

繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル
その 6 動的載荷を受ける極低降伏点鋼 LY100 の
応力-歪関係

動的載荷実験 歪速度依存性 歪振幅依存性
応力上昇 応力-歪関係

正会員 ○小澤 秀允*¹ 同 笠井 和彦*²
同 貞末 和史*³ 同 金子 洋文*⁴
同 小野 喜信*⁵ 同 山崎 久雄*⁶

1. はじめに

著者らは、これまで、簡単な数式を用いながらも高い精度を有する構成則モデルの開発に取り組み、静的繰返し載荷を受ける 4 種鋼材 (SN400, SN490, LY100, LY225) に関して、提案モデルが極めて高い解析精度を有することを報告した^{1),2)}。しかしながら、SN400 などの普通強度鋼と比べて、LY100 などの低降伏点鋼の応力-歪関係は、大きな歪速度依存性を有する事が知られている³⁾。そこで、本報告では、歪速度依存性について定量的に検討するために、既報^{1),2)}の静的な載荷実験に加えて、動的な載荷実験を行った。

2. 実験概要

本研究では板厚 25mm の鋼材を切削して、繰返し載荷試験用円柱型試験体を製作した。使用鋼材は LY100 材である。試験体形状を図 1 に示す。試験区間平行部 17mm で直径 8φである。

2.1 試験機および軸伸びの計測

試験機は最大荷重 50kN の油圧式サーボ式疲労試験機で、荷重 P (引張を正とする) は試験機と試験体の間に設置したロードセルにより計測し、軸伸びは試験体中央 6mm の区間 l₀ の変位 δ (伸びを正とする) を軸伸び計によって計測した。以後、真応力 σ, 真歪 ε を次式により評価する。

$$\sigma = 4P / (\pi d^2) \cdot \delta / l_0 \quad (1a)$$

$$\varepsilon = \ln(\delta / l_0) \quad (1b)$$

2.3 載荷方法

正負一定歪振幅の正弦波載荷とし、歪振幅は ±0.2, ±1.0, ±3.0 % の 3 種類を行い、各歪振幅について振動数 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 3.0 Hz の 5 種類による動的繰返し載荷を各 5 サイクルずつ行った。静的繰返し実験も各歪振幅について同様に 5 サイクルずつ行い、載荷歪速度は 0.01 %/sec とした。歪速度も併せて表 1 に載荷計画を示す。

3. 実験結果

各歪振幅における動的載荷結果(実線)と静的載荷結果(破線)の応力-歪関係の一例を図 2 に示す。動的載荷による応力上昇が見て取れる。表 2 に各動的の実験結果から得られた最大応力値 σ_{max}, 歪速度が最大となる歪 0 クロス時の応力値 σ_{ε=0} を各歪振幅、振動数について示す。また表 2 の σ_{ε=0} を静的実験結果の歪 0 クロス時の応力値 σ_{ε=0, static} で除し、各歪振幅について歪速度で並べたものを図 3 に示す。なおこれらの値は全て履歴が安定する 5 サイクル目の応

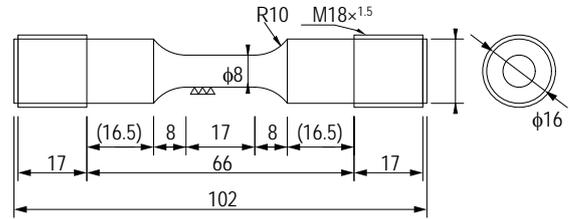


図 1 円柱型試験体形状 (単位:mm)

表 1 載荷計画

歪振幅 (%)	振動数 (Hz)	0.1	0.2	0.5	1.0	3.0
±0.2		0.12	0.25	0.63	1.26	3.77
±1.0		0.63	1.26	3.14	6.28	18.85
±3.0		1.88	3.77	9.42	18.85	56.55

