

コンクリートの静的圧縮変形，破壊に対する時間効果

正 員 畑 野 正*

TIME EFFECT ON THE DEFORMATION AND FAILURE OF CONCRETE UNDER STATICAL COMPRESSIVE LOAD

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

Synopsis: By applying statical compression of various loading velocities on the concrete and mortar specimens such as the failure time is changed in several stages within the range of 20-8 000 sec., the writer has obtained the strength, the relations between stress and strain, compressibility etc. and checked the time effect on these results. As a result, the writer has found that (1) a linear relation exists between the strength and the natural logarithmic value of failure time, and the strength decreases as the failure time increases, (2) the elastic modulus decreases as the failure time increases indicating the viscosity to be large and (3) the compressibility i.e. the compressive strain at the time of presenting maximum stress was approximately constant for the failure time of such degree. From the results thus obtained, the visco-elastic constant as 3 elements model as well as the value for about 10^3 sec. retardation time was obtained. As a result, the writer was able to clarify the statical properties of concrete and mortar during the process of statical compression to a certain degree. Also if the so-called statical compressive strength is considered to be fixative, the aforementioned results indicate that there is the danger of committing a serious error.

要 旨 コンクリートおよびモルタルの供試体に，破壊時間が 20~8 000 sec の範囲内の数段階に変化する各種の荷重速度の静的圧縮を加え，強度，応力ひずみの関係，縮み能力等を求めてこれらに対する時間効果を調べた。この結果強度と破壊時間の対数値との間に直線関係が成立し，破壊時間の大きなるほど強度は低下し，弾性率は破壊時間の小なるほど増大して粘性の大きい事を示し，最大応力時の圧縮ひずみ，すなわち縮み能力はこの程度の破壊時間ではほぼ一定であることなどが明らかにされた。これから三要素模型としての粘弾性常数を求め，遅延時間として 10^3 sec 程度の値が得られ，静的圧縮過程におけるコンクリート，モルタルの力学的性質の一端を説明することができた。また，いわゆる静的圧縮強度を固定的なものと考えると以上の結果から，大きな誤を犯す危険のあることを示した。

1. 緒 言

コンクリートの静的圧縮試験を行なうとき，コンクリートの示す応答がそのひずみ速度ないし荷重速度あるいはまた破壊に至るまでの時間すなわち破壊時間によって異なるであろうことは，前論文¹⁾における動的圧縮試験によって予想される。著者は引続いて従来行なわれている静的圧縮試験の荷重速度を中心として，その前後数段階に変化した荷重速度における実験を行ない静的圧縮変形ならびに破壊に対する時間効果を明らかにした。

2. 実験の方法

圧縮試験は 100 t アムスラー耐圧試験機に自動定速荷重装置を付して行なわれた。本装置は荷重増加の送圧回路をなすもので，定速荷重装置ラムに加わる圧力とスプリングの張力とが平衡させられる。そしてスプリングの一端が一定速度で引きあげられることによってその張力が増加せられ，油圧が自動的に一定速度で増大される。0 から 100 t まで荷重が増大する時間が，ギヤーの切りかえにより，100, 300, 900, 2 700, 8 100, 24 300 sec の 6 段階に変化するよう，本定速荷重装置は設計された。圧力とひずみの測定は前論文¹⁾と同じく非接着型ストレンゲージを用いた特殊鋼円柱型 100 t 圧力計および接着型ストレンゲージをはった燐青銅の π ゲージによって行なわれ，応力，ひずみが電磁オシシログラフに同時記録された。 π ゲージは上下の加圧板に鉛直方向に 4 個固定して用いられ，ひずみとしてはそれらの平均値を採用した。 π ゲージ 4 個は直径 2 方向に 2 組使用された。供試体に用いられたセメント，骨材の性質は表-1, 2 に示される。

実験は表-3 に示す 4 種類について行なわれた。供試体は直径 10 cm，高さ 20 cm の円柱型で実験直前まで 20°C の水中に養生された。

*工学博士 電力中央研究所 技術研究所 構造研究室

表-1 Properties of the Cement

1)	Ig. loss	Ins.R.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
	0.75	0.50	23.22	4.14	3.86	64.36	0.90	1.70
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF				
	47.1	31.1	4.5	11.7				
2)	sp.gr.	fineness (Blaine)						
	3.20	3 160 cm ² /gr						
3)	Strength of Standard Mortar (kg/cm ²)							
	flow	3 day		7 day		28 day		
	246 mm	119		167		364		

