

## 鋼纖維混凝土結構分析方法之建立與比較

鄧作樑\* 璩貽安\*\* 張福安\*\*\* 鄭丁興\*\*\* 沈柏成\*\*\*\*

\*大葉大學機械與自動化學系 \*\*中山科學研究院化學研究所  
\*\*\*國防大學中正理工學院軍事工程系 \*\*\*\*國防大學中正理工學院國防科學研究所

### 摘要

本文結合混凝土圓柱試體單軸材料試驗結果與 Ezeldin 經驗公式建立鋼纖維混凝土應力-應變全曲線材料參數，並與等效同質體法計算所得之鋼纖維等效材料常數應用於 LS-DYNA 軟體，進行鋼纖維混凝土板承受高速彈丸撞擊數值模擬分析與比較。由於等效同質體法無法將鋼纖維非線性塑性變形納入考量，彈丸殘餘速度過低，混凝土疤痕直徑誤差達 30%。若將非線性塑性變形納入考量，彈丸殘餘速度與實驗值接近，疤痕直徑誤差在 10% 以下。本文提出採用應力-應變全曲線之分析方法，可將非線性的塑性變形納入計算，除符合鋼纖維混凝土高韌性特性外，所需之數值參數可由混凝土材料試驗獲得，可適用於不同形狀與含量之鋼纖維混凝土結構。

**關鍵詞：**鋼纖維混凝土，高速衝擊，LS-DYNA

## Development and Comparison Analysis Methodology of Steel Fiber Reinforced Concrete Structures

Tso-Liang Teng\*, Yi-An Chu\*\*, Fwu-An Chang\*\*\*, Ding-Shing Cheng\*\*\*, and Bor-Cherng Shen\*\*\*\*

\* *Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University*

\*\*\* *Department of Civil Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

\*\* *Chemical Division, Chung-Shan Institute of Science and Technology*

\*\*\*\* *School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

### ABSTRACT

This paper employed the uniaxial compression test results of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) specimen and the Ezeldin's empirical formula to construct the stress-strain curve for finite element analyses of SFRC structures subject to impact loading. The numerical results were compared with another methodology base on the Equivalent Inclusion Method (EIM). Both numerical results are compared with the penetration tests of SFRC plates. The non-linear softening behavior of SFRC could not be specified by EIM. The residual velocity of projectile estimated by EIM was lower and the scabbing diameter of SFRC was 30% lower than test results. After nonlinear softening behavior of SFRC was included in material model, the residual velocity of projectile and the scabbing diameters of SFRC show well agreement with the test results, less 10% error were carried out. The proposed methodology not only included the nonlinear stress-strain properties of SFRC, but also achievable by uniaxial material tests, and applicable to different shape and volume fraction of fiber reinforced concrete.

**Keywords:** steel fiber reinforced concrete, high-velocity impact, LS-DYNA

文稿收件日期 96.1.15；文稿修正後接受日期 96.4.16

Manuscript received January 15, 2007; revised April 16, 2007

## 一、前言

混凝土是一種具有高抗壓、低抗拉強度的材料，其抗拉強度通常僅為抗壓強度的十分之一左右。為了改善混凝土的抗拉能力，於是在混凝土基材中加入鋼筋以增強其抗拉強度。但是當拉力過大時，鋼筋混凝土亦會產生龜裂現象，甚至破損。為防止此現象發生，專家學者開始研究改善的方法，直到1950年美國首先於混凝土內加入鋼纖維材料後，才獲得了不錯的成效。鋼纖維混凝土材料是在混凝土基材中摻入適量鋼絲纖維和添加劑所拌合成的一種混凝土材料。由於鋼纖維能有效地增加混凝土的強度與韌性，且適合大量生產；而混凝土本身亦具有施工維護簡單及抗壓能力強等特點。因此，鋼纖維混凝土結構兼具了鋼纖維與混凝土兩種不同性質材料的優點，可改善混凝土的脆性行為，有效抑制混凝土的裂縫發展，達到增強混凝土結構整體抗張能力之效果。相較於傳統混凝土，鋼纖維混凝土具有抗撓曲、抗衝擊、抗爆震、耐磨性佳、韌性大等優點。除了一般民生公共工程外，在軍事設施及相關工程應用上亦被期許為如軍事防護掩體、防爆牆以及核能電廠圍阻體等防護結構用以抗撞擊、抗爆震之良好建材，以有效抵抗並減少遭受各種投射彈藥及其爆炸碎片所導致之損傷。鋼纖維混凝土由於受到所選用纖維的強度、形狀、添加量、纖維長徑比以及混凝土基材強度、骨材粒徑等影響，不單是纖維與混凝土基材間的互制行為相當複雜，其混合後的複合材料力學性質更是不易得知。雖然目前關於混凝土材料的理論模型甚多，但仍是無法全面描述其力學行為，因此目前在鋼纖維混凝土結構分析的研究方法中，大多數仍以實驗的方式為主，惟實體實驗礙於設備及空間之侷限，所能採用之試體尺寸十分有限，如需進行大型實體試驗則所需耗費之材料準備時間與成本相對較高。因此，如何建立一有效之結構分析方法即成為研究鋼纖維混凝土結構的一個重要課題。

近年來隨著有限元素數值模擬方法的發展和電子計算機技術的進步，使用有限元素數值模擬方法進行鋼纖維混凝土結構分析已越來越受到重視，但是在進行分析的過程中，如何將鋼纖維及混凝土這兩種不同性質材料作適當的處理，以獲得混合後的力學性質以及使用適當

