

急速一軸圧縮载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

藤掛一典¹・篠崎敬一²・大野友則³・水野 淳⁴・鈴木 篤⁵

¹正会員 工修 防衛大学校土木工学科助手 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

²学生員 防衛大学校理工学研究所学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

³正会員 工博 防衛大学校土木工学科教授 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

⁴工修 鹿島建設原子力設計部技術長 (〒107-0052 東京都港区赤坂 6-5-30)

⁵工修 鹿島建設原子力設計部 (〒107-0052 東京都港区赤坂 6-5-30)

急速圧縮载荷を受けるコンクリートの軟化領域における挙動は、未だ把握されていない。これは、コンクリートが脆性材料であるために、ポストピーク領域では破壊が急速に進行し、供試体に作用する荷重および供試体の全体変形を計測することが極めて困難であることに起因していると考えられる。本研究では、供試体に作用する荷重および破壊に至るまでの供試体の全体変形を計測する方法について検討するとともに、供試体の長さ、供試体材端の拘束条件および载荷速度をパラメータとする急速一軸圧縮载荷試験を行い、これらのパラメータがプレピークの圧縮特性値・ポストピークにおけるひずみの局所化および軟化挙動に及ぼす影響について定性的・定量的な検討を行っている。またさらに、実験で得られた破壊領域内の応力-平均ひずみ関係に基づきその定式化を行っている。

Key Words : plain concrete, uniaxial rapid compressive loading, strain rate, strain localization, strain softening, compressive fracture energy, stress-strain relation

1. はじめに

コンクリートの力学的特性は、载荷速度の影響を受けると静的载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。コンクリートの圧縮特性に対する载荷速度の影響については、これまでに多くの実験的ならびに理論的研究の成果が報告されている。急速一軸圧縮载荷を受けるコンクリートの圧縮特性に関する1989年頃までの研究の現状が、Bischoff and Perry¹⁾によって詳しく調査されまとめられている。それによれば、既往の研究のほとんどがプレピーク領域における応力-ひずみ関係に代表される動的圧縮特性の把握に重点を置いている。

コンクリートに圧縮応力を加えていくと、応力の増大にもなるとコンクリート内部には微視的なひび割れの発生・累積によって損傷が蓄積される。最大強度後も载荷を継続すると、微視的ひび割れの連結によって破壊領域が形成され、ひずみの増大に対して圧縮応力が低下する軟化現象を生じることが一般的に知られている。既往の静的一軸圧縮载荷実験の結果によると、最大強度以降の軟化領域における応力-ひずみ曲線は、供試体の長さ、端面の拘束状態、あるいはひずみの計測長等に応じて異

なることが報告されている^{2),3),4),5)}。これは、最大圧縮応力以後の軟化領域(ポストピークと呼ぶ)では破壊が供試体中のある狭い範囲に集中するいわゆる破壊の局所化現象が生じるためである。このような圧縮応力下の軟化挙動は、引張応力下の場合とは大きく異なり、破壊領域が3次元的に形成されるためその取り扱い是非常に複雑になる。そのため、圧縮軟化挙動のメカニズム等についてはいまだ不明な点も多い。しかしながら、静的一軸圧縮载荷に限定すれば、応力-ひずみ関係に及ぼす供試体長さの影響は、Bazant⁶⁾によるSeries Coupling Modelをはじめとして、多くの研究者によって供試体内部の破壊領域と非破壊領域における変形挙動を重ね合わせることによって表現できることが示されている^{7),8)}。

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の終局状態に至る破壊メカニズムおよびその挙動を解析的に明らかにするためには、その構成材料であるコンクリートの大きな応力速度あるいはひずみ速度の負荷下におけるポストピークの軟化挙動を定性的・定量的に把握することが重要であると考えられる。しかしながら、急速一軸圧縮载荷を受けるコンクリートのポストピーク領域における軟化挙動についてはいまだ把握されていない。これは、コ

ンクリートが脆性材料であるために、最大圧縮強度に達した後のポストピーク領域では破壊が急速に進行し、供試体に作用する荷重および供試体の全体変形を計測することが極めて困難であることに起因していると考えられる。

本研究では、供試体に作用する荷重および破壊に至るまでの供試体の全体変形を計測する方法について検討するとともに、供試体の長さ、供試体材端の拘束条件および載荷速度をパラメータとする急速一軸圧縮載荷試験を行い、これらのパラメータが軟化領域を含むコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす影響について検討を行っている。具体的には、本実験パラメータが、最大圧縮強度、最大圧縮強度時のひずみ、初期弾性係数等のプレピークの圧縮特性値に及ぼす影響、ならびにポストピークの塑性変形エネルギーや脆性化指標によって、軟化領域の応力-ひずみ関係に及ぼす影響の定量的な評価を行っている。また、急速一軸圧縮載荷における Series Coupling Model の適否について検討するとともに破壊領域における応力-ひずみ関係の定式化を行っている。

2. 実験概要

(1) 供試体の全体変形および平均ひずみの計測方法

これまで、急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリート供試体のポストピークにおける変形挙動について調べた研究はみあたらない。これは、急速載荷装置そのものが一般に普及するには至っていないこと、かつ現象が短時間で終了するために供試体の変形を完全に計測することが極めて困難であるためと考えられる。

本研究では、急速一軸圧縮載荷（最大速度 4m/sec）を受けるコンクリート円柱供試体のポストピークにおける全体変形から応力-平均ひずみ関係を精度よく計測する方法について検討する。既往の急速一軸圧縮載荷実験では、コンクリート供試体のひずみや全体変形の計測に供試体の表面に貼付されたひずみゲージや変位計等が一般的に用いられている。

作用荷重に対して供試体が一様に変形するような場合は、供試体の表面に貼付したひずみゲージで供試体全体の平均ひずみを計測する方法は、簡易であり精度も非常によく有効である。図-1 に、過去に著者らが行った急速一軸圧縮載荷実験でコンクリート円柱供試体の表面に貼付したひずみゲージによって計測されたひずみを用いた応力-ひずみ関係、およびそのときの供試体の破壊状況を示す。ポストピークの軟化領域における応力-平均ひずみ関係は、一般的に図-1 中の破線で示されるような関係にあるものと推定される。しかしながら、実際に供試体の表面に貼付されたひずみゲージによって計測された応力-ひずみ関係は、最大圧縮強度以降、応力の減少

とともにひずみが減少する除荷の様相を呈する。Van Mier が行った静的一軸圧縮載荷実験の結果によると、供試体の表面に貼付されたひずみゲージによるひずみの計測値と変位計による全体変形量の計測値から評価される平均ひずみの関係は、最大圧縮強度まではほぼ同程度とみなせるものの、最大圧縮強度以降では顕著な相違を生じることが示されている⁹⁾。これは、最大圧縮強度以降、コンクリート供試体中には微視的ひび割れの連結によって巨視的なひび割れが形成され、その形成パターン、すなわち破壊モードに応じて供試体中の各部のひずみ応答は複雑に異なるためと考えられる。このことから、コンクリート円柱供試体の表面に貼付したひずみゲージによって軟化領域における供試体全体の平均ひずみを計測することは不可能であると考えられる。

一方、変位計によって供試体の全体変形を計測する場合、ひずみ速度が $10^0(1/\text{sec})$ 程度の急速載荷では変位計自体には応答周波数 10kHz 程度、分解能 5/1000(mm) 程度の性能が要求される。また、急速載荷では、載荷中に非常に大きな加速度 (200G 程度) が生じるとともに振動等の影響も大きくなることから、変位計あるいはそのターゲットの取付は相当強固なものにする必要がある等の問題がある。Ahmad and Shah は、変位計を用いて急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリートの変形を計測することを試みたが、ポストピークの現象が短時間で終了するために不可能であったことを述べている¹⁰⁾。

これらのことから、急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリートの軟化領域における供試体の全体変形および平均ひずみを計測するためには、供試体の表面に貼付されたひずみゲージや変位計といった従来用いられてきた以外の方法によって計測する必要がある。そこで、本研究では図-2 に示すような異形加工したアクリル棒にひずみゲージ (ゲージ長 2mm) を 5~8 枚貼付した治具 (SMR: strain measurement rod) をコンクリート円柱供試体の中央に埋め込み、SMR に貼付されたひずみゲージによるひずみの計測値を SMR 全体にわたって積分することで供試体の全体変形を計測する方法を採用している。具体的には、SMR の各位置で計測されたひずみに基づき図-3 に示すようにアクリル棒のひずみ分布を仮定して、次式から全体変形を求めている。

$$\delta = \int \varepsilon dL = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i L_i \quad (1)$$

図-4 に、実験に用いるアクリル棒の応力-ひずみ関係を示す。アクリル棒の弾性係数は、 $3.3 \times 10^3 (\text{N}/\text{mm}^2)$ でありコンクリートのそれと比較して 1/10 程度と小さく、コンクリートの変形を拘束することはない。また、事前

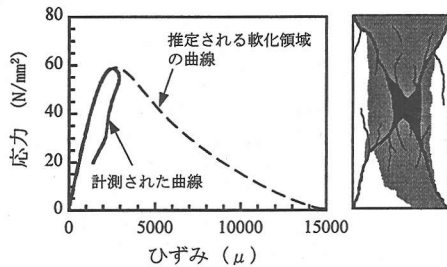


図-1 急速一軸圧縮荷試験による
応力-ひずみ関係の計測例と破壊状況

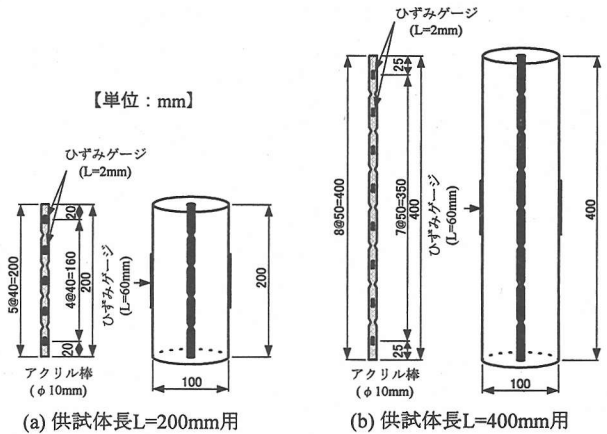


図-2 SMRの概要と供試体への設置状況

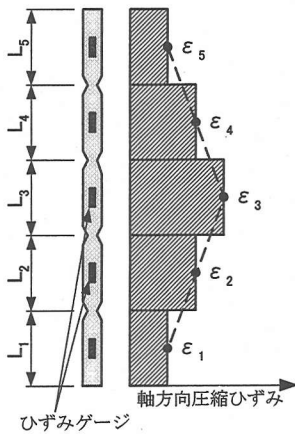


図-3 SMRのひずみ分布

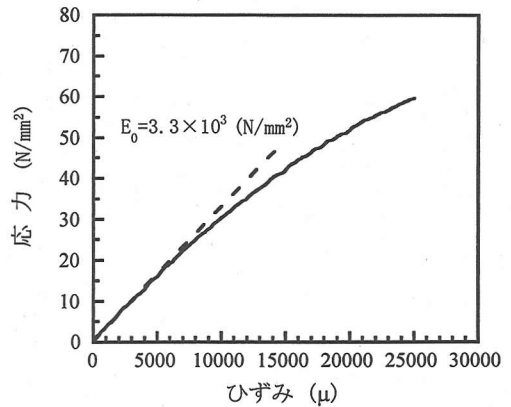


図-4 アクリル棒の応力-ひずみ関係

に行った予備実験の結果から、アクリル棒の円周上に40～50(mm)間隔で三角形のノッチを切削加工することでコンクリートとの付着が強化され、ひずみゲージを貼付している区間でのコンクリートの局所的なひずみを計測することが可能であると判断した。

