

コンクリートの圧縮疲労試験における 力学的諸性質についての考察（第1報）

加賀美一二三* 長谷川 博*

要 旨

コンクリートならびに鉄筋コンクリート構造部材の疲労機構の基礎的研究としての周期的圧縮繰返しの研究が、疲労強度ならびに周波数による弾性率の変化¹⁾などに関して数多く実施され報告されている。著者は σ_{28} が90, 125, 155kg/cm²程度の3種の標準供試体に対し、荷重周期300, 600rpmにて、繰返し回数1万回と5万回負荷することとし、荷重振幅を静的実験結果にもとずき報告¹⁾している弾性限、弾塑性限前後の荷重段階にて負荷した後、この供試体を静的破壊実験をなして静的単一荷重実験結果と比較したところ、各 σ_c のコンクリートはそれぞれにおいて弾性限内の繰返し実験において、破壊強度、破壊時ひずみ（縮み能力）、弾性係数など、本実験の範囲内においては大差ない結果を示し繰返し荷重において応力周期、繰返し数は影響なく疲労現象は認められないが、弾塑性限前後にいたれば破壊強度その他繰返し荷重の影響を受ける結果を示した。そして、応力-ひずみ曲線中の弾性限、弾塑性限については、繰返し負荷後の静的破壊実験の結果は、静的負荷の場合と同様に相対応力値 σ_r がほぼ0.50 σ_{cy} , 0.90 σ_{cy} において定義される結果を示した。また、弾塑性限ならびに塑性領域においては大きい応力振幅の繰返し荷重を受けることになるので、疲労破壊がすみやかである。

結局、コンクリートの疲労による塑性的性質は応力周期、応力振幅、繰返し回数、荷重歴などに主として影響される実験的立証となった。

1. 緒 言

著者はすでに各 σ_c のコンクリートの静的圧縮繰返し荷重実験を実施して、コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線中に弾性限、弾塑性限の定性的定義を与え、この根拠にもとずき鉄筋コンクリートばかりにおいては平面保持不成立のひずみ分布性状より破壊曲げモーメント式を誘導し、さらに極限強さ設計法について述べているが、著者はさらにコンクリートの繰返し圧縮荷重実験を実施し、この場合の荷重段階における応力-ひずみ曲線の特性を静的圧縮繰返し荷重の場合と比較考察した結果は、その特性関係がほとんど近似的数値を示し、弾性限ならびに弾塑性限が静的の場合と同様に定義されるものと考えられ、弾性限内においては応力周期、繰返し回数の影響はないものといえるが、弾塑性限前後の動的繰返し負荷後においては、その破壊強度は応力周期の影響があらわれてrpm300にては σ_r が0.80程度、600rpmにおいては σ_r が0.65~0.75程度の結果を示した。

ゆえに、コンクリートの圧縮負荷に対する設計に当っては、弾性領域内の応力振幅であるならば応力周

期、繰返し負荷回数には関係なく、種々なる強度のコンクリートが弾性領域内疲労実験後の静的破壊実験において、静的破壊実験の場合の破壊強度、破壊時ひずみ、弾性係数、弾性限、弾塑性限などの諸値に大差のないことを示したことを報告するものである。

2. 実験供試体と測定方法

2.1 実験供試体

一般の細骨材と砕石粗骨材にて、疲労試験機の性能を考慮してつぎの3種の配合のコンクリートによる標準供試体を各12本あて造形した。この場合80l分に対する配合表は表1のごとくである。

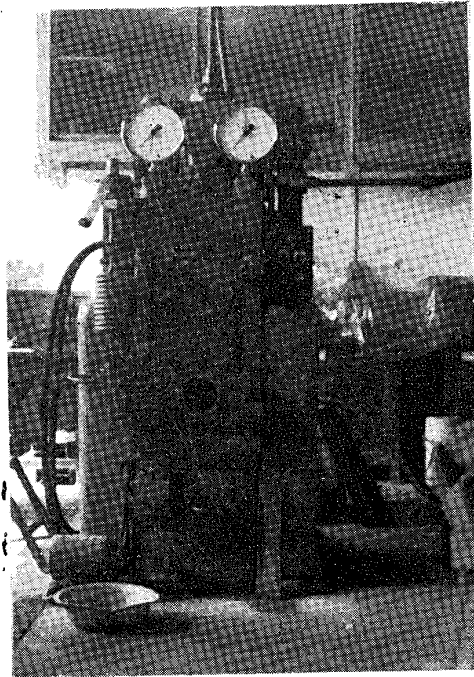
2.2 測定方法

疲労試験機として写真 a, b の30t容量のパルセイターを使用した。回転数は200, 400rpmと300, 600rpmの4種類の周期にて、任意の応力振幅の圧縮負荷ができる。本実験は300, 600rpmを採用した実験である。コンクリート供試体は弾性限、弾塑性付近にて繰返し荷重を負荷し、繰返し回数は1,5万回の二つの場合とし、その繰返し負荷後速かに容量100tのアムスラー型油圧試験機に移し規定の荷重速度にて負荷

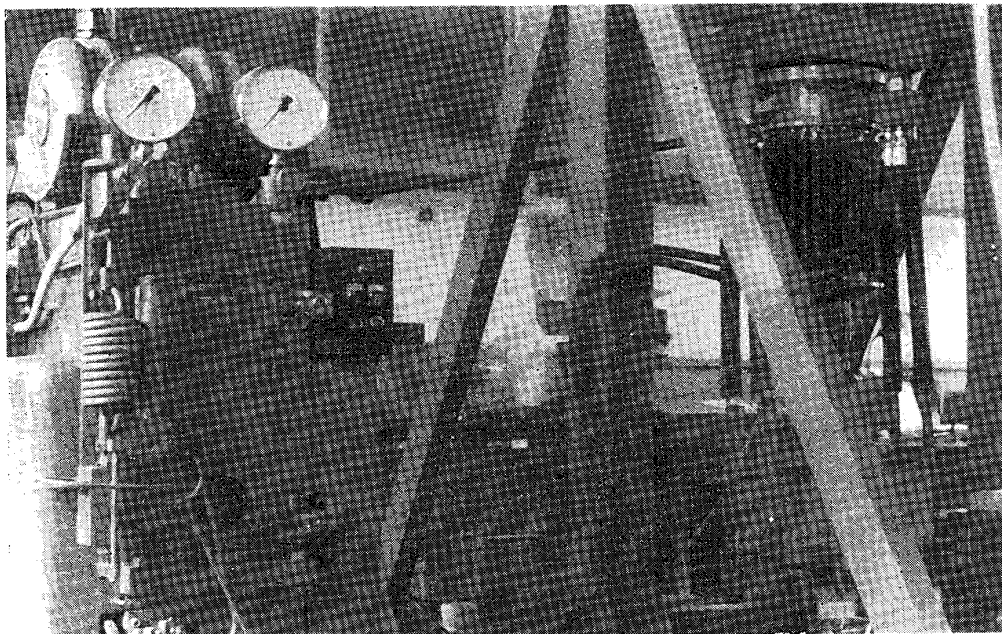
* 土木工学教室

表1 3種のコンクリートの示方配合表

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 mm	スランプの範囲 cm	空気量 %	水量 kg	セメント量 kg	水セメント比 %	s/a %	細骨材 kg	粗骨材 kg			計	σ_{28} , 実 kg/cm ²
									40~25 mm	25~15 mm	15~5 mm		
A	40	7.5	1	14.9	16.7	89.3	47.8	72.3	27.5	27.5	27.5	82.5	88.6
B	40	7.5	1	14.9	18.7	80.1	46.0	69.1	28.2	28.2	28.2	84.6	123.4
C	40	7.5	1	14.9	20.8	71.6	44.3	65.7	28.7	28.7	28.7	86.1	155.1



