

# 超高強度コンクリートにおけるポリカルボン酸系混和剤の主鎖長の影響

## INFLUENCE OF MAIN CHAIN LENGTH OF POLYCARBOXYLATE-BASED SUPERPLASTICIZER ON ULTRA-HIGH-STRENGTH CONCRETE

岡田 和 寿\*, 河 辺 伸 二\*\*  
Kazuhisa OKADA and Shinji KAWABE

Recently, design concrete strength of 150MPa has been used, and polycarboxylate-based superplasticizer has become an essential ingredient to produce ultra-high-strength concrete. In this study, the main chain length of polycarboxylate-based superplasticizer was focused on to optimize performance of dispersing ability at low water cement ratio on ultra-high-strength concrete. Short main chain length exhibited high dispersing ability and low concrete viscosity at low water cement ratio. It was estimated that the thickness of water film on cement particle demanded three times of the main chain length. The main chain length was found to have influence on dispersing ability.

**Keywords :** Polycarboxylate-based Superplasticizer, Molecular Weight, Main Chain Length, Ultra-High Strength Concrete, Fluidity, Thickness of Water Film

ポリカルボン酸系混和剤, 分子量, 主鎖長, 超高強度コンクリート, 流動性, 水膜厚さ

### 1. はじめに

近年, 都市部において建築物の高層化や居住空間確保のため, 設計基準強度が 100N/mm<sup>2</sup>以上の超高強度コンクリートを RC 構造物に適用する事例が増加しており, 設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートも実用化されている<sup>1),2),3)</sup>. 超高強度コンクリートにおいては, そのコンクリートの調合における単位結合材料が多く水結合材比が低くなるため, 混和剤としてコンクリートに高い流動性を与えることができるポリカルボン酸系混和剤が必要とされている。

混和剤の分子構造の違いにおける分散性については, ナフタレンスルホン酸系やメラミンスルホン酸系混和剤はセメント粒子に吸着し, その負電荷による静電的反発力により分散する。ポリカルボン酸系混和剤においては, 図 1 に示すメタクリル酸系混和剤や図 2 に示すマレイン酸系混和剤の構造に代表される櫛形ポリマーの構造を持ち, その側鎖であるポリエーテル部位の立体障害反発による影響が大きいと考えられている。立体反発力は, ポリエーテル鎖長が長いほど大きく, 高分散となるとの報告があり<sup>4),5),6)</sup>, ポリカルボン酸系混和剤の側鎖がセメントの分散に対して大きな役割を担っている。ポリカルボン酸系混和剤の主鎖長についても, 主鎖長が短い方が分散力が高い<sup>6)</sup>との報告もあり, ポリカルボン酸系混和剤の分子構造は分散性に影響する。

超高強度コンクリートでは, その水結合材比の低さにより流動に関与できる水が少ないため, ポリカルボン酸系混和剤の添加量の増

加だけでは分散性を十分得ることができず, 分散性の限界が存在する<sup>8)</sup>。

現在までに, ポリカルボン酸系混和剤の分散性についての報告は行われているが, 特に超高強度コンクリートにおいてのポリカルボン酸系混和剤の分子構造から論じられたものは, 例えば分子量が適度の範囲に制御された特定の 6 つの構成単位による混和剤<sup>9)</sup>や, ポリカルボン酸系混和剤に新たなモノマーを組み込んだもの<sup>10)</sup>があ

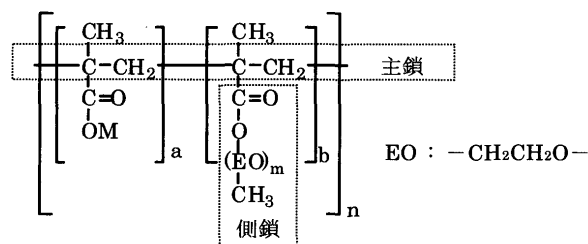


図 1 メタクリル酸系混和剤の化学構造

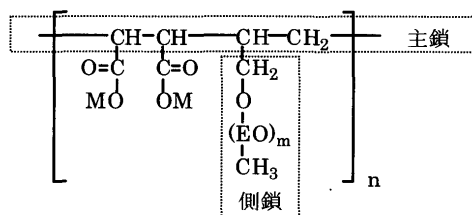


図 2 マレイン酸系混和剤の化学構造

\* 名古屋工業大学大学院工学研究科 大学院生・工修

\*\* 名古屋工業大学大学院工学研究科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, M. Eng.  
Prof., Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

