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=100mm、高 さ H=390mm 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250~300mm となる 結果」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ーひずみ曲 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 2.0×10⁵N/mm² 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	(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)

-145-

	供試体	供試体	リング	リング	形状	横拘束筋比	断面	一軸圧縮	最大圧縮	最大圧縮応力	局所化	圧縮破壊
No	高さ	直径	間隔	幅	肉厚	(帯筋比)	鉄筋比	強度	応力	時のひずみ	領域長さ	エネルギー
INO.	Н	D	S	h	t	$ ho_{s}$	α,	f_{c}'	σ_{max}	E max	Lp	G_{fcc50}
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(%)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(μ)	(mm)	(N/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

表-1 供試体概要

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

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 測定方法および載荷方法

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²¹。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 ベ十分に小さく,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。

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



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カーひずみ関係

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, 応カー 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(*ps*)と横拘束筋の降伏 強度(*fyh*)に比例し、拘束の無いコンクリートの 圧縮強度(*fco*)に反比例すると仮定される³⁰。**図**-4 は、この仮定に基づき、縦軸に圧縮強度比 (*σmax*/*fco*)、横軸に拘束効果(*psfyh*/*fco*)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 *fco*=0.85*f′c* とした。各供試体の最大圧縮応力(*σmax*)ならびに 最大圧縮応力時のひずみ(*εmax*)を表-1に示す。図 中の白丸印は今回の実験結果で、菱形で星限ら の実験結果³¹を併せて示した。星限らの実験の 諸元は帯鉄筋比(0.58~4.66%),帯鉄筋 SR235 (*ф*6), 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,星限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,) を導入し、拘束効果を再整理した。

 $\alpha_s = A_{yh}/A_c$ (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 [$\pi t D_{yh}$], 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(ρ_s f_{yh} /f_{co})/α_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



-147-

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a,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も、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。

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

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

ただし, f_{co}=0.85 f'_{co}

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 σ_{max}, b-d は最 大応力後の 0.9 σ_{max}, 0.8 σ_{max}, 0.7 σ_{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 0.8σ_{max}時までは、ほぼ一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 0.8σmax 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 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 max 時以降にひ





ずみの増加がみられる領域を局所化領域長さ (Lp)と定義し,局所化領域長さに及ぼす拘束効 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(Lp)を局所化領域長さ (Lp)を,図-10に局所化領域長さ(Lp)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-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で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 減した時点までに吸収されたネルギーを拘束コ ンクリートの圧縮破壊エネルギー (Gfc50)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, ρ_sf_{yh}/f_{co}α_sS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。

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

ここで, *G_{fec50}*: 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 トの応カーひずみ関係

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 (Lelm)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(E₀)を有する直線を仮定した。

$$\begin{cases} \sigma_{c} = E_{c}\varepsilon_{c} \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_{c}}{\varepsilon_{max}} \right)^{n-1} \right\} & (0 < \varepsilon < \varepsilon_{max}) \\ \uparrow z \uparrow z \downarrow, \quad n = \frac{E_{c}\varepsilon_{max}}{E_{c}\varepsilon_{max} - \sigma_{max}} & (5) \\ \sigma_{c} = E_{uo}(\varepsilon - \varepsilon_{max}) & (\varepsilon_{max} < \varepsilon < \varepsilon_{50}) \end{cases}$$

ここで,軟化勾配(*E_{no}*)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。

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

$$\varepsilon_{50} = \frac{4}{3} \frac{G_{fcc50} / L_{elm}}{\sigma_{max}} + \varepsilon_{cc} - \frac{2\sigma_{max}}{3E_c}$$
(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}=390mm)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 (ρ_sf_{yh}/f_{co}α_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。



(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

- Nakamura,H. and Higai,T. : Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Modelimg 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 Structual Divsion, ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969-1990 Jul, 1971.