

# 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

小澤満津雄<sup>1</sup>・細井陽介<sup>2</sup>・森本博昭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)  
mitsu@cc.gifu-u.ac.jp

<sup>2</sup>豊橋市役所 (〒440-8501 愛知県豊橋市今橋町1番地)

<sup>3</sup>正会員 工博 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

コンクリートの温度応力解析においてクリープは、履歴理論による重ね合せ理論(以下、重ね合せ理論)によって評価されるのが一般的である。温度応力パターンのように圧縮応力から引張応力に反転する場合、従来の重ね合せ理論では、圧縮応力の減少(除荷)を引張応力の載荷と考えるのに対し、本研究(修正重ね合せ理論)では、圧縮応力の除荷ととらえ、クリープを推定する。その際、圧縮クリープ試験から求められたクリープ回復率を用いる。また、除荷の影響を考慮するため、除荷応力の大きさに応じて、先行載荷応力を減じる手法を提案する。二、三の推定例を示して、本手法により、圧縮応力から引張応力に反転する場合のクリープを精度よく推定できることを明らかにする。

**Key Words:** high-strength concrete, creep, superposition, early ages, recovery creep

## 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。これまでにコンクリートのクリープに関する研究について、数多くの研究がなされている。しかし、若材齢期を対象としたコンクリートのクリープ特性については、十分な研究成果が得られているとは言い難い。特に、若材齢期においては、温度応力および自己収縮応力などのいわゆる初期応力が発生し、その発生履歴も大きく変化する。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<sup>1)</sup>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。一方、近年、使用量が増加している高強度コンクリートでは、大きな自己収縮が発生するため、温度応力とともに自己収縮応力の解明が急務となっている。しかし、高強度コンクリートのクリープ特性についての基礎資料の蓄積は十分ではない。このような現状を踏まえて、本研究では①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を提案する。次に、修正重ね合せ理論の適用性を検証することおよび、基礎資料の蓄積の少ない高強度コンクリートの若材齢期のクリープ特性

を明らかにし、実験より得られたクリープ関数をもとに、若材齢期の変動応力下におけるクリープ評価法について検討を行う。また、普通コンクリートについても、参考文献より引用した実験データについて、修正重ね合せ理論の適用性の検証を行った。本研究では特に、温度応力を模擬した応力パターンについて、圧縮応力の載荷除荷および反転に伴うクリープの挙動の推定法を検討した。従来の重ね合せ理論では、圧縮応力の減少(除荷)を引張応力の載荷と考えるのに対し、本研究では、圧縮応力の除荷ととらえ、クリープを推定する。その際、圧縮クリープ試験から求められたクリープ回復率を用いる。また、除荷の影響を考慮するため、除荷応力の大きさに応じて、先行載荷応力を減じる手法を提案する。二、三の推定例を示して、本手法により、圧縮応力から引張応力に反転する場合のクリープを精度よく推定できることを明らかにする。

## 2. 変動応力下における若材齢コンクリートのクリープ評価に関する既往の研究

ここでは、変動応力下における若材齢コンクリートのクリープ評価について、既往の研究を概説する。

綾野<sup>2)</sup>は、W/Cが50~65%のコンクリートの変動応力

下におけるクリープについて、重ね合せ理論と時間硬化則およびひずみ硬化則による推定を行い、問題点を指摘し、回復クリープを考慮した独自のクリープ硬化則を提案している。後藤ら<sup>2)</sup>は W/C が 45~65% の範囲における若材齢コンクリートの圧縮および引張クリープ試験を実施している。また、温度応力を模擬した応力パターンにおけるクリープ挙動を重ね合せ理論で推定した結果、圧縮除荷期間のクリープ回復量と圧縮クリープひずみ量の関係を考慮することで、ひずみ挙動をよく評価できるとしている。根木ら<sup>3)</sup>は、若材齢時に生じるクリープがコンクリートの引張破壊に及ぼす影響について検討している。そのなかで、応力強度比が 70% 以上では、変形能力は低下するとしている。また、載荷材齢が大きくなっても変形能力は低下するとしている。次に、マツモデルと壁モデルにおいて変動応力下のクリープ評価を行った。壁モデルのような急速温度降下型では、十分に重ね合せ理論は適用可能であるが、マツモデルのような緩速温度降下型で、高応力強度比ではクリープは過少評価されるとしている。入矢ら<sup>4)</sup>は圧縮および引張クリープの室内試験を実施し、各種要因がクリープに及ぼす影響を検討している。そして、5 要素レオロジーモデルを用いたクリープ関数を構築している。また、上記クリープ関数を用いて、単調応力作用時のクリープを重ね合せ理論で推定できるとしている。引張クリープについては応力強度比・載荷材齢・養生および載荷温度の影響について定式化し、温度応力状態のクリープ試験結果と比較している。養生および載荷温度の影響について検討し、高温ではクリープは大きくなるとしている。また、アレニウス式による材齢と温度関数によって、クリープ式の定式化を行っている。次に、応力単調増加パターンのクリープ試験を実施している。そして、定式化したクリープ式を用い、重ね合せ理論によるクリープ推定結果と実験結果との比較を行っている。また、若材齢コンクリートの回復ひずみのモデル化を行っている。さらに、単調除荷パターンのクリープ試験を実施し、重ね合せ理論により、除荷過程に回復ひずみモデルを用いた場合の推定結果と実験結果との比較を行っている。その結果、回復ひずみモデルを用いた方が、実験値をよく評価するが、圧縮クリープを用いた場合でも、実用上は十分評価可能であるとしている。Guénot ら<sup>5)</sup>は、普通強度コンクリートと高強度コンクリートを対象とし、水和熱を考慮した変動応力場のクリープの評価を行っている。重ね合せ理論により積算温度を考慮した粘弾性クリープ式を用いることにより、変動応力下のクリープを評価できるとしている。以上、現在までに若材齢コンクリートのクリープに関して、研究成果の蓄積は進みつつあるが、変動応力下における高強度コンクリートのクリープ推定について

