

# コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす 配合および作製条件の影響

EFFECT OF MIXING RATE AND PRODUCTION CONDITION  
ON DRYING SHRINKAGE STRAIN OF CONCRETE

今井忠男\*・平澤祐介\*\*・杉本文男\*\*\*

by Tadao IMAI, Yousuke HIRASAWA and Fumio SUGIMOTO

## 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮機構に関しては、従来から多くの研究者によってモデル式が提案されており、とくに、馬場<sup>1)</sup>によるモデル式は、多くの研究に引用されている。

しかしながら、近年、コンクリートの乾燥収縮率を基準化するにあたっては、それらモデル式はほとんど用いられず、実験等の測定データのみが重要視される傾向にあり、理論背景が希薄になっている<sup>2)</sup>。この原因は、従来のモデル式によっては、現場の試験データを容易に説明できないためであるが<sup>1)</sup>、実測データによる議論は重要であるが、現象の理論的な解明が進まない限り、配合条件が多様であるコンクリートの作製現場においては、その対策は十分なものにはならない。

乾燥収縮率を抑制したコンクリートを作製するためには、骨材の物性およびコンクリートの配合条件の影響を明らかとし、具体的に理論化する必要がある。従来の有力なモデル式<sup>1)3)4)5)</sup>では、セメントペーストおよび骨材に関する、それぞれの乾燥収縮率およびヤング率から、コンクリートの乾燥収縮率を算定するため、骨材およびセメントペーストの物性値を詳細に知る必要がある。しかし、セメントペーストは、単体で存在する場合と、コンクリート中のマトリックスとして存在する場合とでは、ヤング率等の物性値が異なることが知られており<sup>6)</sup>、この原因は、コンクリート中の骨材とセメントペーストの境界に形成される遷移帯の影響によると考えられている<sup>6)</sup>。すなわち、従来のモデル式に、セメントペースト単体の物性値を用いるならば、その算定値は大きく異なることが予想される。

すなわち、配合条件を考慮したコンクリートの乾燥収縮率について、理論的な算定を試みるならば、それぞれの条件のコンクリート中において、遷移帯を含むマトリックスとしてのセメントペーストについて、検討する必要がある。

著者らはこれまで、コンクリートの乾燥収縮率とセメントペースト量および骨材の乾燥収縮率との関係を、実験によって解明してきており<sup>7)</sup>、これらの関係から、コンクリートの乾燥収縮現象に関する単純なモデルを提案し検討してきた。

本研究では、はじめに、コンクリートの乾燥収縮率に関し、セメントペースト量と骨材およびコンクリート中のセメントペーストの乾燥収縮率を用いたモデル式を提案し、次に、実験によって、このモデル式の検証をおこなった。さらに、骨材および配合条件等が異なるコンクリートを作製し、コンクリート中におけるセメントペーストの乾燥収縮率の増減について調べた。これにより、配合および作製条件に応じたコンクリートの乾燥収縮率について、推定の可能性を検討した。

## 2. コンクリートの乾燥収縮率の算定理論

### 2.1 従来の考え方

コンクリートの乾燥収縮現象については、早くから大野<sup>3)</sup>によって研究が始められ、現在まで多くの研究がおこなわれている。しかし、乾燥収縮のメカニズムに関し、平面状態におけるセメントペーストの収縮とそれによる骨材の圧縮とが均衡するという基本的な考え方は、あまり変化してい

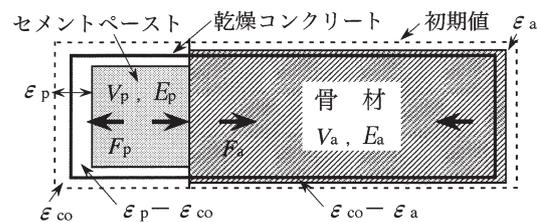


図1 コンクリートの乾燥収縮モデル

\* 秋田大学大学院 准教授 工学資源学研究科 地球資源学専攻 (〒010-0852 秋田市手形学園町1-1)、  
\*\* 秋田大学大学院 博士前期課程 工学資源学研究科、  
\*\*\* 秋田大学大学院 教授 工学資源学研究科 地球資源学専攻

ない。大野<sup>3)</sup>は、図1に示すように、単位体積および単位厚みのコンクリートが、初期の状態(破線)から乾燥状態(太線)に収縮した場合における、平面状態でのセメントペーストの収縮力 $F_p$ とそれによる骨材の圧縮力 $F_a$ とが釣り合うという条件を仮定した。ここで、セメントペーストと骨材のヤング率および乾燥収縮率を、それぞれ $E_p$ 、 $E_a$ および $\varepsilon_p$ 、 $\varepsilon_a$ 、コンクリート全体の乾燥収縮率を $\varepsilon_{co}$ とし、またそれぞれのコンクリート中の体積割合を $V_p$ 、 $V_a$ とすると、次式が成り立つ。なお、単位厚みの場合、面積割合は体積割合と同値である。

$$(\varepsilon_{co} - \varepsilon_a) E_a V_a = (\varepsilon_p - \varepsilon_{co}) E_p V_p \quad \dots (1)$$

ただし、 $\varepsilon_p > \varepsilon_{co} > \varepsilon_a$ とする。

さらに、 $V_p = (1 - V_a)$ として、 $\varepsilon_{co}$ についてまとめると、次式となる<sup>1)</sup>。

$$\varepsilon_{co} = \frac{1 + (m \cdot n - 1) V_a}{1 + (n - 1) V_a} \varepsilon_p \quad \dots (2)$$

