

# 論文 雲母を混和材に使用したコンクリートのひび割れ抵抗性に関する研究

千田太樹\*1・鈴木成\*2・藤原浩己\*3・丸岡正知\*4

**要旨:** コンクリートの乾燥収縮によるひび割れは、劣化因子に対する耐久性の低下の原因となる。本研究では、コンクリートへの雲母の混和により乾燥収縮の低減、及び、ひび割れ抵抗性の向上に効果がみられた。雲母のコンクリート中での化学反応は見られず、乾燥収縮低減効果は雲母の層状の形状により内部に水分を取り込むことが原因であると考察された。また、白雲母に関しては単位量で 10kg/m<sup>3</sup> 細骨材に対して置換した場合、乾燥収縮が最小になった。

**キーワード:** 白雲母, 金雲母, 乾燥収縮ひび割れ, 鉄筋拘束型ひび割れ試験, SEM

## 1. はじめに

コンクリートは、もともと圧縮に強く引張に弱い材料であるためひび割れの発生は避けられない。しかしコンクリート構造物としては、耐久性に影響を及ぼす有害なひび割れが発生することなく密実であることが望まれる。

RC 造建築物に生じるひび割れ対策は、古くから取り組まれていたが、平成 11 年に「住宅の品質確保の促進等に関する法律」(品確法)が公布され、コンクリートのひび割れへの社会的関心が高まった。品確法は、RC 造建築物について工事完了・引渡し後少なくとも 2 年間、住宅については 10 年間に亘り、瑕疵のあると思われる収縮ひび割れを生じさせてはならないとしている。

なお、近年は良質な骨材の枯渇等で骨材事情が悪化している<sup>1)</sup> ことから、生コン工場で製造されるコンクリートの乾燥収縮ひずみは増大すると考えられ、工場によっては、規定の期間ひび割れを生じない品確法を満たすコンクリートを製造することが困難になると思われる。

そこで、乾燥収縮を抑制する混和材料として雲母に着目し、雲母を混和したコンクリートと普通コンクリートとの乾燥収縮及び硬化性状の比較、及び、それらの性状が変化する原因について検討した。

## 2. 使用材料及び配合

### 2.1 使用材料および配合条件

表-1 に実験に使用したコンクリートの材料を、図-1 に雲母の粒度分布を、表-2 に本研究の配合条件を示す。

雲母は、珪酸塩鉱物であり層状で光沢があることが主な特徴である。ここでは、20 メッシュふるいを通過した粉末状の中国産白雲母(KAl<sub>2</sub>AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>)、及び、フィンランド産金雲母(KMg<sub>3</sub>AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>)を使用した。白雲母の静弾性係数は一般に 160~210kN/mm<sup>2</sup> とされている。

### 2.2 配合

本実験では、雲母をセメントに対して置換したシリーズ 1 と、細骨材に対して置換したシリーズ 2 について検討した。なお、練り混ぜは公称容量 100L のパン型一軸強制練りミキサーを使用し、まず粉体と細骨材、粗骨材を投入し空練りを 30 秒間行い、その後、水と高性能 AE 減水剤と AE 剤もしくは消泡剤を投入して 1 分 30 秒間練混ぜを行った。フレッシュ性状は目標範囲となるよう添加材を適宜調整した。

表-1 使用材料

材料の種類	記号	材料名	密度(g/cm <sup>3</sup> )
結合材 (P)	OPC	普通ポルトランドセメント	3.16
	AG	無水石膏	2.90
	BS4	高炉スラグ微粉末4000	2.90
雲母	WM	白雲母	2.00(気乾)
	GM	金雲母	2.90(気乾)
細骨材	S	鬼怒川産川砂	2.58(表乾)
粗骨材	G	笠間産碎石 5号 : 6号 = 6 : 4	2.66(表乾)
水	W	上水道水	1.00
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	1.07
空気連行剤	AE	AE剤	1.04
空気量調整剤	DF	消泡剤	1.00

表-2 配合条件

W/P (%)	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )	s/a (%)	スランプ値(cm)	空気量 (%)
57	178	45	18±2	4.5±1.5

\*1 宇都宮大学 工学部建設学科 (正会員)

\*2 宇都宮大学 工学部大学院地球環境デザイン学専攻 (正会員)

\*3 宇都宮大学 工学部大学院地球環境デザイン学専攻教授 工博 (正会員)

