

論文 持続曲げ載荷試験によるコンクリートの基本・乾燥クリープ挙動の検討

高嶋 豊*¹・下村 匠*²・小幡浩之*³

要旨: 持続荷重および乾燥を受けるコンクリート部材の変形と応力の導入を合理的に表すことを目的に、シール供試体およびアンシール供試体の持続曲げ載荷試験を行い、乾燥収縮、基本クリープ、乾燥クリープ挙動を検討した。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基づいた複合構成モデルに、基本クリープ特性を導入し、基本クリープと乾燥クリープを統一的に表現できるように拡張した。

キーワード: 基本クリープ、乾燥クリープ、複合構成モデル、持続曲げ載荷試験

1. はじめに

精度の高いコンクリートの収縮ひび割れの予測、コンクリート部材の経時変形の予測を行うためには、部材中に生じる、乾燥収縮による応力と荷重作用による応力を、応力解析において統一的に取り扱うことが必要であると考え、著者らは、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⁾。本法は、コンクリート中のセメントペーストの乾燥収縮にともなうセメントペーストと骨材の力のやりとりを、構成モデル中において自然な形式で表し、部材の応力解析に反映させるものである。本法により、乾燥によるクリープの増大が自動的に表現されることを、既報¹⁾において示した。しかし、実験精度やデータ数の問題から、検証が十分でなく、また基本クリープが未考慮であるなど、解決すべき課題も有している。

本研究は、この複合構成モデルに、新たに基本クリープ特性を導入し、完成度を高めることを目的としている。そのため、まず乾燥・非乾燥のモルタル供試体の持続曲げ載荷試験を系統的に行い、曲率の経時変化から、基本

クリープ特性と乾燥クリープ特性を抽出し、検証に耐える実験データを取得する。続いて、簡単なクリープ関数を用いて実験結果から基本クリープ特性を同定し、基本クリープと乾燥クリープをあわせた応力解析を行い、その適用性を検討する。

2. 持続曲げ載荷試験

2.1 実験概要

図-1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。実験シリーズを表-1に示す。供試体

表-1 実験シリーズ

供試体No.	乾燥条件	配合	載荷パターン
No.1	封緘(シール)	配合①	I
No.2	2面乾燥(アンシール)		
No.3	封緘	配合②	I
No.4	2面乾燥		
No.5	封緘	配合②	II
No.6	2面乾燥		
No.7	封緘	配合③	I
No.8	2面乾燥		
No.9(自由収縮)	2面乾燥	配合①	自由収縮試験
No.10(自由収縮)	2面乾燥	配合②	自由収縮試験
No.11(自由収縮)	2面乾燥	配合③	自由収縮試験

*1 株式会社 横河ブリッジ 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)

*3 太平洋セメント株式会社 工修 (正会員)

は、幅 100mm×高さ 50mm×長さ 900mm の無筋モルタルはりとし、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）、側面のみをシールし上下面からの水分の逸散を許した供試体（アンシール供試体）を作成した。配合は、水セメント比を一定としコンクリート全容積中の骨材の体積率を 70, 50, 30% と変化させた 3 種類とした（表 2）。骨材量を変化させたのは、複合構成モデルのパラメータとなるからである。供試体は材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日まで封緘養生を行った。持続荷重は、支間長 800mm 等曲げ区間を 200mm とした 2 点集中荷重とし、等曲げ区間における供試体上下面のひずみの経時変化を測定した。荷重

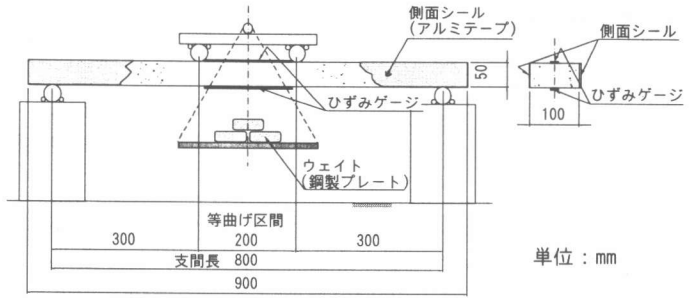


図-1 実験装置および供試体

表-2 コンクリートの配合

	W/C	単位量[kg/m ³]				骨材の体積率 V_{ag}
		W	C	S	Ad.	
配合①	0.4	145	363	1814	2.0[%]	0.70
配合②	0.4	257	643	1294	-	0.50
配合③	0.4	368	920	779	-	0.30

