

論文 暑中環境下における膨張コンクリートの膨張性状に関する一考察

黒岩 笑海歌*1・本田 和也*1・菌井 孫文*2・榊原 弘幸*3

要旨：本研究では、夏期の打込み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使用量、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。その結果、膨張材量が同一の場合 30℃で練混ぜおよび打込みを行った方が 20℃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。加えて、膨張コンクリートの膨張ひずみは凝結時間（始発）に依存し、AE 減水剤または高性能 AE 減水剤に含まれる遅延成分、および凝結遅延剤により凝結時間（始発）が遅くなるほど膨張ひずみが小さくなることが示された。

キーワード：膨張コンクリート、化学混和剤、凝結時間、膨張ひずみ

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れは、美観への悪影響のみならず、耐久性上有害なものとなる可能性がある。ひび割れは、乾燥や温度変化等種々の原因により生じるもので、古くから様々な対策が講じられてきた。日本建築学会では、2006 年に「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¹⁾」において、仕様設計で使用するコンクリートの乾燥収縮ひずみは 800×10^{-6} 以下を標準とすることを示して以降、コンクリートのひび割れに対して、乾燥収縮率を指標として管理する方法が広く普及している。

また、夏期にコンクリートを打ち込む場合、練上がり時および打込み後のコンクリート温度の上昇および外気温の降下に伴う温度変化により温度ひび割れが発生する危険性が増大する²⁾。加えて、強い日射はコンクリート表面の乾燥によるひび割れを助長する恐れがある。

一般的にコンクリートの収縮ひび割れを低減する方法として、膨張材や収縮低減剤等の使用が提示されており、膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートの調査設計・製造・施工に関する指針³⁾も定められている。さらに、JASS 5⁴⁾では 2022 年度の大幅な改正に伴い、低収縮コンクリートの項目が新設された。これにより 1~3 までの低収縮等級に依拠して、それぞれ目標とする乾燥収縮率を満足するように、石灰石骨材、膨張材、収縮低減タイプの化学混和剤等を使用する基準が整備された。

一方で、既往の研究^{5)~6)}において、膨張コンクリートの膨張ひずみは打込み時や養生温度の影響を受け、その影響は打込み温度や養生条件、使用材料等によって異なる結果が報告されている。戸川ら⁴⁾は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の結果を得ている。これに対して、三谷ら⁵⁾は 20℃で練混ぜた場合、養生温度が高温になると自由膨張ひずみは大幅に増大す

ると述べている。岡村ら⁶⁾は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要因によって、相反する結果を生じることを示している。

そこで本研究では、夏期の打込み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使用量、化学混和剤および骨材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。また膨張材を含むセメントペーストの水和発熱速度の測定を行った。

表-1 使用材料の物性

	記号	種類	密度 (g/cm ³)
水	W	上水道水	-
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.15
膨張材	EX1	エトリンガイト・石灰複合系 標準使用量：20 kg/m ³	3.08
	EX2	石灰系 標準使用量：20 kg/m ³	3.16
細骨材	S1	岐阜県多治見産 山砂	2.55
	S2	静岡県掛川産 山砂	2.56
	S3	千葉県君津産 山砂	2.60
	S4	高知県産 石灰石砕砂	2.66
粗骨材	G1	岐阜県多治見産 山砂利	2.60
	G2	愛知県犬山市産 砕石 2005	2.65
	G3	茨城県岩瀬産 砂岩砕石	2.63
	G4	高知県産 石灰石砕石	2.70
珪砂	SiO ₂	結晶性シリカ（石英） 粒形：0.01~6.00 mm	2.65
化学 混和剤	Ad1	高性能 AE 減水剤 標準形	-
	Ad2	高性能 AE 減水剤 遅延形	-
	Ad3	AE 減水剤 遅延形 （高機能・収縮低減タイプ）	-
	Ad4	高性能 AE 減水剤 遅延形	1.04~1.12
	Ad5	高性能 AE 減水剤 標準形 （収縮低減タイプ）	1.00~1.08
	Ad6	高性能 AE 減水剤 遅延形 （収縮低減タイプ）	1.01~1.09
	T	凝結遅延剤	1.22~1.28
	AE1	AE 剤	1.03~1.07
	AE2	AE 剤	1.02~1.06

