

## 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

A FLEXURAL RESPONSE ANALYSIS CONSIDERING STRAIN RATE EFFECT  
OF REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER IMPACT LOAD

高橋 芳彦\* 塩治 長\*\* 大野 友則\*\*\* 石川 信隆\*\*\*\* 内田 孝\*\*\*\*

By Yoshihiko TAKAHASHI, Nagashi ENYA, Tomonori OHNO,  
Nobutaka ISHIKAWA and Takashi UCHIDA

This paper presents a practical approach for the flexural response analysis of reinforced concrete(RC) beams under impact load. The bending moment( $M$ )-curvature( $\phi$ ) relation of RC section is first derived by taking account of rate effects. Then, the behaviour of RC beams under impact load are analyzed by using the discrete model(so-called Wen model) and the idealized degrading  $M$ - $\phi$  relation. The proposed analysis procedure is examined by the experiment dropping a hammer. Furthermore, by comparing this method with the results of available tests, it is confirmed that this approach is applicable to evaluate the dynamic loading problem of RC beams.

### 1 序言

原子力発電所・重化学工業プラントなど社会や産業の基幹となる施設あるいは海洋・砂防構造物および山間道路防護施設などの設計にあたっては、地震や風などに対して十分な安全性を有するとともに万一の発生が予想される施設内外からの飛来物や落下物による衝撃荷重に対してもその安全性を確保することが要求される。構造物が物体の衝突によって衝撃荷重を受けた場合、その応答は衝突する物体の質量・速度・剛性・形状などによって大きく異なるため、構造物の衝撃応答を明らかにすることは極めて困難な問題であると言われている<sup>1), 2)</sup>。

地震のような動的荷重を受ける鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物については動的解析法の進歩もあり、耐震設計法はほぼ確立されているものと考えられる。一方、衝撃荷重のようにその荷重速度が非常に大きいものに対するRC構造物の応答に関しても、これまで国内外においてかなり多くの実験的・理論的研究

---

|      |                  |       |                    |
|------|------------------|-------|--------------------|
| *    | 防衛大学校理工学研究科学生    | (〒239 | 神奈川県横須賀市走水1-10-20) |
| **   | 防衛施設庁東京施設局       | (〒107 | 東京都港区赤坂9-7-45)     |
| ***  | 防衛大学校土木工学教室研究員   | (〒239 | 神奈川県横須賀市走水1-10-20) |
| **** | 工博 防衛大学校土木工学教室教授 | (〒239 | 神奈川県横須賀市走水1-10-20) |

が行われており<sup>3)</sup>、欧米諸国では、すでに各種の実験等による研究成果を生かして航空機落下に対する原子炉建屋の耐衝撃設計が義務づけられている<sup>4)</sup>。わが国では、主として山岳道路の防災施設として用いられる落石覆の耐衝撃設計に資するため、落石の衝撃力の推定などに関する理論的および実験的研究が数多くなされている<sup>5)</sup>。しかし、衝撃的外力を対象とするときは、材料に生ずる応力～ひずみ関係および破壊といった現象が静的外力の場合と異なり、部材の衝撃挙動に対しては通常の動的解析手法をそのまま適用できない場合が多い。すなわち、耐衝撃設計は衝撃的外力とそれを受ける構造物との相互関係を考察しなければならないという難しさがあり<sup>6)</sup>、設計法を確立するためにはまだ残された問題が多い。

本研究は、衝撃に対するRC構造物の耐衝撃設計法を開発するため、その第一段階として衝撃応答解析法について検討を行ったものである。従来、衝撃を受けるRCはり部材の力学的挙動を解明した研究としては、藤井ら<sup>7)</sup>の有限要素法を用いた衝撃応答解析に関するものがあるが、ひずみ速度効果を取り入れるまでは至っていない。また、設計法に直接結びつける観点から、解析法としてはRCはりの衝撃挙動を近似的に把握できかつできるだけ取り扱いが簡便であることが望ましい。

本研究は、上記のような観点から、まずひずみ速度効果を考慮したRCはりの曲げモーメント～曲率関係を導き、次いでこれをモデル化したうえで、離散化モデル（以下、Wen モデル<sup>8)</sup>）を用いた数値解析法に拡張したRCはりの衝撃応答解析法を提示するものである。さらに、両端が単純支持された単鉄筋コンクリートはりに落下衝撃荷重が作用する場合について弾塑性域での実験を行い、数値解析による結果と比較検討するとともに、既往の複鉄筋コンクリートはりの高速載荷実験結果と比較することにより、本研究で提示した数値解析法の妥当性と適用性を調べたものである。

## 2 ひずみ速度効果を考慮した衝撃曲げ応答解析法

### 2.1 ひずみ速度効果を考慮した鉄筋およびコンクリートの応力～ひずみ関係

構造物の材料は、ひずみ速度の増大とともに応力が上昇する特性があり、高速変形のときの材料の応力～ひずみ関係は通常の静的試験で得られたものとは異なった結果を与えることが知られている<sup>6)</sup>。すなわち、衝撃荷重を受ける材料の変形挙動を推定するためには高速変形に対する材料の応力～ひずみ関係が必要であり、部材の衝撃挙動を調べるためにはひずみ速度効果 (rate effect) を考慮した動的解析法によらなければならない<sup>1)</sup>。そこで本研究では、ひずみ速度効果を考慮したRCはりの衝撃応答解析を行うため、まずひずみ速度の影響を導入した応力とひずみの関係式を定式化した。

#### (1) 鉄筋の応力とひずみの関係式

RCの主要材料である鋼材の高速荷重に対する物理的性質に関しては、これまで数多くの実験的研究が行われており、静荷重引張り速度の  $2 \times 10^4$  倍程度までの性状が明らかにされている<sup>9)</sup>。ACI の報告<sup>10)</sup> によれば、ひずみ速度効果は鉄筋の上および下降伏点の上昇に影響をおよぼし、縦弾性係数にはほとんど影響しないことが報告されている。Fig.1 は、文献 10) に示されている鉄筋の上および下降伏点の上昇に関して行われた過去の実験研究の結果である。Fig.1(a)は、鉄筋の上降伏点の上昇率（静的載荷時の降伏点に対する高速載荷時の降伏点の比）をひずみ速度の関係で表わしたものである。Fig.1(b)は、同様に下降伏点の上昇率をひずみ速度の関係で表わしたものである。Fig.1(a)に示した実験結果に基づいて、上降伏点の上昇率とひずみ速度の関係式を次のような形で仮定した。

$$\sigma_{sy,u} / \sigma_{sv,u} = 10^{a_1 \log \dot{\epsilon} + b_1} + c_1 \quad \text{----- (1)}$$

また、Fig.1(b)に示した下降伏点の上昇率に対する実験結果をみると、降伏点の上昇率と対数表示したひずみ速度の間にはほぼ線形的関係があるので、これを次式で仮定した。

$$\frac{d\sigma_{sy,l}}{s\sigma_{sy,l}} = a_2 \log \dot{\epsilon} + b_2 \quad \text{----- (2)}$$

