

コンクリートの非線形クリープ予測式の提案

阪田憲次*・綾野克紀**

コンクリート構造物の設計においてクリープひずみの影響を考慮する際、コンクリートのクリープひずみは、応力に対して線形な現象であると仮定される。しかし、この線形仮定の成り立つ上限に関しては、多くの議論がある。本論文は、コンクリートのクリープひずみの応力に対する非線形性を実験的に明らかにしている。本研究で提案する非線形クリープ予測式は、線形クリープ予測式の倍程度の精度をもつ。

Keywords : creep strain, stress/strength ratio, non-linear, creep compliance, modified Bailey equation

1. ま え が き

コンクリートのクリープひずみは、応力に対して線形であると仮定されている。従って、現在提案されている多くのクリープひずみ予測式は、持続応力に対して線形な応答となるクリープ構成方程式となっている。

この仮定の妥当性は、多くの研究者たちによって明らかにされているが、また同時に、その適用性の限界についても多くの議論がある。クリープひずみの線形仮定で問題となる点は、クリープひずみと応力との線形関係が成り立つ上限の応力強度比である。一般に応力強度比で0.3~0.75の範囲の上限がこれまで報告されているが、中には応力強度比で0.23までしか線形関係が成り立たないとする報告¹⁾もある。このように、この仮定の成り立つ上限の応力強度比に関しては、研究者によって様々であり、一般に明確な上限が存在しないと思われる。しかし、我が国のコンクリート標準示方書²⁾およびCEB/FIPの1978年版のモデルコード³⁾においては、クリープひずみの線形仮定の成り立つ上限を応力強度比で40%までと定めている。線形仮定の成り立つ上限が、実際のコンクリート構造物の応力状態の下で存在すれば、線形仮定のコンクリートのクリープへの適用は、クリープひずみと持続応力の関係を適切に表すことができなければならず、長期間に渡って生じるクリープひずみの予測を不可能にする。

クリープひずみは、かなり小さい応力下においても生じると考えられるので、クリープひずみの線形仮定をコンクリートに適用する際に忘れられがちなのが、線形仮定の成り立つ下限の応力比である。これまで行われてきた多くの線形仮定の妥当性の検討は、乾燥収縮をあまり

大きく生じない状態で行われてきた^{4)~6)}。このような場合には、クリープひずみと応力の関係を表す回帰直線は、原点近くを通る。しかし、L'Hermiteの行った実験⁷⁾のように乾燥収縮ひずみをともなう場合には、総ひずみ(クリープひずみ+乾燥収縮ひずみ)と持続応力の関係を表す回帰直線は、応力0において示す値が乾燥収縮ひずみよりも大きくなっている。

最近提案されたCEB/FIPの1990年版のクリープひずみ予測式⁸⁾では、応力強度比で40%を越える場合にクリープひずみの非線形性が考慮され、応力強度比で40%以下の場合には、これまで同様に、クリープひずみの線形仮定が残されている。しかし、線形仮定の成り立つ上限の応力が、応力強度比で40%より小さいか、あるいは、下限の応力が、0より大きければ、応力強度比で40%以下の場合においてもクリープの非線形性を考慮する必要がある。

以上述べたように、これまでは、実際のコンクリート構造物の応力状態の下で、コンクリートのクリープひずみと応力との間に線形関係が成り立つとする明確な証明もされないままに、近似的に線形仮定が成り立つとされてきた。本論文は、一定持続応力下におけるコンクリートのクリープひずみの非線形性を実験的に明らかにし、非線形性を考慮したクリープ構成方程式を確立することを目的とするものである。

2. 線形クリープ予測式の精度

クリープひずみを応力に対して線形として扱う場合には、一定持続応力下におけるコンクリートのクリープひずみは、一般に、クリープひずみを応力で除して求められる単位応力当たりのクリープひずみ(式(1))、あるいは、クリープひずみを初載荷時弾性ひずみで除して求められるクリープ係数(式(2))によって表される。

$$C(t, t') = \varepsilon_{cr}(t, t') / \sigma_0 \dots \dots \dots (1)$$

* 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科
(〒700 岡山市津島中3-1-1)

** 工修 岡山大学助手 工学部土木工学科

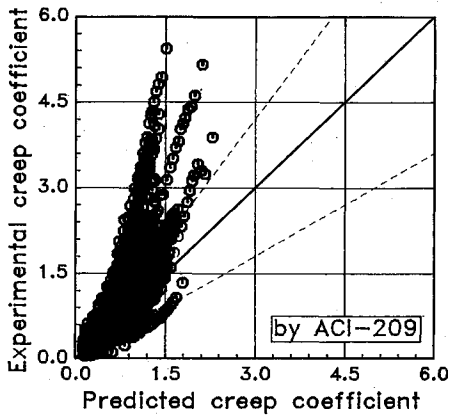


Fig.1 Creep prediction by ACI Model.

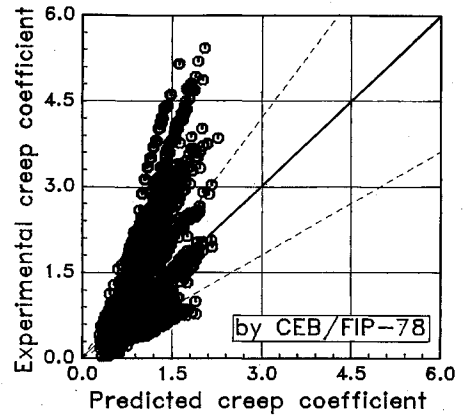


Fig.4 Creep prediction by CEB/FIP-78 Model.

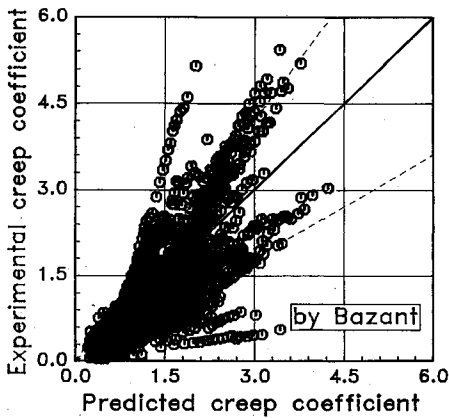


Fig.2 Creep prediction by Bazant Model.

