

論文 コンクリートの劣化とカイザー効果に関する実験的研究

矢村 潔*¹・弓場 茂和*²・壺井 敦史*³・王 旭鵬*²

要旨: 本研究は、コンクリートの物性評価、特に劣化程度の評価にアコースティック・エミッション (A E) 計測法を利用していくための基礎資料を得ることを目的とし、各種条件下でのコンクリートの圧縮載荷試験時におけるカイザー効果特性を実験的に明らかにしたものである。すなわち、初期載荷後の諸原因でカイザー効果が不明確になってくる状況を実験で明らかにし、載荷時に発生する残留ひずみとの関係から、水和反応の継続、劣化の進行等のメカニズムについて検討を加えている。

キーワード: A E, カイザー効果, ひずみ, 劣化, 凍結融解作用

1. はじめに

近年、硬化コンクリートの物性評価・力学挙動の機構解明等にアコースティック・エミッション (A E) 計測法を用いる試みが計測機器の進歩、コンピュータ環境の充実と相まって注目されてきている [1]。鋼、岩石等多くの固体材料に認められる代表的 A E 特性の一つである、過去の履歴荷重までは A E 発生がないとするいわゆるカイザー効果は、材料の履歴を推定するのに有効に利用出来ると考えられている。しかし、コンクリートの諸物性に関しては、水和反応の継続、乾燥収縮等による微小ひびわれの発生、各種化学的、物理的作用による劣化等によって経時的にかなり変動していくことが予想される。したがって、コンクリートのカイザー効果特性は、これらの影響を受け、きわめて複雑になるものと考えられる [2]。

本研究は、このような観点から、コンクリートの配合、材齢、劣化の程度等を変化させた場合の圧縮載荷時における A E 特性、特にカイザー効果特性を実験で明らかにし、コンクリートの劣化を含む物性評価に A E 計測手法を利用していくための基礎資料を得ることを目的としたものである。

2. 実験概要

2. 1 実験計画

本実験はコンクリートのカイザー効果の特性を把握するために行ったもので、主要な要因は、コンクリートの配合、初期載荷時材齢、初期載荷後の保存条件である。各要因と水準を表-1に示す。

2. 2 使用材料およびコンクリートの配合

本実験で使用したコンクリートには、普通ポルトランドセメント、砕石 (最大寸法: 20mm, 比重: 2.68, 吸水率: 0.4%), 川砂 (F.M.: 3.14, 比重: 2.49, 吸

表-1 実験計画

要 因		水 準
コンクリートの 配 合	水セメント比	0.55, 0.65
	空気量	6% プレーン
初期載荷時材齢		28日, 1年, 2年
初期載荷後の保存条件 (保存期間, 繰り返しサイクル数)		気中 (0~10週) 凍結融解作用下 (0~230サイクル)

*1 摂南大学教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)

*2 摂南大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻

*3 摂南大学工学部

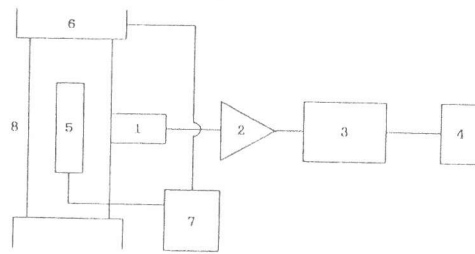
水率：1.3%)を使用した。コンクリートの示方配合を表-2に示す。

2.3 実験方法

供試体はφ10×20cm円柱とし、コンクリート打設後28日間20℃水中養生を行った。以後、初期荷重時までは試験室内で気中保存した。所定の材齢に達した時点(28日の場合は水中養生後ただちに)で初期荷重を行った。初期荷重荷重は過去の研究を参考にして、その時点での圧縮強度(3本の円柱供試体の圧縮強度試験から求めた値)の50%とした[3]。その後、保存条件が気中のものは試験室内に放置し適当な期間毎に、また、保存条件が凍結融解作用の繰り返しのものはJSCE-1986に準じた凍結融解の繰り返し作用を与え、適当なサイクル毎に、それぞれ数本の供試体を取り出し圧縮荷重試験を行ない、圧縮強度、弾性係数、応力～ひずみ関係、AE発生挙動等を測定した。なお、荷重はまず初期荷重荷重まで行った後いったん除荷し、残留ひずみ等を測定した後、再度荷重し、破壊に到らしめた。本実験でAE計測に使用したシステムの構成を図-1に示す。AE変換子は共振周波数が140kHzのものを使用し、供試体側面の中央部にカップリング用パラフィンで接着した。変換子で検出されたAE信号はプリアンプ、ディスクリミネータで合計60dB増幅し、AE事象の頻度計測には不感時間1msのデッドタイム方式を用いた。また、ひずみの測定は、供試体側面中央に対角線に2枚貼り付けた電気抵抗線ひずみ計により行った。

