

論文 複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定

清原 千鶴^{*1}・佐藤 嘉昭^{*2}・永松 静也^{*3}・南本 敬^{*4}

要旨：本研究では、複合則理論を用いた実用的なコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式を構築することを最終目的とし、本論文では、同一環境条件下におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみの推定式について検討を行った。その結果、コンクリートをセメントペーストおよび骨材の二相材料として取り扱い、コンクリート調合設計時に得られる水セメント比、骨材容積比(単位水量)および骨材の吸水率をパラメータとした推定式を提案し、実験データの比較から、その適用の可能性について言及した。

キーワード：複合則理論、乾燥収縮ひずみ、水セメント比、骨材容積比、吸水率

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、構造物の耐久性などに対して重大な影響を及ぼしている。性能照査型設計が注目されている昨今においては、設計時に検討を要する項目になりうる。しかしながら、乾燥収縮ひずみ実験は時間と労力を必要とし、すべてのコンクリートについて実験を行いその特性を把握するのは困難である。そのため、多くの研究者によって乾燥収縮ひずみの予測式が提案されている。予測式には大きく分けて2通りの方法がある。1つは、多数の実験データに基づいて得られる経験式で、設計時に得られるデータから、比較的容易に乾燥収縮ひずみを予測できる点で実用的である。しかしながら、CEB-FIP-1990式¹⁾、ACI-209式²⁾などを代表とする海外の予測式は、日本国内の実験データを過小評価する傾向にあり、またその精度は±40%であるとの報告もある³⁾。

もう1つはコンクリートの乾燥収縮ひずみの発生源はセメントペーストであり、骨材はそれを拘束するという観点から、複合則理論を用いたモデルに基づいて乾燥収縮ひずみを予測する方法である。複合モデルによる方法は、理論的に明快であり、構成材料の性質とその量とで成

り立っているため、多種多様な調合のコンクリートに比較的容易に適用できる。しかしながら、実用的という点では、外的要因の影響を取り入れられていないことや、構成材料の物性値を予測するのが困難などの問題がある。そのため、複合則理論式を用いた実用的な乾燥収縮ひずみに関する研究⁴⁾は少ない。

そこで、本研究では、複合則理論を用いた実用的なコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式を構築することを最終目的としている。本論文では、多くの実験データから得られた乾燥収縮ひずみの予測式が、最終乾燥収縮ひずみに時間関数を乗じた式になっていることから、最終乾燥収縮ひずみを複合則理論式で予測する手法について検討を行った。なお、本論文では乾燥開始材齢7日、温度20℃、湿度60%R.H.の同一環境条件下におけるコンクリート供試体の乾燥収縮ひずみについて検討を行っている。

2. 最終乾燥収縮ひずみの推定

2.1 複合則理論式の適用

コンクリートの乾燥収縮ひずみに関する複合則理論は数多く提示されているが、本論文では、その中の1つである馬場式⁵⁾(式(1))を用いた。馬

*1 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース 助手 工修(正会員)

*2 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース 教授 工博(正会員)

*3 北九州市立大学 国際環境工学部環境空間デザイン学科 教授 工博(正会員)

*4 大分大学大学院 工学研究科博士前期課程建設工学専攻 (現 新日鉄高炉セメント(株))

場式は、母材セメントペーストと複合材料(コンクリート)との相互作用により、コンクリートのヤング係数を含む理論式となっている。

$$\varepsilon_{sc\infty} = \frac{1 - (1 - m \cdot n) \cdot V_a}{E_c / E_p} \cdot \varepsilon_{sp\infty} \quad (1)$$

ここに、

$$m = \varepsilon_{sa\infty} / \varepsilon_{sp\infty}, \quad n = E_a / E_p$$

V_a : 骨材容積比

$$\varepsilon_{sc\infty}, \varepsilon_{sa\infty}, \varepsilon_{sp\infty} :$$

コンクリート、骨材およびペーストの最終乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

E_c, E_a, E_p : コンクリート、骨材およびペーストのヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

本研究では、コンクリートの乾燥収縮ひずみの発生源であるセメントペーストと骨材の二相材料として取り扱うこととした。なお、式(1)中のコンクリートのヤング係数については筆者ら⁶⁾が提案している Hashin-Hansen の複合則理論式を基に、遷移帯領域などを考慮した補正係数を用いて修正した式(2)を用いることとした。