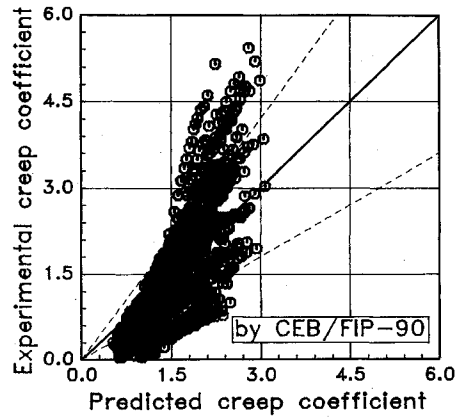


Fig.5 Creep prediction by CEB/FIP-90 Model.

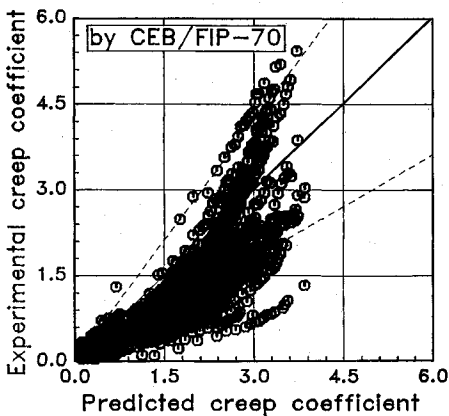


Fig.3 Creep prediction by CEB/FIP-70 Model.

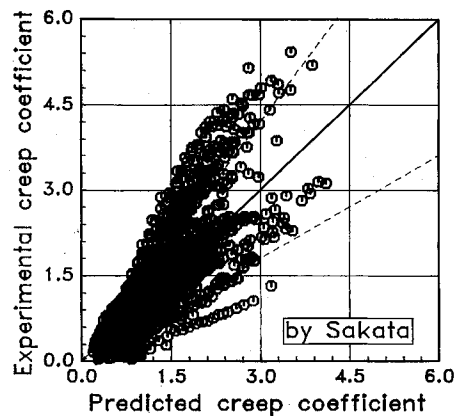


Fig.6 Creep prediction by Sakata Model.

ここに、

$C(t, t')$: 単位応力当たりのクリープひずみ

$\epsilon_{cr}(t, t')$: クリープひずみ

σ_0 : 載荷応力

t : コンクリートの材令

t' : 載荷開始時材令

である。

$$\phi(t, t') = \epsilon_{cr}(t, t') / \epsilon_0 = C(t, t') \times E(t) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

$\phi(t, t')$: クリープ係数

$E(t)$: 弾性係数

ϵ_0 : 初載荷時弾性ひずみ

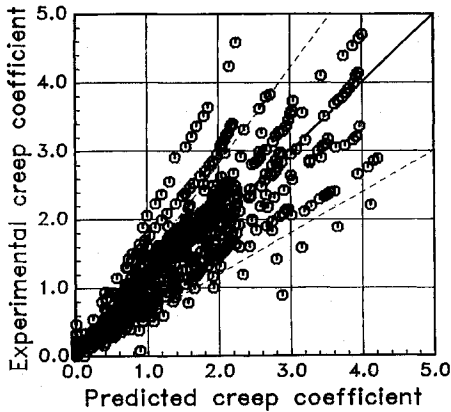


Fig.7 Creep prediction by CEB/FIP-90 Model.

である。

現在提案されている多くのクリープ予測式は、一定持続応力の大きさに関係ない単位応力当たりのクリープひずみまたはクリープ係数の予測式である。本節では、代表的なクリープ予測式の実験値との適合性を検討することにより、線形クリープ予測式の精度を考察する。

Fig.1～Fig.6は、それぞれACI式⁹⁾、Bazant式¹⁰⁾、CEB/FIP-70式¹¹⁾、CEB/FIP-78式³⁾、CEB/FIP-90式⁸⁾および阪田らの式¹²⁾と実験値¹³⁾とを比較した図である。これらの図の横軸は、各々の予測式に基づくクリープ係数の予測値を、縦軸は、実験より求めたクリープ係数を示している。なお、図中の点線は、予測値と実験値との差が±40%の範囲であることを示している。また、実験に用いた供試体の種類は、104本である。

これらの図より明らかなように、いずれの予測式を用いても、平均的には、ほぼ妥当な値を予測することがうかがわれる。しかし、そのばらつきは大きく、長期材令になるほど著しくなることが分かる。

また、Fig.7は、CEB/FIP-90式に基づく予測値とCEB/FIP-90式を確立するのに用いられた実験値¹⁴⁾との比較を行ったものである。なお、図中の点線は、予測値と実験値との差が±40%であることを示している。この図より、CEB/FIP-90式に基づく予測値は、平均的には、実験値とほぼ一致しているが、ばらつきは±40%程度と大きいことが分かる。

以上のことより、線形クリープ予測式に基づく予測値は、実験値に対して±40%程度のばらつきを有すると考えられる。

3. クリープひずみの非線形性の検討

本節では、種々の大きさの応力によって生じるクリープ係数の大きさに差があるか否かを調べることによって、クリープひずみの非線形性を検討した。

table 1 Mix proportion of concrete.

| Max size (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit weight(kg/m ³) | | | |
|------------------|---------------|------------|------------|------------|---------------------------------|-----|-----|------|
| | | | | | W | C | S | G |
| 20 | 4～5 | 0.7 | 66.1 | 44.0 | 185 | 280 | 808 | 1083 |

(1) 実験概要

コンクリートの配合をTable 1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材には碎石(比重:2.74, 吸水率:1.14, F.M.:6.55)を、細骨材には川砂(比重:2.60, 吸水率:2.08, F.M.:3.10)を使用した。

クリープ試験には10 cm×10 cm×38 cmの角柱供試体を、乾燥収縮試験には10 cm×10 cm×40 cmの角柱供試体を用いた。各供試体は打設後3日間水中養生し、その後25日間、温度19±1°C、湿度68±7%の恒温恒湿度室内で気中養生を行った。各供試体に載荷した一定持続応力は、初載荷時圧縮強度(25.1 MPa)の10%、20%、30%、40%および50%である。各々の大きさの一定持続応力を受ける供試体本数は、実験の都合上、それぞれ3、16、3、15および18本の合計55本とした。ただし、クリープ測定用供試体の初載荷時圧縮強度は、クリープ測定用供試体と同じ条件で養生を行った同寸法、同形状の強度測定用供試体3本の平均強度とした。また、強度測定時に、応力-ひずみ曲線を求め、この応力-ひずみ曲線を基に、クリープ測定用供試体に導入される所定の応力に対する弾性ひずみを求めた。この弾性ひずみをクリープ測定用供試体に生じさせることにより所定の応力が導入されたとした。なお、強度試験時および持続応力導入時における載荷速度は、圧縮応力の増加が毎秒0.2 MPa～0.3 MPaとなるようにした。

