

論文 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

若林 幹夫^{*1}・松下 博通^{*2}・鶴田 浩章^{*3}・尾上 幸造^{*4}

要旨：コンクリートの疲労強度は乾湿状態に大きく影響されることが明らかになっている。本実験では粗骨材として吸水率の大きい人工軽量骨材を用いたコンクリートの圧縮疲労試験を気中および水中で行い、その疲労強度をコンクリートの含水状態に着目して検討を行った。その結果、人工軽量骨材を用いたコンクリートの気中疲労強度は、普通コンクリートより低い値となるが、水中では普通コンクリートと全く同等の値となることが明らかとなった。また、コンクリートの水分量が低いほど、気中疲労強度が大きくなることが明らかとなった。

キーワード：人工軽量骨材，圧縮疲労特性，圧縮疲労強度，飽和度，S-N 曲線

1. はじめに

コンクリートの圧縮疲労強度は、たとえ同一配合、同一条件で供試体を作製しても試験時の環境により大きくばらつくことが分かっている。また既往の研究より、普通コンクリートにおいて水中における圧縮疲労強度は、気中に比べ20%程度低下し¹⁾、吸水率の大きい人工軽量骨材を用いたコンクリートの疲労強度は、普通コンクリートに比べ低下する²⁾ことが明らかにされている。このように、水の存在がコンクリートの疲労強度に及ぼす影響は大きい。

しかし、各種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では、水中におけるコンクリートの疲労強度の改善に関する報告は見られる³⁾が、未だに水中におけるコンクリートの疲労強度低下の原因が解明されていないのが現状である。

また、土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]によると、軽量骨材コンクリートの気中疲労強度は、普通コンクリートと大差ない場合と10~25%程度低下する場合とが報告されており、安全側に包括するために設計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⁴⁾。過去に軽量骨材コンクリートの疲労については、高強度軽量骨材コンクリートなどについての研究⁵⁾はあるが、軽量骨材コンクリートの含水状態と疲労強度の関係を明らかにした研究はほとんど見られない。軽量骨材コンクリートの適切な性能照査設計のため、これらの関係を明らかにする必要があると考えられる。

そこで本研究では、水の存在がコンクリートの疲労強度を低下させる原因を解明するため、吸水率の大きい人工軽量骨材を用いたコンクリートについて、気中乾燥状態および水中湿潤状態における圧縮疲労試験を行い、それらの疲労寿命などの圧縮疲労特性について、コンクリートの含水状態に着目して検討を行った。また気中乾燥状態で疲労試験を行う場合、試験に長時間を有するため試験期間中における供試体の乾燥の影響を無視できない。そこで湿空養生後に気中乾燥状態にする際のコンクリートの質量減少の経時変化を測定し、コンクリート中の水分量を飽和度として計算し、飽和度が疲労寿命に及ぼす影響について検討した。それと共に今回の試験結果と既往の研究との比較を行った。

*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 工学研究院建設デザイン部門助教授 博士 (工学) (正会員)

*4 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、すべてφ7.5×15cmの円柱供試体とした。セメントとして普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³）を用い、粗骨材として人工軽量骨材（最大寸法20mm、表乾密度1.42g/cm³、吸水率9.93%）、細骨材として海砂（表乾密度2.54g/cm³、吸水率2.70%、粗粒率2.69）を用いた。粗骨材は吸水率が大きいので、打設前に一日吸水させた後、表面を布でぬぐい、表乾状態にして用いた。また混和剤としてリグニンスルホン酸系のAE減水剤を用いた。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って決定した。

2.2 実験方法

(1) 試験用供試体

コンクリートは、パン型ミキサで3分間練混ぜを行い、φ7.5×15cm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、パイプ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により、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。

疲労試験は長期間を必要とする。試験期間中のコンクリート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。気中の場合は3ヶ月以上湿空養生を行った後、試験開始14日前から恒温恒湿室内（温度20℃、湿度60%）に静置し、気乾状態にしたもの（グループA）と、試験開始28日前から恒温恒湿室内に静置し、気乾状態にしたもの（グループB）について試験を行った。水中の場合は3ヶ月以上湿空養生後、試験開始14日前まで水中に浸漬させ、内部が完全に含水した状態で1グループのみ試験を行った。

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 (%)	単位量(kg/m ³)				AE 減水剤 (g/m ³)
		水 W	セメント C	海砂 S	人工 軽量 骨材 G	
50	48.6	175	350	845	486	875

