

# 論文 粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮ひずみに与える影響

藤井 隆史\*1・丁 上\*2・谷口 高志\*3・綾野 克紀\*4

**要旨**：本論文では、47種類の粗骨材を用いてコンクリートを作製し、粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮に与える影響の検討を行った。吸水率の大きい砕石を用いるほど、コンクリートの乾燥収縮ひずみは大きくなる。火成岩や石灰岩の砕石を用いたコンクリートでは、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に4を用いた方が、土木学会コンクリート標準示方書の予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。ただし、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が大きいものは、 $\alpha$ に6を用いた方がよい。石灰岩を除く堆積岩では、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に6を用いた方が、予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。

**キーワード**：乾燥収縮ひずみ, 粗骨材, 吸水率, 示方書の予測式, 骨材の品質を表わす係数, 安定性

## 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、部材のひび割れやたわみ、プレストレスの減少などに影響し、設計時にはその影響を考慮する必要があるものである。コンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリート中からの水分の逸散によって生じる。コンクリートの乾燥収縮ひずみは、結合材や骨材などの使用材料の種類、単位水量や水セメント比等の配合の影響を受ける。骨材は、コンクリート中の6~7割を占めるため、その品質がコンクリートの品質に与える影響は小さくなく、コンクリートの乾燥収縮に対しても、使用する骨材によって、乾燥収縮ひずみが異なることが、既報1),2),3)等の文献で報告されている。

土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書）の乾燥収縮ひずみの予測式<sup>4)</sup>は、2012年に改訂されたものが用いられている。この予測式は、全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会が、平成22年度に全国の生コンクリート工業組合から収集したデータとセメント協会が昭和54年および昭和56年に収集したデータをもとに作成され、JIS A 1129試験による実験値を概ね±50%の精度で推定できるとされている<sup>5),6)</sup>。この予測式では、骨材の影響を考慮するために、骨材中に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を用いているが、骨材の種類によって、その影響の大きさが異なるため、骨材の品質を表わす係数 $\alpha$ を乗じている。骨材の品質を表わす係数は、 $\alpha=4\sim6$ の値を用いることとされており、標準的な骨材では、 $\alpha=4$ としてよいとされている。予測式の作成過程を示した資料<sup>5),6)</sup>や既往の研究<sup>7)</sup>では、砂岩骨材を用いた場合には、 $\alpha=6$ とするのがよいと報告されている。

本論文では、岩種や産地の異なる47種類の粗骨材を用い、粗骨材以外の材料は同じ条件でコンクリートを作製し、粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮ひずみに

与える影響について検討を行った。また、示方書の予測式による計算値と実験値の比較を行い、骨材の品質を表わす係数 $\alpha$ の選択方法についても検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

#### (1) 粗骨材

実験に用いた粗骨材の物性を表-1に示す。実験には、44種類の砕石および3種類の川砂利を用いた。いずれの砕石および川砂利とも、絶乾密度および吸水率は、JIS A 5005もしくはJIS A 5308 附属書Aの砂利の品質規格値を満足するものであった。一方で、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率は、一部の砕石で、JIS A 5005の規格値である12%よりも大きいものが含まれていた。

#### (2) セメント、細骨材および混和剤

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm<sup>3</sup>、ブレン値：3350cm<sup>2</sup>/g）を、細骨材は、表-1に示すNo.18と同じ産地の硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.57%、粗粒率：3.11）を用いた。混和剤には、リグニンスルホン酸化合物系AE減水剤およびAE助剤を用いた。

#### (3) 配合

表-1に示すNo.1の砕石を用いた場合のコンクリートの配合を表-2に示す。水セメント比が50.0%、単位水量が170kg/m<sup>3</sup>、細骨材率が44.0%で一定の条件で配合を決定した。AE減水剤およびAE助剤は、いずれの粗骨材を用いた場合も、セメント質量の0.3%および0.004%を添加した。

### 2.2 乾燥収縮試験方法

乾燥収縮ひずみの測定には、100×100×400mmの角柱

\*1 岡山大学 学術研究院環境生命科学学域准教授 博(工) (正会員)

\*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科社会基盤環境学専攻

\*3 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻 修(環境) (正会員)

\*4 岡山大学 学術研究院環境生命科学学域教授 博(工) (正会員)

