

論文  
[2014] スターラップを有する RC はりの疲労強度

正会員○佐藤 勉 (鉄道総合技術研究所)  
正会員 斉藤 啓一 (鉄道総合技術研究所)  
正会員 寺田 年夫 (鉄道総合技術研究所)  
正会員 宮本 征夫 (鉄道総合技術研究所)

1. はじめに

スターラップを有する鉄筋コンクリートはりのせん断疲労強度に関しては、折り曲げたスターラップの疲労強度が鉄筋母材より大きく低下することから、せん断疲労の影響が支配的な短スパンの構造物などについて設計の重要な検討項目として取り扱う必要がある。

スターラップの疲労強度については、文献<sup>2) 3)</sup>の結果を踏まえ、土木学会コンクリート標準示方書では折り曲げた鉄筋の設計疲労強度を母材の50%に低減するとした規定が示されている。しかし、設計疲労強度を50%に低減するとした規定は、せん断スパン-有効高さ比 (a/d)が2.5でスターラップの配筋が2,3組みと少ない試験<sup>2)</sup>、a/d が2および4の非対称T型はりでスターラップの配置間隔をせん断スパン内で意図的に変化させた試験<sup>3)</sup>(最終的な疲労破壊はa/d が2の方ですべて生じていた)、にもとずいている。

本研究はこれらを参考とし、a/d を4付近とした場合、スターラップの配置間隔を通常の設計のように等間隔とした場合、その配置間隔を疎とした場合と密とした場合等に着目し、スターラップに生じるひずみと疲労強度の関係およびせん断スパン内に多数本のスターラップが配置されている場合の部材としての疲労強度について検討することを目的とする。

なお、本研究は、運輸省委託研究「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一部として、昨年<sup>1)</sup>の研究の継続として行ったものである。

2. 試験概要

2.1 試験体の種類

試験体の形状は、図-1に示す形およびT形断面とし、せん断スパン内のスターラップは等間隔に配置し、その配置間隔および鉄筋比等を表-1、2に示した。

使用したコンクリートは、表-3に示す配合のものを使用し、試験期間中のコンクリートの材令は約1から12か月である。なお、試験開始時におけるコンクリートの圧縮強度は、標準供試体により確認することとし、表-1に示す圧縮強度であった。

鉄筋は、軸直角方向にふしをもつ異形鉄筋SD30を使用し、各径の材料強度特性を表-4に示す。スターラップは、軸方向鉄筋を取り囲むように曲げ加工し、その曲げ内半径をスターラップ直径の2倍とした。

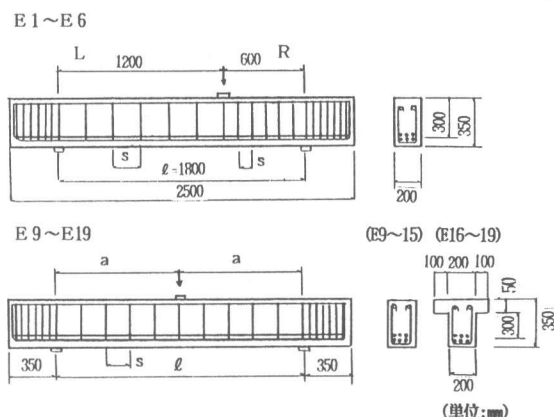


図-1 試験体の形状および配筋

## 2.2 測定項目および試験方法

測定項目は、スターラップのひずみを主体に、その他載荷点のたわみ、ひびわれ幅とした。ひずみの測定には、ワイヤーストレンゲージ（測長 3 mm）を使用し、スターラップの曲げ加工位置より 35～40mm 上方に貼付した。

載荷方法は、1 点集中載荷（載荷板の幅 10cm）とし、a/d を 4、2 の対称および 4 と 2 の非対称とした（表-2 参照）。これは、a/d が異なる場合のスターラップのひずみの違いや支点・載荷点の影響が異なる場合の部材のせん断疲労強度の違いを知ることを目的としている。

