

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## SRC 梁柱接頭力學行為之數值模擬分析 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 98-2221-E-009-096-  
執行期間：98年08月01日至99年07月31日  
執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：翁正強

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：施柏安  
碩士班研究生-兼任助理人員：楊維莘  
博士班研究生-兼任助理人員：施祖涵  
博士班研究生-兼任助理人員：梁景裕

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 09 月 19 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

## SRC 梁柱接頭力學行為之數值模擬分析

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 98-2221-E-009-096

執行期間：2009 年 8 月 1 日至 2010 年 7 月 31 日

執行機構及系所：國立交通大學土木工程系

計畫主持人：翁正強 教授

計畫參與人員：梁景裕、施祖涵、施柏安、楊維莘

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本計畫除繳交成果報告外，另須繳交以下出國心得報告：

赴國外出差或研習心得報告

赴大陸地區出差或研習心得報告

出席國際學術會議心得報告

國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或智慧財產權， 一年後可公開查詢

中華民國 99 年 9 月 17 日

# SRC 梁柱接頭力學行為之數值模擬分析

翁正強

國立交通大學土木工程系教授

**關鍵詞：**S-SRC 梁柱接頭、SRC 柱、鋼梁、力學行為、耐震性能、韌性、數值模擬、有限元素、ANSYS

## 摘要

本研究運用 ANSYS 有限元素分析軟體，針對鋼梁接 SRC 柱之梁柱接頭(Steel Beam-to-Steel Reinforced Concrete Column Connections，簡稱「S-SRC 梁柱接頭」)之力學行為進行數值模擬分析。分析時採用 SOLID45、LINK8 與 SOLID65 元素以分別模擬鋼材、鋼筋與混凝土，並於梁柱接頭區之鋼梁與混凝土的交界面加入接觸元素(Contact Element)。最後，本研究並將 ANSYS 分析結果與一系列已完成之實尺寸 S-SRC 梁柱接頭的反復載重試驗結果進行比較與討論。

分析結果顯示，由於 S-SRC 梁柱接頭之鋼梁插入 SRC 柱內，該部分的鋼梁受到接頭區混凝土的有效束制，使得鋼梁能夠在「SRC 柱混凝土面外」發展出良好的塑性鉸。由於塑性鉸之位置遠離梁柱接頭內部之銲道，因此可以有效的避免銲道發生脆性破壞，此現象顯示 S-SRC 梁柱接頭區之混凝土可以發揮保護接頭內部銲道之功能。

另一方面，本研究發現在 S-SRC 梁柱接頭區之 H 型鋼柱腹板加銲疊合板，可以有效提昇接頭區之剪力強度，並增加其抵抗剪力變形的能力，亦有助於減少梁柱接頭區混凝土開裂的情形。藉由 ANSYS 之分析，本研究初步發現，在 S-SRC 梁柱接頭區加銲適當厚度之疊合板，以取代接頭區之箍筋來抵抗剪力大致上是可行的，此方式將有助於簡化 S-SRC 梁柱接頭區箍筋施工之複雜性。

整體而言，本研究運用 ANSYS 分析 S-SRC 梁柱接頭力學行為之結果與前人之試驗結果表現大致相近。本研究亦發現，經過適當設計的 S-SRC 梁柱接頭可以具備良好的耐震能力，此種接頭之鋼梁可以不需減弱(切削鋼梁翼板)，亦不需補強(加銲蓋板、側翼板、肋板)，能夠發揮適當之強度與韌性，如此亦有助於節省梁柱接頭區之鋼梁加工成本。

# Numerical Simulation of Mechanical Behavior of SRC Beam-to-Column Connections

*C. C. Weng*

*Professor, Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan*

**Keywords :** S-SRC Beam-to-column Connection; SRC Column; Steel Beam; Mechanical Behavior; Seismic Resistance; Ductility; Numerical Simulation; Finite Element; ANSYS

## **Abstract**

It is the objective of this study to numerically investigate the mechanical behavior of the steel beam-to-steel reinforced concrete (SRC) column connections (called “S-SRC connection” in this study) by using the finite element computer program ANSYS. In this study, the SOLID45, the LINK8, and the SOLID65 elements were chosen to represent steel, reinforcement and concrete, respectively. The results of the numerical analysis were then compared with a series of cyclic loading test results of full-scale S-SRC connection specimens.

The numerical results showed that the reinforced concrete in the S-SRC connection zone provided an “effective constraint” to the steel beam which was embedded within the SRC column. This constraint protected the welded steel joint within the S-SRC connection and consequently assisted the steel beam to develop satisfactory plastic hinge right out of the face of the SRC column. Thus the welded joint within the connection zone can be protected from premature failure or brittle damage.

Furthermore, it was noted that for the S-SRC test specimens investigated in this study, the flanges of the steel beam were directly groove welded to the steel section within the SRC column. There was no cover plate or rib welded to the steel flanges, nor reduced beam section (RBS) was adopted in the S-SRC connection zone. In general, the results of the numerical analysis and the cyclic loading tests of the S-SRC beam-to-column connections showed satisfactory performances in strength, ductility and seismic resistance.

# 一、前言

台灣位處環太平洋地震帶，九二一地震造成中部地區許多鋼筋混凝土（Reinforced Concrete, RC）建築倒塌，使得民眾更加重視建築的耐震能力。鋼骨鋼筋混凝土（Steel Reinforced Concrete, SRC）構造在日本經過許多地震考驗發現其耐震能力頗佳，因此國內新增建築使用 SRC 的比例逐漸增加。SRC 構造係將鋼骨（S）與鋼筋混凝土（RC）加以組合，使它可以同時具有「S」構造與「RC」構造之特色與優點，成為一種更安全的結構體[1]。

圖 1 顯示兩種台灣工程界常見的 SRC 梁柱接頭的配置方式，分別為「鋼梁接 SRC 柱」及「SRC 梁接 SRC 柱」[2]。對於傳統的「SRC 梁與 SRC 柱接合」之結構而言，由施工經驗發現，SRC 梁在模板施工與鋼筋綁紮之方面較為複雜，因此若以「鋼梁取代 SRC 梁」，亦即改採「鋼梁接 SRC 柱之梁柱接頭」（簡稱「S-SRC 接頭」），將有助於簡化施工、縮短工期、節省成本與提高品質。這種 S-SRC 接頭的特點在於能發揮 SRC 柱抗壓與勁度的長處，又可利用鋼梁在韌性與施工方便之優點，同時避開傳統 SRC 梁施工較為複雜的缺點。

近年來，S-SRC 梁柱接頭經由反復載重耐震試驗（將於以下「文獻回顧」簡述）證實具備良好的耐震能力。值得注意的是，對於純鋼構之梁柱接頭而言，為確保符合 FEMA-350[3] 之要求，一般需要對接頭區之鋼梁採用「補強」或「減弱」的方式處理。不過，如圖 2 所示，由於本研究探討的「S-SRC 梁柱接頭」其鋼梁與 SRC 柱相接，鋼梁插入 SRC 柱之部份受到接頭區鋼筋混凝土包覆，故其狀況與一般純鋼構不同。主要是因為 S-SRC 梁柱接頭之鋼梁被接頭區之鋼筋混凝土所束制，接頭區之鋼筋混凝土應可扮演類似「補強式接頭」的角色，使得鋼梁的塑性鉸可以發生於 SRC 柱表面之外，達到與補強式接頭類似的效果。

為瞭解梁柱接頭之力學行為，傳統上多藉由大型實驗來求證。然而，由於大型試驗需要消耗較多的時間、人力與成本，因此以數值模擬之方式成為另一種選擇。本研究利用有限元素法進行 S-SRC 梁柱接頭數值模擬分析，並將結果與試驗結果相互比較。運用 ANSYS 有限元素套裝軟體[4]探討各參數對於 S-SRC 梁柱接頭力學行為的影響，並進一步瞭解 S-SRC 梁柱接頭之韌性與耐震能力。

## 二、文獻回顧

### 2.1 SRC 梁柱接頭試驗之文獻

徐振益[5]進行一系列實尺寸 S-SRC 梁柱接頭反復載重試驗，主要參數為接頭區鋼柱腹板之剪力強度對接頭耐震能力之影響，並嘗試採用在接頭區之鋼柱腹板加鉸疊合板但不配置箍筋之方式，以簡化接頭箍筋施工複雜性。實驗結果發現，在接頭區之鋼柱腹板加鉸適當的疊合板可有效提升接頭區之剪力強度與勁度，減少接頭區混凝土開裂的狀況，並且有助鋼梁於 SRC 柱混凝土表面外發展出塑性鉸。

