

載荷状態の異なるコンクリートの圧縮特性について

近 藤 崇*・澤 田 知 之**・能 町 純 雄***

Study on compressive characteristics of concrete under different load

Takashi KONDO, Tomoyuki SAWADA and Sumio G.NOMACHI

要 旨

コンクリートおよび径の異なる5種類のPC鋼棒を用いた圧縮実験を行い、コンクリートの材料特性値への影響および最大応力点までに与えられたひずみエネルギーの変化を考察することとした。荷重増加と共に互いの荷重を分担する割合が変化することにより最大応力および弾性係数は低下、最大応力発生時のひずみは増加する結果が得られた。また、今回行った実験結果より、ひずみエネルギーはPC鋼棒の径が大きくなると共に低下する傾向を示したが、変化量が小さいことから実験数を増やし再度考察する必要がある。

Abstract

This paper describes various compression tests on partly-supported concrete columns under a load device with four-corner steel bars of equal diameter, for five different steel bar diameter cases. And consideration for influence characteristics of concrete and strain energy under occurring maximum stress.

The results of compressive tests, maximum stress, elastic modulus and strain energy occurring maximum stress decreased and strain occurring maximum stress increased with decreasing partial load on a concrete specimen, that's same mean increasing PC steel bar diameter .

1. まえがき

建設材料における材料特性値は、ひずみ速度や荷重速度に大きく影響を受ける^{1)~5)}。既往の研究により、最大応力および弾性係数は載荷速度または破壊までの時間の対数値に比例する結果が報告されている^{4).5)}。しかし、最大応力発生時のひずみについては、一定である⁴⁾とするものとばらつきが生じる⁶⁾とするものの両者がある。現在、載荷加速度の影響は広く認識されており、CEB-FIP Model Code⁷⁾や土木学会におけるコンクリート標準示方書⁸⁾においてもこれらの影響における関係式が採用されている。また、鉄筋コンクリート（以下、RCとする）部材における載荷速度を考慮した応力解析なども報告されている^{6).9)~14)}。しかし、RC部材は材料特性の異なる

材料からなる複合部材であるため、荷重の載荷状態により分担する割合が変化することが考えられる。このことから、RC部材中における各材料は、単一材料として行われた実験による挙動と異なると思われる。

また、コンクリートの種類、含水量の違いによるひずみエネルギー、弾性エネルギー、塑性エネルギー（損失エネルギー）の影響に関する研究¹⁵⁾は行われているが、同一条件の元に作製されたコンクリートに対する載荷条件の違いによるひずみエネルギーに関する報告は行われていない。

そこで本研究では、コンクリート円柱供試体および径を変化させた5種類のPC鋼棒を用いた圧縮実験を行いコンクリートに対する材料特性値（最大応力、最大応力発生時のひずみ、弾性係数）の変化およびコンクリートが最大応力を示すまでに与えられたひずみエネルギーの変化をまとめ、考察することとした。

* 助 手 環境都市工学科

** 教 授 環境都市工学科

*** 名誉教授 北海道大学

表-1 コンクリートの配合

w/c (%)	slump (cm)	air (%)	s/a (%)	unit weight (kg/m ³)				AE water reducing agent (cc/m ³)
				W	C	S	G	
40	12.0	6.0	40.7	183	459	669	978	1180

2. 実験および解析方法

(1) 供試体

コンクリート供試体はw/c=0.4でJIS R 1132に基づき作成したφ100mm×H200mmの円柱体である。使用材料は、普通ポルトランドセメント、細骨材（鵜川産，比重2.68，F.M.=2.73），粗骨材（静内産，比重2.77，F.M.=7.00，Gmax=25mm），混和剤（AE減水剤）とし，配合は表-1に示す。供試体は，打設後材齢1日でキャッピング，脱型後28日間水中養生とした。

(2) 荷重載荷装置

荷重載荷装置は図-1に示した形状^{16),17)}である。ここで，上面の鋼製載荷板はナットで挟み上下に可動させることができ，下面の鋼製載荷板はPC鋼棒4本で支持固定したものである。上面のナットを締めることによって試験機からの荷重の一部がPC鋼棒に負担され，最大応力発生時の急激な破壊を制御することができる。最大応力発生以降は，増加する試験機からの荷重および供試体から移行する荷重をPC鋼棒が負担することになり，供試体の崩壊を防ぐことができる。本実験では，図-2に示したようにPC鋼棒の径をφ16，φ21，φ26，φ31，φ36の5mm刻みに5種類を使用した。ここで，PC鋼棒は基準をφ36とし，その他の径はφ36のものを削り作製した。

