

論文 モンモロロナイト含有骨材使用による ASR 膨張抑制

桑江 ひとみ*1・迫田 恵三*2・丸 章夫*3

要旨：本研究では、コンクリートのアルカリシリカ反応による膨張を抑制するために、陽イオン交換能を有したモンモロロナイトを含有する骨材を反応性骨材と併用した。単位セメント量を 450, 300 kg/m³ とし、コンクリートの等価アルカリ量を Na₂O 換算で 0.5, 1.0 および 1.2% とした。骨材中に含まれるモンモロロナイト量は粗骨材、細骨材ともに 0, 5, 10 および 15% とし、6 ヶ月間の促進試験を行った。長さ変化率や相対動弾性係数を測定した結果、W/C=40.8%, 等価アルカリ量 1.0% の場合、モンモロロナイト含有骨材置換量が 5% 以上で膨張抑制され、等価アルカリ量 1.2% では置換量 10% 以上で膨張は抑制された。

キーワード：アルカリシリカ反応、モンモロロナイト含有骨材、長さ変化率

1. まえがき

アルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化は、コンクリート中の総アルカリ量や供給される水分量と密接な関係がある。この反応による膨張抑制対策としては、反応性骨材の使用量の制限や、使用するセメントおよび混和材料などからのアルカリを量的に抑える方法¹⁾、ならびに表面被覆処理法²⁾等がなされてきた。しかしながらアルカリ骨材反応のメカニズムは複雑であり、徹底した反応性骨材の管理は困難を有し、反応性骨材の使用制限は骨材資源の有効利用の観点からも望ましくない。また、表面被覆による水分制御は構造物の断面厚から限界が生じる。コンクリート中の総アルカリ量を抑える目的として高炉スラグやフライアッシュ等のシリカ質混和材料を使用する方法^{3), 4)}や、リチウム系混和剤の使用も有効である⁵⁾と報告されている。

本研究ではアルカリシリカ反応による膨張抑制効果を得るために、粘土鉱物の一種であるモンモロロナイトを含有する骨材を使用した。粘土鉱物によるアルカリシリカ反応抑制としてはゼオライトの使用もある⁶⁾が、モンモロロナイトは高いイオン交換能を有した粘土鉱物であ

り⁷⁾、その結果アルカリイオン吸着性が期待できることに着目した。はじめに基礎実験として、反応性細骨材にモンモロロナイト含有細骨材を混入したモルタルでモルタルバー法に準拠した長さ変化率試験を行った。その結果に基づいたうえで、コンクリート供試体で単位セメント量およびモンモロロナイト含有骨材置換量の変化によるコンクリートの長さ変化率試験、相対動弾性係数試験、および圧縮強度試験、中性化深さ試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用した骨材の物理的性質を示す。モルタル供試体、コンクリート供試体ともに反応性骨材（ガラス質安山岩）は東北産砕砂（密度 2.67g/cm³, 吸水率 1.88%）、碎石（密度 2.74 g/cm³, 吸水率 0.72%）を使用した。モンモロロナイト含有骨材（安山岩）は中部産砕砂（密度 2.59 g/cm³, 吸水率 4.04%）、碎石（密度 2.63 g/cm³, 吸水率 2.33%）を使用した。モンモロロナイト含有量は偏光顕微鏡観察により測定し、細骨材で 18%, 粗骨材で 16% である。

*1 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 (正会員)

*2 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科 工博 (正会員)

*3 地質鉱物エンジニアリング(株) 理博 (正会員)

表-1 骨材の物理的性質

		密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	モンモリロナイト含有量 (%)
粗骨材	反応性骨材	2.74	0.72	1.54	0
	モンモリロナイト含有骨材	2.63	2.33	1.47	16
細骨材	反応性骨材	2.67	1.88	1.65	0
	モンモリロナイト含有骨材	2.59	4.04	1.63	18

2.2 配合および供試体寸法

モルタルの配合は重量比でセメント 1 に対し細骨材 2.25、水 0.5 とし、等価アルカリ量を Na₂O 換算で 1.2% に調整するために NaOH 水溶液を練り混ぜ水に使用した。モンモリロナイトの混入量は使用した細骨材の全重量に対し重量百分率で 0、0.55、1.1、2.2、および 6% と変化させた。

