

[71] 水中コンクリートの低サイクル疲労に関する研究

正会員 六車 熙 (京都大学工学部)
 正会員 渡辺 史夫 (京都大学工学部)
 光枝 良 (京都大学大学院)
 正会員 ○紺谷 修 (京都大学大学院)

1. まえがき

海洋構造物には、陸上構造物に作用する外力の他に波浪および流水による繰返し荷重が作用する。従って、コンクリート系海洋構造物については、湿潤状態におけるコンクリートの疲労性状が構造物の設計上重要な因子となる。水中におけるコンクリートの疲労性状に関する研究は従来いくつか行われてきた。筆者らは、高応力繰返しを受ける場合につきコンクリートの圧縮疲労試験、RC、PRC、PC梁の曲げ疲労試験等を行ってきたが、これらの研究から、水中でのコンクリートの疲労強度の低下はコンクリート中の空隙に吸収された水のくさび作用が主因であることを示し、さらに密実な高強度コンクリートでは疲労強度低下の度合いが著しく少なくなることなどを示した¹⁾。本研究では、従来の研究に加えて密実な高強度コンクリートの代表として水セメント比26%、通常の海洋構造物に使用されているコンクリートの代表として水セメント比40%のコンクリートにつき、水中および大気中での圧縮疲労試験を行い、試験結果を確率統計的手法を用いて処理し、生存確率を考慮した場合の上限応力比Sと疲労破壊に至までの繰返し回数すなわち疲労寿命Nとの関係(S-N曲線)を示すとともに、疲労寿命Nのばらつきの大さきについても検討し、水中と空中でのコンクリート疲労性状の比較検討を行った。

2. 供試体

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。曲げ強度および圧縮強度は、材令28日それぞれ70 kgf/cm²、410 kgf/cm²であった。粗骨材は硬質山砕石で、最大粒径20mm、比重2.66、吸水率0.66%、粗粒率7.08、細骨材は川砂で、最大粒径5mm、比重2.51、吸水率1.60%、粗粒率3.08のものを用いた。なお、高強度コンクリートに対しては高性能減水剤を用いた。圧縮疲労試験はφ7.5 x 15 cmの供試体を用いて行った。コンクリートの配合は表1の2種類とし、各配合に対して60本の供試体をそれぞれ3回打設し、計360本の供試体を製作した。養生は材令8週まではすべての供試体を水中養生とし、以後は1組60本の供試体を大気中放置(Dグループ)40本および水中養生継続(Wグループ)20本に無作為に分け、実験時まで保存した。

3. 試験方法

圧縮疲労試験は材令14週~18週において行った。試験環境条件によりDグループの供試体を大気中試験(DAシリーズ)20本および水中試験(DWシリーズ)20本に分け、Wグループは大気中試験(WAシリーズ)とした。また、各シリーズ20本の供試体のうち、静的圧縮試験用に4本、圧縮疲労試験用に8本、計12本を抽出し残りの8本は予備とした。

荷重は、上限荷重を静的圧縮強度の70%~96%、下限荷重を5%とする正弦波繰返し圧縮荷重をサーボ弁式ランダムアクチュエーターにより載荷した。載荷速度は1 Hzとしたが、繰返し回数の多い場合には試験を促進するために10 Hz以内で調整した。また、繰返し載荷に伴う供試体圧縮ひずみの変動は、ストローク5mmの耐水型差動トランスによって計測した。なお、計測治具は図1に示した。

表1 コンクリートの配合

W/C (%)	Mix proportion by weight	Cement content (kg/m ³)	Admixture* (%)
26	1 : 1 : 1.5	652.4	1.8**
40	1 : 1 : 1.5	597.6	

*Water reducing admixture **Ratio to cement weight

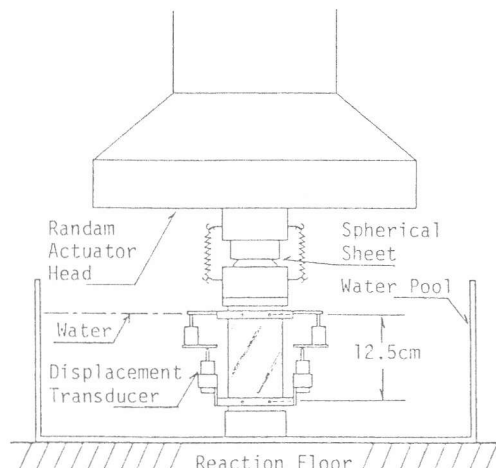
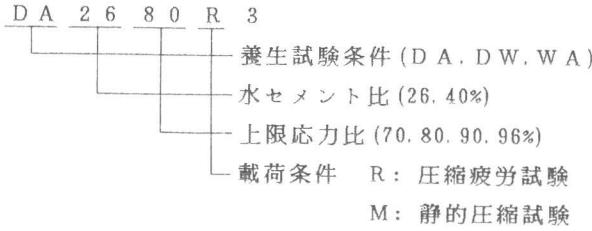


