

論文 超高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす結合材の影響

都築 正則*1・一瀬 賢一*2・神代 泰道*3・川口 徹*4

要旨：100～150N/mm²級の超高強度コンクリートの自己収縮ひずみについて、シリカフェームプレミックスセメント及びシリカフェームの種類、水結合材比、膨張材の混入率などを変化させ、実験的に検討したところ以下の事が得られた。膨張材を混入しない場合、自己収縮ひずみは水結合材比の低下にともない増大し、-400μ～-700μを示した。また、ベースセメントが、低熱系セメントに比べ普通セメントの方が自己収縮ひずみが大きくなった。膨張材の混入率が大きくなると、収縮ひずみは小さくなった。膨張材を結合材重量比にして2.5%混入すると、強度はほぼ低下することなく、自己収縮ひずみは半減した。

キーワード：自己収縮、シリカフェーム、超高強度コンクリート、膨張材

1. はじめに

建築物の長寿命化、高層建築物の需要の増加に伴い、圧縮強度100N/mm²を超える超高強度コンクリートが適用されつつある。この超高強度コンクリートの材料として、シリカフェームの使用が挙げられる。シリカフェームが有するポゾラン反応性やマイクロファイラー効果は、コンクリート組織をより緻密にし、キャリアー効果は流動性を向上する。しかし、シリカフェームを使用した低水結合比のコンクリートは大きな自己収縮が生ずるとされ¹⁾²⁾、その収縮ひずみは、シリカフェーム置換率10%以上、水結合材比20%程度のコンクリートで、400μとの報告³⁾もある。シリカフェームが自己収縮に及ぼす影響は、シリカフェームの使用形態による影響(水結合材比、シリカフェーム置換率)によって異なり⁴⁾、シリカフェーム自体の品質にも影響すると予想される。自己収縮の大きいコンクリートを実部材に打設すると、鉄筋、部材間の拘束によりひび割れが生じ、耐久性の低下が懸念される事から、自己収縮ひずみを低減は早急な検討課題である。

本研究では、100～150N/mm²級の超高強度コン

クリートを対象とし、セメント、シリカフェームの違いによる強度発現性状、自己収縮に及ぼす影響や、自己収縮を低減する材料として代表的な膨張材、収縮低減剤⁵⁾⁶⁾の自己収縮低減効果について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験の組合せを表-1に示す。使用セメントを4水準(シリカフェームプレミックスセメント2種類及び高ビーライト系セメントにシリカフェーム2種類をそれぞれコンクリート練混ぜ時に混入したもの)、水結合材比(以下W/B)を3水準(W/B=14, 17, 20%)、膨張材の置換率及び収縮低減剤との併用で3水準とし、超高強度コンク

表-1 実験の組合せ

使用セメント種類 及び シリカフェーム種類	水結合材比 (%)			膨張材、収縮低減剤 (水結合材比17%)		
	14	17	20	EX2.5	EX5.0	EX5.0 -SRA
記号 ¹⁾						
SPCa						
SPCb						
HBC-SF ₁						
HBC-SF ₂						

1 記号は表-2及び表-3参照

- *1(株)大林組 技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ 研究員 工修(正会員)
- *2(株)大林組 技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ長 工博(正会員)
- *3(株)大林組 技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ 副主査 工修(正会員)
- *4(株)大林組 技術研究所 建築材料研究室 室長 工博(正会員)

リートの自己収縮及び圧縮強度に対する各種条件の影響の検討を行った。

2.2 使用材料

使用材料を表-2に示す。セメントはベースセメントの異なるシリカフェームセメント2種類、高ビーライト系セメント1種類、また、高ビーライト系セメントに混入したシリカフェームは2種類で、それぞれ産地が異なる。細骨材及び粗骨材はそれぞれ甲州産安山岩砕砂、砕砂を使用した。練混ぜ水は実験室内の上水道を、高性能減水剤はポリカルボン酸系化合物を使用した。膨張材は石灰系膨張材、収縮低減剤は低級アルキレンオキシド付加物を使用した。

