

論文 鋼繊維補強高強度コンクリートの三軸圧縮応力における強度・変形特性の数式表示

石川 徹也*1・大沼 博志*2・出雲 健司*3・大原 祥治*4

要旨: 鋼繊維補強高強度コンクリートの三軸圧縮特性を明らかにするために、純三軸圧縮試験装置を用いて実験を行い、八面体応力理論を用いて終局強度およびひずみ包絡線を数式表示した。さらに、等価一軸ひずみ理論に基づく増分型弾性モデルを用いて構成式を提案し、解析結果と実験結果を比較することにより、この構成式の鋼繊維補強高強度コンクリートへの適用性を評価した。

キーワード: 鋼繊維補強高強度コンクリート, 三軸圧縮応力, 増分型弾性モデル

1. はじめに

高強度コンクリートの実用化においての問題点として、圧縮強度の増加に伴うコンクリートの脆性化が挙げられる。高強度コンクリートを高靱性化に改善するための1つの方法として、繊維補強が考えられる。鋼繊維補強コンクリートは、変形に対する拘束効果が高いが、コンクリート中の鋼繊維の方向が様々であるため、その拘束効果を力学的に把握するためには多軸圧縮応力下における強度特性および変形挙動を把握する必要がある。

本研究では、3方向から独立した荷重を作用させることができる純三軸圧縮試験機を用いて、鋼繊維補強高強度コンクリートの応力-ひずみ非線形挙動を把握することを目的とした。実験では、任意の応力経路に対する鋼繊維補強高強度コンクリートの終局強度およびひずみを求め、その破壊包絡線を数式表示した。さらに、Darwinらの等価一軸ひずみ理論に基づく増分型弾性モデルを用いて構成式を提案し、解析結果と実験結果を比較検討して、この構成式の鋼繊維補強高強度コンクリートへの適用性を評価した。

2. 実験の概要

実験に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、粗粒率、比重、吸水量はそれぞれ 2.87, 2.67, 1.43%であった。粗骨材は最大粗骨材寸法 10mm の玉砂利を使用し、その比重は 2.65 であった。配合は設計基準強度を 80.0N/mm^2 とし計算を行った。コンクリートの配合を表-1 に示す。混和剤は高性能 AE 減水剤をセメント重量の 0.90% 使用した。また、鋼繊維は長さ 9mm のものをコンクリート容積の 1.0% 混入した。

実験に使用したコンクリートの力学的性質を測定するための供試体には $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いた。材齢 28 日および三軸圧縮試験時の圧縮強度、割裂引張強度、ヤング係数、ポアソン比を表-2 に示す。ただし、割裂引張強度を測定するための供試体は $\phi 15 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いた。

三軸圧縮試験用供試体は $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ の立方体とした。コンクリート打設数時間後に上面のレイタンスを取り除き、水セメント比 28% のセメントペーストでキャッピングを行い、脱

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻(正会員)

*2 北海道大学教授 大学院工学研究科 工博(正会員)

*3 北海道大学助手 大学院工学研究科 工博(正会員)

*4 北海道大学 工学部

表-1 コンクリートの配合

Max. size of aggregate (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Unit mass (kg/m ³)				
				W Water	C Cement	S Fine aggregate	G Coarse aggregate	SP Admixture
10.0	15.0	27.0	44.5	160.0	592.6	751.5	930.2	5.926

表-2 コンクリートの力学的性質

	tests	Rendulic stress plane (Lateral pressure : constant)	Rendulic stress plane (Axial pressure : constant)	Deviatoric stress plane
at 28 days	Compressive strength (N/mm ²)	80.9	81.7	81.6
	Splitting tensile strength (N/mm ²)	—	5.06	5.01
	Young's modulus (kN/mm ²)	37.1	40.4	41.4
	Poisson's ratio	0.21	0.24	0.23
at testing under triaxial compression	Age(days)	40	40	40
	Compressive strength (N/mm ²)	85.9	87.0	83.6
	Young's modulus (kN/mm ²)	39.8	38.0	41.1
	Poisson's ratio	0.21	0.21	0.22

