

論文 力学モデルによるコンクリートの時間依存ひずみの予測

宮川 邦彦^{*1}

要旨：本論文は、従前の研究成果や著者がこれまでにやってきた実験を基にコンクリートの時間依存ひずみ（乾燥収縮およびクリープ）の生成機構に対する考え方、それを表示できる力学モデルによるひずみ予測法の概要、ならびに本予測法が実測結果との対比から汎用性に優れた手法であることを述べている。なお、本予測法の特長は、統計処理から求められた予測式とは異なり、一つの力学モデルでコンクリートのひずみ挙動のすべてを解析できること、さらに鋼材を表す変形要素を同モデルに追加することにより、コンクリート構造部材の時間依存解析にも適用できることである。

キーワード：力学モデル、ひずみ予測法、乾燥収縮、クリープ、遅れ弾性、流動

1. はじめに

コンクリートは、気体、液体および固体のすべてを含み、その内部構造がセメントの化学反応過程で経時変化する不均質な多相材料であり、しかも、通常の供用状態下でも鋼材には見られない大きな時間依存ひずみを生じる特異な構造材料である。したがって、鋼材で補強されたコンクリート構造物の設計や施工に際しては、このような材料特性の違いによる影響を適切に検討しておくことが重要である。コンクリートの時間依存現象に関しては、二十世紀初頭から今日に至るまで、すでに多くの研究者らにより膨大な量の実験的あるいは理論的研究が行われ、その定性的な性状はほぼ解明されているものの、ひずみの生成機構や定量化のための予測法、さらに同現象がコンクリート構造物のひび割れ性状や破壊耐力などに及ぼす影響を検討した構造面での研究はまだ立ち遅れているように思われる[1, 7]。

さて、コンクリートの時間依存ひずみには、外力の作用に起因するクリープひずみと、外力の作用とは無関係な収縮ひずみ（ここに、収縮ひずみには、セメントの水和反応に起因する硬化収縮や自己収縮、水分逸散に起因する乾燥収縮ひずみなどがあるが、本論文は、このうち、主に乾燥収縮ひずみを対象としている。）がある。前者の生成機構に関しては、塑性変形説、粘弾性説、シーページ説など、後者のそれには、毛細管張力説、表面張力説など種々な仮説が提唱されてきた。また、その解析や予測の手段として、これまでに多くの力学モデルが提案されてきたが、それらの大半は、実際の物体内部で生じるひずみ機構とは無関係に、実測されたひずみ-時間曲線を表示するために数種の変形要素を組み合わせただけのもので、主に実測曲線を数式化するための手段として利用されてきた。その他、ひずみ機構を考慮した解析的な手法も数多く提案されているが、汎用的なひずみ予測法としてはまだ問題があるように思われる[1, 3, 4]。

ところで、本研究の目的は、コンクリートの時間依存ひずみの生成機構を検討し、それを具体化するための特殊な力学モデルの考案と、同モデルによる理論的でしかも汎用性に優れたひずみ予測法を確立することである。

2. ひずみの生成機構と応力平衡化回転モデルによるひずみの予測

コンクリートの時間依存ひずみは長期的な現象であり、しかも、材料、施工、環境などすべての要因がひずみの性状に影響を及ぼすため、限られた実測結果だけからそれを適確に予測するこ

*1 九州産業大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

とは極めて困難である。したがって、汎用的なひずみ予測法を確立するためには、まず、その生成機構を推察し、それを具体化できる理論的な予測法を検討すべきである。

2. 1 ひずみの生成機構

著者は、これまでに究明された時間依存ひずみの全般的な性状から、その主要な生成機構を以下のように考え、同機構を表示するための力学モデルを検討した。

- ① 乾燥収縮ひずみは、水分の逸散に伴って水隙間に形成される内的な毛細管張力の作用に起因する弾性ひずみとクリープひずみとの和である。
- ②. クリープひずみのうち、回復性の遅れ弾性は分散系の複合体内部における応力平衡化現象に起因するひずみ成分である。
- ③. クリープひずみのうち、非回復性の流動は化学反応過程で水中に溶出した固体物質およびゲル水の内部拡散、あるいは外部への流出に起因するひずみ成分である。

