

防衛大学校 ○学生員 松本憲幸 正 員 高橋芳彦 正 員 大野友則
九州大学 正 員 太田俊昭 正 員 日野伸一

1. はじめに

R C 部材などの耐衝撃性を定量的に評価するためには、まず第一に、これらの部材を構成する鉄筋などの鋼材やコンクリート材料の動力学特性を明らかにしなければならない。とくに、R C 部材などの耐衝撃性は最大荷重のみならず、降伏荷重に達した以降の変形量(靱性)も極めて重要な要因であると考えられる。したがって、鋼材の場合には降伏点や引張強度のほか、ひずみ硬化域における応力(σ)～ひずみ(ϵ)関係の特性や破断ひずみなどについてもひずみ速度($\dot{\epsilon}$)の影響を明らかにすることが必要である。

そこで本研究では、鋼板(1種類)および鉄筋(3種類)を対象として、載荷速度を3種類に変化させた引張実験を行い、鋼素材の動力学特性について調べた。さらに、降伏点などの大きさに及ぼすひずみ速度効果を定量的に評価し、それらの結果に基づいて最も簡単な鋼材の動的 $\sigma \sim \epsilon$ 関係モデルを提案した。

2. 実験概要

実験は、表-1に示すように鋼種が異なる鋼板(SS41)および鉄筋(SR24, SD30, SD35)の合計4種類の鋼素材を用いて行った。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} /sec)の3種類の載荷速度とした。高速および低速載荷は、図-1に示す引張載荷装置を高速変形負荷装置に取り付けて行った。高速載荷および低速載荷実験用の試験片を、図-2に示す。変位の計測には、渦電流式非接触変位計を用いた。

表-1 試験片の種類	
鋼板	SS41
	SR24
鉄筋	SD30
	SD35

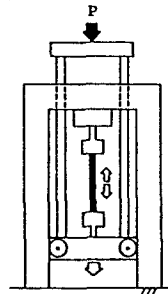


図-1 引張載荷装置

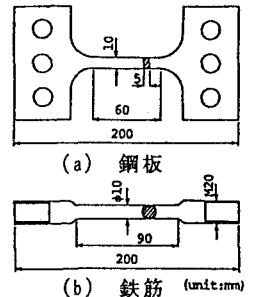


図-2 試験片の形状・寸法 (unit:mm)

3. 実験結果

(1) $\sigma \sim \epsilon$ 関係 図-3に、高速および静的載荷を受ける場合について、破断に至るまでの各鋼素材の $\sigma \sim \epsilon$ 関係の一例を鋼種別に示す。図中に示したひずみは、非接触変位計で得られた変位から求めたものである。すなわち、試験片が破断したときの伸びを破断ひずみと定義し、試験片全体の伸びをひずみに変換している。高速載荷に対する $\sigma \sim \epsilon$ 関係をみると、いずれの鋼種もひずみ速度効果による上降伏点の著しい上昇が認められる。また、ひずみ硬化領域における形状は、いずれも静的載荷とほぼ等しいひずみ硬化特性を示している。したがって、静的載荷を受ける場合の上降伏点、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って、載荷速度の変化にともなう鋼材の $\sigma \sim \epsilon$ 関係のモデルを構成することができる。

