

三軸圧縮応力下のコンクリートの横方向動的軟化特性

CONCRETE LATERAL DYNAMIC STRAIN SOFTENING BEHAVIORS UNDER TRI-AXIAL STRESS STATES

上林勝敏*, 別府万寿博**, 藤掛一典***, 大野友則****

Katsutoshi UEBAYASHI, Masuhiro BEPPU, Kazunori FUJIKAKE and Tomonori OHNO

* 博(工) 防衛庁研究員 装備開発実験隊 (〒410-1432 静岡県駿東郡小山町須走 481-27)

** 博(工) 防衛大学校助手 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)

キーワード: 急速三軸圧縮載荷, ひずみ速度効果, ひずみの局所化, 破壊領域, 軟化挙動
(triaxial rapid compressive loading, high strain-rate, strain localization, fracture zone, strain softening)

1. はじめに

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の挙動を動的非線形 FEM 解析などの解析手法を用いて精度良く評価するためには、構成材料であるコンクリートの高ひずみ速度・三軸応力下における力学的特性を適切に表現した構成モデルを用いることが重要である。

一般に、コンクリートに静的な一軸圧縮応力を加えた場合、図-1 に示すような応力～ひずみ関係が得られることが知られている。コンクリートの応力～ひずみ関係は、最大圧縮応力の 30～45% 程度まではほぼ直線的な傾向を示すが、それ以上の応力レベルではマイクロクラックの発生・進展・累積によってしだいに非線形性を示す。最大圧縮応力の 80% 程度になると横ひずみが急激に増加を開始し、体積ひずみが収縮から膨張に反転する現象を生じる。このような軸圧縮力の作用によって横方向ひずみが急激に増加する現象は、ポアソン効果と呼ばれている¹⁾。帯筋や鋼管で拘束されたコンクリート柱では、コンクリートのポアソン効果によって帯筋や鋼管には引張応力が発生するとともに、その拘束効果によってコンクリート自体には受動的な拘束側圧が作用することになる。このため、軸方向荷重を受ける鉄筋コンクリート柱や鋼管コンクリート柱の耐力や変形性能を解析的に評価する際には、コンクリートの軸方向の変形挙動のみならず横方向の変形挙動も考慮することが重要になる。

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軸方向の応力～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変形能力が著しく増大することが明らかにされている^{2),3),4)}。一方著者ら⁵⁾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軸方向の挙動を調べた結果から、最大応力点以降の軟化域(ポストピーク領域と呼ぶ)では供試体中に一定の破壊範囲が形成されることを明らかにし、破壊範囲における軸方向応力～軸方向ひずみ関係を定式化した。しかしながら、載荷速度が三軸圧縮応力下の横方向の軟化挙動に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、急速三軸圧縮載荷を受けるコンクリートの最大圧縮応力以降の軟化領域における横方向ひずみの挙動を明らかにするために、まずその計測法について検討するとともに、載荷速度が横方向のひずみの局所化や軟化挙動に及ぼす影響について検討を行っている。

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. 急速三軸圧縮載荷を受けるコンクリートの横方向の動的軟化挙動を計測するための試験方法の検討

