

論文 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

伊藤 益嗣^{*1}・川満 逸雄^{*2}・角掛 久雄^{*3}・大内 一^{*4}

要旨：本論文は、コンクリートに潤滑油が浸潤することによって生じる影響を検討する必要性から、潤滑油中コンクリートの圧縮疲労試験を行い、疲労特性の検討を行った。また、疲労寿命の観点からのみではなく、疲労載荷が進むにつれて変化していく応力-ひずみ曲線、残留ひずみの増加、剛性の低下、ヒステリシスループにも着目し、考察を加えた。

キーワード：潤滑油，圧縮疲労，コンクリート，S-N 曲線，剛性，残留ひずみ

1. はじめに

コンクリート基礎は、化学プラントや製鉄所等の産業設備の基礎として広く用いられているが、近年、プレス機のコンクリート基礎に潤滑油による材料劣化が生じた例¹⁾が確認されている。劣化が確認された工場内では、プレス機の周辺温度は 40~50℃にまで達しており、コンクリート内の自由水の蒸発によりコンクリート内には負圧が発生し、潤滑油を吸収しやすい状態となる。また、プレス機の稼動時は絶えずコンクリート基礎に変動荷重が作用しており、疲労劣化が一因として考えられる。動植物油の化学的・物理的作用によるコンクリートの劣化はこれまでに報告²⁾されているが、潤滑油のような鉱物油によるものはほとんど例がない。

このような観点からコンクリートの圧縮疲労特性への潤滑油による影響を検討するため、油中においてコンクリート圧縮疲労試験を行った。気中、水中に関しても同様の試験を行い、応力-ひずみの履歴特性、剛性変化の観点から比較検討を行なった。

リート強度を考慮し、φ75mm×150mm とした。用いたコンクリートはレディミクストコンクリートで、セメントには早強セメントを、粗骨材は砕石を、細骨材は川砂を使用し、混和剤には AE 減水剤を使用したものである。配合を表-1 に示す。供試体養生は、「繰返し圧縮応力によるコンクリートの疲労試験方法」³⁾に基づき、コンクリート打設翌日に脱型し、水温 20℃で 28 日間の水中養生を行い、その後 2 週間気中で放置した。油中、水中、気中の 3 つの条件下で疲労試験を行うが、試験までの養生期間の違いによる影響を小さくするため、2 週間の気中養生後に、105℃の乾燥炉で 24 時間内部の水分を蒸発させた後、外気に触れないようにラップで包み乾燥状態を保持しながら疲労試験まで保管した。ただし、油中・水中の疲労試験に用いる供試体は、試験前にそれぞれの液体への浸漬を行った。試験開始時の材齢、試験前の油中、水中への浸漬日数、静的圧縮強度等、疲労試験条件をまとめて表-2 に示す。グループ A と B では打設日が

表-1 コンクリートの配合

G_{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
15	53	45.9	177	334	798	980

2. 疲労試験概要

2.1 供試体及び養生方法

供試体寸法は疲労試験機の性能およびコンク

*1 (株) 大林組 (正会員)

*2 (株) 日建設計シビル 技術開発部長 工博 (正会員)

*3 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻助手 工修 (正会員)

*4 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻教授 工博 (正会員)

異なり，グループ B は気中，水中でのサンプリング数増加の目的も含むが疲労試験時のひずみを計測するために追加した。またグループ A の油中繰返し応力比 10~80%を 8 本としたのも同様の理由である。なお，グループ B の水中試験用供試体は炉乾燥を行わず，2 週間の気中放置後，水中に浸漬させている。表-2 より浸漬前までは同一条件となるグループ A における静的試験では気中と油中の供試体にはほとんど差が無かった。しかし，水中の供試体は強度が 8 割以下となった。

