

論文 超高強度コンクリートの自己収縮低減

上原 伸郎^{*1}・鈴木 康範^{*2}・河上 浩司^{*3}・西本 好克^{*4}

要旨: 設計基準強度 80N/mm^2 および 120N/mm^2 の超高強度コンクリートの自己収縮低減策として、低添加型膨張材、収縮低減剤、遅延剤および水和熱抑制剤を単独又は併用して検討を加えた。各混和材料がフレッシュ性状および強度発現性に与える影響を求め、さらに 20°C 一定下および温度履歴下での自己収縮ひずみを測定した結果、膨張材を 25kg/m^3 と収縮低減剤を結合材に対して 1.0%の添加で併用するものが良好な自己収縮低減効果を示した。また、単位膨張材量を 30kg/m^3 以上と多く混和したものは、遅れ膨張を示す可能性があることを確認した。温度履歴を与えた場合には、 20°C 一定下よりも膨張量が大きくなることを確認した。

キーワード: 超高強度コンクリート, 自己収縮, 低熱ポルトランドセメント

1. はじめに

近年、都市部を中心に超高層建築物の建設が盛んに行われており、設計基準強度 100N/mm^2 の高強度コンクリートが実構造物に適用され始めている。最近では、設計基準強度 150N/mm^2 を超えるコンクリートが実用化段階を迎えており¹⁾、この傾向は今後さらに増加すると予想される。一方で、高強度コンクリートは所要の強度を得るために多量の結合材を必要とするため、自己収縮ひずみは大きくなる。特に、低水結合材比でシリカフェームを併用するような高強度コンクリートの場合には、顕著な自己収縮ひずみを示す²⁾。さらに、コンクリートの自己収縮ひずみは、温度による影響を大きく受けることも指摘されているため³⁾、水和発熱の大きな高強度コンクリートでは、温度履歴下における自己収縮ひずみを把握することが重要である。

高強度コンクリートの自己収縮ひずみを抑制する方法として、セメントの種類、膨張材や収縮低減剤による効果などの検討がなされているが^{4),5),6)}、水結合材比が 20%程度以下、さらにはシリカフェームを併用するような超高強度コン

クリートに関する報告は未だ少ない。

本研究では、設計基準強度 80N/mm^2 (水結合材比 25%; 以下 Fc80)および 120N/mm^2 (水結合材比 16%, シリカフェーム 10%置換; 以下 Fc120)の超高強度コンクリートを対象に、低添加型膨張材(以下、膨張材)、収縮低減剤、遅延剤および水和熱抑制剤を単独又は併用した場合の自己収縮低減効果について検討した。まず、各混和材料がフレッシュ性状ならびに強度発現性に及ぼす影響を確認し、次に、 20°C 一定下における自己収縮低減効果を確認した。さらに、模擬柱供試体の中心温度を想定した温度履歴下における自己収縮ひずみの測定ならびに強度発現性についても確認し、超高強度コンクリートの自己収縮低減方法に関する検討を行った。本報では、これらの結果について報告する。

2. 試験概要

2.1 試験水準

使用材料を表-1、試験の組合せを表-2 に示す。なお、膨張材および水和熱抑制剤は、事前の試験から、2 日後に型枠の解体に十分な強度を有す

*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 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 グループリーダー 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*4 三井住友建設(株) 技術研究所 副部長 (正会員)

表-1 使用材料

材 料	記号	仕 様 等
低熱ポルトランドセメント	C	密度 3.24g/cm ³ , 比表面積 3310cm ² /g
シリカフェーム	SF	密度 2.26g/cm ³ , 比表面積 22.5m ² /g
細骨材	S	千葉県市万田野産山砂, 密度 2.63g/cm ³ , FM 2.53
粗骨材	G	茨城県岩瀬産砕石, 密度 2.65g/cm ³ , FM 6.76
低添加型膨張材	EX	エトリンガイト-石灰複合系, 密度 3.05g/cm ³
収縮低減剤	T	アルキレンオキシド系化合物
遅延剤	R	グルコン酸ナトリウム
水和熱抑制剤	H	加水分解性タンニン酸化合物
混和剤1	SP1	ポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤
混和剤2	SP2	SP1はFc120, SP2はFc80に使用

