

交番載荷を受ける鉄筋の応力・歪について

松本 進・出口 秀史*
(受理 昭和61年5月31日)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE STRESS-STRAIN CURVE OF REINFORCING BAR SUBJECTED TO CYCLIC LOAD

Susumu MATSUMOTO and Hidefumi DEGUCHI*

This paper describes the stress-strain relative curve for reinforcing bars subjected to cyclic loads. Based on the experiment and the analysis, a new stress-strain relative curve for reinforcing bars has been proposed.

1. 緒 言

地震のような大きな外力を受けた場合の鉄筋コンクリート構造物の変形性能の評価に対して、現在まで広範囲の実験的研究が行なわれてきているが、中でも主鉄筋のフーチングよりの抜出しが耐震性能に対して大きな影響を与えることが指摘されており¹⁾、この方面での研究が必要となっている。この場合、鉄筋の引出しそのものの現象を解明するためには少くとも交番載荷を受ける鉄筋の応力・歪曲線が基本的に明らかにされている必要がある。過去に、交番載荷を受けた鉄筋の応力・歪関係に関する研究はかなり多く行なわれており、良好なる成果を収めている。それらの中でも、代表的なものとしては Ramberg-Osgood の応力・歪履歴曲線が挙げられる³⁾。しかしながら、これらの応力・歪関係には(1)適用できる鉄筋の最大歪が 20000×10^{-6} 程度と小さい。(2)応力を求めるに当たっては試行錯誤法 (Try and Error Method) によって求めるため不便である。(3)交番載荷時における鉄筋の最大応力度が決められず、論理的に矛盾を有している等で全てのケースにわたって適用するには問題があるようである。

そこで、本研究では上記の事情を踏まえた上で鉄筋に交番載荷試験を課し、1) 鉄筋に発生する歪の最大

値を 70000×10^{-6} 程度とし、適用歪の範囲を実用的な範囲で大きくする。2) 交番載荷時の応力・歪関係については試行錯誤法によらず、線形関係を有する応力・歪関係を摸索する。3) 2) との関連をつけた上で、各交番載荷時における鉄筋の最大応力度をみつける。こと等を本研究の主目的とし、最終的には交番載荷を受ける鉄筋の応力・歪関係の新しいモデルを提案しようとするものである。

2. 実験の概要

2. 1 実験供試体

図-1は実験供試体を示したもので、試験部の長さは40 mmで、中央部の径 ϕ を19 mmとしたものである。なお、供試体の上下端部は交番載荷の都合上、ネジ加工を施している。使用鋼材の機械的性質は表-1に示すようであって、SD 30 クラスのものである。

2. 2 実験方法

図-2は交番載荷実験の装置の概略を示したもので、供試体上端部は両動オイルジャッキに取り付けられたロードセルにネジでとめられ、これがテストリング・フレームに固定されている。一方、供試体下端部はネジ部を有する鋼板にネジどめされ、この鋼板はPC鋼棒を介してテストリング・フロアに固定されている。なお、テストリング・フロアと鋼板との間には軸偏心圧縮力による曲げの影響を少なくする目的で球

* 川内職業訓練短期大学

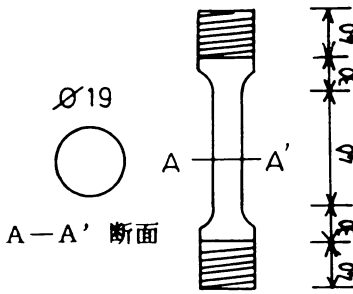


図1 実験供試体

表-1 鉄筋の機械的性質

鉄筋	降伏点	降伏点応力度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
1	S D - 30	3368	5415

