

暑中施工における膨張コンクリートの膨張性状に関する実験的研究

Experimental Study on Expansion Characteristics of Self-Stressing Concrete Constructed in Hot Weather

菌井孫文*¹ 大屋戸理明*² 榊原弘幸*³

概 要

本研究では、夏期の打設を想定した膨張コンクリートの膨張ひずみに及ぼす膨張材量、各種化学混和剤および骨材の影響に関する検討を行った。膨張材量が同一の場合、30℃で練混ぜおよび打設を行った方が 20℃で行った場合に比べ、膨張コンクリートの膨張ひずみは小さくなることが確認された。これに加え、化学混和剤の使用によって凝結時間（始発）を遅延させるほど膨張ひずみが小さくなることが確認された。

key words : 膨張コンクリート、化学混和剤、石灰石骨材、凝結時間、膨張ひずみ

1. はじめに

コンクリート構造物の外観および耐久性を保つため、ひび割れの管理が重要となる。乾燥収縮については、一般に乾燥収縮率を指標として用い、日本建築学会の指針¹⁾にも乾燥収縮率の参考値が示されている。これに加え、夏期の施工では、コンクリート温度が上昇しその後の温度低下も大きいことから、温度収縮にも留意が必要となる。

コンクリートの収縮ひび割れを低減するため、膨張材や収縮低減剤を使用する方法が普及している。膨張コンクリートの膨張ひずみは、諸条件の影響を受けるため、ひび割れを低減する膨張ひずみを効果的に生じさせる方法を整備しておく必要がある。これまでに、低温または高温環境下では拘束膨張ひずみは小さくなるとする研究²⁾、20℃で練り混ぜても養生温度が高温になると自由膨張収縮ひずみは大幅に増大するとする研究³⁾、膨張性状に及ぼす温度の影響は膨張材の種類や使用量などの違いによって異なるとする研究⁴⁾がある。

そこで本研究では、特に夏期に施工する膨張コンクリートに焦点を当て、膨張材の使用量、化学混和剤や骨材の種類といった、諸条件が膨張ひずみに及ぼす影響を把握することを目的として、実験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験のコンクリートの調合を表-1に、実験に使用した材料の一覧を表-2に示す。本研究では、環境温度を20℃または30℃として恒温室内で練り混ぜを行った。

セメントとして普通ポルトランドセメント、膨張材として石灰系およびエトリンガイト・石灰複合系の2種類、細骨材および粗骨材として産地と種類の異なる細骨材7種類および粗骨材5種類を使用した。凝結が早くなる暑中環境下での施工時間を確保することを想定して、凝結遅延効果のある化学混和剤（高性能AE減水剤、AE減水剤および凝結遅延剤）を用いた。実験は以下に示すシリーズに分けて行った。

(1) シリーズ1 (1-1~1-5、環境温度30℃/石灰系膨張材0、20、30kg/m³)

化学混和剤（高性能AE減水剤・遅延型および収縮低減遅延型）の種類のフレッシュコンクリートの性状、物理性状への影響検討

(2) シリーズ2 (2-1~2-7、環境温度30℃/石灰系膨張材25、30kg/m³)

化学混和剤（高性能AE減水剤・収縮低減標準型および収縮低減遅延型、収縮低減遅延型+遅延剤）の種類のフレッシュコンクリートの性状、物理性状の影響検討

(3) シリーズ3 (3-1~3-3、環境温度30℃/石灰系膨張材30kg/m³)

骨材種類（砂岩碎石+山砂、石灰碎石+石灰細砂）のフレッシュコンクリートの性状、物理性状の影響検討

(4) シリーズ4 (4-1~4-5、環境温度30℃/石灰系膨張材20、25、30kg/m³)