表-2 コンクリートの示方配合

種別	W/C (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤(cc)
						W	C	S	G	
A	5.5	20	8	6	45	165	300	783	1002	750
B	6.5					168	258	829	981	645
C	5.5					2	45	183	334	803



(1) AE変換子 (2)プリアンプ (3)ディスクリミネータ
(4)プロッター (5)ひずみゲージ (6)ロードセル
(7)静ひずみ計 (8)供試体

図-1 AE計測システム

3. 実験結果とその考察

3.1 コンクリート材齢のカイザー効果に及ぼす影響

材齢28日および1年で初期荷重を受けた後気中保存された供試体の圧縮荷重試験時のAE発生状況の例を図-2に示す。図の縦軸にはそれぞれの圧縮応力度(横軸の値)において圧縮応力度0.1MPaの増加に対してのAE発生計数を示したものである。また、図中の破線は初期荷重におけるAE発生計数を示したものである。まず、初期荷重時材齢28日の場合は、初期荷重後の放置期間が1日程度であれば圧縮試験時には初期荷重荷重付近までAE発生がほとんどなく、カイザー効果が明確に認められる。しかし、放置期間が2週間を越えると圧縮試験時においても比較的応力レベルからAE発生が認められるようになりカイザー効果が曖昧になってくる。一方、初期荷重時材齢が1年の供試体では、初期荷重後の放置期間が4週間程度でも、初期荷重荷重付近までAE発生がみられず、カイザー効果が明確である。しかし、放置期間が10週間になると荷重初期からAEの発生がみられ、カイザー効果は不明確になる。なお、初期荷重時材齢2年についてはほぼ材齢1年の場合と同様の結果が得られた。