2.1 拘束リングを用いた試験方法の検討

急速三軸圧縮載荷を受けるコンクリート円柱供試体の

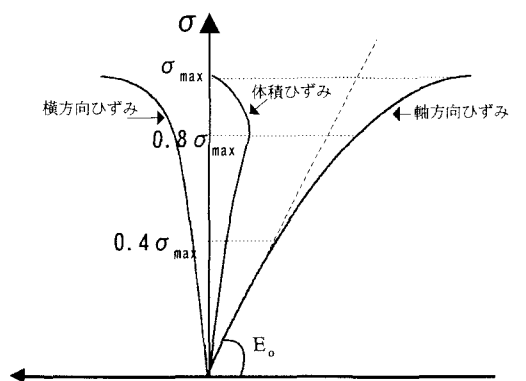


図-1 圧縮試験における応力-ひずみ関係

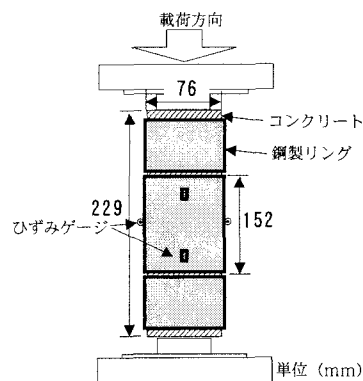


図-2 Ahmadの三軸圧縮試験の概要

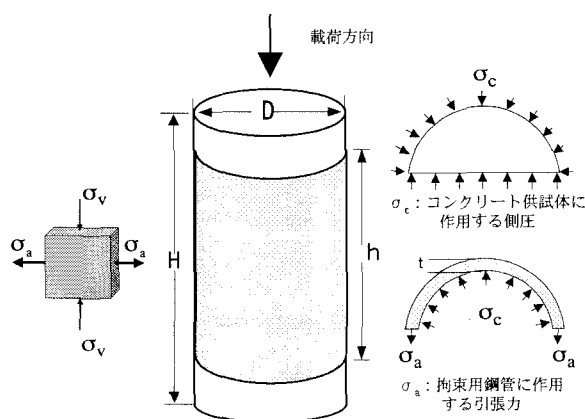


図-3 拘束用鋼管に拘束されたコンクリートの応力状態

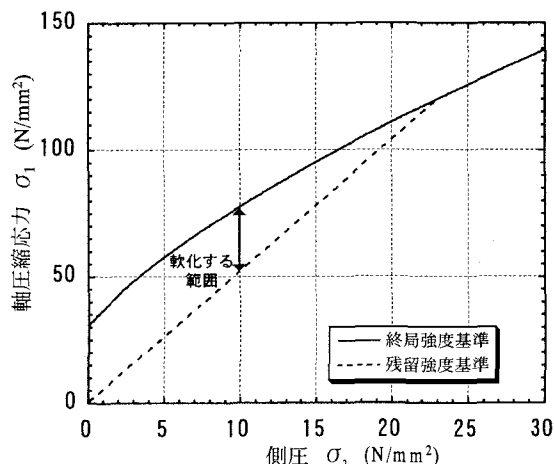


図-4 終局強度基準と残留強度基準の関係

軸方向軟化挙動を、供試体の表面に貼付したひずみゲージや変位計を用いて計測することは極めて困難である。そこで著者らは、異形加工したアクリル棒にひずみゲージを貼付した治具(SMR)を円柱供試体の中央に埋め込むことによって計測する手法を提案している。この手法は、供試体中に形成されるせん断破壊面の方向や位置があらかじめ予測できる場合は有効である。また、本試験で用いている急速三軸圧縮装置は、ひずみゲージ取り出し端子口数が最大4つという制約がある。したがって、横方向のひずみ分布を計測するためには、新たな試験法や計測方法を用いる必要がある。

Ahmad ら⁹⁾は、静的三軸応力下におけるコンクリートの挙動を調べるために、図-2に示すような鋼管で拘束されたコンクリート円柱供試体を用いて静的三軸圧縮荷試験を行う手法を提案している。この手法は、鋼管の円周方向のひずみを計測することでコンクリート供試体の横方向ひずみならびにコンクリート供試体に作用する側圧を求める方法である。本研究では、Ahmad らと同様な手法を用いて急速三軸圧縮荷を受けるコンクリートの軟化領域における横方向の変形挙動を計測を試みる。

鋼管等の巻き立て材によって拘束されたコンクリート円柱供試体に軸圧縮力を荷重した際の応力状態を、模式的に図-3に示す。ただし、軸圧縮荷重はコンクリート

のみに作用させるものとする。コンクリートについては、断面上の軸方向応力は一様に分布し、円周方向と半径方向の応力は等しいと仮定する。また、コンクリートを拘束している巻き立て材は、一般的に軸方向応力 σ_v と円周方向応力 σ_a の2軸応力状態にあると考える。この場合、コンクリートに作用する側圧 σ_c は円周方向応力 σ_a と次のつり合い関係にある。

$$\sigma_c = \frac{2th\sigma_a}{DH} \quad (1)$$

ここで、 t は巻き立て材の肉厚、 D はコンクリートの直径、 h は巻き立て材の高さ、 H はコンクリートの高さである。よって、巻き立て材の円周方向応力 σ_a が求められれば、コンクリートに作用する側圧 σ_c は式(1)から算定できる。また、コンクリートと巻き立て材間の変形の適合条件から、コンクリートの横方向ひずみは巻き立て材の円周方向ひずみと等しくなければならない。したがって、コンクリートの横方向ひずみは、巻き立て材表面の円周方向に貼付したひずみゲージによって計測することができる。

