

周期的圧縮荷重によるコンクリートの挙動

畑 野 正*

要 旨 コンクリートおよびモルタルの各一種の供試体に 0.60, 0.46, 0.31, 0.235, 0.18 sec の 5 種類の周期で約 50~140 kg/cm² および 50~200 kg/cm² の 2 種類の圧縮応力振巾の周期的荷重を作用し、その動挙動を観察した。

くり返しの回数はすべて 1 万回とし、この後荷重を解放して残留ひずみを測定し、さらに破壊時間約 100 sec の静的破壊試験を行なった。

周期的圧縮荷重によるコンクリートの各サイクルごとの応力とひずみの関係は、破壊ひずみの 1/2 に近いひずみを生ぜしめた大応力振巾の場合でも直線的であった。この直線の勾配すなわち動的弾性率の値は、同一応力周期につき 1 万回の間一定値を示し、応力周期の小なるほど大となった。これから動的弾性率の逆数値が応力周期の対数値と直線関係にあるという結論を得た。

また 1 万回くり返し荷重後の残留ひずみは応力周期の大なるほど大となった。動的弾性率ならびに残留ひずみの応力周期による変化を説明するための工学模型として Maxwell-Kelvin body を想定し、その粘弾性常数を求めることができた。

1 万回のくり返し後の静的破壊における破壊ひずみ(くり返し荷重を加える前の状態を起点としたすなわち残留ひずみをふくめた全縮み能力)は応力振巾、応力周期のいかんにかかわらず、くり返し荷重を加えないで始めから一行程の破壊荷重を加えた場合の縮み能力と同一となった。また 1 万回のくり返し後の静的破壊強度は応力周期の大きいほど小となった。これからコンクリートの疲労には応力周期、換言すれば荷重の作用している時間が大きく影響することが明らかになり、応力振巾ならびにくり返し回数と応力周期との積が疲労破壊を決定する重要な要素であることが推定された。

1. 緒 言

著者はすでにコンクリートの材料力学的な動挙動を知るための研究としてコンクリート供試体に一行程の衝撃的な圧縮荷重または引張荷重を加えた場合の観察を述べて来たが^{1),2)}、コンクリート構造物の振動問題や動的な疲労の問題を取り扱うためには、これらの研究をさらに進めて周期的なくり返し荷重によるコンクリートの挙動を知る必要がある。

くり返し荷重によるコンクリートの動的試験は従来数

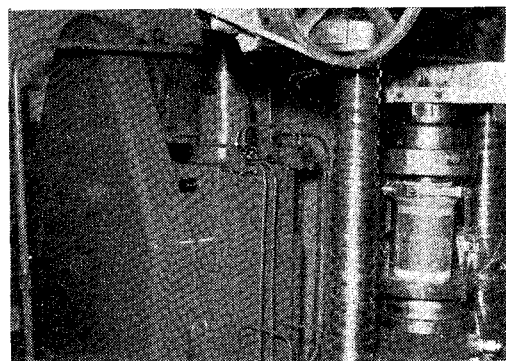
多く報告されているが、これらはほとんどいわゆる疲労強度の問題であって著者がすでに指摘した^{1),2)}ごとく、周波数による弾性率の変化という材料力学の基本問題にふれたものはない。また疲労強度の取り扱いも単に応力振巾とくり返し回数との関係に限定されたものが大多数で、疲労強度とくり返し荷重の周波数の関係、破壊論の立場からの疲労による強度低下の説明などは全く未知の問題である。

これらの問題をここに全般的に論ずるにはばく大な実験を必要とするので、著者はまずコンクリートの動的弾性率の周波数による変化の問題を主題としてとりあげ、これが粘弾性論による説明を試みたい。そして疲労に関する上記問題点については、一定くり返し回数だけ各種周波数の圧縮荷重を加えた後の残留ひずみ、静的破壊強度、破壊ひずみなどを求め、これらから全般的な推定を行なうにとどめたいと考える。

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に容量 100 t の Pulsator を 100 t の Amsler 耐圧試験機に連結して用いた。Pulsator は極数変換式モーターにより 5 段に回転数を変化するように作られ、0.60, 0.46, 0.31, 0.235, 0.18 sec の 5 種類の周期で任意の圧力振巾の周期的圧縮荷重を生ずることができる。写真-1 に示すように円筒供試体の上部に鋼製リングを固定し、リングと供試体をのせた下部加圧板との間の鉛直距離の変化を S.R. ゲージをはった π ゲージにより測り、コンクリートのひずみを求めた。 π ゲージは供試体の直径方向に 2 個使用し、両者の変形の和を記録した。また S.R. ゲージによる圧力計を、前述下部加圧板の下部に置いて圧

写真-1



* 正員 工博 電力中央研究所 技術研究所

表-1 Properties of Cement

(a)											
Ig. Loss	Ins. R.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₂ S	C ₃ S	C ₄ A	C ₄ AF
0.23	0.69	23.03	4.19	3.79	64.03	1.05	1.93	46.5	31.0	4.7	11.5
(b)		(c)									
sp. gr.	Fineness (Blaine)	Flow		Strength of Standard Mortar							
3.20	3 110 cm ² /gr			3 day	7 day	28 day					
		240 mm		118 kg/cm ²	175 kg/cm ²	379 kg/cm ²					

表-2 Properties of Aggregates

Sagami River Natural Aggregates	sp. gr.	Max. Size	Gradation					
			Gravel	25~20 mm	25%	Sand	5~2.5 mm	15%
	2.75	25 mm		20~15	25%		2.5~1.2	15%
				15~10	25%		1.2~0.6	25%
				10~5	25%		0.6~0.3	25%
							0.3~0.15	15%
						0.15~	5%	

