

論文 変動応力下におけるコンクリートのクリープ推定に関する研究

小澤 満津雄^{*1}・古箭 祐三^{*2}・森本 博昭^{*3}

要旨：著者らが提案したコンクリートのクリープ推定法（修正重ね合せ理論）の適用性を検討するために、圧縮応力の載荷除荷パターンおよび圧縮応力と引張応力の交番繰り返し荷重を作用させたクリープ試験を実施した。その結果、従来の重ね合せ理論に比べ、修正重ね合せ理論は繰り返し応力下におけるクリープ進行割合をよく推定できることが明らかとなった。

キーワード：変動応力，クリープ，重ね合せ理論，修正重ね合せ理論

1. はじめに

コンクリートのクリープは、コンクリート構造物に作用する持続応力により、変形が増大する現象であり、時間依存変形問題などに対し、無視することができない。変動応力下におけるクリープの推定については、履歴理論¹⁾による重ね合せ理論(以下、重ね合せ理論)が一般的であるが、その適用性について、十分検証されていないのが現状である。このような現状を踏まえて、著者らは、重ね合せ理論の適用性の問題点を指摘し、除荷過程における応力の取り扱いを考慮した修正重ね合せ理論²⁾を提案している。本論文では、修正重ね合せ理論の適用性を検証するために、高強度コンクリートを対象として、圧縮応力の載荷と除荷を繰り返す行なうパターン(単調除荷型)および圧縮応力と引張応力の交番繰り返し荷重を作用させたパターン(応力反転型)についてクリープ試験を実施した。

2. 重ね合せ理論¹⁾

重ね合せ理論は、コンクリートの温度応力解析等でよく用いられてきた方法である。この方法は、載荷された応力を微小時間で分割して考慮する方法である。重ね合せ理論では、一度作用された応力が永久に作用し続けると仮定する。以下に重

ね合せ理論によるクリープ算定式を示す。

$$\varepsilon_{cr}(t) = \sum_{j=0}^t \Delta\varepsilon_j(t-j) \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{cr}(t)$ ：材齢 t 日におけるクリープひずみ、 $\Delta\varepsilon_j(t-j)$ ：載荷時材齢 j 日の応力増分に対する材齢 t 日におけるクリープひずみ

3. 修正重ね合せ理論²⁾

著者らは、応力反転を含む変動応力下におけるクリープ推定法として、除荷過程以降において、先行載荷応力(以下、本論文では履歴応力という)を低減するとともに、除荷に伴うクリープ推定に回復クリープを適用する方法を提案している。図-1に修正重ね合せ理論の概要図を示す。載荷期間 $\tau_1 \sim \tau_{i+1}$ では、従来の重ね合せ理論によるクリープの推定を行なう。まず、載荷期間 $\tau_1 \sim \tau_{i+1}$ で載荷された応力 $\Delta\sigma_1$ から $\Delta\sigma_i$ に対するクリープひずみ $\varepsilon_{cr}(\tau_i, t_i)$ は式(2)で算定する。次に、除荷期間 $\tau'_1 \sim \tau'_{n+1}$ では、除荷応力 $(\Delta\sigma_{re})_n$ を考慮して、履歴応力低減係数 k_n を載荷応力 $\Delta\sigma_1 \sim \Delta\sigma_i$ に乗じることで、載荷期間 $\tau_1 \sim \tau_{i+1}$ で載荷した応力を低減させる。この手法を履歴応力低減法という。この方法は過去の先行載荷応力に応じて、除荷応力を按配し、先行載荷応力を低減させる方法である。 $\Delta\sigma_i$ に対する履歴応力低減係数を式(3)に示す。

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助手 博士(工学) (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (非会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

