硬化過程におけるコンクリートの圧縮強度・ 変形に及ぼす载荷速度の影響*

大 岸 佐 吉** 小 野 博 宣***

Effects of Strain Rate on Strength and Deformation of Concrete during Hardening Process

by

Sakichi OHGISHI

(Nagoya Institute of Technology, Nagoya)

and Hironobu ONO

(Chubu Institute of Technology, Kasugai)

It is well known that the strength and the modulus of elasticity of some materials are greater for rapid application of load than for slow loading. The theoretical interpretation of this fact has been given in the past based on the linear viscoelastic theory. The present experimental study was carried out to investigate the effects of strain or stress rate the compressive ultimate strength, the modulus of elasticity and the deformation characteristics of cement mortar and concrete at age of 1 to 28 days. The test variables were: the mean rate of stress, $\bar{\sigma}=0.01$ to 35 (kgf/cm²·sec), the mean rate of strain, $\bar{\epsilon}=0.15$ to 450 ($\times 10^{-6}$ /sec); the test age of 1, 3, 7, and 28 days; the water-cement ratio $W/C=0.45$ to 0.75 . $10\phi \times 20$ cm size cylindrical specimens were used for all tests.

The test results were summarized as follows. The dependence of the ultimate strength on strain rate for concrete was more remarkable at an early-age than at the age of 28 days. On the contrary, this dependence for cement mortar was remarkable at the age of 28 days. The strain at the ultimate strength of concrete at an early-age was influenced by strain rate, but it was not influenced at 28 days. The coefficient of viscosity of concrete λ is expressed by the equation as $\lambda=a\bar{\epsilon}^{-b}$, and the relationship between stress rate and strain rate is given by $\bar{\sigma}=\alpha\bar{\epsilon}^{\beta}$. The variation of concrete strength σ_u , which is brought by various rates of loading, can be expressed by the following equation based on the rheological theory, where $\sigma_{u,s}$ is the statical ultimate strength.

$$\sigma_u = \sigma_{u,s} + \lambda \dot{\epsilon}(t)$$

(Received July 26, 1979)

キー・ワード：コンクリート，荷重速度，ひずみ速度，圧縮強度，レオロジー

1 緒 言

材料の力学的諸性質（強度，弾性係数，ひずみ度）が载荷速度もしくはひずみ速度（rate of stress or strain）の影響をうけることは広く知られている。コンクリート構造物においても衝撃的な高速荷重，および地震，交通動荷重，波浪に類する低周期荷重，ならびにクリープのごとき長期の静的荷重など，極めて短時間载荷から長時間载荷に亘る諸問題がある。

広い時間領域についての力学的挙動を解明する必要から，古来コンクリートの载荷速度依存性に関する研究が行われている。高速载荷（ $\dot{\sigma} > 10^3 \sim 10^5$ kgf/cm²·sec）

を対象に R. H. Evans¹⁾，勝田²⁾，D. McHenry and J. J. Shiderer³⁾，竹田⁴⁾⁵⁾，および D. Watstein⁶⁾らの研究があり，中速度の载荷（ $\dot{\sigma} \approx 10^0 \sim 10^2$ kgf/cm²·sec）を対象に，畑野⁷⁾⁸⁾，P. G. Jones and F. E. Richart⁹⁾，および奥島¹⁰⁾¹¹⁾，小阪らの研究がある。他方低速载荷（ $\dot{\sigma} < 10^{-1} \sim 10^{-2}$ kgf/cm²·sec）もしくはクリープにおける粘性問題については筆者が報告した¹²⁾¹³⁾。しかし高速载荷が，コンクリートの強度増大をもたらす理由付について，理論的な考察を行った研究はまだみられない。

上記の諸報告は十分に硬化したコンクリートに関するものであるが，本研究はモルタル・コンクリートの若材令下（1, 3, 7 日）をも対象に，圧縮強度と変形特性の载荷速度依存性を $\dot{\sigma} \approx 10^{-3} \sim 10^1$ (kgf/cm²·sec) の範囲において実験的に検討したものである。かつひ

