

論文

[1140] 反応性骨材を用いたコンクリートの膨張特性に及ぼす混和剤の影響

正会員 中島正智 (日曹マスタービルダーズ中央研究所)

正会員〇能町 宏 (日曹マスタービルダーズ中央研究所)

正会員 高田 誠 (ボゾリス物産技術部)

正会員 西林新蔵 (鳥取大学工学部)

1. はじめに

コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性に関しては、わが国でもすでに化学的、岩石学的手法、ならびにモルタルバー法等で多数の基礎的研究がなされてきており、骨材の有害、無害の判定に関する試験方法もJIS A 5308「レデーミクストコンクリート」の付属書に規定されるようになった。また、反応性に影響する要因もモルタルバー法による試験結果や、コンクリート構造物の損傷調査結果等から解明されつつある。

すでにコンクリート用化学混和剤を使用したコンクリート試験体によって、膨張特性におよぼす骨材の種類とその混合比率、空気量と膨張率との関係、単位セメント量とアルカリ総量、および混和剤の種類等の影響について、6ヶ月¹⁾と12ヶ月²⁾の材令での結果をそれぞれ報告した。通常、この種のコンクリート試験で採用される養生方法は、40℃、相対湿度 95%以上の促進養生、あるいは、20℃、40℃の水中に浸漬する方法が採用されているが、養生方法はコンクリートの膨張特性に大きな影響をおよぼすと考えられる。本研究は上記促進養生と対比して、20℃、相対湿度95%以上の環境下で経時したコンクリート試験体について、混和剤の種類、連行空気量、アルカリの種類等の影響を明らかにするとともに、試験体を水中に浸漬した場合のアルカリ成分の溶出に関しても検討を加えたものである。

2. 実験計画

本実験は、コンクリートの膨張特性におよぼす混和剤の影響に関する一連の実験計画の中から、表-1に示す要因と水準に関するものである。

3. 使用材料およびコンクリートの配合

3.1 使用材料

セメントはJIS R 5210「ポルトランドセメント」に規定する普通ポルトランドセメント(低アルカリ形、Na₂O : 0.19%、K₂O : 0.33%、等価 Na₂O : 0.41%)を用いた。細骨材は瀬戸産精鉱珪砂で、ASTM C 289 規定の化学法による試験で無害と判定されたものである。

粗骨材のうち、Nは上記の試験で無害の青梅産硬質砂岩碎石、Sは潜在的有害と判定された瀬戸内産碎石で古銅輝石安山岩に属している。粗骨材はNとSを50:50に混合して使用した。

アルカリ調整用のNaOH、NaCl等は試薬特級品を

表-1 膨張特性に関する実験計画

要因	水準
粗骨材の種類と混合率	S (潜在的有害)、N (無害) S : N = 50 : 50 (混合率)
単位セメント量 (kg/m ³)	450 (プレーン、AE剤) 405 (AE減水剤、流動化剤)
アルカリの種類と量 (%)	NaOH (R ₂ O* : Cx1.5%) NaCl (R ₂ O* : Cx1.5%)
空気量 (%)	フリー、4.5、6.0
混和剤の種類 (標準使用量)	AE剤 : AE-1、-2 AE減水剤 : AEWR-1、-2、-3、-4 流動化剤 : SP-1、-2
養生方法	A : 20℃、R、H95%以上 B : 40℃、R、H95%以上 E : 20℃、水中 (アルカリ溶出実験)

* R₂O=等価Na₂O

用い、あらかじめ10%水溶液を調整して、所定量を練混ぜ水に添加して使用した。

化学混和剤の種類と特徴は表-2に示す。AE剤は成分の異なるもの2種類、AE減水剤はJIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」の標準形2種類、促進形、遅延形各1種類、また流動化剤は成分の異なるもの2種類である。