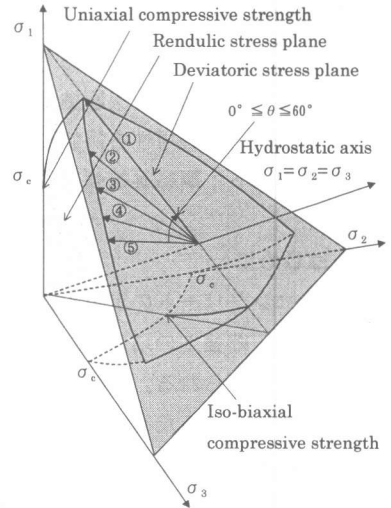


図-1 Rendulic 応力面および偏差応力面の概念図

型後試験日前日まで水中養生した。養生槽から取り出した供試体は、表面の平滑性を得るため研磨砂で研磨した。本試験では加圧盤と供試体との剛性の違いによって生じる端面拘束の影響を取り除くため、加圧盤と供試体の間に平均摩擦係数が 0.014 のテフロンシート(厚さ: 0.1mm)2 枚とシリコングリースの減摩材を挿入した。試験機は各主応力方向の荷重を独立させて任意に与えることができる純三軸圧縮試験機(各方向の最大容量: 2000kN)を使用した。ひずみの測定は、加圧版間の変位を測定して求めた。

三軸圧縮試験には Rendulic 応力面試験と偏差応力面試験を採用した。Rendulic 応力面試験の荷重方法は、まず所定の側圧を加え、これを一定保持しながら軸圧を増加させる側圧一定試験($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)と、軸圧を一定保持しながら側圧を増加させる軸圧一定試験($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)の 2

通りある。ここで、添字 1, 2, 3 は各主応力軸方向を示している。偏差応力面試験の荷重方法は、まず静水圧軸に沿ってあらかじめ定めた八面体直応力 70.0N/mm² を加え、その後この八面体直応力を一定保持しながら、3 主応力を任意の割合で変化させ、偏差応力面上で破壊に至らせるものである。この偏差応力面試験では、コンクリートを巨視的に等方・均質な材料と仮定して、主応力の互換性から、偏差応力面上の偏差角 θ を $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ とし、この範囲内で 5 種類の応力径路を設定し実験を行った。また全ての実験で、1 つの応力条件に対し 3 個の供試体の三軸圧縮試験を行い、それらを実験値とした。Rendulic 応力面と偏差応力面の概念図を図-1 に示す。

3. 終局強度および終局ひずみ曲面

3.1 終局強度曲面

Rendulic 応力面上の側圧一定試験および軸圧一定試験から得られたの終局強度の実験結果を図-2 に示す。本研究では、応力-ひずみ曲線のピーク時の応力を終局強度と定義した。図中のプロット点は鋼繊維補強高強度コンクリートの終局強度の実験値、実線はその終局強度値より最小自乗法によって導いた終局強度包絡線であり、式(1)および(2)で表される。破線は、大沼らにより普通強度のコンクリートに対し提案された終局強度包絡線である¹⁾。またこれらの表示式は八面体応力理論を用いており、 σ_{oct} および τ_{oct} はそれぞれ八面体直応力および八面体せん断応力、 τ_{oe} および τ_{oc} はそれぞれ方向角が $\theta=0^\circ$ および 60° の時の八面体せん断応力、 σ_c は立方体試体の一軸圧縮強度である。この式(1)および(2)と大沼の式は、どちらも σ_{oct} を σ_c で除した変数をもちいる 2 次式であり、両式の差異は最小自乗法で導いた係数にある。式(1)および(2)の寄与率は、どちらも 0.999 であった。実験結果と大沼らの終局強度包絡線の誤差を比較すると、側圧一定試験は平均で 13%、軸圧一定試験は平均で 4.8% であり、実験値は大沼らの包絡線を若干上回った。これは鋼繊維を混入することにより、高強度コンクリートの引張弾性が高くなり、コンクリートの一軸圧縮強度に対する引張強度の比が普通コンクリートよりも大きくなるために、鋼繊維補強高強度コンクリートの相対的なせん断強度(一軸圧縮強度との比)が大きくなることによるものと考えられる。一方表示式(1)および(2)は寄与率から判断しても、実験値と良く一致していることがわかる。したがって、鋼繊維補強高強度コンクリートの Rendulic 応力面上の終局強度は、式(1)および(2)を用いて算定できると考える。

