

論文 水中においてせん断疲労荷重を受ける RC はりの挙動

菅田 紀之^{*1}・尾崎 詔^{*2}・川原 健吾^{*3}

要旨：せん断補強筋比 p_w が 0.4 % である鉄筋コンクリートはりを作製し、水中においてせん断疲労試験を行い、 p_w が 0.79 % であるはりの結果と比較検討を行った。その結果、せん断疲労耐力は、静的せん断耐力の 32 % であり、 $p_w = 0.79$ % の場合よりも 4 % 大きいことが明らかとなった。また、 $p_w = 0.79$ % の場合と同様にスターラップひずみは荷重の繰返しとともに増加すること、コンクリートの受持つせん断力が荷重の繰返しとともに減少し、破壊直前には 0 になる場合があることを明らかにした。

キーワード：はりの疲労、せん断疲労、水中疲労、せん断疲労耐力、分担せん断力

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書設計編¹⁾において、せん断疲労荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の設計は、せん断補強鉄筋の疲労破断に対して行うことが規定されている。これは、大気中において乾燥状態の部材を用いて行った実験結果^{2), 3)}に基づくものであり、水中等において湿潤状態にある部材に対する合理的な設計法は示されていない。

水中環境下において湿潤状態にあるはり部材の疲労実験では、大気中で乾燥状態にあるはりと比較してせん断疲労耐力が著しく低下すること、必ずしもせん断補強筋の破断により破壊しないことが報告されており^{4), 5)}、著者等も、水中において鉄筋コンクリートはりのせん断疲労実験を行い、せん断疲労耐力が低下すること、コンクリートの分担せん断力が 0 になりせん断補強筋のトラス機構のみでせん断力に抵抗する状態になる場合があること等を明らかにした⁶⁾。しかしながら、その疲労性状へのせん断補強筋比の影響、せん断スパン等の影響が十分に明らかにされていない。

そこで本研究では、せん断疲労特性に及ぼすせん断補強筋比の影響に注目し、文献 6) とは異

なるせん断補強筋比のはりを用いてせん断疲労試験を行った。試験は、はりが湿潤状態を保持するように水中において行い、せん断疲労耐力、スターラップひずみの変化、コンクリートの分担せん断力について比較検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 供試体

実験に用いた RC はりを図-1 に示す。軸方向鉄筋には D19 を 2 本用い (鉄筋量: 5.73 cm², 鉄筋比: 3.47 %), 有効高さを 16.5 cm としている。実験は、破壊側スパンを明確にしておくために、左右のスパンでせん断補強量を変えて行った。せん断補強筋にはスターラップとして D6 を用い、図のように右スパンでは 16 cm 間隔、左スパンでは 8 cm 間隔で配置した。せん断補強筋比 p_w はそれぞれ 0.40 %, 0.79 % である。荷重の載荷は、支間長を 110 cm, せん断スパンを 32 cm, せん断スパン比 (a/d) を 1.94 として行った。比較に用いた文献 6) のはりの形状寸法は図-1 と同様であるが、せん断補強筋比は両スパンともに 0.79 % である。使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。また、鉄筋は SD295A であり、その降伏点応力度および引張

*1 室蘭工業大学講師 工学部建設システム工学科, 工博 (正会員)

*2 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科, 工博 (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻

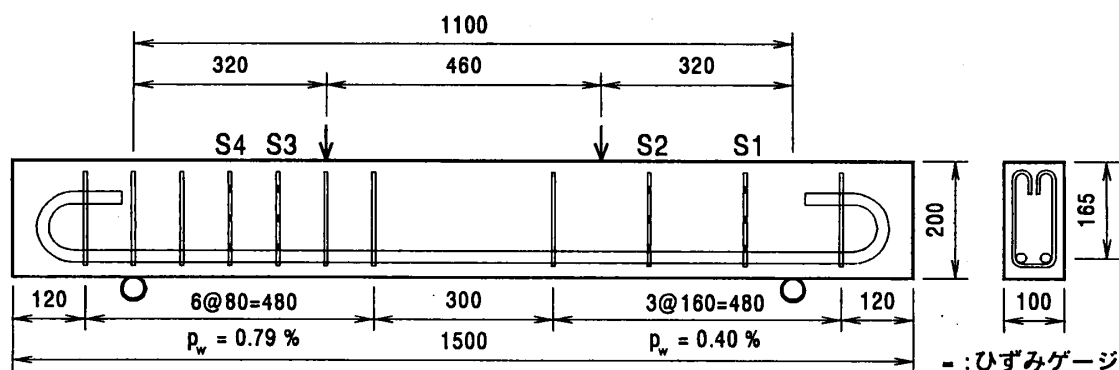


図-1 RCはりおよびひずみゲージ位置

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	AE 剤
55	41	165	300	823	1020	0.06

表-2 鉄筋の降伏点、引張強度

種類	降伏点応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D6	386	533
D19	384	552

強度を表-2に示す。疲労試験中におけるひずみの変化を計測するために、スターラップの12点にゲージ長2mmのひずみゲージを貼付けてある。ゲージ貼付け位置は図-1に示すとおりであり、ひずみゲージを貼付けたスターラップをS1からS4の記号で表すこととする。

2.2 疲労試験方法

疲労試験は電気油圧サーボ式、容量30tfの疲労試験機を用いて水中で行った。荷重は、載荷速度が2Hzおよび3Hzの正弦波とし、作用最大せん断力 V_{max} は静的せん断耐力の計算値 V_y の47%、42%、37%、32%、27%とした。また、作用最小せん断力 V_{min} は V_y の10%とした。試験は材令2ヶ月から3ヶ月のはりを用いて行い、試験開始時におけるコンクリート円柱供試体の圧縮強度の平均は33.4 N/mm²であった。

3. 試験結果および考察

3.1 全試験結果および破壊性状

表-3に試験結果の一覧を示す。 V_c および V_y は次式(1)および(2)に示す棒部材のせん断耐力

であり、それぞれせん断補強筋を用いない場合のせん断耐力⁷⁾、せん断補強筋としてスターラップを用いた場合のせん断耐力である。

$$V_c = 0.20 \sqrt{1/d} \sqrt{100p} \sqrt{f'_c} b_w d \quad (1)$$

$$[0.75 + 1.4/(a/d)]$$

d :有効高さ p :主鉄筋比
 b_w :腹部の幅 a :せん断スパン
 f'_c :コンクリートの圧縮強度

$$V_y = V_c + A_w f_{wy} (z/s_s) / \beta_s \quad (2)$$

A_w :一組のせん断補強筋量
 f_{wy} :降伏強度 s_s :補強筋間隔
 β_s :低減係数⁸⁾

$V_{cr-test}$ および V_{y-test} は、静的試験と疲労試験の初載荷時における斜めひび割れ発生せん断力、および静的試験におけるせん断耐力である。ひび割れ発生せん断力は、スターラップひずみの何れかが増加し始める点とした。表中の破壊回数で>2,000,000とは、荷重を200万回載荷しても破壊に至らなかったことを意味している。

表-3 試験結果一覧

No.	V_c (kN)	V_y (kN)	静的試験結果		疲労試験結果				
			$V_{cr-test}$ (kN)	V_{y-test} (kN)	V_{max}/V_y (%)	V_{max} (kN)	V_{min} (kN)	破壊回数 (回)	破壊性状
1	33.7	78.9	15.2	80.2	—	—	—	—	—
2	34.2	79.4	—	—	37.0	29.4	7.9	>2,000,000	—
3	34.2	79.4	26.9	—	42.0	33.3	7.9	352,510	剥
4	37.9	83.1	—	—	26.7	22.1	8.3	>2,000,000	—
5	37.9	83.1	—	—	31.6	26.3	8.3	>2,000,000	—
6	38.2	83.4	28.8	—	42.0	35.0	8.3	180,520	斜
7	38.2	83.4	—	—	37.0	30.9	8.3	>2,000,000	—
8	33.7	78.9	30.1	—	47.0	37.1	7.9	59,408	斜
9	33.7	78.9	29.7	—	42.0	33.1	7.9	409,456	剥・圧
10	37.3	82.5	—	—	47.0	38.7	8.3	76,979	剥・圧
11	37.3	82.5	30.7	—	42.0	34.6	8.3	1,711,690	剥・圧
12	34.1	79.3	32.2	—	47.0	37.3	7.9	30,723	剥・圧
13	34.1	79.3	18.2	79.2	—	—	—	—	—
14	33.8	79.0	29.7	—	47.0	37.1	7.9	25,522	剥
15	33.8	79.0	20.1	—	47.0	37.1	7.9	90,325	剥

