

衝撃引張荷重によるコンクリートの挙動

正員 畑 野 正*

DYNAMICAL BEHAVIOURS OF CONCRETE UNDER IMPULSIVE TENSILE LOAD

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

Synopsis : The writer made attempts to clarify the dynamical behaviors of concrete and mortar under impulsive tensile load imposed on the specimen by one stroke tensile load and comparing these results with those of ordinary statical test. As a result, the writer has clarified that (1) linear relation can be established between the reciprocal of the strength of failure and the logarithmic value of the failure time, and the strength becomes larger, as the failure time becomes smaller, (2) the strain under the strength of failure, i.e. extensibility is constant irrespective of the failure time, and (3) the reciprocal of elastic modulus is in linear relation with the logarithmic value of the failure time and that the elastic modulus becomes larger, as the failure time becomes smaller.

Utilizing the foregoing results, the writer obtained the coefficient of elasticity and coefficient of viscosity as to a 3-element model which had a spring directly connected to Kelvin model and made attempts to explain the dynamical behaviors thereof. The result obtained is very similar to that of dynamical compression, and it explains that there is not much difference between the dynamical properties for compression and tension.

要旨 コンクリートおよびモルタルの供試体に一行程の衝撃的引張荷重を加え、通常の静的引張試験と比較して、その動的挙動を明らかにしようとした。この結果破壊強度の逆数値と破壊時間の対数値との間に直線関係が成立し、破壊時間の小なるほど強度は増大し、破壊強度のときのひずみ、すなわち伸び能力は破壊時間に関係なく一定となり、また弾性率の逆数値が破壊時間の対数値と直線関係にあって、破壊時間の小なるほど弾性率の増大することなどが明らかになった。これらの結果を用いて、Kelvin 模型にバネの直結した三要素模型としての弾性係数、粘性係数を求め、その動的挙動の説明を試みたが動的圧縮の場合にきわめて類似した結果を得た。

1. 緒 言

コンクリートの材料力学的な動的特性を追求する第一歩として、著者はコンクリート供試体に衝撃的な圧縮荷重を加えて、その変形とこれとともにうるさい破壊を調べ詳細に報告した¹⁾。圧縮荷重について、引張荷重に対する応答は、コンクリートの動的性質の重要な面の一つであるので、著者はコンクリート供試体に衝撃引張荷重を加えてその応答を観察し、これを通常の静的引張試験の場合と比較し、引張応力に対するコンクリートの一般的性質を求め、さらに簡単な模型を想定して粘・弾性常数を計算し、その動的性質を説明しようと試みた。

2. 実験の方法

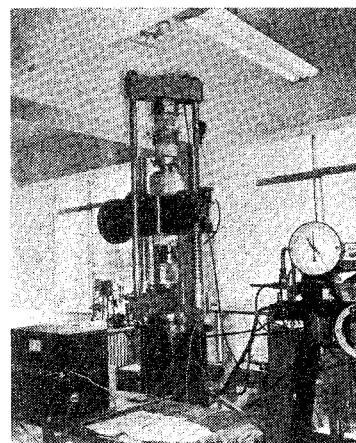
衝撃引張試験はすでに説明した高速圧縮試験機¹⁾に付

* 工学博士 電力中央研究所 技術研究所、構造研究室

属装置を付して行

なった(写真-1
および概要図)。す
なわち 100 t アム
スラー耐圧試験機
のラム上端に固定
した鉢に 2 本の長
い鋼棒をつけ、そ
の上端に固定した
鋼ブロック (up-
per head) に引張
応力計を介してコ
ンクリート供試体
の上端を接続し
た。供試体の下端
は耐圧試験機柱の途中に静止した耐圧鉢 (lower head)
に接続した。

写真-1



フライ、ホィールにより運転される油圧ポンプの圧油はラムの下部に入り、ラムは衝撃的に上昇し、供試体の上端は引張応力計を介して引張力をうける。圧油はカムの運動により一行程の送油のみで止る。

供試体は 15 cm 径、30 cm 長さの円柱の中央部 1/3 の部分を細くして、破断面が中央部に限定されるように製作した。その形は、概略図に示すとおりで、最小直径 11 cm である。供試体の中には上下各 4 本あて、錨型の鉄筋を埋め、これを介して引張荷重を作用せしめた。

伸びの測定は、供試体の周囲に固定された上下 2 個の鉄環の間隔の変化を、SR ゲージを使用して行なった。

鉄環はそれぞれ直径二方向合計4個のピボットをネジにより押しつけることによって供試体周囲に固定された。つぎにポリエスチル薄片を用いたSRゲージの上下端を予備引張りを加えた後にそれぞれ上下鉄環に固定した。上下鉄環のピボットの間隔は30mmで、この間の伸びを測定したことになる。SRゲージは直径方向に2個使用し、電橋の対辺として用いて、2カ所の伸びの和を記録した。

