

# 論文 定荷重繰返し圧縮载荷を受ける高強度コンクリートの損傷評価の試み

西田 浩和<sup>\*1</sup>・片寄 哲務<sup>\*2</sup>・佐藤 幸博<sup>\*1</sup>・寺岡 勝<sup>\*3</sup>

**要旨**：圧縮強度が 31~172N/mm<sup>2</sup> のコンクリートを用いて、圧縮载荷による特性および損傷を評価するために、定荷重繰返し圧縮载荷を行い、コンクリート強度の違いによる繰返し時の安定性および応力-ひずみ曲線の変化を観察し、併せて繰返し载荷前後の動弾性係数の変化を検討することにより、損傷度の評価を試みた。その結果、コンクリートの強度が高いほど繰返し時の安定性が高く、また動弾性係数の減少率が小さいことが分かった。繰返し圧縮载荷による動弾性係数の変化を捉えることで損傷度の評価の可能性があることが分かった。

**キーワード**：繰返し载荷、高強度コンクリート、圧縮強度、応力-ひずみ曲線、弾性係数

## 1. はじめに

地震荷重作用時の塑性設計法の確立のために、普通強度コンクリートを対象として定荷重繰返し圧縮载荷を与えた場合に関しては、既にながりの報告があり、いくつかの力学特性が明らかになっている<sup>1)~6)</sup>。一方、高強度コンクリートについてはほとんど検討がなされておらず、資料を蓄積する必要がある。

本論文は、圧縮強度が 31~172N/mm<sup>2</sup> のコンクリートを用いて、定荷重繰返し圧縮载荷履歴を与えた場合について、コンクリートの変形・破壊挙動を検討するとともに、繰返し载荷前後の動弾性係数からコンクリートの損傷度評価を試みたものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験計画

コンクリートがその圧縮強度よりも低い応力を受けることによって、損傷を受けることは知られており、普通強度のコンクリートを対象として繰返し圧縮载荷を加えて損傷度を評価することも行われている<sup>1)~6)</sup>。

本研究においては、普通から高強度の範囲のコンクリート供試体に単軸圧縮の载荷と除荷の繰返しを加えることにより、コンクリート強度

の違いによる損傷度の評価を試みることにした。

本研究では地震荷重作用時の塑性設計法の確立に資するために、繰返し载荷回数は、5回、10回および20回の計3種類とした。

繰返し圧縮载荷の上限応力は、損傷が大きくなる高応力部を主対象として使用コンクリートの圧縮強度の 50, 80, 90, 95%となるように設定した。下限応力は零とした。

### 2.2 調合および使用材料

表-1に調合を、表-2に使用材料をそれぞれ示す。いずれのコンクリートとも市中の生コン工場で製造したものを30~70分程度で輸送し、供試体を作製した。表-3に供試体を作製したときのフレッシュコンクリートの試験結果を示す。

### 2.3 実験概要

供試体はφ10×20cmの円柱体を用いて試験材齢まで封かん養生とし、端面は機械研磨して成形した。試験材齢は、1シリーズの試験期間内における圧縮強度差を出来るだけ少なくするために、圧縮強度の増進が緩慢になる材齢約4~7ヶ月養生してから試験に供した。

定荷重繰返し载荷には、2000kN アムスラー型試験機を用いた。比較用として、繰返し圧縮载荷を行わない供試体について応力-ひずみ関係

\*1 (株)フジタ 技術センター 工修 主任研究員 (正会員)

\*2 (株)フジタ 技術センター 工修 研究員 (正会員)

\*3 (株)フジタ 技術センター 副所長 博士(工学) (正会員)

表－1 コンクリートの調合

調合 No.	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )												混和剤使用量 (C×%)	
		W1	W2	C1	C2	C3	S1	S2	S3	G1	G2	G3	G4	SP1	SP2
σ B172	15	150	—	1000	—	—	488	—	—	837	—	—	—	1.7	—
σ B122	25	160	—	640	—	—	764	—	—	837	—	—	—	1.5	—
σ B94.5	31	—	160	—	516	—	—	884	—	—	848	—	—	1.35	—
σ B64.4	37	—	175	—	—	473	—	585	193	—	—	437	435	0.95	—
σ B31.2	52.5	—	182	—	—	347	—	614	203	—	—	461	456	—	1.2