*1 住友大阪セメント（株） セメント・コンクリート研究所（正会員）

*2（株）錢高組 技術本部 技術研究所（正会員）

*3（株）錢高組 技術本部 顧問 工博（正会員）

2. 実験概要

2.1 実験計画

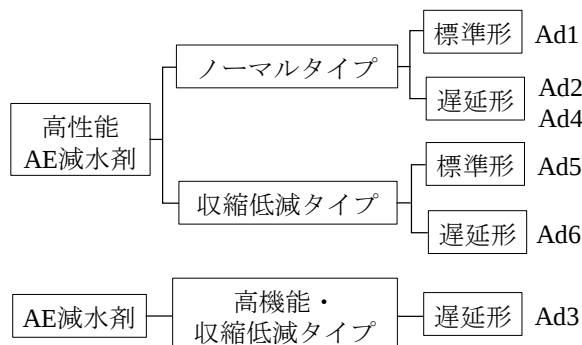
(1) 使用材料

表－1 に本実験の使用材料の物性、図－1 に化学混和剤の分類を示す。セメント (C) として普通ポルトランドセメント、膨張材としてエトリンガイト・石灰複合系および石灰系の 2 種類 (EX1, EX2)、細骨材として産地の異なる山砂および石灰石砕砂の 4 種類 (S1~S4)、粗骨材として山砂利、産地の異なる砂岩碎石、石灰石碎石の 4 種類 (G1~G4) を使用した。セメントペーストには、セメントの一部に珪砂 (SiO₂) を使用した。また、一般的に、温度が高いほどコンクリートの凝結時間は早くなる傾向が知られており、暑中環境下では適切なスランプの保持やコールドジョイントの発生を防ぐため、遅延形の化学混和剤が広く使用される。このため 30℃で練混ぜを行ったコンクリートの化学混和剤には、遅延形の高性能 AE 減水剤または AE 減水剤の他、一部には凝結遅延剤も用いた。

(2) 調合

表－2、表－3 に本実験のコンクリートの調合を示す。

シリーズ 1 では、異なる温度環境下での膨張コンクリートの膨張ひずみを把握するため、標準的な 20℃環境下 (No.20-1, No.20-2) および暑中環境下を想定した 30℃ (No.30-1~No.30-6) で練混ぜおよび供試体作製を行った。シリーズ 2 では、暑中環境下における化学混和剤および骨材の違いが膨張コンクリートの膨張性状へ及ぼす影響を把握するため、30℃環境下で練混ぜおよび供試体作製を行った。フレッシュ性状は、打込み時のスランプ (SL) が 15±2.5 cm、空気量 (Air) が 4.5±1.5 %になるように



図－1 化学混和剤の分類

表－2 調合表 (シリーズ 1)

No.	W/B (%)	W/C (%)	練上がり温度(℃)	単位量 (kg/m ³)						添加率 (C×wt%)				圧縮強度 (N/mm ²)
				W	C	EX1	S1	G1	G2	Ad1	Ad2	Ad3	AE1	
20-1	45.5	-	21.2	165	343	20	791	666	289	0.80	-	-	0.0010	42.5
20-2	-	45.5	21.2	165	363	25	770	666	289	0.80	-	-	0.0010	43.2
30-1	-	45.5	30.1	165	363	0	791	666	289	-	0.70	-	0.0045	41.8
30-2	45.5	-	30.5	165	343	20	791	666	289	-	0.70	-	0.0045	40.2
30-3	45.5	-	30.5	165	338	25	791	666	289	-	0.70	-	0.0045	39.0
30-4	-	45.5	30.5	165	363	25	770	666	289	-	0.70	-	0.0045	42.7
30-5	-	45.5	30.8	165	363	25	770	666	289	-	-	1.1	0.0035	44.8
30-6	-	45.5	30.7	165	363	30	766	666	289	-	-	1.1	0.0035	45.5

表－3 調合表 (シリーズ 2)

