

論文

[1069] 水溶性高分子を添加したフレッシュモルタルの性状に関する基礎実験

正会員○古澤靖彦（鹿島建設技術研究所）

山本博之（同 上）

1. はじめに

近年、特殊水中打設用コンクリートなど、セルロースエーテルに代表される水溶性高分子（以下WSPと略す）を添加したコンクリートが注目されている。これらは、WSPの添加がフレッシュコンクリートに与える優れた性状（材料分離防止、フリージング抑制など）を利用したものであるが、その作用機構についてはWSPの増粘作用に起因するものであると漠然と考えられているものの、力学特性的に、あるいは系統的にこれを検討した例は少ない。WSPは、増粘作用の他にWSP自身の保水性による潤滑作用を有することが知られており、コンクリート中においては、セメント間、あるいは骨材間などの固体間摩擦の低減に寄与している可能性も十分考えられ、泉らもこの効果を指摘している。¹⁾

本研究では、WSPの添加効果を増粘作用と潤滑作用によるものと考え、添加による様々なフレッシュモルタル性状の変化とこれら2つの作用機構の関係を検討したものである。

2. 試験方法概要

(1)検討の手順

今回はWSPの添加効果を把握するための指標として、WSPの分子量と添加量を取り上げた。そして、まずこれらの指標とWSP添加によるフレッシュモルタルの性状変化の関連性を把握し、次に作用機構の検討を行なった。

(2)使用材料

WSPは、分子構造の相違が与える影響を排除するために、同一分子構造のヒドロキシプロポキシメチルセルロースに限定し、分子量のみが異なるものを使用した。WSPを含む材料を表-1に示す。

(3)配合および練り混ぜ方法

基本配合は一定とし、空気量の増加の影響を避けるために、ブレン配合のものを含めて消泡剤は通常使用量の1.5倍程度添加した。基本配合および練り混ぜ方法を表-2に示す。

3. フレッシュモルタル性状変化の把握

(1)試験方法

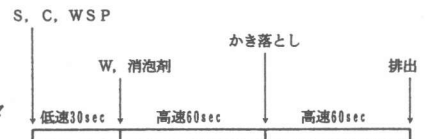
WSPの添加によるフレッシュモルタルへの効果と各々の評価・試験方法を表-3に示す。

ここでセルフレベリング性の評価項目となる静置フロー値とは、テーブルフロー試験で衝撃を与える前に、モルタルの自重のみによる変形が完全に終了した時点（どの配合でも1分以内に変形は終了した）でのフロー値を示す。

表-1 使用材料および性質

材料	性 質		
	記号	粘度品番 (20%溶液の20℃での粘度 cps)	分子量
W S P	Low	4090	低
	Med	12700	中
	High	22900	高
細骨材	豊浦標準砂 比重=2.642 d50=0.18mm		
セメント	普通ポルトランドセメント 比重=3.15		
水	調布市水道水		
消泡剤	トリブチルフォスフェイトとイソプロピルアルコールの1:1溶液		

表-2 配合および練り混ぜ手順



使用ミキサー；容量10ℓのホバート型ミキサー

W/C	S/C	単位量 (g/ℓ)			
		W	C	S	消泡剤
65%	2.0	377	580	1160	3

また、作業性は15回衝撃を与えたフロー値（外より仕事が増えられた際の変型量）で評価することとした。なお、フレッシュモルタルの単位重量も同時に測定した。WSPの添加量は、ブリージング試験では水量に対して0.1%~0.6%（0.1%間隔）の6水準、それ以外の試験では0.2%, 0.6%, 1.0%の3水準とした。

(2)試験結果

結果を表-4に示す。なお、単位重量は消泡剤の効果によりすべてのケースではば一定の値であった。

①材料分離防止性状

分離はモルタルでの変型が進むに連れフローテーブル中央部に細骨材とセメント部が残り、周辺に水がドーナツ状に流出する現象として観察された。プレーン配合のモルタルでは著しい分離が観察されたが、WSPを添加したモルタルでは0.2%添加のものに分離の徴候が見られたが、添加量が0.6%になるとWSPの分子量に関係なく分離現象は観察されなくなった。

