

繰返し曲げを受ける鋼部材の履歴曲線

正会員 黒羽 啓明 *1)

同 〇山 成 實 *2)

1. はじめに 鋼部材を用いた単軸繰返し載荷実験は既に幾つかなされ、応力度-歪度関係式も幾つか提案されている。¹⁾ 実験片、測定方法についても各々の研究において工夫がなされているが、各々一長一短が考えられ、どの方法によるものが優れているかという事は問題としない。素材から得られる応力度-歪度関係を用いて得られる部材の荷重-変形関係と実験より得られる荷重-変形関係との比較は興味深い問題である。

本報では砂時計型実験片 (fig.1) による真応力度-真歪度関係を今回行なわれた繰返し曲げ実験に用いた梁部材について計算し、実験履歴曲線との比較検討を行なう。

2. 実験概要 実験片は SM41, SM50a の 2 種類であり、砂時計型実験片と共に両鋼種について厚さ 16mm の鋼板よりロール方向に長軸をとる矩形断面梁材を機械加工により作成した。実験片を fig.2, 機械的性質を table 1 に示す。尚、実験片作成後の熱処理は施していない。

実験装置は fig.3 に示すように中央部にボルトで固定された実験片に純曲げを与える機構を持つ。実験片の寸法が小さいため大曲率を与えるには実験装置の接点変位が生じるが、それを極力小さくする様設計した。

加力は実験装置を電気油圧式サーボ制御疲労試験機(動的荷重容量 ±10t, 静的荷重容量 15t) に取付けて定変位繰返し載荷とした。実験回路を fig.4 に示す。測定及び記録は以下によった。

荷重は試験機から加えられる力に腕の長さの 1/2 を乗じて曲げモーメントを得、変形は実験片上の標点間にクリップ・ゲージを上下面に取付け、これより曲率を得た。記録は X-Y レコーダで数サイクル毎に行なった。実験片にキ裂が生じた後は記録は中断した。尚、全実験を通して電磁オシログラフにて試験機のストローク、クリップ・ゲージ出力が一定振幅であることを確認するために連続記録を行なった。また、クリップ・ゲージの出力が適正な曲率を示しているかを調べるため、実験片の上下面に塑性ゲージを貼付して初期で比較した。クリップ・ゲージを用いた理由は、繰返し塑性変形を受ける表面に塑性ゲージを貼付した場合、繰返しによって出力の不安定化、剥離等の支障が考えられるからである。

実験条件は、砂時計型実験片による単軸引張圧縮実験と同じで、曲率波形は三

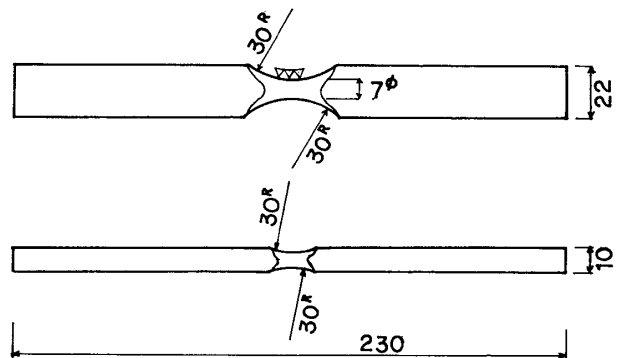


fig.1 砂時計型実験片 (k_t=1.03)

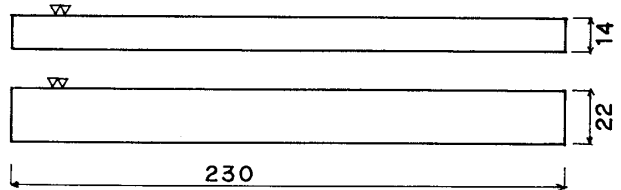


fig.2 曲げ実験片

table.1 機械的性質

material	type	σ _y	σ _y ^t	σ _u	σ _u ^t	ε _f	R.A.	EL.
SM 41	JIS 1	2.50	—	4.63	—	—	—	28.3
	hourglass	—	2.51	4.83	5.83	0.85	57.2	—
SM 50a	JIS 1	3.32	—	5.36	—	—	—	29.1
	hourglass	—	3.82	6.04	9.37	0.68	49.2	—

