

# コンクリートの高温下における材料強度のひずみ速度依存性

## STRAIN RATE EFFECT ON CONCRETE STRENGTH UNDER HIGH TEMPERATURE

白井孝治\*、柳下拓也\*\*、広永道彦\*\*\*、伊藤千浩\*\*\*\*

Koji SHIRAI, Takuya YAGISHITA, Michihiko HIRONAGA and Chihiro ITO

\* 工博 主任研究員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

\*\* 工修 研究員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

\*\*\* 工 主任研究員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

\*\*\*\* 工博 上席研究員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

キーワード：コンクリート，圧縮強度，引張強度，ひずみ速度依存性，高温

(Concrete, Compressive strength, Tensile strength, Strain rate effect, High temperature)

### 1. はじめに

海外では、原子力発電所から取り出された使用済燃料をキャニスタと呼ばれる金属製の密封容器に収納し、円筒形状の鉄筋コンクリート構造物で貯蔵する、いわゆるコンクリートキャスク貯蔵が実用化している(図-1参照)。我が国では、金属キャスクによる貯蔵が実用化段階を迎えつつあるが、経済的な観点からも技術的に成立性のあるコンクリートキャスク貯蔵の実用化を図る必要がある。

コンクリートキャスクの構造強度部材については、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境、並びにその環境下での経年変化に対して信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度・性能を維持し、

必要な安全機能を失うことのないように設計する必要がある。

コンクリートキャスク本体は、約数十年程度の供用期間中、使用済燃料の発熱により高温環境下にさらされる。キャスク取扱時の落下事故等により衝撃的な苛酷な外力を受けた場合、その応答の評価においては、構成材料の力学的性質の温度依存性<sup>1)</sup>やひずみ速度効果<sup>2)</sup>の影響を考慮する必要がある。我が国の重要な原子力施設のコンクリート材料については、表-1に示される温度制限値<sup>3)</sup>が設定されている。しかしながら、高温下において動的荷重を受けるコンクリート材料の挙動については十分に解明されていない<sup>1)</sup>。

本研究では、普通コンクリートを対象として、高温下における材料強度試験を実施し、コンクリート材料の温度依存性やひずみ速度効果に関する基礎的な物性を示すとともに、コンクリートの骨格構造の変化が動的な挙動に及ぼす影響について述べる。

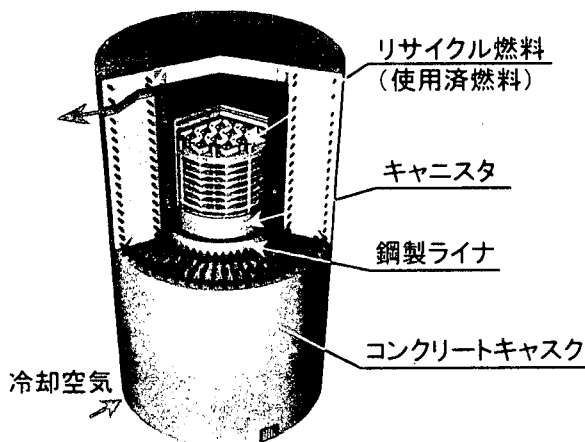


図-1 コンクリートキャスクの概念

表-1 コンクリートの温度制限値<sup>3)</sup>

状態	コンクリート温度 (°C)	
	一般部分	局部
通常運転時	65	90 <sup>*1</sup>
事故時	175	350 <sup>*2</sup>

\*1: 配管貫通部など

\*2: 事故時の配管破断による高温のジェットを受ける部分など

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料

試験では、普通ポルトランドセメント(比重 3.16)を使用した。表—2に、使用した骨材の物理特性を示す。骨材は、JASS5N<sup>4)</sup>で規定される仕様を満足する材料とした。

### 2.2 コンクリートの配合

表—3に、コンクリートの配合を示す。目標スランプは  $10 \pm 2$ cm、目標空気量は 4.5 とした。また、水セメント比は、50%と 60%の2種類とした。混和剤としては、ポソリス No. 70 を使用した。

