

高強度鉄筋コンクリート柱の横補強筋効果 に関する解析的研究

EFFECT OF LATERAL STEEL BAR ON DUCTILITY OF HIGH STRENGTH REINFORCED CONCRETE COLUMN

山田 和夫
Kazuo YAMADA

Abstract In this study, the effect of confinement of core concrete by lateral steel bar on the ductility of high strength reinforced concrete (RC) column was examined analytically by a 3-dimensional finite element method. In the analysis, the endochronic theory was applied to the expression of multi-axial stress-strain relation of concrete. Following results were obtained in this study:

1) The multi-axial stress-strain relations predicted with the endochronic theory proposed by Z.P. Bazant *et al.* are applicable to the predictions of response of high strength RC column subjected to the uniaxial compressive loading.

2) The ductility improvement of RC column by lateral steel bar is affected by the yield point and the method of arrangement of lateral steel bar. Accordingly, the relationship between the stress distribution in RC section and the various conditions of lateral steel bar should be clarified, in order to improve the ductility of RC column effectively.

3) The plastic deformation behavior of RC column is affected by the concrete strength, even if the conditions of yield point and method of arrangement of lateral steel bar is equal. The response of RC column with the higher strength concrete is more brittle.

1. はじめに

最近、高性能 A E 減水剤やシリカフェームなどといった混和材料の開発、コンクリートの調合・施工技術の向上などに伴って圧縮強度が 1,000 kgf/cm² を超える高強度コンクリートが比較的容易に得られるようになり、今後鉄筋コンクリート（以下、RC

と略記する）構造物の軽量化・高層化へのニーズの高まりに応じて RC 構造物に用いられるコンクリートの高強度化が益々進むものと考えられる。筆者は、これらの点を踏まえて、高強度コンクリートを実用化するための材料レベルにおける基礎的研究として、先に高強度コンクリートの圧縮強度の試験方法および変動について一連の検討¹⁾を行い、高強度コンクリート強度の変動は、高強度コンクリートの破壊過程の脆性度から予想される値よりもはるかに小さ

く、比較的安定した強度試験結果が得られることを示した。また、横補強筋で拘束されたコンファインド高強度コンクリートの強度変動は、横補強筋の量および降伏点が高いものほど減少することも明らかにした。

一方、高強度コンクリートをRC構造に用いるためには、構造レベルの検討事項として、高強度コンクリート特有の極めて脆性的な破壊を防止し、RC部材の靱性を確保するための対策について検討する必要がある。RC部材の延性的な変形性能を確保するための一つの方法として、横補強筋をせん断終局強度を確保するためのものと考えただけではなく、横補強筋によるコンクリートの3軸拘束効果を利用してRC部材の圧縮靱性を改善する方法があり、従来からもその有効性が数多くの研究者によって指摘されている。

ところで、横補強筋によるコンクリートの靱性改善効果を正しく評価するためには、横補強筋によって拘束され多軸応力下にある高強度コアコンクリートの力学特性を基礎において検討する必要があるが、コアコンクリートの内部応力分布までを詳細に検討した解析的研究例は少なく不明な点が多い。そのため、本研究では、高強度RC柱の1軸圧縮塑性変形挙動に及ぼす横補強筋の影響を、高強度コアコンクリートの内部応力分布に主眼を置いて解析的に検討を行った。

2. 解析の対象とした試験体

本解析では、過去に実施された高強度RC柱に関する実験の結果^{2),3)}を解析対象とした。柱試験体の寸法は、実寸法の約1/4の縮尺率で断面が25x25cm、長さが75cmである。試験体の設計条件を表-1に、形状と配筋状況を図-1に示す。主筋は、全ての試験体に対してD13筋が12本およびD16筋が4本(主筋量(p_g)=3.71%)である。実験で取り上げた要因は、設計基準強度(F_c=360、480および600kgf/cm²の3種類)、横補強筋比(p_w=0.56、0.82および1.13%の3種類)、横補強筋の降伏点(σ_y =普通(約4,000kgf/cm²)および高強度(約13,000kgf/cm²)の2種類)、並びに配筋形状(前掲の図-1に示す3種類)である。本研究では、表-1に示す試験体のうち、横補強筋比(p_w)が1.13%の試験体を対象として、高強度RC柱の1軸圧縮特性に及