ただし、この方法によってコンクリート供試体に作用する側圧ならびに横方向のひずみを適切に求めるためには、以下次の3点を満足する必要がある。

①コンクリート供試体には巻き立て材からの受動的な拘

表-1 静的一軸圧縮試験結果

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)	ポアソン比 ν_0
31.6	2.41	26.0	0.2

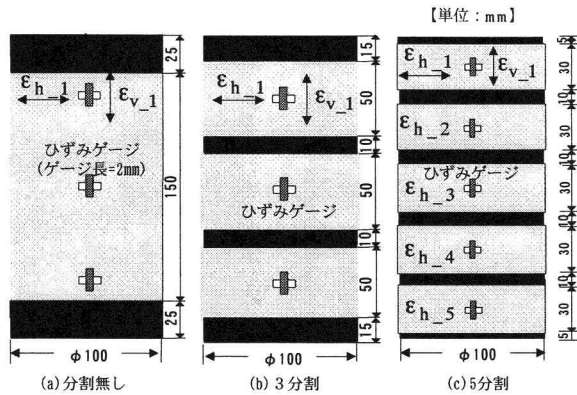


図-5 供試体の形状・寸法およびアルミニウム管の分割配置要領

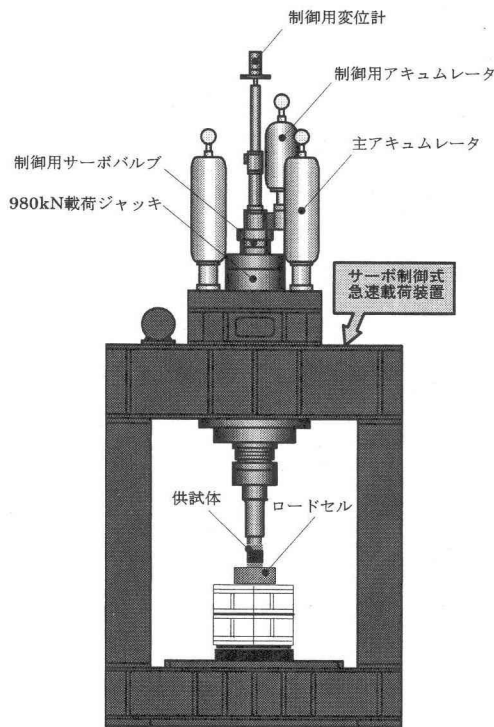


図-6 急速荷重装置と供試体の設置状況

束側圧のみが作用する状態を理想とする。このため、コンクリートと巻き立て材との付着応力の影響は無視できる程度に極めて小さくし、巻き立て材は円周方向応力のみが作用する1軸応力状態にする必要がある。

②コンクリートに作用する拘束側圧を求める上で、ひずみ速度効果を考慮した巻き立て材の応力～ひずみ関係を用いる必要がある。

③供試体中に形成される破壊領域の状況を把握するため

には、軸方向と同様に供試体の横ひずみの分布状況が把握できる必要がある。

著者ら⁷⁾は、急速三軸圧縮荷重を受けるコンクリートは、側圧がある値以上になると軟化現象を生じないことを明らかにしている。図-4に、圧縮強度 $f'_c=30.0$ (N/mm²)の場合の終局強度基準と残留強度基準の関係を示す。図に示した終局強度基準と残留強度との間に差がある場合を軟化する範囲とすると、軟化する範囲は側圧の増加に伴って減少する傾向にある。また、著者らが行った急速三軸圧縮試験⁸⁾では、最大側圧を9.8 N/mm²としている。これに対して本研究では、受動的な急速三軸圧縮試験を行い、得られた結果に対する提案モデルの適用性について検討を行う。そこで、巻き立て材によってコンクリートに加わる受動的側圧は既往の結果との比較上10N/mm²程度以下であることが望ましい。このため、拘束用の巻き立て材料として、引張強度や弾性係数が鋼材のそれらに比べ約1/3～1/2と小さいアルミニウム管(A6063-T5)を用いることにした。また、アルミニウム管には養生時の防錆性に優れるという利点もある。

