

円形リングで横拘束されたコンクリートの動的応力～ひずみ関係

DYNAMIC STRESS-STRAIN MODEL FOR CONFINED CONCRETE WITH CIRCULAR RINGS

高橋芳彦*・大野友則**・丸山貴司***・内田 孝****

By Yoshihiko TAKAHASHI, Tomonori OHNO, Takashi MARUYAMA
and Takashi UCHIDA

This study is to present the unified stress-strain model for circular confined concrete with strain rates to analyze the elasto-plastic behaviors of reinforced concrete structures subjected to any kind of dynamic loadings. The constitutive relationship between compressive axial strength and its corresponding strain under static loads is first developed by the conventional elastic theory. Three types of tests using the circular confined concrete specimens were carried out to examine the effects of strain rates on the dynamic properties of confined concrete specimens and to facilitate the stress-strain model with strain rates. From tests results, it is found that both the strength and strain are affected by the confinement and the strain rate effects separately. The stress-strain model proposed in this study is very simple and of instructive for the development of the structural analysis.

1. はじめに

コンクリート構造物の設計が、従来の許容応力度設計法から限界状態設計法¹⁾へ移行しつつある。この設計法では、終局限界状態における部材断面の検討が行われるので、部材や材料の弾塑性挙動の力学的特性の解明や把握およびそのモデル化などの詳細な検討がより重要になっている。コンクリート材料の靱性に関する多くの研究から、コンクリートをスパイラル筋等で横拘束することにより靱性が著しく改善されることが知られている。コンクリートの圧縮靱性についての研究は、圧縮靱性に大きな影響を及ぼすと考えられる横拘束筋に関するものがほとんどであり、横拘束筋で囲まれたコンクリート（以下、横拘束コンクリートと呼ぶ）の圧縮靱性に及ぼす横拘束筋の影響および応力～ひずみ関係のモデル化についての研究が多い²⁾⁻¹⁴⁾。鈴木ら⁸⁾は、これまでに報告された応力～ひずみ関係の代表的な表示式を総括して、その特徴や問題点を分析・検討している。報告されている表示式はいずれも基本的な考え方は類似しているものの、研究者が各自に行った実験結果に基づいて定式化されているため適用に限定を受ける結果となっている。つまり、実験条件の違いによってその都度係数を修正する必要があるという不便さがある。また、従来の横拘束コンクリートに関する研究は、いずれも静的な載荷を受ける場合を対象としたものである。地震荷重や衝突事故などに

* 正会員 防衛大学校研究員 土木工学科

** 正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学科

*** 学生員 防衛大学校理工学研究科 土木工学科

**** 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学科

(〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

よって生じる衝撃荷重などのように載荷速度の大きい動的荷重を対象とする場合、材料はひずみ速度の影響を受けるのでこれらの結果をそのまま適用することは適切でないと考ええる。したがって、さらにひずみ速度の影響を考慮した動的応力～ひずみ関係式が必要であろう。高速載荷に対する横拘束コンクリートの動力学特性を解明するために行われた研究として、海外で数例^{12)～14)}報告されているが、対象としているひずみ速度 ($10^{-6} \sim 10^{-2}/\text{sec}$) は比較的小さい範囲である。

本研究は、まず静的載荷に対する円形横拘束コンクリートの応力～ひずみ関係式を、実験によらずできるだけ力学的観点から誘導することを試みている。また、定式化した静的応力～ひずみ関係の適用性およびひずみ速度の影響を考慮した動的応力～ひずみ関係式の検討のため、横拘束コンクリートの高速載荷実験を行っている。実験は、鋼管をリング状に切断した鋼製リングを用いて横拘束したコンクリート円柱供試体を対象として、載荷速度の異なる3種類の実験を行っている。主として、動力学特性に及ぼす鋼製リング間隔およびひずみ速度の影響を明らかにするとともに、ひずみ速度と横拘束筋による拘束効果が横拘束コンクリートの動的応力～ひずみ関係に及ぼす影響を統一的に表現し、しかも簡潔な形で表示した構成式を提示するものである。

2. 静的載荷に対する横拘束コンクリートの力学特性の定式化

静的載荷に対する横拘束コンクリートの圧縮強度、最大応力時のひずみなどの力学特性に関して多くの研究が行われている。六車ら^{2)～5)}、藤井ら^{6),7)}、鈴木ら⁸⁾およびIyengarら⁹⁾は実験結果に基づいて拘束係数を定義し、拘束効果を考慮した応力～ひずみ関係の定式化を行っている。しかしながら、式中に現れる係数はいずれも実験から求められる定数であり、異なる条件に対してはその都度実験を行って係数を修正する必要があると考えられる。

そこで、本研究では次の仮定に基づき、横拘束コンクリートの圧縮強度 f_{cm} および最大応力時のひずみ ϵ_{cm} を周知の弾性理論により定式化する。横拘束コンクリート円柱供試体の内部に生じる圧縮応力は、それが十分密に配置されていても軸方向に対して厳密には均等な分布とはならない。しかし、これを便宜的に等分布と仮定することにより、ある区間を拘束する拘束筋の全断面積と等しい面積をもつ鋼製中空円筒による拘束問題と等価であるとみなす。また、内部のコンクリートは横拘束効果により3軸応力状態となり、拘束筋が降伏点に達するまでコンクリートは弾性範囲にあり、鋼製中空円筒が降伏点に達した時点で最大応力（すなわち、圧縮強度）になるものと仮定する。

いま、軸方向に圧縮応力 σ_c が作用しているとき、中空円筒の拘束効果によるコンクリートの圧縮応力を σ_a 、円筒拘束筋に生じている引張応力を σ_s とする。このとき、 $\sigma_a = p_b \cdot \sigma_s / 2$ (p_b : 拘束筋比 $= 4 A_s / D \cdot s$ 、 A_s : 拘束筋1本の断面積、 D : 拘束筋の中心線の直径、 s : 拘束筋間隔) の関係がある。中空円筒内のコンクリートは3軸応力状態にあり、軸直角方向のひずみ ϵ_a は次式で与えられる。

$$\epsilon_a = -(1/E_c) \{ \sigma_a - \nu (\sigma_a + \sigma_c) \} \quad \dots\dots\dots (1)$$

