

論文 せん断補強筋の無い RC はりの疲労寿命に及ぼす潤滑油の影響

角掛 久雄*1・川満 逸雄*2・大内 一*3・鈴木 貴大*4

要旨：潤滑油に浸漬させたせん断補強筋の無い RC はりに対する疲労寿命に関する検討を行うため、下限荷重を一定として3パターンの上限荷重に対してそれぞれ最大 200 万回まで曲げ・せん断繰り返し载荷を行った。さらに、液体の違いによる影響の差異も検討するため、潤滑油の代わりに水を用いて同様な試験を行い、それぞれの疲労破壊性状や疲労寿命に関する検討を行った。その結果、上限荷重が大きいと破壊性状に液体の違いによる差異は見られず、上限荷重が小さくなると水の方が明らかに破壊挙動への影響が大きく、疲労寿命が小さくなることを示した。

キーワード：潤滑油，無補強 RC はり，疲労寿命，せん断疲労破壊

1. はじめに

潤滑油の影響を受けたと思われるコンクリート構造物の事例¹⁾を受け、著者らは劣化の主要因として考えられるコンクリートひび割れ中への油の侵入と疲労载荷に着目して研究を行ってきた^{2,3,4)}。最初に基本的なコンクリート強度を確認するため、油中に浸漬させておいた円柱試験体に対して圧縮疲労試験を行い、次にひび割れの開閉に伴う液体の浸透による破壊性状の影響を検討するため曲げ降伏先行型となる補強筋の無い RC はりに対して曲げ・せん断の疲労载荷試験を行った。その結果、ひび割れの進行、変形のおおきさなどは水中、油中および気中の順で大きくなることを示した。ただし、1つの荷重振幅のみで行っており、水と特性のおおきく異なる油中に対する疲労性状の特定には至っていない。

また、水中の供試体に対する RC 部材の疲労試験は梁構造のみならず板構造においても行われているが、水以外の液体に対する疲労試験は藤山ら⁵⁾が粘性などの異なる液体で覆った RC はりに対して移動荷重で行っている程度である。そのため、液体の粘性などの違いが及ぼす疲労性状への影響の解明には至っていない。

そこで、水とは粘性の異なる油中の RC はりに対してさらなる疲労性状、特に疲労寿命に関する検討を行うため、せん断補強筋の無い RC はりに対して新たに疲労载荷試験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究では文献2)を踏まえた追加検討の意味合いもあるので、断面寸法は文献2)と同じ大きさとし 100mm × 150mm とした。ただし、疲労寿命に着目したことから曲

げ降伏を伴うせん断破壊型ではなく、単純なせん断破壊型にすることとした。そのため、せん断スパン比を小さくし、かつ引張鉄筋量を増やした。詳細を図-1に示す。試験体の養生は早強セメントを使用したこともありコンクリート打設翌日に脱型し、室内温度 20 の養生室において散水養生を7日間行った。その後も同条件下の養生室にて気中で管理した。なお、表-1に使用したコンクリートと鉄筋の特性を示す。

2.2 試験方法

载荷方法は基本的に文献2)と同様の方針で行った。具体的には図-1に示すようなせん断スパン a=300mm の3点曲げとした。計測点は梁の相対変位(回転角)を検討するため図のように载荷点と支持点の変位を計測し、曲げおよびせん断挙動を確認するため、鉄筋のひずみを中央とその両側 150mm の位置の3箇所、および载荷点両側のコンクリートひずみを計測した。

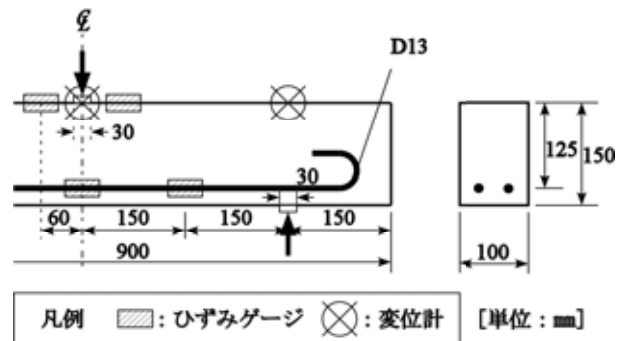


図-1 供試体寸法ならびに計測項目

表-1 材料特性

コンクリート(24-12-15)			鉄筋(D13(SD295A))			
配合		材料試験		材料試験		
Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
15	53	45	29.6	28.8	325	212

