

周期的圧縮荷重によるコンクリートの疲労破壊

FATIGUE FAILURE OF CONCRETE UNDER PERIODICAL COMPRESSIVE LOAD

畑野 正*・渡辺 啓行**

By Tadashi Hatano and Hiroyuki Watanabe

1. 緒 言

コンクリートのごとき脆性体の破壊強度はひずみ速度や温度により著しく変化するが破壊時のひずみの大きさは一定であって、破壊を時間、温度に関係なく統一的に説明するにはひずみ論をもってすればよいことを著者の一人は種々の場合につき実験的に立証してきた。また確率論的には近年の物性論に基づく確率過程論が、コンクリートの破壊には成立せず、あるひずみ値 ϵ に対する非破壊確率 $P(\epsilon)$ が、Weibull分布による $P(\epsilon)=\exp(-a\epsilon^b)$ によって表現されること、すなわちひずみに立脚したいわば静的確率論によって破壊が説明できることを実験的に立証した。破壊論の立場から残る問題の大きな一つは疲労破壊に対するひずみ論の問題である。そこで実験を容易にするため二種類の配合のコンクリートについて、それぞれ二種類の周波数をもつ周期的圧縮荷重を加え、疲労破壊実験を行なうこととし、破壊までの荷重繰り返し回数を数十回、数百回、数千回になるよう、荷重振幅としては相当大きな値を用いることとした。

これらの実験により疲労破壊における破壊ひずみがいかなるものであるかを主眼目に検討し、同時に従来許容応力以下で一般に実験され得られている載荷応力と寿命との関係がこのような大応力の場合にどのようなになるか、また荷重周波数によってこれらがどのように変わるか、さらには動的弾性係数、動的ポアソン比がどのような経過をたどるかなどについても検討することとした。

2. 実験の方法

周期的圧縮荷重をコンクリートの供試体に加えるため、容量50tのパルセーターを100tのアムスラー耐

圧試験機に連結して用いた(写真-1, 2)。パルセーターは無段変速機付モーターにより駆動され、その能力は0~50tの全荷重の間の任意の範囲内で周波数0.4~9.0

c/s、荷重振幅±(0~25t)の脈動荷重を与えられるものである。写真-3に示すように、円筒供試体上部には、4本の針状ビスで鋼製リングを固定し、供試体縦方向の変形は、この鋼製リング支点と供試体を載せた下部加圧板との間の鉛直距離の変化としてS.R.

ゲージを貼った π ゲージにより測った。 π ゲージは直径をはさむ2母線に沿って2本使用し、両方の変形の平均値として記録した。供試体横方向の変形は、供試体中央高さで直径とこれをはさむ2母線の交点の位置に、雌ねじを切った小さな板状の金具をスーパーセメダインで貼りつ

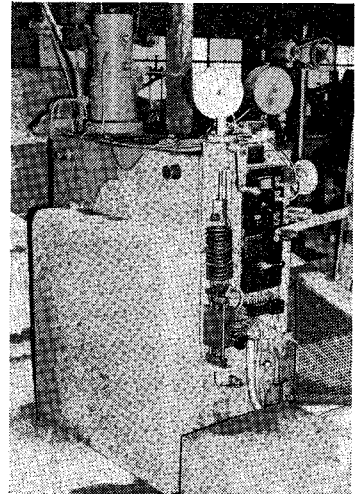


写真-1

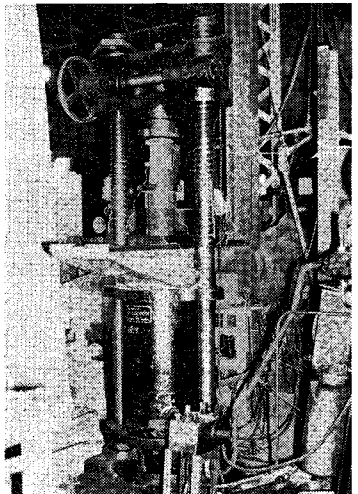


写真-2

* 正会員 工博 電力中央研究所 技術第一研究所

** 正会員 工修 電力中央研究所 技術第二研究所

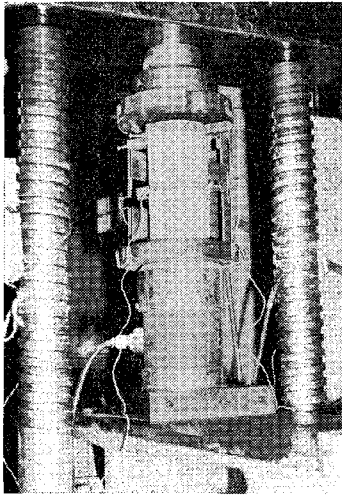


写真-3

け、これにコの字形の剛な脚をもつπゲージを取り付け、直径の変化として記録した。また、S.R. ゲージによる容量 100 t の圧力計を前述下部加圧板の下に置き荷重が圧力計を介して供試体に加わるようにした。

供試体に载荷するには、アムスラー試験機の上部加圧板を固定しておく

とき、供試体をその上面がこれより 2~3 cm 下方に位置するよう据え付ける。パルセーターを始動させると、アムスラー試験機のラムが次第に上昇し、供試体上面がアムスラー試験機の上部加圧板下面に接触するようになる。このとき、微小振幅の圧力が供試体に加わるようになり、この圧力を予定の荷重となるように調節する。この間に要する載荷繰返し回数は 20~25 回である。予定荷重状態に達して後、無段変速機により荷重の振動周波数 $f = \omega/2\pi$ を予定の値に固定し、供試体が破壊するまで載荷を継続する。供試体上面がアムスラー試験機の上部加圧板下面に接触してから供試体が破壊するまでの全行程を圧力および各変形とも電磁オシログラフに同時記録した。また、この間に要する載荷繰返し回数を試験機に付属するタコメーターにより読み取った。

