

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 壓拉桿模式應用於評估 SRC 深梁抗剪強度之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-009-022-

執行期間：93年08月01日至94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

報告類型：精簡報告

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 94 年 9 月 7 日

# 壓拉桿模式應用於評估 SRC 深梁 抗剪強度之研究

## EVALUATION OF SHEAR STRENGTH OF SRC DEEP BEAMS WITH STRUT-AND-TIE MODEL

計畫編號：NSC93-2211-E-009-022

執行時間：93 年 8 月 1 日至 94 年 7 月 31 日

主持人：翁正強 交通大學土木工程系教授

### 一、摘要

本研究根據 21 支鋼骨鋼筋混凝土 (steel reinforced concrete, SRC) 深梁之實驗結果，深入觀察 SRC 深梁的力學行為與破壞模式，嘗試提出一套 SRC 深梁抗剪強度的評估新方法。本質上，由於 SRC 梁屬於鋼梁與鋼筋混凝土(RC)梁之組合體，因此本研究建議採用強度疊加 (strength superposition) 之概念，結合美國 AISC-LRFD 鋼結構規範 (2005) 對鋼梁剪力強度之計演算法與 ACI-318 混凝土規範 (2002) 對 RC 深梁壓拉桿模式 (strut-and-tie model) 之剪力強度計演算法。然後，再針對 SRC 深梁中鋼骨斷面與 RC 之間相互影響之特性進行必要之修正。本研究在實驗中觀察發現，SRC 深梁內部的鋼骨因為受到 RC 的包覆，可以有效的避免局部挫屈(local buckling) 的問題，使鋼骨腹板在極限狀態下可以發揮剪力降伏強度。另一方面，實驗結果亦顯示 SRC 深梁在發生斜張裂縫之後，會形成類似桁架(truss)之壓拉桿模式，由拉力鋼筋和鋼骨之受拉翼板共同構成拉力桿件 (tie)，而在施力點與支承點之間的混凝土則構成一壓力桿件 (strut)。本研

究藉由 21 支 SRC 深梁之實驗資料，最終驗證本研究建議的剪力強度評估法可以合理的預測 SRC 深梁之極限抗剪強度。

**關鍵詞：**SRC 深梁、抗剪強度、實驗資料、壓拉桿模式、剪力強度評估法

### Abstract

Based on the test results of 21 steel reinforced concrete (SRC) deep beams, a new method is proposed to evaluate the shear strength of the SRC deep beams. Among the major building codes around the world today, it is noted that there is no specific provisions outlined for the design of SRC deep beams. Since an SRC deep beam is basically a combination of a steel shape and a reinforced concrete deep beam, it is reasonable to evaluate its shear strength using the concept of strength superposition. In this study, the strut-and-tie model of the ACI-318 code (2002) and the plate girder provisions of the AISC-LRFD specification (2005) is referred to evaluate the shear

strength of the SRC deep beams, with some necessary modifications to account for the composite nature of the two major components. It is hoped that the results of this investigation will provide further understanding on the true mechanical behavior of the SRC deep beam. By comparing the predicted shear strengths with the experimental results of SRC deep beams collected from the literature, it is found that the proposed method is capable of predicting the shear strength of SRC deep beams with sufficient accuracy.

**Keywords :** Steel Reinforced Concrete (SRC), Deep Beam, Shear Strength Evaluation, Test Results, Strut-and-Tie Model.

## 二、前言

鋼骨鋼筋混凝土 (steel reinforced concrete, SRC) 構造由於結合了鋼骨 (S) 與鋼筋混凝土 (RC) 兩種材料, 使得經由適當設計的 SRC 構造可以有效發揮這兩種材料的優點。近年來, 由於建築功能需求與結構安全之雙重考量, 國內採用 SRC 構造之建築物有日益增加之趨勢。

一般而言, 深梁 (deep beam) 主要為剪力控制設計之桿件, 故預測深梁之抗剪強度乃成為一重要之課題。本研究以包覆型 SRC 深梁構材為研究對象, 但由於目前國內外相關設計規範並無明確規定如何區分 SRC 梁為「深梁」或「一般梁」, 因此本研究乃初步依據美國 2002 年出版的 ACI-318 規範[1], 以梁淨跨距與梁全深之比值 ( $l_n/h$ , 簡稱跨深比) 為 4.0 時作為區分 SRC 深梁與 SRC 一般梁之基準。

就 RC 深梁而言, 現行 ACI-318 規範之深梁抗剪強度的預測方法乃採壓拉桿模式 (strut-and-tie model), 壓拉桿模式乃

是將混凝土結構物整體或局部模擬成桁架 (truss) 之形狀, 將各種形式之外力, 透過力平衡關係, 轉換成桁架各桿件之內力[2~4]。它們主要是由三個部份所構成 (如圖 1 所示): 第一部份稱為壓桿 (strut), 用以承受壓力, 通常指承壓之混凝土; 第二部份稱為拉桿 (tie), 用以承受拉力, 包含拉力鋼筋、預力鋼腱等; 第三部份稱為節點 (node), 即各力交會之區域。壓拉桿模式破壞的原因乃在於混凝土壓桿的壓碎、鋼筋拉桿的失敗、或節點區的混凝土被壓碎[5~7]。另一方面, 美國 AISC-LRFD 鋼結構設計規範[8] 中並沒有以跨深比作為區分深梁或一般梁之基準, 而是以鋼梁斷面之腹板深厚比 ( $h_s/t_w$ ) 之大小將鋼梁區分為一般梁與鉸梁 (plate girder) 兩大類。

在國內探討 SRC 梁之剪力強度研究方面, 程幼棣[9]於 1997 年針對一般包覆型 SRC 梁之剪力強度進行探討。林佳宏[10]於 2001 年藉由一系列 SRC 深梁試驗, 探討 SRC 深梁在單向載重作用之力學行為。方志楷[11]於 1999 年進行包括鋼梁、混凝土梁及 SRC 梁之剪力載重實驗, 以探討 SRC 深梁之剪力強度與韌性。陳佑任[12]於 2001 年進行 SRC 深梁之試驗, 試驗參數主要包括腹板深度變化、腹板厚度變化、鋼骨表面處理及鋼骨端部之錨定等。洪浩傑[13]於 2003 年進行一系列 SRC 深梁剪力試驗, 試驗參數主要包括腹板鋼材強度之變化、腹板開縫之型式及加勁板之有無等。

在設計規範方面, 目前美國 ACI-318 設計規範僅針對 RC 深梁之設計有相關之規定, 對於 SRC 深梁的剪力設計強度尚無明文規定; 美國 AISC-LRFD 鋼結構設計規範對於包覆型合成梁 (composite beam) 之剪力強度計算係依照純鋼梁之方式計算, 亦即對於 SRC 梁之剪力強度只考慮鋼骨之剪力強度。因此, 若是直接採用 AISC-LRFD 規範來計算 SRC 深梁的剪力強度將會偏於過度保守。故本研究擬採用最近內政部公告的我國「SRC 構造設計

規範與解說」[14]中強度疊加之概念，結合 AISC-LRFD 規範與 ACI-318 規範，以探討 SRC 深梁剪力強度評估之可行性。本研究共收集 21 支前人的 SRC 深梁實驗資料進行比較，以驗證本研究建議的 SRC 深梁剪力評估法之合理性。

