

【論文】

高強度コンクリートの時間依存特性に関する基礎的研究

宮崎 達也^{*1}・佐藤 武夫^{*2}・宮川 邦彦^{*2}

Fundamental Study on Time-Dependent Characteristic of High-Strength Concrete

Tatuya MIYAZAKI, Takeo SATO, Kunihiko MIYAKAWA

Abstract : As a result of a long-term experiment concerning the time-dependent characteristic of the high-strength concrete that uses the air entraining and high range water reducing agent, this research is summary.

The following results were obtained from this research. 1) The drying shrinkage strain of concrete increases as the amount of the unit cement increased. 2) The creep coefficient is not proportional to the amount of the unit cement.

Key Words : high-strength concrete, shrinkage, creep, high range water reducing agent

1. はじめに

近年、土木構造物の大型化や長大化に伴い、高強度コンクリートに関する研究が急速に進んでいる。平成 14 年度制定の土木学会「コンクリート標準示方書（構造性能照査編）」では、コンクリートの設計基準強度を従前の 60N/mm^2 から 80N/mm^2 まで適用できるように改定された。しかしながら、高強度コンクリートの基礎的諸物性、特に現象の究明に長期間を要する時間依存特性（収縮およびクリープ）に関しては、未だ十分に解明されていないのが現状である¹⁾。

ところで、コンクリートは気体、液体および固体の全てを含み、しかも、その物性が結合材であるセメントの水和反応過程で時々刻々変化する不均質な粒状複合体であり、通常の使用限界状態下でも鋼材にはみ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、このような鋼材とコンクリートの材料物性面の違いに起因する構造体内部における時系列現象を適確に把握

しておくことが同構造物の高性能化や高耐久性化を実現するための重要な課題となっている^{2), 3)}。

さて、コンクリートの高強度化はセメント微粒子の分散効果を高めることができる界面活性剤の開発に依存しており、最近ではナフタレン系、ポリカルボンサン系、メラミン系、アミノスルホンサン系など主成分の異なる高性能 A E 減水剤が実用化され、日本工業規格でも「コンクリート用化学混和剤」の一つとして高性能 A E 減水剤が規定され、その性能基準が定められた。このような高性能 A E 減水剤を用いたコンクリートの出現は、コンクリートの高強度化だけではなく、施工性の改善を目的とした高流動コンクリートの開発も可能にした。しかし、高強度化を目的とした高性能 A E 減水剤の使用は、セメントの水和反応に必要な水量以下の配合に適用されることが多く、従前のコンクリートにはみられなかった、早期のひび割れ発生原因につながる自己収縮ひずみの発現をもたらす結果になった。一方、高流動化を目的とした高性能 A E 減水剤の使用は、施工時における材料分離や急速施工に伴う水和熱による初期ひび割れ発生等を引起す原因にもなっており、

*1 博士前期課程 土木工学専攻

*2 都市基盤デザイン工学科

これらの問題点についても、現在、多くの研究が行われている⁴⁾。

本研究は、ポリカルボンサン系の高性能AE減水剤を用いた高強度コンクリートの諸物性のうち、特に時間依存ひずみの生成機構や予測法を確立するための一環として行った、クリープおよび収縮ひずみの長期測定結果をまとめたものである。

2. 実験概要

本実験では、早強ポルトランドセメントを用い、単位セメント量を 350kg/m^3 、 400kg/m^3 、 450kg/m^3 、 500kg/m^3 、 550kg/m^3 と変えた、水セメント比を 32%、高性能AE減水剤を各単位セメント量の 0.8%一定とした配合条件の高強度コンクリートを用いた。なお、配合記号H35、H45 およびH55 のコンクリートは、平成 13 年 11 月に、H40 とH50 のそれは、平成 15 年 8 月に打設した。使用した材料の密度は、早強ポルトランドセメントが 3.12g/ml 、細骨材（玄海産海砂）が 2.60g/ml 、粗骨材（輝緑岩碎石最大寸法 20mm）が $2.90\sim 2.92\text{g/ml}$ 、細骨材の吸水率は、H35、H45 およびH55 が 1.14%、H40 とH50 が 0.78%、粗骨材の吸水率は、H35、H45 およびH55 が 0.56%、H40 とH50 が 0.16%と、コンクリートの打設年度で若干相違した。