### 2.3 試験方法

#### (1) 試験項目

表—4に、試験項目を示す。また、表—5に、試験装置の概要と主な仕様を示す。低速載荷試験装置では、変位制御型サーボ式アクチュエータによりひずみ速度が  $10^{-6} \sim 10^{-3}/\text{sec}$  の範囲の試験が可能である。また、中高速載荷試験装置では、中速ひずみ速度領域 ( $10^{-3} \sim 10^{-1}/\text{sec}$ ) を対象とした油圧式載荷装置と、高速ひずみ速度領域 ( $10^0 \sim 10^2/\text{sec}$ ) を対象とした Split Hopkinson Pressure Bar 法 (以下 SHPB 法と呼ぶ) の原理を利用した方式<sup>2)</sup>を採用している。

図—2に、SHPB法を適用した圧縮強度試験<sup>2)</sup>の概要を示す。打撃棒を入力棒へ衝突させ、その衝突で入力棒内に発生する応力波により、供試体に動的な負荷を与える。矩形応力波によるひずみは、入力

表—2 骨材の物理特性

	細骨材	粗骨材
産地	大井川水系川砂	大井川水系川砂利
表乾比重	2.61	2.64
吸水率	1.56%	0.77%
最大寸法	5mm	20mm
粗粒率	2.63	6.63

表—3 コンクリート配合

W/C %	S/a %	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		C	W	G	S	混和剤
60	53.5	280	168	974	858	4.48
50	53.4	336	168	950	837	5.38

表—4 試験項目

試験項目	圧縮試験	引張試験
供試体寸法	$\phi 10\text{cm} \times \text{H}20\text{cm}$ $\phi 10\text{cm} \times \text{H}10\text{cm}$ $\phi 8\text{cm} \times \text{H}8\text{cm}$	$\square 10\text{cm} \times \text{H}30\text{cm}$ (直接引張型)
試験温度	R.T. (標準養生), 65°C, 90°C	
目標ひずみ速度	静的、動的 ( $10^{-5} \sim 10^1$ 程度)	

棒と出力棒に取り付けられたひずみゲージにより計測され、これにより、供試体の応力等が求められる。この試験では、入・出力棒にひずみゲージを2枚ずつ貼り、これらの測定値を用いて入力波と反射波を数学的に分離する手法を用いた<sup>2)</sup>。また、コンクリートが複合材料であることを勘案して直径 100mm の棒を使用した。なお、応力波伝播時の分散効果による測定誤差を低減するため、緩衝材を用いて入射波を凸状の滑らかな波形とした<sup>2)</sup>。

#### (2) 供試体

圧縮試験では、低中速ひずみ速度 ( $10^{-6} \sim 10^{-1}/\text{sec}$ ) 領域では直径 10cm×高さ 20cm の円柱供試体を使用し、高速ひずみ速度 ( $10^0 \sim 10^2/\text{sec}$ ) 領域では直径 10cm×高さ 10cm 並びに直径 8cm×高さ 8cm の2種類の円柱供試体を使用した。なお、供試体端面の平行度に留意し、端面を許容精度 0.1mm として平滑に研磨した。

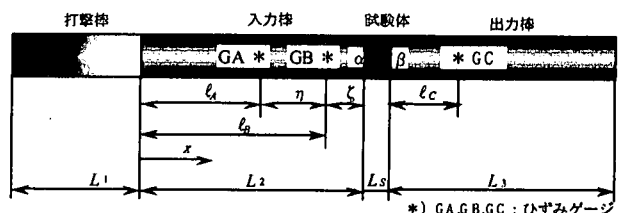
引張試験では、一辺 10cm×高さ 30cm の角柱供試体を用いた。供試体の端部には、長さ 12cm の先端テーパ付きボルトを埋め込み、そのボルトに治具を取り付けて、変位制御型サーボ式アクチュエータにより引張荷重を単調に載荷した。

#### (3) 養生方法

図—3に、高温養生した供試体(水セメント比 50%) の養生温度および期間と重量変化率を示す。供試体の材令 5 週間後から加熱を開始し、自動制御可能な恒温槽内で 65°C, 90°C (湿度 65%RH) の2温度で 6 週間養生した。高温養生した場合、供試体の水分が散逸しているが、試験時にはほぼ安定していることがわかる。

