

## 帯鉄筋間隔の異なる RC 柱部材の軸圧縮特性

水口 和彦 (日大生産工・助教) 木田 哲量 (日大生産工・教授) 阿部 忠 (日大生産工・教授)  
 櫻田 智之 (日大生産工・教授) 澤野 利章 (日大生産工・教授)

### 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の設計においては、性能要求を明確にすることを目的とした性能照査型設計法の構築が進められている。その基本性能は、安全性、使用性、復旧性、社会・環境への適合性の4つが設定されており、安全性を具体的に確保するための性能には、耐荷力性能、疲労耐久性能、材料耐久性能が位置づけられ、その設計手法の具体化が進められている<sup>1)</sup>。

一方、コンクリート構造物のひとつである RC 橋脚においては、経済性を考慮した主鉄筋段落し部が設けられているが、段落し部の鉄筋定着長が短いものや帯鉄筋量が少ないものもあり、兵庫県南部地震においては、これらが致命傷となって損傷した橋脚が幾つも見られた(図-1)。このようなことから、新設される RC 橋脚においては、帯鉄筋間隔を密に配置することにより、帯鉄筋にじん性向上の役割を担わしてモーメントの再配分、もしくは耐震設計上有利な構造とするように基準の改定がなされた<sup>3)</sup>。

また、RC 柱部材の断面破壊に関する設計断面力を照査する1つの手法として軸方向圧縮耐力の上限式が規定されている。しかし、この上限式は帯鉄筋による内部コンクリートに対する横拘束を与えた場合の拘束効果を考慮したものとはなっていない。この問題に対処すべく、各研究機関からは、横拘束を考慮した様々な耐力式の提案がなされている<sup>4), 5), 6), 7)</sup>が、使用鋼材の材質、拘束筋の配置間隔、体積比等多くの影響因子があるため未だ定式化されていないのが現状である。

そこで本研究では、RC 柱部材の横拘束筋となる帯鉄筋間隔が異なる同一断面・寸法供試体に中心軸圧縮力载荷実験を行い、帯鉄筋間隔の違いが RC 柱の耐荷力および破壊様式に及ぼす影響を検



図-1 RC 橋脚の破壊状況<sup>2)</sup>

図-2 供試体寸法および鉄筋配置

供試体	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	水 (kg)
RC25	18	4.5	49.9	51.7	166
RC15	18	3.0	36.0	52.0	160
	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
	普通 (kg)	砕砂 (kg)	20mm (kg)	レオビルド (kg)	マイクウェア (mℓ)
RC25	336	953	865	2.18	13
RC15	320	934	839	3.11	11

討するとともに、RC 柱の横拘束鉄筋のピッチ縮少による三軸拘束コア・コンクリート強度の増加傾向を解析し、これが拘束効果となるコア・コンクリート拘束強度比を用いた圧縮耐荷力算定式の提案を行った。さらに、供試体寸法・配置鉄筋量を縮少させた供試体を作成して同様の実験を行い、供試体寸法の違いが、破壊様式および耐荷力に及ぼす影響について検討した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

各供試体のコンクリートには、早強ポルトランドセメントと5mm以下の砕砂、5mm~20mmの碎石を使用し、設計基準強度が30N/mm<sup>2</sup>のRC25供

試体, 50N/mm<sup>2</sup>のRC15供試体を作製した。ここで, コンクリートの示方配合を表-1に示す。また, 鉄筋には, RC25供試体の主鉄筋にSD345A D16, 帯鉄筋にSD345A D13を使用し, RC 15供試体の主鉄筋にSD345A D10, 帯鉄筋にSD345A D6をそれぞれ用いた。ここで, コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2に示す。

## 2.2 供試体寸法および鉄筋配置

### (1) 供試体 RC25

供試体 RC25 の寸法およびコア寸法は, それぞれ 250×250×900mm, 190×190mm とした。公称帯鉄筋間隔は300mm, 200mm, 150mm, 100mm の4種類とし, 供試体はそれぞれ2本作製した。供試体名称はそれぞれ RC25-300, RC25-200, RC25-150, RC25-100 とする。ここで, 供試体寸法および鉄筋配置を図-2(1)に示す。