楊宗翰[6]進行三組實尺寸鋼梁接 SRC 柱之梁柱接頭受到反復載重作用之試驗，所有試體在 SRC 柱接頭區處均採用四支 90+135 度彎鉤之獨立繫筋組合而成的箍筋，以降低 SRC 梁柱接頭區箍筋施工的複雜性。實驗結果顯示，在滿足強柱弱梁的狀況下，接頭區之鋼梁由於受到 SRC 柱的混凝土束制，可以有效的促使鋼梁於 SRC 柱混凝土表面外發展出塑性鉸，且梁柱接頭區之混凝土並無明顯的開裂情形。

Weng 等[7]進行兩組實尺寸鋼梁接 SRC 柱之梁柱接頭反復載重試驗，其試體之鋼梁於

接頭處並未經過切削或補強。實驗結果顯示，由於接頭區具備足夠的剪力強度，可有效抑制剪力變形，使接頭區混凝土保持完整，進而確保鋼梁受到 SRC 柱混凝土的有效圍束，因此雖然鋼梁並未切削或補強，但仍可在 SRC 柱面外發展出所需之塑性轉角，且試體之遲滯迴圈均相當飽滿，顯示此種 SRC 梁柱接頭具備良好的耐震性能。

再者，陳勤傑[8]以蓋板取代鋼筋，使接頭區之 SRC 梁之塑性區外移以提高 SRC 梁的塑性變形能力，鋼梁並採用切削處理，發現此種接頭之強度、勁度與傳統梁柱接頭相近，其韌性與施工性則仍有改善空間。

在鋼梁接 SRC 柱之梁柱接頭試驗方面，Chou 等[9]進行 2 支實尺寸之鋼梁接 SRC 柱之梁柱接頭試驗研究，其鋼梁翼板均有切削處理。在 SRC 柱中鋼骨與鋼梁（切削處）彎矩強度比滿足強柱弱梁之要求，且梁柱接頭區剪力強度也大於最大需求剪力。試驗結果顯示，鋼梁可以形成良好的塑性鉸。

## 2.2 運用 ANSYS 有限元素程式分析之文獻

Erduran 等[10]採用 ANSYS 有限元素模型模擬鋼筋混凝土柱受反復載重作用之行為。分析結果顯示，當柱撓度小於 30mm 時，分析所得之載重—位移曲線與實驗曲線相符，但在撓度較大時，兩者之結果則相差較大。

Zhou [11]進行六組實尺寸的箱型鋼管混凝土柱接 I 型鋼梁之梁柱接頭反復載重實驗，並使用 ANSYS 在同時考慮大變形的非線性條件下，建立以實驗為基礎之有限元素理論分析模型；並根據實驗結果以及有限元素分析結果提出使梁柱接頭設計更完善之建議。

Lin[12]進行鋼管混凝土柱接鋼梁之接頭反復載重實驗，其接頭型式包括翼板銲接接合、翼板螺栓接合、端板加勁接合及雙 T 板接合。該研究使用 ANSYS 進行翼板銲接及螺栓接合型式受反復載重作用之有限元素分析；然而其分析之結果與實驗之穩合度並不理想。

Nie 等[13]為了研究 SRC 梁接矩形鋼管混凝土柱之梁柱接頭耐震行為，進行十四組梁柱接頭反復載重實驗。實驗參數包含三種不同型式的梁柱接頭，並使用 ANSYS 進行非線性有限元素分析，分析時採用單向力加載及反復載重加載兩種方式進行，結果顯示其分析之力—位移曲線及剪力—變形曲線與實驗結果大致穩合。

陳傑等[14]探討橋柱於預選塑性區的耐震性能，進行一系列的結構破壞試驗，並輔以 ANSYS 進行非線性有限元素分析。其分析顯示採用單向力加載及反復載重加載其分析之載重—位移曲線與實驗結果相似，惟採用單向力加載之分析模型其載重—位移曲線之極限強度發生點較採用反復載重加載之分析模型晚，且在極限強度後強度曲線下降較為平緩。

## 三、本研究之 S-SRC 梁柱接頭有限元素分析

本研究運用 ANSYS 有限元素分析軟體針對 S-SRC 梁柱接頭之力學行為進行數值模擬分析。分析時採用 SOLID45、LINK8 與 SOLID65 元素以分別模擬鋼材、鋼筋與混凝土，並於梁柱接頭區之鋼梁與混凝土的交界面加入接觸元素（Contact Element）。

### 3.1 鋼材元素 SOLID45

SOLID45 是用以建立三維實體結構的基本元素，具有 8 個節點，每節點有三個自由度，此元素支援線彈性、塑性等材料非線性模式，以及大變形、大應變等幾何非線性功能。SOLID45 其形狀通常是三維六面體，ANSYS 在自動切割網格使用到三角柱或四面體形式

時，會將部份節點重疊使之退化成角柱或四面體之形狀，如圖 3 所示。本研究鋼材之材料模型採用多線性之彈塑性應力-應變曲線來模擬，如圖 4 所示，彈性模數設定為  $E_s = 2.0 \times 10^5$  MPa，波松比為 0.3。

### 3.2 鋼筋元素 LINK8

LINK8 為三維 2 節點的連桿元素，每個節點具有 X、Y、Z 三個位移方向的自由度。LINK8 在三維空間中僅可承受單軸張力與壓力之元素而無法承受彎矩。本研究在分析中，由於鋼筋主要承受軸向拉力與壓力，且主筋佔 SRC 柱總斷面積的比例相對較小（僅在 SRC 柱之四個角落有配置主筋），因此選用 LINK8 來模擬鋼筋，其材料模型採用多線性之彈塑性應力-應變曲線，如圖 4 所示。

### 3.3 混凝土元素 SOLID65

SOLID65 是 ANSYS 針對混凝土、岩石等抗壓能力遠大於抗拉的材料所開發之元素，該元素可以模擬混凝土因受壓產生壓碎和張力產生開裂之行為。本研究之混凝土抗壓強度  $f'_c$  係依標準圓柱試體試驗所得，根據 Bresler[15]之研究認為圓柱試體抗壓強度會因尺寸的增加而逐漸降低，稱為尺寸效應（Size Effect）。因此，本研究為模擬實尺寸混凝土之狀況乃參考 Bresler 之建議，將混凝土抗壓強度修正為  $0.85f'_c$ 。本研究描述混凝土材料的應力-應變曲線係採用 Mander 等[16]所提出之建議，如圖 5 所示。

### 3.4 接觸元素（Contact Element）

本研究考量 S-SRC 梁柱之接頭區受反復載重作用時，鋼梁與 SRC 柱之混凝土交界面可能產生分離，形成一微小縫隙，因此在分析上必須考量接觸問題。本研究之接觸對象為混凝土表面與鋼材表面，故採用面對面（Surface-to-Surface）類型之接觸元素，如圖 6 所示，根據兩個體間接觸關係的不同，兩相鄰面可分為接觸面（Contact Surface）與目標面（Target Surface），兩者合稱為配對接觸元素（Contact Pair）。藉由 ANSYS 接觸元素設定之輔助，於混凝土面上採用接觸元素 CONTA174，在鋼材表面上搭配使用目標元素 TARGE170。

### 3.5 實尺寸 S-SRC 梁柱接頭試體與數值分析模型之建立

本研究共探討五組實尺寸 S-SRC 梁柱接頭反復載重試驗之數值模擬分析，試體包括徐振益[5]、楊宗翰[6]與 Weng 等[7]之試驗，如圖 7 至 9 所示，試體之編號及重要參數整理於表 1。

本研究所有 S-SRC 梁柱接頭試體之鋼梁，均未採取補強(加鉸蓋板、側翼板、肋板)或減弱(切削鋼梁翼板)之方式。此外值得注意的是，除 SRC1 之外，其餘試體皆在接頭區鋼柱腹板加鉸疊合板（Doublers Plate），且徐振益[5]之三組試體於接頭區均未配置箍筋。

五組試體之 SRC 柱全斷面尺寸為 550×550mm，長度為 3m。SRC1 柱中鋼柱斷面為  $\square 488 \times 300 \times 11 \times 18$  之鉸接箱型斷面。SRC2 至 SRC5 鋼柱皆為 H 型鋼，SRC2 至 SRC4 鋼柱斷面為 H350×350×12×19，SRC5 鋼柱斷面為 H350×350×10×15。所有試體之鋼梁均為 H488×300×11×18 之 H 型鋼，長度為 2.03m。主筋採用 12 根 #6 竹節鋼筋，箍筋採用 #3 鋼筋。本精簡報告限於篇幅，各組試體之材料強度請參閱相關文獻。

