

# 論文 遷移材令時におけるコンクリートの構成則に関する実験的研究

安藤直樹\*<sup>1</sup>・石川靖晃\*<sup>2</sup>・田邊忠顕\*<sup>3</sup>

**要旨:** 遷移材令時(若材令)のコンクリートのひずみ成分を弾塑性成分に粘弾性成分および粘塑性成分という時間依存性の成分を加えた4つの成分で考えた。そして、これら4つの成分を実験的に捉えるために一軸圧縮試験を行い、そのひずみ成分を各成分に分離した。特に粘塑性成分に関しては新しく構成式を提案して研究を行った。そして、遷移材令時においては粘弾性成分が支配的であることを実験から捉えた。

**キーワード:** 遷移材令時、粘弾性ひずみ、粘塑性ひずみ

## 1. はじめに

コンクリートは打設直後から硬化にいたる間、その性質は粘性流動体から弾性体へと変化する。この期間では温度応力や自己収縮といった初期応力問題が発生し、硬化後の耐久性に大きく影響を及ぼす。そのため、この間の変形挙動を詳細にモデル化することが必要とされる。

従来、この間のコンクリートのモデル化は、粘弾性成分もしくは粘塑性成分のどちらか一方でしか考えられていなかった。しかし、それらのモデルでは、粘弾性成分だけの考慮では弾性域を越えたときの非回復性成分の表現ができず、また粘塑性成分だけの考慮では、低い応力レベルでクリープひずみが発生しないといった問題が生じ、挙動を十分に捉えることができなかった。

そこで、我々はこの間のコンクリートのモデルを弾塑性成分に粘弾性成分と粘塑性成分を加えた4つの成分を用いて表すことを考え、これまで解析的に研究を行ってきた。

これら4つの成分において、弾性成分と粘弾性成分に関してはクリープ試験からそれぞれの成分を捉えることができるが、塑性成分と粘塑性成分に関しては実際の現象からこれら2つの成分を合わせた非回復成分として捉えることはできても、それぞれを捉えることは非常に困難である。

本研究では、これら4つの成分、特に粘塑性成分を実験的に捉えることを考え、若材令コンクリートの一軸圧縮試験を行い、生じたひずみを4つの成分に分離することを試みた。特に粘塑性成分に関してはこれまでの研究よりもより一般性を持たせた構成式を導入して、研究を行った。

表-1 粘性流動体から弾性体へと変化するコンクリートのひずみ成分

	回復性	非回復性
時間依存性	粘弾性	粘塑性
非時間依存性	弾性	塑性

## 2. 若材令コンクリートの一軸圧縮試験

若材令コンクリートの応力-ひずみ関係を調べるために、若材令コンクリートの一軸圧縮繰り返し載荷試験および一軸圧縮単調載荷試験を材令12、24、36および48時間の供試体について行った。一軸圧縮試験に用いた若材令コンクリートの供試体の配合を表-2に示す。

<sup>1</sup>\* 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

<sup>2</sup>\* 名城大学理工学部土木工学科助手 (正会員)

<sup>3</sup>\* 名古屋大学工学部土木工学科教授 (正会員)

表-2 配合表

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ <sup>o</sup> (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
25	7.0± 1.5	1.5± 1.0	55	41	173	314	748	1093

セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は木曽川産の川砂利、細骨材は豊田産の山砂を使用した。また、混和剤は使用していない。

ミキサーで3分間練り混ぜた後、練り上がったコンクリートを型枠に入れて、突き棒で突き固め、室温 20℃の恒温室で養生した。供試体の寸法はφ10×20cmの円柱供試体である。打設から6時間後に W/C = 27%のセメントペーストでキャッピングを行った。打設から12時間後までは気中養生し、12時間後に脱型、12時間以降は水温 20℃の水槽で水中養生した。従って、材令12時間後の試験は脱型後直ちに試験を行った。