表—5 試験装置の主な仕様

試験装置名	低速載荷	中高速載荷	
	サーボ式	油圧式	SHPB 法式
ひずみ速度	$10^{-6} \sim 10^{-3}/\text{sec}$	$10^{-3} \sim 10^{-1}/\text{sec}$	$10^0 \sim 10^2/\text{sec}$
最大荷重	490kN	490kN	-----
載荷速度	0.01 ~ 10 mm/sec	0.6 ~ 3 m/sec	6~20m/sec (衝突速度)
ストローク	-50 ~ +50mm	0 ~ +100mm	-----



図—2 SHPB法による圧縮強度試験の概要<sup>2)</sup>

### 3. 試験結果

#### 3.1 鉱物分析

高温によるセメント鉱物の変質を把握するため、強度試験前に、高温養生した供試体（水セメント比 50%）のペースト部分を用いて鉱物分析を実施した。表一六に、分析項目と結果を示す。

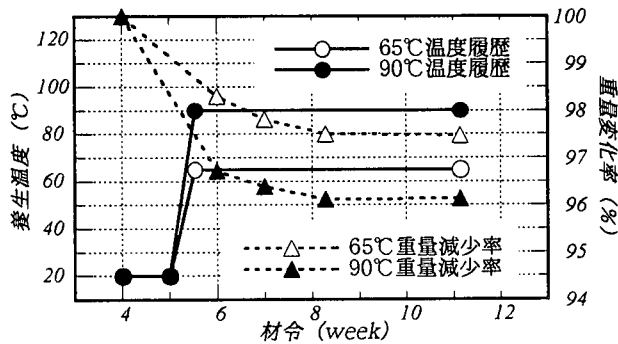
X線回折によれば、20℃並びに 65℃では水酸化カルシウムやモノサルフェート水和物が認められるが、90℃ではモノサルフェート水和物が同定できない結果となった。また、示差熱分析の結果より、高温では、カルシウムシリケート水和物の重量も減少している。

空隙率については、高温養生下でも変化はないものの、細孔径については増加する傾向にあり、ペーストの構造が多孔質な構造へと変化しつつあると考えられる。また、NMR（核磁気共鳴分析法）に

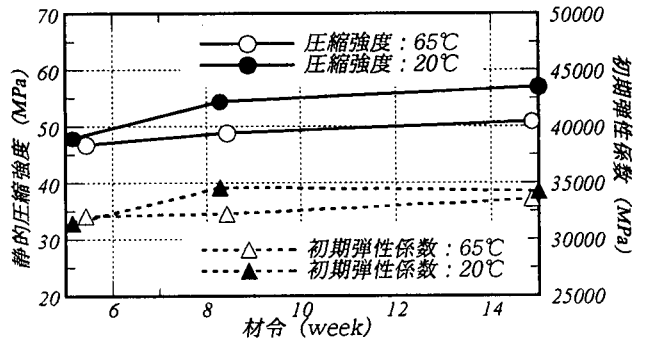
よる分析結果では、高温になるに従い未水和物の骨格を表す Q0 やカルシウムシリケート水和物の骨格を表すスペクトル Q1 が減少しており、セメントの骨格構造が熱の影響により変化していることが理解される。

#### 3.2 静的圧縮強度試験

図一四に、養生温度 65℃で水セメント比 50%の供試体の圧縮強度と初期弾性係数の測定結果を示す。加熱開始直後はコンクリート内の水分の逸散量が大きい、圧縮強度については長期的には加熱開始時からほぼ一定であり、初期弾性係数についても同様な傾向にある。一方、鉱物分析結果によれば、カルシウムシリケート水和物の C-S-H 粒子の構造に変化が見られており、高温養生下におけるコンクリート強度の発現の低下に大きく影響しているものと推察される。



図一三 供試体の養生温度と重量変化率



図一四 静的圧縮強度と初期弾性係数 (65℃, W/C50%)

