

【論文】

コンクリートの時間依存ひずみの予測に関する研究

宮崎 達也・佐藤 武夫・宮川 邦彦

Study on Prediction of Time-dependent Strain in Concrete

Tatsuya Miyazaki · Takeo Sato · Kunihiko Miyakawa

Abstract: The time-dependent properties of concrete are affected with many experimental factors such as mix proportion, material, environment and others. This paper is concerned with the study carried out in order to make clear the relationship between the measurement values and the predicted values by the drying shrinkage strain and the creep factor in concrete.

As a result, the following conclusions were obtained. The difference is seen by the measurement curve and the predicted curve. The predicted value excessively predicts the drying shrinkage strain, and predicts the creep factor underestimating.

Keywords: concrete, drying shrinkage, creep factor, prediction

1. はじめに

コンクリートは、骨材粒子を結合材で一体化した分散系の複合材料であり、広義には、アスファルトコンクリートやレジンコンクリートもこの範疇に含まれる。ただし、通常はセメントコンクリートを単にコンクリートと呼ぶことが多い。ところで、コンクリートは、固体、液体および気体の全てを含み、しかも、その物性がセメントの水和反応過程で大幅に経時変化するだけでなく、通常の使用状態下でも大きな時間依存ひずみ（収縮・クリープ）を生じる特異な材料である。したがって、鋼材で補強された鉄筋コンクリート構造物やプレストレストコンクリート構造物を設計・施工する際には、このようなコンクリート特有の物性が構造物の耐荷力や耐久性に及ぼす影響を適切に検討しておかねばならない。

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、その生成機構が複雑で影響要因が多いこと、長期間継続する現象であること、使用材料、特に骨材の物性が原料である岩石の種類で大幅に相違することなどのため、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^{1),2),3)}。

本報告では、これまでに当研究室で行ってきた多くの実測結果を基に、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の予測式による予測結果と実測結果の比較を行った。以下、主な実験項目の予測値と実測値の関係、予測式の問題点や改善点について述べる^{4),5)}。

2. 実験概要

表-1に実験項目と内容の概略を、表-2に使用材料の特性値を示す。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たが、一部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に試験に供した。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には油圧式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。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）を設置して、静ひずみ計で計測した。

なお、コンクリート標準示方書のクリープ予測式は、単位応力当りのクリープひずみ予測式であるが、通常の構造設計ではクリープひずみを載荷時の弾性ひずみで除したクリープ係数を用いることが多いた

* 工学研究科土木工学専攻

め、本報告では、実測した弾性係数を用いて、単位力当りのクリープひずみをクリープ係数に換算し、予測値と実測値の比較を行った。また、高強度コンクリートと高流動コンクリートの予測値と実測値の比較には、同解説に示されている高強度コンクリートに対する予測式を適用した。

3. 各実験項目の予測値と実測値の関係

実験Ⅰの乾燥収縮ひずみのばらつきに関する予測値と実測値の関係を図-1に、クリープ係数のそれを図-2に示す。700日後にける実測した乾燥収縮ひずみの変動係数が3%であるのに対し、クリープ係数のそれは8%と大きくなっている。これは、クリープ係数の場合、載荷と無載荷供試体それぞれのひずみのばらつきが累加されるためである。なお、バッチ間でも大きな変動を生じることから判断して、本実験の載荷および無載荷供試体各1本を用いて行った実験Ⅱから実験Ⅵのクリープ係数の実測値にも大きなばらつきを生じていることが予想される。

図-1に示す乾燥収縮ひずみの予測値は、実測値と比較して、乾燥開始初期に過大予測し、長期的には過小予測する傾向がみられる。このことから、予測式のひずみの進行曲線式自体が実測値のそれとは若干相違すると思われる。また、図-2のクリープ係数の予測値は、載荷初期に過小予測し、測定日数50日から200日程度ではほぼ妥当であるが、長期的には過小予測しており、乾燥収縮ひずみと同様に、

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 ³ 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 ³
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 ³ 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 ³
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 ³ 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)

