

論文 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

光岡 康寛^{*1}・川満 逸雄^{*2}・角掛 久雄^{*3}・大内 一^{*4}

要旨：本論文は潤滑油がコンクリートのひび割れ部に浸透することによる力学挙動への影響を検討するため，せん断補強筋の無いRC梁を対象に潤滑油に浸漬させて25万回の曲げ・せん断繰り返し载荷を行った。25万回で破壊に至らない場合は，その後静的载荷により破壊に至るまで载荷した。比較検討のため，気中，水中においても同様な試験を行った。そして，ひび割れ進展などの破壊挙動，剛性の低下，コンクリートのひずみなどに対して検討を行い，油中コンクリートはりの疲労特性を示した。

キーワード：潤滑油，コンクリート梁，疲労試験，ひび割れ，曲げ・せん断

1. はじめに

潤滑油の影響を受けるコンクリート構造物は産業設備の基礎が代表的であり，そのひとつであるプレス機のコンクリート基礎に対し潤滑油による劣化が生じた例¹⁾が確認されている。劣化の主要因としてコンクリートひび割れ中への油の侵入とプレス機による疲労载荷が考えられる。そこで，著者らはまず基礎資料を得ることを目的として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，強度に及ぼす影響を調査した^{2),3)}。しかし，油が微小ひび割れ部に浸透することによる破壊への明確な影響を確認するには至っていない。その一つの要因としては圧縮疲労载荷ではひび割れ幅が小さくかつ油の粘度が大きいため，疲労試験時においてひび割れ内に油が十分浸透しなかったことが推察される。そこで，第2段階の試験として明確なひび割れが発生するRC部材試験を行うことにした。

RC部材の疲労試験では，移動荷重を受けるRC床版の試験がよく行われており，水中疲労劣化が指摘されている⁴⁾。RCはりの疲労性状は，気中においては上田ら⁵⁾によって概ね明らかにされており，水中においては西林ら⁶⁾や菅田ら⁷⁾が，曲げせん断疲労試験を行い，特にせん断疲労強度や破壊形式に着目して実験を行っている。しかしながら，油のような水以外の液体に関する研究は未だ行われていない。液体の粘性の違いがRC部材の疲労性状にどの様に影響を及ぼすか不明である。

そこで，本研究ではせん断補強筋のないRCはりに対して油中のみならず，水中と気中による疲労载荷試験を行い，浸漬する液体の違いが強度や破壊性状に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究はコンクリートのひび割れへの油の浸透に着目することから，ひび割れを生じさせた状態で繰り返し载荷をすることにし，引張鉄筋のみ配筋することとした。また，疲労载荷時のひび割れの進行に着目することから，せん断耐力に対して曲げ耐力が小さくなるように設定する。そこで，試験設計時においてコンクリート標準示方書⁸⁾に準拠して算定し，せん断耐力/曲げ耐力が1.3以上となるよう設計した。詳細を図-1に示す。図のように寸法を100mm×150mm×1000mm，引張鉄筋D10(SD295)を1本配筋した。試験体の養生は，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28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。試験体の材料特性を表-1に示す。この材料強度を用いた結果，せん断耐力/曲げ耐力は1.37となった。なお，せん断スパン比は3.75である。ただし，文献6)において気中での疲労载荷時は曲げ破壊しても水中ではせん断破壊となる事例が紹介されていることから，最

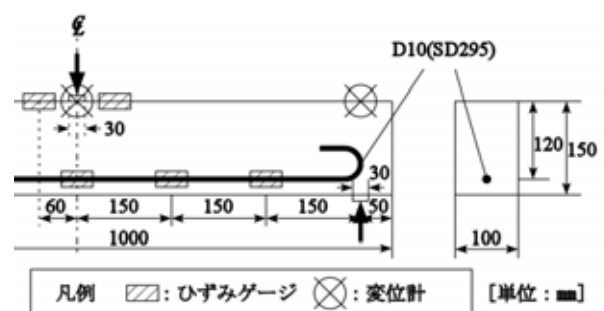


図-1 供試体寸法ならびに計測項目

表-1 材料特性

コンクリート			鉄筋			
圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)	降伏ひずみ (μ)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
28.8	25.8	0.191	372.7	2165	172.2	515.1

