

論文 繰返し荷重を受けるコンクリートの変形状について

佐藤 公紀^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}・角田與史雄^{*3}

要旨: 本研究において、静的および繰返しの圧縮荷重を受けるコンクリートの破壊に至るまでの変形状を実験的に明らかにした。すなわち、破壊に至るまでの軸ひずみと体積ひずみとの関係は、荷重条件によらずほぼ等しいこと、繰返し荷重下の弾性係数の変化は全ひずみのみによって表せ得ること、塑性ひずみは荷重時間の影響を大きく受けることを明らかにすると共に、クリープひずみを用いて繰返し荷重を受けるコンクリートの塑性ひずみの算定方法を提案した。

キーワード: 繰返し荷重, 剛性低下, 塑性ひずみ, クリープひずみ

1. はじめに

現在コンクリートの疲労強度は、一定応力での疲労荷重に対しては応力-疲労寿命曲線 (S-N 曲線)、変動応力下での疲労荷重に対しては損傷が線形に累積するとしたマイナー則により評価されている。しかし、疲労荷重中のコンクリートの破壊に至るまでの変形を予測できる手法は皆無に等しい。

そこで本研究は、主にコンクリートの内部状態の変化に着目したコンクリートの静的および圧縮疲労試験を行い、破壊に至るまでの変形状に関して検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験で使用した供試体は 15×15×6cm の立方体供試体で、粗骨材の最大寸法が 25mm である天然骨材を用いたコンクリートで作成した。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比 60%、細骨材率 41% で配合した。供試体は打設後、約 1 カ月間水中養生し、3 日~20 日間気中で乾燥させた。Table1 に各供試体の試験時材齢及び乾燥開始時材令を示す。

本研究では、疲労試験と静的試験の結果の比較は、養生条件、乾燥期間が等しい供試体により行う。

ひずみの測定には検長 30mm のひずみゲージを用い、荷重軸方向に 8 枚、荷重軸直角方向に 7 枚、合計 15 枚を使用した。実験結果のひずみは、これらの平均値により整理する。

Table1 Condition of Specimens

Specimen No.	Age at Test (day)	Age at Drying (day)
F1,S1	50	30
F2,F3,S2	44	30
F4,S3	47	31
F5,S4	37	34
F6,F7,S5	36	29
Creep	74	31

2.2 実験方法

供試体への荷重はアクチュエータを使用し、静的試験および疲労試験を行った。荷重方向は一軸で、載荷面および底面 (15cm×6cm) はテフロンシートにより拘束の影響を低減している。

静的試験は、疲労試験での上限・下限応力を決定するのに必要な圧縮強度を求めることを主たる目的とした試験と、静的試験における塑性ひずみ、

*1 八千代エンジニアリング (株) 耐震保全部 修士 (工学) (正会員)
 *2 北海道大学大学院工学研究科助手 社会基盤工学専攻 博士 (工学) (正会員)
 *3 北海道大学大学院工学研究科教授 社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

弾性係数などのコンクリートの内部状態の変化を知ることを目的とした試験により構成されており、いずれの場合も変位制御により载荷した。

疲労試験は Table2 に示す条件で、荷重制御により载荷した。载荷周波数は全て 5Hz である。

本実験では 1 秒間に 100 回の測定が可能なシステムを用い、载荷開始から破壊までのすべての応力とひずみ値をコンピュータに保存した。

3. 実験結果

3.1 実験結果

本実験では、数回の繰返しを行なった 2 体 (供試体 s-a と s-b) を含め合計 7 体の静的試験を行った。また、7 体の疲労試験 (供試体 F1 から F7) を行なった。なお、供試体 F5, F6, F7 は疲労载荷後に静的に破壊させたものである。C1 は持続応力载荷後に静的に破壊させた供試体である。本研究ではこれをクリープ試験と呼ぶ。

静的試験の結果を Table 3 に、疲労試験とクリープ試験の結果を Table 4 に示す。

Fig.1 に、静的試験、疲労試験、疲労試験後に静的に破壊した実験、クリープ試験の終局ひずみを示す。静的破壊における終局ひずみとは最大応力時のひずみであり、疲労破壊における終局ひずみ

とは作用最大応力に達し得た最後のループにおける最大応力時のひずみである。なお、図中の S は静的試験を行った供試体、F は疲労荷重により破壊させた供試体、FS は疲労試験後に静的に破壊させた供試体、C は持続応力载荷後に静的に破壊させた供試体 (C1) を表す。疲労試験における終局ひずみはほぼ 2000 μ から 3000 μ の範囲にあり、疲労試験における終局ひずみの方が静的試験よりも若干大きいように見える。クリープ試験における終局ひずみは 3500 μ とそれよりも大きくなっている。

