

## 論文 スランプロスのメカニズムの解明に向けた基礎的研究

高久 結衣\*1・金子 泰明\*2・加藤 佳孝\*3・西村 和朗\*4

**要旨:** 本研究では、水和反応と凝集がセメントペーストの経時変化に与える影響について、使用材料の反応性および粒径に着目して検討した。またスランブをセメントペーストが骨材と一緒に流動した結果として測定される物理量と捉え、骨材を流動させる能力を運搬力と呼称し、運搬力の経時変化や配合による変化について検討した。セメントを反応性のない粉体で置換しても、粒径が同程度であれば、経時変化にほとんど影響せず、また細骨材のように粒径の大きいものは、セメントペースト中の凝集にほとんど影響しないという結果となった。セメントペーストの運搬力は、経時的に変化せず、W/Cにより一定な可能性が考えられた。

**キーワード:** 水和反応, 凝集, 経時変化, スランブロス, 運搬力

## 1. はじめに

コンクリートのスランブロスは、練り上げられたコンクリートが経時的に流動性を失うことでスランブが低下する現象である。特に、高温環境下でスランブロスは大きくなることが知られており<sup>1)</sup>、その原因として、水和反応や凝集の促進などが考えられる。また、コンクリートのスランブロスは、フレッシュコンクリートのポンプ圧送性や打設時の施工性に大きく影響し、最悪、ポンプの閉塞や未充填などの施工不良にもつながる。このため、コンクリートのスランブロスに関する対策は数多く検討されているが、スランブロスの低減を目的とした混和剤<sup>2)</sup>や練混ぜ方法<sup>3)</sup>に関する検討が殆どであり、スランブロスのメカニズムに関する検討は必ずしも十分とはいえない。

また近年では、カーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みとして、新材料の検討がなされており<sup>4)</sup>、今後、新たな材料の導入が予想される。そのため、新材料に対する配合設計のためにも、スランブロスのメカニズムを把握しておくことは重要であると考えられる。

本研究では、コンクリートのスランブロスのメカニズムを明らかにすることを最終目的とした基礎的な段階の検討として、セメントペーストとモルタルを対象に経時変化に関する検討を実施した。

## 2. スランブロスの捉え方と検討の流れ

## 2.1 スランブロスの捉え方

コンクリートの主要な材料である水、セメント、骨材のうち、経時的に性質が変化するのはセメントペーストであるため、骨材はコンクリートの経時変化に影響しないと考えられる。スランブをセメントペーストと骨材の相互作用により、試料が流動した結果として測定される

物理量と捉えると、セメントペーストが骨材を流動させる現象や骨材がセメントペーストを流動させる現象、骨材量、材料の密度等によってスランブが決定されると考えられる。ここで、スランブの経時変化に着目すると、骨材量や密度等は経時変化するものではなく、セメントペーストの性状のみが経時的に変化すると考えることができるため、本研究では、セメントペーストが骨材を流動させる力を運搬力と呼称し、運搬力が経時的に変化することでスランブが経時的に変化すると考えた。この考えのもと、スランブロスの要因は、セメントペーストの経時変化に影響すると考えられている水和反応と凝集<sup>5)6)</sup>、セメントペーストの運搬力であると考えた。なお、本研究では、スランブロスについては、フローの経時変化を基に考える。

## 2.2 検討の流れ

水和反応と凝集がセメントペーストの経時変化に与える影響に関する検討は、使用材料の反応性および粒径に着目して実施した。

使用材料の反応性の影響の検討では、 $\text{CaCO}_3$ は凝結に及ぼす影響が小さいこと<sup>7)</sup>から、短い時間スケールである本実験では $\text{CaCO}_3$ がセメントの水和に影響しないとして整理し、セメントと同程度の粒子径の $\text{CaCO}_3$ を用いた。

