

高ひずみ速度下におけるコンクリートの圧縮および引張強度特性 に及ぼす含水率の影響

Influence of Moisture Content on Compressive and Tensile Strength Properties of Concrete under High Strain-Rates

森 孝二*, 上林勝敏**, 藤掛一典***, 大野友則****, 佐藤紘志****

Koji MORI, Katsutoshi UEBAYASHI, Kazunori FUJIKAKE, Tomonori OHNO and Hiroshi SATOH

* 防衛大学校理工学研究科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 修(工) 防衛大学校研究員 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 博(工) 防衛大学校講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**** 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

This study is to investigate the coupled effects of moisture content and strain-rates on compressive strength and tensile strength of the concrete. Thus, uniaxial rapid compressive loading tests and rapid splitting tensile tests for cylindrical concrete specimens were executed. In tests, the moisture content of specimen and the loading rate were chosen as test parameters. A strong influence of the moisture content of the concrete specimen on both the compressive and tensile strength under rapid loading was observed in tests. Finally, a formulation was proposed to calculate the dynamic increase factor for both compressive and tensile strength as a function of strain-rate and moisture content.

Key Words: moisture content, strain-rate effect, uniaxial rapid compressive loading, rapid splitting tensile loading

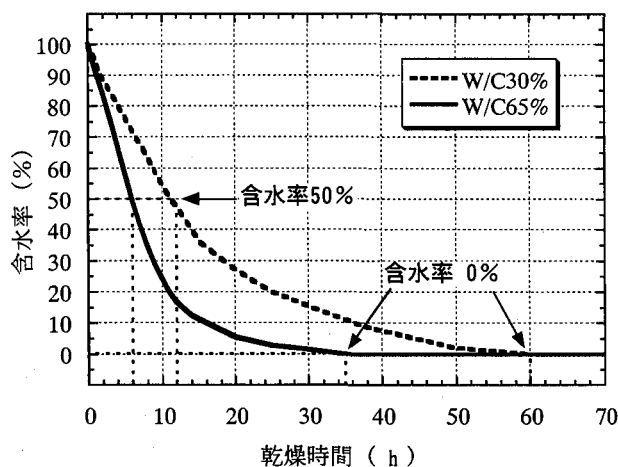
1. はじめに

コンクリートの力学的諸特性の中でも強度特性は、載荷速度の影響を受けると静的載荷に対する特性と大きく異なることが知られている。土木・建築の分野において、落石・土石流などの自然的要因あるいは車両・船舶・航空機や重量物等の衝突事故や爆薬・火薬・ガス等の爆発事故などに起因する人為的要因によって発生する種々の衝撃荷重を受けると、鉄筋コンクリート構造物の構成材料であるコンクリートや鉄筋には $10^{-1} \sim 10^2(1/\text{sec})$ 程度のひずみ速度が発生すると言われている¹⁾。したがって、衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃設計法を確立するためには、まずはその基礎的データとなる高ひずみ速度下におけるコンクリート材料の力学的特性を定量的に把握することが重要である。

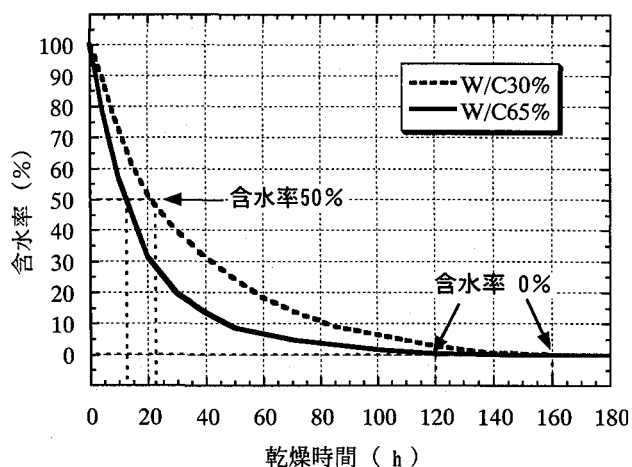
コンクリート材料の動的特性について Kaplan は、コンクリート供試体の含水量、材齢、養生方法、載荷速度等を試験パラメータとする急速一軸圧縮載荷試験を行っている。その結果、載荷速度が大きくなるにしたがい圧縮強度が増加する主因として、コンクリート内部の空隙や毛細管に存在する自由水とその粘性によるものである

という考え方を示している²⁾。すなわち、比較的ゆっくりと載荷が行われる場合、自由水は毛細管を通り低応力あるいは水で満たされていない空隙や新たに形成された微細ひび割れ等に移動するため間隙水圧は消散し耐力上昇には寄与しない。一方、載荷速度が大きくなると、自由水は粘性抵抗のため急速に移動することができず、空隙や毛細管に閉じ込められた自由水が静水圧の形で応力を負担する結果として耐力が上昇するという考えである。載荷速度と動的圧縮強度や動的引張強度の関係にコンクリート中の含水量が大きく影響を及ぼすということは、白井ら³⁾や Ross ら⁴⁾によっても報告されているが、定量的に評価するには至っていない。

著者らは、既往の研究においてコンクリートの圧縮強度、側圧、ひずみ速度をパラメータとする急速三軸圧縮載荷試験を行い、ひずみ速度が三軸応力下の最大応力に及ぼす影響は作用応力状態によって大きく異なり、必ずしもひずみ速度のみが最大応力を増加させる要因ではないことを示している⁵⁾。また、高ひずみ速度・三軸応力下のコンクリートの力学的特性もコンクリート中の含水量によって大きく影響を受けると考えられるが、その影響について把握するには至っていない。



(a) 直径 50mm、高さ100mm



(b) 直径100mm、高さ200mm

図-1 供試体寸法ごとの含水率と乾燥時間の関係

三軸応力下における破壊基準にひずみ速度が及ぼす効果に関する力学的メカニズムの解明や動的構成モデルによってコンクリートの挙動を適切にあらわすためには、コンクリート中の含水率が、高ひずみ速度ならびに三軸応力下における破壊基準に及ぼす影響を定量的に調べる事が重要であると考え、そのためには、まず含水率が動的な圧縮強度および引張強度に及ぼす影響を十分に調べる必要がある。

