

論文 微細空隙構造と内部水分状態に立脚したコンクリートの時間依存変形モデル

朱 銀邦¹・石田 哲也²・前川 宏一³

要旨:セメント硬化体の微細空隙構造とその水分形態に関する熱力学情報を直接用いて、巨視的に観察される時間依存変形を記述する材料モデルの構築を行った。セメントペースト中の水分を、毛細管、ゲル空隙、及び層間空隙内に存在する成分に分離し、各々に起因する可逆・不可逆変形成分を区別してモデル化することで、水和－湿潤・乾燥－外力の任意の組み合わせ下における収縮・クリープ現象を予測する枠組みを提案した。

キーワード:微細空隙構造, 毛細管水, ゲル水, 層間水, 収縮ひずみ, クリープひずみ

1. はじめに

クリープ・収縮現象には、コンクリート中の水分の挙動が関係していることは良く知られている。最も重要な役割を演じると考えられるのは、セメントペースト中の水分、すなわちセメント水和生成物が形成する微細空隙構造中に存在する水分である¹⁾。従って、コンクリートのクリープ・収縮現象を予測するためには、セメントペースト中の微細空隙構造と水分状態に基づく時間依存変形モデルを構築することが重要となる。

Rasha の研究²⁾においては、空隙構造とその中に存在する水分状態に関する熱力学情報を用いて、若材齢コンクリートの時間依存変形モデルの構築を行っている。ただし、空隙中に存在する水分を一括して平均的に取り扱っているため、不可逆変形が主な部分を占める長期クリープ、クリープにおける除荷後の可逆変形と不可逆変形の区分、長期乾燥及び厳しい乾燥等に対しては、一つの粘弾性モデルだけで全ての現象を表現できないと予想される。

そこで本研究では、セメントペースト中の水分を、毛細管、ゲル空隙、及び層間空隙内に存在する成分に分離し、各々に起因する可逆・不可逆変形成分を区別してモデルの構築を行った。各空隙の微細構造とその水分形態に関する情報は熱力学理論³⁾による値をそのまま用いる。このアプローチによって、短期から長期にわたる巨視的時間依存変形

を記述するシステムの提案を行う。

2. 微細空隙構造と内部水分状態に立脚したコンクリートの材料モデル

2.1 基本概念²⁾

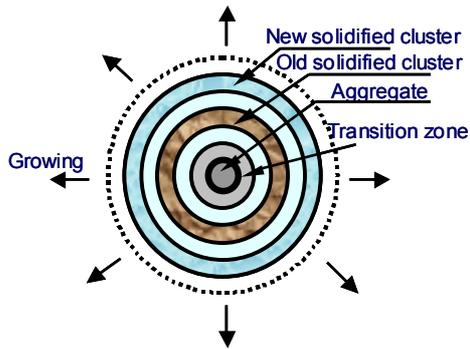
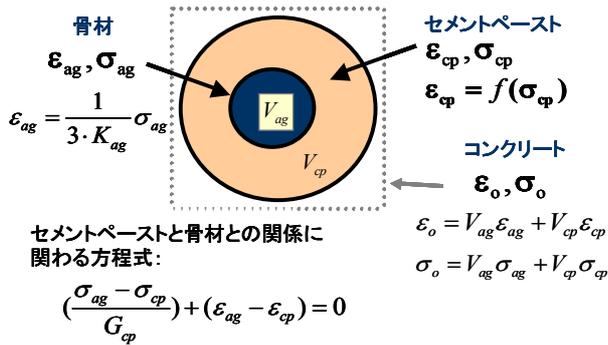
モデルの基本概念は、微細空隙構造中の熱力学情報に基づくコンクリートの材料モデルを構築することにより、収縮・クリープに代表される時間依存変形を統一的に予測するものである。モデルに必要な熱力学情報(水和度, 空隙, 飽和度等)は、配合条件, セメント種類, 環境条件, 構造特性(寸法, 形状, 載荷)の部材条件を入力することで、熱力学連成解析システム DuCOM³⁾により得る。

