

論文 コンクリート内部の液体の表面張力が圧縮疲労強度に及ぼす影響

大屋 敦志^{*1}・松下 博通²・尾上 幸造^{*3}・若林 幹夫^{*1}

要旨：コンクリートの圧縮疲労強度は水中で著しく低下する。この原因としてひび割れ先端における分離圧や、水分の付着による表面エネルギーの低下などが考えられているが、これらについて具体的に検討した例は見られない。そこで本研究ではコンクリートの圧縮疲労強度とコンクリートの空隙を満たす液体の表面張力の関係について検討した。その結果、液体の表面張力の増大とともに圧縮疲労強度が直線的に低下することが明らかとなった。

キーワード：圧縮疲労強度，液体，表面張力，表面エネルギー， $S-N$ 線図， K

1. はじめに

コンクリートの静的強度は湿潤状態より乾燥状態の方が増加することはよく知られており、弾性係数などの変形性状もその含水状態によって大きく変化する。過去には岡島¹⁾、地濃²⁾らによってコンクリートの含水率が強度、および静弾性係数に与える影響が検討されており、強度と含水状態は密接な関係があると考えられる。

また、コンクリートの圧縮疲労強度についても同様であり、たとえ同条件の供試体であっても試験時の環境により大きく異なる。既往の研究により、水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度は、気中に比べ20%程度低下し³⁾、吸水率の大きい軽量骨材を用いたコンクリートの圧縮疲労強度は、普通コンクリートに比べ低下する⁴⁾ことが明らかにされている。過去に著者らも軽量骨材コンクリートの圧縮疲労強度について、気中ではコンクリートの含水の状態、すなわち飽和度に大きく依存し、水中では骨材の吸水率に関わらず普通コンクリートとほぼ一定になる⁵⁾ことを報告している。

しかし、設計疲労強度を算定する上において、吸水率の大きい軽量骨材コンクリートの気中疲労強度は普通コンクリートの湿潤状態と同等とされている⁶⁾だけであり、具体的に気乾状態の

含水量を考慮して設計されていない。また、未だに含水によるコンクリートの疲労強度低下の原因、メカニズムが解明されていないのが現状である。過去に、混和材を用いたコンクリートあるいは真空処理を行ったコンクリートの、水中における疲労強度の改善に関する報告⁷⁾は見られるが、その原因について具体的に検討した例は見られない。今後、コンクリートの適切な性能照査設計のために、これらの関係を明らかにすることは非常に重要であり、必要であると考えられる。

一方、静的強度については、堀らがセメント硬化体中の液体の表面張力と曲げ強度の関係について、液体の表面張力が大きくなると曲げ強度は低下する⁸⁾ことを明らかにしている。また圧縮強度についても同様に液体の表面張力の大きさと直線関係にある⁹⁾ことが報告されている。これらのことより、湿潤状態にあるコンクリートの静的強度の低下の原因は水の表面張力の影響が大きいと考えられる。

そこで、本研究では水中における圧縮疲労強度低下の原因についても、水の表面張力の影響が大きいと考え、コンクリート内部の空隙に存在する液体の表面張力の影響に着目し、表面張力の異なる液体中にて疲労試験を行った。

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士 (工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

供試体は疲労試験機の容量を考慮し、水セメント比 55%、7.5×15cm の円柱供試体を用いた。セメントとして普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）、粗骨材として碎石（最大寸法 20mm、表乾密度 2.86g/cm³、吸水率 1.19%）、細骨材として海砂（表乾密度 2.59g/cm³、吸水率 1.40%、粗粒率 2.90）を用いた。混和剤はリグニンスルホン酸系の AE 減水剤とアルキルアリルスルホン酸系の空気連行剤を併用した。コンクリートの示方配合を表 - 1 に示す。配合はスランプが 8±1cm、空気量が 4.0±0.5%となるように試験練りにより決定した。

2.2 実験方法

(1) 液体

本試験では二種類の液体を用いた。過去の静的強度と液体の表面張力に関する研究では有機溶媒が用いられていた。しかし、疲労試験は試験が長期間にわたるため、安全性を考慮して無機溶媒を使用した。液体 A として、界面活性の作用を有するコンクリート用混和剤を純水で 20 倍希釈した溶液を用い、液体 B として 4mol/l の NaCl 水溶液を用いた。それぞれの表面張力の値は九州大学中央分析センターの表面張力測定装置により測定した結果、液体 A は 63.0dyn/cm、溶媒 B は 90.1dyn/cm であった。また精製水の表面張力は 72.8dyn/cm である。