るように添加率を定めた。

2.2 配合

コンクリートの配合は以下の条件で選定した。1)目標スランプフローは、Fc120 で 65±7.5cm, Fc80 で 60±5cm とした。ただし、範囲を外れた場合でも材料分離が生じていないことを確認すれば、これを試験に供した。2)目標空気量は 2.0%以下とし、高性能 AE 減水剤および消泡剤により調整した。3)粗骨材のかさ容積は、Fc120 で 0.53m³/m³とし、Fc80 で 0.54m³/m³とした。4)単位水量は、Fc120 で 145kg/m³, Fc80 で 165kg/m³とした。5)シリカフェームは Fc120 のコンクリートに添加した。6)シリカフェームは、セメントの質量に対して 10%置換とし、50%濃度のスラリー(以下 SF スラリー)とした。7)膨張材はセメントの内割りで置換した。8)収縮低減剤は混練水の内割りで置換した。9)遅延剤および水和熱抑制剤は外割りで添加した。配合の一例を表-3 に示す。なお Fc120, Fc80 とともに、膨張材と収縮低減剤のどちらも混和しない配合をプレーン(記号 P)と表記する。

2.3 練混ぜ

ミキサは二軸強制練りミキサ(容量55L)を用い、1バッチの混練量は 35 又は 40L/バッチとした。Fc120 では、C, EX, S および G を空練り後、W と SF スラリーを投入して 20 秒、次に SP1 を投

表-2 試験の組合せ

種別	EX (kg/m ³)	T (B×%)	R (B×%)	H (B×%)
Fc120 (W/B16%)	0	0,1,2,3	—	—
	15	0	0.07	0.3
	20	0,1,2,3	—	—
	25	0,1	—	—
	30	0	0.07	—
Fc80 (W/B25%)	0	0,1	—	—
	15	0	0.07	0.3
	20	0,1,2,3	—	—
	25	0,1	—	—
	30	0	—	—

表-3 配合の一例

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	C	SF	S	G	EX	T
P-120	16	41.6	145	816	91	595	840	0	0
E20-120		41.6	145	796	91	594	840	20	0
T1-120		41.6	136	816	91	595	840	0	9.1
E20T1-120		41.6	136	796	91	594	840	20	9.1
P-80	25	47.2	165	660	—	758	856	0	0
E20-80		47.1	165	640	—	757	856	20	0
T1-80		47.2	158	660	—	758	856	0	6.6
E20T1-80		47.1	158	640	—	757	856	20	6.6

R, Hの使用は、記号の最後に(RH), (R)を付記する

入後4分~6分間練り混ぜた。一方、Fc80ではC, EX, S および G を空練り後、W と SP2 を投入して4分間練り混ぜた。なお T については、Fc120 と Fc80 とともに、SP 投入 40 秒後に添加した。

2.4 温度履歴パターン

温度履歴は Fc120, Fc80 とともに次のパターンで与えた。1)打込み温度: 20°C, 2)前置き: 4Hr, 7Hr(遅延剤使用時), 3)昇温: 14Hr(20→60°C), 4)保持: 6Hr(60°C), 5)降温: 84Hr(60→20°C)

