

RC 梁の疲労特性に及ぼす荷条件の影響

構造及びコンクリート工学分野 上田真彦

Abstract

コンクリート構造物における荷速度が及ぼす疲労寿命への影響に関する研究は未だ十分でない。そこで本研究室では、繰返し荷における荷速度に着目し、曲げ降伏先行型の無補強 RC 梁に対して浸漬する液体と荷速度の違いによる疲労寿命への影響を検討するため、全 17 体の供試体の疲労荷実験を行った。その結果、斜めひび割れに対して環境条件及び荷速度が大きく影響すること、同じ荷速度であれば環境条件に依存すること、液中では荷速度が遅ければ疲労寿命が短くなることを明らかにした。また、破壊過程において荷付近の圧縮縁のコンクリートひずみ及び主鉄筋のひずみ(鉄筋とコンクリートの付着)に対しては液体の有無による差が大きくなることも示した。さらに鉄筋の疲労破断による破壊も多く見られ、その鉄筋に対する疲労強度の検討も行った。

1. はじめに

本研究室で行われたせん断補強筋の無い RC 梁に対して曲げ・せん断の液中疲労荷実験^{1,2)}を行った結果、文献 1)においては、水中に浸漬させた供試体のみが疲労荷中にせん断破壊したこと、剛性比と部材角については液中の方が変化量が大きいこと、油中では水中ほどの強度低下は見られないなどの結果を得た。文献 2)においては、斜めひび割れの進展には液体(粘性)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しやすいことなどの結果を得た。この様に、無補強の RC 梁の液中疲労荷実験に関して環境条件が及ぼす影響は大きいという傾向は示唆されたが、これらの実験は荷速度の違いには着目しておらず、全供試体で荷速度を一定にして実験を行っている。ただし、荷速度が疲労荷実験に影響を及ぼす研究については、清宮ら³⁾が割裂引張試験において 0.3~15Hz と様々な荷速度下で検討しており、荷速度が 1~4Hz に比べて 15Hz の場合の疲労強度は大きくなり、0.3Hz では疲労強度がやや小さくなることを明らかにしている。また RC 梁部材に対しては藤本ら⁴⁾が水中せん断疲労性状について 4Hz と 0.4Hz の 2 種類で行っており、ここでも 0.4Hz と荷速度が遅い方が疲労強度は小さくなることを示している。この様に、荷速度による影響があることは示されているが、疲労強度および疲労寿命における荷速度の影響に関する研究は十分ではない。そのため、荷速度による定量的な見解や環境条件によるその影響を明らかにするに至っていない。そこで本研究室では、荷条件が疲労性状に及ぼす影響に着目するとし、環境条件と荷速度の 2 つの因子を相互に組み合わせ、全 17 体の RC 梁供試体の 3 点対

称荷疲労実験を行い、疲労寿命や破壊性状に及ぼす影響について比較、検討することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

環境条件による影響も加味することから、ひび割れが発生した状態での損傷も検討するため文献 1)と同様な供試体条件で実験を行うこととした。なお、供試体は 2 期に分けて製作しているが荷条件等は同一である。供試体は設計上、曲げ破壊型とし、材料試験結果を踏まえたせん断耐力に対する等価応力ブロック法による曲げ耐力の比は 1.4~1.5 程度である。供試体は図-1 に示すようなせん断補強筋のない単鉄筋断面であり、せん断スパン比は 3.75 である。梁の相対変位を計測するため荷位置の前後及び支点位置に変位計を設置した。鉄筋には中央から 150 mm ピッチでひずみゲージ(中央から順に S1, S2, S3)を設置し、コンクリート圧縮縁に中央から 60 mm の位置にもひずみゲージを設置している。

2.2 実験方法

実験は 3 点荷とし、実験変数としては、荷速度を文献 1)で実施した 0.5Hz と実験 2)で実施した 5Hz およ

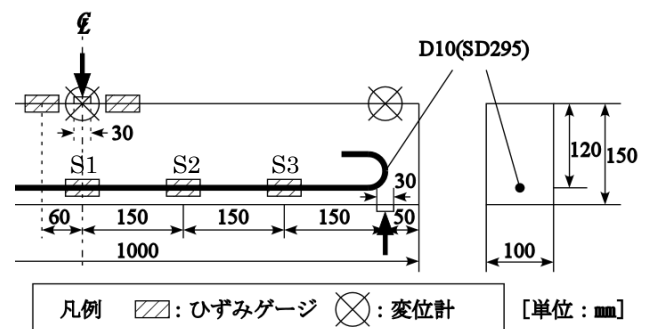


図-1 供試体寸法ならびに計測項目

表-1 液体の物性

	水 ⁵⁾	潤滑油 ⁶⁾	備考
密度 (g/cm ³)	0.9991	0.8584	15°C時
動粘度 (mm ² /s)	0.658	46.94	40°C時

表-2 材料特性

浸漬条件	コンクリート			鉄筋		
	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
1期(液中)	28.8	25.8	0.19	373	172	515
2期(気中)	32.5	22.4	0.19	356	198	501

