

## 第3章 コンクリートの動的引張特性に及ぼす

### ひずみ速度と供試体寸法の影響

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物に発生するひび割れ、付着・せん断破壊やスキッピング現象等はコンクリートの引張特性が重要な因子として挙げられる。これらの現象を解明するためにはひずみ速度がコンクリートの引張特性に及ぼす影響を十分に把握することが重要である。

ところで、既往の多くの静的一軸引張試験結果によれば、コンクリートの引張強度は試験に用いる供試体の形状(円柱、角柱、立方体など)や寸法(径、高さ、幅など)に影響を受ける(いわゆる寸法効果)ことが指摘されている。したがって、ひずみ速度がコンクリートの引張特性に及ぼす影響を実験結果に基づいて適切に評価する観点から、まず試験に用いるコンクリート供試体の寸法の違いがコンクリートの引張特性に及ぼす影響を把握することが重要である。

本章では、コンクリート円柱供試体の高さ寸法ならびに載荷速度をパラメータとする急速一軸引張載荷試験を行い、コンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが動的引張特性に及ぼす影響について定性的・定量的に検討している。またさらに、急速一軸引張載荷を受けるコンクリートの動的引張特性に関して、本実験で得られた結果と既往の研究結果との比較検討を行うとともに、定式化を行っている。

#### 3. 1 はじめに

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の衝撃破壊現象を解明し、その衝撃挙動を予測する上で大きな応力速度あるいはひずみ速度の負荷を受けるコンクリートの力学的性状を定性的・定量的に把握することは、極めて重要である。また、載荷速度の影響を受けると、コンクリートの力学的特性は静的載荷に対する力学的特性と大きく異なることが知られている。

急速一軸圧縮載荷試験によってひずみ速度がコンクリートの圧縮特性に及ぼす影響を調べた研究は、Bischoff<sup>1)</sup>らの報告にまとめられているようになり多い。これに対して、急速一軸引張載荷を受けるコンクリートの力学的特性に関する実験的研究は極めて少なく、たとえば畑野<sup>2)</sup>、竹田ら<sup>3)</sup>、Zielinskiら<sup>4)</sup>による研究例があるにすぎない。これは、コンクリートの急速一軸引張試験を行う場合には、供試体の作成や引張治具の取り付け方法、および応力・ひずみの計測方法などの点で、圧縮試験に比較して困難であること、あるいはコンクリートの引張強度が圧縮強度の約1/10程度であり極めて脆弱なひび割れ挙動を示すため、通常的设计ではコンクリートの引張特性自体が重要とされないこと、等に起因していると考えられる。しかしながら、コンクリ

ートの引張特性は、ひび割れのメカニズムや付着・せん断挙動に影響を及ぼすために、重要構造物の設計においては無視できない要因であるとともに、衝撃力を受けるコンクリートに特有のスキヤビング(scabbing)現象の支配的要因であり、そして多軸応力下におけるコンクリートの破壊基準のパラメータとして軽視できない重要な特性である。また、Suarisらは、コンクリートの引張強度が圧縮強度に比較して顕著な応力速度あるいはひずみ速度依存性を示すことを指摘している<sup>9)</sup>。

一方 Spetla ら<sup>10)</sup>は、コンクリートの静的一軸引張試験において、円柱供試体の高さに対する直径の比（高さ直径比： $H/D$ ）や直方体供試体の高さに対する断面の辺長の比（高さ辺長比： $H/a$ ）の違いが引張強度に及ぼす影響を調べ、高さ直径比( $H/D$ )や高さ辺長比( $H/a$ )が大きくなるにしたがいコンクリートの引張強度は低下し、円柱供試体の場合は  $H/D \geq 2$ 、直方体供試体の場合  $H/a \geq 3$  でそれぞれほぼ一定値に漸近するような傾向が見られることを報告している。

ひずみ速度の大きさがコンクリートの引張特性に及ぼす影響を実験結果に基づいて適切に評価する観点から、動的引張载荷に対しても実験に用いるコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いがコンクリートの引張特性に及ぼす影響を把握することは重要であると考えられる。コンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが急速载荷を受けるコンクリートの引張特性に及ぼす影響について実験的に検討した研究は、これまでほとんど行われていない。

本章では、急速载荷を受けるコンクリートの引張特性の中でも、とくに引張強度、引張強度時におけるひずみおよび弾性係数に着目して、供試体の高さ寸法の相違による影響を把握することを目的とした急速一軸引張実験を行った。また、引張強度、引張強度時のひずみおよび弾性係数のそれぞれとひずみ速度の関係について、本実験による結果と既往の結果との比較検討を行うとともに、各特性に関する評価式を提案している。

## 3. 2 実験概要

### 3. 2. 1 実験パラメータ

急速一軸引張試験に用いるコンクリート円柱供試体の高さ寸法の相違がコンクリートの引張特性に及ぼす影響を実験的に把握することを目的とするため、実験パラメータは、表-3.1に示すようにコンクリート円柱供試体の高さ寸法および载荷速度である。試験数は各ケースに対して5回行うこととし、総試験数は65(実験ケース：13×5体)である。

表-3.1 実験パラメータの一覧

試験ケース	実験パラメータ								試験数
	供試体の高さ寸法				載荷速度				
	75mm	100mm	150mm	225mm	静的	低速	中速	高速	
DT-H75-S1 ~ S5	○				○				5
DT-H75-L1 ~ L5	○					○			5
DT-H75-H1 ~ H5	○							○	5
DT-H100-S1 ~ S5		○			○				5
DT-H100-L1 ~ L5		○				○			5
DT-H100-H1 ~ H5		○						○	5
DT-H150-S1 ~ S5			○		○				5
DT-H150-L1 ~ L5			○			○			5
DT-H150-M1 ~ M5			○				○		5
DT-H150-H1 ~ H5			○					○	5
DT-H225-S1 ~ S5				○	○				5
DT-H225-L1 ~ L5				○		○			5
DT-H225-H1 ~ H5				○				○	5

コンクリート円柱供試体は、直径を一定(71.4mm)とし高さを75mm,100mm,150mmおよび225mmと変えた4種類のを準備した。なお、円柱供試体の直径は次のような理由により決定した。本実験で用いる装置の制約のため、一軸引張載荷装置に設置可能な円柱供試体の最大高さ寸法は約240mm程度である。その高さ寸法以内( $H < 240\text{mm}$ )で高さ直径比( $H/D$ )を最大3程度まで試験しようとする、円柱供試体の直径は80mm以下であることが必要となる。また、円柱供試体の直径はコンクリートの最大粗骨材寸法(本実験では $G_{\max}=20\text{mm}$ )の3倍程度以上(本実験では60mm以上)は確保する必要がある。すなわち、円柱供試体の直径は60~80mm程度となる。これらの条件の下で供試体の製作に用いる型枠を選定した結果、塩化ビニール管製型枠(内径71.4mm)が条件に適合した。したがって、円柱供試体の直径は71.4mmとなった。

載荷速度は、静的、低速、中速および高速の4種類である。ただし、中速載荷に対する試験は低速と高速の載荷速度の中間的な載荷速度でのデータを得ることを目的とし、供試体の高さ寸法150mmの場合のみ実施した。載荷速度の概略の目安は、ひずみ速度で表示すると静的載荷が $2 \times 10^{-6} (1/\text{sec})$ 、低速載荷が $4.6 \times 10^{-3} (1/\text{sec})$ 、中速載荷が $1.2 \times 10^{-1} (1/\text{sec})$ 、高速載荷が $6.0 \times 10^{-1} (1/\text{sec})$ 程度である。

### 3. 2. 2 供試体の製作

本実験に用いる円柱供試体のコンクリートの材料には、普通ポルトランドセメント

表-3.2 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (L/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)
		水	セメント	細骨材	粗骨材			
65	40.0	181	278	702	1095	0.70	8.0	4.0

最大粗骨材寸法：20mm

(密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>) を使用し、細骨材として粒径 5mm 以下の川砂 (密度 2.54 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.45%, 粗粒率 2.23) を、粗骨材には粒径 20mm 以下の川砂利 (密度 2.64 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.82%, 粗粒率 6.62) を使用した。コンクリートの配合を表-3.2 に示す。

内径 71.4mm, 肉厚 1.3mm の塩化ビニール管製型枠を用いて製作した供試体は、打設後 1 日で脱型した後、水中養生を 7 日間行い、その後は実験室内にて気中養生を行った。打設から 18 日目にコンクリート円柱供試体の両端をコンクリートカッターで切断し、さらに研磨機で切断面を研磨して所定の高さに調整した。