検討されている例は少ないのが現状である。著者ら<sup>6)</sup>は、現在までに若材齢高強度コンクリートのクリープ評価方法の提案を目的として検討を行っている。変動応力下のクリープ評価について、圧縮クリープ関数を用い、重ね合せ理論による評価を行った。その結果、圧縮応力の単調増加域では、実測値とよく一致した。しかし、圧縮応力の除荷域および応力反転後の引張応力域において推定値は実測値を大きく評価される結果となった。一方で、圧縮応力と圧縮応力の除荷および引張応力の載荷に対するクリープを推定し、重ね合せ理論により評価すれば、実測値とよく一致するという報告がある<sup>7)</sup>。しかし、先行圧縮応力の載荷履歴は、除荷過程においても、そのまま続くとして仮定している。これは、全載荷応力除荷後も先行圧縮応力が作用し続けることを意味しており、合理的ではないと考えられる。そこで、本研究では、重ね合せ理論の特に除荷過程における先行圧縮応力の取り扱いについて、圧縮応力の除荷ととらえ、除荷応力の大きさに応じて先行載荷応力を減じる手法を提案する。

### 3. 重ね合せ理論によるクリープ推定法

履歴理論による重ね合せ理論<sup>8)</sup>は、コンクリートの温度応力解析等に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。重ね合せ理論の特徴は、一度作用された応力が永久に作用し続ける点である。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

### 4. 検討項目

本研究では以下の項目について検討する。

- (1) 修正重ね合せ理論の提案
  - ①履歴応力低減法の提案
- (2) 若材齢高強度コンクリートのクリープ特性
  - ①圧縮基本クリープ関数
  - ②回復クリープとクリープ回復率
- (3) 変動応力下における修正重ね合せ理論の汎用性の検証
  - ①高強度コンクリートを対象とした実験結果と推定

結果の比較

②普通コンクリートでの適用性

以上の検討を行うため、一定荷重载荷ならびに変動荷重载荷のクリープ実験を実施した。また、提案法の汎用性を検証するため、参考文献より実験値を引用して、ここで、提案する手法の汎用性を検証した。

5. 修正重ね合せ理論の提案

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、先行载荷応力(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する。図-1に本研究で提案する修正重ね合せ理論の概要図を示す。