表-2 Properties of the aggregates

Sagami River natural Agg.	sp. gr.	max size	Gradation	
	2.75	25 mm	Gravel 25~20 mm—25% 20~15 mm—25% 15~10 mm—25% 10~ 5 mm—25%	Sand 5~2.5 mm—15% 2.5~1.2 mm—15% 1.2~0.6 mm—25% 0.6~0.3 mm—25% 0.3~0.15 mm—15% 0.15 mm~ — 5%

表-3 Tested Concrete & Mortar

Test No.	Age in Weeks	Mix Proportion					Slump (cm)	Entrained Air (%)
		Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	w/c (%)		
1	4	371	137	684	1 265	37	0.6	2.5
2	4	300	150	710	1 264	50	9.5	1.4
3	4	220	143	781	1 276	65	3.0	1.8
4	4	511	256	1 533	—	50	flow 16.6	5.9

3. 実験の結果

図-1 は試験記録の二，三の例を示したものである。自動定荷重装置が運転しはじめられると，最初のしばらくのうちは荷重速度は小さいがやがて荷重速度は一定となり，破壊に到るまでほとんど変化のないことが図から知られる。ひずみ速度は徐々に増大し，破壊付近においてさらに急激に増大している。荷重が最大となってやや急激なひずみの増大が生じたのちに，圧力計の読みは最大値よりわずかに低下しながらも，供試体はなお荷重を支えるのが見られ，ひずみはさらに急激に増大してついに供試体は破断するに到る。このとき圧力計の読みはもとの位置に復し，ひずみ計の読みは瞬時に増大してスケールアウトする。

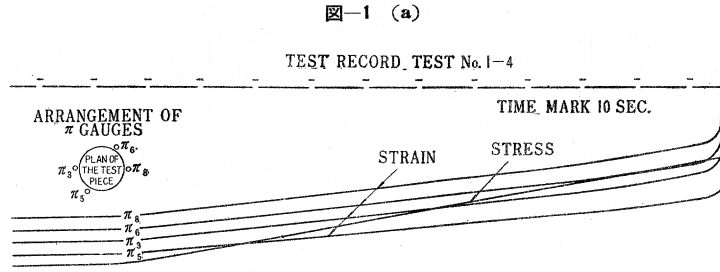


図-1 (b)

図-1 (c)

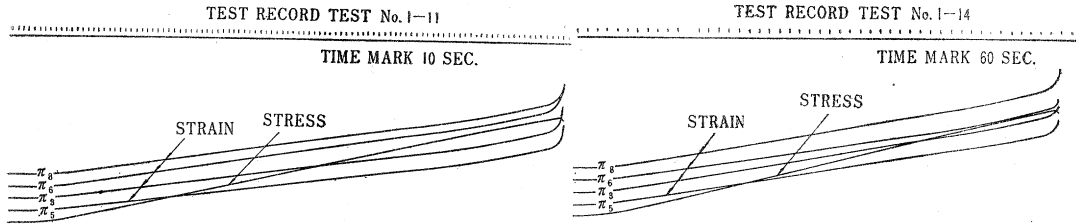


図-2 に試験記録から求めた応力ひずみ曲線の代表的なものを示してある。最大応力すなわち破壊強度に達した以後なお供試体が破断しないで、荷重にたえる間の応力ひずみ関係を点線で示してある。破壊時間の異なるほど応力ひずみ曲線の勾配は小となりかつ貧配合になるほど上に凸の形状をていする。

図-3 は破壊時間 t_u と破壊強度 σ_u および破壊強度のときのひずみすなわち縮み能力 (Compressibility) ϵ_c の関係を示したものである。ここに t_u はその自然対数値をとって表現してある。これらの図から σ_u と $\ln t_u$ はほぼ直線関係にあり、 ϵ_c は t_u に関せずほぼ一定と見なし得るであろうことがわかる。表-4 には σ_u と ϵ_c をこれらの関係で表現したときの回帰線ならびに標準偏差が示してある。 σ_u の偏差係数はコンクリートで 4.9~3.5%, モルタルで 1.8% で、コンクリートの場合貧配合になるほど小さくなっている。 ϵ_c の偏差係数はコンクリートの場合 7.6~4.0%, モルタルの場合 3.2% でコンクリートの場合富配合になるほど小さくなっている。

応力ひずみ曲線における ϵ_c の 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 倍のおおの値の点における Secant Modulus E_s の値は図-4 に示すとおりである。 t_u との関係 $E_s = be^{-c \ln t_u}$ と想定して得られた回帰線および標準偏差を表-5 に示してある。 E_s の偏差係数はコンクリートの場合 6.2~2.7%, モルタルの場合 4.0~2.8% で、 ϵ_c に対する値より 0.25 ϵ_c に対する値に到るにつれて次第に小さくなっている。