2.3 調合

コンクリートの調合を表-3に示す。各種コンクリートの調合記号は、最初が使用セメント種類と水結合材比、次がシリカフェームの種類、最後が膨張材及び収縮低減剤の混入率である。調合は、目標スランプフローを65±10cmとし、単位水量を155kg/m³、空気量を2%、単位粗骨材量を845kg/m³と一定とした。高性能減水剤の添加量は目標スランプフローを満足するよう調整した。シリカフェームはセメント重量の内割りで10%混入した。膨張材混入量は、メーカー推奨量を参考にセメント重量の内割りで5.0%及びその半分の2.5%とした。収縮低減剤混入量はメーカー推奨量から単位水量の一部として6kg/m³とした。

表-2 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	SPCa	低熱セメント(L)ベースのシリカフェームプレミックスセメント, 密度3.08g/cm ³
	SPCb	普通セメント(N)ベースのシリカフェームプレミックスセメント, 密度3.02g/cm ³
	HBC	高ビーライト系セメント, 密度3.20g/cm ³
シリカフェーム	SF ₁	エジプト産, 比表面積13.2m ² /g
	SF ₂	アメリカ産, 比表面積17.7m ² /g
細骨材	S	甲州産安山岩砕砂, 表乾密度: 2.63g/cm ³ , 吸水率2.04%, 粗粒率2.79
粗骨材	G	甲州産安山岩砕石, 表乾密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率1.89%, 粗粒率: 6.69
水	W	上水道
膨張材	EX	石灰系膨張材, 密度3.14g/cm ³
収縮低減剤	SRA	主成分: 低級アルキレンオキシド付加物
高性能減水剤	SP	主成分: ポリカルボン酸系化合物

2.4 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、100Lパン型ミキサーを用いて行った。手順としては細骨材、セメント(シリカフェーム及び膨張材も含む)投入後、15秒空練を行い、水を投入後90~240秒練混ぜた。その後、粗骨材を投入し、60~90秒練混ぜた。(W/Bが小さいものほど練り混ぜ時間を長くしている。)練混ぜ終了後、5分静置し、フレッシュ性状の測定及び、各試験体を作製した。

2.5 試験項目及び試験方法

試験項目及び測定方法を表-4に示す。

自己収縮試験方法は「高流動コンクリートの自己収縮試験方法⁷⁾」によった。内寸法10×10×40cmの型枠内部にテフロンシートを貼付し、型枠がコンクリートを拘束しないようにした。型

表-3 コンクリートの調合

セメント種類	調合記号	W/B (%)	S/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)								SP ² (B×%)
					W	B				SRA	S	G	
						C	SF ₁	SF ₂	EX				
SPCa	SPCa14	14	31.2	2	155	1108	-	-	-	-	382	845	2.40
	SPCa17	17	39.5	2	155	912	-	-	-	-	549	845	1.70
	SPCa17-EX2.5	17	39.5	2	155	889	-	-	23	-	550	845	1.50
	SPCa17-EX5.0	17	39.5	2	155	866	-	-	46	-	550	845	1.70
	SPCa17-EX5.0-SRA	17	39.5	2	149	866	-	-	46	6	550	845	1.70
SPCb	SPCa20	20	44.2	2	155	775	-	-	-	-	666	845	1.50
	SPCb14	14	30.1	2	155	1108	-	-	-	-	363	845	2.30
	SPCb17	17	38.8	2	155	912	-	-	-	-	534	845	1.50
HBC	SPCb20	20	43.7	2	155	775	-	-	-	-	653	845	1.35
	HBC17-SF ₁	17	39.3	2	155	821	91	-	-	-	545	845	1.70
	HBC17-SF ₂	17	39.7	2	155	821	-	91	-	-	554	845	1.17

