

論文

[1032] 高強度コンクリートの一軸圧縮応力-歪に関する実験的研究

正会員 ○八木 敏行 (不動建設 技術開発室)
 正会員 森 浩之 (不動建設 技術開発室)
 石丸 麟太郎 (香 建 築 事 務 所)
 正会員 末永 保美 (横浜国立大学 工学部)

1. はじめに

我が国では31mを超える高層建築物を鉄筋コンクリート造で設計する場合、コンクリートの塑性域での応力と歪の関係を考慮した終局強度型の設計が一般的に行なわれている。この場合に使用されるコンクリートの設計基準強度は現在のところ270~480kgf/cm²程度となっている。

終局強度型の設計を行なう際に常に問題となるのが、曲げ部材の終局時における圧縮域のストレスブロックのモデル化である。既往の実験^{2) 3) 4)}を総合すると、すでに圧縮強度170~800kgf/cm²のコンクリートについて一軸圧縮時の応力下降域を含んだ完全な応力度-歪度の関係曲線(以下、 $\sigma-\epsilon$ 曲線と呼ぶ)が報告されている。ただし、これらの実験に使用された試験装置および試験方法は研究者が各々開発したものであり、試験方法としては現在まで一般化されていないのが実状である。また、 $\sigma-\epsilon$ 曲線のモデル化は梅村式⁵⁾、六車式⁶⁾をはじめとして数多く発表されている¹⁾ものの未だ定説とされているものはない。特に、高強度コンクリートについては先ほど述べた通り試験方法が一般化されていないことや、塑性域での破壊状態が不安定となることなどのため、一つの提案式が必ずしもすべての実験とよい適応を示すとは言い難い状況である。ところで、実際の設計においては、ストレスブロックのモデルと一軸圧縮試験で得られた $\sigma-\epsilon$ 曲線が多少違っていても、ストレスブロック係数がほぼ等しければ実用上問題はなく、この意味においてACI式¹⁾は実用に即した平易な式となっている。

筆者らは、円柱供試体(直径150mm、高さ300mm)を用いて200tfアムスラー型万能試験機による一軸圧縮試験を行い、水セメント比、骨材および養生条件が高強度コンクリートの物性に与える影響を調べた。同時に、コンプレッソメータを用いて $\sigma-\epsilon$ 曲線を測定し、既往の代表的なモデルの形状およびストレスブロック係数との比較を行った。さらに、仮定断面に対して実験値と各モデルを用いて曲げ終局時の中立軸比、断面抵抗モーメントを算定し、どの提案式がより実用的な設計式となり得るかを検討した。

2. 試験体

試験体の種類およびコンクリートの調合を表-1に示す。

表-1 試験体の種類およびコンクリートの調合

実験番号	試験体記号	調合強度 (kgf/cm ²)	コンクリートの 種 別	養生方法	水セメント比 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
実験 I	N270-W	270	普通コンクリート	水中	66.4	256	170	891	978	5.12
	N270-A	270	普通コンクリート	気乾						
	N360-W	360	普通コンクリート	水中	50.7	335	170	807	996	6.03
	N360-A	360	普通コンクリート	気乾						
	N420-W	420	普通コンクリート	水中	45.2	376	170	773	996	7.14
	N420-A	420	普通コンクリート	気乾						
実験 II	L360-W	360	軽量コンクリート	水中	45.6	373	170	739	644	6.71
	L360-A	360	軽量コンクリート	気乾						
	N600-W	600	普通コンクリート	水中	35.0	486	170	705	993	10.33
	N800-W	800	普通コンクリート	水中	27.0	630	170	607	971	21.42

(スランプ18±2cm、空気量4±1%)

実験 I では、調合強度270~420kgf/cm²のコンクリートについて水セメント比、骨材および養生条件の違いがコンクリートの物性や $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす影響を調べた。実験 II では、調合強度600kgf/cm²および800kgf/cm²のコンクリートについて水中養生を行い、実験 I のグループとの違いを調べた。水中養生(記号:W)時の水温は20℃、気乾養生(記号:A)時の気温は20℃、湿度は65%である。円柱供試体の寸法は直径150mm、高さ300mmで各水準ともに20体ずつ製作した。

コンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は砕砂と川砂を容積比1:1で混合した混合砂、粗骨材は普通コンクリート(記号:N)に碎石(粒径5~20mm)、軽量コンクリート(記号:L)に人工軽量骨材(粒径5~20mm)、混和剤は高性能A E減水剤、水は水道水である。

3. 試験方法

試験方法はJIS-A1108に準拠し、載荷装置は200tf万能試験機を使用した。荷重の検出は200tf万能試験機から直接行い、歪度の検出は写真-1に示すようにコンプレッソメータに取り付けた2個の変位計(感度0.002mm)より行なった。検長は供試体の中央部150mmとした。

4. 高強度コンクリートの物性

実験結果を表-2、図-1~図-3に示す。

(1) 圧縮強度

圧縮強度 σ_a を養生条件の違いで比較すると、N270で水中養生が気乾養生よりも8%ほど高い値を示した。N360、N420およびL360では、養生条件の違いによる圧縮強度の違いはあまり見られなかった。

圧縮強度を水セメント比の違いで比較すると、図-1に示すように水セメント比が27~66%の普通コンクリートでは水セメント比が減少するにつれて圧縮強度は直線的に増加する傾向にある。

(2) 圧縮強度時の歪度

圧縮強度時の歪度 ϵ_a は平均で、N270、N360、N420で0.18~0.24%、L360で0.29%、N600、N800で0.23~0.25%の値を示した。圧縮強度時の歪度を養生条件の違いで比較すると、N270、N360、N420では気乾養生が水中養生よりも多少高い値を示しているが、L360では、養生条件の違いによる差は見られなかった。

水中養生を行なった供試体に対し、圧縮強度時歪度の平均値の95%信頼区間をt分布より求め、図-2に示すように既往の提案式と比較すると、信頼区間での歪度は浜田式⁹⁾、六車式⁶⁾、Popovics式¹⁾よりも大きくなっている。

最小2乗法により σ_a と ϵ_a の関係式を求める

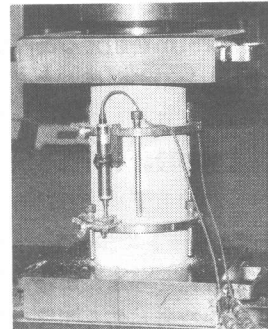


写真-1 試験装置

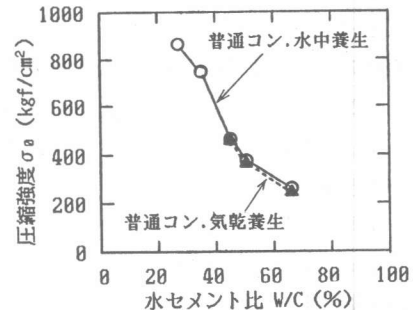


図-1 圧縮強度と水セメント比の関係

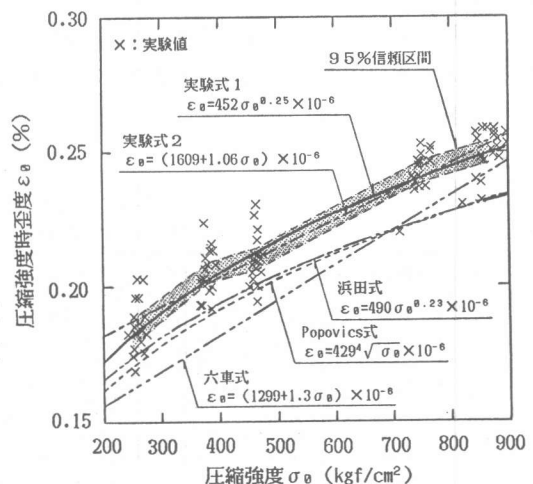


図-2 圧縮強度と圧縮強度時歪度の関係

と、 $\varepsilon_0 = 452 \sigma_0^{0.25} (\times 10^{-6})$ (実験式1) または、
 $\varepsilon_0 = 1609 + 1.06 \sigma_0 (\times 10^{-6})$ (実験式2) となっている。