表-4 Strength & Compressibility

Test No.	Relation between strength & failure time (kg/cm ² , sec)	Standard deviation S_y (kg/cm ²)	Compressibility $\times 10^{-4}$	Standard deviation $S_y \times 10^{-4}$
1	$\sigma_u = -15.4 \ln t_u + 576$	23.5	26.3	1.05
2	$\sigma_u = -14.5 \ln t_u + 430$	15.8	23.2	1.30
3	$\sigma_u = -8.0 \ln t_u + 237$	6.75	19.2	1.47
4	$\sigma_u = -13.4 \ln t_u + 446$	6.63	34.6	1.11

4. 考 察

静的圧縮破壊強度 σ_u は 図-3, 表-4 から、破壊時間 t_u と次の関係にあると一般的にいうことができる。

$$\sigma_u = -d + f \ln t_u \dots \dots \dots (1)$$

$$20 \text{ sec} < t_u < 8000 \text{ sec}$$

図-2 (a)

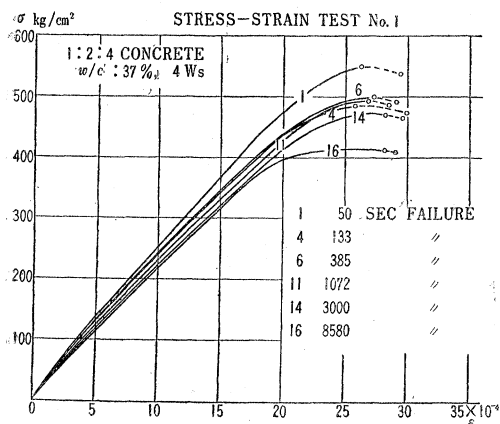


図-2 (b)

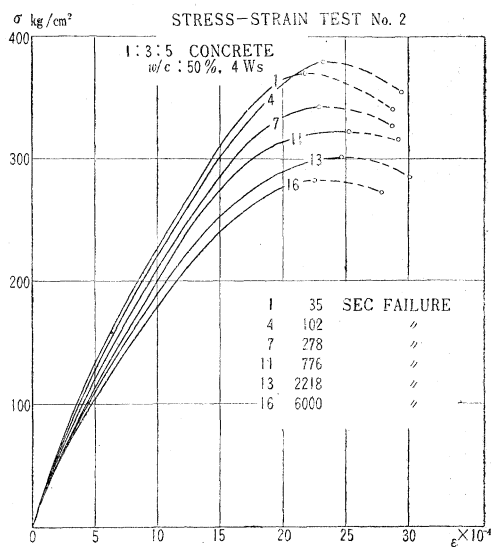


図-2 (c)

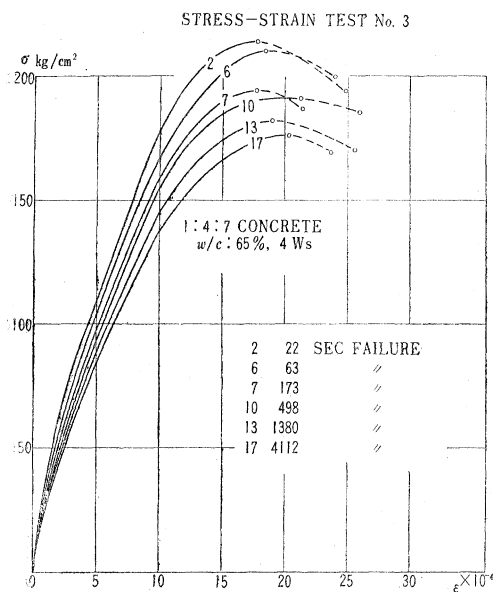
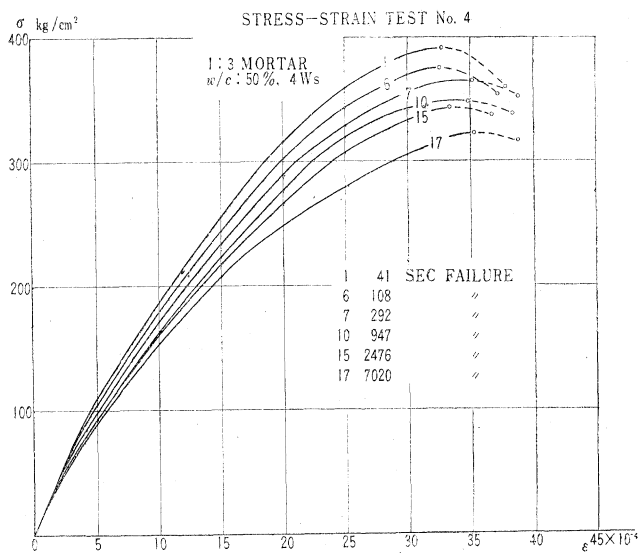