*1 大阪市立大学 工学部土木工学科 (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 修(工) (正会員)

*4 大阪市立大学大学院 工学研究科 博(工) (正会員)

終破壊形態にこだわらず、初期時の損傷を曲げひび割れから進展させて破壊させることとしている。

2.2 試験方法

載荷方法は図 - 1 に示すような 3 点曲げとした。図に示すように、計測点は梁の相対変位（回転角）を検討するため、載荷点と支持点の変位を計測し、曲げおよびせん断挙動を検討するため、鉄筋のひずみを中央から 150mm ピッチで 3 箇所、および載荷点両側のコンクリートひずみを計測した。

実験変数としては上述したように、コンクリートの浸漬条件とし、気中、水中および油中で試験を行うこととした。ただし、写真 - 1 に油中での載荷状況を示すようにひび割れ部への液体の浸透に着目していることから、試験時のみの部分的な浸漬とした。それぞれの浸漬条件に対してまず、基本試験として静的載荷試験を行い、次に静的試験から得られたそれぞれの降伏強度を基準強度として繰返し荷重の上下限を決め、疲労載荷試験を各条件で 3 体ずつ計 9 体行った（表 - 2 参照）。載荷強度の上下限値と載荷速度は試験体の変形量と疲労試験機（電気油圧サーボ式、容量 250kN）の能力の問題もあり基準強度の 10～80% で載荷速度を 0.5Hz とした。繰返し回数は本来 200 万回が基本であるが、載荷速度が 0.5Hz となったことから、文献 6) における無補強はりの水中疲労寿命や、文献 7) のコンクリートの分担せん断力が 0 となる回数などの既往の研究も踏まえ、最大 25 万回で浸漬条件の相違による疲労特性を検討できると判断し 25 万回の正弦波繰返し載荷とした。なお、25 万回で破壊に至らなかった場合にはその後、静的載荷により破壊させた。

3. 静的載荷時の破壊挙動

図 - 2 に各条件での静的試験時の荷重 - 変位曲線を、図 - 3 と図 - 4 に油中載荷時のひび割れ状況と荷重 - 変位曲線を示す。図より、各条件において降伏荷重および最大荷重は近似した値を示しており、かつ、曲げ降伏後、曲げひび割れがせん断ひび割れに成長して破壊に至った。しかし、僅かではあるが、最大荷重は水中、油中、気中の順に大きくなっていった。また、最大荷重発生時の変位や破壊時の変位には若干の相違が見られるが、ひび割れの進展状況の違いが影響しているものと考えられる。それは、水中と油中の右側のひび割れ（せん断破壊面）は載荷板右端部に向かい伸びていったのに対して、気中の右側のひび割れは載荷板の下面に伸びていった後に載荷板右端部に向けてせん断ひび割れ（せん断破壊面）が形成されたことによるものと思われる。次に、コンクリートのひずみ（図 - 5）とあわせて見ることとする。部材降伏までを stage1、最大荷重付近までを stage2、



写真 - 1 供試体設置状況（油中）

表 - 2 実験パラメータ

試験体名	試験条件		材齢 (日)	基準強度 (kN) [繰返し荷重比 (%)]
	環境	載荷		
A-00	気中	静的	70	16.7
A-80-01		疲労	93	[10～80]
A-80-02			143	
A-80-03			156	
O-00	油中	静的	112	15.8
O-80-01		疲労	113	[10～80]
O-80-02			127	
O-80-03			170	
W-00	水中	静的	102	16.0
W-80-01		疲労	106	[10～80]
W-80-02			141	
W-80-03			163	