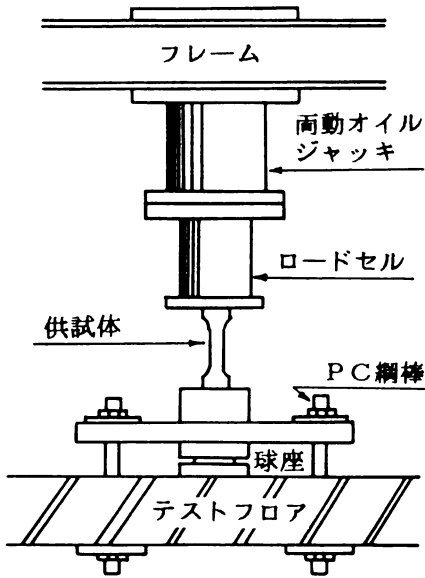


図2 実験装置

座を設置している。最終的には、実験供試体はテストイング・フレームとテストイング・フロアで固定されることになり、荷重は図中の両動オイルジャッキによって、供試体に引張および圧縮力を与えるものである。

2.3 荷重方法ならびに計測

図-3は荷重方法の概略を示したもので、基本的には以下の3種類がある。

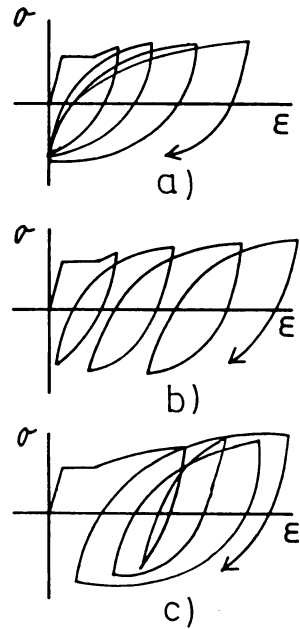


図3 荷重方法

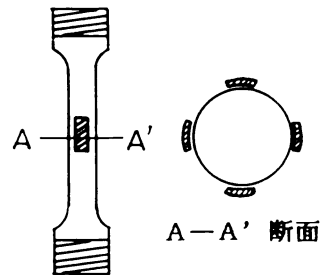


図4 計測方法

- (a) 引張歪を漸増させながら、圧縮の最大歪を常に一定(図中では歪が零のところ)とする。
- (b) 引張歪を漸増させると共に圧縮歪も同じ割合で漸増させる。
- (c) ある歪を起点にして、引張歪および圧縮歪を漸増・漸減させる。

歪の計測に関しては、図-4に示したように測定断面A~A'に歪ゲージ(東京測器研究所製YL-5)を4枚貼付し、曲げの影響が入らぬように1ゲージ法の結線を施した。測定は、上記の鉄筋歪およびロードセルの歪をペンレコーダーにて連続的に記録した。

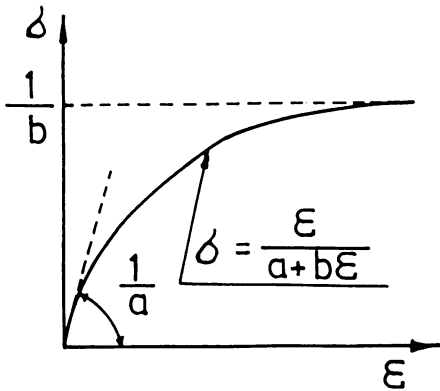


図5 応力・歪のモデル

3. 解析方法

3.1 応力・歪曲線について

図-5は、本方法による応力・歪曲線を示す概念図であり、鉄筋が一度降伏を受けた後の交番载荷時の応力・歪関係を次式で示す双曲線関数で表現しようとするものである。

$$\sigma_s = \frac{\epsilon}{a + b\epsilon} \quad \dots\dots(1)$$

$$\left| \frac{d\sigma_s}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=0} = \frac{1}{a} \quad \dots\dots(2)$$

$$\left| \sigma_s \right|_{\epsilon=\infty} = \frac{1}{b} \quad \dots\dots(3)$$

この応力・歪曲線の特徴は、(1)定数1/aは原点における鉄筋の初期弾性係数を示す (2)定数1/bは最大応力度を示す ところにある。なお、この双曲線関数の妥当性については5章にて明らかにする。

