

鋼骨構架內含非結構 RC 牆之隔離縫設計與驗證

李宏仁^{*1} 朱瑞祥² 陳正誠³

^{*1} 國立雲林科技大學營建工程系副教授

² 國立雲林科技大學工程科技研究所博士候選人

³ 國立台灣科技大學營建工程系教授

一、前言

台灣位於環太平洋地震帶上，板塊運動及地震頻繁，建築物的耐震能力是大眾關心的重要議題，也是工程師作結構設計優先考量的重點。長期以來，在政府機關、民間團體、學者和工程師們不斷的努力下，耐震設計規範和設計方法已漸臻完備，但有時須仰賴工程師經驗判斷，以免不當的配置導致建築物在大地震下之反應不符設計預期。過去的結構設計習慣，多將一般外牆或隔間牆當作不承受剪力、非承重之非結構牆，工程師假設非結構牆可不納入結構分析模型中。雖然國內外已有許多相關研究顯示，非結構性磚牆或鋼筋混凝土（RC）牆具有不可低估之抗側力強度，含牆構架之強度與勁度會遠大於空構架，雖然強度提高有助於建築物耐震能力，但伴隨的高勁度會使建築物基本振動週期縮短，使結構物受地震之反應增大。因此中高層建築物應特別注意非結構牆面對建築物基本振動週期的影響，避免低估地震力。

內政部建築研究所在 97 年度委託國立雲林科技大學，執行「建築構架含 RC 牆之耐震性能研究—非結構牆及槽縫牆行為」研究，試驗結果顯示韌性 RC 抗彎矩構架若內含非結構 RC 牆，強度可提高約三倍，勁度更提高達四倍，但當牆體破壞時，相鄰兩側柱也會同時發生剪力破壞，使強度迅速下降，原本韌性良好的構架變成脆性破壞，顯示非結構 RC 牆之抗側力強度勁度不容忽視。

國內建築物的基底樓層通常作為商業或入口大廳使用，或依開放空間獎勵容積辦法採開放空間設計以增加可建容積，因此建築物基底樓層的牆壁數目遠比樓上少，又因商業或開放空間用途需要，底層樓層高度通常較高，所以底層的剛度容易偏低，然而地震時底層受到的水平總剪力卻最大，一旦有較大的地震來襲，底層柱受力超過彈性限度將造成底層的層間位移大幅增加，形成一樓軟弱層崩塌破壞。921 大地震中發現許多毀損的建築物，如圖 1 所示，樓上結構體沒有嚴重損壞，而底層因軟弱層效應已先行毀壞或崩塌的情況產生。

由於 921 大地震中有不少中高層 RC 構造建築物崩塌，但甚少有鋼骨或鋼骨鋼筋混凝土（SRC）構造大樓倒塌情事，因此震後新建的中高層建築標榜採用鋼骨或鋼骨鋼筋混凝土構造的案例有增多的趨勢。然基於施工習性與成本考量，近年來新建的鋼骨構造建築外牆或隔間牆仍有使用場鑄非結構 RC 牆的情況，由於非結構 RC 牆剛度大，能忍受之層間變形遠較鋼骨構架小，所以鋼骨抗彎矩構架內若含非結構 RC 牆易產生下列缺點：(1) 牆體在中、小規模地震中產生裂損，維修困難，衍生法律糾紛問題；(2) 若牆面沒有連續至基底，在大規模地震時恐將產生軟弱層效應，如圖 2 所示，造成鋼骨構架無法發揮預期韌性；(3) RC 牆會提高整體結構的剛性使週期變短，地震反應可能大於設計預期，造成基底樓層柱或基礎破壞，危及結構安全。

根據中華民國鋼結構協會之專案研究計畫「非構造性牆面在鋼結構建築之應用研究」成果報告，及永峻工程顧問有限公司「鋼骨建築非結構牆參考手冊」所作之調查，目前國內填充在鋼骨構架內之場鑄非結構 RC 牆皆屬脆性剪力主控的低型牆，其剛度大韌度小之特性，除非作特殊處理，例如：牆體內做數條豎縫形成數個彎矩主控之小單元牆體，或如圖 3 所示在牆體四

