

# 論文 高速圧縮荷重を受けるコンクリートの力学特性に関する研究

荒井正直\*1・谷川恭雄\*2・森博嗣\*3・平岩陸\*4

**要旨：**地震や風などの比較的高速度な外力が作用すると、静的な条件下に比べて、材料の力学的性質が変化することが知られている。本研究では、コンクリートの破壊性状に与える載荷速度の影響に関する基礎的な実験を行い、速度効果によるコンクリートの動力学特性について考察した。また、筆者らが提案した非連続体モデルを用いた動的解析手法である粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)を用いた解析を行い、その結果と実験結果とを比較し、高速変形挙動に対する本解析手法の適用性について検討した。

**キーワード：**粘弾塑性解析、非連続体モデル、粘性、高速載荷、応力-ひずみ関係

## 1. まえがき

一般に、地震や風などの比較的高速度な外力が作用すると、静的な条件下に比べて、材料の力学的性質は異なったものとなる[1,2,3]。構造物が破壊に至る原因の多くはこれらの高速な外力であり、構造材料の速度効果に対する動力学特性の把握は重要な課題といえる。近年、実験装置の発達によって、このような動的荷重に対する測定が比較的容易に行えるようになり、これらの成果は、地震力や衝撃力のような瞬時に強大な外力が作用するコンクリート構造物の破壊力学特性を知る上でも重要である。

本研究では、コンクリートの破壊性状に与える載荷速度の影響について基礎的な検討を行うため、一軸圧縮載荷実験および割裂引張載荷実験を行い、速度効果によるコンクリートの力学特性の変化性状について考察した。また、筆者らが提案した非連続体モデルを用いた動的解析手法である粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)による破壊シミュレーションを行い、実験結果と比較することによって、高速変形挙動に対する本解析手法の適用性について検討した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 供試体の作製

本実験では、圧縮試験および割裂引張試験用のコンクリート円柱供試体(共に $\phi 5 \times 10\text{cm}$ )をそれぞれ27本および9本作製した。コンクリートの調合を表-1に示す。水セメント比W/Cを0.3、0.4および0.5の3水準とし、W/C=0.3および0.4のコンクリートには混和剤としてポリカルボン酸塩系高性能減水剤を用いた。セメントとしては早強ポルトランドセメントを用いた。いずれの試料においても、粗骨材最大寸法および単位粗骨材量はそれぞれ10mmおよび $791\text{kg/m}^3$ の一

表-1 供試体の種類とコンクリートの調合

	W/C	s/a	W	C	S	G	HWR/C
C30	0.3	0.43	225	750	608	791	0.015
C40	0.4	0.46	240	600	692	791	0.004
C50	0.5	0.50	240	480	791	791	—

[Notes] W/C: Water cement ratio, s/a: Sand aggregate ratio, W: Water ( $\text{kg/m}^3$ ), C: Cement ( $\text{kg/m}^3$ ), S: Sand ( $\text{kg/m}^3$ ), G: Gravel ( $\text{kg/m}^3$ ), HWR: High-range water reducing agent.

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修 (正会員)

\*2 名古屋大学教授 工学研究科建築学専攻、工博 (正会員)

\*3 名古屋大学助教授 工学研究科建築学専攻、工博 (正会員)

\*4 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻 (会員外)

定とした。

供試体は1週間水中養生した後、研磨による端面成形後、一軸圧縮試験および割裂引張試験に供した。

### 2.2 計測方法

高速載荷時のコンクリートの変形挙動を、応力下降域まで含めて検討するため、一軸圧縮試験では縦・横ひずみに加えて軸方向の変位を、割裂引張試験では横方向の変位を測定した。前者では、ひずみ計測用のワイヤーストレインゲージ(測定長: 30mm)を供試体中央側面に縦・横それぞれ2枚ずつ対称位置に貼付し、載荷板間に変位計を2本セットした。また、後

者では、載荷軸方向に垂直な方向に変位計を供試体側面の対称な位置に2本セットした。縦・横ひずみ、変位および荷重の測定・処理には、高速A/D変換装置を用いた。

### 2.3 載荷方法

200tf万能試験機の変位速度制御機構により、表-2に示す3段階に載荷速度を変化させて一軸圧縮試験および割裂引張試験を行った。各速度階は、載荷速度順にH, M, Lシリーズとし、表-2中の載荷速度は、万能試験機に入力値として与えた。また、各シリーズの供試体数は圧縮試験に9本、割裂試験に3本の計12本である。

