

[1034] 電炉鋼製横ふし太径異形鉄筋の疲労特性に関する実験的検討

正会員○小林茂敏（建設省土木研究所）
 正会員 高橋弘人（建設省土木研究所）
 正会員 後藤幸正（東北学院大学工学部）
 正会員 柳田力（土木研究センター）

1. まえがき

コンクリート用異形鉄筋には大別して高炉を有するメーカーによって高炉から一貫して製造される高炉品と、鉄屑などを原料として電気炉で製鋼を行うメーカーによって製造される電炉品とがある。電炉品の方が価格が安いので普通サイズの鉄筋はほとんどが電炉品が使われているが、D51のような太径の鉄筋の場合にはメーカーの製造設備や、圧接性の良さを配慮したためか、高炉品だけが生産され、使われてきた。しかしながら、最近では電気炉メーカーの技術も進み、電炉品でD51異形鉄筋を製造するメーカーも現れてきた。

鉄筋の静的な強度はJISで規定されていることもあって、鉄筋の材質や形状が異なってもあまり影響をうけないが、疲労強度は鉄筋表面の形状や鉄筋径に影響されることは多くの研究者によって指摘されている。そして最近改訂された土木学会コンクリート標準示方書（以下では文献1）という）ではこれらの特性を加味した鉄筋の疲労強度の計算式を規定している。

一方、電炉品の太径鉄筋の疲労特性については、ほとんど知られていない。

筆者らは最近生産が開始された電炉品の太径異形鉄筋の疲労特性を実験する機会を得たので結果を報告し、あわせて学会式との適合性についても考察を加えることとする。

2. 供試体と試験方法

2.1 試験用鉄筋

試験に用いたSD35 D51異形鉄筋は普通サイズの電炉品異形鉄筋を製造しているメーカーが最近生産を開始した横ふしの異形鉄筋で、JIS G 3112の熱間圧延異形棒鋼3種に適合し、形状は表-1、図-1に示すようなものである。ひびわれ特性を改善するためにふしの間隔を15mmと比較的狭く取り、かつ疲労特性を改善する目的でふしの立ち上がり部には大きな半径の円弧が付けられている。

表-1 D51鉄筋の形状

供試体名	呼び名	材質	ふしの間隔 P (mm)	ふしの高さ A (mm)	ふしの隙間 2B (mm)	角度 θ	円弧
A, C	SD35D51	電炉	15.09	3.0	10.0	90°	付
B, F	SD35051	高炉	30.30	4.7	21.2	>60°	付

比較のために用いた高炉品のSD35 D51異形鉄筋は良く名前前の知られたブランドの使用実績の多い斜めふし（ふしの鉄筋軸からの角度は60°以上あり、横ふしに近い）のもので、これも疲労特性を良くするためにふしの立ち上がり部には円弧が付けられている。

鉄筋の径が及ぼす影響も合わせて検討するために、D41、

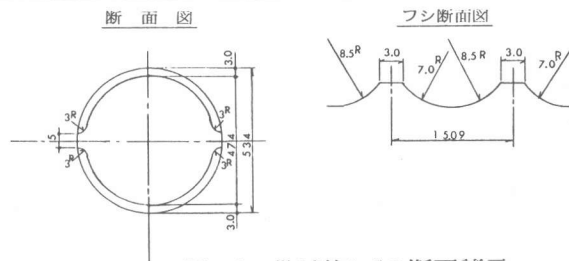


図-1 供試体A, Cの断面諸元

D25、D19の電炉品横ふし異形鉄筋、D19の高炉品の斜めふし異形鉄筋等についても試験を行った。

鉄筋の材質の影響も知るためにSD30も試験に加えた。

2.2 試験用供試体製作

疲労試験ではつかみ部の加工に注意する必要があるが、本実験ではD51の場合、内径70mm、長さ300mm、厚さ5mmのアルミ管をかぶせ、隙間をエポキシ樹脂で充填してつかみ部とした。