(3) 実験方法

荷重載荷は最大載荷容量2000kNの圧縮試験器を使用し，荷重制御により行った。荷重載荷装置には，側面に2枚左右対称にひずみゲージを貼付した供試体，球座，ロードセルを図-1のように設置し，圧縮試験機加圧板間に荷重載荷装置を挿入し荷重載荷を行う。ここで，試験機からの荷重速度は，4 kN/sとした。また，偏心荷重による座屈を防ぐために荷重載荷装置のPC鋼棒の高さの中央に荷重軸方向に4枚（計16枚）ひずみゲージを添付しひずみのチェックを行いながら実験を行った。

(4) 材料特性値算出方法

計測結果より，最大応力は実験前に測定した元

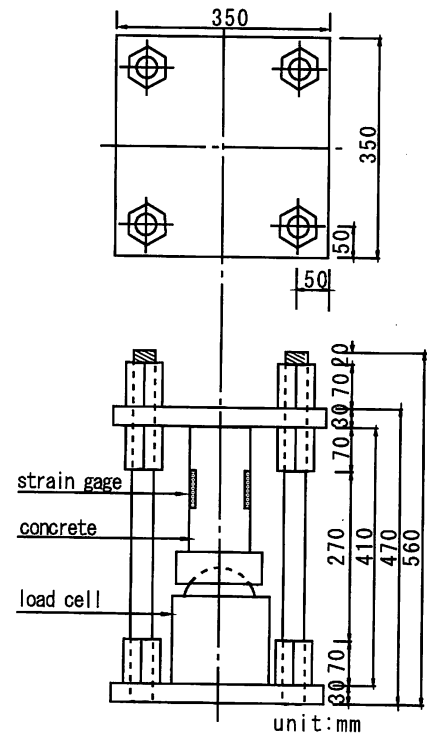


図-1 破壊緩和装置

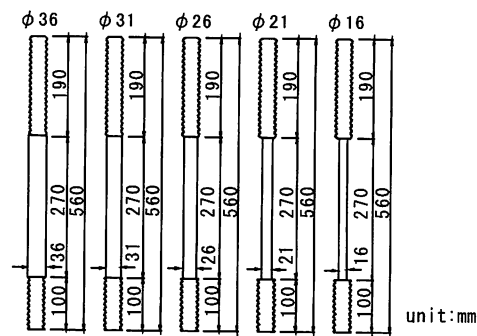


図-2 PC鋼棒の種類

断面積を最大荷重で除して求め，弾性係数は圧縮初期接線弾性係数とし，圧縮応力－ひずみ曲線の初めの接線勾配とする。よって，式(1)により求める。

$$E=\frac{d\sigma}{d\varepsilon}(\varepsilon=0) \tag{1}$$

ここで，E：初期接線弾性係数(N/mm²)

σ：応力

ε：ひずみ

(ε=0：ひずみが0を示す)