クリープ試験および乾燥収縮試験は、温度19±1°C、湿度68±7%の恒温恒湿度室内で行い、ひずみの測定には最小目盛り1/1000 mmのホイットモア式ひずみ計(検長25 cm)を用いた。また、持続応力の減退を補うために、初載荷後、3、10、30日目に持続応力の再導入を行った。最も応力減退の大きかった、応力強度比で50%の持続応力を受ける供試体の初載荷から初載荷後3日目まで、3日目から10日目まで、10日目から30日目までおよび30日目から49日目までのコンクリートに作用する応力の減退の大きさ $\Delta\sigma_c$ を、実際に生じたクリープひずみと乾燥収縮ひずみを用いて式(3)により求めると、1.11 MPa、0.86 MPa、1.15 MPaおよび0.60 MPaとなった。すなわち、最も応力減退が大きい載荷後30日目においてさえ、その大きさは、強度比で4.6%である。この大きさは、実験要因として考えている応力レベルの強度比10%の半分以下の値である。したがって、応力減退が、変動応力とは考えられない範囲で実験が行われたものと考えられる。

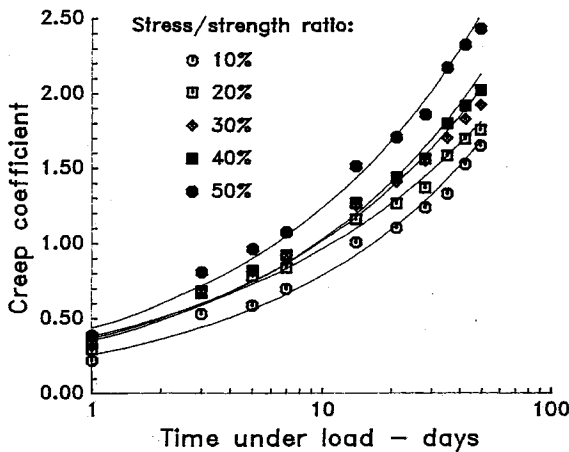


Fig.8 Results of creep test.

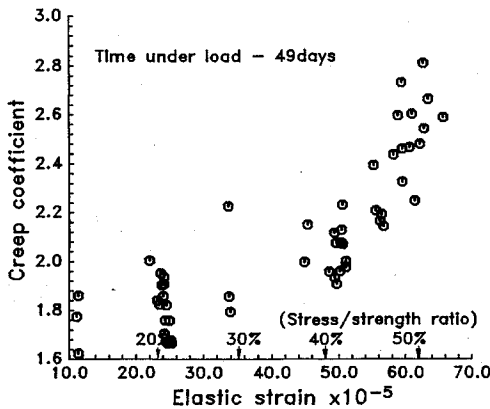


Fig.9 The scatter of creep coefficient.

$$\Delta\sigma_c = \frac{1}{A_c} \times \left(A_p \cdot E_p \cdot \frac{l_c}{l_p} \cdot \Delta\varepsilon_c \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- A_c : コンクリート供試体の断面積
- A_p : プレストレスト鉄筋の断面積
- E_p : プレストレスト鉄筋の弾性係数
- l_c : コンクリート供試体の長さ
- l_p : 定着板間の長さ
- $\Delta\varepsilon_c$: 各再導入時材令間に生じたクリープひずみと乾燥収縮ひずみの和

である。

(2) 実験結果および考察

a) クリープひずみの非線形性の検討

Fig.8は、実験より得られた各々の持続応力によって生じるクリープ係数の経時変化を示したものである。○, □, ◇, ■および●は、それぞれ強度比で10%, 20%, 30%, 40%および50%の持続応力を受けたコンクリートのクリープ係数の平均値を示したものである。もし、コンクリートのクリープひずみが、持続応力に対して線形であれば、クリープ係数の経時変化を表す曲線は、

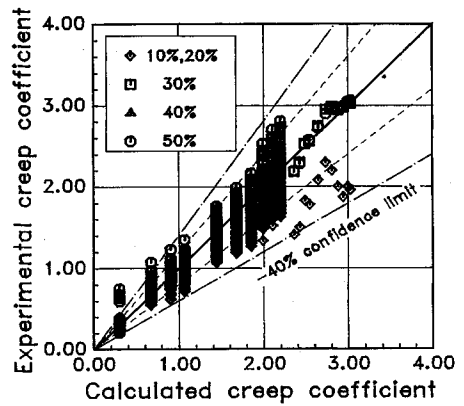


Fig.10 The comparison between calculated data by linear creep compliance and test data.

持続応力の大きさに関係なくすべて、同一の曲線によって表されなければならない。しかし、Fig.8からは、持続応力の大きさによってクリープ係数の大きさに差があることが認められる。特に50%の持続応力によって生じるクリープ係数は、10%~40%の持続応力によって生じるクリープ係数と比べかなり大きいことが分かる。また、10%の持続応力によって生じるクリープ係数と40%の持続応力によって生じるクリープ係数との差は、載荷期間の長さにかかわらずほぼ一定であることが分かる。

Fig.9は、初載荷時弾性ひずみが小さい順に供試体を並べ、そのクリープ係数と弾性ひずみとの関係を載荷期間49日目において示したものである。もし、クリープひずみが持続応力に対して線形であれば、全載荷期間に渡って、クリープ係数の大きさは、弾性ひずみの大きさに関係なくすべて同じでなければならない。しかし、Fig.9からは、弾性ひずみが大きくなるにつれ、クリープ係数は、大きくなる傾向が認められる。特に、応力強度比で40%（応力強度比40%の応力によって生じる弾性ひずみは約500μ）を越えると、急激にクリープ係数が大きくなるばかりでなく、そのばらつきも大きくなることが分かる。

