

## 論文 超高強度コンクリート用高性能減水剤のフレッシュ性状改善効果

菅俣 匠<sup>\*1</sup>・杉山知巳<sup>\*2</sup>・梅沢健一<sup>\*3</sup>・岡沢 智<sup>\*4</sup>

**要旨:**水結合材比 20%以下の超高強度コンクリートを対象としたポリカルボン酸系高性能減水剤を開発し、コンクリートに添加した場合のフレッシュ性状、特に粘性および静置状態から外力を与えてコンクリートを流動させるのに要する力の相違をチキソトロピー性の違いと定義し、これらの低減効果について検討を行った。従来のポリマーに新たなモノマーを結合させたポリカルボン酸系高性能減水剤は、粘性低減に優れることを示した。また、回転粘度計によるセメントペーストのヒステリシスループから得られる面積をチキソトロピー性の指標として、この低減にも優れることを定量的に表した。

**キーワード:** 超高強度コンクリート, 高性能減水剤, 粘性低減効果, チキソトロピー, ヒステリシスループ

## 1. はじめに

最近、設計基準強度で  $100\text{N/mm}^2$  を有する高強度コンクリートの適用事例が増加している<sup>1)</sup>。高強度コンクリートの適用は、柱の断面積の縮小による居住面積の拡大、弾性領域の拡大による地震でのひび割れ発生の抑制および高耐久コンクリートのニーズへの適合等の利点が挙げられ、今後さらに、水結合材比が 20%以下で設計基準強度が  $100\text{N/mm}^2$  を超える超高強度コンクリートの利用頻度も増える可能性が高い。このようなコンクリートでは、施工性を考慮した場合、フレッシュ時において高い変形性を有することはもちろんのこと、いかに粘性を低減させるかが重要になると考えられる。筆者らは、水結合材比が 20%以下でも練上り時から打込み終了時までコンクリートに高い変形性の付与と粘性の低減が可能な、ポリカルボン酸系高性能減水剤(以下、SPN と称す)を開発した。本文では、この SPN を使用した超高強度コンクリートの粘性を低減する効果(以下、粘性低減効果と称する)を従来のポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(以下、SPC と称す)と比較するとともに、静置状態から外力を与えてコンクリートを流動させ

るのに要する力の相違をチキソトロピー性の違いと定義し、回転粘度計を用いたセメントペーストのヒステリシスループから、SPC よりもチキソトロピー性の低減にも優れることを定量的に表した。

## 2. コンクリート試験概要

コンクリートの配合は、単位水量  $150\text{kg/m}^3$ 、単位粗骨材量  $861\text{kg/m}^3$ 、設定空気量 2.0%を一定として、水セメント比(以下 W/C と称す)で 25, 22, 20, 18, 16, 14%を取り上げた。高性能減水剤 SPC は、ポリアクリル酸にポリエチレンオキサイドのグラフト鎖がついたポリカルボン酸ポリマーを主成分とするものである。また、SPN は SPC よりもさらにコンクリートに高変形性の付与と粘性低減が可能となるよう、新たなモノマーをポリマー中に結合したものである。セメントはシリカフェームセメント(密度  $3.08\text{g/cm}^3$ 、ブレン  $5600\text{cm}^2/\text{g}$ )を使用し、細・粗骨材は大井川水系陸砂(表乾密度  $2.57\text{g/cm}^3$ 、吸水率 2.15%、実積率 68.9%、F.M.2.76)および青梅産硬質砂岩碎石(表乾密度  $2.65\text{g/cm}^3$ 、吸水率 0.59%、実積率 61.1%、F.M.6.74、M.S.20mm)

\*1 (株)エヌエムビー 中央研究所 副主任研究員 博士(工学) (正会員)

\*2 (株)エヌエムビー 中央研究所 副主任研究員 (正会員)

\*3 (株)エヌエムビー 中央研究所 主席研究員 (正会員)

\*4 (株)エヌエムビー 中央研究所 所長 (正会員)