本試験では期間が 12 日間と長期に及ぶため、初期の水中養生期間を 7 日間として試験期間中の強度増加をできるだけおさえるようにした。試験に用いたコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を、図-3.1 に示す。試験期間中の圧縮強度の平均値は 32.10(N/mm<sup>2</sup>)、試験開始時と終了時における強度差は約 0.6(N/mm<sup>2</sup>)であった。したがって、試験期間中のコンクリートの圧縮強度はほぼ一定と見なしてもさしつかえないと考える。

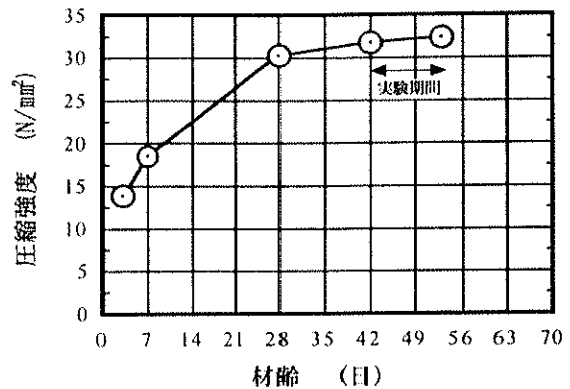


図-3.1 材齢と圧縮強度の関係

### 3. 2. 3 試験方法

コンクリートの急速一軸引張試験に使用する試験装置を、図-3.2 に示す。

本試験では、図-3.2 (a)に示す一軸引張装置を図-3.2(b)に示すように急速載荷装置内部に取り付けて実験を行った。一軸引張装置は、加力フレームを下方方向に移動させることで取り付けられたコンクリート円柱供試体に一軸引張応力を加える装置である。また、急速載荷装置は、最大荷重容量 490kN で任意の載荷速度 (最大載荷速度 4m/sec) に設定できる機能を有している。

供試体は、図-3.2(c)に示すように両端をエポキシ系の接着剤で鋼製の取付治具 (直

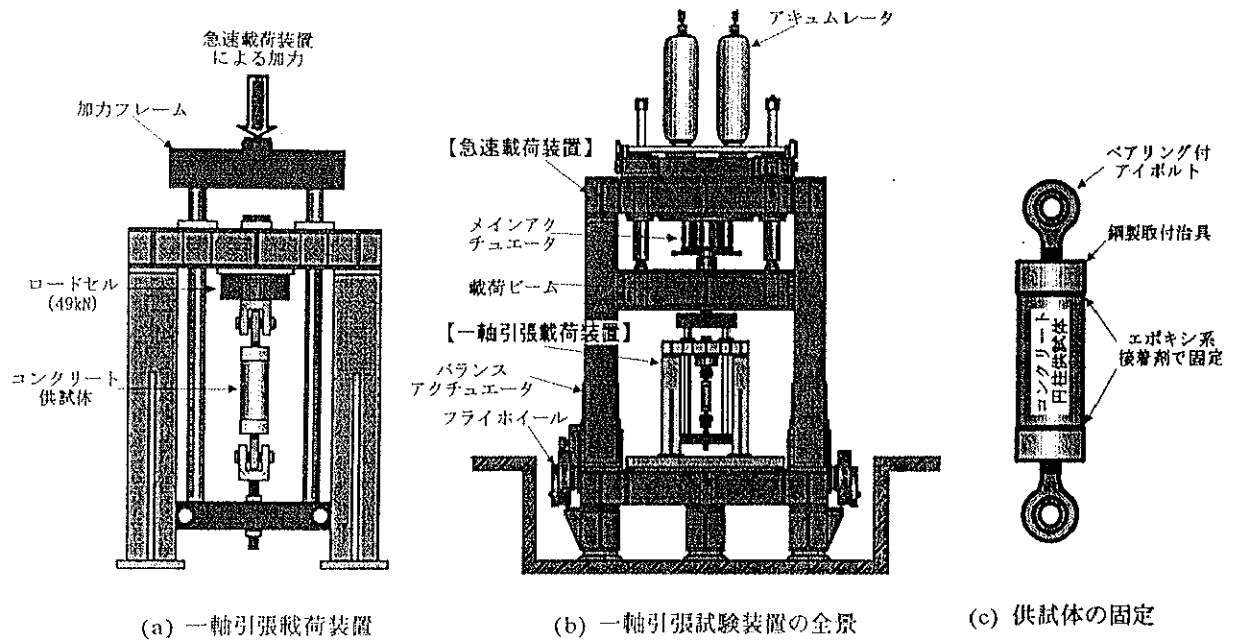


図-3.2 一軸引張試験装置の概要

径：75mm，厚さ：35mm）に接着固定した。さらに、供試体に軸方向の荷重のみ作用させるため、上下にベアリング付アイボルトを取り付け、このアイボルトを介して一軸引張載荷装置に固定した。なお、コンクリート円柱供試体の断面に一樣な引張応力を作用させるため、鋼製取付治具の厚さは35mmとした。試験は、コンクリート円柱供試体を鋼製取付治具にエポキシ系の接着剤で固定後48時間以上おいて実施した。なお、今回の試験ではコンクリート円柱供試体と鋼製取付治具との接着部で破断したケースは全く無かった。

### 3.2.4 計測項目

本試験における計測項目は、コンクリート円柱供試体に作用する荷重およびひずみである。

供試体に作用する荷重は、図-3.2(a)に示すように一軸引張載荷装置の固定端側に取り付けられたロードセル（許容荷重49kN，最大応答周波数11kHz）で計測した。コンクリート円柱供試体に発生するひずみは、ベース長60mmのポリエステル箔ゲージを用いて計測した。ただし、コンクリート円柱供試体のどの部分に破断面が形成されるかを予め予測できないために、破断面がどの部分に形成されてもその付近のひずみの計測ができるように図-3.3のようにひずみゲージを配置した。供試体の高さ寸法が75mmおよび100mmの円柱供試体には、供試体の中央部に90°間隔で4枚のひずみゲージを軸方向に貼付した。また、供試体の高さ寸法150mmおよび225mmの円柱

供試体には、上部・中央部・下部の3断面にそれぞれ90°間隔で4枚のひずみゲージを軸方向に貼付した。計測されたデータは動ひずみ測定器（最大応答周波数：200kHz）で増幅した後、デジタルメモリにより最速 $5 \times 10^{-6}$  sec (200 kHz) の時間間隔でサンプリングした。

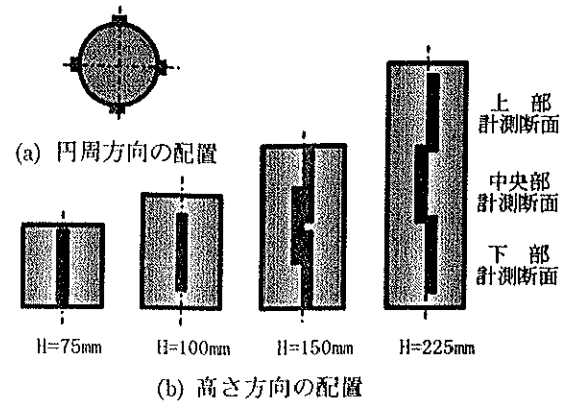


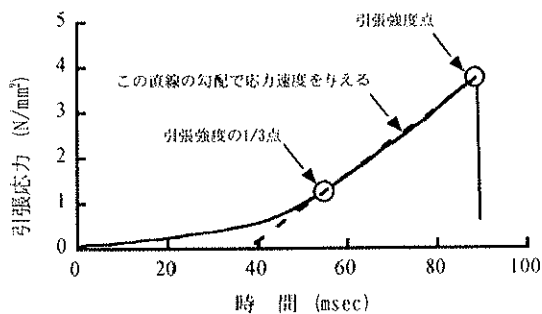
図-3.3 各供試体におけるひずみゲージの配置

### 3. 3 ひずみ速度および応力速度の定義

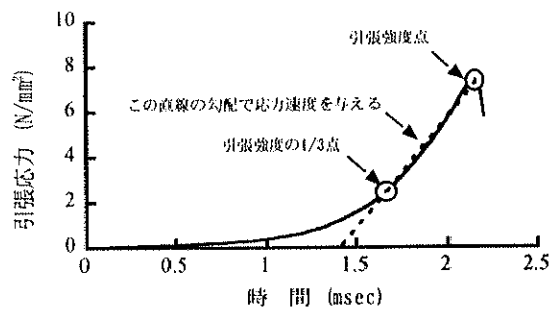
急速荷重を受けるコンクリートの引張あるいは圧縮試験結果から、コンクリートの強度特性は荷重速度に依存することが知られている。コンクリートの速度効果に関する既往の研究では、荷重速度を表す指標としてひずみ速度あるいは応力速度が一般的に用いられている<sup>7)</sup>。

