

複合構成モデルを用いたコンクリート部材の乾燥収縮応力解析法の拡張

コンクリート研究室 清水 淳

指導教官 下村 匠

丸山 久一

1. はじめに

ひび割れ予測を含むコンクリート部材の変形・応力解析において、コンクリートの収縮の影響を合理的に予測するためには、収縮が拘束されることによる応力と作用荷重による応力を統一的に考慮するのが良いと考え、小幡は、セメントペーストと骨材の複合構成モデルを用いた解析手法を開発した[1]。また、耐久性に影響を及ぼす収縮ひび割れに関して、青木は乾燥収縮ひび割れ予測に用いるコンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件に多くの影響因子を一般化して取り込んで表現するため、角柱型一軸引張試験を行い、実験結果よりコンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件の実験式を提案した[2]。

本研究では、複合構成モデルを生かし、正確に収縮・クリープ現象およびひび割れ発生条件を表現するため、小幡と青木の研究に着目し、青木の行った持続一軸引張供試体および一軸拘束供試体を、小幡の手法で解析し、実験結果と比較することで、部材断面応力の予測精度、改善点、およびひび割れ発生条件をどう取り入れるかについて検討する。また、円筒型拘束収縮試験を行い、青木の実験式の他の形状への適用性について検討を行う。

2. 複合モデルを用いた一軸引張試験の解析

2.1 骨材-ペースト複合モデル

均等質なコンクリートでは、細骨材、粗骨材がランダムに分布していると考えられる。簡単のため、粗骨材と細骨材を区別せず、コンクリートを硬化セメントペーストと骨材より成ると考える。すなわち、コンクリート単位体積中のセメントペーストの体積、骨材の体積

をそれぞれ V_{cp} , $V_{ag}(m^3/m^3)$ として、

$$V_{cp} + V_{ag} = 1$$

とする。

骨材とセメントペーストの複合形態を、直列と並列の組み合わせにより表現する (図-1)。

$$V_p + V_s = 1$$

ここに、 V_p , $V_s(m^3/m^3)$ はそれぞれ、コンクリート単位体積中において、並列部分が占める体積、直列部分が占める体積である。これらは、体積というよりもむしろ、コンクリートの並列的性質の割合と直列的性質の割合を表すものであって、パラメータスタディの結果と実験事実を比較することによって決定することにする。骨材は並列部分に含ませて考えるものとする。

$$V_p \geq V_{ag}$$

並列部分のペーストの体積 $V_{cpp}(m^3/m^3)$ と直列部分のペーストの体積 $V_{cps}(m^3/m^3)$ は、それぞれ、以下のように表される。

$$V_{cpp} = V_p - V_{ag}$$

$$V_{cps} = V_s$$

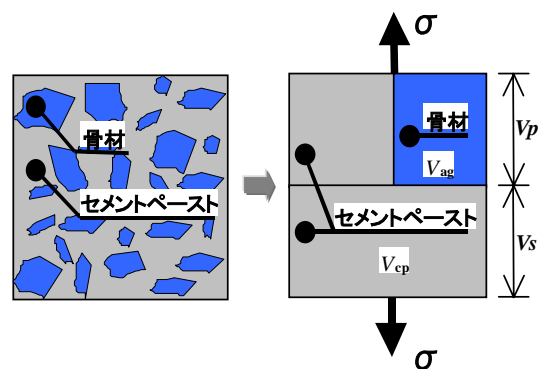


図-1 骨材とペーストの複合モデル

2.2 解析フロー

小幡の複合モデルでは、乾燥による剛性の低下が表現できるが、持続荷重の影響による剛性の低下が考慮されていない。また、持続引張軸

力を受ける棒部材において、応力解析に複合モデルを用いた場合、クリープ現象がどのように表現されるかはまだ検討されていない。乾燥の影響、載荷速度の影響、乾燥と載荷速度の影響の複合効果を調べた青木の一軸引張試験を複合モデルで解析し、実験結果と解析結果を比較することで、複合モデルで乾燥と一軸持続引張荷重を受けるコンクリートの変形挙動がどの程度表現できるかを検討する。また、一軸拘束収縮試験も同様に解析し、実験結果と解析結果の違いを考察する。解析フローは図-2 に示す。水分移動解析、非拘束収縮ひずみの算出は、下村・福留・前川提案のモデル[3]、[4]を用いている。

