

高強度コンクリートの練混ぜ過程における条件およびアルミネート相の増量がスランブフローに与える影響

小林 皆也¹・川崎 佑磨²・坂本 恭裕³・福山 智子⁴

要旨:我が国における高強度コンクリートの施工事例の増加が見込まれており、製造技術も対応していく必要がある。高強度コンクリートの流動性は、同一配合・同一環境でも、練混ぜ条件によって大きく異なる場合がある。既往研究では、練混ぜ過程において、表面水を持つ細骨材とセメントを練混ぜ初期に混練する空練りに着目し、空練りによって流動性に差異が生じることを確認している。本研究ではその練混ぜ過程の中でも、セメント成分の違いに着目し、流動性への影響について確認した。その結果、混和剤を先行吸着するアルミネート相の見掛け上の比表面積が空練りにより減少し、スランブフローに差が生じることを確認した。

キーワード:高強度コンクリート、空練り、混和剤、先行吸着、アルミネート相

1. はじめに

現在、我が国における社会問題として、「いかに低炭素社会を実現するか」、「人口減少に伴う作業などの効率化をどのように促進するか」、「高齢化社会における技術継承をどのように効率よく行うか」など、様々な課題が挙げられている。

その中で、近年の自然災害の激甚化・頻発化等を踏まえ、防災・減災やインフラ老朽化対策等の国土強靱化といった政策から、今後、高強度コンクリートの施工は増加すると考えられる。また、日本全体の人口減少や建設業界における担い手不足といった問題から、工期削減などに伴い、プレキャストコンクリート製品の利用が促進されると予想する。さらに、**JIS A 5308**の改正(2019)における趣旨にも、高強度コンクリートの利用を推進するためと明記されている¹⁾。

このような背景から、高強度コンクリートの施工数はさらに増加し、施工技術だけではなく、パッチャープラントでの製造においても、その対応が求められる。一方で、練混ぜ条件がコンクリートの流動性に影響を与えることも知られており、その原因の一つとしてセメントに対する混和剤の吸着が挙げられている^{2), 3)}。セメント量が多くなる高強度コンクリートでは、通常のコンクリートよりもその影響が大きくなる。しかし、高強度コンクリートを対象とした配合において、上記影響の程度やメカニズムの解明を試みた事例は少ない。練混ぜ条件に伴う流動性の相違の解明は、今後の高強度コンクリートの安定的な供給に寄与できると考える。

既報として、空練り(練混ぜ初期における表面水を持つ細骨材とセメントの練混ぜ)を行うことで、スランブフローに差異が生じることが報告されている^{2), 3)}。また、練混ぜ過程で空練りを行うことでスランブフローが変化する現象に対して、セメントと表面水の水和反応で生じるセメント粒子のフロック形成や液相中に残存する混和剤量という要因が影響していることも報告されている。しかし、セメントの種類によっては比表面積や化学成分が異なるため、スランブフローに対して空練りが及ぼす影響はすべてのセメントで一様であるかは不明である。

そこで本報では、異なるセメントで複数の実験を実施し、空練りによるスランブフロー、混和剤残存量への影響を検討した。また、既往の研究でも重要な指標であった細骨材の表面水や混和剤に着目し、混和剤吸着の化学的考察も加えて、空練りでスランブフローに差異が生じる過程について考察した。

2. 既往研究における練混ぜ過程

既往研究の高強度コンクリート配合において、表面水を持つ細骨材を用いる際、空練りを行うことで、スランブフローが増加することを確認している^{2), 3)}。

また、空練りによるスランブフローの増加は、セメント粒子のフロック形成が要因であると推定されている。**図－1**に現状考えられる練混ぜ過程を示す。本研究で想定している空練りによる流動性向上の仕組みは以下の順序で説明される。

A) 空練り段階

細骨材の持つ表面水とセメント粒子が水和反応を開始する。水和反応が始まったセメント粒子は電荷が不安定となり、電氣的に安定した状態になるために粒子同士が凝集し、フロックが形成される。

B) モルタル練り段階

混和剤を含む水を投入するとフロックの表面に混和剤が吸着する(以後、先行吸着)が、それ以外の混和剤は液相中に残存する。

C) コンクリート練り段階

投入された粗骨材との接触によってフロックが崩壊し、未水和のセメント面が暴露する。**B**でも少なからず細骨材接触による吸着面の露呈が起こっているが、**C**では粗骨材接触のせん断力で顕著化する。

