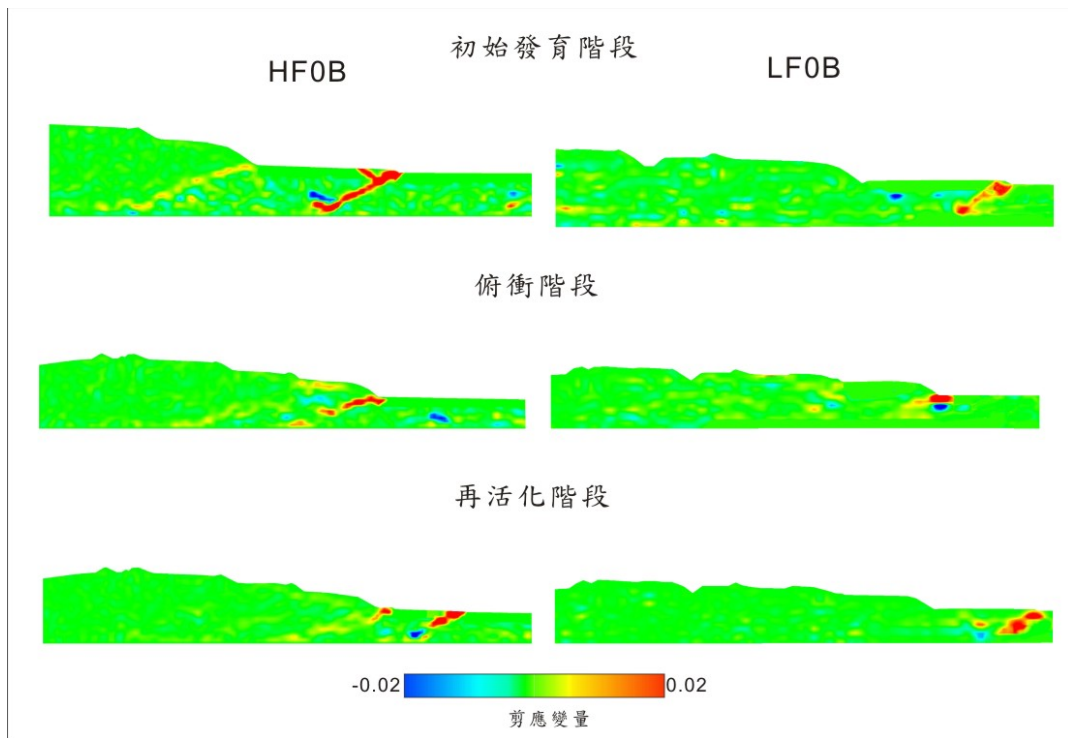


圖 5.5 不同階段不同摩擦係數剪應變量比較圖。

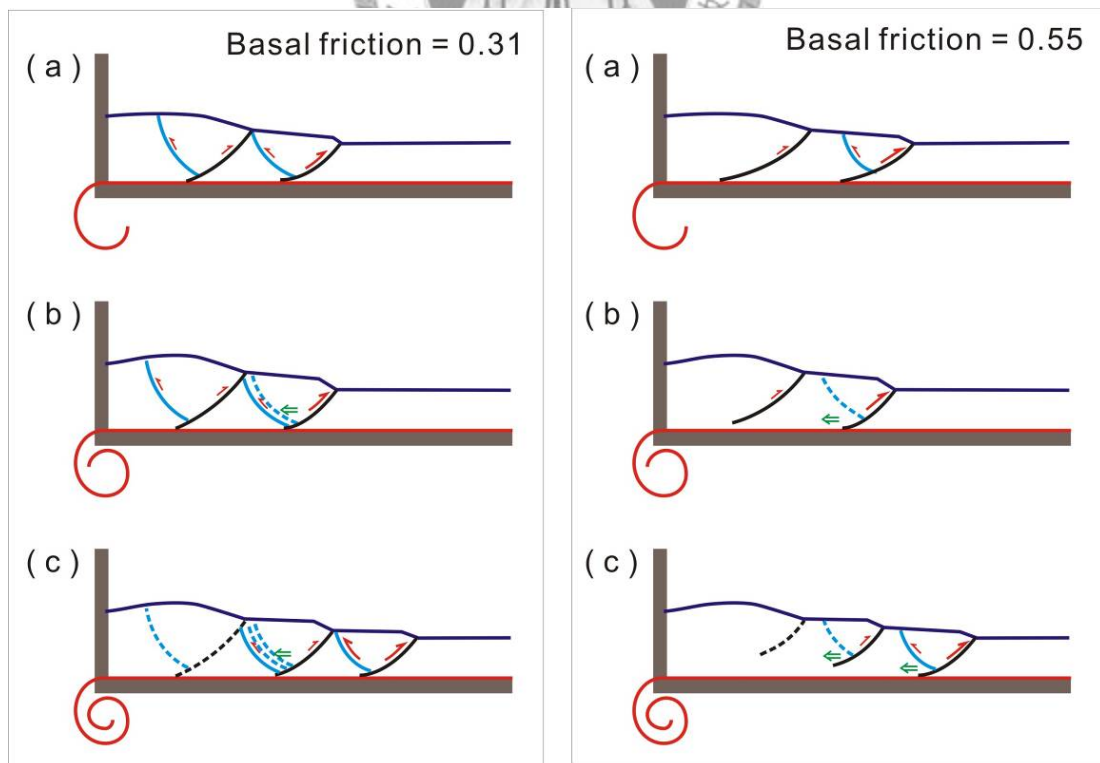


圖 5.6 不同摩擦係數之前緣增積循環模型。(a)斷層初始發育期；(b)俯衝期；(c)再活化期/新的斷層初始發育期。

5.2 滑脫面傾角

5.2.1 構造演化過程

當滑脫面傾角增加時，俯衝作用及背衝斷層再活化現象較明顯(圖 5.7、圖 5.8)，並且於高摩擦係數時有明顯的疊瓦狀逆衝構造(imbricate thrust)，如圖 5.9 黑色斷層序列所示。而透過表 4.1 及表 4.2 繪製比較圖(圖 5.10、圖 5.11)，變形帶寬度大致上在低傾角時較寬，而前緣斷層間距並無太大差異，而發育週期由傾角 0 度至 6 度時則先增加，而後至 8 度時減少(圖 5.10)。坡度(α)大致上隨傾角增加而減少(圖 5.11)，符合增積楔形體理論(Critical Taper Theory, Dahlen, 1990)，並且世界上的實際例子來看，大多位於本實驗設定之摩擦係數 0.31~0.55 所得到之線性關係之間(圖 5.12)。



5.2.2 前緣加積循環過程

以 PIV 分析結果來看，在不同傾角的實驗中，前緣逆衝斷層發育的循環本身無顯著的差異，同樣有三種不同階段，並且於前緣初始發育階段不明顯，但於俯衝作用階段有顯著不同變化；首先，在高底部摩擦係數實驗中，俯衝作用時期時的無底部傾角實驗，抬升區分散於楔形體中，而底部傾角為 8 度時，抬升區域集中於數組逆衝斷層中，呈疊瓦狀的抬升，因此斷層再活化作用顯著(圖 5.13)；而於低底部摩擦係數實驗中，於高傾角實驗的俯衝作用時期水平分量來看，背衝斷層發育比低傾角實驗結果顯著，並且角度較高(圖 5.14)。因此於低傾角時抬升作用多發生於內部並且不易造成斷層滑動，提高傾角時則沿逆衝及背衝斷層抬升，以斷層再活化作用得到局部隆起，以維持楔形體臨界狀態，此隆起所再活化之斷層可以延伸至底部滑脫面，因此有助於深部物質局部的抬升作用(圖 5.15)。

5.2.3 參數影響討論

與不同底部摩擦係數相似之處，在於前緣主要逆衝、背衝斷層作用，受到底部摩擦係數影響較大，因此當滑脫面傾角增加時，高摩擦係數之實驗會有更顯著的俯衝作用，並且藉由疊瓦狀構造使底部增積及內部抬升增加，但低摩擦係數則受到原先連續之背衝斷層，以及較易發育背衝斷層之影響，俯衝作用進行時，不易形成疊瓦狀構造，則沿部分背衝斷層作用。因此若單純考慮滑脫面傾角，則因重力而造成俯衝作用程度較高，並且此因素對於斷層新增及初始發育無顯著影響，而由斷層構造進入楔形體之後的俯衝及再活動為主。進一步重力所影響之機制，由圖 1.2 之靜力平衡狀態可知，底部主要受正向力及摩擦力影響，但摩擦力亦受正向力影響，而重力在具傾角之滑脫面上則有平行及垂直分量，平行於滑脫面上之分量屬真正的重力作用，垂直於滑脫面分量為正向力作用，在相同摩擦係數的條件下，當傾角增加時，作用於滑脫面上之正向力減少，摩擦力亦減少，理應如低摩擦係數般產生隆起及背衝斷層，然而實際上在俯衝作用時以俯衝作用為主，因此，此種俯衝作用為重力牽引所造成。前緣初始時期前緣沉積物厚度較薄，重力作用不顯著，而當其進入俯衝作用時期，前緣增厚而強化了俯衝作用，加上高底部摩擦係數原先主要為逆衝斷層，因此形成疊瓦狀構造，低底部摩擦係數則沿著背衝斷層發育。