次に偏差応力面試験より得られた終局強度の実験結果を図-3 に示す。図から明らかなように、偏差応力面上の終局強度包絡線は、鋼繊維補強高強度コンクリートの終局強度の実験結果と良く一致することが示された。以上より表示

$$\frac{\tau_{oe}}{\sigma_c} = -0.0442 + 0.8664 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right) - 0.138 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{\tau_{oc}}{\sigma_c} = 0.0634 + 1.355 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right) - 0.3689 \left(\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (2)$$

$$\tau_{oct}(\theta) = \frac{2\tau_{oc}(\tau_{oc}^2 - \tau_{oe}^2) \cos\theta + \tau_{oc}(\tau_{oe} - \tau_{oc}) \sqrt{4(\tau_{oc}^2 - \tau_{oe}^2) \cos^2\theta + 5\tau_{oe}^2 - 4\tau_{oc}\tau_{oe}}}{4(\tau_{oc}^2 - \tau_{oe}^2) \cos^2\theta + (\tau_{oc} - 2\tau_{oe})^2} \quad (3)$$

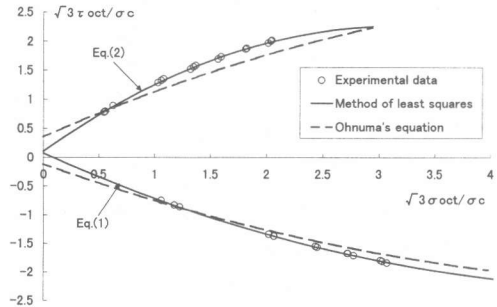


図-2 Rendulic 応力面上の終局強度包絡線

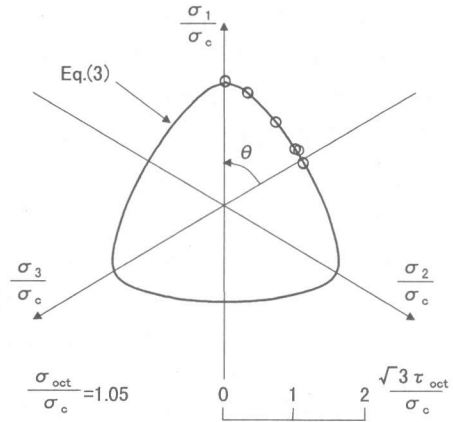


図-3 偏差応力面上の終局強度包絡線

式(1)、(2)および(3)は、普通コンクリートのみならず、鋼繊維補強高強度コンクリートに対しても十分適用可能であると考えられる。

3.2 終局ひずみ曲面

Rendulic 応力面上の側圧一定試験と軸圧一定試験から得られた応力-ひずみ曲線を図-4 および図-5 に示す。両図とも最大主応力(σ_1)を縦軸にとり、横軸のひずみは圧縮側を正にと

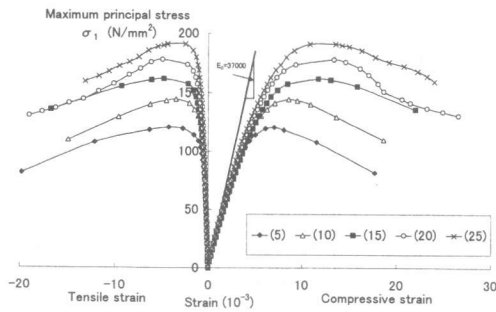


図-4 Rendulic 応力面上の応力-ひずみ曲線 (側圧一定試験)