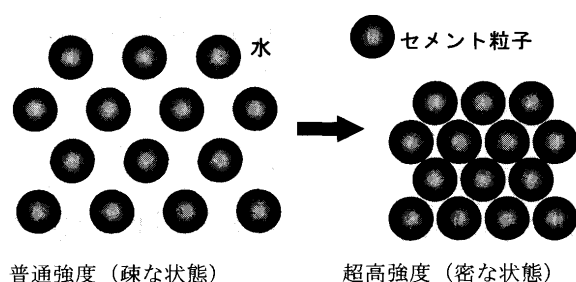


図3 セメント粒子の分散状態

るが、まだ情報は少ない。

高分子界面活性剤においては、その分子量により分散剤としての機能や凝集剤としての機能を持っている<sup>11)</sup>。ポリカルボン酸系混和剤の主鎖はセメント粒子に吸着する部位であるカルボン酸が連なっているが、その主鎖長により分散と凝集の機能の両面に影響を持つと考えられる。

図3にセメント粒子分散状態の概念図に示す。JIS A 5308における普通コンクリートの強度レベルのセメント粒子の水分散系においては、セメント粒子が疎な状態で存在し、粒子間を満たし分散に関与することのできる水が多く存在する。それと比較し、超高強度コンクリートの強度レベルにおいては、セメント粒子が密な状態で存在し、セメント分散に関与できる水が少なく粒子間距離が小さい。普通コンクリートの強度レベルでは分散作用のあるポリカルボン酸系混和剤でも、セメント粒子間距離が小さい場合における分散剤としての混和剤の構造を考えた場合、混和剤分子自体が粒子間の移動拡散や、吸着し分散作用を発揮できる大きさは、セメント粒子間が密であるため分子の大きさは制限され、その分子の大きさのために分散作用を発揮しなくなると考えられる。

超高強度コンクリートを研究する上で重要となる練り混ぜることができる最低水結合材比について、混和剤の構造面からの情報が必要であると考えられる。

本研究は、情報の少ない楕形ポリマーであるポリカルボン酸系混和剤の主鎖長に注目し、超高強度コンクリートに用いられることの多いシリカフェームプレミックスセメントを用いた場合の、練り混ぜることができる最低水セメント比（水結合材比）について、分散性への影響を検討した。練り混ぜることができる最低水セメント比付近でのセメントの分散性については、セメント粒子間に存在するポリカルボン酸系混和剤の主鎖長による影響が大きいと考えられる。そこで、側鎖長を固定し主鎖長のみを変化させた混和剤を用いて、セメントペースト、およびコンクリートにて検討した。以上より、主鎖長が超高強度コンクリートにおけるセメントの分散性に与える影響の有無を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験のながれ

本実験はポリカルボン酸系混和剤の影響を明確にするため、以下のながれで行った。

#### (1) セメントペースト実験

セメントペーストにて、主鎖長の分散性への影響と練り混ぜることができる最低水セメント比について実験した。

表1 各MSPの分子の大きさ

記号	MSP タイプ	主鎖長 (nm)	主鎖 重合度 n	側鎖長 (nm)	重量平均 分子量
OCS	オリゴ	1.8	3.5	11.9	5600
OCL	オリゴ	2.1	4.2	11.9	6800
PCS	ポリ	5.3	10.6	11.9	17200
PCL	ポリ	9.4	18.8	11.9	30500

#### (2) コンクリート実験

セメントペースト試験の結果を用いて、主鎖長がコンクリートの粘性へ与える影響について実験した。

#### (3) 主鎖長と水膜厚さに対する考察

実験したセメント粒子上の水膜厚さ<sup>12)</sup>に対するポリカルボン酸系混和剤の主鎖長との関係について考察を行った。

## 2.2 使用材料

#### (1) ポリカルボン酸系混和剤

本実験で検討を行ったポリカルボン酸系混和剤は、図2に示したマレイン酸系混和剤（以下MSPとする）を用いた。側鎖であるエチレンオキシド（以下EO）鎖を持つモノマーセグメントの分子量を1500（ $m \approx 33$ ）と同一にした。図2における主鎖重合度nを変化させ、主鎖重合度nが5未満と低く、1分子中のカルボン酸数でも10未満であるオリゴタイプのMSPとして主鎖重合度nの小さいタイプと大きいタイプの2種（OCS, OCL）と、主鎖重合度nが10以上で1分子中のカルボン酸数でも20以上のポリタイプのMSPとして主鎖重合度nの小さいタイプと大きいタイプの2種（PCS, PCL）の計4種を用いた。重量平均分子量、主鎖重合度n、主鎖長および側鎖長を表1に示す。