図-2 (d)



本実験では、100 sec 破壊における強度を1としたとき、8000 sec 破壊における強度はコンクリートにおいて0.86~0.82、モルタルにおいて0.85となった。コンクリートの場合配合の方が強度の低下率が大きい。前論文における0.03 sec~100 secの破壊時間についての強度低下率と比較すると、材料が少しく異なり、100 sec 破壊における強度の絶対値に相当開きがあるから正確に比較することは困難であるが、 $\ln t_u$ あたりの強度低下率は破壊時間が大きいほど減少するであろうことが推定される。

縮み能力 ϵ_c については、破壊時間に関係なく次の関係が動的破壊の場合と同様に成立するといつてよい。

$$\epsilon_c = \text{Constant} \dots \dots \dots (2)$$

$$20 \text{ sec} < t_u < 8000 \text{ sec}$$

図-3 (a)

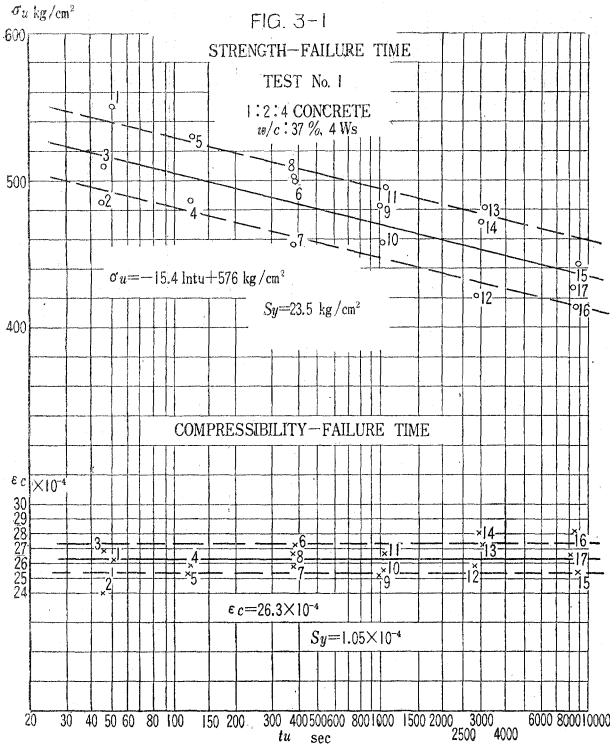


図-3 (b)

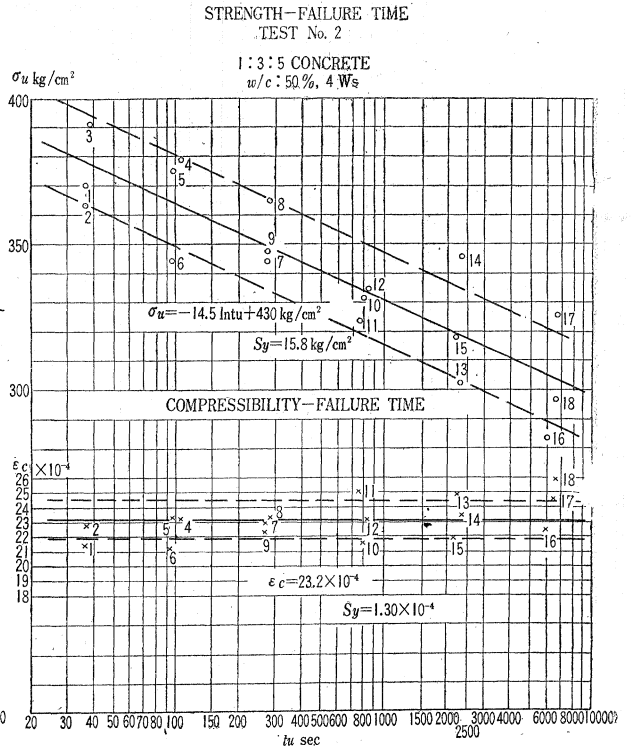


図-3 (c)

