

論文 一軸圧縮を受ける高強度 RC 円柱で生じる圧縮破壊の局所化

佐々木 敏幸^{*1}・秋山 充良^{*2}・前田 直己^{*3}・鈴木 基行^{*4}

要旨: コンクリート圧縮強度 34.1, 65.3N/mm², 横拘束筋降伏強度 404~1413N/mm² を用いた, 円形断面を有する RC 柱の一軸圧縮実験を行った。実験より, 圧縮強度発現後にひずみが増加する破壊領域長さは, コンクリート圧縮強度や横拘束筋体積比の大きさにより変化することが確認され, それは, 構成材料の強度と横拘束筋量から求められる有効横拘束圧を用いて定量化された。さらに, エネルギー基準に基づく平均化応力-ひずみ関係を提案し, ひずみの平均化長さ(圧縮変位の計測長)に関わらず本実験結果を再現可能であることを確認した。

キーワード: 高強度コンクリート, 一軸圧縮実験, 破壊領域, 圧縮破壊エネルギー

1. はじめに

著者らは, 圧縮強度が 100N/mm² を超えたコンクリート, および降伏強度が 1000N/mm² 以上の鉄筋を用いた RC 部材の実用化を目指した研究を行っている。その一環として, 全 48 体の RC 角柱の一軸圧縮実験を実施し, コンクリート圧縮強度が約 40~130 N/mm², 横拘束筋降伏強度が約 300~1450 N/mm², 横拘束筋体積比が 2.2%までの範囲にある高強度 RC 角柱に適用可能なコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係を提案した¹⁾。圧縮破壊エネルギーを介したことで, ひずみの平均化長さに応じて圧縮強度発現後の軟化曲線が変化し, 圧縮変位の計測長が異なる実験結果の再現も可能になるなど, 既往のコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係に比べ, 著者らのモデルは, 非常に高い汎用性を有することを確認した。

これまでに著者らが用いた全ての実験供試体は, 1 辺 250mm の正方形断面で, 高さ 750mm の形状を有しており, 圧縮破壊エネルギーや破壊領域長さに与える供試体寸法や断面形状の影響が評価できず, 今後の課題とされていた。そこで本研究では, 新たに, 高さ 900mm, 直径 300mm の円形断面を有する RC 柱を作製し, 断面形状が

破壊領域長さや平均化応力-ひずみ関係に与える影響を考察した。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元と使用材料

実験供試体の一覧を表-1 に示す。なお, 表-1 には, 参考文献 1) で用いた RC 角柱の横拘束筋拘束形状(Type-A, Type-B)も示している。また, 一例として, NF1P3Y4 の配筋状況を図-1 に示す。供試体の破壊が柱脚部と試験機との拘束部付近に集中することを避けるため, 供試体の上下端の約 0.3D(D: 直径)の範囲(75~100mm)では横拘束筋を密に配筋した。

各供試体には, 図-1 に示すように, 供試体中央位置にひずみゲージを 5cm 間隔に貼付した異形角型アクリル棒を埋め込んだ。なお, この各ひずみゲージから得られる値を以降では局所ひずみと呼ぶ。この計測方法は, 圧縮力作用化のコンクリートで生じる破壊領域(ひずみ進展領域)と非破壊領域(ひずみ後退領域)を実測するために Nakamura and Higai²⁾ が考案したものであり, 全ての局所ひずみを積分して得られる変位は, 変位計により測定される供試体全長変位(上下圧盤間距離の変化量)に概ね一致することを確認している。

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教授 博(工) (正会員)

*3 前田製管(株) 取締役会長

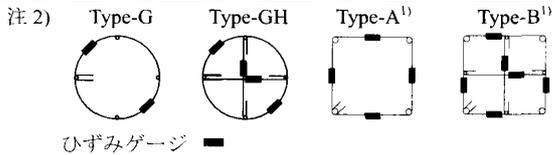
*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 供試体諸元の一覧