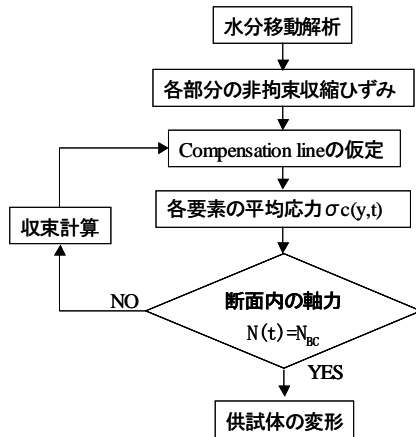


図-2 軸力および乾燥を受ける部材の応力解析フロー

2.3 封緘載荷の実験結果と解析結果の比較

このパターンは、載荷時に供試体を乾燥させず、3体の供試体それぞれの載荷速度を①0.05N/s(100mm×100mm断面のコンクリートが破壊するのに10.2日かかる載荷速度)、②0.10N/s(4.6日で破壊する載荷速度)、③0.25N/s(2.1日で破壊する載荷速度)と変えて引張試験を行ったものである。また、乾燥させずに100N/s(6分で破壊する載荷速度)で載荷したものを実験基準・解析基準として用いる。実験結果と解析結果を図-3に示す。

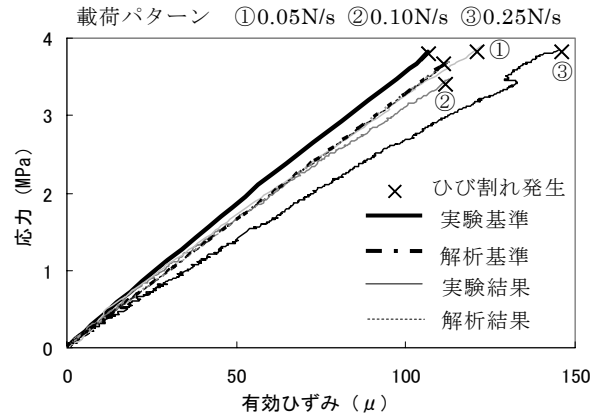


図-3 封緘載荷の応力-有効ひずみ関係

実験結果は、基準と同様に乾燥クリープの影響はないが、載荷速度の遅いものほど基本クリープの影響を受けて弾性係数が低下している。解析結果は、全ての載荷速度において解析基準の結果と同じ挙動を示している。乾燥しない条件で解析を行っているので、実験結果と同様に乾燥クリープの影響はないが、実験結果で見られた基本クリープの影響が表れていない。

2.4 載荷前乾燥の実験結果と解析結果の比較

このパターンは、①1.6日、②4.1日、③8.2日間乾燥させた後、載荷速度100N/sで引張試験を行ったものである。載荷パターンiと同様に、乾燥させずに100N/sで載荷したものを実験基準として用いる。実験結果と解析結果を図-4に示す。

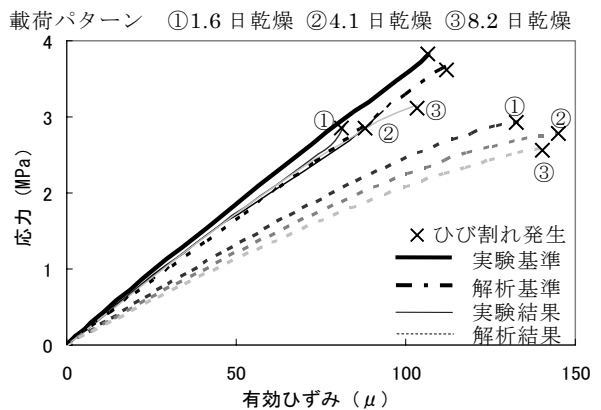


図-4 載荷前乾燥の応力-有効ひずみ関係

実験結果は、クリープの影響を受けていない基準と比較すると弾性係数が低下している。事前に乾燥させた期間によらず、同じ程度の弾性係数を示している。解析結果は弾性係数が大きく低下し、実験結果と違って事前乾燥期間が弾性係数の低下に影響をおよぼしている。本実験で見られた弾性係数の低下は乾燥の影響である。複合構成モデルでは乾燥の影響を定性的に表現できるといえる。

2.5 乾燥+低速载荷の実験結果と解析結果の比較

このパターンは、乾燥させながら载荷し、3体の供試体それぞれの载荷速度を①0.05N/s、②0.10N/s、③0.25N/sと変えて引張試験を行ったものである。実験結果と解析結果を図-5に示す。