表-2 使用材料の諸特性値

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/cm³ 吸水率の単位:%

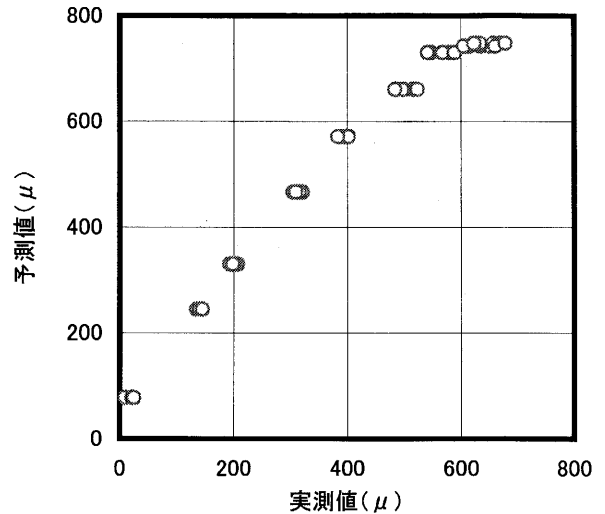


図-1 予測値と実測値の関係

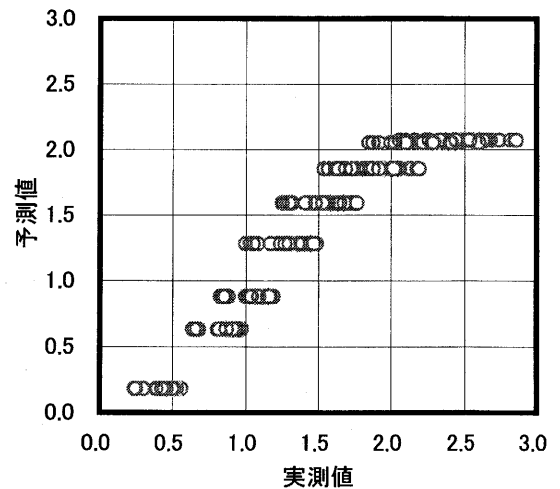


図-2 予測値と実測値の関係

進行曲線式自体が実測値のそれと若干相違することがわかる。なお、比較図では、進行曲線の形状の良否が判断できるように、測定日数1日、10日、20日、50日、100日、200日、500日および700日に対する予測値と実測値の関係をプロットしている。

実験Ⅱでは、粗骨材の物性が乾燥収縮ひずみとクリープ係数に及ぼす影響を調べるため、福岡・北九州地区の生コン工場で使用されている粗骨材碎石12種類を用いた実験を行った。乾燥収縮ひずみとクリープ係数の予測値と実測値の関係をそれぞれ図-3と図-4に示す。図-3のように乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係は、粗骨材の岩種で大幅に相違することがわかる。この原因は、800日後の乾燥収縮ひずみの実測値が使用した粗骨材で400~1050 μ も相違するのに対し、予測式には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組み込まれていないことに起因している。ちなみに、図-5に示す800日後の乾燥収縮ひずみと粗骨材の吸水率の関係には強い正の相関がみられることから、予測式に同要因を組み込むことにより、その予測精度を改善できると考えられる。図-4に示すようにクリープ係数の予測値と実測値の関係は、測定日数が長くなるほど、全ての粗骨材で過小予測していることがわかる。ただし、予測値と実測値のばらつきは、乾燥収縮ひずみのそれより小さくなっている。これは、クリープ係数がクリープひずみを乗荷時の弾性ひずみで除した値であるため、両ひずみに粗骨材の吸水率が影響を及ぼし、その結果、紙面の関係で比較図は割愛するが、クリープ係数と粗骨材の吸水率には殆ど相関がみられないことに関連している。

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て、時間依存ひずみに及ぼす配合の影響を調べた。図-6に乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係を示す。同図から普通ポルトランドセメントの場合、若干過大予測している程度で、ひずみの進行曲線も妥当である。一方、早強ポルトランドセメントの場合、実験Ⅰでも述べたように、初期の乾燥収縮ひずみを過大予測すると共に、ひずみの進行曲線も実測値のそれとは相違しており、長期の乾燥収縮ひずみを過小予測する傾向がみられる。図-7に示すクリープ係数の予測値と実測値の関係は、配合間で大きなばらつきがみられるが、これは、実験Ⅰでも述べたように、クリープ係数の場合、実測値自体に大きなばらつきを生じることが予想されるため予測式の妥当性を判断するには更に多くの実測値との比較を行い、検討すべきであろう。なお、実測したクリープ係数のばらつきは、本実験に使用したク

