

論文 部材寸法・形状および相対湿度がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

半坂 昌広^{*1}・寺西 浩司^{*2}

要旨：本研究では、部材寸法・形状および相対湿度の影響を、複合理論に基づく筆者らの乾燥収縮予測式に取り込むことを目的として、これらの要因がセメントペーストおよびコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響について検討した。その結果、部材寸法・形状は乾燥収縮の進行速度に影響を及ぼし、相対湿度は乾燥収縮の最終値および進行速度に影響を及ぼすとの知見が得られた。また、これらのことは、複合理論によってほぼ表せることがわかった。

キーワード：乾燥収縮, 体積表面積比, 相対湿度, 複合理論, セメントペースト

1. まえがき

コンクリートの乾燥収縮ひび割れの防止・制御対策を講じるためには、事前に乾燥収縮ひずみを正確に予測することが重要である。このような背景から、筆者らは、これまでに、複合理論の一つである馬場式¹⁾をコンクリート中のモルタル成分、コンクリートに段階的に適用する形の乾燥収縮予測式を提案している²⁾。この式は、骨材の乾燥収縮ひずみやヤング係数を考慮できる点が特徴的である。また、式中の因子であるセメントペーストの乾燥収縮ひずみやヤング係数については、実験データに基づいて定式化されている。しかし、現時点では、部材寸法・形状や環境の相対湿度などの影響を考慮できる形にはなっていない。これらの要因については、今後、予測式に順次取り込んでいく予定であるが、乾燥収縮に関する従来の研究では、コンクリートの調合や材料物性などの内的要因の影響に関心が集中しており、外的要因の影響に関しては研究例が少ない。

そこで、本研究では、筆者らの予測式に外的要因の影響を取り込むための基礎資料を収集することを目的として、部材寸法・形状および相対湿度がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

について検討した。

2. 実験概要

本研究では、部材寸法・形状の影響を調べるための実験（実験 1）と、環境の相対湿度の影響を調べるための実験（実験 2）を行った。また、これらの実験では、実験結果に対する複合理論の適合性を検討するために、コンクリートとセメントペーストをそれぞれ試料とした。

2.1 部材寸法・形状の影響の検討実験（実験 1）

(1) 実験要因とその水準

表-1に、実験要因とその水準を示す。実験 1では、水セメント比および体積表面積比 V/S（体積/露出部分の表面積）を要因とした。

(2) 使用材料および調合

表-2に使用材料を示す。細骨材（砕砂）と粗骨材（砕石）は、同一原石から製造されたものであり、原石から採取したコアの試験結果によると、ヤング係数は 62.4kN/mm²、乾燥収縮ひずみは 83.7×10⁻⁶であった。

表-3に、コンクリートの調合を示す。本実

表-1 実験要因とその水準（実験 1）

実験要因	水準
試料種別	セメントペースト, コンクリート
水セメント比 (%)	35, 45, 55
V/S (cm)	0.625, 1.25, 2.5, 5, 10

*1 名城大学 理工学研究科建築学専攻大学院生 (正会員)

*2 名城大学 理工学部建築学科 助教授 工博 (正会員)

表-2 使用材料

材料	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント (密度:3.16 g/cm ³)
細骨材	春日井産硬質砂岩砕砂 (表乾密度:2.68g/cm ³ , 吸水率:1.65%,FM:2.82)
粗骨材	春日井産硬質砂岩砕石 2005 (表乾密度:2.72g/cm ³ , 吸水率:0.54%,実積率:58.0%)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
消泡剤	ポリアルキレングリコール系

表-3 コンクリートの調査

水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			高性能 AE 減水剤 (kg/m ³)
					セメント	細骨材	粗骨材	
35	18 ±2.5	0	48.9	185	167	318	331	9.5
45			51.7		130	354		7.4
55			53.3		106	378		7.7