図1 計測治具

4. 試験結果および考察

(1) 静的試験結果

表2に試験時(材令14週~18週)のコンクリートの静的試験結果を示す。なお、本研究における供試体名称を以下に例示する。



(2) 上限応力比と疲労寿命との関係

図2には、繰り返し荷重の上限応力比Sと疲労寿命Nとの関係すなわちS-N曲線を示した。

この図によると水セメント比の如何にかかわらず、水の影響を受けるDWシリーズおよびWAシリーズの疲労寿命Nが低下している。とくに、水セメント比40%の供試体では疲労寿命Nの低下が著しく、水セメント比の大きいコンクリートほど水の影響を受けやすいことがわかる。すなわち、水セメント比40%の場合には水セメント比26%と比較してコンクリートの密実度が劣ると思われることから、水中では内部空隙中に吸収される水の量が多く、吸収された水のくさび作用による疲労破壊の進行が促進され、しかもその促進の割合が内部空隙すなわち欠陥の多いものほど助長されることからこのような大差が現れたものと判断される。ところが、この処理方法では、疲労寿命Nの平均値やそのばらつきの大きさをどの程度見込むかということに対して、安全性および信頼性を確保することはできない。そこで次に、生存確率を考慮したS-N曲線を示す。

(3) 生存確率を考慮した疲労寿命

疲労試験では、同一試験条件下であっても疲労寿命Nはばらつく。このばらつきを考慮した統計量として、総数n本の供試体の中で小さい方から数えてr番目の疲労寿命Nrの供試体が生存する確率すなわち生存確率は次式で与えられる。

$$P(N_r) = 1 - r / (n + 1) \quad (1)$$

n: 同一試験条件下での供試体総本数で、本試験ではn=8である。

r: 総数n本の疲労寿命Nrを小さい順に並べた序数

本研究で得られたデータを用い、各水セメン

表2 静的試験結果

	W/C (%)	Compressive strength f_c (kgf/cm ²)	Strain at peak load ($\times 10^{-3}$)	Modulus of elasticity E_c ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	Coefficient of variation of f_c (%)
DA2670M	26	1123.1	3.12	4.52	4.18
DW2670M	26	1123.1	3.12	4.52	4.18
WA2670M	26	1016.1	2.79	4.55	3.85
DA2680M	26	1294.0	3.425	4.82	2.22
DW2680M	26	1294.0	3.425	4.82	2.22
WA2680M	26	1095.2	2.966	4.76	3.80
DA2690M	26	1213.7	3.26	4.57	1.26
DW2690M	26	1213.7	3.26	4.57	1.26
WA2690M	26	1059.7	2.94	4.60	1.77
DA4080M	40	577.1	2.56	3.48	6.39
DW4080M	40	577.1	2.56	3.48	6.39
WA4080M	40	572.7	2.425	3.79	3.91
DA4090M	40	577.1	2.56	3.48	6.39
DW4090M	40	577.1	2.56	3.48	6.39
WA4090M	40	572.7	2.425	3.79	3.91
DA4096M	40	640.3	2.842	3.59	5.76
DW4096M	40	640.3	2.842	3.59	5.76
WA4096M	40	572.0	2.517	3.67	5.89