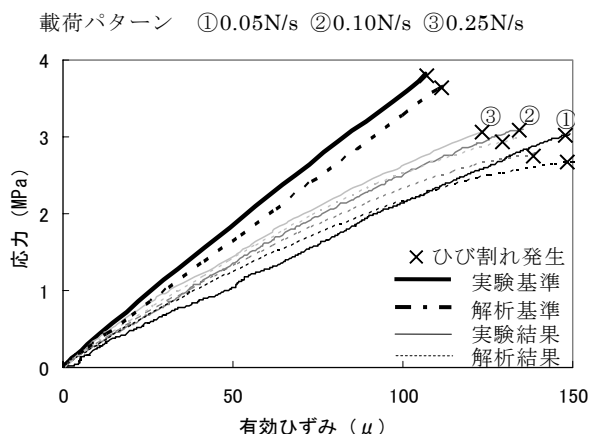


図-5 乾燥+低速载荷の応力-有効ひずみ関係

解析結果と実験結果を比較すると同じ挙動を示している。実験結果は、乾燥クリープ・基本クリープの影響で、大幅に弾性係数が低下しているが、解析結果では乾燥クリープの影響のみで弾性係数が低下している。複合構成モデルは乾燥の影響と载荷速度の影響を定性的に表現できるといえる。

2.6 ひび割れ発生応力の比較

次に各供試体のひび割れ応力を正規化し、実験式と比較する。ひび割れ応力の正規化は、供試体のひび割れ応力を、乾燥を受けていないコンクリートのひび割れ応力で除して行う。解析では、応力を与えてひずみを算出する計算の性質上、ある応力で解が求められなくなり、解析を終了している。実験でのひび割れ応力と解析での解が求まらなくなった応力が近い値であることから、その時点をひび割れ発生と判定することにする。ひび割れ応力に関しては、乾燥速度の影響を受けないとされているので[2]、乾燥時間 t_d (応力の時間積分値 $S(t)=0$ 平面) で表す(図-6)。

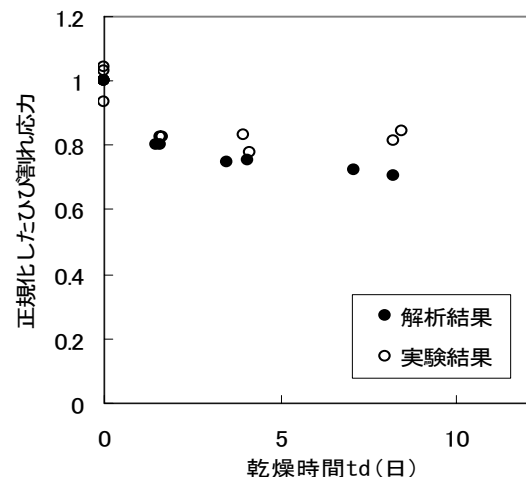


図-6 正規化したひび割れ発生応力の比較

ひび割れ発生応力の低下の様子は、実験結果と解析結果ともに乾燥初期で2割程度低下する。このことから、複合構成モデルにおいても、乾燥によるひび割れ発生応力の低下が表現できるといえる。しかし、実験ではその後は低下せずに一定を保つが、解析では時間経過と共に少しずつ低下する傾向がみられた。複合構成モデルは、短期間では実験との差はそれほどないが、長期間では、実験と解析の差は大きくなり、精度が悪くなることが示された。

3. 複合モデルを用いた一軸拘束試験の解析

小幡の骨材-ペースト複合モデルを用いて一軸拘束収縮供試体の応力解析を行う。応力解析では、一軸引張試験の解析方法と同様だが、一部収束計算が異なる(図-7)。

実験結果および解析結果の応力-有効ひずみ関係を図-8に示す。一軸拘束収縮供試体の実験結果と解析結果を比較すると挙動に大きな違いが見られる。これは一軸引張試験の場合と同様に、複合構成モデルでは基本クリープが考慮されていないためである。一軸拘束収縮試験では、乾燥収縮を拘束することで生じる軸力が0.004N/s(100日で破壊する载荷速度)程度で、ひび割れ発生まで時間がかかる。そのために持続軸力を長時間にわたって受けることになり、実験では、基本クリープの影響が大きく、コンクリートの剛性が大幅に低下してしまう。ひび割れ発生応力に関しては、実験結果では、初期ひび割れ応力が3.7MPaであったものが、乾燥の影響で20%程度減少している。解析においては、応力がピークに達した点をひび割れ発生と判断すると、解析結果では、ひび割れ応力が30%程度低下している。解析では実際のひび割れ応力より10%程度弱く評価してしまう。

