

# 論文 水中におけるコンクリートの圧縮疲労性状に関する一考察

藤本 将行<sup>\*1</sup>・佐藤 靖彦<sup>\*2</sup>・角田 與史雄<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究において、上限応力および環境条件（水中と気中）を変えたコンクリートの圧縮疲労試験を行い、その基本的な変形特性を明らかにすることを試みた。破壊に至るまでに蓄積されるエネルギー量は、応力比（上限応力/圧縮強度）が大きいほど、また、気中よりも水の方が小さくなること、塑性ひずみを疲労破壊直前の全ひずみで除した場合、蓄積エネルギーの増加に対する塑性ひずみの変化は、応力比のみの関数として表すことが可能であることなどを明らかにした。

**キーワード:** 繰返し荷重、剛性低下、蓄積エネルギー、水中疲労

## 1. はじめに

現在、コンクリート構造物も地上、水中を問わず様々な環境下に置かれるようになり、それゆえ、そうした厳しい条件にも適応可能な設計基準や新しい設計手法が要求されるようになってきている。

水中における鉄筋コンクリート部材の疲労寿命が気中に比べて小さくなることが井上ら<sup>1)</sup>により示され、その後、著者ら、菅田ら<sup>2)</sup>によつても確認された。著者らが行った実験では、水中におけるコンクリート圧縮域の破壊が気中に比べ早期に起こることが一つの要因であることが明らかにされた。すなわち、水中における鉄筋コンクリート部材の疲労特性を考える上で、水中におけるコンクリートの圧縮特性を知ることは極めて重要となる。

水中におけるコンクリートの疲労特性は、田ら<sup>3)</sup>や松下<sup>4)</sup>により報告されている。田らは、水中における静的及び低サイクル領域における圧縮強度は気中における場合より低下することを、松下らは、高サイクル領域においても強度の低下が見られることを明らかにするとともに、その疲労寿命式を応力振幅と繰返し回数との関

係で示した。しかし、部材レベルでの疲労特性を考えるに必要な変形特性に関する検討は明らかに欠如している。

そこで本研究は、部材レベルでの解析に必要となるコンクリートの圧縮変形挙動を定量化するための情報を得ることを目的に、気中及び水中におけるコンクリートの圧縮疲労試験を行い、破壊に至るまでの塑性ひずみの増加および剛性低下に関する検討を行った。また、それらと繰返し載荷によりコンクリートに蓄積されるエネルギーとの関係についての検討も行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験供試体

本実験で使用した供試体は  $\phi 10 \times 18\text{cm}$  円柱供試体である。検長 30mm のひずみゲージを高さ方向に 2 枚、円周方向に 3 枚、合計 6 枚貼り付けた。実験結果のひずみは、これらの平均値により整理する。

供試体は打設後、水中養生し、水中で実験するものはそのまま水中に保存し、常に供試体内部が湿潤である状態にした。気中で実験するものに関しては、FA90 は 1 日、FA70, FA80 は 1 週

\*1 中央コンサルタンツ株式会社

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）

間自然乾燥させたものを使用した。

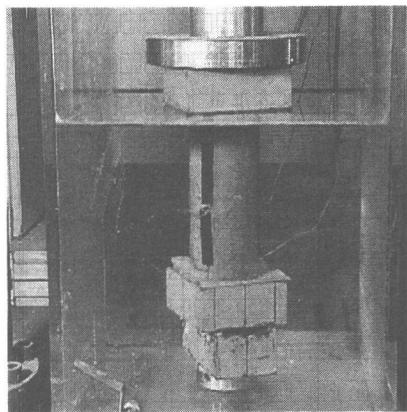


図-1 実験状況

## 2.2 実験方法

供試体への載荷は、アクチュエータにより静的試験は変位制御で、疲労試験は荷重制御で実験を行った。疲労試験における載荷速度は 1 Hz であり、各回数ごとの測定は、静的に載荷を行った。各実験につき 1 体の供試体を使用した。

本実験では、塑性ひずみ（残留ひずみ）と剛性低下（初期剛性に対する除荷時の剛性の変化）を観測するため、最小応力値をほぼ 0 とした。疲労実験の最大応力振幅は静的強度の 70%, 80%, 90% といった比較的高圧縮応力の 3 種類とした。また、供試体端面と載荷板との摩擦を除去するためテフロンシートを挿入した。実験の様子を図-1 に示す。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 静的強度及び疲労寿命