### 三、相關設計規範回顧

近年來，許多研究成果陸續驗證壓拉桿模式可以合理的預測 RC 深梁之剪力強度[2~7]，因此最新版的美國 ACI 318-02 規範針對 RC 深梁的剪力評估方式已採用壓拉桿模式來計算。以下將分別針對 ACI 318-02 規範及 AISC-LRFD-99 規範對於深梁之相關規定作一簡要回顧。

#### 3.1 美國 ACI-318 規範

美國 ACI 318-02 設計規範採用壓拉桿模式來預測 RC 深梁之抗剪強度。圖 1 顯示一個典型的 RC 深梁壓拉桿模型 [4]，壓拉桿模式破壞的原因乃在於混凝土壓桿的壓碎、鋼筋拉桿的失敗、或節點區的混凝土被壓碎。因此，在設計時需依下式分別檢核壓桿、拉桿與節點區之強度：

$$\phi F_n \geq F_u \quad (1)$$

其中  $\phi$  為強度折減係數； $F_n$  為壓桿、拉桿或節點區所能提供之計算強度 (nominal strength)； $F_u$  為作用在壓桿、拉桿或節點區之設計力。

以下分別說明壓桿強度  $F_{ns}$ 、拉桿強度  $F_{nt}$  及節點區強度  $F_{mn}$  之計算方式：

##### 3.1.1 壓桿強度 $F_{ns}$ 之計算：

$$F_{ns} = f_{cu} A_c \quad (2)$$

其中  $f_{cu}$  為壓桿或節點區混凝土之有效抗壓強度； $A_c$  為壓桿之斷面積，為壓桿有效寬度與構材厚度之乘積。混凝土有效抗壓強度  $f_{cu}$  為下列公式(3)與(4)之小值：

$$f_{cu} = 0.85 \beta_s f_c' \quad (3)$$

$$f_{cu} = 0.85 \beta_n f_c' \quad (4)$$

其中公式(3)中之  $\beta_s$  為壓桿混凝土有效抗壓強度受開裂及圍束鋼筋影響之修正因數。若壓桿全長具均勻斷面積時， $\beta_s$  取為 1.0；若壓桿在中央部份之受壓混凝土寬度可朝側向伸展者 (瓶狀壓桿)，當配置的鋼筋足以抵抗壓桿中因壓力傳遞所產生的橫向拉力時，則  $\beta_s$  可取為 0.75，未配置足夠鋼筋時， $\beta_s$  取為 0.6；若壓桿之壓力傳遞需穿過拉力區裂縫時， $\beta_s$  取為 0.4。公式(4)中之  $\beta_n$  為節點區混凝土有效抗壓強度受拉桿錨定影響之修正因數，其主要考量為在節點區的拉桿錨定情形。若節點區單純由壓桿或支承面或兩者共同圍封時， $\beta_n$  取為 1.0；節點區錨定單根拉桿時取 0.8；節點區錨定兩根或多根拉桿時取 0.6[1]。

##### 3.1.2 拉桿強度 $F_{nt}$ 之計算：

$$F_{nt} = A_{rt} f_{yr} \quad (5)$$

其中  $A_{rt}$  為拉力鋼筋之斷面積； $f_{yr}$  為拉力鋼筋之規定降伏強度。

##### 3.1.3 節點區強度 $F_{mn}$ 之計算：

$$F_{mn} = f_{cu} A_n \quad (6)$$

其中  $f_{cu}$  依公式(4)計算； $A_n$  為節點區上設計力  $F_u$  作用面之面積，為節點區寬度與構材厚度之乘積。

#### 3.2 美國 AISC-LRFD 規範

目前美國 AISC-LRFD 鋼結構設計規範對於包覆型合成梁之剪力強度計算係依照純鋼骨梁之方式計算，亦即該規範對於 SRC 梁之剪力強度只考慮鋼骨腹板之剪力強度，尚未明確包含混凝土及箍筋所提供之剪力強度計算方式。純鋼梁之剪力設計基本公式如下：

$$\phi (V_n)_s \geq (V_u)_s \quad (7)$$

其中  $\phi = 0.9$  為強度折減係數； $(V_n)_s$  為鋼梁之計算剪力強度； $(V_u)_s$  為鋼梁之需求

剪力強度。

依 AISC-LRFD 規範之規定，鋼梁剪力強度的大小與腹板之深厚比及是否設計加勁條有關。對於腹板未加勁的鋼梁，AISC-LRFD 規範中限制腹板之深厚比， $h_s/t_w$ ，不得大於 260。其剪力強度可依以下公式計算：

當  $\frac{h_s}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{yw}}}$  時：

$$(V_n)_s = 0.6F_{yw}A_w \quad (8)$$

當  $\frac{418}{\sqrt{F_{yw}}} < \frac{h_s}{t_w} \leq \frac{523}{\sqrt{F_{yw}}}$  時：

$$(V_n)_s = 0.6F_{yw}A_w \times \left( \frac{418/\sqrt{F_{yw}}}{h_s/t_w} \right) \quad (9)$$

當  $\frac{523}{\sqrt{F_{yw}}} < \frac{h_s}{t_w} \leq 260$  時：

$$(V_n)_s = \frac{132,000A_w}{(h_s/t_w)^2} \quad (10)$$

#### 四、SRC 深梁之力學行為

目前 ACI 318-02 規範採用壓拉桿模式來預測 RC 深梁之剪力強度。在 RC 深梁的斜張裂縫形成後，混凝土和拉力鋼筋會分別形成壓桿與拉桿來承受載重，外載重經由混凝土壓桿傳遞至支承，並由鋼筋拉桿之水平力來保持平衡關係。本文將依據前人的試驗中所觀察到的現象來說明 SRC 深梁也會發展出壓拉桿模式，並觀察 SRC 深梁中之鋼骨、鋼筋與混凝土如何透過壓拉桿模式來承受載重。

##### 4.1 SRC 深梁裂縫之發展與壓拉桿模式

照片 1 顯示林[10]研究的 SRC 深梁在不同的載重作用下裂縫發展之情形(試體 DB2-15-NS)。由照片中可以發現，SRC

深梁與一般 RC 深梁之裂縫發展過程頗為相近，顯示在裂縫形成之後都是藉由壓拉桿來傳遞載重。實驗過程中發現，當載重持續增加，但在未達極限載重之前，雖然仍有新的裂縫產生，但此時 SRC 深梁仍處於壓拉桿模式之穩定狀況。當載重增加至極限時，壓拉桿亦同時達到臨界狀態，隨之而來的是穩定狀態遭受破壞而造成強度下降。照片 2 為林[10]研究的 SRC 深梁(試體 DB1-15-NS)在最大載重時之狀況，顯示 SRC 深梁在加載至極限載重時，由於混凝土壓桿遭到壓碎而造成明顯破壞的情形。

