

論文 一軸圧縮応力を受ける拘束コンクリートの破壊性状の推定

平野 貴規^{*1}・中村 光^{*2}・斉藤 成彦^{*3}・檜貝 勇^{*4}

要旨：横拘束リングで拘束された円柱供試体の一軸圧縮試験を行い、拘束コンクリートのポストピーク挙動ならびに軸方向局所ひずみの進展挙動を検討した。実験結果に基づき、拘束コンクリートの圧縮破壊エネルギーとひずみの局所化領域長さを定量的に評価した。さらに、圧縮破壊エネルギーならびに拘束効果を考慮した円柱コンクリートの応力-ひずみ関係を提案した。

キーワード：拘束コンクリート、圧縮破壊エネルギー、局所化領域、応力-ひずみ関係

1. はじめに

コンクリート構造物が破壊に至る場合、破壊は構造物全体には及ばず、ある特定の領域に集中するひずみの局所化現象が生じる。ひずみの局所化現象は、構造物の挙動に大きな影響を及ぼすので、その領域長さやひずみの進展挙動を明らかにする必要がある。また、有限要素法のような離散化解析手法を用いる場合は、構造物に生じる局所化挙動と離散化した連続場に生じる局所化挙動との対応関係を明確にする必要がある。

これまでに著者らは、一軸圧縮応力下における拘束のないコンクリートのひずみの局所化領域ならびに局所化領域内の挙動を実験的に検討し、圧縮破壊エネルギーや局所化領域長さを明らかにしている¹⁾。しかし、実構造物への幅広い適用を行うためには、拘束効果を考慮したコンクリートの局所化領域や圧縮破壊エネルギーの解明が必要である。

そこで本研究では、鋼管リングで拘束したコンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験を行い、ポストピーク挙動に至るまでのひずみの局所化進展挙動を明らかにするとともに、圧縮破壊エネルギーとひずみの局所化領域長さを定量

的に評価した。さらに圧縮破壊エネルギーを考慮した拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を提案した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に用いた供試体は、直径 $D=100\text{mm}$ 、高さ $H=390\text{mm}$ のコンクリート円柱に横拘束筋として、鋼管リングを配置したものである。鋼管リングは、かぶりの影響をなくすために、供試体直径とほぼ同様の外径 95mm のものを用いた。供試体高さは、拘束していないコンクリート円柱のひずみの局所化領域が $250\sim 300\text{mm}$ となる結果¹⁾に基づき、供試体全体にひずみの局所化が生じないように決定した。鋼管リングを用いたのは、らせん鉄筋を使用した場合に終局時に供試体がらせんの勾配に沿った滑り変形をする可能性があり、帯鉄筋を使用した場合には定着部の影響が生じるため、これらの影響をなくし終局時まで安定的な挙動を計測可能にするためである。使用した鋼管リングの応力-ひずみ曲線を図-1に示す。鋼管リングは、降伏強度 304N/mm^2 、ヤング係数 $2.0 \times 10^5\text{N/mm}^2$ であり、応力-ひずみ関係から分かるように降伏棚、ひ

*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

*2 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 博(工) (正会員)

*3 山梨大学助手 工学部土木環境工学科 博(工) (正会員)