式(1),(2)の各係数は、最小2乗法により決定した。ここで、 $\dot{\epsilon}$  はひずみ速度、 $\sigma_{sy,u}$ 、 $\sigma_{sy,l}$  はそれぞれ上および下降伏点、添字  $d, s$  はそれぞれ高速載荷および静的載荷を表わしている。最小2乗法によって得られた各係数の値は、 $a_1 = 0.1524, b_1 = -1.3394, c_1 = 0.9350, a_2 = 0.0403, b_2 = 0.9597$  である。式(1),(2)で表わされる回帰曲線にこれらの数値を代入して応力比～ひずみ速度曲線を計算すれば、Fig.1(a),(b)中に示した実線のようにになる。なお、求められた回帰曲線に対する標準偏差  $S$  は、式(1)では  $S = 0.050$ 、式(2)では  $S = 0.051$  である。また、本研究では文献10)の実験データに基づいて定式化しており、ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  の範囲は、 $\dot{\epsilon} = 10^{-6} - 10^2$  (/sec) である。

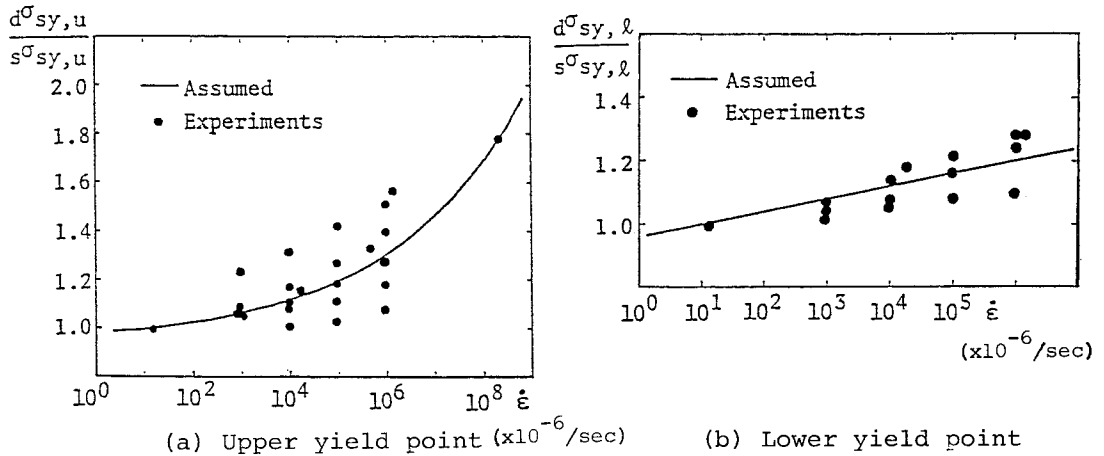


Fig. 1 Effect of strain rate on yield stress of steel reinforcing bars.<sup>10)</sup>

## (2) コンクリートに対するひずみ速度効果

RCのもう一つの主要な材料であるコンクリートのひずみ速度効果に関する研究は国内外において古くから行われている。とくに、竹田ら<sup>11)-13)</sup>は、高速荷重を受けるコンクリートの力学的性質に関する一連の研究成果を報告している。

本研究では、竹田ら<sup>14)</sup>によって提示されたコンクリートの圧縮強度と平均荷重速度の関係式、最大応力度に対応するひずみ度と平均ひずみ速度の関係式および平均荷重速度と平均ひずみ速度の関係式に基づいて、さらにコンクリートの圧縮強度上昇率とひずみ速度の関係式を次のように定式化した。

$$\frac{d\sigma_c}{s\sigma_c} = \frac{\alpha + \beta \log(a' \dot{\epsilon}) + \gamma (\log(a' \dot{\epsilon}))^m}{\alpha + \beta \log(a' \dot{\epsilon}_s) + \gamma (\log(a' \dot{\epsilon}_s))^m} \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 $\alpha, \beta, \gamma, a'$  はコンクリートの種類によって定まる係数<sup>14)</sup>、 $m$ はポアソン数、 $s\sigma_c$  は静的圧縮強度、 $\dot{\epsilon}_s$  は静的載荷時のひずみ速度 ( $\dot{\epsilon}_s = 10^{-5}$  /secとする) である。また、ひずみ速度効果を考慮した応力～ひずみ関係式は動的載荷時のコンクリート圧縮強度  $d\sigma_c$  を梅村のe関数式<sup>17)</sup>に導入することにより次のように表わされる。

$$\sigma = d\sigma_c \cdot R \{ e^{-\alpha'(\epsilon/\epsilon_1)} + e^{-\beta'(\epsilon/\epsilon_1)} \} \quad \text{----- (4)}$$

ただし、

$$\epsilon_1 = \alpha_1 + \beta_1 \log \dot{\epsilon} + \gamma_1 (\log \dot{\epsilon})^{m_1}$$

ここに、 $K, \alpha', \beta'$  はコンクリートの種類によって定まる係数<sup>17)</sup> であり、ひずみ速度の影響は受けないものと仮定する。 $\epsilon_1$  は動的載荷時の最大応力に対応するひずみ、 $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, m_1$  はコンクリートの種類による係数<sup>14)</sup> である。また、引張強度に対するひずみ速度の影響について、Körmeling ら<sup>15)</sup> は過去の実験結果を整理して、それをFig.2 のように報告している。Fig.2 に示した実験結果に対して、1次式を仮定して<sup>16)</sup> 回帰直線を求めれば、静的引張強度に対する強度の上昇率がひずみ速度の関係式として次のように表わされる。なお、実験でのコンクリートに対するひずみ速度の試験範囲は、圧縮の場合  $\dot{\epsilon} = 10^{-6} - 10^1$  (/sec)、引張の場合  $\dot{\epsilon} = 10^{-9} - 10^{-1}$  (/sec) 程度である<sup>9), 14)</sup>。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{st}} = 0.10 \log \dot{\epsilon} + 1.10 \quad \text{----- (5)}$$

なお、式(5) で与えられる回帰式の標準偏差は 0.273である。

2.2 ひずみ速度効果を考慮したRCはりの任意断面における  
曲げモーメント～曲率関係

ひずみ速度効果を考慮したRCはり断面の曲げモーメント (M) ～曲率 ( $\phi$ ) 関係を求めるには、静的載荷に対して得られるM～ $\phi$ 関係に前節で定式化した鉄筋およびコンクリートの応力～ひずみ関係を導入すればよい。したがって、ひずみ速度効果を考慮したM～ $\phi$ 関係を求めるための基本仮定・考え方および解析手順は、従来の方法<sup>17)</sup> と全く同じである。まず、平面保持の仮定よりある断面で中立軸から距離 xだけ離れた点のひずみの大きさ  $\epsilon$  は、断面の曲率  $\phi$  との積で次のように表わされる。

$$\epsilon = \phi \cdot x \quad , \quad d\epsilon = x \cdot d\phi \quad \text{----- (6)}$$