3.2 解析方法

まず、実測の各交番载荷時の応力・歪曲線から、最小二乗法によって(1)式による定数 a, b を求める。次に、定数 a, b は交番载荷の履歴に伴って当然のことながら変化することが予想されるので、これらの定数 a, b と繰り返し回数 n, 前回の载荷により生じた塑性歪 ϵ_{ip} との間に重線形回帰分析を行うことにより、定数 a, b を n, ϵ_{ip} の関数として実験的に求めた。従って最終的には定数 a, b は次式で表されることになる。

$$a = a_0 + a_1 \times n + a_2 \times \epsilon_{ip} \quad \dots\dots(4)$$

$$b = b_0 + b_1 \times n + b_2 \times \epsilon_{ip} \quad \dots\dots(5)$$

ただし、 $a_0 \sim a_2, b_0 \sim b_2$; 重線形回帰分析より得られる定数

4. 実験結果

4.1 応力・歪曲線について

図-6は実測の応力・歪曲線の一例を示したものであり、既往の研究でもいわれているとおり作用応力が一度降伏域を越えると、それ以降の応力・歪関係には明確な降伏点応力度が消失し、また繰り返し回数の増大に伴い、いわゆるラウンディングの効果も大きくなっている傾向が認められる。

次に、各繰り返し回数時における応力・歪について、(1)式で最小二乗近似を行い、この回帰直線より得られる定数 a, b, 相関係数 γ 等の一覧を表-2に一括して示す。表中の相関係数 γ が示すように、相関係数は 0.97-1.00 程度で、応力・歪曲線を双曲線関数で表現しても良い極めて高い結果が得られた。

4.2 定数 a, b と繰り返し回数 n, 塑性歪 ϵ_{ip} の関係について

図-7は回帰直線より得られる係数 a と塑性歪 ϵ_{ip} の実測値の関係を示したものであり同図より引張载荷時および圧縮载荷ともに塑性歪 ϵ_{ip} が大きくなるにつれて係数 a は大きくなる傾向がみられ、このことは塑性歪 ϵ_{ip} が大きくなるにつれて、鉄筋の弾性係数は小さくなり、ラウンディングする傾向と合致している。なお、同図からは圧縮と引張とでは係数 a には明らかに差が歴然と表れているが、この原因については現時点では定かではない。

一方、図-8は繰り返し回数 n と係数 a との関係を示した実測の一例である。同図よりデータのバラツキが若干認められるものの、引張および圧縮時の係数 a はともに繰り返し回数の増大と共に大きくなる傾向が認められる。このことは塑性歪の場合と同様繰り返し回数の増大に伴い弾性係数が小さくなりラウンディングの効果が大きくなるようである。

次に、係数 b についても繰り返し回数 n および塑性歪 ϵ_{ip} に関する関係をみてみると、図-9および図-10に示すように、圧縮および引張の载荷時による相違は余り認められず、塑性歪ならびに繰り返し回数の小さい所を除けば、定数 b はほぼ一定と考えても差支えないようである。

なお、これより引張強度もしくは圧縮強度は 5556 kg/cm² 程度でありこの値は静的载荷試験結果より得られる引張強度にほぼ等しい値が得られた。このことより、定数 b に関しては静的引張強度より求めても