表-2 はコンクリートの配合を示す。水セメント比 (以下、W/C) =40.8%、58.7% とし、単位セメント量を 450 kg/m³、300 kg/m³ の 2 種類とした。全骨材中に含まれるモンモリロナイト量が粗骨材、細骨材ともに重量比で 0、5、10 および 15% となるようにモンモリロナイト含有骨材を置換した。モンモリロナイト含有骨材のモンモリロナイト含有量は重量比で定量しているため、モンモリロナイト含有骨材を質量置換した。セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm³)、アルカリ量は等価 Na₂O 換算で 0.5% を使用し、コンクリート中の等価アルカリ量を Na₂O 換算で 0.5、1.0 および 1.2% と変化させるために NaOH 水溶液を練り混ぜ水に使用した。供試体寸法は φ100 mm×200 mm である。

2.3 養生条件および試験項目

モルタル供試体に関しては JIS A 5308 付属書 8 骨材のアルカリシリカ反応試験 (モルタルパー法) に基づいた養生環境で養生した。

コンクリート供試体は脱型後 28 日間標準養生を行い、アルカリ骨材反応を短期間で誘発させるために、養生温度 40℃、相対湿度 90% 以上の養生条件で促進試験を 6 ヶ月間行った。養生期間中 1 ヶ月ごとにレーザー変位測定器による長さ変化率試験、相対動弾性係数および重量変化率を測定し、促進試験終了後に圧縮強度、

表-2 示方配合および実測空気量

W/C (%)	モンモリロナイト含有量 (%)	単位量 (kg/m ³)						Air (%)
		W	C	S		G		
				R	MO	R	MO	
40.8	0	184	450	639	0	1070	0	4.3
	5			461	178	736	334	3.7
	10			284	355	401	669	3.2
	15			106	533	67	1003	2.7
58.7	0	176	300	847	0	1020	0	4.0
	5			612	235	701	319	3.8
	10			376	471	382	638	4.3
	15			141	706	64	956	3.0

R:反応性骨材

MO:モンモリロナイト含有骨材

静弾性係数を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 標準養生時の圧縮強度と静弾性係数

図-1 にモンモリロナイト含有骨材置換量の変化と標準養生時の圧縮強度を示す。W/C=40.8% の場合、全体的にモンモリロナイト含有骨材置換量の増加に伴い圧縮強度は増大している。Na₂O=0.5% で置換量 0% と 15% では圧縮強度が 30% 程度増加しており、Na₂O=1.0% で置換量 0% と 15% では 8% 程度増加した。本研究における W/C=40.8% では、置換量の増加に伴いコンシステンシーが低下した。とくにモンモリロナイト含有骨材置換量が 15% の場合、スランプ値は 0 であったため、高性能 AE 減水剤を添加した。空気量に関しても同様に低下しており (表-2)、圧縮強度増加の原因としては、空気量低下と遷移帯のセメントペーストマトリックスと骨材界面の付着効果が考えられる。

W/C=58.7% の圧縮強度は、Na₂O=0.5%、1.0% の場合、モンモリロナイト含有骨材置換量 0% と 15% での圧縮強度は大差ない。一般に水セメント比が大きくなると、セメントペーストマトリックスの強度が低下し、骨材が圧縮強度に及ぼす影響は小さくなると考えられているが、

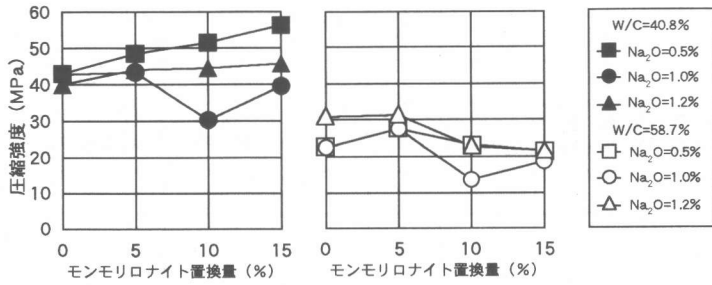


図-1 モンモロロナイト置換量と圧縮強度（標準養生）

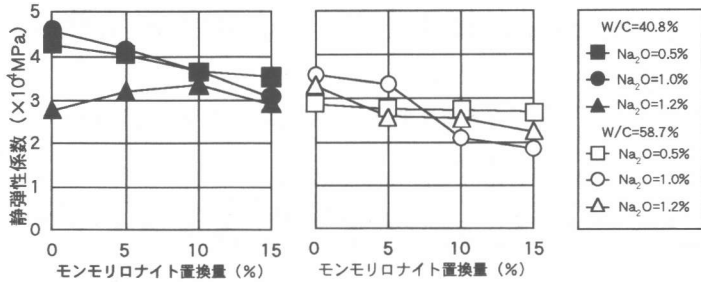


図-2 モンモロロナイト置換量と静弾性係数（標準養生）

Na₂O=1.2%の場合、置換量 0%と 15%では 30%程度の強度低下がみられる。この結果についての原因は明らかでない。

図-2 はモンモロロナイト含有骨材置換量と静弾性係数の結果を示す。モンモロロナイト含有骨材の高い吸水率が影響し、モンモロロナイト置換量が増加すると静弾性係数は低下している。一般に、圧縮強度と静弾性係数は比例的な関係があると言われているが、W/C=40.8%の結果は逆の相関が得られている。静弾性係数を支配するのは骨材の弾性係数である。したがって、空気量減少によって圧縮強度が増大しても、静弾性係数は低下したと考えられる。

