

高ひずみ速度・三軸圧縮応力下における コンクリートの動的軟化特性とそのモデル化

上林勝敏¹・藤掛一典²・大野友則³・水野 淳⁴・鈴木 篤⁴

¹学生会員 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)

²正会員 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)

³正会員 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)

⁴工修 鹿島建設株式会社 原子力設計部 (〒107-0052 東京都港区赤坂 6-5-30)

実際の鉄筋コンクリート構造物中のコンクリートは、複雑な荷重の作用や鉄筋等の拘束によって多軸応力状態にあると考えられる。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性・安全性を合理的に検討するためには、高ひずみ速度・三軸圧縮応力下におけるコンクリートの軟化挙動を把握することが重要である。本研究では、試験に用いるコンクリート円柱供試体の圧縮強度、作用側圧ならびに載荷速度をパラメータとする急速三軸圧縮載荷試験を行い、これらのパラメータがコンクリートの三軸応力下におけるひずみの局所化および動的軟化挙動に及ぼす影響について検討を行っている。またさらに、試験で得られた破壊領域内の軸方向圧縮応力-平均軸方向圧縮ひずみ関係に基づきその定式化を行っている。

Key Words : *triaxial rapid compressive loading, triaxial stress state, high strain-rate, strain localization, fracture zone, strain softening, residual strength criteria, stress-strain model*

1. はじめに

落石・土石流などの自然的要因あるいは車両・船舶・航空機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衝撃外乱は、その生起確率は非常に小さいが、一度構造物に作用すると甚大な被害を及ぼすことが懸念される。このような衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃性・安全性を合理的に検討するためには、構成材料であるコンクリートの材料レベルにおける動的軟化特性を明らかにした上で適切なモデル化を行う必要があると考える。

著者ら¹⁾は、供試体の長さ、供試体材端の拘束条件およびひずみ速度をパラメータとする急速一軸圧縮載荷試験を行い、一軸圧縮応力下の軟化挙動にひずみ速度が及ぼす影響について検討を行っている。その結果、ひずみ速度が大きくなると圧縮強度は増加するが、応力-平均ひずみ関係におけるポストピークの軟化勾配は急になり脆性化する傾向にあることが明らかとなった。また、圧縮試験を行うとコンクリート円柱供試体中には載荷速度によらずひずみが局所化する一定の破壊領域が存在すること、および供試体長さが異なる場合の応力-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などの結果も得られた。

しかしながら、自重による死荷重だけでなく種々の荷重の作用を受ける実際の鉄筋コンクリート構造物中の内部応力が一軸応力状態にあることは極めて特殊な場合であり、帯鉄筋やせん断補強鉄筋等の拘束によってコンクリートは複雑な多軸応力状態に置かれていると考えられる。

静的三軸応力下におけるコンクリートの挙動を調べた実験的研究によれば、三軸圧縮応力状態におけるコンクリートの応力-ひずみ関係は、作用側圧が大きくなると一軸圧縮状態の場合に比べ著しい強度の増加を示すとともに、最大圧縮応力以降の軟化勾配が小さくなり延性の特性を示すことが明らかにされている^{2),3),4)}。一方著者らは、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、必ずしも最大応力を増加させるとは限らないことを示している。また、コンクリートの最大応力点までの特性に対して、ひずみ速度効果を考慮した等価一軸ひずみの概念に基づく直交異方性構成モデルを提案している⁵⁾。しかしながら、最大応力点以降の三軸圧縮応力下における軟化挙動にひずみ速度が及ぼす影響について把握するには至っていない。

そこで本研究では、コンクリート供試体の圧縮強度、側圧、載荷速度をパラメータとする急速三軸圧縮載荷試

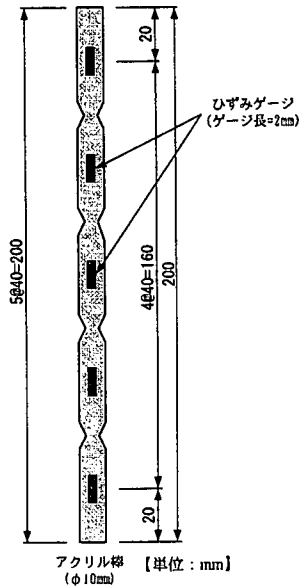


図-1 既往の研究で用いたSMR

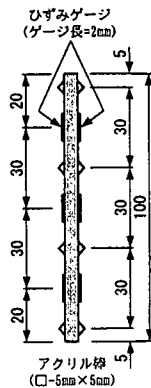


図-2 供試体へのSMRの設置

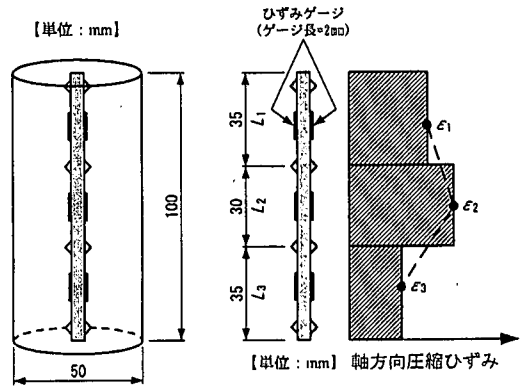


図-3 SMRによるひずみ分布の仮定

験を行い、これらのパラメータが最大圧縮応力以降(ポストピーク領域と呼ぶ)のひずみの局所化や軟化挙動に及ぼす影響について定性的・定量的な検討を行う。また、供試体に生じる破壊領域に着目して、ひずみ速度効果を考慮したポストピーク領域を含めた軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係の定式化を行っている。

なお、本研究では、圧縮応力および圧縮ひずみを正として扱っている。

2. 試験概要

(1) 供試体の全体変形および平均ひずみの計測方法

急速一軸圧縮荷を受けるコンクリート円柱供試体の軟化挙動を供試体の表面に貼付されたひずみゲージや変位計を用いて計測することは困難であることから、著者は図-1に示す異形加工したアクリル棒にひずみゲージを貼付した器具(SMR: strain measurement rod)を円柱供試体(直径100mm、高さ200mm)の中央に埋め込むことによって計測する手法を用いている⁹⁾。アクリル棒の弾性係数は、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、アクリル棒を異形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。本研究でもこの手法を用いて高ひずみ速度・三軸圧縮応力下におけるコンクリート円柱供試体の軟化挙動の計測を行う。

本試験で使用する三軸圧縮載荷装置の制約から、試験に用いるコンクリート円柱供試体は直径50(mm)、高さ100(mm)の小型供試体である。円柱供試体の中央に埋め込むSMRの径は供試体の断面積に対してできるだけ小さい(1/100程度)ことが望まれる。したがって、直径50(mm)の円柱供試体に対しては直径5(mm)程度のアクリル棒に切削加工する必要があるが、その加工は極めて困難である。そこで本試験では、図-2に示すように5(mm)×5(mm)の正方形断面を有するアクリル棒に三角形の異形ノッチを接着することでコンクリートとの付着を図ることとした。

また側圧の作用を受ける急速三軸圧縮応力下では、供試体にはせん断滑り型の破壊モードが生じることがわかっている⁹⁾。そのため滑り面の近傍では、供試体中央に埋め込んだSMRに大きな曲げひずみ成分が加わると考えられる。そこで、図-2に示すようにSMRに配置する3箇所のひずみの計測位置で2ゲージ法を適用し⁹⁾、軸方向の圧縮ひずみ成分のみを計測するようにした。

本研究では、SMRに配置した3箇所におけるひずみの計測値に基づき供試体中の軸方向圧縮ひずみ分布を、図-3に示すように仮定した。よって、供試体全体の軸方向圧縮変形量(δ)は次式で与えられる。

$$\delta = \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i L_i \quad (1)$$