表－2 使用材料

水 (W1)	上水道水(東京都)
水 (W2)	地下水(神奈川県)
セメント (C1)	ソリカフェウム混入セメント(密度 3.08g/cm <sup>3</sup> )
セメント (C2)	低熱ポルトランドセメント(密度 3.22g/cm <sup>3</sup> )
セメント (C3)	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材 (S1)	西茨城郡岩瀬町産砕砂 (表乾密度 2.57 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 3.02%)
細骨材 (S2)	津久井郡藤野町産陸砂 (表乾密度 2.60 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.75%)
細骨材 (S3)	市原市万田野産山砂 (表乾密度 2.57 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 3.02%)
粗骨材 (G1)	岩瀬産砕石 2005 硬質砂岩 (表乾密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.63%)
粗骨材 (G2)	青梅産砕石 2005 硬質砂岩 (表乾密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.63%)
粗骨材 (G3)	城山町小倉産砕石 2005 (表乾密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.53%)
粗骨材 (G4)	相生産砕石 2005 (表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.52%)
混和剤 (SP1)	高性能(AE)減水剤(ポリアルボン酸系)
混和剤 (SP2)	AE 減水剤(変性リグニンスルホン酸化合物)

の負勾配を含めた包絡曲線を得るために 4000kN 高剛性試験機を用いて圧縮強度試験を行った。

表－4 に試験機の違いによる圧縮強度および最大ひずみを示す。最大ひずみで若干の差はあるものの、試験機による差はほとんど無いと考えられる。圧縮強度試験時にはコンプレッソメータを用いて静弾性係数の測定も行った。載荷速度は、繰返し載荷を行わない供試体は JIS A 1108 に準拠して 5kN/秒とし、繰返し載荷する供試体は限られた時間内に所要の供試体の試験を終了させるために 10kN/秒とした。

表－5 に各調合における繰返し載荷応力の上限值の詳細を示す。供試体は設定毎に各 2 本とした。ただし、σ B64.4 は 4 種類の載荷応力比で繰返し回数 5 回、20 回の各 1 本ずつとした。

表－3 フレッシュコンクリート性状

調合 No.	スランプ または フロー(cm)	50cm フロー 到達 時間(s)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)
σ B172	71.0	12.6	1.5	18.5
σ B122	72.5	8.0	1.4	13.8
σ B94.5	62.0	9.6	1.6	22.2
σ B64.4	21.0	—	5.2	27.0
σ B31.2	17.5	—	6.0	29.0

表－4 圧縮強度試験結果

調合 No.	ラムラー型試験機			高剛性試験機				
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大ひずみ (μ)		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大ひずみ (μ)			
σ B 172	179	172	4280	172	172	4030		
	170		4100	4075		4273	4144	
	168		3845	172		4128		
σ B 122	120	122	3413	122	123	3650		
	124		3860	3596		3798	3864	
	123		3515	121		4143		
σ B 94.5	93.5	94.5	3230	92.3	93.5	3263		
	95.6		3205	3168		96.3	3303	3212
	94.3		3068	92.0		3070		
σ B 64.4	63.5	64.4	2503	68.0	68.0	2690		
	64.8		2555	2526		—	2690	
	64.8		2520	—		—		
σ B 31.2	31.3	31.2	1815	29.7	30.6	1865		
	31.3		2080	1958		31.2	1933	1929
	31.1		1980	30.9		1990		

表－5 繰返し載荷応力の上限の設定値 (N/mm<sup>2</sup>)

調合 No.	試験開始材齢 (日)	載荷応力比 (σ / σ <sub>B</sub> )				
		0.5	0.8	0.9	0.95	1.0
σ B172	151	86.2	138	155	164	172
σ B122	165	61.2	97.9	110	116	122
σ B94.5	211	47.2	75.6	85.0	89.8	94.5
σ B64.4	199	32.2	51.5	57.9	61.1	64.4
σ B31.2	118	15.6	25.0	28.1	29.6	31.2