周以完全隔開之方式，設計足夠寬度的隔離縫將牆體與鋼骨構架完全隔開，否則並不適用於鋼骨建築結構。

隔離縫在 RC 構造建築物方面的應用，日本建築學會曾做過許多小尺寸縮尺模型試驗，並在 RC 造建築物的耐震設計指針中，納入隔縫處理以避免台度牆或開高窗牆對相鄰柱造成短柱效應而破壞。瑞士聯邦水理地質調查所 (Swiss Federal Office for Water and Geology) 和瑞士發展與合作署 (Swiss Agency for Development and Cooperation) 共同發表的建築物耐震概念設計，也建議使用隔離縫將非結構性的磚牆與梁柱構架隔開，避免非結構牆牽制 RC 抗彎矩構架之抗震行為。至於鋼骨構造建築物，國外較少進行此一方面研究，需國人自行努力。故內政部建築研究所於 98 年度委託國立雲林科技大學進行「鋼骨構架含非結構 RC 牆之耐震性能研究」，執行鋼骨韌性抗彎矩構架含非結構 RC 牆或隔縫牆之側向反復載重試驗，探討含牆鋼骨構架的層間變形能力及耐震性能，本文為該研究之部份成果，針對工程實務上相關之部份提出簡述，重點在隔離縫的設計與驗證，包括：(1) 未隔開的非結構 RC 牆體對於鋼骨構架耐震性能的影響；(2) 牆邊增設隔離縫之表現；(3) 牆邊增設隔離縫可否改善非結構牆不連續造成的軟弱層效應；(4) 隔離縫細部處理方法及施工便利性。

二、鋼骨含牆構架試驗規劃

鋼骨構架之測試佈置如圖 4 所示，以反力牆上的致動器對單跨門形構架試體施加反復載重，共測試四座試體，每座的鋼骨構架尺寸相同，梁斷面為 H-350×250×9×14 mm，柱斷面為 □-350×350×14 mm，鋼材選用建築結構用可銲接碳鋼，平均降伏強度為 3.69 tf/cm²，抗拉強度為 4.94 tf/cm²，依據現行鋼結構設計技術規範作耐震設計，使塑鉸發生於梁端及柱底，鋼梁兩端依塑鉸彎矩容量設計作切削變斷面處理，移置塑鉸遠離柱面，避免梁柱面銲道破壞。四座受測試體中，一座為鋼骨空構架，其餘三座試體為鋼骨構架內含場鑄鋼筋混凝土牆，牆體高寬比為 0.8，混凝土設計強度為 210 kg/cm²，牆厚 100 mm，模擬非結構牆設計配置最少鋼筋量，鋼筋比為 0.00268，三座含牆構架中有一座採用剪力釘與 RC 牆接合，另兩座則以特別設計之隔離縫將 RC 牆面與梁柱構架完全隔開。

三、隔離縫設計

本研究設計隔離縫之目的是為了將非結構牆與構架隔開，使含牆構架在彈性階段能保有空構架的韌性行為，根據經驗鋼骨空構架約在層間變形 1%~1.5% 之間降伏，因此初步設計採用層間變形 1.5% 作為牆與柱之隔離縫設計寬度，以本研究試體牆高 2120 mm 計算，隔離縫寬度需要 31.8 mm (2120 mm×1.5%)，考慮保麗龍填縫材變形及施工精度，最後設計縫寬取 35 mm，應可吸收層間變形 1.5%，確保在設計地震時，設有隔離縫的含牆構架能有預期之韌性表現。

為方便施工並避免牆體面外變形，牆兩側邊與柱相接處以槽鋼設置 U 型隔離縫，或 Z 形鋼板設置 Z 型隔離縫，縫寬 35 mm，細部處理如圖 5 所示，期吸收大地震引致之層間變形；在牆頂面與梁接合處同時留置 20 mm 間隙不填滿，這些間隙未來在建築上還需配合裝潢需要，填塞具有防火、隔音、防水等功能的彈性填縫材。