表-1 コンクリートのフレッシュ性状

W/C (%)	SP 種類	SP 添加量 (Cx%)	スランプフロー (cm)/T50 (秒)				L30/L50 (秒)		空気量 (%)
			経過時間 (分)		経過時間 (分)		経過時間 (分)		
			0	30	60	90	0	60	
25	SPC	1.2	68.0 5.3	70.0 5.6	64.0 9.4	60.0 15.7	2.6 8.0	4.9 13.3	1.8
	SPN	1.1	70.0 4.5	68.0 5.3	64.0 7.1	62.0 12.4	2.1 6.8	3.4 10.6	1.6
22	SPC	1.4	67.0 7.9	70.0 8.1	65.5 12.3	60.5 18.9	3.2 10.6	6.2 15.3	1.7
	SPN	1.2	69.5 6.8	70.0 7.5	68.0 8.8	64.0 12.2	2.5 8.1	3.5 10.8	1.8
20	SPC	1.8	66.0 9.5	68.5 10.8	66.0 13.7	63.0 16.8	4.6 17.0	7.3 24.1	2.0
	SPN	1.3	68.0 8.0	67.5 8.9	68.5 10.2	67.0 11.7	2.9 9.1	3.6 11.6	1.8
18	SPC	2.2	64.0 13.0	68.5 14.5	67.5 17.6	65.0 21.9	6.4 21.5	10.1 30.1	1.9
	SPN	1.5	68.0 9.5	69.0 10.5	68.0 12.7	68.0 14.2	3.7 12.0	5.1 17.0	1.8
16	SPC	3.5	63.0 29.8	60.0 33.5	-	-	-	-	2.3
	SPN	2.2	69.0 18.6	69.5 21.2	-	-	-	-	1.9
14	SPC	4.5	52.0 49.8	45.0	-	-	-	-	2.2
	SPN	3.0	70.0 25.1	70.0 26.2	-	-	-	-	2.0

を使用した。

練混ぜは、強制二軸ミキサ(公称容量 55 l)を用いて、細骨材とセメント(10 秒)、水と SP(60 秒、ただし、W/C=16%は 120 秒、W/C=14%は 180 秒)、粗骨材(90 秒)の順で行い、練上り後に各測定を行った。練混ぜ量は 35 lとした。コンクリートの変形性の指標としてスランプフローを、また、粘性の指標として 50cm スランプフロー到達時間(以下 T50 と称す)、L 形フロー試験の 30cm および 50cm 到達時間(以下 L30, L50 と称す)を測定した。L 形フロー試験の測定位置は、日本建築学会高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説および土木学会規準 JSCE-F 514-1999 を参考にした。W/C=25~18%は練上り後 90 分まで経時変化の測定も行った。経時変化の測定は、練り板上にコンクリートを静置し、測定前にスコップで切り返してから行った。なお、スランプフローの目標範囲は 65±5cm、試験温度は 20℃とした。