3.2 長さ変化率

図-3 にモルタルパー法に基づいた長さ変化率の試験結果を示す。モンモロロナイト含有骨材置換量の増加に伴い長さ変化率は小さくなっているが、置換量 6%では材齢 6 ヶ月においても 0.05%以下となっているのに対し、それ以外の置換量では 0.6%以上の大きな長さ変化率

を示した。

図-4 はすべてのコンクリート供試体の材齢に伴う長さ変化率の挙動を示す。単位セメント量の少ない W/C=58.7% の場合はアルカリ骨材反応が活発化されず、際だった膨張はみられなかった。一方、W/C=40.8%、等価アルカリ量 0.5%では長さ変化率は大きな値を示しておらず、等価アルカリ量 1.0%でモンモロロナイト含有骨材置換量が 0%のものは、材齢 4 ヶ月でひび割れが確認され、長さ変化率は材齢 6 ヶ月で 0.15%程度となった。しかし、モンモロロ

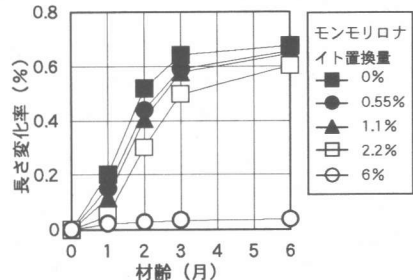


図-3 モルタルパー法による長さ変化率の変化

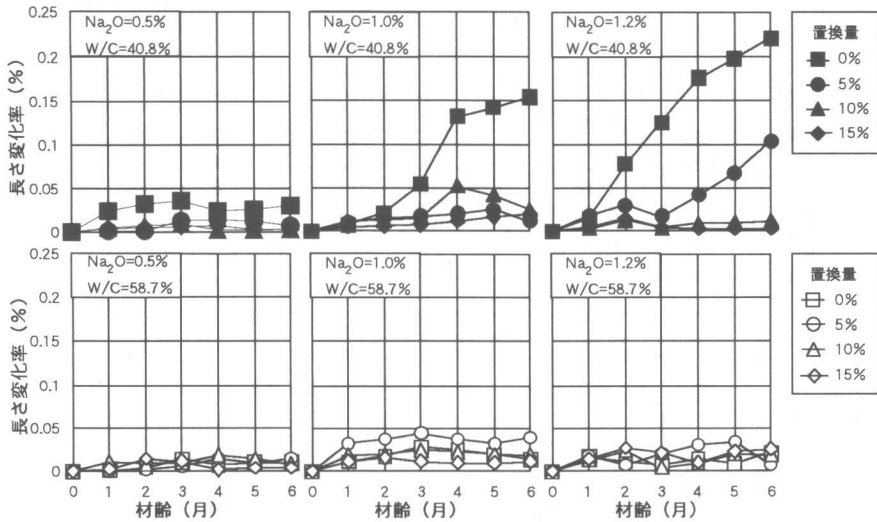


図-4 モンモロロナイト置換量の変化と材齢に伴う長さ変化率の挙動

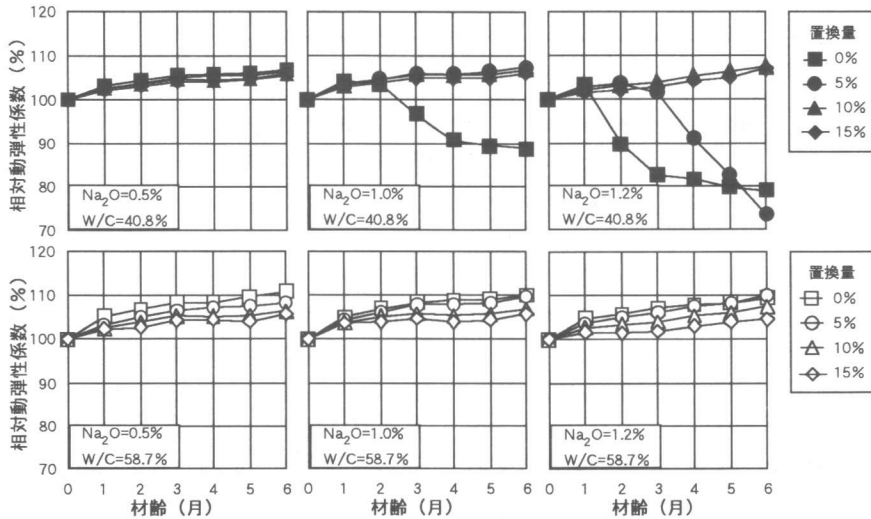


図-5 モンモロロナイト置換量の変化と材齢に伴う相対動弾性係数の挙動

ナイト含有骨材の置換量を5%以上にするこ
とで長さ変化率は小さな値となり、モンモロ
ロナイトによって膨張が抑制されたと思われ
る。同様に、等価アルカリ量1.2%では置
換量0%の長さ変化率は材齢6ヵ月で0.2
%以上となり、材齢3ヵ月でひび割れが観
察された。他方、置換量5%では、材齢4
ヵ月でひび割れが生じ、材齢6ヵ月での長
さ変化率は0.1%程度となった。しかしな
がら、置換量10、15%では長さ変化率
は0.01%以下となっているので、モン
モロロナイトによって膨張は抑制されたと
考えられる。

コンクリート供試体の場合、W/C=40.8%