## 3. 実験結果

### 3.1 一軸圧縮試験

図-1および図-2は、それぞれコンクリート供試体の圧縮応力 $\sigma_c$ -圧縮ひずみ $\epsilon_c$ 曲線および圧縮応力 $\sigma_c$ -ポアソン比 $\nu$ 曲線を、コンクリートの調合別に示したものであり、載荷速度がコンクリート全体系の圧縮変形挙動に及ぼす影響を比較したものである。図-1によれば、実験誤差はあるものの、本実験の比較的低速といえる速度条件でも載荷速度が大きいものほど、圧縮強度 $F_c$ は若干増加し、応力下降域の勾配は同一か、やや脆性的となる。これは、コンクリート供試体に蓄えられるひずみエネルギーが、載荷速度の高速なものほど大きくなるためであり、一般に指摘されているコンクリートの材料的な高強度化に伴う脆性化と類似した性状となるが、いわゆる速度効果、すなわち粘性によるものであると考えられる。この変化は、特にLシリーズと、MおよびHシリーズとの比較で観察されるが、MシリーズとHシリーズの間には、実験値のばらつきもあり、顕著な差はみられない。なお、高強度なC30の場合、比較的高速なMおよびHシリーズにおける最大応力点直後の一瞬に不安定な挙動がみられた。これは、破壊の衝撃によって変位計が載荷板から瞬間的に離れることによるものと考え、図-1(b)に示したデータは、その数点の測定結果を除いている。また、図-2から明らかなように、載荷速度の増加にともない、ポアソン比 $\nu$ は増加し、横方向の変形性状の延性化が観察される。

### 3.2 割裂引張試験

図-3は、全シリーズのコンクリート供試体の引張応力 $\sigma_t$ -横ひずみ $\epsilon_t$ 曲線を、供試体の種類別に示しており、載荷速度がコンクリート全体系の引張変形挙動に及ぼす影響を比較したものである。いずれの図も、実験誤差はみられるものの、載荷速度が大きくなるにつれて、わずかながら延性的な応力下降域を示しているが、横方向の変位の測定精度にも疑問があり、明らかな傾向は認められない。また、最大引張応力に関しては、C40では、載荷速度によらずほぼ一定であるが、

表-2 載荷速度と供試体の記号

Series	Loading speed(mm/s)	Test	Specimen name
H-series	0.83	C	HC1,MC1,LC1
			HC2,MC2,LC3
M-series	0.42		HC3,LC2,LC3
L-series	0.0083	T	HT,MT,LT

[Notes] C: Compressive test,  
T: Tensile splitting test.

