

V-7

力学モデルによるコンクリートの時間依存ひずみの予測について

九州産業大学 正会員 宮川邦彦

1. まえがき

コンクリートの時間依存ひずみ(乾燥収縮, クリープ)を正確に予測するためには, ひずみ性状に影響を及ぼす配合, 材令, 環境条件, 部材寸法等の種々な要因を考慮せねばならず, しかも, 長期間の予測を必要とするため, 単に限られた範囲内での実験結果だけからこれらのひずみを予測することは困難であろう。

本研究は, このような観点から時間依存ひずみの生成機構を十分に検討した上で, その機構を表示できる力学モデルの助けを借り, そのモデル要素値を従来の研究成果に基づいて定めることにより, 種々な条件下での長期的なひずみ予測を行った。以下に, 時間依存ひずみの生成機構に関する考え方, ならびにその考えに立脚した力学モデル解析法とその予測結果について報告する。

2. 時間依存ひずみの生成機構と力学モデル解析

コンクリートの時間依存ひずみの生成機構に関しては, これまでも種々な説が提唱されてきたが, 本研究では特にクリープひずみの生成機構あるいはその要因に関し, 次の2点に着目して解析した。

- (1). 遅れ弾性(回復性クリープ)はコンクリート複合体内部の応力平衡に現象に起因するひずみ成分である。
- (2). 流動(非回復性クリープ)はセメントの水和反応等による化学的要因と荷重による物理的要因との複合作用によって発生するひずみ成分である。

このうち, 遅れ弾性に関しては既に報告済であるので, 本報では流動に関する考え方を説明する。現在, 流動の生成機構に関しては, Seepage説が最も有力視されている。この説は載荷あるいは毛細管張力のような力の作用で, セメントゲル中のゲル水が徐々に逸散するため流動すると考えている。だが, このような Seepage 効果が実験されたクリープ現象のように数十年間も継続すると考えることには問題があるように思われる。従って, この生成が単に力の作用だけによるものではなく, 結合材であるセメントの水和や炭酸塩化現象のような化学的要因と力の作用による物理的要因とが同時に作用するとき生じる現象であろうと推定した。すなわち, セメントマトリックスやマトリックスと骨材粒子との界面で何らかの化学変化が生じている過程で力の作用を受けると, その方向に始めてひずみが助長されると考えた。このように考えれば, 前記の時間依存ひずみの影響要因や試的に究明された複雑なひずみ挙動をより適確に説明できる。

以上のような考えに基づき, 本研究では図-1に示す力学モデルの要素値を次のように定めた。

腕の長さの決定……まず, 配合から骨材部の容積割合( $\ell_1$ )とセメントペースト部のそれ( $\ell_2$ )を求める。次にペースト部の容積割合を図-2のように力を受け持てる連結固相( $\ell_{11}$ ), 流動を生じる未連結の固相( $\ell_{12}$ )および力を受け持てない気・液相( $\ell_{13}$ )に分

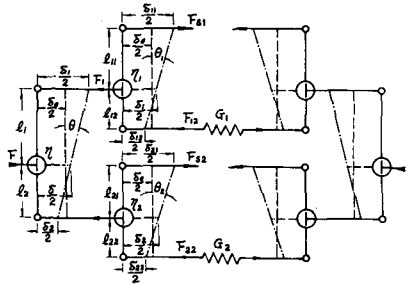


図-1 応力平衡に因るモデル

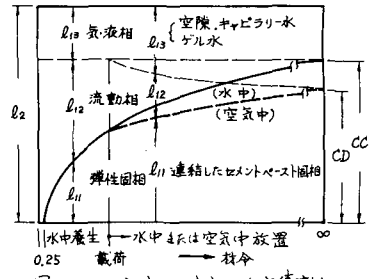


図-2 セメントペースト部の容積割合

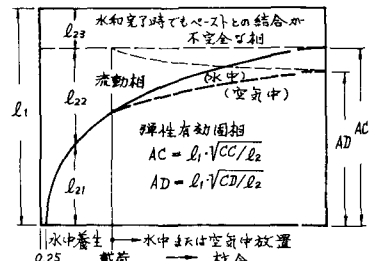


図-3 骨材粒子部の容積割合

$$\begin{aligned}
 CC &= (C/\rho_c + 0.23C)/1000 \dots (1) \\
 X &= 15 \cdot (1-RH) \cdot e^{AY} \dots (2) \\
 AY &= -(0.2 + 0.15\sqrt{C/W}) \cdot (TH - 0.25)^{1/4} \\
 \text{ニク, AY: セメントの水和速度係数} \\
 TH: 単位重量当り水化熱 (度) \\
 \ell_{11} &= CC \cdot (1 - e^{AX}) + CC \cdot DX \cdot \{1 - e^{AX}\} \cdot (1 - e^{AX}) \dots (3) \\
 DX &= (D - X)^2 / D^2 \dots \text{正三角形断面} \\
 AX &= -(0.2 + 0.15\sqrt{C/W}) \cdot (T - 0.25)^{1/4} \\
 \text{ニク D: 部材厚さ} \\
 \ell_{12} &= CC - \ell_{11} - CC \cdot DX \cdot (1 - e^{AX}) \dots (4) \\
 A\beta &= -0.15 \cdot (T - TH)^{1/4} / HY \\
 HY &= \{1 - (1 - DX) \cdot e^{AY}\} \\
 \text{ニク A\beta: 水合速度係数} \\
 HY: \text{水合度} \\
 \eta_1 &= 2 \times 10^4 \sqrt{C/W} \cdot HY \cdot (\ell_{11}/CC)^3 \\
 \eta &= 4\eta_1, \eta_2 = 10\eta_1 \dots (5) \\
 F_{s1} &= \beta \ell_{12} \{1 - e^{\alpha(T-TH)}\} \dots (6) \\
 F_{s2} &= \delta \ell_{22} \{1 - e^{\alpha(T-TH)}\} \\
 \alpha &= -100 / (HY \cdot D^2) \\
 \beta &= 1500 \cdot (1 - RH) \cdot HY \cdot (1 - e^{AY}) \\
 \delta &= \beta / 2
 \end{aligned}$$