表-1 粗骨材の物性

No.	岩種	粒径の範囲 (mm)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性* (%)	No.	岩種	粒径の範囲 (mm)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性* (%)		
1	火成岩	5~20	2.66	0.83	1.1	25	堆積岩	砂岩	2.67	0.46	3.2		
2			2.63	0.47	8.8	26			2.68	0.73	6.9		
3			2.70	0.46	6.6	27			2.69	0.84	7.2		
4			2.61	1.14	6.5	28			2.69	0.57	2.3		
5			2.62	0.56	10.1	29			2.54	2.23	18.6		
6		5~15	2.88	0.68	2.2	30			石灰岩	5~20	2.70	0.19	10.4
7			2.67	1.18	24.2	31					2.70	0.24	5.5
8		5~20	2.72	0.84	11.1	32					2.70	0.32	4.6
9			2.62	0.74	0.9	33					2.59	0.97	3.7
10			2.72	1.51	6.1	34					2.71	0.35	4.1
11			2.66	1.50	4.7	35	2.72	0.51			2.5		
12			2.50	2.44	12.6	36	2.69	0.49			1.7		
13			流紋岩	2.57	1.36	3.5	37	2.72			0.34	2.0	
14				2.60	0.76	6.3	38	粘板岩			2.69	0.87	11.7
15			斑レイ岩	2.75	0.77	2.1	39				2.64	1.11	20.4
16			閃緑岩	2.67	1.47	14.7	40	2.66	0.97	0.9			
17			ヒン岩	2.62	1.02	6.5	41	頁岩	2.71	0.62	10.8		
18	堆積岩	砂岩	2.72	0.56	9.0	42	凝灰岩	2.60	0.85	2.9			
19			2.67	0.58	7.6	43		2.60	0.95	3.0			
20			2.65	0.69	8.1	44	ホルンフェルス	2.73	0.44	0.9			
21			2.73	0.54	10.4	45	川砂利	5~25	2.63	0.78	1.2		
22			2.78	0.71	6.9	46			2.55	1.61	3.6		
23			2.68	0.56	9.2	47			2.57	2.18	4.8		
24			2.67	0.49	5.7								

\*安定性試験における損失質量分率

表-2 コンクリートの配合 (No.1の碎石を用いた場合)

W/C (%)	空気量 (設計値) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (C×%)	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	AE 助剤
50.0	4.5±1.5	44.0	170	340	792	1 016	0.3	0.004

供試体を用いて、JIS A 1129-2:2010 附属書 A (参考) に示される「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」に準拠して試験を行った。供試体は、脱型直後から材齢 7 日まで 20±2℃の水中で養生を行った。水中養生完了後、直ちに変位を測定するための測定用ゲージを、打設面およびその反対面を除く 2 面にそれぞれ 2 対貼り付けて、長さ変化の測定を開始した。長さ変化の測定は、JIS A 1129-2:2010 に示されるコンタクトゲージ法により、ホイットモア式ひずみ計 (検長: 250mm, 最小目盛り: 1/1 000mm) を用いて測定した。乾燥収縮ひずみの測定は、温度が 20±2℃で、相対湿度が 60±5%の恒温恒湿度室内で行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 各種粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮

図-1 は、安山岩の碎石のうち、吸水率の最も小さい No.3, 最も大きい No.10 および中間の No.1 の碎石を用い

たコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。図中の Q は、粗骨材の吸水率である。吸水率の最も小さい No.3 を用いたものの乾燥収縮ひずみが一番小さくなっており、吸水率が大きくなるにつれて、乾燥収縮ひずみも大きくなっている。

図-2 は、砂岩の碎石のうち、吸水率の最も小さい No.25, 最も大きい No.29 および中間の No.28 の碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。安山岩碎石の場合と同様に、吸水率の小さい No.25 を用いたものの乾燥収縮ひずみが最も小さくなっており、吸水率が大きいものほど、乾燥収縮ひずみも大きくなっている。とくに、吸水率の大きい No.29 の碎石を用いたものでは、乾燥期間 182 日で  $1 103 \times 10^{-6}$  という大きい乾燥収縮ひずみを生じていた。

図-3 は、石灰岩の碎石のうち、吸水率の最も小さい No.30, 最も大きい No.33 および中間の No.37 の碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示した