表-3 Tested Concrete & Mortar

Test No.	Age in Week	Mix Proportion					Slump & Flow
		Cement	Water	Sand	Gravel	w/c	
1	4	300 kg/m ³	150 kg/m ³	710 kg/m ³	1 264 kg/m ³	50%	10.5 cm
2	4	511 kg/m ³	255.5 kg/m ³	1 533 kg/m ³	—	50%	168 mm

力を測った。その容量は 100 t で圧力とひずみを電磁オ
ンシロに同時記録した。

Amsler 試験機の upper head を固定しておき、供試
体の上面を upper head の下面から数 cm はなしたと
ころに位置させて、pulsator を一定周期で始動すると
Amsler 試験機の ram は次第に上昇し、供試体上面が
upper head の下面に接触するに至る。このとき微小振
巾の圧力が供試体にかかりはじめるのでこの圧力振巾を
次第に大きくなるよう調整して所定の圧力振巾を得る。
荷重を微小振巾から所定圧力振巾に達せしめるまで、大
体 100~200 回のくり返し荷重のかかる時間を必要と
し、それ以後は一定周期、一定振巾の周期的圧縮荷重が
くり返される。

くり返しの回数はすべて 1 万回までとし、1 万回を終
ると pulsator を停止する。この時数回の減衰振動の後
荷重は完全に解放される。そして圧力記録は 0 となるが
ひずみ記録は残留ひずみを残す。この状態のままで静的
圧縮荷重を加え、約 100 sec で破壊を生ぜしめる。この
間の圧力変形も同様に同時記録する。

圧力、変形をはかるための動ひずみ計には一試験最大
約 2 時間を要するので、その間感度と 0 線の変化のない
よう特別の考慮をはらったものを用いた。

実験はコンクリートおよびモルタルの各一種類につい
て行なった。その材料、配合は表-1, 2, 3 のようである。
供試体の大きさは 10 cm 径、20 cm 長で実験直前まで
20°C の水中に養生した。実験は材令 28 日を中央に
はさんだ 3 日間で行なった。実験の種類は表-4 のごと

表-4

No.	Stress Period	Stress Amplitude
1, 2	Static Test	
3, 4	0.60 sec	50~140 kg/cm ²
5, 6	0.46 "	"
7, 8	0.31 "	"
9, 10	0.235 "	"
11, 12	0.18 "	"
13, 14	0.60 "	50~200 kg/cm ²
15, 16	0.46 "	"
17, 18	0.31 "	"
19, 20	0.235 "	"
21, 22	0.18 "	"

くで、おのおの 22 個あて試験した。

動的試験の場合の記録は荷重がかかりはじめてから所
定の圧力振巾になるまでの A Stage, 所定圧力振巾にな
った直後の B Stage, 最初から 1 000 回目の周期的応力
を受けたときの C Stage, 5 000 回目の周期的応力を受
けたときの D Stage, 10 000 回目の周期的応力を受けた
ときの E Stage, 10 000 回を終った直後の荷重解放の
F Stage, および F Stage 終了後数分たってから行なっ
た静的破壊 (破壊時間約 100 sec) の最終段階である G
Stage の 7 段階にわけて行なった。

3. 実験の結果

測定記録の例を図-1 に示す。Test 1, 4 および Test
1-20 における記録であって、コンクリート供試体に対
する大小 2 種類の応力振巾における例である。今、これ
らの記録を詳細に読みとり、それぞれ応力ひずみの関係
曲線に書きかえたものが図-2 である。

図-1 (a)

Examples of Test Record

(Test 1-4 Stress Period 0.60 sec. Stress Amplitude 50-140 kg/cm²)
1 : 3 : 5 Concrete 4Ws.

A. Initial Stage from Beginning to the fixed Stress Amplitude.

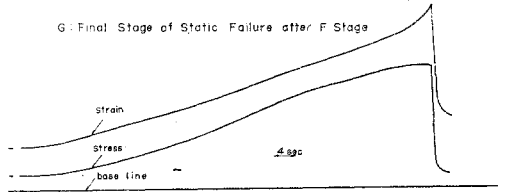
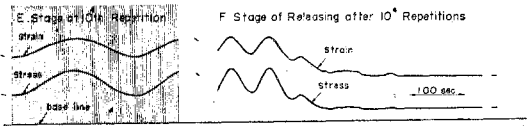
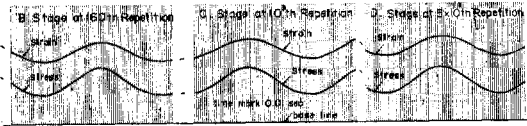
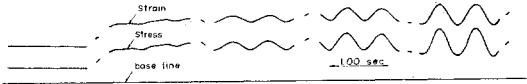


図-1 (b)

Examples of Test Record

(Test 1-20 Stress Period 0.235 sec. Stress Amplitude 60-200 kg/cm²)
1 : 3 : 5 Concrete 4Ws.

A. Initial Stage from Beginning to the fixed Stress Amplitude.

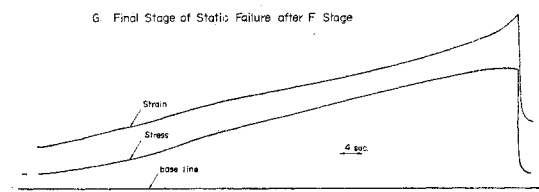
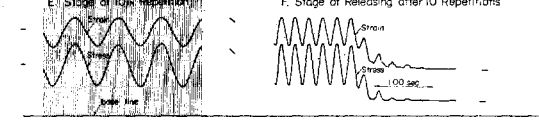
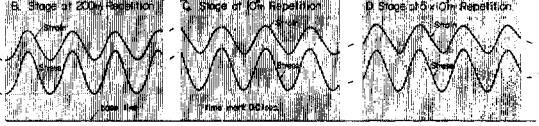
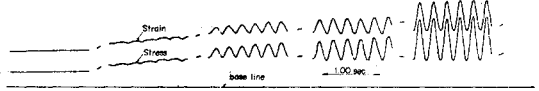


図-2 (a)

Stress - Strain

(Test 1-4 Stress Period 0.60 sec. Stress Amplitude 50-140 kg/cm²)
1 : 3 : 5 Concrete 4Ws.