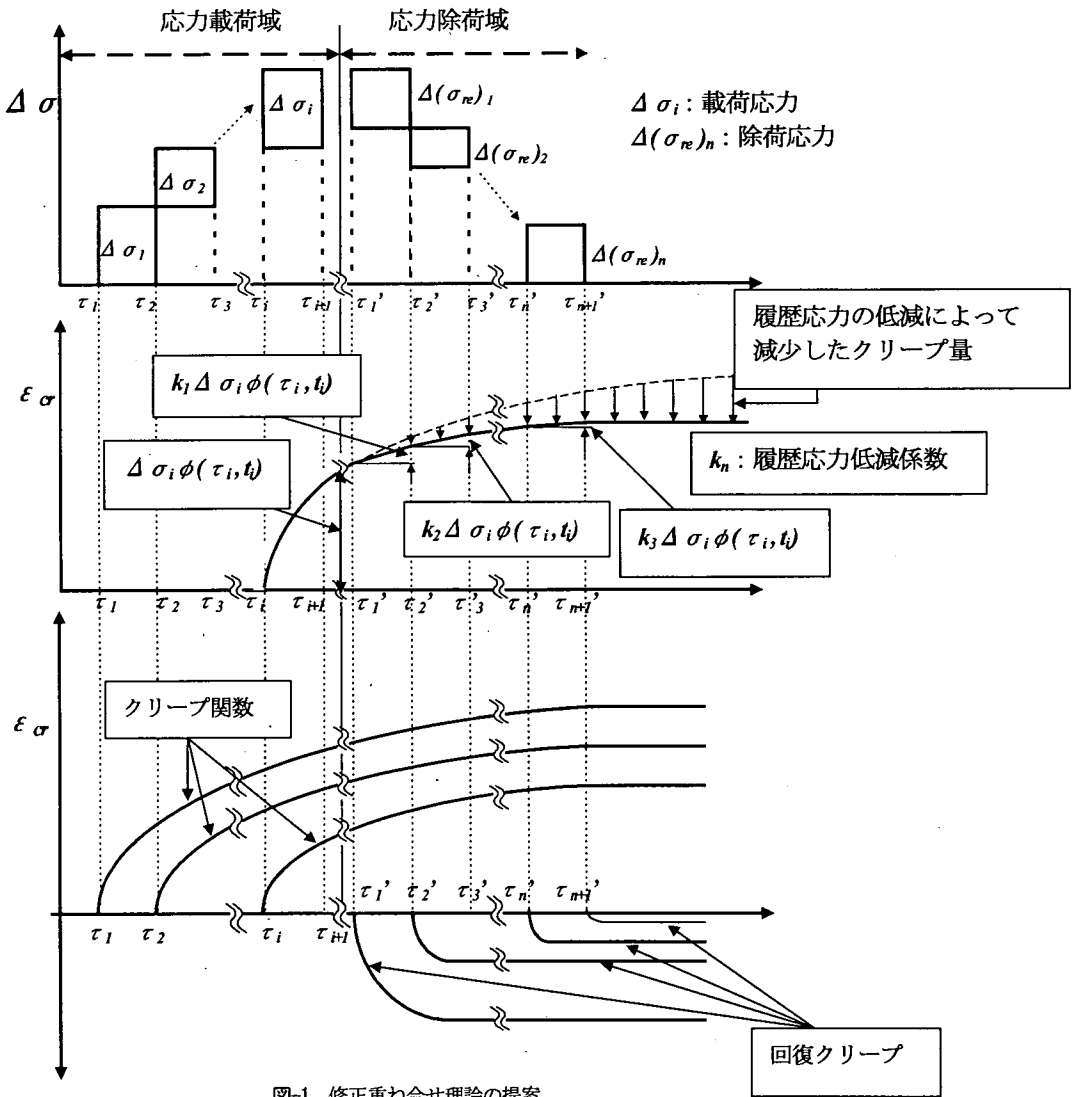


図-1 修正重ね合せ理論の提案

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。本論文では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。 $k_n$  は各除荷域における除荷応力分を先行載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、除荷による先行載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、先行載荷応力がそのまま、載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、先行載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  $t'_n$  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  $\varepsilon_{re}(t'_n, t'_n)$  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。

I. 載荷期間： $\tau_1 \sim \tau_{i+1}$  (従来の重ね合せ理論)

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

II. 除荷期間： $\tau'_1 \sim \tau'_{n+1}$  (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  $k_n$  :

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

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

$$\varepsilon_{cr}'(\tau'_n, t'_n) = k_n \cdot \Delta\sigma_i \cdot \phi(\tau_i, t_i) \quad (4)$$

回復クリープに関する項目：

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

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/mm<sup>2</sup>),  $(\Delta\sigma_{re})_n$  : 除荷応力(N/mm<sup>2</sup>),  
 $\tau_i$  : 載荷時材齢(日),  $\tau'_n$  : 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/mm<sup>2</sup>),  $\phi_{re}(\tau_o, t'_n)$  : 単位回復クリープ関数( $\times 10^6$ N/mm<sup>2</sup>),  $\tau_o$  : 初期載荷時材齢(日),  $\varepsilon'_c(\tau'_n, t'_n)$  : 除荷期間のクリープひずみ( $\times 10^6$ ),  $\varepsilon_c$  : 全クリープひずみ量( $\times 10^6$ ),  $k_n$  : 履歴応力低減係数

## 6. クリープ試験の概要

### (1) 供試体の作製

図-2 に圧縮クリープ試験供試体と変動応力クリープ試験供試体の形状・寸法を示す。図に示すように、供試体の寸法は圧縮と回復および変動応力クリープ試験ともに、100×100×200mm とした。変動応力クリープ用供試体両端には、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。また、材齢 1.5,3.7,14.28 日において圧縮強度、割裂引張強度および弾性係数を測定した。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。各供試体は、試験開始直前まで恒温恒湿室内(温度 20°C, 湿度 60% 以上)で、湿布養生を行った。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：3360cm<sup>2</sup>/g, 密度：3.15g/cm<sup>3</sup>)を用いた。水セメント比は 30% とした。細骨材は長良川産砂(密度：2.62 g/cm<sup>3</sup>, FM2.63)を用いた。粗骨材は長良川産碎石(密度：2.61 g/cm<sup>3</sup>, 最大寸法：25mm)を用いた。混和剤は高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体)を使用した。強度および弾性係数を表-2 に示す。

### (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。ロードセルを用いて所定の荷重を供試体に載荷した後、データロガーにより載荷後 2 時間毎に供試体のひずみと荷重とを計測した。試験期間中、クリープによる荷重の減少量が、初期導入荷重の 3% 程度になった時点で、荷重の再導入を行った。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。クリープ試験期間は、供試体のクリープ進行がほぼ定常状態となる材齢 20 日までを目安とした。

### (3) 圧縮クリープ試験

ここでは、基本クリープ関数を推定するために、圧縮クリープ試験を行い、単位クリープを求める。表-3 に試験ケースを示す。載荷時材齢を 1.5, 3, 7, 14 および 28 日とした。載荷応力は既往の研究の成果<sup>10)</sup>を考慮して、各材齢時の強度の 40% (以下、載荷応力比とする) とした。載荷期間は 20 日とした。試験の本数は各シリーズ 3 本ずつとした。

