

一、緒論

1999年9月21日凌晨1時47分，於日月潭西偏南12.5公里(北緯23.85度，東經120.78度)發生地震規模達7.3級，台灣有史以來死傷最為嚴重的地震——921大地震。此次傷亡慘重的大地震，將國內不良的施工習性與施工品質完全的暴露於國人的面前。

混凝土預拌廠混凝土品質不佳，現地工人不當的施工方式，將使原本設計時所考量的安全係數消耗殆盡，並使得結構物的承载力與耐震能力不如預期，讓結構物使用者背負著莫大的風險。自充填混凝土(Self-compacting concrete, 簡稱SCC)，是一種可以採用免振動、免搗實方式施工的混凝土，其優越的流動性與鋼筋通過能力，可以使其通過密佈的鋼筋籠，完美的與鋼筋緊緊包覆在一起，並填充模版的每一個角落。而且由於SCC配比上的特性，使用SCC施工時，對於混凝土的品質檢測十分容易，可達到「視覺化監造」的特性[1]。

本文的研究計畫主要分為兩個階段，分別敘述如下：第一階段為水平鋼筋握裹力試驗。其目的主要為探討不同性質的混凝土，對於鋼筋握裹力的影響。主要採用自充填混凝土、高坍度混凝土、與標準坍度混凝土分別澆製不同高度之拉拔試體與振動搗實試體，並進行鋼筋拉拔試驗，比較各種混凝土在不同的混凝土澆置深度、振動搗實程度與不同的振動方式下，對於鋼筋握裹力的影響。第二階段為縮尺寸矩形橋柱試驗。其目的主要為使用自充填混凝土製作縮尺寸矩形橋柱，並進行靜態反覆載重試驗，評估SCC橋柱之耐震容量與承载力。

二、SCC之定義與測試

所謂的自充填混凝土(Self-Compacting Concrete, 簡稱SCC)係指澆置過程中不需施加任何額外的振動、搗實，完全藉由其本身優越的充填能力即可充填至鋼筋間隙及模版各角落之特殊混凝土。但要如何判定混凝土在新拌階段有良好的流動性、充填能力與抗析離能力？因此必須有一套可將之「量化」的試驗方法與標準。以下根據日本土木學會所提出，對於自充填混凝土於新拌階段時的品質特性，如流動性、材料抗析離能力、間隙通過能力與自充填能力等評價與檢測項目逐一說明[2]。一、坍流度試驗：用以量測混凝土的流動能力；二、V形漏斗試驗：用以評估混凝土的黏稠度；三、箱型試驗：用以評估混凝土鋼筋間隙通過與充填模版的能力；四、全量通過試驗：於混凝土澆置施工時，在現場用以查核運抵工地之預拌混凝土之充填能力是否達到要求之檢驗方法。

三、文獻回顧

鋼筋混凝土之握裹力可視為一種剪力，鋼筋與混凝土兩種材料彼此藉此種力量相互傳遞應力，而影響握裹強度的因素則包括[3]：1、化學黏著力(Chemical Adhesion)；2、摩擦力(Friction)；3、楔形作用力(Wedging Action)。

早在四、五十年前，專家學者已發現，混凝土試體內之水平鋼筋會隨鋼筋下方混凝土厚度增高，而握裹力會有減少的現象。一般研究指出可能的原因為混凝土浮水現象與塑性沈陷所導致。1947年Clark[4]由拉力試驗結果，發現距離混凝土試體底面15”之處鋼筋的握裹力與距離底面2”之處鋼筋的握裹力有明顯的差異，上部鋼筋約為下部鋼筋的三分之二，此原因係由於上部鋼筋試體底床產生浮水滯留所影響，又經過多位學者研究[5]發現，一致認為澆置混凝土時水平鋼筋底層之混凝土越深，握裹強度之損失越大，此即表示由於混凝土浮水作用，在水平鋼筋底床，聚集水分與空氣所致。1976年Anabd & Briggs[6]兩位學者推斷，水平鋼筋底床與混凝土有一層分離面(Plane of Separation)，可能影響鋼筋與混凝土之結合。Khayat et al.[7]研究發現，在水膠比為0.5，坍度為22cm之配比下，使用增稠劑可以有效的降低外部浮水與表面沈陷的現象產生；同樣的結果，也在不同的配比與坍度值中得到。Khayat[8]並針對增稠劑對於頂筋效應之改善進行研究，研究結果發現不論是何種試體高度，何種坍度之配比或者是震動搗實的方式，增稠劑的使用都大大的增大了混凝土的穩定度並且降低頂筋效應的現象。2000年陳育聖[9]針對自充填混凝土與一般混凝土對水平鋼筋握裹力之影響進行研究。研究結果發現：1、自充填混凝土與一般混凝土握裹力之發展於齡期14天時，即趨於平緩。2、