Fig.10は、任意載荷期間におけるクリープひずみと弾性ひずみの関係を式(4)に基づく直線で回帰し、求められた直線の傾きφを横軸に、同載荷期間で各々の大きさの持続応力によって生じるクリープひずみをその初期弾性ひずみで除して求めたクリープ係数を縦軸に示した図である。また、Fig.10中の2本の一点鎖線は、回帰により求めたφと実験値との差が±40%を示す範囲で、点線は、±20%を示す範囲である。

$$\varepsilon_{cr} = \phi \varepsilon_0 \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 ε_{cr} : クリープひずみ、 ε_0 : 初期弾性ひずみ、 ϕ : クリープ係数である。

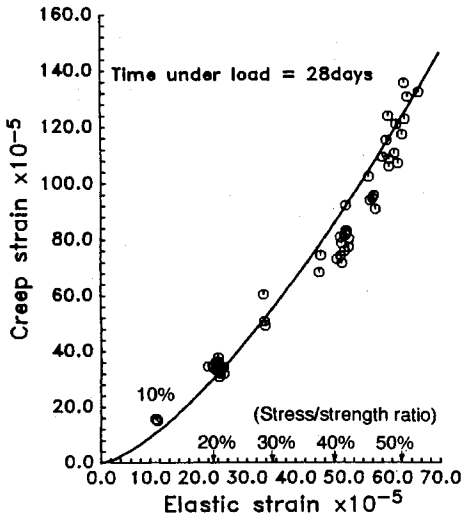


Fig.11 The relation between elastic strain and creep strain modeled by Bailey equation.

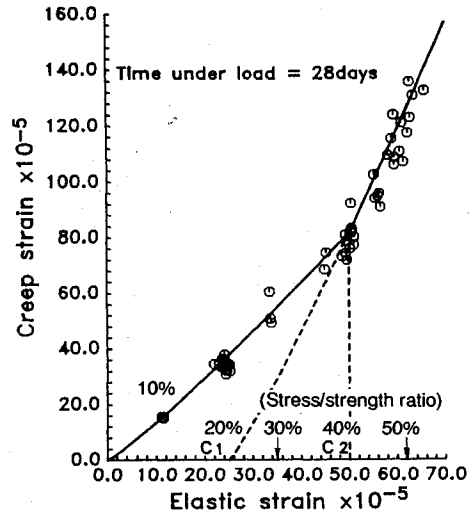


Fig.13 The relation between elastic strain and creep strain modeled by modified Bailey equation.

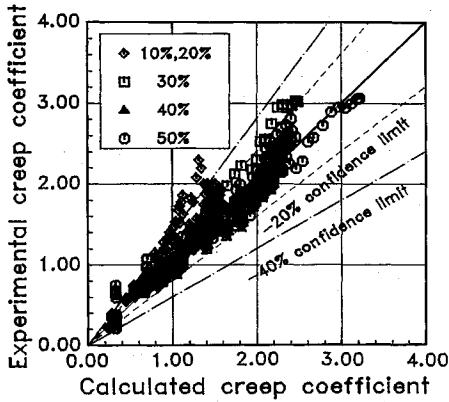


Fig.12 The comparison between calculated data by Bailey equation and test data.

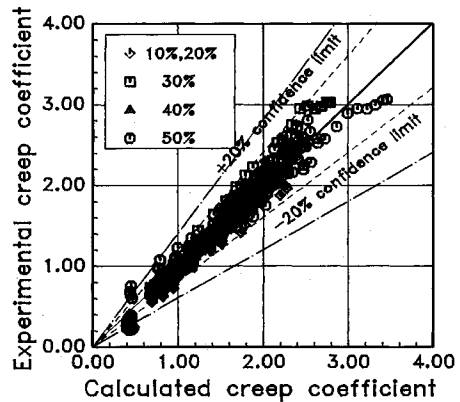


Fig.14 The comparison between calculated data by modified Bailey equation and test data.

Fig.10より、クリープひずみと弾性ひずみとの関係を線形であるとした場合、式(4)に基づく線形クリープ構成方程式の信頼限界は、40%であると思われる。また、回帰して求めたクリープ係数は、持続応力が大きいコンクリートのクリープ係数を過小評価し、持続応力が小さいコンクリートのクリープ係数を過大評価することが分かる。

b) 非線形クリープ構成方程式

Fig.11は、クリープひずみの非線形性を考慮するために式(5)に示されるBailey式によって載荷期間28日目におけるクリープひずみと初期弾性ひずみを近似した結果である。なお、Bailey式は、金属の遷移クリープ現象を表すものとしてよく用いられている¹⁵⁾。

$$\epsilon_{cr} = a\epsilon_0^b \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 ϵ_{cr} :クリープひずみ、 ϵ_0 :弾性ひずみ、 a および

b :非線形最小二乗法により求める未定係数である。なお、本研究で用いた非線形最小二乗法は、非線形性の大きい問題でも比較的安定に収束すると言われているハイブリッド法¹⁶⁾である。

Fig.11より、Bailey式による近似曲線は、応力強度比で20%、30%および50%の持続応力によって生じるクリープひずみに対しては、実験値のほぼ中心を通っているが、応力強度比で10%の持続応力によって生じるクリープひずみに対しては過小評価し、応力強度比で40%の持続応力によって生じるクリープひずみに対しては過大評価していることがうかがわれる。このことは、載荷期間28日目以外においても同様に確認されている。すなわち、Bailey式に基づく回帰曲線は、クリープひずみと持続応力との関係のある程度の精度で表すことができると言える。

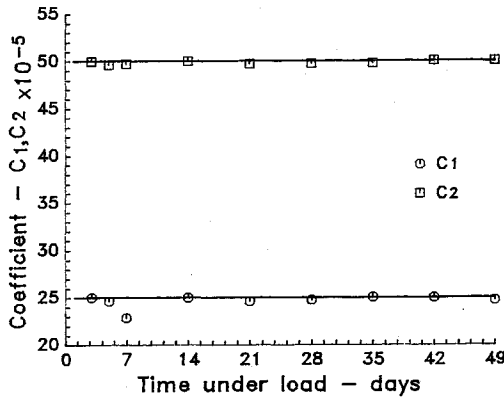


Fig.15 The best estimate value of coefficient- c_1, c_2 .

