

北海道大学 正 員 工 博 横道英雄

" 高田 宣之

" 学生員 O 宇賀 秀典

1. さえがき

本研究は、コンクリートの応力-ひずみ特性に、レオロジカルな方向から考察を加えたものである。筆者らはここ数年、この立場で研究を進めており、既にかんりの成果を得ている。この成果を基に更に歩を進めて、瞬間変形における応力-ひずみ特性の解明を試みたものである。ここで、瞬間変形とは、各荷重段階における変形の瞬間的観測値を意味するものではなく、その値からその時点における時間的要素を取り去ったものを言う。

一般に、載荷試験より得られるコンクリートのひずみを図解的に表わせば、次のようになる。

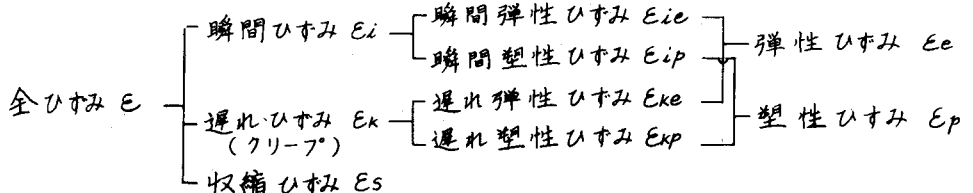


図-1

ここに、 $\epsilon_e = \epsilon_{ie} + \epsilon_{ke}$ は荷重の除去によって瞬間的に、あるいは時間的に回復するひずみであり、一方 $\epsilon_p = \epsilon_{ip} + \epsilon_{kp}$ は永久に回復しないひずみを表わす。そして、 $\epsilon_i = \epsilon_{ie} + \epsilon_{ip}$ が本研究の対象となる瞬間的変形である。なお本研究ではひずみの測定中に ϵ_s は自動的に取除かれている。

図-1. のひずみを、応力-ひずみ曲線を用いて表わせば、図-2. のようになる。

解析には、図-3 に示すレオロジー模型を用いた。

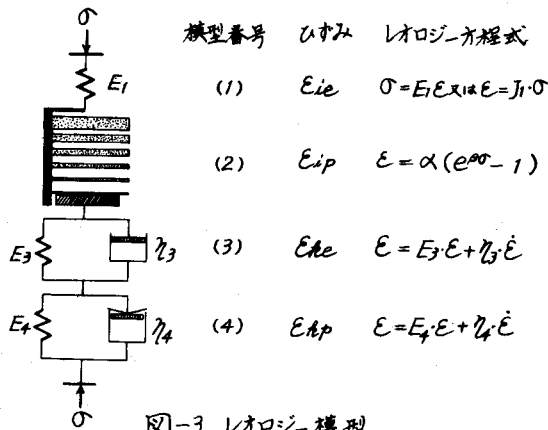
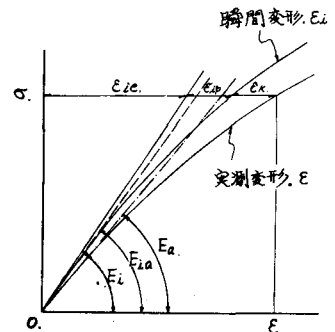


図-2 応力-ひずみ曲線



E_a : ϵ 曲線の初期勾配

$E_{ia} = \frac{1}{J_1 + \alpha \cdot \beta}$: ϵ_{ie} 曲線の初期勾配

$E_i = E_1$: 瞬間弾性係数

ここに模型-(2)は筆者らによって提案されたもので、連綿強度^{分布}を持つ理想体に対する永久ひずみを説明するものである。

定速載荷試験において得られる応力-ひずみ曲線を図-3の模型を用いて表わせば、載荷速度、 $\frac{d\sigma}{dt}$ を k とすると次のようになる。

$$\begin{aligned}\bar{\epsilon} &= (\epsilon_{ie} + \epsilon_{ip}) + (\epsilon_{ke} + \epsilon_{kp}) \\ &= \frac{\sigma}{E_1} + \alpha(e^{\beta\sigma} - 1) + \frac{1}{E_3} \left\{ \sigma - \frac{k\tau_3}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_3}{\tau_3} \frac{\sigma}{k}} \right) \right\} + \frac{\sigma}{E_4} \left\{ \sigma - \frac{k\tau_4}{E_4} \left(1 - e^{-\frac{E_4}{\tau_4} \frac{\sigma}{k}} \right) \right\} \quad (1)\end{aligned}$$

また定応力 $\bar{\sigma}$ でのクリープひずみ曲線は、次のように表わされる。

$$\bar{\epsilon}_k = \frac{\bar{\sigma}}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_3}{\tau_3} t} \right) + \frac{\bar{\sigma}}{E_4} \left(1 - e^{-\frac{E_4}{\tau_4} t} \right) \quad (2)$$