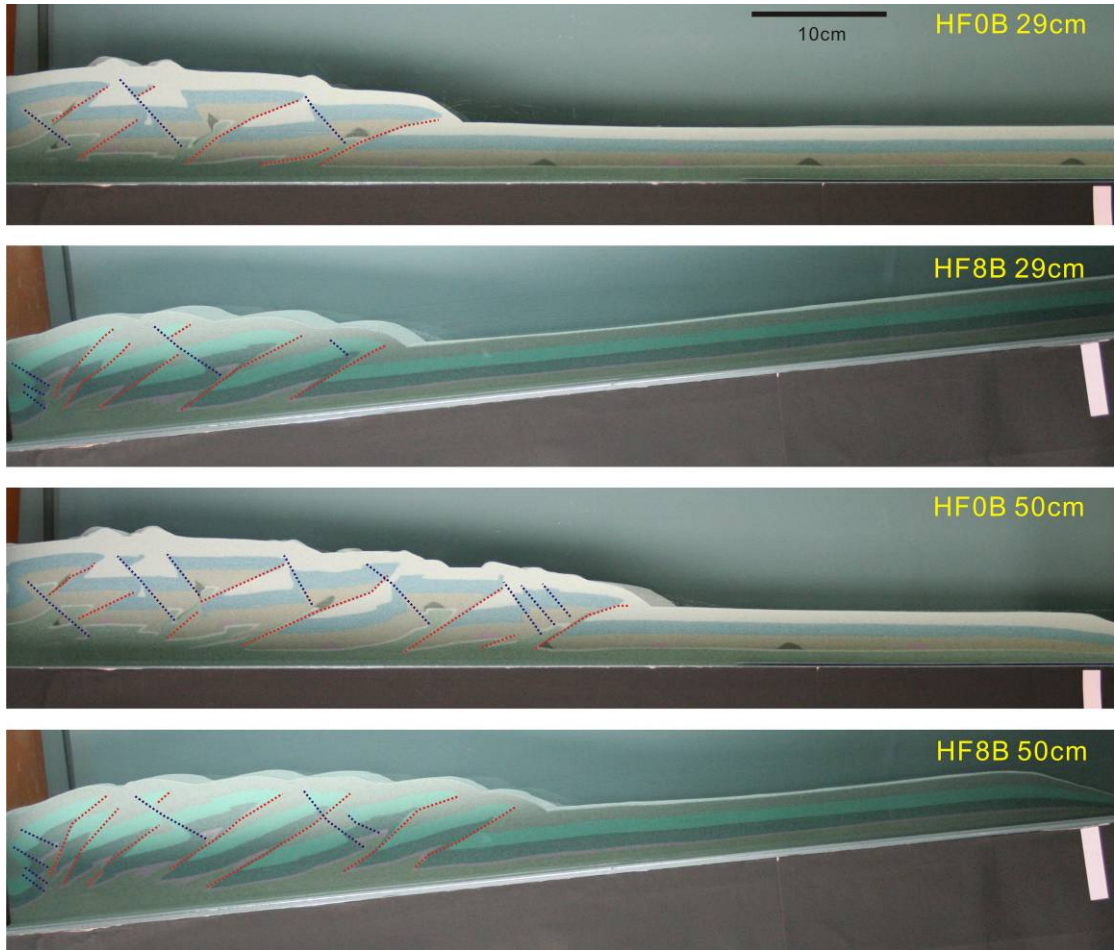


圖 5.7 高底部摩擦係數下不同滑脫面傾角之構造分布。0B 傾角 0 度，8B 傾角 8 度。

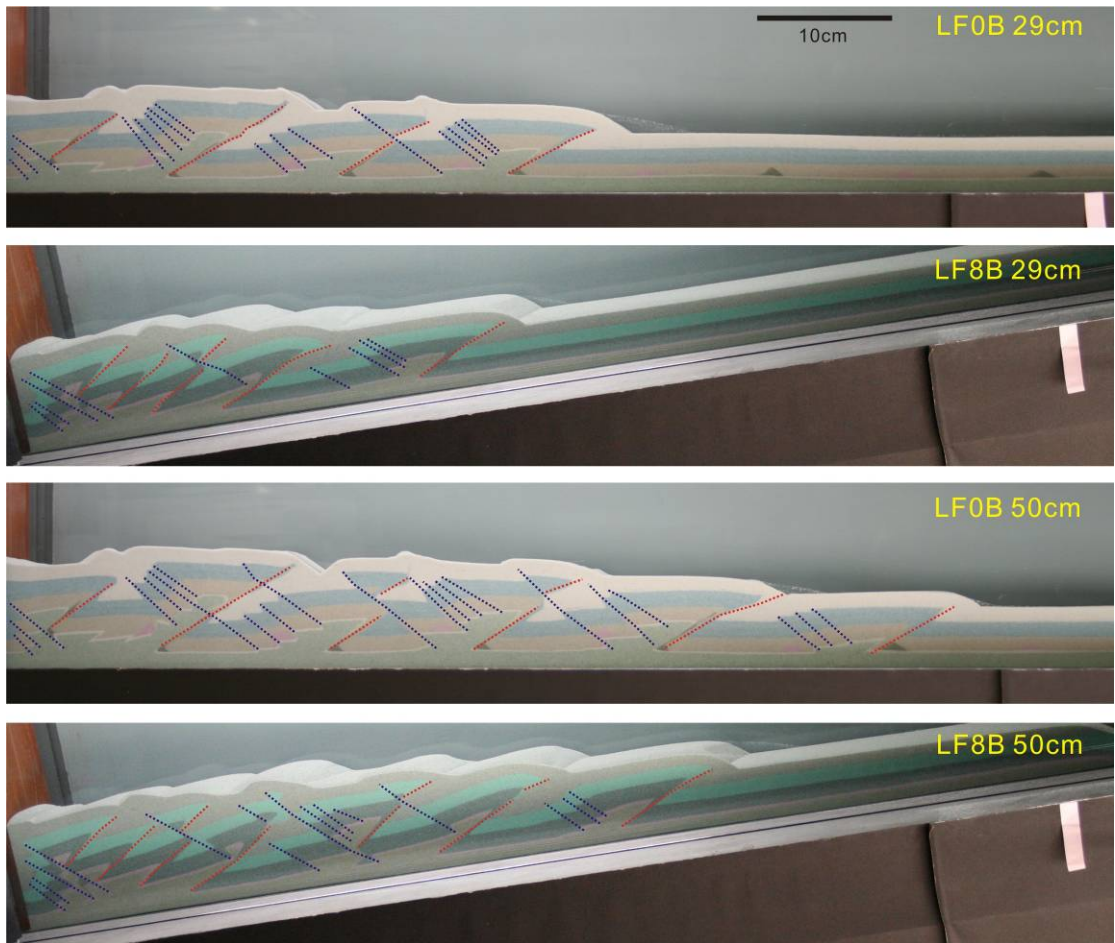


圖 5.8 低底部摩擦係數下不同滑脫面傾角之構造分布。0B 傾角 0 度，8B 傾角 8 度。

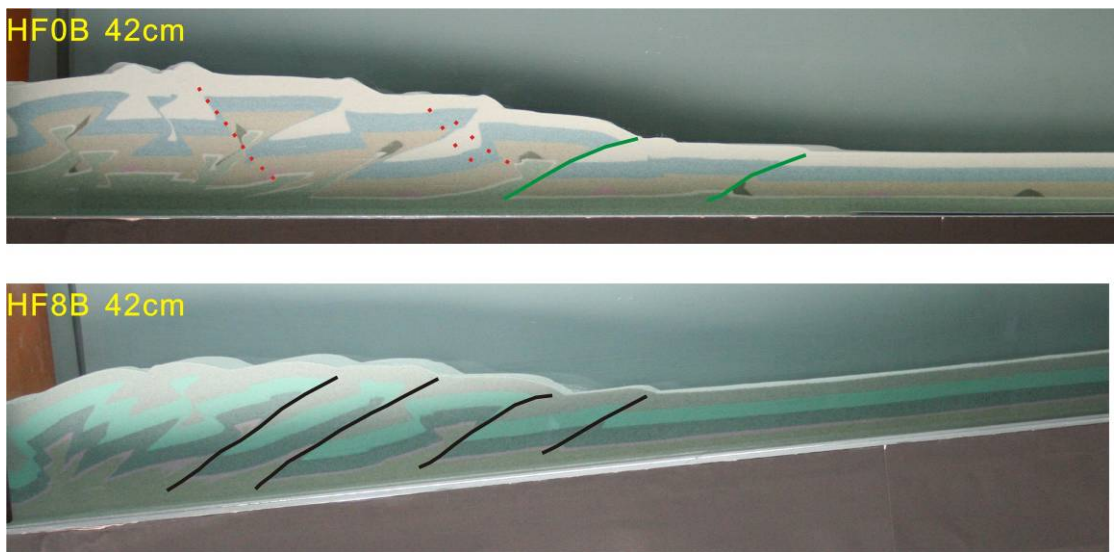


圖 5.9 疊瓦狀構造示意圖。

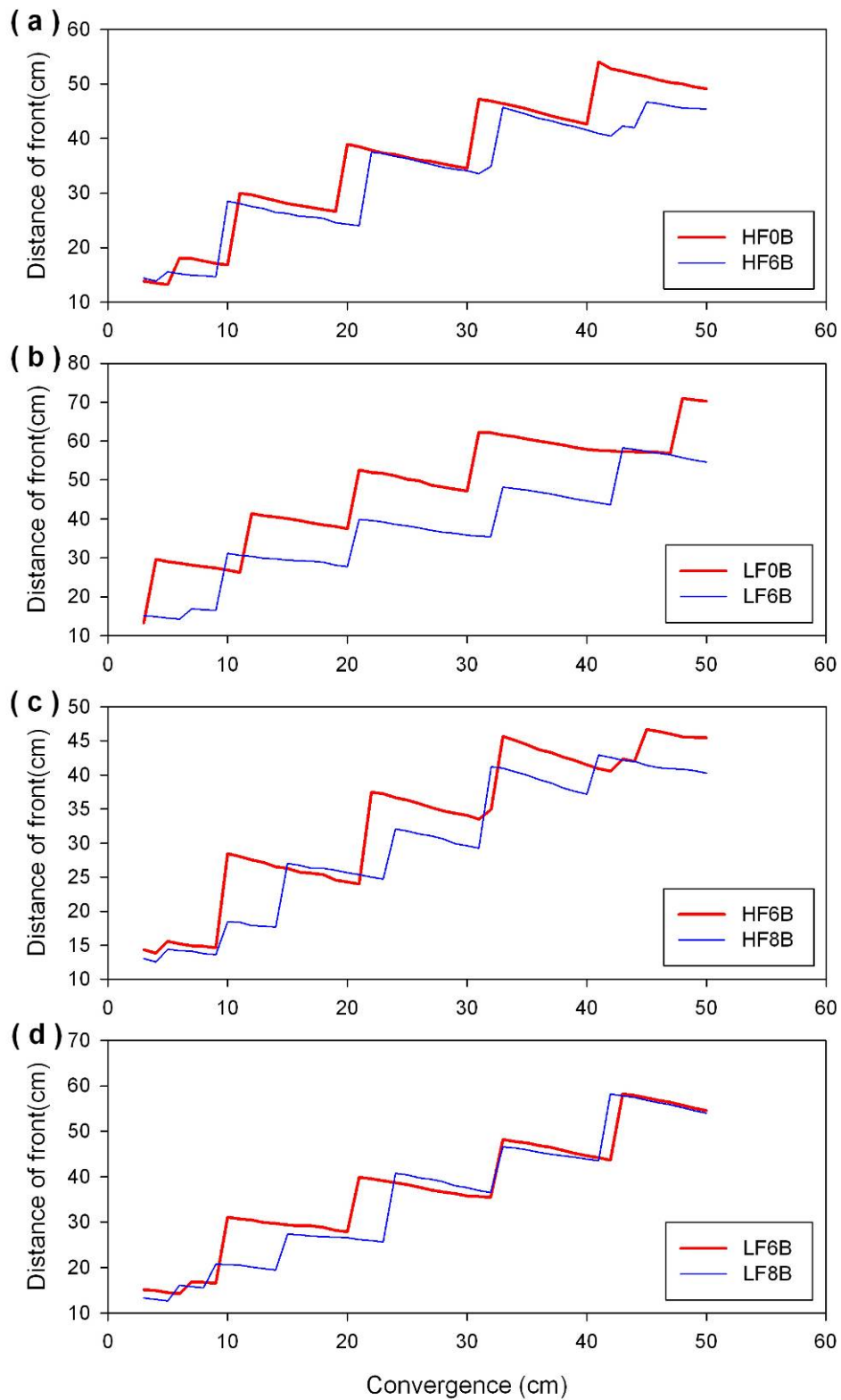


圖 5.10 不同滑脫面傾角下變形前緣隨拉動量之變化。(a) 摩擦係數=0.55， $\beta=0^\circ$ 及 $\beta=6^\circ$ ；(b) 摩擦係數=0.31， $\beta=0^\circ$ 及 $\beta=6^\circ$ ；(c) 摩擦係數=0.55， $\beta=6^\circ$ 及 $\beta=8^\circ$ ；(d) 摩擦係數=0.31， $\beta=6^\circ$ 及 $\beta=8^\circ$ 。