(3) ヤング係数

ヤング係数はJIS原案に従い $50 \mu \sim (1/3) \sigma_0$ のセカントモデュラス E_c を求めた。

図-3に示すように日本建築学会のRC構造計算規準による計算式と比較するとN270、N360、N420の場合、実験値は計算値よりも高い値を示している。L360の場合、実験値は計算値よりも少し低い値を示している。N600、N800の場合、実験値は計算値とほぼ一致している。

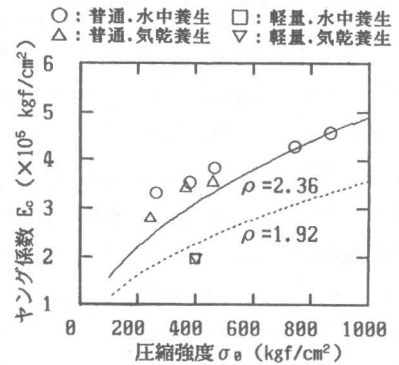


図-3 圧縮強度とヤング係数の関係

表-2 実験結果一覧表 (平均値)

試験体記号	単位容積重量 (ton/m ³)	材令 (日)	最大荷重時		破壊時		ヤング係数 E _c	
			応力度 σ ₀ (kg/cm ²)	歪度 ε ₀ (%)	応力度 σ _u (kg/cm ²)	歪度 ε _u (%)	実験値 ×10 ⁵ (kg/cm ²)	計算値 ×10 ⁵ (kg/cm ²)
N270-W	2.37	25	262	0.18	-	>0.3	3.32	2.51
N270-A	2.31	23	242	0.24	-	>0.3	2.79	2.32
N360-W	2.35	28	379	0.20	367	0.28	3.53	2.98
N360-A	2.32	25~26	367	0.22	335	>0.3	3.42	2.88
N420-W	2.37	26~27	466	0.21	443	0.29	3.84	3.35
N420-A	2.34	24~25	460	0.23	428	>0.3	3.54	3.26
L360-W	1.96	25~26	399	0.29	390	>0.3	1.97	2.32
L360-A	1.89	23	403	0.29	399	>0.3	1.98	2.22
N600-W	2.41	40~41	744	0.23	741	0.26	4.27	4.34
N800-W	2.45	44	865	0.25	864	0.27	4.55	4.80

注) 破壊時: 最大荷重以降において供試体が脆的に崩壊する直前の時点

5. σ-ε 曲線

(1) 実験結果

供試体20個の実験値を平均して得られたσ-ε曲線を図-4に示す。N270では、応力下降域においてゆるやかな耐力低下を示し、歪度が0.5%を超えても脆性破壊を起こさず、σ-ε曲線を測定することができた。N360、N420では、最大荷重以降の応力下降域において歪度が0.3%前後でσ-ε曲線の負勾配が試験機の剛性を上回り、脆性破壊を起こすため完全なσ-ε曲線を測定することはできなかった。

L360やN600、N800では最大荷重直後にσ-ε曲線が急激に負勾配に転じ、試験機の剛性をはるかに上回るため爆裂破壊を起こし、応力下降域でのσ-ε曲線を測定することはできなかった。

本実験で使用した200tf万能試験機の剛性はN270における最大負勾配時の剛性が60t/mm程度であったことから判断しておよそ60~70ton/mm程度と思われる。一方、応力下降域においてσ-ε曲線の測定がやや不十分であったN360、N420の最大負勾配時の剛性は既往の実験²⁾から推察すると70~100ton/mm程度、応力下降域での測定が不可能だったL360やN600、N800の最大負勾配時の剛性は100ton/mm以上であると思われる。

(2) 提案式との比較

実験で得られたσ-ε曲線と梅村式⁵⁾、六車式⁶⁾、CEB-FIP式¹⁾、Popovics式¹⁾を比較して図-5~図-8に示す。

梅村式は圧縮強度が200kgf/cm²程度の普通コンクリートに対して最大応力度以降のσ-ε曲線を近似させることを主眼としており、一般に初期弾性係数E_iは実験値よりも高くなる傾向にある。