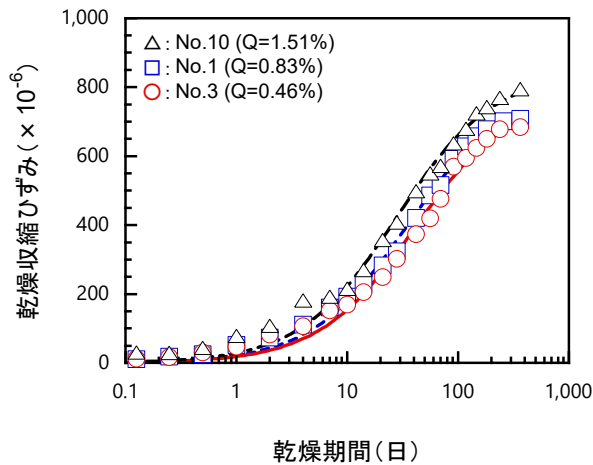


図-1 安山岩砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮

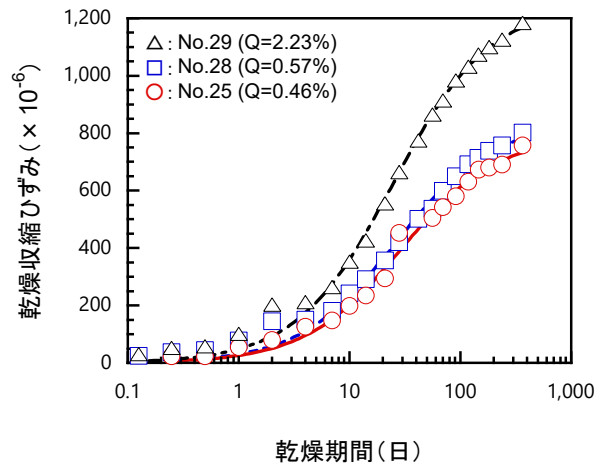


図-2 砂岩砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮

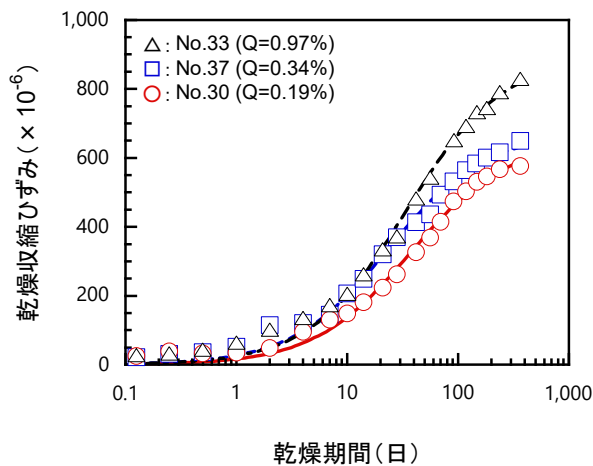


図-3 石灰岩砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮

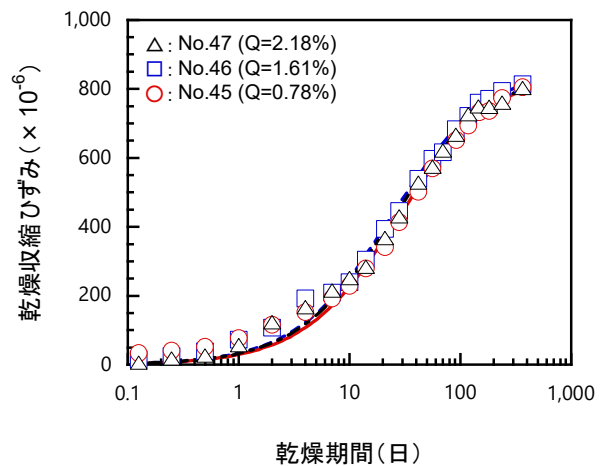


図-4 川砂利を用いたコンクリートの乾燥収縮

ものである。石灰岩砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、安山岩や砂岩と同様に、吸水率の最も小さいNo.30を用いたものの乾燥収縮ひずみが一番小さくなっており、吸水率が大きいNo.33を用いたものの乾燥収縮ひずみが大きくなっている。石灰岩を骨材に用いると、乾燥収縮ひずみは小さいと言われることが多いが、No.30の砕石の吸水率は、本実験で用いた粗骨材の中で最も小さく、それを用いたコンクリートの乾燥期間182日における乾燥収縮ひずみは $537 \times 10^{-6}$ と、本実験で用いたものの中で最も小さいものであった。

