

V-11 セメントの水和進行式とそのコンクリートのクリープ・解析への適用

日本大学, 電力中央研究所 正員 関 恒吾
 電力中央研究所 正員 河角 誠 正員 笠原 清 栗山 武雄

1. はじめに

セメントの水和進行を支配する微分方程式を得たので, その解を示し, セメントの結晶と, 未水和水の量およびその粘性を考慮に入れた簡単なコンクリートのクリープモデルの解析に上記の解ととり入れ, クリープ曲線式を計算した。

2. セメントの水和進行式

既報の, 水中養生した中庸熟ポルトランドセメントペーストの結合水の測定結果から, セメントの水和速度は次の(1)式で表わされることわかった。

$$\frac{dC_H(t)}{dt} = (1-n) k_0 t^{-n} [W - 0.37 C_H(t)] [C - C_H(t)] \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここに, t : 材令(日), C : 単位セメント量(kg/m^3), W : 単位水量(kg/m^3), $C_H(t)$: 材令 t 日までに水和したセメント量(kg/m^3), $W_H(t)$: 材令 t 日までに水和した水量, k_0, n : 実験定数。

ここでセメントの完全結合水量を37%と仮定している。 $(W_H = 0.37 C_H)$ (1) を初期条件 $C_H(0) = 0$ のもとで解けば, R_H をセメントの水和進行率として,

$$C_H(t)/C = R_{H(t)} = \begin{cases} [1 - e^{(0.37C-W)k_0 t^{1-n}}] / [1 - 0.37 \frac{C}{W} e^{(0.37C-W)k_0 t^{1-n}}], & (0.37C-W \neq 0) \cdots (2) \\ 0.37 k_0 t^{1-n} / [\frac{1}{C} + 0.37 k_0 t^{1-n}], & (0.37C-W=0) \cdots (3) \end{cases}$$

を得る。吟味として, $0.37C-W > 0$ (セメント過剰) で(2)より $R_H(\infty) = W/0.37C < 1$ で未水和なセメントが残ることを示している。 $0.37C-W \leq 0$ で(2), (3)より $R_H(\infty) = 1$ であり, 水和が完全に

行われることを示している。

中庸熟ポルトランドセメントペーストを, 水中養生した場合に, 実験より, 次の(4)式のようになつた。

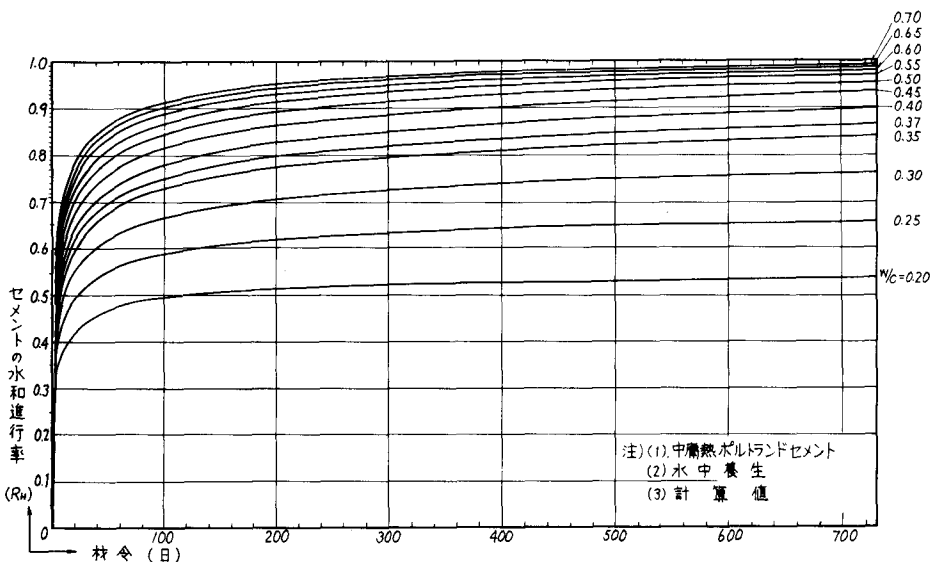


図-1 水セメント比(W/C)を異にしたセメントの水和進行率と材令との関係

$$k \cdot t^{-n} = 0.0009168 t^{-0.6111} [\text{cm}, \text{kg}, \text{days}] \cdots (4)$$

