



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 國科會專題研究計畫成果報告撰寫格式說明

### Preparation of NSC Project Reports

計畫編號：NSC XX-XXXX-X-XXX-XXX

執行期限：XX 年 X 月 X 日至 XX 年 X 月 X 日

主持人：趙文成 國立交通大學土木研究所副教授

共同主持人：XXXXXX 執行機構及單位名稱

計畫參與人員：林添益 國立交通大學土木研究所研究生

#### 一、中文摘要

本研究主要在測試自充填高性能混凝土梁受靜態載重作用下之剪力及韌性行為。其目的在探討自充填高性能鋼筋混凝土梁在不同剪跨比、不同縱向鋼筋量、不同混凝土強度及剪力鋼筋量下之開裂剪力強度  $V_{cr}$ 、極限剪力強度  $V_n$  及韌性的關係。並藉由試驗數據評估過去學者所發展的剪力強度公式及現行 ACI 318-99 規範對於剪力強度的適用性。

**關鍵詞：**自充填混凝土、剪力、韌性

#### 一、Abstract

The purpose of the study is to investigate the shear behavior of Self-Compacting Concrete (SCC) beam under static load. The objects of the research is to investigate the cracking shear strength  $V_{cr}$  and the ultimate shear strength  $V_n$  of the performance concrete beam of shear span -to-depth , amount of longitudinal steel ,concrete strength ,amount of shear steel. The shear strength empirical formulae developed by previous researches and the curret ACI 318-99 code is compared with the test results.

**Keywords:** Self-Compacting Concrete, Shear , ductility

#### 二、緣由與目的

自充填 (SCC) 高性能混凝土 (HPC) 在世界各國及國內已有一段時日，各國對 HPC 之定義依其需求各有不同，而 SCC 則較為

明確。其乃因人工不足、技術欠缺、不易施工，提高工作品質及自動化而發展出一種混凝土，尤以日本使用最多，並且已有許多技術規範，如日本土木學會【1】，日本建築會【2】等。但是均以針對混凝土為主，對結構物的行為，則尚無明確之設計規範，故而普通混凝土之設計規範是否可適用於 SCC 之 RC 構件，而其行為、韌性與普通混凝土構件是否相同，對使用本土化材料之 SCC 與國外者是否一致，均為值得探討。

所以本研究除製作自充填高性能混凝土及普通混凝土梁各 14 根加以比較外，並以三組剪跨比、四組剪力筋由  $\rho_v=0$ ， $\rho_v=\rho_{min}$ ， $\rho_v=2\rho_{min}$ ， $\rho_v=3\rho_{min}$  及三組縱向鋼筋量等變數，研究兩者間韌性及剪力強度差異，探討 SCC 梁在剪力作用下之行為。

本研究的試體編號： $\square-\square-\square-\square-\square$ ，第一個  $\square$  所放之字母為 "N" 或 "S"；"N" 表示普通混凝土梁，"S" 表示自充填高性能混凝土梁。第二個  $\square$  的字母為 "L"、"M" 或 "H"；表示縱向鋼筋量之多寡。第三個  $\square$  的字母字母為 "3" 或 "6"；表示混凝土強度，"3" 為 3000psi，"6" 為 6000psi。第四個  $\square$  的數字代表 a/d 剪跨比。第五個  $\square$  的數字代表剪力鋼筋量：例如 "0" 表示無箍筋，"1" 表示  $\rho_{vmin}$ ，"2" 表示  $2\rho_{vmin}$ ，"3" 表示  $3\rho_{vmin}$ 。

#### 三、分析方法

##### 1、鋼筋混凝土梁之延展性

鋼筋混凝土梁之延展性可定義為構

件在破壞之前所能承受的非彈性變形能力，而結構體之非彈性行為可減低結構體受到地震力或爆炸力所產生的慣性力，所以延展性愈佳，耐震能力愈好。延展性較佳的構件，當其瀕臨破壞時，將有明顯的警示作用，在靜不定結構體上，還能使內力重分配，因此可避免使用者生命財產損失。對於梁的延展性，通常是以構件的撓度或是 P-Δ 曲線下所圍面積的韌性比來定義。

a、樑之構件延展性

(1).ACI Committee 363 【3】對於梁的延展性以撓度表示如下：

$$\tilde{w}_{uu} = \frac{\Delta_{\sim}}{\Delta_{fy}} \dots\dots\dots(1)$$

本研究為設計剪力破壞，部分試體會有拉力筋未降伏，於此情況採下列定義：

$$\tilde{w}_{us} = \frac{\Delta_{\sim}}{\Delta_{sy}} \dots\dots\dots(2)$$

(2) Shin, Ghosh, and Moreno 【4】提出以下方法定義延展性：

$$\tilde{w}_{or} = \frac{\Delta_o}{\Delta_{fy}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\tilde{w}_{os} = \frac{\Delta_o}{\Delta_{sy}} \dots\dots\dots(4)$$