表-1 試験体一覧

試験体記号	F _c (kgf/cm ²)	横補強筋		形状	
			p _w (%)		
No.1	480	4-D4 @40	0.52	a	
2		4-D5 @40	0.82		
3		4-R6 @40	1.13		
4		4-U4 @40	0.53		
5		4-U5 @40	0.82		
6		4-U6 @40	1.13		
7		2-U6 @40	1.13		b
8		2-R6 @40	1.13		
9		4-R6 @40	1.13		
10		600	4-R6 @55		0.82
11	4-R9 @45		1.13		
12	4-R6 @40		1.13		
13	360	4-U6 @40	1.13	a	
14		4-R6 @40	1.13		
15	480	4-D4 @40	0.52		
16		4-D5 @40	0.82		
17		4-R6 @40	1.13		
18					
19	600				
20	360				

[注] F_c: 設計基準強度、p_w: 横補強筋比。

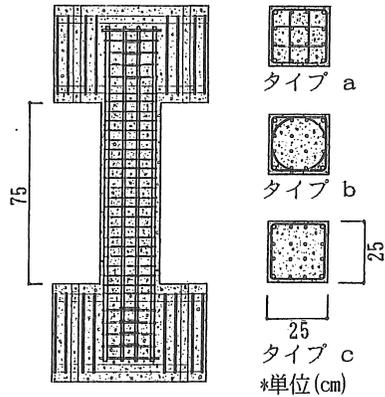


図-1 試験体図

表-2 構成素材の強度試験結果 (a) コンクリート

設計強度 (kgf/cm ²)	実測圧縮強度 (kgf/cm ²)
360	323
480	529
600	679

(b) 鉄筋

種類	種別	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)
横補強筋	D4	59.0	70.8
	D5	42.2	48.1
	D6	41.0	49.6
	R6	39.9	54.0
	R9	34.2	48.0
	U4	165.0	199.2
主筋	U5	145.7	154.0
	U6	142.6	153.7
	D13	37.6	58.3
	D16	36.6	53.6

ぼす横補強筋の配筋形状、降伏点およびコンクリート強度の影響を調べるために、No.3、No.6、No.8、No.10、No.11、No.12、No.13およびNo.14の8体を取り上げて解析を行った。コンクリートおよび鉄筋の強度試験結果を表-2に示す。

3. 解析方法および試験体のモデル化

筆者は、先に多軸応力を受けるコンクリートの応力度 (σ) - ひずみ度 (ϵ) 関係の表示にエンドクロニック理論を適用し、横補強筋およびせん断力によるコンクリートの多軸効果、主筋とコンクリート間のすべり並びに部材端における主筋の拔出し効果、せん断力に起因するクラックの進展状況とクラック間隔の影響、などを考慮に入れた分割要素法によるRC部材の非弾性解析手法を提案するとともに、その適用性・妥当性を確認した^{4)~6)}。しかし、この解析手法では、コアコンクリートの構成式の組立てに際してかなり大胆な仮定を設けているため、内部応力分布を正確に算定することができない。そのため、本研究では、多軸応力下のコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係の表示にエンドクロニック理論を用いた3次元有限要素法(以下、FEMと略記する)を適用して検討を行うこととした。本解析では、コンクリートを8節点アイソパラメトリック要素、主筋および横補強筋を線材要素で近似した3次元モデル試験体を用いた。FEM解析によるモデル試験体は、対称性を考慮して1/8モデルとし、各要素を図-2に示すように分割した。構成素材の構成則としては、コンクリートに対してはZ.P.Bazantらが最初に提案したエンドクロニック理論⁷⁾を、主筋および横補強筋に対してはbi-linear型のモデルを用いた。解析は、

