

## 論文 モルタルの粘性に及ぼす分割練混ぜの効果

伊達 重之<sup>\*1</sup>・長谷川 聖史<sup>\*2</sup>・室賀 陽一郎<sup>\*2</sup>・辻 幸和<sup>\*3</sup>

**要旨：** 2種類の細骨材（陸砂，砕砂）を用いたモルタルを対象に，塑性粘度に及ぼす S/C, W/P, 増粘剤の添加量ならびに分割練混ぜの影響について検討を行った。塑性粘度の測定は，羽根沈入式粘度計を用いた。その結果，塑性粘度はモルタルの砂セメント比，セメント水比および増粘剤添加量の増加に伴って大きくなり，同じ配合条件のモルタルでは，本実験で使用した材料では，陸砂に較べて砕砂を用いたモルタルの方が大きくなる傾向にあった。一方，砂の種類や配合条件によらず，分割練混ぜの採用によってモルタルの塑性粘度が低減され，塑性粘度が高い配合条件の方が，分割練混ぜによる塑性粘度の低減効果が高いことが判った。

**キーワード：** モルタル，分割練混ぜ，塑性粘度

### 1. はじめに

分割練混ぜ工法は，コンクリート中の骨材とセメントペーストの付着性状を良好にし，強度改善に有効である。また，材料分離に伴うブリーディングなどによる内部欠陥を減少させる効果もある。実施工においては，ポンプ圧送性の向上や吹付けコンクリートにおけるリバウンドの低減などのメリットが報告されている<sup>1)</sup>。ポンプ圧送性に限定した場合，作業性の優劣を左右する因子として圧力損失が挙げられる。一方，コンクリートの施工性の評価に有用なレオロジー一定数は，塑性粘度と降伏値である。このうち，圧力損失は塑性粘度に比例するものの，降伏値とはほとんど相関がないといえる<sup>2)</sup>。ゆえに，低粘度のコンクリートの方がポンプ圧送性に有利であるといえる。

分離抵抗性とブリーディングの抑制の観点からは，前述とは逆に塑性粘度が高いコンクリートの方が有利である。しかしながら，コンクリートの充填方法は特殊な場合を除いて現場打ち，プレキャストコンクリートの製造のいずれにおいても，振動締固めが主流である。高粘性のコンクリートは，一般的に振動の粘性減衰による

エネルギーの伝播効率の低下<sup>3)</sup>によって，締固めに要する時間が長くなる。これにより生産性の低下につながることは言うまでもなく，コンクリート中の気泡の除去や表面仕上げが困難となり，場合によっては粗骨材の沈降<sup>4)</sup>やブリーディング率の増加<sup>5)</sup>など，コンクリートの品質低下の原因となる。そのため，自己充填コンクリートや水中不分離性コンクリートのような特殊な用途以外においては，歓迎されないケースが多い。したがって，振動締固めを前提としたコンクリートにおいては，骨材の分離を起こさない必要最小限の降伏値をもち，塑性粘度が低いコンクリートが良好な施工性を有するといえる。

分割練混ぜによるブリーディングの低減効果については，多くの研究者<sup>6)</sup>らによって見出されているが，塑性粘度に及ぼす影響に関する研究は少ない。また，コンクリートの塑性粘度は，Einstein 式をベースに，高濃度サスペンション状態へ拡張したモデルで評価する手法が，多くの研究者によって提案されている。これによって，構成素材の特性および構成比によってある程度推定が可能となる<sup>7)</sup>。したがって，モルタルのフレッシュ性状を評価することによって，コンク

\*1 石川島建材工業（株） 技術研究所主任研究員（正会員）

\*2 石川島建材工業（株） 技術研究所研究員（正会員）

\*3 群馬大学 工学部建設工学科教授 工博（正会員）

リートの評価も可能である。

本研究では、コンクリートの品質改善効果に及ぼす分割練混ぜの影響を解明する研究の一環として、モルタルの塑性粘度の低減に及ぼす分割練混ぜの効果を明らかにすることを目的としている。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。細骨材には茨城県鹿島産のもの（以下“陸砂”と略す）と神奈川県津久井産のもの（以下“砕砂”と略す）の2種類を用いた。