照片 3 顯示林[10]研究的 SRC 深梁兩側被壓碎混凝土剝除後之情形(試體 DB1-15-NS)。由照片 3 可以發現，SRC 深梁鋼骨上下翼板內側之混凝土因為受到翼板的保護而沒有被壓碎，亦即 SRC 深梁的 RC 部份僅在鋼骨翼緣左右兩側之混凝土有發生壓碎之現象(如圖 2 所示)本研究將依據此一現象，在計算 SRC 深梁的混凝土部份之剪力強度時，將翼板左右兩端內外側混凝土抗壓強度乘以不同的折減係數，以反映 SRC 深梁的混凝土在受力時的實際行為，SRC 深梁之混凝土壓桿強度的計算方式將詳述於第 5.2 節。

##### 4.2 拉力鋼筋及鋼骨受拉翼板之應變分佈

SRC 深梁在斜張裂縫形成後，應變計的讀數顯示拉力鋼筋及鋼骨受拉翼板之應變量頗為接近，且在彎矩最大位置(SRC 深梁長度方向的中點)所測得之應變計讀數與靠近支承點附近測得之值差異不大，亦即拉力鋼筋與鋼骨受拉翼板在沿著梁長度方向的應變分佈曲線接近一水平線，顯示 SRC 深梁之拉力鋼筋及鋼骨受拉翼板在斜張裂縫形成後受到均勻拉力作用，發展成拉桿模式來承受載重。另一方面，在施力點與支承之間的混凝土則形成壓桿，此種現象可以視為一類似桁架結構，這也就是壓拉桿模式。

反觀跨深比( $l_n/h$ )大於四的一般

簡支梁受集中載重作用時，其拉力鋼筋沿著梁長度方向所產生的最大應變通常出現在彎矩最大的位置，而愈接近支承處所量測到的應變則愈小。亦即不屬於深梁的一般撓曲構材，其拉力鋼筋沿著梁的長度方向之應變分佈情形會有明顯的梯度變化，而不會像深梁中拉力鋼筋的應變分佈接近一水平線。

### 4.3 SRC 深梁之韌性

圖 3 為林[10]研究中之 SRC 深梁試體 (DB5-15-WS) 及一般 RC 深梁試體之載重 - 位移曲線之比較圖。由圖中可以看出 SRC 深梁試體在達到極限載重後，可以保有一段較長且較穩定的承載能力。此一現象與一般 RC 深梁有明顯的不同，如圖中所示，一般 RC 深梁試體在達到極限載重之後，不久隨即發生強度驟然下降之破壞情形。本研究根據實驗觀察發現，當 SRC 深梁發生混凝土斜壓支桿被壓碎後，由於 SRC 梁內部尚有鋼骨存在，故可以經由應力重新分配讓鋼骨腹板來繼續承擔混凝土壓碎後的外力，此種現象是導致 SRC 深梁具有較佳韌性之主要原因。

## 五、本研究建議之 SRC 深梁抗剪強度評估法

本研究依據 21 支 SRC 深梁之實驗資料，深入觀察 SRC 深梁中鋼骨斷面與鋼筋混凝土之間的相互影響，然後嘗試採用強度疊加之方法並進行必要之修正來求得 SRC 深梁之抗剪強度。表 1 與表 2 為本研究與所收集到的 SRC 深梁試體之尺寸與材料強度資料。基本上，本研究建議的方法主要是結合 AISC-LRFD 之鋼骨設計規範與 ACI-318 之 RC 設計規範，採用強度疊加之觀念將 SRC 深梁中鋼骨部份與 RC 部份之剪力強度相加，以求得其剪力強度  $(V_n)_{prop}$ 。亦即

$$(V_n)_{prop} = (V_n)_s + (V_n)_{rc} \quad (11)$$

有關 SRC 深梁中鋼骨與 RC 部份相互之

影響及其特有的力學行為與剪力強度計算方式謹詳述於以下各節。

### 5.1 鋼骨部份之剪力強度：腹板剪力降伏

經由前人之實驗資料中發現，因 SRC 梁中之鋼骨受到鋼筋混凝土充份的包覆，在極限載重時，鋼骨腹板可有效避免發生局部挫屈的情形。因此依據 AISC-LRFD 規範，鋼骨部份之剪力強度  $(V_n)_s$  可取為

$$(V_n)_s = 0.6 f_{ys} A_w \quad (12)$$

### 5.2 RC 部份之剪力強度：壓拉桿模式

#### 5.2.1 SRC 深梁壓拉桿模式之特殊考量

本研究參考 2002 年出版的 ACI-318 規範中之壓拉桿模式來評估 SRC 深梁中 RC 部份所提供之剪力強度，並考慮 SRC 深梁內部鋼骨斷面對壓拉桿模式造成之影響。本研究由前人的簡支 SRC 深梁實驗之應變計讀數發現，在斜張裂縫形成之後，拉力鋼筋與鋼骨受拉翼板之應變計讀數頗為接近，且均沿著梁長度方向受到近乎均勻之拉力作用。因此本研究建議在計算 SRC 深梁之抗剪強度時，拉桿之強度應同時包含拉力鋼筋與鋼骨受拉翼板之貢獻以反映其真實力學行為。

此外，由於 SRC 深梁試體內部有鋼骨的存在，使得鋼骨翼板的左右兩端與其外側混凝土之間形成一弱面，並造成翼板兩端外側之混凝土先行開裂(如圖 2 與照片 3 所示)。因此本研究依據目前的實驗資料，初步建議在引用公式 (2) 與 (3) 計算 SRC 深梁混凝土部份之壓桿強度時，稍微保守的降低混凝土強度折減係數，在鋼骨翼板左右兩端外側之混凝土強度折減係數  $\beta_s$  取為 0.4，以反映外側混凝土較早開裂對壓桿混凝土強度折減之影響；而鋼骨翼板內側之混凝土因受到翼板之保護，其強度折減係數  $\beta_s$  則可取為 0.6

表 3 與表 4 為本研究計算所得的 21 支 SRC 深梁試體之壓桿、拉桿與節點區

之強度。本節以下將詳細說明 SRC 深梁之壓桿強度、拉桿強度與節點區強度之計算方法，然後再根據這三種強度來評估 SRC 深梁 RC 部份的抗剪強度。

### 5.2.2 混凝土壓桿強度

在計算 SRC 深梁之混凝土壓桿強度方面，由公式 (2) 可求得混凝土壓桿提供之強度  $F_{ns}$ 。依據 ACI-318 規範之附錄 A 之建議，在計算公式 (2) 中之  $A_c$  時，需先求出節點區混凝土有效高度  $w_t$  以及壓桿與拉桿之夾角  $\theta$ ，然後再求出壓桿有效寬度  $w_s$ ，最後將壓桿有效寬度  $w_s$  乘上梁寬  $b$  即可得  $A_c$  (如圖 4 所示)。以下公式 (13) 至 (18) 將說明如何求得壓桿有效寬度  $w_s$ 。

由於 SRC 深梁的拉桿強度包含拉力鋼筋與鋼骨受拉翼板的貢獻，因此需先求出鋼骨受拉翼板與拉力鋼筋合力中心至混凝土下緣的距離  $d_t$  (如圖 4 所示)：

$$d_t = \frac{A_{rt} f_{yr} (h-d) + A_{ft} f_{ys} (h-h_s + t_f) / 2}{A_{rt} f_{yr} + A_{ft} f_{ys}} \quad (13)$$