この場合の実験値と計算値の比較を表-1に示す。

また、普通ポルトランドセメント密封養生の場合^[2]、限られたデータであるが、福田良治氏の結果を用い、

$$k \cdot t^{-n} = 0.0004896 t^{-0.8059} \cdots (5)$$

を得た。この場合も完全結合水量を37%と仮定したが、検討を要するところである。

(4)を用いて計算した、水セメント比を異にしたセメントの水和進行率と材令との関係を図-1に示す。

3. コンクリートの圧縮強度

あでに得られて1)有効セメント水比(C_H/W)とコンクリートの圧縮強度(σ_c)との関係式^[1]

$$\sigma_c = -281.2 + 413.97 (C_H/W) \text{ (kg/cm}^2\text{)} \cdots (6)$$

と(2),(3)式を組合せて得た強度の計算値と、(6)式のデータとしては用いられなかったセメント協会の共同試験結果^[3]とを比較すると図-2のようになる。図-3には有効セメント水比から計算したコンクリートの圧縮強度と材令との関係を示す。

4. セメントの水和と水の粘性を考慮に入れた簡単なコンクリートのクリープモデル

密封養生したコンクリートのクリープを考へる。以下の仮定に基づき、図-4に示したモデルについて式をたてる。

このモデルは本質的に17, Maxwell型ではあるが、クリープ回復の実験結果を見ると、遅延弾性部分の歪成分は比較的小さいと考えられるので、それ

表-1 水和進行率の実験値と計算値

W/C	水 和 進 行 率				注
%	7日	28日	91日	1年	
25	0.443	0.522	0.584	0.632	実験値
	0.415	0.515	0.585	0.641	計算値
35	0.503	0.616	0.724	0.778	実
	0.501	0.627	0.721	0.808	計
40	0.527	0.654	0.770	0.838	実
	0.534	0.669	0.769	0.862	計
55	0.573	0.722	0.900	0.970	実
	0.606	0.756	0.861	0.945	計