之材料模型便成為進行數值模擬分析前的首要工作。首先在探討鋼纖維混凝土材料的力學性質方面，Christensen和Waals [1]應用複合材料線彈性理論提出了可用以計算二維及三維隨機分佈纖維複材有效加勁性質的簡易預估公式，Ahmad和Lagoudas [2]應用Christensen和Waals所提出之公式，經簡化後提出用以計算含有高彈性係數與隨機分佈之纖維混凝土有效彈性模數值，並與其他計算方法比對其所得之結果。Teng [3]以等效同質體法(Equivalent Inclusion Method, EIM)理論為基礎，提出基材內含隨機分佈短纖維複材彈性模數的計算方法，並對鋼纖維長徑比在2~150之間的鋼纖維混凝土材料，提出鋼纖維混凝土等效材料模數之經驗公式。惟等效同質體法係以線彈性材料理論為基礎，據以推導之鋼纖維等效材料模數，嚴格而論，僅能套用於線彈性材料模型進行相關問題的模擬分析，是該等方法之主要缺點。在混凝土有限元素數值模擬分析方面，其他相關的材料模型如TCK [4]，RHT [5] 及HJC [6]等，也分別提出並應用在高強度純混凝土、鋼筋混凝土結構撞擊、爆炸等動態荷載下之結構受力與破壞行為分析；但由於所需要的材料參數甚多，且有些參數甚至無法由一般混凝土材料試驗直接獲得，是該等材料模型在應用上的困難。

在建立鋼纖維混凝土結構數值分析模型時，首先要能獲得鋼纖維混凝土的材料常數，亦即材料的抗壓強度、抗拉強度、彈性模數與應力-應變曲線等資料，其中又以應力-應變曲線最為重要。由於鋼纖維混凝土較純混凝土、鋼筋混凝土具有較佳的韌性，當鋼纖維混凝土達到最大荷載時，由於受到鋼纖維的影響混凝土不會產生立即且全面性的脆性破壞，而有近似塑性變形的行為發生。因此，需要藉由材料完整的應力-應變關係來描述其塑性變形的特性。在混凝土的應力-應變曲線計算方面，Carrera與Chu [7]對強度在9~140MPa之間的純混凝土進行廣泛的材料實驗，並提出計算應力-應變全曲線的經驗公式。Ezeldin與Balaguru [8]應用Carreira和Chu對純混凝土所提出之經驗公式，提出預測端鉤型(Hook-Ended)中低強度鋼纖維混凝土應力-應變全曲線之經驗公式，並導入增強指標(reinforced index)參數 $RI$ ，來決定不同纖維含量與長徑比時之待定參數 $\beta$ 。Nataraja等[9]同樣應用Carreira和Chu對純混凝土所提出

之經驗公式，來預測皺摺型(crimped)低強度鋼纖維混凝土應力-應變全曲線。Hsu [10]則簡化 Carreria與Chu [7]與Ezeldin與Balaguru [8]的計算公式，提出同時適用於計算純混凝土與端鉤型鋼纖維混凝土應力-應變全曲線之通用因子  $n$ ，但當應力卸載(unloading)至0.6倍抗壓強度後該公式即不適用。Mansur與Lee [11] 則認為通用因子  $n$  會受到混凝土抗壓強度與鋼纖維含量的影響，並提出修正因子  $k_1$ 、 $k_2$  來描述鋼纖維混凝土於卸載時應力-應變關係。

由於一般混凝土的材料試驗大多是以無圍束(unconfined)混凝土圓柱試體之單軸試驗來獲得的，特別是對於混凝土材料於最大荷載前、後之非線性應力-應變通常不易獲得。因此在建立鋼纖維混凝土應力-應變全曲線部份，本文將結合混凝土圓柱試體單軸材料試驗結果與應力-應變全曲線經驗公式作為獲得鋼纖維混凝土應力-應變全曲線之計算方法；同時進一步以鋼纖維混凝土板承受高速彈體撞擊為例，以Teng [3]所提出鋼纖維混凝土等效材料模數之經驗公式與本文以鋼纖維混凝土材料試驗配合Ezeldin與Balaguru [8]建立應力-應變全曲線分別進行數值模擬分析及結果比較。數值模擬分析將以LS-DYNA有限元素分析軟體[12]進行鋼纖維混凝土板承受高速彈體撞擊之研究，分析結果並與高速彈體撞擊鋼纖維混凝土板試驗結果進行比較，以驗證本文提出之應力-應變全曲線材料模型與分析方法的正確性與實用性，期能減少實體實驗所需之時間與成本，進而能提供未來軍事防護掩體以及核能電廠圍阻體等，相關鋼纖維混凝土防護結構之設計、分析參考。

## 二、數值分析模型

本節中將利用不同方法計算所得到之鋼纖維混凝土等效材料常數與應力-應變全曲線等材料性質，應用至 LS-DYNA 有限元素分析軟體之材料模型內，並進一步建立鋼纖維混凝土結構分析方法。首先在鋼纖維混凝土等效材料常數部分，利用等效同質體法可在不需執行混凝土材料試驗的條件下，即可快速計算出不同纖維含量之鋼纖維混凝土等效材料常數，且由於等效材料具有均向性，因此使用均向性之有限元素材料模型即可進行計算。其次在鋼纖維

混凝土應力-應變全曲線部份，由鋼纖維混凝土材料試驗結果顯示，添加了鋼纖維之後混凝土的脆性行為獲得改善，當鋼纖維混凝土承受荷載時，不會產生明顯的脆性破壞，而有近似塑性變形的行為產生，如圖 1 所示。由圖 1 可看出當純混凝土達最大荷載後，試體產生全面的脆性破壞，而鋼纖維混凝土雖有破壞與變形產生，但試體仍維持其整體性且可持續承受荷載與變形。