静的強度は、先の表-1 に示されている。水中の方が気中の場合より強度が小さく、平均で 10% 程度低下している。また、最大応力時の圧縮ひずみは水中の方が 15% 程度小さくなる傾向にあった。

疲労実験結果を表-2 に示す。また、応力比と疲労寿命の関係を図-2 に示した。最大作用応力が 80%, 90% に関しては、水中と気中で疲労寿

命に差は見られず、最大作用応力が 70% の時に疲労寿命に大きな差が見られた。図中の直線は、Tepfers<sup>5)</sup> による疲労寿命予測式である。

表-1 供試体諸元

供試体	載荷	環境	試験時材齢	圧縮強度
SA70	静的	気中	11 日	35.1 MPa
FA70	疲労	気中	11 日	—
SA80	静的	気中	9 日	31.2 MPa
FA80	疲労	気中	9 日	—
SA90	静的	気中	8 日	29.0 MPa
FA90	疲労	気中	8 日	—
SW70	静的	水中	12 日	30.3 MPa
FW70	疲労	水中	12 日	—
SW80	静的	水中	10 日	27.7 MPa
FW80	疲労	水中	10 日	—
SW90	静的	水中	10 日	27.7 MPa
FW90	疲労	水中	10 日	—

表-2 疲労実験結果

供試体 No	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$	疲労寿命 $N_f$
FA70	24.6 MPa	0 MPa	54,028 回
FA80	24.9 MPa	0 MPa	224 回
FA90	26.1 MPa	0 MPa	3 回
FW70	21.2 MPa	0 MPa	2,602 回
FW80	22.1 MPa	0 MPa	199 回
FW90	24.9 MPa	0 MPa	4 回