表-3 供試体一覧及び疲労载荷実験結果一覧

供試体名	環境条件	载荷速度 (Hz)	荷重比	静的降伏荷重 P_y (kN)	疲労寿命 N(回)	$\log N$	破壊形式	鉄筋破断	
A5Hz-1	気中	5	0.1Py~0.8Py	15.9	2,000,000以上	-	曲げ・斜めひび割れ発生	A	
A5Hz-2		5			2,000,000以上	-		A	
A2Hz-1		2			2,000,000以上	-		A	
A5Hz-90%	気中	5	0.1Py~0.9Py	15.9	870,675	5.94	曲げ損傷後せん断破壊	B	
A2Hz-90%		2			737,414	5.87		B	
A0.5Hz-90%		0.5			1,275,800	6.10		曲げ引張破壊	C
O5Hz-1	油中	5	0.1Py~0.8Py	15.8	949,571	5.98	曲げ損傷後せん断破壊	B	
O5Hz-2		5			1,311,937	6.12		曲げ引張・せん断破壊	D
O2Hz-1		2			629,168	5.80		曲げ引張・せん断破壊	D
O2Hz-2		2			170,987	5.23		曲げ損傷後せん断破壊	B
O0.5Hz-1		0.5			461,152	5.66		曲げ損傷後せん断破壊	B
W5Hz-1	水中	5	0.1Py~0.8Py	16	518,382	5.71	曲げ引張・せん断破壊	D	
W5Hz-2		5			422,968	5.63		曲げ引張・せん断破壊	D
W2Hz-1		2			202,348	5.31		曲げ損傷後せん断破壊	B
W2Hz-2		2			143,334	5.16		曲げ損傷後せん断破壊	B
W0.5Hz-1		0.5			25,280	4.40		曲げ損傷後せん断破壊	B
W0.5Hz-2		0.5			32,807	4.52		曲げ損傷後せん断破壊	B

注：Nが2,000,000以上は200万回で破壊しなかった

びその中間として2Hzの3パターンとした。また、環境条件は文献1)と同様な条件となる水中、油中、気中の3パターンとした。各液体の一般的な物性を表-1に示す。また、载荷荷重幅は静的载荷実験より得られた降伏荷重 P_y を基準にして、 $0.1P_y \sim 0.8P_y$ で実施した。ここでいう降伏荷重 P_y は、得られた荷重-変位曲線にて、降伏前の曲線と降伏後より最大荷重までの曲線の近似直線の交点の荷重のことをいう。気中においては200万回で破壊せずに終了したことより、それらに対しては気中環境下での载荷速度の違いによる影響を見るため、载荷荷重幅を $0.1P_y \sim 0.9P_y$ に変え追加で行った。繰返し载荷は電気油圧サーボ式の疲労試験機(容量250kN)を用いた。表-2に材料特性、表-3に供試体一覧を示す。併せて表-3には疲労载荷実験結果一覧も示している。

3. 疲労载荷実験結果

3.1 破壊形式

表-3より、気中の上限荷重 $0.8P_y$ 以外の供試体において200万回未満で破壊に至った。表-3に示す破壊形式は曲げひび割れが発生し、その後せん断ひび割れが進展するが破壊せずに载荷が終了したものを曲げ・斜めひび割れ発生(A)、曲げひび割れ発生後斜めひび割れが発生し、その斜めひび割れが進展し上縁まで達して破壊に至ったものを曲げ損傷後せん断破壊(B)、载荷付近である梁中央において曲げひび割れのみが上縁まで達してそのひび割れ部の鉄筋が破断したものを曲げ引張破壊(C)、曲げと斜めひび割れがどちらも上縁まで達したが、梁中央付近の鉄筋が破断したものを混合型とした曲げ引張・せん断破壊(D)と定義した。図-2に破壊形式と疲