本研究對 S-SRC 梁柱接頭採用分離式建模，分別將模型中的主筋、箍筋、鋼材及混凝土分別各自建立，透過布林運算建立 S-SRC 梁柱接頭之外觀模型，將其網格化後建立有限元素分析模型，圖 10 為各元素組合後之 S-SRC 梁柱接頭之有限元素模型。圖 11 為配對接

觸元素使用之位置，附著於混凝土面使用接觸元素 CONTA174，而附著於鋼梁表面則使用目標元素 TARGE170。

## 四、有限元素分析結果與討論

### 4.1 反復載重與位移之遲滯迴圈

本精簡報告限於篇幅，將針對較具代表性之研究成果列於本文中。圖 12 為 S-SRC 梁柱接頭試體 SRC3 受反復載重作用之載重與位移遲滯迴圈 (Hysteretic Loop) 與包絡線 (Envelope)。結果顯示於層間變位角約達 3.5% 時，ANSYS 分析與試驗結果趨勢大致吻合。運用 ANSYS 模擬試體 SRC1 所得之正、負最大載重  $P_{u,ANSYS}$  分別為 +570kN 與 -565kN，試驗所得之正、負最大載重  $P_{u,test}$  分別為 +586kN 與 -578kN，分析結果與試驗平均誤差範圍於 3% 之內。

由圖 12 可看出運用 ANSYS 模擬分析之結果與試驗結果相近。整體而言，由 ANSYS 分析所得之五組試體強度  $P_u$  與試驗結果相近，其誤差約介於 3%-5% 範圍。

### 4.2 梁柱接頭之變形分析

一般而言，梁柱接頭之梁端總位移  $\delta_t$  主要包括三種變形分量，分別為鋼梁本身的變形分量  $\delta_{bt}$ 、柱撓曲變形所造成的梁端變形分量  $\delta_{cf}$  及接頭區剪力變形所造成的梁端變形分量  $\delta_{pz}$ 。

以試體 SRC1 為例，於梁端彎矩達最大時，梁柱接頭總轉角為 3.44% 弧度。接頭之最大柱總轉角於正、負加載方向分別為 0.22% 及 0.23% 弧度，而鋼梁總轉角量分別為 +3.12% 及 -3.11% 弧度，顯示接頭總轉角之貢獻大部份來自鋼梁。再者，相對於接頭總轉角而言，梁柱交會區轉角量與柱撓曲轉角量所占比例甚小，顯示此兩者對於接頭總轉角的貢獻相當有限。由分析發現，試體之非彈性變形主要發生在 SRC 柱面以外之鋼梁上，顯示 S-SRC 梁柱接頭具有優良之塑性變形能力。

### 4.3 接頭區之鋼梁應變分析

圖 13(a) 與 (b) 為梁柱接頭試體 SRC1 施加反復載重時，接頭附近區域之鋼梁翼板的應變之變化情形。圖 13(a) 為實際試驗之結果，圖 14 (b) 為運用 ANSYS 模擬分析所得結果。經由比較可以看出鋼梁自由端位移量達  $3\Delta_y$  後，於 SRC 柱面以外之區域，試驗與分析所得之鋼梁翼板應變值皆明顯提高，但是在 SRC 柱混凝土面內之應變值卻仍維持在較小的範圍之內(約 0.005 以下)，而距離 SRC 柱面外 50、100、150mm 的鋼梁之翼板應變值皆有明顯增加之趨勢，而應變最大值發生於 SRC 柱面外約 100mm 處，此現象顯示 S-SRC 梁柱接頭主要是藉由 SRC 柱混凝土面外的鋼梁翼板產生塑性變形來消散能量。

此外，圖 14(a) 與 (b) 顯示由 ANSYS 模擬分析之 S-SRC 梁柱接頭(試體 SRC2) 的鋼梁翼板之應變的變化情形。由圖 14(b) 可看出，當鋼梁自由端位移量達  $7\Delta_y$  時，由於鋼梁插入 SRC 柱內之部份受到接頭區混凝土的有效束制，使得 SRC 柱面外之鋼梁翼板的應變值明顯大於柱內受到混凝土束制之翼板的應變值，驗證 S-SRC 梁柱接頭主要是藉由 SRC 柱混凝土面外的鋼梁產生塑性變形來消散地震能量。

整體而言，研究結果顯示，經過適當設計的 S-SRC 梁柱接頭具備良好的耐震能力。在 S-SRC 梁柱接頭區，由於插入 SRC 柱內之鋼梁受到 SRC 柱混凝土的有效束制，使



得鋼梁可以在不需經由補強或減弱（切削）的狀況下，有效的於 SRC 柱混凝土面外發展出所充分的塑性轉角。

#### 4.4 接頭區之鋼柱腹板剪應變與箍筋應變

圖 15(a)為五組 S-SRC 梁柱接頭鋼柱腹板之剪應變於反復載重過程的變化趨勢圖，分析顯示當接頭區在未配置箍筋的情況下(試體 SRC2、3、4)，接頭區鋼柱腹板之剪應變隨著腹板厚度增加(加鉸疊合板)而減小。換言之，藉由在接頭區之 H 型鋼柱腹板加鉸疊合板，可有效降低接頭區之剪力變形，進而使接頭區之混凝土開裂狀況明顯降低。

由圖 15 與表 1 亦可觀察出，當接頭區鋼柱腹板之標稱剪力強度與需求剪力強度之比值越大時，其所對應的剪應變值相對較小。以試體 SRC1 為例，其  $(V_{ns})_{SRC} / (V_u)_{SRC}$  之比值為 1.76，顯示 SRC 柱中之箱型鋼骨斷面因其在 X 與 Y 向各有兩片腹板，可提供接頭區充裕的抗剪強度。

值得注意的是，試體 SRC2 之  $(V_{ns})_{SRC} / (V_u)_{SRC}$  比值為 1.15 (其 SRC 柱內採用 H 型鋼)，雖然其接頭區並未配置箍筋而是由 H 型鋼柱腹板加鉸疊合板來增加抗剪能力，由圖 15(a) 之剪應變的變化趨勢可發現其抗剪能力仍有良好表現。因此本研究初步認為，於 H 型鋼柱腹板加鉸適當厚度之疊合板，以取代 SRC 梁柱接頭區之箍筋來抵抗剪力大致上是可行的，將有助於簡化 SRC 梁柱接頭處箍筋施工之複雜性。

圖 15(b)顯示 SRC5 接頭區箍筋應變值變化情形，分析結果顯示梁柱接頭區之箍筋的應變值均維持在彈性範圍內作變化，其應變量皆小於箍筋的降伏應變(約 0.002 左右)，顯示接頭區之箍筋所承受之剪力較小。

## 五、 結論

本研究運用 ANSYS 有限於素分析軟體，針對實尺寸 SRC 梁柱接頭試體之反復載重實驗結果進行數值模擬分析，主要在探討鋼梁接 SRC 柱之梁柱接頭（S-SRC 接頭）的力學行為與耐震能力。茲依據研究結果歸納出以下結論：

1. 本研究於 ANSYS 數值模型中使用 SOLID45、SOLID65、LINK8 等元素分別模擬鋼材、混凝土與鋼筋以進行 S-SRC 梁柱接頭之反復載重之數值分析，研究顯示 ANSYS 之分析結果與前人之實尺寸 SRC 梁柱接頭試驗結果大致相近。
2. 在 SRC 梁柱接頭區，基於考量鋼梁位移時與混凝土之間會形成一微小縫隙，本研究乃於分析模型之局部區域（鋼梁與 SRC 柱混凝土交界面）加入接觸元素。分析結果顯示，加入接觸元素有助於呈現較為合理的變形，亦有助於提昇分析結果之準確度。
3. 模擬結果顯示，S-SRC 接頭之鋼梁可於距離 SRC 柱混凝土表面 5 至 15 公分處產生良好的塑性鉸。這主要是由於「鋼梁插入混凝土的部份」受到接頭區鋼筋混凝土之有效束制，使得鋼梁塑性鉸產生之位置可以遠離接頭內部之鉸道，有效的避免鉸道發生脆性破壞。
4. ANSYS 分析之結果發現，經過適當設計的 S-SRC 梁柱接頭，其鋼梁之端部（接頭區）不需減弱(切削鋼梁翼板)，亦不需補強(加鉸蓋板、側翼板、肋板)，即能發揮適當之強度與韌性，顯示 S-SRC 梁柱接頭具備優良的耐震能力。
5. 分析結果亦顯示，在 S-SRC 梁柱接頭區之 H 型鋼柱腹板加鉸適當之疊合板可以有效降低接頭區之剪力變形，使梁柱接頭區之混凝土開裂狀況得以減緩。再者，由於加鉸疊合板之鋼柱腹板可承擔更多剪力，使得接頭區之箍筋所需分擔之剪力相對