ここで、 $m = \varepsilon_a / \varepsilon_p$ および $n = E_a / E_p$ である。

仕入<sup>4)</sup>は、コンクリートを骨材の周りセメントペーストが球状に覆う球殻モデルを用い、応力の釣合条件からコンクリートの収縮率 $\varepsilon_{co}$ を導いた。また、馬場<sup>1)</sup>は、毛細管力による収縮力から、 $\varepsilon_{co}$ のモデル式を導いているが、どれも両者の釣合条件を基本とする考え方は同じである。

図2に、大野の式によるコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす $n$ および $m$ の主たる要素の影響について示した。図より、 $n > 5$ の領域では、 $n$ の影響は小さいことがわかる。馬場の式も同様の結果を導いている<sup>1)</sup>。このことは、骨材のヤング率 $E_a$ が、セメントペーストの $E_p$ より十分大きい場合、圧縮力による骨材の収縮ひずみは無視できることを示している。すなわち、普通コンクリートでは、通常 $n > 5$ と考えられることから<sup>1)</sup>、骨材およびセメントペーストのヤング率を考慮しなくてもよく、コンクリートの乾燥収縮率 $\varepsilon_{co}$ は、 $V_a$ および $\varepsilon_p$ 、 $\varepsilon_a$ によって決まると思われる。

また、大野<sup>3)</sup>、Hobbs<sup>5)</sup>および馬場<sup>1)</sup>など従来のモデル式では、 $n$ および $V_a$ が大きくなるに従い、実測値 $\varepsilon_{co}$ との誤差が大きくなる傾向が知られている<sup>1)</sup>。よって、本論では、一般的なコンクリートである、 $V_a$ が大きい領域のモデル化について検討した。

## 2. 2 本論で提案するモデル式

著者らは、仕入<sup>4)</sup>と同様に、セメントペースト率 $V_p (= 1 - V_a)$ を用いて、普通コンクリートの乾燥収縮率のモデル式を検討した。図3(a)(b)に骨材の充填と骨材によるセメントペーストの拘束状態を示す。骨材の充填率が小さく $V_p$ が大きい場合、骨材

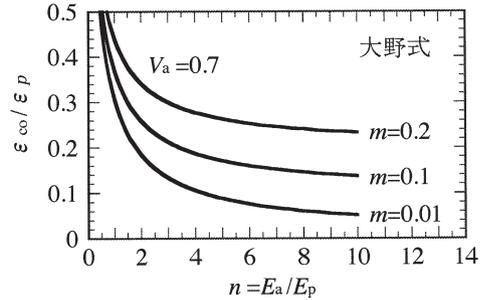
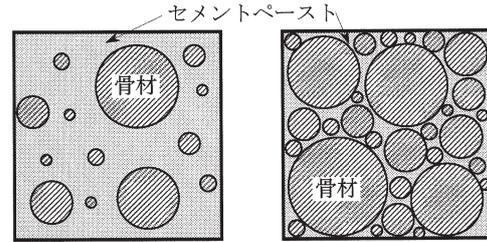


図2 大野の式<sup>3)</sup>による乾燥収縮現象の検討



(a) 自由状態、 $V_p \gg 0.4$  (b) 拘束状態、 $V_p < 0.4$

図3 骨材によるセメントペーストの拘束

は自由に移動でき、セメントペーストも自由に収縮できる。しかし、骨材の充填率が実積率と同程度( $V_p < 0.4$ )になると、骨材は自由に移動できず、骨材間のセメントペーストは拘束される。このように、骨材で拘束された状態でのセメントペーストの乾燥収縮率を $\varepsilon_{cp}$ と定義すると、 $\varepsilon_{cp}$ は自由状態(図3(a))での値 $\varepsilon_p$ より小さく、骨材の充填状態により変化すると考えられる。いま、普通コンクリートの条件を $0.2 < V_p < 0.4$ および $n > 5$ とするなら、 $\varepsilon_{cp}$ は一定であり、収縮力による骨材の変形は無視できると仮定できる。よって、コンクリートの乾燥収縮率 $\varepsilon_{co}$ は、セメントペーストと骨材の乾燥収縮率 $\varepsilon_{cp}$ および $\varepsilon_a$ を、それぞれの体積割合で配分し、それらの和によって、次式のように表すことが可能である。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{co} &= V_p \varepsilon_{cp} + (1 - V_p) \varepsilon_a \\ &= V_p (\varepsilon_{cp} - \varepsilon_a) + \varepsilon_a \quad \dots (3) \end{aligned}$$

すなわち、本式では、コンクリートの乾燥収縮率 $\varepsilon_{co}$ は、単純に、セメントペースト率 $V_p$ と、それぞれの乾燥収縮率 $\varepsilon_{cp}$ および $\varepsilon_a$ で決定されることになる。また、セメントペースト率 $V_p$ は、配合条件によって次式によって求まる。

$$V_p = W (1 / (W/C \rho_c) + 1 / \rho_w) + v_a \quad \dots (4)$$

ただし、 $W$ は単位水量、 $W/C$ は水セメント比、 $\rho_c$ および $\rho_w$ は、それぞれセメントと水の密度であり、 $v_a$ は空気量である。

## 2. 3 セメントペーストの乾燥収縮率とヤング率

セメントペーストの乾燥収縮率は、脱水による

セメントペーストの毛細管力<sup>1)</sup>と体積弾性率で決まると考えられる。また、セメントペーストの毛細管力と体積弾性率は、両者ともセメントペーストの内の微細孔の密度に依存すると仮定するならば、セメントペーストの乾燥収縮率 $\varepsilon_{cp}$ は、そのヤング率 $E_{cp}$ と相関が高いと考えられる。さらに、セメントペーストのヤング率 $E_p$ は、水セメント比 $W/C$ 、空気量 $v_a$ 、水中養生日数 $t$ に影響を受けることが従来より知られている。さらに、部材の体積表面積比 $V/S$ が大きくなると、試験片中心部まで乾燥しにくいため、 $V/S$ は水中養生と同様な効果があると思われる。