図-4は、3種類の川砂利を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。本実験で用いた川砂利の吸水率は、0.78%、1.61%および2.18%と1.4%程度の差があったが、乾燥収縮ひずみは吸水率によらず、ほぼ同じであった。

図-5は、コンクリート $1\text{m}^3$ あたりに含まれる骨材中の水分量 $\Delta\omega$ と乾燥期間182日における乾燥収縮ひずみの関係を示したものである。骨材中の水分量 $\Delta\omega$ は、式(1)より算出した。

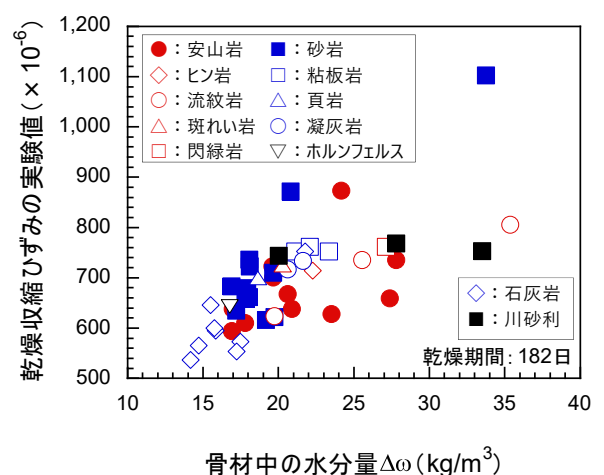
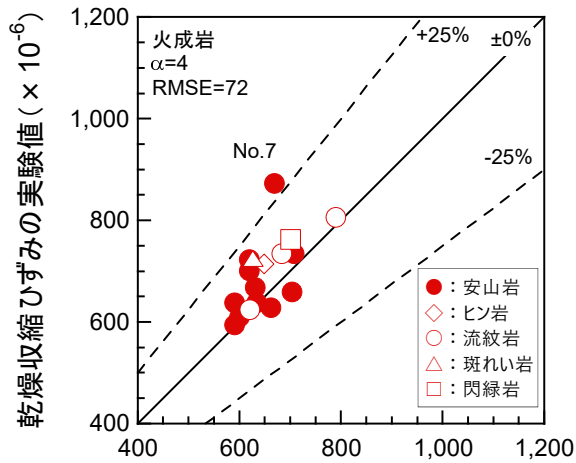


図-5 骨材中の水分量とコンクリートの乾燥収縮ひずみの関係

$$\Delta\omega = \frac{\omega_S}{100 + \omega_S} S + \frac{\omega_G}{100 + \omega_G} G \quad (1)$$

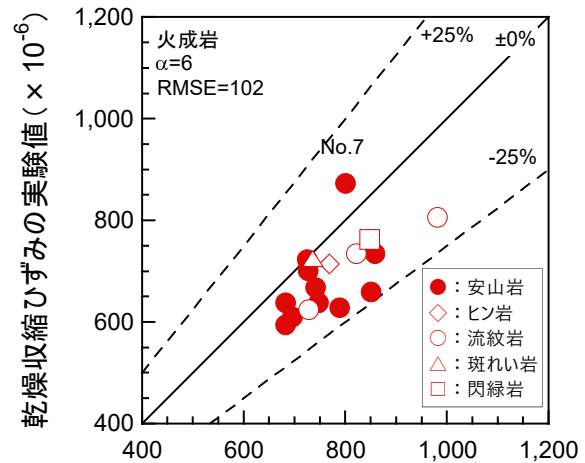
ここに、 $\Delta\omega$  : 骨材中に含まれる水分量 ( $\text{kg/m}^3$ )

$\omega_S$ および $\omega_G$  : 細骨材および粗骨材の吸水率 (%)



示方書予測式による計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

図-6 火成岩の碎石を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=4$  とした場合)



示方書予測式による計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

図-7 火成岩碎石を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=6$  とした場合)