D) 練混ぜ完了時

崩壊したフロックの未水和セメント部に液相中に残存した混和剤が吸着する(以後、後吸着)。

練混ぜ後の流動性を維持するには、**D**で十分な混和剤が残存し、後吸着時点で未水和のセメント表面に新たに吸着できる余剰混和剤が必要である。また、空練り時間が長くなるほどセメント粒子が凝集し、**A**で形成されるフロック比表面積は小さくなる。したがって空練り時間が長いほど**B**で先行吸着する混和剤が少なくなり、**D**で後吸着する混和剤が十分残存するためスランブフローが増加する傾向を得ている(以後、空練り効果)²⁾

しかし、**1**章でも述べたように現状の練混ぜ過程ではセメントの比表面積、セメント成分の影響などによる差が考慮できないため以降の章で検討した。

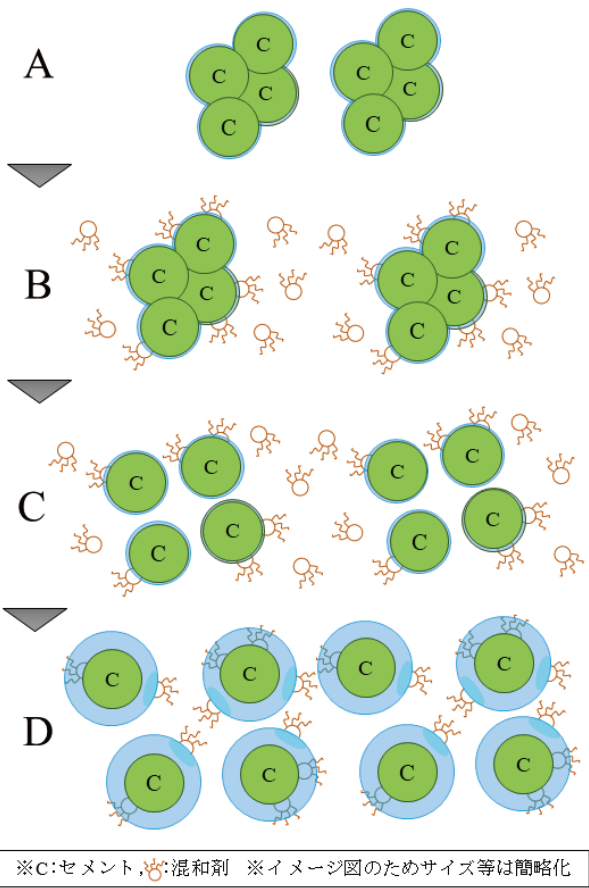
3. 実験概要

3.1 使用材料

本研究において対象とした設計基準強度80N/mm²の高強度コンクリート配合の一例を**表－1**に示す。混和剤添加量は各試験日当日に、コンクリート配合で行った予備試験の結果から、配合調整を行った値に設定した。使用材料を**表－2**に示す。セメントは低熱セメント(**L**)、中庸熱セメント(**M**)、普通セメント(**N**)、早強セメント(**H**)の**4**種類を使用した。各セメントの化学成分と比表面積を**表－3**に示す。混和剤は単位セメント量に対して添加した。空練り効果は細骨材が持つ表面水とセメント粒子の反応によって引き起こされるものと考えるため、本研究では既往研究^{2), 3)}と同様に、細骨材の表面水率を**3%**に統一して実験を行った。

表－1 高強度コンクリート(80-60-20L)の配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランブフロー(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率(%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	混和剤 <i>Pc</i>
20	60.0	21.4	2.0	44.4	175	818	650	815	8.18



図－1 考えられる練混ぜ過程

表－2 使用材料

材料	種類及び品質
細骨材 <i>S</i>	砕砂 岩種：安山岩 表乾密度：2.54g/cm ³
粗骨材 <i>G</i>	砕石 岩種：安山岩 表乾密度：2.67g/cm ³
混和剤 <i>Pc</i>	高性能減水剤 主成分：ポリカルボン酸系化合物

*1 立命館大学 理工学研究科 環境都市専攻 (学生会員)
 *2 立命館大学 理工学部 環境都市工学科 准教授 博士(工学) (正会員)
 *3 日工(株) 技術本部 開発部 (正会員)
 *4 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科 准教授 博士(工学) (正会員)