### 2.2 練混ぜ条件

練混ぜ条件と水準を表-2に示す。

練混ぜには容量が20リットルのホバートミキサを用い、練混ぜ時間は一括練混ぜ・分割練混ぜともに105秒間とした（図-1参照）。また、分割練混ぜにおける一次水量（ $W_1$  :  $\text{kg/m}^3$ ）は、モルタルの遠心試験<sup>8)</sup>によって求めた。

各配合条件におけるモルタルは、一部を除いてJIS R 5201に従って測定したフロー値（以下“15打フロー値”と略す）が $205 \pm 15\text{mm}$ となるように、それぞれ高性能減水剤の添加率を調整した。また、増粘剤（粉末）はセメントと同時に投入した。

粘性の高いモルタルは練混ぜ時に空気を巻き込みやすく、空気量が増大する傾向にある。本実験では、これによる15打フロー値ならびに塑性粘度への干渉を防ぐため、モルタルの空気量が $4 \pm 1.5\%$ となるように、必要に応じて消泡剤を添加した。

### 2.3 モルタルの塑性粘度の測定

モルタルの粘度の測定については、円筒回転式や漏斗式、球引上げ式の粘度計などのさまざまな方法が知られている。漏斗タイプは降伏値が比較的大きいモルタルには適用できず、円筒回転式は試料との界面のすべりが難点であり、球引上げ式は球体にペースト（モルタル）が付着し、見かけの直径が大きくなるというような

表-1 使用材料

| 材料   | 記号 | 種類             | 密度 ( $\text{g/cm}^3$ ) | 実積率 (%) | 吸水率 (%) |
|------|----|----------------|------------------------|---------|---------|
| セメント | C  | 普通ポルトランドセメント   | 3.16                   | -       | -       |
| 細骨材  | S  | 茨城県鹿島産(陸砂)     | 2.62                   | 71.5    | 1.54    |
|      |    | 神奈川県津久井産(砕砂)   | 2.60                   | 61.7    | 1.95    |
| 増粘剤  | VA | セルロース系増粘剤      | -                      | -       | -       |
| 混和剤  | Ad | ポリカルボン酸系高性能減水剤 | -                      | -       | -       |

表-2 練混ぜ条件と水準

| 実験条件                    | 水準                     |
|-------------------------|------------------------|
| 練混ぜ方法                   | 一括練混ぜ, 分割練混ぜ           |
| 細骨材                     | 陸砂, 砕砂                 |
| 水セメント比 (%)              | 30, 35, 40, 45, 50, 55 |
| 砂セメント比 (%)              | 2, 2.5, 2.7            |
| 増粘剤添加率 ( $\times W\%$ ) | 0~0.08                 |