静的試験、疲労試験より得られた応力-ひずみ曲線の一例を Fig.2 に示す。

3.2 破壊経路

本研究ではコンクリートが破壊に至るまでの経路を荷重軸方向のひずみと体積ひずみの関係により整理する。疲労試験での破壊経路を、それぞれに対応する静的試験の破壊経路と共に Fig.3 に示す。ここで横軸は荷重軸方向のひずみ、縦軸は体積ひずみを表す。図中の「 N/N_f 」は、測定できた回数 N と破壊回数 N_f との比を表す。コンクリートの圧縮試験では荷重軸直角方向にひびわれが発生するため、特に高サイクルの疲労試験では荷

Table2 Conditions of Fatigue tests

Specimen No.	Maximum Stress (%)	Minimum Stress (%)
F1	53→62	0
F2	62	0
F3	71	0
F4	53→71	0
F5	71	0
F6	71→53	0
F7	80	40→20→0

Table3 Results of Static Tests

Specimen No.	Strength (MPa)	Ultimate Strain (μ)
S1	35.9	2096
S2	35.1	1991
S3	38.1	2594
S4	37.7	2348
S5	39.0	2301
s-a	37.1	2336
s-b	38.0	2210

Table4 Results of Fatigue Tests

Specimen No.	σ_{max}/f_c (%) - σ_{min}/f_c (%)		Loading Mode at Failure	Ultimate Strain (μ)
	Loading Cycle			
F1	53-0	62-0	Fatigue	1939
	810,000	220,277		
F2	62-0			2267
	1,276,406			
F3	71-0			2345
	33,504			
F4	53-0	71-0		2980
	2,120,000	245,792		
F5	71-0		2441	
	15,101			
F6	71-0	53-0	3033	
	60,000	2,470,202		
F7	80-40	80-20	2671	
	23,000	30,000		
C1	$\sigma_{max}/f_c=80\%$		Static	3483

f_c ; Static Strength, σ_{max} ; Max. Stress, σ_{min} ; Min. Stress

重軸直角方向のひずみゲージが測定不能となり途中で体積ひずみを求められなくなった。しかし、荷重軸方向のひずみは破壊時まで測定されており、その値は図中の太実線で表されている。

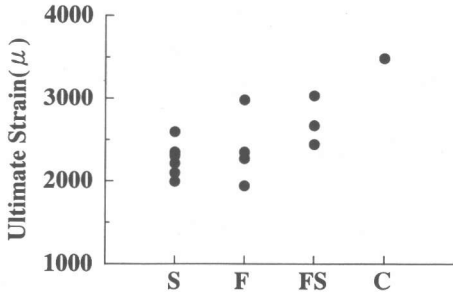
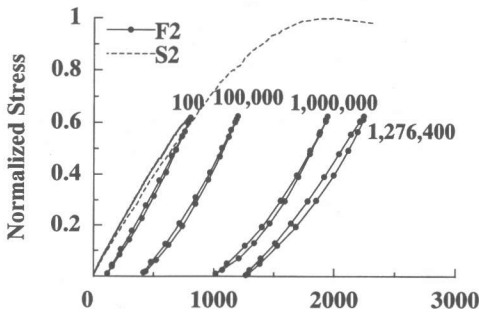
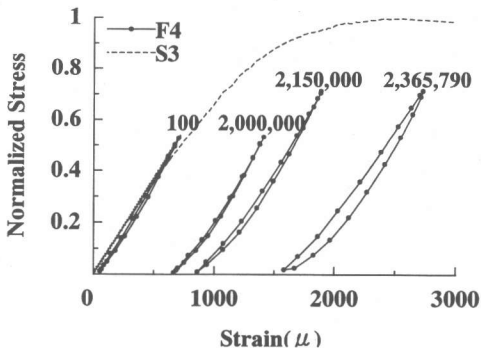