図-1 に示すように本手法では、応力、ひずみを体積部分と偏差部分に分離し、コンクリートを骨材、セメントペーストの2相材料とモデル化する。Solidification 理論⁴⁾に基づく本モデルにおいては、セメントペーストは水和度による決められるクラスターという構造単位により全体挙動が記述される。個々のクラスターはある一定の力学情報を有し、その総和として巨視的な力学特性(剛性, 粘性)が自動的に得られる。すなわち、水和の進行によるセメントペーストの特性の変化は図-2 に示すクラスターの生成により表現される。水和の進展と水分の消失を原因とする体積の変化は、微細空隙に発生した毛細管張力によるものとし、クリープはセメントペーストの微細空隙構造とその中に存在する水分移

¹ 正会員 工修 東京大学研究員 工学系研究科社会基盤工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

² 正会員 博士(工学) 東京大学講師 工学系研究科社会基盤工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

³ 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)



ある時間 t のセメントペーストの応力はこの時間までに形成されたクラスターに負担された応力の合計である。

$$\sigma'_{cp}(t) = \int_{t'=0}^t \sigma'_{ly}(t', t) d\psi(t')$$

$$S'_{ij}(t) = \int_{t'=0}^t S'_{ij}(t', t) d\psi(t')$$

図-1 骨材、セメントペースト、コンクリートの概念図及びセメントペーストの形成過程²⁾

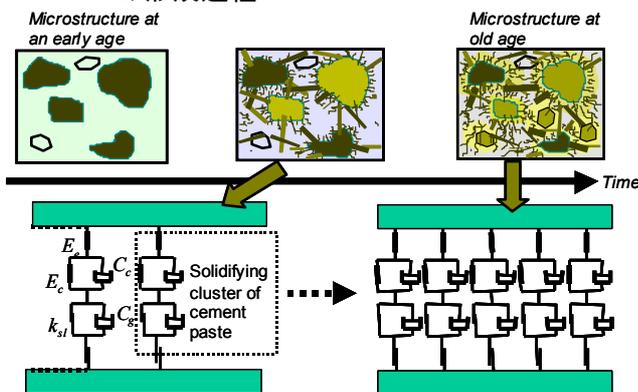


図-2 材齢の経過に伴うクラスターの形成

動に関わると仮定した。以下では、これらの仮想クラスターについて論じる。

2.2 セメントペーストにおけるクラスターの材料モデル

短期(～10日)から長期(～年)にわたるコンクリート時間依存変形モデルを構築するため、セメントペースト中の水分を、毛細管空隙、ゲル空隙、及

び層間空隙内に存在する成分に分離し、各々に起因する可逆・不可逆変形成分を区別してモデル化した。

毛細管空隙中の水分は比較的大きな空隙(10^{-8} - 6 m)に存在する水分であることから、速やかに移動すると予想される。従って、短期間のクリープ現象または若材齢時のクリープにおいて顕著な影響を及ぼす成分である。水和反応の進行とともに、水和物が充てんされることで毛細管空隙は減少、小径化するが、これらクリープの変化速度は空隙が緻密になると従い、小さくなると仮定した。それに対し、ゲル空隙(10^{-9} - 8 m)中の水分移動は遅く、長期間にわたって持続するものである。従って、長期間のクリープに関わると予想される。相対的小さいゲル空隙表面は大きな表面エネルギーを有するため、一度変形したゲル空隙は回復しにくいと考えられる。以上から、不可逆クリープがゲル移動に関わるものと仮説を設けた。一方、層間空隙(10^{-10} m)中の水分移動と塑性変形は強い相関を有し、非常に低い湿度及び高温等の非常に厳しい環境条件でクリープの原因であると考えられる。

これらの空隙中の水分移動と変形に関わる仮説に基づき、図-3 に示すレオロジーモデルを構築した。ここで、体積部分と偏差部分とも同じモデルを用いる。以下に、体積部分に関するモデルを紹介するが、偏差部分のテンソル変量も同じように定式化される。