写真a パルセーター



写真b パルセーターとオイルジャッキ

し、ひずみ値はダイヤゲージにて測定、静的破壊実験を実施し静的単一負荷実験結果と比較した報告である。

3. 測定結果

3.1 静的単一圧縮荷重の場合の応力-ひずみ、応力-弾性係数の関係

3種の圧縮強度のコンクリートの応力-ひずみ関係は図1、応力-弾性係数の関係は図2にて示される。

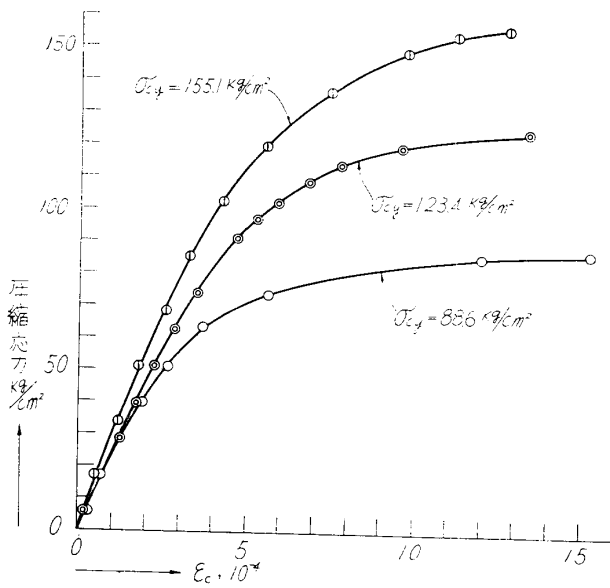


図1 応力-ひずみの関係

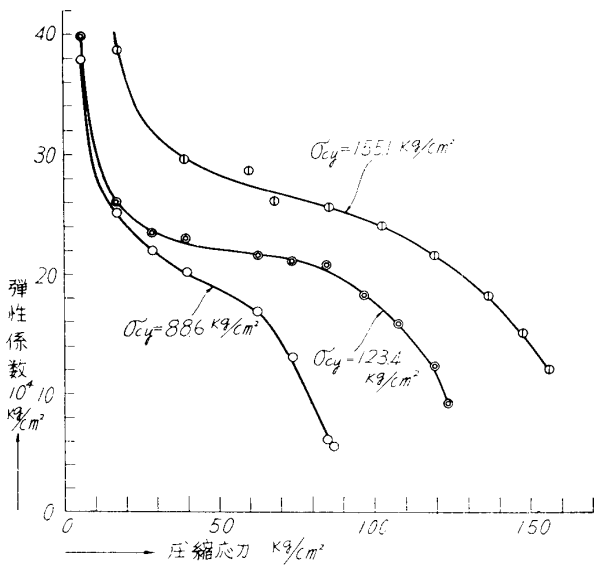


図2 応力-弾性係数の関係

3.2 弾性限前後の繰返し負荷の場合の応力-ひずみ、応力-弾性係数の関係

(1) 繰返し回数1万回の場合

(a) コンクリート強度 86.6 kg/cm² の場合

コンクリート強度 σ_{cy} 86.6 kg/cm² の供試体に対し、下限応力 5.63 kg/cm² と上限応力 $0.45\sigma_{cy}$, $0.55\sigma_{cy}$ の荷重段階にて、応力周期 300, 600 rpm にて荷重した場合の応力-ひずみ、応力-弾性係数の関係は図3, 4にて示される。