2. 2 応力平衡化回転モデルと同モデルによるひずみ予測法

図-1に示す応力平衡化回転モデルは、遅れ弾性を表示するために考案した既報のモデルに流動成分を追加したもので、変形要素として、複合体を構成するセメントペースト部の弾性と骨材粒子部のそれを表す2個の弾性ばね（ばね定数： G_1 、 G_2 ）、複合体内部で生じる応力平衡化および流動を表す3個の回転ダッシュポット（回転粘性係数： η 、 η_1 、 η_2 ）、ならびに複合体を構成する各素材の容積割合を表す6本の腕（腕の長さ： $\ell_1 \sim \ell_2$ ）から構成されており、特に従来の力学モデルにはなかった要素として、各変形要素を繋ぐ腕を組み入れ、その腕の長さにより各素材の容積割合とその経時変化を表した[2, 6]。

いま、同モデルに外力 F が作用した直後は、回転ダッシュポットが角変位（ θ ）しないため、図中の破線で示すようにすべての要素は平行移動するだけであるが、その力が持続されると、回転ダッシュポットが徐々に角変位を生じ始め、任意時間 t 後には一点鎖線のように変形する。なお、ひずみの生成機構の①で述べた毛細管張力をここでは内的な吸引力（ F_{s1} 、 F_{s2} ）に置き換え、外力の作用とは無関係な乾燥収縮ひずみの解析も可能にした。

同モデルに一定外力 F と吸引力 F_{s1} および F_{s2} が同時に作用するときの任意時間 t 後の全変形量 δ は、力の釣り合いと変形の適合条件式から求められる。なお、本解析ではすべての要素値が定数であるとして線形解析したが、本来、コンクリートの時間依存ひずみを求めるためには、セメントの化学反応過程で要素値が経時変化するとして非線形解析すべきである。しかし、実際には要素値の時変数が複雑であるため、非線形解析することは極めて困難である。そこで、本予測

では時間間隔を適切に区切り、その区間内では要素値が一定であるとして、逐次計算を行った。なお、紙面の関係上、モデル解析の詳細については割愛する[6]。

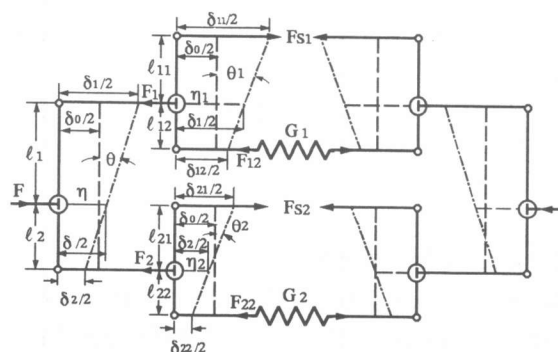


図-1 応力平衡化回転モデル

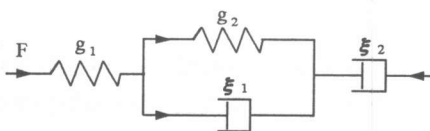


図-2 Burgersモデル

2. 3 応力平衡化回転モデルと従来の力学モデルとの関係

一定外力 F だけが作用するときの応力平衡化回転モデルの任意時間 t 後における全変形量 δ は、短期クリープ曲線の表示に適用される図-2の Burgersモデルの解と同じ形式になり、両モデルの要素間には式(1)のような関係が得られる。ここに、 g_1, g_2 は弾性を表すばね定数、 ξ_1, ξ_2 は流動を表すダッシュポットの粘性係数である。

