

## 論文 収縮ひび割れ予測のためのコンクリートの引張変形特性の検討

松岡 泰弘<sup>\*1</sup>・下村 匠<sup>\*2</sup>・名古屋 翼<sup>\*3</sup>

**要旨：**コンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れを精度良く予測するためには、コンクリートの引張変形特性を正しく評価しなければならない。そのため、開発した持続引張載荷試験機を用いて、応力導入速度と乾燥の有無をパラメータとしたコンクリートの持続引張試験を行い、引張変形特性に及ぼす載荷速度と乾燥の影響を検討した。その結果、従来の知見どおり持続引張応力下における変形特性には乾燥クリープの影響が卓越するが、より長い時間スケールでは、基本クリープの影響も現れることが明らかとなった。

**キーワード：**乾燥収縮, 持続載荷, 引張クリープ, 乾燥クリープ, 基本クリープ

## 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れを精度良く予測するためには、部材中で乾燥収縮が生じたときに発生する応力を正しく評価することが必要である。このためには、コンクリートの収縮特性のみならず、引張変形特性を正しく与えなければならない。乾燥収縮は、自己収縮、セメント水和に伴う温度変化による膨張・収縮に比べて、進行の時間スケールが長いこと、部材内部の水分勾配による内部拘束の影響を受けることが特徴である。したがって、これら乾燥収縮独特の現象を実験において正しく抽出すること、それらを的確に再現する解析手法を構築することが課題である。

コンクリートの引張クリープ（持続引張荷重下における変形特性）に関する研究は、セメントの水和に伴う温度応力解析への適用を念頭に置いたものが多い<sup>1)</sup>。これに比べて、乾燥収縮ひび割れ予測のための応力解析への適用を目的としたコンクリートの持続引張変形特性に関する研究は数少ない<sup>2)</sup>。青木は一軸拘束収縮試験と、乾燥条件と載荷速度を実験パラメータとした一軸引張試験から、以下の知見を得ている<sup>3)</sup>。

- (1) 引張応力-有効ひずみ関係は持続載荷においても直線性が高く、その傾きである有効弾性係数は、載荷速度が遅いほど小さくなる。
- (2) 乾燥させると、有効弾性係数は乾燥初期に 10%程度低下するが、それ以上乾燥を継続させても低下率は増大しない。
- (3) 乾燥させながら緩慢な載荷速度で載荷した供試体の有効弾性係数は、載荷速度が遅いものほど小さくなり、また、乾燥させないで同じ載荷速度で載荷した場合よりも小さくなる。有効弾性係数については、載荷速度が緩慢になることによる低下と乾燥を受けることによる低下が複合する。

コンクリートの持続引張試験は、確立された試験方法がなく、乾燥条件と載荷速度をコントロールしつつ、再現性が高く精度のよいデータを取得するのは容易ではない。そこで著者らは、この目的に適う持続引張載荷試験機<sup>4)</sup>を開発した。本論文では、本実験装置を用いて、青木の実験よりもさらに緩慢な載荷速度を実験水準に含み、コンクリートの引張変形特性に及ぼす載荷速度と乾燥の影響の再検討を行う。また、細孔構造モデルを用いた水分移動解析と複合構成モデルを用いた応力解析法により、実験結果を解析しメカニズムを考察する。

## 2. 持続載荷試験

## 2.1 試験装置概要

持続載荷試験装置の全体像を写真-1 に、制御フローの概要を図-1 に示す。無載荷状態の自由供試体と載荷供試体各 1 体を用いる。両供試体は、同時に作製し同じ養生条件とし、試験中は常に同じ乾燥条件下に置かれている。載荷試験では、自由供試体のひずみ、載荷供試体のひずみ、拘束鋼棒のひずみより算出される載荷供試体の応力をリアルタイム計測し、載荷供試体の応力、またはひずみ、または有効ひずみがプログラミングされたその時点における制御目標値になるようにサーボモータにより載荷供試体の拘束鋼棒を回転移動させる。

