

V-23 水中における鉄筋コンクリートはりのせん断疲労

室蘭工業大学 正 員 菅田 紀之
 室蘭工業大学 フェロー 尾崎 詔

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を次のように行うこととしている。1) はりのせん断疲労の検討は引張応力を受けるせん断補強筋について行う。2) せん断補強筋のように曲げ加工された鉄筋の疲労強度は、母材の50%に低減する。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り、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いる^{4),5)}。

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について検討を行った。また、試験方法が疲労試験結果に与える影響を検討するため、載荷点および支点形状を変えて試験を行った。

2. 試験概要

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 ($A_s = 5.73 \text{ cm}^2$, $p_w = 3.47 \%$)、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8cm間隔で用いた。荷重の載荷は、支間長を110cmとし、せん断スパンを32cm、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。はりには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2mm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10mm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。

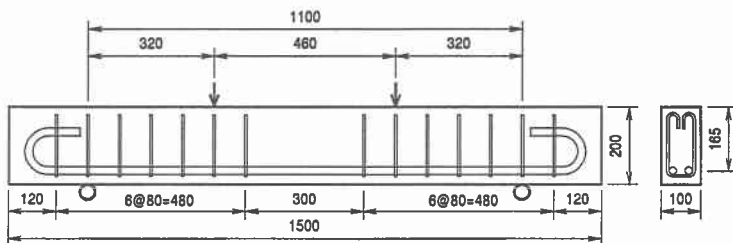


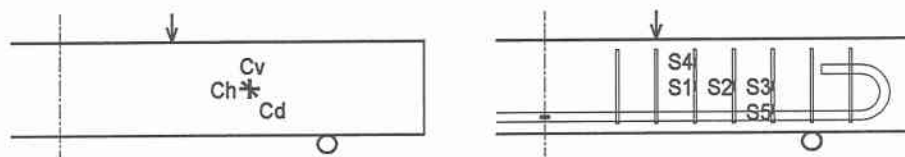
図-1 鉄筋コンクリートはりの形状寸法

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

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行った。荷重は、載荷速度が 2 Hz および 3 Hz の正弦波とし、上限せん断力 V_{max} が 32.6 kN, 37.2 kN, 46.6 kN、下限せん断力 V_{min} が 0.47 kN になるように設定した。疲労試験は材令 2 ヶ月から 3 ヶ月のほりを用いて行い、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 32.6 N/mm² であった。また、No. 9 の圧縮強度試験から、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。

表-3 鉄筋コンクリートはりの試験結果

No.	f'_c (N/mm ²)	V_{cr} (kN)	V_y (kN)	V_{wc} (kN)	静的試験結果		疲労試験結果		載荷点 形状	支点 形状
					$V_{cr-last}$ (kN)	V_{y-last} (kN)	V_{max} (kN)	破壊回数		
1-1	33.4	23.9	66.8	119	26.0	91.5	—	—	丸	丸
1-2	33.4	23.9	66.8	119	46.0	—	46.6	14222	丸	丸
2-1	29.4	22.9	65.8	112	39.0	94.8	—	—	丸	丸
2-2	29.4	22.9	65.8	112	42.0	—	46.6	13755	丸	丸
3-1	33.2	23.9	66.8	119	29.0	94.5	—	—	丸	丸
3-2	33.2	23.9	66.8	119	30.0	—	46.6	9971	丸	丸
4-1	29.4	22.9	65.8	112	42.0	—	46.6	41415	平	丸
4-2	29.4	22.9	65.8	112	41.0	—	46.6	55423	平	丸
5-1	36.2	24.6	67.5	124	34.0	—	46.6	75704	平	丸
5-2	36.2	24.6	67.5	124	30.0	—	37.2	259203	平	丸
6-1	34.1	24.1	67.0	120	30.0	—	46.6	36132	平	丸
6-2	34.1	24.1	67.0	120	—	—	37.2	445263	平	丸
7-1	32.8	23.8	66.7	118	20.0	—	37.2	288591	平	丸
7-2	32.8	23.8	66.7	118	29.0	—	37.2	167132	平	丸
8-1	27.2	22.3	65.2	108	33.0	—	46.6	38490	平	丸
8-2	27.2	22.3	65.2	108	28.0	—	37.2	141305	平	丸
9-1	29.1	22.8	65.7	111	25.0	97.0	—	—	平	丸
9-2	29.1	22.8	65.7	111	25.0	—	32.6	>2000000	平	平
10-1	36.2	24.6	67.5	124	—	—	46.6	254670	平	平
10-2	36.2	24.6	67.5	124	—	—	37.2	773411	平	平
11-1	38.0	25.0	67.9	127	36.0	—	46.6	164798	平	平
11-2	38.0	25.0	67.9	127	—	—	37.2	>1700000	平	平