Fig.1 Ultimate Strain



(a) F2 · S2



(b) F4 · S3

Fig.2 Stress-Strain Curves

Fig.3より、疲労試験、静的試験共にほぼ同じ経路で破壊に至ること、载荷途中で荷重条件を変化させても破壊経路は連続的に推移することが分かる。つまりコンクリートが破壊に至る過程は、変形の推移という観点ではいかなる载荷条件においてもほぼ同じであり、载荷条件による違いは、その過程を経るのに要する载荷時間（繰返し回数×载荷周波数）のみによって表されると言える。なお、Fig.3(c)は、疲労载荷後に静的载荷によって破壊させた実験結果を示すが、静的载荷は、一度完全に除荷した後に行っているため、全ひずみは静的载荷開始時点での塑性ひずみ（図中の点X）まで戻っている。

3.3 剛性の低下

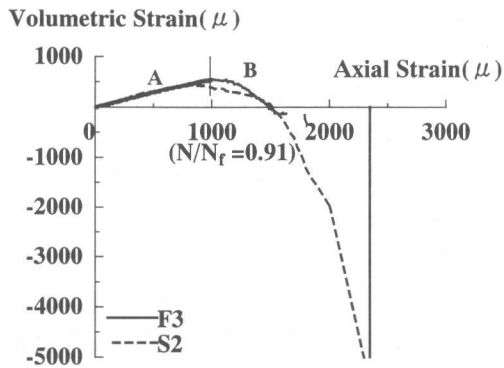
Fig.4に、繰返しを行った静的試験および、全ての疲労試験より得られた剛性と全ひずみの関係を示す。

全ひずみが増加すると剛性は低下するが、载荷条件による違いは見られない。つまり剛性の低下は载荷条件に関係なく、全ひずみのみによって表されると言える。

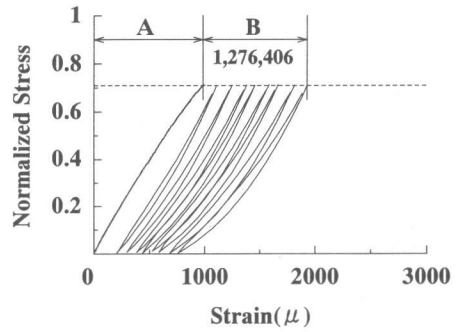
図中の曲線は前川¹⁾により提案されている静的载荷における剛性-全ひずみの関係式である。本実験結果と前川式は概ね一致している。

3.4 塑性ひずみの増加

Fig.5に、繰返しを行った静的試験および、F2,F4より得られた塑性ひずみと全ひずみの関係を示す。全ひずみが増加するにつれて塑性ひずみも増加するが、その傾向は最大応力比の大きさにより異なる。すなわち、ある全ひずみに対して、最大応力比が小さいほど塑性ひずみが大きい。これは、最大応力比が小さいほど同じ変形量に達する時間が長いことから、時間の影響、つまりクリープの影響によるものと考えられる。なお、図中の曲線は前川¹⁾により提案されている静的载荷における塑性ひずみ-全ひずみの関係式であるが、本実験における静的試験結果と概ね一致している。

