論文　分割混練法における一次練混ぜ時間がフレッシュコンクリートの諸物性に及ぼす影響

城戸　亮大[*1]・山本　光彦[*2]・伊藤　祐二[*2]・笠井　哲郎[*3]

要旨：コンクリートの分割混練法である Sand Enveloped with Cement (SEC)工法とダブルミキシング(DM)工法により，ブリーディングの低減，初期水和促進などフレッシュコンクリートの諸物性が改善される。この効果は，最適一次水セメント比の条件で一次練混ぜを行うことで現れる。本研究では，SEC および DM における一次練混ぜ時間を変化させコンクリートおよびセメントペーストのブリーディングの低減効果に及ぼす影響を検討した。SEC では一次練混ぜ時間に比例してブリーディングは低減するが，DM のセメントペーストでは，一次練混ぜ時間が長すぎる場合，ブリーディングが大きくなることが判明した。

キーワード：分割混練法，Sand Enveloped with Cement，ダブルミキシング，一次練混ぜ時間，ブリーディング

1. はじめに

一般にコンクリートの練混ぜはセメント，水，骨材および混和材料をほぼ同時にミキサに投入し，練り混ぜることにより製造される。使用材料が同じでも練混ぜ方法，材料投入順序を工夫することでフレッシュコンクリートや硬化コンクリートの諸物性を改善できることは古くから知られていたが，その条件や効果に関する系統だった検討は少ない[1)]。その後，本研究で述べる Sand Enveloped with Cement (SEC)工法[2)]およびダブルミキシング（DM）工法[3)] など，練混ぜ水を分割して加えて練り混ぜる分割混練法が提案された。SEC 工法は，練混ぜ水の一部と細骨材・粗骨材とを練混ぜ（調整練混ぜ），そのうえでセメントを加えて練混ぜた（一次練混ぜ）後に，残りの水を添加して練混ぜる（二次練混ぜ）ものである。DM 工法は，水の一部をセメントと練混ぜた後，残りの水を添加し練混ぜてセメントペーストを製造し，これに細骨材・粗骨材を加えて練り混ぜることで製造される。SEC と DM の違いは，一次練混ぜの際の骨材の有無と一次水の加え方である。これらの工法により従来の一括で練り混ぜる方法に比べ，フレッシュコンクリートの性質が変化し，また練混ぜ水を最適の分割比率とすることで，ブリーディングの低減，降伏値や粘着力の増加，セメントの初期水和の向上などの大幅な改善効果を示した[2)-5)]。SEC 工法と DM 工法が実用化され，吹き付けコンクリートやプレキャストコンクリートの製造などに広く適用されている[6)-8)]。

一方，分割練混ぜによるこれらの効果の発生メカニズムについて，これまで様々な検討が行われてきた。有力な説の一つは，セメントと水の練混ぜにおいて，セメントと一次水をキャピラリー状態[9)]となる量で練り混ぜた後（一次練り），残りの水（二次水）を加え練混ぜて製造したセメントペーストでは，練混ぜ水を一括で投入する従来の方法（SM）に比べ，セメント粒子の分散・凝集構造が大幅に変化し，水を保持しやすい構造となりブリーディングを大幅に低減するとしている[3),10)]。これらの分割練混ぜの効果を発揮させるためには，最適の一次練り混ぜ条件（最適一次水セメント比：最適 W_1/C）で練り混ぜることが肝要であることは判明しているが，その条件の練混ぜ時間の影響に関しては明確な検討がなされていない。

そこで，本研究では分割練混ぜにおける一次練混ぜ時間を変化させた場合のブリーディングの試験結果から SEC および DM 効果に及ぼす一次練混ぜ時間の影響について検討した。また，実機への適用を指向し，SEC コンクリートに関し最適の一次練混ぜ時間についても検討を試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合条件