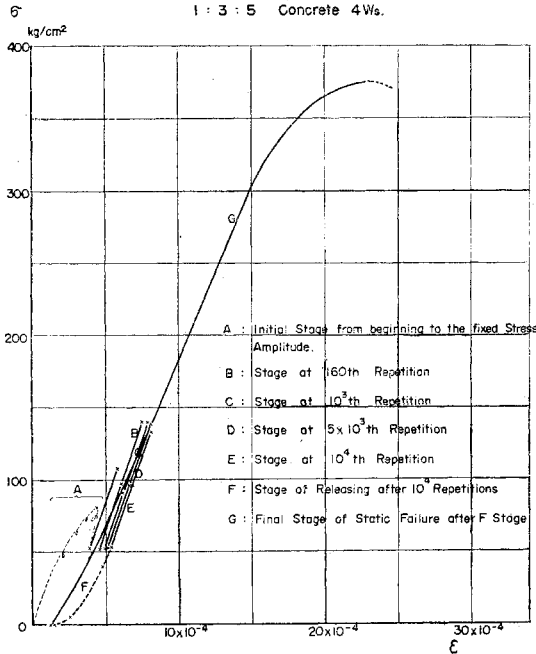
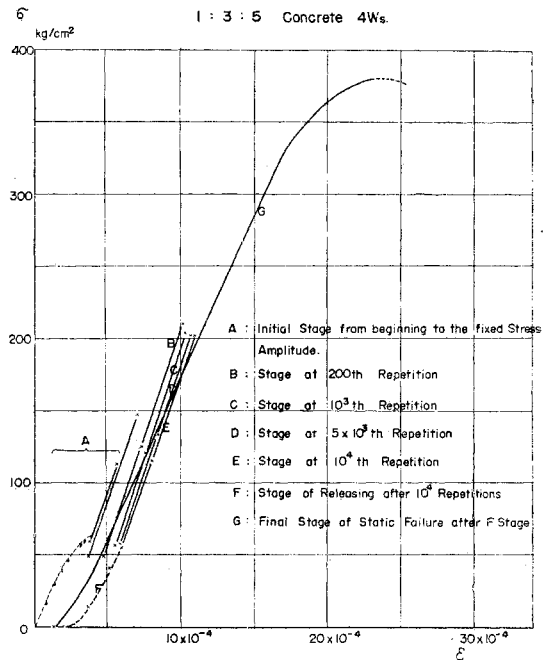


図-2 (b)

Stress - Strain

(Test 1-20 Stress Period 0.235 sec. Stress Amplitude 60-200 kg/cm²)
1 : 3 : 5 Concrete 4Ws.



微小振巾の圧力荷重が加えられはじめてから一定応力振巾になるまでの A Stage では応力振巾が小さく、かつくり返し総数もせいぜい 200 回程度であるが、ひずみの大きさは割合に大きい。B, C, D, E の各 Stage における応力-ひずみの関係は小応力振巾の場合はもちろん、破壊ひずみの約 1/2 程度までひずみが大きくなるような応力を加える、大応力振巾の場合でもほとんど直線的である。今この勾配を動的弾性率 E_d と定義するものとすれ

ば、同一供試体の E_d の値は周期の一定な 1 万回のくり返しの間ではほとんど変化なく一定の値を示す。しかし応力-ひずみ関係直線は次第に右に移動し、ひずみの絶対値がくり返し回数の増大につれて増加して行くことが見られる。ひずみの増加割合は前述 A Stage をふくめて、B~C, C~D, D~E の各区間を比較して初期の方が大きく、くり返し回数の増大とともに次第に小になって行く傾向を示す。応力解放の F Stage では応力-ひずみ曲

