

コンクリートの持続引張変形に及ぼす乾燥と载荷速度の影響

コンクリート研究室 松岡 泰弘
主指導教員 下村 匠

1. はじめに

コンクリート構造物に発生する乾燥収縮ひび割れは、耐久性低下などを招くため問題となっている。乾燥収縮は、部材寸法や環境条件（相対湿度）の影響を受けること、数週間から数か月オーダーでゆっくり進行すること、外部拘束と内部の水分勾配による内部拘束の影響が複合することが特徴である。したがって、乾燥収縮ひび割れを精度よく予測するには、これらを考慮したコンクリートの引張変形特性及びひび割れ応力を評価する必要がある。しかし、圧縮に比べてコンクリートの引張特性に関してはこれまでの知見が少なく、特に乾燥収縮ひび割れ予測への適用を目的とした引張変形特性とひび割れ応力に関する研究はさらに少ない。

青木は、持続直接引張試験を行い、乾燥の有無と低速载荷による持続応力を受けたコンクリートの引張変形特性とひび割れ応力について系統的な知見を取りまとめた¹⁾。引張を受けるコンクリートは、乾燥による剛性低下（乾燥クリープ挙動）を示すこと、乾燥させない場合の基本クリープは小さいこと、などを明らかにしている。しかし、青木の研究は、部材断面の平均応力ー平均ひずみ関係により定量化されているので、有限要素法による任意形状の部材の応力解析の際に構成則として適用することができない。

一般条件下のコンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ予測への適用できるよう、コンクリート中の水分移動解析、応力解析に基づき、乾燥と持続载荷を受けるコンクリート部材の引張変形挙動をメカニズムに立脚し精度良く表現する必要がある。

そのために本研究では、まず数値解析による詳

細な検討に耐える、精密かつ系統的で信頼性の高い実験データの取得を行う。これには、昨年度開発した、数値計算による検証に適した形状の円筒供試体を用い、载荷経路を様々なパターンで精度よくコントロールできる持続载荷試験装置²⁾を用いる。コンクリートの乾燥の有無と、既往の研究よりもさらに緩慢な载荷速度を含む引張载荷経路をパラメータとして持続引張試験を行う。

得られた実験結果を、研究室にて開発された微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデルを用いて再現解析を行い、乾燥と持続载荷を受けるコンクリートの見かけの挙動と内部のメカニズムの関係を検討する。また、現行の解析モデルにおける仮定の妥当性を検証する。

本要旨では、得られた結果の一部を紹介する。

2. 持続引張試験

2.1 概要

実験シリーズでは、無载荷状態の自由供試体と载荷供試体4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。本試験に用いるコンクリート供試体を図-1に示す。

自由供試体および载荷供試体のコンクリートひずみは、試験区間中央部4箇所に着したひずみゲージの平均値を、载荷供試体の拘束鋼棒のひずみは2箇所に着したひずみゲージの平均値を採用する。

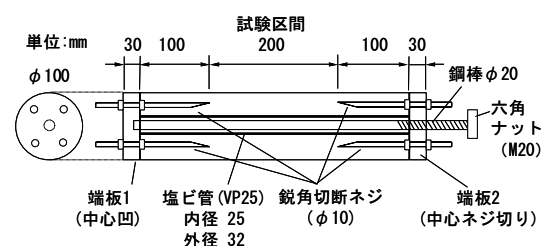


図-1 円筒型供試体寸法

荷重供試体のコンクリート応力 σ_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、 ε_s : 鋼棒ひずみである。

荷重供試体の有効ひずみ ε_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、 ε_c : 荷重供試体のコンクリートひずみ、 ε_{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様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様ではない。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。