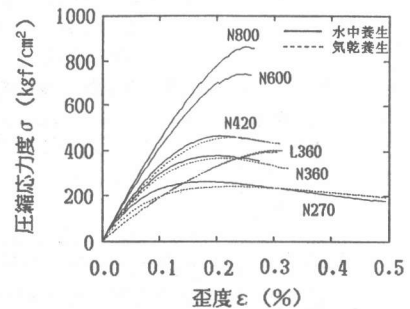


図-4 σ-ε 曲線 (実験値)

N270と比較して、 E_i から歪度0.5%に至るまで全体的によく一致している。N360と比較して、 E_i から実験で測定できた歪度0.3%に至るまで全体的によく一致している。N420と比較して、 E_i は多少高いものの、最大荷重時から歪度0.3%に至るまではよく一致している。L360やN600、N800と比較すると E_i はかなり高くなっている。六車式は圧縮強度が150~700kgf/cm²程度の普通コンクリートに対する提案式で、 E_i を E_0 の1.1倍としている。N270、N360、N420やN600、N800と比較して、 E_i はよく一致しているがN270、N360、N420の応力下降域ではあまり一致していない。CEB-FIP式は、圧縮強度が200~600kgf/cm²程度の普通コンクリートを対象としており、梅村式よりは E_i がやや低く、N270、N360、N420と E_i はよく一致している。最大荷重時以降は直線となるため実験値との対応はあまり良くないようである。Popovics式は圧縮強度が50~520kgf/cm²程度の普通コンクリートに対する提案式で、今回取り上げた4つの提案式の中で実験値と最もよく一致しており、L360を除いたN270、N360、N420やN600、N800に対して E_i や最大荷重時歪度はよく一致している。応力下降域での負勾配はやや大きい値を示している。

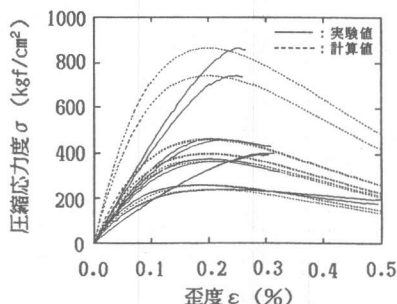


図-5 $\sigma - \epsilon$ 曲線 (実験値と梅村式の比較)

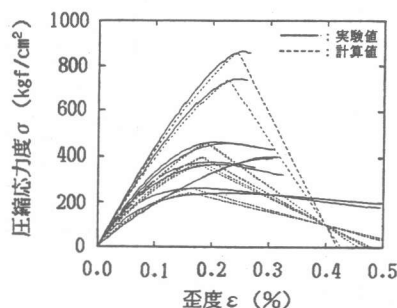


図-6 $\sigma - \epsilon$ 曲線 (実験値と六車式の比較)

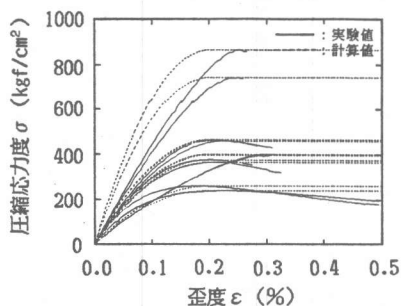


図-7 $\sigma - \epsilon$ 曲線 (実験値とCEB-FIP式の比較)

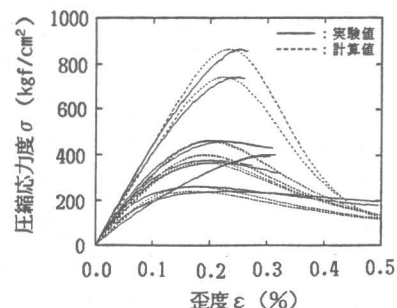


図-8 $\sigma - \epsilon$ 曲線 (実験値とPopovics式の比較)