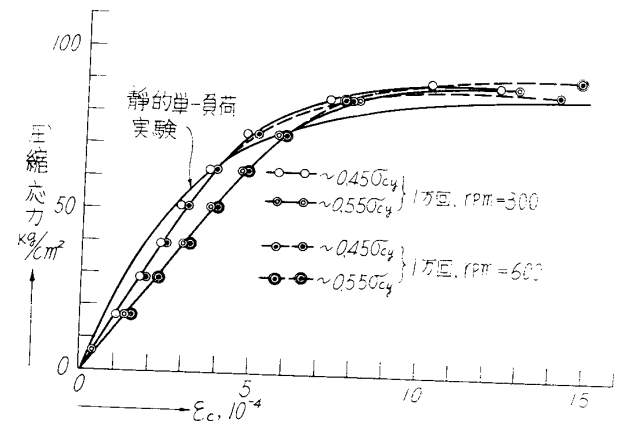


図3 応力-ひずみの関係

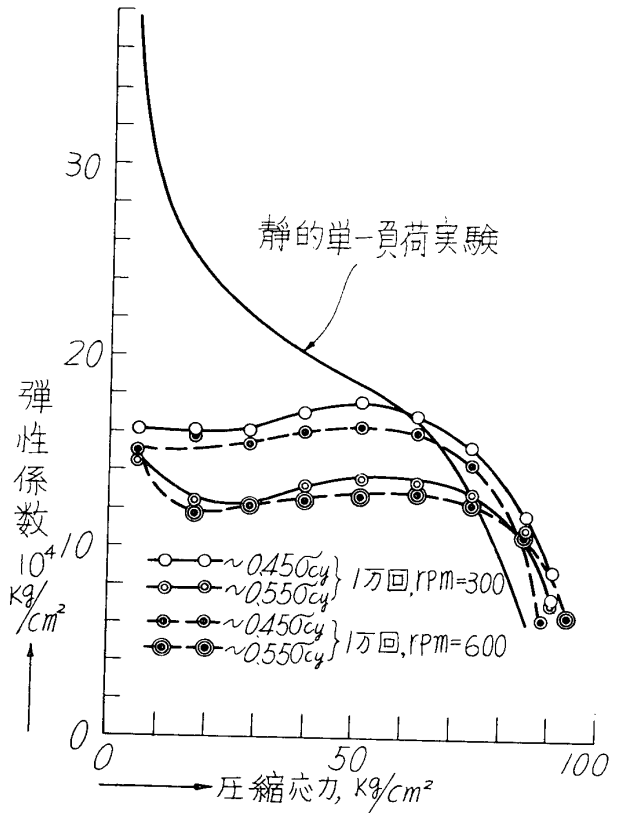


図4 応力-弾性係数の関係

(b) コンクリート強度 123.4 kg/cm² の場合

コンクリート強度 σ_{cy} 123.4 kg/cm² の供試体に対し、(a)の場合と同様の条件にて実験した結果は図5, 6にて示される。

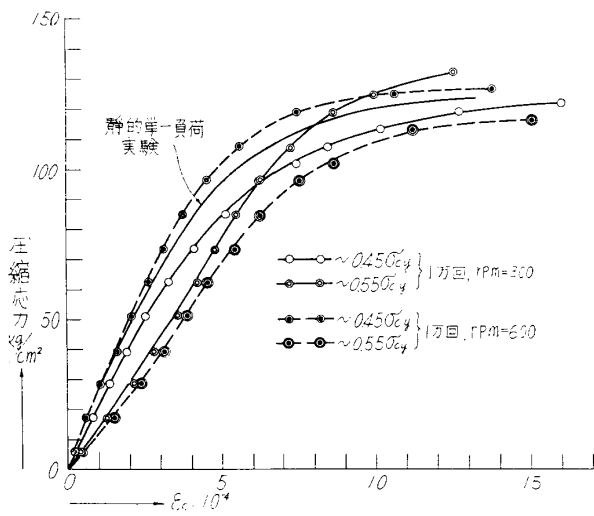


図5 応力-ひずみの関係

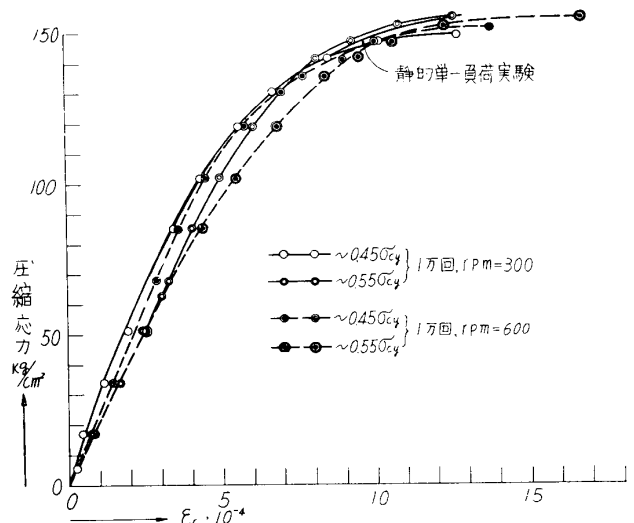


図7 応力-ひずみの関係

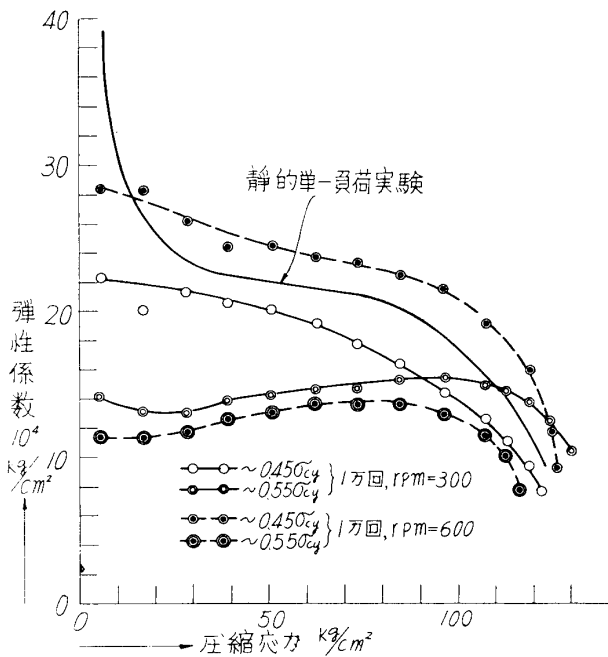


図6 応力-弾性係数の関係

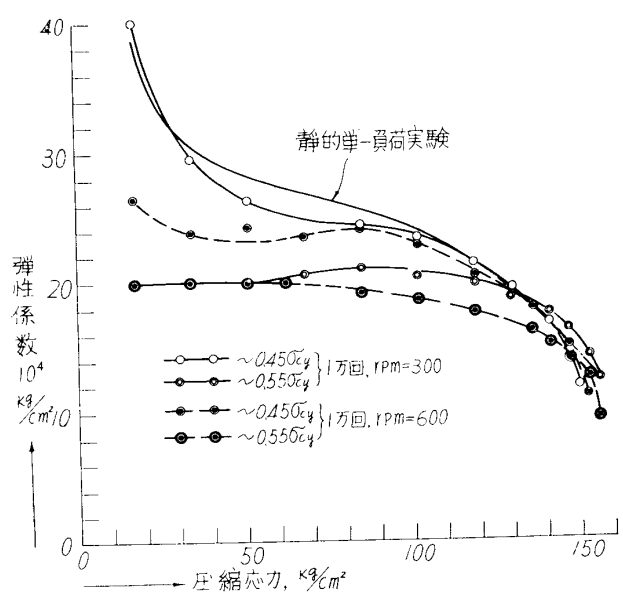


図8 応力-弾性係数の関係

(c) コンクリート強度 155.1 kg/cm^2 の場合
 コンクリート強度 $\sigma_{cy} 155.1 \text{ kg/cm}^2$ の供試体に対し、(a)、(b)の場合と同様の条件にて実験した結果は図7,8にて示される。

(2) 繰返し回数 1,5 万回の場合

(a) コンクリート強度 $\sigma_{cy} 88.6 \text{ kg/cm}^2$ の場合
 コンクリート強度 $\sigma_{cy} 88.6 \text{ kg/cm}^2$ の供試体に対し、下限応力 5.63 kg/cm^2 と上限応力 $0.45 \sigma_{cy}$ の荷重段階にて、応力周期 300, 600 rpm にて負荷し、繰返し回数 1,5 万回とした場合の応力-ひずみ、応力-弾性係数の関係は図9,10にて示される。