2: 目標スランプフロー値を65±10cmとして高性能減水剤の添加量を調整した。

表-4 試験項目及び測定方法

試験項目	測定方法
空気量, スランプフロー, コンクリート温度, 単位容積質量	各JIS等による
圧縮強度 (材齢7, 28, 56, 91日)	JIS A 1108
静弾性係数	JIS A 1149
凝結時間	JIS A 6204 附属書1
自己収縮ひずみ	高流動コンクリートの自己収縮試験方法 ⁷⁾

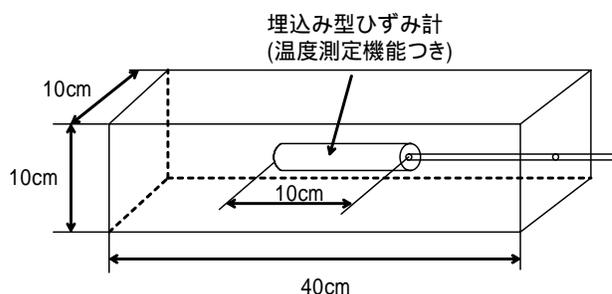


図-1 自己収縮試験体

枠中央部に埋込み型ひずみ計をセットし、 20 ± 2 °C、 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室にてコンクリートの打ち込みを行った。図-1に試験体略図を示す。打ち込み後、試験体上面を平滑に均し、水分の逸散を防ぐためポリフィルムで覆った。翌日の脱型後、試験体全面をポリフィルムで包み静置した。ひずみは、凝結試験より求めた凝結始発時点での値を初期値とし、測定期間はその時点から56日までとした。なお試験体の数は1調合あたり2体とし、その平均を測定値とした。

圧縮強度試験体の型枠は、内寸法 $10 \phi \times 20$ cmの簡易モールドを使用し、翌日の型枠脱型後、試験材齢まで 20 ± 2 °Cの水中養生を行った。圧縮強度試験の際に、コンプレッソメータを用いて静弾性係数の測定を行った。

表-5 フレッシュ性状

記号	スランプフロー	空気量	単位容積質量	CT
	(cm)	(%)	(kg/m ³)	()
SPCa14	66.5	1.5	2470	18.0
SPCa17	72.0	1.0	2454	13.9
SPCa17-EX2.5	74.5	1.2	2496	26.5
SPCa17-EX5.0	74.0	0.7	2462	17.3
SPCa17-EX5.0-SRA	73.0	1.0	2465	19.0
SPCa20	75.8	1.0	2445	18.0
SPCb14	66.3	2.5	2426	22.0
SPCb17	73.8	1.8	2420	20.0
SPCb20	75.5	1.0	2409	18.0
HBC17-SF ₁	78.0	1.2	2454	19.0
HBC17-SF ₂	58.0	1.8	2476	28.6

3. 試験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-5に示す。スランプフローは58~78cmの範囲であり、目標値を超えるものがあつたが材料分離は見られなかった。空気量は0.7~2.5%の範囲であつた。コンクリート温度は、夏期に練混ぜを行ったSFCa17-EX2.5及びHBC17-SF₂が26.5°C、28.6°Cと高く、それ以外は14~22°Cの範囲であつた。

3.2 自己収縮ひずみの測定結果

(1) セメント及びシリカフェームが自己収縮に及ぼす影響

図-2にW/B=17, 20%の使用セメント及びシリカフェームが異なるコンクリートにおける自己収縮ひずみの経時変化を示す。凝結始発時点からの経過時間56日(以下、経時とする)における