表-1 試験パラメータの一覧

試験ケース	試験パラメータ									試験数
	圧縮強度		側圧 (N/mm ²)			載荷速度				
	普通強度 (NS)	高強度 (HS)	0 (P0)	4.9 (P5)	9.8 (P10)	静的 (S)	低速 (L)	中速 (M)	高速 (H)	
NS-P0-S	○		○			○				3
NS-P0-L	○		○				○			3
NS-P0-M	○		○					○		3
NS-P0-H	○		○						○	3
NS-P5-S	○			○		○				3
NS-P5-L	○			○			○			3
NS-P5-M	○			○				○		3
NS-P5-H	○			○					○	3
NS-P10-S	○				○	○				3
NS-P10-L	○					○	○			3
NS-P10-M	○							○		3
NS-P10-H	○					○			○	3
HS-P0-S		○	○			○				3
HS-P0-L		○	○				○			3
HS-P0-M		○	○					○		3
HS-P0-H		○	○						○	3
HS-P5-S		○		○		○				3
HS-P5-L		○		○			○			3
HS-P5-M		○		○				○		3
HS-P5-H		○		○					○	3
HS-P10-S		○			○	○				3
HS-P10-L		○				○	○			3
HS-P10-M		○						○		3
HS-P10-H		○				○			○	3

(2) 試験パラメータ

表-1 に示すように、本試験におけるパラメータはコンクリートの圧縮強度、側圧および載荷速度の3つである。本研究では、これらのパラメータがコンクリートの動的軟化特性や軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係に及ぼす影響について検討する。

試験に用いたコンクリート供試体の圧縮強度は2種類で、それぞれ $f'_c = 30.4, 47.5$ (N/mm²) である。ここでは、これらのコンクリートをそれぞれ普通強度、高強度と呼ぶことにする。コンクリート円柱供試体に作用させる側圧 (σ_L) は、各強度のコンクリートに対して 0, 4.9, 9.8 (N/mm²) の3種類を設定している。なお、 $\sigma_L = 0$ は側圧(=0)が無いことを表しており、一軸圧縮載荷に相当する。載荷速度は、静的、低速、中速および高速の4種類である。載荷速度は、ひずみ速度を指標としている。ひずみ速度は、載荷軸方向のひずみを用いて、載荷開始点から最大圧縮応力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、静的載荷では 1.2×10^{-5} (1/sec)、低速載荷が 3.0×10^{-2} (1/sec)、中速

載荷が 3.0×10^{-1} (1/sec)、高速載荷が 2.0×10^0 (1/sec) である。鉄筋コンクリート構造物が落石や重量物の落下等に起因する衝撃荷重を受けると、構成材料であるコンクリートには $10^{-1} \sim 10^0$ (1/sec) 程度のひずみ速度が発生すると言われている。ここで設定したひずみ速度は概ねそれらのひずみ速度に対応している。試験ケース数は、(試験に用いるコンクリートの種類) × (設定側圧の数) × (載荷速度の数) = $2 \times 3 \times 4 = 24$ ケースである。試験は、それぞれのケースに対して3回(全試験数: $3 \times 24 = 72$ 回)行っている。

(3) 供試体の製作

試験に用いる円柱供試体の寸法は、直径 50(mm)、高さ 100(mm) である。本試験で使用した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(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) の硬質砂岩砕石(青梅産、密度 2.65 g/cm³、吸水率 0.54%) を使用した。静的-

表-2 コンクリートの配合

呼 称	G_{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							空気量 (%)	スランプ (cm)
				W	C	S	G	AE減水剤	高性能 AE減水剤 C×%	消泡剤 C×%		
普通強度	10	70	55	210	300	954	805	300cc/C =100kg	—	0.1	1.0	18.0
高強度	10	55	55	185	336	973	821	—	1.6	0.1	1.0	18.0

表-3 静的一軸圧縮試験結果

実験シリーズ	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	圧縮強度時の ひずみ $\epsilon_c \times 10^{-3}$	弾性係数 $E_0 \times 10^3$ (N/mm ²)
普通強度	30.4	2.40	26.0
高強度	47.5	3.01	30.0

軸圧縮載荷試験で得られたそれぞれのコンクリートの圧縮特性値を、表-3に示す。なお、各圧縮特性値は試験期間中の平均値である。

供試体は、打設後1日で脱型、水中養生を14日間行い、その後は試験室内にて気中養生を行った。試験は、材齢62日目から8日間で行った。材齢の違いによる強度変化の影響を平均化することを目的として、全試験ケース(24ケース)に対して各供試体1体を試験する工程を1サイクルとして3サイクル行った。なお、1サイクルは約2.5日で行った。

(4) 試験方法

試験は、図-4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)に、三軸圧縮載荷装置を組み込んだ急速三軸圧縮載荷装置を用いて行っている⁹⁾。三軸圧縮載荷装置は、三軸圧縮セル本体と側圧一定保持装置から構成されている。図-5に、三軸圧縮セル本体の概略を示す。本装置のメインチャンバー内は、直径50(mm)、高さ100(mm)のコンクリート円柱供試体のみが設置可能な構造となっている。載荷は、三軸圧縮セル内のオイルチャンバー油圧を側圧一定保持装置のポンプユニットによって所定の側圧まで静水圧載荷し、所定の側圧に達した後は側圧を一定に保持した状態で速やかに各設定速度で軸方向載荷を行っている。

また試験では、コンクリート円柱供試体の内部へオイルが浸入することを防止するために、供試体を耐油性のゴムスリーブ(厚さ2mm、内径50mm)で被覆し、さらにゴムスリーブ両端は上下の鋼製ペダスタルまで覆って固定バンドで締付けている(図-6)。また、上下の鋼製ペダスタルにはオイルの浸入を防ぐためのOリングを設

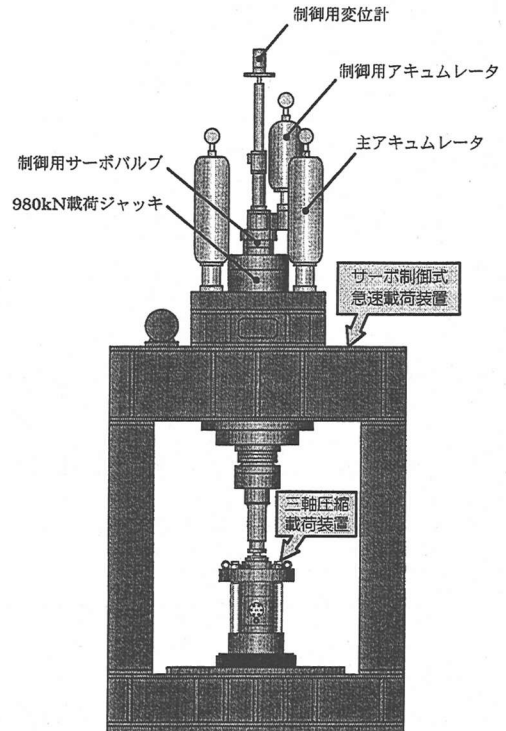


図-4 急速三軸圧縮載荷装置の概要

置している。供試体と上下の鋼製ペダスタルの間には、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($t=0.05\text{mm}$)の間にシリコングリスを塗布したテフロンパッドを挿入している。ひずみゲージのリード線には、銅線をポリエステルコーティングした直径0.4mmのものを用いてゴムスリーブ端部より取り出し、メインチャンバー内のリード線端子棒に接続して三軸圧縮セルから取り出している。

供試体に作用する軸方向力は、図-5に示すように三軸圧縮セル下部に設置してあるロードセルによって計測している。側圧は、オイルチャンバー内に取り付けている高圧用圧力変換器により計測している。供試体の軸方向ひずみは、供試体の中心に埋め込んだSMRに貼付した各ひずみゲージによって測定している。