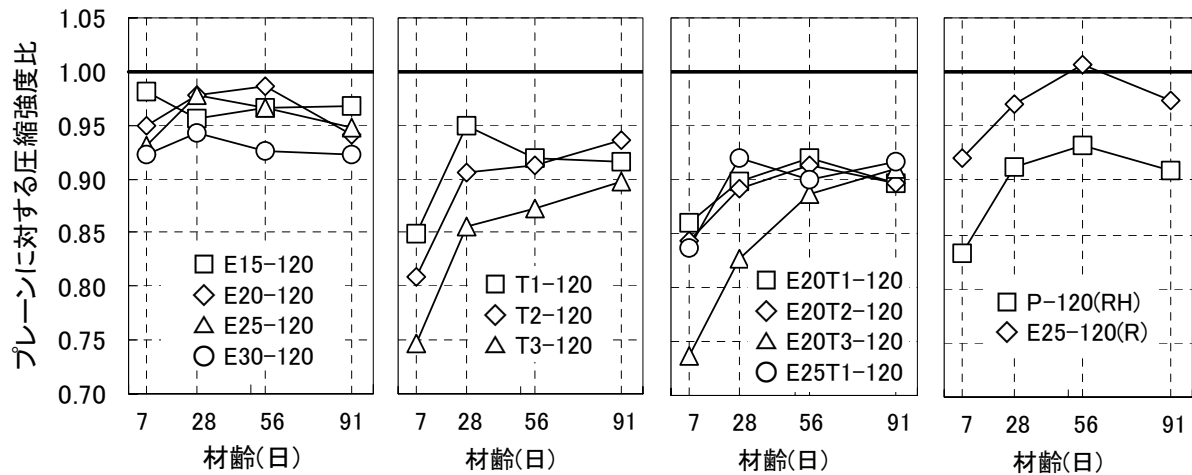


図-1 強度発現性に与える混和材料の影響 (Fc120) (図中R, Hは遅延剤と水和熱抑制剤)

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状および強度発現性への影響

各混和材料がコンクリートのフレッシュ性状および強度発現性に与える影響を確認し、20℃一定下で自己収縮ひずみの測定に供する配合を絞り込んだ。

(1) フレッシュ性状

Fc120では、膨張材置換率の増加に伴って混和剤添加率は増加し、本試験で用いた混和剤(SP1)は膨張材 5kg/m^3 の増加に対して、0.06~0.07%程度増加した。収縮低減剤については、同一フローを得るための混和剤添加率の増加が僅少であるものの、粘性の増加が認められた。また、Fc80では、膨張材置換率の増加に伴って混和剤添加率が減少し、本試験で用いた混和剤(SP2)は膨張材 5kg/m^3 の増加に対して 0.03~0.04%程度減少した。収縮低減剤は 3.0%で若干流動性の低下が認められたが、2.0%以下では、ほぼ同等なフレッシュ性状が得られた。

(2) 強度発現性

強度発現性に与える混和材料の影響を図-1, 2に示す(プレーン強度は図-5参照)。Fc120では、膨張材の混和が強度発現性に与える影響は比較的小さく、今回の範

囲内では、プレーンに比べて95%程度であった。収縮低減剤については、膨張材の有無に関わらず1~2%で材齢7日、3%では材齢56日程度まで明確な遅延が認められるが、91日においてはプレーンに比べて90%程度であった。遅延剤と水和熱抑制剤を併用したものは(図中RHで表記)、材齢7日でプレーンの83%と小さく、材齢91日でもプレーンに比べ90~95%となった。膨張材と遅延剤を併用したものは(図中Rで表記)、初期において遅延の傾向が認められたが、材齢28日以降はプレーンとほぼ同程度の強度を発現した。また、Fc80では、膨張材の混和による強度低下はFc120と同様に5%程度と判断される。しかし、収縮低減剤加による強度低下は添加率の増加に伴って大きくなり、2%以上の添加率では材齢の経過によっても若材齢時と同程度の低下割合で推移した。ここで、E20T1-80, E25T1-80 および

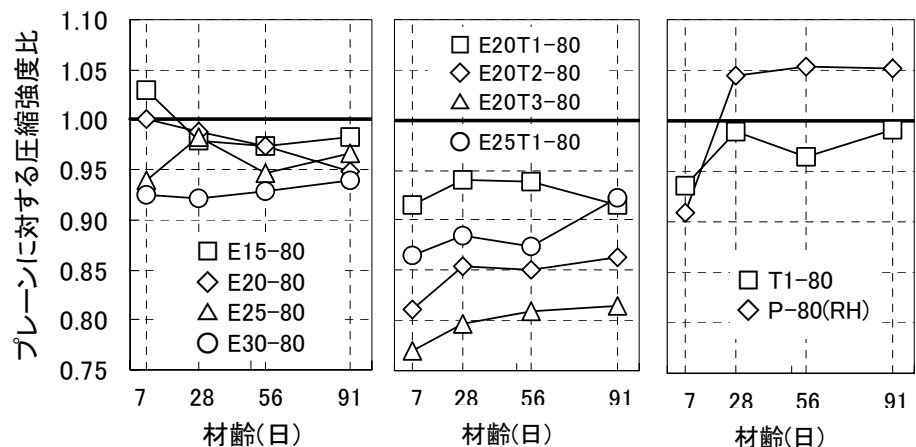


図-2 強度発現性に与える混和材料の影響 (Fc80)

