

二軸圧縮応力下の合成繊維補強高強度コンクリートの強度および変形特性

Strength and deformation of high strength concrete reinforced with a vinylon fiber under biaxial compression

北海道大学工学部

○学生員

勝俣 真(Shin Katsumata)

北海道大学大学院工学研究科

フェロー

大沼博志(Hiroshi Ohnuma)

北海道大学大学院工学研究科

学生員

大原祥治(Syoji Ohara)

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高層化、長大化により高強度コンクリートの需要が高まっている。しかしながら、高強度コンクリートは圧縮強度の増加に伴い、脆性的な性質を示す。そこで、高強度コンクリートを高靱性化させるための方法として、繊維補強が考えられている。また、コンクリート構造物を非線形解析するために、コンクリートの多軸応力下における強度特性を把握することが必要とされている。

本研究では、高靱性、高強度の性質を持つ合成繊維補強高強度コンクリートの二軸圧縮応力下における強度および応力-ひずみ非線形挙動を把握することを目的とした。すなわち、最初に、合成繊維補強高強度コンクリートの二軸圧縮応力下における終局強度および終局ひずみを求め、その破壊包絡線を提案した。次に、二軸圧縮応力下の構成則として Darwin¹⁾らによる等価一軸ひずみ理論に基づく増分型歪弾性モデルを用いて、応力-ひずみ非線形挙動を算定し、実験値との比較検討を行った。

2. 合成繊維の特徴

実験に使用した合成繊維は、ビニロン繊維(VF)である。ビニロン繊維は、セメントマトリックスとの接着性や防錆性、耐アルカリ性、長期耐候性に優れており、引張強度やヤング率においても高い特性を持っている。使用したビニロン繊維の性質を表-1に示す。

表-1 使用繊維の性質

	比重	長さ (mm)	直径 (mm)	引張強度 (Mpa)	ヤング率 (Mpa)
VF	1.3	12	0.2	900	29000

3. 実験の概要

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は鶴川産の海砂を使用し、その粗粒率、比重および吸水率はそれぞれ 2.87、2.67 および 1.43%であった。粗骨材は最大寸法 10mm の玉砂利を使用し、その比重は 2.65 であり表面乾燥状態とした。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤をセメント重量の 0.80%使用した。合成繊維はコンクリート容積の 1.0%混入した。コンクリートの配合を表-2に示す。

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		VF	W	C	S	G	SP
27	50	13	160	593	791	785	4.74

コンクリートの練り混ぜには、強制練りミキサーを使用した。二軸圧縮試験用供試体は 10cm×10cm×10cm の立方体とし、三連の鋼製型枠に二層に分けて打設した。打設 1 日後に供試体を脱型し、試験前日まで標準水中養生した。養生槽から取り出した供試体は、平滑性を得るために研磨剤で研磨した。

また、使用するコンクリートの力学的性質を測定するために、φ10cm×20cm の円柱供試体を用いて一軸圧縮試験および割裂引張試験を行った。材齢 28 日における一軸圧縮強度、割裂引張強度、ヤング係数、ポアソン比を表-3に示す。

表-3 材齢 28 日におけるコンクリートの力学的性質

一軸圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
77.7	5.39	40.5	0.24

加圧板と供試体との剛性の違い、ならびに摩擦抵抗によって生じる端面拘束の影響を取り除き、供試体に作用する応力分布を理想的な状態にするために、加圧板と供試体との間に減摩材を挿入した。この試験で用いた減摩材は、厚さが 0.1mm のテフロンシート 2 枚とシリコングリースから構成されている。

二軸圧縮試験の載荷方法は、手動によって 2 方向の応力比を一定に保持させながら、供試体が破壊に達するまで応力を漸次増加させる比例載荷方法を用いた。最大主応力(σ_1)と最小主応力(σ_2)の主応力比は 5 水準である。さらに、立方供試体の一軸圧縮試験を行った。また、加圧板間の変位を測定することによって、コンクリートのひずみを求めることとした。