*Tangent modulus at 1/3 f_c

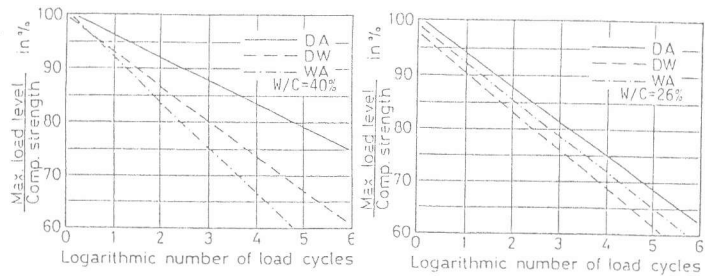


図2 S-N曲線

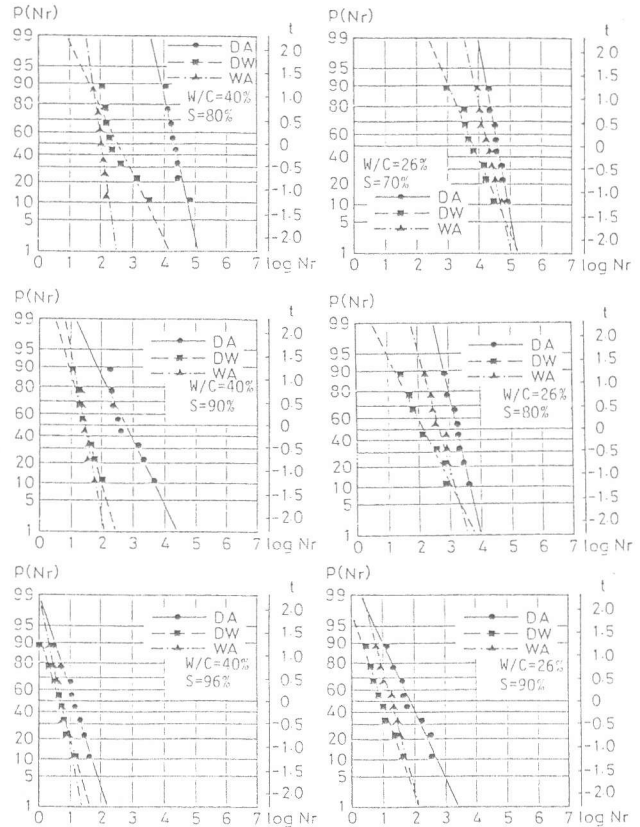


図3 P(Nr) - log Nr関係

ト比および試験環境条件別に生存確率 $P(N_r)$ を求めた結果を図3に示す。これによると、生存確率 $P(N_r)$ と、疲労寿命 N_r の対数 $\log N_r$ との間には直線関係があるので、疲労寿命 N の分布は対数正規分布によって近似できることが確認される。従って、疲労寿命 N_r の分布に最もよく適合する回帰式は次の形で表される。

$$t = A \log N + B \quad \text{--- (2)}$$

t : 正規分布曲線の対称軸からの距離を示し、 $P(N_r)$ の値に対して正規分布表より求められる。

$A \cdot B$: 最小2乗法によって求められる実験定数

ここで、 $t = 0$ とおくと生存確率 $P(N_r) = 50\%$ となり、このときの $\log N_r$ を疲労寿命 N_r の対数の平均値 $\overline{\log N}$ とすると次式で示される。

$$\overline{\log N} = -B / A \quad \text{--- (3)}$$

また、ばらつきの大ききの指標として $\log N_r$ の標準偏差 $D(\log N)$ と変動係数 V を考えるとそれらは次式で示される。

$$D(\log N) = 1 / A \quad \text{--- (4)}$$

$$V = D(\log N) / \overline{\log N} \quad \text{--- (5)}$$

表3には各供試体の疲労寿命 N_r 、 $\log N_r$ 、および $P(N_r)$ の値を参考までに示した。また、表4には図3の $P(N_r) - \log N_r$ 関係に対する回帰式(2)式をまとめて示した。

上述の $\log N_r$ の平均値 $\overline{\log N}$ は正規母集団 $\log N$ の中央値とみなすことができるから平均値 $\overline{\log N}$ によって描いた $S-N$ 曲線には、50%の安全性と信頼性が確保されていることになる。図4は、このようにして求めた $S-N$ 曲線(実線)を生存確率を考慮しない $S-N$ 曲線(破線)とともに示したものである。これによると、水セメント比26%の供試体については、DA, DW, WAの3シリーズとも上記2つの $S-N$ 曲線の間には