で等価アルカリ量1.0%の場合にはモン
モロロナイト含有骨材の置換量が5%以
上で膨張抑制可能であり、等価アルカリ
量1.2%の場合は置換量10%以上で膨
張抑制可能という結果となった。

3.3 相対動弾性係数

図-5に材齢に伴う相対動弾性係数の挙
動を示す。W/C=40.8%の場合、等価
アルカリ量0.5%のものに関しては膨
張によるひび割れは生じておらず、相
対動弾性係数は材齢とともに増加して
いる。しかし、等価アルカリ量1.0%
の場合、ひび割れが確認されたモン
モロロナイト含有骨

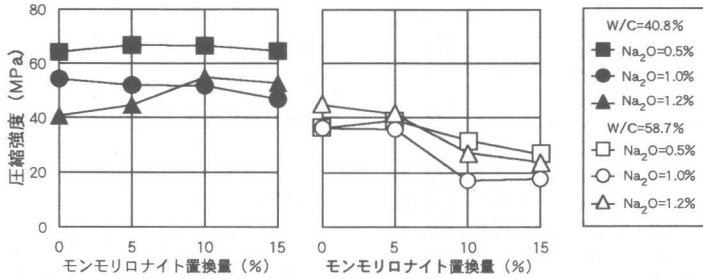


図-6 モンモリロナイト置換量と圧縮強度（促進試験後）

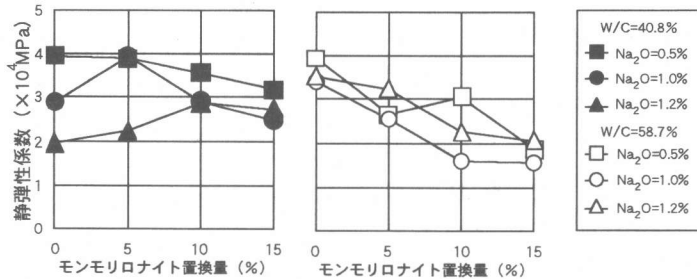


図-7 モンモリロナイト置換量と静弾性係数（促進試験後）

材置換量 0%の相対動弾性係数は材齢 4 ヶ月から低下し、材齢 6 ヶ月で 10%程度の低下となった。等価アルカリ量 1.2%に関しても、置換量 0%では材齢 2 ヶ月、置換量 5%では材齢 3 ヶ月から相対動弾性係数は低下し、最終的には 20%以上の低下となった。W/C=58.7%の場合はアルカリ骨材反応は活発化せず、モンモリロナイト含有骨材の置換量やコンクリート中のアルカリ量による明確な差異はなく、相対動弾性係数はすべて材齢とともに増加した。ひび割れが生じた時点から相対動弾性係数は低下したという結果から、相対動弾性係数の結果は図-4 の長さ変化率の結果と良く対応していると言える。

3.4 促進試験終了後の圧縮強度

図-6 に促進試験終了後の圧縮強度の結果を示す。W/C=58.7%ではアルカリ量の増減による顕著な変化はみられなかったが、モンモリロナイト含有骨材置換量の増加に伴い圧縮強度は低下した。この理由については次のようなことが考えられる。モンモリロナイト含有骨材は表-1 に示したように反応性骨材よりも吸水率が大きい。このためモンモリロナイト置換量が増加すると圧縮強度は低下したと思われる。一