4. 円筒型拘束収縮試験による青木の実験式の検証

青木の実験式の問題点として、角柱型で一軸拘束を受ける部材については適用可能とされているが、他の形状では検証されていない。そこで円筒型拘束収縮試験を行い解析結果と実験結果を比較する。それと同時に、円筒型が一軸の延長で考えられるかどうかについて検討を行う。解析は円筒の半径が無限であるものとし、円筒型供試体を一軸供試体とみなして青木の実験式で解析する。

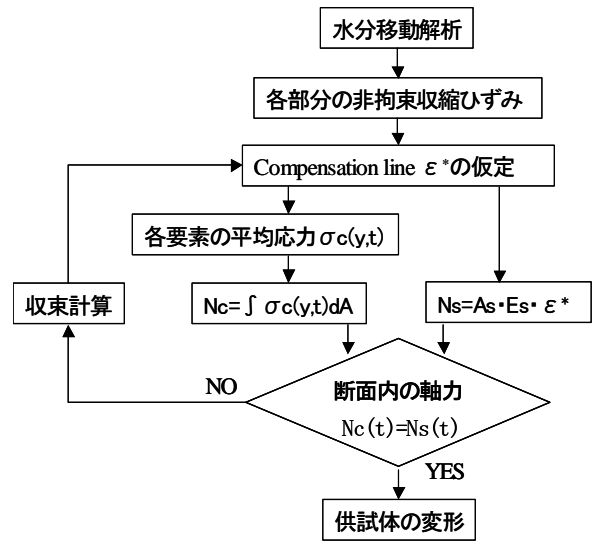


図-7 一軸拘束供試体の応力解析フロー

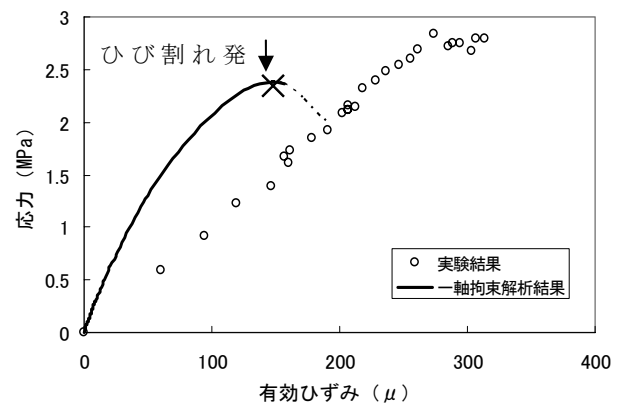


図-8 実験結果および解析結果の
応力-有効ひずみ関係

4.1 実験概要

図-9 に示す実験装置により、円筒型供試体を鋼管により拘束することで応力を導入し、ひずみの経時変化を測定した。供試体のコンクリート幅は2.0cm、4.5cm、7.0cmとし、拘束用鋼管は高さ15cm、外径40cmを用いた。鋼管で拘束するものを拘束収縮供試体、鋼管を取り除いたものを自由収縮供試体とする。供試体の応力-ひずみ関係を得るために、拘束収縮用供試体では、鋼管のひずみをひずみゲージにより測定した。自由収縮用供試体ではコンクリートの収縮ひずみを測定するためにコンクリート側面のひずみをひずみゲージにより測定した。

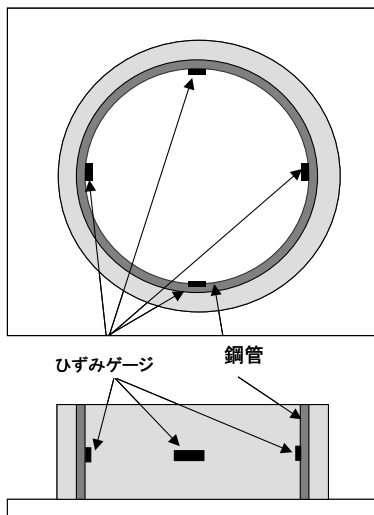


図-9 実験装置

4.2 自由収縮ひずみの比較

円筒型供試体と角柱型供試体の自由収縮ひずみを比較する(図-10)。青木の実験式は、乾燥の影響、載荷速度の影響の他に、寸法の影響として乾燥周長断面積比(供試体断面の乾燥させる辺の総和を断面積で除した値)を取り入れている。比が大きいものほど自由収縮ひずみが大きくなるという結果は従来のものと一致するが、円筒型と角柱型では、比と自由収縮ひずみの関係に違いが見られる。供試体の形状が違う場合、乾燥による供試体の収縮ひずみは、乾燥周長断面積比では比較できない可能性が高い。