### 3. コンクリート試験結果

#### 3.1 コンクリートの変形性に及ぼす効果

フレッシュ性状の試験結果を表-1に、W/C と SP 添加量の関係を図-1に示す。W/C=25%

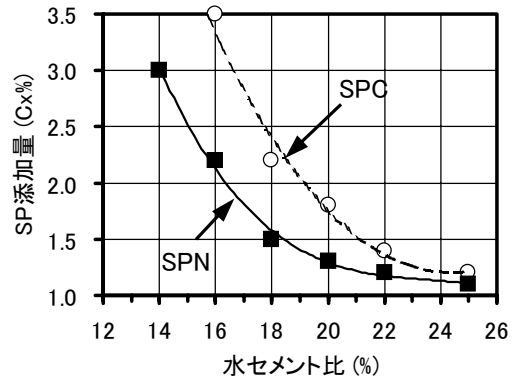


図-1 SP 添加量の比較

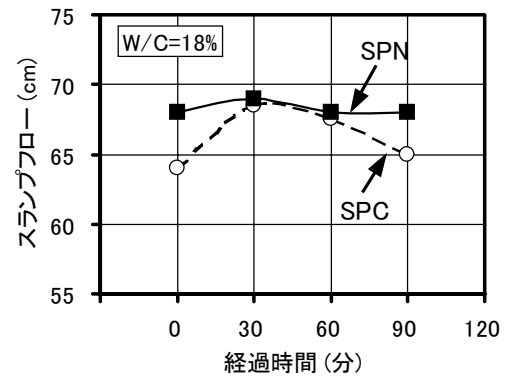


図-2 スランプフローの経時変化

では所要のスランプフローを得る添加量に差は認められないが、その他の W/C では SPN の方が少なく、かつ、W/C の低下に伴って添加量の差が大きくなる傾向にあった。なお、W/C=14%では、SPC を 4.5%以上添加してもスランプフローが 50cm 程度となり、分散効果が頭打ちになる傾向を示したのに対し、SPN は 3.0%で目標とするスランプフローが得られたことから、SPN は SPC に比べて高い分散性を有するものと考えられる。

スランプフローの経時変化のうち W/C=18%の結果を図-2に示す。表-1より、いずれの SP も各水セメント比で目標とするスランプフローの範囲を 90 分間にわたって満足した。ただし、W/C=25%~18%では、SPC は練上りから 30 分後にやや増加した後、緩やかに低下する傾向を示すのに対して、SPN は練上り後 90 分までほぼ一定値を示した。SPN は SPC に比べて、時間が経過してもスランプフローは変わりにくく、安定した経時変化を示した。

#### 3.2 コンクリートの粘性に及ぼす効果

図-3に W/C と粘性の指標として測定した T50 の関係を示す。W/C=25%~20%では、SPC と SPN に大きな粘性の差は認められないが、W/C=18%以下では SPN の方が T50 は小さくて粘性が低く、さらに粘性の差は、W/C の低下に伴い大きくなる傾向にあった。

T50 の経時変化のうち W/C=18%の結果を図-4に示す。図中の数字は練上り直後に対する T50 の増加率である。いずれの SP も各 W/C で時間が経過すると T50 が増加し、コンクリートの粘性が徐々に大きくなる傾向にある。ただし、SPN は SPC に比べて各経過時間の T50 が小さく、かつ、0 分に対する T50 の増加率も小さい。この傾向は、同じく粘性の指標として測定した L30 および L50 でも同様であった。W/C=20%以下のコンクリートを用いて施工する際に重要なことは、いかにコンクリートの粘性を低減するかであると考えられ、SPN は粘性低減効果を練上り時のみならず、時間が経過しても保持できる特長を有していると判断される。

なお、経時変化の測定前に静置したコンクリートをスコップで切り返す際、SPN の方が加える力は少なく済む傾向にあることが認められた。静置状態にあるコンクリートを流動させるのに要する力が異なるのは、コンクリートの「しまり」方が異なるためである。

本研究では、これをチキソトロピー性の違いと定義し、回転粘度計を用いたヒステリシスループから、SP 間の定量的な比較を試みた。

#### 4. チキソトロピー性に及ぼす効果

##### 4.1 コンクリートへのチキソトロピー性の適用

チキソトロピーは、ずり変形を与えたときに生じる構造の破壊と回復の不均衡によって起こる時間依存性の現象であり、懸濁液ではベントナイトなどの粘土鉱物や塗料などでその存在が知られている<sup>2)</sup>。ずり変形によって破壊された構造は一定時間経過しないと回復しないので、図-5に示すようなせん断力とせん断速度の関係では、回転粘度計の上昇曲線(回転数を徐々に