実験は配合容積比 1:3:5 および 1:4:7 の 2 種類のコンクリートのおのおのにつき、荷重振動周波数を 0.47 c.p.s. および 6.0 c.p.s. の 2 種類とし、したがって合計 4 種類について行なった。これらの材料、配合を表-1, 2, 3 に示してある。供試体は直径 10 cm, 高さ 20 cm の円筒で、前述した横方向変形測定用の金具を貼りつけるのに要する半日を除き、実験直前まで 20°C の水中に養生した。材令は 28 日を中央にはさんだ前後 3 日間としこの間に実験した。

各実験の種類ごとに供試体に加えた圧縮応力の大きさ σ は、

$$\sigma = a + b \sin \omega t \dots \dots \dots (1)$$

の形で表わすことができるが、 a と b の組合せにより表-4 に示す 4 種の場合について、その各種ごとに 16~20 本ずつ実験を行なった。この場合、 σ の大きさとしては、コンクリートの破壊強度の 80~90% とし、少数の繰返し回数により疲労破壊を生ぜしめるようにした。

表-1

Properties of Cement

1) Chemical Composition (%)

Ig. Loss	Zns. R.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	MgO	SO ₃
0.5	0.6	23.2	4.1	3.9	64.2	1.1	1.9

2) 3) Strength of Standard Mortar

Sp. Gr.	Finess(Blaine)	3 day	7 day	28 day	Flow
3.20	3220 cm ² /g	108kg/cm ²	171	369	249 mm

表-2

Properties of Aggregates

	Sp. Gr.	Max Size	Gradation	
			Gravel	Sand
			Sagami River Natural Agg.	2.75

表-3

Tested Concrete

Test No	Age in Weeks	Mix Proportion				W/C	Slump	Volume Ratio C:S:G
		Cement	Water	Sand	Gravel			
1	4	300kg/m ³	150kg/m ³	710kg/m ³	264kg/m ³	60%	10.3 cm	1:3:5
2	4	220	143	781	276	65	6.0 cm	1:4:7
3	4	300	150	710	264	50	12.0 cm	1:3:5
4	4	220	143	781	276	65	4.5 cm	1:4:7

表-4

Classification of Tests Applied Load Intensity $\sigma = a + b \sin \omega t$

Test No.1 (1:3:5 Concrete, $f = \omega/2\pi = 0.47$ c.p.s.)

b \ a	198~202 (kg cm ²)	183~189 (kg cm ²)	170~179 (kg cm ²)	152~153 (kg cm ²)
b	1-4-2	1-4-2	1-7-2	1-10-1 1-10-2
105~110 (kg cm ²)	1-1-1	1-5-1	1-8-1	1-10-1 1-10-2
88~91 (kg cm ²)	1-1-1	1-5-2	1-8-1	1-9-1 1-9-2
67~69 (kg cm ²)	1-2-1	1-6-1	1-9-1	1-9-1 1-9-2
45 (kg cm ²)	1-3-1 1-3-2	1-6-2	1-9-2	

Test No.2 (1:4:7 Concrete, $f = \omega/2\pi = 0.47$ c.p.s.)

b \ a	120~122 (kg cm ²)	114~115 (kg cm ²)	107~108 (kg cm ²)	93~94 (kg cm ²)
b	2-7-1 2-7-2	2-7-1 2-7-2	2-7-1 2-7-2	2-10-1 2-10-2
66~68 (kg cm ²)	2-1-1	2-4-1	2-8-1	2-8-1 2-8-2
52~53 (kg cm ²)	2-1-1	2-4-2	2-8-1	2-8-1 2-8-2
40~41 (kg cm ²)	2-2-1	2-5-1	2-9-1	2-9-1 2-9-2
27~28 (kg cm ²)	2-3-1 2-3-2	2-6-1 2-6-2	2-9-2	

Test No.3 (1:3:5 Concrete, $f = \omega/2\pi = 6.0$ c.p.s.)

b \ a	189~192 (kg cm ²)	181 (kg cm ²)	166~172 (kg cm ²)	148~149 (kg cm ²)
b	3-3-1	3-3-1	3-6-1	3-9-1 3-9-2
98~106 (kg cm ²)	3-1-1	3-4-1	3-7-1	3-9-1 3-9-2
83~89 (kg cm ²)	3-1-1	3-4-2	3-7-1	3-7-1 3-7-2
64~65 (kg cm ²)	3-2-1 3-2-2	3-5-1 3-5-2	3-8-1 3-8-2	

Test No.4 (1:4:7 Concrete, $f = \omega/2\pi = 6.0$ c.p.s.)

b \ a	116~119 (kg cm ²)	109~112 (kg cm ²)	104~105 (kg cm ²)
b	4-1-1	4-4-1	4-7-1
63~66 (kg cm ²)	4-1-1	4-4-2	4-7-1
58~60 (kg cm ²)	4-2-1	4-5-1	4-8-1
52 (kg cm ²)	4-2-2	4-5-2	4-8-2
	4-3-1 4-3-2	4-6-1 4-6-2	

記録は、各供試体ごとに、式(1)に示す応力 σ 、縦方向全ひずみ ϵ_v 、横方向全ひずみ ϵ_h 、破壊までの載荷繰返し回数 N について行なった。

3. 実験の結果

オシロペーパーに同時記録された荷重、変位から、応力対ひずみ関係を載荷繰返し回数ごとに読みとり、静的載荷試験結果(載荷時のひずみ速度 $43 \times 10^{-6}/\text{sec}$)とともにプロットすると、1:3:5コンクリートの例では、図-1 のようになり、1:4:7コンクリートの例では、図-2 となる。