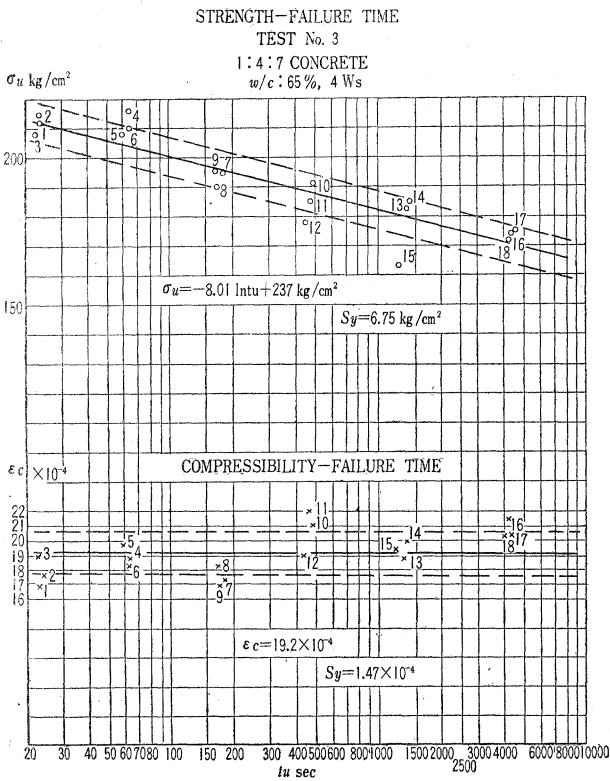


図-3 (d)

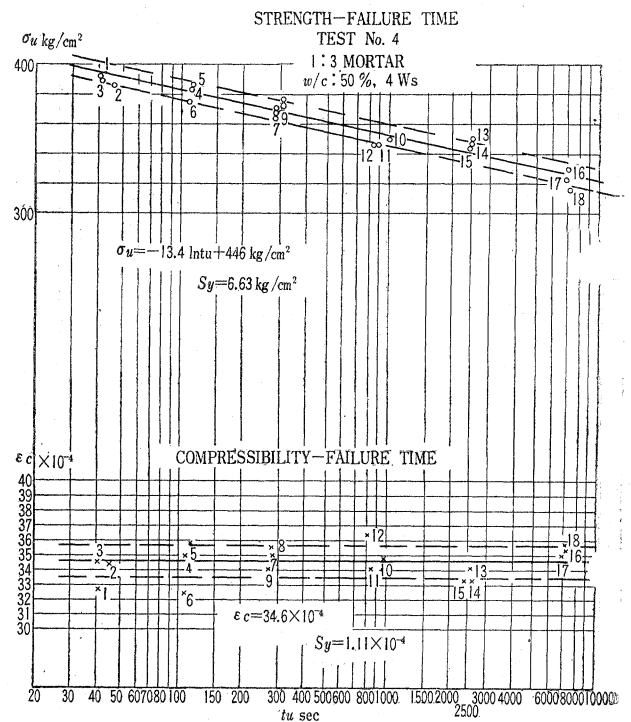


図-4 (a)

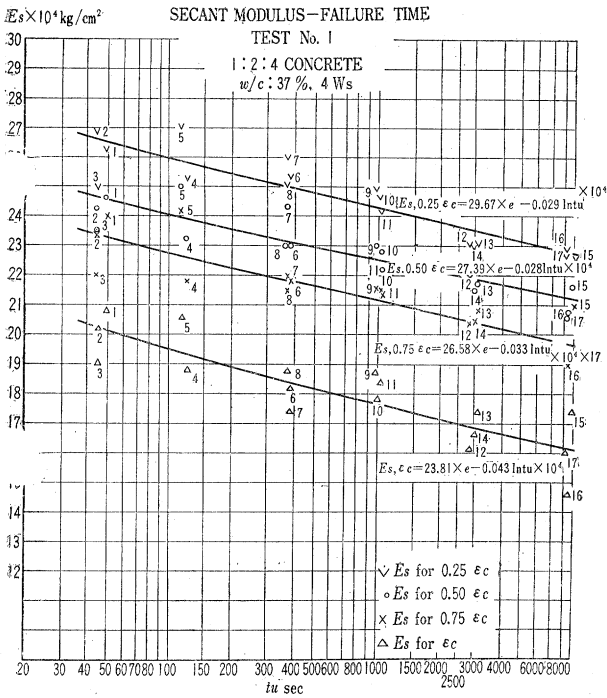


図-4 (b)