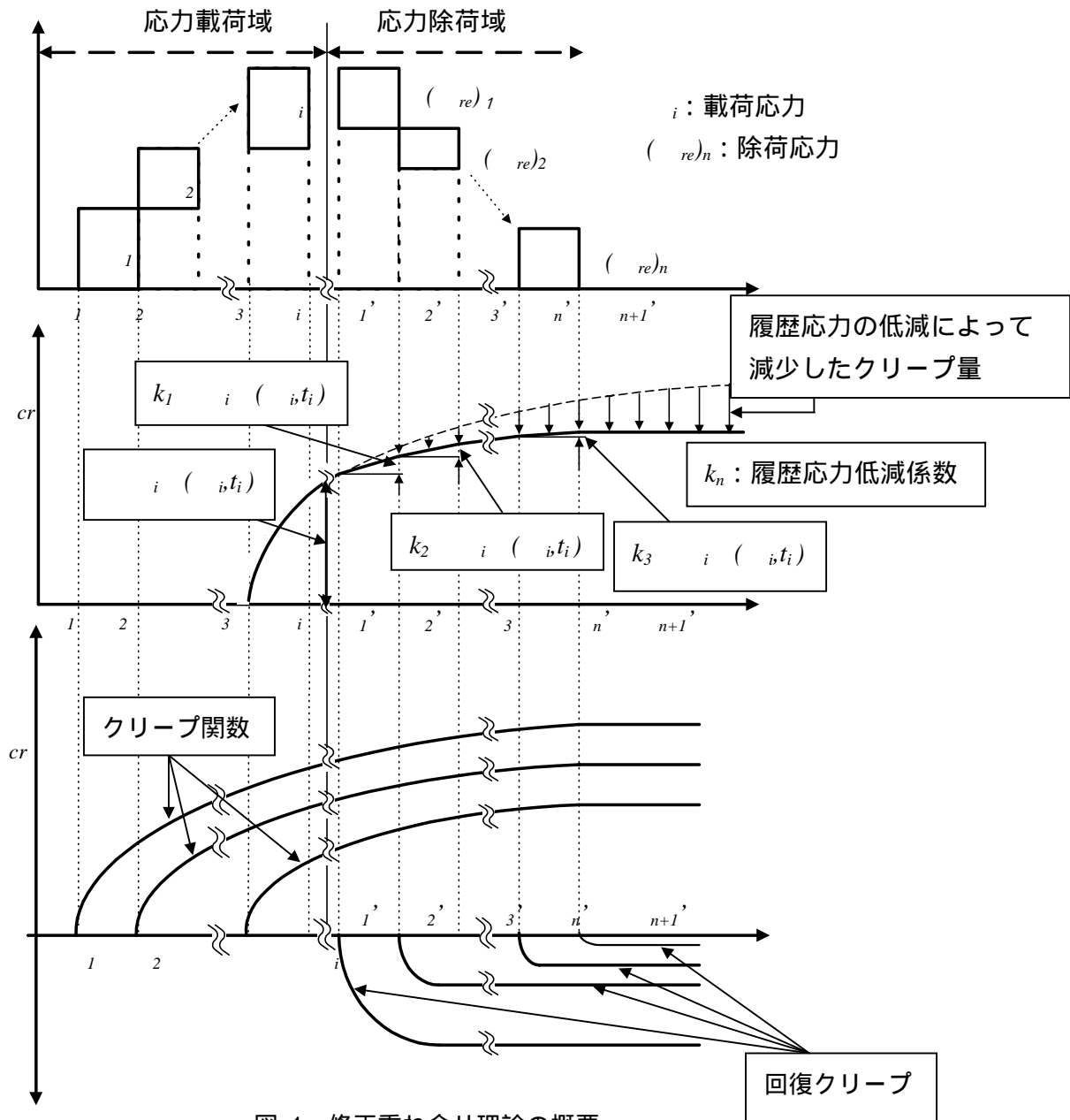


図-1 修正重ね合せ理論の概要

k_n は各除荷域における除荷応力分を先行载荷応力の合計で除したものを 1.0 から差し引くことにより、除荷による先行载荷応力の低減を表現したものである。 $0.0 \leq k_n \leq 1.0$ の範囲で変化し、1.0 の場合は、先行载荷応力がそのまま、载荷され続けることを意味している。 k_n が小さくなることにより、先行载荷応力が小さくなることを示す。除荷期間のクリープ量は式(4)により算出する。次に、除荷時材齢 τ'_n において、回復クリープが発現するものとし、回復クリープひずみ $\varepsilon_{re}(\tau'_n, t'_n)$ を式(5)で算出する。そして、除荷期間におけるクリープひずみは、式(6)に示すように、式(4)の

