

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

STRAIN-RATE EFFECTS ON ELASTO-PLASTIC BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS UNDER IMPACT LOADINGS

高橋芳彦*・大野友則**・太田俊昭***・日野伸一****

By Yoshihino TAKAHASHI, Tomonori OHNO, Toshiaki OHTA
and Shin-ichi HINO

There are many possible types of impact loading, which are induced from impacts of vehicles, aircraft and falling rocks etc., for different structures in civil engineering. Even though these loadings may have a very low probability of occurrence during their lifetime, it is considered that the consequences of an impact failure can be extremely serious. Determining the effects of a transient loading event is a complicated process that usually demands a solution using finite element methods. This not only requires knowledge of nonlinear material properties, which can change at the high strain-rates related to impact, but also a realistic prediction of the applied loads. In this study, material tests for both concrete and steel specimens under high-speed loadings were executed to explore the dynamic stress-strain relationships. Then, introducing these dynamic properties of materials to an analogous mechanical method such as a discrete multi-mass model, the effects of strain-rates on the elasto-plastic behaviors of reinforced concrete beam under impact loading are investigated.

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下、RCと呼ぶ)構造の耐衝撃設計法を確立するための研究が盛んに行われている。車両、船舶、航空機あるいは落石などの衝突によって生じる衝撃外力を受けるRC部材の応答は、載荷直後に載荷位置近傍に生ずる応力波による局部的応答と全体的弾塑性応答が混在するため、衝撃現象は極めて複雑になることが知られている。RC部材が保有する耐衝撃性を定量的に把握するためには、局部的応答と全体応答を分離してそれぞれの影響を明らかにする必要がある。また、衝撃荷重のような高速度の外力の作用を受けるRC部材の力学特性は、材料に生ずるひずみ速度の影響によって静的外力を受ける場合とは異なることが分かっている。RC部材の弾塑性挙動や耐衝撃性を定量的に把握するためには、構成材料であるコンクリートおよび鉄筋の動力学特性を明らかにする必要があり、材料特性のひずみ速度依存性に関する研究が数多く行われている^{1)~8)}。一方、構造物の耐用年数間における衝撃外力の発生確率の頻度を考えると、RC構造などの耐衝撃設計は、部材の靱性を考慮した終局限界変形を安全性の評価基準として行うことが望ましいと考える。従来行われている鋼材などの動力学特性に関する研究は、降伏点や弾性係数のひずみ速度依存性についてのものがほとんどであり、塑性域を含めた材料特性を定量的に検討した研究は比較的少ない。

-
- | | | | |
|----------|-------------|----------|--------------------------|
| * 正会員 | 防衛大学校研究員 | 土木工学科 | (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20) |
| ** 正会員 | 工博 防衛大学校助教授 | 土木工学科 | (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20) |
| *** 正会員 | 工博 九州大学教授 | 工学部土木工学科 | (〒812 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1) |
| **** 正会員 | 工博 九州大学助教授 | 工学部土木工学科 | (〒812 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1) |

また、コンクリートの動力学特性については、圧縮強度が500kgf/cm²程度以下の普通強度コンクリートを対象とした研究が行われており、ひずみ速度効果を考慮した応力～ひずみ関係の構成式が種々提示されている。近年、構造物重量の軽量化を図ることなどを目的として高強度コンクリートの使用が増大しているが、高強度コンクリートの動力学特性に関する研究は現在のところ見あたらない。

そこで本研究は、まず高強度コンクリートを含むコンクリートおよび鋼材の動力学特性を定量的に把握することを目的とし、載荷速度を変化させた1軸圧縮試験および引張試験を行っている。試験結果に基づいて、コンクリートの圧縮強度などおよび鋼材の引張強度などに及ぼすひずみ速度の影響について調べ、それぞれの動的応力～ひずみ関係の定式化を行った。ところで、衝突物体の衝突速度が非常に大きい場合には、衝突点および近傍の局部的な変形や破壊が問題となり、別途の取扱いが必要となる。ここでは、衝突によって構造物あるいは構造部材の全体的挙動が問題となる範囲の衝撃問題を対象としている。この場合でも、挙動が弾性範囲内であるか塑性域を含めて検討を行うかによって用いる解析手法が異なる。塑性域を含めて応答を解析する場合には、一般に材料の非線形性を考慮した上で差分法、境界要素法あるいは有限要素法などが利用されている。しかしながら、構造要素としてのはり部材の衝撃応答のうち、主としてはり全体の変形性状や荷重作用点の変位の大きさに着目すれば、精度は多少粗くとも取扱いが簡便な手法が望ましい。本研究では、離散化多質点系モデルによる解析手法を用い、定式化した動的応力～ひずみ特性を導入することにより、衝撃荷重を受けるRCはりの弾塑性挙動に及ぼすひずみ速度の影響について検討を行っている。

2. コンクリートの応力～ひずみ特性に及ぼすひずみ速度効果

2.1 試験概要

供試体は、表-1に示す示方配合で作製した静的設計基準強度がそれぞれ1000kgf/cm²および350kgf/cm²の高強度および普通強度コンクリート供試体の2種類である。載荷速度は、高速載荷(10⁰m/sec程度)、低速載荷(10⁻²m/sec程度)および静的載荷(10⁻⁵m/sec程度)の3種類とした。供試体は、同一の試験条件に対し3個以上を用い、総数68個について試験を行った。普通強度コンクリートの供試体寸法は、既往の研究結果と比較するために、一般に静的載荷を対象として使用されているφ100×200mm円柱形とした。なお、寸法がφ50×100mmの普通強度コンクリート供試体を対象として行った高速1軸圧縮試験結果との比較から、ひずみ速度の増大にともなう圧縮強度の変化率に対する供試体寸法の影響は認められなかった。高強度コンクリートについてもひずみ速度の変化に応ずる力学特性の変化を調べることを目的としており、前述の比較結果および載荷装置の荷重容量(50tonf)の制限を考慮して供試体寸法をφ50×100mmの円柱形とした。本試験では、高速および低速載荷試験については高速載荷試験装置⁹⁾、静的載荷試験についてはアムスラー型試験機を用いた。荷重は、ひずみゲージ式荷重変換器(ロード・セル)により計測した。ひずみは、供試体中央部に貼付した検長30mmのひずみゲージを用いて計測した。また、ロード・セルと試験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、アンプ内蔵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。計測されたデータは動ひずみ測定器(最大応答周波数:200kHz、ローパス・フィルター:10kHz)で増幅し、デジタル・メモリー(サンプル時間間隔:5μsec)にデジタル・データとして記憶させた後、フロッピーディスクに記録した。高速および低速載荷試験の計測

表-1 示方配合

供試体の種類	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプの範囲(cm)	空気量(%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kgf/m ³)			
						水	セメント	細骨材	粗骨材
高強度	10	8±1	2	25.0	39.0	150	600	647	1012
普通強度	10	8±1	4	45.0	44.0	153	340	801	1041

システムを図-1に示す。

2.2 応力およびひずみの時刻歴応答

図-2に、高速載荷試験で得られた高強度コンクリート供試体に対する応力および縦ひずみの時刻歴応答の一例を示す。縦軸の上側は応力を、下側は平均化した縦ひずみを表す。破線で示した応力はロード・セルで