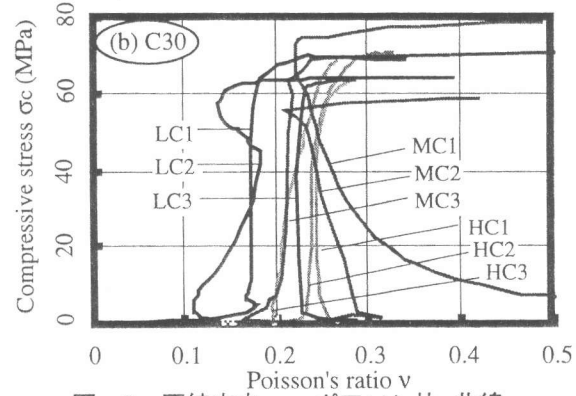
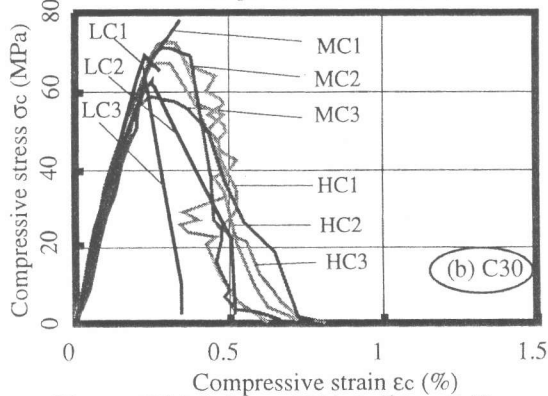
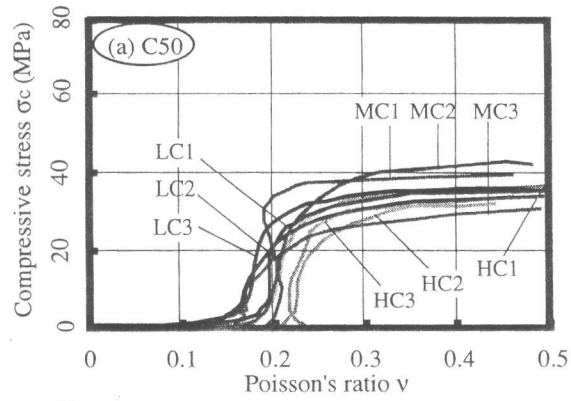
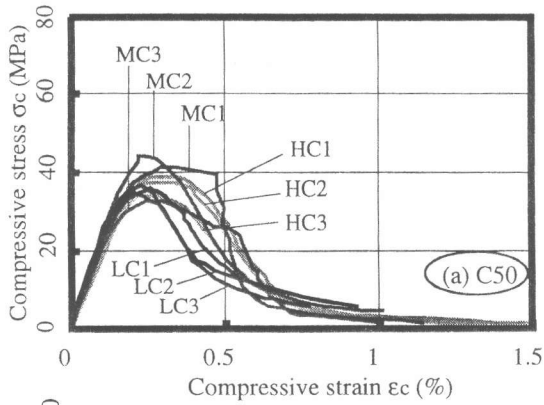


図-1 圧縮応力 $\sigma_c$ -圧縮ひずみ $\epsilon_c$ 曲線

図-2 圧縮応力 $\sigma_c$ -ポアソン比 $\nu$ 曲線

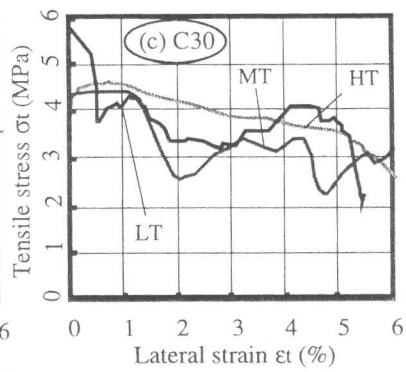
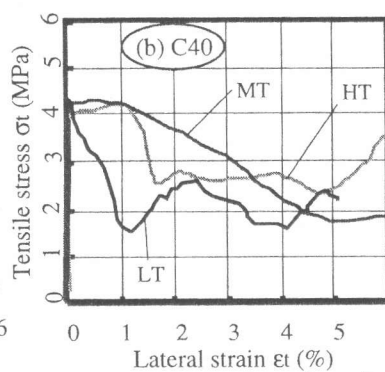
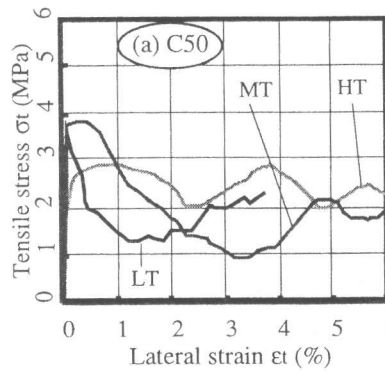


図-3 引張応力 $\sigma_t$ -横ひずみ $\epsilon_t$ 曲線

C50およびC30ではばらつきが大きい。

#### 4. 解析例

##### 4.1 解析の概要

上記の実験結果と比較・検討するために、VEPSEM解析によるコンクリートの一軸圧縮および割裂引張試験のシミュレーションを行い、その破壊性状に及ぼす荷速度の影響について検討した。VEPSEM解析手法の詳細は既報[4]を参照されたい。

本解析に用いた解析モデルは、図-4(a)および(c)に示すように、初期状態として32および16個の粗骨材を2次元に配置した32Bモデルおよび16Bモデルであり、前者は一軸圧縮試験、後者は割裂引張試験のシミュレーションに用いた。なお、16Bモデルは、32Bモデルの円形断面内の粗骨材配置と一致させた(図-4(b))。また、表-1の調合を基に、実験に用いた粗骨材の試料全体に対する面積比を算出し、その値とほぼ一致するように解析モデルを設定している。

