

論文

[1071] 変動応力下におけるコンクリートのクリープ予測に関する研究

正会員 阪田憲次 (岡山大学土木工学科)

正会員○綾野克紀 (岡山大学土木工学科)

檜垣 智 (広島県庁)

1. まえがき

コンクリートのクリープ特性を決定するクリープ試験の場合とは異なり、実際のコンクリート構造物に作用する応力や環境の湿度および温度等は、時間の経過とともに変化する。従って、コンクリート構造物の設計にクリープひずみの影響を考慮する場合には、一定持続応力、一定温度・湿度下において求められたクリープデータとともに、応力、温度・湿度が変化する場合でのクリープ挙動を正確に表すことのできる非定常クリープ構成方程式が必要となる。変動応力下のクリープひずみを表す非定常クリープ構成方程式を定式化するために、コンクリート、高分子材料等のクリープ問題には、クリープひずみの重ね合せ則が、また、金属材料等の結晶質材料のクリープ問題には、時間硬化則、ひずみ硬化則等の種々のクリープ硬化則が提案されている。クリープの重ね合せ則は、一定持続応力下のクリープひずみが応力に対して線形と見なせる場合に、従来のクリープ硬化則は、載荷期間中、"aging"を起こさない材料に対して適用できる手法である。

本研究は、変動応力下におけるコンクリートのクリープひずみの実験データと、クリープの重ね合せ則、従来のクリープ硬化則および著者らの提案するクリープ硬化則に基づく計算値とを比較し、各々の手法のコンクリートのクリープ問題への適用性を検討するものである。

2. 実験概要

図-1に示す載荷期間の経過とともに単調に増加する変動応力と図-2に示す単調に減少する変動応力を、3, 7, 14, 28および56日間水中養生を行った後、直ちに初載荷を行う供試体と、14日間水中養生と21日間の気中養生を行った後、初載荷を行う供試体の6種類の供試体に載荷した。クリープ試験用供試体は、10cm×10cm×38cmの角柱で、乾燥収縮試験用供試体は、10cm×10cm×40cmの角柱である。

実験に使用したセメントは、普通ポルトランドセメントで、粗骨材は、碎石、細骨材は、川砂である。コンクリートの配合を表-1に示す。実験は、全て、温度19±1℃、湿度68±7%の恒温恒湿室内で行い、ひずみの測定には検長250mmのホイットモア式ダイヤルゲージを用いた。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラン プ範囲 (cm)	空気 量 (%)	W/C (%)	細骨 材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
20	9~12	1.2	60.0	47.7	200	333	842	963

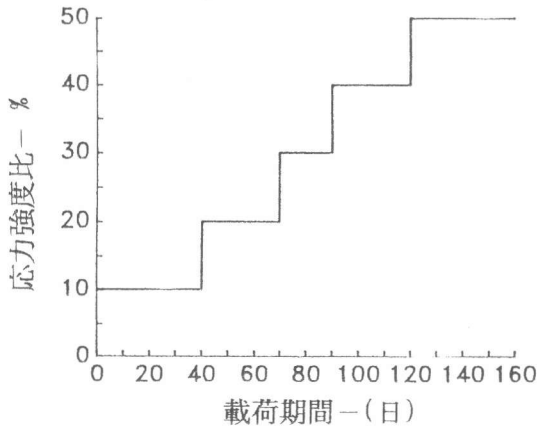


図-1 単調に増加する変動応力

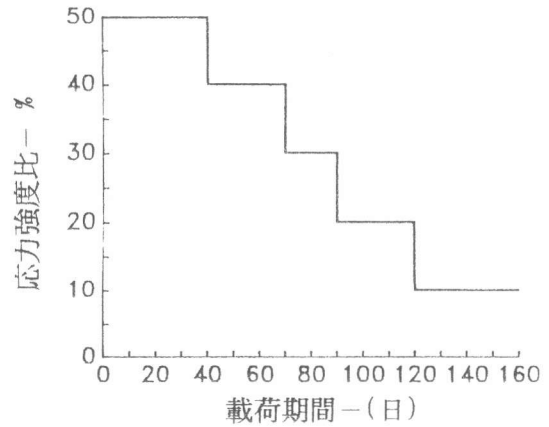


図-2 単調に減少する変動応力

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 クリープ構成方程式

クリープの重ね合せ則および種々のクリープ硬化則とともに、変動応力下のクリープひずみを求めるために用いた一定持続応力下のクリープひずみを表すクリープ構成方程式を式(1)に示す。式(1)は、変動応力下のコンクリートと同一配合で、同一環境下に置かれたコンクリートに強度比で10%~50%の一定持続応力を載荷し、100日間測定したバージンクリープひずみを基に求めたものである。なお、水中養生期間および載荷開始時材令は表-2に示す通りで、供試体総数は、160本である。図-3に、式(1)と実験データとの適合性を示す。