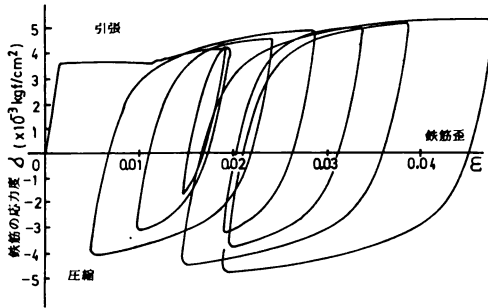


図6 実測の応力・歪曲線

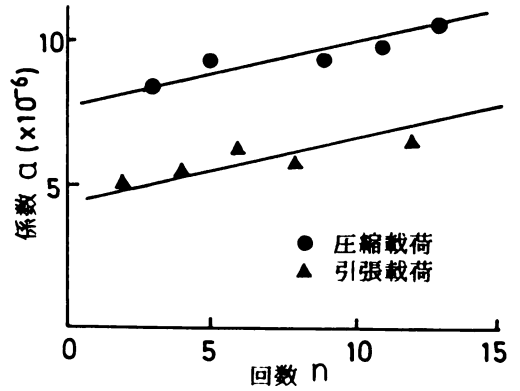


図7 係数 a に及ぼす回数 n の影響

表-2 回帰式より得られた定数 a, b および塑性歪 ϵ_{ip}

N	ϵ_{ip}	定数 a	定数 b	相関係数 γ
1	0.0191	0.7371 * 10^{-6}	0.3172 * 10^{-3}	0.99
2	0.00186	0.4492	0.1171	0.97
3	0.00249	0.8343	0.2245	1.00
4	0.00709	0.5377	0.1723	1.00
5	0.01201	0.9268	0.1982	1.00
6	0.01709	0.6086	0.1788	1.00
7	0.0218	0.7954	0.2077	1.00
8	0.00656	0.5549	0.1520	0.99
9	0.01248	0.9211	0.1931	1.00
10	0.01142	0.4609	0.1688	1.00
11	0.01671	0.9658	0.1865	1.00
12	0.022	0.6368	0.1668	1.00
13	0.03227	0.1038 * 10^{-5}	0.1771	1.00

注) 1) ϵ_{ip} : 前載荷時に生じた塑性歪
 2) a, b: $\sigma = \epsilon / (a + b \epsilon)$ における定数

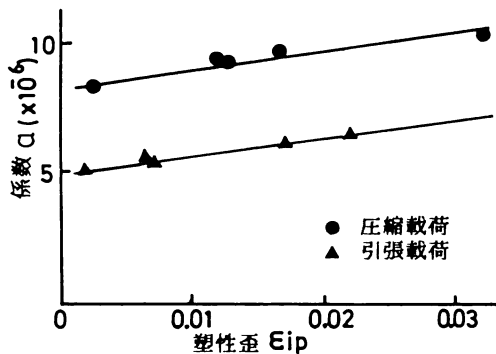


図8 係数 a に及ぼす塑性歪 ϵ_{ip} の影響

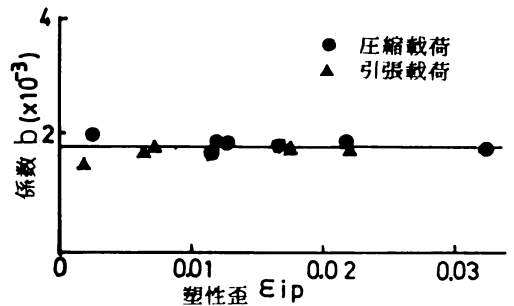


図9 係数 b に及ぼす塑性歪 ϵ_{ip} の影響

良いようである。

4. 3 重回帰解析結果

4. 2より、定数bはほぼ一定として良いようであるので、ここでは定数aに対して、繰り返し回数nと塑性歪ε_{ip}の重回帰解析を行った。その結果、次式のように得られた。

〈圧縮载荷時〉

$$a = 0.8251 \times 10^{-6} + 0.3590 \times 10^{-8} \times n + 0.5442 \times 10^{-5} \times \epsilon_{ip} \quad \dots\dots(6)$$

相関係数γ=0.96

〈引張载荷時〉

$$a = 0.4896 \times 10^{-6} + 0.2681 \times 10^{-8} \times n + 0.5556 \times 10^{-5} \times \epsilon_{ip} \quad \dots\dots(7)$$

相関係数γ=0.98

4. 4 本方法による応力・歪の再現性について

本方法による応力・歪曲線は、繰り返し回数nおよび塑性歪ε_{ip}を含めた式で表すと、最終的には次式のようなになる。

〈圧縮载荷時〉

$$\sigma = \frac{\epsilon}{0.8251 \times 10^{-6} + 0.3590 \times 10^{-8} \times n + 0.5442 \times 10^{-5} \times \epsilon_{ip} + 0.18 \times 10^{-3} \times \epsilon} \quad \dots\dots(8)$$

〈引張载荷時〉

$$\sigma = \frac{\epsilon}{0.4896 \times 10^{-6} + 0.2681 \times 10^{-8} \times n + 0.5556 \times 10^{-5} \times \epsilon_{ip} + 0.18 \times 10^{-3} \times \epsilon} \quad \dots\dots(9)$$

