

論文

[2051] スターラップを有する RC はりの疲労性状

正会員 〇佐藤 勉 (鉄道総合技術研究所)  
 正会員 齋藤 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

鉄筋コンクリートはり (以下、RCはり) の繰り返し荷重によるせん断疲労耐力に関しては、最近の研究成果により明らかにされてきている。その多くは、上田ら<sup>1)</sup>の研究によるもので、コンクリート構造物の設計においても、せん断疲労に対する安全性の検討を行うことが可能となっている。コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>においても、上田らの研究を基にせん断疲労の検討方法および折り曲げ鉄筋の疲労強度等に関する記述が盛り込まれている。

スターラップの疲労強度については、鉄筋母材の疲労強度と曲げ加工された部分の疲労強度との間にあること<sup>1)</sup>、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>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。

これらに対し、有効高さの違い (試験体と実構造物との違い)、せん断補強の程度、せん断補強鉄筋に実際に作用する応力等、実設計においては、さらに数多くの実験等に基づきよりきめ細かな検討方法が望まれていると思われる。

本研究は、鉄道技術基準整備を目的とした運輸省の委託研究の一部として、スターラップを有する矩形のRCはりの繰り返し載荷試験を実施し、破壊性状、破壊形式、スターラップの応力度せん断疲労耐力等についての検討を行い、今後より合理的な設計法を提案するために行ったものである。

2. 試験概要

2.1 試験体の種類

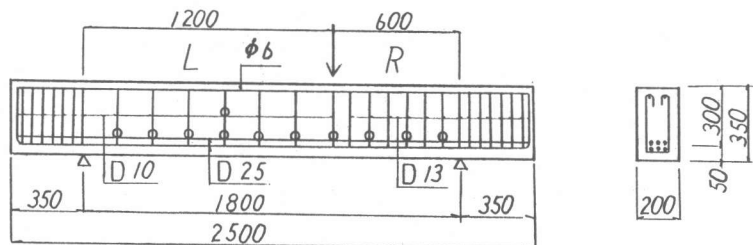
試験体は、スパン1.8mの矩形断面のはり13体とした (図-1に配筋の一例を示す)。試験体のせん断補強鉄筋量、軸方向鉄筋量等を表-1に示す。

使用したコンクリートは、表-2に示す配合のものを用いた。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、SD30を使用し、その強度特性を表-3に示す。

2.2 測定項目および載荷方法

測定項目は、鉄筋 (スターラップ、軸方向鉄筋) のひずみ、荷重点のたわみおよびひびわれ状況とした。鉄筋



○.....ワイヤーストレインゲージ

図-1 試験体の形状 (F1~F8) および測定位置

ひずみの測定には、ワイヤーストレインゲージ（測長 3mm）を使用し、図-1 に示す位置に貼付した。また、コンタクトゲージによりせん断ひびわれ幅の測定も行った。

载荷方法は、1点集中载荷（载荷板の幅10cm）とし、せん断スパンと有効高さの比  $a/d$  を左（L）側が 4.0、右（R）側が 2.0 とした。これは、 $a/d$  が異なる場合のスターラップのひずみを知ることを目的としている。

疲労荷重の载荷には、油圧式疲労試験機（サーボパルサー型）を用いて正弦曲線の繰り返し荷重を 2~4Hz で载荷した。疲労試験中は、所定の回数で試験機を止め静的に载荷した。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 破壊性状

RC はりの破壊までの繰り返し回数、破壊モード、破壊位置等をまとめて表-4 に示す。

繰り返し载荷による試験体の破壊は、スターラップの疲労破断によりせん断破壊したもの（以下、スターラップのせん断疲労破壊）、スターラップは疲労破断せず、はりの腹部あるいは载荷点付近のコンクリートが疲労破壊し、最終的にはりがせん断破壊したもの（以下、表-3 使用鋼材の強度特性コンクリートのせん断疲労破壊）に分類された。

