

## 論文

## [2126] 三軸圧縮応力下におけるコンクリートの力学的挙動に関する研究

正会員○辻 正哲（東京理科大学理工学部）

伊藤幸広（東京理科大学理工学部）

今木俊弥（東京理科大学大学院）

## 1. はじめに

近年、多軸応力下におけるコンクリートの構成則に関する研究が、盛んに行われるようになってきた。また、コンクリートの破壊機構に関する研究も、破壊力学のコンクリートへの適用により、近年盛んに行われるようになってきている。しかし、これらは、いずれも多軸応力下における載荷履歴、載荷速度に関するものが多く、使用材料および配合などの違いがコンクリートの変形性状に及ぼす影響を総合的に研究した例はほとんどない。

一方、Mörschによると、らせん鉄筋コンクリート柱において、コンクリートの強度は、コンクリートの一軸圧縮強度にらせん鉄筋による拘束力の6倍の強度が付加されるとして解析を行っている。<sup>1)</sup> また、昭和6年制定の土木学会のコンクリート標準示方書によると、1900年代初めの実験結果をもとに、らせん鉄筋は同量の軸方向鉄筋の3倍の効果があるとしている。<sup>2)</sup> この方法によると、Mörschの方法によって計算した場合と同一の結果となる。その後、昭和26年度版より現在のコンクリート標準示方書に至るまで、軸方向荷重に対し、らせん鉄筋は同量の軸方向鉄筋の2.5倍の効果があるとしている。<sup>3)</sup> すなわち、これはらせん鉄筋による拘束力の5倍がコンクリートの軸方向強度を増すとした場合と一致する。これらの解析方法では、らせん鉄筋による拘束力がコンクリートの軸方向強度を増加させる程度は、コンクリートの品質に関わらずほぼ一定となっている。しかし、モルタルの場合には、らせん鉄筋の拘束力の2倍程度の軸方向強度しか増加していないといった報告もある。<sup>3)4)</sup>

本研究は、使用材料、配合条件および拘束条件を変化させて実験を行い、終局耐力を推定するための実験結果を報告するものである。

## 2. 実験概要

## 2. 1 使用材料

実験で使用した粗骨材は、比重が2.64で、最大寸法が15mm（吸水率:1.28%、粗粒率:6.45）、20mm（吸水率:1.24%、粗粒率:6.49）、40mm（吸水率:0.92%、粗粒率:7.80）の山梨産の砕石である。細骨材は、比重が2.60、粗粒率が2.60の鬼怒川産の川砂である。また、使用したセメントは、普通ポルトランドセメントである。なお、コンクリートの空気量を調整するためのA E剤としては、ヴィンソル（山宗化学製）を用いた。軸方向鉄筋には、異形鉄筋（SD30A, D10）を使用し、拘束用のらせん鉄筋には、丸鋼（ $f_{py}$ : 17および38 kgf/mm<sup>2</sup>,  $\phi 6$ ）を使用した。

## 2. 2 実験計画

本実験においては、コンクリートの性質におよぼすと考えられる要因として、粗骨材の最大寸法、細骨材率、スランプ、空気量、水セメント比、材令および養生方法を取り上げ、拘束効果に与える要因としては、らせん鉄筋柱の破壊強度およびらせん鉄筋の降伏点強度を変えることにより変化する拘束力を取り上げた。そして、それぞれの要因別に、表-1に示すシリーズA~Iに分けて実験を行った。

### 2.3 実験方法

今回の実験に供した供試体は、図-1に示す通りのφ15×30cmの円柱供試体を軸方向鉄筋と拘束力を付与するらせん鉄筋により補強したものである。φ15×30cmの供試体を用いたのは、載荷試験に用いた試験機の最大荷重が200tであったためである。実験は同一条件で作成した3体の供試体について行った。なお、3体のばらつきの範囲は、後述するkで示すと、すべて平均値±0.2の範囲であった。一方、一軸圧縮強度は、3体のφ10

