

鉄筋コンクリート柱における補助帯鉄筋の拘束効果に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON CONFINEMENT EFFECTS OF SUPPLEMENTARY TIES IN REINFORCED CONCRETE COLUMNS

塚 孝司*・角田与史雄**・能町純雄***

By Koji SAKAI, Yoshio KAKUTA and Sumio NOMACHI

The purpose of this study is to examine the confinement effects of supplementary ties in reinforced concrete columns. 16 short tied columns are tested. The supplementary ties used have 180° hooks at both ends or at one end. In the two test specimens the tie with 180° hooks at both ends are engaged with longitudinal steel bars and in the other test specimens the ties are engaged with a perimeter tie. The test specimens are subjected to monotonic and cyclic loading. Based on the test results, the stress-strain curves of confined core concrete are obtained and the results are compared with the model which has been proposed by the authors. It is concluded that the authors' model on the stress-strain curves of confined core concrete is valid for the confinement effects of supplementary ties.

1. 緒 言

鉄筋コンクリート(RC)柱部材に帯鉄筋を配置することにより、帯鉄筋が拘束されるコアコンクリートの強度の増加およびじん性の改善が期待できることはよく知られている。したがって、帯鉄筋の配置はRC柱部材の耐震性能を考えるうえで非常に重要であるが、帯鉄筋に拘束されるコアコンクリートの力学特性に関する定量的な評価は、まだ十分とはいえない現状にある。

著者らはさきに、Fig. 1のA、BおよびCに示す形状の帯鉄筋を配置したRC柱の中心軸圧縮試験から、拘束コアコンクリートの応力-ひずみ曲線に関する一モデルを提案した¹⁾。ところで、帯鉄筋量および帯鉄筋間隔は拘束効果に非常に大きな影響を与えるが、同時に帯鉄筋の配置形状も重要な影響因子であり、Fig. 1 A、BおよびC以外にも種々の形状が考えられ、実験的検討もいくつかなされている^{2)~7)}。しかしながら、著者らの知る限りではFig. 1 D、EおよびFのような補助帯鉄

筋をもつ帯鉄筋配置の拘束効果に関する研究はほとんど行われていない。本研究は、これら正方形帯鉄筋と補助帯鉄筋とを組み合わせ配置したRC柱について軸圧縮試験を行い、さきに提示したデータとの関連で¹⁾、補助帯鉄筋を含む帯鉄筋配置の拘束効果について検討したものである。

2. 実験概要

Fig. 1に供試体形状および寸法を示す。外側帯鉄筋の外縁からのかぶり厚は、すべての供試体について1cmとした。供試体タイプDは補助帯鉄筋を外側帯鉄筋にかけたものであり、タイプEは補助帯鉄筋を軸鉄筋に直接かけたものである。また、タイプFはJ-タイとよばれているものであり、2本のJ-タイを中央部で固定し、補助帯鉄筋としている。

Table 1に、実験で用いた供試体の帯鉄筋諸元一覧を示す。供試体総数は16体で、補助帯鉄筋にはすべて降伏強度295 MPaのD6を、外側帯鉄筋にはD6または降伏強度404 MPaのD10を用いた。各供試体の帯鉄筋の体積鉄筋比は、1.64%と3.98%の間にある。また、軸鉄筋比はすべての供試体について1.35%であり、柱の全横断面に対する外側帯鉄筋の中心によって囲まれたコア面積の比は、0.723または0.757である。

* 正会員 工博 北海道大学助手 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科
(〒275 千葉県習志野市泉町1-2-1)

帯鉄筋端部は、外側帯鉄筋では135°フック、補助帯鉄筋では180°フックを設けた。また、帯鉄筋および軸鉄筋にはひずみ測定用ゲージを貼り、防水処理を施した。

コンクリートの配合は、7日強度が26.5 MPaとなるように決定した。なお、粗骨材は、供試体のかぶりを考慮して、最大寸法を10 mmとした。各供試体の実験日におけるコンクリート強度は、同時に打設したφ10×20 cmの円柱供試体および20 cm×20 cm×60 cmの無筋角柱供試体を用いた圧縮試験によって得られた。