骨材（砂岩碎石+山砂、石灰碎石+石灰細砂）の種類、化学混和剤（高性能AE減水剤・収縮低減標準型および収縮低減遅延型、収縮低減遅延型+遅延剤）の種類のフ

*1 Magofumi SONOI

技術本部技術研究所 主任研究員

*2 Michiaki OYADO

技術本部技術研究所 主席研究員

*3 Hiroyuki SAKAKIBARA

技術本部 顧問

表-1 調合および練り上がり温度・凝結時間・圧縮強度

Name	W/C (%)	練り上がり温度(°C)	W	C	EX	S			G			化学混和剤(C×%) ^{*3}					始発 / 終結 (h:m)	圧縮強度 (N/mm ²)										
						S1	S2	S3	G1	G2	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ad5													
1-1	47.0	30.1	160	340	なし	825			959		1.4					5:38/6:48	44.6											
1-2		31.7			30	801										5:50/6:52	57.2											
1-3		30.6			なし	825										7:36/9:09	47.6											
1-4		31.3			20	809										7:35/8:44	54.7											
1-5		32.1			30	801										7:18/8:38	57.3											
2-1	47.0	30.2	160	340	30	801			959		1.9		1.9		7:09/8:30	55.1												
2-2		30.2																	5:45/7:09	54.9								
2-3		30.1																0.10	8:59/10:19	57.0								
2-4		29.9							1.9		0.18	11:10/12:38	58.7															
2-5		29.7							438	363		957	1.0				3:22/4:40	45.0										
2-6		30.1											1.9				7:38/9:09	53.1										
2-7		30.1						25	805			959				3.0	9:01/10:21	56.1										
3-1	47.0	30.2	160	340	30	801			959		2.0				6:54/8:15	56.2												
3-2		30.1																2.0		0.18	12:39/14:09	56.8						
3-3		30.2																438	363		957	1.0				4:18/5:15	50.9	
4-1	47.0	30.4	160	340	30					957	1.0				4:22/5:30	49.7												
4-2		30.4																438	363			1.0		0.10	5:37/6:43	50.7		
4-3		30.7																					1.0		0.18	7:00/8:08	53.1	
4-4		30.7																25	805			959					5:51/7:02	51.4
4-5		30.7																20										

Name	W/C (%)	練り上がり温度(°C)	W	C	EX	S				G			化学混和剤(C×%) ^{*3}				始発 / 終結 (h:m)	圧縮強度 (N/mm ²)					
						S4	S5	S6	S7	G3	G4	G5	Ad1	Ad2	Ad6	Ad7							
5-1	45.5	30.1	165	363	なし					666	289					4:41/5:44	42.1						
5-2	45.5 ^{*1}	30.5		343	20 ^{*2}	791											0.7 ^{*4}					4:13/5:04	41.8
5-3		30.5		338																			
5-4	45.5	30.5			25 ^{*2}	770																3:59/4:45	44.3
5-5		30.8		363															1.1			5:23/6:26	47.7
5-6		30.7			30 ^{*2}	776																5:34/6:33	48.9
6-1	45.5 ^{*1}	21.2	165	343	20 ^{*2}	791				666	289			0.8		5:20/6:44	42.7						
6-2	45.5	21.2		363	25 ^{*2}	770														5:33/7:00	45.0		
6-3	52.3 ^{*1}	22.0	175	315	20		329	162	328						1.0	6:44/8:54	41.3						
6-4	52.3	22.0		335		25		319	157	323						0.95	6:17/9:16	43.4					
6-5	48.0	22.2		344				324	160	325					0.8		5:24/7:40	49.2					

特記なきは単位 (kg/m³)

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント [3.15]
水	上水道水
膨張材	(表-1の注 ^{*2} を参照) EX1: 石灰系 [3.16] EX2: エトリンガイト・石灰複合系 [3.08]
細骨材	S1: 山砂 [2.56] 掛川産 S2: 山砂 [2.60] 君津産 S3: 石灰石砕砂 [2.66] 高知産 S4: 山砂 [2.55] 多治見産 S5: 砕砂 [2.61] 大月産 S6: 山砂 [2.57] 富津産 S7: 砕砂 [2.62] 相模原産
粗骨材	G1: 砂岩砕石 [2.63] 岩瀬産 G2: 石灰石砕石 [2.70] 高知産 G3: 山砂利 [2.60] 多治見産 G4: 砕石 2005 [2.65] 犬山産 G5: 石灰石砕石 [2.70] 秩父産
化学混和剤	Ad1: 高性能AE減水剤 収縮低減なし 遅延形 Ad2: 高性能AE減水剤 収縮低減有 遅延形 Ad3: 高性能AE減水剤 収縮低減有 遅延なし Ad4: AE減水剤 収縮低減有 遅延形 Ad5: 遅延剤 Ad6: 高性能AE減水剤 収縮低減なし 遅延なし Ad7: AE減水剤 収縮低減なし 遅延なし Ad8: AE剤

