

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2）

若林 實・中村 武・岩井 哲
渡辺 幸広・下戸 芳寛・林 康裕

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF LOADING RATE ON THE BEHAVIOR OF STRUCTURAL MATERIALS AND MEMBERS (Part II)

By *Minoru WAKABAYASHI, Takeshi NAKAMURA, Satoshi IWAI, Yukihiko WATANABE,*
Yoshihiro ORITO and Yasuhiro HAYASHI

Synopsis

Dynamic and quasi-static cyclic loading tests of steel bar specimens were conducted, and the effects of a strain rate on the stress-strain curve of steel were examined. Stress-strain relationship of steel under cyclic loading in which the effects of the strain rate were taken into consideration was formulated on the basis of the test results.

Effects of a curvature rate on the behavior of steel beams and reinforced concrete beams subjected to dynamic cyclic bending were investigated experimentally and theoretically. Steel beams and reinforced concrete beams were analyzed using the formulated stress-strain relationship taking the effect of the strain rate into consideration. Increases of moment bearing capacity with an increasing curvature rate were recognized in both of theoretical and experimental results.

1. 序

建築構造物が地震力などの外乱を受ける場合、各構造部材が変形する際の歪速度はかなり大きなものとなることが予想される。そのため、部材の耐力や履歴形状を論議する際には、載荷速度や歪速度がそれらの性質にどのような影響を与えるかを考慮に入れることが望ましい。前報¹⁾によってコンクリート及び鉄筋に対し準静的及び動的載荷実験が行なわれ、それらの応力-歪関係に及ぼす歪速度の影響が明らかにされた。また、前報²⁾によって鋼はり及び鉄筋コンクリートはりに対する単調曲げ載荷実験が行なわれ、部材の耐力、変形能力に対する載荷速度の影響が明らかにされた。本報ではそれらの報告に引き続き、鋼材料・鋼はり・鉄筋コンクリートはりの繰返し挙動における載荷速度の影響を調べた。鋼材料に関しては、軸方向引張・圧縮繰返し載荷実験を行ない、その結果より歪速度の影響を考慮に入れた応力-歪履歴のモデル化を行なった。鋼はり・鉄筋コンクリートはりについては、準静的及び動的な繰返し曲げ載荷実験を行ない、また、上述の鋼材料の繰返し載荷実験及び前報¹⁾の結果に基づいて仮定した応力-歪履歴より得られた曲げモーメント-曲率関係の解析結果と比較することにより、それぞれの挙動に及ぼす載荷速度の影響を調べた。

2. 鋼材料軸方向引張・圧縮繰返し載荷実験

2.1 試験体

試験体形状を Fig. 1 に示す。試験部は円形断面とし、塑性域までの圧縮載荷実験が可能のように検長を断面直径の3倍とした。材料はSS41材であり、旋盤によって図の形状に加工した後に焼鈍処理を行なった。試験体数は、準静的載荷用2体、動的載荷用3体の計5体である。

2.2 載荷装置

載荷には電気油圧式サーボ試験機を使用した。試験機の能力は、最大荷重が動的 $\pm 20t$ ・静的 $\pm 30t$ 、最大

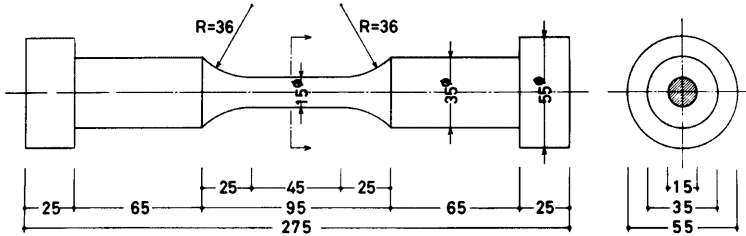


Fig. 1. Test Specimen of Steel Bar.

ピストンストローク $\pm 150\text{mm}$ であり、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 $\pm 1.5\%$ 以内である。

2.3 計測システム

荷重は試験機のアクチュエータに取り付けられたロードセルにより検出された。また試験体の変形は、試験体中央部の対称位置に取り付けられた2個のパイ型ゲージと、試験体中央で材軸方向に貼付された4枚の電気抵抗線型歪ゲージによって計測された。パイ型ゲージの検長は40 mm、歪ゲージの検長は5 mmである。またパイ型ゲージの感度は約 $2000\ \mu/\text{mm}$ であり、測定範囲は $\pm 2\text{mm}$ である。Fig. 2 に試験体つかみ具と試験体・パイ型ゲージの取り付け部分の詳細を示す。試験体は高力ボルトによってつかみ具部分で両端固定支持されている。データは動歪アンプを通してすべてデータレコーダに記録され、ローパスフィルタを介してリニアペンレコーダあるいはX-Yプロッタによりモニタ及び再生がなされた*1。

2.4 載荷方法

載荷は軸方向引張・圧縮繰返し載荷とし、パイ型ゲージによって計測された変位をコントローラにフィードバックし、歪速度が一定となるように制御された。歪速度 $\dot{\epsilon}$ は準静的載荷を $5 \times 10^{-5}\ \text{sec}^{-1}$ とし、動的載荷において $5 \times 10^{-3}\ \text{sec}^{-1}$ 、 $5 \times 10^{-2}\ \text{sec}^{-1}$ の2段階に設定した。

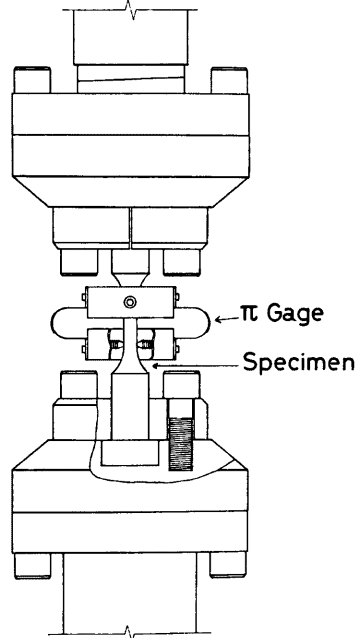


Fig. 2. Specimen and Elongation Measuring System.

