

## 【論文】

## コンクリートの時間依存ひずみの予測

宮川 邦彦・佐藤 武夫

## Prediction of Time-dependent Strain in Concrete

Kunihiko Miyakawa・Takeo Sato

**Abstract:** The time-dependent properties of concrete are influenced by many experimental factors such as mix proportion of concrete, material, environmental condition and others. The purpose of this paper is to propose the adequate equations for the prediction of time-dependent strain in concrete.

As a result, the followings were obtained. The prediction of the drying shrinkage is put into the percentage of absorption of coarse aggregate. The prediction of the creep factor is divided roughly into the delay elasticity and flow.

**Keywords:** concrete, drying shrinkage, creep factor, prediction

## 1. はじめに

コンクリートは、気体、液体および固体の全てを含み、その物性がセメントの水和反応過程で時々刻々変化する分散系粒状複合体であるため、通常の使用状態下では弾性挙動を呈する一般構造用鋼材とは異なり、大きな時間依存ひずみ（収縮・クリープ）を生じる特異な構造主材料である。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に際しては、このようなコンクリート特有の物性が同構造物の耐荷力や耐久性能に及ぼす影響を解明し、その適切な設計手法を早急に確立すべきである。

ところで、コンクリートの時間依存ひずみに関しては、これまでも膨大な量の実験的研究が行われてきたが、①ひずみの生成機構が複雑で影響要因が多であること、②長期間継続する現象であること、③使用材料の物性が地域間で大幅に相違すること、④研究者間でひずみの計測法やクリープ載荷試験法が相違すること、などのために適切な予測式を確立するまでには至っていないのが現状である<sup>1),2),3)4)</sup>。

前回の報告では、当研究室で行ってきた多くの実測結果を基に、コンクリート標準示方書の予測式による予測結果と実測結果の比較・検討を行い、その問題点を指摘したが、本報告では、それらの点を改善した著者らの提案式について言及する<sup>5),6)</sup>。

## 2. コンクリート標準示方書予測式の問題点

土木学会コンクリート標準示方書の解説で推奨されている収縮およびクリープに関する予測式の問題点には、まず、多くの研究機関で計測された実測結果を基に統計処理された予測式（以下、示方書式と呼ぶ）ではあるが、研究者間でひずみの計測法やクリープの載荷試験法が異なるなど、試験方法が統一されていないため、予測式の算定に用いられた基礎データ自体に大きなばらつきが含まれている。例えば、ひずみの計測法には、ダイヤルゲージ方式、コンタクトゲージ方式、あるいは埋込み型ひずみゲージ方式など測定精度の異なる種々な方式が用いられていること、クリープ載荷試験法に関しても、導入応力度が経時変化するポストテンショニング方式による実測結果を含んでいることなどが挙げられる。

更に、コンクリート容積の4～5割を占める粗骨材の物性は、使用される地域や研究機関によって大幅に相違するが、示方書式にはその影響要因が組み込まれていないこと、通常の構造設計にはクリープ係数を用いるが、示方書式は単位応力度当りのクリープひずみの予測式で示されていること、ひずみの測定期間も大半の実測データが一年程度の短期測定結果であること、などのために示方書式の基礎データ自体に多くの不確実性が含まれている。その結果、著者らの実測結果と比較したとき、示方書式の適合性が低下する原因になっていることは明白であり、

コンクリート構造物の時間依存ひずみを適格に解明するためには、これらの点を改善した予測式を早急に検討すべきである。

3. 基礎データの概要

本報告で提案する予測式（以下、提案式と呼ぶ）の基礎データは、全て同一の試験方法で行った結果であり、以下に示すようにコンクリートの時間依存ひずみに及ぼす主要な影響要因を全て含んでいる。