- σ_y ; nominal yield stress (t/cm²)
- σ_y^t ; true yield stress (t/cm²)
- σ_u ; nominal ultimate stress (t/cm²)
- σ_u^t ; true ultimate stress (t/cm²)
- ε_f ; true fracture ductility ln100/(100-R.A.)
- R.A. ; reduction of area 100(A₀-A)/A₀ (%)
- EL. ; elongation

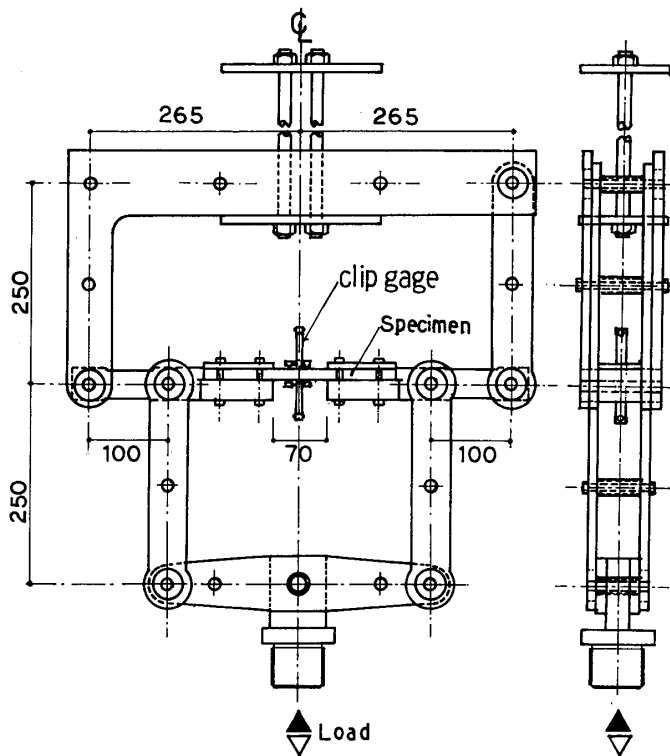


fig.3 繰返し曲げ実験装置

角波、繰返し速度は0.03 Hzとした。

3. 実験結果 定変位実験は試験機の制御能力上、処女載荷時から定変位振幅がとれないため、目標の振幅まで漸増載荷した。X-Yレコーダにて紡錘形の滑かな履歴曲線が得られた。

各実験片について定変位振幅を変え、各振幅毎に十分飽和安定するまで放置した後、閉鎖曲線を得た。飽和安定まで約10サイクル程度の繰返しを要したが、その後そのまま放置してみると、なおも荷重変化が認められる場合があったが、各サイクル間の履歴曲線の差異は判別できない事より、定変位振幅変更後10サイクルもデータとして有効とした。

SM41, SM50aについて異なる振幅に対する履歴曲線(閉曲線)の上昇分岐のみをそれぞれfig.5, 6に示す。図中の一片の曲線は、履歴曲線の一方の反転点を原点に置き、曲げモーメント振幅、曲率振幅の1/2倍で表わされている。同図から、他方の反転点の集合は滑かな曲線上に分布していることが分る。

4. 曲げモーメント-曲率関係

4-1 応力度-歪度関係 本報で扱う応力度-歪度関係は真応力度、真歪度で表わされる次式とする。

$$\frac{\sigma \pm \epsilon \sigma}{2} = 100 \frac{\sigma \pm \sigma_a}{2E} \pm \left| \frac{\sigma \pm \sigma_a}{2a} \right|^\gamma \quad (1)$$

