

クリープ変形を考慮したコンクリートの圧縮変形モデルに関する検討

A Study on Deformational Model of Concrete under Compression Considering Creep Deformation

北海道大学大学院 ○学生員 立石晶洋(Akihiro Tateishi)
北海道大学大学院 正 員 佐藤靖彦(Yasuhiko Sato)

1. はじめに

昨年、佐藤らの研究¹⁾によって繰返し荷重を受けるコンクリートの破壊に至るまでの変形特性の把握およびコンクリートの変形モデルの構築に関する研究が行われたが、さまざまな力学的作用を受けるコンクリートの変形モデルにまでには至っていない。本研究では持続荷重下、特に高圧縮応力下のコンクリートの変形特性および変形モデルの構築を検討することを目的として研究を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本実験では、実験供試体は150×150×60mmの直方体供試体を用いた。供試体は、粗骨材の最大寸法は25mm、セメントは普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比60%、細骨材率41%で配合した。ひずみの測定には、検長30mmのワイヤストレインゲージを荷重軸方向8枚、荷重軸直角方向7枚を用い測定した。図-1に供試体寸法およびゲージ位置を示す。また、供試体諸元を表-1に示す。

2.2 実験方法

クリープ試験および静的試験の荷重は、ローゼン・ハウゼン100t 載荷試験機を用い荷重を厚さ100mmの載荷板を介して載荷した。荷重は一軸とし、載荷板による拘束を低減するため0.5mm厚のテフロンシートを載荷面と底面にそれぞれ2枚ずつはさんだ。持続荷重下におけるコンクリートの変形モデルを表現できるよう1日に一度の除荷及び再載荷を行った。本研究の除荷及び再載荷

では弾性回復のみを考慮し、遅れ弾性回復を含んでいない。静的試験は、クリープ試験開始日と同じ日にそれぞれ3体行った。クリープ試験の応力レベルは、静的試験の結果より決定した。また、クリープ試験中の乾燥収縮ひずみを測定するため同じ条件下でコンタクトゲージによりひずみを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 終局ひずみ

クリープ試験と静的試験の終局ひずみを表-2に示す。C1は、持続荷重を一定期間載荷後、応力レベルを0.95程度に上げクリープ破壊させ、C1以外は、静的に載荷し破壊させている。図-2にC2の応力-ひずみの関係を示す。表-2、図-2からクリープ試験の終局ひずみは、静的試験の終局ひずみに比べ大きくなることは明らかである。また、一定期間持続荷重を載荷後静的に破壊させた供試体に比べ、クリープ破壊をさせた供試体の終局ひずみは明らかに大きくなっている。このことから、持続荷重履歴を持つコンクリートの変形は大きくなることが考えられる。

3.2 クリープ予測式との比較

クリープひずみの測定値と予測値の比較を図-3.1、図-3.2に示す。クリープ予測式は、応力レベル0.50までの

表-1 供試体諸元

	σ/f'_c	乾燥開始材齢(日)	載荷開始材齢(日)
C1	0.40	31	39
C2	0.57	23	25
C3	0.62	26	29
C4	0.71	26	28

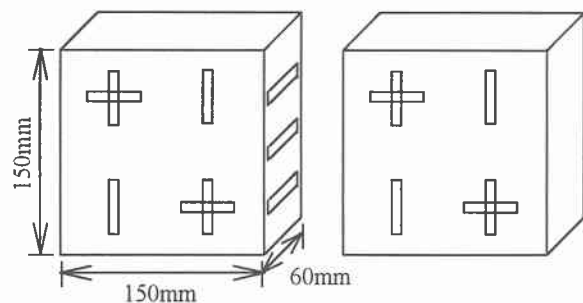
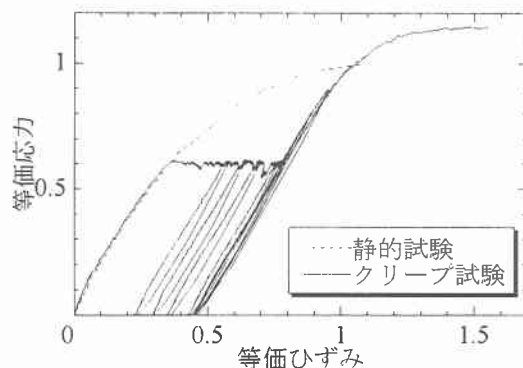