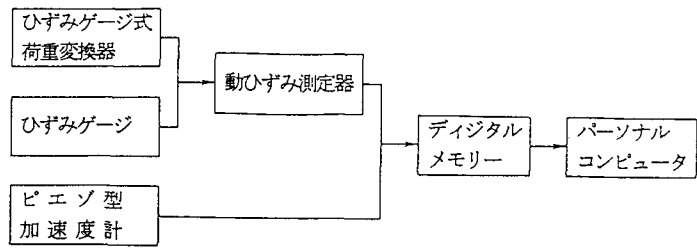


図-1 高速載荷試験の計測システム

得られた荷重値から載荷治具の慣性力の影響を取り除いた応力の値である。図から明らかなように、載荷治具による慣性力の影響は載荷直後において認められるが、その値はきわめて小さく無視できる程度である。応力およびひずみの増加は、載荷開始から約1.0msecに至る間では小さいが、それ以降は時刻の経過とともに線形的に増大している。応力は、最大値に達した以降で急激に減少している。また、計測されたほとんどの縦ひずみは、最大応力付近で計測不能(スケールオーバー)となっており、コンクリート供試体は最大応力に達した時点で爆裂的に破壊したものと考えられる。なお、以後の図等で記述するひずみ速度は、最大応力時のひずみをそれに至るまでの時間で除した値であり、平均ひずみ速度と定義する。

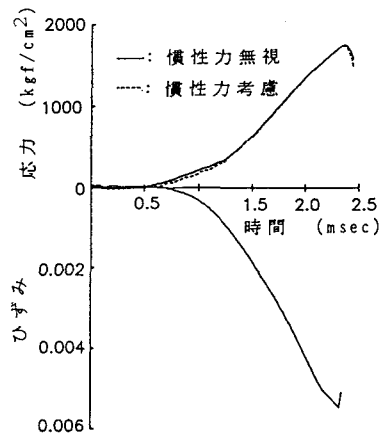


図-2 応力およびひずみの時刻歴応答

2.3 応力とひずみの関係に及ぼすひずみ速度効果

(1) 動的応力～ひずみ特性の数学的表示法

図-2に示した応力およびひずみの時刻歴応答に基づいて時間項を消去すれば、高速載荷に対する応力と縦ひずみの関係が得られる。図-3に、高強度および普通強度コンクリートの高速および静的載荷に対する応力と縦ひずみの関係の一例を示す。図から、高強度および普通強度コンクリートのいずれも、高速載荷に対する最大応力(圧縮強度)および最大応力時のひずみは静的載荷に対する値よりも大きいことがわかる。これらの傾向は、普通強度コンクリートを対象として行われた既往の研究結果^{1)～4)}に類似している。また、高速載荷を受ける場合の最大応力に達するまでの応力～ひずみ特性の形状は普通強度および高強度コンクリートのいずれも静的載荷に対する形状と同様であるとみなせる。

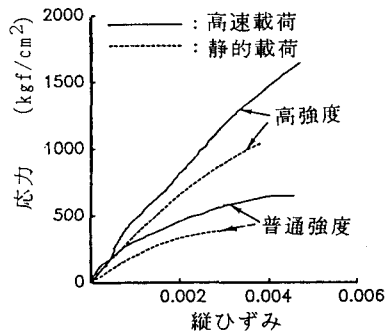


図-3 応力～ひずみ特性に及ぼすひずみ速度および圧縮強度の影響

コンクリートの応力～ひずみ特性の表示法に関して、古くから多くの研究が行われており、種々の表示式が提案されている。表示式は、実際の応力～ひずみ特性をできるだけ忠実に表現し得ることが重要であるが、構造解析の立場からは数学的取扱いが容易であることが望ましい。ここでは、最大応力に至るまでの応力～ひずみ特性の数学的表示法について検討を行う。

図-4に、応力～ひずみ特性の数学的表示法のうち、パラボラ式(式(1))¹⁰⁾およびPopovics式(式(2))¹¹⁾と試験結果との比較を示す。図において、最大応力(f_c')および最大応力時のひずみ(ϵ_{co})は試験で得られた値を用いている。

$$\sigma = f_c' \{ 2(\varepsilon / \varepsilon_{CO}) - (\varepsilon / \varepsilon_{CO})^2 \} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma = f_c' \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{CO}} \frac{n}{(n-1) + (\varepsilon / \varepsilon_{CO})^n} \quad \dots\dots\dots (2)$$

なお、式(2)中の係数nは、次

式に示すようにコンクリートの最大応力の関数として与えられる係数であり、Popovicsが行った各種の静的載荷試験結果に基づいて定式化されたものである。

$$n = (0.57 \times 10^{-2} \times f_c') + 1$$

普通強度コンクリートを対象とする他の表示式としては、梅村のe関数式¹²⁾などがあるが、

最大応力まではパラボラ式と類似しているの、ここでは現行の土木学会コンクリート標準示

方書¹³⁾に採用されている最も簡便なパラボラ式を取り上げる。Popovics式は圧縮強度の相違による応力～ひずみ特性形状の違いを表現できる式である。なお、いずれも静的載荷を対象とした表示式である。高速載荷に対する場合は、ひずみ速度の影響を考慮した別途の表示式を用いる必要があるが、ここでは便宜的に、試験で得られた最大応力とそれに対応するひずみの値を式(1)、(2)の f_c' と ε_{CO} にそのまま代入して算定結果を表示した。図-4(a)から、普通強度コンクリートの場合は試験結果に対し、高速および静的載荷のいずれに対してもパラボラ式による表示が良好に一致している。また、Popovics式も静的載荷に対しては良く一致しているが、高速載荷の場合は同一ひずみに対応する応力が試験結果よりも小さな値となっている。一方、高強度コンクリートの試験結果に対しては、静的および高速載荷をいずれに対してもPopovics式が比較的良好に一致している。また、パラボラ式は同一のひずみに対応する応力が試験結果よりも大きくなり、危険側の評価を与えている。以上の結果から、高強度コンクリートを含むRC部材の動的応答解析を行う場合は、普通強度コンクリートの高速載荷については安全側の評価となるが、Popovics式が実用的であると考える。

(2) 圧縮強度に及ぼすひずみ速度効果の定式化

図-5に、コンクリートの圧縮強度～ひずみ速度関係に関する既往の研究結果¹⁾⁻⁴⁾および本試験結果を示す。ここでは、載荷方法などが本試験と類似している研究結果のみを取り上げる。竹田ら¹⁾は、14種類、合計324個のコンクリートについて高速載荷試験を行い、動的圧縮強度($\sigma_d f_c'$)と荷重速度($\dot{\sigma}$)の関係および荷重速度とひずみ速度の関係などについて定式化している。図中に示した実線は、配合の異なる3種類のコンクリートに対する結果の例である。図から、ひずみ速度の増大にともなう普通強度コンクリートの圧縮強度の増加傾向は、いずれの試験結果も類似していることがわかる。一方、高強度コンクリートを対象として行われた研究は見あたらず比較するデータは無いが、ひずみ速度の増大にともなう圧縮強度の増加は普通強度コンクリートと同様の傾向であることが認められる。

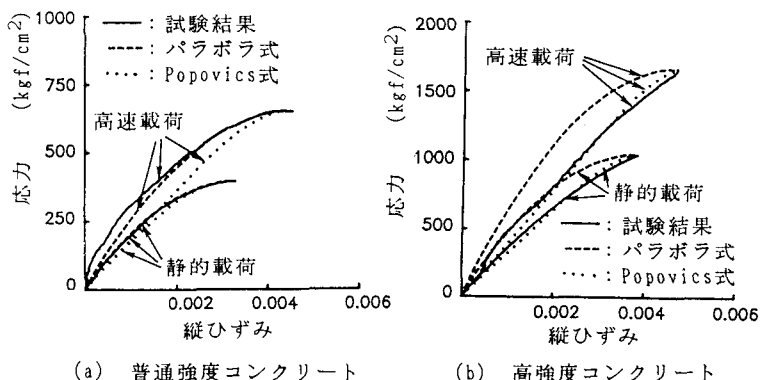


図-4 応力～ひずみ特性の数学的表示法の比較

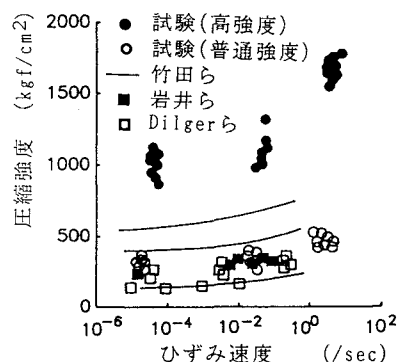


図-5 圧縮強度～ひずみ速度関係

図-6は、静的圧縮強度 (f_c') に対する動的圧縮強度 ($d f_c'$) の増加割合をひずみ速度との関係で示したものである。また、既往の研究によって定式化された圧縮強度増加率の算定式の代表的な例を表-2に示す。Dilgerら³⁾は、ひずみ速度が $10^{-1}/\text{sec}$ 程度までを対象とした研究に基づいて、圧縮強度の増加率とひずみ速度の対数値との間に線形式を提示している。また Soroushianら⁴⁾は、既往の研究結果をまとめて圧縮強度増加率とひずみ速度の対数値との関係を2次式で定式化している。一方、本試験で得られた結果をみると、高強度コン