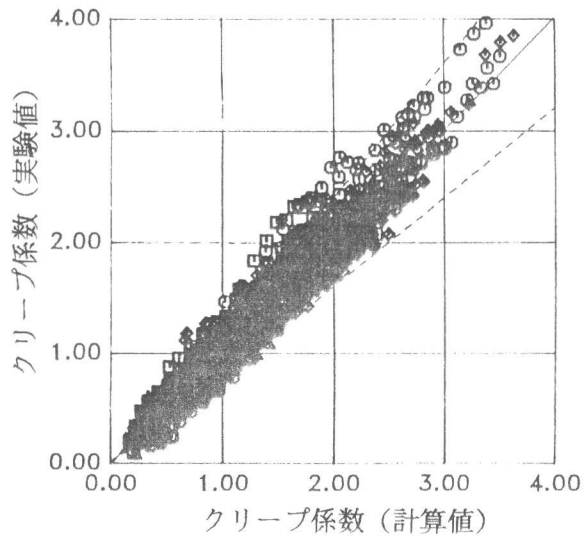


図-3 (1)式の実験データとの適合性

図-3中の破線は、式(1)に基づく計算値が、実験データに対して±20%の大きさであることを示す。図-3より、式(1)は、±20%の範囲内で実験データを表すことが可能である。

$$\left. \begin{aligned}
 &\varepsilon_0 > c_2(t', t_0) \text{ のとき;} \\
 &\varepsilon_{cr}(t, t', t_0, \varepsilon_0) = a(t, t', t_0) \times (\varepsilon_0 - c_1(t_0))^{b(t_0)} \\
 &\varepsilon_0 < c_2(t', t_0) \text{ のとき;} \\
 &\varepsilon_{cr}(t, t', t_0, \varepsilon_0) = a(t, t', t_0) \times \left( \frac{c_2(t', t_0) - c_1(t_0)}{c_2(t', t_0)} \varepsilon_0 \right)^{b(t_0)}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

ただし、 $\varepsilon_{cr}(t, t', t_0, \varepsilon_0)$  は、材令  $t_0$  まで水中養生し、その後材令  $t'$  まで気中養生したコンクリートに弾性ひずみ  $\varepsilon_0$  を生じさせる応力を載荷させた場合に、載荷期間  $t$  日において生じるクリープひずみを表し、 $a(t, t', t_0)$ 、 $b(t_0)$ 、 $c_1(t_0)$  および  $c_2(t', t_0)$  は、コンクリートの任意載荷期間  $t$  日におけるクリープひずみと弾性ひずみの関係を表すための係数である。

表-2 バージンコンクリートの水中養生および載荷開始時材令

		載荷開始時材令 (日)					
水中養生期間 (日)	3	3	10	24	52	94	
	7	7					
	14	14	21	35	63	105	
	28	28					
	56	56	63	77	105		

3.2 クリープの重ね合せ則, 時間硬化則およびひずみ硬化則の妥当性

図-4は、図-1に示した単調に応力が増加する変動応力を材令3日より載荷した場合のコンクリートのクリープひずみを、図-5は、図-2に示した単調に応力が減少する変動応力を材令3日より載荷した場合のコンクリートのクリープひずみを、クリープの重ね合せ則、時間硬化則およびひずみ硬化則に基づき計算した結果を実験値と比較した図である。単調に応力が増加する場合、重ね合せ則および時間硬化則に基づく計算値が、実験値をかなり過小評価するのに対し、ひずみ硬化則に基づく計算値は、載荷応力が大きくなるに連れ、実験値を過大評価することが分かる。また、単調に応力が減少する場合には、第2区間以降の持続応力によって生じるクリープひずみが、第1区間に生じるひずみと比べて非常に小さいため、どの計算手法に基づく計算値も実験値との隔たりが小さいことが分かる。

