

高強度異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートばり の疲労に関する基礎研究

FUNDAMENTAL STUDY ON FATIGUE BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS USING HIGH STRENGTH DEFORMED BARS

国分正胤*・岡村 甫**

By Masatane Kokubu and Hajime Okamura

1. 序 論

高強度異形鉄筋を適当に用いれば、その降伏点に応じて部材の破壊強度が増大し鉄筋量も節約できるので、ここ数年来わが国における高強度異形鉄筋の使用は増加の一途をたどっている。しかし、高強度鉄筋を用いてその許容引張応力度を大きくすると、設計荷重が作用する場合に生ずるコンクリートのひびわれの幅が比較的大きくなり、風雨にさらされる場合鉄筋がさびて部材の耐久性を損なうおそれもある。そのため高強度鉄筋は、一般に異形鉄筋とする必要があるが、鉄筋にフシを設け異形鉄筋とすると、フシの周辺に働く応力集中の影響で、その疲労強度がある程度低下することが考えられる。したがって、鉄道橋のように鉄筋に大きくなり返し応力が作用する部材に高強度異形鉄筋を用いる場合には、その降伏点が高いからといって許容応力度を大きくすると、鉄筋の疲労破断によって部材が破壊するおそれもある。

近年わが国では異形鉄筋の疲労強度に関する研究は多く、すでに結果が公表されているものもある¹⁾²⁾。しかし、現在市販されている高強度異形鉄筋の形状その他は各種各様であって、その疲労強度も相違するのは当然である。また、くり返し載荷をうける鉄筋コンクリートばりにおけるひびわれその他の曲げ性状は、用いる鉄筋の影響を受けるだけではなく、はりの断面形状および鉄筋比その他の影響をも相当に受けることが考えられる。

東京大学土木教室では、昭和 38 年以来異形鉄筋の疲労に関連する基礎研究を続けている。本文は、それらの研究結果を取りまとめたもので、各種高強度異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートばりの疲労性状について論じたものである。

研究の実施に当たり、終始熱心に実験に従事して下さいた東京大学土木教室コンクリート研究室の方々へ厚くお礼申し上げる。また文部省より科学研究費交付金を交付されたことを付記して厚くお礼申し上げる。

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 東京大学工学部土木工学科

2. 使用材料および試験方法

(1) コンクリート

a) コンクリート材料 セメントは日本セメント会社製の普通ポルトランドセメントを用いたが、一部の試験には早強ポルトランドセメントをも用いた。それらの試験成績は表-1に示すようである。砂は富士川産のもので、その比重は2.63であった。砂利は荒川産のもので、その比重は2.64であった。それらのふるい分け試験の結果は図-1に示すようである。ポゾリスNo.5はセメント重量の0.5%を用い、あらかじめ10%溶液としておいて用いた。

b) 配合 コンクリートの配合は大部分のものは表

表-1 セメントの試験成績

種 別	比重	粉 末 度		凝 結				安定性 (煮沸法)	
		ブレン値 (cm ² /g)	88 μ 残分 (%)	室温 (°C)	湿度 (%)	水量 (%)	始 発 (時-分)		終 結 (時-分)
普通ポルトランドセメント	3.16	3470	2.1	20.3	93	27.9	2-20	3-35	良
早強ポルトランドセメント	3.14	4420	0.2	20.0	95	29.9	2-40	4-07	良

種 別	フロー値 (mm)	曲 げ 強 度 (kg/cm ²)				圧 縮 強 度 (kg/cm ²)			
		1 日	3 日	7 日	28 日	1 日	3 日	7 日	28 日
普通ポルトランドセメント	242	—	34.3	50.7	72.4	—	135	239	429
早強ポルトランドセメント	254	27.2	50.6	65.1	82.0	104	238	367	505

図-1 骨材のふるい分け試験

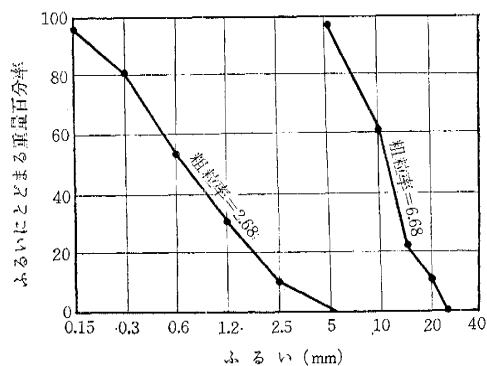


表-2 コンクリートの配合および試験結果

番号	セメント	混和剤	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	
									材令14日	材令28日
1	普通ポルトランドセメント	ボゾリス No. 5	25	55	256	38	6	3.5	—	350
2	普通ポルトランドセメント	なし	15	55	327	49	10	1.5	—	330
3	早強ポルトランドセメント	ボゾリス No. 5	25	55	260	39	6	2.5	380	—

—2 に示す配合1であり、一部の試験には配合2および配合3をも用いた。試験は材令28日以後に開始したが、早強ポルトランドセメントを用いたものは材令14日以後に開始した。試験時におけるコンクリートの圧縮強度は、試験期間が長期にわたったため多少ばらついたが平均約 350 kg/cm² であった。

c) 練り混ぜ・締め固めおよび養生 コンクリートの練り混ぜに当っては、バッチの大きさを 80~120 l とし、バレル型可傾式ミキサを用い3分間練り混ぜた。コンクリートは棒状振動機を用いて入念に締め固めた。供試体は材令2日に脱わくし、実験室内で、試験開始の2~3日前まで、コンクリート上面を湿布でおおって養生した。

(2) 鉄筋

用いた鉄筋は、いずれも熱間圧延したもので、JIS G 3112⁷⁾ “鉄筋コンクリート用棒鋼” に適合する異形鉄筋 17 種およびこれに適合しない異形鉄筋 1 種であって、比較のために普通丸鋼 SR 30 をも用いた。18 種の異形

鉄筋には SD 35 が 3 種、SD 40 が 11 種、SD 50 が 2 種ふくまれており、大部分のものはいわゆる高強度異形鉄筋である。それらの形状は写真-1 に、機械的性質および化学成分は表-3 に示すようである。

A : SR 30 の普通丸鋼である。

B : SD 30 の直角フシの異形鉄筋であり、従来から広く用いられてきたものである。

C₁ : フシと鉄筋軸とのなす角度が 60° の異形鉄筋で、旧型に属するものである。

C₂ : フシの配置は C₁ と同じであるが、フシが鉄筋母材にとりつく所の勾配の急変を緩和するため、フシの高さの 1/3 程度から下の部分を、フシの高さの 9 倍程度の半径をもつ円弧とした市販品である。