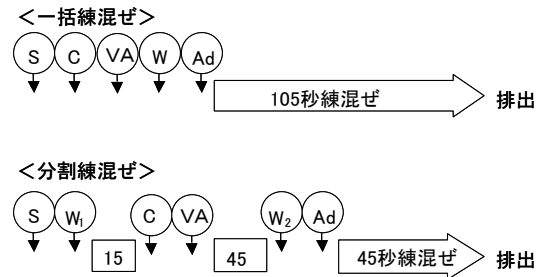


図-1 練混ぜ方法

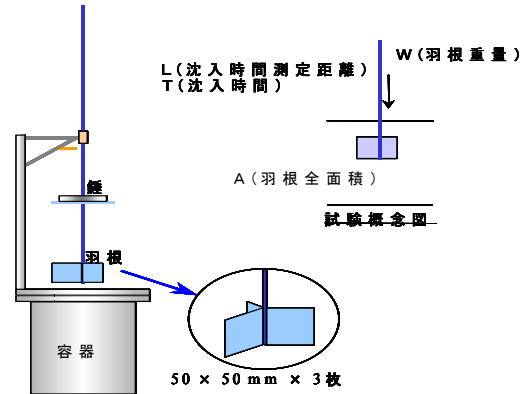


図-2 羽根沈入式粘度計

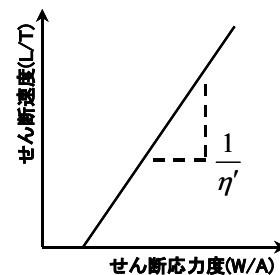


図-3 塑性粘度と測定値の関係

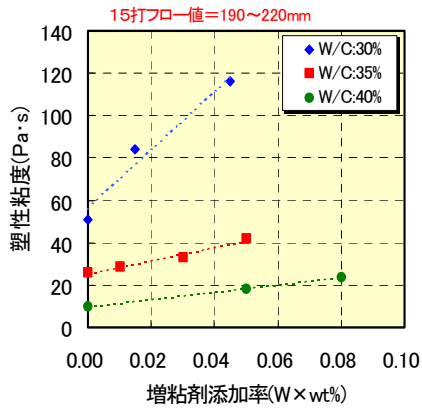


図-4 モルタルの塑性粘度に及ぼす増粘剤添加率の影響

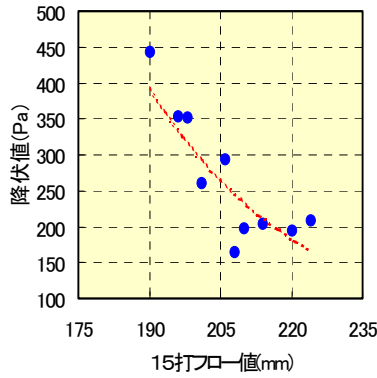


図-5 モルタルの降伏値と15打フローの関係

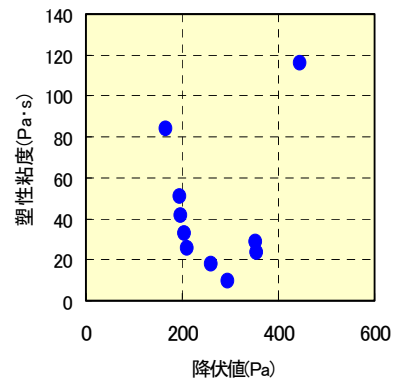


図-6 モルタルの降伏値と塑性粘度の関係

問題点が指摘されている<sup>9)</sup>。また、これら測定方法の違いによって、得られる塑性粘度の値も著しく異なることが知られている<sup>10)</sup>。このように、試験器の種類により、操作性や測定精度の点で一長一短があるため、測定にあたっては対象モルタルの特性に合わせて機種を適切に選定する必要がある。

本研究では、比較的水セメント比が低く、漏斗もしくは管方式では閉塞して測定できないようなモルタルにも適用可能で、操作が簡便な羽根沈入型粘度計<sup>11)</sup>を用いた。本粘度計は、図-2に示すとおり、3枚の羽根を有する治具をモルタルに自重で沈入させて粘性を測定するものである。移動方向から見た投影面積が小さいため、ペーストの付着の影響を極力抑え、円筒回転式粘度計に見られる“せん断履歴の影響”を受けないなど、前述の課題の改善が期待できる粘度計である。

1 試料について、沈入羽根の質量 $W$ を段階的に変えて沈入速度を測定し、図-3に示すせん断速度  $v_t(=L/T)$  とせん断応力度  $\tau(=W/A)$  の関係から、塑性粘度を求めるものである。せん断速度をモルタルのせん断領域の幅 ( $h$ ) で除した値  $v_t/h$  が、せん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}$  となる。モルタルをビンガム流体と考えると、塑性粘度は  $\tau/\dot{\gamma}$  で与えられる。しかしながら、本粘度計において、せん断領域の計測が現実には困難である。このため直接的に塑性粘度を求めることはでき

ない。そこで、本粘度計によって得られた結果を図-3に示す関係に整理して見かけの塑性粘度 ( $\eta'$ ) を求め、この  $\eta'$  と粘度が既知の流体(シリコンオイル; 塑性粘度が  $10\sim 300\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) を用いた実験結果と比較する方法(検量線方式)により、塑性粘度を算出した。

本試験では、沈入時に作用する浮力およびせん断面積が一定になるように、羽根がモルタルに完全に埋まった状態から測定を開始した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 羽根沈入型粘度計の適用性について

陸砂を用いたモルタル(砂セメント比が 2.0) について、塑性粘度に及ぼす増粘剤添加率の影響を図-4に示す。また、図-5にモルタルの降伏値と15打フローの関係を示す。モルタルの塑性粘度は降伏値の影響も受けることが指摘されている<sup>12)</sup>。本実験においては、前述したように各配合におけるモルタルの15打フロー値を  $190\sim 220\text{mm}$  に調整した。

その際、図-3における X 切片に相当する見かけの降伏値は  $200\sim 450\text{Pa}$  と広い範囲の値を示している。それにもかかわらず、塑性粘度の測定結果(図-4)においては良好な直線性を示していることから、本粘度計においては15打フロー値が本実験の設定範囲内では、降伏値の影響を考慮しなくても良いことが確認された(図-5および図-6参照)。

