

I-8 疲労強度におよぼす異形鉄筋の径並び形状に関する研究

川崎製鉄㈱ 山 崎 徳 也

○ “ ” 佐 藤 政 勝

1. まえがき

異形鉄筋は、丸鋼に比べてコンクリートとの付着強度が大きく、コンクリートのひびわれに有利であるばかりでなく定着方法が容易であることから近年急速に使用され、鉄筋コンクリート構造物における主要な鉄筋の大部分を占めている。最近の土木建築物の大型化に伴って、経済性、施工性の立場から異形鉄筋の太径化が要望され、鉄筋各社によって径 41^{mm}、51^{mm} の太径鉄筋が開発され、各種確性試験の結果¹⁾、既に実用化されている²⁾³⁾。しかしながら全ての問題が解決した訳ではなく、耐疲労性や継手などに問題を残しており、これを解決すべく実験的研究が引続き行なわれている。

異形鉄筋の表面形状は、コンクリートとの付着強度に大きな影響を及ぼすが、また耐疲労特性にも影響を及ぼす。すなわち、フシの立上り形状による局部的なものと異形鉄筋の形状に誘因した応力流れによる応力集中が疲労強度の低下の原因と考えられている。径 32^{mm}級までの中径鉄筋を用いた素材および R 〇 桁の疲労実験の結果から、応力集中としては前者のものが支配的であり、フシの立上り部に適当な曲率を設けることでフシ周辺の応力集中を緩和出来る事が認められ⁴⁾、フシの立上りに円弧を設けた中径鉄筋の疲労強度の低下は無視できる程度のもので報告されている。しかし太径鉄筋では、太径ほど断面積に比べて周長の割合が小さいことから細径のそれと同程度の付着性を保持できるように表面形状に工夫を凝しているため、後者の応力流れによる応力集中が前者のものに比べて支配的になり、フシ立上り部に曲率を設ける程度では応力集中の緩和に効果が少なく、この応力集中が疲労強度の低下の原因になっていると思われる。また、中径鉄筋の疲労強度に関しては、素材の引張疲労試験と R 〇 桁による曲げ引張疲労試験結果がほぼ等しいか、R 〇 桁のものが若干高めであるに対して、径 41^{mm}、51^{mm} と太径になるほど R 〇 桁のものが素材のものに比較して低目になる傾向があると指摘されている。事実斜めフシと亀甲フシの太径鉄筋 51^{mm} を用いた実験結果²⁾ では、R 〇 桁のものが素材のそれに比べて $5 \sim 6 \text{ kg/mm}^2$ 低目であるが、その原因については明らかにされていない。

本研究は、中径鉄筋に対する従来の実験結果を見直し、横フシ太径鉄筋 D51 を用いた素材の引張疲労試験および同じ素材を用いた R 〇 桁による曲げ引張疲労試験を基にし、更に光弾性実験および有限要素法解析から求めた異形鉄筋の応力分布を参考にして、太径鉄筋の耐疲労特性の低下および素材と R 〇 桁との疲労実験結果の相異について考察した実験的研究である。尚、R 〇 桁の曲げ引張疲労試験は日本鋼管㈱と共同で実験を行ったものである。

2. 横フシ太径鉄筋 D 5 1 の疲労実験結果⁵⁾

横フシ太径鉄筋に関する素材の引張と R 〇 梁 (Fig. 1) による疲労試験結果を Table 1, 2 に示し、両対数表示したものを Fig. 2 に示す。ここで引張鉄筋にゲージを貼り付けた桁のものは白丸、ゲージのないものを黒丸で、素材の結果を破線の白丸で示し、実線と破線は R 〇 桁と素材の最小二乗法による実験式を示す。コンクリートの弾性係数比を 1.5 とした場合、最小二乗法による平均値から R 〇 桁の 200 万回疲労強度振幅を求めると引張鉄筋中立軸位置では 19.6 kg/mm^2 、引張下縁位置では 20.9 kg/mm^2 と

なり、下限応力度を 2.0kg/mm^2 とした素材の引張疲労
振幅強度 20.1kg/mm^2 とほぼ等しい値であった。

Fig.3 に示すように鉄筋にゲージを貼付けた LFI
桁では数十回の繰り返してゲージを貼付けた断面に
ひびわれが生じ、鉄筋もその断面で破断したが、残
り 4 体の桁では Fig.4 に示すようにひびわれ位置か
ら 10cm 程度離れた断面の鉄筋が突然破断した。鉄筋
破断位置については、M.SKOROBOGATOV⁶⁾が「疲労によ
る鉄筋の破断はひびわれ発生 of の近くで起こるはずで
あり、ひびわれを含む断面でない」と指摘した通り
であり、RC 桁については、コンクリートから伝達
される付着力が鉄筋の疲労破断に影響を及ぼすこと
が実験から確認できた。