クリープ量を式(5)の回復クリープひずみの和として算出する。

・载荷期間： $\tau_l \sim \tau_{i+1}$ (従来の重ね合せ理論)

$$\varepsilon_{cr}(\tau_i, t_i) = \sum_{i=1}^i \Delta\sigma_i \cdot \phi(\tau_i, t_i) \quad (2)$$

・除荷期間： $\tau'_l \sim \tau'_{n+1}$ (履歴応力低減法 + 回復クリープ)

$\Delta\sigma_i$ に対する履歴応力低減係数 k_n :

$$k_n = 1.0 - \frac{(\Delta\sigma_{re})_1 + (\Delta\sigma_{re})_2 + \dots + (\Delta\sigma_{re})_n}{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \dots + \Delta\sigma_i} = 1.0 - \frac{\sum_{n=1}^n (\Delta\sigma_{re})_n}{\sum_{i=1}^i \Delta\sigma_i} \quad (3)$$

$$0.0 \leq k_n \leq 1.0 \quad (i=1,2,3,\dots) \quad (n=1,2,3,\dots)$$

$$\varepsilon_{cr}'(\tau_n', t_n') = k_n \cdot \Delta\sigma_i \cdot \phi(\tau_i, t_i) \quad (4)$$

回復クリープに関する項目：

$$\varepsilon_{re}(\tau_n', t_n') = \sum_{n=1}^n (\Delta\sigma_{re})_n \cdot \phi_{re}(\tau_o, t, t_n') \quad (5)$$

本研究の提案法

$$\varepsilon_c = \sum_{i=1}^i \varepsilon_{cr}(\tau_i, t_i) + \sum_{n=1}^n \varepsilon_{cr}'(\tau_n', t_n') + \sum_{n=1}^n \varepsilon_{re}(\tau_n', t_n') \quad (6)$$

ここに、 $\Delta\sigma_i$ ：載荷応力(N/mm²)、 $(\Delta\sigma_{re})_n$ ：除荷応力(N/mm²)、 τ_i ：載荷時材齢(日)、 τ_n' ：除荷時材齢(日)、 t_i ：載荷期間(日)、 t_n' ：除荷期間(日)、 $\varepsilon_{cr}(\tau_i, t_i)$ ：載荷時のクリープひずみ($\times 10^{-6}$)、 $\varepsilon_{re}(\tau_n', t_n')$ ：回復クリープひずみ($\times 10^{-6}$)、 $\phi(\tau_i, t_i)$ ：単位クリープ関数($\times 10^{-6}$ N/mm²)、 $\phi_{re}(\tau_o, t, t_n')$ ：単位回復クリープ関数($\times 10^{-6}$ N/mm²)、 τ_o ：初期載荷時材齢(日)、 $\varepsilon_{cr}'(\tau_n', t_n')$ ：除荷期間のクリープひずみ($\times 10^{-6}$)、 ε_c ：全クリープひずみ量($\times 10^{-6}$)、 k_n ：履歴応力低減係数

4. 変動応力下のクリープ試験の概要

(1) 供試体の作製

図-2 に変動応力クリープ試験供試体の形状・寸法を示す。供試体の寸法は 100×100×200mm とした。供試体両端に 4 本の異形鉄筋 (D10×80mm) で圧縮・引張兼用の載荷板を取り付けた。クリープ供試体のひずみ計測には供試体断面中央に配置した埋め込みひずみ計を用いた。各クリープ供試体には試験直前に、金属スプレーによる防水コートとアルミ箔粘着テープによる封緘処理を施した。本研究で用いた高強度コンクリートの示方配合を表-1 に示す。セメントは普通セメント(比表面積：3360cm²/g、密度：3.15g/cm³)を用いた。水セメント比は 30% とした。

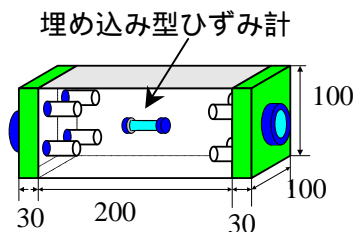


図-2 供試体形状・寸法(単位:mm)