* 原稿受理 昭和54年7月26日

** 正 会 員 名古屋工業大学 名古屋市昭和区御器所町

*** 正 会 員 中部工業大学 春日井市松本町

ずみ速度増加による強度増加の要因をレオロジーによって理論的に考察した。

2 非弾性挙動の理論的考察

2・1 粘性係数の解析

高速载荷による強度増加の原因は、コンクリートの粘性に由来すると考えられる。いま第1次近似としてコンクリートを Maxwell model で置換すれば、その基礎微分方程式(1)式の一般解は(2)式で表される。

$$\dot{\varepsilon}(t) = \delta(t)/E_M + \sigma/\lambda \quad (1)$$

$$\sigma = \exp(-E_M \cdot t/\lambda)$$

$$\left\{ \sigma_0 + E_M \int_0^t \dot{\varepsilon}(t) \exp(E_M \cdot t/\lambda) dt \right\} \quad (2)$$

ここで、 E_M ：モデルの弾性係数、 λ ：軸方向粘性係数、 σ_0 ：初期応力

いま $\sigma_0 = 0$ の状態に (3) 式のひずみ速度が作用する場合は、(2)式は(4)式のごとくなる。ただし、 K と m は実験定数。

$$\dot{\varepsilon}(t) = K t^m \quad (3)$$

$$\sigma = K E_M \exp(-E_M \cdot t/\lambda) \cdot \int_0^t t^m \exp(E_M \cdot t/\lambda) dt \quad (4)$$

またひずみ速度が(5)式のごとく一定の場合には、(6)式のごとく示される。

$$\dot{\varepsilon}(t) = c \text{ (constant)} \quad (5)$$

$$\sigma = \exp(-E_M \cdot t/\lambda) E_M \cdot c \cdot \int_0^t \exp(E_M \cdot t/\lambda) dt \quad (6)$$

ここで $c \neq 0$ なら、(6)式は次のごとく整理される。

$$\sigma = \lambda c \{1 - \exp(-E_M \cdot t/\lambda)\}$$

$$\text{すなわち、} \lambda \{1 - \exp(-E_M \cdot t/\lambda)\} = \sigma/c \quad (7)$$

本実験では、平均ひずみ速度が(5)式の変化をするものとして、(7)式により粘性係数を算定する。 λ の算出には、ほかにも種々の方法がある。

2・2 強度のひずみ速度依存性

コンクリートを第2次近似として Kelvin model で考えると、その単位体積当りの工率 $\dot{w}(t)$ ¹⁴⁾は、

$$\dot{w}(t) = \sigma \dot{\varepsilon}(t) = E_K \varepsilon \cdot \dot{\varepsilon}(t) + \lambda (\dot{\varepsilon}(t))^2 \quad (8)$$

単位体積当りのひずみ仕事 W は、

$$\begin{aligned} W &= W_e + W_\lambda = \int \dot{w}(t) dt \\ &= \int_0^\varepsilon E_K \varepsilon d\varepsilon + \int_0^\varepsilon \lambda (\dot{\varepsilon}(t))^2 dt \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 W_e ：弾性ポテンシャルエネルギー、 W_λ ：消費エネルギー、 E_K ：モデル常数 (=const.)