四、試驗驗證

四座試體的反復載重-位移包絡線如圖 6 所示，以剪力釘接合的含牆構架試體之初始勁度約為其他三座試體的 3.8 倍，二座含隔離縫牆的鋼骨構架試體因牆體一開始並沒有參與抵抗水平力，因此彈性階段行為與空構架試體幾乎完全相同。四座試體大約都在 1% 層間變形發生降伏，二座含隔離縫牆試體在層間變形 1.5% 後，行為開始與空構架不同，此階段因為層間變形已超過隔離縫設計能夠容納的 1.5%，隔縫閉合，牆體開始受力，切線勁度出現轉折大幅增加，直到 3% 層間變形加載過程中達到最大強度。從圖 6 之載重-位移包絡線可看出試體超過最大強度後，含實牆的鋼骨構架試體強度迅速下降，而二座含隔離縫牆試體卻可維持側力抵抗至 6% 層間變形。

綜觀比較含牆鋼骨構架牆體試驗過程裂縫發展如圖 7 及圖 8 所示，含實牆鋼骨構架試體在層間變形 0.25% 已多處開裂至需要修復程度，0.5% 時牆左下角主要裂縫寬度已達 2.5 mm 以上，1.5% 達最大強度時，牆體已嚴重損壞，多處混凝土碎裂崩落，強度因此開始下降，至層間變形 3%，牆體與構架相接處混凝土已幾乎完全崩落，僅左、右下方剩下 1/2 相連如圖 9 所示，此時強度已衰減達 20% 以上。兩座含隔離縫牆試體之行為類似，在層間變形達 1.5% 時，牆體完好如初，即使測試至層間變形 6% 時，牆體僅四個角隅處和牆底與基座相接處有輕微裂損。

五、側推分析驗證

本研究依據各試體之載重-位移包絡線建立非線性側推分析參數，先調整梁柱之塑鉸參數使側推分析結果與空構架試驗曲線相符，再加入等值斜撐(軸力桿)模擬牆面，調整軸力塑鉸參數使側推分析與含牆鋼骨構架試驗曲線相符，最後將所得之塑鉸參數複製成為三座二十層三跨建築構架模型，如圖 10 所示，然後進行非線性側推分析比較，其中一座完全為空構架，另二座有二跨二樓以上分別含有實牆或隔離縫牆，但一樓無隔間牆模擬軟弱層，以探討隔離縫可否克服非結構牆造成的軟弱層效應。

分析結果顯現三座構架在層間變形 1% 以內，屋頂位移與底層層間變形接近，但超過 1% 以後因基底樓層先產生塑鉸，整體變形有集中在底層的現象，致使底層層間變形量大增，而屋頂位移變形仍呈現線性現象。含隔離縫牆構架與空構架之彈性勁度是完全相同的，顯示非結構牆邊設置隔離縫可有恢復為空構架的受側力反應，維持線彈性至屋頂位移 1.2% 以上，但含隔離縫牆構架在梁柱降伏之後，若干層間變形超過 1.5% 以上，部分牆體因隔離縫閉合會參與抵抗水平力而使整體勁度維持原有的線彈性勁度，整體結構在屋頂位移 1.8% 時才產生降伏，至屋頂位移 2.2% 因底層層間變形已達 6% (設定各層之極限層間變形) 而破壞，整體變形能力與空構架相同，且強度更高。分析結果顯示牆邊設置隔離縫，可有效改善非結構牆不連續至基底的軟弱層效應。

四、結語

1. 含牆構架實驗顯示即使是最少量配筋的 RC 牆，填充在構架內會大幅提升抗側力勁度，使結構體基本振動週期變短，可能導致中高層建築地震反應增大，吾人不可輕忽 RC 牆之貢獻。RC 牆周邊雖以剪力釘與鋼骨接合，但實驗過程發現，當構架進入塑性階段變形增大，剪力釘所在之混凝土不連續面易碎裂崩落，故鋼骨構架使用場鑄 RC 外牆時應嚴格限制其層間位移量，以免中小地震時牆壁混凝土碎落傷人。
2. 欲使鋼骨構架發揮其優良的韌性，則構架內填充的牆體必須有足夠的變形能力，本研究建議將非結構 RC 牆兩側邊設置隔離縫，頂面預留間隙，形成牆三邊與構架完全隔開，以吸收層