平井らは、静的一軸圧縮荷を受けるコンクリート供試体の局所ひずみおよび全体変形の計測に本研究と同様の方法を用いて実験を行い、アクリル棒から評価される全体変形と変位計から計測される全体変形は、ほぼ一致することを確かめている¹⁰⁾。

(2) 実験パラメータ

本研究は、急速一軸圧縮荷を受けるコンクリート円柱供試体の長さ、供試体材端の拘束条件および荷速度がコンクリートの動的軟化特性に及ぼす影響を実験的に把握することを目的としている。そこで、実験パラメータは、表-1に示すようにコンクリート円柱供試体の長さ、材端の拘束条件および荷速度とした。

コンクリート円柱供試体は、直径が同じ(100mm)で長さが200mmおよび400mmの2種類のを準備した。材端の拘束条件は、供試体を直接鋼製の荷棒に接触させて行うもの(NP)と、供試体と鋼製の荷棒の間に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($t=0.05\text{mm}$)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行うもの(TP)の2種類である。なお、コンクリートの全体変形および局所ひずみを計測する目的で供試体の中心にSMRを埋め込むことから、SMRを埋め込んだことによる影響を把握するためにSMRを設置しない供試体(H200-NP-NR)に対する実験も行っている。

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、H400シリーズについては静的、低速および高速の3種類である。荷速度の概略の値は、ひずみ速度で表示すると静的荷が 1.2×10^{-5} (1/sec)、低速荷が 1.5×10^{-2} (1/sec)、中速荷が 4.4×10^{-1} (1/sec)、高速荷が 1.4×10^0 (1/sec)程度である。実験は、それぞれの荷

表-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
	供試体長 (mm)		材端条件		SMR設置の有無		載荷速度				
	200	400	NP	TP	有	無	静的	低速	中速	高速	
H200-NP	○		○		○		○				3
	○		○		○			○			3
	○		○		○				○		3
	○		○		○					○	3
H200-NP-NR	○		○			○	○				3
	○		○			○		○			3
	○		○			○			○		3
	○		○			○				○	3
H200-TP	○			○	○		○				3
	○			○	○			○			3
	○			○	○				○		3
	○			○	○					○	3
H400		○	○		○		○				3
		○	○		○			○			3
		○	○		○					○	3

表-2 コンクリートの配合

W/C	W/P	単位量 (kg/m ³)							空気量 (%)	スランプフロー (cm)
		W	C	LS	S	G	SP P×%	VA W×%		
60	40	180	300	150	822	847	1.8	0.25	4.0	67.5

注) P : 粉体(=C+LS), LS : 石灰石粉, SP : 高性能AE減水剤, VA : 増粘剤

荷速度に対して3回行っている。

(3) 試験体の製作

本研究では、2.(1)で述べたように急速荷重によってコンクリート供試体に生じる全体および局所的なひずみを計測するため、SMRに切り欠きを入れ異形加工することでコンクリートとの付着を期待している。そのためには、確実にSMRの切り欠き部分にコンクリートを充填させることが重要となる。しかしながら、供試体内にはSMRに貼付してあるひずみゲージのリード線が多数配置されることから突き棒等でコンクリートを締め固めることが困難な状況にある。そこで、この難点を極力回避できるように高流動コンクリートを用いることにした。

本実験で使用した高流動コンクリートの配合を表-2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(比重3.16)、石灰石粉(比重2.70)を使用し、細骨材には山砂(岩井寺産、比重2.57、吸水率2.02%、粗粒率2.71)を、粗骨材には硬質砂岩砕石(青梅産、比重2.65、吸水率0.54%、粗粒率6.71)を使用した。混和剤には高性能AE減水剤および増粘剤を用いている。

試験体は、打設後材齢1日でキャッピング、脱型した後水中養生を14日間行い、その後は実験室内にて気中

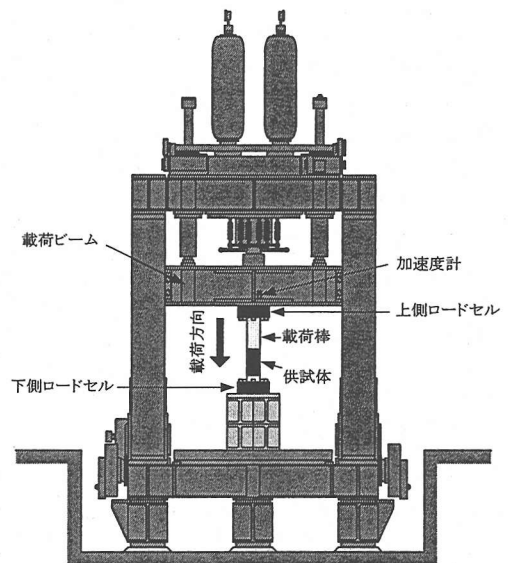
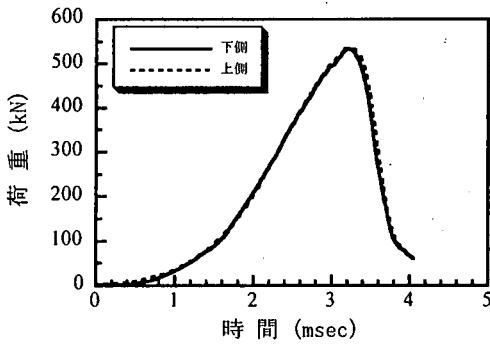
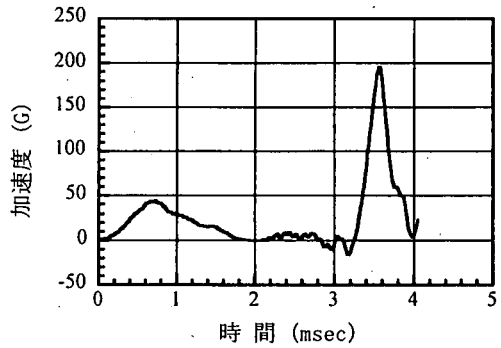


図-5 急速荷重装置と供試体の設置状況



(a) 荷重の時刻歴



(b) 加速度の時刻歴

図-6 高速載荷時の荷重および加速度の時刻歴

養生を行った。実験は、材齢 52 日目から 6 日間で行った。実験に用いたコンクリートの圧縮強度は平均 $45.6(\text{N}/\text{mm}^2)$ である。

(4) 試験方法

本研究では、コンクリートの静的一軸圧縮試験にはサーボ制御式圧縮試験機（最大荷重容量 980kN）を、急速一軸圧縮載荷試験には急速載荷装置をそれぞれ用いている。図-5 に急速載荷装置と供試体の設置状況の概要を示す。急速載荷装置は、最大荷重容量 490kN、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する装置である。

既往の静的一軸圧縮載荷実験の結果によれば、材端に球座式の載荷盤を用いた場合、最大強度以降、材端の回転が応力-ひずみ関係に大きく影響を及ぼすことが示されている³⁴⁾。しかしながら、本実験では、材端の回転が軟化挙動に及ぼす影響を把握することは研究対象外として、すべて材端の回転を拘束した状態で行うことにした。

急速一軸圧縮載荷実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。そこで本実験では、供試体直下の固定端側に設置するロードセルは載荷棒を極力短くし供試体の載荷面に近い位置で計測できるようにした。また、供試体の上側にもロードセルを設置するとともに、ロードセルに付加される慣性力を算定する目的で載荷ビームに加速度計を設置している。

本実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、供試体表面に貼付した 2 枚のひずみゲージ（ゲージ長 60mm）による軸方向ひずみ、供試体の中心に埋め込んだ SMR の各ひずみおよび加速度である。

3. 実験結果および考察

(1) 供試体に作用する荷重の評価

急速一軸圧縮載荷試験で供試体に作用する荷重を計

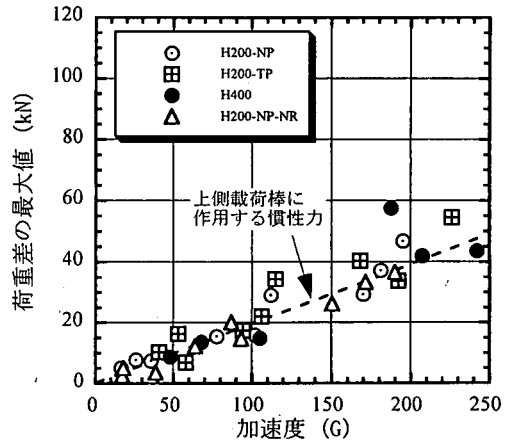
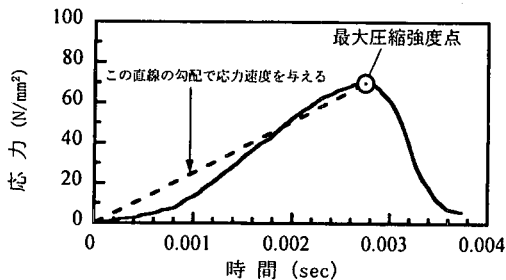