引張応力計は特殊鋼製中空円筒のものにSRゲージをはりつけたものである。その容量は約10tで $64\mu/t$ の感度をもつ。

荷重を作用させるとラムは上昇し鋼ブロックは引張応力計を通じて供試体を引張る。供試体は伸びを生じて上下鉄環の間隔は開き、この間の伸びは引張荷重と同時に電磁オシログラフに記録され

表-1 Properties of the Cement

1)			
Ig. Loss	Ins. R.	SiO ₂	Al ₂ O ₃
0.71	0.43	23.37	4.14
Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
3.86	64.11	0.97	1.83
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
44.7	33.3	4.4	11.7

2)	
sp. gr.	Finess (Blaine)
3.26	3 220 cm ² /g

Strength of Standard Mortar			
flow	3 day	7 day	28 day
233 mm	122 kg/cm ²	165 kg/cm ²	381 kg/cm ²

写真-2

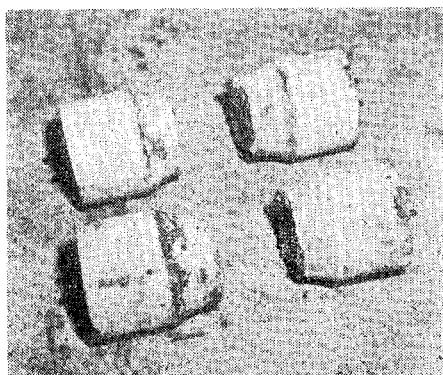


図-1 (a) Test Record

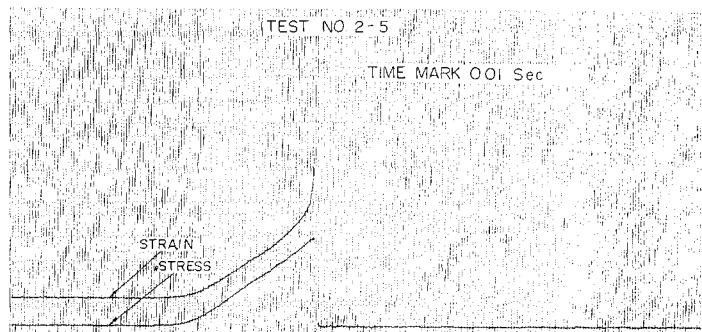


図-1 (b) Test Record

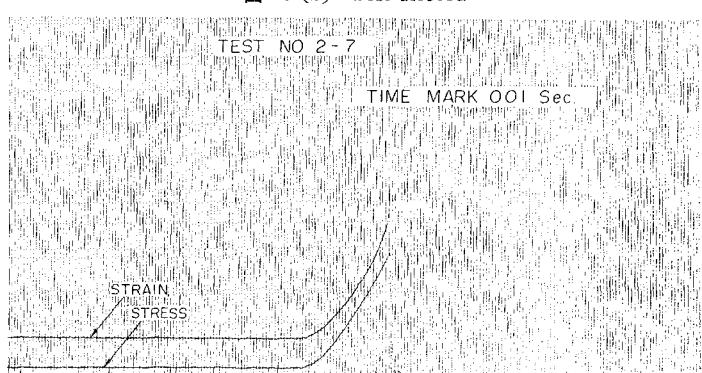
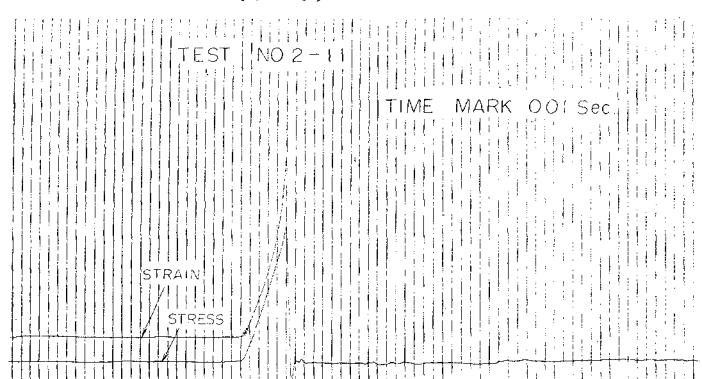


図-1 (c) Test Record



る。上下鉄環を固定するピボットの線の間で供試体が切断すると、引続いて全体で約2mmのラムの急上昇が起り、2本のポリエスチルゲージは中央から切断される。供試体に使用したセメントおよび骨材の性質は表