表一六 鉱物分析項目と分析結果

分析項目\養生温度	20℃	65℃	90℃	
X線回折 水和物の同定	Ca(OH) <sub>2</sub> 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaCO <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O 未水和クリンカー鉱物	Ca(OH) <sub>2</sub> 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaCO <sub>3</sub> ·12H <sub>2</sub> O 未水和クリンカー鉱物	Ca(OH) <sub>2</sub> 未水和クリンカー鉱物	
示差熱分析 水和物重量変化 Ca(OH) <sub>2</sub> 重量変化	23.0% 24.9%	20.7% 25.4%	19.8% 25.0%	
空隙量	25.75%	26.35%	26.43%	
細孔径分布				
固相・結晶水分析 (NMR) C-S-H 構造の変質				

### 3.3 動的強度試験結果

#### (1) 応力-ひずみ曲線

図-5に、水セメント比 60% 供試体のコンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線を示す。標準養生した試験体については、ひずみ速度の増加に伴い初期弾性係数が大きくなる傾向にあり、最終強度や最終強度に至る限界ひずみも大きくなる傾向にある。一方、65℃では初期弾性係数については、ひずみ速度に顕著に依存せず、最終強度も低い値となっている。

#### (2) 初期弾性係数

図-6に、水セメント比 50%と 60%の供試体のコンクリートの初期弾性係数の測定結果を示す。なお、縦軸は、動的試験で得られた初期弾性係数に対し、水中養生供試体を用いた静的試験（ひずみ速度  $10^{-6}/\text{sec} \sim 10^{-5}/\text{sec}$ ）で得られた値で除して無次元化し、動的倍率として表示した。

標準養生供試体については、初期弾性係数の動的倍率はある一定値に収束する傾向にあり、水セメント比 50%ではひずみ速度  $10^{-3}/\text{sec}$  付近で約 1.05、水セメント比 60%ではひずみ速度  $10^{-2}/\text{sec}$  付近で約 1.10 に収束している。一方、高温では、標準養生供試体で得られた値の 10%~20%程度小さな値となっている。

#### (3) 圧縮強度・引張強度

図-7に、コンクリート（水セメント比 50%と 60%）の圧縮強度と引張強度の測定結果を示す。なお、縦軸は、初期弾性係数と同様に、動的試験で得られた終局強度に対し標準養生供試体を用いた静的試験で得られた値で除して無次元化し、動的倍率として表示した。

標準養生供試体については、動的圧縮強度や引張強度の動的倍率はひずみ速度の増加に伴い大きくなる。特に、圧縮強度については、 $10^0/\text{sec}$  付近から急激に大きくなる傾向にある。

高温養生供試体については、標準養生供試体で得られた値の 10%~30%程度小さな値となっているが、高温でもコンクリートのひずみ速度依存性は期待できる。ただし、水セメント比 50%の場合、65℃における強度倍率のひずみ速度に対する増加率の値は、90℃における増加率の値よりも小さくなっている。3.1 節の鉱物分析結果でも示したように、90℃では熱的な影響により構成鉱物に変質しており、高温下における動的な材料特性は、コンクリートの含水率や構成鉱物の変質に影響を受けることが示唆される。

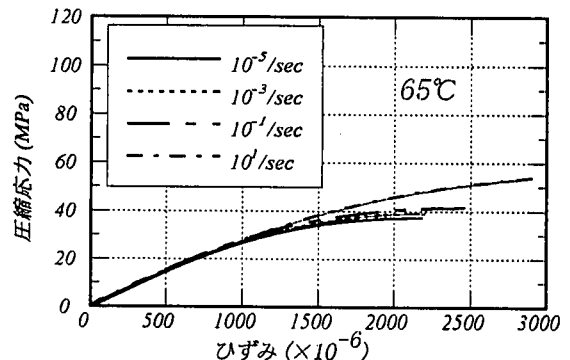
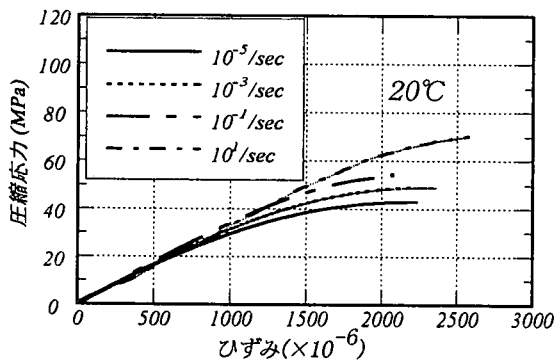