No.	W/C (%)	練上がり 温度(℃)	単位量 (kg/m³)								添加率 (C×wt%)					
			W	C	EX2	S2	S3	S4	G3	G4	Ad3	Ad4	Ad5	Ad6	T	AE2
30-7	47.0	30.7	160	340	20	809	-	-	959	-	-	-	1.9	-	-	0.0040
30-8	47.0	31.3	160	340	20	809	-	-	959	-	-	-	-	2.3	-	0.0030
30-9	47.0	30.7	160	340	25	805	-	-	959	-	-	-	1.9	-	-	0.0040
30-10	47.0	30.1	160	340	25	805	-	-	959	-	-	-	-	1.9	-	0.0030
30-11	47.0	30.1	160	340	25	805	-	-	959	-	3.0	-	-	-	-	0.0030
30-12	47.0	31.7	160	340	30	801	-	-	959	-	-	1.4	-	-	-	0.0030
30-13	47.0	30.2	160	340	30	801	-	-	959	-	-	-	1.9	-	-	0.0030
30-14	47.0	30.2	160	340	30	801	-	-	959	-	-	-	-	2.3	-	0.0035
30-15	47.0	30.1	160	340	30	801	-	-	959	-	-	-	-	1.9	0.10	0.0030
30-16	47.0	30.1	160	340	30	801	-	-	959	-	-	-	-	1.9	0.18	0.0050
30-17	47.0	30.7	160	340	30	-	438	363	-	957	-	-	-	1.0	-	0.0010
30-18	47.0	30.4	160	340	30	-	438	363	-	957	-	-	-	1.0	0.10	0.0010
30-19	47.0	30.4	160	340	30	-	438	363	-	957	-	-	-	1.0	0.18	0.0010

適宜化学混和剤で調整した。なお、30℃環境下で練混ぜを行った調合は、運搬時のスランプロスを考慮し、目標スランブを18±2.5 cmとした。圧縮強度の測定には、型枠打込み後、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。

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+EX, C+EX+Tは、No.30-9~No.30-11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、セメントを珪砂にした水準を設定した。

2.2 測定項目

(1) 凝結時間

凝結時間は、JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に準じて、コンクリートからウェットスクリーニングにより粗骨材を取り除いたモルタルを用いて測定を行った。測定中の環境温度は、練混ぜおよび圧縮強度試験用供試体の作製時と同様とした。

(2) 最大膨張ひずみ

膨張ひずみは、JCI-S-009-2012「円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法」に準じて、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。そして、材齢7日までにおける拘束膨張率の最大値を最大膨張ひずみとした。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た。

(3) ひび割れ抵抗性

ひび割れ抵抗性は、公益社団法人 日本コンクリート工学会の自己収縮応力試験方法を参考に測定を行った。供試体は、100×100×1100 mmとし、内部にφ32 mmの丸鋼にねじ切りを付けたものにひずみゲージを貼り付けて埋め込んだ。型枠にコンクリートを打込み後、30℃恒温室内で封緘養生し、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℃、60%RHおよび20℃、60%RHで保存しつつ経時的に測定したひずみより、式(1)を用いて拘束応力を算出し、ひび割れ抵抗性を評価した。

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

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)

(4) 水和発熱速度

水和発熱速度は、コンダクションカロリメータ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 調合表 (シリーズ 3)

調合名	単位量 (kg/m ³)				T 添加率
	W	C	EX2	SiO ₂	
C+EX	580	1233	91	0	0
C+EX+T	580	1233	91	0	(C+EX)×0.10 wt%
C+SiO ₂	519	130	0	1167	0
EX+SO ₂	519	0	130	1167	0
C+SiO ₂ +T	519	130	0	1167	(C+SiO ₂)×0.10 wt%
EX+SO ₂ +T	519	0	130	1167	(EX+SiO ₂)×0.10 wt%

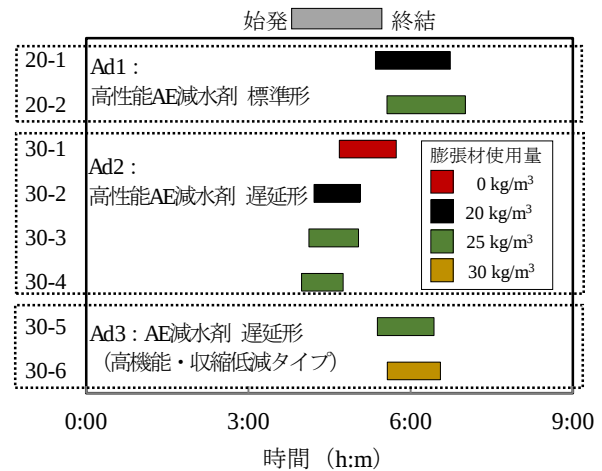


図-2 20℃および30℃環境下での凝結時間 (シリーズ 1)