表-1 に実験項目と内容の概略、表-2 に使用材料の物性値を示す。コンクリートの練混ぜには強制ミキサを用い、大半の供試体（φ15×30cm）は突き棒と木槌で締固めを行ったが、低水セメント比の高強度コンクリートには卓上バイブレータを使用した。供試体は打設1日後に脱型し、所定の期間20℃の水中養生またはシール養生を行った後、試験に供した。時間依存ひずみの試験は、載荷および無載荷供試体各1本を用い、恒温恒湿室（温度20℃、湿度40±5%および65±10%）内で行った。クリープ試験用供試体は油圧式のクリープ試験機で載荷時圧縮強度の20~30%の一定圧縮応力を持続載荷した。ただし、実測値のばらつきを検討した実験Iでは、同一バッチから載荷および無載荷供試体を各6本作製し、試験に供した。また、ひずみの測定は、供試体中央部に埋込み型ひずみ計（測定長10cm）を設置し、静ひずみ計で計測した。

表-1 実験項目一覧

実験I ばらつき	開始材齢:7日、測定期間:700日、セメント:普通 骨材:海砂、角閃岩、配合:W=180、C=360kg/m <sup>3</sup> 試験本数:載荷・無載荷各6本
実験II 粗骨材	開始材齢:7日、測定期間:800日、セメント:普通 骨材:海砂、福岡・北九州地区の粗骨材砕石12種類 配合:W=180、C=360kg/m <sup>3</sup>
実験III 配合	開始材齢:3日、7日、測定期間:1200日 セメント:普通、早強、骨材:海砂、角閃岩 配合:W=160~200、C=300~420kg/m <sup>3</sup> の各9種類
実験IV セメント	開始材齢:7日、測定期間:1200日、セメント:6種類 骨材:海砂、輝緑岩、配合:W=180、C=360kg/m <sup>3</sup>
実験V 高強度	開始材齢:7日、測定期間:1200日、セメント:早強 骨材:海砂、輝緑岩、配合:C=350~550kg/m <sup>3</sup> W/C=32%一定（高性能AE減水剤使用）
実験VI その他	養生期間・開始材齢:3~91日、部材寸法:15~40cm 角柱の乾燥収縮ひずみ、細骨材率(s/a):37~43% 高流動:セメント単体と炭カル混合（流動化剤使用）

4. 乾燥収縮ひずみの提案式

土木学会コンクリート標準示方書の乾燥収縮ひずみの予測式は、前述したように、特にコンクリート容積の4~5割を占める粗骨材の物性要因が含まれていないこと、湿度の影響を過大視していること、ひずみの進行曲線が実測のそれとは若干相違すること、などがわかった。そこで、提案式では、それらの影響要因を修正および追加した。また、示方書式に示されている高強度コンクリートに対する予測式は、普通強度のそれとは異なる曲線式を用いているが、提案式では、両強度のコンクリートに双曲線式を適用したところ、相関性が良好であった。以下に提案式の算出法について簡潔に述べる。

ひずみの曲線式は、実測した乾燥収縮ひずみの経過日数1000日後の値を基準として、双曲線式を適用した結果、その適合性が良好であることがわかった。また、各実験項目について、双曲線式の定数項を求め整理した。次に経過日数1000日後の乾燥収縮ひずみの値をその主要な影響要因である単位水量(W)、粗骨材の吸水率(Q)、相対湿度(RH)の関数として求めた結果、式-1の乾燥収縮ひずみに対する提案式が求められた。

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{sb}(t) / \{0.961(t) + 1.15(V/S)\} \dots 1$$

$$\epsilon_{sb} = 812 - 0.147(W) + 456(Q) - 7.53(RH)$$

ここに、

$\epsilon_{sh}(t)$ : 乾燥開始 t 日後の乾燥収縮ひずみ(μ)

$\epsilon_{sb}$ : 1000日後の乾燥収縮ひずみ(μ)

W: 単位水量(kg/m<sup>3</sup>)、Q: 粗骨材の吸水率(%)

RH: 相対湿度(%)、V/S: 容積表面積比(mm)