4. 終局強度包絡線および終局ひずみ包絡線の表示

二軸圧縮試験における終局強度および終局強度包絡線を図-1に示す。横軸は最小主応力(σ_2)を立方供試体の一軸圧縮強度(σ_c)で除して無次元化した値であり、縦軸は最大主応力(σ_1)を一軸圧縮強度(σ_c)で除して無次元化した値で

ある。

図中左上のプロット点は実験値であり、実線は実験値より最小自乗法を用いて導いた合成繊維補強高強度コンクリートの終局強度包絡線である。図中右下の 3 本の曲線は、大原ら²⁾により既に提案されている高強度コンクリート、鋼繊維補強高強度コンクリートおよび今回提案する合成繊維補強高強度コンクリートの終局強度包絡線である。

図から明らかなように、二軸圧縮応力下の合成繊維補強高強度コンクリートの終局強度包絡線は凸状の曲線を示す。二軸圧縮強度は主応力比(σ_2/σ_1)の増加に伴って大きくなり、主応力比が 0.5 のとき、最大となる特徴を持っている。主応力比が 0.5 のときの二軸圧縮強度は一軸圧縮強度の約 1.40 倍であった。また、最大強度に達してからは、主応力比の

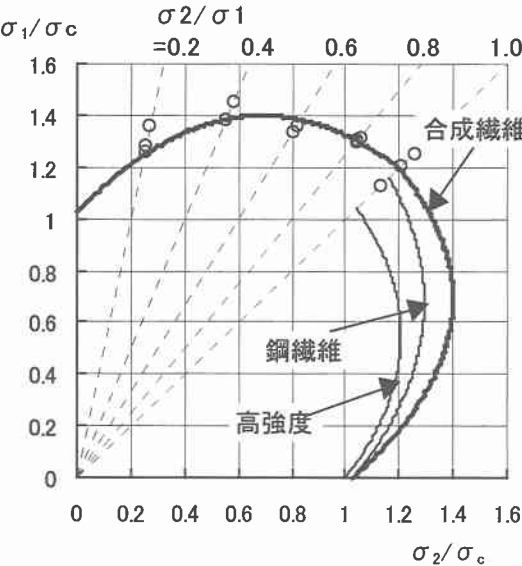


図-1 終局強度包絡線

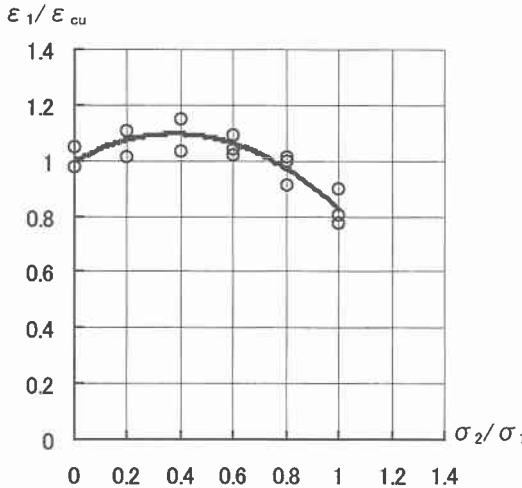


図-2 終局ひずみ包絡線

増加に伴って二軸圧縮強度は減少し始め、等二軸圧縮応力状態における強度は一軸圧縮強度の約 1.20 倍であった。

この実験結果から二軸圧縮応力下の合成繊維補強高強度コンクリートの終局強度は次式によって表示することができた。

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c}\right) = 1.03 + 1.01\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_c}\right) - 0.744\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_c}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 σ_1 、 σ_2 および σ_c はそれぞれ最大主応力、最小主応力および一軸圧縮強度である。

合成繊維補強高強度コンクリートの終局強度の実験結果は、既存の鋼繊維補強高強度コンクリートの表示式を若干上回った。また、高強度コンクリートの表示式に対しては大きく上回った。これは、合成繊維の混入により引張靱性が高くなり、合成繊維補強高強度コンクリートの一軸圧縮強度に対する引張強度の比が、鋼繊維補強高強度コンクリートや高強度コンクリートのそれよりも大きくなる。そのため、一軸圧縮強度に対する相対的なせん断強度が大きくなり、合成繊維補強高強度コンクリートの実験結果が既存の表示式を上回ったと考えられる。