そこで本研究では、載荷速度(ひずみ速度)および含水率をパラメータとする急速一軸圧縮試験および割裂試験を行い、含水率がコンクリートの動的圧縮および引張強度特性に及ぼす影響を調べ、定量的に評価することを目的としている。

2. 含水率の評価手法

コンクリート中の含水量は、コンクリートの耐久性やクリープをはじめとする力学的特性に大きな影響を及ぼすことがわかっている。そのため、コンクリート構造物中の含水率を精度良く測定するための計測法に関する研究が行われ、電極法などが提案されている⁶⁾。従来、コンクリート円柱供試体レベルの含水量を調べる場合には、コンクリート円柱供試体を乾燥炉に入れ 105~110℃で加熱乾燥することによって失われる水分重量を計測することで含水量を評価する試験方法(以下、この試験方法を乾燥重量法と呼ぶ)が用いられている。Ross らは、この乾燥重量法によって水セメント比 53%、直径および高さが 51mm の円柱供試体に対し、乾燥時間を変えることでコンクリート中の含水量を湿潤、半乾燥、完全乾燥という 3 種類に設定し、供試体の含水量が引張強度と載荷速度の関係に及ぼす影響を調べている⁴⁾。

本研究においても、この乾燥重量法を用いてコンクリートの含水量を調整することにした。水中養生した湿潤供試体(供試体重量 W_w)を 105±3℃の乾燥炉に入れ数

時間ごとに供試体重量を計測し、5 時間でその重量変化が 0.5 g 以下になった場合を完全乾燥(供試体重量 W_d)とした。本研究では、水中養生した湿潤供試体に含まれる乾燥脱水可能な水分重量($W_w - W_d$)に対して、任意の乾燥時間における供試体中に含まれる脱水可能な水分重量の比を含水率と定義する。任意の乾燥時間における供試体重量を W とすると供試体の含水率 w (%) は次式で求めることができる。

$$w = \frac{W - W_d}{W_w - W_d} \times 100 \quad (1)$$

したがって、水中養生した湿潤供試体および完全乾燥供試体の含水率は、それぞれ 100% および 0% と評価される。

コンクリート供試体の含水率と乾燥時間の関係が得られれば、乾燥時間を調整することでコンクリート供試体の含水率を任意に設定することが可能となる。本研究では、本試験で用いる供試体の寸法ならびに水セメント比を決定するために、これらをパラメータとした乾燥試験を行った。乾燥試験に用いた供試体寸法は直径 50mm、高さ 100mm および直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体で、それぞれ水セメント比を 30% および 65% の 2 種類に設定した。各設定ケースに対して 5 体の供試体を用いて含水率と乾燥時間の関係を求めた。その結果を供試体寸法ごとに図-1 に示す。この図から、供試体寸法が小さく、かつ水セメント比が大きい方が乾燥による初期の含水率の変化が大きく、完全に乾燥するのに要する時間も短いことがわかる。これは、供試体が大きくなるほど水分の移動距離が長くなること、また水セメント比が小さくなるほどコンクリート中の空隙量は減少するとともに細分化され緻密な内部構造となるために、乾燥による水分の蒸発を遅らせるためであると考えられる。また図中には、目安として含水率 0% および 50% となる乾燥

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					空気量 (%)	スランプ (cm)
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 (cc)		
65	55	205	315	926	781	945	4.4	19.5

時間を点線で示している。乾燥炉で高温養生した場合、セメント水和物の骨格構造が変化することが白井らによって報告されている⁷⁾。すなわち、乾燥によるコンクリートの内部構造への影響を考慮すると乾燥時間は極力短いほうが望ましい。そこで本研究では、水セメント比 65%，直径 50mm，高さ 100mm の円柱供試体を用いることにした。この供試体の場合、湿潤供試体（含水率 100%）から完全乾燥によって失われた水分量は 35.4g で、供試体の体積に対しては 18%であった。また、試験時の材齢におけるセメントの水和反応の進行程度を 75%と仮定し、Powers の理論⁸⁾に従いコンクリート供試体の単位体積当りの空隙比を評価すると 18%となる。このように、単位体積当りの失われた水分の体積比と空隙比は等しいことから、含水率 100%の状態は供試体中の空隙が完全に水で飽和されている状態にあると解釈される。

3. 試験概要

コンクリート供試体中の含水率の相違が動的圧縮強度および動的引張強度特性に及ぼす影響を調べるために、急速一軸圧縮載荷試験および急速割裂載荷試験を行っている。

3.1 試験パラメータ

試験パラメータは、急速一軸圧縮試験および急速割裂試験とも、含水率および載荷速度とした。

含水率は、0%（完全乾燥供試体）、100%（湿潤供試体）およびそれらの中間にあたる 50%（半乾燥供試体）の 3 種類とした。コンクリート供試体をそれぞれ設定した含水率にするのに要する乾燥時間は、図-1(a)から含水率 0%が 35 時間、含水率 50%が 6 時間となる。含水率 100%の湿潤供試体は試験直前まで水中養生（乾燥なし）とした。なお、含水率 0%および 50%の供試体は、試験時の供試体内の温度を均一にするため所用の乾燥を試験の前日までに終了し、含水率 0%の供試体については乾燥炉から取り出した後に気中からの水分吸着を最小限に抑えるため乾燥剤（シリカゲル）を入れたプラスチック製密封容器に保存した。含水率 50%の供試体には乾燥剤は使用していない。

載荷速度は、ひずみ速度を指標として静的、低速、中速および高速の 4 種類を設定している。載荷速度の設定

値については、各試験方法のところで述べる。

各試験における試験ケースは、(含水率の種類)×(載荷速度の数)=3×4=12 ケースである。試験は、それぞれのケースに対して 6 回行っている。

3.2 供試体の製作

試験に用いる円柱供試体の寸法は、直径 50mm，高さ 100mm である。本実験で使用したコンクリートの配合を、表-1 に示す。コンクリートの材料は、普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm³)を使用し、細骨材には山砂(岩井寺産、密度 2.57 g/cm³，吸水率 2.02%)を、粗骨材には最大粗骨材寸法 10(mm)の硬質砂岩碎石(青梅産、密度 2.65 g/cm³，吸水率 0.54%)を使用した。