*4 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

表-1 供試体概要

No.	供試体 高さ H (mm)	供試体 直径 D (mm)	リング 間隔 S (mm)	リング形状		横拘束筋比 (帯筋比) ρ_s (%)	断面 鉄筋比 α_s (%)	一軸圧縮 強度 f_c' (N/mm ²)	最大圧縮 応力 σ_{max} (N/mm ²)	最大圧縮 時のひずみ ε_{max} (μ)	局所化 領域長さ Lp (mm)	圧縮破壊 エネルギー G_{fcc50} (N/mm)
				幅 h (mm)	肉厚 t (mm)							
S3-10-6	390	100	30	10	6	6.57	23.7	19.7	45.2	16103	350	433.4
S3-8-6			30	8	6	5.26	23.7	22.3	39.49	13026	220	394.9
S3-6-6			30	6	6	3.94	23.7	20.9	35	10615	200	300.3
S3-3-3			30	3	3	1.02	12.2	16.7	23.7	6923	---	---
S5-6-6			50	6	6	2.63	23.7	20.6	26	9795	170	125.9
S7-6-6			70	6	6	1.97	23.7	18.7	20.63	6769	210	50.5
S7-6-3			70	6	3	1.02	12.2	18.9	20.61	5205	220	69.9
S7-3-3			70	3	3	0.51	12.2	16.7	17.53	4744	---	---
S9-6-6			90	6	6	1.31	23.7	18.7	17.03	4641	230	25.6
S0-1			---	---	---	---	---	21.1	17.35	2615	270	12.3
S0-2			---	---	---	---	---	19.2	17.19	2179	260	13.4

注) $\rho_s = 4htD_{yh}/(SD^2)$ ここで、 D_{yh} はリングの中心径。 $\alpha_s = A_{yh}/A_c$

ずみ硬化域を有し、通常の鉄筋と同様の性質を示すものである。

表-1 に供試体の概要を示す。実験は、鋼管リングの間隔、幅、肉厚によって拘束力を変化させて行った。コンクリートは、早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材としては最大寸法 20mm の砕石を用いた。目標圧縮強度は 20N/mm² とした。打設は、縦打ちとしブリージングによる柱高さ方向の影響をなるべく少なくするために、スランプ値を 30mm とした。

2.2 測定方法および载荷方法

図-2 に供試体の概略図を示す。本実験では、供試体軸方向の局所ひずみと供試体上下間の軸方向変位の 2 種類を測定した。局所ひずみの測定は、円柱供試体断面中央に異形に加工した一辺 10mm のアクリル製角棒を配置し、アクリル

製角棒に 40mm 間隔で貼り付けたひずみゲージにより供試体内部で行った²⁾。アクリル製角棒を使用したのは、弾性係数がコンクリートに比べて十分に小さく、コンクリートの変形を拘束せず、異形に加工することによりコンクリートとの付着が十分であると考えたためである。軸方向変位の測定は、上鋼載荷板下側の 4 隅に変位計を取り付けて行った。なお、いずれの供試体においても終局域に至るまで各変位計による値は、ほぼ同じ値を示すことを確認している。したがって、軸方向変位は 4 本の変位計の平均値として求め、平均ひずみは軸方向変位を供試体高さで除して算出した。