3.2 コンクリートの配合

試験体の作製にあたって、目標スランブを15cm、空気量はフリー、4.5%、6.0%の3水準とし、単位セメント量はプレーンとAE剤使用の場合は450kg/m³、その他は全て405kg/m³と定めた。また、AE減水剤は標準的使用量、流動化剤はスランブによる流動化幅10cmが得られる使用量とした。

4. 試験体の作製と養生方法

4.1 膨張特性実験

コンクリートを10×10×40cmの鋼製型枠に詰め、20±3℃、相対湿度95%以上の恒温恒湿室に保管し、打設24時間後に脱型、基長測定を行った後、A養生（促進養生）の試験体は

40℃相対湿度95%以上の養生槽に移した。各試験体は互いに接触しないようにし、かつ立てて養生した。測定材令の24時間前に特殊密閉型コンテナに試験体を持ち、コンテナ共に20±3℃、相対湿度80%以上の恒温恒湿室に移動し、各材令で長さ変化を測定した。測定材令は2週、4週、以後6ヶ月までは1ヶ月毎に、以後12ヶ月までは3ヶ月毎に、以後24ヶ月までは6ヶ月毎に定め、長さ変化の状況によって適宜材令を追加した。また、B養生（標準養生）の試験体は、基長測定後、20±3℃、相対湿度95%以上の霧室に移動し、落下水滴が直接試験体に当たらないようにビニールシートで覆いを施して所定材令まで養生した。他はA養生と同様の手順で長さ変化を測定した。ただし、B養生では試験体は横置きで経時させた。また、測定材令は長さ変化がほぼ一定値を示すまで各月毎に実施した。

4.2 アルカリ成分の溶出実験

コンクリートを15×15×15cmの鋼製型枠に詰め、20±3℃、相対湿度95%以上の恒温恒湿室に保管し、24時間で脱型、封かんした後、材令14日までそのまま養生を継続した。その後、容量30ℓの密閉型ポリ容器に20ℓの蒸留水を満たし、その中に試験体を浸漬し、容器を密閉した状態で所定の材令まで20℃恒温室で経時した。

5. 溶出成分の測定方法

浸漬水を均一にかき混ぜた後、20mlの分析用溶液を採取し、Na⁺、K⁺は原子吸光光度法、Cl⁻ならびにSO₄²⁻はイオンクロマトグラフィーで分析した。また、pHはガラス電極pHメーターで測定した。

6. 実験結果および考察

表-2 混和剤の主成分およびR₂O量

混和剤		主成分	R ₂ O* (wt%) (製品中)
タイプ	種類		
AE剤	AE-1	アルキルアリルスルホン酸塩	2.00
	AE-2	天然樹脂酸塩	2.02
AE減水剤	AEWR-1	リグニンスルホン酸化合物	0.23 (2倍液)
	AEWR-2	リグニンスルホン酸化合物	0.26 (2倍液)
	AEWR-3	リグニンスルホン酸化合物 およびロダン化合物	3.94
	AEWR-4	有機酸系誘導体	4.30
流動化剤	SP-1	ナフタリンスルホン酸カルシウム系化合物	0.40
	SP-2	メラミンスルホン酸系化合物	2.98

* R₂O=等価Na₂O

6. 1 混和剤の種類および養生方法の影響

図-1に試験結果を示した。プレーン、AE剤の試験体は、NaOHを用いてコンクリート1m³当りの等価Na₂O量を6.75kgに、AE減水剤は6.075kgに調整し、流動化剤はNaClを用いて等価Na₂O量を6.075kgに調整したものである。