(1)DM

セメントは普通ポルトランドセメント:N セメント（密度：3.16g/cm^3，比表面積：3270cm^2/g，T 社製）と試験用普通ポルトランドセメント:E セメント（密度:3.16g/cm^3，比表面積：3420cm^2/g，セメント協会）の 2 種類を使用した。なお，試験用セメントには，少量混合成分は含まれていない。DM に関する試験は，プレーンのセメントペーストのみで行い，W/C は全て 60%とした。また，少量混合成分の影響を検討するために，E セメントに高炉スラグ微粉末（密度：2.89g/cm^3，比表面積：4310cm^2/g）を内割で 5%混合したものも用いた。

(2)SEC

コンクリートの使用材料は，普通ポルトランドセメン

*1 東海大学大学院　工学研究科建築土木工学専攻　(学生会員)
*2 リブコンエンジニアリング株式会社　(正会員)
*3 東海大学　工学部土木工学科　教授　工博　(正会員)

表－1 コンクリートの配合

G_{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				
			W_1	W_2	C	S	G
20	55	40.7	103	97	364	729	1044

＊一括練混ぜの場合の W は 200 kg/m³である。

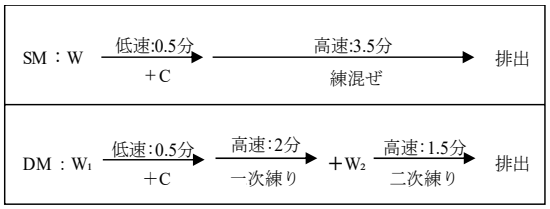
ト（密度：3.16 g/cm³，比表面積：3190cm²/g），石灰岩砕砂（密度：2.63 g/cm³，吸水率：1.66%），硬質砂岩砕石（密度：2.63g/cm³，吸水率：0.71%）を使用した。コンクリートの配合を**表－1** に示す。

モルタルの使用材料はコンクリートと同様で，配合条件は W/C=60%，S/C=2.0 のプレーンモルタルである。

2.2 練混ぜ方法

(1)DM

図－1 にＤＭによるセメントペーストの練混ぜ方法を示す。練混ぜはホバート型モルタルミキサ(容量：10*l*)使用した。通常の一括練混ぜ（SM）では練混ぜ水を一括投入し，高速で 3.5 分練り混ぜた。DM はこの練混ぜ水を 2 分割して練混ぜる方法で，練混ぜ水の一部(一次水：W_1)とセメントを高速で 2 分間練り混ぜた（一次練混ぜ）後，水の残部(二次水：W_2)を加え高速で 1.5 分間の練り混ぜ（二次練混ぜ）を基準とした。セメントは一次水が入った練りバチに最初の低速回転 0.5 分間でミキサに連続投入した。また，一次水セメント比（W_1/C)の影響を評価する試験では，W_1/C を 9, 16, 最適 W_1/C，32%と変化させた。最適 W_1/C はブリーディングが最も少なくなる W_1/C であり，セメントの種類によって異なる。最適 W_1/C は，N セメントで 24%，E セメントで 23%であった。なお，DM においてブリーディングが最小となる W_1/C の条件で，一次練混ぜ時の攪拌トルクが最大となることが報告されている [4]ことから，ここでは一次練混ぜ時の攪拌トルクの値から最適 W_1/C を決定した。一次練混ぜ時間の影響を検討する試験では，この最適 W_1/C の条件で一次練混ぜ時間を 0.5～15 分と変化させ行った。なお，この場合の二次練混ぜ時間は，高速で 1.5 分間と同一とした。



＊W＝W_1＋W_2，DMの一次練混ぜ時間は0.5～15分と変化させた。

図－1 セメントペーストの練混ぜ方法

(2)SEC

SEC によるモルタル，コンクリートの練混ぜ方法を**図－2** に示す。なお，コンクリートの単位水量は 200kg/m³と大きいが，これはブリーディングが多い配合として，練混ぜ方法の相違による差を明確にするためである。SEC における最適の W_1/C は，コンクリートの要求性能，使用材料，配合条件等により異なるが [2]，本研究では参考文献 11)に記載の「一次水量の算定式」に準拠し，モルタル，コンクリートとも W_1/C を 28%として行った。また，一次練混ぜ時間をモルタルで 0～10 分，コンクリートで 0～5 分と変化させた。なお，この際二次練混ぜ時間は，モルタルの場合 1 分，コンクリートの場合 0.5 分とそれぞれ一定時間とした。使用ミキサは，コンクリートでは 2 軸強制練りミキサ（容量：60*l*），モルタルではホバート型ミキサ（容量：20*l*）である。