表-5 (a) Results of Tests.
Test No. 1 1:3:5 Concrete 4 W_s

No.	T Stress Period	Stress Amplitude	E_d Dynamic Modulus of Elasticity	ϵ_r Residual Strain	E_s Static Modulus of Elasticity	σ_u Statical Strength	ϵ_c Compressibility
1		Statical Test	100 sec Failure	—	—	382 kg/cm ²	22.7 × 10 ⁻⁴
2		Statical Test	100 sec Failure	—	—	381 "	23.2 "
3	0.60 sec	60~150 kg/cm ²	25.2 × 10 ⁴ kg/cm ²	2.05 × 10 ⁻⁴	23.2 × 10 ⁴ kg/cm ²	363 "	22.6 "
4	0.60 "	50~140 "	27.0 "	1.35 "	23.2 "	375 "	23.0 "
5	0.46 "	50~140 "	27.5 "	1.45 "	24.1 "	371 "	23.0 "
6	0.46 "	55~130 "	26.0 "	1.10 "	22.5 "	367 "	24.2 "
7	0.31 "	60~140 "	28.2 "	1.25 "	24.2 "	370 "	22.0 "
8	0.31 "	60~140 "	28.2 "	1.00 "	24.7 "	376 "	22.4 "
9	0.235 "	60~150 "	29.6 "	0.49 "	24.6 "	368 "	21.8 "
10	0.235 "	50~140 "	29.0 "	0.85 "	24.0 "	376 "	22.0 "
11	0.18 "	50~140 "	29.0 "	0.65 "	24.1 "	376 "	23.0 "
12	0.18 "	50~140 "	29.6 "	0.44 "	23.4 "	375 "	21.8 "
13	0.60 "	60~210 "	26.8 "	2.80 "	22.2 "	363 "	23.2 "
14	0.60 "	50~200 "	26.8 "	2.80 "	22.0 "	363 "	23.8 "
15	0.46 "	50~200 "	28.0 "	2.10 "	22.1 "	364 "	22.4 "
16	0.46 "	50~200 "	29.2 "	2.11 "	22.5 "	370 "	21.8 "
17	0.31 "	50~200 "	27.0 "	2.10 "	23.1 "	365 "	24.4 "
18	0.31 "	60~210 "	30.0 "	1.36 "	25.1 "	382 "	23.1 "
19	0.235 "	60~200 "	28.7 "	1.37 "	22.0 "	372 "	23.6 "
20	0.235 "	60~200 "	29.2 "	1.36 "	22.8 "	380 "	23.1 "
21	0.18 "	50~210 "	31.2 "	1.13 "	23.4 "	378 "	22.0 "
22	0.18 "	50~200 "	31.0 "	1.52 "	24.5 "	364 "	22.2 "

表-5 (b) Results of Tests.
Test No. 2 1:3 Mortar 4 W_s

No.	T Stress Period	Stress Amplitude	E_d Dynamic Modulus of Elasticity	ϵ_r Residual Strain	E_s Static Modulus of Elasticity	σ_u Statical Strength	ϵ_c Compressibility
1		Statical Test	100 sec Failure	—	—	420 kg/cm ²	34.7 × 10 ⁻⁴
2		Statical Test	100 sec Failure	—	—	406 "	33.6 "
3	0.61 sec	50~140 kg/cm ²	22.6 × 10 ⁴ kg/cm ²	1.41 × 10 ⁻⁴	18.2 × 10 ⁴ kg/cm ²	398 "	34.6 "
4	0.61 "	60~140 "	24.4 "	1.70 "	17.4 "	393 "	33.7 "
5	0.46 "	60~150 "	23.6 "	1.71 "	16.8 "	395 "	35.1 "
6	0.46 "	50~150 "	24.0 "	1.48 "	18.0 "	401 "	35.5 "
7	0.30 "	60~140 "	24.8 "	1.06 "	17.7 "	395 "	33.0 "
8	0.31 "	60~140 "	25.0 "	1.82 "	17.8 "	401 "	33.7 "
9	0.235 "	50~140 "	25.9 "	1.37 "	17.9 "	398 "	33.6 "
10	0.235 "	60~140 "	25.6 "	1.28 "	17.8 "	407 "	34.0 "
11	0.18 "	60~150 "	26.2 "	1.21 "	18.2 "	402 "	34.7 "
12	0.18 "	60~140 "	27.5 "	1.67 "	18.8 "	405 "	34.4 "
13	0.62 "	60~200 "	22.6 "	3.20 "	17.5 "	384 "	34.2 "
14	0.62 "	50~200 "	21.4 "	2.71 "	17.3 "	384 "	35.1 "
15	0.46 "	50~200 "	24.6 "	2.73 "	18.4 "	391 "	34.9 "
16	0.46 "	60~210 "	26.0 "	3.29 "	18.0 "	397 "	34.8 "
17	0.31 "	60~200 "	24.0 "	2.37 "	17.8 "	395 "	34.1 "
18	0.31 "	50~200 "	24.0 "	2.08 "	17.8 "	395 "	32.8 "
19	0.235 "	60~210 "	25.4 "	2.20 "	16.9 "	395 "	35.7 "
20	0.235 "	50~200 "	25.5 "	2.20 "	17.4 "	395 "	34.4 "
21	0.18 "	50~210 "	27.6 "	1.97 "	16.8 "	401 "	35.1 "
22	0.18 "	60~210 "	28.2 "	2.00 "	18.8 "	400 "	33.0 "

線はやや上向きに凹型を示し、弾性余効の状況を呈す。F Stage における応力 0 のときの残留ひずみは数分後の静的破壊の G Stage の始点に至るまで少し減少する。今、G Stage の始点におけるひずみを残留ひずみ ϵ_r と定義する。最終過程 G Stage では応力ひずみ曲線は応力 0、ひずみ ϵ_r から始めて小圧力の範囲では少し上向きに凹型の傾向を示すが、ただちに直線となり大部分を直線のまま進行して破壊ひずみに近くなってから上向き凸型となる。今この直線部分の勾配を静的弾性率 E_s と定義する。上向きに凸型となった応力ひずみ曲線は最大応力すなわち静的破壊強度 σ_u となつてから、なおこれより小なる応力状態でひずみを増大し、ついに破断するに至る。今 A Stage 開始前のひずみ値 0 なる点からこの静的破壊強度 σ_u のときのひずみ値までの、すなわち

ϵ_r をふくめた全ひずみ値を縮み能力 ϵ_c と定義するものとする。

以上の測定数値をコンクリートおよびモルタルのおのおのについてあげると表-5 となる。

4. 考 察

表-5 に示された実験結果から周期的圧縮荷重を受けたコンクリートの動挙動につき重要な性質を知ることができる。動的弾性率 E_d は 0.60~0.18 sec という比較的小範囲の周期の変動において、明瞭な変化を示している。著者は一行程の圧縮または引張荷重において Secant Modulus E_s の逆数値が破壊時間 t_u の対数値と直線関係にあることを導いたが^{2),3)}、ここではこの関係は動的弾性率 E_d の逆数値が圧力周期 T の対数値と直線関係