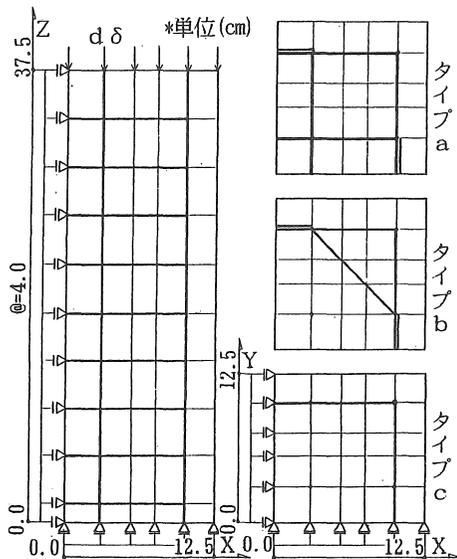


図-2 試験体のモデル化

表-3 最大耐力に関する解析結果

試験体 記号	$f_c^{(1)}$ (kgf/cm ²)	P _u / w _{oy} (kgf/cm ²)	実験値 P _{max} (tf)	累加強度式 P _{max1} (tf)	Park式 P _{max2} (tf)	解析値
						P _{max3} (tf)
No. 3	829	46.3	368	323 (1.14)	367 (1.00)	397 (0.93)
6	829	160.5	464	323 (1.14)	465 (0.99)	474* (0.96)
8	829	46.3	407	368 (1.11)	410 (0.99)	388 (1.05)
10	829	38.4	406	368 (1.10)	387 (1.05)	386 (1.05)
11	679	46.3	466	434 (1.07)	471 (0.99)	478 (0.97)
12	679	160.5	581	434 (1.34)	595 (0.98)	653* (1.05)
13	323	46.3	308	252 (1.22)	297 (1.04)	292 (1.05)
14	323	160.5	422	263 (1.68)	413 (1.02)	363* (1.16)

[注] カッコ内の値は実験値と計算値との比を示す。1) : コンクリートの1軸圧縮強度、* : 10,000μでは最大耐力に達しなかったことを示す。
 $P_{max1} = 0.85 \cdot \sigma_c (Ag - as) + s \cdot \sigma_y$
 $P_{max2} = 0.85 \cdot \sigma_c (Ag - Aco) + f_c' (Aco - as) + s \cdot \sigma_y$; $f_c' = 0.85 \cdot \sigma_c (Ag - as) + 4.1 \cdot \gamma \cdot (aw - woy) / (B' \cdot s)$
 ただし、Ag: 柱断面積、as, oy: 主筋断面積、降伏点、B: 柱コア幅、s: フープ間隔、
 γ: 拘束の強度増加の低減係数(0.49)、woy: P_{max}時横補強筋平均応力度。

加力節点の変位増分を平均軸ひずみ度 (ϵ_m) の増分が 250μとなるように設定した変位制御非弾性増分解析とし、 ϵ_m 値が 10,000μとなるまで解析を行った。

4. 解析結果とその考察

4.1 最大耐力

高強度RC柱の最大耐力に関する解析結果の一覧を表-3に示す。この表によれば、最大荷重の実験値と計算値との比は、累加強度式を用いた場合が1.10~1.68、Park式を用いた場合が0.98~1.05、本FEM解析の結果の場合が0.93~1.05(ただし、最大耐力が得られなかった試験体を除く(表中の"*"記号))であり、最大耐力に関する本FEM解析の結果はPark式と同程度の推定精度を有していることが分かる。