間變形，但由於各層層間變形需求不同，因此於設計時，應先進行空構架分析，再依目標層間變形角之需求設計各樓層隔離縫寬度。

3. 本研究針對鋼骨構造推薦以槽鋼內填保麗龍設計隔離縫，同時拘束牆體之面外變形，經構架實驗驗證表現良好，惟試驗僅針對耐震性能測試，隔離縫尚有防水、防火、及隔音問題，工程實務上應用，還有待建築師、建材公司、結構工程師等專家共同努力研發新式隔牆。

五、誌謝

本文為內政部建築研究所 98 年度委託研究計畫「鋼骨構架含非結構 RC 牆之耐震性能研究」之部分研究成果，試驗期間承蒙內政部建研所研究員曹源暉及陶其駿先生協助，特此致謝。

六、參考文獻

1. 蔡萬來，「九二一集集大地震－建築物破壞分析與對策」，詹氏書局，ISBN 957-744-267-6，(2000)。
2. 中華民國鋼結構協會專案研究計畫成果報告，「非構造性牆面在鋼結構建築之應用研究」，中華民國鋼結構協會，(1996)
3. 中華民國鋼結構協會，「鋼骨建築非結構牆參考手冊」，永峻工程顧問有限公司執行，(2007)。
4. 李宏仁、朱瑞祥、陳永霖，「建築構架含 RC 牆之耐震行為研究」，中華民國內政部建築研究所，ISBN 978-986-01-7136-5，(2008)。
5. 李宏仁、陳正誠、朱瑞祥、歐俊佑，「鋼骨構架含非結構 RC 牆之耐震行為研究」，中華民國內政部建築研究所，ISBN 978-986-02-1645-5，(2009)。
6. 中華民國內政部，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範，(二) 鋼結構極限設計法規範及解說」，(2007)。
7. 中華民國內政部，「建築物耐震設計規範與解說」，(2006)。
8. 陳生金，「鋼結構行為與設計」，科技圖書股份有限公司，ISBN 9789576554568，(2009)。
9. 日本建築學會，「鉄筋コンクリート造建物の耐震靱性保証型耐震設計指針・同解説」，日本建築學會，(1999)。
10. Hugo Bachmann，「Seismic Conceptual Design of Buildings – Basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities」，Swiss Federal Office for Water and Geology，Swiss Agency for Development and Cooperation，(2003)。