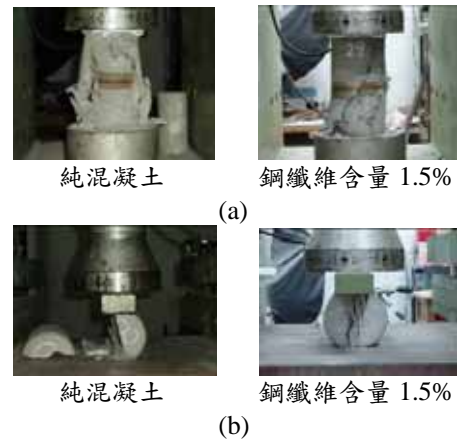


圖 1. 混凝土圓柱試體測試情形：(a)抗壓試驗；(b)劈裂試驗。

由於 LS-DYNA 軟體中之彈塑性流體動力模型(Elastic Plastic Hydrodynamic Model)可利用表列式(tabulated)方式定義材料等效應力(effective stress)與等效塑性應變(effective plastic strain)，用以描述材料進入塑性變形後的應力-應變關係，該模型除可使用狀態方程式(Equation of State, EOS)完整描述高速衝擊下鋼纖維混凝土壓力與體積變化之關係外，亦可將鋼纖維混凝土高韌度(toughness)的特性藉由材料的等效應力與等效塑性應變來描述。因此本文將使用彈塑性流體動力模型作為鋼纖維混凝土數值分析之材料模型。在彈塑性流體動力模型中，材料於塑性變形後之等效應力  $\bar{\sigma}$  可表示為

$$\bar{\sigma} = \left( \frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{1/2} \quad (1)$$

其中  $s_{ij}$  為偏差(deviatoric)應力張量，如(2)式所示

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_{kk} / 3 \quad (2)$$

等效塑性應變  $\bar{\varepsilon}^p$  則如(3)式所示

$$\bar{\varepsilon}^p = \int \left( \frac{2}{3} D_{ij}^p D_{ij}^p \right)^{1/2} dt \quad (3)$$

其中  $D_{ij}^p$  為應變率的塑性分量。若不考慮等效應力與等效塑性應變之關係時，材料的應力-應變關係可以簡化為雙線性(bi-linear)關係，材料的降伏應力  $\sigma_y$  則可表示為

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_h \bar{\varepsilon}_p \quad (4)$$

其中  $\sigma_0$  為初始降伏強度， $E_h$  為塑性硬化模數(plastic hardening modulus)，可由彈性模數  $E$  和切線模數  $E_t$  得到，如(5)式所示

$$E_h = \frac{E_t E}{E_t - E} \quad (5)$$

當彈性模數  $E$  和切線模數  $E_t$  接近時，亦即塑性硬化模數  $E_h$  值趨近於無限大時，此時材料的應力-應變關係可進一步簡化為線性關係。

在狀態方程式(EOS)方面，由於混凝土為不均勻的脆性材料，當添加了鋼纖維之後，其力學性質更加複雜，混凝土的狀態方程式通常需藉由飛板撞擊實驗來獲得[13]。本文使用 LS-DYNA 軟體之 Gruneisen 狀態方程式來描述鋼纖維混凝土於衝擊荷載時混凝土壓力與體積之關係。Gruneisen 方程式形式為：

$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{b}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + b \mu) E_m \quad (6)$$

其中  $E_m$  為材料初始體積之內能， $C_0$  為材料的體積聲速(bulk sound velocity)，其為材料激震波傳速度  $U_s$  (shock velocity) 與質點速度  $U_p$  (partial velocity) 曲線之截距， $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  為  $U_s - U_p$  曲線參數， $\gamma_0$  為 Gruneisen 常數， $b$  為  $\gamma_0$  一階體積修正量， $\mu = \frac{V_0}{V} - 1$  為材料之壓縮率， $V_0$  為材料

初始體積， $\rho_0$  為材料初始密度。當衝擊荷載甚高時，材料之狀態方程式可由  $U_s - U_p$  關係式來描述，如(7)式所示

$$U_s = C_0 + S_1 U_p + S_2 U_p^2 + S_3 U_p^3 \quad (7)$$

其中  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  為  $U_s - U_p$  曲線參數。由於混凝土狀態方程式二次項以上之參數不易獲得，因此可將(7)簡化為一階線性方程式，如(8)式所示。

$$U_s = C_0 + S_1 U_p \quad (8)$$

材料的體積聲速則可由(9)式計算得到，其中  $K$  與  $\rho_0$  分別為鋼纖維混凝土之體積模數與初始密度。

$$C_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (9)$$

### 三、鋼纖維混凝土材料性質

在建立鋼纖維混凝土結構數值分析模型時，首先要能獲得鋼纖維混凝土的材料性質，本節將分別應用等效同質體法經驗公式[3]計算不同纖維含量之鋼纖維混凝土之等效材料常數，及以 Ezeldin 與 Balaguru [8]所提出之經驗公式，計算不同纖維含量之鋼纖維混凝土之應力-應變全曲線，作為有限元素分析軟體材料模型所需之參數。

#### 3.1 等效同質體法經驗公式

等效同質體法其基本概念係將基材中與其材料性質相異的異質體(inhomogeneity)，以一個幾何形狀相同，但是在局部的區域內(原異質體所佔區域)含有等效特徵應變  $\varepsilon_{ij}^*$  來等效，如圖 2 所示。這個與基體材料性質一致的替代體稱為等效同質體(Equivalent Inclusion)。利用等效同質體法結合 Eshelby 張量[14]以及 Mori-Tanaka [15]平均應力的觀念，可推導出多向隨機分佈短

纖維材之等效彈性模數理論公式，得到具有均向性(isotropic)的等效材料性質。亦即：

$$\bar{E} = \bar{E}_{11} = \bar{E}_{22} = \bar{E}_{33} \quad (10)$$

$$\bar{G} = \bar{G}_{11} = \bar{G}_{22} = \bar{G}_{33} \quad (11)$$

$$\bar{\nu} = \bar{\nu}_{12} = \bar{\nu}_{21} = \bar{\nu}_{23} = \bar{\nu}_{32} = \bar{\nu}_{13} = \bar{\nu}_{31} \quad (12)$$