式(6) より、任意断面でのひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt = x \cdot d\phi/dt = x \cdot \dot{\phi} \quad \text{----- (7)}$$

ここで、 $\dot{\phi}$  を曲率速度と定義する。

各断面での  $\phi, \dot{\phi}$  を与え、中立軸を仮定すれば、断面の各要素における  $\epsilon, \dot{\epsilon}$  は式(6), (7) から求められる。次に、ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  に対応する応力は、RC材料の応力～ひずみ関係式 (式(1), (2), (4), (5)) に基づいて算定できる。そこで、断面の各要素での内部応力と部材に作用する断面力との釣り合いを満足するかどうかの判定を行って中立軸を決定する。この繰返し計算によって、ある曲率速度のもとでのRCはりの断面のM～ $\phi$ 関係が算定できることになる。速度効果を考慮したRCはり断面のM～ $\phi$ 関係の一例をFig.3 に示した。Fig.3 から、曲率速度の増大にともなって上および下降伏曲げモーメントが増加し、かつその差も大きくなることがわかる。また、計算によって得られる曲げ剛性は鉄筋比が大きい場合には曲率速度の増加にともなって多少

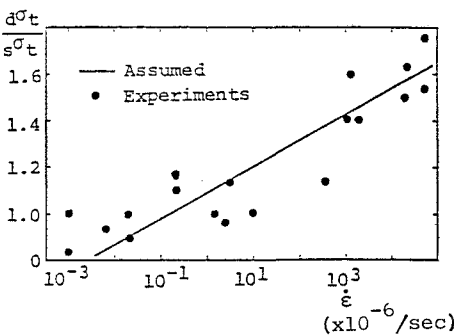


Fig. 2 Tension strength of concrete at different strain rates.<sup>15)</sup>

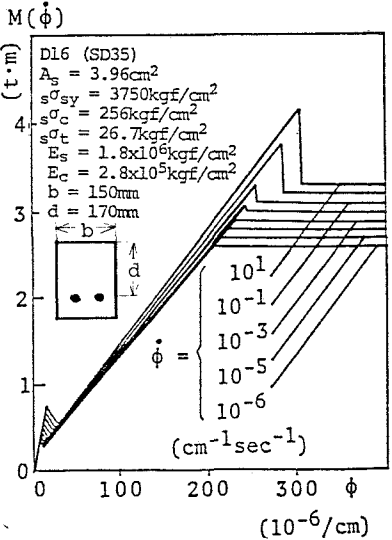


Fig. 3 Effect of strain rates on moment-curvature relationship.

増大する傾向がある。なお、Fig.3 における $M = 1 \text{ t}\cdot\text{m}$ 以下の不連続点はRCはりに生ずるひび割れ曲げモーメントに対応している。しかし、以後の解析ではこの影響は微小とみなして考慮していない。

### 2.3 RCはり断面の曲げモーメント～曲率関係の履歴モデル

一般に、RC部材の復元力特性の履歴モデルとしては、荷重反転後の剛性が劣化する、いわゆる剛性劣化型モデルがよく用いられている。衝撃荷重に対する応答も一種の振動であるともみなせるので、このモデルを基本として載荷速度の増大による上および下降伏曲げモーメントの上昇を取り入れた履歴モデルを考案した。Fig.4 は、ひずみ速度効果を考慮したRCはり断面の理想化曲げモーメント～曲率 ( $M - \phi$ ) 履歴モデルである。Fig.4(a)は、単鉄筋はりの解析に用いるためのモデルで、負側の曲げモーメントはコンクリートのひび割れモーメントとしている。Fig.4(b)は複鉄筋はりの解析に用いるためのモデルである。Fig.4 中の、上降伏曲げモーメント ( $M_{y,u}$ ) および下降伏曲げモーメント ( $M_{y,l}$ ) は、前節 2.2で示した方法によって定まる $M \sim \phi$  関係に基づいて次式で与えられる。

$$\begin{aligned} M_{y,u} &= a' + \frac{M_y}{s_y} + b'(\log \dot{\phi}) + c'(\log \dot{\phi})^2 + d'(\log \dot{\phi})^3 \\ M_{y,l} &= a + \frac{M_y}{s_y} + b(\log \dot{\phi}) \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $a, b, a', b', c', d'$  は、ひずみ速度効果を考慮したRCはりの $M \sim \phi$  関係を求めることによって定まる係数で、はりの断面寸法、鉄筋・コンクリートの材料定数、鉄筋量などによって異なる。本実験では、鉄筋量のみが異なる同一諸元の試験体を用いており、各係数  $a, b, a', b', c', d'$  は各試験体について Table 1 に示した値を用いた。

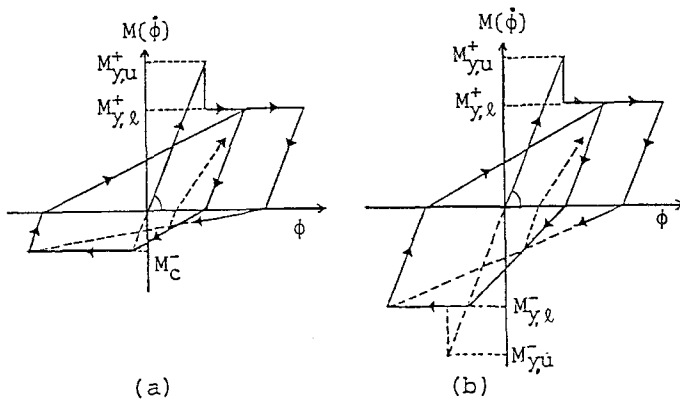


Fig. 4 Idealized bending moment-curvature relation for an impact problem.

### 2.4 RCはりの離散化モデルおよび応答解析の方法

#### (1) RCはりの離散化モデル

ひずみ速度の影響を考慮した $M \sim \phi$  関係を Wenらによって提案された離散化モデルに適用して、RCはりの衝撃応答解析式を定式化する。実際のはりは、連続した質量と剛性を有するが、本解析で用いた Wenモデルは、Fig.5 (a) に示す連続体としてのはり

Table 1 Values of coefficients. (t·m)

|     | a     | b     | a'    | b'    | c'    | d'    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D10 | 0.272 | 0.037 | 0.549 | 0.310 | 0.082 | 0.007 |
| D13 | 0.544 | 0.066 | 0.898 | 0.324 | 0.062 | 0.005 |
| D16 | 0.975 | 0.103 | 1.485 | 0.432 | 0.066 | 0.004 |
| D22 | 2.488 | 0.203 | 3.392 | 0.734 | 0.091 | 0.005 |