読みとられたひずみ振幅を縦・横方向のおのおのについて ϵ_{vb} 、 ϵ_{hb} とし、

$$E_d = b/\epsilon_{vb} \dots\dots\dots (2)$$

$$\nu_d = |\epsilon_{hb}|/|\epsilon_{vb}| \dots\dots\dots (3)$$

として、 E_d 、 ν_d を応力の大きさごとに、載荷繰返し回数 N に対してプロットした例を 1:3:5 コンクリー

トについては、図-3、4 に、また、1:4:7 コンクリートについては、図-5、6 に示してある。

図-1 および 図-2 に示されるように、供試体が破

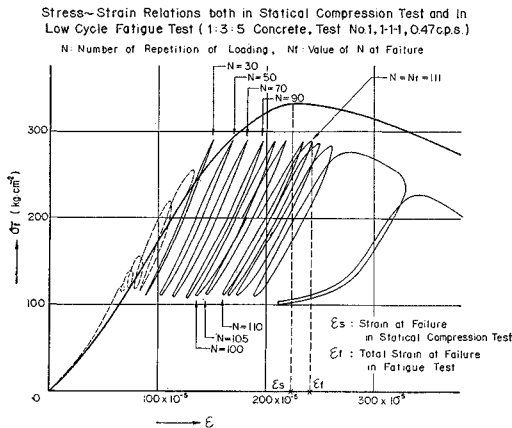


図-1

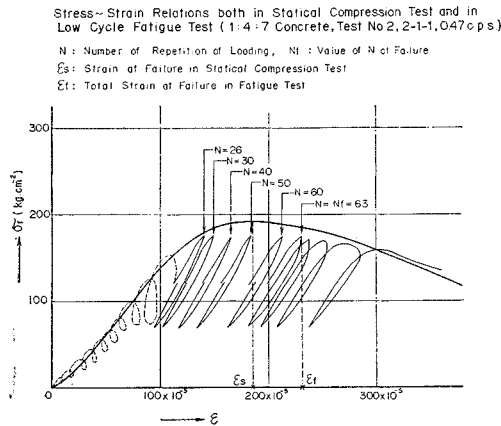


図-2

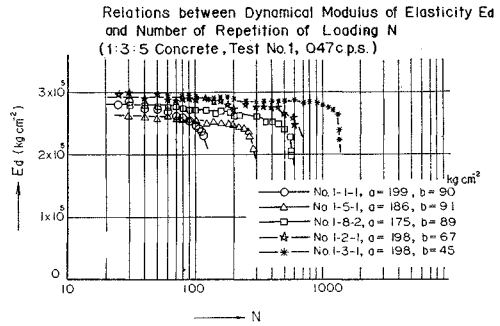


図-3

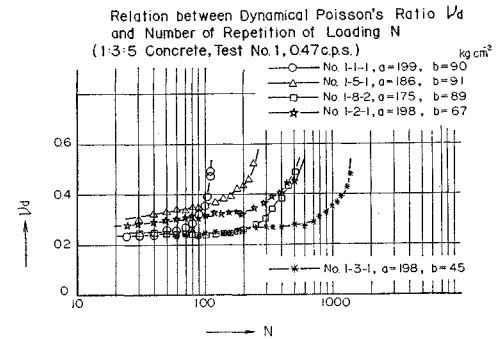


図-4

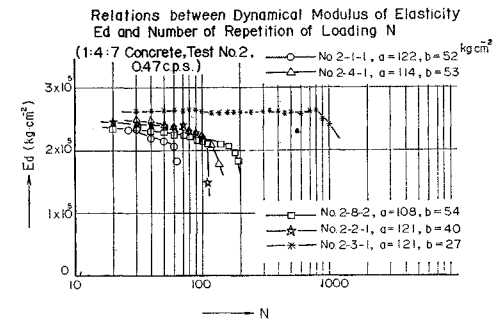


図-5

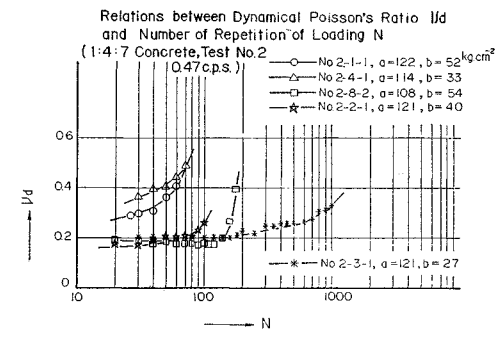


図-6

断する直前 3~6 回の繰返し回数に次式で与えられる最大応力 σ_f ,

$$\sigma_f = a + b \dots \dots \dots (4)$$

は徐々に低下して行く。この最大応力が低下を開始する

時点をもって破壊点と定義し、そのときの载荷繰返し回数を疲労寿命として N_f で表現する。また、 $N = N_f$ における σ_f に対応した縦ひずみを破壊ひずみとし、 ϵ_f と表現する。