細骨材は長良川産砂(密度：2.62 g/cm³、FM:2.63)を用いた。粗骨材は長良川産碎石(密度：2.61 g/cm³、最大寸法：25mm)を用いた。混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。強度および弾性係数の一例を表-2 に示す。

表-1 示方配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad*
30	44.2	110	440	840	1060	22

*) 高性能 AE 減水剤

表-2 強度および弾性係数試験結果

材齢 (日)	f_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)
1.5	20.0	1.6	2.3
3	60.0	4.4	3.3
7	69.2	4.5	4.1
14	78.7	5.6	4.0
28	83.0	6.5	3.8

(2) クリープ試験装置

本研究では図-3 に示すような油圧式の圧縮および引張クリープ試験装置を用いた。圧縮および引張クリープ試験機の最大容量は、それぞれ 500kN および 200kN である。クリープ試験の測定ひずみには、自己収縮ひずみ成分を含んでいるため、同一の環境条件下に置いた無載荷供試体に生じる自己収縮ひずみを測定し、クリープ試験の測定ひずみから差し引くことでクリープひずみ成分を求めた。

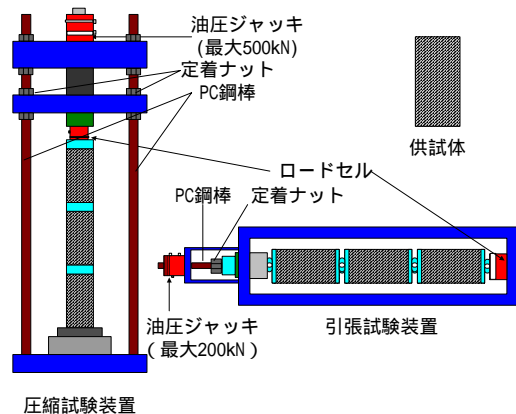


図-3 クリープ試験装置

(3) 荷重応力パターン

図-4,5に応力パターンを示す。図-4は圧縮応力の荷重除荷の繰り返し(応力単調除荷型)パターンである。図-5は,圧縮 圧縮の除荷 引張を繰り返す(応力反転型)パターンである。材齢28日まで,所定の応力変化材齢において,強度試験を行い,その強度試験結果の40%以内を荷重応力とした。試験の本数は各パターンでそれぞれ3本ずつとした。

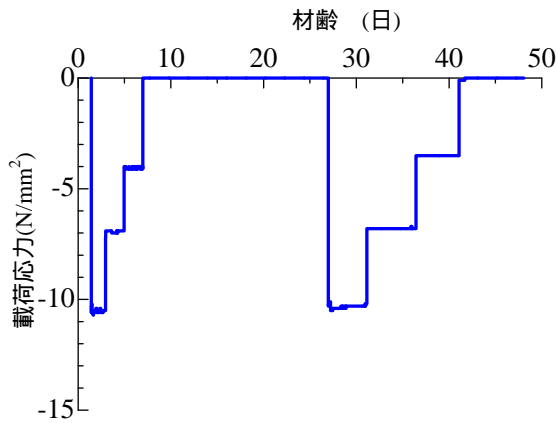


図-4 応力単調除荷型

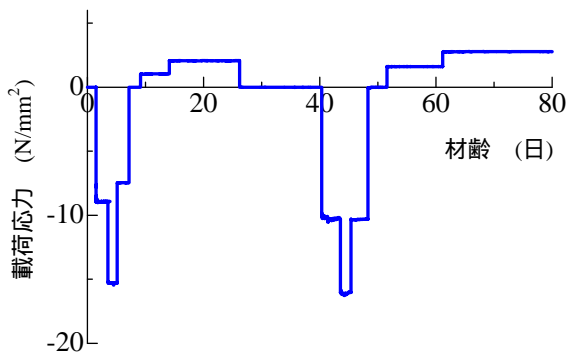


図-5 応力反転型

5. クリープ関数

(1) 基本クリープ関数²⁾

本研究では,若材齢高強度コンクリートの基本クリープ関数として,土木学会式³⁾を参考にして実験結果より,式(7)~(11)のクリープ関数を推定したものをを用いた。本式は,荷重期間20日の終局クリープ値 $\gamma(\tau_i)$ にクリープ進行関数 $\beta(t_i)$ を乗ずることで,単位応力あたりのクリープ値 $\phi(\tau_i, t_i)$ を推定するものである。荷重時材齢28日以降のクリープ関数は,一定と仮定した。なお,本研究

