

論文

[2056] セン断補強鉄筋を有するRCはりの疲労設計

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 宮 本 征 夫 (鉄道総合技術研究所)

1. はじめに

セン断補強鉄筋を有する鉄筋コンクリートはりのセン断疲労強度に関しては、折り曲げた鉄筋の疲労強度が鉄筋母材より大きく低下することから、セン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。

セン断補強鉄筋の疲労強度については、文献^{2) 3)}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、十分な試験データに基づいたものではないことから、本研究では、過去2年間においてスターラップに生じるひずみと疲労強度の関係およびセン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してきた。^{4) 5)}さらに、今回スターラップと折曲げ鉄筋を併用したはりの試験を実施しセン断疲労強度の検討を行った。本論文では、今回実施したスターラップと折曲げ鉄筋を併用したはりの試験結果を報告するとともに、これまでの試験結果に基づき、設計上の取り扱い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、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に示すく形断面とし、セン断スパン内のスターラップ及び折曲げ鉄筋はそれぞれ等間隔に配置し、その配置間隔および鉄筋比等を表-1に示す。試験体の配筋方法としては、セン断補強鉄筋量及びスターラップと折曲げ鉄筋の配置量のバランス等を変化させて設計している。なお、スターラップは、部材軸に対して垂直に配置し、折曲げ鉄筋は45°の角度で配筋している。

使用したコンクリートは、表-2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6か月である。なお、各試験体のコンクリート圧縮強度を表-1に示す。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-3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。また、折曲げ鉄筋の曲げ内半径は、鉄筋直径の5倍とした。

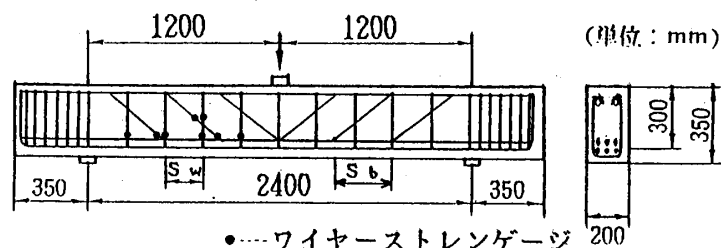


表-3 使用鋼材の強度特性

| 鋼材 | φ mm | 降伏点 kgf/cm ² | 引張強度 kgf/cm ² |
|----|---------|----------------------------|-----------------------------|
| 鉄筋 | 6 | 3790 | 5380 |
| | 10 | 3910 | 5440 |
| | 25 | 3600 | 5200 |

表-1 試験体の種類

| 試験体 No. | せん断補強鉄筋 | | | | | | 軸方向 鉄筋 As cm ² | コンク リート 強度 f'c kgf/cm ² |
|------------|---------|-----|-------|-------|------|-------|------------------------------------|--|
| | スターラップ | | | 折曲げ鉄筋 | | | | |
| | γ% | φmm | sw cm | γ% | φmm | sb cm | | |
| H 1 | 0.11 | D 6 | 30.00 | 0.13 | D 6 | 17.14 | 25.3/D25 | 291 |
| H 2 | 0.11 | D 6 | 30.00 | 0.19 | D 6 | 12.00 | 25.3/D25 | 294 |
| H 3 | 0.11 | D 6 | 30.00 | 0.19 | D 6 | 12.00 | 25.3/D25 | 308 |
| H 4 | 0.18 | D 6 | 17.14 | 0.13 | D 6 | 17.14 | 25.3/D25 | 295 |
| H 5 | 0.18 | D 6 | 17.14 | 0.13 | D 6 | 17.14 | 25.3/D25 | 310 |
| H 6 | 0.18 | D 6 | 17.14 | 0.19 | D 6 | 12.00 | 25.3/D25 | 297 |
| H 7 | 0.11 | D 6 | 30.00 | 0.25 | D 10 | 20.00 | 25.3/D25 | 299 |
| H 8 | 0.18 | D 6 | 17.14 | 0.25 | D 10 | 20.00 | 25.3/D25 | 301 |
| H 9 | 0.16 | D 6 | 20.00 | 0.11 | D 6 | 20.00 | 25.3/D25 | 304 |
| H 10 | 0.21 | D 6 | 15.00 | 0.15 | D 6 | 15.00 | 25.3/D25 | 305 |
| H 11 | — | — | — | 0.17 | D 10 | 30.00 | 25.3/D25 | 313 |