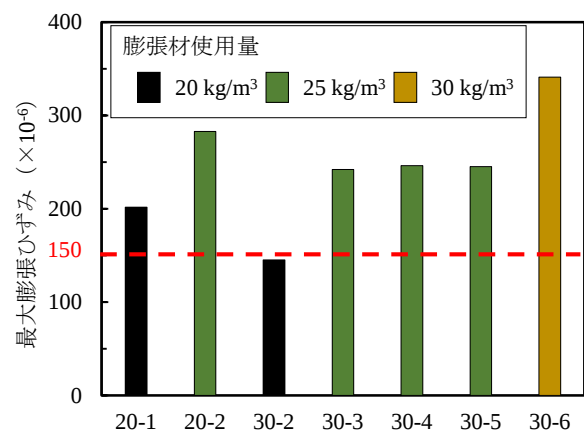


図-3 20℃および30℃環境下での最大膨張ひずみ (シリーズ 1)

3. 実験結果および考察

3.1 環境温度が膨張コンクリートの凝結時間および膨張性状に及ぼす影響 (シリーズ 1)

図-2に20℃および暑中環境下を想定した30℃で練混ぜおよび測定を行ったコンクリートの凝結時間を示す。20℃環境下で練混ぜた場合に比べ、30℃環境下で練混ぜた方が凝結時間は早くなることを想定し、30℃環境下で練混ぜたコンクリートには、遅延形の高性能 AE 減水

剤（Ad2）および AE 減水剤（Ad3）を用いた。しかし、本検討において、20℃で練混ぜたコンクリートに比べ、30℃で Ad2 のような遅延成分を含む化学混和剤を用いた場合でも、凝結時間が早くなる傾向が確認された。

図-3 に 20℃および暑中環境下を想定した 30℃で練混ぜおよび測定を行ったコンクリートの最大膨張ひずみを示す。膨張材使用量が同じ場合、20℃で練混ぜた膨張コンクリートに比べ、30℃で練混ぜた膨張コンクリートの方が、最大膨張ひずみが 50×10^{-6} 程度小さくなった。

「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³⁾」では、膨張材による収縮低減効果を十分に得るためには、膨張材の使用量については、拘束膨張率が 150×10^{-6} 以上を得るように定める必要があると示している。30℃で練混ぜおよび測定を行った水準において、膨張材を標準使用量である 20 kg/m³ とした場合、最大膨張ひずみが 150×10^{-6} 以下となった。暑中環境下で膨張材を使用する場合、 150×10^{-6} 以上の最大膨張ひずみを得るためには、標準使用量よりも、膨張材を増加させる必要があると考えられる。

以上の結果より、暑中環境下で、膨張材を使用する場合、標準使用量の 20 kg/m³ では、20℃環境下での打込みと比較して、膨張ひずみが小さいため、十分なひび割れ抵抗性を有する膨張コンクリートにならない可能性が考えられる。そこで、暑中環境下での打込みを想定し、膨張材の使用量を増加させたコンクリートのひび割れ抵抗性を検討した。

図-4 に暑中環境下を想定した 30℃で練混ぜおよび測定を行ったコンクリートのひび割れ抵抗性試験の結果を示す。材齢 35 日において膨張材を使用していない 30-1 に、材齢 72 日において標準使用量である 20 kg/m³ 使用した 30-2 にそれぞれひび割れが発生した。しかし、膨張材を標準使用量より増加させた水準 30-3~30-6 は材齢 120 日時点でもいづれもひび割れが発生しなかった。こ

の要因として、前述で述べたように、暑中環境を想定した 30℃で打込みを行った場合、20℃で打込みを行った場合に比べ、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かったためと推察される。

したがって、暑中環境下で膨張コンクリートの打込みを行う際は、練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満足するように試験練り等により取得したデータをもとに膨張材の使用量を決定する必要があると考えられる。

3.2 暑中環境下で各種化学混和剤および骨材を用いた膨張コンクリートの膨張性状（シリーズ 2）

図-5 に暑中環境下を想定した 30℃で練混ぜを行った各種化学混和剤および骨材を用いたコンクリートの最大膨張ひずみを示す。膨張材の使用量増加に伴い、最大膨張ひずみは増加し、化学混和剤の種類によって最大膨張ひずみが異なることが確認された。さらに、化学混和剤の添加量は異なるものの種類が同じ場合、山砂および碎石を使用したコンクリートに比べ、石灰石砕砂および石灰石碎石を用いたコンクリートの方が、最大膨張ひず