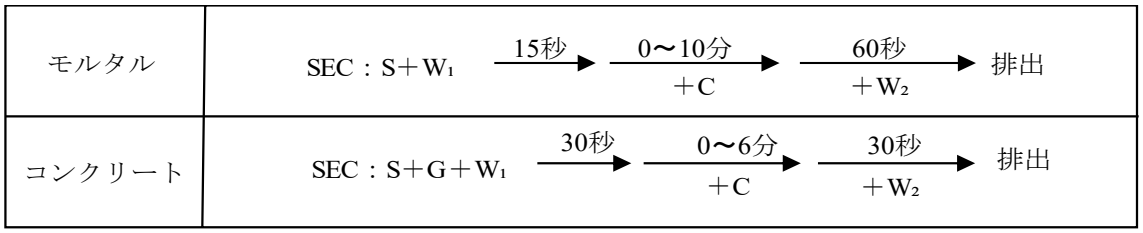
2.3 各種試験方法

(1)セメントペーストのブリーディング試験

セメントペーストのブリーディング率の測定は，土木学会基準「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法(JSCE-F 522-2013)」に準拠して行った。なお，この試験で測定するブリーディング水量は時間経過に伴い増加し，ある時間を過ぎると減少する。この測定におけるブリーディング水量の最大値(m*l*)を試料の容積(m*l*)で除した値を最大ブリーディング率(%)として以下で用いた。また，測定間隔は 1 時間とした。

(2)セメントの強熱減量試験

本試験は，DM における一次練混ぜ時のセメントの水和の程度を測定するために行った。各セメントの最適



図－2 モルタル・コンクリートの練混ぜ方法

W_1/C の条件で一次練混ぜ時間を 0～15 分と変えて練混ぜ，各練混ぜ時間終了直後に練りバチから約 8 g のセメントペーストを取る。これに直ちに 300m*l* のアセトンを加え 30 秒間攪拌し，これを吸引濾過してセメントを採取する。このセメントからアセトンを乾燥するために，現有装置の関係から一般に簡便な手法として適用される 105℃の炉乾燥[12),13)]を 24 時間行い，強熱減量試験用の試料とした。以後，JIS R 5202「強熱減量の定量方法」に準拠して行った。

(3)一次練混ぜ時のミキサからの蒸発水量の測定

図－1 の DM の練混ぜ方法において，0.5 分で最適の一次水を投入した直後に練りバチをミキサから脱着し，練りバチ，パドルおよび練りバチ内の一次セメントペーストの合計質量を計り，この値を m_1 とする。計量後直ちに練りバチをミキサに装着し，一次練混ぜを行ない，一次練混ぜ時間終了後の上記の合計質量を計り，この値を m_2 とする。各一次練混ぜ時間における m_2 を計測し，m_2 から m_1 を差し引いた値を，一次練混ぜ時のミキサ内の一次セメントペーストからの練混ぜ水の蒸発量とした。質量は 0.1g の精度で計測した。

(4)モルタル・コンクリートのブリーディング試験

コンクリートは，JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠して行った。モルタルは，土木学会基準「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法」と試料容器に φ10×20cm のモールドを用いて，JIS A 1123 に準拠して 2 種類の方法で行った。なお，ブリーディング率は配合水量に対するブリーディング水量の率とした。