表3 各供試体疲労試験結果

	S(%)	r	Nr	log(Nr)	p(Nr)		S(%)	r	Nr	log(Nr)	p(Nr)
DA4080R8	80	1	11824	4.073	88.9	DA2670R2	70	1	21128	4.325	88.9
DA4080R6		2	12663	4.103	77.8	DA2670R1		2	22672	4.356	77.8
DA4080R3		3	17104	4.233	66.7	DA2670R8		3	33128	4.520	66.7
DA4080R2		4	18833	4.275	55.6	DA2670R3		4	35990	4.556	55.6
DA4080R1		5	24028	4.381	44.4	DA2670R4		5	39391	4.595	44.4
DA4080R5		6	26652	4.426	33.3	DA2670R7		6	55970	4.748	33.3
DA4080R4		7	27343	4.437	22.2	DA2670R6		7	61576	4.789	22.2
DA4080R7		8	73665	4.867	11.1	DA2670R3		8	85273	4.931	11.1
DA4090R4	90	1	199	2.300	88.9	DA2680R9	80	1	715	2.854	88.9
DA4090R2		2	210	2.322	77.8	DA2680R8		2	829	2.919	77.8
DA4090R8		3	240	2.380	66.7	DA2680R1		3	1579	3.198	66.7
DA4090R5		4	326	2.513	55.6	DA2680R3		4	1857	3.269	55.6
DA4090R1		5	421	2.624	44.4	DA2680R6		5	1959	3.292	44.4
DA4090R7		6	1577	3.198	33.3	DA2680R5		6	2050	3.312	33.3
DA4090R3		7	2243	3.351	22.2	DA2680R7		7	2911	3.464	22.2
DA4090R6		8	4952	3.695	11.1	DA2680R10		8	4237	3.627	11.1
DA4096R3	96	1	3	0.477	88.9	DA2690R12	90	1	14	1.146	88.9
DA4096R11		2	5	0.699	77.8	DA2690R5		2	22	1.342	77.8
DA4096R1		3	10	1.000	66.7	DA2690R4		3	42	1.623	66.7
DA4096R10		4	11	1.041	55.6	DA2690R10		4	45	1.653	55.6
DA4096R14		5	14	1.146	44.4	DA2690R2		5	59	1.771	44.4
DA4096R7		6	21	1.322	33.3	DA2690R7		6	184	2.265	33.3
DA4096R13		7	31	1.491	22.2	DA2690R3		7	337	2.528	22.2
DA4096R2		8	42	1.623	11.1	DA2690R9		8	350	2.544	11.1

	S(%)	r	Nr	log(Nr)	p(Nr)		S(%)	r	Nr	log(Nr)	p(Nr)
DW4080R4	80	1	112	2.049	88.9	DN2670R6	70	1	953	2.979	88.9
DW4080R2		2	146	2.164	77.8	DN2670R7		2	3228	3.509	77.8
DW4080R8		3	127	2.196	66.7	DN2670R1		3	3651	3.562	66.7
DW4080R5		4	196	2.292	55.6	DN2670R5		4	4776	3.679	55.6
DW4080R1		5	231	2.364	44.4	DN2670R9		5	6871	3.837	44.4
DW4080R7		6	409	2.612	33.3	DN2670R4		6	15331	4.186	33.3
DW4080R3		7	1352	3.131	22.2	DN2670R3		7	16559	4.219	22.2
DW4080R6		8	3388	3.530	11.1	DN2670R8		8	31253	4.495	11.1
DW4090R8	90	1	11	1.041	88.9	DN2680R7	80	1	28	1.447	88.9
DW4090R6		2	16	1.204	77.8	DN2680R3		2	51	1.708	77.8
DW4090R3		3	17	1.230	66.7	DN2680R1		3	65	1.813	66.7
DW4090R4		4	22	1.342	55.6	DN2680R2		4	67	1.826	55.6
DW4090R1		5	23	1.362	44.4	DN2680R5		5	137	2.137	44.4
DW4090R7		6	48	1.681	33.3	DN2680R9		6	395	2.597	33.3
DW4090R5		7	61	1.785	22.2	DN2680R4		7	721	2.858	22.2
DW4090R2		8	105	2.021	11.1	DN2680R6		8	735	2.866	11.1
DW4096R5	96	1	1	0.000	88.9	DN2690R3	90	1	3	0.477	88.9
DW4096R2		2	2	0.301	77.8	DN2690R1		2	4	0.602	77.8
DW4096R4		3	3	0.477	66.7	DN2690R7		3	5	0.699	66.7
DW4096R3		4	4	0.602	55.6	DN2690R4		4	7	0.845	55.6
DW4096R1		5	5	0.699	44.4	DN2690R9		5	10	1.000	44.4
DW4096R8		6	6	0.778	33.3	DN2690R2		6	11	1.041	33.3
DW4096R7		7	7	0.845	22.2	DN2690R5		7	24	1.380	22.2
DW4096R9		8	15	1.176	11.1	DN2690R6		8	42	1.623	11.1