験では、単位水量および単位粗骨材料を一定とした。一方、セメントペーストの試料では、混和剤は使用せず、フロー値や空気量の調整も行わなかった。

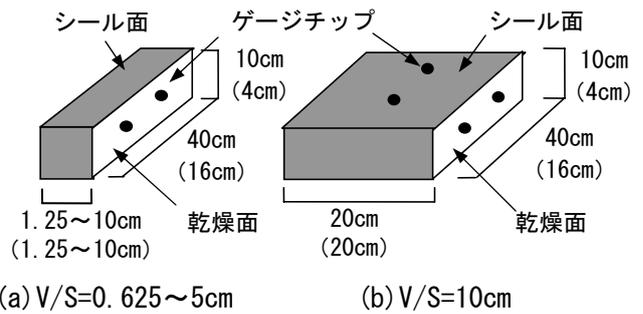
(3) 試験方法

(a) 乾燥収縮試験

図-1に、乾燥収縮試験の供試体の概要を示す。供試体は、原則として、所定寸法の型枠を用意して作製した。ただし、コンクリートのV/S=0.625~2.5cmのケースでは、10×10×40cmのコンクリート片を作製し、それを縦方向に切断して所定寸法の供試体とした。また、供試体の乾燥面は相対する2面のみとし、他の4面はシールした。以上の供試体の他に、JIS A 1129に推奨された寸法・形状の供試体（以下、標準供試体という）を用意した。乾燥収縮ひずみの測定は、材齢7日まで標準水中養生した後に、恒温恒湿室（温度20℃、相対湿度60%）においてコンタクトゲージ法により行った。測定位置は、原則として乾燥面（端部）としたが、V/S=10cmの場合は、中央部での測定も行った。

(b) その他の試験

セメントペーストの試料では、ブリーディング量を考慮した実質的な水セメント比の算出を



* () 外および () 内の数値は、それぞれコンクリートおよびセメントペースト供試体の寸法を表す。

図-1 供試体の概要（実験1）

目的として、供試体ごとのブリーディング量を簡易的に測定した。また、複合理論による考察を行うために、乾燥収縮の供試体と同様な方法で養生したセメントペーストの供試体(φ5×10cm)に対してヤング係数試験を行った。

2.2 相対湿度の影響の検討実験（実験2）

(1) 実験要因とその水準

表-4に、実験要因とその水準を示す。実験2では、水セメント比および環境の相対湿度を要因とした。

(2) 使用材料および調査

使用材料および調査は実験1と同様とした。なお、実験2では、相対湿度の水準ごとに、セメントペーストおよびコンクリートの試料を練り混ぜて試験に供した。

(3) 試験方法

(a) 乾燥収縮試験

コンクリートの場合は、乾燥収縮の測定期間を短縮するために、1×10×40cmの供試体を用いた。図-2に、コンクリート供試体の概要を示す。この供試体は、10×10×40cmのコンクリート片を作製し、打設面を上にした状態で縦方向に切断して作製した。一方、セメントペーストの場合は、4×4×16cmの供試体を用いた。なお、これらの供試体は、材齢7日まで標準水中養生した後、相対湿度を所定の水準とした恒温恒湿槽（温度20℃）に供試体を移し、乾燥収縮ひずみの測定（コンタクトゲージ法）を開始した。

(b) その他の試験

実験1の場合と同様に、セメントペースト試

料に対して簡易ブリーディング試験およびヤング係数試験を行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 ブリーディング量による測定値の補正

セメントペーストの試料では、コンクリートに比べてブリーディング水が多量に発生したため、実験結果の考察に先立って乾燥収縮ひずみの測定値を補正した。その一例を図-3に示す。補正に当たっては、まず、同図に示すように、ブリーディング量の試験結果から実質的な水セメント比を算出した。次に、セメントペーストの場合、乾燥収縮ひずみと水セメント比の間に比例関係が認められることから²⁾、ここでも乾燥収縮ひずみの測定値と実質的な水セメント比の関係を線形と仮定し、水セメント比の設定値（水準）に対する乾燥収縮ひずみを求め、これを補正值とした。

