

# 論文 脱型直後から乾燥させたコンクリートの収縮率と含水率に関する一考察

坂本 亮<sup>\*1</sup>・中田 善久<sup>\*2</sup>・大塚 秀三<sup>\*3</sup>・飛坂 基夫<sup>\*4</sup>

要旨:本論文は,コンクリートの含水率と乾燥収縮率について明らかにしすることを目的として,脱型直後から乾燥を開始した乾燥面の異なるコンクリートの供試体中の含水率と乾燥収縮の関係について考察したものである。その結果,質量減少率と乾燥収縮率の関係は,密接な関係があるものの,乾燥材齢8週以降はばらつく傾向を示した。一方,絶乾状態の質量減少率に対する各乾燥期間の質量減少率の割合を絶乾状態における質量減少率の割合から差し引いた値である供試体の含水率の割合と乾燥収縮速度は,水セメント比,乾燥面の数および養生ごとに2次曲線的な関係で示すことができる。

キーワード:乾燥収縮率,質量減少率,脱型,含水率,乾燥収縮速度,乾燥面

## 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮率は,2009年の日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事<sup>1)</sup>の改定により特記がない場合において $8 \times 10^{-4}$ 以下と規定された。また,コンクリートの乾燥収縮率は,脱型後から材齢7日まで水中養生した $100 \times 100 \times 400$ (mm)の供試体を用いて JISA 1129:1993 による測定が一般的<sup>2)</sup>である。さらに,筆者らが行った乾燥収縮に関する文献調査<sup>3)</sup>でも測定方法に JISA 1129:1993 を用いた文献が大半を占めており,供試体を材齢7日まで水中養生してから乾燥開始し,測定を行っている現状である。また,日本建築学会においても収縮ひび割れの推定式が提案されている<sup>4)</sup>ものの,脱型時期および養生,体積表面積比といった施工条件が異なる乾燥収縮に関するデータはほとんどない。

一方,JISA 1129:1993 により測定した乾燥収縮率は,コンクリートの品質を評価するものであるため,水中養生が困難である実際の建築現場におけるコンクリートが試験結果による乾燥収縮率と同等な傾向を示すか不明確である。

そこで,本研究は,脱型直後から乾燥開始させたコンクリートの含水率と収縮率の関係を明らかにするため,質量減少率および乾燥収縮率を乾燥期間ごとに区分し,これらの速度および含水率の関係が調査,使用材料,乾燥面および養生方法が異なることにより,どのように変化するかを考察したものである。

ここでは,水セメント比,粗骨材の種類,乾燥面の数および脱型後の養生方法を変えたコンクリートの乾燥収縮の試験を行い,さらに供試体を絶乾状態にさせてその含水率の変化を検討している。なお,本論文は,脱型後に基長を測定しいるため,自己収縮がほとんど含まれてない乾燥収縮の測定結果について検討したものである。

## 2. 乾燥面の違いによる質量減少率と乾燥収縮率の関係

### 2.1 実験概要

#### (1) 使用材料およびコンクリートの調査

使用材料を表-1に示す。使用材料は,セメントを普通ポルトランドセメントとし,粗骨材は,硬質砂岩および石灰石の2種類とした。また,化学混和剤はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。

コンクリートの調査と品質を表-2に示す。コンクリートの調査は水セメント比を45,50および55%の3水準とし,単位水量を $170 \text{kg/m}^3$ ,単位粗骨材かさ容積を $0.55 \text{m}^3/\text{m}^3$ の一定とした。さらに,スランプ,空気量および標準養生供試体の圧縮強度を示した。

#### (2) 乾燥開始から試験終了までの過程

乾燥開始から試験終了までの過程を図-1に示す。本実験では,製造したコンクリートを温度が $20^\circ\text{C}$ ,湿度が60%の恒温恒湿室により封かん養生し,翌日に脱型した。本実験では,建築現場におけるコンクリートを想定しているため脱型後を基長とし,乾燥開始させ,所定の乾燥材齢において JIS

表-1 使用材料

使用材料	名称	品質・性状
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: $3.16 \text{g/cm}^3$ 比表面積: $3,300 \text{cm}^2/\text{g}$
水	上水道水	-
細骨材	山砂	表乾密度: $2.60 \text{g/cm}^3$
粗骨材	硬質砂岩2005	表乾密度: $2.68 \text{g/cm}^3$ 実積率:60.5% 吸水率:0.59%
	石灰石2005	表乾密度: $2.64 \text{g/cm}^3$ 実積率:59.4% 吸水率:1.21%
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

\*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

\*2 日本大学 理工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 ものつくり大学 技能工芸学部建設技能工芸学科 講師 修士(工学) (正会員)