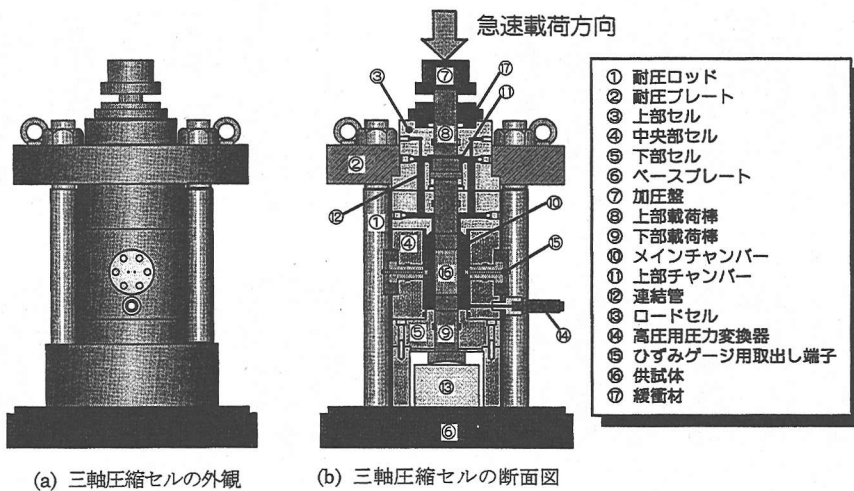


図-5 三軸圧縮セル本体の概要

3. 試験結果および考察

(1) 供試体の破壊状況

急速三軸圧縮載荷試験で、各設定側圧ならびに載荷速度に対する普通強度および高強度コンクリート供試体の破壊状況を、図-7 および図-8 に示す。

側圧が0である一軸圧縮載荷時の普通強度および高強度コンクリート供試体の破壊状況は、載荷速度の違いによらず縦ひび割れ(割裂破壊)に斜めひび割れを伴った混合型の破壊モードであった。これに対して、設定側圧が4.9ならびに9.8(N/mm²)の場合における供試体の破壊状況は、載荷速度の違いによらず斜めひび割れによるせん断滑り型の破壊モードを生じた。供試体の破壊モードは側圧の有無によって、混合型破壊(割裂破壊が顕著)からせん断滑り破壊へ移行する傾向が認められる。

滑り破壊を生じた供試体の滑り面の角度は、試験に用いたコンクリートの圧縮強度や載荷速度の相違による影響を受けず、ほぼ一定で水平面から角度は平均62°、標準偏差2.1°であった。

試験後の供試体に対して、図-9 に示すようにひび割れが及んでいない非破壊領域部分の長さを計測し試験前の供試体長さから差し引いた長さを、破壊状況から求めた破壊領域長と定義する。普通強度および高強度コンクリートシリーズにおける供試体の破壊状況から求めた破壊領域長と試験によってその領域長が出現する頻度の関係を、図-10 ならびに図-11 に示す。これらの図から、側圧の有無によって破壊モードが変わっても破壊状況から求めた破壊領域長と発生頻度の関係には顕著な違いは認められない。よって、コンクリート円柱供試体中には一定長さの破壊領域が形成されると考えられる。破壊状況か

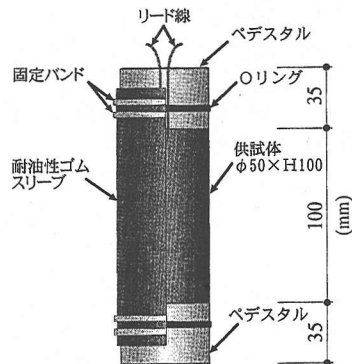
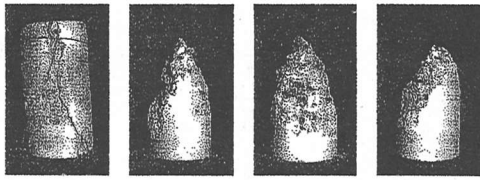


図-6 供試体の概要

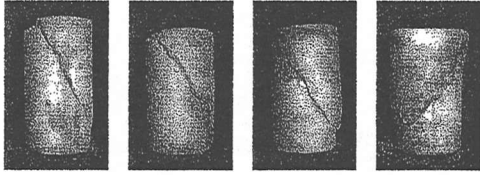
ら求めた破壊領域長は平均77mm、標準偏差10.7mmであった。

(2) 載荷応力経路

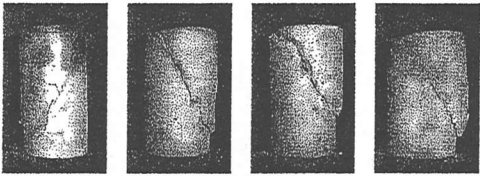
本試験では、所定の側圧まで静水圧載荷した後、側圧を一定に保持した状態で軸方向に各設定速度で急速載荷を行う載荷経路を設定した。図-12 に、普通強度ならびに高強度コンクリートシリーズに対して、供試体に加えられた代表的な載荷応力経路を示す。この図から、静的載荷では、側圧は設定した載荷応力経路に従い偏差応力載荷過程中一定に保持された状態にあることがわかる。これに対して、低速載荷、中速載荷および高速載荷では、側圧が載荷初期においては軸圧縮応力の増大にともなって低下し、最大軸圧縮応力の90%程度以降においては逆に増加している。これは、三軸圧縮載荷装置内の油圧を



1) 静的載荷 2) 低速載荷 3) 中速載荷 4) 高速載荷
(a) 側圧 0(N/mm²)

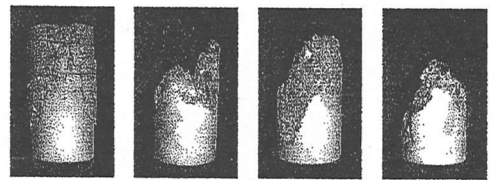


1) 静的載荷 2) 低速載荷 3) 中速載荷 4) 高速載荷
(b) 側圧 4.9(N/mm²)

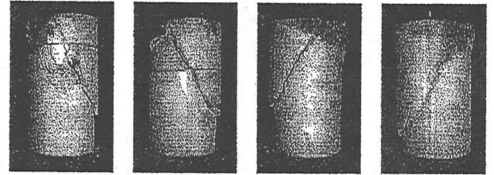


1) 静的載荷 2) 低速載荷 3) 中速載荷 4) 高速載荷
(c) 側圧 9.8(N/mm²)

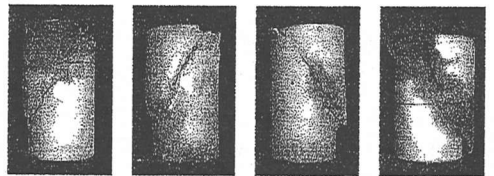
図-7 普通強度コンクリートシリーズの破壊状況



1) 静的載荷 2) 低速載荷 3) 中速載荷 4) 高速載荷
(a) 側圧 0(N/mm²)



1) 静的載荷 2) 低速載荷 3) 中速載荷 4) 高速載荷
(b) 側圧 4.9(N/mm²)



1) 静的載荷 2) 低速載荷 3) 中速載荷 4) 高速載荷
(c) 側圧 9.8(N/mm²)

図-8 高強度コンクリートシリーズの破壊状況

一定に保持するために用いているオイルポンプの吐出能力に起因するもので、供試体の体積変化（収縮・ダイラタンシーによる膨張）のために側圧が変動する結果となったと考えられる。

(3) ひずみの局所化と破壊領域

図-13 および図-14 に、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に高速載荷時の軸方向圧縮応力と軸方向圧縮ひずみの関係を示す。これらの図から、普通強度、高強度コンクリートシリーズの各設定側圧において SMR に貼付した各ひずみゲージの計測値は最大圧縮応力までは計測位置によらずほぼ等しいと言える。しかしながら、最大圧縮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領域と減少する領域が存在することが認められる。既に著者らは、急速一軸圧縮載荷を受ける場合、ひずみの局所化は載荷速度によらず最大圧縮応力点で供試体のある特定の領域に起こることを明らかにしている⁹⁾。本試験結果から、急速三軸圧縮載荷を受ける場合においても、ある特定の領域のひずみが増加する部分が形成されるひずみの局所化現象は、側圧ならびに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。