3. 異形鉄筋の応力分布に関する実験結果

3-1 光弾性実験による応力集中係数

フシの形状による応力集中を確かめるため、2 次
元および応力凍結 3 次元光弾性実験を実施した。横
フシ太径鉄筋 D 5 1 の形状寸法を Fig.5 に、実験結
果を Table3、Photo 1～5 に示す。Photo 1、2 に示す
ように太径鉄筋の立上り角を 60° にし円弧を設けな
い場合は応力集中係数 α_p は 1.99、円弧のある場合は
1.68 と比較的大きいが、Photo 4、5 に示すように、
D 2 5 の場合には半径 2mm の円弧を設けることで α_p
が 1.50 から 1.22 に減少した。また Photo 3 に示すよう
に太径鉄筋のフシ間隔を 30mm とした場合、 α_p は 1.23
程度になった。この事からフシ間隔がフシ高さの 10 倍以上の場合はフシ形状による応力集中が支配
的であるが、フシ間隔が狭くなるとフシの立上り部の応力集中よりも素材の全体的な応力流れによる
応力集中が支配的になるため、フシの立上り部に円弧を設けても応力集中の緩和に効果が少ないこと
が認められる。Table 3 に示すように、3 次元凍結法による実験結果は 2 次元模型によるものより 1 割
程度低く、D 5 1 の応力集中係数は半径 5mm のもので 1.50、フシ間隔 30mm のもので 1.18 であった。

3-2 ひずみゲージの測定による応力集中係数

D 2 5 と D 5 1 異形鉄筋の表面に 2mm のひずみゲージを貼付けて軸方向応力分布を測定した。ゲー
ジの位置および応力集中係数を Fig.6～9 に示す。Fig.6、7 は D 5 1 のものを、Fig.8 は D 5 1 の素材
から切削した平板としてのものを、Fig.9 は D 2 5 の素材のものを示す。Photo 6 に示すように、素材
の試験片の両端を切削加工し、上下左右にゲージを貼付けて偏心載荷を避けると共に、素材の弾性係

Table 1 Results of Tensile Fatigue Test on Large Deformed Bar D51

No. of Test Piece	Deformed		Load (t)		Calculated Stress (kg/mm^2)		Cycles to Failure $N(10^4)$		Remarks
	Diameter (mm)	Section (mm ²)	Pmax	Pmin	σ_{max}	σ_{min}	$\sigma_{\text{max}}-\sigma_{\text{min}}$		
1	50.8	2027	69.4	4.1	34.0	2.0	32.0	9.7	Contact to Lub
2	"	"	65.3	"	32.0	"	30.0	19.5	"
3	"	"	58.1	"	28.5	"	26.5	25.6	"
4	"	"	"	"	"	"	"	42.4	"
5	"	"	54.1	"	26.5	"	24.5	64.5	"
6	"	"	50.0	"	24.5	"	22.5	84.7	"
7	"	"	"	"	"	"	"	101.5	"
8	"	"	48.0	"	23.5	"	21.5	1132.6	"
9	"	"	43.9	"	21.5	"	19.5	$N > 260.0$	No Failure

Table 2 Experimental Results of Fatigue Test on R. C. Beams with D51

No. of Test Beam	Load (t)		Calculated stress on the middle axis					Calculated stress on fiber (kg/mm^2)					Number of Cycles $\times 10^4$
	Pmax	Pmin	σ_{max}	σ_{min}	$\sigma_{\text{max}}-\sigma_{\text{min}}$	$\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$	$\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$	σ_{max}	σ_{min}	$\sigma_{\text{max}}-\sigma_{\text{min}}$	$\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$	$\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$	
LF1	34.75	7.0	18.8	3.8	15.0	15.5	20.1	4.1	16.0	16.5	277.1		
LF2	39.4	7.0	21.3	3.8	17.5	18.0	22.8	4.1	18.7	19.3	335.9		
LF3	44.0	7.0	23.8	3.8	20.0	20.6	25.5	4.1	21.5	22.1	150.0		
LF4	48.6	7.0	26.2	3.8	22.5	23.2	28.1	4.1	24.0	24.7	83.8		
LF5	42.2	7.0	22.8	3.8	19.0	19.6	24.4	4.1	20.3	20.9	185.8		

