

論文 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

菅田 紀之^{*1}・尾崎 詔^{*2}

要旨：鉄筋コンクリートはりのせん断疲労試験を水中で行った。その結果、せん断疲労破壊の形式は静的と同様にスターラップの降伏に起因するものであり、せん断疲労耐力は、静的せん断耐力を基準とすると、26%であることが明らかとなった。また、疲労試験中のひずみ変化の検討より、コンクリートの受け持つせん断力が、荷重の繰返し載荷とともに減少し、スターラップの受け持つせん断力が大きくなる。コンクリートの受け持つせん断力が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

鉄筋コンクリートはりがせん断疲労荷重を受ける場合、せん断補強鉄筋の疲労破断により破壊するという上田等の研究がある[1], [2]。この成果をもとに土木学会コンクリート標準示方書設計編[3]では、鉄筋コンクリートはりのせん断疲労に対する検討は、引張応力を受けるせん断補強筋について行えばよいとし、次のように定めている。1) コンクリートの受け持つせん断力をせん断補強筋を用いない棒部材のせん断耐力の50%として、せん断補強筋の応力度を求める。2) せん断補強筋の疲労強度は、曲げ加工された鉄筋として、母材の50%とする。しかしながら、これらの規定は、はりが乾燥状態にある場合に対してのものである。湿潤状態のはりに関しては、せん断補強筋のないはりとして検討を行うこととしており、合理的な検討方法が示されていないのが現状のようである。一方、湿潤状態の鉄筋コンクリートはりの試験において、静的載荷時には曲げ破壊する場合においても、繰返し荷重が載荷するとせん断破壊するという結果が報告されており[4], [5]、湿潤状態におけるはりのせん断疲労耐力がかなり小さいことが予想される。

そこで本研究では、水中環境下において鉄筋コンクリートはりのせん断疲労試験を行い、せん断疲労耐力、スターラップおよびコンクリートのひずみの変化、コンクリートの分担せん断力について検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 供試体

実験に用いた鉄筋コンクリートはりの形状寸法は、図-1に示すとおりである。軸方向鉄筋には D19 を2本用い

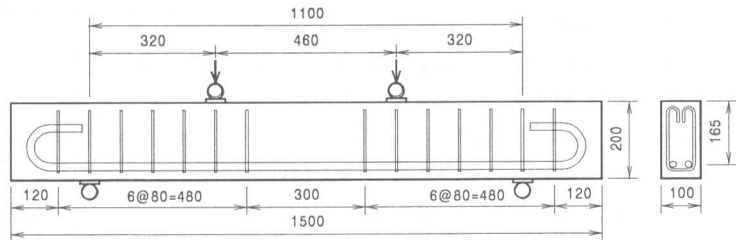


図-1 鉄筋コンクリートはりの形状寸法

($A_s = 5.73 \text{ cm}^2$, $p_w = 3.47\%$)、有効高さを 16.5 cm としている。また、せん断補強筋には D6 を用い図のように 8 cm 間隔に配置した。せん断補強筋比は 0.79% である。荷重の載荷は、支間長を

*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）

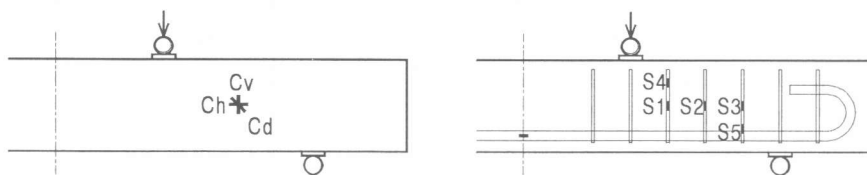
*2 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科、工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 剤 AD
55	44	165	300	823	1020	0.06

表-2 鉄筋の降伏点および引張強度

	降伏点応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D6	378	528
D19	384	552



— : ひずみゲージ

図-2 ひずみゲージ貼付け位置

110 cm とし、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。コンクリートの配合を、表-1 に示す。鉄筋は、SD295A D19 および D6 であり、それらの降伏点応力度および引張強度を表-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、軸方向鉄筋の支間中央点およびスターラップの 5 点にゲージ長 2 mm のひずみゲージ、せん断スパン中央点のはり側面にゲージ長 10 mm の 3 軸ロゼットゲージを貼付けてある。ゲージ貼付け位置は、図-2 に示すとおりである。