粒径が凝集に与える影響の検討では、水和反応せずにセメントよりも粒径の大きいものとして細骨材を用いた。そのため、細骨材を用いた場合には、配合としてはモルタルになるが、3.の検討では、セメントペースト中のセメントを細骨材で置換したものと捉えて整理している。

セメントペーストの運搬力については、図-1に示すように、練上がり直後、60分後、120分後、180分後の

\*1 東京理科大学大学院 創域理工学研究科 社会基盤工学専攻 (学生会員)

\*2 飛島建設(株) 研究開発グループ 第3研究室 副主任研究員 工修 (正会員)

\*3 東京理科大学 創域理工学部社会基盤工学科 教授 博士(工) (正会員)

\*4 東京理科大学 創域理工学部社会基盤工学科 助教 博士(工) (正会員)

ペーストに細骨材を投入してモルタルを製造し、運搬力の経時変化について検討した。

また図-2 に示すように、練上がりからの経過時間は異なるがフローが同等なセメントペーストを用いてモルタルを製造し、経過時間が運搬力に与える影響について検討した。同一フローのペーストであればペーストの運搬力も同程度になると想定される。その場合、経過時間が異なってもフローが同程度ならば、それらのペーストを使用したモルタルのフローも同程度になると予想し、ペーストの運搬力がフローにより評価できるかについて確認することを目的とした。

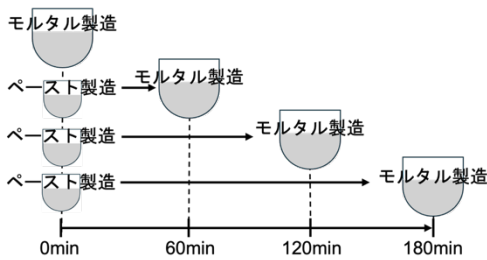


図-1 運搬力の経時変化の実験

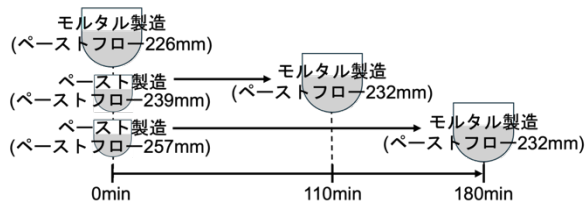


図-2 経過時間の異なるセメントペーストの運搬力の実験

### 3. 粉体の反応性および粒径がスランプロスに与える影響

#### 3.1 使用材料および配合

本試験に使用した材料を表-1 に、本章で用いた細骨材の粒度分布を図-3 に示す。2.2 で示したように、本章では、セメントよりも粒径が大きく反応性がない物質の一例として細骨材を用いているため、図-3 に示すように、通常の細骨材の粒度分布を外れて細粒分が多めの細骨材を用いた。

配合を表-2 に示す。なお、表中の w/p は水と粉体（セメント、CaCO<sub>3</sub>、細骨材）の体積比を示している。セメントペーストの経時変化の基本的な性状を把握するために、W/C を 40% から 2.5% 刻みで 4 種類実施した。セメントを CaCO<sub>3</sub> で置換した配合では、単位水量および w/p は一定として、セメント体積の 6%、11%、16%、20% を CaCO<sub>3</sub> で置換した。セメントを細骨材で置換した配合も CaCO<sub>3</sub> で置換した配合と同様に単位水量および w/p は一定とし

表-1 使用材料

| 使用材料    | 記号                | 物性値等                                                                         |
|---------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 水       | W                 | 上水道水<br>密度:1.00(g/cm <sup>3</sup> )                                          |
| セメント    | C                 | 普通ポルトランドセメント<br>密度:3.15(g/cm <sup>3</sup> )<br>比表面積:3400(cm <sup>2</sup> /g) |
| 炭酸カルシウム | CaCO <sub>3</sub> | 密度:2.70(g/cm <sup>3</sup> )<br>比表面積:3500(cm <sup>2</sup> /g)                 |
| 細骨材     | S                 | 君津産山砂<br>密度:2.53(g/cm <sup>3</sup> )<br>F.M.=1.48                            |