[]は表乾密度 g/cm³

表-1の注:

- Name (試験ケース): シリーズ-供試体番号 (例: 2-3はシリーズ2の3)
- ^{*1} 膨張材ありの場合は内割で計算 (C=セメント量+膨張材量)、他は膨張材を外割で計算 (C=セメント量のみ)
- ^{*2} エトリンガイト・石灰複合系膨張材 (EX2) である。他は石灰系膨張材 (EX1)。但し、製品カタログの説明文またはメーカーHPの表記による。
- ^{*3} 全てにAE剤 (Ad8) 使用 (シリーズ5,6は他と銘柄が異なる)
- ^{*4} 1-1、1-2で使用のAd1とメーカー・銘柄が異なる

- フレッシュコンクリートの性状、物理性状への影響検討
- (5) シリーズ5 (5-1~5-6、環境温度 30°C / エトリンガイト・石灰複合系膨張材 0、20、25、30kg/m³)
膨張材の種類のフレッシュコンクリートの性状、物理性状への影響検討
- (6) シリーズ6 (6-1~6-5、環境温度 20°C / エトリンガイト・石灰複合系及び石灰系膨張材 20、25kg/m³)
環境温度、膨張材の種類のフレッシュコンクリートの性状、物理性状への影響検討

2.2 測定項目

試験項目と方法を表-3に示す。打設時の目標スランブを 15±2.5cm (30°C環境下の運搬時のスランブロス を考慮した目標スランブを 18±2.5cm) とし、空気量が

4.5±1.5%になるようにAE剤(Ad8)で調整した。圧縮強度の測定には、打設後、練混ぜ時および供試体作製時と同様の温度条件で封緘養生を行い、材齢7日で脱型後、材齢28日まで20℃水中養生を行った供試体を用いた。

凝結時間は、フレッシュコンクリートからウェットスクリーニングによりモルタルを作製し、自動試験機にてプロクター貫入抵抗試験を行った。測定中の環境温度は、練混ぜ時および供試体作製時と同様とした。

膨張ひずみは、簡易拘束膨張試験と自由膨張収縮試験の2つの方法で測定した。簡易拘束膨張ひずみは、ぶりき製の円筒型枠の円周方向に貼り付けたひずみゲージにより継続的に測定した。この測定値は、膨張ひずみ100~600×10⁻⁶の範囲において、規格(JIS A法)⁵⁾に基づいて測定した値とおおむね一致するとされる。測定中の環境温度は、練混ぜおよび供試体作製時と同様の条件とし、材齢7日までの拘束膨張率の最大値を最大膨張ひずみとした。一方の自由膨張収縮量は、既存のコンクリート長さ変化測定方法⁶⁾⁷⁾を参考に測定した。100×100×400(mm)鋼製型枠(図-1(上)参照)の内面(打設面を除く5面全て)にテフロンシートを敷き詰め、標点距離100mmの測温機能内蔵埋設型ひずみ計を中心部(長手方向)に埋設して経時的に温度とひずみを測定した。

ひび割れ抵抗性は、既往の事例⁸⁾を参考に測定を行った。供試体寸法は100×100×1100mm(図-1(下)参照)とし、長さ1200mmの丸鋼(φ32mm)の中央300mmを除く両端部にねじ切りを付け、中央300mm区間にひずみゲージを貼り付けたのちテフロンシート(t=0.1mm)を二重に巻いて絶縁し埋設して経時的に温度とひずみを測定した。コンクリート打設後30℃恒温槽で封緘養生し、材齢7日で脱型を行った。その後、夏から秋への季節変化を想定して、30℃および20℃(湿度60%RH)環境下でひずみを継続的に測定し、式(1)により拘束応力を算出した。ここで、 σ_c :コンクリートの拘束応力(N/mm²)、 E_s :鋼材の弾性係数(N/mm²)、 ϵ_s :鋼材のひずみ、 A_s :鋼材の中央断面積(mm²)、 A_c :コンクリート純断面積(mm²)である。