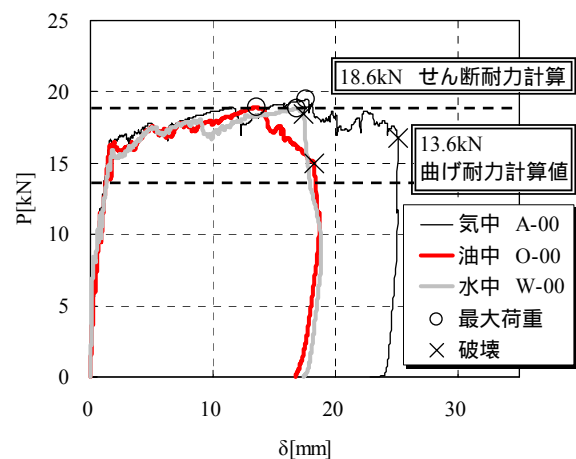


図 - 2 荷重 - 変位曲線

その後を stage3 としてひずみの変化を示した。図からわかるように stage1（部材の降伏）までは曲げが卓越していることから、ひずみの増加が大きく、曲げひび割れのみ発生している。stage2 では部材の変形に比べるとひずみの伸びが小さく曲げせん断ひび割れが生じてせん断変形の影響が大きくなったと思われる。stage3 では、圧縮ひずみは減少し、曲げせん断ひび割れにせん断ひび割れが追加されて破壊に至った。せん断耐力/曲げ耐力の比は 1.37 であったが、表 - 1 に示すように鉄筋の引張強度

は大きく、ひずみ硬化の影響もあり、曲げ損傷・せん断破壊移行型の試験体となり、最大荷重と算定せん断耐力が近似する結果となった。なお、鉄筋の引張強度/降伏強度の比は 1.38 となり、せん断耐力/曲げ耐力比と同等であるが、鉄筋の破断は生じていなかった。

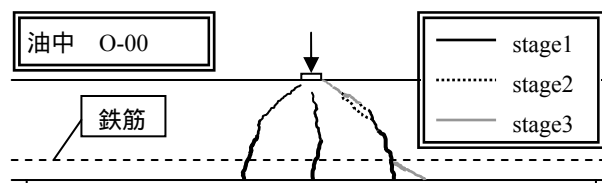


図 - 3 ひび割れ進展図

4. 疲労試験結果

4.1 疲労試験時の破壊挙動

全試験体の結果一覧を表 - 3 に示す。試験体 W-80-02 と W-80-03 は疲労载荷中にせん断破壊が生じた。表の载荷履歴の疲労载荷の()内に破壊時载荷回数を示す。他の疲労载荷試験体は疲労载荷後の静的载荷で曲げ降伏後せん断破壊が生じた。表の降伏荷重比 P_y^{exp}/P_{y0}^{exp} の値から分かるように疲労载荷による大きな影響は観られない。そこで、各浸漬条件における代表の荷重 - 変位履歴を図 - 6 に示す。併せて、その荷重 - コンクリートひずみ履歴曲線を図 - 7 に、試験体のひび割れ進展状況を図 - 8 に示す。なお、W-80-02 は 25,280 回で破壊したため、履歴曲線は最終計測分である 25,000 回までとした。また、図 - 8 のひび割れ図において初载荷から 1000 回まで、疲労载荷終了時まで、疲労载荷後の静的载荷でのひび割れ進展状況を示した。なお、W-80-02 については 25,000 回までと疲労破壊時としている。また、図 - 6、7 において、繰り返し荷重の最大はひび割れ強度より大きく設定しているため、1 回目はひび割れの影響を受けた履歴となっている。図 - 6 より、回数を重ねるごとに変位量が大きくなっているが、疲労破壊した水中では、1 万回の時点で既に変位量が非常に大きく、2 万回時点で気中と油中の 25 万回以上の変位量となっている。気中と油中では 1 万回時の変位量が異なる傾向を示している。そこで、図 - 8 のひび割れ進展状況を見ると、気中と油中