\*4 宇都宮大学 工学部大学院地球環境デザイン学専攻准教授 工博 (正会員)

### (1) シリーズ 1

本シリーズでは、雲母を結合材に対して置換することによる雲母の効果について検討した。

コンクリートの収縮とは、自己収縮と乾燥収縮を足し合わせたものである。マスコンクリートでは温度変化による収縮の影響も考慮する必要があるが、今回は対象外とした。既往の研究によると、セメントを石灰石微粉末で置換すると、水和反応を生じるセメントの減少に伴い、水和生成物量が減少するため、自己収縮が小さくなるが、水和に必要な水分量が少なくなり、水和に寄与しない水分が乾燥により雰囲気中に散逸するため乾燥収縮が大きくなるといわれている<sup>2)</sup>。雲母は化学的に安定しており、コンクリート中で反応を生じないと考えられるため、石灰石微粉末と同様の現象が生じると仮定し、自己収縮と乾燥収縮にどのような影響を与えるか把握する目的で、本シリーズでは結合材に対して置換した。

表-3 にシリーズ 1 の配合を示す。配合 WM0MIX, WM5MIX, 及び WM10MIX については、雲母混和量による性状変化を比較するために、雲母の単位量をそれぞれ 0 kg/m<sup>3</sup>, 5 kg/m<sup>3</sup>, 10kg/m<sup>3</sup> とし、結合材の高炉スラグ微粉末に対して置換した。

さらに、他の収縮低減効果を示す混和材料との比較のため、無水石膏のみを混和した配合 AG, 高炉スラグのみを混和した配合 BS についても検討した。

### (2) シリーズ 2

表-4 にシリーズ 2 の配合を示す。シリーズ 2 はシリーズ 1 と同様に雲母は反応しないと考え、結合材として扱わず、代わりに細骨材の微粉末として扱い、細骨材の一部と置換した。水セメント比を一定とし、雲母が強度に与える影響について検討した。

また、雲母の種類による性状の変化の比較のため、金雲母を細骨材に対して 10kg/m<sup>3</sup> 置換した配合 GM10 外についても検討した。

## 3. 試験項目

### (1) 走査型電子顕微鏡観察

走査型電子顕微鏡(SEM)を用い雲母の粒子、及び材齢 7 日のコンクリート中の雲母周辺の状況を観察した。

### (2) フレッシュ性状試験

a.スランブ試験 : JIS A 1101 に準拠した。

b.空気量試験 : JIS A 1128 に準拠した。

c.温度測定 : アルコール棒温度計を使用し、練混ぜ直後にコンクリートの温度を測定した。

### (3) 硬化性状試験

a.圧縮強度試験:JIS A 1108 に準拠した。養生は 20°C 水中及び 20°C 封緘養生とし、それぞれ材齢 7 日及び 28 日で試験を行った。

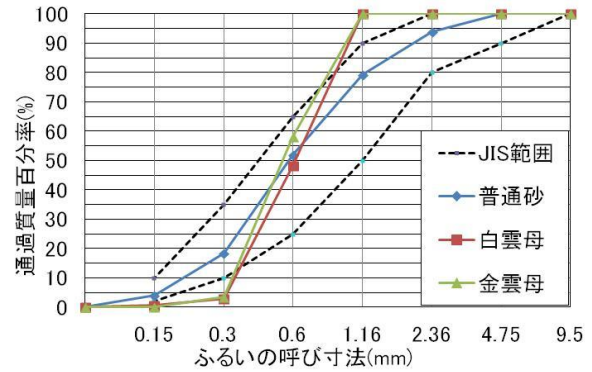


図-1 粒度分布

表-3 シリーズ 1 配合

配合	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
	W	OPC	AG	BS4	WM	S	G
OPC	178	315	0.0	0.0	0.0	786	991
WM0MIX	178	295	6.3	13.7	0.0	786	990
WM5MIX	178	295	6.3	8.7	5.0	785	989
WM10MIX	178	295	6.3	3.7	10.0	784	988
WM10内	178	305	0.0	0.0	10.0	784	988
WM&AG	178	299	6.3	0.0	10.0	784	988
AG	178	309	6.3	0.0	0.0	786	991
BS	178	301	0.0	13.7	0.0	786	990