繰り返し荷重の載荷には、油圧式疲労試験機（サーボパルサー型）を用いて正弦波の荷重を 2 ～ 4 Hz で載荷した。疲労試験中は、所定の回数で試験機を止め静的に載荷し、スターラップのひずみ等の測定を実施した。

## 3. 試験結果

表-5 に載荷荷重、せん断ひびわれ発生荷重、試験体が疲労破壊するまでの繰り返し回数 (Nu)、破壊位置等をまとめて示す。

載荷荷重は、コンクリートが分担するせん断力 (Vco: 表-2 参照) に対して、1～3 倍に相当する荷重を上限荷重としており、せん断力によるひびわれが 1 回目の荷重載荷により生じるようにした。実際には、表-5 に示すように E 3 および E 15 試験体を除いて、載荷点を挟んで左 (L) 側と右 (R) 側の両方にせん断ひびわれが生じた。繰り返し回数が増えても破壊しなかった試験体については、荷重を上げて試験を続けすべて疲労試験中に破壊させた。

破壊形態として、E 11 以外の試験体すべてスターラップの疲労破断によりせん断破壊した。スターラップの破断面を破壊後はつって調べたが、鉄筋の伸びはほとんど見られないことから、破断は疲労によるものと判断された。しかし、スターラップが複数本にわたって破断しているものの中には、鉄筋が絞り切れによる破断面も 3 本程度見られた。スターラップの破断位置は、各試験体ともに、最終的にせん断破壊面に沿って集中しており、破壊面となっていないひびわれ面に交差するスターラップには、観察した範囲では 1 本の破断も見られなかった。1 試験体当たりの疲労破断したスターラップの本数は、スターラップの配置本数や繰り返し回数によって異なり、一般に配置本数が多く、繰り返し回数が多いほど破断本数も多くなって

表-1 試験体の種類

試験体 No.	せん断補強鉄筋						軸方向鉄筋 A s cm <sup>2</sup>	コンクリート強度 f <sub>c</sub> kgf/cm <sup>2</sup>
	L 側			R 側				
	r %	φ mm	s cm	r %	φ mm	s cm		
E 1	0.16	φ 6	20.00	0.36	φ 10	10.00	15.2/025	374
E 2	0.42	φ 10	17.14	0.74	φ 13	8.57	30.4/025	374
E 3	0.16	φ 6	20.00	0.36	φ 10	10.00	30.4/025	374
E 4	0.26	φ 6	12.00	0.59	φ 10	6.00	30.4/025	374
E 5	0.40	φ 6	8.00	0.89	φ 10	4.00	30.4/025	313
E 6	0.26	φ 6	12.00	0.59	φ 10	6.00	30.4/025	313
E 9	0.11	φ 6	30.00	0.11	φ 6	30.00	30.4/025	325
E 10	0.18	φ 6	17.14	0.18	φ 6	17.14	30.4/025	327
E 11	0.24	φ 10	30.00	0.24	φ 10	30.00	30.4/025	325
E 12	0.30	φ 10	24.00	0.30	φ 10	24.00	30.4/025	328
E 13	0.37	φ 6	8.57	0.37	φ 6	8.57	30.4/025	341
E 14	0.48	φ 10	15.00	0.48	φ 10	15.00	30.4/025	360
E 15	0.42	φ 13	30.00	0.42	φ 13	30.00	30.4/025	355
E 16	0.42	φ 10	17.14	0.42	φ 10	17.14	30.4/025	343
E 17	0.24	φ 10	30.00	0.24	φ 10	30.00	30.4/025	349
E 18	0.40	φ 6	8.00	0.40	φ 6	8.00	30.4/025	343
E 19	0.85	φ 13	15.00	0.85	φ 13	15.00	30.4/025	362

(注) r = Aw / (bw · s) Aw:スターラップの断面積 bw:腹部の幅  
s :スターラップのピッチ φ :鉄筋径  
試験体 No. E 7 および E 8 は欠番