コンクリートの静的一軸引張試験を行った上田ら<sup>8)</sup>の研究によると、引張強度点付近で破断面近傍にひずみが局所化（破断面近傍のひずみが破断しなかった部分のひずみの値に比べて大きくなる）して引張破壊が生じることが報告されている。本実験の供試体高さ150mmおよび225mmの結果において、破断した部分と破断していない部分にそれぞれ貼付されたひずみゲージの平均値を比較すると、上田らと同様に破断した部分のひずみの平均値が破断していない部分のひずみの平均値より5~30%程度大きくなる傾向がみられ、また、その傾向はひずみ速度が大きくなるほど顕著になることが認められた。そこで本研究では、破断した部分（破断面）に貼付された周方向4枚のひずみゲージの平均値を用いてひずみ速度を定義することにする。

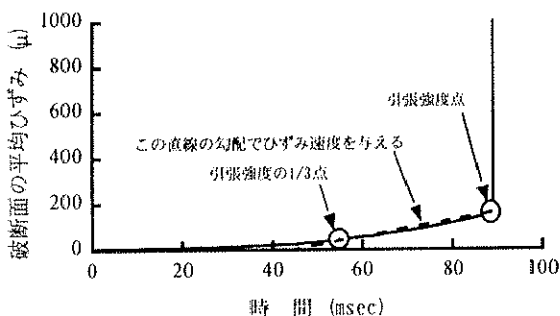
図-3.4(a)(b)に、低速荷重における引張応力の代表的な時刻歴および破断した断面における平均ひずみの時刻歴、図-3.5(a)(b)に、高速荷重における引張応力の代表的な時刻歴および破断した断面における平均ひずみの時刻歴をそれぞれ示す。図-3.4および図-3.5をみると、コンクリート円柱供試体に作用する荷重初期の引張応力の立ち上がりは緩慢で引張強度の1/3点以降から引張強度点まで概ね直線的に増加する傾向にあることがわかる。荷重初期の応力の立ち上がりが緩やかとなるのは、本研究で使用した荷重装置の性能に起因するものと考えられる。既往の多くの研究では、全体的な荷重を表す平均的な応力速度およびひずみ速度として荷重開始点から引張強度点までの勾配を取っている。しかしながら、本試験結果にこのような既往の研究と同様の定義を適用すると、危険側の評価を与えることが考えられる。そこで本研究では、図-3.4お



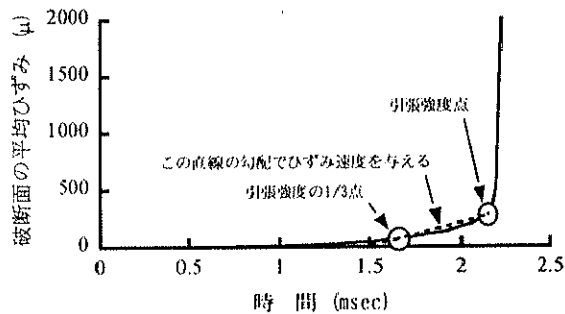
(a) 引張応力の時刻歴



(a) 引張応力の時刻歴



(b) 破断面における平均ひずみの時刻歴



(b) 破断面における平均ひずみの時刻歴

図-3.4 低速載荷 (DT-H225-L3)

図-3.5 高速載荷 (DT-H150-H4)

よび図-3.5の図中に示すように引張強度の1/3点から引張強度点までの応力-時間、破断面の平均ひずみ-時間のそれぞれの勾配で応力速度およびひずみ速度を評価するものとする。このように評価された応力速度とひずみ速度の間には、Takedaら<sup>9)</sup>によって指摘されているように両対数座標で直線関係があることが認められた。なお、静的載荷の場合の応力速度およびひずみ速度は全データの平均的な値としてそれぞれ  $0.02 \text{ (N/mm}^2\text{/sec)}$ 、 $2.0 \times 10^{-6} \text{ (1/sec)}$ の値を用いることにする。

### 3.4 コンクリート円柱供試体の破壊状況および破壊メカニズム

ひずみ速度およびコンクリート円柱供試体の高さ寸法をパラメータとしたコンクリートの急速一軸引張試験を行った結果、静的・低速・中速載荷に対するコンクリート供試体の破壊状況は、全てのケースで破断面が1箇所しか形成されなかった。これに対し、ひずみ速度が大きい高速載荷ではひび割れの枝分れ(分岐現象)や写真-3.1に示すような一つの供試体中に2箇所の破断面が形成されるものがいくつかのケースで見られた。高速載荷に対する試験で、供試体に複数の破断面が形成される割合は、供試体の高さ寸法が大きくなるほど多くなる傾向が認められた。しかしながら、同一寸