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。 f'_c はコンクリート円柱供試体の疲労試験開始時における圧縮強度、 V_{cr} 、 V_y および V_{wc} は式 (1)、(2) および (3) に示す土木学会コンクリート標準示方書の棒部材のせん断耐力であり、それぞれせん断補強鋼材を用いない場合のせん断耐力、スターラップを用いた場合のせん断

耐力、斜め圧縮破壊耐力である。

$$V_{cr} = 0.20 \sqrt[4]{1/d} \sqrt[3]{100p_w} \sqrt[3]{f'_c} b_w d \quad (1)$$

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

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

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 : せん断補強筋の配置間隔

$$V_{wc} = 1.25 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (3)$$

$V_{cr-test}$ および V_{y-test} は、静的試験と疲労試験の初荷重時における斜めひび割れ発生せん断力および静的試験時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。荷重点および支点の形状としては、荷重点が丸の場合は直径3 cmの丸棒、支点が丸の場合は直径5 cmの丸棒、平の場合は接触面が5 cm × 10 cmの平板を用いたことを示している。

疲労試験を行ったはりの破壊形式は、せん断スパンにおけるコンクリート部の斜め圧縮破壊であった。

3.2 荷重点および支点形状の影響

図-3に、上限せん断力と疲労寿命の関係を、荷重点および支点形状によって分類して示している。上限せん断力 46.6 kN の場合について、荷重点および支点形状による疲労寿命の比較をすると、荷重点・支点ともに丸棒の場合には疲労寿命が10,000から14,000回程度、荷重点のみ平板の場合には36,000から75,000回程度、荷重点・支点ともに平板の場合には160,000から250,000回程度となっている。以上のことより荷重点および支点の形状が疲労寿命に大きく影響するものと考えられる。写真-1は、はりの破壊状況を示したものである。(a)は荷重点および支点到丸棒、(b)は荷重点に平板、支点到丸棒、(c)は荷重点および支点到平板を用いた場合の写真である。(a)では、荷重点が供試体断面に2 cm程度貫入し、荷重点部分における局所的な圧壊が確認できる。他の実験結果では荷重点が4 cm程度はりに貫入している場合もあった。(b)および(c)では、(a)で確認できるような荷重点の貫入および荷重点における局所的な破壊は確認できない。また、荷重点あるいは支点到丸棒を用いた試験においては、疲労試験中に丸棒とはりの接触面が偏摩耗し、供試体

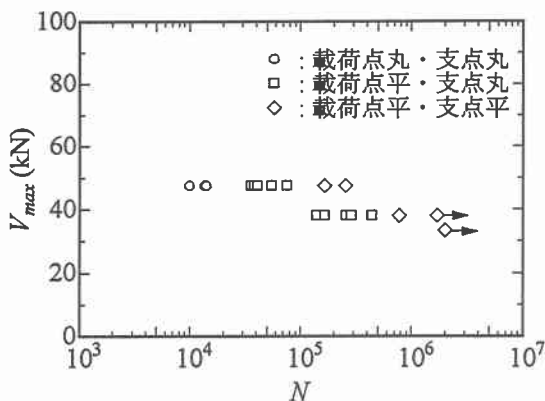
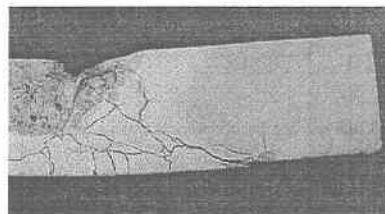
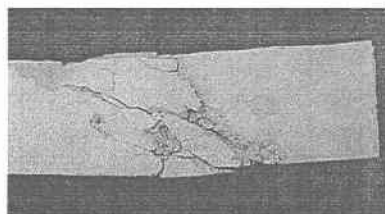