表－3 各セメントの化学成分と比表面積

セメント種類	化学成分(%)				比表面積(cm²/g)
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
低熱ポルトランドセメント (L)	27	55	2	9	3130
中庸熱ポルトランドセメント (M)	43	36	4	13	3120
普通ポルトランドセメント (N)	56	18	9	9	3320
早強ポルトランドセメント (H)	63	12	9	8	4350

3.2 練混ぜ手順

練混ぜには二軸強制練りミキサ(容量**60L**)を使用し、練り量は**36L**とした。**図－2**に練混ぜ手順を示す。練り時間は細骨材、セメント、水、混和剤までのモルタル練りを**7分**、粗骨材投入後のコンクリート練りを**3分**、計**10分**間の練混ぜを行った。モルタル練り後にモルタルフローを測定、コンクリート練り後にスランプフローを測定した。各練混ぜにおいて、空練りの時間は**0s**、**30s**、**90s**のいずれかで行うが、空練り時間はモルタル練りの時間を含むため、合計の練混ぜ時間は変化しないものとした。試験環境については温度**20±2℃**、湿度**50%**以上の一定環境下の室内で実験を行った。

3.3 混和剤残存量の測定

5章では、**図－1B**の後(粗骨材投入前)に、モルタル試料の混和剤残存量の測定を行った。測定は遠心分離機を用いてモルタル試料を液相と固相に分離し、抽出した液相を熱分析(**TG/DTA**)にかけ、混和剤の有効成分が燃焼する温度帯での重量変化から液相中の混和剤残存量を算出した。測定は**6**回行い、平均値を比較した。

4. セメント種類が空練り効果に及ぼす影響

2章の既往研究では、セメント粒子の物理的特性に着目し、ブロック形成による比表面積の減少から空練りによる流動性向上の過程を示した。そこで本章では、化学的特性として、セメント種類が空練り効果に対してどのような影響を及ぼすかについての実験を行った。材料や練混ぜ手順については前項で示した実験条件で実施した。

4.1 セメント比表面積の影響

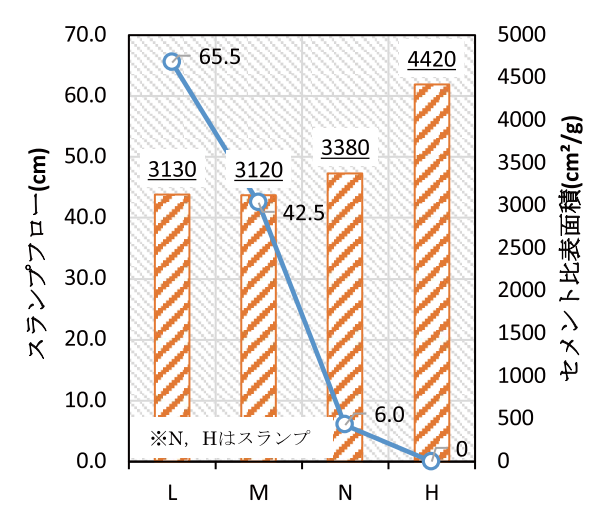
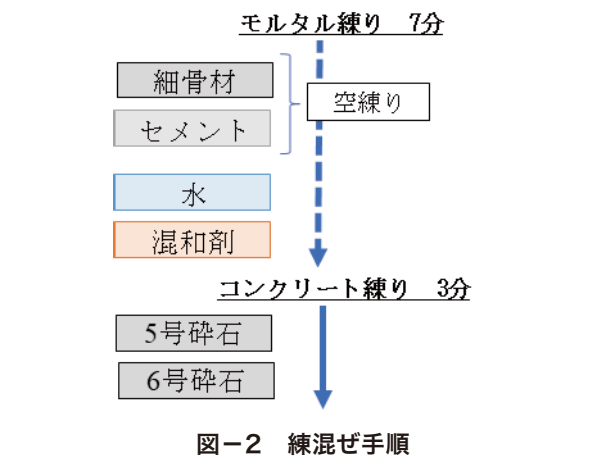
(1) 実験の概要

比表面積の異なるセメント**4種(L, M, N, H)**を用いて、各種セメントのスランプフローと比表面積の関係を検討した。セメント比表面積の影響を確認するため、混和剤添加量**0.65%**、空練り時間**30s**に統一し実施した。また、セメントの種類ごとに密度が異なるため、総容積が変動するが**L, M, N**については影響が小さいと考え、容積変動は考慮しないこととした。

