

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

若林 實・中村 武・吉田 望・岩井 哲・渡辺幸広

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF LOADING RATE ON THE BEHAVIOR OF STRUCTURAL MATERIALS AND MEMBERS

By Minoru WAKABAYASHI, Takeshi NAKAMURA, Nozomu YOSHIDA
Satoshi IWAI, and Yukihiro WATANABE

Synopsis

To investigate the effect of a stress rate on the tensile strength of concrete, dynamic splitting tests of twenty concrete cylinder specimens were made. It is recognized that the tensile strength of concrete increases with a increasing stress rate.

Effects of a curvature rate on the elastic-plastic behavior of steel beams and reinforced concrete beams subjected to dynamic bending are discussed on the basis of the experimental and theoretical investigations. The stress-strain relationships of steel, concrete and reinforcing bar were formulated taking the effect of a strain rate into consideration and used in the analysis. It is recognized that the moment bearing capacity of beams increases with a increasing curvature rate.

1. 序

建築構造物が地震を受けた際、各構造部材は大きな歪速度で変形し、降伏・破壊に至ることが予想される。一方、従来構造物の耐力・変形性能、履歴性状に関する実験的研究は準静的な単調あるいは繰り返しの載荷実験が大部分であり、載荷速度または歪速度の影響を考慮した研究はあまりなされていない。従って載荷速度によって構造物の耐力及び変形性能がどのように変化するかを調べる必要がある。本報では昨年度報告したコンクリートおよび鋼材の応力-歪曲線に対する歪速度の影響を調べた研究¹⁾の成果に基づいて、コンクリート及び鋼材の応力-歪関係を歪速度の影響を考慮できる形で定式化し、それを用いて曲げモーメントによって破壊する鋼はり鉄筋コンクリートはりの静的および動的載荷での挙動を解析し、その結果に対応する動的載荷実験を行い両者を比較し歪速度の影響を調べた。さらに、前報¹⁾に続いて材料の挙動に関する歪速度の影響を調べる目的で、コンクリートの割裂強度に対する載荷速度の影響を調べた。

2. 動的割裂実験

2.1 試験体

試験体は圧縮実験の場合と同様の直径 50 mm、高さ 100 mm の普通コンクリート円柱形供試体を用いられた。試験体数は割裂実験用 20 体、割裂強度に対する載荷速度の影響と圧縮強度に対する載荷速度の影響を比較するための圧縮実験用 10 体の計 30 体であった。試験体に用いられたコンクリートの調合材料は、4 週圧縮強度 400 kg/cm²、比重 3.16 の普通ポルトランドセメント、細骨材として表乾状態の比重 2.59 の川砂、粗骨材として表乾状態の比重 2.55 の川砂利を用いた。水セメント比 62%，スランプ 21 cm で、その重量調合比はセ

メント：砂利：砂が1：2.20：2.01であった。実験時の材令は5週であった。養生は実験室内で空中養生とした。

2.2 載荷装置及び載荷方法ならびに計測方法

載荷には電気油圧式サーボ試験機が用いられた。

試験機の能力は、最大荷重が動的 20 t, 静的 30 t, 最大ピストンストローク ± 150 mm, 制御可能な量は荷重, ピストンストローク, 試料変位で, 総合精度は各レンジフルスケールの ± 1.5 %以内である。この実験での載荷はピストンストロークの速度が一定となるように制御された。静的割裂, 圧縮実験としては 100 t アムスラー型試験機が使用された。設定載荷速度は割裂実験では動的 3 段階, 静的 1 段階, 圧縮実験では動的 1 段階, 静的 1 段階であった。

Fig. 1 に載荷装置, 計測システムを示す。

2.3 実験結果

Table 1, 2 にそれぞれ割裂, 圧縮実験結果を示す。載荷速度は載荷実験での荷重の時刻歴から, 荷

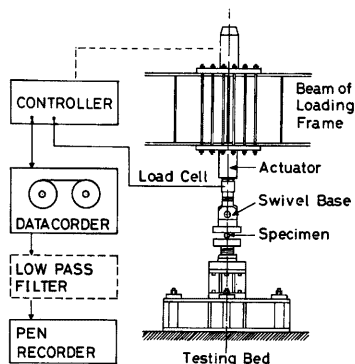


Fig. 1. System of Splitting Test

Table 1. Results of Splitting Tests of Concrete

Specimen Number	Tensile Strength (kg/cm ²)	Stress Rate (kg/cm ² /sec.)
60	(14.1)	(0.705)
61	22.4	0.148
62	(16.5)	(0.207)
63	29.3	0.366
64	31.2	0.339
65	36.7	758
66	30.6	681
67	38.0	985
68	35.9	867
69	26.9	858
70	29.2	70
71	29.0	100
72	30.8	102
73	37.2	117
74	25.9	99
75	—	—
76	41.8	2730
77	42.0	2890
78	25.4	1670
79	35.5	3020

Table 2. Results of Compressive Tests of Concrete

Specimen Number	Maximan Stress (kg/cm ²)	Stress rate (kg/cm ² /sec.)
50	246.8	Static
51	240.4	
52	(286.6)	
53	255.4	
54	255.4	
55	—	—
56	316	6480
57	307	6560
58	323	6740
59	329	6870