表4 回帰式

	Regression curve	$\overline{\log N}$	$D(\log N)$
DA2670R	$t = -3.7721 \log N + 17.362$	4.605	0.265
DW2670R	$t = -1.6351 \log N + 6.228$	3.808	0.611
WA2670R	$t = -3.0221 \log N + 12.981$	4.295	0.331
DA2680R	$t = -3.0481 \log N + 9.881$	3.242	0.328
DW2680R	$t = -1.4071 \log N + 3.035$	2.157	0.711
WA2680R	$t = -2.5761 \log N + 6.899$	2.678	0.388
DA2690R	$t = -1.4771 \log N + 2.746$	1.859	0.677
DW2690R	$t = -2.0231 \log N + 1.939$	0.958	0.494
WA2690R	$t = -2.5991 \log N + 3.194$	1.229	0.385
DA4080R	$t = -3.0101 \log N + 13.092$	4.350	0.332
DW4080R	$t = -1.4161 \log N + 3.601$	2.543	0.706
WA4080R	$t = -5.2841 \log N + 10.511$	1.989	0.189
DA4090R	$t = -1.4041 \log N + 3.927$	2.798	0.712
DW4090R	$t = -2.3311 \log N + 3.399$	1.458	0.429
WA4090R	$t = -3.5831 \log N + 5.170$	1.443	0.279
DA4096R	$t = -2.0701 \log N + 2.277$	1.100	0.483
DW4096R	$t = -2.2201 \log N + 1.353$	0.609	0.450
WA4096R	$t = -3.2801 \log N + 2.204$	0.672	0.305

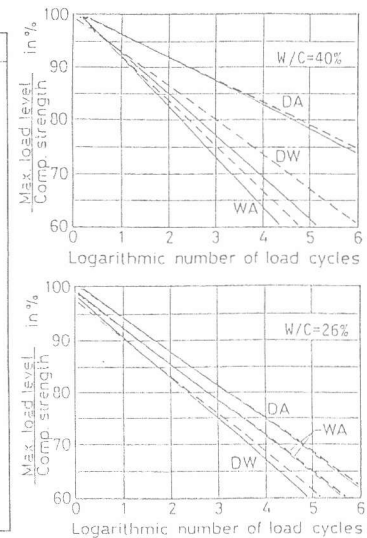


図4 $P(N_r) = 50\%$ の $S-N$ 曲線

大差はない。水セメント比40%の供試体については、DAシリーズではほとんど差がみられないのに対して、水の影響のあるDWおよびWAシリーズでは大きな差がみられる。従って、水セメント比40%のコンクリートの水中疲労を論ずる場合には、生存確率 $P(N_r)$ を考慮しないS-N曲線では、疲労寿命 N_r を大きく見積りすぎる可能性があり、実際の構造物に適用するには安全性と信頼性の確保という面で問題を残す。なお、図5には $P(N_r) = 95\%$ に対するDA, DW, WAシリーズそれぞれのS-N曲線を示した。この図によると、水セメント比26%の供試体では、DW, WAシリーズのS-N曲線をDAシリーズのS-N曲線と比較しても、疲労寿命 N はそれほど低下していない。しかし、水セメント比40%の供試体では、DAシリーズに比べてDW, WAシリーズでの疲労寿命 N の低下が著しくなっていることがわかる。参考までに、表5には生存確率 $P(N_r) = 50\%$ に対するS-N曲線実験式を示した。また、図6には $P(N_r) = 50\%$, 90% および 95% の値に対するS-N曲線を試験環境条件別に示した。これによってもDWシリーズではS-N曲線の間隔が大きく、ばらつきの大きことを示している。従って、実際に繰り返し荷重を受ける構造物が水の影響を受けるときは、大気中構造物と比較して大きな安全率を見込まなければならないと推定される。

(4) 疲労寿命 N_r のばらつき

前述のとおり、 $\log N_r$ のばらつきの指標として標準偏差 $D(\log N)$ と変動係数 V を用いた。図7は、標準偏差 $D(\log N)$ と上限応力比 S との関係を示しているが、両者の間には顕著な関係はみられない。次に、変動係数 V と上限応力比 S との関係を図8に示したが、これによると、上限応力比 S の増大に伴って変動係数 V の増大がみられ、両者の間に相関関係が認められる。