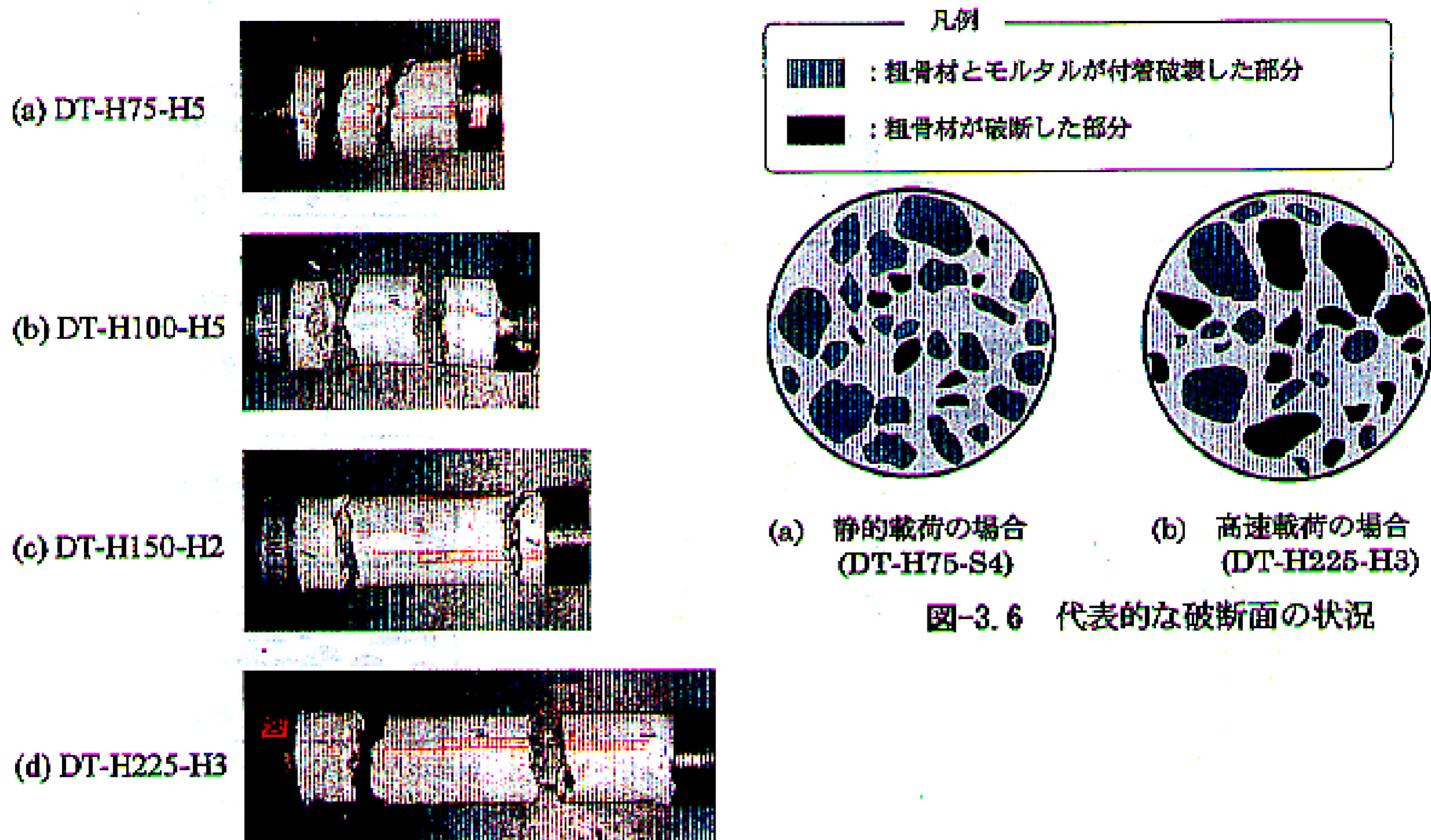


図-3.6 代表的な破断面の状況

写真-3.1 高速載荷での代表的な供試体の破壊状況

法の供試体で複数の破断面を形成した場合と一断面しか形成されなかった場合の最大引張強度には有意な差は認められなかった。図-3.6に、静的載荷(DT-H75-S4)および高速載荷(DT-H225-H3)試験後の供試体の代表的な破断面の状況を示す。静的載荷では、多くの場合図-3.6(a)のようなブリージングによる粗骨材下面の空隙や欠陥を起点としたと考えられる粗骨材とモルタルとの界面での付着破壊が顕著であった。これに対して、低速・中速・高速載荷とひずみ速度が大きくなるにつれて、粗骨材とモルタルとの界面での付着破壊ではなく図-3.6(b)に示すように大きな粗骨材自体が破断するケースが多く見られ、載荷速度の増大とともにその割合が大きくなる傾向が認められた。

一般的に考えられるコンクリートの静的一軸引張載荷に対する破壊進展過程を、図-3.7に示す。これに対し、高速載荷におけるひび割れの分岐現象や粗骨材自体が破断する現象は、静的な破壊メカニズムとは異なるのではないかと考える。すなわち、静的載荷の場合のように複数のモルタルひび割れが連結して破壊面を形成すると考えるよりは、骨材周辺の付着ひび割れが少ない状況下で一つあるいはかなり限定された界面での付着ひび割れを起点としたモルタルひび割れが高速でモルタル中を進展したためと考えた方が説明しやすい。同様な見解が Zielinski ら<sup>10)</sup>によっても報告されている。

さらに、高速載荷を受けるコンクリート供試体における複数の破断面形成のメカニ



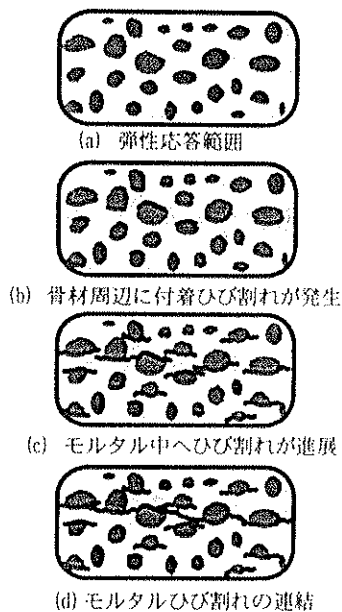


図-3.7 静的荷重における破壊進展過程の模式図

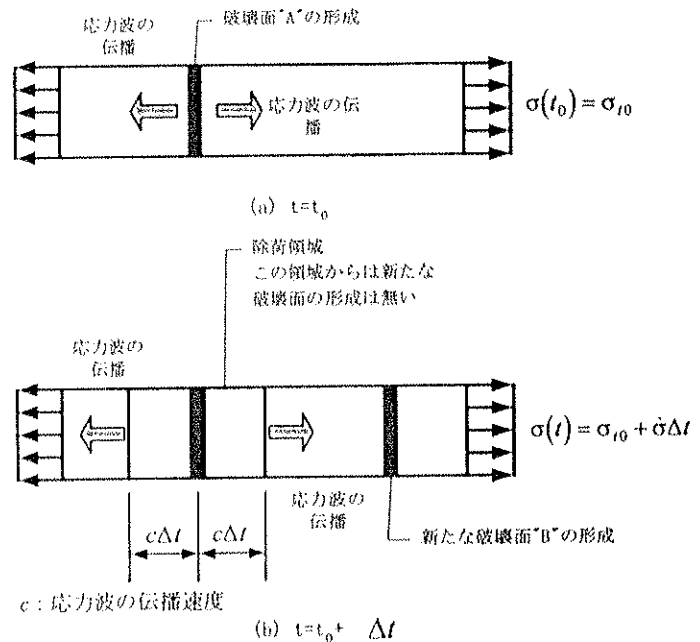


図-3.8 高速荷重における複数の破壊面形成のメカニズム

ズムは、次のように推察される。複数の破断面形成のメカニズムに関する模式図を、図-3.8に示す。図-3.8(a)に示すように、1つ目の破断面“A”は引張強度到達後、極めて短時間に形成される。この破断面形成による局所的な除荷による影響は、応力波として供試体内を伝播するが、微小時間  $\Delta t$  後においても応力波が到達していない部分では、断面に作用する引張応力が除荷されずに新たな破断面“B”が形成される可能性がある。円柱供試体の高さ寸法が大きい(長い)ほど応力波が供試体内を伝播する時間を要すること、および破断面形成のための核となる空隙や欠陥を含む確率も大きくなる。このことは、本試験において、供試体の高さ寸法が大きくなるほど複数の破断面が形成される割合が多かったという事実に対応している。

図-3.9に、一つの供試体中に2箇所の破断面が形成されたDT-H150-H2の場合の各計測断面における最大引張応力付近のひずみの時刻歴を示す。この図から、最大引張応力以降、破断しなかった中央部のひずみは減少するのに対して、破断した上部・下部のひずみは急激に増加しその立ち上がりは下部のひずみの方が上部のひずみより  $15 \mu \text{sec}$  程度速いことがわかる。つまり、破断面の形成は下部・上部の順であったことが推察される。コンクリート中の応力波の伝播速度は約  $3,500 \text{m/sec}$  程度であり、この供試体の2箇所の破断面間の距離である約  $10 \text{cm}$  を伝播するためには約  $29 \mu \text{sec}$  の時間が必要となる。これに対して、実際に計測された上部・下部のひずみの急激な立ち上り部分の時間差は  $15 \mu \text{sec}$  程度であった。したがって、最初の破断面が形成されたことによって発生した応力波が2番目の破断箇所に到達する以前に2番目の破断面が形成されたと考えられる。

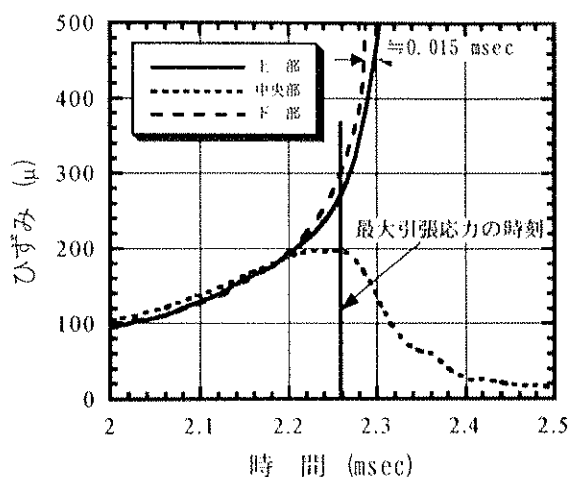


図-3.9 DT-H150-H2のひずみの時刻歴

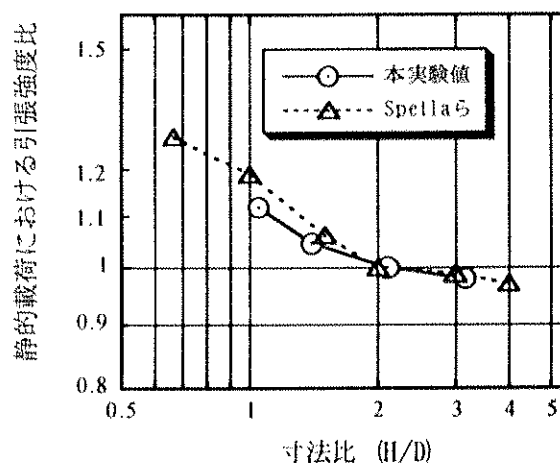


図-3.10 寸法比と静的載荷における引張強度比

### 3. 5 静的および動的載荷に対する供試体の高さ寸法の影響について

#### 3. 5. 1 静的載荷に対する供試体の高さ寸法と引張強度の関係

供試体の高さ寸法比(H/D)と引張強度の関係について、静的載荷に対する本試験結果および Spetla ら<sup>9)</sup>の既往の結果を図-3.10に示す。図中、横軸はコンクリート円柱供試体の高さ(H)と直径(D)の寸法比(H/D)を、縦軸は各寸法比での引張強度を基準高さの供試体の引張強度で割ったものを引張強度比として示している。本試験による結果は、同一高さ寸法について5回行った結果の平均値を用い、供試体の高さが H=150mm の供試体(H/D≒2)の引張強度を基準強度として各供試体の高さ寸法における引張強度比を表している。また、Spetla らの結果は H/D=2 の供試体の引張強度を基準強度としている。

