

論文 練混ぜ水の挙動がフレッシュコンクリートの流動性に及ぼす影響

馬場 勇介^{*1}・小野 広道^{*2}・笠井 哲郎^{*3}

要旨：本研究の目的は、練混ぜ直後および時間が経過した場合の、フレッシュコンクリートの流動性の変化に及ぼす水の影響を明らかにすることである。そこで、スランプロスおよびスランプロスが生じたものに所定水量を添加した場合のスランプの増大量を実測した。この両者の関係から、セメント粒子の分散・凝集形態が異なる場合の水の作用機構に関して検討を行った。その結果、フレッシュコンクリートの流動性に寄与する水の効果は、練混ぜ直後から時間の経過と共に減少する傾向にあり、さらに、静置とアジテートされたコンクリートでは、流動性に及ぼす水の作用機構が異なることが明らかとなった。

キーワード：練混ぜ水、単位水量、フレッシュコンクリート、スランプロス、ゼータ電位

1. はじめに

コンクリートのスランプロスは、フレッシュコンクリートの流動性が時間経過に伴い失われる現象である。この現象は、セメント粒子の水和反応に伴う化学的凝集¹⁾、およびセメント粒子の衝突に伴う物理的凝集²⁾が原因であるとされている。何れの場合にしても、セメント粒子の分散・凝集構造の変化は、同時にフレッシュコンクリート中で唯一連続体である練混ぜ水の分布状態を変化させるため、スランプロス等の流動性の経時変化は、その凝集構造だけでなく、そこに作用する水の影響についても明らかにする必要があり。

フレッシュコンクリートの流動性に及ぼす、単位水量の影響に関しては、一般的には配合設計の考え方として、コンクリート標準示方書³⁾に示されている。普通コンクリートの場合、スランプを1cm増大させるためには、単位水量を1.2%増大させる必要があるとされている。しかし、このスランプ値と単位水量の関係は、練混ぜ時のより分散状態が安定している場合の関係であり、化学的・物理的凝集により初期の分散状態が変化し、スランプロスが生じたコンクリ

ートではこの考え方をそのまま適用できない可能性が大きい。

近年、問題視されているコンクリート構造物の早期劣化原因の一つとして、違法加水が挙げられるが、これはスランプロスが生じ施工性が劣るコンクリートに、ポンプ圧送性の要求性能を満たすべく違法に水を添加するものである。こうしたスランプロスが生じたコンクリートでは、上述したように、スランプを回復するための水量が、一般的に既知であるスランプ1cm=単位水量1.2%より多くなり、想定以上に耐久性が劣る可能性が推察される。

本研究では、練混ぜ水の挙動がフレッシュコンクリートの流動性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、上述した違法加水における練混ぜ後の加水の影響を一例として検討した。すなわち、練混ぜ直後および時間が経過した場合の、各々の時点での流動性に及ぼす水の影響を明らかにすることに主眼を置いた。そこで、スランプの経時変化を測定すると共に、スランプロスが生じたものに所定水量を添加した場合のスランプの増大量を実測した。この両者の関係から、分散・凝集形態が異なる場合の水の作

*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 修(工) (正会員)

*2 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*3 東海大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

種類	物性または主成分
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
細骨材	大井川産陸砂 密度：2.60g/cm ³ ，粗粒率：2.64
粗骨材	富士川産砕石 密度：2.70g/cm ³ ，最大寸法：20mm
混和剤	AE減水剤
	AE剤
	空気量調整剤

表-2 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
55.0	45.0	162	295	819	1040

表-3 実験の水準

記号	経時変化測定中の試料の状態	練混ぜ時の水量* (\hat{v} -s)	各経過時間における水量*			
			10分	30分	60分	
W152-0-0(152)	静置 および アジテート (2rpm)	152 (162-10)	152 (\hat{v} -sのまま)			
W152-60-10(162)			152 (\hat{v} -sのまま)		162 (\hat{v} -s152 + 10)	
W152-60-20(172)			152 (\hat{v} -sのまま)		172 (\hat{v} -s152 + 20)	
W152-30-10(162)			152 (\hat{v} -sのまま)	162 (\hat{v} -s152 + 10)		
W152-30-20(172)			152 (\hat{v} -sのまま)	172 (\hat{v} -s152 + 20)		
W152-10-10(162)			162 (\hat{v} -s152 + 10)			
W152-10-20(172)			172 (\hat{v} -s152 + 20)			
W162-0-0(162)			162 (示方配合)	162 (\hat{v} -sのまま)		
W162-60-10(172)				162 (\hat{v} -sのまま)		172 (\hat{v} -s162 + 10)
W162-30-10(172)				162 (\hat{v} -sのまま)	172 (\hat{v} -s162 + 10)	
W162-10-10(172)	172 (\hat{v} -s162 + 10)					
W172-0-0(172)	172 (162+10)	172 (\hat{v} -sのまま)				