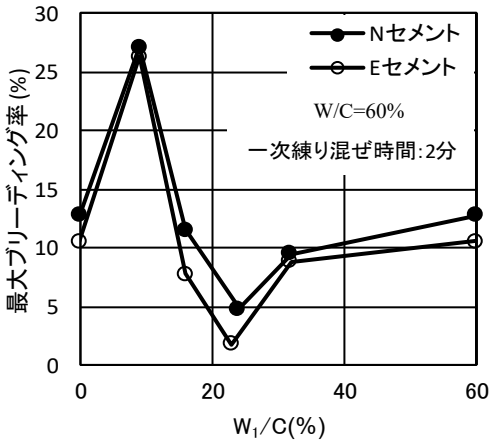
3.実験結果および考察

3.1 各セメントの DM 効果

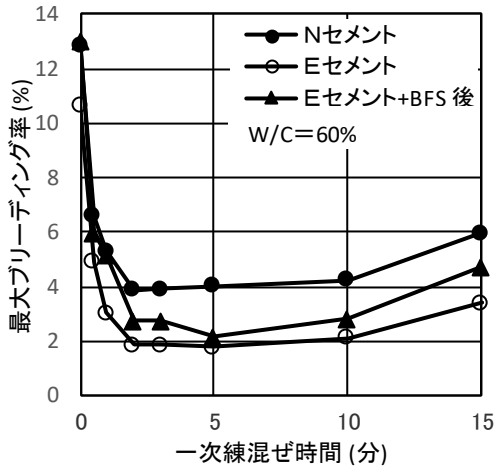
図－3 は N セメントと E セメントを用い，W_1/C を変化させて DM で製造したセメントペーストの最大ブリーディング率を示したものである。なお，図の W_1/C=0%と 60%は SM の結果である。図より両セメントの場合とも最大ブリーディング率は W_1/C に伴い大幅に変化し，最適 W_1/C において最小値を示している。また，W_1/C=9%の場合にブリーディングは最大となり，SM の場合より 2 倍以上のブリーディングが生じている。ここでブリーディングが最小となる点を最適条件，その時の W_1/C を最適 W_1/C およびブリーディングが最大となる点を最悪条件，その時の W_1/C を最悪 W_1/C とそれぞれ定義し以下に用いる。また，DM によって SM の場合よりブリーディングが減少することを正の DM 効果，増加することを負の DM 効果と呼ぶことにする。セメントの種類の影響としては，E セメントの方が N セメントより SM および DM の場合とも最大ブリーディング率は小さくなっている。また，SM のブリーディング率に対する最適 W_1/C のブリーディング率の比（SM/DM）を比較すると N セメントで 3.0，E セメントで 5.8 となる。上述の DM 効果の定義より，SM/DM が大きいほど正の DM 効果が大きいことを示すことから，E セメントの方が正の DM 効果が顕著となることがわかる。

3.2 DM の一次練混ぜ時間の影響

図－4 は N セメントおよび E セメントを用い，DM における最適 W_1/C の条件で一次練混ぜ時間を 0～15 分まで変化させたときの最大ブリーディング率を示したものである。なお，一次練混ぜ時間 0 分は SM の値である。田澤ら[3)]は，正の DM 効果は最適 W_1/C の条件で一次練混ぜ時間を長くするほどより顕著に現れ，W/C=60%のセメントペーストの練混ぜにおいて，一次練混ぜ時間を 15 分とするとブリーディングがほとんど発生しないことを示した。しかし，本研究では図より両セメントの場合とも，一次練混ぜ時間 2～3 分までは一次練混ぜ時間が長くなるほどブリーディングは単調に減少しているが，一次練混ぜ時間をそれ以上長くするとブリーディングがわずかずつ増加する結果となった。この主な原因として，一次練混ぜ時間の経過に伴い練混ぜ水が減少し，一次練