圖1 軟弱底層嚴重破壞或倒塌

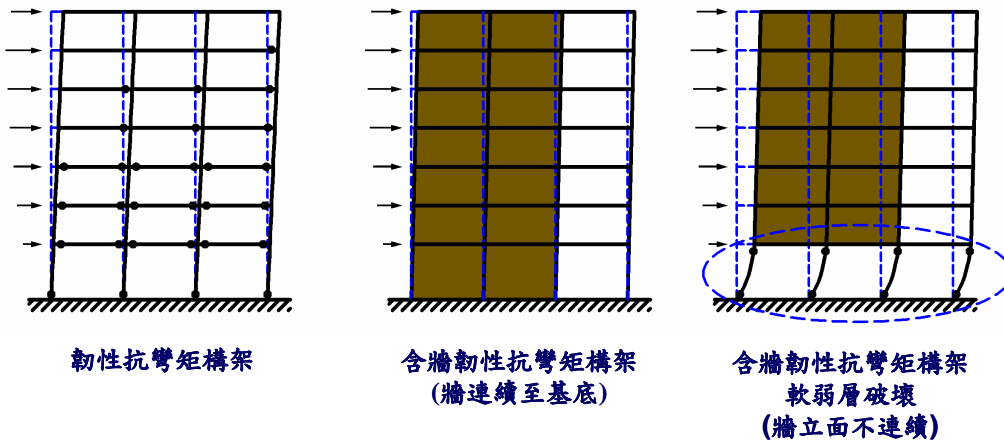


圖2 牆不連續至基底易引起軟弱層破壞或倒塌

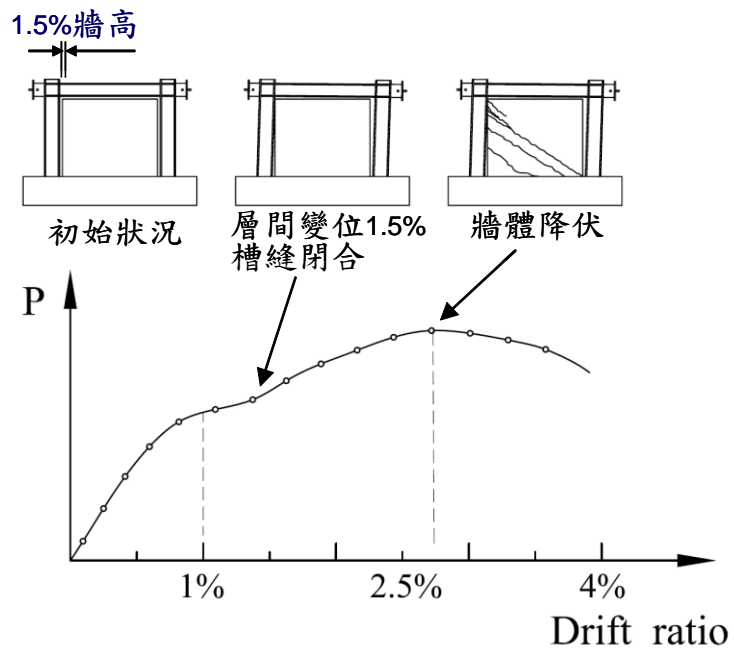


圖 3 隔離縫牆概念

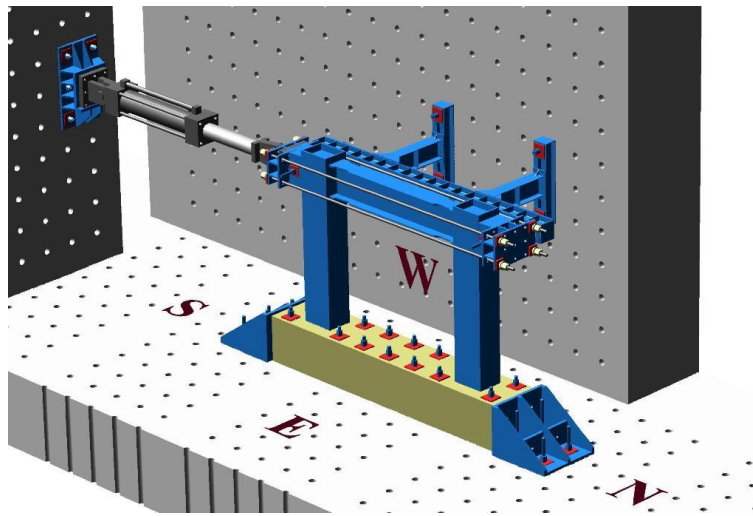


圖 4 試驗佈置