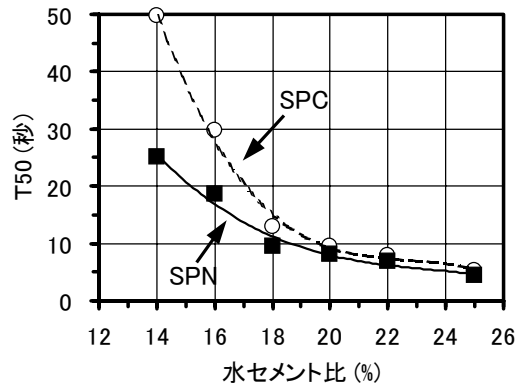


図-3 コンクリートの粘性の比較

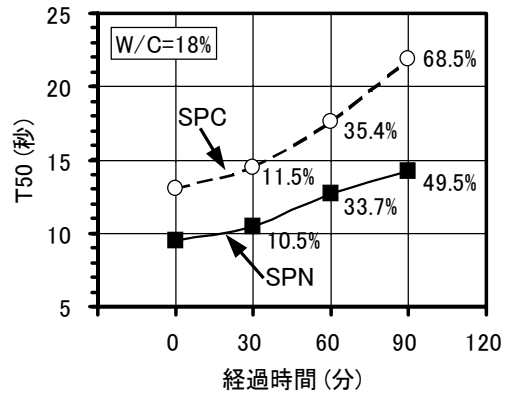


図-4 T50 の経時変化

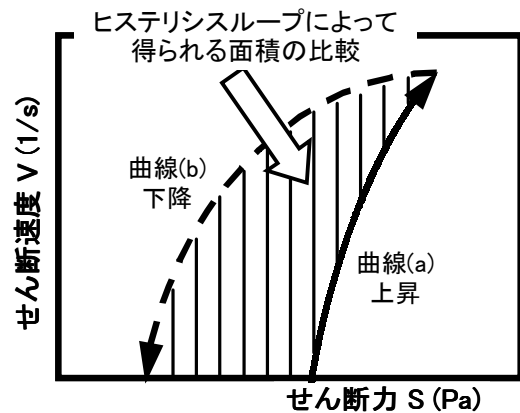


図-5 回転粘度計によるヒステリシスループ

増加した場合)と下降曲線(回転数を徐々に低下した場合)から得られるヒステリシスループを描く。ヒステリシスループで描かれる面積が小さいほど、静置状態から流動させるのに要する外力が小さくて済み、チキソトロピー性が小さいと判断できる。上昇および下降の近似曲線と X 軸で囲まれる領域の面積を比較することで、感覚による定性的な評価から定量化が可能になると考えた。