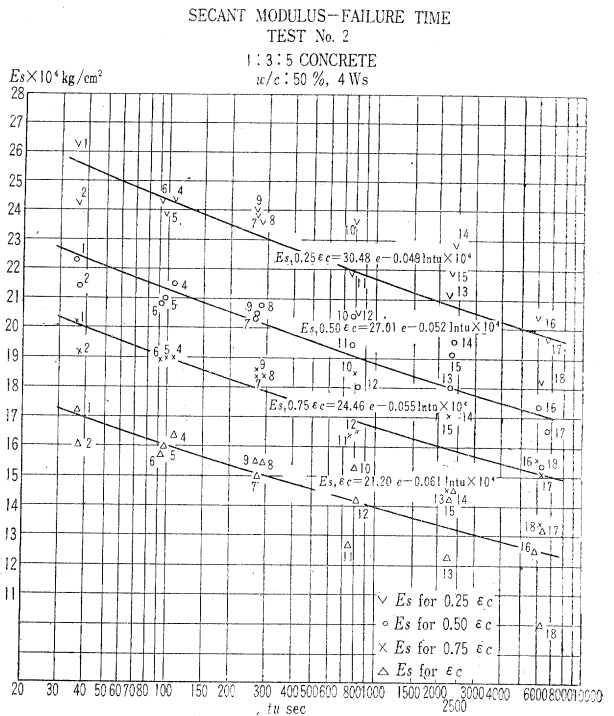


図-4 (c)

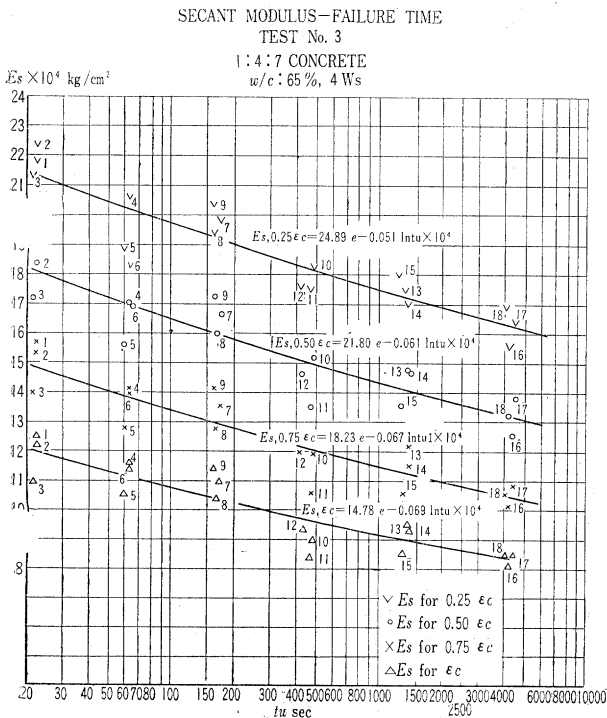


図-4 (d)

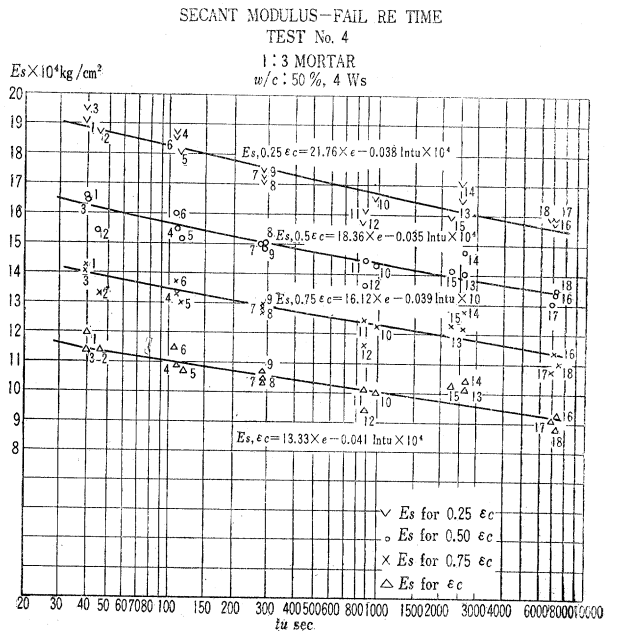


表-5 Secant Modulus

(1)

Test No.	Relation between Secant Modulus for 0.25 ϵ_c & failure time (kg/cm ² , sec) $\times 10^4$	Standard deviation (kg/cm ²) $\times 10^4$	Relation between Secant Modulus for 0.5 ϵ_c & failure time (kg/cm ² , sec) $\times 10^4$	Standard deviation (kg/cm ²) $\times 10^4$
1	$E_{S,0.25\epsilon_c} = 29.67 e^{-0.029 \ln t_u}$	0.66	$E_{S,0.5\epsilon_c} = 27.39 e^{-0.029 \ln t_u}$	0.60
2	$E_{S,0.25\epsilon_c} = 30.48 e^{-0.049 \ln t_u}$	1.14	$E_{S,0.5\epsilon_c} = 27.01 e^{-0.052 \ln t_u}$	0.89
3	$E_{S,0.25\epsilon_c} = 24.89 e^{-0.051 \ln t_u}$	0.83	$E_{S,0.5\epsilon_c} = 21.80 e^{-0.051 \ln t_u}$	0.82
4	$E_{S,0.25\epsilon_c} = 21.76 e^{-0.038 \ln t_u}$	0.48	$E_{S,0.5\epsilon_c} = 18.36 e^{-0.035 \ln t_u}$	0.41