また拘束筋の円周に沿うひずみ ϵ_s は、断面の半径方向のひずみ ϵ_a に等しい。

$$\epsilon_s = \epsilon_a = \sigma_s / E_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)と(2)から次の関係を得る。

$$\sigma_s / E_s = -(1/E_c) \{ \sigma_a - \nu (\sigma_a + \sigma_c) \} = (\nu \cdot \sigma_c / E_c) - (1 - \nu) / 2 \cdot (p_b \cdot \sigma_s / E_c)$$

これを σ_c について整理すると、

$$\sigma_c = \{ E_c / (\nu \cdot E_s) + (1/\nu - 1) \cdot p_b / 2 \} \cdot \sigma_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここに E_c 、 E_s は、それぞれコンクリートおよび拘束筋の縦弾性係数、 ν はコンクリートのポアソン比である。

次に、拘束筋の応力が降伏点に達した ($\sigma_s = f_y$) 時点で横拘束コンクリートが圧縮強度 f_{cm} を示すとい

う仮定から、式(3)より次式が得られる。

$$f_{cm} = E_c / (\nu \cdot E_s) \cdot f_y + (1/\nu - 1) \cdot p_b \cdot f_y / 2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ところで、拘束筋が無い場合は、 $p_b = 0$ 、 $f_{cm} = f_c$ (f_c : プレーンコンクリートの圧縮強度) だから、結局式(4)は

$$f_{cm} = f_c + (1/\nu - 1) \cdot p_b \cdot f_y / 2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表すことができる。式(5)の両辺を f_c で除せば、プレーンコンクリートの圧縮強度と横拘束コンクリートの圧縮強度との関係が次式で表される。

$$f_{cm} / f_c = 1 + (1/\nu - 1) / 2 \cdot p_b \cdot (f_y / f_c) \quad \dots\dots\dots (6)$$

最大応力時のひずみについても同様の関係を求めると、次式が得られる。

$$\epsilon_{cm} / \epsilon_{co} = 1 + (1/\nu - 1 - 2\nu) / 2 \cdot p_b \cdot (f_y / f_c) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 ϵ_{co} はプレーンコンクリートの最大応力時のひずみである。なお、横拘束コンクリートは最大応力付近でひびわれが進展して破壊に至ることから、 ν はコンクリートの破壊点近傍の値として $1/2.5 \sim 1/3.5$ の値を用いる。式(6)と(7)では、右辺第2項にわずかな違いがあるだけで、両式は同一のパラメータで定式化されている。また、いずれの式も拘束筋の諸元 (A_s 、 D 、 s) と降伏点 (f_y) およびプレーンコンクリートの圧縮強度 (f_c) とポアソン比 (ν 、またはポアソン数 $m = 1/\nu$) だけで与えられる。

次に、最大応力点以降の応力が低下していく勾配の大きさも拘束効果を受けるので、これを定式化する。実験において、横拘束コンクリートは最大応力以降でコンクリートにひびわれが進展し、応力が徐々に低下する傾向が認められた。したがって、最大応力以降の挙動については弾性理論を用いて定式化することはできない。そこで、本研究では最大応力以降の応力下降勾配を最も単純な1つの直線でモデル化し、最終的に応力が零になるときのひずみを破壊ひずみ ϵ_u と定義する。ここでは、後述する実験結果を参照して概略の大きさを推定し、これに拘束効果を考慮した次式を提案する。

$$\epsilon_u = 5(1 + C_e)^2 \cdot \epsilon_{co} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 C_e は式(7)に示される拘束効果を表わす係数で、 $C_e = (1/\nu - 1 - 2\nu) / 2 \cdot p_b \cdot (f_y / f_c)$ である。

表-1に、式(6)および(7)を用いて得られる横拘束コンクリートの圧縮強度と最大応力時のひずみの推定値と実験結果との比較を示す。前述のように、ここで提示した式((6)、(7))は横拘束コンクリートの最大応力点が拘束筋の降伏点に対応するという仮定から、プレーンコンクリートの圧縮強度と拘束筋の降伏点だけを実験定数として与えている。圧縮強度に関する推定値と実験結果を比較すると、 $p_b = 3.59\%$ の場合は実験結果と良好に一致している。これは、拘束効果が大きい $p_b = 3.59\%$ の場合には用いた仮定が成り立つことを示すものである。しかしながら、拘束筋が少ない $p_b = 2.39\%$ の場合は実験結果に比較し、推定値が5～17%程度大きな値となっている。これは、拘束筋の応力が降伏点に至る以前にコンクリートが最大応力に達して応力が低下域にあるためと考えられる。最大応力時のひずみについては、 $p_b = 3.59\%$ の場合は実験結果の約1/2、 $p_b = 2.39\%$ の場合は実験結果にほぼ一致している。すなわち、拘束筋比が大きい $p_b = 3.59\%$ の場合の横拘束コンクリートの最大応力点は、拘束筋が降伏した後の塑性域で生じていることを示すものと考えられる。また、拘束筋比が小さい $p_b = 2.39\%$ の場合は、拘束筋の降伏ひずみに対応するひずみで最大応力に達したことを示すものである。したがっ

て、本提示式は拘束筋比が比較的大きい横拘束コンクリートに対して有効であるといえる。またその際、最大応力時のひずみの推定値は実験値よりも小さいので安全側の評価を与えることになる。

表-1 実験結果と推定値の比較

	$p_b = 3.59\%$		$p_b = 2.39\%$	
	f_{cm} / f_c	$\epsilon_{cm} / \epsilon_{co}$	f_{cm} / f_c	$\epsilon_{cm} / \epsilon_{co}$
実験結果	1.74～1.78	2.95～3.10	1.28～1.43	1.42～1.57
推定値	1.75	1.50	1.50	1.33