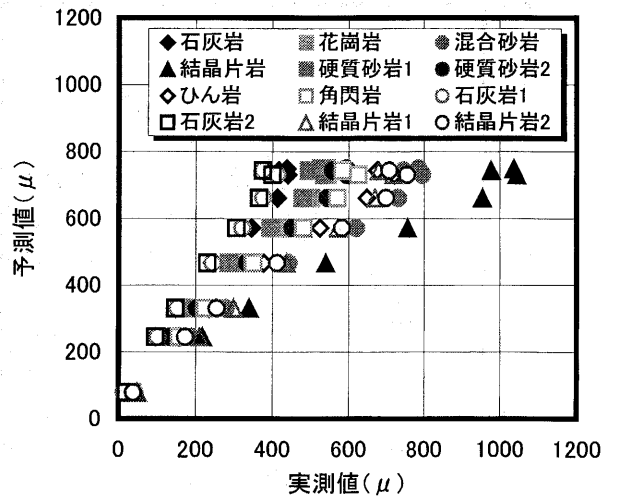


図-3 予測値と実測値の関係

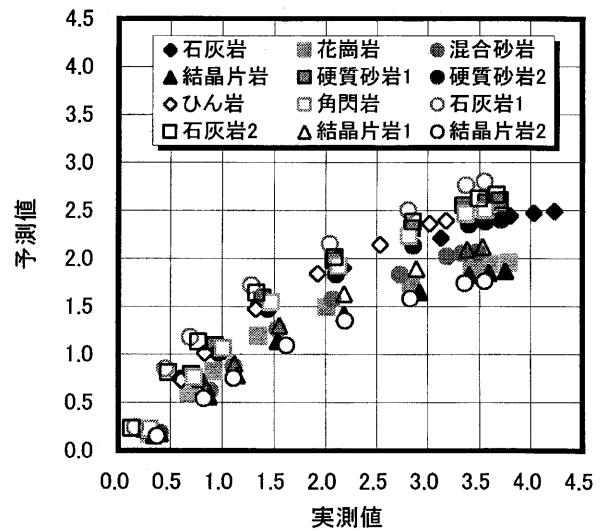


図-4 予測値と実測値の関係

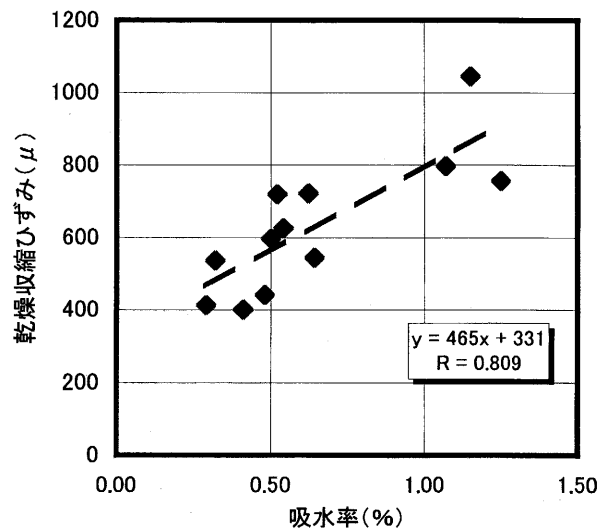


図-5 乾燥収縮ひずみと吸水率の関係

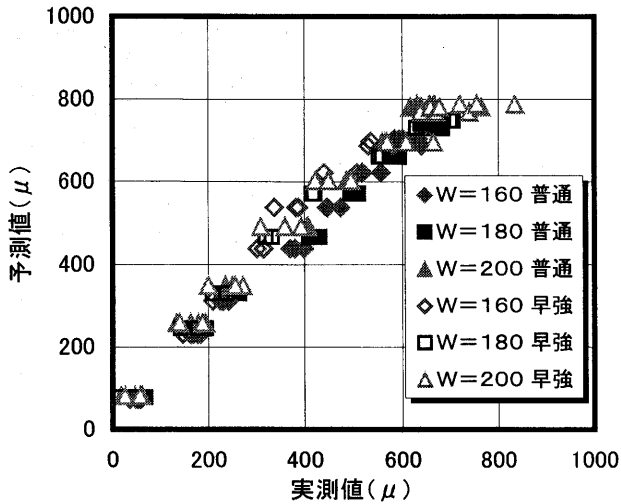


図-6 予測値と実測値の関係

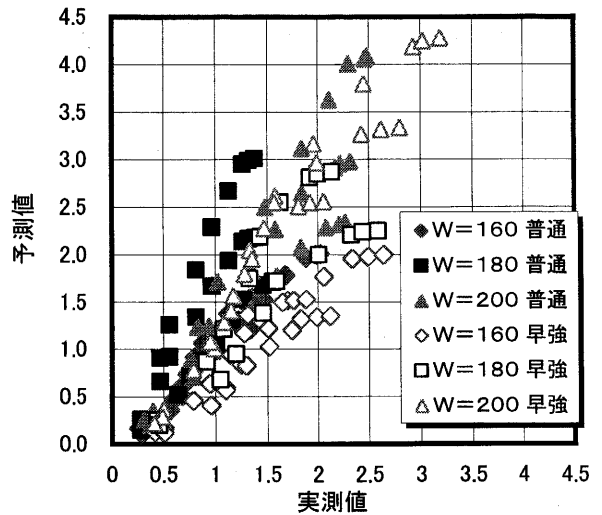


図-7 予測値と実測値の関係

リープ試験機が油圧を手動により一定圧に調整するタイプの装置であるため、測定期間中に圧力が若干変動することも、一因であると思われる。

実験Ⅳでは、セメントに普通、早強、中庸熱、低熱の各ポルトランドセメント、高炉セメントB種および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（以下、シリカフェームセメントと呼ぶ）の計6種類を用いて、セメントの種類がコンクリートの時間依存ひずみに及ぼす影響を調べた。図-8に示す乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係からわかるように、セメントの種類で予測値と実測値にばらつきがみられる。全体的には湿度65%（中抜き記号）の場合、予測値と実測値はほぼ一致しており、妥当な予測であると考えられる。しかし、湿度40%（塗潰し記号）の場合、全体的に過大予測している。なお、両湿度条件共、超微粒子のシリカフェームを混合したシリカフェームセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみが他のセメントを用いたそれらより若干大きくなっている。ただし、他のセメントの乾燥収縮ひずみは、湿度条件で大小関係が相違すること、1200日後の乾燥収縮ひずみがセメントの種類で200 μ 程度しか相違しないこと、実測値自体にもばらつきがあることを考慮すると、セメントの種類が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は、実験Ⅱで述べた粗骨材の影響度と比較して、無視できるものと考えられる。図-9に示すクリープ係数の予測値と実測値の関係は、全セメント共、載荷初期に過小予測し、測定日数が長期になるほど更に過小予測する傾向がみられ、予測値の進行曲線が実測値のそれと相違することがわかる。また、湿度65%（中抜き記号）の場合、全体的に過大予測し、

