

論文 水中 RC はりのせん断疲労挙動

井上 正一^{*1}, 吉野 公^{*2}, 黒田 保^{*3}, 川原 一夫^{*4}

要旨: 海洋コンクリート構造物の疲労性状を明確にするため、コンクリート強度、主鉄筋量、せん断補強鉄筋量、せん断スパン比を要因に選んだ94体のRCはりの疲労試験を実施している。その結果、気中と水中では破壊様式が異なり、気中では主鉄筋の疲労破断によって曲げ破壊するRCはりが水中ではせん断破壊になりやすいこと、この場合のせん断疲労破壊ではスターラップの疲労破断を伴わないこと、などが明らかになった。本論文では、この特異なせん断疲労性状を述べるとともに、繰返し載荷に伴うスターラップ応力の推移やせん断分担力の推移を検討した結果を述べている。

キーワード: 水中疲労、せん断疲労、疲労強度、疲労寿命、せん断分担力、せん断破壊

1. はじめに

近年建造件数の増えている海洋コンクリート構造物においては、海水中の塩化物イオンによるコンクリートや鉄筋腐食に対する耐久性だけでなく、供用寿命中に受ける10⁸回以上の波荷重による疲労に対する安全性の配慮も必要となる。さらに、海洋のような湿潤環境に曝されるコンクリート構造物の疲労に関しては、使用材料であるコンクリートや鉄筋の疲労強度は気中におけるよりも大幅に低下し、鉄筋においては疲労限が消失する。また、これらを複合したコンクリート構造としての疲労破壊様式に関しても、気中と水中とでは破壊様式が異なり、気中では主鉄筋の疲労破断によって曲げ破壊をする部材であっても水中ではせん断破壊になりやすい。また、この場合のせん断破壊においても、気中のせん断疲労破壊がスターラップの疲労破断を伴って破壊するのに対して、水中ではスターラップの疲労破断を伴わないせん断破壊をするのが特徴である。

そこで、本研究では、まず、水中でのこの特異なせん断疲労強度を明確にする。次に、水中

でのせん断疲労破壊機構を解明するために、何体かのはりで測定したスターラップひずみに基づき、繰返し載荷に伴うせん断分担力の推移について検討した結果を述べる。

2. 実験概要

2. 1 供試体の種類と作製

表-1および図-1に、実験計画、はりの種類、使用材料の機械的性質および載荷方法の詳細を示す。RCはりは、せん断補強鉄筋の無いはりとスターラップ筋でせん断補強したはりで、主鉄筋比($p_w = 1.9 \sim 2.8\%$)、コンクリート強度(疲労試験実施時(材令100日以上)の圧縮強度 $f'_c = 23 \sim 58 \text{ N/mm}^2$)、せん断スパン比($a/d = 2.0 \sim 4.0$; $d = 16.5 \text{ cm}$)、およびせん断補強量を試験要因として選んだ。RCはりの断面寸法は、全て $12.5 \times 20 \times 170 \text{ cm}$ 、有効高さ $d = 16.5 \text{ cm}$ である。なお、RCはりは全て2本の主鉄筋を用いており、はりの種類、例えば、表-1のD19-40は、D19が主鉄筋量 $A_s = 2D19 = 5.73 \text{ cm}^2$ であることを、次の数字40は28日目標圧縮強度が $f'_c = 40 \text{ N/mm}^2$ のコ

*1 烏取大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*2 烏取大学講師 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 烏取大学助手 工学部土木工学科 工修 (正会員)

*4 烏取大学大学院 工学研究科土木工学専攻

ンクリートを用いていることを示している。なお、せん断補強は、 $\phi 6$ か $\phi 9$ の普通丸鋼(SR235)ないしは D10 の異形棒鋼(SD295)で作製した鉛直スターラップを用いて行った。この場合、スターラップの所要量は、土木学会コンクリート標準示方書(以下、標準示方書と略記)に基づいて算定されるスターラップ筋降伏時のせん断耐力が算定曲げ耐力の 1.3 倍以上となるように設計・配置した(表-1 の $V_{y_{cal}}$ と $P_{uc}/2$ を参照)。また、特に、D10 のスターラップを用いてせん断補強をする場合には、スターラップ筋の所要量はコンクリートの受け持つせん断力をゼロと仮定した場合にもせん断耐力が曲げ耐力の算定値を上回るように設計・配置した(同表-1 の V_{sy} と $P_{uc}/2$ の値参照)。