供試体は、打設後 1 日で脱型、その後水中養生を行った。含水率 0%，50%のものは、材齢 35 日で水中から取出し所要の乾燥を行った。試験時の材齢は含水率 100%が 35 日、含水率 50%が 36 日、含水率 0%が 38 日であった。

3.3 試験方法

(1) 急速一軸圧縮載荷試験

急速一軸圧縮試験は、図-2 に示すサーボ制御式急速載荷装置（最大載荷力 980kN，最大載荷速度 4m/sec）を用いて行っている。供試体と上下の鋼製載荷棒の間には、端面摩擦を極力小さくする目的から 2 枚のテフロンシート(t=0.05mm)の間にシリコングリースを塗布したテフロンパッドを挿入している。

本試験における計測項目は、供試体に作用する荷重ならびに供試体の軸方向の変形量である。急速一軸圧縮載荷試験でコンクリート円柱供試体に作用する荷重を計測する場合、供試体に近い位置で慣性力の影響を排除して計測することが望まれる⁹⁾。そこで本試験では、ロードセルを供試体直下の固定端側に設置するとともに載荷棒を極力短くし供試体の載荷面に近い位置で計測している。供試体の軸方向の変形量はレーザー式非接触変位形によって計測している。著者らは、既往の急速一軸圧縮載荷試験結果において、供試体各部における軸方向ひずみの値は計測位置によらず最大圧縮強度点まではほぼ等しい⁹⁾ことを報告している。したがって、レーザー式非接触変位形で計測した軸方向の変形量から軸方向ひずみを求めても、精度的に問題はないと考える。

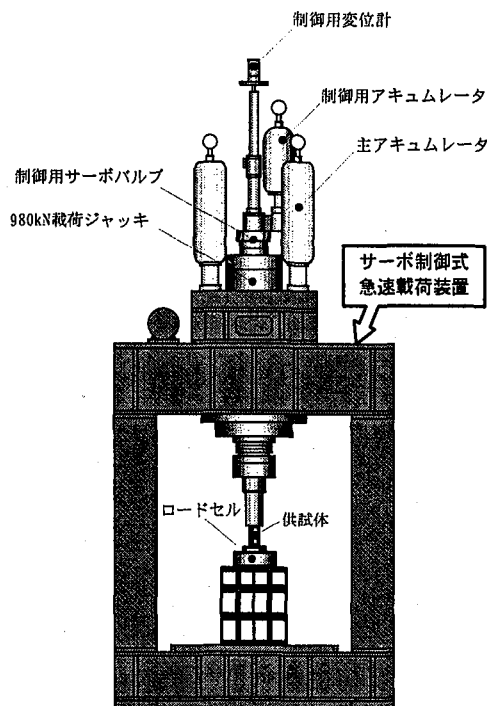


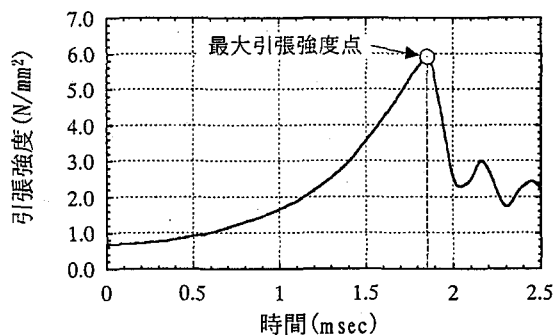
図-2 試験装置の概要

載荷速度はひずみ速度を指標として、静的、低速、中速および高速の4種類で載荷している。ひずみ速度は、載荷軸方向の変形量から求まるひずみを用いて、載荷開始点から最大圧縮強度点までの平均ひずみ速度で与えている。各載荷速度をひずみ速度で定義すると、静的載荷が 1.2×10^{-5} (1/sec)、低速載荷が 3.7×10^{-2} (1/sec)、中速載荷が 3.2×10^{-1} (1/sec)、高速載荷が 1.2×10^0 (1/sec)である。

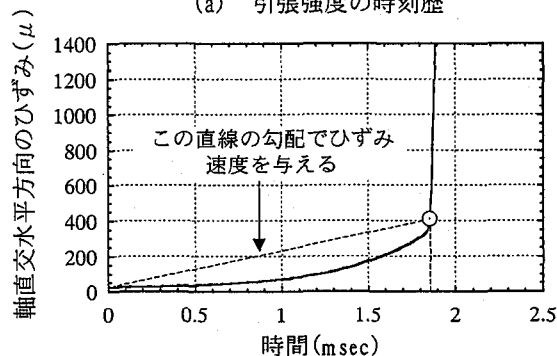
(2) 急速割裂載荷試験

急速割裂載荷試験は、急速一軸圧縮載荷試験と同様にサーボ制御式急速載荷装置（最大載荷力 980kN、最大載荷速度 4m/sec）を用いて行っている。供試体に作用する荷重は、供試体直下の固定端側に設置したロードセルによって計測している。また、レーザー式非接触変位計によって載荷軸方向の供試体の変形量を計測している。

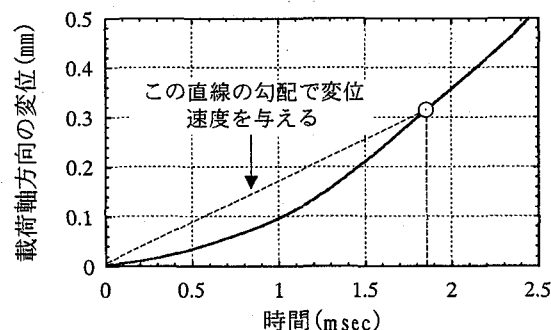
載荷速度の指標となるひずみ速度を求める上で、引張応力が作用する載荷軸方向に直交する水平方向のひずみをひずみゲージによって計測する必要がある。しかしながら、ひずみゲージを供試体に貼付するためには貼付面を十分に乾燥させる必要があり、供試体の含水率を一定に保持することが困難であると判断した。そこで、事前に本試験と同配合で製作した材齢 35 日の供試体（水中養生 28 日後、試験まで気中放置）に対して本試験と同様の載荷速度により急速割裂載荷試験を行い、載荷軸方向の変位量をレーザー式非接触変位計で、載荷軸方向に直交する水平方向の供試体中心部のひずみをひずみゲージを用いてそれぞれ計測し、平均変位速度と平均ひずみ速度の関係を求めることとした。事前試験は、各載荷速度に対し 5