分子量を基にした分子の大きさについて、それぞれ最大に伸びきった状態の大きさとした。大きさの計算による推定は、化学結合における $sp^3$ 混成軌道の結合角 $\angle C-C-C$ 、 $\angle C-C-O$ および $\angle C-O-C$ を $109.5^\circ$ 、 $C-C$ 結合距離を $0.154nm$ 、 $C-O$ 結合距離を $0.143nm$ <sup>13)</sup>とし、主鎖における $C-C-C$ 結合距離を $0.251nm$ と計算した<sup>14)</sup>。側鎖については、EOセグメント1つ分の $C-C-O-C$ の距離を $0.359nm$ と計算した。

本実験に用いたMSPの添加量は固形分表記とし、セメントに対する百分率（ $C \times \%$ ）とした。MSPの固形分は調合水の一部と見なした。

#### (2) セメント

セメントはシリカフェームの内添率が10%であるシリカフェームプレミックスセメントを用いた。セメントの組成を表2に、粒度分布を図4に示す。

#### (3) 細骨材

細骨材は岩瀬産陸砂（表乾密度 $2.64g/cm^3$ 、粗粒率2.67、記号S）を用いた。

#### (4) 粗骨材

粗骨材は岩瀬産碎石（表乾密度 $2.66g/cm^3$ 、実積率60.0%、最大寸法20mm、記号G）を用いた。

## 2.3 実験方法

#### (1) セメントペースト実験

セメントペースト実験は温度 $20^\circ C$ 、湿度80%の条件にて行った。練混ぜは、5L容量のモルタルミキサにシリカフェームプレミックス

表2 セメントの組成

ブレーション比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)			密度 (g/cm <sup>3</sup> )			
6610			3.08			
化学組成 (%)						
ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
1.04	27.97	2.85	3.48	59.59	0.69	2.98

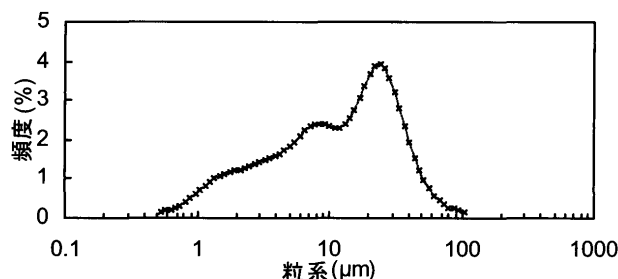


図4 セメントの粒度分布

スセメント, MSP を添加した水を投入し, 低速で 15 分間練り混ぜた。水セメント比が 11.0%以下では低速で 20 分間練り混ぜた。

分散性の評価は JASS15M・103 に準じ, 内径 50mm, 高さ 51mm のフローコーンを用いてペーストフローを測定した。

練り混ぜることができる最低水セメント比 (以下限界 W/C とする) の評価を, 相対フロー面積比(Γ)と水粉体容積比の線形関係<sup>15)</sup>を用いることにより行った。水粉体容積比と水セメント比は体積換算と重量換算の比例関係にあるため, 本試験では水セメント比 (以下 W/C とする) として測定した。Γ を式(1)により求めた。

$$\Gamma = (F^2 - 50^2) / 50^2 \quad (1)$$

F: ペーストフロー値 (mm)

測定は, MSP の 1 添加量において W/C の変化を 4 点以上とした。W/C 対 Γ の直線回帰における相関係数 R が, R<sup>2</sup>において 0.95 以上であることを確認した。

各 MSP について, MSP の添加量を変化させた場合の Γ が直線回帰により 0 となるセメントの拘束水比<sup>15)</sup>を求め, 実際に添加した MSP の実験から求められた Γ=0 となる最低の W/C を, 実測した限界 W/C とした。

自由水量<sup>16), 17)</sup>は, セメントペーストを 3000rpm で 10 分間遠心分離を行い, 得られた上澄水を 105℃にて 2 時間乾燥させ固形分を測定し, 上澄水から固形分を除いた水をセメントペースト中の自由水とした。自由水量をセメント質量に対する自由水の百分率 (自由水/セメント%) として表した。

## (2) コンクリート実験

実験は温度 20℃, 湿度 80%の条件下で行った。練混ぜ量は 30L とした。コンクリートの調合を表 3 に示す。

練混ぜは, 強制二軸ミキサ (容量 55L) を用いて, 細骨材, セメント, MSP を含んだ水を添加し W/C=14.0%では 240 秒間, W/C=12.0%では 600 秒間, W/C=10.5%と 10.0%では 1080 秒間練り混ぜた後, 粗骨材を投入し 120 秒間練り混ぜた。その後, ミキサ内で 300 秒間静置し, さらに 30 秒間練り混ぜた。空気量の調整は消泡剤を用いて行った。

流動性の評価をスランブフロー(JIS A 1150)にて行った。W/C の低い方からの実験を開始し, 初めて到達する目標スランブフローを

表3 コンクリートの調合

W/C (%)	空気量 (%)	MSP 添加量 (C×%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
10.0	2.0	1.00	140	1400	177	846
10.5	2.0	1.00	140	1333	235	846
12.0	2.0	0.80	140	1167	378	846
14.0	2.0	0.55	150	1071	433	846