表-2 試験体の形状および特性

試験体 No.	断面形状	a/d		スパン ℓ (mm)	Vco <sup>D)</sup> (tf)
		L	R		
E 1 E 2～4 E 5、6	く形	4	2	1800	8.2 10.4 9.8
E 9～12	く形	4		2400	9.9
E 13～15	く形	2		1200	13.4
E 16～18	T形	4		2400	10.1
E 19	T形	2		1200	13.5

D) Vco = 0.94 β d β p f<sub>c</sub><sup>1/3</sup> b w d  
ここに、β d = (100/d)<sup>1/4</sup> (d:cm)  
β p = (100 p w)<sup>1/3</sup>、p w = A s / (b w · d)  
破壊した側の計算値を示す。

表-3 コンクリートの配合

単位量 kg/m <sup>3</sup>	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
165		275	960	906	6.3

表-4 使用鋼材の強度特性

鋼材	φ mm	降伏点 kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>
鉄筋	6	3880	5560
	10	3790	5450
	13	3410	5050
	25	3690	5480

おり、その本数は1本から12本であった。

スターラップが破断した部分は、その多くが軸方向鉄筋を囲む曲げ加工された部分とそのやや上側の位置に集中していた。表-6に全試験体の疲労破断したスターラップの位置および箇所数を集計して示した。表より、曲げ加工部付近が全体の約80%を占めており、上部(フック部付近)および中間部はそれぞれ約10%程度となっている。

#### 4. スターラップのひずみと疲労強度

スターラップに実際に生じるひずみは、これまでの試験結果等<sup>1-3)</sup>からも報告されているように、荷重の繰返しにより漸増することが知られている。これはコンクリートの分担するせん断力が繰返しとともに減少するためと考えられている。

図-2(a)(b)にE12およびE19試験体のスターラップ1本のひずみ( $\epsilon$ )と繰返し回数(Log N)の関係を示す。E12は a/dが4でく形断面、E19は a/dが2でT形断面の試験体である。疲労試験時の最大せん断力( $V_{max}$ )は、コンクリートの分担せん断力の1~1.5倍程度である。

図-2より、両方ともスターラップのひずみは繰返しに伴い増加しているが、対数座標軸としたLog Nに対してひずみがある回数を越えると急増する傾向がある。ここで測定したスターラップは、最終回のひずみ測定後、数万回から数十万回後の疲労試験中に破断している。なお、以下の検討では、最終回のひずみ測定から破壊までのひずみ変化については特に考慮していない。

ひずみの静的測定より、スターラップが疲労破断した時点を予想し、その1回前の静的測定結果より得られた変動応力度( $S_{wr}$ )と文献<sup>3)</sup>の方法による応力度の計算値( $Scal_3$ )の比較を図-3に示す。ここで、文献<sup>3)</sup>の計算値  $Scal_3$ は、5.に示す(c)によって求めた。なお、図に示したデータは、スターラップ全数のひずみ測定を行った11体<sup>1)</sup>と文献<sup>2)</sup>のデータをあわせて示している。

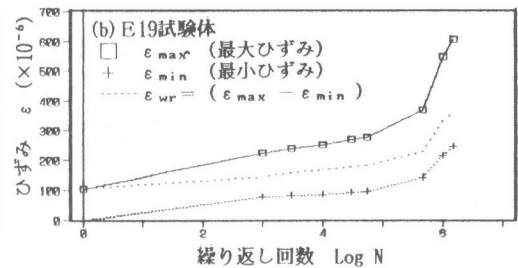
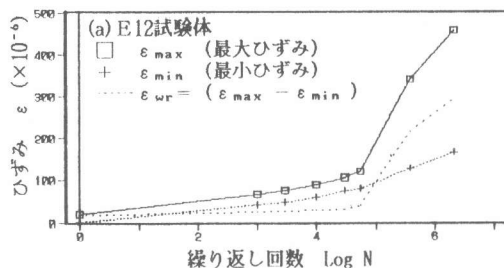