Fig.12 は、Bailey 式に含まれる未定係数 a および b の最適値を実験値を基に求め、その最適値を用い計算したクリープ係数と、実験より求めたクリープひずみをその初載荷時弾性ひずみで除して求めたクリープ係数とを比較した図である。Fig.10 と比較し、Fig.12 においては、計算値と実験値とのばらつきが小さくなっている。従って、Bailey 式を用いてクリープひずみの持続応力に対する非線形性を考慮したことにより、線形クリープ構成方程式よりもコンクリートのクリープ挙動をさらに正確に表すことができたと言える。しかし、Bailey 式においても、その計算値が、信頼限界 40% を越える場合がある。

そこで、応力強度比で 40% を越える持続応力が載荷されると、クリープひずみが急激に増加することを表すために、新たな係数 c_1 および c_2 を用い、Bailey 式を式 (6) (以降、修正 Bailey 式とよぶ) に修正した。

Fig.13 は、修正 Bailey 式に含まれる係数 a, b, c_1 および c_2 を未定係数とし、ハイブリッド法を用いて載荷期間 28 日目におけるクリープひずみと初期弾性ひずみの関係を近似した結果である。Fig.13 より、本研究で提案する修正 Bailey 式は、任意載荷期間におけるクリープひずみと弾性ひずみの関係を持続応力の大きさにかかわらず、非常によく表していることが分かる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_0 < c_2 \text{ 場合;} \\ \epsilon_{cr} = a \left(\frac{c_2 - c_1}{c_2} \cdot \epsilon_0 \right)^b \\ \epsilon_0 \geq c_2 \text{ 場合;} \\ \epsilon_{cr} = a(\epsilon_0 - c_1)^b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

Fig.14 は、修正 Bailey 式に含まれる未定係数 a, b, c_1 および c_2 の最適値を実験値を基に求め、その最適値を用い計算したクリープ係数と、実験より求めたクリープひずみをその初載荷時弾性ひずみで除して求めたクリープ係数とを比較した図である。なお、未定係数 a, b, c_1 および c_2 の最適値を求める際に、これらの値の範

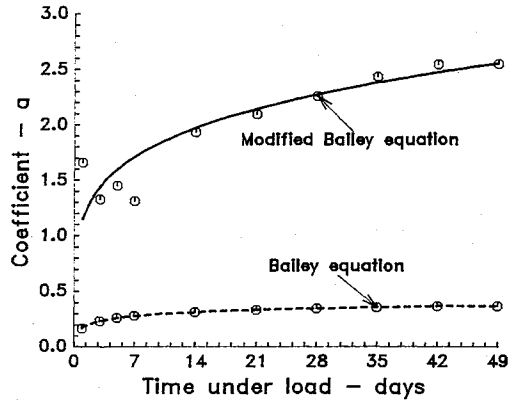


Fig.16 The best estimate value of coefficient- a .

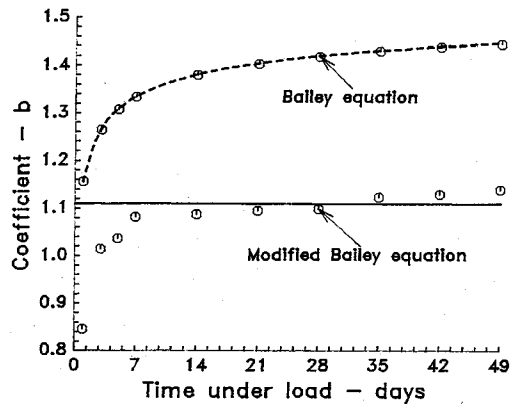


Fig.17 The best estimate value of coefficient- b .

囲には条件をつけずに回帰を行った。この図より、修正 Bailey 式に基づく計算値は、実験値との間にばらつきが少なく、きわめてよく一致していることが分かる。

Fig.15 は、修正 Bailey 式に含まれる未定係数 c_1 および c_2 の最適値を示したものである。未定係数 c_1, c_2 の最適値はともに、載荷期間に関係なくほぼ一定となった。また、未定係数 c_2 の最適値は、応力強度比で約 40% の持続応力によって生じる弾性ひずみに一致した。すなわち、修正 Bailey 式に c_2 を用いたことで、応力強度比 40% の持続応力を越えると、クリープひずみの増加割合が急激に増加することを表すことができたと考えられる。

Fig.16 および Fig.17 は、それぞれ、Bailey 式および修正 Bailey 式に含まれる未定係数 a および b の最適値を示したものである。Bailey 式に含まれるクリープひずみの大きさに関係する係数 a は、修正 Bailey 式のそれに比べて小さいことが分かる。また、Bailey 式に含まれる非線形性を表す係数 b は、修正 Bailey 式のそれに比べて大きいことが分かる。また、未定係数 b の最適値は、Bailey 式においては、載荷期間の経過とともに大きくなる傾向があるが、修正 Bailey においては、載

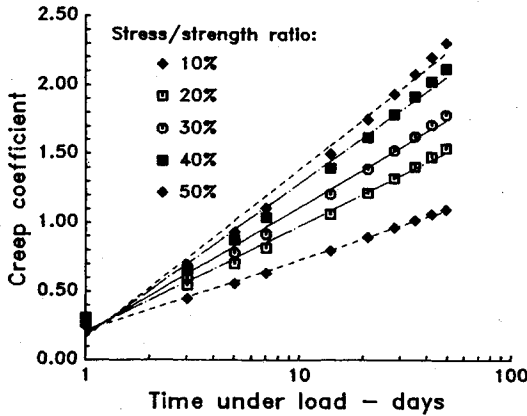


Fig.18 The change of creep coefficient with time calculated by Bailey equation.

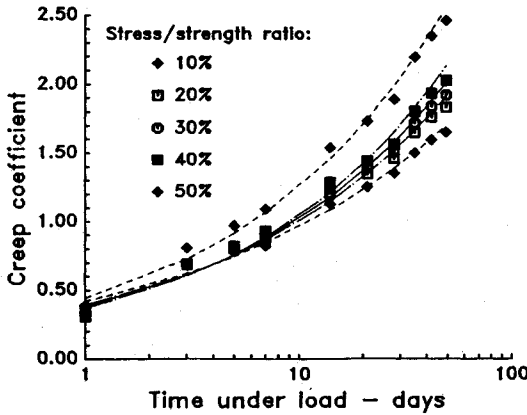


Fig.19 The change of creep coefficient with time calculated by modified Bailey equation.