さらに具体的にカイザー効果の存在の程度を評価するために次式で定義される Felicity Ratio(FR値)を用いる[1]。

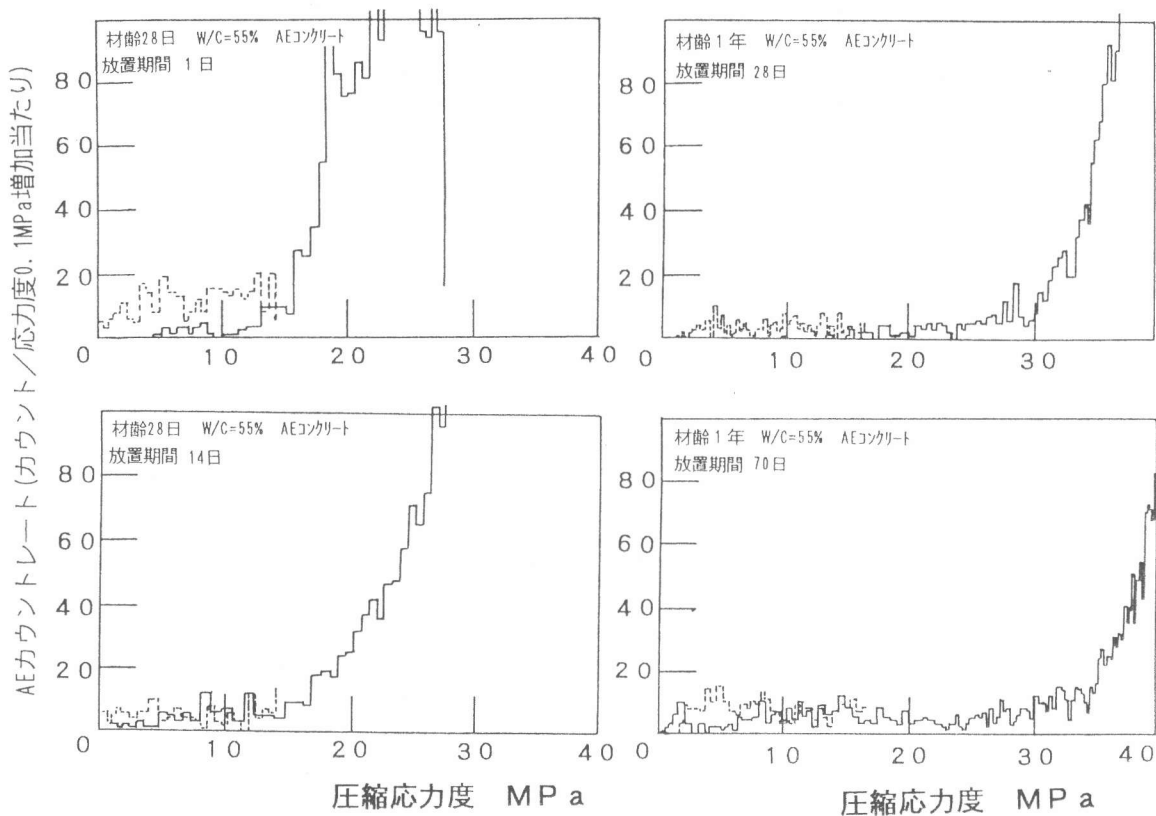


図-2 AE発生状況(初期荷重を受けた後気中放置)

Felicity Ratio(FR値)

$$= \text{AE発生開始応力} / \text{処女荷重時の最大応力}$$

FR値と初期荷重後の放置期間との関係を図-3に示す。この図から、初期荷重材齢が28日の供試体では、初期荷重後放置期間の経過と共にFR値は急速に低下し、4週程度でカイザー効果はほぼ消滅する。材齢が1, 2年の場合は、初期荷重後6週程度から徐々にFR値が減少し始める。このようにFR値が低下するのは、初期荷重後の放置期間中にコンクリートの内部構造が変化する事を意味する。材齢28日の場合には、初期荷重で生じた微小ひびわれ等が水和反応の継続で修復されたりまた、

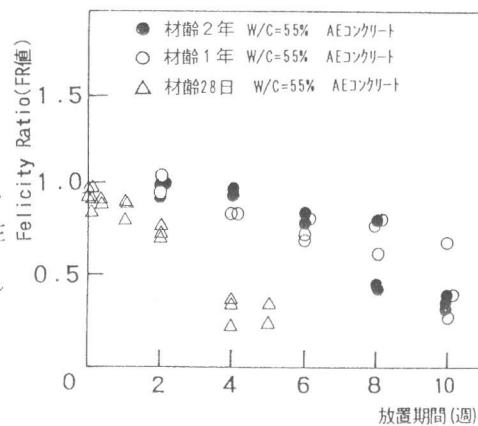


図-3 FR値と放置期間の関係

新たな水和生成物が形成されたものが圧縮試験時に初期荷重荷重以下の荷重で破壊されることによってAEが発生するものと考えられる。また、本実験では、材齢1, 2年の供試体でも初期荷重後長期間経過することによってFR値の低下がみられたことから、コンクリートの内部活性はかなり長期間継続していることがうかがえる。

3. 2 コンクリートの劣化とカイザー効果

本実験での凍結融解作用の繰り返しによる各種のコンクリート供試体の劣化挙動を動弾性係数比、圧縮強度比(それぞれ各繰り返しサイクルにおける値/凍結融解試験開始直前の値)を指標として図-4に示す。また、凍結融解作用の繰り返し後の圧縮試験におけるAE発生状況の例を図-5に示す。まず、材齢2年、W/C 55%のAEコンクリートについて、凍結融解繰り返しサイクルが40サイクル程度であれば、初期荷重荷重以下でのAE発生はほとんど見られずカイ

ザー効果は明確に認められる。しかし、繰り返しサイクルが100サイクルを越えてくると初期荷重よりかなり低い荷重でAE発生がみられるようになり、さらに200サイクルを越えると載荷初期からAEが発生し、初期荷重の影響がほとんど認められなくなる。このように凍結融解作用の繰り返しでカイザー効果がきわめて曖昧になるサイクル数は、材齢2年、W/C 65%のAEコンクリートの場合は100サイクル程度、材齢1年、W/C 55%のプレーンコンクリートで35サイクル程度であった。これらのサイクル数は、いずれも動弾性係数比がおおむね0.7程度になるサイクル数に対応している。このような傾向は従来から知られているところである[3]。