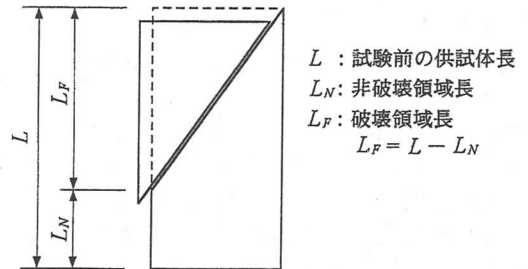


図-9 破壊状況に基づく破壊領域長の決定法

また本研究では、SMR に貼付した各ひずみゲージによるひずみの計測値に基づき供試体中の軸方向圧縮ひずみ分布を図-3 のように仮定し、最大圧縮応力以降の軟化領域でひずみが増加する部分を、破壊領域と考える。図-13 および図-14 から、SMR に配置した 3 箇所のひずみゲージによる計測値のうち、上か下の材端に近い位置で計測された 1 箇所のひずみは最大圧縮応力以降の軟化領域でほぼ初期弾性係数を有する直線上を戻す傾向が見られるのに対して、残る 2 箇所の位置で計測されたひずみは増加する傾向を呈する。つまり、ひずみが局所化する破壊領域長は、コンクリートの圧縮強度、側圧ならびに載荷速度の

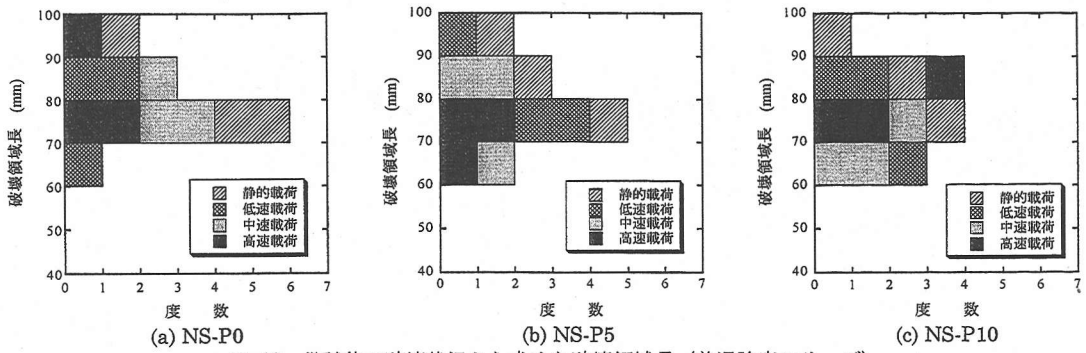


図-10 供試体の破壊状況から求めた破壊領域長 (普通強度シリーズ)

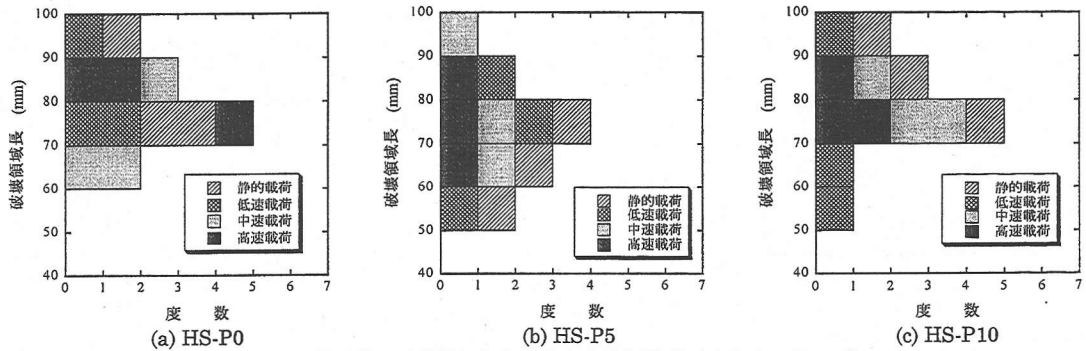


図-11 供試体の破壊状況から求めた破壊領域長 (高強度シリーズ)

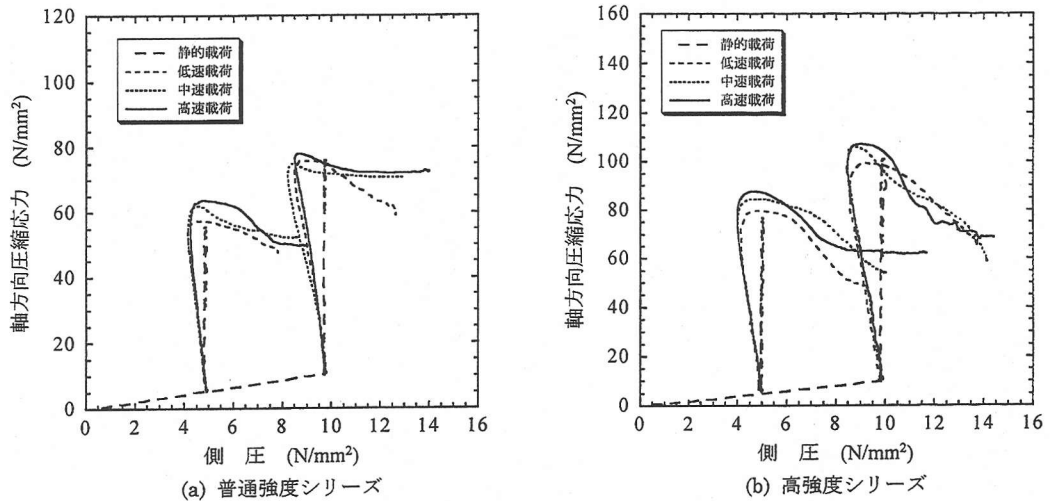


図-12 載荷応力経路

違いによらず円柱供試体のどちらか一方の材端から65mm(=35+30mm)の部分として評価される。この破壊領域長は、供試体の破壊状況から目視で求めた破壊領域長(77mm)にほぼ対応する。既に著者らは急速一軸圧縮応力下における軟化領域で、供試体中に埋め込んだSMRに配置されたひずみゲージの各位置によって計測ひずみの傾向が異なる理由を、供試体の破壊状況との関係から説明している³⁾。側圧を受ける急速三軸応力下において

も最大圧縮応力以降の軟化域で同様な現象が生じる理由を、供試体の破壊状況との関係から次のように考える。すなわち、軟化領域ではせん断滑り面が形成され、滑り面における滑り変形による軸方向圧縮ひずみ成分が増加するため、図-15に示すように滑り面を挟んで上下に配置されたひずみゲージによるひずみの計測値が増加したものと考える。