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{(1 - V_a) \cdot E_p + (1 + V_a) \cdot E_a}{(1 + V_a) \cdot E_p + (1 - V_a) \cdot E_a} \quad (2)$$

ここに、 $E_p = k \cdot \bar{E}_p$

\bar{E}_p : 単独で作製したセメントペーストのヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

k : 補正係数

式(1)および(2)の適用にあたってセメントペーストおよび骨材の物性値を推定する必要がある。そこで、以下に構成材料の物性値の推定方法について述べる。

2.2 セメントペーストの物性値の推定

セメントペーストの物性値の推定を行うために、水セメント比 0.25~0.65 のセメントペースト供試体を作製し、圧縮強度試験および乾燥収縮試験を行った。表-1 に実験項目を示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)、混和剤には高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)を用いた。セメントペーストは強制攪拌ミキサ(100ℓ)を用いて練り混

表-1 実験項目

実験内容	供試体の大きさ	養生条件	ひずみの測定方法	試験材齢(日)
ヤング係数	$\phi 5 \times 10 \text{cm}$	封緘	コンプレッソメータ	1,3,7,28
		封緘7日その後気乾		56,112,365
乾燥収縮	$\phi 5 \times 10 \text{cm}$	封緘	小型埋込みゲージ	3,7,28,180

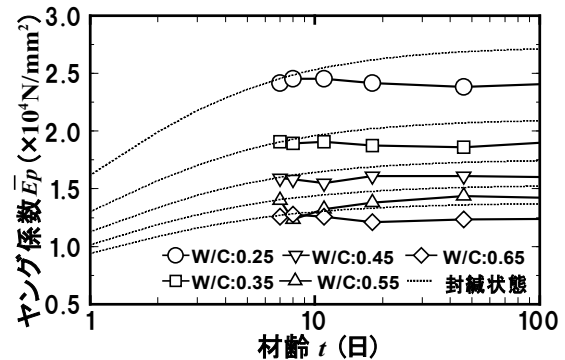


図-1 ペーストのヤング係数の経時変化

ぜた後、ブリーディング水が無くなり打設可能となる2,3時間の間、密封容器の中に置き定期的に攪拌し、フロー値 200mm 程度になった時点で型枠に打設した。なお、乾燥条件は温度 $20 \pm 0.5^\circ \text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\% \text{R.H.}$ である。

(1) セメントペーストのヤング係数 (E_p)

図-1 に材齢 7 日より乾燥を受けたセメントペーストのヤング係数の経時変化を示す。図中の点線は各水セメント比における封緘状態のヤング係数の経時変化を示している。図より、材齢 7 日から乾燥を受けたヤング係数の値は、水セメント比によらず乾燥開始時の値とほぼ等しいか若干小さい値を示している。他の研究⁴⁾も同様な傾向を示している。そこで、本論文では、乾燥開始材齢 7 日から乾燥を受ける場合のセメントペーストのヤング係数は乾燥開始時の値を用い、式(3)のように表すこととした。他の材齢から乾燥を受けたヤング係数の推定については水和度の影響などを考慮して算出する必要があり、この点は今後の検討課題にしたい。

$$\bar{E}_p = \frac{A \cdot t_0}{1 + t_0} \quad A = 0.036 + 0.66 \cdot \frac{1}{x} \quad (3)$$

ここに、 $t_0 = 7$, x : 水セメント比

式(2)中の補正係数 k は、遷移帯領域などの影響を考慮している係数である。内川ら⁷⁾の研究によれば、形成された遷移帯組織は、材齢が経過しても密実化されず、材齢7日程度で最大値を示し、その後収束する傾向を示している。そこで、ここでは既往の文献⁶⁾で得られた補正係数の最終値と水セメント比の関係(図-2)より最終的な補正係数を式(4)で表すこととした。

$$k = 0.61 \cdot x^{-0.21} \quad (4)$$

ここに、 x : 水セメント比

(2) セメントペーストの最終乾燥収縮ひずみ

図-3に乾燥開始材齢7日における乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。実験により得られたセメントペーストの乾燥収縮ひずみの経時変化を双曲線関数で表されるとし、回帰曲線を求めて、最終乾燥収縮ひずみを算出した。