Fig.5(b)に示すように任意長の剛体で質量を持たないパネルに分割し、はりが持つ質量と剛性を隣接するパネル長の1/2ずつ分割点に集中させたものとした。

まず、Fig.6 (a) に示す分割点  $i$  における力の釣り合いから、次のような運動方程式が得られる。

$$m_i \ddot{y}_i = P_i + V_{i,i+1} - V_{i,i-1} \quad (9)$$

ここに、 $m_i, \ddot{y}_i, P_i, V_i$  は、それぞれ分割点  $i$  の集中質量、応答加速度、外力および断面力である。

なお、断面力  $V_i$  の2番目の添字は、分割点  $i$  に隣接する分割点の番号を表す。式(9)は、Fig.6(b)に示すパネル  $i-1 \sim i$  における力の釣り合い関係を代入して、次式のように変形できる。

$$m_i \ddot{Y}_i = P_i + (M_{i+1} - M_i)/l_{i+1} - (M_i - M_{i-1})/l_i \quad \text{----- (10)}$$

ここに、 $l_i, M_i$  はそれぞれパネル  $i$  の長さおよび分割点  $i$  での作用曲げモーメントである。

次に、Fig.6(c)より次の変形適合条件が得られる。

$$\theta_i = -y_{i-1}/l_i + y_i(1/l_i + 1/l_{i+1}) - y_{i+1}/l_{i+1} \quad \text{----- (11)}$$

ここに、 $\theta_i, y_i$  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  $l_{i+1}/2$  までの曲率  $\phi_i$  を一定と仮定すれば、分割点  $i$  の回転角  $\theta_i$  は次式のように表わされる。

$$\theta_i = \phi_i (l_i + l_{i+1})/2 \quad \text{----- (12)}$$

式(12)を式(11)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。

$$\phi_i = 2 \{-y_{i-1}/l_i + y_i(1/l_i + 1/l_{i+1}) - y_{i+1}/l_{i+1}\}/(l_i + l_{i+1}) \quad \text{----- (13)}$$

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のように表わされる。

$$\dot{\phi}_i = 2 \{-\dot{y}_{i-1}/l_i + \dot{y}_i(1/l_i + 1/l_{i+1}) - \dot{y}_{i+1}/l_{i+1}\}/(l_i + l_{i+1}) \quad \text{----- (14)}$$

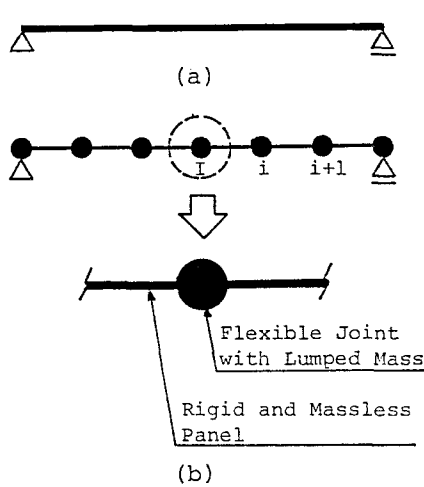


Fig. 5 Discrete beam model.

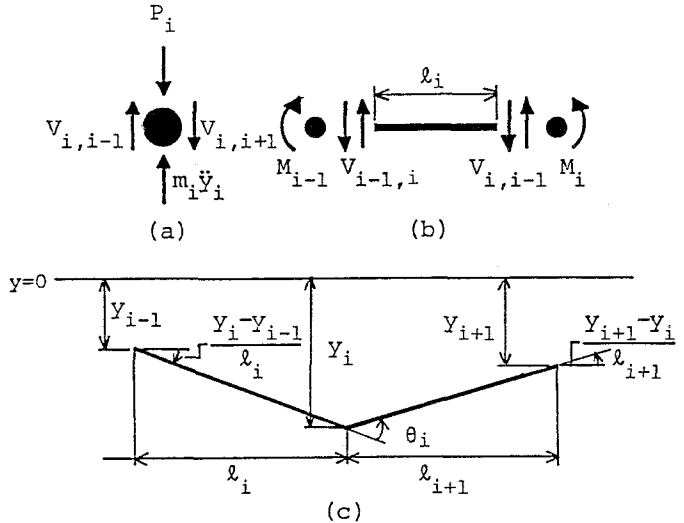


Fig. 6 Free body diagram for joint  $i$ .

## (2) 応答解析の方法

衝撃応答解析は、式(10),(13),(14)およびモデル化した  $M \sim \phi$  関係を用いて行うことができる。解析にあたってはNewmarkの  $\beta$  法による数値積分を行った。本解析では、計算をより簡便にするという目的から  $\beta = 0$  とし、次の式を用いた。

$$y_i(t+\Delta t) = y_i(t) + \Delta t \dot{y}_i(t) + (\Delta t)^2 \ddot{y}_i(t)/2 \quad \text{----- (15)}$$

$$\dot{y}_i(t+\Delta t) = \dot{y}_i(t) + \Delta t \{\ddot{y}_i(t) + \ddot{y}_i(t+\Delta t)\}/2 \quad \text{----- (16)}$$

なお、Newmarkの $\beta$ 法による数値計算を行ううえで、Wenらは時間増分 $\Delta t$ を $\Delta t = 0.1T/N^2$  ( $T$ は、はりを完全弾性体としたときの1次固有周期、 $N$ はパネルの分割数)以下にとれば解が一定になるとしている。これに対し、本研究で検討した結果では、 $N$ が20以上、 $\Delta t = 0.2T/N^2$ 以下とすれば、一定の解が得られることがわかった。したがって、以後の解析には $N = 20$ 、 $\Delta t = 0.2T/N^2$ を用いた。なお解析に用いる基本式は、式(10)で与えられるが、本解析では衝撃力 $P_i$ の代わりに衝突物がはりに衝突した後はりに付着して運動するとしても取り扱うことができる。この場合には、解析に必要な材料定数などをデータとして入力後、初期条件として時刻 $t_j = 0$ での分割点 $i$ における変位 $y_i$  および変位速度 $\dot{y}_i$ を以下のような手順で求めて入力する。まず、 $P_i = 0$ とし次の初期条件を与える。

$$y_i(0) = 0, \quad \dot{y}_i(0) = 0 \quad (i \neq I) \quad \text{----- (17・a)}$$

$$y_I(0) = 0, \quad \dot{y}_I(0) = m_W V / (m_I + m_W) \quad \text{----- (17・b)}$$

ここに、 $V$ 、 $m_W$ はそれぞれ衝突物の衝突時の速度および質量、 $y_I$ 、 $\dot{y}_I$ 、 $m_I$ は、それぞれはりの衝突点 $I$ での変位、変位速度および集中質量である。

初期条件における $M_i(0)$ 、 $\phi_i(0)$ 、 $\dot{\phi}_i(0)$ 、 $\ddot{y}_i(0)$ および時刻 $t_j$ での各応答値を求める手順は以下の通りである。

