

## 論文 繰返し荷重を受ける SRC はりのせん断疲労挙動

佐藤 勉\*<sup>1</sup>・築嶋大輔\*<sup>2</sup>

要旨：鉄骨鉄筋コンクリートはりのせん断疲労試験に基づき、充腹型の鉄骨とスターラップの繰返し荷重下での応力度変化に着目して、はりのせん断疲労設計について考察した。その結果、繰返しの増加により、コンクリートの負担せん断力は減少するが、その減少分を鉄骨とスターラップの両方で分担することを明らかとした。また、鉄骨およびスターラップの繰返しに伴う応力度の算定方法として、鉄筋コンクリートはりの算定式を基本に鉄骨鉄筋コンクリートはりへ拡張した算定式を提示するとともに、試験値との検証を行い鉄骨およびスターラップの応力度を比較的精度よく推定できることを示した。

キーワード：鉄骨鉄筋コンクリート、疲労、せん断、応力度変化

## 1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRC）はりのせん断疲労については、繰返しによる応力度の変化を求めれば、せん断補強鉄筋や鉄骨のそれぞれの材料疲労強度を用いて設計が可能となる。鉄筋コンクリート（以下、RC）はりでは、繰返し荷重下におけるスターラップの応力度の算定式が文献[1]により示されている。文献[1]によると、コンクリートが負担するせん断力は、繰返し回数の増加とともに減少すること、またそれに伴いスターラップの応力度は、繰返し回数の対数に比例して増加すること等をもとに、RCはりのスターラップ応力度算定式が導かれている。

SRCはりにおいて、RCと同様な仮定に基づくとした場合、鉄骨とスターラップの荷重分担率および繰返しに伴うコンクリートが負担するせん断力の減少分を鉄骨とスターラップでどのように分担されるかなどを明らかにする必要がある。そこで、本論文は、充腹型SRCはりの繰返し載荷試験を実施し、主として鉄骨とスターラップの応力度変化に着目して、設計に用いる算定式を検討するものである。

## 2. 試験の概要

試験体は、5体製作し、図-1に示す形状および配筋で、鋼材については表-1のとおりとした。鋼材は、鉄骨（SM400A）、鉄筋（SD295A）を使用した。鉄骨は、鋼板を削り所定の板厚に平面加工し、溶接により組み立てた。鉄筋および鉄骨の試験強度一覧を表-2に示す。試験時のコンクリート圧縮強度は、試験体I-1：36.8N/mm<sup>2</sup>、I-2：34.9N/mm<sup>2</sup>、I-3：36.2N/mm<sup>2</sup>、I-4：36.2N/mm<sup>2</sup>、I-5：36.8N/mm<sup>2</sup>であった。

測定項目は、試験体各断面における鉄骨および鉄筋のひずみを主体とし、測定位置は、図-1のとおりとした。測定は、繰返し回数 $N=1, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 2 \times 10^6$ 回で、静的載荷により0～疲労上限荷重まで10kNピッチで測定した。載荷装置は、油圧サーボ疲労試験機（±500kN）を使用し、中央1点載荷で、繰返し荷重（3Hz程度）を載荷した。

なお、所定の荷重レベルで200万回繰返し載荷後、静的載荷で破壊させた。

\*1) (財) 鉄道総合技術研究所 橋梁担当主任技師 (正会員)

\*2) (財) 鉄道総合技術研究所 橋梁担当技師 (正会員)

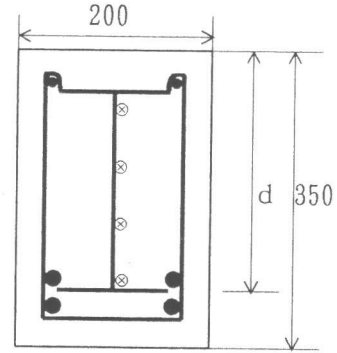
表-1 試験体の鋼材寸法および諸元

No.	鉄骨形状 (mm)				軸方向鉄筋	有効高さ d (mm)
	H × B × h × t × t <sub>f</sub>					
I-1	150 × 75 × 138 × 4.5 × 6				D25 × 4本	287.5
I-2	200 × 100 × 188 × 4.5 × 6				D25 × 4	279.5
I-3	212 × 100 × 188 × 4.5 × 12				D25 × 4	279.5
I-4	228 × 100 × 188 × 4.5 × 20				D25 × 2	302.0
I-5	- (RC)				D25 × 6	287.5

