

# 論文 複合則理論を用いたコンクリートの圧縮クリープひずみの推定に関する研究

清原 千鶴<sup>\*1</sup>・佐藤 嘉昭<sup>\*2</sup>・永松 静也<sup>\*3</sup>・三橋 博三<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究では、複合則理論を用いた実用的なコンクリートの圧縮クリープひずみの予測式を構築することを最終目的とし、ここでは、同一環境下におけるコンクリートのBasic Creepひずみの予測式について検討を行った。その結果、有効ヤング係数によってクリープひずみを表し、コンクリート調合設計時に得られる水セメント比、骨材容積比および骨材の吸水率をパラメータとしたBasic Creepひずみの予測式を提案した。

**キーワード：**複合則理論，圧縮クリープひずみ，Basic Creepひずみ，セメントペースト，骨材

## 1. はじめに

コンクリートのクリープは乾燥収縮と並んで、コンクリート構造物のひび割れの発生・進展にもなう耐久性上の重要な材料特性の一つであり、コンクリート構造物の耐久性を保証する上で、検討されるべき重要な因子である。しかしながら、一般にクリープ実験は長期間を要し、コンクリートの全ての調合についてそのクリープ特性を明らかにすることは不可能に近い。

そこで、本研究ではコンクリートをクリープ発生源となるセメントペーストと骨材の構成材料から成る二相複合材料として取り扱い、構成材料の特性および量の影響を考慮できる複合則理論を用いてコンクリートのクリープ関数を構成する方がより合理的であると考え、図-1に示すような手法でBasic Creepひずみの予測式の構築を試みた。

なお、本論文では1)使用するセメントは普通ポルトランドセメント、2) 載荷期間中の載荷応力は一定( 応力度比0.3以下)、3) 温度20℃、湿度60%R.H.の条件下におけるコンクリート供試体のBasic Creepひずみについて検討を行った。

## 2. Basic Creep の予測式の構築

### 2.1 複合則理論の適用

ひずみは個々の要素の集積であるという特性を

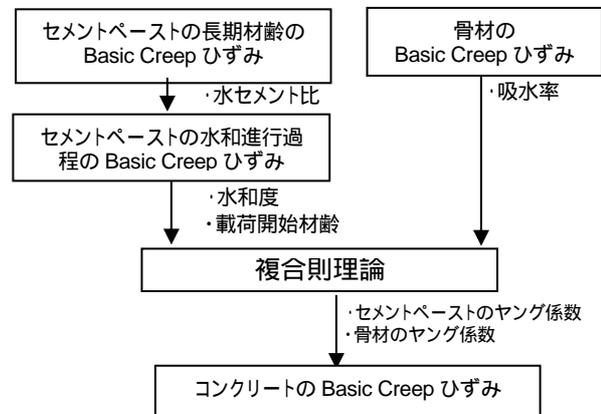


図-1 Basic Creep ひずみの予測フローチャート

持っているため、複合則理論が成り立つ。クリープひずみも例外ではない。そこで、本論文では有効ヤング係数を用いてコンクリートのクリープひずみを表したCounto<sup>1)</sup>の研究を参考にし、複合則理論の適用を検討した。有効ヤング係数は、無載荷状態のコンクリートのヤング係数にクリープによる剛性低下を考慮した値であり、式(1)で表される。有効ヤング係数を用いることで、複雑なクリープ特性を簡易的に表すことができる利点がある。

$$E_{ec}(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + C(t, t_0) \cdot E_c(t_0)} \quad (1)$$

ここに、

$E_{ec}(t, t_0)$  : 材齢 $t_0$ で載荷された材齢 $t$ における  
コンクリートの有効ヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)

\*1 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース助手 博士(工学)(正会員)

\*2 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース教授 工博(正会員)

\*3 北九州市立大学 国際環境工学部環境空間デザイン学科教授 工博(正会員)

\*4 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻教授 工博(正会員)

$C(t, t_0)$  : 材齢 $t_0$ で載荷された材齢 $t$ における  
 コンクリートのスペシフィッククリープひずみ  
 ( $\times 10^{-6}/(\text{N}/\text{mm}^2)$ )