*1 計測機器の周波数特性については文献³⁾を参照されたい。

2.5 実験結果

実験より得られた応力-歪関係を Fig. 3(a)~(e) に示す*2。Table 1 に各試験体の降伏時前後の歪速度及び降伏応力を示す。Fig. 4 に試験体 No. 5 ($\dot{\epsilon} = 4.69 \times 10^{-2} \text{ sec}^{-1}$) の荷重及びパイ型ゲージのデータから得ら

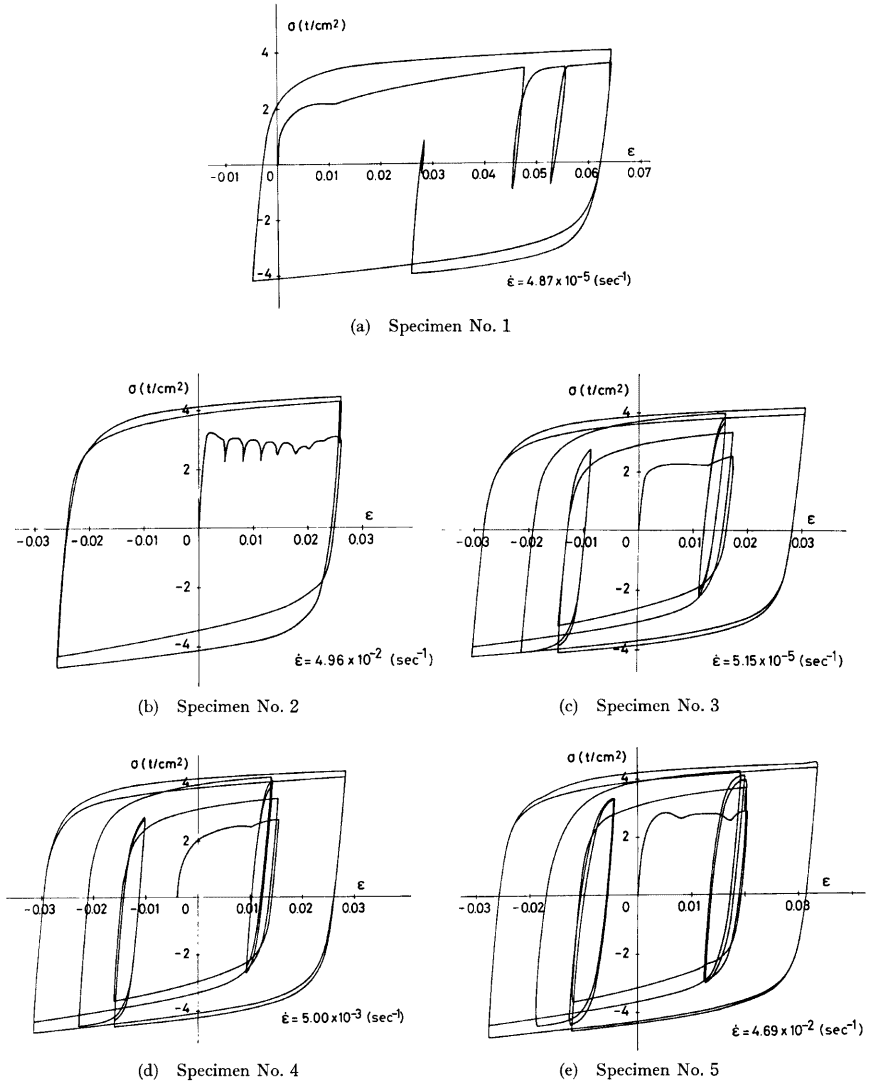


Fig. 3. Stress-Strain Curves of Experimental Results.

*2 試験体 No. 4 は試験体取り付け時に圧縮を過大にかけたために実験開始前に降伏した。

Table 1. Test Results of Steel Bars

| Specimen No. | Strain Rate $\dot{\epsilon}$ (sec ⁻¹) | Yield Stress σ_y (t/cm ²) |
|--------------|---|--|
| 1 | 4.87×10^{-5} | 2.17 |
| 2 | 4.96×10^{-2} | 2.81 |
| 3 | 5.15×10^{-5} | 2.21 |
| 4 | 5.00×10^{-3} | 2.55 |
| 5 | 4.69×10^{-2} | 2.78 |

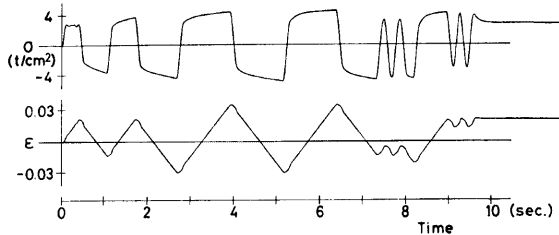


Fig. 4. Stress Rate and Strain Rate Diagram.

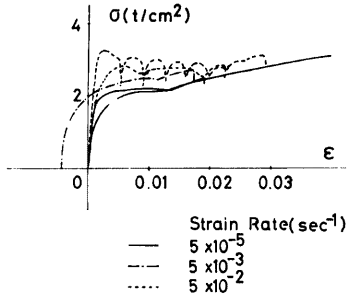


Fig. 5. Comparison of Virgin Curves.

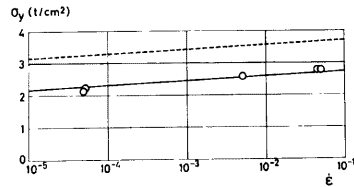


Fig. 6. Yield Stress versus Strain Rate Diagram.

れた、応力と歪の時刻歴を示す。試験体試験部での歪速度はほぼ一定で設定通りに载荷されたといえる。**Fig. 5** に各実験より得られた処女曲線を重ねて示す。**Fig. 6** に降伏応力-歪速度関係を示す。図中破線は前報¹⁾の丸鋼に対する単調引張実験結果から得られた近似直線 ($\sigma_y = 3.25 \times (4.73 \times 10^{-2} \times \log \dot{\epsilon} + 1.204)$) であり、実線は破線に対し平行にひいたものである。歪速度の増加による降伏応力の増大率は、この近似直線によってよくあらわされているといえる。**Fig. 7(a)~(e)** に試験体 No. 4, No. 5, No. 6 の実験結果より得られた応力-歪関係をもとに、第($i-1$)反転点 ($\epsilon^{(i-1)}$, $\sigma^{(i-1)}$) から (i) 反転点までの半サイクルを、第($i-1$)反転点を座標原点としてあらわしたものを示す。この結果により、弾性域での勾配及び歪硬化域での勾配は歪速度に関わらずほぼ一定であることがわかる。