斜：斜めひび割れの拡大，剥：斜めひび割れ部コンクリートの剥離

圧：曲げ圧縮部コンクリートの圧壊

ひび割れ発生せん断力の試験結果は、 V_c の計算値と比較すると小さな値であった。また、せん断耐力の試験結果は、 V_y の計算値とほぼ一致した結果となった。

疲労試験によるはりの破壊は、すべてせん断補強筋比の小さな右スパンで発生した。その破壊状況は、斜めひび割れ部コンクリートの剥離、コンクリートの剥離とともにせん断スパン載荷点近傍の曲げ圧縮部コンクリートの圧壊、および斜めひび割れの拡大の3種類であった。また、ひずみゲージのリード線がひび割れ部などで切断することにより、破壊時までスターラップひずみが測定されないケースがあったが、No. 6, 9, 14のはりでは、スターラップの降伏がひずみの変化から確認された。

3.2 せん断疲労耐力

生存確率50%に対するS-N回帰直線式および200万回せん断疲労耐力を求めると表-4のようになる。その回帰直線を図-2に示す。比

表-4 S-N回帰式および200万回疲労耐力

P_w (%)	S-N 回帰式	耐力 (%)
0.40	$\frac{V_{max} - V_{min}}{V_y - V_{min}} = 0.683 - 0.058 \log N$	32
0.79	$\frac{V_{max} - V_{min}}{V_y - V_{min}} = 0.921 - 0.101 \log N$	28

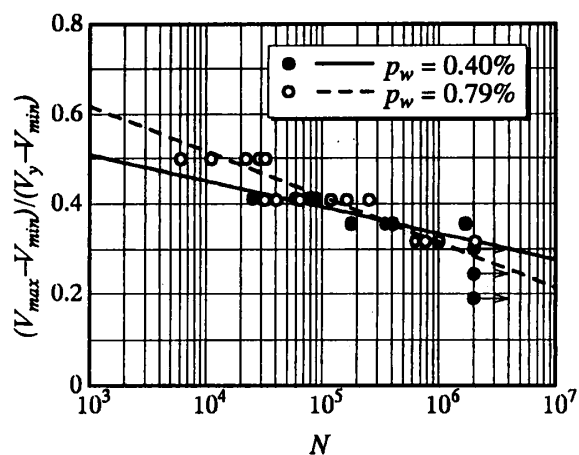


図-2 S-N線図

較のため文献 6) の結果も示している。せん断補強筋比 p_w が 0.40 % である鉄筋コンクリートはりの 200 万回せん断疲労耐力は、静的せん断耐力の 32 % であった。これは、 p_w が 0.79 % の場合のせん断疲労耐力の値 28 % より、4 % 大きい結果である。しかしながら、回帰直線の傾きは、 $p_w = 0.40$ % の方が小さくなっており、30 万回以下の繰返し回数に対する疲労耐力は小さくなっていることがわかる。このように、せん断補強筋比により $S-N$ 回帰直線およびせん断疲労耐力が異なっていることがわかった。

3.3 ひずみの変化

図-3～6 は、最大せん断力 (V_{max}) 作用時におけるスターラップひずみの計測値および文献 2) による予測値の変化である。ひずみの計測値は 3 ゲージの平均値である。図-3 および 4 は、200 万回载荷によっても破壊に至らなかったはり (No. 7, $V_{max}/V_y = 37$ %) の右スパン ($p_w = 0.40$ %) および左スパン ($p_w = 0.79$ %) の結果である。図-5 および 6 は、破壊に至るまでひずみが計測されたはりの結果であり、それぞれ $V_{max}/V_y = 42$ % (No. 6) のひずみ変化、 $V_{max}/V_y = 47$ % (No. 14) のひずみ変化である。