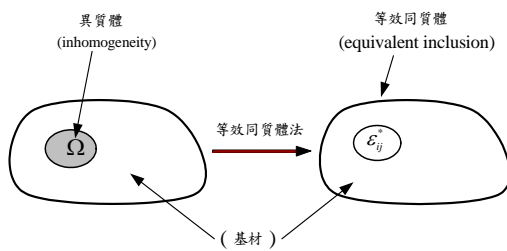


圖 2. 基材、異質體及等效同質體示意圖[3]。

由於隨機分佈之鋼纖維混凝土材料亦可視為一均向性材料，因此可直接將計算所得之材料參數代入有限元素分析軟體之均向性材料模型中，即可進行相關之鋼纖維混凝土結構問題之分析。由於等效同質體法在計算鋼纖維混凝土等效材料的過程中僅與基材以及鋼纖維的基本材料性質、形狀及含量有關，因此除可用於計算鋼纖維混凝土等效材料常數外，其計算方法亦可應用於其他纖維混凝土等效材料常數之計算，如聚丙烯纖維混凝土等。Teng [3]所提出預估不同纖維含量之鋼纖維混凝土等效材料模數之經驗公式如下：

$$\bar{E} = E_m \frac{1 + \xi \eta_E V_f}{1 - \eta_E V_f} \quad (13)$$

$$\bar{G} = G_m \frac{1 + \xi \eta_G V_f}{1 - \eta_G V_f} \quad (14)$$

其中  $E_m$ 、 $G_m$  分別為混凝土基材之彈性模數與剪力模數， $V_f$  為鋼纖維體積含量，而(13)(14)式中所對應的  $\eta_E$  與  $\eta_G$  則為

$$\eta_E = \frac{E_f / E_m - 1}{E_f / E_m + \xi} \quad (15)$$

$$\eta_G = \frac{G_f / G_m - 1}{G_f / G_m + \xi} \quad (16)$$

其中  $E_f$ 、 $G_f$  分別為鋼纖維之彈性模數與剪力模數，而  $\xi$  則為待定之經驗參數，依據建議值，鋼纖維長徑比  $l/d$  在 30~150 之間時，取待定參數  $\xi = 2.5$  計算不同鋼纖維體積含量  $V_f$  之鋼纖維混凝土等效材料常數。

### 3.2 Ezeldin 與 Balaguru 應力-應變全曲線經驗公式

鋼纖維混凝土由於受到所選用纖維的強度、形狀、含量以及混凝土基材強度、骨材粒徑等影響，不單是鋼纖維與混凝土基材間的互制行為相當複雜，其混合後的複合材料力學性質更是不易得知，雖然目前已有研究提出關於鋼纖維混凝土材料常數的計算方法，但利用混凝土材料試驗直接獲得不同纖維形狀、含量之鋼纖維混凝土材料性質仍是分析鋼纖維混凝土材料性質常用的方法。Ezeldin 與 Balaguru [8] 對於混凝土強度在 35~85MPa 之間的端鉤型(Hook-Ended)鋼纖維混凝土進行不同鋼纖維含量之鋼纖維混凝土抗壓實驗，依據得到之實驗結果提出預估端鉤型鋼纖維混凝土之應力-應變全曲線經驗公式如下：

$$\frac{f_{cf}}{f_c} = \frac{\beta \left( \frac{\epsilon_{cf}}{\epsilon_c} \right)}{\beta - 1 + \left( \frac{\epsilon_{cf}}{\epsilon_c} \right)^\beta} \quad (17)$$

其中  $f_c$  為鋼纖維混凝土抗壓強度， $\epsilon_c$  為鋼纖維混凝土於最大荷載時之應變， $f_{cf}$ 、 $\epsilon_{cf}$  為應力-應變曲線上之應力與應變值， $\beta$  為應力-應變曲線形狀參數，與纖維含量與長徑比有關，為纖維強化指標(reinforced index)  $RI$  之函數，如(18)(19)式所示。

$$\beta = a + b(RI)^c \quad (18)$$

$$RI = W_f(l/\phi) \quad (19)$$

其中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  為待定之參數，可由混凝土試體無圍束(unconfined)抗壓實驗結果訂定之， $W_f$  為鋼纖維重量分率，約為 3 倍鋼纖維體積分率， $l/\phi$  為鋼纖維長徑比。

#### 四、鋼纖維混凝土板承受高速彈丸撞擊分析

為進一步建立與比較不同方法對鋼纖維混凝土結構分析之正確性，本節將以鋼纖維混凝土板承受高速彈丸撞擊為例，分別應用等效同質體法經驗公式[3]計算不同纖維含量之鋼纖維混凝土之等效材料常數，及以 Ezeldin 與 Balaguru [8]所提出之經驗公式，計算不同纖維含量之鋼纖維混凝土之應力-應變全曲線，分別將其代入 LS-DYNA 軟體彈塑性流體動力模型中進行鋼纖維混凝土結構於衝擊荷載下之結構分析，並從彈丸穿靶後之殘餘速度(residual velocity)與混凝土靶體疤落直徑(scabbing diameter)等模擬結果與鋼纖維混凝土板撞擊試驗結果進行比較，以驗證不同材料參數分析方法之正確性。