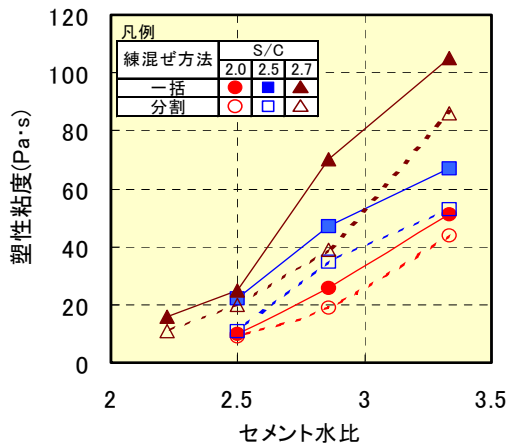


図-7 モルタルの塑性粘度に及ぼす分割練混ぜの効果（陸砂）

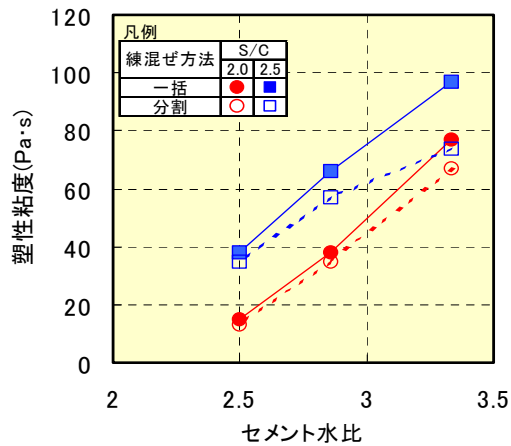


図-8 モルタルの塑性粘度に及ぼす分割練混ぜの効果（砕砂）

### 3.2 モルタルの塑性粘度に及ぼす分割練混ぜの効果

陸砂および砕砂を用いたモルタルの塑性粘度に及ぼす分割練混ぜの効果を図-7～10に示す。なお、陸砂については3水準のS/Cで練混ぜを行ったが、砕砂についてはS/C=2.7および2.5のモルタルを評価した。

モルタルの塑性粘度に及ぼす分割練混ぜの効果に関する既往の研究成果は数少ない。セメントペースト(W/C=50, 60%)を対象にした管式粘度計による塑性粘度を評価した笠井の研究<sup>13)</sup>によると、分割練混ぜによって概ね塑性粘度は低下するものの、逆に降伏値は大きくなると報告されている。

これに対して、モルタルを対象とした本研究においては、笠井の研究と同様にすべての配合条件において、分割練混ぜによって製造されたモルタルの塑性粘度は、一括練混ぜによるものと比較して同等もしくはそれ以下に低減されることが確認された。

C/W, S/Cが増加するほど、塑性粘度は増大し、陸砂に比べて砕砂の方が相対的に大きい塑性粘度を示しているのが判る。前述した配合条件の変化によって、いずれについてもモルタル中の細骨材間隙容積<sup>14)</sup>が相対的に大きくなる傾向にある。すなわち、骨材間隙に捕捉されない自由なモルタルの容積の割合が小さくなることを示

す。これについて、Powers<sup>15)</sup>が提案した「余剰ペースト膜厚理論」は、コンクリート(モルタル)を骨材とペーストの2成分からなる複合材料と考え、全ペースト容積から骨材間隙に捕捉されるペーストの容積を引いた“余剰ペースト”によって流動性が支配されると考えるものである。図-11にモルタルの塑性粘度と余剰ペースト比(余剰ペースト容積/モルタル容積)の関係を示す。

概ね余剰ペースト比が増加するほど、塑性粘度が低くなる傾向を示している。また、一括練混ぜに対して、分割練混ぜによる塑性粘度の低減量は、余剰ペースト比の増加とともに小さくなる傾向にある。余剰ペースト膜厚理論においては、同一の材料、配合におけるモルタルの塑性粘度は変わらないとされる。したがって、材料投入の順序以外はすべて同じ条件のモルタルが異なる塑性粘度を有するという本結果は、明らかに矛盾する。本来この理論は余剰モルタルが骨材の回りにすべて堆積、あるいは付着するという幾何学的なアプローチで成立しているため、実際の練混ぜ環境における骨材の表面状態の違いおよび練混ぜ時間やミキサの型式などの練混ぜ条件の違いの影響は考慮されていない。したがって、分割練混ぜによる塑性粘度の低減効果を考察する上で本研究では、塑性粘度の低減に有効な膜厚は、材料、配合から求められる