(注) $r\% = A_w / b \cdot s_w$ 、 $r_b = A_b (\sin \theta + \cos \theta) / b \cdot s_b$
 A_w : スターラップの断面積 b : 腹部の幅
 s_w : スターラップのピッチ ϕ : 鉄筋径
 A_b : 折曲げ鉄筋の断面積 θ : 折曲げ鉄筋と部材軸との角度
 s_b : 折曲げ鉄筋のピッチ

表-2 コンクリートの配合

| 単位量 kg/m ³ | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤 |
|--------------------------|-----|------|-----|------|------|
| | 162 | 300 | 810 | 1029 | 0.75 |

表-4 疲労試験結果

| 試験体 No. | 載荷荷重 | | 繰り返し 回数 Nu ×10 ³ | せん断 ひびわれ 発生荷重 tf |
|------------|------------|------------|--------------------------------------|---------------------------|
| | Pmin tf | Pmax tf | | |
| H 1 | 3.0 | 20.0 | 114.8 | 15.0 |
| H 2 | 3.0 | 20.0 | 246.6 | 14.0 |
| H 3 | 6.0 | 20.0 | 743.8 | 13.0 |
| H 4 | 3.0 | 20.0 | 793.0 | 14.0 |
| H 5 | 6.0 | 20.0 | 3070.1 | 13.0 |
| H 6 | 3.0 | 20.0 | 599.9 | 10.0 |
| H 7 | 3.0 | 20.0 | 519.7 | 12.0 |
| H 8 | 3.0 | 20.0 | 1009.5 | 14.0 |
| H 9 | 3.0 | 20.0 | 508.2 | 15.0 |
| H 10 | 3.0 | 20.0 | 1295.0 | 15.0 |
| H 11 | 2.0 | 13.4 | 349.7 | 10.0 |

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等とした。ひずみの測定には、ワイヤーストレンゲージ（測長 3mm）を使用し、図-1 に示すように片側のせん断スパン内全てのスターラップ及び折曲げ鉄筋に貼付した。貼付位置は、曲げ加工位置より 35~40mm 上方の曲げ内面と外面に対称にそれぞれ貼付した。さらに、せん断スパン中央付近のスターラップ及び折曲げ鉄筋のはり図心位置にもワイヤーストレンゲージを貼付した。

載荷方法は、1 点集中荷重（載荷板の幅 10cm）とし、 a/d を 4 の対称載荷とした。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、スターラップ及び折曲げ鉄筋のひずみ等の測定を実施した。

3. 試験結果

表-4 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) 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 (Vc) 以上の荷重を上限荷重としており、せん断力によるひびわれが処女載荷時に生じるようにした。

破壊は、試験体すべて鉄筋の破断によるせん断破壊であった。スターラップ及び折曲げ鉄筋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、多数本の鉄筋が破断した試験体では、一部の鉄筋に絞り切れによる破断面も見られた。鉄筋の疲労破断位置は、各試験体ともにせん断破壊面に沿って集中していた。1 試験体当たりの疲労破断した鉄筋の本数は、せん断補強鉄筋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いた。

スターラップが破断した位置は、軸方向鉄筋を囲む曲げ加工された部分とそのやや上側に多く見られ、試験終了後の調査では、疲労破断したと見られる箇所数が H11 を除く 10 体の合計で 67 箇所

所あり、うち45箇所が曲げ加工された付近であった。また、折曲げ鉄筋の場合も、スターラップと同様に曲げ加工された付近に破断が多く見られ全体で疲労破断箇所数57箇所のうち31箇所であった。