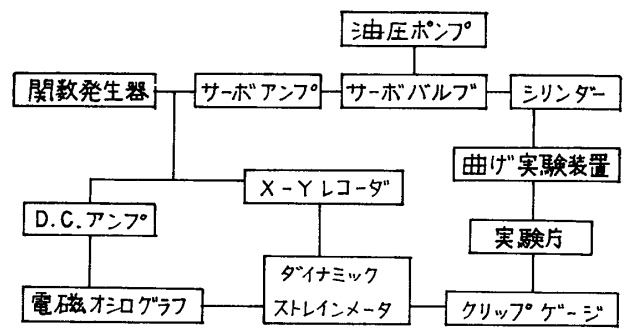


fig.4 実験回路

但し、Eはヤング率、 σ_a は真応力度振幅、 ϵa は真歪度振幅である。 a, γ は σ_a の1次式で表わされる。即ち、

$$a = U \cdot \sigma_a + V, \quad \gamma = S \cdot \sigma_a + t$$

で与えられ、U, V, S, tは材料定数である。

単軸引張圧縮実験から得たそれらをtable 2に示す。

繰返し応力度-歪度曲線は次式で与えられる。

$$\epsilon_a = 100 \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{\tilde{A}} \right)^{\tilde{B}} \quad (2)$$

ここに \tilde{A}, \tilde{B} は材料定数である。table 2に示す。

4-2 曲げモーメント-曲率関係

純曲げを受ける部材の曲げモーメント-曲率関係は梁断面について垂直応力度を積分して得られる。

計算は次の仮定の下で行なわれた。

- 1) 梁は曲げ変形時に変形前の平面を保持する。
- 2) 変形時の中立軸は移動しない。
- 3) 変形時、梁断面形は変化しない。
- 4) 断面を分割して得られる要素間の力学的影響はない。
- 5) 各要素は式(1), (2)の関係を満たす。

仮定4)の要素は、梁断面の幅方向に分布する応力度は一樣と考えられる事から、中立面に平行な面で分割した。分割は40等分とし、実験曲線の曲率振幅に対応する曲げモーメント-曲率関係を得た。

4-3 実験曲線と解析曲線との比較

fig.7, 8に実験曲線と解析曲線の一部を示す。図中の実線が実験曲線である。破線は4-2で得た曲線である。両者の形状はよく一致しているものの、大曲率振幅時($\phi_a > 0.08$)で後者は前者より高いモーメント値を示しており、低曲率振幅では逆の傾向が見られる。この事については5で検討する。

table 2

material	U	V	S	t	\tilde{A}	\tilde{B}
SM41	0.6363	1.4501	1.6372	3.4589	3.8539	3.9231
SM50a	0.7049	1.4638	0.8704	8.1554	4.9888	4.1068