実験方法は、さきに行った方法¹⁾と同様である。ただし、供試体11R~16Rは繰り返し荷重を作用させた。その方法は、まず無筋角柱供試体の最大荷重 P_{max} を求め、0.25 P_{max} まで荷重を上げた後、数t程度まで除荷する。この手順を0.5 P_{max} 、0.75 P_{max} および P_{max} についてそれぞれ1回ずつ行い、 P_{max} 以降は、載荷荷重が低減し始めたなら同様な除荷を行い、これを繰り返す。

3. 実験結果および考察

(1) 耐荷挙動

さきの実験結果¹⁾と同様に、荷重の増加とともにひびわれの発生、かぶりの剥落、そしてコアコンクリートが帯鉄筋の間から膨れ上がって飛び出すことによるアーチ効果の低下と、一連の破壊過程が観察された。最大荷重を越えて変形が大きくなると、すべての供試体において軸鉄筋の座屈が生じた。また、変形が大きくなると外側帯鉄筋は補助帯鉄筋で支えた部分以外において外側に大きく膨れ、補助帯鉄筋の顕著な有効性が観察された。

(2) 帯鉄筋の拘束効果

コアコンクリートに対する帯鉄筋の拘束効果を評価するためには、実験で得られた荷重-軸ひずみ関係における荷重から、かぶりコンクリートおよび軸鉄筋の受け持つ力を差し引かなければならないが、その取り扱いにはさ

きの研究で用いた方法¹⁾に準じた。

Table 2は、得られた結果の一覧である。ここに f_c は円柱供試体強度、 f_{cu} は無筋角柱供試体強度、 $f_{c,max}$

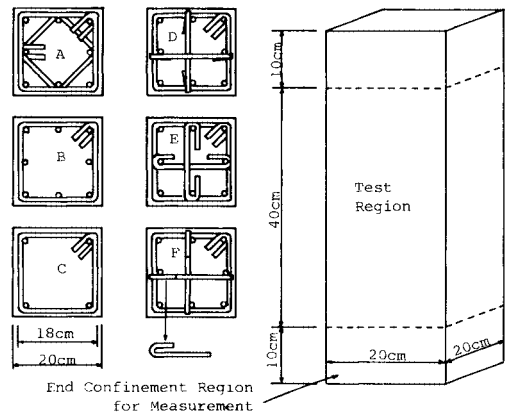


Fig. 1 Configuration of tie reinforcement.

Table 1 Details of tie reinforcement.

Specimen	Dia. of bars		Type	Spacing s (cm)	Volumet. ratio ρ_s (%)
	Periph.	Supple.			
1	D6	D6	D	4.0	2.30
2	D10	D6	D	6.0	3.32
3	D6	D6	D	6.0	1.64
4	D6	D6	D	5.0	1.97
5	D10	D6	D	5.0	3.98
6	D10	D6	D	7.0	2.66
7	D6	D6	E	4.0	2.24
8	D10	D6	E	6.0	3.28
9	D6	D6	F	4.0	2.30
10	D10	D6	F	6.0	3.32
11R	D6	D6	D	4.0	2.30
12R	D10	D6	D	6.0	3.32
13R	D6	D6	D	6.0	1.64
14R	D6	D6	D	5.0	1.97
15R	D10	D6	D	5.0	3.98
16R	D10	D6	D	7.0	2.66

Specimens-11R - 16R = cyclic loading

Table 2 Test results.