$E_c(t_0)$  : 材齢 $t_0$ におけるコンクリートの  
 ヤング係数( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$t, t_0$  : 材齢および載荷開始材齢(日)

コンクリートのクリープは、有効ヤング係数を用いて  
 式(2)のように表される。

$$C(t, t_0) = \frac{1}{E_{ec}(t, t_0)} - \frac{1}{E_c(t_0)} \quad (2)$$

式(2)中におけるコンクリートのヤング係数の算出  
 は、筆者らが提案したHashin-Hansen式を修正した複  
 合則理論式<sup>2)</sup>を用いることとした(式(3)参照)。

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{(1-V_a) \cdot E_p + (1+V_a) \cdot E_a}{(1+V_a) \cdot E_p + (1-V_a) \cdot E_a} \quad (3)$$

ここに、 $E_p = k \cdot \bar{E}_p$

$\bar{E}_p$  : セメントペーストのヤング係数( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$k$  : 補正係数

式(3)に示すHashin-Hansenの修正式は、骨材界  
 面に生じるマイクロクラックや遷移帯領域の影響を補  
 正係数として考慮している。したがって式(4)で示さ  
 れるBasic Creepひずみには、骨材界面に生じる非弾  
 性挙動が考慮されていることとなる。

$$C_{BC}(t, t_0) = \frac{(1+V_a)E_{ebp}(t, t_0) + (1-V_a) \cdot E_{eba}(t, t_0)}{[(1-V_a)E_{ebp}(t, t_0) + (1+V_a) \cdot E_{eba}(t, t_0)] \cdot E_{ebp}(t, t_0)} - \frac{(1+V_a)E_p(t_0) + (1-V_a) \cdot E_a}{[(1-V_a)E_p(t_0) + (1+V_a) \cdot E_a] \cdot E_p(t_0)} \quad (4)$$

ここに、

$E_{ebp}(t, t_0), E_{eba}(t, t_0)$  : Basic Creepひずみに  
 おけるセメントペーストおよび骨材の有効ヤング  
 係数( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$E_p(t_0)$  : 載荷開始材齢 $t_0$ における  
 セメントペーストのヤング係数( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$E_a$  : 骨材のヤング係数( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$V_a$  : 骨材容積比

さらに、式(4)におけるセメントペーストおよび  
 骨材の有効ヤング係数は、クリープひずみを考慮  
 したヤング係数となり、式(5)で表される。

$$E_{ebp}(t, t_0) = \frac{E_p(t_0)}{1 + C_{BP}(t, t_0)E_p(t_0)} \quad (5)$$

$$E_{eba}(t, t_0) = \frac{E_a}{1 + C_{Ba}(t, t_0)E_a}$$

ここに、

$C_{BP}(t, t_0), C_{Ba}(t, t_0)$  : 硬化セメントペースト  
 および骨材のBasic Creepひずみ( $\times 10^{-6}/(\text{N}/\text{mm}^2)$ )

$E_p(t_0), E_a$  : 載荷開始材齢 $t_0$ における硬化セメント  
 ペーストおよび骨材のヤング係数( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

なお、コンクリート中のセメントペーストと骨  
 材が負担する応力はコンクリートに生じる応力と  
 同一であると仮定し、構成材料のクリープ特性の  
 違いに伴う応力負担割合については考慮していな  
 い。

## 2.2 セメントペーストの物性値の推定

### (1) セメントペーストのヤング係数

図-2に外部と水分の移動のない封かん状態の  
 ヤング係数の経時変化を示す。水セメント比によ  
 らず材齢28日までは急激に増大するが、その後一  
 定値に収束する傾向を示している。本研究では式  
 (6)に示すような水セメント比および材齢をパラ  
 メータとする双曲線関数で表すこととした。

$$\bar{E}_p(x, t) = \frac{A \cdot t}{1+t} \times 10^4 \quad A = 0.036 + \frac{0.66}{x} \quad (6)$$

ここに、 $x$  : 水セメント比

式(3)中の補正係数 $k$ は、遷移帯領域などの影響  
 を考慮している係数である。内川ら<sup>3)</sup>の研究によ  
 れば、形成された遷移帯組織は、材齢が経過して