疲労試験時の最大荷重  $P_{max}$  は、今回の試験においては、全試験体とも次式より求まる  $V_c$  以上の大きさの荷重で繰り返しており、初期载荷において斜めひびわれが生ずるように行っている。

$$V_c = 0.94 \beta_a \cdot \beta_p \cdot f'_c \cdot b \cdot d \quad (1)$$

$$\beta_a = (100/d)^{1/4}, \beta_p = (100p)^{1/3}, b: \text{腹部幅}, d: \text{有効高さ}$$

$$f'_c: \text{コンクリートの圧縮強度}, p: \text{軸方向鉄筋比}$$

破壊時のひびわれ状況を図-2 に示す。図-2 (a) (b) は、スターラップのせん断疲労破壊した試験体（F 2, F 4）のひびわれ状況である。各試験体とも破壊後、試験体をはつりスターラップの破断位置を観察している。F 2 試験体の場合、スターラップの破断は L 側スパンに生じており、曲げ加工された部分のやや上側の位置で 3 本破断し、また破壊面と交差した直線部でも 2 箇所破断していた。スターラップの破断面の観察より、スターラップの伸びはほとんど見られないことから、破断はすべて疲労によるものと判断された。F 4 試験体の場合、スターラップの破断は R 側スパンで生じ、破断したスターラップは 3 本で、すべて曲げ加工された部分のや

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 kg/cm <sup>2</sup>
	L 側			R 側				
	$r$ %	$\phi$ mm	s cm	$r$ %	$\phi$ mm	s cm		
F 1	0.42	D 10	17.14	1.48	D 13	8.57	30.4/D25	338
F 2	0.42	D 10	17.14	1.48	D 13	8.57	30.4/D25	347
F 3	0.42	D 10	17.14	1.48	D 13	8.57	30.4/D25	340
F 4	0.42	D 10	17.14	1.48	D 13	8.57	30.4/D25	352
F 5	0.42	D 10	17.14	1.48	D 13	8.57	30.4/D25	368
F 6	0.42	D 10	17.14	1.48	D 13	8.57	30.4/D25	359
F 7	0.42	D 10	17.14	1.48	D 13	8.57	30.4/D25	367
F 8	0.42	D 10	17.14	1.48	D 13	8.57	30.4/D25	380
F 9	0.42	D 13	30.00	1.48	D 13	10.00	30.4/D25	391
F 10	0.40	D 6	8.00	1.78	D 10	4.00	30.4/D25	361
F 11	0.26	D 6	12.00	1.19	D 10	6.00	30.4/D25	359
F 12	0.40	D 6	8.00	1.78	D 10	4.00	30.4/D25	365
F 13	0.30	D 10	24.00	1.06	D 13	12.00	30.4/D25	360

(注)  $r = A_w / b s$   $A_w$ : スターラップの断面積  $b$ : 腹部の幅  
 $s$ : スターラップのピッチ  $\phi$ : 鉄筋径

表-2 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-3 使用鋼材の強度特性

鋼材	$\phi$ mm	降伏点 kgf/mm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/mm <sup>2</sup>
鉄筋	6	39.2	52.7
	10	37.4	52.4
	13	38.1	57.0
	25	40.0	55.0

表-4 疲労試験結果

試験体 No.	載荷荷重		載荷回数 N <sub>max</sub> ×1000	せん断ひびわれ 発生荷重 tf		破壊 位置	破壊 モード
	P <sub>min</sub> tf	P <sub>max</sub> tf		L 側	R 側		
F 1	3.0	39.4	18.8	28.0	20.0	L	II
F 2	3.0	35.0	927.2	35.0	26.0	L	I
F 3	3.0	33.1	564.0	30.0	22.0	R	I
F 4	3.0	31.5	448.0	31.5	22.0	R	I
F 5	9.0	39.0	1690.0	30.0	20.0	R	I
F 6	15.0	39.5	968.0	30.0	20.0	R	I
F 7	15.0	42.0	18.0	30.0	20.0	L	II
F 8	3.0	39.0	70.6	—	—	L	II
F 9	3.0	35.0	170.3	26.0	22.0	L	I
F 10	3.0	35.0	688.0	26.0	16.0	R	II
F 11	3.0	36.0	14.5	30.0	20.0	L	II
F 12	1.0	37.0	73.9	30.0	20.0	R	II
F 13	3.0	30.0	3.7	26.0	20.0	L	II