4. セン断補強鉄筋のひずみと疲労強度

試験では、曲げ加工された鉄筋のやや上方の曲げ内外面にワイヤーストレンゲージを貼付していることから、曲げ内面のひずみと曲げ内外面の平均ひずみの比較を行ってみた。図-2は、静的試験（処女荷重）における最大荷重時のスターラップ及び折曲げ鉄筋の曲げ内面のひずみと曲げ内外面の平均ひずみの比を各試験体について示したものである。図に示されるように、スターラップ及び折曲げ鉄筋ともに曲げ内面のひずみが、平均ひずみに対して約1.4倍程度となっている。このことは、曲げ加工された鉄筋の疲労強度が低下すること及び疲労き裂が曲げ加工の内側から発生進展する一つの理由と考えられる。なお、曲げ内半径の異なるスターラップと折曲げ鉄筋では、大きな差は今回の試験結果からは認められなかった。

図-3にH5試験体のセン断スパン中央付近の断面図心位置にあるスターラップ及び折曲げ鉄筋各1本のひずみ（折曲げ鉄筋の疲労上限荷重及び下限荷重時のひずみ ε_{bmax} 、 ε_{bmin} 、スターラップのひずみ ε_{wmax} 、 ε_{wmin} ）と繰返し回数（ $\log N$ ）の関係を示す。