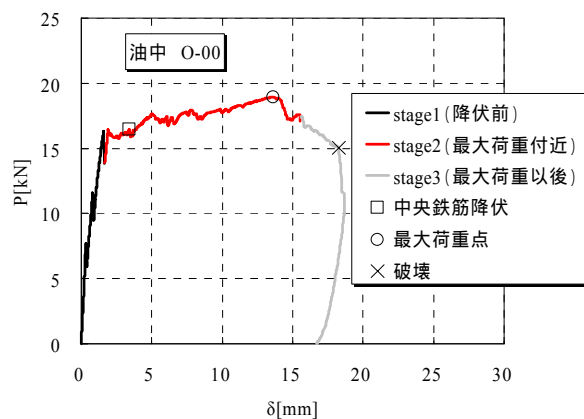


図 - 4 荷重 - 変位曲線 (油中)

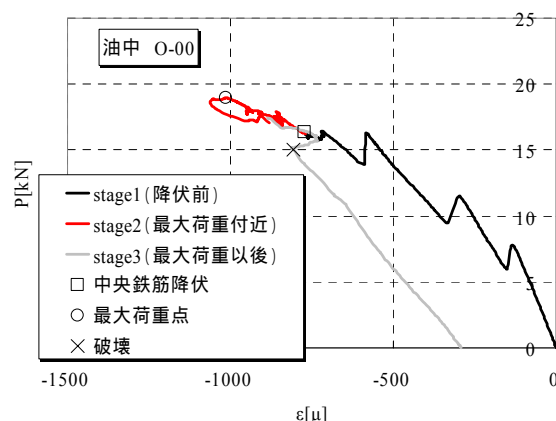


図 - 5 荷重 - コンクリートひずみ曲線 (油中)

表 - 3 試験結果一覧

試験体名	降伏荷重 P_y^{exp}	P_y^{exp}/P_{y0}^{exp} a)	最大荷重 P_u^{exp}	P_u^{exp}/P_{u0}^{exp} a)	P_u^{exp}/P_{vu}^{cal} b)	終局部材角 R_u^{exp}	R_u^{exp}/R_{u0}^{exp} a)	载荷履歴		破壊形式
								疲労载荷	静的载荷	
A-00	16.6	-	19.4	-	-	0.0558	1.00	-	○	曲げ降伏後せん断破壊
A-80-01	16.5	0.99	21.4	1.10	-	0.0638	1.14	○	○	
A-80-02	17.6	1.06	18.8	0.97	-	0.0402	0.72	○	○	
A-80-03	16.7	1.01	18.7	0.96	-	0.0620	1.11	○	○	
O-00	16.3	-	19.0	-	-	0.0429	1.00	-	○	
O-80-01	17.4	1.07	20.7	1.09	-	0.0747	1.74	○	○	
O-80-02	17.3	1.06	19.3	1.02	-	0.0347	0.81	○	○	
O-80-03	17.1	1.05	18.1	0.95	-	0.0509	1.19	○	○	
W-00	16.0	-	18.8	-	-	0.0453	1.00	-	○	
W-80-01	17.6	1.10	18.1	0.96	-	0.0376	0.83	○	○	疲労载荷時せん断破壊
W-80-02	-	-	12.8	0.68	0.69	0.0066 c)	0.15	○ (25,280)	-	
W-80-03	-	-	12.8	0.68	0.69	0.0147 c)	0.32	○ (32,807)	-	