### (4) 回復クリープ試験

ここでは、温度応力における除荷過程を検討するために、応力載荷後の初期で、除荷が起こった場合の回復クリープ性状を把握することを目的とした。表-4 に試験ケースを示す。載荷時材齢は 1.5 日とした。載荷期間は、打設初期の回復クリープ性状を把握するために、1, 3, 5 日とし、コンクリートの性状がほぼ一定となる 27 日を比較のために選定した。除荷期間は回復クリープがほぼ定常となる 6 日とした。載荷応力比は 40% とした。試験の本数は各シリーズ 3 本ずつとした。

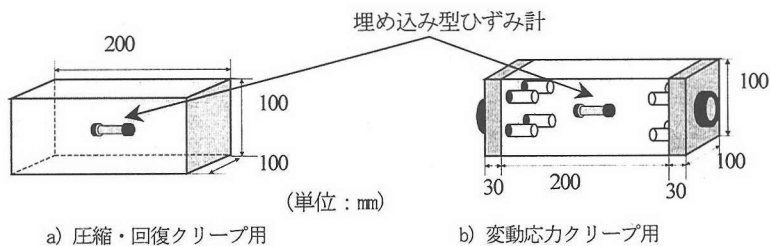


図-2 供試体形状・寸法

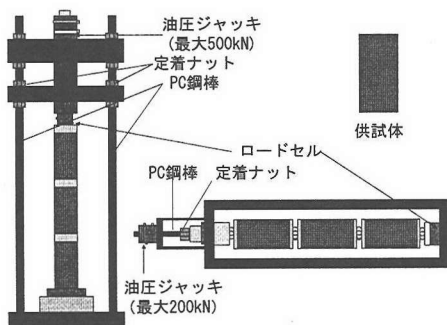


図-3 クリープ試験装置

表-1 示方配合

W/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	W	C	S	G	Ad*
%					
30	132	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 <sup>2</sup> )	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c$ ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
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

表-3 圧縮クリープ供試体

載荷時材齢 (日)	載荷期間 (日)	載荷応力比 (%)	本数 (本)
1.5	20	40	3
3	20	40	3
7	20	40	3
14	20	40	3
28	20	40	3

表-4 回復クリープ供試体

載荷時材齢 (日)	載荷期間 (日)	載荷応力比 (%)	本数	除荷期間 (日)
1.5	1	40	3	6
1.5	3	40	3	6
1.5	5	40	3	6
1.5	27	40	3	6

## 7. 実験結果

### (1) 自己収縮ひずみの経時変化

無荷荷供試体に発生する自己収縮ひずみの経時変化の一例を図-4 に示す。図より、自己収縮ひずみは材齢のごく初期の段階から発生し、材齢 5 日以降から増加速度は小さくなるものの、長期にわたり進展することがわかる。材齢 20 日における自己収縮ひずみは  $200 \times 10^{-6}$  程度であった。この値を用いて、クリープひずみの補正を行った。

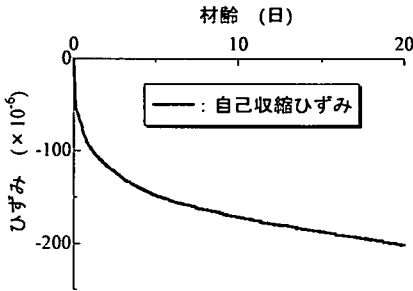


図-4 自己収縮ひずみの経時変化

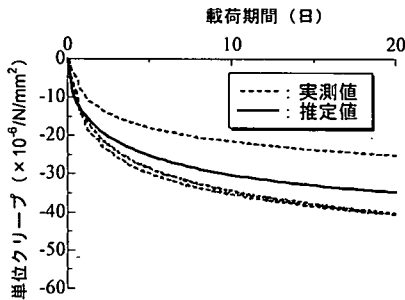


図-6 単位クリープ (載荷時材齢 3 日)

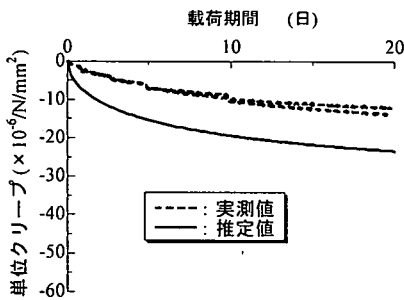


図-8 単位クリープ (載荷時材齢 14 日)

### (2) 載荷時材齢の影響

ここでは載荷応力比が 40%以下で、載荷時材齢が 15, 3, 7, 14 および 28 日の各ケースにおける単位クリープを図-5~9 に示す。図-10 に載荷時材齢 15 日の載荷期間 20 日におけるクリープ値を 1.0 とし、各載荷時材齢の載荷期間 20 日におけるクリープ値との比率を示す。図より、載荷時材齢 3 日で 0.65 程度まで減少し、その後の変化は緩やかであることが分かる。以上より、載荷時材齢 15~3 日にかけての材齢初期に、クリープ特性が大きく変化することを確認できる。

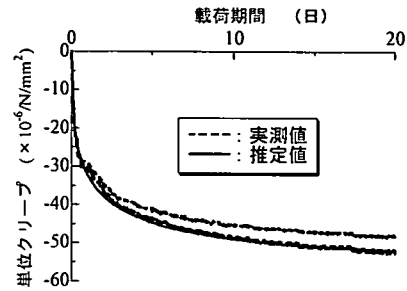


図-5 単位クリープ (載荷時材齢 1.5 日)