## 2.2 供試体

本装置に用いるコンクリート供試体は図-2 に示すように外径 100mm、内径 32mm、全長 400mm の円筒型である。円筒の内側は塩ビ管を配し、その中に直径 20mm の鋼棒を配している。全長 400mm のうち両端から 100mm ずつには直径 10mm のネジを 4 本ずつ埋め込み定着区間とし、中央の 200mm を試験区間としている。載荷は、ナットを回転させることにより、端板 2 と鋼棒のネジ切り部で回転から鋼棒の移動へと変換し、鋼棒と端板 1 と

\*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

\*2 長岡技術科学大学 環境・建設系 准教授 工博 (正会員)

\*3 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (非会員)

の間の接触反力により行う。自由収縮供試体の場合は、鋼棒を端版1に接触させない。

### 2.3 測定項目

自由供試体および載荷供試体のコンクリートひずみは、試験区間中央部4箇所に接着したひずみゲージの平均値を、載荷供試体の拘束鋼棒のひずみは2箇所に接着したひずみゲージの平均値を採用する。載荷供試体のコンクリート応力 $\sigma_c$ は式(1)により算出する。

$$\sigma_c = -\frac{A_s}{A_c} \times E_s \varepsilon_s \quad (1)$$

ここに、 $A_s$ ：鋼棒断面積、 $A_c$ ：試験区間コンクリート断面積、 $E_s$ ：鋼棒弾性係数、 $\varepsilon_s$ ：鋼棒ひずみである。

載荷供試体の有効ひずみ $\varepsilon_e$ は式(2)より算出することができる。

$$\varepsilon_e = \varepsilon_c - \varepsilon_{sh} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_c$ ：載荷供試体のコンクリートひずみ、 $\varepsilon_{sh}$ ：自由収縮（自由供試体のコンクリートひずみ）である。

なお、実験により測定されるコンクリートの応力、ひずみ、有効ひずみ、自由収縮は、試験区間の断面内の平均値である。コンクリートの乾燥収縮が進行している非定常条件下では、供試体表面から水分の逸散が生じるため、断面内の局所的な水分分布は一樣ではなく空間勾配を有する。その結果、コンクリートの収縮（非拘束下の体積変化成分）、応力、有効ひずみも断面内で一樣ではない。これら局所的な応力、ひずみは、数値解析を介して考慮される。

## 3. 乾燥と持続荷重を受けるコンクリート円筒供試体の引張変形特性

### 3.1 実験概要

供試体は表-1に示す示方配合のコンクリートを用いて作製し、恒温恒湿室（室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ ）にて試験開始時（材齢28日）まで乾燥が生じないように封緘状態で養生し、脱型と同時に乾燥を開始した。載荷試験も同じ恒温室内において行った。養生期間を28日間設けたのは、試験期間中の水和の進行による物性変化の影響と自己収縮の影響をなるべく排除するためである。供試体数は各実験シリーズ4体作製し、そのうちの1体は自由供試体とし、残りの3体にそれぞれ異なる載荷経路を設定して載荷試験を行った。各実験シリーズ開始時には、円筒供試体と同時に作製し同じ条件で養生した円柱供試体を用いて、圧縮強度と圧縮弾性係数を測定した。その結果を表-2に示す。

### 3.2 実験シリーズ

載荷速度と乾燥の有無がコンクリートの引張変形特性に及ぼす影響に着目していることから、各供試体の載荷

条件を表-3に示す通りに設定した。Aシリーズを乾燥条件下における実験、Bシリーズを非乾燥条件下における実験とした。Bシリーズの供試体は、写真-2のように供試体全体をポリエチレン袋で包み、載荷中も乾燥させないようにした。載荷速度は、JIS一軸拘束収縮試験体において収縮が拘束される程度の緩慢さとなるよう $0.271 \text{ (MPa/day)}$ を最も速いケースに設定し、さらにその $1/2$ の $0.135 \text{ (MPa/day)}$ 及び $1/4$ の $0.072 \text{ (MPa/day)}$ の3水準とした。なお、青木らが行った実験<sup>3)</sup>では最も緩やかなケースが $0.432 \text{ (MPa/day)}$ であり、今回はそれよりも緩やかな範囲のデータとなる。A、B両シリーズともに、載荷