式中

$\Delta_{fy}$  為拉力筋降伏時所對應之撓度

$\Delta_{sy}$  為第一根剪力筋降伏時所對應之撓度

$\Delta_o$  為構件最大載重時所對應之撓度

$\Delta_{\sim}$  為構件破壞時所對應之撓度

$\Delta_{\sim}$  本文採用構件載重下降至 0.75 倍最大載重時所對應之撓度

b、梁之韌性比

Yuliang, Shuaib, Tiejun, and W.Chung

【5】提出以下方法定義：

$$\tilde{w}_{uo} = \frac{W_{\sim}}{W_o} \dots\dots\dots(5)$$

為了解拉力筋及剪力筋降伏後的韌性容量關係，多定義下列三式：

$$\tilde{w}_{ut} = \frac{W_{\sim}}{W_{fy}} \dots\dots\dots(6)$$

$$\tilde{w}_{us} = \frac{W_{\sim}}{W_{sy}} \dots\dots\dots(7)$$

$$\tilde{w}_{uu} = \frac{W_{\sim u}}{W_{sy}} \dots\dots\dots(8)$$

式中

$W_{fy}$  為拉力筋降伏時在 P-Δ 曲線下之面積

$W_{sy}$  為第一根剪力筋降伏時在 P-Δ 曲線下之面積

$W_o$  為構件最大載重時在 P-Δ 曲線下之面積

$W_{\sim}$  為構件破壞時在 P-Δ 曲線下之面積

$W_{\sim u}$  為構件試驗終點時在 P-Δ 曲線下面積

$W_{sy}$  為第一根剪力筋與拉力筋最先降伏或最大載重等之小者時在 P-Δ 曲線下面積

$W_{\sim}$  本文採用構件載重下降至 0.75 倍最大載重時在 P-Δ 曲線下之面積

2、鋼筋混凝土梁之剪力強度

當 RC 梁受剪力作用時，梁構件內部發生剪力轉換。其主要的傳遞機構由未開裂混凝土剪力、裂縫面骨材之連鎖力及主筋綴縫作用力三項所組成。根據 ACI 318-99，剪力計算強  $V_n$  (normal shear strength) 乃由混凝土所提供之剪力強度  $V_c$  及剪力筋所提供之標稱剪力強度  $V_s$  所組成。 $V_n = V_c + V_s$

而對於不加剪力筋 RC 梁之標稱剪力強度而言： $V_n = V_c$

當混凝土構件發生剪力轉換時，其受力結構之組合包含下列幾項：

(1) 未開裂混凝土之剪力， $V_{cz}$

由裂縫上方未開裂之壓力區所承受的剪力。 $V_{cz}$  所提供的抗剪能力，取決於混凝土本身的強度及未開裂區面積之大小。

(2) 骨材之連鎖力， $V_a$

梁一但開裂後，破裂面間的粗糙界面，將以骨材互鎖效應 (aggregate interlock) 剪力摩擦 (shear friction) 等方式來分擔部分的剪力。

(3) 綴縫作用， $V_d$

由拉力筋作用於周圍混凝土所形成之剪力作用的抵抗力，又稱為接合力 (dowel force)。

(4) 繫拱效應 (arch action)

當 RC 樑是直接由加載點到支承點間的混凝土來傳遞剪力時，其傳遞剪力方式

有如拱一般的承力方式。此種受力方式可大幅提高梁的剪力強度，稱之為繫拱效應 (arch action)。尤其是在跨深比值小的深梁，此效應最為明顯。

在上述各項剪力機構中， $V_{cz}$ 、 $V_a$  及  $V_d$  合併成以混凝土所提供之剪力強度  $V_c$  來代替，則 RC 梁之標稱剪力強度  $V_n$  可表示如下：