表-4 シリーズ 2 配合

配合	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	W	OPC	WM	GM	S	G
WM5外	178	315	5.0	10.0	780	991
WM10外			10.0		773	991
WM15外			15.0		767	991
GM10外			10.0		777	990

b.静弾性係数試験:JIS A 1149 に準拠した。養生は 20°C 水中とし、材齢 28 日で試験を行った。

c.割裂引張強度試験:JIS A 1113 に準拠した。養生は 20°C 封緘とし、材齢 7 日及び 28 日で試験を行った。

### (4) 耐久性試験

a.長さ変化試験:JISA1129-3 に準拠した。

b.ひび割れ抵抗性試験:JCI-SAS2「コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)」に準拠した。図-2 に試験体および型枠の形状を示す。

本試験方法は容易にコンクリートの応力を推定できることや、ひび割れ発生の確認が容易であること、JIS A 1129 の長さ変化試験(乾燥収縮試験)の結果との対応が可能であることなどの利点がある。

本試験は自己収縮によるひび割れについて試験するものであるためコンクリートの乾燥を防止した状態で試験を行うことになっているが、本実験では材齢 7 日から乾燥させた状態で試験を行うこととした。したがって、乾燥収縮と自己収縮の影響を含めた試験方法となる。以下に、JCI 案に示す試験条件と異なる条件を示す。