$$\sigma_c = -\frac{(E_s \times \epsilon_s \times A_s)}{A_c} \quad \text{式(1)}$$

水和発熱速度は、コンダクションカロリメーターを用いて測定を行った。恒温槽温度は30℃に保ち、セメントペーストの練上がり後直ちに測定を開始した。表-4に水和発熱速度の測定に使用したセメントペーストの調合を示す。C+EX1、C+EX1+Ad5は、膨張材量25kg/m³で化学混和剤以外の材料が同じの、2-6、2-7、4-4をベースに、骨材を除いた調合とした。また、セメント、膨張材それぞれに及ぼす凝結遅延剤の影響を把握するため、セメントを珪砂に置換した水準を設定した。

表-3 試験項目・方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A1101 (2020)
空気量	JIS A1128 (2020)
コンクリート温度	JIS A1156 (2014)
圧縮強度	JIS A1108 (2018)
凝結時間	JIS A1147 (2019) 自動試験
簡易拘束膨張量	JCI-S-009(2012) 円筒型枠使用
自由膨張収縮量	100×100×400(mm) 試験体使用
ひび割れ抵抗性	100×100×1100(mm) 試験体使用
水和発熱速度	コンダクションカロリメーター使用

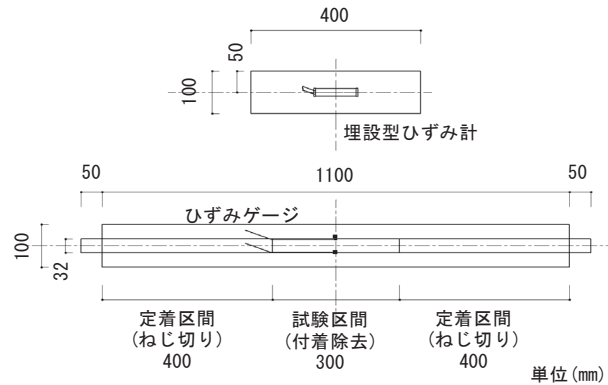


図-1 自由膨張収縮量試験(上)とひび割れ抵抗性試験(下)の試験体形状寸法

表-4 調合表(水和発熱速度試験)

調合名	単位量 (kg/m ³)				Ad5 添加率
	W	C	EX1	SiO ₂	
C+EX1	580	1233	91	0	0
C+EX1+Ad5	580	1233	91	0	(C+EX1) × 0.10 wt%
C+SiO ₂	519	130	0	1167	0
EX1+SO ₂	519	0	130	1167	0
C+SiO ₂ +Ad5	519	130	0	1167	(C+SiO ₂) × 0.10 wt%
EX1+SO ₂ +Ad5	519	0	130	1167	(EX1+SiO ₂) × 0.10 wt%

3. 実験結果・考察

3.1 フレッシュ性状・圧縮強度・凝結時間

全試験ケースのフレッシュ性状試験結果と材齢28日圧縮強度試験結果を、膨張材量を横軸にとりて図-2に示す。膨張材の使用量の違いによってスランプ、空気量に明確な傾向はみられない。今回の実験範囲では、化学混和剤によってフレッシュ性状を適切に制御できたと考えられる。圧縮強度は膨張材の量によって大きな違いはなく、標準使用量である20kg/m³を超えて使用した場合においても強度の観点からは問題ないと考えられる。

シリーズ1~4では20℃環境下の類似調合のデータがないため、シリーズ5および6のコンクリート体積あたりの膨張材量がほぼ等しい調合と比較し、環境温度による影響を検討した。30℃環境下において遅延効果のある高性能AE減水剤を使った場合の始発時間を、20℃環境下で遅延効果のないものを使った場合と比べて図-3に示