図-5に示すように、アルミニウム管の分割数が異なる3種類の供試体を対象として、コンクリートとアルミニウム管との付着の影響を調べる。

2.2 試験概要

(1) 試験パラメータ

本試験におけるパラメータは、アルミニウム管の分割数、荷重速度の2つである。本研究では、横方向の軟化挙動を計測する上で最適なアルミニウム管の分割数を調べるとともに、各パラメータが軸方向および横方向の軟化挙動に及ぼす影響について検討している。

アルミニウム管の分割数は、(a)分割無し、(b)3分割、(c)5分割、の3つとした。荷重速度は、静的、高速の2種類である。荷重速度はひずみ速度を指標としている。ひずみ速度は、荷重軸方向のひずみを用いて、荷重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。各荷重速度をひずみ速度で定義すると、静的荷重では 1.2×10^{-6} (1/sec)、高速荷重が 2.0×10^0 (1/sec)である。試験ケース数は(アルミニウム管の分割数)×(荷重速度)=3×2=6 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:3×6=18回)行っている。

(2) 供試体の製作

図-5に、示したように供試体に用いたアルミニウム管は、外径100mm、肉厚2.8mmである。供試体は、直径100mm、高さ200mmのコンクリート円柱供試体用の型枠を使用し、その中にアルミニウム管を分割数に応じて所定の位置に固定するとともに、各アルミニウム管の間の非拘束部分にはコンクリートが流入しないように外径100mm、厚さ3mmのゴム輪を設置しコンクリート