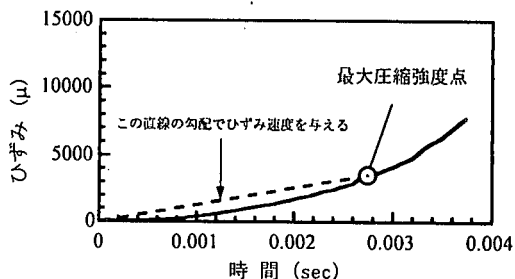
図-7 最大荷重以後に上下のロードセルで計測された荷重差と加速度の関係

測する場合、載荷初期および最大荷重以降において大きな加速度が発生することによって、計測された荷重値には載荷治具自体の慣性力の影響が含まれていることが考えられる。

図-6 に、上下のロードセルおよび加速度計によって計測された高速度急速載荷（略して、高速載荷と呼ぶ）時の荷重および加速度の時刻歴の一例を示す。この図から、載荷初期の加速域において、上下に設置したロードセルの計測値に若干の差があるものの最大荷重まではほぼ等しい値が得られていることがわかる。しかしながら、最大荷重以降では大きな加速度が発生することにより上下に設置したロードセルの計測値に若干の差異が生じている。図-7 に、実験で得られた最大荷重以降における上下に設置したロードセルによるそれぞれの荷重計測値の最大差とそのときの発生加速度の関係を示す。この図から、上下に設置したロードセルによる荷重計測値の最大差とそのときの発生加速度の間には概ね比例関係が認められる。また、その関係は、図中に破線で示すように上側ロードセルに取り付けてある鋼製の載荷棒（重量：196N）に働く慣性力にほぼ等しい。このことから、供試体の上



(a) 応力の時刻歴



(b) ひずみの時刻歴

図-8 応力速度およびひずみ速度の定義

下に設置したロードセルで計測された荷重差は、上側ロードセルに取り付けられている載荷棒に作用する慣性力とみなして差し支えない。よって、本研究では、供試体直下の固定端側に設置したロードセルによる計測値を供試体に作用する荷重と評価することにする。供試体に作用する圧縮応力は、作用荷重を供試体の全断面面積で割った公称応力として計算している。SMR を埋設した供試体については、SMR による断面欠損があるがその断面積がコンクリート供試体の断面積に対して 1/100 と小さいので無視している。

(2) 応力速度およびひずみ速度の定義

急速荷重を受けるコンクリートの圧縮あるいは引張試験において、コンクリートの強度特性は載荷速度に依存すると考えられている。コンクリートの速度効果に関する既往の研究では、載荷速度を表すパラメータとして一般的にひずみ速度あるいは応力速度が用いられている^{12),13)}。また、全体的な載荷過程を表す平均的な応力速度およびひずみ速度は、載荷開始点から最大圧縮強度点までの勾配を採用している¹⁾。

図-8 に、高速載荷における代表的な圧縮応力の時刻歴および SMR から評価された平均ひずみの時刻歴を示す。この図から、載荷初期に供試体に作用する圧縮応力および平均ひずみの立ち上りは緩慢であるが、その後は最大圧縮強度点までほぼ直線的に増加する傾向にあることがわかる。本研究では、既往の研究と同様に載荷開始点から最大圧縮強度点までの圧縮応力-時間、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定義するものとする。ただし、SMR を設置していない H200-NP-NR シリーズについては、供試体の表面に貼付したひずみゲージの計測値から評価される平均ひずみを用いてひずみ速度を与えている。実際には、最大圧縮強度点近傍のひずみ速度は、ここで定義したひずみ速度の 1.5~3.0 倍程度になっている。しかしながら、コンクリートの圧縮特性に及ぼす載荷速度の影響は対数的であることから、このように定義してもそれほど大きな誤差はないと考えられる。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 et al.¹⁴⁾によって報告された結果と同様に両対数座標で直線関係があることが認められた。なお、静的載荷の場合のひずみ速度および応力速度は、全データの平均的な値としてそれぞれ 1.2×10^{-5} (1/sec), 0.2 (N/mm²/sec)の値を用いることにする。

(3) 各実験パラメータが応力-平均ひずみ関係に及ぼす影響

コンクリートの静的一軸圧縮載荷による軟化特性に関する既往の研究結果によれば、最大圧縮強度以降の軟化領域における応力-ひずみ曲線は、供試体の長さ、端面の拘束状態、あるいはひずみの計測長さ等に応じて大きく異なることが指摘されている^{2),3),4),5)}。

ここでは、コンクリート円柱供試体の長さ、材端の拘束条件、および載荷速度をパラメータとした急速一軸圧縮試験によって得られた結果に基づき、これらのパラメータが急速載荷時の最大圧縮強度以降の軟化領域における応力-平均ひずみ関係に及ぼす影響について調べる。なお、検討に用いる平均ひずみは、SMR の各ひずみの計測値から計算される供試体全体に対する平均ひずみを意味している。

SMR を埋設した以外は同一の条件下で実験を行った H200-NP と H200-NP-NR の圧縮強度は、各載荷速度に対してほぼ同程度の値を示したことから SMR を供試体の中心に埋設した影響は無視できるものとする。

a) 載荷速度による影響

H200-NP, H200-TP および H400 の各実験シリーズで得られた応力-平均ひずみ関係を図-9~図-11 に示す。これらから SMR を用いて比較的精度よくコンクリートの動的軟化挙動を計測することが可能であることがわかる。

図-9~図-11 に示す応力-平均ひずみ関係から載荷速度が大きくなると、最大圧縮強度が大きくなるとともにプレピーク部分の応力の上昇域における応力-平均ひずみ関係の勾配も大きくなっている。一方、載荷速度が大きくなり最大圧縮強度が増加するとポストピークの軟化勾配は急になる傾向にあることが全ての実験シリーズで

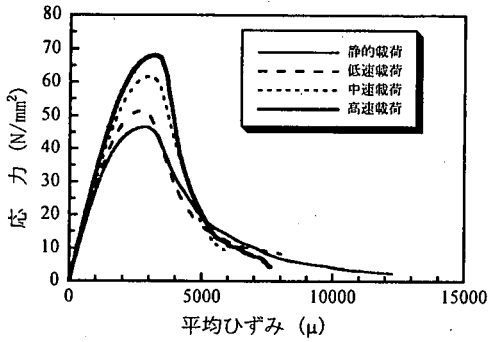


図-9 応力-平均ひずみ関係(H200-NP)

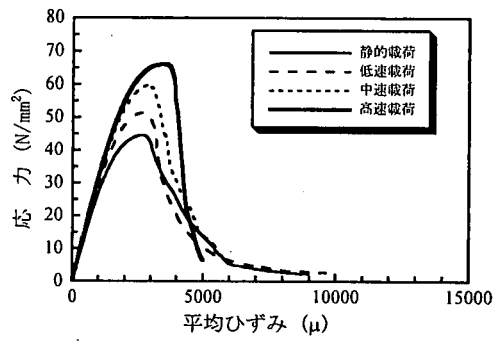


図-10 応力-平均ひずみ関係(H200-TP)

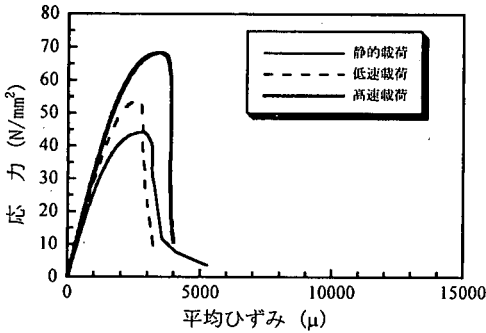


図-11 応力-平均ひずみ関係(H400)

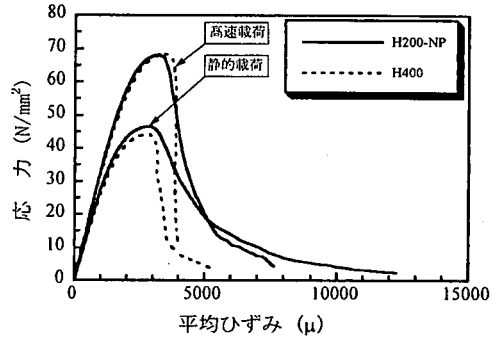


図-12 供試体長さの影響

認められる。すなわち、荷重速度が大きくなると圧縮強度は増加するが脆性化する傾向にあると考えられる。このことは、通常の静的一軸圧縮試験でコンクリートの圧縮強度が増加する、すなわち高強度コンクリートになる程ポストピークの軟化勾配が急になり脆性化する傾向にあるのと類似している。

b) 供試体の長さの相違による影響

材端の拘束条件が同じでコンクリート円柱供試体の長さが異なるH200-NPおよびH400シリーズにおいて、静的荷重と高速荷重で得られた代表的な応力-平均ひずみ関係を比較したものを図-12に示す。どちらの荷重速度においても、供試体の長さが大きいH400シリーズの方が最大圧縮強度以降の軟化勾配は急になる。静的荷重においては、供試体の長さが長くなると軟化勾配は急になることが一般的に知られている^{2),3),5)}が、急速荷重においても同様な傾向にあることがわかる。

c) 材端の拘束条件の相違による影響

コンクリート円柱供試体の長さは同じで材端の拘束条件が異なるH200-NPおよびH200-TPシリーズにおいて、静的荷重と高速荷重で得られた応力-平均ひずみ関係を比較したものを図-13に示す。どちらの荷重速度においても、最大圧縮強度以降のポストピーク領域の軟化勾配は、供試体の両端にテフロンパッドを挿入したH200-TPシリーズの方が急になる傾向にあることが認められる。静的荷重においては、供試体の端面における

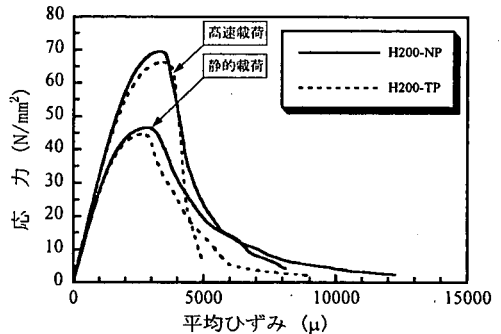


図-13 供試体材端の拘束条件の影響

拘束が小さくなるほど軟化勾配は急になることが知られている^{3),5)}が、高速荷重においても同様な傾向にあることがわかる。

(4) ひずみの局所化と供試体の破壊状況

H200-NP および H400 シリーズのような供試体の材端で端面摩擦が顕著である場合、実験終了後に目視によって確認した供試体の破壊モードは、荷重速度の違いによらずせん断破壊型であった。一方、H200-TPシリーズのようにテフロンパッドを挿入して端面摩擦を除去した場合、荷重速度の違いによらず縦ひびわれ(割裂破壊)に斜めひびわれを伴った混合型の破壊モードであった。