C : 普通ポルトランドセメント
S : 山砂 (表乾比重 2.59, 吸水率 1.89, FM2.76)
Ad. : AE 減水剤

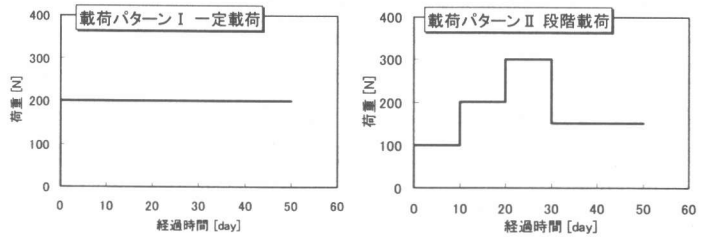


図-2 載荷パターン

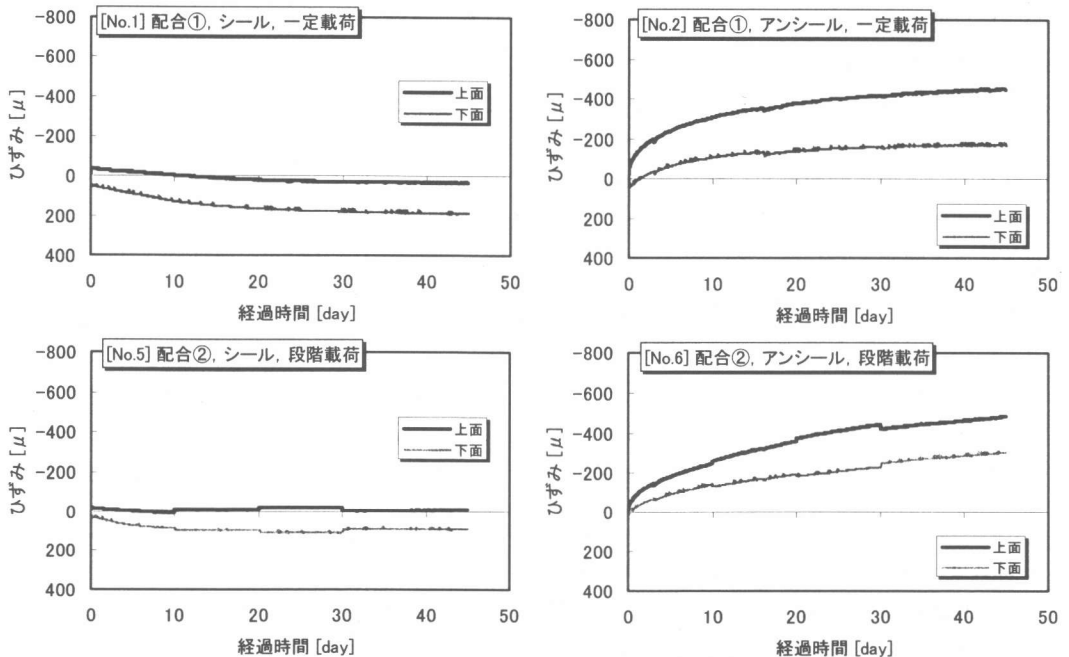


図-3 ひずみの経時変化

はおもり（鋼製プレート）を吊すことにより調整した。荷重パターンを図-2に示す。ひずみの測定には、ゲージ長60mmのペーパーゲージを用いた。

実験は20°C60%RHの恒温室内で実施した。持続荷重試験と同時に、配合3種類それぞれの2面乾燥供試体の自由収縮試験を行った。

2.2 実験結果

紙面の制約上、実験結果の一部を示す。図-3にシール供試体、アンシール供試体の上端および下端のひずみの経時変化を示す。アンシール供試体は側面のみシールを施してあるので、図にみられるひずみの経時変化は、荷重による弾性ひずみ、クリープひずみおよび乾燥収縮ひずみによるものである。シール供試体は全面シールを施してあるので、ひずみの経時変化は弾性ひずみおよびクリープひずみによるものといえる。しかし本実験では、全てのシールした荷重供試体で、わずかではあるが、図に示すように上端（圧縮側）のひずみが減少し、下端（引張側）のひずみが増加する、すなわち供試体が膨張する結果が得られた。この原因は、測定の不具合（ゲージや接

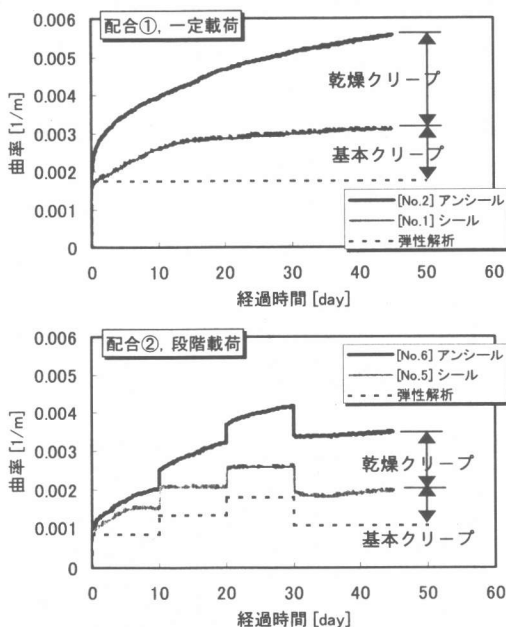