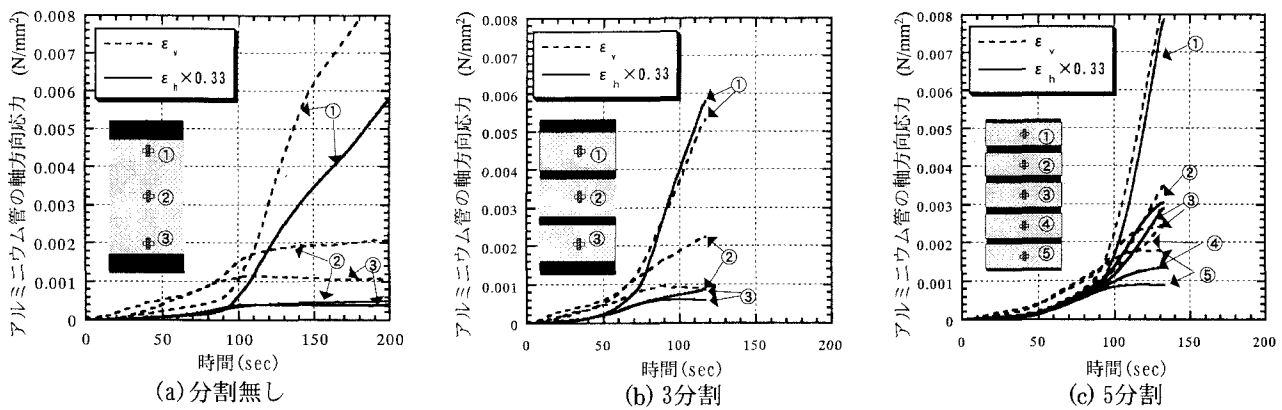


図-7 アルミニウム管の軸方向ひずみの時刻歴（静的載荷）

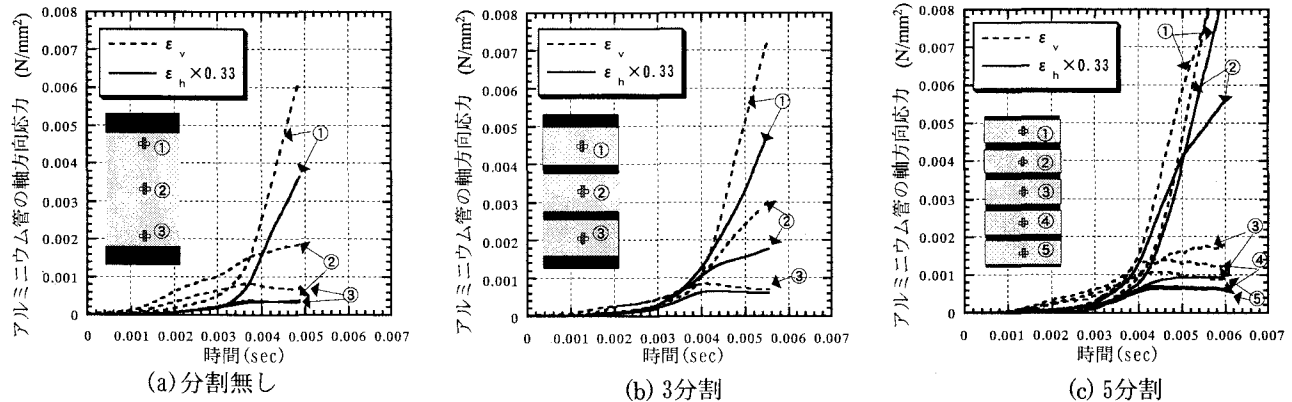


図-8 アルミニウム管の軸方向ひずみの時刻歴（高速載荷）

を打設している。また、試験体の軸方向変形を計測するために、供試体の中央にひずみ計測用のアクリル棒（SMR）を埋め込んでいる。

静的一軸圧縮試験で得られたコンクリートの圧縮特性値を、表-1に示す。なお、各圧縮特性値は試験期間中の平均値である。

(3) 試験方法

試験は、図-6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）を用いている。供試体と上下の鋼製載荷棒の間には、端面摩擦の影響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いる。

供試体に作用する軸方向力は、供試体下部に設置してあるロードセルによって計測している。アルミニウム管に生じる円周方向および軸方向ひずみは、図-5に示すように所定の位置に 2 ゲージ法⁸⁾を適用して貼付されたひずみゲージによって計測している。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 2 ゲージ法を適用して貼付した 3 対のひずみゲージによって計測している。

2.3 試験結果および考察

(1) アルミニウム管の分割数と付着応力との関係

ここでは、まずアルミニウム管の分割数とその応力状態に及ぼす影響について検討を行う。各試験ケースで得られたアルミニウム管の軸方向ひずみの時刻歴を、図-7、図-8に破線で示す。また図中には、試験で得られた円周方向のひずみにポアソン比（ $\nu=0.33$ ）を乗じて求めた換算軸方向ひずみを実線で示している。アルミニウム管が円周方向のみに応力が作用する一軸応力状態であれば、実際に計測された軸方向ひずみと換算軸方向ひずみとは等しくなるはずである。図から、分割無しの場合は、実際に計測された軸方向ひずみと換算軸方向ひずみは大きく異なる傾向がみられる。これは、付着応力がアルミニウム管に伝達されたことが原因と考えられる。一方、アルミニウム管を分割して配置した場合、いずれの載荷速度においても実際に計測された軸方向ひずみと換算軸方向ひずみはほぼ一致している。このことから、アルミニウム管を分割して配置することで軸方向の付着応力の影響は無視できる程度に低減されるといえる。

(2) 横方向ひずみの局所化と破壊領域

図-9、図-10に、SMR およびアルミニウム管の円周方向に貼付した各ひずみゲージによって計測された静的および高速載荷時のコンクリートの軸方向ひずみおよび横方向ひずみと軸圧縮応力との関係を示す。この図から、SMR ならびにアルミニウム管の円周方向に貼付した各