### (2) 供試体 RC15

供試体RC15の寸法およびコア寸法は, それぞれ 150×150×600mm, 110×110mm とした。公称帯鉄筋間隔は200mm, 150mm, 100mm, 75mm の4種類とし, 供試体はそれぞれ1本作製した。供試体名称はそれぞれRC15-200, RC15-150, RC15-100, RC15-75とする。ここで, 供試体寸法および鉄筋配置を図-1(2)に示す。

## 2.3 荷重載荷方法

荷重載荷方法は, 載荷容量5000kNの圧縮試験機により, 荷重を100kNずつ増加させる段階載荷とした。また, 荷重1000kN増加ごとに荷重を0kNに減少させる包絡荷重として供試体が破壊するまで荷重の増減を繰り返した。

## 3. 実験結果および考察

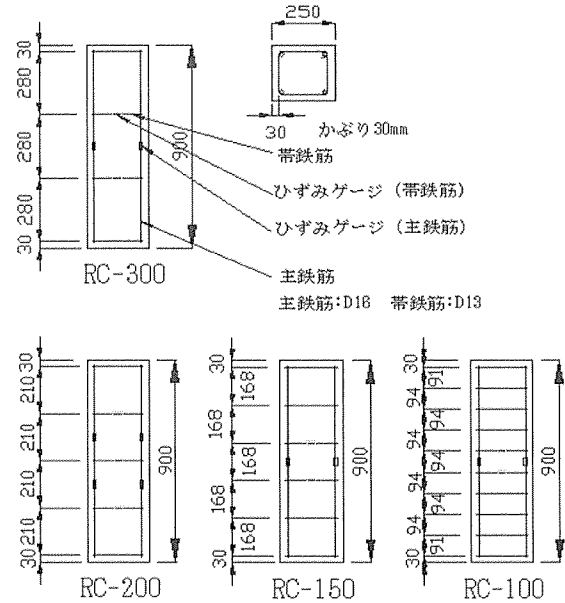
### 3.1 実験最大耐荷力

実験より得られた各供試体の最大耐荷力および耐荷力比を表-1に示す。

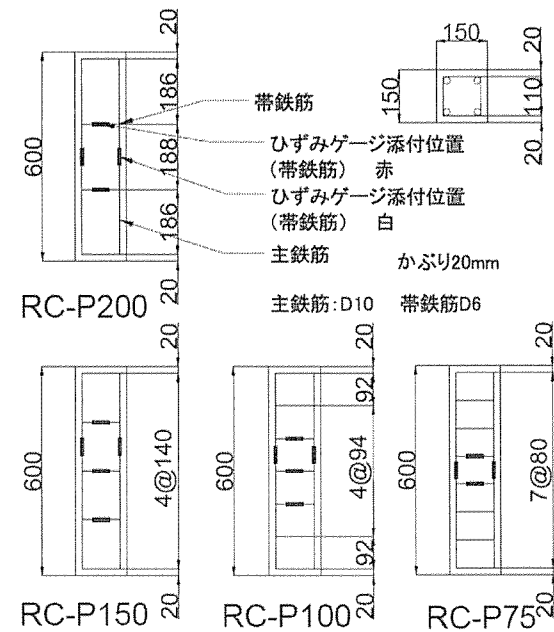
同表より, RC25供試体の場合の平均耐荷力は, RC25-300, RC25-200, RC25-150, RC25-100でそれぞれ2579kN, 3078kN, 3320kN, 4256kNとなった。ここで, RC25-200を基準として耐荷力を比較すると, RC25-200, RC25-150, RC25-100でそれぞれ1.19倍, 1.29倍, 1.65倍の耐荷力の増加が見られた。同様に, RC15供試体の場合の耐荷力を