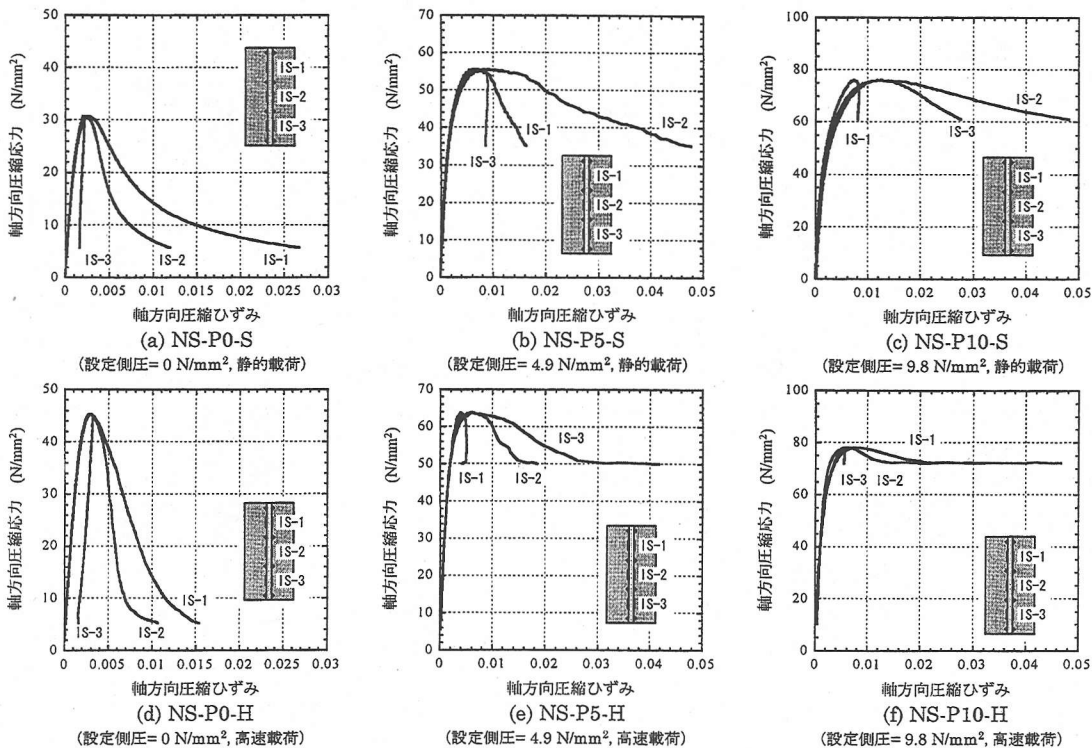


図-13 SMRの各ひずみ計測位置における軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係 (普通強度シリーズ)

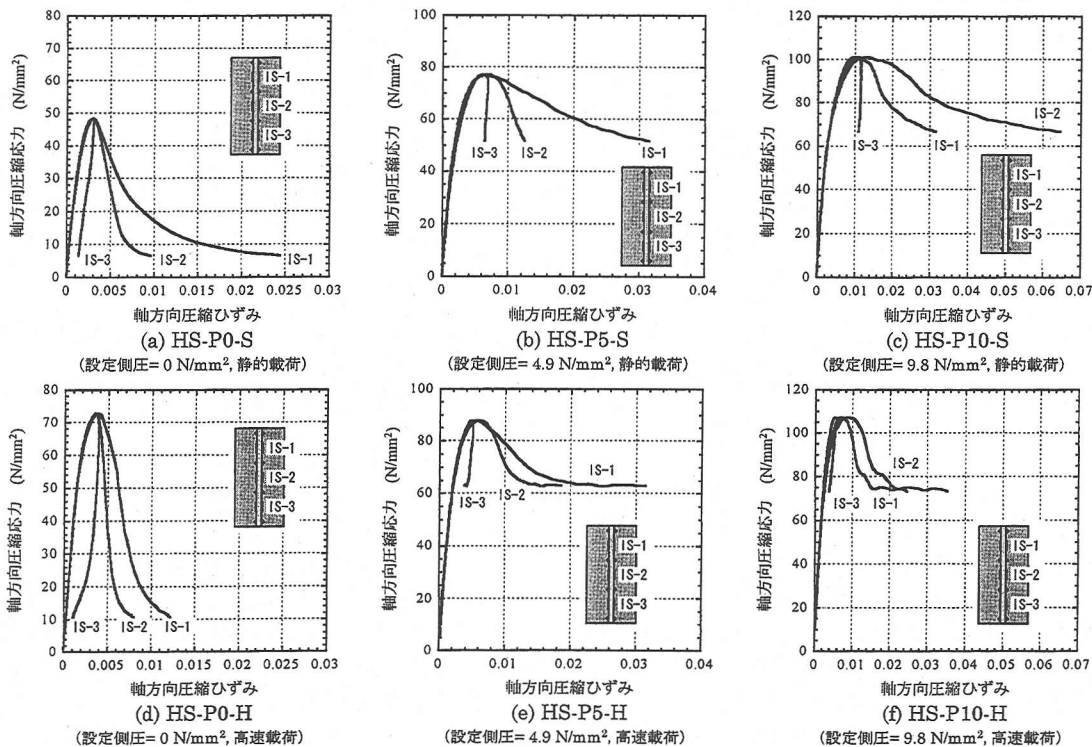


図-14 SMRの各ひずみ計測位置における軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係 (高強度シリーズ)

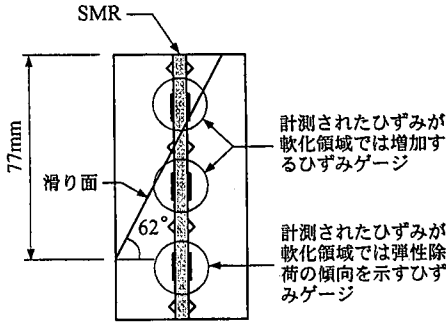


図-15 供試体中に形成された滑り面とSMRに配置されたひずみの計測位置との関係

(4) 急速三軸圧縮応力下における最大応力基準

既に著者らは、コンクリート円柱供試体を用いた急速三軸圧縮載荷試験を行い、ひずみ速度が三軸圧縮応力下における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ることを明らかにし、任意のひずみ速度における最大応力基準を次式で与えている⁹⁾。

$$\frac{\sigma_p}{f'_c} = \frac{\sigma_L}{f'_c} + \xi \sqrt{\left\{ \frac{1-h^2(\eta/\xi)^2}{h\eta} \right\} \left(\frac{\sigma_L}{f'_c} \right) + 1} \quad (2)$$

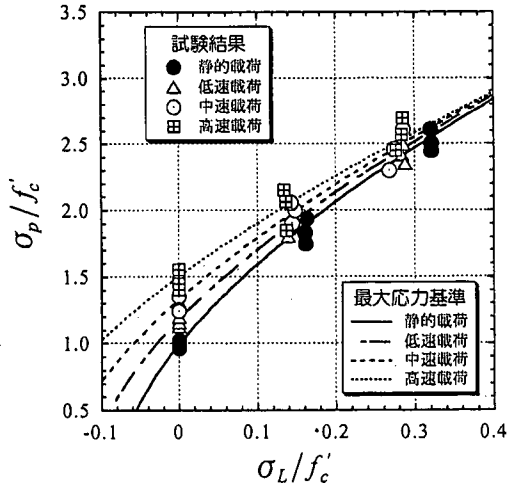
ここで、 σ_p は軸方向最大圧縮応力、 σ_L は軸方向最大圧縮応力時の側圧、 h はパラメータ ($h=0.08$)、 f'_c は静的な一軸圧縮強度、 ξ および η はそれぞれひずみ速度効果による一軸圧縮強度の動的増加率ならびに一軸引張強度の動的増加率であり、ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) の関数として次式で与える。

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}} \right)^{0.006 \left[\text{Log}_{10} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{sc}} \right) \right]^{1.05}} \quad (3)$$

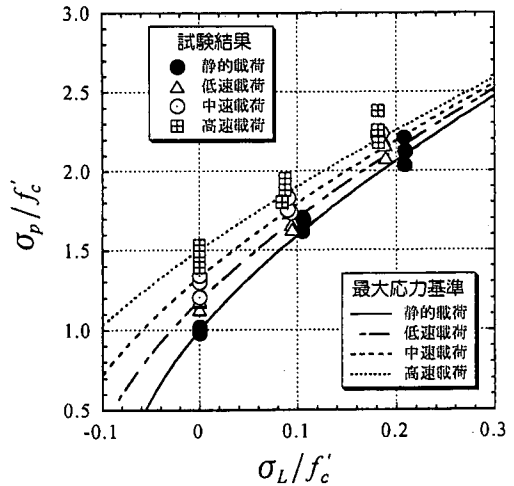
$$\eta(\dot{\epsilon}) = \exp \left[0.00126 \left(\text{Log}_{10} \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}} \right)^{3.373} \right] \quad (4)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_{sc}$ 、 $\dot{\epsilon}_{st}$ は静的載荷におけるひずみ速度で、それぞれ $\dot{\epsilon}_{sc} = 1.2 \times 10^{-6}$ (1/sec)、 $\dot{\epsilon}_{st} = 1.0 \times 10^{-7}$ (1/sec) である。