また、コンクリートのヤング率は、骨材の表面に形成される遷移帯に影響を受けることから<sup>6)</sup>、コンクリート中のセメントペーストは遷移帯を含むと定義するならば、骨材率 $V_a$ が同じ場合には、骨材の比表面積 $S_f$ は、ほぼ骨材粒径 $d$ によって決まるから、骨材率の大きいコンクリートにおけるセメントペーストのヤング率 $E_{cp}$ は、骨材率 $V_a$ と骨材平均粒度 $d$ に影響を受けると考えられる。よって、これら $E_{cp}$ に影響を与える要因は、すべて $\varepsilon_{cp}$ にも影響を与えると推察される。

#### 2. 4 コンクリートの乾燥収縮率の推定法

上述の議論をまとめると、セメントペーストの乾燥収縮率は、セメントペーストのヤング率を低下させる要因に影響を受けると考えられる。

そこで、セメントペーストの乾燥収縮率 $\varepsilon_{cp}$ について、基準値 $\varepsilon_{cp0}$ を設定し、配合条件等の影響による増減値を $\Delta\varepsilon_{cp}$ とすると、 $\varepsilon_{cp}$ は次式で表される。

$$\varepsilon_{cp} = \varepsilon_{cp0} + \Delta\varepsilon_{cp} \quad \dots (5)$$

また、増減値 $\Delta\varepsilon_{cp}$ は、次式のようなパラメータ $W/C$ 、 $v_a$ 、 $t$ 、 $V/S$ 、 $S_f$ 等によって、決定されると考えられる。

$$\Delta\varepsilon_{cp} = f(W/C, v_a, t, V/S, d) \quad \dots (6)$$

すなわち、この増減値を決める関数を求めることで、式(3)を用いてコンクリートの乾燥収縮率を算定することができる。

さらに、上式のそれぞれのパラメータを $i$ で示し、 $\Delta\varepsilon_{cp}$ と $i$ との関係について、本論では、次のような線形関数で近似した。

$$\Delta\varepsilon_{cpi} = \alpha_i(i - i_0) \quad \dots (7)$$

ここで、 $\alpha_i$ はそれぞれの条件 $i$ におけるひずみの増減割合であり、 $i_0$ は $i$ の基準値である。上式を、式(3)および式(5)に代入してまとめると、コンクリートの配合および作製条件に対応した、コンクリートの乾燥収縮率の推定式が得られる。

$$\varepsilon_{co} = V_p \{ [\varepsilon_{cp0} + \alpha_i(i - i_0)] - \varepsilon_a \} + \varepsilon_a \quad \dots (8)$$

上式を用い、実験結果から、それぞれの条件 $i$ における増減割合 $\alpha_i$ を求めることができれば、コンクリートの配合条件に応じた乾燥収縮率 $\varepsilon_{co}$ を求めることが可能になる。

なお、コンクリートのヤング率 $E_{co}$ は、Hashin-Hansenの式<sup>8)</sup>によって次式で与えられる。

$$E_{co} = \frac{V_p E_{cp} + (2 - V_p) E_a}{(2 - V_p) E_{cp} + V_p E_a} E_{cp} \quad \dots (9)$$

よって、上式より、 $E_{co}$ は、 $E_{cp}$ に大きく影響を受けることから、コンクリートの乾燥収縮率 $\varepsilon_{co}$ の指標となると考えられる。

### 3. 実験方法

#### 3. 1 コンクリート試験片および骨材

本研究では、小型なコンクリート試験片を用いて、乾燥期間を短縮させた。本コンクリート試験片は、図4に示すように、 $40 \times 40 \times 160$ mmの角柱( $V/S=8.89$ mm)であり、モルタルバー法(アルカリシリカ反応性試験)で用いられる型枠を用いて作製した。なお、JIS規格における長さ測定用のコンクリート試験片は、 $100 \times 100 \times 400$ mmの角柱( $V/S=22.2$ mm)である。

このように、小型のコンクリート試験片を作製する場合、通常の粗骨材粒度(5~20mm)を用いると、試験片内において粗骨材の偏りが大きくなるため、独自の骨材粒度を定めた。写真1(a)(b)に本研究で用いた細骨材および粗骨材の独自の粒度を示す。ここでは、細骨材の粒度を0.15~2mmとし、粗骨材を2~12.5mmとした。なお、本法では、1つの原石を破砕し、粗骨材から細骨材まで一貫的に作製し、細骨材に天然砂を用いなかった。

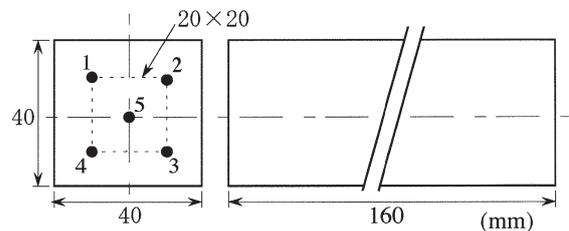


図4 コンクリート試験片の寸法 (●1~5は測定点)

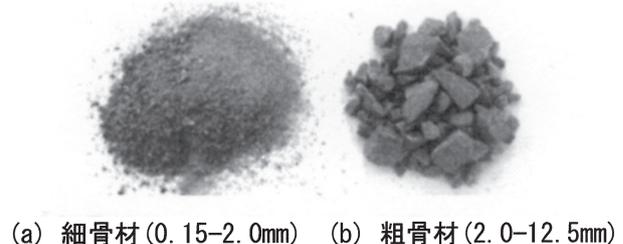


写真1 コンクリート用骨材の粒度

表1 骨材岩石の基礎物性値

| 岩石名   | 吸水率(%) | 比重   | 乾燥収縮率( $\mu$ ) | ヤング率(GPa) |
|-------|--------|------|----------------|-----------|
| 安山岩A  | 1.80   | 2.61 | 214            | 64.3      |
| 安山岩B  | 3.70   | 2.55 | 537            | 43.1      |
| 変成岩   | 2.70   | 2.66 | 160            | 65.6      |
| 硬質砂岩A | 0.25   | 2.69 | 54             | 64.3      |
| 硬質砂岩B | 0.36   | 2.63 | 240            | 51.0      |
| 軟質砂岩  | 11.1   | 1.96 | 942            | 7.9       |