(2) 結果と考察

各セメントにおけるスランプフローの結果を**図－3**に示す。低熱セメント(**L**)、中庸熱セメント(**M**)、普通セメント(**N**)は比表面積が同等だが、スランプフローは、低熱セメント(**L**)を基準とすると中庸熱セメント(**M**)は**23.0cm**減、普通セメント(**N**)はスランプフローが測定できず、スランプ**6cm**となった。比表面積が同等でもフローが大きく違うことから、セメント成分にも影響を大きく受けることが想定される。

また、早強セメント(**H**)は比表面積が他のセメントと比べて約**1000cm²/g**大きいため、先行吸着で多くの混和剤が使用され、後吸着のための混和剤が不足しスランプが生じなかったと考えられる。



図－3 スランプフローとセメント比表面積

4.2 セメント成分の影響

(1) 実験の概要

4.1節において、セメント比表面積が同等でもフローが大きく異なることから、流動性はセメント成分にも影響を受けることが想定された。そこで各セメントのスランプフローとセメント成分の関係を検討した。

(2) 結果と考察

セメント成分の中でも、アルミン酸三カルシウム(以下、**C₃A**)の含有量とスランプフローについて、おおよそ相関がみられた。そのため、スランプフローと**C₃A**の関係を**図－4**に示す。セメント比表面積が同等の低熱、中庸熱、普通において**C₃A**の含有量は、低熱セメント(**L**)<中庸熱セメント(**M**)<普通セメント(**N**)の順に多く、スランプフローは低熱セメント(**L**)>中庸熱セメント(**M**)>普通セメント(**N**)の順で小さい。**C₃A**の含有量が増加するとスランプフローは減少することが確認できる。**C₃A**含有量が多いセメントのスランプフローが減少する原因として、**C₃A**の初期水和による混和剤の先行吸着があげられる^{4), 5), 6)}。混和剤は**C₃A**に先行的に吸着するため、**C₃A**含有量が多いセメントでは**図－1B**での先行吸着量が増加し、液相中に残存する混和剤量が少なくなる。そのため、**図－1D**で後吸着する混和剤量が少なくなり、練混ぜ完了時点で混和剤が不足するため、スランプフローが小さくなると考えられる。したがって、比表面積が同等のセメントにおいてもスランプフローに差が生じたと考えられる。

4.3 セメント種類の空練り効果に対する影響

(1) 実験の概要

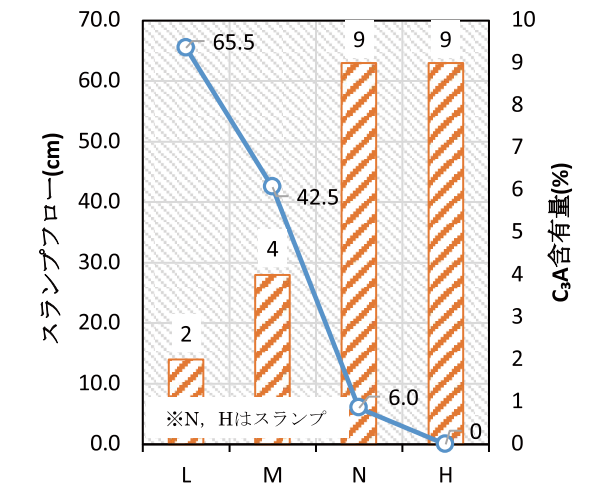
4.1、**4.2**節において、各種セメントのスランプフローは**C₃A**含有量に大きく影響を受けることを確認した。そこで、**C₃A**含有量が異なると空練り効果も異なると考えて、**C₃A**含有量が異なる際の空練り時間の影響について検討した。セメントは、混和剤添加量一定でスランプフローが測定可能であった低熱セメント、中庸熱セメントとした。