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科 修(工) (正会員)

*2 日建設計シビル 技術開発部 博(工) (正会員)

*3 大阪市立大学大学院 工学研究科 博(工) (正会員)

*4 大阪市立大学 工学部都市基盤工学科

表 - 2 各液体の物性

	水 ⁶⁾	潤滑油 ⁷⁾	備考
密度 (g/cm ³)	0.9991	0.8584	15 時
動粘度 (mm ² /s)	0.658	46.94	40 時

表 - 3 試験体一覧

試験体名	試験条件		材齢 (日)	荷重比 (%)
	環境	載荷		
S-1	気中	静的	9	-
S-2			9	-
O90-1	油中	疲労	63	10~90
O90-2			71	
O70-1			29	10~70
O70-2			51	
O50-1	39	10~50		
W90-1	水中	疲労	59	10~90
W90-2			71	
W70-1			23	10~70
W70-2			55	
W50-1			36	

疲労試験の実験変数としては粘性の大きく異なる液体の比較ということも踏まえコンクリートの浸漬条件を水中および油中の2パターンとした。各液体の一般的な物性を表-2に示す。なお、文献2)と同様にひび割れ部への液体の浸透に着目していることから、支持点間において試験時のみの部分的な浸漬としている。また、疲労寿命に対する検討を行うため、荷重振幅も実験変数とし、荷重振幅は下限値を一定として3パターンの上限值で行うこととした。その値は基本試験として静的載荷試験を行い、得られたせん断終局荷重を基準強度として繰り返し荷重の上下限を設定した。ただし、文献2)において静的試験時のみ浸漬させた状態での気中と液中の静的耐力にほとんど差が見られなかったことと、設計時において気中での強度が基本となると考えられるので静的試験は気中のみで行った。各試験体の試験条件を表-3に示す。なお、表における疲労試験の試験体の材齢は試験開始時の材齢を示す。

疲労試験は電気油圧サーボ式の疲労試験機(容量250kN)を用い、載荷速度は5Hzとし最大200万回まで繰り返し載荷を行った。200万回で破壊に至らなかった場合にはその後に静的載荷により破壊させた。

3. 試験結果

3.1 破壊状況

本試験における結果の一覧を表-4に示す。表において、環境条件と荷重振幅が同じ場合は平均も併せて示している。また、参考に文献2)において疲労破壊を得られた試験体の結果も併せて示す。ただし、曲げ降伏耐力

表 - 4 疲労試験結果

試験体名	S (%)	N (回)	logN	静的破壊荷重 (kN)	破壊状況
S-1	-	-	-	50.0	せん断破壊
S-2	-	-	-	50.6	せん断破壊
S-平均	-	-	-	50.3	
O90-1	90	8,308	3.92	-	せん断破壊
O90-2		73	1.86	-	せん断破壊
O90-平均			2.89		
O70-1	70	306,831	5.49	-	せん断破壊
O70-2		1,161,431	6.06	-	せん断破壊
O70-平均			5.78		
O50-1	50	2,000,000	6.30	69.8	せん断破壊
W90-1	90	30	1.48	-	せん断破壊
W90-2		25,212	4.40	-	せん断破壊
W90-平均			2.94		
W70-1	70	12,900	4.11	-	せん断破壊
W70-2		60,803	4.78	-	せん断破壊
W70-平均			4.45		
W50-1	50	2,000,000	6.30	66.7	せん断破壊
O-4*	67	461,152	5.66	-	曲げ降伏後の せん断破壊
W-2*	66	25,280	4.40	-	
W-3*		32,807	4.52	-	