図-4 曲率の経時変化

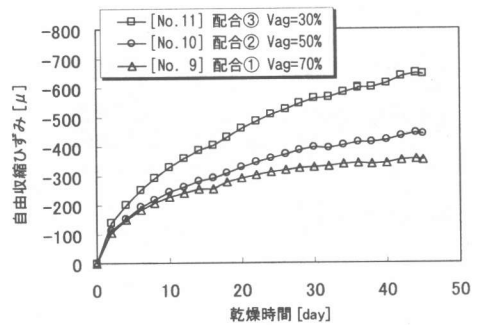


図-5 自由収縮試験結果

着剤の長期安定性など）によるのか、荷重条件（支点の摩擦など）によるのか、明らかではない。

図-4に曲率の経時変化を示す。曲率は、供試体上下面のひずみの測定値より計算した。荷重を一定に保った期間の曲率の経時変化がシール供試体、アンシール供試体ともにみられた。乾燥収縮もしくは膨張では曲率は発生しないので、供試体の曲率の経時変化は、クリープによるものといえる。シール供試体の曲率の経時変化は基本クリープによるものであり、アンシール供試体の曲率の経時変化は基本および乾燥クリープによるものである。本実験により、構成モデルの改良に必要な、基本・乾燥クリープ特性の把握という第一の目的は達成できたと考える。

図-5に自由収縮供試体のひずみの経時変化を示す。コンクリート全容積中の骨材の体積率 V_{ag} が小さいものほど収縮ひずみが大きくなる傾向を示した。

3. 数値解析

3.1 骨材-ペースト複合構成モデル

複合構成モデルでは、コンクリート中の骨材とセメントペーストの複合形態を、直列部分と並列部分の組み合わせにより表現する（図-6）。乾燥収縮はセメントペースト部分に導入する。コンクリート要素の平均応力と平均ひずみは、セメントペーストと骨材それぞれの応力-ひずみ関係（図-7）、各相の変形適合条件、応力平衡条件に基づき計算され