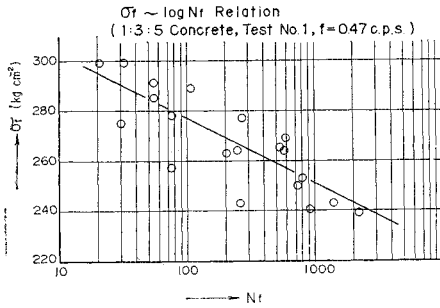


図-7

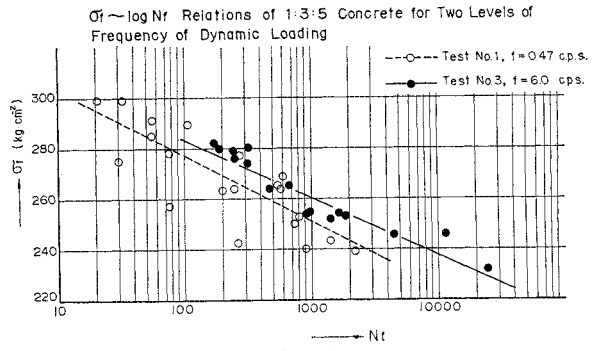


図-11

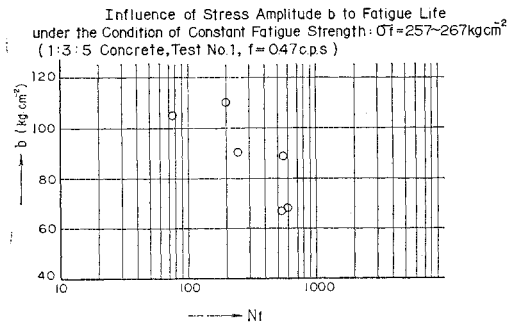


図-8

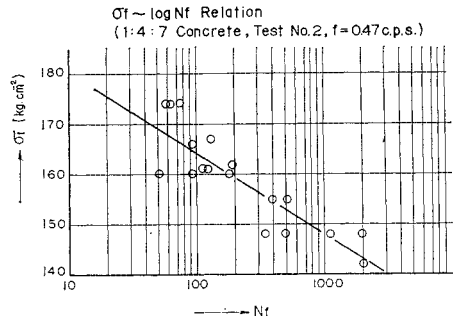


図-12

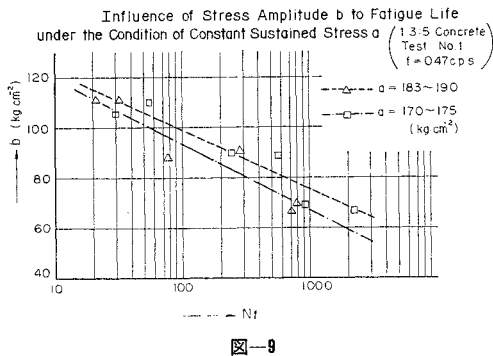


図-9

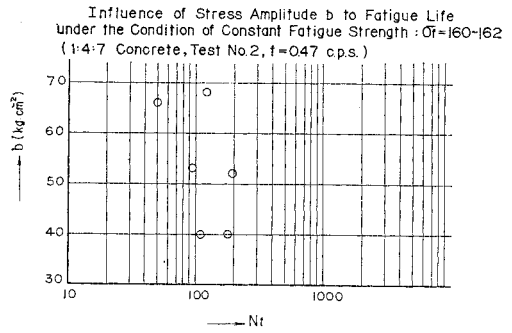


図-13

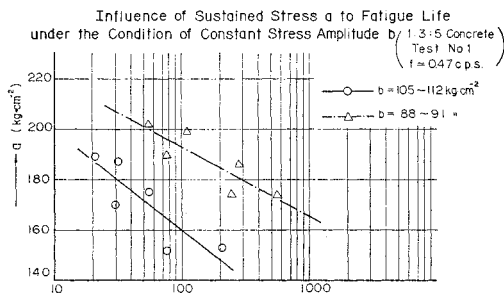


図-10

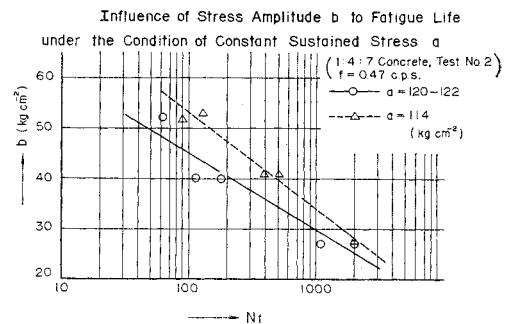


図-14

σ_f を $\log N_f$ に対してプロットすると、1:3:5 コンクリートについては、載荷振動周波数 f が 0.47 c.p.s. の場合 図-7 に、 f が 6.0 c.p.s. の場合 図-11 に示すようになり、1:4:7 コンクリートについては、 f が 0.47 c.p.s. の場合 図-12 に、 f が 6.0 c.p.s. の場合 図-16 に示すようになる。

疲労寿命に対する荷重振幅の影響を見るため、 σ_f をほぼ一定に保った状態で、 b を $\log N_f$ に対してプロットした例を、1:3:5 コンクリートの場合 図-8 に、1:4:7 コンクリートの場合 図-13 に示してある。また、 a をほぼ一定に保った状態で b を $\log N_f$ に対してプロットした例を、1:3:5 コンクリートの場合 図-9 に、1:4:7 コンクリートの場合 図-14 に示してある。

先に定義した破壊ひずみ ϵ_f を σ_f および $\log N_f$ に対してプロットすると、1:3:5 コンクリートについては、 f が 0.47 c.p.s. の場合 図-17.1~17.2 に、 f が 6.0 c.p.s. の場合 図-21 に示すごとくなり、1:4:7 コンクリートについては、 f が 0.47 c.p.s. の場合 図-18.1~18.2 に、 f が 6.0 c.p.s. の場合 図-23 に示すごとくなる。

先に定義した破壊時の動的割線弾性係数 E_d を E_{df} とし、 N_f の 1/3 までの平均的な動的割線係数をやはり E_d と表現して、 E_{df}/E_d の百分率を σ_f および $\log N_f$ に対してプロットした例を 1:3:5 コンクリートについては、 f が 0.47 c.p.s. の場合 図-19.1~19.2 に、 f が 6.0 c.p.s. の場合 図-22 に示してあり、1:4:7 コンクリートについては f が 0.47 c.p.s. の場合 図-