図-5 コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線（水セメント比 60%）

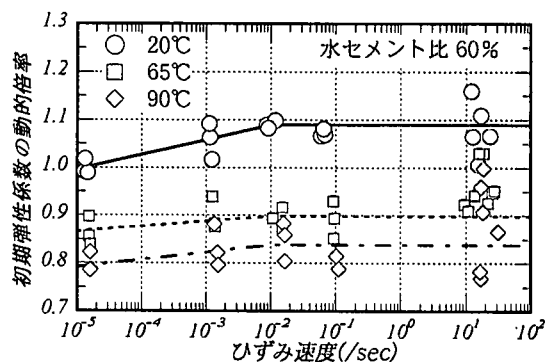
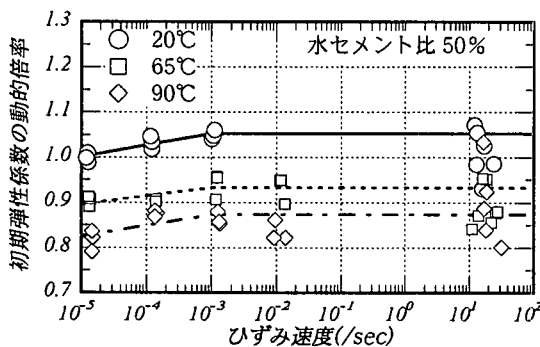
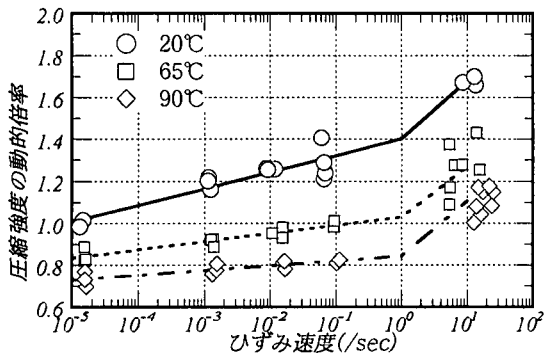
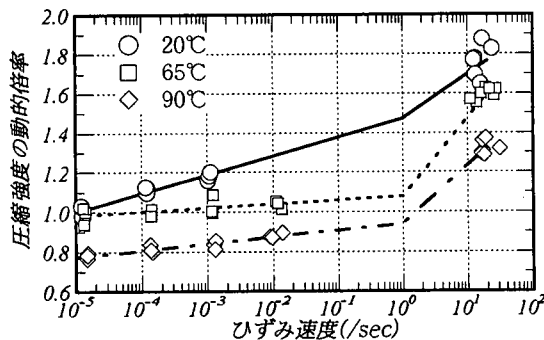
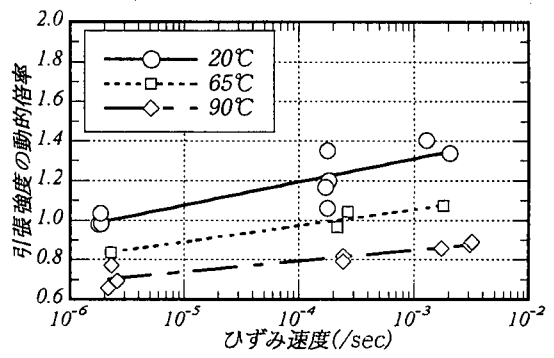


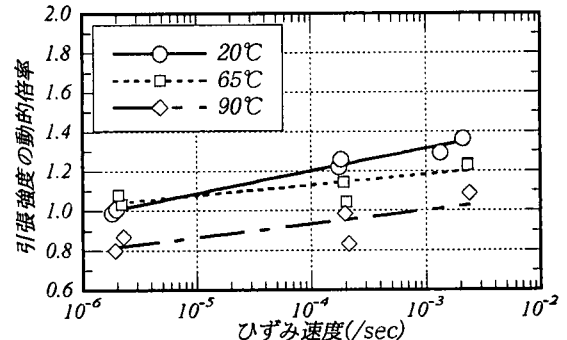
図-6 コンクリートの初期弾性係数のひずみ速度依存性（水セメント比 50,60%）