時間依存ひずみ（乾燥収縮およびクリープ）の測定用供試体には $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 円柱供試体、圧縮強度およびヤング係数試験用には $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を用いた。時間依存ひずみの測定用供試体は、打設 1 日後に脱型し、6 日間水中養生（温度 20°C ）を行った後、材齢 7 日から湿度条件の異なる二つの恒温実験室（温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $65\% \pm 10\%$ と $40 \pm 1\%$ ）内に設置し、写真-1 に示す油圧ジャッキ式クリープ試験装置を用いて一定応力状態（載荷時強度の 20%程度）下における全ひずみを、また、無載荷状態下における乾燥収縮ひずみを各 1 本測定した。時間依存ひずみの測定には、供試体中心部に埋設した埋込み型ひずみゲージを用いた。なお、H35、H45 およびH55 の供試体は載荷日数 1000 日間で除荷して回復クリープを測定継続中で、H40 とH50 のそれは、湿度 65%の恒温実験室内で載荷日数 400 日間まで測定を完了している。同時に作製した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を用いて、材齢 7 日、28 日、91 日、1 年および 3 年の水中養生を継続した供試体、材齢 7 日から湿度条件の異なる二つの恒温実験室内に移し、空气中養生した供試体の圧縮強度とヤング

係数も測定した。

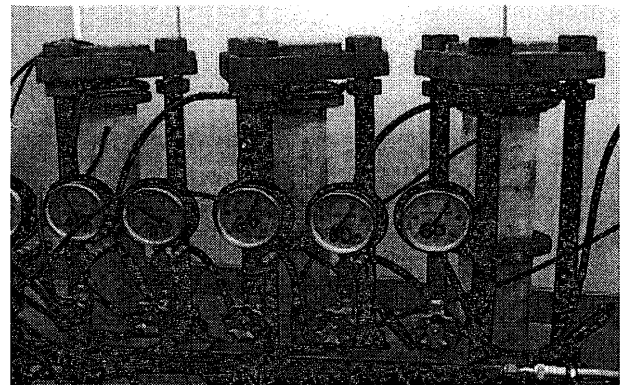


写真-1 クリープ試験装置

表-1 コンクリートの示方配合 (kg/m^3)

配合記号	s/a	W	C	S	G	混和剤
H35	40	112	350	765	1280	2.8
H40	40	128	400	753	1268	4.0
H45	39	144	450	681	1188	3.6
H50	39	160	500	669	1176	4.0
H55	38	172	550	600	1093	4.4

注)単位水量に高性能AE減水剤を含む

表-2 フレッシュコンクリートの実測値

配合記号	材料温度 ($^\circ\text{C}$)	スランプ (cm)	空気量 (%)
H35	18	1.0	2.8
H40	31	3.0	2.6
H45	28	8.5	2.8
H50	31	16.0	2.2
H55	18	22.0	2.3

3. 実験結果および考察

表-1 にコンクリートの示方配合を示す。なお、高性能AE減水剤は、その使用量が通常の混和剤と比較して多量であるため、単位水量の一部として加算している。表-2 にフレッシュコンクリートの特性値を、図-1 にスランプと配合との関係を示す。同図からわかるように、スランプは単位セメント量の増加に伴い急増しているが、これは、本実験の場合、高性能AE減水剤を単位セメント量の 0.8%一定としたためであり、各配合のセメントペースト自体の流動性は同一であるが、単位セメント量の増加に伴い、骨材粒子を取り巻くペースト厚さ、すなわ