65±5cm とした。初めて目標フローに到達した MSP の添加量に対して, 他の MSP も同一添加量とした。ただし, W/C=14.0%では PCL は結果として十分なスランブフローが得られなかったため, 添加量を C×0.55%とした。粘性の評価を L フロー初速度<sup>18)</sup> (流れ始動面より 3cm から 8cm までの流動速度) にて行い, 同一フローである場合に L フロー初速度が大きいものが低い粘性であると判断した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 セメントペースト実験

各 MSP の添加量を変化させた場合の W/C と Γ の関係を図 5 から図 8 に示す。一般に, 混和剤の添加量を増加させると流動性が高くなり, 低い W/C で練り混ぜることができるようになる。本結果からも同様な傾向が C×0.1%から 0.7%まで確認できたが, OCS および OCL では C×1.0%で, PCS と PCL では, C×0.7%で Γ=0 となる W/C が頭打ちになる分散限界が存在し, 特に PCL では添加量が C×0.7%から 1.0%に上昇させると, かえって分散性が低下した。

図 9 に, 図 5 から図 8 より得られた各 MSP における Γ=0 となる W/C を示す。C×0.1%, 0.4%では, 流動を開始する Γ=0 となる W/C は OCS>PCL≒OCL>PCS となった。C×0.7%では各 MSP の順番が入れ替わる領域であり, C×1.0%では PCL>PCS>OCL≒OCS となった。低い添加量で Γ=0 となる W/C が高い場合は, 主鎖長の長い PCS や PCL の分散性が高い結果となった。一方, 超高強度領域である限界 W/C に近いほど主鎖長の短い OCS や OCL の分散性が高い結果となった。

各 MSP において自由水量の限界 W/C への影響を検討するため, 自由水量の測定を行った。W/C と自由水量の関係を図 10 に示す。C×0.1%と 0.4%では上澄水中の固形分は 10%未満であったが, C×0.7%以上では上澄水中の固形分が 50%以上であった。自由水量からは限界 W/C が 12%前後に存在する結果が得られた。12%以下では, 自由水量のばらつきが大きかった。坂井らの報告<sup>17)</sup>と同様に, 低い W/C における自由水だけでは, MSP の分散性について説明することは難しいと考える。MSP の種類による分散性の差は自由水量からは確認できなかったため, 練り混ぜることができるか否かの極限領域においては, W/C と Γ を用いた評価が必要であると考えた。

そこで図 11 に, 図 5 から図 8 より結果を得られた添加量における主鎖長に対する限界 W/C を示す。限界 W/C は主鎖長に依存することを表した。実測した限界 W/C は OCL を用いたときの 10.1%であった。オリゴタイプで分子量の小さい OCS は 10.3%であり, ポリタイプではそれよりも大きかった。