a) 静的载荷 (A-00, O-00, W-00) の値に対する比

b) せん断耐力計算値 $P_{vu}^{cal} = 18.6 \text{ kN}$

c) W-80-02, W-80-03 破壊直前の 25,000 回, 32,000 回载荷時の値を示す。

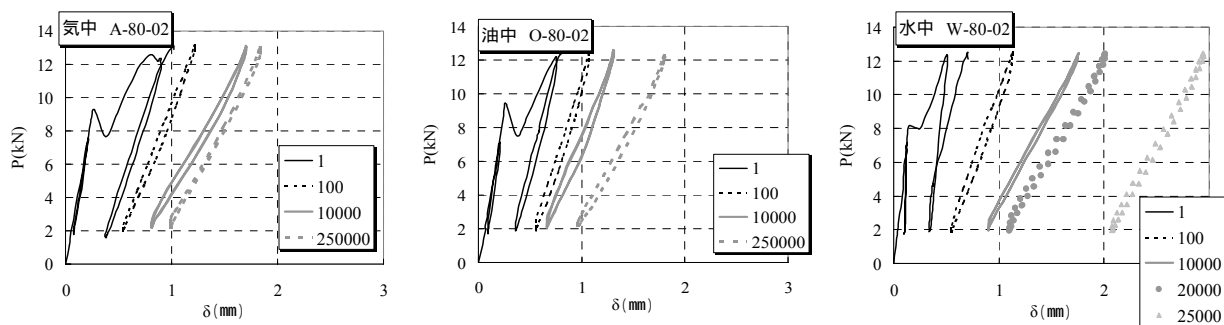


図 - 6 荷重 - 変位履歴曲線

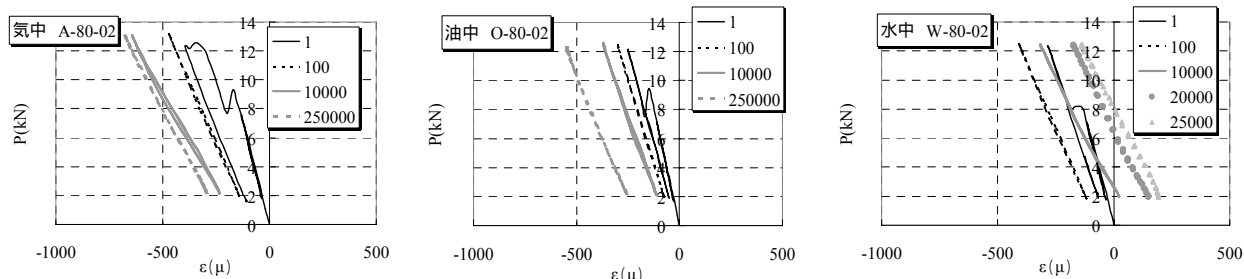


図 - 7 荷重 - コンクリートひずみ履歴曲線

は初期時に曲げひび割れが発生し、その後回数を重ねるごとに曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが成長していくが、気中に比べて油中のほうが曲げせん断ひび割れの成長が大きい。水中では曲げせん断ひび割れの進展がより早く、1万回程度で油中の25万回と同等の高さまでひび割れが生じている。破壊時にはせん断引張破壊と思われる主鉄筋に沿ったひび割れも発生した。次に、コンクリートの中央付近の上縁ひずみをみると、水中以外は変位履歴と相関性が見られる傾向を示しているが、水中においては1万回時のひずみが100回時より小さくなり、回数が進むに従い、小さな値となり、荷重の下限付近では引張りひずみが発生している。このことは、ひび割れの進展状況と併せて考えてみても、回数が進むにつれて曲げ変形よりせん断変形が卓越していることが分かる。ただし、コンクリート標準示方書⁸⁾における気中のせん断補強筋の無い部材の設計疲労耐力は式(1)で表され、25万回載荷においては9.46kNとなり、どの試験体においても疲労破壊が生じてもおかしくない条件で実施していたが、結果としては水中のみで発生した。

$$V_{rcd} = V_{cd}(1 - V_{pd}/V_{cd})(1 - \log N/11) \quad (1)$$

ここで、 V_{rcd} ：せん断疲労耐力、 V_{cd} ：設計せん断耐力、 V_{pd} ：永久荷重作用時の設計せん断力、 N ：疲労寿命

4.2 疲労試験時の部材変形履歴

繰り返し載荷による変形への影響を検討するため、図 - 9 に各載荷回数におけるたわみに関する剛性の変化を示す。ここで、剛性は、図 - 6 の荷重 - 変位履歴曲線において、各載荷回数における荷重振幅を変位振幅で除したものを言い、剛性比は初期載荷における降伏強度の