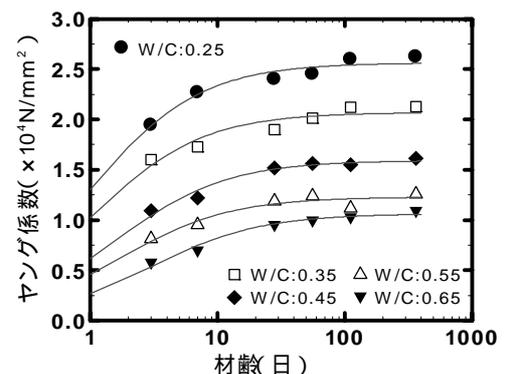


図-2 セメントペーストのヤング係数の経時変化

も密実化されず、その量は材齢7日程度で最大値を示す結果が得られている。そこで、ここでは既往の研究<sup>2)</sup>で得られた水セメント比と材齢の関数である式(7)で表すこととした。

$$k = 0.4x^{-0.19} \cdot t^{0.08} \quad (7)$$

## (2) セメントペーストのBasic Creepひずみ

既往の研究<sup>4)</sup>において、水和進行過程にあるBasic Creepには水和の進行の影響を受けない長期材齢の基準状態のクリープひずみ( $C_{BP0}$ )と同一のメカニズムによる載荷期間依存性が含まれ、それに加えて載荷開始材齢のひずみ速度( $\dot{C}_{BP0}$ )が載荷期間中のセメントの水和の影響を受けて徐々に小さくなるものと仮定して、式(8)のように表している。式(8)を積分することによって、Basic Creepひずみが算出できる。

$$\dot{C}_{BP}(t, t_0) = f(m, m') \cdot \dot{C}_{BP0}(t, t_0) \quad (8)$$

ここに、

$\dot{C}_{BP0}(t, t_0)$  : 基準状態のクリープひずみ速度

$f(m, m')$  : 水和度  $m$  , 載荷時の水和度  $m'$  の関数、

したがって、水和進行過程にあるクリープひずみの数式表示には、セメントの水和の進行を表す水和度  $m$  および基準状態のBasic Creepひずみの算出が必要となる。

### a) 水和度の算出

水和度  $m$  は結合水量  $w_m$  の進行を2次の反応速度論<sup>5)</sup>で表されるものと仮定すれば、式(9)で表される。また、水和の進行のし易さを表す係数  $a$  は、セメントペーストの結合水量の測定データより、水セメント比の関数で表されるものとした。

$$m = \frac{t}{a+t} \quad a = 4.75x^{1.55} \quad (9)$$

### b) 基準状態のBasic Creepひずみ

水和の進行の影響が含まれない基準状態のBasic Creepひずみは、回復性のひずみである遅延弾性成分と非回復性ひずみである流動成分の和として表されると考え、既往の研究<sup>4)</sup>により、式(10)で表すこととした。

$$C_{BP0}(t, t_0) = C_{BP0, (t, t_0)} + C_{BP0, (t, t_0)}$$

$$= a_0 \sum_{i=1}^n a_i \{1 - e^{-b_i(t-t_0)}\} + \eta \cdot (t-t_0)$$

$$\eta = 1.67x^{2.34} \quad a_0 = 39.1x^{0.74} \quad a_1 = 0.28x^{-0.44}$$

$$a_2 = 1 - a_1 \quad b_1 = 3.93x^{1.67} \quad b_2 = 0.11 + 0.16 \cdot \log(x)$$

(10)

### c) 水和の進行を考慮した関数 $f(m, m')$ の決定

基準状態のBasic Creepひずみは式(10)で表されることから、式(8)中の水和の進行を考慮した未定関数  $f(m, m')$  を具体的に決めれば、水和進行過程にあるBasic Creepひずみ ( $C_{BP0}(t, t_0)$ ) を求めることができる。ここでは、基準状態のBasic Creepひずみ  $C_{BP0}(t, t_0)$  が回復性ひずみと非回復性ひずみの和として表されることから、水和進行過程下にあるクリープひずみも同様に回復性および非回復性ひずみの2つに分けられ、回復性ひずみは載荷開始材齢および材齢の影響を受け、非回復性ひずみは材齢の影響を受けると仮定して、式(11)のように表されるものとした。