このモデルでは、全体ひずみを瞬間弾性ひずみ(ϵ_e)、粘弾性ひずみ(ϵ_c)、粘塑性ひずみ(ϵ_g)及び塑性ひずみ(ϵ_l)に分離して、式(1)により表現する。

$$\epsilon_{ly} = \epsilon_e + \epsilon_c + \epsilon_g + \epsilon_l \quad (1)$$

ここで、 ϵ_{ly} ; クラスターの体積ひずみである。

式(1)における、ある時間 t のクラスターの体積ひずみ ϵ_{ly} は時間 t とクラスター形成された時間 t' のセメントペースト体積ひずみの差である。

$$\epsilon_{ly}(t) = \epsilon_{cp}(t) - \epsilon_{cp}(t') \quad (2)$$

図-3 に示したクラスターのレオロジーモデルにおける弾性、粘弾性、粘塑性、及び塑性の各部分に対するモデル化を以下に論じる。

(1) 弾性部分

完全弾性バネにより瞬間弾性変形を表現する。

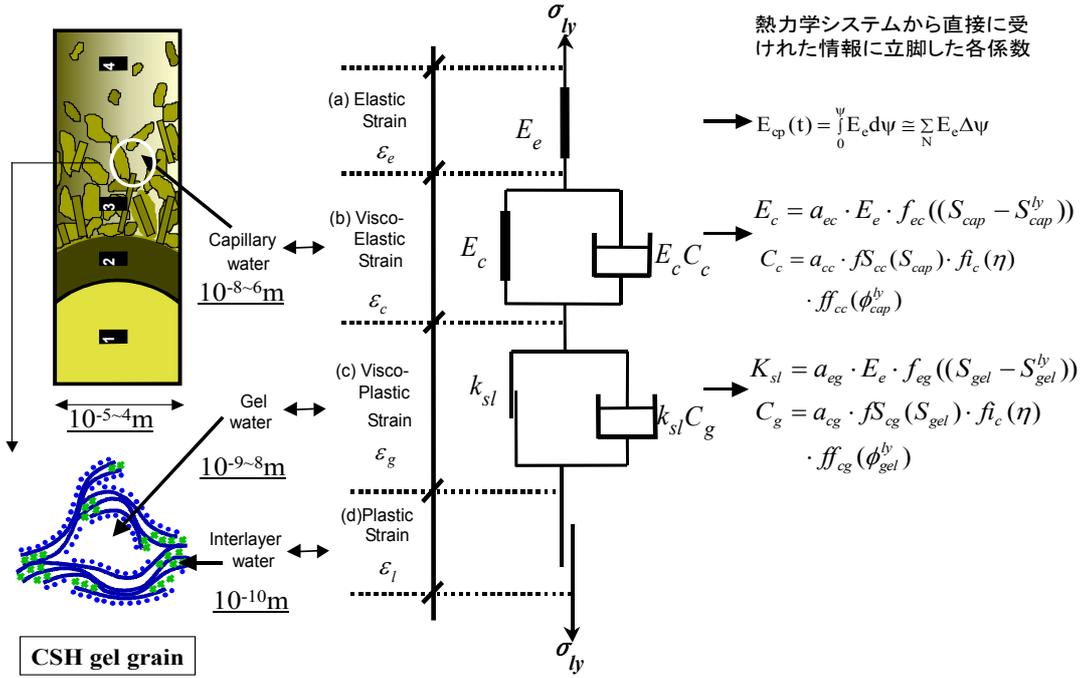


図-3 セメントペーストにおけるクラスターのレオロジーモデル

$$\sigma_{ly} = E_e \cdot \varepsilon_e \quad (3)$$

ここで、 σ_{ly} ; クラスターの体積応力, E_e ; 弾性バネの剛性, ε_e ; 瞬間弾性ひずみである。

弾性部分の剛性, E_e , は式(4)により得られる。

$$E_{cp}(t) = \int_0^{\psi} E_e d\psi \cong \sum_N E_e \Delta\psi \quad (4)$$

ここで、 E_{cp} ; セメントペーストの剛性²⁾, ψ ; 水と度である。

(2) 粘弾性部分

弾性バネとダッシュポットから構成される Kelvin-chain により、クリープにおける可逆変形を表現する。この部分は毛細管空隙中の水分移動に起因する変形成分である。