表-2 Properties of Aggregates

	sp. gr.	Max Size	Gradation	
			Grand	Sand
Sagami		mm 25~20	-25%	mm 5~2.5 -15%
River	2.75	mm 25	20~15 -25%	2.5~1.2 -15%
natural		mm 15~10	-25%	1.2~0.6 -25%
Aggregates		mm 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 Weeks	Mix proportion					Slump, cm	Entrapped air %
		Cement kg/m³	Water kg/m³	Sand kg/m³	Gravel kg/m³	w/c %		
1	4	371	137	684	1.265	37	0.4	1.8
2	4	300	150	710	1.264	50	10.0	1.3
3	4	220	143	781	1.276	65	2.1	1.8
4	4	511	256	1.533	—	50	flow 16.5	5.0

—1,2に示すとおりである。これらを用いて表-3に示す配合の4種のコンクリート モルタルを製作した。各種類の供試体はそれぞれ8個あて2回にわけて製作した。供試体は実験直前まで20°Cの水中に養生された。

3. 実験の結果

実験は各試験ごとに16個あて行なった。100 sec前後に破壊する通常の静的試験と、フライホイールの回転数を変化して、0.03~0.6 secに破壊する動的試験の両者である。

破壊の状況は写真-2に示すとくで、伸びを測定した区間に正しく破断したものは16個のうち11ないし14個であった。破断面が伸びの測定区間外に生じた場合はその記録を棄却した。

貧配合の場合粗骨材とモルタルのはく離が、全破断面に見られたが、富配合の場合は粗骨材が引張破断されているのが多く見られた。図-1は試験記録の二、三の例である。応力は初期にやや緩慢に増大をはじめ、後は直線的に増大する。破壊はその増大過程で突然おこって、応力記録は元にもどる。一方ひずみは破壊近くに至って急速にその速度を増大し、破壊とともにラムの急激な上昇によって記録が失なわれる。このときポリエスチルゲージの切断が生じているのである。

これらの試験記録から応力-ひずみ曲線を求め、その代表的な数曲線を各試験ごとに表わしたもののが図-2である。以下すべて応力は応力計の読みから得られた荷重を、最小直径11 cmの断面で割った値をとり、ひずみはSRゲージの読みから得られた値をピボット間隔30 mmで割った値をとっている。静的実験においては、応力が最大になった瞬間になお破断は生ぜず、その後やや応力が小さくなつた状態でさらに大きな伸びを生じ終に破断するに至る。この状態の応力-ひずみ関係を点線で示しておいた。破壊時間の差による応力-ひずみ曲線の勾配の差は、圧縮の場合と同様いちじるしいが特に破壊時間の大きいほど破壊直前の伸びはいちじるしく、静的破壊においては応力-ひずみ曲線がほとんど水平に近くなつてから破断している。

いま破壊時間 t_u と破壊強度 σ_u および最大応力すなわち破壊強度の時のひずみ ϵ_e (これを伸び能力 Extensibility と定義する)との関係を図に示すと図-3となる。ここに t_u はその自然対数値をもって表わし、 σ_u は