では,既往の研究⁴⁾を参考にして圧縮クリープと引張クリープの大きさは同じとして,クリープを推定した。

$$\phi(\tau_i, t_i) = \gamma(\tau_i) \cdot \beta(t_i) \quad (7)$$

$$\beta(t_i) = \{1 - \exp(-b(\tau_i) \cdot t_i^c c(\tau_i))\} \quad (8)$$

$$\gamma(\tau_i) = 44/\tau_i + 26 \quad (9)$$

$$b(\tau_i) = 1.3/\tau_i^2 + 0.3 \quad (10)$$

$$c(\tau_i) = 0.55 \cdot \{1 - \exp(-0.9 \cdot \tau_i^{0.8})\} \quad (11)$$

ここに, $\phi(\tau_i, t_i)$: 単位クリープひずみ($\times 10^{-6}$ N/mm²), $\beta(t_i)$: クリープ進行関数, $\gamma(\tau_i)$: 最終クリープひずみ($\times 10^{-6}$ N/mm²), t_i : 荷重期間(日), τ_i : 荷重時材齢(日), $b(\tau_i)$: 中長期のクリープ速度影響係数, $c(\tau_i)$: 初期のクリープ速度影響係数

(2) 回復クリープ関数²⁾

初期荷重時材齢 τ_o のクリープ関数に回復率 $Re(t_i)$ をかけることにより,回復クリープ関数を定義した。ここでは,上記で得られた荷重時材齢1.5日の圧縮クリープ関数にクリープ回復率を乗ずることで除荷時のクリープ挙動を評価することとした。以下に単位回復クリープ関数を示す。なお,荷重期間27日以降のクリープ回復率は一定と仮定した。

$$\phi_{re}(\tau_o, t_i, t'_n) = \frac{Re(t_i)}{100} \cdot \phi(\tau_o, t'_n) \quad (12)$$

$$Re(t_i) = 33.8 - 6.37 \cdot \ln(t_i) \quad (13)$$

$$(t_i \geq 1.0)$$

$$\phi(\tau_o, t'_n) = 55.3 \cdot (1 - \exp(-0.878 \cdot t'_n^{0.392})) \quad (14)$$

ここに, $\phi_{re}(\tau_o, t_i, t'_n)$: 単位回復クリープ($\times 10^{-6}$ N/mm²), $Re(t_i)$: クリープ回復率(%), $\phi(\tau_o, t'_n)$: 初期荷重時材齢 τ_o の単位クリープ関数($\times 10^{-6}$ N/mm²), t'_n : 除荷期間(日)($6.0 \leq t'_n$), t_i : 荷重期間(日), τ_o : 初期荷重時材齢(日), 本研究では $\tau_o = 1.5$ 日と仮定した。

6. 実験結果と推定結果の比較

(1) 応力単調除荷型

図-4に示す単調除荷型の応力パターンによるクリープ挙動を図-6に示す。まず,従来の重ね合

せ理論による推定値は，1サイクル目において，実測値の範囲内にあるが，材齢7日における3回目の除荷以降，実測値よりも回復クリープを大きく推定する傾向にある。2サイクル目においても，材齢41日における3回目の除荷以降，実測値よりも回復クリープを大きく推定する傾向にある。一方，修正重ね合せ理論による推定値は，1サイクル目の実測値よりも，若干，回復クリープを小さく推定しているが，実測値の傾向とよく一致している。しかし，2サイクル目は，圧縮応力载荷クリープの推定値が，実測値よりも大きく推定しているため，その影響により，除荷過程のクリープを，実測値よりも大きく推定する結果となっている。