2.2 疲労試験方法

試験は最初に各条件下で静的圧縮試験を任意の 3 本の供試体について実施し，ここで得られた圧縮強度を疲労試験の基準応力とした。繰返し応力は下限応力比を基準応力の 10%とした。上限応力比 S (%) は油中では 80%，70%，60%と 10%ごとに変化させて 3 ケース，水中および気中では 80%で各 1 ケースとした。なお，本研究は油中での疲労試験を主としていることから，気中および水中については参考として，上限応力比 80%のみでの試験とした。また，繰返し応力の载荷波形は 5Hz の正弦波とした。試験終了条件は供試体が圧縮破壊するか，下限応力以下にまで低下した場合とした。油中，水中での供試体および液体の設置状況を写真-1 に示す。一部の試験においては写真-1 のように供試体高さ方向中央部に貼り付けたひずみゲージ (PL-60) を用いて，動ひずみを計測した。ひずみゲージの貼り付けに際して，サンドペーパーで表面を滑らかにした後，貼り付け

を行なった。また，油中・水中での試験では防油・防水処理として，ひずみゲージを VM テープでコーティングした。なお，側面はアクリル板，底面は鋼板からなる水槽を用いた。疲労試験機は電気油圧サーボ式で，容量 250kN である。

3. 試験結果

3.1 疲労寿命

表-3 には表-2 に示したグループ A, B 全供試体の試験結果を示す。また，疲労寿命は同一条件下でもばらつくことから，統計的処理を実施した。 $p(Nr)$ は繰返し回数 Nr における生存確率の期待値であり，同一条件下での供試体総数 n において疲労寿命の小さいものから数えて r 番目の測定値を Nr とすると， $p(Nr)$ は次式で算定される。

$$p(Nr) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (1)$$

$p(Nr)$ と $\log Nr$ の関係は最小二乗法を用いて，ほぼ直線で近似できることが既往の研究⁴⁾で提案されており，その回帰直線より $p(Nr)=50$ (%)

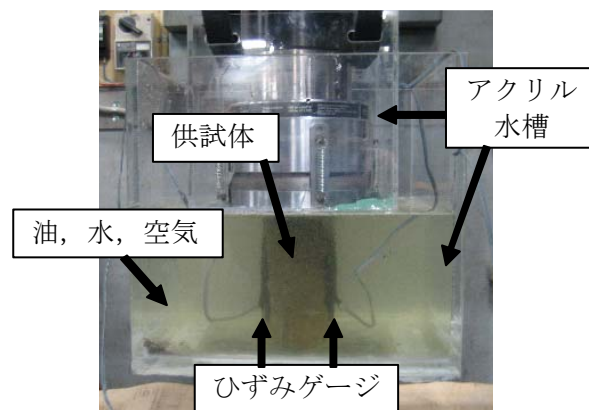


写真-1 供試体設置状況

表-2 疲労試験条件

グループ	7日強度 (N/mm ²)	試験条件	材齢 (日)	浸漬日数 (日)	供試体数 (本)		圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	繰返し応力比 (%)
					静的	疲労			
A	19.7	気中	52	14	3	5	22	20.8	10~80
		水中	66		3	5	16.9	18.2	
		油中	92	40	3	8	21.6	20.5	10~70
					5	5			10~60
B	22.8	気中	43	4	3	4	24.5	20.7	10~80
		水中	45		3	5	28	27.4	

表-3 疲労試験結果

試験条件	S (%)	r	Nr (回)	logNr	p (Nr) (%)
気中	80	1	27	1.43	90.0
		2	799	2.90	80.0
		3	6825	3.83	70.0
		4	7032	3.85	60.0
		5	14505	4.16	50.0
		6	15282	4.18	40.0
		7	15648	4.19	30.0
		8	93346	4.97	20.0
		9	386900	5.59	10.0
水中	80	1	11	1.04	90.9
		2	131	2.12	81.8
		3	142	2.15	72.7
		4	200	2.30	63.6
		5	925	2.97	54.5
		6	1885	3.28	45.5
		7	3175	3.50	36.4
		8	3930	3.59	27.3
		9	4264	3.63	18.2
		10	9671	3.99	9.1
油中	80	1	430	2.63	88.9
		2	466	2.67	77.8
		3	9354	3.97	66.7
		4	11169	4.05	55.6
		5	12395	4.09	44.4
		6	17374	4.24	33.3
		7	44743	4.65	22.2
		8	93993	4.97	11.1
	70	1	1570	3.20	83.3
		2	14620	4.16	66.7
		3	18059	4.26	50.0
		4	22956	4.36	33.3
		5	54233	4.73	16.7
	60	1	905	2.96	83.3
		2	8309	3.92	66.7
3		71185	4.85	50.0	
4		200770	5.30	33.3	
5		217028	5.34	16.7	