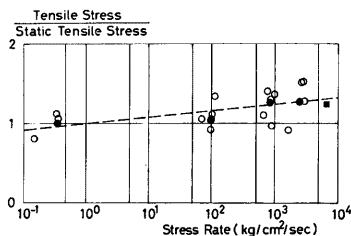


Fig. 2. Tensile Strength-Stress Rate Diagram of Concrete

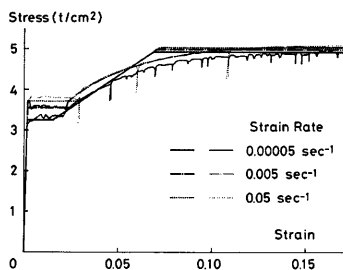


Fig. 3. Stress-Strain Curves of Steel

重速度を求めた。この荷重速度から応力速度は、圧縮実験では荷重速度を実測断面積で除して求めた。割裂実験では、割裂強度 σ_t は P を割裂時荷重、 d を供試体直径、 l を供試体長さとする $\sigma_t = 2P/\pi dl$ と求められるから、応力速度 $\dot{\sigma}_t$ は荷重速度 $\dot{P}$ から $\dot{\sigma}_t = 2\dot{P}/\pi dl$ とした。ここで d 、 l は供試体実測寸法を用いた。Fig. 2 に割裂強度—応力速度関係を示す。図中、割裂強度は静的割裂強度の平均値によって無次元化されている。(○) は実験値を示し、(●) は各設定速度段階における応力速度、割裂強度の平均を示している。(■) は動的圧縮実験結果の平均値を示している。破線は割裂実験結果を最小自乗法によって直線回帰させたものである。以上よりコンクリートの割裂強度は載荷速度が高くなれば増大し、またその上昇率は、載荷速度が最も速い場合（応力速度 2576 kg/cm²/sec）平均値で約31%の上昇を示しており、Fig. 2 で示されるように、圧縮強度の場合と比べてほぼ同程度であると言える。

3. 鋼はりの解析

ここでは前報¹⁾の丸鋼に対する実験結果をもとにして、歪速度の影響を考慮した鋼に対する応力—歪曲線を仮定して曲げモーメントによって破壊する長方形断面、H形断面をもつ鋼はりの曲げモーメント—曲率関係を計算する。

3.1 仮定

(1) Fig. 3 に示したのは前報の丸鋼に対する実験より得られた応力—歪曲線と、モデル化した応力—歪曲

線を示している。これより以下のように応力-歪曲線を仮定する。

- 降伏応力，最大強度は歪速度の常用対数関数について線型関係にあり，歪速度が速くなれば降伏応力，最大強度も増大する。また最大強度は降伏応力ほど歪速度の影響が顕著ではない。ここで歪速度の影響を考慮するのは歪速度が $50 \mu/\text{sec}$ を超える場合でありこの値以下では，降伏応力，最大強度は歪速度とは無関係に静的な値をとる。
- 応力-歪曲線は引張，圧縮同形であるとする。
- 弾性係数，歪硬化域での勾配は歪速度に関係せず一定値をとり，かつ同一の直線とする。

以上によりモデル化された応力-歪関係は **Fig. 3** に示したように四つの部分から成り立っている。即ち，応力が0から降伏するまでの部分，降伏棚の部分，歪硬化域から最大強度に達する部分，最大強度に達してから以降の部分である。応力-歪曲線は静的降伏応力を σ_y ，静的最大強度を σ_u ，弾性係数を E ，歪硬化域での勾配を E' とし， α_y ， β_y ， α_u ， β_u を材料によって定まる定数， ε を歪， $\dot{\varepsilon}$ を歪速度， ε_y を降伏歪，静的応力-歪曲線での歪硬化開始歪を ε_{sho} ，動的な場合での歪硬化開始歪を ε_{sh} ，最大強度に達する歪を ε_{sf} とすると上にモデル化した応力-歪関係は次の4式で表わされる。

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \begin{cases} E\varepsilon & (|\varepsilon| \leq \varepsilon_y) \\ \sigma_y(\alpha_y \log_{10} \dot{\varepsilon} + \beta_y) & (\varepsilon_y \leq |\varepsilon| \leq \varepsilon_{sh}) \\ E'\varepsilon + (\sigma_y - E'\varepsilon_{sho}) & (\varepsilon_{sh} \leq |\varepsilon| \leq \varepsilon_{sf}) \\ \sigma_u(\alpha_u \log_{10} \dot{\varepsilon} + \beta_u) & (\varepsilon_{sf} \leq |\varepsilon|) \end{cases}$$

ここで ε_y ， ε_{sh} ， ε_{sf} はそれぞれ $\dot{\varepsilon}$ を変数とする式で表わされる。

$$\varepsilon_y = \sigma_y(\alpha_y \log_{10} \dot{\varepsilon} + \beta_y) / E$$

$$\varepsilon_{sh} = \{\sigma_y(\alpha_y \log_{10} \dot{\varepsilon} + \beta_y - 1) + E'\varepsilon_{sho}\} / E$$

$$\varepsilon_{sf} = \{\sigma_u(\alpha_u \log_{10} \dot{\varepsilon} + \beta_u - 1) + E'\varepsilon_{sho}\} / E'$$

従って，ここで与えた応力-歪曲線を決めるためには E ， E' ， σ_y ， σ_u ， α_y ， β_y ， α_u ， β_u ， ε_{sho} を定数として与える必要がある。