其中  $h$  為 SRC 梁全斷面深度； $d$  為拉力鋼筋中心到混凝土受壓外緣的距離； $h_s$  為鋼梁之深度； $t_f$  為鋼骨翼板厚度； $A_{ft}$  為鋼骨受拉翼板斷面積。依 ACI-318 規範附錄 A 之建議，節點區混凝土有效高度  $w_t$  可取為混凝土受拉外緣到拉桿中心的兩倍距離，即：

$$w_t = 2d_t \quad (14)$$

由圖 4 可知，壓桿與拉桿合力中心之夾角  $\theta$  為：

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{jd}{a} \right) \quad (15)$$

其中  $jd$  為拉力鋼筋與鋼骨受拉翼板的合力  $T$  到壓力鋼筋、鋼骨受壓翼板與受壓混凝土合力  $C$  的距離，即 SRC 深梁受撓曲時之抗彎力臂 (如圖 4 所示)； $a$  為載重到支承點之距離，即剪力跨度。依據 ACI-318 規範假設混凝土撓曲壓應力為線性分佈，則：

$$jd = h - d_t - (kd_c/3) \quad (16)$$

在計算壓力區深度係數  $k$  時，係考慮鋼筋、混凝土與鋼骨之間的力平衡關係 (如圖 4 所示，即  $C = T$ )， $k$  值可由下式求得：

$$k = \sqrt{[n\rho_t + (n-1)\rho_c]^2 + 2[n\rho_t + (n-1)\rho_c d' / d_c]} - [n\rho_t + (n-1)\rho_c] \quad (17)$$

其中  $n$  為鋼筋與混凝土彈性模數之比值； $d'$  為壓力鋼筋中心到混凝土受壓外緣的距離； $\rho_t$  為拉力鋼筋加鋼骨受拉翼板之斷面積與 SRC 深梁有效斷面積之比值； $\rho_c$  為壓力鋼筋加鋼骨受壓翼板之斷面積與 SRC 深梁有效斷面積之比值。公式 (17) 中之  $\rho_t$  及  $\rho_c$  分別為：

$$\rho_t = \frac{A_{rt} + A_{ft}}{bd_c} \quad (18)$$

$$\rho_c = \frac{A_{r'} + A_{f'}}{bd_c} \quad (19)$$

其中  $A_{r'}$  為壓力鋼筋斷面積； $A_{f'}$  為鋼骨受壓翼板斷面積。在求出  $w_t$  及  $\theta$  後，由圖 5 的幾何關係可求出壓桿之有效寬度  $w_s$  如下：

$$w_s = w_t \cos \theta + l_b \sin \theta \quad (20)$$

依公式 (20) 求出  $w_s$  之後，即可計算壓桿斷面積  $A_c$ ，即  $A_c = w_s \times b$ 。然後，混凝土壓桿之強度即可由  $F_{ns} = f_{cu} A_c$  求得。不過，如 5.2.1 節所述，在考量混凝土抗壓強度時，因實驗觀察顯示混凝土壓桿在極限載重之前，鋼骨翼板左右兩端外側之混凝土已有明顯開裂，故本研究建議翼板左右兩端外側混凝土之強度折減係數  $\beta_s$  取為 0.4；內側混凝土之  $\beta_s$  則取為 0.6。如圖 2 所示，混凝土壓桿之斷面積可區分為  $A_{c1}$  與  $A_{c2}$ ，其中  $A_{c1} = (b - b_f) \times w_s$ ，而  $A_{c2} = b_f \times w_s$ ， $b_f$  為鋼骨翼板寬度。所以，修正後的混凝土壓桿強度可以採用下式計算：

$$F_{ns} = f_{cu1} A_{c1} + f_{cu2} A_{c2} \quad (21)$$

表 3 詳列本研究針對 21 支 SRC 深梁試體計算所得的混凝土壓桿強度。

### 5.2.3 拉桿強度與節點區強度

在計算 SRC 深梁之拉桿強度方面，由於 SRC 深梁中的拉桿係由拉力鋼筋與鋼骨受拉翼板共同組合而成，因此拉桿之強度可依下式求得：

$$F_{nt} = A_{rt}f_{yr} + A_{ft}f_{ys} \quad (22)$$

在計算 SRC 深梁之節點區強度  $F_{mn}$  方面，主要是考量在節點區內混凝土的抗壓能力，可依 2.1 節中之公式 (6) 求得，即：

$$F_{mn} = f_{cu}A_n \quad (23)$$

其中  $f_{cu}$  依公式(4)計算，因為 SRC 深梁在節點區至少錨定一組鋼筋，故節點區之混凝土折減係數  $\beta_n$  以 0.8 計算； $A_n$  為節點區之面積，為支承板寬度  $l_b$  與梁斷面寬度  $b$  之乘積。

表 4 顯示本研究對 21 支 SRC 深梁試體之拉桿強度及節點區強度計算結果。

### 5.2.4 SRC 深梁 RC 部份之剪力強度

在依照上述方法計算出 SRC 深梁的壓桿強度  $F_{ns}$ 、拉桿強度  $F_{nt}$  及節點區強度  $F_{mn}$  之後，接下來必須比較此三種強度何者最弱，由最弱者控制 SRC 深梁 RC 部份之剪力強度。不過，由於壓桿強度、拉桿強度及節點區強度之作用力不在同一方向，因此在分析何者會先破壞時，需將上述所求得之壓桿強度、拉桿強度及節點區強度之作用力轉換到同一方向上再作比較。根據圖 5 的幾何關係，將拉桿強度及節點區強度之作用力轉換到壓桿軸心方向，將可以求出沿壓桿軸心方向最弱的力  $(F_{ns})_{axial}$ ，即公式 (23) 中的最小值：

$$(F_{ns})_{axial} = \min(F_{ns}, F_{nt}/\cos\theta, F_{mn}/\sin\theta) \quad (24)$$

接著再求出  $(F_{ns})_{axial}$  之垂直分量，即可得到 SRC 梁中 RC 部份之抗剪強度  $(V_n)_{rc}$ ：

$$(V_n)_{rc} = (F_{ns})_{axial} \sin\theta \quad (25)$$

最後，將 (23) 式代入 (24) 式可求得：

$$(V_n)_{rc} = \min(F_{ns}\sin\theta, F_{nt}\tan\theta, F_{mn}) \quad (26)$$

表 5 為本研究依據壓拉桿模式計算所得的 21 支 SRC 深梁試體中 RC 部份之抗剪強度  $(V_n)_{rc}$ 。本表中所列的壓桿強度、拉桿強度與節點區強度的詳細計算結果分別顯示於表 3 與表 4 之中。

### 5.3 SRC 深梁之抗剪強度求解流程

根據 5.1 與 5.2 節所述，本研究建議之 SRC 深梁之抗剪強度求解流程可彙整為圖 6 之計算流程圖。首先依公式 (21)、(22) 及 (6) 分別求出混凝土壓桿強度  $F_{ns}$ 、拉桿強度  $F_{nt}$  及節點區強度  $F_{mn}$ ，並代入公式 (25)，即可求出 SRC 深梁中鋼筋混凝土部份提供之抗剪強度  $(V_n)_{rc}$ 。

另一方面，鋼骨腹板提供之剪力  $(V_n)_s$  依公式 (12) 計算。最後，將 SRC 深梁中鋼骨部份之剪力強度  $(V_n)_s$  與 RC 部份之剪力強度  $(V_n)_{rc}$  相加，即可求得其 SRC 深梁整體之剪力強度  $(V_n)_{prop}$ 。

