

# 論文 日常環境下の乾燥がコンクリートの乾燥収縮ひずみおよび力学的性質に及ぼす影響

佐藤 晴香<sup>\*1</sup>・寺西 浩司<sup>\*2</sup>・中村 雄一<sup>\*3</sup>

要旨：本研究では、寸法の大きな単一粒度骨材を用いた場合に、日常環境下の乾燥に伴いコンクリートのヤング係数などが低下する現象に対する水セメント比の影響を検討した。その結果、このような現象はいずれの水セメント比においても生じることが明らかになった。また、モデル実験と FEM 解析により、骨材寸法が大きいと、セメントペーストの収縮拘束応力を緩和する役割を果たす遷移帯のコンクリート中での総量が少なくなり、遷移帯全体としての剛性が見かけ上高くなるため、コンクリート内部の微細ひび割れが増大し、乾燥収縮ひずみが小さく測定されるとの知見が得られた。

キーワード：乾燥収縮，内部ひび割れ，単一粒度骨材，水セメント比，遷移帯，有限要素法

## 1. はじめに

筆者らは、既報<sup>1),2)</sup>において、寸法の大きな単一粒度骨材を用いた場合に、コンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなり、ヤング係数が低下することを報告した。ここで、乾燥収縮ひずみが小さくなるのは、日常環境下の乾燥に伴ってコンクリート内部に微細ひび割れが発生し、それに相当する膨張ひずみとポテンシャルの乾燥収縮ひずみが相殺されるためである。また、乾燥に伴って、コンクリート内部に微細ひび割れが発生することは他の研究者によっても近年報告されている<sup>3),4),5)</sup>。

しかしながら、上記の現象は、筆者らの研究では、未だ、限られた調査条件の範囲でしか確認していない。そこで、本研究では、まず、実験 1 において、単一粒度骨材を用いたコンクリートの水セメント比を変化させ、既報<sup>2)</sup>と同様の実験を行った。そして、寸法の大きな骨材を用いた場合に、乾燥収縮ひずみが小さくなり、ヤング係数などの力学的性質が低下する現象に対する水セメント比の影響を検討した。

次に、本研究では、コンクリート内部に微細ひび割れが発生し、乾燥収縮ひずみが見かけ上小さくなる現象が、骨材寸法が大きい場合に顕著に生じる原因について検討した。検討にあたっては、骨材とセメントペーストの界面に存在する脆弱層である遷移帯のコンクリート中での総量が骨材寸法によって変化することに着目した。そして、実験 2 において、その影響を単純化された条件下で検討するためのモデル実験を行うとともに、そのモデル実験を対象とした FEM 解析を行った。

## 2. 水セメント比の影響を調べるための実験（実験 1）

## 2.1 実験概要

### (1) 実験ケース

表-1 に実験ケースを示す。本実験では、骨材寸法の影響をより単純化された条件下で把握するため、既報<sup>2)</sup>と同様に、単一粒度骨材を用いて実験を行い、その寸法を 2 水準に変化させた。また、水セメント比 (W/C) を変化させた。なお、本報では、本実験と同一の使用材料および調合の設計方針で実験を行った既報<sup>2)</sup>の実験 2 における W/C50%の結果も含めて考察を行うこととした。

### (2) コンクリート

#### (a) 使用材料および調合

本実験では、表-2 に示すような、同一工場から入手した砕砂および砕石をそれぞれふるい分けて寸法 1.2 ~ 2.5mm および 10 ~ 20mm の単一粒度骨材を取得した。また、寸法 10 ~ 20mm の骨材を用いたコンクリートの分離抑制を目的として、全てのケースで増粘剤を使用した。

表-3 にコンクリートの調合を示す。骨材体積比を 50%一定とし、W/C を変化させた。

表-1 実験ケース

記号	W/C (%)	骨材寸法 (mm)
40-2.5	40	1.2 ~ 2.5
40-20		10 ~ 20
50-2.5*	50	1.2 ~ 2.5
50-20*		10 ~ 20
65-2.5	65	1.2 ~ 2.5
65-20		10 ~ 20