降低。本研究初步發現，於接頭區之鋼柱腹板加鉸疊合板，以取代接頭區之箍筋來抵抗剪力大致上是可行的，此法將有助於簡化 SRC 梁柱接頭區箍筋施工之複雜性。

6. 整體而言，本研究運用 ANSYS 分析所得的各組 SRC 梁柱接頭試體之遲滯迴圈、彎矩與轉角關係曲線、鋼梁翼板之應變值變化、鋼柱腹板之剪應變值變化及接頭區箍筋之應變值變化等項目之結果，大致上皆與試驗結果之趨勢吻合，顯示本研究建立之 ANSYS 數值分析模型可以合理的模擬大尺寸 S-SRC 梁柱接頭於反復載重作用下之力學行為。

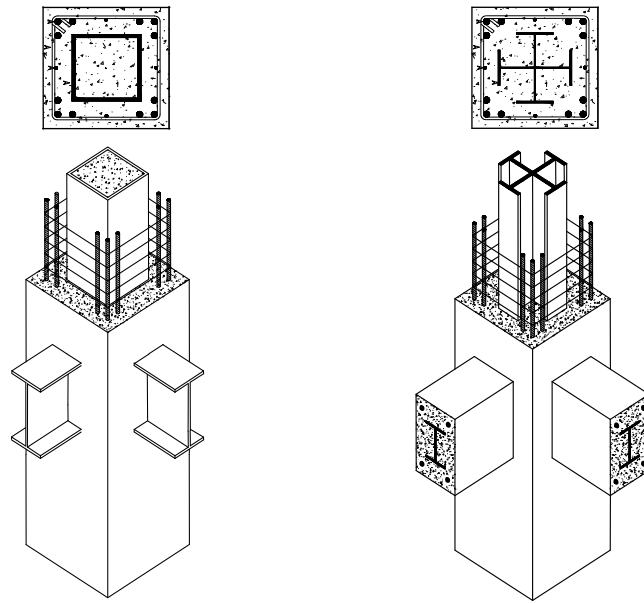
## 參考文獻

1. 翁正強 (2005)，「我國鋼骨鋼筋混凝土構造 (SRC) 設計規範之發展」，結構工程，中華民國結構工程學會，第二十卷，第一期，pp. 3-30，三月，台北。
2. 翁正強 (2004)，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計教材」，內政部建築研究所，十二月，台北。
3. FEMA (2000), Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, FEMA-350, SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
4. ANSYS(2007) "Release 11.0 Documentation for ANSYS," ANSYS Inc, Canonsburg, Pennsylvania.
5. 徐振益 (2004)，「交會區鋼骨剪力強度對 SRC 柱接鋼梁之梁柱接頭耐震性能影響之研究」，碩士論文，交通大學，土木工程研究所，新竹。
6. 楊宗翰 (2004)，「鋼骨彎矩強度對 SRC 柱接鋼梁之梁柱接頭耐震性能影響之研究」，碩士論文，交通大學，土木工程研究所，新竹。
7. Weng, C.C., Yin, Y.L., Wang, H.S. and Yang, C.H. (2008) "Experimental Study on Seismic Performance of Steel Beam to SRC Column Connections," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 31, No. 2, pp. 239-252.
8. 陳勤傑 (1996)，「鋼骨鋼筋混凝土梁柱接頭之耐震行為」，碩士論文，台灣科技大學，營建工程研究所，台北。
9. Chou, C.C., Uang, C.M. (2002) "Cyclic performance of a type of steel beam to steel-encased reinforced concrete column moment connection," Journal Constructional Steel Research Vol. 58, Issue 5-8, pp.637-663.
10. Erduran, E. and Yakut, A. (2004) "Drift Based Damage Functions for Reinforced Concrete Columns," Computers and Structures, Vol. 82, Issue 2-3, pp. 121-130.
11. Zhou, T.H., (2004) "Study on Seismic Behavior and Load-carrying Capacity of Concrete-filled Square Tubular Column to Steel Beam Connection," Ph.D. dissertation, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shanxi.
12. Lin, J. (2004) "Experimental Study on Seismic Performance of Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Column to Steel Beam Connections," Master thesis, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian.
13. Nie, J.G., Qin, K. and Cai, C.S. (2008) "Seismic Behavior of Connections Composed of CFSSTCs and Steel-concrete Composite Beams-Finite Element Analysis," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64, Issue 6, pp. 680-688.
14. 陳傑 (2008)，「預選塑性區鋼橋柱耐震行為之研究」，博士論文，國立臺灣科技大學，營建工程研究所，台北。
15. Bresler, B. (1974) "Reinforced Concrete Engineering: Volume I - Materials, Structural Elements, Safety," John Wiley & Sons, New York.
16. Mander, J.B., Priestley, M. J. N. and Park, R. (1998) "Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No.8, pp. 1804-1826.

表 1 本研究模擬 S-SRC 梁柱接頭試驗試體相關資料 [5, 6, 7]

試體 編號	參考 文獻	原始文獻 試體編號	試體重要參數					試驗結果				
			$\frac{\sum(M_{ns})_c}{(M_{ns})_b}$	$\frac{\sum(M_{nSRC})_c}{(M_{ns})_b}$	$\frac{(V_{ns})_{SRC}}{(V_u)_{SRC}}$	接頭鋼梁 處理方式	接頭區 箍筋型式	試體極限狀態 與耐震能力		最大層間 變位角 $(\theta_t)_u$ (%)	鋼梁塑 性轉角 $\theta_{bp}$ (%)	
								SRC 柱面 外之鋼梁	接頭區之 混凝土			
SRC1	Weng 等 (2008)[7]	SRC1-BOX-N	2.23	2.84	1.72	未切削 未補強	4 支 L 型 箍筋	鋼梁形成 良好塑性鉸	保持良好	6.20	5.35	
SRC2	徐振益 (2004)[5]	SRC2-VR1.15	1.87	2.62	1.15	未切削 未補強	未配置 箍筋	鋼梁形成 良好塑性鉸	輕微裂縫	6.20	5.48	
SRC3		SRC3-VR0.82	1.88	2.60	0.98					4.77	3.81	
SRC4		SRC4-VR0.82	1.91	2.64	0.82				微裂縫	5.73	4.78	
SRC5	楊宗翰 (2004)[6]	SRC2-MR1.26	1.26	1.85	0.76	未切削 未補強	4 支周邊 繫筋	鋼梁形成 良好塑性鉸	輕微裂縫	5.23	3.99	

註解：(1)  $(M_{ns})_c$  為 SRC 柱中鋼骨之標稱彎矩強度  
 (2)  $(M_{ns})_b$  為鋼梁之標稱彎矩強度  
 (3)  $(M_{nSRC})_c$  為 SRC 柱之標稱彎矩強度  
 (4)  $(V_{ns})_{SRC}$  為梁柱接頭區之鋼柱腹板（含疊合板）之標稱剪力強度  
 (5)  $(V_u)_{SRC}$  為梁柱接頭區之最大需求剪力強度



(a) 鋼梁接 SRC 柱

(b) SRC 梁接 SRC 柱

圖 1 SRC 梁柱接頭示意圖 (翁正強, 2004) [2]