自充填混凝土以免振動、搗實的施工方式即可得到比一般混凝土更高的握裹強度。3、自充填混凝土與一般混凝土皆有所謂的「頂筋效應」。自充填混凝土折減約 25~35%，一般混凝土折減約 35~45%。4、由非破壞性檢測與破壞性檢測的結果都顯示自充填混凝土的均質性要比一般混凝土來的好。因此，對於箍筋密佈、搗實不易的結構，實有必要使用自充填混凝土。

在鋼筋混凝土橋柱耐震設計中，一般藉由柱底的區域產生塑鉸，以消耗地震力產生的巨大能量，確保剪力及扭轉等脆性破壞模式不會在塑鉸產生前發生，使橋樑不至於完全倒塌，橋面版在災後仍可維持部分機能，以利運輸與救援工作進行。欲達到上述之目的，塑鉸區之韌性設計是非常重要的，最重要的設計觀念是在塑鉸區內提供足夠的橫向鋼筋量，最主要有兩種功能：1、當塑鉸區保護層剝落，橫向箍筋可維持柱心的良好，使抵抗軸力的能力不至於大幅降低。2、柱心混凝土的極限應變加大，增加塑鉸區斷面的極限曲率，提高消散能量與韌性，進而確保橋柱在塑鉸產生後應力重新分配。

張宏輔[10]於 1999 年發表鋼筋混凝土舉行橋柱耐震分析與 FRP 補強之研究成果。研究中主要針對國內現行「公路橋樑耐震設計規範」與公路局橋樑工程標準圖和國內舊有設計與施工慣例進行探討。實驗分別規劃新規範與舊規範以 1/2.5 比例之縮尺寸橋柱，並進行靜態反覆載重試驗，並評估其韌性行為。：

鍾豐旭[11]於 2000 年發表 RC 矩形橋柱 FRP 剪力及搭接耐震補強之研究成果。研究主要著重於橋柱剪力破壞及搭接破壞行為之實驗與探討，評估其耐震能力後，進行 FRP 包覆補強，以分析比較補強前後的效果。

實驗結果顯示，搭接破壞試體與剪力破壞試體，其消能性差、韌性差、強度衰減速度驚人，幾乎是瞬間破壞，是必須避免的脆性破壞模式。

四、實驗計畫

本實驗計畫主要分為兩個階段。第一個階段主要研究使用不同混凝土與不同的振動方式與搗實程度下，混凝土與鋼筋間之握裹力關係，試驗內容包括使用不同之混凝土材料，分別製作高程拉拔試體與不同方式與程度之振動、搗實拉拔試體。第二個階段主要研究將自充填混凝土應用於大型結構物，對於結構物之承载力與耐震能力之影響，試驗內容為使用自充填混凝土與普通混凝土澆置縮尺寸矩形橋柱，並評估其耐震能力與承载力。除此之外，於兩階段實驗中，分別對各實驗混凝土材料製作 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 之圓柱抗壓試體，以量測各混凝土材料之抗壓強度與靜彈性模數。

五、實驗結果與討論

圖 1 為各高程試體握裹比率比較圖。實驗結果顯示，在標準坍度混凝土試體中，內部浮水的現象並不十分嚴重，使得鋼筋的上、下半環皆與混凝土包覆在一起，有良好的握裹，也減少的「頂筋效應」的現象。在混凝土坍度較高時，鋼筋高程越高，握裹力折減的越嚴重。由此我們可以推測，高坍度混凝土內部浮水現象比起標準坍度混凝土要來的顯著，而且隨者混凝土澆置深度的增加，浮水的現象也越顯著。當 SCC 的黏稠度明顯不足，再加上用水量頗高時，仍然無法避免混凝土內部浮水的現象發生。圖 2 為各振動搗實試體握裹比率比較圖。實驗結果顯示，當混凝土坍度較低時，充分的搗實是必要的！當混凝土坍度較高的情況下，在增加搗實的時間下，握裹力則減 15%~20%。搗實程度增加，對於坍度較高的混凝土而言，會導致內部浮水的現象更為嚴重，而影響混凝土的握裹強度。對於 SCC 而言，試體內部因為添加輸氣劑而產生的細微氣泡因振動而往混凝土試體上部移動，造成混凝土試體上部充滿大量的孔隙而降低混凝土上部的拉力強度。浮水現象於鋼筋的下半環產生弱面，雙重效應下，鋼筋握裹力自然大幅折減。因此，SCC 經過振動對於握裹力會有不良的影響。圖 3 為不同振動方式試體握裹比率圖，實驗結果顯示，在混凝土坍度較低的情況下，因為內部浮水效應較為輕微，只要鋼筋與周圍的混凝土有良好的包覆，即可獲得良好的握裹強度。在混凝土坍度較高的情況下，將振動棒依靠在鋼筋上振動將使得鋼筋握裹力大幅折減。推測原因可能為，將振