よって、この試験片の実験結果は、1種類の骨材岩石の性能だけを反映したものとなり、天然砂の影響を考慮しなくてもよい。

また、骨材に使用した5種類の岩石の物性値を表1に示す。表中の乾燥収縮率は、岩石コアをマイクロメータ法<sup>7)</sup>によって測定したものであり、ヤング率は弾性波速度から算定した動的ヤング率である。本研究では、これら岩石コアの物性値を骨材の物性値 $\varepsilon_a$ および $E_a$ として用いた。

### 3. 2 コンクリートの基本配合および実験条件

本実験の基本となる配合条件を表2に示す。なお本実験では、自己収縮量も含めて乾燥収縮率と定義する。この条件でのセメントペーストの乾燥収縮率を基準値 $\varepsilon_{cp0}$ とする。ただし、セメントの密度は $3.140\text{g/cm}^3$ とした。なお、本法では、コンクリートは手練りし、空気量は調整せずに、自然の空気量の推定値を $v_a=1\%$ として計算した。

この基本配合を基に、表3に示すような各配合条件および作製条件が異なるコンクリートを作製した。実験①および②では、セメントペースト率 $V_p$ および骨材の乾燥収縮率 $\varepsilon_a$ の影響を調べ、セメントペーストの乾燥収縮率の基準値 $\varepsilon_{cp0}$ を算定した。次に、実験③～⑦では、 $V_p$ をほぼ一定とし、それぞ

れの配合および作製等の条件 $i$ が、基準値 $\varepsilon_{cp0}$ に与える影響について調べ、その増減割合 $\alpha_i$ を求めた。なお、実験③では、セメント量 $C=390\text{kg/m}^3$ とし、 $W$ を変化させたため、セメントペースト率が多少変化している。実験④では、基本配合にAE剤によって空気量を増加させ、骨材量が変化しないようにコンクリートを型枠へ詰めた。したがって、 $W$ および $C$ が空気量の増加分だけ減少している。実験⑤では、コンクリート試験片を $20\pm 2^\circ\text{C}$ の水中で養生させた。実験⑥では、基本配合条件のコンクリートを用い、圧縮試験用の円柱状(直径100、長さ200mm)の型枠で試験片を作製した。脱型後、端面を研削し、長さを測定した。ちなみに、JIS規格の試験片では $V/S=22.2\text{mm}$ であり、円柱試験片の $V/S=20\text{mm}$ とほぼ近い。実験⑦では、骨材平均粒径を変化させるため、細骨材比を30、40および50%とした。

### 3. 3 乾燥収縮率および動的ヤング率の測定法

コンクリートの乾燥収縮率の測定では、マイクロメータを用い、図4に示すように試験片の長さについて、中心点を含む5点を測定し、それぞれの測定点の乾燥収縮率を平均して求めた。

コンクリート試験片は、 $20\pm 2^\circ\text{C}$ の恒温室において、乾燥させずに型枠内で24時間養生した後、初期値となる試験片長を測定したのち、同室内のデシケータ内(湿度 $50\pm 5\%$ )で乾燥させ、定期的に長さを測定した。測定は、試験片長が変化しなくなるまで続けた。なお、水中養生する場合は、型枠内で24時間養生した後、 $20\pm 2^\circ\text{C}$ の水槽内で養生させ、水中養生後の長さを初期値とした。

コンクリート試験片は、乾燥収縮率が一定となった後、超音波透過法によってP波およびS波速

表2 基本配合条件

| 使用骨材 | $s/a$ (%) | 平均粒径(mm) | $W/C$ (%) | 単位質量(kg/m <sup>3</sup> ) |      |      |     | 空気量(%) | セメントペースト率 |
|------|-----------|----------|-----------|--------------------------|------|------|-----|--------|-----------|
|      |           |          |           | 水                        | セメント | 粗骨材  | 細骨材 |        |           |
| 安山岩A | 40        | 3.59     | 50        | 195                      | 390  | 1043 | 690 | 1      | 0.328     |

表3 各試験における作製条件

| 実験番号 | セメントペースト率           | 骨材収縮率( $\mu$ ) | $W/C$ (%)  | 空気量(%)  | 養生日数    | $V/S$ (mm) | 骨材平均粒径(mm)       |
|------|---------------------|----------------|------------|---------|---------|------------|------------------|
| ①    | 0.328~0.582         | 214            | 50         | 1       | 0       | 8.89       | 3.59             |
| ②    | 0.328               | 54~936         | 50         | 1       | 0       | 8.89       | 3.59             |
| ③    | 0.319, 0.328, 0.348 | 214            | 45, 50, 55 | 1       | 0       | 8.89       | 3.59             |
| ④    | 0.328               | 214            | 50         | 0.5~7.8 | 0       | 8.89       | 3.59             |
| ⑤    | 0.328               | 214            | 50         | 1       | 0, 2, 6 | 8.89       | 3.59             |
| ⑥    | 0.328               | 214            | 50         | 1       | 0       | 8.89, 20   | 3.59             |
| ⑦    | 0.328               | 214            | 50         | 1       | 0       | 8.89       | 1.95, 3.59, 7.95 |