No. 7 の S1 の計測値は 20 万回载荷程度まではほぼ 0 であり、その後増加している。これは、20 万回载荷程度まで S1 近傍に斜めひび割れが発生しなかったためと考えられる。S2 の計測値は 50 万回载荷程度まで徐々に増加し、その後、急激に増加している。これは、ひび割れ部でリード線が断線したためであると考えられる。計測値と予測値を比較すると、S1 の計測値は予測値より遅れてひずみの増加が始まり、増加後の傾きは計測値の方が大きくなっている。S2 の予測値は約 500 载荷時まで 0 であるのに対して、計測値は初载荷時より増加している。しかしながら、1 万回载荷以後において両者はほぼ一致していることがわかる。

No. 7 の左スパン (図-4, $p_w = 0.79$ %) に関しては、S3 および S4 の予測値は約 500 载荷時

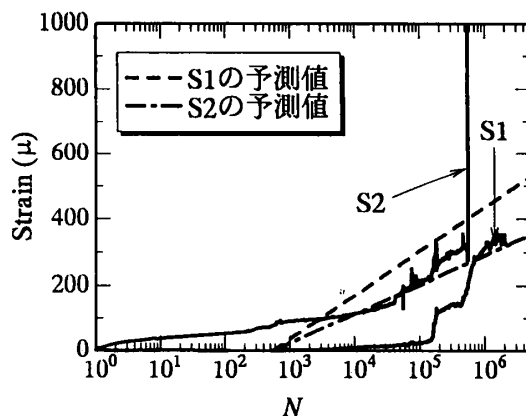


図-3 No.7 のスターラップひずみ変化 (右スパン, $V_{max}/V_y=37$ %, $p_w=0.40$ %)

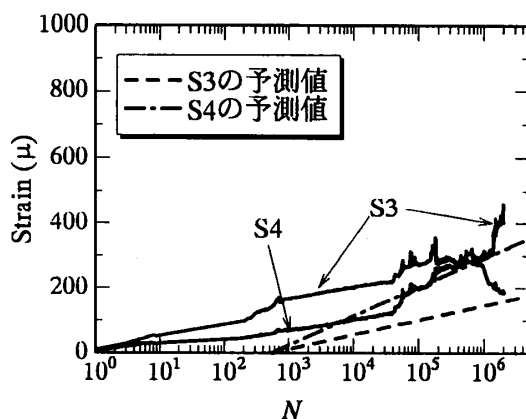


図-4 No.7 のスターラップひずみ変化 (左スパン, $V_{max}/V_y=37$ %, $p_w=0.79$ %)

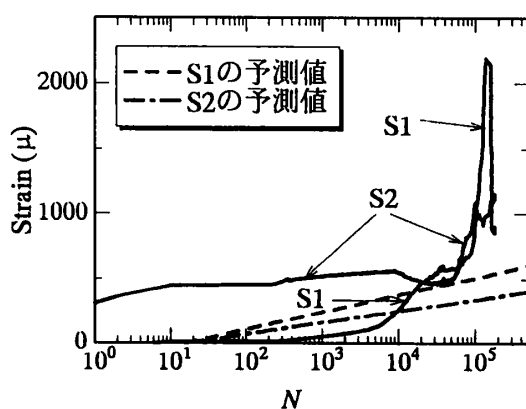


図-5 No.6 のスターラップひずみ変化 ($V_{max}/V_y=42$ %)

まで 0 であるのに対して、計測値は初载荷時より徐々に増加している。また、S3 の計測値は予測値の 2 倍以上であるが、増加率はほぼ等しいことがわかる。S4 では、5 千回载荷以後におい