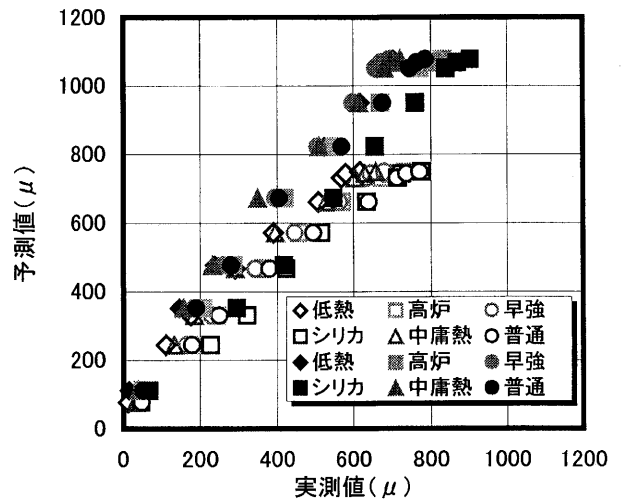


図-8 予測値と実測値の関係

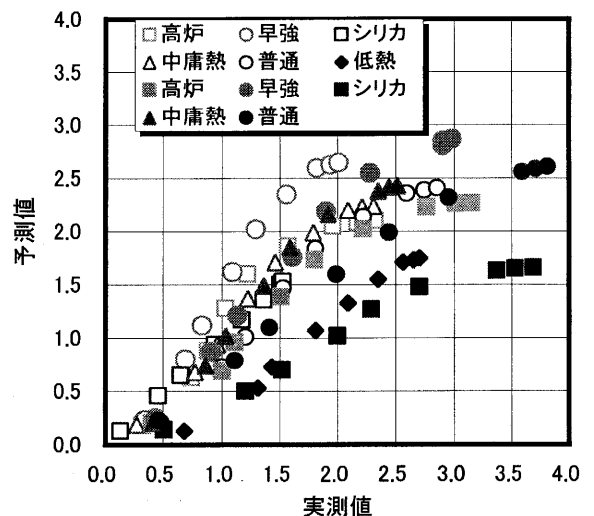


図-9 予測値と実測値の関係

湿度40%（塗潰し記号）の場合は、全体的に過小予測している。これは、各セメントの水和速度が湿度条件で大幅に相違するためと考えられる。

実験Vでは、構造物の大型化や長大化に伴って施工実績が増加しつつある、圧縮強度80N/mm²程度の高強度コンクリートに関する実験を行った。なお、通常のコンクリートの水セメント比(40~65%程度)と比較して、高強度コンクリートの場合、高性能減水剤または高性能AE減水剤を用い、水セメント比を25~35%程度まで低減する結果、フレッシュコンクリートのワーカビリティや硬化コンクリートの強度発現状態が大幅に相違するため、土木学会コンクリート標準示方書でも高強度コンクリートに対する予測式を別に規定している。図-10に示す乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係は、全体的に過大予測しているが、ひずみの進行曲線はほぼ妥当である。ただし、湿度が低いほど、また、単位セメント量が多くなるほど、過大予測する傾向がみられる。なお、図中のHは高強度、35~55は単位セメント量が350~550 kg/m³であること、65と40は湿度(%)を表している。図-11にクリープ係数の予測値と実測値の関係を示す。同図から載荷初期の値を若干過小予測するが、クリープ係数の実測値自体のばらつきを考慮すれば、全体的には妥当な予測であると考えられる。なお、図中の記号は図-10と同じである。

実験VIでは、コンクリートの時間依存現象に影響を及ぼすその他の要因について、予測値と実測値の関係を調べた。養生期間および乾燥開始材齢の違いによる乾燥収縮ひずみの予測値と実測値の関係は、定量的には若干過大予測しているが、定性的には妥当な予測である。なお、関係図は紙面の関係で割愛する。図-12に示すようにクリープ係数の予測値と実測値の関係は、乾燥開始材齢が7日一定の場合、ほぼ妥当な予測であるが、載荷開始材齢まで水中養生した場合（塗潰し記号）は、材齢が遅くなるほど、過小予測することがわかる。次に部材寸法が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は、図-13に示すように部材寸法が大きくなるほど、過大予測し、そのひずみの進行曲線も実測値とは大幅に相違している。細骨材率の影響に関しては、吸水率が大きい、低品質の川砂を用いて行った本実験の実測結果自体でもあまり差がないことから、その影響は、示方書の予測式と同様、無視できると考えられる。ただし、予測値は、本実験結果と比較して、乾燥収縮ひずみを若干過大予測し、クリープ係数を過小予測している。高流動コンクリートに関する実験では、結合材として普通ポルトランドセメントだけを用いた配合と、打設時