図-11は、引張载荷時の各回における応力・歪を前回の徐荷時に重ねたものである。図中に示す黒丸は、(9)式によって求めた計算値を示したものである。また、図-12は同様に圧縮载荷時のものについて示したも

のである。これより、引張载荷時ならびに圧縮载荷時共に、計算値が実測値に一部合わないところも見受けられるが、全体的には両者は良く合っていると考えても差支えないようである。なお、このことは図-11

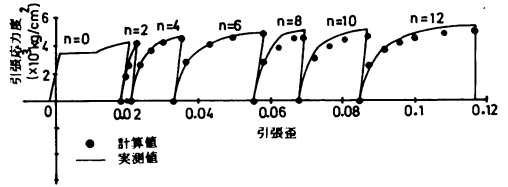


図11 引張载荷における応力・歪の比較

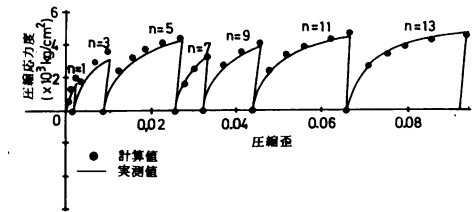


図12 圧縮载荷における応力・歪の比較

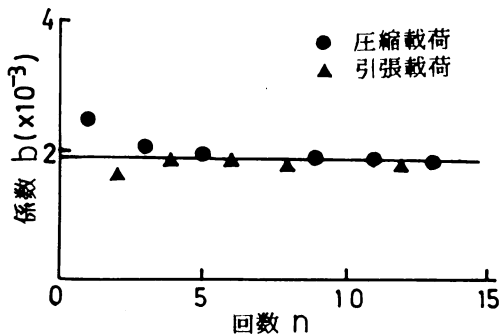


図10 係数bに及ぼす回数nの影響

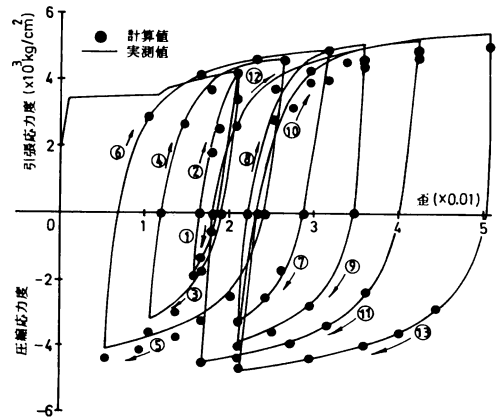


図13 繰返し载荷に伴う応力・歪の比較

表-3 圧縮載荷における応力の比較

回数 n	歪	応力 (kg/cm ²)		
		実測値	計算値	実/計
1	0.00053	617	516	1.20
	0.00106	1235	1305	0.95
	0.00265	1693	1880	0.90
3	0.00222	1587	1777	0.89
	0.0054	2575	2964	0.87
	0.00857	3051	3583	0.86
5	0.00397	3328	2446	0.95
	0.00714	3034	3225	0.93
	0.01032	3422	3731	0.92
	0.01455	3810	4125	0.92
7	0.01878	4092	4379	0.93
	0.00233	1869	1678	1.11
	0.00445	2575	2514	1.02
9	0.00762	3210	3256	0.99
	0.00508	2610	2761	0.95
	0.00931	3386	3579	0.95
11	0.01354	3845	4027	0.95
	0.0019	2381	2394	0.99
	0.00825	3245	3380	0.96
13	0.01248	3792	3898	0.97
	0.01883	4162	4334	0.96
	0.02306	4409	4516	0.98
	0.00317	2751	2610	1.05
13	0.0074	4021	3745	1.07
	0.01163	4515	4249	1.06
	0.01587	4850	4534	1.07
	0.02433	5185	4843	1.07
	0.03279	5397	5009	1.08

表-5 除荷時の弾性係数 E's

回数 n	E's	回数 n	E's
0	1.74 * 10 ⁶	1	1.90 * 10 ⁶
2	1.73	3	1.74
4	1.69	5	1.82
6	1.64	7	1.62
8	1.75	9	1.81
10	1.46	11	1.75
12	1.75	13	1.76
平均	1.68 * 10 ⁶	平均	1.77 * 10 ⁶