(2) コンクリートの含水率試験

3ヶ月以上湿空養生を行った供試体6本から恒温恒湿室内（温度20℃、湿度60%）に3本、110℃の乾燥炉に3本それぞれ静置させ、それぞれについて乾燥開始からの供試体の質量変化を測定した。測定方法は乾燥開始から0.5、1、1.5、3、6、12、24時間後の質量を測定し、その後24時間ごとに測定し、質量の減少が収まるまで測定を行った。また、気中疲労寿命を比較するパラメータとして用い、コンクリートに含まれる水分量を飽和度として次のように定義した。

$$\text{飽和度}(\%) = \frac{m_a - m_d}{m_0 - m_d} \times 100 \quad (1)$$

ここに m_0 : 乾燥前供試体群の平均質量

m_a : 大気中乾燥した供試体群の平均質量

m_d : 炉乾燥した供試体群の平均質量

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度は、疲労試験前と試験後にそれぞれ5本ずつ測定した。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に強度が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った。

(4) 圧縮疲労試験

疲労試験は、電気油圧サーボ式で容量200kNの疲労試験機を用い、載荷波形を正弦波形とし、載荷速度を5Hzとした。繰返し応力の大きさは下限応力 S_2 を静的強度に対して10%の一定とし、上限応力 S_1 を気中グループAは65~75%、気中グループBは70~80%、および水中は50~70%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、その時点における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

気中および水中において、疲労試験前後での、材齢にともなう強度増加は見られなかった。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、試験前の5本の圧縮強度の平均を疲労試験時の静的強度とした。また圧縮強度の平均は、気中グループAで46.7N/mm²、グループBで48.3N/mm²および水中で46.1N/mm²であった。

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、疲労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り⁶⁾、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、

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

となる。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し、寿命の小さい方から数えて r 番目の測定値 N_r での生存確率の期待値 $P(N_r)$ は、

$$P(N_r) = 1 - \frac{r}{n+2} \quad (3)$$

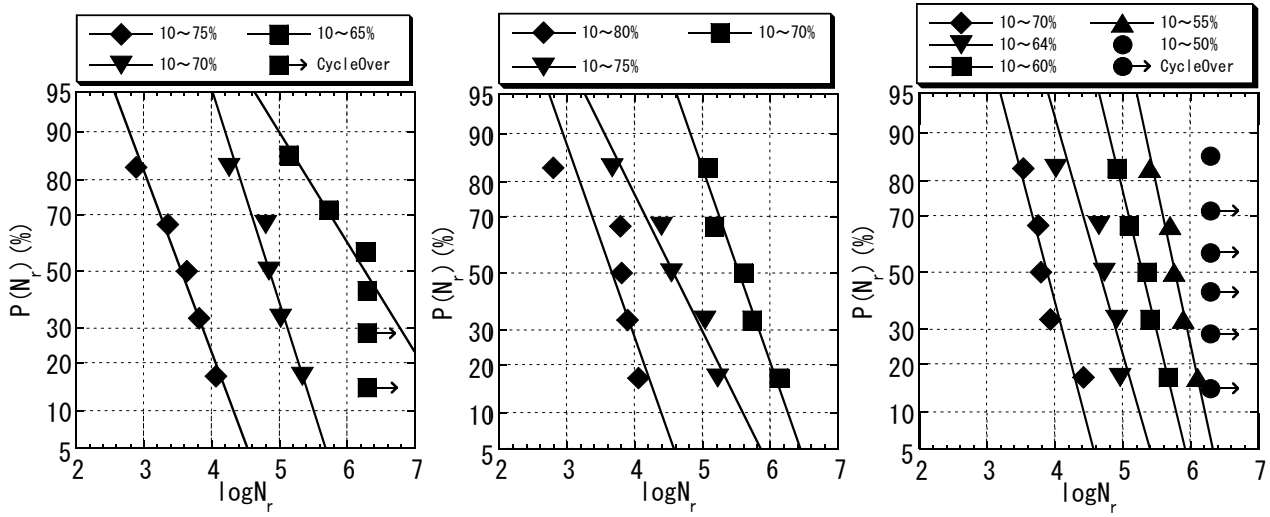
となる。上記の生存確率を考慮し、表-2の試験結果を正規確率紙上にプロットしたものについて、それぞれ図-1に示す。いずれの場合も直線で近似することができた。これより、軽量骨材コンクリートの気中および水中における疲労寿命は、普通コンクリートと同様に対数正規分布することが明らかとなった。