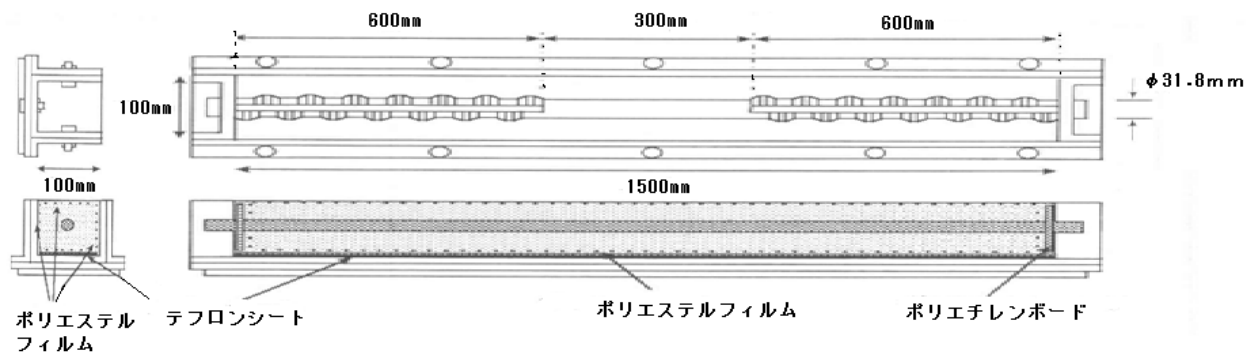


図-2 鉄筋拘束試験型枠



図-3 白雲母 SEM 写真

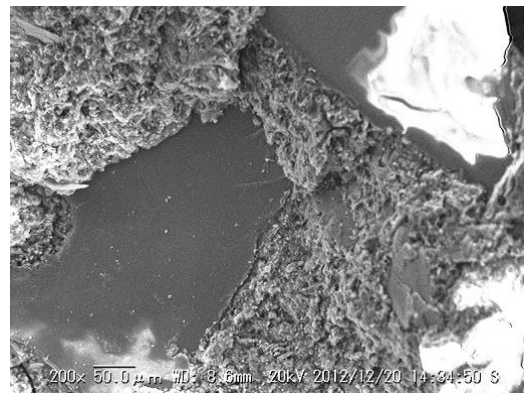


図-5 WM10 外 SEM 写真

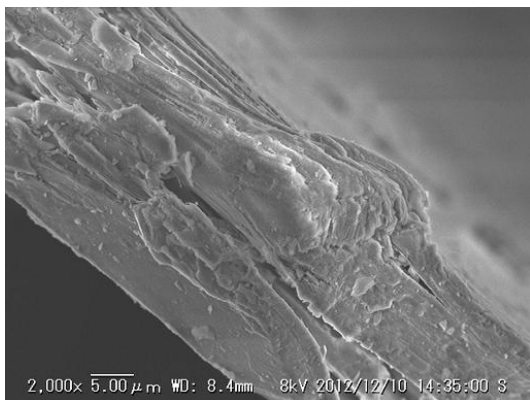


図-4 金雲母 SEM 写真

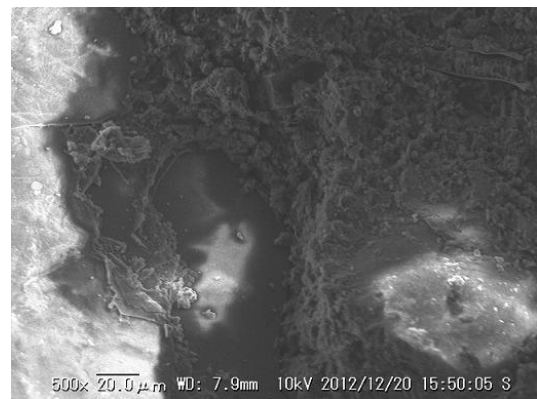


図-6 GM10 外 SEM 写真

a. 拘束鉄筋の径

JCI 案では、拘束鉄筋として D32 を用い、中央部はリブと節を取り除き、直径 31mm の円断面とすることとなっている。しかし、実際に切削をしてみると、リブと節を完全に除去するには直径 30mm 程度にしなければならないことが分かったため、中央部の鉄筋径は 30mm とした。

b. 供試体の養生方法

コンクリート打込み後、表面をポリエステルフィルム及びアルミ箔粘着テープでシールし、材齢 1 日で脱型し全面をシールした。材齢 7 日でシールをはがして、20℃・60%RH の恒温恒湿室に静置し乾燥状態とした。

4. 試験結果

(1) SEM 観察

図-3 に白雲母の、図-4 に金雲母の SEM 写真をそれぞれ示す。図-3 及び図-4 よりいずれも雲母が非常に薄い層状になっているのが分かる。また、図-5 に配合 WM10 外の、図-6 に配合 GM10 外の SEM 写真をそれぞれ示す。図-5 及び図-6 より、いずれの雲母を混和した場合も、雲母からの水和物などの析出物はないということが分かる。

表-5 フレッシュ性状試験結果

	配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	SP/P (%)	AE/P (%)	DF/P (%)
シリーズ1	OPC	18.5	5.2	29	0.30	0.2	
	WMOMIX	16.5	5.8	27	0.25	1.0	
	WM5MIX	16.0	5.7	27	0.50	0.6	
	WM10MIX	19.0	5.5	28	0.60	0.7	
	WM10内	16.0	5.1	29	0.90	0.0	0.0
	WM&AG	17.5	3.1	28	1.40		0.3
	AG	20.0	4.8	28	0.40	0.0	0.0
	BS	18.5	5.3	27	0.25	0.4	
シリーズ2	WM5外	16.5	5.7	20	0.40		0.1
	WM10外	16.5	4.5	21	1.20		0.1
	WM15外	16.5	5.7	19	1.40		0.2
	GM10外	17.0	4.9	18	0.95		0.4

(2) フレッシュ性状試験

表-5にフレッシュ性状試験の結果を示す。雲母の混和によりスランプが小さくなった。これは、層状に重なった雲母粒子の間に水分を拘束したことが原因と考えられる。そこで高性能 AE 減水剤の添加量を増やし、これにより増大した空気量を消泡剤の添加し調整することにより減少させ目標のフレッシュ性状とした。シリーズ1において DF を使用せずに目標の空気量が満足できたのは、シリーズ1は夏季に実験を行ったためコンクリートの温度が高く空気量が減少したため<sup>3)</sup>と思われる。

(3) 圧縮強度試験

表-6、及び図-7に圧縮強度試験の結果を示す。

いずれの材齢、養生条件においても配合 WM15 外の圧縮強度が小さく、配合 WM5 外の圧縮強度が大きい以外はほぼ同等の結果となった。配合 WM0MIX, WM5MIX, WM10MIX 及び配合 WM5 外, WM10 外, WM15 外においては雲母の混和量が多くなるほど強度が減少した。これは、薄板状の雲母がマトリックスの結合を阻害していること、図-5及び図-6より雲母とセメントは付着が弱くはがれやすいことが原因と考えられる。加えて、既往の研究<sup>3)</sup>では水セメント比が50%以上のコンクリートにおいては高性能 AE 減水剤の添加量が増加するほど圧縮強度は低下するとしている。本研究では雲母混和量の増加に伴い、高性能 AE 減水剤添加量も増加しているので、これも原因の一つと考えられる。しかし、WM5 外と OPC を比較した場合、WM5 外が上回っている。これは消泡剤により細孔量が減少したためと考えられる。図-8に40~150nmの細孔量を示す。WM5外に関しては、細孔量減少による圧縮強度増大の影響が、上述の雲母の混和による圧縮強度減少の影響より大きかったためと推測される。