$$\sigma_{ly} = E_c \cdot \varepsilon_c + E_c C_c \frac{d\varepsilon_c}{dt} \quad (5)$$

ここで、 E_c ; 弾性バネの剛性, ε_c ; 粘弾性ひずみ, C_c ; ダッシュポットの粘性に関わる係数である。

粘弾性部分の剛性 E_c は式(6)により表現する。

$$E_c = a_{ec} \cdot E_e \cdot f_{ec}((S_{cap} - S_{cap}^{ly})) \quad (6)$$

$$a_{ec} = 3, f_{ec} = \exp(S_{cap} - S_{cap}^{ly})$$

ここで、 a_{ec} ; 定数, S_{cap} ; 時刻 t における毛細管空隙の飽和度, S_{cap}^{ly} ; クラスターが形成された時における毛細管空隙の飽和度である。クリープにおける可逆変形の極限值と瞬間弾性変形の比率は、1/4 から 1/2 程度にあると推察されるので、第一近似とし

て、1/3 の値を仮定した ($a_{ec}=3$)。

関数 f_{ec} は、毛細管空隙中の飽和状態が剛性 E_c に及ぼす影響を示すものである。乾燥条件により毛細管空隙の飽和度が小さくなり、载荷荷重を負担する水分量が少なくなることで、同じ载荷荷重下においても変形が大きくなると考えられる。従って、見かけ上剛性 E_c を小さくすることとした。以上の飽和度と剛性 E_c に関わる考えに基づき、関数 f_{ec} は式(6)により決定した(図-4)。

粘弾性部分の粘性に関わる係数 C_c は熱力学システムから直接に受け渡された毛細管空隙の水分移動特性(飽和度, 空隙比, 水の粘性)より決定して、以下の式により表現する。

$$C_c = a_{cc} \cdot fS_{cc}(S_{cap}) \cdot f\hat{t}_c(\eta) \cdot ff_{cc}(\phi_{cap}^{ly}) \quad (7)$$

$$a_{cc} = 9 \times 10^3, f\hat{t}_c = 10 + \eta, ff_{cc} = 1 - \phi_{cap}^{ly}$$

ここで、 a_{cc} ; 定数, η ; 微細空隙構造中の水の粘性, ϕ_{cap}^{ly} ; クラスター形成されたときで毛細管空隙率である。関数 fS_{cc} は図-4 に示す。毛細管空隙が少なく、飽和度が小さく、空隙水の粘性が大きいと、ダッシュポットの粘性が大きというモデルである。

(3) 粘塑性部分

この部分はスライダーとダッシュポットにより構成される。ゲル空隙中の水分移動と関連するもので、以下のような式で表現する。

$$\frac{d\varepsilon_g}{dt} = \frac{1}{C_g} \cdot (\varepsilon_{g\lim} - \varepsilon_g) \quad (8)$$