T1-80 を比べると、膨張材と収縮低減剤とを併用した場合に、強度低下の割合が大きくなるものと考えられる。これは、Fc120 の結果とは異なるものであり、水結合材比やシリカフェームの有無が影響していると推察されるが、今後の検討課題としたい。遅延剤と水和熱抑制剤を併用したものは、材齢 7 日こそ遅延傾向を示したが、28 日以降はプレーンを 5%程度上回る強度を発現した。

3.2 20°C一定下での自己収縮ひずみ

前節より、フレッシュ性状の改善が比較的容易で、強度低下が少ないことから判断し、表-4 に示す配合について 20°C一定下での自己収縮ひずみを測定した。自己収縮ひずみはコンクリートの始発を基長とし、線膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して算定した。試験結果を図-3, 4 に示す。

Fc120 では、プレーンで 500×10^{-6} (材齢 91 日) 程度の自己収縮ひずみが確認された。単位膨張材量の増加に伴って自己収縮ひずみは低減され、 $20\text{kg}/\text{m}^3$ で 24%、 $25\text{kg}/\text{m}^3$ で 39%、 $30\text{kg}/\text{m}^3$ では 60%が低減された。収縮低減剤のみでは自己収縮の低減効果がほとんど認められないが、膨張材と併用すると単なる重ね合わせとは異なる効果が期待され、E25-120 とこれに収縮低減剤 1.0% 添加した E25T1-120 とを比べると収縮低減率は 39%から 55%まで向上した。この結果は、既往の研究^{5),6)}と一致している。遅延剤を用いたものは、P-120(RH)、E25-120(R)ともに 40%程度の収縮低減率を示した。ここで、E30-120 に着目すると、材齢 60 日以降から膨張傾向を示している。盛岡ら⁷⁾によれば、水結合材比が小さいものほど長期にわたって継続的に膨張するとし、その理由について、物質移動が抑制されるため未水和の膨張材が継続的にゆっくりと水和するためとしている。今回の結果についても同様なメカニズムであると考えられる。また、供試体は封緘状態であることを勘案すると、水分の供給源はコンクリート内部であり、河上ら⁸⁾が示唆するように、コンクリート内部において継続的でゆっくりと

表-4 20°C一定下における自己収縮ひずみ測定水準

		EX (kg/m ³)			
		0	20	25	30
T (B×%)	0.0	P-120 P-80	E20-120 E20-80	E25-120 E25-80	E30-120 E30-80
	1.0	T1-120 T1-80		E25T1-120 E25T1-80	
R & H		P-120(RH) P-80(RH)			
R				E25-120(R)	

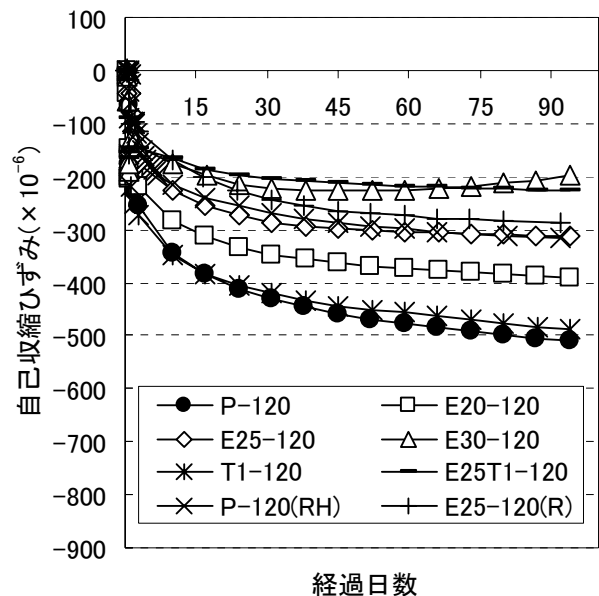


図-3 20°C一定下での自己収縮ひずみ(Fc120)

