

論文 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プフローに与える影響

坂本 恭裕*1・川崎 佑磨*2・福山 智子*3・金 倫美*4

要旨：高強度コンクリートの施工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、同配合・同環境でも、練混ぜ条件によって大きく異なる場合がある。本研究では、2軸強制練りテストミキサによる高強度コンクリート配合の練混ぜにおいて、空練り（練混ぜ初期における細骨材とセメントの練混ぜ）による流動性変化に着目した。その結果、空練りによるスランプフロー値差を確認し、Cryo-SEM、混和剤吸着量の分析から、空練りを行うことでブロックが形成され、その後に吸着する混和剤の量やタイミングに変化を生じさせ、流動性に差異が生じると考察した。

キーワード：高強度コンクリート、2軸強制練りミキサ、空練り、ブロック形成、Cryo-SEM、混和剤吸着

1. はじめに

現在、我が国における社会問題として、「地球温暖化対策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、より高強度化した建造物の建設など、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ことから加速的に利用増加が見込まれる。

このような背景から、高強度コンクリートの施工はさらに増加し、施工技術だけではなく、バ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¹⁾、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⁾。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く、練混ぜ条件の違いに伴う流動性の相違の解明は急務であり、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。

そこで本研究では、練混ぜ初期における細骨材とセメントの練混ぜ（以下、空練り）の有無や時間に着目して、高強度コンクリートの流動性に空練りが与える影響を考察した。既報³⁾として、ホバートミキサ（5L）でのモルタルにおける空練りの影響およびメカニズムについて報告したが、本報では、2軸強制練りテストミキサを用いてより実務に近い形で複数の実験を実施した。各空練り条件におけるモルタルフロー値とコンクリートのスランプフロー値や、既存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、Cryo-SEM を用いた物理的考察、混和剤吸着の化学的考察も加えて、流動性の差異が生じる理由について考察した。

2. 空練りが各フロー値に与える影響

2.1 実験概要

本項では、本報において記述する全ての実験において共通の概要を示す。実験対象とした設計基準強度 80N/mm² の高強度コンクリートの配合を表-1 に示す。本研究では、この配合から、使用したミキサでの練混ぜ

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)	スランプ 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

*1 日工（株） 技術本部 開発部（正会員）

*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 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）

*4 立命館大学 総合科学技術研究機構 助教 博士(工学)（正会員）

可能量である 36L 当たりの必要材料値を計算して後述する各試験を行った。使用材料を表-2 に示す。

混和剤は単位セメント量に対して添加した。添加量は、各試験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。使用ミキサは、それぞれ材料の動きが異なるように設計された羽根高さが異なる 2 種類（以下、A、B とする）の 2 軸強制練りテストミキサ（60L）を使用し、試験環境は温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 50% 以上の一定環境下の室内で試験を行った。

2.2 空練りの有無および空練り時間による影響

(1) 概要

図-1 は練混ぜ方法について図示したものである。予備実験によるミキサの動力データから、空練り時間を含んだモルタル練混ぜを 7 分、粗骨材を投入してからのコンクリート練混ぜを 3 分の合計 10 分の練混ぜを行った。

細骨材の表面水とセメントによる初期吸着の影響を確認するため、空練りを行い、その後に細骨材および粗骨材の表面水分を差し引いた練混ぜ水と混和剤を投入して練混ぜる方法でモルタルを製作した。なお、湿潤状態の細骨材における表面水率は 3% に統一した。

また、空練りの有無および空練り時間による影響を確認するため、モルタルの合計練混ぜ時間は 7 分に固定したまま、各ミキサによる空練り時間を 0、30、60、90 秒の 4 パターンに設定し、空練り時間に応じて練混ぜ水を投入した後のモルタル練混ぜ時間を変更した。そのモルタルに粗骨材を投入してフレッシュコンクリートを製作した。モルタル練混ぜ後とフレッシュコンクリート練混ぜ後のそれぞれのタイミングでフロー測定に必要な量のサンプリングを行い、モルタルフローおよびスランプフローの比較を行った。

(2) 実験結果および考察

各空練り時間のモルタルフロー値およびスランプフロー値を図-2 に示す。ここで、空練り時間 30 秒のスランプフロー値とは、空練り 30 秒で作製したモルタルに粗骨材を投入した場合のフローを意味している。