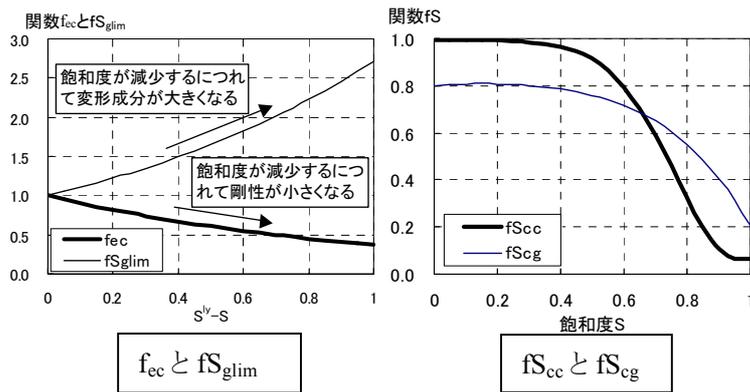


図-4 毛細管空隙，ゲル空隙の飽和度に関わる関数

$$f_{ec} \text{ と } f_{S_{glim}}, f_{S_{cc}} \text{ と } f_{S_{cg}}$$

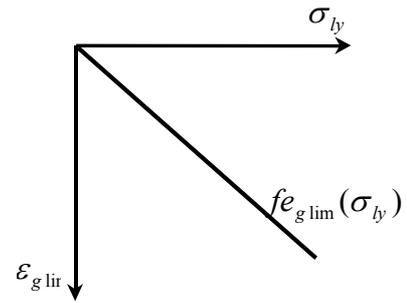


図-5 粘塑性ひずみの極限值 ε_{glim}

ここで、 ε_g ; 粘塑性ひずみ、 ε_{glim} ; その極限值、 C_g ; ダッシュポットの粘性に関わる係数である。

粘塑性部分の粘性に関わる係数 C_g は、粘弾性部分と同じく、熱力学システムから得られるゲル空隙の水分移動特性(飽和度、空隙比、水の粘性)より決定する。すなわち、

$$C_g = a_{cg} \cdot f_{S_{cg}}(S_{gel}) \cdot f_{ic}(\eta) \cdot ff_{cg}(\phi_{gel}^{ly}) \quad (9)$$

ここで、 a_{cg} ; 定数、 S_{gel} ; 時刻 t でゲル空隙の飽和度、 ϕ_{gel}^{ly} ; クラスタ形成されたときでゲル空隙率。関数 $f_{S_{cg}}$ は図-4 に示す。

粘塑性ひずみ ε_g の極限值 ε_{glim} は载荷された応力とゲル空隙の飽和度に関連すると仮定した。ゲル空隙に水が満たされていると、高いレベルの応力が载荷されるにも関わらず、クリープは極めて低いことが、水中でのクリープ試験から知られている。逆に、乾燥環境に置く供試体の場合、ゲル空隙の飽和度が低くなり、クリープが大きくなる。以上の現象に基づき、式(10)を採用した。

$$\varepsilon_{glim} = f_{e_{glim}}(\sigma_{ly}) \cdot f_{S_{glim}}(S_{gel} - S_{gel}^{ly})$$

$$f_{e_{glim}} = \frac{\sigma_{ly}}{E_e / 2.5}, f_{S_{glim}} = \exp(-(S_{gel} - S_{gel}^{ly})) \quad (10)$$

ここで、 S_{gel}^{ly} ; クラスタ形成されたときでゲル空隙の飽和度である。

式(10)に示す関数 $f_{e_{glim}}$ はクラスタが形成されたときのゲル空隙の飽和度 S_{gel}^{ly} に対する粘塑性ひずみの極限值で、载荷された応力 σ_{ly} の関数である。本研究では、図-5 に示すように線形関数を採用した。不可逆変形の極限值と瞬間変形の比率は

1~4 程度にあると推察されるので、第一近似として、式(10)に示すように、不可逆変形の極限值が瞬間変形(= σ_{ly}/E_e)の2.5倍と仮定した。

式(10)に示す関数 $f_{S_{glim}}$ は以上に述べたゲル空隙の飽和状態が極限值 ε_{glim} に及ぼす影響を反映するものである(図-4)。

(4) 塑性部分

スライダーにより表現する。層間空隙中の水分移動に関わるもので、厳しい環境条件下の収縮とクリープを記述すると仮定される。

$$\frac{d\varepsilon_l}{dt} = a_{int} \cdot \frac{dS_{int}}{dt}, a_{int} = 5 \times 10^{-3} \quad (11)$$