図-2 荷重の繰返しによるスターラップのひずみ変化

表-5 疲労試験結果

試験体 No.	載荷荷重		繰返し回数 <sup>3)</sup> Nu × 10 <sup>3</sup>	せん断ひびわれ発生荷重 <sup>2)</sup> tf		破壊位置	破壊モード <sup>2)</sup>	
	Pmin tf	Pmax tf		L 側	R 側			
E 1	3.0	25.0	46.8	25.0	15.0	L	I	
E 2	3.0	35.0	355.2	30.0	20.0	L	I	
E 3	3.0	20.0	1600.0	N=280	20.0	L	I	
	3.0	25.0	1228.0					
E 4	7.0	35.0	150.2	30.0	16.0	L	I	
E 5	15.0	35.0	29200.0	30.0	20.0	L	I	
	3.0	35.0	419.0					
E 6	3.0	35.0	90.1	30.0	16.0	L	I	
E 9	3.0	15.0	85.5	15.0	15.0	R	I	
E 10	3.0	17.0	529.6	14.0	14.0	R	I	
E 11	3.0	19.0	0.15	19.0	19.0	L	II	
E 12	3.0	15.0	12534.0	15.0	15.0	R	I	
	3.0	16.0						790.0
	3.0	18.0						54.0
E 13	3.0	23.0	2520.0	16.0	16.0	R	I	
	3.0	27.0						555.0
	3.0	35.0						9.0
E 14	3.0	34.0	503.9	30.0	32.0	L	I	
E 15	3.0	24.0	3538.0	N=1	24.0	L	I	
	3.0	30.0						1462.0
	3.0	35.0						459.0
E 16	3.0	26.0	196.1	26.0	26.0	R	I	
E 17	3.0	21.0	29.8	20.0	21.0	R	I	
E 18	3.0	26.0	448.7	26.0	20.0	R	I	
E 19	3.0	40.0	1844.0	26.0	30.0	L	I	

(注) 1) 破壊時の繰返し回数は、荷重を途中で変化させた試験体は表中の値の合計値となる。  
 2) 破壊モード I: スターラップのせん断疲労破壊 II: コンクリートのせん断疲労破壊  
 3) 載荷回数N(×10<sup>3</sup>)時点でひびわれが発生したことを示す。

表-6 疲労破断したスターラップの位置および箇所数

疲労破断位置	破断本数	比率(%)
上部(フック部付近)	13	10
中間部	11	8
下部(曲げ加工部付近)	107	82

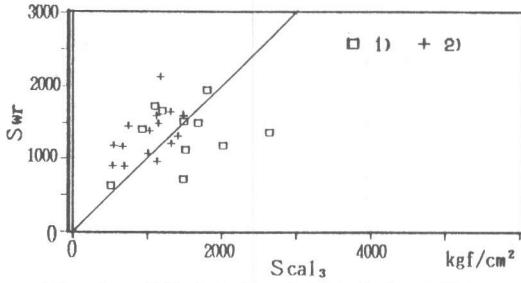


図-3 計算応力度と実測応力度の関係

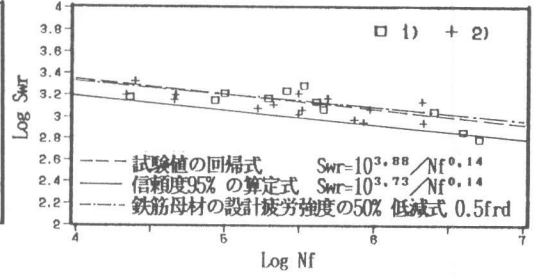


図-4 1本目のスターラップ破断時の繰り返し回数と応力振幅の関係

図-3より、実測値と計算値

にはかなりのばらつきがあり、1本のスターラップの応力度の評価法についても検討する必要があると考えられる。なお、ここで求めた計算値  $Scal_3$  は、文

献<sup>3)</sup>で示されている  $\beta x$  (支点・載荷点の影響を考慮するための低減係数)は考慮していない。

スターラップの最初の1本が疲労破断した時の繰り返し回数 (Log Nf) とそのスターラップに作用している変動応力度 (Log Swr) の関係を図-4に示す。図-4に示した試験体の数は、文献<sup>2)</sup>を含めて26体である。図より、実測のひずみをもとにスターラップの疲労強度を評価した場合、次式が得られる。