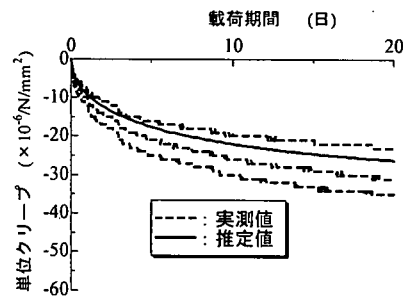


図-7 単位クリープ (載荷時材齢 7 日)

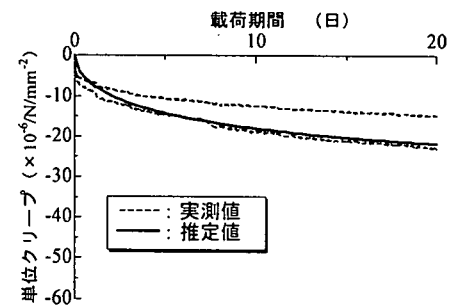


図-9 単位クリープ (載荷時材齢 28 日)

### (3) 基本クリープ関数の推定

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<sup>10)</sup>を参考にして式(7)~(11)のクリープ関数を用いることとした。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 $\phi(\tau_i, t_i)$ を評価するものである。

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

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

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

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

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

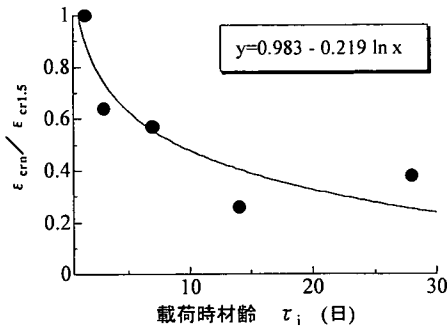


図-10 クリープ値の載荷時材齢の影響

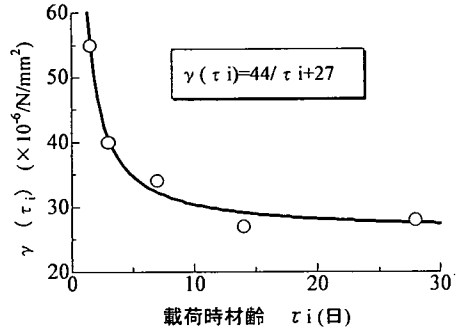


図-11 最終クリープ値 $\gamma(\tau_i)$

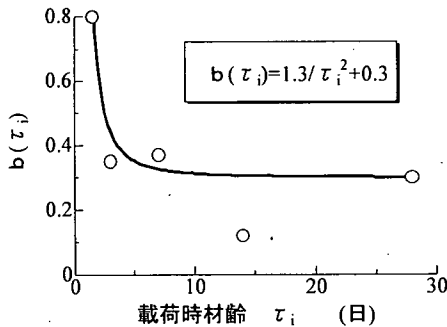


図-12 中長期のクリープ速度影響係数 $b(\tau_i)$

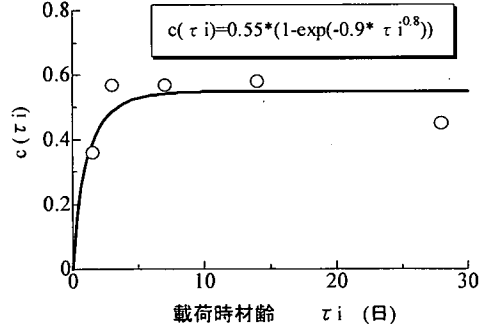


図-13 初期のクリープ速度影響係数 $c(\tau_i)$

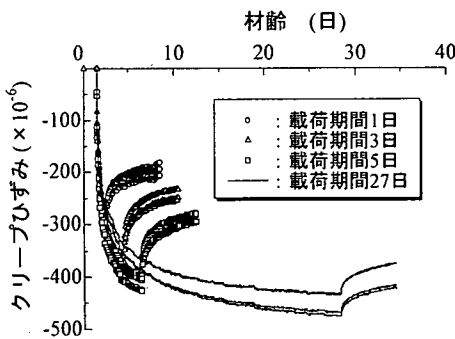


図-14 クリープひずみと回復クリープの経時変化

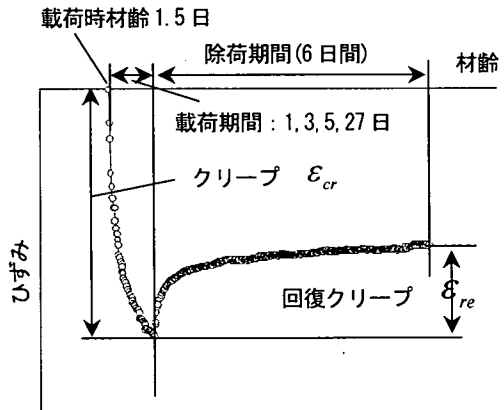


図-15 回復クリープ測定例

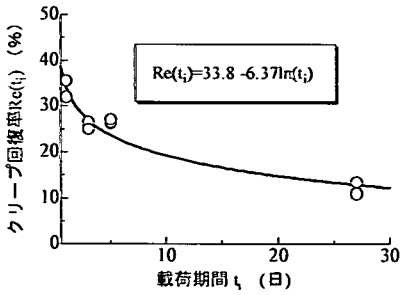


図-16 クリープ回復率

ここに、 $\phi(\tau_i, t_i)$  : 単位クリープひずみ ( $\times 10^6 \text{N/mm}^2$ ),  $\beta(t_i)$  : クリープ進行関数,  $\gamma(\tau_i)$  : 最終クリープひずみ ( $\times 10^6 \text{N/mm}^2$ ),  $t_i$  : 載荷期間 (日),  $\tau_i$  : 載荷時材齢 (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