以上のように、一軸圧縮強度と応力比が既知の場合、二軸圧縮応力を受けるコンクリートの終局強度はこの放物線表示式によって算定することができる。

次に、二軸圧縮試験における終局ひずみおよび終局ひずみ包絡線を図-2 に示す。ここで、本研究では終局ひずみを応力が終局強度に達したときのひずみと仮定した。横軸は主応力比(σ_2/σ_1)であり、縦軸は最大主応力方向のひずみ(ϵ_1)を一軸圧縮破壊時のひずみ(ϵ_{cu})で無次元化した値である。また、図中のプロット点は実験値である。実線は実験値より最小自乗法を用いて導いた合成繊維補強高強度コンクリートの終局ひずみ包絡線である。

図から明らかなように、二軸圧縮応力下の合成繊維補強高強度コンクリートの終局ひずみ包絡線は凸状の曲線を示す。また、終局ひずみは主応力比(σ_2/σ_1)の増加に伴って大きくなり、主応力比が 0.4 の付近で最大となる。このときの終局ひずみは一軸圧縮応力下の終局ひずみの約 1.10 倍である。最大値に達してからは、主応力比の増加に伴って、終局ひずみは減少し始め、等二軸圧縮応力状態の終局ひずみは一軸圧縮応力下の約 0.83 倍である。

実験結果から、二軸圧縮応力下の合成繊維補強高強度コンクリートの終局ひずみは次式によって表示することができた。

$$\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_{cu}}\right) = 1.00 + 0.524\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) - 0.695\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^2 \quad (2)$$

ここで、 ϵ_1 および ϵ_{cu} は、それぞれ最大主応力方向のひずみおよび一軸圧縮破壊時のひずみである。

5. 増分型弾性モデルによる解析方法

5.1 増分型構成方程式

平面応力状態の増分型構成方程式は、直交異方性を仮定すると次式のように書くことができる。

$$\{\Delta\sigma\} = [C] \cdot \{\Delta\varepsilon\} \quad (3)$$

$$[C] = \frac{1}{\phi} \begin{bmatrix} E_1 & \sqrt{E_1 E_2} \mu_{12} & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & \phi G_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mu_{12} = \nu_1 \nu_2, \phi = 1 - \mu_{12}^2 \quad (5)$$

ここで、 $[C]$ は弾性マトリックスである。本研究では、Darwin らが開発した等価一軸ひずみ理論を用いて、式(3)のマトリックスを線形の形にし、計算の簡略化を図った。

5.2 等価一軸ひずみ理論

Darwin らによって開発された等価一軸ひずみ理論によると、増分応力と増分等価一軸ひずみ($d\varepsilon_{iu}$)の関係は次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{1u} \\ d\varepsilon_{2u} \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式(6)より、等価一軸ひずみの和は、増分等価一軸ひずみを応力経路に沿って積分することにより、算定することができる。

$$\varepsilon_{iu} = \int \frac{d\sigma_i}{E_i} \quad (7)$$

5.3 応力と等価一軸ひずみの関係式

一軸圧縮応力下のコンクリートに関して軟化領域を含めた応力-ひずみ曲線の表示式が Saenz によって提案されている³⁾。この表示式のひずみを、等価一軸ひずみ(ε_{iu})に置き換えると次式のように表され、二軸圧縮応力下の応力-等価一軸ひずみ曲線が得られる。

$$\sigma_i = \frac{E_0 \cdot \varepsilon_{iu}}{1 + \left(R + \frac{E_0}{E_s}\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right) - (2R-1) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right)^2 + R \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right)^3} \quad (8)$$

$$R = \frac{E_0 \left(\frac{\sigma_{ic}}{\sigma_{if}} - 1\right)}{E_s \left(\frac{\varepsilon_{if}}{\varepsilon_{ic}} - 1\right)^2} - \frac{\varepsilon_{ic}}{\varepsilon_{if}} \quad (9)$$

$$E_s = \frac{\sigma_{ic}}{\varepsilon_{ic}}, \sigma_{if} = \frac{\sigma_{ic}}{4}, \varepsilon_{if} = 4\varepsilon_{ic} \quad (10)$$