(9)式を書き改めれば、

$$\begin{aligned} W_e &= W - \int_0^\varepsilon \lambda (\dot{\varepsilon}(t))^2 dt = \int_0^\varepsilon E_K \varepsilon d\varepsilon \\ &= \frac{E_K \varepsilon^2}{2} \geq W_{e0} \end{aligned} \quad (10)$$

となったとき破壊を生ずる。 W_{e0} は等方性破断エネルギーであり、破断の基準量である。

(10)式において、破断のときのひずみ度を ε_u とすれば、 $\varepsilon_u^2 E_K / 2 = W_{e0}$ のとき破断するから

$$\varepsilon_u = \pm \sqrt{2W_{e0}/E_K} \quad (11)$$

K -モデルの2個の要素の各応力を σ_H 、 σ_N とすると、

$$\sigma = \sigma_H + \sigma_N = E\varepsilon + \lambda \dot{\varepsilon}(t)$$

なる関係から直ちに、

$$\sigma_u = E\varepsilon_u + \lambda \dot{\varepsilon}(t) = \sqrt{2W_{e0} \cdot E_K} + \lambda \dot{\varepsilon}(t) \quad (12)$$

準静力学的状態 (すなわち $\dot{\varepsilon} \approx 0$) における破断応力を σ_{us} とすれば、 $\sigma_{us} = \pm \sqrt{2W_{e0} \cdot E_K}$ であるから、

$$\sigma_u = \sigma_{us} + \lambda \dot{\varepsilon}(t) \quad (13)$$

(13)式は物体の λ が一定である場合、強度 σ_u は $\dot{\varepsilon}(t)$ に比例して Fig. 1 の (a) 直線のごとく増大することを示す。しかし λ 自体が $\dot{\varepsilon}(t)$ の関数である場合は、同図の (b) または (c) 曲線のごとく強度が変化する。

Fig. 1. Strength vs. strain rate.

本研究ではひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ に関する λ の関数形の決定を目指している。(13)式の中の λ の算定は、 K -モデルについても求めることができる。理論的には(7)式を含め、どのような方法によってもよい。

3 実験方法

3・1 実験試料の作成

本研究ではセメントモルタルとコンクリートの両者を対象とする。その重量調合を Table I に示す。水セメント比は両者各3種、合計6種類である。使用材料の詳細を表の脚注に示す。供試体寸法は $10\phi \times 20$ (cm) であり、試料はすべて試験材令まで 20°C 水中養生とする。

3・2 試験方法

モルタルの試験材令は、1, 3, 7, 14および28日の5材令、コンクリートでは、1, 7および28日の3材令である。種々のひずみ速度で供試体に圧縮荷重を与えるのに、電動サーボモーターによるオートグラフ式の荷重試験機 (島津製 DSS-50T) を用いた。原則として一条件につき3個の供試体を当てた。供試体の相対する2母線上に標点間距離150(mm)の変位を差動トランスにより自動記録させた。本実験では前記荷重試験機により変位制御を行った。変位の速度階は、高速から遅速にいたる4段階について、おおむね下記の範囲で実験を行った。等速度の変位制御を行っても、コンクリートは必ずしも等速度のひずみを示さないことに留意する必要がある。

Table I. Mix proportions by weight of test concrete and cement mortar.

	W/C (%)	C*1	W	S*2	G*3	Flow (mm)	Slump (mm)
		Mixing (kg/m³)					
		(Proportion)					
Mortar	55	490 1	270 0.55	1 470 3.00	0 —	165	—
	65	467 1	304 0.65	1 402 3.00	0 —	211	—
	75	446 1	335 0.75	1 339 3.00	0 —	240	—
Concrete	45	437 1	197 0.45	712 1.63	960 ^{*4} 2.20	340×350	189 ^{*4}
	55	345 1	190 0.55	815 2.36	960 ^{*4} 2.78	352×340	188 ^{*4}
	70	275 1	193 0.70	886 3.22	960 ^{*4} 3.45	275×310	185 ^{*4}

Notes *1 Ordinary portland cement, $\rho_c=3.14$ (gr/cm³) $28F_c=413$ kgf/cm², *2 Kiso river sand, $\rho_s=2.56$, under 5(mm), FM=3.05, *3 Kiso river gravel, $P_g=2.62$, under 25(mm), FM=6.80, *4 Volume of gravel and slump are constant.