図-3.10 から、本試験値は Spetla らの結果と同様に、寸法比(H/D)が大きくなるにしたがい引張強度比は低下し、H/D≒2 以上ではほぼ一定値に収束していく傾向を示している。Spetla らは、このような現象は供試体の端面で変形が拘束されるための影響によるものであり、供試体の高さ寸法がある程度(H/D≧2)以上になると端面拘束の影響が無視できるようになるためと説明している。また、コンクリート強度は寸法効果によって異なる値を示すことが知られている<sup>19),20)</sup>。小阪ら<sup>11)</sup>によれば、寸法効果は一般に供試体中の欠陥量の多少に依存する容積効果に起因するとしている。すなわち、本試験で得られた結果は、端面での拘束という境界条件による影響だけではなく、コンクリート円柱供試体の容積に依存する寸法効果の影響という2つの複合効果によるものであると考えられる。

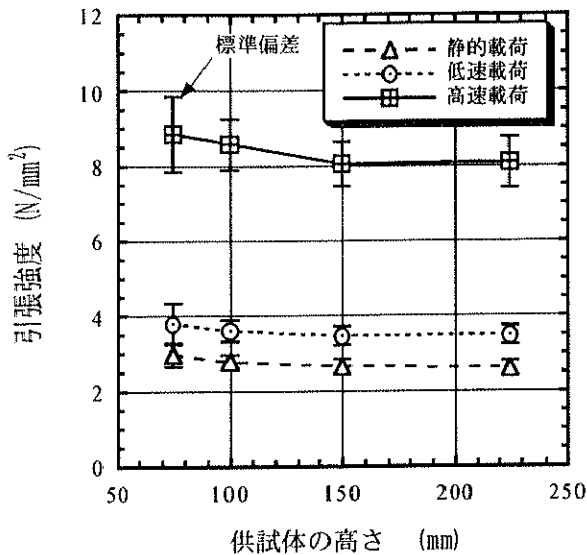


図-3.11 供試体の高さと同張強度の関係

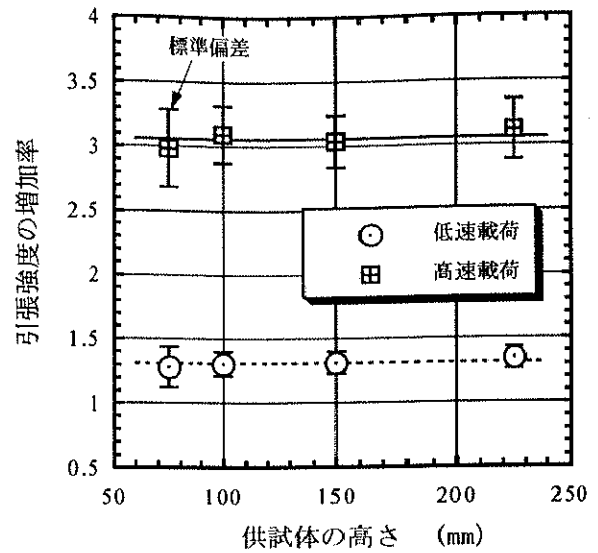


図-3.12 供試体の高さと同張強度の増加率の関係

### 3. 5. 2 異なる載荷速度に対する供試体の高さ寸法と同張強度の関係

静的および急速載荷（低速と高速の各載荷速度）試験によって得られた結果から、供試体の高さ寸法と同張強度の関係を図-3.11 に示す。図中には、各載荷速度で各供試体の高さ寸法毎に5回行った同張強度の平均値および標準偏差の幅を表示している。静的、低速および高速のいずれの載荷速度においても、供試体の高さ寸法が大きくなるにつれて同張強度は少しずつ減少し、寸法比(H/D)がほぼ2以上となる供試体の高さ150mm以上で一定値に収束する傾向を示している。また、各々の値のバラツキは載荷速度が大きくなるほど、供試体の高さ寸法が小さくなるほど大きくなる傾向がある。

各供試体の高さ寸法ごとに、静的載荷の同張強度に対する各載荷速度での同張強度の比（同張強度の増加率）と同試体の高さ寸法の間を、図-3.12 に示す。図中には、各試験ケースごとの平均値および標準偏差の幅を表示してある。また、図中に表示してある破線および実線は低速および高速のそれぞれの載荷速度に対して得られた値の平均値である。低速および高速のいずれの載荷速度に対しても、同張強度の増加率は供試体の高さ寸法によらずほぼ一定値とみなせる。すなわち、同張強度の増加率は、供試体の高さ寸法によらずに載荷速度のみに依存すると考えられる。

和泉・三橋<sup>12)</sup>は、コンクリートの強度に及ぼす載荷速度の影響を確率過程理論に基づき、コンクリートの同張強度の増加率は同一材料であれば供試体の寸法の違いによらず載荷速度のべき乗で表されることを理論的に導いている。

今回の試験においても、同張強度の増加率は供試体の高さ寸法には影響を受けないという結果が得られており、載荷速度が同張強度の増加率に及ぼす影響を調べる試験

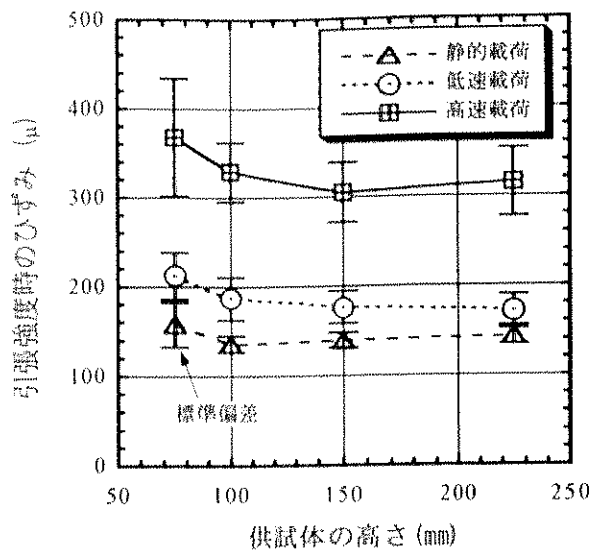


図-3.13 供試体の高さ と引張強度時のひずみの関係

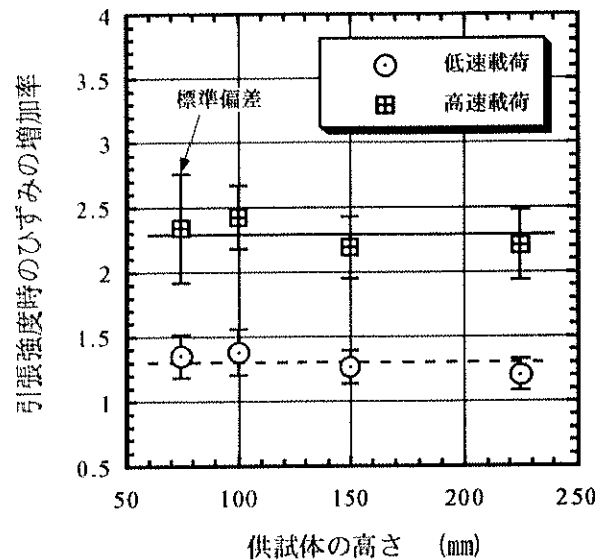


図-3.14 供試体の高さ と引張強度時のひずみの増加率の関係

では、供試体の寸法を任意に決定することができる。しかしながら、実験値のバラツキの大きさを考えると寸法比(H/D)が2以上の供試体を用いる方が良い。

### 3. 5. 3 異なる載荷速度に対する供試体の

#### 高さ寸法と引張強度時のひずみの関係

静的、低速および高速の各載荷速度に対する試験結果から、供試体の高さ寸法と引張強度時のひずみの関係を、図-3.13 に示す。ただし、引張強度時のひずみの値は破断面におけるひずみである。また、図中には、各載荷速度で各供試体の高さ寸法ごとに5回行った引張強度時のひずみの平均値および標準偏差の幅を表示している。