×20cmの円柱供試体の圧縮強度試験結果の平均値として求めた。コンクリートの打ち込み後ただちに供試体を恒温温室(20℃,湿度80%)に搬入し、24時間経過後脱型した。なお、表-1に示す水中養生は、20±2℃の恒温水槽において、所定の材令まで養生する方法であり、表-1中の気中養生は、脱型後引き続き恒温室内において所定の材令まで養生する方法である。

### 3. 解析方法

三軸圧縮応力下におけるコンクリートの強度( $f'_1$ )は、一軸圧縮強度( $f'_c$ )にらせん鉄筋による拘束圧( $\sigma'_3$ )のk倍の値が加算されたものとして、(1)式を仮定し解析した。

$$f'_1 = f'_c + k \sigma'_3 \quad \text{----- (1)}$$

今回実験を行ったらせん鉄筋量の範囲では、かぶり部のコンクリートが剥離した後に最大耐力

表-1 試験条件と主要因

シリーズ	試験条件	主要因	$f_{py}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )
A		らせん鉄筋柱の圧縮強度 $f'_1$	
B		無拘束のときの圧縮強度 $f'_c$	
C	Gmax=20(mm), s/a=50(%) W/C=55(%), スランプ=10(cm) 養生方法: 水中養生	拘束力 $\sigma'_3 = 42$ および85(kgf/cm <sup>2</sup> )	17
	Gmax=5 <sup>1)</sup> (mm), s/a=100(%) W/C=55(%), スランプ=10(cm) 養生方法: 水中養生		38
D	Gmax=20(mm), s/a=50(%) W/C=55(%), 養生方法: 水中養生	スランプ=3・10・13・16(cm)	17
E	Gmax=20(mm), s/a=50(%) W/C=55(%), スランプ=10(cm) 養生方法: 水中養生	空気量=2.0・3.3 5.8・7.2・9.0(%)	38
F	s/a=50(%), W/C=55(%) スランプ=10(cm), 養生方法: 水中養生	Gmax=5 <sup>2)</sup> ・15・20・40(mm)	38
	s/a=50(%), W/C=55(%) スランプ=10(cm), 養生方法: 気中養生		
G	Gmax=20(mm), s/a=50(%) スランプ=10(cm), 養生方法: 水中養生	W/C=45・55・65(%)	17
	Gmax=5 <sup>3)</sup> (mm), s/a=100(%) スランプ=10(cm), 養生方法: 水中養生		38
H	Gmax=20(mm), W/C=55(%) スランプ=10(cm), 養生方法: 水中養生	s/a=30・50・75・100 <sup>4)</sup> (%)	17
	Gmax=15(mm), W/C=55(%) スランプ=10(cm), 養生方法: 水中養生		
	Gmax=20(mm), W/C=55(%) スランプ=10(cm), 養生方法: 水中養生		
I	Gmax=20(mm), s/a=50(%) W/C=55(%), スランプ=10(cm) 養生方法: 水中養生	材令=7・21・28・42・91(日)	17
	Gmax=20(mm), s/a=50(%) W/C=55(%)		
	Gmax=40(mm), W/C=55(%) スランプ=10(cm), 養生方法: 水中養生		

ただし、Gmaxは粗骨材の最大寸法  
1)2)3) Gmax=5(mm)についてはs/a=100(%)となる  
4)5)についてはGmax=5(mm)となる

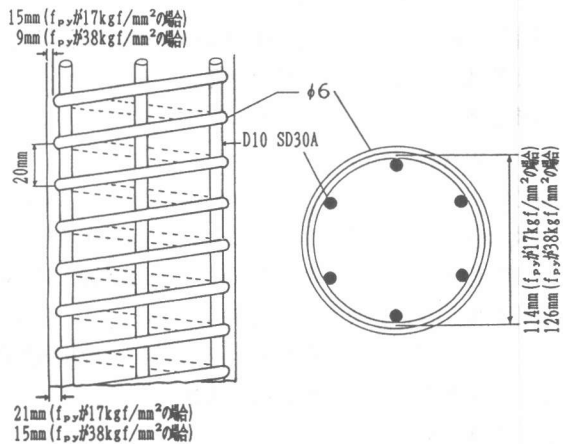


図-1 供試体の形状

に達していた。そのため、解析に当たっては、土木学会コンクリート標準示方書に示されているらせん鉄筋柱の終局荷重を求める式の場合と同様に、最大耐力はらせん鉄筋に囲まれている部分のコンクリートのみが関係すると仮定した。また、らせん鉄筋は等圧曲線（円形）状に配置されており、コンクリートに作用する内圧（ $\sigma_3$ ）と釣り合っている。そして、 $\sigma_3$  は軸方向に均一に作用するものと仮定した。すなわち、らせん鉄筋のピッチの影響は無視でき、 $\sigma_3$  は（2）式で与えられると仮定した。