図-5~9 に各材齢のクリープ試験結果を示す。ここでは、圧縮クリープ試験より得られた実験値の平均から最小二乗法で近似関数を推定した。係数  $b(\tau_i), c(\tau_i)$  はクリープ進行特性を表し、 $b(\tau_i)$  が大きくなれば中・長期のクリープ速度が増大し、 $c(\tau_i)$  が大きくなれば載荷初期のクリープ進行速度が増大する。 $\gamma(\tau_i)$  および係数  $b(\tau_i), c(\tau_i)$  の値ならびにそれぞれの評価式を図-11~13 に示す。図-11 より、終局クリープ値  $\gamma(\tau_i)$  は、材齢 15 日で  $55 \times 10^6 \text{N/mm}^2$  を示すが、材齢の進行とともに、 $30 \times 10^6 \text{N/mm}^2$  に漸近していくことがわかる。図-12 に示すように、中長期のクリープ速度影響係数  $b(\tau_i)$  は、材齢 15 日の 0.8 から減少し、0.3 に漸近することがわかる。図-13 より、初期のクリープ速度影響係数  $c(\tau_i)$  は、材齢 15 日で 0.35 程度であるが、材齢の進行とともに 0.5 程度に落ち着く傾向にある。図-5~9 の推定値は式(7)~(11)の式を用いたものである。載荷時材齢 14 日の推定値は実測値を大きく評価している。しかし、載荷時材齢 1.5, 3.7, 28 日の推定値は、ほぼ実測値と一致している。以上より、変動応力下のクリープ推定に際して、このクリープ関数を用いることとした。なお、本研究では、既往の研究<sup>12)</sup>より圧縮クリープと引張クリープに大きな差異がみられなかったことより、圧縮クリープと引張クリープの大きさは同じとして評価する。

#### (4) 回復クリープ試験結果

図-14 に回復クリープ試験におけるクリープひずみと回復クリープの経時変化を示す。図は、載荷期間 1,3,5,27 日の結果である。この試験結果をもとに、クリープ回復率を算出した。図-15 にクリープ回復率の算出方法を示す。図に示すように、載荷期間  $t_i = 1,3,5,27$  日のクリープひずみ  $\varepsilon_{cr}(t_i)$  を求め、各除荷時材齢から除荷期間 6 日間の回復クリープを求める。回復クリープひ

ずみ  $\varepsilon_{re}(t_i)$  とクリープひずみ  $\varepsilon_{cr}(t_i)$  の比を回復率  $Re(t_i)$  とする。以下に算定式を示す。

$$Re(t_i) = \frac{\varepsilon_{re}(t_i)}{\varepsilon_{cr}(t_i)} \quad (12)$$

ここに、 $t_i$  : 載荷期間 1,3,5,27 日,  $Re(t_i)$  : クリープ回復率,  $\varepsilon_{re}(t_i)$  : 除荷期間 6 日間の回復クリープひずみ ( $\times 10^6$ ),  $\varepsilon_{cr}(t_i)$  : 載荷期間  $t_i$  日のクリープひずみ ( $\times 10^6$ )

クリープ回復率の百分率と載荷期間との関係を図-16 に示す。図より、載荷期間 1 日でクリープ回復率は、32~35% となった。載荷期間が 3,5 日ではクリープ回復率は 25% 前後となった。コンクリートの物性がほぼ一定と考えられる載荷期間 27 日では、クリープ回復率は 12% 程度となった。載荷期間が長くなると、クリープ回復率は低下する傾向を示した。若材齢期のクリープ回復率については 20~40% 程度とする報告がある<sup>8)</sup>。

#### (5) 回復クリープ関数の推定

初期載荷時材齢  $\tau_o$  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、上記で得られた載荷時材齢 15 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。

$$\phi_{re}(\tau_o, t_i, t'_n) = \frac{Re(t_i)}{100} \cdot \phi(\tau_o, t'_n) \quad (13)$$

$$Re(t_i) = 33.8 - 6.37 \cdot \ln(t_i) \quad (14)$$

$$(t_i \geq 1.0)$$

$$\phi(\tau_o, t'_n) = 55.3 \cdot (1 - \exp(-0.878 \cdot t'_n \wedge 0.392)) \quad (15)$$

ここに、

$\phi_{re}(\tau_o, t_i, t'_n)$  : 単位回復クリープ ( $\times 10^6 \text{N/mm}^2$ ),  $Re(t_i)$  : クリープ回復率(%),  $\phi(\tau_o, t'_n)$  : 初期載荷時材齢  $\tau_o$  の単位クリープ関数 ( $\times 10^6 \text{N/mm}^2$ ),  $t'_n$  : 除荷期間(日) ( $6.0 \leq t'_n$ ),  $t_i$  : 載荷期間(日),  $\tau_o$  : 初期載荷時材齢(日)ここでは、1.5日とする。