(1) プレーン、AE剤

40℃養生の場合、プレーンの膨張率は材令1ヶ月ですでに0.1%を越えており、材令6ヶ月まではほぼ直線的に増大し、その後材令24ヶ月まで微増の傾向を示している。

材令24ヶ月の膨張率は0.36%である。AE剤を添加した試験体もプレーンと類似の膨張パターンであり、材令6ヶ月で頭打ちになっている。膨張率はいずれの材令でもプレーンよりも小さく、材令24ヶ月の膨張率は、AE-1:0.24%、AE-2:0.24%でAE剤間で差は認められない。これに対して20℃養生の場合、膨張の開始が遅れ、プレーンで材令5ヶ月、AE剤で材令6ヶ月以後に膨張がみられる。また、20℃養生では膨張が始まるとその後の膨張速度は40℃養生とほぼ同等になり、材令24ヶ月でもまだ活発な膨張段階にある。AE剤の試験体では20℃養生の方が、材令18~20ヶ月で40℃養生よりも大きくなり、明かな逆転現象が生じている。なお、AE剤の場合、プレーンよりも膨張率が小さいのは、連行空気量の効果によるものである。

(2) AE減水剤

40℃養生でいずれのAE減水剤もプレーンに比較して膨張率は小さい。これは連行空気量と単位セメント量の低減効果によるものである。各混和剤間の膨張率では、促進形のAEWR-3が最も大きく、これは混和剤がコンクリート中に持ち込むアルカリ量の違いによるもので、AEWR-3を標準量使用した場合、持ち込まれるアルカリ量はコンクリート1m³あたり0.170Kg、他の混和剤では0.013~0.035Kgになる。