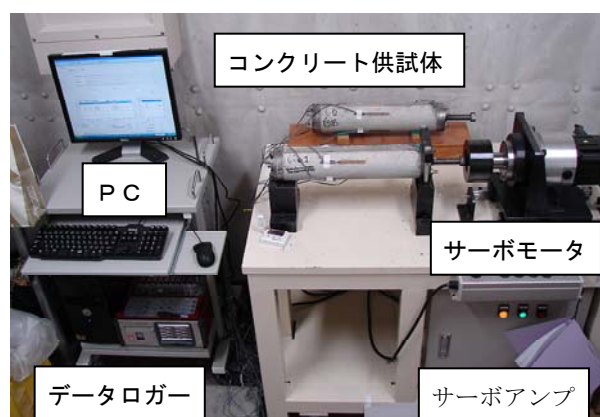


写真-1 持続載荷試験装置

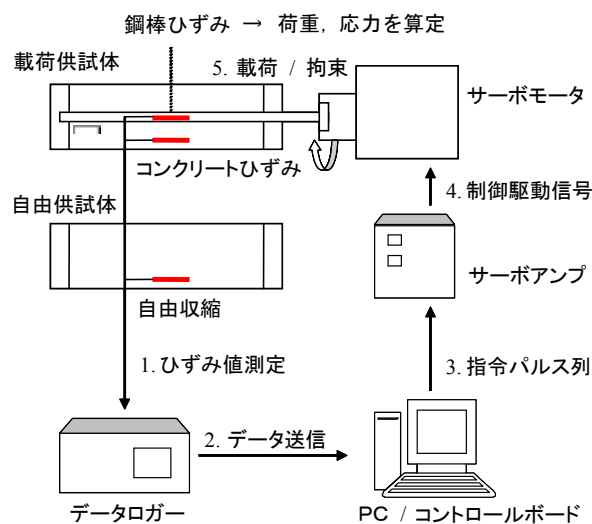


図-1 装置の制御フロー概要

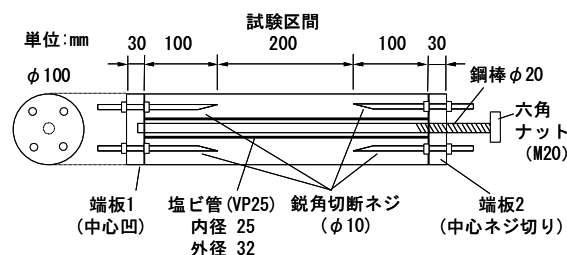


図-2 円筒型供試体寸法

速度が 0.072(MPa/day)の供試体を装置による自動載荷で行い、残りを手動載荷により実施した。毎日一定の時間に応力が所定の値になるように調節した。

### 3.3 実験結果

#### (1) 供試体のひずみの経時変化

図-3 に自由供試体および載荷供試体のコンクリートひずみの経時変化を示す。ひずみは収縮を正としている。図にはひび割れによる破断点も示している。最も遅い 0.072(MPa/day)の載荷供試体を除くと、非乾燥の B シリーズよりも乾燥させながら載荷した A シリーズの方が、載荷開始からひび割れまでの日数が短くなった。この傾向は青木の研究においても確認されている<sup>3)</sup>。

非乾燥自由供試体 B-0 のひずみは概ね 0 であり、非乾燥状態が保たれていることがわかる。B シリーズの載荷供試体は引張応力による伸び変形のため、ひずみは初期に比べて伸張側となるが、A シリーズでは乾燥収縮のために載荷供試体であっても観察されるひずみは収縮側となっている。

#### (2) 供試体の応力-有効ひずみ関係

図-4 に載荷供試体の応力-有効ひずみ関係を示す。持続載荷試験機を用いた同配合のコンクリートに対して行った静的引張試験<sup>4)</sup>より得られた静弾性係数を用いた応力-ひずみ直線を併記している。表-4 に各載荷供試体のひび割れ応力、ひび割れ時の有効ひずみ、有効弾性係数(応力-有効ひずみ関係を直線近似したときの傾き)を示す。

ひび割れ応力に及ぼす、乾燥の影響、載荷速度の影響については、本実験では明確な傾向が確認できなかった。ひび割れ応力はばらつきの影響も含まれるので、定量的に論じるためには、より多数のデータが必要であると思われる。