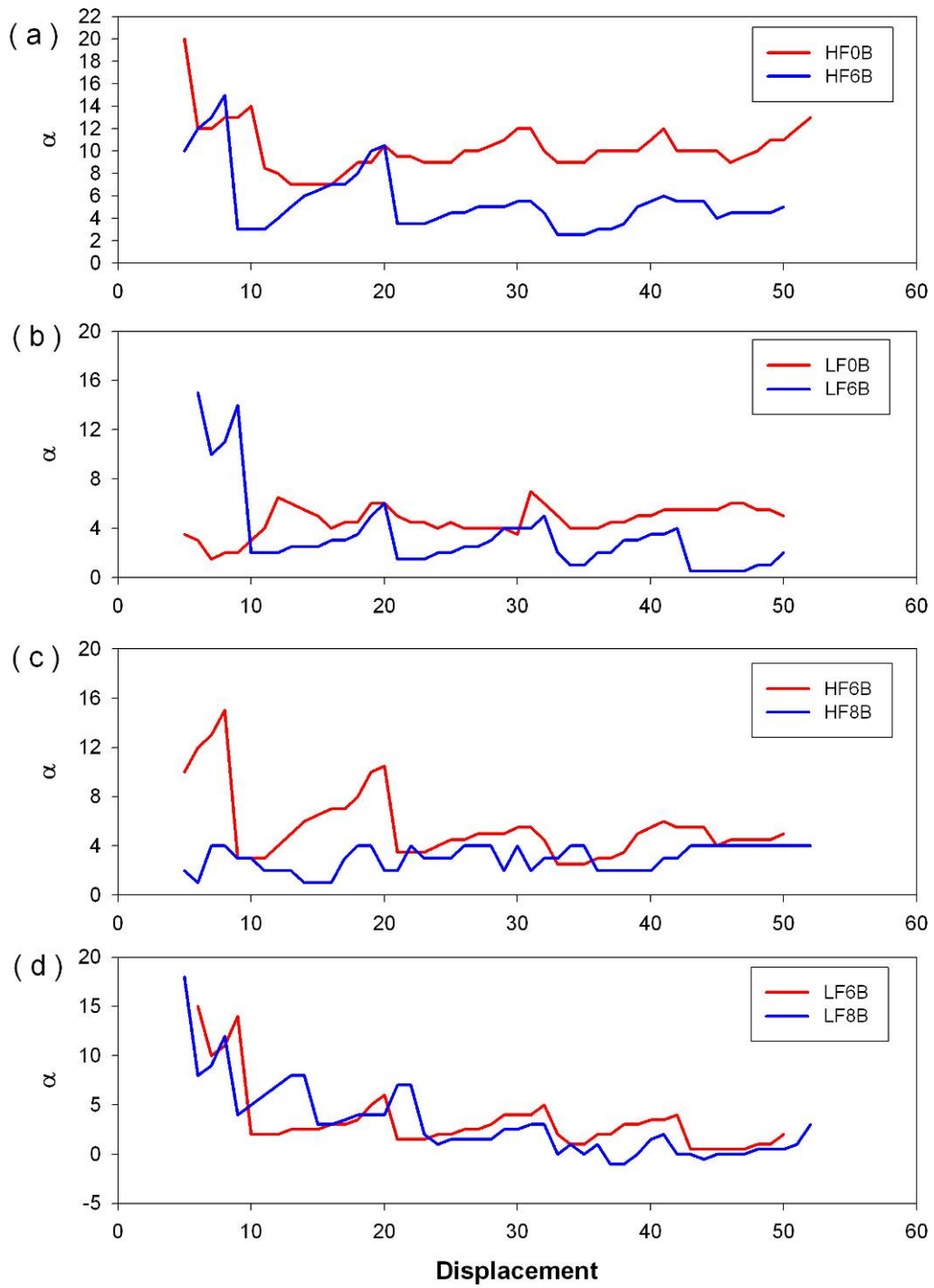


圖 5.11 不同滑脫面傾角下表面坡度隨拉動量之變化。(a) 摩擦係數=0.55, $\beta=0^\circ$ 及 $\beta=6^\circ$; (b) 摩擦係數=0.31, $\beta=0^\circ$ 及 $\beta=6^\circ$; (c) 摩擦係數=0.55, $\beta=6^\circ$ 及 $\beta=8^\circ$; (d) 摩擦係數=0.31, $\beta=6^\circ$ 及 $\beta=8^\circ$ 。

