

論文 曲げ降伏型無せん断補強筋 RC 梁の疲労寿命に及ぼす载荷条件の影響

角掛 久雄^{*1}・上田 真彦^{*2}・鬼頭 宏明^{*1}・大内 一^{*1}

要旨: 曲げ降伏先行型のせん断補強筋の無い RC 梁に対して浸漬する液体と载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 体の疲労载荷実験を行った。その結果、载荷速度に関わらず環境条件が疲労寿命に影響すること、また、環境条件によって载荷速度による疲労寿命への影響が異なることを明らかにした。破壊過程において斜めひび割れの発生や载荷点付近の圧縮縁のコンクリートひずみおよび主鉄筋のひずみ（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。

キーワード: 疲労寿命, 環境条件, 载荷速度, RC 梁, 曲げ降伏

1. はじめに

産業基礎である潤滑油に覆われたコンクリート構造物の損傷事例を受け¹⁾、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液体の侵入と繰返し载荷に着目してせん断補強筋の無い RC 梁に対して曲げ・せん断の疲労载荷実験を行った^{2),3)}。その結果、環境条件によって疲労強度が異なることを明らかにし、曲げひび割れは液体の種類による影響が少なく、斜めひび割れの発生に対しては液体の種類による差が大きくなることを示した。

しかし、潤滑油に覆われたコンクリート基礎のプレス加工時の振動数は 1Hz 以下と一般的な疲労試験の载荷速度 2~5Hz と比べると小さな振動数となる。また、鈴木ら⁴⁾が 3 種類の実橋梁において上部工の振動実験を行った結果では約 3~5Hz の振動数を得ており、当然のことながら構造物による振動数の違いが見られる。海洋構造物では波浪による衝突の周期に大きな違いがあるため、清宮ら⁵⁾は割裂引張試験による 0.3~15Hz と様々な载荷速度の影響を検討しており、载荷速度が 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。RC 梁部材に対しては藤本ら⁶⁾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 と载荷速度が小さい方が疲労強度は小さくなることを示している。この様に载荷速度による影響があることは示されているが、疲労強度における载荷速度の影響に関する研究は十分ではない。そのため、载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、文献 2) と同様な条件、つまり気中と粘性の異なる液体に浸漬した RC 梁に対してそれぞれ载荷速度をパラメータに全 17 体の疲労载荷実験を行い、破壊性状への影響と疲労寿命に関する影響を検討した。

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の進展も検討するため文献 2) 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载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の等価応力ブロック法による曲げ耐力に対する比は 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無い単鉄筋断面であり、せん断スパン比は 3.75 である。鉄筋には中央から 150mm ピッチでひずみゲージを設置し、コンクリート圧縮縁に中央から 60mm の位置にもひずみゲージを設置している。なお、供試体の養生は、室内温度 20℃の養生室において散水養生を 28 日間行った。その後も同条件下の養生室にて気中で養生した。

2.2 実験方法

実験は 3 点対称载荷とし、実験変数としては、正弦波による繰返し载荷時の载荷速度による違いを検討するため、载荷速度を文献 2) で実施した 0.5Hz と文献 3) で実施した 5Hz およびその中間として 2Hz の 3 パターンとした。また、環境条件は文献 2) と同様な条件となる油中、水中、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（下限荷重~上限荷重）は静的载荷実験より得られた降伏強度 P_y を基準にし

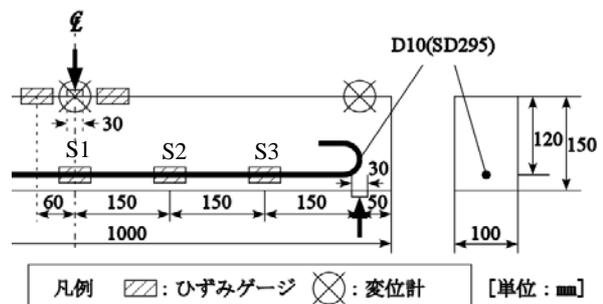


図-1 供試体寸法ならびに計測項目

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科 博(工) (正会員)

*2 大阪市立大学大学院 工学研究科

表-1 液体の物性

	水 ⁷⁾	潤滑油 ⁸⁾	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-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)
気中	32.5	22.4	0.19	356	198	501
水中・油中	28.8	25.8	0.19	373	172	515