5. 結論

本研究より得られた結果をまとめると次のようになる。(1)水中ではコンクリートの内部空隙が多いほど疲労破壊が促進されるため、低強度コンクリートほど疲労寿命の低下が著しくなる。(2)水中では大気中と比較して疲労寿命のばらつきが大きくなる。とくに、低強度コンクリートではばらつきが著しいので、生存確率を考慮したS-N曲線をあたえる必要がある。

1) 六車, 張, 安井 水中でのコンクリート系部材の低サイクル疲労, 第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集, p473~p476, 1982

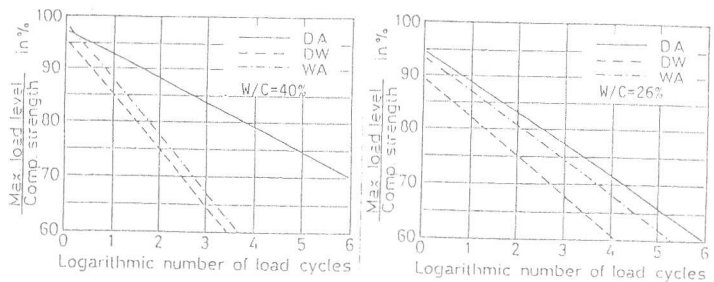


図5 $P(N_r) = 95\%$ のS-N曲線

表5 S-N曲線実験式

W/C		S-N Curve
26	DA	$\log N = 15.43 - 0.153S$ $S = 100.9 - 6.539 \log N$
	DW	$\log N = 12.63 - 0.128S$ $S = 98.5 - 7.802 \log N$
	WA	$\log N = 14.28 - 0.144S$ $S = 99.3 - 6.951 \log N$
40	DA	$\log N = 22.40 - 0.222S$ $S = 100.8 - 4.498 \log N$
	DW	$\log N = 12.79 - 0.127S$ $S = 100.6 - 7.860 \log N$
	WA	$\log N = 10.96 - 0.108S$ $S = 101.3 - 9.241 \log N$

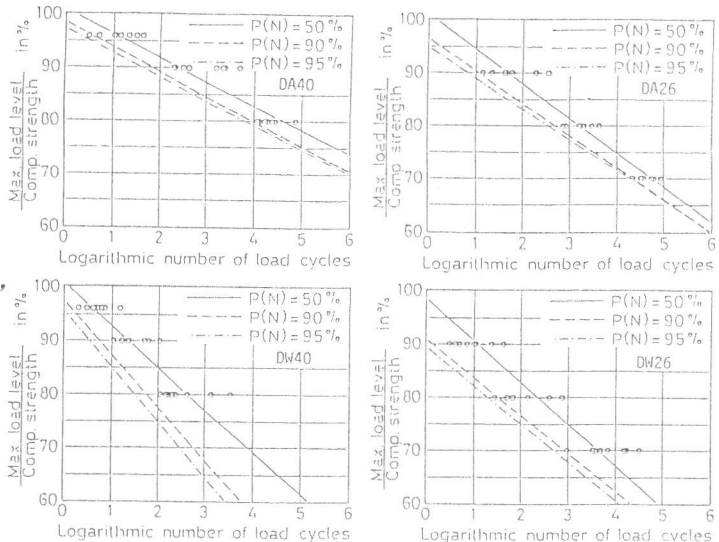


図6 $P(N_r) = 50, 90, 95\%$ のS-N曲線

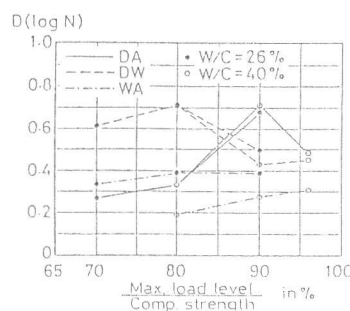


図7 標準偏差と上限応力比

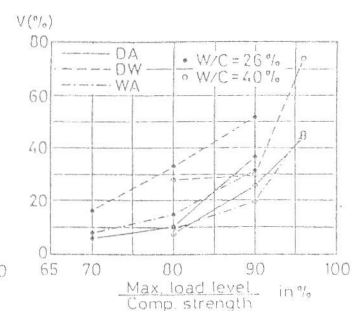


図8 変動係数と上限応力比