凍結融解繰り返しサイクル数とFR値の関係を図-6に示す。この図から、さきに述べた動弾性係数比70%程度からFR値の低下も顕著となり、以後急

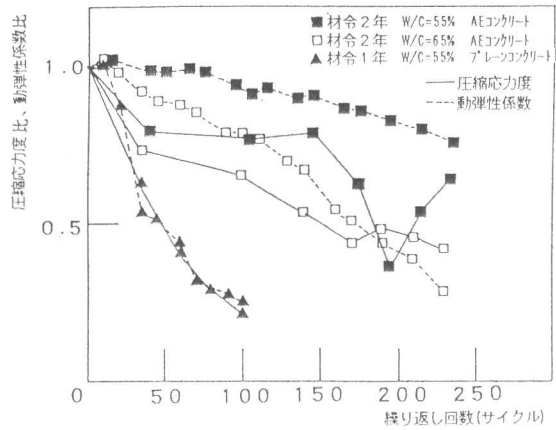


図-4 凍結融解試験によるコンクリートの劣化

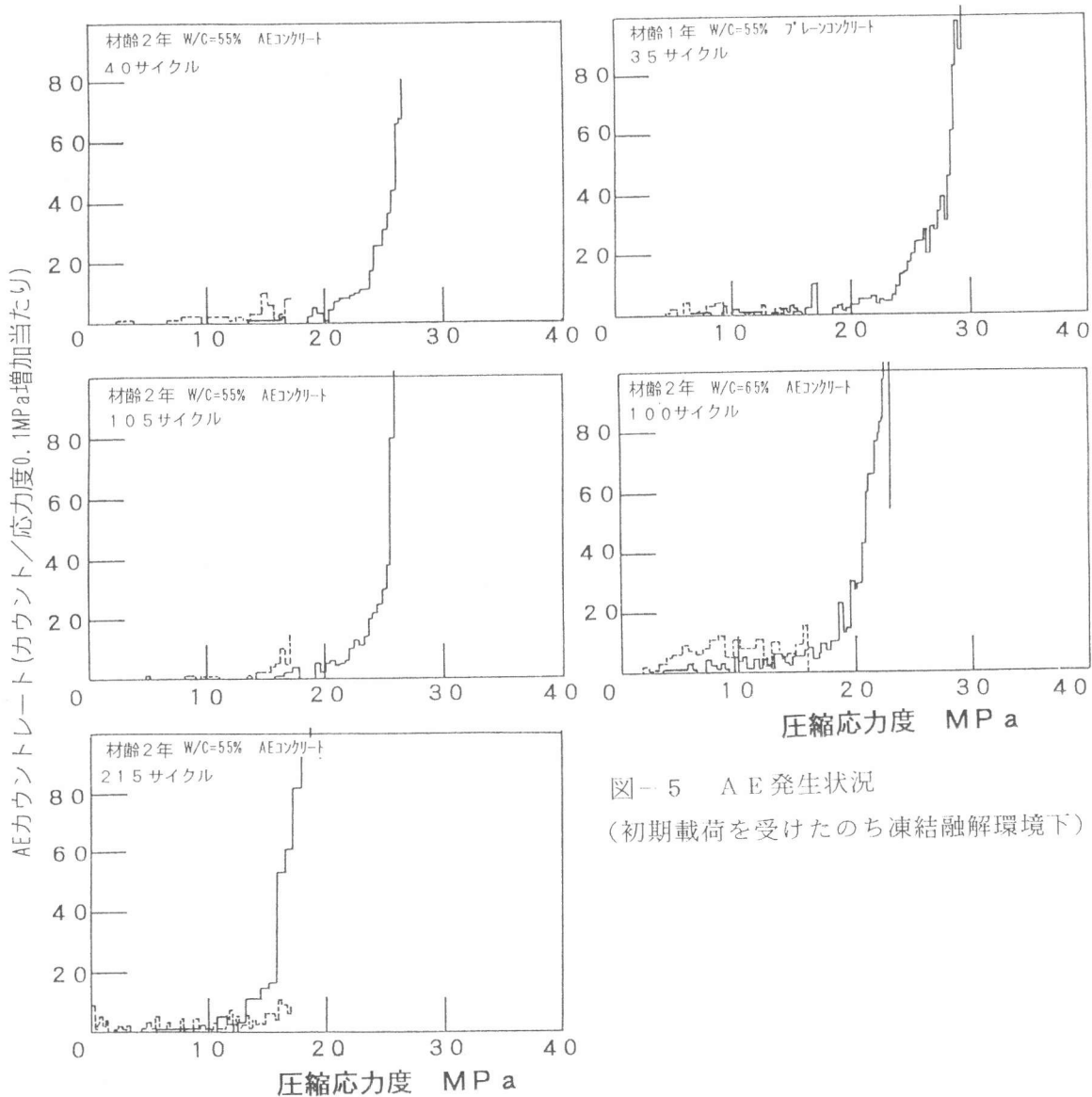


図-5 AE発生状況
(初期荷重を受けたのち凍結融解環境下)

激にFR値が低下しており、凍結融解作用の繰り返しによりコンクリートが劣化、弱体化し、低応力でひびわれの発生、進展が生じることを示している。

3. 3 カイザー効果と

残留ひずみの関係

圧縮試験時に初期載荷荷重で一旦除荷したときの残留ひずみと初期載荷後の放置期間の関係を図-7に示す。この図から、残留ひずみは、おおむね 20×10^{-6} 以下であり、放置期間が長くなるにつれて若干大きくなる傾向にある。なお、初期載荷時における残留ひずみは 25×10^{-6} 程度であった。次に、初期載荷後凍結融解作用の繰り返しを受けた供試体について圧縮試験時に初期載荷荷重で一旦除荷したときの残留ひずみと繰り返しサイクルの関係を図-8に示す。