図－3 W_1/C と最大ブリーディング率の関係

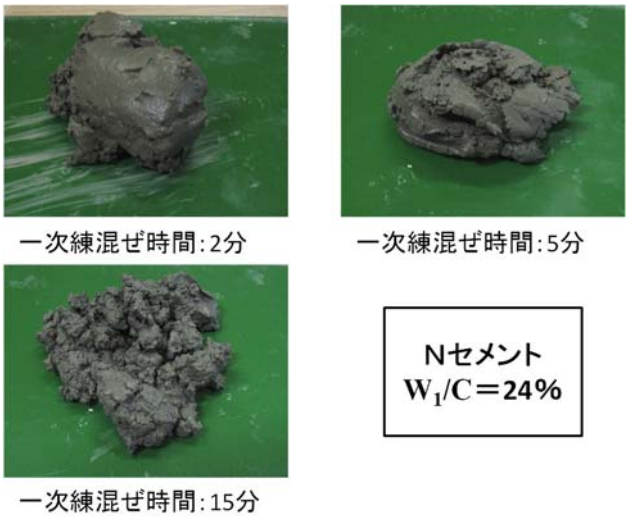


図－4 一次練り混ぜ時間と最大ブリーディング率の関係

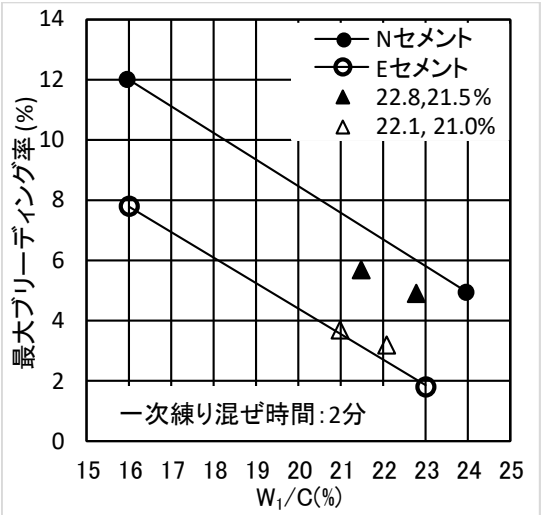
混ぜ時間が 2 分における最適 W_1/C より小さい W_1/C で一次練りを行う期間が生じたためであると考えられる。しかし，どの一次練混ぜ時間の場合においても E セメントの方がブリーディングは小さくなった。

同図にはEセメントに少量混合成分を想定して高炉スラグ微粉末を混合した場合についても同時に示した。図より，少量混合成分により SM および DM の場合とも最と同程度の値となった。一次練混ぜ時間 2 分の DM と SM に関し，3.1 で示した SM/DM を算出すると 4.4 となり，E セメントの場合より小さくなっていることから，少量混合成分により正の DM 効果小さくなることがわかる。また，一次練混ぜ時間の影響は，N セメントの場合とほぼ同様な傾向となっている。以上のことより，高炉スラグ微粉末をセメントの少量混合成分として混合した場合，セメントペーストのブリーディングが大きくなり，DM 効果も小さくなる。

図－5 は最適 W_1/C の条件で一次練混ぜ時間を 2, 5, 15 分とした場合のセメントペーストの写真である。写真より 2 分が 1.で述べたキャピラリー状態であるとすると，5, 15 分はそれよりセメントに対し水が少ない状態（ファニキュラー:Funicular[9]）である。一次練混ぜの際に一次水が減少する原因として，セメントの結合水の増加とミキサからの水の蒸発が考えられる。そこで，各一次練混ぜ時間終了時のセメントペーストの強熱減量と蒸発量を測定し，それらの値から算出した各一次練混ぜ時間における“実質”の W_1/C と算出に必要な各種実測値を**表－2** に示す。これより，一次練混ぜ時間が長くなるほど最適 W_1/C よりも小さい W_1/C の条件で，ある時間一次練混ぜが行われたことがわかる。そこで，**表－2** の練混ぜ時間 5, 15 分の場合の実質 W_1/C で DM の一次練混ぜ時間を 2 分としたセメントペーストのブリーディング試験を行い，その結果を**図－3** の W_1/C=16～24%（または 23%）上にプロットし，**図－6** に示す。図より，実質 W_1/C の DM で製造したセメントペーストの最大ブリーディング率は，W_1/C=16～24%（または 23%）の線上とほぼ同程度または近い値となっている。