(5) ひずみエネルギーの算出方法

ひずみエネルギーは，実験で得られたコンクリートの応力－ひずみ曲線より求めることとした。

まず，ひずみエネルギー求める基本式を式(2)とする。

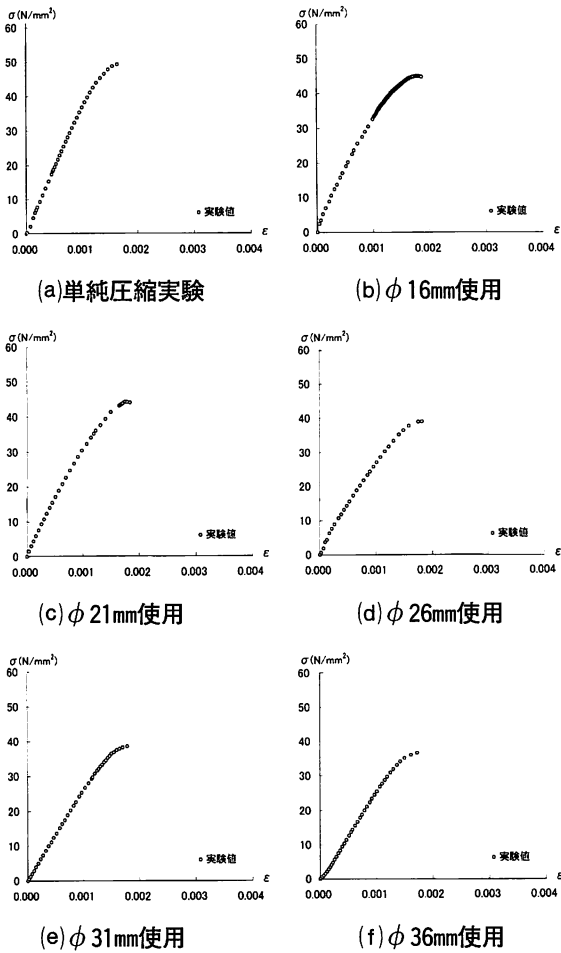


図-3 応力－ひずみ関係

$$W = \int_{l_0}^l P dl \tag{2}$$

ここで、 W ：与えられたエネルギー
 l_0 ：元の長さ
 l ：変形後の長さ
 p ：与えられた荷重
 式(3)、(4)から、式(2)を式(5)とする。

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{3}$$

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l} \tag{4}$$

$$W = A l_0 \int_0^{\epsilon_0} \sigma d\epsilon \tag{5}$$

ここで、 A ：元の断面積
 ϵ_0 ：最大応力発生時のひずみ
 すなわち、最大応力までの応力－ひずみ曲線で囲まれた面積とコンクリート供試体の元の体積との積より求める。

表-3 材料特性値

PC鋼棒	A	Ac/A	σ (N/mm ²)	ϵ_0	E(N/mm ²)
φ 0	7854	1.000	51.3	0.001736	42354
φ 16	8658	0.907	47.0	0.001793	39635
φ 21	9239	0.850	45.0	0.001829	36573
φ 26	9978	0.787	40.3	0.001957	33527
φ 31	10873	0.722	38.5	0.002026	31507
φ 36	11925	0.659	36.7	0.002142	30473

※ PC鋼棒:荷重載荷装置で使したPC鋼棒の種類
 A:総断面積(PC鋼棒の径＋コンクリートの断面積)
 Ac/A:コンクリートの断面積／総断面積

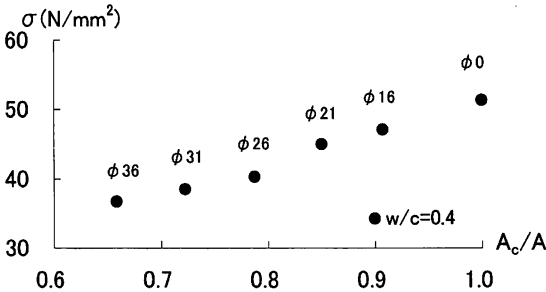


図-4 最大応力および変化

3. 実験結果および考察

(1) 材料特性値の変化

PC鋼棒の径を変化させて行った実験より得られた、コンクリートの応力－ひずみ関係を図-3(a)～(f)、材料特性値を表-2に示す。

図-3より、それぞれの応力－ひずみ曲線は上に凸の放物線を描くが、初期接線の傾きや変曲点が異なる結果が得られた。これらより、各実験におけるコンクリートの材料特性値に変化が生じていることが判明した。この原因を最大応力、最大応力発生時のひずみ、弾性係数についてそれぞれ考察する。

a) 最大応力

図-4に最大応力の変化を示す。ここで、横軸はコンクリートの断面積(A_c)とコンクリートおよびPC鋼棒の断面積(A_s)の合計($A=A_c + A_s$)の比(A_c/A)とした。

図-4より、破壊緩和装置のPC鋼棒の径が大きくなる(コンクリートの断面積の割合が低下する)に従い最大応力が低下する傾向を示している。これは、実験の進行と共に双方の荷重分担の割合が変化するためコンクリートに対する載荷速度が低下するためであると考えられる。