図-2 (a) Stress-Strain

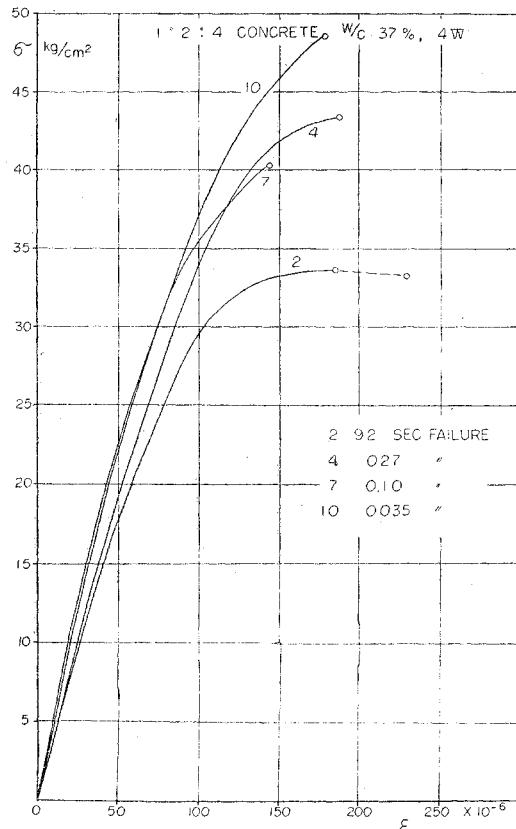


図-2 (b) Stress-Strain

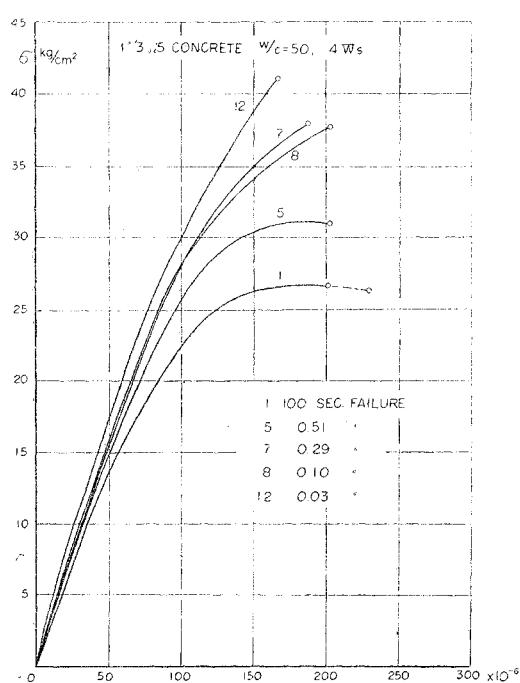


図-2 (c) Stress-Strain

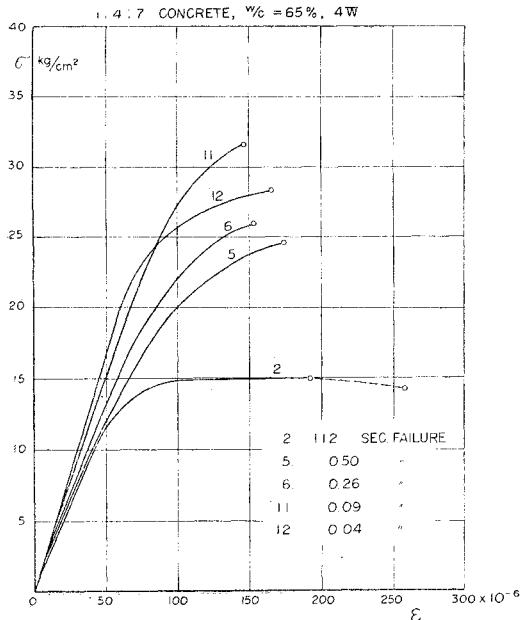
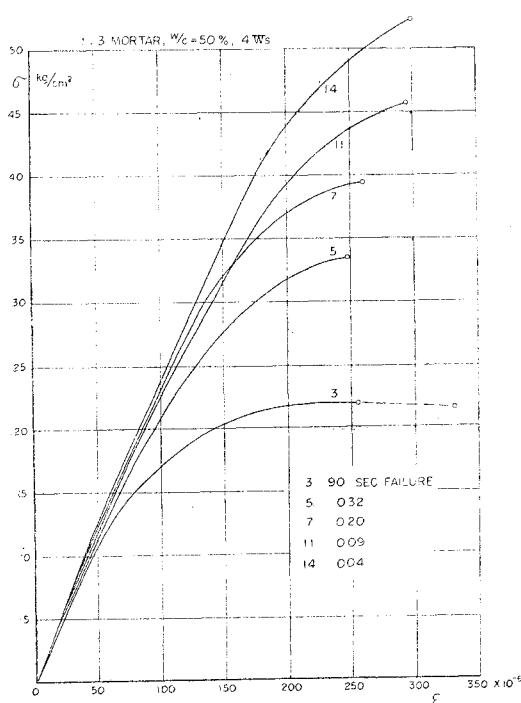


図-2 (d) Stress-Strain



その逆数値 $1/\sigma_u$ をもって表わしてある。これから圧縮破壊の場合と同様 $1/\sigma_u$ と $\ln t_u$ の間にほぼ直線関係が成立し、 ε_e は t_u に関せずほぼ一定であることがわかる。 σ_u と ε_e をこの関係で整理した場合の回帰線の値と標準偏差を表-4 に示す。 $1/\sigma_u$ の偏差係数は 7~12%， ε_e の偏差係数は 9~