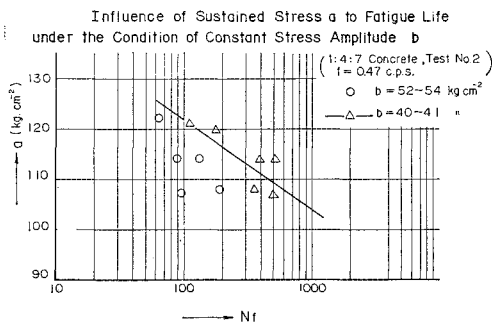


図-15

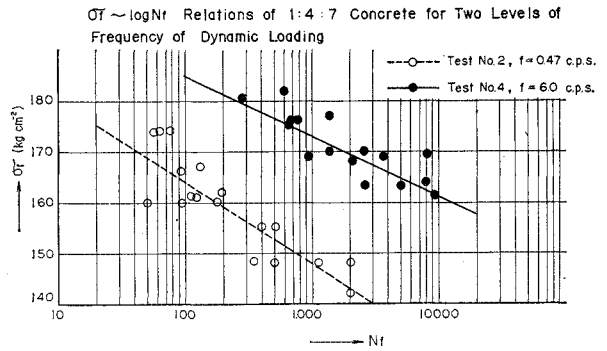


図-16

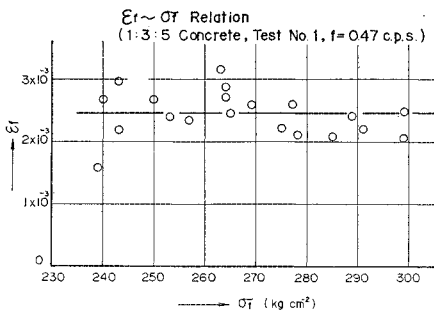


図-17.1

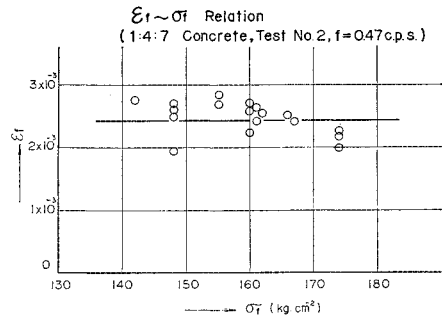


図-18.1

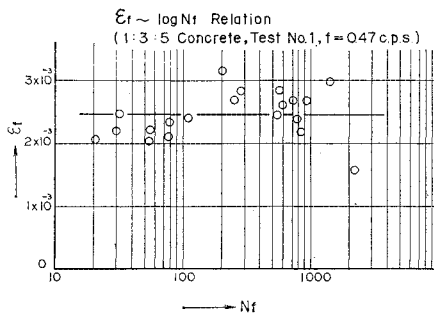


図-17.2

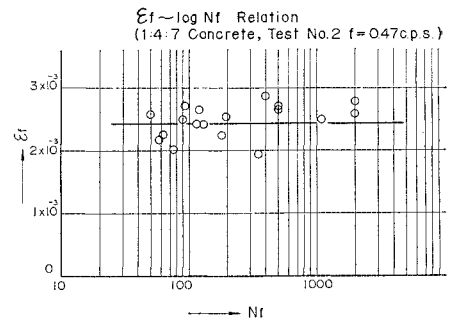


図-18.2

20.1~20.2 に、 f が 6.0 c.p.s. の場合 図-24 に示してある。

以上において、 $f=6.0$ c.p.s. の場合の、 $E_d, \nu_d \sim \log N_f$ 関係、 $a, b \sim \log N_f$ 関係、 $\epsilon_f \sim \log N_f$ 関係、および

$E_{df}/E_d \sim \log N_f$ 関係は省略してある。

以上の測定数値を各実験種類ごとに 表-5~8 に示してある。

上述ひずみ測定値の精度はつぎのように推定してあ

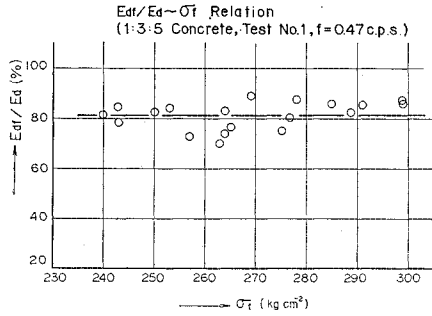


図-19.1

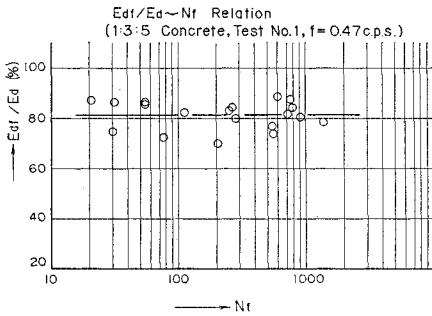


図-19.2

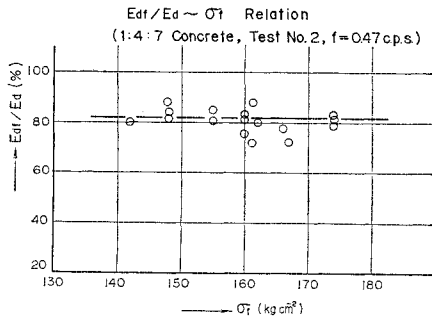


図-20.1

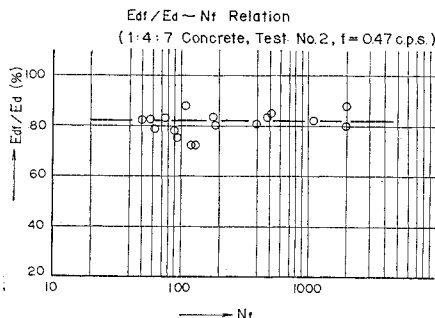


図-20.2

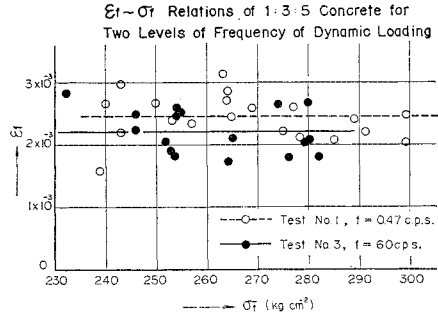


図-21

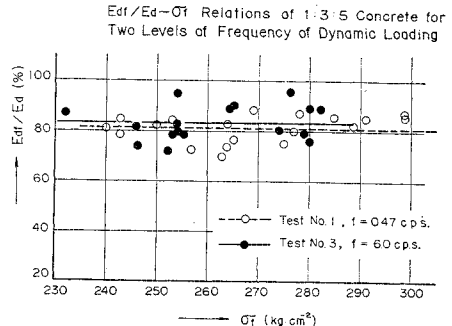


図-22

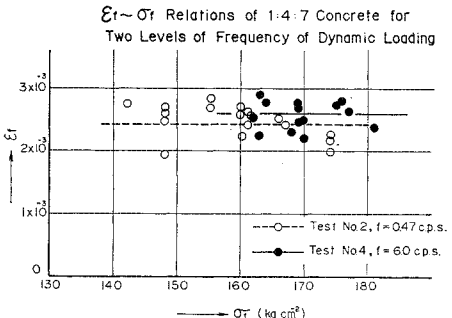


図-23

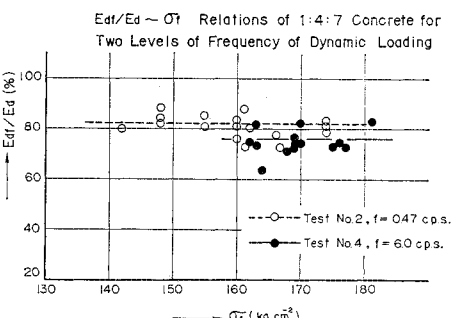


図-24

る。すなわち、ひずみ計測に用いたπゲージを実験時と同様に対の状態で一端を固定し、他端を0.01mm読みのマイクロメーターに固定し、ゲージ容量の0~3mmの範囲を10等分した階段上の変位をマイクロメーターにて与え、往復のπゲージ指示値を電磁オシログラフに記録した。これを数回行ない、読みとった全指示値をマイクロメーター指示値に対してプロットして、最小自乗法により検定曲線をつくり、この曲線からの偏差よりなる不偏分散の平方根を推定誤差とした。推定された誤差は±0.013mmであった。