表-4 水および潤滑油の粘度

	粘度 (mm ² /s)
水	0.294 ⁵⁾
潤滑油	2~40 ⁶⁾

となる $\log Nr$ の値を平均疲労寿命 $\log Nr_{50}$ として疲労寿命の代表値とする。このようにして求めた平均疲労寿命 $\log Nr_{50}$ と各上限応力比 $S(\%)$ を各試験条件によってプロットすると図-1 となる。図-1 では、水中浸漬の供試体は気中、油中のものに対して明らかな疲労強度低下が見られる。しかし、油中浸漬の供試体では上限応力比 $S=80(\%)$ において、気中の供試体に対して水中供試体程の疲労強度低下は見られなかった。この原因としては、供試体への油の浸透状況が考えられ、表-4 に示すように油の粘度が高いためひび割れが生じて、すぐに浸透しない上、載荷前の供試体自体にも十分に浸透されていなかったことが考えられる。疲労試験後の油中供試体断面を観測したが、潤滑油が完全に浸透した様子は確認できなかった。

3.2 応力-ひずみ曲線

グループ A の油中、グループ B の気中、水中において $S=80(\%)$ の疲労試験中の動ひずみ計測により求めた代表的な応力-ひずみ履歴を図-2~6 に示す。図には、静的載荷試験から求めた弾性載荷曲線も参考としてプロットしている。また、図の右側に配置した凡例内の数字は、それぞれの応力-ひずみ曲線測定時の繰り返し載荷回数を疲労寿命で無次元化したものであり、以下これを「載荷回数比」と呼ぶ。これらの図より浸漬条件に関わらず、繰り返し載荷が進むにつれて、供試体内には残留ひずみが蓄積されるため、図の右方向へシフトしている。また、そのとき曲線の形は文献 7) に述べられているように線形から下に凸な曲線に変形していく。

3.3 残留ひずみの履歴

図-2~6 に示したように、繰り返し載荷が進むにつれて、供試体には残留ひずみ（初期載荷時の 10%ひずみを 0 とした相対ひずみ）が蓄積さ

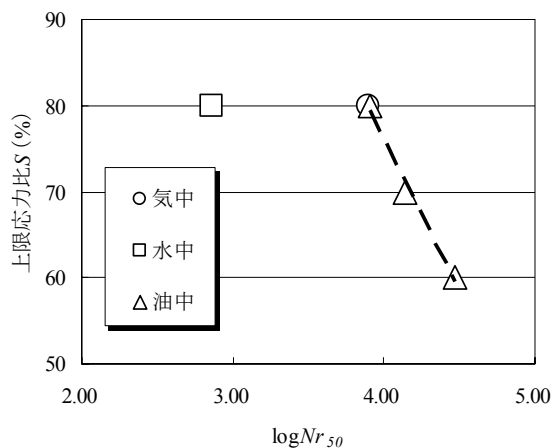


図-1 S-N 曲線

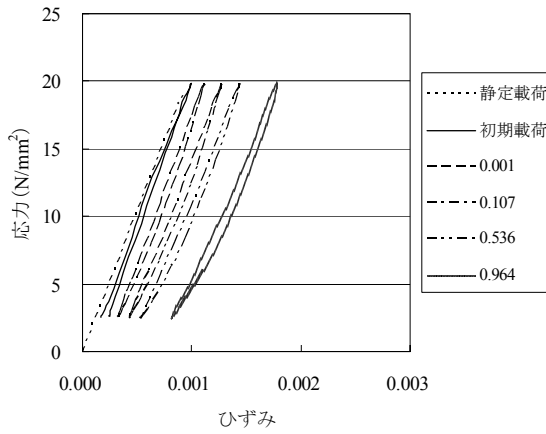


図-2 応力-ひずみ曲線
(グループ B 気中, Nr=93346 回)