### 5.4 預測值與實驗結果之比較與討論

表 6 顯示本研究建議法求得之 SRC 深梁抗剪強度預測值與 21 支 SRC 深梁試體之實驗剪力強度的比較結果。表中的預測值  $(V_n)_{prop}$  為  $(V_n)_s$  與  $(V_n)_{rc}$  之和，其中  $(V_n)_s$  依公式 (12) 計算， $(V_n)_{rc}$  則依公式 (25) 求得。表 6 中所列之預測值皆依據實際材料強度計算。當簡支梁受到中點集中載重  $P$  作用時（如圖 1 所示），該梁所受到的剪力  $(V_u)_{test} = 0.5P$ 。實驗資料顯示 21 支試體之破壞模式均為壓桿破壞控制。

由表 6 之比較結果可以發現，根據本研究建議方法所推求之 SRC 深梁極限抗剪強度  $(V_n)_{prop}$  與試驗極限抗剪強度  $(V_u)_{test}$  之比值， $(V_n)_{prop}/(V_u)_{test}$ ，平均值為 0.95、標準偏差與變異係數分別為 10.9% 與 11.5%。表 6 的結果顯示本研究建議的方法可以合理的預測 SRC 深梁之極限抗剪強度。依據前人的實驗資料觀察 SRC 深梁之破壞模式，本研究認為以壓拉桿模式來計算 SRC 深梁的 RC 部份之剪力強



度，可以合理反映出 SRC 深梁 RC 部份之真實力學行為。

有關鋼骨受拉翼板對拉桿強度的貢獻方面，本研究探討的 21 支試體之鋼梁皆配置於 SRC 梁斷面中央，其鋼骨斷面深度與 SRC 梁全斷面深度之比值介於 0.5 至 0.73。從實驗中發現，SRC 深梁的鋼骨受拉翼板及拉力鋼筋會共同形成壓拉桿模式中的拉桿，故應將鋼骨受拉翼板納入拉桿強度計算，以符合 SRC 深梁的真實力學行為。在有限的實驗資料中，本研究初步建議鋼骨斷面深度與 SRC 梁全斷面深度之比值應大於 0.5，以使鋼骨受拉翼板在壓拉桿模式下能夠一同提供拉力以增加拉桿的強度，如此的 SRC 深梁斷面也較符合經濟效益。

此外，在極限載重下，本研究發現 21 支 SRC 深梁內部的鋼骨均未發生局部挫屈，這主要是受到混凝土充份包覆的益處。在 21 支試體中，鋼骨翼板上下兩端到混凝土外緣的最小距離為 76mm，鋼骨翼板左右兩端到混凝土外緣之最小距離者為 50mm。實驗結果顯示這樣的混凝土保護層厚度能對鋼骨產生良好的包覆，有助於避免鋼骨發生局部挫屈的問題。

另一方面，SRC 深梁試體因鋼骨的存在使得鋼骨翼板左右兩端與其外側混凝土之間形成一弱面，如圖 2 所示。根據實驗之觀察，在試體達到極限載重之前，鋼骨翼板左右兩端外側混凝土即已開裂，此一現象使得此區混凝土壓桿之壓力在傳遞時，需穿過這些裂縫。依據 ACI-318 規範附錄 A 之建議，當混凝土壓桿受到混凝土開裂的影響時，將導致混凝土的有效抗壓強度降低。所以本研究為了區隔鋼骨翼板左右兩側混凝土之強度，如 5.2 節所述，乃建議採用不同的混凝土強度折減係數  $\beta_s$  來計算壓桿強度。

再者，本研究從前人之實驗資料中發現，SRC 深梁內部的鋼骨主要發揮了以下三項功能：(1) 因為混凝土的充份包覆，鋼骨腹板並未產生局部挫屈，因此可以充分發揮腹板的剪力降伏強度；(2) SRC

深梁中的鋼骨受拉翼板可以成為拉桿的一部份，進而對 SRC 深梁剪力強度有所貢獻；(3) 當 SRC 深梁的混凝土壓桿被壓碎後，由於尚有鋼骨的存在，可由鋼骨繼續承擔混凝土壓碎後的外力，因此可以提供 SRC 深梁較佳的韌性。

基於上述的討論，本研究發現經由實驗資料來探討鋼骨對 SRC 深梁的影響及混凝土包覆對鋼骨的益處，將有助於對 SRC 深梁真實力學行為的瞭解，進而發展出一套較合理的方法來預測 SRC 深梁的剪力強度。

## 六、結論

本研究根據 21 支 SRC 深梁之實驗結果，深入觀察 SRC 深梁中鋼骨斷面與鋼筋混凝土之間的相互影響，提出一套 SRC 深梁抗剪強度的評估方法。謹作成初步結論如下：

1. 本研究建議採用強度疊加之概念並進行必要之修正，然後將 SRC 深梁中鋼骨部份與 RC 部份之剪力強度相加以求得其剪力強度。
2. 在鋼骨部份之剪力強度方面，由於 SRC 深梁內部之鋼骨受到鋼筋混凝土良好的包覆，因此本研究在採用 AISC-LRFD 規範 (2005) 計算鋼骨之抗剪強度時，排除鋼骨發生局部挫屈之問題。
3. 在 RC 部份之剪力強度方面，本研究經由實驗觀察發現，當 SRC 深梁試體發展出壓拉桿的行為模式時，拉力鋼筋與鋼骨之受拉翼板會共同形成拉桿。因此本研究在引用 ACI-318 規範 (2002) 之「壓拉桿模式」來預測 RC 部份之剪力強度時，拉桿強度之計算同時包含拉力鋼筋及鋼骨受拉翼板的貢獻。
4. 由於 SRC 深梁試體內部有鋼骨的存在，使得鋼骨翼板的左右兩端與其外側混凝土之間形成一弱面，並造成翼板兩端外側之混凝土先行開裂 (如圖 2 所示)。因此本研究依據實驗資料，初步建議在計算 SRC 深梁混凝土部份之壓

桿強度時，鋼骨翼板左右兩端內側之混凝土強度折減係數  $\beta_s$  取為 0.6，而鋼骨翼板外側之混凝土強度折減係數  $\beta_s$  則取為 0.4，以反映外側混凝土開裂對壓桿強度折減之影響。

5. 相較於一般 RC 深梁，SRC 深梁由於內部有鋼骨存在，其載重-位移曲線在達到試體的極限載重後並未有急速陡降之趨勢，顯示鋼骨的存在可以有效提昇 SRC 深梁之韌性，此點為 SRC 深梁之主要優點之一。
6. 在理論預測值與實驗結果的比較方面，本研究共收集 21 支前人的 SRC 深梁實驗資料進行比較。經由預測值與實驗結果比較得知，本研究建議的剪力強度評估法所預測之 SRC 深梁抗剪強度與實驗結果之比值， $(V_n)_{prop} / (V_u)_{test}$ ，平均值為 0.95，標準偏差與變異係數分別為 10.9% 與 11.5%，顯示本研究建議的方法可以合理的預測 SRC 深梁的抗剪強度。