- 変形は微小であり，平面保持の仮定が成立するとする。
- 載荷は単調であって，曲率速度が一定であるとする。

3.2 解析方法

仮定の(2)，(3)よりある断面での中立軸より x だけ離れた要素の歪と歪速度は曲率速度 $\dot{\phi}$ と載荷開始後の時刻 t によって定まる。すなわち， $\varepsilon = \dot{\phi}tx$ である。仮定の(1)よりこの要素の応力が求められる。ここで求められた応力を断面全体にわたって積分することにより断面に働く曲げモーメントが求められる。

(1) 長方形断面の場合

Fig. 4 に示されている幅 B ，高さ $2H$ の断面を考える。対称断面故，上半分だけについて計算すればよい。歪が ε_y ， ε_{sh} ， ε_{sf} となる高さ x_1 ， x_2 ， x_3 はそれぞれ次の式の解である。

$$x_1: \log_{10} x - (E\dot{\phi}t/\alpha_y \sigma_y)x + \log_{10} \dot{\phi} + \beta_y/\alpha_y = 0$$

$$x_2: \log_{10} x - (E'\dot{\phi}t/\alpha_y \sigma_y)x + \log_{10} \dot{\phi} + \{\beta_y \sigma_y - (\sigma_y - E'\varepsilon_{sho})\}/\alpha_y \sigma_y = 0$$

$$x_3: \log_{10} x - (E'\dot{\phi}t/\alpha_u \sigma_u)x + \log_{10} \dot{\phi} + \{\beta_u \sigma_u - (\sigma_y - E'\varepsilon_{sho})\}/\alpha_u \sigma_u = 0$$

ここで， x_1 ， x_2 ， x_3 は H 以下である。 x_1 ， x_2 ， x_3 が H より大きい値が解となれば，その値を H とする。歪分布，応力分布が決定すると次の積分によって曲げモーメントが得られる。

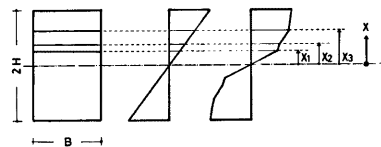


Fig. 4. Cross Section, Strain Distribution and Stress Distribution

$$\begin{aligned}
 M &= 2 \int_0^H B \sigma_x dx = 2 \int_0^{x_1} B E \varepsilon_x dx + 2 \int_{x_1}^{x_2} B \sigma_y(\varepsilon) dx + 2 \int_{x_2}^{x_3} B \{E' \varepsilon + (\sigma_{y0} - E' \varepsilon_{sh0})\} dx + 2 \int_{x_3}^H B \sigma_u(\varepsilon) dx \\
 &= M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \\
 M_1 &= (2 B E \phi t / 3) [x^3]_0^{x_1} \\
 M_2 &= B \sigma_{y0} [\alpha_y (\log_e x - 1/2) x^2 / \log_e 10 + (\alpha_y \log_{10} \phi t + \beta_y) x^2]_{x_1}^{x_2} \\
 M_3 &= 2 B [E' \phi t x^3 / 3 + (\sigma_{y0} - E' \varepsilon_{sh0}) x^2 / 2]_{x_2}^{x_3} \\
 M_4 &= B \sigma_{u0} [\alpha_u (\log_e x - 1/2) x^2 / \log_e 10 + (\alpha_u \log_{10} \phi + \beta_u) x^2]_{x_3}^H
 \end{aligned}$$

(2) H 形断面の場合

この場合は Fig. 5 で示すように、長方形断面の解析方法の重ね合せを用いて曲げモーメントを得ることができる。

3.3 解析結果

50 mm × 50 mm の長方形断面，Built-up H-50 × 50 × 6 × 6 の H 形断面について求めた曲げモーメント—曲率関係をそれぞれ Fig. 6 (a)，(b) に示す。またここでは文献¹⁾により $E = 2100 \text{ t/cm}^2$ ， $E' = 0.015 E$ ， $\sigma_{y0} = 3.25 \text{ t/cm}^2$ ， $\sigma_{u0} = 4.93 \text{ t/cm}^2$ ， $\alpha_y = 4.73 \times 10^{-2}$ ， $\beta_y = 1.204$ ， $\alpha_u = 6.59 \times 10^{-3}$ ， $\beta_u = 1.028$ とした。曲げモーメントは全塑性状態曲げモーメント M_p で、曲率は $\phi_p = M_p / EI$ で無次元化されている。長方形断面，H 形断面とも曲率速度が高くなると降伏耐力が増大することとなり、両者とも曲率速度 $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ に比べて曲率速度 $2.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ の場合は降伏耐力で約 14% 上昇している。

4. 鉄筋コンクリートはりの解析

ここでは、複筋長方形断面はりに対し、前報の結果をもとにしてコンクリート、鉄筋の応力—歪関係をそれぞれ歪速度の影響を考慮してモデル化して適用し、純曲げを受ける場合について曲げモーメント—曲率関係を求める。

4.1 仮定

- (1) 鉄筋の応力—歪関係は鋼はりの解析に用いた鋼の応力—歪関係と同一である。
- (2) コンクリートの圧縮に対する応力—歪関係は次の様に仮定する。

- (a) 最大応力 (σ_{cu}) は歪速度の常用対数関数について線型の関係を保って増大するとする。
- (b) 最大応力時歪 (ε_{cu}) は歪速度に関わらず一定である。
- (c) 応力—歪曲線の形状は最大応力時歪と最大応力を頂点とし原点を通る 2 次曲線である。