4.2 平均軸応力-軸ひずみ関係

図-3(a)および(b)は、横補強筋として普通強度筋を使用した高強度RC柱の平均軸応力度 (σ_m) - 軸ひずみ度 (ϵ_m) 関係に関する実験結果と解析結果を、それぞれ横補強筋の配筋形状別に示したものである。これらの図によれば、実験結果と解析結果とはよく一致しており、同一横補強筋比 (pw) であれば、横補強筋を田状に配筋した場合 (No. 3 試験体) に高強度RC柱の圧縮靱性の改善効果が最も大きく、次に□+○状 (No. 8試験体)、□状 (No. 10試験体) の順に次第に圧縮靱性の改善効率が低下していく傾向が読み取れる。なお、実験結果では横補強筋を□状に配筋した No. 10試験体の場合、最大耐力後軸ひずみ度の増大とともにやや急激な耐力低下

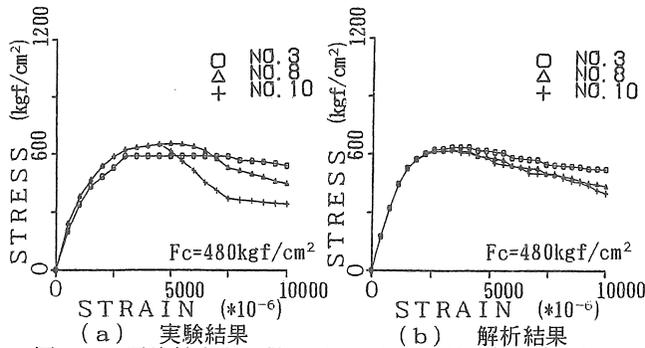


図-3 平均軸応力-軸ひずみ関係 (配筋形状の影響)

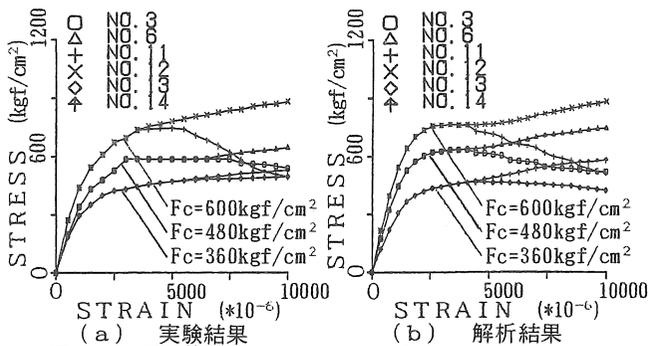


図-4 平均軸応力-軸ひずみ関係 (コンクリート強度および横補強筋強度の影響)