すなわち、チキソトロピーの考えを本研究での「しまり」の現象に当てはめると、練り上が

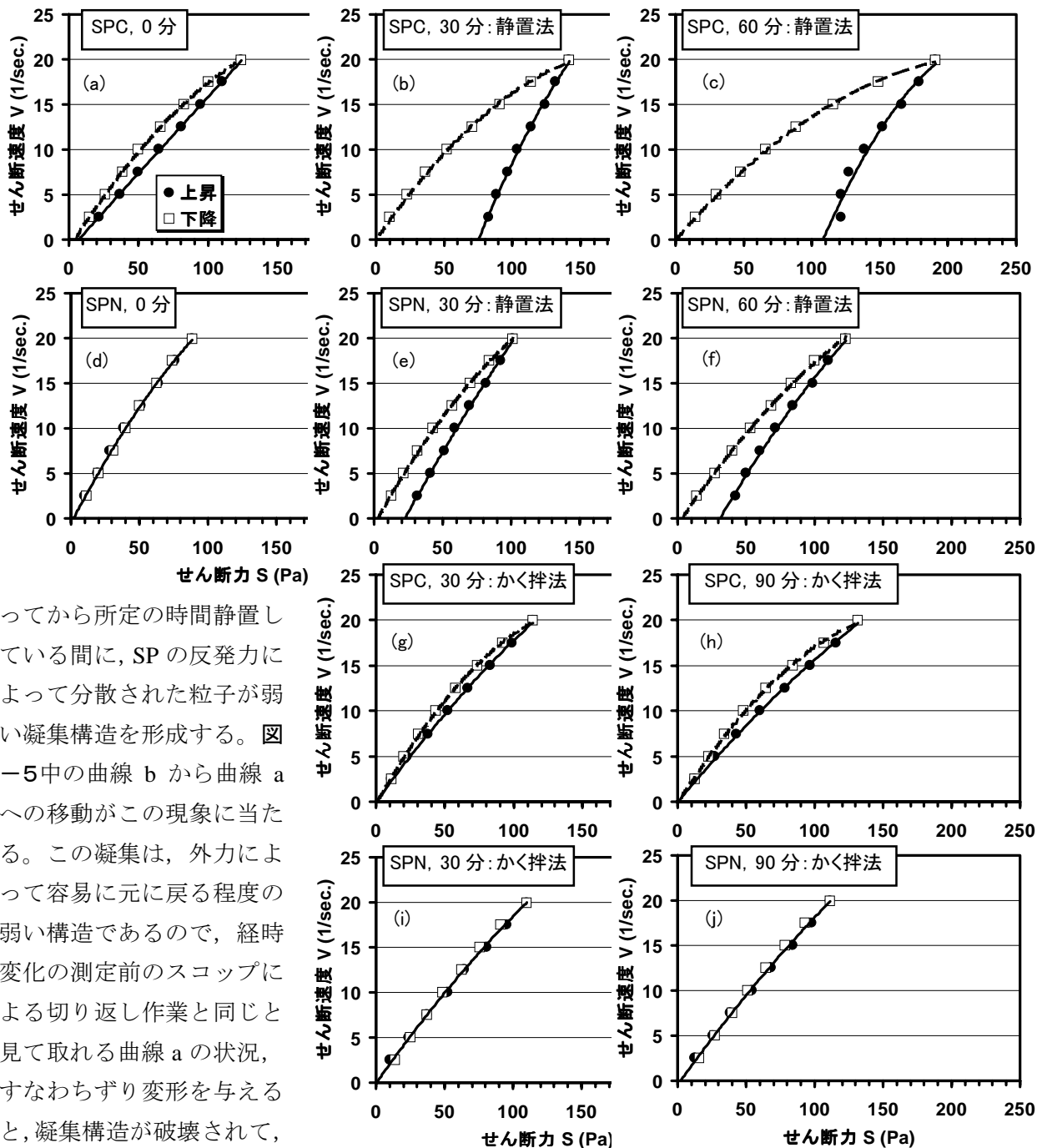


図-6 ヒステリシスループの比較

ってから所定の時間静置している間に、SPの反発力によって分散された粒子が弱い凝集構造を形成する。図-5中の曲線bから曲線aへの移動がこの現象に当たる。この凝集は、外力によって容易に元に戻る程度の弱い構造であるので、経時変化の測定前のスコープによる切り返し作業と同じと見て取れる曲線aの状況、すなわちずり変形を与えると、凝集構造が破壊されて、曲線bでは同じずり変形を与えるのに要する外力が小さくて済むのである。

本研究では、回転粘度計によるレオロジー的性質の測定に際し、ばらつきを抑制する目的で、セメントペースト(W/C=18%)によって両SPのチキソトロピー性に及ぼす効果を検討した。

#### 4.2 チキソトロピーの測定方法

使用した回転粘度計は、外筒回転式のもので、外筒半径 35mm、内筒半径 14mm、外筒深さ 100mm、内筒の浸液長 70mm である。回転数は

10rpm から 80rpm まで 10rpm 毎に 20 秒間ずつ保持させて上昇後、同様に 10rpm まで下降させ、各回転数の内筒にかかるトルクを求めた。試料の測定条件は、練上り時から外筒内にそのまま試料を 30 分置いたもの、および、この測定後さらに 60 分置いたもの(すなわち、練上りから 90 分経過したもの)とした(以下、静置法と称す)。得られたせん断力とせん断速度の関係から上昇・下降の近似曲線をそれぞれ求め、面積を算

出した。ただし、静置状態の単純な面積の比較では、同じ回転数でも SP によってせん断力が相違する、すなわち塑性粘度が異なるために、自ずと面積も相違することになる。そこで本研究では、静置法