クリープの重ね合せ則に基づくクリープひずみの計算方法を式(2)に示す。

$$\varepsilon_{Hc}(t) = \sum \varepsilon_{cr}(t_i, t'_i, t_0, \Delta \varepsilon_{0i}) \quad (2)$$

ただし、 $\varepsilon_{Hc}(t)$ は、変動応力を受けるコンクリートの載荷期間t日目におけるクリープひずみ、すなわち、図-4および図-5の縦軸で、 $\varepsilon_{cr}$ は、式(1)に示したバージンクリープひずみの構成方程式である。また、 $\Delta \varepsilon_{0i}$ は、第i区間における持続応力によって生じる弾性ひずみと第i+1区間における持続応力によって生じる弾性ひずみとの差で、 $t'_i$ は、第i区間開始時材令、 $t_i$ は、第i区間開始時材令 $t'_i$ から時間tまでの経過時間である。

クリープの重ね合せ則に従えば、 $t'_i$ に持続応力が $\sigma_{10\%}$  (強度比で10%の応力) から $\sigma_{20\%}$  (強度比で20%の応力)

になったとき、 $t'_i$ 以降 $\sigma_{20\%}$ によって生じるクリープひずみは、 $t'_i$ 以前から載荷されている $\sigma_{10\%}$ によって生じるクリープひずみに、 $t'_i$ 以降さらに載荷される $\sigma_{10\%}$ によって生じるクリープひずみを足して求められる。すなわち、クリープひずみと持続応力の関係は、線形として扱

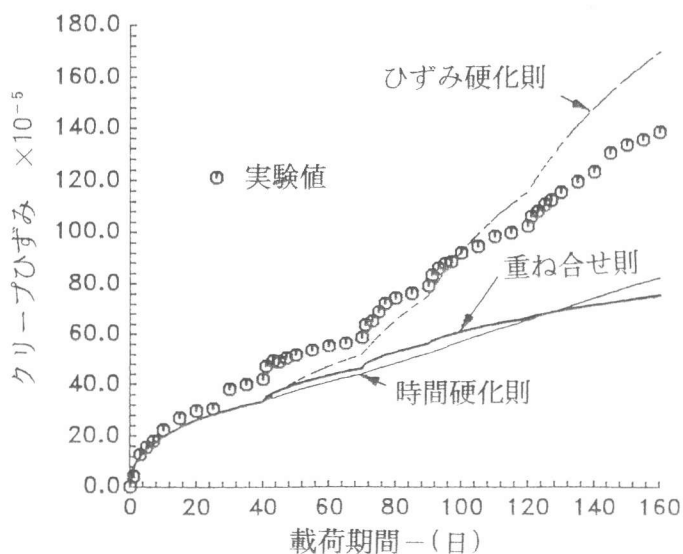


図-4 応力が単調に増加する場合のクリープ予測

われる。しかし、図-4からも明らかなように、載荷期間160日において、クリープの重ね合せ則に基づく計算値は、実験値と比べて約半分の値であり、変動応力下のコンクリートのクリープひずみは、応力に対して著しく非線形な現象であるといえる。

時間硬化則に基づくクリープひずみの計算方法を式(3)に示す。

$$\varepsilon_{Hc}(t) = \sum \varepsilon_{cr}(t_{si}, t', t_0, \varepsilon_{oi}) \quad (3)$$

ただし、 $\varepsilon_{oi}$ は、第*i*区間における応力によって生じる弾性ひずみで、 $t_{si}$ は、第*i*区間における載荷期間、 $t'$ は、第1区間における載荷開始時材令、すなわち、初載荷時材令である。

時間硬化則は、第*i*区間におけるクリープひずみが、その時点の応力と載荷開始からの時間に依存すると仮定されるため、図-4に示されるような単調増加の応力履歴下では、応力変化の直後においても、時間硬化則に基づくクリープひずみの計算値は、大きく変化しない。

ひずみ硬化則に基づくクリープひずみの計算方法を式(4)に示す。ただし、 $t''$ は、第*i*-1区間までに生じたクリープひずみと同一クリープひずみを、第*i*区間に載荷される応力によって生じさせるのに必要な時間である。

$$\varepsilon_{Hc}(t) = \sum \{ \varepsilon_{cr}((t_{si} + t''), t', t_0, \varepsilon_{oi}) - \varepsilon_{cr}(t'', t', t_0, \varepsilon_{oi}) \} \quad (4)$$