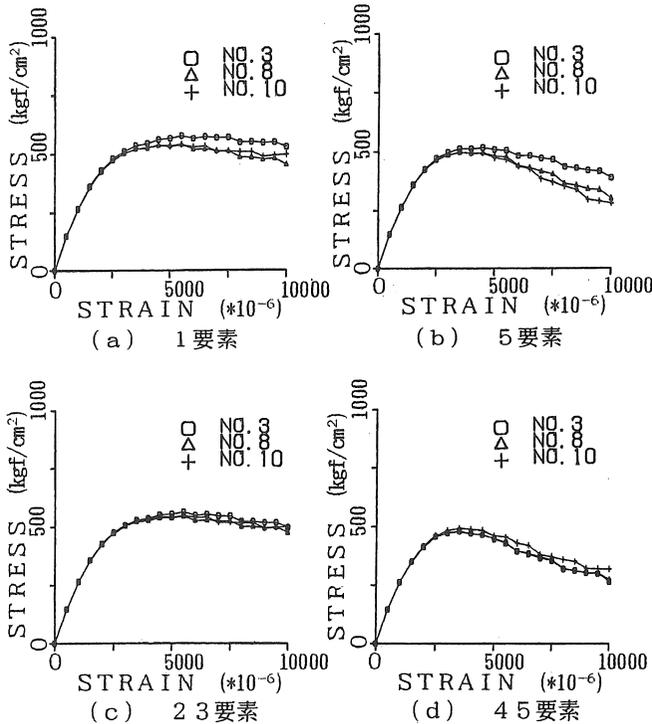
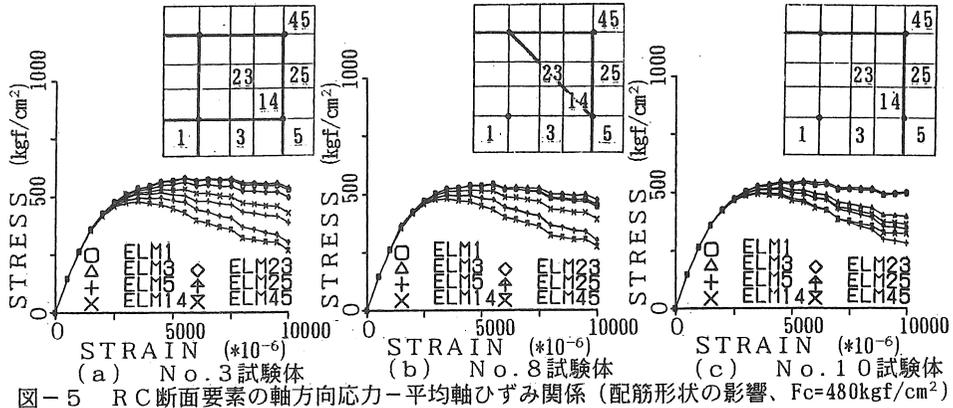
が観察されるが、解析結果では実験結果ほどの急激な耐力低下は認められない。これは、おそらく本解析では考慮していない被りコンクリートの剥落の影響によるものと思われる。

図-4は、横補強筋を罫状に配筋した高強度RC柱の $\sigma_m - \epsilon_m$ 関係に及ぼすコンクリート強度および横補強筋の降伏点の影響を示したもので、図(a)が実験結果、図(b)が解析結果である。これらの図によれば、 $\sigma_m - \epsilon_m$ 関係に関する実験結果と解析結果は、極めてよく一致していることが分かる。横補強筋として高強度筋を使用した試験体 (No. 6、No. 12および No. 14) について注目してみると、平均軸ひずみ度が10,000 μ までの範囲では横補強筋が降伏していないこともあって、 $\sigma_m - \epsilon_m$ 関係は、コンクリート強度に応じて平行移動したような形状を示し最大耐力は観察されないが、横補強筋として普通強度筋を使用した試験体 (No. 3、No. 11およびNo. 13) の場合には、高強度RC柱が最大耐力に達した直後に横補強筋が降伏し、以後軸ひずみ度の増大とともに平均軸応力度 (σ_m) は 徐々に低下し、かつ応力下降域の勾配はコンクリート強度が大きいほど大き

くなっている。このことは、横補強筋の降伏点の相違が高強度RC柱の圧縮靱性に及ぼす影響は、コンクリート強度が大きい試験体ほど著しいことを意味しており、この点を本FEM解析においても確認することができた。

4.3 横補強筋の拘束効果

図-5(a)~(c)は、高強度RC柱 (No. 3、No. 8およびNo. 10 試験体) の中央断面 (1/8の解析モデルでは前掲の図-2に示す要素分割図の下端部) での各コンクリート要素の軸方向応力度 (σ_c) - 平均軸ひずみ度 (ϵ_m) 関係を横補強筋の配筋形状別に示したものである。これらの図によれば、高強度RC断面内の各コンクリート要素の $\sigma_c - \epsilon_m$ 関係の変動は、横補強筋を罫状に配筋した場合 (図-5(a)参照) が最も大きく、次に $\square + \circ$ 状試験体 (図-5(b)参照)、 \square 状試験体 (図-5(c)参照) の順に小さくなる傾向を示している。特に、横補強筋を罫状に配筋した場合には、コア部のコンクリート要素 (1、3、14および 23要素) の $\sigma_c - \epsilon_m$ 関係は、23要素よりも1および3要素の方が延



