

# 論文 水中における RC はりのせん断疲労耐力に及ぼすスターラップの補強効果

菅田 紀之<sup>\*1</sup>

要旨：せん断補強鉄筋量が異なる3種類の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、せん断疲労耐力等について検討した。その結果、せん断補強鉄筋量を増加させるとせん断疲労耐力の静的せん断耐力に対する比は小さくなり、静的せん断耐力の向上に相当するだけの補強効果が得られないことが明らかになった。また、コンクリートの受持つせん断力が載荷の繰返しにともない減少し、繰返し初期の段階において分担せん断力が初載荷時の1/2以下に減少する場合があることを示した。

キーワード：せん断疲労, 水中疲労, せん断疲労耐力, せん断, スターラップ, RC はり

## 1. はじめに

海洋構造物を設計する場合、海水等の作用に対する耐久性の検討のほか、波浪などにより受ける疲労作用に対する安全性の検討が必要である。海洋コンクリート構造物のように水中環境下において湿潤状態にある鉄筋コンクリートはり部材の疲労特性については、1) 静的載荷時には曲げ破壊する部材においてもせん断破壊しやすい、2) 破壊形式はせん断圧縮型になりやすい、3) 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、4) せん断力の繰返しに伴い、コンクリートの分担せん断力が減少し、せん断補強鉄筋の分担せん断力が増加する、5) せん断補強量によりせん断疲労耐力が異なること、等が明らかになっている<sup>1)~4)</sup>。しかしながら、疲労特性へのせん断補強鉄筋量の影響、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鉄筋量の影響に注目し、せん断補強鉄筋量の異なる3種類の鉄筋コンクリートはりを作製して、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、せん断疲労耐力および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

実験には、図-1に示すようにせん断補強鉄筋量の異なる3種類のRCはりを用いた。軸方向鉄筋にはD19を2本用い(鉄筋量:5.73 cm<sup>2</sup>, 鉄筋比:3.47%), 有効高さ $d$ を16.5 cmとして配置している。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鉄筋量を変えて行った。せん断補強鉄筋にはスターラップとしてD6を用い、破壊スパンに12 cm, 8 cm, 5.33 cm 間隔で配置した。せん断補強鉄筋比 $p_w$ はそれぞれ0.53%, 0.79%および1.19%である。以後、それぞれのはりをシリーズ1, 2および3と呼ぶこととする。荷重の載荷は、支間長を110 cm, シリーズ1および2のせん断スパン $a$ を48 cm, せん断スパン比 $ald$ を2.91, シリーズ3のせん断スパン $a$ を32 cm, せん断スパン比 $ald$ を1.94として行った。はりの製作に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。疲労試験開始時点における圧縮強度は、26.0 ~ 33.7 N/mm<sup>2</sup>であり、その平均値は29.8 N/mm<sup>2</sup>であった。また、使用した鉄筋はSD295Aであり、その降伏点応力度および引張強度を表-2に示す。スターラップには、疲労試験中におけるひずみの変化を計測するために、ゲージ長2 mm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に示すとおりである。なお、

<sup>\*1</sup> 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)