注:*は文献2)のデータ

比で載荷していたのでせん断耐力比に換算し直した。表より静的載荷(Sシリーズ)において得られた破壊荷重は近似しており、破壊形式も類似したせん断引張破壊となった。よって、この2体の平均値を疲労試験時の基準荷重とした。また、図-2にひび割れの進展状況を示す。

表より上限耐力比S=50%を除いた試験体において疲労破壊が得られた。疲労破壊が生じた試験体では上限耐力比S=90%において、油中と水中共にばらつきが大きい。S=70%に比べると非常に少ない回数で破壊している。また、S=90%のlogNの平均では油中と水中で類似した値となっているように、上限荷重が大きくなると、荷重による破壊挙動が主となり、破壊現象に及ぼす液体の浸透の影響が小さくなることが考えられる。ただし、図-2において疲労寿命の小さいO90-2とW90-1は1回目のサイクルで載荷点を中心に対称的な曲げひび割れが生じ、その後のひび割れの進展は主に左側にのみ集中し破壊に至る大きな斜めひび割れに進展した。O90-1ではひび割れの進展は左側の方が早く、載荷回数n=100回程度で右側の斜めひび割れが載荷板直下までに進展している。その後、主な斜めひび割れの進展は左側になり、最終的な破壊も左側になるという破壊状況の変化が生じていた。さらに、W90-2においてn=5,000回程度で左右の曲げせん断ひび割れが載荷板直下で繋がってしまい、その後、載荷板の反対側にひび割れが進展するという特異なひび割れの発生が生じた。このことが、2体の疲労寿命の差に繋がったものと思われる。