図-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	鉄筋 (SD345A, D16, D13, D10, D6)		
		降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 kN/mm <sup>2</sup>
RC25	38.9	365	510	200
RC15	55.3	368	510	200



### (1) 供試体 RC255



### (2) 供試体 RC15

図-1 供試体寸法および鉄筋配置

RC15-200を基準として比較すると, RC15-200, RC15-150, RC15-100でそれぞれ1.08倍, 1.18倍, 1.28倍の耐荷力の増加が見られた。

次に, 耐荷力と帯鉄筋間隔の関係を図-2に示す。

同図より、2種類の供試体ともに帯鉄筋間隔が密になるにつれて、耐荷力はほぼ線形的に増加していることが確認できる。

### 3.2 破壊形状

2種類の供試体の破壊形状を図-3、4に示す。同図より、それぞれの供試体のかぶりコンクリートのはく離は、帯鉄筋間隔が大きくなるにつれて激しくなっており、供試体 RC25-300, RC25-200, RC15-200, RC15-150 などでは有効断面が深く損傷しており、最終的な破壊は主鉄筋の座屈によるコア・コンクリート部分の脆性的なせん断破壊となった。このことより、座屈した主鉄筋は帯鉄筋間隔が供試体 RC25 で 200mm, RC15 供試体で 150mm 以上の中間間隔の場合には帯鉄筋とコア・コンクリートとの定着がなされておらず側圧が有効に作用していないものと考えられる。それに対して供試体 RC25-150, RC25-100, RC15-150, RC15-100 では、かぶりコンクリート部分の剥落は多く見られるものの、コア・コンクリート部分でのせん断破壊は生じておらず、終局時においてもコア内部はかなり密な状態を保っている。したがって、帯鉄筋間隔を密にすることによって横拘束力が向上し、じん性向上の役割を担わせることができるものと考えられる。

### 3.3 荷重と主鉄筋ひずみの関係

荷重と主鉄筋ひずみ関係を図-5に示す。同図より、2種類の供試体ともに荷重の増加に対し線形的なひずみの増加がみられる。また、帯鉄筋間隔からは、帯鉄筋間隔が大きくなるにつれて初期段階よりひずみの増加傾向が大きくなっている。さ

表-1 最大耐荷力および耐荷力比

供試体	最大耐荷力	平均耐荷力	耐荷力比
	(kN)	(kN)	
RC25-300-1	2562	2578.5	1.00
RC25-300-2	2595		
RC25-200-1	3155	3077.5	1.19
RC25-200-2	3000		
RC25-150-1	3457	3319.5	1.29
RC25-150-2	3182		
RC25-100-1	4532	4256.0	1.65
RC25-100-2	3980		
RC15-200	1225	—	1.00
RC15-150	1317	—	1.08
RC15-100	1442	—	1.18
RC15-75	1567	—	1.28