## 參考文獻

1. ACI, *Buildings Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan (2002).
2. Hwang, S. J., Lu, W. Y. and Lee, H. J., "Shear Strength Prediction for Deep Beams," *ACI Structural Journal*, V.97, No.3, pp.367-376 (2000).
3. Tan, K.H., Kong, F.K. and Weng, L. W., "High-Strength Reinforced Concrete Deep and Short Beams : Shear Design Equations in North American and UK Practice," *ACI Structural Journal*, V.95, No.3, May-June, pp.318-329 (1998)
4. MacGregor, J.G., *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, 3<sup>rd</sup> Ed., Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey (1997).
5. Mau, S. T. and Hsu, T. T. C., "Shear Strength Prediction for Deep Beams with Web Reinforcement," *ACI Structural Journal*, V.84, No.6, Nov.-Dec., pp.513-523 (1987).
6. Yang, K.H., Chung, H.S., Lee, E.T., Eun, H.C., "Shear Characteristics of High-Strength Deep Beams without Shear Reinforcements," *Engineering Structures*, V.25, No.6, pp.1343-1352 (2003).
7. 呂文堯、黃世建，「鋼筋混凝土深梁之抗剪強度評估」，中國土木水利工程學刊，第十二卷，第一期，第 11-20 頁，臺北 (2000)。
8. AISC, *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, 4<sup>rd</sup> Ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois (2005).
9. 程幼棣，「鋼骨鋼筋混凝土 (SRC) 構材剪力設計之研究」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹 (1997)。
10. 林佳宏，「鋼骨鋼筋混凝土 (SRC) 深梁試驗與剪力強度研究」，碩士論文，國立交通大學土木研究所，新竹 (2001)。
11. 方志楷，「鋼骨鋼筋混凝土深梁之剪力強度實驗行為」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程技術研究所，臺北 (1999)。
12. 陳佑任，「鋼骨鋼筋混凝土深梁抗剪行為之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程技術研究所，臺北 (2001)。
13. 洪浩傑，「鋼骨鋼筋混凝土深梁抗剪行為」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程技術研究所，臺北 (2003)。
14. 內政部，「鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範與解說」，內政部營建署，臺北 (2004)。

表 1 SRC 深梁試體之尺寸資料

作者	試體編號	斷面尺寸			
		梁長	跨深比	全斷面	鋼骨斷面
		$l_n$ (mm)	$l_n/h$	(mm)	(mm)
林佳宏[10]	DB1-15-NS	600	1.71	200×350	198×99×4.5×7
	DB2-15-NS				
	DB3-NT-NS				
	DB4-15-FS				
	DB5-15-WS				
	DB6-NT-WS				
方至楷[11]	SRC1-00	2000	3.33	350×600	300×150×6.5×9
	SRC1-50				
	SRC1-25				
	SRC1-17				
陳佑任[12]	B-H1	1260	2.29	450×550	450×200×9×14
	B-H2				390×200×10×16
	B-H3				300×200×13×15
	B-H1-IS				450×200×9×14
	B-H2-IS				390×200×10×16
	B-H2-NA				390×200×10×16
	B-H2W2				390×200×15×16
	B-H2W3				390×200×20×16
	B-H2W3				390×200×20×16
洪浩傑[13]	B1-35-STD	1390	2.53	350×550	400×150×15×20
	B1-80-STD				400×150×6.4×20
	B1-80-STF				400×150×6.4×20

表 2 SRC 深梁試體之材料強度

試體編號	材料性質				
	鋼骨		鋼筋		混凝土
	$f_{ys}$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$f_{yr}$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$f'_c$ (MPa)
DB1-15-NS	325	450	387	568	23.3
DB2-15-NS					24.5
DB3-NT-NS					23.7
DB4-15-FS					23.9
DB5-15-WS					23.9
DB6-NT-WS					24.2
SRC1-00	330	439	426	632	28.9
SRC1-50					27.7
SRC1-25					32.2
SRC1-17					28.9
SRC1-17					28.9
B-H1	312	-	459	651	40.1
B-H2	330				
B-H3	325				
B-H1-IS	327				
B-H2-IS	312				
B-H2-NA	330				
B-H2W2					
B-H2W3					
B1-35-STD	456				
B1-80-STD	711	857	31.5		
B1-80-STF	711	857	27.8		

表 3 SRC 深梁試體之混凝土壓桿強度  $F_{ns}$

Specimen Designation	$A_{c1}^{(1)}$	$A_{c2}^{(1)}$	$f_{cu1}^{(2)}$	$f_{cu2}^{(2)}$	$F_{ns}^{(3)}$
	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>2</sup> )	(MPa)	(MPa)	(kN)
DB1-15-NS	20619	20211	7.92	11.88	404
DB2-15-NS			8.33	12.50	421
DB3-NT-NS			8.06	12.09	410
DB4-15-FS			8.13	12.19	414
DB5-15-WS			8.13	12.19	414
DB6-NT-WS			8.23	12.34	419
SRC1-00	47038	35278	9.83	14.74	982
SRC1-50			9.42	14.13	941
SRC1-25			10.95	16.42	1094
SRC1-17			9.83	14.74	982
B-H1	56791	45433	13.63	20.45	1703
B-H2	60349	48279			1810
B-H3	66513	53211			1995
B-H1-IS	56603	45283			1698
B-H2-IS	60433	48347			1813
B-H2-NA	60349	48279			1810
B-H2W2					
B-H2W3					
B1-35-STD	39387	29540			10.71
B1-80-STD	39088	29316	10.71	16.07	890
B1-80-STF	39088	29316	9.45	14.18	785

註：

- (1)  $A_{c1}$  與  $A_{c2}$  分別為鋼骨翼板兩端外側與內側之混凝土壓桿斷面積
- (2)  $f_{cu1}$  與  $f_{cu2}$  分別為鋼骨翼板兩端外側與內側之混凝土有效抗壓強度
- (3) 依公式 (21) 計算： $F_{ns} = f_{cu1}A_{c1} + f_{cu2}A_{c2}$

表 4 SRC 深梁試體之拉桿強度  $F_{nt}$  及節點區強度  $F_{nn}$

試體編號	拉桿強度					節點區強度						
	$A_{rt}$	$f_{yr}$	$A_{ft}$	$f_{ys}$	$F_{nt}$	$f_{cu}$	$A_n$	$F_{nn}$				
	(mm <sup>2</sup> )	(MPa)	(mm <sup>2</sup> )	(MPa)	(kN)	(MPa)	(mm <sup>2</sup> )	(kN)				
DB1-15-NS	254	387	693	325	324	15.84	30000	475				
DB2-15-NS						16.66		500				
DB3-NT-NS						16.12		483				
DB4-15-FS						16.25		488				
DB5-15-WS						16.25		488				
DB6-NT-WS						16.46		494				
SRC1-00	3042	426	1350	330	1741	19.65	35000	688				
SRC1-50						18.84		659				
SRC1-25						21.90		766				
SRC1-17						19.65		688				
SRC1-17						19.65		688				
B-H1	4032	459	2800	312	2724	27.27	63000	1718				
B-H2									3200	2907		
B-H3									3000	2826		
B-H1-IS									2800	2766		
B-H2-IS									3200	2849		
B-H2-NA									3200	330	2907	
B-H2W2												
B-H2W3												
B1-35-STD									4032	494	3200	456
B1-80-STD	3000	711	4125	21.42	750							
B1-80-STF	3000	711	4125	18.90	662							