$$\begin{aligned} \dot{C}_B(t, t_0) &= f(m, m') \cdot \dot{C}_{B0}(t, t_0) \\ &= g_1(m, m') \cdot \dot{C}_{B0, (t, t_0)} + g_2(m) \cdot \dot{C}_{B0, (t, t_0)} \\ g_1(m, m') &= \left\{ 1 + 5x^{-1.4} \cdot (1-m')^{0.8} \right\} \cdot \left\{ 1 + (m-m')^{(17.0 \cdot x^{0.6} \cdot m'^{7.2})} \right\} \\ g_2(m) &= m^{33x^{-0.22} (m')^{0.86x^{-1.95}} \end{aligned} \quad (11)$$

式(8)に式(9)、式(10)、式(11)を代入し、水和進行過程にあるBasic Creepひずみを算出した。その結果を図-3に示す。これによると両者の間には若干ばらつきはみられるが、計算値は実測値の傾向を表していることが分かる。

## 2.3 骨材の物性値の推定

コンクリートのクリープひずみの主たる発生源は水和セメントペーストであり、コンクリート中の骨材は主にセメントペーストのひずみを拘束する働きをする。しかしながら、コンクリートに一定の応力が生じた場合、コンクリート中の骨材にも応力が生じているため、セメントペーストと同様にクリープひずみが生じるものと考えられる。そこで、本研究では、コンクリートのクリープひ

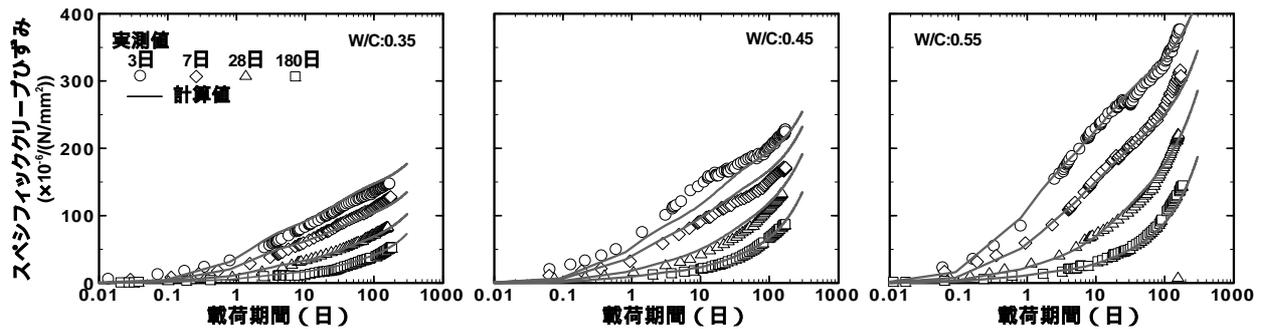


図 - 3 計算値と実測値の比較(セメントペースト)

ずみに影響を及ぼす骨材の特性として、1)骨材自体に生じるクリープひずみ、2)骨材によるセメントペーストのひずみの拘束効果(骨材のヤング係数)、の2つがあるものとした。

### (1) 骨材のヤング係数

骨材のヤング係数は、骨材の吸水率との関係に着目して検討することとした。既往の研究より収集したデータを図 - 4に示す。これによると、骨材の吸水率が増加にするとつれて骨材のヤング係数は低下しており、細骨材および粗骨材のヤング係数を式(12)に示す実験式で表すこととした。骨材のヤング係数は、式(12)で求めた細骨材および粗骨材のヤング係数にコンクリート中の細骨材および粗骨材の絶対容積比を乗じた値で表すこととした。

$$E_a = (s/a) \cdot E_s + (1 - (s/a)) \cdot E_g \quad (12)$$

$$\left. \begin{matrix} E_s \\ E_g \end{matrix} \right\} = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \times 10^4$$

ここに、 $E_s$ 、 $E_g$ ：細骨材および粗骨材のヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)  
 $s/a$ ：細骨材率、 $\mu$ ：吸水率(%)