ひび割れ発生時における有効ひずみは、載荷速度との間に明瞭な関係性はみられなかった。しかし、載荷速度別に乾燥の有無で比較すると、いずれの載荷速度も非乾燥の供試体に比べ、乾燥を伴う供試体の方が、ひび割れ時の有効ひずみは大きくなった。これは、乾燥を伴う供試体の有効ひずみには乾燥クリープ成分が含まれるためと解釈できる。

有効弾性係数に関する全体的な傾向として、乾燥させない B シリーズの有効弾性係数は、乾燥させながら載荷した A シリーズよりも大きく、静弾性係数よりも小さい。なお、B シリーズの最も遅い載荷速度の供試体 B-1 の有効弾性係数が他の 2 供試体よりも大きくなったが、これはコンクリートひずみ測定の不具合による可能性がある。

B シリーズは乾燥を受けないので、有効弾性係数が静弾性係数よりも小さい理由は、持続載荷による基本クリープ成分の影響によるといえる。青木の実験結果では、

収縮が拘束されたコンクリートの引張クリープは、大部分乾燥クリープによることが示唆されていた<sup>3)</sup>。しかし、今回の実験では、乾燥させない B シリーズの供試体の有効弾性係数が静弾性係数より明確に小さかったことから、引張基本クリープ成分の存在が確認された。これは、今回の実験は青木の実験よりも載荷速度が小さく、載荷時間が長い範囲で行っていることにもよると考えられる。

A シリーズの供試体の有効弾性係数が、同じ載荷履歴の B シリーズの供試体よりも小さい理由は、従来指摘されている乾燥クリープによると考えられる。

また、A シリーズは、B シリーズに比べ、応力-有効ひずみ曲線が山形のカーブを描いていることが分かる。その原因は、乾燥を受けている A シリーズ供試体では、乾燥の進行につれて供試体内の水分分布およびこれに伴う乾燥収縮の分布が時間的に変化することにより、乾燥収縮の内部拘束による表面付近のコンクリートの微視的な破壊が徐々に進行し、この部分の応力負担能力が低下した結果、供試体の平均剛性も低下するためと考えられる。

表-1 示方配合

| W/C | s/a | Air(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |      |     |      |
|-----|-----|--------|-------------------------|-----|-----|-----|------|-----|------|
|     |     |        | W                       | C   | S   | G   | Ad1  | Ad2 | Ad3  |
| 0.5 | 0.5 | 5      | 170                     | 340 | 891 | 908 | 0.51 | 6.8 | 0.41 |

Ad1:分離低減剤 Ad2:高性能AE減水剤 Ad3:消泡剤  
G:粗骨材最大寸法13mm

表-2 圧縮試験結果

|       | 材齢<br>(day) | 圧縮強度<br>(MPa) | 弾性係数<br>(GPa) | 引張強度<br>(MPa) |
|-------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| Aシリーズ | 28          | 39.36         | 32.63         | 2.66          |
| Bシリーズ | 28          | 44.35         | 37.39         | 2.88          |

表-3 載荷条件

| 供試体   |     | 乾燥条件 | 引張載荷量          | 載荷方法 |
|-------|-----|------|----------------|------|
| Aシリーズ | A-0 | 乾燥   | 自由収縮供試体        | —    |
|       | A-1 |      | 0.072(MPa/day) | 試験装置 |
|       | A-2 |      | 0.135(MPa/day) | 手動   |
|       | A-3 |      | 0.271(MPa/day) | 手動   |
| Bシリーズ | B-0 | 非乾燥  | 自由収縮供試体        | —    |
|       | B-1 |      | 0.072(MPa/day) | 試験装置 |
|       | B-2 |      | 0.135(MPa/day) | 手動   |
|       | B-3 |      | 0.271(MPa/day) | 手動   |



写真-2 非乾燥コンクリート供試体

#### 4. 直接引張試験による既往の実験結果との比較

##### 4.1 検討方法

青木らは、角柱供試体の一軸持続引張試験の結果に基づき、乾燥と持続引張応力を受けるコンクリートの有効弾性係数とひび割れ応力の実験式を定式化している<sup>3)</sup>。

$$\frac{E_{ef}(S, t_d)}{E_{ef}(0, 0)} = 1 - \frac{S}{C_1 + C_2 S} - \frac{t_d}{C_3 + C_4 t_d} - C_5 \frac{S}{C_1 + C_2 S} \frac{t_d}{C_3 + C_4 t_d} \quad (3)$$