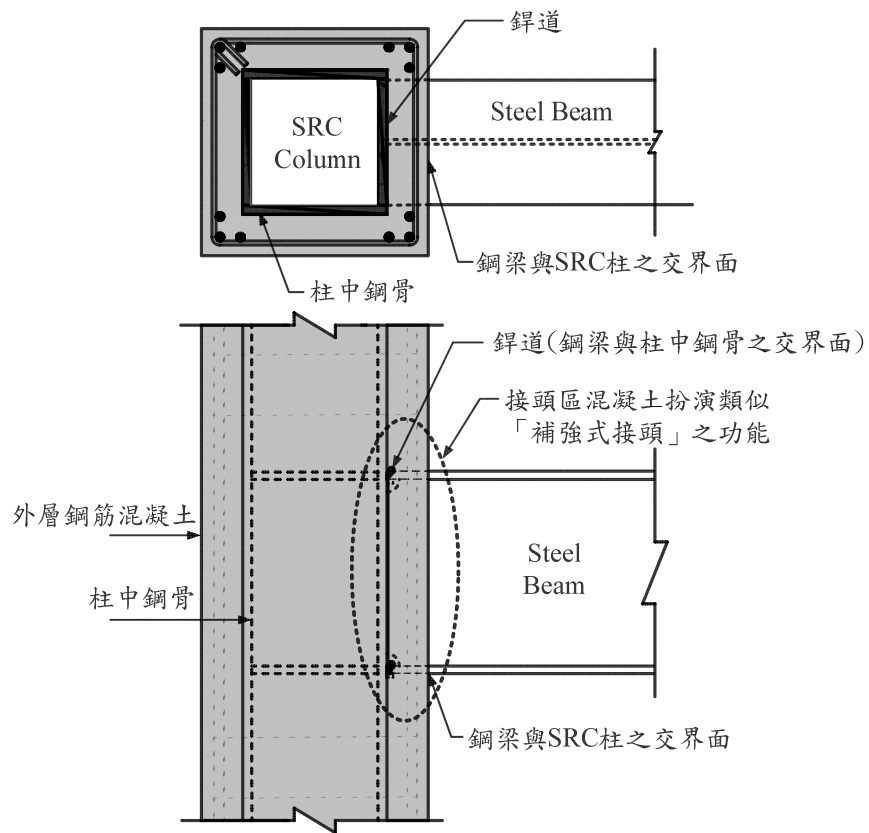


圖 2 S-SRC 梁柱接頭區之鋼筋混凝土扮演類似「補強式接頭」之功能

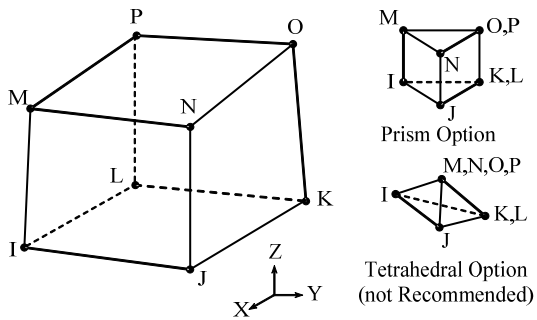


圖 3 SOLID45 元素示意圖 [4]

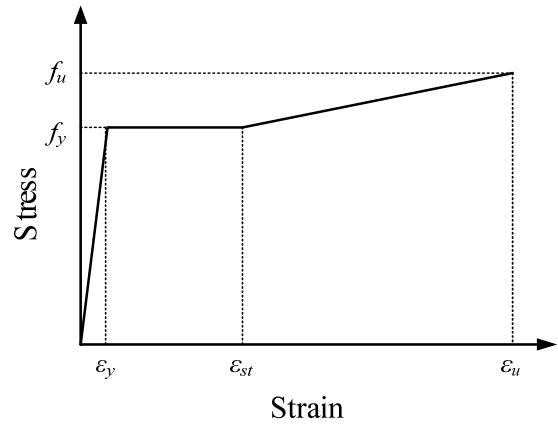


圖 4 鋼材及鋼筋應力-應變曲線

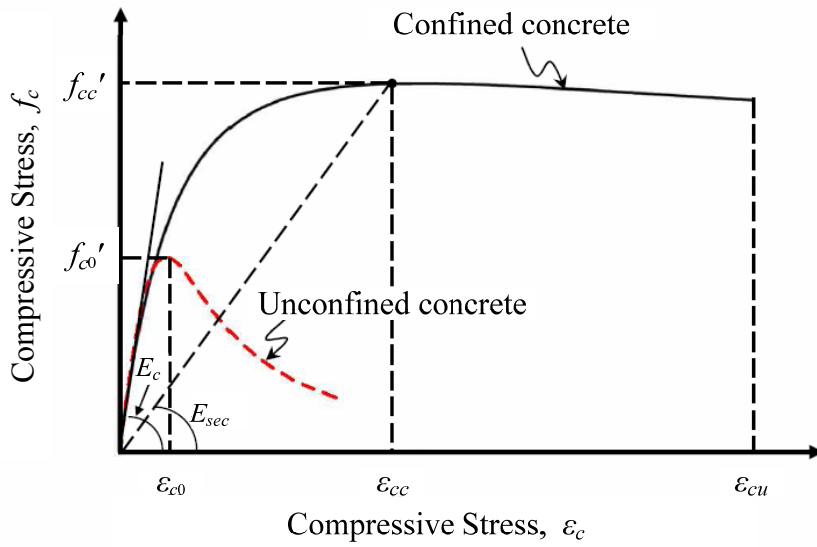


圖 5 混凝土應力-應變關係曲線 (Mander 等, 1998) [16]

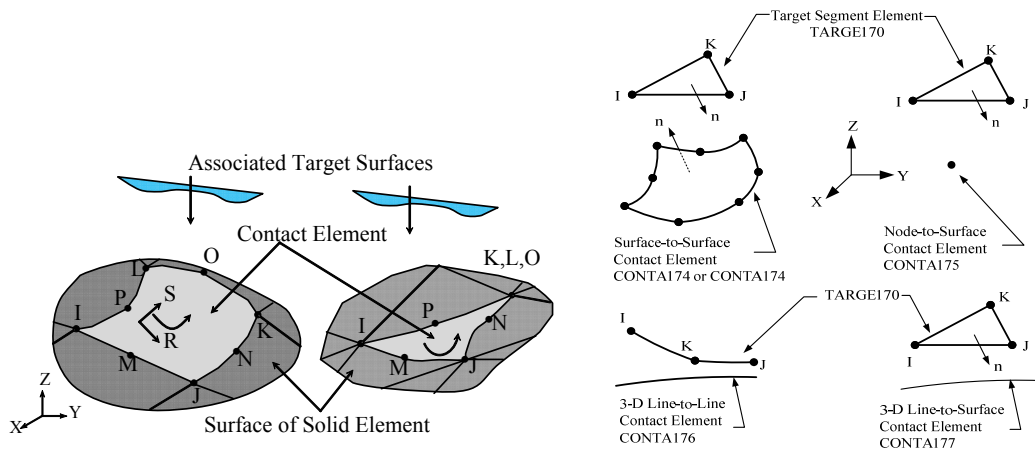


圖 6 CONTA174 與 TARGE170 元素幾何圖形與節點示意圖 [4]

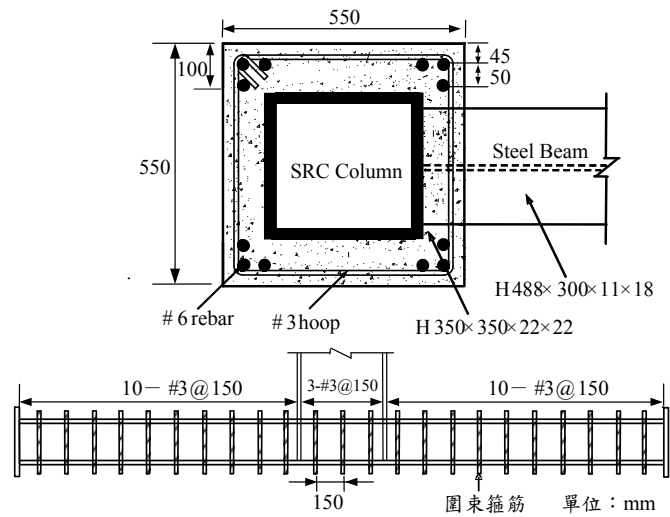


圖 7 SRC1 試體之柱斷面及箍筋配置圖 (Weng 等, 2008) [7]

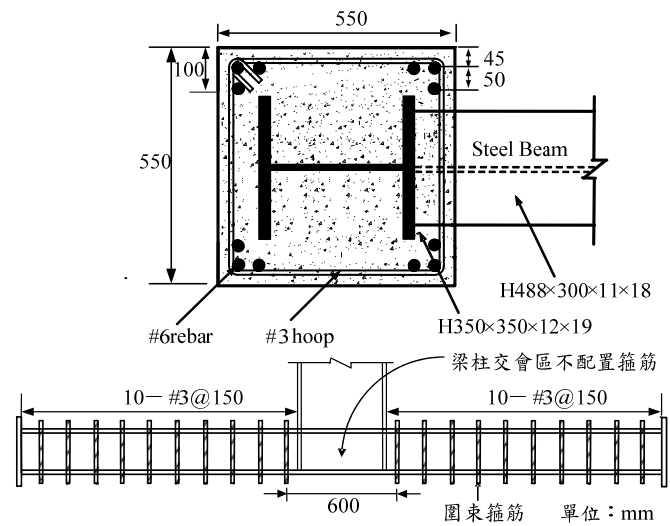


圖 8 SRC2 至 SRC4 試體之柱斷面及箍筋配置圖 (徐振益, 2004) [5]