静的、低速および高速のいずれの載荷速度に対しても、供試体の高さ寸法が大きくなるにしたがい引張強度時のひずみは減少し、寸法比(H/D)がほぼ2以上となる供試体の高さ150mm以上で一定値に収束するような傾向を示している。また、各データのバラツキは載荷速度が大きくなるほど、供試体の高さ寸法が小さくなるほど大きくなっている。

各供試体の高さ寸法ごとに、静的載荷における引張強度時のひずみに対する各載荷速度における引張強度時のひずみの比（ひずみの増加率）と供試体の高さ寸法の間を、図-3.14 に示す。図中には各実験ケース毎の平均値および標準偏差の幅を表示してある。また、図中に表示してある破線および実線は低速および高速のそれぞれの載荷速度における全試験結果の平均値である。低速および高速のそれぞれの載荷速度で各々の値にバラツキはあるが引張強度の増加率と同様にひずみの増加率は供試体の高

さ寸法によらず、ほぼ一定値であるとみなせる。すなわち、ひずみの増加率も、供試体の高さ寸法によらずに載荷速度のみに依存すると考えられる。

### 3. 5. 4 異なる載荷速度に対する供試体の高さ寸法と弾性係数の関係

静的、低速および高速の各載荷速度における供試体の高さ寸法と弾性係数の関係を、図-3.15 に示す。ただし、弾性係数としてここでは破断面での応力-ひずみ関係における引張強度の1/3点での割線弾性係数を用いている。図中には、各載荷速度で各供試体の高さ寸法ごとに5回行った試験で得られた弾性係数の平均値および標準偏差の幅を表示してある。また、図中に表示してある破線および実線は静的、低速および高速のそれぞれの載荷速度における全実験結果の平均値を示している。

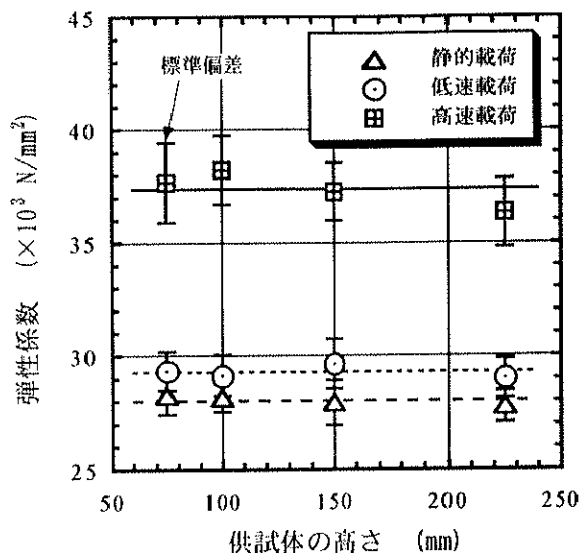


図-3.15 供試体の高さ寸法と弾性係数の関係

図-3.15 から、供試体の高さ寸法 225mm における弾性係数の値が高速載荷に対して若干小さくなっているが、同一の載荷速度に対しては弾性係数の値も供試体の高さ寸法の違いによらず一定値をとるものとみなせる。

### 3. 6 コンクリートの引張特性とひずみ速度の関係

コンクリートの引張特性として引張強度、引張強度時のひずみおよび弾性係数に着目し、急速載荷における各特性値の静的載荷に対する比として定義された引張強度の増加率、引張強度時のひずみの増加率および弾性係数の増加率についてひずみ速度との関係を考察する。

前節での結果から、引張強度の増加率、引張強度時のひずみの増加率および弾性係数は供試体の高さ寸法によらずにひずみ速度のみに依存することがわかった。ここでは、高さ寸法 H=150mm の供試体(H/D=2)に対する結果を標準値として検討する。

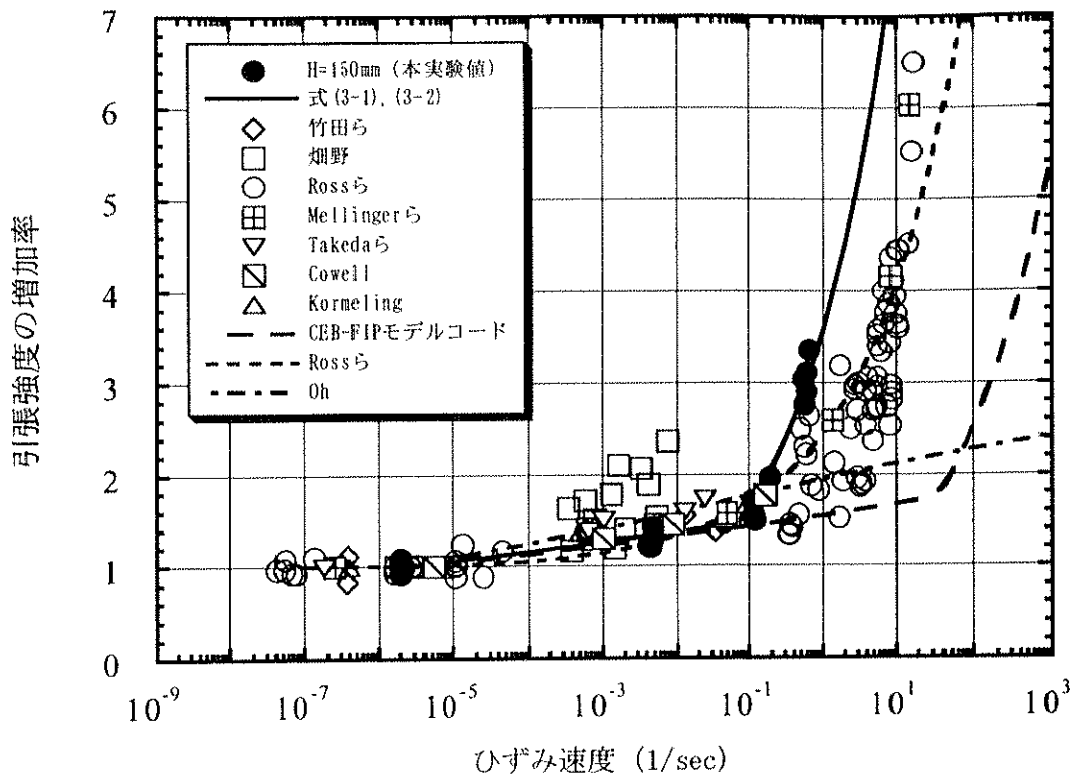


図-3.16 引張強度の増加率とひずみ速度の関係

### 3. 6. 1 引張強度の増加率とひずみ速度の関係

高さ寸法が  $H=150\text{mm}$  のコンクリート円柱供試体の引張強度の増加率とひずみ速度の関係を、図-3.16 中に●印で示す。図中には、竹田ら<sup>3)</sup>、畑野<sup>2)</sup>、Rossら<sup>13)</sup>、および文献 14) から引用した Mellingerら、Takedaら、Cowell、Kormelingらによる既往の結果も合わせて表示している。ただし、Rossらによるデータは割裂試験により得られた結果に基づいて引張強度の増加率を評価している。

いずれのデータにおいても、コンクリートの引張強度の増加率はひずみ速度が大きくなるにしたがい増加している。ただし、約  $1.0 \times 10^{-1}$  (1/sec) 付近のひずみ速度を境としてその前後で引張強度の増加率の増大傾向に相違がみられる。ひずみ速度が  $1.0 \times 10^{-1}$  (1/sec) 以下の範囲では畑野による結果だけが大きくなっているが、その他の既往の結果はほぼ同程度の値を与えている。ひずみ速度の値が約  $1.0 \times 10^{-1}$  (1/sec) 以上の範囲では本結果、Mellingerらおよび Rossらによる結果のいずれもひずみ速度の増加にともない引張強度の増加率が急激な増加傾向を呈している。ただし、引張強度の増加率が急激な増加傾向を呈するようになるひずみ速度の値は、Rossらの結果 [ $10^0$  (1/sec)] に比べて本結果 [ $10^{-1}$  (1/sec)] は低ひずみ速度側である。この違いは、実験法による相違に起因しているものと考えられる。すなわち、本試験では油圧式の急速載荷装置を用いた載荷方式であるのに対して、Rossらは Split-Hopkinson Pressure Bar