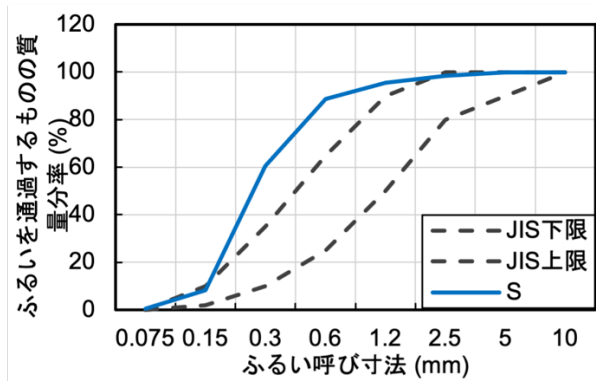


図-3 細骨材の粒度分布

表-2 ペーストの配合

| 配合名                   | w/p (%) | W/C (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |      |                   |     |
|-----------------------|---------|---------|-------------------------|------|-------------------|-----|
|                       |         |         | W                       | C    | CaCO <sub>3</sub> | S   |
| W/C 40                | 1.26    | 40      | 558                     | 1394 | —                 | —   |
| W/C 42.5              | 1.34    | 42.5    | 572                     | 1347 | —                 | —   |
| W/C 45                | 1.42    | 45      | 586                     | 1303 | —                 | —   |
| W/C 47.5              | 1.50    | 47.5    | 599                     | 1262 | —                 | —   |
| CaCO <sub>3</sub> 6%  | 1.26    | 42.5    | 558                     | 1312 | 70                | —   |
| CaCO <sub>3</sub> 11% | 1.26    | 45      | 558                     | 1239 | 133               | —   |
| CaCO <sub>3</sub> 16% | 1.26    | 47.5    | 558                     | 1174 | 189               | —   |
| CaCO <sub>3</sub> 20% | 1.26    | 50      | 558                     | 1115 | 239               | —   |
| S6%                   | 1.26    | 42.5    | 558                     | 1312 | —                 | 66  |
| S11%                  | 1.26    | 45      | 558                     | 1239 | —                 | 124 |
| S16%                  | 1.26    | 47.5    | 558                     | 1174 | —                 | 177 |

表-3 ペーストの練混ぜ時間とフローの初期値

| 高速の練混ぜ時間(秒) | 180   | 240   | 300   |
|-------------|-------|-------|-------|
| フローの初期値(mm) | 221.3 | 230.9 | 233.6 |

て、セメント体積の 6%、11%、16% を細骨材で置換した。

### 3.2 試験方法および測定項目

練混ぜには、JIS R 5201 の機械練用練り混ぜ機に準拠したモルタルミキサーを使用した。今回の実験では、水を投入し、低速で 30 秒練り混ぜた後にかき上げ、その後高速で 240 秒練混ぜを行った。高速の練混ぜ時間の影響について検討した結果を表-3 に示す。検討には、W/C=45%のペーストを用いた。高速の練混ぜ時間を 180 秒から 240 秒に増やすと初期のフローは増加したが、さらに 240 秒から 300 秒に増やしてもほとんど変化しなかったことから、高速の練混ぜ時間を 240 秒に設定した。

本試験の測定項目は、ペーストの温度とフローとした。JIS R 5201 に準拠したフローコーンと、JISA 1171 に準拠したスランプコーンを用い、いずれの場合もコーンを持ち上げたときに広がった試料の最大直径とそれに直行する直径を測定し、平均値を求めた。それぞれの結果を、以降では、フロー、スランプフローと称す。測定は、練上がり直後から 1 時間毎に 3 時間後まで行った。測定直前に、低速で 10 秒練り混ぜた後、高速で 30 秒練り返した。