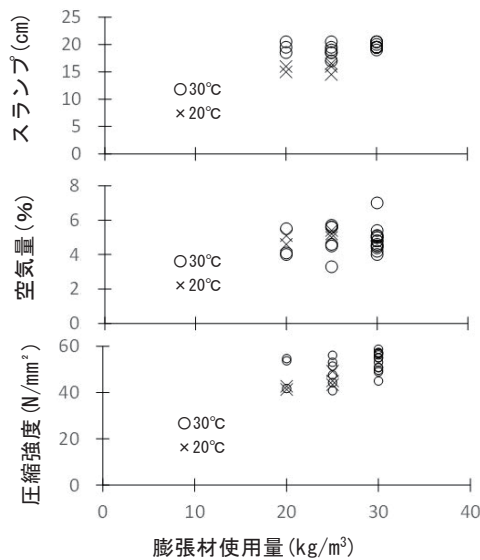


図-2 フレッシュ性状・圧縮強度

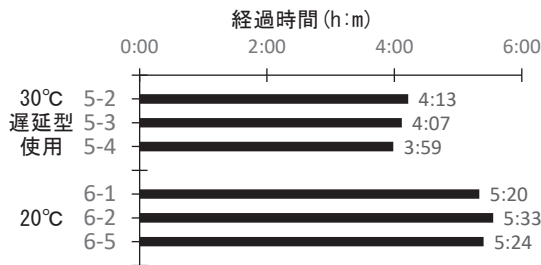


図-3 始発時間 (シリーズ 5, 6 のうち直接比較可能な試験ケースで比較)

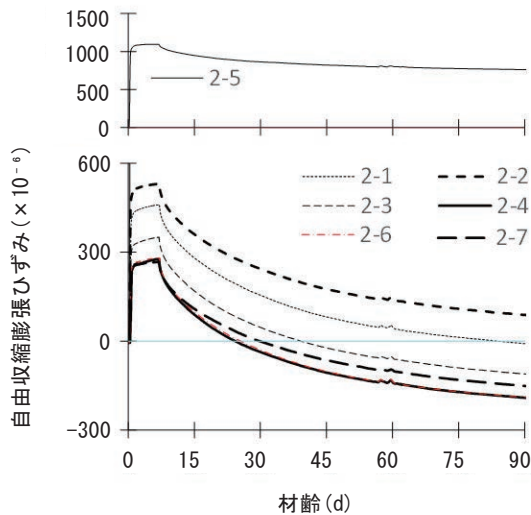


図-4 自由膨張収縮ひずみ時系列変化 (シリーズ 2)

す。遅延効果のある高性能 AE 減水剤を使用しても、30°C 環境下では 20°C 環境下と比べて 1 時間程度始発が早くなっている。

3.2 自由膨張収縮ひずみ

自由膨張収縮ひずみの時系列変化について、シリーズ 2 を例として図-4 に示す。材齢 7 日まで型枠を取り外さず

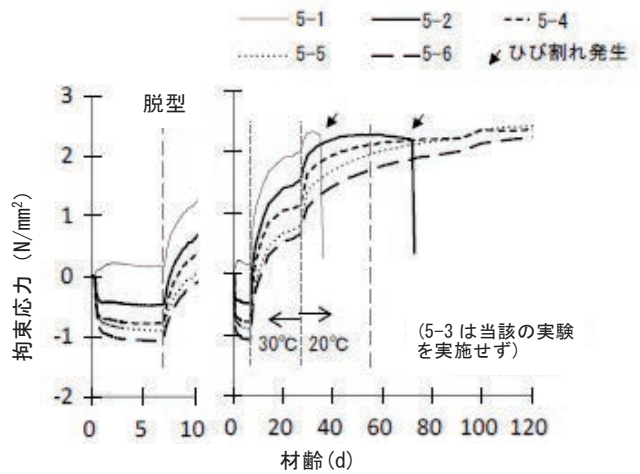


図-5 ひび割れ抵抗性試験 (シリーズ 5)

封緘養生として、これ以降に乾燥が始まっている。自由膨張収縮ひずみは最大値に達したあと減少し、材齢 90 日時点では最大値から 400×10^{-6} 以上ひずみが減少している。自由膨張収縮ひずみの小さい試験ケース 2-3、2-4、2-6、2-7 は、材齢 30 日前後でひずみが収縮側 (-) に達している。残る 2-1 と 2-2 は、膨張材量が 30 kg/m^3 と多く、遅延成分がない化学混和剤を使用したものであり、ひずみが膨張側 (+) にとどまっている。2-5 については自由膨張ひずみが 1200×10^{-6} と極めて大きく、これは石灰石粗骨材を使用していることが影響した可能性がある。