(4) 静弾性係数試験

表-6、及び図-9に静弾性係数試験の結果を示す。その結果配合 BS と配合 WM15 外を除き、すべて OPC を上回った。また、雲母の混和によりわずかながら変形抵抗性が向上することが分かった。

表-6 圧縮強度試験結果

	配合	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
		水中養生		封緘養生		水中養生
		7日	28日	7日	28日	28日
シリーズ1	OPC	20.8	30.7	18.7	26.7	30.3
	WMOMIX	23.0	33.7	23.4	30.0	31.4
	WM5MIX	22.0	29.3	19.3	27.3	30.6
	WM10MIX	21.2	28.3	20.2	27.6	31.6
	WM10内	17.9	26.9	16.2	24.7	35.3
	WM&AG	21.3	29.0	20.5	27.8	35.0
	AG	22.3	30.6	22.2	28.5	37.8
	BS	20.2	26.8	20.1	27.4	29.4
シリーズ2	WM5外	25.8	38.3	25.3	29.3	32.0
	WM10外	21.4	30.8	25.1	29.3	32.2
	WM15外	15.8	22.9	16.9	22.4	29.2
	GM10外	19.3	27.8	19.9	28.7	30.3

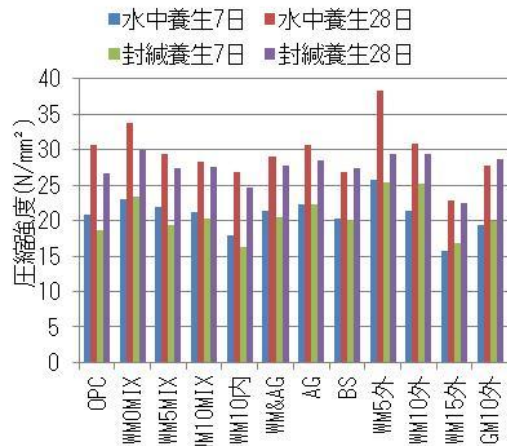


図-7 圧縮強度試験結果グラフ

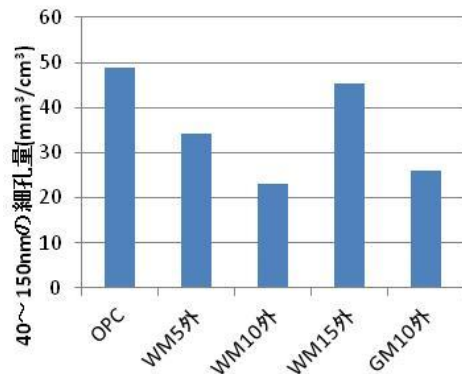


図-8 細孔量

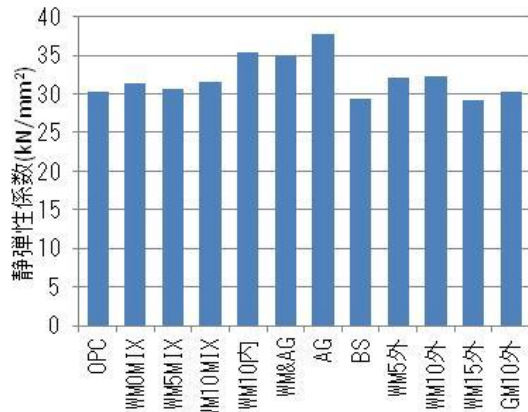


図-9 静弾性係数 水中28日

表-7 割裂引張強度試験結果

	配合	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		封かん養生	
		7日	28日
シリーズ1	OPC	2.19	2.25
	WM0MIX	2.40	2.79
	WM5MIX	2.09	2.34
	WM10MIX	2.05	2.39
	WM10内	1.44	2.15
	WM&AG	2.05	2.82
	AG	2.20	2.88
	BS	2.10	2.48
シリーズ2	WM5外	1.87	3.00
	WM10外	2.40	2.91
	WM15外	1.82	2.16
	GM10外	2.08	2.90