*表中の灰色部分の値は歪速度 (%/sec) である。

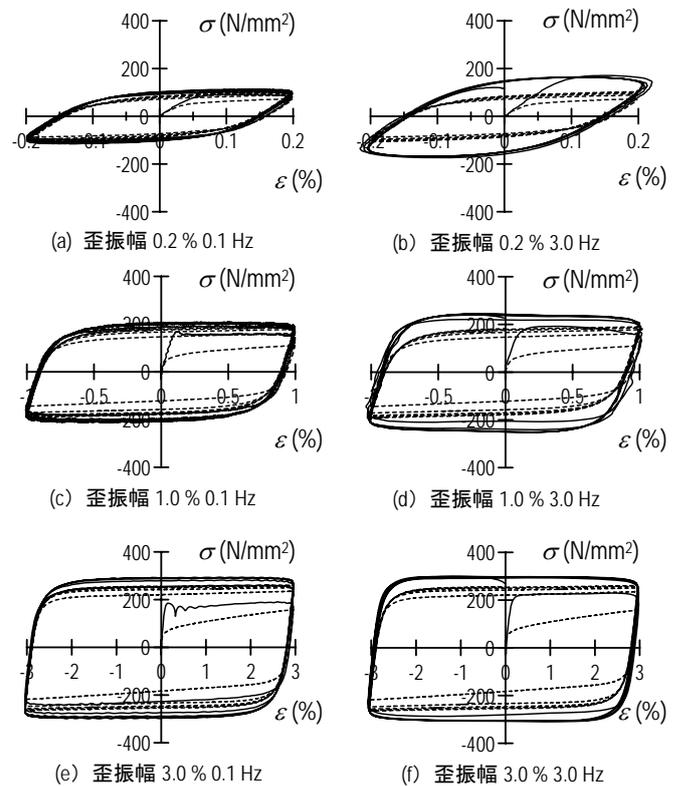


図 2 動的実験結果と静的実験結果の比較 (一動的実験、……静的実験)

表 2 実験結果

振動数 f (Hz)	±0.2%	±1.0%	±3.0%	±0.2%	±1.0%	±3.0%
	最大応力 σ _{max} (N/mm²)			ε=0時の応力 σ _{ε=0} (N/mm²)		
静的	105	191	263	85	179	263
0.1	115	212	293	101	205	293
0.2	121	217	296	104	207	296
0.5	128	231	300	113	228	300
1.0	132	238	299	120	237	299
3.0	167	249	302	145	247	302

力値であり、正側、負側で平均した値である。歪振幅が±0.2%, ±1.0%では歪速度の上昇に伴い静的応力に対する動的応力の割合も上昇するが、その度合いは歪振幅に依存している。歪振幅が±3.0%, 3.0Hzのような高速の歪速度でも割合が著しく上昇するとは限らない。即ち、小歪振幅ではその度合いが大きく、大歪振幅では度合いが小さくなっている。よって歪速度のみで静的応力に対する動的応力の割合の値を表すことはできないと思われる³⁾。

4. 楕円履歴型から求める K'_d , η_d , C_d の同定

全ての履歴が安定する 5 サイクル目を用いて、各歪振幅について動的実験結果の応力から静的実験結果の応力を引く。その結果それぞれ図 4 の点線のような少し傾いた楕円履歴が求まる。その履歴を粘弾性体の楕円形履歴とみなす。 K'_d はその傾いた楕円の傾きを表す。 η_d は楕円の太さを表し、楕円の歪 0 クロス時の応力値 $\sigma_{z=0}$ と歪が最大(最小)となるときの応力 σ_{max} との比率である。

- a. K'_d の同定：図 4 より得られた(動的結果—静的結果)の歪が最大、最小となる ϵ_{max} , ϵ_{min} の値を直線で結ぶ。得られた直線の傾きを K'_d として決定する
- b. C_d の同定：次式(2) K'_d , η_d , ω により C_d が求まる。 C_d は歪速度に依存する係数である。

$$C_d = \frac{K'_d \eta_d}{\omega} \quad (2)$$

以上に述べた方法を用いて、LY100 材に関する動的結果—静的結果を動的な成分と考え、得られた楕円履歴のパラメータを表 3 に示す。

5. K'_d , C_d の各歪振幅、振動数における検討

図 5 は横軸を歪速度とし、縦軸は C_d に歪速度を乗じ、動的载荷による応力の増分 $\Delta\sigma$ としたグラフである。ここでも歪速度の上昇に伴い、 $\Delta\sigma$ は上昇していく。しかし $\Delta\sigma$ の値も歪振幅に依存する傾向があるため、 $\Delta\sigma$ は歪振幅によって上昇の度合いが異なり一番値が大きくなるときは、歪振幅±1.0%, 振動数 3.0Hz のときである。同様に、小歪振幅では $\Delta\sigma$ の増分が大きく、大歪振幅では $\Delta\sigma$ の増分が小さくなっている。図 6 は K'_d 振動数関係である。歪振幅が±0.2%, ±1.0%では振動数の上昇に伴い、 K'_d は上昇するが、歪振幅±3.0%については K'_d の値が小さく、ほぼ