実験時の供試体の状態は、単純圧縮実験では大きなせん断ひび割れを生じ、最大応力発後時瞬時に上下の円錐形を残し側面のコンクリートが剥落した。しかし、破壊緩和装置を用いた実験では全

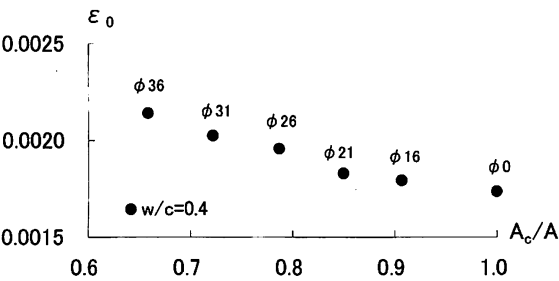


図-5 最大応力発生時のひずみの変化

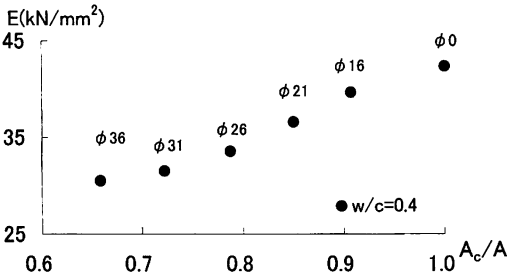


図-6 弾性係数の変化

体に多数の細かい縦ひび割れを生じ最大応力発生後、荷重が減少する過程で上下の円錐形を残し側面が崩壊する挙動を示した。通常、コンクリートが破壊する過程では、まず内部に骨材とモルタル部分にひび割れ（モルタルクラック）が生じる。そして、先端が骨材で止まり安定した状態となり変形（荷重）に抵抗する。この繰り返しが破壊または崩壊まで連続的に生じると考えられる。しかし、変形速度（載荷速度）が遅い場合には、ひび割れが安定する前の分岐や、他部にひび割れが発生し進展することとなり全体として、多数の縦ひずみと生じることにより、安定した状態が起こりにくいため最大応力が低下すると考えられる。

b) 最大応力発生時のひずみ

図-5に最大応力発生時のひずみの変化を示す。この図より、最大応力発生時のひずみは、 A_c/A の増加と共に増加する傾向を示している。単純圧縮実験の場合には、コンクリートの変形は縦ひずみの増加が大きく、横ひずみが小さいため圧縮変形に耐えられなくなり最大応力発生後瞬時に供試体が破壊する。しかし、破壊緩和装置を用いた実験では、荷重の分担率が低下することにより荷重増加の勾配が緩やかになり、縦ひずみが増加し圧縮変形に耐えられなくなる前に横ひずみが増加する時間的余裕が生じること、コンクリート内の水分の移動が可能となる等により、最大応力発生時のひずみが増加する傾向を示すと考えられる。このことは、a)において記したひび割れ発生状況か

表-3 ひずみエネルギー

PC鋼棒	A_c/A	ひずみエネルギー(J)
φ 0	1.000	76.245
φ 16	0.907	78.450
φ 21	0.850	74.613
φ 26	0.787	67.353
φ 31	0.722	62.641
φ 36	0.659	56.212

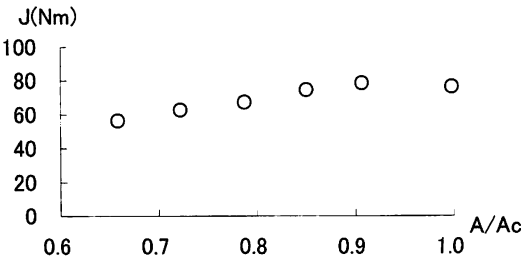


図-7 ひずみエネルギーの変化

ら、大きな縦ひび割れの発生はなく、多無数の細かな縦ひび割れが発生していることから推測できる。

c) 弾性係数

図-6に弾性係数の変化を示す。

弾性係数は、 A_c/A の増加と共に低下する傾向を示している。弾性係数は、応力-ひずみ曲線の初期接線としているためa)、b)で述べた要因により勾配が低下することから説明できる。また、ひび割れはコンクリート表面のみでなく内部でも発生していると考えられるため、破壊緩和装置を用いた圧縮実験では単純圧縮試験と比較すると同載荷重時における変形量は大きくなることも判明した。