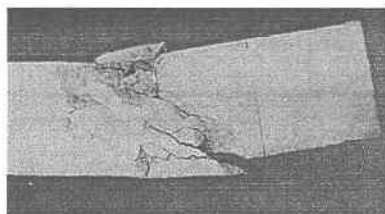
図-3 荷重点および支点形状と疲労寿命の関係



(a) 荷重点および支点到丸棒



(b) 荷重点: 平板、支点到丸棒



(c) 荷重点および支点到平板

写真-1 はりの破壊状況

および載荷版が傾く現象が確認されている。以上の結果から、載荷点および支点の形状により疲労寿命が異なってくる原因として、載荷点部の支圧応力による局所的な破壊、偏心載荷の影響が考えられる。

3.3 せん断疲労耐力

前節において載荷点および支点の形状により疲労寿命が異なることを示したが、ここでは載荷点に平板を用いた場合の結果より、せん断疲労耐力を求めることとする。

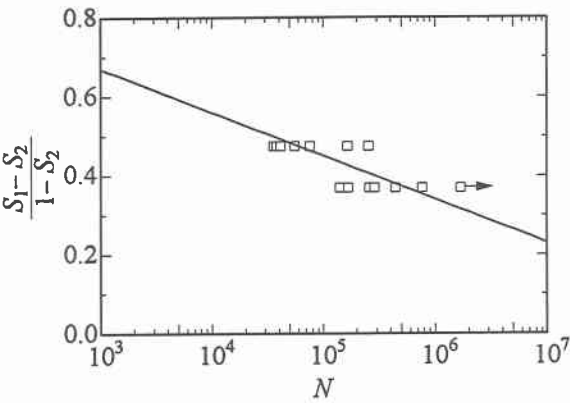
各上限せん断力ごとの疲労寿命分布が対数正規分布に従うものと仮定し、各上限せん断力に対する生存確率 50 %の疲労寿命を求め、コンクリート標準示方書設計編³⁾に従い $S-N$ 回帰直線を求めると図－4 ようになる。(a)は基準耐力として静的載荷試験により求めたせん断耐力の平均を用いた場合、(b)は基準耐力として斜め圧縮破壊耐力の計算値を用いた場合の図である。また、表－4 に回帰直線式、200 万回せん断疲労耐力およびコンクリート標準示方書設計編に従い求めた K 値を示す。比較のため水中におけるコンクリートの圧縮疲労試験の結果⁶⁾も示した。鉄筋コンクリートはりのせん断疲労耐力は、基準耐力として静的載荷試験により求めたせん断耐力を用いた場合には

31 %、斜め圧縮破壊耐力を用いた場合には 20 %という結果になった。また、コンクリートの圧縮疲労強度と比較すると、それぞれ 7 %および 18 %小さい。しかしながら、この結果は支点の形状の影

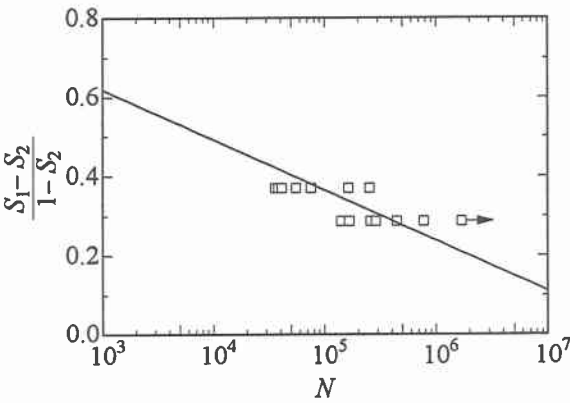
響を含んだ結果であり、支点を平板とした結果のみを用いてせん断疲労耐力を求めた場合には、以上の結果よりも大きくなるものと考えられる。また、 K 値は 9.1 および 7.8 という結果になった。