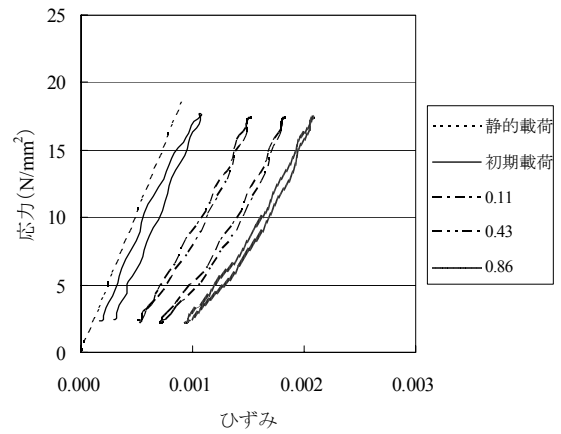


図-5 応力-ひずみ曲線
(グループ A 油中 1, Nr=466 回)

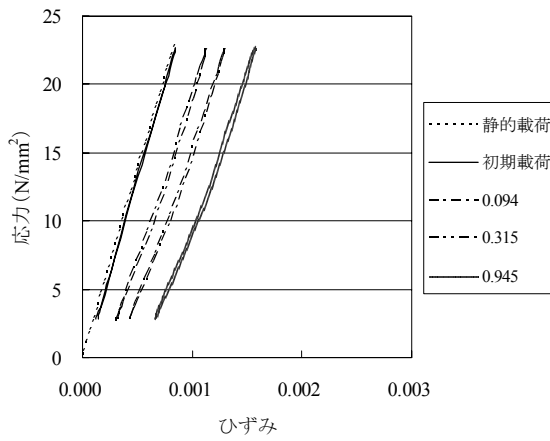


図-3 応力-ひずみ曲線
(グループ B 水中 1, Nr=3175 回)

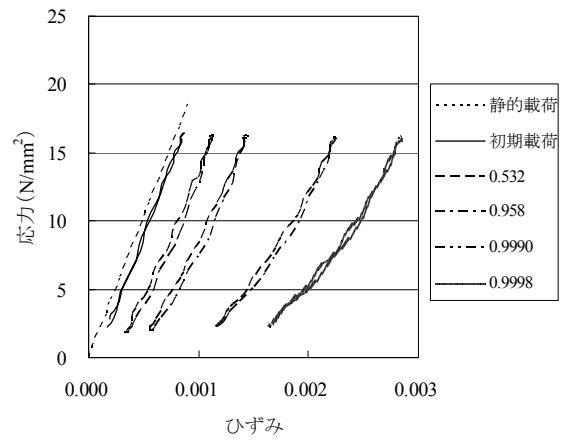


図-6 応力-ひずみ曲線
(グループ A 油中 2, Nr=93993 回)

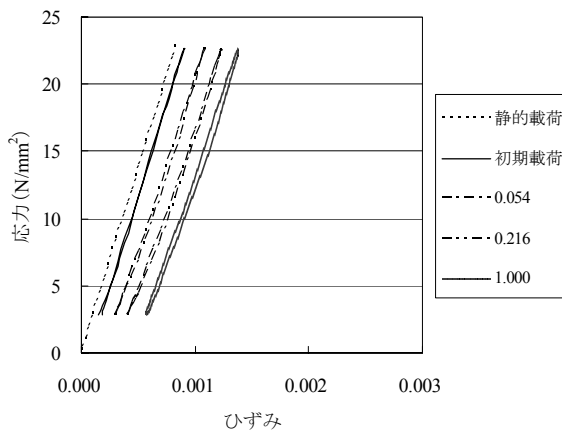


図-4 応力-ひずみ曲線
(グループ B 水中 2, Nr=925 回)