*示方配合の単位水量は162kg/m³。152：示方配合より単位水量のみ10kg差し引いたもの（計算上の容積：990ℓ）。
172：示方配合に単位水量のみ10kg加えたもの（計算上の容積：1010ℓ）。

用機構に関し考察を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、混和剤はリグニンスルホン酸系の AE 減水剤を用いた。その他の使用材料は表-1 に示す通りである。

2.2 コンクリート実験

(1) コンクリートの配合および練混ぜ方法

コンクリートの示方配合は表-2 に示す通りである。単位水量は 162kg/m³とし、練混ぜ直後のスランプおよび空気量の目標値は12.0±1.0cm, 4.5±1.0%とした。また本研究では、フレッシュコンクリートの流動性に及ぼす水の影響を明らかにすることを目的としているため、練混ぜ時の単位水量を、示方配合から見かけ上 10kg/m³ 差引いた計量値 (162-10=152 kg/m³) のもの、10kg/m³ 加算した計量値 (162+10=172 kg/m³) で

練り混ぜたもの各々についても実施し、10kg/m³ の水量が練混ぜ時の流動性に及ぼす影響を実測した。(練混ぜ水以外の材料の計量値は示方配合の数値のままとしたため、実質的な容積は 1 m³ とならない。従って、各々の配合を示方配合で表記した場合、実際の単位水量とは一致しないが、本稿では便宜上 152, 172kg/m³ と表記した。) また、示方配合から見かけ上 10kg/m³ 差引いた計量値 (152kg/m³) で練り混ぜたものについては、経時 10, 30, 60 分後のそれぞれの時間においてスランプを測定後、10kg/m³ 加水 (この時点で示方配合の 162kg/m³ に戻る) し、加水前後のスランプの差から、各経過時間における 10kg/m³ 加水の影響を実測した。さらに 10kg/m³ 加水した場合 (172kg/m³) についても実施した。その他の実験の水準は表-3 に示す通りである。表中の記号は、「練混ぜ時の単位水量 - 加水を行う時間 - 加水の量 (最終的な単位水量)」とした。コンクリートの練混ぜには、強制式パン型ミキサ (公