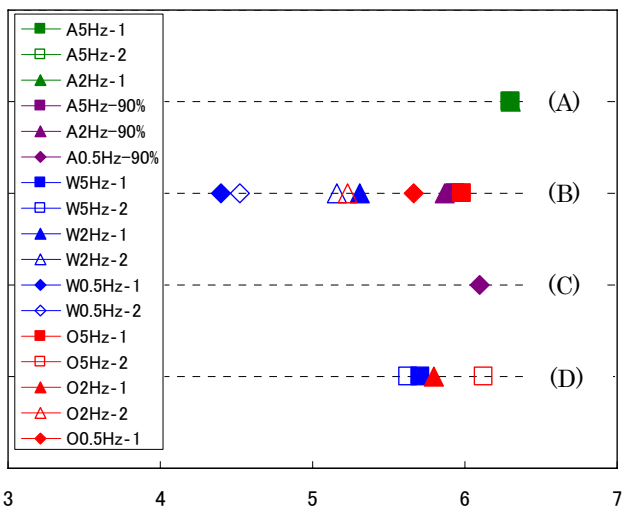


図-2 破壊形式と疲労寿命

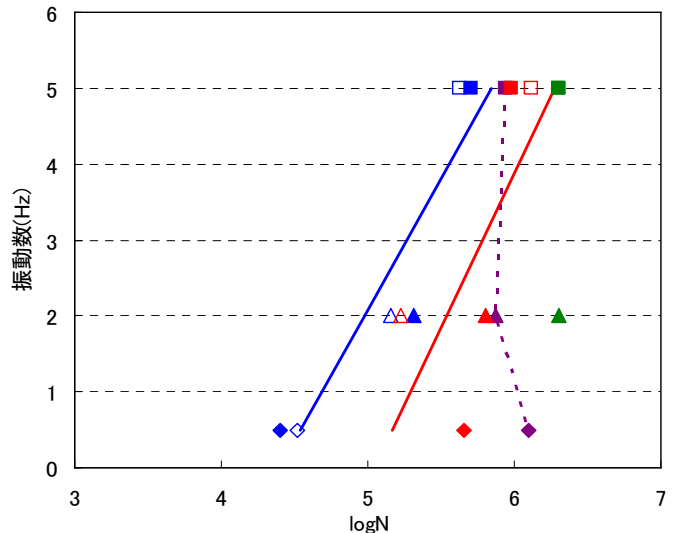


図-3 载荷速度と疲労寿命

疲労寿命の関係を示す。破壊形式で一番多かったのは破壊形式 B であり、また水中の 0.5Hz や 2Hz が集結していることより、破壊形式 B の場合に疲労寿命が短くなる傾向が示唆された。その要因として、曲げひび割れ後の斜めひび割れに液体が関与することで進展を促進させ、破壊に至らしたと考えられる。またその斜めひび割れの進展には粘性が小さく、載荷速度が遅いほど、影響が大きい可能性が確認された。さらに、破壊形式 B の疲労寿命が短かった W2Hz-1, W2Hz-2, W0.5Hz-1, W0.5Hz-2, O2Hz-2 の供試体は、どれも鉄筋破断していない。鉄筋破断するよりも先にコンクリート自身が疲労破壊していることが確認された。疲労寿命の $\log 5.5$ 付近で、鉄筋破断の境界線があることが示唆される。