表 5 SRC 深梁之鋼筋混凝土部份抗剪強度( $V_n)_{rc}$

試體編號	壓桿強度	拉桿強度	節點區強度	壓桿與拉桿之夾角	鋼筋混凝土抗剪強度
	$F_{ns}$	$F_{nt}$	$F_{nn}$	$\theta$	$(V_n)_{rc}$
	(kN)	(kN)	(kN)	(degree)	(kN)
DB1-15-NS	404	324	475	39.2	255
DB2-15-NS	421		500		264
DB3-NT-NS	410		483		260
DB4-15-FS	414		488		262
DB5-15-WS	414		494		264
DB6-NT-WS	419		688		384
SRC1-00	982	1741	659	23.0	368
SRC1-50	941		766		428
SRC1-25	1094		688		384
SRC1-17	982		40.7		1111
B-H1	1703	2724	40.0	1164	
B-H2	1810	2907	39.0	1256	
B-H3	1995	2826	40.7	1107	
B-H1-IS	1698	2766	40.0	1165	
B-H2-IS	1813	2849	40.0	1164	
B-H2-NA	1810	2907			
B-H2W2					
B-H2W3					
B1-35-STD	896	3360	750	47.2	658
B1-80-STD	890	4125	750	653	
B1-80-STF	785	4125	662	576	

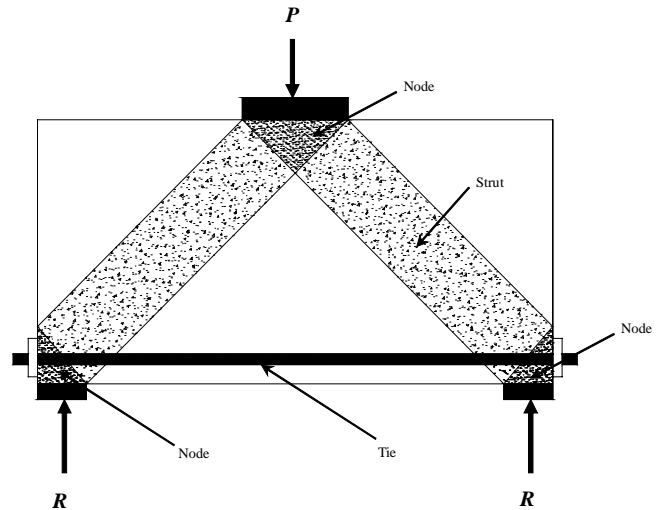
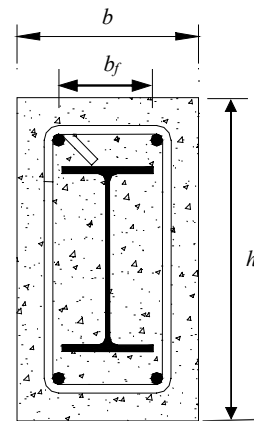


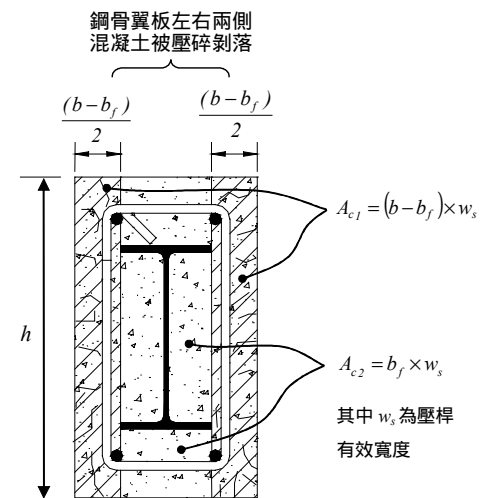
圖 1 RC 深梁之壓拉桿模式 (Strut-and-Tie Model) [4]

表 6 本研究預測之 SRC 深梁抗剪強度與實驗值之比較

試體編號	本研究預測強度			實驗強度	$\frac{(V_n)_{prop}}{(V_u)_{test}}$
	$(V_n)_s$	$(V_n)_{rc}$	$(V_n)_{prop}$	$(V_u)_{test}$	
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
DB1-15-NS	174	255	429	391	1.10
DB2-15-NS		264	438	409	1.07
DB3-NT-NS		260	433	396	1.09
DB4-15-FS		262	436	414	1.05
DB5-15-WS		262	436	398	1.09
DB6-NT-WS		264	438	430	1.02
SRC1-00	381	384	765	772	0.99
SRC1-50		368	749	861	0.87
SRC1-25		428	809	877	0.92
SRC1-17		384	765	923	0.83
B-H1	758	1111	1869	2423	0.77
B-H2	772	1164	1936	2399	0.81
B-H3	761	1256	2016	2109	0.96
B-H1-IS	758	1107	1865	2256	0.83
B-H2-IS	772	1165	1937	1972	0.98
B-H2-NA	772	1164	1936	2217	0.87
B-H2W2	1158		2322	2281	1.02
B-H2W3	1544		2708	2605	1.04
B1-35-STD	1643	658	2301	2399	0.96
B1-80-STD	1091	653	1744	2183	0.80
B1-80-STF	1091	576	1667	1947	0.86
Average Value					0.95
Standard Deviation					10.9%
Coefficient of Variation					11.5%



(a) 破壞前



(b) 破壞後

圖 2 壓桿破壞造成鋼骨翼板左右兩側混凝土被壓碎

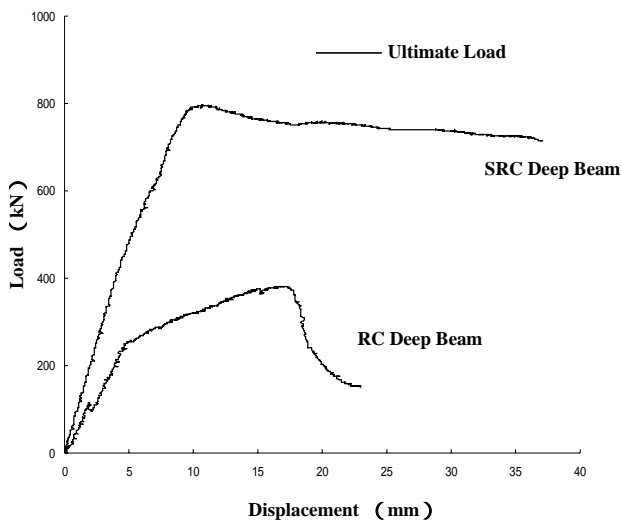


圖 3 SRC 深梁與一般 RC 深梁之載重-位移曲線的比較[10]