(a) 引張強度の時刻歴



(b) 軸直交水平方向のひずみの時刻歴



(c) 載荷軸方向の変位の時刻歴

図-3 高速載荷で得られた試験結果の一例

本づつ行っている。一例として、高速載荷で得られた試験結果を図-3に示す。図-3(b), (c)に示すようにひずみ速度および変位速度は、載荷開始点から最大引張強度点を結ぶ勾配とした。その結果、軸直交水平方向の平均ひずみ速度と載荷軸方向の平均変位速度との間には図-4に示すような直線関係が認められ、回帰式を求めたところ次式を得た。

$$\dot{\epsilon} = 1.6 \times 10^{-2} (\dot{\delta} - 3.8 \times 10^{-4}) + 2.2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度(1/sec)、 $\dot{\delta}$ は変位速度(cm/sec)である。

載荷速度の指標となるひずみ速度は、引張応力が作用する載荷軸方向に直交する水平方向のひずみ速度とし、載荷軸方向の変位速度から式(2)を用いて与えることとした。本試験で得られた載荷軸方向の変位速度から式(2)

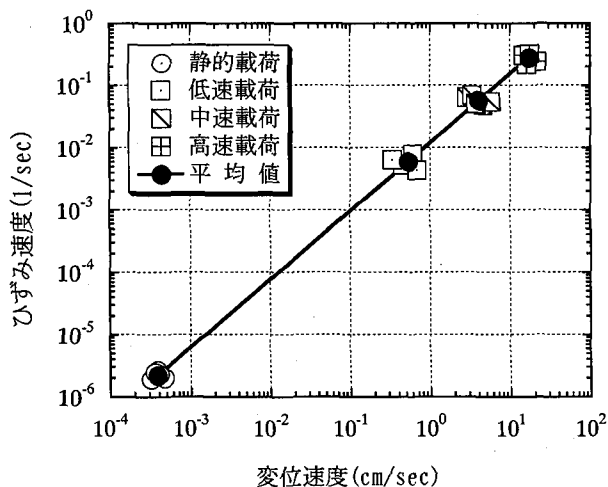


図-4 ひずみ速度と変位速度の関係

によって換算したひずみ速度は、それぞれ静的载荷が 2.0×10^{-6} (1/sec), 低速载荷が 8.5×10^{-3} (1/sec), 中速载荷が 6.6×10^{-2} (1/sec), 高速载荷が 2.7×10^{-1} (1/sec) に相当する。

4. 試験結果および考察

本研究では、コンクリート供試体の含水率を設定するために乾燥重量法により乾燥炉内で高温乾燥 ($105 \pm 3^\circ\text{C}$) を行っている。各含水率 (0, 50, 100%) に対する静的一軸圧縮および割裂载荷試験の結果を表-2, 3 に示す。これらの値は各静的载荷試験で得られた6個のデータの平均値である。これより、圧縮および引張強度のいずれも含水率が小さくなるほど強度が増大する傾向が認められる。この説明として、水の潤滑作用、乾燥による摩擦係数の増加、表面エネルギーの低下等が挙げられている¹⁰⁾が、未だ不明な点が多い。

図-5 には最大圧縮および引張強度とひずみ速度の関係を示している。図中のデータは、各含水率毎に得られた結果の平均値を示している。図から、静的载荷に相当するひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \sim 10^{-5}$ では、含水率が小さいほど大きな強度を示すが、ひずみ速度が $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \sim 10^0$ の場合は、逆に含水率が大きいほど大きな強度を示している。ただし、含水率の大小は乾燥重量法による評価であり、強度の大小を単純に比較することは問題もある。

そこで本研究では、各含水率における圧縮強度や引張強度について静的载荷に対する各载荷速度における強度の比をそれぞれ動的圧縮強度の増加率、動的引張強度の増加率と定義し、これらの動的強度の増加率に含水率や载荷速度が及ぼす影響を検討することにする。動的圧縮強度の増加率ならびに動的引張強度の増加率の算定には表-2, 3 に示した各含水率の静的载荷における圧縮強度と引張強度の値を用いている。

表-2 各含水率の静的一軸圧縮強度

含水率	0%	50%	100%
静的圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	34.20	32.02	28.93

表-3 各含水率の静的引張強度

含水率	0%	50%	100%
静的引張強度 f_t (N/mm ²)	3.33	2.69	2.57

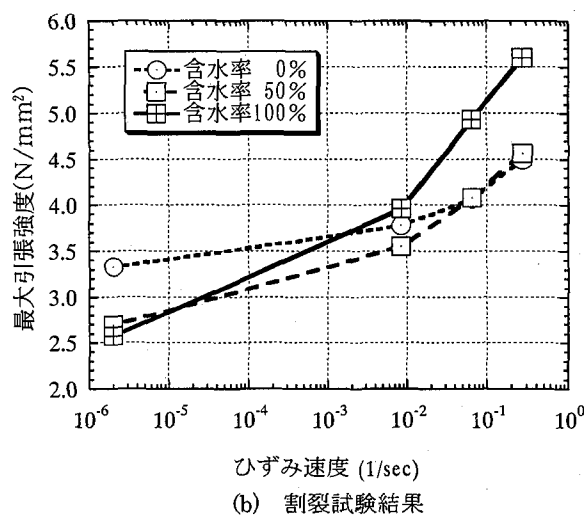
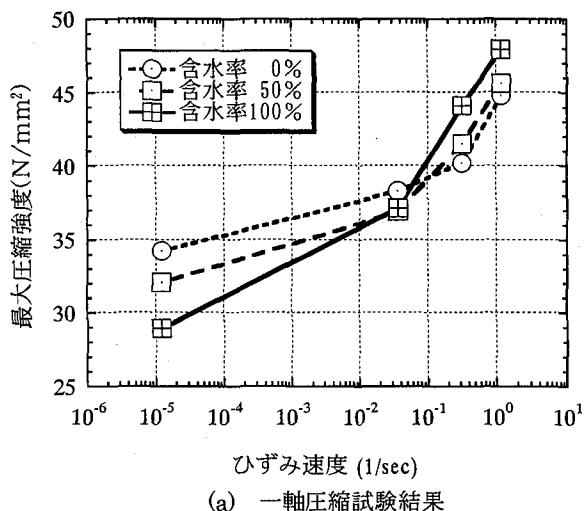