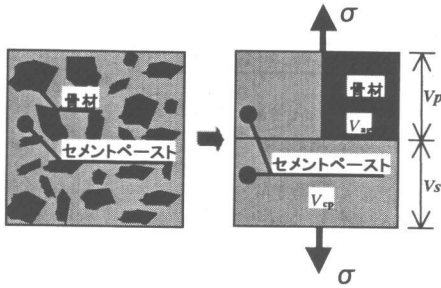


図-6 骨材-ペースト複合構成モデル

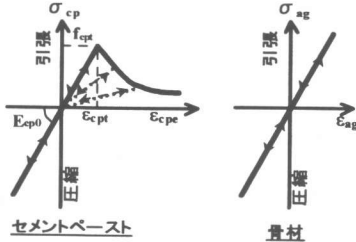


図-7 セメントペーストと骨材の
応力-有効ひずみの関係

る。複合構成モデル原型の詳細については、既報¹⁾に譲る。

3.2 基本クリープの導入

コンクリートの基本クリープの主たる原因はセメントペーストのクリープであると考えられる。複合構成モデルでは、セメントペーストと骨材を区別しているので、ペースト部分のみにクリープ特性を導入することが可能で、それが本アプローチの本来のとりべき道である。しかしながら、基本クリープ導入の第一段階として、数値計算を簡便にして方法論の大まかな妥当性を確認することを優先し、ここでは以下の方法を用いる。

クリープを応力に関して線形と仮定し、骨材とセメントペーストに同じクリープ関数を適用することにより、コンクリートの基本クリープを表現する。以下、骨材相とセメントペースト相に共通した式である。

時間 t [day]における各相のひずみ $\varepsilon(t)$ は、瞬間ひずみ $\varepsilon_i(t)$ と時間依存性ひずみの和 $\varepsilon_c(t)$ により表す。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_i(t) + \varepsilon_c(t) \quad (1)$$

各ひずみ成分は、以下のように表す。

$$\varepsilon_i(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon_c(t) = \int_0^t \frac{\varphi(t-\tau)}{E_0} \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3)$$

ここに、 E_0 は各相の初期弾性係数、 $\sigma(t)$ は時間 t における各相の作用応力、 $\varphi(t)$ は各相に共通したクリープ関数であり、本研究では、関数形が簡単な以下を採用する。

$$\varphi(t) = \alpha(1 - e^{-\beta t}) \quad (4)$$

ここに、 α :クリープ係数の終局値、 β :クリープの速度を表す定数 [1/day]である。

以上の方法によると、基本クリープでは、骨材とセメントペーストの応力の比が変化しないことになる。すなわち、基本クリープに関する限り、コンクリートを複合体ではなく単相材料とみなしたことになる。計算がきわめて簡便になる反面、複合構成モデルの特徴が生かせない。本法は、あくまで便法として採用するものである。

3.3 数値計算方法

図-8に示すフローに基づき、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²⁾のモデルを用いて評価し、その材料パラメータは自由収縮供試体の実験結果より同定した(図-9)。基本クリープのクリープ関数のパラメータ α 、 β はシール供試体の実験結果より同定した。解析