- (a) 式(17)の初期条件を、式(13)、(14)に代入し、 $\phi_i(0)$ 、 $\dot{\phi}_i(0)$ を求める。
- (b)  $\phi_i(0)$ 、 $\dot{\phi}_i(0)$ をFig.4に示した $M \sim \phi$ 関係に代入して、 $M_i(0)$ を求める。
- (c)  $M_i(0)$ を、式(10)に代入し、 $\ddot{y}_i(0)$ を求める。
- (d) (a)～(c)によって初期値が決定されるので、以後は時刻 $t_j$ における応答値を算定する。  
 $y_i(t_{j-1})$ 、 $\dot{y}_i(t_{j-1})$ および $\ddot{y}_i(t_{j-1})$ を式(15)に代入して、 $y_i(t_j)$ を求める。
- (e)  $y_i(t_j)$ を式(13)に代入して、 $\phi_i(t_j)$ を求める。このとき、 $\dot{y}_i(t_{j-1}) = \dot{y}_i(t_j)$ と仮定して、  
 $\dot{y}_i(t_{j-1})$ を式(14)に代入して $\dot{\phi}_i(t_j)$ を求める。
- (f)  $\phi_i(t_j)$ 、 $\dot{\phi}_i(t_j)$ が求まったら、手順(b)、(c) (時刻 $t = 0$ の代わりに $t = t_j$ とする)を行い、  
 $M_i(t_j)$ 、 $\ddot{y}_i(t_j)$ を求める。
- (g)  $\dot{y}_i(t_{j-1})$ 、 $\ddot{y}_i(t_{j-1})$ 、 $\ddot{y}_i(t_j)$ を式(16)に代入して、 $\dot{y}_i(t_j)$ を求める。
- (h) 以上の(d)～(g)の手順を繰り返すことにより、時刻 $t_j$ におけるRCはりの応答が計算できる。

衝撃力 $P_i$ をそのまま入力する場合は式(17・a)の初期条件だけを用いて手順(a)～(g)の解析を行う。

なお、境界条件として、解析対象が単純支持のはりであることから、両支点(パネル番号1、 $N$ )の変位および曲げモーメントは零という次の条件を用いる。

$$\begin{aligned} y_1(t) &= y_N(t) = 0 \\ M_1(t) &= M_N(t) = 0 \end{aligned} \quad \text{----- (18)}$$

### 3 衝撃载荷実験

#### 3.1 衝撃载荷装置

载荷は、Fig.7(a)に示すように重量47 kgfの鋼製の重錘を2本のガイドで誘導し、自然落下によりRCはりの中央部に横衝撃を与えるようにした。また、試験体中央のはりの幅方向に集中荷重を载荷させるために、重錘の下部形状を半径5cmの半円柱形とした。重錘の落下高さは、全試験体に対して1 m (衝突速度約4.43 m/sec)の一定高さとした。実験におけるはり試験体の支持条件は単純支持とした。また、衝撃により試験体が両支点から跳ね上がるのを防止するために、Fig.7(b)に示すように支点位置で試験体の上下部

を鋼製の円柱に接するようにボルトで固定した。

3.2 試験体

試験体は、Fig.8 に示すように、引張側に2本の軸鉄筋を配置した単鉄筋コンクリートはりである。その全長およびスパン長は、それぞれ140 cm,120 cmとした。なお、せん断に対する補強として異形鉄筋D6を軸方向に20cm間隔で配置した。Table 2 に、試験体の種類と軸鉄筋面積および軸鉄筋比を示している。使用した鉄筋の鋼種はすべてSD35 ( $\sigma_{sy} = 3750 \text{ kgf/cm}^2$ ) である。コンクリートの配合は、水セメント比 53 %、スランプ 8 cm、細骨材率 42 %、設計基準強度  $240 \text{ kgf/cm}^2$  である。

実験は、鉄筋量が同一の各2本の試験体に対して同一条件で行った。

3.3 計測装置

Fig.9 に示した位置に、ひずみゲージおよび変位計を取りつけ、Fig.10 に示す計測システムを構成して計測を行った。鉄筋およびコンクリートのひずみは、箔ひずみゲージを用いて測定した。はり中央点および1/4点の変形量を、非接触型変位計を用いて測定した。測定したデータは、デジタルメモリ (8 bit/word、サンプリングタイム  $10 \mu\text{s}/\text{word}$ 、記憶容量 2048 words) に接続したパーソナルコンピュータを介して、自動的に記録させた。なお、荷重の計測は行わなかった。

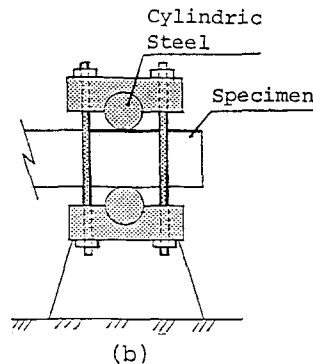
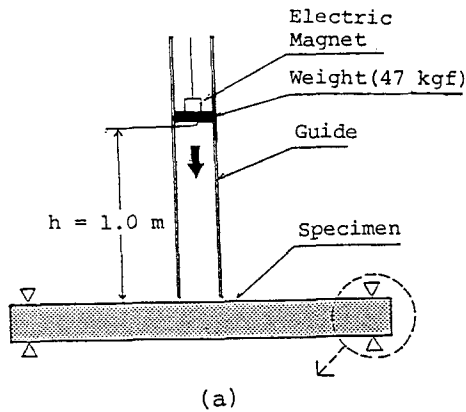


Fig. 7 Test set-up.

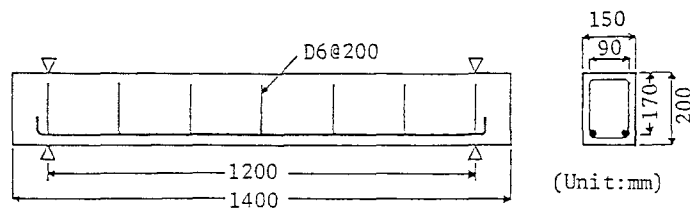


Fig. 8 Dimensions of test specimen.

Table 2 Reinforcement of test specimen.

| Specimen Type | Area of Steel( $\text{cm}^2$ ) | Steel Ratio(%) |
|---------------|--------------------------------|----------------|
| D10           | 1.43                           | 0.42           |
| D13           | 2.54                           | 0.75           |
| D16           | 3.96                           | 1.16           |
| D22           | 7.76                           | 2.28           |

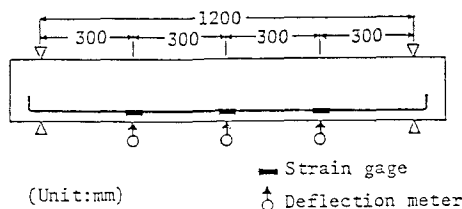


Fig. 9 Measuring position.

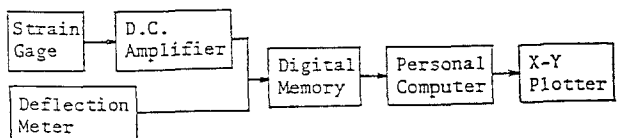


Fig. 10 Measuring system.

