

論文 各種高流動コンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験

安田 正雪^{*1}・阿部 道彦^{*2}・笹原 厚^{*3}・桃谷 智樹^{*4}

要旨：水粉体比27～60%の各種高流動コンクリートおよび通常のコンクリートの乾燥収縮，自己収縮および収縮ひび割れ試験を行うとともに，自己収縮試験終了後の乾燥による収縮も測定した。この結果，高流動コンクリートの乾燥収縮率と自己収縮率との間には負の相関関係が認められ，自己収縮率にその試験終了後の乾燥による収縮率を加えた値は，乾燥収縮率とほぼ同じとなった。また，ひび割れの発生のしやすさには，自己収縮率の影響が大きいことが明らかとなった。

キーワード：高流動コンクリート，自己収縮，乾燥収縮，ひび割れ，自由収縮

1. はじめに

高流動コンクリートの調合では材料分離抵抗性を高めるために，粉体量を多くしたり，分離低減剤を用いたりしてモルタルの粘性を高める他，単位粗骨材量を小さくする傾向がある。このため，高流動コンクリートは通常のコンクリートと比較して自己収縮および乾燥収縮が大きくなることやひび割れが発生しやすくなることが懸念されている。また，現状では自己収縮についてはまだ標準的な試験方法が確立されておらず，評価方法も定まっていないが，既往の乾燥収縮ひび割れ試験でも粉体量が多いコンクリートのひび割れの発生しやすさを評価する場合には，自己収縮を考慮しないと不明な点が多い[1, 2]。これらは，各々の収縮試験やひび割れ試験が同時に実施されていないため，試験結果の相互関係が明らかとされないことが原因の一つと考えられる。

本論文は，各種高流動コンクリートと通常のコンクリートを対象に，同一のコンクリート試料から各種試験体を作製して，乾燥収縮，自己収縮および収縮ひび割れ試験を行うとともに，自己収縮試験終了後の乾燥による収縮の測定も行って，コンクリートの各種収縮性状の相互関係，ならびに収縮性状とひび割れの関係について述べたものである。

2. 実験計画

高流動コンクリートの水粉体比は35%，42%および53%の3水準とし，水粉体比35%では，普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュ，石灰石粉にそれぞれ置換えたものについても試験を行った。比較のために，水セメント比27%，35%および60%の通常のコンクリートについても試験を行った。

2. 1 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料と物性を表-1に，コンクリートの調合を表-2に示す。高流動コンクリートの調合条件は，単位水量を 170kg/m^3 ，単位粗骨材かさ容積を $0.5\text{m}^3/\text{m}^3$ に一定とし，スランプフロー，空気量の目標値をそれぞれ $65 \pm 5\text{cm}$ ， $4.5 \pm 1.0\%$ とした。セメントの一部を置換した粉体は，い

*1 東洋建設(株)総合技術研究所美浦研究所材料研究室主任研究員(正会員)

*2 建設省建築研究所第2研究部無機材料研究室室長，工博(正会員)

*3 (株)間組建築統括本部技術部技術第1課課長(正会員)

*4 (株)間組技術本部技術研究所技術研究部第4研究室

れもセメント質量の3割とした。
水粉体比42%と53%の割合では
分離低減剤を使用した。

2. 2 試験体の作製方法と 試験方法

コンクリートの練混ぜは 100%
強制水平 2 軸ミキサを用いて行
い、1 回の練混ぜ量を 50% とし
た。練混ぜ方法は、粉体と細骨
材をミキサに投入し 15 秒間空練
りし、水と混和剤を投入して 60
秒間攪拌した後、粗骨材を投入
してさらに 60 秒間攪拌して、練
置き板に排出した。これを 2 回
繰り返して、混合したものをコ
ンクリート試料とした。

フレッシュコンクリートの試
験結果を表-3 に示す。同一のコンクリート試料から下記に示す試験の供試体をいずれも各 2 体
作製した。

(1) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に準じてコン
パレータ方法（検長 340mm、精度 1/1000mm）で行った。供試体の形状・寸法は 10×10×40cm の角柱
である。高流動コンクリートの供試体の作製は、コンクリートを型枠 2 層に分けて詰め、各層 20
回突き棒で締固めた。型枠脱型は材齢 2 日とした。供試体は材齢 7 日まで温度 20±1℃ の水中で
養生した後、基長と質量を測定し、
温度 20±1℃、湿度 60±3% の室内
で乾燥を開始し、材齢約 6 か月まで
長さ変化と質量を測定した。