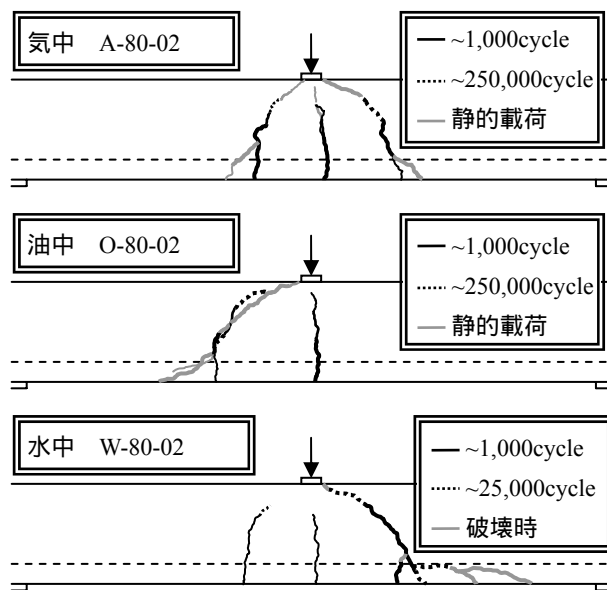


図 - 8 ひび割れ進展状況

10%から3分の1までの弾性剛性を初期剛性として基準にし、無次元化したものである。どの試験体においても曲げひび割れの発生により急激に減少するが、その後（10回以降）の傾向に浸漬条件の違いが見られる。気中においては、1000回程度までは徐々に減少するが、その後、ほぼ一定の値で推移している。それに対して、水中と油中ではなだらかに減少が継続して進行しており、類似した傾向を示している。なお、疲労破壊した2体(W-80-02,03)において破壊から数百回前の記録であり、剛性の変化から明確な破壊に至る変化は得られなかった。

次に、繰り返し載荷による最大部材角の推移を図 - 1

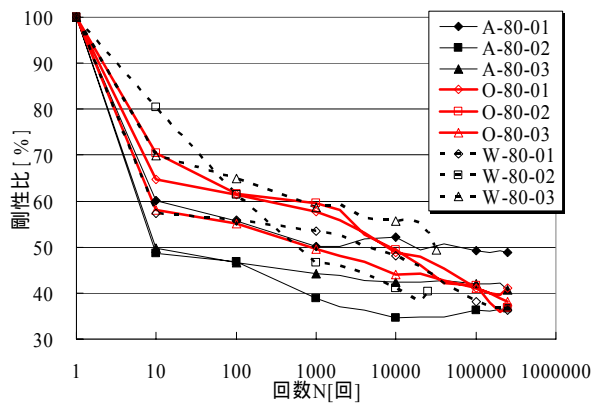


図 - 9 剛性比 - 荷回数履歴

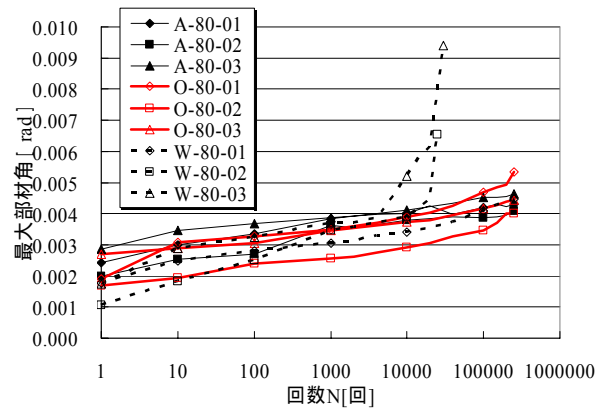


図 - 10 最大部材角 - 荷回数履歴

0 に示す。ここで言う最大部材角とは繰り返し荷重の最大値の時の中央変位から求めた回転角のことである。気中については、25 万回までの増加はほぼ直線的な変化となっている。水中では 4 千回程度までは直線的な変化となり類似しているが、破壊した試験体では急激な増加が発生し、破壊に至っている。破壊しなかった W-80-01 は油中と類似した傾向が見られ、1 万回程度までは直線的に増加しているが、荷が進むにつれ変位増分が大きくなっていることが分かる。油中において特に 10 万回以降の変位増分が大きくなっており、25 万回以上の荷に対して疲労破壊が生じる可能性がうかがえる。