H:鉄骨全高、B:フランジ幅、h:ウェブ高、t:ウェブ厚、t<sub>f</sub>:フランジ厚

表-2 鉄筋および鉄骨の強度特性 (N/mm<sup>2</sup>)

鋼材強度	鉄筋			鉄骨			
	D25	D13	D10	t <sub>f</sub> =20	t <sub>f</sub> =12	t <sub>f</sub> =6	t=4.5
降伏	352.8	382.8	389.7	289.8	289.8	338.8	269.8
引張	540.7	534.6	526.7	437.7	437.7	455.7	435.7



⊗:鉄骨3方向ゲージ (I-2試験体断面)

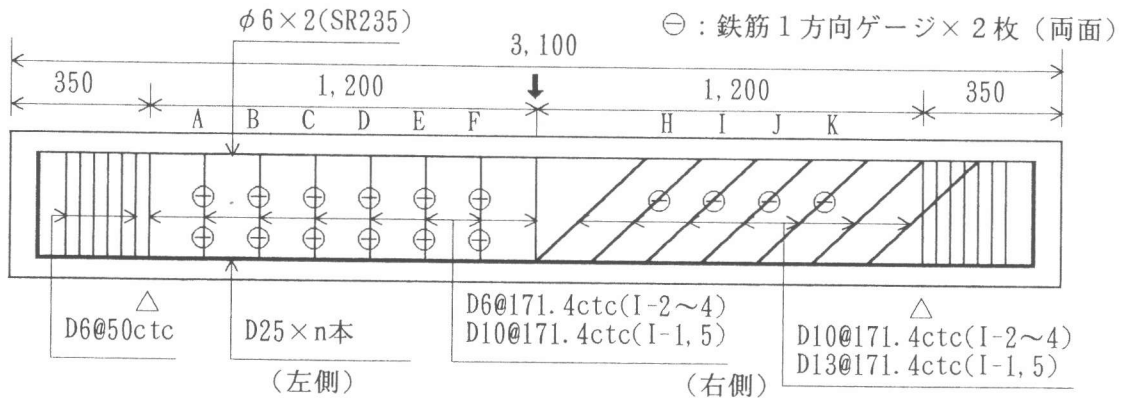


図-1 試験体の配筋および測定位置 (mm)

### 3. 試験結果

#### (1) 破壊荷重および破壊位置

繰返し載荷試験における作用せん断力、ひび割れ発生および静的破壊時のせん断力等を表-3に示す。繰返し載荷試験時の作用せん断力の上限  $V_{max}$  は、式(1)より求まる  $V_c$  以上を目安として定めた。なお、目視観察で確認したせん断ひび割れは、 $V_c$  より低いせん断力で発生したものが見られるが、試験前に微細な収縮ひび割れが生じていたことによる影響と考えられる。

$$V_c = 0.2 \beta_d \beta_p f'_c{}^{1/3} b d \quad (N) \quad (1)$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4}, \beta_p = (100 p_t)^{1/3}, f'_c: \text{コンクリートの圧縮強度 (N/mm}^2\text{)}$$

b: 腹部幅(mm)、d: 有効高さ(mm)、p<sub>t</sub>: 軸方向引張鉄筋比

破壊は、最終的には、軸方向鋼材の降伏後、せん断ひび割れ面に沿う上方のコンクリート圧縮部が破壊した。今回の試験体は、ひずみ挙動の違いを測定するため、はりの左側を鉛直スターラップでせん断補強し、右側を45度傾斜スターラップでせん断補強し、右側のスターラップの直径を太くして配置した。このため、破壊はすべてスパン中央より左側で破壊した。

表-3 試験結果

(kN)