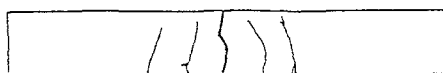
### 3.4 実験結果および考察

#### (1) ひび割れ状況

一般に、衝撃荷重によって構造物に生じる破壊は衝撃特有の現象として、硬質な物体が高速で衝突する場合の局所的破壊（侵徹、貫通、裏面剝離など）と、比較的重量が大きい物体が低速で衝突する場合に生じる全体的破壊の2種類に大別される。本実験の場合は、衝突速度が比較的低速であり、また重錘の重量が試験体重量の約57%に相当する大きさであった。このため、衝突面において載荷物が試験体に貫入する侵徹などの現象は生じなかった。

Fig.11(a)～(d)は、鉄筋量の異なる試験体のひび割れ状況を示したものである。なお、以後では試験体を使用した鉄筋の径（D10,D13,D16,D22）を呼び名として区別する。図から、はり下部のひび割れは、鉄筋量が多くなるにつれて広い範囲に生じていることがわかる。とくに、鉄筋量が少ないD10では、Fig.11(a)に示すように、はり中央部で上下に貫通する大きなひび割れが生じている。これに対し、鉄筋量の多いD22の場合には、はり中央部の上側に大きなひび割れが生じているが、他の試験体に比べると小さく貫通するまでに至っていない。はり上側のひび割れは、衝突後の振動による載荷逆方向への変形によるものであり、またはりの上側には軸鉄筋を配置していないために引張破壊によるひび割れが大きく生じたものであると推定される。

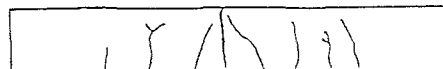
(a) D10



(c) D16



(b) D13



(d) D22



Fig. 11 Final state of damage in each specimen.

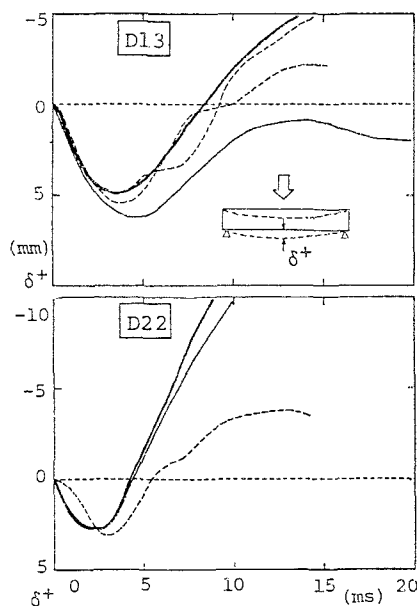
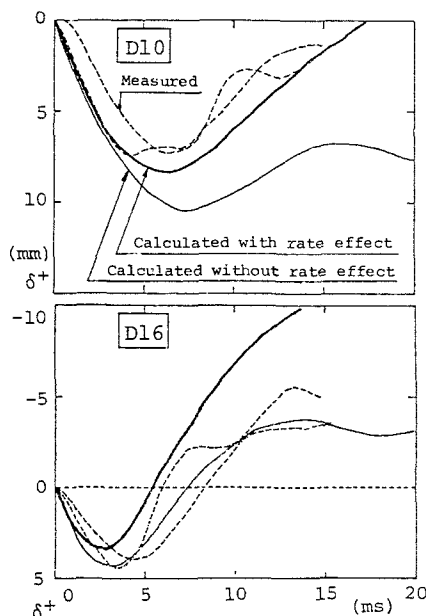


Fig. 12 Deflection time relations.

## (2) 変位～時間関係

Fig.12中の破線は、それぞれ実験で得られた D10,D13,D16および D22に対するはり中央部の変位の時間的変動を示したものである。複数の破線は、同一条件で行った複数の試験体に対する実験の結果である。

鉄筋量の少ない D10の場合 ( Fig.12(a) )、はり中央部に大きな塑性変形が生じており、その最大変位量は他の試験体に比較して大きく、載荷方向のみに変位が生じている。また、鉄筋量が多くなるにしたがって載荷方向側の変位が減少し、逆方向へ変位が転じている傾向がみられる。これは、鉄筋量が少ない場合には衝撃力によって引張鉄筋が降伏し、載荷後に上方へ反転する能力がなくなったものと考えられる。これに対し、鉄筋量が多い場合には引張鉄筋が降伏するまでには至らず、ほぼ弾性的挙動を示しているとみなせる。Fig.12を概括的にみると、D13 の場合は D10と、D16 の場合は D22と類似した挙動を示していることが認められる。

## (3) 変形モード

Fig.13(a),(b) は、鉄筋量に大きな差のある D10および D22のはり全体の変形状態を時刻の推移に従って示したものである。Fig.13(a) をみると、鉄筋量の少ない D10の場合には、はり中央部を頂点とする三角形形状の変形モードで、しかも下方でのみ振動を行っていることがわかる。一方、D22の場合 ( Fig.13(b) ) には、時刻の経過とともに上下方向にほぼ台形形状の変形モードで振動している。すなわち、D10 の場合には、はり中央部に塑性ヒンジが形成されて変形が一方方向のみに進行するのに対し、D22 の場合には弾性状態にあり上下振動を行っていることを表わしている。

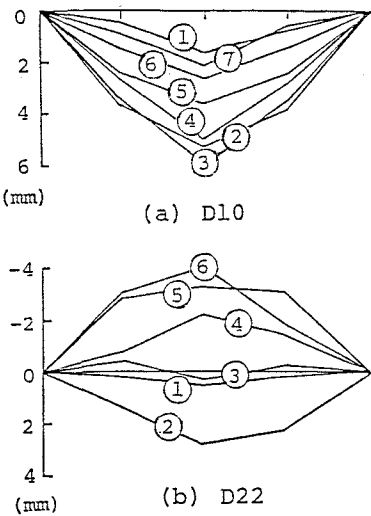


Fig. 13 Deformed beam shapes.