方、W/C=40.8%、等価アルカリ量 1.2%のものはモンモリロナイト含有骨材の置換量が多くなるにつれて圧縮強度は高くなる傾向がみられる。これは図-4 の長さ変化率からも明らかのように、置換量 10%以上で膨張が大幅に抑制されたことが原因と考えられる。

3.5 促進試験終了後の静弾性係数

図-7 は促進試験後の静弾性係数結果を示している。W/C=58.7%に関しては、モンモリロナイト置換量の増加によって静弾性係数は低下している。この原因は圧縮強度の結果と同様に、モンモリロナイト含有骨材の吸水率が反応性骨材の吸水率より大きいことが原因と考えられる。一方、W/C=40.8%、等価アルカリ量 1.2%では、置換量の増加に伴い静弾性係数は増している。これはコンクリートが高アルカリな場合、モンモリロナイト含有骨材の置換量が 10%以上で膨張抑制効果があったためだと考えられる。

3.6 中性化深さ

図-8 に促進試験終了後の中性化深さを示す。W/C=40.8%と 58.7%では単位セメント量 450 kg/m³である W/C=40.8%の方が中性化深さは小さい。また、モンモリロナイト含有骨材置換量

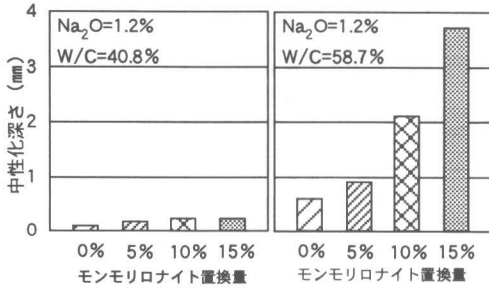


図-8 促進試験終了後の中性化深さ

の増加に伴い中性化深さは大きくなっている。本研究における中性化深さは、水セメント比やモンモリロナイト含有骨材の品質によるものだと考えられる。水セメント比の増加と、吸水率の高いモンモリロナイト含有骨材置換量の増加によりコンクリートは多孔質になり、その結果透気性が高くなったと考えられる。したがって水セメント比、置換量のより多いものの中性化深さが大きくなったものと考えられる。

4. あとがき

モンモリロナイト含有骨材使用による ASR 膨張抑制の研究を行った結果、以下のような結論が得られた。

(1) 28 日間標準養生した場合、W/C=40.8%、等価アルカリ量 0.5%ではモンモリロナイト置換量の増加により圧縮強度が増し、静弾性係数は低下した。W/C=58.7%についてはモンモリロナイト含有骨材の高い吸水率が影響し、モンモリロナイト置換量の増加に伴い圧縮強度と静弾性係数はともに低下した。

(2) 長さ変化率試験では、W/C=40.8%、等価アルカリ量 1.0%のときモンモリロナイト含有骨材の置換量が 5%以上で膨張は抑制され、等価アルカリ量 1.2%では置換量 10%以上で膨張抑制効果がみられた。長さ変化率の結果と相対動弾性係数果は対応しており、膨張抑制されたコンクリートの相対動弾性係数は大きくなった。

(3) 中性化深さについては、水セメント比やモンモリロナイト含有骨材置換量の増加によるコンクリートの多孔質化が中性化を促したと考えられる。

以上のように、たとえ反応性骨材を用い、コンクリート中が高アルカリな場合でも、モンモリロナイト含有骨材を用いることによって、膨張を抑制することが可能である。

参考文献

- 1) 高木俊郎ほか：SiO₂を含む混和材のアルカリ骨材反応抑制効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.2，pp783-788，1990
- 2) 藤田修一ほか：表面処理材によるアルカリ骨材抑制効果に関する実験報告，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp943-948，1997
- 3) 山本親志ほか：高炉スラグ骨材コンクリートのアルカリ反応に対する安定性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.8，pp157-160，1986
- 4) 長滝重義ほか：アルカリ骨材反応抑制に及ぼすフライアッシュの粒度および非晶質成分の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp807-810，1990
- 5) 二村誠二：水酸化リチウムがアルカリシリカ反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp935-940，1993
- 6) 高橋徹ほか：天然ゼオライトによるコンクリートのアルカリ骨材反応抑制技術，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp1099-1104，1994
- 7) 白水晴雄著：粘土鉱物学，朝倉書店，1988