ミキサ A・B 共に空練り時間の増加に伴い、モルタルフローおよびスランプフローが大きくなった。

モルタルフローに着目すると、2 軸強制練りテストミキサで作製したモルタルの空練り 30 秒と 90 秒ではモルタルフロー値の差は約 3cm であった。これに対し、既報³⁾のホバートミキサでのモルタルフロー値差は約 10cm 程度であり、ホバートミキサと 2 軸強制練りテストミキサでは違いがあった。

また、スランプフローにおいては、空練り時間が増加するほどフローが伸びており、同一配合にも関わらず各ミキサでスランプフロー値差は 20cm を超過している。これは、JIS A 5308 にも記載されているコンクリートの

スランプフロー 60cm の場合の規定である $\pm 10\text{cm}$ よりも大きい。

このスランプフロー値差が生じた要因としては、粗骨材投入後の練混ぜではなく空練りが寄与していると考えられる。その理由として、①既報³⁾で空練りがモルタルフローに大きく寄与していること、②ミキサ A・B ともに、スランプフロー値差と空練り時間の増加に伴うフローの増加率は同程度であることが挙げられる。

しかし、2 軸強制練りテストミキサのモルタルフロー値差は 3cm と既報³⁾に比べて小さいことから、コンクリートの流動性に寄与するモルタルの特徴はフロー値では表すことができない性状であるとの仮説をたて、以降の実験で検証することとした。

表-2 使用材料

材料	種類および品質
セメント C	低熱ポルトランドセメント 密度: 3.23g/cm^3 比表面積: $3130\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材 S	砕砂 岩種: 安山岩 表乾密度: 2.54g/cm^3
粗骨材 G	砕石 岩種: 安山岩 表乾密度: 2.67g/cm^3
混和剤 Pc	高性能減水剤 主成分: ポリカルボン酸系化合物

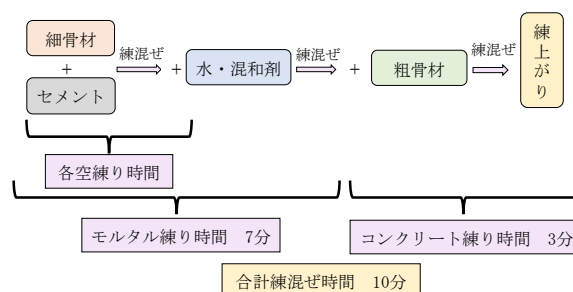


図-1 練混ぜ方法

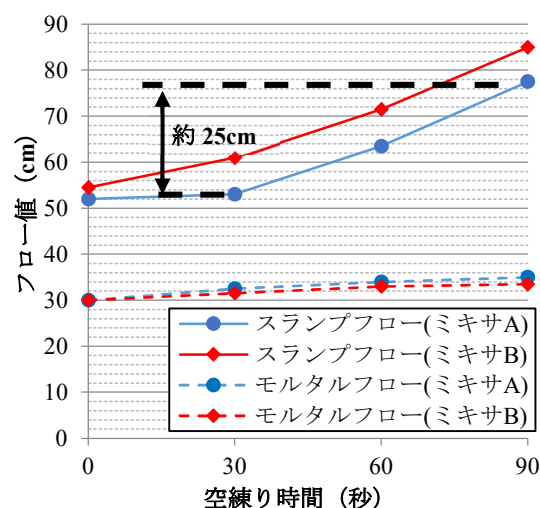


図-2 空練りによるフロー

2.3 モルタル性状差による影響

(1) 概要

前節の検討により推察した、モルタルフロー値差では表すことができないモルタル性状差の存在をより明確にするために、図-3 のような練混ぜを行うこととした。モルタルを A・B それぞれのミキサで練混ぜ、そのモルタルをミキサ A に移し替えることで粗骨材投入後の練混ぜ機構を一定とし、その際のスランプフロー値を評価した。

空練り時間は 0, 30, 60, 90 秒の 4 パターンとし、モルタルの移し替えによる条件を一定にするために、一貫して同じミキサで練混ぜを行うパターンにおいても、一度排出し、入れ戻す作業を行った。モルタルの移し替えに要する時間に関しても一定となるように、管理して実験を行った。その他の試験条件は、前節と同様の条件で実施した。