クリートと普通強度コンクリートの圧縮強度増加率に顕著な相違は認められず、竹田らやSoroushianらの結果と類似した傾向を示した。そこで、高強度および普通強度コンクリートの試験結果のすべてを統一的に表示できるように、ひずみ速度の対数値を変数とする2次式を仮定して定式化すると次式が得られる。

$$d f_c' / f_c' = 1.49 + 0.268(\log \dot{\epsilon}) + 0.035(\log \dot{\epsilon})^2 \dots\dots (3)$$

式(3)および表-2に示した各提案式を図示すると、図-7のようになる。図から、本試験結果に基づく関係式はひずみ速度が小さい範囲($10^{-3}/\text{sec}$ 程度まで)では、普通強度コンクリートを対象とした他の関係式に比べて圧縮強度の増加率を小さめに評価していることが認められる。

(3) 最大応力時のひずみの大きさに及ぼすひずみ速度効果

図-8に、最大応力時のひずみとひずみ速度の関係に関する既往の研究結果および本試験結果を示す。竹田ら¹⁾は、圧縮強度と同様に動的最大応力時のひずみ ($d \epsilon_{co}$) ~ ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) 関係についても、表-3中に示す関係式を提示している。図中の実線で示してあるのは、図-5と同様に配合の異なる3種類のコンクリートに対する結果の例である。図

-8の結果に基づいて、静的載荷に対する最大応力時のひずみ (ϵ_{co}) と動的載荷に対する最大応力時のひずみの割合 ($d \epsilon_{co} / \epsilon_{co}$) (最大応力時のひずみ変化率と定義する) を求め、ひずみ速度との関係で示すと図-9のようになる。また、最大応力時のひずみ変化率の算定に関する提案式の代表的な例を表-3に示す。竹田

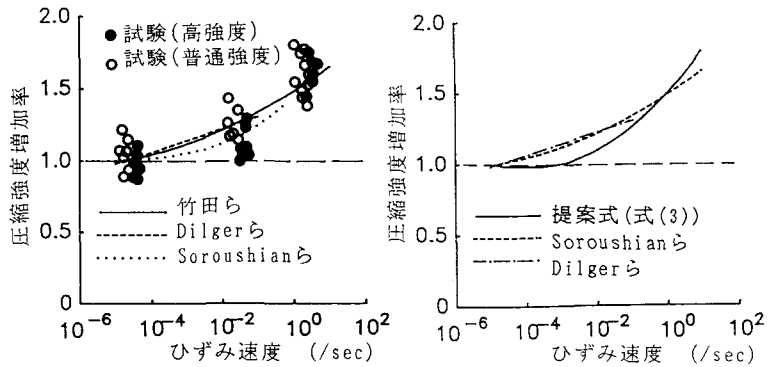


図-6 圧縮強度増加率～ひずみ速度関係

図-7 圧縮強度増加率～ひずみ速度関係式の比較

表-2 圧縮強度増加率に関する既往の研究結果の比較

竹田ら ¹⁾	$d f_c' = \alpha + \beta(\log \dot{\epsilon}) + \gamma(\log \dot{\epsilon})^m$ $\dot{\epsilon} = a(\dot{\epsilon})^b$	$\alpha, \beta, \gamma, m, a$ および b は コンクリートの種類による定数
Dilgerら ³⁾	$d f_c' / f_c' = 1.38 + 0.08(\log \dot{\epsilon})$	
Soroushianら ⁴⁾	$d f_c' / f_c' = 1.48 + 0.160(\log \dot{\epsilon}) + 0.013(\log \dot{\epsilon})^2$	

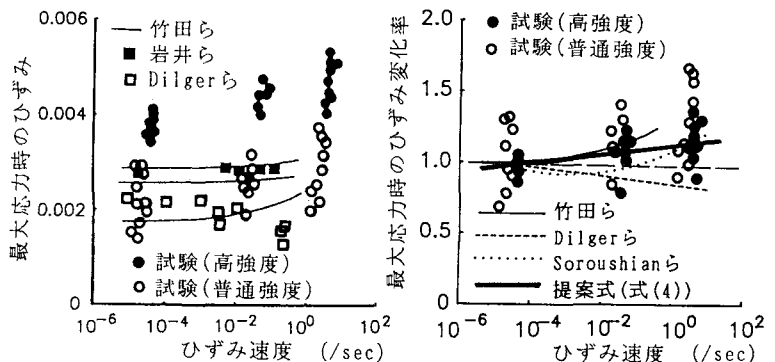


図-8 最大応力時のひずみ～ひずみ速度関係

図-9 最大応力時のひずみ変化率～ひずみ速度関係

ら¹⁾の結果によると、コンクリートの種類によって最大応力時のひずみの増加率は異なるが、全体としては $10^{-3}/\text{sec}$ 程度まではほとんど変化せず、それより大きい $10^{-2}/\text{sec}$ 程度で約5%、 $10^{-1}/\text{sec}$ 程度で約

表-3 最大応力時のひずみ変化率に関する既往の研究結果の比較

竹田ら ¹⁾	$d\epsilon_{co} = \alpha_1 + \beta_1(\log \dot{\epsilon}) + \gamma_1(\log \dot{\epsilon})^{m_1}$	$\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ および m_1 はコンクリートの種類による定数
Dilgerら ³⁾	$d\epsilon_{co} = \{1.3 - 0.06(\log \dot{\epsilon}) + 9.96 \times 10^{-4} \times s f_c'\} \times 10^{-3}$	
Soroushianら ⁴⁾	$d\epsilon_{co} / s\epsilon_{co} = 1.08 + 0.112(\log \dot{\epsilon}) + 0.019(\log \dot{\epsilon})^2$	

10%の増加を示すことが報告されている。岩井ら²⁾によると、ひずみ速度の増大にともなって線形的に増加するが、その増加率はきわめて小さい。一方、Dilgerら³⁾は他の研究結果に反し、ひずみ速度の増大にともなって線形的に減少することを述べている。Dilgerらの結果が他の研究結果と著しく異なるのは、ひずみゲージを用いずに供試体の変位量からひずみを求めているためと考えられる。また、Soroushianら⁴⁾は、ひずみ速度の対数値に対するひずみ変化率を2次式で与えることを提案している。一方、本研究で得られた高強度コンクリートの最大応力時のひずみは、いずれの載荷速度に対しても普通強度コンクリートよりも大きな値を示している。また、圧縮強度の大小にかかわらず、ひずみ速度の増大にともなって最大応力時のひずみはほぼ線形的に増加する傾向が認められた。また、最大応力時のひずみ変化率に関しては、圧縮強度による顕著な相違は認められなかった。そこで、最大応力時のひずみ変化率とひずみ速度の対数値の間には線形関係が成り立つとして最小2乗法を用いて定式化すると、次式が得られる。

$$d\epsilon_{co} / s\epsilon_{co} = 1.24 + 0.053(\log \dot{\epsilon}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(4)を用いれば、図-9中の太い実線で示す関係が得られる。