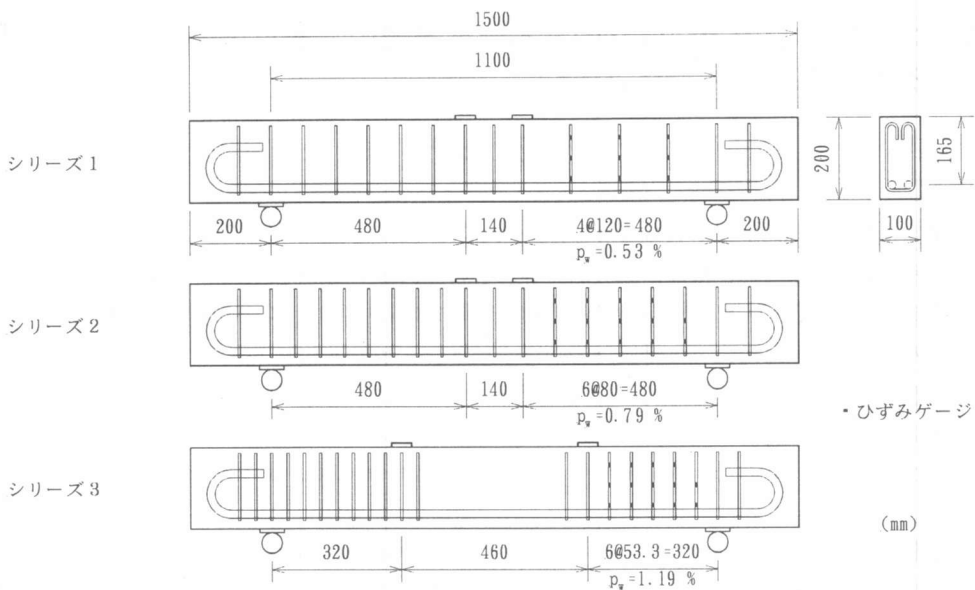


図-1 RCはりおよびひずみゲージ位置

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		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 <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D6	386	533
D19	384	552

はりの養生は試験開始時まで水中において行った。養生期間は2ヶ月から3ヶ月である。

疲労試験は電気油圧サーボ式、容量 300 kN の疲労試験機を用いて行った。はりを水槽内に設置し水没させ、載荷速度が 3 Hz である正弦波荷重を作用させた。

### 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。表中の  $V_c$  の計算は、せん断スパン比  $a/d$  が 2.91 の場合には式(1)<sup>5)</sup> を、 $a/d$  が 1.94 の場合にはディープビームの式(2)<sup>6)</sup> を用いて行った。また、 $V_y$  の計算には、式(3)<sup>7)</sup> に示すスターラップを使用した場合のせん断耐力式を用いた。

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

$$V_c = 0.244(1 + \sqrt{100p})(1 + 3.33r/d) f_c^{2/3} b_w d [1 + (a/d)^2] \quad (2)$$

$d$ : 有効高さ  $p$ : 主鉄筋比  
 $b_w$ : 腹部の幅  $a$ : せん断スパン  
 $r$ : 支圧板の幅 (ここでは50mm)  
 $f'_c$ : コンクリートの圧縮強度

$$V_y = V_c + A_w f_{wy} (z/s_s) / \beta_x \quad (3)$$

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

(シリーズ1, 2: 0.970

シリーズ3: 0.646)

本実験に用いたはりは静的載荷時には曲げ破壊するものであったことより、はりに作用させた最大せん断力  $V_{max}$  は式(3)より求めたせん断耐力  $V_y$  を基準にして設定し、シリーズ1および2に対しては4レベル、シリーズ3に対しては3