②ブリージング抑制性状

練り上り3時間後における、各WSP添加モルタルのブリージング率を図-1に示す。これより、WSPの種類に関係なく、いずれも0.5%の添加量でブリージングが検出されなくなった。

③セルフレベリング性状

結果を図-2に示す。これよりわかるように、どのWSPを添加した際も0.2%の添加量で静置フロー値は一度減少し、その後0.6%, 1.0%と添加量が増加するに連れて、逆に静置フロー値が増加する傾向が観察された。また、同一WSP添加量での静置フロー値を比較すると、分子量が大きいWSPほど小さくなる。

④作業性

結果を図-3に示す。これより、すべての種類のWSPについて添加量の増加と共にフロー値が減少することが明らかであり、また同一添加量では、WSPの分子量が大きいものほどフロー値の減少量が多い。

表-3 WSPの添加効果と試験方法

評価測定項目	試験方法
材料分離防止性状	テーブルフロー試験時に目視により観察
ブリージング抑制性状	JIS A 1123に準拠
セルフレベリング性状	静置フロー値
作業性	テーブルフロー試験(JIS R 5201)

表-4 性状把握試験結果

配合記号	WSP種	添加量(対水%)	3時間後ブリージング率(%)	分離性状	静置フロー値(mm)	フロー値(mm)
Plain		0	3.3	×	125	238
Low-0.1	Low	0.1	2.5	—	—	—
Low-0.2		0.2	1.9	△	115	201
Low-0.3		0.3	0.9	—	—	—
Low-0.4		0.4	0.5	—	—	—
Low-0.5		0.5	0	—	—	—
Low-0.6		0.6	0	○	139	191
Low-1.0	1.0	—	○	152	186	
Med-0.1	Med	0.1	2.5	—	—	—
Med-0.2		0.2	1.6	△	113	184
Med-0.3		0.3	1.0	—	—	—
Med-0.4		0.4	0.4	—	—	—
Med-0.5		0.5	0	—	—	—
Med-0.6		0.6	0	○	136	179
Med-1.0	1.0	—	○	147	172	
High-0.1	High	0.1	2.6	—	—	—
High-0.2		0.2	1.7	△	112	177
High-0.3		0.3	1.1	—	—	—
High-0.4		0.4	0.5	—	—	—
High-0.5		0.5	0	—	—	—
High-0.6		0.6	0	○	131	168
High-1.0	1.0	—	○	143	162	

*×:分離, △:一部分離, ○:分離なし
単位重量は、全てのケースで2.080±0.005の範囲にあった。

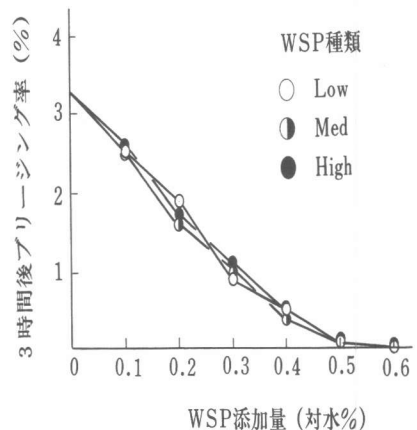


図-1 ブリージング率への影響

以上、WSPの添加によりフレッシュモルタルに与えられる性状の変化を系統的に把握したが、これらの変化にはWSPの分子量の相違には依存せずに、添加量の相違のみに依存して値が変化するもの（材料分離防止性状、フリージング抑制性状）と、WSPの分子量および添加量の相違の両方に依存して値が変化するもの（セルフレベリング性状、作業性）があることが確認された。