## 4 解析結果と実験結果の比較検討

### 4.1 変位～時間関係

Fig.12に示したはりの中央点の変位～時間関係において、太い実線はひずみ速度の影響を考慮した計算結果を表わし、細い実線は速度効果を考慮しない通常の動的解析による結果を表わしている。

一方、K.Brandes ら<sup>18),19)</sup> は、

複鉄筋コンクリートはりを用いて高速載荷実験を行っている。そこで、本解析法の妥当性を検討するために、この実験結果との比較も行う。K.Brandes らが用いた試験体の諸元および本解析に用いたデータを Table 3に示す。なお、数値解析にあたっては、単鉄筋コンクリートはり場合には、衝撃力は重錘がはりに衝突した後にはり付着して運動するものとし、衝撃

Table 3 Test specimen<sup>18),19)</sup> and material properties for analysis.

| Material Properties |                   | Dimension of test specimen |                               |
|---------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------------|
| $\sigma_{sy}$       | 4793              |                            | 4φ18BST420/500RK<br>(Unit:mm) |
| $\sigma_c$          | 300               |                            |                               |
| $\sigma_t$          | 30                |                            |                               |
| $E_s$               | $2.1 \times 10^6$ |                            |                               |
| $E_c$               | $2.0 \times 10^5$ |                            |                               |

(Unit:kgf/cm<sup>2</sup>)

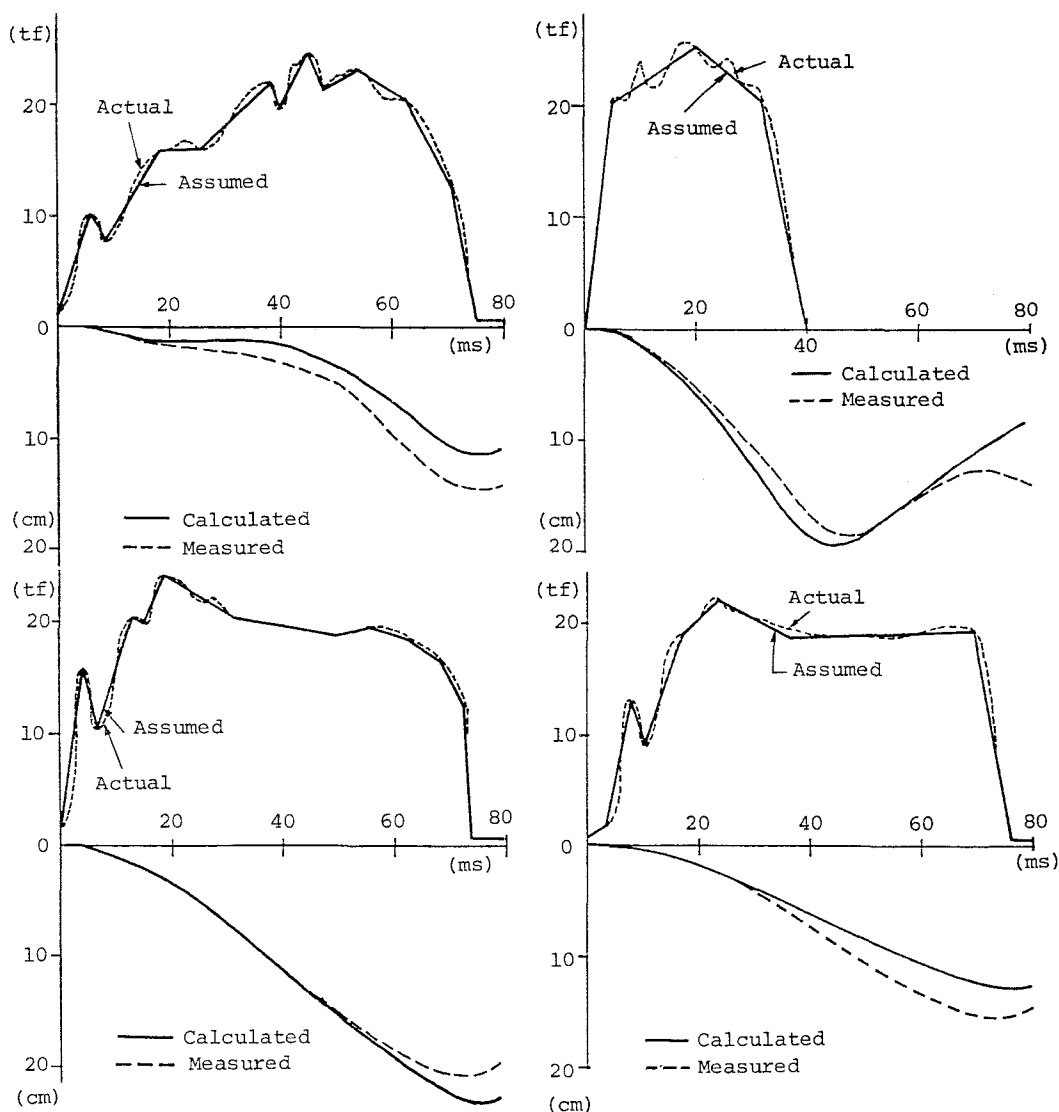


Fig. 14 Deflection time relations.<sup>18),19)</sup>

点のはりの変位速度を初期条件として与えた。また、計算に用いたはりの長さは、Fig.8 において張り出し部を除いたスパン長 120 cm である。複鉄筋コンクリートはり場合は、荷重～時間関係が与えられているので、Fig.14 のように荷重～時間関係を近似しこれを入力として用いた。Fig.14 に、荷重～時間関係および試験体中央の応答変位～時間関係を示す。図中、破線は実験結果を表わし、実線は計算結果を表わしている。まず、Fig.12 の実線で示した単鉄筋コンクリートはりに対する実験値を計算値と比較すれば、以下のことが考察される。

(1) Fig.12 を概括的にみると、ひずみ速度効果を考慮した解析結果も考慮しない場合のいずれも実験による衝撃応答性状を比較的良好に表わしていることが認められる。

(2) 時刻が経過するにしたがって載荷方向と逆向きの変位が生じ、計算値と実験結果との差が大きくなる傾向がある。また、その傾向は鉄筋量が多くなるほど顕著に表われる。これは実験では重錘がはりに衝突した後跳ね上がり再びはりに衝突する現象がみられるのに対し、解析の場合には重錘がはりに付着したまま運動するという条件で計算を行っているためと考えられる。

次に、K.Brandes らの複鉄筋コンクリートはりによる実験との比較から、以下のことが考察される。

(1) 荷重の時間的変化の違いによって、変位の時間的変動や変位の最大値にかなりの差がみられるが、解析によってもこれらの相異を十分に表現できることが認められる。

(2) 実験結果と解析結果による変位～時間関係は、厳密には一致していない。しかしながら、実験結果が一つの試験体によるものであり、同一諸元の試験体を用いて同一の条件で実験を行っても結果にバラツキが生ずることを考慮すれば、本解析法によって衝撃応答を非常に良好に追跡できる。

以上の二つの比較から、本研究で提示した解析法は極めて単純なモデルと簡単な計算式によって表現でき、衝撃荷重に対するRCはり（とくに複鉄筋コンクリートはり）の応答を評価するうえで非常に有用であることが認められる。

#### 4.2 最大応答変位～鉄筋量の関係

Fig.15は、はり中央点における最大応答変位と鉄筋量との関係を示している。図中、●印は実験結果、○印はH.Coxの理論<sup>20)</sup>すなわち、はりを完全弾性体として重錘の位置エネルギーがすべてひずみエネルギーに変換するものとして算定した値、実線はひずみ速度効果を考慮した解析結果、破線はひずみ速度効果を考慮しない解析結果を表わしている。