高速度 (H) $\bar{\epsilon}=(2\sim4)\times 10^{-4}/s$

$\rightarrow \bar{\sigma}=(10\sim40)$ (kgf/cm²·s)

中速度 (M) $\bar{\epsilon}=(2\sim4)\times 10^{-5}/s$

$\rightarrow \bar{\sigma}=(1\sim4)$ (kgf/cm²·s)

低速度 (L) $\bar{\epsilon}=(2\sim4)\times 10^{-6}/s$

$\rightarrow \bar{\sigma}=(0.1\sim0.4)$ (kgf/cm²·s)

遅速度 (LL) $\bar{\epsilon}=(2\sim4)\times 10^{-7}/s$

$\rightarrow \bar{\sigma}=(0.01\sim0.04)$ (kgf/cm²·s)

以上の応力速度下でコンクリートの強度、ひずみ度、弾性係数を求めた。

4 実験結果

前節の実験条件のもとで行ったモルタルに関する実験結果の一部を Table II に示す。材齢 1, 7, 14 日の結果を省いた。ここではコンクリートに関する結果の表示を省略した。第 II 表には平均応力速度 $\bar{\sigma}_0$ 、終局強度 σ_u (=最大応力点), 平均圧縮ひずみ速度 $\bar{\epsilon}$, 応力 σ_u における試料 3 個の平均ひずみ度 $\bar{\epsilon}_u$, および割線ヤング係数を一覧している。

本実験装置のもとでの圧縮応力度の時間変化の事例を Fig. 2 に示す。ここでは解析の便宜上, 載荷開始後終局強度までの経過時間 t を用い, 平均応力速度 $\bar{\sigma}$ は, (14)式によることとした。一方ひずみの時間変化の例を Fig. 3 に示す。これによれば ϵ は次式(15)により比較的良好な適合性を示した。

Table II. Test results of cement mortar.

Test age (days)	W/C (%)	Rate of stress, $\bar{\sigma}_c$ (kgf/cm ² ·sec)	Stress rate's step	Aver. comp. strength, $\bar{\sigma}_u$ (kgf/cm ²)	Rate of strain, $\bar{\epsilon}_c$ ($\times 10^{-6}/\text{sec}$)	Strain at ultimate st., $\bar{\epsilon}_u$ ($\times 10^{-6}$)	Secant*2 modulus, $E_{1/5}$ (10^5 kgf/cm ²)
3d.	55	20.9 ~ 21.2	H	152	296 ~ 391	2435	1.92
		2.02 ~ 2.29	M	143	37.8 ~ 39.9	2556	1.90
		0.23 ~ 0.24	L	137	3.95 ~ 4.21	2867	1.89
		0.014	LL	129	0.34	3200	1.78
	65	15.2 ~ 17.4	H	125	281 ~ 319	2021	1.64
		1.80 ~ 2.09	M	119	36.4 ~ 37.9	2194	1.59
		0.15 ~ 0.17	L	113	3.32 ~ 3.65	2486	1.45
		0.01 ~ 0.014	LL	106	0.36 ~ 0.37	2949	1.38
	75	13.8 ~ 17.3	H	87	323 ~ 442	1905	1.25
		1.10 ~ 1.52	M	79	33.3 ~ 34.4	2296	1.13
		0.15 ~ 0.16	L	76	3.86 ~ 5.33	2358	1.01
		0.0084	LL	68	0.37	2600	0.85
28d.	55	32.4 ~ 34.8	H	399	215 ~ 274	2951	2.66
		3.22 ~ 3.29	M	363	25.8 ~ 27.8	2973	2.53
		0.30 ~ 0.32	L	335	2.47 ~ 3.01	2999	2.21
		0.025	LL	317	0.23 ~ 0.25	3057	2.14
	65	26.6 ~ 30.2	H	339	218 ~ 260	2750	2.40
		2.68 ~ 3.14	M	311	23.0 ~ 28.3	2786	2.28
		0.26 ~ 0.27	L	287	2.63 ~ 2.78	2819	2.04
		0.026	LL	252	0.28	2860	1.96
	75	26.5 ~ 30.6	H	238	318 ~ 341	2597	1.90
		2.61 ~ 2.80	M	207	27.9 ~ 32.6	2627	1.78
		0.24 ~ 0.25	L	191	3.01 ~ 3.23	2677	1.65
		0.020	LL	177	0.31	2707	1.59

Notes; *1 Average values of three or two test pieces, σ_u : Ultimate compressive strength, ϵ_u : Strain at σ_u

*2 Values $E_{1/5}$ at stress $\sigma_u/5$.