载荷は容量 1000kN のアムスラー型载荷試験機を使用し、10~20kN の Pre-Loading を行い载荷面を均した後に行った。また最大応力以降も

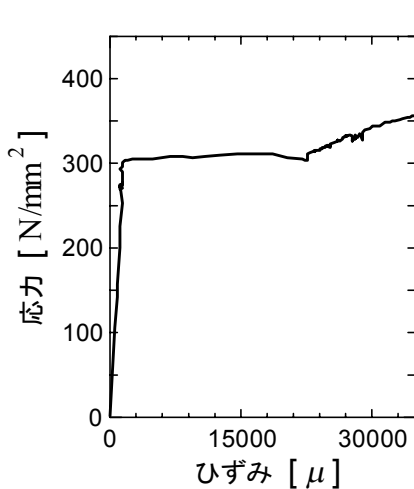


図-1 応力-ひずみ関係

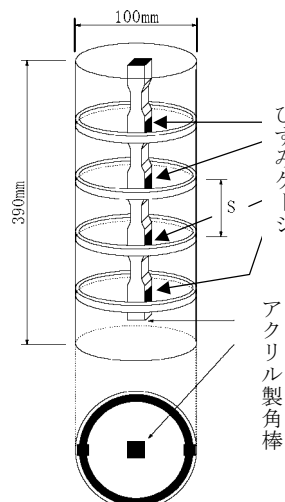


図-2 供試体概略図

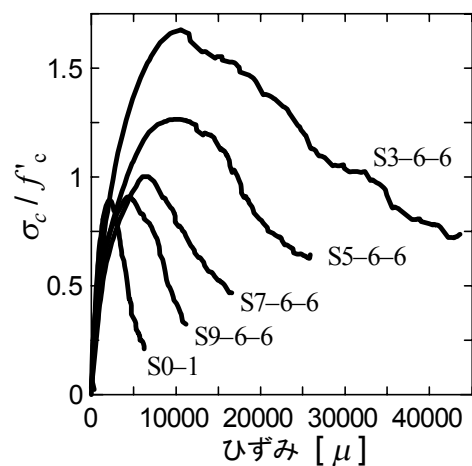


図-3 応力-ひずみ関係

安定的な計測を行うため、最大荷重到達と同時に除荷を行う一方向繰り返し載荷を行った。尚、本実験は端部を拘束して行ったが、予備実験としてテフロンシートを挿入し端部拘束を除去した場合と同様な結果を示したことを付記する。

3. 拘束コンクリート円柱の応力-ひずみ関係

図-3 に同一の鋼管リング形状(幅 6mm, 肉厚 6mm)でリング間隔を変化させた場合の、応力-ひずみ関係を示す。図の縦軸は、応力を一軸圧縮強度で正規化した圧縮応力比(σ_c/f'_c)で示している。図より、横拘束筋による受動拘束力が大きくなるほど最大圧縮応力と最大圧縮応力時のひずみが増加し、軟化勾配が緩やかになっていることが分かる。

拘束効果は、横拘束筋比(ρ_s)と横拘束筋の降伏強度(f_{yh})に比例し、拘束の無いコンクリートの圧縮強度(f_{co})に反比例すると仮定される³⁾。図-4 は、この仮定に基づき、縦軸に圧縮強度比(σ_{max}/f_{co})、横軸に拘束効果($\rho_s f_{yh}/f_{co}$)として整理したものである。なお、拘束の無いコンクリートの最大圧縮応力は、実験結果より $f_{co}=0.85f'_c$ とした。各供試体の最大圧縮応力(σ_{max})ならびに最大圧縮応力時のひずみ(ϵ_{max})を表-1 に示す。図中の白丸印は今回の実験結果で、菱形で星隈らの実験結果³⁾を併せて示した。星隈らの実験の諸元は帯鉄筋比(0.58~4.66%), 帯鉄筋 SR235 (φ6), 拘束の無いコンクリートの圧縮強度 18.5N/mm², 供試体サイズ D=200mm, H=600mm の円柱であ

る。なお帯鉄筋は溶接して用いられている。リング断面が幅 3mm, 肉厚 3mm(S3-3-3,S7-3-3)の結果は、星隈らの結果とよく合っている。しかし、その他の結果は、拘束効果と線形関係が見出せるが、その勾配は異なったものとなった。また、最大圧縮応力時のひずみについても同様の結果となった。

本実験と星隈らの実験との相違は、横拘束筋に矩形断面を有する鋼管リングを用いているため断面形状が異なることと、供試体直径が 100mm と小さいことである。断面形状の影響については、幅 3mm, 肉厚 3mm の供試体の結果がいずれも星隈らの結果と同様な傾向を示したことから、それほど顕著でないと推測され、傾向の相違は主に供試体の直径によるものと考えられる。すなわち、今回の供試体の寸法が小さいことから、横拘束筋比が等しい場合でも、相対的に断面積が大きな横拘束筋を広い間隔で配置していることになる。このような相違は、実構造物への適応を考えた場合大きな問題となるため、寸法の相違を考慮した何らかの補正を行う必要がある。そこで、供試体寸法と鉄筋断面の関係を考慮できる式(1)に示す断面鉄筋比(α_s)を導入し、拘束効果を再整理した。

$$\alpha_s = A_{yh}/A_c \quad (1)$$

ここに、 A_{yh} : コンクリート断面における横拘束筋の面積 [πD_{yh}], A_c : 拘束を受けるコアコンクリートの面積 [$\pi(D_{yh}-t)^2/4$]。