表-3 供試体一覧

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)
A5Hz-1	気中	5	10~80	15.9
A5Hz-2		5		
A2Hz-1		2		
A5Hz-90%	気中	5	10~90	15.9
A2Hz-90%		2		
A0.5Hz-90%		0.5		
O5Hz-1	油中	5	10~80	15.8
O5Hz-2		5		
O2Hz-1		2		
O2Hz-2		2		
O0.5Hz-1		0.5		
W5Hz-1	水中	5	10~80	16.0
W5Hz-2		5		
W2Hz-1		2		
W2Hz-2		2		
W0.5Hz-1		0.5		
W0.5Hz-2		0.5		

表-4 実験結果一覧

供試体名	疲労寿命 N (回)	$\log N$	破壊形式	鉄筋破断
A5Hz-1	2,000,000以上	-	曲げ・斜めひび割れ発生	-
A5Hz-2	2,000,000以上	-		-
A2Hz-1	2,000,000以上	-		-
A5Hz-90%	870,675	5.94	せん断破壊	○
A2Hz-90%	737,414	5.87	せん断破壊	○
A0.5Hz-90%	1,275,800	6.10	曲げ引張破壊	○
O5Hz-1	949,571	5.98	せん断破壊	○
O5Hz-2	1,311,937	6.12	曲げ引張・せん断破壊	○
O2Hz-1	629,168	5.80	曲げ引張・せん断破壊	○
O2Hz-2	170,987	5.23	せん断破壊	×
O0.5Hz-1	461,152	5.66	せん断破壊	○
W5Hz-1	518,382	5.71	曲げ引張・せん断破壊	○
W5Hz-2	422,968	5.63	曲げ引張・せん断破壊	○
W2Hz-1	202,348	5.31	せん断破壊	×
W2Hz-2	143,334	5.16	せん断破壊	×
W0.5Hz-1	25,280	4.40	せん断破壊	×
W0.5Hz-2	32,807	4.52	せん断破壊	×

注: 2,000,000以上は200万回で破壊しなかった

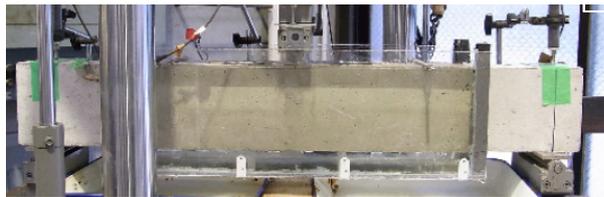


図-2 浸漬時供試体設置状況

て、 $0.1P_y \sim 0.8P_y$ で実施した。ただし、気中において200万回で破壊せずに終了したことより、気中環境下での载荷速度の違いによる影響を見る為、载荷荷重幅を $0.1P_y \sim 0.9P_y$ に変え0.5Hz, 2Hz, 5Hzの3パターンの疲労実験を追加で行った。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。計測は初期载荷(荷重振幅中央 $0.35P_y$ もしくは $0.4P_y$ まで)を静的に、疲労試験時を動的に計測するため、静的、動的のどちらも測定できるDRA-30Aを用い疲労試験機から得られる载荷荷重、変位および図-1に示す変位とひずみを各载荷速度に対し、1周期40点計測するようにサンプリング周波数を決定して行った。なお、図-2に示すように液体は支持点間において実験時のみの部分的な浸漬としている。表-2に材料特性、表-3に供試体一覧を示す。

3. 疲労実験結果

3.1 疲労寿命

実験結果の一覧を表-4に示す。気中の上限荷重80%以外の供試体において200万回未満で破壊に至った。表に示す破壊形式は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せん断破壊(斜めひび割れ部の鉄筋が破断

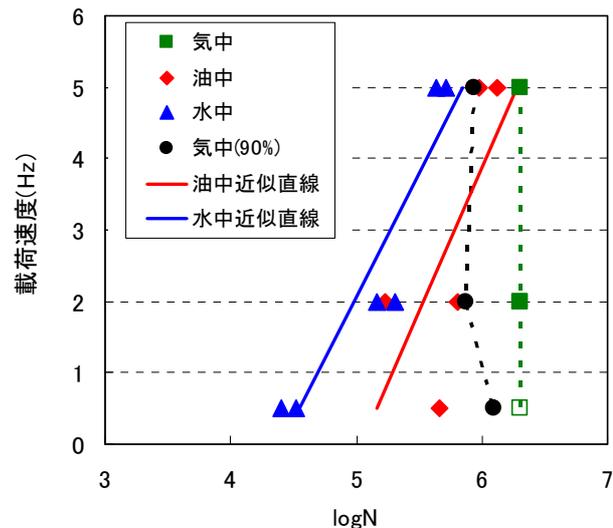


図-3 载荷速度と疲労寿命

したものも破断していないものがあるが、ここでは特に区別はしていない)、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、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て曲げ引張・せん断破壊と定義した。なお、破壊時に鉄筋の破断が生じているのは0.59%と低鉄筋比であることが一つの要因と考えられる。