$$\text{回帰式: } Swr = 10^{3.88} / Nf^{0.14} \text{、95\% 信頼限界算定式: } Swr = 10^{3.73} / Nf^{0.14}$$

また、図-4には、鉄筋母材の疲労強度算定式<sup>4)</sup>

$$f_r = (1 - f_{min}/f_b) \cdot 10^{3.14} / N^{0.12} \cdot 10.2 \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 $f_r$  : 鉄筋母材の疲労振幅強度 (kgf/cm<sup>2</sup>) で、鉄筋径  $\phi = 10\text{mm}$  の場合

$f_{min}$  : 最小応力度、 $f_b$  : 鉄筋の引張強度、 $10.2$  : kgf/cm<sup>2</sup> に換算するための係数を基本とした設計疲労強度式  $f_{rd} (= f_r/1.2)$  の50%低減式も比較のため示した。ただし、最小応力度  $f_{min}$  は0として計算している。図-4より、実測のひずみをもとにスターラップの疲労強度を求めた場合、鉄筋母材の設計疲労強度の50%式と試験値の回帰式がほぼ一致し、95%信頼限界式はさらに疲労強度が低くなっている。また、実測のひずみは、疲労破断する直前の測定値で繰り返しによりひずみが急増し最大となった時の値がNf回一定に繰り返されたと仮定しており、実際の応力履歴を考慮するとさらに疲労強度が低下することになる。

### 5. はりのせん断疲労強度

4. では、1本のスターラップに着目し、実測のひずみをもとに疲労強度の検討を行った。しかし、試験では、スターラップの配置方法によっても異なるが、1本のスターラップが疲労破断しても、はりはすぐに破壊には至らないことから、部材の疲労破壊に着目して検討する。なお、スターラップの応力度は、設計に一般に用いられている計算式で求め、部材としての疲労強度を評価してみることにする。

検討にあたって、スターラップの応力度計算には、次の3通りの方法で求めることとした。

$$(a) \quad Swr_1 = (V_{max} - 0.5V_{c1})s / (Aw Z) \cdot Vr / (V_{max} + V_{c1})$$

$$V_{c1} = 0.9 \beta d \beta_p f_c^{1/3} b_w d$$

表-7 検討に用いたデータの範囲

文献名	データ数	断面形状	有効高さ d (mm)	$\beta a/d$	$f_c'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	pw (%)	スターラップ		
							r (%)	s (mm)	$\phi$ (mm)
本論文及び1)	18	く、T	300	2.4	313~374	2.5, 5.1	0.11~1.48	80~300	6, 10, 13
2)	17	く形	220	2.5	190~359	1.7, 3.1	0.26, 0.63	135, 185	10, 13
3)	9	T形	435	2	248~304	3.5	0.95	75	10

(注) 1) a/d の値は、破壊した側の値を示す。

(a) による場合

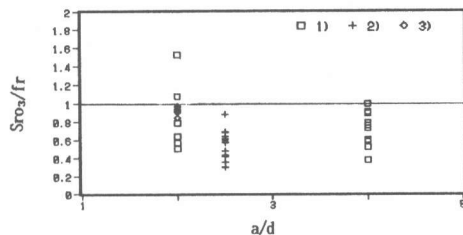
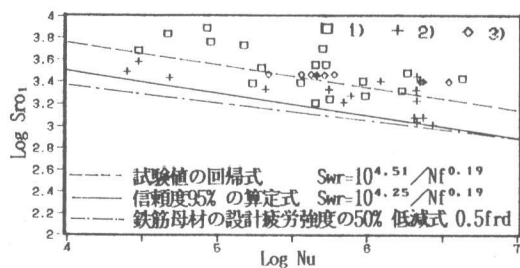