ち、余剰ペースト量が増加するため、スランプが大幅に増大したものと考えられる。

表-3にコンクリートの圧縮強度、表-4にヤング係数の試験結果を、図-2に材齢28日の圧縮強度と配合との関係、図-3に材齢3年の同結果を示す。図-2から材齢28日の圧縮強度は80N/mm²程度であるが、単位セメント量の増加に伴い、逆に若干の強度低下がみられる。これは、結合材であるセメントペーストの強度よりも使用した骨材自体の強度が高いことに起因するものである。また、材齢7日から空气中養生した供試体の強度の方が、水中養生したそれよりも若干大きくなっているが、これは、乾燥による一時的な強度増大に起因するもので、図-3に示すように養生期間が増加すると、いずれの配合も空气中養生した供試体の強度の方が低下していることがわかる。これは、供試体の乾燥に伴い、結合材であるセメントペーストが収縮し、骨材との界面に引張りの収縮応力が生じて、破壊時における靱性低下を引起したためと考えられる。したがって、高強度コンクリートを使用する場合、このような長期乾燥状態下における強度や靱性の低下について、留意すべきである。なお、高強度コンクリートの靱性低下については、コンクリート標準示方書でも終局限界状態におけるコンクリートの終局圧縮ひずみを低減しているが、更に構造物が設置される環境条件等についても考慮すべきであろう。

図-4に材齢28日のヤング係数と配合との関係、図-5に材齢3年の同関係を示す。圧縮強度の結果と同様に、ヤング係数の値も単位セメント量の増加に伴い低下しているが、これは、セメントペーストのヤング係数に比較して、通常使用される骨材のヤング係数の方が大きいことに起因するものである。ただし、圧縮強度の結果とは異なり、空气中養生の場合でも、材齢増加に伴うヤング係数の低下割合は僅少であり、実験誤差程度である。

図-6に時間依存ひずみの一例を示す。図示するように湿度65%の場合、ひずみ-時間曲線に若干のばらつきがみられるが、これは、恒温室内の湿度の変動が、湿度40%のそれと比較して、大きいことに起因している。図-7にH35、H45およびH55の1000日後における乾燥収縮ひずみの実測値と配合との関係を、図-8に400日後の全供試体のそれを示す。図示するように乾燥収縮ひずみは、単位セメント量に比例して増大しているが、これは、乾燥収縮ひずみが主にセメントペースト内部のゲル水の逸散

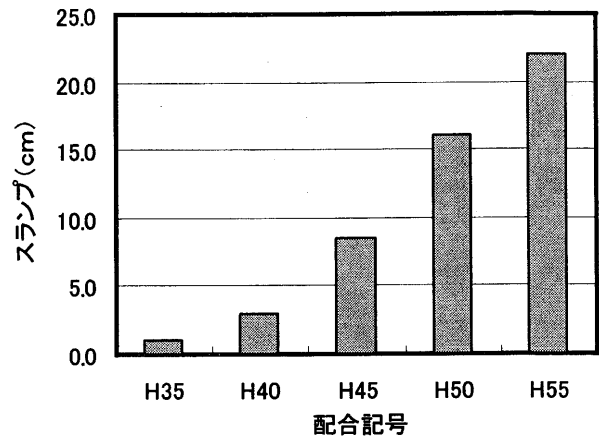


図-1 スランプと配合との関係

表-3 圧縮強度試験結果 (N/mm²)

配合記号(環境)	7日	28日	91日	1年	3年
H35(水中)	71.7	83.8	87.1	96.2	94.9
H35(湿度 65%)	-	91.3	85.7	87.6	90.6
H35(湿度 40%)	-	92.2	91.5	89.5	83.9
H40(水中)	74.5	80.4	-	-	-
H40(湿度 65%)	-	83.7	90.0	78.8	-
H45(水中)	69.4	78.0	82.6	89.5	81.1
H45(湿度 65%)	-	78.9	84.1	79.7	73.3
H45(湿度 40%)	-	81.0	82.4	79.7	70.2
H50(水中)	71.5	79.1	-	-	-
H50(湿度 65%)	-	84.6	84.2	80.3	-
H55(水中)	67.5	75.6	75.4	82.7	84.6
H55(湿度 65%)	-	77.8	75.8	77.0	79.8
H55(湿度 40%)	-	78.4	72.6	75.7	75.0

表-4 ヤング係数試験結果 (kN/mm²)