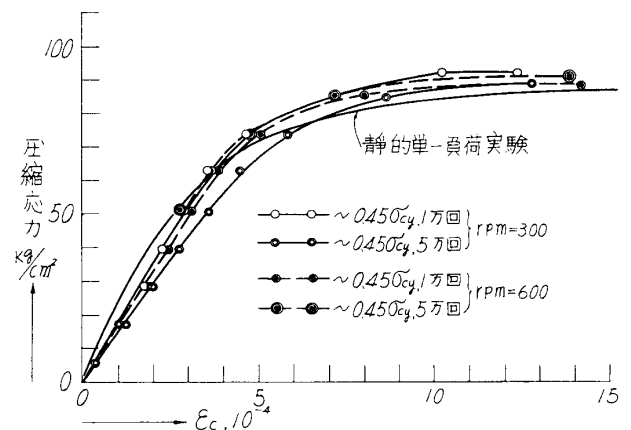


図9 応力-ひずみの関係

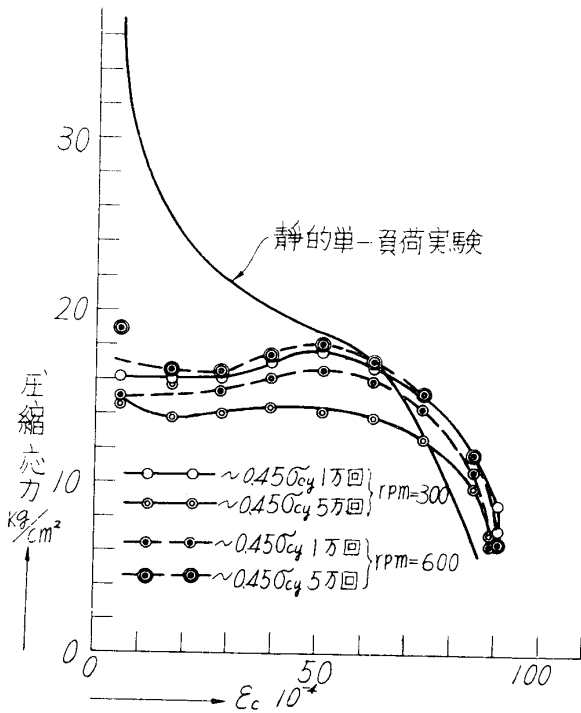


図10 応力—弾性係数の関係

(b) コンクリート強度 123.4 kg/cm^2 の場合
 コンクリート強度 $\sigma_{cy} 123.4 \text{ kg/cm}^2$ の供試体に対し、(a)の場合と同様の条件にて実験した結果は図11, 12にて示される。

(c) コンクリート強度 155.1 kg/cm^2 の場合
 コンクリート強度 $\sigma_{cy} 155.1 \text{ kg/cm}^2$ の供試体に対し、(a), (b)の場合と同様の条件にて実験した結果は図13, 14にて示される。

3.3 弾塑性限前後の繰返し負荷の場合の応力—ひずみ、応力—弾性係数の関係

(1) 応力振幅の上限を $0.80 \sigma_{cy}$ とした場合
 コンクリート強度を3種類とし、静的試験と応力周期300, 600 rpm の場合の動的試験との結果は表2のごとくである。