破壊形式を考慮せず、環境条件および载荷速度による影響を検討するため、図-3に载荷速度と疲労寿命の関係を示す。図には供試体数が少ないため当然、精度はよくないが、液中それぞれの载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示した。既往の研究^{2),3)}同

様、同じ荷速度に着目すると環境条件が疲労強度に影響することが確認できた。また、気中の場合は荷速度による疲労寿命への影響はほとんど見られないが、液中（水中、油中）の供試体では液体の種類に関係なく、荷速度が速くなるほど疲労寿命が大きくなる結果となった。特に粘性が小さいほど環境条件+荷速度によって疲労寿命が大きく変化することとなった。ただし、荷速度が速くなることで、油中の0.5Hz 荷と水中の5Hz 荷の疲労寿命が近似する結果となり、液体に浸漬した場合は荷速度によって疲労寿命に与える影響が大きいたことが分かる。

3.2 ひび割れ状況

破壊過程を比較することとして、図-4に各条件のひび割れ進展過程を示した。気中と油中では1万回程度までのひび割れについて、荷速度および環境条件による明確な傾向は見られず、梁高の2/3~3/4程度までひび割れが伸びていた。水中においては荷速度が遅いほどひび割れが少ない回数で上縁付近まで伸びており、荷速度0.5Hzについては10万回に到達せず破壊した。他の条件の供試体はすべて10万回以上となっているが、水中、油中の場合は10万回で上縁付近までひび割れが進展し

ていた。しかし、その後の最終破壊に至るまでに液体の種類と荷速度に違いが生じる結果となった。気中においては10万回までは上限荷重80%の方が若干ひび割れの進展が早いもののその後の進展が見られないまま200万回の荷が終了した。その後、上限荷重90%に変えた気中の3体については、同様のひび割れの進展が見られたが、10万回以降のひび割れ進展に差異が生じ、最終的に位置は異なるが3体すべてにおいて鉄筋の破断が生じた。なお、図のようにA0.5Hz-90%の場合のみ斜めひび割れが上縁まで達しない曲げ破壊となった。

3.3 部材挙動

ひび割れの進展からは特に油中と気中において荷速度の違いによる影響が得られなかったため、部材の中央たわみから得られる挙動の進展状況を見ることとして、図-5に繰り返し荷時の最大部材角（変位）の履歴を示す。併せて、図-6に繰り返し荷時の上限、下限荷重作用時の変位増分を荷重振幅幅で除して算出した曲げ剛性の履歴を示す。ただし、疲労破壊しなかった気中の上限荷重80%を除いて示す。なお、図は環境条件ごとに色分けをし、荷速度ごとに線のタイプを統一している。両図よりひび割れ発生状況の違いによる影響もあり1回