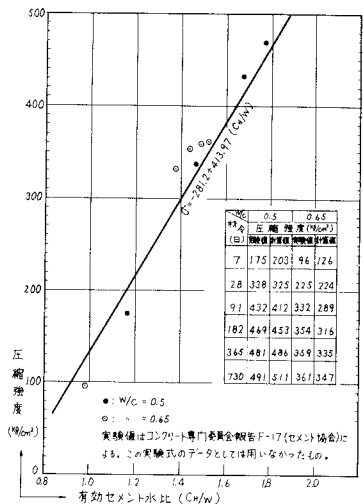


図-2 強度推定式の有効性

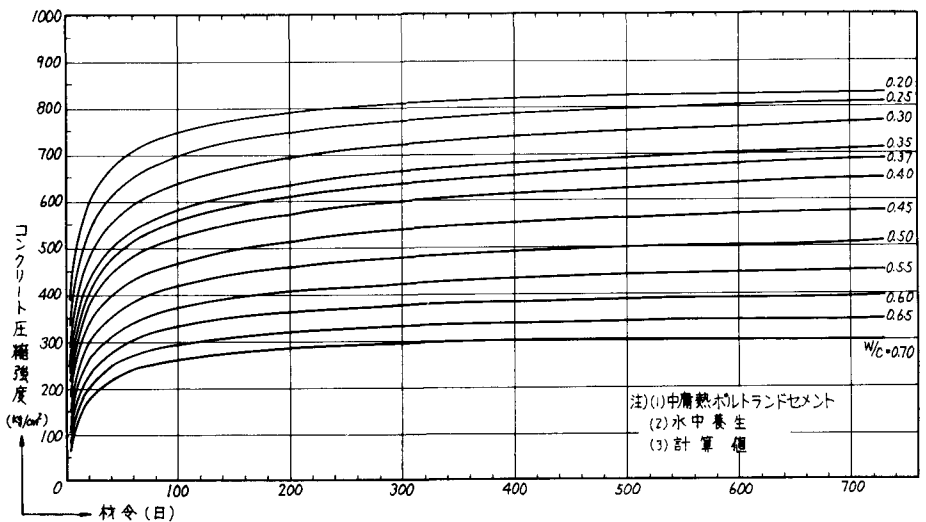


図-3 有効セメント水比より計算したコンクリートの圧縮強度と材令との関係

近似では(11)とも考えられる。

さて、(1)結晶の形状は、半径 r 、長さ l の円柱でCSH針を近似したものとし、セメント化学の知識により、結晶は、水和の図程でその大きさは不変で、その数が増すと仮定する。クリープ速度は、以下の(2)、(3)に比例し、(4)~(6)に反比例するとする。(2)応力の σ 乗、(3)結晶間の水膜の厚さ(d)の p 乗、(4)結晶間の接触長さ(l) (5)水の粘性(η) $\times$ 結晶の数(m)。さらにクリープ歪(ϵ_c)は応力(σ)と接触長さ(l)に比例するとし、 m の影響は今回 d の中に入れて考える。この点では将来改善したい。いま V_{uw} を未水和水の体積、 V_{hc} は水和セメントの体積として、 $d \propto V_{uw}/2\pi r h m$ なる近似を用いれば、仮定より $\sigma = 2$ となり、結局、

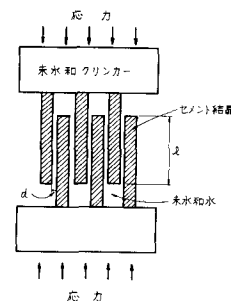


図-4 セメントの水和と水の粘性を考察に入れたセメントポアーストのクリープモデル

$$d\epsilon_c/dt = (A_1/\eta) [V_{uw}/V_{hc}]^p \sigma^2 / \epsilon_c.$$

ここで、水の単位容積重量を ρ_w (kg/m³) とすれば、

$$V_{uw} = \begin{cases} (1/\rho_w) [W - 0.37C] / [1 - 0.37(C/W) e^{(0.37C-W)R_0 t^{1-n}}] & (0.37C-W \neq 0) \dots (7) \\ (1/\rho_w) W / [1 + W R_0 t^{1-n}] & (0.37C-W = 0) \dots (8) \end{cases}$$

であるから、

$$\epsilon_c(t-t_1) = \begin{cases} (A_2/\eta^{1/2}) \int_{t_1}^t [(W-0.37C) / \{1 - e^{(0.37C-W)R_0 t^{1-n}}\}]^p dt & (0.37C-W \neq 0) \dots (9) \\ (A_2/\eta^{1/2}) \int_{t_1}^t \left[\frac{1}{R_0} \frac{1}{(1-n)p-1} (t_1^{1-(1-n)p} - t^{1-(1-n)p}) \right] & (0.37C-W = 0) \dots (10) \end{cases}$$

ここに、 t :コンクリートの材令(日)、 t_1 :載荷材令(日)、 $\epsilon_c(t-t_1)$:載荷後 $t-t_1$ 日におけるクリープ歪。

ただし式中の p は以下のようにして定めた。普通ポルトランドセメントを用いた $W/C = 0.4$ のコンクリートを密封養生した供試体に材令28日と91日で載荷したクリープ試験のデータに、 $\log$ の実験式のあてはまる材令の範囲で、 $\epsilon_c/\sigma = F(R) \log_e(t-t_1+1)$ と仮定し、 $F(R)$ を求めてある。これより、

$$F(R) \frac{\log_e(t-t_1+1)}{t-t_1+1} = \frac{A_2}{\eta} \left[\frac{W-0.37C}{1 - e^{(0.37C-W)R_0 t^{1-n}}} \right]^p$$

$t-t_1+1 > e$ の範囲で両辺の $\log$ をとり、この勾配から p を最小自乗法によって決定した。

結果は $p = 5.936$ となり、

クリープ歪の絶対値を求めるためには A_2 が明らかとならねばならない。コンクリートのクリープ歪は、他の条件が等しければ、ポアースト量に比例すると考えられているので、 A_2 はおそらくポアースト量に比例し、骨材の性質に比例