セメントペースト実験より, 主鎖長が分散性に大きく影響することが分かった。

### 3.2 コンクリート実験

限界 W/C が 10.1%であった OCL を用いて, W/C=10.0%と

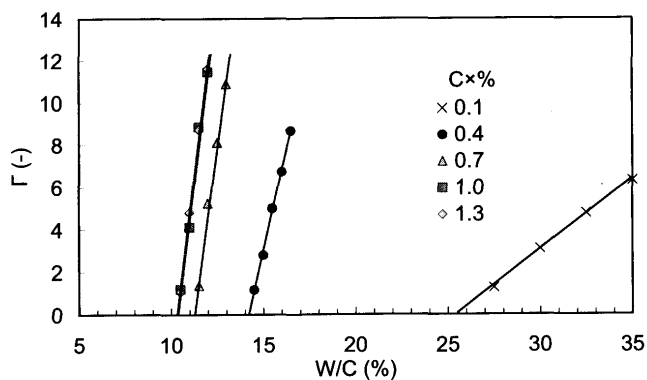
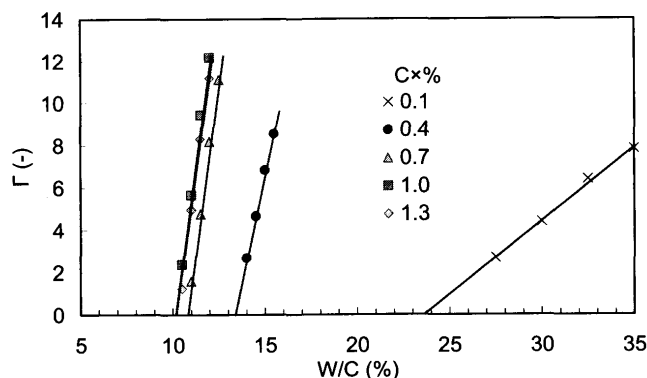
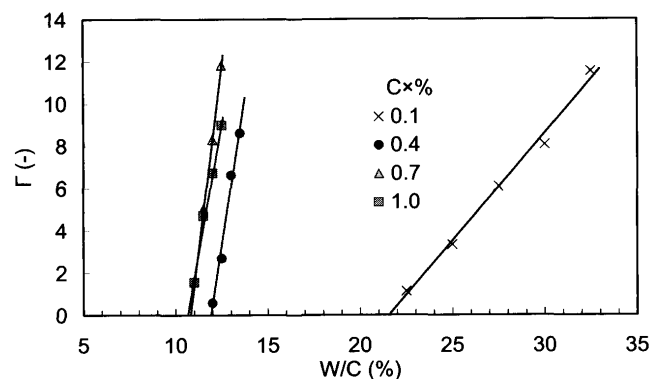
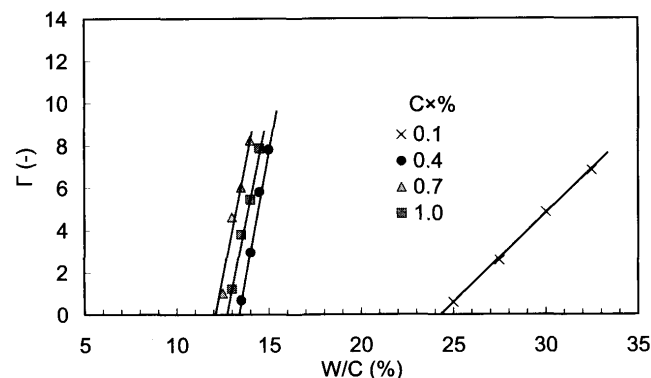
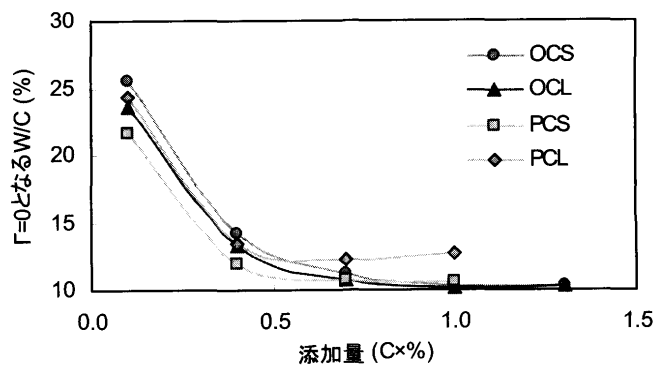
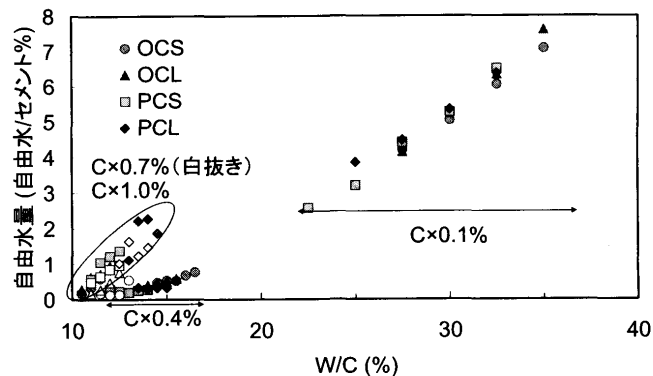