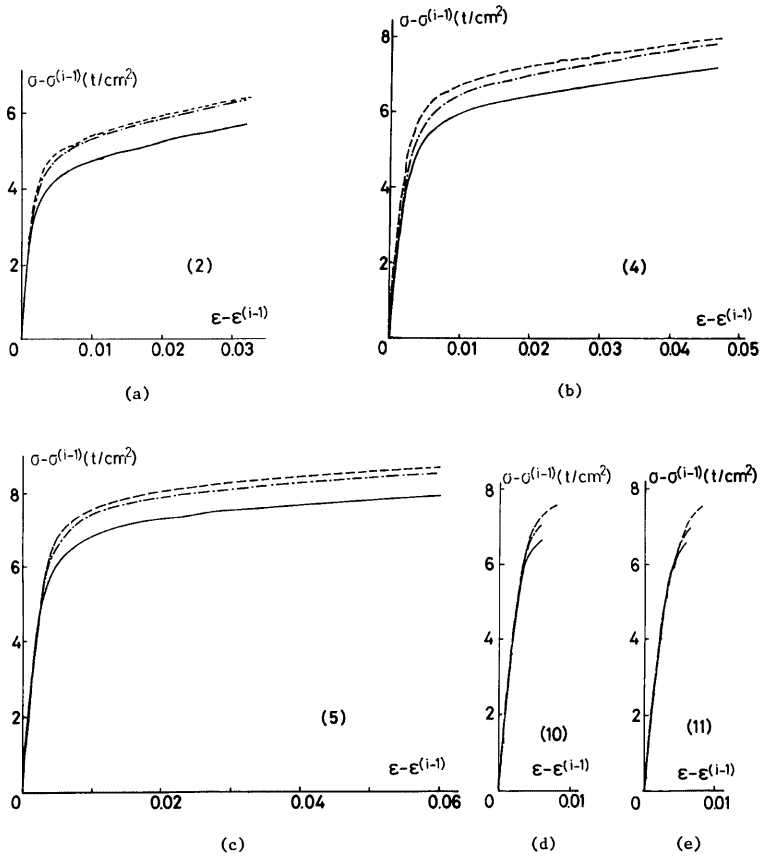


Fig. 7. Comparison of Stress-Strain Curves

3. 歪速度の影響を考慮に入れた鋼材料の応力-歪履歴モデル

上述の実験結果に基づき、歪速度の影響を考慮に入れた応力-歪履歴モデルとして、すでに若林・柴田によって文献⁹⁾で発表された Tri-linear 型応力-歪履歴に対して歪速度の影響を考慮に入れて修正したものをを用いる。Fig. 8 にこの Tri-linear 型応力-歪履歴を示す。この履歴ループは E_1 から E_4 までの4つの勾配と降伏応力 σ_y によって決定される。弾性域勾配は E_1 とする。Bauschinger 域に対応する第2勾配は、小振幅の場合前回の除荷点に向かう直線とし、大振幅の場合勾配 E_2 を持つとする。また、歪硬化域に対応する第3勾配を E_3 とし、履歴ループのふくらみを規定する補助線の勾配を E_4 とする。ここで弾性域勾配 E_1 と歪硬化域での勾配 E_3 は上述の実験結果より歪速度に関わらず一定値をとるものとした。勾配 E_2, E_4 については実験値から求め歪速度との対応を示すと、Figs. 9, 10 となる。図中破線は、Fig. 9 では最小自乗法による近似直線であり、Fig. 10 では平均値である。この結果より勾配 E_2 については歪速度の常用対数関

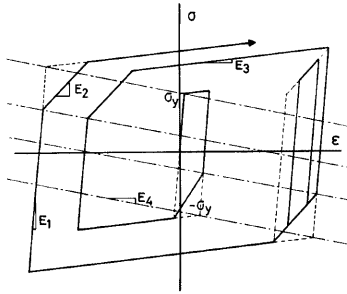


Fig. 8. Idealized Stress-Strain Relation of Steel.

数について線形に増加するとし、勾配 E_4 については歪速度に関わりなく一定値をとるものとした。また降伏応力 σ_y は、前報¹⁾の実験結果及び前述の実験結果より、歪速度の常用対数関数について線形に増加するとした。**Table 2** に実験より得られ解析に用いられた4つの勾配 E_1, E_2, E_3, E_4 と降伏応力 σ_y の数値あるいは数式を示す。**Fig. 11(a), (b)** にこのモデルと実験結果との対応を示す。(a), (b) はそれぞれ試験体 No. 3, No. 5 に対応する。

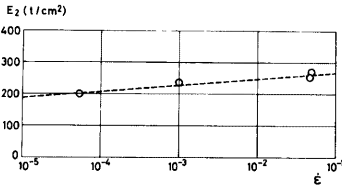


Fig. 9. E_2 versus Strain Rate Diagram

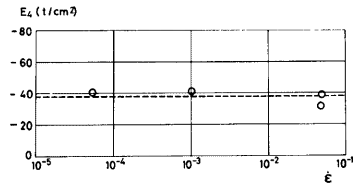


Fig. 10. E_4 versus Strain Rate Diagram.

Table 2. Variables and Constants Used in Analysis

| | | | |
|------------|--|-------------------|---|
| σ_y | $\sigma_y = \sigma_{y0} (\alpha_y \log \dot{\epsilon} + \beta_y)$ *) | t/cm ² | ($\dot{\epsilon} > 50 \mu\text{/sec}$) |
| | $\sigma_y = \sigma_{y0}$ | t/cm ² | ($\dot{\epsilon} \leq 50 \mu\text{/sec}$) |
| E_1 | $E_1 = 2100$ | t/cm ² | |
| E_2 | $E_2 = 199.2 (\alpha_2 \log \dot{\epsilon} + \beta_2)$ | t/cm ² | ($\dot{\epsilon} > 50 \mu\text{/sec}$) |
| | $E_2 = 199.2$ | t/cm ² | ($\dot{\epsilon} \leq 50 \mu\text{/sec}$) |
| E_3 | $E_3 = 21$ | t/cm ² | |
| E_4 | $E_4 = -37.8$ | t/cm ² | |
| α_y | $\alpha_y = 4.73 \times 10^{-2}$ | | |
| β_y | $\beta_y = 1.204$ | | |
| α_2 | $\alpha_2 = 9.42 \times 10^{-2}$ | | |
| β_2 | $\beta_2 = 1.405$ | | |

* σ_{y0} : yield stress at static loading

4. 鋼はり両振り繰返し載荷実験

4.1 試験体及び載荷装置

試験体はSS41材帯板E-6をH-50×50×6×6の形状に溶接によって組み立てた後、焼鈍を行なったものを用いた。支持点及び載荷点にスチフナと載荷のための厚さ3mmの鋼板を、また試験体中央及び中央より100mm離れた位置に変位測定装置取り付け用のボルト3本をそれぞれ溶接によって取り付け、再度焼鈍した。**Fig. 12**に試験体形状を示す。試験体数は準静的載荷用1体、動的載荷用3体の計4体である。載荷は2・2と同じ電気油圧式サーボ試験機を用いた。**Fig. 13**に載荷装置を示す。また、**Photo 1**に載荷前の試験体及び載荷装置を示す。

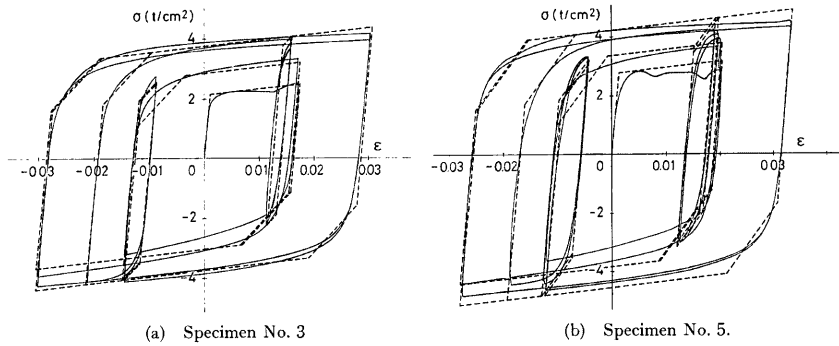


Fig. 11. Comparison of Analytical Results with Experiments.