装置を用いて衝撃的な载荷を行っている。Split-Hopkinson Pressure Bar 装置による試験の場合、供試体に作用する応力は入力・出力棒の計測ひずみデータから一次元の波動理論を用いて評価される。これに対して、本試験では供試体に作用する応力をロードセルの計測値から直接評価している。このように、各研究者によって報告された結果におけるデータのばらつきや傾向の相違は、供試体への荷重の载荷方式や応力の評価法等の違いあるいは供試体自体の相違が原因として考えられる。また、供試体の乾・湿の状態が引張強度の増加率に大きく影響を及ぼすことが Ross らにより指摘されていることから、試験時における供試体の乾・湿の状態の違いも結果に差異を生じさせた一因として考えられる。

図-3.16 に示した引張強度の増加率とひずみ速度の関係について、本試験結果を対象として回帰式を求めた。その結果、次に示す2つの式を得た。

$\dot{\epsilon} \leq 7.22 \times 10^{-2}$  (1/sec) に対して

$$\frac{f'_{td}}{f'_{ts}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.0371} \quad (3-1)$$

$\dot{\epsilon} > 7.22 \times 10^{-2}$  (1/sec) に対して

$$\frac{f'_{td}}{f'_{ts}} = 0.0433 \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.3363} \quad (3-2)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$  は静的载荷のひずみ速度 [ $2.0 \times 10^{-6}$  (1/sec)]、 $\dot{\epsilon}$  は急速载荷時のひずみ速度 (1/sec)、 $f'_{ts}$  は静的载荷の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_{td}$  はひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  で载荷した場合の引張強度である。式(3-1)、(3-2)を用いて評価した関係を、図-3.16 中に太い実線で示す。図中には、CEB-FIP モデルコード<sup>15)</sup>、Ross ら<sup>16)</sup>、Oh<sup>17)</sup>による算定式を用いた結果についても示している。なお、CEB-FIP モデルコードによる引張強度の増加率の算定には、本試験で使用したコンクリートの圧縮強度  $f'_c = 32.10$  (MPa)の値を用いた。

図-3.16 をみると、ひずみ速度が  $\dot{\epsilon} \leq 7.22 \times 10^{-2}$  (1/sec) の範囲では、式(3-1)は、CEB-FIP モデルコードの算定式による結果と非常に良く一致している。ところが、ひずみ速度が  $\dot{\epsilon} > 7.22 \times 10^{-2}$  (1/sec) の範囲では、式(3-2)と CEB-FIP モデルコードによる引張強度の増加率の評価は大きく異なっている。CEB-FIP モデルコードの算定式は、圧縮载荷における圧縮強度の増加率を参考として増加率が急激に増加を開始するひずみ速度を  $3 \times 10^1$  (1/sec) に設定したものである。Oh による算定式は、あるひずみ速度以上における引張強度の増加率の急激な増加傾向が表現されていない。Ross らの算定式は、ひずみ速度の値が静的载荷レベルから大きなひずみ速度まで一つの式で表そう

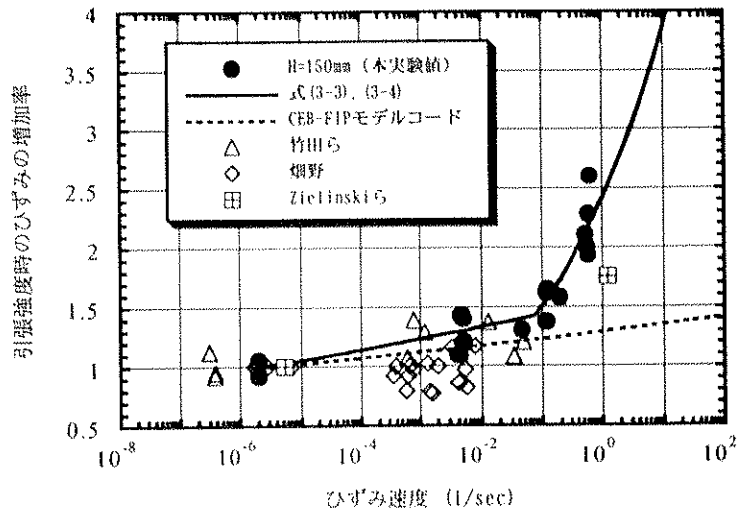


図-3.17 引張強度時のひずみの増加率とひずみ速度の関係

と試みている。Ross らの算定式はひずみ速度の増加に対する強度増加率を一つの式で表示したものであり、 $1.0 \times 10^{-1}$  (1/sec)程度までのひずみ速度においては本結果に対しても良い一致を示している。しかしながら、Ross ら自身の結果、本試験結果および既往の結果をみると、ひずみ速度に対する強度増加率は一つの式で表される関係とはなっていないことが明らかである。

Kipp ら<sup>18)</sup>は、微小ひび割れ先端における慣性効果を考慮した動的線形破壊力学を用いて、ひずみ速度がある程度大きな値以上になると引張強度はひずみ速度の 1/3 乗に比例することを理論的に導いている。ひずみ速度が  $\dot{\epsilon} > 7.22 \times 10^{-2}$  (1/sec)の範囲に適用する式(3-2)は、コンクリートの引張強度は概ねひずみ速度の 1/3 乗に比例して増加することを示しており、Kipp らによる理論解を裏付ける結果を与えている。

### 3. 6. 2 引張強度時におけるひずみの増加率とひずみ速度の関係

供試体の高さ寸法が H=150mm の場合に対する結果において、引張強度点でのひずみの増加率とひずみ速度の関係を図-3.17 中に●印で示す。また、図中には竹田ら<sup>9)</sup>、畑野<sup>2)</sup>、Zielinski ら<sup>4)</sup>の既往の結果も合わせて示す。

ひずみ速度の増大にともなうコンクリートの引張強度時におけるひずみの増加率は、引張強度の増加率と同様に、約  $1.0 \times 10^{-1}$  (1/sec)付近のひずみ速度を境としてその前後で増加の傾向が大きく異なっている。畑野は、引張強度時におけるひずみはひずみ速度によらずほぼ一定値を示すことを報告している。しかしながら、本試験結果、竹田らおよび Zielinski らによる引張強度時のひずみは、いずれもひずみ速度が大きくなるにしたがい増大する傾向が認められる。

本試験で得られた結果に対して、引張強度時におけるひずみの増加率とひずみ速度



の関係を求めると、次に示す2つの式が得られた。

$\dot{\epsilon} \leq 7.56 \times 10^{-2}$  (1/sec)の場合

$$\frac{\epsilon_{td}}{\epsilon_{ts}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.0338} \quad (3-3)$$

$\dot{\epsilon} > 7.56 \times 10^{-2}$  (1/sec)の場合

$$\frac{\epsilon_{td}}{\epsilon_{ts}} = 0.1661 \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.2041} \quad (3-4)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的荷重のひずみ速度 [ $2.0 \times 10^{-6} \frac{L}{E} \cdot (\frac{L}{E})^m$ ]、 $\dot{\epsilon}$ は急速荷重時のひずみ速度 (1/sec)、 $\epsilon_{ts}$ は静的荷重の場合の引張強度時におけるひずみ、 $\epsilon_{td}$ はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で荷重した場合の引張強度時におけるひずみである。式(3-3)、(3-4)を用いて評価した関係を、図-3.17中の実線で示す。図中には、CEB-FIPモデルコード<sup>15)</sup>による算定式を用いた結果を破線で示している。式(3-3)はひずみ速度が $\dot{\epsilon} \leq 7.56 \times 10^{-2}$  (1/sec)の範囲では、CEB-FIPモデルコードの算定式による場合より2割程度大きな値を与えている。ひずみ速度が $\dot{\epsilon} > 7.56 \times 10^{-2}$  (1/sec)の範囲においては、CEB-FIPモデルコードの算定式では急増するひずみの増加率を評価することはできないことがわかる。

### 3. 6. 3 弾性係数の増加率とひずみ速度の関係

供試体の高さ寸法がH=150mmの場合における試験結果に対して得られた弾性係数の増加率とひずみ速度の関係を、図-3.18中に●印で示す。図中には、竹田ら<sup>3)</sup>、畑野<sup>2)</sup>、Zielinskiら<sup>4)</sup>の結果を合わせて示す。

ひずみ速度の増大によるコンクリートの弾性係数の増加率は、前述の引張強度の増加率および引張強度点でのひずみの増加率の場合と同様に約  $1.0 \times 10^{-1}$  (1/sec)付近のひずみ速度で増加の傾向が大きく異なっている。いずれの結果からも、ひずみ速度が大きくなるにしたがい弾性係数は大きくなることが認められる。ただし、ひずみ速度が約  $1.0 \times 10^{-1}$  (1/sec)以下の範囲においては、増加率は大きくない。