$$\begin{aligned} g_1 &= G_1 + G_2 \\ \xi_1 &= \{ \ell_{12}^2 \eta \eta_2 + \ell_{22}^2 \eta \eta_1 + (\ell_1 + \ell_2)^2 \eta_1 \eta_2 \} \\ &\quad / 2(\ell_{12}^2 \ell_{22}^2 \eta + \ell_1^2 \ell_{22}^2 \eta_1 + \ell_2^2 \ell_{12}^2 \eta_2) \\ g_2 &= G_1 G_2 (G_1 + G_2) \{ \ell_{12}^2 \eta \eta_2 + \ell_{22}^2 \eta \eta_1 + (\ell_1 + \ell_2)^2 \eta_1 \eta_2 \}^2 \\ &\quad / \{ (\ell_{12}^2 G_1 \eta_2 - \ell_{22}^2 G_2 \eta_1) \eta + (\ell_1 G_1 - \ell_2 G_2) \eta_1 \eta_2 \}^2 \\ \xi_2 &= \eta \eta_1 \eta_2 (G_1 + G_2)^2 \{ \ell_{12}^2 \eta \eta_2 + \ell_{22}^2 \eta \eta_1 + (\ell_1 + \ell_2)^2 \eta_1 \eta_2 \} \\ &\quad / 2 \{ (\ell_{12}^2 G_1 \eta_2 - \ell_{22}^2 G_2 \eta_1) \eta + (\ell_1 G_1 - \ell_2 G_2) \eta_1 \eta_2 \}^2 \end{aligned} \quad \text{式(1)}$$

式(1)のように Burgersモデルの要素は、さらに多くの変形要素から成り立っていることがわかる。したがって、コンクリートのようにその物性がセメントの化学反応過程で経時変化する物体では Burgersモデルの各要素値を一般化することは極めて困難である。一方、応力平衡化回転モデルの場合、数値計算は煩雑になるが、セメントの化学反応過程を腕の長さの経時変化として適切に式化できれば、汎用的なひずみ予測に適用するが十分可能であると考えられる。

2. 4 モデル要素値の決定

応力平衡化回転モデルを汎用的なひずみ予測法（以下、本予測法と呼ぶ。）に適用するためには、セメントの化学反応過程に伴って経時変化するモデルの各要素値を一般化することが重要な課題となる。ただし、セメントの水和反応自体が十分に解明されていない現状では、そのすべてを理論的に決定することは極めて困難である。そこで本予測法では、従前の研究成果や著者がこれまでに行ってきた多くの実測結果を基に各要素値を試行的に決定した。ただし、今後、セメント化学とコンクリートの力学物性との関係、いわゆる、境界領域における基礎研究が進めば、各要素値をより理論的に決定することも可能であると考ええる。以下、紙面の関係上、各要素値の決定に対する概要だけを述べる。

(1) 腕の長さ（容積割合）

配合計算から骨材粒子部の腕の長さ ℓ_1 とセメントペースト部のそれ ℓ_2 が求められる。さらにセメントペースト部の腕の長さを弾性相 ℓ_{11} と流動相 ℓ_{12} に、また、骨材粒子部も同様にそれぞれ ℓ_{21} と ℓ_{22} に分け、各値の時変数はヤング係数の材令変化を考慮して決定した。

(2) ばね定数

ばね定数 G_1 および G_2 は、セメントペースト部と骨材粒子部それぞれの弾性を表す要素であり、モデルの関係から $G_1 = E_c \rho_{11}$ 、 $G_2 = E_a \rho_{21}$ になる。なお、本予測法では、セメントペースト弾性相のヤング係数を $E_c = 4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、骨材粒子部のそれを使用骨材に応じて、 $E_a = 5 \sim 8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

(3) 回転粘性係数

回転ダッシュポットは分散系の複合体内部で生じる応力平衡化と流動を表示するために仮想した要素であり、したがって、本予測法では、ひずみ曲線の形状に影響を及ぼす要因を考慮して、その回転粘性係数 η 、 η_1 および η_2 を決定した。

(4) . 吸引力

吸引力 F_{s1} および F_{s2} は、前述のように水隙間に形成される毛細管張力を仮想したものであり、乾燥収縮ひずみの曲線形状に影響を及ぼす要因を考慮して決定した。

3. 追加実験

著者がこれまでに行ってきた実験内容の一覧を表-1に示す。実験概要および実測結果の大半は既に報告済みであるので、ここではその後に行った実験のうち、粗骨材品質がコンクリートの時間依存ひずみに及ぼす影響について述べる[5]。