表-3 試験結果一覧

シリーズ	No.	$V_c$ (kN)	$V_y$ (kN)	$V_{max}/V_y$ (%)	$V_{max}$ (kN)	$V_{min}$ (kN)	破壊回数 (回)	破壊性状
1	1	28.6	58.7	50.0	29.4	5.9	241,751	せん断圧縮
	2	28.6	58.7	45.0	26.4	5.9	433,837	せん断圧縮
	3	29.2	59.3	50.0	29.7	5.9	166,776	せん断圧縮
	4	29.2	59.3	45.0	26.7	5.9	278,998	せん断圧縮
	5	30.6	60.7	50.0	30.4	6.1	790,348	せん断圧縮
	6	30.6	60.7	40.0	24.3	6.1	>2,000,000	-
	7	30.8	60.9	45.0	27.4	6.1	389,420	せん断圧縮
	8	30.8	60.9	50.0	30.5	6.1	112,036	せん断圧縮
	9	29.8	59.9	40.0	24.0	6.0	>2,000,000	-
	10	29.8	59.9	45.0	27.0	6.0	>2,000,000	-
	11	30.6	60.7	50.0	30.4	6.1	91,519	せん断圧縮
	12	30.6	60.7	45.0	27.3	6.1	>2,000,000	-
	13	30.5	60.6	55.0	33.3	6.1	63,397	せん断圧縮
	14	30.5	60.6	55.0	33.3	6.1	120,341	せん断圧縮
	15	30.2	60.3	55.0	33.2	6.0	32,216	せん断圧縮
	16	30.2	60.3	55.0	33.2	6.0	195,590	せん断圧縮
2	1	29.7	74.9	40.0	30.0	7.5	340,601	せん断圧縮
	2	29.7	74.9	45.0	33.7	7.5	203,420	曲げ圧縮
	3	29.8	75.0	40.0	30.0	7.5	289,940	せん断圧縮
	4	29.8	75.0	35.0	26.3	7.5	>2,000,000	-
	5	29.7	74.9	45.0	33.7	7.5	128,833	せん断圧縮
	6	29.7	74.9	40.0	30.0	7.5	379,653	せん断圧縮
	7	29.3	74.5	45.0	33.5	7.4	107,570	せん断圧縮
	8	29.3	74.5	40.0	29.8	7.4	625,750	せん断圧縮
	9	30.6	75.8	45.0	34.1	7.6	49,905	曲げ圧縮
	10	30.6	75.8	50.0	37.9	7.6	10,176	曲げ圧縮
	11	29.8	75.0	45.0	33.8	7.5	114,718	せん断圧縮
	12	29.8	75.0	50.0	37.5	7.5	57,257	曲げ圧縮
	13	30.4	75.6	35.0	26.5	7.6	1,544,296	せん断圧縮
	14	30.4	75.6	40.0	30.2	7.6	859,849	せん断圧縮
	15	29.1	74.3	45.0	33.4	7.4	242,770	せん断圧縮
	16	29.1	74.3	35.0	26.0	7.4	1,852,233	せん断圧縮
3	1	50.7	152.5	34.0	51.9	15.3	869,349	せん断圧縮
	2	50.7	152.5	50.0	76.3	15.3	996	曲げ圧縮
	3	45.1	146.9	41.5	61.0	14.7	18,907	せん断圧縮
	4	45.1	146.9	34.0	49.9	14.7	262,296	せん断圧縮
	5	46.9	148.7	41.5	61.7	14.9	11,440	曲げ圧縮
	6	46.9	148.7	41.5	61.7	14.9	35,520	せん断圧縮
	7	44.5	146.3	41.5	60.7	14.6	11,356	せん断圧縮
	8	44.5	146.3	34.0	49.7	14.6	83,044	せん断圧縮
	9	46.0	147.8	34.0	50.3	14.8	60,405	曲げ圧縮
	10	46.0	147.8	34.0	50.3	14.8	87,032	せん断圧縮

レベルとした。また、最小せん断力  $V_{min}$  は  $V_y$  の 10 % である。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。

はりのせん断破壊は、すべてせん断補強鉄筋量の少ないスパンで発生した。その破壊状況は、主に斜めひび割れ部コンクリートの剥離、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を伴う、せん断圧縮型の破壊であった。

### 3.2 せん断疲労耐力

各シリーズの生存確率 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。これらは、せん断破壊を生じた結果のみを用い、式(3)より求めた  $V_y$

を基準とした荷重比に基づいて求めた。文献 1) および 2) の  $V_c$  の算定に式(2)を適用した結果も示している。一般に、疲労強度あるいは疲労耐力は基準値に対する比率のことを示すが、本論文では基準値に対する比率を疲労耐力比、耐力

の絶対値を疲労耐力と呼ぶこととする。 $S-N$  回帰直線を図-2 および 3 に示す。図-2 はせん断スパン比  $a/d$  が 2.97 の結果、図-3 はせん断スパン比  $a/d$  が 1.94 の結果である。図中の点はせん断破壊を生じた結果および非破壊のデータ