3.2 部材寸法・形状の影響（実験1）

(1) 経時変化

図-4に、セメントペーストおよびコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化の一例を示す（W/C55%）。ここで、図中の曲線は、次式による試料ごとの回帰曲線である。

$$\varepsilon_s(t) = \frac{t}{Ns + t} \varepsilon_{s\infty} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_s(t)$: 乾燥収縮ひずみ, t : 乾燥期間(日),
 Ns : 進行速度を表す定数(日),
 $\varepsilon_{s\infty}$: 乾燥収縮ひずみの最終値

同図より、乾燥収縮ひずみは、 V/S が大きいほど緩やかに増加するが、最終的には、 V/S に関わらずにほぼ同じ値に収束することがわかる。ただし、セメントペーストの $V/S=10\text{cm}$ のケースでは、乾燥期間 518 日の時点でも、未だ乾燥収縮が進行しているようである。

(2) 最終値および進行速度

式(1)は、乾燥収縮ひずみの最終値を表す因子 $\varepsilon_{s\infty}$ と進行速度を表す項で構成されており、 Ns が大きいほど進行速度が遅くなる。そこで、ここでは、 $\varepsilon_{s\infty}$ および Ns の回帰結果に対して考察を

表-4 実験要因とその水準（実験2）

実験要因	水準
試料種別	セメントペースト, コンクリート
水セメント比 (%)	35, 45, 55
相対湿度 (%)	80, 60, 40

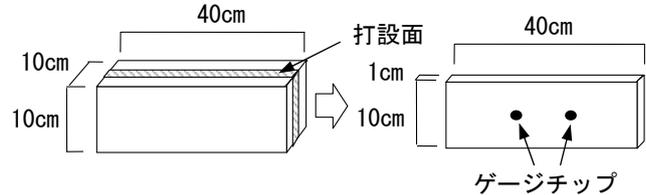


図-2 コンクリートの供試体の概要（実験2）

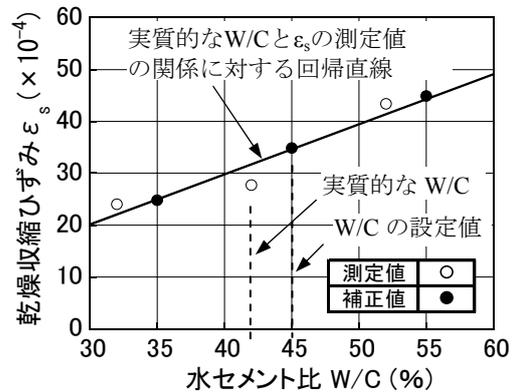
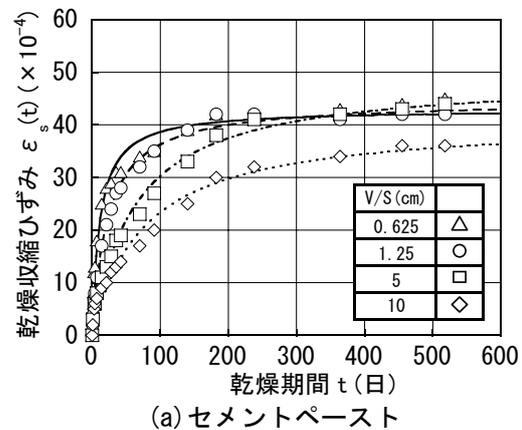
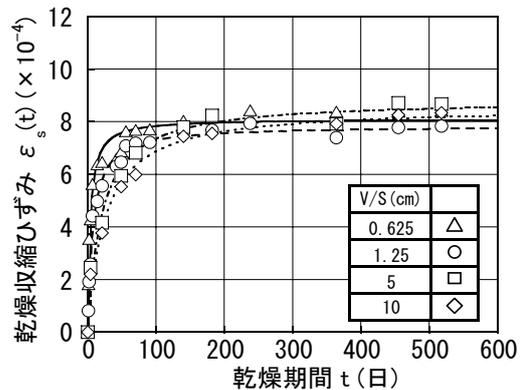


図-3 ブリーディング水量による補正 (V/S=0.625cm)