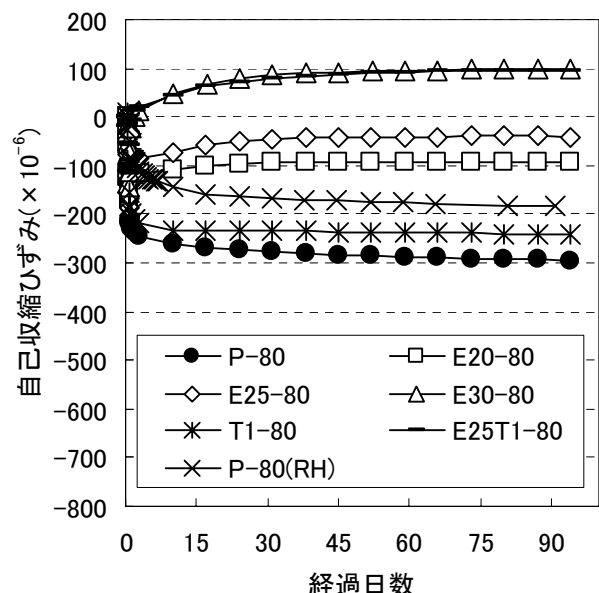


図-4 20°C一定下での自己収縮ひずみ(Fc80)

した水分の移動が生じているものと考えられる。

Fc80 では、プレーンで 300×10^{-6} (材齢 91 日) 程度の自己収縮ひずみが確認された。Fc120 と同様に、膨張材の置換量増加に伴って自己収縮ひ

ずみは減少し 30kg/m^3 では膨張域を示した。さらに、収縮低減剤の効果は、単独では小さいものの、膨張材と組み合わせることで良好な改善効果が認められた。

3.3 温度履歴下での自己収縮ひずみ

前節までの結果より、表-5 に示す 11 水準について温度履歴下における自己収縮ひずみおよび圧縮強度を測定した。標準養生ならびに温度履歴下での強度発現性を図-5、自己収縮ひずみを積算温度($^{\circ}\text{C}\cdot\text{D}$)で整理した結果を図-6~9 に示す。なお、線膨張係数は $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 一定とした。

温度履歴を与えたコンクリートの圧縮強度について、Fc120 では、材齢 28 日で標準養生供試体の材齢 91 日程度を示し、Fc80 では、高温条件下に置かれた後も強度増進が認められ、材齢 91 日では標準養生とほぼ同程度の強度を示した。この傾向は、高温履歴下においてシリカフェームの活性が上昇したことによると推察され、既往の報告⁹⁾と一致するものと考えられる。

自己収縮ひずみの温度依存性を積算温度によって整理した結果、図-6~9 より明らかなように明確な相関は認められなかった。膨張材を混和した配合では、温度履歴を与えたものの方が膨張側に推移し、E30-80 は明らかな膨張傾向を示した。この原因の一つは、膨張材とセメントの温度活性の差によるものと推察されるが、今回は、硬化初期の高温履歴下における線膨張係数

表-5 温度履歴下における自己収縮測定水準

		EX (kg/m^3)		
		0	25	30
T (B×%)	0.0	P-120 P-80	E25-120 E25-80	E30-120 E30-80
	1.0		E25T1-120 E25T1-80	
R & H		P-120(RH) P-80(RH)		
R			E25-120(R)	

の変化に特別な考慮をしていないことから、今後、水和活性の差や線膨張係数の変化に着目し、さらに詳細な検討を進めることとしたい。

4. まとめ

W/B25%ならびに 16%の低水結合材比のコンクリートについて、低添加型膨張材、収縮低減剤などが強度発現性や自己収縮ひずみに及ぼす影響を検討した結果、以下の知見を得た。