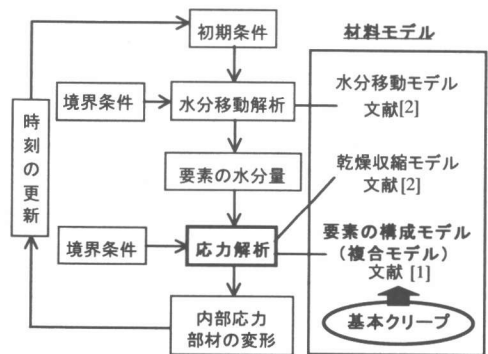


図-8 解析フロー

表-3 解析に用いた材料パラメータ

	配合①	配合②	配合③	パラメータの決定方法
骨材の弾性係数 E_{ag} (MPa)	60000			既往の研究 ¹⁾
ペーストの初期弾性係数 E_{gp} (MPa)	15000			既往の研究 ¹⁾
骨材の体積率 V_{ag} (m ³ /m ³)	0.70	0.50	0.30	配合条件
並列部分の体積率 V_p (m ³ /m ³)	0.85	0.80	0.75	既往の研究 ¹⁾ と V_{ag} より推定
ペーストの軟化パラメータ α_s	0.1			既往の研究 ¹⁾
ペースト弾性限界ひずみ ϵ_{gp} (μ)	250			既往の研究 ¹⁾
細孔容積 V_0 (m ³ /m ³)	0.087	0.154	0.221	既往の研究 ¹⁾ と配合条件より推定
細孔容積分布密度関数のパラメータ B	34000			自由収縮試験結果
細孔容積分布密度関数のパラメータ C	0.5			自由収縮試験結果
水蒸気移動に関する特性を表す材料係数 K_v	0.03			自由収縮試験結果
液状水移動に関する特性を表す材料係数 K_l	0.0006			自由収縮試験結果
毛細管力に対する弾性係数 E_{cap} (MPa)	3000			自由収縮試験結果
基本クリープ クリプ係数の終局値 α	0.4			シール供試体試験結果
基本クリープ クリプ速度定数 β (1/day)	0.2			シール供試体試験結果

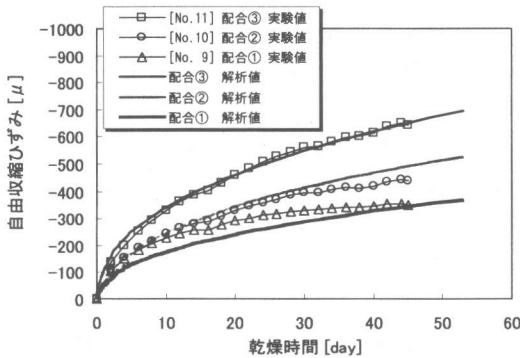


図-9 ひずみの経時変化 (自由収縮供試体)

に用いた材料パラメータの値を表-3に示す。3つの配合は、セメントペーストの水セメント比が同一で骨材量が異なるのみであるので、対応するパラメータのみを変化させている。アンシール供試体中の水分移動は、上下方向の一次元解析により評価した。応力解析は、Bernoulli-Eulerの運動場の仮定に基づき、曲げ解析を行った。

3.4 解析結果

図-10にアンシール供試体のひずみの経時変化の解析結果を示す。解析結果は、それぞれの配合の供試体で、ひずみの経時変化の傾向を良好に再現している。特に、時間の経過とともに上面(圧縮側)のひずみの増加の割合が、下面(引張側)の増加割合より大きくなる傾向を表現できている。

配合の違い、すなわちコンクリート容積中

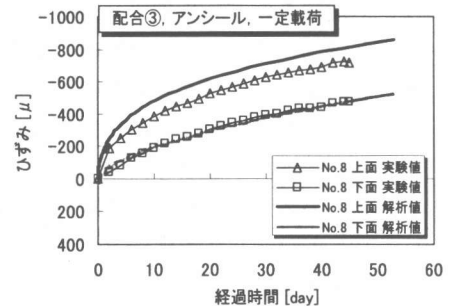
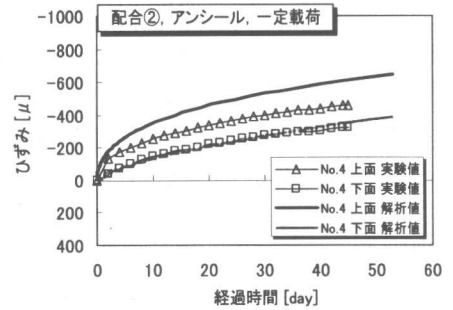
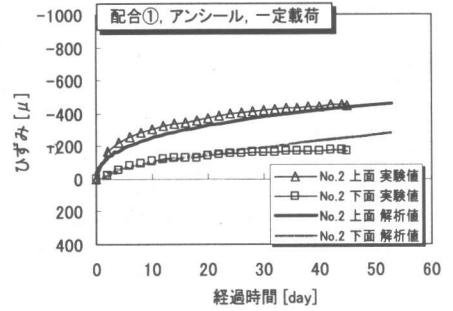


図-10 ひずみの経時変化 (アンシール供試体)