供試体名 ⁽¹⁾	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	軸方向鉄筋	横拘束筋					圧縮強度 (N/mm ²)	破壊領域 長さ (mm)
			径 (mm)	間隔 (mm)	体積比 (%)	降伏強度 (N/mm ²)	拘束形状 ^(1,2)		
CF1P1Y1	34.1	D6-4 本 SD295	6.4	25	1.91	404	Type-G	46.5	600
CF1P1Y2			6.4		1.91	975	Type-G	66.6	850
CF1P1Y4			6.2		1.81	1413	Type-G	73.4	800
CF1P2Y2			6.4	50	0.96	975	Type-G	42.9	600
CF1P2Y4			6.2		0.91	1413	Type-G	42.4	650
CF1P3Y4			6.2		0.57	1413	Type-G	38.6	500
NF1P1Y4			6.2	35	1.94	1413	Type-GH	71.8	850
NF1P2Y4			6.2	70	0.97	1413	Type-GH	41.3	550
NF1P3Y4			6.2	125	0.54	1413	Type-GH	33.7	500
CF2P1Y1			65.3	D6-4 本 SD295	6.4	25	1.91	404	Type-G
CF2P1Y2	6.4	1.91			975		Type-G	90.3	550
CF2P1Y4	6.2	1.81			1413		Type-G	95.8	650
CF2P2Y2	6.4	50			0.96	975	Type-G	66.9	— ^(1,3)
CF2P2Y4	6.2				0.91	1413	Type-G	68.3	400
CF2P3Y4	6.2				0.57	1413	Type-G	58.5	400
NF2P1Y4	6.2	35			1.94	1413	Type-GH	92.3	700
NF2P2Y4	6.2	70			0.97	1413	Type-GH	69.5	450
NF2P3Y4	6.2	125			0.54	1413	Type-GH	54.2	250

注1) この他に、横拘束筋を持たない無拘束供試体を圧縮強度毎に2体製作している

注3) 局所ひずみから計算される全長変位と供試体4側面に設置した変位計の値が一致しない供試体



実験因子は、コンクリート圧縮強度 σ'_c (34.1, 65.3N/mm²), 横拘束筋降伏強度 f_{sy} (404~1413 N/mm²), 横拘束筋体積比 ρ_s (0.54~1.94%), および横拘束筋拘束形状(Type-G, Type-GH)である。コンクリート圧縮強度毎に横拘束筋を配筋しない無拘束供試体を2体作製し、コンファインド効果を評価する際の基準としている。全ての供試体の軸方向鉄筋にはSD295を4本使用しているが、その荷重負担分は非常に小さいため、作用荷重をコンファインドコンクリートの平均応力に変換する際にはその負担分を無視している。

混和剤は、 $\sigma'_c=34.1$ N/mm²のコンクリートには、減水剤とAE剤、 $\sigma'_c=65.3$ N/mm²のコンクリートには高性能減水剤を用いた。また、 $\sigma'_c=65.3$ N/mm²のコンクリートには高強度混和材を使用している。粗骨材の最大寸法は全供試体で15mmとした。

2.2 実験条件および測定項目

荷重には、10MN大型荷重試験装置を用いた。この試験装置は、油圧負荷式の4本柱構造で、負荷速度として0.01~50mm/minの荷重が可能な非常に剛性の高い試験機である。荷重は、(i)供試体全長の平均ひずみが3%に達する、(ii)荷重が最大荷重の10%まで低下する、のいずれかの条件に

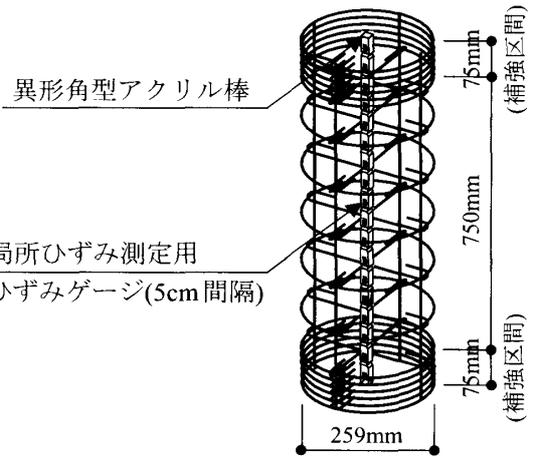


図-1 供試体配筋の一例 (NF1P3Y4)