表-3 全試験結果

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} (kN)	破壊回数
1	38.2	104.6	—	—	46.6	254,670
2	38.2	104.6	—	—	37.2	773,411
3	38.8	105.2	36.0	—	46.6	164,798
4	38.8	105.2	35.0	—	37.2	2,066,626
5	38.3	104.7	—	—	37.2	636,046
6	36.9	103.3	30.0	—	55.9	6,113
7	36.9	103.3	37.0	—	46.6	41,091
8	36.0	102.4	32.0	—	55.9	22,397
9	36.0	102.4	38.0	—	46.6	32,622
10	36.2	102.6	31.0	—	55.9	11,198
11	36.2	102.6	31.0	—	46.6	120,718
12	37.8	104.2	34.0	—	55.9	28,992
13	37.8	104.2	42.0	—	46.6	64,772
14	35.8	102.2	38.0	108.4	—	—
15	35.8	102.2	—	—	55.9	32,850
16	39.0	105.4	33.0	106.4	—	—
17	39.0	105.4	—	—	37.2	1,009,539

2.2 疲労試験方法

疲労試験は電気油圧サーボ式、容量 30 tf の疲労試験機を用いて水中で行った。荷重は、載荷速度が 2 Hz および 3 Hz の正弦波とし、作用最大せん断力 V_{max} が 37.2 kN, 46.6 kN, 55.9 kN、作用最小せん断力 V_{min} が 4.7 kN になるように設定した。疲労試験は材令 2 ヶ月から 3 ヶ月のはりを用いて行い、そのときにおけるコンクリート円柱供試体の圧縮強度の平均は 33.2 N/mm² であった。また、圧縮強度試験から、割線弾性係数が 26.6 kN/mm²、ポアソン比が 0.2 という値を得ている。

3. 試験結果および考察

3.1 全試験結果

表-3 に試験結果の一覧を示す。 V_c および V_y は式 (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[6]、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。

$$V_c = 0.20^4 \sqrt{1/d} \sqrt[3]{100 p_w} \sqrt[3]{f'_c b_w d} [0.75 + 1.4/(a/d)] \quad (1)$$

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

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

A_w :区間 s_s におけるせん断補強筋の総断面積 f_{wy} :せん断補強筋の降伏強度
 z : $d/1.15$ s_s :せん断補強筋の間隔
 β_x :支点および載荷点の位置による低減係数[7]

$V_{cr-test}$ 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。斜めひび割れ発生時のせん断力は、図-2に示す点でのスターラップひずみの何れかが増加し始める点とした。斜めひび割れ発生せん断力の実験結果は、せん断補強筋を用いない場合のせん断耐力の計算値と同程度であり、せん断耐力の実験結果は、スターラップを用いた場合のせん断耐力の計算値とほぼ一致していることがわかる。

せん断疲労荷重を受けるはりの破壊は、乾燥状態ではスターラップの疲労破断により生ずると報告されている[1], [2]。しかしながら、水中で疲労試験を行ったはりでは、スターラップの降伏に起因する破壊であった。15本のはりのうち11本のはりにおいてせん断スパン腹部にコンクリートの剥離あるいは圧壊がみられたが、スターラップ降伏後の変形により生じたものと考えられる。式(2)において V_c を0と仮定した場合でも、はりのせん断耐力は66.4 kNであり、作用最大せん断力より大きくなっておりスターラップの降伏は起こらないことになる。しかしながら、せん断ひび割れと部材軸とのなす角度をトラス理論における圧縮斜材の角度 θ と考えたスターラップのせん断耐力式(3)を用いると、

$$V_s = A_w f_{wy} z \cot \theta / s_s \quad (3)$$

せん断耐力は、最大せん断力 V_{max} が55.9 kNの場合には36~54 kN、46.6 kNの場合には37~46 kN、37.2 kNの場合には35~40 kN程度と算定された。したがって、コンクリートの分担せん断力が0となれば、ほぼ全てのケースでせん断耐力より作用最大せん断力の方が大きくなり、スターラップの降伏が起こることを説明できる。なお、スターラップの降伏はひずみの変化から確認している。