##### 4.1 鋼纖維混凝土板高速撞擊實驗

在高速撞擊實驗中關於投射體的製作，主要係參考爆炸成型彈丸設計原理[16]製作一具高速彈丸產生器，利用高能炸藥之爆炸能將金屬藥型罩(liner)潰縮成一個高速的彈丸，作為鋼纖維混凝土結構撞擊實驗之投射體。彈丸的外型與速度資料是藉由閃爍式 X 光機(Flash X-ray)照相獲得的，由 X 光之曝光時間、拍攝到之彈丸位置以及底片影像放大率等資料即可計算出彈丸撞靶前之速度。所採用之高速彈丸長度為 22.74 mm、彈徑為 24.76 mm，材質為純鐵，重量為 45 g，以 2474 m/s 之速度垂直撞擊靶體。在靶體部份，鋼纖維混凝土靶體尺寸為 500 mm × 500 mm × 100 mm，使用端鈎型(Hook-Ended)鋼纖維，直徑  $d$  為 0.5 mm，長度  $l$  為 30 mm，

長徑比  $l/d$  為 60，鋼纖維體積分率  $V_f$  計有 1.0%、1.5%、2.0% 等 3 種，混凝土基材與鋼纖維材料性質如表 1 所示。高速撞擊實驗佈置如圖 3 所示，本實驗利用 2 組銅箔電針(尺寸為 594 mm × 420 mm × 1 mm)與 2 台 X-光機結合成一訊號系統。當彈丸穿靶後依序撞擊兩組銅箔電針時，除可產生斷路訊號外，可一併順序啟動 X-光機照相，再利用訊號處理器將 2 組電針斷路訊號與 X-光機照相之時間資料截取出來。最後由 X-光機照相時間、彈丸飛行距離等數據計算出彈丸穿靶後之殘餘速度。圖 4 為彈丸貫穿纖維含量 0.5%之混凝土板後之 X-光片，可以看到彈丸貫穿靶體後依序啟動 X-光機照相，且由 X-光機照片中可看出彈丸因受到鋼纖維的阻擋在貫穿混凝土板之後產生了破裂、分離等現象，顯示在混凝土基材中添加適量的鋼纖維之後，可提昇混凝土整體的韌度，使其具有較佳的抗衝擊性能。另外在靶體疤落破壞的部份，靶體背面疤落直徑的計算則是將所拍攝到的靶體數位影像匯入 AutoCad 繪圖軟體中計算得到的，表 2 為各種纖維含量之鋼纖維混凝土板的實驗結果。

表 1. 混凝土基材與鋼纖維材料性質

	彈性模數 $E$ (MPa)	泊松比 $\nu$
混凝土基材	14365	0.18
鋼纖維	200000	0.3

表 2. 鋼纖維混凝土板高速撞擊實驗結果

鋼纖維體積分百分比 $V_f$ (%)	1.0	1.5	2.0
彈丸殘餘速度 (m/s)	316	231	180
混凝土板疤落直徑 (cm)	35	33.5	32.6

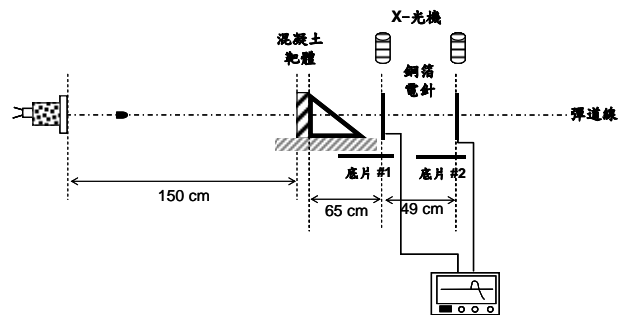


圖 3. 鋼纖維混凝土板高速撞擊實驗佈置圖。

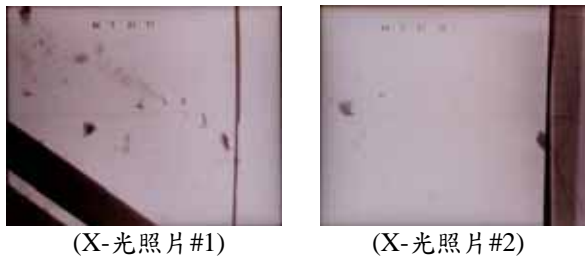


圖 4. 彈丸貫穿鋼纖維混凝土板後之 X-光片。  
(鋼纖維含量 0.5%)

## 4.2 材料參數計算

### (1) 等效同質體法經驗公式

在鋼纖維混凝土板模擬參數計算方面，首先在鋼纖維混凝土板等效彈性模數部份，依據表 1 之混凝土基本材料性質，利用(13)~(16)式可計算出不同纖維含量之鋼纖維混凝土板等效彈性模數，計算結果如表 3 所示。

### (2) 應力-應變全曲線經驗公式

在鋼纖維混凝土應力-應變全曲線方面，結合混凝土圓柱試體試驗結果與 Ezeldin 與 Balaguru [8]經驗公式建立不同纖維含量之鋼纖維混凝土應力-應變全曲線，混凝土圓柱試體試驗結果如表 4 所示。圖 5 為不同纖維含量之鋼纖維混凝土應力-應變全曲線，利用(17)~(19)式可得到鋼纖維混凝土等效應力 $\bar{\sigma}$ 與等效塑性應變 $\bar{\epsilon}^p$ 之關係，如圖 6 所示，作為彈塑性流體動力模型中描述材料塑性變形後之應力-應變關係。表 5 則為本算例之彈丸與鋼纖維混凝土靶體數值模擬參數，其中鋼纖維混凝土靶體的降伏強度 $\sigma_y$ 是利用應力-應變曲線線性段斜率平移 0.2% 預估得到的。

表 3. 鋼纖維混凝土板等效彈性模數

鋼纖維體積百分比 $V_f$ (%)	1.0	1.5	2.0
彈性模數 $\bar{E}$ (MPa)	14805	15026	15251
剪力模數 $\bar{G}$ (MPa)	6234	6308	6383
泊松比 $\bar{\nu}$	0.187	0.191	0.194