SおよびG：単位細骨材量および単位粗骨材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

この図より、骨材中の水分量 $\Delta\omega$ が大きいものほど、乾燥収縮ひずみは大きくなること分かる。石灰岩碎石は、他の粗骨材に比べて骨材中の水分量が少ないことで、乾燥収縮ひずみが小さいと言える。赤色のマーカーで示す火成岩に比べて、青色のマーカーで示す堆積岩は、骨材中の水分量が乾燥収縮ひずみに与える影響が大きく、同じ骨材中の水分量であっても、乾燥収縮ひずみが大きい傾向にある。

### 3.2 土木学会コンクリート標準示方書の予測式による計算値との比較

2017年制定の土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕では、収縮の特性値は、JIS A 1129 試験 (100×100×400mm 供試体、水中養生7日後、温度20°C、相対湿度60%の環境下で6か月乾燥後の収縮ひずみ) によるものとされており、試験によらない場合には、以下に示す予測式で特性値を算出する。

$$\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left( W + \frac{45}{-20+30 \cdot C/W} \cdot \alpha \cdot \Delta\omega \right) \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon'_{sh}$ ：収縮の試験の推定値 ( $\times 10^{-6}$ )

W：コンクリートの単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

( $W \leq 175 \text{kg}/\text{m}^3$ )

C/W：セメント水比

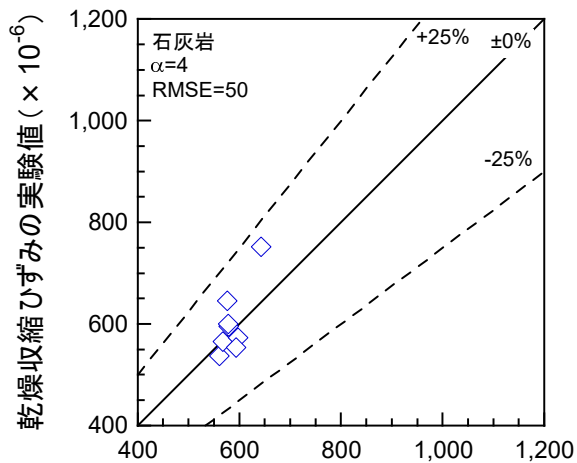
$\alpha$ ：骨材の品質の影響を表す係数 ( $\alpha=4\sim 6$ ) 標準的な骨材の場合は $\alpha=4$ としてよい。

$\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

図-6 および図-7 は、それぞれ、火成岩の碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を4および6として計算した示方

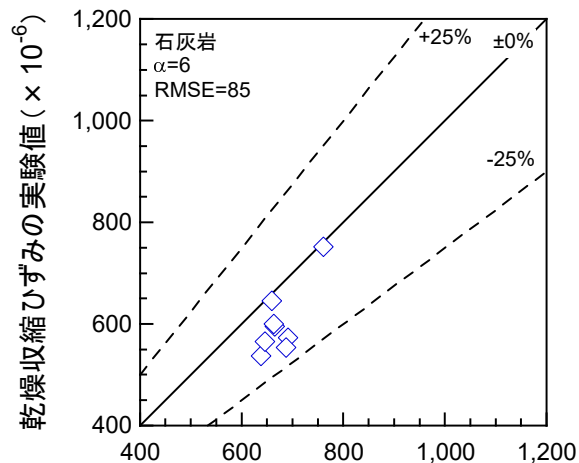
書予測式による計算値とを比較し示したものである。骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を4として計算した方が、6として計算した場合に比べて、予測式による計算値と実験値の誤差が小さくなること分かる。図中に示すRMSEは、図中のデータ全体の二乗平均平方根誤差であるが、その値からも、 $\alpha$ を4として計算した方が6として計算した場合に比べて、計算値と実験値の誤差が小さくなっているといえる。一方で、No.7の碎石では、 $\alpha$ を4として計算した場合には誤差が大きく、 $\alpha$ を6として計算した方が計算値と実験値の誤差が小さくなっている。No.7の碎石は、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が24.2%と、とくに大きな値である。硫酸ナトリウムによる安定性試験は、硫酸ナトリウムの結晶生成圧を水の凍結時の膨張圧に見立てて、骨材の耐凍害性を評価する試験であるが、骨材中の空隙や骨材強度が試験結果に関係する。硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が著しく大きい骨材では、空隙が多く骨材強度が小さいものであることが多いため、乾燥収縮ひずみが大きくなる可能性がある。