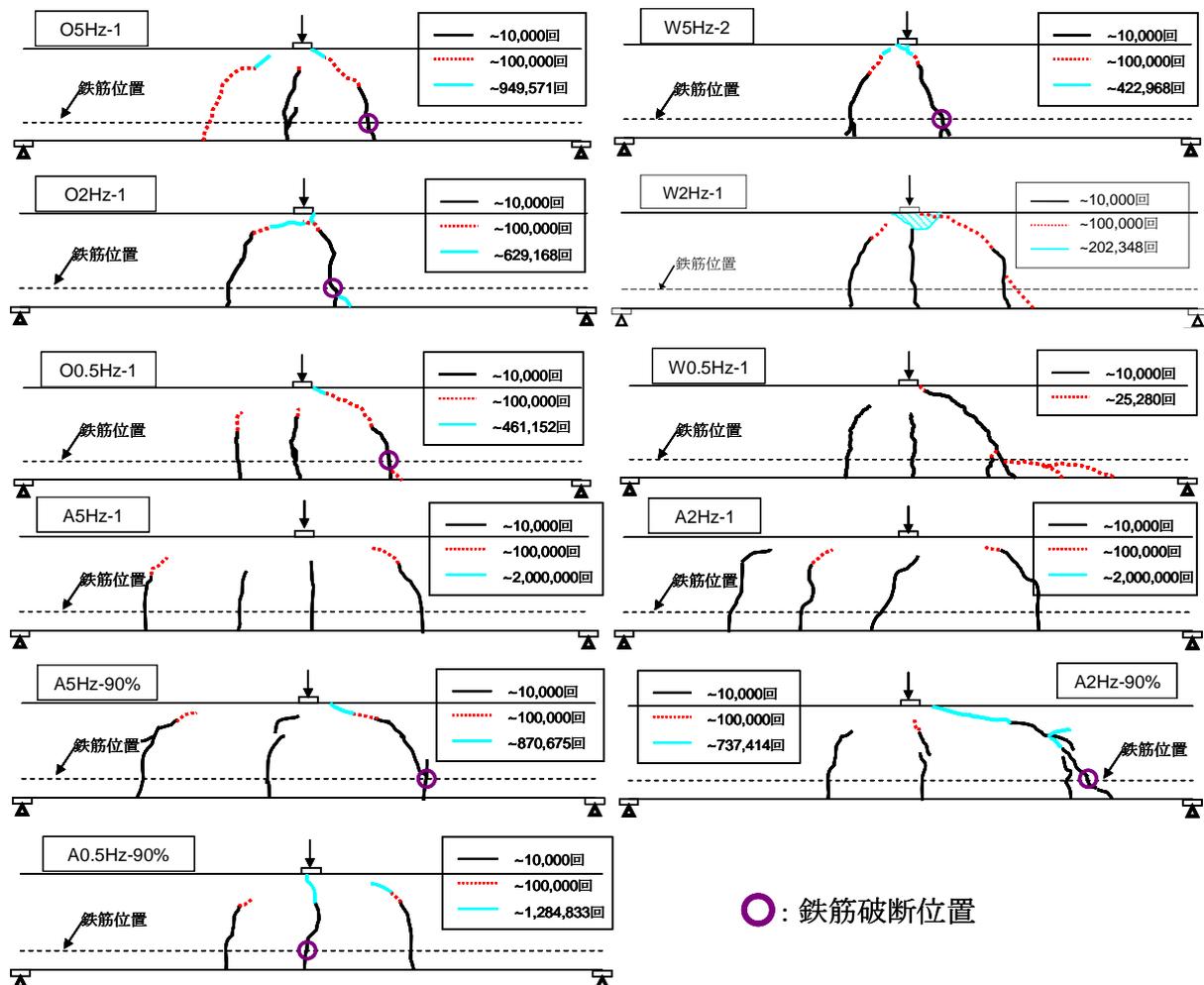


図-4 ひび割れ進展状況

目の部材角，剛性ともにバラツキが見られ，部材角においてはその影響により全体では同じ荷重回数でも 0.002 程度の差が見られた状態で千回程度まで推移している。剛性においては初期時（100 回程度まで）まではばらつきが大きい，それ以降で破壊付近まではばらつきが小さくなっている。環境条件ごとに着目すると，気中（黒線）は荷重速度によって破壊形式が異なるが，部材角，剛性ともに特にばらつきが小さく，荷重速度ごとの違いがほとんど見られない。部材角は全供試体において破壊付近になるとそれぞれの部材角が急激に変化するが，液中（水中：青線，油中：赤線）ではより顕著に変化している。また，剛性の 100 回程度以降での勾配を見ると気中は液中の場合より小さいことが分かる。ひび割れ内への液体の侵入によるひび割れ進展の差が剛性低下の要因と考えられる。さらに，水中においては 100 回～1 万回程度までは油中と同様な剛性で推移している。その後，急激に剛性が低下（部材角も同様に増加）しだして破壊に至っている。油中においても同様に急激な変化は見られるが，1 万～10 万回程度からの剛性の低下（部材角の増加）は気中より大きい水中よりやや小さくなっている。液中では部材角においては荷重速度が 2Hz の場合にやや大きく 5Hz と 0.5Hz での相違はあまり見られない結果となり，図-3 の疲労寿命と荷重速度の相関性とは対応しない。図-5，6 より部材挙動に関しては荷重速度による影響は小さく環境条件による影響の方が大きくなる結果となった。