の骨材の体積率 V_{ag} の変化によるひずみ経時変化の挙動の違いを、解析では、骨材の体積率 V_{ag} 、並列部分の体積率 V_p 、細孔容積 V_0 の3種類のパラメータのみを変化させることにより表現できている。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、骨材によるセメントペーストの乾燥収縮の拘束による損傷の導入が、コンクリートの剛性の低下として表現されるからであり、複合構成モデルが本来持つ特徴である。

図-11にシール供試体およびアンシール供試体の曲率の経時変化の解析結果を示す。まず、全体的な傾向として、シール供試体で

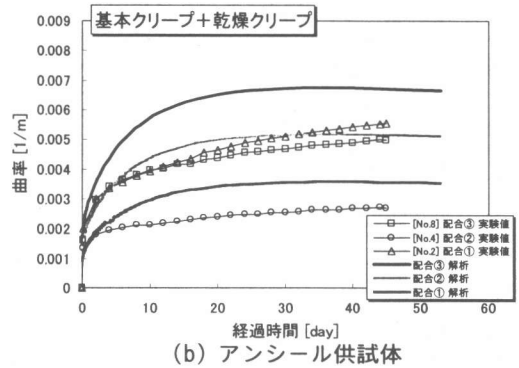
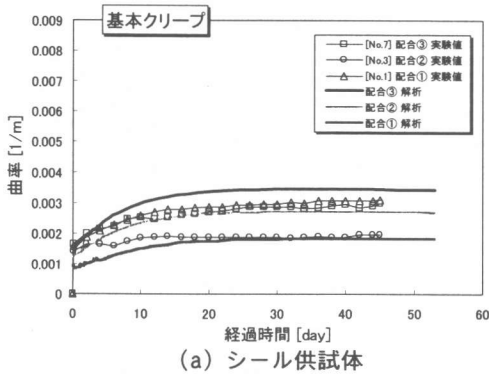


図-11 曲率の経時変化

は基本クリープによる，アンシール供試体では基本+乾燥クリープによる経時的な曲率の増加を表現することに成功している。

しかし，配合の違いによる変形の大きさの順序は，実験結果と解析結果で異なった。解析では，骨材とセメントペーストに同一のクリープ関数を仮定したので，基本クリープひずみと瞬間ひずみの比は骨材量によらず一定となる。図-11(a)の解析結果が配合により異なるのは，瞬間変形が異なるからである。骨材の弾性係数はセメントペーストよりも大きいので，解析では骨材量が多いほどコンクリート瞬間ひずみ基本クリープひずみともに小さくなる。乾燥クリープは骨材量の影響を複雑に受けるが，図-11(b)によると，結果的に瞬間ひずみと基本クリープが大きい供試体は乾燥クリープも大きい解析結果が得られている。

一方，実験結果では，骨材量の違いによる変形の大きさの順序に明瞭な規則性が認められなかった。瞬間ひずみは3配合とも大差ないが，基本クリープ，基本+乾燥クリープともに，中程度の骨材量の配合②が著しく小さくなった。骨材量が多い配合①と少ない配合③は，ほぼ同様のクリープ挙動を示した。

なぜこのような実験結果が得られたのかは，現時点では明らかではない。一般的には，水セメント比が同じであれば，骨材量が少ないほど，すなわちペースト量が多いほどコンクリートの基本クリープ，乾燥クリープともに

大きくなると考えられ，汎用的なクリープ予測式⁴⁾にもその傾向が表現されている。これは，本解析手法によっても表現可能である。

本実験は，圧縮・引張クリープが複雑に影響する曲げクリープであるので，考慮していない要因が作用した可能性もある。今後，検討を重ねたい。

4. まとめ

シール供試体およびアンシール供試体の持続曲げ載荷試験を実施し，曲率の経時変化より基本クリープ，基本+乾燥クリープを抽出した。既往の骨材-ペースト複合構成モデルに，基本クリープ特性を導入し，基本クリープ挙動，基本+乾燥クリープ挙動を統一的に表現することに成功した。

【参考文献】

- 1)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報告集，Vol.21，No.2，pp.781-786，1999
- 2)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
- 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，pp.41-53，1995
- 4)土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書設計編，1996