静的・高速荷重に対するH200-NP、H200-TPおよびH400の各実験シリーズで得られた代表的な最大応力以

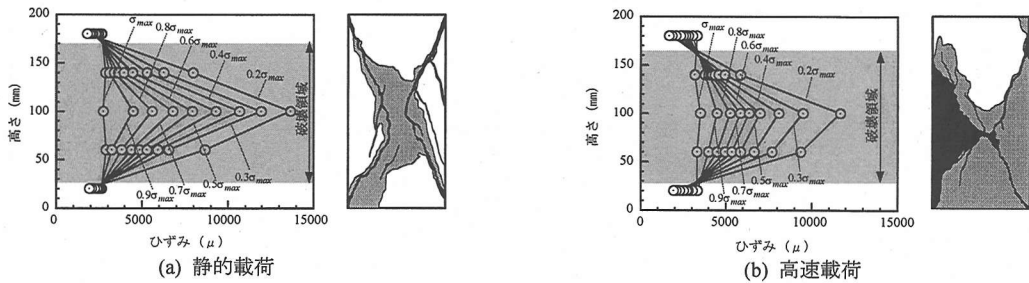


図-14 H200-NPシリーズの代表的なひずみ分布と破壊状況

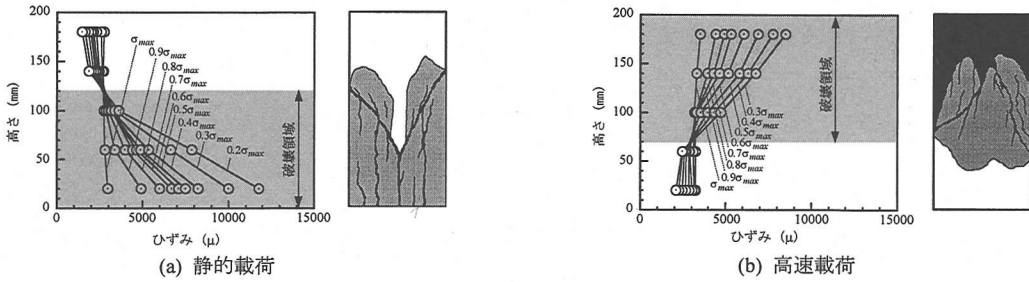


図-15 H200-TPシリーズの代表的なひずみ分布と破壊状況

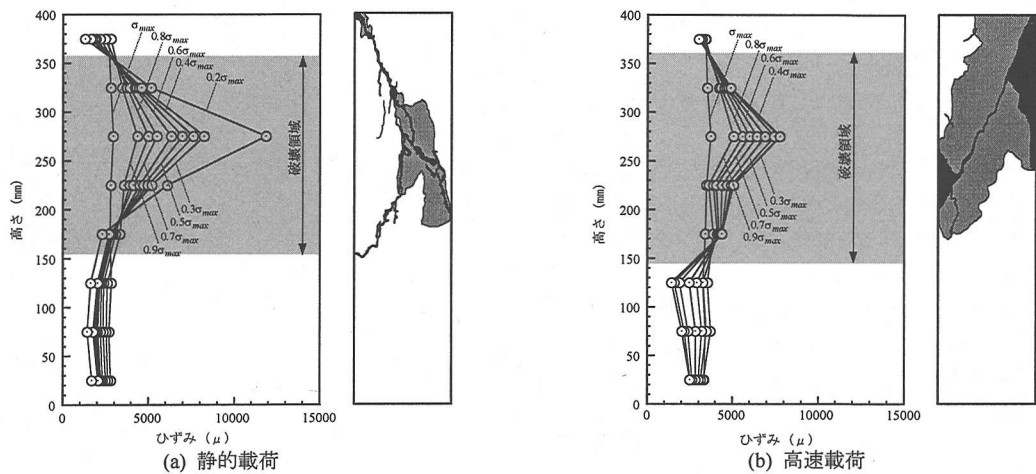


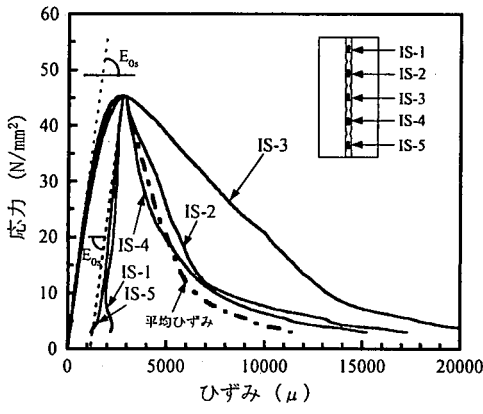
図-16 H400シリーズの代表的なひずみ分布と破壊状況

降の軟化域における供試体の軸方向ひずみの分布状況、ならびにその時の供試体の破壊状況を図-14～図-16に示す。これらの図中で、ひずみ分布の状況は、最大応力時および軟化域における最大応力の10%間隔ごとの応力レベルについて描いている。

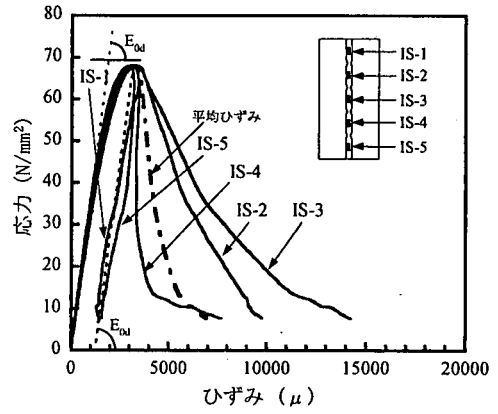
図-17に、H200-NPシリーズにおいてSMRに貼付した各ひずみゲージによって計測された静的ならび高速載荷時の応力-ひずみ関係を示す。この図から、SMRに貼付した各ひずみゲージの計測値は最大圧縮強度まではほぼ等しいと言える。しかしながら、図-17ならびに図-14～図-16に示すように、最大応力以降の軟化領域においては、明らかにひずみが増加する (IS2, IS3, IS4) 領域と減少する (IS1, IS5) 領域が存在することが認められる。

このことから、静的載荷における Torrenti et al.⁹⁾の研究結果と同様に、高速載荷においても供試体中にある特定の領域のひずみのみが増加する部分が形成されるひずみの局所化は載荷速度の違いによらずに最大応力点以降から起こると考えられる。また、図-17から、最大圧縮強度以降ひずみが戻る(除荷)ものについては、ほぼ初期弾性係数を有する直線上を戻す傾向があることが認められる。

図-14および図-15に示したH200-NPとH200-TPシリーズのひずみの分布形および破壊状況の相違は、端面での拘束条件によって大きく異なることが全ての載荷速度で認められる。端面摩擦が大きいH200-NPシリーズの場合、最大応力点以後両端付近の軸方向ひずみは減少



(a) 静的載荷



(b) 高速載荷

図-17 SMRの各ひずみの計測位置における応力-ひずみ関係 (H200-NPシリーズ)

する(除荷)のに対して中央付近の軸方向ひずみの増加が顕著となる。すなわち、軸方向ひずみは供試体の中央付近のある特定の領域に局所化する。両端にテフロンパッドを挿入して端面摩擦を除去した H200-TP の場合は、上か下のどちらか一方の材端における軸方向ひずみの増加が顕著となり、もう一方の材端付近のひずみは減少する(除荷)傾向を呈する。なお、端面摩擦を除去した場合においても、軸方向のひずみ分布は一樣にならずどちらか一方の材端に局所化する。このように一方の材端にひずみが局所化する現象は、テフロンパッドによる端面摩擦の除去の程度差や、あるいはコンクリート自体の不均一性によるものと考えられる。供試体長さが 200mm の H200-NP シリーズに対して 2 倍の長さとした H400 シリーズの場合、図-16 に示すように概ね供試体の上半もしくは下半のどちらか一方の領域の中央付近でひずみの増加が顕著となり、もう一方の領域のひずみは減少する(除荷)傾向を呈する。ひずみが局所化する部分のひずみ分布の形は、H200-NP シリーズの場合と同様である。

最大圧縮強度以降の応力の低下域で、SMR に貼付した各ひずみゲージによって計測されたひずみが増加する部分を破壊領域と考える。ひずみが局所化する破壊領域の長さは、図-18 に示すように載荷速度の違いによらず H200-NP シリーズでは約 15cm、H200-TP シリーズでは約 13cm、H400 シリーズでは約 19cm 程度である。H200-NP シリーズと H400 シリーズを比較した場合、H400 シリーズの方が約 30% 程度大きな値を示している。これは、SMR によるひずみの計測間隔の違いに起因している可能性が考えられる。同一条件(供試体長さ、材端拘束条件)の供試体においては、ひずみの局所化する領域の長さには載荷速度の違いによる顕著な違いは認められずほぼ同程度であった。また、SMR の計測値から評価されるひずみが局所化する領域と実験終了後に目視によって確認した供試体の破壊が集中する領域は、おお

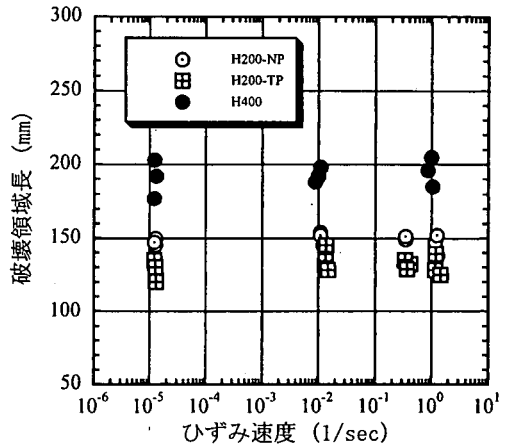


図-18 破壊領域長と載荷速度の関係

むね一致している。

(5) プレピーク領域における圧縮特性とひずみ速度の関係

本実験で得られたコンクリートのプレピークの圧縮特性とひずみ速度の関係について示し、コンクリートのプレピークの圧縮特性に及ぼすひずみ速度の影響を定量的に評価する。ここでは、コンクリートのプレピークの圧縮特性として、特に重要な最大圧縮強度、最大圧縮強度時のひずみおよび初期弾性係数に着目し、静的載荷に対する高速載荷時の各特性値の比を動的圧縮強度の増加率、最大圧縮強度時のひずみの変化率、弾性係数の増加率とそれぞれ定義し、ひずみ速度との関係を定量的に評価する。なお、全実験シリーズで得られた応力-ひずみ関係が最大圧縮強度の 1/3 点程度まではほぼ線形とみなせることから、初期弾性係数は最大圧縮強度の 1/3 点における割線係数として求めている。