図5 OCSを用いたときの W/C と  $\Gamma$  の関係

図6 OCLを用いたときの W/C と  $\Gamma$  の関係

図7 PCSを用いたときの W/C と  $\Gamma$  の関係

図8 PCLを用いたときの W/C と  $\Gamma$  の関係

図9 各 MSP における  $\Gamma=0$  となる W/C


図10 W/C と自由水量の関係

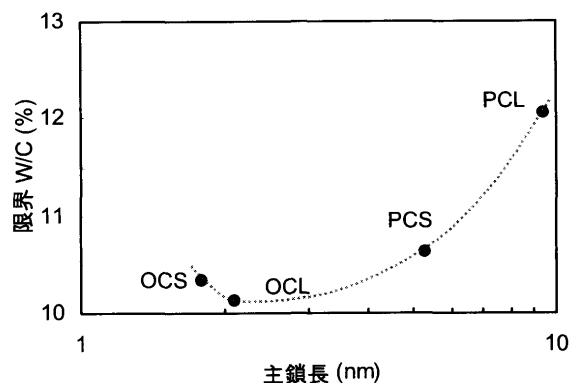


図11 主鎖長に対する限界 W/C

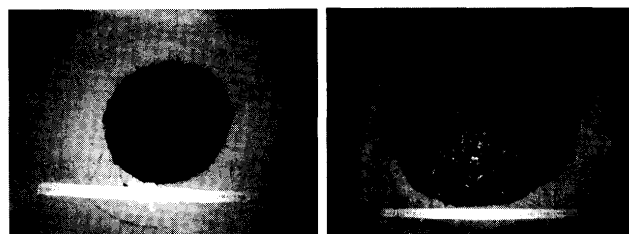


写真1 W/C=10.0%と 10.5%におけるスランプフローの形状

W/C=10.5%のコンクリートを練り混ぜた。スランプフローの形状を写真1に示す。W/C=10.0%のコンクリートでは流動性がほとんど無

く、気泡を多く含んでいたが、W/C=10.5%で流動性が得ることができた。

続いて、W/C=10.5%、12.0%、14.0%におけるコンクリートのスランプフローとLフロー初速度試験結果を表4から表6に示す。設

表4 W/C=10.5%におけるスランプフローとLフロー初速度

種類	W/C (%)	空気量 (%)	スランプフロー (cm)	Lフロー初速度 (cm/s)
OCS	10.5	2.6	61.0	0.7
OCL	10.5	2.5	62.5	0.9
PCS	10.5	-	-	-
PCS注水	11.0*	2.8	56.5	0.8

\*注水後のW/Cを表す

表5 W/C=12.0%におけるスランプフローとLフロー初速度

種類	W/C (%)	空気量 (%)	スランプフロー (cm)	Lフロー初速度 (cm/s)
OCS	12.0	1.8	76.0	2.0
OCL	12.0	1.7	77.0	2.5
PCS	12.0	2.0	65.0	1.3
PCL	12.0	-	-	-
PCL注水	12.5*	2.7	47.0	-

\*注水後のW/Cを表す

表6 W/C=14.0%におけるスランプフローとLフロー初速度

種類	W/C (%)	空気量 (%)	スランプフロー (cm)	Lフロー初速度 (cm/s)
OCS	14.0	1.5	64.0	2.7
OCL	14.0	0.8	76.0	5.7
PCS	14.0	1.3	78.0	4.8
PCL	14.0	1.6	53.0	-

定したW/Cでの流動性を確認できなかったものは、練り混ぜているコンクリートに更に注水することにより流動性を得ることができるか確認した。

表4に示したW/C=10.5%においてPCSは流動性を得ることができなかったため、流動性が確認できるまで注水し、W/C=11.5%相当で流動した。これは、ペースト試験における限界W/Cの結果を再現したものと考えられる。同様に、PCLはこのW/Cにおいては練り混ぜることができなかった。OCSとOCLはほぼ同一の流動性となったが、OCLの方がLフロー初速度が大きく、コンクリートの粘性が低かった。

表5に示したW/C=12.0%においてPCLは流動性を得ることができなかったため、流動性が確認できるまで加水し、W/C=12.5%相当で流動した。W/C=10.5%のときのPCSと同様にペースト試験における限界W/Cの結果を再現したものと考えられる。OCSとOCLは、W/C=12.0%においてもほぼ同一であり、Lフロー初速度はOCLの方が大きく、コンクリートの粘性が低かった。

表6に示したW/C=14.0%においてはすべてのMSPで流動性を得ることができたが、その中でもOCLとPCSの流動性が高かった。W/C=10.5%と12.0%で流動性が高かったOCSは、OCLとPCSと比較し低い流動性であった。OCSは図5で示したセメントペースト試験においてもC×0.4%、0.7%ではOCLとPCSより $\Gamma$ が小さかったため、その結果を再現したものと考えられる。OCLとPCSは同等な流動性であったが、OCLの方がLフロー初速度が大きく、コンクリートの粘性が低かった。

W/C=10.5%から14.0%の範囲においてOCLを用いたコンクリートの粘性が低かった原因として、この領域においてはOCLの主鎖

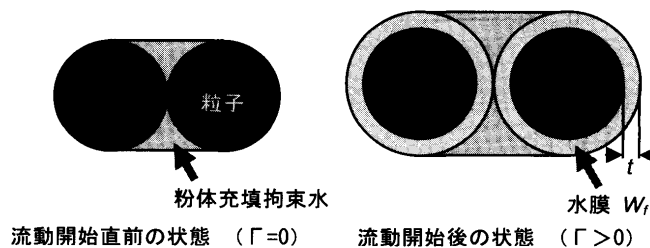


図12 水膜厚さの概念図

長が最適であり、バランスがとれているためであると考えられる。

以上、主鎖長がコンクリートの粘性へ与える影響について検討した。

### 3.3 主鎖長と水膜厚さに対する考察

セメントペーストの流動性については、セメント粒子を取り巻く水の影響が大きい。太田らは、水膜厚さが流動性に影響することを報告している<sup>12)</sup>。本研究においても、セメント粒子上に形成される水膜が重要な要素であると考えた。主鎖長と水膜厚さとの関係がセメント粒子の分散に影響しているのではないかと考え、必要な分散力を得ることができる主鎖長について考察を行った。