3.4 ひずみの変化

図－5 は、No. 5-1 および 5-2 のスターラップひずみの変化である。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。No. 5-1 では、S1-4 および S3-5 が初載荷時より徐々に増加している。しかしながら、S2 は 100 回載荷程度まで増加傾向を示さず、その後増加している。100 回載荷程度まで S2 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。No. 5-2 で



(a) 基準値として静的せん断耐力を用いた場合



(b) 基準値として斜め圧縮破壊耐力を用いた場合

図－4 $S-N$ 線図

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
RC はり (a)	$(S_1 - S_2) / (1 - S_2) = 1 - 0.110 \log N$	31	9.1
RC はり (b)	$(S_1 - S_2) / (1 - S_2) = 1 - 0.127 \log N$	20	7.8
コンクリート	$(S_1 - S_2) / (1 - S_2) = 1 - 0.098 \log N$	38	10.2

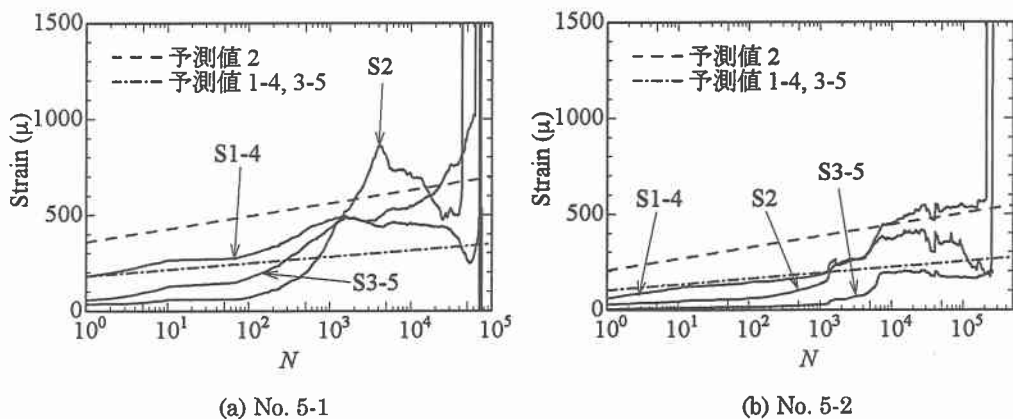


図-5 スターラップのひずみの変化

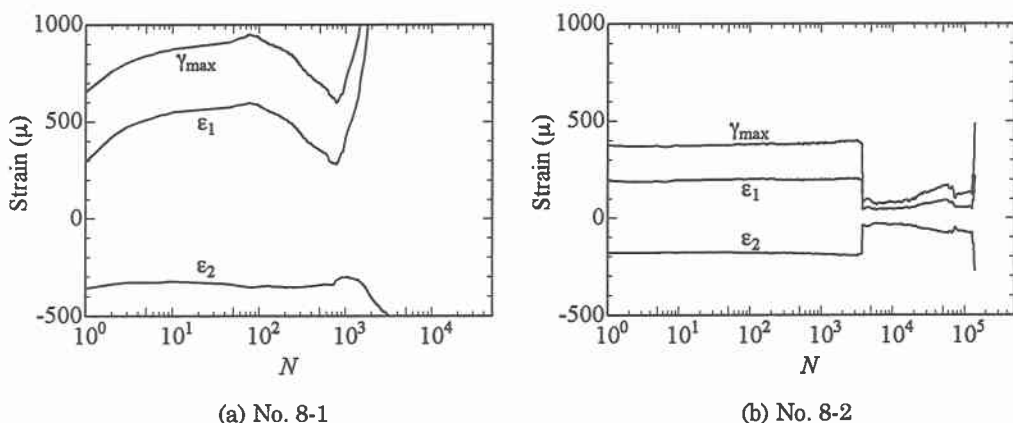


図-6 コンクリート側面の主ひずみの変化

は、S1-4が初載荷時より徐々に増加しているが、S2は200回載荷程度まで、S3-5は1000回載荷程度まで増加傾向を示していない。ひずみが徐々に増加するという結果は、乾燥状態のほりの試験結果¹⁾と同様の傾向である。図中に示した直線は、スターラップの平均ひずみの予測値¹⁾である。予測値2はS2に対する予測値、予測値1-4, 3-5はS1-4およびS3-5に対する予測値である。S2の予測値と計測値を比較すると、No. 5-1では1000回載荷程度まで、No. 5-2では7000回載荷程度まで測定値の方が小さくなっている。予測値は平均値であるのに対して、S2は1点におけるものであることが原因の一つと考えられる。S1-4に関しては、No. 5-1では100回載荷程度まで、No. 5-2では1000回載荷程度まで一致しているが、その後計測値の傾きが大きくなっている。

図-6は、No. 8-1および8-2のほ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。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る。No. 8-1の1000回載荷、No. 8-2の4000回載荷までにおいては、引張と圧縮の主ひずみが同程度の値となる二軸応力状態となっていることがわかる。No. 8-1では500 μ 以上の引張ひずみが計測されており、ひび割れが発生した状態になっているものと思われる。No. 8-2では、200 μ 程度の引張ひずみが計測されているが、同位置におけるスターラップのひずみが、ほぼ0であることより、大きなひび割れが発生していない状態であると考えられる。No. 8-1では1000回載荷以後、大きくひ