(2) 自己収縮試験

JCI の（仮称）高流動コンクリート
の自己収縮試験方法[1] に準じて行
った。供試体の形状・寸法は図-1
に示す 10×10×40cm の角柱である。
ひずみの測定は、型枠中央に予め設
置した埋込み型ひずみ計（長さ 100mm、
見掛けのヤング係数約 40N/mm²）を
用いて行い、コンクリートを打設後、
20±1℃ の室内において包装用フィ
ルムおよびビニールで供試体を封か
んした後、直ちに測定を開始し材齢

表-1 使用材料と物性

項 目	使 用 材 料（記号）	物 性
粉 体	普通ポルトランドセメント(C)	比重 3.16 フレッシュ値 3300cm ² /g
	高炉スラグ微粉末(BS)	比重 2.89 フレッシュ値 6100cm ² /g
	フライアッシュ(FA)	比重 2.11 フレッシュ値 4210cm ² /g
	石灰石粉(LS)	比重 2.67 フレッシュ値 2100cm ² /g
細骨材	大井川産川砂(S)	表乾比重 2.62 実積率 70.0%
粗骨材	秩父産硬質砂岩碎石(G)	表乾比重 2.69 実積率 58.8%
混和剤	分離低減剤(V)	セルロースエーテル系
	高性能AE減水剤(SP)	ポリカルボン酸系

表-2 コンクリートの割合

割合 No.	W/P (%)	目 標 スランパ (cm)	粗骨材 かき容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)							V W×% C×%	SP
				W	C	BS	FA	LS	S	G		
1	35	スランパ フロー 65	0.5	170	486	—	—	—	883	—	—	1.40
2	35				—	146	—	—	870	—	—	1.20
3	35				340	—	146	—	823	791	—	1.25
4	35				—	—	—	146	859	—	—	1.10
5	42				405	—	—	—	951	—	0.20	1.50
6	53				321	—	—	—	1019	—	0.40	1.50
7	27	23	0.6	175	630	—	—	—	650	—	—	1.13
8	35	21			486	—	—	—	728	950	—	0.75
9	60	18			292	—	—	—	878	—	—	0.25

表-3 コンクリートの物性

調 合 No.	スラ ンパ *1 (cm)	スラ ンパ *2 フロー (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	圧縮強度		断壊性係数		割裂引張強度		
					(N/mm ²)		(×10 ⁻⁴ N/mm ²)		(N/mm ²)		
					7 日	28 日	7 日	28 日	7 日	14 日	28 日
1	27.0	66.5	4.4	20.0	58.7	72.4	3.30	3.36	4.29	4.47	4.15
2	25.5	61.0	4.8	19.0	49.0	80.1	3.02	3.59	4.33	4.37	5.19
3	27.0	66.0	3.8	20.0	45.5	68.3	2.93	3.09	3.31	3.80	4.69
4	26.5	60.0	4.2	20.0	42.7	59.3	3.06	3.14	3.04	3.90	4.31
5	27.0	64.0	4.7	20.0	44.0	61.5	3.22	3.30	3.30	3.97	4.25
6	26.5	64.0	4.9	20.0	30.0	48.7	2.79	2.83	2.79	3.30	3.44
7	22.5	38.0	4.2	21.0	72.9	86.9	3.59	3.59	5.36	4.67	4.72
8	20.0	30.5	3.2	20.5	58.0	72.1	3.51	3.55	3.95	4.88	4.77
9	16.0	27.5	4.0	20.0	27.2	41.2	2.89	2.94	2.59	3.36	3.79

注) 試験方法

*1: コンクリートを 3 層に分けて詰め、各層 5 回突き棒で締固め

*2: コンクリートを 3 層に分けて詰め、各層 10 回突き棒で締固め

*3: 圧縮強度試験時の 1/3 の応力時の割線係数

*4: φ10×20cm 供試体による

31日まで行った。本論文ではこの材齢までの測定値を自己収縮として扱っている。その後、型枠を脱型して、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 3\%$ の室内において、引き続き材齢約6カ月まで自己収縮試験終了後の乾燥による収縮ひずみを測定した。

