

鹿島建設技術研究所 正員 夏目忠彦

・ 村山八洲雄

・ ○村田俊彦

1. まえがき マスコンクリート等を施工する場合、温度ひびわれの防止あるいは制御の観点から、事前に、コンクリートに生ずる温度応力を定量的に把握しておくことが重要である。そこで、セメントの水和熱に起因する温度応力の解析手法の妥当性を検証するために、表-1のコンクリートを用いて、若材令コンクリートのクリープ特性を中心にした材料実験ならびに新旧コンクリート打継部の模型実験を行った<sup>1)</sup>。本報告は、これらの実験結果の概要をまとめたものである。

2. 温度応力の解析手法 セメントの水和熱に起因する温度応力は、コンクリートが硬化する過程で生ずるので、材令の進行に伴うコンクリートの温度や物理的諸性質（弾性係数、線膨張係数、クリープ係数等）の時間的变化を考慮して解析する必要がある。そのため、ここでは、この時間的变化を考慮するため、増分法（Step by Step）を適用し、各Stepの応力増分（弾性解） $\Delta\sigma_i$ に対して重ね合せ法によるクリープ解析を行って、各Stepでの温度応力を算定する。この場合、 $\Delta\sigma_i$ はFEM解析から算定し、応力の重ね合せは、ひずみの適合条件を正確には満足していないが、新旧コンクリート間の力の釣合いを満足させるように、 $\Delta\sigma_i$ を内部拘束応力 $\Delta\sigma_{i,n}$ と外部拘束応力 $\Delta\sigma_{i,e}$ とに分離し、近似的に(1)式に基づいて行う。 $\Delta\sigma_i$ は、各Stepの打継目に発生するせん断応力に対応した応力と考え、別途、FEM解析から算定する。なお、今回は、(1)式の $1.2\sigma_{i,n}$ を、 $1.2\sigma_{i,n} = 2\sigma_{i,n}$ として取扱った。

$$(1) \text{コンクリート} \quad \begin{aligned} \sigma_{i,n} &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\Delta_1 \sigma_i}{1 + 2\sigma_{i,n}} + \frac{\Delta_2 \sigma_i}{1 + 1.2\sigma_{i,n}} \right] \\ (\text{新コンクリート}) \quad \sigma_{i,n} &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\Delta_2 \sigma_i}{1 + 2\sigma_{i,n}} + \frac{\Delta_1 \sigma_i}{1 + 1.2\sigma_{i,n}} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_{1,n}, \sigma_{2,n}$ ；旧および新コンクリートの*i*Stepでの温度応力、 $\Delta_1 \sigma_i, \Delta_2 \sigma_i$ ；旧および新コンクリートの*i*Stepでの内部拘束応力、 $\sigma_{i,n}$ 、 $\Delta_1 \sigma_i, \Delta_2 \sigma_i$ ；旧および新コンクリートの*i*Stepでの外部拘束応力、 $\sigma_{i,n}$ ；旧コンクリートの*i*Stepでの応力増分の*n*Stepでのクリープ係数、 $2\sigma_{i,n}$ ；新コンクリートの*i*Stepでの応力増分の*n*Stepでのクリープ係数、 $1.2\sigma_{i,n}$ ；*i*Stepでの外部拘束応力に対応した*n*Stepでのクリープ係数。

### 3. 若材令コンクリートの材料実験

(1). 弹性係数 供試体の形状寸法は $\phi 10 \times 20$ である。養生条件は、標準養生と養生槽での養生の2種類である。この養生槽は、供試体製作時に表-1のコンクリートを打設して製作したもので、セメントの水和熱を利用して供試体の温度履歴がマッシブなコンクリートの温度履歴に等しくするためのものである。この場合、供試体の乾燥収縮を抑制するため銅板容器( $t=0.1\text{mm}$ )にコンクリートを打設して密封し、試験時にはこの銅板を取り除いた。図-1に弹性係数( $E_c$ の $1/3$ 点、3個の平均値)と温度履歴から定まる有効材令<sup>2)</sup>の関係を示す。この図から、コンクリートの温度履歴の相違に基づく硬化促進の影響は、有効材令を適用することによって適切に評価できることがわかる。

(2). クリープ係数 模型（図-5参照）の新コンクリートの温度上昇段階で圧縮クリープ試験、温度下降段階で引張クリープ試験を行った。供試体は、いずれも $\phi 15 \times 40$ で内表面にグリースを塗布した銅板容器( $t=0.1\text{mm}$ )にコンクリートを打設して製作した。試験は、(1)の場合と同様な製作方法および目的の養生槽

表-1 コンクリートの配合

組成材の 最大寸法 (mm)	栓抜き 寸法 (mm)	セメント 量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材 量 (%)	単位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W %	セメント C %	細骨材 S %	粗骨材 G %	水和剤 P %
20	12±2.5	4±1	57	43.5	175	307	790	1036	0.768