C₃ : フシの配置は C₁ および C₂ と同じであるが、フシのとりつけをフシの高さの 5 倍程度の半径をもつ円弧とした異形鉄筋で、旧型に属するものである。

D : フシと鉄筋軸とのなす角度が 30° の波フシ型の異形鉄筋で、フシの間隔およびフシのすきまも JIS

表-3 鉄筋の試験結果

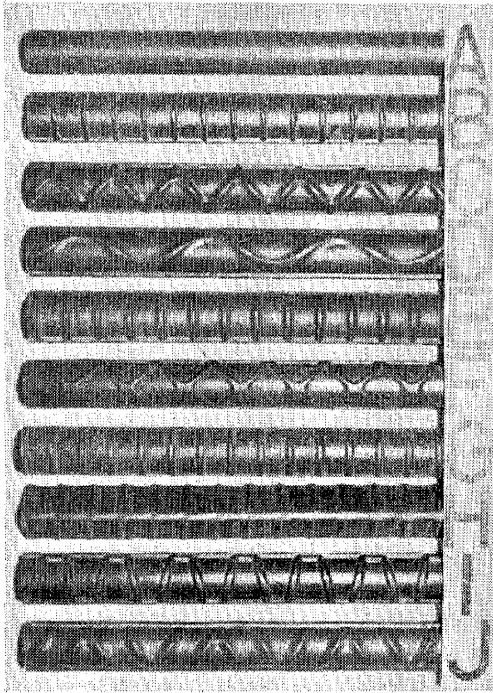
直径 (mm)	種類*	規格	機械的性質***			形 状						化 学 成 分 (%)						
			降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	平均断面積 (cm ²)	フシの軸とのなす角	フシの高さ (mm)	フシの幅 (mm)	フシの間隔 (mm)	フシの幅 (mm)	リブの幅 (mm)	C	Mn	Si	P	S	C+ Mn/6
19	A 30	SR 30	38	58	29	2.86	—	—	—	—	—	—	0.20	1.18	0.30	0.020	0.017	0.40
	B 30	SD 30	32	53	26	2.79	90°	1.3	1.8	3.0	12.5	3.5	0.33	0.52	0.11	0.013	0.022	0.42
	C ₁ 35	SD 35	39	60	27	2.79	60°	1.7	3.0	5.5	12.4	3.7	0.22	1.29	0.33	0.024	0.022	0.44
	C ₁ 40	SD 40	44	59	23	2.92	60°	1.9	2.5	5.5	12.4	4.5	0.26	0.97	0.06	0.024	0.017	0.42
	C ₁ 50	SD 50	54	72	23	2.80	60°	1.4	2.5	5.0	12.5	4.0	0.27	1.32	0.27	0.023	0.025	0.49
	C ₂ 40	SD 40	46	60	26	2.78	60°	1.5	2.5	7.0	12.4	4.0	0.17	1.19	0.34	0.041	0.027	0.37
	D 40	—	49	67	23	2.79	30°	1.4	2.2	8.0	24.0	4.0	0.21	1.19	0.34	0.041	0.027	0.41
	E 40	SD 40	42	65	22	2.83	90°	1.3	2.0	4.0	12.3	4.0	0.28	1.05	0.43	0.019	0.014	0.46
	E 60	SD 60**	61	84	16	2.85	90°	1.4	2.0	3.5	12.4	4.0	0.32	1.53	0.52	0.017	0.019	0.58
	F 35	SD 35	40	63	26	2.84	45°	1.5	2.0	3.5	10.7	2.4	—	—	—	—	—	—
	F 40	SD 40	43	67	24	2.86	45°	1.5	2.0	3.5	10.9	2.5	—	—	—	—	—	—
	G 40	SD 40	44	66	23	2.77	90°	1.2	2.8	5.0	12.0	5.2	0.25	1.60	0.44	0.040	0.018	0.51
H 40	SD 40	42	61	21	2.82	90°	1.6	3.0	4.5	13.6	4.1	0.24	1.46	0.30	0.015	0.019	0.51	
25	B 30	SD 30	30	53	25	4.92	90°	1.6	2.0	3.5	16.0	4.7	0.34	0.52	0.10	0.014	0.020	0.43
	C ₂ 40	SD 40	48	64	23	5.01	60°	2.2	3.5	8.0	16.5	5.0	0.23	1.21	0.36	0.039	0.025	0.43
	C ₃ 35	SD 35	40	55	29	4.93	60°	1.8	3.2	8.0	17.0	4.5	0.17	1.15	0.34	0.039	0.018	0.34
	E 40	SD 40	42	64	22	5.07	90°	2.0	3.2	7.0	16.3	5.0	0.24	1.23	0.42	0.025	0.029	0.44
	F 40	SD 40	42	66	24	5.03	45°	1.5	3.0	4.1	15.4	4.0	0.23	1.63	0.50	0.022	0.029	0.50
	G 40	SD 40	42	64	23	5.06	90°	1.5	3.0	5.1	16.0	7.0	0.25	1.60	0.44	0.040	0.018	0.52
	I ₁ 40	SD 40	42	60	21	4.90	75°	2.0	4.0	5.0	17.0	4.9	0.21	1.50	0.43	0.014	0.014	0.46
	I ₂ 40	SD 40	47	62	28	5.11	75°	1.6	2.5	8.0	17.8	7.5	0.20	1.57	0.34	0.024	0.015	0.46
	I ₃ 40	SD 40	51	68	23	5.03	75°	1.9	1.5	8.0	18.5	8.5	0.20	1.57	0.34	0.024	0.015	0.46
	J 40	SD 40	42	63	23	5.00	60°	1.3	2.5	10.0	14.0	9.0	0.23	1.39	0.32	0.014	0.021	0.46

* 鉄筋の種類を示す場合、写真-1 に示す形状と降伏点の規格値とで示すことにした。

** JIS G 3112 における規格値ではないが、仮にこのように表示した。

*** 降伏点および引張強さは、公称断面積を用いて算出した。

写真-1 鉄筋の形状

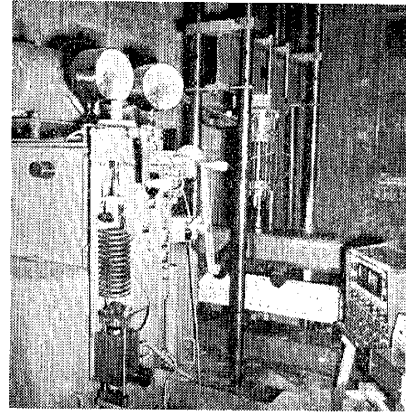


規格よりもはるかに大きく、フシのとりつけも円弧で行なった。特に耐疲労性を考慮した試作品である。

- E: 直角フシの異形鉄筋で、フシの高さの 1/3 程度から下の部分を、フシの高さ程度の半径をもつ円弧とした市販品である。
- F: フシと鉄筋軸とのなす角度が 45° の斜めフシの異形鉄筋で、市販品である。
- G: 直角フシの異形鉄筋で最近まで市販されていたが、その後改良されたと聞いており、旧型に属している。
- H: 三角形断面の異形鉄筋で、フシと鉄筋軸とのなす角度が 90° の市販品である。
- I₁: フシと鉄筋軸とのなす角度が 75° の斜めフシの異形鉄筋で、旧型に属するものである。
- I₂: フシの配置は I₁ と同じであるが、フシのとりつけをフシの高さの 2 倍程度の半径をもつ円弧で行なった市販品である。
- I₃: フシの配置は I₁ および I₂ と同じであるが、フシのとりつけをフシの高さの 5 倍程度の半径をもつ円弧で行なった試作品である。
- J: フシと鉄筋軸とのなす角度が 60° の斜めフシの異形鉄筋で、フシの高さを規格の限度まで小さくし、フシの上部を滑めらかにするとともにそのとりつけも大きい半径の円弧で行なった試作品である。

鉄筋の表示に当っては、上記の形状と降伏点の規格値とで示すことにした。

写真-2 疲労試験装置



(3) 疲労試験方法

試験の様子は写真-2に示すようであって、用いた疲労試験機は前川試験機製作所製で、容量 10 t、載荷速度毎分 300 回のものである。支点および載荷点のローラーにはボールベアリングを用いているが、載荷にともなってローラーは回転し、自由支承として働いていることが確かめられた。動的に載荷する場合の荷重の検定は、ジャッキの下にロードセルをそう入して行なった。スパンは 120 cm あるいは 129 cm とし、載荷点の間隔を 40 cm とした 2 点載荷とした。

疲労試験開始前、および載荷回数がそれぞれ 1000, 1×10^4 , 10×10^4 , 50×10^4 , 100×10^4 , 200×10^4 に達した時に試験機の運転を停止し、上限荷重まで静的に載荷して、コンクリートのひずみ、たわみ、ひびわれの幅等を測定した。一部の試験では疲労試験中の鉄筋およびコンクリートのひずみを、動的ひずみ測定器および電磁オシログラフを用いて測定した。鉄筋のひずみを測定するためゲージを貼ると、そのすぐ近くで鉄筋が破断することの多いことが示されたので、荷重の検定その他特に必要のある場合のほかは、鉄筋のひずみは実測しなかった。鉄筋にゲージを貼った場合でも、疲労試験の途中で測定不能となることが多かった。コンクリートのひずみはワイヤストレンゲージあるいはコンタクトゲージを用いて測定した。スパン中央および支点から 10 cm の位置のたわみをダイヤルゲージで測定し、支点沈下および支承部コンクリートの変形等の影響を除くため、前者と後者との差をたわみの試験値とした。

ひびわれ幅はコンタクトゲージを用いて測定した。すなわち、供試体側面で、鉄筋の重心位置に、あらかじめ 6 cm 間隔にコンタクトゲージ用ボールを打込んだ鋼小板を貼りつけておいて、その間の長さ変化を測定し(図-2参照)、ひびわれを生じなかった区間の平均縮みとひびわれを生じた区間の伸びとの代数和をひびわれ幅としたのである⁹⁾。スパン中央部の長さ 72 cm (載荷点の間隔+有効高さの 2 倍)の区間におけるひびわれの最