\*4 飛坂技術士事務所 所長 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの調合と品質

セメントの種類	粗骨材の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位粗骨材かさ容積 (m³/m³)	単位量 (kg/m³)				絶対容積 (/m³)			フレッシュコンクリートの性状		標準養生供試体の圧縮強度 (N/mm²)			
					W	C	S	G	C	S	G	スラブ (cm)	空気量 (%)	3日	7日	28日	91日
N	硬質砂岩	45	49.9	0.55	170	378	863	892	120	333	333	18.5	4.1	24.2	35.6	46.1	46.5
		50	50.8			340	894	892	108	344	333	19.0	4.9	20.5	30.2	39.4	44.2
		55	51.5			309	920	892	98	355	333	18.0	6.0	18.0	28.1	38.8	39.0
	石灰石	45	50.8			378	879	863	120	339	327	18.5	4.8	27.4	40.2	52.6	54.8
		50	51.7			340	910	863	108	350	327	19.0	4.5	25.3	28.7	37.8	43.1
		55	52.4			309	936	863	98	361	327	17.0	5.5	16.9	24.3	32.6	33.2

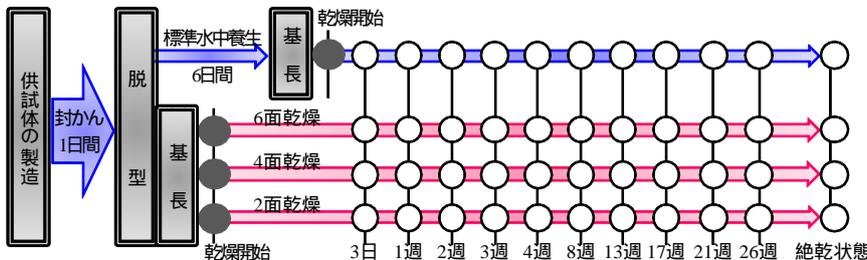


図-1 乾燥開始から試験終了までの過程

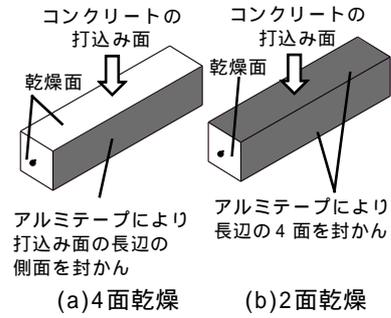


図-2 4面乾燥および2面乾燥の概要

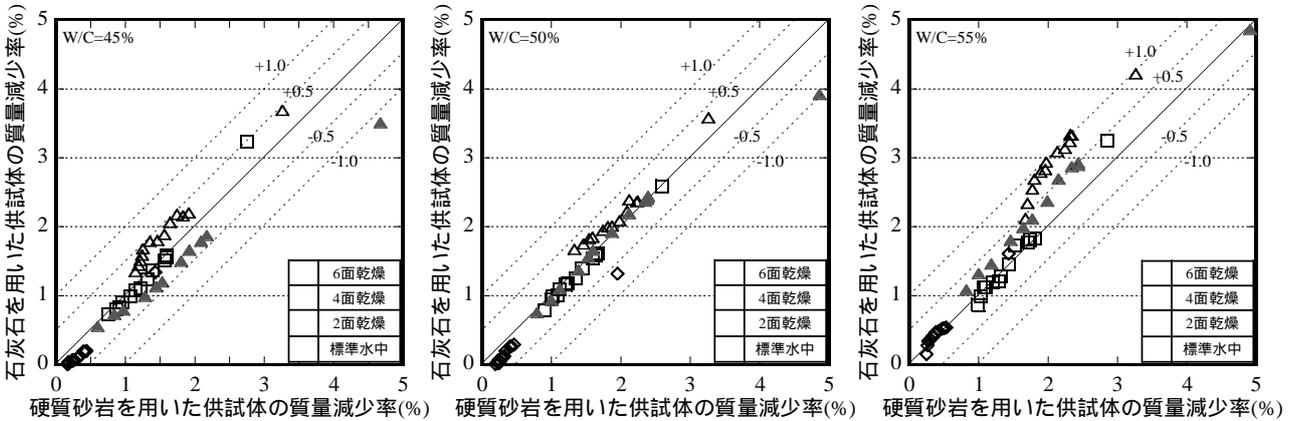


図-3 乾燥材齢と質量減少率の関係

A 1129-3:2001「モルタル及びコンクリートの長さ試験方法-第3部;ダイヤルゲージ方法」により測定を行い,脱型後に材齢7日まで標準水中養生してから乾燥開始した供試体と比較を行った。4面乾燥および2面乾燥の概要を図-2に示す。4面乾燥は打込み面に対して長辺の側面,2面乾燥は長辺面の4面をアルミテープを用いて覆い乾燥面を変化させ,温度20℃,湿度60%に空中養生したものである。さらに,乾燥材齢26週終了後は,供試体を乾燥炉により強制的に乾燥させ,その後は炉内で常温まで下げ,温度20℃,湿度60%の恒温恒湿室へ戻し,一定期間後に測定を行った。なお,本実験では供試体を110℃に調節した乾燥炉により一定期間乾燥させた状態を絶乾状態と定義し,検討を行った。