図-5 最大圧縮および引張強度とひずみ速度の関係

4.1 供試体の破壊状況

(1) 急速一軸圧縮载荷試験

急速一軸圧縮载荷試験における供試体の破壊モードは、载荷速度や含水率の違いによらず縦ひび割れ(割裂破壊)にコーン状の斜めひび割れを伴った混合型の破壊モードであった。また、ひび割れを含む破壊領域の長さは含水率の大小によらずほぼ一定で、約 75mm であった。

(2) 急速割裂載荷試験

急速割裂載荷試験における供試体の破断面の状況を見ると、静的載荷では粗骨材とモルタルとの界面における付着破壊が顕著であるのに対して、載荷速度の増大にともない粗骨材が破断する割合が大きくなる傾向が認められた。

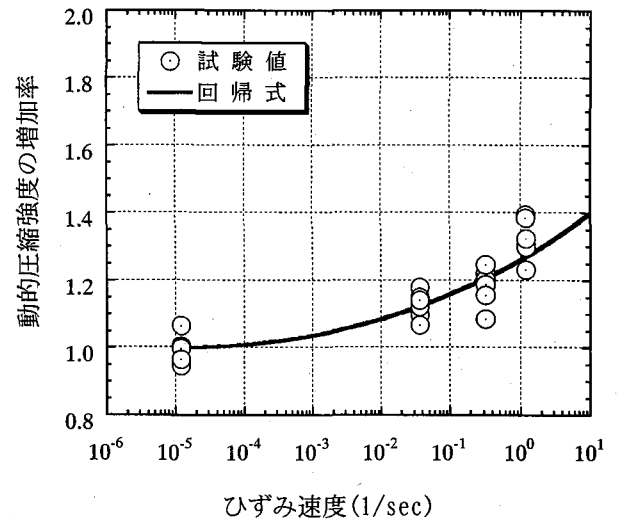
4.2 含水率が動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係に及ぼす影響

本試験で得られた動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係を示す。この図から、ひずみ速度が大きくなるほど、また含水率が大きくなるほど動的圧縮強度の増加率は大きくなるのがわかる。ひずみ速度が 1.2×10^0 (1/sec) である高速載荷に対する動的圧縮強度の増加率の平均値は、含水率 0% の場合が約 1.3 であるのに対し、含水率 50% の場合は約 1.4、含水率 100% の場合は 1.65 程度になり、含水率 0% の場合と比較して含水率 50% の場合は約 8%、含水率 100% の場合は約 27% 大きくなっている。これらのことから、動的圧縮強度の増加とひずみ速度の関係に含水率が大きな影響を及ぼしていることが理解できる。ただし、含水率 0% は内部に水分を含まない状態であるとみなされるが、この場合でもひずみ速度が大きくなるにしたがい緩やかにではあるが圧縮強度が増加している。このことから、コンクリート内部の空隙や毛細管に存在する自由水の粘性効果がひずみ速度による圧縮強度の増加に寄与するという以外にもほかの要因があると考えられる。例えば、コンクリート内部の空隙や毛細管に存在する自由水は 105℃ 程度の高温で養生すると蒸発によって失われるが、セメント水和物中の結合水を取り除くことは難しいことから、セメント水和物中の結合水が強度増加に影響を及ぼしていることも考えられる。また、一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係は、微細ひび割れ（マイクロクラック）の生成、進展、結合といった内部損傷の累積によって非線形性を示すが、この内部損傷の進展に影響を及ぼす微細ひび割れ先端における慣性効果も強度増加の要因の一つであると考えられる¹¹⁾。

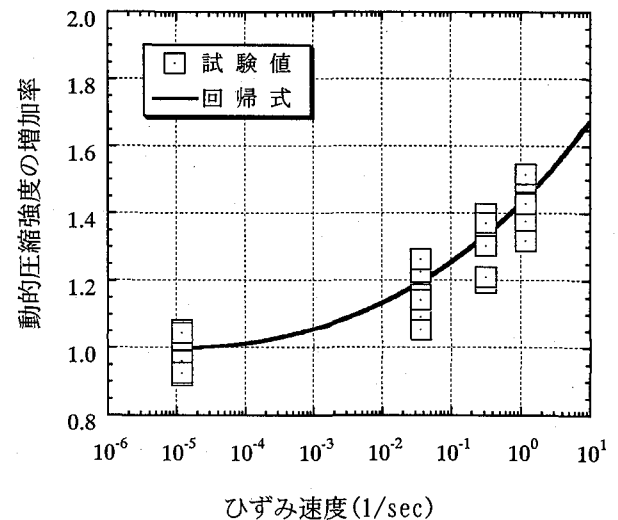
ここで、動的圧縮強度の増加率とひずみ速度ならびに含水率の関係について重回帰分析を行った。その結果、次に示す式を得た。

$$\frac{f'_{cd}}{f'_c} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}} \right)^{\left(4.5 \times 10^{-5} w + 4.15 \times 10^{-3} \right) \log_{10} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}} \right)} \quad (3)$$