該当した時点で終了した。測定項目は、荷重、供試体4側面で測定される供試体全長の圧縮変位、横拘束筋ひずみ、および異形角型アクリル棒によって測定される供試体軸方向の局所ひずみであり、あわせて損傷状況を観察している。

なお、表-1に示す供試体は、全て約20mmのかぶりコンクリートを有する。そこで、無拘束供試体の挙動と一致すると仮定して求めたかぶりコンクリート負担分の荷重を全荷重から引き、それをコア断面積で除すことによってコンファインドコンクリートの平均応力を求めた。

3. 実験結果

3.1 破壊領域

異形角型アクリル棒より得られる平均応力-局所ひずみ関係の一例として、CF2P3Y4の結果を図-2に示す。図-2には、最終的な供試体の破壊状況も示している。RC円柱を用いた実験でも、角柱の場合と同様に、圧縮強度発現後にひずみが大きく増加するひずみ進展領域(例：ゲージ番号5)、ひずみが減少するひずみ後退領域(例：ゲージ番号1)、そして、圧縮強度発現後、わずかにひずみが大きくなったあとに、応力の減少に対しほとんどひずみが増減することのないひずみ停滞領域(例：ゲージ番号10)が存在する。

ひずみ進展領域などの各領域長さは、コンクリート圧縮強度や横拘束筋量などにより変化する。コンファインドコンクリートの圧縮強度 σ_{cc} の発現後に、応力が $0.8\sigma_{cc}$ まで低下したときの局所ひずみ分布の一例を図-3に示す。図-3には、参考文献1)で行ったRC角柱の実験結果(TF2P2Y4, $\sigma'_c=80.0\text{ N/mm}^2$, $f_{sy}=1420\text{ N/mm}^2$, $\rho_s=0.96\%$, 横拘束筋拘束形状 Type-B)も示している。ひずみ進展領域が大きい供試体は、圧縮強度発現後の軟化勾配が緩やかであり、その長さは、断面形状の違いを含む横拘束筋拘束形状、横拘束筋体積比、および材料強度により変化する。

ここで、後述するエネルギー基準に基づく平均化応力-ひずみ関係を提案するため、ひずみ停滞領域の存在を考慮した圧縮破壊エネルギーの消費領域(以後、破壊領域)長さを新たに定義する。参考文献1)にあるRC角柱48体、および表-1の18体に対して、(i)破壊領域内で吸収される圧縮破壊エネルギーと、応力-全長変位関係から求められる値の差を可能な限り小さくする、および(ii)図-2のような軸方向ひずみ分布を基に、大きな局所ひずみが生じる領域長さを特定できる指標とする、ことに配慮し、破壊領域長さ L_p は、無拘束供試体の圧縮強度発現時ひずみ ϵ_{c0} の3倍以上に局所ひずみが増加した領域と定義した。なお、この定義の破壊領域内で吸収される圧縮破壊エネルギーは、平均的に応力-全

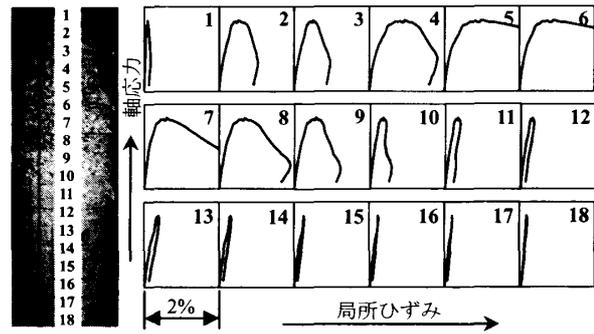


図-2 局所ひずみの分布の一例(CF2P3Y4)