はり供試体は、同一打設日ごとに 8 体作製し、材齢 1 日で脱枠、以後 27 日間の水中養生を施した後、実験室内で保存・乾燥させた。疲労試験に際しては、試験実施 1 週間前より鋼製の水槽内にこれらのはり供試体を水没させ、その状態のままで試験した。なお、疲労試験は各荷重比ごとに、2 体以上の供試体を試験している(表

- 1 参照)。

2.2 載荷とスターラップひずみの測定法

はりの載荷は図-1 に示すような 2 点対称

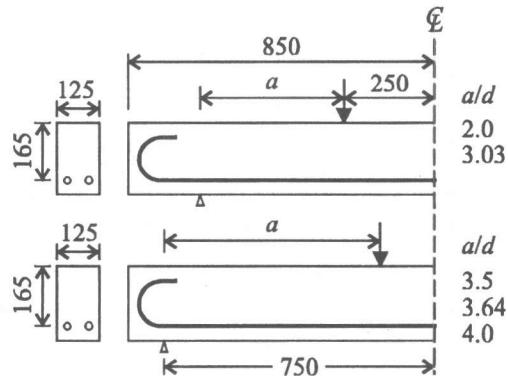


図-1 はりの詳細 (単位:mm)

表-1(A) 実験計画 (せん断補強鉄筋無)

はりの 種類	a/d	コンクリート			せん断耐力 (kN)			荷重比 P_s (%)
		圧縮強度 $f'c_{28}$	降伏強度 f'_c	主鉄筋 f_y	降伏強度 f_{wy}	直径 (mm)	間隔 (mm)	
D16-20	3.03	20	23.5		27.9		38.7	60, 50, 45
		2.0			55.7	79.4	60, 55, 50	
D16-40	3.03	40	52.7		36.8	47.0	60, 55, 50, 45	
		4.0			33.3	35.3	65, 60, 55, 50	
D19-20	3.03	20	26.4		32.8	44.1	60, 50, 40	
		2.0			60.3	100.5	60, 55, 50, 45	
D19-40	3.03	40	50.4		40.7	46.6	80, 70, 60	
		4.0			36.8	39.7	60, 55, 50	

表-1(B) 実験計画と静的試験結果 (せん断補強鉄筋有り)

はりの 種類	a/d	コンクリート			スターラップ			せん断耐力の計算値			静的曲げ耐力 (kN)	荷重比 P_s (%)	供試 体数	
		圧縮強度 $f'c_{28}$	降伏強度 f'_c	主鉄筋 f_y	降伏強度 f_{wy}	直径 (mm)	間隔 (mm)	V_{cu}	V_{sy}	$V_{y_{cal}}$	計算値 $P_{uc}/2$	実験値 $P_{u/2}$		
D16-20	3.03	20	26.4	375	235	$\phi 6$	56	29.0	34.3	63.3	41.2	47.5	60, 55, 50	4
D16-40	3.03	40	49.2	404	295	D10	125	35.8	48.2	84.0	41.5	50.5	60, 55, 50	4
D19-25	3.03	25	33.2	379	295	D10	100	35.4	60.2	95.6	58.5	64.0	60, 55, 50	2
	3.03		50.5	361	235	$\phi 9$	83	40.8	51.6	92.4	60.2	67.1	60, 55, 50	4
D19-40	3.03	40	47.2	379	295	D10	100	39.9	60.2	100.1	62.5	67.0	60, 55, 50	2
	3.64		49.3	361	235	$\phi 9$	86	37.9	49.8	87.7	50.0	54.9	60, 55, 50	4
D19-100	3.03	100	114.5	408	295	D10	83	53.5	72.3	125.8	70.0	73.5	70, 65, 60	2
	3.03							31.5		83.1	50.9	59.8	50	2
D19-18	3.5	18	23.2	361	235	$\phi 9$	83	29.9	51.6	81.5	44.1	49.0	52	2
	4.0							28.6		80.2	38.6	44.1	51	2
	3.03							39.0		83.6	59.1	64.7	53	2
D19-30	3.5	30	44.2	361	235	$\phi 9$	96	37.0	44.6	81.6	51.2	55.4	53	2
	4.0							35.4		80.0	44.8	52.4	50	2
	3.03							42.7		81.6	61.3	71.5	51	2
D19-50	3.5	50	58.6	361	235	$\phi 9$	110	40.5	38.9	79.4	53.0	62.2	51	2
	4.0							38.7		77.6	46.4	54.4	51	2