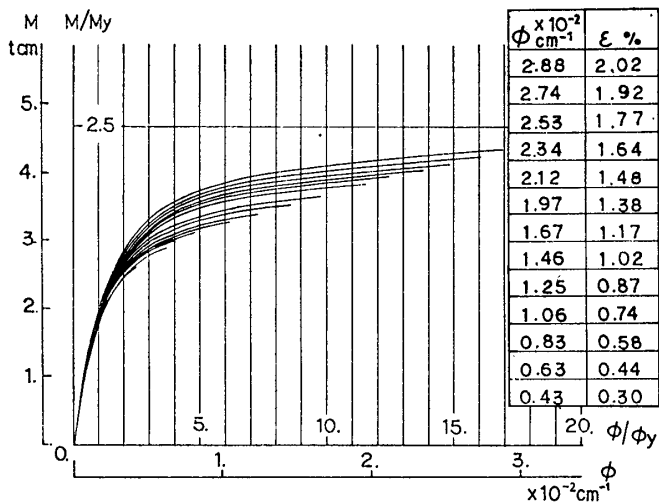


fig. 5

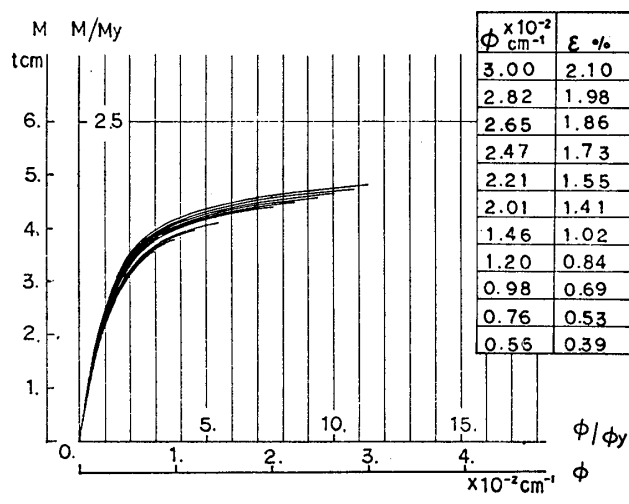


fig. 6

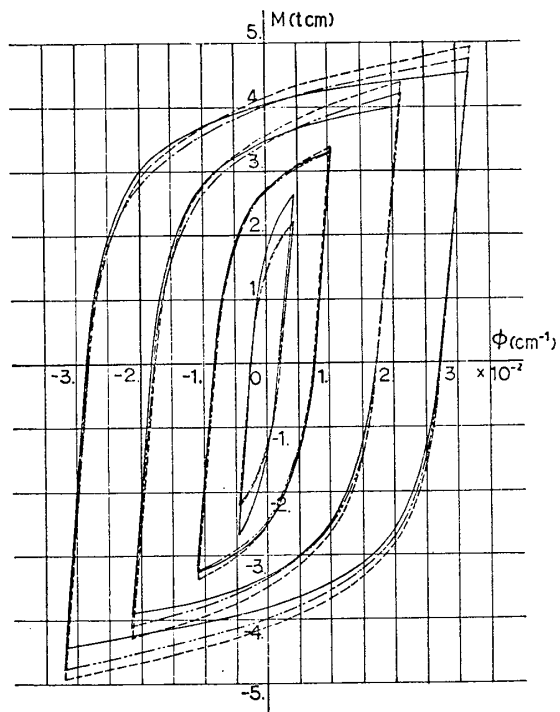


fig. 7

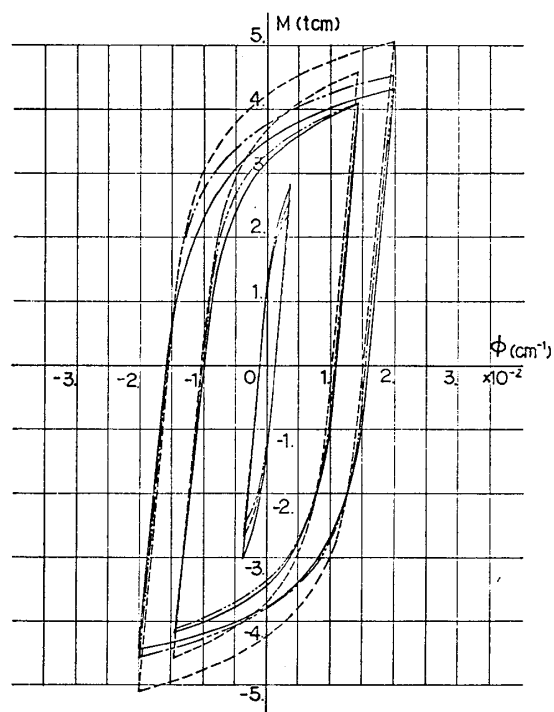


fig. 8

5. 検討

5-1 梁断面形の変化を考慮した場合

4-2では仮定3)を用いたが、本来応力度は真応力度で考えているから、むしろ曲げ変形時の梁断面形の変化を考慮しなければならない²⁾。今、弾性ポアソン比 $\nu_e=0.3$ 、塑性歪に対して非圧縮性を仮定すれば、梁断面を分割して得られた要素は次式のような幅変化を生ずる。

$$\frac{B}{B_0} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ 2\nu_e \frac{\sigma}{E} + \frac{1}{100} \left(\frac{\sigma}{A} \right)^{\tilde{B}} \right\} \right] \quad (3)$$