なお、本研究におけるフリープおよびフリープ回復の試験結果より、対象とする時間 t が非常に短かいこと等から、 $E_4\tau_4 t \ll 1$ すなわち ϵ_k および $\bar{\epsilon}_k$ は近似的に次のように置き換えられることが明らかとなったので、解析には次式を用いた。

$$\text{定速載荷において} \quad \epsilon_k = \frac{1}{E_3} \left\{ \sigma - \frac{k\tau_3}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_3}{\tau_3} \frac{\sigma}{k}} \right) \right\} + \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{k\tau_4} \quad (3)$$

$$\text{定応力クリープにおいて} \quad \bar{\epsilon}_k = \frac{\bar{\sigma}}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_3}{\tau_3} t} \right) + \frac{\bar{\sigma}}{\tau_4} t \quad (4)$$

種々の定応力 $\bar{\sigma}$ におけるフリープ試験結果より、定数 E_3, τ_3, τ_4 を定めることができ、その結果に基づいて、任意の載荷速度で行なって得られる応力-ひずみ曲線の測定値から、時間的ひずみ要素を差引けば、瞬間ひずみ曲線が得られる。

2. 材料および供試体

セメントは富士セメントK.K.の早強ポルトランドセメントを使用し、その物理的性質は表-1に

示す通りである。骨材は錦国海岸産の砂および砂利を使用し、その試験結果を表-2に示す。コンクリートの示配合は表-3に示す通りで、供試体として $\phi 100 \times 200$ mmのシリンドーを用いた。供試体の製作には $\phi 2.5$ mm, 7500rpmの棒状バイブレーターを用いて十分な締固めを行った。製作後1日で脱型、試験前日まで水中養生を行い、水中より引き上げた後、直ちにその表面を合成樹脂薄膜で封緘し、試験までの乾燥を仰じた。

3. 試験方法

試験は圧縮応力に対して行い、普通^荷速度による静的試験の外に、急速および緩速試験、なうびに種々の応力段階にお

表-1. セメントの物理的性質

種別	比重	フロー値	比表面積 (cm^2/g)	標準モルタル強度 (kg/cm^2)					
				曲 17			圧 縮		
				3日	7日	28日	3日	7日	28日
早強ポルトランドセメント	3.14	204	4430	41.4	56.3	76.1	85.2	263	384

表-2. 骨材試験成績

骨材種類	粒度範囲	粗粒率	比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/m^3)
石・小	<2.5mm	2.66	2.73	0.29	1887
・大	2.5~6.0mm	5.00	2.68	0.67	1663
砂利・小	5~15mm	5.65	2.68	0.57	1815
・大	15~20mm	6.61	2.67	0.46	1778

表-3. 示配合

最大 圧力 (mm)	スランプ 範囲	単位 水量 (kg/m^3)	単位 セメント量 (kg/m^3)	水・セ メント比 (%)	単位容積重量 (kg/m^3)		単位容積重量 (kg/m^3)	
					小・大・計		小・大・計	
20	5.5±1.5	150	300	50	713	2049	77	2049
								1120

ける繰返し載荷試も行った。また ε_k の性質を調べる為、種々の応力において短時間 (5~10秒) のクリープ試験を行なった。ひずみの測定は、供試体中央部の対称位置に、たゞよ各2枚のダイヤーストレンゲージにより、2台のストレンメーターを用いて行ない、これと同時に、ひびわれ信号音の検出を行なった。また、クリープ試験では、クリープ回復ひずみも測定した。なお、全ての供試体について、試験に先立って動弾性係数 (E_{dyn}) を測定した。

4. 試験結果

種々の応力段階で行ったクリープ試験結果から、その1例を図-4に示す。図中の実線は、測定値に対する(4)式の最確値曲線を示すものである。

なおこの場合、載荷に要した時間による影響についての補正を行なっている。この図でわかるように、測定値と理論はよく一致した。

図-5は、(4)式で整理した同一バッチの供試体 (12本) から得られた結果を示したものであるが、 $\bar{\sigma}/\sigma_B$ の値が、0.7附近で常数に、かなり明確な変化が現われている。同様のことが、繰返し載荷試験の弾性挙動や、ひびわれ信号音の検出中にも観測された。図には、そのうちの定常部分に対する平均値が示されている。なお、材令 (14日、28日) の違いによる常数の変化を参考までに、表-4に示す。

表-4. 材令によるクリープ常数変化

材令 (日)	平均強度 (kg/cm^2)	E_3 (kg/cm^2)	繰延時間 (sec)	η_4 ($\text{kg}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$)
14	374.2	6.24×10^6	19.6	3.77×10^9
28	406.8	12.9×10^6	17.8	5.16×10^9

平均強度は普通載荷速度によるものである。

図-4の値と、(3)式を用い定速載荷により σ のある値に達したときのひずみに含まれる、クリープ成分 (ε_k) と、たゞ速度 (σ_{rate}) との関係の1例を図-6に示す。この図から、クリープひずみ成分は、 σ_{rate} の大きい範囲で、その変化が著しいが、普通に用いられる値、すなわち 2~3 $\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$ 以下の σ_{rate} では比較的、変化の少ないことがわかる。なお、このことは、一般に知られている載荷速度と破壊強度の大きさとの関係に似ている。測定値から前記の ε_k を差引いた残りが瞬時変形を与えるが、その1例を図-7中の実線に示す。