荷期間の長さに関係なくほぼ一定となることが分かる。

Fig.18は、Bailey式に含まれる未定係数に最適値を用い、各々の持続応力によって生じるクリープ係数の経時的変化を求めたものである。この図より、Bailey式に基づき求められる各々の大きさの持続応力によって生じるクリープ係数は、対数的に増加し、Fig.8に示された実験結果とは、かなり異なる傾向を示すことが分かる。すなわち、Bailey式では、計算値と実験値との差が、荷期間が長くなるにつれて、ますます大きくなることわがわかれる。一方、Fig.19は、修正Bailey式に含まれる未定係数に最適値を用い、各々の持続応力によって生じるクリープ係数の経時的変化を求めたものである。各々の大きさの持続応力によって生じるクリープ係数の計算値の経時的変化は、べき乗的であり、Fig.8に示した実験結果と同じ傾向を示している。また、50%の持続応力によって生じるクリープ係数が、10%~40%の持続応力によって生じるクリープ係数に比べ著しく大きくなる様子も表されている。ただし、10%の持続応

Table 2 Mix proportion of concrete.

| Max size (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit weight(kg/m ³) | | | |
|------------------|---------------|------------|------------|------------|---------------------------------|-----|-----|-----|
| | | | | | W | C | S | G |
| 20 | 9~12 | 1.2 | 60.0 | 47.7 | 200 | 333 | 842 | 963 |

Table 3 Water curing period and age at application of load.

| Water curing period (days) | Age at the loading (days) | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|----|----|-----|-----|----|
| | 3 | 7 | 14 | 28 | 56 | 94 |
| 3 | 3 | 10 | 24 | 52 | 94 | |
| 7 | 7 | | | | | |
| 14 | 14 | 21 | 35 | 63 | 105 | |
| 28 | 28 | | | | | |
| 56 | 56 | 63 | 77 | 105 | | |

力によって生じるクリープ係数と40%の持続応力によって生じるクリープ係数との差が荷期間の経過とともに大きくなる点で、実験結果と異なっている。しかし、10%の持続応力によって生じるクリープ係数が、Fig.8に示したものより大きめであることを除けば、修正Bailey式に基づく計算値は、実験値と比較しても妥当な値であり、クリープ係数の経時変化も十分表すことが可能であると言える。このように、修正Bailey式は、クリープひずみの非線形挙動を適切に表すことができる非線形クリープ構成方程式であると考えられる。

4. 非線形クリープ構成方程式の提案

修正Bailey式により、任意荷期間におけるクリープひずみと弾性ひずみの関係を表すことが可能であることが分かった。しかし、クリープ構成方程式は、変動応力下のクリープひずみの計算を行う場合等において、時間の関数でなければ実用的ではない。また、時間の関数となった修正Bailey式に含まれる、各々の係数に及ぼすコンクリートの配合、環境条件、部材寸法の影響等が明らかとなり、クリープ予測式を確立することができるならば、設計段階において多くの時間、経費、労力をともなうクリープ試験を行う必要がなくなるであろう。

修正Bailey式に含まれる係数 a には配合の影響が、係数 b には水分の逸散と環境条件、部材寸法が、 c_2 にはコンクリートの強度との関係があると推測される。しかし現段階では、修正Bailey式に含まれる係数 a 、 b 、 c_1 および c_2 の経時的変化を近似する時間の関数が明らかでないために、クリープに影響をおよぼす因子を関数として修正Bailey式の中に取り込むことはできない。

そこで、本節では、修正Bailey式に時間の項を含め、より具体化された非線形クリープ構成方程式を導いた。さらに、水中養生期間、気中養生期間の長さが、修正Bailey式に含まれる未定係数 a 、 b 、 c_1 および c_2 におよぼす影響についても、以下のような実験を実施し、検討した。

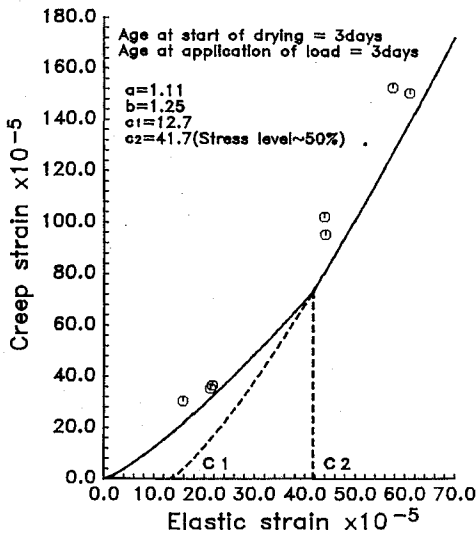


Fig.20 The relation between creep strain and elastic strain.

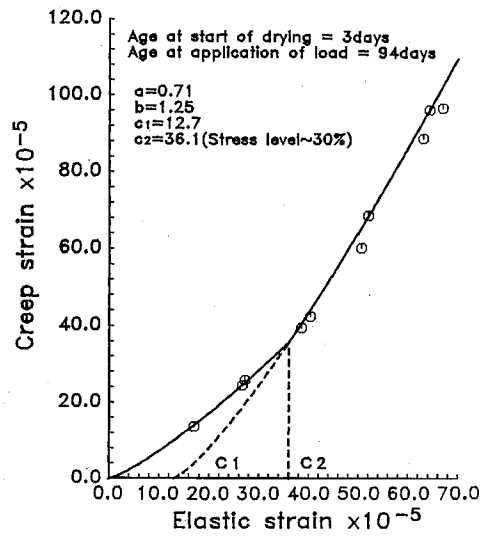


Fig.22 The relation between creep strain and elastic strain.

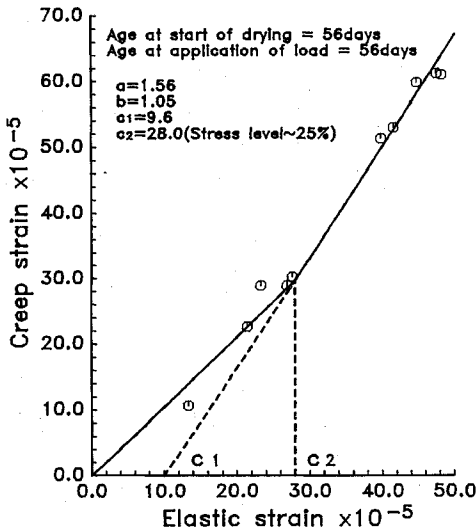


Fig.21 The relation between creep strain and elastic strain.