度を測定し、これら弾性波速度と配合表から求めたコンクリート密度を用いて、乾燥収縮後のコンクリートの動的ヤング率 $E_{co}$ を求めた。

4. 実験結果および考察

4. 1 コンクリートの乾燥収縮挙動

図5は、基本配合の本試験片と円柱試験片によるコンクリートの乾燥収縮率の経時変化を示している。ただし、水中養生日数はそれぞれ、0日および6日とした。ここで、円柱試験片の6日水中養生の試験条件は、JIS規格の試験条件に近い。図より、コンクリートの乾燥収縮率は、本試験片では、急激に乾燥収縮し、30日程度で一定となっていることがわかる。これに対し、円柱試験片では、緩やかに乾燥収縮し、一定となるまで約80日以上を要し、本試験片より、乾燥収縮率は小さくなることわかる。また、どちらの試験片も、水中養生すると、乾燥収縮率は小さくなることわかった。

4. 2 セメントペースト率および骨材の乾燥収縮率の影響

図6(a)(b)にセメントペースト率とコンクリートの乾燥収縮率および動的ヤング率との関係を示す。図6(a)のセメントペースト率 $V_p$ とコンクリートの乾燥収縮率 $\epsilon_{cp}$ との関係は、この領域では、本論で予測したとおり、ほぼ直線的な関係を示し、これに式(3)を近似させた結果、 $\epsilon_{cp}=1899\mu$ と算定された。この値を基準値 $\epsilon_{cp0}$ とする。この値は、セメントペースト単体の乾燥収縮率 $\epsilon_p$ に対し、1/3程度である<sup>9)</sup>。次に、図6(b)では、コンクリートの動的ヤング率 $E_{co}$ は、セメントペースト率の増加によって、多少減少していることがわかる。これらの値から、Hashin-Hansenの式(9)を用いて、セ

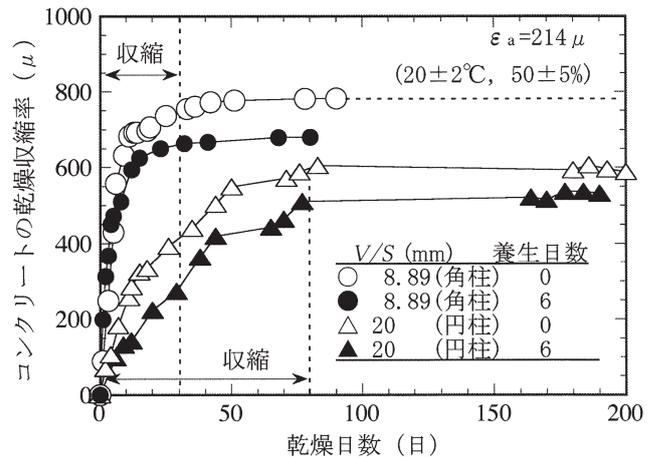


図5 コンクリートの乾燥収縮率の測定例

ントペーストの動的ヤング率 $E_{cp}$ を推定した結果も同図中に示した。 $E_{cp}$ は、セメントペースト率 $V_p$ の増加にしたがい増加傾向にある。この原因は、 $V_p$ の増加とともに、骨材量が減少し、力学的に弱い遷移帯が減少するためと考えられる。本論では、セメントペーストの $E_{cp}$ が増加すれば、乾燥収縮率 $\epsilon_{cp}$ が減少するという予測を立てているが、ここでは、 $E_{cp}$ の増加に対して $\epsilon_{cp}$ は一定となった。この原因は、 $V_p$ の増加によって、骨材の拘束が弱くなり、セメントペーストは収縮し易くなると予測されるが、同時に $E_{cp}$ が増加するため、乾燥収縮率 $\epsilon_{cp}$ は、この2つの要因が相殺して、この $V_p$ の領域では、あまり変化しなかったと推察される。

同様に、図7(a)(b)は、コンクリートの乾燥収縮率 $\epsilon_{co}$ および動的ヤング率 $E_{co}$ 、 $E_{cp}$ に及ぼす骨材の乾燥収縮率 $\epsilon_a$ の影響を示している。図7(a)には、 $\epsilon_{co}$ と $\epsilon_a$ との関係に対し、式(3)を示した。本データと式

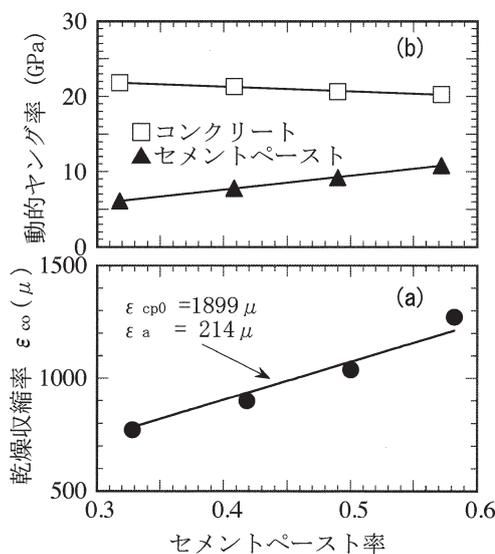


図6 セメントペースト率の影響 (実験①)

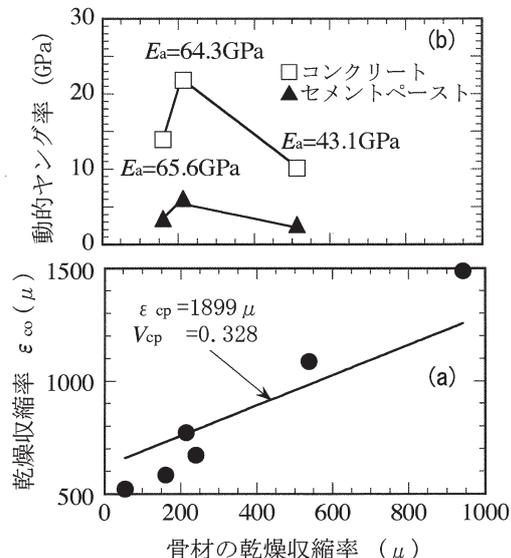


図7 骨材の乾燥収縮率の影響 (実験②)