ここに B_0, B はそれぞれ変形前、変形後の幅である。式(2), (3)から σ の値を変化させて要素幅と垂直応力度との関係をfig.9に示す。平面保持の仮定から、梁の側

面は同図のように変形する。この事を考慮して曲げモーメントを計算した結果を4-2での曲げモーメント M_0 に対する比としてfig.10に示す。曲率振幅の増加に対し直線的に M/M_0 が増加している。これより高曲率域では梁断面形の変化を考慮した場合、計算値は実験値より更に高くなる。

以上から、実験値と計算値の差の原因は梁部材断面の変化によるものでない事を示した。

5-2 塑性拘束の影響

堀田氏等は、単調引張試験におけるJIS引張試験片と砂時計型試験片のデータを比較し、砂時計型試験片の形状より生ずる塑性拘束を指摘した³⁾。即ち、後者の

方が引張り強さで約10~18%, 降伏点で約10%高い結果を得ている。本報においてもtable 1 から σ_u について見ると、SM41で4.3%, SM50aで12.7%と同様の事実がある。塑性拘束は繰返し荷重下でも働くと考えられるから、4-2で得た解析曲線が実験曲線より高い曲げモーメントを示す事の説明として足りる。

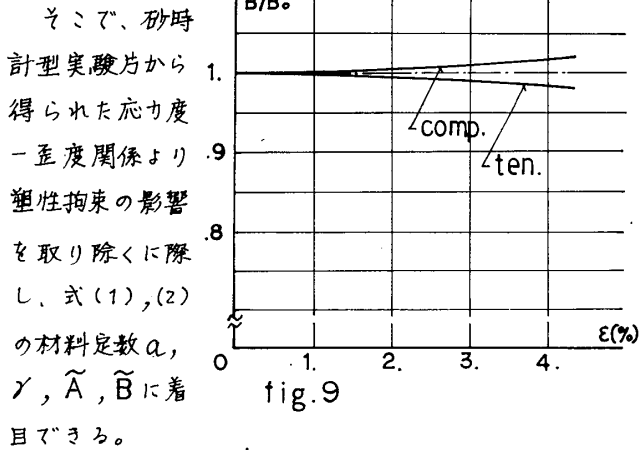


fig. 9

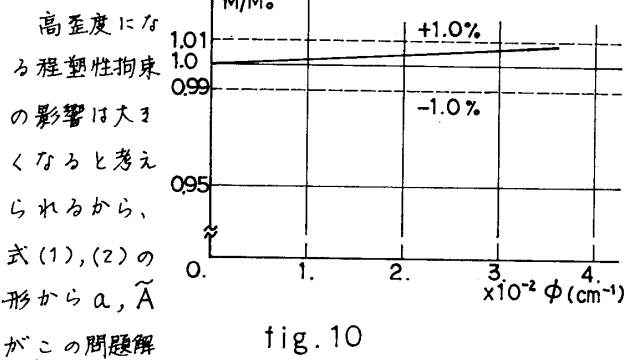


fig. 10

高歪度になる程塑性拘束の影響は大きくなると思われるから、式(1),(2)の形から α, \tilde{A} がこの問題解決の主たる役割を果たすであろう。そこで、式(2)において $\tilde{B} = \text{const.}$ として $\alpha_a - \tilde{A}$ 関係を ϵ_a をパラメータとして図示するとfig.11の様になる。これより低歪時の α_a の変化は \tilde{A} の変化に対して鈍化する。式(1)においては、 α は α_a の関数であり既に α_a は低減されているから V のみを低減すれば良い事になる。こうして履歴曲線を計算するとfig.7, 8中の2点鎖線で描かれる。