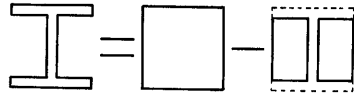
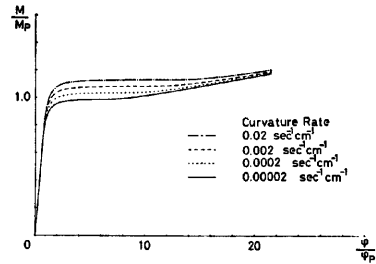
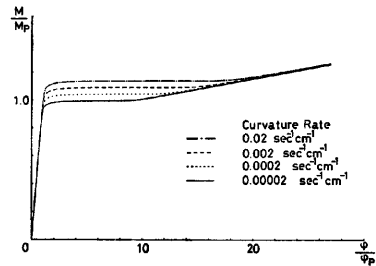


Fig. 5. Method of Calculating Moment of H-shaped Cross Section



(a) Rectangular Cross Section



(b) H-shaped Cross Section

Fig. 6. Moment-Curvature Diagrams

- (d) 歪速度の影響を考慮するのは歪速度が $20 \mu/\text{sec}$ を超える場合であり、 $20 \mu/\text{sec}$ 以下では静的載荷の場合の応力-歪曲線とする。

以上よりコンクリートの圧縮応力 σ_c は歪 ϵ 、歪速度 $\dot{\epsilon}$ を変数とし、 σ_{c0} を静的圧縮最大応力、 α_c 、 β_c を材料によって定まる定数とすることによって次式であらわされる。

$$\sigma_c = \sigma_{c0}(\alpha_c \log_{10} \dot{\epsilon} + \beta_c) \{ -(\epsilon/\epsilon_{cu} - 1)^2 + 1 \}$$

- (3) コンクリートの引張応力は無視する。
 (4) 変形は微小であり、平面保持の仮定が成立する。
 (5) 載荷は単調で、曲率速度が一定であるとする。

4.2 解析方法

解析する断面として幅 b 、全せい D 、圧縮縁より引張鉄筋中心まで圧縮鉄筋中心までの距離をそれぞれ d 、 d_c とする。引張鉄筋断面積を A_{st} 、圧縮鉄筋断面積を A_{sc} とする。曲率速度 $\dot{\phi}$ を与え、載荷開始後の時刻 t で軸方向力の和が零であり、中立軸位置が圧縮縁より距離 N で釣合を保つ断面を考える。この時、引張鉄筋歪 ϵ_{st} 、圧縮鉄筋歪 ϵ_{sc} 、中立軸より x の距離のコンクリートの歪を ϵ_{cx} とするとそれぞれ次式で与えられる。

$$\epsilon_{st} = (d - N)\dot{\phi}t$$

$$\epsilon_{sc} = (N - d_c)\dot{\phi}t$$

$$\epsilon_{cx} = x\dot{\phi}t$$

時刻が $t + \Delta t$ になった時中立軸が $N + \Delta N$ になったと仮定すると、歪は次のようになる。

$$\epsilon_{st} = \{d - (N + \Delta N)\}\dot{\phi}(t + \Delta t)$$

$$\epsilon_{sc} = (N + \Delta N - d_c)\dot{\phi}(t + \Delta t)$$

$$\epsilon_{cx} = (x + \Delta N)\dot{\phi}(t + \Delta t)$$

ここで、各歪速度 $\dot{\epsilon}_{st}$ 、 $\dot{\epsilon}_{sc}$ 、 $\dot{\epsilon}_{cx}$ は

$$\dot{\epsilon}_{st} = \{d - (N + \Delta N)\}\dot{\phi} - \Delta N\dot{\phi}t/\Delta t$$

$$\dot{\epsilon}_{sc} = \{(N + \Delta N) - d_c\}\dot{\phi} + \Delta N\dot{\phi}t/\Delta t$$

$$\dot{\epsilon}_{cx} = (x + \Delta N)\dot{\phi} + \Delta N\dot{\phi}t/\Delta t$$

以上より時刻 $t + \Delta t$ での歪と歪速度が定まった。これから鉄筋については 3.1 (1) で与えられる応力-歪曲線を用い、コンクリートについては 4.1 (2) で与えられる応力-歪曲線を用いて応力が求められる。鉄筋引張合力 T 、鉄筋圧縮力 C_s 、コンクリート圧縮合力 C_c は次のようにあらわされる。

$$T = \sigma(\epsilon_{st}, \dot{\epsilon}_{st}) \cdot A_{st}$$

$$C_s = \sigma(\epsilon_{sc}, \dot{\epsilon}_{sc}) \cdot A_{sc}$$

$$C_c = b \int_0^{N + \Delta N} \sigma(\epsilon_{cx}, \dot{\epsilon}_{cx}) dx$$

ここで $T - (C_s + C_c) = 0$ となる条件を用い仮定した中立軸位置を判定する。中立軸位置が定まれば、応力分布、歪分布が得られ、その時の応力分布から断面に働く曲げモーメントが得られる。