配合記号(環境)	7日	28日	91日	1年	3年
H35(水中)	40.1	43.2	45.2	47.9	48.5
H35(湿度 65%)	-	45.6	45.4	44.7	44.8
H35(湿度 40%)	-	45.1	45.2	42.4	44.8
H40(水中)	39.0	44.4	-	-	-
H40(湿度 65%)	-	43.3	43.5	37.7	-
H45(水中)	40.6	40.4	43.6	43.0	39.5
H45(湿度 65%)	-	41.7	41.9	43.2	37.6
H45(湿度 40%)	-	41.3	41.2	40.7	35.4
H50(水中)	40.2	43.0	-	-	-
H50(湿度 65%)	-	40.1	42.3	38.2	-
H55(水中)	36.1	39.7	42.4	42.8	44.0
H55(湿度 65%)	-	38.4	39.1	38.6	39.5
H55(湿度 40%)	-	38.6	37.5	39.4	39.4

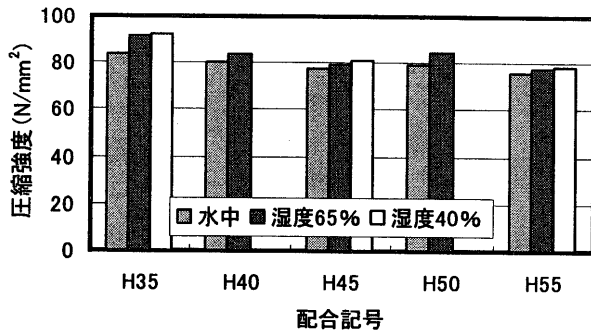


図-2 圧縮強度と配合との関係

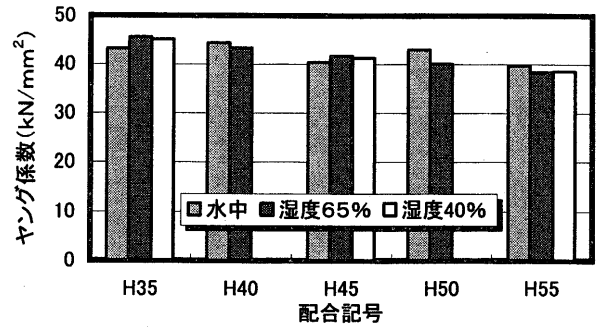


図-4 ヤング係数と配合との関係

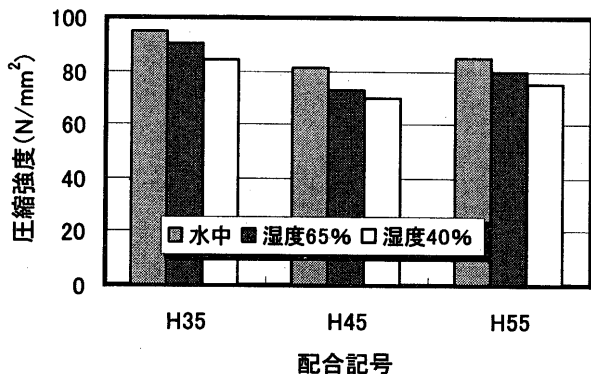


図-3 圧縮強度と配合との関係

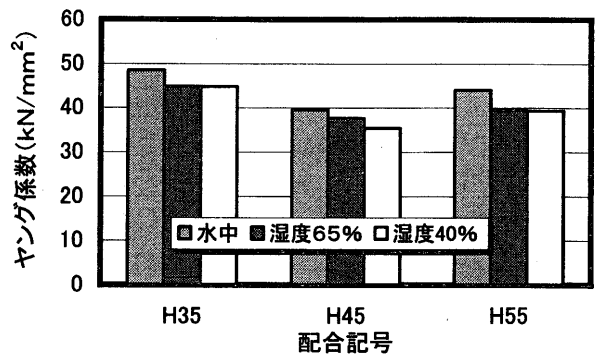


図-5 ヤング係数と配合との関係

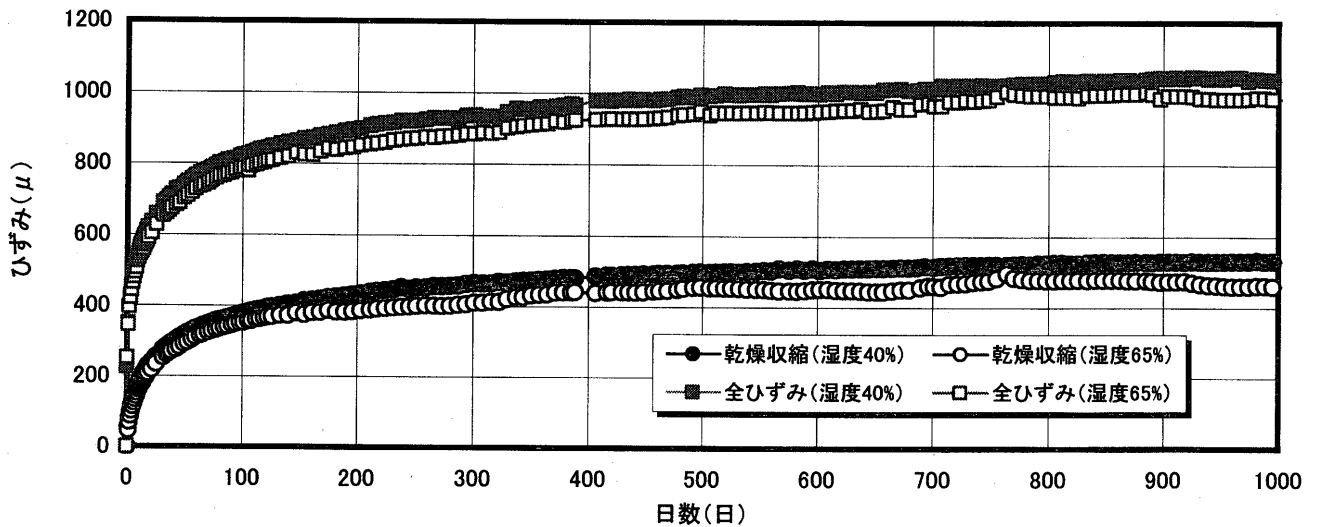


図-6 ひずみ-時間曲線

に伴う毛細管張力の作用に起因するものであり、骨材はそれを拘束するため、ペースト量の増加、すなわち、単位セメント量の増加に伴い、乾燥収縮ひずみも増大したと考えられる。ただし、図-8 のH40とH50の値がH35、H45およびH55のそれらより若干小さくなっているが、これは主に、前記したコンクリートの打設年度で粗骨材の密度が相違したことに起因するものと考えられる。すなわち、同じ産