図-3 (a) Strength-Failure Time

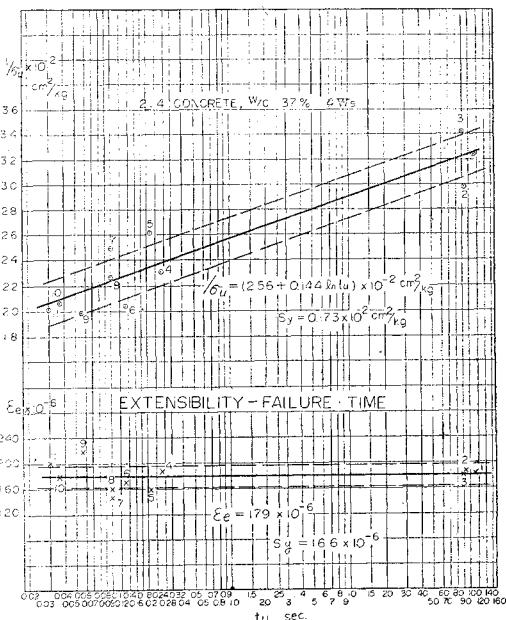
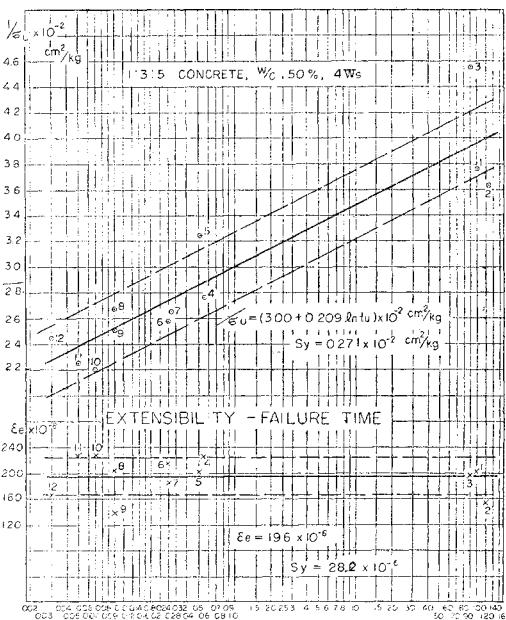


図-3 (b) Strength-Failure Time



14% である。なお供試体と同一種類のコンクリートで 10 cm 直径、20 cm 長の圧縮供試体をつくり、破壊時間約 100 sec の静的圧縮試験を行なって、縮み能力および

表-4 Strength & Extensibility

Test No.	Relation between strength failure time, $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{sec}$	Standard derivation cm^2/kg	Extensi-bility	Standard deviation
1	$1/\sigma_u = (2.56 + 0.144 \ln t_u) \times 10^{-2}$	0.173×10^{-2}	179×10^{-6}	16.6×10^{-6}
2	$1/\sigma_u = (3.00 + 0.209 \ln t_u) \times 10^{-2}$	0.271×10^{-2}	196×10^{-6}	28.2×10^{-6}
3	$1/\sigma_u = (4.11 + 0.281 \ln t_u) \times 10^{-2}$	0.488×10^{-2}	165×10^{-6}	16.8×10^{-6}
4	$1/\sigma_u = (3.18 + 0.248 \ln t_u) \times 10^{-2}$	0.273×10^{-2}	262×10^{-6}	25.1×10^{-6}

図-3(c) Strength-Failure Time

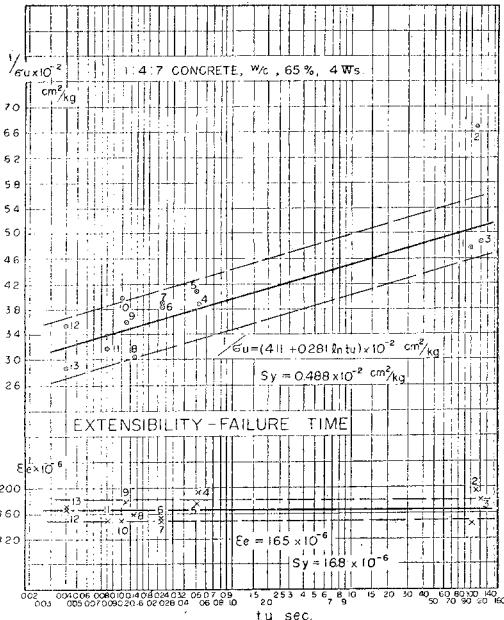


表-5 Compressibility & Compressive Strength

Test No.	Compressibility ϵ_0	ϵ_0/ϵ_e	Compressive strength at $t_u=100$ sec	Ratio between compressive & tensile strength at $t_u=100$ sec
1	29.5×10^{-4}	16.5	530 kg/cm^2	17.1
2	24.6×10^{-4}	12.6	350 kg/cm^2	13.8
3	20.0×10^{-4}	12.1	208 kg/cm^2	10.6
4	33.4×10^{-4}	12.8	390 kg/cm^2	16.7

100 sec 強度を求めたものを表-5 に示しておく。

次に応力-ひずみ曲線において ϵ_e の 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 倍の各点における Secant Modulus E_s を破壊時間 t_u との関連で示したもののが図-4 である。ここに E_s はその逆数値 $1/E_s$ をもって表わしてある。 E_s をこのように表現したときの回帰線の値と標準偏差を表-6 に示す。 $1/E_s$ の値のバラツキは $1/\sigma_u, \epsilon_e$ の値のバラツキよりやや大きく偏差係数は 7~20% となった。偏差係数の大きさは、 $1/\sigma_u, \epsilon_e, 1/E_s$ のいずれの場合も富配