繰返し載荷前後の動弾性係数の測定は、JIS A 1127 に準拠して行い、縦振動の 1 次共鳴振動から求めた。

### 3. 実験結果の考察

#### 3.1 定荷重繰返し圧縮载荷時の安定性

図-1は、繰返し回数と载荷応力比を主軸として、所定の繰返し回数を実施した際に破壊した供試体の関係をコンクリート強度別に示す。図中の○は所定回数繰返し载荷を実施できた供試体、●は所定回数繰返し载荷出来ずに圧縮破壊した供試体を示す。

繰返し回数1回の位置にプロットしてある3点は、圧縮強度試験結果を応力比に換算して示したものである。コンクリート強度が低いものはほとんどバラツキが見られなかったのに対して、コンクリート強度が高いものは供試体個々のバラツキが若干見られる。

载荷応力比が0.80以下の供試体は、繰返し回数が20回以下では圧縮破壊した供試体は1本も見られなかったが、0.90以上になると所定回数に達する前に圧縮破壊してしまう供試体が多く見られた。また、コンクリートの強度が高いほど、繰返し回数を10~20回行っても破壊しない供試体が多くなる傾向にあった。つまり、高強度コンクリートほど安定的な材料であると考えられる。

以上のことを確認するために圧縮破壊比率（同一载荷応力比の供試体のうち破壊した割合）と载荷応力比の関係を求め、図-2に示す。供試体数が少ないσB64.4を除けば、コンクリートの強度が高くなるほど载荷応力比が高くなっても圧縮破壊比率が小さい傾向が分かる。つまり、コンクリート強度が高いほど高応力の上限応力で定荷重繰返し圧縮载荷を受けた場合の安定性があり、破壊に至るまでの繰返し载荷回数が多くなる事が分かる。

#### 3.2 応力-ひずみ曲線の挙動

コンクリートの定荷重繰返し圧縮载荷を行った応力-ひずみ曲線のうち、载荷応力比が0.90の場合の一例を図-3に示す。ただし、σB64.4は载荷応力比が0.90で圧縮破壊した供試体が無かったので、破壊例は载荷応力比0.95の挙動を示す。