5. 鋼はりの載荷実験

5.1 試験体及び載荷装置

試験体は SS41 材 $\mathbb{B}-6$ を溶接により組み立て、Built-up H- $50 \times 50 \times 6 \times 6$ の形状にし、これをその後焼鈍したものである。試験体を Fig. 7 に示す。試験体中央部及び中央より 100 mm 離れた断面のウェブ中心に測定治具取り付け用ボルト穴 (14φ) があけられている。試験体数は動的載荷用 2 体、静的載荷用 1 体、計 3 体である。載荷装置は電気油圧式サーボ試験機が用いられた。Photo. 1 に載荷前の試験体及び実験装置を示す。

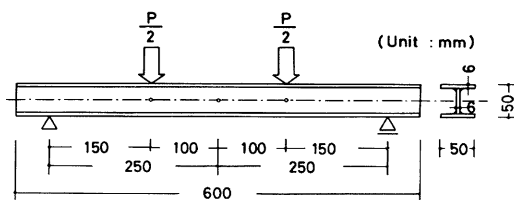


Fig. 7. Test Specimen of Steel Beam

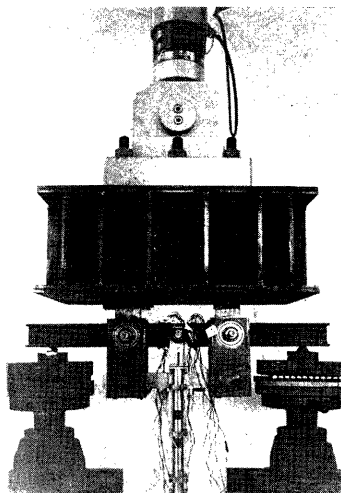


Photo. 1. View of Test of Steel Beam

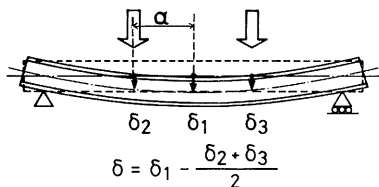


Fig. 8. Measuring Displacement

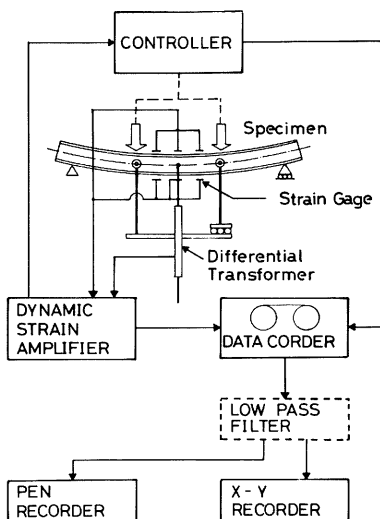


Fig. 9. Testing System of Steel Beams

5.2 計測システム

Fig. 8 で示す相対たわみ δ が差動トランスによって計測された。この計測装置は試験体の中央及び中央より 100 mm 離れた断面に取りつけられた 3 つのボルトにより試験体に取りつけられた。中央及び中央より 50 mm 離れた 3 つの断面の上下フランジの軸方向歪が検長 5 mm の電気抵抗線型歪ゲージをフランジ中心線よりフランジの幅方向に 15 mm ずつ

離れた 2 ヶ所に計 12 枚貼布して測定された。荷重はロードセルによって検出された。すべてのデータはデータレコーダによって記録され、ローパスフィルターを介してリニアコーダ、あるいは X-Y レコーダに再生された。上に述べた計測システムを Fig. 9 に示す。

5.3 载荷方法

载荷は単純支持はり 2 点载荷とし、载荷点は Fig. 7 で示されている。中央点のたわみを δ_1 (mm)、中央

Table 3. Mechanical Properties of Material

	Elastic Modulus (t/cm ²)	Yield Stress (t/cm ²)	Ultimate Stress (t/cm ²)	Strain at Beginning of Strain-hardening (%)	Strain at Breakage (%)
Flange	2124.5	2.71	4.23	2.5	31.53
Web	2143.6	2.64	4.16	—	31.65

Table 4. Measured Dimensions of Steel Beams

	Depth (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	
			Web	Flange
for Static Test	49.85	49.74	5.99	5.97
for Dynamic Test	49.95	49.84	5.97	5.93

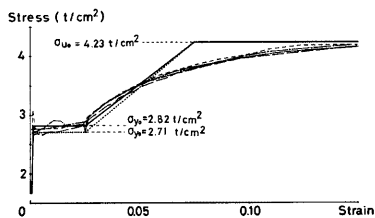


Fig. 10. Stress-Strain Curves of Steel

より a (mm) だけ離れたたわみを δ_2, δ_3 (mm) とすると Fig. 8 で示されている δ は $\delta_1 - (\delta_2 + \delta_3)/2$ であるが、この相対たわみ δ から曲率 ϕ 及び曲率速度 $\dot{\phi}$ は、曲げモーメント一定である試験部では次式で与えられる。

$$\phi = 2\delta / (\delta^2 + a^2), \quad \dot{\phi} = 2\dot{\delta}(a^2 - \delta^2) / (a^2 + \delta^2)^2$$

相対たわみ δ が a に比べて十分小さいと考えてよい。これにより相対たわみ速度 $\dot{\delta}$ が一定であるならば曲率速度も一定となる。従って载荷は差動トランスで検出されたこの相対たわみをコントローラーにフィードバックし、相対たわみ速度一定となるように制御された。