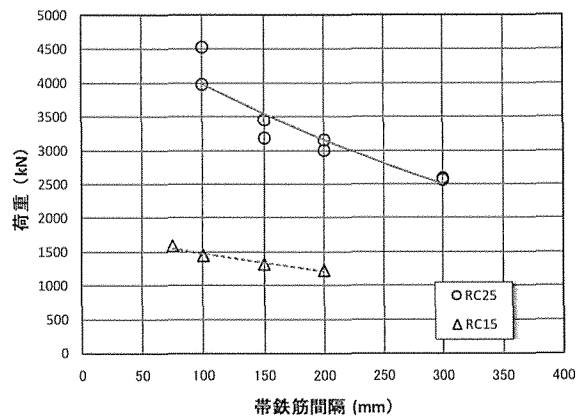


図-2 耐荷力と帯鉄筋間隔の関係

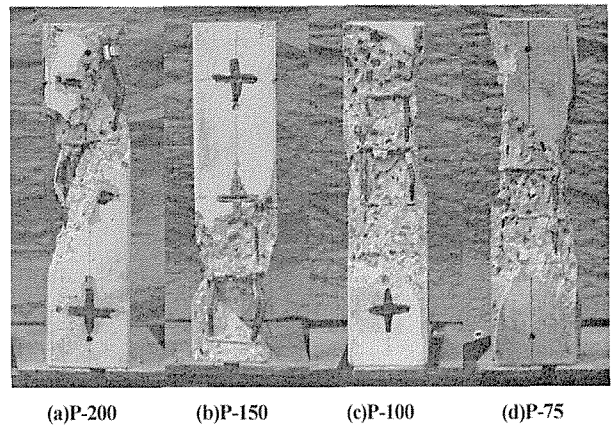


図-3 破壊形状 (RC15)

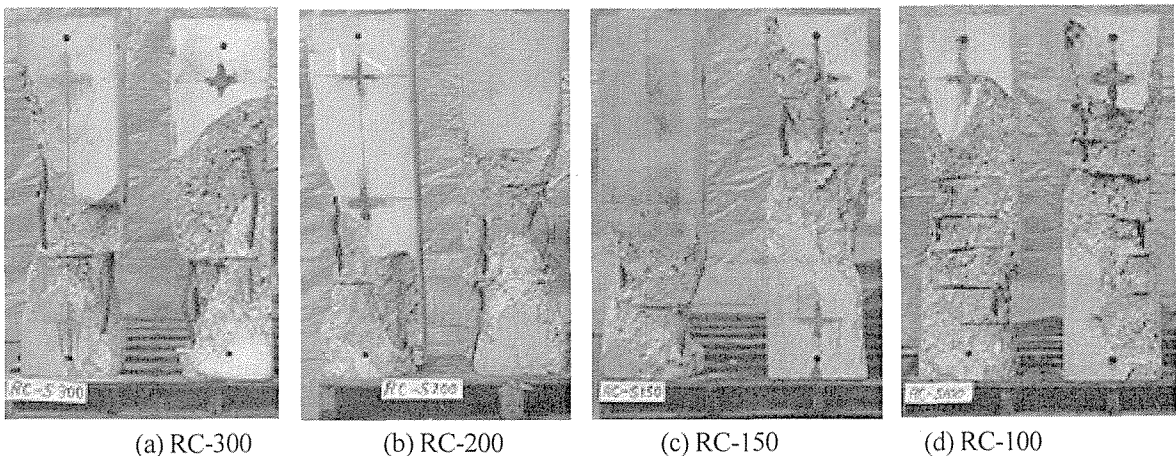


図-4 破壊形状 (RC25)

らに、主鉄筋の降伏ひずみは、材料特性値より算出すると $2000 \times 10^{-6}$ 程度であるが、帯鉄筋間隔が密になるにつれて主鉄筋降伏後も大きな変形を示しており、じん性能が向上していることが確認できる。なお、供試体RC15では供試体RC25に比してひずみの増加が少ない傾向にある。これには、コンクリートの圧縮強度の影響等が考えられるが、今回の実験では供試体数が少ないことから今後更なる検討を行う予定である。

#### 4. 帯鉄筋による拘束効果の検討

本研究では、RC 柱部材における拘束筋による横拘束効果が RC 柱の耐荷力に及ぼす影響に着目し、帯鉄筋間隔が横拘束効果に係わる検討を行った。

##### 4.1 RC 柱の軸方向圧縮耐荷力評価式の現状

設計軸圧縮耐力の上限  $N'_{oud}$  と設計軸圧縮荷重  $N'_d$  との比は構造物係数  $\gamma_i (=1.0 \sim 1.2)$  より小さくならないように、軸圧縮荷重を受ける部材を設計しなければならない。設計曲げモーメント  $M_d$  と設計軸圧縮荷重との比がごく小さい部材の終局抵抗力は、施工段階での部材の不整合初期誤差によって生じる僅かな曲げモーメント増加によっても大きく低下する。このような問題を避けるために、軸圧縮耐力に上限が設定されており、かつ部材係数 1.3 が採用されている。軸方向圧縮力を受ける部材における軸方向圧縮耐力の上限値  $N'_{oud}$  は、帯鉄筋を使用する場合は式(1)により、また、らせん鉄筋を使用する場合には式(1)、(2)のいずれか耐力が大きくなるほうで算定することになっている。