ここに、 $E_{ef}(S, t_d)$ ：乾燥時間  $t_d$ 、応力履歴  $S$  を受けたコンクリートの有効弾性係数、 $E_{ef}(0, 0)$ ：応力履歴と乾燥時間 0 のコンクリートの有効弾性係数、 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  は実験定数である。

$$\frac{\sigma_{cr}(t_d)}{\sigma_{cr}(0)} = 1 - \frac{t_d}{D_1 + D_2 t_d} \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_{cr}(t_d)$ ：乾燥時間  $t_d$  のコンクリートのひび割れ応力、 $\sigma_{cr}(0)$ ：乾燥時間 0 のコンクリートのひび割れ応力、 $D_1, D_2$  は実験定数である。

これらの実験式が、円筒供試体を用いた持続荷重試験装置による今回の実験結果に適合するかどうか検証を行う。なお、各実験定数については青木らの実験と同一のものを使用する。 $E_{ef}(0, 0)$  は、本実験と同配合のコンクリートによる静的引張試験<sup>4)</sup>より得られた 33.10(GPa)を用い、 $\sigma_{cr}(0)$  も同様に 3.58(MPa)を用いる。

##### 4.2 検討結果

図-5 に A シリーズの結果を示す。全体的に初期剛性やその後の剛性低下の傾向を表現できているといえる。しかし、A-1 の 1(MPa)以上の部分、A-2 の 2(MPa)以上の部分においては、実験結果とやや相違が見られる。これは、実験式のもとになった実験が 10 日間前後と、本実験に比べると比較的短期であったので、長期データに対する算定精度が低いためと考えられる。また、乾燥の影響の程度を表すパラメータである供試体の乾燥周長断面積比が異なっていることも精度低下の原因の 1 つであるとされる。ひび割れ時の応力に関しては、全体的に実験結果に比べ予測値が小さい値となった。

図-6 に B シリーズの結果を示す。A シリーズよりも剛性が低下しない傾向が表現されている。青木らの実験では荷重速度によるひび割れ応力の違いは見られなかったが、本実験の B シリーズの結果では、荷重速度が遅いほどひび割れ応力が小さくなった。

これらより、細部に若干の相違が見られるが、今回の実験結果は、異なる実験方法で得た既往の実験結果の傾向に一致することが確認された。

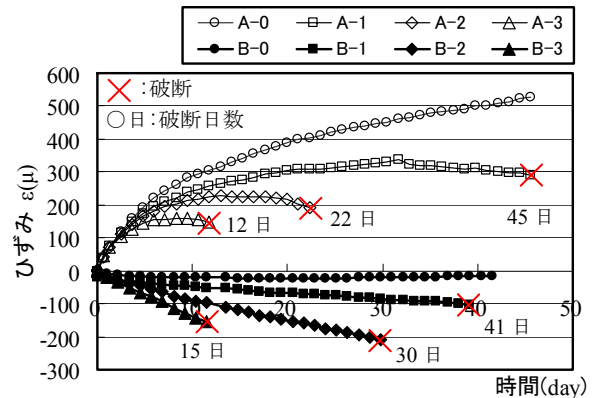


図-3 コンクリートひずみの経時変化

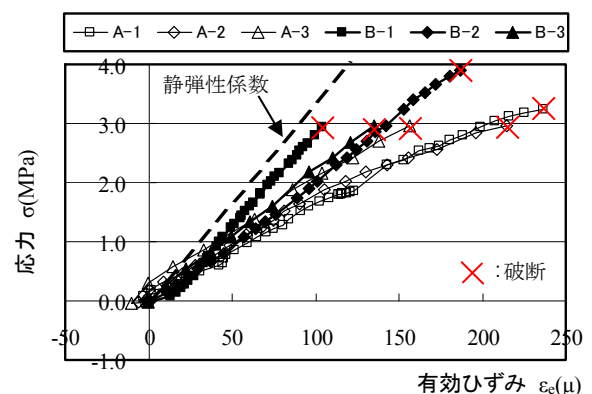


図-4 応力-有効ひずみ関係

表-4 ひび割れ応力と有効弾性係数

|       |     | ひび割れ時   |          | 有効弾性係数<br>(GPa) |
|-------|-----|---------|----------|-----------------|
|       |     | 応力(MPa) | 有効ひずみ(μ) |                 |
| Aシリーズ | A-1 | 3.24    | 237      | 15.1            |
|       | A-2 | 2.95    | 215      | 15.7            |
|       | A-3 | 3.24    | 169      | 20.1            |
| Bシリーズ | B-1 | 2.97    | 105      | 26.8            |
|       | B-2 | 3.88    | 187      | 20.7            |
|       | B-3 | 3.24    | 146      | 22.1            |