地の粗骨材でも使用年度でその物性が異なるため、H35、H45 およびH55 の粗骨材と比較して、H40とH50 で用いた粗骨材の密度が高いことからヤング係数も大きくなり、セメントペースト部の収縮に対する骨材の拘束効果が大きかったことに起因するものと考えられる。また、湿度 65%に比較して、湿度 40%の乾燥収縮ひずみの方が2～3割大きくなっていることがわかる。

図-9にH35、H45およびH55の荷重期間1000日後のクリープ係数を、図-10に400日後の全供試体のそれを示す。図-9に示すように両湿度条件ともに、H45のクリープ係数が最大になっており、前記の乾燥収縮の傾向とは相違していることがわかる。これは、クリープひずみの場合、持続荷重応力の関係で、セメントペースト部と骨材粒子部との応力分担割合が時々刻々変化するため、乾燥収縮ひずみの生成機構よりも複雑で影響要因が多く、実測されたクリープ係数が、他の配合と比較して、H45の場合に大きくなったものと考えられる。なお、クリープ試験装置の関係で、H40とH50の配合に関しては、湿度40%での実験を行っていないため、特にH45の湿度40%のクリープ係数が他の値と比較して極端に大きく、普通強度のコンクリートのそれと同程度であるが⁵⁾、その原因については不明である。

図-11と図-12に乾燥収縮ひずみの実測値と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による予測値との関係を示す。なお、ひずみ-時間曲線形状の適合性も判断できるように、経過日数1日、10日、50日、100日、200日、400日、700日および1000日について比較した。

図-11および図-12からわかるように、予測値は経過日数の増加に伴って、徐々に実測値よりも大きくなっており、図-11の1000日後では6割程度過大に予測している。これは主に、使用した粗骨材の物性、主にヤング係数の違いによるものと考えられる。なお、ひずみ-時間曲線の形状は、実測値と予測値との関係が経過日数に伴ってほぼ直線的に増加していることから判断して、妥当であることがわかる。したがって、予測式に使用骨材の物性相違に関する影響係数を考慮すれば、適切な予測が可能であると思われる。