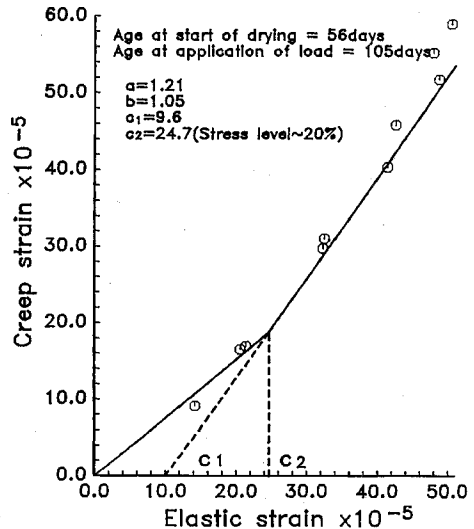


Fig.23 The relation between creep strain and elastic strain.

(1) 実験概要

コンクリートの配合を **Table 2** に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材には碎石（比重：2.73，吸水率：0.76，F.M.：6.68）を，細骨材には川砂（比重：2.62，吸水率：1.78，F.M.：2.81）を使用した。

クリープ試験には 10 cm×10 cm×38 cm の角柱供試体を，乾燥収縮試験には 10 cm×10 cm×40 cm の角柱供試体を用いた。クリープ試験および乾燥収縮試験は，温度 19±1°C，湿度 68±7% の恒温恒湿度室内で行い，ひずみの測定には，最小目盛り 1/1 000 mm のホイットモア式ひずみ計（検長 25 cm）を用いた。また，持続応力の減退を補うために，初載荷後 3，10，30 および 70

日目に持続応力の再導入を行った。測定期間は，200 日である。**Table 3** に水中養生期間および気中養生期間を示す。各々の養生を行った後，載荷された応力が応力強度で 10% の供試体数は 1 本，20%，30%，40% および 50% の供試体はそれぞれ 2 本である。また，初載荷時圧縮強度が 30 MPa 以下の場合には，応力強度比で 50% の応力を，30 MPa 以上の場合には，応力強度比で 30% の応力を載荷される供試体を 1 本用意した。

(2) 実験結果および考察

Fig.20 および **Fig.21** は，それぞれ，3 日および 56 日間水中養生した後直ちに初載荷を行ったコンクリートの載荷期間 30 日目におけるクリープひずみと弾性ひずみとの関係を示したものである。また，**Fig.22** および

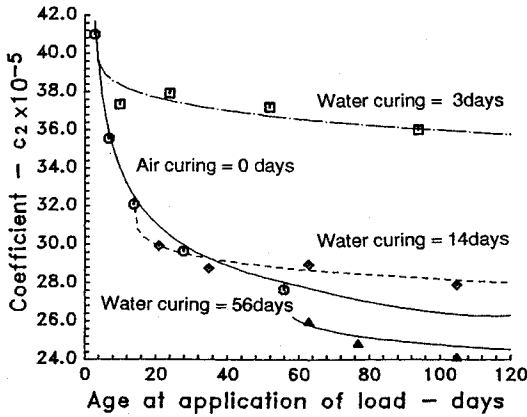


Fig.24 The change of c_2 with curing condition.

Fig.23 は、それぞれ、3日間水中養生した後、材令91日まで気中養生を行ったコンクリートと56日間水中養生した後、材令105日まで気中養生を行ったコンクリートの載荷期間30日目におけるクリープひずみと弾性ひずみとの関係を示したものである。これらの図より、修正 Bailey 式は、水中養生期間、載荷開始時材令の異なるなどのコンクリートのクリープひずみと弾性ひずみの関係も良く表していると思われる。

また、Fig.20～Fig.23中に示した未定係数 b の最適値より、水中養生期間が長くなるにつれ、クリープひずみの非線形性が小さくなるのが分かる。また、水中養生期間が同じ場合には、気中養生期間が長くなってもクリープひずみの非線形性は同程度であることが分かる。

式(7)および式(8)は、Table 3に示した養生方法が16種類、荷重の大きさが5種類異なるコンクリートより、200日間測定された実験値をもとにハイブリッド法を用いて決定された非線形クリープ構成方程式である。

$$\left. \begin{aligned} &\varepsilon_0 < c_2(t', t_0) \text{ の場合;} \\ &\varepsilon_{cr}(\varepsilon_0, t, t', t_0) = a(t, t', t_0) \\ &\quad \times \left(\frac{c_2(t', t_0) - c_1(t_0)}{c_2(t', t_0)} \cdot \varepsilon_0 \right)^{b(t_0)} \\ &\varepsilon_0 \geq c_2(t', t_0) \text{ の場合;} \\ &\varepsilon_{cr}(\varepsilon_0, t, t', t_0) = a(t, t', t_0) \times (\varepsilon_0 - c_1(t_0))^{b(t_0)} \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} &\text{ここに、} \\ &a(t, t', t_0) = 2.64t_0^{0.114} (0.002(t' - t_0) + 1)^{-2.9} \\ &\quad \times \left(\frac{(t - t')}{262 + (t - t')} \right)^{0.434} \\ &b(t_0) = 0.285 \exp(-0.047t_0) + 1 \\ &c_1(t_0) = \frac{9.62}{t_0} + 9.81 \\ &c_2(t', t_0) = 47.1 \{ \log_e(t_0 + 1) \}^{-0.372} \\ &\quad \times \exp\{-0.055(t' - t_0)^{0.214}\} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

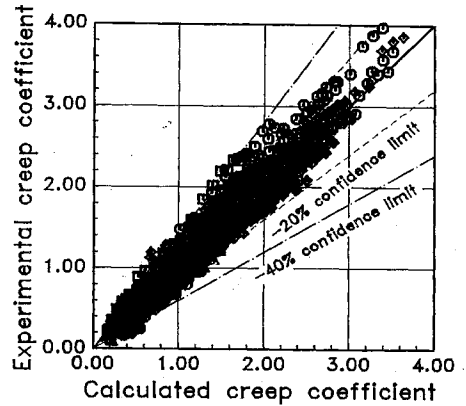


Fig.25 The comparison between calculated data by the present non-linear creep prediction equation and test data.