図-2 最大ひびわれ幅および平均ひびわれ幅の定め方

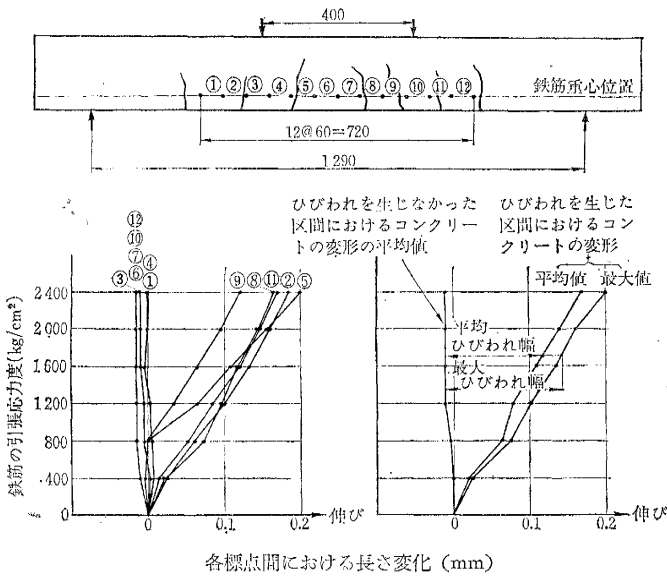
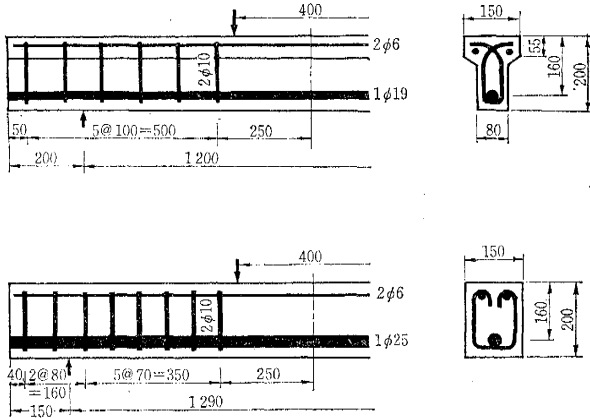


図-3 供試体の形状および寸法



大幅を最大ひびわれ幅、ひびわれの平均幅を平均ひびわれ幅と称することとした。

3. 異形鉄筋の相違がはりの疲労性状におよぼす影響

合計 81 本の鉄筋コンクリートはりについて、異形鉄筋の相違が、鉄筋コンクリートはりの疲労性状におよぼす影響を検討した。用いた異形鉄筋は形状および材質の異なる 18 種の鉄筋であって、昭和 40 年 2 月現在の代表的市販品 8 種をふくんでいる。用いた供試体は図-3 に示すような T 型はり(直径 19mm の場合)および矩形はり(直径 25mm の場合)であって、スパンをそれぞれ 120cm および 129cm として曲げ疲労試験を行なった。鉄筋を配置する場合、ごく小数のはりを除き、引張鉄筋端にもフックは設けなかった。

疲労試験は、一般に破壊に至るまで続行し、200 万回の

載荷によっても破壊しない場合には、200 万回でこれを中止した。なお一部に、200 万回以上継続したものもある。疲労試験における下限荷重は、コンクリートの引張応力を無視し n を 15 とし、弾性理論によって計算した鉄筋の応力度が 400 kg/cm^2 となるような荷重としたが、その場合の鉄筋応力度の実測値は 1 回目の載荷を除き $700 \sim 900 \text{ kg/cm}^2$ であった。上限荷重は、各鉄筋ごとに 200 万回疲労強度が得られるように定めた。これを定める場合には、あらかじめ適当な上限荷重たとえば鉄筋応力度が 2800 kg/cm^2 となるような荷重で疲労試験を行ない、その疲労破断までの載荷回数から本試験における上限荷重を定めた(上限荷重時の鉄筋応力度の実測値は、ひびわれ近傍では計算値と同様であった)。

試験の結果から、200 万回のくり返し載荷で疲労破断するような上限荷重に相当する鉄筋応力度を求め((1)参照)、200 万回疲労強度と呼び、これにもとづいて鉄筋の疲労強度を論じたのである。最初の間は、同一の鉄筋について一般に 4 本以上の供試体を用いて疲労試験を行なったが、試験の後半には、少数の供試体による試験結果から 200 万回疲労強度が推定できた。

(1) 鉄筋の疲労強度

疲労強度の試験結果は表-4 および表-5 に示すようであって、この結果から 200 万回疲労強度を求めると表-6 に示すようになる。疲労試験の結果には、比較的ばらつきが大きく供試体の数も少ない場合もあったが、上限応力度と破壊するまでの載荷回数との関係を片対数目盛で表わせば、

一般的に比例的な関係となるので(図-4 参照)、この場合にもこの関係が成り立つものとして表-6 の値を推定したのであって、表-6 に示された値は妥当なものと信じている。

はりの疲労強度は用いる鉄筋によっていちじるしく相違し、各種異形鉄筋をその疲労強度によって区分すると、3 グループに分けることができる。

第 1 グループは、疲労強度がいちじるしく高く、200 万回疲労強度が 2800 kg/cm^2 以上のものである。このグループに属する鉄筋は $C_2 40$, $C_3 40$, $E 40$, $E 60$, $I_2 40$, $I_3 40$ の 6 種である。 $E 40$ および $E 60$ は直角フシであるが、その他のものはすべて斜めフシである。これらはいずれも、フシが鉄筋母材にとりつく所の勾配急変が緩和されているものである。すなわち、フシのとりつけ部がフシの高さの 1~9 倍の半径をもつ円弧となっている(2. 参照)。

表-4 疲労試験結果 (鉄筋直径 19 mm の場合)

鉄筋の種類	番 号	上限荷重作用時における鉄筋応力度 (kg/cm ²)	載荷回数 (×10 ⁴)	破断箇所*	最大ひびわれ幅 (mm)				W ₂ /W ₁	鉄筋端におけるフックの有無
					荷重を除去した時		上限荷重が作用した時			
					1 回目	10万回後	1 回目 W ₁	10万回後 W ₂		
A 30	1	2400	520	破断せず	0.14	0.24	0.33	0.54	1.65	有
	2	2400	213	破断せず	0.08	0.21	0.19	0.47	2.45	有
	3	2800	50	A	0.14	0.48	0.32	1.0 以上	3.0 以上	有
	4	2800	47	B	0.09	0.37	0.26	0.86	3.30	有
	5	3200	16	A	0.17	0.40	0.50	0.80	1.60	有
	6	3200	5	A	0.11	—	0.32	—	—	有
	7	3600	2	A	0.22	—	0.40	—	—	有
B 30	1	2400	150	A	0.04	0.06	0.18	0.19	1.05	
	2	2800	31	A	0.05	—	0.18	—	—	
	3	2800	39	A	0.05	0.53	0.19	0.64	3.45	
C ₁ 40	1	2800	59	B	0.04	0.05	0.19	0.20	1.05	
	2	2800	153	C	0.04	0.05	0.15	0.16	1.05	
	3	3200	38	A	0.05	—	0.21	—	—	
	4	3200	50	B	0.04	0.07	0.18	0.20	1.10	
C ₁ 35	5	2800	128	C	0.04	0.06	0.18	0.19	1.10	
	6	2800	101	A	0.04	0.05	0.15	0.20	1.30	
	7	3200	46	A	0.06	0.07	0.24	0.25	1.05	
C ₁ 50	8	2800	47	A	0.05	0.06	0.18	0.20	1.10	
	9	2800	51	A	0.04	0.05	0.17	0.18	1.05	
	10	2800	64	B	0.05	0.07	0.20	0.24	1.20	
	11	3200	62	A	0.06	0.07	0.18	0.21	1.15	
	12	3200	20	A	0.04	—	0.17	—	—	
C ₃ 40	1	2800	848	A	0.04	0.07	0.18	0.20	1.05	
	2	2800	72	B	0.06	0.09	0.18	0.25	1.40	
	3	2800	200	破断せず	0.05	0.08	0.17	0.19	1.15	
	4	3200	190	A	0.06	0.09	0.21	0.24	1.15	
	5	3200	106	B	0.05	0.08	0.21	0.24	1.15	
	6	3200	90	B	0.07	—	0.22	—	—	
	7	3600	77	A	0.05	0.10	0.22	0.26	1.20	
D 40	1	2800	186	破断せず	0.07	0.12	0.18	0.29	1.65	有
	2	3200	134	A	0.09	0.13	0.25	0.38	1.50	
	3	3600	41	B	0.10	0.17	0.32	0.52	1.65	有
E 40	1	2800	88	C	0.06	0.07	0.18	0.22	1.20	
	2	2800	236	破断せず	0.05	0.06	0.16	0.16	1.00	
	3	3200	96	C	0.10	0.11	0.22	0.26	1.15	
	4	3200	38	A	0.05	0.07	0.22	0.24	1.10	
	5	3200	170	D	0.05	0.06	0.21	0.21	1.00	
E 60	6	2800	182	破断せず	0.04	0.07	0.17	0.20	1.20	
	7	2800	223	破断せず	0.05	0.07	0.17	0.18	1.05	
	8	3200	42	A	0.06	0.07	0.22	0.23	1.05	
E 40	1	2800	125	A	0.06	0.07	0.18	0.18	1.00	
	2	2800	66	A	0.07	0.08	0.19	0.23	1.20	
	3	3200	43	B	0.04	0.06	0.19	0.20	1.05	
F 35	4	2400	180	破断せず	0.03	0.04	0.15	0.16	1.10	
	5	2800	162	C	0.04	0.05	0.18	0.18	1.00	
	6	3200	48	B	0.06	0.08	0.18	0.22	1.25	
G 40	1	2400	188	破断せず	0.04	0.05	0.13	0.15	1.20	
	2	2800	55	B	0.05	0.06	0.17	0.18	1.05	
	3	2800	53	A	0.07	0.06	0.18	0.19	1.05	
	4	3200	40	B	0.06	0.07	0.22	0.21	0.95	
H 40	1	2400	205	破断せず	0.03	0.04	0.12	0.13	1.05	
	2	2800	41	C	0.04	0.06	0.19	0.19	1.00	
	3	2800	43	A	0.04	0.06	0.16	0.17	1.05	
	4	3200	22	A	0.05	0.06	0.20	0.22	1.10	