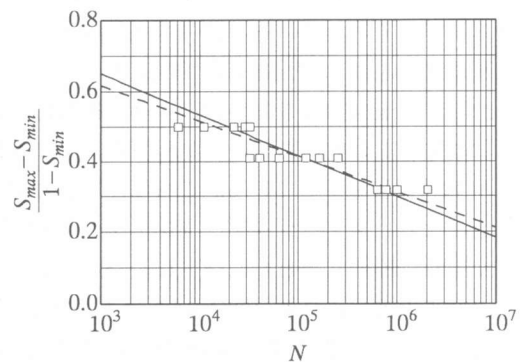


図-3 S-N線図

3.2 せん断疲労耐力

各最大せん断力ごとの疲労寿命分布が対数正規分布に従うものと仮定し、各最大せん断力に対する生存確率50%の疲労寿命を求め、S-N回帰直線を求めると図-3ようになる。図中の S_{max} および S_{min} は次式で表される。

表-4 S-N回帰式、200万回疲労耐力、K値

S-N回帰式	疲労耐力 (%)	K値
$(S_{max} - S_{min}) / (1 - S_{min}) = 1 - 0.117 \log N$	26	8.5
$(S_{max} - S_{min}) / (1 - S_{min}) = 0.921 - 0.101 \log N$	28	-

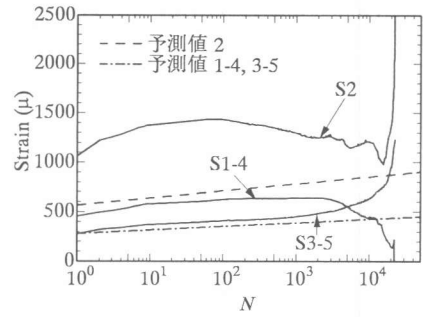
$$S_{max} = V_{max}/V_o, \quad S_{min} = V_{min}/V_o \quad (4)$$

V_o : 基準耐力

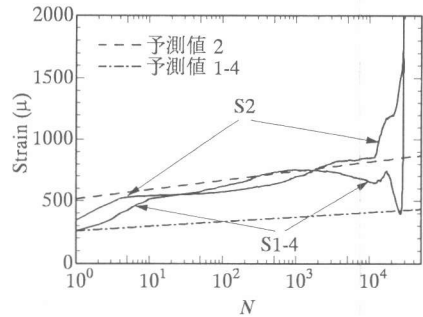
実線は $N=1$ で $(S_{max}-S_{min})/(1-S_{min})=1$ になるようにした回帰直線、破線は生存確率 50% の疲労寿命のみを用いた結果である。基準耐力には静的載荷試験により求めたせん断耐力の平均である 107.4 kN を用いた。また、表-4 に回帰直線式、200 万回せん断疲労耐力およびコンクリート標準示方書設計編[3]に従い求めた K 値を示す。鉄筋コンクリートはりのせん断疲労耐力は、静的せん断耐力の 26% あるいは 28% という結果になった。水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度は 38% [8] であるから、水中における鉄筋コンクリートはりのせん断疲労耐力はかなり小さいといえる。また、 K 値は 8.5 である。