試験体	作用せん断力		計算値 V <sub>c</sub>	曲げひび割れ発生 時の作用せん断力	せん断ひび割れ発生時の作用せん断力		静的試験による 破壊時のせん断力	破壊 位置
	V <sub>max</sub>	V <sub>min</sub>			左側	右側		
I-1	98	29.4	79.5	29.4	58.8	39.2	180.8	左側
I-2	98	29.4	77.2	19.6	58.8	63.7	200.9	左側
I-3	137	39.2	78.0	29.4	68.6	78.4	230.8	左側
I-4	98	29.4	64.0	19.6	78.4	68.6	211.7	左側
I-5	98	29.4	91.0	29.4	58.8	39.2	182.3	左側

(2) スターラップのひずみ変化

試験体I-2(SRC)およびI-5(RC)の繰返しによるスターラップの平均ひずみ(最大荷重時)の変化を図-2、3に示す。スターラップの平均ひずみは、試験体左側の鉛直スターラップの下部のひずみゲージ測定値(図-1に示すB~E断面)の平均値とした。

スターラップのひずみは、RCでは繰返しの増加に伴い一般に増加する傾向があるが、SRCの場合についても、図-2に示すようにひずみの増加傾向がうかがえる。しかし、図-3と比較するとSRCとRCとでやや異なる挙動も見られる。これは、SRCの場合、鉄骨の配置により繰返しに伴うコンクリートの負担分 $V_c$ の減少分を鉄骨が一部受け持つため、繰返しによるスターラップのひずみ増加がRCより小さくなったものと考えられる。

(3) 鉄骨の負担せん断力およびスターラップのひずみ

試験体I-2について、作用せん断力に対する鉄骨の負担せん断力 $V_s$ との関係を図-4に示す。鉄骨の負担せん断力 $V_s$ は、鉄骨に貼付した3方向ひずみゲージ(E断面)より、せん断ひずみを求めせん断力に換算したものである。

その結果、1回目の载荷において、荷重の増加とともに、鉄骨の負担せん断力は増加するが、せん断ひび割れが生じて以降、鉄骨の負担せん断力はより大きくなる傾向が見られる。また、繰返しに伴い負担せん断力はさらに増加するが、これは、コンクリートの負担せん断力 $V_c$ が繰返しとともに低下するのにあわせ、鉄骨の負担せん断力 $V_s$ が増加するためと考えられる。

試験体I-2について、作用せん断力 $V$ とスターラップのひずみ $\epsilon_w$ (E断面の上側のひずみゲージ)との関係を図-5に示す。スターラップのひずみは、せん断ひび割れが生じるまではほとんど変化しないが、作用せん断力 $V$ が $V_c$ を超える付近からひずみは増加する傾向が見られる。また、繰返しの増加に伴いスターラップのひずみも増加している。

図-4および5より、繰返し回数の増加により、コンクリートの負担せん断力 $V_c$ は減少するが、その減少分は鉄骨とスターラップ両方で分担するものと考えられる。

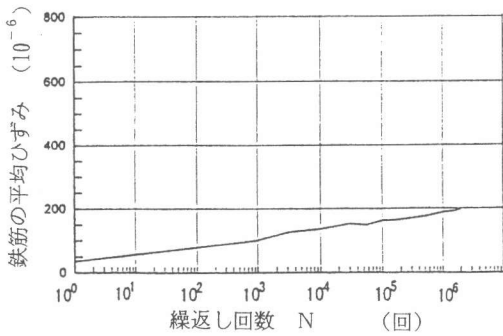


図-2 スターラップのひずみ変化(I-2)

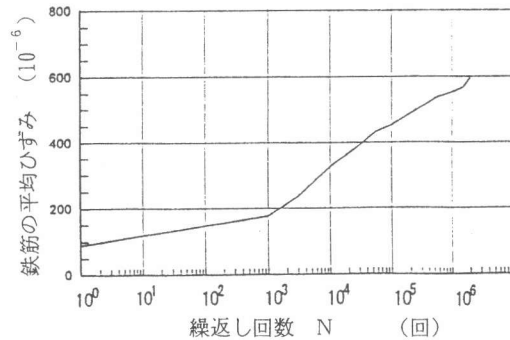


図-3 スターラップのひずみ変化(I-5)