分散剤分子がセメント粒子に対して平坦に吸着した場合の厚さをC-C結合距離3個分であると仮定すると、その厚さは0.377nmとなる。この厚さをセメントの比表面積を用いて計算された体積分を水に換算すると、W/C=0.025%分に相当する。この値は、本実験におけるW/Cで議論しているオーダーより十分小さく無視できると考えられる。よって、OCLの分散性試験で実測した限界W/C=10.1%を水膜の形成を開始できる水量である粉体充填拘束水とした。練混ぜ水と粉体充填拘束水との差を、水膜を形成する水とした。本研究は太田らの用いたモデル<sup>12)</sup>により、表2に示すプレーン比表面積を用いて水膜厚さを計算した。水膜の水膜厚さは式(2)により算出する。水膜厚さの概念を図12に示す。

$$t = \frac{W_f}{P \cdot \rho_w \cdot BL} (\times 10^7 \text{ nm}) \quad (2)$$

$t$  : 水膜厚さ (nm)

$BL$  : セメントの比表面積 (cm<sup>2</sup>/g)

$\rho_w$  : 水の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$P$  : 粉体の質量 (g)

$W_f$  : 水膜の水量 (g)

コンクリート試験においてW/Cの低い方から、初めて目標スランプフロー65±5cmとなった実測W/Cから限界W/C=10.1%を引くことにより $W_f$ を計算した。ただし、W/C=14.0%のPCLのスランプフローは53cmであったが、そのままW/C=14.0%にて $W_f$ を計算した。

各MSPにおいてコンクリート試験にてスランプフロー65±5cmを確認した主鎖長と水膜厚を図13に示す。水膜厚さと主鎖長とを比較すると、必要な流動性を得ることができる水膜厚さ $t$ は主鎖長の約3倍以上必要であり、主鎖長が大きいPCSでは約5倍、PCLでは約6倍あった。

側鎖であるポリアルキレングリコール類のセメントへの吸着はない<sup>7),19)</sup>と考えられる。また、W/C=10.5%では粒子間距離が水膜厚さの2倍の12nmとなり、側鎖の最大伸長である11.9nmと同等もしくはそれ以上の距離であることより、主鎖長に対する議論が重

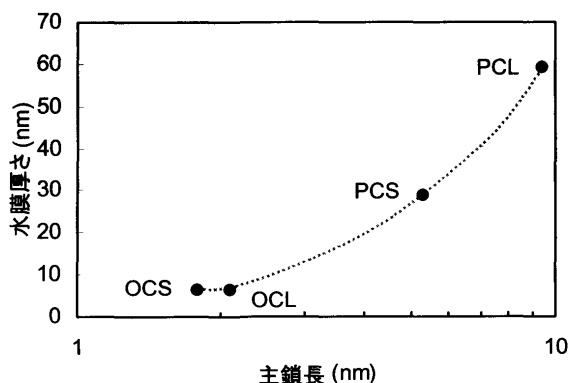


図 13 スランプフロー $65 \pm 5$ cm を確認した主鎖長と水膜厚さ

要であると考え。

W/C が小さい範囲における分散性は主鎖長が水膜厚さに対して十分短い場合、MSP 分子自体が粒子間距離の狭いところに存在するために起こる絡み合い<sup>20)</sup>や、吸着部位であるカルボン酸を持つ主鎖が複数のセメント粒子間に吸着してしまい橋架け凝集<sup>21)</sup>を起きていることが原因と考える。特に、これらの現象は主鎖長が大きいほど顕著になるものと考え。これらの分散阻害を避け分散作用を得るためには、主鎖長が短い必要があると考える。

以上より、主鎖長は超高強度コンクリートにおいてのセメント分散性に対して影響があることが分かった。

#### 4. まとめ

本研究では、マレイン酸系混和剤 (MSP) の主鎖長の短い方から OCS, OCL, PCS, PCL の 4 種類の混和剤を用い、超高強度コンクリートにおけるポリカルボン酸系混和剤の主鎖長が分散性に及ぼす影響について実験し、以下の知見を得た。