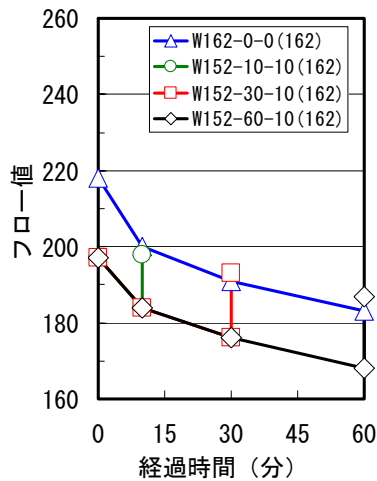


図-1 フローの経時変化と加水の効果

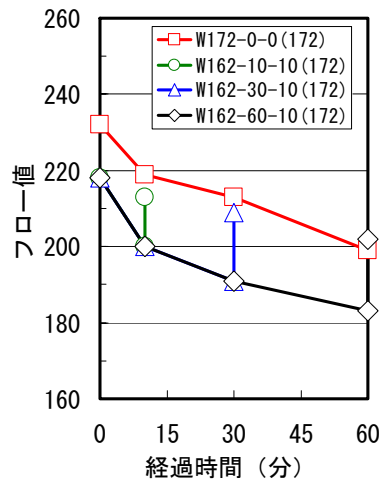


図-2 フローの経時変化と加水の効果

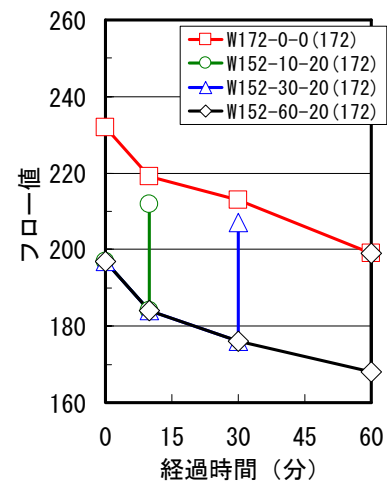


図-3 フローの経時変化と加水の効果

称容量 55l) を用い、粗骨材・細骨材・セメントの投入後 10 秒間空練りし、その後混和剤を含む練混ぜ水を投入し 1 分間練り混ぜた。排出後フレッシュコンクリートの実験に供した。なお、実験は各水準につき 3 バッチ実施した。

(2) フレッシュコンクリートの実験

フレッシュコンクリートの実験項目は、スランプ試験 (JIS A 1101) および空気量試験 (JIS A 1128) とした。

(3) スランプの経時変化の測定と加水方法

練混ぜ後、フレッシュコンクリートの実験に供した試料は、静置もしくはアジテートし、経時変化の測定を行った。静置の場合は測定直前にスコップにて練直し (切返し) を行い、これを実験に供した。なお、加水時は所定量の水を添加後、同様にスコップにて練直し (切返し) を行った。一方、アジテートは、重力式傾胴形ミキサ (公称容量 55l, 回転数 2rpm) にて行い、測定時には攪拌を停止し、排出することなくミキサ内から直接試料のサンプリングを行った。加水の場合は、測定直前にアジテート中の試料に所定量の水を添加し、そのままの回転数で 3 分間攪拌を行ったものを測定に供した。なお、事前にアジテートの場合の加水時の攪拌効率の予備実験を行い、回転数 2rpm で 3 分間以上攪拌することにより、スコップにて練直し (切返し) した場合と同等の攪拌効果を得られることを確認した。

(4) ゼータ電位の測定

静置およびアジテートがセメント粒子の分散・凝集形態に及ぼす影響を明らかにするため、各経過時間における試料を採取し、ゼータ電位の測定を行った。測定にはレーザー・回転プリズム方式コロイド粒子ゼータ電位測定装置を用い、電気泳動法によりゼータ電位を測定した。試料はコンクリートを 5mm ふるいにてウェットスクリーニングしたモルタルとし、100ml のイオン交換水中に 0.2g のセメント粒子が含まれるように調整したものを 1 分間超音波分散し、これを測定に供した。

2.3 モルタル実験

モルタルの配合および実験水準は、2.1(1)と同様とし、コンクリートから粗骨材を除いた配合のモルタルを「セメントの物理試験方法」(JIS R 5201) に準じて製造し、フロー試験に供した。なお、フロー値の経時変化の測定に供した試料は静置とし、加水時には所定量の水を添加後、低速で 20 秒間攪拌を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルのフロー値に及ぼす水の影響

図-1~図-3 はモルタルのフロー値の実験結果を示したものである。なお、図中のフロー値は測定値の平均値であり、誤差範囲は平均値 ± 3 であった。図-1 に W162, W152 のモルタルのフロー値の経時変化を示す。また、図には各経