今回は繰り返し荷重において油中では破壊には至らず、繰り返し初期時にも浸漬条件の違いは明確に現れなかった。しかし、回数が進むに従い影響が明確になり、液体に浸らせた方がひび割れは進行し、変形に対する抵抗性能の低下が見られる。ただし、油中では水中ほどの強度低下は見られない結果となった。なお、荷重試験中の観察では水および油共にひび割れ部からコンクリート内へ浸透し、荷重回数の増大にともないペーストが水槽内に流出する。しかし、水の方がより浸透し、多くのペースト流出が確認できた。これは、ひび割れへの液体の侵入と侵入圧力の相違、およびこれにともなう部材劣化の相違をうかがわせる。

4.3 25 万回荷重後の静的荷重

25 万回荷重で破壊しなかった試験体に対して破壊までの静的荷重実験を行った。その時の荷重 - 変位曲線を図 - 11 に示す。ここでは、気中、油中については図 - 6 と同じ試験体を示し、水中については疲労破壊しなかった W-80-01 を示す。全試験体において最大荷重や破壊時の変位に幾分のバラツキがあるものの、25 万回荷重後の静的荷重で 17~18kN 程度まで荷重が増加してから部材の降伏が生じ、その後変形が進み、せん断破壊が生じた。図 - 8 のひび割れ図を見ると 25 万回荷重終了時で曲げせん断ひび割れの成長は見取れるが、図 - 11 では疲労試験において部材としての降伏には至っていなかつ

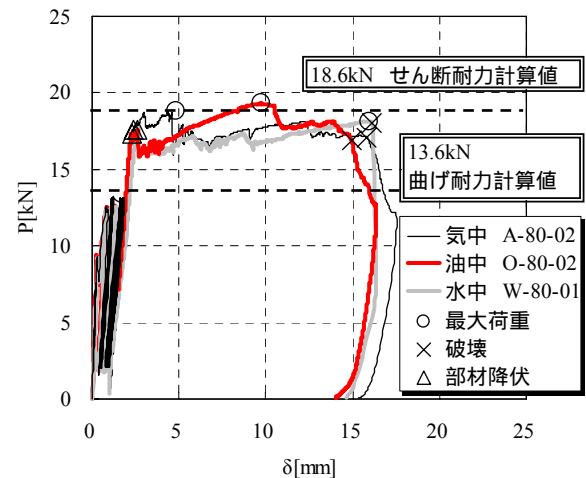


図 - 11 疲労荷重後荷重 - 変位曲線

たことがわかった。ひび割れ状況に着目すると浸漬条件に関わりなく、繰り返し荷重により発生した曲げせん断ひび割れに追加される形で斜めひび割れが発生し、斜め引張破壊が形成されている。

4.4 耐力と終局変位

次に疲労荷重中にせん断破壊した水中試験体を含め、結果一覧を図 - 12 および図 - 13 に示す。図 - 12 の最大荷重を見ると、せん断破壊した試験体がある水中を除き、気中と油中は疲労荷重による変化は少ない。水中試験体のうち 2 体は計算せん断耐力の 0.69 で疲労荷重時にせん断破壊したため、他に比較し低い値を示している。なお、平均値については曲げ降伏後せん断破壊した試験体のみの値を示している。図 - 13 に部材角で表した終局変位については、最終的にせん断破壊であるため試験体間でバラツキがある。そのため、気中に比較し油中試験体は全体的には劣るものの、1 体の結果が大きいため平均値としては同様の結果を示す。一方、水中試験体の場合は曲げせん断破壊の他に比較し低くなる傾向がある。疲労試験中にせん断破壊した試験体 2 体については当然の事ながら低い値を示す。