(3) 収縮ひび割れ試験

JIS 原案の乾燥収縮ひび割れ試験方法[3]に準じて行った。予めひずみゲージ(長さ6mm)を貼付けた拘束器具にコンクリートを打込んでひび割れ供試体とした。ひび割れ供試体を図-2に示す。高流動コンクリートのひび割れ供試体の作製は、コンクリートを型枠に2層に分けて詰め、各層40回突き棒で締固めた。測定はコンクリート打設直後からひび割れ発生まで行った。型枠の脱型は材齢7日とし、その間の養生は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の室内で封かん養生とした。また、自由収縮の測定に用いた供試体の形状・寸法は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱であり、養生はひび割れ供試体と同一とし、材齢7日に型枠を脱型した後、基長と質量を測定した。ひずみの測定は、JIS A 1129に準じてコンタクトゲージ方法(検長200mm, 精度 $1/1000\text{mm}$)で行った。自由収縮の測定は材齢約6カ月まで行った。いずれの供試体も乾燥収縮試験と同一の室内で測定を行った。

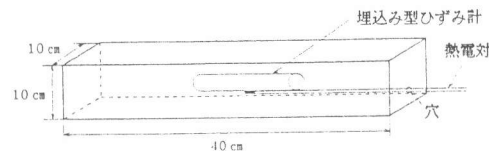


図-1 自己収縮測定用供試体

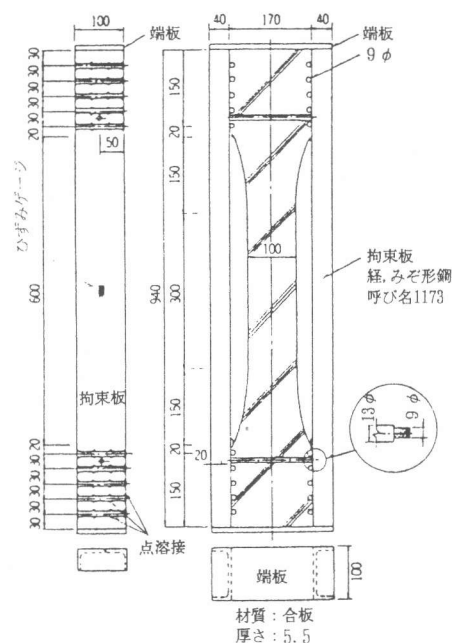


図-2 ひび割れ供試体

3. 実験結果および考察

硬化コンクリートの力学的性質は表-3に示した。

3. 1 乾燥収縮率

図-3に、水粉体比と保存期間26週における乾燥収縮率の関係を示す。普通セメントのみを用いた高流動コンクリートの乾燥収縮率は、通常のコンクリートと比較して水粉体比が小さい場合には差がないものの、大きい場合には大きい結果となった。また、普通セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した場合にはやや小さくなるのに対して、フライアッシュや石灰石粉で置換した場合には逆にやや大きい結果となった。この理由として、高炉スラグ微粉末を置換したコンクリートは、他のものと比較して圧縮強度と静弾性係数が大きく、緻密であることが考えられる。

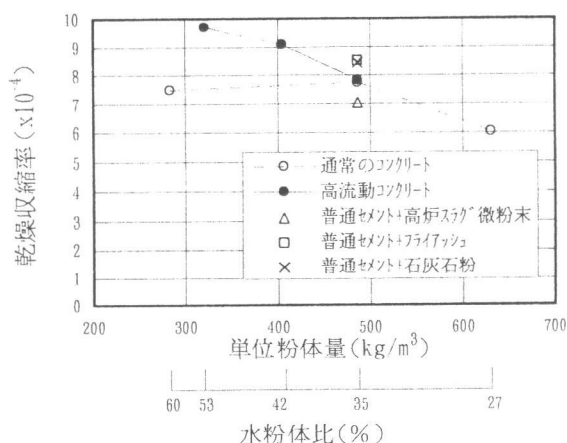


図-3 水粉体比と乾燥収縮率の関係

図-4に、質量減少率と乾燥収縮率の関係を
示す。高流動コンクリートの乾燥収縮率は、
質量減少率が大きくなると大きくなる傾向が
ある。また、フライアッシュや石灰石粉で置
換した場合には質量減少率が大きく、これら
の粉体には結合材としての効果が少ないこと
がわかる。

3. 2 自己収縮率と試験終了後の乾燥 による収縮率

図-5に、水粉体比と材齢28日における自
己収縮率の関係を示す。高流動コンクリート
および通常のコンクリートのいずれも粉体量
が多くなるほど自己収縮率が大きくなる傾向
がみられるが、混和材で置換したものは混和
材の種類により差が認められ、フライアッシ
ュや石灰石粉の場合には約100 μ と小さい値
である。