備 考

* 鉄筋破断箇所の表示はつぎのようである。

A: 最大幅のひびわれ位置

B: 最大幅ではないが平均幅よりは大きいひびわれの位置

C: 平均幅以下のひびわれ位置

D: ひびわれとひびわれの中間

表-5 疲労試験結果(鉄筋直径 25 mm の場合)

鉄筋の種類	番号	上限荷重作用時における鉄筋応力度 (kg/cm ²)	載荷回数 (×10 ⁴)	破断箇所*	最大ひびわれ幅 (mm)				W ₂ /W ₁	鉄筋端におけるフックの有無
					荷重を除去した時		上限荷重が作用した時			
					1回目	10万回後	1回目 W ₁	10万回後 W ₂		
B 30	1	2000	190	破断せず	0.05	0.08	0.18	0.21	1.15	
	2	2400	37	A	0.07	0.09	0.24	0.27	1.10	
C ₂ 40	1	2800	235	破断せず	0.06	0.10	0.24	0.29	1.20	
	2	3200	260	破断せず	0.06	0.09	0.25	0.28	1.10	
	3	3200	200	破断せず	0.07	0.12	0.32	0.36	1.15	
C ₃ 35	1	2800	285	破断せず	0.08	0.16	0.33	0.45	1.35	有
	2	3000	134	B	0.09	0.18	0.33	0.53	1.60	有
E 40	1	2800	280	破断せず	0.06	0.08	0.22	0.26	1.15	有
	2	3000	92	B	0.06	0.09	0.25	0.27	1.10	有
F 40	1	2800	70	B	0.06	0.11	0.24	0.31	1.30	
	2	2800	81	A	0.05	0.12	0.25	0.29	1.15	
G 40	1	2400	168	B	0.05	0.12	0.21	0.29	1.40	
	2	2800	45	B	0.05	0.08	0.24	0.25	1.05	
I ₁ 40	1	2400	50	A	0.07	0.12	0.25	0.29	1.15	
	2	2400	32	A	0.06	0.08	0.24	0.27	1.10	
	3	2800	30	B	0.06	0.08	0.20	0.25	1.25	
I ₂ 40	1	2400	155	A	0.06	0.12	0.24	0.33	1.35	
	2	2800	234	破断せず	0.07	0.12	0.26	0.34	1.30	
	3	3000	225	破断せず	0.07	0.10	0.30	0.33	1.10	
	4	3200	55	A	0.05	0.16	0.23	0.42	1.80	
I ₃ 40	1	2800	235	D	0.07	0.14	0.25	0.40	1.60	
	2	3200	73	A	0.07	0.13	0.26	0.35	1.35	
	3	3200	47	A	0.08	0.14	0.27	0.40	1.50	
J 40	1	2800	30	A	0.12	0.20	0.31	0.44	1.40	
	2	2800	195	破断せず	0.12	0.22	0.40	0.59	1.50	有
	3	3000	77	C	0.08	0.16	0.29	0.47	1.60	有
	4	3200	21	A	0.12	--	0.38	--	--	

備考 * 鉄筋破断箇所の表示については表-4 参照のこと。

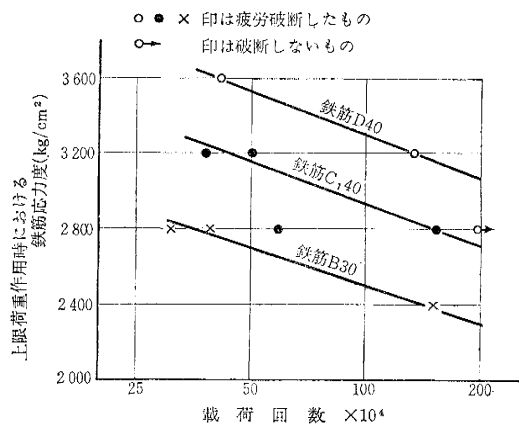
表-6 各種高強度異形鉄筋の疲労強度 (下限応力度 400 kg/cm² の場合の上限応力度の値)

鉄筋の種類	200 万回疲労強度 (kg/cm ²)	
	直径 19 mm の場合	直径 25 mm の場合
B 30	2300	2100
C ₁ 35	2600	—
C ₁ 40	2600	—
C ₁ 50	2500	—
C ₂ 40	—	3200 以上
C ₃ 35	—	2900*
C ₃ 40	3000	—
D 40	3100*	—
E 40	3000	2900*
E 60	2900	—
F 35	2700	—
F 40	2600	2500
G 40	2500	2300
H 40	2400	—
I ₁ 40	—	2100
I ₂ 40	—	2900
I ₃ 40	—	2900
J 40	—	2300, 2800*

* 印は鉄筋端にフックを設けたものにおける値

第2グループは、200万回疲労強度が2600 kg/cm²前後のものであって、このグループに属する鉄筋はC₁ 35, C₁ 40, F 35, F 40の4種である。これらはいずれも斜

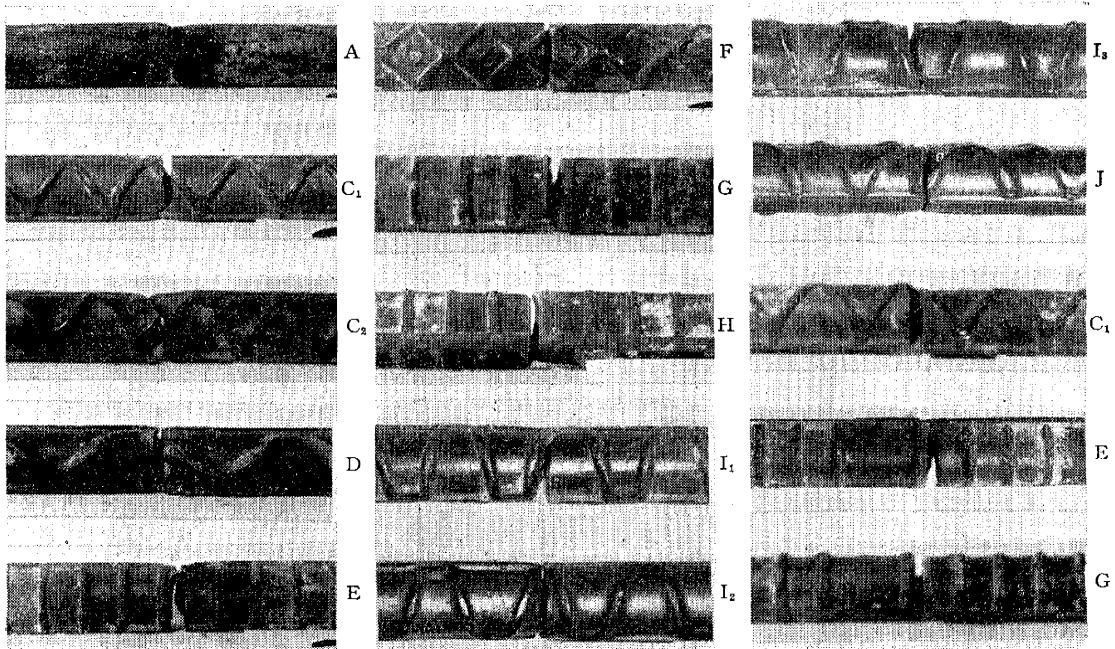
図-4 疲労試験結果 (直径 19 mm の場合の例)



めフシであるが、フシのとりつけ部で勾配が急変しているものである。

第3グループは、200万回疲労強度が2500 kg/cm²以下のものであって、このグループに属する鉄筋はB 30, C₁ 50, G 40, H 40, I₁ 40, J 40の6種である。B 30, G₁ 40およびH 40は直角フシであるが、他はいずれも斜めフシである。これらはJ 40を除いては、いずれもフ