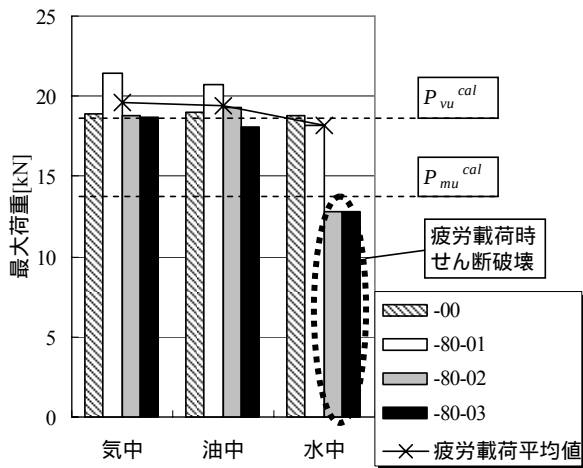


図 - 1 2 最大荷重比較

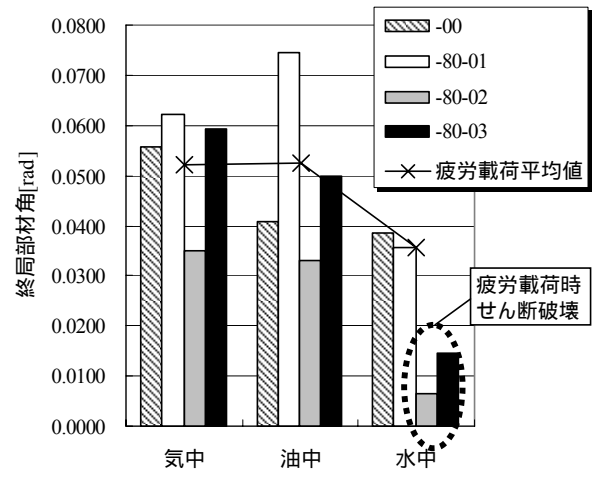


図 - 1 3 終局部材角比較

5. まとめ

油中にあるコンクリートはりの疲労劣化性状を明らかにする目的で、せん断補強筋の無い RC 梁を用い、気中・水中を含む浸漬条件をパラメータとする疲労載荷試験を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 浸漬条件の違いや疲労載荷の有無に関わらず静的載荷試験においては、曲げ降伏後せん断破壊した。各条件における最大荷重には大きな差は見られない。
- (2) 水中の疲労試験において 3 体中 2 体が疲労載荷中にせん断破壊をした。
- (3) 油中、気中ともに疲労載荷中に破壊にまで至らなかったが、油中試験体は曲げせん断ひび割れが進展した。
- (4) 剛性比と載荷回数の関係において、気中では 1000 回程度までは徐々に減少した後、ほぼ一定の値で推移する。それに対して、水中と油中は 1000 回以降もなだらかに減少が進行する。
- (5) 部材角と載荷回数において、気中とそれ以外において変化がみられ、気中では 25 万回までの増加はほぼ直線的である。破壊しなかった W-80-01 は油中と類似した傾向が見られ、1 万回ぐらいまでは直線的に増加するが、載荷が進むにつれ増加量が大きくなる。
- (6) 疲労載荷初期時は浸漬条件の違いは明確に現れないが、回数が進むに従い影響が明確になる。液体に浸らせた場合は破壊が進行し、変形に対する抵抗性能の低下が見られる。ただし、油中では水中ほどの強度低下は見られない。

今回の 25 万回の疲労載荷では破壊に至らなかったが、油中試験体はそれ以上の繰り返し載荷に対し疲労破壊

の可能性がある。今後追加試験を行う予定である。

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) 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
- 3) 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
- 4) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 9，No. 2，pp. 627-632，1987
- 5) 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
- 6) 西林新蔵，井上正一，大田公行：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集，Vol. 9，No. 2，pp. 633-638，1987
- 7) 菅田紀之，尾崎昶：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集，Vol. 19，No. 2，pp. 819-824，1997
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002