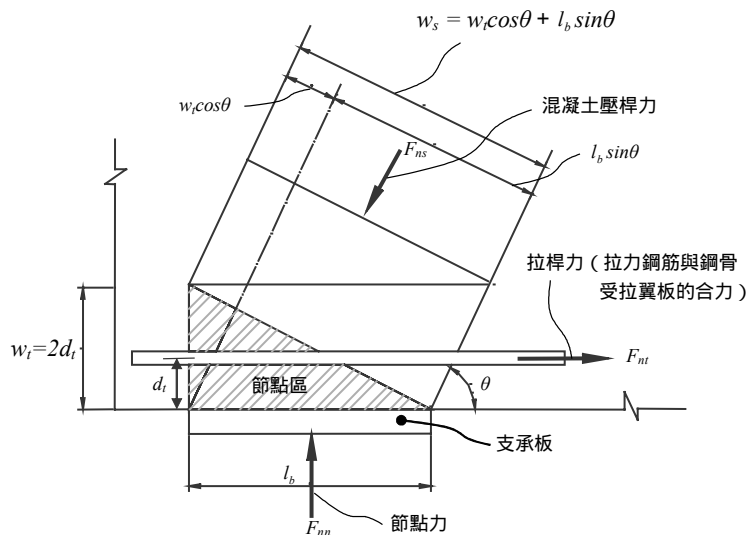
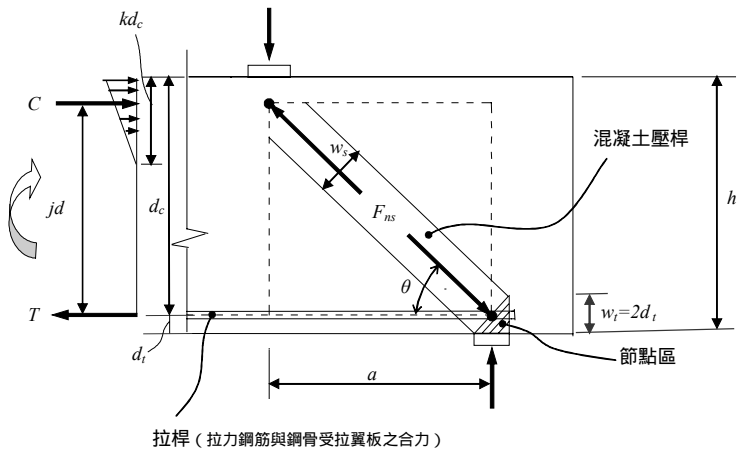


圖 5 壓桿有效寬度  $w_s$  與節點區有效高度  $w_i$  之示意圖



註：C 為因撓曲造成之壓力合力（包含壓力鋼筋、鋼骨受壓翼板與混凝土）  
T 為因撓曲造成之拉力合力（包含拉力鋼筋與鋼骨受拉翼板）

圖 4 壓桿與拉桿及其夾角之示意圖

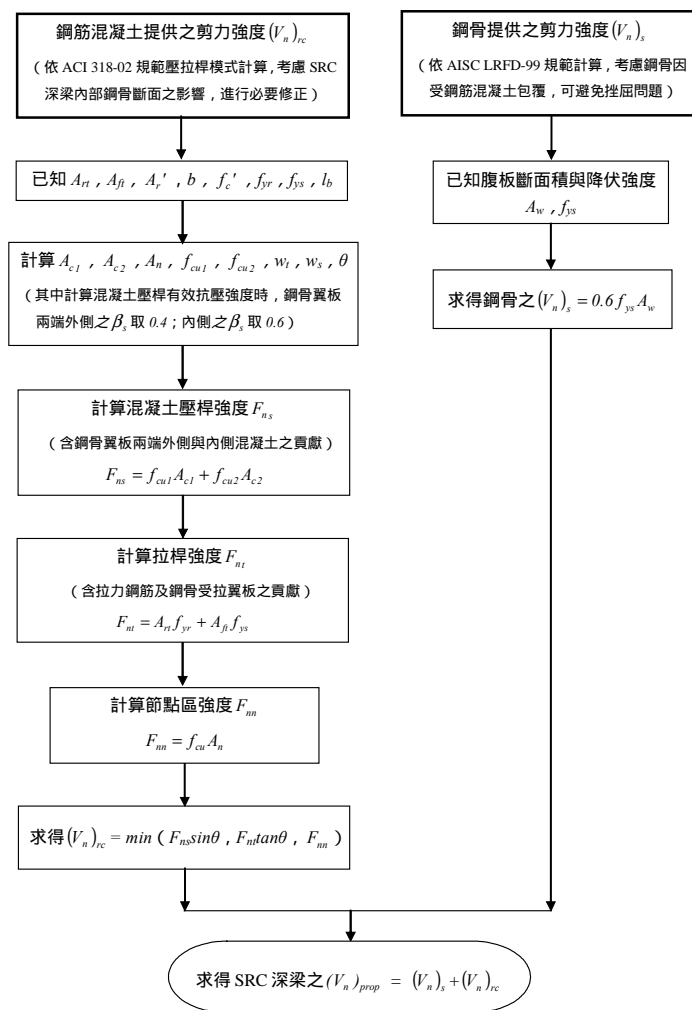
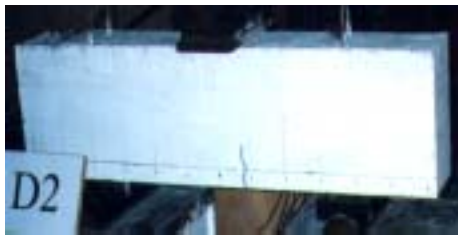


圖 6 SRC 深梁之抗剪強度求解流程



(a)  $P = 200 \text{ kN}$

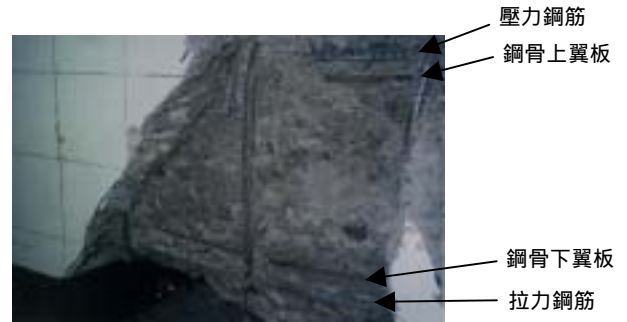


(b)  $P = 600 \text{ kN}$



(c)  $P = 816 \text{ kN}$

照片 1 SRC 深梁 ( 試體 DB2-15-NS ) 在載重過程中裂縫發展之情形[10]

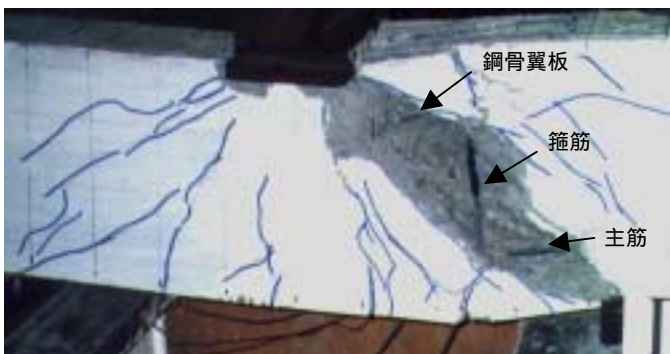


(a) 剝除壓碎混凝土後情形 ( 正面 )



(b) 剝除壓碎混凝土後情形 ( 側面 )

照片 3 SRC 深梁 ( 試體 DB1-15-NS ) 壓桿破壞後剝除混凝土之情形[10]



照片 2 SRC 深梁 ( 試體 DB1-15-NS ) 壓桿破壞之情形[10]