表 4. 鋼纖維混凝土圓柱試體試驗結果

鋼纖維體積百分比 $V_f$ (%)	1.0	1.5	2.0
密度 $\rho$ ( $g/cm^3$ )	2.36	2.35	2.47
抗壓強度 $f_c$ (MPa)	28.03	30.1	35.52
最大荷載時之應變 $\epsilon_c$ (mm/mm)	0.0026	0.003	0.0035
抗拉強度 $f_{st}$ (MPa)	3.6	4.01	5.02

表 5. 彈塑性流體動力模型數值模擬參數

數值參數	彈丸	鋼纖維混凝土板 ( $V_f$ )		
		1.0%	1.5%	2.0%
密度 $\rho$ ( $g/cm^3$ )	7.87	2.36	2.35	2.47
剪力模數 $G$ (MPa)	77500	6315	5924	5530
降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	50	24.63	25.29	27.43
塑性硬化 模數 $E_h$ (MPa)	4200			
$C_0$ (cm/ $\mu$ s)	0.457	0.181	0.179	0.169
$S_1$	1.49	1.4	1.4	1.4
$\gamma_0$	2.17			
剪力損蝕 應變 $f_s$	0.9	0.4	0.4	0.4
張力損蝕 強度 $f_t$ (MPa)		5.4	6.02	7.53

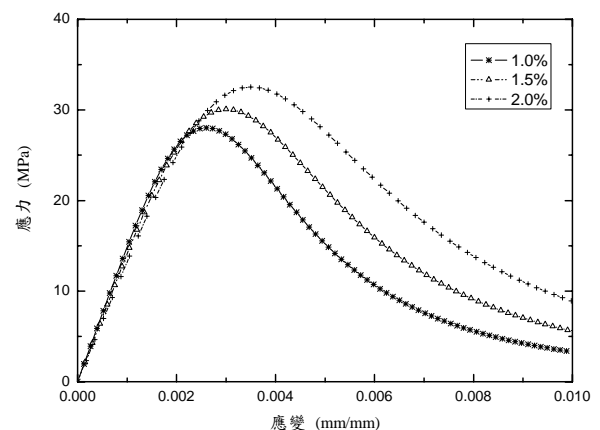


圖 5. 鋼纖維混凝土應力-應變曲線。

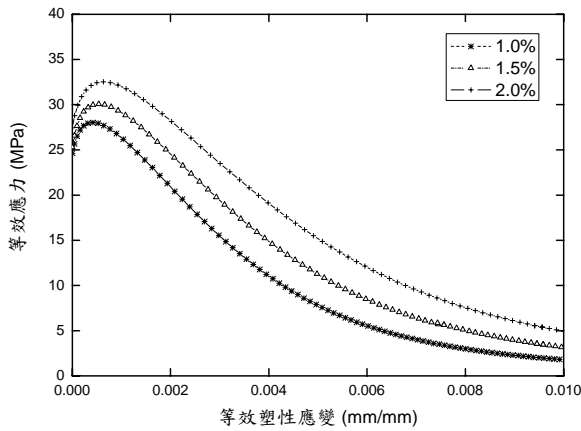


圖 6. 鋼纖維混凝土等效應力-等效塑性應變曲線。

### 4.3 有限元素分析模型

由於分析模型具有對稱性，因此本文使用 1/2 模型建構，有限元素分析模型如圖 7 所示，其中彈丸劃分為 192 個平均邊長為 0.935 mm 的 Q4(四節點線性元素)元素，鋼纖維混凝土板則劃分為  $200 \times 80$  個邊長為 1.25 mm 的 Q4 元素。在有限元素軟體分析過程中，為顯示彈丸、靶體元素受撞擊後之破壞現象，將應用分析軟體損蝕模式(erosion mode)功能將達到材料破壞臨界條件之元素移除，同時啟動程式自動接觸(auto contact)功能，來處理彈丸與靶板間的後續碰撞反應。本分析例以剪力破壞(shear failure)作為彈丸與混凝土靶體之破壞準則，其中在混凝土靶體部份，另增加張力破壞(tensile cut-off)損蝕條件來描述混凝土元素承受張力作用時之疤落破壞現象。損蝕條件之判別式分別如 (20)(21)式所示

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}} \geq f_s \quad (20)$$

$$f_{td} \geq f_t \quad (21)$$

其中  $f_s$  及  $f_t$  分別為剪力損蝕應變值及張力損蝕強度值， $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{kk} / 3$  為偏差應變(deviatoric strain)， $\bar{\varepsilon}$  為有效剪應變(effective shear strain)， $f_{td}$  為混凝土動態抗拉強度，可由混凝土動態放大因子(dynamic increase factor, DIF) [17]估算獲

得。在有限元素分析的過程中，當靶板受到外力作用後其元素內的應變值與張力值的變化達到前述任一損蝕條件時，該元素則立即被移除。就真實情況而言，剪力損蝕應變值  $f_s$  及張力損蝕強度值  $f_t$ ，並非靶板材料之真實極限應變與強度，僅為參照該臨界值而另行估算之設定值，此亦為一般數值分析軟體處理高速碰撞問題時常用之設定方式[18]，本算例之彈丸與鋼纖維混凝土靶體損蝕條件設定值如表 5 所示。

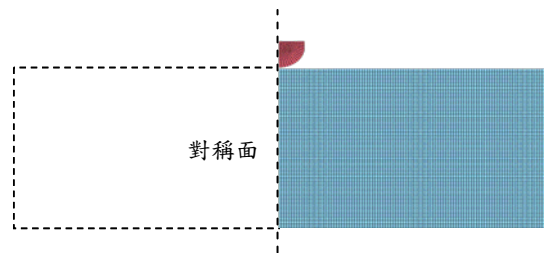


圖 7. 彈體撞擊鋼纖維混凝土板有限元素模型。

### 4.4 結果與討論

數值模擬分析結果將分別從彈體與靶體兩方面進行比較，首先在彈體部分，將以彈丸穿靶後之殘餘速度(residual velocity)進行數值分析結果比較，圖 8 為彈丸貫穿不同鋼纖維含量靶板後之殘餘速度，可以看出由等效同質體法經驗公式預估彈丸穿靶後之殘餘速度較實驗值為低，且隨著纖維含量的增加，彈丸之殘餘速度與實驗結果之誤差有增加的趨勢，這是由於等效同質體法之理論限制將鋼纖維混凝土等效為線彈性材料時，預估之鋼纖維混凝土靶體強度相對過強，不易破壞，使得彈丸穿靶後之殘餘速度較低。採用應力-應變全曲線將鋼纖維混凝土的塑性變形納入計算考量，其計算結果與實驗結果則較為接近。