* 終局曲げモーメント M_u の算定式 $M_u = A_s \cdot f_y \cdot (d - 0.4x)$, $x = A_s \cdot f_y / (0.68 \cdot b \cdot f'_c)$, $P_{uc} = 2 \cdot M_u / a$

* $V_{y_{cal}}$: スターラップ筋の降伏を仮定した時のせん断耐力の算定値で, $V_{y_{cal}} = V_{cu} + V_{sy}$, $V_{sy} = A_w \cdot f_{wy} \cdot (z/s)$, $z = d/1.15$, A_w はスタラップ 1 組の断面積で $\phi 6$, $\phi 9$, D10 に対して, それそれぞれ, $A_w = 0.57, 1.27, 1.427 \text{ cm}^2$

* V_{cu} は本文の式 (1) or (2) による算定値を示す。* 供試体数は各荷重比ごとに用いた供試体本数を示す。

載荷とした。疲労試験は、容量 400 kN、電気油圧サーボ機構を有する疲労試験機を用い、載荷速度 5Hz、荷重と時間との関係には正弦波形を採用して行った。疲労試験における上限荷重比 P_s は疲労試験に先立って行った各はりの静的終局耐力（スターラップのないはりではせん断耐力を、せん断補強したはりでは曲げ耐力を指す）の百分率で数水準を選定し、一方、下限荷重比は P_s の 10% と一定として行った。

スターラップひずみの測定は疲労試験中の所定の繰返し回数ごとに行つた。なお、この測定においては、1 チャンネル当たりのデータのサンプリングタイムは 10 msec. とし、スターラップのはり中央高に相応する位置に貼付した電気抵抗線ひずみゲージ（検長 2 mm）を介してデータロガー・アナライザを用いて行った。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊様式

せん断補強鉄筋のない RC はりの破壊様式は、D16-40 の $a/d = 4.0$ のはりが静的荷重下で曲げ引張破壊をしたが、残りのはりは静的と疲労試験、 a/d 、コンクリート強度等の試験要因の相違にかかわらず、全てせん断破壊をした。一方、スターラップを配置したはりの破壊様式は、静的試験においては全てのはりが曲げ引張破壊を、水中での疲労試験においては、D19-18、 $a/d = 4.0$ のはり 2 体のうちの 1 体が曲げスパン内のコンクリートの圧縮疲労で曲げ破壊したことを除くと、その他のはりは全てせん断破壊をした。なお、この場合のせん断疲労破壊では、高強度コンクリートを用いた D19-100 のはりで上限荷重比が大きい $P_s = 70\%$ で試験したはり 1 体がスターラップの疲労破断を伴う形のせん断破壊したが、他のはりはスターラップの疲労破断を伴わないタイプのせん断破壊を示した。

3.2 せん断疲労強度

図-2 は、せん断補強鉄筋のない RC はりのせん断に対する S-N 線図を示したもので、

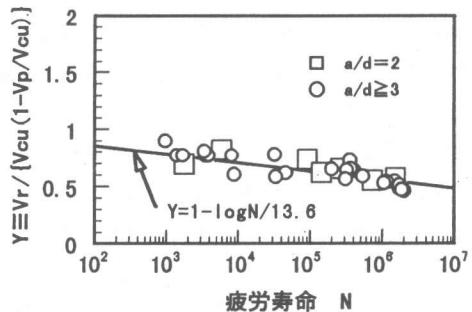


図-2 S-N線図

図中の縦軸の静的せん断耐力 V_{cu} としては、以下の解析を含め二羽式 ($a/d \geq 3$ の場合には式(1)²⁾ を、 $a/d = 2$ の場合にはデープビームに対するせん断耐力式(2)³⁾ を用いている。また、 $V_r = V_{max} - V_{min}$ 、 $V_p = V_{min}$ で、 V_{max} と V_{min} はそれぞれ上限および下限荷重作用時のせん断力で、 V_r は変動荷重によるせん断力である。

$$V_{cu} = 0.20 \cdot \left(P_w \cdot f'_c \right)^{1/3} \cdot d^{-1/4} \cdot \left\{ 0.75 + 14 / (a/d) \right\} \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

$$V_{cu} = 0.25 \cdot b_w \cdot d \cdot f'_c^{2/3} \cdot \left(1 + \sqrt{100 P_w} \right) \cdot \left(1 + 3.33 r/d \right) / \left(1 + (a/d)^2 \right) \quad (2)$$