S=70%ではそれぞれの液体のlogNの値はばらつきが小さくなっているが、液体の違いにより平均で1以上

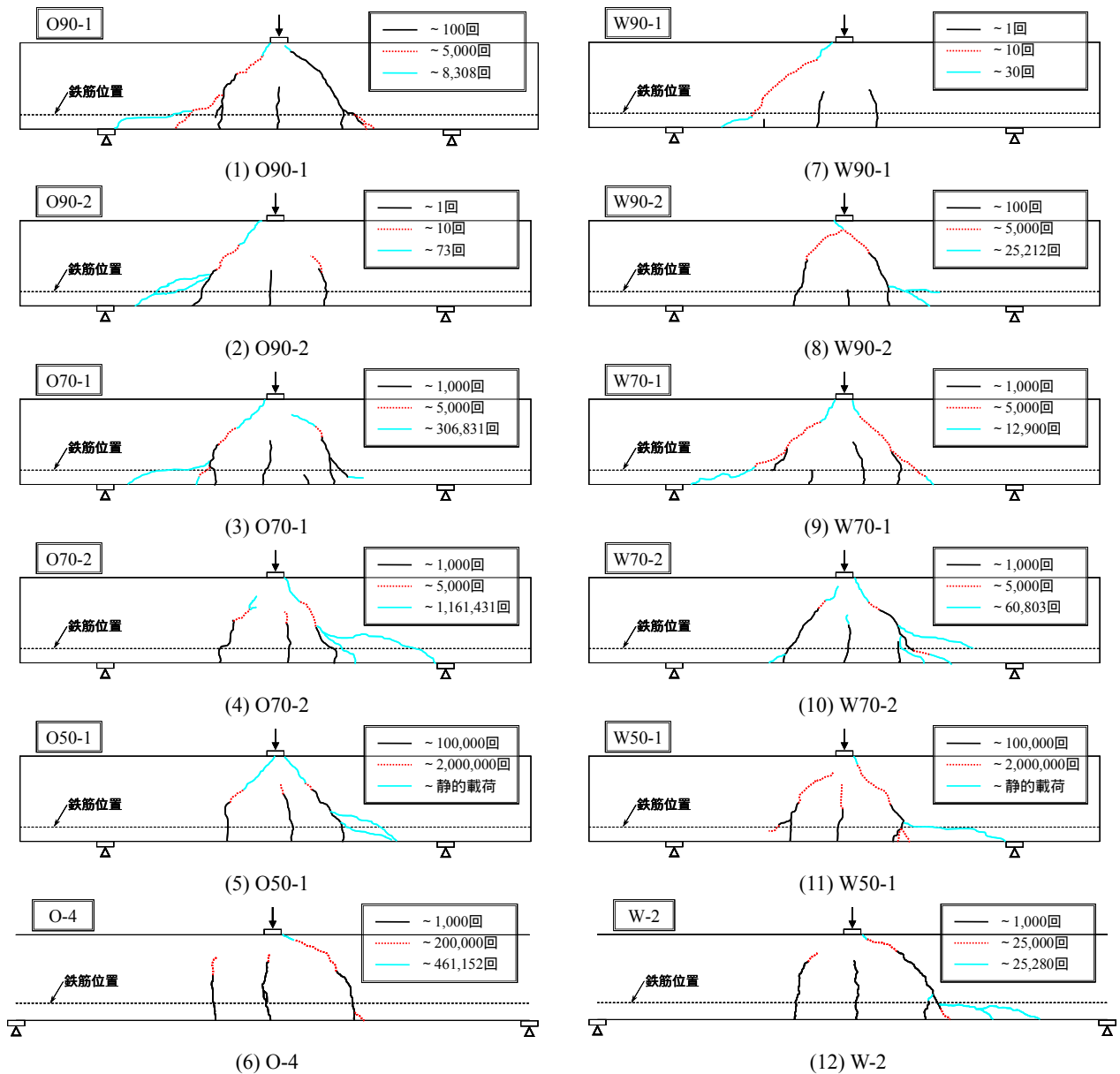


図 - 2 ひび割れ進展状況

異なる結果となった。この荷重振幅幅では液体の違いによる疲労破壊への影響が明確に現れていると考えられる。しかし、図 - 2 を見るとどちらの液体の試験体においても $n=5,000$ 回程度までのひび割れ（主に曲げひび割れ）は類似した傾向を示し、その後、つまり斜めひび割れの進展に液体の違いによる影響が大きく現れている。水中は斜めひび割れが上面付近まで進展してから、すぐに破壊が生じているが、油中は斜めひび割れが上面付近まで進展しても水中と比べて破壊が生じるまでに多くの荷回数を経ている。水の方が水槽の底に沈殿する粉末の量が明らかに多いことから、ひび割れの開閉に伴ってひび割れ内のペーストを溶かす、もしくはひび割れ面を削る（磨く）量が多くなりひび割れ外にペーストが排出されるのではないかと考えられる。ゆえに、粘性の小さな水の浸透が斜めひび割れ内の接触面におけるせ

ん断抵抗力の低減効果に寄与しているのではないかと考えられる。また、文献 5) では粘性の大きな液体のほうが、くさび効果が大きくなりひび割れの増加につながる旨の考察がなされていたが、本試験体では動粘度がさらに大きいためか曲げひび割れの本数には影響が見られなかった。なお、この疲労寿命はそれぞれの液体において破壊の進行過程とせん断スパン比が大きく異なる文献 2) の結果とも類似した値となった。ひび割れの進展状況においても大きな違いは見られない結果となった。上田ら⁸⁾はせん断スパン比が 2.5 以下と以上では破壊形式が異なることから疲労寿命の傾向は異なることを述べているが、本試験はせん断スパン比が 2.4 と 2.5 に近く、破壊形式に大きな差異が生じなかったことから類似した傾向の疲労寿命が得られたと考えられる。