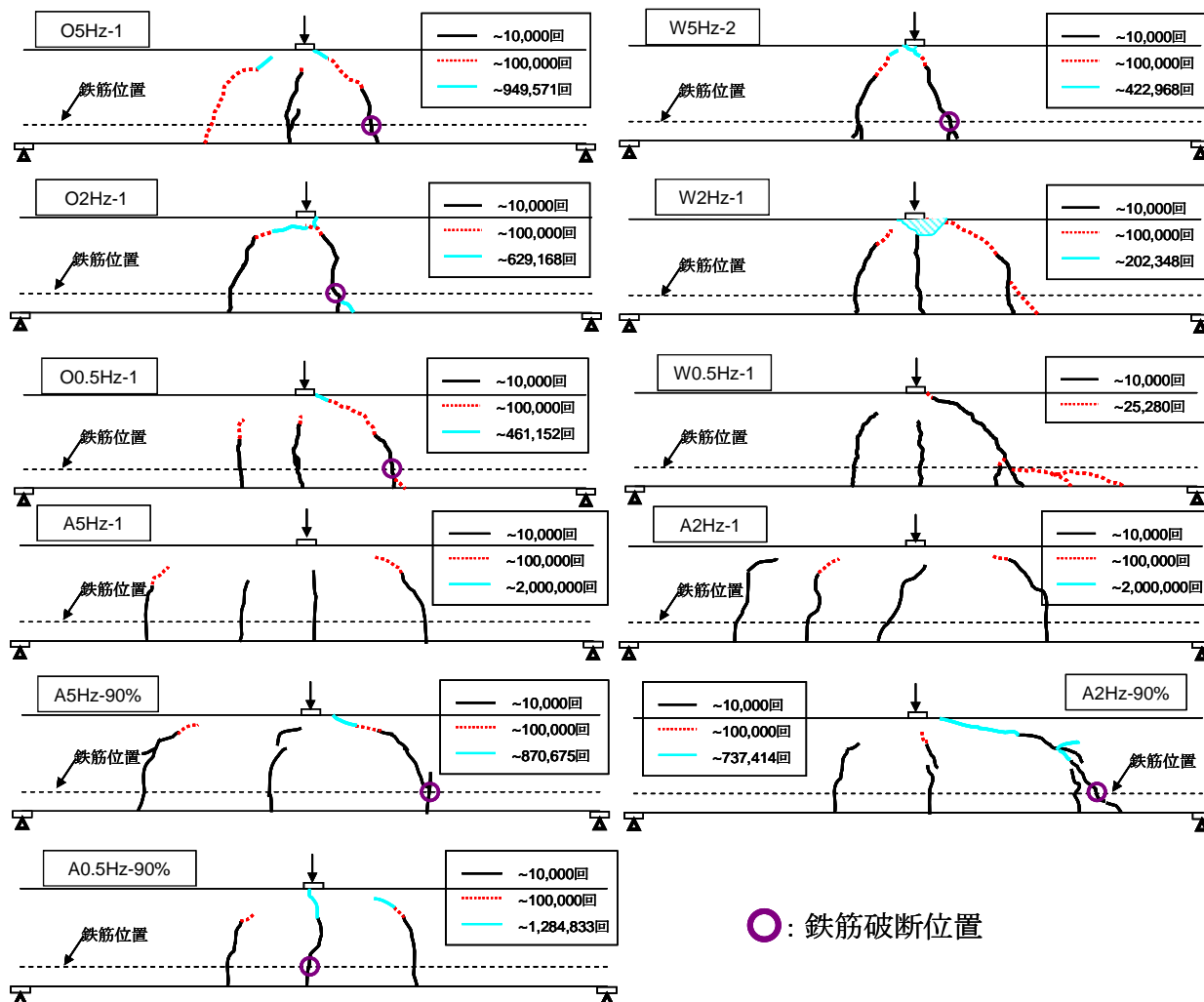
3.2 疲労寿命

破壊形式また鉄筋の破断を考慮せず、環境条件および載荷速度による影響を検討するため、図-3 に載荷速度と疲労寿命の関係を示す。図には液中(水中, 油中)それぞれの載荷速度と疲労寿命の関係を最小二乗法による近似直線でも示した。同じ載荷速度に着目すると全ての載荷速度別で水中, 油中, 気中の順で疲労寿命が小さかった。また気中の場合は載荷速度による疲労寿命への影響がほとんど見られないことに対し、液中の供試体では

液体の種類に関係なく、載荷速度が遅くなるほど疲労寿命が小さくなった。さらに、粘性が小さい水中の方が粘性の大きい油中よりも、載荷速度を遅くすればするほど疲労寿命が小さくなりやすいことが確認できた。粘性の小さい液体(水中)に浸漬している供試体の疲労載荷実験では、環境条件および載荷速度によって疲労寿命が大きく変化する傾向が得られた。

3.3 ひび割れ状況

破壊過程を比較するために、図-4 に各条件のひび割れ進展過程を示した。併せて破壊時に鉄筋の破断が見られた供試体については、破断した鉄筋位置も示している。全供試体について、1 万回程度のひび割れについては、載荷速度および環境条件による明確な傾向は見られなかった。水中においては載荷速度が遅いほどひび割れが上縁付近まで伸びており、載荷速度 0.5Hz についてはそのひび割れが進展して 10 万回に到達せず破壊した。水中では載荷速度が遅くなるほど斜めひび割れの進展が速くなり、疲労寿命同様の相関性が見られる結果となった。この要因として、ひび割れの開閉に伴い液体の流れによって生じると思われるひび割れ面の磨耗効果に対して液体の粘性と載荷速度が大きく影響し、せん断抵抗力につながってゆくものと想定され、それによって水



○: 鉄筋破断位置

図-4 ひび割れ進展状況

中と油中の疲労寿命の差が生じたと考えられる。

3.4 鉄筋の疲労強度

鉄筋の破断が生じているが、破断の有無による差異が明確に見られなかったことから、ここでは鉄筋の疲労強度について検討する。図-5には鉄筋の引張疲労強度を示す。図に示す疲労強度はコンクリート標準示方書により算出した。算定は前節で行った断面分割法による算定ひずみを用いて行った。また、図には曲げ引張破断型と曲げ引張・せん断破断型において破断したものを曲げ破断型、曲げ損傷後せん断破断型において破断したものをせん断破断型として示す。すべてにおいて気中の上限比80%におけるせん断疲労寿命より大きかった。また、曲げ破断型の供試体はS1位置での理論上の鉄筋の疲労寿命より大きかったことから、すべての供試体で鉄筋破断が生じる可能性があるという結果となった。せん断破断型で破断したものはほとんどがS2位置での鉄筋の疲労寿命より小さな値で破断が生じている。S1位置におけるひび割れの引張の力のみならず、S2位置でのせん断作用による影響を受けて破断したとも考えられる。

3.5 部材挙動

変形量の進展状況を見ることとして、図-6に1回目の繰り返し载荷時の最大部材角(変位)からの部材角を示す。ひび割れの発生状況の影響もあり増分にバラツキが見られ、同じ载荷回数でも0.002程度の差が見られる。環境条件別に着目すると、水中、油中、気中の順に大きいことが明確に分かる。水中と油中では、1,000回付近までは傾きがほぼ同じで、その後破壊に至るまでに疲労寿命に差が生じるという傾向が得られた。一方、気中においては、1,000回まで水中、油中と同じ傾きで増加するが、その後も変化はなく、上限荷重 $0.9P_y$ の気中3体は、上限荷重 $0.8P_y$ の気中と同じ履歴のまま、鉄筋の破断により破壊に至った。载荷速度別に着目したが、環境