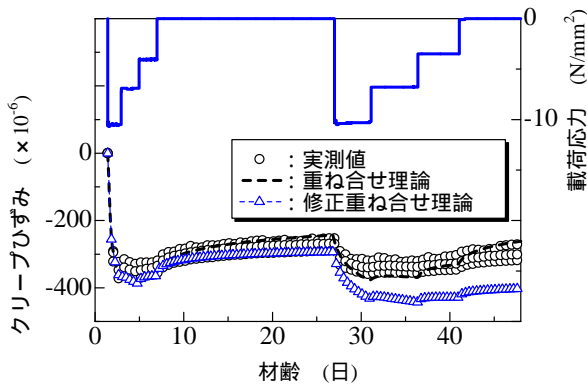


図-6 実測値と推定値の比較
(応力単調除荷型)

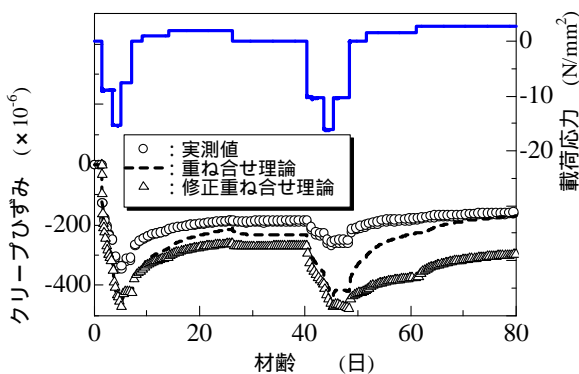


図-7 実測値と推定値の比較
(応力反転型)

(2) 応力反転型

図-5に示す応力反転パターンによるクリープ挙動を図-7に示す。まず，重ね合せ理論による推定値では，圧縮応力増加域および圧縮応力除荷域ともに，実測に比べ，クリープを大きく推定して

いる。また，応力が圧縮から引張へ反転した後も，実測値を引張側に大きく推定する傾向にある。一方，修正重ね合せ理論による推定値も圧縮応力増加域では，実測値を大きく推定している。しかし，圧縮応力の除荷域および応力反転以降の引張応力域においては，推定値は実測値を圧縮側に大きく評価している。

(3) 修正重ね合せ理論の適用性について

図-8,9に単調除荷型の各サイクルにおけるクリープ量(cr)を各サイクルの圧縮クリープ最大値(cr_{cmax})で無次元化した結果を示す。無次元化したものをクリープ進行割合と定義する。まず，図-8より，修正重ね合せ理論と重ね合せ理論共に，圧縮応力の载荷過程と除荷過程ともに実測値とよく一致している。次に，図-9より，2サイクル目の除荷過程において修正重ね合せ理論は実測値とよく一致している。一方，重ね合せ理論は除荷が進むにつれて，実測値よりも除荷クリープを大きく推定している。

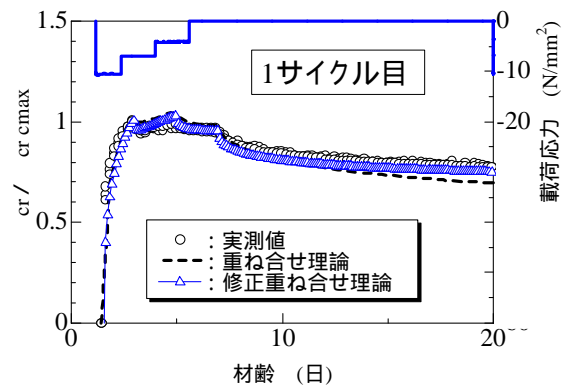


図 8 クリープひずみの無次元化
(応力単調除荷型：1サイクル)

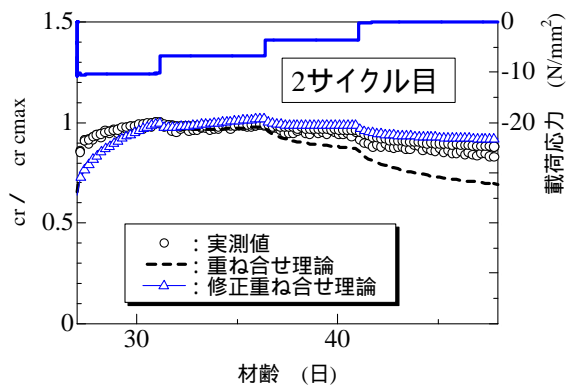


図 9 クリープひずみの無次元化
(応力単調除荷型：2サイクル)