#### 5. 水分移動および乾燥収縮応力解析による機構の検討

##### 5.1 解析手法

実験で得られた円筒供試体の応力、ひずみ挙動を、コンクリート中の水分移動解析、収縮を考慮した応力解析の結果と比較検討し、内部で生じている機構について考察する。図-7 に解析手法の概要を示す。円筒供試体内の水分の移動は軸対象問題として扱い、半径方向の移動のみ考慮する。供試体の応力解析では、軸方向の応力、ひずみ成分のみを考慮し、平面保持を仮定する。数値計算は時間に関して差分陰解法を用いる。計算に用いる材料モデルは、著者らが開発したセメントペースト中の細孔組織中における水分の微視的挙動に基づく水分移動と乾燥収縮モデル<sup>5)</sup>、コンクリート中の骨材とセメントペーストの複合関係を直並列にモデル化することにより骨



材によるセメントペーストの収縮低減を表現した構成モデル<sup>6)</sup>である。モデル中の材料パラメータの値は、過去の実験データに基づき配合と養生条件よりおよそ定め、自由供試体の収縮の解析結果が実験結果と一致するように修正した。また、複合構成モデル中のセメントペーストの引張強度は同配合のコンクリートによる静的引張試験<sup>4)</sup>より得られた3.58(MPa)を用いている。同一シリーズでは全ての供試体に同じ材料パラメータを用いる。

図-8にAシリーズの供試体のひずみの経時変化を示す。解析値は、どの载荷供試体においても実験値に概ね一致していることがわかる。

図-9にAシリーズの供試体の応力-有効ひずみ関係を示す。解析モデルではセメントペーストや骨材の材料特性としての乾燥クリープは考慮していないが、乾燥と持続载荷を受ける供試体の有効弾性係数(応力-有効ひずみ関係の傾き)が静弾性係数に比べ低下する傾向、すなわち供試体としての見かけの乾燥クリープ挙動が、解析結果に表現されている。これは、乾燥の進行に伴い、コンクリート中のセメントペーストの収縮の骨材による拘束と、供試体内部の収縮分布による内部拘束によって、供試体の平均剛性が低下することが、解析において表現されるためである。これらのことが実際のコンクリート中でも生じていることが示唆される。

解析結果においても载荷速度の小さい供試体ほど剛性は小さくなる傾向が表現されているが、3者の違いは小さい。解析では、乾燥による剛性低下は乾燥初期に大部分が完了してしまうためである。実験結果の方が解析結果よりも、全体的に剛性低下が若干大きい結果となった。これは、現段階の構成モデルでは、持続的に応力が作用することによる変形の経時的増加、すなわち基本クリープは考慮していないことによると考えられる。

なお、载荷パスとして定められた断面の応力を満足する変形状態の解が存在しなくなった時を解析終了としている。このときの断面応力は、3者とも実験のひびわれ応力と概ね合っていることがわかる。

図-10にBシリーズの供試体のひずみの経時変化を、図-11に応力-有効ひずみ関係をそれぞれ示す。解析ではセメントペースト、骨材ともに構成モデルにおいて基本クリープを考慮していないため、乾燥させない供試体の剛性は、载荷速度によらず静弾性係数に等しくなる。解析に用いた弾性係数は配合より推定したものであるが、実験での静弾性係数と同程度であることから、推定は良好に行われていると言える。本シリーズにおける供試体の剛性の実験値と解析値との差異は、持続载荷による基本クリープ成分の有無に起因すると考えてよい。今回、従来の実験範囲よりも低载荷速度で行ったことにより、これまで考慮していなかった基本クリープの影響が無視