\*既報<sup>2)</sup>より実験データを引用

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 3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	藤原産石灰石砕砂 (表乾密度 2.69g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.78%)
粗骨材	藤原産石灰石砕石 (表乾密度 2.69g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.31%)
増粘剤	セルロース系水溶性高分子化合物

\*1 名城大学大学院 理工学研究科建築専攻 大学院生 (学生会員)

\*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 矢作建設工業(株) (会員外)

(b) 型枠への充填

寸法 10～20mm の骨材を用いたケースでは、骨材の沈降を防ぐため、コンクリートがある程度固くなってから（練上がりから W/C40%では 1hr 後、W/C65%では 5hr 後）、練返しを行って供試体の型枠に詰めた。

(3) 試験項目および試験方法

(a) 乾燥収縮試験

供試体は 10×10×40cm とし、材齢 1 週まで標準水中養生を行った後に、温度 20℃、相対湿度 60%の乾燥環境下で、JIS A 1129-3 に準拠し、乾燥収縮ひずみおよび質量減少率を測定した。

(b) 圧縮試験

表-4 に圧縮試験のケースを示す。乾燥による力学的性質の変化を調べるために、気中養生した供試体（10×20cm）に対して 2 材齢で圧縮試験を行い、圧縮強度およびヤング係数を測定した。また、比較のために、標準水中養生した供試体に対しても試験を行った。

2.2 実験結果とその考察

(1) 乾燥収縮

(a) 骨材寸法の影響

図-1 および 2 に、乾燥収縮ひずみおよび質量減少率と骨材寸法の関係を示す（乾燥期間 182 日）。図-1 によると、乾燥収縮ひずみに対しては、W/C よりも骨材寸法の方が大きな影響を及ぼしており、いずれの W/C の場合も、骨材寸法が大きいと乾燥収縮ひずみが小さくなっている。また、W/C60%の場合にその差が最も大きくなっており、骨材寸法 1.2~2.5mm と 10~20mm では  $1000 \times 10^{-6}$  程度の差が生じている。一方、図-2 によると、質量減少率は、W/C が高いほど大きくなっており、骨材寸法には左右さ

れていない。

(b) 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

図-3 に、乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を示す。寸法 10～20mm の単一粒度骨材を用いたケースでは、どの W/C の場合も、寸法 1.2～2.5mm のケースより、同一の質量減少率に対する乾燥収縮ひずみが小さくなっている。これは、寸法の大きな単一粒度骨材を用いたコンクリートでは、既報<sup>2)</sup>に示したように、内部に微細ひび割れが生じ、その幅に相当する見掛けの膨張ひずみの分だけ乾燥収縮ひずみが小さく測定されるためであると考えられる。

(2) 圧縮強度

図-4 に、圧縮強度と骨材寸法の関係を示す。一般に知られているように、骨材寸法が小さいほど圧縮強度が高くなっている。また、圧縮強度は、W/C40%では、骨材寸法が大きい場合に乾燥により低下するのに対し、W/C50%および 65%では乾燥しても変化していない。

(3) ヤング係数

図-5 に、ヤング係数と骨材寸法の関係を示す。ヤング係数は、W/C40%では傾向がやや曖昧であるが、全体として、水中養生のケース（W4W）では骨材寸法によって変化せず、気中養生のケース（A5W および A14W）では、骨材寸法が大きい場合に大幅に低下している。すなわち、骨材寸法が大きい場合に乾燥によりヤング係数が大幅に低下するといえる。これは、乾燥により生じた内部ひび割れが、ヤング係数試験の圧縮載荷時に徐々に閉じていき、その分の見かけ上のひずみが弾性ひずみに加わることが原因と推察される。

表-3 調合

W/C (%)	空気量 (%)	骨材体積比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )		増粘剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
				セメント	骨材		
40	0	50	279	221	500	0.3	0.005
50			306	194			
65			336	164			