表-2に求めた最終乾燥収縮ひずみの一覧を示す。また、図-4に水セメント比と最終乾燥収縮ひずみの関係を示す。水セメント比が大きくなるほどまた乾燥開始材齢が早いものほど最終乾燥収縮ひずみは大きい値を示している。両者の間には相関性が見られることから、セメントペーストの最終乾燥収縮ひずみを水セメント比の関数である式(5)で表すこととした。

$$\varepsilon_{sp\infty} = (1.25 \cdot t_0^{0.034}) \cdot x^\beta \quad \beta = 1.05 \cdot t_0^{0.11} \quad (5)$$

ここに、

$\varepsilon_{sp\infty}$: セメントペーストの
最終乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)
 x : 水セメント比, t_0 : 乾燥開始材齢(日)

2.3 骨材の物性値の推定

(1) 骨材のヤング係数

筆者ら⁶⁾は骨材の吸水率に着目し、骨材のヤング係数との関係についてデータを収集した。吸水率の増加とともに骨材のヤング係数は低下しており、両者の関係から細骨材および粗骨材のヤング係数は、式(6)に示す式で表すこととし

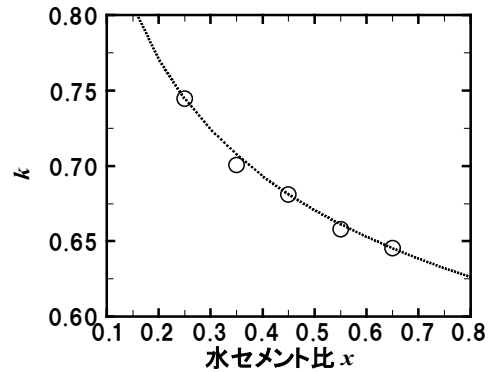


図-2 補正係数 k と水セメント比の関係

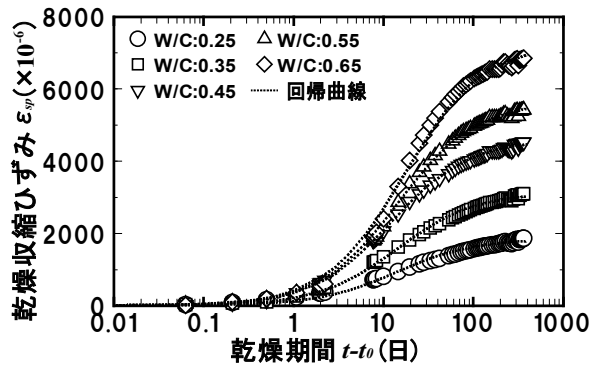


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化 ($t_0=7$ 日)

表-2 最終乾燥収縮ひずみの算出結果

W/C \ t_0	3	7	28	180
0.25	—	1849.4	—	—
0.35	3803.0	3125.2	2813.4	2064.0
0.45	5075.5	4599.8	3972.3	3139.1
0.55	6365.4	5636.7	5378.0	4858.0
0.65	—	7227.7	—	—

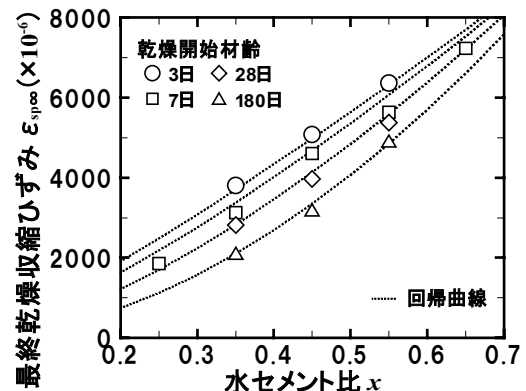


図-4 水セメント比と最終乾燥収縮ひずみの関係

た。なお、骨材のヤング係数 E_a は、細骨材および粗骨材のヤング係数にコンクリート中の細骨材および粗骨材の絶対容積比を乗じた値(式(6))とした。

$$E_a = (s/a) \cdot E_s + (1 - (s/a)) \cdot E_g$$

$$\left. \begin{matrix} E_s \\ E_g \end{matrix} \right\} = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \quad (6)$$

ここに、 E_s 、 E_g ：細骨材および粗骨材のヤング係数($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
 s/a ：細骨材率、 μ ：吸水率(%)