### 3.3 実験結果

#### (1) 水セメント比の影響

図-4 にスランプフローとフローの関係を示す。両者には、高い相関が確認できたことから、これ以降では、フローの結果を用いる。

図-5 にフローの経時変化を示す。セメントペーストのフローは、全ての配合で経時的に減少した。図-6 は、W/C ごとに初期値に対する比率（以降、フロー比率）を示している。W/C=40%の配合では、120 分から 180 分にかけてフローが大きく低下した。図-6 より、W/C が高いほど、経時変化しにくいことが読み取れる。

#### (2) 粉体の反応性がスランプロスに与える影響

図-7 にフローの経時変化、図-8 にフロー比率の経時変化を示す。凡例は、CaCO<sub>3</sub>の置換率と W/C を示している。セメントペーストと同様に、フローは経時的に減少した。フロー比率の経時変化については、図-6 で見られたような W/C の影響は見られなかった。CaCO<sub>3</sub>は、セメントと同程度の粒子径で水和反応をしないものとしており、セメントに置換した配合は、ペースト中の粉体の反応性が低下したものと捉えることができる。W/C が変化しても w/p が一定であれば、経時変化にほとんど差が見られなかったことから、置換率 20%までの範囲では、水和反応の影響よりも凝集の影響の方が支配的であると考えられる。