ここで、 ε_l ; 塑性ひずみ、 a_{int} ; 定数、 S_{int} ; 層間空隙の飽和度である。本要素に関する挙動は未だ不明な点が多いため、ごく簡便に取り扱っている。ただし、現在研究を進めており、追って報告する予定である。

2.3 間隙水圧とセメントペーストの材料モデルの連成

コンクリートの収縮メカニズムについて、今まで色々な仮説が提案されている。本研究では、中・高湿度域での収縮を対象として、最も広く用いられている毛細管張力理論を採用する。低湿度の機構は別途に検討中である。

毛細管張力理論に基づき、微細空隙構造中に生じる毛細管張力を起因とする間隙水圧は外部载荷荷重とともにセメントペースト変形を生じさせると考えられる。セメントペーストに生じる全体体積応力 σ_{cp} は以下の式(12)、(13)、(14)により計算される。

$$\sigma_{cp} = \sigma'_{cp} + \beta \cdot \sigma_s \quad (12)$$

$$\sigma_s = -\frac{\rho \cdot R \cdot T}{M} \ln h \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\phi_{cap} \cdot S_{cap} + \phi_{gel} \cdot S_{gel}}{\phi_{cap} + \phi_{gel}} \quad (14)$$

ここで、 σ_{cp} ;セメントペーストに生じる全体体積応力、 σ'_{cp} ;セメントペーストの skeleton 部分に生じる体積応力、 σ_s ;セメントペーストの空隙水に生じる毛細管張力、 β ;毛細管張力の分布密度関数、 ρ ;液体水の密度、 R ;気体定数、 T ;絶対温度、 M ;水の分子量、 h ;空隙中の相対湿度、 S_{gel} ;ゲル空隙の飽和度、 ϕ_{gel} ;ゲル空隙比、 S_{cap} ;毛細管空隙の飽和度、 ϕ_{cap} ;毛細管空隙比である。

3. モデルの検証

提案したコンクリートの時間依存変形モデルを用い、コンクリートの収縮・クリープ挙動の検証を行う。

表-1 に検証する供試体の諸元、環境条件及び载荷条件を示す。解析に用いた典型的要素分割は図-6 の通りである。

表-1 検証する供試体諸元、環境条件及び载荷条件

供試体番号	供試体寸法 (cm)	W/C (%)	骨材量 (%)	使用粉体	乾燥条件 (%)	乾燥開始材齢 (days)	载荷又は除荷時材齢 (days)
C1 ⁵⁾	Prism 4x4x16	28	50	MC ^a	45,66	2	--
C2 ⁶⁾	Cyl.10.2x35.6	59	68	OPC ^b	50,70	28	--
C3 ⁷⁾	Cyl.10x20	50	68	OPC ^b	Sealed	--	0.75
C4 ⁸⁾	Cyl.15.2x30.5	42	69	OPC ^b	Sealed	--	7,60
C5	Cyl. 10x20	30	0	OPC ^b	70	1	--
C6	Cyl. 10x20	30	0	OPC ^b	70	1	1,4,7,11
C7 ⁹⁾	Prism 7x7x28	49	69	OPC ^b	50	1	7,90

(^a MC = 中庸熟セメント ^b OPC = 普通ポルトランドセメント)