ひずみ硬化則をも含め、従来より提案されているクリープ硬化則の計算に必要なバージンクリープひずみは、初載荷時材令におけるバージンクリープひずみのみである。従って、図-4に示した変動応力下のクリープひずみの計算には、載荷開始時材令3日のバージンクリープひずみが、初載荷後増加した応力によって生じるクリープひずみの計算にも用いられ、載荷期間70日を越えると、ひずみ硬化則に基づく計算値は、実験データに比べて非常に大きくなる。

### 3.3 著者らの提案するクリープ硬化則の妥当性

図-6に著者達の提案するクリープ硬化則の概念図を示す。また、図-6中のModel-2に基づく変動応力下のクリープひずみ計算方法を式(5)、式(6)に示す。ただし、 $\varepsilon_D$ は第*i*区間より以前に受けた最大持続応力によって生じる弾性ひずみで、 $\varepsilon_D'$ は第*i*区間において再び過去に受けた最大持続応力を受けるコンクリートのクリープひずみと同じ大きさのクリープひずみを、第*i*区間より載荷を開始したコンクリートに生じさせる弾性ひずみである。また、 $\varepsilon_D' = \varepsilon_D - \varepsilon_E$ で、 $t''$ は、第*i*-1区間までに生じた $c_2$ を越えた弾性ひずみによって新たに生じるクリープひずみ(式(1)の $\varepsilon_0 > c_2$ の場合の $\varepsilon_{cr}$ から $\varepsilon_0 < c_2$ の場合の $\varepsilon_{cr}$ を引いたクリープひずみ)

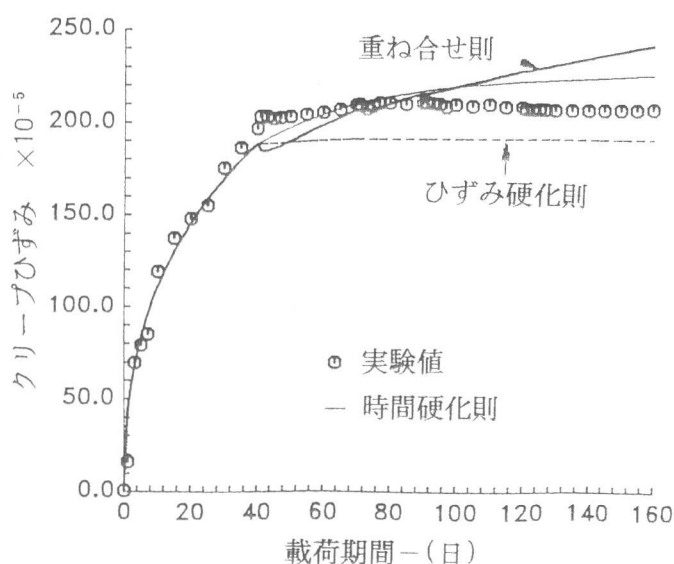


図-5 応力が単調に減少する場合のクリープ予測

と同一クリープひずみを第*i*区間に載荷される応力によって生じさせるのに必要な時間である。

$$\begin{aligned}
 &\varepsilon_{0i} > \varepsilon_D \text{ の場合;} \\
 &\varepsilon_{Hc}(t) = \sum \varepsilon_{cr}(t_{si}, t'_i, t_0, \varepsilon_D' + (\varepsilon_0 - \varepsilon_D)) \\
 &\varepsilon_{0i} < \varepsilon_D \text{ の場合;} \\
 &\varepsilon_{Hc}(t) = \sum \frac{\varepsilon_{cr}(t_{si}, t'_i, t_0, \varepsilon_D')}{\varepsilon_{cr}(t_{si}, t'_i, t_0, \varepsilon_D') - \varepsilon_{cr}(t_{si}, t'_i, t_0, (\varepsilon_D' / \varepsilon_D) \times \varepsilon_E)} \\
 &\quad \times \{ \varepsilon_{cr}(t_{si}, t'_i, t_0, (\varepsilon_D' / \varepsilon_D) \times \varepsilon_E) \\
 &\quad \quad - \varepsilon_{cr}(t_{si}, t'_i, t_0, (\varepsilon_D' / \varepsilon_D) \times \varepsilon_0) \}
 \end{aligned} \tag{5}$$