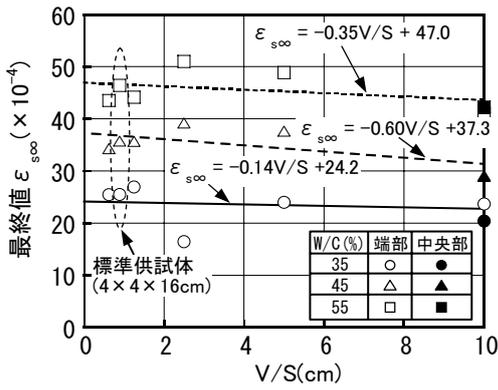


(a) セメントペースト

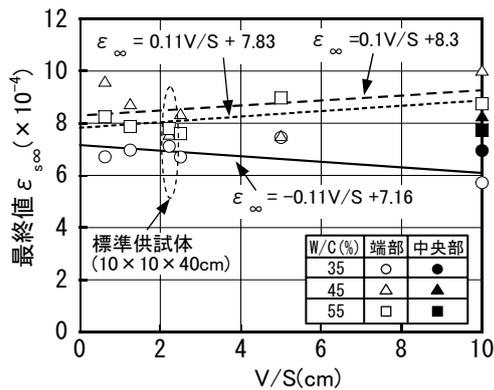


(b) コンクリート

図-4 乾燥収縮ひずみの経時変化 (W/C55%)



(a) セメントペースト



(b) コンクリート

図-5 最終値 $\epsilon_{s\infty}$ と V/S の関係

行うこととする。

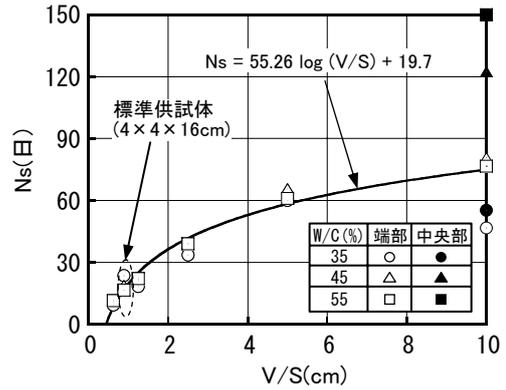
(a) 最終値

図-5に、最終値 $\epsilon_{s\infty}$ の回帰結果とV/Sの関係を示す。同図によると、最終値 $\epsilon_{s\infty}$ は、セメントペースト、コンクリートのいずれの場合も、V/Sに関わらずにほぼ一定の値となっている。このことから、V/Sは、最終値 $\epsilon_{s\infty}$ にほとんど影響を及ぼさないものと考えられる。

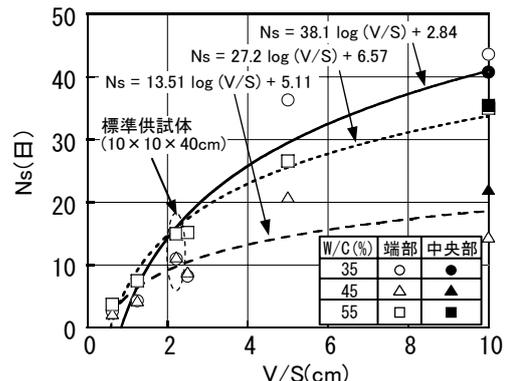
(b) 進行速度

図-6に、Nsの回帰結果とV/Sの関係を示す。同図における端部のNsに着目すると、セメントペースト、コンクリートのいずれの場合も、NsはV/Sが大きくなるにつれて対数的に増加している。また、セメントペーストの場合、Nsは、水セメント比に関わらず、V/Sによってほぼ一律に決定される。それに対して、コンクリートの場合、NsとV/Sの関係は、水セメント比ごとにやや異なったものになっている。