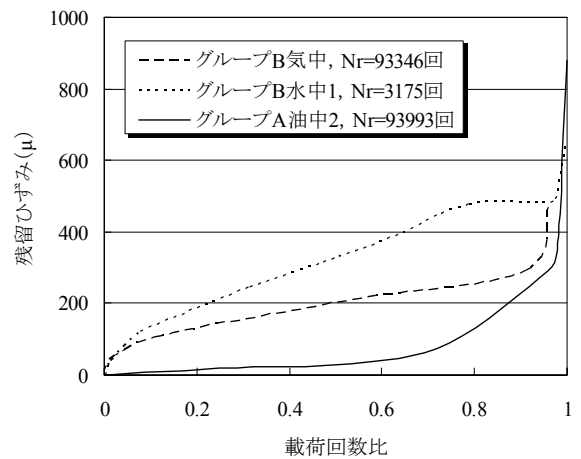


図-7 残留ひずみ-载荷回数比曲線

れていく。図-7は、S=80 (%)の供試体について応力比 10%まで除荷したときの残留ひずみを縦軸に取り、载荷回数比に対する変化を示した。すべての供試体において载荷回数比 1 付近で急激に大きくなるが、気中、水中では、疲労破壊直前まで緩やかに増加し続ける傾向となっている。ただし、水中では気中に比べ増加の割合がやや大きくなっている。油中に関しては、载荷回数比 0.7 程度までは他の供試体よりも緩やかに増加しているが、その後水中よりやや大きな増加を示す。破壊直前の急激変化前の残留ひずみは、油中と気中は近似しているが、水中は他より大きくなっている。

3.4 剛性の履歴

図-8にS=80 (%)の供試体の繰返し载荷による剛性の低下を示す。応力-ひずみ曲線の下限応力比 10%から基準強度の3分の1までを線形と見なし、その傾きを初期载荷時のそれで除し無次元化した。気中の剛性比は载荷回数比 0.3 付近まで低下し続け、その後はほぼ一定となる傾向がある。一方、水中では、低下し続けているが、载荷回数比約 0.3 以後は緩やかに低下していく。油中の場合は载荷初期に非常に大きく減少し、その後载荷回数比 1 までは水中の 0.3 以降と同程度の緩やかな割合で低下し続ける傾向がある。これらの破壊直前の剛性は初期の約 70%になっている。このことは、繰返し载荷による剛性低下は初期の約 70%になるとしている文献7)と符号する。

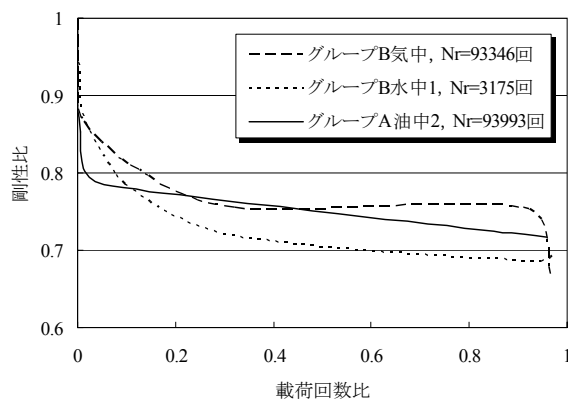


図-8 剛性比-载荷回数比曲線

3.5 ヒステリシスループ

3.2 項で示したように、繰返し荷重を受けるコンクリートの応力-ひずみのヒステリシスループ

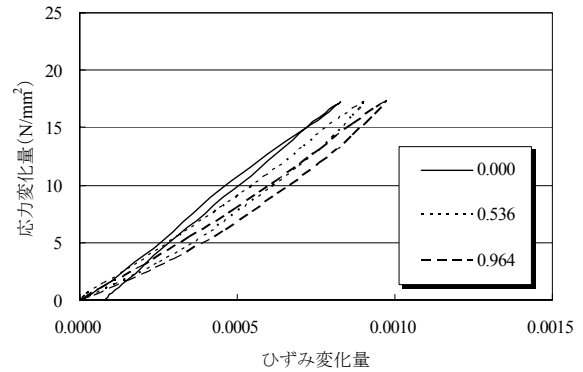


図-9 ヒステリシスループ
(グループ B 気中, Nr=93346 回)