Fig. 2. Observed stress rate under various rates of loading. (mortar tests)

Fig. 3. Observed strain rate under various rates of loading. (concrete tests)

Fig. 4. Stress-strain diagram of concrete under various rates of loading.

$$\bar{\sigma} = \sigma_u / t \quad (14)$$

$$\varepsilon(t) = kt^n \quad (15)$$

この場合, $kn=K$, $(n-1)=m$ とすれば $\varepsilon(t)$ は, (3)式に相当している. しかし粘性係数の計算の便宜上, 本実験ではひずみ速度を見掛け上, 等速度であると仮定し, (5)式を適用した. 平均ひずみ速度こう配 $c(=\dot{\varepsilon}(t))$ の値は Table II を参照.

Fig. 4 はコンクリートの材令 1, 7, 28 日における 4 段階の荷重速度下で記録された(応力度・ひずみ度)曲線の例を示す. 高速載荷の場合ほど曲線は上位にあり, 速度効果が明りょうに認められる. この傾向はモルタルについても同様であった. (図を省略)

5 結果の考察

5・1 終局強度のひずみ速度依存性

Fig. 5 はひずみ速度階が遅速 (LL) の場合の終局強度を基準としたモルタルの強度増大比を示したものである. 図中には遅速の場合の強度値を記入してある. この図によれば強度増大比は, $\dot{\varepsilon}(t)$ に対し対数関数的に増加し, 高材令の場合ほどひずみ速度依存性が大きい. ひずみ速度が一桁増すごとに強度はおおむね 28 日材令で約 12%, 7 日材令で約 7% の増加をみる.

Fig. 5. Relationship between the increasing ratio of ultimate strength, (σ_u/σ_{LL}) and the strain rate in cement mortar. (base rate of strain: $\dot{\varepsilon}_{LL} = (0.14 \sim 0.61) \times 10^{-6}/\text{sec}$.)

Fig. 6. Relationship between the increasing ratio of ultimate strength, (σ_u/σ_{LL}) and the strain rate in concrete. (base rate of strain: $\dot{\varepsilon}_{LL} = (0.14 \sim 0.61) \times 10^{-6}/\text{sec}$.)

Fig. 6 は同種の結果をコンクリートについて示したものである. この場合は若材令の方が高材令よりも $\dot{\varepsilon}$ の影響を受けやすいことがモルタルの場合と異っている. 材令に対するこの両者の逆転の原因は明確ではない. しかし強度増加の原因がセメント硬化体の粘性にあると考える筆者の見解からすれば, 若材令において $\dot{\varepsilon}$ の依存が大であることの方が妥当であると考え.

5・2 強度のひずみ速度効果の理論値

ここではコンクリート強度のひずみ速度効果を, (13)式により理論的に検討する.

まず同式中の粘性係数 λ を求める. λ は(6)式または(7)式で得られる. 本研究では後者による. 同式中の弾性係数 E は, モルタルでは $E=1.05 E_{1/5}$, コンクリートでは $E=1.1 E_{1/3}$ とみなし, Table II の値などから Table III のごとく定めた. また同式中の定ひずみ速度 c として, Table II 中の値 ($\bar{\varepsilon}$) を用いた.

Table III. Coefficient of viscosity, λ of cement mortar and concrete under various rate of compressive strain.