表-4 S-N回帰直線式および200万回せん断疲労耐力

シリーズ	せん断スパン比 $a/d$	せん断補強鉄筋比 (%)	せん断耐力 $V_y$ (kN)	S-N 回帰直線式	疲労耐力比 $V_f/V_y$ (%)	疲労耐力 $V_f$ (kN)
1	2.97	0.53	59.2	$S = 0.945 - 0.092 \log N_f$	36.5	21.6
2	2.97	0.79	73.5	$S = 0.889 - 0.098 \log N_f$	27.4	20.1
文献 2)	1.94	0.40	96.3	$S = 0.560 - 0.048 \log N_f$	26.0	25.0
文献 1)	1.94	0.79	117.5	$S = 0.839 - 0.093 \log N_f$	25.7	30.2
3	1.94	1.19	148.8	$S = 0.704 - 0.083 \log N_f$	18.4	27.4

$$S = (V_{max} - V_{min}) / (V_y - V_{min})$$

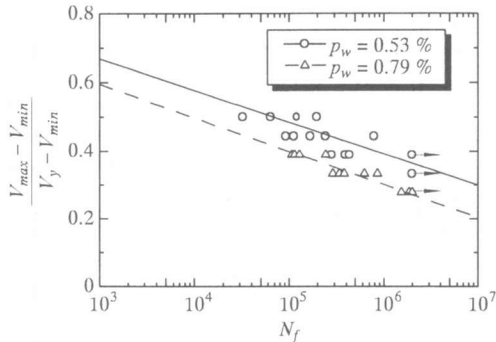


図-2 S-N関係 ( $a/d = 2.97$ )

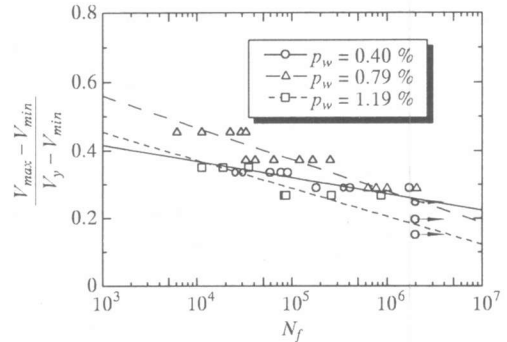


図-3 S-N関係 ( $a/d = 1.94$ )

を示している。せん断補強鉄筋比  $p_w$  が 0.40 % の結果を除くと、それぞれの S-N 回帰直線はほぼ平行になっており、せん断補強量が増加すると 200 万回せん断疲労耐力比が減少していることがわかる。せん断スパン比  $a/d$  が 2.97 の場合、せん断補強鉄筋比  $p_w$  が 0.53 % から 0.79 % に増加すると、静的せん断耐力  $V_y$  は 59.2 kN から 73.5 kN に増加している。しかしながら、せん断疲労耐力  $V_f$  は、21.6 kN から 20.1 kN に若干減少している。せん断スパン比  $a/d$  が 1.94 の場合については、せん断補強鉄筋比  $p_w$  が 0.40 % から 0.79 % に増加するとせん断疲労耐力  $V_f$  も 25.0 kN から 30.2 kN に増加している。しかしながら、さらに  $p_w$  が 1.19 % に増加した場合、静的せん断耐力  $V_y$  は 1.5 倍程度に増加しているにも関わらず、反対にせん断疲労耐力  $V_f$  は 27.4 kN に減少している。このように、せん断補強量を増加させても疲労耐力が増加しない場合があることがわかった。

次に、式(1)および(2)により求めた  $V_c$  を基準

とした荷重比による S-N 回帰直線および 200 万回せん断疲労耐力を求めると表-5 および図-4、5 のようになる。この場合の回帰式の計算は、実験ごとに荷重比が異なるため生存確率の概念は導入せず、荷重比と破壊回数との関係から求めた。図には、井上等<sup>4)</sup>によって同様にして求められた、せん断補強鉄筋のない鉄筋コンクリートはりの水中における S-N 回帰直線も示している。せん断スパン比  $a/d$  が 2.97 の場合、せん断補強の効果によりせん断疲労耐力が、せん断補強のない場合よりも向上していることがわかる。また、短寿命域においてその効果が大きいことがわかる。200 万回せん断疲労耐力比は 83.0 % および 81.9 %、疲労耐力  $V_f$  は 24.9 kN および 24.3 kN であり、せん断補強鉄筋量によらずほぼ等しい結果となっている。せん断スパン比  $a/d$  が 1.94 の場合については、せん断補強鉄筋量が増加すると疲労耐力の向上がみられ、27.7 kN から 30.4 kN および 39.8 kN へ増加している。しかしながら、せん断補強鉄筋比  $p_w$