図－5　一次練混ぜ終了後のセメントペースト



図－6　W_1/C と最大ブリーディング率の関係

表－2 各一次練混ぜ時間終了時の実質 W_1/C の算出

セメントの種類	最適一次練混ぜ時の配合	一次練混ぜ時間(min.)	強熱減量(%)	強熱減量の増加量(%)	結合水量の増加量(g)	一次水の蒸発量(g)	一次水の全減少量(g)	実質の W_1/C (%)
N セメント	C:1000g W_1:240g W_1/C=24%	0	2.24	0	0	0	0	24
		2	2.62	0.38	3.8	4.2	8.0	23.2
		5	2.80	0.56	5.6	6.9	12.5	22.8
		15	2.96	0.72	7.2	18.0	25.2	21.5
E セメント	C:1000g W_1:230g W_1/C=23%	0	0.60	0	0	0	0	23
		2	0.86	0.26	2.6	3.4	6.0	22.4
		5	0.87	0.27	2.7	5.6	8.3	22.1
		15	0.95	0.35	3.5	16.4	19.9	21.0

以上のことより，一次練混ぜ時間が長すぎる場合にブリーディングが増加した原因は，最適 W_1/C よりも小さい W_1/C で一次練混ぜが行われたと同等の条件となったためと推察される。

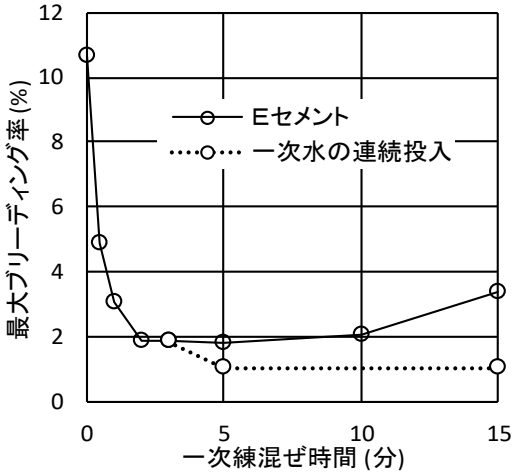
図－7 は E セメントに関し，最適 W_1/C の条件で一次練混ぜ時間を 5, 15 分行う際に，**表－2** に示した減少する水量を連続してミキサに投入し，一次練混ぜの間，一次セメントペーストがキャピラリー状態を保つ条件として，DM で製造したセメントペーストの最大ブリーディング率を**図－4** の結果に追記したものである。なお，DM の二次水量は一次練りの際に連続投入した水量を差し引いた量で，最終の W/C は 60%である。図より，本条件で製造したセメントペーストのブリーディングは大幅に減少している。すなわち，DM において最適 W_1/C の条件を保って一次練りを行うことで正の DM 効果はより顕著となり，田澤ら[4] が指摘しているようなブリーディングの極めて小さいセメントペーストの製造が可能となる。

3.3 SEC の一次練混ぜ時間の影響

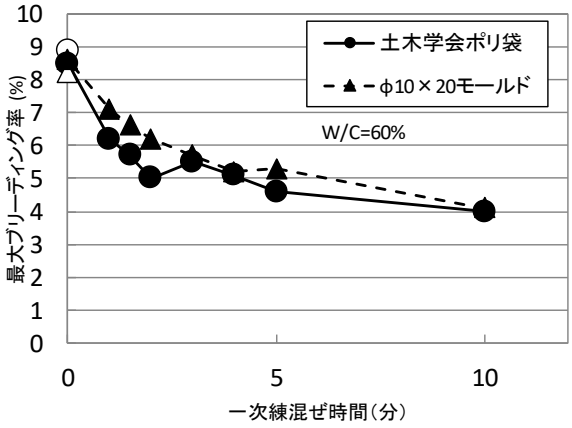
図－8 は SEC において一次練混ぜ時間を変化させて製造したモルタルの最大ブリーディング率を示したものである。図の○，△は一括練混ぜの場合の値である。DM のセメントペーストの場合，一次練混ぜ時間が 3 分を超えるとブリーディングが僅かに増加する傾向を示したが，SEC モルタルはそれとは異なり，一次練混ぜ時間が長くなるほどブリーディングが減少する結果となった。また，一次練混ぜ時間が 2 分までは練混ぜ時間の延長に伴い急激にブリーディング率が減少しているが，それ以降はブリーディング率の減少は緩やかである。試験法として，JIS A 1123 に準拠する方法と土木学会基準の方法を用いたが，どちらもほぼ同様な傾向を示し，試験法による差は見られなかった。