図-1 供試体寸法およびゲージ位置

表-2 終局ひずみ

	σ/f'_c	持続荷重 載荷期間(日)	終局ひずみ(μ)	
			静的試験	クリープ試験
C1	0.40	5.7	1195.7	3121.1
C2	0.57	10.0	1636.8	2335.6
C3	0.62	5.8	1518.1	2375.3
C4	0.71	9.5	1466.9	2356.5

図-2 応力-ひずみの関係(C2, $\sigma/f'_c=0.57$)

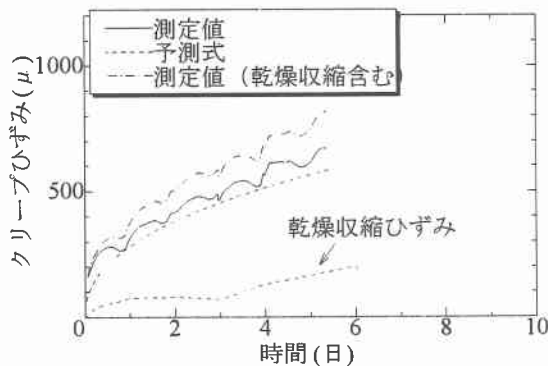


図-3.1 クリープひずみ (C2, $\sigma/f'c=0.40$)

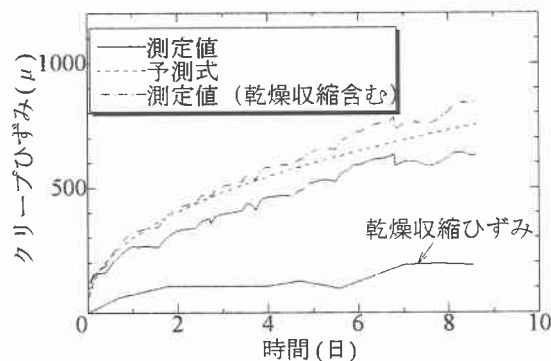


図-3.2 クリープひずみ (C2, $\sigma/f'c=0.57$)

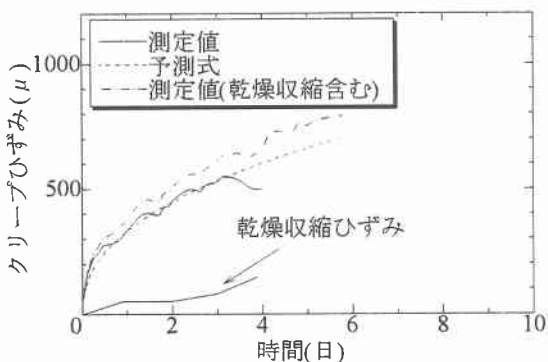


図-3.3 クリープひずみ (C3, $\sigma/f'c=0.63$)

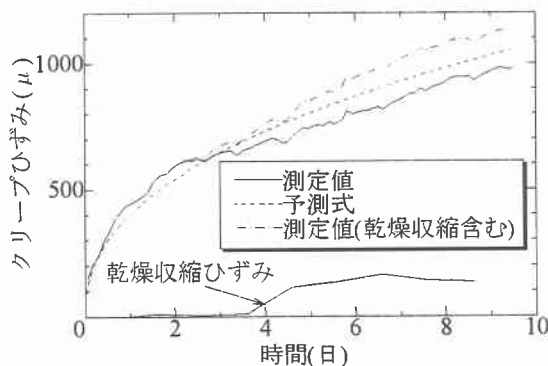


図-3.4 クリープひずみ (C4, $\sigma/f'c=0.71$)

高応力レベルも予測可能であることと段階持続応力を表現しやすいことから、綾野らの研究²⁾による予測式を用いた。クリープ予測式を式(1)に示す。

$$\varepsilon_{cr}(t, t', t_0) = a(t, t', t_0) \cdot (\varepsilon_0 - c_1(t_0))^{b(t_0)} \quad (1)$$

$$a(t, t', t_0) = 2.64 \cdot t_0^{0.114} \cdot \{0.002 \cdot (t' - t_0) + 1\}^{2.9}$$

$$\left\{ \frac{t - t'}{262 + (t - t')} \right\}^{0.434}$$

$$b(t_0) = 0.285 \cdot \exp(-0.047 \cdot t_0) + 1$$

$$c_1(t_0) = \frac{9.62}{t_0} + 9.81$$

$$c_2(t', t_0) = 47.1 \cdot \{\log_e(t_0 + 1)\}^{-0.372} \cdot \exp\{-0.055(t' - t_0)^{0.214}\}$$

ε_{cr} ; クリープひずみ (μ)