以上に述べたように、載荷速度の大きい動的載荷に対して最大応力時のひずみのひずみ速度依存性を検討する場合、計測方法の相違などによって結果がかなり異なるが、本試験結果および既往の研究結果との比較に基づいて統一的に表示した式(4)は、動的載荷を受けるコンクリートの最大応力時のひずみの大きさを推定する場合に有用であると考えられる。(2)および(3)節で定式化した動的圧縮強度の推定式(式(3))および最大応力時の動的ひずみの推定式(式(4))を、(1)節で述べた動的応力～ひずみ特性形状を表わすPopovics式(式(2))に導入することにより、図-10に示すコンクリートの動的応力～ひずみ特性が得られる。

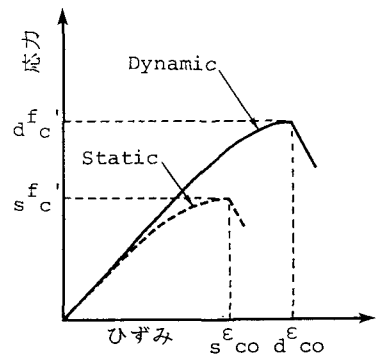
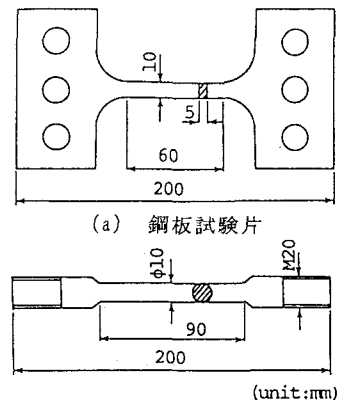


図-10 コンクリートの動的応力～ひずみ特性提案式

3. 鋼材の応力～ひずみ特性に及ぼすひずみ速度効果

3.1 試験概要

試験は、鋼種が異なる鋼板(SS41)および鉄筋(SR24, SD30, SD35)の合計4種類の鋼材を対象として行った。試験片の形状・寸法を、図-11および表-4に示す。鋼板試験片は、肉厚 $t=5\text{mm}$ の鋼板を6号試験片に準じて図-11(a)に示す形状・寸法に成形した。両端には、載荷装置に取り付けるための孔(直径20mm)を3個ずつ設けた。また、鉄筋試験片は、 $\phi 22$ (異形鉄筋はD22)丸棒を図-11(b)に示す形状・寸法に成形した。両端は、載荷装置への取り付けのためにネジ(M20)状に成形した。載荷は、高速載荷(ひずみ速度:約2/sec)、低速載荷(ひずみ速度:約0.05/sec)および静的載荷(ひずみ速度:約 $10^{-5}/\text{sec}$)



(a) 鋼板試験片
(b) 鉄筋試験片
(unit:mm)
図-11 試験片の形状・寸法

表－4 試験片の主要寸法

	試験片の 種類	平行部の 長さP (mm)	評点 距離L (mm)	平行部の 直径D (mm)	平行部の 厚さt (mm)	平行部の 幅W (mm)
鋼 板	6号	60	56	—	5	10
鉄 筋	2号	90	80	10	—	—

の3種類の载荷速度とし、図-12に示す引張载荷装置を高速载荷試験装置に取り付けて行った。計測は、荷重、試験片のひずみおよび変位について行った。荷重は、引張载荷装置に取り付けてある引張用ロード・セル(荷重容量：5tonf)を用いて計測した。ひずみゲージは、降伏点付近のひずみ特性を調べるために検長2mmの箔ゲージを用い、試験片中央部に2枚貼付した。また、破断に至るまでの伸び変形を測定するために、渦電流式非接触変位計を用いた。

3.2 応力～ひずみ特性に及ぼすひずみ速度効果

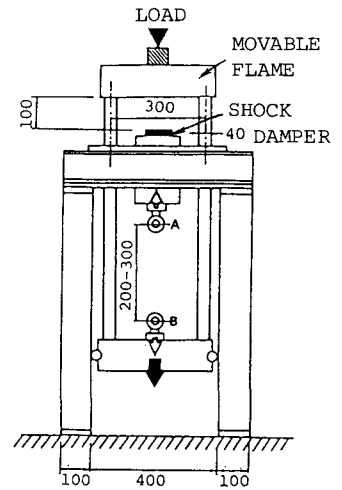
(1) 応力～ひずみ特性

ア. ひずみ0.01までの応力～ひずみ特性

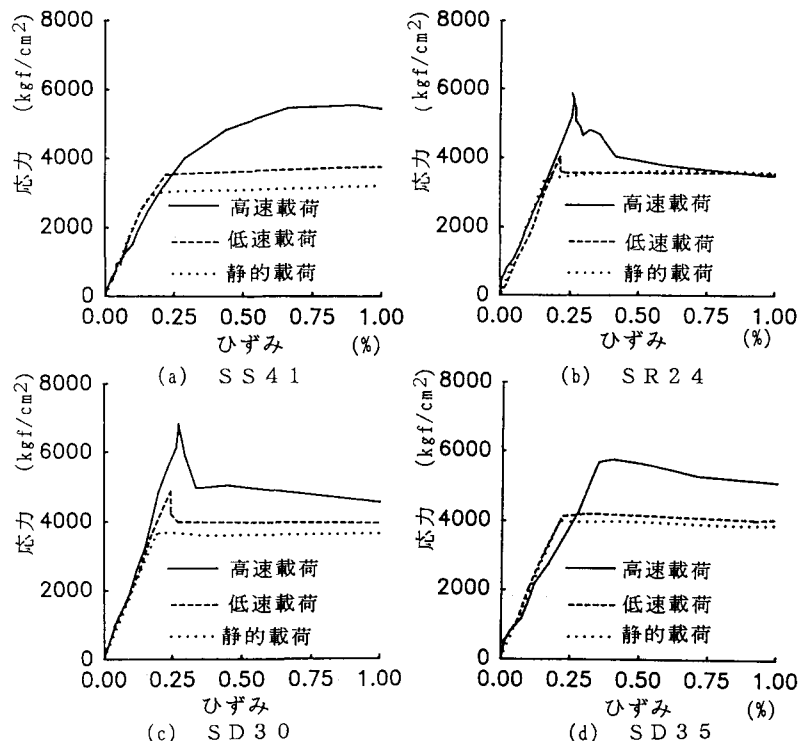
図-13に、それぞれの载荷速度について、ひずみが0.01までの応力～ひずみ特性を鋼種別に示す。図中、横軸のひずみは、試験片中央に貼付したひずみゲージにより計測されたひずみである。図から、弾性係数はいずれの鋼種とも、ひずみ速度の大小によらずほぼ一定の値を示していることがわかる。また、ひずみ速度が増大するにつれて上降伏点と下降伏点の差が明瞭になっている。とくに、鉄筋試験片(SR24, SD30, SD35)は、上降伏点に達するまでは弾性的に挙動し、上降伏点に達すると応力が急激に減少して下降伏点に至っている。これに対し鋼板試験片(SS41)は、高速载荷の場合静的载荷時の降伏点付近から緩やかな非線形曲線の形で応力が上昇している。また、上、下降伏点などの特性値は明瞭に現われない。この降伏点近傍における鉄筋試験片と鋼板試験片の応力～ひずみ特性形状の相違は、試験片形状や固定条件の相違などによるものと考えられる。