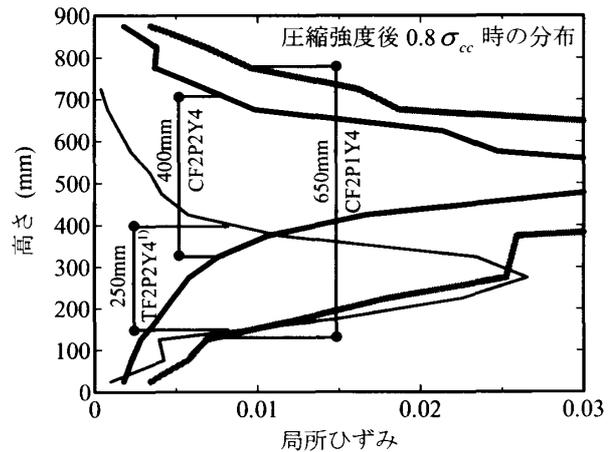


図-3 軸方向ひずみ分布の違い

長変位関係から求められる値の8割程度を確保できており、この値を用いた平均化応力-ひずみ関係は、破壊領域から供試体全長までの範囲でひずみの平均化長さを変化させても、実験結果を概ね再現可能である。なお、参考文献1)では、RC角柱のみの実験結果を基に、コンファインドコンクリートの圧縮強度発現時ひずみ ϵ_{cc} の2倍以上に局所ひずみが増加した領域を破壊領域と定義しているが、RC角柱の場合、この長さは、前記の定義から求められる破壊領域長さとはほとんど同じになることを確認している。図-3には、この定義から求められる破壊領域長さを示している。他の供試体の破壊領域長さは表-1に示してある。

破壊領域長さ L_p に関する前記のパラメータは、参考文献1)で定義した有効横拘束圧 p_e (式(1))とコンクリート圧縮強度で包含できる。

$$p_e = k_e \rho_w f_{s,c} \quad (1)$$

ここに、 ρ_w は横拘束筋面積比、 $f_{s,c}$ は圧縮強度発現時の横拘束筋作用応力、 k_e はManderら³⁾

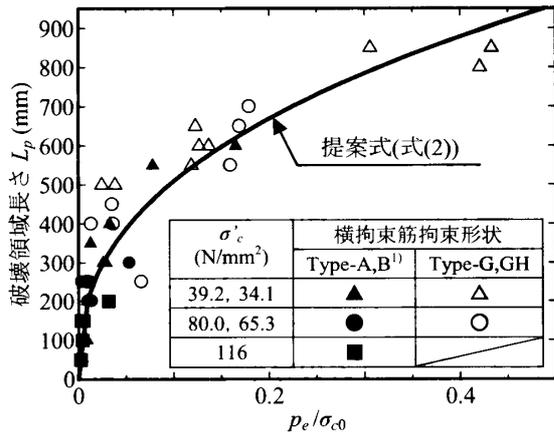


図-4 式(2)と破壊領域長さの関係

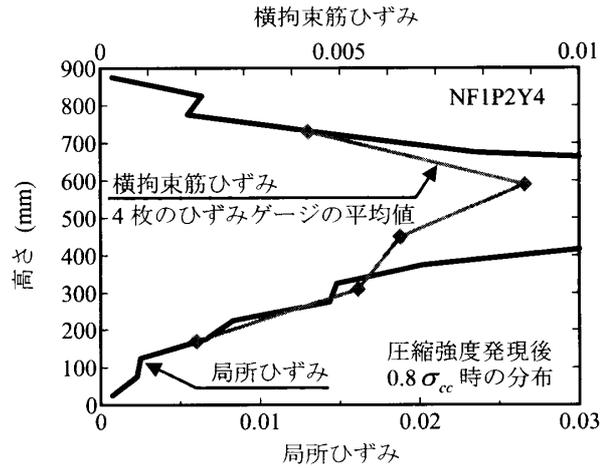
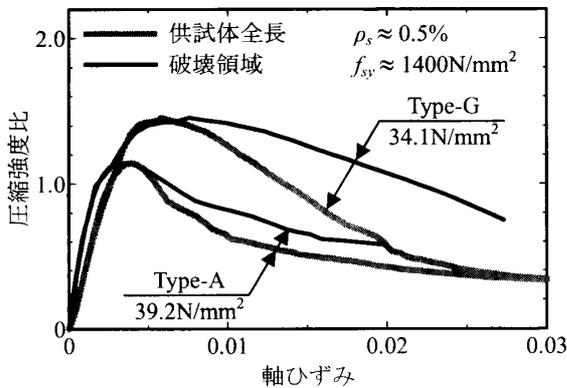
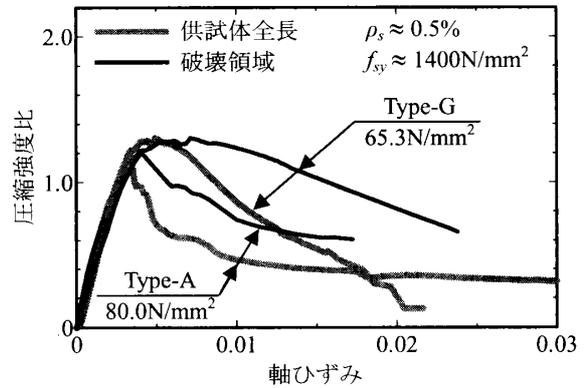