(2) 結果と考察

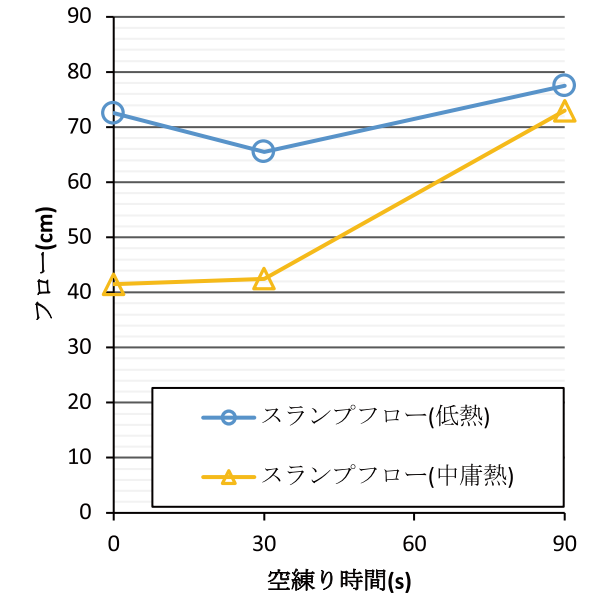
空練り時間とスランプフローの関係を**図－5**に示す。低熱セメント、中庸熱セメントともに空練り時間**90s**でスランプフローが最大となった。**C₃A**の含有量が異なるセメントでも、空練り時間の増加によるスランプフローの増加が確認できた。

また、空練り時間**0s**、**30s**においては低熱セメントと中庸熱セメントの間に**20~30cm**のスランプフロー差が確認できた。一方、空練り時間**90s**では低熱セメント、中庸熱セメントの間にスランプフロー差はほとんど存在しない結果となった。セメント比表面積が同等のセメントにおいて、空練り時間によるスランプフローの増加率に差が存在することから、空練りによって**C₃A**への混和剤吸着量に差が生じていると想定できる。

C₃Aの含有量は低熱セメント<中庸熱セメントであるため、空練り時間が短い(**0s**、**30s**)場合において、**図－1B**での混和剤の先行吸着量が低熱セメント<中庸熱セメントとなり、中庸熱セメントは**図－1D**で混和剤の後吸着量が不足し、スランプフローが低熱セメントに比べて小さくなったと考えられる。一方、空練り時間が長い(**90s**)場合、**図－1A**でのブロック形成により**C₃A**が吸着するための見掛け上の比表面積が減少すると推測される。そのため**図－1B**で混和剤の先行吸着量が減少し、**図－1D**において低熱セメント、中庸熱セメントともに後吸着に必要な混和剤量が十分に残存しており、同等のスランプフローが得られたと推測した。



図－4 スランプフローとC₃A含有量



図－5 空練り時間とスランプフロー

5. アルミネート相増量のスランブフローへの影響

(1) 実験の概要

4章において、セメント種類が異なると空練り効果に差があることが確認できた。また、空練りを長く行うことで**C₃A**に対する混和剤の先行吸着量を抑えることが可能であるとの推察を得た。しかし、セメント種類が異なるため**C₃A**以外の成分が影響した可能性を除去できない。そこで本章では、混和剤を先行吸着すると考えられる**C₃A**のみに着目するため、低熱セメントの一部を酸化アルミニウム粉末（以下、アルミナ粉末）に置換して実験を行った。低熱セメントに対するアルミナ粉末の置換率はセメント量から**C×1%**分を置換した。パターンは以下に示す**3**タイプで比較した。

1. 空練り30s

2. 空練り30s(アルミナ1%)

3. 空練り90s(アルミナ1%)

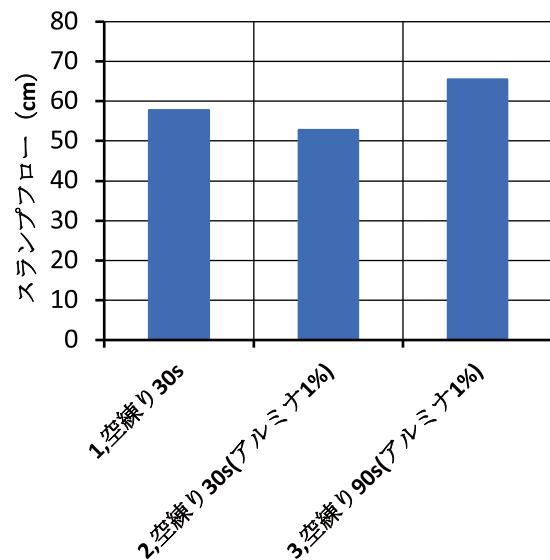
材料や練混ぜ手順については4章と同様の条件で実施した。また、置換率が**1%**と小さいため比表面積に対する影響は小さいと考えて、置換後の比表面積差については考慮しないものとした。