[$\sigma - \epsilon$ 曲線の提案式]

$$\text{梅村式}^5) : \eta = 6.75(e^{-0.812\xi} - e^{-1.218\xi})$$

$$\begin{aligned} \text{六車式}^6) : \sigma &= E_i \cdot \epsilon + (\sigma_0 - E_i \cdot \epsilon_0) \xi^2 & : 0 \leq \xi \leq 1 \\ \sigma &= \{(\sigma_0 - 100) / (\epsilon_{cu}' - 0.004)\} \epsilon + (100 \epsilon_{cu}' + 0.004 \sigma_0) / (\epsilon_{cu}' - 0.004) & : 0 \leq \xi \leq 1 \\ \epsilon_{cu}' &= (1.3 \sigma_0 + 1299) \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CEB-FIP式}^1) : \eta &= 2\xi - \xi^2 & : 0 \leq \xi \leq 1 \\ \eta &= 1 & : 1 \leq \xi \leq k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Popovics式}^1) : \eta &= \frac{n \cdot \xi}{(n-1) + \xi^n} & n = (0.57 \times 10^{-2} \times \sigma_0) + 1 \\ & & \epsilon_0 = 429 \sqrt{\sigma_0} \times 10^{-6} \end{aligned}$$

ここで、 $\eta = \sigma / \sigma_0$ 、 $\xi = \epsilon / \epsilon_0$ 、 $E_i = 1.1E_0$ 、 σ_0 : 円柱供試体の圧縮強度、 ϵ_0 : 圧縮強度時の歪度、 E_0 : ヤング係数

6. ストレスブロック係数

(1) 実験結果

実験で得られた $\sigma - \epsilon$ 曲線より終局歪を0.3%とした時のストレスブロック係数を求め、圧縮強度との関係を調べたところ、図-9、図-10に示すように普通コンクリートでは圧縮強度の増加にと

もなって $k_1 k_3$ の値は0.5、 k_2 の値は0.33に近づいてゆき、ストレスブロックは三角形に近い形状となる傾向にある。

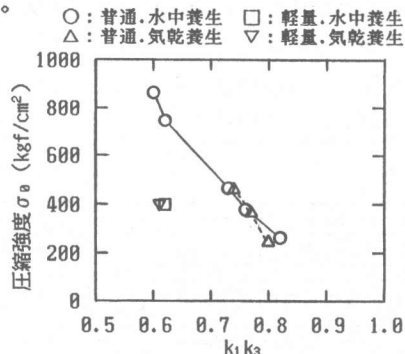


図-9 ストレスブロック係数 $k_1 k_3$ (実験値) と圧縮強度の関係

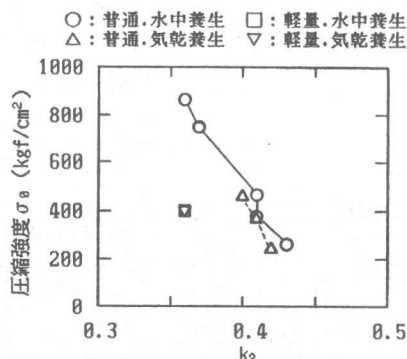


図-10 ストレスブロック係数 k_2 (実験値) と圧縮強度の関係

(2) 提案式との比較

実験値の係数と、ACI式¹⁾、梅村式⁵⁾、六車式⁶⁾、CEB-FIP式¹⁾、Popovics式¹⁾で与えられる係数とを比較して表-3に示す。

ACI式は実験値と比較してN270、N360、N420やL360に対し $k_1 k_3$ の値は多少小さくなっているが k_2 の値はほぼ同じ値となっている。N600、N800に対しては $k_1 k_3$ 、 k_2 の値はかなり小さくなっている。梅村式は圧縮強度が変化しても $k_1 k_3$ 、 k_2 の値は一定であり、実験値と比較して $k_1 k_3$ および k_2 の値はN270、N360、N420でほぼ同じ値となっている。L360およびN600、N800に対しては多少大きい値となっている。六車式はN270、N360、N420に対して $k_1 k_3$ および k_2 の値は多少小さくなっている。L360に対し $k_1 k_3$ および k_2 の値は多少大きくなっている。N600、N800に対してはほぼ同じ値となっている。CEB-FIP式は梅村式と同様に圧縮強度が変化しても $k_1 k_3$ 、 k_2 の値は一定であり、実験値と比較して $k_1 k_3$ および k_2 の値はN270、N360、N420でほぼ同じ値となっている。L360およびN600、N800に対しては多少大きい値となっている。Popovics式はL360に対し $k_1 k_3$ および k_2 の値が多少大きくなるほかは、N270、N360、N420やN600、N800に対して $k_1 k_3$ および k_2 の値はほぼ同じ値となっている。