図-6に自己収縮試験と試験終了後の乾燥
による収縮率の経時変化を示す。この図から
自己収縮率は材齢4週でほぼ一定となってい
るが、その後の乾燥によってさらに収縮し、
材齢約200日ではほぼ一定となることがわかる。

図-7に自己収縮率と試験終了後の乾燥に
よる収縮率との関係を示す。自己収縮率が小
さいほどその後の乾燥による収縮率が高い
傾向が認められた。また、自己
収縮率と比較して乾燥による収
縮率の方が大きいことがわかる。

3. 3 ひび割れ発生日数、 自由収縮率

図-8に、水粉体比とひび割れ
発生日数の関係を示す。ひび割れ
発生は高流動コンクリートおよ
び通常のコンクリートのいずれ
も水粉体比が小さくなるほど早
く、同一の水粉体比の場合には、
高流動コンクリートの方がやや
早い傾向が認められた。しかし、
石灰石粉で置換した場合には
ひび割れ発生は遅くなった。

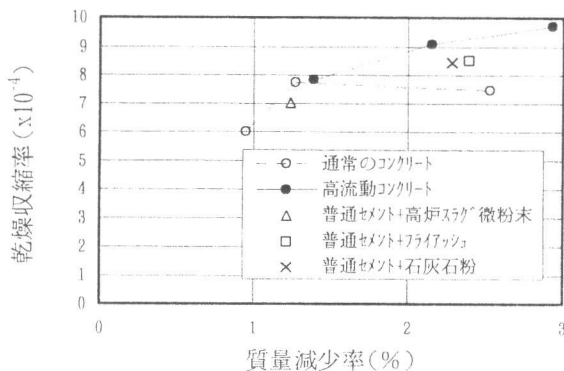


図-4 質量減少率と乾燥収縮率の関係

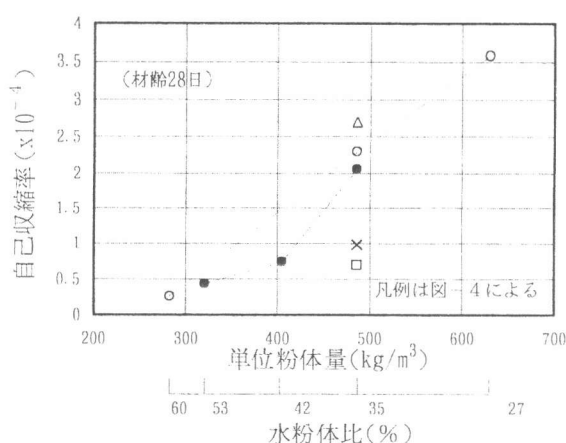


図-5 水粉体比と自己収縮率ひずみの関係

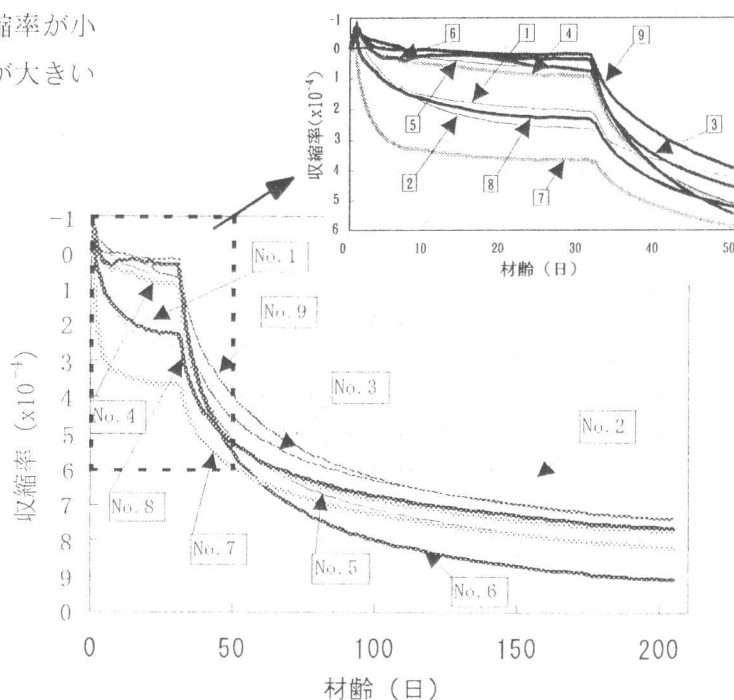


図-6 収縮率の経時変化

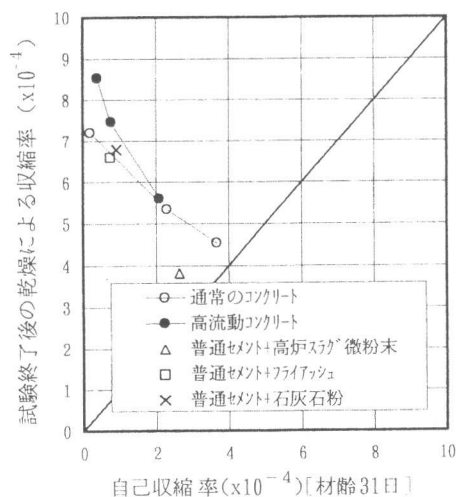


図-7 自己収縮率と試験終了後の乾燥による収縮率との関係