Table 3 Stress Concentration Factors by Photo Elasticity Test

Profiles of Deformed Bar				2 Dimension Test					3 Dimension Test				
Dimm)	h(mm)	For R	Q(mm)	No.	Position	G. No.	σ_{max}	σ_{min}	$\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$	No.	Position	G. No.	σ_{max}
50.8	3.5	5.0	15.0	1	Center of Parallel	⑧	1.046	1.758	1.68	8	Center of Parallel	⑤	0.028
"	"	R=60°	"	2	"	⑨	1.035	2.123	1.99	"	"	⑥	0.042
"	3.5	5.0	30.0	3	"	⑩	0.641	0.792	1.23	9	"	⑦	0.033
"	2.0	"	15.0	4	"	⑪	0.643	0.838	1.30	"	"	⑧	1.18
25.4	2.0	"	20.0	5	"	⑫	0.958	1.169	1.22	"	"	⑨	
"	"	R=60°	"	6	"	⑬	0.966	1.445	1.50	"	"	⑩	
"	2.0	"	"	7	"	⑭	0.960	1.215	1.27	"	"	⑪	

Table 4 Stress Concentration Factors by Strain Measurement

Profiles of Deformed Bar (mm)				2 Dimension Test				3 Dimension Test			
D	h	For R	Q	No.	Position	G. No.	σ_{max}	No.	Position	G. No.	σ_{max}
50.8	3.5	5.0	15.0	1	Center of Parallel	⑧	1.57	3	Center of Parallel	⑤	1.47
"	"	R=60°	"	2	"	⑨	1.40	"	"	⑥	1.49
50.8	3.5	5.0	30.0	3	Back of Lug	⑩	1.38	4	Back of Lug	⑦	1.18
"	"	"	"	4	"	⑪	1.36	"	"	⑧	1.24
25.4	2.0	2.0	20.0	5	Back of Lug	⑫	1.25	5	Back of Lug	⑨	1.07

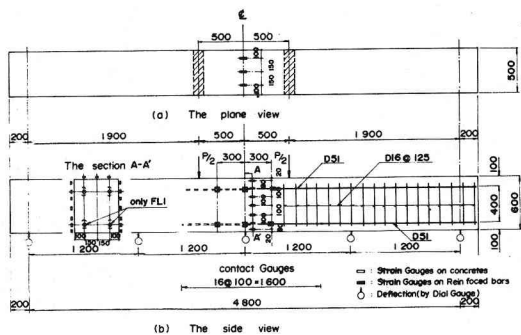


Fig. 1 Dimension and Gauge Position of R.C. Beam with D51

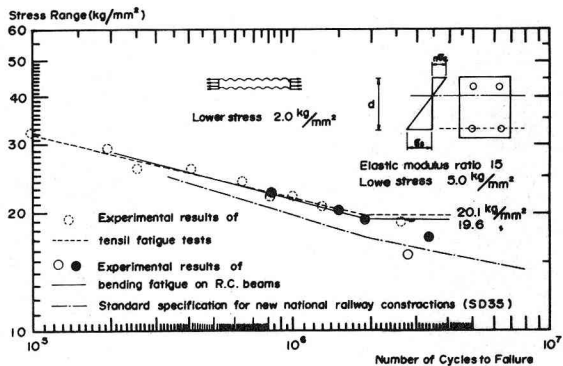


Fig. 2 Stress - Endurance Diagram in Stress Amplitude

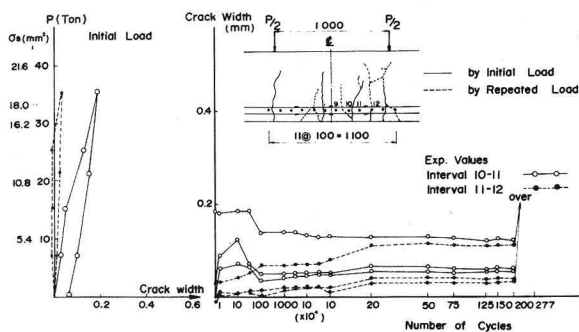


Fig. 3 Crack Width in Interval of Broken Part and Next One (LF1)

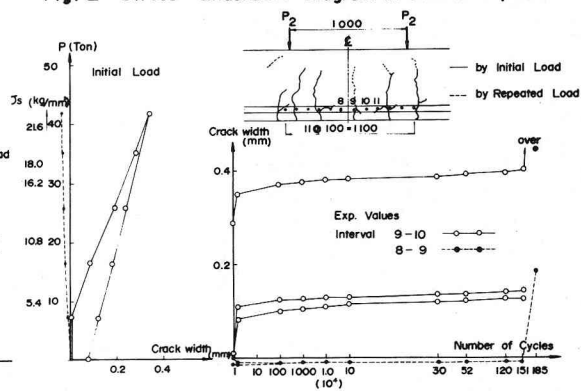


Fig. 4 Crack width in Interval of Broken Part and Next One (LF5)