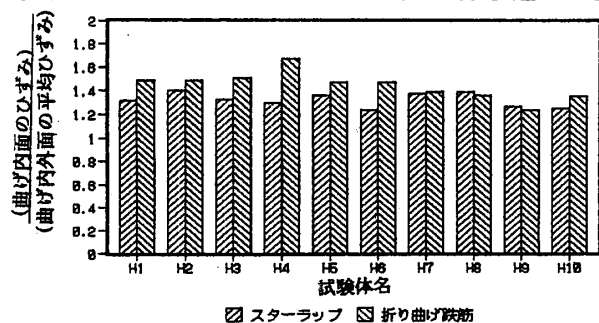


図-2 曲げ内外面のひずみ

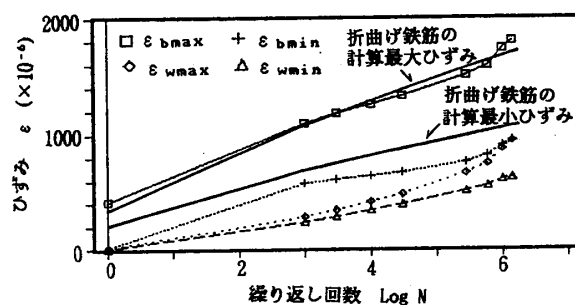


図-3 繰返しによる鉄筋のひずみ変化

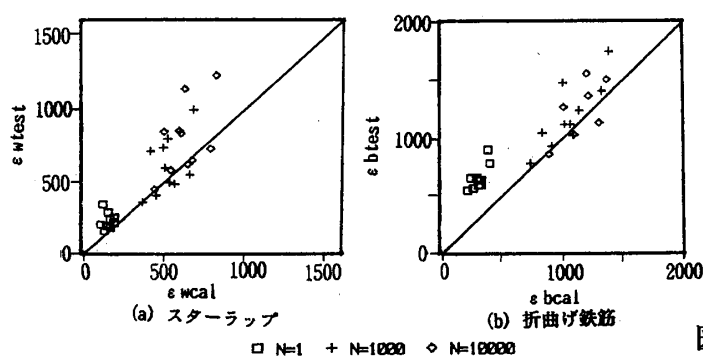


図-4 計算ひずみと実測ひずみ

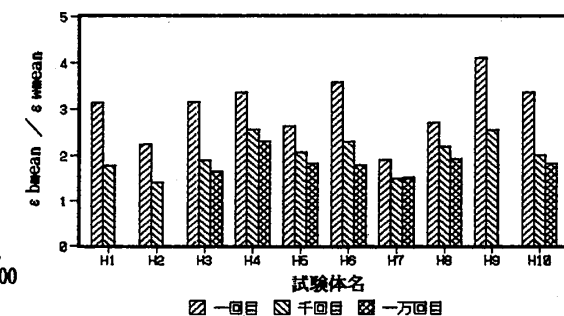


図-5 折曲げ鉄筋とスターラップの平均ひずみの比較

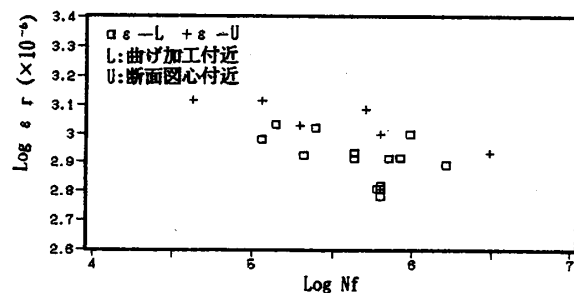


図-6 鉄筋破断時の回数とひずみ振幅

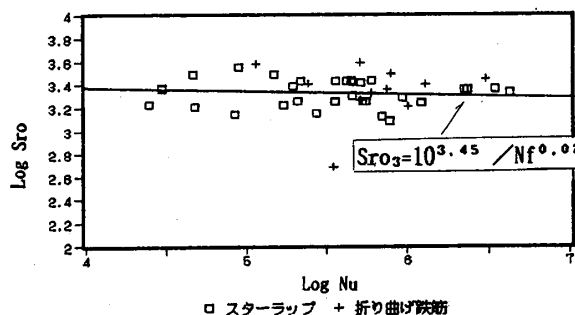


図-7 部材破壊時の回数と計算振幅応力度

なお、図-3に示したひずみ測定位置には、丁度せん断ひびわれが交差している。

図-3より、スターラップ及び折曲げ鉄筋両方のひずみは繰返しに伴い増加し、折曲げ鉄筋のひずみは同位置のスターラップのひずみより2倍からそれ以上の値が測定されていることがうかがえる。なお、図-3には、文献³⁾に示されている折曲げ鉄筋の計算値(5.(1)式参照)を併せて示したが、この測定値に対してほぼ一致する結果となった。

ひずみ測定結果をもとに、スターラップ及び折曲げ鉄筋それぞれについて、最大荷重載荷時の実測ひずみ($\varepsilon_{w\text{ test}}$ 及び $\varepsilon_{b\text{ test}}$)と計算ひずみ($\varepsilon_{w\text{ cal}}$ 及び $\varepsilon_{b\text{ cal}}$)との関係を図-4に示す。ひずみ量の計算値は、同様に文献³⁾の方法によっている。なお、図では、繰返し回数 $N=1$ 回1000回、10000回ごとに示した。図-4より、実測ひずみは、やや計算値よりも大きめであるものの、計算方法としてはほぼ妥当な結果が得られているものと考えられる。なお、ここで求めた計算値は、文献³⁾で示されている β_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。

図-5に各試験体ごとの折曲げ鉄筋とスターラップの実測平均ひずみの比($\varepsilon_{b\text{ mean}}/\varepsilon_{w\text{ mean}}$)の関係を示す。ここで、実測平均ひずみは、曲げ加工付近に貼付したワイヤーストレンゲージの全部の平均としている。図-5より、 $N=1$ 回目においては、 $\varepsilon_{b\text{ mean}}/\varepsilon_{w\text{ mean}}$ の値は、3倍あるいはそれ以上となっているものの、繰返し回数の増加とともに減少し、約2倍程度に収束する傾向が見られる。

さらに、ひずみの静的測定より、スターラップまたは折曲げ鉄筋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ひずみの振幅($\log \varepsilon_r$)と破断時の繰返し回数($\log N_f$)の関係を図-6に示す。図-6では、曲げ加工付近のひずみ($\varepsilon-L$)及び断面図心付近のひずみ($\varepsilon-U$)を区別して示した。図より、曲げ加工付近で疲労破断した鉄筋のひずみは、断面図心付近で疲労破断した鉄筋のひずみに対して小さな値となっていることがわかる。このことは、図-2で述べたように曲げ内面のひずみが曲げ加工内外面の平均ひずみより大きいことや曲げ加工による残留ひずみの影響等が原因しているものと考えられる。

5. 折曲げ鉄筋とスターラップを併用したはりのせん断疲労強度

4. では、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、せん断補強鉄筋の配置方法によっても異なるが、1本のせん断補強鉄筋が疲労破断しても、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。