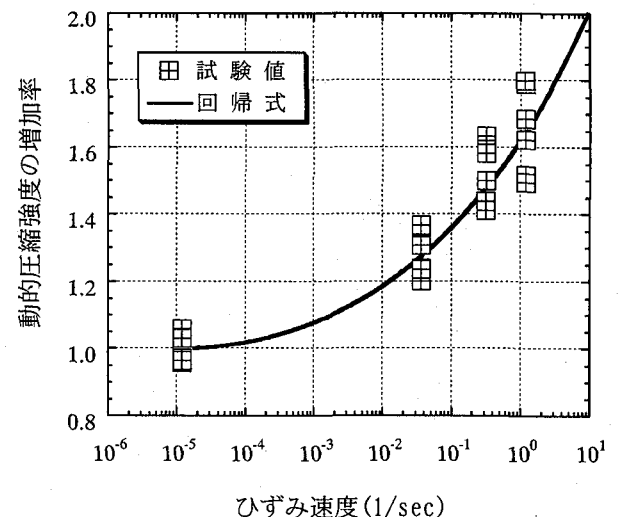
ここで、 $\dot{\epsilon}_{sc}$ は静的載荷のひずみ速度 [1.2×10^{-5} (1/sec)], $\dot{\epsilon}$ は急速載荷時のひずみ速度 (1/sec), f'_c は静的載荷時の圧縮強度 (N/mm²), f'_{cd} はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で載荷した場合の圧縮強度 (N/mm²), w は供試体の含水率 (%) である。



(a) 含水率 0% の圧縮試験結果



(b) 含水率 50% の圧縮試験結果



(c) 含水率 100% の圧縮試験結果

図-6 動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係

式(3)を用いて得られる関係を図-6中に、実線で示す。本試験の範囲内においては、動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係は式(3)を用いて概ね評価することができる。

4.3 含水率が動的引張強度の増加率とひずみ速度の関 係に及ぼす影響

本試験で得られた動的引張強度の増加率とひずみ速度の関係を、各含水率ごとに図-7に示す。この図から動的圧縮強度の増加率と同様に、ひずみ速度が大きくなるほど、また含水率が大きくなるほど動的引張強度の増加率は大きくなることがわかる。ひずみ速度が 2.7×10^{-1} (1/sec)である高速载荷に対する動的引張強度の増加率は、含水率0%の場合が約1.3、含水率50%の場合が約1.7、含水率100%の場合が約2.2となっている。これより動的圧縮強度の増加率に比べて動的引張強度の増加率の方が、ひずみ速度や含水率の影響を大きく受けると言える。

次に、圧縮载荷の場合と同様に動的引張強度の増加率とひずみ速度ならびに含水率の関係について重回帰分析を行ったところ、次式を得た。

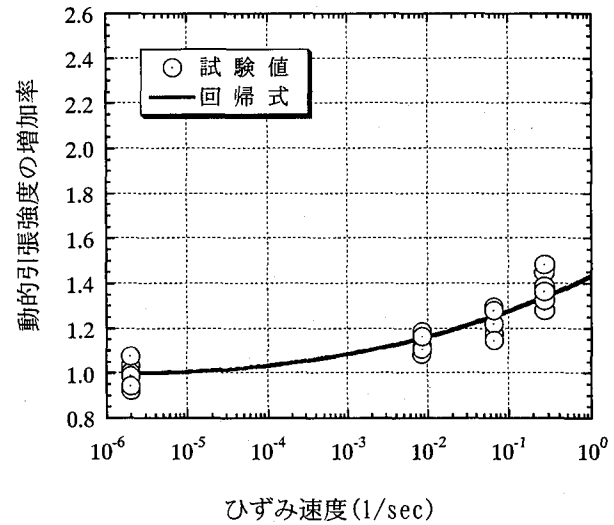
$$\frac{f_{td}}{f_t} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}} \right)^{(8.5 \times 10^{-3} w + 4.8 \times 10^{-3}) \log_{10} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}} \right)} \quad (4)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_{st}$ は静的载荷のひずみ速度 [2.0×10^{-6} (1/sec)], $\dot{\epsilon}$ は急速载荷時のひずみ速度(1/sec), f_t は静的载荷時の引張強度(N/mm²), f_{td} はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で载荷した場合の引張強度(N/mm²), w は含水率(%)である。

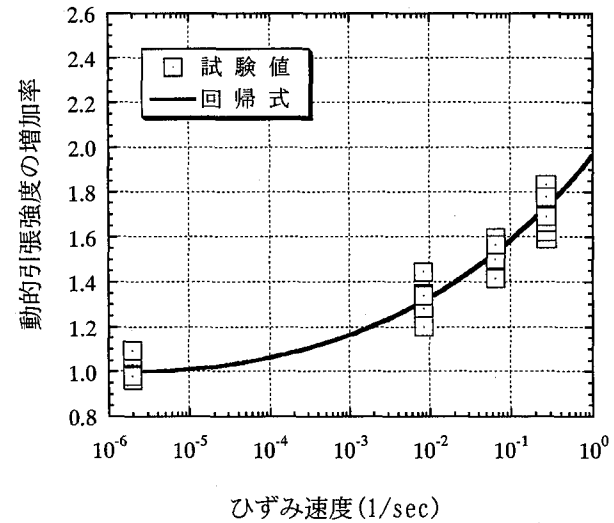
式(4)を用いて得られる関係を図-7中に、実線で示す。本試験の範囲内においては、動的引張強度の増加率とひずみ速度の関係は式(4)を用いて概ね評価することができる。また、動的強度の増加率とひずみ速度および含水率との関係は、圧縮・引張ともに全く同じ形の関数によって表すことができる。