疲労破壊が生じなかった $S=50\%$ において、曲げひび割

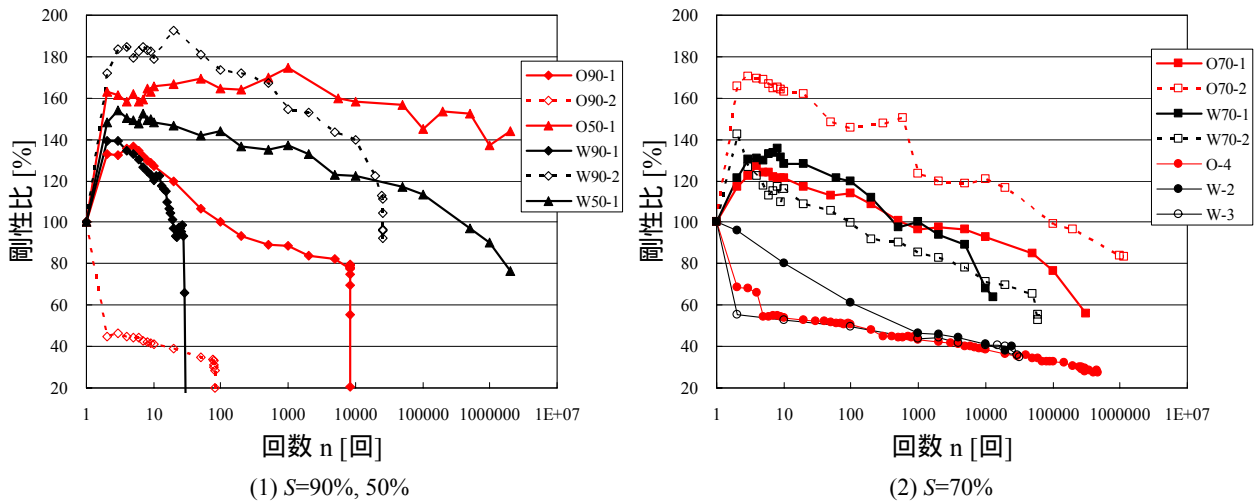


図 - 3 剛性比 - 载荷回数履歴

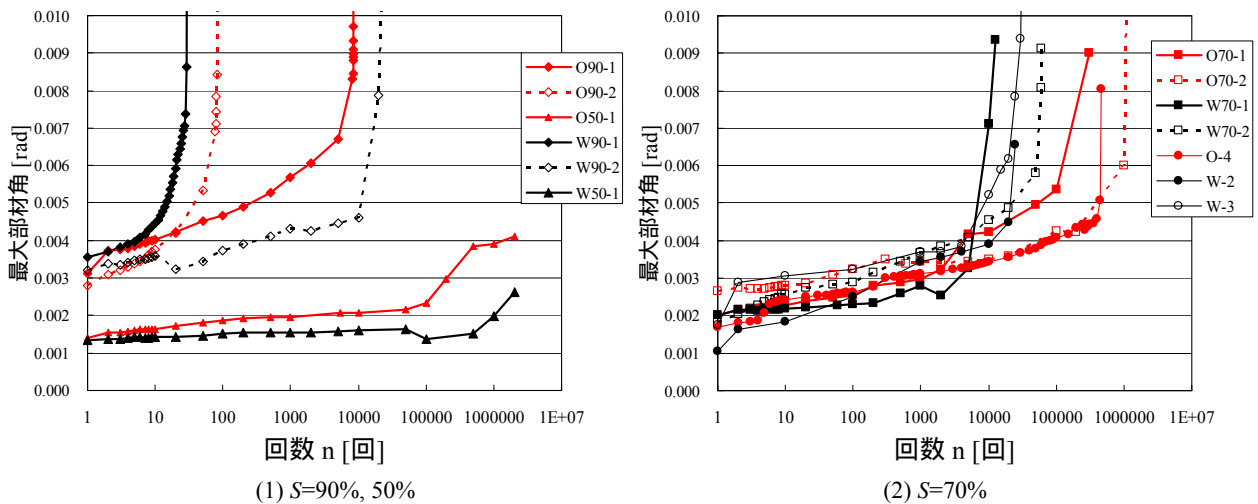


図 - 4 最大部材角 - 载荷回数履歴

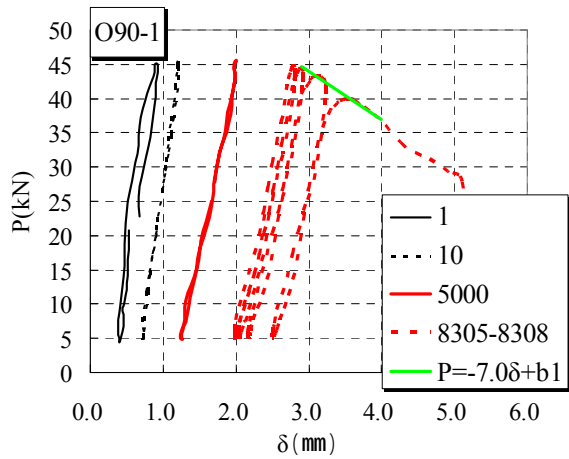
れが主となった $n=10$ 万回程度までの载荷では、油中の方がひび割れの長さは大きくなっている。その後は斜めひび割れの進展が主になっているが、 $n=200$ 万回では明らかに水中の方がひび割れの範囲は大きくなっている。 $n=200$ 万回後の静的载荷においては基準荷重を大きく上回る事になり、繰り返し载荷による耐力低下は確認できなかった。このことは静的試験時の材齢が少なく、他の試験体の材齢が長いことによる強度増加も若干あると思われる。ただし、図 - 2 の $S=50\%$ のどちらにおいても右側でせん断破壊が生じているが、進展状況としては左側の方が早い進展を示し、斜めひび割れが载荷板の下面に到達しその後最終破壊が逆側で生じたという破壊挙動の変化の影響が大きいものと思われる。

3.2 部材変形履歴

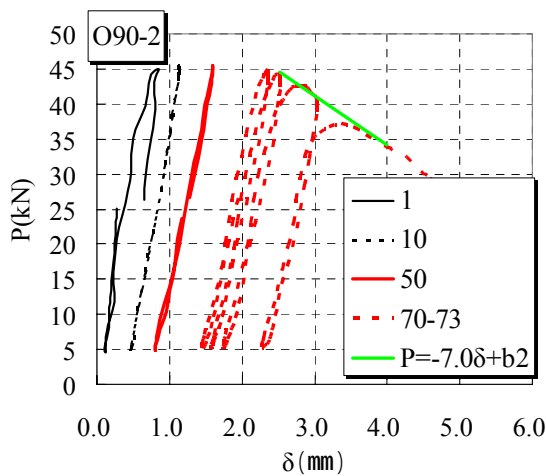