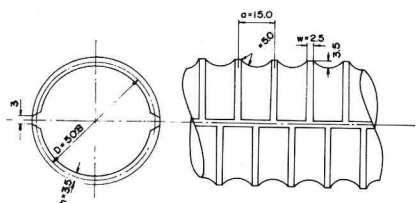


Fig. 5 Profiles and Dimension of Deformed Bar D51

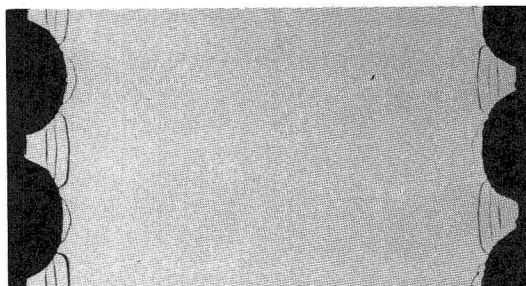


photo 1 No. 1 D51 $R = 5\text{mm}$

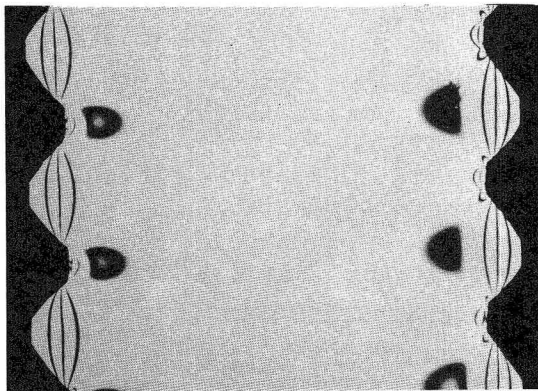


photo 2 No. 2 D51 $R = 60^\circ$

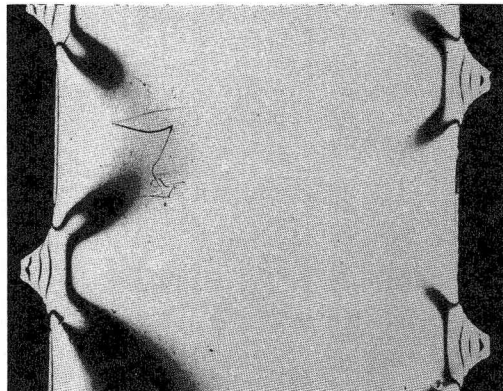


photo 3 No. 3 $a = 30\text{mm}$

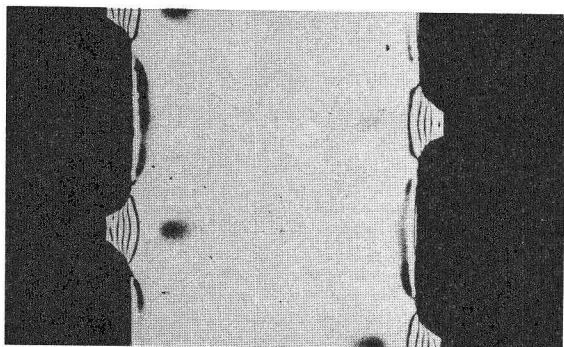


photo 4 No.5 $\rho = 2\text{mm}$

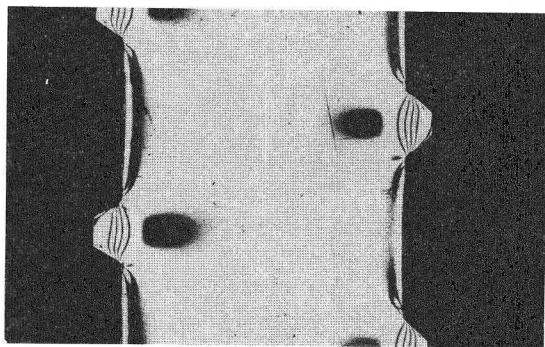


photo 5 No.6 D25 $R = 60^\circ$

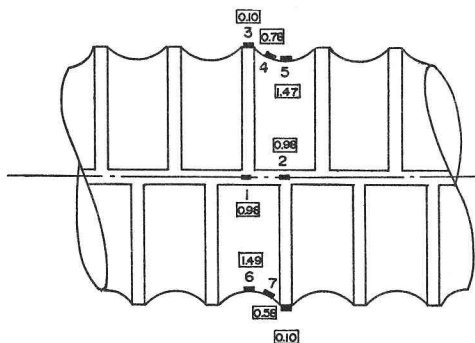


Fig.6 No.3 D51 $a = 15\text{mm}$

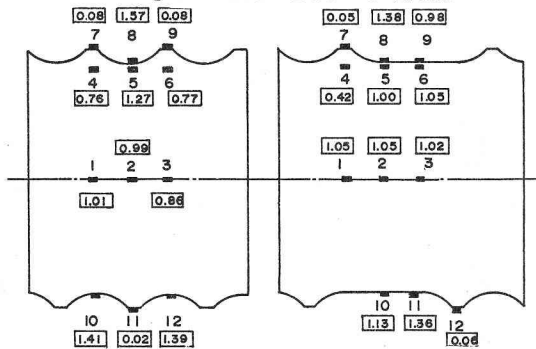


Fig.8 No.1 and No.2 D51

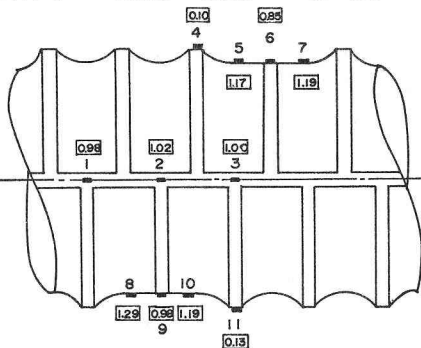


Fig.7 No.4 D51 $a = 30\text{mm}$

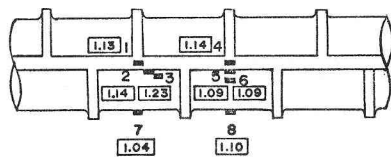


Fig.9 No.5, D25, $a = 20.0$

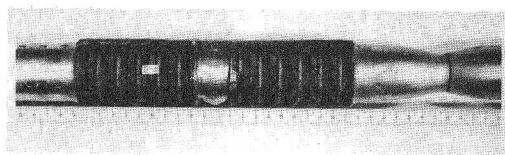


photo 6 Test Piece using for Measurement