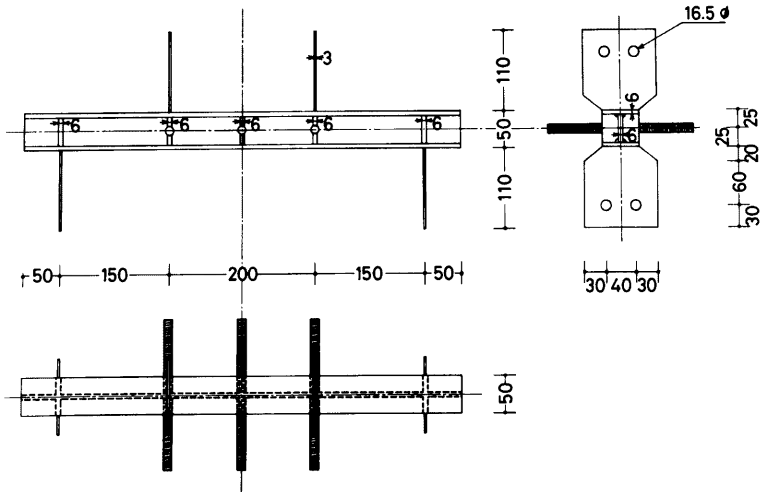


Fig. 12. Test Specimen of Steel Bar.

4.2 計測システム

Fig. 14 に示す曲げモーメント一定の試験部における相対たわみ 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に取り付けられた3本のボルトにより Fig. 13 のように取り付けられた。試験体中央及び中央より材軸方向に 50mm 離れた上下フランジに検長 5mm の電気抵抗線型歪ゲージが貼付されて曲率及び試験体中央の軸方向歪が計測された。荷重はアクチュエータに取り付けられたロードセルにより検出された。データの記録・再生は鋼材料実験と同様である。

4.3 載荷方法

載荷は単純支持はり 2 点載荷とし、支持点及び載荷点では 3mm 厚鋼板を利用してピン・ローラーとして機能させた。また載荷速度の制御を以下のようにして行なった。Fig. 14 に示す相対たわみ δ を用いて曲率 ϕ 及び曲率速度 $\dot{\phi}$ は、曲げモーメント一定の試験部では次式で与えられる。

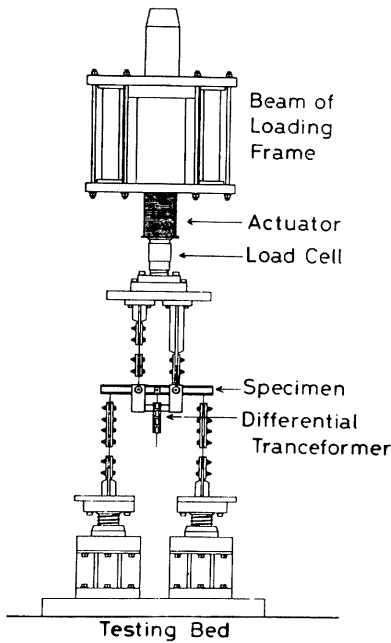


Fig. 13. Testing System.

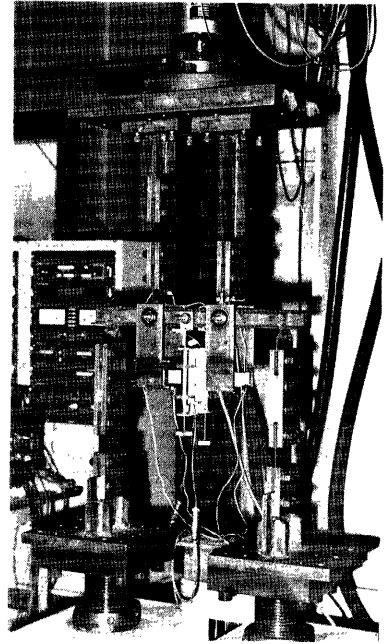


Photo. 1 View of Test of Steel Beam.

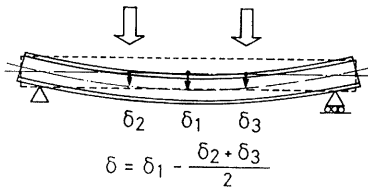


Fig. 14. Measuring Displacement.

$$\begin{aligned} \varphi &= 2\delta/(\delta^2 + a^2) \\ \dot{\varphi} &= 2\delta(a^2 - \delta^2)/(a^2 + \delta^2)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

相対たわみ δ が a に対して十分に小さいと考えるとよい*3。これにより相対たわみ速度 $\dot{\delta}$ が一定であれば試験部の曲率速度 $\dot{\varphi}$ も一定となる。従って実験では差動トランスで計測された相対たわみ δ をコントローラにフィードバックして相対たわみ速度 $\dot{\delta}$ が一定となるように制御し、曲率速度が一定の下での挙動を調べることを目的として種々の速度で荷重を行なった。

4.4 実験結果

材長 100 mm の短柱の圧縮実験結果より、式食体材料の降伏応力は 3.21 t/cm^2 であった。Fig. 15(a)~(d) に実験結果より得られた曲げモーメント-曲率関係を示す。Table 3 に各試験体の最大耐力時の曲率速度 $\dot{\varphi}$ 、最大耐力 L_{\max} 、相対たわみ δ を示す。Fig. 16 に試験体 No. 2 の動的荷重時 ($\dot{\varphi} = 2.06 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$) の荷重及び相対たわみの時刻歴を示す。降伏耐力に達するまでの時間は試験体 No. 1 から No. 4 に対し、それぞれ約 90 秒、5 秒、0.2 秒、0.05 秒であった。Fig. 17 に最大耐力-曲率速度関係を示す。

*3 相対たわみ δ が a に比べて十分小さいとすると、近似曲率速度 $\dot{\varphi}'$ は $\dot{\varphi}' = 2\delta/a^2$ となる。本実験で得られる δ は最大 2.2 mm 程度であり、この場合でも $\dot{\varphi}'$ と $\dot{\varphi}$ の比は $\dot{\varphi}'/\dot{\varphi} = 20.00 \times 10^{-4}/1.997 \times 10^{-4} = 1.002$ 程度である。