3. 実験概要

3. 1 供試体

本実験では、鉄筋コンクリートはり部材のスターラップまたは鉄筋コンクリート柱部材のスパイラル筋などによって拘束されたコンクリートをモデル化できるように、鋼製リングを用いてコンクリートに横拘束を与えた。鋼製リングを用いることにより供試体全周に一樣の横拘束を与えることができるので、横拘束効果の影響を適切に調べることでできるものと考えられる。横拘束コンクリートの力学特性は、コンクリートと横拘束筋の強度比や横拘束筋断面積の大きさなどに左右されることが知られている²⁾⁻¹⁴⁾が、本研究では基礎的段階として鋼製リング間隔および載荷速度だけをパラメータとした。図-1に示すように、供試体は外径89.1mm、肉厚3.2mmの一般構造用炭素鋼管(STK41)を幅10mmで輪切りにしたリングを40mm間隔 (Type-1) および60mm間隔 (Type-2) に配置した2種類とした。また比較のために、横拘束筋の無い標準の $\phi 100 \times 200$ mmコンクリート円柱供試体 (Type-3) についても同様の実験を行った。供試体の作製にあたっては、鋼製リングを所定の間隔に配置するために鋼製リングの外側に5×5mmの木材を添えて固定した。横拘束コンクリート作成に用いた型枠は、 $\phi 100 \times 200$ mm円柱供試体用モールドである。なお、鋼製リング外側のコンクリートはかぶり部分とみなし、応力の算定に際してはその面積を無視した。また、上端および下端の鋼製リングから載荷面までの距離は、一樣に長い供試体の一部を切り出した場合の応力状態と等価にするために、鋼製リング間隔の1/2とした。供試体端面はコンクリート・カッターで切断して所定の長さとした後、研磨・成型した。載荷速度は3種類とし、それぞれの平均ひずみ速度は約 $10^{-5}/\text{sec}$ (静的載荷)、約 $10^{-2}/\text{sec}$ (低速載荷)および約 $10^0/\text{sec}$ (高速載荷)であった。なお、鋼製リングの機械的性質およびコンクリートの配合はそれぞれ表-2および表-3に示すとおりである。

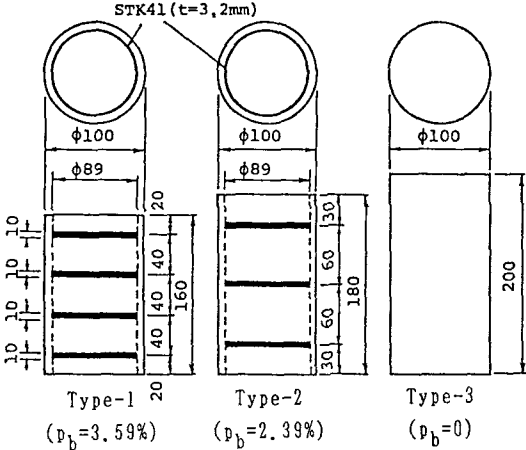


表-2 鋼製リングの機械的性質

降伏点 f_y (kgf/cm ²)	3900
引張強さ (kgf/cm ²)	4600
伸び (%)	28
断面積 (cm ²)	8.64
単位重量 (kgf/m)	6.77

図-1 供試体の寸法・諸元

表-3 示方配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kgf/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
47.8	41.4	159	333	712	1064

3. 2 高速載荷装置

本実験で使用した載荷装置は、高速および低速載荷実験については図-2に示す高速変形負荷装置、静的載荷実験についてはアムスラー型試験機である。高速変形負荷装置は、1msec以内で加速した後に供試体を一定の速度で変位させることができるという特徴を有している。本載荷装置を使用することにより、試験体に一定の変位速度を与えることができるので、試験体内に生じるひずみ速度が材料の特性に及ぼす影響を調べることができる。この装置は、油圧ポンプにより一定の圧力に保たれた主アクチュエータの荷重を、左右にある2基のバランス・アクチュエータで保持し、次にバランス・アクチュエータに内蔵された制御バルブを機械的に一定速度で下方向に作動させて所定の速度で供試体を変位させるものである。制御バルブの移動

速度すなわち載荷速度は、フライホイールの回転数を制御することにより最大4m/secまで任意に設定できる。なお、本載荷装置の最大荷重容量は50tonfである。本実験の高速載荷では載荷速度を2~3m/secに設定した。また、低速載荷での載荷速度は高速載荷の1/100程度(約2~3cm/sec)とした。

3. 3 計測方法

計測は荷重、変位および加速度について行った。荷重はひずみゲージ式荷重変換器(ロード・セル)を用いて計測し、動ひずみ測定器(最大応答周波数200kHz)で増幅した。供試体の縦ひずみはひずみゲージでの計測が不可能なため、非接触型変位計(最大応答周波数50kHz)で測定した変位量を供試体の高さで除した値とした。また、ロード・セルと供試体との間にある載荷治具の慣性力がロード・セルの出力値に及ぼす影響を調べるために、アンプ内臓式のピエゾ型加速度計(最大応答周波数:5kHz)を載荷治具に取り付けて加速度を測定した。なお、載荷治具の慣性力は小さく、ロード・セルの出力値への影響はほとんどないことを

確認している。高速載荷および低速載荷実験におけるそれぞれのデータは、デジタル・メモリー(最小サンプリングタイム5 μ sec)にデジタル・データとして取り込み、さらにパーソナル・コンピュータを介してフロッピー・ディスクに記録した。高速載荷および低速載荷実験の計測システムは図-3に示すとおりである。

4. 横拘束コンクリートの動力学特性

4. 1 応力~ひずみ関係に及ぼす横拘束筋の拘束効果およびひずみ速度の影響

図-4に、それぞれの載荷速度に対する応力~ひずみ関係を示す。図から明らかなように、いずれの載荷速度に対しても拘束筋比が大きくなるにつれて最大応力は増大している。また、最大応力以降の応力下降勾配は拘束筋比が大きくなるにつれて緩やかになる傾向がある。なお、最大応力に至るまでの応力の上昇勾配は拘束筋間隔の大きさによらずほぼ等しい。静的載荷を受ける横拘束コンクリートに対するこのような性状は、鈴木ら⁸⁾や六車ら⁴⁾などによって報告された結果と同様である。また図-5に、異なる載荷速度に対する応力~ひずみ関係を各タイプ毎に示す。図から、いずれのタイプも載荷速度の増大にともなって最大応力が増大していることがわかる。これはコンクリートや拘束筋のひずみ速度効果に起因するものと考えられる。一方、最大応力時のひずみの大きさはひずみ速度の増大にともなって減少する傾向にある。竹田ら^{15),16)}は、ブレンコンクリートを対象とした実験において、最大応力時のひずみは圧縮強度と同様にひずみ速度の増大にともなって増大することを報告している。本実験による結果が竹田らの実験結果と異なるのは、ひずみの評価や測定方法の違いによるものと考えられる。すなわち、コンクリート円柱供試体の静的圧縮試験