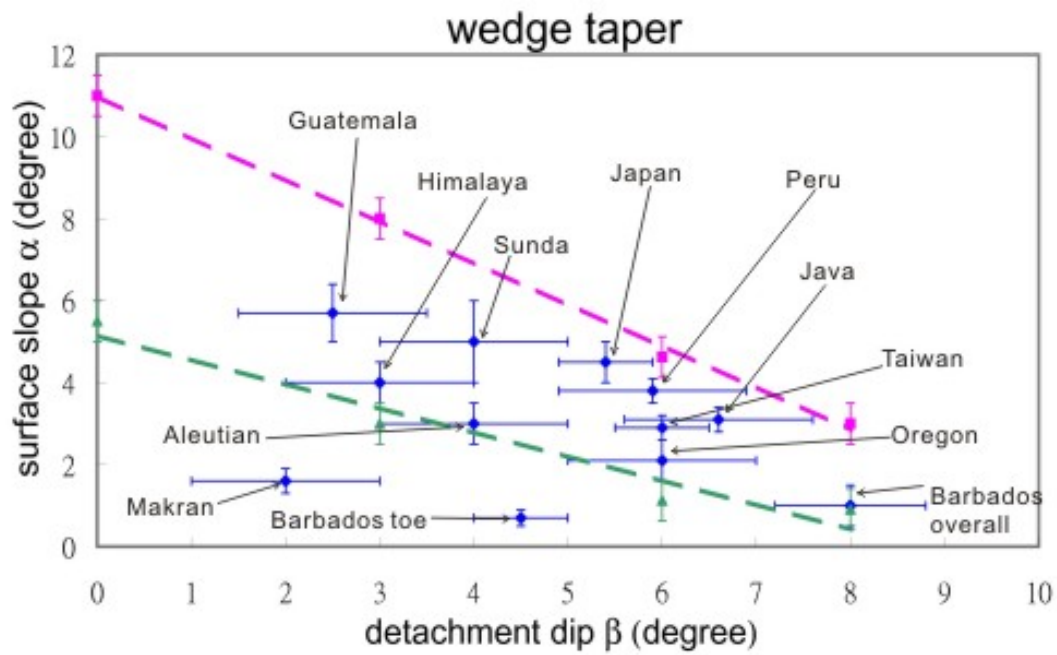


圖 5.12 實驗室得到之維度與世界上之實例比較。紅色部分為底部摩擦係數 = 0.55，綠色部分為底部摩擦係數 = 0.31。

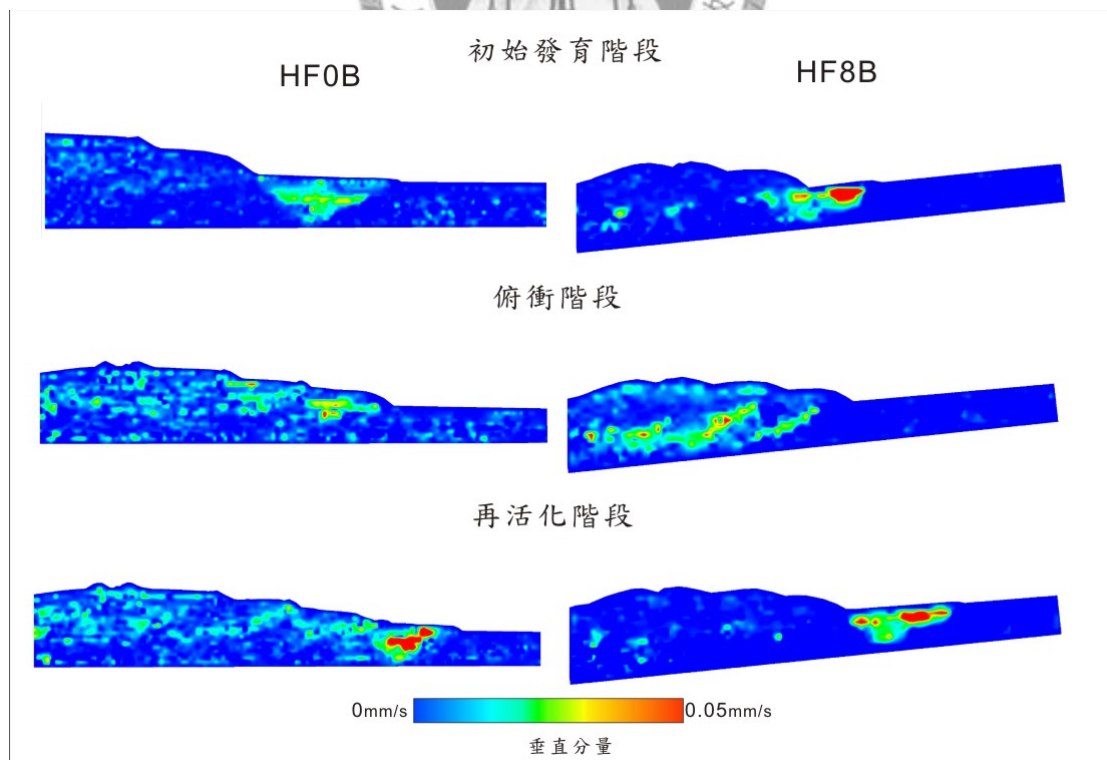


圖 5.13 高摩擦係數下不同滑脫面傾角不同階段之垂直速度分量比較圖。

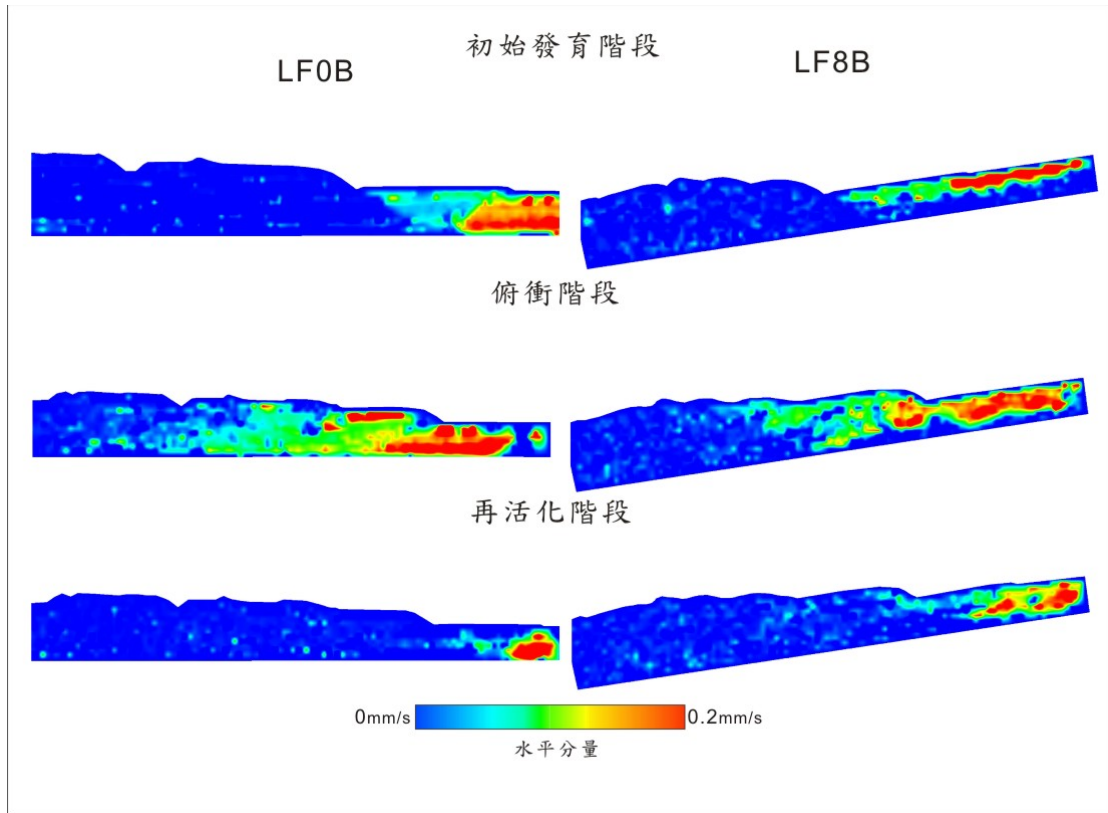


圖 5.14 低摩擦係數下不同滑脫面傾角不同階段水平速度分量比較圖。

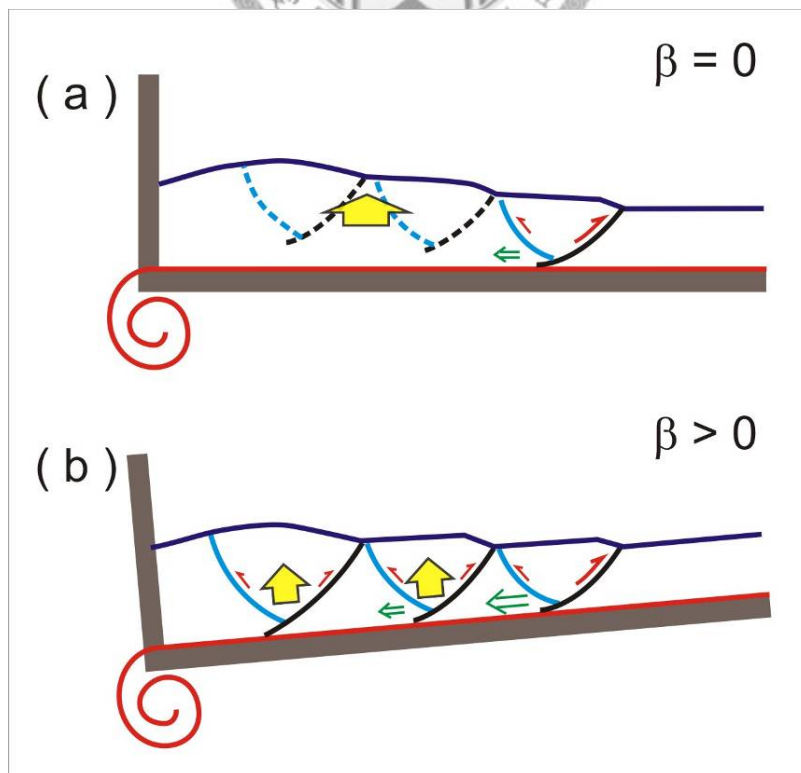


圖 5.15 滑脫面傾角對於俯衝作用的影響。

5.3 原始弱面深度

5.3.1 構造演化過程

以變形特徵來看，在實驗 M15L~M25L，主要的逆衝斷層由底拖帶發育，而在主要逆衝斷層間則為小的逆衝斷層由玻璃微珠層往上發育；實驗 M30L 及 M35L 的逆衝斷層階由玻璃微珠層向上發育(圖 5.16，圖 5.17)。而實驗 M15L 的俯衝作用比不含玻璃微珠層之實驗(HF0B)更顯著(圖 5.18)。透過表 4.3 繪製比較圖(圖 5.19)，以變形前緣變化來看，在玻璃微珠存在深度較淺時(1.5~2.5cm)，在主要斷層發育期間會形成 1 至 2 組小型逆衝斷層，而實驗 M15L 的主要逆衝斷層的斷層間距較大，底部滑脫面不受玻璃微珠影響；而在玻璃微珠存在深度較深時(3.0~3.5cm)，所有的主要逆衝斷層皆由玻璃微珠層發育，而且變形特徵與摩擦係數=0.31 時的特性接近，實驗 M30L 和 M35L 比較，M35L 的斷層間距及發育週期都較長(圖 5.19)。

5.3.2 前緣加積循環過程

根據不同的玻璃微珠層的深度，可分為較淺(1.5~2.5cm)及較深(3.0~3.5cm)兩系列探討(圖 5.20)。當玻璃微珠層較淺時，前緣斷層在進入俯衝階段後，除了本身的俯衝作用，前緣亦會由玻璃微珠層形成新的小型逆衝斷層(約 1~2 組)，小型逆衝斷層的發育週期短，並且不會有再活化作用，因此，抬升量由主要的逆衝斷層俯衝作用來提供沉積物輸入，此外，玻璃微珠層以下的物質結合斷層再活化作用向楔形體內部俯衝，並且此現象在玻璃微珠層最淺時最明顯(實驗 M15L，圖 5.21)；而當玻璃微珠層較深時，其加積循環過程與底摩擦係數=0.31 時相近，俯衝作用時抬升區域會向後擴展而形成一系列背衝斷層，但主要差異為俯衝作用時，前一組逆衝斷層再活化現象較顯著，而背衝斷層不會再活化，由 PIV 影像結果可以觀察到剪應變向內部延伸，因此玻璃微珠層則成為相較基底滑脫面較淺之滑脫面(圖 5.22)。與 Hoth, et. al., 2007 研究中使用單一玻璃微珠層比較，在玻璃微珠層深度較

淺時，在俯衝作用的過程中，於玻璃微珠層產生大量的俯衝作用的滑動或是於玻璃微珠層形成分支斷層，與本研究結果相符；而當玻璃微珠層較深時，則玻璃微珠層形成另一組新的且離表面較近的滑脫面，而無類似之行為。

5.3.3 玻璃微珠與剪應變之關係

在含玻璃微珠層之實驗當中，楔形體深部可以觀察到由俯衝作用或是底部滑脫(detachment)作用造成之剪應變集中之現象(圖 5.23)，因此，本研究將剪應變量區域定義由前緣逆衝斷層的剪應變集中區一直延伸至深部，來探討剪應變區域分布隨拉動量的變化(圖 5.24)，並將其隨時間變化以線性方式計算剪應變區域擴展之速率(圖 5.25)。由於剪應變的計算上純粹為量化計算，不考慮俯衝及滑脫作用，純粹只考慮玻璃微珠層附近之剪應變集中現象，因此可觀察到兩種趨勢，當玻璃微珠存在深度較淺時，其剪應變集中區域的擴展速率隨深度減少，但玻璃微珠層深度大於 3 公分時，剪應變集中區的擴展速率則隨深度增加。因此，玻璃微珠層對於楔形體內部變形的影響主要為其存在深度較深時，在玻璃微珠層內易形成新的滑脫面；而深度較淺時，則易由玻璃微珠層形成斷層分支或是小型逆衝斷層，並且更強化主要斷層之俯衝作用。

5.3.4 參數影響討論

對於原始存在弱面深度的影響，其深度於較淺處(2.5 公分以上)及深處(3 公分以下)有不同之特性。位於較深處時，在玻璃微珠層之下無變形行為，而在此層之上之變形行為則與低摩擦係數實驗接近，顯示該層成為一個相對基底滑脫面較淺且摩擦係數較低之滑脫面，此滑脫面越深，底部與玻璃微珠層之剪應變越集中，因此由圖 5.25 可知滑脫作用隨弱層變深更易向內部延伸。玻璃微珠位於較淺處時，主要逆衝斷層有更明顯的俯衝作用，而於玻璃微珠層發育小型逆衝斷層時，

滑移量集中於小型逆衝斷層，小型逆衝斷層底部並有滑脫現象，並且在短時間內即恢復以原先主要逆衝斷層的俯衝作用，其結果與 Hoth et al., 2007 之演化相同(圖 1.7)，此淺部不連續面對前緣發育的循環會出現新的階段週期—延伸斷層階段，並且在發育小型逆衝斷層時，後方的前一組主要斷層會暫時減少俯衝作用之活動，但此影響僅限於位於整體沉積物較接近淺部之處。上述之小型逆衝斷層由玻璃微珠層發育過程中，其玻璃微珠層會形成一段滑脫作用至前一組逆衝斷層，因此此區域之沉積物會繼續進入楔形成前一組斷層之俯衝作用，故由圖 5.25 亦顯示，其俯衝作用隨深度減少之原因可能為玻璃微珠層以下沉積物厚度較薄所致。