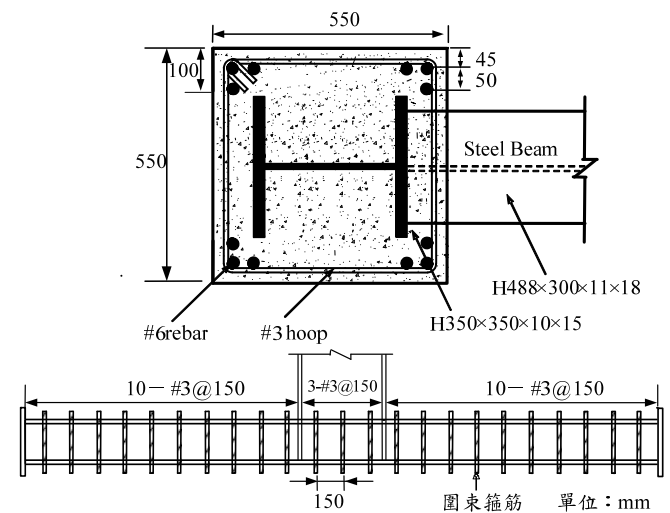


圖 9 SRC5 試體之柱斷面與箍筋配置圖 (楊宗翰, 2004) [6]

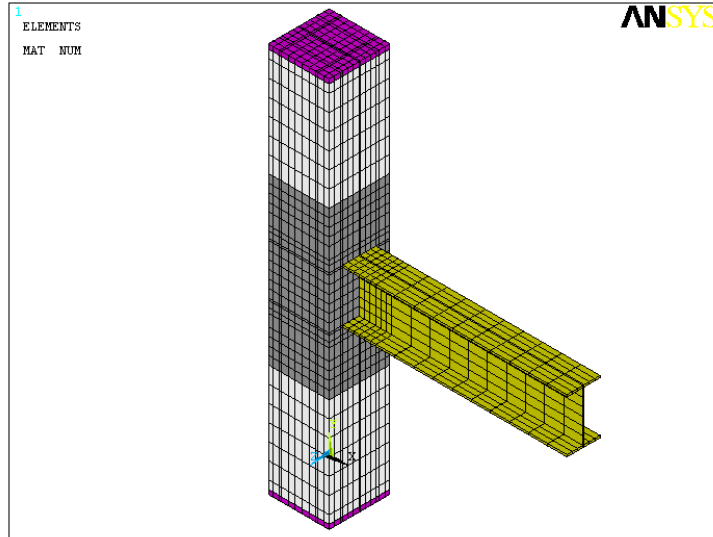


圖 10 以 ANSYS 模擬 S-SRC 梁柱接頭之有限元素網格示意圖

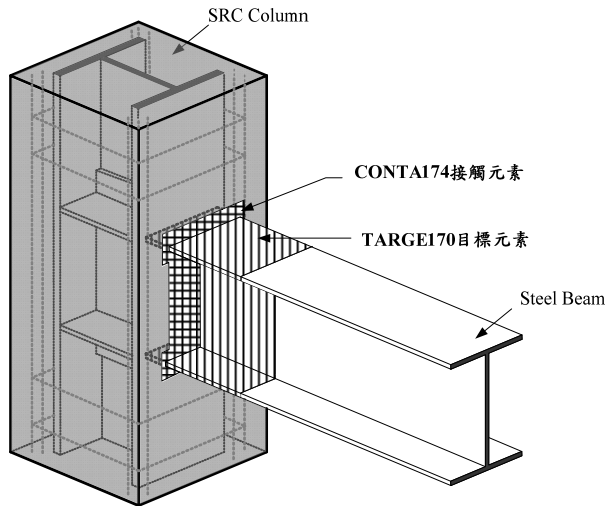


圖 11 在 S-SRC 梁柱接頭區使用接觸元素示意圖

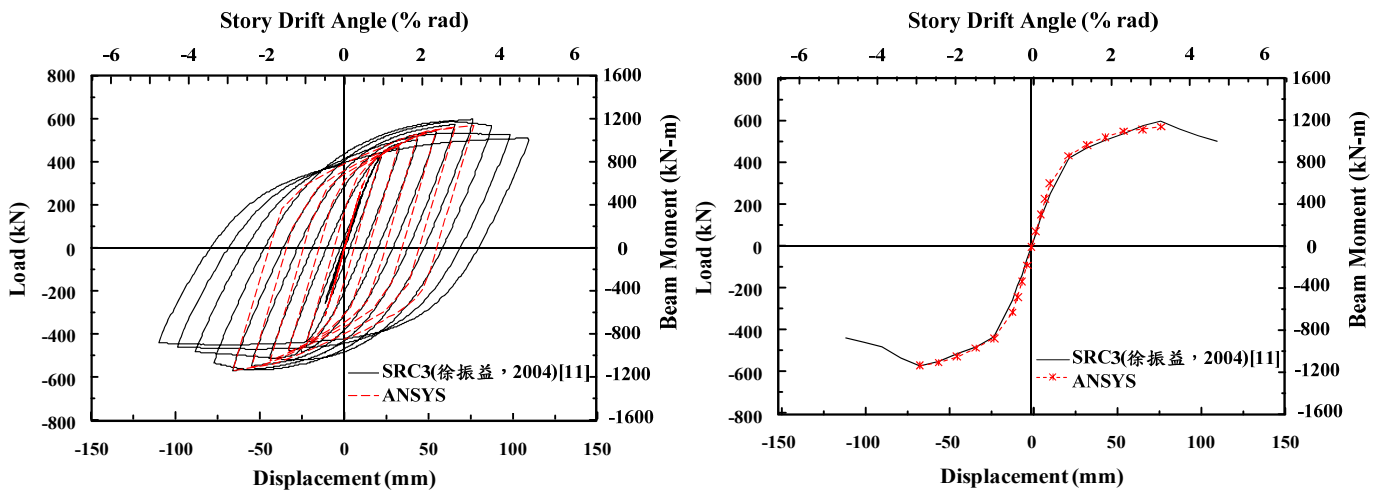
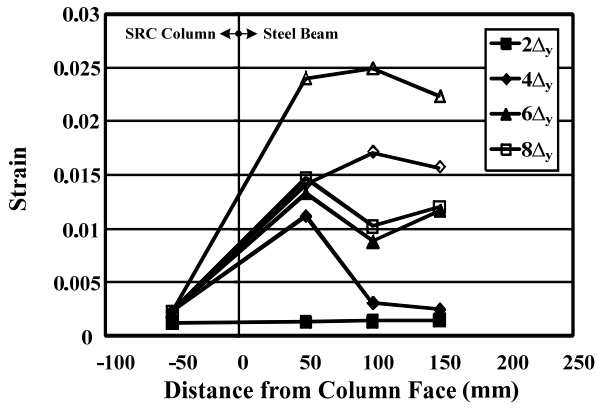
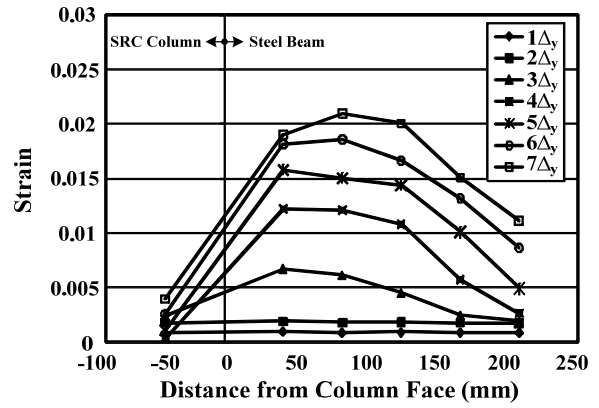