$$\sigma_3' = \frac{2 \cdot A_{sp} \cdot f_{py}}{d_{sp} \cdot s} \quad \text{----- (2)}$$

ただし、 $d_{sp}$  はらせん鉄筋で囲まれた断面の直径、 $s$  はらせん鉄筋のピッチ、 $A_{sp}$  はらせん鉄筋の断面積、 $f_{py}$  はらせん鉄筋の引張降伏強度である。

以上の仮定に加えてらせん鉄筋柱の終局耐力（ $N'_{0.4}$ ）は、らせん鉄筋で囲まれたコンクリートの受け持つ耐力に、軸方向鉄筋の降伏点耐力を加算した値となると仮定し、（3）式を与えた。

$$N'_{0.4} = (f'_c + k \sigma_3') A_e + f'_y A_{st} \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 $A_e$  は、らせん鉄筋で囲まれたコンクリートの断面積、 $A_{st}$  は、軸方向鉄筋の全断面積、 $f'_y$  は、軸方向鉄筋の圧縮降伏強度である。ただし、 $f'_y$  の絶対値は、軸方向鉄筋の引張降伏強度の絶対値に等しいとして解析した。

本研究では、実験より得られた最大耐力を（3）式の $N'_{0.4}$ に代入し、 $k$ を逆算して、らせん鉄筋の拘束力の影響について検討を加えた。なお、らせん鉄筋による拘束力の最大値は、らせん鉄筋の降伏点強度より（2）式により定められると仮定したのは、現行のコンクリート標準示方書に準じたことによる。しかし、引張強度を用いるとすると、4章に示す $k$ の値は、 $f_{py}$ が、 $17 \text{ kg f/mm}^2$  および  $38 \text{ kg f/mm}^2$  の場合、それぞれ約50%および約80%となる。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4. 1 定数 $k$ と強度の関係

図-2および図-3は、それぞれ拘束下のコンクリートの強度（ $f'_1$ ）およびコンクリートの一軸圧縮強度（ $f'_c$ ）と定数 $k$ の関係を示したものである。定数 $k$ は2~8の範囲に広く分布し