$$N'_{oud} = (k_1 f_{cd} A_c + f_{yd} A_{st}) / \gamma_b \quad (1)$$

$$N'_{oud} = (k_1 f_{cd} A_e + f_{yd} A_{st} + 2.5 f_{pyd} A_{spe}) / \gamma_b \quad (2)$$

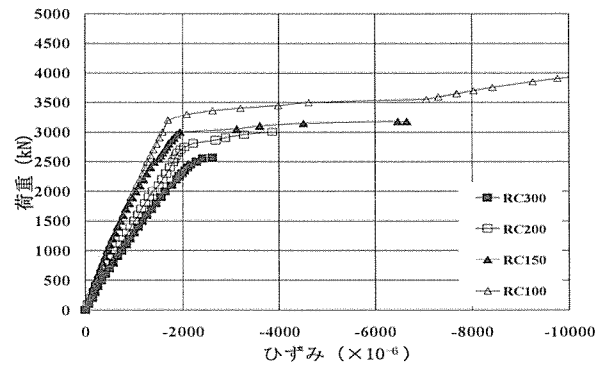
ここで、 $A_c$  : コンクリートの断面積

$A_e$  : らせん鉄筋で囲まれたコンクリートの断面積

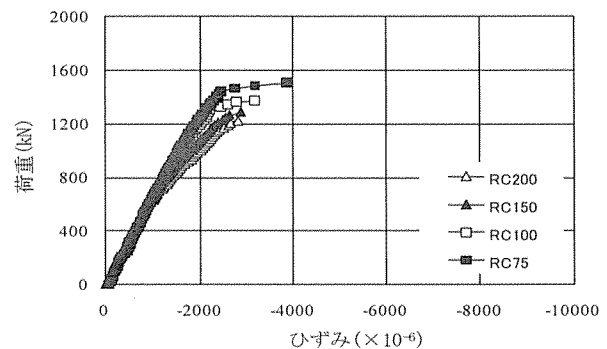
$A_{st}$  : 軸方向鉄筋の全断面積

$A_{spe}$  : らせん鉄筋の換算断面積  
( $= \pi d_{sp} A_{sp} / s$ )

$d_{sp}$  : らせん鉄筋で囲まれた断面の



(1) RC25 供試体



(2) RC15 供試体

図一5 荷重—主鉄筋ひずみ

直径

$A_{sp}$  : らせん鉄筋の断面積

$s$  : らせん鉄筋のピッチ

$f_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度

$f_{yd}$  : 軸方向鉄筋の設計圧縮降伏強度

$f_{pyd}$  : らせん鉄筋の設計引張降伏強度

$k_1$  : 強度の低減係数 ( $= 1 - 0.003 f_{ck} \leq 0.85$ , ここで、 $f_{ck}$  : コンクリート強度の特性値)

$\gamma_b$  : 部材係数(一般に 1.3)

式(1)、(2)における、第1項目は、コンクリート分担能、第2項目(らせん鉄筋の場合は第3項)は鉄筋の分担能となっており、それらの合算により軸方向圧縮耐力の上限値を算出している。したがって、帯鉄筋配置した場合の横拘束による拘束効果は式(1)、(2)には考慮されていないことが分かる。

一方、RC 柱の軸方向圧縮耐荷力では、主鉄筋自体の単純圧縮強度を完全に発揮されず、主鉄筋の強度が RC 柱の耐荷力に及ぼす効果が顕著に現われない<sup>8)</sup>ことが報告されており、加藤ら<sup>9)、10)</sup>