繰り返し载荷による上限耐力比や液体の違いによる変形への影響を検討するため、図 - 3 に各载荷回数におけるたわみに対する剛性の変化を示す。ここで、剛性は荷重 - 変位履歴において、各载荷回数における荷重振幅を変位振幅で除したものを言う。ただし、1 回目の载荷

でひび割れが発生する可能性があるため、剛性比に関する基準剛性として繰り返し载荷前の初期静的载荷時の荷重 - 変位曲線より基準荷重に対する 10 ~ 30% 弾性剛性を基準剛性として無次元化したものである。そのため、便宜上、図における $n=1$ 回は 100% とした。

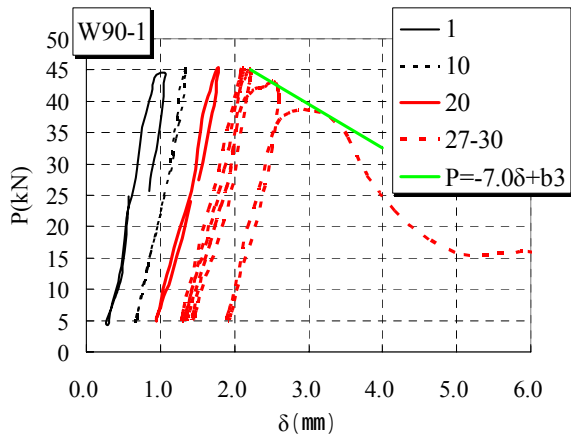
図より本試験においては O90-2 を除いて、剛性が $n=3 \sim 10$ 万回程度まで増加している。载荷初期時にひび割れが生じていても増加する結果となった。また、せん断スパン比の大きな曲げ降伏先行型の試験体には見られない傾向である。本試験での载荷速度が 5Hz であり、文献 2) における 0.5Hz から高速化したことによる影響と思われる。O90-2 は基準剛性 (最小自乗法による近似直線) の算出時のデータのばらつきが他の試験体より大きいことなどが原因と考えられる。初期時に剛性が増加して概ね 10 万回程度の载荷後に剛性が低下する傾向も全試験体で見られる。その後、破壊に近づくにより急激に低下しているが、その変化点はばらつきが大きくなっている。ただし、破壊した試験体は全て、基準剛性以下 (100% 未満) に低下している。個別に見ると $S=50\%$ ではひび割れ