(2) 骨材の乾燥収縮ひずみ

これまでコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測において、骨材の乾燥収縮ひずみの影響についてはほとんど検討されていない。しかしながら、近年では骨材自体の性質がコンクリートの乾燥収縮ひずみに大きく影響を及ぼすことが指摘⁸⁾されており、また骨材の低品質化の傾向が見られることから、コンクリート収縮ひずみの予測に骨材の影響を考慮する意義は大きい。

そこで、本論文では、粗骨材を用いて乾燥収縮ひずみの測定を行っている藤本ら⁹⁾の研究を参考に、表-3に示すような3種類の粗骨材を用いて乾燥収縮実験を実施した。使用した骨材は骨材径15mm以上のものを用い、測定した骨材数は各種類とも15個とした。粗骨材は、水中に浸漬し、膨張が収束した時点(5日間)を基準として乾燥を開始した。ひずみの測定には防水型ひずみゲージを用い、粗骨材の1面を平滑にして貼り付けた。図-5に各骨材の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。藤本らの研究によれば、骨材の収縮ひずみ量が母材を整形した供試体と同程度の値を示していることから本研究においても実測データを基に骨材の乾燥収縮ひずみの推定を行った。

本論文では、図-5より、骨材の乾燥収縮ひずみもセメントペーストと同様に双曲線関数で表されるとし、双曲線関数で回帰し、最終乾燥収縮ひずみを算出した。

骨材自体の収縮ひずみは、その変形機構より内部表面積に比例するといわれている。しかしながら、骨材の内部表面積の測定には専用機器を要するため、実用的な面から考えると推定式のパラメータには適さない。そこで、本報告で

表-3 粗骨材の基礎性状

	硬質砂岩碎石	石灰石碎石	川砂利
絶乾密度(g/cm^3)	2.64	2.69	2.62
表乾密度(g/cm^3)	2.67	2.70	2.64
吸水率(%)	1.23	0.38	0.81
実積率(%)	59.8	62.1	61.8
粗粒率	5.72	6.57	6.76

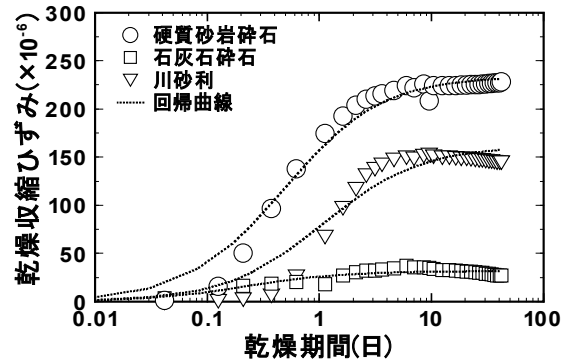


図-5 骨材の乾燥収縮ひずみの経時変化

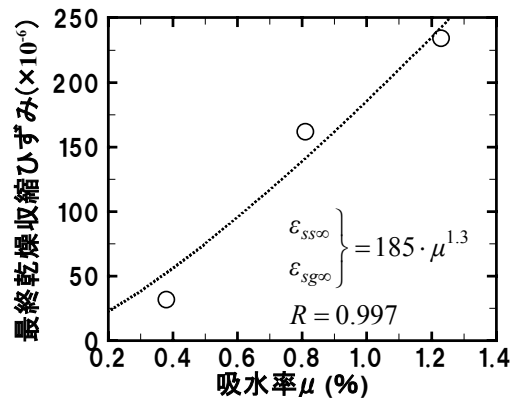


図-6 吸水率と骨材の最終乾燥収縮ひずみ

は、骨材の吸水率と乾燥収縮ひずみの関係について着目した。吸水率は骨材の一般的な測定項目であり、式(6)に示しているように、骨材のヤング係数も吸水率で表していることから、複合則理論式(式(1))の骨材の性質は吸水率のみで表示が可能となる。

図-6に吸水率と算出した骨材の最終乾燥収縮ひずみの関係を示す。吸水率が増加するにつれて最終乾燥収縮ひずみの値も大きくなっており、ここでは両者の関係を式(7)で表すこととした。なお、骨材の最終乾燥収縮ひずみもヤング係数と同様に、細骨材および粗骨材の最終乾燥収縮ひずみにコンクリート中の細骨材および粗骨材の絶対容積比を乗じた値とした。

$$\varepsilon_{sq\infty} = (s/a) \cdot \varepsilon_{ss\infty} + (1 - (s/a)) \cdot \varepsilon_{sg\infty}$$

$$\left. \begin{matrix} \varepsilon_{ss\infty} \\ \varepsilon_{sg\infty} \end{matrix} \right\} = 185 \cdot \mu^{1.3} \quad (7)$$