(2) 供試体

コンクリートは、パン型ミキサで 3 分間練混ぜを行い、7.5×15cm 円柱型枠に 2 層に分けて打ち込み、各層 6 回ずつ突き棒で突き、バイブレーターにより締め固めた。供試体は打設後 24 時間で脱型し、養生室（室温 20±1、湿度 95%以上）内で湿空養生を行った。

コンクリートは数回に分けて打設し、打設ごとの供試体群を 1 グループとし、グループ毎に任意に抽出した供試体から静的圧縮強度を求め、残りの供試体を用いて疲労試験を行った。

供試体は 2 グループ作製し、一方を液体 A 中

表 - 1 コンクリートの示方配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (g/m ³)	AE剤 (ml/m ³)
		水 W	セメント C	海砂 S	碎石 G		
55	47	165	300	846	1054	938	300

で試験を行うグループとし、他方を液体 B 中で試験を行うグループとした。疲労試験は長期間にわたるため、試験期間中のコンクリートの強度増進を避けるため、試験時の材齢は 3 ヶ月以上の長期材齢を原則とした。

また、コンクリート内部を各液体で満たすために供試体を一旦絶対乾燥状態にし、水分を除いた後、各液体に浸漬させた。乾燥させる際、急激な温度変化によるコンクリートの微細ひび割れの発生を防ぐため、養生後、恒温恒湿室（20、60%R.H.）で 3 日間静置させた後、60 の乾燥炉で 3 日間、90 の乾燥炉で 7 日間乾燥させ、供試体を絶乾状態とした。その後各液体に 14 日間浸漬させ、コンクリート内部が液体に満たされている状態とした。乾燥および浸漬期間については、事前実験により質量変化が収まるまでの期間として定めた。

(3) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度は、各供試体群から無作為にそれぞれ 5 本ずつ抽出し、疲労試験前後に測定を行った。また、試験前の 5 本の圧縮強度の平均を疲労試験の繰返し応力設定時の静的強度とし、試験後の 5 本の平均は疲労試験中の強度増加の有無を確認するために行い、強度増加が見られれば繰返し応力比の補正を行うこととした。

また、圧縮強度を測定する際に供試体縦方向に長さ 60mm のワイヤストレインゲージを貼付けて、縦ひずみを測定し、その値をもとに静弾性係数を算出した。

(4) 圧縮疲労試験

疲労試験は供試体を各液体に浸漬させた状態で行った。疲労試験機は電気油圧サーボ式で容量 200kN のものを用い、載荷波形を正弦波形、載荷速度を 5Hz とした。各液体に繰返し応力の大きさは下限応力比 S_2 を静的強度に対して 10%

の一定とした。上限応力比 S_1 は各液体の表面張力を考慮して、液体 A は 55 ~ 75% , および液体 B は 45 ~ 65% とし、それぞれ 5% 間隔で変化させた。また応力比ごとに供試体 5 本ずつ試験を行った。試験用供試体が破壊するか、もしくは繰返し回数が 2×10^6 回に達した場合はその時点で試験を中止し、疲労寿命を算定した。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

液体 A および液体 B 中における圧縮強度試験と静弾性係数試験結果を表 - 2 に示す。また比較として水中における試験結果も同表中に示す。

表よりいずれの液体においても各供試体間のばらつきは小さく、疲労試験前後での材齢に伴う強度増加および静弾性係数の違いはいずれもほとんど見られなかった。したがって試験後の強度増加による応力比の補正は行わず、それぞれ試験前の 5 本の圧縮強度の平均、液体 A の場合は 32.3N/mm^2 , および液体 B の場合は 28.8N/mm^2 を疲労試験時の静的強度とした。

また、表中の各環境の下に示す数字は各液体の表面張力の大きさである。これらと圧縮強度および静弾性係数の関係を、それぞれ図 - 1 , 図 - 2 に示す。モルタルの場合と同様、空隙を満たす液体の表面張力の増加と共に、コンクリートの圧縮強度は小さくなった。同様に、静弾性係数の値も液体の表面張力の増加に伴い小さくなることが認められた。