5.4 実験結果

Table 3, Fig. 10 に材料試験結果を示す。Fig. 10 で降伏応力が 2.82 t/cm², 2.71 t/cm² の2種示されているのは前者が歪 0.02の時の応力の平均値、後者が下部降伏応力の平均値である。Fig. 11 に動的载荷実験での荷重と差動トランス及び歪ゲージのデータから計算された曲率の時刻歴を示す。Fig. 12 に実験より得られた荷重-変位関係を示す。同図には Table 3 で示されている材料定数, Table 4 で示されている試験体断面実測寸法, 更に溶接による断面積増加を考慮し, Fig. 11 での差動トランスからのデータから得られ

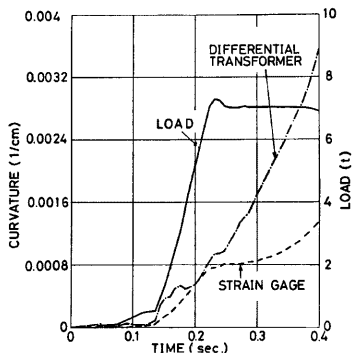


Fig. 11. Loading Rate and Curvature Rate Diagram

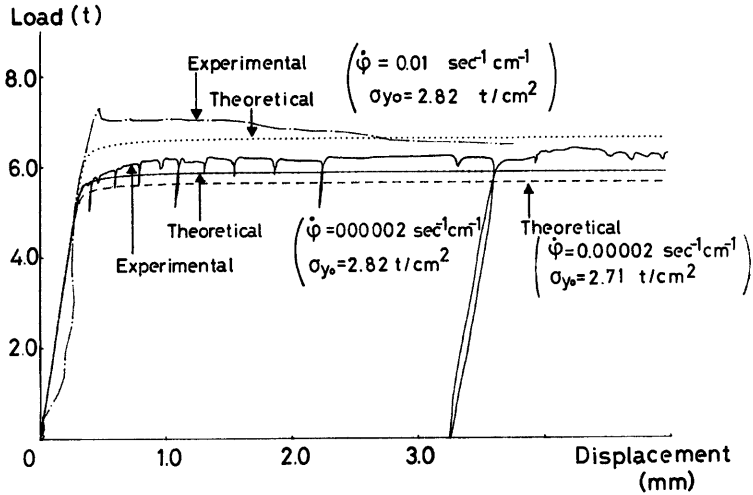


Fig. 12. Load-Displacement Diagram

た曲率の時刻歴から計算された降伏時前後の曲率速度の平均値と、3節で仮定した歪速度を考慮した応力-歪関係を用いた解析値が同時に示されている。動的載荷時の実験曲線（一点鎖線）で耐力が下がっているのは、試験体に横座屈、局部座屈が生じたためである。動的載荷では降伏耐力に達するまで約0.2秒、静的載荷では約1分である。Fig. 13に最大耐力-曲率速度関係を示す。图中破線は、実験に用いられた試験体の実測寸法、材料定数の平均値をもとに、曲率速度を変数として与えて得られた曲率 0.002 cm^{-1} の時の耐力の解析値を示している。

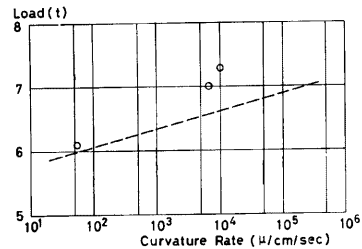


Fig. 13. Load-Curvature Rate Diagram

5.5 考察

実験値、解析値とも曲率速度が増大すれば降伏耐力が上昇することが認められた。しかし、動的載荷の実験値は解析値を上まわっており、両者はあまり良く一致していない。しかし、実験値では曲率 0.002 cm^{-1} （相対たわみ $\delta=1 \text{ mm}$ ）で動的載荷の荷重は静的載荷の値と比べて14%の上昇を示し解析値でも同じ上昇を示し、降伏耐力の上昇率については実験と解析の値はよく合っている。

6. 鉄筋コンクリートはりの実験

6.1 試験体

(1) コンクリート

4週圧縮強度 401 kg/cm^2 、比重3.15の普通ポルトランドセメント、細骨材として最大粒径 1.2 mm 以下で、表乾状態の比重2.54、綴喜郡田辺町産の山砂、粗骨材として粒径 5 mm 以上 10 mm 以下で、表乾状態の比重2.58、田辺町産の山砂利を用いた普通コンクリートである。水セメント比60%，スランプ 15 cm ，調合重量比はセメント：砂：砂利が1：3.06：2.50である。養生は実験室で空中養生とした。実験時の材