セメントは普通セメントを使用

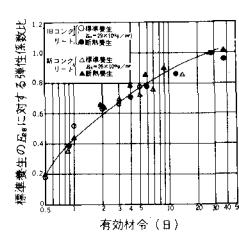


図-1 弾性係数と有効材令の関係

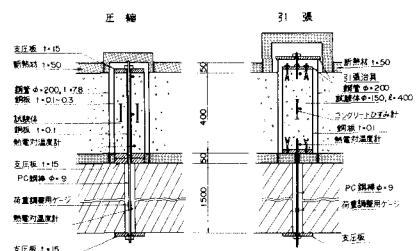


図-2 クリープ試験方法

を製作し、この養生槽の中で図-2に示すように、PC鋼棒(Φ9.2mm)を緊張して行った。試験結果は、コンクリートの硬化促進の影響を考慮するため、有効材令の考え方でまとめた。図-3にクリープひずみと有効材令の関係を示す。有効材令に対するクリープ係数 $\varphi_t$ は、有効材令28日の弾性係数 $E_{28}$ (実測値 $0.25 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ )を基準にして、下記の手順で算定した。(2)式から単位有効材令当りのクリープ係数 $\Delta\varphi_t$ を算定し、 $\Delta\varphi_t$ と $t$ の関係を最小自乗法によって、 $\Delta\varphi_t = 0.67 \times e^{0.17t}$ で表現した(図-4参照)。そして、便宜的に、 $t=0$ で $\varphi_t=0$ とし(3)式から $\varphi_t$ を求めた。このようにして算定した実測クリープ係数 $\varphi_t$ は、H.リュッシャー<sup>2)</sup>のクリープ係数に比べて、初期急速変形によるクリープを過小評価しており、遅れ弾性変形および残余の流動によるクリープを過大評価する傾向がある。なお、(1)式の $\varphi_t$ と $\varphi_t$ の関係は、(4)式のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_t &= \frac{\Delta E_{c,t}}{E_{28}} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (2) \quad \text{ここに, } E_{28}; \text{有効材令28日の弾性ひずみ, } \Delta E_{c,t}; \Delta t \\ \varphi_t &= \int_0^t \Delta\varphi_t \cdot dt \quad \} \quad (3) \\ &= 3.9 \cdot (1 - e^{-0.17t}) \\ &\quad (\text{ただし, } t < 22 \text{ 日})\end{aligned}$$

$$\Phi_{t_0, t_1} = \frac{E_{t_0}}{E_{28}} (\varphi_{t_1} - \varphi_{t_0}) \quad (4)$$

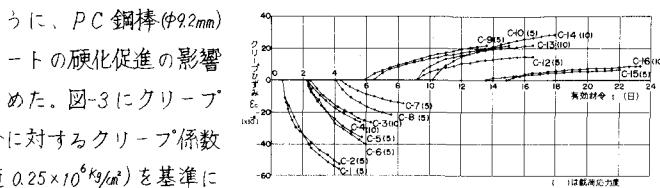


図-3 クリープひずみ

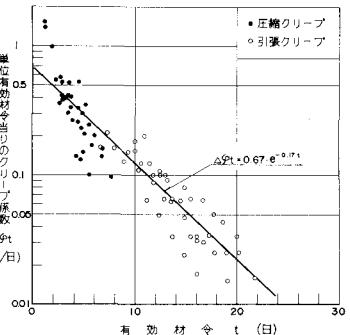


図-4 単位有効材令当りのクリープ係数

#### 4. 新旧コンクリート打継部の模型実験

(1) 実験方法 試験体の形状寸法を図-5に示す。新コンクリートは、旧コンクリート打設後17日目に打設した。この場合、試験体の側面は、ビニールシートと断熱材で囲み、試験体の乾燥収縮を小さくするとともに、側面からの放熱を少なくして、マッシュな部材と同一条件にならるようにした。試験体には、コンクリート応力計、無応力計および熱電対温度計を図-5のように埋設し、旧コンクリート打設直後から、約50日間にわたって測定を行った。

(2) 温度応力の解析条件 解析は、旧コンクリート打設後から約50日間を対象とし、この期間を14 Stepに分割して、2に示した要領で行った。解析に用いた各Stepの弾性係数、線膨張係数( $10.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )、クリープ係数および温度変化量は、実測値を用い、ボアソン比については、 $\nu_c = 0.17$ (一定値)と仮定した。

なお、旧および新コンクリートの物性は、それぞれの平均温度から定まる有効材令を用いて評価した。

(3) 温度応力に関する実測値と計算値の比較 温度応力の経時変化について比較した一例を図-6に示す。この図から、実測値と計算値とはかなり良好な対応を示していることから、2に示した解析手法は、ほぼ妥当なものであり、また、解析精度も実用的には十分であると判断される。

5. あとがき 今回の実験により、セメントの水和熱に起因する温度応力を実用的な精度で算定できる見通しが得られた。現在、実構造物の施工にあたっての水和熱に起因する温度ひびわれの事前検討において、このような解析手法を適用しながら、実状に見合った諸定数の取扱いについて検討している。

(参考文献) 1) 鹿島建設技術研究所年報、1980, Vol. 28 (発表予定)

2) H. Rüsch他「コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮」百島祐信訳、鹿島出版会

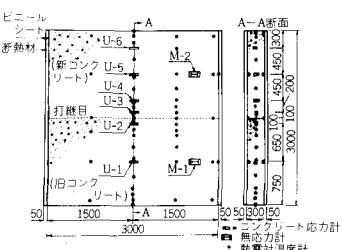


図-5 模型の形状寸法

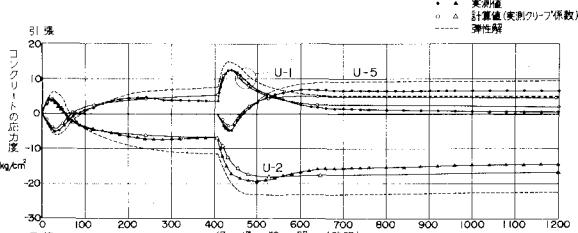


図-6 温度応力の経時変化