供試体の長さは、150cmとし、つかみ部を除いた純試験区間は90cmとした。他のこれよりも細い鉄筋の場合にも同様の方法でつかみ部を加工した。

2.3 荷重方法

疲労試験では動的な荷重能力が200tのサーボ電気油圧式疲労試験機(写真-1)を用いて、繰り返し速度約600cpmで行った。ただし、普通径の鉄筋には荷重能力50tの疲労試験機を用いたものもある。

応力下限値は多くの実験例になり2~3kgf/cm²とした。

3. 試験結果

3.1 試験値

各材料ごとの、静的な強度試験の結果を表-2に示す。

67供試体の疲労試験の結果を表-3に示す。

鉄筋の種類ごとの表面形状を破断部分とともに写真-2に示す。

対数グラフに示したS-N曲線を図-2(太径鉄筋)、図-3(普通径鉄筋)に示す。

太径鉄筋の供試体のいくつかは、つかみ部で疲労破断したが、そのために疲労強度が著しく低く現れたと思われる(プロットが他のものと極端に離れない)ものはすべて解析に採用した。ちなみに、太径鉄筋で低応力高サイクル時に破断したものは何れも、つかみ部以外の点で破断していたので、つかみ部破断の結果への影響は非常に小さいと考えられる。

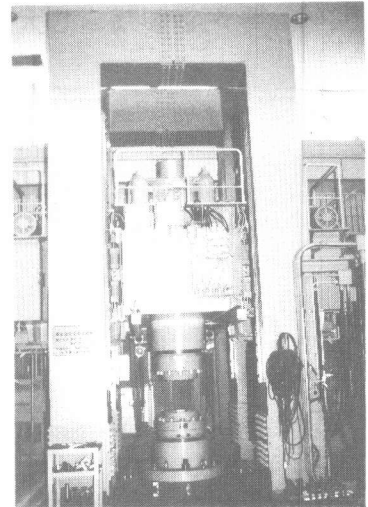


写真-1 疲労試験機

表-2 使用鉄筋の機械的性質

供試体名	呼び名	材質	公称断面積 (cm ²)	降伏点 (kgf/mm ²)	引張り強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)
A, C	SD35051	電炉	20.27	39.0	57.0	21.9
B, F	SD35051	高炉	20.27	39.4	56.1	26.0
E	SD30051	電炉	20.27	35.0	54.0	31.4
D	SD35041	電炉	13.40	41.6	61.8	23.2
G	SD30025	電炉	5.07	35.3	53.8	25.0
F	SD30019	電炉	2.87	38.1	54.0	23.4
I	SD30019	高炉	2.87	35.0	53.5	27.9