写真-3 鉄筋の疲労破断位置



シのとりにつけ部で勾配が急変しているものである。

試験に用いた 18 種の異形鉄筋は、材質に大差のあるものをふくみ、たとえば降伏点は $3\,000 \sim 6\,100 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で相違していたが、上記 3 グループの区分は鉄筋の材質にほとんど無関係となっている。鉄筋直径の相違による影響はある程度まで認められたが、疲労強度の相違する主要原因がフシのとりにつけ部における勾配の緩急に在ることはきわめて明瞭である。写真-3 に示すように、直角フシの異形鉄筋の場合の疲労破断は、いずれもフシのとりにつけ部に沿って生じており、斜めフシの場合でもフシとリブとの交点ではフシのとりにつけ部から破断していた。これは異形鉄筋のフシのとりにつけ部に応力集中が起こり、この部分が疲労を受ける場合の弱点になることを示すものである。フシのとりにつけ部の勾配を緩くすれば、応力集中の程度が弱められ、鉄筋の疲労強度が高くなるものと思われる。また、鉄筋の両側でフシの位置をいくぶんずらすこと、フシと鉄筋軸とのなす角度を小さくすること、等も弱点を一断面に集つめないことになるので、疲労性状の改善に有効であろう。しかし異形鉄筋の疲労強度を高めるには、フシと鉄筋軸とのなす角度を小さくするよりも、フシのとりにつけを適当な円弧で行ない勾配の急変を避けることがいっそう有効である。これは第 1 グループに属する鉄筋によって実証されている。

第 3 グループに属する異形鉄筋の大部分は研究途上の試作品であって、現在代表的な鉄鋼会社から市販されている異形鉄筋の大部分は、第 1 グループまたは第 2 グループに属している。1~2 の市販品で第 3 グループに属す

るものもあるが、現在その改良が進行中であるか、または疲労が対象となる場合には市販されないと聞いている。

したがって、これら一流会社の市販品に対しては、この試験方法による場合の 200 万回疲労強度として、 $2\,500 \text{ kg/cm}^2$ 以上を期待できるものと思われる。しかし、鉄筋の疲労強度は、鉄筋の直径、部材の断面寸法、試験方法、等によって相違するものであり、特に応力の交番が起こる場合には、上記試験値と相当に異なった疲労性状を呈することもあろう。なおこの試験の試験値はある程度ばらついており、特に第 1 グループに属するもののばらつきは幾分大きくなっていった。したがって、疲労の影響を受ける部材の設計における許容応力度を定める場合には、適当な安全度を考慮する必要がある。また、鉄筋直径が 19 mm の場合にくらべて、 25 mm の場合には疲労の影響がいくぶんいちじるしくなることも示されているので、大径の異形鉄筋に対しては直径の影響も無視できない。これらをすべて考慮しても、疲労の影響を受ける部材に用いる高強度異形鉄筋の許容引張応力度としては、一般に $2\,000 \text{ kg/cm}^2$ 程度までは十分に採り得るものと思われる。

前記のように、フシのとりにつけ部の勾配をゆるくしたり、フシと鉄筋軸とのなす角度を小さく改めたりすれば、鉄筋の疲労強度は高められるが、その反面、付着強度は低下する。したがって、これらの改善には実用上の限度があり、異形鉄筋の選択に当っては、疲労と付着の両性状について詳細に検討しなければならない。普通丸鋼は耐疲労性が最も良いといわれているが、この試験にお

ける疲労強度は、フックを設けて用いたのにもかかわらず、第1グループに属する鉄筋より小さかった。またJ40はフシのとりつけ部の勾配がきわめてゆるやかな鉄筋であって、両端にフックを設けて試験した場合には第1グループに属するものと同程度の疲労強度が示されたものである。しかしフックを設けずに試験した場合には第3グループに属してしまった。これらは付着性能が悪いため、はりのひびわれ幅が載荷回数増加にともなっていちじるしく過大となったので、その影響を受けたものと思われる。

鉄筋の疲労強度を検討する場合には、破断までの載荷回数が200万回程度以上となるような試験を行なうことが望ましいと思われるが、そのような試験は相当に面倒であり、試験に要する時間も長い。表-4、表-5、表-6を通覧すると、破断までの載荷回数が100万回程度以上となるような試験を行なえば、その結果から200万回疲労強度が相当正確に推定できることが認められる。このようにすることによって疲労試験もいくぶん簡易化される。

(2) ひびわれ性状

鉄筋コンクリート部材においては、コンクリートに生ずるひびわれの幅が過大となると、鉄筋が腐食して部材の耐久性を損なうおそれがあるので、特に高強度の鉄筋を用いる場合には、その許容引張応力度をひびわれ幅を考慮して制限する必要も考えられる。そこで鉄筋コンクリートばりの疲労試験に当って、コンクリートに生ずるひびわれの幅を測定し、異形鉄筋の相違がくり返し載荷

を受けるはりのひびわれ性状におよぼす影響について検討した。

最大ひびわれ幅の試験結果の一例は図-5に示すようであり、すべてのはりについての疲労試験開始直前と載荷回数が10万回の時の値を表-4および表-5に示してある。これらの図および表から、くり返し載荷を受ける鉄筋コンクリートばりのひびわれ性状が、用いる鉄筋の種類によっていちじるしく相違することが明瞭に認められ、各種鉄筋を、それらを用いたはりのひびわれ性状によって区分するとつぎの3グループに分けられる。

第1グループは、くり返し載荷を受けてもはりの最大ひびわれ幅がほとんど増大しなかったもので、用いた異形鉄筋の大部分がこれに属している。

第2グループは、直径19mmの鉄筋を用いたT型ばりの場合には最大ひびわれ幅がほとんど増大しなかったが、直径25mmを用いた矩形ばりの場合には載荷回数増加にともなって最大ひびわれ幅が増大し、10万回の載荷時に最初の約1.5倍となったものであって、C₃、I₃、Jの3種がこれに属している。これらはいずれもJISの規定に適合する斜めフシの異形鉄筋で、フシのとりつけ部にはフシの高さの5倍以上の半径をもつ円弧を設けたものである。

第3グループは、直径19mmの鉄筋を用いたT型ばりの場合にも、載荷回数増加にともなって最大ひびわれ幅がいちじるしく増大したもので、A、Dの2種がこれに属している。Aは普通丸鋼であり、DはJISの規定に適合しないきわめてデフォーメーションの少ない異形鉄筋である。

このようにはりのひびわれ性状が用いる鉄筋の種類によって異なるのは、その付着性能が相違するからである。これを確かめるため、表-7の付着強度試験結果と対比してみるとつぎのようになる。表-7は引抜き試験によって求めた各鉄筋の付着強度を鉄筋Gの付着強度を100として表わしたものと

図-5 鉄筋の相違がはりのひびわれ性状におよぼす影響 (鉄筋直径 25 mm, 上限荷重作用時における鉄筋の応力度 2800 kg/cm² の場合の例)

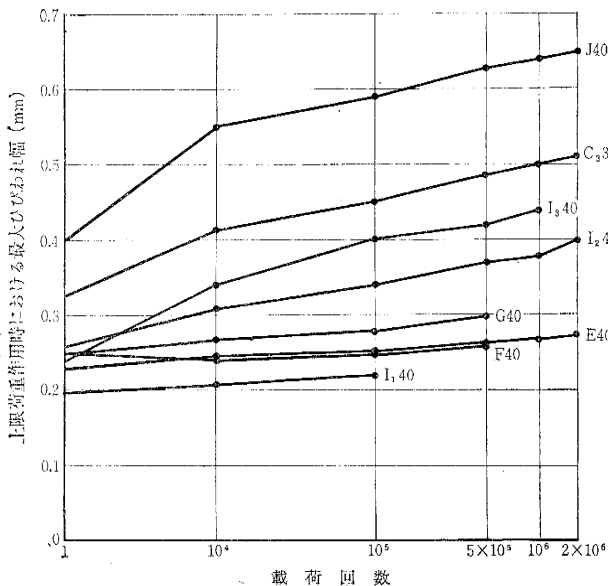


表-7 引抜き試験における各種鉄筋の付着強度⁹⁾

自由端における鉄筋の滑動量が0.1mmに達した時の平均付着応力度を、鉄筋G40を100として表わしたものである。

鉄筋の種類	付着強度の比
A 30	31
B 30	102
C ₂ 40	86
C ₃ 40	80
D 40	64
E 40	112
F 40	86
G 40	100
I ₁ 40	93
I ₂ 40	100
I ₃ 40	82
J 40	74

であるが、第1グループに属する鉄筋は86以上、第2グループに属するものは74~82、第3グループに属するものは65以下であって、上記の論旨と一致している。したがって、鉄筋コンクリートばりによる疲労試験を行なえば、異形鉄筋の疲