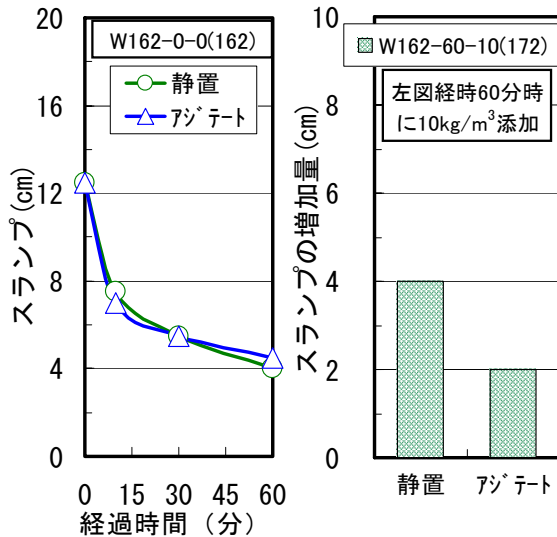


図-4 静置・アジテートの違いがスランプに及ぼす影響

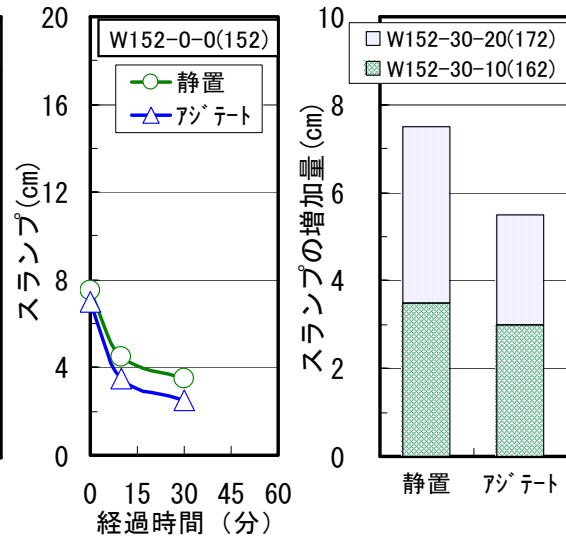


図-5 静置・アジテートの違いがスランプに及ぼす影響

過時間において W152 に 10kg/m^3 の水を添加した場合のモルタルのフロー値の増加量 (W152 の線上より、10、30、60 分の各経過時間で垂直に増大する値) を示した。なお、練混ぜ直後の 10kg/m^3 加水の効果は、W162 と W152 のそれぞれの 0 分のフロー値の差として読み取ることができる。図より、モルタルのフロー値の経時変化の比較では、両者の勾配はほぼ平行であり、単位水量が異なった場合でも同様の経時変化であることが確認できる。また、 10kg/m^3 加水した場合のフローの増大効果の傾向は、0 分が最も大きく、次に 60、30、10 分の順で小さくなる傾向を示しているが、何れの時間においても 15~20 程度の増大であり、流動性に寄与する水の効果は練混ぜから時間が経過した場合でも大きく変化しないことが分かる。また、加水後のフロー値は、W162 の各経過時間の値に近づいており、それぞれの時間における単位水量が同一であれば、フロー値にはほとんど差が表れていない。

図-2 には W172、W162 のモルタルのフロー値の経時変化を示す。また、各経過時間において W162 に 10kg/m^3 の水を添加した場合のモルタルのフロー値の増加量を示している。 10kg/m^3 加水の効果は、図-1 に比較し経時 30、60 分は同等であるが、経時 0、10 分はその値が小さい傾向にあった。これは、フロー値が 220 を超えると、その増大が鈍感になるためであると考えら

表-4 ゼータ電位の測定結果

記号	試料の状態	ゼータ電位 (mV)		
		経過時間 (分)		
		0	30	60
W162-0-0(162)	静置	-9.3	-9.0	-9.0
	アジテート	-9.4	-9.0	-9.0

れる。図-3 は W172、W152 のモルタルのフロー値の経時変化と、各経過時間において W152 に 20kg/m^3 の水を添加した場合のフロー値の増加量を示している。この場合も、図-1 および図-2 と同様の傾向であることが確認できる。以上より、コンクリートから粗骨材を除いた配合で製造したモルタルで検討した結果、加水した場合のフローの増大効果は、何れの時間においても同等の増加量であり、流動性に寄与する水の効果は練混ぜから時間が経過した場合でも変化しないと同時に、各経過時間におけるフロー値は、単位水量に依存していることが明らかとなった。

3.2 コンクリートのスランプに及ぼす水の影響

図示したスランプの実験結果は測定値の平均値であり、誤差範囲は平均値 $\pm 0.5\text{cm}$ であった。

(1) 静置およびアジテートの違い

図-4 に W162 のスランプの経時変化および、経時 60 分後に 10kg/m^3 の水を添加した場合のスランプの増加量を示す。図より、静置またはアジテートの何れの場合においても、スランプの経時変化は同じ傾向を示しており、その影響を