2.2 実験結果

持続引張試験はコンクリートの応力により制御し、実験シリーズは全6シリーズを行った。青木の研究の荷重速度が0.432(MPa/day)であったため、その約半分の0.271(MPa/day)を最も急速な荷重速度とし3種の荷重速度にて行ったシリーズ(応力経路は図-2参照)及び、引張応力を一定とし、時間が経過してから追加で荷重し、その後除荷する荷重経路を3種の応力レベルで行ったシリーズ(応力経路は図-3参照)、それぞれ乾燥と非乾燥状態で実験した計4シリーズについて今回は紹介する。

まず、引張荷重速度にて制御したシリーズについて、図-4に乾燥を伴う荷重供試体、図-5に非乾燥の荷重供試体の応力-有効ひずみ関係を示す。非乾燥の荷重供試体の剛性は、乾燥を伴う荷重供試体よりも大きく、静弾性係数よりも小さい。非乾燥の荷重供試体の剛性が静弾性係数よりも小

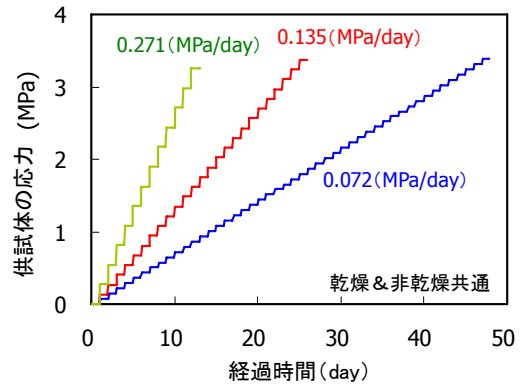


図-2 低荷重速度シリーズの荷重経路

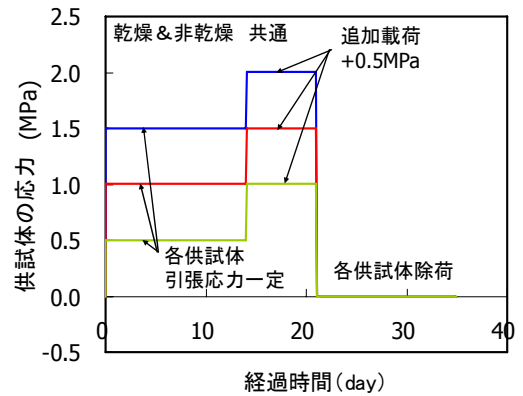


図-3 段階的荷重シリーズの荷重経路

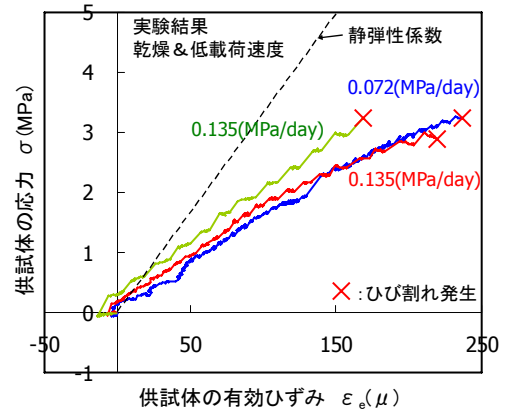


図-4 乾燥 & 低荷重速度シリーズ
実験結果の応力-有効ひずみ関係

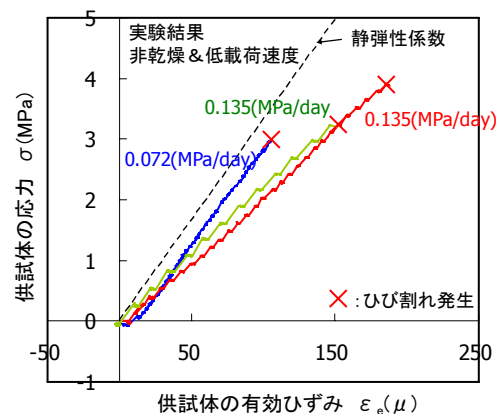


図-5 非乾燥 & 低荷重速度シリーズ
実験結果の応力-有効ひずみ関係

い理由は、持続荷重の影響のみによる基本クリープ成分によると言える。乾燥を伴う荷重供試体の剛性が、同じ荷重履歴の非乾燥の荷重供試体よりも小さい理由は、乾燥クリープによると考えられる。青木の実験結果では、コンクリートの基本クリープは乾燥クリープに比べて小さいことが示唆されていた。しかし、今回の実験では青木による実験で見られたよりも、観察された基本クリープ成分は大きくなった。荷重速度が小さく荷重時間が長い範囲で行っていることによると思われる。