$$\text{無剪力筋 } V_n = V_c = V_{cz} + V_a + V_d \dots (9)$$

有剪力筋

$$V_n = V_c + V_s = V_{cz} + V_a + V_d + V_s \dots (10)$$

剪力強度之預測公式

剪力破壞依構件之形狀、大小、載重特性而定，難以用所有情況的特定方法來供作剪力設計。為了解剪力破壞機理，常首先考慮無剪力筋 RC 梁，進而了解含剪力筋 RC 梁之情形，進行剪力破壞試驗而獲得一些數據，經由多次迴歸、整理分析此數據，得到了一些經驗公式。雖然尚未能完全清楚地解釋 RC 樑的抗剪行為，卻也提供了進行剪力設計時的參考資料及方向。以下論述學者們或規範建議的剪力強度預測式。

a 無剪力筋 RC 梁剪力開裂強度之預測式

(1) ACI 所建議之剪力強度計算式：

由 ACI-318【6】第 11.3.2.1 小節之說明：

對於只承受彎矩及剪力之構件，其混凝土所提供的剪力強度值  $V_c$ ，可以下列之公式表示。(kgf/cm<sup>2</sup>)

$$V_c = 0.504 \times \sqrt{f_c'} + 176 \times \dots \times \frac{V_u \times d}{M_u} \leq 0.93 \times \sqrt{f_c'} \dots (11)$$

(a) 當試驗的梁試體產生斜拉破壞時：以

$$V_c = 0.504 \times \sqrt{f_c'} + 176 \times \dots \times \frac{V_u \times d}{M_u} \dots (12)$$

(b) 當試驗的梁試體產生肋拱破壞時：以

$$V_c = 0.93 \times \sqrt{f_c'} \dots (13)$$

(2) Zsutty 所建議剪力開裂強度計算式：

對於一般強度之鋼筋混凝土梁構件，其開裂強度預測是可依照跨深比之大小分類，現將試體的開裂強度分為兩種【7, 8】。(psi)

(a) 當  $\frac{a}{d} \geq 2.5$  時：

$$V_{cr} = 59 \times \left( f_c' \times \dots \times \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \dots (14)$$

(b) 當  $\frac{a}{d} < 2.5$  時：

$$V_{cr} = \frac{2.5}{a/d} \times \left[ 59 \times \left( f_c' \times \dots \times \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \dots (15)$$

b 有剪力筋 R.C. 梁剪力開裂強度預測式

(1) ACI 所建議之剪力強度計算式：

(kgf/cm<sup>2</sup>)

由 ACI-318【6】Eq.11-5 第 11.3.2.1

小節之說明：對於只承受彎矩及剪力之構件，其混凝土所提供的剪力強度值  $V_c$ ，可以下列之公式表示。

$$V_c = 0.504 \times \sqrt{f_c'} + 176 \times \dots \times \frac{V_u \times d}{M_u} \dots (16)$$

(2) Zsutty 所建議之剪力開裂強度計算式

【7, 8】：(psi)

$$V_{cr} = 60 \left( f_c' \times \dots \times \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \dots (17)$$

c 無剪力筋 R.C. 樑極限剪力強度之預測式

Zsutty 所建議之極限剪力強度計算式：

(psi)

Zsutty 所建議之極限剪力強度預測式，與剪力開裂強度預測式有相同的變數。不同的是，基於極限強度大於開裂強度之考量，Zsutty 將開裂剪力強度計算式中所採用的係數放大【7, 8】。因此，對於一般強度之 R.C. 梁構件，其極限剪力強度預測式亦以  $a/d$  為分界點，依跨深比之大小，將樑試體的極限剪力強度預測式分為以下兩段。

(a) 當  $\frac{a}{d} \geq 2.5$  時：

$$V_u = 63.4 \times \left( f_c' \times \dots \times \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \dots (18)$$

(b) 當  $\frac{a}{d} < 2.5$  時：

$$V_u = \frac{2.5}{a/d} \times \left[ 63.4 \times \left( f_c' \times \dots \times \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \dots (19)$$

d 有剪力筋 R.C. 梁極限剪力強度預測式

(1) ACI 所建議之極限剪力強度計算式：  
(psi)

由 ACI-318【6】Eq.11-5 式及 11-15 式之觀念，可以下列之公式表示。

$$V_u = \left( 1.9 \times \sqrt{f_c'} + \frac{2500 \times \dots \times V_u \times d}{M_u} \right) + \dots_v \times f_y \dots (20)$$