(1) O90-1



(2) O90-2



(3) W90-1

図 - 5 荷重 - 変位曲線

の範囲が小さかった O50-1 においては他の試験体に比べ明らかに剛性低下が少なく疲労载荷による構造への影響が小さいことが伺える。S=70%は油中と水中で類似した傾向を示し、n=10 回以降の勾配は近似しており、O-4 や W-3 よりも勾配が大きくなっている。

次に、繰り返し载荷による最大部材角の推移を図 - 4 に示す。ここで言う最大部材角とは繰り返し荷重が上限

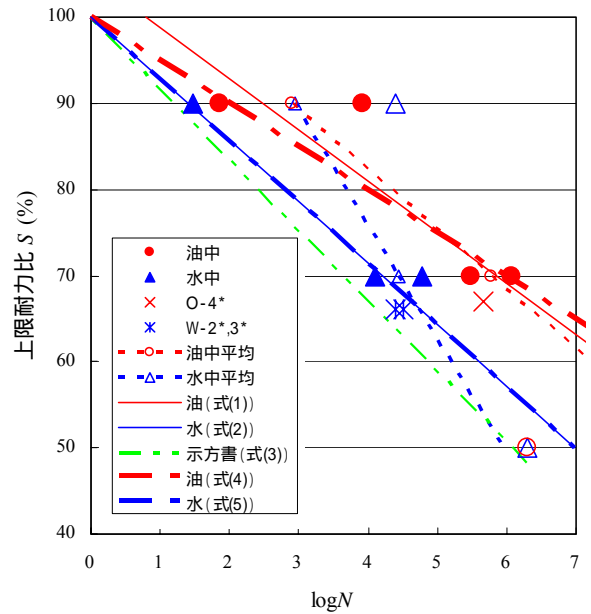


図 - 6 S - N 曲線

値の時の中央変位から求めた回転角のことである。S=90%では n=10 回程度までは試験体による違いはあまりなく、その後から急激に違いが生じている。ただし、W90-2 に関しては他の試験体が放物線を描くように増加しているのに対して直線的な変化となっていることから、ひび割れ状況と併せて考えても特異な破壊現象と考えられる。S=70%は曲げ降伏型の試験体も含めて全ての試験体でほぼ一定の割合で回転角が増加し、水中だと部材角が 0.003 ~ 0.004 程度から、油中だと 0.004 ~ 0.005 程度から急激に増加するという傾向が見られる。S=50%では n=10 万回程度までは他の試験体に比べてどちらも緩やかに増加しているが、その後、急激に増加している。ただし、O50-1 の方が回転角が大きくなっているが、ひび割れの長さは W50-1 の方が進展しているという結果になった。

また、破壊した S=90%の試験体の内、破壊時の計測が出来た試験体の P- 曲線を図 - 5 に示す。変位量 に関しては違いのあるものの類似した曲線となっていることが分かる。特に破壊時の上限荷重と変位に関して全ての試験体で同一の勾配の近似直線($P = -7.0 + b$)が得られており、疲労試験時の破壊において、一定の傾向が見られることが分かった。

変位の挙動に関しては最大部材角の変化において、急激に変位の増加するときの部材角に違いが見られること以外に顕著な違いが見られなかった。

3.3 疲労寿命 (S-N 曲線)

表 - 4 における、上限耐力比 S と疲労寿命 log N をグラフにして図 - 6 に示す。S-N 関係における相関性を考えるため、図中には水中、油中それぞれの S=90%と 70%の