表-2 使用材料の諸物性値

セメント	普通:3.14~3.16、早強:3.12~3.14、中庸熱:3.20、 低熱:3.25、高炉B種:3.10、シリカフェーム混合:3.05
細骨材	海砂:表乾密度:2.56~2.60、吸水率:1.19~1.36 川砂:表乾密度:2.52~2.55、吸水率:1.92~3.52
粗骨材 最大寸法 20mm	石灰岩:表乾密度:2.70~2.71、吸水率:0.21~0.48
	硬質砂岩:表乾密度:2.69~2.74、吸水率:0.32~1.07
	花崗岩:表乾密度:2.69、吸水率:0.64
	ひん岩:表乾密度:2.74、吸水率:0.62
	安山岩:表乾密度:2.66~2.73、吸水率:0.69~0.75
	輝緑岩:表乾密度:2.88~2.90、吸水率:0.62~0.85
	結晶片岩:表乾密度:2.84~2.97、吸水率:0.52~1.25
	角閃岩:表乾密度:2.89~2.91、吸水率:0.51~0.80

注). 密度および表乾密度の単位:g/cm<sup>3</sup> 吸水率の単位:%

5. クリープ係数の提案式

前述したように土木学会コンクリート標準示方書の予測式は、単位応力当りのクリープひずみの予測式で示されているが、一般の構造設計ではクリープ係数が用いられること、乾燥開始材齢(t<sub>0</sub>)や相対湿度(RH)に対する影響を過大視していること、クリープひずみの進行曲線が実測のそれとは若干相違すること、などがわかった。そこで、提案式では、まず、クリープひずみをその生成機構の観点から遅れ弾性成分と流動成分に大別し、短期間で収束する遅れ弾性成分の進行曲線を指数関数で、長期間継続する流動成分のそれを双曲線で求めることにした。以下に、提案式の算出方法について簡潔に述べる。

乾燥収縮ひずみの算出方法と同様、実測したクリープ係数の経過日数1000日後の値を基準として、双曲線式で近似したところ、載荷初期を除外すれば、ほぼ適用できることがわかった。そこで、載荷初期の相違の原因が遅れ弾性成分に起因すると考え、その生成機構を勘案して指数関数式を適用した。遅れ弾性成分は実験要因で若干相違するが、実測結果からクリープ係数に換算すると、除荷後の最終値が0.3~0.4程度であるため、提案式では実験要因に関係なく、遅れ弾性成分のクリープ係数の最終値を0.4一定とした。クリープ係数に関しても乾燥収縮ひずみの章で述べたと同様な方法で、その主要な影響要因が水セメント比(W/C)、乾燥開始材齢(t<sub>0</sub>)、相対湿度(RH)であることから、式-2の提案式を求めた。

$$\phi(t, t_0) = \phi b(t) / \{ (0.960(t) + 58.4) + \phi de [1 - \text{EXP}\{-0.25(t)\}] \} \dots 2$$

$$\phi b = \{ 1.73 + 0.0528(W/C) - 0.0109(t_0) - 0.028(RH) \} - \phi de$$

ここに、

- φ(t, t<sub>0</sub>): 載荷日数 t 日後のクリープ係数
- φb: 1000日後のクリープ係数
- φde=0.40: 遅れ弾性成分の最終値
- t<sub>0</sub>: 乾燥開始材齢(日)、RH: 相対湿度(%)
- W/C: 水セメント比(%)

6. 示方書式と提案式との適合性の比較

本章では、時間依存ひずみの主な影響要因に対する示方書式と提案式との適合性について比較する。なお、以下に示す予測値と実測値との関係図では、ひずみの進行曲線の適合性が判断できるように1日、10日、50日、100日、200日、500日および測定最終日の値をプロットしており、図に示す破線上に値があるとき、予測値と実測値が一致することになる。

6. 1 粗骨材の物性について(実験II)