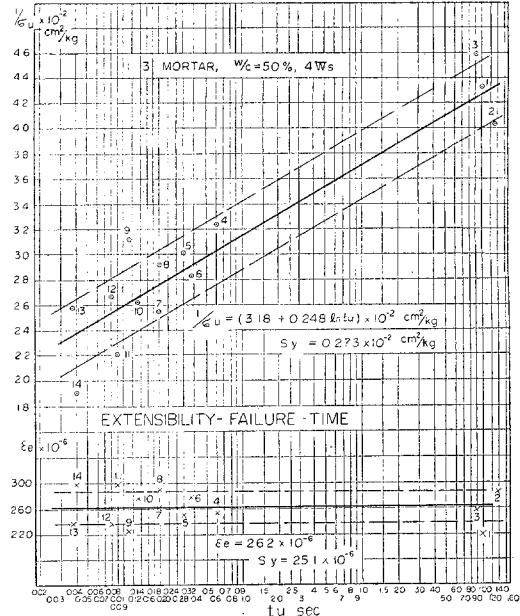
表-6 Secant Modulus (1)

Test No.	Relation between Secant Modulus for $0.25\epsilon_e$ & Failure time $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{sec}$	Standard Deviation cm^2/kg	Relation between Secant Modulus for $0.5\epsilon_e$ & Failure time $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{sec}$	Standard Deviation cm^2/kg
1	$1/E_{s,0.25\epsilon_e} = (2.46 + 0.072 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.193×10^{-6}	$1/E_{s,0.5\epsilon_e} = (2.89 + 0.097 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.209×10^{-6}
2	$1/E_{s,0.25\epsilon_e} = (3.32 + 0.068 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.303×10^{-6}	$1/E_{s,0.5\epsilon_e} = (3.81 + 0.118 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.554×10^{-6}
3	$1/E_{s,0.25\epsilon_e} = (3.71 + 0.068 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.317×10^{-6}	$1/E_{s,0.5\epsilon_e} = (4.35 + 0.173 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.603×10^{-6}
4	$1/E_{s,0.25\epsilon_e} = (4.47 + 0.093 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.376×10^{-6}	$1/E_{s,0.5\epsilon_e} = (5.31 + 0.214 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.427×10^{-6}

Secant Modulus (2)

Test No.	Relation between Secant Modulus for $0.75\epsilon_e$ & Failure time $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{sec}$	Standard Deviation cm^2/kg	Relation between Secant Modulus for ϵ_e & Failure time $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{sec}$	Standard Deviation cm^2/kg
1	$1/E_{s,0.75\epsilon_e} = (3.62 + 0.176 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.232×10^{-6}	$1/E_{s,\epsilon_e} = (4.57 + 0.274 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.322×10^{-6}
2	$1/E_{s,0.75\epsilon_e} = (4.66 + 0.208 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.718×10^{-6}	$1/E_{s,\epsilon_e} = (5.83 + 0.358 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.929×10^{-6}
3	$1/E_{s,0.75\epsilon_e} = (5.45 + 0.370 \ln t_u) \times 10^{-6}$	1.018×10^{-6}	$1/E_{s,\epsilon_e} = (6.86 + 0.529 \ln t_u) \times 10^{-6}$	1.353×10^{-6}
4	$1/E_{s,0.75\epsilon_e} = (6.53 + 0.367 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.497×10^{-6}	$1/E_{s,\epsilon_e} = (8.19 + 0.575 \ln t_u) \times 10^{-6}$	0.623×10^{-6}

図-3(d) Strength-Failure Time



合になるにつれて小さくなっている。

4. 考察

コンクリートおよびモルタルの一行程の引張荷重に対する動的挙動は上述実験結果から一般的に次のようにまとめられる。

すなわち引張破壊強度と破壊時間との間には

$$1/\sigma_u = A + B \ln t_u \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$0.03 \text{ sec} < t_u < 100 \text{ sec}$$

の関係が成立する。

伸び能力に関しては破壊時間のいかんにかかわらず

$$\epsilon_e = \text{Constant} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$0.03 \text{ sec} < t_u < 100 \text{ sec}$$

の関係が大体において成立する。

Secant Modulus に関しては、(1), (2) の関係から導かれる

$$1/E_s = C + D \ln t_u \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$0.03 \text{ sec} < t_u$$

$$< 100 \text{ sec}$$

の関係が大体において成立する。

以上 3 つの関係はすでに述べた圧縮試験²⁾における関係と全く同一のものので、コンクリートおよびモルタルに関する一般的性質といってよいよう

に思われる。

本引張試験の場合、(1), (2), (3) 式の表現による各実験値の偏差係数は圧縮試験の場合の偏差係数に比して相当大きい。すなわち強度については圧縮試験における値の 3~3.5 倍、ひずみ能力については 2~3 倍、弾性率については 2.5~4 倍程度となっている。