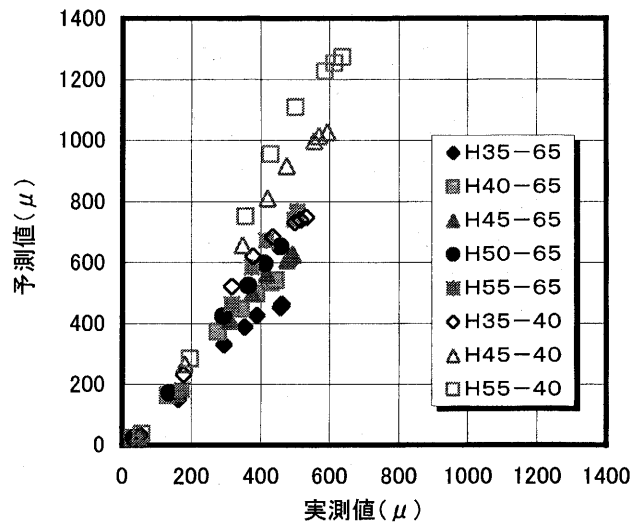


図-10 予測値と実測値の関係

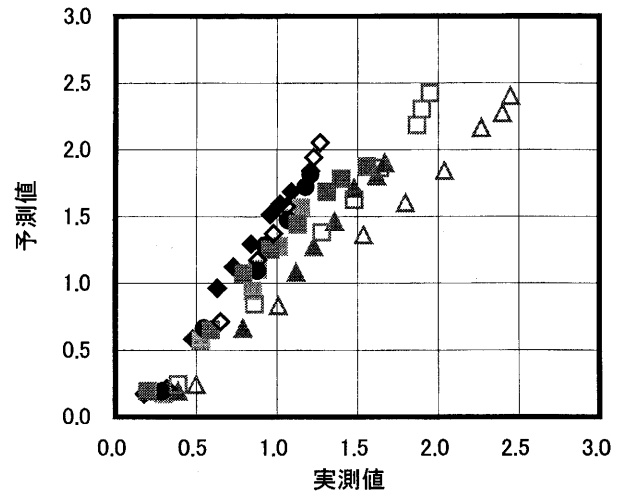


図-11 予測値と実測値の関係

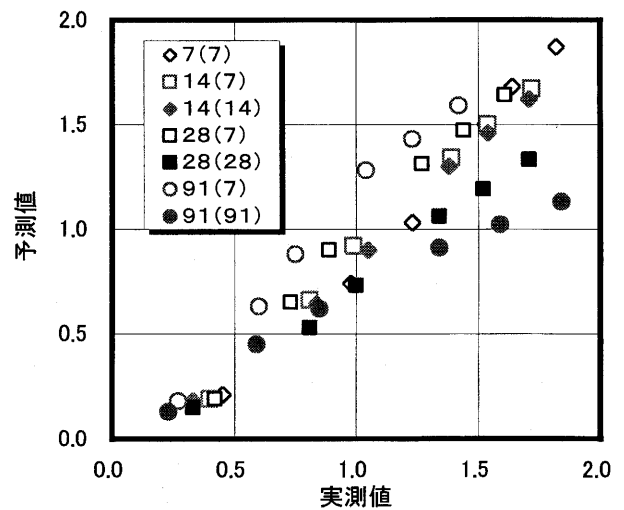


図-12 予測値と実測値の関係

の水和熱の影響を考慮して、セメントの約30%を炭酸カルシウム微粉末に置換えた配合について、予測値と実測値の関係を調べた結果、結合材にセメントだけを使用したコンクリートの実測値は、高強度コンクリートに対する予測式と、また、炭酸カルシウムを混合したコンクリートの実測値は、普通強度のコンクリートに対する予測式との適合が良好であることがわかった。なお、紙面の関係上、予測値と実測値の関係図は割愛する。

図-14と図-15に実験 I から実験 VI までの全ての予測値と実測値の関係を示す。図-14から乾燥収縮ひずみの場合、全体的に過大予測すること、また、図-15からクリープ係数の場合、実験項目で予測値と実測値の関係が相違し、全体的な予測精度は良好であるとは言えない。

3. 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と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予測式との関係について比較検討を行った。以下に、その主な結論を要約する。