表-3に気中および水中の繰返し応力別に最小二乗法により求めた回帰曲線および回帰係数を示す。表中の変数 t は正規分布曲線の対称軸か

表-2 疲労試験結果

環境	S_1 (%)	r	疲労寿命 (回)	$\log N_r$	$P(N_r)$	
気中A	75	1	781	2.89	83.3	
		2	2317	3.36	66.7	
		3	4324	3.64	50.0	
		4	6617	3.82	33.3	
		5	11633	4.07	16.7	
	70	1	18403	4.26	83.3	
		2	63262	4.80	66.7	
		3	70124	4.85	50.0	
		4	103965	5.02	33.3	
		5	220004	5.34	16.7	
	65	1	138504	5.14	85.7	
		2	536568	5.73	71.4	
		3	1865799	6.27	57.1	
		4	2000000	6.30	42.9	
		5	2000000→	6.30	28.6	
		6	2000000→	6.30	14.3	
	気中B	80	1	633	2.80	83.3
			2	6164	3.79	66.7
3			6492	3.81	50.0	
4			7943	3.90	33.3	
5			11471	4.06	16.7	
75		1	4654	3.67	83.3	
		2	25282	4.40	66.7	
		3	35648	4.55	50.0	
		4	108571	5.04	33.3	
		5	170998	5.23	16.7	
70		1	150586	5.18	83.3	
		2	312208	5.49	66.7	
		3	411898	5.61	50.0	
		4	554937	5.74	33.3	
		5	1349977	6.13	16.7	
水中	70	1	3443	3.54	83.3	
		2	5764	3.76	66.7	
		3	6364	3.80	50.0	
		4	8774	3.94	33.3	
		5	27194	4.43	16.7	
	65	1	10430	4.02	83.3	
		2	44871	4.65	66.7	
		3	54873	4.74	50.0	
		4	81901	4.91	33.3	
		5	92780	4.97	16.7	
	60	1	82680	4.92	83.3	
		2	125526	5.10	66.7	
		3	228526	5.36	50.0	
		4	255513	5.41	33.3	
		5	476168	5.68	16.7	
	55	1	253525	5.40	88.9	
		2	504783	5.70	77.8	
		3	583761	5.77	66.7	
		4	793781	5.90	55.6	
		5	1288626	6.11	44.4	
50	1	2000000	6.30	85.7		
	2	2000000→	6.30	71.4		
	3	2000000→	6.30	57.1		
	4	2000000→	6.30	42.9		
	5	2000000→	6.30	28.6		
	6	2000000→	6.30	14.3		

らの距離で、 $P(N_r)$ の値より正規積分表の値から求まる値である。表に示された回帰曲線の傾き、および表-2に示す疲労試験結果からも分かるように、同グループの同じ応力比であっても、



(a) 気中グループ A(14 日乾燥) (b) 気中グループ B(28 日乾燥) (c) 水中

図-1 各環境における P-N 線図

水中の疲労寿命のばらつきは気中に比べかなり小さいことが分かる。これは、水中ではコンクリート内部空隙が全て水によって飽和されているため供試体間のばらつきが小さくなるが、気中の場合は試験期間の長さ、試験時の外気の湿度等により供試体内部の含水状態に差が生じたためであると考えられる。

(2) 最小応力比 S_2 を考慮した S-N 曲線

生存確率 $P(N_r)$ が 50% となる平均疲労寿命と、最小応力比 S_2 を考慮した応力比との関係を図-2 に示す。また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^{1),4)}を示す。これより求められた軽量骨材コンクリートの 200 万回疲労強度は、気中グループ A は 62.2%、気中グループ B は 65.8%、および水中は 51.5% となった。よって、気中での軽量骨材コンクリートの静的強度に対する疲労強度は、グループ A およびグループ B とともに普通コンクリートに比べて低下するが、水中の場合は、軽量骨材コンクリートと普通コンクリートの疲労強度は同等の値となることが明らかとなった。

また気中で試験を行ったグループ A とグループ B を比較した場合、200 万回疲労強度はグループ B の方が 3.6% 大きくなった。さらにグループ A の S-N の関係より、各応力での平均疲労寿命が直線関係から逸脱していることが分かる。

表-3 各環境における P-N 線の回帰曲線式

環境	S_1 (%)	回帰曲線式	相関係数
気中 A	75	$\log N_r = -0.6022t + 3.555$	0.985
	70	$\log N_r = -0.5121t + 4.853$	0.965
	65	$\log N_r = -0.9913t + 6.265$	0.967
気中 B	80	$\log N_r = -0.5668t + 3.672$	0.847
	75	$\log N_r = -0.7988t + 4.578$	0.974
	70	$\log N_r = -0.5626t + 5.548$	0.979
水中	70	$\log N_r = -0.4225t + 3.893$	0.944
	64	$\log N_r = -0.4627t + 4.657$	0.904
	60	$\log N_r = -0.3908t + 5.293$	0.989
	55	$\log N_r = -0.3452t + 5.776$	0.984