表-4 圧縮試験のケース

記号	養生方法	試験材齢 (週)
W4W	標準水中	4
A5W	材齢 1 週まで標準水中の後、 気中 (20℃, 60%RH)	5
A14W		14

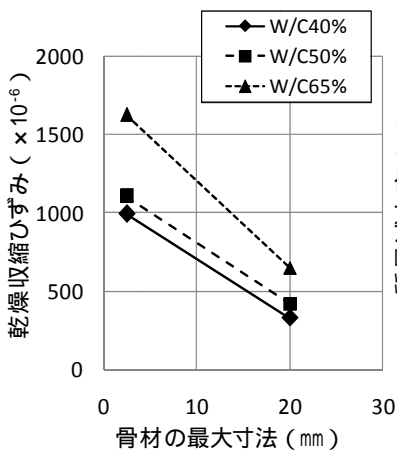


図-1 乾燥収縮ひずみと骨材寸法の関係

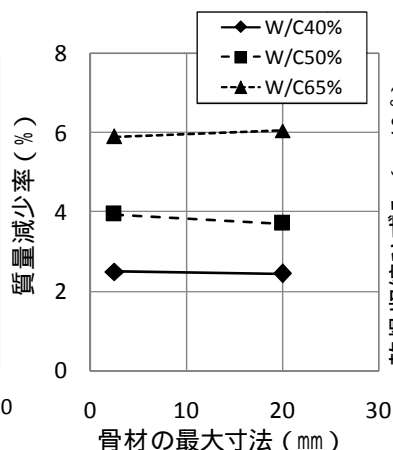


図-2 質量減少率と骨材寸法の関係

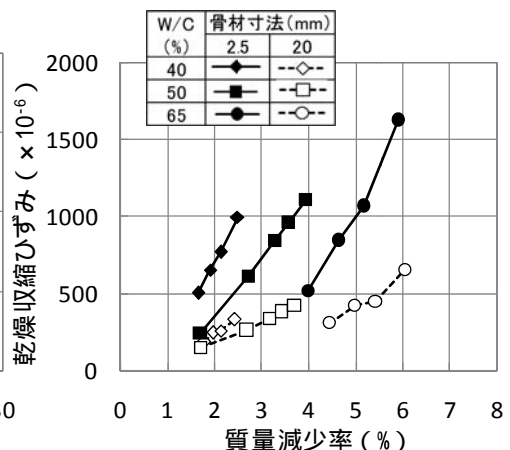


図-3 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

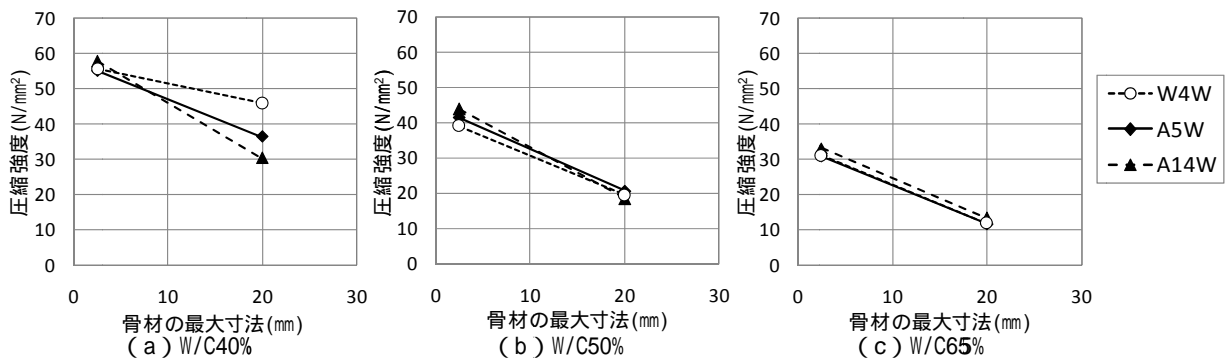


図-4 圧縮強度と骨材寸法の関係

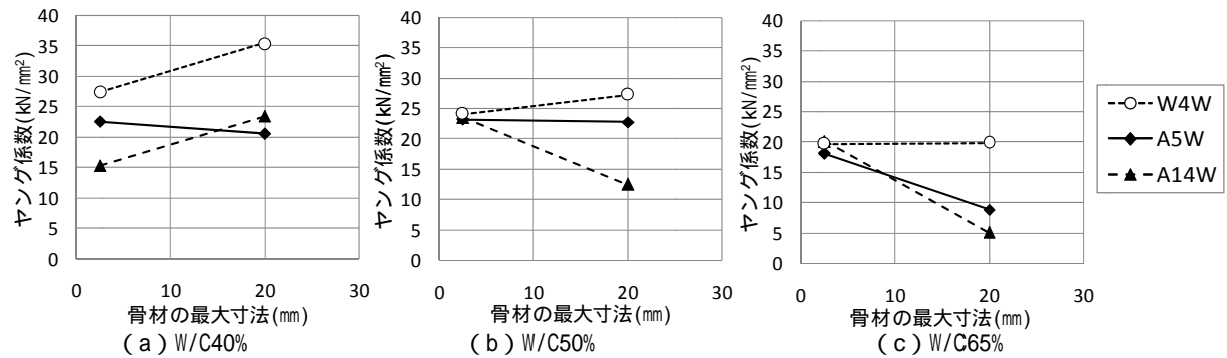


図-5 ヤング係数と骨材寸法の関係

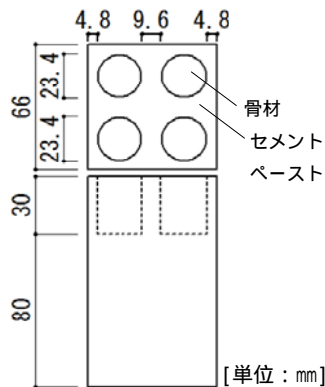