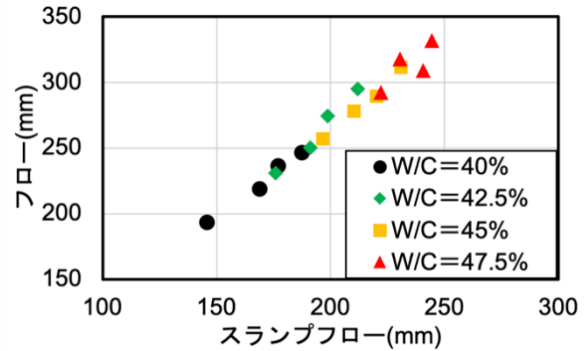


図-4 スランプフローとフローの関係

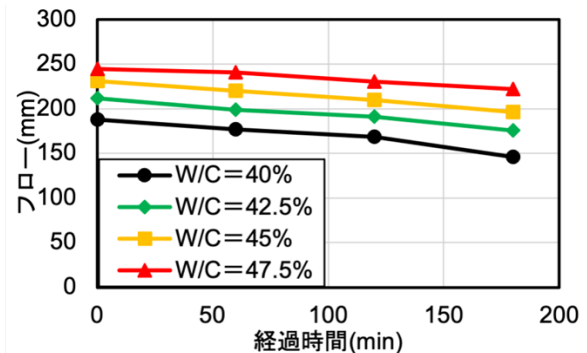


図-5 フローの経時変化

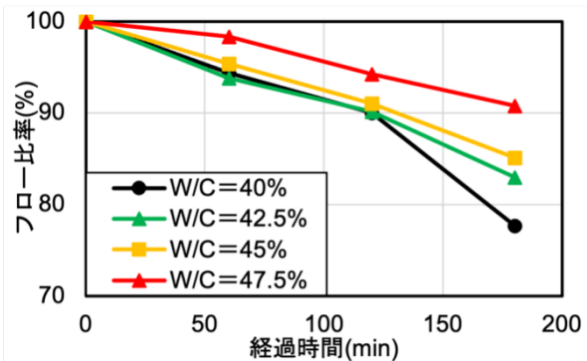


図-6 フロー比率の経時変化

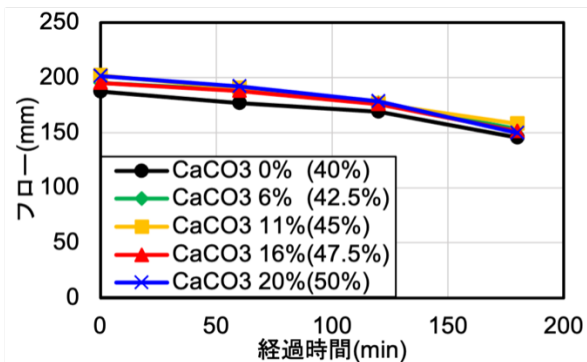


図-7 フローの経時変化

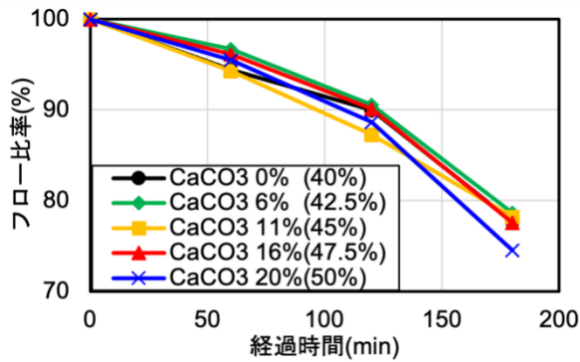


図-8 フロー比率の経時変化

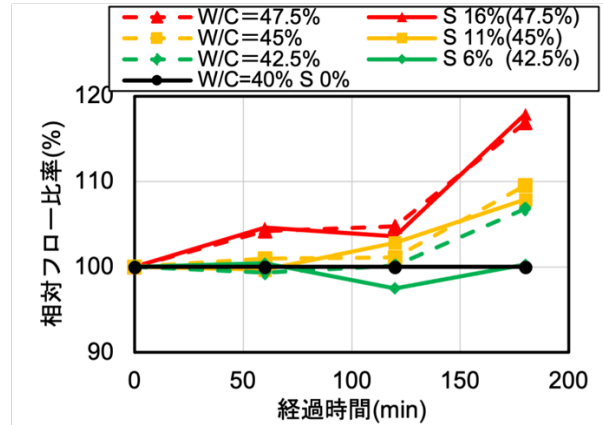


図-11 相対フロー比率

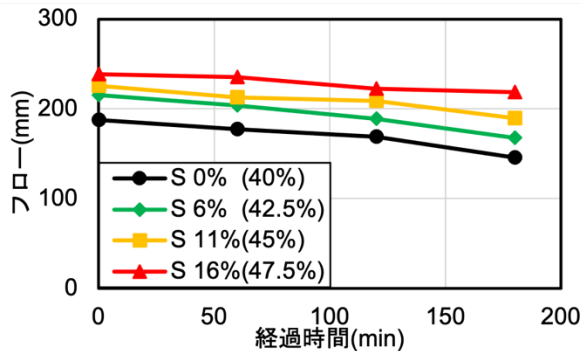


図-9 フローの経時変化

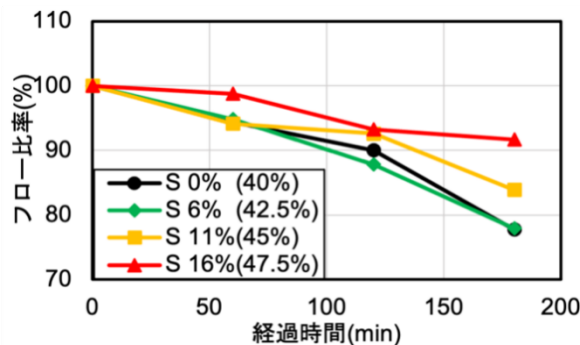


図-10 フロー比率の経時変化

### (3) 粒径がスランプロスに与える影響

図-9 にフロー、図-10 にフロー比率の経時変化を示す。凡例は、細骨材の置換率と W/C を示している。セメントペーストと同様にフローは、経時的に減少した。

ここで、細骨材でセメントを置換した場合の W/C は、3. (1) で検討したセメントペーストの場合と同様である。そこで、両者の経時変化の傾向を比較するために、各ケースのフロー比率の結果を同じ経過時間での W/C=40% の比率で除すことで、経時変化の W/C=40% との差を示した。以降、相対フロー比率とする。結果を図-11 に示す。実線は細骨材で置換した結果を、点線はセメントペーストの結果を示している。グラフは、値が 100% より大きければ経時変化が小さく、100% より小さければ経時変