其次在靶體部分，將分別就靶板破壞模式與背面疤落直徑  $d_{sc}$  (scabbing diameter)等結果進行分析方法之比較，圖 9 為鋼纖維體積含量  $V_f$  為 1.5%之混凝土板實驗與數值模擬之結果，其中  $d_{sc}$  表示鋼纖維混凝土板背面疤落直徑。由模擬結果可以看出，等效同質體法之理論限制將鋼纖維混凝土等效為一線彈性材料，除無法描述鋼纖維混凝土高韌性之特性外，亦無法將鋼纖維混凝土的塑性變形納入計算考量，使得預估之鋼纖維混凝土靶體強度過強，



由圖 9(c)可以看出，當鋼纖維混凝土板承受高速彈體撞擊後，由於靶體剪力強度較大，使得靶體破壞範圍較小，且靶體的剪力破壞裂縫不顯著，同時亦造成靶體背面之疤落損傷範圍較小；採用應力-應變全曲線將鋼纖維混凝土的非線性應力-應變關係納入計算考量時，鋼纖維混凝土板承受彈體撞擊後靶體雖呈現破壞範圍較大的破壞，但由於仍受到鋼纖維的加勁，使得靶體內部雖有較多之微裂縫產生但仍能維持靶體的整體性，且靶體受剪力破壞而產生之裂縫與破壞模式現象與實驗結果相近。

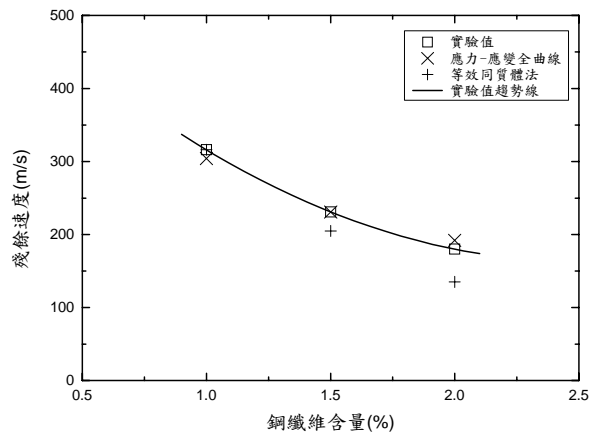


圖 8. 彈體貫穿鋼纖維混凝土板後之殘餘速度。

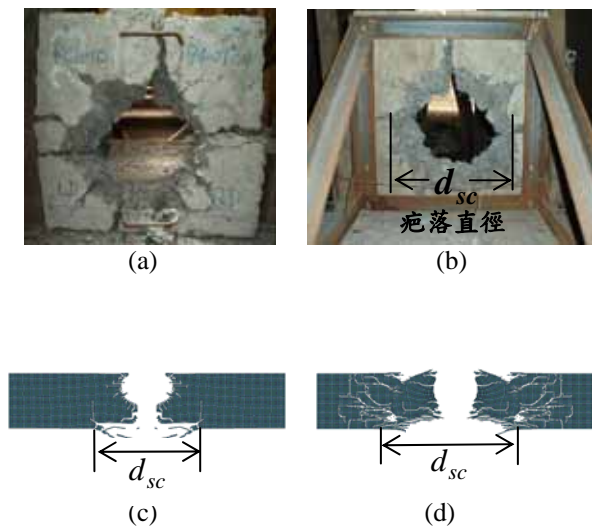


圖 9. 鋼纖維混凝土板(體積含量 1.5%)實驗與數值模擬之結果：(a)靶體正面；(b)靶體背面；(c)等效同質體法；(d)本文方法。

不同纖維含量之鋼纖維混凝土板承受高速彈體撞擊後，靶板背面疤落直徑  $d_{sc}$  模擬結果如圖 10 所示，由圖 10 可以看出將鋼纖維混凝土簡化為一線彈性材料時，由於預估之鋼纖維混凝土強度過強，且無法將鋼纖維混凝土非線性應力-應變關係納入考量，使得混凝土靶板疤落直徑  $d_{sc}$  明顯過小，本計算例中三種鋼纖維含量之計算結果與實驗值平均誤差達 30% 以上；若採用應力-應變全曲線將鋼纖維混凝土的非線性塑性變形納入計算考量，計算結果則與實驗結果較為接近，與實驗值平均誤差在 10% 以下。顯示在進行鋼纖維混凝土結構分析時，必須將鋼纖維混凝土高韌性之特性納入考量，而在描述鋼纖維混凝土材料應力-應變關係時，除線彈性部份外，非線性的塑性變形部份亦需納入計算，如此才能符合鋼纖維混凝土實際的材料特性。

本研究所提出採用應力-應變全曲線之分析方法基本上亦可視為一種非線性之等效同質體法，結合混凝土材料試驗結果，計算出材料於塑性變形後的非線性材料性質，並將其納入數值材料模型內計算，經與撞擊實驗結果比較後，在彈丸穿靶後之殘餘速度與鋼纖維混凝土靶體破壞模式及疤落直徑等方面均與實驗結果接近，顯示本研究提出之分析方法確實能將鋼纖維混凝土高韌性之材料特性表現於材料模型中，可進一步作為數值模擬軟體之材料模型與建立鋼纖維混凝土結構分析之方法。