## 8. 変動応力下における修正重ね合せ理論の汎用性の検証

### (1) はじめに

本研究で提案した修正重ね合せ理論の汎用性を検証するために、変動応力下のクリープ試験結果と参考文献より引用した実験データをもとに、クリープの推定を行



った。

(2) 変動応力下のクリープ試験

図-17~18に応力パターンを示す。これは、外部拘束が卓越する場合の温度応力の発現パターンを模擬したものである。なお、導入応力は載荷材齢時の強度の40%程度とした。図-17は応力除荷過程を検討するための応力パターンである。図-18は、圧縮→圧縮の除荷→引張と変化していくパターンである。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%以内を載荷応力とした。試験の本数は各パターンでそれぞれ3本ずつとした。

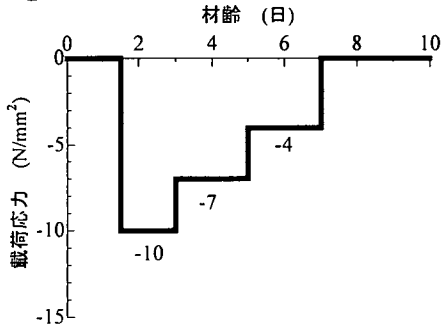


図-17 応力単調除荷パターン

(3) 実験結果と推定結果の比較

a) 応力単調除荷型

図-17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-19に示す。まず、従来の履歴理論は、実測値の範囲内で評価されているが、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評価する傾向にある。一方、本研究の提案法は、実測値よりも、若干、回復クリープを小さく評価しているが、実測値の傾向とよく一致していることが分かる。

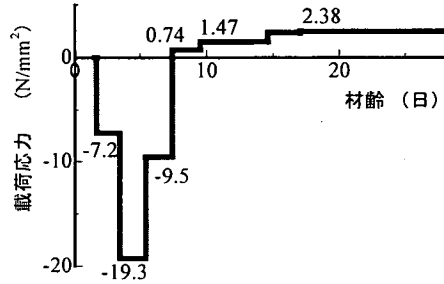


図-18 応力反転パターン

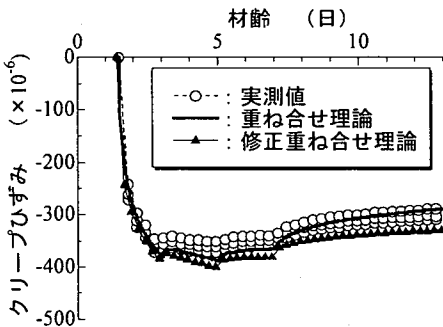


図-19 変動応力クリープ試験結果 (単調除荷型)

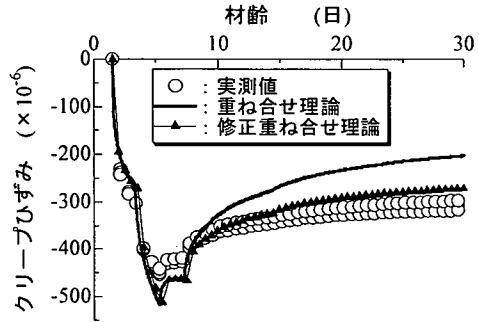


図-20 変動応力クリープ試験結果 (変動応力型)

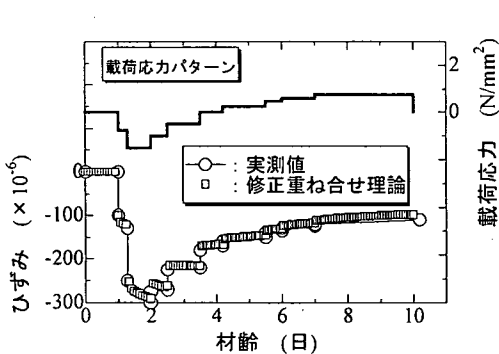


図-21 適用性の検証1(後藤ら<sup>3)</sup>)

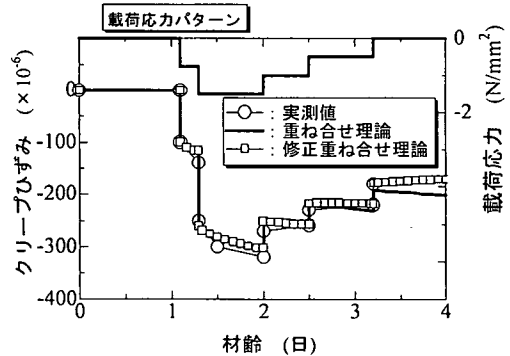


図-22 適用性の検証2 (入矢ら<sup>8)</sup>)

## b) 応力反転型

図-18に示す温度応力を模擬した応力パターンによるクリープ挙動を図-20に示す。まず、従来の履歴理論による評価法は、推定値が実測値を圧縮応力増加域および圧縮応力除荷域において若干大きく評価しているが、全般的によく合致している。しかし、応力が圧縮から引張へ反転した後、実測値を大きく評価する傾向にある。一方、本研究の提案法による推定値は、圧縮応力増加域と圧縮応力除荷域も、実測値を若干大きく推定しているが、全般によく一致している。また、応力反転以降の引張応力域において、推定値は実測値を大きく評価している。しかし、重ね合せ理論に比べ、推定値と実測値の差は小さいことが分かる。以上のことから、本研究の提案法は、応力反転以降のクリープ推定精度を向上させる一つの手法としての有効性が示されたと考える。