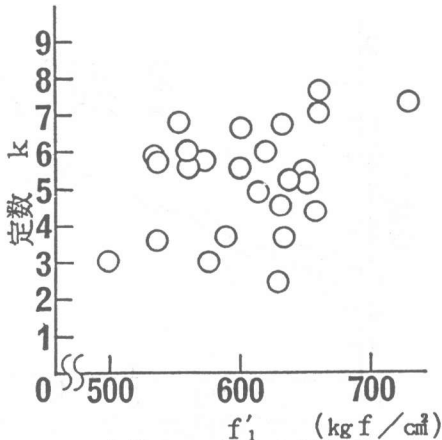


図-2 定数 $k$ とらせん鉄筋柱の圧縮強度の関係（シリーズA）

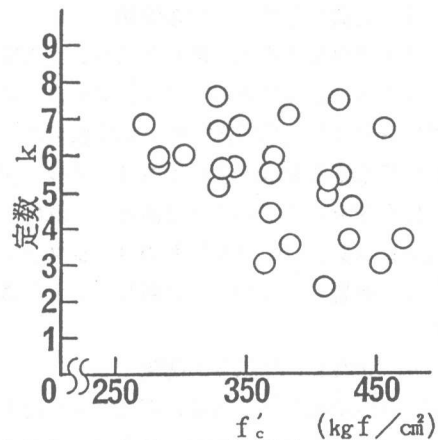


図-3 定数 $k$ と無拘束のときの一軸圧縮強度の関係（シリーズB）

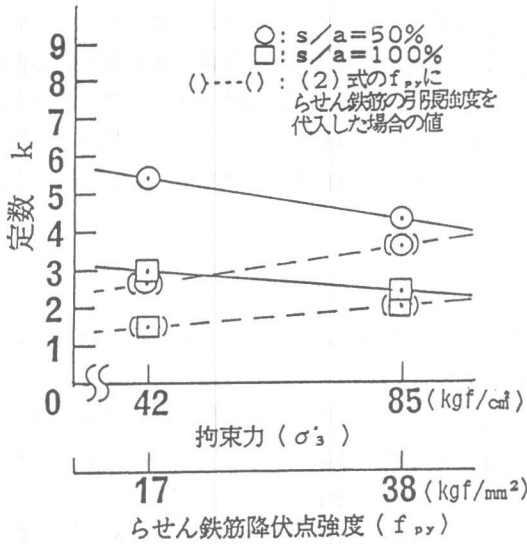


図-4 定数kと拘束力の関係  
(シリーズC)

ている。この範囲は、E. Ben-Zvi らの研究によって示された範囲とほぼ一致している。図-2では、特定の関係は認められないが、図-3では、一軸圧縮強度  $f'_c$  の増大とともに、定数kは2~4の範囲と小さな部分にも分布するようになっている。

#### 4.2 定数kと拘束力の関係

図-4はらせん鉄筋の降伏点強度を変化させてコンクリートに対する拘束力  $\sigma_3$  を変化させたときの定数kを示したものである。拘束力が大きくなると若干定数kは小さくなる傾向にある。

#### 4.3 定数kとスランプの関係

シリーズDで求めた定数kとスランプの関係は、図-5に示す通りである。スランプを3~16cmの範囲で変化させたのであるが、いずれのスランプにおいても定数kは5前後であり、スランプは定数kに影響を与えないようである。これは、定数kはフレッシュコンクリートのコンシステンシーにあまり影響されないことを表していると考えられる。

#### 4.4 定数kと空気量の関係

図-6は定数kと空気量の関係を示したものである。2~9%の範囲で空気量を変化させても、定数kの値はほとんど変化せず、空気量は定数kの支配的な要因とはなっていないようである。

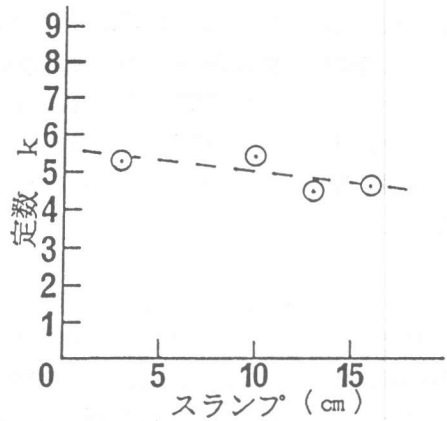


図-5 定数kとスランプの関係  
(シリーズD)

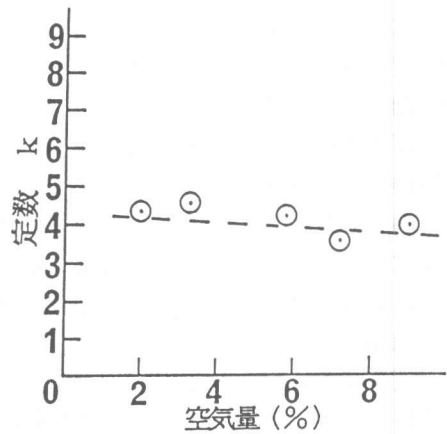


図-6 定数kと空気量の関係  
(シリーズE)

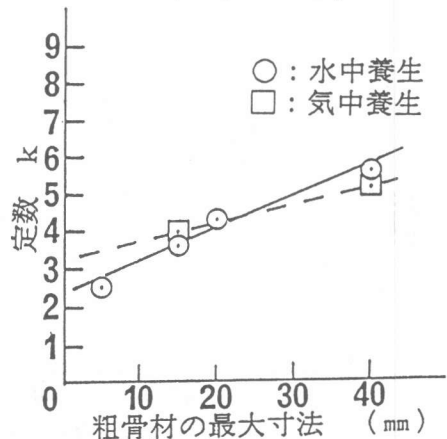


図-7 定数kと粗骨材の最大寸法の関係  
(シリーズF)