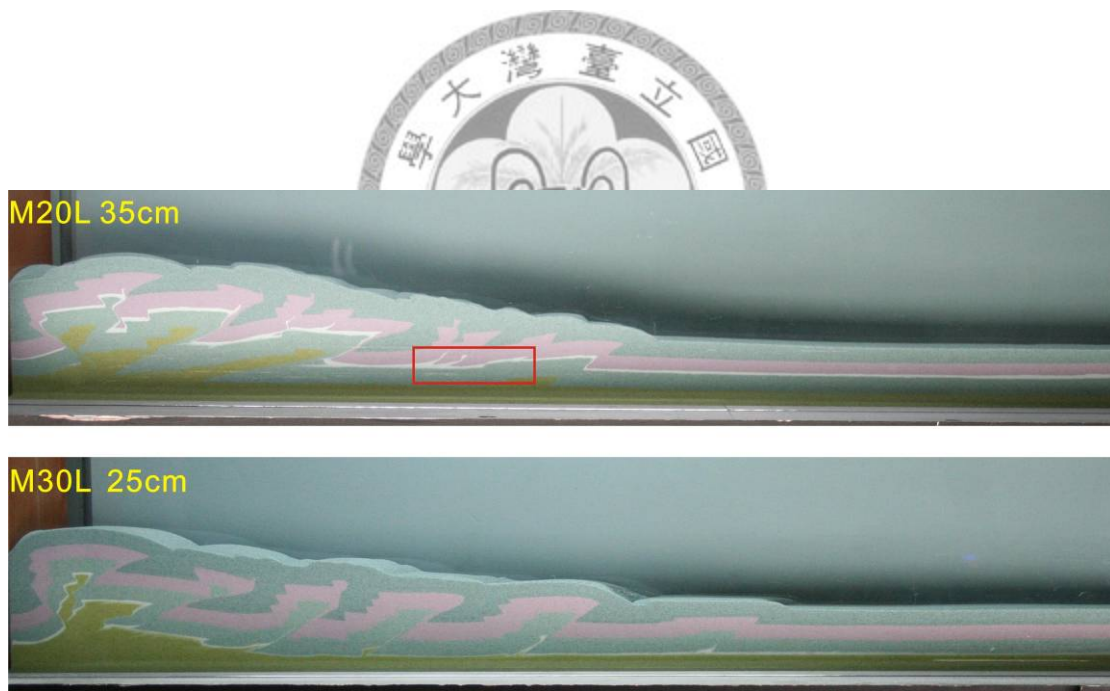


圖 5.16 由玻璃微珠層發育之小型逆衝斷層。

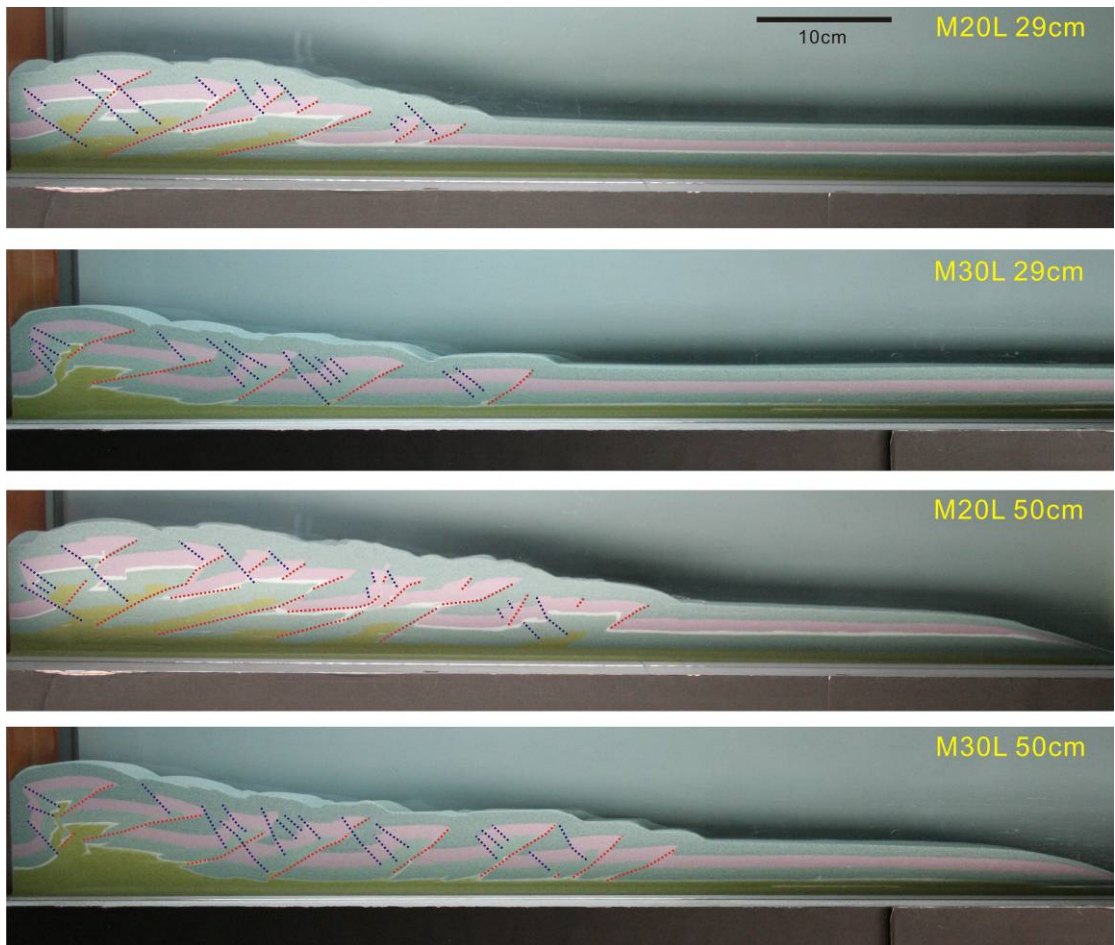


圖 5.17 不同玻璃微珠層存在深度之構造分布。M20L 是深度位於 2 公分處，M30L 則是位於 3 公分處。

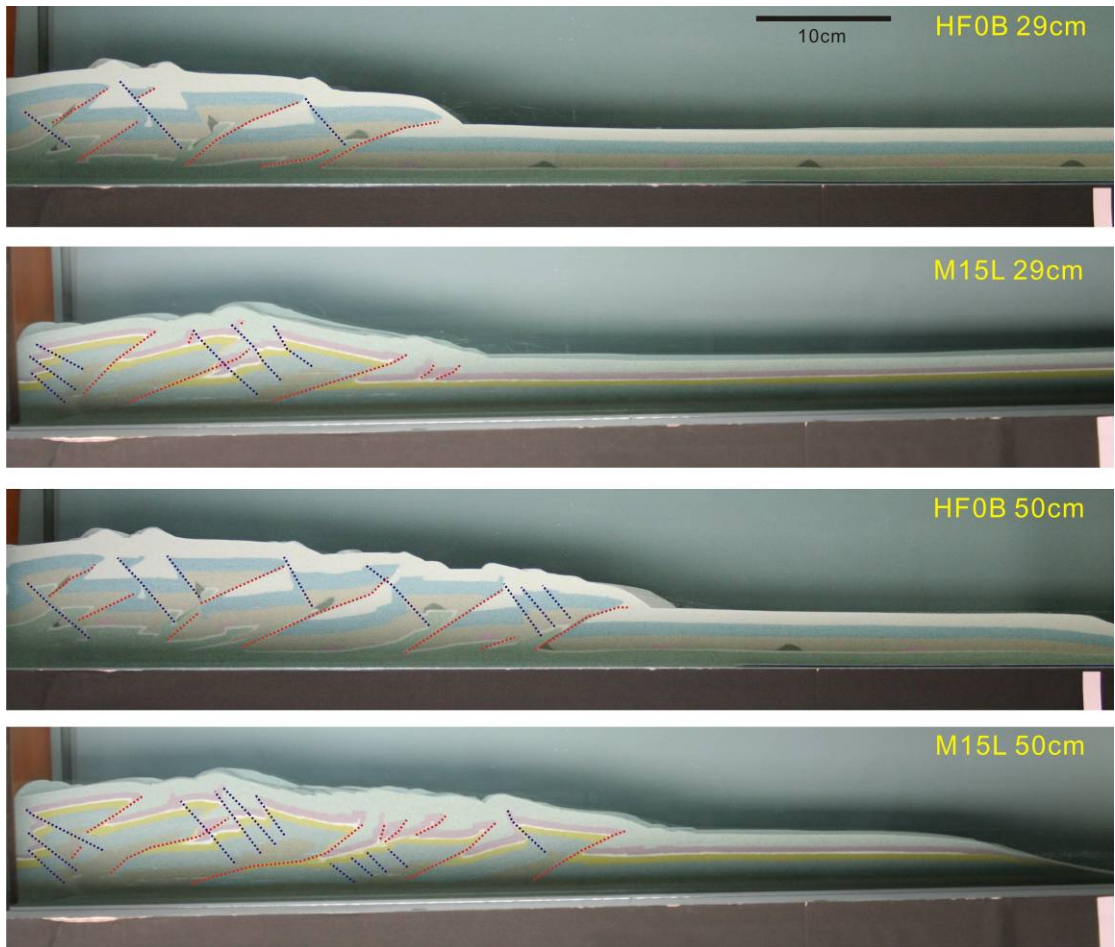


圖 5.18 有無存在玻璃微珠層之構造分布。HF0B 為無玻璃微珠層，M15L 則為玻璃微珠層位於深度 1.5 公分深度處。

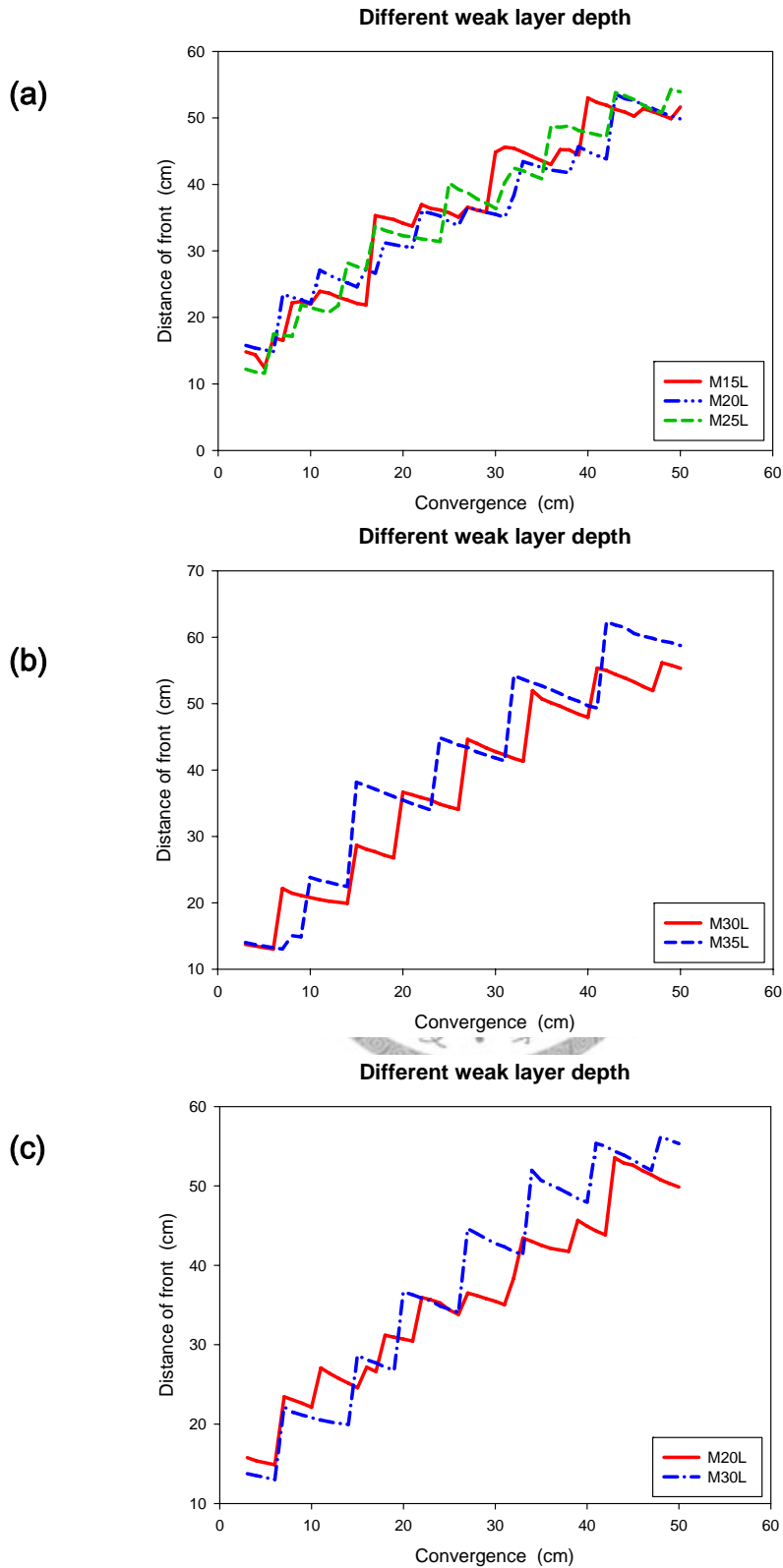


圖 5.19 不同玻璃微珠存在深度時變形前緣隨拉動量之變化。(a)玻璃微珠位於淺部
 (b)玻璃微珠位於深部 (c)淺部與深部的特性比較。

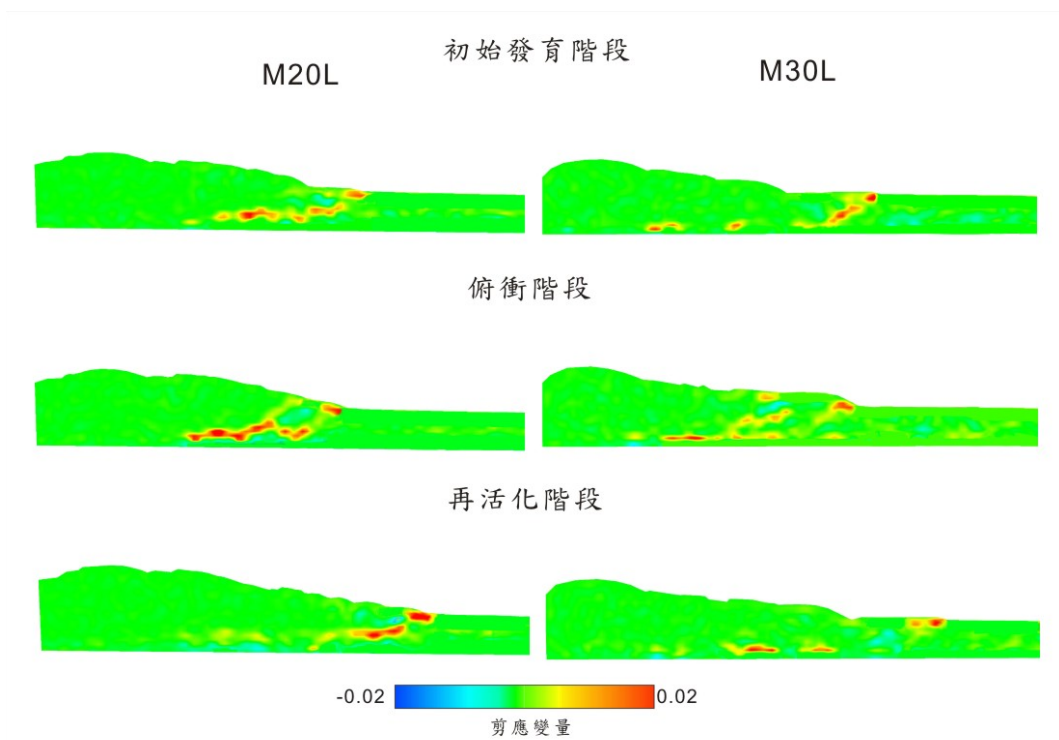


圖 5.20 不同玻璃珠存在深度在不同階段時期的剪應變比較圖。

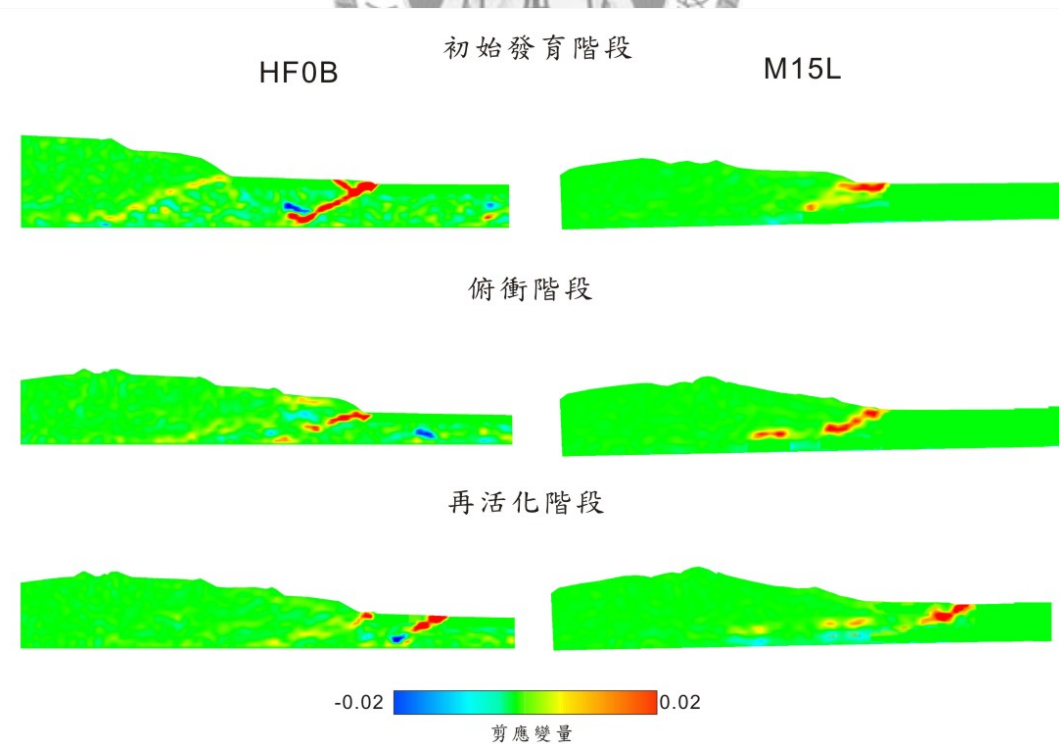


圖 5.21 含玻璃珠及玻璃珠層深度位於 1.5 公分處不同階段的剪應變比較圖。