次に、図-10,11に応力反転型の各サイクルにおけるクリープ量を各サイクルの圧縮クリープ最大値で無次元化した結果を示す。図-10より、修正重ね合せ理論は除荷・応力反転後においても、実測値とよく一致している。重ね合せ理論は、応力除荷反転に対して若干、実測値を大きく推定する傾向にある。図-11の2サイクル目において、修正重ね合せ理論は、除荷過程で若干、実測値を大きく推定しているが、実測値とよく一致している。一方、重ね合せ理論は、除荷・応力反転後に実測値よりも大きく推定する結果となった。以上のように、著者らが提案した修正重ね合せ理論は除荷後のクリープをよく推定できると考えられる。

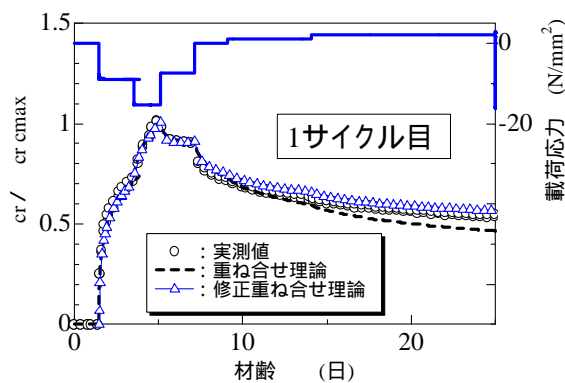


図 10 クリープひずみの無次元化
(応力反転型：1サイクル)

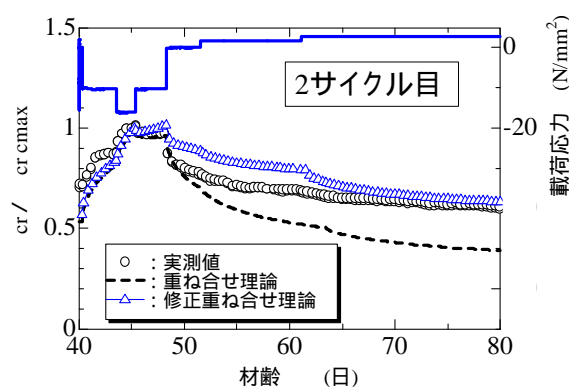


図 11 クリープひずみの無次元化
(応力反転型：2サイクル)

変動応力下のクリープ推定で重要となるのは、単位クリープ関数およびクリープ推定法である。図-6,7のクリープ推定結果では、単位クリ

ープ関数が実測値のそれとよく合致しなかったために推定値が大きく異なった。しかし、図 8 ~ 11に示すように、無次元化したクリープで比較すると修正重ね合せ理論の特徴である除荷過程のクリープ推定法として、履歴応力低減法および回復クリープを適用することにより、実測値をよく推定できることが明らかとなった。

7.まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- 1) 修正重ね合せ理論および重ね合せ理論ともに、圧縮応力増加過程におけるクリープを実測値に比べ大きく推定した。これは、クリープ関数の適用性が原因であると考えられる。
- 2) 繰り返し応力作用下においても、修正重ね合せ理論によるクリープ推定法は重ね合せ理論に比べて、特に除荷過程におけるクリープ進行割合を精度よく推定できることが明らかとなった。

今後、さらに種々の応力履歴におけるクリープ推定を行い、修正重ね合せ理論の適用を検討するとともに、各種配合コンクリートについてクリープ実験データの蓄積が必要と考える。

参考文献

- 1) D. McHenry : A New aspect of creep in concrete and its application to design , Proc.A.S.T.M.40 , pp.1069-1084 , 1943
- 2) 小澤満津雄, 細井陽介, 森本博昭 : 変動応力下における若材齢高強度コンクリートのクリープ評価に関する研究 , 土木学会論文集 , No.746 , V-61, pp.229-239 , 2003,11
- 3) 土木学会 : コンクリート標準示方書 , [構造性能照査編] , 2002
- 4) 小澤満津雄, 森本博昭, 国森亮平, 車戸勝巳 : 若材齢高強度コンクリートのクリープ特性に関する基礎的研究 , コンクリート工学年次講演論文集 , Vol.22 , NO.2 , 631-636 , 2000