#### 4. 5 定数kと粗骨材の最大寸法の関係

粗骨材の最大寸法と定数kの関係は、図-7に示す通りである。粗骨材の最大寸法が大きくなると、定数kは直線的に大きくなる傾向にある。また、養生方法による差はほとんど認められない。粗骨材の最大寸法が20mm以下の場合には、コンクリート標準示方書で採用されている値すなわち5よりも小さくなっており、細骨材率、水セメント比、スランプが一定の場合には、最大寸法とともに定数kを変化させるのが適当と考えられる。

#### 4. 6 定数kと水セメント比の関係

水セメント比を変化させた場合の定数kは、図-8に示す通りである。細骨材率100%すなわちモルタルでは、定数kに対する水セメント比の影響はほとんど認められないものの、細骨材率50%のコンクリートでは、水セメント比の増加とともに定数kは大きくなる傾向にある。水セメント比は強度を支配する重要な要因であるため、この定数kの変化は、配合上の要因によるものか、または、セメントペーストの強度の違いによるのかは、今回の実験の範囲内では断定できなかった。

#### 4. 7 定数kと細骨材率の関係

図-9は、粗骨材の最大寸法別に、細骨材率と定数kの関係を示したものである。粗骨材の最大寸法が同一の場合、細骨材率の増大とともに、定数kは大きく低下する傾向にある。また、粗骨材の最大寸法が大きいほど、細骨材率の定数kにおよぼす影響は大きくなっている。一方、細骨材率が50%で粗骨材の最大寸法が20mmという通常のコンクリートでは、定数kは5程度となっているが、粗骨材の最大寸法が15mmと小さい場合や細骨材率が75%以上の範囲では、コンクリート標準示方書に用いられている値すなわち5よりも定数kはかなり小さくなっている。そのため、コンクリートポンプによる施工などで細骨材率を極端に大きくする場合や粗骨材の最大寸法を15mm以下と極端に小さくする場合には、定数kの値の補正が必要となる可能性が生じるとも考えられる。この傾向は、細かい骨材が増すと、定数kは小さくなることを表しているとも考えられる。このことには、供試

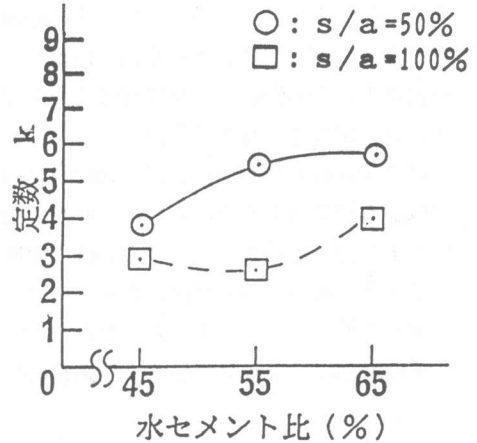


図-8 定数kと水セメント比の関係 (シリーズG)

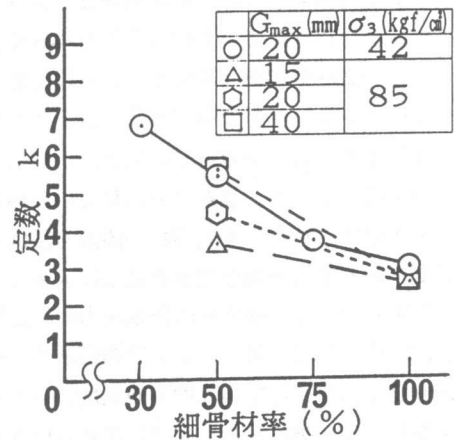


図-9 定数kと細骨材率の関係 (シリーズH)