実験IIでは、福岡県内の主要な生コン工場で使用されている12種類の粗骨材を用いた実験を行った。

図-1に乾燥収縮ひずみに対する示方書式の予測値と実測値との関係、図-2に提案式の同関係を示す。両図から示方書式と比較して、粗骨材の吸水率を影響要因に組み込んだ提案式の適合性が大幅に改善されていることがわかる。これは、モルタルのヤング係数に比較して、粗骨材のそれが大きいため、粗骨材粒子はモルタル部で生じる収縮を拘束し、コンクリート自体の乾燥収縮ひずみを低減させる効果を有しているが、粗骨材のヤング係数と吸水率とには高い相関がみられるため、予測式に粗骨材の吸水率を組み込むことでその精度が改善されたと考えら

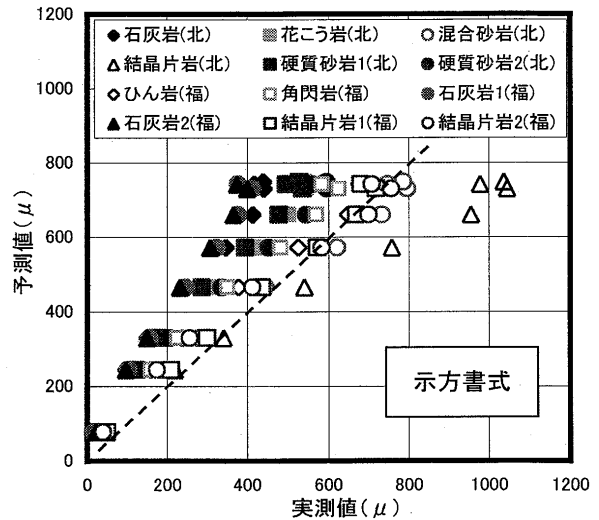


図-1 乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係

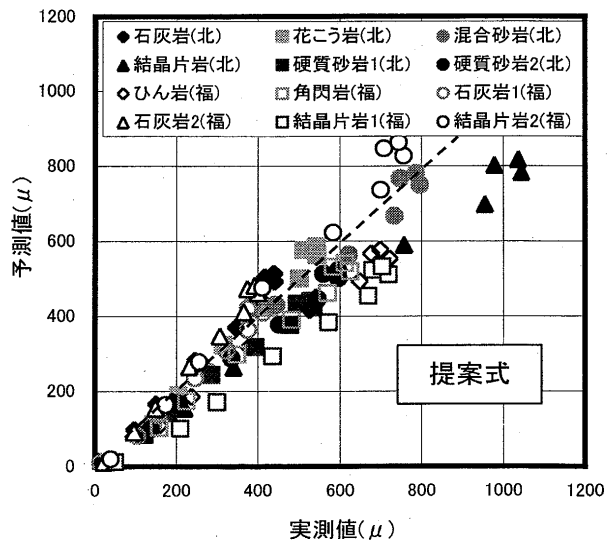


図-2 乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係

れる。なお、図中の（北）は北九州市地区、（福）は福岡市地区で使用されている粗骨材を表している。

クリープ係数に対する示方書式および提案式の予測値と実測値との関係図は、紙面の関係で割愛するが、示方書式に比較して、提案式では粗骨材間での値のばらつきを改善することができた。ただし、両予測式共、長期のクリープ係数を若干過小予測している。この原因は、各実験項目で実施年度が相違するため、使用したセメントや細骨材の物性がこの実験項目で用いたものと若干相違していたことに起因していると考えられる。

6. 2 配合要因について (実験 III)

実験 III では、普通および早強ポルトランドセメントを用い、単位水量 (W) を 160、180 および 200 kg/m<sup>3</sup>、単位セメント量 (C) を 300、360 および 420 kg/m<sup>3</sup> に変えた配合要因に対する実験を行った。

乾燥収縮ひずみに対する示方書式および提案式の予測値と実測値との関係図は、紙面の関係で割愛するが、示方書式に比較して、提案式はひずみの進行曲線や単位水量などで若干改善された。