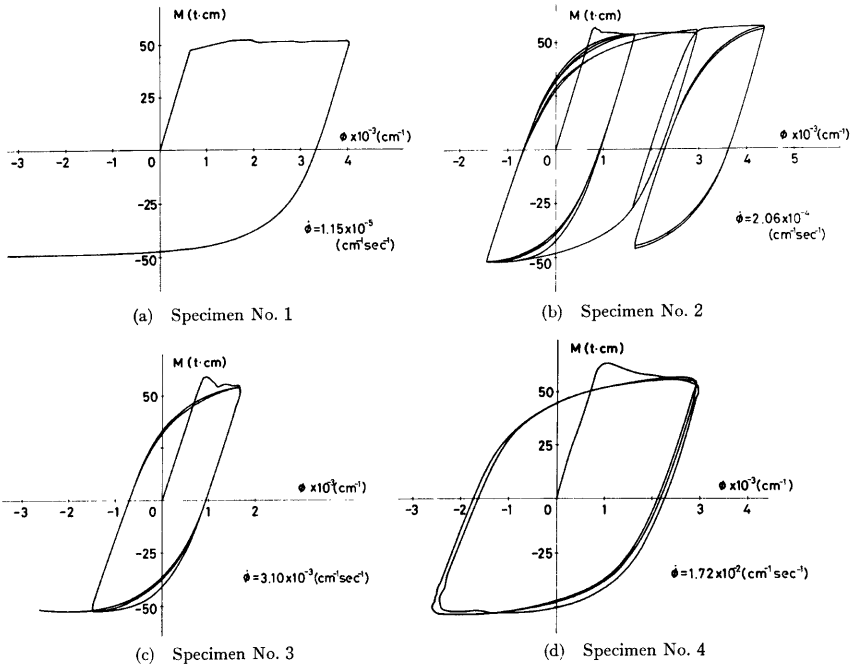


Fig. 15. Moment-Curvature Diagrams of Experimental Results

Table 3. Test Results of Steel Beams

| Specimen No. | Curvature Rate $\dot{\phi}$ (cm ⁻¹ sec ⁻¹) | Maximum Load L_{max} (t) | Displacement at L_{max} δ (mm) |
|--------------|---|----------------------------|---|
| 1 | 1.15×10^{-5} | 6.89 | 0.982 |
| 2 | 2.06×10^{-4} | 7.55 | 0.420 |
| 3 | 3.10×10^{-3} | 7.96 | 0.470 |
| 4 | 1.72×10^{-2} | 8.47 | 0.499 |

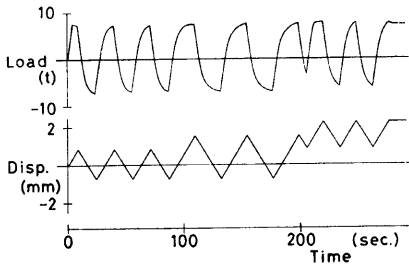


Fig. 16. Loading Rate and Displacement Rate Diagram.

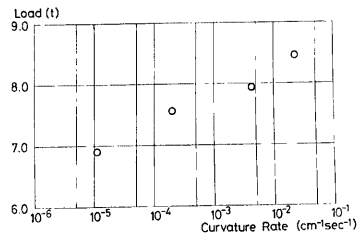


Fig. 17. Maximum Load versus Curvature Rate Diagram.

5. 鋼はりの解析

5.1 仮定

- (1) 解析で用いる応力-歪履歴は、前述の歪速度の影響を考慮した Tri-linear 型履歴モデルとする。
- (2) 変形は微小であり、平面保持の仮定が成立するとする。
- (3) 曲率速度が一定であるとするとする。

5.2 解析方法

断面をウェブ10等分、上下フランジ各3等分に断面成の方向に分割し、16要素モデルとする。仮定5.1(2)、(3)より各要素の中心の歪と歪速度は、中立軸から中心までの距離、曲率速度及び載荷開始後の時間によって定まる。各要素の歪をその要素の中心での歪で代表させるとするならば、仮定5.1(1)より各要素の応力状態が求まる。求められた応力によるモーメントを全要素にわたって合計すれば、ある時刻における曲率に対応して働く、曲げモーメントが求まる。このようにして連続的に時刻を追うことにより、断面の曲げモーメント-曲率関係を求める。

5.3 解析結果

Fig. 18(a)~(d)に解析で求められた曲げモーメント-曲率関係を破線で示し、実験結果と比較する。解析においては、断面寸法は公称値を用い、実験結果に対応するように曲率振幅、曲率速度、静的降伏応力を与えた。

5.4 考察

曲げモーメント-曲率関係は、降伏耐力・歪硬化域での挙動については実験結果と解析結果が比較的良好

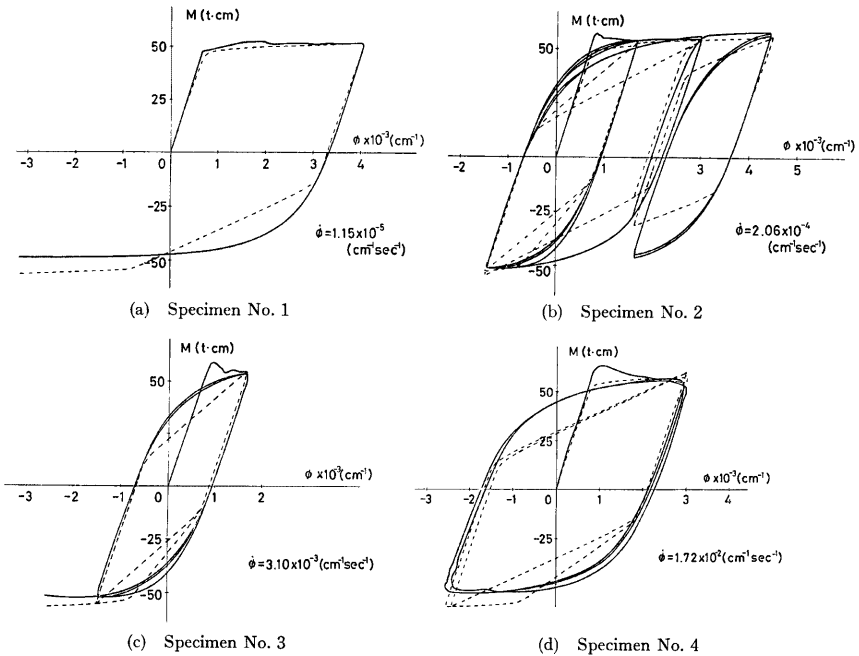


Fig. 18. Comparison of Analytical Results with Experiments.

一致している。しかし、応力-歪履歴でのバウシinger域を示す第2勾配に相当する部分及び曲げモーメント正側比ば負側での解析結果と実験結果の誤差が大きいのが認められる。バウシinger域に対応する勾配の部分については、モデル化の対象とした鋼材料の実験結果での歪振幅に比べ、はりの実験の曲率振幅が小さく、各要素の歪振幅が降伏側で繰返されたため、折り返し点指向型のモデル化を行なったことにより誤差が生じたものと思われる。また曲げモーメントの負側については、現実の応力-歪履歴では引張経路と圧縮経路ではその曲線の形状が異なっているが、本解析ではこれを無視した応力-歪履歴を用いたために誤差が大きくなったと思われる。解析の精度を上げるためには小振幅域でのさらに詳しいモデル化が必要である。

6. 鉄筋コンクリートはり両振り繰返し載荷実験

6.1 試験体

(1) 試験体形状及び試験体数

試験体の長さは1000mm, そのうち試験部分の長さは300mmである。試験部分の断面は100mm×100mmで、主筋には上下各2本の6φ鉄筋が、かぶり厚12mmで配置されている。また、あばら筋は3φ鉄筋が50mm間隔で配置されている。試験体中央及び中央より材軸方向に100mm離れた位置に3本の曲率測定装置取り付け用のボルトが取り付けられている。載荷点及び支持点には、載荷・支持用の2mm厚の鋼板が取り付けられている。Fig. 19に試験体詳細を示す。試験体数は準静的載荷用1体、動的載荷用2体の計3体である。