Mortar (C/W/S=1/0.65/3)				Concrete (C/W/S/G=1/0.45/1.62/2.20)			
Test age (days)	Strain rate steps	Modulus of elasticity $E(10^3 \text{ kgf/cm}^2)$	Coefficient of viscosity, $\lambda(\text{kgf}\cdot\text{sec/cm}^2)$	Test age (days)	Strain rate steps	Modulus of elasticity $E(10^3 \text{ kgf/cm}^2)$	Coefficient of viscosity, $\lambda(\text{kgf}\cdot\text{sec/cm}^2)$
3d.	H	1.72	2.42×10^5	1d.	H	1.77	3.12×10^5
	M	1.67	1.64×10^6		M	1.72	1.56×10^6
	L	1.52	1.62×10^7		L	1.64	1.38×10^7
	LL	1.45	1.50×10^8		LL	1.59	1.67×10^8
7d.	H	2.22	4.51×10^5	7d.	H	3.05	8.41×10^5
	M	2.12	3.08×10^6		M	2.97	5.39×10^6
	L	1.85	5.80×10^7		L	2.89	4.91×10^7
	LL	1.75	3.03×10^8		LL	2.75	6.07×10^8
28d.	H	2.52	8.84×10^5	28d.	H	3.63	2.13×10^6
	M	2.39	7.78×10^6		M	3.54	1.58×10^7
	L	2.14	6.51×10^7		L	3.48	1.14×10^8
	LL	2.06	5.15×10^8		LL	3.42	1.04×10^9

was calculated by eq. (7) from test results.

以上のデータにより(7)式で算定したモルタルとコンクリートの粘性係数の計算結果例を Table III に示す。すなわち軸方向粘性係数 λ は、 $\dot{\epsilon}$ が一桁増すごとに逆に一桁ずつ小さくなることからわかる。これはセメント硬化体が多く粘性成分を混在しており、高速載荷、つまり短時間載荷の場合ほど粘性係数の小さい成分が応答することを示している。これは筆者の以前に報告した結果に同じである。この λ を $\dot{\epsilon}$ に対して描いたものが Fig. 7 と Fig. 8 である。前者はモルタル、後者

はコンクリートの場合である。 λ は $\dot{\epsilon}$ の関数であり、よい精度で下式(16)で表しうる。

$$\lambda = a \{\dot{\epsilon}\}^{-b} \quad (16)$$

ここで a , b はコンクリートによって定まる定数であり、本題では Table IV のごとく算定された。

さて Table II に示された $\dot{\epsilon}$ の値と、Fig. 7 でその $\dot{\epsilon}$ に対応した λ の値を用いて、理論的な破壊強度を(13)式により計算した。その結果を Fig. 9 の破線で示す。○印で示す実線は実験の結果である。(13式の $\sigma_{u,s}$ として、ひずみ速度階 LL での終局強度 σ_{LL} をあてた。すなわち

$$\sigma_{u,s} \equiv \sigma_{LL} \quad (17)$$

Table IV. Constant a and b in eq. (16).

Mortar (W/C=0.65)			Concrete (W/C=0.45)		
Age	a	b	Age	a	b
3d.	5.6×10^7		1d.	4.6×10^7	
7d.	9.0×10^7	-0.990	7d.	12.0×10^7	-0.968
28d.	15.2×10^7		28d.	25.0×10^7	

Constant a and b was calculated from Fig. 7 and Fig. 8.

Fig. 7. Strain rate vs. coefficient of viscosity, λ in cement mortar.

Fig. 8. Strain rate vs. coefficient of viscosity, λ in concrete.

Fig. 9. Comparison between experimental results and theoretical ultimate strength of cement mortar.

Fig. 10. Variation of strain at ultimate stress, ϵ_u in cement mortar for test age.