表-2 セメントペーストの各測定結果

SPの種類および添加量	測定試料の状態	図-6に対応する図	経過時間(分)	ペーストフロー(mm)	V漏斗流下時間(秒)	下降時の塑性粘度(Pa·s)	経路	近似式 $V = aS^2 + bS + c$ (V:せん断速度, S:せん断力)			R <sup>2</sup> (寄与率)	各面積(Pa/s)	面積(静置法-かく拌法)(Pa/s)	
								a	b	c				
SPC Cx2.2 %	静置法	(a)	0	224	6.15	5.73	上昇 下降	-2.077E-05 -6.157E-04	0.173 0.245	-1.208 -0.976	0.999 0.999	206	-	
		(b)	30	222	7.70	6.39	上昇 下降	-1.113E-03 -5.613E-04	0.538 0.219	-34.126 0	0.998 0.998	954	841	
		(c)	60	222	8.82	8.39	上昇 下降	-1.317E-03 -3.609E-04	0.630 0.173	-52.706 0	0.974 0.999	1375	1214	
	かく拌法	(g)	30	-	-	-	上昇 下降	-3.077E-04 -7.817E-04	0.208 0.265	0 -0.164	0.999 0.999	113	-	
		(h)	90	-	-	-	上昇 下降	-2.324E-04 -6.476E-04	0.179 0.236	0 -0.069	0.998 0.999	161	-	
	SPN Cx1.5 %	静置法	(d)	0	215	5.82	4.24	統一	-6.992E-04	0.292	-0.533	0.999	0	-
			(e)	30	214	6.74	4.79	上昇 下降	-3.370E-04 -6.780E-04	0.293 0.271	-6.437 -0.629	0.999 0.999	290	290
			(f)	60	214	7.23	5.76	上昇 下降	-5.185E-04 -4.469E-04	0.295 0.224	-8.634 -0.648	0.998 0.999	363	363
かく拌法		(i)	30	-	-	-	統一	-2.931E-04	0.214	-0.057	0.997	0	-	
		(j)	90	-	-	-	統一	-2.511E-04	0.210	-0.420	0.997	0	-	

の面積から測定前にミキサで10秒間(低速)練り混ぜて凝集構造を破壊した場合の面積(以下、かく拌法と称す)との差で、チキソトロピー性を比較した。なお、近似曲線は、式(1)に示すようなハーシェルバークレーのべき乗で表されることが多いが<sup>3)</sup>、ここでは計算の簡素化のため、式(2)のような2次関数式とした。ただし、2次関数式で表した場合でも相関係数が非常に高いことを確認しており、面積の計算には影響がないと考えられる。

$$V = \mu S^n + S_0 \quad (1)$$

$$V = a S^2 + b S + c \quad (2)$$

ここに、V:せん断速度(1/s)、 $\mu$ :非ニュートン係数、S:せん断力(Pa)、n:粘性係数、 $S_0$ :降伏値、a、b、c:係数

また、表-1のコンクリート試験結果との整合性を確認する目的で、セメントペーストの変形性は JASS 15T<sup>4)</sup>に規定されるフローコーンを、粘性はV漏斗試験器<sup>5)</sup>を用いて、練上り時および静置状態で30分、90分経過後にミキサで10秒間(低速)練り混ぜた試料、すなわち、かく拌法と同じ方法で、ペーストフロー値と漏斗の流下時間を測定した。

#### 4.3 チキソトロピーの測定結果

各回転数の5秒経過時のトルクから近似式を

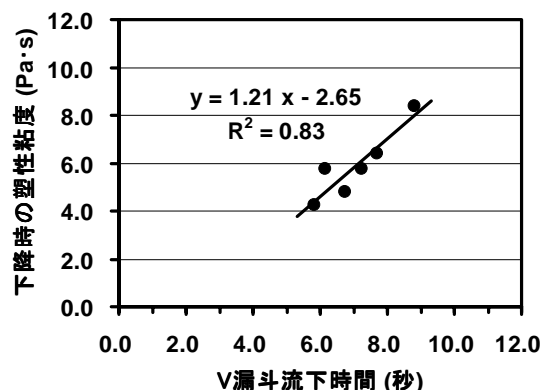


図-7 V漏斗流下時間と下降時の塑性粘度の比較

求め、ヒステリシスループを描いた結果を図-6に、面積の計算結果を表-2にそれぞれ示す。ただし、式(2)の近似式のうち、降伏値がわずかに計算上、負の値を取る場合は、便宜上、降伏値を0として扱った。