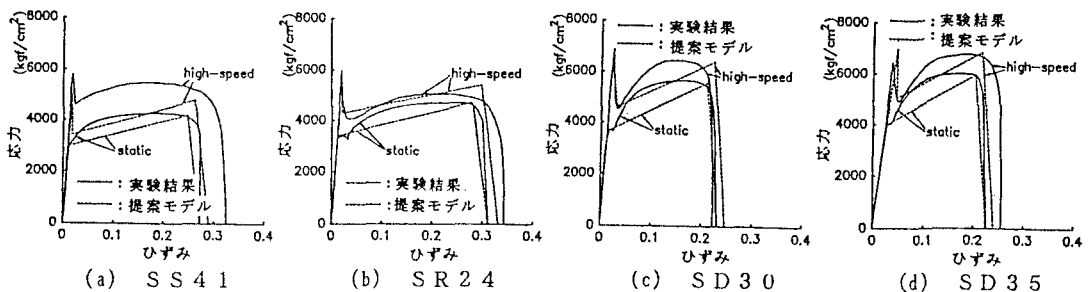


図-3 応力～ひずみ関係

(2) 降伏点などに及ぼすひずみ速度効果の定量評価 動的載荷に対するそれぞれの試験片の上降伏点、下降伏点、引張強度および破断ひずみの静的載荷に対する変化率とひずみ速度の関係を、図-4(a)～(d)に示す。なお、ひずみ速度は、降伏ひずみの値を載荷開始から降伏ひずみに達するまでの時間で除して求めたものである。図-4(a)および(b)から明らかなように、ひずみ速度の増大にともなって上降伏点および下降伏点は増大する傾向が認められる。また、この増加傾向は、既往の研究結果¹⁾とほぼ同様である。一方、引張強度および破断ひずみについても下降伏点と類似の傾向が認められる。すなわち、上降伏点変化率($d f_{y,u} / s f_{y,u}$)については、既往の研究で提示した式(1)で表わすことができる。式(1)中の係数は、本実験結果に対して最小自乗法により求めた。また、下降伏点の変化率(d/s)も既往の研究結果と同様であり、式(2)で表わすことができるものとみなす。引張強度および破断ひずみの変化率(d/s)をひずみ速度の対数値との関係で表わせば、これらの間にはほぼ線形関係がある。したがって、下降伏点に対する関係式とまったく同様に式(2)で表わすことができる。なお、本実験で得られた下降伏点などに対する結果に基づいて最小自乗法で求めた式(2)の係数 a および b は、表-2に示すとおりである。

$$d f_{y,u} / s f_{y,u} = 10^{0.3796 \cdot \log \dot{\epsilon} - 0.2579} + 0.993 \quad (1)$$

$$d / s = a + b \cdot \log \dot{\epsilon} \quad (2)$$

表-2 式(2)の係数

	a	b
下降伏点	1.244	0.056
引張強度	1.135	0.029
破断ひずみ	1.060	0.016

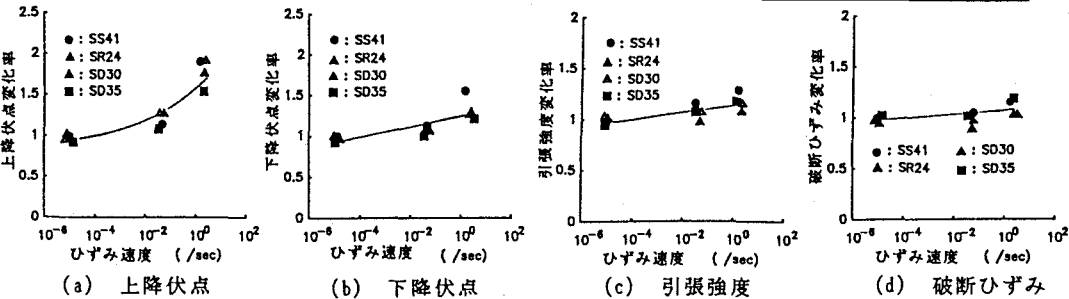


図-4 降伏点などに及ぼすひずみ速度の影響

4. 動的 $\sigma \sim \epsilon$ 関係モデル

動的載荷に対する $\sigma \sim \epsilon$ 関係の形状特性およびひずみ速度効果を考慮した降伏点などの算定式に基づいて、破断に至るまでの鋼素材の $\sigma \sim \epsilon$ 関係のモデル化を行った。このモデルを最も単純な直線近似として表示すると、図-5のようになる。モデル化にあたっては、①ヤング係数は、ひずみ速度の大小にかかわらず一定である。②ひずみ速度が上、下降伏点、引張強度および破断ひずみの大きさに及ぼす影響は、式(1)および式(2)で与えられる。③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ものとする。④引張強度時のひずみは、本実験の結果からは明確に得られなかったので、破断ひずみの90%の大きさに相当するものと仮定する。このモデルを用いて算定した $\sigma \sim \epsilon$ 関係を、図-3中に破線で示す。図から、ひずみ硬化領域において上に凸の曲線を直線近似しているために実験結果との対応が不十分であることがわかる。しかしながら、 $\sigma \sim \epsilon$ 関係を特徴づける上、下降伏点および引張強度の値についてはほぼ良好に算定することができるので、動的解析のための簡便な動的 $\sigma \sim \epsilon$ モデルとして用いることができるものとする。なお、ひずみ硬化領域の形状を適当な曲線で近似すれば、実際の特性をさらに良好にシミュレートできるものとする。

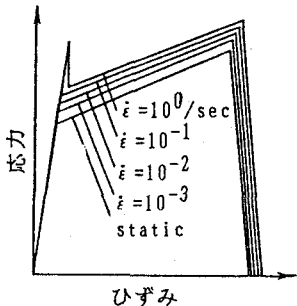


図-5 動的応力～ひずみ関係モデル

1) 高橋ほか：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