3.2 疲労試験結果

(1) 疲労寿命分布

同一の载荷条件下におけるコンクリートの疲労寿命のばらつきは非常に大きく、試験結果を整理する上で統計的手法を用いることが必要である¹⁰⁾。本実験のように供試体本数が少ない場合は生存確率を考慮し、順序統計量の理論を適用すべきである。すなわち、同一条件下で試験された総数 n 本のうち疲労寿命が小さい方から r 番目の供試体の生存確率の期待値 $P(N_r)$ は、次式のようになる。

表 - 2 圧縮強度および静弾性係数試験結果

液体	試料番号	圧縮強度 (N/mm ²)	平均 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
水中 (72.8)	No.1	31.8	31.7	1.31	26.4
	No.2	29.4			
	No.3	32.5			
	No.4	31.6			
	No.5	33.4			
疲労試験前液体A (63.0)	No.1	31.7	32.3	1.41	27.1
	No.2	31.4			
	No.3	30.6			
	No.4	34.7			
	No.5	32.8			
疲労試験後液体A (63.0)	No.1	31.2	32.0	0.89	28.1
	No.2	33.4			
	No.3	32.7			
	No.4	31.2			
	No.5	31.6			
疲労試験前液体B (90.1)	No.1	28.4	28.8	0.92	23.6
	No.2	28.9			
	No.3	29.7			
	No.4	27.3			
	No.5	29.8			
疲労試験後液体B (90.1)	No.1	30.1	29.6	0.87	22.7
	No.2	29.6			
	No.3	28.3			
	No.4	30.9			
	No.5	29.2			