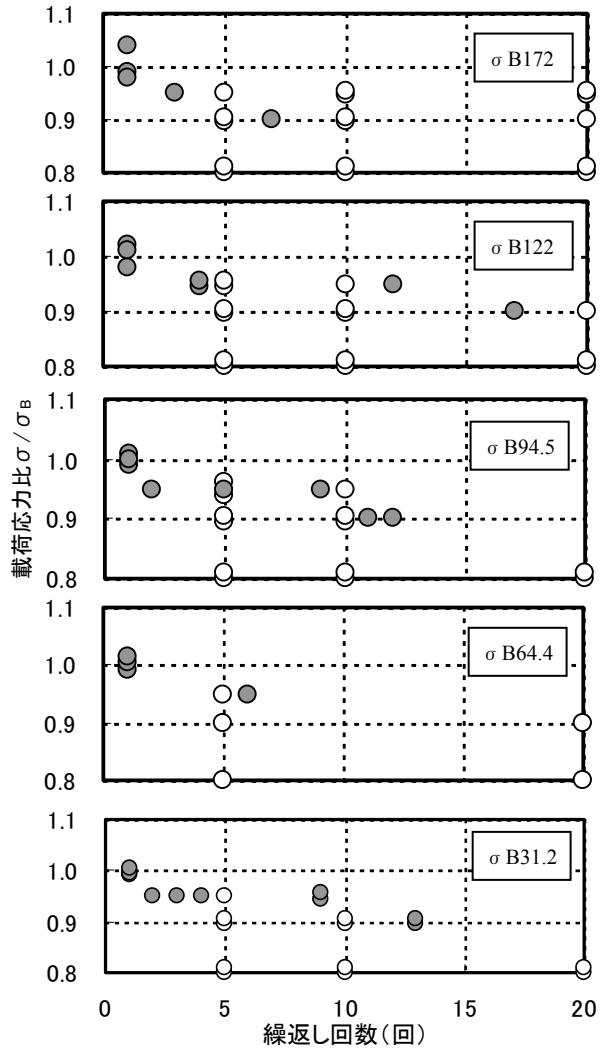


図-1 繰返し回数と载荷応力比

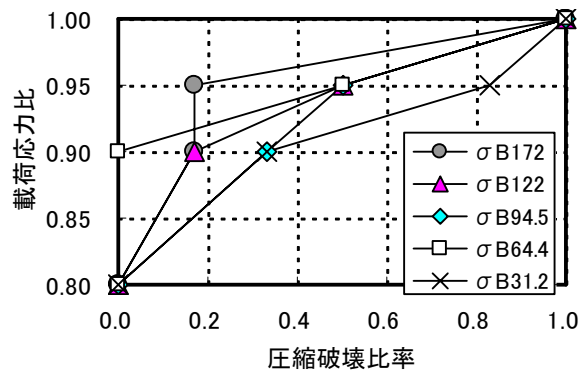


図-2 圧縮破壊比率と载荷応力比

凡例には調合 No., 载荷応力比, 繰返し回数を示す。図中の左側半分は所定繰返し回数を载荷したもの、右側半分は繰返し载荷途中で圧縮破壊したものである。図中には繰返し载荷を行っていない高剛性試験機の試験データも示す。また、圧縮破壊した供試体は横ひずみの挙動も示す。

高剛性試験機による試験結果をみると、既に指摘されているようにコンクリートの強度が高いほど最大圧縮応力到達後の強度低下が急激である。

先に述べたように荷重応力比が 0.5 または 0.8 の比較的低レベルの繰返し荷重では、応力-ひずみ曲線がほぼ同じ位置で収斂してしまい破壊に至っていない。

いずれのコンクリート強度の供試体においても繰返し荷重により最大ひずみは徐々に増大し、破壊に至った供試体では高剛性試験機で得られた包絡線に到達した近傍で圧縮破壊に至った。この特性は、普通強度に対して岡本らにより確認された特性と一致している<sup>2)</sup>。

普通強度のコンクリートに関して、繰返し圧縮応力を受けたコンクリートの応力-ひずみ曲線は、既に指摘されている<sup>1)</sup>ように荷重の繰返しと共に形状が著しく変化し、上に凸の曲線から次第に直線状となり、更には下に凸となる部分が現れた。

一方、高強度コンクリートは、応力-ひずみ曲線の正勾配はより直線的であり、普通強度のコンクリートほど顕著でないが、繰返し回数の増加と共に下に凸の部分が見られた。高強度コンクリートの応力-ひずみ曲線が直線的な挙動となる理由としては、普通強度のコンクリートに比べて空気量・ブリーディング量が少ないことから、繰返し荷重を受けても劣化が少なく、より緻密なコンクリートであることに起因すると考えられる。

繰返し回数に伴ってひずみが増加する割合はコンクリート強度が高くなるほど少ない。ただし、高強度コンクリートにおいても最大応力に近い領域（荷重応力比 0.90 以上）で繰返し荷重を受けるとひずみが増大し、圧縮破壊に至るケースがあった。これは、供試体個々の圧縮強度のバラツキが影響し、圧縮破壊に至ったと考えられる。