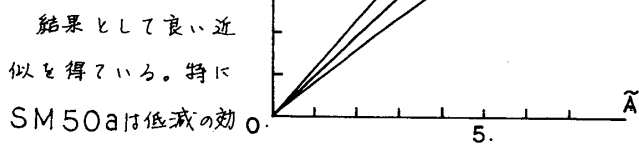


fig.11 $\alpha_a - \tilde{A}$ relation

6. 実験モーメント-曲率曲線からの応力度-歪度関係の推定

矩形断面梁の場合、実験から得た曲げモーメント-

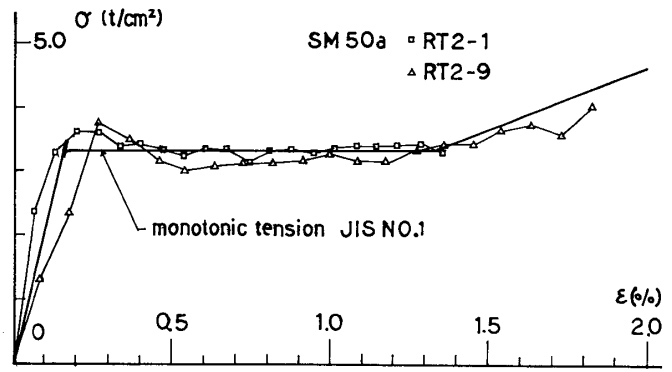


fig.12 estimate of stress on surface

曲率曲線から梁表面の応力度-歪度関係を得る事ができる。即ち、

$$\epsilon = \frac{H}{2} \phi$$

$$\sigma = \frac{d}{d\phi} (M \cdot \phi^2) / \left(\frac{1}{2} B \cdot H^2 \right)$$

但し、 B, H は梁の幅、せいである。

処女載荷曲線と繰返し曲線から得た応力度-歪度関係をfig:12, 13に示す。処女曲線の場合はJIS試験片の曲

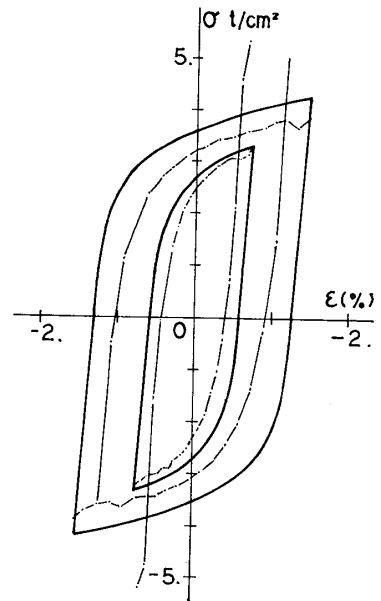


fig.13

線に良く合っている。繰返し曲線の場合は反転点直後の応力度推定は過大となる傾向があるが、低勾配域ではかなり良い。

7. 結語

矩形断面梁の繰返し曲げ実験を行なった。砂時計型実験片の応力度-歪度関係を用いて得た曲げモーメント-曲率関係は実験値より上回る。この原因として塑性拘束の影響が挙げられ、修正後良い近似曲線を得た。また曲げモーメント-曲率関係より梁表面の応力度-歪度関係を推定できる事を示した。

参考文献

- 1) 骨組構造解析法要覧, 日本鋼構造協会, 昭51, pp. 118-136
- 2) 八木順吉, 他2名: 厚鋼板の塑性曲げ(第2報), 日本造船学会論文集, 第135号
- 3) 堀田知道, 他4名: 鋼材の歪制御低サイクル疲労強度推定に関する研究(第一報), 日本造船学会論文集, 第124号

*1) 熊本大学教授 工博

*2) 神戸大学大学院生