表1 実験計画一覧

	固定要因	変動要因
実験Ⅰ (配合)	骨材:海砂、角閃岩 開始材令:普通 7日、早強 3日 載荷期間:普通 1000日間 :早強 1000日間	セメント:普通、早強 配合:9種類 ($W=160, 180, 200\text{kg/m}^3$ $C=300, 360, 420\text{kg/m}^3$)
実験Ⅱ (材令)	配合: $W=180\text{kg/m}^3, C=360\text{kg/m}^3$ 骨材:海砂、角閃岩 載荷期間:350日	セメント:普通、早強 開始材令:3日、7日、28日 環境:水中、湿度65%大気中
実験Ⅲ (骨材)	配合: $W=180\text{kg/m}^3, C=360\text{kg/m}^3$ セメント:普通 開始材令:7日、載荷期間:350日	骨材:川砂、海砂 角閃岩、安山岩、石灰岩 細骨材率:37%、40%、43%
実験Ⅳ (乾燥 材令)	配合: $W=180\text{kg/m}^3, C=360\text{kg/m}^3$ 材料:普通、海砂、角閃岩 載荷期間:140日間	乾燥、載荷開始材令の相違 乾燥 7日、および同時乾燥 :7日、14日、28日、91日
実験Ⅴ (収縮)	配合: $W=180\text{kg/m}^3, C=360\text{kg/m}^3$ 材料:普通、海砂、角閃岩 測定期間:1000日間	開始:3日、7日、28日、91日 部材寸法:15cm角、20cm角 40cm角柱(長さ:60cm)
実験Ⅵ (骨材 品質)	配合: $W=180\text{kg/m}^3, C=360\text{kg/m}^3$ セメント:普通 開始材令:28日 載荷期間:400~800日間 継続中	粗骨材:石灰岩3種、角閃岩 硬質砂岩3種、ひん岩 花崗岩、結晶片岩3種
実験Ⅶ (変動)	材料:普通、海砂、角閃岩 開始材令:7日、	配合: $W=180\text{kg/m}^3, C=360\text{kg/m}^3$ 載荷期間:700日間、 測定本数:各6本

注). 表記の他、200日間の回復クリープひずみも測定している。

3. 1 粗骨材品質の影響

天然骨材の枯渇やコンクリートの大量使用に伴い、特に西日本地域では粗骨材の大半を碎石に頼っている。しかし、その品質の良否がコンクリート構造物の耐久性や変形特性に及ぼす影響についてはあまり考慮されていないのが現状である。そこで、福岡地区の生コン工場で実際に使用されている碎石12種類(最大寸法:20mm)を用いて、その品質の違いが同一配合のコンクリートの変形特性に及ぼす影響を検討した。時間依存ひずみの測定は、各骨材に対して載荷および無載荷の供試体(φ15×30cm)各1本ずつを用い、無載荷供試体から乾燥収縮ひずみを、また、載荷供試体の全ひずみから載荷時の弾性ひずみと無載荷供試体から得られた乾燥収縮ひずみを差し引くことにより、クリープひずみを求めた。

本実験に使用した粗骨材の表乾比重は2.69~2.97、吸水率は0.29~1.25のもので、また、材令28日におけるコンクリートの平均圧縮強度は334kgf/cm²(変動係数:5.3%)であった。ただし、この程度の強度の変動は同一材料のバッチ間でも生じることから判断して、本実験の場合、粗骨材の品質が圧縮強度にはほとんど影響しなかったと考えられる。

図-3のようにコンクリートのヤング係数と粗骨材の吸水率とには負の相関が観られる。これは、一般に吸水率が小さくなるほど、骨材自体のヤング係数が大きくなるためである。ただし、各骨材の成因や造岩鉱物が相違するため、全体的な相関はあまり強くない。

図-4に測定日数400日の乾燥収縮ひずみと粗骨材の吸水率の相関を示す。両者には測定日数に関係なく正の相関が観られる。なお、粗骨材の違いによりコンクリートの乾燥収縮ひずみが2倍以上相違することに留意すべきである。一方、図-5と図-6に示すようにクリープ係数の場合は、測定日数の増加に伴って正から負の相関へ移行している。これは、吸水率が小さくなるほど、換言すれば、粗骨材のヤング係数が大きくなるほど、応力平衡化の速度が遅くなることを意