(注) 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

や上側の位置で生じていた。なお、個々のスターラップの破断がどの載荷回数で生じたのかについては不明であるが、たわみの測定結果等から、スターラップの破断が同時には生じていないものと予想された。

図-2 (c) は、コンクリートのせん断疲労破壊した試験体 F 10 のひびわれ状況である。F 10 試験体でのコンクリートのせん断疲労破壊は、R側スパンに生じている。R側スパンに斜めひびわれが、繰り返し回数の増加にしたがって多数本発生し、最終的にははりの腹部および上面のコンクリートが破壊に至っている。なお、この時、スターラップの破断は生じていない。

### 3. 2 荷重-変位

スターラップのせん断疲労破壊した F 2 試験体の荷重-変位の関係を図-3に示す。また、繰り返し回数 N の対数 log N - 変位 δ の関係を図-4に示す。図-3、図-4は、それぞれ所定の回数で試験機を止め静的載荷して測定した載荷点位置でのたわみをもとに示したものである。

図-3、図-4より、最大たわみおよび除荷時の残留たわみが繰り返しとともに徐々に増加し、終局時には急激に増大するのが観察された。

### 3. 3 スターラップのひずみ

スターラップの疲労破断した試験体 F 4 について、せん断力 V - スターラップの平均ひずみ ε との関係を図-5に示す。スターラップの平均ひずみは、L側の曲げ加工された部分の上側に取り付けたひずみゲージの測定値の平均としている。図-6に、スターラップの平均ひずみ ε と繰り返し回数 log N (疲労試験時の荷重振幅の最大荷重時 P<sub>max</sub> および最小荷重時 P<sub>min</sub>) の関係も示す。

図-5、図-6より、スターラップのひずみは、繰り返し回数の増加に伴い増加する傾向があることが伺える。また、残留ひずみも、図-5より増加している。図-6には、文献<sup>1)</sup>に示されている平均ひずみの計算値 ε<sub>maxcal</sub> (最大荷重 P<sub>max</sub> 時) も示した。これより、本試験体のひずみの実測値は、文献<sup>1)</sup>の計算値に比較し増加傾向はほぼ類似しているが、値は計算値よりもやや低くなっている。

(a) F 2 試験体



(b) F 4 試験体



(c) F 10 試験体

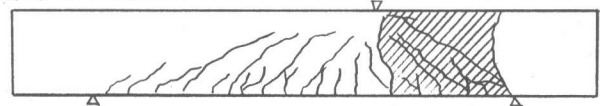


図-2 破壊後のひびわれ状況

### 3. 4 セン断ひびわれの挙動

セン断ひびわれに関して、コンタクトゲージによりひびわれ幅を測定した。試験体F4のセン断力V-ひびわれ幅wとの関係を図-7に、ひびわれ幅の測定位置におけるスターラップのひずみとひびわれ幅の関係を図-8に示す。また、セン断ひびわれ幅wと繰り返し回数log Nとの関係を図-9に示す。なお、測定に際して、図-9に示しているように載荷点よりL側2本目のスターラップのひずみゲージを取り付けた位置付近に生じたセン断ひびわれに着目している。

図-7~9より、セン断ひびわれ幅は、荷重の繰り返しに伴い増加しており、30万回時に0.35mmに広がっている。また、ひびわれ位置と同位置にあるスターラップのひずみも、荷重の繰り返しに伴い増加傾向にある。