った。また図中の凡例の値は、拘束応力を示している。これらの図から明らかなように、拘束応力の増加に伴い終局強度および終局ひずみが一軸圧縮応力状態に比べて著しく増大することがわかる。これは拘束応力が増加することによりコンクリート内部のマイクロクラックの成長が抑制され、コンクリートの性質が脆性から延性へと変化したためである。

次に Rendulic ひずみ面上の軸圧一定試験および側圧一定試験から得られた終局ひずみの実験結果を図-6 に示す。本研究では、終局ひずみを“応力が終局強度に達した時のひずみ”と定義した。図中のプロット点は鋼繊維補強高強度コンクリートの終局ひずみの実験値、実線はその終局ひずみ値より最小自乗法によって導いた終局ひずみ包絡線であり、式(4)および(5)で表される。ここで、 ϵ_{oct} および γ_{oct} はそれぞれ八面体直ひずみおよび八面体せん断ひずみであり、 γ_{oe} および γ_{oc} はそれぞれ方向角が $\theta = 0^\circ$ および 60° の時の八面体せん断ひずみ、 ϵ_{cu} は立方体試体の一軸圧縮ひずみである。式(4)および(5)の近似曲線の寄与率は、それぞれ 0.607 および 0.648 であった。

図-6 より、Rendulic 応力面試験から得られた終局ひずみの実験結果は終局強度に比べるとばらつきが大きいものの、式(4)および(5)を用いることで、Rendulic ひずみ面上の終局ひずみを算定できると考える。

次に偏差応力面試験から得られた終局ひずみの実験結果を図-7 に示す。図中の実線は普通

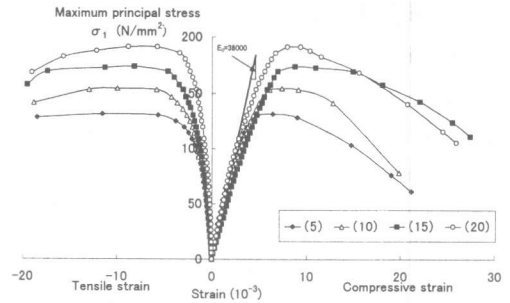


図-5 Rendulic 応力面上の応力-ひずみ曲線 (軸圧一定試験)

$$\frac{\gamma_{oe}}{\epsilon_{cu}} = 3.9534 + 0.109 \left(\frac{\epsilon_{oct}}{\epsilon_{cu}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\gamma_{oc}}{\epsilon_{cu}} = 3.6885 + 2.1315 \left(\frac{\epsilon_{oct}}{\epsilon_{cu}} \right) \quad (5)$$

$$\gamma_{oct}(\theta) = \frac{2\gamma_{oc}(\gamma_{oc}^2 - \gamma_{oe}^2)\cos\theta + \gamma_{oc}(2\gamma_{oe} - \gamma_{oc})\sqrt{4\gamma_{oc}^2 - \gamma_{oe}^2}\cos^2\theta + 5\gamma_{oe}^2 - 4\gamma_{oe}\gamma_{oc}}{4\gamma_{oc}^2 - \gamma_{oe}^2\cos^2\theta + (\gamma_{oc} - 2\gamma_{oe})^2} \quad (6)$$