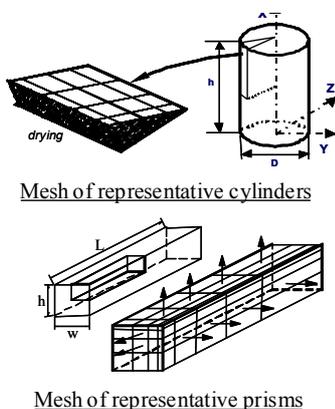


図-6 解析用いた要素分割

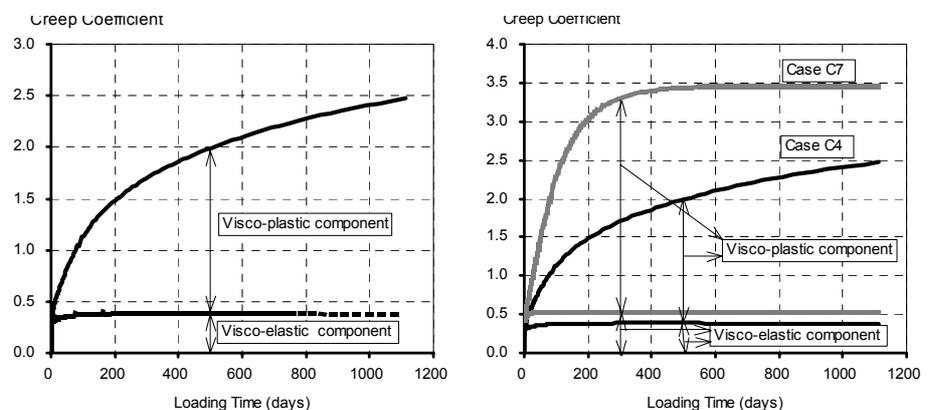


図-7 提案したモデルによりクリープ各成分の区分図

図-7 に示すように提案したモデルを用いることで、クリープの各成分を区分することが可能となる。長期間に渡る解析結果からは、粘弾性部分は短期間クリープが主な成分で、逆に粘塑性部分は長期間クリープに主な役割を演じる。封緘した供試体 C4と乾燥を受けた供試体 C7の結果を比較すると、粘塑性部分に大きな差を生じるが、これは乾燥によるものである。

乾燥収縮、基本クリープ、乾燥クリープに関する実験と解析の比較を図-8~13 に示す。場所毎に異なる解析値を供試体全体として平均化して得られた結果である。供試体 C1, C3, C5,6 が短期間で、供試体 C2, C4, C7 が長期間に渡るものである。経時的な乾燥収縮、基本クリープ及び乾燥クリープが良好に追跡されている。

4. 結論

本研究を通して、セメント硬化体の微細空隙構造と水分形態に関する熱力学情報を用いて、巨視的時間依存変形を記述する材料モデルの構築す

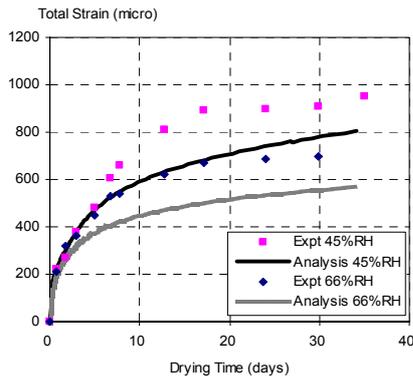


図-8 短期間乾燥収縮 (ケースC1)

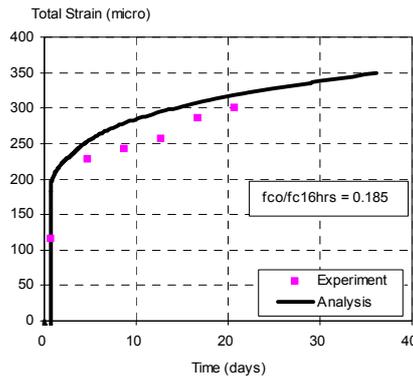


図-10 短期間基本クリープ (ケースC3)

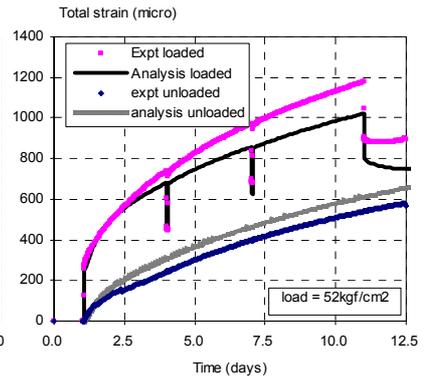


図-12 短期間乾燥クリープ (ケースC5, 6)