(2) 実験結果および考察

モルタル移し替え試験の各空練り時間に対するフロー値の結果を図-4 に示す。前節と同様に、モルタルフローについては、ミキサによって差がないことが確認された。しかし、それぞれ違うミキサによって練混ぜた同じフロー値のモルタルを、ミキサ A に移しコンクリートの練混ぜを行った場合では、一貫して同じミキサで練混ぜたスランプフロー値と異なる結果となった。

この結果から、モルタルフロー値では表すことができないモルタルの性状差が空練りで生じていることが推測できる。また、このモルタル性状差が、空練りによるスランプフロー値差につながっていると推測できる。

そのモルタル性状差を確認するために、空練りで生じていると考えられる、細骨材表面水のセメント粒子への移動やフロック形成、混和剤吸着量差を次章で検討した。

3. 空練りが流動性に与える影響

2 章における結果から、空練りによってモルタルフローでは表すことができない性状差がスランプフローに影響していることが確認できた。そこで本章では、物理的試験として、細骨材の表面水がセメント粒子に対してどのような影響を及ぼしているのか、またその表面水で生じるフロックの形成について確認実験を行った。さらに、化学的試験として、流動性に大きく影響を及ぼす混和剤吸着量の測定を行った。

3.1 細骨材の表面水移動に関する実験

(1) 概要

空練り時間に応じて、細骨材の表面水がどのようにセメント粒子に吸着および移動しているかを定量化するために、赤外線多成分計を用いて試験を行った。実験に用いる材料は、セメントの代用として白色の粉体である炭

酸カルシウム（密度：2.71g/cm³）と細骨材を用いた。炭酸カルシウムを用いることにより、水との反応もなく、粉体と細骨材の純粋な吸着の評価につなげることが可能と考えたためである。セメントの比表面積に対して、3000 cm²/g と同等であるため、水分の移動を評価するにあたっては影響ないと判断した。

赤外線多成分計による測定対象は色の波長とし、空練り後の材料表面における波長から吸光度を測定した。なお、細骨材の表面水と炭酸カルシウムの本来の色では波長差が生じにくい。そこで、炭酸カルシウムとの色波長差をより明確にするために、絶乾状態の細骨材に表面水 3% となるように食紅で着色させた水を吸収させた。

各材料の計量値は、表-1 に示した基準配合から 36L 当たりの必要材料値を計算した。測定条件は、空練り時間を 30, 60, 90 秒の 3 パターンとして、本練りを行う前の空練りのみを測定対象とし、試料の採取場所は、図-5 に示すように、ミキサ平面に対して対角箇所と中心の

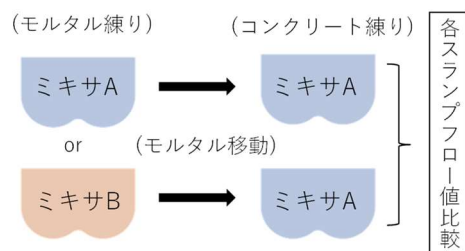


図-3 モルタル移し替え試験方法

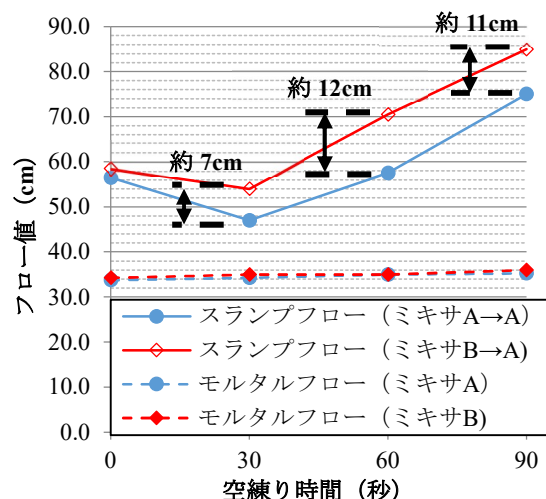


図-4 モルタル移し替え試験におけるフロー

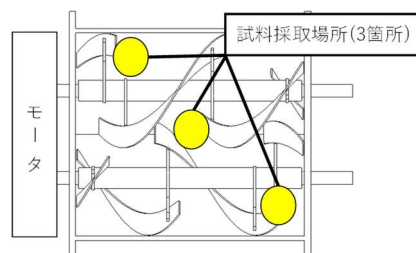


図-5 サンプリング箇所

3箇所から採取した。空練り直後の材料をステンレス製のバットに移し、表面を平滑に調整した後、その容器内を図-6に示すように6区分に分割した。各区分中央の表面色波長の測定を3回ずつ行い、1バッチ当たり計54回の測定を行った。