表-5 S-N回帰直線式および200万回せん断疲労耐力

シリーズ	せん断スパ ン比 $a/d$	せん断補強 筋比 (%)	せん断耐力 $V_c$ (kN)	S-N回帰直線式	疲労耐力比 $V_f/V_c$ (%)	疲労耐力 $V_f$ (kN)
1	2.97	0.53	30.0	$S = 1.800 - 0.154 \log N_f$	83.0	24.9
2	2.97	0.79	29.7	$S = 2.545 - 0.274 \log N_f$	81.9	24.3
文献2)	1.94	0.40	51.1	$S = 1.292 - 0.119 \log N_f$	54.2	27.7
文献1)	1.94	0.79	51.1	$S = 2.188 - 0.253 \log N_f$	59.4	30.4
3	1.94	1.19	46.1	$S = 2.734 - 0.297 \log N_f$	86.3	39.8

$$S = (V_{max} - V_{min}) / (V_c - V_{min})$$

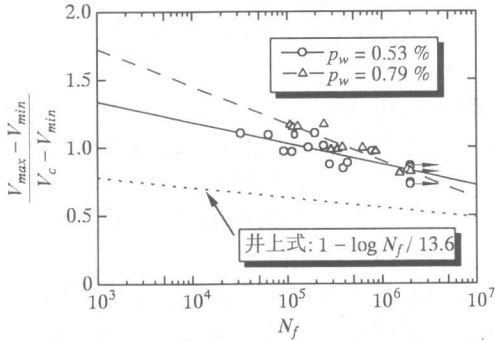


図-4 S-N関係 ( $a/d = 2.97$ )

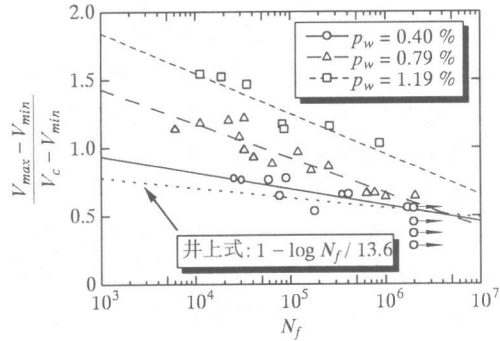


図-5 S-N関係 ( $a/d = 1.94$ )