図-6 モデル試験体

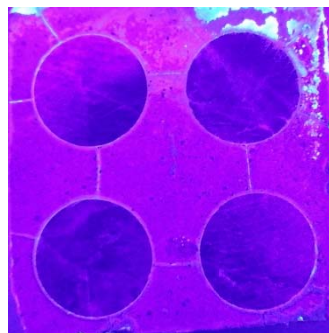


図-7 ひび割れ発生状況

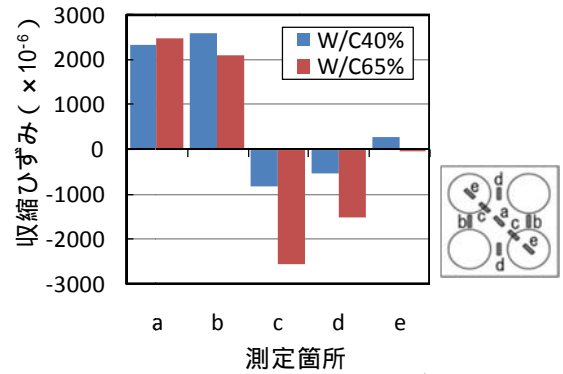


図-8 ひずみ

### 3. モデル実験（実験2）

#### 3.1 実験概要

##### (1) 試験体

図-6にモデル試験体を示す。この試験体は、円柱状骨材と見なした、石灰石の岩石塊から採取したコア（23.4mm）4本と、W/C40%または65%のセメントペーストで構成されるものとした（試験体断面に占める骨材の比率は40%とした）。また、試験体の側面および底面はエポキシ樹脂でシールし、試験体上面からの乾燥のみを許容した。

##### (2) 試験項目および試験方法

試験体は材齢7日まで標準水中養生した。その後、試験体上面（測定面）の骨材およびセメントペースト部分に、図-8中に示すようにひずみゲージ（ゲージ長5mm）を貼付した。そして、恒温恒湿室内（温度20℃、相対湿度60%）に試験体を存置してひずみの測定を開始した。