本解析では、いずれの場合も、時間刻みを $2.5 \times 10^{-6}$ 秒として、圧縮試験では圧縮ひずみが0.5%に達するまで、割裂試験では横ひずみが0.2%に達するまでの現象について計算を行った。解析に

用いた入力データを表-3に示す。なお、本解析に用いた入力データのうち、粘性 $\eta_m$ の値については、計算時間の都合上、前述の実験結果のうち、高速なHシリーズおよびMシリーズより得られた応力上昇域および最大応力点を本解析結果と比較して、両者が比較的一致する一定値を用いた。水セメント比の違いによるコンクリート供試体の強度変化に対して、今回の計算では、影響要因を簡略化するために純引張強度 $F_{tm}$ と弾性係数 $E_m$ を実測値に基づいて変化させた。以下の考察では、コンクリートの破壊特性のメカニズムを定量的に再現するモデルを構築するための基礎的な検討を行う。

#### 4.2 解析結果の考察

##### (1) 一軸圧縮試験

図-5は、実験によって測定

された各シリーズの圧縮応力 $\sigma_c$ -圧縮ひずみ $\epsilon_c$ 曲線とVEPSEMによる解析結果を比較したものである。同図によると、応力下降域の形状はほぼ再現されていると思われるが、高強度なC40およびC30では両者の差がやや大きい。この原因として、下降域における実験の計測誤差、単純な解析モデルの使用、あるいは粘性 $\eta_m$ を一定値にしたことなどが考えられるが、特に、粗骨材配置の2次元化や、単純なレオロジーモデルを用いていることによる影響が大きいものと思われる。

図-6は、各速度階における圧縮強度 $F_c$ および弾性係数 $E_c$ を比較するため、それぞれ、最も低速なLシリーズの圧縮強度 $F_{cl}$ および弾性係数 $E_{cl}$ で除した値をとり、それぞれ圧縮強度比( $F_c/F_{cl}$ )および弾性係数比( $E_c/E_{cl}$ )として各速度階別に比較したものである。また同図では、圧縮強度 $F_c$ および弾性係数 $E_c$ に及ぼす載荷速度の影響について実験結果と解析結果を比較している。なお、実験結果の圧縮強度 $F_c$ および弾性係数 $E_{cl}$ は、各速度階の測定値を平均したものであり、弾性係数 $E_c$ は、圧縮強度 $F_c$ の1/3における割線弾性係数を用いた。図-6(a)によると、実験結果から見られる速度効果は供試体の種類によらずほぼ同様の傾向を示しているが、解析結果では載荷速度差が大きいLシリーズとMシリーズの間で、強度増加が大きくなっている。これは、解析に用いた粘性の値 $\eta_m=0.1\text{MPa}\cdot\text{s}$ が多少大きかったためと考えられる。また、解析における速度効果は、高強度な材料ほど大きくなっており、実現象を表現するためには、高強度のものほど粘性 $\eta_m$ に小さな値を用いる必要があることがわかる。一方、図-6(b)では、弾性係数 $E_c$ に及ぼす載荷速度の影響が、実験結果では顕著に観察されるが、解析結果では、この傾向はほとんど見られず、弾性係数 $E_c$ に