(3)との相関係数は0.91であり、コンクリート実験におけるデータのバラツキを考慮するなら、およそその傾向を示していると考えられる。よって、本論で提案したコンクリートの乾燥収縮率のモデル式は、有効であることが実証された。なお、図7(b)のコンクリートの動的ヤング率と骨材の乾燥収縮率との間に相関はなく、骨材の $E_a$ の差以上に、コンクリートの $E_{co}$ は大きく異なることがわかった。これは、骨材の表面形状や鉱物組成によって、遷移帯の形成が異なるためと思われる。

### 4.3 各配合および作製条件の影響

図8～図12は、同一の骨材岩石およびセメントペースト率のコンクリートにおいて、その乾燥収縮率 $\epsilon_{co}$ および動的ヤング率 $E_{co}$ 、 $E_{cp}$ に及ぼす配合および作製条件の影響を示す。また、実験結果の $\epsilon_{co}$

と各作製条件のパラメータとの関係を式(8)を用いて近似し、セメントペーストの乾燥収縮率の増減割合 $\alpha_i$ を算定した。

図8(a)(b)に水セメント比 $W/C$ の影響を示す。図より、 $W/C$ の増加に伴い、コンクリートの乾燥収縮率 $\epsilon_{co}$ は増加し、動的ヤング率は低下することがわかる。図8(a)より、 $W/C=50\%$ を基準としたとき、セメントペーストの乾燥収縮率の増減割合 $\alpha_{w/c}$ は、 $36.8 \mu/\%$ と算定された。この算定にあたっては、式(8)にセメントペースト率の変化も考慮して近似した。同様に、図9(a)(b)に空気量 $v_a$ の影響を示す。図より、 $v_a$ の増加に伴い、コンクリートの乾燥収縮率は増加し、動的ヤング率は低下することがわかる。図9(a)より、 $v_a=1\%$ を基準としたとき、セメントペーストの乾燥収縮率の増減割合 $\alpha_{v_a}$ は、

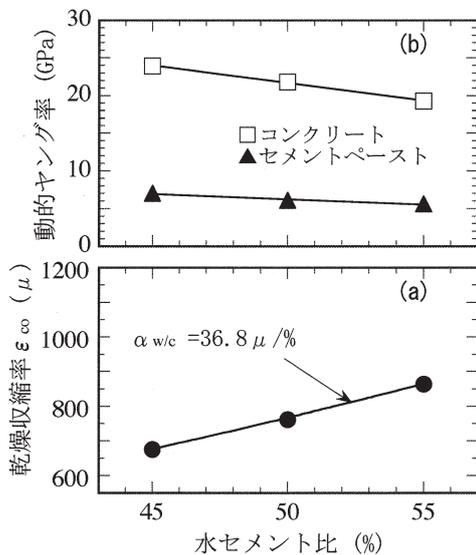


図8 水セメント比の影響 (実験③)

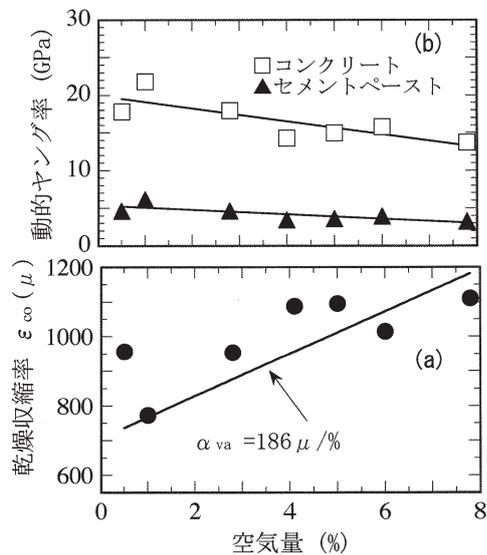


図9 空気量の影響 (実験④)

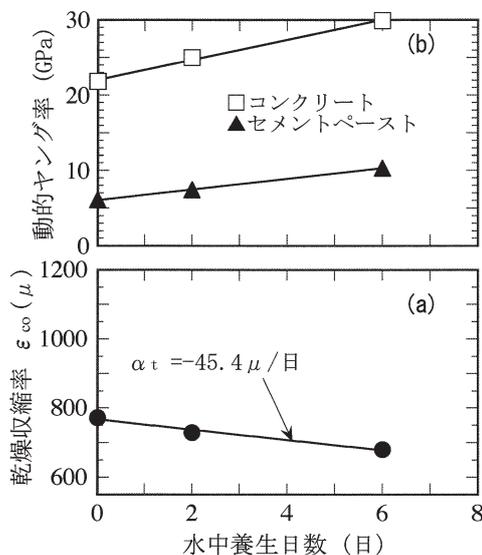


図10 水中養生日数の影響 (実験⑤)

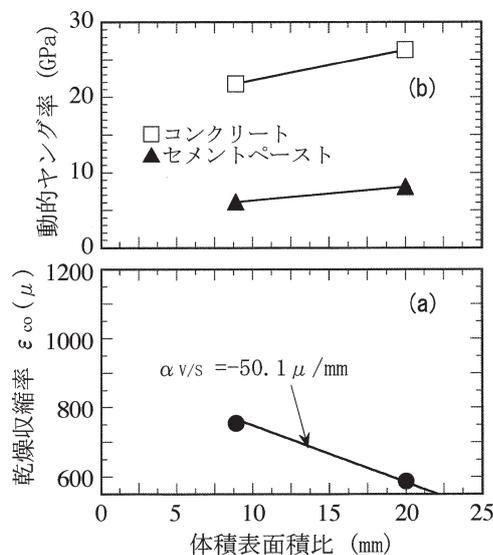


図11 体積表面積比の影響 (実験⑥)