また、既報<sup>2)</sup>の実験と同様の方法により、試験体上面に発生したひび割れの状況を観察した。

#### 3.2 実験結果

図-7に、試験体上面のひび割れ発生状況を示す（W/C65%、材齢49日）。既報<sup>2)</sup>の実験結果と同様に、骨材界面に生じたものと、骨材から放射状に生じたもの（骨材同士を結ぶもの）の2種類のひび割れが観察された。

図-8に、図-7と同一材齢における試験体上面のひずみ（同一記号のゲージの平均値）を示す（収縮ひずみを正の値で表示する）。同図からわかるように、セメントペーストの骨材同士を結ぶ方向（位置aおよびb）には、収縮ひずみが生じている。一方で、骨材界面（位置c）、およびセメントペーストの骨材同士を結ぶ方向と直交方向（位置d）には、膨張ひずみが生じている。これらの膨張ひずみの発生は、図-7に示したひび割れが検知された結果であると考えられる。

#### 4. モデル実験を対象とした FEM 解析

##### 4.1 解析概要

本章では、3次元 FEM 解析プログラム<sup>6)</sup>を用いて、擬似的な2次元の材料非線形解析を行った。

##### (1) 解析モデル

図-9に解析モデルの一例を示す。解析モデルは、実験2に用いたモデル試験体を4分割したものとし、要素は、骨材、セメントペーストおよび遷移帯の3種類とした。また、遷移帯の厚みは、文献<sup>7)</sup>を参考にして50 $\mu$ m一定とした。

##### (2) 解析要因とその水準

表-5に、解析要因とその水準を示す。本解析では、骨材寸法 ( $A_s$ ) を2および20mmの2水準とした(骨材寸法に対する比率が一定となるように、解析モデルの外寸を定めた)。また、遷移帯のヤング係数 ( $E_t$ ) をセメントペーストのヤング係数 ( $E_p$ ) の1(遷移帯なし)、1/10および1/100倍の3水準に変化させた。

##### (3) 材料特性値

表-6に、解析に用いた材料特性値を示す。表中のセメ

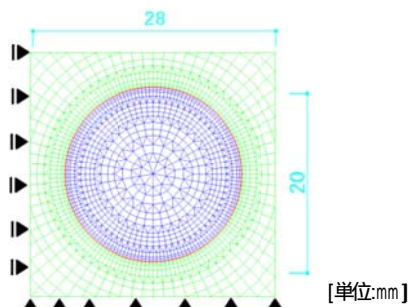


図-9 解析モデル( $A_s=20$ mm)

表-5 解析要因とその水準

要因	水準
骨材寸法 $A_s$ (mm)	2, 20
遷移帯のヤング係数 $E_t$	$E_p$ (遷移帯なし), $1/10E_p$ , $1/100E_p$

\* $E_p$ : セメントペーストのヤング係数

表-6 材料特性値

特性値	セメントペーストおよび遷移帯	骨材
圧縮強度	$f_c(t) = 54.7 \times t / (0.69 - 0.74t)$	93.9
ヤング係数	$E_c(t) = e \times f_c(t)^{0.96}$	$78.1 \times 10^3$
引張強度	$f_t(t) = 0.24 \times f_c(t)^{0.572}$	9.4
ポアソン比	0.27	0.28
乾燥収縮ひずみ	$\varepsilon_{sh}(t) = -3050 \times \{1 - \exp(-0.086 \times t^{0.96})\}$	0

[記号]  $f_c(t)$ : 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $t$ : 材齢(日),  $E_c(t)$ : ヤング係数(N/mm<sup>2</sup>),  $f_t(t)$ : 引張強度(N/mm<sup>2</sup>),  $\varepsilon_{sh}(t)$ : 自由収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ ),  $e$ : セメントペーストは265, 遷移帯は、解析ケースに応じて265, 26.5または2.65。

ントペーストの値は、実験2における水セメント比40%のセメントペーストに対する圧縮試験、割裂引張試験および乾燥収縮試験で得られた実験値をフィッティングして求めたものである。