- (1)膨張材添加による強度発現の低下は、 30kg/m^3 までの範囲において 5%程度であることが確認された。
- (2)膨張材と収縮低減剤は単独で用いるより併用することにより自己収縮ひずみ抑制効果は向上する。本研究では膨張材 25kg/m^3 および収縮低減剤 B×1.0%の使用によって、W/B25%では膨張域に、W/B16%の低結合材比では、自己収縮ひずみが 55%低減された。
- (3)低水結合材比のコンクリートでは、コンク

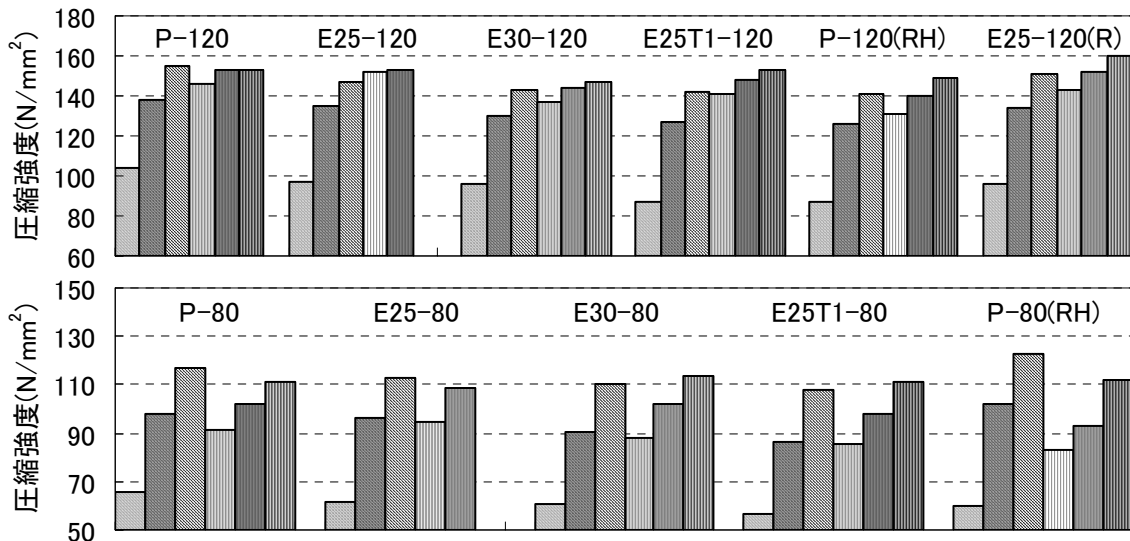


図-5 強度発現性 (図中左より、標準養生7D, 28D, 91D, 温度履歴7D, 28D, 91D)

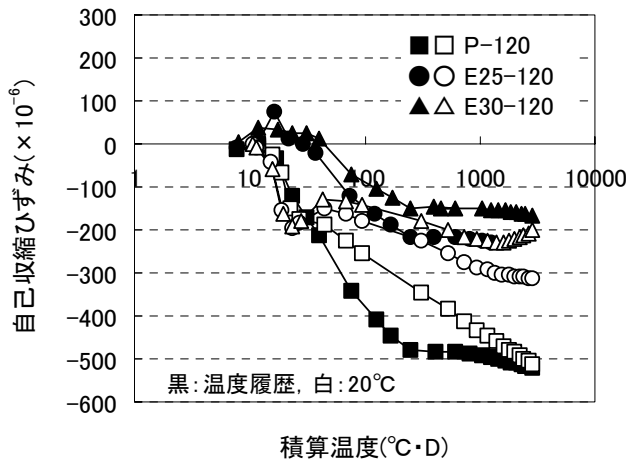


図-6 積算温度と自己収縮(Fc 120N/mm²)

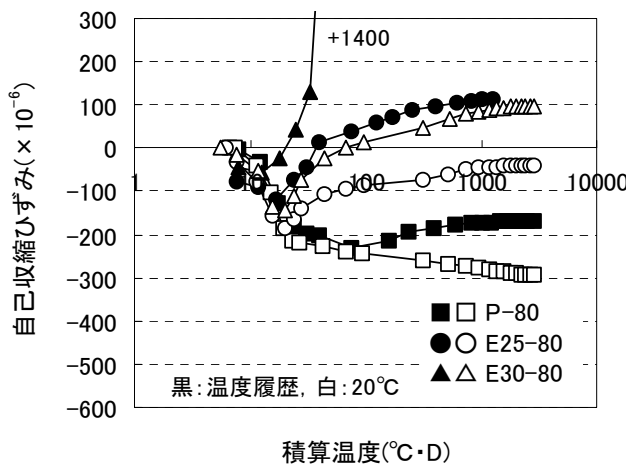


図-8 積算温度と自己収縮(Fc 80N/mm²)