ここに、 V_{cu} の単位は N で、 b_w はウエブ幅 (mm)、 r は支圧板の幅 (ここでは 30 mm)、 P_w は鉄筋比 ($A_s/b_w d$)、 A_s は主鉄筋量 (mm^2)、 f'_c はコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2) で、ここでは疲労試験時の圧縮強度を用いている。

せん断補強鉄筋のない水中 RC はりのせん断 S-N 線式は、Goodman タイプの次式を用いれば、コンクリート強度、主鉄筋量や a/d の多少にかかわらず、一本の直線式で近似できることがわかる。

$$Y \equiv \frac{V_r}{V_{cu}(1 - V_p/V_{cu})} = 1 - \log N/K \quad (3)$$

示方書によれば、せん断補強鉄筋のない棒部材の気中でのせん断疲労に対する S-N 線式として、上式における K に、 $K=10$ を用いることを規定している。

本研究における回帰式の傾きは $K=13.6$ となり、標準示方書における押抜せん断疲労に対する $S-N$ 線式の傾き ($K=14$) に近い値となっている。このことは、せん断補強鉄筋のない RC はりの水中疲労強度は気中におけると大差がない、少なくとも本研究においては低下していないといえる。なお、海洋コンクリート構造物を対称とした NPD 基準⁴⁾では、せん断に対する $S-N$ 式として $K=12.5$ を用いることを推奨している。

図-3 は、本研究および児島ら⁵⁾が行ったせん断補強をした RC はりに対して、せん断で疲労破壊したはりの $S-N$ 線図を示したもので、参考のためにこれらのはりと同一の a/d の範囲 ($a/d \geq 3$) で試験されたせん断補強鉄筋のないはりの結果 (図-2 の一部) も併記している。なお、この場合も縦軸の V_{cu} は、せん断補強鉄筋の有無によらず同一で、せん断補強筋のないせん断耐力式(1)より算定される。

図より、スターラップを配置したはりの疲労寿命は、スターラップのないものに較べて、高せん断力作用時には疲労寿命が長くなるが、作用せん断力が小さくなつて長寿命域になるに伴つて両者の疲労寿命に差異がなくなる傾向のあることがわかる。このことは、海洋構造物に作用する波荷重による疲労のように長寿命域を対象とする場合には、スターラップを配置しても疲労強度の改善を期待しにくいことを示している。

3.3 スターラップ応力とはりの疲労寿命

図-4 は、標準示方書におけるスターラップの応力算定式(4)において、繰返し載荷に伴つて低下するコンクリートの受持つ残存せん断分担力 $k_2 \cdot V_{cu}$ がゼロであるとして算定されるスターラップの応力振幅 σ_{wr} とはりの疲労寿命との関係を示したもので、児島ら⁴⁾の結果も併記している。また、図中の曲線はスターラップ筋の設計 $S-N$ 線式 (スターラップの疲労破断によってせん断破壊するはりの疲労寿命を予測する式で、ここでは、式(5)を水中

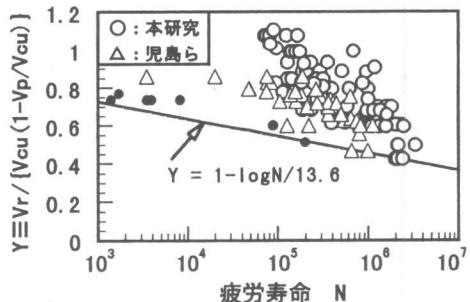


図-3 $S-N$ 線図

D19-40 はりに適用した結果を示しているが、他のはりに適用した場合も曲線はほとんど重なる結果となる) を描いたものである。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{wr} &= \frac{(V_p + V_r - k_2 V_{cu}) s}{A_w z (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)} \frac{V_r}{V_p + V_r + V_{cu}} \\ \sigma_{wp} &= \frac{(V_p + V_r - k_2 V_{cu}) s}{A_w z (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)} \frac{V_p + V_{cu}}{V_p + V_r + V_{cu}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$f_{wrd} = \frac{1}{2} \left\{ 190 \frac{10^\alpha}{N^{0.12}} \left(1 - \frac{\sigma_{wp}}{f_{wu}} \right) \middle/ \gamma_s \right\} \quad (5)$$

$$\alpha = 0.81 - 0.003 \phi$$

ここに、 σ_{wr} 、 σ_{wp} ：変動荷重および永久(下限)荷重作用時のせん断力によるスターラップの応力、 f_{wu} ：スターラップの引張強度(ここでは、 $\phi=9$ の普通丸鋼と D10 異形鉄筋に対して、それぞれ、 $f_{wu}=380, 539 \text{ N/mm}^2$ を用いた)、 $\gamma_s=1.05$ 、 ϕ ：スターラップ径(mm)、 A_w 、 s ：1組のスターラップの断面積と間隔、 z はモーメントの腕長で、 $z=d/1.15$ 、 α_s は部材軸とスターラップのなす角度で、 $\alpha_s=90^\circ$ である。