*括弧内の数字は各液体の表面張力(dyn/cm)を表す

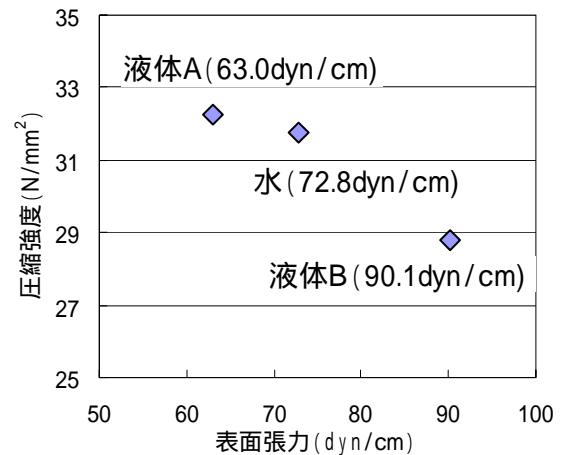


図 - 1 圧縮強度と液体の表面張力の関係

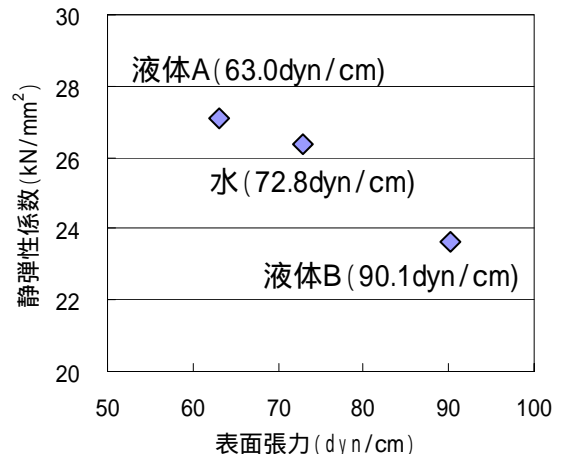


図 - 2 静弾性係数と液体の表面張力の関係

表 - 3 疲労試験結果

環境	S_1 (%)	r	疲労寿命 (回数)	$\log N_r$	$P(N_r)$
液体A	75	1	2422	3.38	83.3
		2	3796	3.58	66.7
		3	5550	3.74	50.0
		4	7813	3.89	33.3
		5	9110	3.96	16.7
	70	1	20041	4.30	83.3
		2	22545	4.35	66.7
		3	30593	4.49	50.0
		4	35402	4.55	33.3
		5	44442	4.65	16.7
	65	1	41083	4.61	83.3
		2	52679	4.72	66.7
		3	82196	4.91	50.0
		4	172214	5.24	33.3
		5	318536	5.50	16.7
	60	1	61917	4.79	83.3
		2	201213	5.30	66.7
		3	525042	5.72	50.0
		4	627433	5.80	33.3
		5	835498	5.92	16.7
	55	1	393204	5.59	85.7
		2	653554	5.82	71.4
		3	1232407	6.09	57.1
		4	1834670	6.26	42.9
		5	2000000	6.30	28.6
6		2000000	6.30	14.3	
液体B	65	1	9801	3.99	83.3
		2	21964	4.34	66.7
		3	24674	4.39	50.0
		4	32624	4.51	33.3
		5	33218	4.52	16.7
	60	1	29950	4.48	83.3
		2	57556	4.76	66.7
		3	69485	4.84	50.0
		4	97296	4.99	33.3
		5	110731	5.04	16.7
	55	1	133938	5.13	83.3
		2	163529	5.21	66.7
		3	224669	5.35	50.0
		4	248553	5.40	33.3
		5	291952	5.47	16.7
	50	1	374388	5.57	83.3
		2	400611	5.60	66.7
		3	518903	5.72	50.0
		4	661840	5.82	33.3
		5	817267	5.91	16.7
45	1	2000000	6.30	80.0	
	2	2000000	6.30	60.0	
	3	2000000	6.30	40.0	
	4	2000000	6.30	20.0	

$$P(N_r) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (1)$$

また、繰返し回数が 2×10^6 回に達しても破壊しない場合、つまり供試体総本数 n 本のうち、 m 本が規定回数までに破壊しなかった場合は、 $n+1$ 本の供試体が試験されたとして、規定回数 N_x で $n-m+1$ 番目の供試体が破壊したとみなす。すると、寿命の小さい方から数えて r 番目の測定値 N_x での生存確率の期待値 $P(N_r)$ は、

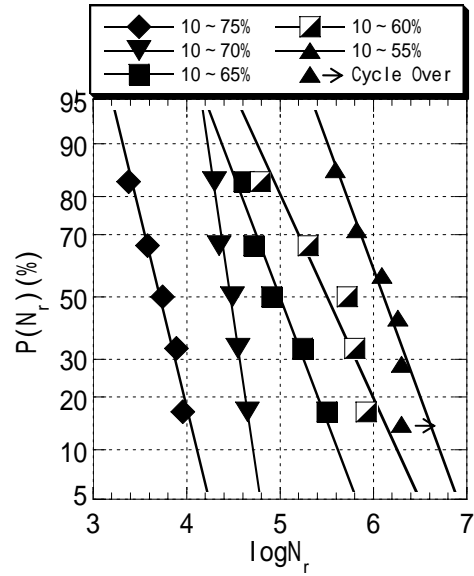


図 - 3 P - N 線図 (液体 A)

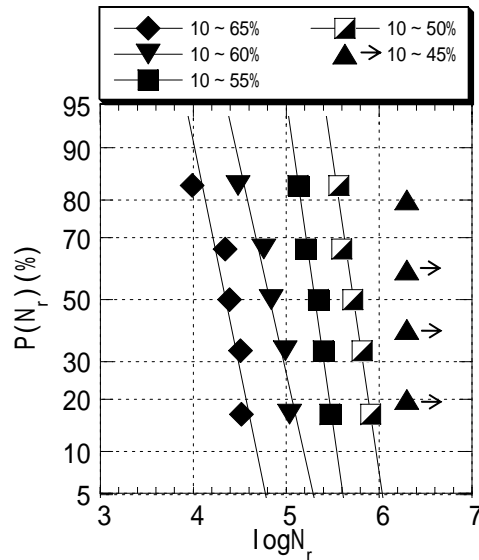


図 - 4 P - N 線図 (液体 B)

$$P(N_r) = 1 - \frac{r}{n+2} \quad (2)$$

となる¹¹⁾。上記の生存確率を考慮し、表 - 3 の試験結果を正規確率紙上にプロットしたものをそれぞれ図 - 3 および図 - 4 に示す。ここで液体 B の最大応力比 45% のグループは、全ての供試体が 2×10^6 回に達しても破壊しなかったため、直線で回帰していない。図より、いずれの場合もよく直線で近似することができた。これより、水とは表面張力の異なる液体中におけるコンクリートの疲労寿命は、水中と同様に対数正規分布することが明らかとなった。