イ. 破断までの応力～ひずみ特性

図-14に、静的および高速载荷に対する破断に至るまでの応力～ひずみ特性を



図－12 引張载荷装置



図－13 ひずみ0.01までの応力～ひずみ特性

鋼種別に示す。図中に示したひずみは、試験片が破断するまでの伸びを試験前の長さで除した値であり、変位計で得られた変位量を用いて算定している。なお、図-13では降伏点近傍(ひずみ1%以下)の挙動に対して鋼種の違いによる影響が認められたが、図-14に示すように大ひずみ域(ひずみ約30%)までを対象として図示した場合は、降伏点近傍の挙動に対する鋼種の影響は顕著に現われず、いずれもほぼ同様の挙動を示している。また、高速载荷に対しては、引張強度も上降伏点および下降伏点と同様に、静的载荷に対する強度よりも大きな値を示していることがわかる。さらに、引張強度に対応するひずみおよび破断ひずみの大きさは、SD30試験片の破断ひずみを除いていずれも高速载荷を受ける場合の方が静的载荷よりも大きな値を示している。しかしながら、結果的には高速载荷に対する応力～ひずみ特性の形状はいずれの鋼種も静的载荷と類似した特徴を示す。したがって、鋼材の降伏点近傍および破断までの応力～ひずみ特性は、静的载荷に対して得られる応力～ひずみ特性の中で上降伏点、下降伏点、引張強度および破断ひずみ(または、引張強度時のひずみ)にひずみ速度の影響を単純に考慮することにより、構成することができるものとする。

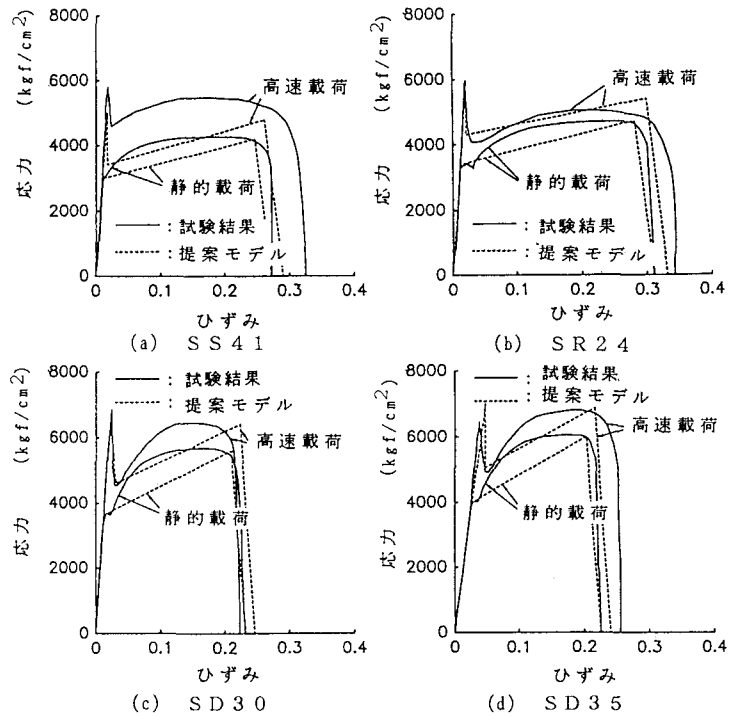


図-14 破断までの応力～ひずみ特性

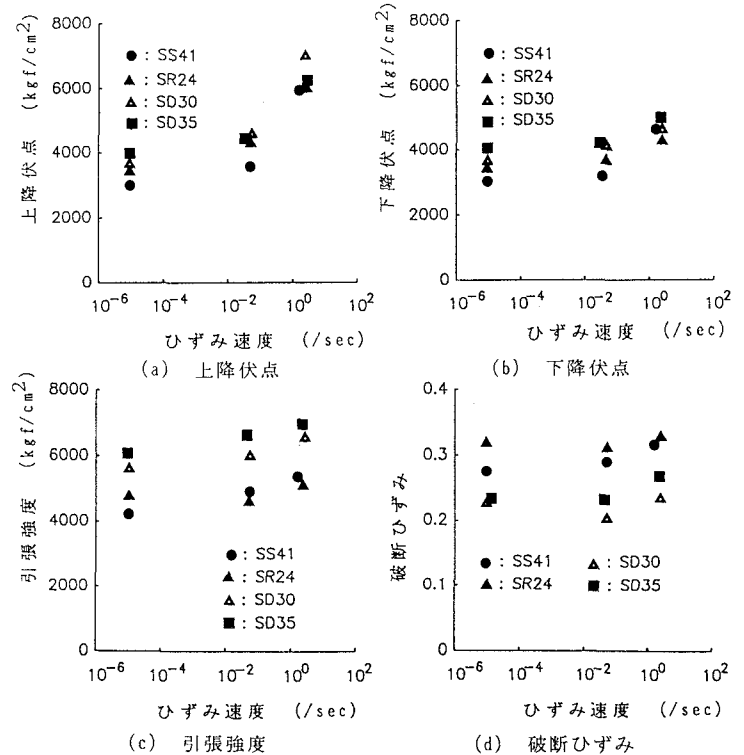


図-15 降伏点などの特性値に及ぼすひずみ速度効果

(2) 降伏点などに及ぼすひずみ速度効果

動的载荷に対する各試験片の上降伏点、下降伏点、引張強度および破断ひずみとひずみ速度の関係を、図-15に示す。図中、横軸のひずみ速度は、降伏ひずみの値をそれに至るまでの時間で除した平均ひずみ速度である。図から、降伏点などの特性値はいずれもひずみ速度の増大にともなって増加することが認められる。図-15に示したそれぞれの特性値を静的载荷に対する特性値で除した値を、変化率と定義する。各変化率とひずみ速度の関係を、図-16に示す。変化率の大きさは、いずれの場合も鋼種の相違による差は顕著でなく、ほぼ同一であるとみなしてさしつかえないと考えられる。図-16(a)から、上降伏点変化率($df_{Y,u}/sf_{Y,u}$)はひずみ速度の変化に対して曲線的に変化することが認められる。そこで、すべての鋼種の試験片に対して、上降伏点変化率とひずみ速度の関係を次式の形で定式化する。

$$df_{Y,u}/sf_{Y,u} = 10^{a_1 \cdot \log \dot{\epsilon} + b_1} + c_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)の係数 a_1 、 b_1 および c_1 は、試験結果に対して最小2乗法により求められる。本研究では、各係数の値は、 $a_1=0.380$ 、 $b_1=-0.258$ 、 $c_1=0.993$ である。

下降伏点変化率($df_{Y,l}/sf_{Y,l}$)は、高速载荷($\dot{\epsilon}=10^0/\text{sec}$ 程度)に対する鋼板(SS41)の値が鉄筋の試験結果に比べて大きい値を示しているが、全体としては、ひずみ速度の対数値の増大に対して線形的に増加するものとみなせる。そこで、下降伏点変化率については1次式を仮定して定式化する。

$$df_{Y,l}/sf_{Y,l} = a_2 + b_2 \cdot \log \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (6)$$

一方、引張強度変化率(df_{su}/sf_{su})や破断ひずみ変化率($d\epsilon_{f1}/s\epsilon_{f1}$)とひずみ速度の関係も、下降伏点と同様に、ひずみ速度の対数値の増大にともなって線形的に増加する傾向が認められる。したがって、引張強度変化率および破断ひずみ変化率についても式(6)と同様に、1次式の形で定式化する。

$$df_{su}/sf_{su} = a_3 + b_3 \cdot \log \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$d\epsilon_{f1}/s\epsilon_{f1} = a_4 + b_4 \cdot \log \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(6)～(8)の係数 $a_2 \sim a_4$ 、 $b_2 \sim b_4$ は、最小2乗法で求められたもので、表-5に示している。