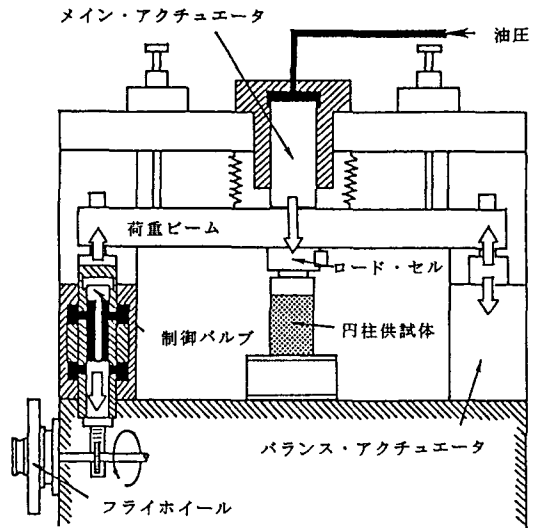


図-2 高速変形負荷装置の概要

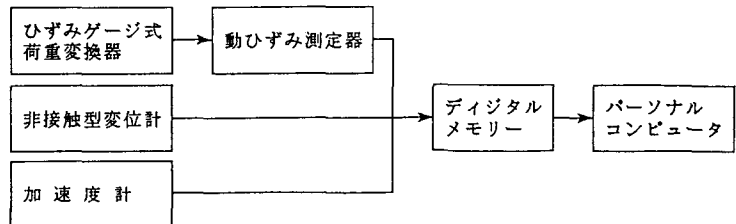


図-3 計測システム

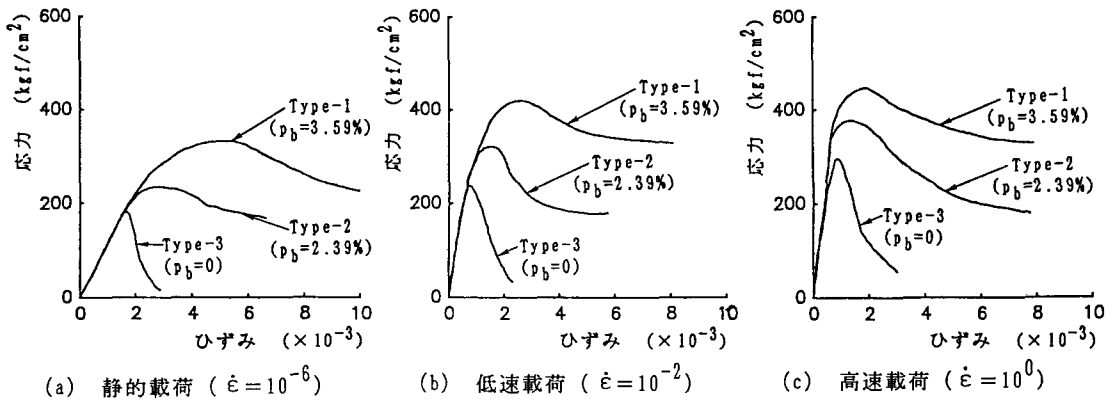


図-4 異なる拘束筋比に対する応力～ひずみ関係

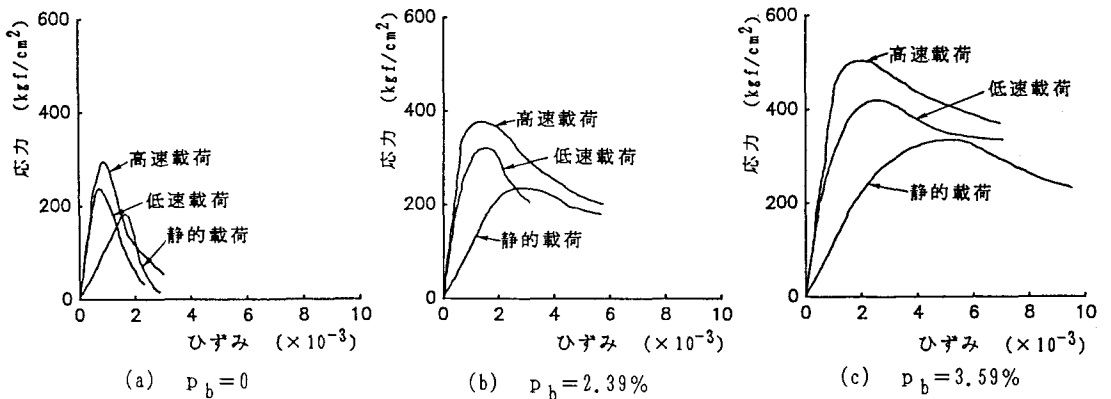


図-5 異なる載荷速度に対する応力～ひずみ関係

によれば、その破壊面の角度は一般に底面から 60° 程度であることが知られている。これに対し、高速載荷の場合には破壊面の角度はそれより小さく $45 \sim 50^\circ$ 程度となり、破壊が供試体中央部に集中する傾向が認められた。したがって、ひずみゲージから計測される供試体中央部の局所的なひずみに着目すると、最大応力時のひずみは静的載荷に対する場合よりも大きくなるが、供試体全体の変位量から求めたひずみは静的載荷に対する場合よりも小さい値になるものと考えられる。なお、横拘束コンクリートについてもプレーンコンクリートに類似する傾向が認められた。