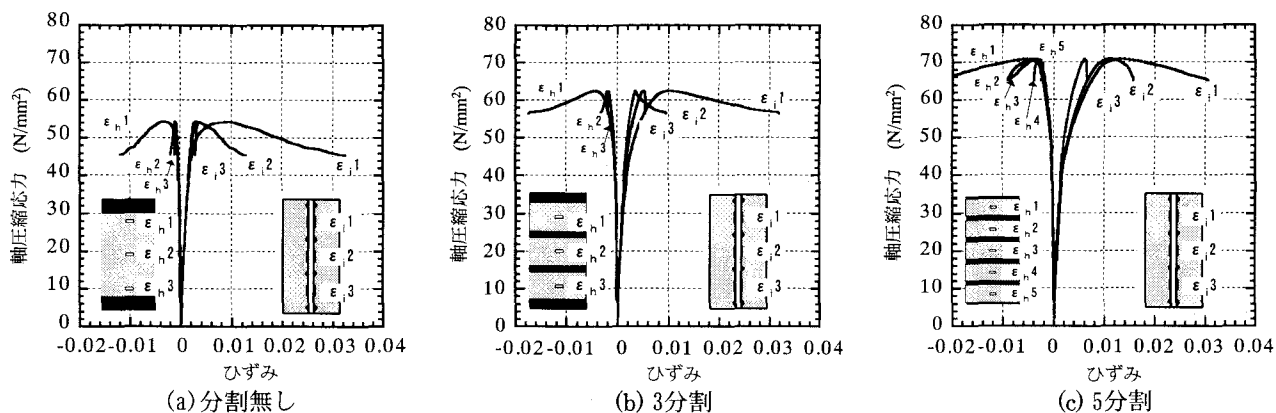


図-9 各計測位置における応力～ひずみ関係（静的载荷）

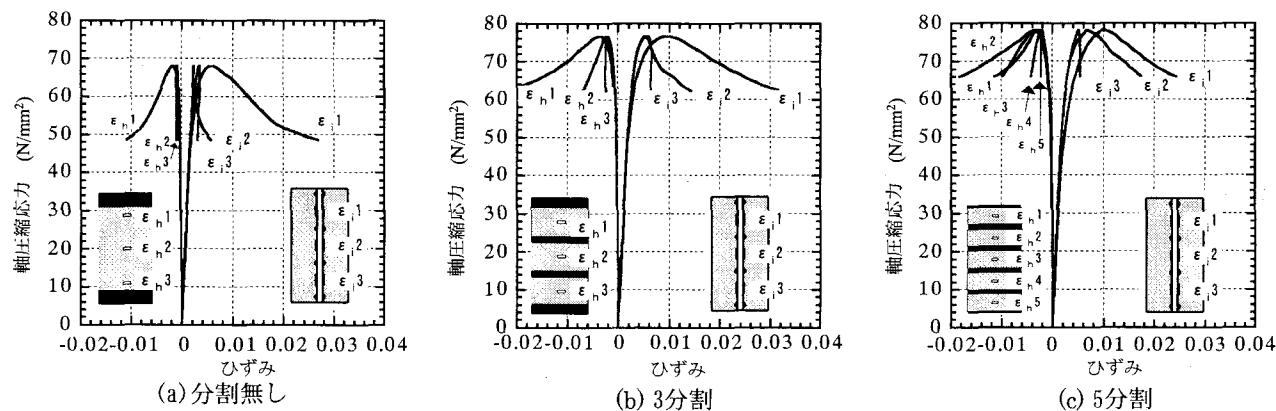


図-10 各計測位置における応力～ひずみ関係（高速载荷）

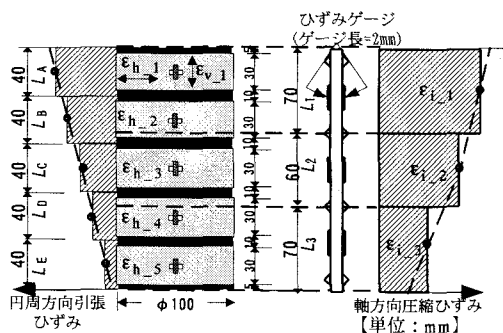
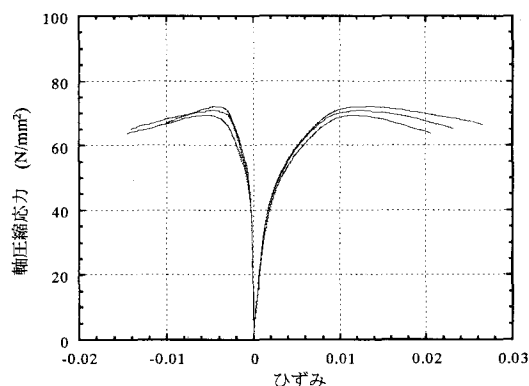