3.3 ひずみの変化

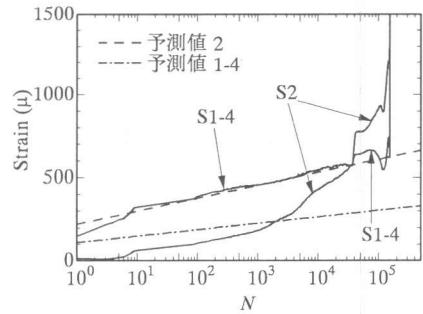
図-4 は、最大せん断力作用時におけるスターラップひずみの変化である。(a) および (b) は V_{max} が 55.9 kN の結果、(c) は 44.6 kN の結果、(d) は 37.2 kN の結果である。 V_{max} が 55.9 kN については、初載荷時の S2 のひずみが 1000 μ 以上の場合と 1000 μ 以下の場合の 2 ケースについて示している。S1-4 は S1 と S4 の計測値の平均、S3-5 は S3 と S5 の計測値の平均である。(a) の S2 および (d) の S3-5 以外のひずみは初載荷時より徐々に増加する傾向にあることがわかる。(a) の S2 は 100 回載荷以後減少している。これは作用応力が大きいことにより、スターラップとコンクリートとの間の付着が荷重の繰返しとともに減少し、ひずみが平均化された結果と考えられる。(d) の S3-5 は 1000 回載荷程度まではほぼ 0 であるが、その後増加傾向に転じている。これは 1000 回載荷程度まで S3 および S5 の近傍に斜めひび割れが発生していないことによるものと考えられる。また、いずれのケースにおいても、はりの疲労破壊時に急激にひずみが増加していることがわかる。最終的なひずみの値は 2000 μ 以上になっており、スターラップは降伏しているものと考えられる。ひずみが徐々に増加するという結果は、文献[1]の乾燥状態のはりの試験結果と同様の傾向であり、図中にスターラップの平均ひずみの予測値[1]を破線および一点鎖線で示した。予測値 2 は S2 に対する予測値、予測値 1-4、3-5



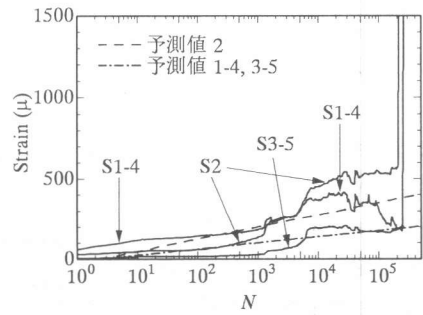
(a) $V_{max} = 55.9$ kN



(b) $V_{max} = 55.9$ kN



(c) $V_{max} = 46.6$ kN



(d) $V_{max} = 37.2$ kN

図-4 スターラップひずみの変化

は S1-4 および S3-5 に対する予測値である。全体的な傾向としては、測定結果の傾きが予測値よりも大きくなっているといえる。S2 の予測値と計測値を比較すると、(b)ではおおむね一致しているといえるが、(a)では測定値の方が予測値の 2 倍程度になっている。また、(c)では 30000 回載荷程度まで、(d)では 1000 回載荷程度まで測定値の方が小さくなっている。S1-4 に関しては、測定値が予測値の 1.7 から 2 倍程度になっている。S3-5 に関しては、(a)では 3000 回載荷程度まで、(c)では 7000 回載荷以後ではほぼ一致した結果となっている。

図-5 は、はり側面に貼付けたロゼットゲージによる測定結果より求めた主ひずみおよび最大せん断ひずみの変化である。(a)は V_{max} が 55.9 kN の結果、(b)は 46.6 kN の結果である。鉛直方向および部材軸方向のひずみの値が、斜め方向のひずみより小さくなっており、主ひずみの圧縮の成分は、斜め方向のひずみゲージの値とほぼ等しい結果となっていた。特に鉛直方向のひずみの値はほぼ 0 であった。(a)および(b)ともに同程度のひずみ値であり、圧縮成分が引張成分よりも大きい二軸応力状態となっている。また、各ひずみ成分ともに荷重の繰返しに伴い増加傾向を示している。(b)においては破壊時に若干増加していることがわかる。はりを弾性体と仮定し測定結果からせん断応力度を求めると、(a)では 5 N/mm^2 程度、(b)では 6 N/mm^2 である。また、作用最大せん断力から求めたせん断応力度は、それぞれ 3.8 N/mm^2 および 3.2 N/mm^2 であり、測定値の方が大きい結果となった。また、測定結果から主応力を求めると、(a)では 1.6 N/mm^2 および $-11 \sim -8 \text{ N/mm}^2$ 程度、(b)では $3.8 \sim 5.2 \text{ N/mm}^2$ および $-8 \sim -7 \text{ N/mm}^2$ 程度であり、最終的な破壊に至るまでは腹部コンクリートの圧壊が問題になるような応力は作用していないものと考えられる。