### (4) 普通コンクリートに対する修正重ね合せ理論の適用性

ここでは、本提案法の適用性を検証するために、参考文献より引用した普通コンクリートに対する変動応力下のクリープ試験結果と本提案法との推定結果を比較した。図-21に後藤ら<sup>3)</sup>が実施した温度応力を模擬した応力パターンにおけるクリープ試験の実測値および修正重ね合せ理論によるクリープ推定結果を示す。後藤らは、W/C=55%の普通コンクリートを対象として、圧縮および引張クリープの構成式と圧縮の除荷クリープを構築し、重ね合せ理論により変動応力下のクリープ挙動を推定している。ここでは、圧縮と引張および圧縮の除荷クリープ構成式を用い、除荷過程に履歴応力低減法を用いた。図より、推定値は圧縮応力域と圧縮の除荷域および引張応力域ともに、実測値の挙動をよく捉えていることが分かる。次に、図-22に入矢ら<sup>9)</sup>が実施したW/C=55%で28日圧縮強度が35N/mm<sup>2</sup>の普通コンクリートを対象として、除荷過程のクリープ試験結果と本提案法による推定結果を示す。ここでは、土木学会コンクリート標準示方書<sup>13)</sup>のクリープ推定式(圧縮強度55N/mm<sup>2</sup>以下)を用いた。除荷過程の回復クリープは、クリープ回復率を30%とし<sup>9)</sup>、これを載荷時材齢1.1日のクリープ推定式に乗ずることで求めた。図より、従来の重ね合せ理論による推定値は、圧縮応力域で実測値をよく評価している。しかし、圧縮応力除荷域において、増加傾向を示している。これは、圧縮応力域のクリープ値が除荷域にも影響を及ぼしているためである。一方、本提案法による推定値は、除荷域においても実測値とよく合致していることがわかる。以上より、本提案法の適用性が検証できたと考えられる。

## 9. まとめ

本研究では、変動応力下のクリープ推定法について検討した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 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、履歴応力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修正重ね合せ理論を提案した。
- (2) 回復クリープは、基本クリープ関数にクリープ回復率を乗じることにより、評価することが可能である。
- (3) 若材齢コンクリートのクリープ回復率は、載荷期間1日で32~35%程度となり、3.5日ではクリープ回復率は25%前後となった。コンクリートの物性がほぼ一定と考えられる載荷期間27日では、クリープ回復率は12%程度となった。載荷期間が長くなると、クリープ回復率は低下する傾向を示した。
- (4) 参考文献より引用した普通コンクリートのクリープ試験結果と本研究で提案した修正重ね合せ理論による推定値はよく一致した。このことより、本提案法は、十分な適用性を有すると考える。

### 参考文献

- 1) McHenry, D: A New aspect of creep in concrete and its application to design, Proc. A.S.T.M.40, pp.1069-1084, 1943.
- 2) 綾野克紀: コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測とその設計への適用に関する研究, 岡山大学学位論文, 1993.3.
- 3) 後藤忠広, 上原匠, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートのクリープ挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1133-1138, 1995.
- 4) 根木崇文, 入矢桂史郎, 梅原秀哲: 若材齢のクリープがコンクリートの引張破壊に与える影響に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.757-762, 1999.
- 5) 入矢桂史郎, 平本昌生, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp.1-14, 1998.8.
- 6) 入矢桂史郎, 根木崇文, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの引張クリープに関する研究, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.201-213, 1999.5.
- 7) 入矢桂史郎, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの比較に関する研究, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp.105-117, 1998.8.
- 8) 入矢桂史郎, 服部達也, 根木崇文, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの除荷過程におけるクリープ挙動のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, No.613/V-42, pp.164-174, 1999.2.
- 9) Guenot, J, Torrenti, J.M, and Laplante, P: Stress in Concrete at early ages: Comparison of Different Creep Models, Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Edited by R.Springenschmid, Published 1994, by E&FN

Spon,2-6,Boundary Row, London SE1,8HN,UK.ISBN:0419.

10) Ozawa,M and Morimoto,H: Evaluation of Creep of High-strength concrete at early ages, Control cracking in Early Age Concrete, Mihashi& Wittmann (eds.), pp.255-264, 2002.

11) 小澤満津雄, 森本博昭: 若材齢高強度コンクリートのクリープ推定法, pp.259-266, 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変形に関するシンポジウム, 2001.

12) 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.

13) 土木学会: コンクリート標準示方書, [構造性能照査編], 2002.

(2003. 3. 26 受付)

## EVALUATION OF CREEP IN HIGH-STRENGTH CONCRETE UNDER CHANGING STRESS AT EARLY AGES

Mitsuo OZAWA, Yohsuke HOSOI and Hiroaki MORIMOTO

In this study, we proposed a method for creep evaluation in high-strength concrete under changing stress at early ages. We used creep recovery ratio obtained from creep tests for estimation of creep behavior accompanying with stress unloading, beside decreased values of precedent sustained stress to consider the stress unloading in applying super position method. Application of the method was examined through a few examples of calculation.