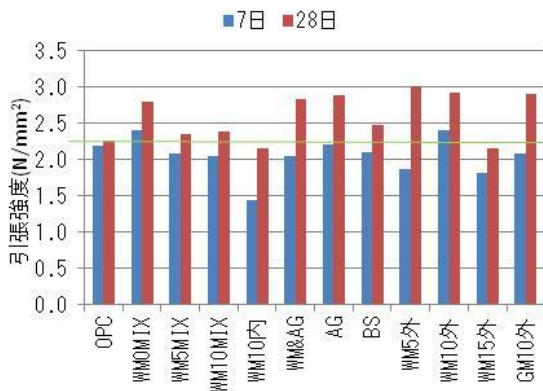


図-10 割裂引張強度試験結果グラフ

(5) 割裂引張強度試験

表-7, 及び図-10 に割裂引張強度試験結果を示す。

材齢 28 日強度はほとんどの配合で OPC を上回り、雲母の混和により引張強度は増加する傾向を示した。これは薄板状の雲母が短繊維のような働きをし、引張応力に抵抗したためと思われる。WM10 内は引張強度が低下したが、これはセメント量の減少や雲母の異方性によるばらつきなどが原因と考えられる。

また、圧縮強度試験結果と同様に雲母置換量の増大に伴い、引張強度は減少する傾向を示した。その理由も同様のものと考えられる。

(6) 長さ変化試験

シリーズ 1 の長さ変化のグラフを図-11, シリーズ 2 を図-12, シリーズ 1 の質量変化のグラフを図-13, シリーズ 2 を図-14 にそれぞれ示す。

シリーズ 1 では、配合 WM10 内が OPC と比較して質量減少率が大きく、2.2 で述べたように水和に寄与しない水分が OPC と比較して増加していると考えられる。また、配合 AG, WM10 内, WM&AG の収縮ひずみが OPC と比較して小さくなっているのは、これらの配合の静弾性係数が大きいことが理由と考えられる<sup>4)</sup>。

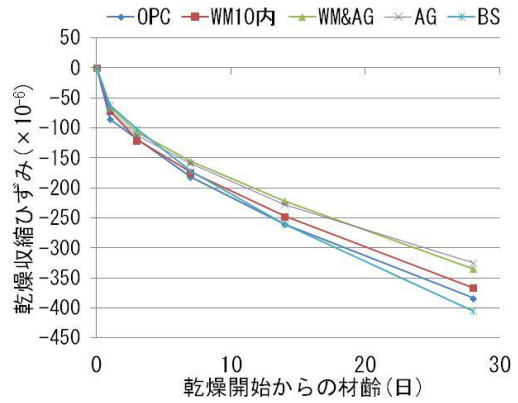


図-11 シリーズ1長さ変化

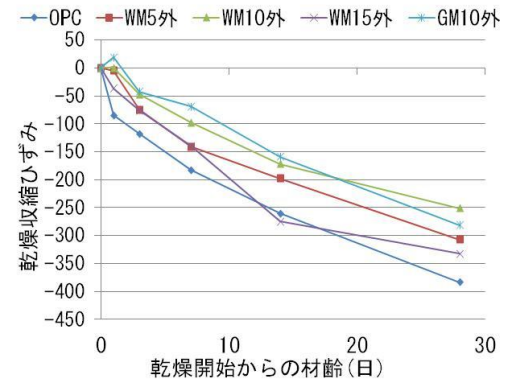


図-12 シリーズ2長さ変化

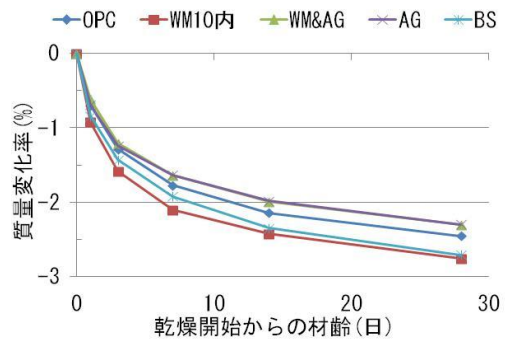


図-13 シリーズ1質量変化

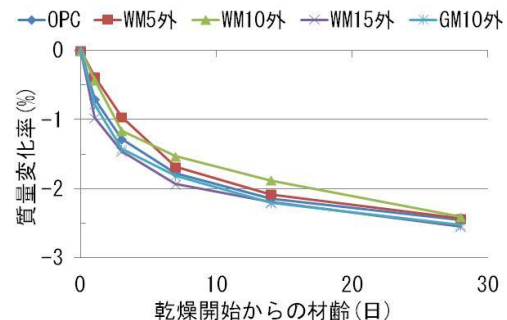


図-14 シリーズ2質量変化

一方シリーズ 2 では、質量変化率と静弾性係数がほぼ同等であるにもかかわらず、雲母を混和した配合において収縮ひずみが  $50 \times 10^{-6} \sim 130 \times 10^{-6}$  程度小さくなった。これは、薄板状の雲母が短繊維のような働きをし、引張応力に抵抗したためと思われる。