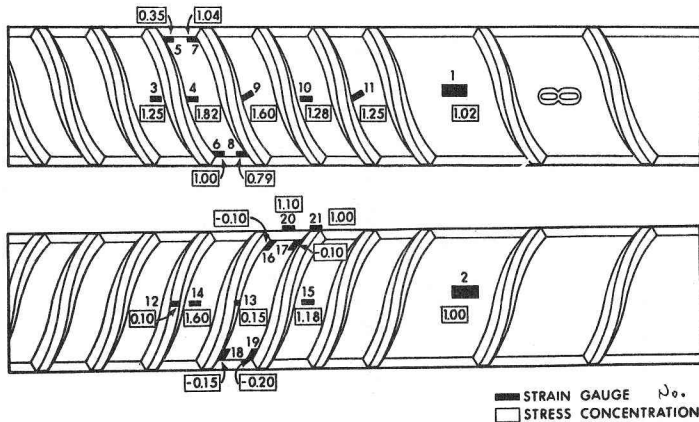


Fig.10 · STRESS CONCENTRATION MEASUREMENTS ON DEFORMED BAR

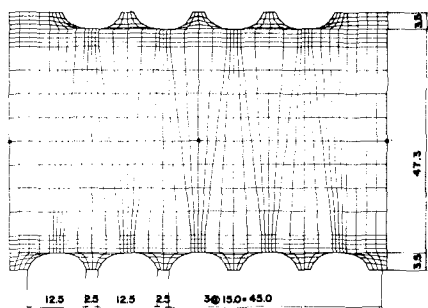


Fig.11 Element Division of D5I

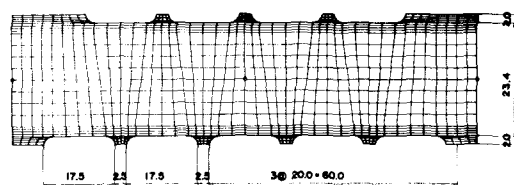


Fig.12 Element Division of D25

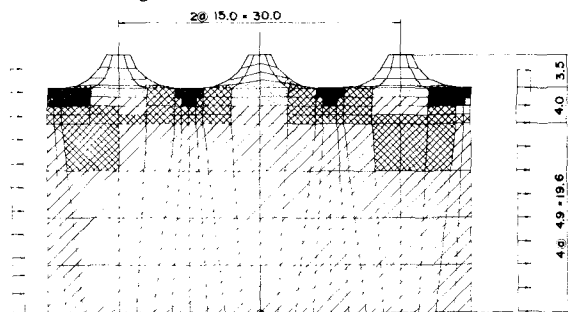


Fig.13 Stress Concentration Factors by F.E.M. for Case 1

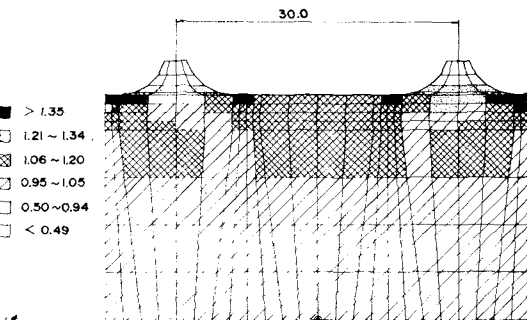


Fig.14 Stress Concentration Factors by F.E.M. for Case 2

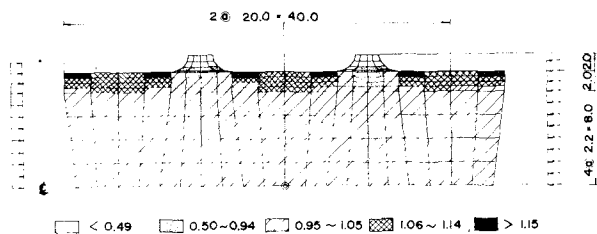


Fig.15 Stress Concentration Factors by F.E.M. for Case 3

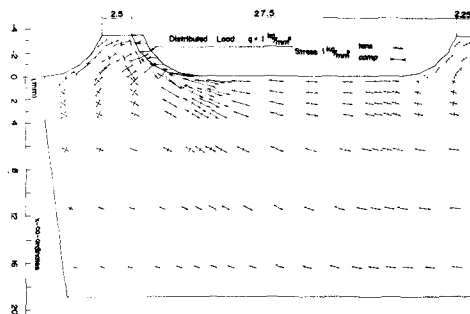


Fig.16 Stress Distribution of D5I, $a = 30\text{mm}$

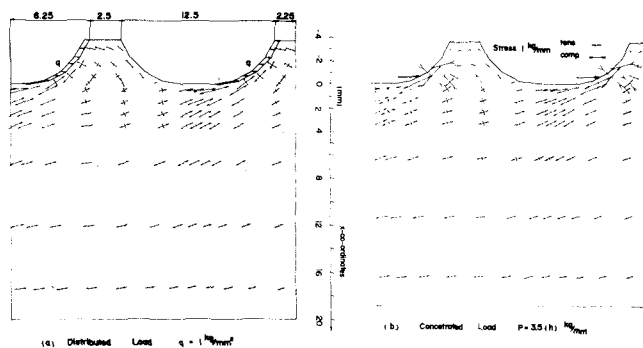


Fig.17 Stress Distribution of D5I, $a = 15\text{mm}$ by F.M.E.

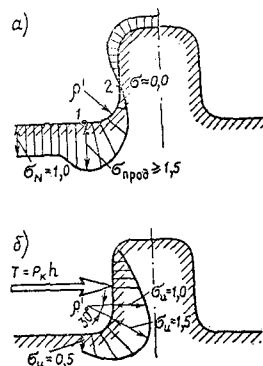


Fig.18 Stress Distribution by Skorobogatov