次に、引張応力一定としその後追加荷重及び除荷を加えたシリーズについて、**図-6**に乾燥を伴う荷重供試体、**図-7**に非乾燥の荷重供試体の応力-有効ひずみ関係を示す。非乾燥のシリーズの応力一定下における有効ひずみの増加は、基本クリープの影響であるが、本実験ではどの供試体においてもほとんど確認されなかった。一方、乾燥を伴うシリーズは非乾燥のシリーズよりも応力一定下における有効ひずみの増加量が大きい理由は、乾燥クリープ成分が含まれているためである。引張応力が大きいほど乾燥クリープひずみが大きくなる傾向にあることがわかる。初期及び追加荷重時、除荷時の瞬間弾性ひずみについて、乾燥及び応力レベルの影響は見られなかった。除荷後の遅れ弾性ひずみ(クリープ回復)は、乾燥を伴うシリーズの方が非乾燥のシリーズよりも大きくなったため、乾燥クリープに遅れ弾性ひずみ成分が含まれていることが明らかとなった。

3. 青木式による既往の研究結果との比較

3.1 検討方法

青木らは、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。

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

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、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。

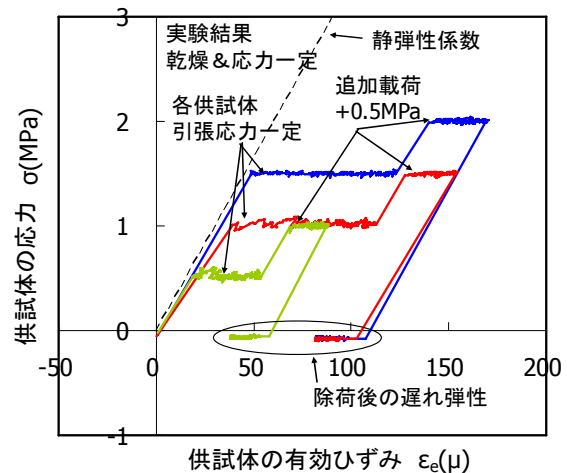


図-6 乾燥&応力一定シリーズ
実験結果の応力-有効ひずみ関係

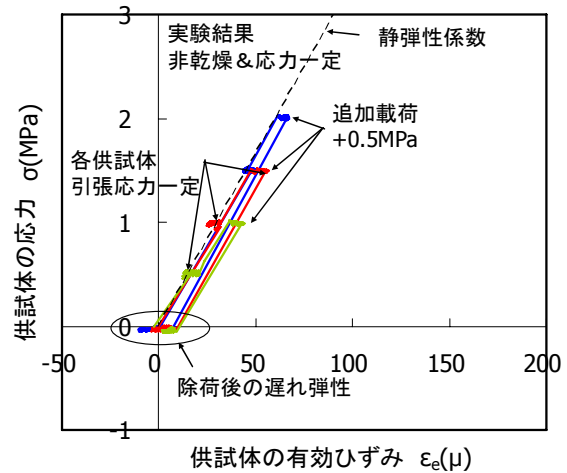


図-7 非乾燥&応力一定シリーズ
実験結果の応力-有効ひずみ関係

3.2 検討結果

载荷速度にて制御したシリーズについて青木式を適用し検証を行った。図-8に乾燥を伴うシリーズ、図-9に非乾燥のシリーズの実験結果と青木式の結果を示す。青木式でも乾燥と持続引張载荷の影響により剛性が静弾性係数より低下する傾向が表れている。そのため、乾燥を伴うシリーズでは初期剛性やその後の剛性低下の傾向が概ね一致しており、载荷速度が緩慢になっても引張変形特性の傾向は変わらないことがわかる。応力が大きくなると実験結果と計算結果にやや乖離が見られる。青木式のもとになった実験が本実験に比べ比較的短期であったため、青木式は長期データに対する算定精度が低いためと考えられる。非乾燥のシリーズでは、青木式においても乾燥を伴うシリーズよりも剛性が低下しない傾向にある