繰り返しサイクルが150サイクル程度まではサイクルの増加と共に、材齢2年 W/C55%のAEコンクリート、材齢2年 W/C65%のAEコンクリート、材齢1年 W/C55%のプレーンコンクリートの順で残留ひずみが大きくなっており、劣化の程度、FR値の低下と対応している。また、全体的に残留ひずみ量は、気中放置の場合と比較して大幅に大きくなっている。なお、150サイクル以降については、供試体表面のスケーリング等が激しくなり、ひずみの測定が困難となり、信頼できるデータが得られなかった。

次に、各供試体のFR値と残留ひずみの関係を図-9に示す。各々の条件で、FR値が低下するにつれて残留ひずみが増加する傾向が認められるが、その増加割合は、劣化が進行していると考えられるものほど大きい

特に初期載荷材齢28日で初期載荷後気中放置した供試体では、放置期間が数日でFR値が急激に減少するが残留ひずみはほとんど増加していない。このことは、先に述べたように、水和反応の継続等で初期載荷荷重以下の荷重レベルで発生するAEは、初期載荷後新たに水和反応等で生成されたものが破壊するのみで既存のコンクリートの破壊進行にはほとんど関係せず、一方、劣化が進行して初期載荷荷重以下で発生するAEは、既存のコンクリートそのものの破壊進行によるものであることを示唆している。これらの現象は、今後さらに多くの要因について、履