(2) Zsutty 所建議之極限剪力強度計算式  
【7, 8】: (psi)

$$V_u = 60 \left( f_c' \times \dots \times \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} + \dots_v \times f_y \dots (21)$$

其中  $V_{cr}$  表示梁試體之剪力開裂強度， $f_c'$  為混凝土抗壓強度， $\rho$  為拉力鋼筋比， $A_s$  為拉力筋之斷面積， $d$  為梁斷面之有效深度， $b$  矩形梁斷面之梁腹寬， $a$  為加載點到支承點之剪跨長度， $a/d$  表示梁試體之跨深比。

#### 四、結果與討論

##### 1、試驗過程梁之開裂及破壞情形

梁試體承受載重時，隨著荷重的增加將使剪力強度的裂縫寬度及數目增加，逐漸形成了主要斜裂縫及次要斜裂縫。而不同的  $a/d$  值及鋼筋比大小造成了不同的裂縫發展方式，也產生了不同的開裂及破壞模式。其中  $a/d=4.0$  為主斜剪力裂縫延伸至拉力鋼筋產生劈裂握裹破壞的剪張破壞 (shear tension failure) 模式， $a/d=2.0$  於無剪力筋梁以壓力區之壓應力超過混凝土抗壓強度造成壓碎的剪壓破壞 (shear compression failure) 模式，而有剪力鋼筋者，則因壓力鋼筋及剪力筋的作用，使成為主斜裂縫經過壓力區穿越整個斷面的對角張力破壞 (diagonal tension failure) 模式。最後  $a/d=1.0$  者為當梁產生剪力開裂後，即延伸入至壓力區內一部份，就告停止，其梁所承受之載重由梁上緣未開裂的壓力區及拉力筋共同承擔的肋拱破壞 (arch-rib failure)

模式。

##### 2、梁之韌性比

由比較觀察得知，用撓度為基準的韌性比以  $a/d=2$  者較好，其次為  $a/d=4$ ，最後才為  $a/d=1$ 。且自充填優於普通混凝土。若改以  $P-\Delta$  曲線下之面積基準為考量，更為明顯。且除自充填混凝土較好外 (如圖 1 所示)，強度高者大於強度低者。

剪力筋間距愈小的梁，其延展性愈佳、極限荷重愈大，推其原因是剪力筋間距小者所形成的圍束效果較為理想，所提供圍束力也較大。可從圖 2 得以證明。而自充填混凝土與普通混凝土皆有相同的趨勢。

##### 3、剪力強度預測式與實驗值得比較

由比較得知，ACI 預測式比較保守，而 Zsutty 之預測式在無剪力筋方面，除  $a/d=1$  為 80%~90% 較不保外，餘皆達 120% 之準確率。另有剪力筋之開裂強度  $V_{cr}$  以  $a/d=2$  較差只達約 95%， $a/d=4$  可達約 120%。顯然 D4 剪力筋因直徑太小，握裹力效果較差，和一般剪力筋歸納之預測式比較有低估現象。而極限剪力強度  $V_n$  而言，皆可發揮至預測式的 100%~200% 之間。

在無剪力筋之情況下，自充填混凝土與普通混凝土一樣， $a/d$  愈小其剪力開裂強度  $V_{cr}$  愈大 (詳如圖 3 所示)。而在  $a/d=4$  時剪力筋配置愈密集剪力強度  $V_n$  愈高 (詳如圖 4)。

#### 五、成果自評

試驗結果可歸納如下：

1. 在變數相同的情況下，自充填高性能混凝土梁的剪力開裂強度與極限剪力強度大部分皆比普通混凝土佳。
2. 自充填混凝土的剪力破壞模式仍類似於普通混凝土，但其斜裂縫的破裂面較為平整，且從其粗骨材剪裂，原因是有卜作蘭反應強化了骨材與水泥漿體的界面所致。
3. 利用 ACI、Zsutty 的預測式推算自充填高性能混凝土梁與普通混凝土梁的剪力開裂強度及極限剪力強度，顯示 ACI 規範