検討にあたって、折曲げ鉄筋の応力度計算 S_r には、次の方法で求めることとした。

$$S_r = (V_{\max} - V_c 10^a) / (A_w Z / s_w + \sqrt{2} A_b Z / s_b) \cdot V_r / (V_{\max} + V_c) \quad \text{----- (1)}$$

$$V_c = 0.94 \beta_d \beta_p f_c'^{1/3} b_w d$$

ここで、 S_r : 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 ($=V_{\max}-V_{\min}$)、 V_c : コンクリートが分担するせん断力

$\beta_d = (100/d)^{1/4}$ 、 $\beta_p = (100P_w)^{1/3}$ 、 $P_w = A_s/(b_w d)$ 、 A_s : 軸方向鉄筋の断面積

A_b 、 A_w : 1本の折曲げ鉄筋および1組みのスターラップの断面積

s_b 、 s_w : 折曲げ鉄筋およびスターラップの配置間隔

f_c' : コンクリートの圧縮強度、 $Z = d/1.15$ 、 d : 有効高さ

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

この方法は、文献³⁾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。上式にもとづいて求めた変動応力度を完全片振り時の応力度 S_{ro} に換算して、部

材破壊時の繰返し回数 N_u との関係を両対数座標軸で示した結果を図-7に示す。なお、データとしては、折曲げ鉄筋を用いた試験の他文献^{1) 2) 3)}のスターラップのみを用いた試験結果(表-5)及び全データの回帰式も併せて示した。図-7より、折曲げ鉄筋とスターラップを併用したはり(図中+印)のせん断疲労強度は、スターラップのみを用いたはり(図中□印)の試験結果と比較し、1体を除きわずかに大きいようであるが、明確な差は見られなかった。なお、非常に小さな値を示した試験体(H11試験体)は、折曲げ鉄筋の配置間隔が広く(30cm)、スターラップを用いていない試験体であり、このような配筋方法のため部材の疲労破壊が早く生じたものと思われる。

6. はりのせん断疲労強度の推定

ここでは、はりのせん断疲労破壊に着目し、その推定を行うこととする。取り扱うデータは、表-5に示す試験データ40体を用いた。はりとしての疲労強度の評価にあたって影響すると予想される要因として、スターラップの配置方法の違い(配置間隔 s_w 及び補強量 τ_w)に着目し、 S_{ro}/f_r との関係を検討した(図-8、9)。

なお、 f_r は、文献⁶⁾をもとに次式を用いた。

$$f_r = (1 - f_{min}/f_u) \cdot 10^4 / N^{0.12} \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 f_r :鉄筋母材の疲労振幅強度(kgf/cm²)、 f_{min} :最小応力度、 f_u :鉄筋の引張強度

$$\alpha = 4.16 - 0.003 \phi, \quad \phi: \text{鉄筋径}$$

図-8において、 s_w/d が小さくなると、 S_{ro}/f_r の値が大きくなる傾向が見られている。一方、図-9では τ_w の違いによる明確な傾向が見られていない。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るため、はりとしては破壊に至らなかったためと考えられる。

図-8の結果をもとに、部材の疲労強度を s_w/d の違いにより $f_r' = f_r(1 - 0.57 s_w/d)$ と仮定し、試験値を再整理した結果(S_{ro}/f_r' は平均値 $\mu_1 = 1.04$ 、変動係数 $\delta_1 = 15.0\%$)を図-10に示す。なお、設計上の取り扱いとしては、鉄筋母材の疲労強度の推定精度(平均値 $\mu_2 = 1.0$ 、変動係数 $\delta_2 = 9.6\%$)⁶⁾の違いおよびスターラップの最大間隔を構造細目において、

表-5 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 d (cm) | a/d | f _c ' (kgf/cm ²) | p _t (%) | スターラップ | | |
|-----|------|------|---------------|------|--|--------------------|--------------|------------|-------------|
| | | | | | | | τ_w (%) | s_w (mm) | ϕ (mm) |
| 1) | 21 | く, T | 20~30 | 2, 4 | 313~374 | 2.5, 5.1 | 0.11~1.48 | 80~300 | 6, 10, 13 |
| 2) | 10 | く形 | 22 | 2.5 | 190~359 | 1.7, 3.1 | 0.26, 0.63 | 135, 185 | 10, 13 |
| 3) | 9 | T形 | 43.5 | 2 | 248~304 | 3.5 | 0.95 | 75 | 10 |