表-3 ストレスブロック係数の比較

試験体記号	実験値		ACI		梅村		六車		CEB-FIP		Popovics	
	$k_1 k_3$	k_2	$k_1 k_3$	k_2	$k_1 k_3$	k_2	$k_1 k_3$	k_2	$k_1 k_3$	k_2	$k_1 k_3$	k_2
N270-W	0.82	0.43	0.72	0.43	0.80	0.42	0.71	0.44	0.78	0.41	0.77	0.43
N270-A	0.80	0.42	0.72	0.43	0.80	0.42	0.71	0.44	0.78	0.41	0.78	0.43
N360-W	0.76	0.41	0.66	0.39	0.80	0.42	0.67	0.43	0.78	0.41	0.73	0.41
N360-A	0.77	0.41	0.67	0.39	0.80	0.42	0.67	0.43	0.78	0.41	0.74	0.41
N420-W	0.73	0.41	0.61	0.38	0.80	0.42	0.65	0.42	0.78	0.41	0.71	0.40
N420-A	0.74	0.40	0.61	0.38	0.80	0.42	0.65	0.42	0.78	0.41	0.71	0.40
L360-W	0.62	0.36	0.65	0.39	0.80	0.42	0.67	0.42	0.78	0.41	0.73	0.41
L360-A	0.61	0.36	0.65	0.38	0.80	0.42	0.67	0.42	0.78	0.41	0.73	0.41
N600-W	0.62	0.37	0.44	0.26	0.80	0.42	0.62	0.39	0.78	0.41	0.67	0.38
N800-W	0.60	0.36	0.37	0.21	0.80	0.42	0.61	0.38	0.78	0.41	0.65	0.37

7. 曲げ終局耐力

各提案式のストレスブロック係数 $k_1 k_3$ および k_2 の違いが曲げ部材の終局耐力に及ぼす影響を調べるため、図-11に示す仮定断面について、実験および各提案式の $k_1 k_3$ および k_2 を用いて曲げ終局時の中立軸比 X_{n1} と断面抵抗モーメント $m(=M_u/b \cdot d^2 \cdot \sigma_0)$ を求めた。仮定断面は25階建て程度のRC造建築物の下層階大梁を想定した。

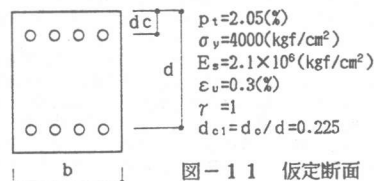


図-11 仮定断面

表-4に示すように実験値と各提案式の X_{n1} 、 m はよく一致しており、 $\sigma - \epsilon$ 曲線やストレスプロ

ック係数が実験値と多少違っても曲げ部材の終局耐力に及ぼす影響はほとんどなく、実用上はどの提案式を用いてもあまり問題にならないことを示している。また、日本建築学会のRC構造計算規準・同解説に示されている梁の曲げ終局強度略算式 ($M_u = 0.9 a_t \cdot \sigma_y \cdot d$)¹⁰⁾ より求めた m も表-4に示しているが、実験値や各提案式を用いた場合の値とよく一致している。

表-4 中立軸比、断面抵抗モーメントの比較

試験体記号	実験値		ACI		梅村		六車		CEB-FIP		Popovics		建築学会略算式	
	Xnl	m	Xnl	m	Xnl	m	Xnl	m	Xnl	m	Xnl	m	m	1.1m
N270-W	0.27	0.27	0.29	0.26	0.28	0.27	0.29	0.26	0.28	0.27	0.28	0.27	0.26	0.29
N270-A	0.29	0.29	0.30	0.28	0.28	0.29	0.30	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.31
N360-W	0.25	0.19	0.26	0.19	0.24	0.19	0.26	0.19	0.24	0.19	0.25	0.19	0.18	0.20
N360-A	0.25	0.20	0.26	0.20	0.24	0.20	0.26	0.19	0.25	0.20	0.25	0.20	0.19	0.20
N420-W	0.23	0.16	0.25	0.16	0.22	0.16	0.24	0.16	0.23	0.16	0.23	0.16	0.15	0.16
N420-A	0.23	0.16	0.25	0.16	0.22	0.16	0.24	0.16	0.23	0.16	0.24	0.16	0.15	0.16
L360-W	0.26	0.18	0.26	0.18	0.24	0.18	0.25	0.18	0.24	0.18	0.25	0.18	0.17	0.19
L360-A	0.26	0.18	0.26	0.18	0.24	0.18	0.25	0.18	0.24	0.18	0.24	0.18	0.17	0.19
N600-W	0.21	0.10	0.23	0.10	0.18	0.11	0.21	0.10	0.19	0.11	0.20	0.11	0.09	0.10
N800-W	0.20	0.09	0.24	0.09	0.17	0.09	0.19	0.09	0.18	0.09	0.19	0.09	0.08	0.09