4. 2 ひずみ速度効果を考慮した横拘束コンクリートの応力～ひずみ関係の定式化

(1) 横拘束コンクリートの動力学特性に及ぼす横拘束効果とひずみ速度の影響

図-6に、圧縮強度とひずみ速度の関係を示す。横軸に対数目盛で表示したひずみ速度は、最大応力時のひずみの大きさを、最大応力に達するまでの時刻で除した値である。すなわち、平均ひずみ速度である。図から明らかなように、いずれのタイプにおいてもひずみ速度の増大にともなって圧縮強度が増大している。また、任意のひずみ速度に対しては拘束筋比が大きいほど圧縮強度は大きい。つまり、あるひずみ速度に対する圧縮強度の大小は拘束筋による拘束の効果を表わし、同一の拘束を受ける供試体の圧縮強度の増大はコンクリートや拘束筋のひずみ速度の影響を表わすことになる。各タイプの供試体において、圧縮強度とひずみ速度の間にはほぼ線形関係が成立するとみなし、1次式を仮定して最小2乗法で求めると図中の直線が得られる。この直線から明らかなように、直線の勾配は拘束筋間隔の大小にかかわらずほぼ等しい。この結果は、横拘束コンクリートの圧縮強度の増大は、横拘束筋による拘束の効果とひずみ速度による影響をそれぞ

れ独立して受けることを示すものである。したがって、ひずみ速度を変化させた場合のプレーンコンクリートの圧縮強度特性および静的载荷に対する横拘束コンクリートの圧縮強度特性を明確にかつ定量的に評価できれば、ひずみ速度の影響を受ける横拘束コンクリートの圧縮強度が推定できることになる。

図-7に、最大応力時のひずみ (ϵ_{cm}) とひずみ速度の関係を示す。図から、最大応力時のひずみはひずみ速度の増大ともなつて減少することがわかる。次に、最大応力時のひずみの逆数 ($1/\epsilon_{cm}$) とひずみ速度との関係を表わすと、図-8のようになる。この結果から、最大応力時のひずみの逆数 ($1/\epsilon_{cm}$) とひずみ速度の関係に対しても圧縮強度とひずみ速度の関係と同様に、勾配が等しい線形関係があることが認められる。したがって、最大応力時のひずみの大きさも、横拘束の効果とひずみ速度の影響をそれぞれ独立に受けるものと推察できる。

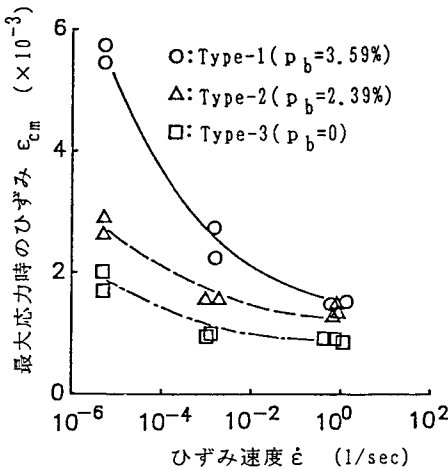


図-7 最大応力時のひずみ (ϵ_{cm}) とひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) の関係

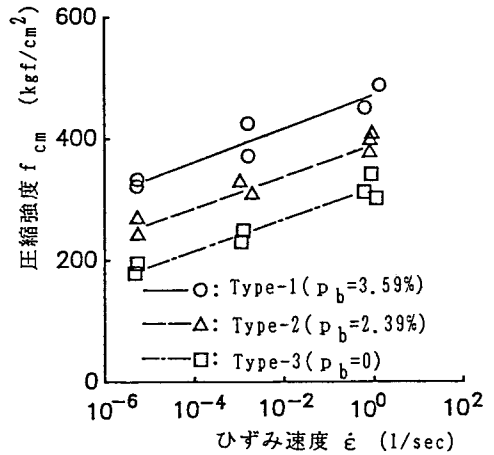


図-6 圧縮強度 (f_{cm}) とひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) の関係

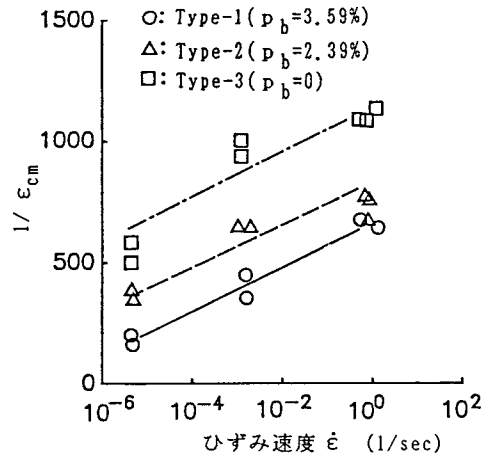


図-8 ($1/\epsilon_{cm}$) とひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) の関係

(2) ひずみ速度の影響を受けるプレーンコンクリートの動力学特性の定式化

図-6、8に示したように、プレーンコンクリートの圧縮強度および最大応力時のひずみの逆数のそれぞれとひずみ速度の対数値との間には線形関係がある。これらの関係を、求めると以下の各式が得られる。

$$\frac{d f_c}{s f_c} = a + b \cdot \log \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$(1/d \epsilon_{co}) / (1/s \epsilon_{co}) = s \epsilon_{co} / d \epsilon_{co} = c + d \cdot \log \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで以後、下添字sおよびdはそれぞれ静的载荷および動的载荷を表わす。本研究での静的载荷のひずみ速度は $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-6} \text{ sec}$ 程度とした。係数a~dは、図-6および8に示した実験結果に基づいて最小2乗法を用いて求められる。