クリープ係数に対する示方書式および提案式の予測値と実測値との関係図も、紙面の関係で割愛するが、示方書式に比較して、提案式は配合間での値のばらつきが大幅に改善された。これは、示方書式が単位水量や水セメント比の影響を過大視しており、提案式ではそれらの影響を修正したためである。

6. 3 セメントの種類について (実験 IV)

実験 IV では、セメントの種類として、普通、早強、中庸熱および低熱ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、普通ポルトランドセメントの 1 割をシリカフェームに置換えたセメントの計 6 種類を用い、相対湿度 40% および 65% の環境下で実験を行った。

図-3 に乾燥収縮ひずみに対する示方書式の予測値と実測値との関係、図-4 に提案式の同関係を示す。両図から示方書式に比較して、提案式は相対湿度やひずみの進行曲線の影響要因を修正したことにより若干改善された。なお、セメントの種類が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は無視できるようである。

図-5 にクリープ係数に対する示方書式の予測値と実測値との関係、図-6 に提案式の同関係を示す。両図から示方書式に比較して、提案式はセメント間での値のばらつきが大幅に改善されていることがわかる。これは、示方書式が単位応力当りのクリープひずみの予測式で示されているため、セメントの種類でコンクリートのヤング係数が大幅に相違す

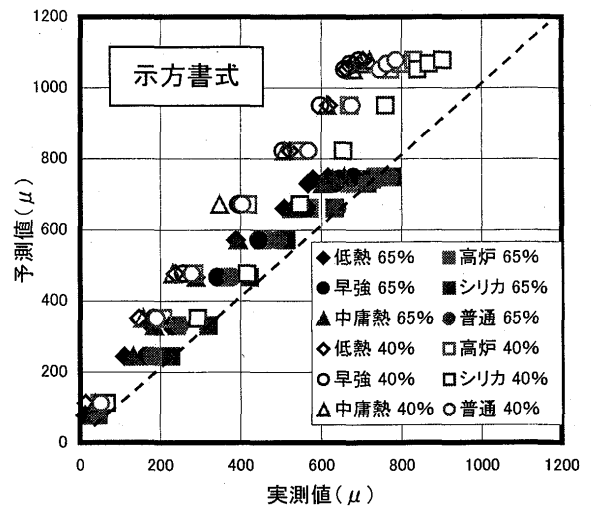


図-3 乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係

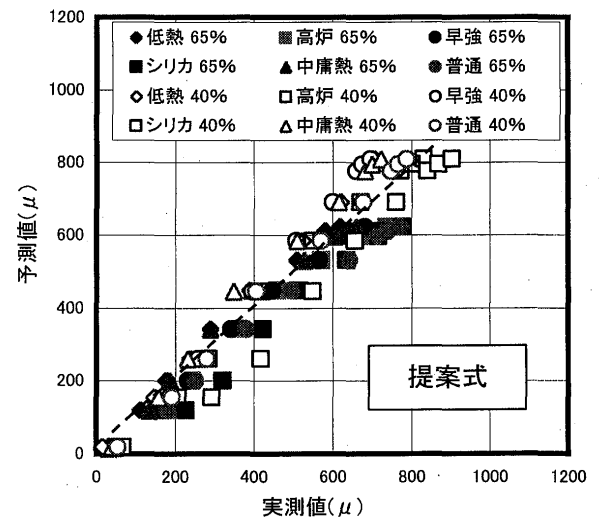


図-4 乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係

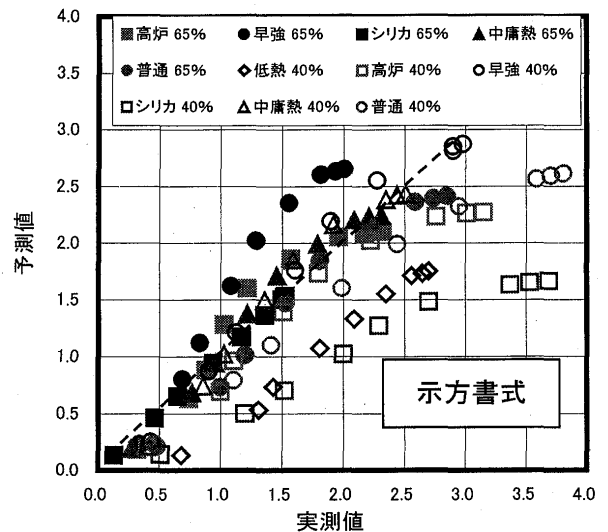


図-5 クリープ係数の予測値と実測値の関係

ることを考慮できないことに起因している。

6. 4 部材寸法について (実験VI)