Specimen	Concrete cylinder strength, f'_c (MPa)	Unconfined concrete strength, f_{cu} (MPa)	Maximum core stress, $f_{c,max}$ (MPa)	Concrete strain at $f_{c,max}$, ϵ_{sl} (%)	Strain in tie steel at $f_{c,max}$ (%)		Mean stress in tie steel at $f_{c,max}$, f_s (MPa)	$K_s = \frac{f_{c,max}}{f_{cu}}$
					Periph. ϵ_s	Supple. ϵ'_s		
1	30.1	31.4	41.6	0.598	0.124	0.101	180	1.33
2	31.2	30.9	40.1	1.000	0.223	0.187	349	1.30
3	41.2	39.2	46.1	0.622	0.164	0.100	211	1.18
4	24.7	25.5	33.3	0.555	0.177	0.105	226	1.31
5	29.3	25.5	44.9	1.160	0.357	0.215	349	1.76
6	28.8	28.2	37.8	1.471	0.145	0.186	282	1.34
7	29.2	25.8	36.8	0.625	0.193	0.131	252	1.43
8	33.3	30.4	43.5	0.682	0.242	0.652	349	1.43
9	24.9	25.5	38.3	0.569	0.220	0.097	225	1.50
10	24.9	25.5	40.2	1.144	0.230	0.201	349	1.58
11R	29.1	29.4	41.3	0.599	0.340	0.134	255	1.40
12R	28.1	26.5	42.8	0.809	0.252	0.164	333	1.62
13R	22.9	21.4	29.9	0.642	0.250	0.195	295	1.40
14R	22.9	21.4	32.8	0.743	0.514	0.227	295	1.54
15R	22.8	21.6	38.6	2.352	0.327	1.383	349	1.79
16R	22.8	21.6	32.7	0.951	0.155	0.206	291	1.52

はコアコンクリートの最大応力（強度）、 ϵ_s および ϵ'_s は $f_{c,max}$ 時の外側および補助帯鉄筋の平均ひずみ、 ϵ_{s1} および f_s は $f_{c,max}$ 時の軸ひずみおよび帯鉄筋の平均ひずみ、 K_s は拘束による強度増加率を表す。なお、繰り返し載荷の供試体に対する上記の各ひずみの値は包絡線に基づいている。

供試体 1~6 の結果は、実験的ばらつきが多少みられるが、鉄筋間隔が小さくなると、また、鉄筋量が大きくなると、強度増加率が大きくなることを示している。コアコンクリートの最大応力時の軸ひずみについては、かなりのばらつきがみられる。

補助帯鉄筋端部を外側帯鉄筋にかけた場合（供試体 1 および 2）と軸鉄筋にかけた場合（供試体 7 および 8）の強度増加は、本実験ではそれほど大きな差とはなっていないが、定性的には軸鉄筋に直接かけた場合の方が拘束効果がよくなる傾向があり、本実験で用いた供試体のように軸鉄筋間隔がかなり小さい場合には、軸鉄筋の拘束効果への寄与が大きいことを意味している。

J-タイを用いた供試体 9 および 10 は、供試体 1, 7 および 2, 8 より拘束効果が大きくなっている。このことは、J-タイは外側帯鉄筋との間に隙間を作ることなく配置できることによると思われる。

単調載荷による供試体 1~6 の強度増加と繰り返し載荷による供試体 11 R~16 R のそれと比較すると、供試体 5 と 15 R とはほとんど同じ結果であるが、その他の場合は繰り返し載荷によるものの方が大きな結果となっている。それは、一般的に考えられる傾向と逆といえるが、その原因としては、単調載荷のための供試体 1~6 は本実験シリーズの前半に相当するので、鉄筋組み立て

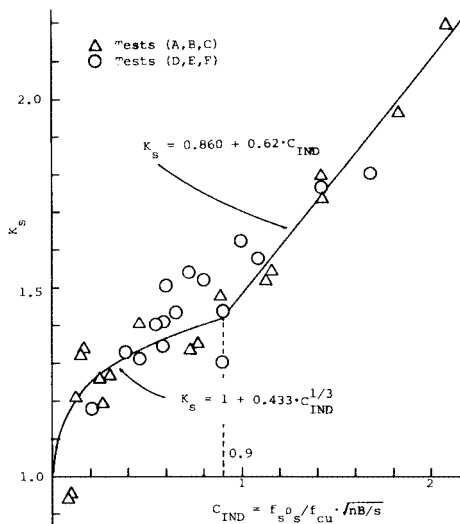


Fig.2 Relationships between K_s and confinement index, $C_{IND} = f_s \rho_s / f_{cu} \cdot \sqrt{nB/s}$.