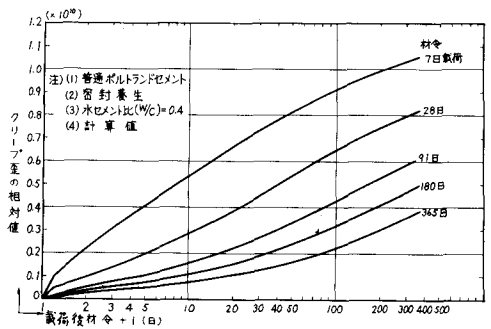


図-5 載荷材令を異にしたコンクリートのクリープ歪の相対値

する量と思われる。(9)式の根号部分を計算して得られた結果を図-5~図-8に示す。定性的には従来の実験結果に類似していると考えられる。特に図-5に見られる曲線の形状は、長期間実験を行ったり、若材令で載荷を行ったりと実際にあらわれるもので、従来の南拓局のlog式では表わし得なかったため、このような考察を思いつく有かな動機となったものである。ただし実際にはこゝろと数しり曲り方ではない。

5. あわりに、

水和を考慮に入れたクリープモデルは、上記のようにごく簡単なものであつても、得られる結果は極めて興味深いものがあり、このように関心からの研究が有効であることを示唆している。定量的な一致を得るためには、(1) 普通ポルトランドセメントの結合水量の豊富が測定結果(2) 組織的によりクリープ実験、(3) 電子顕微鏡観察等に基づいたペーストモデルの3次元化を含んだ精密化が切に望まれる。

上記において、水の粘性をとり入れた利点には特に認められぬようであるが、これは高温下におけるクリープの説明を心に描いて行つたものである。⁽⁴⁾筆者は高温下におけるクリープもこのような考へ方で説明されることを夢みている。そのためには、温度による水の粘性の変化がよく知られてゐるので、水和速度の温度による変化を知ることにより重要なことになる。(しかし本格的には統計力学等の力によるわけはわからぬであろう。計算にあつてはK.C.C. 杉村英彦氏に大変お世話にたつた。

6. 参考文献

- [1] Seki et al., J. A. C. I. May, 1969.
- [2] 福田: 小野田研究彙報第6巻第1冊 19号
昭和29・4.
- [3] コンクリート専門委員会報告F-17 昭和42・4.
- [4] Seki & Kawasumi, A. C. I. Seminar, Berlin, 1970.

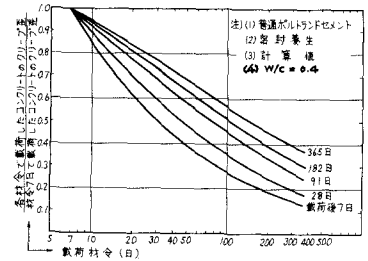


図-6 クリープ係数による載荷材令の影響

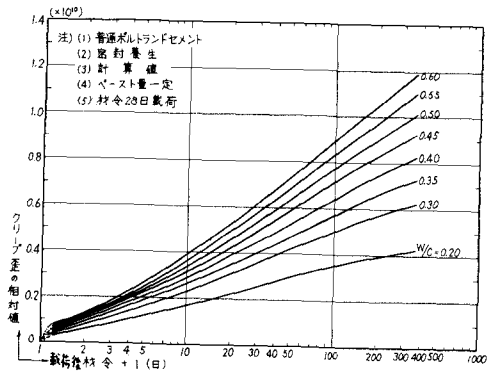


図-7 水セメント比を異にしたコンクリートのクリープ係数の相対値

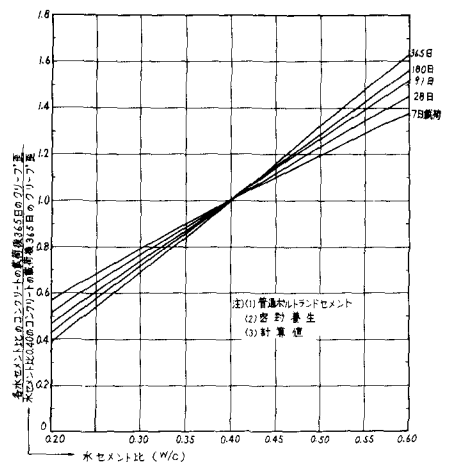


図-8 コンクリートの載荷後365日のクリープ係数による水セメント比の影響