注) 単位kg/cm²

表-4 引張載荷における応力の比較

回数 n	歪	応力 (kg/cm ²)		
		実測値	計算値	実/計
2	0.00138	2187	1786	1.22
	0.00238	3228	2549	1.27
	0.0045	4233	3421	1.24
4	0.00275	2751	2658	1.03
	0.00593	3915	3690	1.06
	0.00910	4374	5179	1.05
6	0.01439	4586	4598	1.00
	0.00360	2928	2883	1.02
	0.00955	4145	4160	1.00
8	0.01630	4621	4612	1.00
	0.02476	4868	4896	0.99
	0.00317	3175	2835	1.12
10	0.0074	4656	3937	1.18
	0.01375	5026	4549	1.10
	0.00423	3616	3154	1.15
12	0.00846	4550	4023	1.13
	0.01269	4903	4431	1.11
	0.01804	5115	4752	1.08
12	0.00317	2751	2610	1.05
	0.0074	4021	3745	1.07
	0.01163	4515	4249	1.06
	0.01587	4850	4534	1.07
	0.02433	5185	4843	1.07
0.03279	5397	5009	1.08	

および図-12に示した計算値の点における実測値との比を示した表-3および表-4を見ると、全ケースにわたって両者の比は0.98-1.09(平均1.04)程度で、良く合っているといえる。

次に、繰返しに伴う応力・歪曲線の履歴について検討を行うには除荷時の弾性係数が必要となる。表-5は、引張・圧縮両載荷時から得られた除荷時の弾性係数を示したもので、引張・圧縮両載荷時ともに繰返し回数Nによる影響はほとんどみられず、ほぼ一定として良いようである。しかしながら、引張および圧縮のそれぞれの弾性係数は表中にも示したように同じ値ではなく、圧縮の弾性係数の方が引張の弾性係数よりも大きいようである。この原因については、幾つか検討を行ってみたが、現時点では明らかとはならなかった。

図-13は、繰返しに伴う実測の応力・歪と計算

によるものを示したものである。同図より、計算値は歪が0.05とかなり大きい領域にいたるまで、実測の傾向と繰返し性状を良く表していることが認められる。

5. 結 言

本研究では、交番載荷を受ける鉄筋の応力・歪曲線として、繰返しに伴う軟化の程度を定数 a 、そのときの最大応力度を定数 b から求めることのできる双曲線関数 ($\sigma = \epsilon / (a + b\epsilon)$) に選んだところに特徴がある。この定数 a は、繰返し回数 n と前回受けた塑性歪 ϵ_{ip} との間で重回帰分析を行うことにより実験的に得られた。一方、定数 b は、繰返し回数 n と前回受けた塑性歪 ϵ_{ip} には全くと無関係で、一定と考えても差支えないことが確かめられた。このようにして得られた a 、 b を使った計算値は、4-3でも示したようになりに良い精度で実測値を推定できることが確かめられた。

以上、実験の数が少ないので確定的なことは言い難いところもあるが、交番載荷を受ける鉄筋の応力・歪曲線として双曲線関数を採用しても良い妥当性が得られたものと考えられる。

あ と が き

本研究の実験の遂行ならびに図面作製に関しては、

本学前村政博技官には多大の労を賜った。ここに厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 既存コンクリート構造物の耐震補助—実施および研究の現状と問題点, 日本コンクリート工学協会, 1983-1.
- 2) D. C. Kent and R. Park, "Cyclic load Behavior of Reinforcing Steel," *Strain*, Vol.9, No.3, July 1973, p. 98-103.
- 3) W. Ramberg and W. R. Osgood, "Description of Strees-Strain Curves by Three Parameters," *Technical Note 902, National Advisory Committee for Aeronautics*, July 1943.
- 4) B. Kato, H. Akiyama, and Y. Yamanouchi, "Predictable Properties of Material Under Incremental Cyclic Loading", *Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads, Reports of Working Comissions*, Vol.13, *International Association for Bridge and Structural Engineering*, Lisbon, 1973, p. 119-124.