なお、V/S=10cmにおける中央部のNsは、端部のNsよりも全体的に大きくなっている。これは、V/Sが大きい場合に、供試体の平面保持が成



(a) セメントペースト



(b) コンクリート

図-6 Ns と V/S の関係

り立たなくなったためであると考えられる。

(3) 複合理論による推定値の検証

ここでは、筆者らの乾燥収縮予測式の基盤となっている複合モデルである馬場式²⁾ (2)に着目し、部材寸法・形状が異なる場合の同式の適用性を検証する。

$$\frac{\epsilon_{sc}}{\epsilon_{sm}} = \frac{[1 - (1 - mn)V_a][n + 1 - (n - 1)V_a]}{n + 1 - (n - 1)V_a} \quad (2)$$

ここに、 $n = E_a/E_m$ 、 $m = \epsilon_{sa}/\epsilon_{sm}$ 、 ϵ_s :乾燥収縮ひずみ、

E :ヤング係数(kN/mm²)、 V_a :骨材体積比

*添字 c, a, m は、それぞれコンクリート、骨材、マトリックスセメントペーストを示す。

図-7に、コンクリートの乾燥収縮ひずみの推定値と実測値の比較を示す(W/C55%の場合)。ここで、同図における推定値は、以下の手順によって求めた値である。i) 図-5(a)および6(a)に示したセメントペーストの $\epsilon_{s\infty}$ およびNsの回帰結果を式(1)に代入し、乾燥期間7, 28, 91, 182, 364および518日におけるセメントペーストの乾燥収縮ひずみ ϵ_{sm} を求める。ii) 式(2)に、i)で得られた ϵ_{sm} の値、セメントペーストのヤング係数 E_m の試験値などを代入し(材齢による

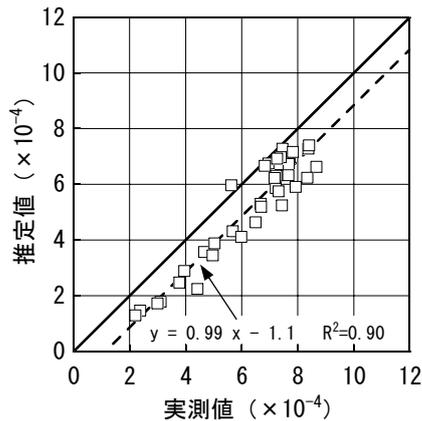


図-7 コンクリートの乾燥収縮ひずみの実測値と推定値の比較 (W/C55%)

E_m の変動は小さく、W/C55%の場合、その範囲は12.4~14.1kN/mm²であった)、各乾燥期間におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみ ϵ_{sc} を推定する。

同図によると、推定値は、実測値よりやや小さくなっているものの、実測値に近い値となっている。また、推定値と実測値の間には、乾燥期間やV/Sに関わりなく線形の関係が認められ、このことは、乾燥収縮ひずみの最終値だけではなく、進行過程においても、V/Sに関わらず、複合理論が適用できることを意味しているものと考えられる。

3.3 相対湿度の影響 (実験 2)

(1) 経時変化

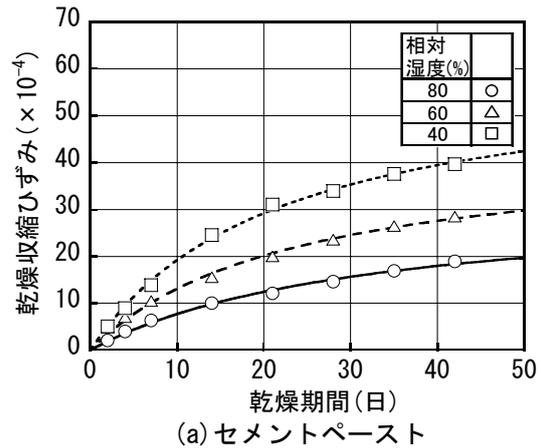
図-8に、相対湿度を変化させた場合のセメントペーストおよびコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化の一例を示す (W/C55%)。ここで、図中の曲線は、式(1)による試料ごとの回帰曲線である。同図によると、セメントペースト、コンクリートのいずれの場合も、全体的な傾向としては、相対湿度が低いほど、乾燥収縮ひずみが大きくなっている。