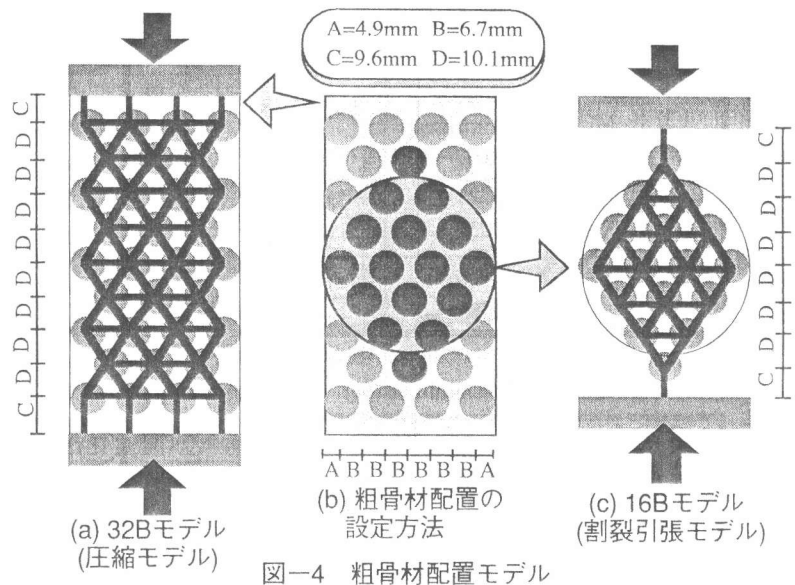


図-4 粗骨材配置モデル

表-3 入力データ

	Test	No.	$\tan\phi$	$F_{tm}$	$E_m$	$\eta_m$	$v$	$d$	$H_d$	$D$
32B-model	C	C30	0.5	5.0	34.5	0.1	H:0.8 M:0.4 L:0.01	9.6	100	50
		C40		4.1	31.0				79.8	
16B-model	T	C50		2.6	23.0					

[Notes] C: Compressive test, T: Tensile splitting test, No.: Specimen No.,  $\phi$ : Angle of internal friction,  $F_{tm}$ : Pure tensile strength (MPa),  $E_m$ : Elastic modulus (GPa),  $\eta_m$ : Viscosity ( $\text{MPa}\cdot\text{s}$ ),  $v$ : Loading rate (mm/s),  $d$ : Diameter of aggregate (mm),  $H_d$ : Initial distance between loading boards (mm),  $D$ : Width of specimen (mm).

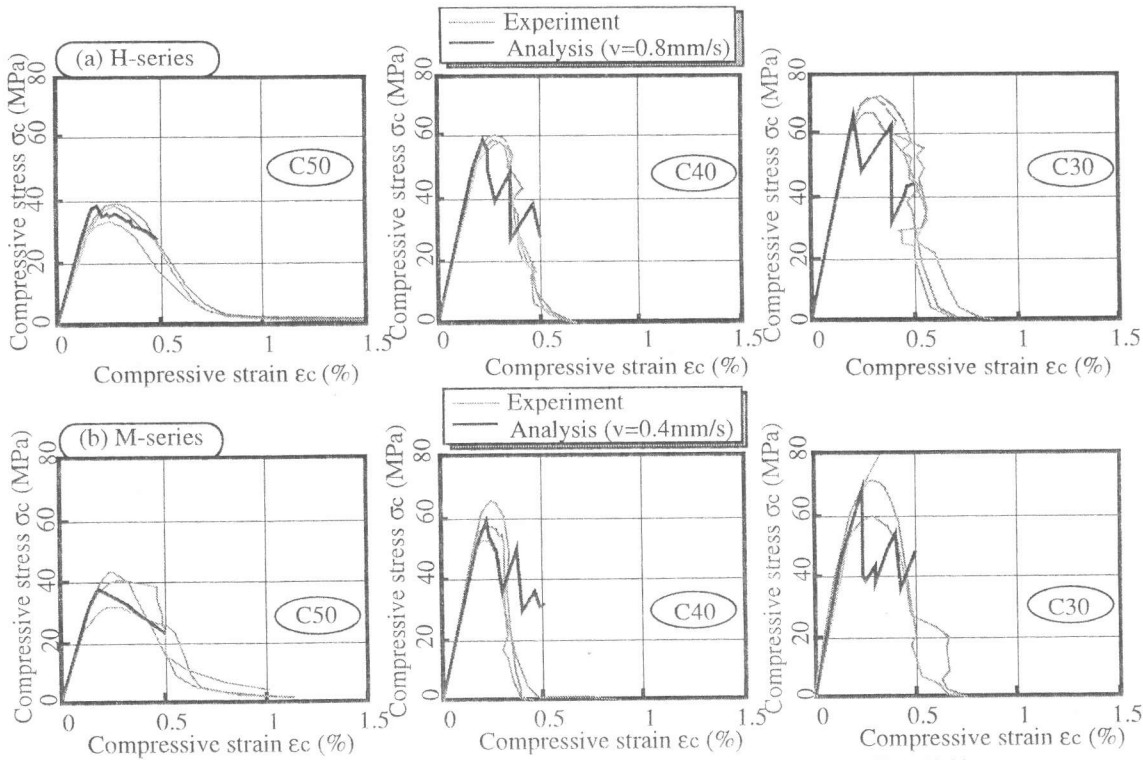


図-5 圧縮応力 $\sigma_c$ -圧縮ひずみ $\epsilon_c$ 曲線(実験結果と解析結果の比較)