ここで、 E_0 は初期ヤング係数、 E_s は割線係数、 σ_{ic} は現在の特定の主応力比に対して求められる*i*方向の終局強度、 ε_{ic} は σ_{ic} に対応する等価一軸ひずみ、 σ_{if} および ε_{if} は、応力-等価一軸ひずみ曲線の軟化領域における任意の点の座標である。式(8)を ε_{iu} で微分することにより接線ヤング係数 E_i が得られ、各主応力軸方向のヤング係数を求めることができる。

$$E_i = E_0 \frac{1 + (2R-1) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right) - 2R \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right)^3}{\left[1 + \left(R + \frac{E_0}{E_s} - 2\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right) - (2R-1) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right)^2 + R \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right)^3\right]^2} \quad (11)$$

5.4 ポアソン比

式(3)のパラメータとして使用するポアソン比については、Kupfer らの実験のうち一軸圧縮試験データを最小二乗法によって3次式にあてはめて定義された次式を用いることとした。

$$\nu_i = \nu_0 \left[1.0 + 1.3736 \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right) + 5.3600 \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right)^2 + 8.586 \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}}\right)^3 \right] \quad (12)$$

5.5 解析方法

解析方法には、ひずみ増分を与えてそれに伴う応力増分を算定するひずみ増分型の方法を採用した。解析手順は、まずパラメータとしてコンクリートの一軸圧縮強度、一軸圧縮ひずみ、ヤング係数、ポアソン比を入力する。次に荷重条件として主応力比を入力する。その後、前述の終局強度および終局ひずみ包絡線の表示式を用いて、終局強度および終局ひずみを算定する。さらに、等価一軸理論に基づく応力-等価一軸ひずみ関係式を使用し、増分等価一軸ひずみから応力増分を算定する。最終的に、増分等価一軸ひずみを応力-ひずみ曲線のひずみ軟化領域を表現するのに充分満足するまで繰り返し足し合わせて、応力-等価一軸ひずみ曲線を描いた。

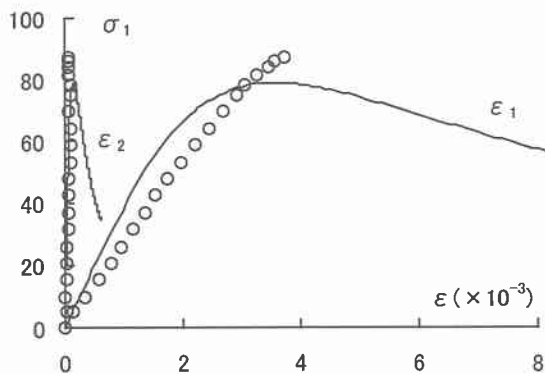


図-5 応力-ひずみ曲線(主応力比 : 0.2)

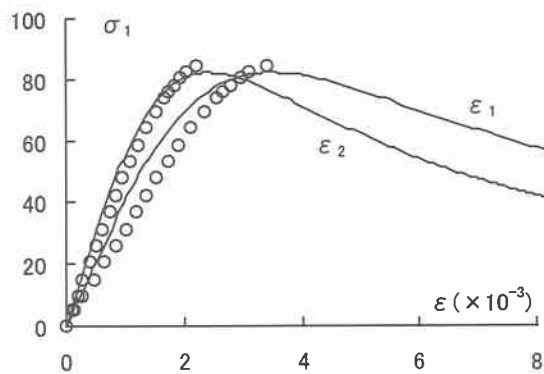


図-8 応力-ひずみ曲線(主応力比 : 0.8)