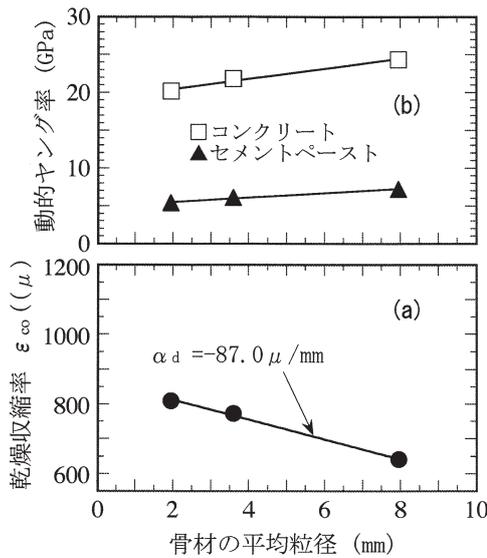


図12 骨材の平均粒径の影響 (実験⑦)

186 μ /%と算定された。なお、図中の近似式に精度がない原因は、コンクリート作製中の温度にバラツキが生じたことが原因と推測される。上述のように、 $W/C$ および $v_a$ の増加は、セメントペーストを弱くし、セメントペーストの $\epsilon_{cp}$ を増加させる効果があることがわかった。

次に、図10(a)(b)に水中養生日数 $t$ の影響を示す。図より、 $t$ の増加に伴い、コンクリートの乾燥収縮率は減少し、動的ヤング率は増加することがわかる。図10(a)より、 $t=0$ 日を基準としたとき、セメントペーストの乾燥収縮率の増減割合 $\alpha_t$ は、 $-45.4 \mu / \text{日}$ と算定された。同じく、図11(a)(b)に体積表面積比 $V/S$ の影響を示す。図より、 $V/S$ の増加に伴い、コンクリートの乾燥収縮率は減少し、動的ヤング率は増加することがわかる。図11(a)より、 $V/S=8.89 \text{mm}$ を基準としたとき、セメントペーストの乾燥収縮率の増減割合 $\alpha_{v/s}$ は、 $-50.1 \mu / \text{mm}$ と算定された。 $t$ の増加はセメントペーストを硬化させ、自己収縮させるが、 $V/S$ の増加もコンクリートの乾燥を抑制し、水中養生と同様の効果が得られると考えられる。

図12(a)(b)は骨材の平均粒径 $d$ の影響を示している。平均粒径 $d$ の増加に伴い、コンクリートの乾燥収縮率は減少し、動的ヤング率は増加することがわかる。図12(a)より、 $d=3.59 \text{mm}$ を基準としたとき、セメントペーストの乾燥収縮率の増減割合 $\alpha_d$ は、 $-87.0 \mu / \text{mm}$ と算定された。この結果から、骨材の平均粒径が小さくなり、骨材の比表面積が増加すると、セメントペースト中に遷移帯が増加してセメントペーストを弱くし、乾燥収縮しやすくなることがわかった。

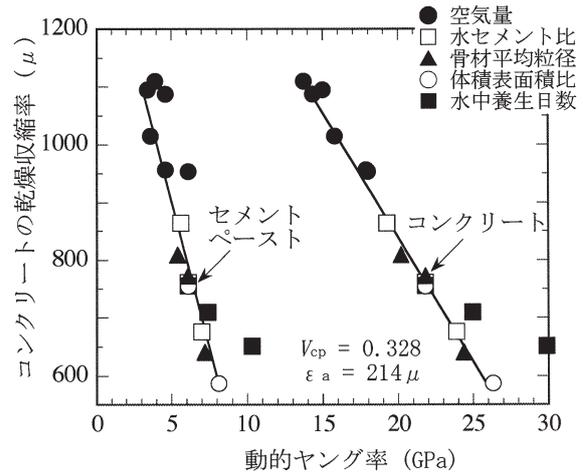


図13 コンクリートの乾燥収縮率と動的ヤング率の関係

#### 4. 4 コンクリートの乾燥収縮率と動的ヤング率の関係

図13は、図8～図12の結果について、コンクリートの乾燥収縮率 $\epsilon_{co}$ とコンクリートおよびセメントペーストの動的ヤング率 $E_{co}$ 、 $E_{cp}$ との関係をまとめたものである。この結果において、コンクリートの乾燥収縮率 $\epsilon_{co}$ とコンクリートのヤング率 $E_{co}$ との関係は、骨材およびセメントペースト率 $V_p$ が一定の場合のみに成り立つが、セメントペーストのヤング率 $E_{cp}$ に関しては、全ての作製条件において成り立つと考えられる。図より、コンクリートの乾燥収縮率とコンクリートおよびセメントペーストの動的ヤング率とは、負の傾きを持つ直線的な関係にあり、両者とも相関が高いことがわかる。なお、水中養生日数を長くすると、動的ヤング率は増大するが、コンクリートの乾燥収縮率の低下割合は小さかった。

上述のことから、本論の仮説のとおり、セメントペーストを弱くするコンクリートの配合および作製条件は、コンクリートの乾燥収縮率を増大させる効果があることが明らかとなった。また、この結果より、乾燥後のコンクリートについて、動的ヤング率を測定することで、乾燥収縮率 $\epsilon_{co}$ を推定できる可能性があるが、今後の課題である。