本試験で得られた結果に基づいて、弾性係数の増加率とひずみ速度の関係を求めると、次に示す2つの式が得られる。

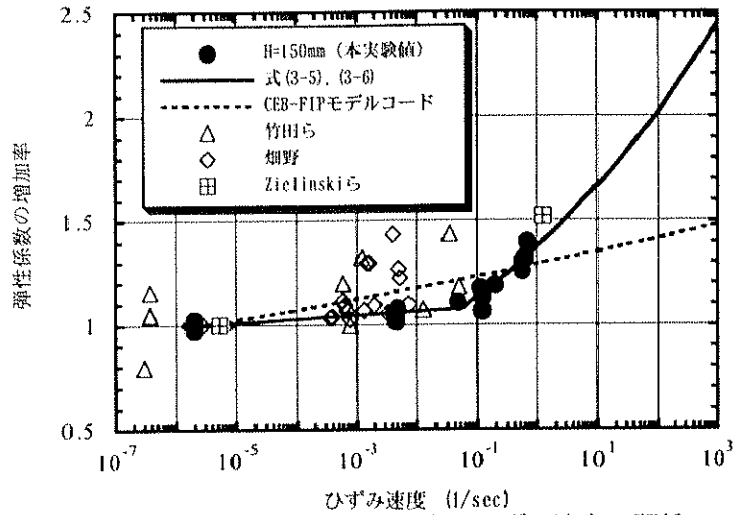


図-3.18 弾性係数の増加率とひずみ速度の関係

$\dot{\epsilon} \leq 5.43 \times 10^{-2}$  (1/sec) の場合

$$\frac{E_{td}}{E_{ts}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.0074} \quad (3-5)$$

$\dot{\epsilon} > 5.43 \times 10^{-2}$  (1/sec) の場合

$$\frac{E_{td}}{E_{ts}} = 0.4598 \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.0835} \quad (3-6)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$  は静的荷荷のひずみ速度 [ $2.0 \times 10^{-6}$  (1/sec)]、 $\dot{\epsilon}$  は急速荷荷時のひずみ速度 (1/sec)、 $E_{ts}$  は静的荷荷の場合の弾性係数、 $E_{td}$  はひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  で荷荷した場合の弾性係数である。式(3-5)、(3-6)を用いて評価した関係を、図-3.18 中に実線で示す。図中には、CEB-FIP モデルコード<sup>15)</sup>による弾性係数の増加率の算定式を破線で示している。CEB-FIP モデルコードの算定式は、 $10^{-1}$  (1/sec) のひずみ速度レベルまでは本試験結果および既往の結果に対する平均的な値を与えている。

### 3. 7 まとめ

本章では、コンクリート円柱供試体の高さ寸法ならびに載荷速度をパラメータとする急速一軸引張載荷試験を行い、コンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが動的引張特性に及ぼす影響について実験結果に基づき定性的・定量的な検討を行った。本章において得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 一軸引張試験におけるコンクリート供試体の破壊状況は、ひずみ速度が大きくなると大きな骨材が破断するケースが多くなること、および破断面が複数箇所形成されるケースがみられる等、静的載荷の場合とは大きく異なることが認められた。
- (2) コンクリート供試体の高さ寸法の違いは、各載荷速度において引張強度および引張強度時のひずみの値に影響を及ぼす。ただし、弾性係数については供試体の高さ寸法の違いによる影響は認められなかった。
- (3) 各載荷速度において、コンクリート円柱供試体の高さ(H)と直径(D)の寸法比(H/D)が2以上になると、引張強度および引張強度時のひずみは一定値に収束する傾向が認められた。
- (4) 急速載荷を受ける場合、コンクリートの引張強度あるいはその時のひずみの増加率は、供試体の高さ寸法の違いによらずひずみ速度のみに依存する。
- (5) コンクリートの引張強度、引張強度時のひずみおよび弾性係数は、ひずみ速度が増加するにしたがい大きくなる。また、約  $1.0 \times 10^{-1}$  (1/sec)のひずみ速度を境にしてその前後で増加傾向が大きく異なることが認められた。
- (6) 試験結果に基づき、コンクリートの引張強度の増加率、引張強度点におけるひずみの増加率および弾性係数の増加率とひずみ速度の関係を求める評価式をそれぞれ定式化した。なお、本評価式は本試験範囲内において有効である。

【第3章の参考文献】

- 1) Bishoff, P. H. and Perry, S. H. : Compressive behaviour of concrete at high strain rates, *Materials and Structures*, Vol.24, pp.425-450, 1991.
- 2) 畑野 正 : 衝撃引張荷重によるコンクリートの挙動, 土木学会論文集, 第73号, pp.28 - 34, 1961年3月.
- 3) 竹田仁一, 立川博之 : 直接引張法によるコンクリート高速引張実験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.73 - 74, 1970年9月.
- 4) Zielinski, A. J., Reinhardt, H. W. and Kormeling, H. A. : Experiments on concrete under uniaxial impact tensile loading, *Materiaux et Constructions*, Vol.14, No.80, pp.103 - 112, 1981.
- 5) Suaris, W. and Shah, S. P. : Constitutive model for dynamic loading of concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.111, No.3, pp.563 - 576, March, 1985.
- 6) Spetla, Z. and Kadlecck, V. : Effect of slenderness on the direct tensile strength of concrete cylinders and prisms, *RILEM Bulletin*, No.33, new series, pp.403-412, December, 1966.
- 7) 例えば竹田仁一, 立川博之, 藤本一男 : コンクリートと衝撃 — 衝撃を受けるコンクリートの性状と実験 —, *コンクリート工学*, Vol.14, pp.1-11, April, 1977.
- 8) 上田稔, 長谷部宣男, 佐藤正俊, 奥田宏明 : コンクリートの引張破壊メカニズムと引張強度の破壊力学的研究, 土木学会論文集, 第466号(V), pp.69-78, 1993.5.
- 9) Takeda, J. and Komoto, H. : Rate effects on crack propagation in concrete and brittle fracture of concrete structures, *Proc. of The 6th Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials*, , Kyoto, July, 1991.
- 10) Zielinski, A. J. and Reinhardt, H. W. : Impact stress-strain behavior of concrete in tension, *Proc. of Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading*, RILEM, CEB, IABSE, IASS Int. Symp., Berlin, pp.112-124, June, 1982.
- 11) 小阪義夫, 谷川恭雄, 山田和夫 : コンクリート強度に関する確率破壊モデルの適用性とその定量化, 日本建築学会構造系論文報告集, 第352号, pp.10-21, 1985.6.
- 12) 和泉正哲, 三橋博三 : 確率過程理論に基づいたコンクリートの破壊理論 Part I, 日本建築学会論文報告集, 第287号, pp.1 - 13, 1980年1月.
- 13) Ross, C. A. , Jerome, D. M. , Tedesco, J. W. and Hughes, M. L. : Moisture and strain rate effects on concrete strength, *ACI Materials Journal*, Vol.93, No.3, pp.293 - 300, May-June, 1996.
- 14) John, R. , Shah, S. P. and Jenq, Y. S. : A fracture mechanics model to predict the rate sensitivity of mode I fracture of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.17, pp.249 - 262, 1987.
- 15) CEB-FIP MODEL CODE 1990, First Draft, *CEB Bulletin d'Information*, No.195, 1990.
- 16) Ross, C. A. , Thompson, P. Y. and Tedesco, J. W. : Split-Hopkinson Pressure-Bar Tests on concrete and mortar in tension and compression, Vol.86, No.5, pp.475-481, Sep.-Oct., 1989.
- 17) Oh, B. H. : Behavior of concrete under dynamic tensile loads, *ACI Materials Journal*, Vol.84, No.1, pp.8 -13, January-February, 1987.
- 18) Kipp, M.E. , Grady, D.E. and Chen, E.P. : Strain-rate dependent fracture initiation, *International Journal of Fracture*, Vol.16, No.5, pp.471-478, Oct., 1980.

- 19) 例えば Kadlecěk, V. and Spetla, Z. : Effect of size and shape of test specimens on the direct tensile strength of concrete, RILEM Bulletin, No.36, pp.175 - 184, September, 1967.
- 20) 例えば長谷川俊昭, 塩屋俊幸, 岡田武二 : コンクリートのひびわれと寸法効果, セメント・コンクリート, No.474, pp.6 - 20, 1986.8.