図-16に、本試験の各載荷速度に対して式(2)、式(3)および式(4)で計算される最大応力基準を試験結果と合わせて示す。これらの図から、定式化した最大応力基準[式(2)~(4)]は、いずれの圧縮強度シリーズに対しても各載荷速度で試験結果と良好に適合しているとみなせる。



(a) 普通強度シリーズ



(b) 高強度シリーズ

図-16 急速三軸圧縮応力下における最大応力基準

(5) 急速三軸圧縮応力下における残留応力基準

圧縮載荷試験において最大圧縮応力以降も軸方向載荷を継続して行くと、ひずみ軟化領域を経て、軸方向圧縮応力はある一定の値に収束する。ここでは、その時の応力を残留応力と定義する。

図-17に、普通強度ならびに高強度コンクリートシリーズに対して、急速三軸圧縮載荷試験で得られた残留応力 (σ_R) とその時の側圧 (σ_L) の関係を静的な一軸圧縮強度 (f'_c) で除した無次元化応力 (σ_R/f'_c 、 σ_L/f'_c) を用いて表したものを示す。この図から、載荷速度の相違が残留応力とその時の側圧の関係に及ぼす顕著な影響は認められない。また、残留応力は側圧の増加に比例して直線的に増加する傾向が認められる。

次に、本試験で得られた無次元化残留応力と無次元化側圧 (σ_R/f'_c と σ_L/f'_c) の関係に対して回帰式を求め

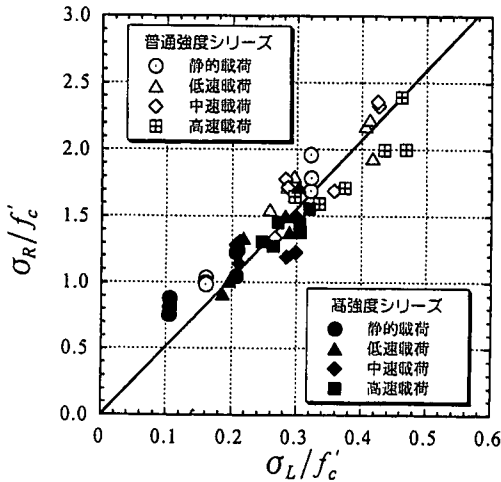


図-17 急速三軸圧縮応力下における残留応力基準

た。その結果、次式に示す残留応力基準が得られた。

$$\frac{\sigma_R}{f'_c} = 5.2 \frac{\sigma_L}{f'_c} \quad (5)$$

式(5)による関係を、図-17に実線で示す。

残留応力は骨材の噛み合いややり込みに起因する見かけの摩擦力と考えられる³⁾。本試験では、載荷速度によらずに供試体に形成される滑り面の角度は一定で水平面から62°であること、残留応力基準が式(5)で評価されることから残留応力時における見かけの摩擦係数は載荷速度によらず0.9と評価される。

(6) 急速三軸圧縮応力下における軸方向圧縮応力-軸方向圧縮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、供試体の全体変形から得られる全体平均ひずみが用いられる。ところが、最大圧縮応力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、供試体の長さによって平均ひずみの値は異なってくる。したがって、平均ひずみを用いてコンクリートの応力-ひずみ関係を評価することは適切とは言えない。そこで本研究では、本節(3)で示したようにひずみが局所化する破壊領域内(円柱供試体のどちらか一方の材端から65mmの部分)における平均ひずみを用いて、軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係を評価し定式化を行う。

a) 軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係の定式化

破壊領域における軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係($\sigma - \varepsilon$ 関係)を定式化するためにあたっては、式(6)に示

すSargin式⁷⁾を基本式としている。ただし、式中のパラメータ D および無次元化ひずみ X のそれぞれの評価は試験結果と適合するように、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。

$$\sigma = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2} \sigma_p \quad (6)$$

ここに、

$$X = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \quad (7)$$

ここで、 σ_p は軸方向最大圧縮応力、 ε_p は軸方向最大圧縮応力時の軸方向圧縮ひずみ、 A および D はそれぞれパラメータである。

$\varepsilon \leq \varepsilon_p$ で表される応力の上昇域に対して、式(6)中の無次元化ひずみ X は式(7)で与えるものとし、パラメータ A および D の各値は静的載荷におけるAttardらによる提案モデル⁹⁾を参考として、以下のように与える。

任意のひずみ速度($\dot{\varepsilon}$)で載荷した場合の動的な初期弾性係数は、次式で与える¹⁾。

$$E_{0d} = E_0 \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right)^{0.002} \left[\text{Log}_{10} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right) \right]^{1.12} \quad (8)$$

ここに、 $\dot{\varepsilon}_{sc}$ は静的載荷のひずみ速度 [1.2×10^{-6} (1/sec)], E_0 は静的載荷における初期弾性係数(N/mm²)である。

式(6)と(7)によって評価される初期弾性係数を動的な初期弾性係数 E_{0d} に一致させるように、パラメータ A は次式で与える。

$$A = \frac{E_{0d} \varepsilon_p}{\sigma_p} \quad (9)$$

さらに、任意のひずみ速度($\dot{\varepsilon}$)における動的一軸圧縮強度を f'_{cd} とすると、試験結果から軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係は0.45 f'_{cd} 程度の応力レベルまでは直線関係にあるという点を考慮し、パラメータ D は次式で与える。

$$D = \frac{(A-1)^2}{1 - 0.45 f'_{cd} / \sigma_p} \quad (10)$$

ここで、動的な一軸圧縮強度(f'_{cd})は任意のひずみ速度($\dot{\varepsilon}$)に対して次式で与えることができる¹⁾。

$$f'_{cd} = f'_c \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right)^{0.006 \left[\text{Log}_{10} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right) \right]^{1.05}} \quad (11)$$

次に $\varepsilon \geq \varepsilon_p$ で表されるひずみ軟化領域に対して、式(6)中のパラメータ A は応力の上昇域と同様に式(9)で与える。またパラメータ D および無次元化ひずみ X は、それぞれ以下のように与える。

式(6)において、 $\varepsilon \rightarrow \infty$ ($X \rightarrow \infty$) で軸方向圧縮応力が残留応力 (σ_R) に収束するものと考え、パラメータ D は次式で与えることができる。

$$D = \frac{\sigma_p}{\sigma_p - \sigma_R} \quad (12)$$

長沼は、静的載荷における軟化領域の軸方向圧縮応力一軸方向圧縮ひずみ関係を Sargin 式で表すためには、無次元化ひずみ X を次式で与えることにより良好な結果を得ることができることを報告している⁹⁾。

$$X = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^m \quad (13)$$

ここに、 m はパラメータである。

本研究においても、応力の下降域における無次元化ひずみ X の評価に、式(13)を適用する。式(6)中の無次元化ひずみ X を式(13)で与えることは、軸方向最大圧縮応力点から残留応力に至る曲線の形状を決定する上で極めて重要となる。また、軸方向最大圧縮応力点から残留応力に至る曲線の形状は、とくに静的一軸圧縮強度およびひずみ速度の影響を強く受けるものとする。そこで、パラメータ m を静的一軸圧縮強度およびひずみ速度の両者の影響を含む動的一軸圧縮強度 (f'_{cd}) を用いて評価する。本試験で得られた軟化領域における軸方向圧縮応力一軸方向圧縮ひずみ関係に基づいて回帰式を求めると、パラメータ m の評価式として次式が得られる。

$$m = 1.04 + 2.0 \left(\frac{f'_{cd}}{100} \right)^2 \quad (14)$$

一方、式(6)を用いて軸方向圧縮応力一軸方向圧縮ひずみ関係を与える場合、軸方向最大圧縮応力 (σ_p) とその時の軸方向最大圧縮ひずみ (ε_p) の関係を記述する必要がある。ここでは、既に著者らが提案した次式に示す評価式を用いることにする⁹⁾。