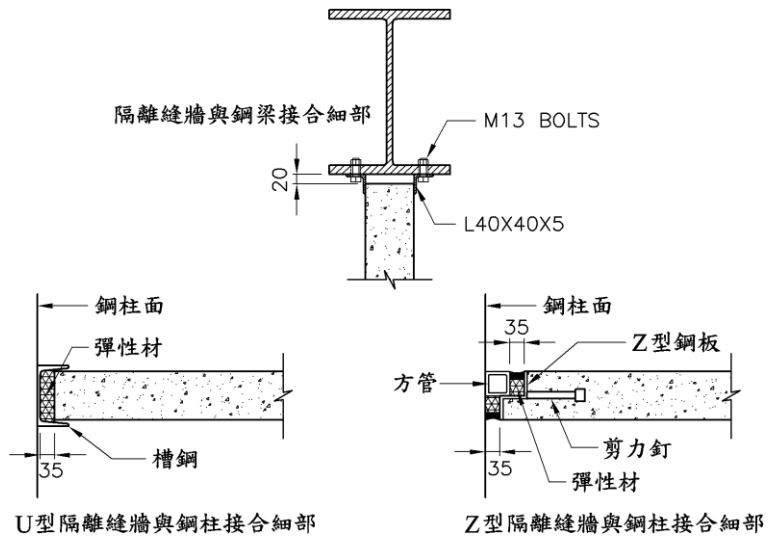


圖 5 隔離縫設計

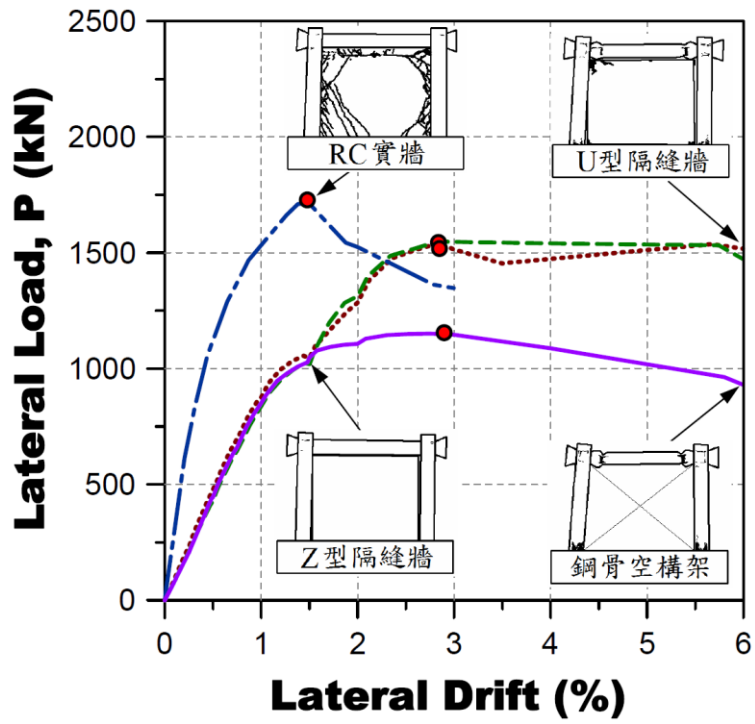


圖 6 各試體側力-變位包絡線

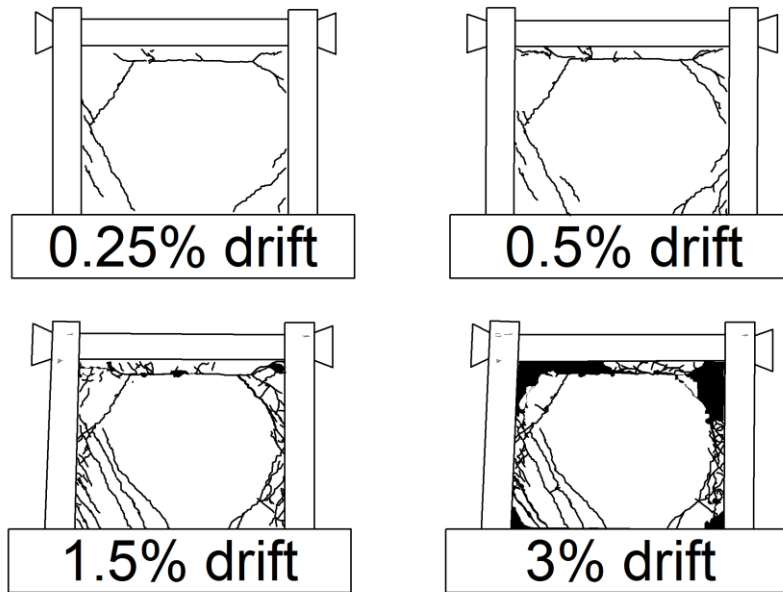


圖 7 含 RC 實牆鋼骨構架裂縫發展圖