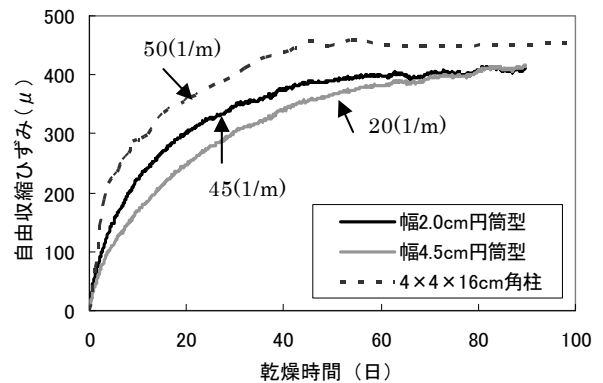


図-10 自由収縮ひずみの比較

4.3 青木の実験式による解析

青木が一軸引張試験の実験結果より導出した実験式で、円筒型拘束収縮試験の挙動を表現できるかどうかを検証する。今回は円筒型供試体の半径が限りなく大きいものとし、円筒型拘束を、一軸拘束を受ける部材とみなし解析を行う。円筒型自由収縮試験の実験結果より時間ごとの自由収縮ひずみの増分を入力し、応力の増分を算出している。解析結果と実験結果の乾燥時間-応力関係を図-11に示す。

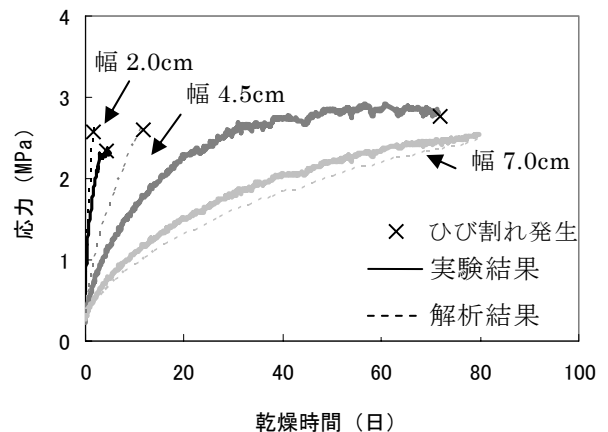


図-11 乾燥時間-応力関係

比較的断面積の小さい幅 2.0cm 供試体，幅 4.5cm 供試体の場合，実験式を用いた解析結果では，乾燥開始 5 日で有効弾性係数を 30%低下させるが，実験結果では，55%低下している．断面積の大きい幅 7.0cm 供試体は解析結果と実験結果でともに有効弾性係数は 15%の低下となった．一軸拘束収縮試験では，異なる寸法の場合，乾燥周長断面積比で有効弾性係数の低下を表現できたが，形状の異なる円筒型においては，乾燥周長断面積比で有効弾性係数の低下を表すことは難しいと考えられる．この原因として円筒型と角柱型で乾燥の影響が違うこと，形状の違いにより，乾燥収縮が拘束されることで生じる内部拘束応力が違うことが考えられる．

5. まとめ

- (1) 複合構成モデルでは乾燥による有効弾性係数は表現できるが，載荷速度による低下は表現できない．
- (2) 複合構成モデルにおいても，乾燥によるひび割れ発生応力の低下が表現できる．
- (3) 一軸拘束におけるひび割れ発生応力，乾燥の影響は定性的に評価できるが長期的なものでは精度が落ちる．
- (4) 青木の実験式の他の形状の部材への適用は難しい．形状の違いによる，乾燥収縮の拘束による内部拘束応力の違いが考えられる．

【参考文献】

- [1] 小幡浩之：持続荷重および乾燥収縮を受けるコンクリート部材の応力解析に関する研究，長岡技術科学大学修士論文，1999.
- [2] 青木優介：コンクリート部材における乾燥収縮応力の導入とひび割れ発生に関する研究，長岡技術科学大学博士論文，2002.
- [3] 下村匠，福留和人，前川宏一：微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析，土木学会論文集，No. 514，pp41 - 53，1995， 5
- [4] 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，pp35 - 45，1995， 8