表-4 使用材料

| 使用材料 | 記号  | 物性値等                                                     |
|------|-----|----------------------------------------------------------|
| 水    | W   | 上水道水<br>密度:1.00(g/cm <sup>3</sup> )                      |
| セメント | C   | 普通ポルトランドセメント<br>密度:3.15(g/cm <sup>3</sup> )<br>比表面積:3400 |
| 細骨材  | JIS | 標準砂<br>密度:2.60(g/cm <sup>3</sup> )                       |

化が大きいことを示す。相対フロー比率の結果を見ると、単純なセメントペーストの結果と細骨材で置換した同じ W/C の結果は、概形が一致することから、W/C の影響が大きく、細骨材による置換の影響は小さいことが見て取れる。つまり、細骨材のような粒径の大きい場合は、セメントペースト中の凝集に対してほとんど影響を与えないと考えられる。

## 4. セメントペーストの運搬力

### 4.1 実験概要

本試験に使用した材料を表-4 に示す。

セメントペーストの練混ぜは、3.2 と同様に実施した。測定直前に、低速で 30 秒練り混ぜた後、高速で 240 秒練返した。モルタルは、ペーストが均一に混ぜられている前提で必要量を計量した後、標準砂を投入した。低速で 30 秒練り混ぜた後にかき上げ、その後高速で 180 秒練り混ぜた。測定項目は 3.2 と同様である。

#### (1) 運搬力の経時変化

練上がり直後、60 分後、120 分後、180 分後のペーストを用いてモルタルを製造した。W/C=47.5% のセメントペーストを用い、S/C=1.5 となるように細骨材を練混ぜた。各時点の細骨材投入前のセメントペーストのフローと、細骨材投入後のモルタルのフローを比較することで、セメントペーストの運搬力の経時変化について検討した。

表-5 実験(2)の配合

| 配合名 | W/C (%) | S/C  | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |
|-----|---------|------|-------------------------|-----|------|
|     |         |      | W                       | C   | S    |
| W/C | 45      | 1.25 | 361                     | 801 | 1001 |
| W/C | 47.5    | 1.29 | 369                     | 775 | 1001 |
| W/C | 50      | 1.33 | 376                     | 752 | 1001 |

表-6 ペーストフローの運搬力の経時変化

| 経過時間 (min) | ペーストのフロー (mm) | モルタルのフロー (mm) |
|------------|---------------|---------------|
| 0          | 240.6         | 184.2         |
| 60         | 245.8         | 180.8         |
| 120        | 223.9         | 170.3         |
| 180        | 213.4         | 159.9         |

表-7 ペーストスランプフローの運搬力の経時変化

| 経過時間 (min) | ペーストのスランプフロー(mm) | モルタルのスランプフロー(mm) |
|------------|------------------|------------------|
| 0          | 344.5            | 251.2            |
| 60         | 337.5            | 246.9            |
| 120        | 307              | 229.0            |
| 180        | 290.3            | 221.2            |

(2) 経過時間の異なるセメントペーストの運搬力

セメントペーストを練混ぜ、フローが 230mm 程度になったことを確認した後、細骨材を練混ぜた。練上がり直後のペーストを用いたモルタルの配合は、S/C=1.25 とし、その他のものについては、全ての配合においてペースト体積が同じになるようにした。配合を表-5 に示す。