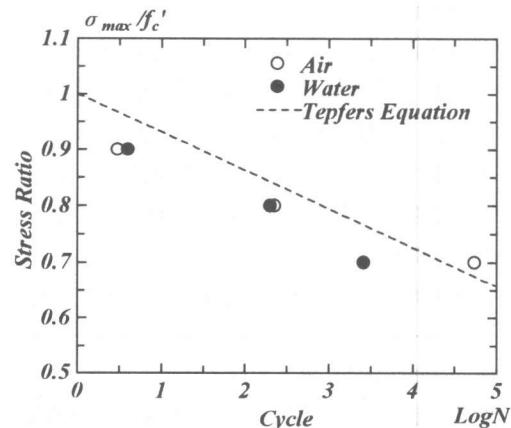


図-2 応力比と疲労寿命の関係

### 3.2 応力-ひずみ関係

図-3は疲労試験で得られた応力とひずみとの関係を示す。参考のため静的試験で得られ

た曲線が点線で示されている。応力およびひずみは、それぞれ静的実験の圧縮強度、最大圧縮ひずみで正規化されている。

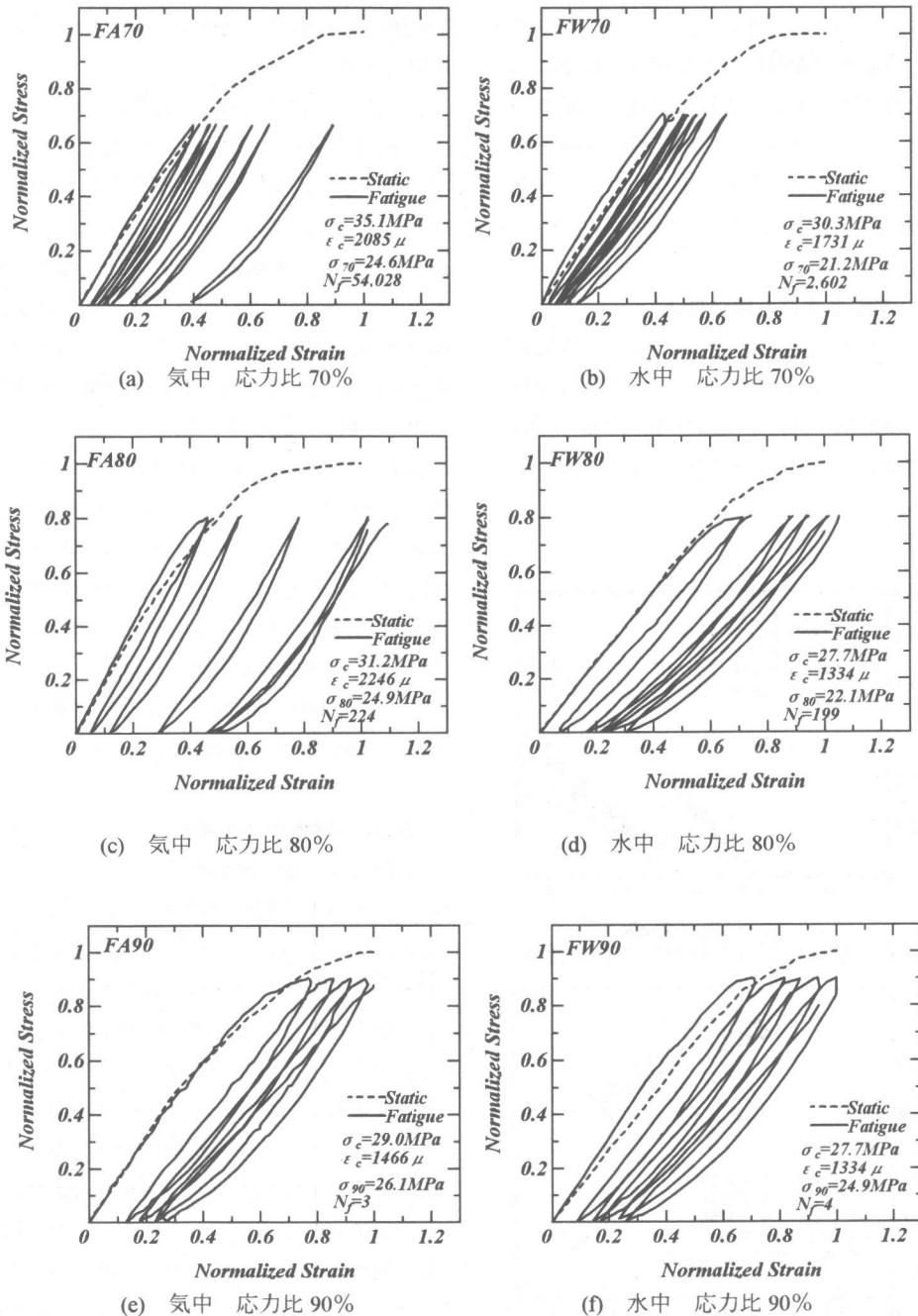


図-3 応力とひずみとの関係

作用応力が大きいほど、除荷・再載荷で囲まれるループの面積が大きい。この面積はコンクリート内部に蓄積されるエネルギーと大きく関連するものであり、作用応力が大きいほど 1 サイクルあたりのエネルギー量が大きいといえる。

次にループの形状を考える。サイクルが少ない時は、再載荷の曲線は処女載荷と同様上に凸の形状になっているのに対し、繰返し回数が多くなるにつれて、再載荷曲線は、除荷曲線と類似した下に凸の形状となる。すなわち、ループの形状が繰返し回数とともに変化する。

### 3.3 塑性ひずみと剛性低下

図-4 は塑性ひずみと全ひずみとの関係を示している。任意の回数で応力が 0 の時の残留ひずみ（塑性ひずみ）と圧縮ひずみは疲労実験の破壊時直前の最大圧縮ひずみにより正規化されている。

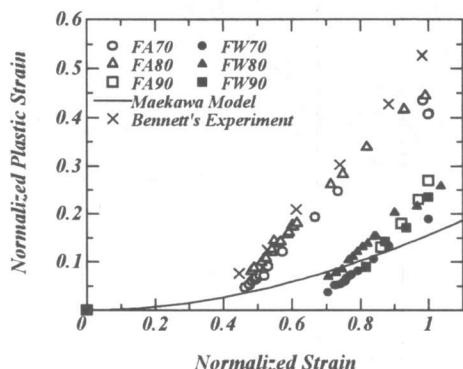


図-4 塑性ひずみと全ひずみとの関係

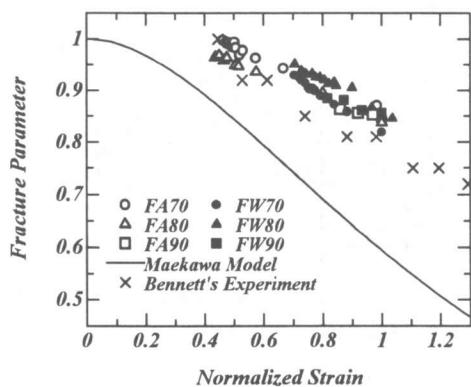


図-5 剛性低下と全ひずみとの関係

図には比較の為、前川<sup>6)</sup>により提案されている静的荷重下における塑性ひずみと全ひずみとの関係を示す。また、×印は最大応力比 65%，最小応力比 0.01% の条件で気中での疲労試験を行った Bennett<sup>6)</sup>による実験結果(破壊回数 350,500 回)における塑性ひずみと全ひずみとの関係を示す。