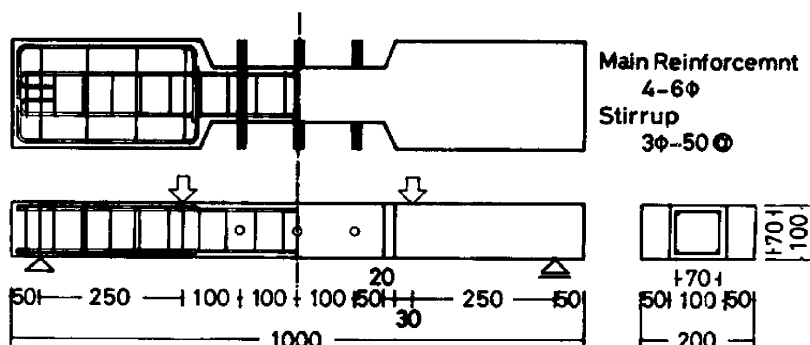


Fig. 14. Test Specimen of Reinforced Concrete Beam

令は試験体 No. 1, No. 2 で 42 週, No. 3 で 44 週, No. 4 で 52 週であった。

(2) 鉄筋

主筋として SR 24 の規格を満たすように特別に製作された直径 6 mm の丸鋼, スターラップとして直径 3 mm の丸鋼を用いた。

(3) 試験体形状及び試験体数

試験体は長さ 1,000 mm, 試験部の長さ 300 mm, 試験部の断面は 100 mm×100 mm で, 上下各 2 本の 6 φ 鉄筋が, かぶり厚さ 12 mm で配置されている。試験体中央及び中央より 100 mm 離れた 3 つの断面の中央より 3 本の測定のための差動トランス取りつけ用ボルトが取り付けられている。試験体詳細を Fig. 14 に示す。試験体数は動的載荷用 2 体, 静的載荷用 2 体, 計 4 体である。

6.2 載荷装置, 計測システム, 載荷方法

鋼はりの場合と同様である。歪は試験体中央部の断面において, 圧縮側コンクリート表面の 2 点および引張鉄筋 2 本にそれぞれ検長 30 mm, 5 mm の電気抵抗線型歪ゲージが貼布され測定された。設定した載荷速度は動的 1 段階, 静的 1 段階である。

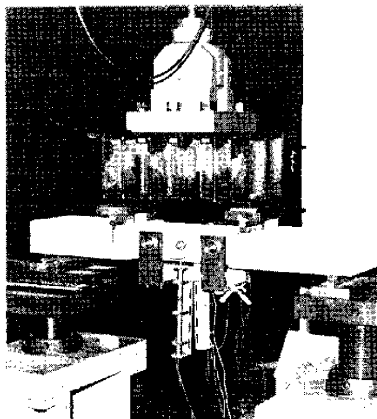


Photo. 2. View of Test of Reinforced Concrete Beam

Table 5. Mechanical Properties of Concrete

Specimen Number	Compressive Strength (kg/cm ²)	Strain at Maximum Stress (%)
1	216	0.210
2	204	0.214
3	221	0.215
4	218	0.217

Table 6. Mechanical Properties of Reinforcing Bars

Yield Stress (t/cm ²)	Ultimate Strength (t/cm ²)	Strain at Breakage (%)
2.44	3.73	43

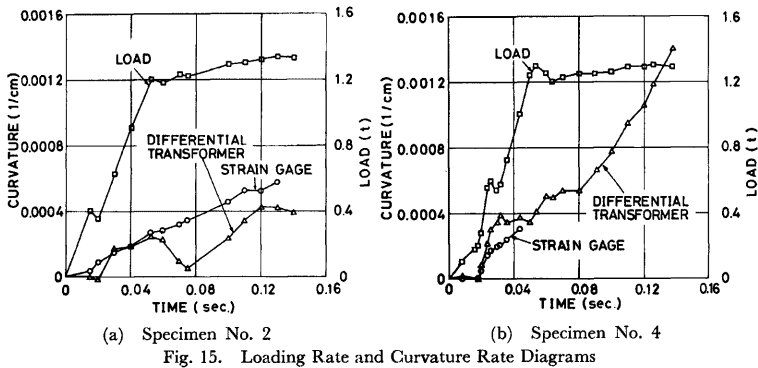


Fig. 15. Loading Rate and Curvature Rate Diagrams

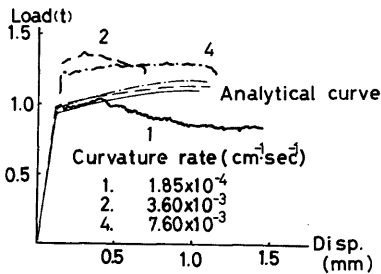


Fig. 16. Load-Displacement Diagram

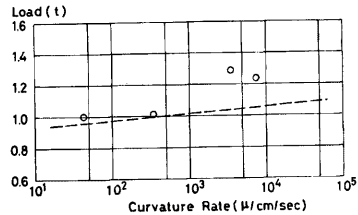


Fig. 17. Load-Curvature Rate Diagram

Photo. 2 に載荷前の試験体及び実験装置を示す。

6.3 実験結果

Table 5, 6 にそれぞれコンクリートと鉄筋の材料試験結果を示す。Fig. 15 (a), (b) に動的載荷時の荷重および差動トランス、歪ゲージのデータから計算された曲率の時刻歴を示す。Fig. 15 (a) が試験体 No. 2, Fig. 15 (b) は No. 4 である。Fig. 16 に荷重—変位関係を示す。図中、解析値が細線で示されている。解析では試験体実測寸法、コンクリート圧縮強度、最大応力時歪の実験値、実験での降伏時前後の曲率速度の平均値が用いられている。Fig. 17 に最大荷重—曲率速度関係が示されている。図中破線は、試験体実測寸法及び材料定数の実験値の平均値を用い、曲率 0.001 cm^{-1} (相対たわみ $\delta = 0.5 \text{ mm}$) の解析値を示している。実験では、降伏耐力に達するまでの時間は試験体 No. 1 で約 9 秒、No. 2 で 0.05 秒、No. 4 でも 0.05 秒