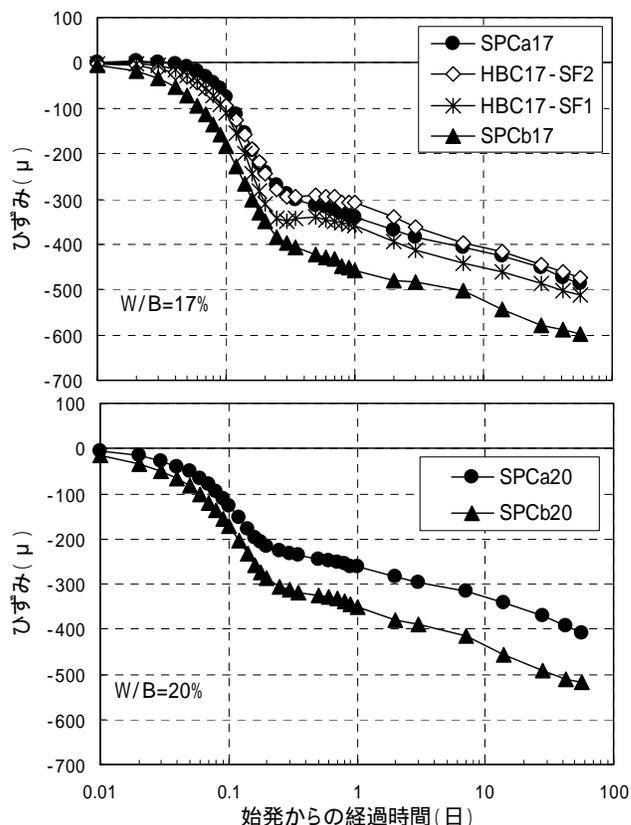


図-2 収縮ひずみの経時変化(1)

W/B=17%のコンクリートは約 $-500\mu\sim-600\mu$ 、W/B=20%のコンクリートは約 $-400\mu\sim-500\mu$ と大きな収縮ひずみを示し、使用セメント及びシリカフェームが異なるとその収縮ひずみも異なる結果となった。

経時56日におけるSPCaとSPCbの自己収縮ひずみを比較するとW/B=17, 20%ともに、SPCaが 100μ 程度小さい値となった。この理由としては、ベースセメントの品質の違い、シリカフェームを含む混和材の違いによるものであると考えられる。これまでの研究⁴⁾⁸⁾によると低熱セメントのほうが普通セメントよりも自己収縮が小さいと言われており、その影響が表れているものと推察できる。HBC17-SF₁やHBC17-SF₂がSPCb17に比べ自己収縮ひずみが小さいのも上記の理由と考えられる。なお、HBC17-SF₁とHBC17-SF₂の収縮ひずみを比較すると、それほど大きな差は生じていない。今回の実験の範囲では、シリカフェーム種類の違いによる影響はそれほど大きくはなかった。

(2) 膨張材、収縮低減剤が自己収縮に及ぼす影響

図-3に膨張材及び収縮低減剤を使用したコンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を示す。膨張材や収縮低減剤がコンクリートの自己収縮を低減することはすでに報告されているが⁵⁾⁶⁾、今回の実験においても、それらの事が確認できた。経時56日のSPCa-EX2.5とSPCa-EX5.0の収縮ひずみを比較すると、膨張材の混入量によって自己収縮ひずみも異なり、SPCa-EX2.5の -200μ 程度に対しSPCa-EX5.0は 0μ 程度と収縮変形を完全に抑制する事が出来た。また、膨張材と収縮低減剤を併用したSPCa-EX5.0-SRAは 200μ 膨張側のひずみを示した。

これら膨張材および収縮低減剤の混入が、無混入コンクリートに対し、何%の自己収縮を低減しているのかを「収縮低減効果」として検討した。収縮低減効果は、膨張材および収縮低減剤の混入によって低減されたひずみ量を、無混