(水セメント比60%)



(水セメント比50%)



図一七 コンクリートの圧縮強度と引張強度のひずみ速度依存性

#### 4. 骨格構造が動的挙動に及ぼす影響

##### 4.1 多孔質モデルの表示

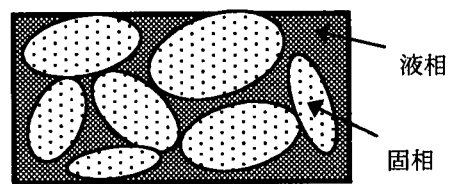
前節までに得られた高温養生したコンクリートの性質として、コンクリート中の自由水が散逸し乾燥状態にあること、また、鉱物が熱的影響を受けて変質しコンクリートが多孔質な構造に変化する可能性が示唆された。したがって、高温下におけるコンクリートの動的挙動は、これらの影響を受けて複雑に変動するものと考えられるが、十分に解明されていないのが現状である<sup>1)</sup>。

本節では、コンクリートの骨格構造の変質が動的挙動に及ぼす影響を把握するため、コンクリートを多孔質材料として取り扱った多孔質モデルによる衝撃応答解析を実施した。

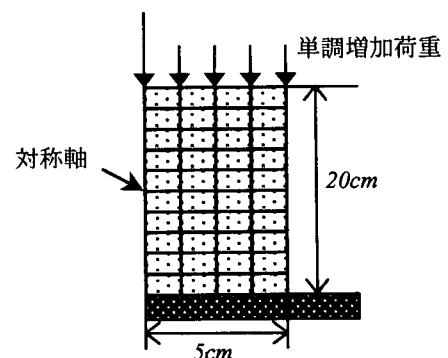
図一八に、多孔質モデルを示す。コンクリートを巨視的に固体と液体の二相系の飽和弾性構造体としてモデル化した。固体相と液体相の二相から成る材料の波動理論の基礎は、Biotにより二相混合体理論<sup>5)</sup>として古くから提案され、土質材料の動的応答問題に適用されている。コンクリート材料は土質材料に比べて透水性が小さいことを考慮し、液相の慣性力を考慮できるように修正  $\alpha$ - $\pi$ 法<sup>6)</sup>を適用し、時間領域解析に拡張し、二次元有限要素法に適用した。

##### 4.2 数値解析モデル

図一九に、有限要素法の解析モデルを示す。幅10cm×高さ20cmのコンクリート上面に単調に増加する荷重を負荷し、解析モデル下面の鉛直方向変位を拘束した。要素数は40、節点数は55である。物性値は、固相はコンクリートの値で代表し、液相の物性は水の値で代表した。



図一八 多孔質モデル



図一九 解析モデル

### 4.3 数値解析結果

図-10 に、荷重の負荷速度をパラメータとして得られたみかけひずみ（モデル上面の応答変位から換算）とモデル中央断面の平均全応力の関係を示す。平均全応力は、液相の間隙圧力と固相の有効応力の合計であり、ひずみ速度が大きくなると液相の間隙圧力が大きくなる。したがって、コンクリートを飽和材料として仮定した場合、荷重載荷直後の弾性領域では、ひずみ速度が大きくなると見かけの初期弾性係数が大きくなることが理解され、図-5 で示した測定結果においても同様な傾向が伺える。

コンクリートの多孔質性や不飽和度を、巨視的に透水係数  $k$  と液相の体積弾性係数  $K_f$  で代表して、これらをパラメータとして衝撃解析を実施した。図-11 に、解析結果を示す。見かけの初期弾性係数の動的倍率は、透水係数  $k$  の値にかかわらず一定の値に飽和する傾向にあり、透水係数  $k$  が小さいほどひずみ速度の低いところで飽和している。また、その飽和値は液相の体積弾性係数  $K_f$  に大きく依存していることが判る。図-6 で示した測定結果では、水セメント比が小さくなると、弾性係数の倍率がひずみ速度の低いところで飽和している。一般的に水セメント比が小さくなると透水係数  $k$  は小さくなることから知られており、上記のパラメータ解析より得られた知見と同様な傾向を示している。