### (2) 骨材のBasic Creepひずみ

骨材のクリープひずみは、主に岩石からコア供試体を用いて求められている。ここでは、国内外で公表された岩石のクリープ試験に関する実験データを収集し、骨材のBasic Creepひずみの推定について検討を行った。収集した実験データによれば骨材の含水状態によってクリープひずみが異なっている。そこで、本論文では、コア供試体中の水分移動のない状態として、周囲の環境と平衡状態にある自然乾燥状態の実験データを用いた。

図 - 5に様々な岩石のクリープひずみの経時変

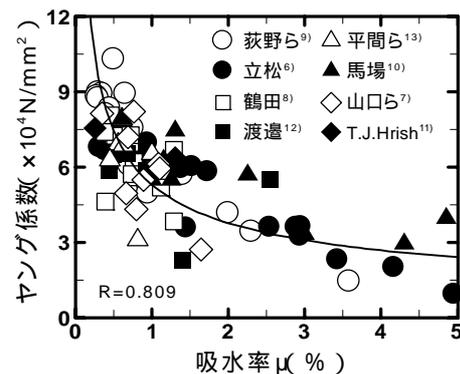


図 - 4 骨材の吸水率とヤング係数の関係

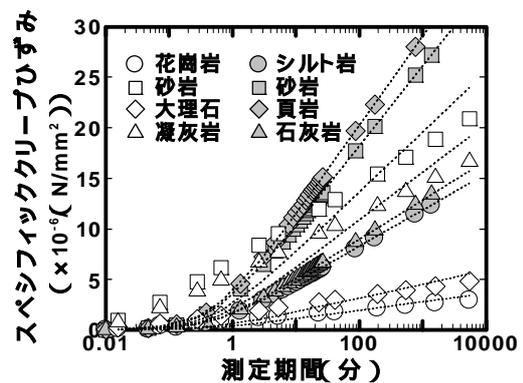


図 - 5 骨材の Basic Creep ひずみの経時変化

化の一例<sup>(14), (15)</sup>を示す。載荷応力レベルは0.95~0.9である。図中の点線は対数関数である式(13)で近似した曲線である。これによると、若干ばらつきはあるが、式(13)で表されているものと思われる。

$$C_{Ba}(t') = \alpha \cdot \log_e(t'+1) \quad (13)$$

ここに、 $\alpha$ ：定数、 $t'$ ：載荷期間(日)

骨材のBasic Creepひずみを推定するためには式(13)の定数 $\alpha$ を求める必要がある。そこで、定数 $\alpha$ と骨材の特性について検討することとした。図 - 6に岩石のヤング係数と定数 $\alpha$ の関係を示す。岩石のヤング係数が大きくなるほど定数 $\alpha$ の値が小さくなっている。また、図 - 7に載荷応力レベ

ル<sup>14)</sup>と定数Aの関係に示す。これによると応力レベル0.3以下になるとほぼ同一の値を示していることが分かる。セメントペーストのヤング係数に対して、骨材のヤング係数が大きいいため、骨材の負荷応力はセメントペーストよりも大きいものと思われる。しかしながら、一般に、骨材の圧縮強度のほうがコンクリートの圧縮強度よりも大きいことから、コンクリート中の骨材に対する応力レベルは低応力レベルであると考えられ、本論文では、式(14)に示すような骨材のヤング係数によって骨材のBasic Creepひずみが表されるものと仮定した。

$$C_{Ba}(t) = 0.64 \cdot E_a^{-1.11} \cdot \log_e(1440t+1) \quad (14)$$

さらに骨材のヤング係数 $E_a$ は、式(12)で表されていることから、式(14)に式(12)を代入すると骨材のBasic Creepは吸水率をパラメータとした式で表されることになる。

### 3. Basic Creepひずみの予測

#### 3.1 検証実験の概要

図 - 1に示すフローチャートに沿って複合則理論を用いてコンクリートのBasic Creepを予測する本手法の妥当性を検証するために、水セメント比0.25,0.35,0.45のコンクリートを作製し、圧縮クリープ実験を行った。