図-4 に繰返し回数の累積比  $((N-1) / (N_f - 1))$ 、 $N_f$ ：破壊時の繰返し回数) とひずみ増加

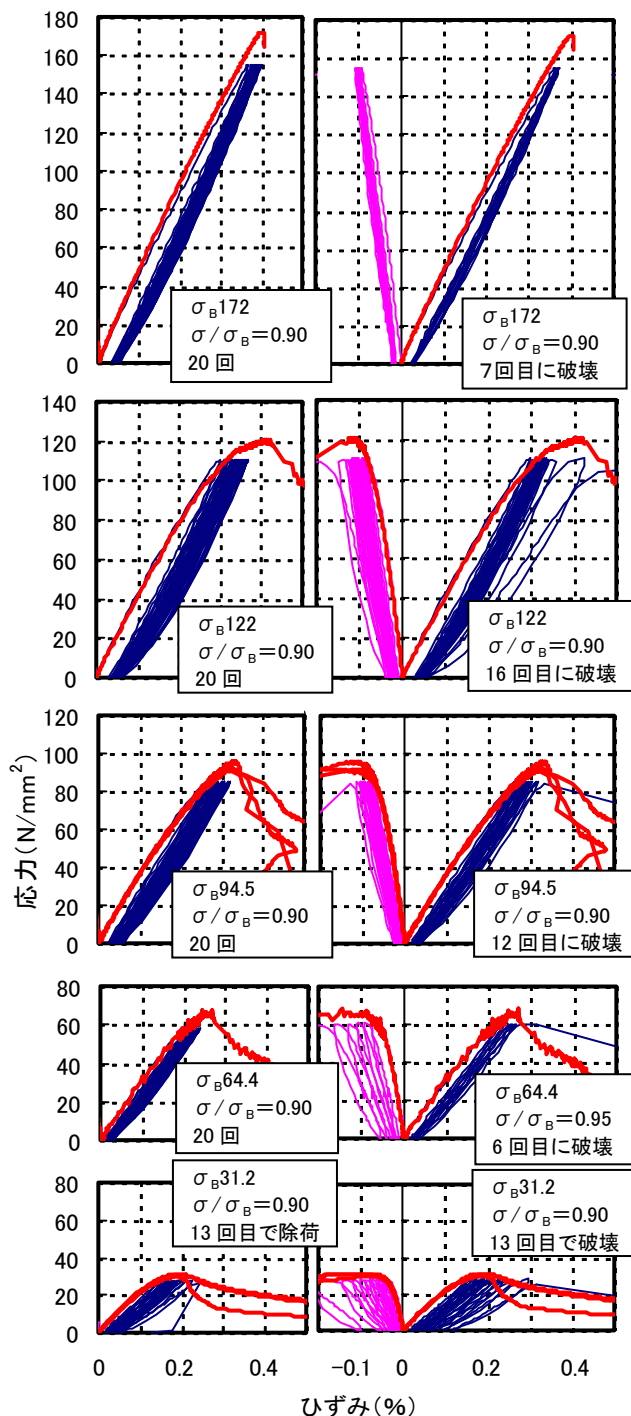


図-3 繰返し荷重した応力-ひずみ曲線の例

率  $((\epsilon_n - \epsilon_1) / (\epsilon_{nf} - \epsilon_1))$ 、 $\epsilon_{nf}$ ：破壊時のひずみ) の関係について整理した例を示す。繰返し回数が 10 回程度以上で破壊した場合のひずみ増加率は、滑らかな逆 S 字型曲線<sup>3),4)</sup>となっているが、繰返し回数が少ないとより直線的にひずみが増大する傾向があった。

また、高強度コンクリートほど繰返し回数初期におけるひずみ増加率が高い傾向があった。

なお、横ひずみの増加に関しては縦ひずみのような顕著に逆S字型曲線となる傾向は認められず、繰返し回数と共に徐々に増加していった(図-3参照)。

### 3.3 弾性係数と超音波パルス速度

図-5は繰返し载荷を行わない供試体の静弾性係数と動弾性係数の関係を示したものである。凡例は、割線弾性係数を求めるための静的破壊強度に対する割合を示す。

コンクリートの強度が高くなるほど、動弾性係数・静弾性係数とも高くなる傾向があった。 $\sigma_{B172}$ と $\sigma_{B122}$ の弾性係数に大差がないのは、粗骨材の種類と単位量が同一であることが主要因と考えられる。

英国示方書 CP110-1972 によれば、静弾性係数  $E_c$  と動弾性係数  $E_d$  の間には、 $E_c = 1.25E_d - 19$  (式(1): GPa 単位) の関係があることが知られているが<sup>6)</sup>、高強度コンクリートにおいては Lydon と Balendran が提唱した  $E_c = 0.83E_d$  (式(2)) により近似していた<sup>7)</sup>。

繰返し载荷前後に測定された動弾性係数から以下の式を用いて超音波パルス速度を算出した。

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3)$$

ここに、 $V$ : 超音波パルス速度 (km/s),  $E_d$ : 動弾性係数 ( $N/mm^2$ ),  $\mu$ : ポアソン比,  $\rho$ : 単位容積質量 ( $t/m^3$ )。ポアソン比は静弾性係数測定時(最大応力の 1/3)の値, 単位容積質量は個々の供試体の値を用いた。