(2) 実験結果および考察

ミキサごとの各空練り時間に対して測定した色吸光度の結果を図-7に示す。

各吸光度は、数値が大きくなるにつれて、着色箇所が多いことを示す。空練り時間の増加に伴ってミキサAでは吸光度が高くなり、炭酸カルシウムの着色箇所が多くなっている。一方ミキサBでは、空練り時間の増大に伴う炭酸カルシウムへの着色箇所の増加は確認できず、逆に炭酸カルシウムが着色した表面水を覆う結果となった。ミキサによって色吸光度の変化傾向が異なるため、フロックの形成過程が異なることが推測される。

図-8は吸光度の結果に基づき考察したフロックの形成過程を模式化したものである。

ミキサAでは、空練り時間が増大すると細骨材の表面水がセメントに移りフロックを形成していることを示している。一方ミキサBでは、空練り時間が増大することで、セメント粒子が表面水を保持した細骨材の表面に付着しフロックを形成していることを示す。フロックの形成過程が異なるどちらのミキサでも、目視の結果から、空練り時間の増加につれてダマが多くなることは確認できた。

また、空練り時間の増加に伴って、各測定箇所のバラつきは小さくなっており、フロックが均一に形成していることが読み取れる。

3.2 セメントフロックの形成に関する実験

(1) 概要

セメントは加水されると水和反応によってセメント粒子の表面に正の電荷が発生して不安定となり粒子同士がくっついてフロックを形成する。そこで本報では、空練り時間に応じて、細骨材の表面水がセメント粒子に移動している影響を確認するため、Cryo-SEMを用いて、フロック形成量を定量化した。

測定方法は、空練りを行い作製したモルタル試料を練上がり直後に液体窒素を用いて瞬間冷凍を行い、その試料の切断面を、冷凍状態で観察することのできるCryo-SEMにて断面を250倍と500倍で観察する。同時に、250倍のSEM画像に対し、細骨材の主成分であるSiとセメントの主成分であるCaのマッピングも行うことで、細骨材とセメントの区別をできるようにした。

各ミキサで空練り時間は30, 90秒の2パターンとし、それぞれ250倍率のSEM画像から画像解析により、比表面積を算出した。フロックは、セメントの平均粒形以

上とするため、15 μ m以上の直径を持つ粒子をフロックとして観察した。

(2) 実験結果および考察

各ミキサによる空練り時間に対するモルタルのSEM画像およびマッピング画像について図-9、また、画像から算出したフロックの比表面積の結果を表-3に示す。

前節の表面水移動の実験結果からも想定できる通り、空練り時間が増大すれば細骨材の表面水による影響から、フロック形成が大きくなることで、比表面積差が生じることが確認できた。