図-5 局所ひずみと横拘束筋ひずみの関係



(a) 普通強度(39.2, 34.1N/mm²)



(b) 普通強度(80.0, 65.3N/mm²)

図-6 断面形状が平均化応力-ひずみ関係に及ぼす影響

の有効横拘束係数である。

$f_{s,c}$ は、参考文献 1) と Cusson and Paultre⁴⁾ の手法から円柱および角柱供試体を対象にそれぞれ算定し、コンクリート圧縮強度は、無拘束供試体の圧縮強度 σ_{c0} で表す。 p_e と σ_{c0} を用いて求めた破壊領域長さ L_p の回帰式を式(2)に示す。

$$L_p = 1100 \left(\frac{p_e}{\sigma_{c0}} \right)^{0.39} \quad (2)$$

回帰式と各供試体の破壊領域長さ L_p の関係を図-4 に示した。図-4 に示されるように、 p_e/σ_{c0} の増加により破壊領域長さは大きくなり、横拘束圧が大きく、またコンクリート圧縮強度が小さい供試体ほど圧縮強度発現後の応力-全長変位関係の軟化勾配が緩やかとなることに対応している。断面形状の違いを含む横拘束筋拘束形状の変化がある場合にも、有効横拘束圧 p_e を用いることで、破壊領域長さは式(2)で統一的に表現された。

3.2 軸方向ひずみと横拘束筋ひずみの関係

圧縮強度発現後、応力が圧縮強度の 80%まで

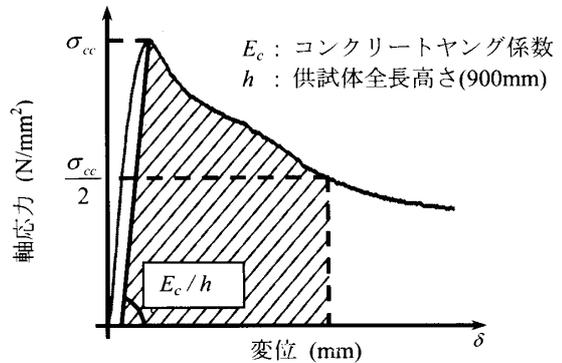


図-7 圧縮破壊エネルギーの定義

低下した時点での局所ひずみと横拘束筋ひずみの関係の一例を図-5 に示す。局所ひずみと横拘束筋ひずみの分布形状は概ね一致し、破壊領域のコアコンクリートの横膨張に合わせ、横拘束筋から受動的な横拘束圧がコアコンクリートに与えられている。前記の破壊領域長さ L_p 内にある局所ひずみの平均値と横拘束筋ひずみの平均値の比 r ($r = (\text{横拘束筋ひずみ}) / (\text{局所ひずみ})$) を全供試体に対して求めたところ、圧縮強度発現時の r の平均値は 0.44 であり、その後の応力の低下に