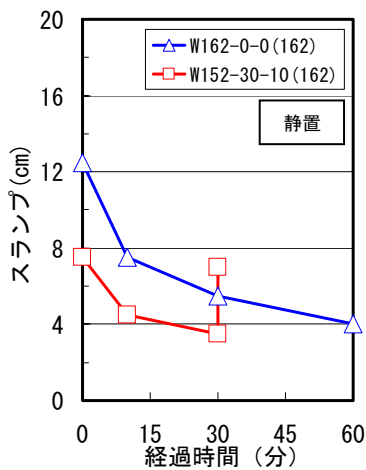


図-6 スランプの経時変化と加水の効果

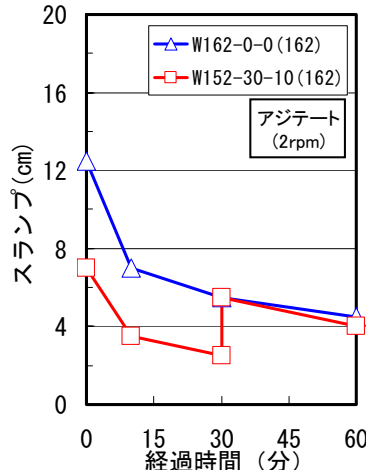


図-7 スランプの経時変化と加水の効果

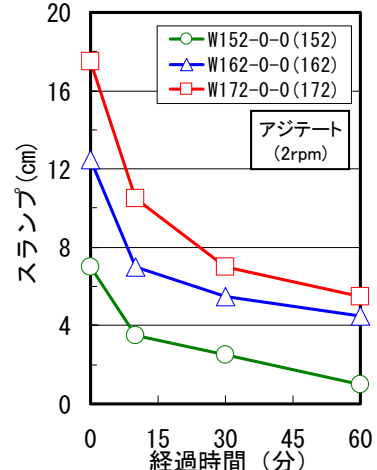


図-8 スランプの経時変化と加水の効果

受けていないことが確認できる。しかしながら、経時 60 分後に加水した場合のスランプの増加量は、静置がアジテートに比較し大きい傾向にあった。図-5 に W152 のスランプの経時変化および、経時 30 分後に 10, 20kg/m³ の水を添加した場合のスランプの増加量を示す。図-4 と同様にスランプの経時変化には大差は見られない。また、経時 30 分後に 10kg/m³ の水を添加した場合のスランプの増加量の両者の違いはわずかであるが、さらに 10kg/m³ の水を添加 (合計 20kg/m³) した場合の増加量では、明らかな差が生じており、静置がアジテートに比較し、大きい傾向にあった。これは、加水前のスランプは同一であっても、静置とアジテートでは流動性に及ぼす水の作用機構が異なるため、こうした現象が生じたものと考えられる。これらの原因として、水和生成物の比表面積の増大の影響や、セメント粒子の化学・物理的凝集構造の違いが考えられる。アジテートでは、静置に比べセメントの水和活性度が增大する可能性があり、水和生成物の比表面積が増大するものと考えられる。こうした条件では、水を添加した場合でも、瞬時に水和生成物の拘束水として捕捉され、流動性に寄与する水として機能しないものと推察される。また、こうした考え方は、コンクリートの流動性に寄与する自由水が、水和の進行に伴い拘束水に変化することで、流動性が低下する可能性を示唆するものであり、コンクリートのス

ランプロスの原因としての可能性についてもより詳細な検討を行う必要がある。

一方、アジテートによる水和活性度の増大は、物理的・化学的凝集の促進を助長し、静置とは異なる凝集構造を形成させる可能性がある。しかしながら、スランプの経時変化にその傾向は表われていない。また、表-4 に W162 の静置およびアジテートの各々のコンクリートより採取した試料の、ゼータ電位測定結果を示す。表より、各経過時間においても静置とアジテートの場合の違いは確認できないことから、水和活性の増大による凝集構造の変化が原因であるとは考えにくい。

図-6 (静置) および図-7 (アジテート) に、W162 のスランプの経時変化と、W152 の経時 30 分の時点で 10kg/m³ の水を添加した場合のスランプの増加量を示す。スランプ増大効果は、図-5 の 10kg/m³ と同一データであり、増加量の絶対値は静置・アジテート共に同等である。しかしながら、添加前のスランプに若干の差があるため、W162 の経時 30 分後のスランプと、W152 の 10kg/m³ 加水後のスランプの比較では、アジテートの場合が 3.1 で述べたモルタルの場合と同傾向であるのに対し、静置の場合は W162 より大きくなる傾向にあった。