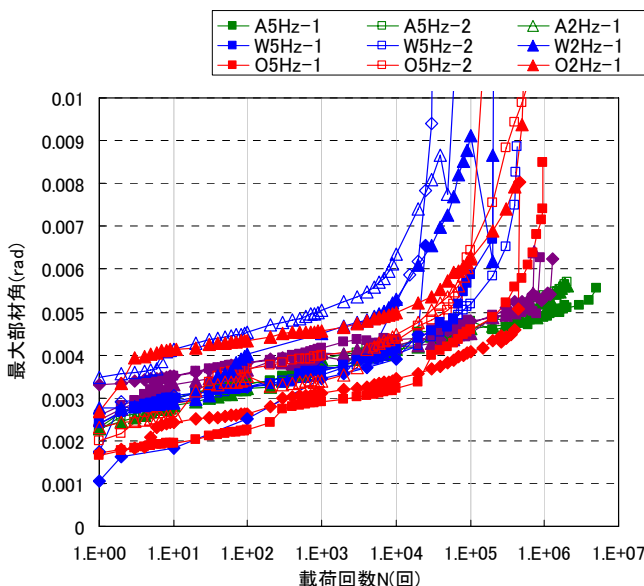


図-6 最大部材角と载荷回数

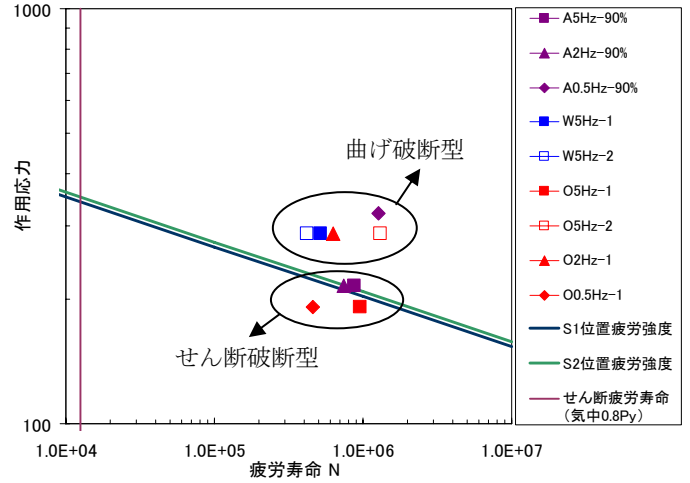


図-5 鉄筋の引張疲労強度

条件ほどの違いは見られなかった。次に繰り返し载荷時の最大、最小荷重時の変位増分を荷重振幅幅で除して算出した剛性の履歴を図-7に示す。最大部材角と同様、初期時にはバラツキが見られるが、1,000回付近から1万回の間で全供試体が、類似した推移になっている。環境条件別に着目すると、1万回以降で液体による差異が明らかに確認でき、水中、油中、気中の順で剛性の低下が見られる。载荷速度別に着目してみたが、最大部材角と同様に、環境条件別で見られたような差異は見られなかった。部材の挙動に関しては、载荷速度による影響は小さく、環境条件による影響が大きいと考えられる。

3.6 中央変位の履歴

全供試体の中央変位の履歴を示す。気中ではどの条件でも履歴に差異が見られなかったため、A5Hz-1を気中の代表値とする。図-8に中央変位と载荷回数の関係を示す。ただしW0.5Hz-1, W0.5Hz-2に関しては10万回以内で破壊しているため、破壊直前の中央変位をプロットしている。またA5Hz-1のみ、比較しやすいようにプロットを結んだ点線も示す。図より、1,000回目の載