実験VIの一要因として、乾燥収縮ひずみに及ぼす部材寸法の影響に関する実験を行った。

図-7に乾燥収縮ひずみに対する示方書式の予測値と実測値との関係、図-8に提案式の関係を示す。両図から示方書式に比較して、提案式は部材寸法の影響要因を適切に予測できることがわかる。ただし、本実験で測定した最大の部材寸法は40cm角柱であり、今後、実部材に近い部材寸法の実験を実施し、提案式の適合性を検討すべきである。

6. 5 全ての実験項目について

表-1に示す著者らが行った全ての実測結果と示方書式および提案式による予測結果との関係を図-9から図-12に示す。

図-9に乾燥収縮ひずみに対する示方書式の予測値と実測値との関係、図-10に提案式の関係を示す。両図から示方書式に比較して、提案式は著者らが実測した全ての影響要因に対して、適切に予測できることがわかる。なお、提案式の予測値と実測値とにも若干のばらつきがみられるが、これは、実験Iで行った同一バッチから作製した6本の供試体間でも3%強のばらつきがみられることから判断すると、分散系粒状複合体であるコンクリート自体の諸物性のばらつきに起因するものと考えられる。

図-11にクリープ係数に対する示方書式の予測値と実測値との関係、図-12に提案式の関係を示す。両図から示方書式に比較して、提案式は全ての影響要因を適切に予測できることがわかる。なお、乾燥収縮ひずみの適合性に比較して、クリープ係数の場合、提案式でも予測値と実測値とに大きなばらつきがみられる。これは、クリープ係数には荷重および無荷重供試体2本の測定値のばらつきが影響するためであり、因みに実験Iで行った同一バッチから作製した6本の供試体間でも、クリープ係数のばらつきは8%強と乾燥収縮ひずみのその2倍以上である。したがって、コンクリート構造物に及ぼすクリープの影響を設計する場合は、クリープ係数のばらつきを適切に判断して、設計すべきであろう。

7. まとめ

本研究では、当研究室で行ってきたコンクリートの時間依存ひずみに関する多くの実測結果を基に、乾燥収縮ひずみとクリープ係数に対する提案式を示したが、以下に、本研究の結果を要約する。