表-6 (a) Results of Statistical Analysis.
Test No. 1 1:3:5 Concrete 4 W_c

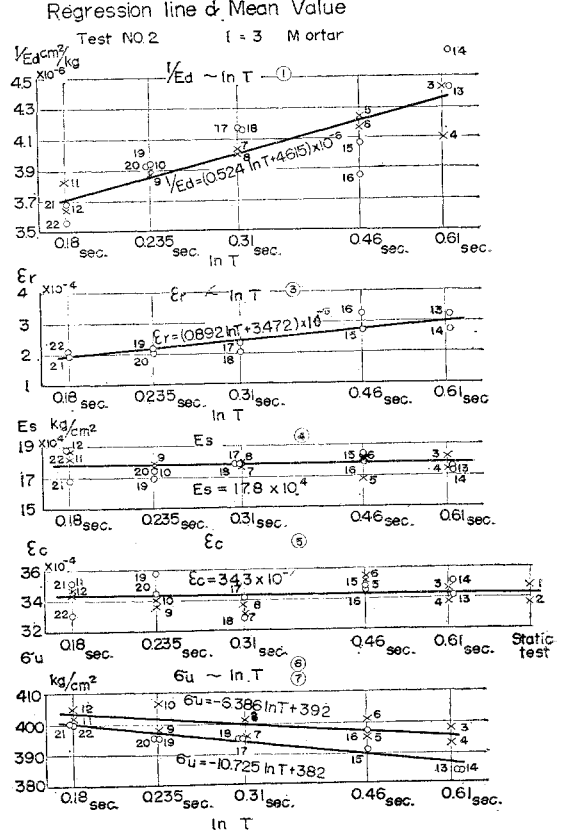
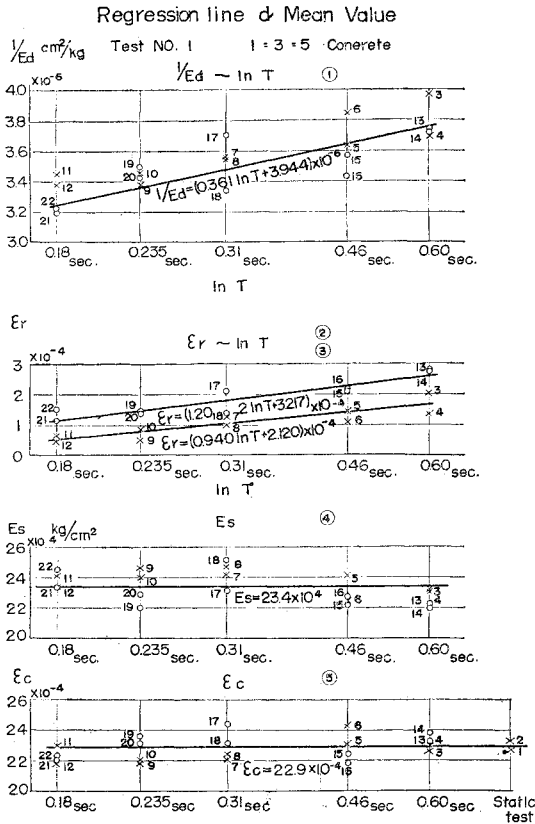
No.	Relation	Analysis	Test	Regression line, mean value & Standard Deviation
1	$1/E_d \sim \log T$	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 33.40 > F_{18}^1(0.01) = 8.29$	$1/E_d = (0.361 \log T + 3.944) \times 10^{-6}$ $S = 0.122 \times 10^{-6}$ ①
2	$\epsilon_r \sim \log T$ (low Stress Amplitud)	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 27.00 > F_8^1(0.01) = 11.26$	$\epsilon_r = (0.940 \log T + 2.120) \times 10^{-4}$ $S = 0.250 \times 10^{-4}$ ②
3	$\epsilon_r \sim \log T$ (high Stress Amp.)	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 37.66 > F_8^1(0.01) = 11.26$	$\epsilon_r = (1.202 \log T + 3.217) \times 10^{-4}$ $S = 0.270 \times 10^{-4}$ ③
4	E_s	Test of chisquare	$\chi^2 = 0.79 < \chi^2(19, 0.01) = 36.2$	$E_s = 23.4 \times 10^4$ $S = 1.0 \times 10^4$ ④
5	ϵ_c	Test of chisquare	$\chi^2 = 0.55 < \chi^2(21, 0.01) = 38.9$	$\epsilon_c = 22.9 \times 10^{-4}$ $S = 0.78 \times 10^{-4}$ ⑤
6	$\sigma_u \sim \log T$ (low Stress Amplitude)	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 3.00 < F_8^1(0.05) = 5.32$	—
7	$\sigma_u \sim \log T$ (high Stress Amp.)	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 2.92 < F_8^1(0.05) = 5.32$	—