“余剰ペースト比”に加え、分割練混ぜによって形成される“ペースト皮膜”<sup>16)</sup>の影響をも考慮する。

一括練混ぜに比べて分割練混ぜによって製造されたモルタルの塑性粘度が全体的に小さいのは、前述の余剰ペーストの効果に加えて、分割練混ぜによって形成される細骨材周囲のペースト皮膜による骨材同士の摩擦の軽減が寄与しているものと考えられる。また、水セメント比が低い条件下での一次練混ぜの過程で形成されるペースト皮膜は、練混ぜ終了時はもとより、硬化後においてもこの構造が保持されるため、強度や耐久性の向上に効果があることが報告<sup>16)17)</sup>されている。これゆえ配合上の余剰ペースト比の影響を受けないものと考えられる。したがって図-11のとおり、余剰ペースト比が小さい領域ほど相対的にペースト皮膜による塑性粘度の低減効果への寄与が大きくなるものと推察される。また、ブリーディングは砕砂に比べて陸砂の方が分割練混ぜによる低減の効果が高かった<sup>6)</sup>が、本研究の条件下における塑性粘度に対してはほとんど差異は見られなかった。このことは、砕砂に比べて陸砂を用いたモルタルは余剰ペースト比が大きいため、ペースト皮膜の効果が相対的に小さくなるものの、分割練混ぜによるペースト皮膜の形成余力も砕砂に比べて陸砂の方が高いため、分割練混ぜによる塑性粘度の低減効果に差異がなくなったと考えられる。

本実験条件の配合のうち、W/Cが40%以下のモルタルでは、ほとんどブリーディングが発生しない。したがってこれらの配合については、ブリーディングの低減に及ぼす分割練混ぜの効果はない。

低水セメント比のモルタルや拘束水率の高い細骨材を用いたモルタルは、組織中の自由水量が相対的に少なく、ブリーディングの絶対量も限りなく0に近づくため、分割練混ぜの効果はほとんど期待できない<sup>6)</sup>。これに対して、このようなモルタルに対して特に、分割練混ぜによる塑性粘度の低減効果が高いことが確認された。

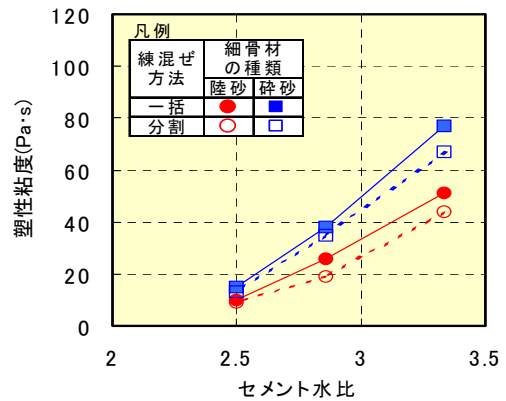


図-9 モルタルの塑性粘度に及ぼす分割練混ぜの効果 (S/C=2.0)

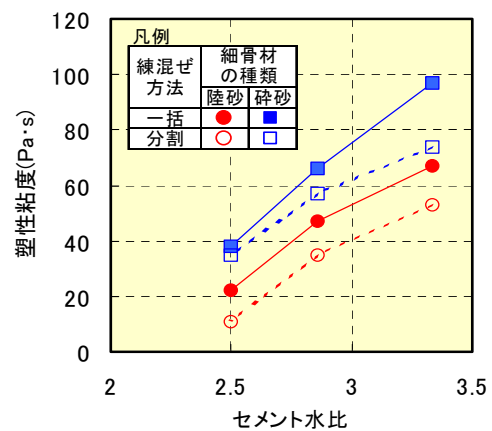


図-10 モルタルの塑性粘度に及ぼす分割練混ぜの効果 (S/C=2.5)