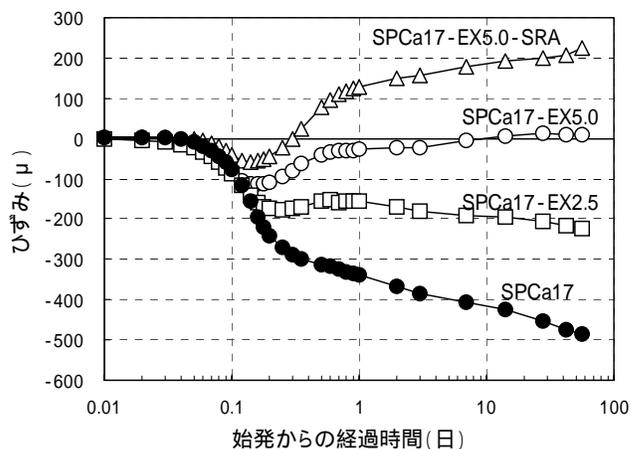


図-3 収縮ひずみの経時変化(2)

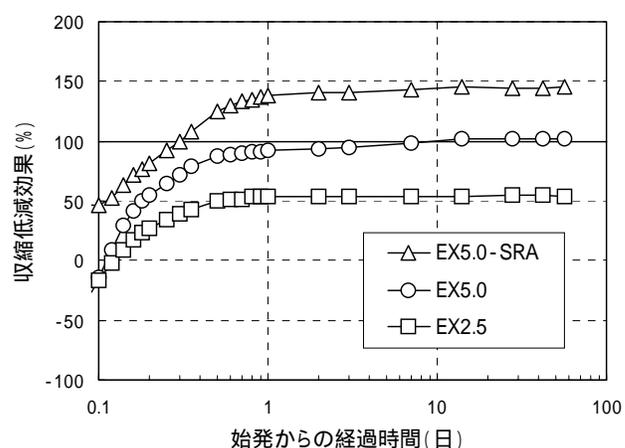


図-4 収縮低減効果の経時変化

入コンクリートのひずみ量で除したものを百分率で表したものである。

図-4に、膨張材及び収縮低減剤の収縮低減効果の経時変化を示す。図より、経時1日以降からは、各膨張材及び収縮低減剤の収縮低減効果は一定の値を示し、経時56日時点であっても、その低減効果は変化していないことが確認できる。また、EX2.5とEX5.0を比較すると、今回の実験では膨張材の混入量が2倍になると、その収縮低減効果も約2倍になる事が確認できた。

(3) 水結合材比が自己収縮に及ぼす影響

図-5にシリカフェームセメントSPCaとSPCbを使用したW/Bの異なるコンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を示す。図より、W/Bの低下に伴い自己収縮ひずみが増大することが確認でき

た。特に水結合材比が小さいW/B =14%のひずみは著しく大きくなるのが明らかとなった。

3.3 圧縮強度試験結果

(1) セメント及びシリカフェームが強度に及ぼす影響

図-6にW/B=17, 20%におけるセメント及びシリカフェームが異なるコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を示す。材齢7日から91日までの強度の伸びは、使用セメントおよびシリカフェームによって異なり、SPCbは30~40N/mm²程度、HBC17-SF₂は50N/mm², SPCaは60~70N/mm²及びHBC17-SF₁は70N/mm²程度であった。これは、普通セメントに比べ高ビーライト系セメント、低熱セメントの長期強度の伸びが大きい性状を表しているものと理解できる。また、HBC17-SF₁とHBC17-SF₂を比較すると、混入したシリカフェームの品質によって、コンクリートの強度発現が異なった結果となった。

(2) 膨張材、収縮低減剤が強度に及ぼす影響

図-7に膨張材及び収縮低減剤を混入したコンクリートの強度と材齢の関係を示す。膨張材5.0%混入したコンクリートは無混入のコンクリートに比べて、材齢91日で20N/mm²程度強度が低い結果となった。収縮低減剤を併用したものは、膨張材5.0%混入コンクリートに比べて、膨張材2.5%混入したものは、無混入のものに比べて強度低下はほとんど確認できなかった。膨張材の混入率により、強度低下の割合は異なる。