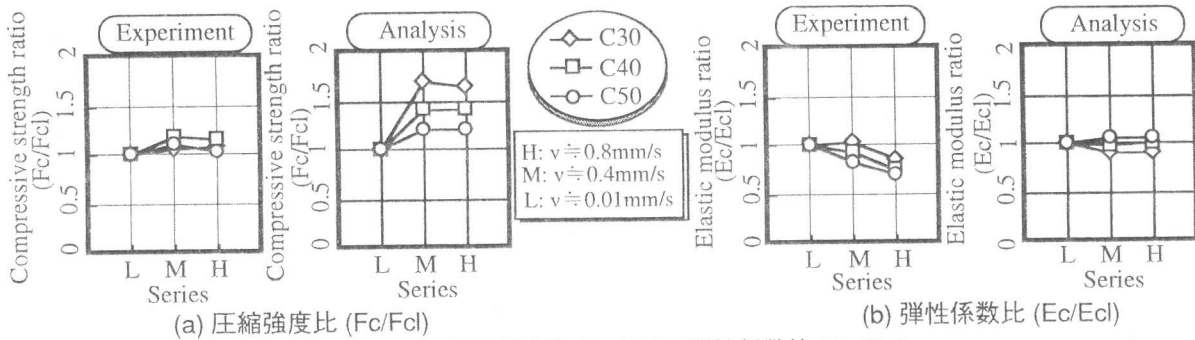


図-6 圧縮強度比( $F_c/F_{cl}$ )と弾性係数比( $E_c/E_{cl}$ )

与える粘性 $\eta_m$ の影響は、圧縮強度 $F_c$ の場合よりも小さくなる。実現象の速度効果を、本解析ではバネと並列に配置させたダッシュポットの粘性 $\eta_m$ だけを用いて表現しており、このレオロジーモデルの妥当性について今後さらに検討を行う必要があるものと考えられる。また、本実験では、載荷速度の増加に伴い、弾性係数 $E_c$ が減少する傾向が観察されており、その傾向は解析では再現できない。これは、本実験で用いた載荷速度の範囲内では、コンクリートが持つ粘性の効果が応力上昇域では比較的小さいためと思われ、上述の速度増加に伴う横方向変形状の延性化より推論すると、横方向変形の増大による側圧効果が小さくなるためと考えられる。しかし、この現象についてはデータも少なく今後詳細な検討を予定している。

## (2) 割裂引張試験

図-7は、実験によって測定された各シリーズの割裂引張応力 $\sigma_t$ -横ひずみ $\epsilon_t$ 曲線とVEPSEMによる解析結果を比較したものである。応力上昇域の形状については比較的よく一致しているものの、応力下降域においては、実験結果の延性的な性状を再現することはできず、解析の曲線は最大引張応力点以降、急速に抵抗力を失っている。これは、粗骨材配置の単純性に起因するものであり、モデルが単純であるためサスペンション要素がピーク後、ほぼ同時に破壊し、クラックが実際よりも急激に進展するためと考えられる。また、実測方法についてもさらに検討する必要がある。