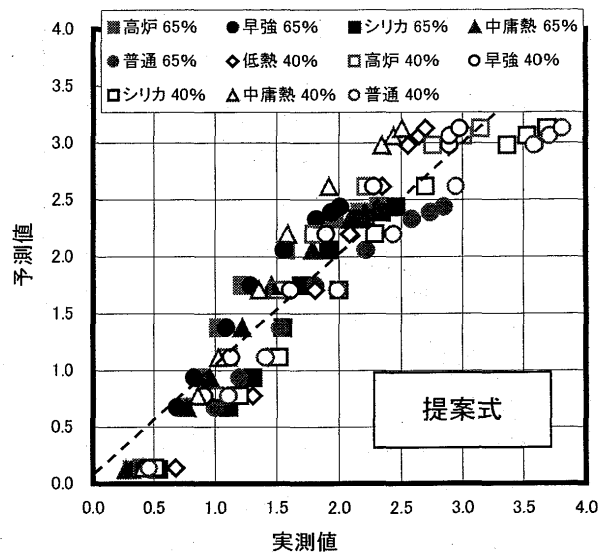


図-6 クリープ係数の予測値と実測値の関係

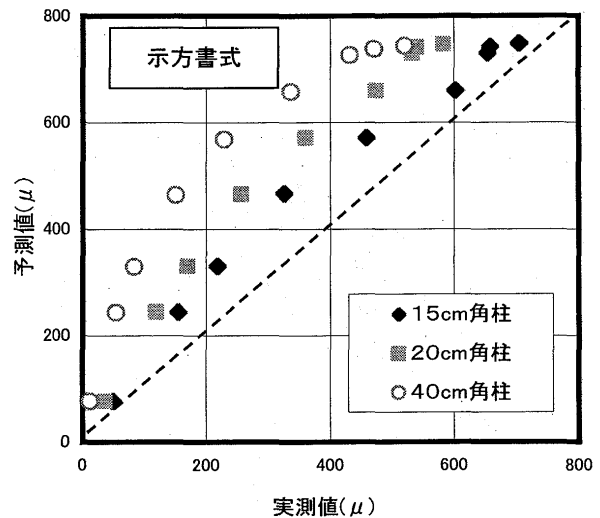


図-7 乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係

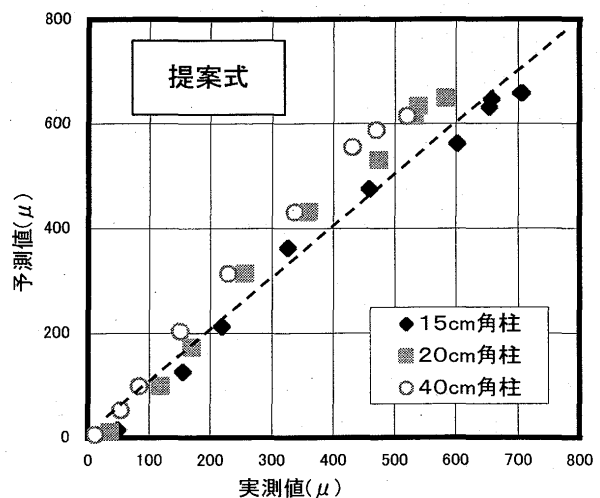


図-8 乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係

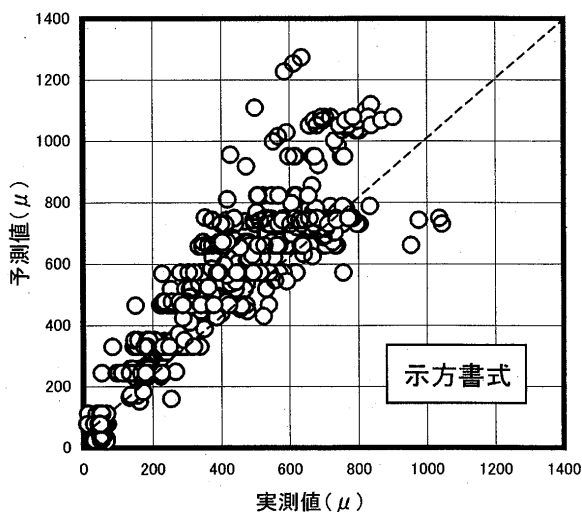


図-9 乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係

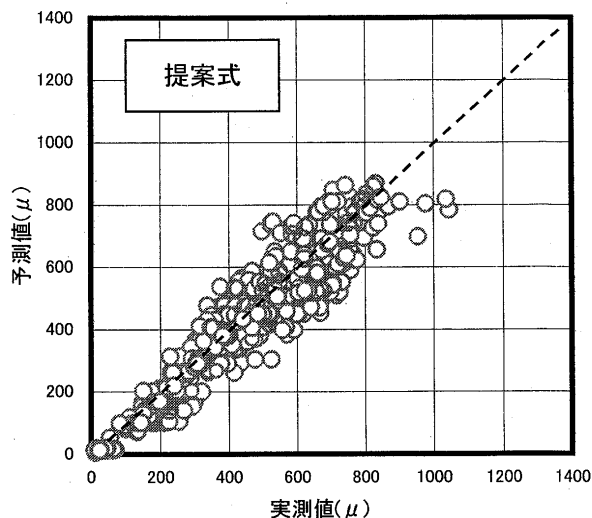


図-10 乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係

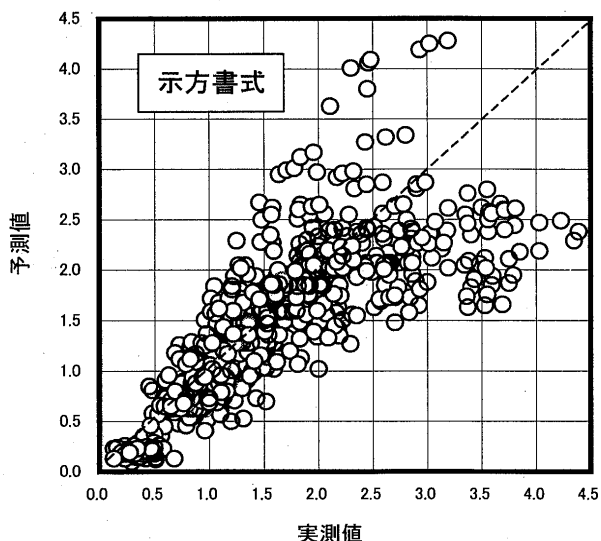


図-11 クリープ係数の予測値と実測値の関係

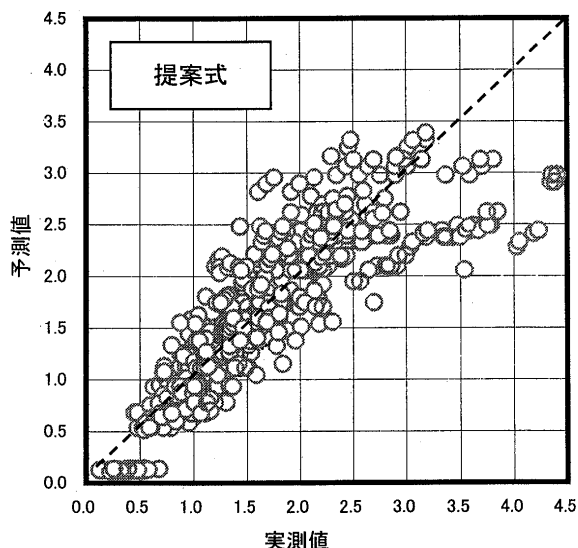


図-12 クリープ係数の予測値と実測値の関係

(1). 乾燥収縮ひずみの予測式に粗骨材の吸水率の影響要因を組み込み、更に相対湿度や単位水量などに対する影響要因を修正することにより、提案式の予測精度は、示方書式と比較して、大幅に改善できることがわかった。

(2). 圧縮強度が20~80 N/mm<sup>2</sup>程度までの乾燥収縮ひずみは、その進行曲線を双曲線で近似できることがわかった。

(3). クリープ係数の予測値は、クリープひずみの生成機構を考慮して、遅れ弾性成分と流動成分とに大別して算定すること、相対湿度や水セメント比などの影響要因を修正することにより、提案式の予測精度は、示方書式と比較して、大幅に改善できることがわかった。

参考文献

- 1). Neville, A.M and Dilger, W.H : Creep of Concrete, Plain, Reinforced and Prestressed. North-Holland, 1970
- 2). 村田二郎, 岡田清 : 最新コンクリート技術選書 1, 山海堂, 1979
- 3). A.M.ネビル著, 後藤幸正, 尾坂芳夫訳 : ネビルのコンクリートの特性, 技報堂, 1979
- 4). 三浦尚 : ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版, 2004
- 5). コンクリート標準示方書(構造性能照査編), 土木学会, 2002, pp. 30~37
- 6). 宮崎達也, 佐藤武夫, 宮川邦彦 : コンクリートの時間依存ひずみに関する研究, 九州産業大学工学部研究報告 第42号, 2005, pp. 221~226