コンクリートの静的一軸圧縮特性に関する既往の研

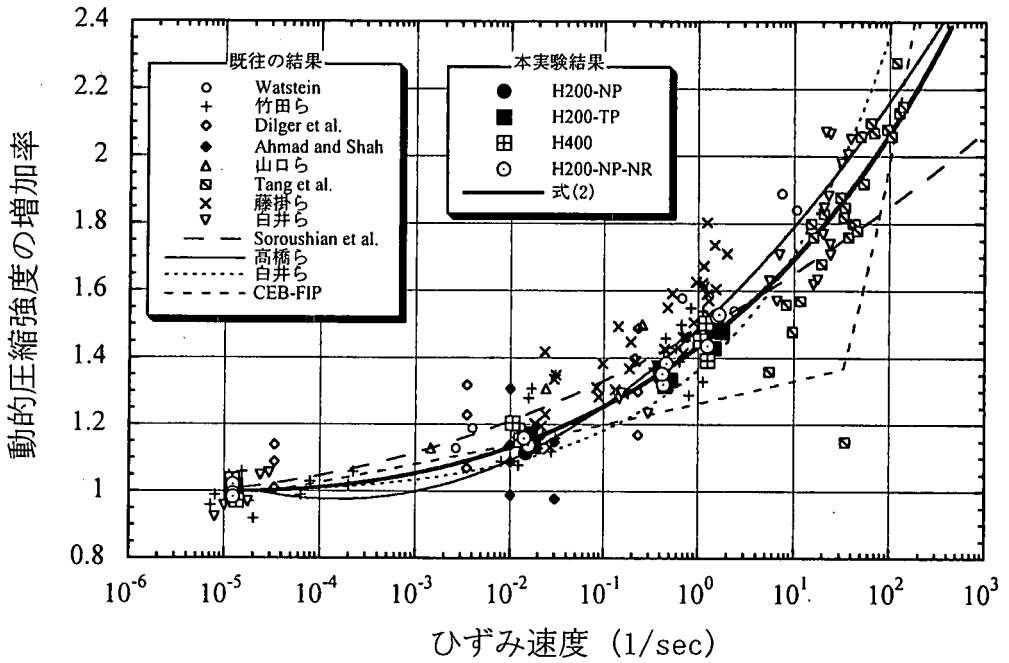


図-19 動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係

究結果によれば、供試体の形状比(H/D)が2~4の範囲内では最大圧縮強度、最大圧縮強度時のひずみおよび初期弾性係数のそれぞれは、供試体の長さや材端の拘束条件の相違によらずほぼ一定値をとることが示されている⁹⁾。

a) 動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係

本実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図-19に示す。また、図中には Watstein¹⁵⁾、竹田ら¹²⁾、Dilger et al.¹⁶⁾、Ahmad and Shah¹⁰⁾、山口ら¹⁷⁾、Tang et al.¹⁸⁾、藤掛ら¹⁹⁾および白井ら²⁰⁾の既往の実験結果を併せて表示する。

本実験結果および既往の実験結果とも実験値にバラツキはあるが、ひずみ速度が大きくなると動的圧縮強度の増加率は増加することがわかる。また、本実験で得られた結果をみると、同程度のひずみ速度レベルでは供試体の長さや材端の拘束条件によらずほぼ一定値をとることから、動的圧縮強度の増加率は主として載荷速度に依存すると言える。

次に、図-19に示す動的圧縮強度の増加率とひずみ速度の関係について、本実験値を対象として回帰式を求めた。その結果、次に示す式を得た。

$$\frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^\alpha \left[\text{Log} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^\beta \quad (2)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ 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'_{cs} 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), α および β は定数 [$\alpha = 0.006$, $\beta = 1.05$] である。式(2)による関係を図-19に太い実線で示す。図中には、Soroushian et al.²¹⁾、高橋ら²²⁾、白井ら²⁰⁾、CEB-FIP モデルコード²³⁾による関係も併せて示している。なお、CEB-FIP モデルコードの算定式には、本実験で使用したコンクリートの圧縮強度 $f'_c = 45.6$ (N/mm²)を用いた。

式(2)は、ひずみ速度が 10^1 (1/sec)以上の載荷速度で得られた Tang et al. や白井らの実験値に対しても良い対応を示している。また、本実験値および既往のすべての実験値と比較した場合、本実験式(2)による方が整合性が良いことが認められる。一方、CEB-FIP モデルコードの算定式は、2つの指数関数の式で表されているため、動的圧縮強度の増加率はひずみ速度が 30 (1/sec)の前後で大きく異なる傾向を示している。CEB-FIP モデルコードの算定式は、本実験式に対してかなり安全側の評価を与えると言える。

b) 最大圧縮強度時のひずみの変化率とひずみ速度の関係

H-200-NP, H200-TP および H400 シリーズにおける最大圧縮強度時のひずみの変化率とひずみ速度の関係について、図-20に示す。図中には Watstein¹⁵⁾、文献(21)から引用した Cowell, Atchley et al.²⁴⁾、Bresler et al.²⁵⁾、Takeda et al.²⁶⁾、Dilger et al.¹⁶⁾、Ahmad et al.¹⁰⁾、藤掛

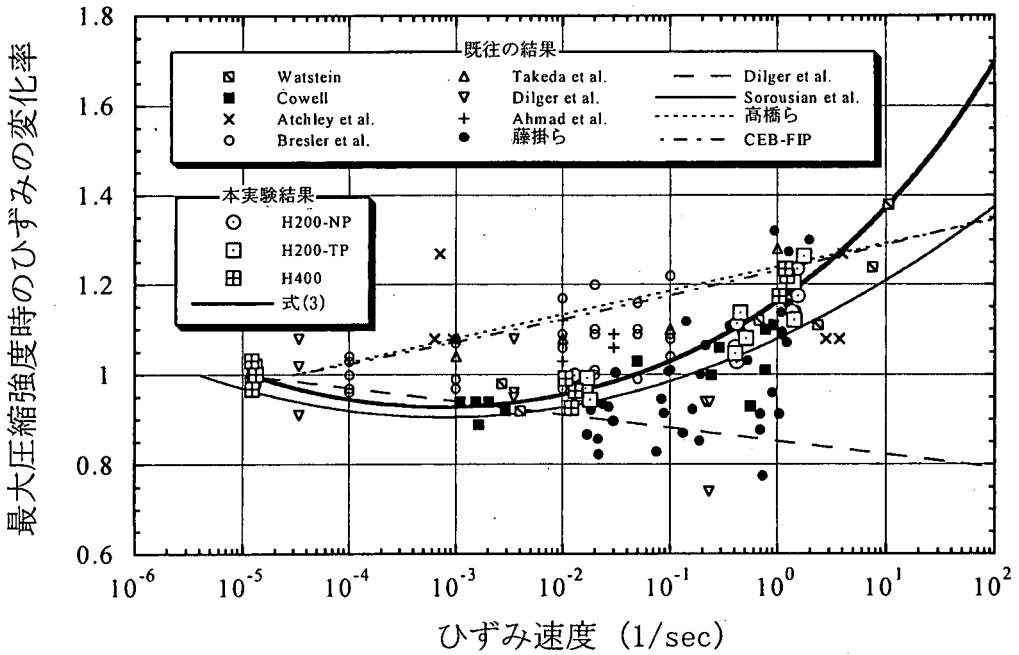


図-20 最大圧縮強度時のひずみの変化率とひずみ速度の関係

ら¹⁹⁾の既往の実験結果を併せて示している。

本実験で得られた結果をみると、同程度のひずみ速度レベルでは供試体の長さや材端の拘束条件によらず最大圧縮強度時のひずみの変化率はほぼ一定値をとることがわかる。したがって、最大圧縮強度時のひずみの変化率は、主として載荷速度に依存すると言える。本実験結果は、ひずみ速度が約 $1.0 \times 10^{-5} (1/sec) \sim 1.0 \times 10^2 (1/sec)$ の範囲ではひずみ速度の増加とともに徐々に減少していき、低速載荷時のひずみの変化率が約 0.95 で最も小さい。それ以上のひずみ速度の範囲では、ひずみ速度の増加とともにひずみの変化率は増加し、ひずみ速度が約 $1.0 \times 10^0 (1/sec)$ の高速載荷ではひずみの変化率は 1.15 ~ 1.20 程度に増加している。このような現象は、載荷速度が大きくなる（載荷時間が短くなる）とクリープに伴う粘性変形や遅れ弾性ひずみが小さくなるためと考えられている²⁾。

図-20 に示す既往の実験結果をみると、各実験値が非常にばらついている。そのため、最大圧縮強度時のひずみの変化率とひずみ速度の関係について、研究者によって様々な見解が示されている。たとえば、Takeda et al. は、ひずみ速度が大きくなるにしたがい、最大強度時のひずみの変化率は徐々に増加していく傾向を示すことを述べている。また、Cowell は、最大圧縮強度時のひずみはひずみ速度によらずほぼ一定値を示すことを述べている。一方、Dilger et al. は、ひずみ速度の増加とともに最大圧縮強度時のひずみの変化率は減少すると報告している。

本実験で得られた最大圧縮強度時のひずみの変化率

とひずみ速度の関係について、回帰式を求めた。その結果、次に示す式を得た。

$$\frac{\epsilon_{cd}}{\epsilon_{cs}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\left[\gamma + \eta \log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]} \quad (3)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的載荷のひずみ速度 [$1.2 \times 10^{-5} (1/sec)$]、 $\dot{\epsilon}$ は急速載荷時のひずみ速度 (1/sec)、 ϵ_{cs} は静的載荷の場合の最大圧縮強度点でのひずみ、 ϵ_{cd} はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で載荷した場合の最大圧縮強度点のひずみ、 γ および η は定数 [$\gamma = -0.036$, $\eta = 0.01$] である。式(3)で与えられる曲線を、図-20 に太い実線で示す。図中には、Dilger et al.¹⁹⁾、Soroushian et al.²¹⁾、高橋ら²²⁾、CEB-FIP モデルコード²³⁾による算定式の結果を併せて示す。

図-20 から、本実験式(3)および Soroushian et al. の提案式は、おおむね類似した関係を与えることがわかる。また本実験式は、Watstein, Cowell, 藤掛らの既往の実験値とも良い対応を示している。なお本実験式によれば、ひずみ速度が $1 \times 10^3 (1/sec)$ 付近で最大圧縮強度時のひずみの変化率は最小値を持つ。一方、高橋ら、CEB-FIP モデルコードの 2 つの式による結果はほぼ同じ値を与えるが、本実験値に対してかなり大きめの評価を与える。Dilger et al. の算定式は、ひずみ速度が $1 \times 10^2 (1/sec)$ 以上の載荷速度の範囲で本実験値に対してかなり小さめの評価を与えている。