##### 4.2 解析結果

図-10に変形状況の一例を示す( $A_s=20$ mm・ $E_t=1/10E_p$ , 材齢28日)。同図から、セメントペーストの収縮が骨材により拘束されている様子わかる。また、図-11に、図-10と同一ケース・同一時期における最大主応力分布を示す(ただし、この結果のみは、ひび割れが発生しないと仮定して解析した結果。また、引張応力を正の値で表示する)。骨材界面と骨材から放射状の領域の引張応力が高くなっており、その位置は、図-7に示したひび割れの発生位置と合致している。

図-12にひび割れ状況の一例を示す( $A_s=2$ mm, 材齢48日)。遷移帯が存在するケース( $E_t=1/100E_p$ )では存在しないケース( $E_t=E_p$ )に比べて、特に骨材界面のひび割れが減少していることがわかる。

##### 4.3 考察

##### (1) 遷移帯のヤング係数および骨材寸法の影響

図-13に、解析モデル全体のひずみ(水平方向)の経時変化を示す。また、図-14に、全体のひずみと骨材寸法の関係を示す(材齢28日)。図-14によると、 $E_t=1/100E_p$ のケースでは、他のケースに比べて収縮ひずみが大きくなっており、このことは、以下により説明されるものと考えられる。すなわち、コンクリートに内部ひび割れが発生すると、それに相当する膨張ひずみの分だけ収縮ひ

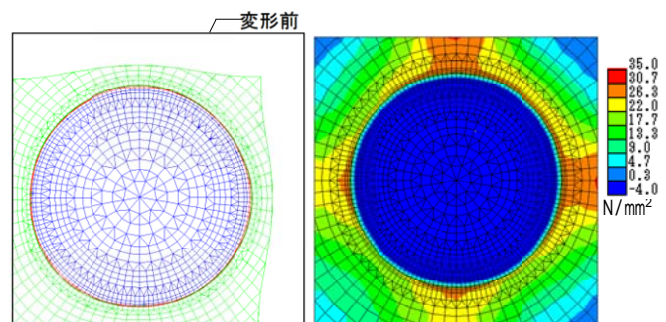
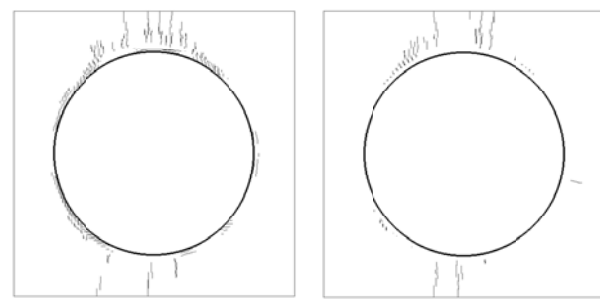


図-10 変形状況

図-11 最大主応力分布



(a)  $E_t=E_p$

(b)  $E_t=1/100E_p$

図-12 ひび割れ状況 ( $A_s=2$ mm)

ずみが見かけ上小さくなる。しかし、遷移帯の剛性がある程度以上低いと、それが、ペーストの収縮拘束応力を緩和する役割を果たし、内部ひび割れが減少するため、結果として、収縮ひずみが見かけ上大きくなる。

さらに、図-14 によると、 $E_t=1/100E_p$  のケースでは、収縮ひずみは、骨材寸法が大きい場合の方が小さくなっている。これは、骨材寸法が大きいほど、骨材の表面積の減少に伴ってコンクリート中の遷移帯の総量が少なくなり、遷移帯全体としての剛性が見かけ上高くなるのが原因であると考えられる。また、以上により、骨材寸法が大きい場合に、コンクリートに内部ひび割れが生じ、乾燥収縮ひずみが小さく測定される機構がある程度説明されるものと考えられる。