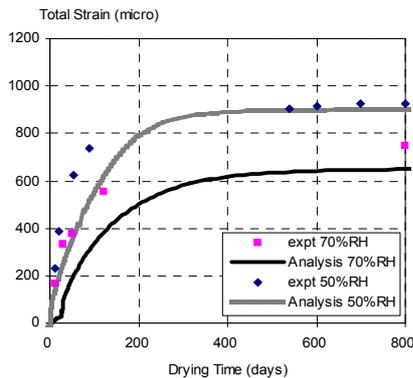


図-9 長期間乾燥収縮 (ケースC2)

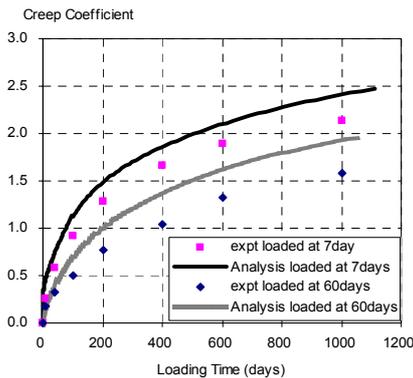


図-11 長期間基本クリープ (ケースC4)

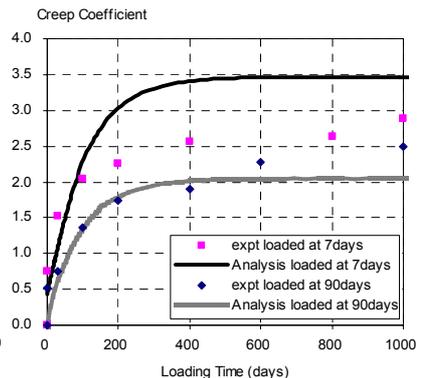


図-13 長期間乾燥クリープ (ケースC7)

ることが出来た。

1) セメントペースト中の水分を、毛細管、ゲル空隙、及び層間空隙内に存在する成分に分離し、各々に起因する可逆・不可逆変形成分を区別してレオロジーモデルを提案した。これにより、クリープ各成分(可逆成分, 不可逆成分)を区分して取り扱うことが可能になった。

2) Solidification 理論に基づく本モデルを用い、収縮・クリープに代表される短期から長期にわたる時間依存変形を統一的に予測することが出来た。

3) 微細空隙構造中に生じる毛細管張力を起因とする間隙水圧と外部載荷荷重の両者をセメントペースト変形の駆動力とすることで、環境作用と外力の複合効果が自動的に得られた。

参考文献

- 1) コンクリートのクリープおよび乾燥収縮 II, 土木学会, 2000
- 2) Rasha T.S.Mabrouk: Unified constitutive law of solidifying concrete composite and application to reinforced concrete structures, Ph.D. Thesis submitted to The University of Tokyo, 1999

- 3) Maekawa, k., Kishi, T., and Chaube, R.P.: Modeling of concrete performance, E&FN SPON, 1999
- 4) Bazant ZP and Prasannan S: Solidification theory for concrete creep, I-Formulation, Journal of Engineering Mechanics, August 1989, 115(8), pp. 1691-1704
- 5) 石田哲也: 微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム, 博士論文, 1999
- 6) Bazant, P. and Kim, J.: Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 1-Shrinkage, *Materials and Structure*, Vol. 24, 1991, pp. 327-345.
- 7) Khan, A. A., Cook, W. D. and Mitchell, D.: Creep, Shrinkage and Thermal Strains in Normal, Medium and High-Strength Concretes during Hydration, *Material Journal, ACI*, March-April 1997, pp. 156-163
- 8) Bazant, P. and Kim, J.: Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 2-Basic Creep, *Materials and Structure*, Vol. 24, 1991, pp. 409-421.
- 9) Bazant, P. and Kim, J.: Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 3-Creep at drying, *Materials and Structure*, Vol. 25, 1992, pp. 21-28.