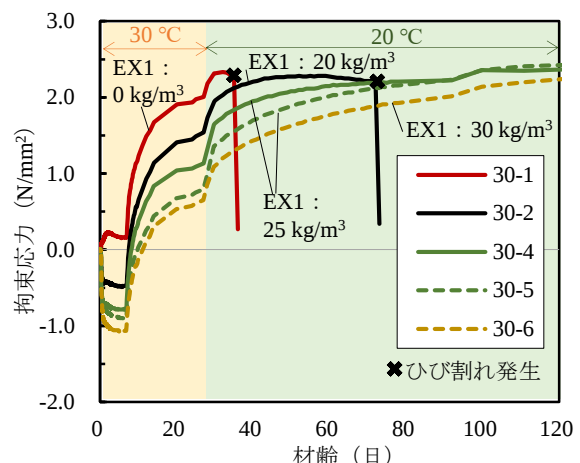


図-4 30℃環境下でのひび割れ抵抗性（シリーズ 1）

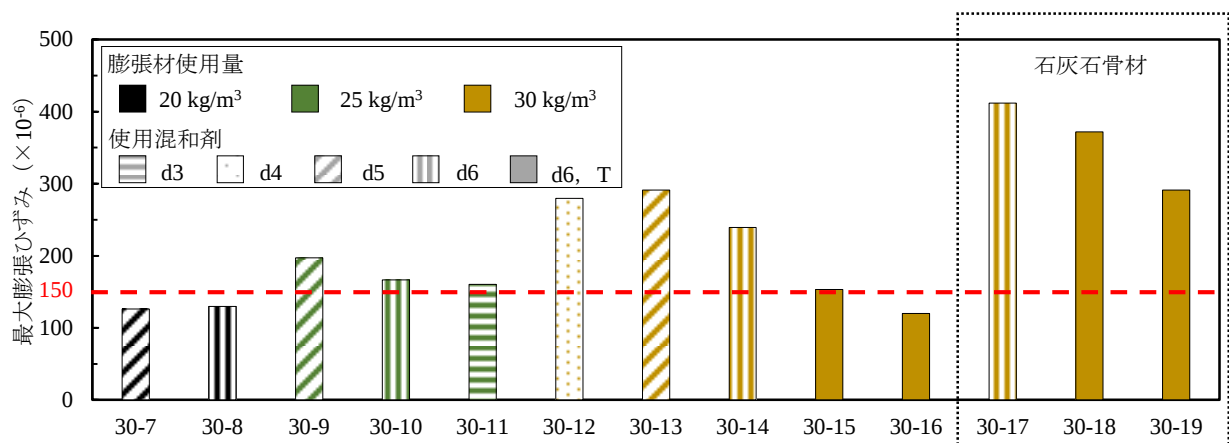


図-5 30℃環境下での最大膨張ひずみ（シリーズ 2）

みが大きくなった。また、骨材の種類によらず標準形の高性能 AE 減水剤を使用した場合に比べ、遅延形の AE 減水剤、高性能 AE 減水剤および凝結遅延剤を用いた水準の方が最大膨張ひずみは小さくなる傾向が認められた。

3.3 膨張コンクリートの膨張ひずみに関する検討

(1) 凝結時間と膨張ひずみの関係 (シリーズ2)

化学混和剤、骨材の種類により、膨張コンクリートの最大膨張ひずみが異なる理由を検討するため、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いと有効に付与されないとの見解⁷⁾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を整理した。

図-6に30℃環境下での凝結時間(始発)と最大膨張ひずみの関係を示す。一部、シリーズ1の膨張材使用量20 kg/m³の20℃および30℃環境下で測定を行ったデータも追記した。膨張材の使用量が25 kg/m³および30 kg/m³の場合、骨材の種類によらず、凝結時間(始発)が遅くなるほど最大膨張ひずみが小さくなる傾向が確認された。膨張材の使用量が20 kg/m³の水準においては、温度が異なる場合でも、凝結時間(始発)が早くなるほど、膨張ひずみが大きくなることが確認された。しかし、膨張材の種類が異なることやサンプル数が少ないことから、温度が異なる場合の凝結時間(始発)と最大膨張ひずみの関係については、さらなる検討が必要であると考えられる。なお、石灰石骨材を使用した水準は山砂や碎石を使用した水準に比べ凝結時間(始発)が早くなる傾向が確認された。これは、今回使用した石灰石骨材は同一スランプを確保するための化学混和剤添加量が少なくなる。そのため、石灰石骨材を使用した調合は凝結時間(始発)が早くなったと推察される。