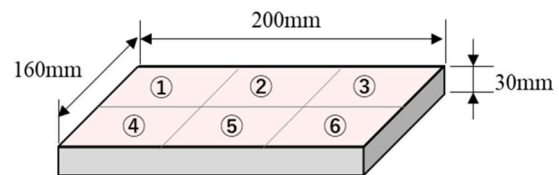


図-6 吸光度測定箇所

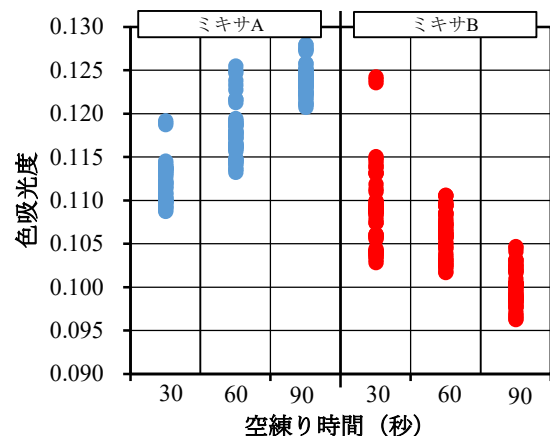


図-7 空練り時間における色吸光度

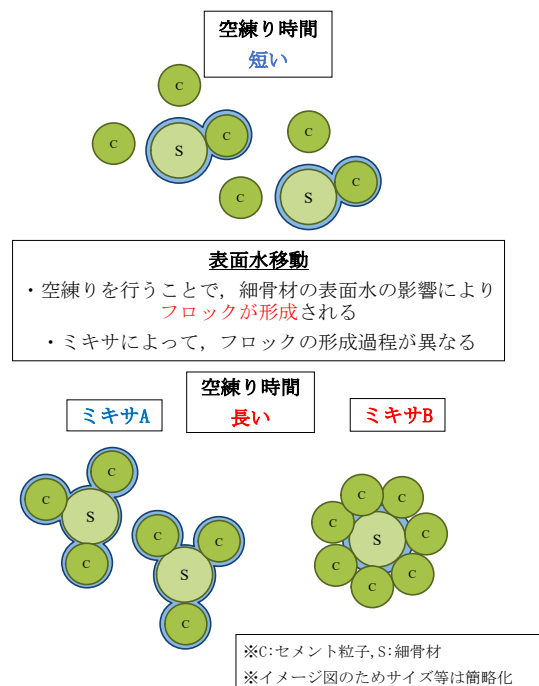


図-8 空練りによるフロック形成メカニズム

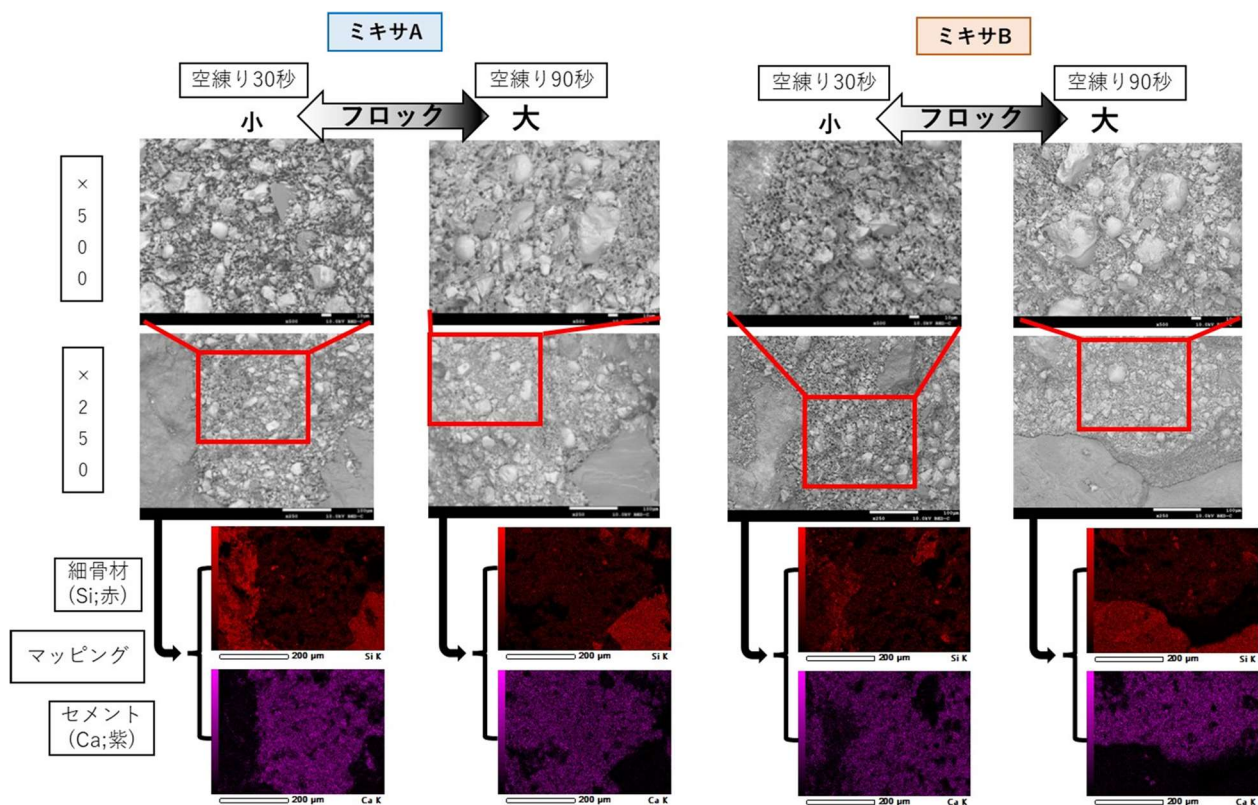


図-9 空練り時間におけるモルタルのSEM画像およびマッピング画像

また、500倍率のSEM画像からは、目視確認でもフロックの大きさが確認できる結果となった。

図-10は比表面積差の結果に基づき考察したモルタル中のフロックを模式化したものである。

3.3 混和剤吸着量に関する実験

(1) 概要

3.1および3.2から、細骨材の表面水の影響によりフロックを形成することが明らかとなった。そこで、本項では、空練り段階によるフロック形成が混和剤の吸着にどの程度影響を及ぼすのか確認するため、空練り時間に応じた混和剤吸着量の測定を行った。各材料の計量値は、表-1に示した基準配合から36L当たりの必要材料値を計算して作製したモルタルおよびフレッシュコンクリートを用いた。

遠心分離機で液相と固相に分離し、抽出した液相を熱分析することで、液相中の混和剤の残存量を測定した。

測定条件は、各ミキサそれぞれにおいて、空練り時間を0, 30, 90秒の3パターンとした。作製したモルタルおよびフレッシュコンクリートのモルタル分から分離したそれぞれの液相を採取して、各6回ずつ測定を行った。