4. 考 察

上述実験結果より、1:3:5コンクリートおよび1:4:7コンクリートの低サイクル疲労破壊および疲労変形について認められる点を列記すればおおよそつぎのごとくである。

(1) 疲労破壊ひずみの特性

(i) 疲労破壊ひずみ ϵ_f は σ_f の値によらず一定のごとく見える。 σ_f は $\log N_f$ と直線関係にあると見なせるので ϵ_f は N_f にもよらず一定と見なせる。この傾向はコンクリートの種類、荷重振動周波数によらないようである(図-17, 18, 21, 23)。

(2) 疲労寿命におよぼす載荷応力の影響

(i) 式(4)で考えられる σ_f を疲労破壊強度と定義すると σ_f は疲労寿命 N_f の対数値の増加につれて減少し直線関係にあるように見える。この傾向はコンクリートの種類、荷重振動周波数によらないようである(図-7, 11, 12, 16)。

(ii) コンクリートの種類によらず、最大応力 σ_f が一定の場合、応力振幅が大きいほど疲労寿命が短くなる傾向にある(図-8, 13)。

(iii) 平均応力 a が一定の場合、応力振幅の減少につれて疲労寿命は増加して行き、 b と N_f の対数値とは直線関係にあるように見える(図-9, 14)。

(iv) 応力振幅 b が一定の場合平均応力 a が減少するにつれて疲労寿命は増大し a と N_f の対数値とは直線関係にあるように見える(図-10, 15)。

(3) 疲労寿命、疲労破壊ひずみにおよぼす荷重振動周波数の影響

(i) 疲労寿命は荷重振動周波数の大きいほ

ど長くなる傾向にある(図-11, 16)。

(ii) 疲労破壊ひずみ ϵ_f の荷重振動周波数による差は見られないようである(図-21, 23)。

(4) 疲労変形特性

(i) 本実験で与えた荷重の範囲では応力ひずみ関係の画くヒステリシスは、疲労が進行し破壊に近づくにつれてそのループを拡大し傾斜も大きくなる(図-1, 2)。

(ii) 式(2)で定義される動的割線係数 E_d は、寿命の1/3程度までの載荷繰返し回数ではほぼ一定を保つが、その後徐々に低下して行き、疲労寿命付近で急激に低下する。動的ポアソン比 ν_d は寿命付近で急激に上昇する(図-3, 4, 5, 6)。

表-9.1

Results of Statistical Analysis of Test No.1 (1:3:5 Concrete, f=0.47c.p.s.)

No	Relation	No. of Figure	Analysis	Test	Regression Line, Mean Value, and Standard Deviation	Remarks
1	$\sigma_f \sim \log N_f$	Fig. 7	Analysis of Variance in Regression	$F_0=37.15 > F_{16}^*(0.01)=8.29$	$\sigma_f = 32.9 - 26 \log N_f$ $S = 11.4$ (kg/cm ²)	-----
2	$b \sim \log N_f$	Fig. 8	Analysis of Variance in Regression	$F_0=6.85 < F_{16}^*(0.05)=7.71$	-----	σ_f is kept nearly constant in the range 257~267 kg/cm ²
3	$b \sim \log N_f$	Fig. 9	Analysis of Variance in Regression	$F_0=33.70 > F_{16}^*(0.01)=21.20$	$b = 148 - 27 \log N_f$ $S = 7.2$ (kg/cm ²)	a is kept nearly constant in the range 183~193 kg/cm ²
4	$b \sim \log N_f$	Fig. 9	Analysis of Variance in Regression	$F_0=32.34 > F_{16}^*(0.01)=21.20$	$b = 145 - 23 \log N_f$ $S = 6.6$ (kg/cm ²)	a is kept nearly constant in the range 170~175 kg/cm ²
5	$a \sim \log N_f$	Fig. 10	Analysis of Variance in Regression	$F_0=10.40 > F_{16}^*(0.05)=7.71$	$a = 239 - 40 \log N_f$ $S = 9.8$ (kg/cm ²)	b is kept nearly constant in the range 105~112 kg/cm ²
6	$a \sim \log N_f$	Fig. 10	Analysis of Variance in Regression	$F_0=10.60 > F_{16}^*(0.05)=7.71$	$a = 246 - 26 \log N_f$ $S = 7.0$ (kg/cm ²)	b is kept nearly constant in the range 88~91 kg/cm ²
7	$\bar{\epsilon}_f = \bar{\epsilon}_c$ = constant for σ_f , and so N_f	Fig. 17-1	Analysis of Variance in Test of Homogeneity of Mean Values	$F_0=19.1 < F_{16}^*(0.01)=5.29$	$\bar{\epsilon}_c = 2.45 \times 10^{-3}$ $S = 0.37 \times 10^{-3}$	all the data of $\bar{\epsilon}_f$ given in table 5 were classified into 4 classes according to each level of σ_f . (class 1) $\sigma_f = 289-299$ kg/cm ² (class 2) $\sigma_f = 265-285$ kg/cm ² (class 3) $\sigma_f = 279-282$ kg/cm ² (class 4) $\sigma_f = 245-264$ kg/cm ² $\sigma_f = 239-240$ kg/cm ²

表-9.2

Results of Statistical Analysis of Test No.3 (1:3:5 Concrete, f=6.0c.p.s.)