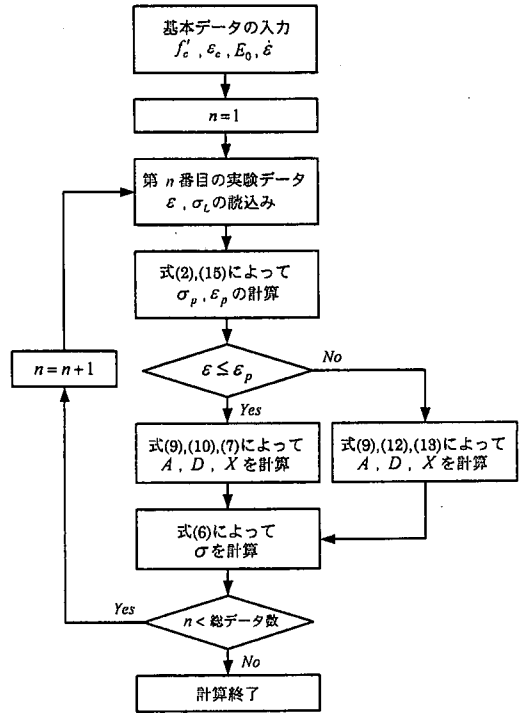


図-18 計算フロー

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{cd} \left(\frac{\sigma_p}{f'_{cd}} \right)^{1.74 \exp(-0.05\varepsilon)} \quad (15)$$

ここに、

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_c \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right)^{\left[-0.036 + 0.01 \text{Log}_{10} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right) \right]} \quad (16)$$

ここで、 ε_c は静的一軸圧縮載荷における最大圧縮応力点におけるひずみである。

次に、本提案モデルと試験結果との比較を示す。本節(2)で示したように本試験では軸方向急速圧縮載荷過程中に側圧が変動するという結果となった。そのため試験結果に対して、本提案モデルによって軸方向圧縮応力一軸方向圧縮ひずみ関係を求めるには、載荷経路に沿って側圧の変動を考慮して計算を行う必要がある。ここでは、図-18 に示すフローに従い計算する。すなわち、試験によって得られた破壊領域内における軸方向圧縮ひずみ (ε) および側圧 (σ_c) の計測データを与え、側圧の各計測値に対して本提案モデル中の軸方向最大圧縮応力 (σ_p)、その点における軸方向圧縮ひずみ (ε_p) および残留応力 (σ_R) の各値を更新して軸方向圧縮応力 (σ) を計算する。図-19 ならびに図-20 に、試験および計算によって得られた破壊領域における軸方向圧縮応力一軸方向圧縮ひずみ

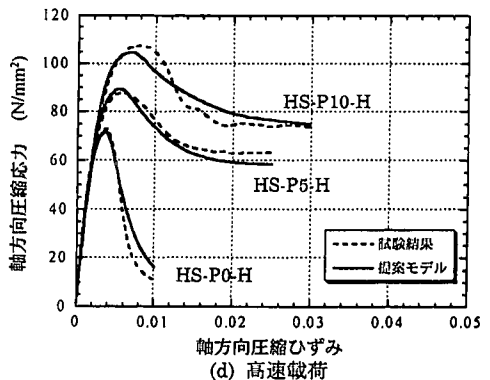
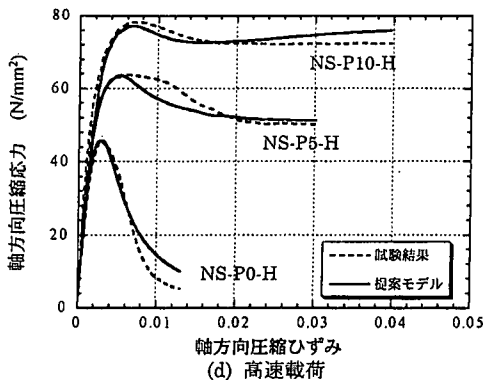
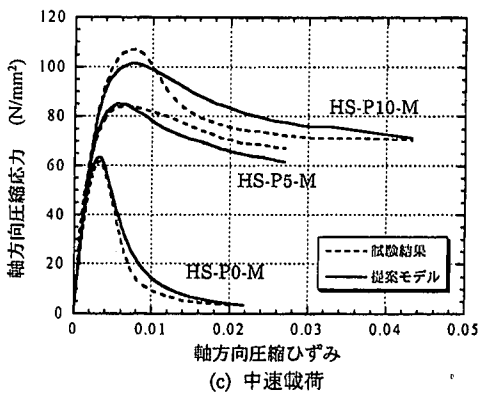
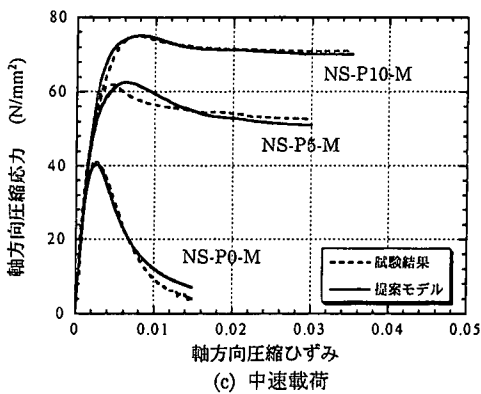
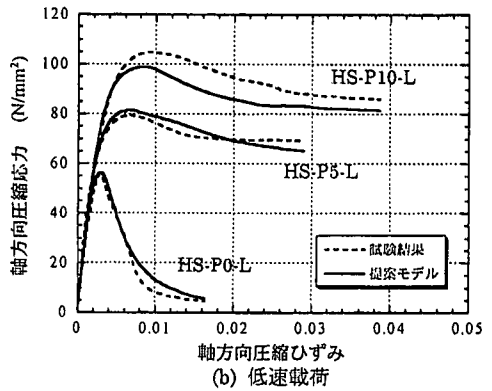
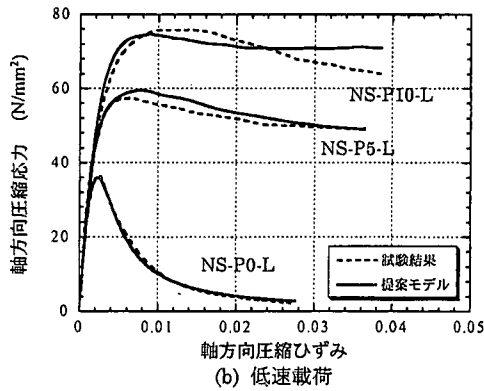
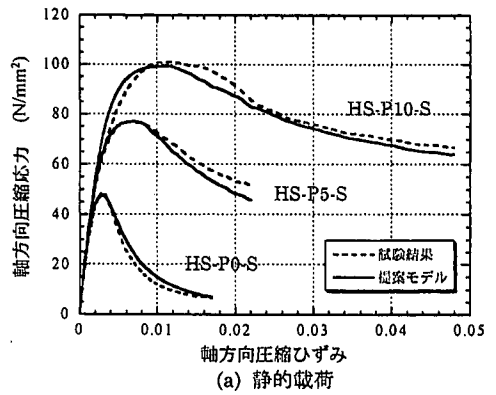
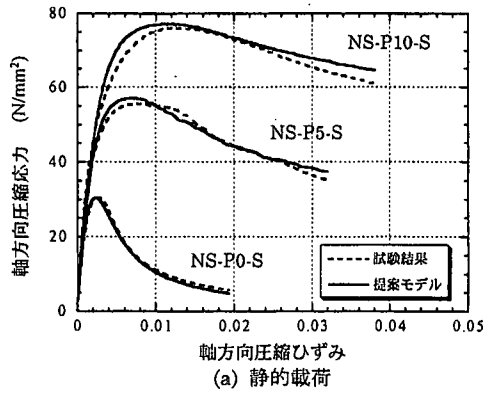
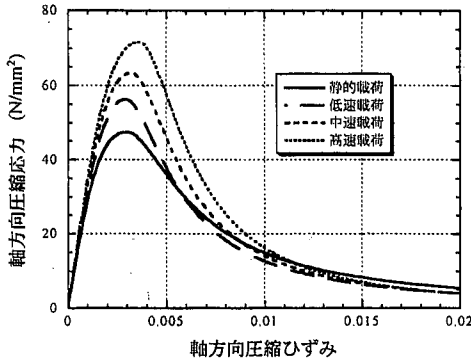
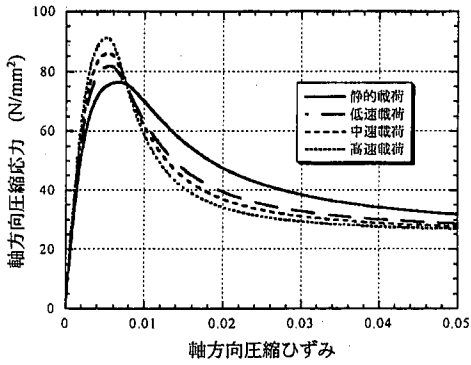