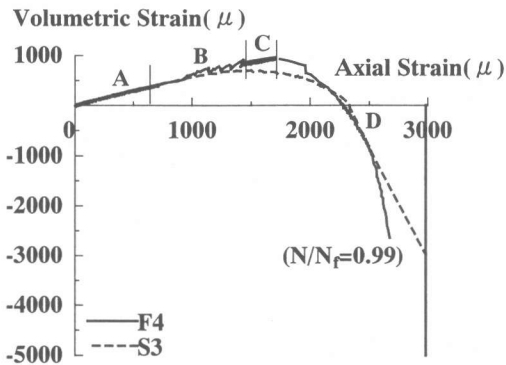


(i) Axial Strain and Volumetric Strain Relation

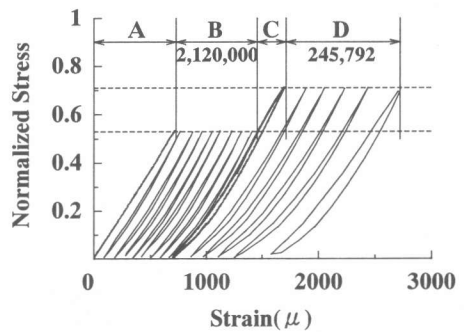


(ii) Loading History

(a) Specimens F3 and S2

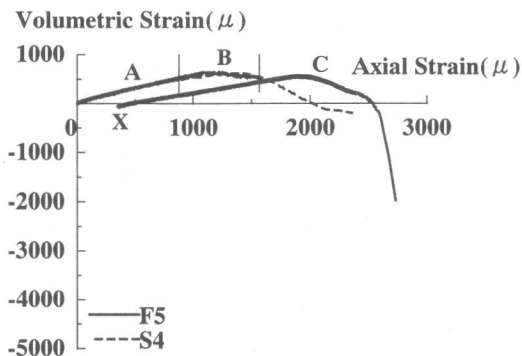


(i) Axial Strain and Volumetric Strain Relation

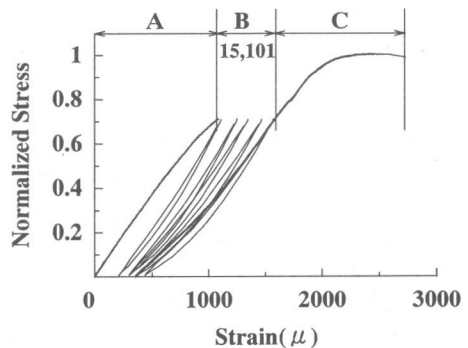


(ii) Loading History

(b) Specimens F4 and S3



(i) Axial Strain and Volumetric Strain Relation



(ii) Loading History

(c) Specimens F5 and S4

Fig.3 Comparison of Strain Pass in Fatigue Test and That in Static

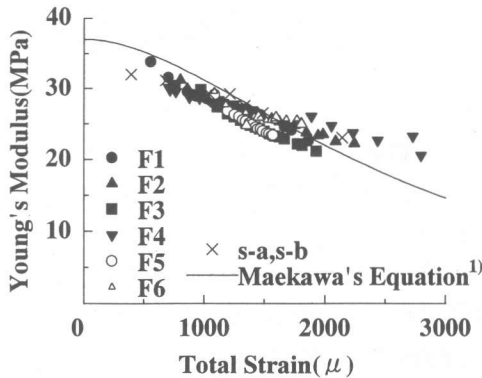


Fig.4 Young's Modulus-Total Strain

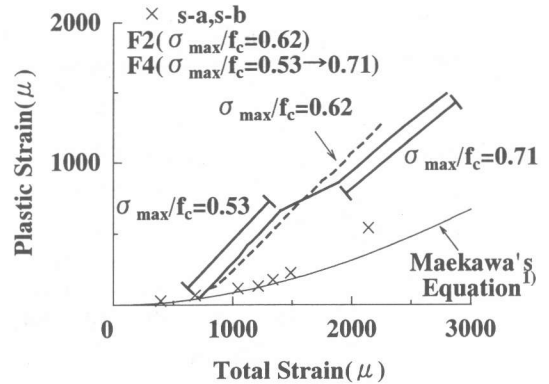


Fig.5 Plastic Strain-Total Strain

4. 時間の影響を考慮した塑性ひずみの表現

荷重時間の影響を考慮し、クリープひずみを用いて塑性ひずみを表す方法に関して検討する。

まず、静的圧縮試験によって得られた塑性ひずみを時間の影響を受けない塑性ひずみ ϵ_{P-m} と仮定する (Fig.6)。ここで、縦軸は塑性ひずみ、横軸は全ひずみを表す。次に疲労試験より得られた塑性ひずみから ϵ_{P-m} を除いたひずみをクリープひずみ ϵ_c とし、綾野²⁾ により提案されているクリープひずみの予測式 (以下「綾野式」) を用いて表現することを考える。すなわち、疲労荷重によるクリープ変形と持続荷重によるクリープ変形に差異がないものと仮定する。これは、両者の差異を現在の研究レベルにより説明することができないためであり、それゆえ、本研究では、疲労試験における時間の影響を簡便な方法により求めることとする。

綾野式によって求められるクリープひずみは一定の荷重を継続して荷重した場合に生じるクリープひずみなので、除荷、荷重を繰り返す疲労荷重のクリープひずみを求めるには、疲労荷重と等価な一定持続荷重を定める必要がある。そこで本研究では、疲労荷重における最大応力の60%~120%の一定持続荷重を荷重したとして綾野式から求めたクリープひずみと、疲労試験より得られたクリープひずみを比較することによって、疲労荷重と等価な一定持続荷重を求めることとした。