図-13と図-14にクリープ係数の実測値と予測値との関係を示す。ここに、予測式中の荷重時の圧縮強度およびヤング係数の値は本実験の実測結果を用いた。両図からわかるように、予測値と実測値との関係は配合条件で相違している。これは、前記したように実測のクリープ係数がH45で最大になっているのに対し、予測値の場合、単位セメント量の増加に伴ってクリープ係数が若干増加すると予測しているためである。また、クリープ係数の経日変化も配合条件で相違しており、乾燥収縮ひずみの図-11と比較して、クリープ係数の経日変化はその影響要因が多く、複雑であることがわかる。

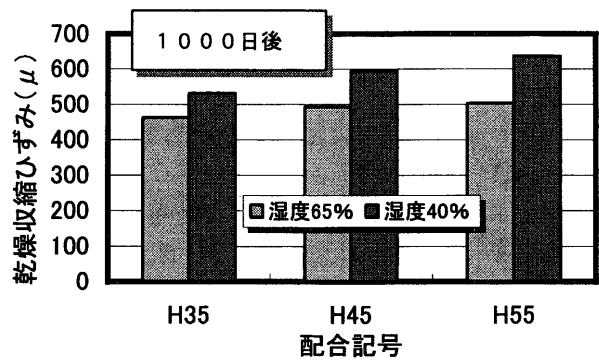


図-7 収縮ひずみと配合との関係

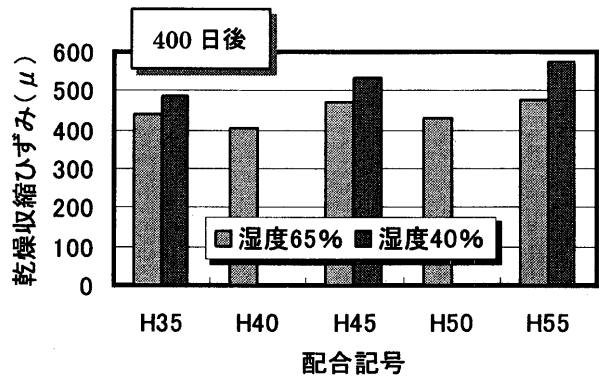


図-8 乾燥収縮ひずみと配合との関係

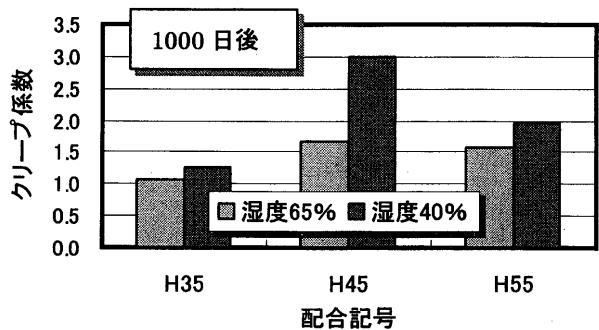


図-9 クリープ係数と配合との関係

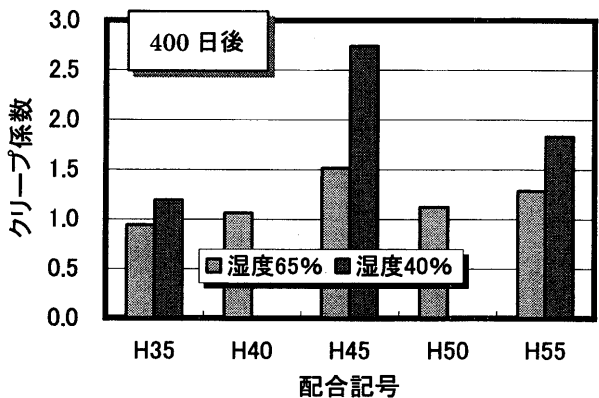


図-10 クリープ係数と配合との関係

4. まとめ

本研究では、早強ポルトランドセメントを用い、単位セメント量を 350kg/m^3 、 400kg/m^3 、 450kg/m^3 、 500kg/m^3 、 550kg/m^3 と変えた、水セメント比を 32%、高性能 AE 減水剤を単位セメント量の 0.8% 一定とした配合条件の高強度コンクリートを用いて、1000 日間または 400 日間の乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数を実測した。以下に本研究から得られた主な結果を要約する。