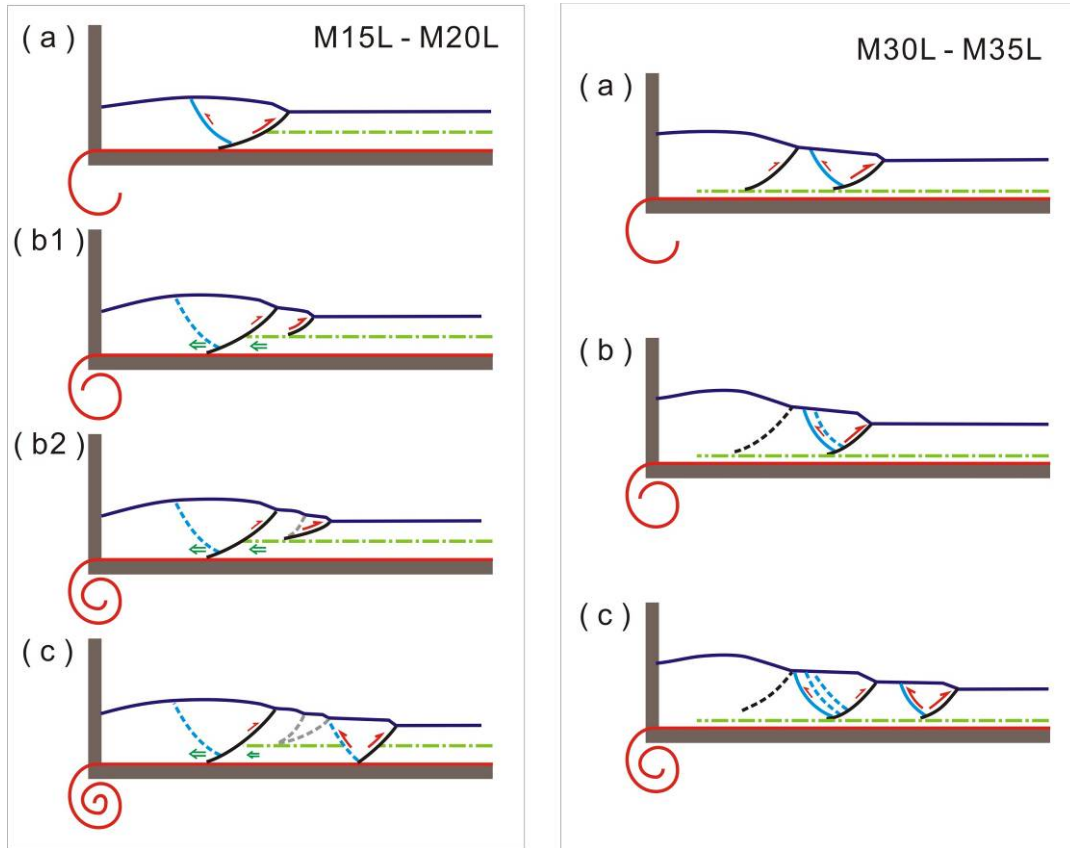


圖 5.22 不同原始弱面深度之前緣增積循環模型。(a)斷層初始發育期；(b)俯衝期；(c)再活化期/新的斷層初始發育期。

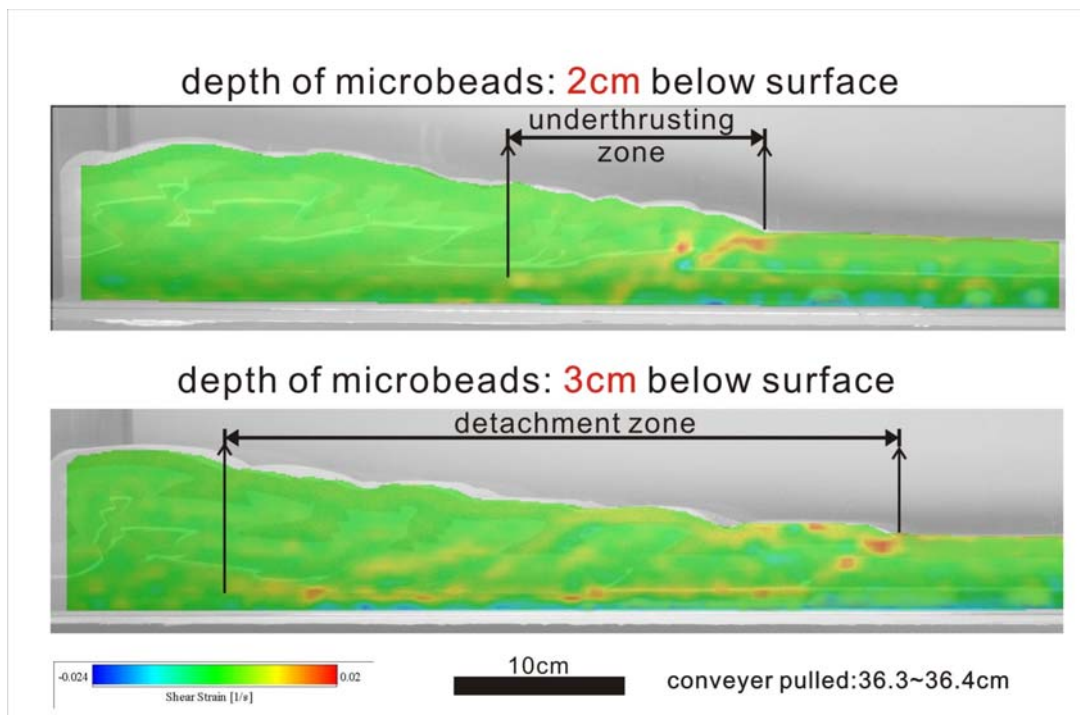


圖 5.23 剪應變量統計區域示意圖。

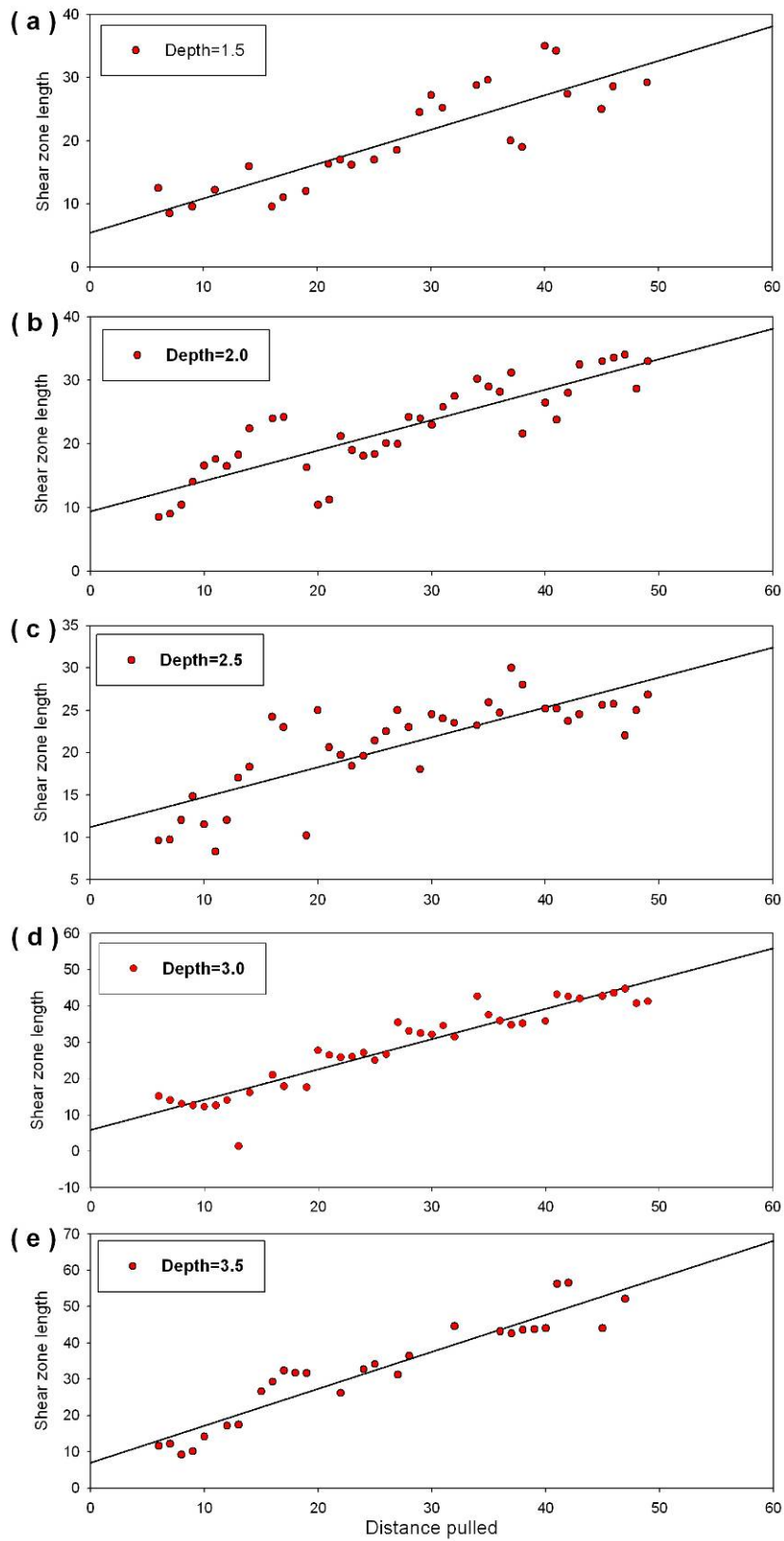


圖 5.24 剪應變量隨拉動量變化統計圖。

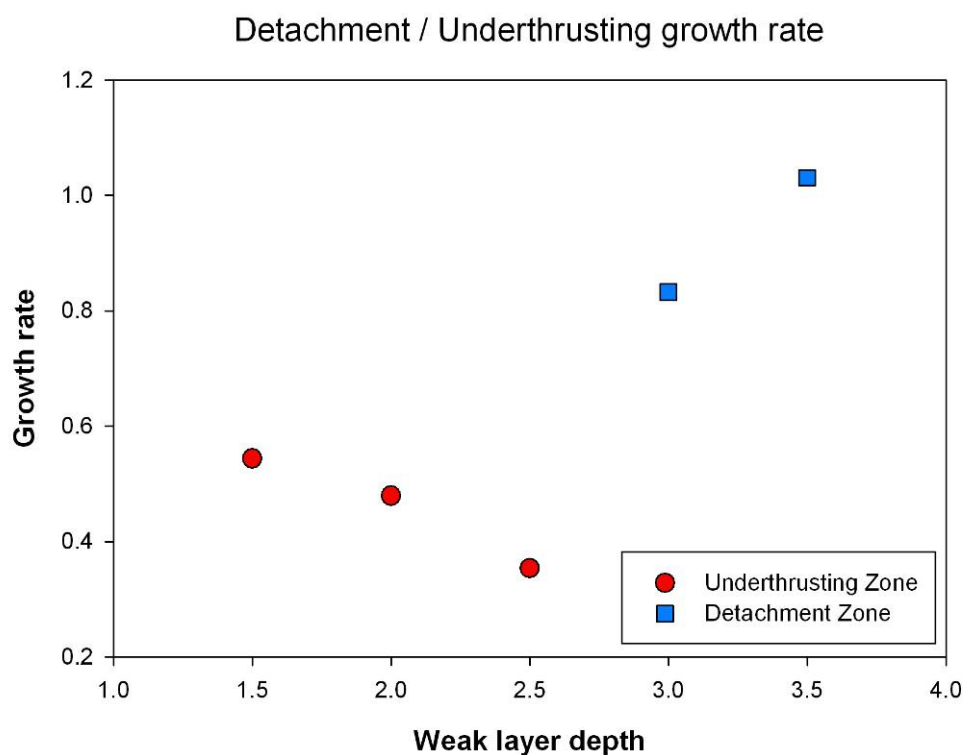


圖 5.25 不同玻璃微珠層深度下剪應變量延伸速率。



5.4 斷層面傾角探討

本研究對不同實驗之斷層傾角進行測量，針對不同階段，分別測量逆衝及背衝斷層之傾角，並求其平均，列於表 5.1。

在低底部摩擦係數下，逆衝斷層角度較高摩擦係數稍低，平均分別為低底部摩擦係數的 26.8 及高底部摩擦係數的 27.1，差異不大，唯在初始階段分別為 27.3 及 25.6，有 1.7 度的差異；而背衝斷層於低底部摩擦係數下明顯小於高底部摩擦係數，在不同階段下分別有 3 至 5 度的差異，高底部摩擦係數的部分，背衝斷層亦會隨著不同階段的變化而增加傾角，由初始階段到再活化階段，增加量由 6 度至 10 度不等(除了實驗 