### 5. 結論

我が国の原子力施設における鉄筋コンクリート製の重要構造物については、温度制限値（通常運転時：一般部 65℃、局部 90℃）が設定されており、この制限値範囲内におけるコンクリート材料の動的強度については、十分なデータが存在しない。このため、養生温度（20℃～90℃）やひずみ速度（ $10^{-5}/\text{sec}$ ～ $10^1/\text{sec}$ ）、水セメント比（50%、60%）をパラメータとして動的強度試験を実施した。さらに、熱的影響を受けたコンクリートの微視的な特徴を把握するため、鉱物分析を実施した。さらに、これらの微視的な特徴が動的挙動に与える影響を把握するため、多孔質モデルを用いた衝撃応答解析を実施し、弾性領域における挙動を定性的に把握した。

今後は、終局状態まで含めたコンクリートのひずみ速度依存性について検討するため、コンクリート材料の非線形性や破壊時のダイレタンシーの効果を検討した多孔質モデルに拡張する。

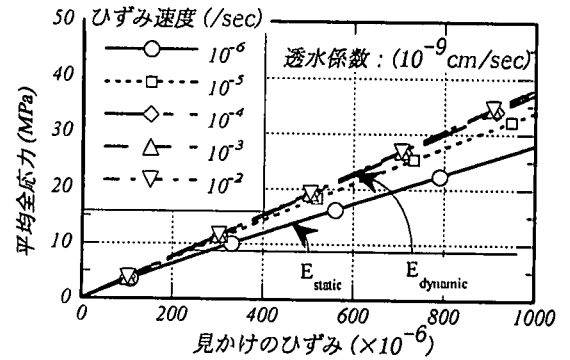
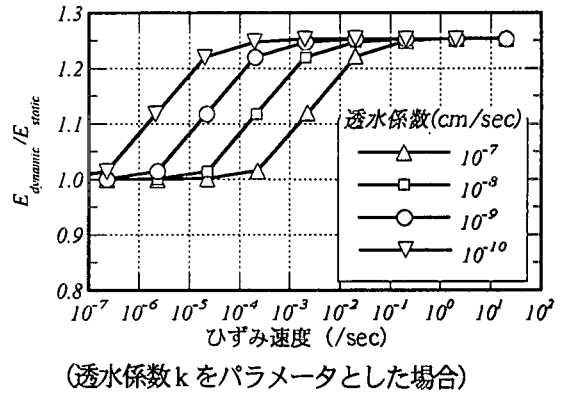
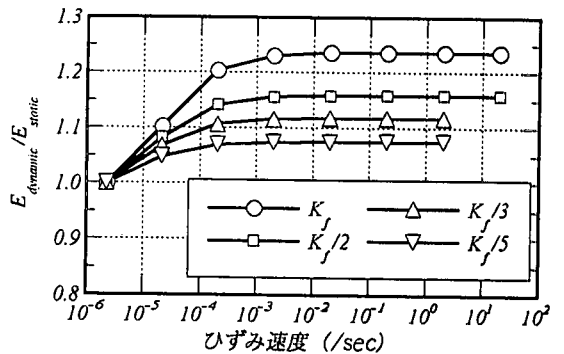


図-10 みかけひずみと平均全応力の関係



(透水係数  $k$  をパラメータとした場合)



(液層の体積弾性係数  $K_f$  をパラメータとした場合)  
図-11 初期弾性係数の動的倍率に関する解析結果

### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧（第二版），技報堂出版，1996。
- 2) 白井 孝治他：コンクリート強度のひずみ速度依存性の定式化 -ホプキンソン棒法式衝撃試験方法の適用と圧縮強度試験結果-、構造工学論文集 Vol.44A、1998。
- 3) 日本建築学会：原子力用コンクリート格納容器設計指針案・同解説、丸善、1978。
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N（第二版），1991。
- 5) M.A.Biot：Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, Phys. Vol.33, 1962。
- 6) 塩尻 弘雄：二相体の有限要素法の一定式化、構造工学論文集 Vol.43B、1997。