### 2.2 乾燥材齢と質量減少率の関係

乾燥材齢と質量減少率の関係を図-3に示す。質量減少率は,乾燥面の数が6面>4面>2面の順に小さくなる傾向を示した。これは,乾燥面が少ないことにより供試体から蒸発する水分が抑制されたためと考えられる。また,同じ乾燥面

の数であれば,乾燥材齢26週の場合,硬質砂岩と石灰石を用いた質量減少率は乾燥面6面における水セメント比が55%を除き,ほぼ同等な傾向を示した。しかし,脱型直後から乾燥開始した場合,絶乾状態における質量減少率は,硬質砂岩より石灰石を用いた供試体の方が概ね大きくなる傾向を示し,硬質砂岩より石灰石を用いた供試体の方が水分を多く保有している。一方,絶乾状態の場合,標準水中養生した供試体の質量減少率は,脱型直後から乾燥するより大きくなる傾向を示した。これは,標準水中養生を行うことにより,供試体に保有する水分が多くなったためと考えられる。

### 2.3 乾燥材齢と乾燥収縮率の関係

乾燥材齢と乾燥収縮率の関係を図-4に示す。乾燥収縮率は,乾燥面の数が6面>4面>2面の順に小さくなる傾向を示した。これは,前述した質量減少率と同様な示し,乾燥面が少ないほど供試体の供試体から蒸発する水分が抑制されるためと考えられる。また,6面,4面および2面乾燥した乾燥収縮率は,硬質砂岩と石灰石を用いた供試体に標準水中養