図-6 せん断スパン有効高さ比の影響

(b) による場合

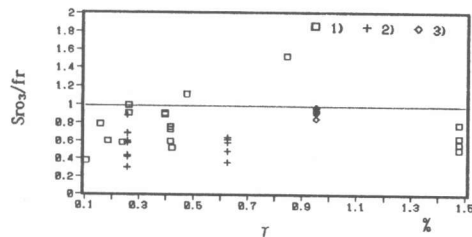
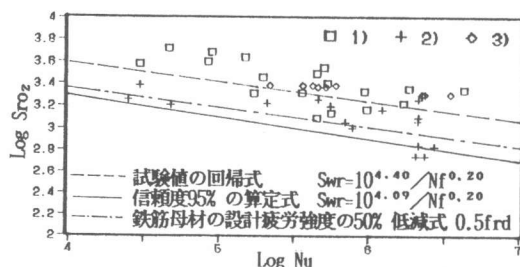


図-7 スターラップ鉄筋比の影響

(c) による場合

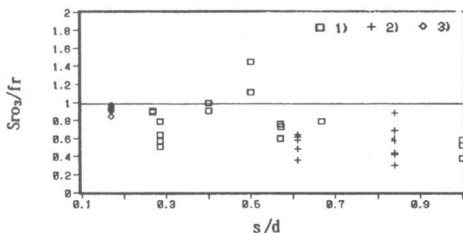
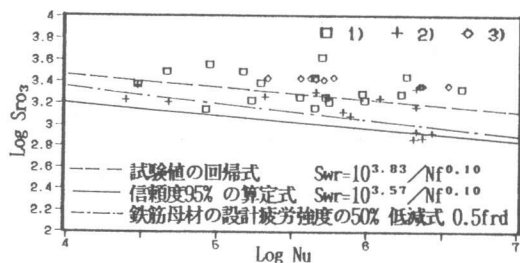


図-8 スターラップの配置間隔の影響

図-5 部材破壊時の繰返し回数と計算振幅応力度の関係

$$(b) \quad SWR_2 = (V_{max} - 0.5V_{C2})s / (Aw Z) \cdot Vr / (V_{max} + V_{C2})$$

$$V_{C2} = 0.94 \beta d \beta_p f_c'^{1/3} b_w d (0.75 + 1.4 / a/d)$$

$$(c) \quad SWR_3 = (V_{max} - V_{C3} 10^a) s / (Aw Z) \cdot Vr / (V_{max} + V_{C3})$$

$$V_{C3} = 0.94 \beta d \beta_p f_c'^{1/3} b_w d$$

ここで、 $SWR_1, SWR_2, SWR_3$ : 変動応力度、 $V_{max}$ : 最大せん断力、 $V_{min}$ : 最小せん断力

$V_r$ : 変動せん断力 ( $=V_{max} - V_{min}$ )、 $Aw$ : 1組みのスターラップの断面積

$V_{C1}, V_{C2}, V_{C3}$ : コンクリートが分担するせん断力、 $Z: d/1.15$ 、 $d$ : 有効高さ  
 $\beta d = (100/d)^{1/4}$ 、 $\beta_p = (100P_w)^{1/3}$ 、 $P_w = A_s / (b_w \cdot d)$ 、 $A_s$ : 軸方向鉄筋の断面積  
 $f_c'$ : コンクリートの圧縮強度、 $s$ : スターラップの配置間隔