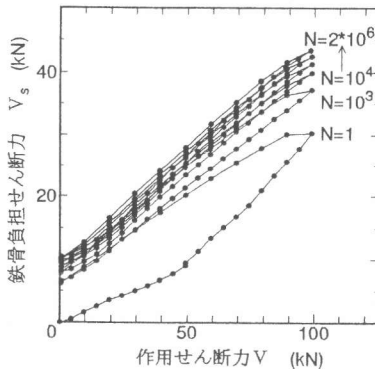


図-4 作用せん断力に対する鉄骨の負担せん断力との関係(I-2)

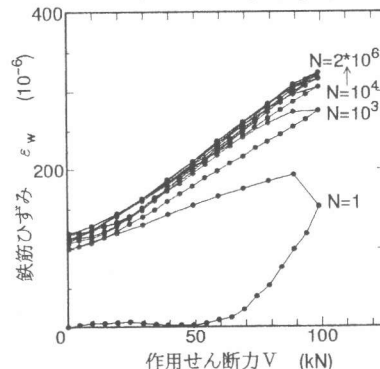


図-5 作用せん断力とスターラップのひずみとの関係(I-2)

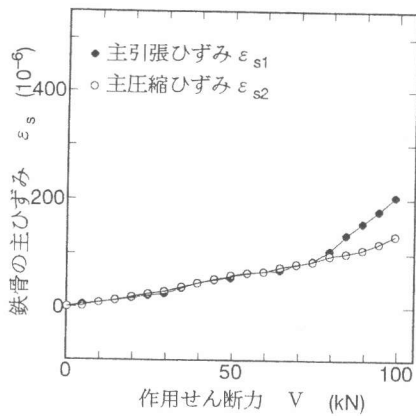
#### (4)鉄骨の主ひずみの変化

試験体I-2、3について、N=1回目載荷時の鉄骨の主引張ひずみ ( $\epsilon_{s1}$ )および主圧縮ひずみの絶対値 ( $\epsilon_{s2}$ )と作用せん断力の関係を図-6に示す。主ひずみは、図-1に示す鉄骨E断面の部材圧縮縁から150mmの位置(上から2番目)に取り付けた3方向ひずみゲージから求めた値を示した。なお、主ひずみの方向は、いずれの試験体も部材軸に対して、 $45\sim 60^\circ$ の範囲にあった。

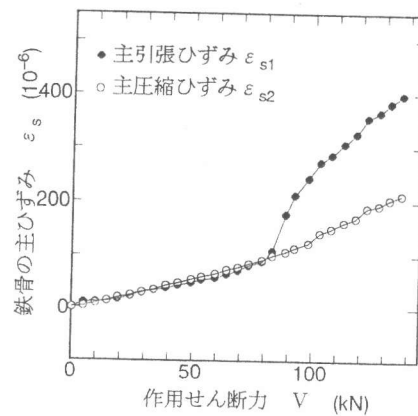
図-6から、主引張ひずみ ( $\epsilon_{s1}$ )と主圧縮ひずみの絶対値 ( $\epsilon_{s2}$ )の変化は、いずれの試験体もほぼ同様な傾向が見られ、作用せん断力が小さい段階では両者の絶対値はほぼ等しいが、せん断力の増加に伴い(コンクリートにせん断ひび割れが生じた付近から)主引張ひずみの増加が主圧縮ひずみの増加に比べ顕著となっていることがうかがえる。

これは、SRCはりにおいて、せん断ひび割れの生じない段階では、鉄骨が単にRCはりとの重ねばりのように挙動しているが、せん断ひび割れ発生後においては、鉄骨のウェブがせん断補強材としても挙動するため、主引張ひずみの増加が顕著となったものと考えられる。

上限荷重時における鉄骨の主引張ひずみ ( $\epsilon_{s1}$ )および主圧縮ひずみの絶対値 ( $\epsilon_{s2}$ )と繰返し回数との関係を図-7に示す。図-7に示す主ひずみは、図-6と同様にE断面での3方向ゲージの測定値より求めたものである。図-7より、いずれの繰返し回数においても、上限荷重時の主引張ひずみの値は、主圧縮ひずみの絶対値より大きくなってきている。また、繰返し回数の増加に伴い、主引張ひずみの方が主圧縮ひずみの絶対値より若干増加傾向が大きいようである。これは、繰返し回数の増加により、コンクリートの負担せん断力 ( $V_c$ )が減少するため、鉄骨のウェブがせん断補強材として受け持っているためと考えられる。