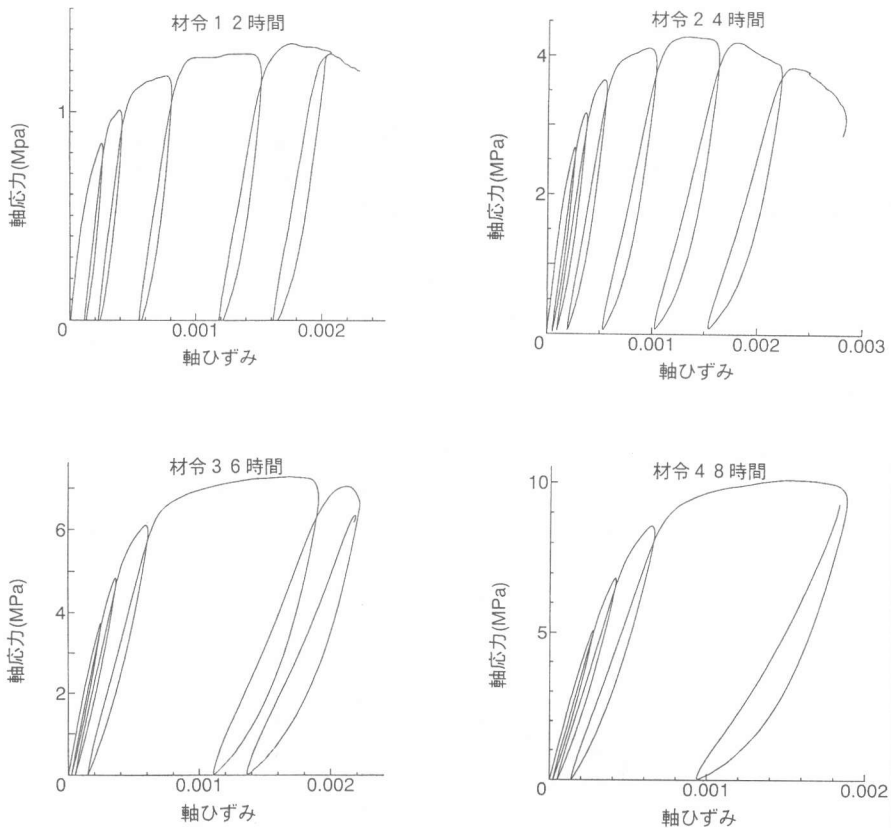


図-1 各材令における応力-ひずみ関係(順に材令 12、24、36、48 時間)

試験に際しては、供試体内部から水がしみ出してきて供試体表面が濡れているために、ひずみゲージを取り付けることができないので、ドライヤーで供試体の相対する2箇所を乾燥させて、ひずみゲージを取り付けた。

高剛性圧縮試験機で、一定変位速度 ( $2.0 \times 10^{-3} \text{mm/sec}$ ) で単調載荷および圧縮強度の約 50% から 60% 点で繰り返し繰り返し載荷試験を行った。

各材令における一軸圧縮繰り返し載荷試験の結果を図-1 に示す。

各材令の平均的な一軸圧縮強度は、材令 12、24、36 および 48 時間でそれぞれ 1.4、4.3、7.1 および 9.8 MPa となった。

また実験では、一軸圧縮強度以後の軟化域のデータがひずみゲージが剥がれてきてしまうため思うように記録できなかった。

### 3. 実験結果の考察

#### 3.1 弾性及び粘弾性ひずみに関する考察

一軸圧縮試験の結果から以下のようにして弾性、粘弾性、塑性および粘塑性ひずみを求めた。

図-2 に示すように、各サイクルにおいて、除荷した時に回復したひずみについては、それを弾性ひずみと粘弾性ひずみの和とし、残留ひずみを塑性ひずみと粘塑性ひずみの和として考えた。

まず、回復したひずみを弾性ひずみと粘弾性ひずみに分離するわけであるが、弾性ひずみについては実験から初期接線剛性を求め、軸応力と初期接線剛性から弾性ひずみを求めた。表-3 に今回の実験から求められた各材令における初期接線剛性を示す。また、粘弾性ひずみについては回復したひずみと弾性ひずみとの差を粘弾性ひずみとした。

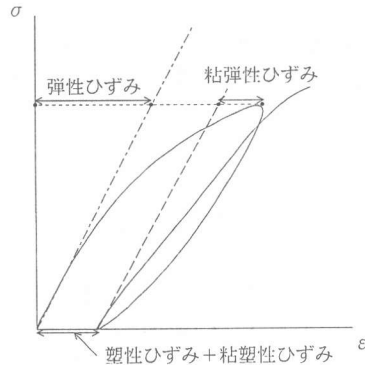


図-2 各ひずみ成分

#### 3.2 塑性及び粘塑性ひずみに関する考察

次に、残留ひずみを塑性ひずみと粘塑性ひずみに分離するのであるが、それには以下に示すように粘塑性ひずみを求めることで分離した。

粘塑性ひずみについては田邊、石川らが過去に報告 [1] を行っており、それによれば粘塑性ひずみ増分  $d\varepsilon^{vp}$  は式 (1) で表されている。

$$d\varepsilon^{vp} = \gamma \cdot dt \cdot \Phi \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \quad (1)$$

ここで  $\gamma$  は粘性係数であり、 $\Phi$  は粘塑性ポテンシャルである。粘塑性ポテンシャルというのは実際のところどのようになっているのか明らかになっていないのが現状である。そこで、より一般性を持たせるために本研究においては粘塑性ひずみ増分を式 (2) のように書くことにした。

$$d\varepsilon^{vp} = \gamma \cdot dt \cdot \Phi^n \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \quad (2)$$