$a = -0.036 (1 - (V_{min}/V_{max})^2) \text{Log Nu}$ 、 $Nu$ : 部材破壊時の繰返し回数

(a) による方法は、コンクリート標準示方書にもとづいた方法であり、(b) による方法は、コンクリートの分担するせん断力 $V_c$ において $a/d$ の影響を考慮した場合の方法である。(c) による方法は、文献<sup>3)</sup>を参考に繰返し回数に応じてコンクリートの分担するせん断力を低減した方法である。

上記、3式にもとずいて求めた変動応力度を完全片振り時の応力度 $S_{roi}$ に換算して、破壊時の繰り返し回数 $N_u$ との関係を両対数座標軸で、図-5に示す。なお、データとしては表-7に示す44体を用いるとともに、データの回帰式、信頼度95%の算定式および鉄筋母材の設計疲労強度の50%低減式も合わせて示した。

図-5より、(a)～(c)いずれの方法によっても試験値のばらつきが見られ、実測ひずみをもとにした図-2と比較しても変動がかなり大きくなっている。また、現在コンクリート標準示方書では、鉄筋母材に対して設計疲労強度を50%に低減することとしており、この低減値は、試験値の信頼度95%の算定式にほぼ等しい結果となっている。

前述の(c)の方法により求めた $S_{ro3}$ と破壊時の繰り返し回数 $N_u$ に対応する鉄筋母材の疲労強度 $f_r$ の比を縦軸として、せん断スパン有効高さ比( $a/d$ )、スターラップの鉄筋比 $\gamma (=A_w/bw_s)$ および配置間隔有効高さ比( $s/d$ )を横軸として、それぞれ図-6～8に示す。各図とも $S_{ro3}/f_r$ の分布として明瞭な傾向を示すには至っていない。しかし、図-8において、 $s/d$ が小さくなると、 $S_{ro3}/f_r$ の値が大きくなる傾向もやや見られている。これは、部材のせん断疲労破壊を限界状態として考えるとした場合、スターラップを密に配置することによってスターラップ1本が破断しても他のスターラップに応力が分配され、部材のせん断疲労強度が上がったとも考えられる。

## 6. まとめ

以上の検討結果より、明らかとなった主な点を列記する。

- (1) スターラップが疲労破断する位置は、有効高さが30cm程度のはりの実験では、その80%以上が曲げ加工された付近に集中しており、疲労強度も鉄筋母材に対して低下することから、疲労の影響を受けるスターラップに対して設計でこれを配慮する必要がある。
- (2) 1本目のスターラップ疲労破断時の繰り返し回数と実測の応力振幅から、スターラップの疲労強度を評価すると、試験データの回帰式と鉄筋母材の設計疲労強度の50%低減式はほぼ等しい。
- (3) 部材のせん断疲労強度は、5.に示した応力度計算式を用いた場合、試験値の信頼度95%の算定式と鉄筋母材の設計疲労強度の50%低減式はほぼ等しくなった。
- (4) 部材のせん断疲労強度の評価において、試験値の変動が大きく、スターラップの応力度の算定方法や配筋方法の違いによる影響をさらに検討する必要がある。

## 7. おわりに

実験結果をもとに今後さらに検討を加え、せん断疲労に関する合理的な設計法の確立に寄与したいと考えている。

なお、本研究は、運輸省の委託研究「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一部として行ったものであり、関係の方々に謝意を表する次第である。

### 〔参考文献〕

- 1) 佐藤、斉藤、寺田、宮本：スターラップを有するRCはりの疲労性状、第10回コンクリート工学年次講演会論文集、1988
- 2) H.OKAMURA, S.A.FARGHALY, T.UEDA : Behavior of Reinforced Concrete Beames with Stirrups Failing in Shear under Fatigue Loading, Proc.of JSCE, No.308, April, 1981, pp.109-122
- 3) T.UEDA, H.OKAMURA : Behavior of Reinforced Concrete Beames under Fatigue Loading, Concrete Library of JSCE, No.2, Dec.1983, pp.37-69
- 4) 二羽、前田、岡村：異形鉄筋の疲労強度算定式、土木学会論文集第354号、V-2、1985.2