図-8 および図-9 は、それぞれ、石灰岩の碎石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を4および6として計算した示方書予測式による計算値とを比較し示したものである。二乗平均平方根誤差で比較すると、 $\alpha$ を4として計算した方が、 $\alpha$ を6として計算した場合に比べて、全体的に計算値と実験値の誤差が小さい。 $\alpha$ を6として計算した方が計算値と実験値の誤差が小さい骨材もあるが、計算値と実験値の差は $\pm 25\%$ 以内であった。石灰岩は、他の碎石に比べて吸水率が小さいものが多く、骨材中の水分量の影響も小さいと言える。



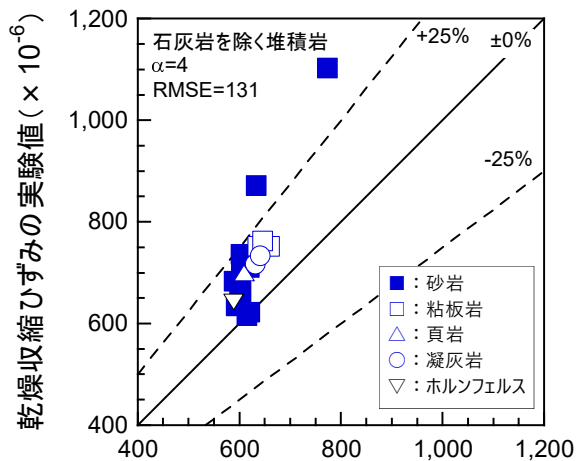
示方書予測式による計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

図-8 石灰岩砕石を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=4$ とした場合)



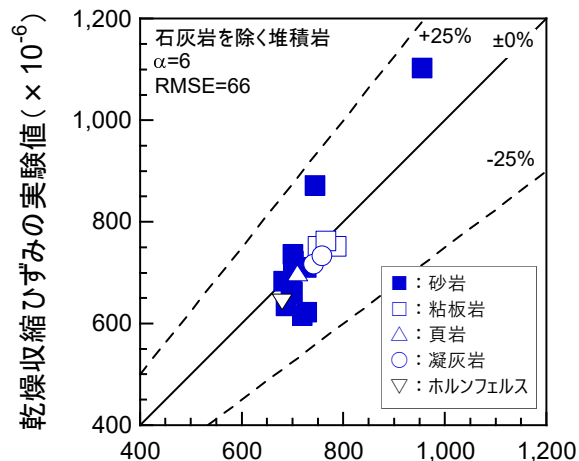
示方書予測式による計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

図-9 石灰岩砕石を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=6$ とした場合)



示方書予測式による計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

図-10 石灰岩を除く堆積岩砕石を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=4$ とした場合)



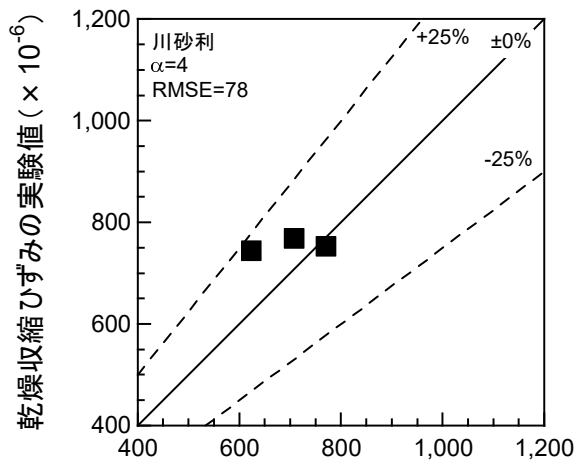
示方書予測式による計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

図-11 石灰岩を除く堆積岩砕石を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=6$ とした場合)

図-10 および図-11 は、それぞれ、石灰岩を除く堆積岩の砕石を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を4および6として計算した示方書予測式による計算値とを比較示したものである。石灰岩を除く堆積岩を用いた場合には、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を6として計算した方が、4として計算した場合に比べて、予測式による計算値と実験値の誤差が小さいことが分かる。既報<sup>7)</sup>において、砂岩を骨材に用いた場合、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ には、6を用いた方が、4を用いた場合よりも実験値と計算値の誤差小さいことが示されている。本実験で使用した粗骨材においても、砂岩砕石を用いたものは、 $\alpha$ に6を用いて計算した方が、計算値と実験値の誤差が小さい。