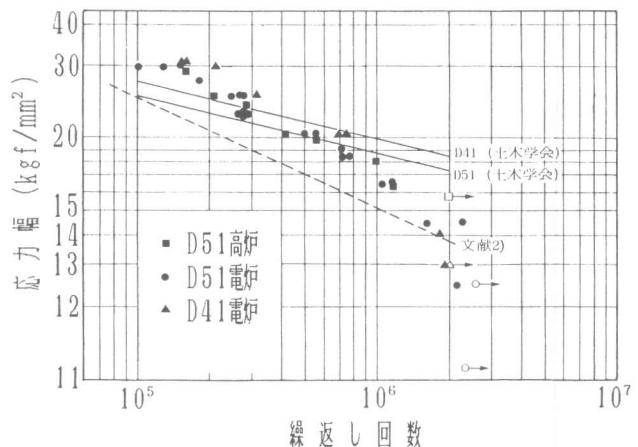


図-2 太径鉄筋のS-N曲線

表-3 疲労実験結果

No	供試体名	材 料	鉄筋径 (mm)	上限応力度 (kgf/mm ²)	下限応力度 (kgf/mm ²)	応力幅 (kgf/mm ²)	繰返し回数 ×10 ⁴ 回	備 考	α	κ
1	A-1-1	SD35電炉	51	14.5	2.0	12.5	216.09		4.8	0.26
2	A-1-2	"	51	14.5	2.0	12.5	256.00	破断せず		
3	A-2	"	51	16.5	2.0	14.5	164.15			
4	A-3	"	51	18.5	2.0	16.5	107.85			
5	A-4-1	"	51	20.5	2.0	18.5	73.59			
6	A-4-2	"	51	20.5	2.0	18.5	73.81			
7	A-5	"	51	22.5	2.0	20.5	51.48			
8	A-6-1	"	51	24.5	2.0	22.5	25.57			
9	A-6-2	"	51	24.5	2.0	22.5	27.01			
10	A-6-3	"	51	24.5	2.0	22.5	27.43			
11	A-6-4	"	51	24.5	2.0	22.5	28.04			
12	A-7	"	51	27.0	2.0	25.0	25.14			
13	A-8	"	51	29.5	2.0	27.5	18.74			
14	A-9-1	"	51	32.0	2.0	30.0	13.13			
15	A-9-2	"	51	32.0	2.0	30.0	10.50			
16	C-1	"	51	18.5	2.0	16.5	119.15			
17	C-2	"	51	22.5	2.0	20.5	55.60			
18	C-3	"	51	27.0	2.0	25.0	27.76			
19	E-1	SD30電炉	51	13.1	2.0	11.0	228.91	破断せず		
20	E-2	"	51	16.5	2.0	14.5	227.21			
21	E-3	"	51	21.0	2.0	19.0	71.35			
22	E-4	"	51	27.0	2.0	25.0	26.31			
23	E-5	"	51	32.0	2.0	30.0	15.07			
24	B-1	SD35高炉	51	18.5	2.0	16.5	116.82			
25	B-2	"	51	22.5	2.0	20.5	40.75			
26	B-3	"	51	27.5	2.0	25.0	21.72			
27	F-1	"	51	17.8	2.0	15.8	200.00	破断せず		
28	F-2	"	51	25.7	2.0	23.7	28.89			
29	F-3	"	51	22.0	2.0	20.0	55.00			
30	F-4	"	51	31.2	2.0	29.2	15.30			
31	F-5	"	51	20.0	2.0	18.0	99.23			
32	D-1-1	SD35電炉	41	15.0	2.0	13.0	200.00	破断せず		
33	D-1-2	"	41	15.0	2.0	13.0	195.06			
34	D-2	"	41	16.0	2.0	14.0	182.99			
35	D-3-1	"	41	22.5	2.0	20.5	75.50			
36	D-3-2	"	41	22.5	2.0	20.5	69.79			
37	D-4	"	41	27.0	2.0	25.0	31.77			
38	D-5-1	"	41	32.0	2.0	30.0	21.69			
39	D-5-2	"	41	32.0	2.0	30.0	15.26			
40	D-5-3	"	41	32.0	2.0	30.0	15.86			
41	G-1-1	SD30電炉	25	29.5	2.9	26.6	44.78			
42	G-2	"	25	29.5	2.9	26.6	42.70			
43	G-3	"	25	29.5	2.9	26.6	38.90			
44	G-4	"	25	27.6	2.9	24.7	58.57			
45	G-5	"	25	27.6	2.9	24.7	47.60			
46	G-6	"	25	27.6	2.9	24.7	39.88			
47	G-7	"	25	25.8	2.9	22.9	106.71			
48	G-8	"	25	25.8	2.9	22.9	52.68			
49	G-9	"	25	25.8	2.9	22.9	95.70			
50	H-1	"	19	30.4	3.0	27.4	48.85			
51	H-2	"	19	30.4	3.0	27.4	55.68			
52	H-3	"	19	30.4	3.0	27.4	47.71			
53	H-4	"	19	26.5	3.0	23.5	369.60			
54	H-5	"	19	26.5	3.0	23.5	610.09	破断せず		
55	H-6	"	19	26.5	3.0	23.5	102.32			
56	H-7	"	19	28.4	3.0	25.4	100.11			
57	H-8	"	19	28.4	3.0	25.4	64.86			
58	H-9	"	19	28.4	3.0	25.4	81.41			
59	I-1	SD35高炉	19	30.1	3.0	27.1	25.26			
60	I-2	"	19	30.1	3.0	27.1	32.60			
61	I-3	"	19	30.1	3.0	27.1	42.36			
62	I-4	"	19	26.3	3.0	23.3	72.47			
63	I-5	"	19	26.3	3.0	23.3	80.91			
64	I-6	"	19	26.3	3.0	23.3	101.30			
65	I-7	"	19	22.5	3.0	19.5	244.35	破断せず		
66	I-8	"	19	22.5	3.0	19.5	200.69	破断せず		
67	I-9	"	19	22.5	3.0	19.5	233.52	破断せず		