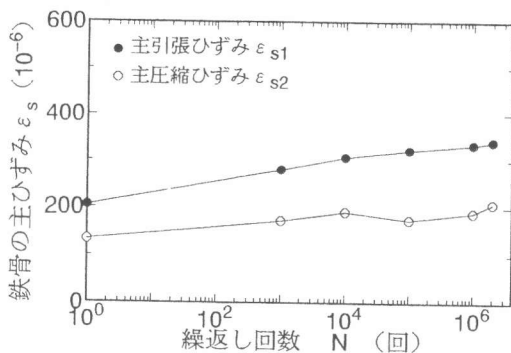


(a)I-2試験体

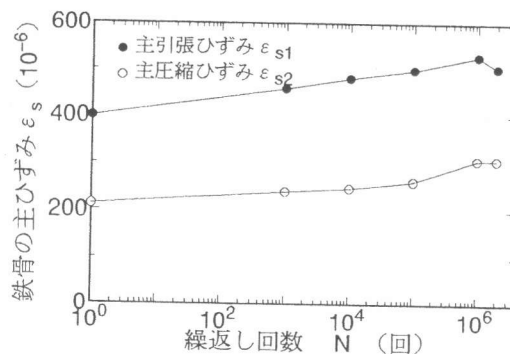


(b)I-3試験体

図-6 N=1回目載荷時の鉄骨の主ひずみの絶対値と作用せん断力の関係



(a)I-2試験体



(b)I-3試験体

図-7 鉄骨の主ひずみの絶対値と繰返し回数との関係

#### 4. せん断力の分担の計算方法と試験結果との対応

##### 4. 1 せん断力の分担の計算方法

鉄骨とスターラップの繰返しに伴うせん断力の分担を試験結果から、以下のように仮定する。

$$1 \text{ 回目の荷重載荷時} \quad V_s = \alpha_s V + \beta_s (\alpha_r V - k_r V_c) \quad (2)$$

$$V_w = \beta_r (\alpha_r V - k_r V_c) \quad (3)$$

1 回目の荷重除荷時以降

$$V_s = \alpha_s V + \beta_s (\alpha_r V_{\max} - k_r V_c) \cdot \frac{\alpha_r V + V_c}{\alpha_r V_{\max} + V_c} \quad (4)$$

$$V_w = \beta_r (\alpha_r V_{\max} - k_r V_c) \cdot \frac{\alpha_r V + V_c}{\alpha_r V_{\max} + V_c} \quad (5)$$

ただし、 $\alpha_r V - k_r V_c \leq 0$  のときは 0

ここに、 $V_s$  : 鉄骨の負担せん断力、 $V_w$  : せん断補強鉄筋の負担せん断力、 $V$  : 作用せん断力  
 $V_{\max}$  : 最大作用せん断力 (振幅荷重の上限値)、 $V_c$  : コンクリートの負担せん断力

$$\alpha_s = E_s I_s / (E_s I_s + E_{RC} I_{RC}), \quad \alpha_r = E_{RC} I_{RC} / (E_s I_s + E_{RC} I_{RC})$$

$E_s I_s$  : 鉄骨の曲げ剛性、 $E_{RC} I_{RC}$  : 鉄筋コンクリート部材の曲げ剛性 (コンクリート引張部を無視)、 $z_r = d/1.15$ 、 $d$  : 有効高さ、 $N$  : 繰返し回数、

$$k_r = 10^{-0.036 \log N (1 - (V_{\min}/V_{\max})^2)} \quad ([1] \text{より})、V_{\min} : \text{最小作用せん断力 (振幅荷重の下限値)}$$

$$\beta_s = \frac{2 \cdot t \cdot h}{2 \cdot t \cdot h + A_w \cdot z_r (\sin \theta + \cos \theta)^3 / s} \quad (6) \quad \beta_r = \frac{A_w \cdot z_r (\sin \theta + \cos \theta)^3 / s}{2 \cdot t \cdot h + A_w \cdot z_r (\sin \theta + \cos \theta)^3 / s} \quad (7)$$