数を求めて、応力集中係数の計算に用いている。

Table 5 Stress Concentration Factors by F.E.M. (2-Dimension)

Table 4 にフシの立上り部、あるいはフシ間の中央部における応力集中係数を示す。D 25 のフシ間中央における応力集中係数は 1.04~1.10 である

Profiles of Deformed Bar (mm)				Case No.	Top of Lug	Base of Lug	Center of Lug	Max. of Factor	
D	h	p	a					Position	αf_{max}
50.8	3.5	5.0	15.0	1	0.018	1.45	1.39	Base of Lug	1.45
50.8	3.5	5.0	30.0	2	0.014	1.36	1.11	"	1.36
25.4	2.0	2.0	20.0	3	0.029	1.17	1.08	"	1.17

が、D 51 のものは 1.47~1.49 と大きい、D 51 のフシ間隔を 30 mm とした場合 αg は 0.98~1.19 に、立上りの円弧部の αg は 1.19~1.29 に減少する。また平板とした場合は、D 51 のフシ間中央における αg は 1.39~1.57 と素材のものに比べて 1 割程度高く、光弾性実験と同じような結果を得た。

Fig.10 に # 8 (径 25^{mm}) の斜めフシ異形鉄筋に対する J.C.JHAMB らの測定結果⁷⁾を示す。径 25^{mm} にもかかわらず αg が 1.82 と高いのは、フシ高さ 1.9^{mm} に対して立上り円弧半径が 0.35^{mm} と小さい為に生じたフシ立上り部の応力集中が主因であると思われるが、ゲージ番号 2 番と 15 番を比べるとわかるように、フシ間隔が 10^{mm} 程度と狭いため、素材全体の応力流れの乱れによる応力集中もその一因であると認めることができる。