の不慣れから、後半の繰り返し載荷用供試体に比べて、外側帯鉄筋と補助帯鉄筋のかみ合わせ部の隙間がいく分大きくなっていった可能性が考えられる。そのことは帯鉄筋の平均応力から間接的に類推されることではあるが、その定量的評価は困難である。

外側帯鉄筋の応力と補助帯鉄筋の応力とは同じ重みで平均して取り扱っているが、問題があるかもしれない。しかし、この重みを定量的に評価するには、さらに多くの実験的検討が必要である。

(3) 拘束コアコンクリートの応力-ひずみ曲線

著者らはさきに、拘束コアコンクリートの応力-ひずみ ($\sigma_c - \epsilon$) 曲線に関して、次のモデルを提案した¹⁾。

最大応力までの曲線は Sargin 型の次式で表わした。

$$\frac{\sigma_c}{f_{cu}} = \frac{E_c \epsilon_{s1} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{s1}} \right) - K_s \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{s1}} \right)^2}{1 + \left(\frac{E_c \epsilon_{s1}}{K_s \alpha f'_c} - 2 \right) \frac{\epsilon}{\epsilon_{s1}}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに $\alpha = f_{cu} / f'_c$, $E_c = 2f'_c / \epsilon_0$, ϵ_0 は f'_c に対応するひずみを表す。

強度増加係数 K_s は、影響変数 $C_{IND} = f_s \rho_s / f_{cu}$

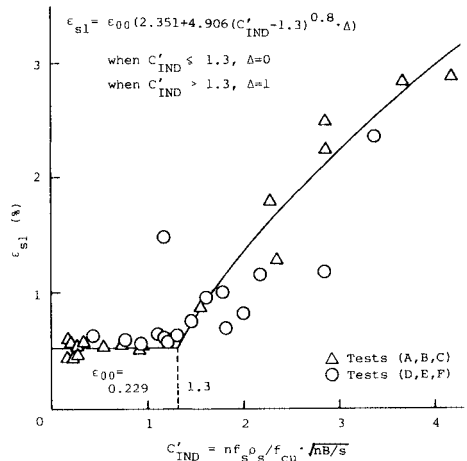


Fig.3 Relationships between ϵ_{s1} and confinement index, $C'_{IND} = n f_s \rho_s / f_{cu} \cdot \sqrt{nB/s}$.

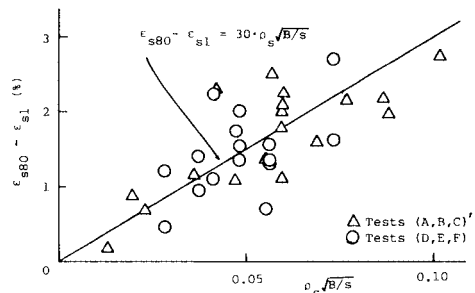


Fig.4 Effects of ties on descending branch of core concrete stress-strain curve.

$\sqrt{nB/s}$ を用いて次式で表わした。

$$\left. \begin{aligned} C_{IND} \leq 0.9 \text{ のとき } K_s &= 1 + 0.433 C_{IND}^{1/3} \\ C_{IND} > 0.9 \text{ のとき } K_s &= 0.860 + 0.62 C_{IND} \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

ここに、 ρ_s は帯鉄筋の体積鉄筋比、 s は帯鉄筋間隔、 B はコアの一辺の長さ、 n は供試体一側面当たりの、帯鉄筋に支持される軸鉄筋本数から1を差引いた値（本実験では $n=2$ ）を表わし、 $s \times B/n$ は帯鉄筋と軸鉄筋によって囲まれる面積を意味する。

最大応力時のひずみ ϵ_{s1} は、影響変数 $C'_{IND} = n f_{ps} \rho_s / f_{cu} \cdot \sqrt{nB/s}$ を用いて次式で表わした。

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{00} \{ 2.351 + 4.906 (C'_{IND} - 1.3)^{0.8} \Delta \} \dots\dots(3)$$