ひび割れ抵抗性試験の結果について、シリーズ 5 を例として図-5 に示す。材齢 35 日において膨張材を使用していない 5-1 に、材齢 72 日において標準使用量である 20 kg/m^3 使用した 5-2 に、それぞれひび割れが発生した。一方、膨張材を標準使用量より増加させ、 25 kg/m^3 使用した 5-4 および 5-5、および 30 kg/m^3 使用した 5-6 は、材齢 120 日時点までひび割れが発生しなかった。特に、 30 kg/m^3 使用した 5-6 は最も膨張ひずみが小さかった。この実験の範囲では、暑中環境を想定した 30°C 環境で打設した場合は、20°C 環境で打設した場合に比べて、膨張ひずみが小さくなり、標準使用量の膨張材ではひび割れ抵抗性を改善するために十分な膨張が得られないこと、ならびに 25 kg/m^3 以上使用した場合にひび割れ抵抗性が改善することが確認できる。暑中環境下で膨張コンクリートを施工する際は、練り上がり温度や養生温度の変化による膨張ひずみの減少を考慮して、所定の膨張ひずみを得られるように膨張材の使用量を決定する必要がある。

3.3 自由膨張収縮ひずみと簡易拘束膨張ひずみ

膨張材の膨張ひずみは、2.2 で述べた通り、JIS A 法による測定値で評価される。簡易拘束膨張ひずみはこの測定値と概ね一致する一方、収縮ひずみを測定することができない。これに対して、自由膨張収縮実験は収縮ひずみが測定でき、かつ拘束のある場合よりも収縮ひずみが大きくなるので、ひび割れの発生に対して検討する場合に

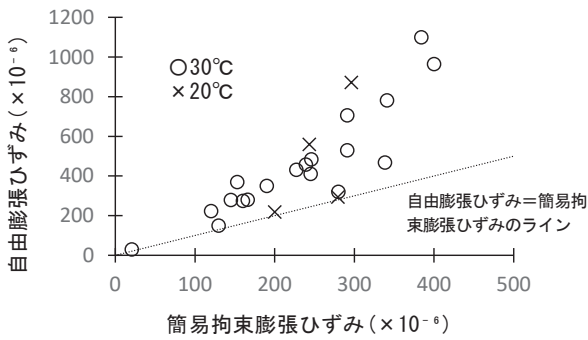


図-6 自由膨張収縮ひずみと簡易拘束膨張ひずみの比較

安全側の計測が可能となる。全シリーズの自由膨張収縮ひずみと簡易拘束膨張ひずみを比較して図-6に示す。自由膨張収縮ひずみは簡易拘束膨張ひずみより大きい値を示しているが、自由膨張収縮ひずみは外部拘束が小さいことが影響している。自由膨張収縮ひずみは簡易拘束膨張ひずみの1~3倍程度で、簡易拘束膨張ひずみは自由膨張収縮ひずみの下限値となっている。

3.4 膨張材量の影響

全シリーズにおける膨張材量と簡易拘束膨張ひずみ量の関係を図-7に示す。学会指針⁹⁾では、膨張材による収縮低減効果を十分に得るために、膨張材の使用量は拘束膨張率が 150×10^{-6} 以上となるように用いると記されている。膨張材量を標準使用量の 20 kg/m^3 から 25 kg/m^3 、 30 kg/m^3 と増すにつれて、簡易拘束膨張ひずみ量が大きくなる一方、膨張材量を 25 kg/m^3 、 30 kg/m^3 と増しても簡易拘束膨張ひずみが増えず、例えば膨張材を 30 kg/m^3 使用した場合でも、最大膨張ひずみが 150×10^{-6} 以下となった試験ケースがある。20°C環境下で実験した場合は、そのようなケースは生じていない。暑中環境下の膨張コンクリートで 150×10^{-6} 以上の最大膨張ひずみを得るには、膨張材量を標準使用量の 20 kg/m^3 から 25 kg/m^3 または 30 kg/m^3 に増やすだけでなく、追加対策が必要なることがわかる。