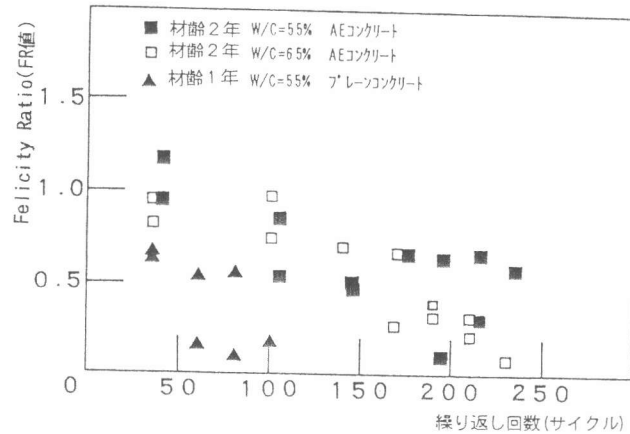


図-6 FR値と凍結融解サイクルの関係

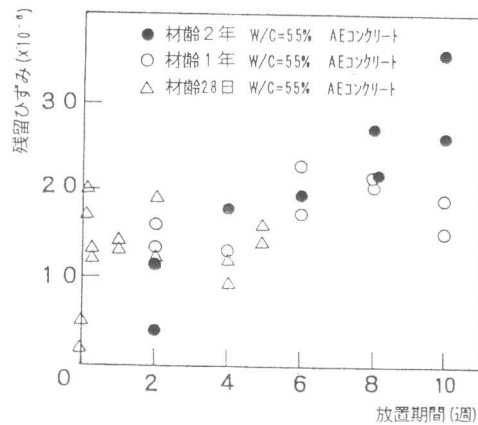


図-7 残留ひずみと放置期間の関係

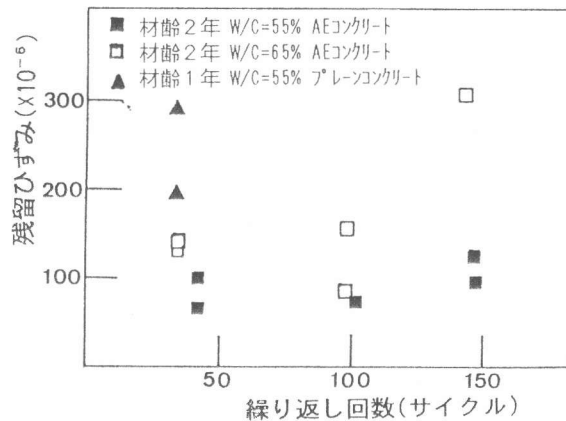


図-8 残留ひずみと凍結融解サイクルの関係

歴，A E発生挙動，ひずみ関係等を精密に調査することにより，コンクリートの劣化の評価に有効に利用できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究は，圧縮荷試験におけるA E特性からコンクリートの劣化程度を評価する方法の開発のための基礎資料を得ることを目的とした一連の研究のうち，コンクリートにおけるカイザー効果特性について実験的に明らかにしたものである。得られた結果を以下に要約し，本研究のまとめとする。

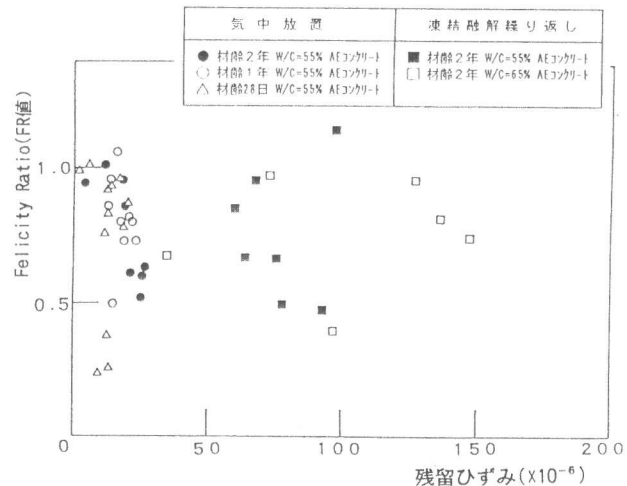


図-9 FR値と残留ひずみの関係

- (1) 初期荷重時材齢28日程度の若材齢コンクリートであれば，初期荷重後数日でカイザー効果は曖昧となる。材齢が1～2年程度のコンクリートでは，荷重後4～5週間程度気中に放置していてもカイザー効果は比較的明確に認められる。しかし，荷重後10週間程度経過するとカイザー効果は曖昧になる。
- (2) 初期荷重後凍結融解作用の繰り返しを受けると，相対動弾性係数が70%に低下するあたりから圧縮試験において初期荷重荷重よりかなり低い荷重レベルからA E発生がみられるようになりカイザー効果が明確でなくなる。
- (3) 再荷重時に初期荷重荷重で一旦除荷した時の残留ひずみは，気中放置の場合は放置期間の増加と共に若干増加する傾向がある。凍結融解の繰り返し作用を受けた場合は，残留ひずみ量は大幅に大きくなり，サイクルの増加と共に大きくなる傾向がある。
- (4) FR値が低下するにつれて残留ひずみは大きくなり，その増加割合は，劣化が進行していると考えられる状態ほど大きい。

参考文献

- 1) 丹羽義次監修，大津政康：A Eの特性と理論，1988.8
- 2) 矢村潔，長井吾朗：劣化コンクリートのA E特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.853-858，1993.7
- 3) 矢村潔 ほか：凍結融解作用を受けたコンクリートのA E特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.1221-1226，1995.6