は RC 橋脚の主筋座屈を単純モデル化したうえで、座屈効果を考慮した上方限界耐荷力評価式  $N'_{oub}$  を式(3)のように提案している。

$$N'_{oub} = A_e f_c + A_s \sigma_s \quad (2)$$

ここで、 $A_e$ : コンクリートの全断面積  
 $f_c$ : コンクリートの設計圧縮強度  
 $A_s$ : 軸方向鉄筋の全断面積  
 $\sigma_s$ : 座屈応力

このように、帯鉄筋による横拘束をなした RC 柱の軸方向圧縮耐荷力の評価式は幾つか提案されている。しかし実際には、帯鉄筋は柱の横方向拘束を図るものであり、コア・コンクリートの見かけの強度増加は耐荷力の増加要因に含まれていないのが現状である。そこで本研究では、帯鉄筋配置によるコア・コンクリートの見かけの強度増加、すなわち拘束強度比を用いた RC 柱部材の軸方向圧縮耐荷力式の提案を行うこととする。

#### 4.2 RC 柱耐荷力と帯鉄筋間隔の関係

図-6は、RC柱の拘束強度比（実験耐荷力／理論耐荷力）と帯鉄筋間隔との関係を示したものである。なお本研究では、寸法の影響を検討することから、帯鉄筋間隔は、コンクリート標準示方書に規定される<sup>1)</sup>最大帯鉄筋間隔は部材断面の最小寸法以下、すなわち本実験では供試体RC25の場合250mm、供試体RC15の場合150mmで各供試体の帯鉄筋間隔を除して無次元化させたものを使用する。

同図より、RC柱の拘束強度比は帯鉄筋間隔が縮小するにつれて増大しており、この傾向は重拘束になる間隔ほど卓越している。また、この傾向は供試体RC25、供試体RC15の場合ともに同様の傾向を示しており、本実験の範囲内においては供試体寸法の違いによる顕著な差異は確認されなかった。以上の結果より、主鉄筋と帯鉄筋の双方の格子効果による適切な横拘束とすることが、より高い耐荷力に連係することが明らかとなった。逆に、帯鉄筋間隔がある間隔以上となった場合、横拘束はあまり顕著な効果を示さず、帯鉄筋RC柱に関する基本設計式としての式(1)によって与えられる

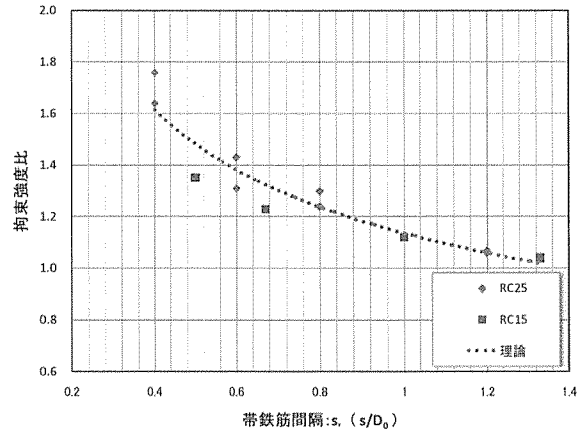


図-6 拘束強度比と帯鉄筋間隔

上方限界耐荷力に接近する。また、耐荷力と帯鉄筋間隔の関係は式(3)に示す近似相関式として得られる。

$$\alpha = 1.1349(s/D_0)^{-0.382} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$ : 拘束強度比

$s$ : 帯鉄筋間隔 (mm)

$D_0$ : 基準間隔(部材断面の最小寸法)