図-6は繰返し载荷を行う直前の供試体の超音波パルス速度の平均値を示す。コンクリートの強度が高くなるほど超音波パルス速度は段階的に大きくなる傾向にあった。これは、使用材料とくに粗骨材が異なることが影響しているものと考えられる。

図-7は繰返し载荷を行った供試体の载荷前

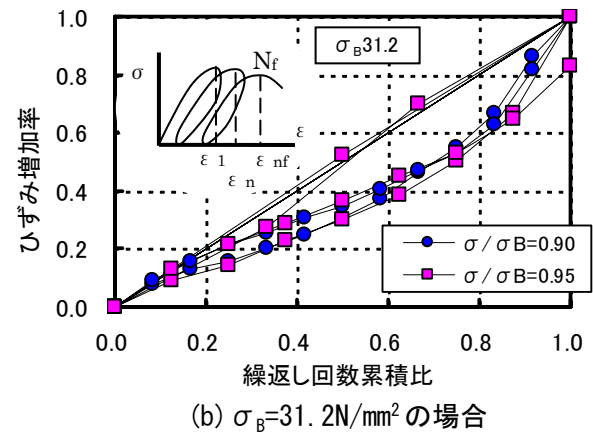
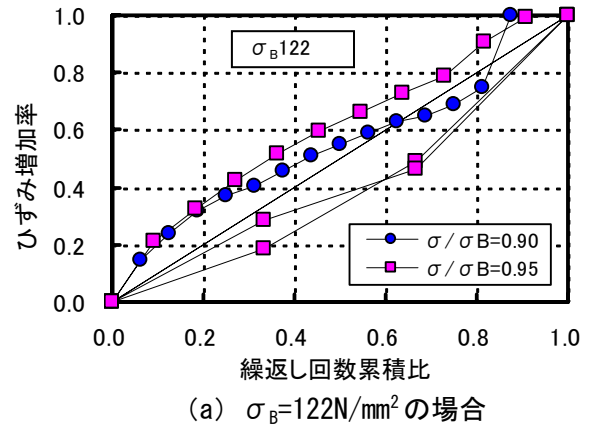


図-4 繰返し回数とひずみ増加率

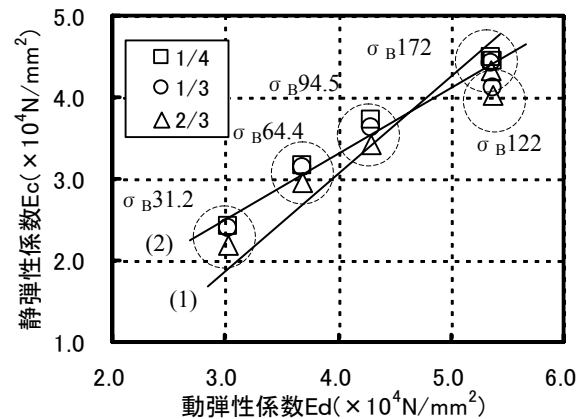


図-5 弾性係数の比較

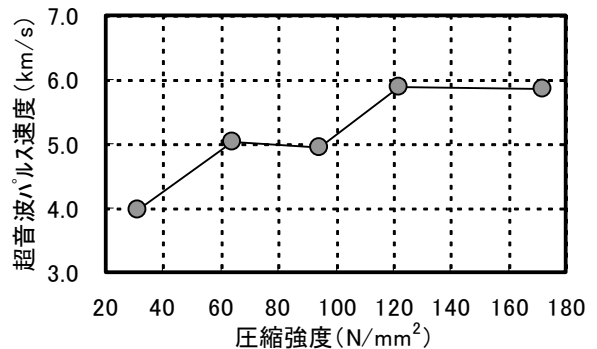


図-6 超音波パルス速度

後に測定された動弾性係数の平均減少率を強度別にプロットしたものである。凡例は載荷応力比を示す。

図中の点線部分は、繰返し回数 20 回の一部の供試体が圧縮破壊により正確な動弾性係数が測定できなかったため、1本のデータ値あるいは載荷応力比 0.95 のデータをプロットした。