また、セン断ひびわれ幅の計算方法の一例として、CEBモデルコード<sup>3)</sup>による方法があり、これによった計算値を図-8に示した。このとき、スターラップのひずみは、実測ひずみを用いて計算している。図-8より、計算値は、 $N=10^3$  回でのひびわれ幅と比較的傾向が一致しているものの、繰り返し回数の増加に伴い、実測ひびわれ幅は、計算値よりかなり大きくなるようである。

### 3. 5 コンクリートの疲労耐力

今回実施した試験において、コンクリートのセン断疲労破壊が生じることが観察された。しかし、当初スターラップの疲労を想定して行った試験であるため、コンクリートの疲労に着目していなかった。そこで、ここではコンクリートの曲げ圧縮

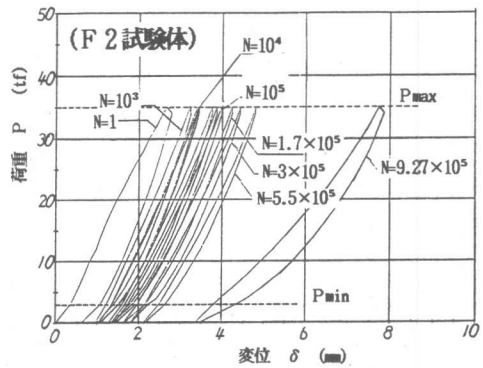


図-3 荷重-載荷点の変位

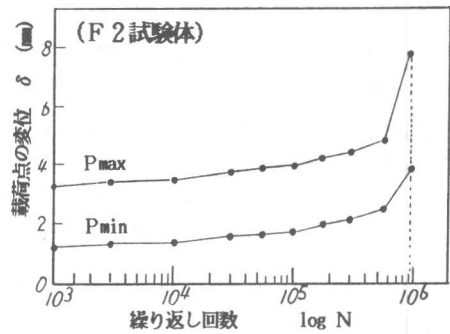


図-4 載荷点の変位-繰り返し回数

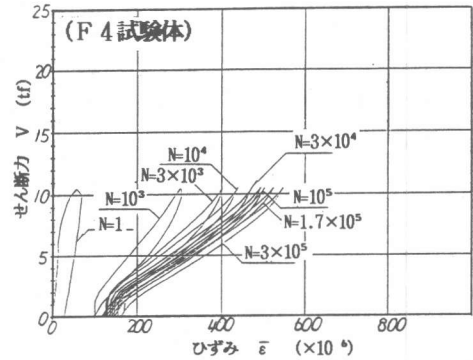


図-5 セン断力-スターラップのひずみ

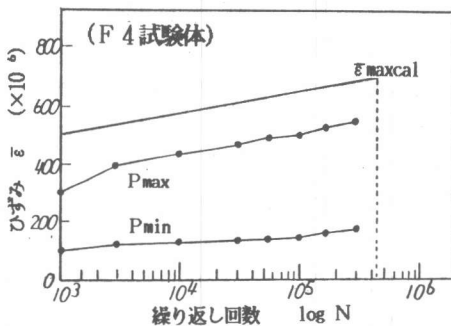


図-6 スターラップのひずみ-繰り返し回数

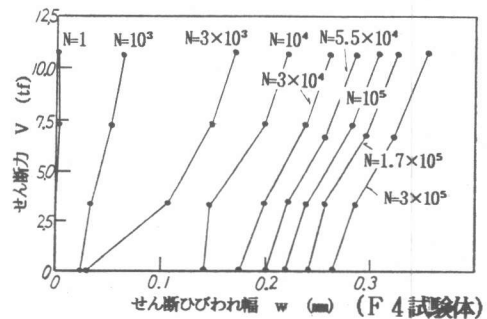


図-7 セン断力-セン断ひびわれ幅

疲労耐力と実験値との比較を行ってみた。なお、曲げ圧縮疲労に関する計算は、文献<sup>3)</sup>を参考にして、鉄筋およびコンクリートの応力-ひずみ曲線（非線形）を仮定し、コンクリートの応力分布を求め、これと等価な矩形応力ブロックを求め、一軸圧縮疲労強度と比較した。