3.2 計算値との対比

疲労強度 σ_r (応力振幅 kgf/cm^2) は (1) 式で表わされるとした場合の係数 α 、 κ の値を実験値から最小二乗法で求めた結果を表-3 に記入した。

$$\sigma_r = (1 - \sigma_{\min} / f_u) \cdot 10^{\alpha} / N^{\kappa} \dots (1)$$

ただし、 σ_{\min} : 最小応力
 f_u : 鉄筋引張強度
 N : 繰返し回数

$(1 - \sigma_{\min} / f_u)$ は厳密には材料ごとに異なるが、0.95として一定とした。

文献1)では α は鉄筋径とふし形状の関数、 κ は0.12、文献2)では $\alpha=4.3$ 、 $\kappa=0.18$ として良いと規定している。

図-2、3にはこれらの計算式によって計算した場合の値も書き込んである。

4. 考 察

4.1 高炉品と電炉品の疲労強度について

鉄筋の疲労強度には鉄筋径やふしの形状が関係すると言われている³⁾。また、鉄筋の降伏強度は疲労強度に影響しないと言われている⁷⁾。

D51 については電炉品にはSD30とSD35があるが、ふしの形状はすべて同じなので、同一のグループとして扱う。高炉品は斜めふしのSD35であるが、ふしの角度が鉄筋軸に対して 60° 以上あり、電炉品と同様にふしの立ち上がり部に円弧がついているので、文献1)の方法によって疲労強度の計算をすれば、材質以外は電炉品のグループと同じであるとみなせる。各々のグループについて α 、 κ を求めた結果は表-3に示すように全く同じ値なので、比較した二つの製品の間には材質の違いによる疲労特性の差はないとして良いのではないかと考えられる。