(3) ひずみ速度効果を考慮した横拘束コンクリートの応力~ひずみ関係

(1) で述べたように、拘束筋による拘束効果とひずみ速度が横拘束コンクリートの動力学特性に及ぼ

す影響は、個々に分離して考慮することができる。したがって、拘束効果は式(6)、(7)で表されるものをそのまま用いることとし、ひずみ速度による影響をプレーンコンクリートの圧縮強度および拘束筋の降伏点に考慮するものとする。なお本研究では、拘束筋について的高速載荷実験は行っていないが、著者らが行った鋼材のひずみ速度効果についての既往の研究¹⁷⁾からひずみ速度の影響を考慮した拘束筋の動的降伏点 d^f_y は、次式で与えられるものとした。

$$d^f_y = s^f_y \cdot (10^n + 0.94) : n = 0.15 \cdot \log \dot{\epsilon} - 0.43 \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(9)～(11)を式(6)、(7)および(8)に用いれば、ひずみ速度を考慮した横拘束コンクリートの動的圧縮強度 d^f_{cm} 、最大応力時のひずみ d^{ϵ}_{cm} および破壊ひずみ d^{ϵ}_u は以下の式で表すことができる。

$$d^f_{cm} = d^f_c + (1/\nu - 1)/2 \cdot p_b \cdot d^f_y \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$d^{\epsilon}_{cm} = d^{\epsilon}_{co} \{1 + (1/\nu - 1 - 2\nu)/2 \cdot p_b \cdot (d^f_y / d^f_c)\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$d^{\epsilon}_u = 5(1 + d^{\epsilon}_{ce})^2 \cdot d^{\epsilon}_{co} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、

$$d^f_c = s^f_c \cdot (a + b \cdot \log \dot{\epsilon}) \quad : a = 1.70, b = 0.14$$

$$d^{\epsilon}_{co} = s^{\epsilon}_{co} / (c + d \cdot \log \dot{\epsilon}) \quad : c = 2.14, d = 0.19$$

$$d^{\epsilon}_{ce} = (1/\nu - 1 - 2\nu)/2 \cdot p_b \cdot (d^f_y / d^f_c)$$

以上に求めた特性値を用いて、横拘束コンクリートの動的応力～ひずみ関係形状を最大応力 (d^f_{cm}) に至るまでを2次式で、最大応力以降の応力下降域を1次式で表すものとするれば、ひずみ速度効果を考慮した横拘束コンクリートの動的応力 (d^{σ}) ～ひずみ (d^{ϵ}) 関係が次式で与えられる。(図-9参照)

$$d^{\sigma} = (d^f_{cm} / d^{\epsilon}_{cm}) \cdot \{2 \cdot d^{\epsilon} - (d^{\epsilon 2} / d^{\epsilon}_{cm})\} \quad : d^{\epsilon} \leq d^{\epsilon}_{cm} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$d^{\sigma} = d^f_{cm} \cdot (d^{\epsilon}_u - d^{\epsilon}) / (d^{\epsilon}_u - d^{\epsilon}_{cm}) \quad : d^{\epsilon} > d^{\epsilon}_{cm}$$

ここに、添字dはひずみ速度の影響を考慮したときの応力とひずみを表す。

図-10は、拘束筋比の違いによるコンクリートの応力～ひずみ関係を、異なる載荷速度（高速、低速および静的）に対して示したものである。図中、実線は実験から得られた応力～ひずみ関係を表し、破線は本研究で提示した式(12)～(15)で求めた動的応力～ひずみの近似関係を表している。提示式による結果と実験結果を比較すると、とくに低速度載荷に対する最大応力以降の応力下降勾配の大きさに差がみられるが、拘束筋による拘束効果と載荷速度の違いによるひずみ速度が最大応力やその時点のひずみの大きさおよび応力下降勾配に及ぼす影響を良好にシミュレートできることが認められる。したがって、拘束筋の無いプレーンコンクリート円柱供試体に対する圧縮試験および拘束筋として用いる鋼材の引張試験によって得られる結果 (f_c 、 ϵ_{co} および f_y) およびそれぞれの値にひずみ速度の影響を考慮することにより、式(12)～(15)を用いて横拘束コンクリートの動的応力～ひずみ関係が比較的精度良く推定できる。

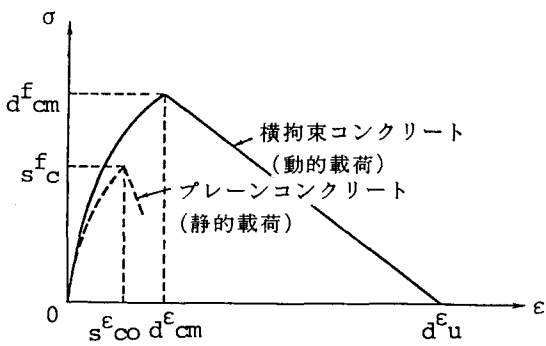


図-9 応力～ひずみ関係のモデル

(4) 提案式におけるポアソン比の影響

コンクリートのポアソン比は、許容応力付近までは約1/5～1/7、破壊応力点近傍ではその2倍 (1/2.5～1/3.5) になることが知られている。式(12)～(14)による計算では、便宜上 $\nu = 1/3$ (ポアソン数 $m = 3$) の値を用いた。ここでは、破壊点近傍のポアソン比の大きさが応力～ひずみ関係に及ぼす影響について調べてみる。図-11は、 $p_b = 3.59\%$ の横拘束コンクリートの場合について、載荷速度毎に応力～ひずみ関係の実験結果と計算結果を比較したものである。図中には、ポアソン比が1/2.5、1/3.0および1/3.5 (ポアソン数 m

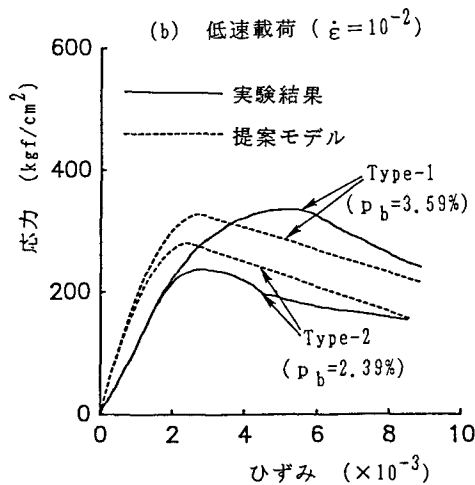
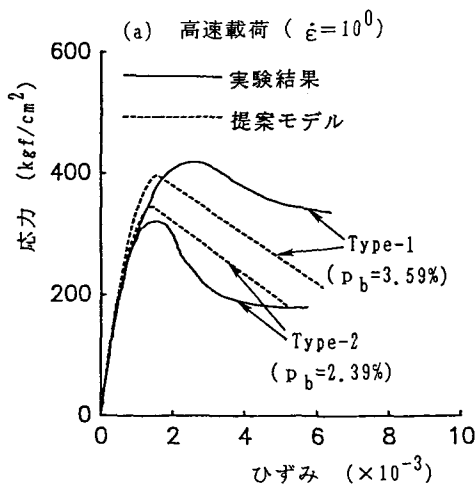
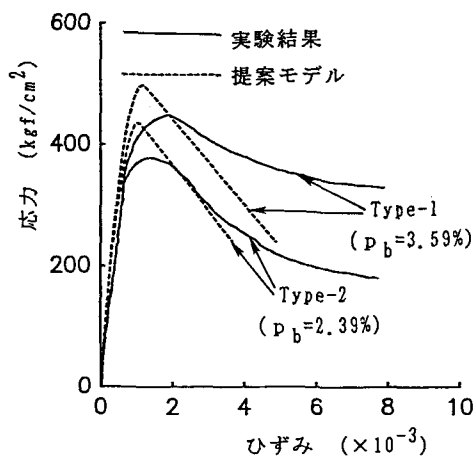