(2) 結果と考察

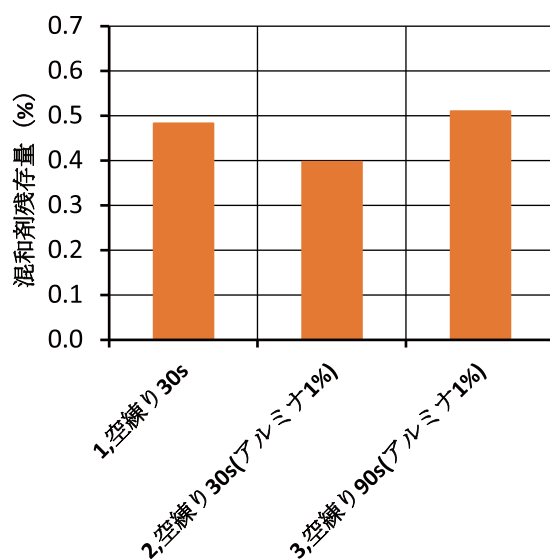
図－6に各パターンのスランブフロー、図－7に各パターンの混和剤残存量の結果を示す。図－6から空練り時間**30s**と空練り時間**30s**(アルミナ**1%**)を比較すると、スランブフローの減少が確認できた。図－7でも混和剤残存量が同様に減少していることがわかる。混和剤残存量は、図－1Bの後(粗骨材投入前)に測定しているため、アルミナ粉末が増えると混和剤の先行吸着量が増加して、混和剤の後吸着量が少なくなりスランブフローが減少したと推察できる。

また、空練り時間**30s**(アルミナ**1%**)と空練り時間**90s**(アルミナ**1%**)を比較すると、空練り時間の増加に伴うスランブフローの増加が確認できた。空練り時間の増加で、混和剤残存量も増加していることから、空練りによって酸化アルミニウムに対する混和剤の先行吸着量を抑制できていることがわかる。すなわち、空練り時間が長くなることで、図－1Aにおいてセメント粒子が形成するブロックによりアルミナ粉末の比表面積が減少し、混和剤の先行吸着量の減少につながっていると想定できる。

空練り**30s**と比較すると、空練り時間**90s**(アルミナ**1%**)の方がスランブフロー、混和剤残存量が大きいことも確認できた。したがって、アルミナ**1%**に対する混和剤の先行吸着によるスランブフローの減少より、空練りを**90s**行うことによるスランブフローの増加の方が大きいことがわかった。



図－6 空練り時間とフロー



図－7 空練り時間と混和剤残存量

6. 実験の結果から想定される練混ぜ過程

4章、5章で検討したセメント成分の影響を考慮して空練り時間も踏まえた練混ぜ過程を図－8に示す。今回の検討を踏まえると空練りによる流動性向上の仕組みは以下の順序で説明される。

A) 空練り段階

細骨材の持つ表面水とセメント粒子が水和反応を開始する。水和反応が始まったセメント粒子は電荷が不安定となり、電気的に安定した状態になるために粒子同士が凝集し、ブロックが形成される。空練り時間が長くなると、ブロックは大きくなると推察され、混和剤が吸着するためのセメントの比表面積（特に**C₃A**）は減少する。