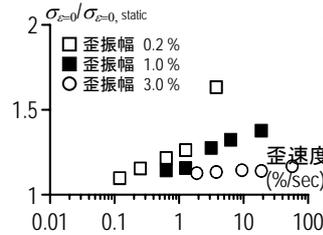


図 3 歪 0 時の応力の比較

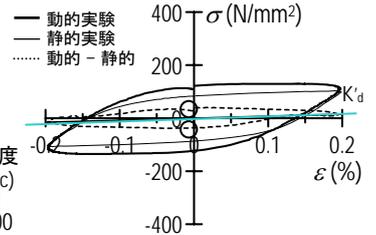


図 4 K'_d , η_d の同定

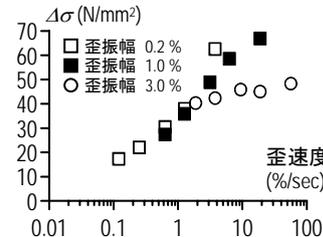


図 5 $\Delta\sigma$ -歪速度関係

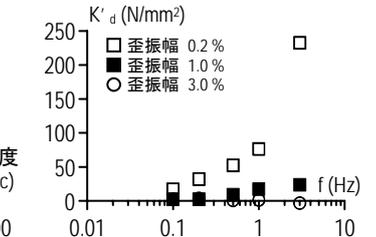


図 6 K'_d - 振動数関係

一定で推移する。 K'_d は歪振幅が大きくなると、徐々に値が減少して行く。つまり (動的結果—静的結果) がより傾きを持たない楕円型に近くなり、全体的な応力上昇も小さくなる。

6. まとめ

LY100 材を用いた繰返し载荷実験を行い、動的载荷を行うことで、応力が上昇することが分かった。その応力上昇は歪振幅に依存しており、小歪振幅では歪速度の上昇に伴い、静的応力に対する動的応力の割合、応力上昇の増分共に大きくなるが、大歪振幅では歪速度の上昇にかかわらず、それら割合、増分共に小さくなることが分かった。また動的結果から静的結果を差し引いた楕円型履歴から K'_d , C_d の算出を試みた。 K'_d は歪振幅が大きくなると、徐々に値が減少して行き、(動的結果—静的結果) がより傾きを持たない楕円型に近くなり、全体的な応力上昇も小さくなる。

【参考文献】

- 1) 笠井 他：繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル (その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造Ⅲ, pp.745-746, 2005.9
- 2) 笠井 他：繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル、(その 3—その 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造Ⅲ, pp.935-940, 2006.9
- 3) 山田 他：動的繰返し载荷実験結果に基づくダンパー用鋼材の履歴特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 553 号, pp.121-128, 2002.3

表 3 各歪振幅における K'_d , η_d , C_d の値

振動数 f (Hz)	歪振幅 0.2 (%)							歪振幅 1.0 (%)							歪振幅 3.0 (%)						
	歪速度 (%/sec)	ω (rad/sec)	K'_d (N/mm ²)	η_d	K'_d'' (N/mm ²)	C_d (N/mm ²)(%/sec)		歪速度 (%/sec)	ω (rad/sec)	K'_d (N/mm ²)	η_d	K'_d'' (N/mm ²)	C_d (N/mm ²)(%/sec)		歪速度 (%/sec)	ω (rad/sec)	K'_d (N/mm ²)	η_d	K'_d'' (N/mm ²)	C_d (N/mm ²)(%/sec)	
0.1	0.12	0.63	16.9	5.35	90.50	144.03		0.63	0.63	2.5	10.93	27.32	43.48		1.88	0.63	2.5	5.39	13.47	21.45	
0.2	0.25	1.26	32.0	3.46	110.73	88.11		1.26	1.26	2.4	14.96	35.90	28.50		3.77	1.26	3.6	3.88	14.12	11.23	
0.5	0.63	3.14	52.3	2.90	151.78	48.31		3.14	3.14	8.9	5.47	48.87	15.56		9.42	3.14	0.7	21.25	15.30	4.87	
1.0	1.26	6.28	76.4	2.48	189.31	30.13		6.28	6.28	17.2	3.41	58.56	9.32		18.85	6.28	1.3	12.01	15.01	2.39	
3.0	3.77	18.85	232.7	1.34	312.94	16.60		18.85	18.85	23.6	2.84	66.95	3.55		56.55	18.85	-3.3	-4.84	16.11	0.85	

*1 東京工業大学 人間環境システム専攻 大学院生
 *2 東京工業大学 建築物理研究センター 教授・Ph. D.
 *3 広島工業大学 工学部建築工学科 講師
 *4 (株)竹中工務店 技術研究所 工博
 *5 (株)竹中工務店 技術研究所 工修
 *6 ユニオンシステム(株) 振動解析プロダクト

*1 Graduate Student, Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology
 *2 Professor, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.
 *3 Lecturer, Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.
 *4 Research & Development Institute, Takenaka Corp., Dr. Eng.
 *5 Research & Development Institute, Takenaka Corp., M. Eng.
 *6 Dynamic Analysis Research Complex, Union System Inc.