4.4 既往の試験結果に対する検討

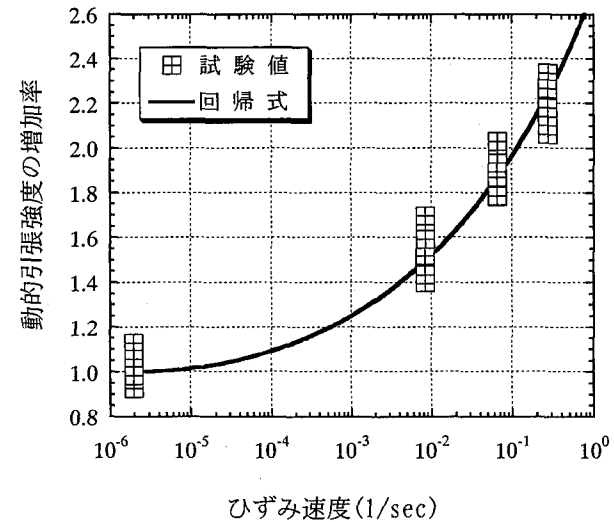
動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係を調べた既往の Watstein¹²⁾, 竹田¹³⁾, Dilger et al.¹⁴⁾, Ahmad et al.¹⁵⁾, 山口¹⁶⁾, Tang et al.¹⁷⁾, 藤掛^{9), 18)}, 白井³⁾の試験結果に、含水率0%, 50%, 100%に対して式(3)で求められる関係を併せて図-8に示す。また、引張強度の増加率とひずみ速度の関係を調べた既往の藤掛¹⁹⁾, 竹田¹³⁾, 畑野²⁰⁾, 文献²¹⁾から引用した Mellinger et al., Takeda et al., Cowell, Kormelingら, および Ross et al.⁴⁾の試験結果に、含水率0%, 50%, 100%のそれぞれに対して、式(4)で求められる関係を併せて図-9に示す。これらの図から、既往の各試験結果にはひずみ速度が大



