

論文 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

小幡浩之*1・下村 匠*2

要旨: 持続荷重および乾燥収縮を受けるコンクリート部材の変形と応力状態の経時変化を合理的に評価することを目的として、コンクリート中の骨材とセメントペーストの複合関係に着目し、両者の複合構成モデルを提案した。持続荷重と乾燥を受けるコンクリート梁の曲げ変形の経時変化を、水分移動解析および提案した構成モデルを用いた応力解析により評価し、実験結果と比較した。提案モデルは、乾燥クリープの効果を合理的に表現しつつ、部材の変形を妥当に評価し得ることを示した。

キーワード: 複合モデル, 乾燥収縮, 乾燥クリープ, 応力解析, 水分移動解析

1. はじめに

本研究は、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適用可能な、コンクリートの構成モデルの開発を目的としている。著者らはこれまで、構造物の初期応力とひび割れの予測への応用を目的として、乾燥収縮応力解析手法の構築を進めてきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。本研究は、その延長線上にあるが、乾燥収縮による応力だけでなく、作用荷重による応力を統一的に取り扱うことを新たに目標と据えた。

著者らのアプローチの枠組みは、コンクリートを理想連続体とみなして、構造物中の水分移動解析と応力解析を行う方法を採用している(図-1)。解析結果が現実を精度よく汎用的に予測し得るかどうかは、解析に用いるいくつかの材料モデルが現象の真実を捉えたものであるかどうか依存していることは言を待たない。本研究は、材料モデルのうちコンクリートの構成モデルに主眼を置くものである。乾燥収縮と作用荷重によるコンクリートの変形と応力の伝達を統一かつ合理的に表現するためには、コンクリート中の骨材とセメントペーストの相互作用を表現することが不可欠であると考え、両者の複合関係に基づく構成モデルを用いることにした。

2. 骨材-ペーストの複合関係に基づくコンクリートの構成モデル

2.1 乾燥収縮における骨材-ペーストの相互作用に関する考察

乾燥収縮および作用荷重を受けるコンクリート部材中では、コンクリート中のセメントペーストに以下の種類の応力成分が複合的に作用すると考えられる。

- ①作用荷重による一般的な応力
- ②コンクリート中の水分量が位置によって異なることによる、乾燥収縮の巨視的な内部拘束応力
- ③セメントペーストの乾燥収縮が近傍の骨材

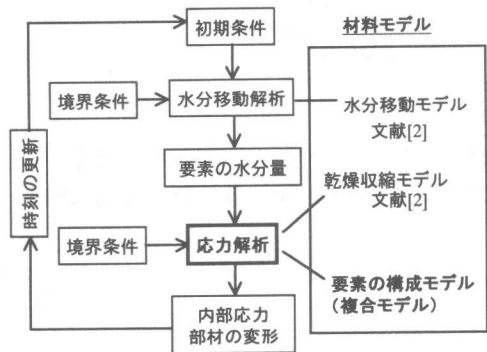


図-1 解析フロー

*1 太平洋セメント株式会社 工修 (正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 工博 (正会員)

に拘束されることによる応力

一方、コンクリート中の粗・細骨材は上記①②についてはセメントペーストと応力を分担しあい、③に対しては反作用として応力を負担する。コンクリートの挙動は、セメントペーストと骨材が内部で演じるこれらの相互作用の所産として観察されるものであると考えることができる。上記に列挙した応力のうち、①は一般的な応力解析問題に現れるが、②は乾燥収縮や温度応力に特徴的なメカニズムであり、③は乾燥収縮および自己収縮などセメントペーストの体積変化に起因した現象に見られる。したがって、乾燥収縮応力を合理的に評価するためには、①②③すべてを考慮した構成モデルが必要であると考え、骨材-ペーストの複合構成モデルを開発することにした。

2.2 定式化

(1) 骨材-ペーストの複合則

均等質なコンクリートでは、種々の空隙を含む硬化セメントペーストマトリクス中に、細骨材、粗骨材がランダムに分布していると考えることができる。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、