LF6B)，由背衝斷層的差異及隨推移量的變化，可知在底部摩擦係數較高時，楔形體前後的主要應力方向並不對稱，並且會隨前緣抬升而增加不對稱的作用，直至新的前緣逆衝斷層再發育。

當滑脫面傾角增加時，逆衝斷層傾角大致上趨勢為減少，而背衝斷層則為增加，因此上述之應力不對稱情形隨傾角增加而更加強化，低滑脫面傾角時，逆衝斷層的角度並無太大變化，而當滑脫面傾角為 8 度時，逆衝斷層由初始階段開始為逐漸增加的趨勢，於實驗 HF8B，由 24.7 度轉變為 28 度，而實驗 LF8B 中，由 24.1 度轉變為 26 度，反映其形成疊瓦狀構造時，斷層面向上抬升並逆時針旋轉的現象。

在原始弱面深度較淺之實驗，存在部分小型逆衝斷層(M15Ls~M25Ls)，其小型斷層面傾角隨拉動量而增加(如 M15Ls，由 32.5 度轉變為 40.5 度)，並且並無形成背衝斷層，而主要逆衝斷層傾角隨拉動量降低(如 M15L，由 30.7 度降低至 25 度)，背衝斷層則增加(如 M15L，由 40 度增至 40.5 度)，代表弱面深度較淺時其效應類似於底部摩擦係數增加。而弱面深度較深時，逆衝斷層與背衝斷層不隨拉動量變化的特性，在實驗 M30L 中，其逆衝及背衝斷層傾角皆十分接近於 0，代表其應力狀態十分穩定，並且類似於低底部摩擦係數之效應。