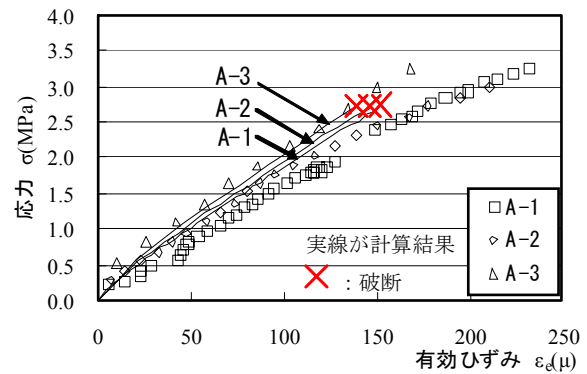


図-5 青木の実験式による計算結果 (Aシリーズ)

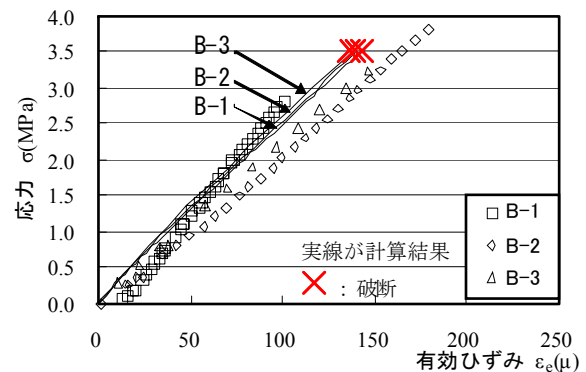


図-6 青木の実験式による計算結果 (Bシリーズ)