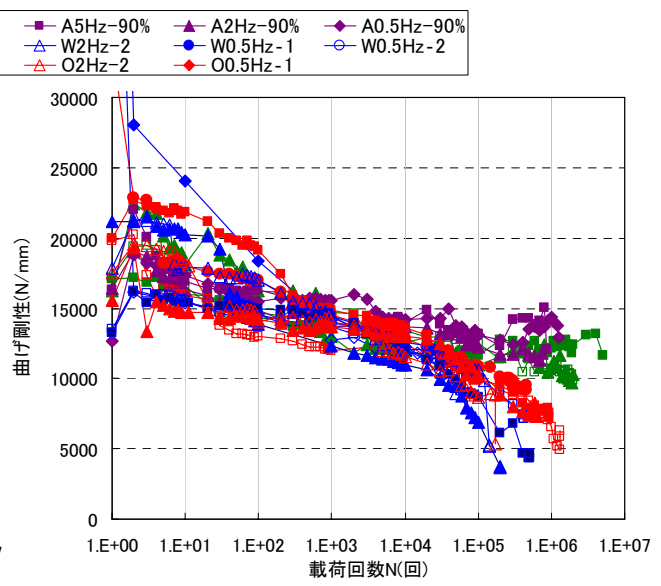


図-7 曲げ剛性と载荷回数

荷では、W2Hz-2 と O2Hz-2 が 2 mm以上の値を計測しているが、他の供試体ではあまり差が見られない。次に 1 万回目の荷では W0.5Hz-2, W0.5Hz-2, W2Hz-1, O2Hz-1 の順に大きな値を示す。特に水中の荷速度が遅い供試体の値が大きくなっていることが分かる。その後、0.5Hz の水中の 2 体は 10 万回の荷までに破壊に至っている。最後に 10 万回の荷では明確に水中の 2Hz で値が大きくなる。対して水中の 5Hz は油中、気中の供試体とあまり差は見られず、また 1,000 回時と比べ増加が小さいことが分かる。中央変位でも粘性の小さい水中で荷速度が遅い方が中央変位に与える影響が大きいことが確認され、図-3 の疲労寿命との相関性が示唆された。しかし油中と気中に関しては荷速度の影響は小さいという結果を得た。

3.7 鉄筋ひずみの履歴

図-1 に示した梁中央に配置した鉄筋ひずみゲージ S1 と梁中央から 300 mm の位置に取り付けた鉄筋ひずみゲージ S3 の履歴を図-9, 10 に示す。なお、図には梁理論におけるそれぞれの位置での曲げモーメントが作用した時の理論上の鉄筋ひずみと表-2 に示す引張試験より得られた降伏ひずみを併せて示す。ただし、理論上の鉄筋ひずみは断面分割法を用い、コンクリート部の応力ひずみ関係はコンクリート標準示方書⁷⁾を適用して求めた。図-9 より S1 ひずみは、1 回目の荷で曲げひび割れの影響を大きく受けるため、ひび割れ発生位置との関係から初期時はバラツキが大きい。その後、理論ひずみより大きなひずみが生じた状態で推移しており、降伏ひずみを超えた状態のものもある。S1 位置での鉄筋ひずみによっても曲げ破断を起こした供試体の疲労破断の可能性が示唆される。次に図-10 の S3 ひずみを見ると、計測位置付近でひび割れが生じていないことで、理論よりかなり小さなひずみとなっているが、1,000 回以

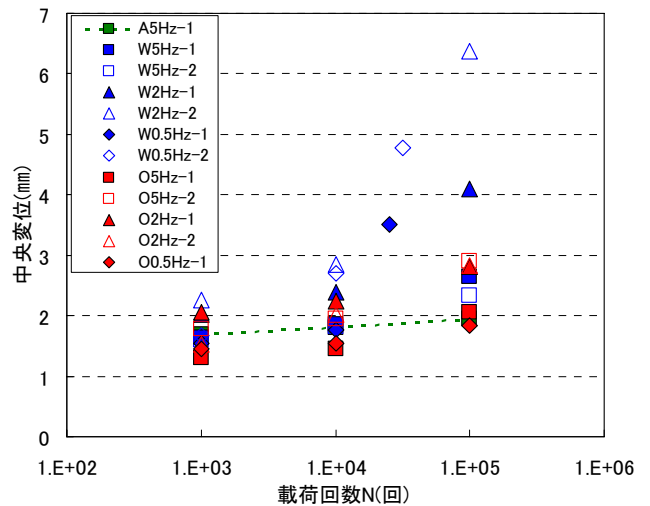
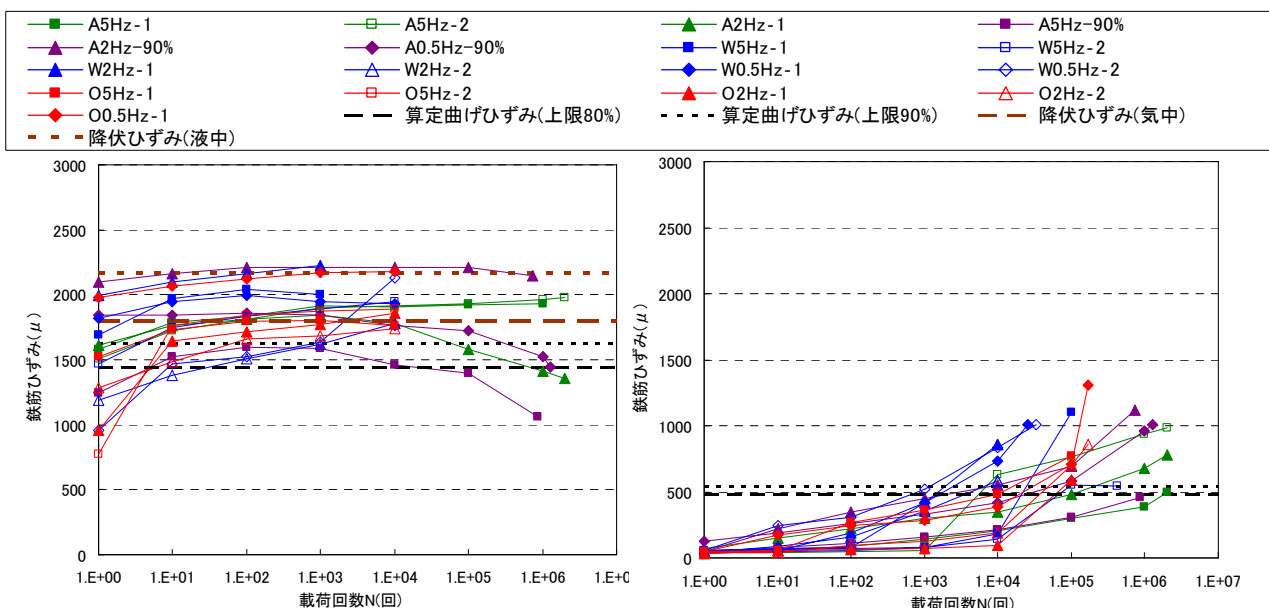