表-6 (b) Results of Statistical Analysis
Test No. 2 1:3 Mortar 4 W_c

No.	Relation	Analysis	Test	Regression line, mean Value & Standard Deviation
1	$1/E_d \sim \log T$	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 43.30 > F_{18}^1(0.01) = 8.29$	$1/E_d = (0.524 \log T + 4.615) \times 10^{-6}$ $S = 0.158 \times 10^{-6}$ ①
2	$\epsilon_r \sim \log T$ (low Stress Amplitude)	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 0.95 < F_8^1(0.05) = 5.32$	—
3	$\epsilon_r \sim \log T$ (high Stress Amp.)	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 23.7 > F_8^1(0.01) = 11.26$	$\epsilon_r = (0.892 \log T + 3.472) \times 10^{-4}$ $S = 0.26 \times 10^{-4}$ ③
4	E_s	Test of chisquare	$\chi^2 = 0.35 < \chi^2(19, 0.01) = 36.2$	$E_s = 17.8 \times 10^4$ $S = 0.57 \times 10^4$ ④
5	ϵ_c	Test of chisquare	$\chi^2 = 4.03 < \chi^2(21, 0.01) = 38.9$	$\epsilon_c = 34.3 \times 10^{-4}$ $S = 0.8 \times 10^{-4}$ ⑤
6	$\sigma_u \sim \log T$ (low Stress Amplitude)	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 6.08 > F_8^1(0.05) = 5.32$	$\sigma_u = -6.386 \log T + 392$ $S = 3.70$ ⑥
7	$\sigma_u \sim \log T$ (high Stress Amp.)	Analysis of Variance in Regression	$F_0 = 23.6 > F_8^1(0.01) = 11.26$	$\sigma_u = -10.725 \log T + 382$ $S = 3.20$ ⑦

図-3 (a)

図-3 (b)



にあるとすることができるであろう。

1万回の周期的圧力を加えてのち、荷重を解放して生ずる残留ひずみ ϵ_r はその周期、換言すれば力の作用していた時間によって異なるもののように見える。すなわち周期の長いほど、換言すれば1万回だけ荷重の作用している時間が長いほど、 ϵ_r の値が大きくなると思われる結果となっている。

次に最終の静的破壊において、静的弾性係数 E_s と破壊強度のときの全ひずみ値 ϵ_c とは周期と圧力振巾の異なる各試験ののちにおいてもほとんど差がないように見える。さらに静的破壊強度は周期の異なる1万回の同一振巾の周期的圧縮荷重ののちにおいて異なる傾向を示していると思われる。

以上のことから実験結果の変動を考慮して、統計的な検定の上で結論されねばならぬであろう。今、上述の諸点に関する統計解析の結果を示せば表-6のごとくである。同表において回帰線および平均値の得られたものについて図示すると図-3となる。

結局、動的弾性率 E_d については

$$1/E_d = C + D \ln T \dots \dots \dots (1)$$

$$0.18 \text{ sec} < T < 0.60 \text{ sec}$$

の関係が成立することが結論される。すなわち動的弾性

率 E_d はコンクリートの粘性のため、圧力周期 T の減少とともに増大するのである。

1万回のくり返し圧縮荷重を加えたのちの残留ひずみ ϵ_r はモルタルにおける小圧力振巾の場合を除いて、圧力周期の大なるほど大きいとの結論が得られた。モルタルの小圧力振巾の場合は実験結果のばらつきがやや大きかったために回帰線の成立を説明できなかったが、コンクリートの一般的性質として同一圧力振巾、同一くり返し回数に対して、残留ひずみは周期の大きいほど大となるといってさしつかえないと思われる。換言すればくり返し荷重の影響はその回数だけによるものでなく、その周期または作用時間の影響を受けるものであるということが出来る。なお表-6(a)における回帰線の式②③の差の検定を行なうと、両者の間に差があるとはいえないとの結論となった。そのばらつきに対して圧力振巾の差が小さすぎたためと思われる。

くり返し荷重を1万回作用したのちの静的弾性率 E_s は周期および圧力振巾の異なる各試験後において差があるとはいえないという結果になった。

また最初から一行程の静荷重を加えて破壊させた場合の縮み能力 ϵ_c と、周期および圧力振巾を異にした1万回のくり返し荷重を加えたのちの静的破壊における全縮

み能力 ϵ_c との間には差があるとはいえない。結局くり返し荷重の有無にかかわらず

$$\epsilon_c = \text{const.} \dots\dots\dots (2)$$

の関係が成立すると考えられる。

1 万回の一定圧力振巾のくり返し荷重後の静的圧縮強度 σ_u はコンクリートの場合ややばらつきが大きかったために、応力周期の対数值との間に“直線関係がない”ということ打ち消すことができなかつたが、ばらつきの少ないモルタルの場合は荷重周期の大きいほど小さいという結論となった。このモルタルについての結論と残留ひずみ ϵ_r が応力周期 T の増大とともに大となり、かつ、全縮み能力 ϵ_c が一定であるということとをあわせ考えれば、コンクリートの一般的性質として一定回数、一定応力振巾のくり返し荷重後の強度はその応力周期の大きいほど小さいと考えてきつつかえないであろう。なお表-6 (b) における回帰式⑥⑦の差の検定の結果、両者に差があるとはいえないとの結論となった。実験結果のばらつきに対して圧力振巾の差が小さすぎたためであろう。

今回は疲労破壊に至るまでの実験は行なわなかつたけれども、以上のごとき実験結果からコンクリートの疲労に関する新しい所見が推察される。すなわち応力振巾に応じて疲労破壊を生ずるためのくり返し回数が決められるという従来の考え方は成立せず、応力周期が大きく影響するものであることが推定されるのである。換言すればコンクリートの疲労という現象は破壊ひずみに至る要素によって定まると考えるべきであつて、くり返し回数と応力周期の積ならびに応力の大きさがその主要な要素であると推定されるのである。応力周期の大きいくり返し荷重の場合は、同一応力振巾、同一くり返し回数でも

$$E_d = \frac{b \sin \omega t}{b \sin \omega t \left(\frac{1}{E} + \frac{\tau}{\eta_1} \frac{1}{1 + \tau^2 \omega^2} \right) - b \cos \omega t \left(\frac{1}{\gamma \omega} + \frac{\omega}{\eta_1} \frac{\tau^2}{1 + \tau^2 \omega^2} \right)} \dots\dots\dots (4)$$