表 - 4 各環境における P - N 線の回帰曲線式

環境	S_1 (%)	回帰直線式	相関係数
液体A	75	$t = 0.3109 \log N_r + 3.710$	0.985
	70	$t = 0.1901 \log N_r + 4.468$	0.988
	65	$t = 0.4856 \log N_r + 4.996$	0.980
	60	$t = 0.5856 \log N_r + 5.506$	0.943
	55	$t = 0.4677 \log N_r + 6.112$	0.979
液体B	65	$t = 0.2623 \log N_r + 4.350$	0.908
	60	$t = 0.2868 \log N_r + 4.822$	0.964
	55	$t = 0.1838 \log N_r + 5.312$	0.984
	50	$t = 0.1896 \log N_r + 5.724$	0.982

表 - 4 に各液体中の繰返し応力比別に最小二乗法によって求めた回帰曲線および回帰係数を示す。なお、表中の変数 t は正規分布曲線の対称軸からの距離で、 $P(N_r)$ の値より正規分布表の値から求められる。これらの相関係数からも高い相関で直線に回帰されることが確認された。

(2) 最小応力比 S_2 を考慮した S - N 曲線

各液体における P - N 線図から求められる、生存確率が 50% となる平均疲労寿命 $\overline{\log N}$ と、最小応力比 S_2 を考慮した応力比との関係を図 - 5 に示す。また比較のため同図中に既往の研究により求められた普通コンクリートの気中および水中における最小応力比を考慮した S - N 曲線^{3),7)}を示す。これらより最小二乗法によって求められた S - N 曲線式を表 - 5 に示す。

これらの式より求められた静的強度に対する 200 万回疲労強度は、液体 A 中の場合は 55.3% および液体 B 中の場合は 46.5% となった。また水中の 200 万回疲労強度は 51.5% である。これよりコンクリートの空隙を満たす液体の表面張力が大きくなるに従い、その疲労強度は小さくなることが明らかとなった。

(3) K と液体の表面張力の関係

Griffith 理論¹²⁾によると、載荷によって与えられたひずみエネルギーは、新しいクラックを発生することでクラック中の界面エネルギーとして消費される。しかし、クラックの表面に水分子などが液体として存在していると、消費される界面エネルギーが減少するため、新たなクラックを形成すると考えられる。

ここで、クラックの界面エネルギーとは固体

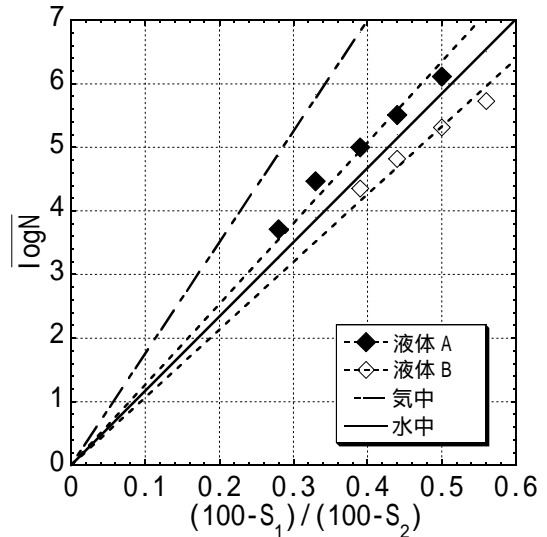


図 - 5 最小応力比 S_2 を考慮した S - N の関係

表 - 5 各液体における S - N 曲線式

媒質	S-N曲線式
気中	$\log N_r = 17.5(100-S_1)/(100-S_2)$
水中	$\log N_r = 11.7(100-S_1)/(100-S_2)$
液体A	$\log N_r = 12.7(100-S_1)/(100-S_2)$
液体B	$\log N_r = 10.6(100-S_1)/(100-S_2)$