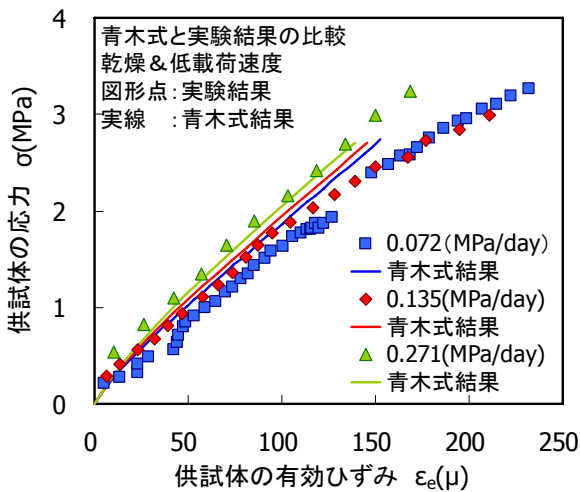


図-8 乾燥&低载荷速度シリーズ

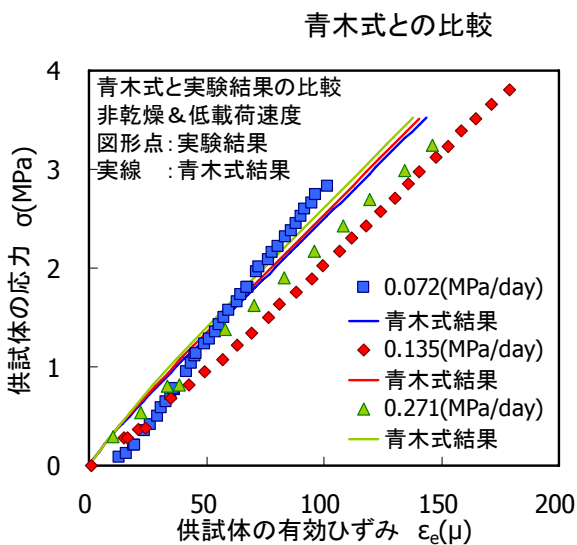


図-9 非乾燥&低载荷速度シリーズ
青木式との比較

ことが確認でき、傾きは一致していることから概ね表現できたと言える。

4. 数値解析による検討

4.1 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-10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³⁾、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