図－9 は SEC において一次練混ぜ時間を変化させて製造したコンクリートの最大ブリーディング率を示したものである。前図の SEC モルタルの場合と同様に，一次練混ぜ時間が長くなるほどブリーディングは減少した。また，一次練混ぜ時間が 1.5 分までは練混ぜ時間の延長に伴い急激にブリーディング率が減少しているが，それ以降はブリーディング率の減少は緩やかとなった。

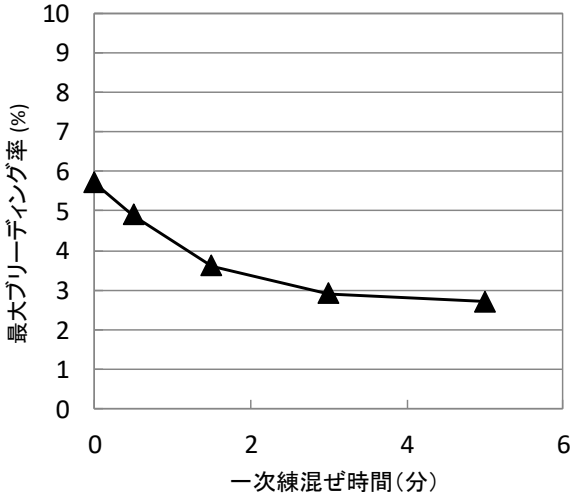
図－10 は一次練混ぜ時間がコンクリートのスランプに及ぼす影響を示したものである。一次練混ぜ時間が 1.5



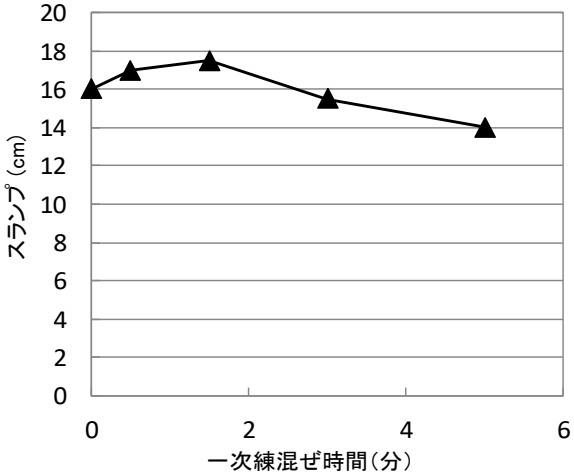
図－7 一次練混ぜ時間と最大ブリーディング率の関係



図－8 最大ブリーディング率と一次練混ぜ時間の関係 (SEC モルタル)



図－9 最大ブリーディング率と一時練混ぜ時間の関係 (SEC コンクリート)



図－10 スランプと一時練混ぜ時間の関係 (SEC コンクリート)

分まではスランプは僅かに増加しているが，それ以降，一次練混ぜ時間が長くなるほどスランプは小さくなった。実機への適用を想定した場合，一般に練混ぜ時間が長すぎることは工程管理の上で望ましくない。以上のことから，ここで行った条件の場合，SEC の一次練混ぜ時間は 1.5 分程度が適切であると考えられる。