(a) 含水率 0%の割裂試験結果



(b) 含水率 50%の割裂試験結果



(c) 含水率100%の割裂試験結果

図-7 動的引張強度の増加率とひずみ速度の関係

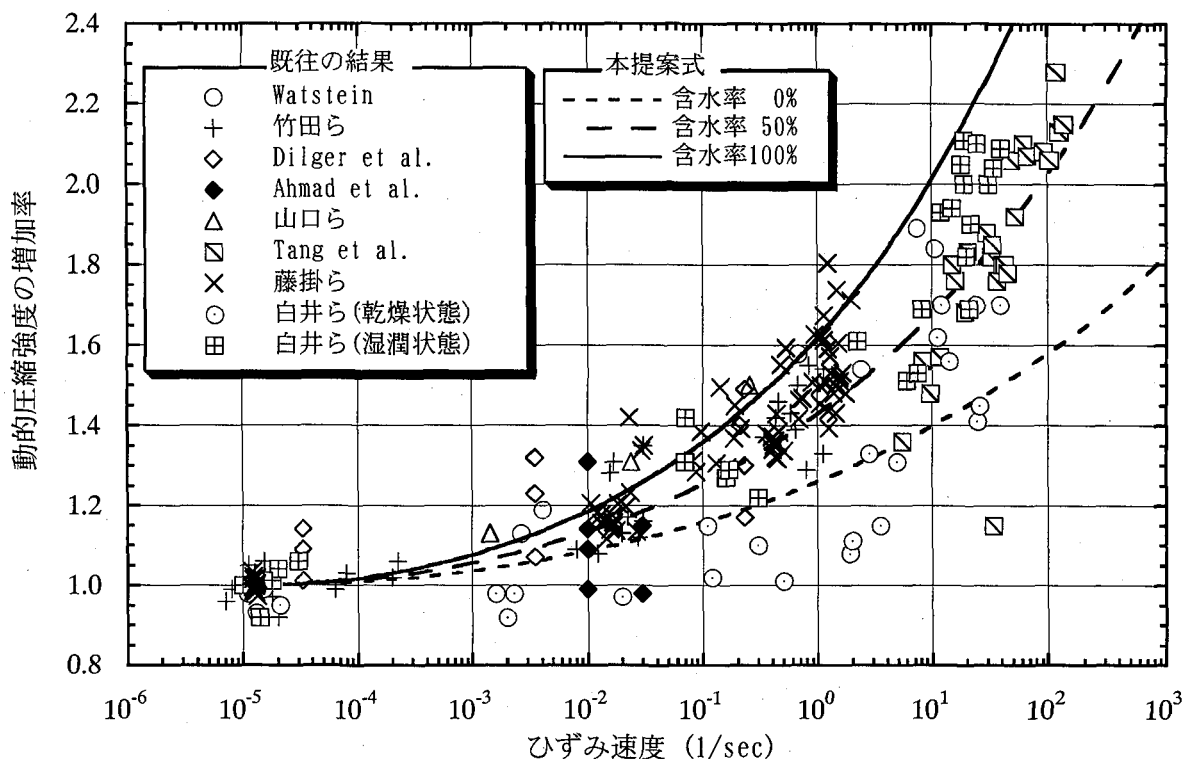


図-8 動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係

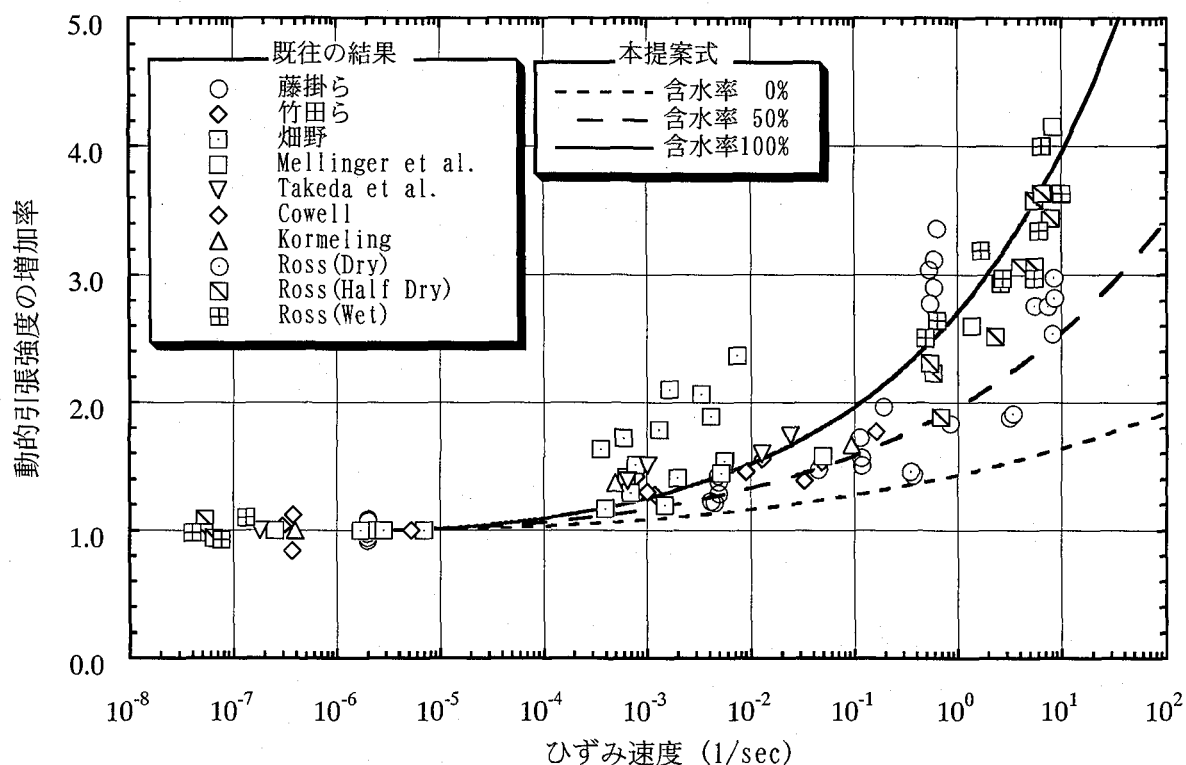


図-9 動的引張強度の増加率とひずみ速度の関係

きくなると動的圧縮強度の増加率や動的引張強度の増加率は大きくなる傾向が認められるが、非常に大きなばらつきがあることがわかる。図-8 および図-9 とともに既往の試験結果の下限ならびに上限は本研究で定式化した含水率 0% ならびに 100% の曲線に概ね対応しているといえ

る。このことから、既往の試験結果にみられる大きなばらつきの要因の一つとして、試験に用いている供試体の含水率の相違も考えられる。ただし、図-8 に示した白井らの乾燥状態の試験結果に対しては、本提案式は大きめの評価となっている。これは、異なるコンクリート強度

(24 N/mm²) および供試体寸法(直径 100mm, 高さ 200mm)に対するものであることから, 動的強度の増加率は含水率のみならずコンクリート強度や供試体寸法等にも影響を受ける可能性があるといえる. よって, 今後これらの影響に関しても, 試験を行い検討する必要があると考える.

5. まとめ

本研究では, 水中養生した湿潤供試体に含まれる水分量を基準として供試体の含水率を定義し, コンクリートの含水率および載荷速度をパラメータとする急速一軸圧縮試験ならびに急速割裂載荷試験を行い, コンクリートの含水率が動的圧縮強度や動的引張強度に及ぼす影響を調べたものである. 本研究の範囲内において得られた結果を, まとめて以下に示す.

- (1) コンクリートのひずみ速度効果による圧縮強度および引張強度の増加率は, 供試体の含水率に大きく依存する.
- (2) 載荷速度や含水率が及ぼす影響は, 圧縮強度に比べて引張強度の方が顕著である.
- (3) コンクリートの含水率の影響を考慮した動的圧縮および引張強度の増加率とひずみ速度の関係を定式化した.
- (4) 動的圧縮強度および動的引張強度の増加率とひずみ速度の関係を調べた既往の各試験結果間にみられる大きなばらつきは供試体の含水率の相違が大きな要因と考えられる.

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会: 構造物の衝撃挙動と設計法, 構造工学シリーズ 6, 1993.12.
- 2) Kaplan, S. A. : Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.32, No.111, pp.79-88, June, 1980.
- 3) 白井孝治, 島村和夫, 實晃司, 伊藤千浩, 大沼博志: 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, pp.1793-1804, 1998.3.
- 4) 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.
- 5) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: ひずみ速度効果を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集 (現在投稿中, 第V部門).

- 6) セメント・コンクリート研究会水委員会: セメント・コンクリート中の水の挙動, TCR, 1993.
- 7) 白井孝治, 柳下拓也, 広永道彦, 伊藤千浩: 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, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.211-216, 2000.6.
- 8) P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro : Concrete microstructure, properties, and materials, McGraw-Hill (田澤榮一, 佐伯昇 監訳) コンクリート工学 - 微視構造と材料特性 -, 技報堂出版, 1998.
- 9) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.627, V-44, pp.37-54, 1999.8.
- 10) 岡島達雄: コンクリートの力学的性質と水分, セメント・コンクリート, No.44, pp.18-26, 1985.10.
- 11) Kipp, M.E. , Grady, D.E. , Chen, E.P. : Strain-rate dependent fracture initiation, International Journal of Fracture, Vol.16, No.5, pp.471-478, Oct., 1980.
- 12) Watstein, D. : Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete, ACI J., V.49, No.8, pp.729-744, Apr., 1953.
- 13) 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, 1977.4.
- 14) Dilger, W. H. , Koch, R. and Kowalczyk, R. : Ductility of plain and confined concrete under different strain rates, ACI J., V.81, pp.73-81, Jan.-Feb., 1984.
- 15) Ahmad, S. H. and Shah, S. P. : Behavior of hoop confined concrete under high strain rates, ACI J., V.82, pp.634-647, Sep.-Oct., 1985.
- 16) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係 その2 高速載荷, 日本建築学会構造系論文報告集, 第396号, pp.50-59, 1989.2.
- 17) Tang, T., Malvern, L. E. and Jenkins, D. A. : Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete, Journal of Engineering Mechanics, Vol.118, No.1, pp.108-124, Jan., 1992.
- 18) 藤掛一典, 大野友則, 小暮幹太, 喜多龍一郎: 高速圧縮載荷を受けるコンクリートの材料特性, 土木学会第51回年次学術講演会概要集第5部, pp.546-547, 1996.9.
- 19) 藤掛一典, 山根茂樹, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.83-95, 1998.5.
- 20) 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, 1961.3.
- 21) 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.

(2000年9月14日受付)