劣性と同時に付着性をも判定できるのであって、付着強度試験を追加する必要はないと思われる。

異形鉄筋において、フシと鉄筋軸とのなす角度を小さくすること・フシのすきまを大きくすること・フシのとりつけ部の勾配をゆるくすること・等はいずれも耐疲労性の改善には有利であるが、付着性能を低下させるものであって、これらの要素が重なれば付着性能はいちじるしく劣り、はりのひびわれ性状にも悪影響をおよぼすことがある。したがって、疲労および付着の両性状を考慮すれば、フシのとりつけ部における円弧の適当な半径は、フシと鉄筋軸とのなす角度、フシの高さその他によっても若干相違するが、一般にフシの高さの 1~2 倍程度であらう。

4. 異形鉄筋における応力集中

3. で述べたごとく、各種異形鉄筋において疲労強度が相違する主要原因は、フシとりつけ部の勾配の緩急であり、延いてはこの部分における応力集中の差によるものと思われた。これをさらに確かめるため、フシとりつけ部の勾配が異なる各種異形鉄筋について、フシの近傍における応力分布を測定し検討を加えた。

図-6 引張試験におけるゲージ貼りつけ位置

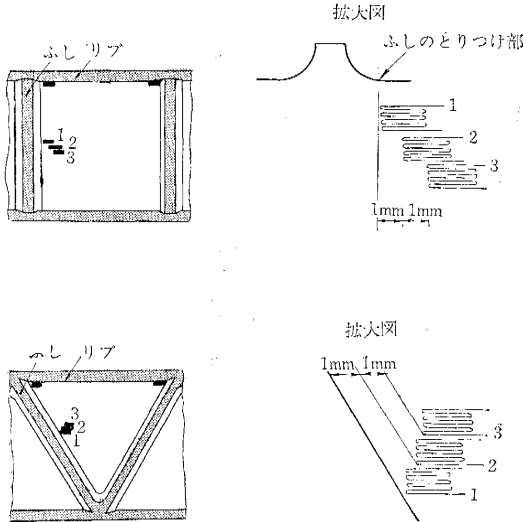


図-7 鉄筋の相違がその応力集中度におよぼす影響

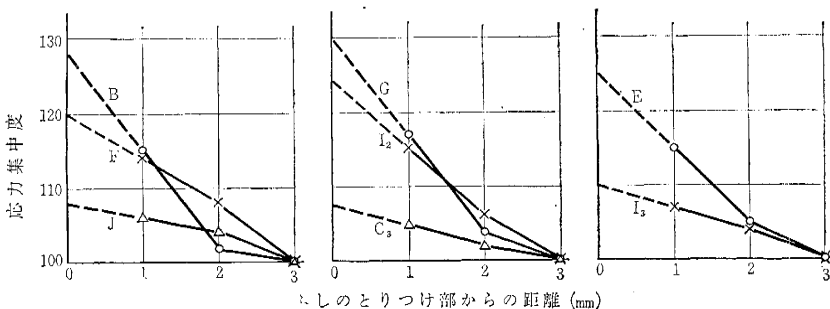


表-8 異形鉄筋における応力集中度

(鉄筋直径 25 mm, 鉄筋応力度 2 400 kg/cm² の場合の値を、フシのとりつけ部から 3 mm 離れた点における実測値を 100 として表わしたものである。)

鉄筋の種類	応力集中度*					σ_0/σ_1
	σ_2	σ_1	σ_0	$\sigma_{1 \max}$	$\sigma_{0 \max}$	
B 30	102	115	128	127	141	1.20
C ₃ 40	102	105	108	112	115	1.03
E 40	105	115	125	134	147	1.09
F 40	108	114	120	131	138	1.09
G 40	104	117	130	128	142	1.11
I ₂ 40	106	115	124	120	129	1.08
I ₃ 40	104	107	110	117	120	1.03
J 40	104	106	108	107	109	1.02

* 応力集中度の表示はつぎのようである。

σ_2 : フシのとりつけ部から 2mm 離れた点における実測値
 σ_1 : フシのとりつけ部から 1mm 離れた点における実測値
 σ_0 : σ_2 と σ_1 を結んで延長し、フシのとりつけ部における値を推定したもの
 $\sigma_{1 \max}$: フシとリブとの交差している点でフシのとりつけ部から 1mm 離れた点における実測値
 $\sigma_{0 \max}$: $\sigma_{1 \max}$ に σ_0/σ_1 を乗じて求めたもので、フシとリブとの交差している点における推定値

8種の異形鉄筋について、ゲージ長 2mm のワイヤストレン ゲージをフシとりつけ部に接して 1枚、そこから 1mm ずつずらしてさらに 2枚、合計 3枚、貼りつけて引張試験を行なった(図-6 参照)。試験結果の例は図-7に示すようであって、フシのとりつけ部近傍の応力集中が特にいちじるしいことが認められる。これらの実測値は 2mm の間の平均値に過ぎないので、とりつけ部には、さらに大きな応力集中が働いていることが考えられる。実測値の 3点を結んで延長し、フシとりつけ部における応力集中度を推定した。なお応力集中度は、とりつけ部から 3mm 離れた所(フシの影響を受けないと考えられる)の応力度を 100 として表わすこととした。その結果は表-8に示すようであり、この応力集中度(σ_0)は鉄筋によって異なった。すなわち、鉄筋 B および G は 130、E、F、I₂ は 120~125、C₃、I₃、J は 110 程度となった。これらの値はリブから十分に離れた部分におけるもので、フシとリブとの交差している部分ではさらに大きいと思われる。そこで、リブから離れた部分における推定値と実測値との比を、フシとリブとの交差している部分における実測値に乗じて、この部分における応力集中度を推定してみた。それらの推定値($\sigma_{0 \max}$)は表-8に示すごとく、鉄筋 B、E、F、G は 140~150、I₂ は 130、I₃、C₃、J は 110~120 であった。B、E、G は直角フシ、他は斜めフシで、C₃、E、I₂、I₃、J 等はとりつけ部に円弧を設けたものである。特に C₃、I₃、J は円弧の半径を

図-7のグラフから読み取ると、応力集中度は距離が増えるにつれて減少する傾向がある。特に B、E、G のような直角フシでは、距離 1mm 付近で応力集中度が 120 以上になる。斜めフシや円弧を設けた鉄筋 (C₃, I₃, J) は、応力集中度の増加が比較的緩やかである。

大きくとったものである。これらは、異形鉄筋のフシのとりつけ部における応力集中の程度は、フシと鉄筋軸とのなす角度によってもいくぶん異なるが、フシのとりつけ部の緩急によっていちじるしく相違することを明瞭に示すものであり、3. の論旨を実証するものである。

これらの試験において応力集中度が130以下である鉄筋はすべて疲労強度の最も高い第1グループ(3. 参照)に属している。したがって鉄筋の引張試験を行ない、フシとりつけ部に働く応力集中を測定することによって、ある程度まで異形鉄筋の疲労強度が推定できることが示唆されていると思われるが、応力集中測定方法の細部についてはいっそうの研究が必要である。

鉄筋の疲労破断位置とコンクリートに生じたひびわれの位置との関係を検討すると、表-4 および 表-5 に示してあるように、最大幅に近いひびわれの位置と一致しているもの(A)57%、最大幅ではないが平均幅以上のひびわれの位置と一致しているもの(B)29% であって、ひびわれの中間で破断したもの(D)はわずか3%に過ぎなかった。ここでひびわれの位置と一致したと表現した中にはひびわれの位置から1cm以内における場合をもふくめているのであるが、これらの結果はひびわれの位置における鉄筋の引張応力度が他の部分よりも相対的に大きくなっていったことによるとと思われる。