(3) 水結合材比が強度に及ぼす影響

図-8にSPCaとSPCbを使用したW/Bの異なるコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を示す。SPCbでは材齢7日~91日の強度発現はW/Bによらず同程度であり、今回の調合では、圧縮強度160N/mm²程度で強度発現が頭打ちになるようであった。なおSPCaでも、W/B=14%と17%では強度発現に差が認められず、180N/mm²程度で頭打ちになるようである。使用シリカフェームセメントの違いによっても強度発現の頭打ちのレベルが異なることが確認された。

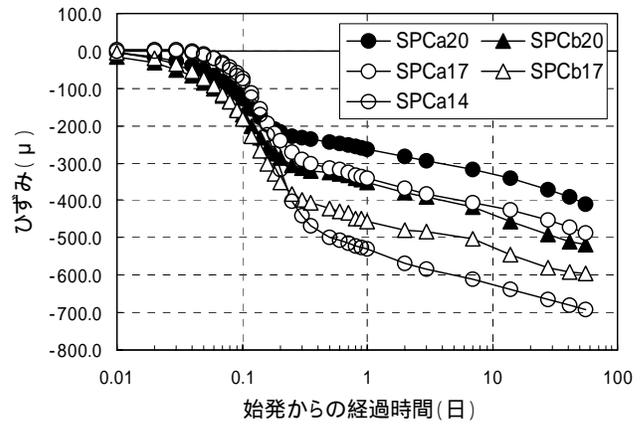


図-5 収縮ひずみの経時変化 (3)

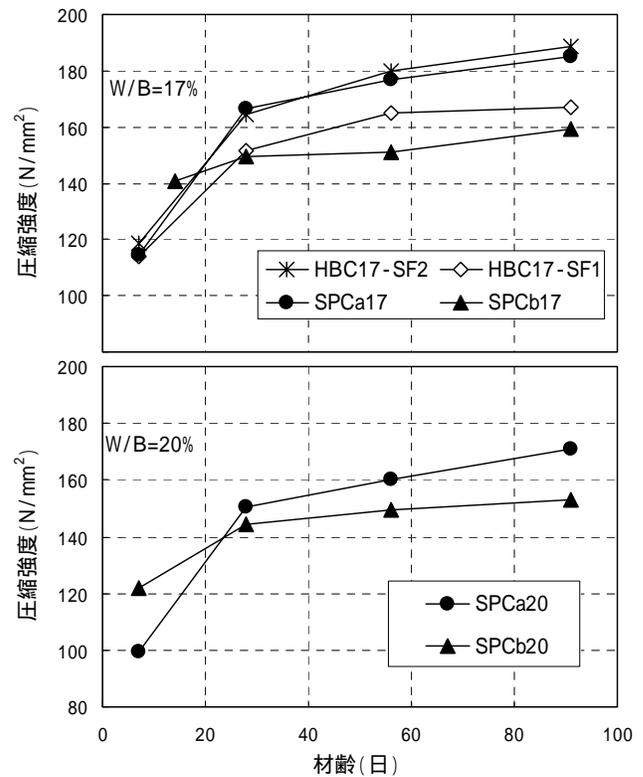


図-6 圧縮強度と材齢 (1)

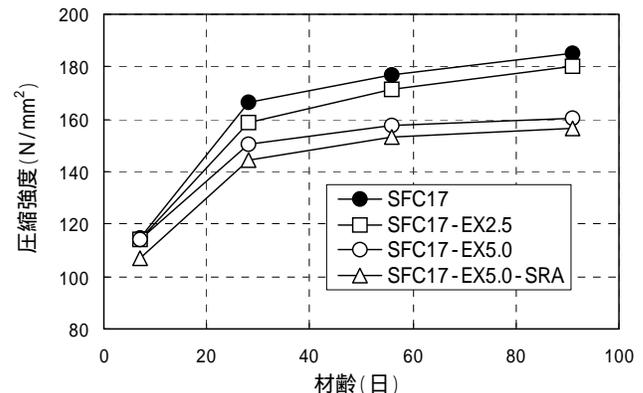


図-7 圧縮強度と材齢 (2)