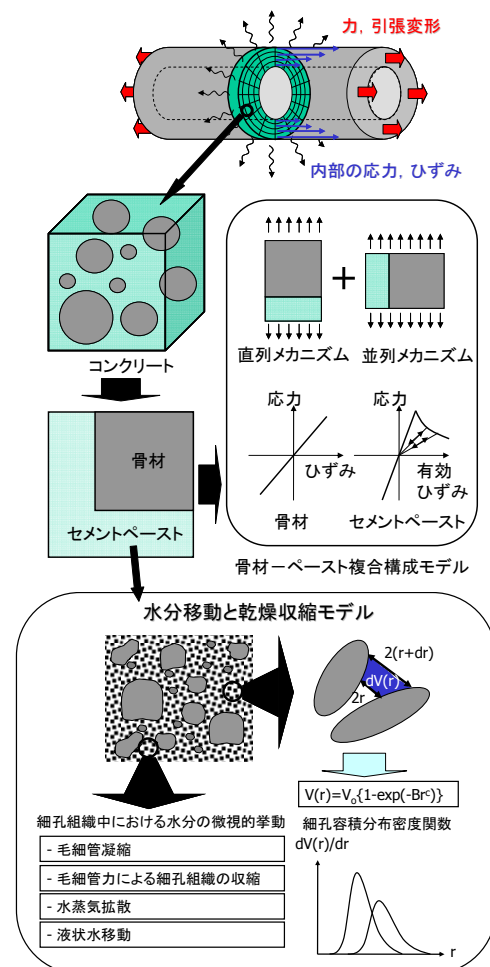


図-7 水分移動および乾燥収縮応力解析概要

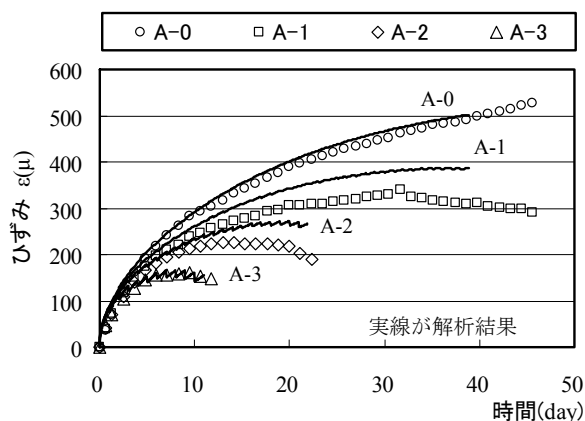


図-8 A シリーズ解析結果（ひずみ経時変化）

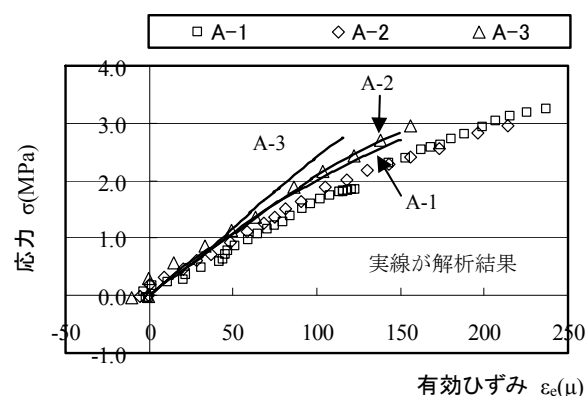


図-9 A シリーズ解析結果（応力-有効ひずみ）

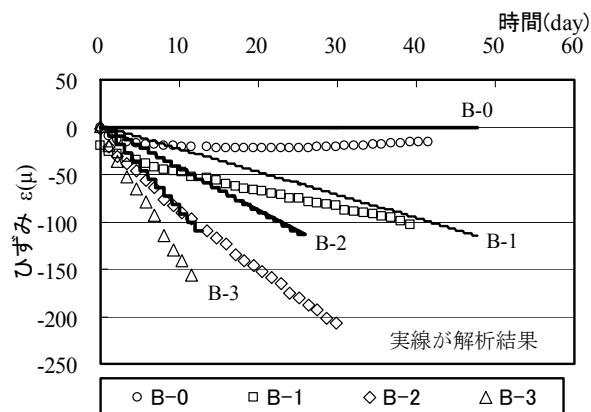


図-10 B シリーズ解析結果（ひずみ経時変化）

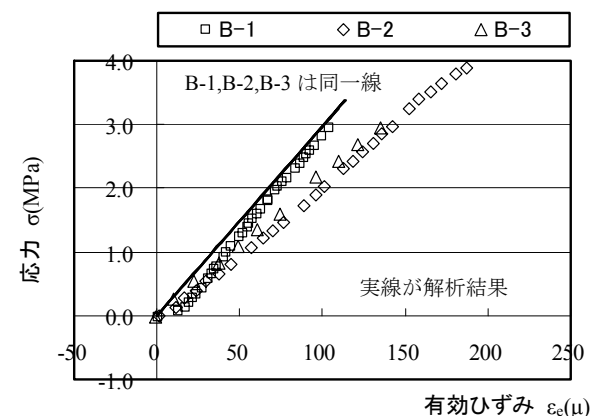


図-11 B シリーズ解析結果（応力-有効ひずみ）

できないことが明らかになった。収縮が拘束された部材中のコンクリートに導入される引張応力を広範な条件下で精度良く評価するためには、引張基本クリープも考慮すべきであることがわかった。

## 8. まとめ

本研究により以下の知見を得ることができた。

- (1) 開発した持続載荷試験装置を用いて、コンクリートの引張変形特性に及ぼす載荷速度と乾燥の影響について、系統的な実験検討を行うことができる。
- (2) 乾燥と持続載荷を受けるコンクリートの引張変形特性には、従来の知見どおり乾燥クリープの影響が卓越することが明らかになった。さらに、より長い時間スケールでは、基本クリープの影響も現れることが明らかとなった。
- (3) コンクリート中の水分移動解析と収縮応力解析により、乾燥収縮が拘束されたコンクリートの応力、ひずみ挙動を概ね再現することができた。
- (4) 乾燥収縮が拘束されたコンクリートの応力、ひずみ挙動を広範な条件下で精度良く予測するためには、乾燥による内部拘束による剛性低下に加え、引張基本クリープを考慮すべきである。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 上田賢司ほか: コンクリート部材に生じる乾燥収縮応力の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.637-642, 1998
- 3) 青木優介, 下村匠: 乾燥収縮ひび割れ抵抗性評価のためのコンクリートの引張変形特性およびひび割れ発生条件に関する検討, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.135-148, 2003
- 4) 齋藤明幸ほか: 中空円筒供試体を用いたコンクリートの拘束収縮試験装置の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, 2009.7
- 5) 下村 匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.35-45, 1995.8
- 6) 小幡浩之, 下村 匠: 骨材-ペースト複合モデルによるコンクリート部材の乾燥収縮応力解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.781-786, 1999.6