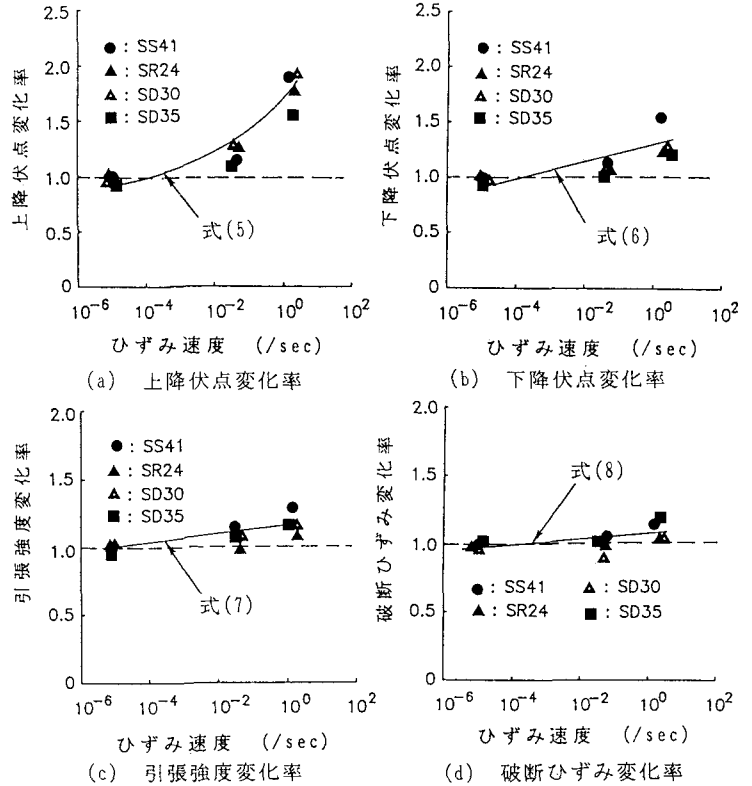


図-16 降伏点などの特性値変化率に及ぼすひずみ速度効果

表-5 回帰式の係数

式	a	b
(6)	1.202	0.040
(7)	1.172	0.037
(8)	1.044	0.013

(3) ひずみ速度効果を考慮した動的応力～ひずみ特性式

動的载荷に対する鋼材の応力～ひずみ特性の形状およびひずみ速度効果を考慮した動的特性値の推定式に基づいて、破断に至るまでの鋼材の応力～ひずみ特性の定式化を行う。実際の応力～ひずみ特性は図-14に示すように複雑な曲線と与えられるが、構造解析を行う際に力学的に重要となるのは上降伏点、下降伏点、引張強度および破断ひずみなどの特性値である。そこで、応力とひずみの関係をできるだけ簡便な形で表示するために、これらの特性値間は1次式で与えることにすれば、次のように表される。また、図に示せば図-17のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon & : \varepsilon < d\varepsilon_{y,u} \\ d f_{y,u} \leq \sigma &\leq d f_{y,l} & : \varepsilon = d\varepsilon_{y,u} \\ \sigma &= d f_{y,l} + (d f_{su} - d f_{y,l}) \cdot (\varepsilon - d\varepsilon_{y,u}) / (d\varepsilon_{su} - d\varepsilon_{y,u}) & : d\varepsilon_{y,u} < \varepsilon \leq d\varepsilon_{su} \\ \sigma &= d f_{su} - d f_{su} \cdot (\varepsilon - d\varepsilon_{su}) / (d\varepsilon_{fl} - d\varepsilon_{su}) & : d\varepsilon_{su} < \varepsilon \leq d\varepsilon_{fl} \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

ただし、 $d\varepsilon_{y,u} = d f_{y,u} / E$ 、 $d\varepsilon_{su} = 0.9 \cdot d\varepsilon_{fl}$

なお、特性式のモデル化にあたっては、以下の仮定および条件を設定した。

- ① 弾性係数は、ひずみ速度の大小にかかわらず一定とする。
- ② 下降伏点からひずみ硬化開始に至る領域、いわゆる降伏棚については考慮しない。
- ③ 引張強度に対応するひずみを試験結果から特定することは困難なため、本研究では破断ひずみの90%の値を引張強度に対応するひずみ($d\varepsilon_{su} = 0.9 \cdot d\varepsilon_{fl}$)と仮定する。

試験結果と比較するために、式(9)を用いて算定した応力とひずみの関係を図-14中に破線で示している。破壊に至るまでの部材の力学特性(降伏耐力、終局耐力、終局変位など)を把握するためには、主として材料の応力とひずみの関係を特徴づける降伏点や引張強度などの特性値が十分反映されたモデルを用いることが重要である。本研究では、各特性値間を直線で折線近似した簡便な応力～ひずみ特性モデルを解析に用いている。なお、応答の詳細を調べる場合などには、ひずみ硬化域の形状を適当な曲線で近似したモデルを用いることが必要であると考える。

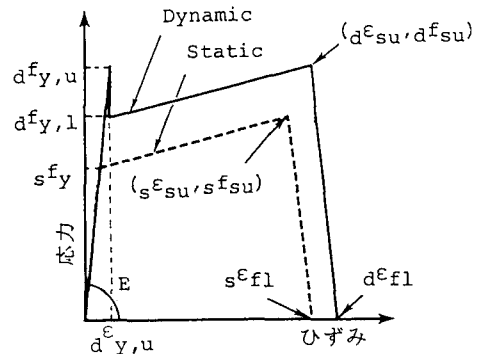


図-17 鋼材の動的応力～ひずみ特性モデル

4. 離散化多質点系モデルによるRCはりの衝撃応答解析

4.1 ひずみ速度効果を考慮したRC断面の曲げ解析

離散化多質点系モデルを用いたRCはりの衝撃応答解析を行うためには、まず第一に材料のひずみ速度効果を考慮したRC断面の曲げモーメント～曲率関係を求めなければならない。なお、弾性域を越えたRCはりの挙動に対して、鉄筋とコンクリートとの付着特性などが影響を及ぼすことが知られている。しかしながら、この影響を解析に導入することは容易ではなくまた本研究では主として曲げの影響を基本的に調べることを目的としている。そこで、断面の平面保持の仮定に基づいた曲げ解析手法の一つである断面分割法¹⁴⁾を用いて、曲げモーメント～曲率関係を算定する。以下に、曲げ解析の概要を示す。

図-18は、RCはり断面内の応力とひずみの分布を表したものである。まず、図に示すように与えられた断面に対して中立軸を仮定すると、中立軸から距離 x 離れた点のひずみの大きさ ε は、断面に作用する曲率 ϕ との積で次のように表される。

$$\varepsilon = \phi \cdot x \dots\dots\dots (10)$$

また、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ についても式(10)と同様に曲率速度 $\dot{\phi}$ を用いて、次式で表される。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\phi} \cdot x \quad \dots\dots\dots(11)$$

したがって、断面の ϕ および $\dot{\phi}$ を与え、中立軸を仮定することにより、断面内の任意位置における ϵ および $\dot{\epsilon}$ を求めることができる。次に、それぞれのひずみ ϵ およびひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ をコンクリートおよび鉄筋のひずみ速度効果を考慮した動的応力～ひずみ特性式(2)～(4)および式(9))に代入することにより、

動的載荷時のそれぞれの応力が算定できる。算定されたそれぞれの応力を用いて断面内の引張合力(T)および圧縮合力(C)を求め、CとTのつり合い判定(C=T)を行うことにより、中立軸を決定する。同様にし、曲率 ϕ を逐次増分させることにより、任意の曲率速度 $\dot{\phi}$ に対する曲げモーメント～曲率関係が算定できる。