図-5 に横軸を $(\rho_s f_{yh}/f_{co})/\alpha_s$ とした場合の結果を示す。図-5 によれば、寸法の異なる供試体に

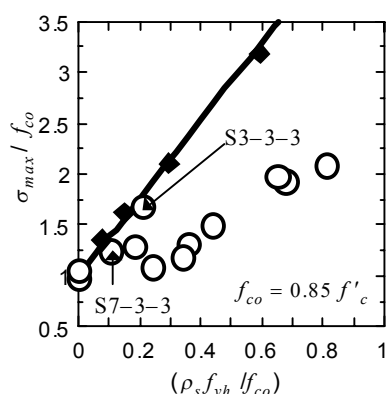


図-4 最大圧縮応力と拘束効果の関係

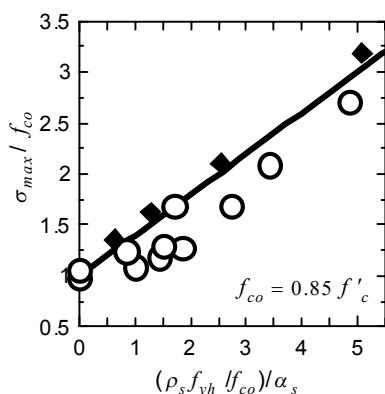


図-5 最大圧縮応力と拘束効果の関係

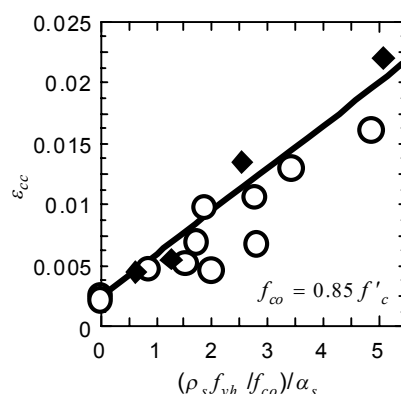


図-6 最大圧縮応力時のひずみと拘束効果の関係

対しても、同一に評価できることが分かる。最大圧縮応力時のひずみについても α_s を考慮して評価した結果を図-6に示すが、最大応力と同様に、異なる寸法の供試体に対して、同一の傾きを持つ線形関係で表される。図-5、図-6の結果に基づき、最大応力ならびに最大応力時のひずみに対して、次の関係が得られた。

$$\sigma_{max}/f_{co} = 1.0 + 0.4 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co} \alpha_s} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_{co} + 0.0035 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co} \alpha_s} \quad (3)$$

ただし、 $f_{co}=0.85 f'_c$

4. 拘束コンクリートの局所化領域長さ

図-7、図-8、図-9に供試体高さ方向の軸方向ひずみ分布の進展挙動を示す。図-7は無筋コンクリート(S0-2)の結果を、図-8、図-9はS7-6-6、S3-6-6の結果をそれぞれ示す。図中の破線は最大応力、aは最大応力以前の $0.8\sigma_{max}$ 、b-dは最大応力後の $0.9\sigma_{max}$ 、 $0.8\sigma_{max}$ 、 $0.7\sigma_{max}$ 時のひずみ分布を示す。横軸と平行な破線は、横拘束筋の配筋位置を示す。

拘束量によらずいずれの供試体も、最大応力前 $0.8\sigma_{max}$ 時までは、ほぼ様のひずみ分布をし、その後徐々に局所化が進展していき、最大応力以降に局所化が顕著になることが分かる。また、無筋コンクリート(S0-2)では、最大応力以降、ひずみが除荷する領域が現れる。これに対し、拘束筋を多く配置するほど、最大応力後 $0.8\sigma_{max}$ 程度までは、供試体全体でひずみが進行しながらある領域に、局所化が進行する挙動を示すことが分かる。それ以降は、一定の領域内でひずみが進行して局所化が顕在化する。局所化領域外では、最大応力以降 $0.8\sigma_{max}$ 時からひずみがほとんど増加せず、ひずみの戻り現象も現れる。拘束コンクリートには、横拘束筋量によってひずみレベルに違いはあるものの、これと同様の傾向が見られた。