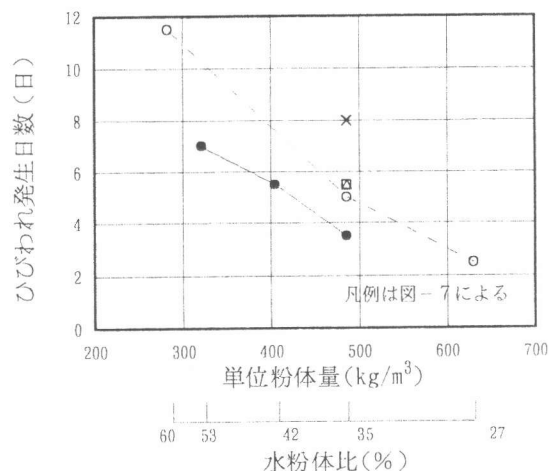


図-8 ひび割れ発生日数に及ぼす水粉体比の影響

図-9に、全ひずみに対する養生期間中のひずみの比とひびわれ発生日数の関係を示す。全ひずみに対する養生期間中のひずみの割合が大きいほどひび割れ発生日数が早い傾向が認められる。ここで、全ひずみとは、コンクリート打設からひび割れ発生時までの拘束器具のひずみ、すなわち養生期間中の収縮ひずみと乾燥開始からひび割れ発生までの収縮ひずみの合計のことである。このことから、養生期間中のひずみがひび割れ発生に大きく寄与していると考えられる。なお、ひび割れ供試体が発生したひび割れ発生直前の応力を拘束器具のひずみから算出して、ひび割れ発生日数に応じて直線補間して求めた割裂引張強度との比を求めると、いずれのコンクリートも50~60%程度であり、本試験におけるひび割れ発生条件には強度比の影響は少ないものと思われる。

また、図-10に示すように、養生期間中の拘束器具のひずみと材齢7日までの自己収縮率の間には高い相関性が認められ、拘束器具の収縮ひずみの原因は自己収縮によるものであると考えられる。このため、自己収縮率の大小は、ひび割れの発生のしやすさに大きく影響していると考えられる。

保存期間26週における自由収縮率は、乾燥収縮率に比べて50~130 μ 小さく、質量減少率も0.15から0.7% 小さい値であった。しかし、自由収縮試験の単位質量減少率あたりの収縮率は乾燥収縮試験のそれよりも若干大きかった。