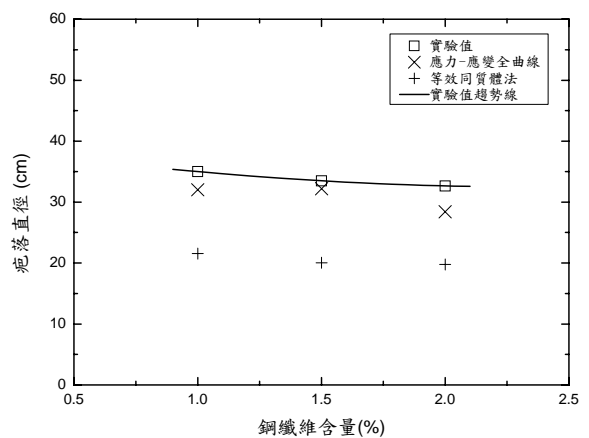


圖 10. 鋼纖維混凝土板疤落直徑模擬結果。

## 五、結論

鋼纖維混凝土結構兼具了鋼纖維與混凝土兩種不同性質材料的優點，可改善混凝土的脆性行為，有效抑制混凝土的裂縫發展，達到增強混凝土結構整體抗張能力之效果。鋼纖維混凝土承受動態荷載時，由於結構體的變形量已超出彈性範圍而有塑性變形產生，此時無法僅由彈性模數來描述結構體的受力行為。本文分別應用等效同質體法經驗公式計算不同纖維含量之鋼纖維混凝土等效材料常數，與 Ezeldin 與 Balaguru 所提出之經驗公式，計算不同纖維含量之鋼纖維混凝土應力-應變全曲線，並應用於有限元素均質材料模型與彈塑性流體動力模型中進行鋼纖維混凝土結構於衝擊荷載下之結構分析。由於等效同質體法之線性理論限制，無法將鋼纖維混凝土的材料非線性效應納入考量，使得預估之靶體強度過強，鋼纖維混凝土結構在承受衝擊荷載後，靶體受剪力破壞而產生之裂縫與疤痕破壞範圍均較實驗結果為少。在描述鋼纖維混凝土材料特性時，除線彈性部份外，非線性的塑性變形部份亦納入計算，以符合鋼纖維混凝土高韌性之特性。本研究所提出之分析方法，除符合鋼纖維混凝土高韌性之特性外，數值分析所需的參數均可由鋼纖維混凝土圓柱試體單軸材料試驗獲得，可適用於不同纖維形狀與含量之鋼纖維混凝土結構，具有工程上之應用價值，可作為如軍事防護掩體、核電廠圍阻體等防護結構設計與分析方法之參考。

## 參考文獻

- [1] Christensen, R. M., and Waals, F. M., "Effective Stiffness of Randomly Oriented Fiber Composites," *Journal of composite Materials*, Vol. 6, No. 4, pp. 518-535, 1972.
- [2] Ahmad, H., and Lagoudas, D. C., "Effective Elastic Properties of Fiber-Reinforced Concrete with Random Fibers," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 12, pp. 2931-2939, 1991.
- [3] Teng, T. L., Chu, Y. A., Chang, F. A., and Chin, H. S., "Calculating the elastic moduli of steel-fiber reinforced concrete using a dedicated empirical formula," *Computational Materials Science*, Vol. 31, pp. 337-346, 2004.
- [4] Huang, F., Wu, H., Jin, Q., and Zhang, Q., "A numerical simulation on the perforation of reinforced concrete targets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 173-187, 2005.
- [5] Tham, C. Y., "Reinforced concrete perforation and penetration simulation using AUTODYN-3D," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, pp. 1401-1410, 2005.
- [6] Holmquist, T. J., Johnson, G. R., and Cook, W. H., "A computational constitutive model for concrete subjected to larger strains, high strain rates, and high pressure," *14<sup>th</sup> Int. Symposium on Ballistics*, pp. 591-600, 1993.
- [7] Carrier, D. J., and Chu, K. H., "Stress-strain relationship for plain concrete in compression," *ACI Journal*, pp. 797-804, 1985.
- [8] Ezeldin, A. S., and Balaguru, P. N., "Normal- and high- strength fiber-reinforced concrete under compression," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 415-429, 1992.
- [9] Nataraja, M. C., Dhang, N., and Gupta, A. P., "Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression," *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, pp. 383-390, 1999.
- [10] Hsu, L. S., and Hsu, C. T., "Stress-strain behavior of steel-fiber high-strength concrete under compression," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, pp. 448-457, 1994.
- [11] Mansur, M. A., Chin, M. S., and Wee, T. H., "Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 21-29, 1999.
- [12] Hallquist, J. O., *LS-DYNA Keyword User's Manual*, Version 960, Livermore Software Technology Corporation, LSTC, Livermore, 2001.
- [13] Gebbeken, N., Greulich, S., and Pietzsch, A., "Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 2017-2031, 2006.
- [14] Eshelby, J. D., "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and

- Related Problems,” Proceedings of the Royal Society of London, A241, pp. 376-396, 1957.
- [15] Mori, T., and Tanaka, K., “Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusion,” ACTA Metallurgica, Vol. 21, No. 5, pp. 571-574, 1973.
- [16] Richard, M. L., Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 179, 1998.
- [17] Malvar, L. J., and Crawford, J. E., “Dynamic increase factors for concrete,” 28<sup>th</sup> DDESB seminar, Orlando, FL, Aug. 1998.
- [18] Sewell, D. A., Ong, A. C. J., and Hallquist, J. O., “Penetration calculation using an erosion algorithm in DYNA,” Proceeding of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, San Antonio, Vol. 3, pp. 208-217, 1992.