AE減水剤においても40℃養生よりも20℃養生の方が遅れて膨張の開始があり、材令12ヶ月以

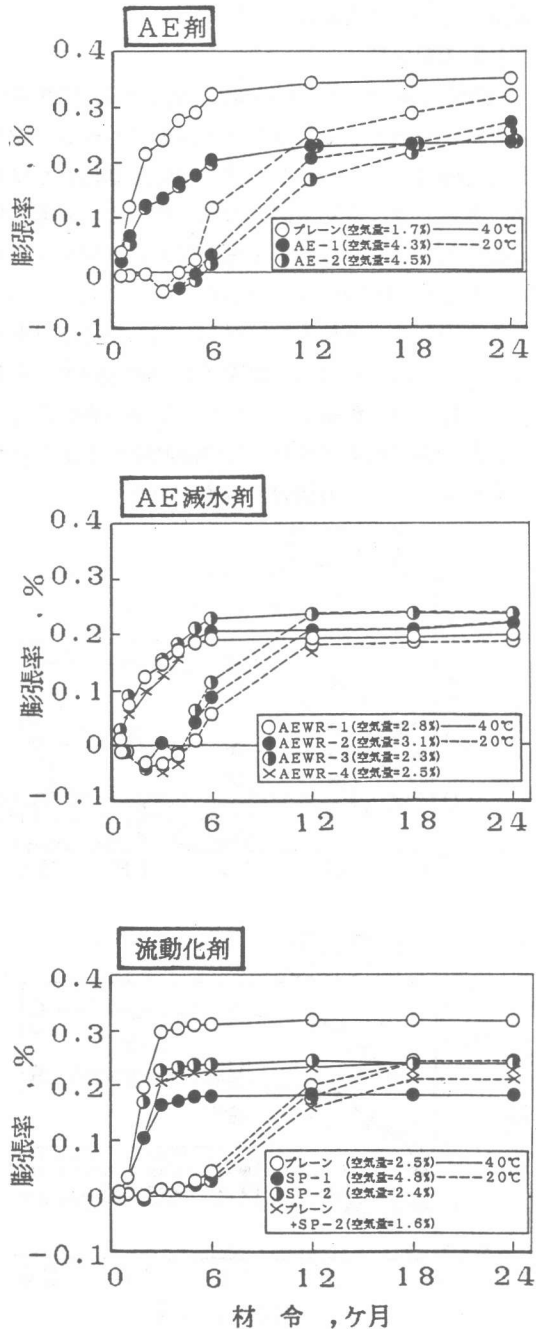


図-1 膨張特性におよぼす養生方法の影響

後でも漸増の傾向にある。促進形のAEWR-3では材令12ヶ月の時点で膨張率が逆転し、20℃養生の方がやや大になっている。

(3) 流動化剤

流動化剤をコンクリートに同時添加した結果を示した。

また、一例としてスランブ 9cmのプレーンコンクリートにメラミンスルホン酸塩系のSP-2をあと添加して、スランブ19.0cmに流動化した結果も併記した。同時添加した場合で比較すると、40℃養生では、SP-2の方がSP-1よりも各材令での膨張率は大きい。これは、連行空気量の違いならびに、SP-1およびSP-2から持ち込まれるアルカリ量が、 Na_2O 量でそれぞれ 0.006kg/m^3 、 0.136kg/m^3 であり、AEWR-3の場合と同様に、混和剤中のアルカリ量の影響によるものと考えられる。しかし、20℃養生では空気量ならびにアルカリ量の影響は見られなく、SP-1とSP-2は、大略等しい膨張速度、膨張率である。材令24ヶ月でも膨張が進行中であり、まだ十分に膨張していないことが両者の差を小さくしていると考えられる。

また、40℃養生でSP-2の同時添加とあと添加との間に膨張速度、膨張率ともに差はなく、20℃養生ではあと添加の方がやや小さい。

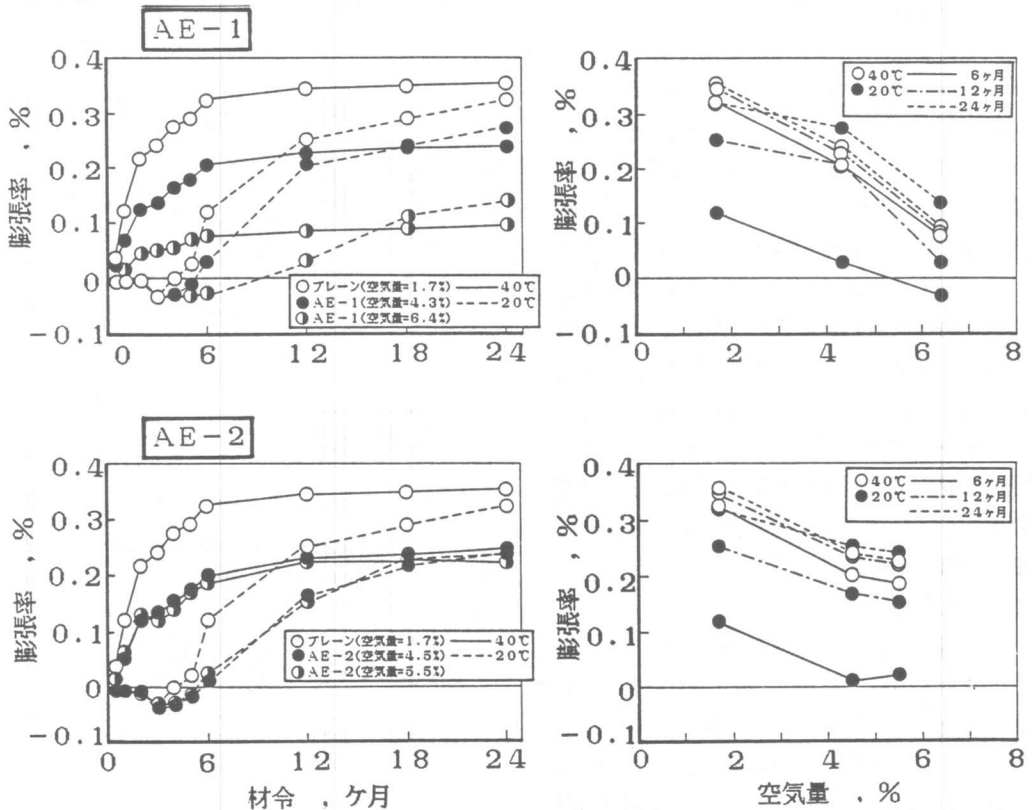


図-2 膨張特性におよぼす空気量の影響

6.2 空気量と膨張率の関係

図-2は、2種類のAE剤を用いて、空気量と膨張率の関係を求めた結果である。筆者らは前報¹⁾で材令6ヶ月で上記の関係を求め、連行空気量はアルカリシリカ反応の膨張率を小さくする