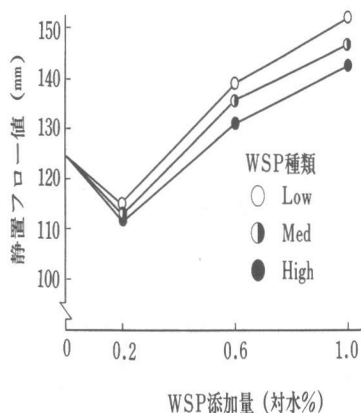


図-2 静置フロー値への影響

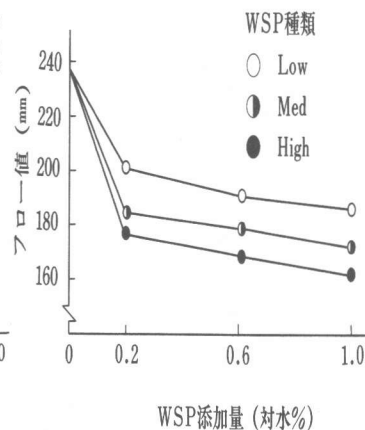


図-3 フロー値への影響

4. 作用機構の系統的把握

(1) 試験方法

WSPの増粘作用、潤滑作用を把握する試験として、表-5に示す測定を実施した。

(2) 二重円筒型回転粘度計

図-4に使用した二重円筒型のモルタル回転粘度計を示す。なお、ローターと試料間のスリップや流動範囲に関しては、菊川ら²⁾の方法に準じて補正を行なった。

② 一面せん断試験

図-5に使用した一面せん断試験装置の概略を示す。せん断速度はすべてのケースに対して0.1 mm/1 secで一定とした。また、垂直応力は20, 40, 60, 80, 100 g/cm²の5段階とした。

③ 加圧脱水試験

モルタル中における粒子間摩擦は、固体-固体界面の接触により生ずるものである。WSPの潤滑作用は、WSP自身が水を吸着して（主にWSP内のOH基と水分子との水素結合）移動を抑制するために、固体-液体-固体の界面状態を保ちやすくすることで発揮されるものと考えられる。すなわち、系内の水の動きやすさは、潤滑作用を間接的に示すものである。そこで今回はこの水の動きやすさを図-6に示す加圧脱水試験装置を用いて測定した。圧力は50 g/cm²の一定とし、結果は単位時間、単位面積あたり脱水する水量で表 表-5 WSPの作用機構と試験方法

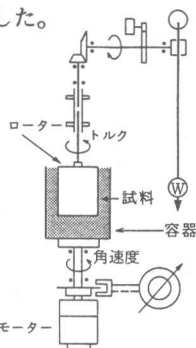


図-4 回転粘度計

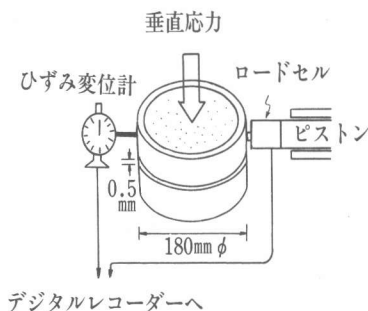


図-5 一面せん断装置

作用機構	試験方法	被測定項目
増粘作用	二重円筒型回転粘度計	降伏応力 τ_f 塑性粘度 η_{pl}
	単純せん断試験	粘着力 C 内部摩擦角 ϕ
潤滑作用 (保水作用)	加圧脱水試験	系内の水の移動度

(2) 結果

結果の一覧を表-6に示す。

①二重円筒型回転粘度計測定結果

図-7に、今回測定された流動曲線のうち代表的なものを示す。また、図-8, 9に各WSP添加モルタルの降伏応力塑性粘度の変化を示す。これより、WSPの添加量の増加につれて、降伏応力、塑性粘度ともに増加することがわかり、また、同一添加量では分子量の大きいものほど増粘効果が大きいことがわかる。