図より、コンクリートが受け持つせん断分担

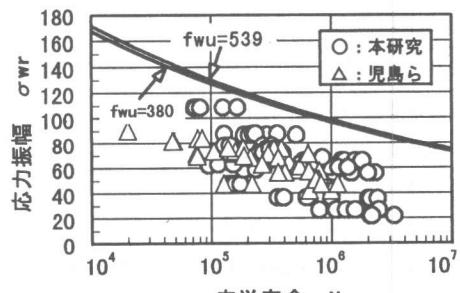


図-4 $\sigma_{wr}-N$ 関係

力がゼロ、すなわち、 $k_2 = 0$ とした（スターラップの応力振幅として最大値を見積もった）場合においても、プロット点は予測式の下側（危険側）にあることがわかる。本実験における水中RCはりは、スターラップの疲労破断によってせん断破壊に至っていないこと、さらにはきわめて小さなスターラップ応力振幅で破壊している。そのため、せん断補強した水中RCはりの疲労寿命の予測に土木学会の標準示方書の考え方、すなわち、気中RCはりのせん断疲労寿命はスターラップの疲労破断によって決まり、疲労寿命は式(5)によって予測できるとする考え方、が適用できることを示している。

3.4 せん断分担力

図-5に、繰返し載荷回数 n の増加に伴う上限荷重作用時のスターラップひずみの実測例を示す。図中の右・25等の記号は、右スパンの載荷点から支点方向に25 cmの位置にあるスターラップひずみであることを示す。このようなひずみ測定に基づいて、ここでは、所定の載荷回数 n ($= 1, 200, 500, 700, 1000, \dots$)において測定した上限荷重作用時のスターラップひずみのうちの上位2つのひずみの平均値 $\bar{\epsilon}_{w,n}$ を用い、さらにスターラップ筋の弾性係数を $E_w = 2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ して、 45° のトラス理論を適用した場合のスターラップおよびコンクリートが受け持つせん断分担力($V_{s,n}, V_{c,n}$)を、それぞれ次式より算定した。なお、 $\bar{\epsilon}_{w,n}$ を用いたのは、スターラップ応力および式(6)の $V_{s,n}$ として大きめの値でもって評価するためである。

$$V_{s,n} = A_w \cdot E_w \cdot \bar{\epsilon}_{w,n} \cdot z / s, \quad z = d / 115 \quad (6)$$

$$V_{c,n} = V_{max} - V_{s,n} \quad (7)$$

図-6に、上限荷重作用時のスターラップひずみと載荷回数との関係の一例を示す。一般に、載荷回数の増加に伴うスターラップひずみの増加は、作用せん断力が大きい方が大きいが、いずれの場合もスターラップが降伏するまでには至っていない。