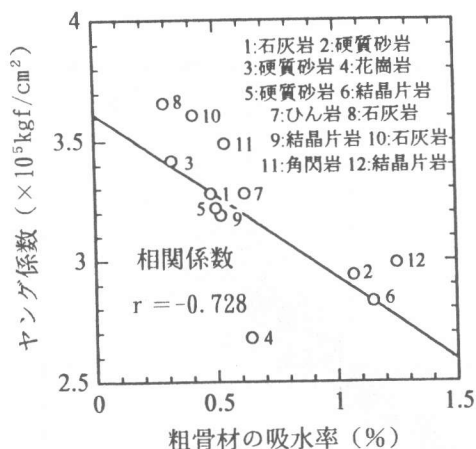


図-3 ヤング係数と吸水率の関係

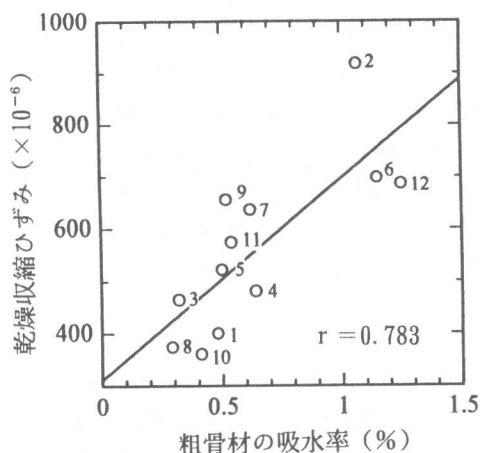


図-4 乾燥収縮ひずみと吸水率の関係

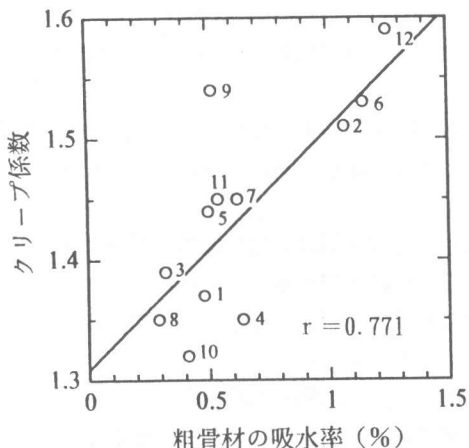


図-5 クリープ係数(50日)と吸水率の関係

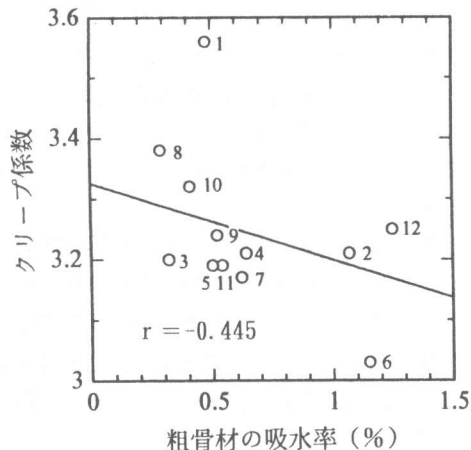


図-6 クリープ係数(400日)と吸水率の関係

味しており、特に石灰岩砕石の場合、他の骨材に比べて、载荷初期のクリープ係数は小さいが、長期のそれは逆に大きくなることに留意すべきである。

4. 実測値と予測値との関係

図-7と図-8に乾燥収縮ひずみとクリープ係数それぞれの全実測値と本予測法による予測値との関係を示す。図示するように予測値は、実測値とほぼ一致しており、一つの力学モデルの解析から求めた準理論的な予測法であるにも拘わらず、本予測法の全般的な予測精度が、既報のそれと比較しても、かなり高いことがわかる。なお、予測精度があまりよくない要因は、乾燥収縮ひずみに対する粗