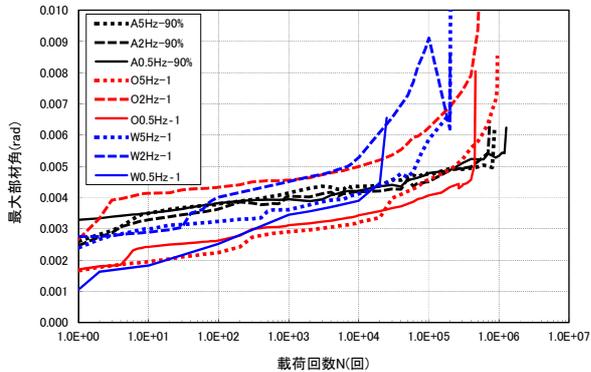


図-5 最大部材角と荷重回数

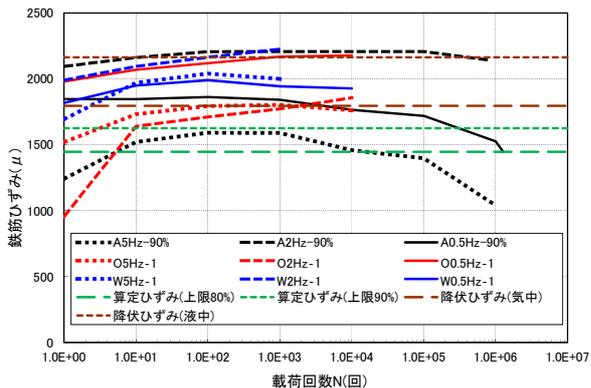


図-7 S1 位置鉄筋ひずみ（上限荷重作用時）

3.4 鉄筋ひずみ履歴

図-1 に示した梁中央に配置した鉄筋ひずみ S1 と梁中央から 300mm の位置に取り付けた鉄筋ひずみ S3 の繰返し荷重時の上限荷重作用時 ($0.8P_u$ もしくは $0.9P_u$) の履歴を図-7，8 にそれぞれ示す。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算定ひずみと表-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，算定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⁹⁾を適用して求めた。図-7 より S1 ひずみは，1 回目の荷重での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ばらつきが大きく，算定ひずみから上下 500 μ 程度の差異が生じている。その後，算定ひずみより大きなひずみが生じた状態で若干増加しながら推移しており，降伏ひずみを超えた状態のものもある。特に，A2Hz-90%（黒線）は実験中常に降伏ひずみを超えているが，中央付近での鉄筋の破断は生じなかった。ただし，大きなひずみが生じた状態が継続することから，曲げ引張により鉄筋破断が生じた供試体においては鉄筋の疲労破断の可能性が考えられる。また，気中（黒線）のみ途中から減少しており，特に梁中央部の鉄筋が破断した 0.5Hz においても減少していた。なお，液中のひずみは途中で計測不能となったため，破壊時付近の結果は得られていない。次に図-8 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もあり，算定値よりかなり