No	Relation	No. of Figure	Analysis	Test	Regression Line, Mean Value, and Standard Deviation	Remarks
1	$\sigma_f \sim \log N_f$	Fig. 11	Analysis of Variance in Regression	$F_0=126.21 > F_{16}^*(0.01)=8.68$	$\sigma_f = 32.9 - 23 \log N_f$ $S = 5.1$ (kg/cm ²)	-----
2	$\bar{\epsilon}_f = \bar{\epsilon}_c$ = constant for σ_f , and so N_f	Fig. 21	Analysis of Variance in Test of Homogeneity of Mean Values	$F_0=3.05 < F_{16}^*(0.01)=5.74$	$\bar{\epsilon}_c = 2.21 \times 10^{-3}$ $S = 0.34 \times 10^{-3}$	all the data of $\bar{\epsilon}_f$ given in table 7 were classified into 4 classes according to each level of σ_f . (class 1) $\sigma_f = 279-282$ kg/cm ² (class 2) $\sigma_f = 253-276$ kg/cm ² (class 3) $\sigma_f = 246-255$ kg/cm ² (class 4) $\sigma_f = 232$ (kg/cm ²)

表-9.3

Test on the Comparison of Two Mean Values of $\bar{\epsilon}_f$: Results of Test No.1 (1:3:5 Concrete, f=0.47c.p.s.) and Test No.3 (1:3:5 Concrete, f=6.0c.p.s.)

No	Hypothesis	No. of Figure	Analysis	Test	Remarks
1	$S^2(\text{Test No.1}) = S^2(\text{Test No.3})$	Fig. 21	Analysis of Variance in Test on the Comparison of Two Variances	$F_0=1.16 < F_{16}^*(0.01)=3.28$	S^2 -Variance
2	$\bar{\epsilon}_c(\text{Test No.1}) = \bar{\epsilon}_c(\text{Test No.3})$	Fig. 21	Student's Test	$ Z_0 =193 < Z_{2as}(0.01)=2.72$	-----

(iii) 動的割線係数 E_d のうち、寿命 N_f の 1/3 までの平均的な値を E_d とし破壊時の値を E_{df} とすると E_{df}/E_d の値は、疲労強度、寿命によらずほぼ一定と見られる(図—19.1~19.2, 図—20.1~20.2, 図—22, 24)。

以上述べた事柄は、諸原因に基づく変動を考慮して、統計的に検討を加えた上で結論されなければならない。

上述の諸点のうち、とくに重要と考えられる特性について、統計的検定を行なった結果を、表—9.1~10.2 に示してある。同表において、回帰直線、平均値の得られたものについて図示した結果が各図における実線、一点鎖線、および点線などである。とくに、 ϵ_f については、各試験ごとに、その最も依存度の高いと思われる σ_f の範囲を4区間に分け、これら区間に応じて ϵ_f を4群に

分割し、それぞれの分散の均一性を検定し、その有為性の前提のもとに、平均値の均一性を検定した。さらに、コンクリートの種類ごとに、荷重振動周波数による ϵ_f の平均値の差を検定してある。

以上の統計解析に基づき明らかとなった事実のうち、主要な点をあげると、つぎようになる。

(a) 各コンクリートの種類ごとに、疲労破壊ひずみ ϵ_f は、最大応力 σ_f によらず一定とみなすことに意味があり、後述の点から疲労寿命にもよらないといえる。すなわち、

$$\epsilon_f = \text{const. (for } \sigma_f, N_f) \dots\dots\dots (5)$$

(b) 各コンクリートの種類ごとに、 $f=0.47$ c.p.s. の実験結果に属する破壊ひずみ ϵ_f の集団は、 $f=6.0$ c.p.s. の実験結果に属する ϵ_f の集団と同一の分散を持つとみなすことに意味があり、これらの平均値には差があるといえない。すなわち、破壊ひずみは荷重振動周波数によらず一定といえる。式(5)を含めて表式すると、結局つぎのごとくなる。

$$\epsilon_f = \epsilon_c = \text{const. (for } \sigma_f, N_f, f) \dots\dots (6)$$

ここに、 ϵ_c はコンクリートのひずみ能力¹⁾とする。式(6)の結果は著者の一人が先に、1:3:5 コンクリートにつき行なった破壊時間を変化させた圧縮破壊実験結果¹⁾、供試体温度を変えた静的圧縮破壊実験結果²⁾、先行ひずみを動的に与えた後の静的圧縮破壊実験結果³⁾のいずれとも一致する。結局一軸圧縮破壊では、与える条件により破壊までの履歴が変わるとしても、すでに指摘されたとおり⁴⁾、残留ひずみが累積して全体のひずみ能力 ϵ_c が消費しつくされたとき破壊現象を生ずるのであり、ひずみ能力 ϵ_c はひずみの履歴によらず、コンクリートの種類ごとに一定であるということがいえるのである。

(c) 最大応力 σ_f と疲労寿命 N_f との間にはつぎの関係をあてはめることに意味がある。

$$\sigma_f = C_1 - C_2 \log N_f \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$239 \leq \sigma_f \leq 299 \text{ kgcm}^{-2}$$

(1:3:5 コンクリート, $f=0.47$ c.p.s.)

$$232 \leq \sigma_f \leq 282 \text{ kgcm}^{-2}$$

(1:3:5 コンクリート, $f=6.0$ c.p.s.)

$$142 \leq \sigma_f \leq 174 \text{ kgcm}^{-2}$$

(1:4:7 コンクリート, $f=0.47$ c.p.s.)

$$163 \leq \sigma_f \leq 181 \text{ kgcm}^{-2}$$

(1:4:7 コンクリート, $f=6.0$ c.p.s.)

表—10.1

Results of Statistical Analysis of Test No.2 (1:4:7 Concrete, $f=0.47$ c.p.s.)