図-10 計算値と実験結果による
応力～ひずみ関係の比較

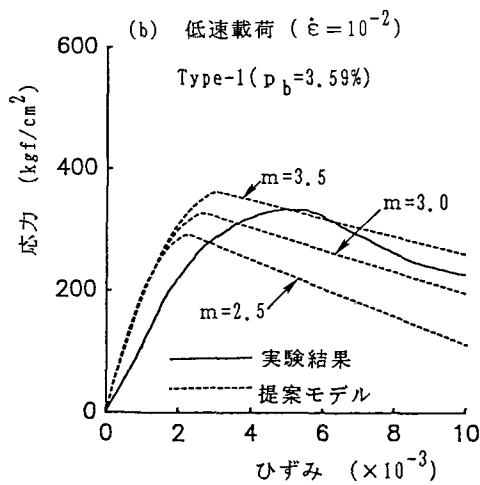
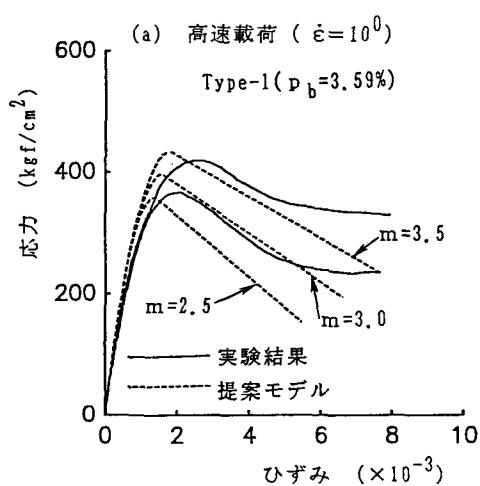
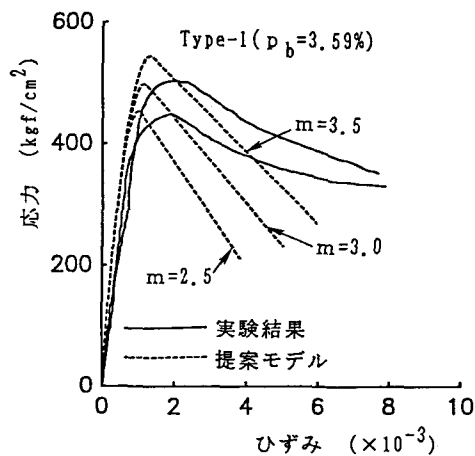


図-11 応力～ひずみ関係に及ぼす
ポアソン比の値

は、2.5、3.0および3.5) についての計算結果を破線で示している。図から、実験結果はいずれもポアソン数が2.5と3.5の場合の間に含まれることがわかる。したがって、実験上のばらつきを考えると、その平均値1/3.0を用いても十分であるとみなせる。

(5) 応力～ひずみ関係に及ぼす拘束効果とひずみ速度の影響の一般的特性

図-12および図-13は、式(12)～(15)を用い、拘束筋比 p_b とひずみ速度をパラメータとして動的応力～ひずみ関係を求めたものである。図-12から、一定のひずみ速度では、拘束筋比が大きくなるにしたがって最大応力およびそれに対応するひずみの大きさが增大することがわかる。また、最大応力以後の応力下降勾配は、拘束効果によって緩やかになる傾向が認められる。図-13は、拘束筋比 $p_b=5.0\%$ のとき、ひずみ速度をパラメータとして示している。図から、ひずみ速度が上昇するにつれて最大応力は増大するが、そのときのひずみの大きさは逆に減少することがわかる。また最大応力以後の応力低下勾配は、ひずみ速度の上昇とともに急勾配となり、靱性が減少することが認められる。

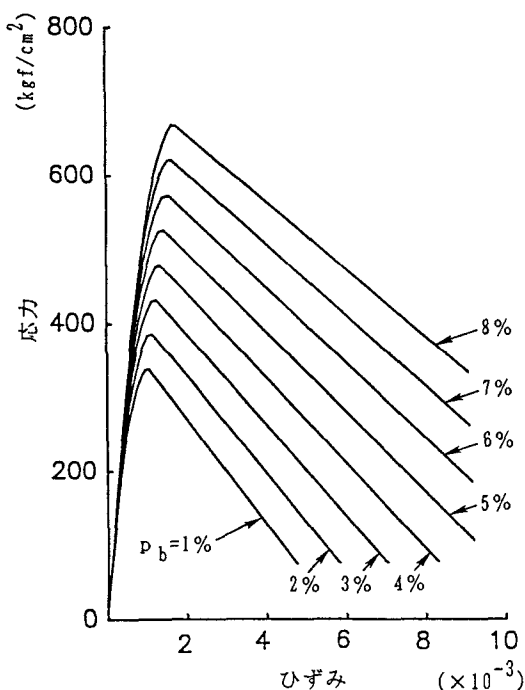


図-12 応力～ひずみ関係に及ぼす拘束効果の影響 ($\dot{\epsilon}=10^{-2}$)