である。

ただし、式(7)および式(8)に示したクリープひずみ $\varepsilon_{cr}(\varepsilon_0, t, t', t_0)$ 、弾性ひずみ ε_0 、係数 $c_1(t_0)$ および $c_2(t', t_0)$ の単位は、ひずみの単位で、その次元は、 10^{-5} である。また、係数 $a(t, t', t_0)$ および係数 $b(t_0)$ は、無次元で、材令 t 、載荷開始時材令 t' および乾燥開始時材令 t_0 の単位は、日である。

ハイブリッド法により求められた未定係数 b 、 c_1 および c_2 の最適値は、養生条件の異なるいずれのコンクリートでも載荷期間の長さに関係なく、一定と見なすことができた。また、乾燥開始時材令は、すべての未定係数の最適値に影響を及ぼし、載荷開始時材令は、未定係数 a および c_2 の最適値にのみ影響を及ぼすことが分かった。

Fig.24に、ハイブリッド法により求められた未定係数 c_2 の最適値と養生条件の関係を示す。 c_2 の最適値より、クリープひずみが急激に増加する点での弾性ひずみの値は、養生期間が長くなるにつれ小さくなるのが分かる。さらに、Fig.24に示す c_2 の値は、応力強度比で40%の応力によって生じる弾性ひずみに必ずしも一致せず、Fig.15に示した c_2 の値に比べ、小さくなるのが分かる。このことより、 c_2 の値は、コンクリートの強度や配合などによって影響を受けることが考えられる。

また、Fig.25は、式(7)および式(8)より求めたクリープ係数と実験より求めたクリープ係数を比較した図である。データ総数は、3200個である。式(7)および式(8)は、材令 t 、載荷開始時材令 t' および乾燥開始時材令 t_0 の項を含むにもかかわらず、Fig.14の場合と同程度の精度で実験結果を表せていることが分かる。

5. まとめ

クリープひずみの持続応力に対する線形性が成り立つ明確な上限および下限の応力強度比は、存在しないこと

が実験的に明らかとなった。また、クリープひずみは持続応力に対して一様に増加するのではなく、クリープひずみの増加割合が急激に大きくなる点が存在することが分かった。このように非線形なクリープ挙動を、本研究で提案する修正 Bailey 式を用いると、±20% の範囲で実際のクリープ挙動を表せることを示した。

今後、式(8)に含まれる14個の未定係数のそれぞれと、コンクリートの配合、環境条件、部材寸法等、クリープひずみの大きさに影響を及ぼす因子との関係を明らかにすることにより、従来の線形クリープ予測式よりも、さらに精度良いクリープひずみの予測式を確立することが可能であると思われる。

参 考 文 献

- 1) Freudenthal, A.M. and Roll, F. : Creep and creep recovery of concrete under high compressive stress, *ACI Journal*, 54, pp.1111~1142, 1958.
- 2) 土木学会編：平成3年制定コンクリート標準示方書(設計編), p.27, 1991.
- 3) CEB-FIP : Model Code for concrete structures, Vol. II, International System of Unified Standard Codes of Practice for Structures, Comité Eurointernational du Béton-Fédération Internationale de la Précontrainte, 1978.
- 4) L'Hermite, R.G. : Volume changes of concrete, Proc. Fourth Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Vol.2, Washington DC, pp.659~694, 1960.
- 5) Sheikin, A.A. and Baskakov, N.J. : The influence of mineralogical composition of Portland cement on the creep of concrete in compression, *Stroitel'naya Promyshlennost*, No.9, pp.39~40, 1955, Translation No.236, Department of Scientific and Industrial Research, 1956.

- 6) Klieger, P. : Early high-strength concrete for prestressing, Proc. World Conf. on prestressed Concrete, San Francisco, pp.A5-1~A5-14, 1957.
- 7) L'Hermite, R.G. and Mamillan, M. : Further results of shrinkage and creep tests, Proc. Int. Conf. on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association : London, pp.423~433, 1968.
- 8) CEB-FIP : Model Code 1990, Comité Euro-Internatinal du Béton-Fédération Internationale de la Précontrainte, (Draft), 1990.
- 9) ACI Committee 209 : Prediction of creep, shrinkage and temperature effects on concrete structures, ACI-SP-76, 1982.
- 10) Bazant, Z.P. and Panula, L. : Simplified Prediction of concrete creep and shrinkage from strength and mix, Structural Engineering Report No.78-10/6405, Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois, p.24, 1978, Oct.
- 11) CEB-FIP : Internatinal Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structures, Comité Européen du Béton-Fédération Internatinal de la Précontrainte, 1970.
- 12) 阪田憲次・綾野克紀・廣村治：コンクリートのクリープひずみの予測式の提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10-2, pp.271~276, 1988.
- 13) Sakata, K. and Kohno, I. : Prediction of Shrinkage and Creep of Concrete, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, Vol.21-1, pp.57~80, 1986.
- 14) Dilger, W.H. : Private communication.
- 15) 日本材料学会編：固体力学の基礎，日刊工業新聞社，p.153, 1981.
- 16) 中川徹・小柳養夫：最小二乗法による実験データ解析，UP 応用数学選書7，東京大学出版会，pp.65~71, 1989. (1991.10.7 受付)

STUDY ON NON-LINEAR CREEP PREDICTION EQUATION OF CONCRETE

Kenji SAKATA and Toshiki AYANO

Concrete is considered as an aging linear visco-elastic material. Hence, the creep behavior of concrete under the constant sustained stress is represented by either creep coefficient or specific creep, both of which are based on an assumption of the linear relation between creep strain and externally applied stress. What is in doubt, however, is the upper limit of this relation. In terms of the stress/strength ratio, an upper limit between about 0.23 and 0.75 has been observed. The purpose of this study is to clarify the nonlinearity of creep strain of concrete under the constant sustained stress. We verify the significant difference among the creep coefficient of concrete which is under the various constant stress level. Furthermore, we propose a non-linear creep prediction equation which can represent the results of creep experiment.