- (1) セメントの分散性は MSP の添加量が  $C \times 0.1\%$  および  $0.4\%$  では  $PCS > OCL \approx PCL > OCS$  であるが、 $C \times 1.0\%$  では主鎖長の短い OCS, OCL の分散性が高くなった。
- (2) 限界 W/C に近い W/C=10.5% においては主鎖長の短い OCS, OCL のみが流動性を得ることができた。
- (3) 限界 W/C 付近においては、分散性を自由水量からは確認できなかった。
- (4) コンクリート試験では、ペースト試験で得られた結果の限界 W/C を再現した。また、限界 W/C の低い OCL を用いた場合、他の MSP よりもコンクリートの粘性が低かった。
- (5) セメント粒子に対する水膜厚さを想定した場合、水膜厚さが主鎖長の約 3 倍以上の場合に分散性を得ることができた。

#### 参考文献

- 1) 陣内浩, 渡邊悟士, 寺内利恵子, 阿部剛士: 設計基準強度  $150\text{N/mm}^2$  の低収縮型高強度コンクリートの打設と品質管理, コンクリートテクノ, Vol. 25, No. 9, pp. 18-22, 2006. 9
- 2) 藤井義捷, 藁品忠義, 佐藤真吾: 設計基準強度  $150\text{N/mm}^2$  の低収縮型高強度コンクリートの出荷について, コンクリートテクノ, Vol. 25, No. 9, pp. 23-27, 2006. 9
- 3) 三井健郎, 小島正朗, 高尾全, 佐藤敏之: 設計基準強度  $150\text{N/mm}^2$  超高強度コンクリートによる超高層集合住宅の施工, セメント・コンクリート, No. 723, pp. 25-31, 2007. 5
- 4) 飯場栄二, 稲垣順司, 木之下光男, 名和豊春: ポリカルボン酸系分散剤の化学構造が流動性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No. 2, pp. 151-156, 2000
- 5) 坂井悦郎, 大門正樹: ポリカルボン酸系減水剤によるセメントの分散機構, セメント・コンクリート, No. 595, pp. 13-22, 1996. 9
- 6) Ohta, A., Sugiyama, T., and Tanaka, Y.: Fluidizing Mechanism and Application of Polycarboxylate-Based Superplasticizers, Fifth CANMET/ACI Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in concrete, pp. 359-378, 1997
- 7) 小川彰一, Ammar YAHIA, 市川高央, 伊藤昭則: 減水剤の分子構造とセメントペーストの流動性に関する一考察, セメント・コンクリート論文集, No. 53, pp. 134-139, 1999
- 8) 菅俣匠, 小泉信一, 原田健二, 岡沢智:  $150\text{N/mm}^2$  級コンクリートの強度発現性に及ぼすシリカフェュームの反応率の影響, コンクリート工学論文集, Vol. 18, No. 2, pp. 1-11, 2007
- 9) 木之下光男, 結城康夫, 齊藤和秀, 高橋智雄: 超高強度コンクリート用高性能減水剤としてのメタクリル系水溶性高分子, 高分子論文集, Vol. 52, No. 6, pp. 357-363, 1995. 6
- 10) 菅俣匠, 杉山知巳, 梅沢健, 岡沢智: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 1, pp. 927-932, 2002
- 11) 木之下光男: コンクリート用化学混和剤の最近の動向, 化学工業, Vol. 49, No. 5, pp. 55-63, 1998
- 12) 太田顕, 名和豊春, 大沼博志: セメント粒子の凝集構造とセメントペーストの流動性の関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 2, pp. 271-276, 2001
- 13) H. ハート: ハート基礎有機化学, 培風館, 1986
- 14) 太田晃, 杉山知巳, 魚本健人: ポリカルボン酸系分散剤の分散作用効果に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 53, pp. 122-127, 1999
- 15) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンコンクリート, 技報堂出版, 1993
- 16) 星野清一, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正樹: 無機粉体の粒子特性とセメントペーストのレオロジー, セメント・コンクリート論文集, No. 50, pp. 186-191, 1996
- 17) 坂井悦郎, 山田貴之, 新大軌, 大門正樹: シリカフェュームを混和した超高強度セメントの流動特性, セメント・コンクリート論文集, No. 60, pp. 32-38, 2006
- 18) 米澤敏男, 和泉意登志, 三井健郎, 奥野亨: 高強度コンクリートワークability に関する L 型フロー試験法による研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, pp. 171-176, 1989
- 19) 松尾茂美, 永峯秀則, 太田晃: 新規なポンプ圧送向上剤の作用機構, セメント・コンクリート論文集, No. 52, pp. 224-229, 1998
- 20) 尾崎邦宏: レオロジーの世界, 工業調査会, 2004
- 21) 古沢邦夫: 新しい分散・乳化の科学と応用技術の新展開, テクノシステム, 2006

(2008年5月8日原稿受理, 2008年8月29日採用決定)