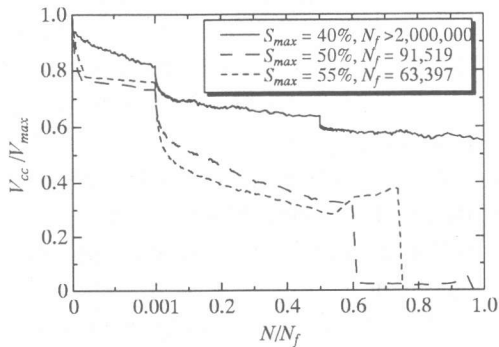


図-6 コンクリートの分担せん断力の変化  
シリーズ1

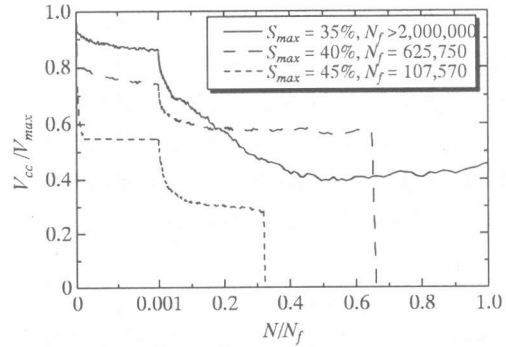


図-7 コンクリートの分担せん断力の変化  
シリーズ2

が0.40%の回帰直線は、せん断補強鉄筋のない場合とほぼ一致しており、せん断補強の効果がほとんど得られていないことがわかる。せん断補強鉄筋比  $p_w$  が0.79%の場合、短寿命域において疲労耐力の向上が見られるが、200万回疲労耐力についてはせん断補強鉄筋のない場合に相当している。また、せん断補強鉄筋比  $p_w$  が1.19%の場合、せん断疲労耐力  $V_f$  が39.8 kNと算定されているが、 $V_c$  を基準として求めた疲労耐力  $V_f$  の値27.4 kNとは大きく異なっている。

### 3.3 コンクリートの分担せん断力の変化

図-6および7は、シリーズ1および2の最大せん断力  $V_{max}$  作用時におけるコンクリートの分担せん断力の変化を示している。コンクリートの分担せん断力  $V_{cc}$  は次式により求めた。

$$V_{cc} = V_{max} - \sum A_w E_w \varepsilon_w \quad (4)$$

$A_w$  : スターラップの断面積

$E_w$  : スターラップの弾性係数

$\varepsilon_w$  : スターラップのひずみ

計算に用いたスターラップのひずみ値は、はりのひび割れあるいは破壊状況から判断して決定した。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  $E_w \varepsilon_w$  を降伏点応力度  $386 \text{ N/mm}^2$  としている。図の横軸には破壊回数と荷重載荷回数の比をとり、 $N/N_f < 0.001$  の範囲は拡大して示している。なお、200万回載荷時に非破壊の場合には  $N_f$  を200万回としている。また、 $S_{max}$  とは作用最大せん断力  $V_{max}$  のせん断耐力  $V_y$  に対する比  $V_{max}/V_y$  である。

コンクリートの分担せん断力は、破壊回数の5%程度までの載荷回数で大きな減少を起し、その後は緩やかな減少傾向を示している。シリーズ1の  $S_{max}$  が50%および55%、シリーズ2の  $S_{max}$  が40%および45%の実験ケースにおいて分担せん断力が急激に0方向に推移する現象は、スターラップの降伏によるものである。シリーズ1の  $S_{max}$  が50%および55%、シリーズ2の  $S_{max}$  が35%のケースでは、初載荷時ににおいてコンクリートの分担せん断力が80%から95%であったものが、破壊回数の30%から40%の荷重載荷で約1/2に減少していることがわかる。また、シリーズ2の  $S_{max}$  が45%のケースでは、破壊回数の10%までに分担せん断力が1/2以下になっていることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究では、せん断補強鉄筋量の異なる3種類の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、せん断補強の効果等について検討を行った。その結果をまとめると以下ようになる。

- 1) はりの破壊は、主に斜めひび割れ部コンクリートの剥離、せん断スパン荷重載荷点近傍の曲げ圧縮部コンクリートの圧壊を伴うせん断圧縮型の破壊形式になる。
- 2) せん断スパン比が2.97であるはりの200万回せん断疲労耐力は、せん断補強量によらずほぼ等しい。
- 3) 耐力の基準値としてせん断補強鉄筋のない

場合のせん断耐力を用いて  $S-N$  関係を導き、200万回せん断疲労耐力を求めると、せん断スパン比が1.94であるはりのせん断疲労耐力は、せん断補強量の増加とともに大きくなる。

- 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。その減少割合は荷重の繰返し初期において大きく、繰返し初期の段階で分担せん断力が初載荷時の1/2程度まで減少する場合がある。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 菅田紀之・尾崎詔・川原健吾：水中においてせん断疲労荷重を受けるRCはりのせん断挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 3, pp.355～360, 1998.
- 3) 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.
- 4) 井上正一・吉野公・黒田保・川原一夫：水中RCはりのせん断疲労挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 3, pp.289～394, 1998.
- 5) 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.
- 6) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式，第2回RC構造物のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム，日本コンクリート工学協会，pp.116～126, 1983.
- 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.