表-3 各材令における初期接線剛性

材令	初期接線剛性 (MPa)
12 時間	$6.20 \times 10^5$
24 時間	$1.44 \times 10^6$
36 時間	$1.70 \times 10^6$
48 時間	$2.06 \times 10^6$

ここで、 $\Phi$ には Drucker-Prager の破壊則を用いた。

一軸状態における Drucker-Prager の破壊則を考えると、

$$\Phi = \left(\alpha + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\sigma - k \quad (3)$$

となる。ここで、 $\alpha$ 、 $k$ は内部摩擦角 $\phi$ 、粘着力 $c$ を用いて、

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (5)$$

と表される。式(2)において

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = \alpha + \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

であるから、これは定数となる。従って、式(2)は、ある定数と応力に依存する関数と時間の積とみなすことができる。まず、粘塑性ひずみと時間の関係を調べるために式(2)の中の応力に依存する部分を除いたものを $d\varepsilon_t^{vp}$ とすると、

$$d\varepsilon_t^{vp} = \gamma \cdot dt \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \quad (7)$$

となり、これは $d\varepsilon_t^{vp}$ と時間とが直線で表される関係にあることを示している。言い換えれば、この直線は図-3に示すように時間と粘塑性ひずみの曲線における時間が0の時の接線を表しているといえる。また、実際に生じている粘塑性ひずみはこの直線とその時の応力で決定される $\Phi$ を $n$ 乗したものと積で表すことができる。

この理論に基づいて、実験結果から粘塑性ひずみを求めた。

まず、繰り返し載荷試験において各サイクルで載荷した時間を求める。ただし、ここでの載荷した時間とは粘塑性ひずみが生じ始めてから測った時間である。粘塑性ひずみが生じているか否かは破壊則で判定を行った。

また、その際に $\alpha$ 、 $k$ を決定するために必要な内部摩擦角 $\phi$ 、粘着力 $c$ を決めてやらなければならないが、今回は簡単にするために内部摩擦角は材令によらず一定で $27^\circ$ とし、粘着力については同条件で行われた井上の実験[2]から一軸圧縮強度の約 $1/4$ とし、材令12、24、36、48時間ではそれぞれ0.3、1.0、1.7、2.4MPaとした。そして、各サイクルでこの時間と残留ひずみをプロットし、これを最小二乗法で近似し、時間-残留ひずみ曲線を求めた。

次に、この曲線の時間が0における接線を求める。この接線の傾きが式(7)の傾きと一致するはずである。従って、この傾きから粘性係数 $\gamma$ を決定することができる。図-4に時間-残留ひずみ曲線を実線で、式(7)にあたる直線を破線で示す。また、表-4に各材令における粘性係数を示す。

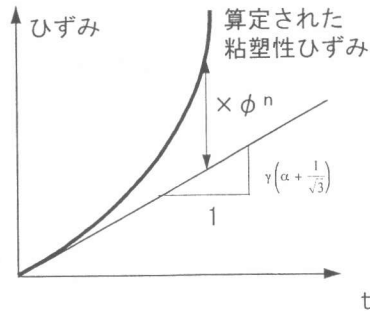


図-3 時間-粘塑性ひずみ関係

表-4 各材令における粘性係数の値

材令	粘性係数
12 時間	$1.66 \times 10^{-6}$
24 時間	$1.01 \times 10^{-6}$
36 時間	$9.50 \times 10^{-7}$
48 時間	$7.95 \times 10^{-7}$

図-4 を見ると、塑性ひずみが指数関数的に増加しているのに対して、粘塑性ひずみはほぼ直線的に増加している。この理由としては、今回の実験の期間がおよそ 30 分と非常に短期的なものであったために、時間依存性である粘塑性ひずみはあまり生じなかったものと思われる。