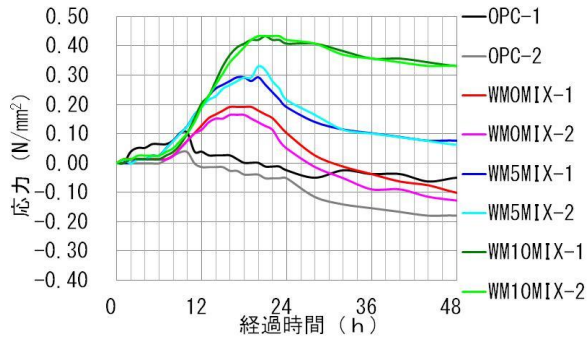


図-15 ひび割れ抵抗性試験 2日まで

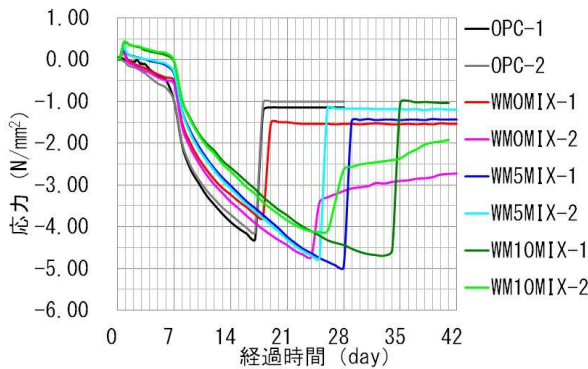


図-16 ひび割れ抵抗性試験結果  
材齢と発生応力度の関係

表-8 ひび割れ発生までの日数

配合名	ひび割れ発生日数(日)		平均ひび割れ 発生日数(日)
	供試体1	供試体2	
OPC	18	18	18
WMOMIX	19	25	22
WM5MIX	29	26	27
WM10MIX	35	27	31

### (7) ひび割れ抵抗性試験

材齢 48 時間までの収縮応力の測定結果を図-15 に、ひび割れ発生までの収縮応力の測定結果を図-16 にそれぞれ示す。

各配合のひび割れ発生までの日数は表-8 の通りとなった。なお、平均ひび割れ発生日数の計算方法は式(1)に示すとおりである。ここでは小数点以下は切り捨てとした。

$$\text{平均ひび割れ発生日数} = \frac{\text{供試体1} + \text{供試体2}}{2} \quad (1)$$

配合 OPC と比較して雲母を使用した配合では、ひび割れ発生日数が遅延したことからひび割れ抵抗性が向上したと考えられる。また、雲母混和量の多い条件ほどひび割れの発生は遅延したが、本実験では雲母以外の混和材料の影響と考えられるため、雲母のみを混和した配合についても検討する必要がある。

### 5. まとめ

本研究では、雲母の混和によるコンクリートの乾燥収縮及び強度発現特性に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・雲母はコンクリート中において析出物を生成しない。
- ・雲母をコンクリートに混和することでスランプは減少し、空気量は増大する。
- ・雲母の混和量が増えるほど圧縮強度は低下する。
- ・雲母の混和により、わずかながら変形抵抗性が增大する。
- ・雲母の混和により引張強度が長期材齢において増大する。
- ・白雲母の混和による乾燥収縮低減効果は本実験の範囲では単位量  $10\text{kg/m}^3$  において最大となる。

### 参考文献

- 1) 神奈川県再生骨材協同組合：環境と再生骨材，<http://www.saikotsu.or.jp/environment/index.html>
- 2) 丸岡正知：石灰石微粉末を混和した自己充填コンクリートの諸性質と圧力損失の評価に関する研究，学位論文，pp.64，2007.6
- 3) コンクリート関連用語集・AE 剤，[http://www.shintosangyo.com/glossary/alphabet\\_000004.html](http://www.shintosangyo.com/glossary/alphabet_000004.html)
- 4) 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.1，2009