が、骨材の種類やアルカリ量によってその程度が異なることを指摘した。図-2は、材令6ヶ月に加えて材令12ヶ月と材令24ヶ月の関係を示したものである。

AE-1の場合、40℃養生では、材令6ヶ月で膨張率は頭打ちになっている。したがって、材令6ヶ月での膨張率と空気量の関係は、そのまま材令12ヶ月と材令24ヶ月での関係になっている。空気量が1.7%~6.4%の範囲で、何れの材令でも膨張率との間ではほぼ直線の関係が認められた。

20℃養生では、材令6ヶ月で空気量6.4%はまだ膨張状態になく、材令12ヶ月に至って膨張の始まりが認められる。20℃養生ではまだ膨張が進行中であり、24ヶ月までの材令では、空気量と膨張率の間に良い対応が取れない。

AE-2の場合、40℃、20℃養生ともに空気量4.5%と5.5%とで膨張率にあまり差がなく、空気量と膨張率の間に直線の関係はみられない。

6.3 アルカリの種類の影響

NaOHとNaClを選んで、セメントに対するアルカリ量を等価Na₂O量で1.5%に調整して膨張特性の違いを実験した。結果を図-3に示した。各材令における膨張率は、混和剤の種類、アルカリ量ならびに養生条件が違って、常にNaClの方が明らかに大である。

また、本実験においても、これまでに述べてきたごとく、材令24ヶ月で40℃養生よりも20℃養生の膨張率は大きく、しかも膨張傾向はそれ以後も継続する傾向が認められる。

6.4 アルカリ成分の溶出

コンクリート試験体を使用して、アルカリシリカ反応の諸特性を研究する場合に、試験体の養生方法の一つとして、20℃あるいは40℃の水槽内に浸漬する方法がある。この養生方法では、材令とともにアルカリ成分が溶出し、とくに膨張の進行に伴ってクラックが発生した場合には、その程度が大きくなり、試験体作製当初に調整したアルカリ条件が維持できなくなる恐れが生じる。この点を確認する目的で、反応性骨材を用いて作製したコンクリート試験体を20℃の水中に完全に浸漬して、材令に伴って溶出するアルカリ成分を測定した。図-4はその実験結果である。

実験に供した試験体は、粗骨材をSとNを50:50に混合したもの、コンクリート1m³あたりの等価Na₂O量をNaClで6.075kgに調整し、AE減水剤AEWR-1を