圖 12 以 ANSYS 模擬梁柱接頭試體 SRC3 之遲滯迴圈圖與載重-位移包絡線

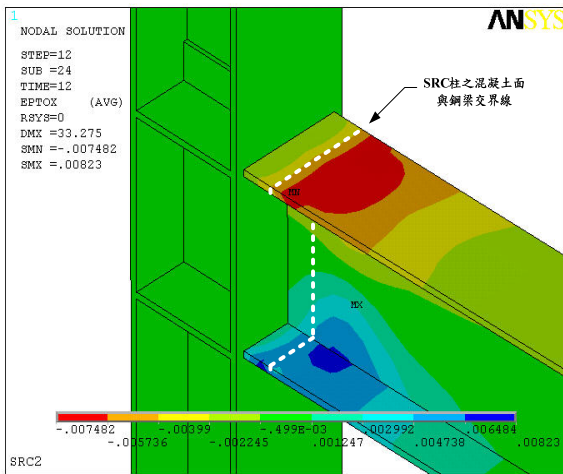


(a) 實驗所得試體 SRC1 之鋼梁翼板應變值

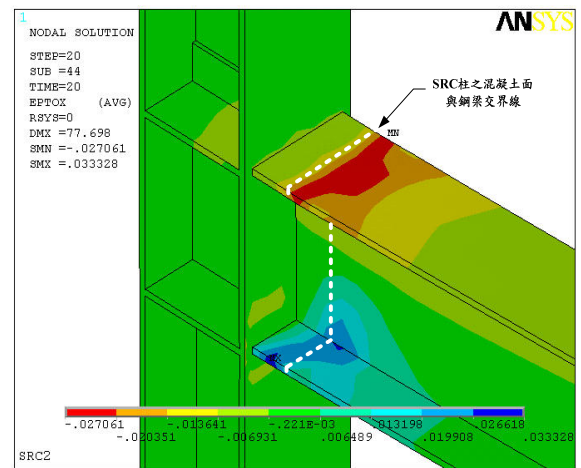


(b) ANSYS 模擬試體 SRC1 之鋼梁翼板應變值

圖 13 梁柱接頭試體 SRC1 之鋼梁翼板應變值變化情形

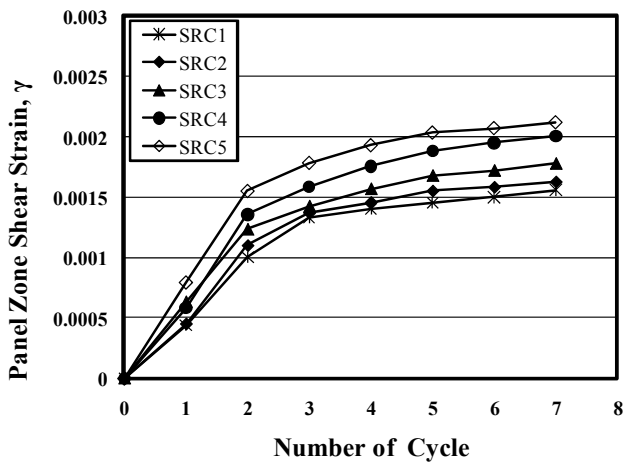


(a) 試體 SRC2 之鋼梁自由端位移達  $3\Delta y$  時

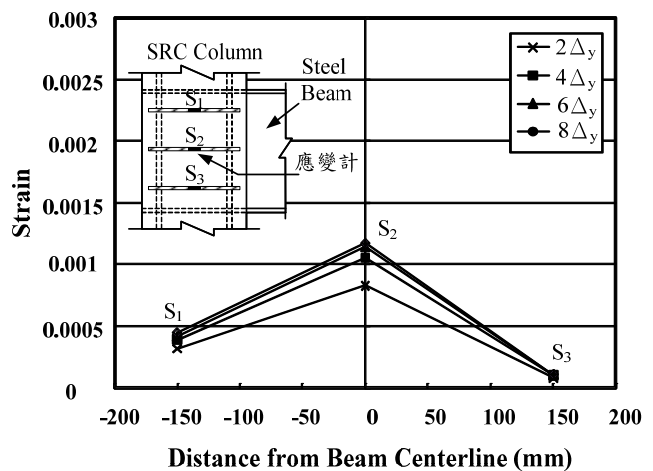


(b) 試體 SRC2 之鋼梁自由端位移達  $7\Delta y$  時

圖 14 以 ANSYS 模擬 S-SRC 梁柱接頭之鋼梁受混凝土束制下之應變的變化情形



(a) 五組接頭試體之鋼柱腹板剪應變



(b) 試體 SRC5 接頭之箍筋應變

圖 15 以 ANSYS 模擬 S-SRC 梁柱接頭之鋼柱腹板剪應變與箍筋應變之變化情形



## 計畫成果自評

1. 本研究內容與原計畫相符，亦達成原定預期之主要目標。目前正將研究成果撰寫為學術論文，擬將論文投稿於知名學術期刊。
2. 研究成果之學術或應用價值：
  - 本研究運用 ANSYS 有限元素軟體分析與探討 SRC 梁柱接頭之力學行為與耐震能力。分析結果顯示，由於 SRC 梁柱接頭之鋼梁插入 SRC 柱內，該部份的鋼梁受到接頭區混凝土的有效束制，使得鋼梁能夠在「SRC 柱混凝土面外」發展出良好的塑性鉸，可以有效的避免鉸道發生脆性破壞，此現象顯示 SRC 梁柱接頭區之混凝土可以發揮保護接頭內部鉸道之功能。
  - 本研究發現，經過適當設計的 SRC 梁柱接頭具備良好的耐震能力，此種接頭之鋼梁不需補強(加鉸蓋板、側翼板、肋板)亦不需減弱(切削鋼梁翼板)，能夠發揮適當之強度與韌性。
  - 本研究成果除了具備學術與工程應用價值外，亦將有助於作為修訂我國「鋼骨鋼筋混凝土構造(SRC)設計規範」之重要參考資料。

# 出席國際學術會議心得報告

**會議名稱：第五屆世界結構控制與監測會議 ( The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring )**

**會議時間： 2010 年 7 月 12 日至 15 日**

**會議地點：日本東京市新宿區 Keio Plaza Hotel 會議廳**

**報 告 人：國立交通大學土木工程系 翁正強**

第五屆世界結構控制與監測會議 (The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, 5WCSCM) 於2010年7月12日至15日在日本東京市新宿區之Keio Plaza Hotel 召開。

世界結構控制與監測會議是國際上探討結構控制與健康監測工程領域頗有影響力的會議之一。本次會議由國際結構控制與監測協會 (International Association of Structural Control and Monitoring, IASCM)主辦，並由日本學術振興會 (Japan Society of Promotion of Science, JSPS)與亞太智慧型結構科技研究中心聯盟 (The Asian-Pacific Network of Centers for Research in Smart Structure Technology, ANCRiSST)共同贊助。

本屆大會主席為東京大學土木系之藤野陽三教授 (Prof. Yozo Fujino) 與早稻田大學建築系之西谷章教授 (Prof. Akira Nishitani)，這是日本十二年來第二次舉辦本會議，上屆大會(第四屆)於2006年7月在美國加州大學聖地牙哥分校 (UCSD) 舉行。

本次會議有超過 350 位來自世界各個國家和地區相關之國際組織官員、專家、學者、工程師參加。本屆結構控制與監測會議主要包含以下三項主題：

1. 結構健康監測 (Structural Health Monitoring)，主要包含以下子題：Structure diagnosis, damage detection, sensor application, remote sensing, system identification, etc.
2. 振動控制 (Vibration Control)，主要包含以下子題：Active control, semi-active control, passive control, base-isolation, motion control, damping augmentation, device invention,

application of civil structures, etc.

3. 智慧材料與結構 (Smart Materials and Structures)，主要包含以下子題：Actuator technology, intelligent materials, dissipation materials, shape memory alloy, sensor materials, self-adaptive structures, etc.