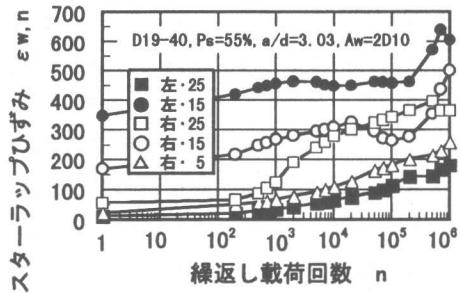


図-5 スターラップひずみの推移

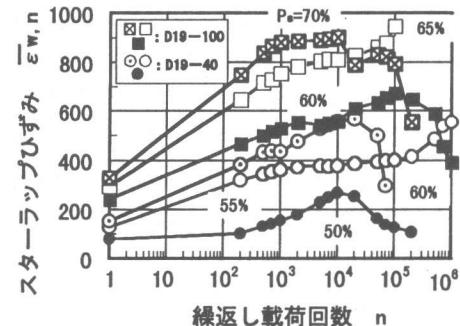


図-6 スターラップひずみの推移

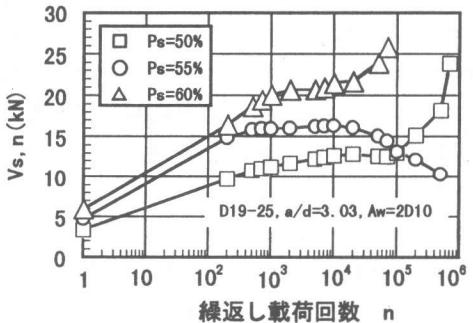


図-7 スターラップのせん断分担力の推移

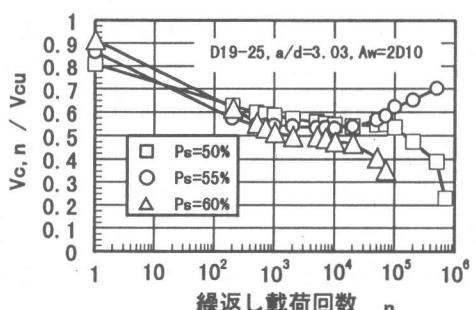


図-8 コンクリートのせん断分担力の推移

図-7, 8 に、載荷回数 n の増加に伴うせん断分担力の推移を示す。これらの図より、繰返し載荷回数の増加に伴って $V_{c,n}$ が増加する一方で、 $V_{c,1}$ は減少することがわかる。なお、標準示方書では、気中構造物に対して、繰返し回数 $n = 10^6$ で k_2 の値が 0.5 程度まで低下することを想定しているが、水中コンクリート構造物においてはより少ない載荷回数で k_2 が 0.5 以下にまで低下して破壊に至っている。

図-9 は、 n 回載荷時におけるコンクリートの受け持っている分担せん断力を初載荷時のそれとの比 $V_{c,n} / V_{c,1}$ で表示したものである。 $V_{c,n} / V_{c,1}$ 値の低下は、作用せん断力が大きい方が大きく、また高強度コンクリートを用いた場合に低下割合が大きいことがわかる。

4. まとめ

本研究は、海洋を含む湿潤環境下のコンクリート構造物が繰返し荷重を受ける場合に生じやすいせん断疲労性状を明らかにすることを目的として行ったものである。しかし、水中 RC はりのせん断疲労性状は極めて複雑で、疲労に対する安全性の照査式を構築するためにはさらなる検討が必要である。ここでは、本研究の範囲内で明らかになったことを列挙し、まとめとする。

- (1)せん断補強鉄筋を用いない RC はりの水中での S-N 線式は、コンクリート強度、 a/d 、主鉄筋量の相違によらず、1 本の Goodman タイプの式で表記できる。
- (2)スターラップの疲労破壊を伴わずにせん断破壊する水中 RC はりの疲労寿命は、高せん断力作用時にはスターラップを用いないはりの疲労寿命よりも長くなるものの、作用せん断力が小さく長寿命域になるに伴つて両者の疲労寿命に差異がなくなる。
- (3)せん断補強鉄筋を用いた水中 RC はりのせん断疲労破壊は、スターラップ応力がきわめて小さい値でも生じる。
- (4)水中 RC はりのせん断分担力は、繰返し載

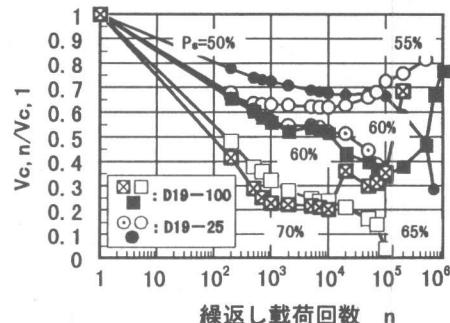


図-9 せん断分担力の推移

($a/d=3.03$, $A_w=2D10$)

荷回数の増加に伴ってスターラップの受け持つせん断分担力が増加する一方で、コンクリートの受け持つせん断分担力は減少する。この場合、コンクリートが受け持つせん断分担力は比較的早い繰返し載荷回数で初載荷時に受け持っていたせん断分担力の 0.5 以下まで低下する。

本研究は平成 9 年度科学技術研究費（基盤研究(C)）の一部で行った。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書〔設計編〕, 土木学会, p. 35, pp. 100-104, 1996
- 2) 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. 8
- 3) 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. 119-126, 1983. 10
- 4) Norwegian Petroleum Directorate: Regulation for the Structural Design of Fixed Structures on the Norwegian Continental Shelf, NPD, 1977
- 5) 池田光伸, 児島孝之, 高木宣章: シリカフュームを混入した鉄筋コンクリートはりの水中および海水中における疲労性状について, 土木学会年次講演概要集 V, pp. 530-531, 1988.