図-19 普通強度コンクリートシリーズの軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係

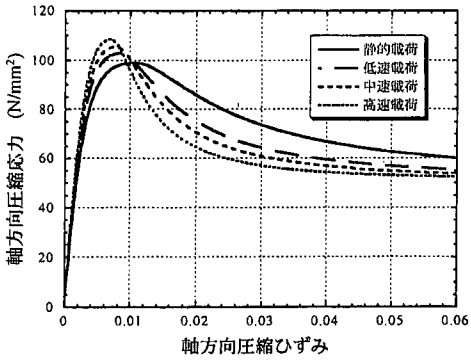
図-20 高強度コンクリートシリーズの軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係



(a) 側圧 = 0 (N/mm²)



(b) 側圧 = 4.9 (N/mm²)



(c) 側圧 = 9.8 (N/mm²)

図-21 側圧一定条件下における提案モデルによる応力-ひずみ関係 (高強度コンクリート)

関係を示す。これらの図から、計算結果のうち NS-P10-L や NS-P10-H では軟化域で応力が減少から増加に転じるものがみられる。これは式(6)を用いた本定式化の特性と考えられる。しかしながら、計算値と試験値は全体的には良い一致を示していることがわかる。よって、本試験範囲内では急速三軸圧縮応力下におけるコンクリートの軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係は、式(2)~(16)を用いることにより良好に評価できると言える。

b) ポストピークの軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係にひずみ速度が及ぼす影響

三軸圧縮応力下にあるコンクリートのポストピークの

軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係に、ひずみ速度が及ぼす影響を把握するために、前項で定式化した提案モデルを用いて検討する。側圧一定条件下における各載荷速度での軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係を、高強度コンクリートシリーズに対して計算した結果を、図-21 に示す。この図から、いずれの側圧においてもポストピークの軟化勾配は載荷速度(ひずみ速度)が大きくなるにつれて急になる傾向にあることがわかる。よって、三軸圧縮応力下のコンクリートは、ひずみ速度の増大とともにポストピークにおいて脆性的な挙動を示すと言える。

急速三軸圧縮力下におけるコンクリートは、最大圧縮応力以降の軟化域でせん断滑り面が形成され、すべり変形の増加とともにせん断滑り面で伝達される応力は低下し最終的に残留応力に至ると考えられる。ひずみ速度の増大とともに軟化挙動が脆性化する一因として、残留応力基準に載荷速度による違いがみられないことから、せん断滑り面の形成から残留応力に至る劣化の進展が、載荷速度が大きくなるほど速くなるためではないかと考えられる。詳細な脆性化のメカニズムについては今後の研究課題と考えている。

4. まとめ

本研究は、コンクリート円柱供試体の圧縮強度、側圧および載荷速度をパラメータとする急速三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軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係に及ぼす影響を調べ、その関係を定式化したものである。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) 供試体の破壊モードは、側圧の有無によって混合型破壊からせん断滑り破壊型破壊へと移行する。また、圧縮強度およびひずみ速度の相違がコンクリートの破壊状況に及ぼす顕著な影響は認められない。
- (2) 急速三軸圧縮載荷を受ける場合、ひずみの局所化はコンクリートの圧縮強度、側圧および載荷速度の違いによらず最大圧縮応力点以降から供試体中の特定の領域に起こる。なお、ひずみが局所化する破壊領域は円柱供試体のどちらか一方の材端から 65 mm 程度である。
- (3) ひずみ速度の相違が残留応力とその時の側圧の関係に及ぼす顕著な影響は認められないこと、および残留応力は側圧の増加に比例して直線的に増加することを考慮して残留応力基準を定式化した。
- (4) 急速三軸圧縮載荷試験に基づいて、ひずみ速度効果を考慮した破壊領域における軸方向圧縮応力-軸方向圧縮ひずみ関係を定式化した。
- (5) 本提案モデルを用いた検討結果から、三軸圧縮応力

下におけるコンクリートのポストピークの挙動はひずみ速度が大きくなるほど脆性化を示すと考えられる。

参考文献

- 1) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮荷重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.
- 2) 畑中重光, 服部宏己, 近藤洋右, 谷川恭雄: 3軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力-ひずみモデル, コンクリート工学年次論文報告集, 13-2, pp.31-36, 1991.
- 3) 村上雅英, 大谷恭弘: 3軸圧縮軟化域におけるコンクリートの破壊現象と損傷領域の同定, コンクリート工学論文集, Vol.6, No.2, pp.47-61, 1995.7.
- 4) Attard, M. M. and Setunge, S. : Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete, *ACI Materials Journal*, V.93, No.5, pp.432-442, September-October, 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, No.669/V-50, pp. 109-123, 2001.2.
- 6) 高橋賞, 河井正安: ひずみゲージによるひずみ測定入門, 大成社, 1998.
- 7) Sargin, M. : Stress-strain relationships for concrete and analysis of structural concrete sections, Study No.4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1971.
- 8) 長沼一洋: 三軸応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8.

(2000. 1. 19 受付)

STRESS-STRAIN MODEL WITH DYNAMIC STRAIN SOFTENING BEHAVIORS FOR CONCRETE MATERIALS UNDER TRIAXIAL COMPRESSIVE STRESS STATES

Katsutoshi UEBAYASHI, Kazunori FUJIKAKE, Tomonori OHNO,
Jun MIZUNO and Atsushi SUZUKI

The concrete material of RC structures may be under triaxial stress states due to complex loadings and the confining effect of transverse reinforcement. Thus, to assess properly the crashworthiness and the safety of the RC structures subjected to impact/impulsive loads, it is important to find precisely the dynamic mechanical properties of concrete materials under triaxial compressive stress states. This study is to investigate the dynamic strain softening behaviors of concrete material subjected to high-strain rate and triaxial stresses. The compressive strength of specimen, the confining pressure and the loading rate are chosen as test parameters. From test results, the effects of these parameters on the strain softening behaviors and strain localization are examined. In consideration of test results, a set of formulations of the axial compressive stress - axial compressive strain in the fracture zone is proposed.