さらに、 $\varepsilon_{0i} > c_2$  の場合；

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{Hc}(t) &= (\text{式(5)より求まる } \varepsilon_{Hc}(t)) \\
 &\quad + \varepsilon_{cr}((t_{si} + t''), t'_i, t_0, \varepsilon_{0i}) - \varepsilon_{cr}(t'', t'_i, t_0, \varepsilon_{0i})
 \end{aligned} \tag{6}$$

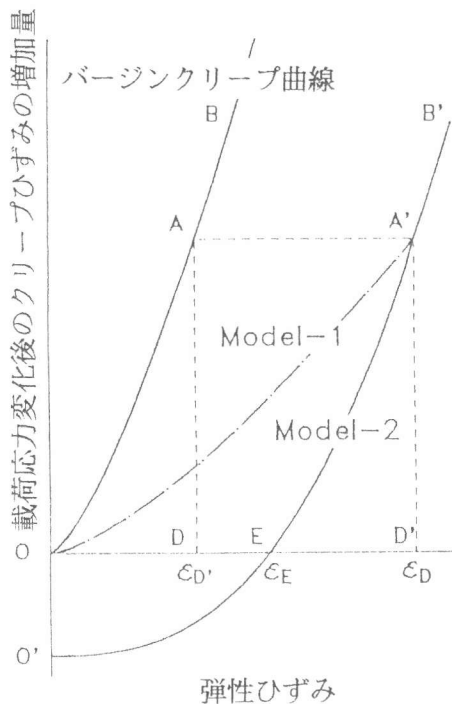


図-6 Model-1, Model-2の概念図

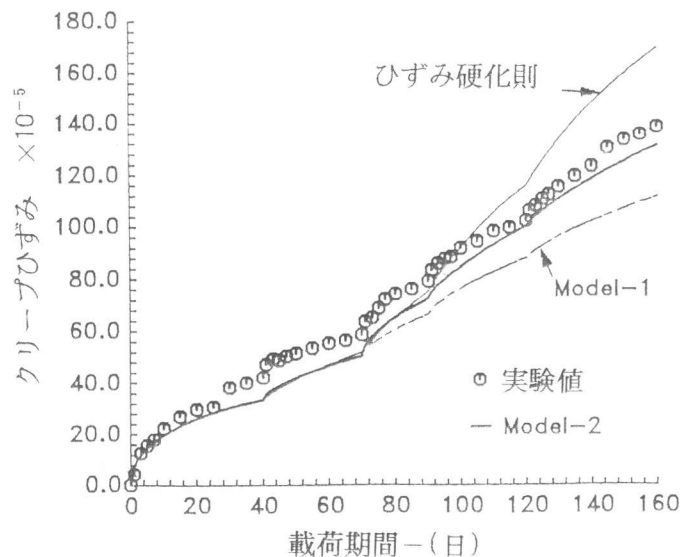


図-7 初載荷時材令3日のクリープ予測

Model-1は、回復性クリープひずみの影響を除いた状態で、実験より明らかとなった応力履歴を受けたコンクリートのクリープ特性を基に得られたモデル[1]で、Model-2は、Model-1を基に、回復性クリープひずみおよび式(1)中の $c_2$ を越える弾性ひずみを生じさせる応力が載荷される場合に生じるクリープひずみ[2]の影響を考察し、確立したモデルである。

図-7は、単調に増加する変動応力を材令3日で初載荷したコンクリートのクリープひずみを、Model-1, Model-2および図-4中で最も実験値との適合性があったひずみ硬化則に基づき計算した結果と実験値とを比較した図である。Model-1に基づく計算値が、実験値を過小評価し、ひずみ硬化則に基づく計算値が、実験値を過大評価するのに対し、Model-2に基づく計算値は、実験値と非常に一致を示すことが分かる。

図-8は、3, 7, 14, 28および56日間水中養生を行った後、直ちに初載荷を行った供試体と、

14日間水中養生と21日の気中養生を行った供試体に、図-1に示した変動応力を載荷し、各々の載荷区間において得られた実験データをModel-2に基づく計算値と比較した図である。図-8より、Model-2に基づく計算値は、図-3に示したバージンクリープひずみの構成方程式、式(1)と実験データとの適合性と同じ程度の精度で、応力が変化した後のクリープ挙動を正確に表していることがいえる。