(2) コンクリート

調合材料として、4週圧縮強度396kg/cm²、比重3.16の普通ポルトランドセメント、最大粒径1.2mm以下、表乾状態での比重2.56吸水率2.9%の京都府城陽市木津川産の川砂、粒径5mm以上10mm以下、表乾状態での比重2.64の滋賀県高島郡安曇川産の川砂利をそれぞれ用いた普通コンクリートである。水セメント比66%、スランプ15cm、調合重量比は、セメント：砂：砂利が1：2.38：2.77である。養生は実験室の地下室で空中養生とした。実験時の材令は試験体 No. 1, No. 2で54週, No. 3で58週であった。

(3) 鉄筋

主筋にはSR24の規格を満たすように特別に製作された直径6mmの丸鋼、あばら筋には直径3mmの丸鋼、また載荷点及び支持点付近のせん断補強筋として直径4.5mmの丸鋼を用いた。

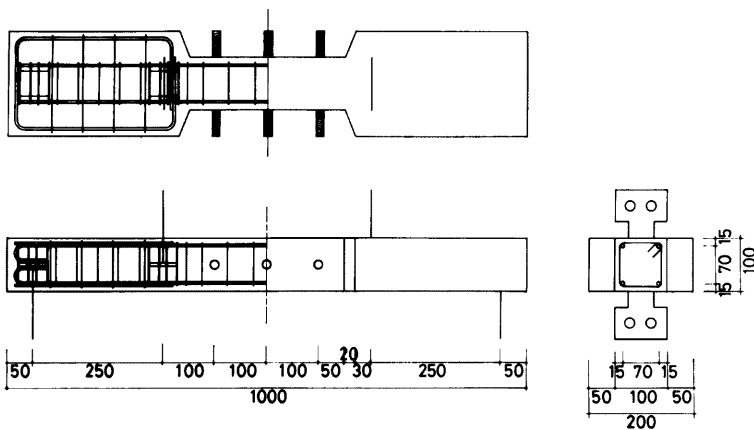


Fig. 19. Test Specimen of Reinforced Concrete Beam.

6.2 載荷装置・計測システム・載荷方法

載荷装置・計測システム・載荷方法は鋼はり実験の場合と同様である。歪の測定には試験体中央部の断面において、コンクリート表面の3点および主筋4本にそれぞれ検長60mmと5mmの電気抵抗線型歪ゲージが貼付された。設定した載荷速度は準静的1段階、動的2段階である。Photo 2 に試験体及び載荷装置を示す。

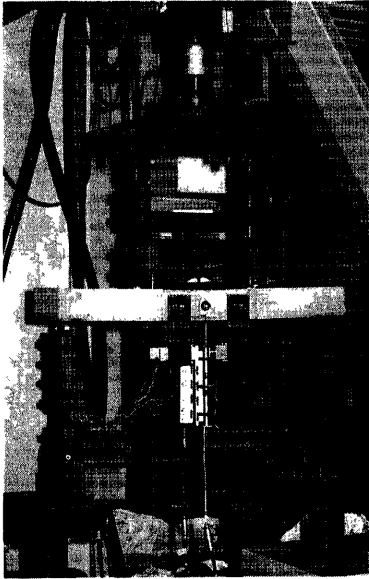


Photo. 2 View of Test of Reinforced Concrete Beam.

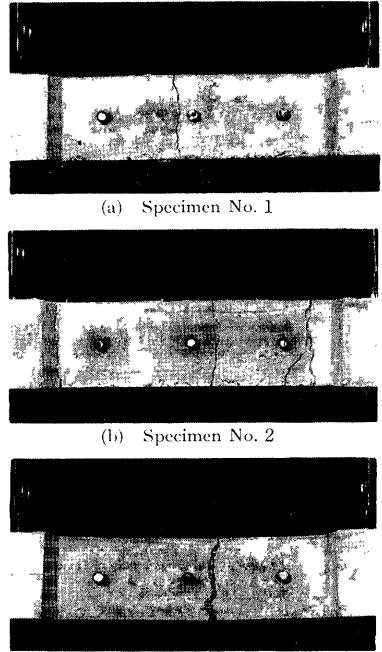


Photo. 3 Specimens after Tests.

Table 4. Mechanical Properties of Concrete

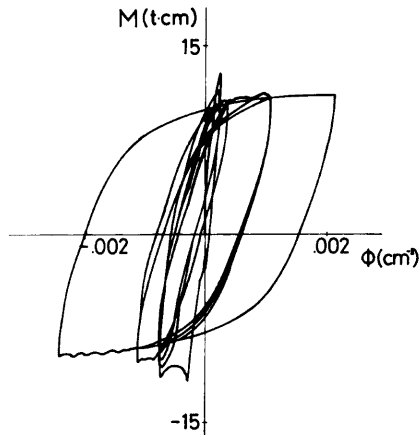
| Specimen No. | Compressive Strength (kg/cm ²) | Strain at Maximum Stress (%) |
|--------------|--|------------------------------|
| 1 | 321 | 0.204 |
| 2 | 332 | 0.183 |
| 3 | 362 | 0.203 |

Table 5. Mechanical Properties of Reinforcing Bars

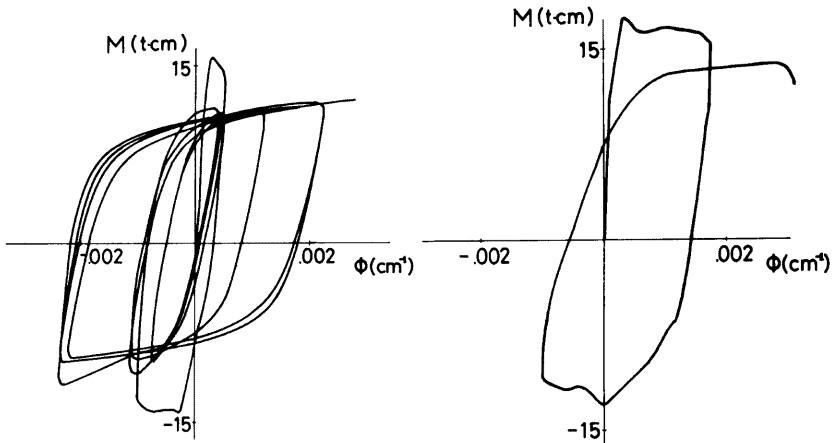
| Young's Modulus (t/cm ²) | Yield Stress (t/cm ²) | Ultimate Strength (t/cm ²) | Strain at Breakage (%) |
|--------------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 1.96×10 ³ | 2.49 | 4.07 | 30.3 |

6.3 実験結果

Tables 4, 5 にそれぞれコンクリートと主筋の材料試験結果を示す。Fig. 20 (a)~(c) に荷重及び相対たわみより得られた曲げモーメント-曲率関係を示す。Table 6 に各試験体の最大耐力時の曲率速度 $\dot{\phi}$ 、最大耐力 L_{max} 、最大耐力時の相対たわみ δ を示す。Fig. 21 に試験体 No. 2 の動的載荷時 ($\dot{\phi}=6.00 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$) の荷重及び相対たわみの時刻歴を示す。最大耐力に達するまでの時間は試験体 No. 1 で約30秒、No. 2 で約0.5秒、No. 3 で約0.02秒であった。Fig. 22 に最大耐力-曲率速度関係を示す。実験後の試験体の破壊形状を Photo 3 (a)~(c) に示す。(a) は準静的載荷、(b)・(c) は動的載荷によるものである。



(a) Specimen No. 1 ($\dot{\phi}=9.20 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$)



(b) Specimen No. 2 ($\dot{\phi}=6.00 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$)

(c) Specimen No. 3 ($\dot{\phi}=1.90 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$)

Fig. 20. Moment-Curvature Diagrams of Experimental Results.