(1) 図において、実験結果とH.Coxによる理論値を比較すると鉄筋量が少なくなるにしたがって理論値の方が実験値より小さくなる。これは、実際の挙動において塑性変形が生じているためである。逆に、鉄筋量が多い（D16,D22の場合）と両者は良く一致しているが、これは衝撃荷重の大きさに対して試験体が弾性応答を示すとともに速度効果の影響をあまり受けていないことによるものと考えられる。

(2) 図中の実線で示すように、ひずみ速度効果を考慮した解析によって、さらに実験値に近似した値を得ることができる。とくに、鉄筋量が少なく塑性変形が大きく生ずる場合には本解析法の有用性が認められる。

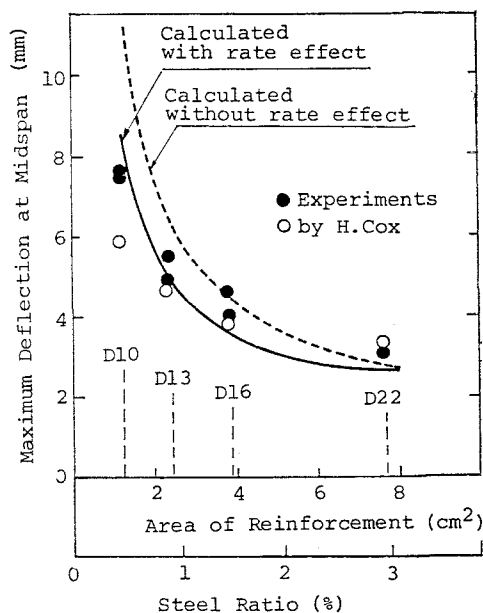


Fig. 15 Relation between maximum deflection at midspan and area of reinforcing bars.

#### 5 結言

本研究は、RC建造物の耐衝撃設計法を開発するための第一段階として、横衝撃を受けるRCはりの衝撃応答解析法を確立することを試みたものである。この目的から、まず衝撃応答解析のための定式化を行い、

次に鉄筋量のみをパラメータとした試験体を用いた実験を行って衝撃荷重に対するRCはりの応答を基礎的に調べた。解析では、衝撃現象として特有なひずみ速度効果を考慮した $M \sim \phi$ 履歴モデルを考案し、単純な離散化モデル（Wenモデル）を用いた応答解析を行った。応答解析による結果と実験結果を比較検討することにより衝撃に対する本解析法の適用性を確認した。

本研究で得られた成果を要約すれば、以下ようになる。

- (1) 衝撃または高速载荷を受ける材料の速度効果に対する既往の実験結果に基づいて、まずひずみ速度効果を考慮したRCはりの $M \sim \phi$ 関係を求めた。ひずみ速度効果による曲げ剛性の増大は多少現われたが、その影響は小さいので無視し、ひずみ速度効果が強度に与える影響のみを考慮した。さらに衝撃载荷を受けるRCはりの衝撃曲げ応答を表現できる $M \sim \phi$ 履歴モデルを提案した。このモデルを用いることによって、衝撃荷重および高速载荷を受けるRCはりの挙動を解析的に求めることができた。
- (2) 単純な離散化モデル（Wenモデル）とひずみ速度効果を考慮した解析法によって、衝撃荷重を受けるRCはりの応答を簡便にしかも比較的良好な精度で追跡できることが明らかとなった。
- (3) 耐衝撃設計の観点からは衝撃直後の1周期を考慮すればよく、設計法に資することを目的とした本解析法によって衝撃応答特性の評価が十分に可能であると認められる。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、材料のひずみ速度効果について有益な御教示をいただいた熊本工業大学教授 竹田仁一先生に深甚の謝意を表します。また、実験を行うに際し防衛庁技術研究本部第4研究所 藤本一男氏および防衛大学校土木工学教室助手 南和孝氏より技術上の貴重な御助言と御指導をいただいた。さらに、防衛大学校本科第29期卒研生 星川辰雄君、後藤一郎君および土木工学教室技官 畠山勝彦氏には多大の御協力を得た。ここに深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 竹田仁一他：コンクリートと衝撃、コンクリート工学Vol.15、No.4、1977.
- 2) 竹田仁一他：コンクリートの衝撃破壊における衝撃速度の影響、セメント技術年報34, pp.261 ~264, 昭.55.
- 3) BAM :Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading,Proceedings , Berlin, 1982.
- 4) ACI Code: Requirements for Nuclear Safety Related Structures, ACI 349 ~376,1977.
- 5) 金沢大学工学部土木工学科構造力学研究室編：第1回落石の衝撃およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集、1983.
- 6) 佐治泰次他：落錘式試験機によるモルタルの衝撃圧縮強度について、セメント技術年報28, pp.211~214,昭.49.
- 7) 藤井・宮本・境：有限要素解析によるRCはりの衝撃挙動に関する研究、RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集、pp.105~112,1984.
- 8) Robert,K.Wen and Teokistos,T.: Discrete Dynamic Models for Elasto - Plastic Beams, Proc. of ASCE,Vol.90, No.EM5, pp.71 ~102, 1964.
- 9) E.Siebel: Handbuch der Werkstoffprüfung, 1955.

- 10) ACI Committee 439: Effect of Steel Strength and of Reinforcement Ratio on the Mode of Failure and Strain Energy Capacity of Reinforced Concrete Beams, *ACI Journal*, pp.165~172, 1969.
- 11) 竹田・立川：高速度荷重試験装置とこれによるコンクリート円筒圧縮試験、日本建築学会論文集第63号、pp.657~660, 昭.35.
- 12) 竹田・立川：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）、日本建築学会論文集第66号、pp.105~108, 昭.35.
- 13) 竹田・立川：高速圧縮、引張および曲げを受ける各種コンクリートの力学的性質（その3）、日本建築学会論文集第77号、pp.1~6, 昭.37.
- 14) 竹田・立川：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（その4）、日本建築学会論文集第78号、pp.1~6, 昭.37.
- 15) Körmeling, H.A., Zielinski, A.J. and Reinhard, H.W.: Experiments on concrete under single and uniaxial impact tensile loading, Delft University of Technology, Stevin Report 5-80-3, 1980.
- 16) König, G. and Helge, J.D.: A Constitutive Law for Reinforced Concrete with Consideration to the Effect of High Strain Rates, *Proc. of BAM*, Berlin, pp.67 ~82, 1982.
- 17) 小阪・森田：鉄筋コンクリート構造、丸善、pp.21, pp.121~126、昭.53.
- 18) K.Brandes, E.Limberger and J.Herter: Strain Rate Dependent Energy Absorption Capacity of Reinforced Concrete Members under Aircraft Impact, *Trans. of the 7th SMirt Conference*, pp.431~438, 1983.8.
- 19) K.Brandes, E.Limberger and J.Herter: Experimental Investigation of Reinforced Concrete Behaviour due to Impact Load, *Trans. of the 5th SMirt Conference*, pp.1~8, 1979.
- 20) S.P.チモシェンコ（谷下市松・渡辺茂訳）：工業振動学、東京図書、pp.375~377, 1968.

(1985 年10月18日受付)