て両者はほぼ一致しているといえる。

No.6 (図-5) のS1の計測値は300回載荷程度まではほぼ0であり、その後若干の増加傾向を示し、5千回載荷程度から増加率が大きくなり、降伏ひずみ程度まで計測されている。S2は初載荷時よりひずみが300 μ 程度の値になっている。これは、初載荷時よりS2を横切るせん断ひび割れが発生したためと考えられる。そのひずみは、1万回載荷程度まで徐々に増加し、その後一旦減少傾向を示すが、3万回載荷以後から再び増加している。計測値と予測値の間には大きな差が見られる。

No.14 (図-6) のS1の計測値は、初載荷時より増加傾向を示し、予測値の1/3から1/2程度の値であることがわかる。また、計測値は破壊直前に急激に増加し1500 μ に達している。S2の計測値は、2万回載荷程度まではほぼ一定の増加率であり予測値とも良く一致している。しかしながら、計測値は破壊直前に急激に増加し、最終的な値は2500 μ 以上となっており、S2は降伏しているものと考えられる。

全体的に、計測値と予測値は良い一致性を示していないといえる。また、右スパン ($p_w = 0.40\%$) の結果において、予測値では支点側のスターラップひずみ (S1) の方が載荷点側のひずみ (S2) より大きい値になっているのに対して、計測値では載荷点側の方が大きい値になっていることがわかった。

3.4 分担せん断力の変化

図-7および8は、最大せん断力 (V_{max}) 作用時におけるコンクリートの分担せん断力の変化である。図-7はせん断補強筋比 p_w が0.40%，図-8は p_w が0.79%の結果⁶⁾である。コンクリートの分担せん断力は次式により求めた。

$$V_c = V_{max} - \sum A_w E_w \varepsilon_w \quad (3)$$

A_w : 一組のスターラップの断面積

E_w : スターラップの弾性係数

ε_w : スターラップのひずみ

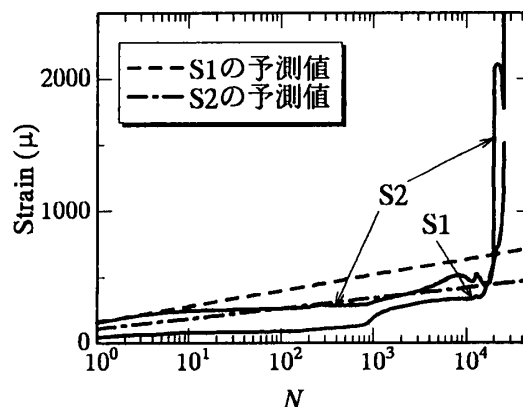


図-6 No.14のスターラップひずみ変化 ($V_{max}/V_y=47\%$)

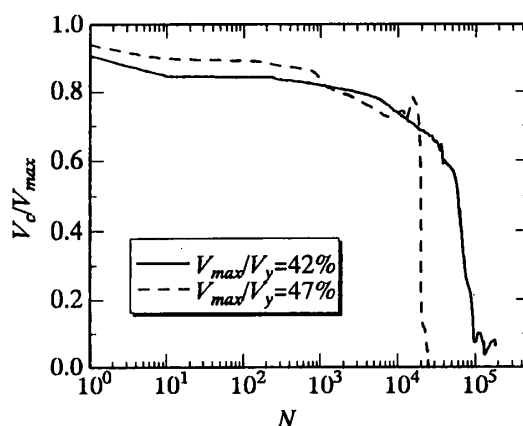


図-7 コンクリートの分担せん断力 ($p_w=0.40\%$)

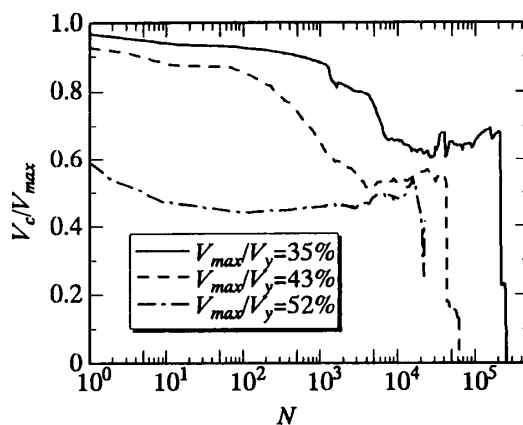


図-8 コンクリートの分担せん断力⁶⁾ ($p_w=0.79\%$)