Table 6. Test Results of Reinforced Concrete Beams

| Specimen No. | Curvature Rate $\dot{\phi}$ (cm ⁻¹ sec ⁻¹) | Maximum Load L_{max} (t) | Displacement at L_{max} δ (mm) |
|--------------|---|----------------------------|---|
| 1 | 9.20×10^{-6} | 1.01 | 0.120 |
| 2 | 6.00×10^{-4} | 1.24 | 0.124 |
| 3 | 1.90×10^{-2} | 1.39 | 0.161 |

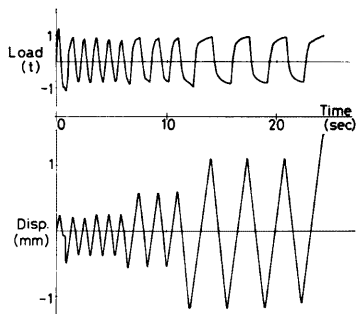


Fig. 21. Loading Rate and Displacement Rate Diagram.

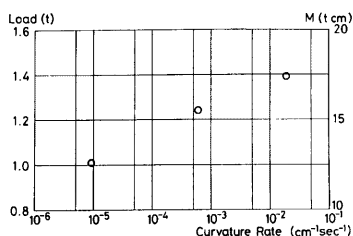


Fig. 22. Maximum Load versus Curvature Rate Diagram.

7. 鉄筋コンクリートはりの解析

7.1 仮定

(1) 鉄筋の応力-歪関係は Fig. 23 に示すように完全弾塑性で、降伏応力・弾性係数については鋼はりの解析に用いた鋼の応力-歪関係と同一の取扱いを行なった。Fig. 24 に繰返し載荷を受ける応力-歪履歴を示す。

(2) コンクリートの圧縮に対する応力-歪関係は文献⁹⁾の結果より以下のように仮定する。応力-歪関係の形状は Fig. 25 に示すように完全弾塑性であるとする。ここで降伏応力 σ_c 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。降伏応力時歪 ϵ_0 は歪速度に関わらず一定であるとする。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-歪関係を用いる。Fig. 26 に繰返し載荷を受けるコンクリートの応力-歪履歴を示す。

- (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) 曲率速度が一定である。

7.2 解析方法

解析する断面として幅 b 、全せい D 、断面の重心軸から引張鉄筋中心及び圧縮鉄筋中心までの距離をそれぞれ X_{st} 、 X_{sc} 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。またコンクリート断面を n 等分する。Fig. 27 に示すように載荷開始後の時刻 t で設定された曲率に対して、重心軸位置での歪が ϵ_g 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} 、断面の重心軸から要素の中心までの距離が x であるコンクリート要素の平均歪を ϵ_{cx} とするとそれぞれ次式で与えられる。

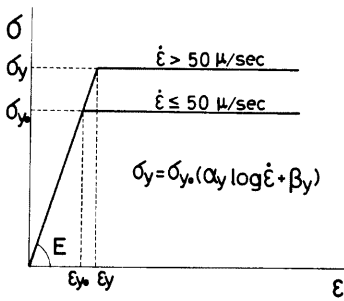


Fig. 23. Stress-Strain Curve for Steel.

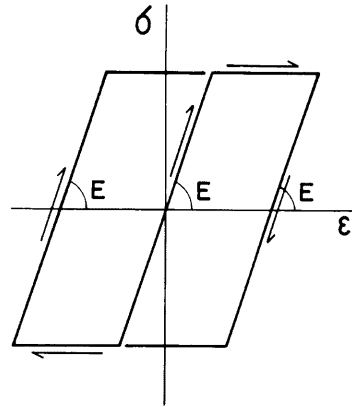


Fig. 24. Stress-Strain Curve for Steel with Cyclic Loading.

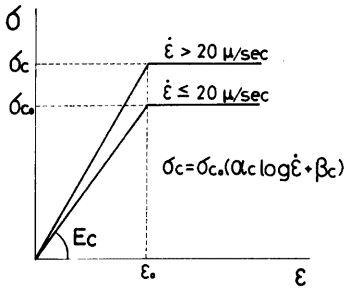


Fig. 25. Stress-Strain Curve for Concrete.

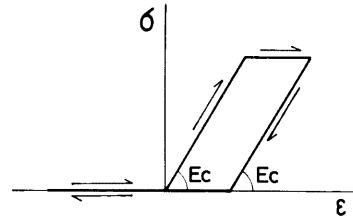


Fig. 26. Stress-Strain Curve for Concrete with Cyclic Loading.

$$\begin{aligned} \epsilon_{st} &= x_{st} \dot{\phi} t + \epsilon_g \\ \epsilon_{sc} &= x_{sc} \dot{\phi} t - \epsilon_g \\ \epsilon_{cx} &= x \dot{\phi} t - \epsilon_g \end{aligned} \quad (2)$$

時刻が $t + \Delta t$ になった時重心軸歪が $\epsilon_g' = \epsilon_g + \Delta \epsilon_g$ となったとすると、各歪は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{st}' &= x_{st} \dot{\phi} (t + \Delta t) + (\epsilon_g + \Delta \epsilon_g) \\ \epsilon_{sc}' &= x_{sc} \dot{\phi} (t + \Delta t) - (\epsilon_g + \Delta \epsilon_g) \\ \epsilon_{cx}' &= x \dot{\phi} (t + \Delta t) - (\epsilon_g + \Delta \epsilon_g) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで各歪速度 $\dot{\epsilon}_{st}$, $\dot{\epsilon}_{sc}$, $\dot{\epsilon}_{cx}$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{st} &= x_{st} \dot{\phi} + \Delta \epsilon_g / \Delta t \\ \dot{\epsilon}_{sc} &= x_{sc} \dot{\phi} - \Delta \epsilon_g / \Delta t \\ \dot{\epsilon}_{cx} &= x \dot{\phi} - \Delta \epsilon_g / \Delta t \end{aligned}$$

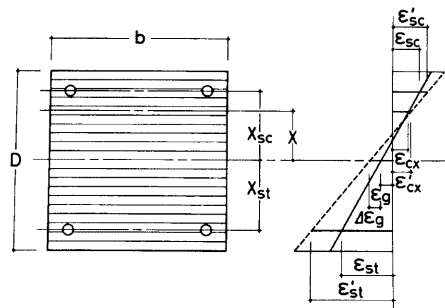


Fig. 27. Cross Section and Strain Distribution.