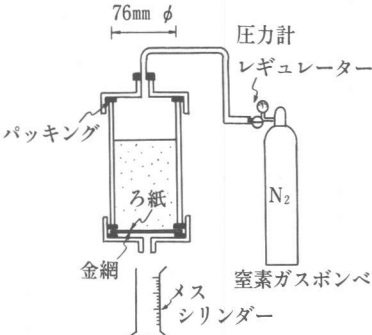


図-6 加圧脱水装置

②一面せん断試験結果

図-10に変位と応力の関係のうち代表的なものを示す。これより、WSPの添加量の多いものほど、小さな変位で最大応力(せん断抵抗力)を示すことがわかる。図-11, 12にWSP添加量と内部摩擦角(ϕ)、および粘着力(C)の関係を示す。これより、内部摩擦角はWSPの分子量には

表-6 作用機構検討試験結果

配合記号	二重円筒型回転粘度計		単純せん断試験		加圧脱水試験
	降伏応力 τ_f (g/cm ²)	塑性粘度 η_{pl} (P)	粘着力 C (g/cm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	水の移動度 (cm/sec)
Plain	0.20	18.3	0.02	41.80	1.65×10^{-3}
Low-0.2	0.27	21.2	0.50	12.20	4.28×10^{-4}
Low-0.6	0.70	67.2	2.13	3.74	1.15×10^{-4}
Low-1.0	2.34	162.1	2.70	1.02	—
Med-0.2	0.36	28.0	0.71	12.20	7.99×10^{-4}
Med-0.6	1.59	84.1	3.85	3.30	1.26×10^{-4}
Med-1.0	3.07	268.1	4.91	1.10	—
High-0.2	0.44	34.1	1.04	11.01	7.96×10^{-4}
High-0.6	2.20	100.2	5.20	2.85	1.10×10^{-4}
High-1.0	3.76	366.1	6.47	1.00	—