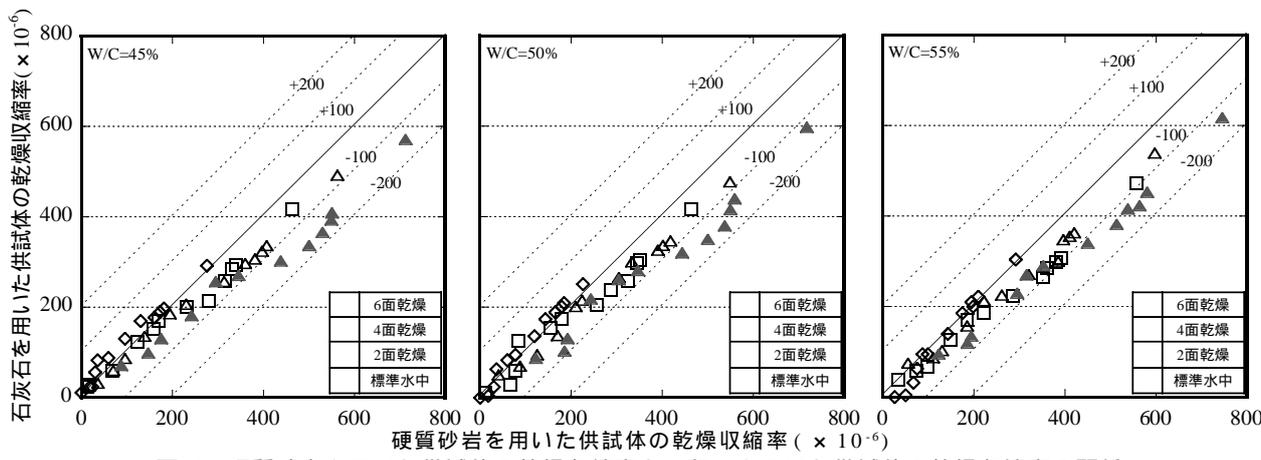


図-4 硬質砂岩を用いた供試体の乾燥収縮率と石灰石を用いた供試体の乾燥収縮率の関係

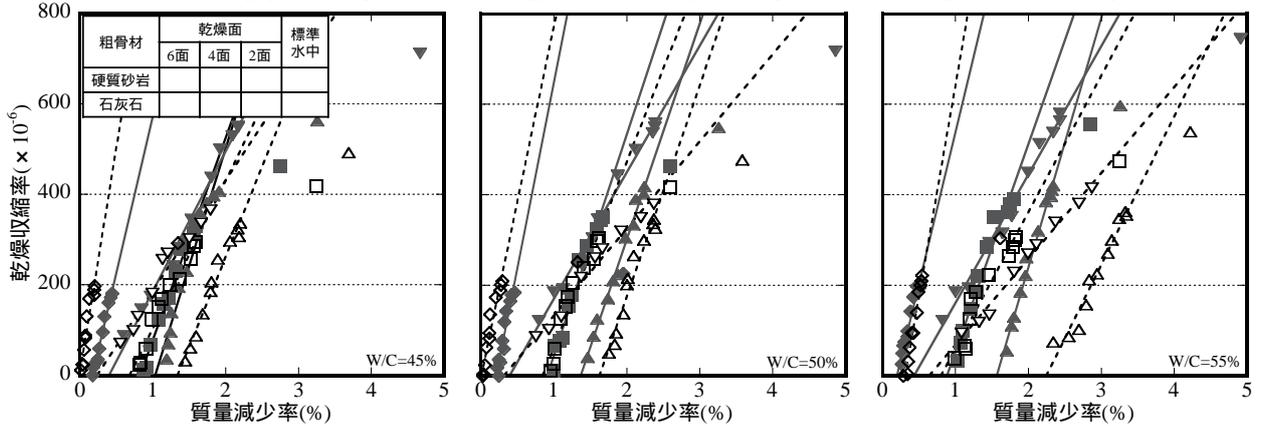


図-5 質量減少率と乾燥収縮率の関係

生した場合のような著しい差が見られないものの、硬質砂岩の方が石灰石を用いた供試体より若干大きくなる傾向を示した。これは、前述したように、石灰石を用いた供試体の保有している水分の量が硬質砂岩より多いため、乾燥材齢26週までに水分の蒸発が多い硬質砂岩の乾燥収縮率が石灰石より大きくなったと考えられる。一方、標準水中養生した供試体の乾燥収縮率は、6面乾燥した供試体より大きくなる傾向を示した。これは、供給された水分の蒸発により乾燥収縮が進行したことに加え、脱型直後から乾燥させたためマイクロクラックによる乾燥収縮率が低減した<sup>5)</sup>と考えられる。

2.4 質量減少率と乾燥収縮率の関係

質量減少率と乾燥収縮率の関係を図-5に示す。乾燥収縮率は、質量減少率の増大に伴い大きくなる傾向を示し、質量減少率と乾燥収縮率に密接な関係があることを示した。また、質量減少率と乾燥収縮率の関係は、乾燥材齢26週までであれば、直線的な傾向が見られるものの、絶乾状態の場合は、この直線的な関係から外れる結果となった。これは、乾燥炉で絶乾状態にすることにより乾燥材齢26週時に供試体の保有していた水分が蒸発し、質量減少率が乾燥収縮率より急激に増大したためと考えられる。一方、質量減少率と乾燥収縮率の傾きは、乾燥面の数にかかわらず同等であり、乾燥面が異なることにより脱型時の質量減少率に差が生じる傾向を示した。この傾向は、硬質砂岩を用いた方が石灰石より明確に示す結果となった。これは、乾燥面の数が少なくなると

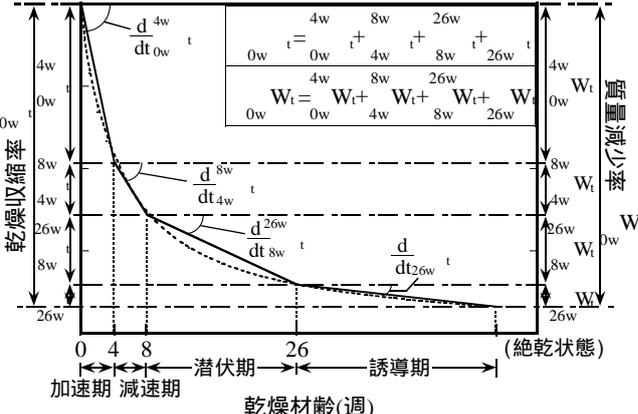


図-6 コンクリートにおける乾燥収縮の概念図

水分の蒸発が少なくなるため石灰石の界面とセメントペーストが反応し、乾燥収縮率が小さくなった<sup>6)</sup>と考えられる。

3. コンクリート中の含水率と乾燥収縮の関係

3.1 コンクリートにおける乾燥収縮の概念図

前項までの結果を踏まえると、質量減少率と乾燥収縮率には密接な関係が見られた。本項では、質量減少率と乾燥収縮率の関係をコンクリートにおける概念図に基づき検討を行ったものである。コンクリートにおける乾燥収縮の概念図を図-6に示す。乾燥収縮の概念図は、乾燥収縮率および質量減少率を乾燥材齢0週から4週、4週から8週、8週から26週および26週から絶乾までの4つの期間に区分し、それぞれ