ここに、 $C'_{IND} \leq 1.3$ のとき $\Delta = 0$ 、 $C'_{IND} > 1.3$ のとき $\Delta = 1$ である。また、 ϵ_{00} は無筋角柱強度に対応するひずみを表わす。

最大応力以降の応力低下は線形変化とし、kentらの提案式に基づいた次式を用いた。

$$\epsilon_{s80} - \epsilon_{s1} = 30 \rho_s \sqrt{\frac{B}{s}} (\%) \dots\dots(4)$$

ϵ_{s80} は最大応力の80%の応力に対するひずみである。

Fig. 2に、影響変数 C_{IND} を横軸にとった場合の K_s 値の実験結果と提案モデル式との比較を示す。参考のため、提案モデルのもとになったさきの実験値も示してある。この図から、 C_{IND} が0.8前後において、補助帯鉄筋を含む供試体の方が、強度増加率が若干大きくなる傾向のあることがわかる。

Fig. 3は、同様に、影響変数 C'_{IND} を横軸にとった場合の最大応力時のひずみ ϵ_{s1} の実験結果と提案モデル式との比較を示す。図より、上述の両者は、供試体5および6を除き、ほぼ妥当な関係にあるということができよう。供試体5および6の結果を説明することのできる特別な事実は得られていない。

Fig. 4は、影響変数 $\rho_s \sqrt{B/s}$ を横軸にとった場合の $(\epsilon_{s80} - \epsilon_{s1})$ の値の実験結果と提案モデル式との比較を示している。比較的大きなばらつきがみられるが、その程度はさきの実験結果とはほぼ同じである。

以上の結果より、補助帯鉄筋を含む帯鉄筋配置に対しても、著者らがさきに提案した拘束コアコンクリートの応力-ひずみ曲線が有効であるといえるであろう。

4. 結 語

本研究は、RC柱における帯鉄筋の拘束効果について

特に帯鉄筋として正方形帯鉄筋と補助帯鉄筋とを組み合わせて配置した場合について、単調および繰り返し载荷による軸圧縮試験を行い、その結果を著者らがさきに提案した拘束コアコンクリートの応力-ひずみ関係と比較検討した。その結果、本実験の範囲において、補助帯鉄筋を含む帯鉄筋配置の場合に対しても、提案モデル式が有効であることが明らかになった。

補助帯鉄筋の配置では、端部のかみ合わせ部分に隙間を作らないことが重要である。本実験で用いた両端180°フックを有する補助帯鉄筋は、かみ合わせ部の隙間が生じないように組み立てるのが非常に難しく、熟練を要する。このような観点からは、J-タイのほかに、ACI 318-83の解説にある90°フックの利用も実用的と思われるが、90°フックの有効性については今後なお実験的検討が必要であろう。

本研究は、文部省科学研究費(昭和59年度奨励研究A, No. 59750365)によって行ったものであり、実験においては千歳市の小西隆幸氏(昭和60年北海道大学卒業)および北海道大学の木村 勉氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 堺 孝司・角田与史雄・能町純雄：鉄筋コンクリート柱における帯鉄筋の拘束効果に関する実験的研究，土木学会論文集，第354号/V-2，1985。
- 2) Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M. : Strength and ductility of tied columns, Proceedings of ASCE, Vol. 106, No. ST 5, pp. 1079~1102, 1985.
- 3) Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M. : Analytical model for concrete confinement in tied columns, Proceedings of ASCE, Vol. 108, No. ST 12, pp. 2703~2722, December 1982.
- 4) Sheikh, S. A. : A comparative study of confinement models, ACI Journal, pp. 296~306, July-August 1982.
- 5) Park, R. et al. : Ductility of square-confined concrete columns, Proceedings of ASCE, Vol. 108, No. ST 4, pp. 929~950, April 1982.
- 6) Scott, B. D. et al. : Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates, ACI Journal, pp. 13~27, January-February 1982.
- 7) Scott, B. D. : Stress-strain relationships for confined concrete—rectangular sections, Research Report No. 80-6, University of Canterbury, p. 100, February 1980. (1985. 11. 13・受付)