関係なく、添加量の増加に伴ない低下してゆくことがわかる。また、粘着力はWSPの添加量に伴ない増加し、同一添加量では分子量の大きいものほど大きな値となった。

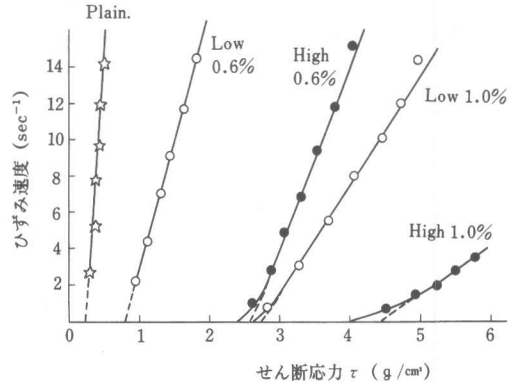


図-7 流動曲線

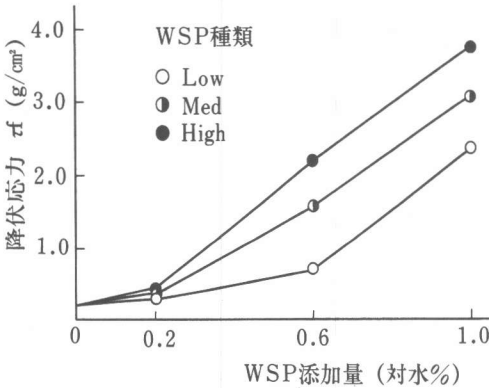


図-8 降伏応力への影響

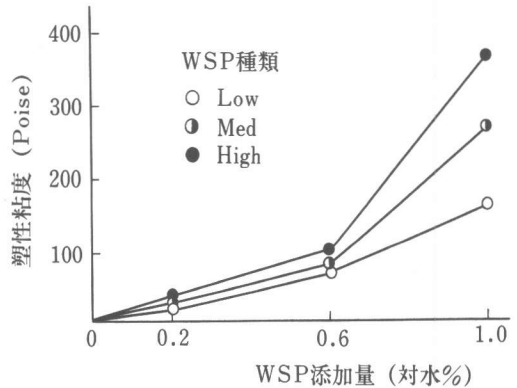


図-9 塑性粘度への影響

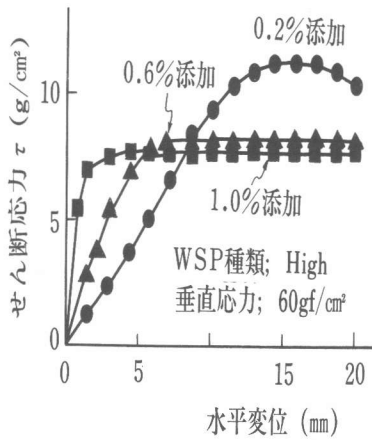


図-10 変位と応力

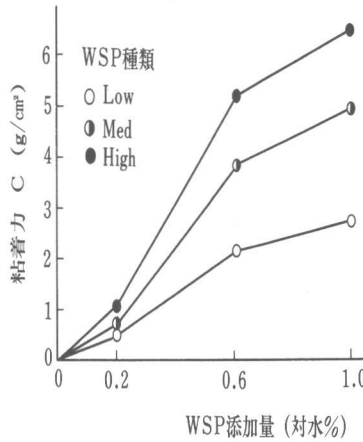


図-11 粘着力への影響

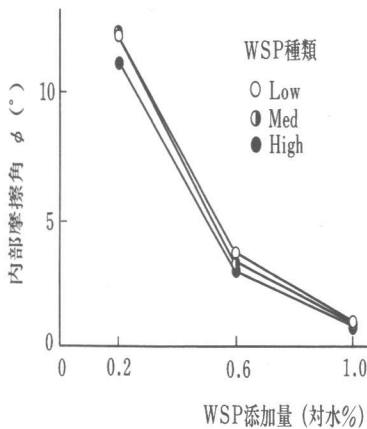


図-12 内部摩擦角への影響

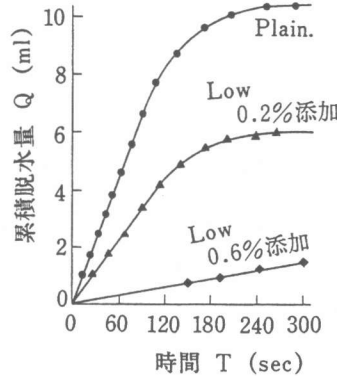


図-13 時間と累積脱水量

③加圧脱水試験

図-13に時間Tと累積脱水量Qの関係の一部を示す。これよりQは時間に伴ない直線的に上昇した後、一定値に収束する挙動を示すことがわかる。今回は、モルタル中での水の移動のしやすさを把握することが目的であるので、ろ過特性が現れる収束時の挙動は無視し、図中直線部の勾配を脱水試験装置の断面積で割った値を水の易動度として定義した。

$$\text{水の易動度 } M \text{ (cm/sec)} = (\Delta Q / \Delta T) / \text{断面積}$$

表-6の結果より易動度は、WSPの分子量には関係なくWSPの添加量の増加に連

れて低下し、1.0%の添加量で脱水現象は観察されなくなった。

以上、WSPの作用機構を検討した結果、増粘作用を示すもの(降伏応力 τ_l 、塑性粘度 η_{pl} 、粘着力C)はWSPの分子量、添加量の相違の両方に依存して値が変化し、潤滑作用(保水作用)