$t$  : 鉄骨腹板の厚さ、 $h$  : 鉄骨腹板の高さ、 $s$  : スターラップの配置間隔

$A_w$  : 区間  $s$  におけるスターラップの総断面積、 $\theta$  : スターラップが部材軸となす角度

$\alpha_s$ 、 $\alpha_r$  は、鉄骨部分と RC 部分の作用せん断力の分担率を示す係数で、これは、鉄骨部分と鉄筋コンクリート部分が同じ曲率で変形し、せん断力の伝達が生じないと仮定して、せん断力の分担を両者の曲げ剛性の比と考えたものである。また、RC 部分の負担せん断力 ( $\alpha_r V$ ) がコンクリート部分の負担せん断力 ( $k_r V_c$ ) を超えるとせん断ひび割れが生じ、( $\alpha_r V - k_r V_c$ ) 分をスターラップと鉄骨とで分担すると考え、この分担比をトラス機構を仮定して式(6)および式(7)に示す  $\beta_s$  と  $\beta_r$  で求めるとしたものである。この場合、鉄骨の腹部に生じる主応力の方向を部材軸に対して  $45^\circ$  とし、圧縮斜材方向のひずみ増分を近似的に 0 として仮定し、鉄骨ウェブとスターラップのひずみを求め、せん断力の分担比  $\beta_s$ 、 $\beta_r$  を式(6)(7)のように導いたものである。

##### 4. 2 計算値と試験結果との対応

###### (1) 鉄骨負担せん断力

試験体 I-2 (C 断面)、I-3 (J 断面) の鉄骨腹部の 3 方向ひずみゲージの実測値から求まる鉄骨負担せん断力  $V_{s,t}$  と 4.1 節の方法で求めた負担せん断力  $V_{s,cal}$  の比較を図-8、9 に示す。図は、 $N = 1, 10^3, 2 \times 10^6$  回における実測値と計算値を示したものである。図より、いずれの試験体も、繰返し回数  $N$  の増加により、鉄骨負担せん断力が増加しており、繰返しに伴う  $V_c$  の減少分を鉄骨が負担していることがうかがえる。さらに、作用せん断力が 0 となっても鉄骨の負担せん断力が 0 となっていないことから、RC の場合と同様に考えた算定式が妥当であると考えられる。

###### (2) スターラップのひずみ変化

試験体 I-2 のスターラップ (鉄筋 B~E)、および試験体 I-3 (鉄筋 H~K) の上側に取り付けたゲージの平均ひずみ  $\varepsilon_{w,t}$  と計算値  $\varepsilon_{w,cal}$  との対応を図-10、11 に示す。図-11 (I-3) では、 $N = 1$  回目の載荷において、計算値より早い段階でせん断ひび割れが生じたため、実測値は 1 回目の載荷時においてやや大きめの値となっているが、繰返しにともなう鉄筋ひずみの変化はほぼ計算と対応

しているものと考えられる。

(3) 繰返し回数と鋼材分担力  
 試験体I-1~3 (CまたはJ断面) の繰返し回数Nと鋼材のせん断力分担の変化を図-12に示す。なお、 $V_{w,t}$  : 試験値に基づくスターラップの負担せん断力、 $V_{w,cal}$  : 4.1節に示す計算に基づくスターラップの負担せん断力を表す。

図-12より、繰返しに伴ってコンクリートの負担せん断力の減少分を鉄骨とスターラップとで分担し、各試験体とも概ね計算値と対応しており4.1節の方法から鉄骨およびスターラップの応力度を算定してもよいものと考えられる。

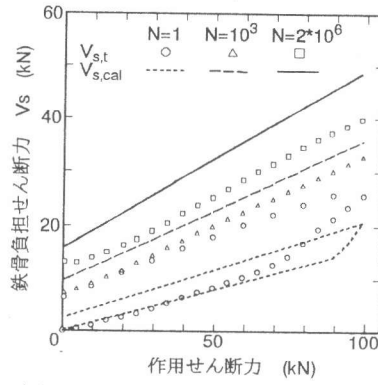


図-8 鉄骨負担せん断力(I2-C)