図-19に、解析で求められた曲げモーメント～曲率関係を示す。図-19(a)は、降伏曲げモーメント近傍の結果を、図-19(b)は引張鉄筋が破断するまでの結果を示している。解析では、引張鉄筋が引張強度に達した時点で破断して終局限界状態に至るように条件を設定している。解析に用いたRCはりの形状・寸法などを、図-20に示す。また、ここでは引張鉄筋の破断で終局限界状態に達するように、コンクリートの最大応力以降の応力低下はないものと仮定している。なお、この仮定はコンクリートの最大応力以降の応力状態が曲げモーメント～曲率関係に及ぼす影響は

ほとんど無視できる、という別途行った研究¹⁵⁾に基づいたものである。図-19(a)から、弾性時曲げ剛性に対しては曲率速度 $\dot{\phi}$ の影響はほとんど無いことが認められる。また、上降伏曲げモーメントは、曲率速度が $\dot{\phi} = 10^{-1}/(\text{cm} \cdot \text{sec})$ 以上で顕著に生じているが、それより小さい曲率速度では認められない。下降伏曲げモーメントの上昇割合は、曲率速度の対数値に対応してほぼ等間隔であり、両者には線形関係があることが認められる。また、終局曲げモーメントおよび終局曲率についても下降伏曲げモーメントと同様であり、曲率速度の対数値に対して線形関係がある。そこで、下降伏曲げモーメント、終局曲げモーメントおよび終局曲率のそれぞれに対して、静的載荷に対する増加率(d/s)と曲率速度の対数値との関係を線形とみなして定式化すると、次式が得られる。

$$d/s = a + b \cdot \log \dot{\phi} \quad \dots\dots\dots(12)$$

それぞれの係数aおよびbを、表-6に示す。また、表-6には、式(6)～(8)で求められた鋼材の下降伏点変化率などに関する係数も併記してある。表-6から、

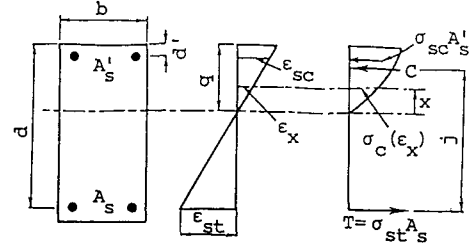


図-18 RCはり断面内の応力およびひずみ分布

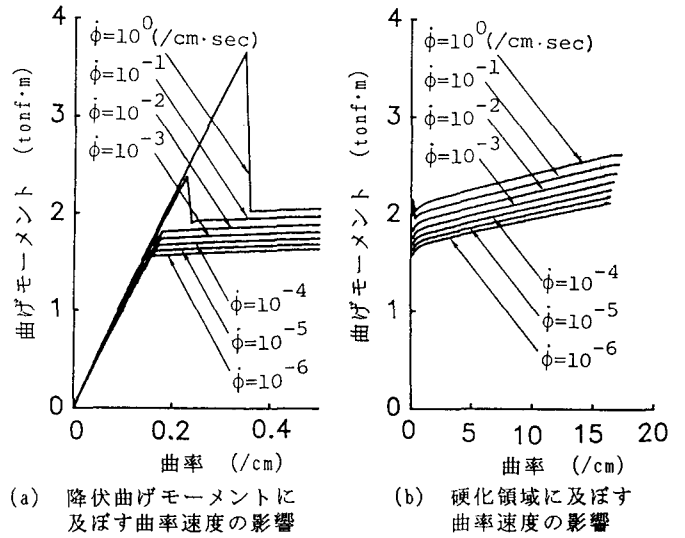


図-19 曲げモーメント～曲率関係に及ぼす曲率速度の影響

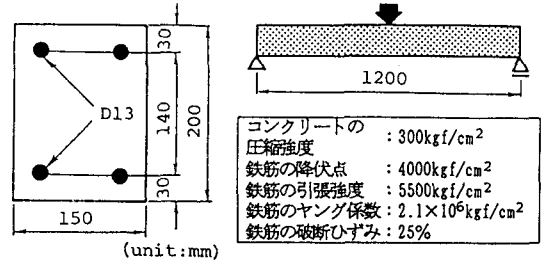


図-20 解析に用いたRCはりの諸元

各係数は、下降伏曲げモーメントに対しては鋼材の下降伏点、終局曲げモーメントに対しては引張強度、また、終局曲率に対しては破断ひずみがほぼ等しくなっており、鉄筋のひずみ速度依存性がひずみ速度の影響を受けるRC断面のそれぞれの特性値の変化率に対して極めて大きな影響を及ぼすことが認められる。

表-6 回帰式の係数比較

R C はり	a	b	鋼 材	a	b
下降伏曲げモーメント	1.243	0.041	下降伏点	1.202	0.040
終局曲げモーメント	1.218	0.037	引張強度	1.172	0.037
終局曲率	1.090	0.013	破断ひずみ	1.044	0.013

4.2 離散化多質点系モデルを用いた解析法の概要

実際のはり部材は、連続した質量と剛性を有するが、これを図-21に示すような任意長の剛体で質量を持たないパネル要素に分割し、パネル要素が持つ質量と剛性の1/2ずつを隣接するパネル要素の分割点に集中させる。分割点*i*における力のつり合いから、次に示す運動方程式が導かれる(図-22(a)参照)。

$$m_i \ddot{y}_i = P_i + (M_{i+1} - M_i) / l_{i+1} - (M_i - M_{i-1}) / l_i \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 m_i 、 $\ddot{y}_i$ 、 P_i 、 l_i および M_i は、それぞれ分割点*i*における集中質量、応答加速度、外力、パネル要素*i*の長さおよび分割点*i*における作用曲げモーメントである。次に、図-22(b)に示す幾何学的関係から次の変形適合条件が得られる。

$$\theta_i = -y_{i-1} / l_i + y_i \cdot (1/l_i + 1/l_{i+1}) - y_{i+1} / l_{i+1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 θ_i および y_i は、それぞれ分割点*i*の回転角および変位である。

また、 $l_i/2$ から $l_{i+1}/2$ までの区間の曲率 ϕ_i を一定と仮定すれば、分割点*i*の回転角 θ_i は次のように表される。

$$\theta_i = \phi_i (l_i + l_{i+1}) / 2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

式(15)を式(14)に代入すれば、分割点*i*における曲率と変位の関係が次のように得られる。

$$\phi_i = 2 \{ -y_{i-1} / l_i + y_i \cdot (1/l_i + 1/l_{i+1}) - y_{i+1} / l_{i+1} \} / (l_i + l_{i+1}) \quad \dots\dots (16)$$

同様に、分割点*i*における曲率速度と変位速度との関係が次式で表される。

$$\dot{\phi}_i = 2 \{ -\dot{y}_{i-1} / l_i + \dot{y}_i \cdot (1/l_i + 1/l_{i+1}) - \dot{y}_{i+1} / l_{i+1} \} / (l_i + l_{i+1}) \quad \dots\dots (17)$$

また、解析に用いる曲げモーメント～曲率の履歴モデルを、図-23に示す。図中の、下降伏曲げモーメント(${}_dM_{y,1}$)、終局曲げモーメント(${}_dM_u$)および終局曲率(${}_d\phi_u$)は、式(12)で与えられる。なお、上降伏曲げモーメントに及ぼす曲率速度の影響は考慮していない。衝撃応答解析における数値積分には、Newmarkの β 法($\beta = 1/6$)を用い、時間増分は $\Delta t = 0.0001 \text{sec}$ とした。