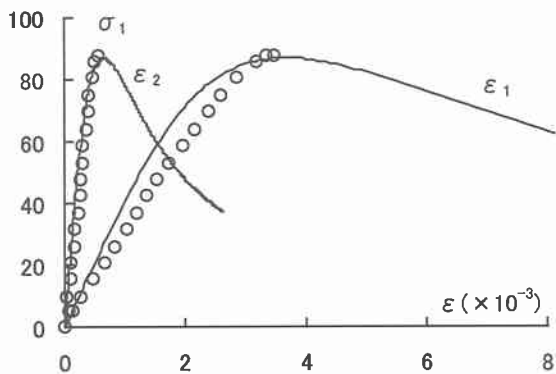


図-6 応力-ひずみ曲線(主応力比 : 0.4)

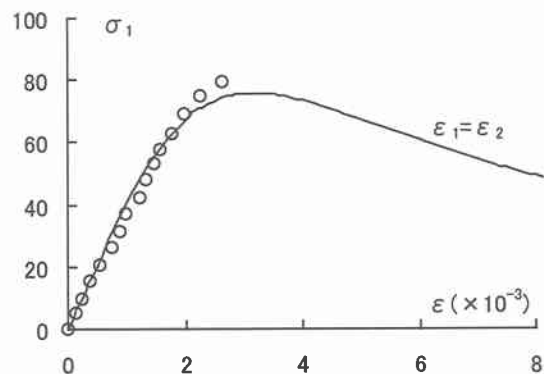


図-9 応力-ひずみ曲線(主応力比 : 1.0)

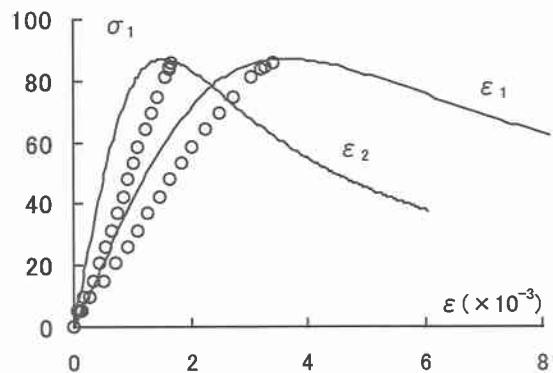


図-7 応力-ひずみ曲線(主応力比 : 0.6)

6. 実験結果と解析結果の比較

図-5～9は、それぞれの応力比についての実験結果(丸点)と解析結果(実線)との比較である。解析においては、ひずみ軟化領域を含めた応力-ひずみ曲線の表示を試みた。実験結果と解析結果は比較的良好な整合性を示した。したがって、二軸圧縮応力下における合成繊維補強高強度コンクリートの応力-ひずみ曲線の非線形挙動は、増分型弾塑性モデルを用いて算定できると考える。また、前述の終局強度および終局ひずみ包絡線の表示式は、終局強度および終局ひずみの算定に有用であり、二軸圧縮応力状態を考慮した終局強度および終局ひずみ基準として適用可能であると考えられる。

7. まとめ

本研究から以下の結論が得られた。

- (1) 二軸圧縮応力下の合成繊維補強高強度コンクリートの終局強度包絡線は、既存の研究で提案された高強度コンクリートや鋼繊維補強高強度コンクリートの終局強度包絡線を上回った。これは、合成繊維補強高強度コンクリートの相対的なせん断強度が大きくなったことによるものと考えられる。
- (2) 二軸圧縮応力下における合成繊維補強高強度コンクリートの応力-ひずみ非線形挙動は増分型弾塑性モデルを用いて算定できることが示された。また、提案した終局強度および終局ひずみ包絡線の表示式は、合成繊維補強高強度コンクリートを使用した構造物を非線形解析する場合、二軸圧縮応力状態を考慮した破壊基準として適用可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) D.Darwin et al: Nonlinear Biaxial Law for Concrete, ASCE EM Division, pp.249-241, 1977
- 2) 大原祥治ほか: 高強度コンクリートの二軸圧縮応力下における強度および変形特性, 第 54 回セメント技術大会講演要旨, pp.304-305, 2000
- 3) I.P.Seanz: Discussion of "Equation of the Stress-Strain Curve of Concrete" by P.Desayi and Krishnan, ACI Journal, vol.61, No.9, pp.1229-1235, 1964