4.まとめ

セメントペーストの DM およびモルタル・コンクリートの SEC における一次練混ぜ時間の影響に関し検討した結果，以下の結論を得た。

(1) N セメントおよび少量混合成分の混合がない E セメントの場合とも, DM で製造したセメントペーストのブリーディング率は W_1/C により変化し，ブリーディングが最大となる最悪 W_1/C と最小となる最適 W_1/C が存在する。

(2) 高炉スラグ微粉末をセメントの少量混合成分として混合した場合，SM および DM ともセメントペーストのブリーディングは大きくなり，また，SM のブリーディング率に対する最適 W_1/C のブリーディング率の比（SM/DM）で評価する正の DM 効果は小さくなる。

(3) DM で製造したセメントペーストにおいて，一次練混ぜ時間 2～3 分までは一次練混ぜ時間が長くなるほどブリーディングは単調に減少したが，一次練混ぜ時間をそれ以上長くするとブリーディングが僅かずつ増加した。これは，一次練混ぜ時にセメントの結合水の増加とセメントペーストからの水の蒸発により，一時練混ぜ水が減少し，最適 W_1/C よりも小さい W_1/C で一次練混ぜが行われたことが主な原因であると推察した。

(4) DM の一次練混ぜの際に減少する水量分を連続して投入し, 最適 W_1/C の条件を保って一次練りを行うことで正の DM 効果はより顕著となり，ブリーディングの極めて小さいセメントペーストを製造できる。

(5) SEC で製造したモルタルは, 一次練混ぜ時間が長くなるほどブリーディングが減少し，特に一次練混ぜ時間が 2 分までは練混ぜ時間の延長に伴い急激にブリーディングが減少した。

(6) SEC で製造したコンクリートは, 一次練混ぜ時間が長くなるほどブリーディングが減少するが，特に一次練混ぜ時間が 1.5 分までの減少が大きい。また，1.5 分を超えると，一次練混ぜ時間が長くなるほどスランプは小さくなる。このため，本研究の条件の範囲内でブリーディングを抑制でき，スランプを低下させないための適切な一次練混ぜ時間は，1.5 分程度であると考えられる。

参考文献

1) 吉田徳次郎 : コンクリートの材料を混合物に投入すべき順序に就いて，九州大学工学部彙報 3－6，1931.
2) 伊東靖郎ほか : S.E.C.コンクリートの特性と展望，セメントコンクリート，No.410, pp.20-29, 1981.
3) 田澤榮一ほか : ダブルミキシングで作成したセメントペーストの諸物性について，コンクリート工学年次講演会論文集，pp.125-128(1982)
4) 田澤榮一，笠井哲郎 : フレッシュセメントペーストのダブルミキシング効果，土木学会論文集，第 396 号/V-9，pp.135-142，1988
5) 中川好正ほか : ダブルミキシングがセメントの初期水和反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.29，No.1，pp.51-56，2007
6) 高野晃一ほか : 粉じん低減を目的に実施した実大模擬トンネルでの吹付け試験（その 5）－SEC 吹付けコンクリートを用いた吹付け試験－，土木学会第 60 回年次学術講演会概要集，第 6 部門，pp.41-42，2005
7) 笠井哲郎，田澤榮一，磯貝寛幸 : 常圧蒸気養生で製造するコンクリート製品へのダブルミキシングの適用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1，pp.2185-2190，2009
8) 鈴木翔太ほか : ダブルミキシングで製造したプレキャストコンクリートの耐凍害性と細孔構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.355-360，2014
9) 日本粉体工学技術協会編 : 凝集工学, 日刊工業新聞社, pp.40, 1982
10) 吉岡一弘 : セメント粒子の凝集構造に及ぼす鉱物組成ならびに練混ぜ方法の影響，広島大学学位論文，1999
11) 一般財団法人 土木研究センター : ＳＥＣコンクリート, 建設技術審査証明報告書, (建技審証 第 0309 号), p.68，2003
12) Taylor，H.F.W. : Concrete Chemistry，Academic Press, pp.26-35，1990
13) 原沢蓉子ほか : 消費水分量に着目した高炉セメントの水和反応解明に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.67-72，2015