図-8 中央変位と荷回数

降から徐々に理論ひずみより大きなひずみが生じた。気中はほぼ一定なひずみ増分をしているが、液中の場合は急激な増加が見られ、水中の場合は 100 回以降、油中は 1 万回以降となっている。このことは鉄筋とコンクリートの付着への液体による影響が考えられる。気中において鉄筋ひずみが徐々に大きくなっているのは疲労実験によって鉄筋とコンクリートの付着が低減していることが想定される。液中の場合は、ひび割れのみならず、鉄筋とコンクリート界面に液体が浸透していったことが急激なひずみ増加をもたらしたと考えられる。

3.8 コンクリートひずみの履歴

梁中央(荷重点)から 60 mm の位置の圧縮縁に設置したコンクリートゲージの上・下限荷重時のひずみの履歴をそれぞれ、図-11, 12 に示す。また、図には理論によるひずみを併せて示す。なお、図のひずみは圧縮を正として示している。上限荷重時において初期時は理論ひずみもしくはそれ以下のひずみ値となっており、下限荷重時においては理論ひずみ付近となっている。その後、どちらの荷重時も徐々に増加しているが、気中は荷重終了時



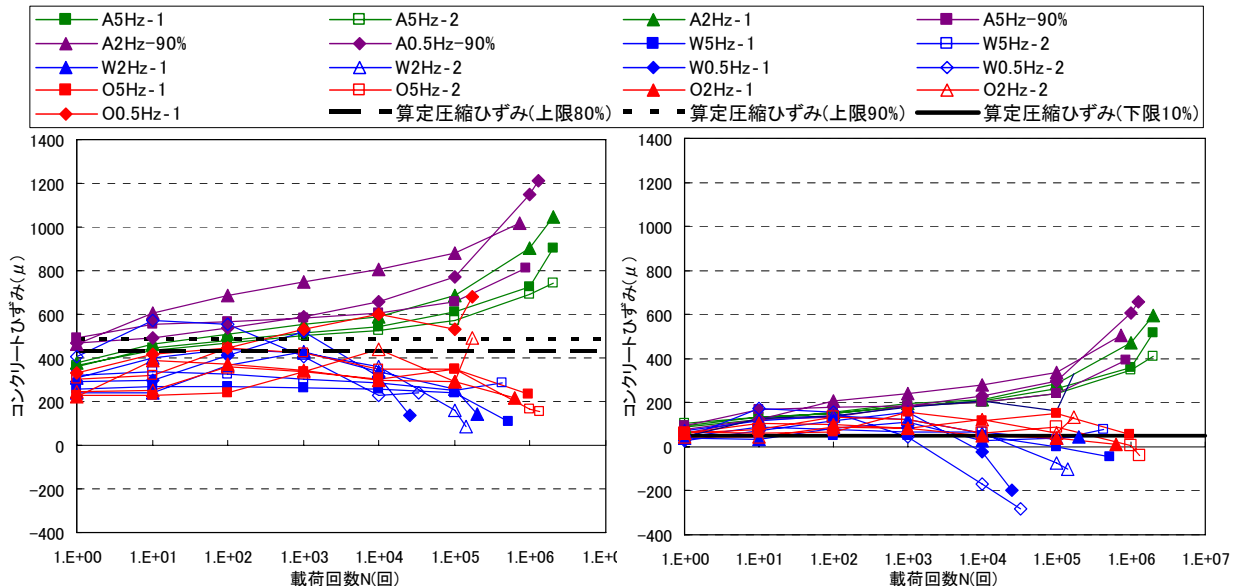


図-11 コンクリート圧縮ひずみ(上限荷重)

図-12 コンクリート圧縮ひずみ(下限荷重)