4.2 実験結果

(1) 運搬力の経時変化

表-6 にフロー、表-7 にスランプフローの結果を示す。

図-12 にフロー、図-13 に、スランプフローの初期値に対する比率(以降、フロー比率、スランプフロー比率)の経時変化を示す。ペーストフローの 60min の結果については、増加してはいるものの、全体的な低下傾向はフロー比率とスランプフロー比率ともに、ペーストとモルタルで大きな差はない。この結果より、経時変化がペーストの運搬力に与える影響は小さいと考えられる。しかし、運搬力の経時変化に関する検討については、データ数が十分でないこと、また検討を行った配合の W/C が大きくペーストの流動性が高かったために、細骨材を混入したことの影響が見え難かった可能性もあるため、引き続き検討する必要があると考えている。

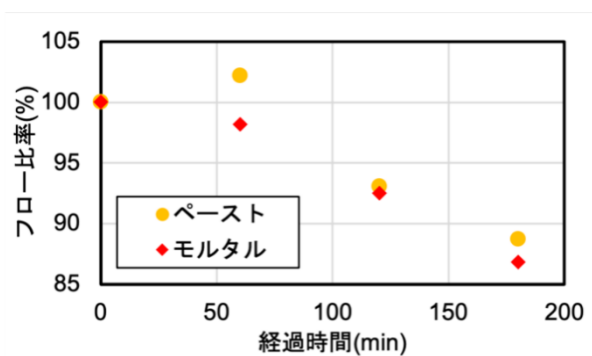


図-12 フロー比率の経時変化

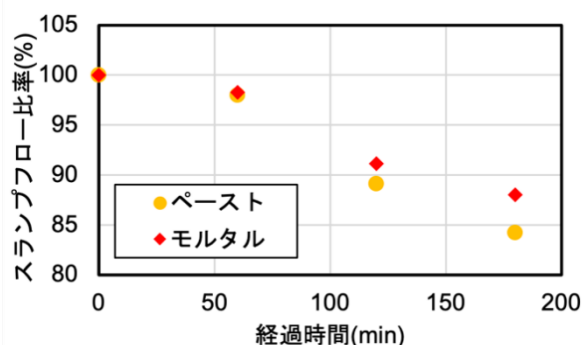


図-13 スランプフロー比率の経時変化

表-8 同ペーストフローの運搬力

| W/C  | 経過時間 (min) | ペーストのフロー(mm) | モルタルのフロー(mm) |
|------|------------|--------------|--------------|
| 45   | 0          | 226.1        | 188.4        |
| 47.5 | 110        | 231.7        | 191.1        |
| 50   | 180        | 232.3        | 196.7        |

表-9 同ペーストスランプフローの運搬力

| W/C  | 経過時間 (min) | ペーストのスランプフロー(mm) | モルタルのスランプフロー(mm) |
|------|------------|------------------|------------------|
| 45   | 0          | 314              | 257.6            |
| 47.5 | 110        | 317              | 264.0            |
| 50   | 180        | 315              | 277.3            |

(2) 経過時間の異なるセメントペーストの運搬力

表-8 にフロー、表-9 にスランプフローの結果を示す。図-14 にフロー、スランプフローの減少率を示す。減少率は、ペーストに対する、ペーストとモルタルのフローまたはスランプフローの差の比率である。つまり、ペーストに砂を投入したときの減少した値のペーストのスランプフローに対する割合を示しており、減少率が大きいほどセメントペーストの運搬力が小さく、減少率が小さいほどペーストの運搬力が大きいと考えられる。

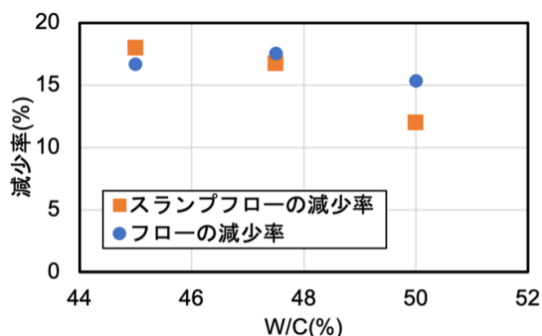


図-14 フローとスランプフローの減少率

W/C が大きくなると減少率は低下する傾向が認められ、同一のフロー・スランプフローであったとしても、W/C が大きいほどセメントペーストの運搬力が大きい可能性がある。この結果から、ペーストの運搬力は、フローによってのみ定まるものではなく、粘度などのペーストの質も影響するものであると考えられる。しかし本実験では、データ数が十分でなく、また設定した基準のフローが大きかったため、ペーストの流動性が高く、細骨材を混入したことの影響が見え難かった可能性もあるため、引き続きの検討が必要であると考えている。