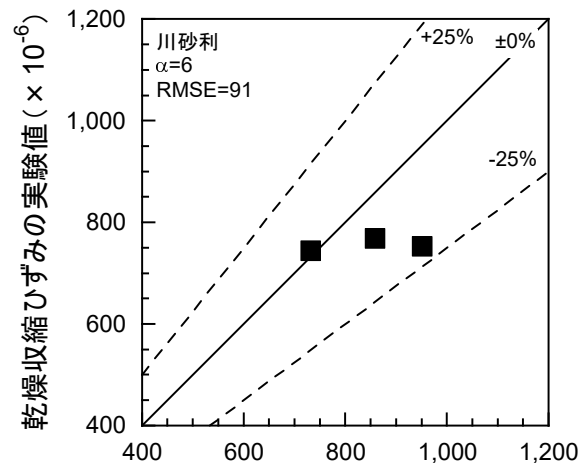
また、砂岩以外の堆積岩についても、 $\alpha$ に4を用いた場合よりも、6を用いた方が計算値と実験値の誤差が小さい。堆積岩は、砂や泥、火山灰などの堆積物が圧縮等の作用を受けて固まった岩であるため、生成された年代が新しい場合には、収縮が大きくなることが報告されている<sup>2)</sup>。砕石を採取した地層の年代が新しい場合には、砂岩以外の堆積岩でも乾燥収縮ひずみが大きくなる可能性がある。

図-12 および図-13 は、それぞれ、川砂利を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの実験値と骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ を4および6として計算した示方書予測式による計算値とを比較示したものである。全体としては、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に4を用いた方



示方書予測式による計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

図-12 川砂利を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=4$  とした場合)



示方書予測式による計算値 ( $\times 10^{-6}$ )

図-13 川砂利を用いたコンクリートの実験値と予測式による計算値との比較 ( $\alpha=6$  とした場合)

が誤差は小さいが、 $\alpha$ に6を用いた方が、誤差が小さい川砂利もある。砕石は、均質な岩盤を破碎して製造されるため、骨材粒子間の品質のばらつきは少ない。一方で、川砂利は、河川の堆積物であり、山の岩石が河川を流れ堆積したものであるため、様々な岩種の岩石の混合物となっているため、粒子間のばらつきが大きい。流域で堆積岩が多く採取されるような地域では、 $\alpha$ を大きくしておく方がよいと思われる。

#### 4. まとめ

本実験で得られた知見を以下に示し、本論文のまとめとする。

- (1) 吸水率の大きい粗骨材を用いるほど、骨材中の水分量が多くなり、コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなった。
- (2) 火成岩や石灰岩の砕石を用いたコンクリートでは、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に4を用いた方が、予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。ただし、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が大きいものは、 $\alpha$ に6を用いた方がよい。
- (3) 石灰岩を除く堆積岩では、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に6を用いた方が、予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。
- (4) 川砂利は、骨材の品質の影響を表す係数 $\alpha$ に4を用いた方が、予測式による計算値と実験値の誤差が小さい。ただし、流域に堆積岩が多い場合には、 $\alpha$ を大きくしておくのがよいと思われる。

#### 参考文献

- 1) 糟谷守, 樋渡一輝, 高田浩夫, 森本博昭: 各種コンクリート用骨材の乾燥収縮特性について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 559-564, 2009.6
- 2) 土木研究所: 骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究, 土木研究所資料, 第4199号, 2011.3
- 3) 兵頭彦次, 谷村充, 藤田仁, 番地成朋: 石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 571-576, 2009.6
- 4) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.107-109, 2018.3
- 5) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書改定資料-基本原則編・設計編・施工編-, コンクリートライブラリー138, pp.65-70, 2012.3
- 6) 綾野克紀, 藤井隆史, 平喜彦: コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.4, pp.421-437, 2013.12
- 7) 藤井隆史, 下村匠: 最近の試験データを用いた土木学会の収縮ひずみ予測式の適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No. 1, pp. 275-280, 2021.6