ずみが増加しているが、これは鉛直および軸方向のひずみが大きく増加したことによるものであり、ゲージ部のひび割れの開口によるものと考えられる。また、8-2においても4000回載荷以後、ひずみが増加しているが、これは斜め方向のゲージがほぼ0に変化したため、このゲージの不良によるものと考えられる。圧縮の主ひずみは、大きく値が変動するまではほぼ一定値を示している。弾性体と仮定し測定結果からせん断応力度を求めると、No. 5-1では6～10 N/mm²程度、No.5-2では4.2 N/mm²である。また、作用せん断力から求めたせん断応力度は、それぞれ3.2 N/mm²および2.6 N/mm²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、No. 5-1では6.5～15 N/mm²および-7.2～-5.5 N/mm²程度、No. 5-2では4.5 N/mm²および-3.9 N/mm²である。

4. ま と め

水中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、載荷点および支点形状が疲労寿命に与える影響、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について検討を行った。その結果を以下に示す。

- 1) 水中におけるせん断疲労の破壊形式は、せん断スパンにおける斜め圧縮破壊であり、せん断補強筋のないはりとして検討するということは合理的でない。
- 2) 載荷点および支点の形状は疲労寿命に大きな影響を与え、載荷点に直径3 cmの丸棒を用いた場合には、支圧応力によりコンクリートに局部的な疲労破壊がおこり、載荷点がはりに貫入する。また、載荷点あるいは支点に丸棒を用いた場合には、丸棒とはりの接触部が偏摩耗し、はりあるいは載荷版が傾き偏心載荷状態となる。その結果、疲労寿命が短くなる。
- 3) 支点に平板を用いた場合の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31%であり、斜め圧縮破壊耐力の計算値を用いた場合には20%である。しかしながら、載荷点および支点に平板を用いた場合には、この結果より大きくなることが予想される。
- 4) スターラップのひずみは、乾燥状態のりと同様に、斜めひび割れが入ると荷重の繰返しとともに徐々に増加する。
- 5) せん断スパンにおけるコンクリートの主ひずみは、引張と圧縮のひずみが同程度の値となる二軸応力状態となっている。圧縮の主ひずみは、繰返し載荷に伴う変化はほとんどない。

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) 菅田紀之・尾崎訓・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.