各応力比における水中の場合および気中の応力比 90% の場合は、他に比べ正規化した塑性ひずみが小さい。また、増加割合も気中に比べ水中の方が小さい傾向にある。なお、気中の応力比 90% が、水中の場合の挙動と類似している理由として、乾燥期間が短く、コンクリート内部の含水率が他の気中のものより高かったことが考えられる。また、Bennett の実験値と本実験の気中の結果が一致している。

初期の剛性に対する除荷時の剛性の変化（損傷パラメータ）と全ひずみとの関係を図-5 に示す。損傷パラメータは、全ひずみの増加と共に減少しているが、その傾向は、応力比や気中・水中による差は無いと思われる。剛性の低下は初期時に比べて 8 割程度まで減少した。本実験結果と Bennett の実験結果と比較すると、剛性低下の傾向においても類似している。

### 3.4 蓄積エネルギー

前節では、各内部状態量をそのコンクリートの全ひずみとの関係で表現していた。ここでは、その状態量をコンクリートに蓄積されるエネルギーと関連付けて考える。蓄積エネルギーとは正規化された応力-ひずみ曲線で囲まれた面積であり無次元量である。繰返し荷重を受ける場合、除荷時に、蓄積エネルギーは増加せず再載荷の過程でエネルギーが増加する。今、初期載荷時に最大振幅応力まで蓄積されるエネルギーを  $A$  (図-6, 実線部分) とする。また、除荷により減少するエネルギーを  $B_I$  (図-6, 点線部分)、再載荷により蓄積されるエネルギーを  $C_I$  (図-6, 鎖線部分) とすると、1 サイクルで増加するエネルギー量  $\Delta P_I$  は、次式となる。

$$\Delta P_i = (C_i - B_i) \quad (1)$$

となる。 $N_i$ 回目の増加エネルギーを $\Delta P_i$ とする  
と、総エネルギー量 $P_{max}$ は、

$$P_{max} = A + \sum_{i=1}^{N_f} \Delta P_i \quad (2)$$

とかける。 $N_f$ は破壊回数である。

実際には、繰返し載荷試験すべてのループのエネルギー増加量を測定するのは困難である。そこで、本実験では計測した任意の回数での増加量をプロットし、それで囲まれる面積を蓄積されるエネルギーの総量（総エネルギー量）とした（図-7参照）。

表-3に、各供試体の総エネルギー量を記し

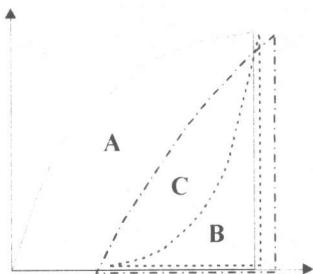


図-6 蓄積エネルギー

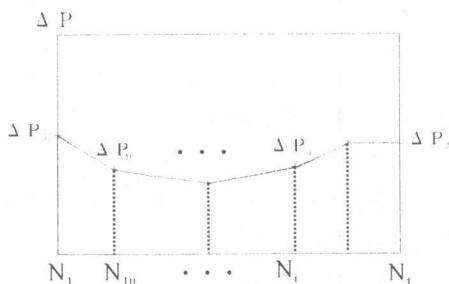


図-7 エネルギー計算

表-3 総エネルギー量

供試体 No	総エネルギー $P_{max}$	供試体 No	総エネルギー $P_{max}$
FA70	723.95	FW70	80.18
FA80	8.09	FW80	10.36
FA90	0.84	FW90	0.83

た。総エネルギー量は、応力比が小さいほど大きくなる。また、応力比70%の場合、水中の方が、気中に比べ極端に小さい。

図-8は各サイクルに対するエネルギー増加量と繰返し回数の関係である。横軸は対数表示している。応力比によりエネルギーの増加量は異なる。応力比が大きいほど増加量 $\Delta P$ が大