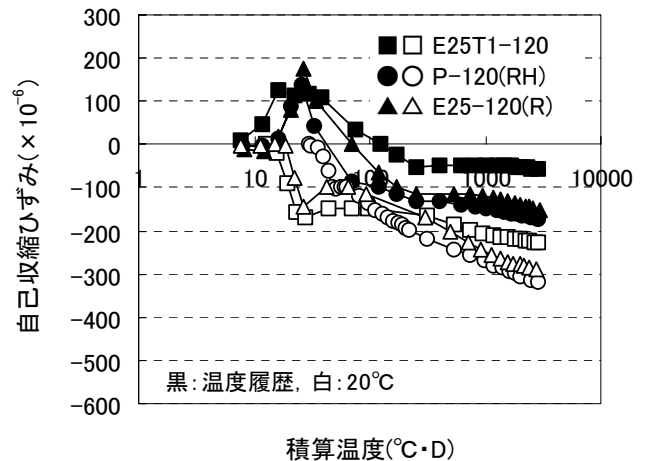


図-7 積算温度と自己収縮(Fc 120N/mm²)

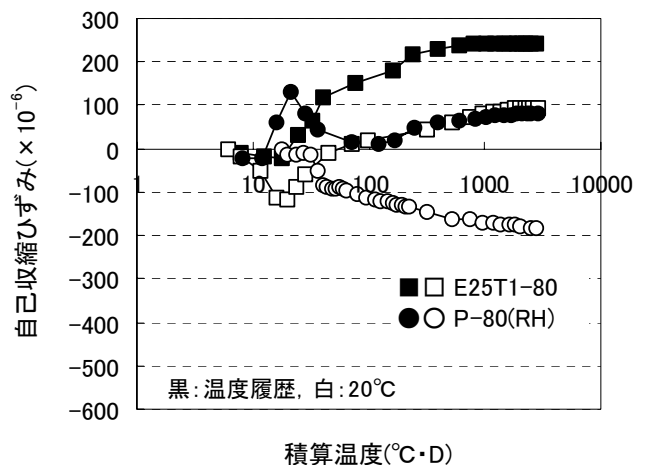


図-9 積算温度と自己収縮(Fc 80N/mm²)

リート内部において継続的でゆっくりとした水分の移動があると推察される。このため、膨張材の置換量によっては遅れ膨張が生じる可能性がある。

(4)温度履歴下における自己収縮ひずみを積算温度によって整理したが、線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 一定と仮定した今回は、明確な相関が認められなかった。

(5)膨張材を用いたコンクリートは温度履歴下において 20°C 一定条件下より膨張量が大きくなる傾向がある。

参考文献

- 1) 陣内 浩ほか：実用化を迎えた[設計基準強度]150N/mm²級超高強度コンクリートの性能，セメント・コンクリート，No.678，pp10-16，2003.8
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，pp114，2002.9
- 3) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報

告書，pp58，1996.11

- 4) 近松竜一ほか：高強度・高流動コンクリートの低収縮化に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp169-174，1997
- 5) 谷村 充ほか：高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp991-996，2000
- 6) 正木 聡ほか：コンクリートの低収縮化による RC 部材の曲げ性能向上，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp757-762，2001
- 7) 盛岡 実ほか：膨張材を混和した低水結合材比モルタルの膨張挙動，「膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化」に関するシンポジウム，pp103-108，2003.9
- 8) 河上浩司ほか：高強度コンクリートの強度発現に及ぼすコンクリート中の水分の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp1317-1322，2004
- 9) 菅俣 匠ほか：セメント-シリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現性の関係に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp1287-1292，2004