ここに

$$\tau = \frac{\eta_1}{E_1}$$

上式から明らかなように Maxwell-Kelvin body に周期的応力が作用すれば応力とひずみの間に位相差を生ずることになる。本実験では図-1 に示すように位相差として認めることのできるような大きな差は観測されず、もし存在するとすれば微小位相差についての精度高い測定を必要とするであろう。従つてここでは

$$\left(\frac{1}{E} + \frac{\tau}{\eta_1} \frac{1}{1 + \tau^2 \omega^2} \right) > \left(\frac{1}{\gamma \omega} + \frac{\omega}{\eta_1} \frac{\tau^2}{1 + \tau^2 \omega^2} \right) \dots\dots (5)$$

の条件のもとに

$$E_d = \frac{EE_1(1 + \tau^2 \omega^2)}{E + E_1(1 + \tau^2 \omega^2)} \dots\dots\dots (6)$$

と考えるものとする。

次に荷重を解放して数分おいたのちの残留ひずみ ϵ_r は

$$\epsilon_r = \frac{a}{\eta} t \dots\dots\dots (7)$$

* 応力周期の短い場合に比べてひずみの量は大となり、破壊により近づいていると考えられる。ただ、この場合くり返し回数と応力周期の積に正比例してひずみが增大するかどうかは疑問であつて、この点に関しては将来の実験観察が必要である。

最後に今回の実験結果を用いてコンクリートの粘弾性常数を計算してみよう。従来著者は一行程の圧縮荷重、引張荷重に対するひずみの経過からコンクリートを Kelvin body に spring の直結された 3 要素模型を想定して粘弾性常数を計算して来た¹⁾²⁾。しかし今回のように周期的圧縮荷重を受けたコンクリートのひずみの経過は図-2 に示したように複雑で、これらの全過程を説明するにたりる模型を想定することは困難である。そこでここでは応力周期 T による動弾性率 E_d の変化をおもなる説明の対象とし、また残留ひずみ ϵ_r が時間と荷重の積に正比例すると簡単のために想定した場合の Maxwell-Kelvin body を考えて粘弾性常数を求めて見ることにする。

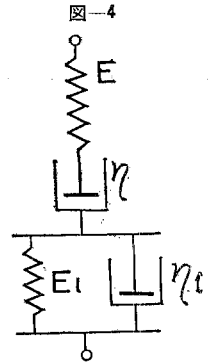
今図-4 のように Maxwell-Kelvin body に本実験に採用したとき

$$\sigma = a + b \sin \omega t \dots\dots (3)$$

ここに

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

式(3)の形の応力が作用するとすれば、振動部分の応力とひずみの比、すなわち E_d は次のように計算される。



として与えられるものとし、平均的な η の値を求めものとする。ただし、この場合の t は 1 万回周期的圧縮荷重を作用した全時間とする。(6)式を用いて E, E_1, η_1 を求めるのに表-6 の回帰線の式①における $T=0.60 \text{ sec}, 0.31 \text{ sec}, 0.18 \text{ sec}$ に対する E_d の 3 つの値を用いるものとし、(7)式を用いて η を求めるのに各試験ごとに計算したものの平均値をとるものとする。表-7 はこの結果を示したものである。これらの数値はほぼ(5)の条件を満足しており、周波数によるコンクリートの動的弾性率の変化と、近似的な残留ひずみに関する模型的説明を与えるものである。ここに得られたような粘弾性常数

表-7 Calculated Visco-elastic Constants.

Test No.	1(1:3:5 Concrete)	2(1:3 Mortar)
E (kg/cm ²)	31.95×10^4	29.09×10^4
η (kg/cm ² ·sec)	2.9×10^9	2.1×10^9
E_1 (kg/cm ²)	123.50×10^4	85.18×10^4
η_1 (kg/cm ² ·sec)	6.29×10^4	4.37×10^4

をコンクリート構造物の振動解析に使用すれば従来一般に行なわれている弾性振動の取り扱いをいちじるしく前進せしめることができるであろう。

5. 結 論

以上述べたところを要約すれば次のようである。

(1) コンクリートに周期的応力が作用すると、その粘弾性に原因して応力周期が小さいほど、動的弾性率が大きくなる。この間の関係は(1)式により表現される。このような性質を説明するためのモデルは近似的に Maxwell-Kelvin body とすることができる。

コンクリートや岩石について観察される、音速から求めた弾性率と静的弾性率との間の差異をここに述べた粘弾性的な解釈で説明することができるであろう。またコンクリート構造物の振動問題の解析は粘弾性体の振動として取り扱うのがよいと考えられる。

(2) コンクリートの疲労に関しては最終の疲労破壊までの実験は行なわなかったが、1万回の荷重くり返しおよびその後の静的破壊の観察から次の諸点が推察され

る。一軸的な荷重に対して一行程の圧縮破壊におけるひずみ能力とくり返し圧縮荷重を加えたのちの静的圧縮破壊におけるひずみ能力の間には差はなく(2)式が成立する。またくり返し荷重を加えると荷重の大きさとその作用時間によって定まる残留ひずみが生ずる。すなわち荷重がくり返されるとひずみが累積されてついにひずみ能力に達し疲労破壊が生ずる。応力振巾が同一でも応力周期が大きいと残留ひずみは大となり早く破壊に近づくことになる。すなわち応力振巾とくり返し回数のほかに荷重周期がコンクリートの疲労を支配する主要な要素であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 畑野 正：地震荷重を対象としたコンクリートの動的圧縮変形ならびに破壊，土木学会論文集第 67 号
- 2) 畑野 正：衝撃引張荷重によるコンクリートの挙動，土木学会論文集第 73 号
- 3) 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，土木学会論文集第 73 号

(原稿取付：1962. 3. 17)

DYNAMICAL BEHAVIORS OF CONCRETE UNDER PERIODICAL COMPRESSIVE LOAD.