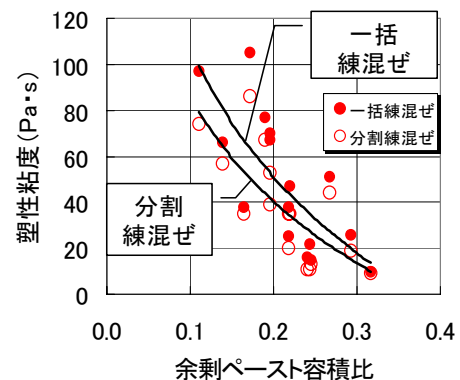


図-11 モルタルの塑性粘度と余剰ペースト容積比の関係

本実験では細骨材の特性値として吸水率（拘束水率）と実積率に着目して検討を行った。これ以外にも、細骨材の形状や親水性などの特性値の影響なども重要な要素と考えられるので今後の検討課題としたい。

#### 4. まとめ

羽根沈入型粘度計を用いて、モルタルの塑性粘度に及ぼす分割練混ぜの影響について実験した結果、以下の知見を得た。

- (1) 本粘度計による塑性粘度の測定において、モルタルの15打フロー値が190~220mmの範囲では、降伏値の影響を考慮しなくても良いことが認められた。
- (2) 分割練混ぜによって製造したモルタルの塑性粘度は、一括練混ぜによるものと比べて同等以下に低減されることが明らかになった。
- (3) モルタル中の余剰ペースト比が増加するほど、塑性粘度が低くなる傾向を示す。
- (4) 余剰ペースト比が小さい領域ほど、相対的にペースト皮膜による塑性粘度の低減効果への寄与分が大きくなるものと推察される。
- (5) 分割練混ぜを採用してもブリーディングの低減効果が期待できないモルタルに対しては、塑性粘度の低減効果が高いことが確認された。

#### 参考文献

- 1) 山本康弘：SECコンクリートのポンプ圧送性に関する研究，大成建設技術研究所報，16号，pp.3~9，1983.
- 2) 渡辺健治ほか：フレッシュコンクリートの分離抵抗性・流動性の測定方法に関する一考察，フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集，pp.37-42，1996.4
- 3) 伊達重之ほか：モルタルのフレッシュ性状に及ぼすシリカフュームの添加効果，土木学会年次学術講演会概要集（CD-ROM），Vol.57，部門5，page.V-739，2002
- 4) Safawi, M, I ほか：The Effect of Flowability and Plastic Viscosity on Vibrated High Fluidity Concrete，土木学会年次学術講演会概要集（CD-ROM），Vol.57，部門5，V-739，2002
- 5) 末岡英二ほか：充填コンクリートのブリーディングと沈下に関する一考察，土木学会年次

学術講演会概要集 第5部，Vol.55，pp.470-471，2000

- 6) 伊達重之ほか：分割練混ぜにより製造したモルタルのブリーディングに及ぼす細骨材特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.615-620，2004
- 7) 日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの挙動研究委員会報告書，1990.3
- 8) 辻幸和ほか：遠心力を利用した細骨材の保有水試験方法，土木学会論文集，No.384，pp.103-109，1987
- 9) 日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書，1996.4
- 10) 村田二郎ほか：フレッシュコンクリートの物性値測定法に関する共通試験結果，コンクリート工学，Vol.26，No.8，pp.20-29，1988
- 11) 室賀陽一郎ほか：モルタルの粘性評価試験装置の開発，土木学会年次学術講演概要集（CD-ROM），Vol.55，部門5，V-406，2000
- 12) 三浦律彦ほか：高流動コンクリートの分離抵抗性や施工性判定のための漏斗流下試験，フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集，pp.31-36，1996.4
- 13) 笠井哲郎：コンクリートの新しい練混ぜ方法に関する研究，広島大学学位論文，1990
- 14) 小澤光一ほか：骨材間隙状態を考慮したアスファルト混合物の配合指標に関する一検討，舗装工学論文集，Vol.3，pp.217-224，1998.12
- 15) Powers, T.C.：The Properties of Fresh Concrete，John Wiley & Sons, Inc., pp.501-503，1968
- 16) 吉田行ほか：各種コンクリートのブリーディングと圧縮強度に及ぼす分割練混ぜの影響，開発土木研究所月報，No.531，pp.18-26，1997.8
- 17) A.K.Tamimi, et al., The Effect of a New Mixing Technique on the Properties of the Cement Paste-Aggregate Interface, Cement and Concrete Research, Vol.24, No.7, pp.1299-1304, 1994