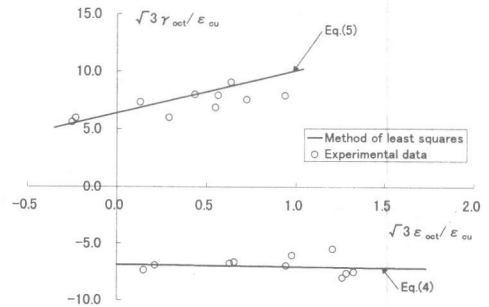


図-6 Rendulic ひずみ面上の終局ひずみ包絡線

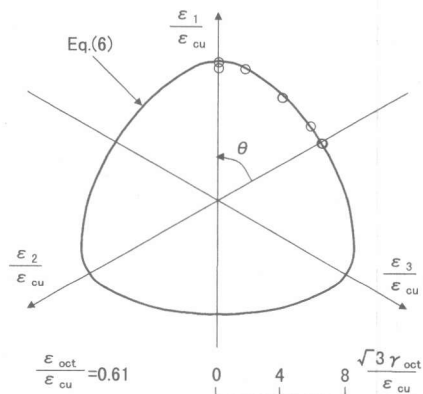


図-7 偏差ひずみ面上の終局ひずみ包絡線

強度のコンクリートに対して、既に提案されている終局ひずみ包絡線であり¹⁾、式(6)で示される。図から明らかなように、偏差ひずみ面上の終局ひずみ包絡線は、鋼繊維補強高強度コンクリートの終局ひずみの実験結果と良く一致することが示された。したがって既存の表示式は、鋼繊維補強高強度コンクリートに対しても十分適用可能であると考えられる。

4. 増分型弾塑性モデルによる解析方法²⁾

4.1 増分型構成方程式

軸対称解析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。

$$\{\Delta\varepsilon\} = [D] \cdot \{\Delta\sigma\} \quad (7)$$

ここで、[D]は軸対称の弾性マトリックスである。式(7)のマトリックスは複雑であり、これを解くためには、6個の弾性係数が必要である。そこで本研究では、Darwinらが開発した等価一軸ひずみ理論を用いて、式(7)のマトリックスを線形の形にし、計算の簡略化を測った。

4.2 等価一軸ひずみ理論

DarwinとPecknoldによって開発された等価一軸ひずみ理論²⁾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。

$$d\sigma_i = E_i \cdot d\varepsilon_{iu} \quad (8)$$

式(8)より、等価一軸ひずみの和は、増分等価一軸ひずみを応力径路に沿って積分することにより、算定することができる。

$$\varepsilon_{iu} = \int \frac{d\sigma_i}{E_i} \quad (9)$$

4.3 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²⁾。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、応力-等価一軸ひずみ曲線が得られる。

$$\sigma_i = \frac{E_0 \cdot \varepsilon_{iu}}{1 + \left(R + \frac{E_0}{E_s} - 2 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} \right) - (2R-1) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} \right)^2 + R \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} \right)^3} \quad (10)$$

ただし、

$$R = \frac{E_0 \left(\frac{\sigma_{ic}}{\sigma_{if}} - 1 \right)}{E_s \left(\frac{\varepsilon_{if}}{\varepsilon_{ic}} - 1 \right)^2} - \frac{\varepsilon_{ic}}{\varepsilon_{if}} \quad (11)$$

$$E_s = \frac{\sigma_{ic}}{\varepsilon_{ic}}, \quad \sigma_{if} = \frac{\sigma_{ic}}{4}, \quad \varepsilon_{if} = 4\varepsilon_{ic} \quad (12)$$

ここで、 E_0 は初期ヤング係数、 σ_{ic} は任意の応力比に対する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曲線を通る定点を示す。式(10)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。

$$E_i = E_0 \frac{1 + (2R-1) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} \right)^2 - 2R \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} \right)^3}{\left[1 + \left(R + \frac{E_0}{E_s} - 2 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} \right) - (2R-1) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} \right)^2 + R \cdot \left(\frac{\varepsilon_{iu}}{\varepsilon_{ic}} \right)^3 \right]^2} \quad (13)$$

4.4 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とった。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、ポアソン比および増分ひずみを入力する。次に前述の終局強度およびひずみ包絡線の表示式を用いて、終局強度およびひずみを算定する。さらに増分ひずみを増分等価一軸ひずみとして構成式に代入し増分応力を導き、反復計算を行う。最終的に応力-等価一軸ひずみ曲線の形で解析を行った。

5. 三軸圧縮応力下の応力-ひずみ挙動

応力径路①~⑤の偏差応力面試験で得られた実験結果と解析結果を図-8に示す。この図から明らかなように、プレピーク挙動に対して解析結果と実験結果は良い整合性を示した。したがって、提案した構成式は任意の応力径路に沿