By Dr. Eng., Tadashi Hatano, C.E. Member

1. As a study for knowing the dynamical properties as materials of concrete, the writer has referred previously to the observation made for the case of applying one stroke of impulsive compressive load or tensile load on the specimen.

However it becomes necessary to know the behaviors of concrete under the condition periodic load is applied for the purpose of treating the problem of vibration and dynamic fatigue of the concrete structure.

Although there are many tests reported hertofore on concrete resorting to repeated load, there is not at all that refers to the fundamental problem of dynamics of material such as the variation of modulus of elasticity due to the change of stress period, and the treatment of fatigue strength was in majority restricted to the relation between stress amplitude and numbers of stress cycle endured. The relation between fatigue strength and frequency of load and the explanation of decrease of strength due to fatigue from stand point of theory of failure are the problem utterly unknown.

But to discuss these problems in general requires a great deal of tests. Therefore at first the writer wishes to take up the problem of the variation of dynamic modulus of elasticity of concrete due to the change of stress period as the main subject and conduct the explanation based on the theory of visco-elasticity. And as to fatigue, by obtaining the residual strain, static strength of failure after applying the compressive load of the various frequencies for a certain number of repeated times, the writer conceives to refer only to the performance of the presumption from these results.

2. For the tests, the pulsator coupled to Amsler test machine was used. It's number of rotation can be changed in 5 stages by the pole change motor. And periodical compressive load of an optional amplitude at 5 kinds of period such as 0.60, 0.46, 0.31, 0.235, 0.18 sec. can

be produced.

The strain of concrete was measured by π gauges which were pasted with S.R. gauges, and the stress was measured by the pressure meter resorting to S.R. gauge. The stress and strain were recorded simultaneously by the electro-magnetic oscillograph.

The test was performed on respectively one kind of concrete and mortar, and each kind was tested on 22 pieces.

2 pieces : Statical test, 10 pieces : dynamical test in low stress amplitude (40-150 kg/cm²), 10 pieces : dynamical test in high stress amplitude (50-200 kg/cm²).

The record of the dynamical test was obtained in 7 stages, i.e. A stage which is from the time the load begins to be applied until the pre-determined amplitude is obtained, B stage which is directly after the pre-determined amplitude is obtained, C stage which is the result at the time the periodical load at 1,000 times is sustained, D stage which is the result at the time the periodical load at 5,000 times is sustained, E stage which is the result at the time the periodical load at 10,000 times is sustained, F stage which is at the release of load right after F stage, and G stage which is the final stage of statical failure performed after elapsing few minutes upon completion of F stage.

3. The relation between the stress and strain at respective B, C, D, E stage is almost linear not only for the case of low stress amplitude but also for high stress amplitude which is obtained by applying the stress that increases the strain up to about one half of the failure strain. Now defining this gradient as dynamic modulus of elasticity E_d , its value of the identical specimen indicates a constant value almost without variation during repetition of 10,000 times under constant period. Also absolute value of strain can be observed to increase as

number of repetition times increases.

Now the strain at starting point of G stage will be defined residual strain ϵ_r .

At G stage, stress strain curve starts from zero stress and strain ϵ_r , and slightly upward concave shape is indicated within small range of stress but immediately becomes straight and proceeds at this straight line condition in majority. Upon reaching near the failure strain upward convex shape is produced. Now the gradient of this straight line is defined as static modulus of elasticity E_s .

The stress strain curve of upward convex shape is such that after indicating max. stress, i.e. static strength of failure σ_u , the strain at the stress condition smaller than the max. stress increases and finally reaches the condition of collapse. Now the total strain from the point zero value of strain before beginning A stage up to the strain value at the static failure strength σ_u i.e. including ϵ_r will be defined as compressibility ϵ_c .

4. From those test results, important properties can be revealed concerning the dynamic behaviors of concrete under periodical compressive load.

Concerning E_d , clear variation is shown in variation of stress period. Between E_d and stress period T , the establishment of the following relation can be concluded.

$$1/E_d = C + D \ln T$$

The residual strain ϵ_r after applying repeated load of 10,000 times becomes larger as T becomes larger.

The static modulus E_s after applying the 10,000 times load indicated nearly same value.

The total strain capacity ϵ_c was nearly same to the compressibility in the case producing the failure by applying one stroke of statical load

from beginning.

As a consequence, regardless of the presence of the repeated load next relation can be established.

$$\epsilon_c = \text{Const.}$$

Concerning the static strength σ_u after repetition of 10,000 times load of constant stress amplitude, it can be conceived that σ_u becomes smaller as the stress period becomes larger.

Although test reaching the stage of fatigue failure was not performed this time, a new conception concerning the fatigue of concrete can be presumed.

That is, the repetition times endured are greatly influenced by the stress period. In other words, the conception should be made that the phenomena of the fatigue of concrete is determined by the elements presented up to the stage of failure strain and the presumption can be made that the product of the repeated number of times and stress period as well as the magnitude of the stress are the essential elements.

Lastly the writer computed the visco-elastic constants of concrete by using test results. The history of strain subjected to the periodical load as of this time is complicated and to assume the model sufficiently explains entire history is very difficult.

Therefore writer made attempts to obtain the visco-elastic constants conceiving Maxwell-Kelvin body setting the variation of dynamic modulus E_d due to stress period as main object of explanation and assuming that the residual strain ϵ_r is proportionate with the product of time and load.

If using the obtained constants for the vibration analysis of concrete structure, the writer feels treatment of elastic vibration conducted conventionally can be advanced conspicuously.