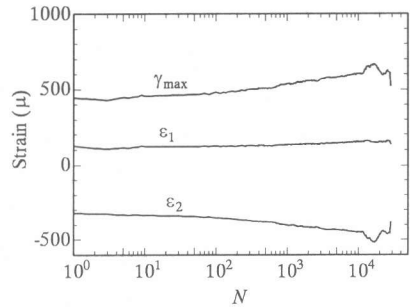
3.4 分担せん断力の変化

図-6 は、最大せん断力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。コンクリートの分担せん断力は次式により求めた。

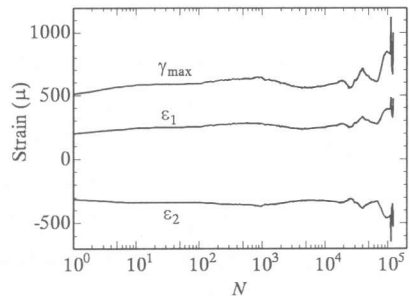
$$V_c = V_{max} - \sum A_w E_w \varepsilon_w$$

A_w : 一組のスターラップ断面積 E_w : スターラップの弾性係数 (5)
 ε_w : スターラップのひずみ

スターラップのひずみは、5 点の計測結果であり、データとしては十分なものでないが、本実験で得られた結果の範囲内で考察を行うこととする。ただし、スターラップのひずみが降伏点ひず



(a) $V_{max} = 55.9 \text{ kN}$



(b) $V_{max} = 46.6 \text{ kN}$

図-5 はり側面のひずみの変化

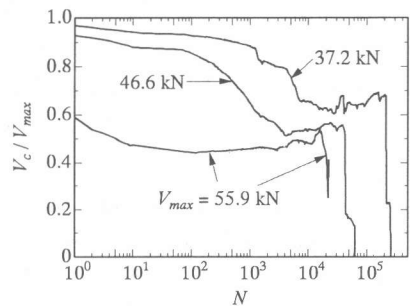


図-6 コンクリートの分担せん断力

みよりも大きい場合には $E_w \epsilon_w$ を 378 N/mm^2 としている。 V_{max} が 55.9 kN の場合には、コンクリートの分担せん断力は 100 回載荷程度まで減少しているが、以後一定あるいは若干の増加傾向を示し破壊直前に急激に減少している。100 回載荷以後の増加の傾向は、スターラップとコンクリートの付着が減少しスターラップひずみが平均化され、減少したことによるものと考えられる。 V_{max} が 46.6 kN および 37.2 kN の場合には、4000 回および 7000 回載荷程度まで減少し、以後ほぼ一定値を示し破壊直前に急激に減少し分担せん断力が 0 になっている。乾燥状態のほりでは、コンクリートの分担せん断力が 1000 万回載荷時に初載荷時の 1/2 程度になることが報告されているが [1], [2]、水中疲労では、破壊直前にコンクリートの分担せん断力が 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

水中における鉄筋コンクリートはりのせん断疲労特性を明らかにすることを目的として、有効高さを 16.5 cm 、主鉄筋比を 3.47% 、せん断補強筋比を 0.79% 、せん断スパン比を 1.94 とするはりの疲労試験を行った。限られた条件による結果ではあるが、まとめると以下ようになる。

- 1) 静的せん断耐力の 35% から 50% 程度のせん断力を繰返し作用させた場合、水中におけるせん断疲労の破壊形式は、静的試験時と同様にスターラップの降伏に起因するものである。
- 2) 200 万回せん断疲労耐力は、基準耐力として静的試験によるせん断耐力を用いた場合には 26% あるいは 28% である。
- 3) スターラップのひずみは、乾燥状態のほりと同様に、荷重の繰返しとともに徐々に増加する。その増加率は乾燥状態の場合よりも大きい。しかしながら、最大せん断力が 55.9 kN で初載荷時のひずみが大きい場合には増加の傾向を示さないことがある。
- 4) コンクリートの分担するせん断力は、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] H. Okamura, S.A. Farghaly and T. Ueda : Behaviors of Reinforced Concrete Beams with Stirrups Failing in Shear under Fatigue Loading, Proc. of JSCE, No. 308, pp.109 ~ 122, 1981.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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] 二羽淳一郎・山田一宇・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.
- [7] 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.
- [8] 菅田紀之・尾崎諤・水吐則行 : 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp.1067 ~ 1072, 1995.