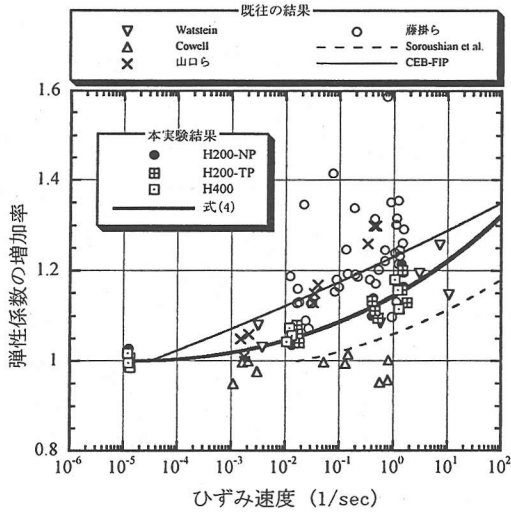


図-21 弾性係数の増加率とひずみ速度の関係

c) 初期弾性係数の増加率とひずみ速度の関係

H200-NP, H200-TP および H400 シリーズにおける初期弾性係数の増加率とひずみ速度の関係を、図-21 に示す。図中には Watstein¹⁵⁾, 文献 21) から引用した Cowell, 山口ら¹⁷⁾, 藤掛ら¹⁹⁾の既往の実験結果を併せて示す。

本実験で得られた結果から、同程度のひずみ速度レベルでは供試体の長さや材端の拘束条件によらず増加率はほぼ一定値をとることから、弾性係数の増加率も主として載荷速度のみに依存すると言える。またこの図から、本実験結果は Watstein の結果と概ね一致しているが、山口らおよび藤掛らの結果に比べて全体的に小さい値を示している。これは、山口ら、藤掛らの結果は 20~30 (N/mm²) のコンクリートに対するものであることから、初期弾性係数の増加率は実験に用いたコンクリート強度の違いにも影響を受けると考えられる。

次に、本実験で得られた初期弾性係数の増加率とひずみ速度の関係について、回帰式を求めた。その結果、次に示す式を得た。

$$\frac{E_{0d}}{E_{0s}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^\lambda \left[\text{Log} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^\mu \quad (4)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ 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), E_{0s} は静的載荷の場合の初期弾性係数 (N/mm²), E_{0d} はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で載荷した場合の初期弾性係数 (N/mm²), λ および μ は定数 [$\lambda = 0.002$, $\mu = 1.12$] である。式(4)で与えられる曲線を図-21 に太い実線で示す。図中には、Soroushian

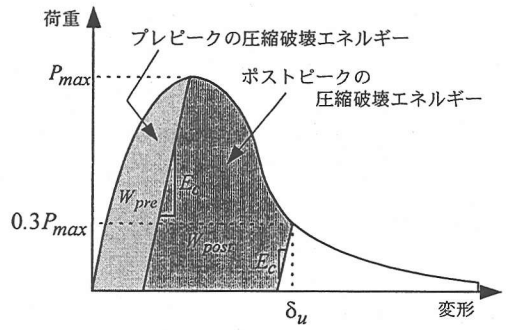


図-22 圧縮破壊エネルギーの定義

et al.²¹⁾, CEB-FIP モデルコード²³⁾の初期弾性係数の増加率に関する算定式による結果を併せて示す。

図-21 から、CEB-FIP モデルコードの算定式は本実験値に対して大きめな評価を、Soroushian et al.の算定式は本実験値に対して小さめな評価をそれぞれ与えている。式(4)は、CEB-FIP モデルコードおよび Soroushian et al.の提案式の中間的な評価を与えると言える。

(6) コンクリートの動的な圧縮軟化挙動の定量的評価

Hillerborg ら²⁷⁾が、コンクリートの引張軟化挙動を数値的に記述するために Fictitious Crack Model を提案して以来、コンクリートの引張軟化挙動を破壊進行領域 (Fracture Process Zone) の単位面積当りで消費される破壊エネルギーを用いて定量的に評価することが盛んに行われている。また、Jansen and Shah は、供試体の寸法比 (H/D = 2.0~5.5) をパラメータとする静的一軸圧縮試験を行い、応力-変位曲線下で最大圧縮応力以後、終局点 (最大圧縮応力の 0.33 点) までに吸収・消費される塑性変形エネルギー (単位面積当たりの破壊エネルギー) は供試体の長さ寸法によらず一定となることを報告している²⁾。

本研究では、引張軟化挙動に対して用いられるのと同様の概念である図-22 に示す圧縮破壊エネルギーを用いて供試体の長さ、端面の拘束条件および載荷速度の各パラメータが軟化挙動に及ぼす影響を定量的に評価することを試みる。

実験によって得られた荷重(P)-全体変形(δ)関係において、図-17 で示したように各荷重点での除荷は初期剛性を有する直線上に戻るものと仮定して、最大圧縮荷重までに蓄積される塑性変形エネルギーを W_{pre} (プレピークの圧縮破壊エネルギー) と定義する。さらに、軟化領域における荷重が最大圧縮荷重の 30% に低下したときの変位を終局変位として最大圧縮荷重点からこの終局点までに消費される塑性変形エネルギーを W_{post} (ポストピークの圧縮破壊エネルギー) と定義する。ここで、

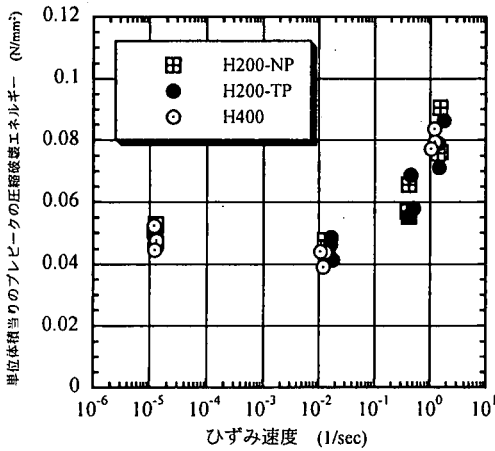


図-23 プレピークの圧縮破壊エネルギーとひずみ速度の関係

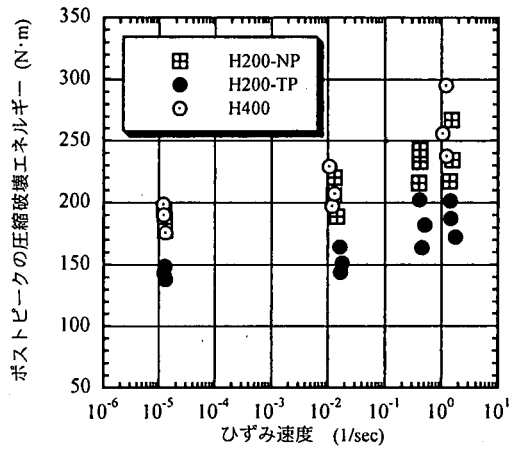


図-24 ポストピークの圧縮破壊エネルギーとひずみ速度の関係

終局変位は、供試体に埋め込んだ SMR によってひずみを計測した結果、軟化領域において最大圧縮荷重の 30% 点までは少なくともすべての実験ケースでデータが得られたため、これらのデータを定量的に評価する観点から便宜上定めたものである。

a) 圧縮破壊エネルギーによる動的軟化挙動の評価

図-23 に、H200-NP、H200-TP および H400NP の各実験シリーズで得られたプレピークの圧縮破壊エネルギー (W_{pre}) を供試体容積 (V) で割って求めた単位体積当りのプレピークの圧縮破壊エネルギー (W_{pre}/V) とひずみ速度の関係を示す。単位体積当りのプレピークの圧縮破壊エネルギーは、ひずみ速度が約 $1.0 \times 10^5 (1/sec) \sim 1.0 \times 10^2 (1/sec)$ の範囲ではひずみ速度の増加とともに若干減少し、低速載荷時に最小となる。それより大きいひずみ速度の範囲では、ひずみ速度の増加にともないプレピークの圧縮破壊エネルギーは増加している。これは、低速載荷時のクリープ等に起因した塑性ひずみが最も小さくなるためと考えられる。またこの図から、単位体積当りのプレピークの圧縮破壊エネルギーは、供試体の長さや材端の拘束条件によらずに同一ひずみ速度レベルではほぼ同程度の値をとることが認められる。プレピークの圧縮破壊エネルギーは、微視的なひび割れ(マイクロクラック)の発生・累積によって、最大圧縮荷重までに消費されるエネルギーを意味している。これらのことから、同一載荷速度に対しては、供試体の長さや材端の拘束条件によらず最大圧縮荷重までにほぼ均等に内部損傷を受けていると考えられる。

次に、H200-NP、H200-TP および H400 の各実験シリーズで得られたポストピークの圧縮破壊エネルギー (W_{post}) とひずみ速度の関係を示す。この図から、ポストピークの圧縮破壊エネルギーは、いずれのシリーズにおいてもひずみ速度が大きくなるにしたがい増

加する傾向にあることが認められる。また、供試体材端の拘束条件が同じで供試体の長さが異なる H200-NP と H400 シリーズのポストピークの圧縮破壊エネルギーは、同一ひずみ速度レベルではほぼ同程度の値をとる。すなわち、急速載荷においても同一の載荷速度で載荷した場合、材端の拘束条件が同じであれば供試体の長さの違いにはよらずに破壊領域(ひずみの局所化領域)で消費される圧縮破壊エネルギーは一定値をとるものと考えられる。一方、供試体材端での拘束条件が H200-NP、H400 シリーズとは異なる H200-TP シリーズの圧縮破壊エネルギーは、同一ひずみ速度レベルでは H200-NP および H400 の値と比較して小さい。

b) ポストピークの圧縮破壊エネルギーの増加率とひずみ速度の関係

静的載荷に対する急速載荷時のポストピークの圧縮破壊エネルギーの比を、圧縮破壊エネルギーの増加率と定義する。図-25 に、全ての実験シリーズについて得られた圧縮破壊エネルギーの増加率とひずみ速度の関係を示す。圧縮破壊エネルギーの増加率は、ひずみ速度が大きくなるほどばらつく傾向を示すが同一ひずみ速度レベルにおいては全実験シリーズでほぼ同程度の値をとることが認められる。同一載荷速度下においては材端の摩擦が小さいほうがポストピークの圧縮破壊エネルギーは小さくなるが、急速載荷における圧縮破壊エネルギーの増加率に着目した場合、その値は供試体の長さや材端の拘束条件にはよらずに同一ひずみ速度レベルではほぼ同程度の値をとると言える。したがって、ポストピークの圧縮破壊エネルギーの増加率は載荷速度のみに依存するとと言える。