(2) 凝結時間が膨張ひずみに影響を及ぼすメカニズムの検討 (シリーズ3)

凝結時間(始発)によって最大膨張ひずみが変わる

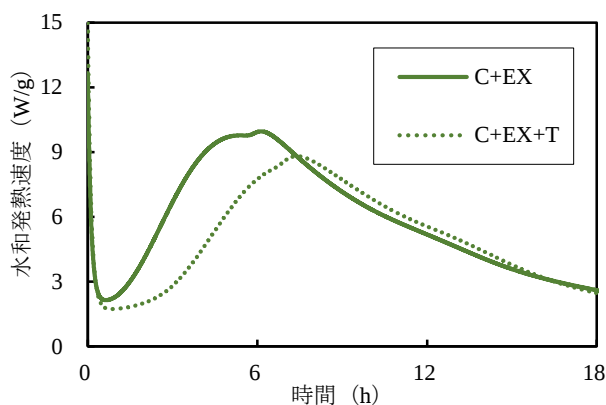


図-7 30℃環境下でのセメントペーストの水和発熱速度 (シリーズ3)

原因を検討するため、セメントと膨張材における化学混和剤の凝結作用の違いについて検討した。

図-7に30℃環境下でのセメントペーストのセメントおよび膨張材の質量に対する水和発熱速度を示す。セメントと膨張材を用いた試料においては、凝結遅延剤の使用により、水和発熱速度のピークが現れる時間が遅くなっており、凝結遅延剤の添加による水和反応の遅延効果が確認できた。図-8は、セメントの一部を珪砂に置き換えることにより、セメントと膨張材に対する凝結遅延剤の遅延作用の違いを比較した結果である。図-8に示すようにセメントまたは膨張材と珪砂の混合物のセメントおよび膨張材の質量に対する水和発熱速度においては、セメントと珪砂を混合した試料の場合凝結遅延剤の使用により、水和発熱速度のピークが現れる時間が遅くなった。一方、膨張材と珪砂を混合した試料においては、凝結遅延剤により水和発熱速度のピークに変化が現れないことが確認された。この結果より、凝結遅延剤の遅延成分はセメントの水和反応には影響を及ぼすが、膨張材の水和反応には影響を及ぼさない可能性が考えられる。

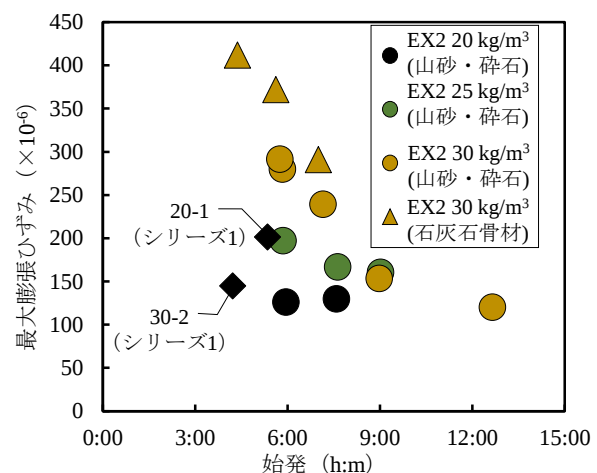


図-6 30℃環境下での凝結時間と膨張ひずみの関係 (シリーズ2)

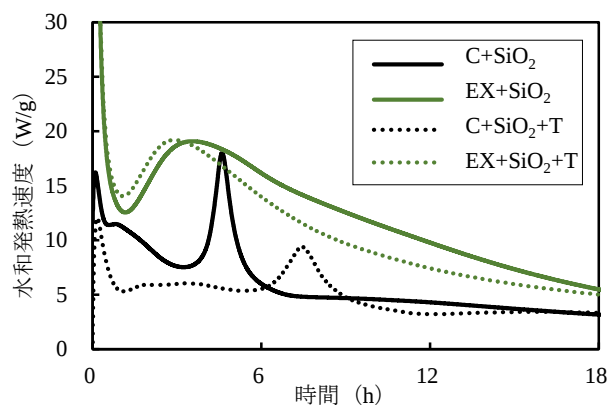


図-8 30℃環境下でのセメントまたは膨張材と珪砂の混合物の水和発熱速度 (シリーズ3)