$$V_{cp} + V_{ag} = 1 \quad (1)$$

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-2)。

$$V_p + V_s = 1 \quad (2)$$

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。

$$V_p \geq V_{ag} \quad (3)$$

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。

$$V_{cpp} = V_p - V_{ag}, \quad V_{cps} = V_s \quad (4)$$

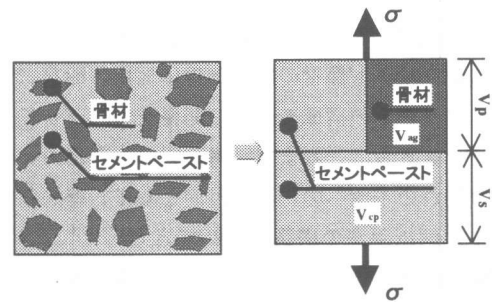


図-2 ペースト-骨材複合モデル

(2) 変形適合条件

並列部分のコンクリートのひずみ ϵ_p 、並列部分のペーストのひずみ ϵ_{cpp} 、骨材のひずみ ϵ_{ag} は一致する。

$$\epsilon_p = \epsilon_{ag} = \epsilon_{cpp} \quad (5)$$

コンクリート要素全体のひずみ ϵ_c は、並列部分のコンクリートのひずみ ϵ_p 、直列部分のコンクリート部分のひずみ ϵ_s を用いて以下のように表される。

$$\epsilon_c = \epsilon_p \cdot V_p + \epsilon_s \cdot V_s \quad (6)$$

(3) 応力の平衡条件

直列部分のペーストの応力 σ_{cps} は、コンクリート要素全体の応力 σ_c に等しい。

$$\sigma_c = \sigma_{cps} \quad (7)$$

並列部分では、セメントペーストと骨材が、それぞれの体積率に応じて応力を分担する。

$$\sigma_c = \frac{V_{ps}}{V_p} \sigma_{cpp} + \frac{V_{ag}}{V_p} \sigma_{ag} \quad (8)$$

ここに、 σ_{cpp} 、 σ_{ag} はそれぞれ、並列部分のペーストの応力、骨材の応力である。

(4) 骨材とセメントペーストの応力-有効ひずみ関係

骨材は完全弾性体とする (図-3)。骨材の弾性係数の実測値は、骨材の種類、生成条件および風化程度などにより、相当に幅があることが知られている⁸⁾。本研究では、骨材の弾性係数は、吸水率を入力値とした既往の実験式⁹⁾を用いて推定した。

$$\sigma_{ag} = E_{ag} \varepsilon_{ag} \quad (9)$$

乾燥収縮を考慮すると、セメントペーストの有効ひずみは以下のように定義される。

$$\varepsilon_{cpe} = \varepsilon_{cp} - \varepsilon_{cpsh} \quad (10)$$

ここに、 ε_{cpe} 、 ε_{cp} 、 ε_{cpsh} はそれぞれ、セメントペーストの有効ひずみ、ひずみ、乾燥収縮ひずみである。

コンクリート中のセメントペーストは、骨材による乾燥収縮の拘束作用 (先述したメカニズム③) により、骨材近傍では容易にひび割れが発生していると考えられる。ただし、このようなひび割れは局所的であるため、骨材を均一に含んだ領域を考えた場合、セメントペーストは微視的ひび割れ発生後も領域平均的には引張応力を負担していると考えられる (図-4)。このことを考慮して、セメントペーストの応力-有効ひずみ関係は、弾性およびひずみ軟化型とする (図-3)。除荷過程は弾性とし、弾性係数を過去に受けた最大引張有効ひずみの関数とする。なお、圧縮領域では完全弾性とする。

$$\sigma_{cp} = E_{cp} \varepsilon_{cpe} \quad (11)$$

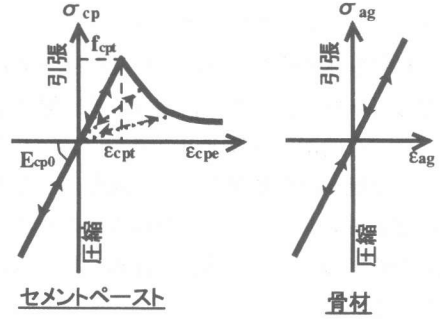


図-3 セメントペーストと骨材の応力-有効ひずみの関係

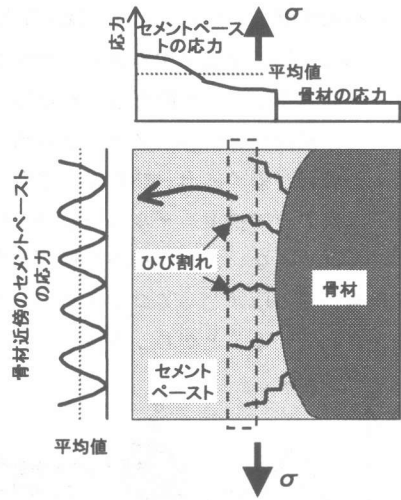


図-4 コンクリート中のセメントペーストの平均応力に関する概念図

ここに

$$\begin{cases} E_{cp} = E_{cp0} & [\varepsilon_{cpmax} \leq \varepsilon_{cpt}] \\ E_{cp} = E_{cp0} \left(\frac{\varepsilon_{cpt}}{\varepsilon_{cpmax}} \right)^{\alpha+1} & [\varepsilon_{cpmax} > \varepsilon_{cpt}] \end{cases}$$