ε_e ; 弾性ひずみ (μ)

t ; 材齢 (日)

t' ; 載荷開始材齢 (日)

t_0 ; 乾燥開始材齢 (日)

各供試体とも測定値と予測式の値はほぼ近い値を示した。綾野式による予測は応力レベル 0.50 まで信頼できることは綾野らの研究により明確であることから、本研究の実験の範囲内においてクリープひずみは、予測式とよく一致しており、綾野式は応力レベル 0.71 まで適用できるといえる。

3.3 前川モデル

本研究では、持続荷重を受けるコンクリートの変形モデルに前川モデル³⁾を用いる。前川モデルの概要を式(2)と図-4に示す。

$$S = E_0 K_0 (E - E_p) \quad (2)$$

$$K_0 = \exp(-0.73 \cdot E_t (1 - \exp(-1.25 \cdot E_t))) \quad (3)$$

$$E_p = E_t - \frac{20}{7} \cdot (1 - \exp(-0.35 \cdot E_t)) \quad (4)$$

S ; 等価応力

E ; 等価全ひずみ

E_t ; 過去に経験した最大の等価全ひずみ

E_p ; 等価塑性ひずみ

K_0 ; 破壊パラメータ

E_0 ; 初期弾性係数

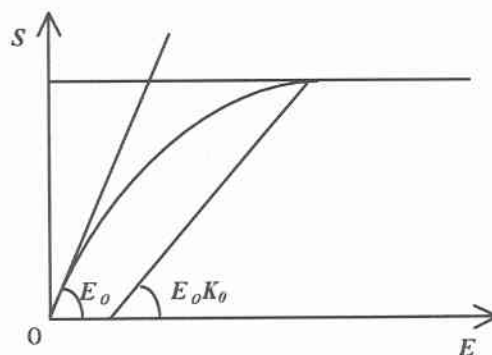


図-4 前川モデルの概要図

前川モデルは、静的な荷重を受けるコンクリートの変形に関して、初期剛性に対する除荷時の剛性の比である破壊パラメータ K_0 と塑性ひずみ E_p を用いて、包絡線および除荷、再載荷の内部曲線を表現するモデルである。この前川モデルを応用することでクリープひずみ量からコンクリートの変形を表現できるようになると考える。しかし、前川モデルは時間の影響を受けない等価ひずみによって破壊パラメータ K_0 、塑性ひずみ E_p を表現しているのに対し、クリープひずみは時間に依存するひずみである。時間の影響を前川モデルにとりこむことが、持続荷重を受けるコンクリートの変形を表現するのに重要だと考える。

3.4 破壊パラメータ K_0

持続荷重載荷中に除荷載荷し得られた破壊パラメータ K_0 を図-5 に示す。図-5 が示すようにすべての供試体において破壊パラメータ K_0 は式(3)には沿わず、全ひずみが増加してもほぼ一定となった。本研究における実験の範囲内では、1 回目以降の除荷による弾性回復の変形及び再載荷による弾性変形はほぼ一定であるといえる。つまり、初期剛性と除荷時の剛性の比は変化せず、持続荷重によるコンクリートの破壊は進行していないことがいえる。本研究では、短期間の持続荷重下におけるコンクリートの変形挙動しか測定していないため破壊の進行をみるができなかった。

3.5 塑性ひずみ E_p

次に、図-6 に除荷時の等価塑性ひずみを示す。図-6 によると持続荷重を受けたコンクリートの塑性ひずみは、式(4)の値よりも大きな値を示している。このことから、持続荷重を受けたコンクリートは塑性ひずみ E_p が大きくなり、コンクリートが持続荷重を受ける場合式(4)を修正する必要があると考えられる。除荷時におけるコンクリートの変形には、図-7 に示すように弾性回復ひずみと遅れ弾性回復ひずみがあり、クリープの変形モデルを構築するためには、遅れ弾性回復を考慮し塑性ひずみ E_p を決定する必要がある。