本研究では、最大応力以降 $0.8\sigma_{max}$ 時以降にひ

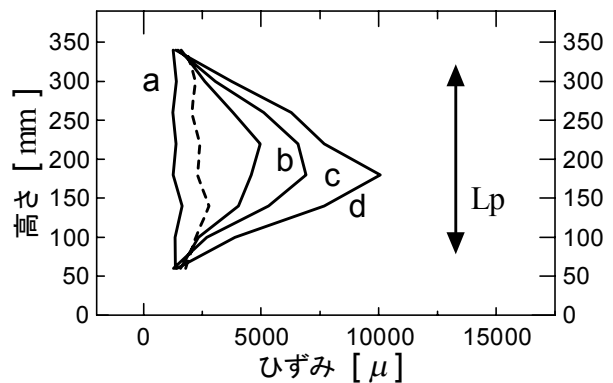


図-7 軸方向ひずみ分布 (S0-2)

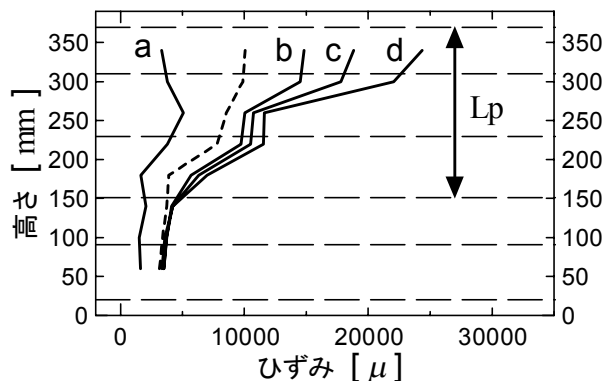


図-8 軸方向ひずみ分布 (S7-6-6)

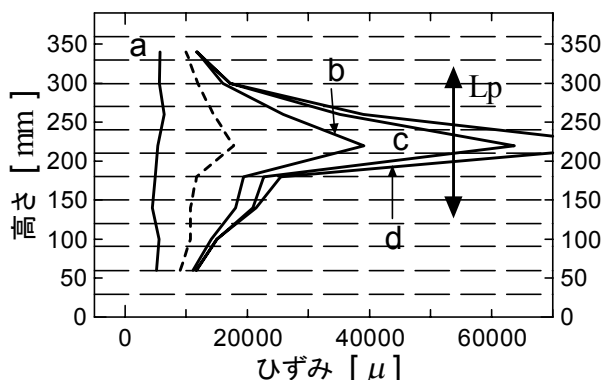


図-9 軸方向ひずみ分布 (S3-6-6)