また、図-9は、図-4に示した実験データを、クリープの重ね合せ則、時間硬化則およびひずみ硬化則のうち最も実験データとの適合性のあったひずみ硬化則と比較した図である。最も実験データとの適合性のあったひずみ硬化則を用いても、初載荷時材令が早い場合には、計算値は、実験値の約2倍程度になることが分かる。

#### 4. まとめ

単調に増加する変動応力が載荷された場合、クリープひずみが応力に対して線形であるとするクリープの重ね合せ則に基づく計算値は、実験データをかなり過小評価し、載荷期間中のコンクリートの"aging"の影響を考慮しないひずみ硬化則に基づく計算値は、初載荷後、約70日以降変化した応力によって生じるクリープひずみを著しく過大評価することが分かった。また、著者らの提案する計算手法を用いれば、十分材令が経った後に初載荷を行うコンクリートのみならず、初載荷時材令の若いコンクリートの変動応力下におけるクリープひずみをも正確に表されることが確かめられた。

また、単調に減少する変動応力が載荷された場合、第2区間以降に生じるクリープが非常に小さいために、いかなる解析手法を用いても実験値との隔たりが小さいことが確認された。

#### 参考文献

- 1) 綾野克紀・檜垣 智・大西幸雄・阪田憲次：応力履歴を受けたコンクリートのクリープ特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.167~172、1990。6
- 2) 阪田憲次・綾野克紀・檜垣 智：一定持続応力下におけるクリープひずみの非線形挙動に関する研究、第45回セメント技術大会講演集、1991、(掲載予定)

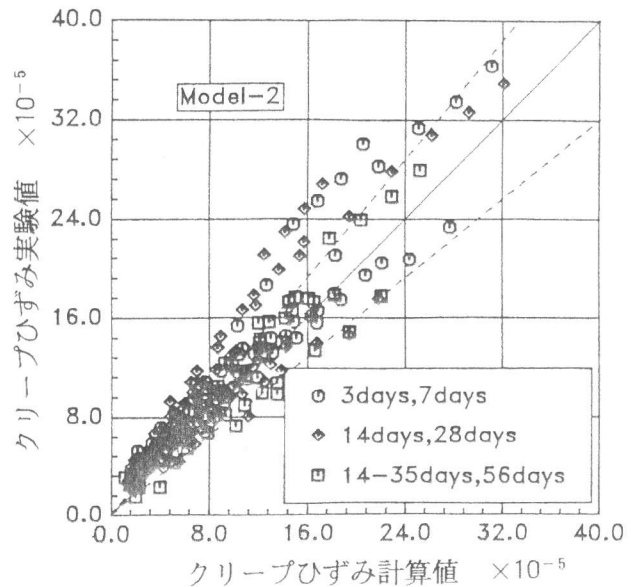


図-8 Model-2の実験値との適合性

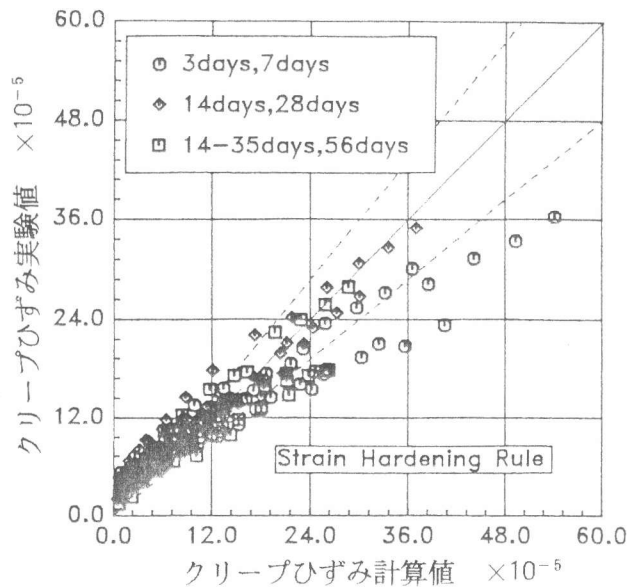


図-9 ひずみ硬化則の実験値との適合性