平均をつないだ線を点線で加えており、 $S=70\%$ 以下については $S=50\%$ で破壊まで繰り返し荷重を行っていないことから延長させて示している。また、コンクリート標準示方書⁹⁾(以後、「示方書」と言う)のせん断補強筋の無い部材の設計疲労耐力(式(9.3.1))に準拠して算定した線(二点鎖線)も参考に示している。それぞれの平均線は、水中のほうが油中より勾配が急になっている。しかし、どちらの液体の平均線においても $S=100\%$ で $\log N=1$ 以上となり、代表としては適切ではないと考えられる。そこで、それぞれの液体の結果に対する近似曲線を加えてみることにする。近似曲線を考える上で、これまでの考察より W90-2 の破壊が特異だったことから、それを除いて疲労破壊した試験体(図中の と)と文献2)(* と ×)の結果を加えてそれぞれの液体(印の色)に対して、最小自乗法で近似直線を算出した。その結果が以下の式である。併せて本試験条件における示方書の式も示す。

$$\text{油中} : S = -5.9519 \times \log N + 104.78 \quad (1)$$

$$\text{水中} : S = -7.1631 \times \log N + 100.04 \quad (2)$$

$$\text{示方書} : S = -8.1818 \log N + 100 \quad (3)$$

また、水中それぞれの液体の近似直線において、切片が 104.78 と 100.04 とほぼ 100 になっていることから、近似直線の切片は 100 ($S=100\%$ で $\log N=0$ を通る)とする近似直線に算定し直したものを以下に示す。

$$\text{油中} : S = -5.0193 \log N + 100 \quad (4)$$

$$\text{水中} : S = -7.1547 \log N + 100 \quad (5)$$

それぞれの勾配(係数)を比較すると示方書、水中、油中の順で、1 程度以上勾配が小さくなっており、示方書の式で、設計していても安全側となる結果となった。切片を変更したのを見ると水中に関しては、あまり勾配は変わらないが、油中に関しては勾配が小さくなり、式(4)の場合、式(1)に対して $S=74.3\%$ 以上の場合は安全側となる式になった。

4. まとめ

せん断補強筋の無い RC はりを対象に、油中と水中という浸漬条件と上限耐力比をパラメータとする疲労荷重試験を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 上限荷重が大きくなると、荷重による破壊挙動が主となり、破壊現象に及ぼす液体の浸透の影響は小さくなる。

- (2) $S=70\%$ と 50% において曲げひび割れの進展は類似した傾向を示すが、斜めひび割れの進展には液体の違いによる影響が大きく現れ、水中の方が明らかに斜めひび割れの進展が早く疲労破壊が生じやすくなる。
- (3) 荷重回数に伴う最大部材角の変化において、急激に変位の増加するときの部材角に 0.001 程度の違いが見られた。
- (4) $S-N$ 曲線より得られた近似直線より本試験条件における上限耐力比と疲労寿命に関する式が得られた。
- (5) 本試験に関しては液体に浸漬させても示方書の疲労強度式で、安全側の値となる結果が得られた。

参考文献

- 1) 川満逸雄, 鎌田敏郎, 内田慎哉: 潤滑油に曝されるコンクリート構造物における劣化事例, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 671-676, 2006
- 2) H. Ohuchi, H. Tsunokake and I. Kawama: Fatigue Characteristic of Reinforced concrete Member in Mineral Oil, The 3rd ACF International Conference, pp. 1117-1124, 2008
- 3) 伊藤益嗣, 川満逸雄, 角掛久雄, 大内一: 潤滑油中におけるコンクリートの圧縮疲労特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 29, pp. 849-854, 2007
- 4) 内田慎哉, 鎌田敏郎, 大内一, 川満逸雄: 鉱物油中におけるコンクリートの圧縮疲労試験時の AE 特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 29, pp. 855-860, 2007
- 5) 藤山知加子, 千々和伸浩, 川中勲, 前川宏一: 移動荷重と水分の影響を同時に受ける RC 部材の疲労破壊特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 30, pp. 883-888, 2008
- 6) 大西外明: 最新水理学, pp. 7-12, 1981
- 7) 出光興産(株): 潤滑油製品資料 ダブニースーパーハイドロ X, 2008
- 8) 上田多門, 榎本松司, Sabry A. Farghaly: せん断補強鉄筋のない鉄筋コンクリートはりの疲労強度, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol. 3, pp. 385-390, 1981
- 9) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2007