(2) 実験結果および考察

ミキサごとの各空練り時間に対して作製したモルタルおよびフレッシュコンクリートからの混和剤残存量の結果を図-11に示す。各残存量の結果から、どちらのミ

表-3 フロックの比表面積

比表面積 (1/m)		
	空練り 30 秒	空練り 90 秒
ミキサ A	24.66	19.44
ミキサ B	21.78	18.67

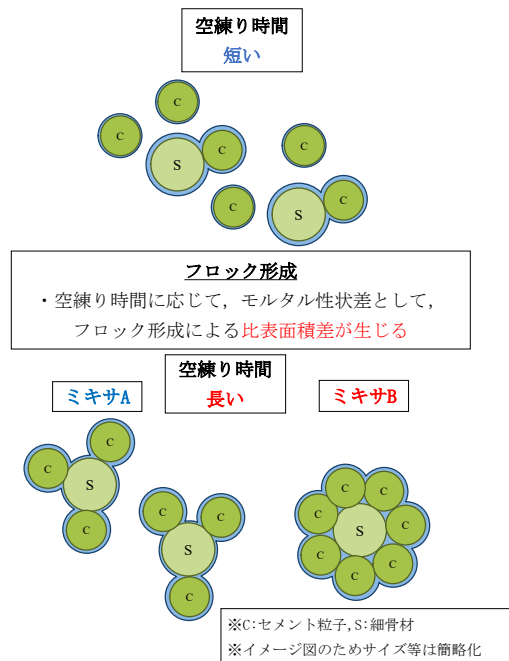


図-10 空練りによる比表面積差メカニズム

キサにおいても、空練り時間が増加するに伴って、液相に残る混和剤量が多くなる傾向にあることがわかった。そのことから、空練り時間が短い場合は、固相への混和剤吸着量が大きく、空練り時間が長い場合は吸着量が小さくなる結果を得た。混和剤が余ることで、後添加で見られるような、その後の流動性が向上すると考察できる。

図-12 は混和剤吸着量の結果に基づき考察したブロックと混和剤の関係を模式化したものである。

3.4 空練りが流動性に与える影響解明

各試験結果から、空練りを行うことにより、細骨材の表面水がセメント粒子と接触することでブロック形成され、比表面積が小さくなることで、混和剤吸着量が減少する結果を得ることができた。練混ぜ初期にブロックとなる量が多いと、本練りにおいて投入される水とセメント粒子が接する量が少なくなるため、先行吸着する混和剤量が減少したと考えられる。