本実験で得られたポストピークの圧縮破壊エネルギーの増加率とひずみ速度の関係について回帰式を求めると以下の式が得られる。

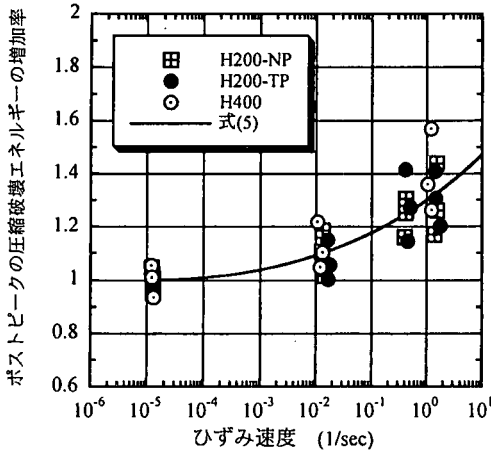


図-25 ポストピークの圧縮破壊エネルギーの増加率とひずみ速度の関係

$$\frac{W_{post,d}}{W_{post,s}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^\chi \left[\text{Log} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^\zeta \quad (5)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的载荷のひずみ速度 [1.2×10^{-5} (1/sec)], $\dot{\epsilon}$ は急速载荷時のひずみ速度 (1/sec), $W_{post,s}$ は静的载荷によるポストピークの圧縮破壊エネルギー (N・m), $W_{post,d}$ はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で载荷した場合のポストピークの圧縮破壊エネルギー (N・m), χ および ζ は定数 [$\chi = 0.004$, $\zeta = 1.10$] である。式(5)による関係を、図-25 に示す。

c) 脆性化指標による定量的評価

3.(3)で、最大圧縮応力以降の軟化領域における応力-平均ひずみ関係の軟化勾配は、载荷速度が大きくなるほど、供試体の長さが長くなるほど、材端における摩擦が小さくなるほど急になり脆性化する傾向にあることを示した。また、最大圧縮荷重以降の荷重-変位曲線で囲まれる面積で定義される圧縮破壊エネルギーは、载荷速度が大きくなるにしたがい大きくなることを示した。圧縮破壊エネルギーの値自体は、その値が大きくなるほど圧縮破壊に対して大きな抵抗性能を有することを意味するものである。しかしながら、最大圧縮荷重以後の挙動が脆性的か否か、あるいは圧縮破壊がどれだけ急激に進むのかを表すものではないことが指摘されている²⁸⁾。

Van Mier は、最大圧縮荷重以後の挙動が脆性的か否か、あるいは圧縮破壊がどれだけ急激に進むかを表す指標として、弾性エネルギーと破壊エネルギーの比を用いて表すことが妥当であると論じている²⁹⁾。そこで、脆性化指標 (Brittleness Index) を次の式で定義する。

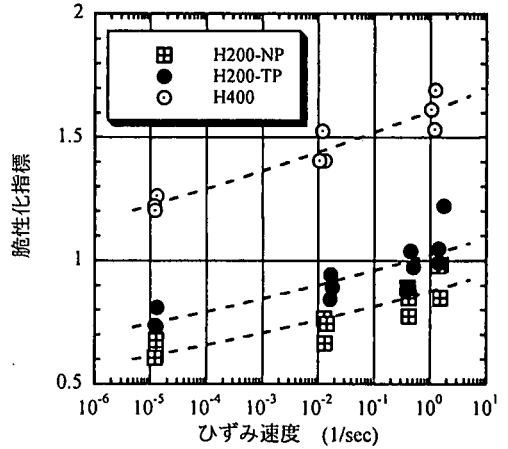


図-26 脆性化指標とひずみ速度の関係

$$\text{脆性化指標} = \frac{2 \times \text{弾性エネルギー}}{\text{ポストピークの圧縮破壊エネルギー}}$$

$$= \frac{f'_{cd}{}^2 AL}{E_{0d} W_{post,d}} = \frac{f'_{cd}{}^2 L}{E_{0d} G_{F,d}} \quad (6)$$

ここに、 f'_{cd} はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で载荷した場合の圧縮強度、 E_{0d} はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で载荷した場合の初期弾性係数、 $W_{post,d}$ はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で载荷した場合のポストピークの圧縮破壊エネルギー、 L は供試体の長さ、 A は供試体の断面積、 $G_{F,d}$ は単位面積当たりのポストピークの圧縮破壊エネルギー [= $W_{post,d} / A$] である。式(6)によって評価される脆性化指標は、その値が大きいのほど脆性的となることを意味するものである。

ここでは、供試体の長さ、材端の拘束条件および载荷速度の各パラメータが最大圧縮応力以後の軟化領域における脆性化傾向に及ぼす影響を、式(6)の脆性化指標を用いて定量的に評価する。本実験値から評価された各実験シリーズの脆性化指標とひずみ速度の関係を、図-26 に示す。この図から、全ての実験シリーズの脆性化指標は载荷速度が大きくなると増加する傾向にあることがわかる。つまり、载荷速度の増大にともなってその破壊は脆性的となることが評価される。

(7) 応力-ひずみ関係の定式化

圧縮試験の結果に基づいて応力-ひずみ関係を求める場合、通常、供試体全体の変形から得られる全体平均ひずみを用いている。ところが、最大圧縮強度後のポストピーク領域では供試体には破壊領域と非破壊領域が存在するために、平均ひずみは供試体の長さによって異なることが明らかである。したがって、平均ひずみを用い

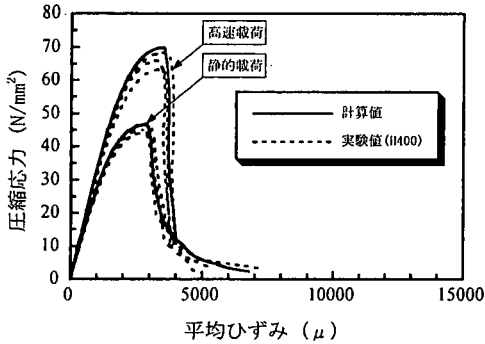
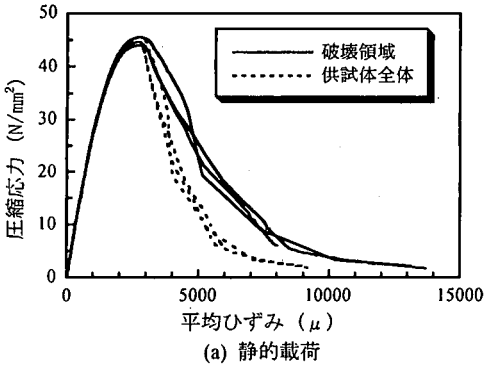
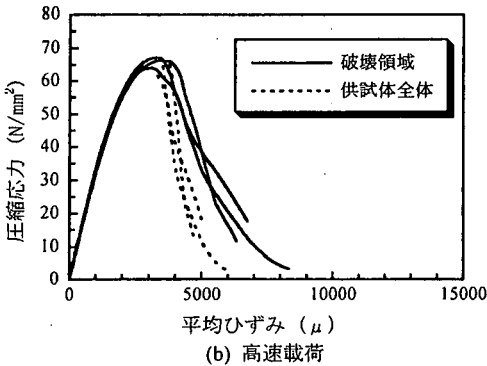


図-27 Series Coupling Modelによる計算値と実験値の比較



(a) 静的荷重



(b) 高速荷重

図-28 破壊領域ならびに供試体全体における応力-ひずみ関係

て応力-ひずみ関係を定式化することは望ましいとは言えない。そこで、ひずみが局所化する破壊領域内における平均ひずみを用いて、応力-平均ひずみ関係を評価することを試みる。

a) 急速荷重における Series Coupling Model の適用

静的一軸圧縮荷重に対して、供試体長さが異なる場合の応力-平均ひずみ関係は、供試体内部の破壊領域と非破壊領域における変形挙動を重ね合わせることによって表しうることが示されている^{7),8)}。ここでは、H200-NP および H400 シリーズで得られた結果に基づき、急速荷重に対する Series Coupling Model の適用性を検討する。

以下に示す①～④の仮定と手順に従い、まず H200-NP シリーズの破壊領域内における応力-平均ひずみ関係を算定する。次に、求められた破壊領域内の応力-平均ひずみ関係に基づいて、供試体の長さが 400mm の場合の応力-平均ひずみ関係を推定する。

- ① H200-NP シリーズの破壊領域長は、実験結果から荷重速度によらず約 15cm 程度であった。そこで、破壊領域長を一律 15cm と仮定する。
- ② 非破壊領域における応力-ひずみ関係は、最大応力以後初期弾性係数を有する直線上を戻ると仮定する。
- ③ 供試体の全体変形から評価された応力-平均ひずみ関係より、上記②の仮定を用いて Series Coupling Model を適用して破壊領域内の応力-平均ひずみ関係を求める。
- ④ 上記③によって求められた H200-NP シリーズの破壊領域内の応力-平均ひずみ関係から、供試体の長さが 400mm の場合の応力-平均ひずみ関係を Series Coupling Model を適用して推定する。その際、供試体長さが 400mm の場合の破壊領域長を 15cm、非破壊領域長を 25cm とする。

図-27 に、H200-NP シリーズの破壊領域内の応力-平均ひずみ関係から Series Coupling Model を適用して推定した供試体の長さが 400mm の場合の応力-平均ひずみ関係と実験で得られた H400 シリーズの応力-平均ひずみ関係を示す。この図から、両者の応力-平均ひずみ関係はほぼ一致することが認められる。よって、破壊領域内における応力-平均ひずみ関係が特定できれば、Series Coupling Model を適用することにより任意の長さを有する供試体の応力-平均ひずみ関係が推定できる。

b) 応力-ひずみ関係の定式化

供試体の材端に減摩パッドを挿入して実験を行った H200-TP シリーズの結果に基づき、破壊領域内の応力-平均ひずみ関係を定式化する。H200-TP シリーズの破壊領域長は、荷重速度によらずほぼ 13cm 程度であったことから、ここでは破壊領域長を一律 13cm とする。前項と同様な手順で、破壊領域における応力-平均ひずみ関係を算定する。図-28 に、破壊領域における応力-平均ひずみ関係と供試体の全体変形から評価される応力-平均ひずみの関係を静的荷重および高速荷重について示す。破壊領域における応力-ひずみ関係は、供試体の全体変形から評価される応力-ひずみ関係と比較して最大圧縮応力以降の軟化勾配が小さくなっている。