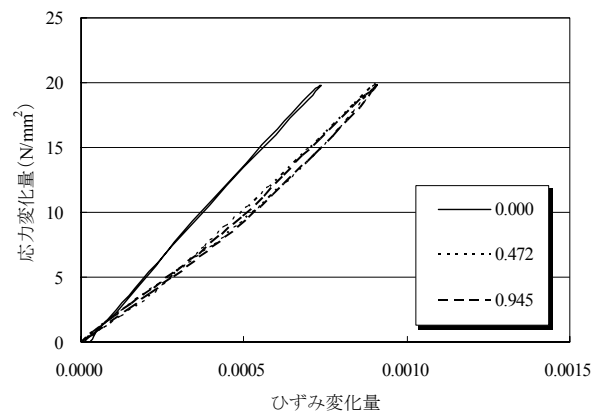


図-10 ヒステリシスループ
(グループ B 水中 1, Nr=3175 回)

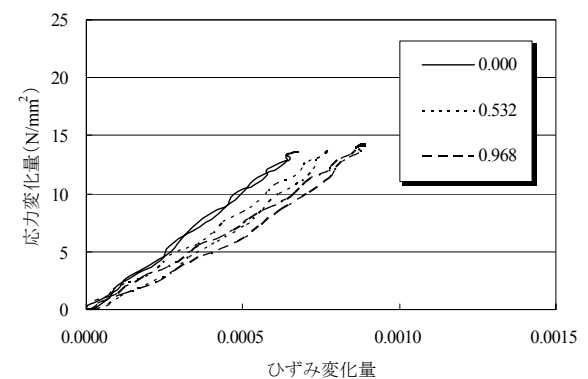


図-11 ヒステリシスループ
(グループ A 油中 2, Nr=93993 回)

は繰返し回数が進むにつれて形が線形から下に凸の曲線へと変化していく。図-9~11には気中、水中、油中の場合の、それぞれの载荷回数においてヒステリシスループを示した。なお、すべての曲線において基準強度の10%応力時を原点としたヒステリシスの形状に注目している。共通して言えることは、载荷回数比1に向かうにつれてひずみが大きくなる傾向にあり、下に凸のループに移行している。ひずみの増加量についても同様であり、3者間で大きな差異はない。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 潤滑油に浸漬されたコンクリート供試体の静的圧縮強度は気中のそれとほぼ同じ程度であった。
- (2) 疲労試験により求めたS-N関係では、潤滑油によるコンクリート疲労強度低下は気中の供試体と同程度で、水中供試体程の疲労強度低下は見られなかった。
- (3) 疲労試験時の残留ひずみの増加に対して、気中と水中では類似傾向が見られたが、油中のみ破壊直前に大きくなるという異なった傾向を示した。
- (4) 気中、水中、油中の供試体はいずれも、疲労破壊直前の剛性は、初期の約70%まで低下する。
- (5) 疲労寿命回数に近づくにつれ応力-ひずみのヒステリシスは下に凸の形状を示す。

今回の油中供試体は、気中と同程度の平均疲労寿命を示した。水中供試体の場合は水のくさび作用による疲労強度低下が考えられるが、油

中供試体では粘度の違いが挙げられる。今回の油中浸漬は40日間という限定期間でもある。一般論を語るには浸漬方法および浸漬期間を含め、今後更なる検討を加えることが必要である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、大阪大学の鎌田敏郎教授ならびに内田慎哉氏に多大なるご尽力を頂きました。ここに付記し、深く御礼申し上げます。

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) 岸谷孝一, 西澤紀昭他編: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 化学的腐食, pp. 28-32, 1986
- 3) (財)建材試験センター: 繰返し圧縮応力によるコンクリートの疲労試験方法 (JSTM C 7104), JSCCM, 1999
- 4) 阪田憲次, 木山英郎, 西林新蔵: 統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究, 土木学会論文報告集, 第198号, pp. 107-114, 1972
- 5) 大西外明: 最新水理学 I, pp. 7-12, 1981
- 6) 星野道男, 渡嘉敷道秀, 藤田稔: トライボロジー叢書 8 潤滑グリースと合成潤滑油, p. 193, 1983
- 7) Van Ornum: Fatigue of Cement Products, Transactions, ASCE Vol. 51, 1903