計算に用いたひずみ値は、はりのひび割れあるいは破壊状況から判断して、S1の下およびS2の上の計測値とした。ただし、スターラップの

ひずみが降伏点ひずみよりも大きい場合には $E_w \epsilon_w$ を 386 N/mm^2 としている。

図-7のせん断補強筋比 p_w が 0.40 % であるはりの分担せん断力において、 V_{max}/V_y が 42 % の場合には、コンクリートの分担せん断力は、5 千回載荷程度まで緩やかな減少傾向を示し、その後、減少率は大きくなり、1 万回載荷時には 0.1 程度まで小さくなり破壊に至っている。 V_{max}/V_y が 47 % の場合には、1 千回載荷程度まで緩やかな減少を示し、その後、減少率は若干大きくなり、2 万回載荷時には急激に減少し分担せん断力が 0 になっている。

図-8に示すように、 p_w が 0.79% であるはりの分担せん断力も p_w が 0.40 % であるはりと同様な傾向を示していることがわかる。このように、せん断補強筋比に関わらずコンクリートの分担せん断力の変化は同様な傾向を示し、はりの破壊直前ではコンクリートの分担するせん断力が 0 になり、スターラップのみでせん断力に抵抗する状態になる場合があることが明らかになった。

4. ま と め

本研究では、有効高さを 16.5 cm、主鉄筋比を 3.47 %、せん断補強筋比を 0.40 % とする鉄筋コンクリートはりを作製し、支間長を 110 cm、せん断スパンを 32 cm として水中でせん断疲労試験を行い、せん断補強筋比が 0.79 % であるはりの結果と比較検討を行った。その結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 疲労試験を行ったはりの破壊は、斜めひび割れ部コンクリートの剥離、コンクリートの剥離とともにせん断スパン載荷点近傍の曲げ圧縮部コンクリートの圧壊、および斜めひび割れの拡大によるものである。
- 2) せん断補強筋比が 0.40 % であるはりの 200 万回せん断疲労耐力は、静的せん断耐力の 32 % であり、せん断補強筋比が 0.79 % である結果より 4 % 大きい。
- 3) スターラップのひずみは、荷重の繰返しと

ともに徐々に増加する。また、破壊直前に降伏ひずみに達することもある。

- 4) コンクリートの分担するせん断力は、せん断補強筋比が 0.79 % であるはりと同様に荷重の繰返しとともに減少する。また、破壊直前に急激に減少しコンクリートの分担せん断力が 0 になる場合がある。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：[平成 8 年制定] コンクリート標準示方書 設計編，1996。
- 2) Okamura, H., Farghaly, S.A. and Ueda, T. : Behaviors of Reinforced Concrete Beams with Stirrups Failing in Shear under Fatigue Loading, Proc. of JSCE, No. 308, pp.109 ~ 122, 1981.
- 3) 上田多門・岡村甫：疲労荷重下のスターラップの挙動，コンクリート工学，Vol. 19, No. 5, pp.101 ~ 116, 1981.
- 4) 西林新蔵・井上正一・大谷公行：水中における鉄筋コンクリートはりの疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 9, No. 2, pp.633 ~ 638, 1987.
- 5) 井上正一・西林新蔵・吉野公・権赫文：水中における RC はりの疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 2, pp.437 ~ 442, 1993.
- 6) 菅田紀之・尾崎詔：水中における鉄筋コンクリートはりのせん断疲労特性について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 2, pp.819 ~ 824, 1997.
- 7) 二羽淳一郎・山田一字・横沢和夫・岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第 372 号 / V-5, pp.167 ~ 176, 1986.
- 8) H. Okamura and S.A. Farghaly : Shear Design of Reinforced Concrete Beams for Static and Moving Loads, Proc. of JSCE, No. 287, pp.127 ~ 136, 1979.