これは引張破壊の生ずる箇所を供試体中の一定箇所に限定する実験法を探ったこと、各実験を二バッチのコンクリートについて行なったこと、伸びの測定はべつべつ

図-4 (a) Secant Modulus-Failure Time

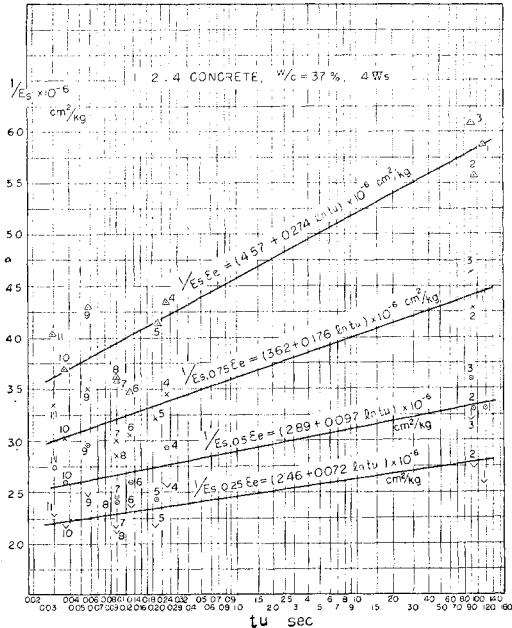
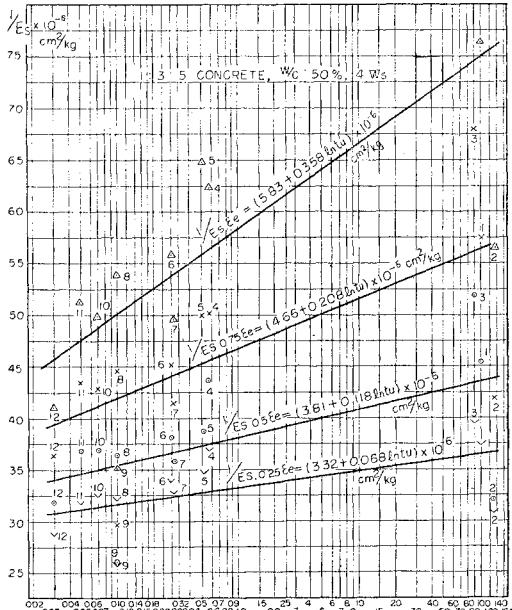