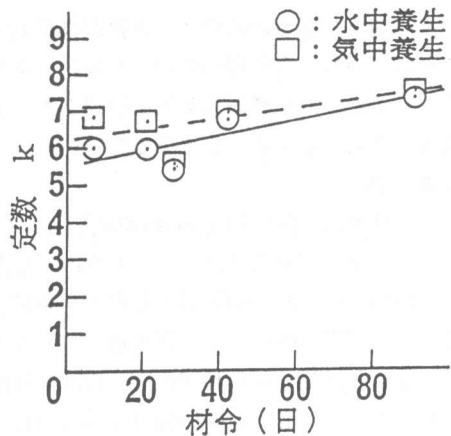


図-10 定数kと材令の関係 (シリーズI)

体の寸法が小さいことから、ピッチの影響による可能性が考えられる。しかし、モルタルについて、著者らが大型供試体を用いて以前行った実験結果<sup>3)</sup>や、既往の結果<sup>4)</sup>とも一致しているため、供試体寸法の影響による可能性は薄いと現在考えている。

#### 4. 8 定数kと材令の関係

材令と定数kの関係は、図-10に示す通りである。材令の増加とともに、定数kはほんの若干ではあるが増加する傾向にある。また、初期材令においては、気中養生を行った場合のほうが水中養生を行った場合に比べ定数kは1程度大きくなっている。しかし、材令の増加とともにその差は小さくなっていく傾向にある。材令とともにコンクリートの一軸圧縮強度は300 から500kgf/cm<sup>2</sup>と大きくなっているにもかかわらず、定数kはさほど変化していないことは、材令にともなう強度増加は、定数kにはあまり影響しないことを表しているとも考えられる。

#### 5. まとめ

本実験の範囲内で明らかとなったことは、以下の(1)～(4)の通りである。

- (1) スランプ、材令、空気量および養生方法は、定数kを支配する大きな要因とはならない。
- (2) 無拘束のときの一軸圧縮強度が大きくなると、定数kが、現行のコンクリート標準示方書に採用されている値よりも小さくなる場合が認められる。しかし、強度を要因として、一意的に定数kを定めることはできない。
- (3) 定数kは、粗骨材の最大寸法が大きくなるとともに、直線的に大きくなる傾向にある。
- (4) 定数kは、細骨材率の増大とともに、小さくなる傾向にある。

以上のことより、現在用いられている通常のコンクリートに対して、現行のコンクリート標準示方書に準じたらせん鉄筋柱の設計方法は妥当と考えられる。しかし、粗骨材の最大寸法を20mm以下とする場合や細骨材率を極端に大きくする場合には、現行のコンクリート標準示方書によって算定したらせん鉄筋柱の圧縮耐力は、危険側となる可能性がある。たとえば、モルタルの場合には、定数kは、著者らが大型の供試体を用いて測定したときの結果<sup>3)</sup>と同じく、2程度となり、示方書で採用されている軸方向強度に対するらせん鉄筋の効果の40%となっている。そのため、定数kは配合条件とともに変化させるほうが妥当かと考えられる。

#### 謝辞

本研究は、著者の内の辻 正哲が東京大学大学院に在学中に行っていた研究の一部を発展させたものであり、当時御指導頂いた岡村 甫教授に深謝の意を表す次第である。また、本実験を担当して頂いた東京理科大学理工学部土木工学科材料研究室の中川好正、伊沢孝一郎、樋口耕治の諸氏に感謝の意を表す次第である。

#### 参考文献

- 1) E. Mörsch, "Der Eisenbetonbau", Fünfte Auf. Ibd. 1 Hälfte. 1920
- 2) 土木学会, "鉄筋コンクリート標準示方書", 昭和6年9月・昭和26年6月(昭和24年制定)・昭和33年11月(昭和31年制定)・昭和61年度版
- 3) 辻 正哲・岡村 甫・原島竜一, モルタル充てん鋼管柱におけるらせん鉄筋の効果, コンクリート工学 vol. 16, No. 11, 1978年11月, pp. 103-114
- 4) E. Ben-Zvi, G. Müller and I. Rosenthal, "Symposium on Reinforced Concrete Columns", A.C. I., SP-13, 1966, pp. 193-234, "Effect of Active Triaxial Stress on the Strength of Concrete Elements".