## (2) 経過時間の異なるセメントペーストの運搬力

表-8 にフロー、表-9 にスランプフローの結果を示す。図-14 にフロー、スランプフローの減少率を示す。減少率は、ペーストに対する、ペーストとモルタルのフローまたはスランプフローの差の比率である。つまり、ペーストに砂を投入したときの減少した値のペーストのスランプフローに対する割合を示しており、減少率が大きいほどセメントペーストの運搬力が小さく、減少率が小さいほどペーストの運搬力が大きいと考えられる。W/C が大きくなると減少率は低下する傾向が認められ、同一のフロー・スランプフローであったとしても、W/C が大きいほどセメントペーストの運搬力が大きい可能性がある。この結果から、ペーストの運搬力は、フローによってのみ定まるものではなく、粘度などのペーストの質も影響するものであると考えられる。しかし本実験では、データ数が十分でなく、また設定した基準のフローが大きかったため、ペーストの流動性が高く、細骨材を混入したことの影響が見え難かった可能性もあるため、引き続きの検討が必要であると考えている。

## 5. まとめ

本研究では、粉体の反応性や粒径がセメントペースト

の経時変化に与える影響について実験的に検討した。またセメントペーストが骨材を流動させる現象について、その力を運搬力と呼称し、運搬力の経時変化や履歴の異なるペーストの運搬力について調べた。本研究で得られた主な知見を次に列挙する。

- (1) 粒径が同程度で反応性のない粉体でセメントを置換した結果、置換率が 20% までの範囲であれば、水和反応よりも凝集の方がフローの経時変化に影響すると考えられた。
- (2) 細骨材のように粒径の大きいものは、セメントペースト中の凝集にほとんど影響しないと考えられた。
- (3) セメントペーストの運搬力は、経時的に変化せず、W/C により一定である可能性が考えられた。
- (4) 経過時間の異なるセメントペーストの運搬力は、経過時間ではなく W/C の影響が大きく、W/C が大きいほど運搬力が大きい可能性が考えられた。

## 謝辞

本実験の実施にあたり、東京理科大学学部 4 年生の片岡真一さんには多大なるご協力をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 名和豊春, 大久保正弘, 江口仁: 高性能減水剤を添加したモルタルおよびセメントペーストの流動性に及ぼす温度の影響, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.110-115, 1991
- 2) 本田亮, 守屋健一, 田中徹: 流動保持剤および超遅延剤によるスランプ保持時間と初期効果性能の改善に関する実験的研究, 戸田建設技術研究報告, 第 49 号, 2023
- 3) 高橋直也, 鈴木翔太, 馬場勇介, 笠井哲郎: 貧配合コンクリートのスランプロス発生機構とその提言に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1183-1188, 2013
- 4) 土木学会: コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて, コンクリートライブラリー165, 2023
- 5) 岡田隆吉, 武広実, 宇智田俊一郎, 内川浩, 大門正機: フレッシュセメントペーストおよびモルタルの流動性に及ぼすセメントの充填性と初期水和の影響, 無機マテリアル, Vol.6, pp.22-32, 1999
- 6) 服部健一: スランプロスのメカニズムおよびその対策, 材料, 第 29 巻, 318 号, pp.34-40, 1980
- 7) 盛岡実: 石灰石微粉末, コンクリート工学, 特集, Vol.52, No.2, pp.405-408, 2014