## (2) 実験 1 の結果との比較

図-14 中には、実験 1 により得られた材齢 182 日の乾燥収縮ひずみも示してある。本解析と実験 1 では供試体や測定材齢などが異なるため、乾燥収縮ひずみの値同士を直接比較することに意味はない。しかしながら、同図によれば、いずれの結果も、骨材寸法が大きいほど乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向となっている。したがって(1)項に上述した骨材寸法が大きい場合に乾燥収縮ひずみが小さく測定される機構は、実験によってもある程度裏付けられたものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、単一粒度骨材を用いたコンクリートの水セメント比を変化させて、乾燥収縮ひずみや力学的性質に対する影響を調べた。また、モデル実験とそれを対象とした FEM 解析を行い、遷移帯に着目して、コンクリート内部の微細ひび割れの発生状況および乾燥収縮ひずみに対する骨材寸法の影響を検討した。本研究により得られた知見は以下の通りである。

(1) 圧縮強度は、コンクリートが乾燥すると、W/C40%では骨材寸法が大きい場合に低下するが、W/C50%以上では変化しない。また、ヤング係数は、コンクリートが乾燥すると、骨材寸法が大きい場合に大幅に低下する。

(2) 骨材寸法が大きいと、セメントペーストの収縮拘束応力を緩和する役割を果たす遷移帯のコンクリート中の総量が少なくなり、遷移帯全体としての剛性が見かけ上高くなるため、内部ひび割れが増加し、収縮ひずみが小さく測定される。

## 謝辞

本研究の実施に際し、名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科・石川靖晃教授に解析プログラムを提供して頂いた。さらに、本研究費の一部は、文部科学省平成 24 年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「21 世紀型自

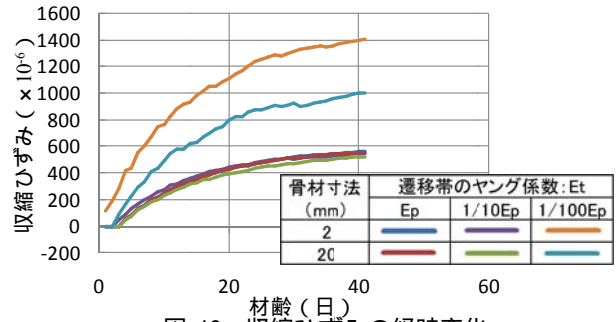


図-13 収縮ひずみの経時変化

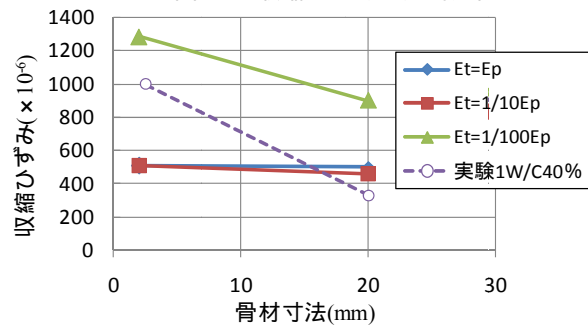


図-14 収縮ひずみと骨材寸法の関係

然災害のリスク軽減に関するプロジェクト」によった。ここに付記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 樋口優香, 寺西浩司, 齊藤和秀: 骨材寸法および微粒分がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.418-423, 2012
- 樋口優香, 寺西浩司: 乾燥に伴う内部ひび割れがコンクリートの乾燥収縮ひずみおよび力学的性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.502-507, 2014
- 閑田徹志, 市川禎和, 紺谷修, 武田三宏, 大塚浩司: 高温および低湿度影響下におけるコンクリート物性の変化と損傷の定量化に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, No.615, pp.15-22, 2007.5
- 最知正芳: 早期材齢において乾燥作用を受けたコンクリート内部の微細ひび割れの定量的評価, 日本建築学会東北支部研究報告集, No.68, pp.63-66, 2005.6
- 篠野宏, 堀口直也, 丸山一平: コンクリートの乾燥により生じるひずみ分布と微細ひび割れ性状の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.454-459, 2012.7
- 田辺忠顕: 初期応力を考慮した RC 構造物の非線形プログラム, 技報堂出版, 2004.3
- 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移体厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, Vol.4, No.2, pp.1-8, 1993.7