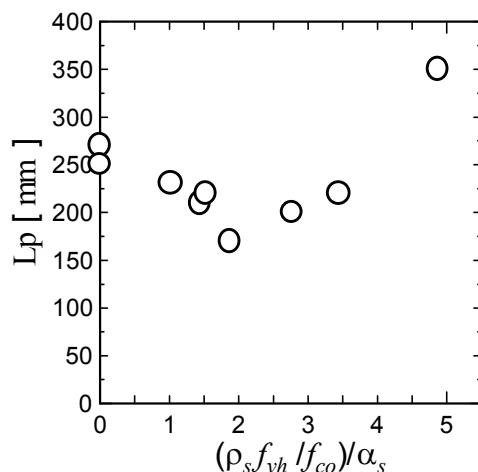


図-10 拘束効果と
局所化領域長さの関係

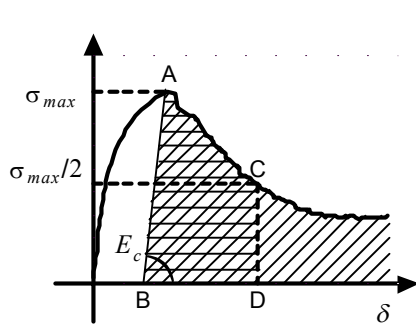


図-11 圧縮破壊
エネルギーの定義

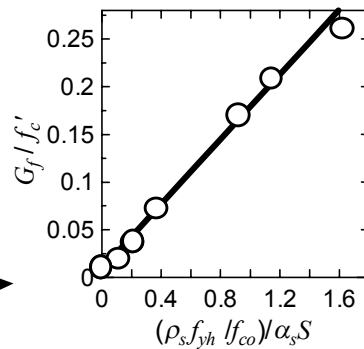


図-12 破壊エネルギーと
拘束効果の関係

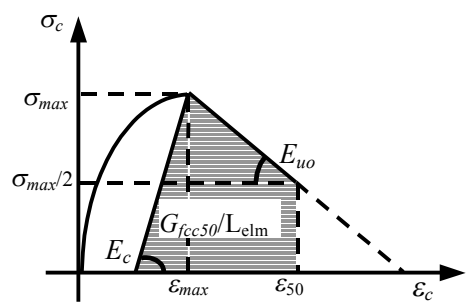


図-13 応力-ひずみ関係

ひずみの増加がみられる領域を局所化領域長さ (L_p)と定義し、局所化領域長さおよび拘束効果の影響を検討した。表-1 に、この定義により得られた局所化領域長さ (L_p)を局所化領域長さ (L_p)を、図-10 に局所化領域長さ (L_p)と横拘束筋による拘束効果 ($\rho_s f_{yh} / f_{co} \alpha_s$)との関係を示す。図より、局所化領域長さは、拘束効果 ($\rho_s f_{yh} / f_{co} \alpha_s$) が 4 以下では拘束力の増加に伴い若干狭くなる傾向を示すことが分かる。

5. 拘束コンクリートの圧縮破壊エネルギー

著者らは、無筋コンクリートの圧縮破壊エネルギーを、供試体全体の吸収エネルギーではなく、ひずみの局所化が進展する領域で吸収されるエネルギーとして、図-11 の斜線部に示す一軸圧縮試験より得られる応力-変位関係の面積で定義した²⁾。この定義は、最大応力以降の非局所化領域では、ひずみの戻り現象が生じ、エネルギーが解放されると仮定したものである。拘束コンクリートの場合、4 章で説明したように必ずしも最大応力時にひずみの戻り現象が生じない場合があるが、無筋コンクリートとの連続性ならびに定義の簡便性から、同様に拘束コンクリートの圧縮破壊エネルギーを定義することとした。ただし、拘束コンクリートの場合、応力がある程度まで低下すると応力収束域が生じ下降勾配の非線形性が顕著になることから、図-11 の ACDB で囲まれた、応力が 50%まで低下した時点までに吸収されたエネルギーを拘束コンクリートの圧縮破壊エネルギー (G_{fcc50})と定

義した。

表-1 に、この定義に基づき算出された拘束コンクリートの圧縮破壊エネルギーの値を示し、図-12 に拘束効果との関係を示す。これより、拘束コンクリートの圧縮破壊エネルギーは、 $\rho_s f_{yh} / f_{co} \alpha_s S$ と線形関係があることが分かる。以上の結果に基づき、拘束コンクリートの圧縮破壊エネルギーに対し次の関係が得られた。

$$\frac{G_{fcc50}}{f_{co}} = \frac{G_{fc50}}{f_{co}} + 17 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co} \alpha_s S} \quad (4)$$

ここで、 G_{fcc50} :拘束コンクリートの応力が 50%まで低下した時の圧縮破壊エネルギー、 G_{fc50} :無筋コンクリートの応力が 50%まで低下した時の圧縮破壊エネルギー。