ここに、 E_{cp0} 、 ε_{cpt} 、 ε_{cpmax} はそれぞれ、セメントペーストの初期弾性係数、弾性限界ひずみ、過去に受けた最大引張有効ひずみである。パラメータ α は、最大応力に達した以降の応力緩和を表現する材料パラメータである。

なお、本研究では、直列部分のペースト、並列部分のペーストに同一の応力-有効ひずみ関係を適用する。

また現段階では、骨材、セメントペーストともに、材料単体の時間依存性変形（クリープ）は考慮していない。しかし、後の解析結果に示すように、今回用いた仮定のみでも、コンクリートとして見かけの乾燥クリープ現象が表現されるのである。したがって、材料単体のクリープは、今後メカニズムの検討を進め、組み込むことにしたい。

2.3 コンクリート要素の応力とひずみの関係のシミュレーション

提案した複合構成モデルを用いて、要素レベルの変形挙動を解析した例を示す。図-5は、ペースト部分に乾燥収縮ひずみが導入されたコンクリート要素をひずみ制御で引張った場合の結果である。直列部分のペースト、並列部分のペースト、骨材が描く応力-ひずみ経路も示してある。本例のみで提案モデルの一般的な特徴を示すことはできないが、三相の材料が独自の経路を描き、その所産としてコンクリートの挙動が表現されていることがわかる。

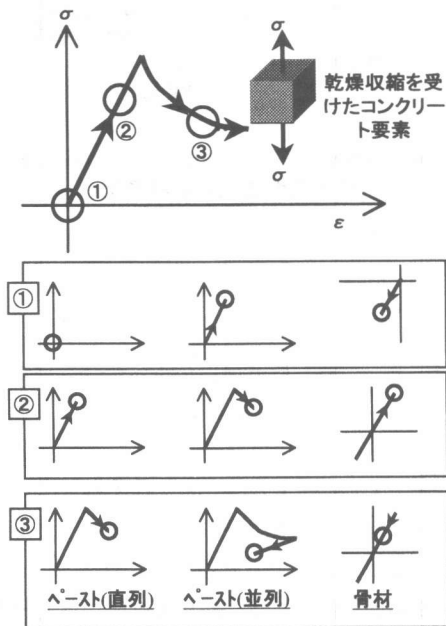


図-5 コンクリート要素の応力-ひずみ関係の計算例

3. 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

3.1 実験概要

図-6に示す実験装置により、供試体に持続曲げ荷重を載荷し、ひずみの経時変化を測定した。荷重はおもり（鋼製プレート）を吊るすことにより調整した。供試体は、寸法を $100 \times 100 \times 1400 \text{mm}$ とし（図-7）、アルミテープにより全面シールし乾燥を防いだ供試体（シール供試体）、側面のみシールし上下面のみから水分の逸散を許した供試体（アンシール供試体）を作製した。 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の自由収縮供試体も試験した。供試体はモルタルを用いて作製し、その配合は、水セメント重量比 42.2%、石粉セメント重量比 28.5%、砂セメント重量比 216.9%とした。供試体は材齢 1 日で脱型し、材齢 76 日まで封鎖養生を行った。ひずみの測定には、ゲージ長 6cm のペーパーゲージを用い、測定位置は図-7に示す位置の上下面とした。実験は 20°C 60%RH の恒温室内で行った。

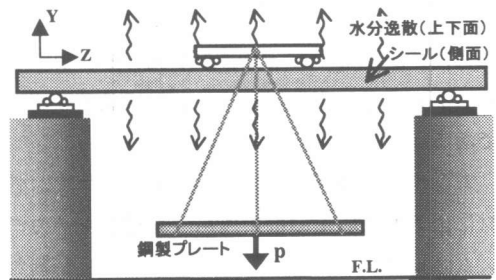


図-6 実験装置

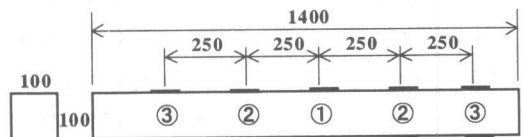


図-7 供試体の寸法

3.2 解析方法

冒頭の図-1に示したフローに基づき、解析を行った。供試体中の水分移動、各部分のセメントペーストの乾燥収縮ひずみは、細孔組織構造に基づく著者らの既往のモデル²⁾を用いて評価した。これに関わる材料パラメータは、自由