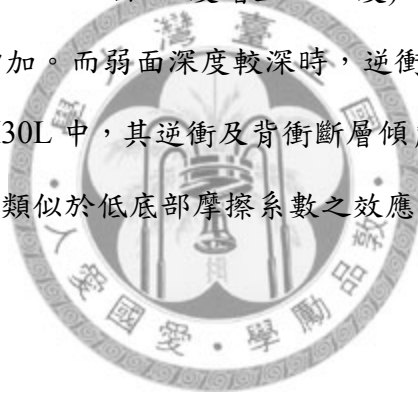


表 5.1 所有實驗不同階段之逆衝及背衝斷層之傾角。其中 M15Ls、M20Ls 及 M25Ls 代表由玻璃微珠發育之小型短週期逆衝斷層。

實驗名稱	逆衝斷層： 初始階段	逆衝斷層： 俯衝階段	逆衝斷層： 再活化階段	平均 (逆衝斷層)	背衝斷層： 初始階段	背衝斷層： 俯衝階段	背衝斷層： 再活化階段	平均 (背衝斷層)
HF0B	27.9	28	28	28.0	32.7	37.3	39.6	36.5
HF3B	27.7	27.5	26.6	27.3	36.2	41.1	42.4	39.9
HF6B	28.7	25.7	24.9	26.4	38.2	41.6	46.8	42.2
HF8B	24.7	27.9	28	26.9			45.6	45.6
LF0B	25.6	29.3	30.2	28.4	26.9	37.7	38	34.2
LF3B	27.9	28.7	28.7	28.4	32.4	33.9	39.3	35.2
LF6B	24.9	26.3	24.6	25.3	35.3	30.8	30.8	32.3
LF8B	24.1	25.5	26	25.2	30.9	37.2	39	35.7
M15L	30.7	26.4	25	27.4	40.3	43.8	45.5	43.2
M15Ls	32.9	35.3	40.5	36.2				
M20L	30.5	26.6	24.6	27.2	39.7	42.2	45.2	42.4
M20Ls	32	32	36.6	33.5				
M25L	31.3	22.8	22.8	25.6	35.8	38.9	38.9	37.9
M25Ls	28.2	33.8		31.0				
M30L	28.7	29.8	29.8	29.4	38.9	38.9	38.9	38.9
M35L	28.4	31.2	39.9	29.2	38.8	34.3	33.1	35.4

5.5 結論

本研究利用砂箱實驗模擬增積岩體的變形特徵，在一系列實驗中，以控制不同變因來瞭解該項變因對增積岩體演化的影響，並配合 PIV 技術進行分析比對，其結果對於斷層再活動作用、俯衝作用及底部滑脫等內部變形行為提供直接的證據，其結果亦有助於探討局部抬升作用及不同階段的瞬時變形行為。整體而言，本研究所分析之各項參數對整體變形及前緣增積作用之影響如下：

1. 對於底部摩擦係數的影響，最大的不同為斷層俯衝階段。低摩擦係數時，底部滑脫作用造成逆斷層下盤物質不易帶入，而使得背衝斷層漸次發展，主要抬升區域集中於前緣；高摩擦係數時，底部互鎖作用造成逆衝斷層下盤物質受俯衝作用帶入楔形體，主要抬升區域分布於後方。摩擦係數以上述不同斷層之行為達到臨界坡度狀態。
2. 滑脫面傾角之作用上，傾角增加直接加強了重力平行於滑脫面之作用，使得兩側應力極端不對稱，造成斷層俯衝並形成疊瓦構造及高角度背衝斷層發育。
3. 在不同玻璃微珠層深度下，深度造成之影響可分為存在於淺部及深部。玻璃微珠位於淺部時主要會由該層形成小型逆衝斷層，造成俯衝作用的間斷，但深部的俯衝作用則更為劇烈，類似高底部摩擦係數的特性；位於深部時則由玻璃微珠層形成新的一組滑脫面，整體變形特性受到玻璃微珠層的摩擦係數影響，類似低底部摩係數特性。
4. 以上三種參數影響的共同點，各項變因的實驗於俯衝作用的階段中，會產生截然不同的變化，因此，可以認為俯衝作用時期是的活動為用來定義不同參數作用之重要階段。

參考文獻

- Adam, J., Lohrmann, J., Hoth, S., Kukowski, N. and Oncken, O., 2002. Strain variation and partitioning in thrust wedges: High-resolution data from scaled sandbox experiments by 2D-3D PIV analysis. *Bollettino di Geofisica teorica ed applicata*, 42, 123-126.
- Adam, J., Urai, J.L., Wieneke, B., Oncken, O., Pfeiffer, K., Kukowski, N., Lohrmann, J., Hoth S., van der Zee, W. and Schmatz, J., 2005. Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting—new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques. *Journal of Structural Geology*, 27, 283-301.
- Bernard, S., Avouac, J.P., Dominguez, S. and Simoes, M., 2007. Kinematics of fault-related folding derived from a sandbox experiment. *J. Geophys. Res.*, 112, B03S12, doi:10.1029/2005JB004149.
- Burbidge, D.R. and Braun, J., 2002. Numerical models of the evolution of accretionary wedges and fold-and-thrust belts using the distinct-element method. *Geophysical Journal International*, 148, 542-561.
- Chapple, W.M., 1978. Mechanics of the fold and thrust belts. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, 1189-1198.
- Dahlen, F.A., 1984. Noncohesive critical Coulomb wedges: An exact solution, *Journal of Geophysical Research*, 89, 10125-10133.
- Dahlen, F.A., Davis, D. and Suppe, J., 1984. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges: cohesive coulomb wedges theory. *Journal of Geophysical Research*, 89, 10087-10101.
- Dahlen, F.A. and Suppe, J., 1988. Mechanics, growth, and erosion of mountain belts. *Geological Society of America Special Paper*, 218, 161-178.
- Dahlen, F.A., 1990. Critical taper model of fold-and thrust belts and accretionary wedges. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 18, 55-99.
- Davis, D., Suppe, J. and Dahlen, F.A., 1983. Mechanics of fold and thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research*, 88, 1153-1172.
- Dominguez, S., Lallemand, S., Malavieille, J., and Schnurle, P., 1998. Oblique subduction of the Gagua Ridge beneath the Ryukyu accretionary wedge system: Insights from marine observations and sandbox experiments. *Marine Geophysical Researches*, 20, 383-402, doi:10.1023/A:1004614506345
- Dominguez, S., Malavieille, J. and Lallemand, S.E., 2000. Deformation of accretionary wedge in response to seamount subduction. Insights from sand-box experiments. *Tectonics*, 19, 182-196.

- Dominguez, S., Avouac, J.P. and Michel, R., 2003. Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: Implications for the seismic cycle along the western foothills of central Taiwan. *J. Geophys. Res.*, 108(B2), 2083.
- Heermance, R.V. and Evans, J.P., 2006. Geometric evolution of the Chelungpu fault, Taiwan: the mechanics of shallow frontal ramps and fault imbrication. *Journal of Structural Geology*, 28, 929-938.
- Hoth, S., Hoffmann-Rothe, A. and Kukowski, N., 2007. Frontal accretion: An internal clock for bivergent wedge deformation and surface uplift. *J. Geophys. Res.*, 112, B0640810, doi:10.1029/2006JB004357
- Hubbert, M.K., 1937. Theory of the scale models as applied to the study of geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 48, 1459-1520.
- Hubbert, M. and Rubey, W., 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Geological Society of America Bulletin*, 70, 115–166.
- Klinkmuller, M., Rosenau, M., Boutelier, D., Kemnitz, H. and Schreurs, G., 2008. Properties benchmark of granular and viscous analogue materials. Abstract for the GeoMod 2008 pre-conference workshop "Analogue and numerical modelling of crustal processes", Villa La Pietra, Firenze.
- Konstantinovskaia, E. and Malavieille, J., 2005. Erosion and exhumation in accretionary orogens: experimental and geological approaches. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 6, 1-25, doi:10.1029/2004GC000794.
- Kukowski, N., Lallemand, S.E., Malavieille, J., Gutscher, M.A. and Reston, T.J., 2002. Mechanical decoupling and basal duplex formation observed in sandbox experiments with application to the Mediterranean Ridge accretionary complex. *Mar. Geol.*, 186, 29-42.
- Lallemand, S.E., Schnürle, P. and Malavieille, J., 1994. Coulomb theory applied to accretionary and nonaccretionary wedges: Possible causes for tectonic erosion and/or frontal accretion. *J. Geophys. Res.*, 99, 12033-12055.
- Lohrmann, J., Kukowski, N., Adam, J. and Oncken, O., 2003. The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges. *Journal of Structural Geology*, 25, 1691-1711.
- Malavieille, J., 1984. Modélisation expérimentale des chevauchements imbriqués: Application aux chaînes de montagnes, *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 26, 129-138.
- Mair, K., Frye, K.M. and Marone, C., 2002. Influence of grain characteristics on the friction of granular shear zones. *J. Geophys. Res.*, 107, B10, 2219, doi:10.1029/2001JB000516
- Marone, C., 1998. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 26, 643–696.

- McIntosh, K., Nakamura, Y., Wang, T.K., Shih, R.C., Chen, A. and Liu, C.S., 2005. Crustal-scale seismic profiles across Taiwan and the western Philippine Sea. *Tectonophysics*, 401, 23-54.
- Schellart, W.P., 2000. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling. *Tectonophysics*, 324, 1-16.
- Suppe, J., 2007. Absolute fault and crustal strength from wedge tapers. *Geology*, 35, 1127-1130, doi: 10.1130/G24053A.1.
- Tseng, C.H., Hu, J.C., Chan, Y.C., Chu, H.T., Lee, J.F., Wei, J.Y. and Lu, C.Y., 2008. Non-catastrophic landslides induced by the Mw 7.6 Chi-Chi earthquake in central Taiwan as revealed by PIV analysis. *Tectonophysics*, revised.
- White, D.J., Take, W.A. and Bolton, M.D., 2001. Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis. 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, 997-1002.
- White, D.J., Take, W.A. and Bolton, M.D., 2003. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Geotechnique*, 53, 619-631.
- Yui, T.F. and Chu, H.T., 2000. 'Overturned' marble layers: evidence for upward extrusion of the Backbone Range of Taiwan. *EPSL*, 179, 351-361.
- Yue, L.F., Suppe, J. and Hung, J.H., 2005. Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan(MW=7.6). *Journal of Structural Geology*, 27, 2058-2083.
- 王芳琳，2006，利用二維離散元素法探討增積岩體的變形模式。國立台灣大學海洋研究所碩士論文，共 133 頁。
- 張國楨，1998，台灣西部基盤高區對鄰近主要新構造影響之三維模擬，國立台灣大學地質研究所碩士論文，共 134 頁。