(注) a/dの値は、破壊した側の値を示す。
p_t: 軸方向鉄筋比

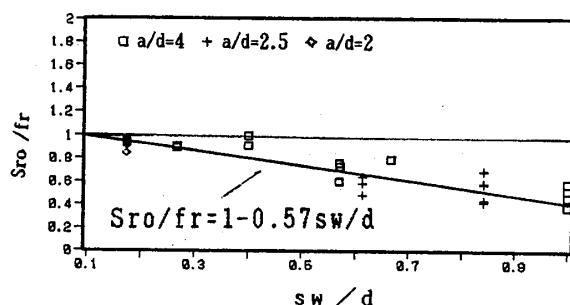


図-8 スターラップの配置間隔の影響

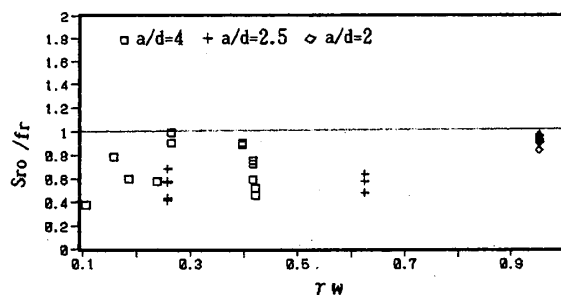


図-9 スターラップの補強量の影響

有効高さの $1/2$ 以下としていることから、スターラップの疲労強度を鉄筋母材の設計疲労強度 f_{rd} に対する低減率は、次のように求められる。

$$\frac{\mu_1 (1 - 1.645 \delta_1)}{\mu_2 (1 - 1.645 \delta_2)} (1 - 0.57 s_w/d) \approx 0.65$$

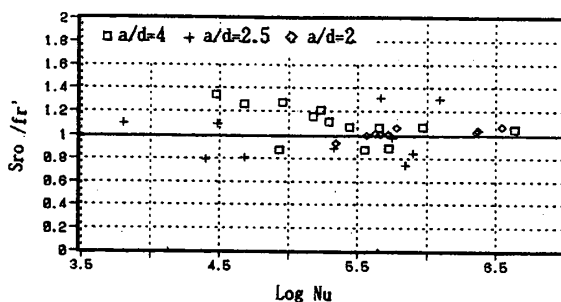


図-10 s_w/d の影響を考慮した疲労強度の推定

7. 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) 曲げ加工されたせん断補強鉄筋の曲げ内面のひずみは、内外面の平均ひずみに対して1.4 倍程度となっているが、曲げ内半径の異なるスターラップと折曲げ鉄筋とで大きな差は今回の試験結果からは見られなかった。
- (2) 曲げ加工付近の疲労強度と断面図心付近の直線部の疲労強度とでは、曲げ加工部のほうが小さく、(1) に示した曲げ内面のひずみや残留ひずみによる影響と予想される。
- (3) 部材のせん断疲労強度の評価において、スターラップの配置間隔が密になると部材のせん断疲労強度が上がる傾向がある。これを鉄筋母材の疲労強度式に考慮することにより、部材のせん断疲労強度をほぼ妥当に評価することができる。
- (4) 設計上、部材の疲労強度を検討する場合には、構造細目を満足することを条件に、スターラップの疲労強度を鉄筋母材の65%とするのがよいと考える。

8. おわりに

せん断補強鉄筋を有するはりの疲労強度について、各種試験結果をもとに考察を行った。試験結果を実構造物の設計に考慮する場合、1本の鉄筋の破断を限界状態とするか、部材の破壊を限界状態とするかは、設計する構造物によって異なるものと思われる。しかし、実構造物レベルでは、せん断ひびわれが使用状態で顕著とならない設計を行っていること、構造細目上、スターラップは、部材高さに比較し小間隔で多数本配置されること等を考慮して部材の破壊を限界状態として設計してもよいと思われる。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はりのせん断疲労強度、鉄道総研報告、vol.4、No.1、1990.1
- 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) 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
- 5) 佐藤、斉藤、寺田、宮本：スターラップを有するRCはりの疲労強度、第11回コンクリート工学年次講演会論文集、1989
- 6) 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