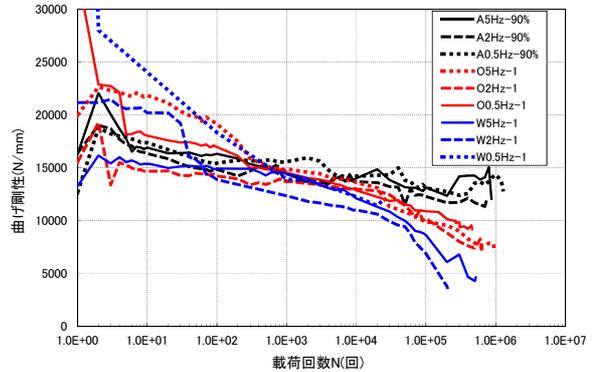


図-6 曲げ剛性と荷重回数

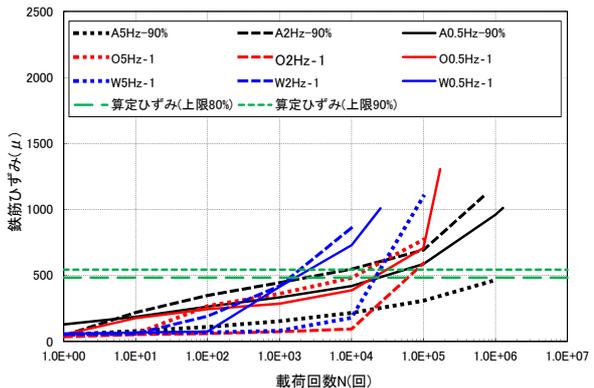


図-8 S3 位置鉄筋ひずみ（上限荷重作用時）

小さなひずみとなっているが、1000回以降から徐々に算定ひずみより大きなひずみが生じた。気中（黒線）はほぼ一定なひずみ増分での増加をしているが、液中の場合は早い段階で急激な増加が見られる。水中（青線）の場合は100回以降で急激な増加が見られ、油中（赤線）は1万回以降で急激な増加が見られる。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節部によるコンクリート支圧破壊が進行し、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。液中の場合にも同様な現象が考えられるが、そのために生じる鉄筋のずれによる隙間への浸透つまり、鉄筋とコンクリート界面へも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。ただし、ひずみゲージのリード線とコンクリート界面に液体が浸透していることは実験での観察により明らかである。リード線を部分的に鉄筋に沿わせて支間の外側上からまとめて供試体の外側に引き出していることからひび割れを横断する形になっていたため、浸透が部分的にリード線により若干誘発されたことは否めない。なお、環境条件による差異は見られたが、荷重速度による差異は明確に表れていない。

3.5 鉄筋の疲労強度

鉄筋の破断が生じているが、鉄筋ひずみの履歴において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-9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⁹⁾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、図に示す曲げ破断は図-1に示したS1位置付近で破断した曲げ引張破壊型と曲げ引張・せん断破壊型において鉄筋破断したものを示し（◆印）、それ以外の供試体全てを曲げ破断以外（▲印）として、S1位置での疲労強度同様に算定上の応力値で表記した。併せて、せん断破壊型で破断したもののみをせん断破断（●印）として、S2位置での応力を考慮し示した。なお、白抜き（△もしくは○）は気中の上限荷重90%の場合であり、せん断補強筋の無いRC梁のせん断疲労寿命（気中80%）も併せて示している。図よりすべてにおいてせん断疲労寿命より大きく、最も疲労寿命の小さい水中の0.5Hzの2体（図中○囲い部）を除いてS1位置での理論上の鉄筋の疲労寿命より大きく、鉄筋の破断が生じる可能性があることが分かる。既往の研究¹⁰⁾よりRC梁の疲労性状として鉄筋の破断よりせん断破壊が生じる方が早い結果が示されているが、本研究においても曲げ破断型の方が疲労寿命は大きくなる傾向となった。また、せん断破壊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

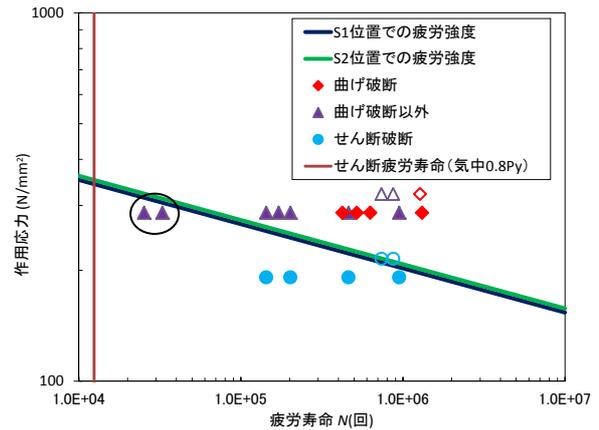


図-9 鉄筋の疲労強度



(1) 02Hz-1 (2) 05Hz-1

図-10 破断鉄筋

小さな値で破断が生じており、引張のみならず、せん断の影響を受けて破断したと思われる。そこで、破断鉄筋の断面の一例を図-10の(1)に曲げ破壊型、(2)にせん断破壊型として示す。図において右側が供試体下面側（引張側）として示している。どちらも同様な破断面をしており、破断付近が細くなる通常の引張破断では無く、疲労破断の様に見える。ただし、疲労破断に見られるビーチマークは見えず、せん断による破壊が生じた様にも見えるが鉄筋のせん断降伏強度に鉄筋断面積を乗じた鉄筋のせん断耐力（14.7~15.4kN）より疲労実験時の作用せん断力（気中90%時7.2kN）の方が小さい。