D19 についても高炉品と電炉品とを実験しているが、結果は同表に示されるように係数にかなりの差

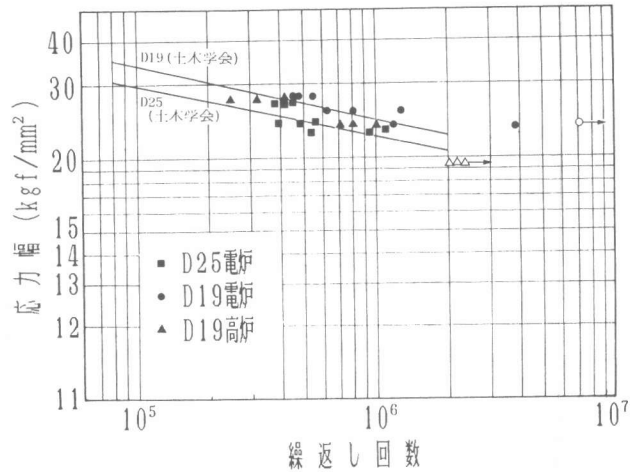


図-3 普通径鉄筋のS-N曲線

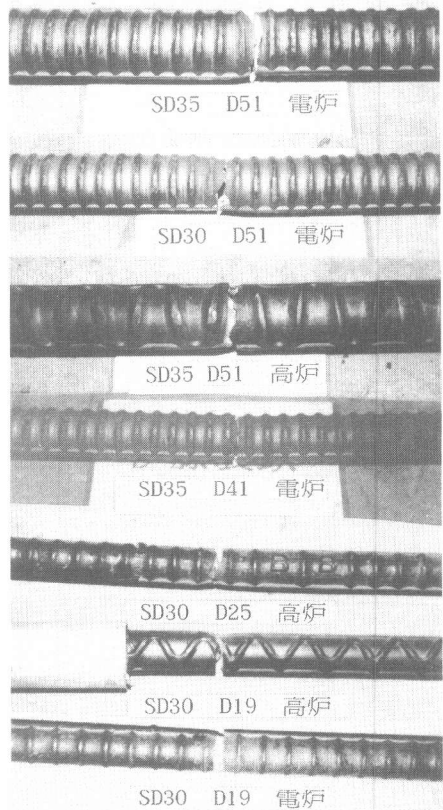


写真-2 鉄筋の表面形状と破断状況

があった。200万回疲労強度で電炉品の方が15%程度強度が大きく出たが、原因のひとつは前者は斜めふしであるがふしに円弧が付いていなかったのに対して、後者には写真でもわかるように円弧が付いていたためであることが考えられる。したがってこの実験データからは製法の疲労強度に及ぼす影響は論じることが出来ない。

4.2 太径鉄筋の疲労強度について

鉄筋径が大きくなれば疲労強度も低下することは文献3)等でも述べられてきてはいるが、D51についてはメーカー側から発表されている資料、文献6)などから予想していた値に比べてかなり小さく、200万回疲労強度で 1400kgf/cm^2 程度であった。また、文献1)に示される鉄筋径を考慮した疲労強度の計算式に比べても図-2に示されるようになりにかなり異なった傾向を示した。

疲労試験機の特性によることも考えられたので機器の検定も行ったが特に問題はなかった。また、普通径の鉄筋については図-3に示されるように 2000kgf/cm^2 以上の疲労強度を有し、提案されている強度式から見てもほぼ妥当な値であることから、供試体が実際にそのような性質を示しているものと考えられる。また、同じ学会の同じ委員会から別の時期に発行された文献2)では別の係数による疲労強度の計算式が提案されているが、その式によった場合には $\alpha=4.3$ 、 $\kappa=0.18$ で同図中に点線で示されるように200万回疲労強度は 1400kgf/cm^2 程度になり実験値と比較的良く合うことがわかった。

4.3 大きく異なった二つの疲労強度の計算式が提案された根拠の考察

このように大きく異なる計算式が導かれた原因を追跡した結果以下のことがわかった。

文献1)の提案式は文献4)が原点で、式は多数の実験データの95%信頼限界値として求められているが、式の誘導に使われた太径鉄筋の試験値はメーカー発表のものが多く、そのデータの大部分が太径鉄筋でも200万回疲労強度が 2000kgf/cm^2 以上となっている。

文献2)の提案式が誘導された際に用いられた太径鉄筋のデータは主として文献5)によっているが、これは接合部の強度を求める研究グループで得られた母材の強度試験の値で、それには本論の実験値と同様に低いものが多数含まれている。そして提案式はそれらの下限値を用いている。

これらの事から、式の差異は係数の誘導に使用したデータの違いによると結論される。

4.4 異なった実験値の現れる理由に関する考察

太径鉄筋は限られた大メーカーからのみ生産されているので、不良品が出回ったり、故意のデータが発表される事は考えにくい。疲労強度試験は定まった規格がないので試験法の違いによる差が考えられる。