B) モルタル練り段階

混和剤を投入するとブロックの表面に混和剤が吸着する。特に**C₃A**に対して先行的に吸着する。

C) コンクリート練り段階

投入された粗骨材との練混ぜによってブロックが崩壊する。

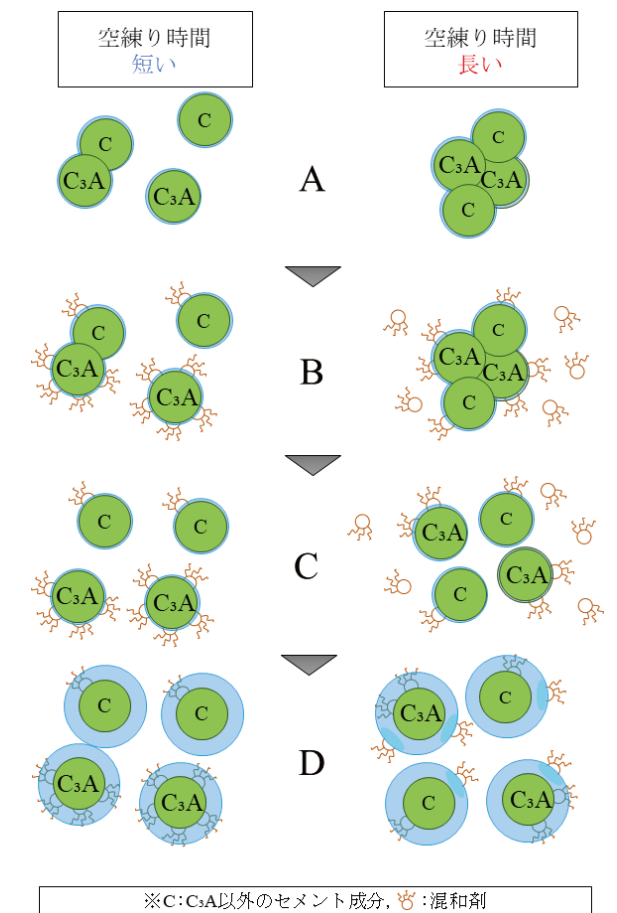
D) 練り混ぜ完了時

崩壊したブロックの未水和セメント部に液相中に残存した混和剤が後吸着する。

図－1の練混ぜ過程では、空練りの効果はAでのセメント粒子ブロック形成によるブロック比表面積の減少、Bでの混和剤先行吸着量の減少、によってDで後吸着する混和剤の量が増加し、スランブフローが増加すると推察していた。

しかし、今回の検討ではセメント成分に着目し、セメントの比表面積が同等でも、**C₃A**の含有量によって混和剤残存量に差が生じていることを確認した。そのため、空練りを行うことで、Aでセメント粒子のブロック形成により**C₃A**の比表面積が減少し、Bで**C₃A**に対する混和剤の先行吸着量が減少することで、Dで後吸着する混和剤量が増加し、スランブフローが増加すると推察した。

したがって空練りによるスランブフローの増加は、セメント粒子のブロック形成による混和剤が吸着可能な面積の減少、**C₃A**の見掛け上の比表面積減少による混和剤の先行吸着量の減少、の**2**点が大きな要因であると考えた。



図－8 今回の検討から考えられる練混ぜ過程

7. まとめ

本研究で得られた知見について、以下にまとめる。

- (1) 本研究で使用した配合において、低熱セメント、中庸熱セメント、アルミナ置換低熱セメントのすべてで、空練り時間増加によるスランブフローの増加が確認できた。
- (2) 空練り時間一定、セメントの比表面積同等であっても、セメント成分の違いによりスランブフローは異なった。これは、**C₃A**に対する混和剤の先行吸着量の影響であり、空練り時間が長くなると、セメント成分が異なるセメントでも、後吸着用の混和剤が十分残存し、同等のスランブフローが得られた。
- (3) 「セメント粒子の比表面積が減少し混和剤の吸着量が減少する」、「**C₃A**に対する混和剤の先行吸着量が減少する」、この**2**つの作用により、後吸着用の混和剤が残存してスランブフローの増加につながるという練混ぜ過程の推察を得た。

これらの結果は、本研究の高強度コンクリート配合で得られたものである。今後は、他配合の高強度コンクリート、普通コンクリートでも同様の結果が得られるか、本研究で推察した練混ぜ過程の一般性について詳細な検討を進める。

参考文献

- 1) JIS A 5308:2019レディーミストコンクリート
- 2) 坂本恭裕, 川崎佑磨, 福山智子, 金侖美: 高強度コンクリートを対象とした空練りがモルタルフローに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.850-855, 2022
- 3) 坂本恭裕, 川崎佑磨, 福山智子, 金侖美: 空練りによるブロック形成が高強度コンクリートのスランブフローに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.826-831, 2023
- 4) 丸屋英二, 一瀬龍太郎, 坂井悦郎: 混和剤を添加したアルミネート高含有セメントの流動性と水和特性, Cement Science Concrete Technology, No.64, 2010
- 5) 中口歩香, 森泰一郎, 松澤一輝, 黒川大亮: 少量混合成分とアルミネート相を増量したセメントの設計開発～その1セメントの品質評価～, Cement Science Concrete Technology, Vol.73, No.1, pp.429-435, 2019
- 6) 太田晃, 魚本健人: 微粉末粒子に対するポリカルボン酸系分散剤の分散効果に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.2, pp.131-136, 1999

筆者紹介



SAKAMOTO Yasuhiro
坂本 恭裕
2012年入社
開発部
開発2課