性的な性状を示しているが、横補強筋を□+○状および□状に配筋した場合には、23要素が最も延性的な挙動を示している。また、図-6 (a) ~ (d) は、前掲の図-5 に示した結果の一部 (1、5、23 および 45 要素) を要素別に示したものである。これらの図より、被りコンクリート要素 (5 および 45 要素) の $\sigma_c - \varepsilon_m$ 関係は、周辺要素の影響のために、横補強筋の配筋形状によって若干相違しているが、 $\sigma_c - \varepsilon_m$ 関係の形状はコアコンクリート (1 および 23 要素) と比較して脆性的となっていることが分か

る。ただし、横補強筋を田状に配筋した場合 (No. 3 試験体) の 5 要素の $\sigma_c - \varepsilon_m$ 関係が、他の配筋形状の試験体に比べてやや延性的な性状を示しているが、これは、No. 3 試験体では 5 要素に隣接して横補強筋が 2 本配筋されているために、5 要素に隣接した横補強筋による拘束効果が他の配筋形状の試験体よりも大きくなっているためと考えられる。これに対して、コア部のコンクリート要素 (1 および 23 要素) の $\sigma_c - \varepsilon_m$ 関係は、23 要素の $\sigma_c - \varepsilon_m$ が横補強筋の配筋形状の影響を殆ど受けていないことを除けば、

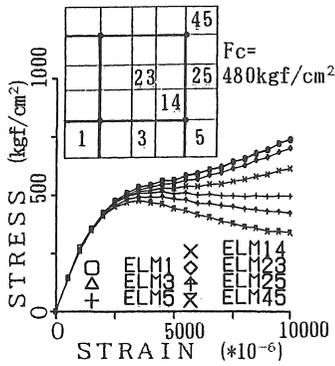


図-7 RC断面要素の軸方向応力-平均軸ひずみ関係 (高強度横補強筋を用いた場合)

一般に横補強筋を□状、□+○状および罫状に配筋した順に延性的な性状となっている。

以上のことから、高強度RC柱の圧縮靱性を横補強筋によって効果的に改善させるためには、横補強筋の配筋形状と高強度RC断面内のコンクリート要素の応力分布との関係を明らかにする必要のあることが分かる。

図-7は、高強度横補強筋を罫状に配筋したNo.6試験体 ($F_c=480\text{kgf/cm}^2$) の $\sigma_c-\epsilon_m$ 関係を前掲の図-5と同様の方法で整理した結果である。この試験体では、平均軸ひずみ度 (ϵ_m) が10,000 μ までの範囲では横補強筋は降伏しておらず、横補強筋による3軸拘束力は平均軸ひずみレベルが大きくなるとともに増大するため、コア部のコンクリートはいずれの要素(1、3、14および23要素)も応力上昇域にある。また、被りコンクリート要素(5、25お

よび45要素)の $\sigma_c-\epsilon_m$ 関係を前掲の図-5(a)に示した結果と比較すると、45要素以外の被りコンクリート要素は横補強筋による拘束効果とその降伏点に応じてある程度相違していることが分かる。なお、45要素が横補強筋強度の影響を殆ど受けていないのは、この要素が横補強筋要素に隣接していないためであろう。

図-8(a)および(b)は、それぞれコンクリートの設計基準強度 F_c を360および600 kgf/cm^2 とし、普通強度の横補強筋を罫状に配筋した試験体 (No.13およびNo.11試験体) の $\sigma_c-\epsilon_m$ 関係を前掲の図-5と同様の方法で整理した結果である。これらの図および前掲の図-5(a)から明らかなように、高強度RC断面内のコンクリートの $\sigma_c-\epsilon_m$ 関係は、要素の位置にかかわらずコンクリート強度の増大とともに脆性的な挙動を示している。したがって、高強度コンクリートの靱性改善を横補強筋による拘束効果に期待して行おうとする場合には、横補強筋によるコンクリートの拘束効果とコンクリート強度との関係について十分に検討しておく必要があるといえる。