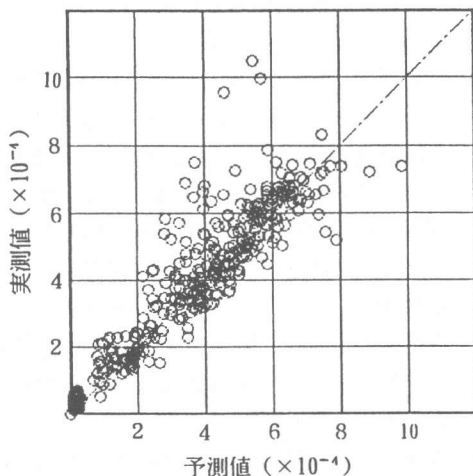


図-7 乾燥収縮の実測値と予測値の関係

骨材品質の要因とクリープ係数に対する配合の要因であり、この点に関してはまだ若干検討の余地があるように思われる。

以上の結果から、前述の時間依存ひずみの生成機構に対する著者の考え方や本予測法が汎用的な手法として十分適用できることを立証し得たものと考ええる。

5. まとめ

本論文は、コンクリートの時間依存ひずみを理論的に予測する手法を検討するため、まず、そのひずみの生成機構に対する考え方、ならびに同機構を表示するために考案した力学モデルとそれによるひずみ予測法の概要などについて述べてきた。以下、本研究の結果を要約する。

(1)．追加実験の結果から、コンクリートの乾燥収縮ひずみと粗骨材の吸水率とは正の相関が観られ、また、粗骨材の違いだけでコンクリートの乾燥収縮ひずみが2倍以上相違することがわかった。

(2)．コンクリートのクリープ係数と粗骨材の吸水率との関係は、載荷期間の増加に伴って正から負の相関へ移行する。特に石灰岩碎石の場合、それが顕著であることがわかった。

(3)．2. 1で述べた時間依存ひずみの生成機構に対する著者の考え方が妥当であること、応力平衡化回転モデルがそのひずみ機構を表示できることがわかった。

(4)．応力平衡化回転モデルによるひずみ予測法が、汎用性に優れた理論的な予測法として十分適用できることがわかった。ただし、モデル要素値の決定に関しては、今後、さらに検討すべき余地がある。

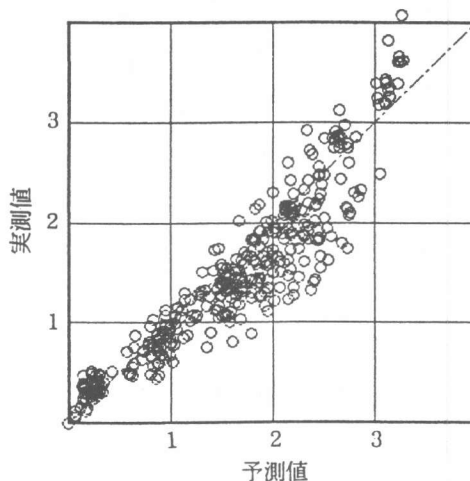


図-8 クリープ係数の実測値と予測値の関係

参考文献

- [1] Neville, A. M. Dilger, W. H. and Brooks, J. J. : Creep of Plain and Structural Concrete, Constructin Press, 1983
- [2] 宮川邦彦, 渡辺 明: 新力学モデルの提案とそれによるコンクリートの遅れ弾性現象の解析, コンクリート工学, Vol. 15, No. 4, pp. 119~125, 1977
- [3] 長滝重義, 米倉亜州夫: コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察, コンクリート工学論文, No. 82. 12, pp. 85~95, 1982
- [4] 河角 誠, 関 慎吾, 笠原 清, 栗山武雄: セメントの水和と内部水の粘性からみたコンクリートのクリープ特性, 土木学会論文報告集, No. 321, pp. 167~175, 1982
- [5] 宮川邦彦: コンクリートの乾燥収縮及びクリープの予測に関する研究, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol. 14, No. 1, pp. 579~584, 1992
- [6] 宮川邦彦: コンクリートおよび同構造物の時間依存現象に関する基礎的研究, 学位論文, 九州工業大学, 1993
- [7] 宮川邦彦, 前田隆志, 佐藤武夫: P C柱のひびわれおよび破壊性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol. 16, No. 2, pp. 599~604, 1994