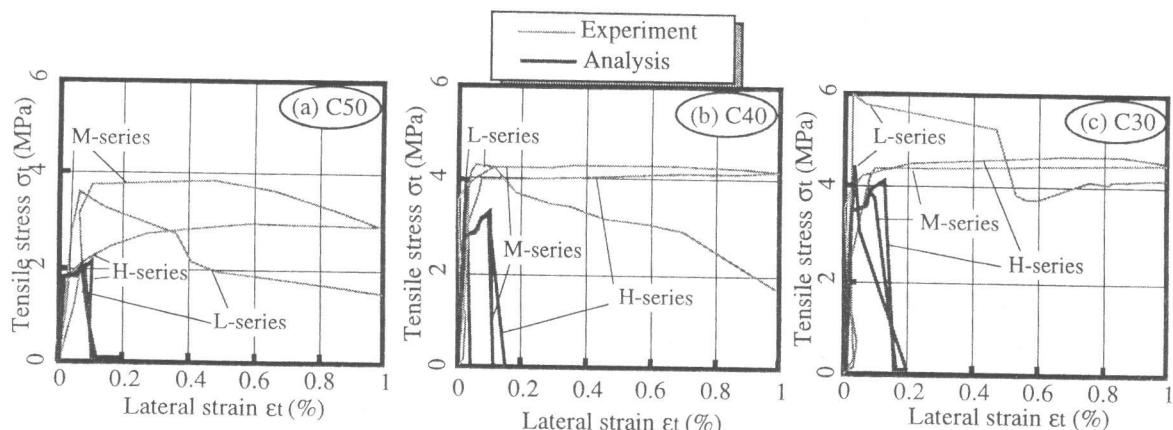


図-7 引張応力 $\sigma_t$ -横ひずみ $\epsilon_t$ 曲線 (実験結果と解析結果の比較)

あるものと思われる。

図-8は、各速度階における引張強度 $F_t$ を、最も低速なLシリーズの引張強度 $F_{tL}$ で除し、引張強度比 $(F_t/F_{tL})$ として示したものであり、コンクリートの引張強度 $F_t$ に及ぼす荷重速度の影響について、実験結果と解析結果を比較したものである。上述のように、割裂引

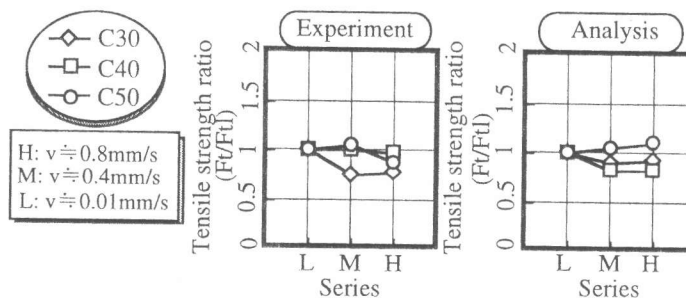


図-8 引張強度比 $(F_t/F_{tL})$

張試験では実験例が少ないため、ばらつきが大きいですが、解析結果では、C40およびC30の場合、荷重速度の大きい方がコンクリート全体系の引張強度 $F_t$ が小さくなっており、実験結果でもC30にはこの傾向が認められる。

## 5. まとめ

本研究では、荷重速度がコンクリートの破壊性状に及ぼす影響について検討するために、円柱供試体による一軸圧縮試験および割裂引張試験を行った。また、先に提案した粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)を用いて、高速荷重を受けるコンクリートの破壊挙動に関する単純な解析モデルによる再現を試みた。

本研究によって得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 一軸圧縮試験の結果によれば、荷重速度が高速になるほど圧縮強度 $F_c$ 、ポアソン比 $\nu$ は増加し、横方向変形を促進する傾向がある。
- 2) 実験によって得られた圧縮応力 $\sigma_c$ -圧縮ひずみ $\epsilon_c$ 曲線および引張応力 $\sigma_t$ -横ひずみ $\epsilon_t$ 曲線と、それと同条件下で行ったVEPSEM解析の結果を比較し、応力下降域の挙動を正確に再現するためには高強度なものほど粘性 $\eta_m$ を小さくする必要があること、およびレオロジーモデルの検討が必要であることがわかった。

【謝辞】本研究に際して、南部禎士君(名古屋大学大学院)の助力を得た。また、本研究費の一部は、文部省科学研究費補助金・一般研究(B)および特別研究員奨励研究による。付記して謝意を表す。

### 【引用文献】

- [1]竹田仁一・立川博之：高速圧縮、引張りおよび曲げをうける各種コンクリートの力学的性質，日本建築学会論文報告集，No.77，pp.1-6，1962.9.
- [2]竹田仁一・立川博之：高速圧縮荷重をうけるコンクリートの力学的性質とその基本的関係式，日本建築学会論文報告集，No.78，pp.1-6，1962.10.
- [3]竹田仁一・高本秀幸・谷川達彦：コンクリート中のクラックの高速伝播と動的な破壊靱性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.3，pp.111-116，1988.6.
- [4]荒井正直・船見晃啓・黒川善幸・森 博嗣・谷川恭雄：非連続体モデルを用いたコンクリートの破壊解析手法，日本建築学会構造系論文集，No.471，pp.1-9，1995.5.