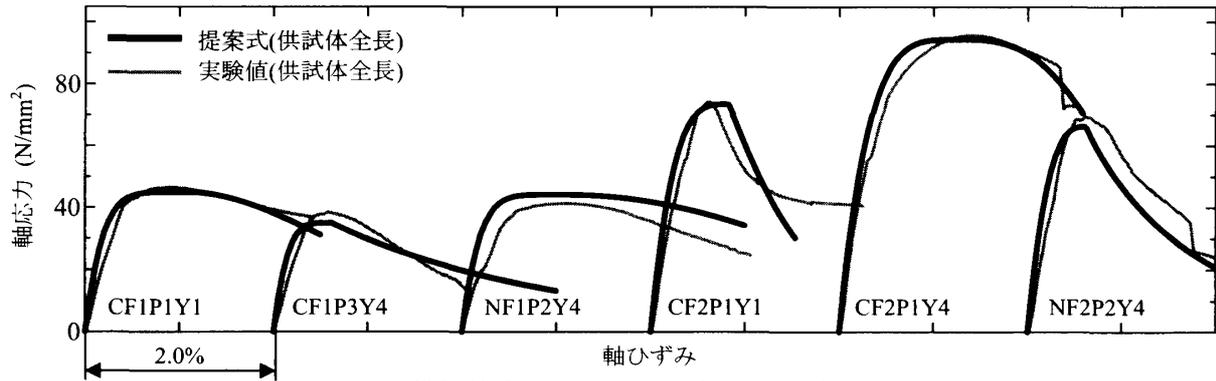


図-8 供試体全長での平均化応力-ひずみ関係の比較

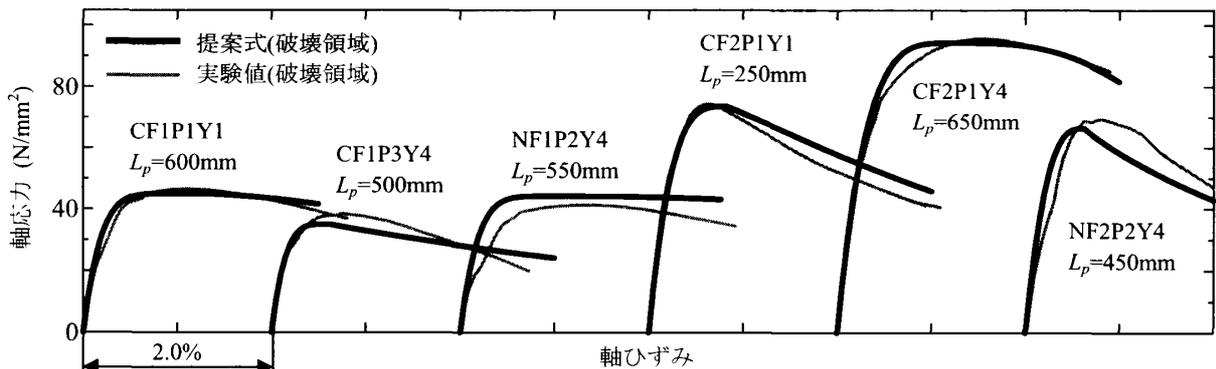


図-9 破壊領域内の平均化応力-ひずみ関係の比較

対する r の減少程度は、RC 角柱の実験結果¹⁾とほぼ同様であることを確認している。

3.3 破壊領域内の平均化応力-ひずみ関係

横拘束筋積比が約 0.5%，横拘束筋降伏強度が約 1400N/mm² であり，横拘束筋拘束形状が Type-A¹⁾と Type-G の供試体から得られる平均化応力-ひずみ関係を図-6 に示す。図-6 には，破壊領域内の局所ひずみを積分して求めた平均化応力-ひずみ関係と，変位計により測定される供試体全長変位から求めた平均化応力-ひずみ関係を示している。縦軸は，参考文献 1)と表-1 の供試体の圧縮強度の差を考慮するため，コンファインドコンクリートの平均応力を無拘束供試体の圧縮強度で除し，無次元化している。

図-6 に示されるように，供試体全長変位から求められる平均化応力-ひずみ関係は，横拘束筋拘束形状により現れるコンファインド効果が大きく異なり，円形断面とすることで，コアコンクリートには効果的に横拘束圧が与えられていることが確認される。ひずみ停滞領域の存在により，定義した破壊領域内の平均化応力-ひずみ関係は，図-2 のゲージ番号 5 や 6 のような

完全弾塑性型とはならないが，圧縮強度発現後の軟化勾配の供試体毎の差は小さい。当然，破壊領域の小さい供試体では，破壊領域内と供試体全長に対して得られる平均化応力-ひずみ関係の圧縮強度発現後の差は大きくなる。