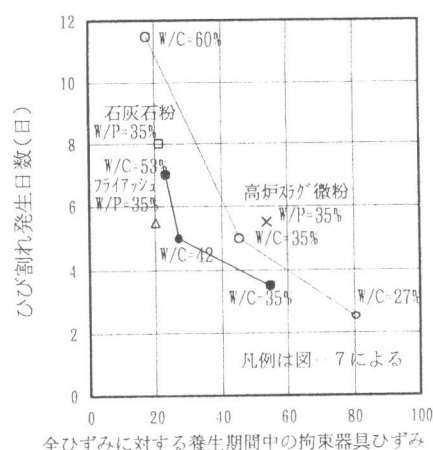


図-9 全ひずみに対する養生期間中の拘束器具ひずみとひび割れ発生日数との関係

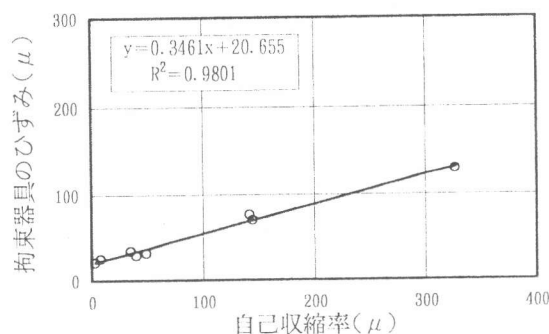


図-10 自己収縮率(材齢7日)と養生期間中の拘束器具のひずみの関係

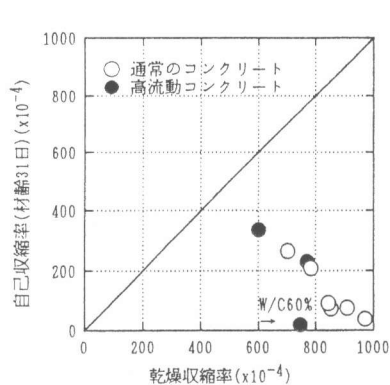


図-11 試験結果の関係①

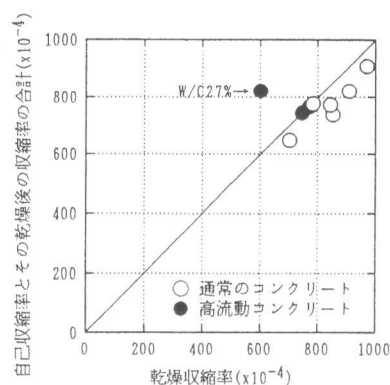


図-12 試験結果の関係②

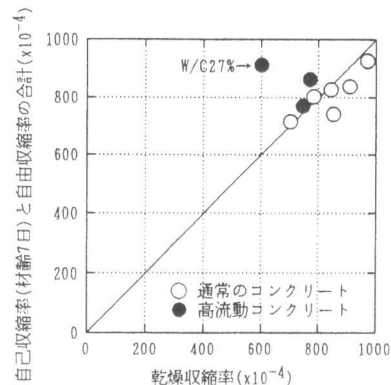


図-13 試験結果の関係③

3. 4 各種収縮率の関係

乾燥収縮率と自己収縮率の関係を図-11に示す。水セメント比60%の通常のコンクリートを除くと、自己収縮率と乾燥収縮率の間には負の相関があり、乾燥収縮率が高いものは自己収縮率が小さいことがわかる。一方、図-12によると、乾燥収縮率は水セメント比27%の通常のコンクリートを除くと、自己収縮率とその後の乾燥による収縮率の合計とほぼ同じ値である。

図-13では、乾燥収縮率と材齢7日までの自己収縮率に自由収縮率を合計したものとを比較した。後者は一般の施工条件に近いものと考えられる。これより、水セメント比27%の通常のコンクリートを除くと、両者はほぼ等しいことがわかる。

以上のことから、本実験で対象とした高流動コンクリートについては、JISによる乾燥収縮試験方法で収縮量の絶対評価が可能であると考えられる。

4. まとめ

本実験の範囲で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 高流動コンクリートは、通常のコンクリートと同様に水粉体比が小さくなるほど自己収縮率は大きくなり、ひび割れ発生日数は早くなる。
- (2) 高流動コンクリートは、セメントの一部を石灰石粉に置換することにより、ひび割れ発生日数が遅れる。
- (3) 自己収縮率と乾燥収縮率の間には負の相関がある。
- (4) 自己収縮率と比較してその後の乾燥による収縮率のほうが大きい。
- (5) 自己収縮率とその後の乾燥による収縮率の合計は、乾燥収縮率とほぼ同じである。

なお、本論文は、(社)日本建築学会・高流動コンクリート研究小委員会（主査：友澤史紀東京大学教授）の活動の一環として、力学特性・耐久性ワーキンググループ（主査：川瀬清孝新潟大学教授）により実施された研究の一部をとりまとめたものである。

参考文献

- [1]「超流動コンクリート研究委員会 報告書Ⅱ」：日本コンクリート工学協会 1994.5
- [2]飛坂基夫，真真孝次，榊田佳寛，安田正雪，神田彰久：コンクリートのひび割れ発生に及ぼす水セメント比の影響，セメント技術年報 第44巻，pp. 782～787，1990
- [3]ひび割れ研究会「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」セメント・コンクリート，No.536，pp. 66～68. 1991