表 - 1にコンクリートの調合を示す。練混ぜには、強制攪拌二軸ミキサ(容量100ℓ)を使用した。空練を30秒間行い、水と混和剤を投入後、1分間練り混ぜを行った。なお、水セメント比0.25のコンクリートは目標スランプフロー値 $55 \pm 5$ cm、空気量 $3.0 \pm 1.5\%$ とし、水セメント比0.35、0.45のコンクリートは目標スランプ値 $20 \pm 3$ cm、空気量 $3.0 \pm 1.5\%$ として高性能AE減水剤で調整した。使用したコンクリートの物性を表 - 2に示す。

載荷時材齢は3、7、28日とし、クリープ載荷装置にはスプリング式載荷装置を用いた。ひずみの測定には小型埋め込みゲージを用いた。載荷荷重は静的圧縮強度の30%程度とした。

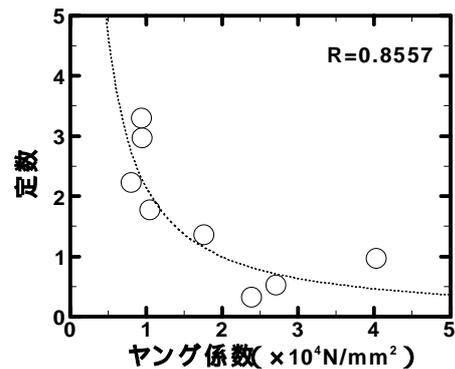


図 - 6 ヤング係数と定数 の関係 (応力レベル 0.9 の場合)

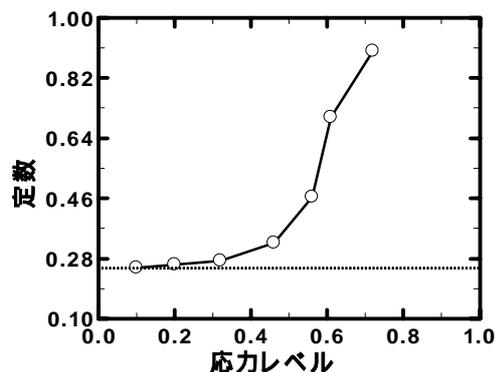


図 - 7 定数 と応力レベルの関係

表 - 1 調合表

W/C	細骨材率 (%)	骨材容積比 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
0.25	38.0	0.573	165	660	571	976
0.35	40.0	0.637	165	471	661	1039
0.45	42.0	0.672	165	367	729	1055

セメント：普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>)

細骨材：混合砂(表乾密度 2.59g/cm<sup>3</sup>，吸水率 2.20%)

粗骨材：硬質砂岩砕石(表乾密度 2.66g/cm<sup>3</sup>，吸水率 1.09%)

混和剤：高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)

表 - 2 コンクリートの物性

W/C	混和剤添加 (C×%)	スランプフロー (mm)	単位容積質量 (kg/ℓ)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
						3日	7日	28日
0.25	1.550	510×525	2.84	1.7	30	58.6	59.2	66.3
0.35	0.525	340×350	2.76	3.3	29	40.4	48.3	51.6
0.45	0.500	450×440	2.75	4.2	26	25.7	32.1	35.8

#### 3.2 予測結果

本論文で提案する手法は、調合や材料物性に關わるパラメータとしており、調合設計時に得られるデータを用いて、任意の載荷開始材齢におけるコンクリートのBasic Creepが推定できることとなる。式(4)に式(6)、式(8)、式(12)、式(14)で得られた値を代入することによって予測ができる。