その結果を図-10に示す。なお、参考として文献<sup>4)</sup>によるはりの曲げ圧縮疲労試験結果も比較のため示した。図-10より、実測値/計算値 ( $P_{test}/P_{cal}$ ) は、今回の試験において1.0付近に分布している。しかし、実測値/計算値が70%程度で破壊したF13試験体があることや破壊モードがコンクリートのせん断疲労破壊であり、コンクリートの曲げ圧縮疲労破壊とは異なることから、コンクリートがせん断疲労破壊する場合の疲労耐力の算定方法については、今後さらに検討することが必要と考えられる。

### 3.6 スターラップのせん断疲労耐力

スターラップの疲労破断により破壊した試験体6体 (F2~6, 9) について、文献<sup>1)</sup>に示された計算方法による実測の繰返し回数に対応する荷重 ( $P_{cal}$ ) と載荷荷重 ( $P_{test}$ ) との比較を図-11に示す。なお、計算に用いた鉄筋の疲労強度は、次の値を用いている。<sup>5)</sup>

$$f_r = f_{min} + (1 - f_{min} / f_B) \cdot 10^a / N^K \cdot 10.197$$

ここで、 $f_r$  : 鉄筋の疲労強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$f_{min}$  : 最小応力

$f_B$  : 鉄筋の引張強度

$a = 3.17 - 0.003 \phi$

$K = 0.12$

$\phi$  : 鉄筋の径 (mm)

図-11より、今回の試験において  $P_{test}/P_{cal}$  が1.0よりかなり小さくなっており、文献<sup>1)</sup>と同様にスターラップの疲労強度は、鉄筋母材の疲労強度よりも低下する結果となった。しかし、計算では全てL側での破壊を想定していたが、R側での破壊が4体生じており、その  $P_{test}/P_{cal}$  もかなり小さいことから、今後  $a/d$  等の違いについて検討を行う必要があると思われる。