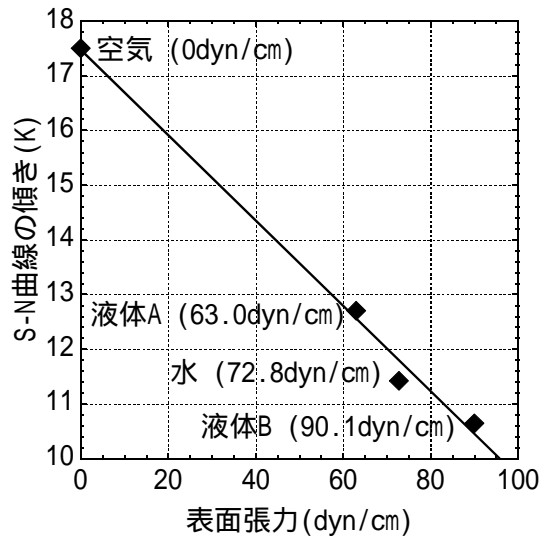


図 - 6 K と表面張力の関係

(セメントペースト) と液体のもつ表面エネルギーとの差に等しいと考えられる。本実験では供試体内部が各液体で満たされ、クラック先端にも液体が浸透していると仮定すると、界面エネルギーは式(3)のように求まる。

$$E_{sl} = E_s - E_l \quad (3)$$

ここに、 E_{sl} : 界面エネルギー

E_s : 固体の表面エネルギー

E_l ：液体の表面エネルギー

ここで液体の表面エネルギーは表面張力と等価である。

図 - 6 に K と液体の表面張力の関係を示す。この K の値は $S - N$ 曲線の傾きを表し、増加と共に疲労寿命が大きくなることを意味する。図より液体の表面張力が大きくなるに従い K の値が直線的に低下することが確認できる。これは、表面張力が大きくなることで、式(3)より、クラック中の界面エネルギーが減少する。よって、繰返し载荷により与えられたひずみエネルギーから変換される界面エネルギーが減少するため、クラックの形成が促進され、コンクリートの圧縮疲労強度が低下したと考えることができる。なお、気中乾燥状態のコンクリートでは新たなクラック発生による水分の移動がないと考え、表面張力を 0dyn/cm とした。

本研究によりコンクリートの圧縮疲労強度が含水によって低下する原因について、水の表面張力の影響が大きいことが明らかとなった。

4. まとめ

以下に、本研究によって得られた知見を示す。

- (1) コンクリートの静的強度および静弾性係数はコンクリートの空隙を満たしている液体の表面張力が大きくなるに従い低下する。
- (2) 水とは異なる表面張力を持つ液体で満たされたコンクリートの圧縮疲労寿命は、水中と同様に対数正規分布する。
- (3) コンクリートの圧縮疲労強度は、空隙を満たしている液体の表面張力が大きくなるに従い直線的に低下する。
- (4) 水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度低下の原因は、水の持つ表面張力の影響によるところが大きい。

本研究における表面張力の測定には、九州大学中央分析センターの表面張力測定装置を利用しました。関係者の方々に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岡島達雄ほか：コンクリートの強度および弾性定数の含水率依存性，セメント技術年報，vol.36，pp.211-213，1982.10
- 2) 地濃茂雄ほか：コンクリートの強度・弾性係数におよぼす含水分の影響，セメント技術年報，vol.40，pp.284-287，1986.10
- 3) 松下博通：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，No.296，pp.87-95，1980.4
- 4) 浜田純夫：軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する一実験，土木学会論文報告集，No.176，pp.83-88，1970.4
- 5) 若林幹夫ほか：含水状態を考慮した軽量骨材コンクリートの圧縮疲労特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.435-440，2004.6
- 6) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp.24-25，2002.3
- 7) 菅田紀之ほか：各種コンクリートの疲労強度および疲労破壊性状に関する研究，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.1-16，2001.2
- 8) 堀素夫：表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ，窯業業界誌，Vol.70，No.7，pp.54-59，1962.7
- 9) 松下博通ほか：コンクリートおよびモルタル中の水分が強度・弾性係数に与える影響，第30回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.37-42，2003.11
- 10) 松下博通ほか：生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，No.284，pp.127-138，1979.4
- 11) 浜田純夫：疲労試験における途中打ち切りデータの処理に関する研究，土木学会論文報告集，No.189，pp.99-105
- 12) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊，学献社，pp.45-47，1990.7