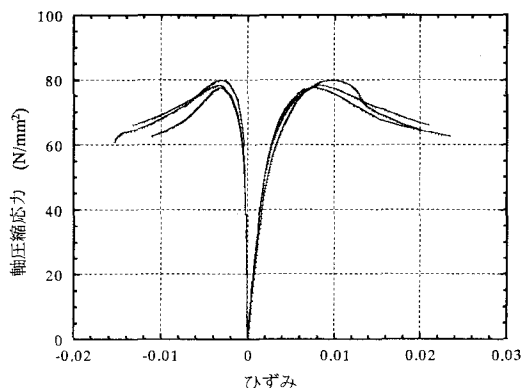
図-11 軸方向・横方向のひずみ分布の仮定

ひずみゲージの計測値はそれぞれ最大圧縮応力までは計測位置によらずほぼ等しいといえる。しかしながら、最大圧縮応力以降の軟化領域においては、軸方向ひずみのみならず横方向ひずみについても明らかに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。著者ら⁹⁾は既に、急速三軸圧縮载荷を受けるコンクリート供試体において载荷軸方向のひずみの局所化は側圧ならびに载荷速度の違いによらずに最大圧縮応力点以降から起こることを明らかにした。本試験においても、コンクリート中の横方向ひずみの局所化は最大圧縮応力以降から供試体中の特定の領域に起こるとみなせる。

またこれらの図によれば、最大圧縮応力以降に軸方



(a) 静的载荷 [$\dot{\epsilon}_1 = 1.2 \times 10^{-5}$ (1/sec)]



(b) 高速载荷 [$\dot{\epsilon}_1 = 2.0 \times 10^0$ (1/sec)]

図-12 破壊領域における応力～平均ひずみ関係(5分割)

向ひずみおよび横方向ひずみが局所化する部分はほぼ等しいことがわかる。そこで、最大圧縮応力以降の軟化領域において軸方向および横方向のそれぞれのひずみが増加する部分を破壊領域と定義する。図-9、図-10 から、アルミニウム管の分割数や載荷速度の違いによらず、ひずみが局所化する破壊領域は供試体（高さ 200mm）の材端から約 130mm の範囲としてほぼ評価できる。

(3) 破壊領域における応力～平均ひずみ関係

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は、破壊領域における平均ひずみを用いることが妥当である。ここでは、付着の影響が最も小さい 5 分割の場合の試験結果に基づいて破壊領域内における応力～平均ひずみ関係を求める。5 分割の場合の軸方向および横方向のひずみ分布を図-11 に示すように仮定し、コンクリート円柱供試体の破壊領域を上端から 130mm の部分とすると、5 分割の場合の破壊領域内における軸方平均ひずみ ε_{if} および横方向平均ひずみ ε_{hf} は、それぞれ次式により計算することができる。

$$\varepsilon_{if} = \frac{L_1 \varepsilon_{i1} + L_2 \varepsilon_{i2}}{L_1 + L_2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{hf} = \frac{L_A \varepsilon_{h1} + L_B \varepsilon_{h2} + L_C \varepsilon_{h3} + \frac{1}{4} L_D \varepsilon_{h4}}{L_A + L_B + L_C + \frac{1}{4} L_D} \quad (3)$$

図-12 に、付着の影響が最も小さい 5 分割の場合の 3 体に対する試験結果に基づいて求めた破壊領域内における応力～平均ひずみ関係を示す。

4. まとめ

本研究では、拘束用アルミニウム管の分割数、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た。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) アルミニウム管は分割して配置することにより、分割しない場合に比べて軸方向の応力伝達が低減できる。
- (2) 急速三軸圧縮載荷を受ける場合、ひずみの局所化はアルミニウム管の分割数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ある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上部の材端から約 2/3 の範囲である。

参考文献

- 1) Chen, W. F. : Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill (色部 誠・河角 誠・安達 洋監訳) コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, 1985.
- 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) 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤 : 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, 土木学会論文集 No.669, V-50, pp.135-148, 2001.2.
- 6) Ahmad, S.H. and Shah, S.P. : Complete Triaxial stress-strain curve for concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST4, pp.728~742, April, 1982.
- 7) 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.125-134, 2001.2.
- 8) 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.