4. 圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係

4.1 圧縮破壊エネルギー

参考文献 1)では，コンファインドコンクリートの圧縮破壊エネルギー G_{fc} を図-7 に示す応力-変位曲線下の斜線部の面積で定義した。本研究では，この定義に従い各供試体の圧縮破壊エネルギーを算出し， G_{fc} の算定式を表-1 に示す 18 体の RC 円柱の実験結果をもとに作成した。結果を式(3)に示す。 G_{fc} は， σ_{c0} や p_e のほかに，無拘束供試体の実験結果の回帰から得られた圧縮破壊エネルギー G_{fc0} や鉄筋強度の影響を考慮するパラメータ k_a の関数となった。

$$\frac{G_{f,c}}{\sigma_{c0}} = \frac{G_{fc0}}{\sigma_{c0}} + 4753 \frac{k_a^2 p_e}{\sigma_{c0}^2} \quad (3)$$

$$G_{f,c0} = 80 - 50k_b \quad (4)$$

$$k_a = 1 + k_e \frac{f_{sy} - f_{s,c}}{f_{sy}} \quad (5)$$

$$k_b = \frac{40}{\sigma_{c0}} \leq 1.0 \quad (6)$$

4.2 平均化応力-ひずみ関係の提案

コンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係は、参考文献 1)と同様に、圧縮強度に達した点($\varepsilon_{cc}, \sigma_{cc}$)と圧縮強度発現後に応力が50%低下した点($\varepsilon_{50}, 0.5\sigma_{cc}$)を通る関数とした。

このうち、応力上昇域は Fafitis and Shah⁵⁾のモデルを用いた。一方、圧縮強度発現後の軟化曲線は、Cusson and Paultre⁴⁾のモデルを用いた。

σ_{cc} と ε_{cc} は式(1)の有効横拘束圧 p_e を用いて回帰した。結果を式(7)および(8)に示す。また、 ε_{50} は、式(3)の圧縮破壊エネルギー $G_{f,c}$ を用いて式(9)により算定する¹⁾。

$$\frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{c0}} = 1.0 + 3.0 \left(\frac{p_e}{\sigma_{c0}} \right)^{0.82} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} + 0.035 \left(\frac{p_e}{\sigma_{c0}} \right)^{0.65} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{50} = \varepsilon_{cc} + \frac{2}{3} \left(\frac{2G_{f,c}}{\sigma_{cc}L_m} - \frac{\sigma_{cc}}{E_c} \right) \quad (9)$$

ここに、 L_m は平均化応力-ひずみ関係を求めたい着目区間の長さ(ひずみの平均化長さ)である。

4.3 提案モデルの検証

提案式と実験結果の比較の一例を図-8 および図-9 に示す。図-8 は、供試体全長で生じる平均ひずみ、図-9 は、破壊領域で生じる平均ひずみを基にしている。圧縮破壊エネルギーを介することにより、式(9)の L_m を L_p に変更することのみで、ひずみの平均化長さ(圧縮変位の計測長)に関わらず、精度良く実験結果を再現できていることが確認される。

5. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- (1) 破壊領域長さに影響するパラメータを実験時の観察を基に同定し、その領域長さを定義するとともに、断面形状に依存しない統一的破

壊領域長さの回帰式を作成した。

- (2) 圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係を提案した。提案モデルは、供試体諸元、およびひずみの平均化長さに関わらず実験結果を精度良く再現可能であることを確認した。

今後は、超高強度 RC 円柱や、断面幅に対する高さの比が様々に異なる RC 柱の一軸圧縮実験を行い、その圧縮破壊特性を解明する。また、構成材料の強度や横拘束筋拘束形状に関わらず統一的に適用可能なコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係の提案や、それらの曲げ部材の設計への適用性などを検証予定である。

謝辞

本研究で用いた横拘束筋は、高周波熱錬(株)より提供頂いたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 秋山充良ほか：普通強度から高強度までの構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験と圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No.788/V-67, 2005.5
- 2) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, Oct.1999
- 3) Mander, J. B., Priestley, M. J., and Park, R. : Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, Aug.1988
- 4) Cusson, D. and Paultre, P. : Stress-Strain Model for Confined High-Strength Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.121, No.3, pp.468-477, Mar.1995
- 5) Fafitis, A. and Shah, S. P. : Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, High-Strength Concrete, SP-87, ACI, Detroit, Mich., pp.213-232, May.1985