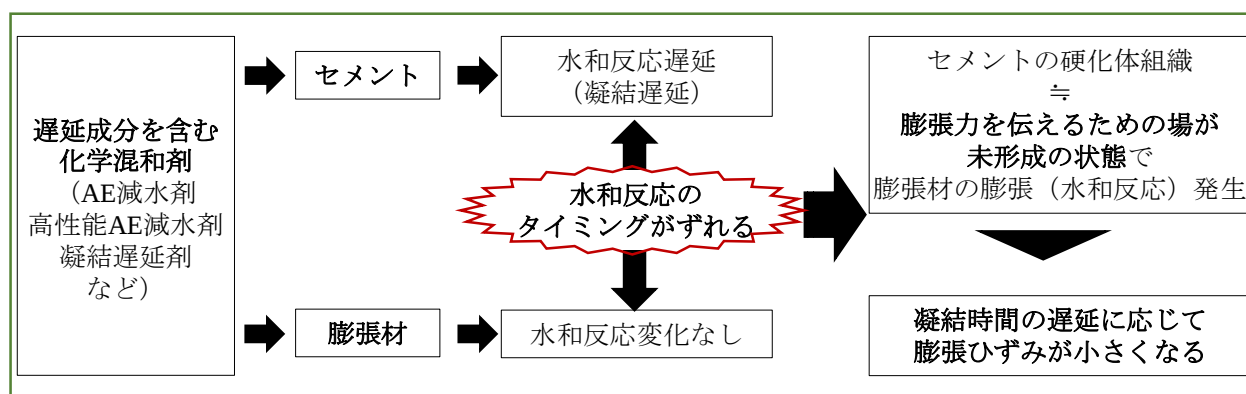


図-9 膨張コンクリートの凝結時間が膨張ひずみに影響を及ぼすメカニズムの概要

以上のことを踏まえて、膨張コンクリートの凝結時間（始発）が膨張ひずみに及ぼす影響に関するメカニズムの考察を行った。図-9に膨張コンクリートの凝結時間（始発）が膨張ひずみに影響を及ぼすメカニズムの概要を示す。前述の結果より、凝結遅延剤または凝結遅延成分を含む混和剤は、セメントの水和反応を遅延させ、凝結時間は遅くする一方、膨張材の水和反応には影響を及ぼさないため、両者の水和反応のタイミングにずれが生じる。ここで前記の既往研究⁷⁾において、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ため、膨張材の膨張作用には、膨張材の水和反応とセメントの水和反応との時間的一致も重要であることが示唆されている。つまり、AE減水剤または高性能AE減水剤に含まれる遅延成分、および凝結遅延剤の遅延成分により膨張力の受け側であるセメント硬化体組織の形成は遅延される一方、膨張材の反応は遅延されないため、膨張力がセメント硬化体に有効に作用せず、結果、膨張ひずみが小さくなったと推察される。

4. まとめ

本研究では、夏期の打込みを想定し、膨張コンクリートの膨張ひずみに及ぼす膨張材使用量、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。以下に得られた知見を示す。

- (1) 同一膨張材量で比較した場合、20℃に比べ、30℃で打込みを行った場合の方が最大膨張ひずみは小さくなることが確認された。
- (2) 30℃で打込みを行った場合、膨張材使用量を標準使用量の20 kg/m³とした際には供試体にひび割れが発生したが、膨張材使用量を25 kg/m³以上とした

供試体ではひび割れは生じなかった。

- (3) 化学混和剤の種類および添加率により凝結時間が異なる膨張コンクリートは、凝結時間（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。
- (4) 膨張コンクリートの凝結時間（始発）により膨張ひずみが異なる要因として、AE減水剤または高性能AE減水剤に含まれる遅延成分、および凝結遅延剤の遅延成分は、セメントと膨張材では遅延効果が異なるためであると考えられる。

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) 塚山隆一：暑中コンクリートの温度ひびわれ，コンクリート・ジャーナル，Vol.4，No.6，1966
- 3) 日本建築学会：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，2017
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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.21，No.0，pp.89-92，1979
- 7) 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