3.5 始発と最大膨張ひずみの関係

膨張材による膨張作用はセメントの硬化体組織が形成

されていなければ有効に付与されないとの知見¹⁰⁾を参考に、コンクリートの凝結時間(始発)と最大膨張ひずみの関係について考察する。30°C環境下での始発と最大膨張ひずみの関係を図-8に示す。骨材の種類や膨張材の使用量はコンクリートの収縮・膨張に影響するため、全シリーズの中から骨材の種類が同一(S1、G1)、かつ膨張材量が同じ(30 kg/m^3)ケースのみを抽出して図示している。今回の実験では限られたケースでしか確認できていないため、さらなる検討が必要であるが、始発が遅くなるほど最大膨張ひずみが小さくなる関係が確認できる。中塗りした点は遅延剤(Ad5)を使用したケースであり、始発は概ね9時間を上回る一方、最大膨張ひずみは 200×10^{-6} 程度にとどまっている。膨張コンクリートの打ち込み時間を長く確保するために遅延剤を使用する場合は、膨張量の低下に注意が必要と考えられる。

遅延剤を使用して始発を遅くした場合に、最大膨張ひずみが小さくなることにつながる、水和反応の変化について、コンダクションカロリメーターによる水和発熱速度測定試験で確認する。30°C環境下でのセメントペーストにおける、セメントおよび膨張材の単位質量あたりの水和発熱速度を図-9に示す。セメントと膨張材の混合試料(図-9上)では、遅延剤の使用により C_3S の水和発熱速度のピーク時刻が遅延している(概ね $5\text{h} \rightarrow 7\text{h}$)。図-9下では、セメント+遅延剤とセメント単独で比較し、加えて膨張材+遅延剤と膨張材単独についても同様に比較している。なお、セメントおよび膨張材の一部を珪砂に置き換えて計測を実施している。セメント単体については、遅延剤の使用によって水和発熱速度のピーク時刻が遅くなった(概ね $4.5\text{h} \rightarrow 7.5\text{h}$)一方で、膨張材単体については、遅延剤によって水和発熱速度のピークにほとんど変化が見られなかった。遅延剤はセメントの水和を遅延させる一方、膨張材の水和反応には影響しないと考えられ、遅延剤によってセメントと膨張材の水和反応の時期がずれる。膨張材の膨張は、セメントが水和して硬化体組織が形成されなければ有効な膨張が付与されない¹⁰⁾ため、膨張ひずみが小さくなったと推察される。

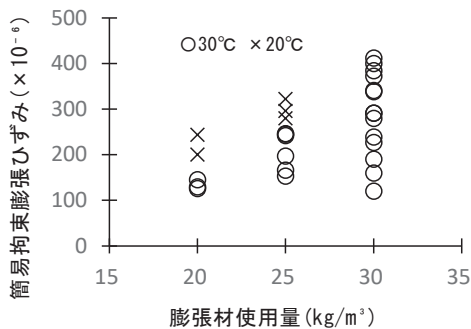


図-7 膨張材量と簡易拘束膨張ひずみ量の関係

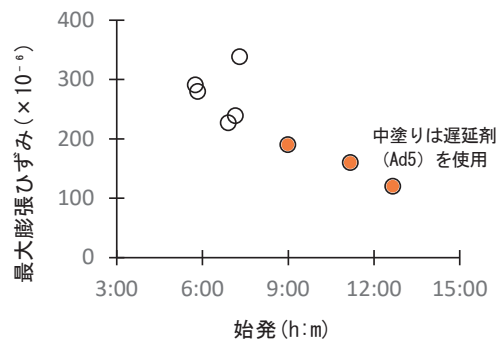


図-8 30°C環境下での始発と最大膨張ひずみの関係(全シリーズのうちS1・G1使用・膨張材量 30 kg/m^3)