割し、 $\ell_{11}$ はセメントの水和過程から、また、その最終値  $C_1$ は式-1のように  $C_{\text{germin}}$ の考えを適用して決定する。なお、ある枝令から空气中に放置されるときは、水和が一部阻害されるため、その影響深さ  $X$ を式-2のように仮定し、このときの任意枝令  $T$ での  $\ell_{11}$ の値を式-3のように、また、 $\ell_{12}$ も乾燥の影響を考慮して式-4のように定める。

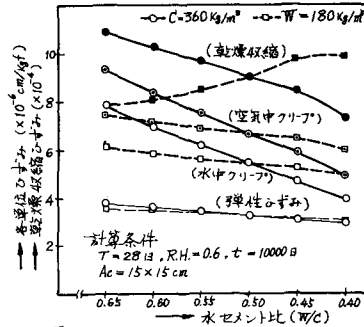


図-4 水セメント比と各ひずみの関係

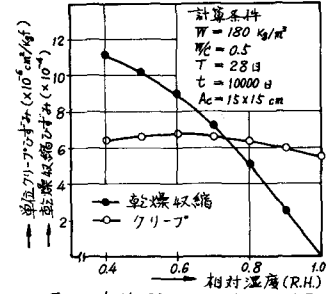


図-5 相対湿度と各ひずみの関係

ここに、低水セメント比 ( $w/c \leq 0.42$ ) で完全水和に必要な水量が不足する場合、その未水和セメント粒子は骨材と考える。次に骨材部の各骨材割合は、図-3のようにペースト部の水和程度に応じて定める。

バネ定数の決定・・・バネ定数  $G_1, G_2$ はモデルの関係上、 $G_1 = \ell_{11} E_{cp}$   $G_2 = \ell_{12} E_a$ となるが、本研究では従来の実験結果を参考にして、セメントペースト固相の弾性係数を  $E_{cp} = 3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、骨材のそれを  $E_a = 6.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ に定める。

回転粘性係数の決定・・・回転ダッシュポントは、コンクリート内部での応力平衡化や流動現象を表すための仮想要素であり、従って、それらの値はひずみ挙動を考慮して求めなければならない。ただし、 $\eta_1$ は遅れ弾性、 $\eta_2$ はペースト部の流動、 $\eta_3$ は骨材部の流動の各速度に関連している。本研究ではこの点を考慮して式-5のように定める。

吸引力の決定・・・モデル中に示した吸引力  $F_{s1}, F_{s2}$ は、乾燥に伴う毛細管張力を仮想したものであり、空気中の相対湿度 (RH)と毛細管張力 (AP)との関係を単純化して式-6のように定める。

以上のようにモデル要素値を決定したが、このように全要素値が時間の関数であるため、これらの値を用いて直接モデル解析することは不可能である。従って、一応ある時間内ではこれらの値が定数であるとしてモデル解析した後、その時間間隔を適当に区切り、各間隔毎に要素値が段階的に変化するとして数値計算を行った。解析結果を図-4～7に示す。

### 3. 力学モデルによる予測結果の考察

図-4は単位セメント量あるいは単位水量を一定とした配合の水セメント比に関する予測である。図のように乾燥収縮ひずみは単位水量が増す程、また単位ペースト量が増す程大きい。この傾向は従来の実験結果と一致している。次に水中でのクリープは、単位セメント量が一定の場合、クリープ係数が水セメント比の増加に伴い1.2～2.0程度まで変化するのに対し、単位水量が一定の場合は1.6前後と一定している。これはコンシステンシー増減を考慮している Rüschの予測と一致するものである。また、空気中でのクリープも定性的には水中のそれと同様であるが、定量的には水中のクリープより3割程度大きく、クリープ係数で2.0～2.5程度である。この値はRüschの予測に基づく現行のPC示性書のそれとはほぼ一致している。図-5は相対湿度に関する予測であるが、図のように乾燥収縮に関しては Baganatの予測と定性的に一致している。図-6は載荷時枝令に関する予測を示しており本予測では、多少空気中での早期載荷クリープを過大に、長期載荷では逆に過小評価している。図-7は部材寸法に関する予測であるが、この場合20cm以下の部材では従来の実験結果と異なるように思われる。ただし、本予測は10000日後の結果であることや炭酸塩化収縮を本予測では無視したことによるものと思われる。

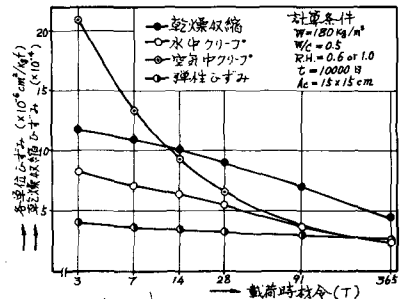


図-6 載荷時枝令と各ひずみの関係

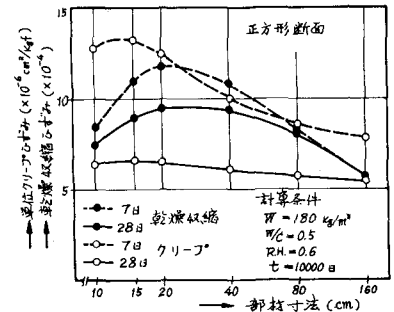


図-7 部材寸法と各ひずみの関係