有趨於保守的現象，即 ACI 規範的規定亦適用於自充填高性能混凝土梁。且 Zsutty 的預測式較 ACI 的預測式準確，適用於破壞強度的預測。

4. 在變數條件相同的情況下，韌性容量高，尤以  $a/d=2$  為甚，其中 SCC 最高韌性比達 52.34；比普通混凝土高出約 17 倍。顯示 SCC 有較好的耐震能力。
5. 剪力開裂強度方面，有剪力筋者由於剪力筋的圍束作用比無剪力筋者來得大，尤以自充填混凝土更為明顯。
6. 自充填高性能混凝土梁比普通混凝土梁之剪力撓度延展性佳，最高可達 3.3 倍。
7. 自充填混凝土的剪力開裂強度及極限剪力強度，皆隨著跨深比之減少及拉力鋼筋比之增加而提高。此一現象與普通混凝土梁試體有相同的趨勢。

## 六、參考文獻

- [1] 日本土木學會，“高流動混凝土施工指南”，平成 10 年 7 月。
- [2] 日本建築學會，“高流動混凝土材料、調和、製造、施工指針(案)同解說”，1997 年 1 月。
- [3] ACI Committee 363, “State-of-Art Report on High Strength Concrete”, ACI Journal July-August 1984..
- [4] Shin, S. W.; Ghosh, S. K.; and Moreno, J., “Flexural Ductility of Ultra- High Strength Concrete Members ”, ACI Structural Journal Vol.86, No.4, July-August 1989, pp.394-400.
- [5] Yuliang Xie, Shuaib H. Ahmad, Tiejun Yu, S. Hino, and W.Chung, “Shear Ductility of Reinforced Concrete Beams of Normal and High-Strength Concrete”, ACI Structural Journal, March- April 1994, pp.140-149.
- [6] ACI 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-99) and Commentary (ACI318R-99)”, American Concrete Institute, June 1999.
- [7] Zsutty. T. C., “Beam Shear Strength Prediction By Analysis of Existing Data”, ACI Journal, Proceedings V.65, No. 11, Nov. 1986, pp.943-951.

- [8] Zsutty. Theodore, “Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests”, ACI Journal, Proceedings V.68, No. 2, Feb. 1971, pp.138-143.

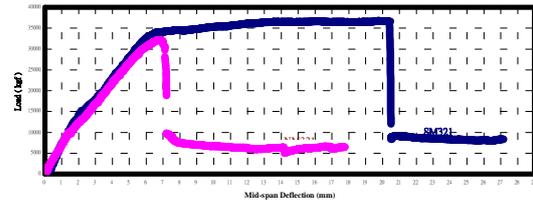


圖 1 NM321 與 SM321 之 P- 關係圖

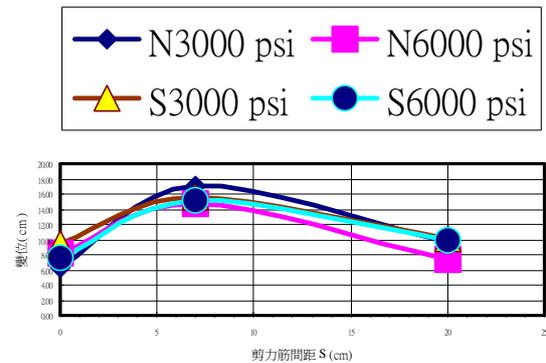


圖 2 變位與剪力筋間距關係圖 ( $a/d=4$ )

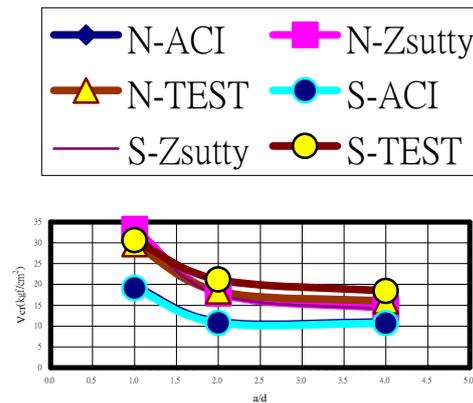


圖 3  $V_{cr}$  與  $a/d$  關係圖

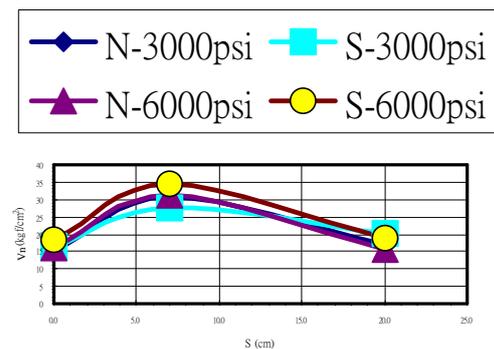


圖 4 剪力筋間距與  $V_n$  關係圖