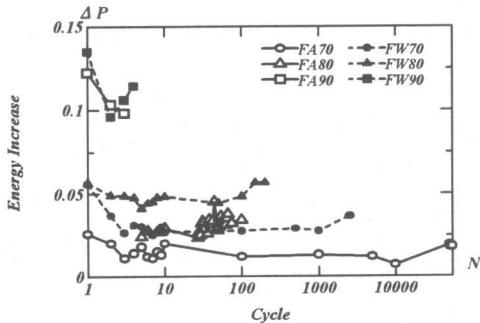


図-8 エネルギー増加量と  
破壊回数との関係

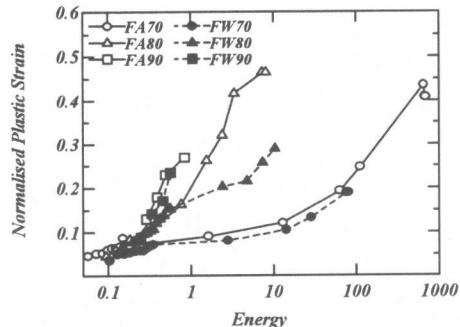


図-9 塑性ひずみと蓄積  
エネルギーとの関係

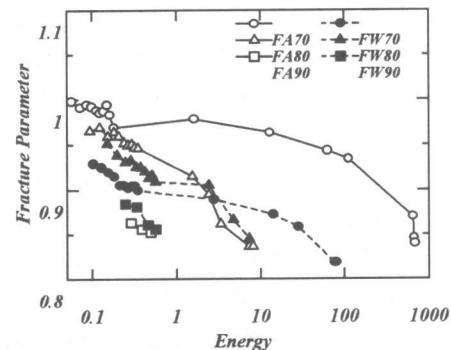


図-10 剛性低下と蓄積  
エネルギーとの関係

きく、また応力比でも水中の方が気中よりも増加量  $\Delta P$  が大きい。すなわち、より早く破壊に必要なエネルギー量に達することになる。

### 3.5 蓄積されるエネルギーと各状態量

エネルギーと塑性ひずみとの関係を図-9に示す。横軸は対数表示している。応力比によって増加割合が異なり、応力比が大きいほど増加割合が大きい。水中と気中との差異は、塑性ひずみを疲労破壊時の全ひずみで正規化することにより取り除くことができている。

図-10は剛性の低下とエネルギー量との関係である。剛性低下割合は応力比が小さい程小さく、水中の方が気中よりも低下割合が大きい傾向にある。また、共通して、繰返し回数の少ない段階で急激に低下し、その後緩やかに低下していく傾向にある。

## 4. 結論と課題

本実験で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 圧縮強度は気中に比べ水中が 10%程度、圧縮ひずみも水中で 15%程度低下した。
- 2) 上限応力を気中および水中でのそれぞれの圧縮強度で除した応力比で整理した場合、その疲労寿命は、応力比が 80%以上（低サイクル領域）では水中と気中に差異は見られなかった。しかし、応力比が 70%の場合（高サイクル領域）では、水中の方が気中よりも疲労寿命が短くなった。
- 3) 破壊までに蓄積されるエネルギー量を考えた場合、その量は応力比が小さくなるにつれ大きくなる傾向にある。気中と水中との比較では、疲労寿命に大きな差が認められた応力比 70%の場合に両者に大きな差が見られた。すなわち、蓄積エネルギー量は水中の方が極端に小さい。さらに、1 サイクルあたりの蓄積エネルギー量で比較した場合にも、水中の方が気中よりも大きい傾向にある。
- 4) 剛性は、応力比や環境条件によらず、破壊

時に処女載荷の 80%程度まで低下した。同じ蓄積エネルギーで整理した場合、水中の方が気中よりその低下割合は大きい傾向にあった。

- 5) 塑性ひずみは、応力比が大きいほど増加割合が大きいが、水中と気中との差異は、塑性ひずみを疲労破壊時の全ひずみで正規化することにより取り除くことができる。

今回は限られた実験体数の下でのデータであり、今後更なる実験を重ねて行きたい。

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

## 参考文献

- 1) 井上正一、西林新蔵、吉野 公、権 赫文：水中における RC はりのせん断疲労性状、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.15, No.2, 1993
- 2) 菅田紀之、尾崎 訊：水中における鉄筋コンクリートはりの疲労性状、土木学会論文報告集 Vol.53, pp.546～551, 1997.2
- 3) 田 政範、島田静雄：水で飽和されたモルタルの圧縮破壊及び疲労特性に関する基礎的研究、土木学会論文報告集 No.245, pp.65～76, 1976
- 4) 松下博通：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究、土木学会論文報告集 No.296, pp.87～95, 1980.4
- 5) R.Tepfers,B.Hedberg,G.Szczechocki : Absorption of Energy in Fatigue Loading of Plain Concrete
- 6) 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
- 7) E.W.BENNETT, N.K.RAJU : Cumulative Fatigue Damage of Plain Concrete in Compression