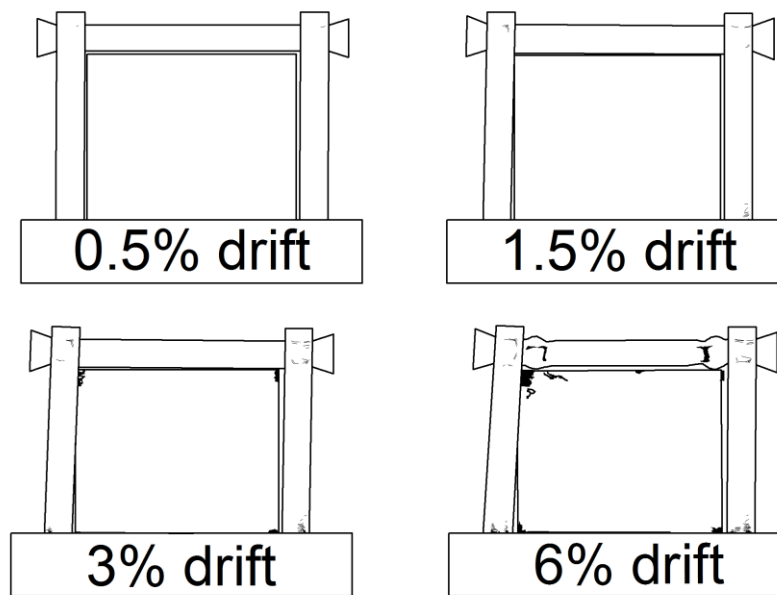


圖 8 含 U 型隔縫牆鋼骨構架裂縫發展圖

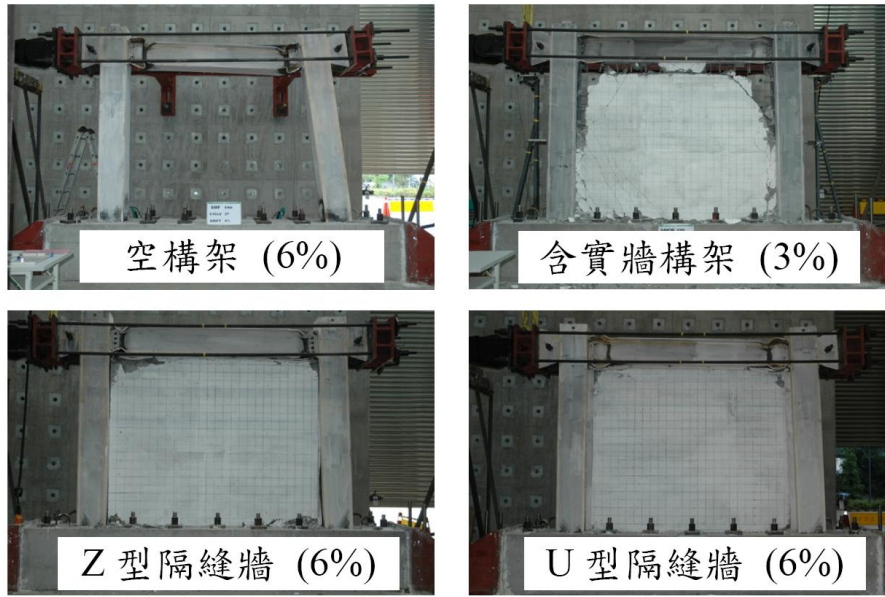


圖 9 各試體試驗至最後階段照片

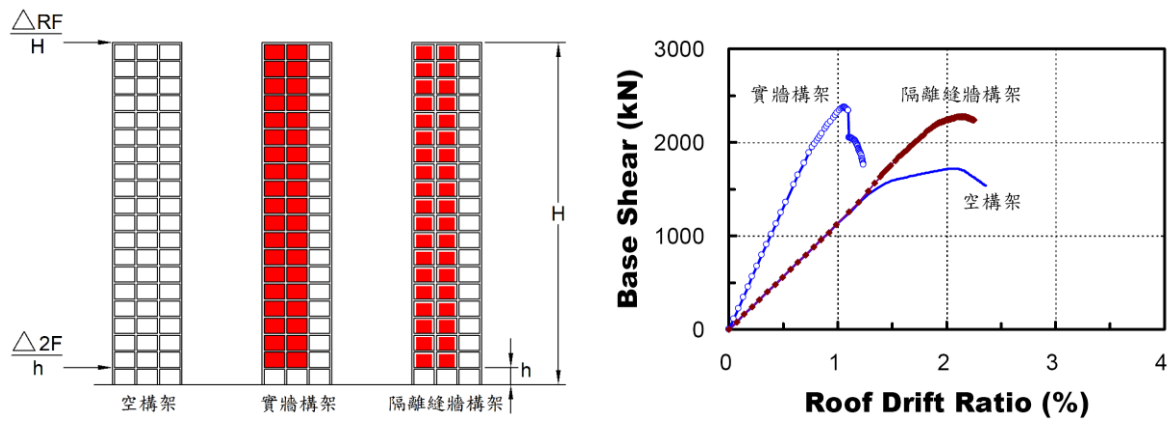


圖 10 三跨 20 層鋼骨構架側推分析驗證