σ_u の理論値は, 実験結果に傾向的に酷似しており, この理論の妥当性を示している。(6)式による λ を用いれば, 理論と実験の合一性がより高まるであろう。Fig. 9 の横軸は対数目盛であるが, これをリニアスケールに直せば, モルタル・コンクリートの ($\sigma_u \sim \dot{\epsilon}$) 関係は Fig. 1 の(b)形式であることがわかる。

5・3 終局ひずみ量の荷重速度効果

Fig. 4 の 1day の線群にみるごとく, 最大応力点におけるひずみ量 ϵ_u (図中の丸印) は, 低荷重速度の場合ほど大である。これに対して 28 day の線群では, ϵ_u の速度依存性はほとんどみられない。同様の傾向はモルタルについても明らかに認められた。いまモルタルの ϵ_u を試験材令に対して描き直すと, Fig. 10 のごとくなる。 ϵ_u はあきらかに若材令下で, 荷重速度の影響を受けるが, 28日材令ではほとんど影響をうけないことが注目される。以上の傾向を模式的に示すと Fig. 11 のごとく理解され, 興味深い現象である。 ϵ_u の値は, 28日材令のモルタルで, $W/C=55$, 65 , 75% に対しそれぞれ約 3 000, 2 800, 2 700 ($\times 10^{-6}$) である。

Fig. 11. Tendency of the change in S-S curves of concrete during hardening process.

Fig. 12. Normalized stress-strain curves in concrete. ($C/W/S/G=1/0.7/3.22/3.49$, $10\phi \times 20$ cm)

Fig. 12 は材令 1 日と 28 日 コンクリートの相対 (応力・ひずみ) 線図であり, 四つの荷重速度階での値をプロットしている。($\sigma/\sigma_u \sim \epsilon/\epsilon_u$) 曲線の経路は若材令と高材令とで荷重速度について逆転する傾向が認められる。相対応力度ひずみ度曲線の初期接線係数は, 一般に 2 程度といわれるが, Fig. 12 の材令 1 日の場合,

$$\left. \frac{d(\sigma/\sigma_u)}{d(\epsilon/\epsilon_u)} \right|_{(\epsilon/\epsilon_u=0)} = 4.76 \sim 8.33$$

であり非常に大きい。しかし 28 日材令での値は 1.92 $\sim$ 2.32 を示した。

5・4 応力速度とひずみ速度の関係

Fig. 13 はコンクリートについて測定された $\bar{\sigma}$ と $\bar{\dot{\epsilon}}$ との関係を示す。これによれば両者は次の(18)式で精度よく関係づけられる。

$$\bar{\sigma} = \alpha \{ \bar{\dot{\epsilon}} \}^\beta \quad (18)$$

Fig. 13. Relationship between the mean rate of strain and the mean rate of stress in concrete.

ここに α , β はコンクリートの種別で定まる定数であり, 本実験例では $\beta=1 \sim 1.024$ (18)式の関係は J. Takeda によっても示されている。同報告では $\beta=1.007 \sim 1.033$ としている。モルタルについても(18)式が同様に成立することを確かめた。

5・5 弾性係数のひずみ速度効果

Fig. 14 はコンクリートの平均ひずみ速度 $\bar{\dot{\epsilon}}$ と, 割線係数 $E_{1/3}$ との関係を示したものである。測定結果に若干ばらつきがあるが, 高速度の載荷ほど弾性係数が増大する。 $\dot{\epsilon}$ の $E_{1/3}$ への寄与は, $W/C=0.55$ の

Fig. 14. Relationship between the strain rate and modulus of elasticity in concrete.