(2) 最終値および進行速度

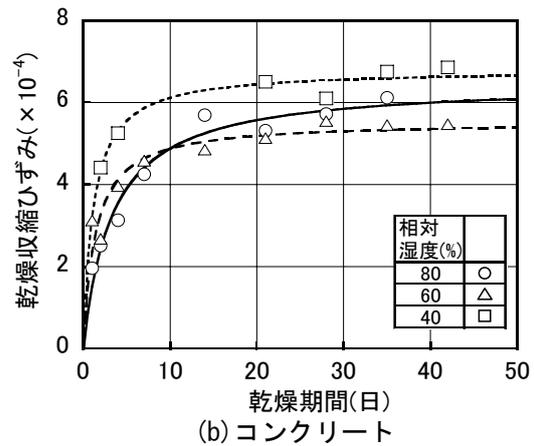
図-9および10に、式(1)による最終値 $\epsilon_{s\infty}$ およびNsの回帰結果と相対湿度の関係を示す。これらの図によると、セメントペースト、コンクリートともに、相対湿度が高くなるほど、最終値 $\epsilon_{s\infty}$ が減少し、Nsは増加している。

(3) 複合理論による推定値の検証

図-11に、コンクリートの最終値 $\epsilon_{s\infty}$ の馬場式

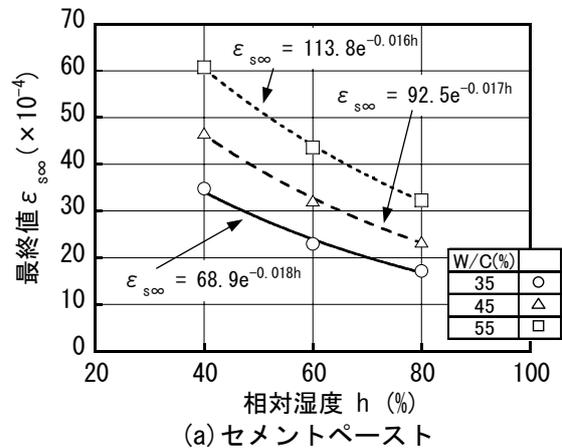


(a) セメントペースト

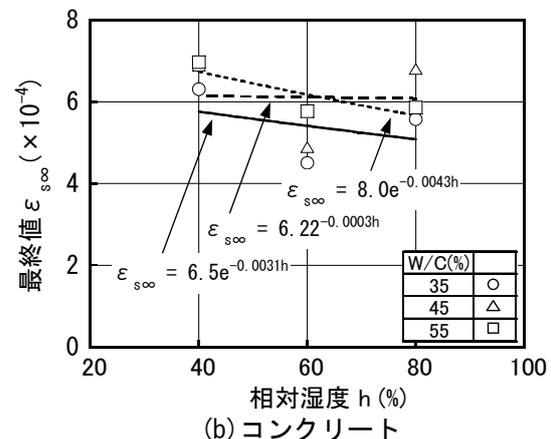


(b) コンクリート

図-8 乾燥収縮ひずみの経時変化 (W/C55%)