3.4 静弾性係数試験結果

静弾性係数と圧縮強度の関係を図-9に示す。材齢91日において静弾性係数は $4.5 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ の範囲であった。また、New RC式⁹⁾と比較しても、今回実験した超高強度コンクリートの静弾性係数は膨張材や収縮低減剤の使用の有無に関わらず、概ねNew RC式によって推定することが出来ると考えられる。

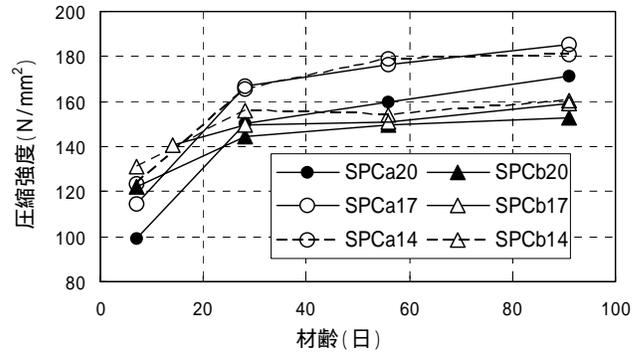


図-8 圧縮強度と材齢(3)

4. まとめ

100~150N/mm²級の超高強度コンクリートを対象とし、実験的に検討したところ、以下のことが得られた。

- 1) 膨張材、収縮低減剤を混入していないコンクリートの自己収縮ひずみは水結合比の低下にともない増大し、経時56日で $-400 \mu \sim -700 \mu$ 、材齢91日の圧縮強度は150~190N/mm²の範囲であった。
- 2) ベースセメントが、低熱系セメントに比べ普通セメントの方が自己収縮ひずみが大きくなりその差は100 μ 程度であった。
- 3) 膨張材の混入率によってその収縮ひずみは異なり、混入率を2倍にすると、その収縮低減効果は約2倍になった。膨張材と収縮低減剤との併用により、ひずみは膨張側を示した。
- 4) 膨張材を結合材重量比にして2.5%混入すると、強度はほぼ低下することなく、収縮ひずみが半減した。

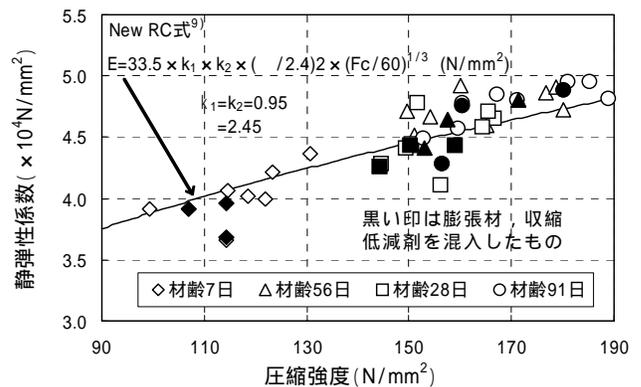


図-9 静弾性係数と圧縮強度

参考文献

- 1) 田沢栄一 他：水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積減少，セメント・コンクリート論文集，No. 502/V-25, pp. 43-45, 1994
- 2) 今本啓一 他：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，Vol. 17, No. 1, pp. 1061 - 1066, 1995
- 3) 田沢栄一 他：コンクリートの自己収縮，コ

ンクリート工学年次論文集，Vol. 14, pp. 561-566, 1992

- 4) (社)日本コンクリート工学協会：自己収縮委員会報告書，1996. 11
- 5) 谷村充 他：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，Vol22, No2, pp. 991-996, 2000. 6
- 6) 近松竜一 他：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, pp. 169-174, 1997. 6
- 7) (社)日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，pp. 209-210, 1994
- 8) 田沢栄一 他：自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響，セメントコンクリート論文集，No47, pp. 528-533, 1993
- 9) (社)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp. 39, 1999