(1). 高性能 AE 減水剤を単位セメント量の 0.8% 一定とした配合条件の場合は、単位セメント量の増加に伴い、フレッシュコンクリートのスランプは大幅に増大する。

(2). 空气中養生した高強度コンクリートの材齢 3 年の圧縮強度は、水中養生したそれと比較して、1 割程度低下する。

(3). 乾燥収縮ひずみは、単位セメント量の増加および環境湿度の低下に伴い、増大する。

(4). クリープ係数は、本実験の範囲内では、単位セメント量が 450kg/m^3 で最大になり、特に湿度 40% の場合は、普通強度のコンクリートのそれと同程度の値である。

(5). コンクリート標準示方書で推奨されている乾燥収縮ひずみの予測式による予測結果は、実測結果と比較して、6 割程度過大に予測するが、その経日変化の形状はほぼ妥当である。

(6). コンクリート標準示方書で推奨されているクリープ係数の予測式による予測結果は、実測値と比較して、配合条件で大幅に相違する。

最後に、平成 13 年度から平成 15 年度までの宮川研究室の卒業研究生諸先輩に感謝の意を表します。

参考文献

- 1). コンクリート標準示方書（構造性能照査編），土木学会，2002 年制定
- 2). コンクリート構造の時間依存性変形・ひび割れ評価－現状と今後の課題－，土木学会，1998
- 3). 長滝重義監修：コンクリートの高性能化，技報堂出版，1997
- 4). コンクリート用混和材料の規格と性能評価，日本コンクリート工学協会九州支部，1997
- 5). 宮川邦彦他：コンクリートの時間依存ひずみに及ぼすセメントの影響，九州産業大学工学部研究報告，第 36 号，pp.183-188，1999

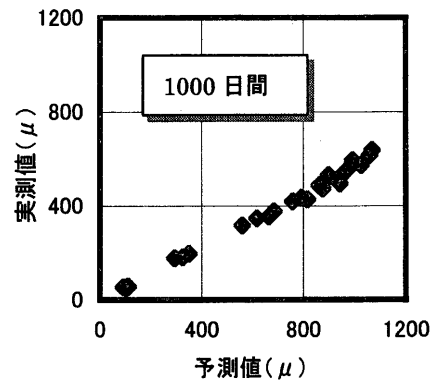


図-11 実測値と予測値との関係

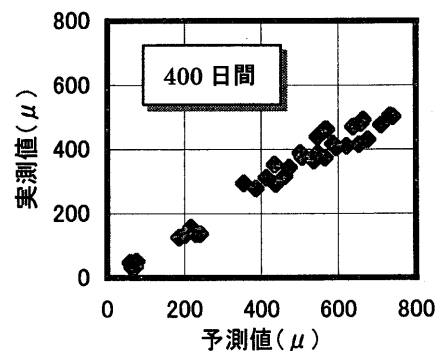


図-12 実測値と予測値との関係

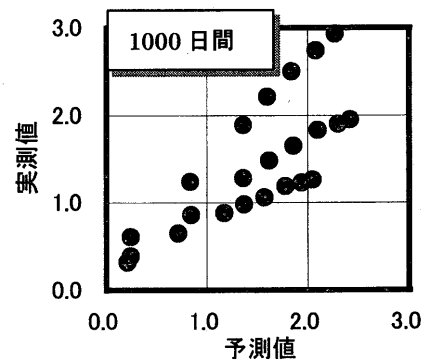


図-13 実測値と予測値との関係

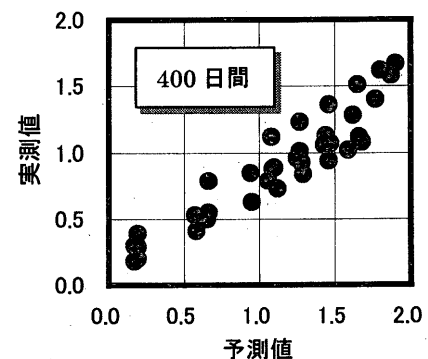


図-14 実測値と予測値との関係