#### 4.3 拘束強度比を適用した軸圧縮耐荷力算定式

帯鉄筋間隔を考慮したRC柱部材の軸方向圧縮耐荷力式は、式(3)の相関式を側圧の係数とすると式(2)に導入することにより式(4)として与えられる。

$$N'_{ou} = \alpha \cdot N'_{oud} \quad (4)$$

ここで、 $N'_{ou}$ : 帯鉄筋を考慮した軸方向圧縮耐荷力の上限値

式(4)より、軸方向圧縮耐荷力を算出した結果を表-4に示す。同表より、供試体 RC25 の場合、帯鉄筋間隔 300, 200, 150, 100 の各理論耐荷力は、それぞれ 2562kN, 2991kN, 3338kN, 3897kN となった。同様に、供試体 RC25 の場合、帯鉄筋間隔 200, 150, 100, 75 の各理論耐荷力は、それぞれ 1200kN, 1339kN, 1562kN, 1756 kN となった。この理論値と実験値とを比較すると、各供試体の耐荷力比は 0.92~1.09 倍となっており、理論値と実

表-4 実験・理論耐荷力および耐荷力比

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大耐荷力	平均耐荷力	耐荷力比	理論値 式(1)	提案式(4)	耐荷力比
		(kN)	(kN)				
RC25-300-1	38.9	2562	2578.5	1.00	2420	2562	1.01
RC25-300-2		2595					
RC25-200-1		3155	3077.5	1.19		2991	1.03
RC25-200-2		3000					
RC25-150-1		3457	3319.5	1.29		3338	0.99
RC25-150-2		3182					
RC25-100-1		4532	4256.0	1.65		3897	1.09
RC25-100-2		3980					
RC15-200	55.3	1225	—	1.00	1180	1200	1.02
RC15-150		1317	—	1.08		1339	0.98
RC15-100		1442	—	1.18		1562	0.92
RC15-75		1567	—	1.28		1745	0.9

験値は近似する結果を得た。なお、供試体 RC25 には重拘束になるにつれて耐荷力比が減少する傾向が見られる。この要因としては供試体の寸法、コンクリートの圧縮強度の違いなどの影響が考えられるが、今回の実験範囲内での究明は困難であることから、今後更なる検討を行う予定である。

## 5. まとめ

- ①供試体寸法の違いに関わらず、帯鉄筋間隔を密にすることで線形的にRC柱の耐荷力の増加がみられた。よって、主鉄筋と帯鉄筋の双方の格子効果による適切な横拘束は高耐荷力に繋がる事が明らかとなった。
- ②帯鉄筋間隔の違いにより破壊形状が異なることが判明した。とくに帯鉄筋間隔が供試体RC25で200mm, RC15供試体で150mm以上の場合、帯鉄筋による側圧は有効に機能していない。
- ③荷重ひずみの関係より、帯鉄筋間隔を密にすることは変形能を高めることが明らかにされた。
- ④帯鉄筋間隔と拘束強度比の関係から得られた相関式を側圧の係数とした軸圧縮耐荷力算定式の提案を行い、実験値と近似する結果を得た。

## 参考文献：

- 1)土木学会：コンクリート標準示方書 (2007)
- 2)片山恒雄：阪神・淡路大震災報告，土木構造物の被害，第一章 橋梁，土木学会，(1996)
- 3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，IV

(2002)

- 4)Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. : Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.114, No.ST8, pp.1804-1826 (1988)
- 5)Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. : Observed stress-strain behavior of confined concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.114, No.ST8, pp.1827-1849 (1988)
- 6)堺淳一，川島一彦，庄司学：コンクリートの横拘束効果に及ぼす横拘束筋の配置間隔と中間帯鉄筋の影響，土木学会論文集，No.717/I-61, pp.91-106 (2002)
- 7)小橋弘樹ほか：円筒形コンファインドコンクリートの強度・変形特性に及ぼす材料強度の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22, No.3, pp.217-222 (2002)
- 8)樋口盛一，斎藤秀雄：弾性および材料力学，養賢堂，pp.112-119 (1966)
- 9)K.Kato, N.Kato, N.Iwasaka : Improvement of Loading Capacity of RC Column Confined by Heavy Reinforcement, Proc. 38th Japan Cong. Mat. Res., pp.272-279 (1995)
- 10)M.Sudo et al.:Load-Carrying Capacity of Laterally Confined RC Column Considering Buckling of Primary Rebar, Theoretical. and Applied. Mechanics., Vol.50, pp.115-123