4. 有限要素法による異形鉄筋の応力解析

4-1 軸力が作用したときの応力集中係数

異形鉄筋に軸力が作用したときのフシ形状による応力集中係数を求めるために、2次元の有限要素法による弾性解析を実施した。フシの立上りの円弧を表現できるように、モデル化に際しては三角形要素を 2 個組合せた不等辺四辺形を用い、フシ立上り部の要素分割を極力細くした。また境界条件における荷重の影響を受けないよう軸方向の長さを 5 倍のフシ間隔まで延ばしたので要素数は 1000 程度となった。D 51 と D 25 の有限要素分割を Fig.11 と 12 に示す。Fig.13, 14 に D 51 の応力分布を、Fig.15 に D 25 のものを示す。図中では、応力集中係数を濃淡で示しているが、代表的な位置の応力集中係数を Table 5 に示す。D 51 の最大応力集中はふし立上り部に生じ、 αf は 1.45、フシ間隔中央では 1.39 となり、フシ間隔を 30^{mm} とした場合はそれぞれ 1.36、1.11 に下がる。また D 25 の場合も最大応力集中はフシ立上り部に生じ、 αf は 1.17 で、フシ間隔の中央では 1.08 であった。有限要素法による応力集中係数は要素の平均値を示すから最大あるいは表面の応力集中係数が低めになる傾向があるが全体的な応力流れの把握には最適な方法である。今回の解析結果は光弾性実験およびゲージによるひずみの測定の結果と一致しており、異形鉄筋の応力解析に大いに役立つことが保証された。

4-2 フシに水平力が作用したときの応力分布

曲げを受ける RC 桁の異形鉄筋は、曲げ引張応力と付着応力を受けている。鋼構造物の純曲げ区間では一般にせん断力は作用しないが、RC 桁では純曲げ区間においてもひびわれの影響で曲げ引張応力が変化し、これと釣合うように鉄筋の表面には付着力が作用する。D 51 鉄筋のようなフシ間隔が狭く、平行部がほとんど無いような場合は、表面に作用する付着力と言うよりもむしろ、フシに作用する支圧力として曲げ引張応力に釣合っている。このような支圧力がフシに作用した場合のフシ周辺の主応力線を Fig.16, 17 に示す。Fig.17 に示すように、フシ間隔 15^{mm} のものについてフシに等分布荷重を作用させたときフシの立上り部に単位支圧力の 2.2 倍の主応力が生じ、集中荷重を作用させたときは 2.5 倍程度の主応力が生じる。また Fig.16 に示すように、フシ間隔 30^{mm} の場合には外力の単位支圧力が 15^{mm} のものに比べて 2 倍となるために、フシ立上り部にも 4.2 倍の主応力が生じる。Fig.17 に

対応するものとして、文献 6 の理論的な応力分布を Fig.18 に示す。このフシ形状による素材の軸方向の応力集中係数は 1.5 以上であると報告されている。

5. 考 察

5-1 応力集中係数に及ぼす異形鉄筋の径とフシ形状について

光弾性実験，ゲージによるひずみ測定，有限要素法による応力解析の結果細径鉄筋に対して指摘⁴⁾されたように，D25 の場合はフシの立上り部に円弧を設けることでフシの取付部端に生じる応力集中を著しく緩和できることが確認できたが，しかし横フシ太径鉄筋の D51 の場合はフシ立上り部に円弧を設ける程度では応力集中は緩和されず，フシの谷部に高い応力集中が生じた。この原因として，フシ高さに比べてフシ間隔が狭く谷部の平行部が 3mm 前後と短いため隣接したフシ形状の影響を相互に受け，素材の全体的な応力流れによる応力集中が大きくなる事と，フシ立上り部の応力集中はフシ高さ比（フシ高／径）に比例するのではなくフシの高さに依存するから，市販されている異形鉄筋のように径に比例してフシ高を高くすると太径ほどフシ立上り部の応力集中が大きくなる事が今回の実験と解析から確認できた。前者に対してはフシ間隔をフシ高の 10 倍程度にすることで，後者に対してはフシ高を抑えることで応力集中を緩和することができるが，細径鉄筋と同程度の付着性を確保するためには太径鉄筋の表面形状に工夫を凝らす必要があり，フシ間隔を広くかつ高さを抑えた形状にすることは不可能に近い。RC 構造物の異形鉄筋は，疲労性より付着性が重要な問題であり現状では太径鉄筋の耐疲労性が細径に比べて低下するのはやむをえないことであるが，今後耐疲労性の勝れた太径鉄筋の開発に際しては，従来の細径のように単にフシ立上り部に円弧を設ける程度ではなく，フシ間隔，高さ，幅，曲率半径と平行部の長さなど総合的に判断してフシ形状を決める必要がある。フシ立上り部に円弧を設けた場合でも最大応力集中はフシ立上り部に生じ，その係数は D25 に対して 1.17，D51 に対しては 1.50 と推定される。斜めおよび亀甲フシ太径鉄筋 D51 においてもフシ間隔は 35mm と広いが，フシ高が 4.0mm と高いのでその係数は 1.40 以上と予想される。

5-2 異形鉄筋における応力集中係数と疲労強度の関連性について

市販されている丸鋼と異形鉄筋の疲労強度を比べた場合，鉄筋の表面形状に起因する応力集中係数と密接な関係がある切欠き効果が耐疲労性に大きな影響を及ぼす。切欠き効果を表わすものとして，切欠き係数 β (σ_{wo}/σ_{wk} ，ここで σ_{wo} は平滑試験片の疲労限度， σ_{wk} は切欠き試験片の疲労限度を示す)を用い，この β と前項で求めた応力集中係数 α の関係は切欠き感度係数 q を導入することによって，式(1)のように表わされる⁸⁾ また q を文献 9 の式 (22.17) から求めると式(2)のように表わされる。

$$\beta = 1 + q (\alpha - 1) \dots\dots\dots(1) \quad , \quad q = \frac{1}{1 + 0.45/\sqrt{R}} \dots\dots\dots(2)$$