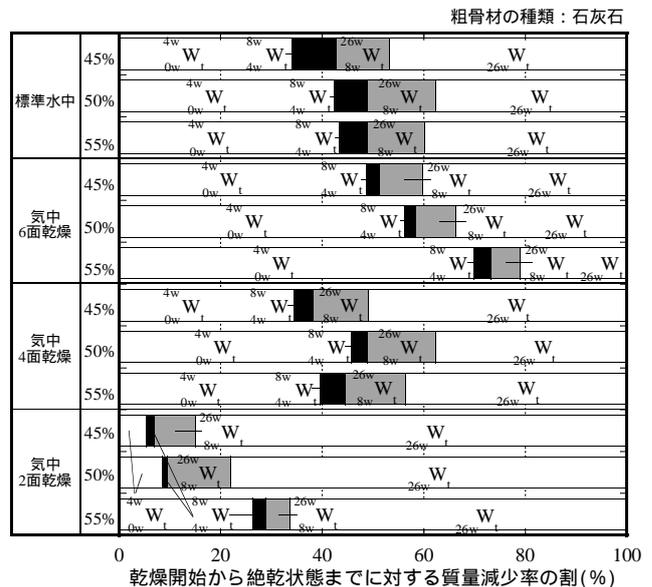
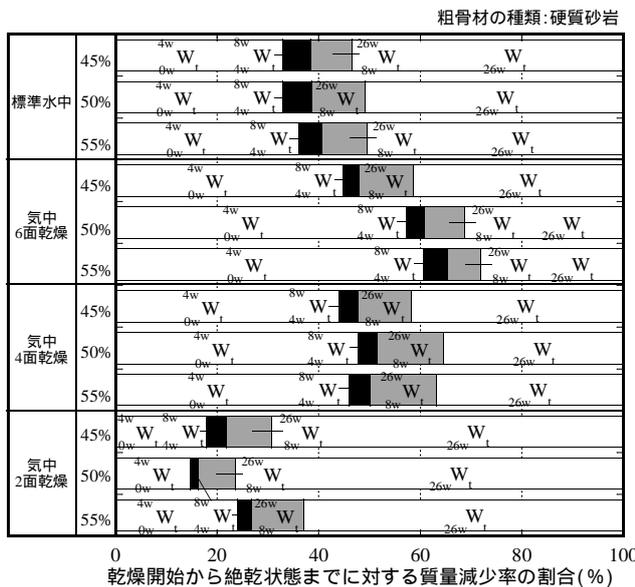


図-7 乾燥開始から絶乾状態までにおける質量減少率の割合

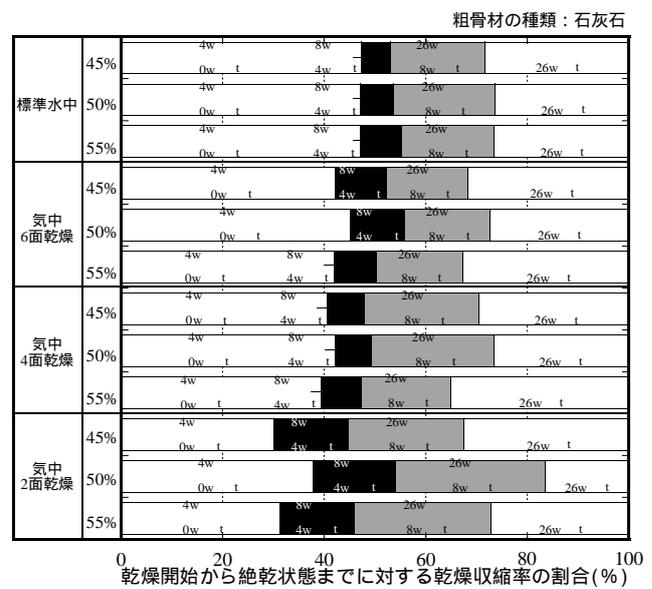
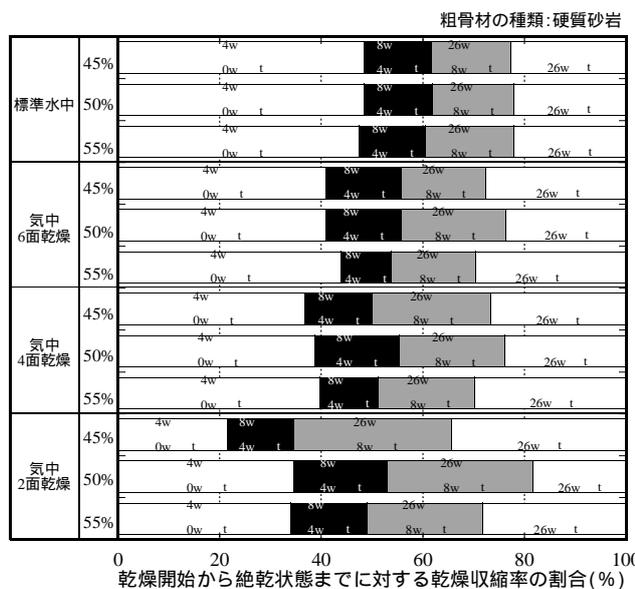