以上により時刻 $t + \Delta t$ における歪と歪速度が決まる。これから鉄筋については 7.1(1)で、またコンクリートについては 7.1(2)で仮定された応力-歪関係を用いて応力が求められる。鉄筋引張力 T 、鉄筋圧縮力 C_s 、コンクリート圧縮合力 C_c は次のようにならわされる。

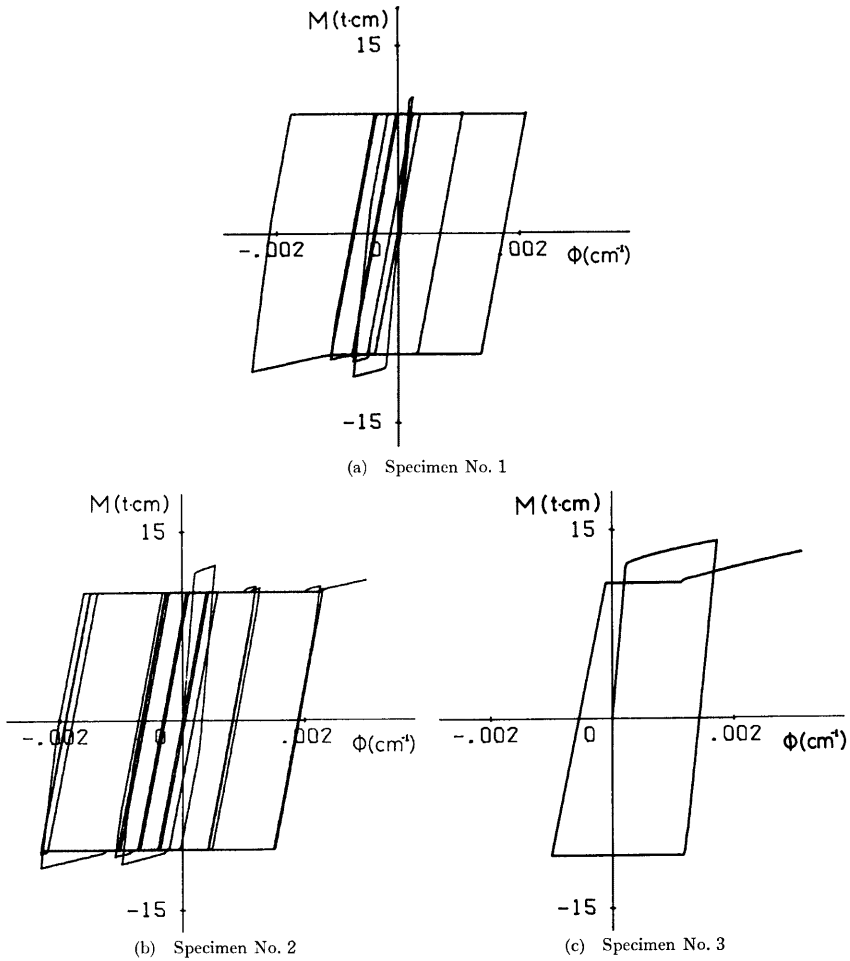


Fig. 28. Moment-Curvature Diagrams of Analytical Results.

$$T = \sigma(\epsilon_{st}', \dot{\epsilon}_{st}') \cdot A_{st}$$

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

$$C_c = \sum \sigma(\epsilon_{cx}', \dot{\epsilon}_{cx}') \cdot \frac{bD}{n}$$

ここで $(C_c + C_s) - T = 0$ となる条件を用い重心軸歪 ϵ_g' を判定する。重心軸歪増分 $\Delta \epsilon_g$ が定まれば、歪分布、応力分布が得られ、その応力分布から、設定した時刻 $t + \Delta t$ における曲率に対応する曲げモーメントが得られる。

7.3 解析結果

Fig. 28 (a)~(c) に解析によって得られた曲げモーメント-曲率関係を示す。解析においては、断面寸法は

試験体実測寸法を用い、実験結果に対応するように曲率速度、曲率振幅及び鉄筋・コンクリートの材料定数を与えた。

7.4 考察

実験値・解析値ともに、処女サイクルでの曲げモーメントがそれ以降のサイクルより大きくなることが認められる。この点では解析結果は単純なモデルながら耐力・履歴形状をよくとらえていると言える。この原因として、一つには載荷を繰返すことにより重心軸歪 ϵ_g が次第に増大し、曲率 ϕ が大きくならなければコンクリート要素歪 ϵ_{cx} がすべて引張側になり、コンクリートの圧縮合力 C_c が零となることがあると思われる。コンクリートの圧縮合力 C_c が零になれば、鉄筋のみの2点モデルとなり、コンクリートの圧縮合力 C_c が存在する処女サイクルに比べて曲げモーメントの腕の長さが短くなり曲げモーメントが小さくなると考えられる。しかし解析値に比べて実験値の場合、曲率速度の増大による曲げ耐力の増加率が大きくなっている。この原因は解析によって明らかにすることができなかった。一方履歴形状に関しても今回の解析は応力-歪履歴のモデル化が単純なこともあって、解析によってその性質をよく示せたとはいえない。この点については、本実験の結果をふまえた鉄筋及びコンクリートの歪速度の影響を考慮に入れた応力-歪履歴のより詳細なモデル化が必要である。

8. 結 論

1. 鋼材軸方向引張圧縮繰返し載荷実験の結果、以下のことが明らかになった。
 - (a) 弾性勾配・歪硬化域での勾配・履歴ループのふくらみは歪速度に影響を受けない。
 - (b) 降伏応力及びバウシinger域に相当する部分の勾配は歪速度の常用対数関数について線型に増大する。

以上のような結果をもとに、歪速度の影響を考慮に入れた応力-歪履歴のモデル化を行ないほぼ良好な近似が得られた。

2. 鋼はり両振り繰返し載荷実験及び解析の結果、以下の点が明らかになった。
 - (a) 降伏耐力・歪硬化域での挙動については、解析によるよい近似が得られた。
 - (b) 履歴形状に関しては、モデル化の単純さによる誤差が見られ、今後の課題が明らかとなった。
3. 鉄筋コンクリートはり両振り繰返し載荷実験及び解析の結果、以下の点が明らかになった。
 - (a) 解析における鉄筋・コンクリートの応力-歪履歴のモデル化は単純であったが、歪速度の影響を考慮に入れることにより降伏耐力上昇等の挙動をとらえることができた。
 - (b) 解析によると、処女載荷時の曲げモーメントの上昇はコンクリートの影響が大きく、繰返し載荷が行なわれるに従って、コンクリート応力の寄与分がなくなり、鉄筋応力のみによる曲げモーメントが生じていることを示している。

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
- 2) 若林 實, 中村 武, 吉田 望, 岩井 哲, 渡辺幸広: 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, 京都大学防災研究所年報, 第23号 B-1, 1980, pp. 159-171
- 3) 岩井 哲・吉田 望・中村 武・若林 實: 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, 1981.4, pp. 103-112
- 4) 若林 實・柴田道生: 一定軸力と変動曲げモーメントを受ける鉄骨鉄筋コンクリート断面の変形能力, 京都大学防災研究所年報, 第19号 B-1, 1976, pp. 153-166