R は曲率半径である。 $\alpha = 1.17$ (D25)，1.50 (横フシ D51) と 1.40 (斜めと亀甲フシ D51) に対して β は各々 1.13，1.42 と 1.33 となる。 σ_{wo} を文献 10 の SM50YA の平滑試験片の 200 万回疲労強度 29kg/mm^2 程度とした場合，疲労強度 σ_{wk} は 25.7，20.4 と 21.8kg/mm^2 となる。この値は文献 4 の D25 の 26kg/mm^2 ，Fig.19 に示すように横フシ D51 の素材の実験結果にほぼ一致している。斜めと亀甲フシ D51 に対しては素材の実験結果が高目であるが，日本材料学会，JIS 疲れ試験通則では

特定の時間強度に対して3個以上の実験結果がない場合は、実験結果の平均値で時間強度を決める必要があるとされている。この通則に基づいて、Fig.19の斜めと龜甲フシの200万回疲労強度を求めると 22Kg/mm^2 弱になり、ほぼ計算値と一致する。

5-3 素材の軸引張のものとR〇桁による曲げ引張疲労実験結果の相異について

細径鉄筋では素材のものがR〇桁のものに比べて幾分小さい傾向があると報告されているが、前述し

たように、細径の疲労強度はフシ立上り部の形状に支配されて実験結果にバラツキが大きい、また同一異形鉄筋を用いて両者の比較を行った実験は皆無に等しい。外国の実験結果でも、J.C.JHAMBらのようにR〇桁の高いもの、G.REHM¹¹⁾のように素材の高いものが報告されているが、その関連性は明らかであるとは言い難い。しかしながら、太径鉄筋では、4-2項で述べた単位表面積当りの支圧力は径は比例して大きくなり、かつ支圧力による応力は素材の引張実験では生じないR〇桁特有のもので、外力による曲げ引張応力に付加されるものである。図19に示すように斜めと龜甲フシD51のR〇桁のものは素材に比べて相当低く、横フシD51のものが素材とほぼ等しいのは、前者のフシ間隔が35^{mm}に対して後者のそれは15^{mm}と狭いのでフシ一個に作用する支圧力が少ない為と思われる。将来太径鉄筋開発に際しては、素材として応力集中係数が小さく、かつR〇桁としてフシに作用する支圧力が小さくなるようなフシ形状を検討する必要がある。

7. 文 献

- 1) 例えば、土木学会：太径鉄筋の使用法に関する研究，昭和43年12月
- 2) 土木学会：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（案），昭和50年6月
- 3) 太径鉄筋研究委員会：横ぶし太径鉄筋D51を用いた構造物の設計指針，昭和50年7月
- 4) 国分，岡村：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，コンクリートライブラリー14号，土木学会
- 5) 佐藤，石渡，高塚：太径鉄筋（横フシD51）を用いた大型R〇梁の疲労試験，第30回土木学会年次学術講演会概要集V-163，昭和50年10月
- 6) C.M. Skorobogatov：曲げ部材における異形鉄筋の耐久性に及ぼす周囲コンクリートの影響，コンクリートと鉄筋コンクリート誌（ロシア語），1972，№11
- 7) I.C. Jhamb, J.G.M. Gregor：Stress Concentrations Caused By Reinforcing Bar Deformations, Fatigue of Concrete, SP41-8, A.C.I
- 8) C.M. Skorobogatov：疲れ破断の原因による異形鉄筋の疲れ限定の算定（ロシア語）
- 9) 日本金属学会強度委員会編：金属材料の強度と破壊，丸善社，1964，P326~P332
- 10) 日本鋼構造協会：疲労データシート№8，SM50YA
- 11) G. Rehm：Contribution to the Problem of the Fatigue Strength of Steel Bar for Concrete Reinforcement, 6th of IABSE, Paper Ia 2, Stockholm

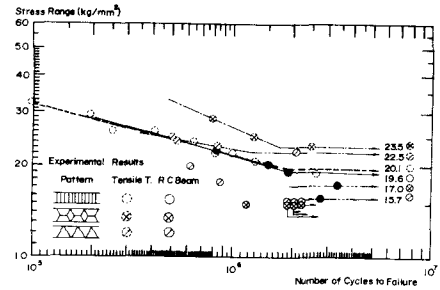


Fig.19 S-N Curves of Tensile Test and RC Beam with D51