繰返し回数が増大すると動弾性係数減少率も増大する傾向にあるが、高強度コンクリートになるほどその割合が少ないことが分かる。また、圧縮強度の違いにより動弾性係数の減少率は異なるものの、これらの測定によりコンクリートの損傷を評価できる可能性があることが分かった。

#### 4. まとめ

高強度コンクリートの圧縮載荷による特性および損傷を評価するために、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  供試体における定荷重繰返し圧縮載荷を行い、損傷度の評価を試みた。以下に得られた知見を示す。

(1) 定荷重繰返し圧縮載荷を受けたコンクリートは、コンクリート強度が高いほど繰返し時の安定性が高く、動弾性係数の減少率が小さいことが分かった。

(2) 繰返し圧縮載荷による動弾性係数の変化を捉えることで、損傷度の評価がほぼ推定可能であることが分かった。

#### 謝辞

本実験を実施するにあたり、貴重な御意見・御指導を頂きました京都大学・渡邊史夫教授に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 六車熙, 富永恵: Repeated Over-Load をうけるコンクリートの力学的性質の遷移現象について, 材料, 第 19 巻, 第 200 号, pp.413-422, 1970.5
- 2) 岡本伸, 柳下文夫, 高強度コンクリートの応力・ひずみ特性, 建築研究所年報, pp.330-334, 1973
- 3) 谷川恭雄, 小阪義夫: 高圧縮ひずみ領域にお

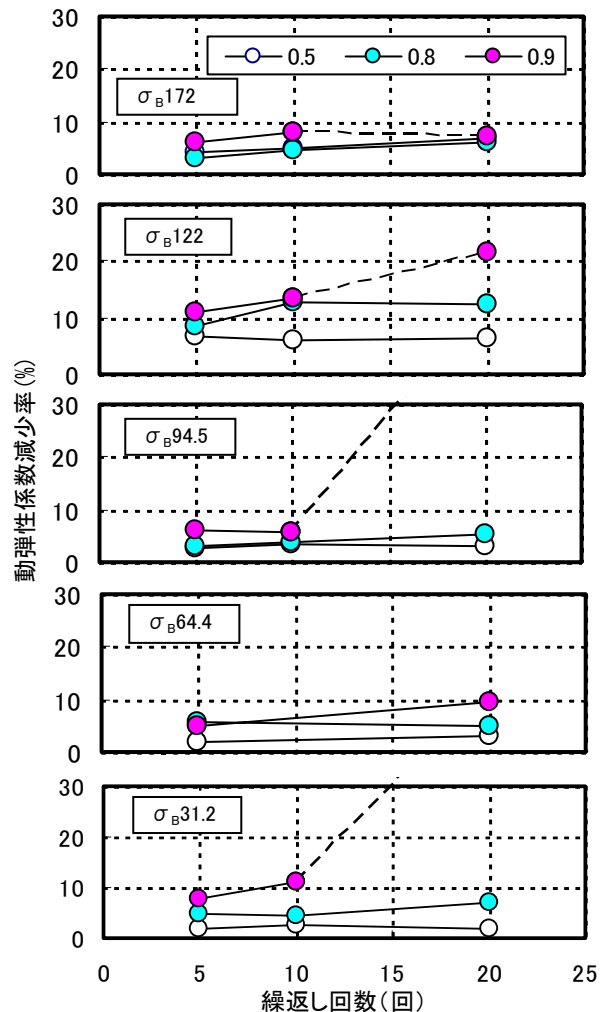


図-7 動弾性係数減少率

けるコンクリートの履歴特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 構造系, pp.449-450, 1978.10

- 4) T.Paskova and C.Meyer, Low-cycle Fatigue of Plain and Fiber-Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, pp.273-285, July-August 1997
- 5) 最知正芳, 四戸英男: 応力度-ひずみ度平均曲線によるコンクリートのダメージ評価, コンクリート工学論文集, 第 10 巻, 第 2 号, pp.73-82, 1999.5
- 6) 岡田 清, 六車 熙編: コンクリート・ハンドブック, 朝倉書店, 1981
- 7) F.D.Lydon and R.V.Balendran, Some Observations on elastic properties on plain concrete, Cement and Concrete Research, 16, No.3, pp.314-324, 1986