動棒倚靠鋼筋做振動，會直接加速鋼筋周圍之混凝土粒料析離的現象，並直接在鋼筋的下半環造成浮水而產生弱面，降低鋼筋握裹力，因此當混凝土較高時，將振動棒依靠鋼筋進行振動實為不合宜的。對 SCC 而言，只要經過振動，不論以何種形式，對於握裹力都有一定的折減。

圖 4、5、6 分別為 NCR1、SCCR1、SCCRL100 橋柱試體之遲滯迴圈圖。比較後發現各試體之初始勁度以 NCR1 較高，SCCR1 略低。再比較 NCR1 與 SCCR1 試體，發現即使 SCC 的抗壓強度較高，但是整體構件的水平側向承載力並沒有因此而提升，推論可能的原因有二，一是此次使用之 SCC 含氣量較高，導致 SCC 的抗拉強度較低，造成柱身橫向裂縫的產生與裂縫擴大的情形提早發生，而降低抗壓側混凝土的抗壓強度，二是 SCC 之彈性模數較小，可能間接降低構件的勁度，導致構件的水平側向承載力下降。雖然 SCCR1 沒有比 NCR1 強度來的高，然而，SCCR1 達到極限水平力的時間點卻比 NCR1 來的晚，而且強度下降的趨勢也比 NCR1 來的緩和，顯示在超過極限水平側向力後，SCCR1 的行為比 NCR1 來的要好。

圖 7 為 SCCRL100 與 BMRL100[11]包絡線圖。BMRL100 試體緊縮的現象嚴重，消能性也不佳。整體的強度並不高，於位移 24.375mm (drift=0.75%) 時達極限水平側向力，其值為 328.6kN。由圖形顯示，兩者的行為非常的類似，在達極限水平側向力後，構件強度隨即大幅衰減，而且 SCCRL100 衰減的速度要比 BMRL100 來的快，兩者幾乎是沒有韌性可言。

六、結論與建議

結論

- 1、由此次實驗的結果顯示，標準坍度混凝土其水平鋼筋握裹力隨著混凝土澆置深度的增加而折減的現象並不十分的明顯，甚至是沒有；相對於 SS-NC 試體，HS-NC 試體與 SCC 試體的「頂筋效應」就相當的明顯，HS-NC 試體握裹力隨澆置混凝土深度的增加約有 30~35% 的折減，SCC 試體則約有 15~45% 的折減。
- 2、此次的實驗結果顯示，SS-NC 試體隨著搗實時間的增加，會增加其握裹力，增加幅度約為 8~12%；SS-NC 與 SCC 試體搗實時間拉長，則握裹力會有所折減，折減的幅度於 HS-NC 試體約為 15~20%，SCC 試體約為 15%。
- 3、若將振動棒直接倚靠在鋼筋上做振動，對於 SS-NC 試體的握裹力影響不大，對於 HS-NC 試體握裹力則有約 33% 的折減。SCC 試體與 SCC-S-10 比較約有 7% 的值折減，與 SCC-S-00 比較則約有 20% 的折減。
- 4、由此次的實驗結果顯示，NCR1 與 SCCR1 試體皆有良好的韌性行為，而 SCCRL100 試體韌性顯然不佳。
- 5、量測結果顯示，SCC 與 HPC 以 ASTM 規範量測之彈性模數約為 ACI-318 規範值之 75%，約為 ACI-363 規範值之 80%，以 RILEM 規範量測之彈性模數約為 CEB-FIP 規範值之 70%；OPC 以 ASTM 規範量測之彈性模數約為 ACI-318 規範值之 86% 約為 ACI-363 規範值之 90%，以 RILEM 規範所量測的彈性模數約為 CEB-FIP 規範值之 73%。

建議

- 1、V 漏斗試驗僅為確保混凝土的抗析離能力，隨著拌和技術的提升與經驗的累積，拌和 SCC 已經越來越難以析離，因此大家對於 V 漏斗試驗也漸漸忽略，因此，我們必須將 V 漏斗試驗重新定義，除了確定混凝土的黏稠度以確保抗析離能力外，更為了確保水膠比，保障混凝土的強度。
- 2、當結構物設計以及鋼筋施工部分滿足耐震設計規範時，則使用 SCC 可以消除因為人員施工不當對於結構物所造成的不確定性，亦即可以讓構件更接近數值分析與設計之承載力與韌性；然而當結構設計或鋼筋工程施工不當，造成整體結構力學行為改變時，即使使用再優質的混凝土，仍然無法改變其既定的行為模式。