収縮供試体の乾燥収縮挙動の計算結果が、実験結果に適合するように定めた(図-8)。アンシール供試体中の水分移動は、上下方向にしか生じないので、この方向の一次元解析により評価した。応力解析では、本研究で提案した構成モデルを用いた。構成モデル中の材料パラメータは、表-1に示す値を用いた。シール供試体、アンシール供試体の応力解析は、Bernoulli-Eulerの運動場の仮定に基づき行った。

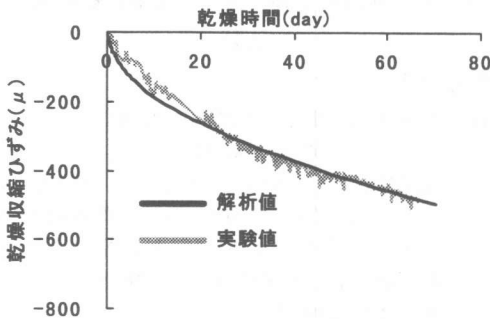


図-8 ひずみの経時変化(自由収縮供試体)

表-1 計算に用いた複構成モデルの材料パラメータ

骨材の弾性係数 E_{ag} (Mpa)	60000
ペーストの初期弾性係数 E_{cp0} (Mpa)	15000
骨材の体積率 V_{ag} (m^3/m^3)	0.5
並列部分の体積率 V_p (m^3/m^3)	0.6
パラメータ α	0.1
ペースト弾性限界ひずみ ϵ_{cp1} (μ)	250

3.3 実験結果および解析結果

シール供試体およびアンシール供試体の持続曲げ荷重試験の結果(供試体の曲率の経時変化)を、図-9, 10にそれぞれ示す。荷重パターンも図中に示した。2つの供試体の荷重パターンは同一ではない。各位置における供試体の曲率は、上下面のひずみの測定値から計算した。荷重を一定に保った期間のシール供試体の曲率の経時変化は小さい(図-9)。すなわち、本試験では基本クリープが小さいことがわかる。一方、アンシール供試体の曲率の経時変化は大きく、その傾向は曲げモーメントが大きい位置

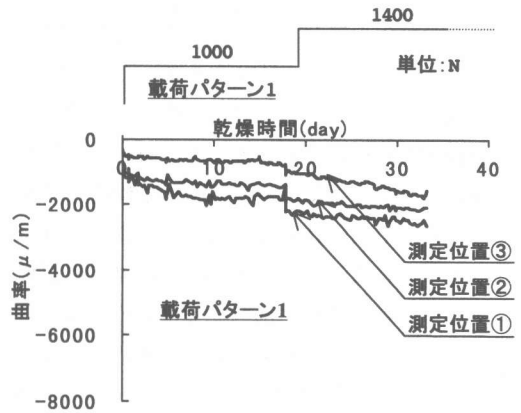


図-9 曲率の経時変化(シール供試体)

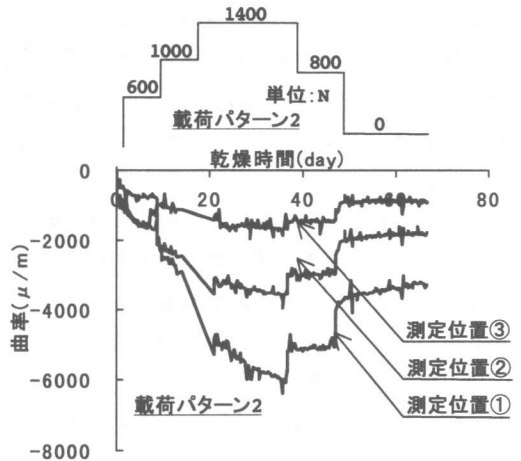


図-10 曲率の経時変化(アンシール供試体)