図-4. クリープ曲線

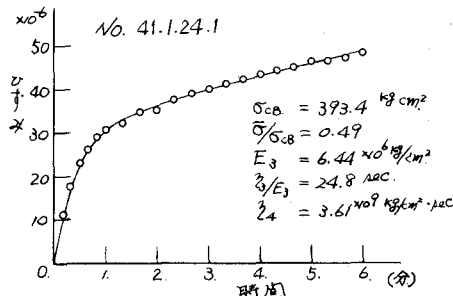


図-5 クリープ諸常数

(材令14日, 41.1.24-供試体)

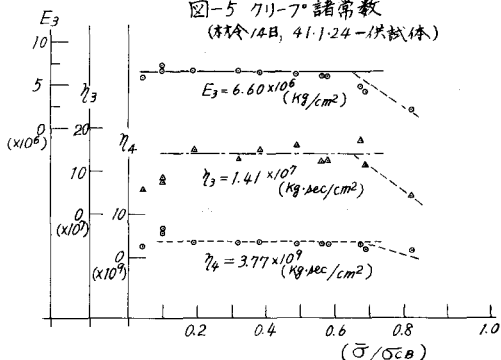
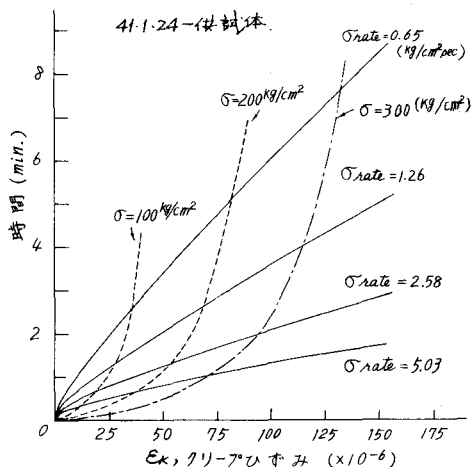


図-6 定速載荷ひずみのクリープ成分

41.1.24-供試体



この図から、時間的要素 ε_k を差引いた、いわゆる、瞬時的変形は、非線型型であって、永久ひずみ成分を含むものであることが解かる。これに対し、筆者らの理論式：(1)式の σ_1 および σ_2 項、すなわち

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{ie} + \varepsilon_{ip} = \frac{1}{E_i} \sigma + \alpha (e^{\beta \sigma} - 1) \quad (5)$$

を適用した結果を示すも破線の様になり、補正有効範囲、すなわち、図-5の定常部分に対しては、実測値 ($\varepsilon - \varepsilon_k$) に極めてよく一致している。なお、この範囲を越えた部分は図-5に示すように、 $\bar{\sigma}_{0.2}$ が約0.7以上になった部分に相当するもので、常数の変化する影響を受けて、理論値は当然、少し偏差している。このことから、採用した模型-(2)が、瞬時変形に於ける永久ひずみを説明するのに有効であるといつてよいことがわかる。全部の供試体の実測値について曲線の解析を行つて求めた E_i および E_{ia} と E_{smic} 、 E_a などの値の各バッチ毎の平均値を示すと、表-5の通りである。この表から E_i は E_{smic} にほぼ近い値を示している。

図-7. 瞬時変形曲線

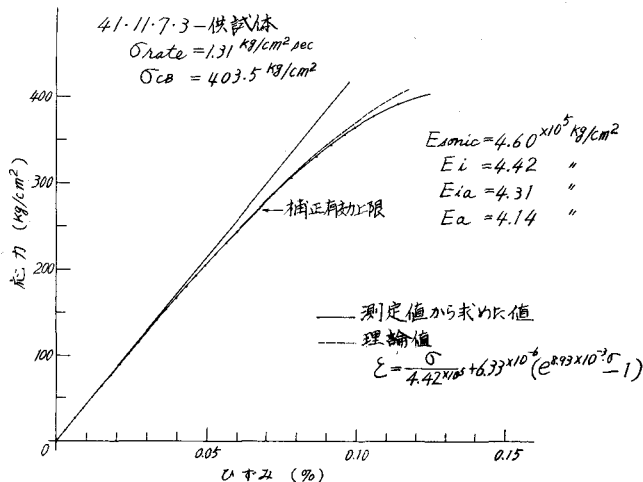


表-5 各種弾性常数の比較

バッチ別	材令	E_{smic} ($\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)	E_i ($\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)	E_{ia} ($\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)	E_a ($\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)	$\frac{E_{smic}}{E_i}$	$\frac{E_{smic}}{E_a}$
41.11.7	28 ^B	4.63	4.63	4.39	4.13	1.00	1.12
41.11.22	28	4.54	4.49	4.23	3.98	1.01	1.14
41.1.24	14	4.31	4.22	4.17	3.72	1.02	1.14

E_a は普通載荷速度に対するもの。

1) 横道、松岡：「コンクリートの変形のレオロジー的考察」セメント技術年報 昭和39年、XVIII。