表-7 WSPの素材特性と作用機構

添加量	分子数	
	多	少
少	分子数 中 係粘桂 本 中	分子数 少 係粘桂 小 中
	分子数 多 係粘桂 本 中	分子数 少 係粘桂 小 中

を示すものはWSPの添加量の相違のみに依存して値が変化することがわかった。

今回、WSPの増粘作用および潤滑作用のWSPの分子量、添加量への依存性が異なったのはWSPの素材特性から次のように解釈される。

WSPの増粘作用は分子間のからまりの度合により与えられ、同一量であれば1つの分子が長い(分子量が大きい)ほど、また同一の分子の長さであれば、単位体積中の分子の数が多い(添加量が多い)ほど分子間のからまりは大きくなり、大きな増粘効果を与えることになる。一方、WSPはそれ自身が、あるいはセメント粒子と複合体を形成しながら水を吸着して、水の移動を抑制することで潤滑作用を与えるものと考えられる。

ここで、WSPに吸着される水量は単位体積中に占めるWSPの分子の長さの総計（添加の絶対量）により決まり、分子一本あたりの長さ（分子量）にはほとんど関連がないものと考えられる。

以上をモデル化して示せば、表-7のようになり、増粘作用（分子間のからまり）はWSPの添加量、分子量の相違の両方に依存し、潤滑作用（保水性）はWSPの添加量のみ依存する。

5. フレッシュモルタル性状の変化と作用機構の関係

WSPを添加したモルタルの性状変化と作用機構の関係を、WSPの分子量および添加量の2つの指標への依存性から検討して表-8に示す。

(1)材料分離防止性状

今回観察されたのは、固液分離防止性状でありミクロの材料分離防止効果である。しかしコンクリートレベルでは、粗骨材の沈下など増粘作用に関係する分離も生じるものと考えられる。

(2)フリージング抑制性状

フリージング量の低減効果がWSPの添加量のみ依存していたことから、WSPの保水作用により発揮される性状と考えられる。すなわち、フリージングはWSPに吸着されなかった水が浮く現象であると考えられる。これを検証するためにはフリージング水中のWSPを何らかの方法で定量する必要があり、今後の検討課題となろう。

(3)セルフレベリング性状および作業性

モルタルの変型に抵抗する内部応力は、粘着力と摩擦力に分割されるものと考えられる。WSPは増粘作用により粘着力を増加させる一方、潤滑作用により摩擦力を低減させる。従ってWSPを添加したモルタルの変型は、両者の影響により決定される。静置フロー値がWSPの低添加量域で一度低下したのは、粘着力>摩擦低減力の領域であり、その後静置フロー値が増加したのは、粘着力も増加したものの、粘着力<摩擦低減力の領域に達したためと考えられる。またこの時、WSPの分子量の大きいものほど静置フロー値が小さかったことは、摩擦低減作用（潤滑作用）が分子量に関係なく発揮されるのに対して、増粘作用は分子量の大きいWSPの方が強く、粘着力による変型抵抗応力を、より高めたためである。外からの仕事に対する変型特性（作業性）は、今回の試験範囲では増粘作用に深く関係して現れたものと考えられる。

6. おわりに

今回は、WSPの添加効果と作用機構の関係をモルタルレベルで検討した。今後は、WSPの有する優れた性状をより効率的に利用するために、粗骨材の共存するコンクリートレベルでの検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 泉 達男ほか：固体間摩擦抵抗に及ぼすペーストの効果、コンクリート工学年次論文報告集、10-2、1988、pp. 309-314
- 2) 菊川 浩治：例えば『フレッシュコンクリートの挙動の解析と施工作業のシステム化への応用に関する研究』、昭和60、61、62年度科学研究費補助金、研究成果報告書 1988. 3

表-8 性状変化と作用機構

WSPの添加により与えられる効果	効果の作用機構	依存する指標
材料分離抵抗性状	WSPにより移動を抑制された水の増加（保水作用）	WSPの添加量
ノンフリージング性状	WSPにより移動を抑制された水の増加（保水作用）	WSPの添加量
セルフレベリング性状	潤滑作用の増加（フロー増加側）	WSPの添加量
	増粘作用の増加（フロー低下側）	WSPの分子量 WSPの添加量
作業性低下	増粘作用の増加	WSPの分子量 WSPの添加量