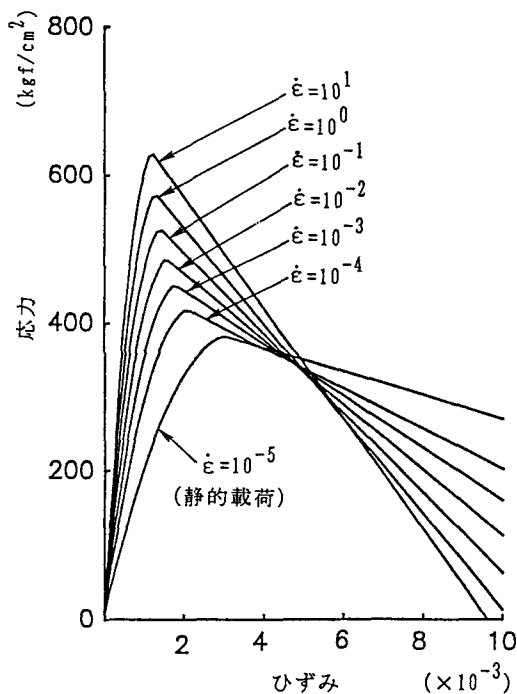


図-13 応力～ひずみ関係に及ぼすひずみ速度の影響 ($p_b=5.0\%$)

5. まとめ

本研究は、ひずみ速度の影響を考慮した円形横拘束コンクリートの動的応力～ひずみ関係を定式化することを目的としたものである。まず円形横拘束コンクリートの静的応力～ひずみ関係式を、実験によらずできるだけ力学的観点から誘導することを試みた。また、定式化した応力～ひずみ関係の適用性およびひずみ速度の影響を考慮した動的応力～ひずみ関係式の検討のため、円形横拘束コンクリート供試体を用いて載荷速度の異なる3種類の実験を行った。実験で得られた応力～ひずみ関係と本研究で提示した式による算定結果

を比較することにより、その適用性と有用性を確認した。本研究で得られた成果を要約すれば以下のようになる。

- (1) 円形横拘束コンクリートの力学特性を与える式として、弾性理論に基づいた式を誘導した(式(6)、(7))。また、ひずみ速度の影響を取り入れることによって、拘束効果と載荷速度を同時に考慮できる動的応力～ひずみ関係式(式(15))が得られた。
- (2) 本研究で提示した式は、材料定数やひずみ速度の影響による係数を除けば実験によって定まる係数が少ないので、取扱いが比較的簡便である。なお、提示した式中のポアソン比は、破壊点近傍の平均的な値として $1/3$ を用いれば十分良好な近似値を与える。
- (3) また、提示した式による検討から以下の点が考察できる。
 - 1) 一定のひずみ速度では、拘束筋比が大きくなるにしたがって最大応力およびそれに対応するひずみの大きさが増大する。最大応力以後の応力下降勾配は、拘束効果によって緩やかになる。
 - 2) 拘束筋比が一定の場合、ひずみ速度が上昇するにつれて最大応力は増大するが、そのときのひずみの大きさは逆に減少する。また最大応力以後の応力下降勾配は、ひずみ速度の上昇とともに急勾配となり、コンクリートの靱性は減少する。

なお本研究では、限られた条件と試験体数による実験結果との比較を行っているが、適用性の検討には異なる条件やさらに多くの実験が必要であると考えている。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕、昭61.10.
- 2) 西山峰広、六車熙、渡辺史夫：横拘束によるコンクリート系部材の曲げ靱性改善、コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集、pp.33-44、1988.3.
- 3) 六車、岩清水、光枝、井上：横補強による高強度コンクリートの靱性改善に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.97~100、1983.
- 4) 六車、渡辺、田中、勝田：横拘束筋によるプレストレスコンクリート梁の曲げ靱性改善に関する研究、第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.377~380、1980.
- 5) 六車、渡辺、勝田、田中：横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化、セメント技術年報34、pp.429~432、1980.
- 6) 藤井学、宮本文穂、平岡良彦、大山広高：横拘束コンクリートの応力～ひずみ曲線の定量化に関する研究、セメント技術年報、40、pp.273-276、昭61.
- 7) 藤井学、小林和夫、宮川豊章、井上晋、松本利彦：横拘束コンクリートの応力～ひずみ関係の適用に関する検討、セメント技術年報42、pp.311-314、昭63.
- 8) 鈴木計夫、中塚信、井上和政：円形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの応力～ひずみ特性および同コンクリート内に配置された圧縮軸筋の座屈性状、コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集、pp.21-32、1988.3.
- 9) Iyengar,K.T.S.R., Desayi,P. and Reddy,K.N.:Stress-strain characteristics of concrete confined in steel binders, Magazine of Concrete Research, Vol.22, No.72, 1970.9.
- 10) Mander,J.B., Priestley,M.J.N. and Park,R.:Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Engrg.,Vol.114, No.8, pp.1804-1826, 1988.
- 11) Soroushian,P. and Obaseki,K. :Strain-Dependent Interaction Diagrams for Reinforced Concrete Sections, ACI Journal, No.83-13,pp.108-116, 1986.1-2.

- 12) Scott, B.D., Park, R. and Priestley, M.J.N.: Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, ACI Journal, Vol.79, No.1, pp.13-27, Jan-Feb, 1982.
- 13) Soroushian, P., Choi, K-B. and Alhamed, A.: Dynamic Constitutive Behavior of Concrete, ACI Journal, No.83-26, pp.251-259, 1986.3-4.
- 14) Dilger, W.H., Koch, R. and Kowalczyk, R.: Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates, ACI Journal, Vol.81, No.1, pp.73-81, Jan-Feb, 1984.
- 15) 竹田仁一、立川博之：高速度荷重試験装置とこれによるコンクリート円筒体圧縮実験について（構造物および構造材料の高速度荷重に対する力学的性質の研究 その1）、日本建築学会論文報告集、第63号、pp.657-660、昭和34年10月。
- 16) 竹田仁一、立川博之：高速圧縮および引張を受けるコンクリートの力学的諸性質について（構造物および構造材料の高速度荷重に対する力学的性質の研究その2～4）、日本建築学会論文報告集、第66号（pp.105-108、昭和35年10月）、第77号（pp.1-6、昭和37年9月）、第78号（pp.1-6、昭和37年10月）。
- 17) 高橋、塩冶、大野、石川、内田：ひずみ速度効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの衝撃曲げ応答解析、構造工学論文集、Vol.32A、pp.669～682、1986.3.

（1989年10月2日受付）