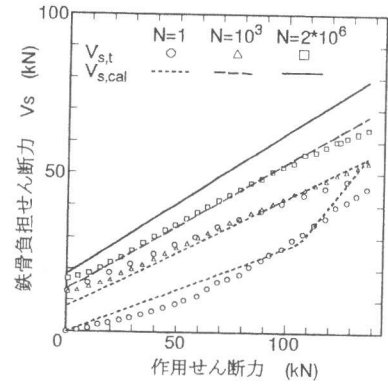


図-9 鉄骨負担せん断力(I3-J)

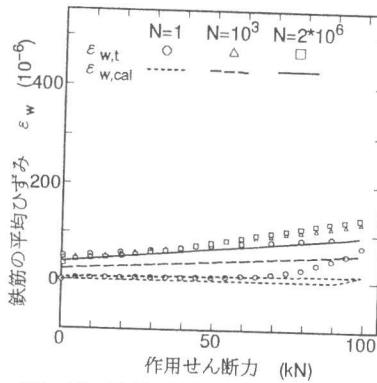


図-10 鉄筋ひずみ変化(I2-C)

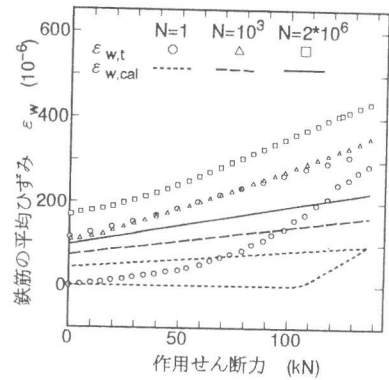
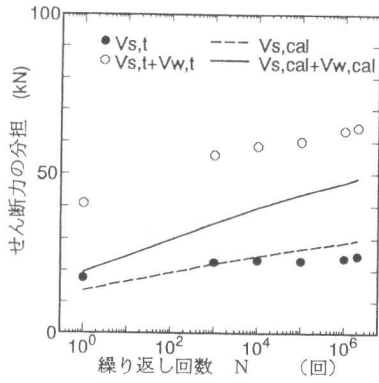
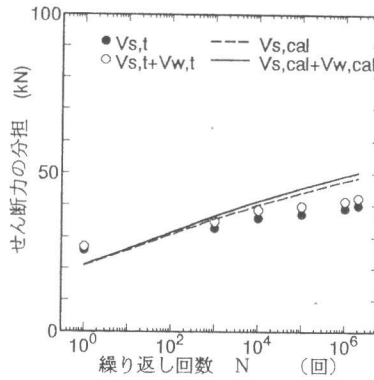


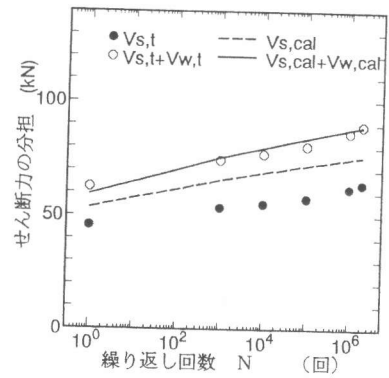
図-11 鉄筋ひずみ変化(I3-J)



(a)I-1(J断面)



(b)I-2(C断面)



(c)I-3(J断面)

図-12 繰返し回数と鋼材の分担力

## 5. まとめ

充腹型SRCはりの繰返し荷重による鉄骨とスターラップの応力度変化に着目した試験結果より、以下の事項がまとめられる。

- (1) 繰返し回数の増加により、コンクリートの負担せん断力 $V_c$ は減少するが、その減少分を鉄骨とスターラップの両方で分担する。
- (2) せん断力の分担は、充腹型のSRCはりにおいては、本文で示した算定式でほぼ評価できる。
- (3) 繰返し荷重を受けるSRCはりのせん断疲労に関し、本文で示した算定式を基に応力変動を求めることにより、鉄筋および鉄骨それぞれの材料疲労強度に基づき評価が可能である。

なお、本論文をまとめるにあたって、北海道大学 角田與史雄教授に貴重なるご助言を頂いた。ここに、記して謝意を表します。

### 【参考文献】

- [1] T. UEDA, H. OKAMURA : Behavior of Reinforced Concrete Beams under Fatigue Loading, Concrete Library of JSCE, No. 2, pp. 37-69, Dec. 1983