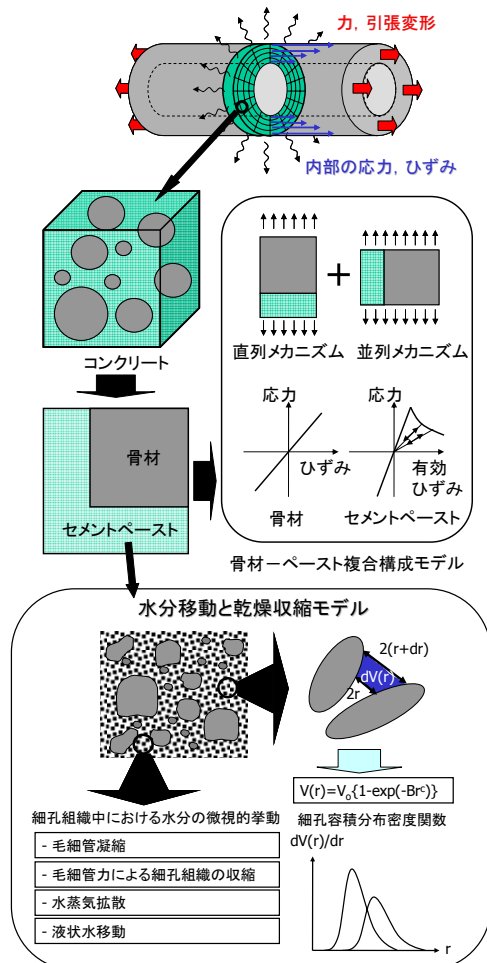


図-10 水分移動および乾燥収縮応力解析概要

メントペーストの収縮低減を表現した構成モデル⁴⁾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。

4.2 解析結果

今回は引張応力一定としその後追加載荷及び除荷を加えたシリーズについて、解析結果の検討を行った。図-11に乾燥を伴うシリーズ(実験結果の図-6に対応)、図-12に非乾燥のシリーズ(実験結果の図-7に対応)の応力-有効ひずみ関係について解析結果を示す。非乾燥のシリーズの解析では、基本クリープを考慮していないため、弾性挙動を示している。乾燥するシリーズでは、応力一定下で有効ひずみが増加していることが確認できる。乾燥の進行に伴うセメントペーストの骨材による拘束と、内部拘束により平均剛性の低下が解析において表現されているためである。これらの拘束による剛性の低下の効果は乾燥によるものだけでなく引張応力レベルにも影響しているとわかる。また、除荷後は解析においても若干遅れ弾性ひずみ成分が見られる。解析モデルにより見かけの遅れ弾性が表現されたためである。実際のコンクリートにおいても同様のメカニズムにより見かけのクリープ及び遅れ弾性が生じていることが示唆された。しかし、実験結果では乾燥クリープ、遅れ弾性ととも解析結果に比べ、大きい傾向を示した。従って、解析モデルのみでは表現できないメカニズムが生じていることが示唆される。例えば、乾燥を受けると基本クリープのメカニズムによるクリープが大きくなることが考えられる。また、解析では追加載荷時の剛性が初期載荷時の剛性に比べ、セメントペーストの軟化により低くなっているが、実験では両者の違いはほとんど確認できなかった。これらを検証することが今後の課題である。

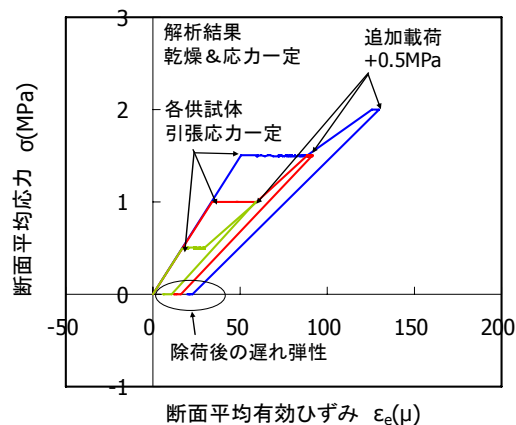


図-11 乾燥&応力一定シリーズ
解析結果の応力-有効ひずみ

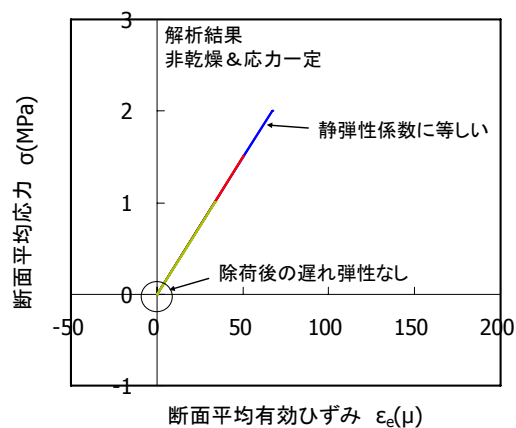


図-12 非乾燥&応力一定シリーズ
解析結果の応力-有効ひずみ関係

<参考文献>

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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