- (1). 標準示方書に示されている予測式の進行曲線式と実測曲線には、若干の相違がみられる。
- (2). 予測値は、乾燥収縮ひずみを全体的に過大予測し、クリープ係数を過小予測する。
- (3). 乾燥収縮ひずみの予測式に粗骨材の吸水率を考慮すれば、その精度を改善できる。
- (4). 高強度コンクリートに対する予測式は、普通強度のコンクリートに対する予測式と比較して、ひずみの進行曲線の適合性や予測精度が高い。

最後に、卒業研究として当研究に携わり、多くの貴重な実測データを残して頂いた先輩諸氏に感謝の意を表します。

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). 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
- 5). 昭和59年度~平成16年度までの卒業研究論文 : コンクリートの時間依存ひずみに関する基礎的研究

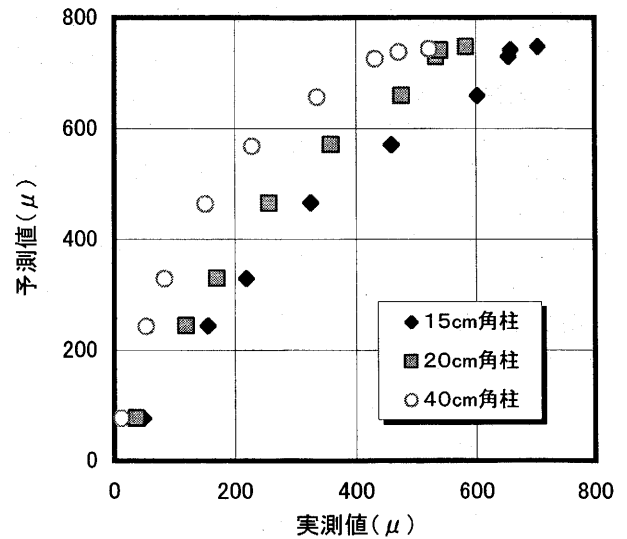


図-13 予測値と実測値の関係

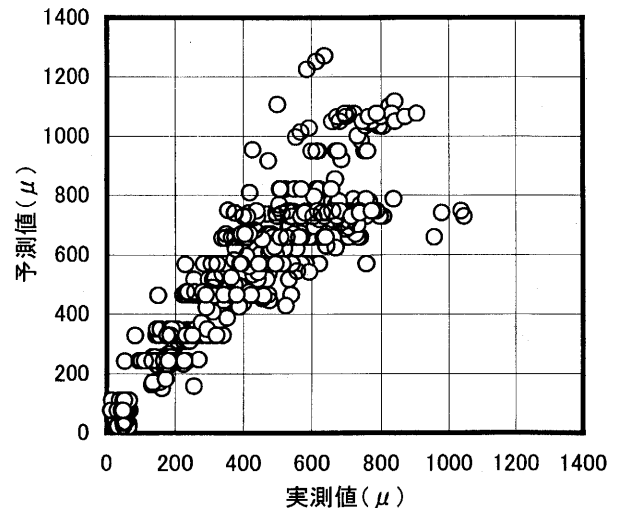


図-14 予測値と実測値の関係

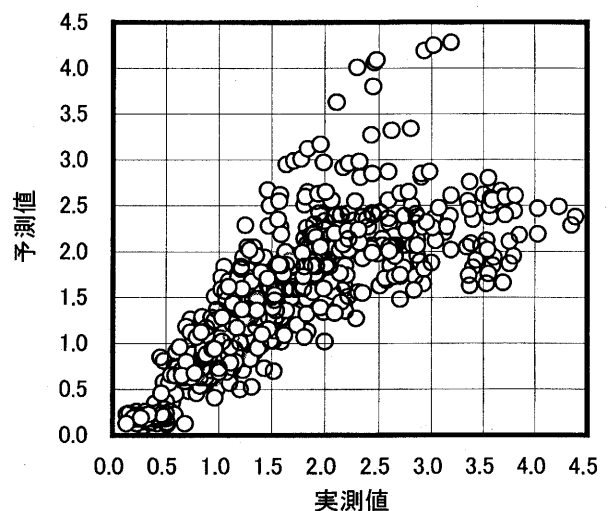


図-15 予測値と実測値の関係