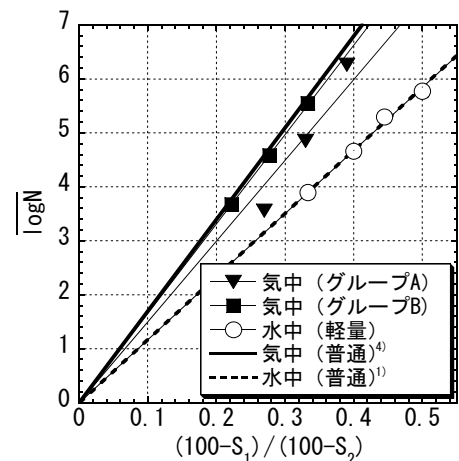


図-2 最小応力比 S_2 を考慮した S-N 関係

これらについての考察は含水率試験の結果と共に次に示す。

(3) 疲労寿命とコンクリートの飽和度の関係

図-3 にコンクリートの質量変化の測定結果を示す。ここに、乾燥前の質量と乾燥中の各測定質量の比を質量比とする。図より 14 日目では

気中乾燥状態の質量比は約 97.5%であり、28 日目では97.0%となった。また絶乾質量は約 92.0%で質量変化が収束していることが確認できる。これより式(1)を用いて 14 日目および 28 日目の飽和度を求めると、それぞれ 69%および 62%となった。14 日目からの飽和度の減少量は大きく、図からも 14 日間の乾燥期間では大気中における質量変化は収束しないと言える。

本実験では、気中グループ A の疲労試験は、最大応力比が 75%の時はおよそ 24 時間以内に試験が終了するが、最大応力比 65%の時は 1～3 週間試験に費やした。つまり実質的には 3～5 週間の乾燥期間をおいたことになる。これによりグループ A の場合、14 日間の乾燥期間では軽量骨材コンクリート内部が十分乾燥されておらず、応力比が低くなることに伴う試験期間の長期化による供試体の飽和度の変化が、無視できないと考えられる。このため、グループ A の S-N の関係が直線関係から逸脱し、最大応力比が低くなるに伴い水中から気中の S-N の関係に移行していく結果となったと考えられる。またグループ B の場合、28 日以降の飽和度の変化は 14 日以降に比べて比較的安定しており、またその値はグループ A より低く、試験期間中の飽和度の変化の影響が小さいと考えられる。よってグループ B の疲労寿命が大きくなり、S-N の関係もほぼ直線関係に近似できたものと考えられる。

さらに水中では、コンクリートが完全に含水した状態であれば常に飽和度は 100%となるため、吸水率の大きい軽量骨材を用いたコンクリートと、普通コンクリートの静的強度に対する疲労強度が同等の値になったと考えられる。

また水の存在によって疲労寿命が低下する原

因であるが、水の持つ表面張力の影響が大きいと考えられる。堀ら⁷⁾はモルタルの曲げ強度と媒質の表面張力の関係について、媒質の表面張力が大きくなると曲げ強度は低下することを明らかにしている。つまり、载荷により与えられるひずみエネルギーが、新たなひび割れ（界面）の形成により界面エネルギーとして消費される時、媒質の表面張力の影響により内部ひび割れを形成する界面エネルギーが低下し、少ないひずみエネルギーでひび割れが形成され、強度が低下する。本研究においても供試体水分量が大きくなるほど、この界面エネルギーが低下するため疲労強度が低下したと考えられる。しかし、本研究の範囲内ではそれを明らかにすることはできなかった。

3.3 気中における軽量骨材コンクリートの疲労寿命のばらつき

大気中における軽量骨材コンクリートの圧縮疲労特性に関する研究は過去多く行われている。表-4 に他の研究者により報告された軽量骨材コンクリートの圧縮疲労特性に関して S-N 曲