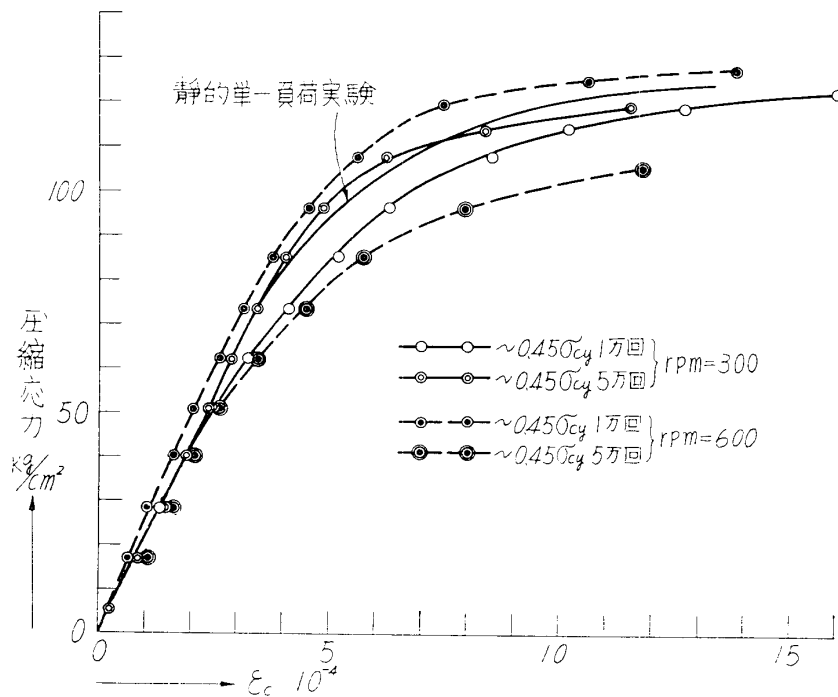


図11 応力—ひずみの関係

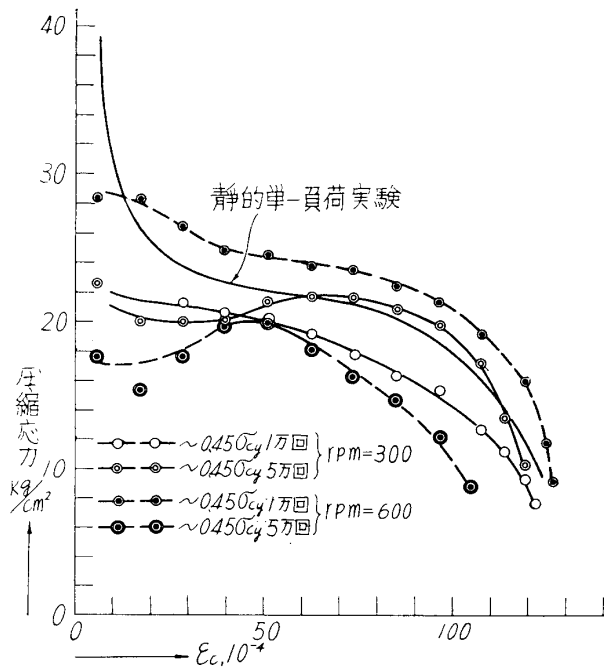


図12 応力—弾性係数の関係

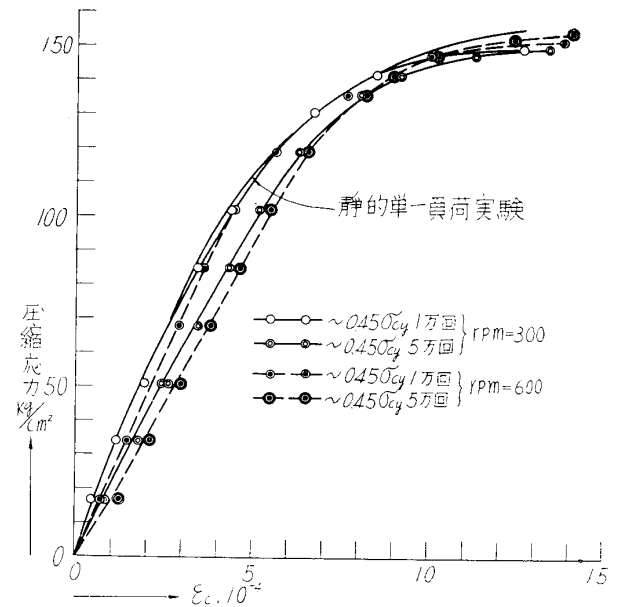


図13 応力—ひずみの関係

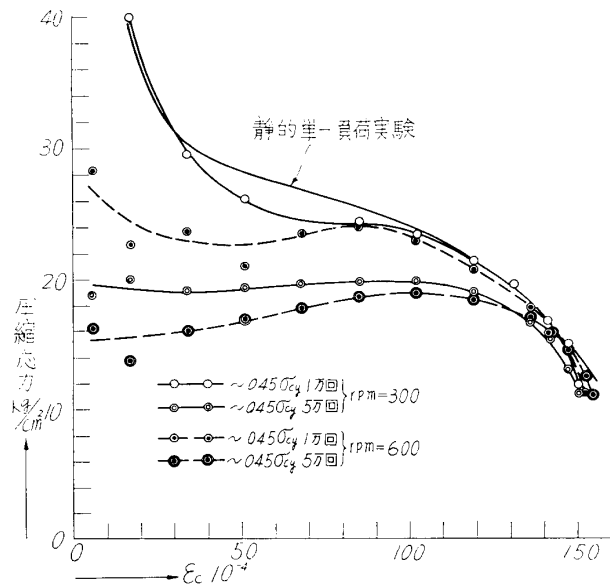


図14 応力—弾性係数の関係

表 2

荷動状態	初期繰返し回数	繰返し回数	強度, 応力, t, kg/cm²
静的実験	—	—	15.3, 86.6
”	—	—	16.0, 90.6
動的実験 (1.0~12.9t)			
0.80σ _{cy} , 300rpm	240	400	12.5, 70.8
静的実験	—	—	21.8, 123
”	—	—	23.0, 130
動的実験 (1.0~17.9t)			
0.80σ _{cy} , 300rpm	700	1810	17.9, 101
0.80σ _{cy} , 600rpm	200	850	14.5, 82.1
静的実験	—	—	25.8, 146
”	—	—	27.4, 155
動的実験 (1t~21.6t)			
0.80σ _{cy} , 300rpm	1040	3300	21.6, 122
0.80σ _{cy} , 600rpm	1200	450	20.0, 113

(2) 応力振幅の上限を $0.95 \sigma_{cy}$ とした場合
 コンクリート強度は前の場合と同様3種類とし、静的単一負荷実験と応力振幅の上限応力が塑性領域中に

あり大きいので、静的繰返し実験によったもので実験結果は表3のごとくである。

表 3

荷重状態	繰返し回数	強度 t	応力, kg/cm ²
静的実験	—	15.3	86.6
"	—	16.0	90.6
0.95 σ_{cy} (1t~15.3t)	4→破壊	14.8	83.8
静的実験	—	21.8	123
"	—	23.0	130
0.95 σ_{cy} (1t~21.3t)	12→破壊	19.6	111
静的実験	—	25.8	146
"	—	27.4	155
0.95 σ_{cy} (1t~25.7t)	5→破壊	25.4	144

表3の3種のコンクリートの応力—ひずみの関係を図示すると図15, 16, 17となる.

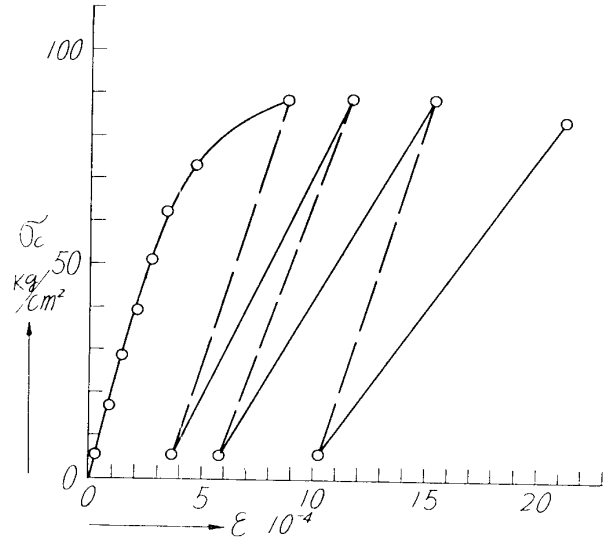


図15 上限0.95 σ_{cy} の場合の応力—ひずみ関係 (σ_{cy} 90kg/cm² 程度)

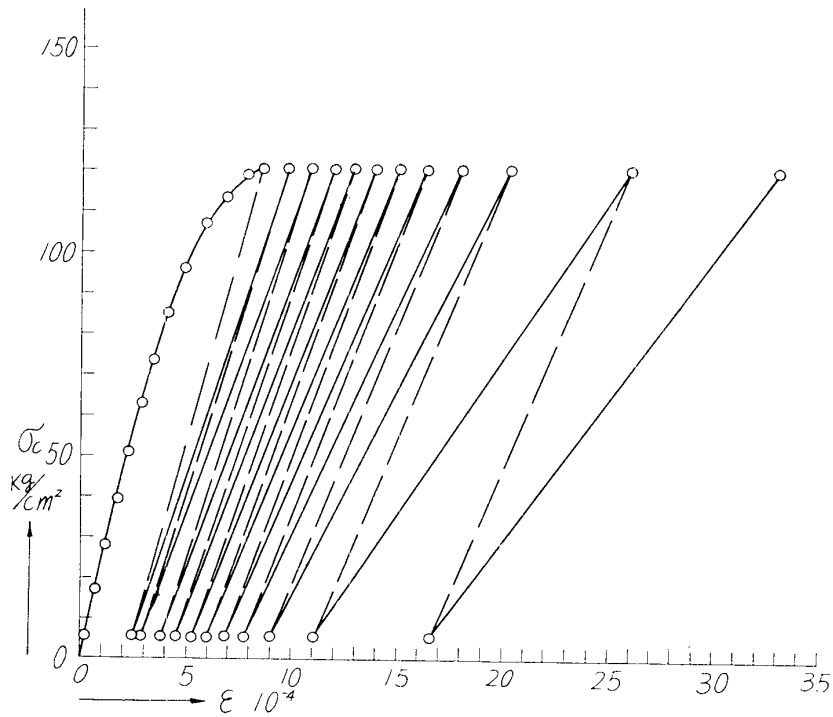


図16 上限 0.95 σ_{cy} の場合の応力—ひずみ関係 (σ_{cy} 125kg/cm² 程度)