(2)

Test No.	Relation between Secant Modulus for 0.75 ϵ_c & failure time (kg/cm ² , sec) $\times 10^4$	Standard deviation (kg/cm ²) $\times 10^4$	Relation between Secant Modulus for ϵ_c & failure time (kg/cm ² , sec) $\times 10^4$	Standard deviation (kg/cm ²) $\times 10^4$
1	$E_{S,0.75\epsilon_c} = 26.58 e^{-0.033 \ln t_u}$	0.72	$E_{S,\epsilon_c} = 23.81 e^{-0.043 \ln t_u}$	0.86
2	$E_{S,0.75\epsilon_c} = 24.46 e^{-0.055 \ln t_u}$	0.89	$E_{S,\epsilon_c} = 21.20 e^{-0.061 \ln t_u}$	0.88
3	$E_{S,0.75\epsilon_c} = 18.23 e^{-0.067 \ln t_u}$	0.69	$E_{S,\epsilon_c} = 14.78 e^{-0.069 \ln t_u}$	0.62
4	$E_{S,0.75\epsilon_c} = 16.12 e^{-0.038 \ln t_u}$	0.43	$E_{S,\epsilon_c} = 13.33 e^{-0.041 \ln t_u}$	0.40

本実験の場合、縮み能力はコンクリートにおいて $19.2 \sim 26.3 \times 10^{-4}$ モルタルにおいて 34.6×10^{-4} の値が得られた。またこれらの値は配合が富なるほど大きな値を示した。

静的圧縮強度ならびに縮み能力に関するこれらの結果から、コンクリート、モルタルの性質を規定する一つの尺度として静的圧縮強度を使用すること、コンクリート構造物の安全度を推定する尺度として静的圧縮強度を使用すること等が厳密な意味では適当でないことがわかる。動的、静的圧縮破壊を通じてむしろ縮み能力の方が一定の規準を与えるように見えるが、著者はさらに広範な実験的検討の上、一般的な結論を導きたいと考える。静的圧縮強度を便宜的に上述の意味における尺度として使用する場合でも、破壊時間をさらに増大することによって強度がいかなる限度まで低下するか、この場合圧縮ひずみはどのようになるかを調べることによって、いわゆる静的圧縮強度なるものの意味する限界を知らなければ、誤をおかすもととなるであろう。

応力とひずみの関係は Secant Modulus E_S により次のように表わすことができるであろう。

$$E_S = be^{-e \ln t_u} \dots \dots \dots (3)$$

$$20 \text{ sec} < t_u < 8000 \text{ sec}$$

本実験では 100 sec 破壊における E_S の値を 1 としたとき、8000 sec 破壊ではコンクリートにおいて、0.89 ~ 0.74、モルタルにおいて 0.85 ~ 0.84 となった。コンクリートの場合、貧配合の方が E_S の低下率が大きく、また 0.25 ϵ_c に対する E_S より、 ϵ_c に対する E_S になるにつれて低下率が大きくなっている。

以上の実験結果を用いて、レオロジー的解析を行なって見る。いま単純に Kelvin 模型にスプリングの直結した三要素模型を考えて、本実験のように

$$\sigma = Kt \dots \dots \dots (4)$$

なる圧縮応力を加えると、生ずるひずみ ϵ は次のように与えられる。

$$\epsilon = K \left(\frac{t}{E_1} - \frac{\eta_1}{E_1^2} + \frac{\eta_1}{E_1^2} e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \right) + K \frac{t}{E} \dots \dots \dots (5)$$

ここに σ : stress (kg/cm²), K : constant (kg/cm²·1/sec), t : time (sec), ϵ : strain, E_1 : coeff of elasticity of kelvin body (kg/cm²), η_1 : coeff of viscosity of kelvin body (kg/cm²·sec), E : coeff of elasticity of the spring connected to kelvin body (kg/cm²)