8. まとめ

(1) コンクリートの物性

実験で得られた圧縮強度240~860kgf/cm²のコンクリートの基本的な物性は既往の実験報告⁷⁾とほぼ同じ傾向を示している。ヤング係数や圧縮強度時歪度はやや高い値を示している。圧縮強度と圧縮強度時歪度の関係については、今回の実験の範囲内で平均値の信頼区間と回帰式を示した。

(2) 試験方法

本実験で使用した200tf万能試験機の剛性は60~70ton/mm程度と思われる。そこで、円柱供試体の寸法を直径150mm、高さ300mmから直径100mm、高さ200mmへ小さくした場合、N360、N420の最大負荷時の剛性は45~70ton/mm程度に低くなると思われ、高歪域での $\sigma - \epsilon$ 曲線の測定が可能になるものと期待される。ただし、L360やN600、N800の最大負荷時の剛性は70ton/mm以上になると思われ、応力下降域での $\sigma - \epsilon$ 曲線の測定を行うには供試体の寸法をさらに小さくするか、あるいは高剛性試験機を使用する必要があるものとする。この問題については今後の研究課題としてゆくつもりである。

(3) ストレスブロック係数と曲げ終局耐力

実験値と各提案式から得られる $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状やストレスブロック係数 k_1 、 k_3 、 k_2 の値が多少違っても中立軸比 X_{nl} 、断面抵抗モーメント m はよく一致している。また、日本建築学会のRC構造計算規準に示されている梁の曲げ終局強度略算式より求めた m ともよく一致しており、実用上はどの提案式を用いてもあまり問題にならないことを示している。

〔謝辞〕

本研究に際して実験とデータ整理に御協力を戴きました横浜国大院生・渡辺明紀君、横浜国大院生・山崎和彦君（当時、横浜国大生）、竹中工務店・吉村章君（当時、横浜国大生）に謝辞を表します。

〔参考文献〕

- 岡田 清、六車 照編集：改訂新版コンクリート工学ハンドブック、pp.438~475
- 平松良雄、岡田 清、岡 行俊、小柳 治、水田義明：剛性試験機的设计・製作とコンクリートの剛性試験結果について、材料、第24巻260号、1975.5、pp.447~454
- 木山英郎、西林新蔵：コンクリートの破壊前後の応力-ひずみ挙動、土木学会論文報告、第240号、1975.8、pp.103~111
- 谷川恭雄、西山公三、小阪義夫：高剛性変位速度制御圧縮試験機の試作・開発並びにコンクリートの塑性変形挙動に関する複合材料論的考察、建築学会論文報告、第260号、1977.10、pp.9~18
- 梅村 魁：鋼筋コンクリート梁の塑性変形及び終局強度、建築学会論文報告、第42号、1951.2、pp.59~70
- 六車 照、長井英治：コンクリート圧壊ひずみに関する研究、セメント技術年報、XXX、1976、pp.362~365
- 友沢史紀、柳田佳寛、阿部道彦、田中 斉、安田正雪：高強度コンクリートの調合と基礎的物性、昭和62年度建築研究所年報、pp.49~54
- 谷川恭雄、山田和夫：各種コンクリートの応力度-ひずみ度曲線に対する Endochronic theoryの適用性、第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1981、pp.109~112
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、昭和63年版、pp.44
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、昭和63年版、pp.661