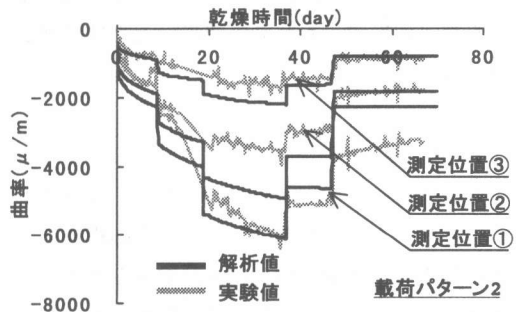


図-11 解析結果(アンシール供試体)

ほど大きい(図-10)。乾燥収縮のみでは曲率は生じないので、本実験におけるアンシール供試体の曲率の経時変化は、大部分が乾燥クリープによるものであるといえる。

紙面の制約上アンシール供試体の解析結果のみを図-11に示す。解析結果は、荷重が変動した場合を含めて、各測定位置の曲率の経時変化の傾向を良好に予測している。特に、荷重を一定に保った期間に曲率が漸増する傾向を表現できていることに注目されたい。これは、コンクリート中のセメントペーストに乾燥収縮が導入されることによる、部材表面付近の要素の内部拘束、骨材による拘束が、複合構成モデルによりコンクリート要素の剛性の変化として評価されるからである。これらは乾燥クリープのメカニズム⁵⁾⁶⁾⁷⁾の一部を表現したものと解釈している。なお、コンクリート中のセメントペーストと骨材の複合関係を考慮した応力解析により、乾燥クリープの効果(Pickett効果)が表現されることは、Mabrouk¹⁰⁾らによっても報告されている。

コンクリートの構成モデルが曲率の経時変化の解析結果に及ぼす影響を検討するために、提案複合構成モデルによる解析結果と、コンクリートをセメントペーストと骨材の複合体とせず、単一相の弾性材料とした弾性解析による結果を、図-12にあわせて示した。弾性解析においても、水分移動解析に基づき、各時間、各位置におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみを考慮している。弾性解析によると、一定荷重と乾燥収縮が作用するもとの曲率の変化は評価されないことがわかる。

4. まとめ

コンクリート中の骨材とセメントペーストの複合効果を考慮したコンクリートの構成モデルを提案し、持続荷重と乾燥収縮を受けるコンクリート部材の応力解析問題に適用した。提案モデルにより、乾燥クリープの効果の一部が合理的に表現されることを示した。

本研究では、一次元の構成モデルを定式化し、その適用範囲内のはり供試体により検証実験を行った。今後は一般的な形状と境界条件の部材に適用範囲を拡張する予定である。

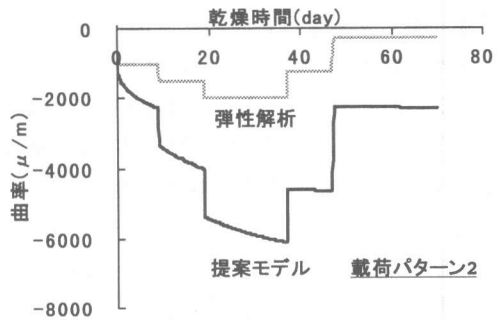


図-12 構成モデルの違いによる解析結果の比較

参考文献

- 1) 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
- 2) 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/V-27，pp41-53，1995.5
- 3) 小幡浩之・下村匠・丸山久一：コンクリートの乾燥収縮における乾燥速度依存性に関する解析的研究，第52回セメント技術大会講演要旨，pp.198-199，1998.5
- 4) 小幡浩之・下村匠・丸山久一：コンクリートの乾燥収縮における乾燥速度依存性に関する一考察，土木学会第53回年次学術講演会第5部，1998.9
- 5) 橋田 浩：コンクリートの乾燥クリープとその機構，コンクリート工学，Vol.35，No.10，pp.33-36，1997.10
- 6) Bazant,Z,P and Xi,Y: Drying Creep of Concrete : Constitutive Model and New Experiments Separating its Mechanisms, Materials and Structures 27, pp.3-14, 1994
- 7) Bazant,Z.P: Material Models for Structural Creep Analysis, Mathematical of Creep and Shrinkage of Concrete Edited by Bazant,Z.P, pp134-146, 1988
- 8) 村田二郎・岩崎訓明・児玉和巳：コンクリートの科学と技術，山海堂，pp46-54，1996
- 9) セメント協会：C&C エンサイクロペディア，pp179-180，1996
- 10) Mabrouk,R., Ishida,T., and Maekawa,K.: Solidification Model of Hardening Concrete Composite for Predicting Creep and Shrinkage of Concrete, Proceedings of the JCI, Vol.20, No.2, pp.691-696, Jul. 1998