図-8 乾燥開始から絶乾状態までにおける乾燥収縮率の割合

を加速期、減速期、潜伏期および誘導期とし、各々の乾燥収縮率、質量減少率、乾燥収縮速度および質量減少速度を示したものである。また、誘導期の乾燥材齢は不明であるため、乾燥面が6面の潜伏期の乾燥収縮速度から誘導期の乾燥材齢を算出した。さらに、4面乾燥、2面乾燥および標準水中養生の乾燥収縮速度は、算出した乾燥材齢から乾燥収縮率を除いて求めた。同様に質量減少速度も算出し、質量減少速度と乾燥収縮速度の関係を検討した。

### 3.2 質量減少率の割合および乾燥収縮率の割合

乾燥開始から絶乾状態までに対する質量減少率の割合を図-7に示す。質量減少率の割合は、乾燥面の数が増えると加速期が大きくなる傾向を示し、標準水中養生で約40%、6面乾燥で約50%、4面乾燥で約40%、2面乾燥で約20%であった。これは、乾燥開始直後の方が供試体中の水分の蒸発が大きいと考えられる。一方、誘導期の場合、質量減少

率の割合は、乾燥面の数が少なくなると大きくなる傾向を示し、2面乾燥の場合、約70%であった。これは、乾燥面の数が少なくなることにより誘導期以前に蒸発する水分の量および速度が小さくなるためと考えられる。

乾燥開始から絶乾状態までに対する乾燥収縮率の割合を図-8に示す。乾燥収縮率の割合は、質量減少率のように顕著な差は見られないものの、乾燥面の数が増えると加速期が大きくなる傾向を示し、標準水中養生、6面乾燥および4面乾燥で約40%、2面乾燥で約30%であった。一方、乾燥面が少ない場合、潜伏期および誘導期に乾燥収縮率の割合が大きくなる傾向を示し、2面乾燥の場合に約20～30%であった。これは、乾燥面の数が少なくなると供試体中の水分の蒸発が減少し、乾燥収縮の進行が遅くなったためである。