5. 結論

本研究では、横補強筋による高強度RC柱の靱性改善効果の解明を目的とした基礎的研究として、3次元非弾性有限要素法を適用した解析によって一連の検討を行った。本研究によって得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

1) 3軸応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係

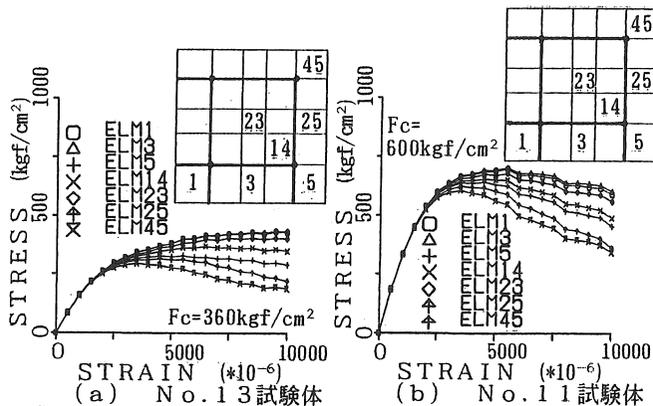


図-8 RC断面要素の軸方向応力-平均軸ひずみ関係 (コンクリート強度の影響)

の表示にエンドクロニック理論を適用した3次元有限要素法による解析結果は、高強度RC柱の1軸圧縮実験の結果とよく一致した。

- 2) 横補強筋によるRC柱の靱性改善効果は、横補強筋の降伏点や配筋形状によって相違するため、RC柱の圧縮靱性を横補強筋によって効果的に改善するには、横補強筋の降伏点および配筋形状とRC断面内のコンクリートの応力分布との関係を明らかにしておく必要がある。
- 3) 横補強筋の降伏点および配筋形状が同一であっても、RC柱の圧縮塑性変形挙動はコンクリート強度によって相違し、一般にコンクリート強度が大きいほど脆性的な挙動を示す。

【謝 辞】

解析に際して有益なる御助言を賜りました(株)トータル・インフォメーション・サービスの金刀督純氏に謝意を表します。また、解析結果の整理に際して御助力を得た本学大学院生の山本正岳君および学部学生の渡部 憲君に対して謝意を表します。なお、数値計算に際しては、愛知工業大学計算機センターのスーパーコンピュータCRAY X-MP/14seを使用したことを付記する。

【引用文献】

- 1) 谷川恭雄、山田和夫、畑中重光、柴田辰正：高強度・超高強度コンクリートの圧縮強度の試験方法並びに変動に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第1号、pp.231-236、1990.6
- 2) 山本俊彦、本田義博、白都 滋、大滝 健：高強度鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究（その1実験概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.739-740、1989.10
- 3) 本田義博、山本俊彦、白都 滋、大滝 健：高強度鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究（その2 一軸圧縮引張実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.739-740、1989.10
- 4) 小阪義夫、谷川恭雄、山田和夫：エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析－第1報：解析方法－、日本建築学会論文報告集、第326号、pp.78-90、1983.4
- 5) 小阪義夫、谷川恭雄、山田和夫：エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析－第2報：本解析手法の特徴および解析結果と実験結果との比較検討－、日本建築学会論文報告集、第330号、pp.9-23、1983.8
- 6) 小阪義夫、谷川恭雄、山田和夫：エンドクロニック理論による鉄筋コンクリートの非弾性解析－第3報：鉄筋コンクリート部材の力学挙動に及ぼすコンクリートの非均質性の影響－、日本建築学会構造系論文報告集、第354号、pp.1-11、1985.8
- 7) Bazant, Z.P. and Bhat, P.D. : Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete, Jour. of EM-Div., Proc. of ASCE, Vol.102, No.EM4, PP.701-722, Aug. 1976
(受理 平成4年3月20日)