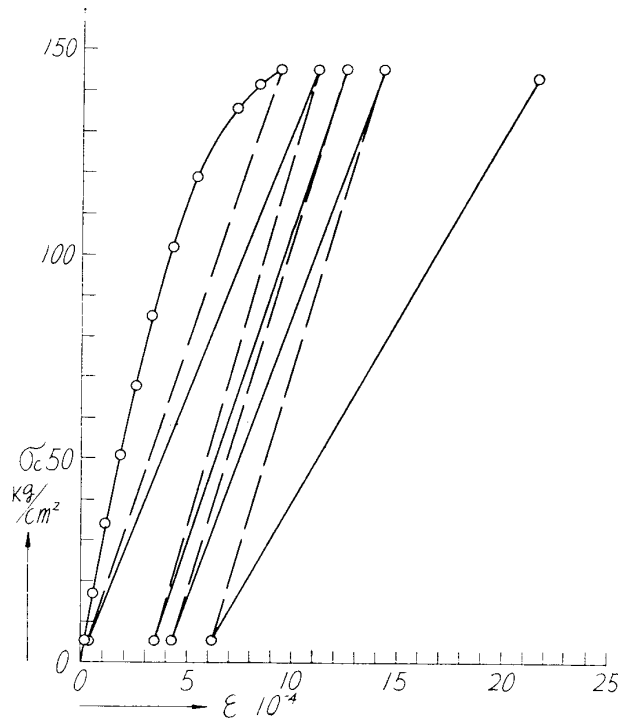


図17 上限 $0.95 \sigma_{cy}$ の場合の応力—ひずみ関係 (σ_{cy} 155 kg/cm^2 程度)

この場合の応力—弾性係数の関係を図示すると図18となる。

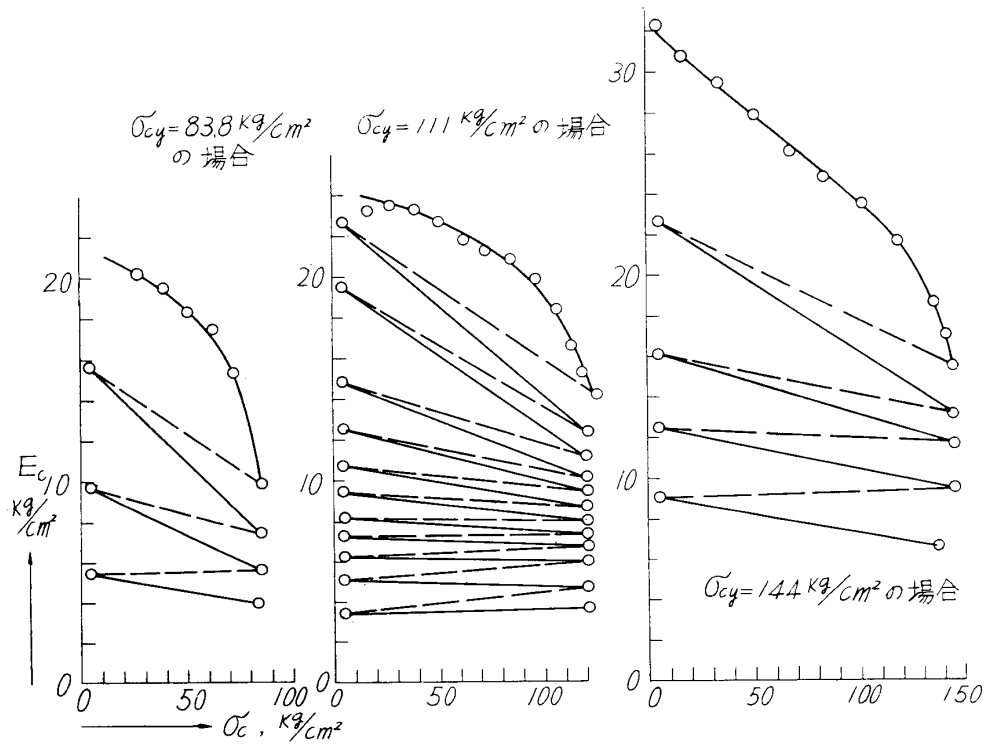


図18 3種のコンクリートの応力—弾性係数の関係

3.4 静的単一負荷実験, 動的圧縮実験

後の静的実験コンクリート供試体における ϵ_c/σ_r — ϵ_c 関係における各折点

相対応力値 $\sigma_r (= \sigma_c/\sigma_{cy})$ にもとずき, $\epsilon_c/\sigma_r - \epsilon_c$ の3例の関係を示すと図19, 20, 21のごとくなる。

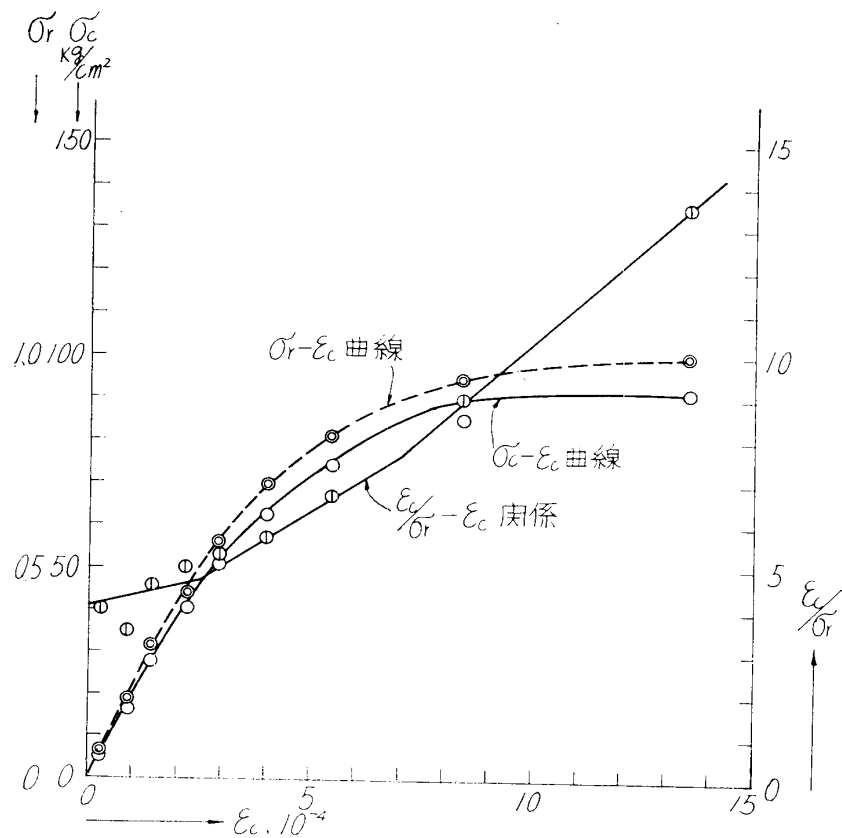


図19 $\sigma_{cy} 88.6 \text{kg/cm}^2$ 場合の $\sigma_c - \epsilon_c$, $\sigma_r - \epsilon_c$, $\epsilon_c / \sigma_r - \epsilon_c$ の関係