#### 4. 5 コンクリートの乾燥収縮率の推定

表4に、図8～図12のセメントペーストの乾燥収縮率における増減割合 $\alpha_i$ の結果をまとめた。この表から、コンクリートの作製条件に応じた $\Delta\epsilon_{cp}$ を、次式のように算定できる。

$$\Delta\epsilon_{cp} = \sum \Delta\epsilon_{cpi} = \sum \alpha_i (i - i_0) \quad \dots (10)$$

上式を、式(3)に代入すると、配合および作製条件を考慮した、コンクリートの乾燥収縮率 $\epsilon_{co}$ を予測する次式が求まる。

表4 セメントペーストの乾燥収縮率における増減割合

| 基本配合の<br>乾燥収縮率 $\varepsilon_{cp0}$ ( $\mu$ ) | 乾燥収縮率の増減割合 $\alpha_i$       |                             |                               |                                    |                                |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
|  | W/C                         | 空気量 $v_a$                   | 養生日数 $t$                      | V/S                                | 骨材平均径 $d$                      |
|  | $\alpha_{w/c}$ ( $\mu/\%$ ) | $\alpha_{v_a}$ ( $\mu/\%$ ) | $\alpha_t$ ( $\mu/\text{日}$ ) | $\alpha_{v/s}$ ( $\mu/\text{mm}$ ) | $\alpha_d$ ( $\mu/\text{mm}$ ) |
| 1899   | 36.8                        | 186                         | -45.4                         | -50.1                              | -87.0                          |

表5 通常コンクリートの配合とその骨材の乾燥収縮率の限界値

| s/a<br>(%) | 骨材平均径<br>(mm) | W/C<br>(%) | 単位水量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 空気量<br>(%) | セメントペースト率 | 乾燥収縮率 ( $\mu$ ) |       |
|------------|---------------|------------|------------------------------|------------|-----------|-----------------|-------|
|            |               |            |                              |            |           | セメントペースト        | 骨材限界値 |
| 40         | 6             | 55         | 175                          | 5          | 0.326     | 1636            | 395   |

$$\varepsilon_{co} = V_p \{ [\varepsilon_{cp0} + \sum \alpha_i (i - i_0)] - \varepsilon_a \} + \varepsilon_a \quad \dots (11)$$

ただし、養生日数  $t$  と体積表面積比  $V/S$  は、どちらもセメントペーストの自己収縮率および硬化に関する条件なので、どちらかを十分大きくすると、もう一方の効果は得られない。なお、上式は、配合条件等の組合せによる複合的な影響が小さい場合に成り立つ。

以上の結果を用いて、表5のような普通コンクリートの通常の配合条件を想定し<sup>10)</sup>、JIS規格による試験法 ( $V/S=22.2\text{mm}$ 、 $t=7\text{日}$ ) でコンクリートの乾燥収縮率を測定した場合について、式(11)を用いて計算した結果、このコンクリート中のセメントペーストの乾燥収縮率は、 $\varepsilon_{cp}=1636\mu$  と算定された。さらに、この値と  $V_p=0.326$  およびコンクリートの乾燥収縮率の建築学会基準値  $\varepsilon_{co}=800\mu$  を式(3)に代入し、安全な骨材の乾燥収縮率  $\varepsilon'_a$  について解くと、 $\varepsilon'_a=395\mu$  が得られた。本試験の乾燥湿度は、建築学会基準より10%低く、収縮し易い条件のため、この値は、通常配合における骨材の乾燥収縮率の基準値として、十分に安全である。ただし、本研究とは異なり、細骨材に天然砂を用いた場合の影響については、今後の検討課題である。

## 5. まとめ

本研究では、コンクリートの乾燥収縮率の推定式を提案し、実験によって、それを実証した。また、コンクリートの配合および作製条件が乾燥収縮率に与える影響について明らかとし、算定式の汎用性を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 普通コンクリートの乾燥収縮率は、骨材で拘束された状態でのセメントペーストおよび骨材の乾燥収縮率によって決定される。

(2) セメントペーストの乾燥収縮率は、コンクリートの配合および作製条件によって異なり、ヤング率が低下すると増加する傾向にある。

(3) 本論で提案したコンクリートの乾燥収縮率の

算定式および実験結果から、安全な骨材の乾燥収縮率の基準値は  $395\mu$  と算定された。

## 引用文献

- 1) 馬場明生(1976)：コンクリートの乾燥収縮の複合機構、日本建築学会関東支部研究報告集、409-412.
- 2) 日本コンクリート工学協会(2010)：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書、日本コンクリート工学協会、pp. 81-95.
- 3) 大野和男(1953)：モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と龜裂防止に関する研究、北海道大學工學部研究報告、Vol. 9、pp. 49-110.
- 4) 仕入豊和(1961)：セメントペースト量とコンクリートの乾燥収縮量の関係に関する研究、日本建築学会研究報告、No. 58、pp. 13-16.
- 5) Hobbs, D.W.(1971): The dependence of the bulk modulus, the Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration, Materials & Structures, Vol.4, No.20, pp.107-114.
- 6) 塚原絵万ら(2000)：遷移帯を考慮したモルタルのヤング係数の推定に関する研究、生産研究、52巻、8号、pp. 333-336.
- 7) 今井忠男ら(2009)：コンクリート用骨材における乾燥収縮ひずみの許容値について、資源・素材2009(札幌)講演資料、pp. 271-274.
- 8) Hashin, Z.(1962): The Elastic Modulus of Hetero-homogeneous Materials, J. App. Mech., Vol.29, No.1, pp.143-150.
- 9) 清原千鶴ら(2004)：コンクリートの乾燥収縮ひずみの推定に関する研究、日本建築学会吸収支部研究報告、第43号、pp. 129-132.
- 10) 真野孝次ら(2010)：砕石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実験的研究、資源・素材2010(福岡)講演資料、pp. 235-238.

(2010年10月14日受付 2011年2月10日受理)