ここに、 $\varepsilon_{ss\infty}$ 、 $\varepsilon_{sg\infty}$ ：細骨材および粗骨材の最終乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

μ ：吸水率(%), s/a ：細骨材率

2.4 最終乾燥収縮ひずみの推定

式(1)とこれに付随する式(2)～式(7)が、本論文において提案するコンクリートの最終乾燥収縮ひずみの推定式である。本推定式は、水セメント比、骨材容積比、骨材の吸水率をパラメータとしており、設計時に得られるデータで推定が可能である。

提案する推定式の適用性について検討を行うため、筆者らが行った水セメント比 0.25～0.65、単位水量を 160～180kg/m³とした全 11 調合のコンクリート実験¹⁰⁾から得られたデータを基に検証することとした。

得られた実験データを双曲線関数で回帰し、最終乾燥収縮ひずみを算出した。図-7に式(1)から求めた推定値と実測値の関係を示す。本実験の範囲内においては、水セメント比が 0.25 において値を過大評価しているが、その他の調合においては本推定式を用いることによって最終乾燥収縮ひずみを比較的良く表している。

3. コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式

コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式として、前項で提案した複合則理論を用いた最終乾燥収縮ひずみの推定式に時間関数を乗じた式(8)のように表すこととした。最終乾燥収縮ひずみを複合則理論式で表すことによって、これまで考慮が困難であった骨材の物性も考慮することができる。

$$\varepsilon_{sc}(t, t_0) = \varepsilon_{sc\infty} \cdot \frac{t - t_0}{\gamma + (t - t_0)}$$

$$\varepsilon_{sc\infty} = \frac{1 - (1 - m \cdot n) \cdot V_a}{E_c / E_m} \cdot \varepsilon_{sp\infty} \quad (8)$$

ここに、 γ ：乾燥の進行度を表す係数

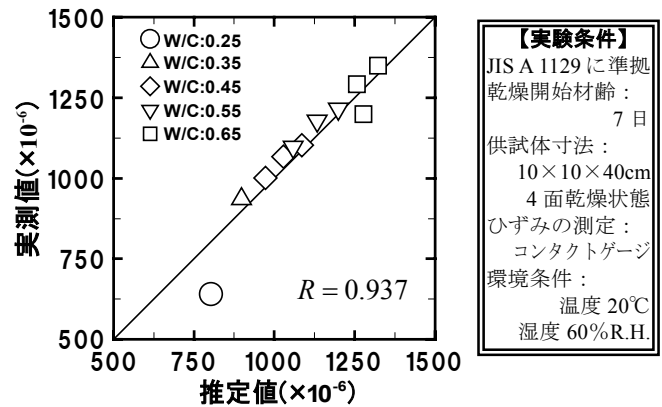


図-7 推定値と実測値の比較

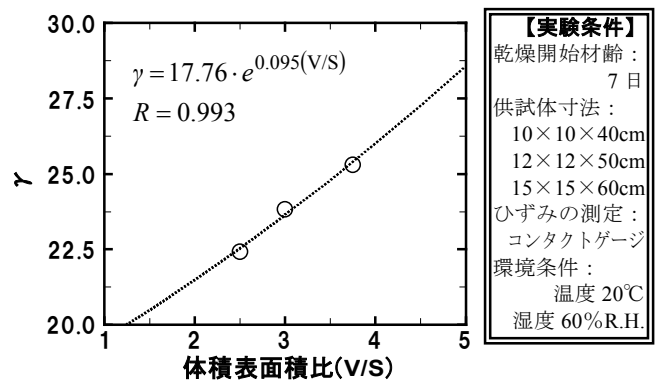


図-8 γ と体積表面積比の関係

乾燥の進行を表す係数については、本論文では、既往の研究¹¹⁾と同様に部材寸法の影響を考慮することとした。乾燥期間が早い時期においては、供試体寸法が大きくなるほど乾燥収縮は小さくなるが、最終的な乾燥収縮ひずみが供試体寸法の影響を受けるかどうかについては、明確な結論が得られていない。