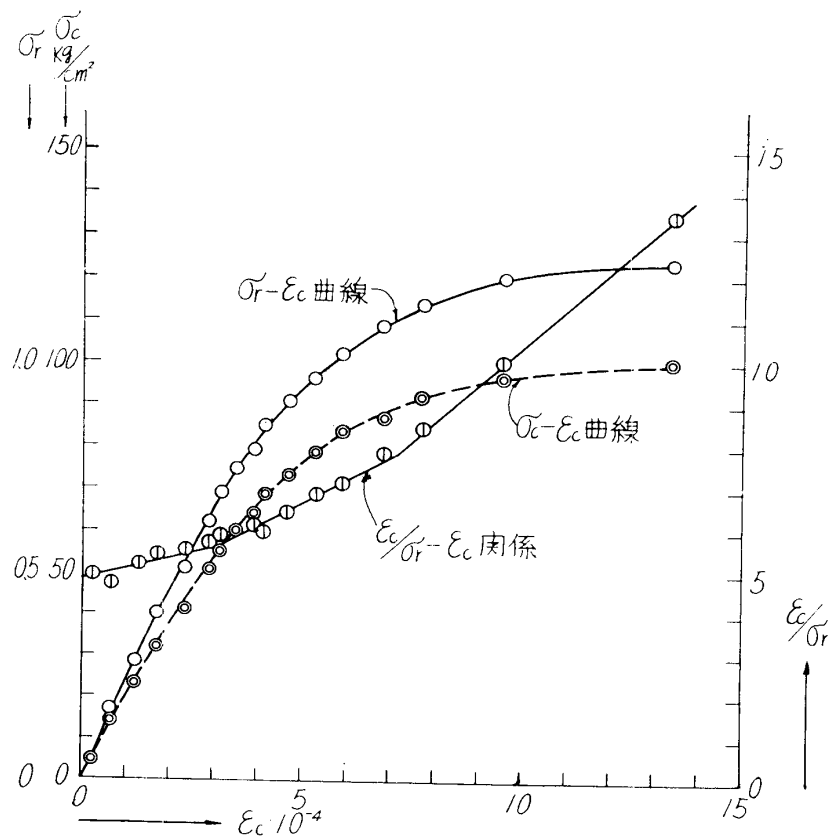


図20 $\sigma_{cy} 127 \text{kg/cm}^2$ の場合の $\sigma_c - \epsilon_c$, $\sigma_r - \epsilon_c$, $\epsilon_c / \sigma_r - \epsilon_c$ の関係

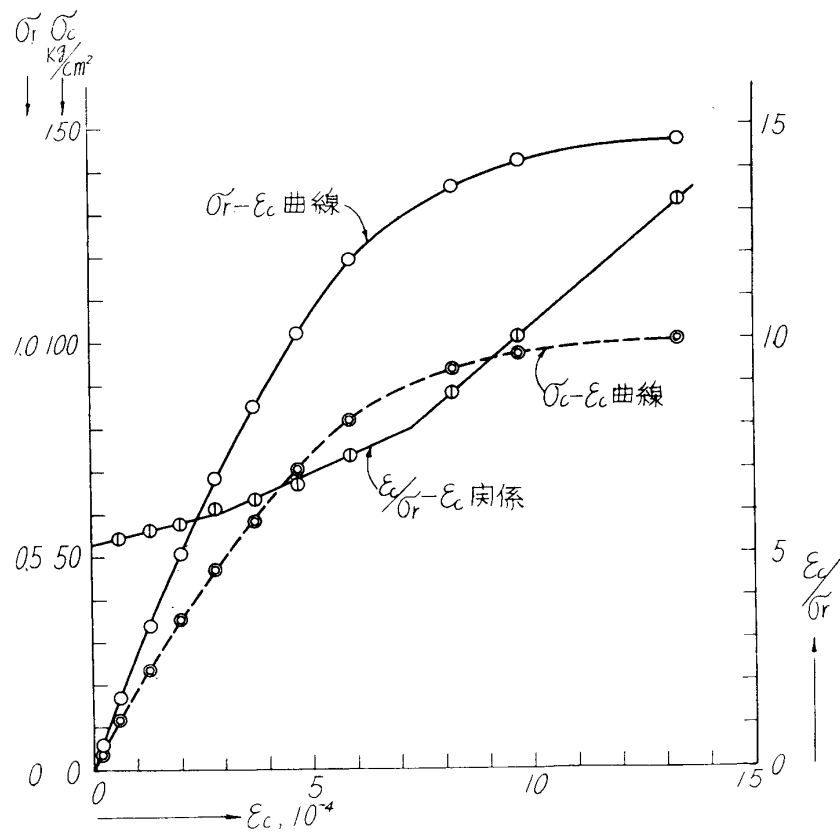


図21 $\sigma_{cy} 151\text{kg/cm}^2$ の場合の $\sigma_c-\epsilon_c, \sigma_r-\epsilon_c, \epsilon_c/\sigma_r-\epsilon_c$ の関係

以上のように各供試体に対し測定値にもとずいて折点の位置を求めた値は表4のごとくである。

表 4

荷重状態	rpm	$\sigma_{cy} 88.6\text{kg/cm}^2$ の コンクリート		$\sigma_{cy} 127\text{kg/cm}^2$ の コンクリート		$\sigma_{cy} 151\text{kg/cm}^2$ の コンクリート	
		弾性限	弾塑性限	弾性限	弾塑性限	弾性限	弾塑性限
静的実験		—	0.90	0.53	0.89	0.49	0.90
	〃	0.50	0.90	0.50	0.87	0.51	0.90
0.45 σ_{cy} (1万回繰返し)	300	0.50	0.90	0.50	0.89	0.50	0.89
	600	0.54	0.90	0.52	0.91	0.51	0.89
0.55 σ_{cy} (1万回繰返し)	300	0.51	0.84	0.58	0.89	0.52	0.90
	600	0.50	0.88	0.51	0.90	0.51	0.90
0.45 σ_{cy} (5万回繰返し)	300	0.50	0.92	0.57	0.88	0.56	0.87
	600	0.54	0.92	0.48	0.90	0.51	0.89

4. 考 察

3.1 の結果について；～疲労試験機の負荷能力を考え、 σ_{cy} が 90～155 kg/cm² の範囲のコンクリート供試体について比較基準値として求めた結果であり、一連の実験として妥当の値が得られたものと思われる。

3.2¹⁾ の結果について；図3の場合は応力-ひずみ曲線は、動的負荷の場合は弾塑性限付近まで静的単一負荷曲線より繰返し負荷のため、材質調整がなされたものと考えられる原因により、ほとんど直線状となり図5,7のように σ_{cy} が漸次大となるに従い、応力振幅 0.45 σ_{cy} の場合は静的の場合の曲線状に漸近するが、