これらをさらに確かめるため、図-8 に示すように、直径19mmの鉄筋を半割りに切断し、その内部にワイ

ヤ ストレイン ゲージを10~20mm 間隔に貼りつけたのち、鉄筋両半部を接着剤で貼り合わせ一体とした鉄筋を用いてはりの曲げ試験を行ない、ひびわれ周辺における鉄筋応力度を詳細に測定した。鉄筋を切断する場合には中心からいくぶんずらした面で切り、ゲージの位置が内部をくりぬいた鉄筋断面の重心と一致するようにした。このような鉄筋を用いたのは、鉄筋とコンクリートとの付着状態を変えないで、鉄筋のひずみを測定するためである。用いた供試体は図-10 に示すII型(T型断面)およびI型(矩形断面)のはり供試体で、まず静的に4tまで載荷した。この際0.8t ごとに鉄筋の応力度を測定した(鉄筋応力度の測定結果は図-9 のようになった)。その後、さらに下限荷重を0.8t, 上限荷重を4tとして1万回の載荷を行なった。ひびわれ周辺における鉄筋応力度の一例は図-9 に示すようであって、ひびわれの位置で大きくひびわれとひびわれとの中間では小さくなっていることが明瞭に認められる。ひびわれの位置における鉄筋応力度とひびわれの中間における鉄筋応力度との差(応力差)は、荷重の増加にともなって増大し、鉄筋応力度が1000~1500 kg/cm² 程度で、200~400 kg/cm² に達するが、その後はひびわれ幅は増大するにもかかわらずこの応力差はほとんど増大しなかった。またくり返し載荷によってもこの応力差はほとんど増大しなかった。これらのことは、ひびわれの位置で鉄筋の疲労破断が起りやすいのは、この位置における鉄筋応力度が他の部分よりも大きいことが一つの原因であることを示すとともに、その他の原因、たとえばひびわれの位置では鉄筋とコンクリートとの相対変位が大きく、そのために異形鉄筋のフシに集中応力が働くこと——これはひびわれの幅が大きいほどいちじるしい——等の影響が相当に大きいことを示すものと思われる。

5. 断面形状および鉄筋比の相違がはりの疲労性状におよぼす影響

鉄筋コンクリートばりの疲労性状は用いる鉄筋による影響を受けるばかりでなく、断面形状および鉄筋比による影響も受けることが考えられる。そこで、これらを変化させて造ったはりの疲労試験を行ない検討を加えた。

用いた供試体は図-10 に示す6種とした。すなわち、供試体断面を同じくし、用いる鉄筋の本数のみを2, 3, 5本と変化させることによって、鉄筋比だけを0.6, 0.9, 1.5%の3種に変化させたもの、および鉄筋比を同じくし、供試体断面を変化させることによって、かぶり厚さだけを1, 3, 6cmの3種に変化させたものである。用いた鉄筋はいずれもF40である。用いたコンクリートは表-2

図-8 半割りにして内部にゲージを貼った鉄筋

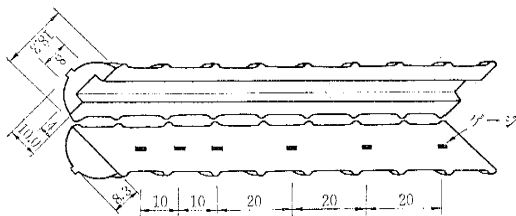
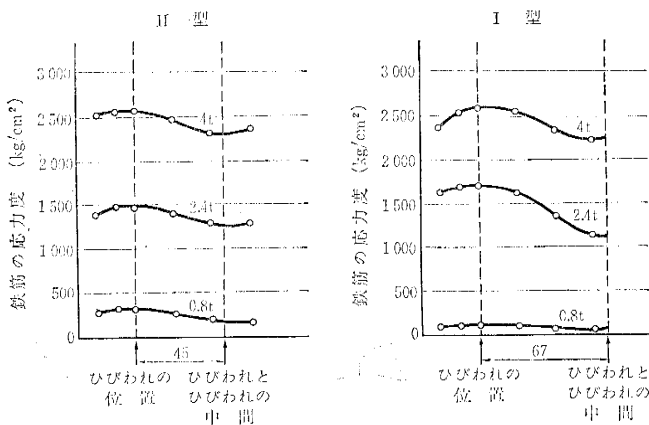
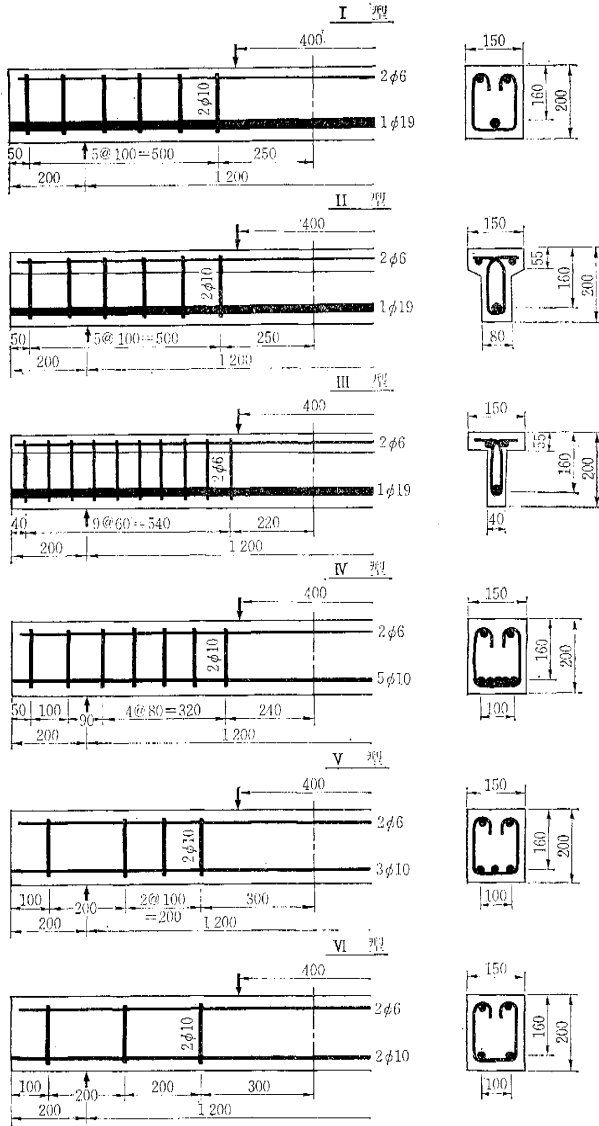


図-9 ひびわれ周辺における鉄筋の応力度



図一10 供試体の形状および寸法



に示す配合2で、粗骨材の最大寸法を15mmとした。下限荷重を鉄筋応力度が400kg/cm²に相当する荷重とし、上限荷重を2400kg/cm²に相当する荷重として45万回載荷したのち、上限荷重を3200kg/cm²に相当する荷重まであげて続行し破壊に至らした。

上限荷重を3200kg/cm²に相当する荷重としてから、鉄筋が疲労破断するまでの載荷回数は表一6のようであって、6種のはりは断面形状および鉄筋比が相当に異なっているが、その疲労強度はほぼ同程度であることが認められる。これは断面形状および鉄筋比がこの程度に相違していても上下限における鉄筋応力度が同じになっていたことによるものである。したがって、はりの疲労試験によって異形鉄筋の疲労強度を求める場合には、特に付着性能の劣るものでないかぎり、一般にはりの断面形状および鉄筋比を比較的自由に選んでもよいことになる。これは鉄筋コンクリート部材に用いる鉄筋の疲労性状試験の簡易化に役立つ便利な性質であろう。

また土木学会の研究グループはスパン4.6mの大型T型はりによって各種異形鉄筋の疲労試験を行なったが¹⁰⁾、その試験結果も大体において、この小型はりによる試験結果と一致していた。これは、小型はりによる試験結果にもとづいて、鉄筋コンクリート部材の疲労性状を論じ得ることを実証したものである。

前記の疲労強度試験の場合にも、2.で述べた方法でひびわれ幅を測定した。最大ひびわれ幅の試験結果は表一9に示すようであって、くり返し載荷を受けるはりのひびわれ性状におよぼす鉄筋比の影響は小さいが、断面形状の影響は相当に大きい。したがって、鉄筋コンクリートばりの疲労試

表一9 疲労試験結果

供試体断面	鉄筋直径 (mm)	鉄筋比 (%)	鉄筋の かぶり (mm)	番号	載荷回数* (×10 ⁴)	上限荷重作用時における最大ひびわれ幅 (mm)						
						上限荷重作用時における鉄筋応力度が 2400 kg/cm ² の場合				上限荷重作用時における鉄筋応力度が 3200 kg/cm ² の場合		
						1 回目	載荷 1万回後	10万回後	45万回後	1 回目	載荷 1万回後	10万回後
I 型	19	1.19	65	1	45}	0.16	0.19	0.20	0.21	0.25	0.27	0.29
					38}	0.15	0.19	0.21	0.23	0.26	0.29	0.31
II 型	19	1.19	30	1	37}	0.18	0.19	0.19	0.20	0.24	0.25	0.26
					34}	0.13	0.13	0.14	0.15	0.18	0.17	0.18
III 型	19	1.19	10	1	37}	0.13	0.15	0.15	0.15	0.19	0.19	0.20
					33}	0.11	0.12	0.12	0.12	0.16	0.16	0.16
IV 型	10	1.48	20	1	34}	0.14	0.16	0.16	0.17	0.22	0.24	0.25
					38}	0.13	0.14	0.15	0.16	0.20	0.20	0.21
V 型	10	0.89	20	1	40}	0.11	0.13	0.14	0.14	0.18	0.19	0.19
					36}	0.10	0.16	0.17	0.17	0.21	0.22	0.21
VI 型	10	0.59	20	1	42}	0.09	0.14	0.15	0.17	0.20	0.22	0.23
					43}	0.12	0.15	0.17	0.18	0.22	0.23	0.23