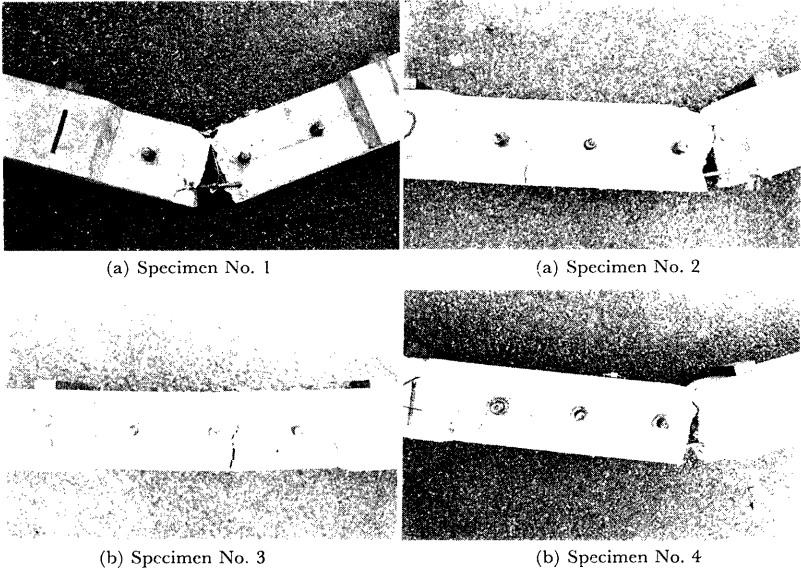


Photo. 3. Specimen after Static Loading

Photo. 4. Specimen after Dynamic Loading

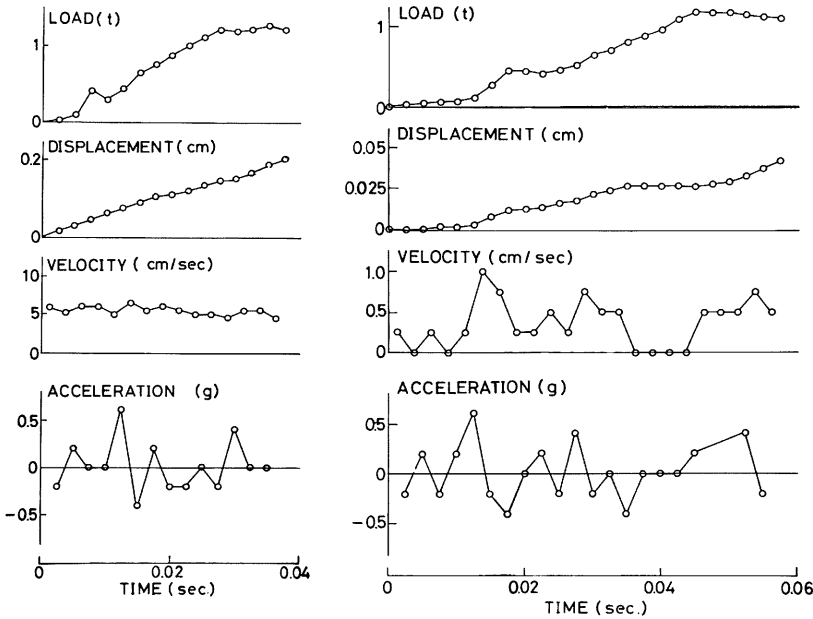


Fig. 18. Time-Load, Ram Displacement, Ram Velocity, and Ram Acceleration Diagrams

であった。静的載荷後の試験体 (No. 1, No. 3) を **Photo. 3 (a), (b)** に、動的載荷後の試験体 (No. 2, No. 4) を **Photo. 4 (a), (b)** にそれぞれ示す。

6.4 考 察

試験体の終局状態では動的、静的載荷の間では破壊状態に大きな違いが認められる。静的載荷の場合、中央部を中心にしてひびわれが入り、最も大きなひびわれは中央部付近で発生した。一方、動的載荷の場合、中央部にもひびわれは認められるが、最も大きなひびわれは中央より 150 mm 離れた断面が変化する部分で発生した。静的載荷時の荷重-変位曲線は実験と解析がよく一致しているが、動的載荷の場合、実験での最大耐力は解析値より30%程度大きい。この原因として、ラムの加速度による、ロードセル以下の部分の質量による慣性力の影響が考えられる。この影響について、ラムの変位時刻歴を調べ、その加速度を求めた。**Fig. 18 (a)** が試験体 No. 2, **Fig. 18 (b)** が試験体 No. 4 の荷重時刻歴, ラム変位時刻歴, ラム変位速度, ラム加速度を示している。これから、降伏近傍ではその加速度は $0 \sim 0.2 \text{ g}$ であり、この加速度によって降伏耐力は $0 \sim 40 \text{ kg}$ 程度の影響を受ける可能性がある。しかし、これによって実験値と解析値の差を十分説明できない。この差の原因については今後の課題である。

謝 辞

本実験でコンクリート試験体の製作に関して、摂南大学建築学科 佐々木良一助教授に御便宜を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。本研究は昭和52, 53年度文部省科学研究費補助金・一般研究(c)「動的繰返し力を受ける構造部材の曲げ及びせん断破壊挙動に関する基礎的研究」(No. 255219, 研究代表者・若林實)に依るものである。

参 考 文 献

- 1) 若林 實, 中村 武, 吉田 望, 岩井 哲: 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, 京都大学防災研究所年報, 第22号 B-1, 1979, pp. 255-272.