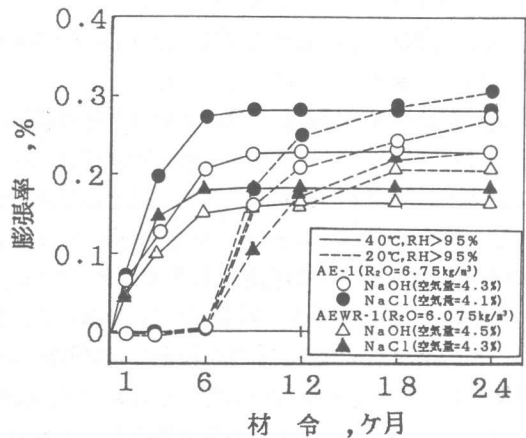


図-3 膨張特性に及ぼすアルカリの種類の影響

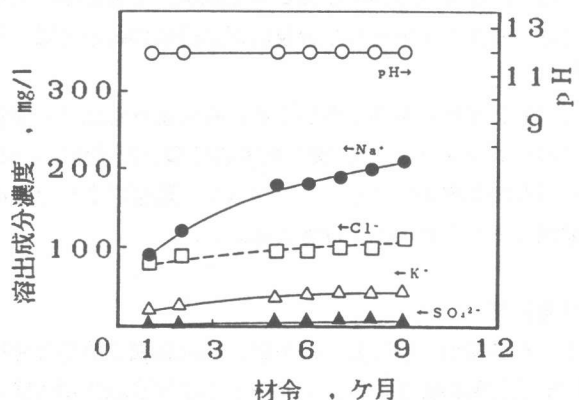


図-4 コンクリート試験体から溶出する成分の消長

使用したコンクリートである。

なお、同時にこの条件で作製した 10×10×40cm 試験体の20℃養生の膨張率は、材令 6ヶ月で 0.06%、材令9ヶ月で0.1%であった。

図-4から水溶液のpHは、材令 1ヶ月で既に12.1を示し、以後 9ヶ月まではほぼ一定値を保っている。Cl⁻とK⁺は、材令 6ヶ月以後はほぼ一定の溶出量となっている。SO₄²⁻の溶出量は、1mg/ℓ～4.3mg/ℓの範囲内にあり、ほとんど変化はなかった。Na⁺の溶出量は、材令とともに増大し、材令6ヶ月で180mg/ℓ、材令9ヶ月で210mg/ℓである。これらの値をコンクリート試験体作製時のNa⁺量に対する溶出率に換算すると、それぞれ27.5%と32.1%になる。

また、K⁺の溶出量は、材令 6ヶ月で39mg/ℓ、材令 9ヶ月で43mg/ℓであり、同様に19.5%、21.5%の溶出率になる。水中に浸漬した試験体の膨張率ならびにクラック発生状況は、本実験では明らかではないが、別途に行った10×10×40cm試験体の膨張率から推して、本実験の試験体にも材令6ヶ月～9ヶ月でクラックが発生し、多量のアルカリ成分の溶出につながったものと推察される。

7. まとめ

古銅輝石安山岩系骨材を用いて作製した混和剤使用コンクリート試験体の膨張特性に関して、材令24ヶ月までに得られた結果をまとめると以下のごとくである。

(1) 40℃、相対湿度95%以上の促進養生では、材令 6ヶ月までに急激な膨張はほぼ完了し、以後24ヶ月まで微増または変化はない。

(2) 20℃、相対湿度95%以上では、材令 6ヶ月までほとんど膨張はなく、以後に膨張が開始すると、40℃促進養生に近似した膨張速度を示し、24ヶ月でまだ膨張段階にあり、40℃よりも大きな膨張率を示すものも認められる。

(3) AEコンクリートは連行空気量によって、同一単位セメント量のブレンコンクリートよりも小さな膨張率である。AE減水剤、流動化剤を添加した場合、連行空気による効果、および単位セメント量低減効果により、ブレンコンクリートよりも小さな膨張率である。

(4) 混和剤間では、構成々分による影響はほとんどないが、混和剤から持ち込まれるアルカリ量の多いものほど膨張率も大になる傾向が認められる。

(5) 流動化剤の同時添加とあと添加とで膨張率に大差はない。

(6) まだアルカリシリカ反応が進行中の段階では、空気量と膨張率の間に直線関係は得られない。

(7) いずれの条件においても、NaOHよりもNaClを添加したもののほうが大きな膨張率を示す。

(8) コンクリートを 20℃水中に浸漬した場合に、材令 9ヶ月において、Na⁺で32.1%、K⁺で21.5%の溶出率である。したがって、膨張性クラックの発生に伴って、かなりのアルカリ成分が溶出してくるものとみなされる。

参考文献

1) 秀島節治、能町宏、高田誠、西林新蔵：反応性骨材を用いたコンクリートの膨張特性におよぼす混和剤の影響、コンクリート工学年次論文報告集、9-1、1987、pp.579～584

2) Nomachi, H., Takada, M., Harada, K. and Nishibayashi, S.: Effects of Admixtures on Expansion Characteristics of Concrete Containing Reactive Aggregate, 8th International Conference on Alkali-aggregate Reaction, Kyoto, 1989, pp.211～215