本人於7月10日搭乘長榮航空 BR2198 號班機由台北飛往日本，於當日傍晚抵達東京成田機場，隨即搭乘機場巴士轉赴位於東京市內新宿區的旅館。本次世界結構控制與監測會議也有許多台灣學者參加，例如台灣大學土木系羅俊雄教授、交通大學土木系黃炯憲教授、高雄第一科技大學營建系盧鍊元教授與施明祥教授等。各國學者專家得以於大會期間廣泛交流結構控制與健康監測工程方面之最新學術成果，展望此領域中最新的科技發展趨勢。

本次大會活動從7月12日上午開始辦理報到及與會人員交誼活動，隨即進行簡單的開幕式。於開幕式結束後安排兩場特邀專題演講 (Keynote Speech)，由大會邀請國際知名學者英國雪菲爾德 (Sheffield University) 土木系之 James Brownjohn 教授與京都大學防災研究所之中島正愛(Masayoshi Nakashima) 教授，分別演講結構健康監測與結構控制方面之最新研究發展情況以及未來的展望。其演講題目分別為：

1. James Brownjohn 教授

“STRUCTURAL HEALTH MONITORING AND REAL-TIME PERFORMANCE  
DIAGNOSIS OF LANDMARK STRUCTURES IN THE UK”

2. 中島正愛教授

“ROLES OF LARGE-SCALE SHAKING TABLE TESTING FOR VERIFICATION  
OF ADVANCED TECHNOLOGIES ON STRUCTURAL CONTROL AND  
MONITORING”

近年來，世界各地頻頻發生大地震，且由於日本與台灣同處環太平洋地震帶，結構耐震安全、監測與評估設計的重要性無庸置疑，因此發展先進結構控制與健康監測科技，並朝向智慧材料與結構方向發展，乃成為本次會議的重點議題。

本會議由於議題較廣故分為多項主題發表及討論，在多個會場分別同時進行。各國學者專家得以針對自己關心之主題於大會期間廣泛交流最新學術研究與工程應用成果，並探討此領域未來發展之新趨勢。

本人身為台灣居民的一份子且長期從事建築耐震相關的教學與研究工作，自從1999

年發生921大地震之後，深深感受到建築物地震災害防治的重要性與緊迫性。加上過去兩年來，世界各地相繼發生規模超過七以上的大地震，如中國汶川、海地、智利、印尼、紐西蘭等地區，更加令人覺得地震災害防治不可等閒視之！雖然隨著國內經濟成長、社會發展與世界潮流的進步，近年來建築物的隔震與減震技術之研究與發展逐漸趨於成熟，國內工程師亦可以依據設相關建築耐震計規範之規定，並運用隔減震裝置之技術與產品以改善建築物之耐震能力。不過，本人對於目前的建築物地震災害防治工作仍然有以下的感想與期許：

1. 近年來，隔震與減震裝置多數應用於新蓋的建築物，然而畢竟居住在「新建築」的人口尚屬社會中的少數，大多數的普通老百姓仍然居住在抗震能力較弱的一般「舊住宅」之中。換言之，隔減震技術雖然有長足的進步與應用潛力，仍然尚未嘉惠於大多數居住在普通住宅的民眾。
2. 上述的現象並非台灣獨有，而是一個全球性的問題！不過，此一問題似乎並未在此次世界結構控制與監測會議中獲得較高层次的重視。大多數的研究仍然偏向於應用在新增建築物。本人對於居住在地震頻繁地區之普通「舊住宅」的民眾感到憂心，因為目前的隔震與減震技術之研究成果對廣大的群眾受益尚未普及。
3. 持平而論，改善一般「舊住宅」的耐震能力有其特殊的「工程方面」技術困難與「社會方面」的施行障礙，以致於此一問題未能夠在政府部門或學術界進行較具深度的研究。因此，這似乎是一個「接近無解或困難度極高的問題」。可是萬一真有大地震來襲，倘若震央接近人口稠密的都會區，那將是一個「最不願意面對的真相」！
4. 因此，相對於「新建築」享受到較多的隔減震新技術之益處，本人誠摯的呼籲政府部門或學術界能夠再次針對提升一般「舊住宅」耐震能力的議題，進行更為廣泛且更具深度的討論與研究，以挑戰此一接近無解或困難度極高的問題！因為此一問題可能是我們「最不願意面對的真相」。

另一方面，本人亦注意到近年來「中間層隔震建築技術」的快速發展與應用，此一技術將傳統「基底隔震建築技術」的耐震設計概念進一步提升。隨著隔震技術漸趨成熟，特別是以鉛心橡膠支承墊(Lead Rubber Bearing, LRB)的技術發展，除了基底隔震建築外，由於中間層隔震建築不需於建築基底處留下隔震器位移之空間，更能夠配合都會區的建築基地條件及許多外在因素之需求，使得中間層隔震建築逐漸成為許多業主、建築師及結構技師所喜愛的選項。

近年來，台灣新建的醫院、公共與民間建築物採用隔震技術者日益增加，醫院方面如慈濟醫院的花蓮、新店、潭子醫院，公共建築物如台北市地政及災害應變中心辦公大樓及谷關聯勤指揮中心等。民間建築物採用隔震系統者如富邦大衛營、捷運公館站聯合開發大樓等。在台大附近的捷運公館站聯合開發大樓則為台灣第一棟中間層隔震建築案例。此外，最近甫完工啟用由潤泰集團捐贈給台大的土木研究大樓也是屬於中間層隔震建築，該大樓於一、二樓間加入隔震層，採用國內自行設計之鉛心橡膠隔震支承及美國 Taylor Device 公司捐贈之阻尼器。當地震來臨時，將可有效減少大樓之水平方向搖晃程度，並期望於大地震來襲時結構體不致受到損傷。

一般而言，建築物隔震之主要目的在於「隔離地震的震波進入建築物」，因此它是從「根本上」來降低建築物所受到的水平地震力影響，是一種最原始、也是最道地的抗震觀念。在結構設計專業方面，隔震建築通常需具有消能裝置以控制建築物因週期延長所可能導致的位移增加，且須具有足夠之水平勁度以抵抗風力及具有足夠的回復勁度，使隔震結構在經過地震後能夠回復到原本的位置。

由於國內大型結構耐震試驗的設備與技術不斷的進步，本人相信若能配合相關耐震設計規範之更新與修訂，「隔震建築技術」相當值得進一步加速研發與推廣應用。我國第一個有關建築物隔震設計規範已經於2002年4月由內政部正式頒布，並於2005年之「建築物耐震設計規範」中增加「隔震設計」相關章節。期望國內能藉由政府部門持續推動建築耐震設計規範之修訂，再經由學術界與工程界不斷的研究發展，並落實設計與施工品質，如此將有助於大幅提升國內建築之耐震能力。

最後，本人於7月15日傍晚搭乘長榮航空 BR2195 號班機由日本東京返抵國門。整體而言，第五屆世界結構控制與監測會議不僅為各國相關之國際組織官員、專家、學者提供學術交流的機會，同時還舉辦工程參觀等系列活動，為相關企業和研究機構提供展現最新結構控制與監測研究成果的平台。本次會議有利於加強國際交流與合作，成功的促進各國在結構健康監測技術、振動控制工程、智慧材料與結構以及建築物隔減震技術領域方面進行廣泛的交流與探討。

無研發成果推廣資料

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：翁正強		計畫編號：98-2221-E-009-096-				計畫名稱：SRC 梁柱接頭力學行為之數值模擬分析	
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	0%	篇	
		研究報告/技術報告	1	1	100%		
		研討會論文	0	0	0%		
		專書	0	0	0%		
	專利	申請中件數	0	0	0%	件	
		已獲得件數	0	0	0%		
	技術移轉	件數	0	0	0%	件	
		權利金	0	0	0%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	2	2	100%	人次	
		博士生	2	2	100%		
博士後研究員		0	0	0%			
專任助理		0	0	0%			
國外	論文著作	期刊論文	0	0	0%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	0%		
		研討會論文	0	0	0%		
		專書	0	0	0%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	0%	件	
		已獲得件數	0	0	0%		
	技術移轉	件數	0	0	0%	件	
		權利金	0	0	0%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	0%	人次	
		博士生	0	0	0%		
博士後研究員		0	0	0%			
專任助理		0	0	0%			

<p style="text-align: center;">其他成果</p> <p>(無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>1. 本研究之成果將有助於作為修訂我國「鋼骨鋼筋混凝土構造(SRC)設計規範」之重要參考資料。</p> <p>2. 本研究發現，經過適當設計的 SRC 梁柱接頭具備良好的耐震能力，此種接頭之鋼梁不需補強(加鉸蓋板、側翼板、肋板)亦不需減弱(切削鋼梁翼板)，能夠發揮適當之強度與韌性。</p>
---	--

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	





# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本研究採用 ANSYS 有限元素軟體對「SRC 梁柱接頭」之力學行為進行數值模擬分析，並與一系列申請人已完成之實尺寸 SRC 梁柱接頭反復載重實驗結果互相比對。

經由驗證過程建立 SRC 梁柱接頭之分析模型，並繼續在此基礎上進一步探討各項可能影響梁柱接頭強度與韌性之重要參數。相關參數包括材料強度、斷面尺寸、接頭區箍筋之配置、SRC 梁柱接頭之型式、梁柱接頭之彎矩強度、接頭區之剪力強度等。

本研究從數值模擬分析的角度提供學術界與工程界對「SRC 梁柱接頭」之力學行為與耐震能力更進一步的瞭解，同時並針對「SRC 梁柱接頭」之鋼梁是否需切削或補強進行探討，進而建立其相關數值模擬分析模型，並發展一合理的分析與設計方法以供工程界參考。