破壊領域における応力-平均ひずみの定式化にあたっては、式(7)に示す Popovics 式³⁰⁾を基本式としている。ただし、式中の n の値は応力の上昇域、下降域でそれぞれ別々に与えることにする。すなわち、応力の上昇域では、初期弾性係数が一致するように式(8)で与える。下降

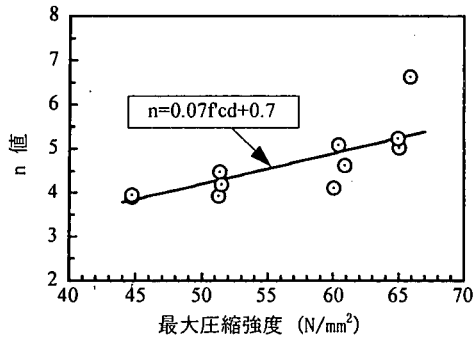
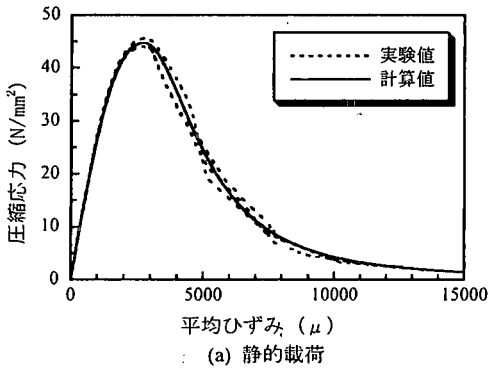
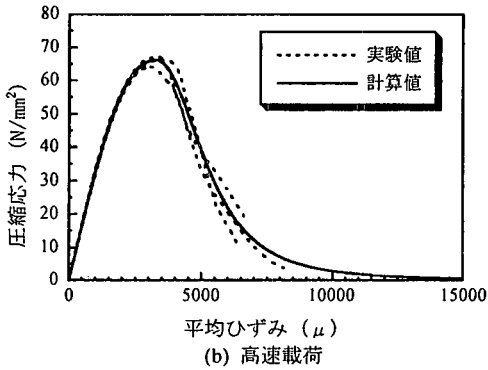


図-29 ポストピークにおける n 値と最大圧縮強度の関係



(a) 静的載荷



(b) 高速載荷

図-30 応力-ひずみモデル (実験値と計算値の比較)

域では、図-29 に示す実験データから、 n の値と最大圧縮強度の間には線形関係があるとみなして式(9)で与えている。

$$\sigma = \frac{n(\varepsilon/\varepsilon_{cd})}{n-1 + (\varepsilon/\varepsilon_{cd})^n} f'_{cd} \quad (7)$$

ここで、 f'_{cd} 、 ε_{cd} は任意のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ で載荷した場合の最大圧縮強度およびそのときのひずみである。また、 n の値は式(8)、(9)によって与えられる。

(a) 応力の上昇域 ($\varepsilon \leq \varepsilon_{cd}$)

$$n = \frac{E_{0d}}{E_{0d} - (f'_{cd}/\varepsilon_{cd})} \quad (8)$$

(b) 応力の下降域 ($\varepsilon > \varepsilon_{cd}$)

$$n = 0.07 f'_{cd} + 0.7 \quad (9)$$

ここで、 E_{0d} は任意のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ で載荷した場合の初期弾性係数である

任意のひずみ速度に対する応力-ひずみ関係は、式(2)～式(4)および式(7)～式(9)を用いることで算定することができる。図-30 に、実験および計算によって得られた破壊領域の応力-ひずみ関係を示す。この図から、計算値と実験値は良い一致を示していることがわかる。

4. まとめ

本研究は、供試体の長さ、供試体材端の拘束条件および載荷速度をパラメータとする急速一軸圧縮載荷試験を行い、各パラメータがコンクリート材料の応力-ひずみ関係に及ぼす影響を定性的・定量的に調べたものである。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) SMR を用いることにより、急速一軸圧縮載荷を受ける供試体の局所ひずみおよび全体変形の計測が可能である。
- (2) コンクリートの動的圧縮強度の増加率、最大圧縮強度時のひずみの変化率および弾性係数の増加率は、供試体の長さや材端の拘束条件によらず主として載荷速度に依存する。
- (3) 急速一軸圧縮載荷を受ける場合、ひずみの局所化は最大応力点で供試体のある特定の領域に起こる。また、端面での拘束条件の違いにより局所化領域でのひずみ分布のモードは大きく異なる。
- (4) 載荷速度、供試体の長さおよび端面での拘束条件が、コンクリートのポストピークの軟化勾配に与える影響は大きい。
- (5) ポストピークの圧縮破壊エネルギーは、載荷速度が大きくなるにしたがい増加する。材端の拘束条件が同じであればポストピークの圧縮破壊エネルギーは、供試体の長さの違いにはよらずに載荷速度に依存する。また、ポストピークの圧縮破壊エネルギーの増加率に着目した場合、その値は供試体の長さや材端の拘束条件にはよらずに載荷速度のみに依存する。
- (6) 脆性化指標によって圧縮軟化挙動は、載荷速度の増大とともに脆性的となることが定量的に評価さ

れた。

- (7) 供試体長さが異なる場合の応力-平均ひずみ関係は、供試体内部の破壊領域と非破壊領域における変形挙動を重ね合わせることによって表しうる。
- (8) ひずみ速度効果を考慮して破壊領域内における応力-平均ひずみ関係を定式化した。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、カナダ・ブリティッシュコロンビア大学教授 Sidney Mindess 先生、山梨大学助教授 中村 光先生、ならびに土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会（委員長：小林治俊先生）の皆様方から貴重なご意見を頂きました。本実験を行うにあたり、防衛大学校 加藤清志教授には、多大なご配慮を頂きました。また、防衛大学校理工学研究科学生 山根茂樹氏には、実験ならびにデータ整理にご尽力を頂きました。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) Bischoff, P. H. and Perry, S. H. : Compressive behaviour of concrete at high strain rates, *Materials and Structures*, pp.425-450, 24, 1991.
- 2) Jansen, D. C. and Shah S. P. : Effect of length on compressive strain softening of concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, pp.25-35, Jan. 1997.
- 3) Choi, S., Thienel, K. -C. and Shah, S. P. : Strain softening of compression under different end constraints, *Magazine of Concrete Research*, 48, No.175, pp.103-115, June, 1996.
- 4) Torrenti, J. M., Benajia, E. H. and Boulay, C. : Influence of boundary conditions on strain softening in concrete compression test, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.119, No.12, pp.2369-2384, Dec., 1993.
- 5) Kotsovos M. D. : Effect of testing techniques on the post-ultimate behavior of concrete in compression, *Materials and Structures*, Vol.16, pp.3-12, 1983.
- 6) Bazant, Z. P. : Identification of strain-softening constitutive relation from uniaxial tests by series coupling model for localization, *Cement and Concrete Research*, Vol.19, pp.973-977, 1989.
- 7) 小坂義夫, 谷川恭雄, 畑中重光 : 低側圧三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動, *材料*, Vol.34, No.376, pp.19-25, 1985年.
- 8) 小柳 玲, 六郷恵哲, 内田裕市 : コンクリートの圧縮挙動, *セメント技術年報*, 37, pp.268-271, 1983年.
- 9) Van Mier, J. G. M. : *Fracture Processes of Concrete*, CRC Press, pp.178-189, 1997.
- 10) 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.
- 11) 平井圭, 中村光, 檜貝勇 : コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.17, No.2, pp.339-344, 1995年.
- 12) 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年4月.
- 13) 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年5月.
- 14) Takeda, J. and Komoto, H. : Rate effects on crack propagation in concrete and brittle fracture of concrete structures, *Proc. of The 6th Conf. on Mechanical Behavior of Materials*, Kyoto, July, 1991.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎 : 高圧三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年2月.
- 18) 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.
- 19) 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年9月.
- 20) 白井孝治, 島村和夫, 實見司, 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 - ホブ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年3月.
- 21) Soroushian, P., Choi, K. and Alhamad, A. : Dynamic constitutive behavior of concrete, *ACI J.*, Vol.83, pp.251-259, Mar.-Apr., 1986.
- 22) 高橋芳彦, 大野友則, 太田俊昭, 日野伸一 : 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果, *構造工学論文集*, Vol.37A, pp.1567-1580, 1991年3月.
- 23) CEB-FIP MODEL CODE 1990. First Draft, CEB Bulletin d'Information No.195, 1990.
- 24) Atchley, B. L. and Furr, H. L. : Strength and energy absorption capabilities of plain concrete under dynamic and static loadings, *ACI J.*, pp.745-756, Nov., 1967.
- 25) Bresler, B. and Bertero, V. V. : Influence of high strain rate and cyclic loading of unconfined and confined concrete in compression, *Proc. of 2nd Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Hamilton, Ontario, pp.1-13, 1975.
- 26) Takeda, J. and Tachikawa, H. : Deformation and fracture of concrete subjected to dynamic load, *Proc. Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials*, Vol.4, pp.267-277, 1972.
- 27) Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P. E. : Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, Vol.6, pp.773-782, 1976.
- 28) 三橋博三 : コンクリートの強度特性が破壊力学パラメータに及ぼす影響, *コンクリート工学論文集*, 第6巻, 第1号, pp.81-88, 1995年1月.
- 29) 前掲文献9)に同じ : pp.384-387.
- 30) Popovics, S. : Factors affecting the elastic deformations of concrete, *Proc. of the Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials*, Kyoto, pp.172-183, Aug., 1971.

(1998.7.22 受付)

POST-PEAK AND STRAIN-SOFTENING BEHAVIORS OF CONCRETE MATERIALS IN COMPRESSION UNDER RAPID LOADING

Kazunori FUJIKAKE, Yoshikazu SHINOZAKI, Tomonori OHNO,
Jun MIZUNO and Atsushi SUZUKI

The results of compressive rapid loading tests and many studies related on the dynamic compressive properties of concrete have been reported. However, the strain softening behaviors of concrete material under uniaxial compressive rapid loading has been left unsolved. This may be the reason that it is difficult to measure the post-peak behaviors of plain concrete since the fracture of the test specimen will happen suddenly and instantaneously under rapid loading. Thus, the methods of measuring overall deformation of the specimen is presented in this study. Also, this study is to investigate the strain softening behaviors of concrete material in compression under rapid loadings. The length of specimen, the constriction of both ends of specimen and the loading-rate are chosen as test parameters. From tests results, the effects of these parameters on the peak stress, the strain at the maximum stress, the stress softening behaviors and the strain localization are examined. Furthermore, based on the concept of the fracture energy, a set of formulations of the uniaxial compressive stress – strain relationship in the fracture zone is proposed.