### 3.3 質量減少速度と乾燥収縮速度の関係

質量減少速度と乾燥収縮速度の関係を図-9に示す。質量

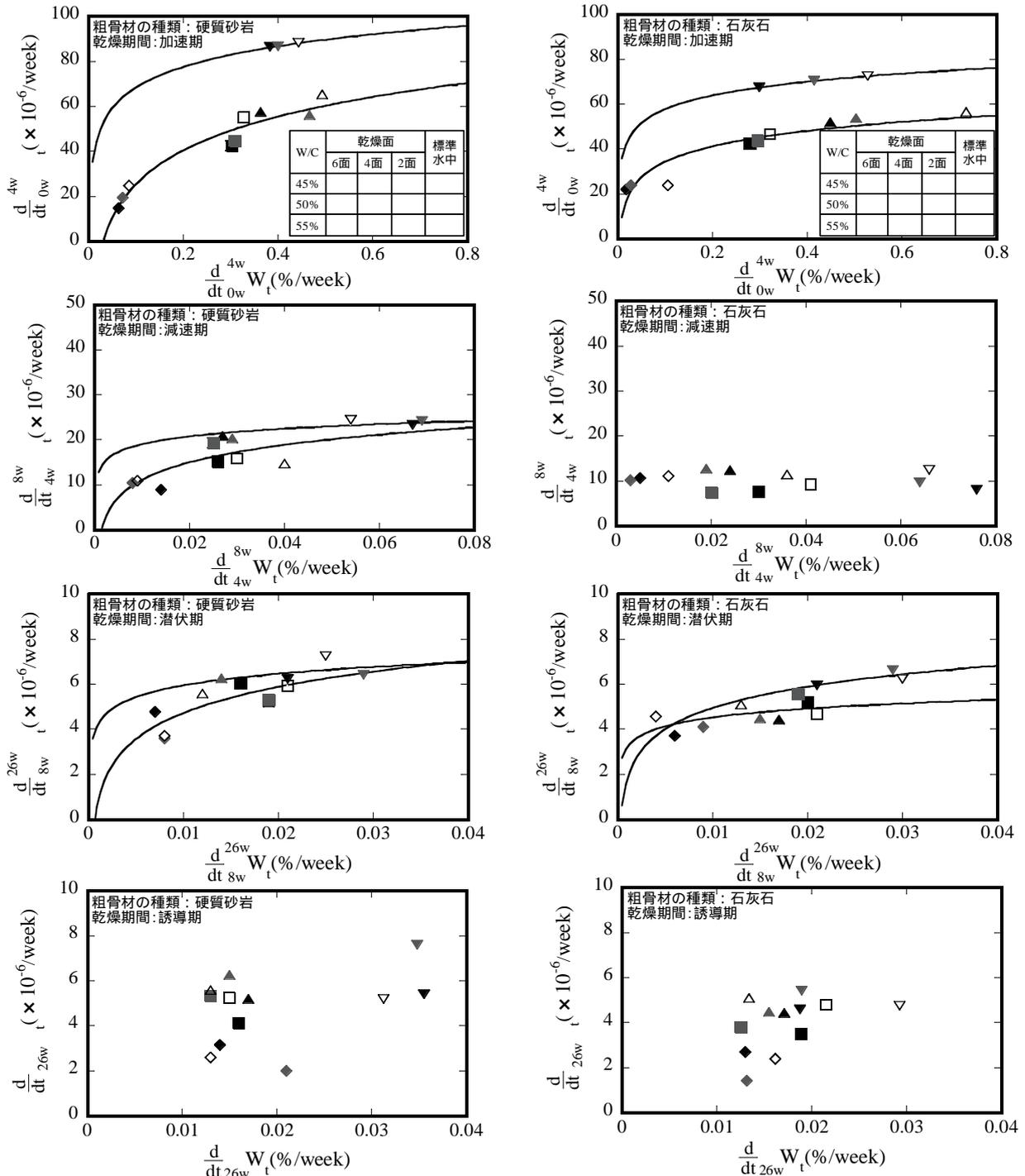


図-9 質量減少速度と乾燥収縮速度の関係

減少速度と乾燥収縮速度の関係は、加速期および潜伏期の場合、双曲的な関係を示し、ばらつきも小さく、密接な関係を示している。しかし、減速期では、水セメント比、粗骨材の種類、乾燥面の数および養生方法にかかわらず、硬質砂岩を用いた供試体の乾燥収縮速度が  $10(\times 10^{-6}/\text{week})$  以上を示しているのに対し、石灰石では  $10(\times 10^{-6}/\text{week})$  以下となる傾向を示した。これより、石灰石を用いた供試体の乾燥収縮が硬質砂岩より小さくなる要因の一つであると考えられる。さらに、誘導期の場合、質量減少速度と乾燥収縮速度の関係は明確ではなく、ばらつきが大きくなる傾向を示した。これは、絶乾状態にする過程で乾燥炉を用いて強制的に乾燥させ

ることにより、質量減少率が乾燥収縮率に比べ急激に増大したためと考えられる。これより、質量減少速度と乾燥収縮速度の関係は、加速期には密接な関係が見られるものの乾燥材齢が進行するにつれてばらつきが大きくなると考えられる。一方、乾燥収縮速度は、標準水中養生した方が、脱型直後から乾燥開始した場合より大きくなる傾向を示した。これは、標準水中養生を行うことにより供試体に保有する水分が多くなったためと考えられる。