以上の結果から、空練りの有無、空練り時間がモルタルフロー値に影響を与えることが明らかとなった。特に、細骨材の表面水とセメント粒子によってブロック形成することで、混和剤の吸着量が変化し、練混ぜ直後のフロー値が異なることから、ブロック形成量をコントロールすることで、練混ぜ直後のスランプフロー値を制御できると推測する。

ただし、空練り時間を長くすることが重要ではなく、本練り時に投入される混和剤の吸着を受け入れる状態が空練りで整えられているか、が重要であると考えられる。

また、3.1 で行った表面水移動の結果からもわかるように、ミキサによってブロック形成過程が異なることも明らかとなった。これらの結果から、このブロック形成における最適な状態を造るためには、例えばミキサの性能などが影響すると考えている。

4. 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) 2 軸強制練りテストミキサにおいて、フロー値では現れない、ブロック形成量といったモルタルの性状差が、その後のコンクリートのスランプフロー値に大きく寄与している。
- (2) 空練りについては、同じ配合・環境においてもモルタルの流動性に影響を与えていることが確認できた。そのメカニズムとして、混和剤が投入される前に、細骨材の表面水とセメントの接触時間が増加することでセメント粒子がブロック形成されることにより、比表面積が小さくなり、混和剤吸着量が減少する。その余った混和剤がその後の練混ぜにおけるフレッシュコンクリートにおけるスランプフロー値の増加に寄与する。

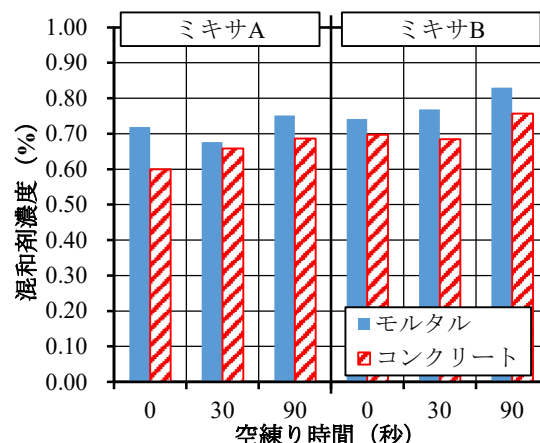


図-11 空練り時間における混和剤残存量

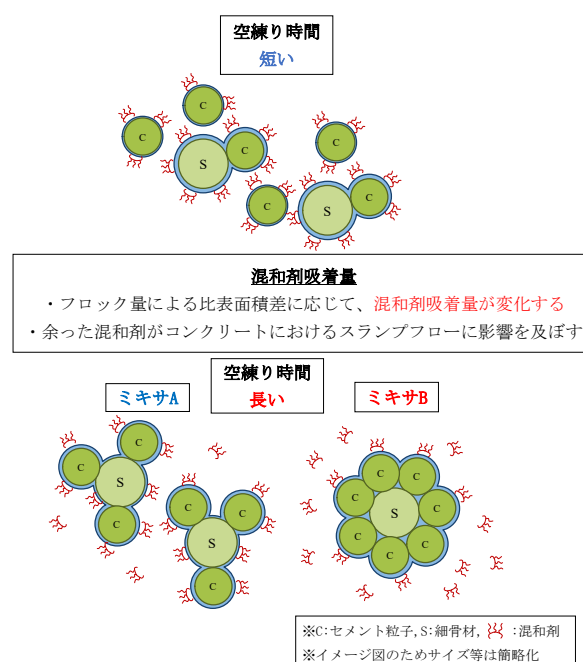


図-12 空練りによる混和剤吸着量差メカニズム

- (3) 練混ぜ機構による材料の動き方によって、空練り時のブロック形成過程が異なる。

参考文献

- 1) 安田和弘, 近松竜一, 十河茂幸: 高性能 AE 減水剤を用いた高流動モルタルの練混ぜに関する一実験, 土木学会第 53 回年次学術講演会, 1998.10
- 2) 菅俣匠, 日比野誠, 大内雅博, 岡村甫: 高性能 AE 減水剤の作用効果に及ぼす練混ぜ方法の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.325-330, 1998.7
- 3) 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, 2022.6