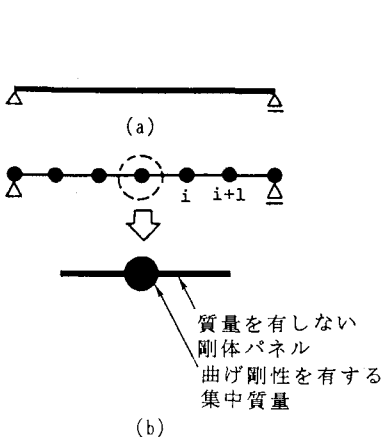


図-21 離散化多質点系モデル

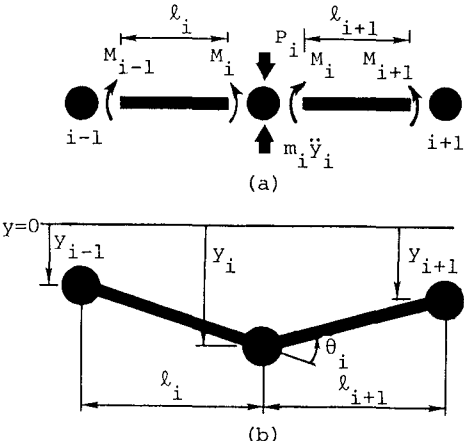


図-22 パネル要素の力のつり合いおよび変形適合条件

4.3 解析結果

ここでは、衝撃力を受けるRCはりの弾塑性応答に及ぼすひずみ速度の影響について簡単例を用いて検討する。解析に用いたRCはりの諸元を図-20に示す。衝撃外力は、図-24(a)に示すように三角波と台形波を合成した単純な形状とした。これは、RCはりに鋼製重錘を衝突させた場合などに得られる荷重～時間曲線を理想化したものである。図-24(b)に、載荷点変位～時間関係を示す。図中の実線は、材料のひずみ速度効果および降伏曲げモーメント以降の曲げモーメントの上昇を考慮した結果である。破線は、材料のひずみ速度効果は考慮しているが、降伏曲げモーメント以降の曲げモーメントの上昇を考慮しない場合の結果であり、点線はいずれも考慮していない場合の結果を示す。図から、それぞれの応答の違いが顕著に認められる。ここで示した解析例での最大変位量を比較すると、ひずみ速度効果と曲げモーメントの上昇の両者を考慮した場合の結果に比し、ひずみ速度効果は考慮しているが曲げモーメントの上昇を考慮しない場合は約1.2倍、いずれも考慮しない場合は約2倍大きな値を示している。

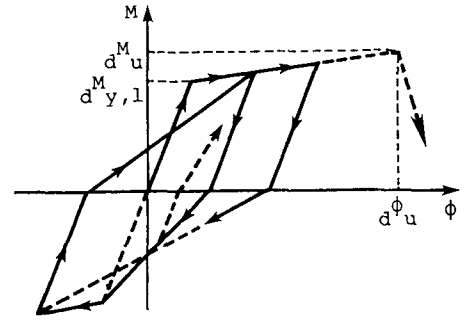


図-23 曲げモーメント～曲率の履歴モデル

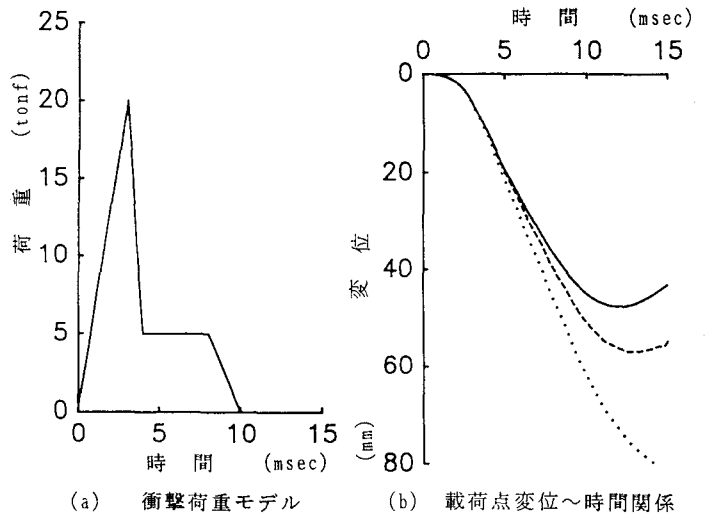


図-24 解析結果

5. まとめ

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはり部材の弾塑性挙動を調べる場合には、鉄筋コンクリートの構成材料であるコンクリートおよび鋼材の動的応力～ひずみ特性の定量的評価が重要な問題となる。本研究は、まずコンクリートおよび鋼材を対象として、載荷速度を各種変化させた1軸圧縮試験および引張試験を行い、各材料の弾塑性挙動や応力とひずみの関係の特徴づける特性値について検討を行った。次に試験結果に基づいて、ひずみ速度が圧縮強度などの大きさに及ぼす影響を定量的に把握するとともに、動的載荷に対する応力とひずみの関係の定式化を行った。また、得られた動的応力～ひずみ特性を離散化多質点系モデルによる数値解析法に導入して、衝撃荷重を受けるRCはりの弾塑性応答に及ぼすひずみ速度の影響を調べた。本研究で得られた成果は、以下のように要約できる。

- (1) コンクリートおよび鋼材を対象とした高速載荷試験に基づいて、ひずみ速度の影響を考慮したコンクリートおよび鋼材の動的応力～ひずみ特性を定式化した。
- (2) 本研究で得られた材料の動的応力～ひずみ特性を、慣用の離散化多質点系モデルを用いたRCはりの数値解析法に導入することにより簡便に衝撃応答解析を行うことができる。数値解析の結果から、ひずみ速度効果および降伏曲げモーメント以降の曲げモーメントの上昇を考慮するか否かによって、応答値の大きさが顕著に異なることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 竹田仁一・立川博之：高速圧縮荷重をうけるコンクリートの力学的諸性質とその基本的関係式(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4)日本建築学会論文報告集，第78号，pp.1～6，昭和37年10月
- 2) 岩井・吉田・中村・若林：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究(その1 コンクリートと鋼材の応力-歪関係に及ぼす歪速度の影響)，日本建築学会論文報告集，第314号，pp.102～111，昭和57年4月
- 3) 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
- 4) Soroushian, P., Choi, K. and Alhamad, A. : Dynamic Constitutive Behavior of Concrete, ACI Journal, Vol. 83, pp. 251～259, March-April 1986
- 5) ACI Committee 439 : Effect of Steel Strength and of Reinforced Ratio on The Mode of Failure and Strain Energy Capacity of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal pp. 165～172, 1969.
- 6) 睦好宏史・町田篤彦：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究，土木学会論文集，第354号/V-2，pp. 81～90，1985. 2
- 7) 金多・甲津・藤村・篠原・木上：高速載荷時の鋼構造接合部の力学的挙動に関する実験的研究 その1 鋼素材，突合せ溶接接合部，高力ボルト摩擦接合部の載荷実験，日本建築学会構造系論文報告集，第359号，pp. 84～92，1986. 1.
- 8) 青木・加藤・難波・佐藤：変断面鋼板引張材の変形能力に及ぼす試験温度，ひずみ速度の影響，日本建築学会論文報告集，第322号，pp. 11～19，1982. 12.
- 9) 高橋芳彦・大野友則・丸山貴司・内田 孝：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，構造工学論文集，Vol. 36A，pp. 1141～1152，1990. 3.
- 10) Hognestad, E. : A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, Bulletin, No. 399, Univ. of Illinois, Engineering Experiment Station, Urbana, pp. 128, Nov. 1951
- 11) Popovics, S. : Factors Affecting the Elastic Deformations of Concrete, Proc. of the International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Vol. IV, Kyoto, pp. 172～183, Aug. 1971
- 12) 梅村 魁：鉄筋コンクリート梁の塑性変形及び終局強度，日本建築学会論文報告集，第42号，1951. 2
- 13) 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.
- 14) Park, R., Kent D. C. and Sampson R. A. : Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading, Proc. of ASCE, ST7, July 1972.
- 15) 高橋芳彦・太田俊昭・日野伸一・大野友則：高強度コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成版型部材の静的弾塑性挙動と終局限界性能，構造工学論文集，Vol. 35A，pp. 1245～1258，1989. 3.

(1990年10月12日受付)