### 3.4 コンクリート中の含水率と乾燥収縮速度の関係

供試体中の含水率の割合と乾燥収縮速度の関係を図-10に

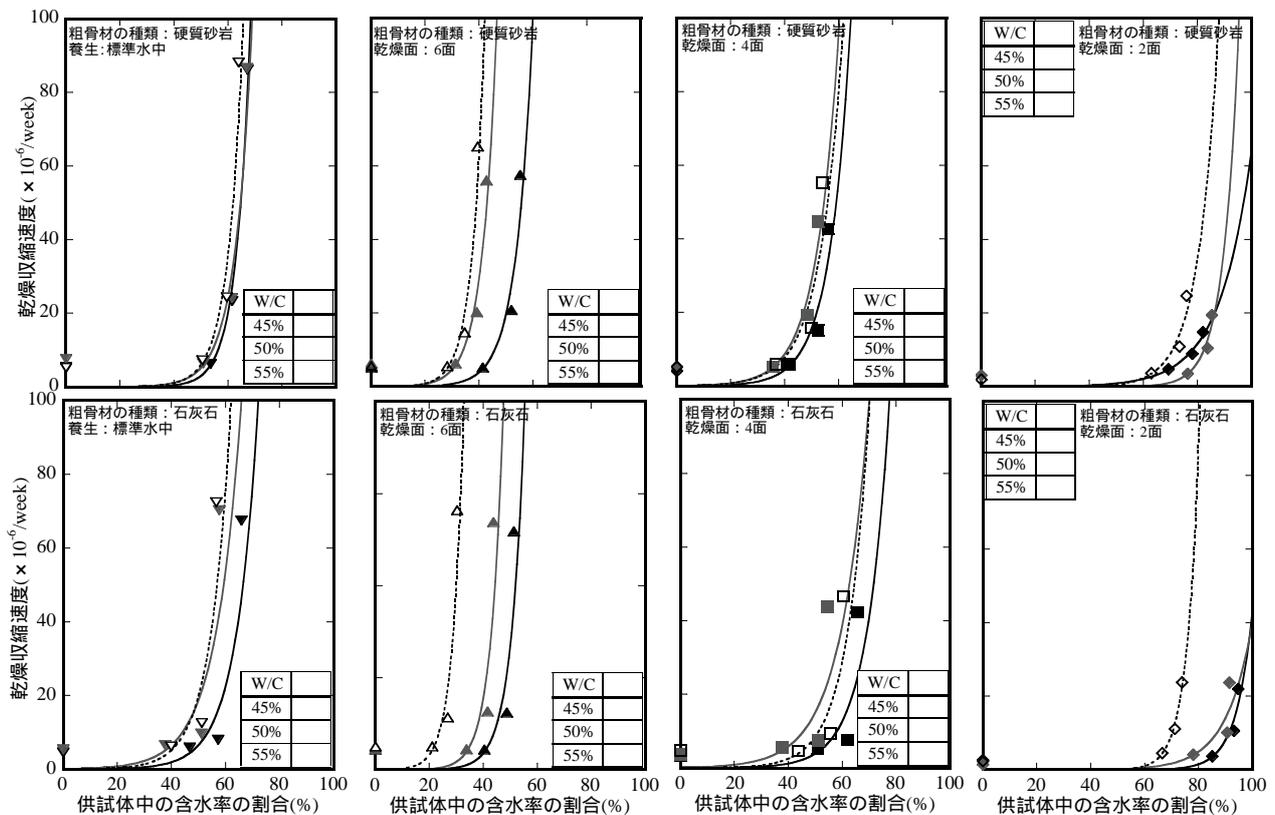


図-10 供試体の含水率の割合と乾燥収縮速度の関係

示す。ここでは、絶乾状態の質量減少率に対する各乾燥期間の質量減少率の割合を絶乾状態における質量減少率の割合から差し引いた値(以下、含水率の割合と称する)とし、含水率の割合と乾燥収縮速度の関係を検討した。乾燥収縮速度は、供試体の含水率の割合の増大に伴い、大きくなる傾向を示した。これは、質量減少率と乾燥収縮率に密接な関係があることと同様に、乾燥収縮は水分の供給または蒸発との関係が密接であることが示された。また、供試体の含水率の割合と乾燥収縮速度の関係は、2次曲線的に示すことができ、水セメント比、乾燥面の数および養生方法にかかわらず、ばらつきが小さい結果となった。

#### 4. まとめ

脱型直後に乾燥開始させたコンクリートの乾燥収縮率および質量減少率を調べ、これらの速度と含水率の関係について考察したものである。

これにより得られた知見を以下に示す。

- (1) 乾燥収縮速度は、質量減少速度が小さく、水分を保有している石灰石を用いた供試体の方が硬質砂岩より小さくなる傾向を示した。
  - (2) 石灰石を用いた供試体の乾燥収縮速度は、水セメント比、乾燥面の数および養生方法にかかわらず、減速期において  $10(\times 10^{-6}/\text{week})$  以下を示し、乾燥収縮が低減する要因の一つと考えられる。
- 今後は、さらに脱型時期、水中養生期間および乾燥条件が

異なるコンクリートの乾燥収縮率、質量減少率およびこれらの速度と含水率の関係についてデータの検討をしていく。

#### 謝辞

本論文を作成するに当たり、(前)足利工業大学教授・毛見虎雄先生および日本大学理工学部上席研究員・清水五郎先生より、ご指導・ご鞭撻を頂いた。また、本実験を行うに当たり、日本大学中田研究室およびものづくり大学大塚研究室の学生の協力を得た。ここに付記して深謝する。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事2009,2009.2
- 2) 日本規格協会:JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」,1993.3
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説,2006
- 4) 坂本亮ほか:調合および粗骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する文献的検討,コンクリート工学年次論文集,Vol31, No.1, pp.583-588, 2009.7
- 5) 杉山央ほか:コンクリートの乾燥収縮による変形量に関する基礎的研究,セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.460-465,1996
- 6) セメント協会:コンクリート専門委員会報告F-46,石灰石膏材コンクリートに関する研究,1992.10