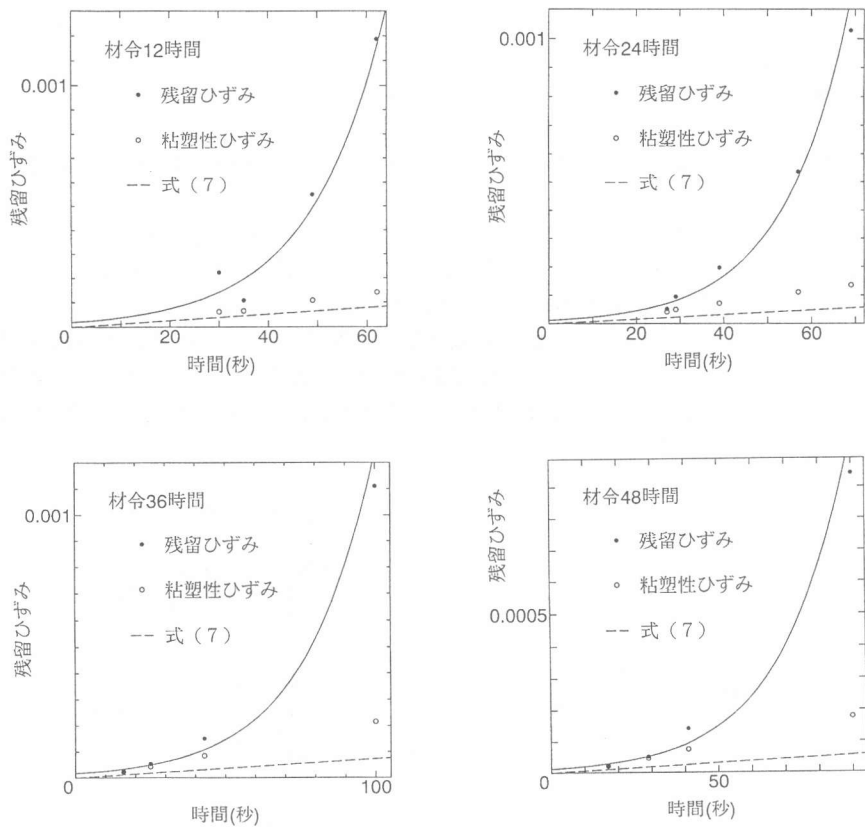


図-4 各材令における時間-残留ひずみ曲線 (順に材令 12、24、36、48 時間)

最後にこれまでに述べてきた方法で、実際に各ひずみ成分を求めてみた。材令 24 時間の供試体についての結果を表-5 に示す。

弾性成分が応力に比例して増加しているのに対して、粘弾性成分は応力の増加とともに急激に増加していることが分かる。つまり、遷移材令時には粘弾性成分が支配的であると思われる。

表-5 材令 24 時間における各ひずみ成分

応力 ( $Mpa$ )	弾性	粘弾性	塑性	粘塑性
2.76	190	13	10	41
3.26	225	35	45	49
3.74	258	80	125	71
4.20	290	166	426	111
4.32	298	268	893	136

ここで、表-5のように求められた塑性ひずみというのは、実験から得られた残留ひずみから粘塑性ひずみを引いただけであるため、次に一般的な塑性理論に基づいたモデルから塑性ひずみを求めてみた。

一般的な塑性理論に基づけば、塑性ひずみ増分  $d\varepsilon^p$  は式 (8) で表される。

$$d\varepsilon^p = \frac{\frac{\partial F}{\partial \sigma} \frac{\partial F}{\partial \sigma} D^e d\varepsilon}{\frac{\partial F}{\partial \sigma} D^e \frac{\partial F}{\partial \sigma} + h} \quad (8)$$

ここで、 $h$  は硬化パラメータである。この硬化パラメータは応力-塑性ひずみ曲線から求めることができる [3]。

実験から得られた応力と塑性ひずみを図-5のようにプロットし、近似曲線を求めるとその曲線の勾配が硬化パラメータとなっている。このようにして求められた硬化パラメータを用いて計算された塑性ひずみ増分と実験から得られた塑性ひずみ増分を表-6に示す。

応力が  $3.0\text{MPa}$  を越えたあたりから曲線の勾配が急激に変化することや、今回の実験が繰り返し試験であるために曲線を求めるために用いた実験値が少ないために、増分を大きくとらなければいけなかったことを考えれば、おおむね一致していると思われる。従って、今回用いた考え方の妥当性が示されたものと思われる。

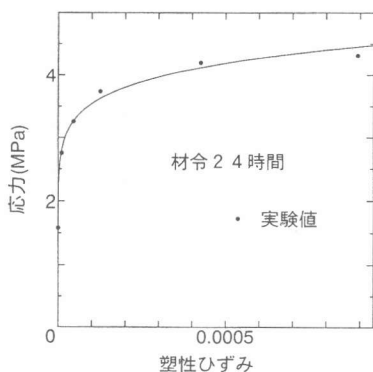


図-5 応力-塑性ひずみ曲線

表-6 塑性ひずみ増分の値

	実験 ( $\mu$ )	計算 ( $\mu$ )
1-2	10	10
2-3	35	32
3-4	80	117
4-5	301	345
5-6	467	563

#### 4. 結論

本研究で提案した方法を用いて遷移材令時のコンクリートのひずみ成分を Drucker-Prager 則をベースにして、弾性、粘弾性、塑性および粘塑性成分に分離することを試みた。その結果、遷移材令時には粘弾性成分が支配的であることが確認された。

#### 参考文献

- [1] 石川靖晃、大下英吉、田邊忠顕: 粘塑性飽和透水材料としての若材令コンクリートの変形挙動、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.603-608, 1994.
- [2] 井上健: 若材齢コンクリートの変形挙動に関する研究, 名古屋大学修士論文, 1988.
- [3] 山田嘉昭: 塑性・粘弾性, pp4-6, 倍風館