まで継続しており、1万回以降では増分が大きくなっている。それに対して液中では途中から減少に転じている。水中では100回以降で、油中では1万～10万回以降で減少しており、この液中の傾向は図-10の上限荷重時のS3ひずみの変化と類似した傾向となった。ただし、コンクリートひずみの方が明確に、荷重速度が遅いほど早く変化が現れる傾向が見られる。気中と液体によるこの違いは、液体の場合、斜めひび割れ面でのせん断抵抗が液体の侵入により低減され、せん断変形が大きくなり、上縁側に引張力が加わることが要因と考えられる。その際、水中の方がより引張力が加わり、コンクリートひずみの値が減少している。粘性が小さいことにより、斜めひび割れ内に液体が侵入しやすくなり、せん断抵抗を低減させる傾向にあると考えられる。

4. まとめ

曲げ降伏型のせん断補強筋の無いRC梁を対象に、環境条件と荷重速度をパラメータとし全17体の3点对称曲げ疲労荷重実験を行った。得られた結果を示す。

- 1) 破壊形式としては、曲げ損傷後せん断破壊型が一番多く、その中でも粘性の小さい水中、また荷重速度の遅い供試体が多い。その斜めひび割れにおいて、粘性及び荷重速度の影響が確認された。
- 2) 荷重速度と疲労寿命に関して、同じ荷重速度では水中、油中、気中の順に疲労寿命が短く、同じ環境条件では0.5Hz、2Hz、5Hzの順に疲労寿命が短かった。ただし気中においては、荷重速度の影響を受けない。
- 3) 鉄筋の疲労強度においては、曲げ破壊型で破断した供試体は理論上の鉄筋の疲労寿命より長く、せん断破壊型で破断した供試体はほとんどが鉄筋の疲労寿命より短い値で破断が生じた。
- 4) 部材挙動に関しては、環境条件の違いが大きく影響

- し、水中、油中、気中の順に急激な変化(部材角は上昇、曲げ剛性は低下)が発生する傾向が見られた。
- 5) 中央変位に関して、水中では、荷重速度が遅いほど値は大きくなり、荷重速度に影響されやすい結果を得た。
 - 6) ひび割れの発生しない位置で測定した鉄筋に作用する曲げひずみは、環境条件にて、水中、油中、気中の順に増加が生じる。鉄筋とコンクリートの付着機構の劣化低減によるものと考えられる。
 - 7) 圧縮縁のコンクリートひずみは、破壊に近づくほど気中は増加をして、液中は低下をした。液体の場合、斜めひび割れ面でのせん断抵抗が液体の侵入により低減されるためと考えられる。

参考文献

- 1) 光岡, 川満, 角掛, 大内: 潤滑油によるコンクリートはりの疲労劣化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.853-858, 2008
- 2) 角掛, 川満, 大内, 鈴木: せん断補強筋のないRCはりの疲労寿命に及ぼす潤滑油の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.265-270, 2009
- 3) 清宮, 本多: 周波数がコンクリートの引張疲労強度に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1341-1346, 1991
- 4) 藤本, 水河, 佐藤, 上田: 水中におけるRCはりのせん断疲労性状に及ぼす繰り返し荷重速度の影響, 土木学会北海道支部論文報告集, 第54号(A), pp.636-641, 1998
- 5) 大西外明: 最新水理学 I, pp.7-12, 1981
- 6) 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
- 7) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2007

●討議【 谷口 与史也 先生】

実験パラメータは粘性ではなく、液体分子の大きさの影響ではないのか。

本実験ではパラメータを粘性としているわけではなく、環境条件としています。液体の有無として、水中と気中で比較を行っていますし、それに加えて、動粘度(p.7に記載)の違いとして、その動粘度に差がある水中と油中を比較対象としました。粘性については詳しく定義していなかったため、今後の表記の仕方について再検討を行う必要があります。

●討議【 吉中 進 先生】

想定している荷重とは何か。

まず研究背景として、鉄鋼プラント基礎による潤滑油の浸透による疲労劣化事例を受け、研究を行ってきました。しかし実際の荷重というよりも、どの荷重幅が液体の侵入による影響を大きく受けるのかといった点に着目しました。

●討議【 山口 隆司 先生】

鉄鋼プラントでの振動数はどれくらいか。

実際のコンクリート基礎のプレス加工時の振動数は1Hz以下となっています。

●討議【 松村 政秀 先生】

本実験条件化での結果を一般化できるか。

本実験では、実際の事例を対象とした実験ではなく、環境条件と載荷速度の違いが疲労劣化にどの程度影響を及ぼすのか検討しています。載荷速度のパラメータの数が少ないことが問題なので、今後載荷速度のパラメータを増やし、予測式等の検討を行う必要があります。

●討議【 山口 隆司 先生】

既往研究と比較してどのような評価を得たのか。

既往の研究でも水中と気中では、水中の方が疲労寿命が短くなるという結果を得ていて、本研究でも同等の結果を示しました。それに加えて、油中という環境条件を増やした結果、粘性の大きい油中では載荷速度の影響が水中と比べて小さいこと、しかし気中よりも影響は大きいこと、という環境条件と載荷速度の2つの因子を組み合わせた実験で、新規の傾向を得たという評価をしています。