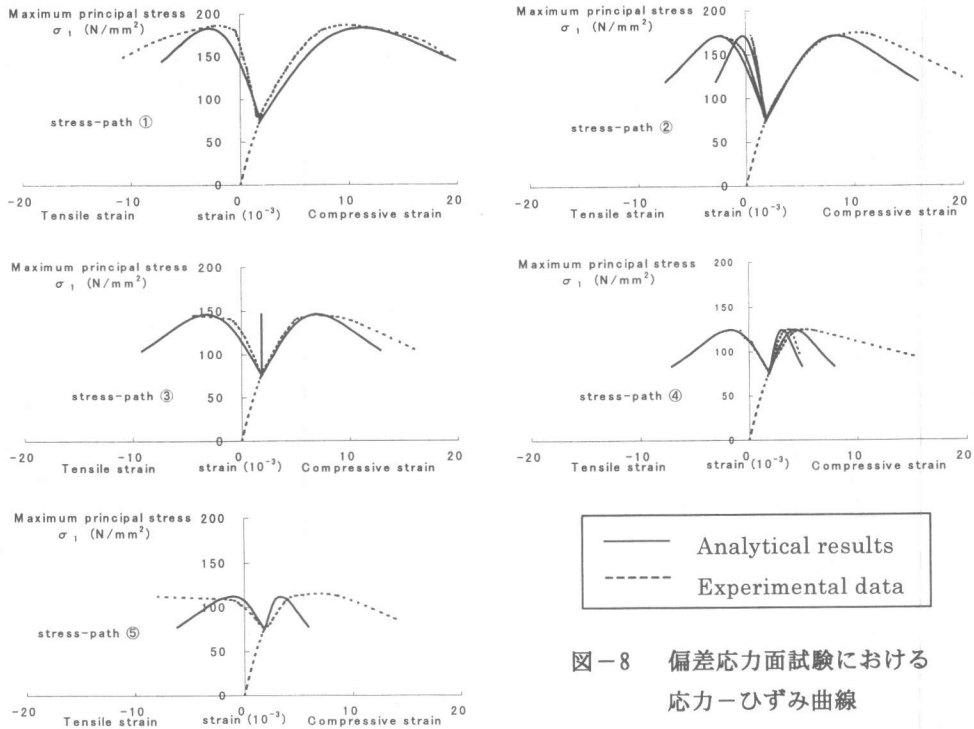


図-8 偏差応力面試験における
応力-ひずみ曲線

った鋼繊維補強高強度コンクリートのプレピーク応力-ひずみ曲線の非線形挙動を算定できることが示された。さらに前述の終局強度およびひずみ包絡線の表示式は、終局強度およびひずみの算定に有用であり、三次元の構造物に対し有限要素法等を用いて非線形解析する場合、多軸応力状態を考慮した終局強度およびひずみ基準として適用可能であると考え。ポストピーク挙動に対しては、一部の引張ひずみのデータを得られず、解析結果と実験結果を比較できないものもあったが、提案した構成式によって、ひずみ軟化領域を表示できると判断する。

6. まとめ

本研究から、以下の結論が得られた。

- (1) 鋼繊維補強高強度コンクリートの終局強度の実験結果は、既存の表示式を若干上回った。これは鋼繊維を混入したことにより高強度コンクリートの引張靱性が高くなり、一軸圧縮強度に対する相対的な

せん断強度が大きくなったためである。

- (2) 今回新たに提案した Rendulic 面上の終局強度およびひずみ包絡線の表示式を用いることで、鋼繊維補強高強度コンクリートの Rendulic 面上終局強度およびひずみを算定できることが示唆された。
- (3) 等価一軸ひずみ理論に基づく増分型弾塑性モデルによる解析結果と実験結果の比較から、このモデルによる構成式は任意の応力径路に沿って三軸圧縮応力下の鋼繊維補強高強度コンクリートの応力-ひずみ非線形挙動を、ひずみ軟化領域も含めて算定できることが示唆された。

参考文献

- 1) 大沼博志, 青柳征夫: 三軸圧縮応力下におけるコンクリートの強度特性, 電力中央研究所研究報告, No381021, 1981.12
- 2) W.F.Chen: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill, 1982