(2) 最大応力までのひずみエネルギーの変化

表-3および図-7に最大応力までにコンクリートが受けたひずみエネルギーの変化を示す。

図-7より、破壊緩和装置に用いたPC鋼棒の径が大きくなるに従い最大応力時までにコンクリートに与えられたひずみエネルギーは低下する傾向を示している。しかし、単純圧縮実験の値が、破壊緩和装置のPC鋼棒の径をφ 16mmを使用した場合よりも小さな値を示していることについては、実験数を増やし再度検討する必要があると思われる。

同一条件のもと作製されたコンクリートが、載荷条件によって最大応力までに与えられるひずみエネルギーが異なる原因は、荷重の増加と共に分担率が低下することによりコンクリートに与えられたエネルギーがひび割れの進展や内部の水分移動に費やされるためであると考えられる。

4. ま と め

本実験結果より、コンクリートの圧縮特性として全体に占めるコンクリート断面積の低下により材料特性値に変化が生じる（最大応力および弾性係数は低下，最大応力発生時のひずみは増加）。また，最大応力までのひずみエネルギーに変化が生じ，低下する傾向を示すことが確認された。今後の課題は実験数を増やし，コンクリートの材料特性値変化の定式化を行う。また，ひずみエネルギー変化の特性を明らかにし，弾性エネルギーおよび塑性エネルギーの把握を行う必要がある。

参考文献

- 1) Bischoff, P. H. and Perry, S. H. : Compressive Behaviour of Concrete at High Strain Rates, *Material and Structures*, pp.425-450, 1991.
- 2) Dilger, W. H., Kock, R. and Kowalczyk, R. : Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates, *ACI Jurnal*, Vol.81, No.1, pp.73-81, 1984.
- 3) Soroushian, P., Choi, K. and Alhamad, A. : Dynamic Constitutive Behavior of Concrete, *ACI Jurnal*, Vol. 83, pp.251-259, 1986.
- 4) 畑野正：コンクリートの静的圧縮変形，破壊に対する時間効果，土木学会論文集，第70号，pp.32-39, 1970.
- 5) 畑野正，堤一：地震荷重を対象としたコンクリートの動的圧縮変形並びに破壊，土木学会論文集，第67号，pp.19-26, 1970.
- 6) 細谷博，阿倍勇，岡田恒男，北川良和：鉄筋コンクリート部材の耐力と破壊性状に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究－材料実験と高軸力が作用する柱部材の水平加力実験－，コンクリート工学論文集，第4巻第2号，pp.43-55, 1993.
- 7) CEB : CEB-FIP Model Code 1990, pp.48-50, 1993.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，pp.23-24, 1997.
- 9) 岩井哲，吉田望，中村武，若林實：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第314号，pp.102-111, 1982.
- 10) 小谷俊介：鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響，コンクリート工学，Vol.21, No.11,

pp.23-33, 1983.

- 11) 高橋芳彦，大野友則，太田俊昭，日野伸一：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果，構造工学論文集，Vol.37A, pp.1567-1580, 1991.
- 12) 細谷博，岡田恒男，北川良和，中埜良昭，隈澤文俊：ひずみ速度の影響を考慮したファイバーモデルによる鉄筋コンクリート部材の断面解析，日本建築学会構造論文集，第482号，pp.83-92, 1996.
- 13) 鉄筋コンクリート部材の耐力と破壊性状に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究－せん断破壊型柱部材の静的および動的水平加力実験，コンクリート工学論文集，第5巻第1号，pp.39-49, 1994.
- 14) 松浦誠，山本春行：鉄筋コンクリートはり，柱部材の非線形および時間依存性挙動，日本建築学会論文報告集，第322号，pp.37-43, 1982.
- 15) 岡田清，小柳洽，六車恵哲：含水量の異なるコンクリートの圧縮破壊過程に関するエネルギー的考察，土木学会論文報告集，第248号，pp.129-136, 1976.
- 16) 村田二郎，越川茂雄，富田嘉雄：コンクリートの応力－ひずみ曲線について，土木学会第30回年次技術講演会概要集(V)，pp.195-196, 1975.
- 17) 村田二郎，岩崎訓明：新土木実験指導書・コンクリート編，技報堂出版，pp.143-146, 1994.

(平成12年11月29日受理)