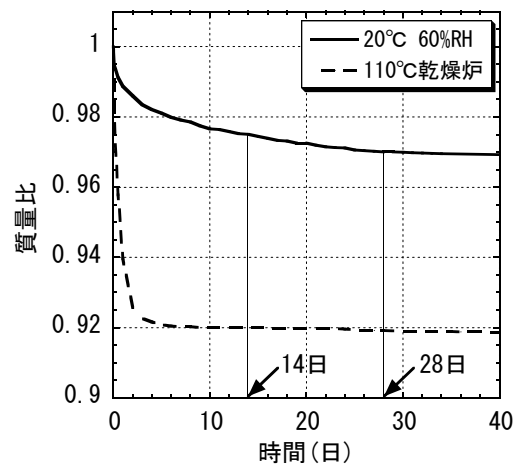


図-3 質量変化の測定結果

表-4 軽量コンクリートの S-N 曲線式と 200 万回疲労強度

研究者	供試体形状	最小応力比 (%)	最大応力比 (%)	S-N曲線式	200万回疲労強度(%)
阪田ら ⁸⁾	円柱	8	50~80	$\log N_r = -0.144S_1 + 14.1$	54.3
Gray ⁹⁾	円柱	1.9~4.3	40~80	$\log N_r = -0.118S_1 + 13.1$	57.3
都築ら ¹⁰⁾	角柱	10	65~60	$\log N_r = -0.247S_1 + 20.5$	57.5
浜田ら ²⁾	角柱	10	65~60	$\log N_r = -0.269S_1 + 20.3$	58.6
林ら ⁵⁾	円柱	10	65~75	$\log N_r = -0.209S_1 + 19.8$	64.5
本研究(A)	円柱	10	75~65	$\log N_r = -0.271S_1 + 23.9$	62.2
本研究(B)	円柱	10	80~70	$\log N_r = -0.188S_1 + 18.7$	65.8

線式と 200 万回疲労強度を示す。使用材料，試験方法および試験開始材齢が異なるため，一概に比較はできないが，各研究者の報告において 200 万回疲労強度および $S-N$ 曲線の傾きが大きくばらついていることが確認できる。

また，図-4 にそれぞれの $S-N$ 曲線を比較した図を示す。図より，各報告の $S-N$ 曲線は，大きくばらついているものの，普通コンクリートの気中⁶⁾および水中¹⁾の $S-N$ 曲線の間にはほぼ収まっていることが確認できる。普通コンクリートの大気中の疲労に関する過去の研究例と比較しても，これほどのばらつきは見られない。これは，各研究において試験時の外気の状態などの条件の違いにより，コンクリートの含水状態が異なることがばらつきの原因の一つであると考えられる。本研究においても同一材料を使用し同一試験方法で試験したが，飽和度の違いが疲労強度に大きく影響した。

以上より，軽量骨材コンクリートの圧縮疲労試験を行う際には，試験時の供試体の含水状態を十分考慮する必要があると考えられる。

4. まとめ

以下に，本研究において得られた知見を示す。

- (1) 軽量骨材コンクリートの気中および水中における疲労強度は，普通コンクリートと同様に対数正規分布する。
- (2) 大気中における軽量骨材コンクリートの静的強度に対する疲労強度は，コンクリートの飽和度が大きく影響する。また，飽和度が小さいほど疲労強度は大きくなる。
- (3) 水中における軽量骨材コンクリートの静的強度に対する疲労強度は，普通コンクリートと同等となる。
- (4) 軽量骨材コンクリートの圧縮疲労試験を行う際には，コンクリート内部の含水状態を考慮することが必要である。

参考文献

- 1) 松下博通：水中におけるコンクリートの圧縮

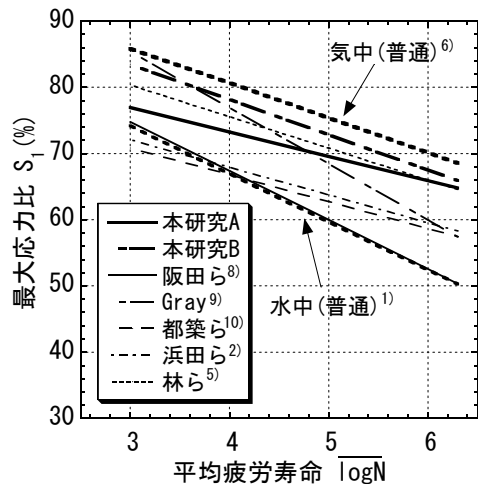


図-4 各研究者による $S-N$ 曲線の比較

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

- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 林宏信ほか：高強度コンクリートの圧縮疲労特性，土木学会論文集，No.641/V-46，pp.67-76，2000.2
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 阪田憲次ほか：統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する検討，土木学会論文報告集，No.198，pp.107-114，1972.2
- 9) Gray, W. H. et al. : Fatigue Properties of Lightweight Aggregate Concrete, Journal of the ACI, Vol.58, pp.149-162, Aug, 1961
- 10) 都築和夫ほか：軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する検討，セメント技術年報 25，pp.291-295，1971.12