図-4 (b) Secant Modulus-Failure Time



のポリエステル SR ゲージを各回消耗しながら行なったことなど、圧縮試験における方法に比しバラツキの発生の要因が大きかったことに起因するものと思われる。

次に以上の実験結果を用いて引張りに対するレオロジー的解析を行なって見よう。

圧縮の場合¹⁾にならって、簡単に Kelvin 模型にバネ 1 個を直結した三要素模型を考える。いまこの模型に

なる応力を作用すれば、生ずるひずみ ϵ は次のように与

図-4 (c) Secant Modulus-Failure Time

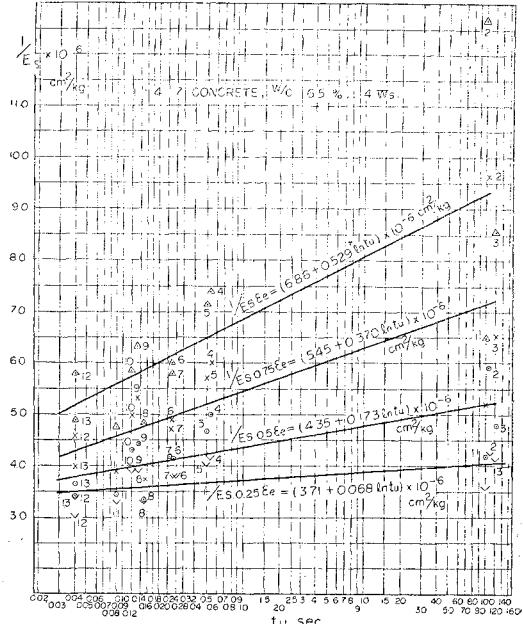


図-4 (d) Secant Modulus-Failure Time

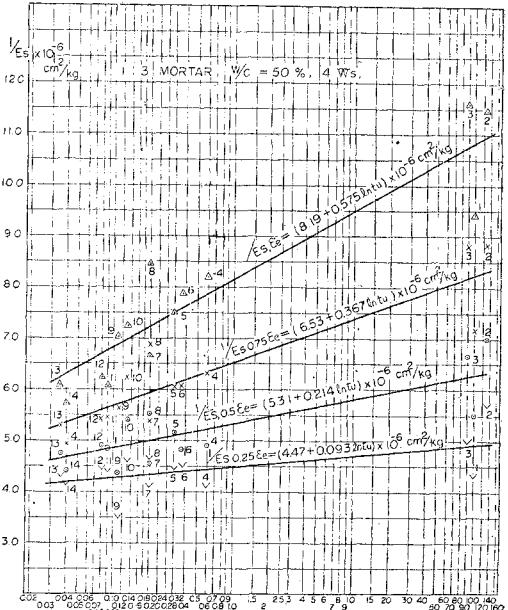
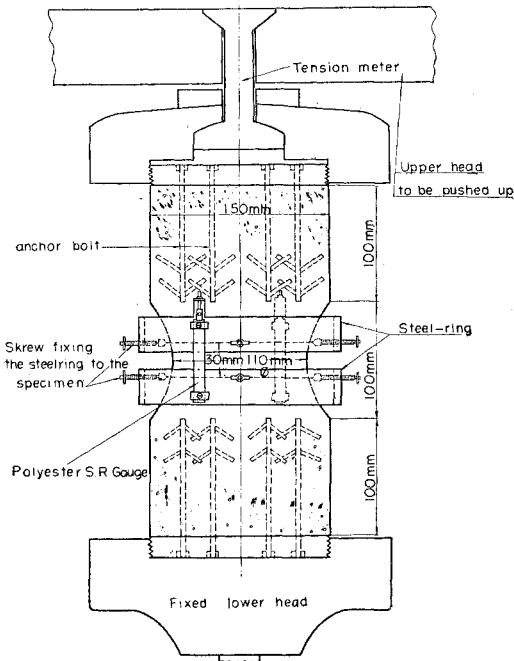


図-5 Schema of Arrangements



えられる。

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

ここに σ : 応力 (kg/cm^2), K : 定数 ($\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ sec}$),
 t : 時間 (sec)

E_1 : Kelvin body の弾性係数 (kg/cm^2)

η_1 : Kelvin body の粘性係数 ($\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ sec}$)

E : 直結バネの弾性係数 (kg/cm^2)

上述実験結果を(4),(5)式に適用するにあたって、簡単のため応力ひずみ曲線の $0.25 \epsilon_e$ における値のみを考える。すなわち $\epsilon_e, \sigma_u, E_{s, 0.25\epsilon_e}$ の回帰線から $t_u = 0.03 \text{ sec}, 0.20 \text{ sec}, 1 \text{ sec}, 100 \text{ sec}$ の4点に相当する値を求め各 t_u に対する σ_u から K を定め、 $E_{s, 0.25\epsilon_e}$ から $0.25 \epsilon_e$ に対する応力 σ を求め(4)式より t を得る。これらの値を(5)式に適用して曲線のあてはめを行なって各係

表-7 Calculated Viscoelastic Constant

Test No.	1	2	3	4
$E(\text{kg}/\text{cm}^2)$	44.7×10^4	32.5×10^4	28.8×10^4	23.9×10^4
$E_1(\text{kg}/\text{cm}^2)$	6.1×10^4	5.0×10^4	4.5×10^4	4.0×10^4
$\eta_1(\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$	108.9×10^4	89.7×10^4	88.8×10^4	74.9×10^4
Retardation time $\eta_1/E_1 \text{ sec}$	17.8	18.0	19.6	18.7

数を定めれば表-7のごとくなる。

これらの結果は先に求めた動的圧縮の場合¹⁾ときわめて似ており、静的試験における挙動をまでふくめて説明することは到底できないが、本実験のような動的試験の範囲内における小応力内の挙動をある程度説明することができるといつてよいであろう。

すなわちこれらを用いて静的弾性率、動的弾性率、特に周期的応力をうける場合の周波数による動的弾性率の変化、粘性の絶対値等を具体的に求めることができる。

5. 結 論

以上によって、コンクリートおよびモルタルの一行程引張荷重に対する動的挙動がある程度明らかにされた。

破壊強度は破壊時間の小なるほど増大して、その間に(1)式の関係が成立する。

伸び能力はその材質材令によってほぼ一定の値となり破壊時間に関係なく(2)式が成立する。

弾性率は破壊時間の小なるほど増大して、(3)式の関係が成立する。

これから単純な三要素模型としての弾性係数、粘性係数が得られ小応力内の動的挙動をある程度説明することができる。これらの係数は先に求めた動的圧縮の場合におけるものによく近似しており、圧縮引張に対する動的性質にあまり大きな差のないことを物語っている。

参 考 文 献

- 1) 畑野・堤: 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 67号、1960-3
- 2) 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、1961-3

(原稿受付: 1960.11.8)