(a) セメントペースト



(b) コンクリート

図-9 最終値 $\epsilon_{s\infty}$ と相対湿度の関係

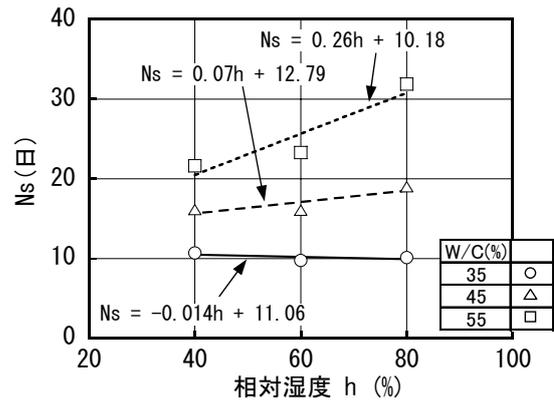
による推定値と実測値の比較を示す。ここで、同図における推定値は、原則として、3.2 (3) 項に示したのと同様な手順により求めた。ただし、ここでは、算出された各乾燥期間におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみ ϵ_{sc} の値を、式 (1) によりさらに回帰してコンクリートの ϵ_{sc} を推定した。また、式 (2) の E_m には、セメントペーストのヤング係数の試験値を代入した (E_m は相対湿度が高いほど大きくなり、W/C35%の場合は $18.7\sim 22.1\text{kN/mm}^2$ 、W/C45%の場合は $13.8\sim 15.5\text{kN/mm}^2$ 、W/C55%の場合は $9.7\sim 11.8\text{kN/mm}^2$ であった)。一方、 ϵ_{sc} の実測値は、図-9 (b) に示した回帰結果である。なお、ここで ϵ_{sc} を比較対象としたのは、セメントペーストとコンクリートの供試体の寸法・形状が異なっても、そのことが ϵ_{sc} に与える影響は小さいとの知見が 3.2 節において得られたためである。

同図によると、相対湿度 60 および 40%では、推定値と実測値がほぼ一致しており、このことから、相対湿度が異なる場合でも馬場式の適用性は高いと考えられる。ただし、相対湿度 80% の場合は、実測値に比べて推定値が小さくなっており、その原因は定かになっていない。

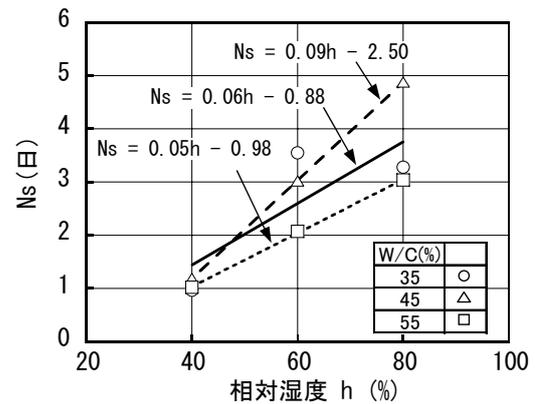
4. まとめ

本研究では、筆者らの乾燥収縮予測式に外的要因の影響を取り込むことを目的として、乾燥収縮ひずみに対する部材寸法・形状および相対湿度の影響を検討した。その結果から得られた知見は、以下の通りである。

- (1) V/S が大きいほど、乾燥収縮ひずみは緩やかに増加する。また、乾燥収縮ひずみの最終値に対する V/S の影響は小さい。
- (2) 環境の相対湿度が低いほど、乾燥収縮ひずみの最終値は大きくなり、乾燥収縮の進行速度は速くなる。
- (3) コンクリートの乾燥収縮ひずみの進行過程および最終値は、V/S に関わらず、セメントペーストの乾燥収縮ひずみに基づいて馬場式により推定できる。



(a) セメントペースト



(b) コンクリート

図-10 Ns と相対湿度の関係

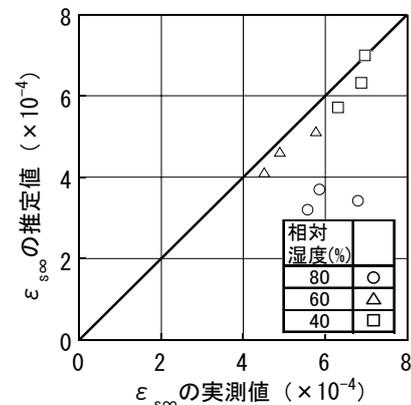


図-11 コンクリートの最終値 ϵ_s の実測値と推定値の比較

- (4) 馬場式は、環境の相対湿度に関わらずに適用できる可能性が高い。

謝辞

本研究の実施に際し、名城大学学生・戸田英世君、山下鯉由君の助力を得た。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岸谷孝一, 馬場明生: 建築材料の乾燥収縮機構, セメント・コンクリート, No.346, pp.30-40, 1975.12
- 2) 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, No.557, pp15-22, 2002.7