(2) 各経過時間でのスランプの増大効果

図-8 に W152, W162, W172 のスランプの経時変化を示す。モルタルの場合とは異なり、ス

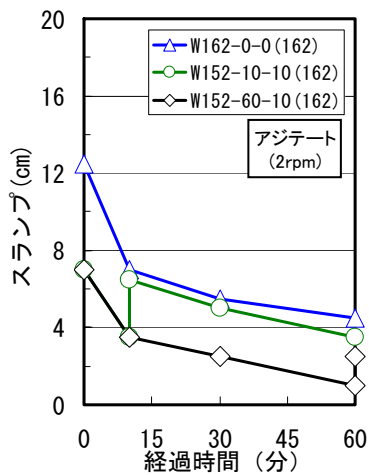


図-9 スランプの経時変化と加水の効果

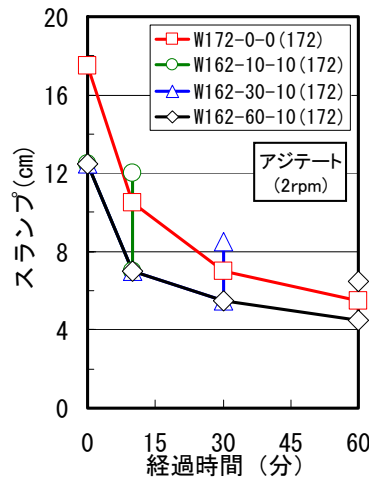


図-10 スランプの経時変化と加水の効果

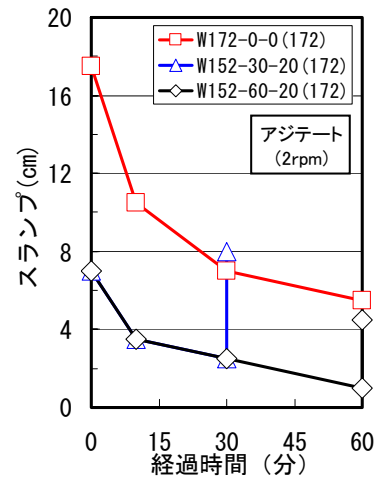


図-11 スランプの経時変化と加水の効果

ランブロス傾向は単位水量に依存しており、W172の変化量は他に比較し極めて大きい。

図-7および図-9に、W162、W152のスランプの経時変化を示す。また、各経過時間においてW152に10kg/m³の水を添加した場合のスランプの増加量と、その後の経時変化も併せて示した。図より、10kg/m³の水がスランプの増大効果に及ぼす影響は、モルタルの場合と異なり、練混ぜ直後程大きく、時間の経過に伴いその効果が減少する傾向にある。このモルタルとコンクリートで加水の影響に差が生じる原因については、今後検討する必要があるが、フロー試験とスランプ試験の結果に影響するレオロジー量の差、および粗骨材間の機械的摩擦等がその要因であると思われる。また、W152に10kg/m³の水を添加した後のスランプと、各経過時間でのW162のスランプの比較では、経時30分後まではほぼ同様な値を示しているが、経時60分後では加水により同等の値を得るまでには至らなかった。なお、加水したコンクリートのスランプのその後の経時変化は、W162の経時変化とほぼ同様な傾向を示した。

図-10および図-11は、それぞれ、W172とW162の比較、W172とW152の比較である。この条件の場合も、図-7および図-9と同様に、10、20kg/m³の加水がスランプの増大に及ぼす影響は、練混ぜ直後程大きく、時間の経過に伴いその効果が減少する傾向があることが明らかと

なった。

4. 結論

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

- (1) コンクリートから粗骨材を除いた配合で製造したモルタルの場合、流動性に寄与する水の効果は練混ぜから時間が経過した場合でも変化しないと同時に、各経過時間におけるフロー値は、単位水量に依存する。
- (2) 静置およびアジテートされたコンクリートでは、加水後のスランプに差が表われ、流動性に及ぼす水の作用機構が異なることが考えられる。
- (3) コンクリートの場合、流動性に寄与する水の効果は練混ぜ時からの時間経過と共に減少する傾向にある。

参考文献

- 1) 長滝重義, 坂井悦郎, 尾崎大輔: 高性能減水剤を添加したコンクリートのスランブロス, セメント技術年報, Vol.35, pp.210-213, 1981.
- 2) 服部健一: スランブロスのメカニズムおよびその対策, 材料, Vol.29, No.318, pp.240-246, 1980.3
- 3) 土木学会: 2002年制定 コンクリート標準示方書【施工編】, pp.374-379, 2002.3