コンクリート標準示方書に規定されている応力

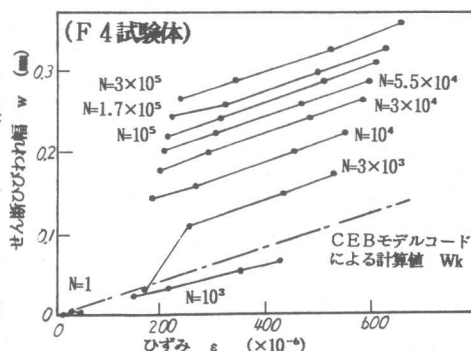


図-8 せん断ひびわれ幅-スターラップのひずみ

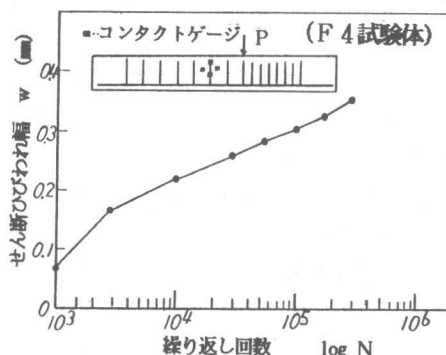


図-9 せん断ひびわれ幅-繰返し回数

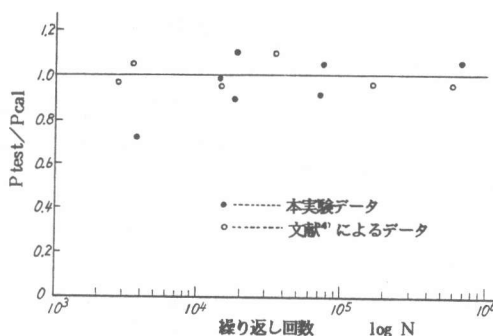


図-10  $P_{test}/P_{cal}$  - 繰返し回数

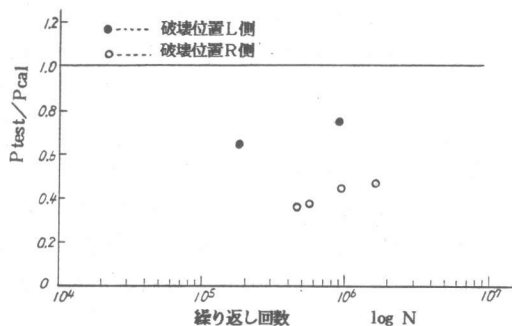


図-11  $P_{test}/P_{cal}$  - 繰返し回数

度の計算式を基に求めた各試験体の計算応力度  $f_r$  と破壊回数  $\log N$  の関係を図-12に示す。図-12には、コンクリート標準示方書で規定されている鉄筋母材の設計疲労強度 ( $\phi=10\text{mm}$ ) および母材50%低減値も示した。なお、示方書では、スターラップのように折り曲げた鉄筋に対しては母材の疲労強度の50%に低減することとしている。

図-12より、示方書に示されている鉄筋母材の設計疲労強度と比較しやや下回るが、50%の低減値に対しては十分安全側となっている。

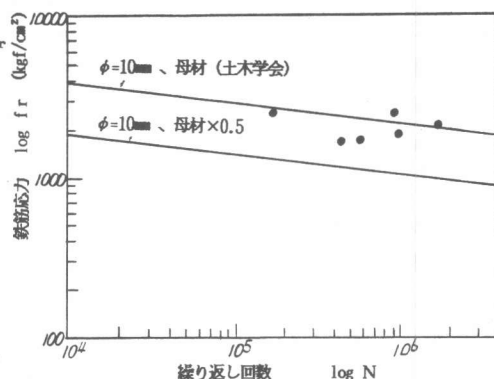


図-12 応力-繰り返し回数

#### 4. まとめ

スターラップを有する矩形断面はりのせん断疲労試験の結果および考察から、明らかとなった主な点を列記する。

(1) 今回行った試験範囲において、試験体の破壊形式として、スターラップの疲労によりせん断破壊したものおよびスターラップが疲労破壊せず、コンクリートの疲労破壊によりせん断破壊したものに分類された。

(2) 疲労の影響を受けるはりのせん断ひびわれ幅は、荷重の繰り返しに伴い増加傾向が著しくせん断ひびわれ幅の算定方法に繰り返しの影響を評価することが必要である。

(3) スターラップが疲労強度は文献<sup>1)</sup>と同様に低下する結果となったが、 $a/d$ や配筋等の違いについて検討を行う必要があると思われる。

(4) スターラップが疲労破壊する場合の疲労強度の設計値として、コンクリート標準示方書に規定されている値は十分安全側の規定であると思われる。

なお、スターラップの疲労強度に対して、スターラップの間隔、試験体の形状、有効高さ等の各種要因を考慮した実験データを基とした検討をさらに要すると思われる。

#### 5. おわりに

技術基準整備の一環として本実験を行ったが、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「鉄道技術基準整備に関する調査研究」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次第である。

#### [参考文献]

- 1) T.UEDA, H.OKAMURA: Behavior in Shear Reinforced Concrete Beames under Fatigue Loading, Concrete Library of JSCE, No.2, Dec. 1983, pp.37~69
- 2) コンクリート標準示方書、設計編、土木学会、1986.10
- 3) コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)、コンクリートライブラリー第52号、土木学会、昭和58年11月、pp.285~300
- 4) 西林新蔵、井上正一、加古達: RCはりの曲げ疲労特性について、土木学会第36回年次学術講演会概要集、1981、pp.410~41
- 5) 二羽淳一郎、前田詔一、岡村甫: 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、pp.73~79