場合 $\bar{\epsilon} = 0.5 \times 10^{-6}$ から $\bar{\epsilon} = 0.5 \times 10^{-3}$ (1/sec) への変化において、材令 1 日では約 1.94 倍に、材令 28 日では約 1.29 倍に増大する。(6) 式に類する関係式において λ を用いて解析を行えば理論上の ($\sigma \sim \epsilon$) 線図をうることができる。したがって $\bar{\epsilon}$ に対する E の数理的検討も可能である。

6 結 論

若材令を含めたセメントモルタル、コンクリートの圧縮強度と変形特性に及ぼす載荷速度 $\bar{\sigma} = 0.005 \sim 34.8$ (kgf/cm²·sec) (またはひずみ速度) の影響に関する本実験の結果を次のように要約する。

(1) 高速載荷ほど圧縮強度が増大することは、従来の知見と同一である。しかし強度のひずみ速度依存の特性は、モルタルとコンクリートで異り、前者は高材令の方が大であり、後者は若材令の方が大である。モルタルの強度増加比は、 $0.1 \times 10^{-6} < \bar{\epsilon} < 500 \times 10^{-6}$ (1/sec) の範囲で、変形速度が一桁増すごとに材令 28 日で約 12%、7 日で約 7% である。(Fig. 5, 6)

(2) 最大応力点でのモルタルのひずみ量 ϵ_u は、若材令において荷重速度に大きく支配され、低応力速度ほど ϵ_u は大である。しかし材令が 28 日では応力速度 (またはひずみ速度) にかかわりなく、 ϵ_u はほぼ一定値を示す。(Fig. 10, 11)

(3) 応力速度が、 $10^1, 10^0, 10^{-1}, 10^{-2}$ (kgf/cm²·sec) の 4 段階に応じて現れるコンクリートの軸方向粘性係数は、それぞれ $10^6, 10^7, 10^8, 10^9$ (kgf·sec/cm²) (つまり $10^{12} \sim 10^{15}$ poise) である。作用するひずみ速度とセメント硬化体の粘性係数の間に (5・1) 式が成立する。(Fig. 7, 8)

コンクリートの粘性は、調合や材令よりもひずみ速度、もしくは応力速度に大きく依存する。

(4) セメント硬化体が高速載荷によって、強度を増す理論的な説明として、粘性を考慮した (3) 式の考えがある程度の合理性をもつことを実証した。(Fig. 9)

(5) コンクリートにおける平均応力速度と平均ひずみ速度の関係は (18) 式で精度よく表される。(Fig. 13)

(6) コンクリートの圧縮ひずみに関する割線係数 E_s は、高速載荷ほど大であり、 $\epsilon = 10^{-7}$ (1/sec) より 3 桁増大すると、 E_s は 1.3~1.9 倍に増大する。(Fig. 14)

(7) 相対応力ひずみ線図の接線係数は、材令とひずみ速度の両者に影響をうけ、特に若材令では非常に大きな値 (5~8) を示す。(Fig. 12)

参 考 文 献

- 1) Evans, R. H., Jour. of Inst. Civil Engineering, **18**, 296 (1942).
- 2) 勝田千利, 日本建築学会論文集, 29号 (1943); 31号 (1944).
- 3) McHenry, D., and J. J. Shiderer, ASTM Symposium on Speed of Testing of Non-Metallic Materials (1955).
- 4) 竹田仁一, 日本建築学会論文報告集, 66号, 105 (1960); 78号, 1 (1962).
- 5) Takeda, J., and H. Tachikawa, Proc. of 1st. Inter. Confe. on Mechanical Behavior of Materials (ICM-1), **IV**, 267 (1971).
- 6) Watsein, D., Proc. of ACI, **39**, 739 (1953).
- 7) 畑野 正, 土木学会論文集, 70 (1960).
- 8) 畑野 正, 土木学会論文集, 73 (1961).
- 9) Jones, P. G., and F. E. Richart, Proc. of ASTM, **36**, Part III, 380 (1936).
- 10) 奥島正一, 小阪義夫, 西岡思郎, セメント技術年報, **13**, 509 (1960).
- 11) 奥島正一, 小阪義夫, 西岡思郎, セメント技術年報, **14**, 250 (1961).
- 12) 大岸佐吉, 日本建築学会論文報告集, **81**, 1 (1963); **86**, 1 (1963).
- 13) 大岸佐吉, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 号外, 43 (1969).
- 14) Reiner, M., Deformation and Flow p. 282 (1949) London