応力振幅 $0.55 \sigma_{cy}$ の場合はその傾向は図3の場合に近似する。この応力-弾性係数曲線の性状は、図4, 6, 8にみるようにその顕著の傾向を示し、各々弾塑性限付

近までほとんど同値を示している。

3種のコンクリートに対する破壊強度、破壊ひずみ、弾性係数の諸値は表5のごとくである。

表 5

σ_{cy} その他		86.6			123			155		
		σ_{cy} kg/cm ²	$\epsilon_u 10^{-4}$	$E_{cu} 10^5$	σ_{cy} kg/cm ²	$\epsilon_u 10^{-4}$	$E_{cu} 10^5$	σ_{cy} kg/cm ²	$\epsilon_u 10^{-4}$	$E_{cu} 10^5$
静 的 実 験		88.6	15.3	0.568	123	13.4	0.923	155	12.8	1.22
	〃	90.6	13.5	0.671	130	9.3	1.40	146	13.3	1.10
300 rpm	0.45 σ_{cy} , 1万回繰返し	90.6	12.4	0.732	122	16.0	0.761	149	12.6	1.18
	0.55 σ_{cy} , 1万回繰返し	90.0	12.9	0.699	130	12.5	1.04	156	12.5	1.25
600 rpm	0.45 σ_{cy} , 1万回繰返し	88.3	14.1	0.625	126	13.8	0.915	152	13.8	1.11
	0.55 σ_{cy} , 1万回繰返し	93.4	14.8	0.633	116	15.1	0.771	156	16.6	0.93

表5に示す破壊の場合における諸値は、応力振幅 $0.45 \sigma_{cy}$, $0.55 \sigma_{cy}$ の異なる場合、応力周期 300, 600 rpm の異なる場合も、静的単一負荷の場合に比較してほとんど大差なく、疲労現象の影響を受けているものと考えられない。

3・2 (2)の結果について；～応力-ひずみ曲線について、3・2 (1)において応力振幅 $0.45 \sigma_{cy}$, $0.55 \sigma_{cy}$ の性状について述べたが、この場合も応力-ひずみ曲線は1,5万回繰返しの場合3・2(1)の場合とほとんど同傾向であるが、弾塑性限付近までは応力周期 600 rpmの

場合は300 rpmの場合より、繰返し回数5万回の場合は1万回の場合より同じ応力に対してわずかに大きいひずみが生ずる。また、応力-弾性係数関係も3・2(1)の場合の図4,6,8中のもと同傾向であるが、応力-ひずみの性状により600rpmは300rpmより、5万回の場合は1万回の場合より比較的小なる弾性係数値を示す。この場合の3種のコンクリートに対する破壊強度、破壊ひずみ、弾性係数の諸値は表6のごとくである。

表 6

σ_{cy} その他		86.6			123			155		
		σ_{cy} kg/cm ²	$\epsilon_u 10^{-4}$	$E_{cu} 10^5$	σ_{cy} kg/cm ²	$\epsilon_u 10^{-4}$	$E_{cu} 10^5$	σ_{cy} kg/cm ²	$\epsilon_u 10^{-4}$	$E_{cu} 10^5$
静 的 実 験		86.6	15.3	0.568	123	13.4	0.923	155	12.8	1.22
	〃	90.6	13.5	0.671	130	9.3	1.40	146	13.3	1.10
300 rpm	0.45 σ_{cy} , 1万回繰返し	90.6	12.4	0.732	122	16.0	0.761	149	12.6	1.18
	0.45 σ_{cy} , 5万回繰返し	88.9	12.8	0.698	119	11.5	1.03	150	13.4	1.12
600 rpm	0.45 σ_{cy} , 1万回繰返し	88.3	14.1	0.625	126	13.8	0.915	152	13.8	1.11
	0.45 σ_{cy} , 5万回繰返し	90.6	13.9	0.653	105	11.9	0.882	155	14.0	1.10

表6に示す破壊の場合における諸値は、繰返し回数1万回、5万回の異なる場合、応力周期 300, 600 rpm の異なる場合も、静的単一負荷の場合に比較してほとんど大差なく、疲労現象の影響を受けているものと考えられない。

3・3(1)の結果について；～表2に示すような結果に

て、応力周期 300 rpm の小さい場合には各種コンクリートとも静的強度に対して約0.80程度であるが600 rpm の大きい場合には所定圧力振幅に達するとすぐ破壊に達し、静的強度に対し約0.65～0.75程度である。

3・3(2)の結果について；～表3に示すような結果に

て、数回の静的繰返しにおいて破壊する。静的単一圧縮破壊に比して破壊強度が小にて、約0.90~0.95程度である。破壊時の残留ひずみは破壊ひずみの約 $\frac{1}{2}$ を示し、静的単一負荷の場合の約2倍程度の破壊ひずみに達したとき破壊する。

3・4の結果について；～表4にみるように各種コンクリートの静的単一負荷ならびに弾性限前後の負荷において、繰返し回数1万回および5万回にて応力周期300, 600 rpmの場合にも、ともにその弾性限はほぼ $0.50\sigma_{cy}$ 、弾塑性限は $0.90\sigma_{cy}$ 程度であることが立証できた。

5. 結 言

σ_{28} が90, 125, 155 kg/cm²程度のコンクリートに対し、荷重周期300, 600 rpmにも繰返し回数1,5万回負荷することとし、応力振幅の上限を $0.50\sigma_{cy}$, $0.90\sigma_{cy}$ 前後程度として実験研究した結果の要約は

(1) 弾性限近くの繰返し負荷を受けた後静的破壊した場合応力周期、繰返し数はほとんど影響なく、疲労現象は認められない。

(2) 静的単一負荷の場合と同様、弾性限、弾塑性限近くにて繰返し負荷した後静的破壊実験の結果は、相対応力値 σ_r がほぼ $0.50\sigma_{cy}$, $0.90\sigma_{cy}$ において静的負荷の場合と同様、弾性限、弾塑性限が定義される。

(3) 弾塑性限ならびに塑性領域において、大きい応力振幅の繰返し荷重を受けると疲労破壊が速かである。

結局コンクリートの疲労を支配する要素は応力振幅、繰返し回数、応力周期、荷重歴などであるといえる。

参 考 文 献

- 1) 加賀美：材料試験, 6, 4号, (1957)
- 2) G. M. Nordby: J. T. Mccall: Vol. 30, 2, ACI, (1958)
- 3) 畑野正：土木学会論文集, 70号, (1960)
- 4) 畑野正：土木学会論文集, 75号, (1961)
- 5) W. H. Gray, J. F. McLaughlin, J. D. Antrin: Vol. 58, 2, ACI, (1961)
- 6) 畑野正：土木学会論文集, 84号, (1962)
- 7) B. P. Sinha, K. H. Gerstle, L. G. Tulin: Vol. 61, 2, ACI, (1961)