備考 * 上限荷重を鉄筋応力度が3200kg/cm²に相当する荷重としてから鉄筋が疲労破断するまでの載荷回数を示したものである。

験に当って、鉄筋の付着性をも判定しようとする場合には、断面形状の影響について考慮を払う必要がある。

6. 結 論

材質および形状の相違する各種高強度異形鉄筋を用いて、鉄筋コンクリートばりの曲げ疲労試験を行ない、その疲労性状について検討した。疲労試験は、高さ 20 cm、長さ 160 cm の鉄筋コンクリートばりについて行なったが、下限荷重を鉄筋応力度が 400 kg/cm^2 に相当する荷重とし、上限荷重を適当に定め、載荷速度を 300 回/分とした。試験の結果から、載荷を 200 万回継続した時に破壊する上限荷重を求め、これに相当する鉄筋応力度を 200 万回疲労強度と呼び、これにもとづいて各種高強度異形鉄筋の疲労強度を論じたのである。試験に用いた異形鉄筋は総計 18 種であって、降伏点は $3000 \sim 6100 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で相違し、フシの形状も大差のあるものをふくんでいる。しかし、フシの高さ・間隔・およびすきま・等においては比較的類似しているため、本研究の成果があらゆる種類の異形鉄筋に適用されるものとは限らないが、わが国の現在の市販品に関しては、試験の範囲内でつぎのことがいえると思われる。

1. 鉄筋コンクリートばりの曲げ引張疲労強度は、用いる鉄筋の相違によっていちじるしく異なるが、はりの断面形状、鉄筋の配置および鉄筋量、等の相違による影響は小さいことが確かめられた。たとえば、各種異形鉄筋を用いたはりについて、下限荷重を鉄筋応力度が 400 kg/cm^2 に相当する荷重とし、上限荷重を 2800 kg/cm^2 に相当する荷重として、疲労試験を行なった場合には、用いる鉄筋の種類によって、30 万回程度の載荷で疲労破壊するものから 200 万回以上の載荷でも疲労破壊しないものまでであった。しかし、同じ種類の鉄筋を用いた場合には、鉄筋比を 0.6% から 1.5% に変化させても、あるいは断面を矩形から T 型に変えても、破壊するまでの載荷回数にはほとんど相違が認められなかったのである。したがって、この疲労試験の結果から鉄筋の疲労強度を論じても実用上支障ないものと信じている。

2. 高強度異形鉄筋のこの試験方法による 200 万回疲労強度は、用いた鉄筋の範囲内で、高いものは 3200 kg/cm^2 以上にも達するが、低いものは 2000 kg/cm^2 程度に過ぎず、鉄筋の種類によっていちじるしい相違が認められたが、現在の代表的な高強度異形鉄筋は 2500 kg/cm^2 以上であった。したがって、試験方法による疲労性状の相違、鉄筋のばらつき、その他を考慮しても、降伏点が 3500 kg/cm^2 以上で、JIS に合するデフォーメーションを持つ高強度異形鉄筋に対しては、疲労の影響を受ける部材に用いる場合の許容引張応力度として、一般には 2000 kg/cm^2 程度の値を採っても実用上支障ないものと思われる。

3. 各種異形鉄筋において、疲労強度が相違する主要原因は、フシが鉄筋表面にとりつき取りつけ部の勾配の緩急にあり、延いてはこの部分における応力集中の差によるものであって、フシとりつけ部を適当な円弧として応力集中を緩和したものの耐疲労性はきわめて良好である。すなわち、異形鉄筋でもフシとりつけ部をフシの高さの 1~9 倍の半径をもつ円弧としたものの 200 万回疲労強度はいずれも 2800 kg/cm^2 以上であった。また 200 万回疲労強度が 2100 kg/cm^2 程度の鉄筋において、フシとりつけ部だけを変え、フシの高さの 2 倍あるいは 5 倍の半径をもつ円弧に改めた鉄筋は、その 200 万回疲労強度がいずれも 2900 kg/cm^2 程度となっていちじるしく改善された。このように、フシとりつけ部の勾配をゆるくすれば疲労性状はいちじるしく改善されるが、付着性状は劣ってくる。それで付着性状をも考慮すると、適当な円弧の半径としては、フシの高さ・フシと鉄筋軸とのなす角度・等によって若干の相違はあるが、一般にフシの高さの 1~2 倍であろう。なお、異形鉄筋において、フシと鉄筋軸とのなす角度を小さくすればいくぶん耐疲労性は高められるが、これは疲労に対する弱点であるフシ取りつけ部が一断面上に集まらないことによるものと思われる。このように、高強度異形鉄筋の疲労強度におよぼすフシ形状の影響はきわめて大きい、その材質の影響は、実験の範囲内ではほとんど認められなかった。

4. くり返し載荷を受ける鉄筋コンクリートばりのひびわれ性状は、鉄筋の付着性状の影響を受け、その影響の程度は、静的載荷を受ける場合よりいちじるしいことが認められた。付着の良好な異形鉄筋を適当に用いれば過大なひびわれの発生を防止することができるが、JIS のデフォーメーションの規定の範囲内にある異形鉄筋であっても、付着を悪くするような諸条件、すなわちフシと鉄筋軸とのなす角度が小さいこと・フシのとりつけ部その他が余りに滑めらかであること・フシの高さが小さいこと・等が重なった鉄筋を用いる場合には、はりのひびわれは載荷回数の増加にともなっていちじるしく過大となり、耐久性に支障をきたす場合がある。本試験においても、この種の異形鉄筋や普通丸鋼を用いたはりにおいて、過大となったひびわれによってはりが早期に疲労破壊した事例があった。しかし、現在市販されている代表的な高強度異形鉄筋は、一般に規格に十分適合するものであり、これらを用いたときのはりのひびわれ幅は、くり返し載荷を受けてもほとんど増大しなかった。

5. 鉄筋コンクリートばりによる鉄筋の疲労試験には、小型ばりを用いても実物大の部材における疲労性状をある程度まで推定できること、異形鉄筋の疲労および付着の両性状を同時に判定できること、等の特長があるので、鉄筋の引張疲労試験および曲げ疲労試験より合理的であると思われる。しかし、この種の試験には特別な機

械を必要とし、試験に要する時間も多く相当に面倒であることが欠点である。はりにおける鉄筋の疲労破断が応力集中によるものであることを考慮すれば、鉄筋表面にゲージ長の短いワイヤ ストレイン ゲージを多数貼りつけて引張試験し、フシとりつけ部近傍の応力集中を測定することによって、簡便に異形鉄筋の耐疲労性のある程度まで推定できることが認められた。

参 考 文 献

- 1) 丸安隆和・吉谷 豊・小林一輔：冷間ねじり鉄筋の疲労試験結果について，コンクリート・ライブラリー 第2号，昭和 37 年 12 月
- 2) 横道英雄・藤田嘉夫：各種異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート桁の曲げ試験について，コンクリート・ライブラリー第2号，昭和 37 年 12 月
- 3) 河野通之・富田勝信・小松原政次・渡辺信一・小寺重郎：異形鉄筋の疲れ強度に関する研究，コンクリート・ライブラリー第2号，昭和 37 年 12 月
- 4) 中山紀男：異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートはりの疲労について，セメント技術年報，昭和 38 年
- 5) 横道英雄・太田利隆・西堀忠信：鉄筋コンクリートけたの曲げ疲労に関する実験的研究，セメント技術年報，昭和 38 年
- 6) 横道英雄・藤田嘉夫・小谷一三・西堀忠信：鉄筋コンクリートはりの疲労に関する 実験的研究，セメント技術年報，昭和 39 年
- 7) JIS G 3112 “鉄筋コンクリート用棒鋼”
- 8) 国分正胤・後藤幸正・岡村 甫：異形鉄筋とコンクリートとの付着に関する研究，コンクリート・ライブラリー第2号，昭和 37 年 12 月
- 9) 国分正胤・岡村 甫：鉄筋とコンクリートとの付着について，第2回異形鉄筋シンポジウム，昭和 40 年
- 10) 国分正胤・多田美朝・立花一郎・松本嘉司：各種の高張力異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート大型ばりの疲労に関する研究，土木学会論文集第 122 号，昭和 40 年 10 月
- 11) W. Weibull: Fatigue Testing and Analysis of Results, Pergamon Press LTD., London, 1961
(1965.4.8・受付)