3.6 コンクリートひずみ

繰返し荷重時の上限荷重作用時（ $0.8P_y$ もしくは $0.9P_y$ ）および下限荷重作用時（ $0.1P_y$ ）の図-1に示す梁中央（荷重点）から60mmの位置の圧縮縁に設置したコンクリートひずみの履歴をそれぞれ、図-11、12に示す。また、図には鉄筋ひずみと同様に理論による算定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。上限荷重作用時において初期時は算定ひずみもしくはそれ以下のひずみ値となっており、下限荷重作用時には算定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（黒線）は荷重終了時まで継続しており、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若干の増加をしているものの途中から減少に転じている。水中（青線）では100回以降で、油中（赤線）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-8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

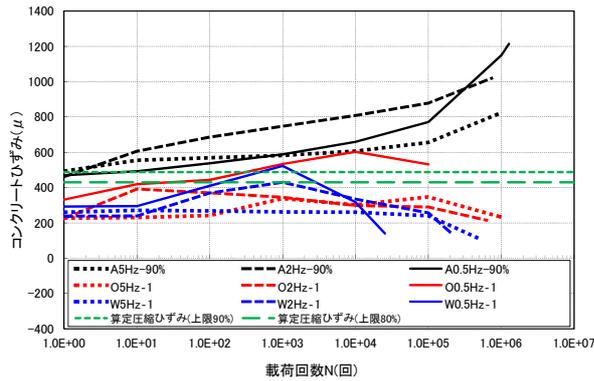


図-1 1 コンクリートひずみ(上限荷重作用時)

ずみの方が明確に、荷重速度の影響が見られ、荷重速度が小さ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。

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する全17体の3点对称曲げ疲労荷重実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 本供試体のような低鉄筋比の曲げ降伏型の供試体において曲げ疲労荷重実験で破壊する場合は曲げ破壊とせん断破壊が混在する。
- (2) 同じ荷重速度では疲労寿命が気中より液中の方が小さく、かつ粘性の小さな水中で最も小さくなった。
- (3) 液中の場合、荷重速度が遅くなるほど疲労寿命が小さくなった。しかし、気中に関しては、荷重速度の影響は見られなかった。
- (4) 水中においては荷重速度が遅くなるほどひび割れが早く進展し、上縁のコンクリートひずみの減少が大きくなる現象が生じた。
- (5) 最大部材角と曲げ剛性に関しては、環境条件の違いが大きく影響し、気中より液中の方が急激な変化(部材角は増加、曲げ剛性は低下)が発生し、水中で最もその傾向が見られた。
- (6) ひび割れの発生しない位置において鉄筋に作用するひずみは、気中より液中の方がより早く理論上の算定ひずみより大きなひずみが発生し、水中で最もその傾向が見られた。このことは、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、液体による影響が大きいと考えられる。
- (7) 鉄筋の引張疲労強度と比較すると、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大きく、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小さな値で破断が生じた。

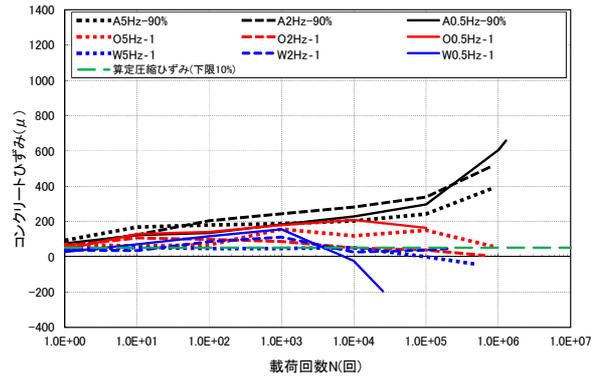


図-1 2 コンクリートひずみ(下限荷重作用時)

- (8) 圧縮縁のコンクリートひずみは、気中と液中において明確な特性の違いが見られ、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。

謝辞：本研究は科学研究費補助金、若手研究(B) (課題番号：21760362 代表 角掛久雄)によって行なわれたことを付記し、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 川満, 鎌田, 内田: 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) 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報告集, Vol.30, No.3, pp.853-858, 2008
- 3) 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
- 4) 鈴木, 長谷川, 鳩: 橋梁アセットマネジメントのための実橋振動実験, 土木学会第 60 回年次学術講演会, Vol.60, pp.7-8, 2005
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 大西外明: 最新水理学 I, pp. 7-12, 1981
- 8) 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
- 9) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2007
- 10) 岸谷孝一, 西澤紀昭編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 疲労, 技報堂出版, 1987