練上り後30分およびさらにその後60分静置することにより(図-6(b, c, e, f)), いずれのSPを用いた場合も練上り直後に比べてヒステリシスループから得られる面積は増大した。一方、測定前にミキサで練り混ぜて静置時に生じた凝集構造を取り除くと(図-6(g, h, i, j)), いずれのSPも練上り時と同程度の面積で、チキソトロピー性は時間が経過しただけではほとんど変わらないことが認められた。SPNは図-6(d, i, j)のように、上昇・下降曲線がほぼ同一経路を通る

ダイラタントな挙動を示したのに対して、SPCは図-6(a, g, h)のように、測定前にミキサで攪拌しても上昇・下降曲線が一致せず、瞬時にチキソトロピー性が生じやすいことが認められた。

静置法による面積からかく拌法による面積を差し引いてチキソトロピー性を比較すると、30分およびさらにその後60分静置した場合、SPCがそれぞれ841, 1214(Pa/s)であったのに対して、SPNは290, 363(Pa/s)でSPCに比べて小さく、おおむね1/3程度まで低減されることが明らかとなった。この傾向は、コンクリートでの定性的な感覚と一致するものである。同様の方法でチキソトロピー性の評価を行っている報告もあり<sup>6)</sup>、本手法を用いることで、静置することによって生じるコンクリートの「しまり」の度合いを定量的に評価することが可能と考えられる。

なお、ミキサで練り混ぜてから測定したV漏斗流下時間と30分および60分静置した場合の下降曲線から求めた塑性粘度の関係は、図-7に示す通り、高い相関が認められた。すなわち、回転数を80rpmまで上昇させて凝集構造を取り除いた状態から測定される下降曲線のレオロジー的性質は、コンクリートでみれば、本研究の測定前にスコップで十分に切り返した状態で測定されるT50やL30, L50に相当するものと考えられる。

以上のことから、コンクリートがアジテートされている範囲内では、打込みのし易さは粘性の影響が大きい、コンクリートを一旦静置させた後に再び流動させる場合には、粘性に加えてチキソトロピー性の影響も考慮する必要がある。チキソトロピー性の低減は、バケットによる打込み作業、ポンプ打設では配管内のコンクリート再圧送時の圧力負荷、さらには均し作業の軽減等につながる。チキソトロピー性を低減する効果は、高性能減水剤の有する新たな特性の一つになると考えられる。今後は、チキソトロピー性の低減のメカニズムについて、物理的・化学的なアプローチから検討する予定であ

る。

## 5. まとめ

水結合材比20%以下の超高強度コンクリートを対象としたポリカルボン酸系の高性能減水剤を開発し、コンクリートのフレッシュ性状、特に粘性およびチキソトロピー性の低減効果に関して、従来の高性能減水剤を使用した場合と比較した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 従来の高性能減水剤と比較してさらに高い分散性を有し、かつ、スランプフローの経時変化が小さいことが認められた。
- (2) 従来の高性能減水剤と比較して、スランプフローの50cm到達時間で表した粘性を練上りのみならず、時間が経過しても小さい値に保持できることが認められた。
- (3) 回転粘度計によるセメントペーストのヒステリシスループから得られる面積をチキソトロピー性の指標とすると、従来の高性能減水剤に比べて、静置状態で発生するチキソトロピー性の低減にも優れることが認められた。
- (4) チキソトロピー性を低減する効果は、高性能減水剤の有する新たな特性の一つになると考えられた。

## 参考文献

- 1) 児玉好正：高性能コンクリートの施工実績調査，月刊生コンクリート，Vol.19, No.4, pp.59-64, 1999.4
- 2) 小野木 重治：レオロジー要論，槇書店，1968
- 3) 川崎種一：回転粘度計による粘性測定の実際<改訂>，東機産業，2000.11
- 4) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 15 左官工事，日本建築学会，1998.1
- 5) 岡村 甫ほか：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993.9
- 6) 榎畑智之ほか：吹付け材料のチキソトロピー性簡易評価方法の適用性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.675-680, 1996