実験写真等から推してメーカー側の実験はJISの鋼材の静的強度の試験に準じて供試体の則長を径の4~5倍としているようである。

実験値が低く出た例は、継手実験の際に得られるもの⁵⁾、コンクリート供試体にして試験をするもの³⁾、電磁共振式試験機によるもの⁶⁾等、試験手法からして供試体の長さが1mを越えるような大きな供試体を用いた事が想像されるという、共通点があるように思われる。そして本実験も長さ90cm以上の供試体を用いているので同じ範疇に入る。低応力高サイクル時における破断の特徴は写真-3に見られる

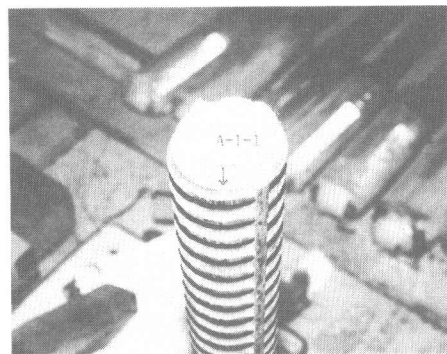


写真-3 D51の破断面

ように供試体に生じている小さな傷、マークなど、不測の欠陥部が破壊のきっかけになっている。即ち供試体の中で最弱点部が疲労強度を決める事になり、大きな供試体ほど弱点部を拾う確率が高くなる。いわゆる寸法効果によって強度が下がるものと考えられる。この考え方は鉄筋径が大きくなる程疲労強度が小さくなる事実に照らしても矛盾がない。

4.5 疲労強度式に対する提言

少ない種類の材料の実験結果なので断言はできないが、本実験の結果からは、文献1)の疲労強度式は太径鉄筋に対しては、さらに見直す必要があるのではないかと考えられる。

その際には実物に則し、長さの大きい太径鉄筋供試体による試験データを多く採用すべきと考えられる。

また、供試体が大きくなると静的強度が下がるのではなく、疲労速度が早くなるのであるから、係数 α ではなく κ を鉄筋径の関数とするのが適当であると考えられる。

そのような修正が済むまでは文献1)によって疲労を受ける構造物を太径鉄筋を用いて設計をする場合には、原則に従い実験で疲労強度を求めるか、あるいは文献2)の疲労強度式によるのがよいと考えられる。

5. 結論

以上の実験結果から以下の結論を得た。

- (1) 実験に使用した電炉品横ふし D51異形鉄筋は試験に用いた市販の高炉品に比べて疲労特性は大略同じであると考えられる。
- (2) 文献1)の疲労強度式は太径の鉄筋には適応性が低く、これには文献2)の式の方がより適すると考えられる。
- (3) 太径鉄筋の疲労強度の低下は寸法効果のためとも考えられるので、式の修正に際しては寸法の大きい供試体データの採用、係数類の関数式の合理化等に配慮する必要がある。

本結論は、建設省土木研究所と電気炉鋼工業会、及び(財)土木研究センターが共同研究として行った太径電炉鋼製鉄筋の疲労実験のデータをもとに、筆者らが独自に検討を加えて得たものである。最後に鉄筋の入手、諸特性の調査について助力をいただいた(株)伊藤製鉄所 加藤晴久、(株)神戸製鋼 山本孝夫の両氏に深謝致します。

【参考文献】

- 1) コンクリート標準示方書 61年改訂版 設計編 土木学会 昭和61年10月
- 2) コンクリート構造の限界状態設計法指針(案) 土木学会 昭和58年11月
- 3) 国分・岡村：太径鉄筋の使用に関する研究、土木学会論文集 No202,1972.6
- 4) 丹羽・前田・岡村：異形鉄筋の疲労強度算定式、土木学会論文集 No354,1985.2
- 5) JMC 溶接分科会資料：各種鉄筋継手の疲れ試験結果、JMCW-122-76,1976.9
- 6) 太径鉄筋 D51を用いる鉄筋コンクリート 構造物の設計指針「コンクリート」第43号 1977.8
- 7) MacGregor et."Fatigue Strength of Hot-Rolled Reinforcing Bars".ACI Jur68.3