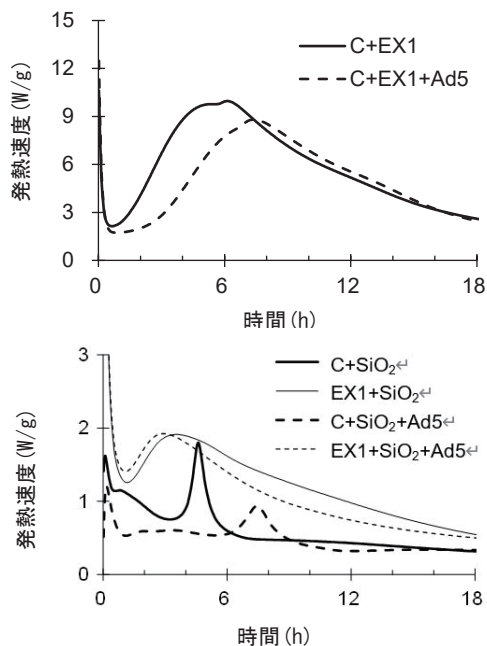


図-9 コンダクションカロリメーター試験結果
(30℃環境下のセメントペーストにおける、セメント
および膨張材の単位質量あたりの水和発熱速度)

4. まとめ

本研究では、夏期の施工を想定し、膨張コンクリートの膨張ひずみに及ぼす膨張材量、化学混和剤および骨材の種類の影響の把握を目的に、膨張コンクリートの最大膨張ひずみ、ひび割れ抵抗性を評価した。今回の実験範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 化学混和剤によってフレッシュ性状を適切に制御できた。圧縮強度は膨張材の量によって大きな違いはなく、標準使用量である 20kg/m³を超え最大で 30kg/m³を使用した場合でも問題ない結果となった。
- (2) 自由膨張収縮ひずみは簡易拘束膨張ひずみの 1~3 倍程度で、簡易拘束膨張ひずみは自由膨張収縮ひずみの下限値となっている。
- (3) 30℃の高温環境における自由膨張収縮試験において、自由膨張収縮ひずみの小さい試験ケースは、膨張ひずみが消失した。膨張材量が 30kg/m³と多く、収縮低減効果ありかつ遅延成分がない化学混和剤 Ad3 を使用した試験ケースでは、材齢 90 日でひずみがプラス、すなわち膨張側にとどまった。
- (4) ひび割れ抵抗性試験の結果、膨張材を使用していない場合と標準使用量である 20kg/m³を使用した場合に、それぞれ材齢 35・72 日にひび割れが発生した。膨張材を標準使用量より増加させ、25kg/m³および 30kg/m³を使用した試験ケースは、材齢 120 日時点までひび割れが発

生しなかった。少なくとも初期材齢において環境温度 30℃で養生された場合、標準使用量の膨張材ではひび割れ抵抗性を改善するために十分な膨張が得られないこと、ならびに 25kg/m³以上使用した場合にひび割れ抵抗性が改善することが確認できる。

- (5) 膨張コンクリートは、始発の遅延に伴い、膨張ひずみが小さくなる傾向が確認された。その要因として、混和剤の遅延効果がセメントと膨張材で異なることが考えられる。

【謝辞】

本研究は、住友大阪セメント株式会社との共同で実施し、特に実験の実施に際しては、セメント・コンクリート研究所 コンクリート技術センターの本田和也氏、黒岩笑海歌氏に多大なご助力を頂いた。各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 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。
- 2) 戸川一夫、中本純次：膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響、土木学会論文報告集、Vol. 321、pp. 177-187、1982
- 3) 三谷裕二、谷村 充、佐久間 隆司、佐竹 紳也：膨張材を混和したコンクリートの拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 25、No. 1、pp. 155-160、2003
- 4) 岡村甫、吉沢孝男、辻 幸和：膨張コンクリートの膨張性状に及ぼす温度の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 1、pp. 89-92、1979
- 5) コンクリート用膨張材、日本産業規格 JIS A 6202 附属書 2A 法（2017）
- 6) 今本啓一、大谷 博：高強度・超高強度コンクリートの収縮性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、17-1、pp. 1061-1066、1995
- 7) モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法 第 3 部 ダイヤルゲージ方法、日本産業規格、JIS A 1129-3（2010）
- 8) 名和豊春、山田一夫、閑田徹志、久田真、石川嘉崇：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会、コンクリート工学年次論文集、32-1、pp. 23-34、2010
- 9) 膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針（案）・同解説、日本建築学会、2017
- 10) 五味秀明：コンクリート用膨張材、Journal of the Society of Inorganic Materials、Vol. 12、pp. 54-61、2005