No	Relation	No of Figure	Analysis	Test	Regression Line, Mean Value and Standard Deviation	Remarks
1	$\sigma_f \sim \log N_f$	Fig.12	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 4758 > F_{16}^*(0.01) = 853$	$\sigma_f = 19.6 - 18 \log N_f$ $S = 5.0$ (kg/cm ²)	—————
2	$b \sim \log N_f$	Fig.13	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 1.38 < F_{16}^*(0.05) = 2.71$	—————	σ_f is kept nearly constant in the range 160-162 kg/cm ²
3	$b \sim \log N_f$	Fig.14	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 25.75 > F_{16}^*(0.05) = 10.10$	$b = 75 - 15 \log N_f$ $S = 2.4$ (kg/cm ²)	σ_f is kept nearly constant in the range 120-128 kg/cm ²
4	$b \sim \log N_f$	Fig.14	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 112.98 > F_{16}^*(0.01) = 34.1$	$b = 91 - 19 \log N_f$ $S = 1.9$ (kg/cm ²)	σ_f is kept nearly constant in the range 114 kg/cm ²
5	$a \sim \log N_f$	Fig.15	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 2.68 < F_{16}^*(0.05) = 10.10$	—————	b is kept nearly constant in the range 52-54 kg/cm ²
6	$a \sim \log N_f$	Fig.15	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 8.09 > F_{16}^*(0.05) = 7.71$	$a = 15.6 - 18 \log N_f$ $S = 2.4$ (kg/cm ²)	b is kept nearly constant in the range 40-41 kg/cm ²
7	$\epsilon_f = \epsilon_c = \text{const. for } \sigma_f, \text{ and so } N_f$	Fig.18-1	Analysis of Variance in Test of Homogeneity of Mean Values	$F_0 = 3.03 < F_{16}^*(0.01) = 55.8$	$\epsilon_c = 2.47 \times 10^3$ $S = 0.20 \times 10^3$	all the data of ϵ_f given in Table 6 were classified into 4 classes according to each level of σ_f (class 1) $\sigma_f = 142$ (kg/cm ²) (class 2) $\sigma_f = 148-155$ (kg/cm ²) (class 3) $\sigma_f = 160-167$ (kg/cm ²) (class 4) $\sigma_f = 174$ (kg/cm ²)

表—10.2

Results of Statistical Analysis of Test No.4 (1:4:7 Concrete, $f=6.0$ c.p.s.)

No	Relation	No of Figure	Analysis	Test	Regression Line, Mean Value, and Standard Deviation	Remarks
1	$\sigma_f \sim \log N_f$	Fig. 16	Analysis of variance in Regression	$F_0 = 34.28 > F_{16}^*(0.01) = 8.86$	$\sigma_f = 20.9 - 12 \log N_f$ $S = 3.8$ (kg/cm ²)	—————
2	$\epsilon_f = \epsilon_c = \text{const. for } \sigma_f, \text{ and so } N_f$	Fig. 23	Analysis of Variance in Test of Homogeneity of Mean Values	$F_0 = 1.38 < F_{16}^*(0.01) = 6.55$	$\epsilon_c = 2.38 \times 10^3$ $S = 0.22 \times 10^3$	all the data of ϵ_f given in Table 6 were classified into 4 classes according to each level of σ_f (class 1) $\sigma_f = 175-177$ (kg/cm ²) (class 2) $\sigma_f = 168-170$ (kg/cm ²) (class 3) $\sigma_f = 162-164$ (kg/cm ²) (class 4) $\sigma_f = 181$ (kg/cm ²)

表—10.3

Test on the Comparison of Two Mean Values of ϵ_f : Results of Test No.2 (1:4:7 Concrete, $f=0.47$ c.p.s.) and Test No.4 (1:4:7 Concrete, $f=6.0$ c.p.s.)

No	Hypothesis	No. of Figure	Analysis	Test	Remarks
1	$S^2(\text{Test No.2}) = S^2(\text{Test No.4})$	Fig. 23	Analysis of Variance in Test on the Comparison of Two Variance	$F_0 = 1.22 < F_{16}^*(0.01) = 3.40$	S^2 : Variance
2	$\bar{\epsilon}_c(\text{Test No.2}) = \bar{\epsilon}_c(\text{Test No.4})$	Fig. 23	Student's Test ¹	$ Z_0 = 1.28 < Z_{\alpha/2}(0.01) = 2.75$	—————

すなわち最大応力は疲労寿命の対数値の増加につれて直線的に減少する。

(d) 式(7)においてつぎの関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} C_1(f=0.47 \text{ c.p.s.}) &\simeq C_1(f=6.0 \text{ c.p.s.}) \\ C_2(f=0.47 \text{ c.p.s.}) &> C_2(f=6.0 \text{ c.p.s.}) \end{aligned} \right\} (8)$$

すなわちコンクリートの疲労寿命は同一最大応力 σ_f に対し荷重振動周波数の大きいほど長い。

5. 結 論

以上述べたところを結論として要約すれば以下のようになる。

(1) コンクリートの疲労破壊ひずみは、載荷応力、疲労寿命、荷重振動周波数によらず、コンクリートの種類により一定値となる。したがってコンクリートの一軸圧縮破壊では全体のひずみ能力が消費されたときに破壊現象を生じ、そのひずみ能力はひずみの履歴によらないで、コンクリートの種類ごとに一定であることが再確認された。

(2) コンクリートの低サイクル疲労現象において、

最大応力は、疲労寿命の対数値の増加につれて直線的に減少する。

(3) コンクリートの低サイクル疲労寿命は同一の最大応力 σ_f に対して、荷重振動周波数の大きいものほど長い。

(4) 最大応力 σ_f が一定の場合応力振幅が大きいほど、低サイクル疲労寿命は短くなる。

以上のコンクリートの疲労破壊に関する結論は、従来実証されて来た諸事実^{1)~4)}とあいまってコンクリート構造物の設計概念に対する一つの新しい視点を提示するものであると著者たちは考えている。

参 考 文 献

- 1) 畑野 正：コンクリートの破壊強度ひずみ能力，弾性率と破壊時間との関係，土木学会論文集，73号，1961.
- 2) 畑野 正：コンクリートの静的圧縮変形破壊に対する温度効果，土木学会論文報告集，111号，1964.
- 3) 畑野 正：周期的圧縮荷重によるコンクリートの挙動，土木学会論文集，84号，1962.
- 4) 畑野 正：コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論，土木学会論文集，153号，1968.

(1970. 7. 31・受付)