図-8に実験データから得られた体積表面積比(V/S)と係数 γ の関係を示す。体積表面積比が大きくなるほど係数 γ の値も増加していることが分かるが、両者の関係を式(9)に示す回帰式で表すこととした。

$$\gamma = 17.76 \cdot e^{0.095(V/S)} \quad (9)$$

ここに、V/S：体積表面積比 (cm)

前項で検証を行った実験データの経時変化を用いて実験値との比較検討を行った。式(8)に式(2)～式(7)および式(9)を代入することによって乾燥収縮ひずみの予測が可能となる。予測値

と実験値を比較したものを図-9に示す。これによると、本実験の範囲内においては、水セメント比が小さいものについては過大評価しているが、提案する予測式を用いることによってコンクリートの乾燥収縮ひずみの進行を比較的良く表しているものと思われる。今後は、他の研究機関の実験データを収集し、本予測式の汎用性について確認を行っていく予定である。

4. まとめ

本論文では、複合則理論を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式について提案し、その適用性について検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

- 1) セメントペーストの最終乾燥収縮ひずみは、水セメント比をパラメータとする式(5)で推定できる。
- 2) 骨材の最終乾燥収縮ひずみは、吸水率を用いて式(7)で推定できる。
- 3) コンクリートの最終乾燥収縮ひずみの推定式として、複合則理論を用いて水セメント比、単位容積比、骨材の吸水率をパラメータとした式で推定できる。
- 4) コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測式として、複合則理論を用いた最終乾燥収縮ひずみの推定式に時間関数を乗じた式(8)を提案した。

参考文献

- 1) CEB-FIP Model Code 1990, Comite Euro - International du Beton, pp.53-58,1990
- 2) ACI Committee 209: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI SP-76, pp.193-300,1982
- 3) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム委員会報告書・論文集, pp.101-121, 2001.7
- 4) 江口清, 寺西浩司:複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, 第557号, pp.15-22, 2002.7
- 5) 馬場明生:建築材料の乾燥収縮機構とその応用

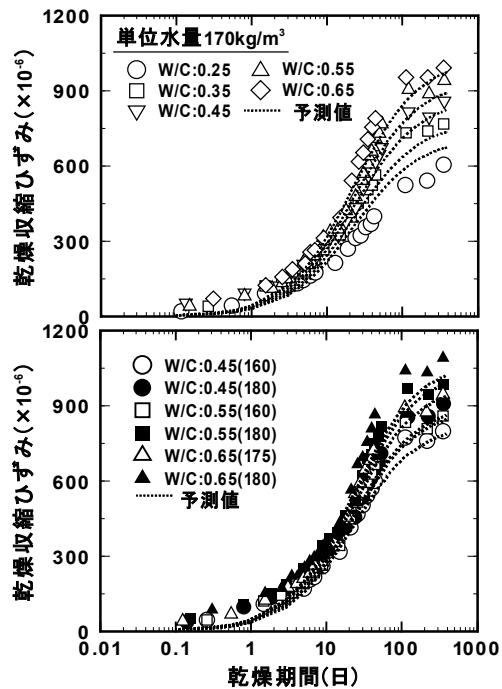


図-9 予測値と実測値の比較

- に関する研究, 東京大学学位論文, 1975
- 6) 清原千鶴ほか:複合則理論を用いたコンクリートのヤング係数の推定式に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 2004.2 掲載予定
- 7) Uchikawa Hiroshi : Similarities and Discrepancies of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete from Standpoints of Composition and Structure, Engineering Foundation Conference, Advances in the Production and Utilization of Cement Based Materials, Vol.1, pp.271-310, 1988.
- 8) 荒井正直ほか:骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.741-746, 1999.9
- 9) 藤本貴ほか:粗骨材がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.97-98, 2003.9
- 10) 長谷川浩延ほか:コンクリートの力学特性に関する基礎的研究(その 2 コンクリートの強度および乾燥収縮), 日本建築学会研究報告, 九州支部, 第 37 号・1, 構造系, pp.89-92, 1999.3
- 11) T. C. Hansen and A. H. Mattock: Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete, A.C.I Mater. J., Vol.63, No.2, pp. 267-290, Feb. 1996