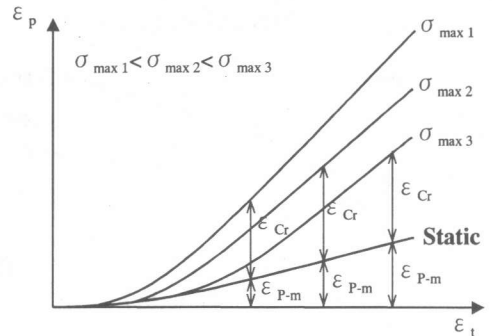
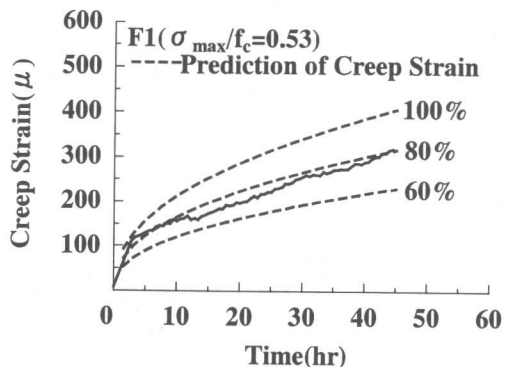
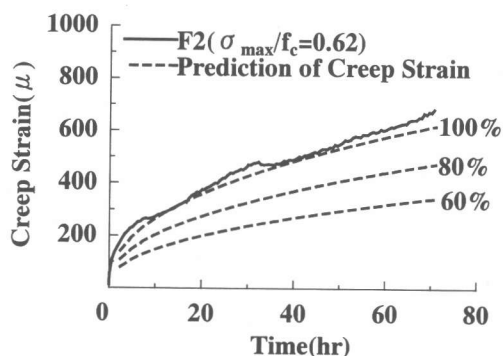


Fig.6 Definition of Plastic Strain Components

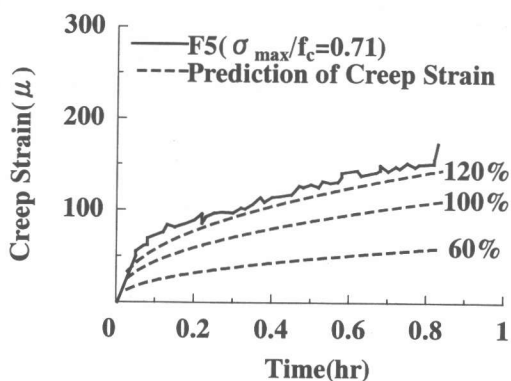
計算値と実験値の比較を Fig.7 に示す。実験値は、疲労荷重における最大応力が強度比53%の場合は最大応力の80%の持続応力として、最大応力が62%の場合は最大応力を持続応力として、最大応力が71%の場合は最大応力の1.2倍を持続応力として求めたクリープひずみにほぼ一致する。疲労荷重以上の持続荷重を作用させなければならない理由は、綾野式の適用範囲にあるものと考えられる。綾野式は強度比50%程度までの範囲に対して検証がなされており、それよりも高い応力域に対しては精度が落ちるものと思われる。本研究で行った応力比80%でのクリープ試験によるひずみは綾野式から求められる値の2倍以上と大きく、上述の結果を裏付けるものであった。高応力の繰返し荷重を受けるコンクリートの疲労挙動を予測



(a) F1



(b) F2



(c) F5

Fig.7 Creep Strain

するには、高応力の持続荷重を受けるコンクリートのクリープひずみを予測することが必要であろう。

5. 結論

本実験の範囲において得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 破壊に至るまでの全ひずみと体積ひずみとの関係、すなわち、破壊に至るまでのひずみ経路は、荷重条件によらずほぼ等しかった。すなわち、コンクリートが破壊に至る過程は、変形の推移という観点では荷重条件によらずほぼ同じであり、荷重条件による違いは、その過程を経るのに要する時間に支配されるものと考えられる。
- 2) 静的荷重同様、疲労試験におけるコンクリートの剛性低下は、全ひずみのみによって表すことが可能であり、その割合は静的試験における低下割合とほぼ等しい。
- 3) コンクリートの塑性ひずみの増加の割合は、荷重条件や作用応力の大きさによって異なる。これは荷重時間の影響によるものであると考えられる。
- 4) 塑性ひずみを、クリープひずみを用いて表す方法を提案した。この方法により、繰返し荷重を受けるコンクリートの疲労特性において時間の影響を考慮することが可能になる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、北海道大学大学院 上田多門助教授より貴重なご助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。また、この研究は文部省科学研究費（基礎研究(B)：研究代表者 角田 興史雄）を受けて行ったものであります。

参考文献

- 1) 岡村 甫、前川 宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版
- 2) 綾野克紀：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測とその設計への適用に関する研究、岡山大学博士論文、1993