3.6 遅れ弾性回復を考慮した破壊パラメータ K_0

遅れ弾性回復を含むパラメータを図-7 に示す弾性回復ひずみと遅れ弾性回復ひずみをの和を回復性のひずみ

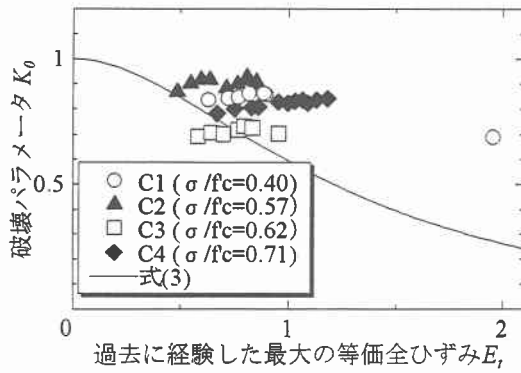


図-5 破壊パラメータ

と考え算出した場合、回復性のひずみは、図-8.1 の A→B→C の経過を経ることになる。このとき除荷時の剛性は直線 AC の傾きとなり、この値より破壊パラメータ K_0 が得られる。しかし、本研究における持続荷重の載荷期間内では、除荷、再載荷の変形はほぼ等しいので載荷時も弾性回復のみの除荷同様の剛性が得られるはずである。よって、図-8.1 に示す算出方法で得られるような破壊パラメータ K_0 の減少は考えられない。また、既往の研究³⁾によると遅れ弾性回復を含む除荷、再載荷においても弾性回復と再載荷時のコンクリートの変形は等しいと記してある。既往の研究⁴⁾は、応力レベル 0.63 と 0.35 で 180 日間の試験期間内に 3 回のクリープ回復を含む除荷、再載荷を行っている。よって、持続荷重下におけるコン

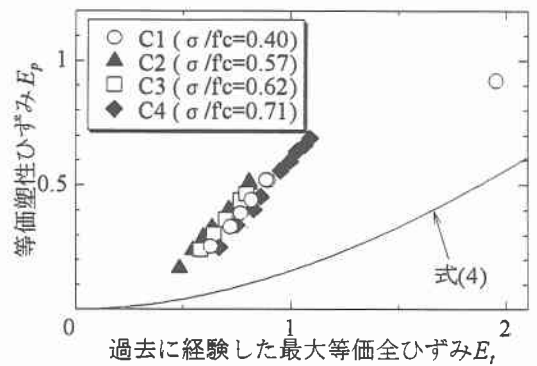


図-6 塑性ひずみ

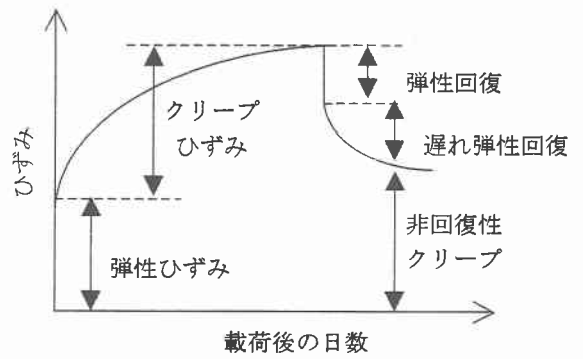


図-7 持続荷重を受けるコンクリートのひずみ

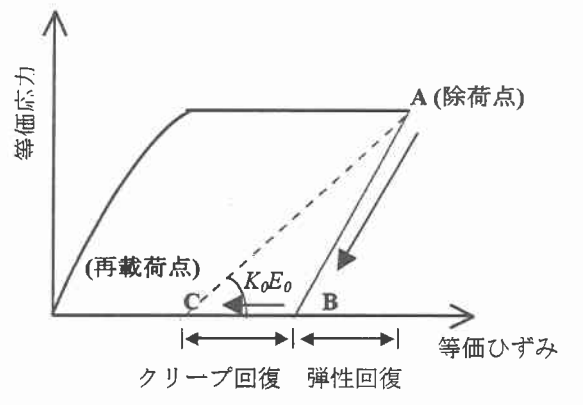


図-8.1 遅れ弾性回復を含む破壊パラメータ算出方法(a)

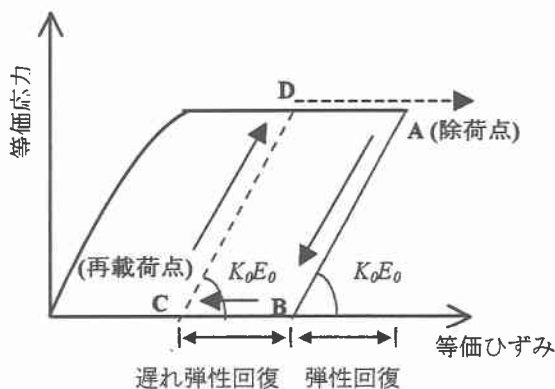


図-8.2 遅れ弾性回復を含む破壊パラメータ算出方法(b)