ϵ_c , σ_u , E_S の回帰線から $t_u = 100, 400, 1000, 3000, 8000 \text{ sec}$ のおのおの場合の値をそれぞれ求め、 σ_u と t_u とから (4) によって K を求める。次にそれぞれの場合の $\epsilon = 0.25 \epsilon_c, 0.50 \epsilon_c, 0.75 \epsilon_c, \epsilon_c$ に対する応

力 σ の値を E_s から求め、(4) から各 σ に達する時間 t を求める。これら ϵ および t の値を (5) に適用して、曲線のあてはめを行ない粘弾性常数 E_1, η_1, E を求めるものとする。

表-6 はこれらの計算結果であって、100~8000 sec 破壊程度の荷重速度におけるコンクリート、モルタルの力学的挙動の説明となる。またコンクリート構造物の力学において弾性率の代わりに粘弾性常数を用いて解析する

表-6

(1) $\epsilon=0.25 \epsilon_c, 0.50 \epsilon_c, 0.75 \epsilon_c, t_u=100 \text{ sec}, 400 \text{ sec}, 1000 \text{ sec}, 3000 \text{ sec}, 8000 \text{ sec}$
の 15 点に曲線のあてはめを行なった場合

Test No.	1	2	3	4
$E \text{ kg/cm}^2$	22.9×10^4	19.7×10^4	14.5×10^4	14.3×10^4
$E_1 \text{ kg/cm}^2$	58.1×10^4	26.3×10^4	15.8×10^4	25.1×10^4
$\eta_1 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$	2.727×10^9	1.054×10^9	0.823×10^9	1.410×10^9
retardation time $\eta_1/E_1 \text{ sec}$	4.68×10^3	3.92×10^3	5.19×10^3	5.61×10^3
coeff. of variation %	4.7	9.4	15.1	10.7

(2) $\epsilon=0.25 \epsilon_c, t_u=100 \text{ sec}, 400 \text{ sec}, 1000 \text{ sec}, 8000 \text{ sec}$ の 5 点に曲線のあてはめを行なった場合

Test No.	1	2	3	4
$E \text{ kg/cm}^2$	25.8×10^4	23.9×10^4	19.3×10^4	17.8×10^4
$E_1 \text{ kg/cm}^2$	65.6×10^4	37.4×10^4	30.9×10^4	40.5×10^4
$\eta_1 \text{ kg/cm}^2 \text{ sec}$	0.889×10^9	0.579×10^9	0.578×10^9	0.654×10^9
retardation time $\eta_1/E_1 \text{ sec}$	1.36×10^3	1.55×10^3	1.87×10^3	1.62×10^3
coeff. of variation %	4.3	7.1	5.6	4.9

ことにより時間効果をふくめた応力ひずみの状況を知ることができる。同表においてひずみが縮み能力 ϵ_c の 7 割 5 分に到る大きな応力までの挙動を説明する常数と、2 割 5 分までの比較的小応力に到るまでの両者を比較してある。同表に示す常数により計算したひずみ値と、曲線のあてはめ計算に用いたひずみ値との差から求めた偏差係数の値をも付記した。これらから破壊点付近を除いたほとんど大部分の静的挙動が、10% 程度の偏差をもって説明できることがわかる。さらに破壊点までふくめて常数を求めたときの偏差係数は 15% 程度となった。

なお、遅延時間としては前論文¹⁾の地震荷重のごとき荷重速度の場合 10^1 sec 程度、本論文のごとき静荷重試験の場合 10^3 sec 程度、また長期載荷によるクリープ試験では一般に $10^6 \sim 10^7 \text{ sec}$ 程度と考えてよいであろうから、コンクリートの力学的挙動を説明する統一的模型は相当複雑なものを考えねばならぬことがわかる。

6. 結 論

コンクリート及びモルタルの供試体に静的圧縮荷重を加えてその変形と破壊の状況から、次の関係が得られた。破壊時間大なるほど静的圧縮強度は低下し、それらの間にほぼ (1) の関係が成立する。縮み能力は本実験のごとき破壊時間内では、破壊時間に関係なくほぼ一定と見なされ、(2) の関係が成立する。

弾性率は破壊時間大となるにつれて減少し、ほぼ (3) の関係が成立する。これらの結果から単純な三要素模型としての粘弾性常数が求められ静的圧縮過程における力学的応答をある程度説明することができる。

通常の静的圧縮試験によって得られるいわゆる圧縮強度をコンクリートの性質を代表する尺度として、あるいはまたこれら構造物の安全度の尺度として用いるには、それが便宜的なものであり、上述の関係から導かれるいわゆる強度なるものの意味する限度についての誤まりない判断をとまわなければならないという事に注意しなければならない。

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