6. エネルギー基準に基づく拘束コンクリートの応力-ひずみ関係

3 章で定式化した拘束コンクリートの最大応力とその時のひずみ、ならびに 5 章で定式化した圧縮破壊エネルギーを用い、エネルギー基準に基づく拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を図-13 ならびに(5)式のように提案する。提案する応力-ひずみ関係は、応力上昇域の曲線については既注の提案式⁴⁾を検討した結果から星限らの関数³⁾を用いることとした。応力下降域は、圧縮破壊エネルギーとひずみの平均化長さ (L_{elm})で決定される勾配を有する一次直線と仮定した。また、最大応力以降の除荷曲線は、初期勾配 (E_c)を有する直線を仮定した。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_c = E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{max}} \right)^{n-1} \right\} \quad (0 < \varepsilon < \varepsilon_{max}) \\ \text{ただし, } n = \frac{E_c \varepsilon_{max}}{E_c \varepsilon_{max} - \sigma_{max}} \\ \sigma_c = E_{uo} (\varepsilon - \varepsilon_{max}) \quad (\varepsilon_{max} < \varepsilon < \varepsilon_{50}) \end{array} \right. \quad (5)$$

ここで、軟化勾配(E_{uo})および応力が50%まで低下した時点のひずみは、次式で与えられる。

$$E_{uo} = \frac{-1}{2} \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{50} - \varepsilon_{max}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{50} = \frac{4}{3} \frac{G_{fcc50}}{\sigma_{max}} \frac{L_{elm}}{\sigma_{max}} + \varepsilon_{cc} - \frac{2\sigma_{max}}{3E_c} \quad (7)$$

図-14 に応力-ひずみ関係の実験値と提案式の比較を示す。実線は実験値を示し、破線は提案式を示す。供試体寸法と同じ平均化長さ($L_{elm}=390\text{mm}$)を用いた結果は、当然であるが実験結果とよく一致する。本モデルの特徴は、ひずみの平均化長さにより軟化勾配が変化することであり、平均化長さを短くすれば軟化勾配は緩やかになり、長くなれば急になる。有限要素法に軟化勾配を有する応力-ひずみ関係を用いる場合、ひずみの局所化による要素寸法依存性が生じる。それに対し、エネルギー基準に基づく本モデルでは、用いるひずみの平均化長さを局所化が生じる要素寸法と一致させることで、要素依存性を、軽減できることになる。

7. 結論

拘束コンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験を行い、ひずみの局所化進展状況、圧縮破壊エネルギーならびに応力-ひずみ関係を検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 拘束コンクリートの最大応力ならびに最大応力時のひずみは、断面鉄筋比(α_s)を考慮することで寸法の相違を妥当に考慮できる。
- (2) 圧縮破壊領域長さは、拘束効果 ($\rho_s f_{yh}/f_{co}\alpha_s$) が4以下では拘束力の増加に伴い若干短くなる傾向を示す。

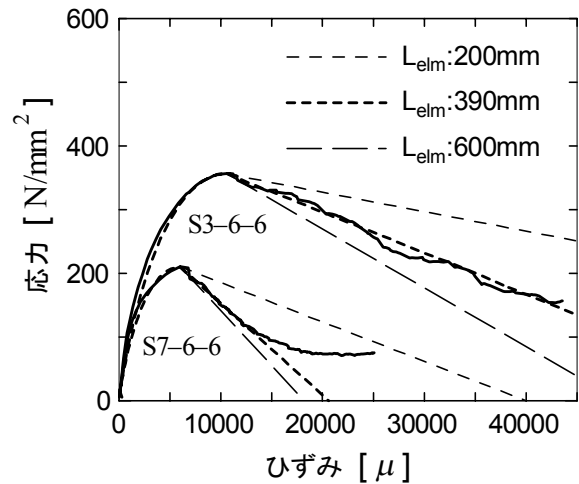


図-14 応力-ひずみ関係

- (3) 拘束コンクリートの圧縮破壊エネルギーを求めるとともに、エネルギー基準に基づく拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を提案した。

謝辞

本研究は、平成13年度日本学術振興会科学研究費補助金 奨励研究(A) (課題番号:4033020)の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001
- 2) 平井圭, 中村光, 檜貝勇 : コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.17, No.2, pp.339-344, 1995
- 3) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏 : 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の調査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, V-28, No.520, pp.1-11, 1995.8
- 4) 例えば Kent, D.C., and Park, R. : Flexural members with confined concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969-1990 Jul, 1971.