クリートの剛性は再載荷時の剛性で表せ得る。

したがって、遅れ弾性回復による変形は持続荷重を受けるコンクリートの破壊に対して影響を及ぼさないと考えられ、前川モデルを用いる場合は、それぞれのパラメータから遅れ弾性回復を差し引いて算出する。このことから、図-8.2 に示すように算出方法を考える。持続荷重下におけるコンクリートの剛性は、再載荷時の剛性(直線 CD の傾き)によるが、除荷時の剛性(直線 AB の傾き)と等しいので直線 AD の傾きとする。最大等価全ひずみ、等価塑性ひずみは、それぞれ A 点、B 点から遅れ弾性回復を差し引いた D 点、C 点が真の最大等価全ひずみ、等価塑性ひずみであるとして算出する。

3.7 遅れ弾性回復算出方法

本研究では遅れ弾性回復の変形を含まない除荷及び再載荷を行ったことと、遅れ弾性回復に関する研究はあまり行われていないことから遅れ弾性回復を含んだコンクリートの変形を正確に表現することはできない。そこで本研究では大沼らの研究⁵⁾より遅れ弾性回復率を算定し遅れ弾性回復を含む破壊パラメータ K_0 を求めることとした。

大沼らの研究では、時間の対数値とひずみが直線関係にある応力レベルの範囲内におけるクリープ試験により遅れ弾性回復率を提案している。遅れ弾性回復率は時間の対数値とクリープひずみで表されるクリープ曲線と遅れ弾性回復曲線の傾きの比であると定義している。

$$\text{遅れ弾性回復率} = \frac{\text{遅れ弾性回復曲線の傾き}}{\text{クリープ曲線の傾き}} \quad (5)$$

本研究におけるクリープ試験の応力レベルは 0.40 以上であり時間の対数値とひずみの関係は直線ではないが、載荷期間が短期であることから直線であると仮定してクリープ曲線の傾きを近似し算出した。遅れ弾性回復曲線の傾きは大沼らの研究により一定持続荷重時の応力レベルが高いほど傾きの絶対値は大きくなる傾向にあったので、遅れ弾性回復曲線の傾きを各応力レベルに対して近似し算出した。以上の方法から算出したクリープ曲線の傾きと遅れ弾性回復曲線の傾きから遅れ弾性回復率を求めるとすべての応力レベルに対してほぼ 0.46 になった。

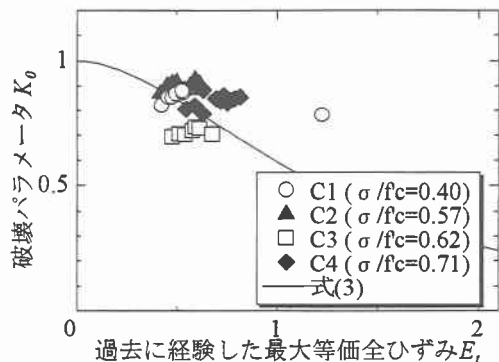


図-9 遅れ弾性回復を含む破壊パラメータ

上記の方法により算出した遅れ弾性回復を差し引いて求めた全ひずみと破壊パラメータ K_0 との関係を図-9 に示す。得られた破壊パラメータ K_0 が式(3)に一致すれば、前川モデルによって持続荷重を受けるコンクリートの変形モデルを構築することが可能である。図-9 において破壊パラメータ K_0 が式(3)に近くなるが、一致しているとはいいい切れない。今後、クリープ破壊を起こすクリープ試験において遅れ弾性回復を含めた持続荷重下のコンクリートの変形挙動を把握することが必要だと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られたまとめを以下に示す。

- (1) 持続荷重を受けるコンクリートの圧縮破壊時のひずみは持続荷重を受けない場合に比して大きくなる。
- (2) 綾野によるクリープひずみ予測式は、応力レベル 0.71 まで予測可能だと考えられる。
- (3) 1 回目以降の除荷時による弾性回復のコンクリートの変形および再載荷による弾性変形はほぼ等しいといえる。
- (4) 持続荷重を受けるコンクリートの遅れ弾性回復を含む破壊パラメータ K_0 は、静的試験から得られた破壊パラメータ K_0 に近くなるが、一致するとはいいい切れない。

参考文献

- 1) 佐藤公紀：繰返し荷重を受けるコンクリートの変形及び破壊に関する研究、北海道大学修士論文、2001
- 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、1993
- 3) 岡村甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、pp.73-114、
- 4) A.M.Freudenthal, Frederic Roll: Creep and Creep Recovery of Concrete under High Compressive Stress, JACI, V.29, No.12, Title No.54-66
- 5) 大沼博志、阿部博俊：高温化において三軸圧縮応力を受けるコンクリートのクリープ、1978