算出した結果と実測値を比較したものを図 - 8

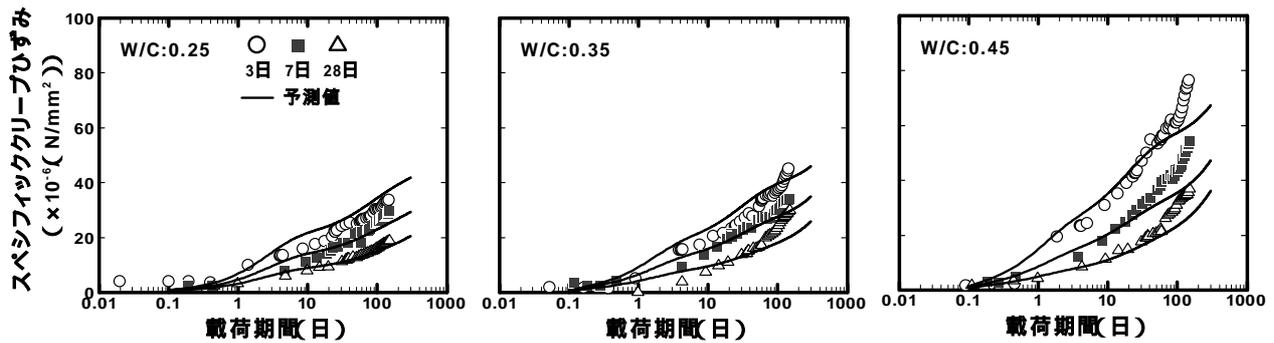


図-8 計算値と実測値の比較(Basic Creep ひずみ)

に示す。これによると、いずれの水セメント比および荷重開始材齢においても荷重期間が経過するにつれて過小評価する傾向にある。また、骨材のクリープひずみを考慮することによって1割程度クリープひずみの値が大きくなった。これらの結果より既往のクリープ予測式の精度が $\pm 40\%$ である<sup>16)</sup>ことを考えれば本提案式はコンクリートのBasic Creepひずみの傾向を表すことができているものと思われる。

#### 4. まとめ

本論文では、複合則理論を用いたコンクリートのBasic Creepひずみの予測式の提案を行った。その結果、コンクリートの構成材料であるセメントペースト、骨材のヤング係数およびBasic Creepひずみを用いて、予測可能であることを示した。

しかしながら、コンクリート構造物におけるクリープ性状を把握するためには、乾燥を受けた場合のクリープひずみであるTotal Creepひずみの検討が必要であるため、今後は、Total Creepひずみにおける複合則理論の適用可能性について検討していく予定である。

#### 謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(若手研究B 課題番号:17760457)の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) U. J. Counto: The Effect of the Elastic Modulus of the Aggregate on the Elastic Modulus, Creep and Creep Recovery, M. of Concrete Research, vol.16, No.48, pp.129-138, 1964
- 2) 清原千鶴ほか: 複合則理論を用いたコンクリートのヤング係数の推定式に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.576, pp.7-14, 2004.2

- 3) Uchikawa Hiroshi: Similarities and Discrepancies of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete from Standpoints of Composition and Structure, Engineering Foundation Conference, Advances in the Production and Utilization of Cement Based Materials, Vol.1, pp.271-310, 1988.1
- 4) 清原千鶴ほか: 水和を考慮したベーシッククリープの数式表示に関する研究, セメント・コンクリート論文集No.56, pp.2003.2
- 5) 竹田吉紹ほか: 乾燥を受けるセメント硬化体の水和の進行を表す式, 日本建築学会構造系論文報告集, No.361, pp.21-31, 1986
- 6) 萩野正二, 渡辺久夫: 砕石の力学的性質に関する研究(第2報), 日本鉱業会講演要旨, pp.7-8, 1970
- 7) 立松和彦: コンクリートの細孔分布と耐久性に関する研究, 浅沼組技術研究所報(別冊), pp.17-26, 2001.5
- 8) 鶴田浩章: 高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす粗骨材品質の影響に関する基礎的研究, 九州大学博士論文, 2001.3
- 9) 渡邊悟士ほか: 高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.588, pp.21-27, 2005
- 10) 平間昭信ほか: 超高強度コンクリートに使用する粗骨材の評価方法に関する基礎実験, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1分冊, pp.307-308, 1999.9
- 11) 馬場明生: 建築材料の乾燥収縮機構とその応用に関する研究, 東京大学博士論文, 1975.6
- 12) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門, 財団法人東京大学出版会, pp.123-168, 1991.8
- 13) T. J. Hirsh: Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Modulus of Cement Paste Matrix and Aggregate, Journal of ACI, Vol.59, No.3, pp.427-439, 1962.3
- 14) 増田秀夫, 田中荘一訳: 岩石・岩盤技術者のためのハンドブック 岩石の力学的性質 - 試験に関する技術と結果 -, 古今書院, 1999
- 15) 赤木智之, 川本眺万: 岩石のクリープ特性と構成法則, pp.73-78, 第6回岩石の力学国内シンポジウム講演論文集, 1984
- 16) (社)日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存性変形に関するシンポジウム, 2001.7