參考文獻 [略]

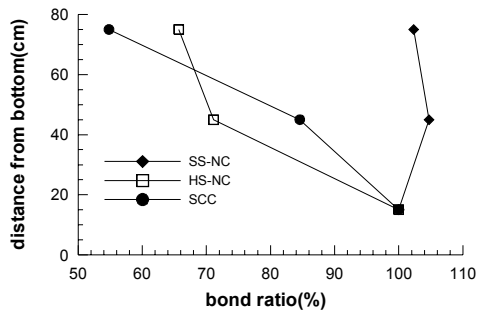


圖 1 各高程試體握裹比率比較圖

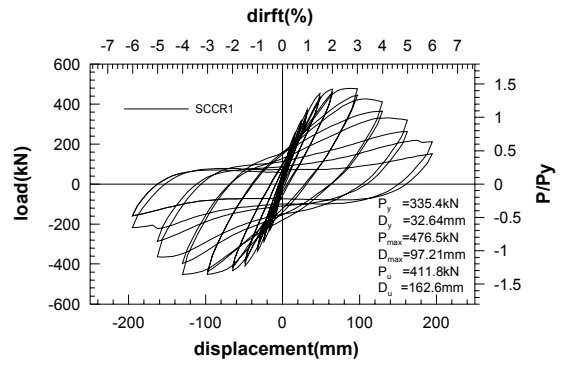


圖 5 SCCR1 試體遲滯迴圈圖

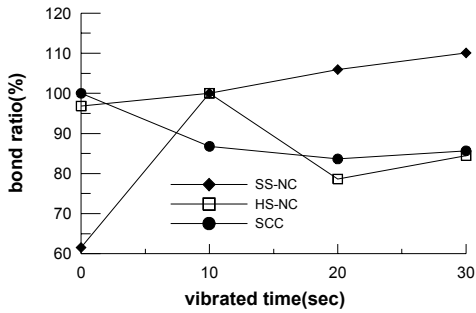


圖 2 各振動試體握裹比率比較圖

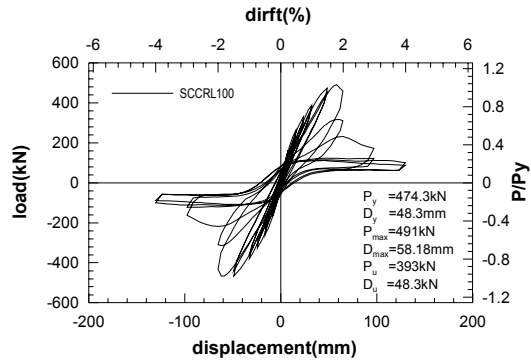


圖 6 SCCRL100 試體遲滯迴圈圖

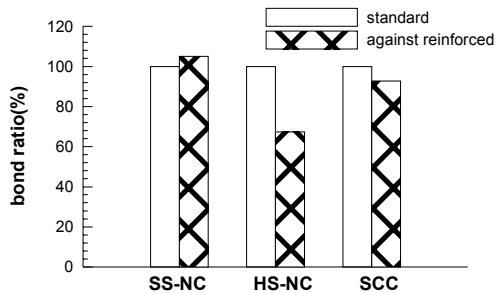


圖 3 不同振動方式試體握裹比率圖

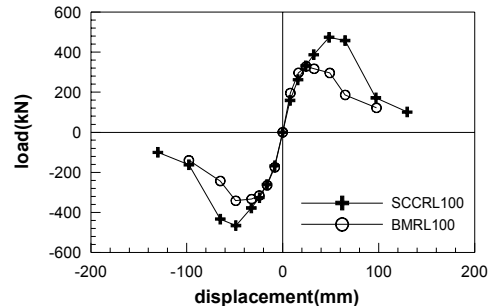


圖 7 SCCRL100 與 BMRL100 包絡線圖

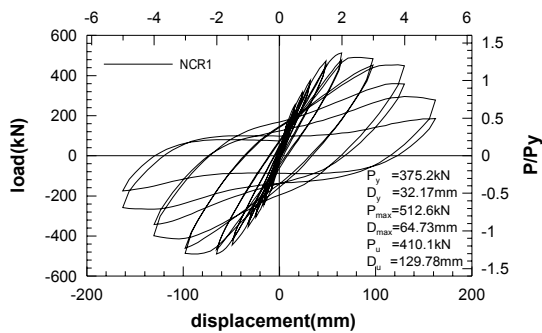


圖 4 NCR1 試體遲滯迴圈圖