

論文 高性能AE減水剤を分割して使用した高強度コンクリートの基礎的性状に関する研究

宮部 義章^{*1}・中田 善久^{*2}・斉藤 丈士^{*3}・西 祐宜^{*4}

要旨: 高性能AE減水剤は、練混ぜ中やあらかじめ練り混ぜられたコンクリートに追加して使用することによりコンクリートの流動性を増大できる特徴を有している。ここでは、高性能 AE 減水剤を練混ぜ開始時とそれ以降に分割して使用（分割添加）した高強度コンクリートの性状について検討を行った。その結果、高性能AE減水剤の分割割合により高強度コンクリートのスランプフローが変化すること、分割添加が圧縮強度に及ぼす影響は小さいが、荷卸しを想定した時点で分割添加を行った場合には圧縮強度に及ぼす温度の影響が小さくなることなどが明らかにした。

キーワード: 高性能 AE 減水剤, 分割添加, 高強度コンクリート, スランプフロー, 圧縮強度

1. はじめに

高性能AE減水剤は、その使用量により相当に広い範囲で流動性を調整できる特徴を有している。このため、高性能AE減水剤を用いたコンクリートの配合（調合）設計においては、材料の構成割合を大きく変化させることなく高性能 AE 減水剤の使用量によりスランプ（以下、SLと称す）を調整することが可能である。また、高性能AE減水剤は 1980 年代に普及していた流動化剤と成分が似通っており、流動化コンクリート¹⁾における工場流動化や現場流動化のように、コンクリートの練混ぜ中やあらかじめ練り混ぜられたコンクリートに後から追加（添加）して流動性を増大させることが可能な特徴も有している。

そこで、本研究は、高性能AE減水剤の有するこれらの特徴を利用してコンクリートの品質を向上あるいは製造コストを低下させるために、高性能AE減水剤を二段階に分けて使用（以下、分割添加という）したコンクリートの性状について検討を行ったものである。ここでは、高性能 AE 減水剤の使用が不可欠な高強度コンクリートを対象として、練混ぜ中に高性能AE減水剤を分割添加した高強度コンクリートおよび練混ぜ時と荷卸しを想定した時点で分割して高性能 AE 減水剤を添加した高強度コンクリートの品質について検討した。

一方で、コンクリートのフレッシュ性状は季節の違いによる温度変化の影響を受けることが周知の事実であり、高性能 AE 減水剤を分割添加するコンクリートにおいても、スランプの経時変化量や高性能AE減水剤の使用量などが温度の影響を受けることは容易に推察できる。そこで、コンクリート温度および環境温度の違いが高性能 AE 減水剤を分割添加したコンクリートの品質に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 練混ぜ中に高性能 AE 減水剤を分割添加した高強度コンクリートの性状

2.1 実験概要

練混ぜ開始時にセメント、骨材、水および一部の高性能AE減水剤をミキサに投入し、2分間練り混ぜた後に残りの高性能AE減水剤を投入してさらに1分間練り混ぜた高強度・高流動コンクリートの品質を調べた。

(1) 使用材料

使用材料を表-1に示す。セメントに普通ポルトランドセメント、水に上水道水、細骨材に千葉県富津市産山砂、粗骨材に東京都青梅市産硬質砂岩砕石 2005、化学混和剤にポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。

(2) 高強度コンクリートの製造方法

高強度コンクリートの製造方法を図-1に示す。練混ぜには水平二軸形強制練りミキサを用い、セメント、骨材、水および一部の高性能AE減水剤を投入し2分間練り混ぜた後に残りの高性能 AE 減水剤を投入し、さらに 1

表-1 使用材料

| 種類 | 名称 | 概要 |
|------------|--------------|--|
| セメント (C) | 普通ポルトランドセメント | 密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3,300cm ² /g |
| 水 (W) | 上水道水 | 千葉県浦安市 |
| 細骨材 (S) | 砂 | 千葉県富津市産山砂 表乾密度: 2.59g/cm ³ 粗粒率: 2.38 |
| 粗骨材 (G) | 砕石2005 | 東京都青梅市産硬質砂岩 表乾密度: 2.70g/cm ³ 実積率: 59.3% |
| 化学混和剤 (Ad) | 高性能AE減水剤 | ポリカルボン酸系化合物 |
| | 空気量調整剤 | 変成ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤 |
| | 消泡剤 | ポリアルキレン グリコール誘導体 |

*1 日本大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生（学生会員）

*2 日本大学理工学部建築学科 教授 博士（工学）（正会員）

*3 (株)内山アドバンス 中央技術研究所 博士（工学）（正会員）

*4 (株)フローリック コンクリート研究所（正会員）

表-2 実験の変化要因および水準と高強度コンクリートの調合条件

| 変化要因 | 高性能AE減水剤の二次投入割合 (%) | 環境温度 (°C) | セメントの種類 | W/C (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 単位セメント量 (kg/m ³) | 単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³) | 目標SF (cm) |
|---------------|---------------------|-----------|--------------|---------|---------------------------|------------------------------|---|-----------|
| 高性能AE減水剤の分割割合 | 0 | 20 | 普通ポルトランドセメント | 28 | 170 | 607 | 0.525 | SF 60±5.0 |
| | 20,40,60,80,100 | | | | | | | — |
| 環境温度 | 0 | 20 | | 38 | | 447 | 0.56 | SF 60±5.0 |
| | 30 | 10,20,30 | | | | | | — |

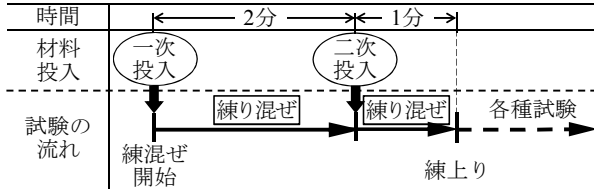


図-1 高強度コンクリートの製造方法

分間練り混ぜて練上りとした。高性能AE減水剤を分割添加しない場合（以下、一括投入という）は、全材料をミキサーに投入し3分間練り混ぜて練上りとした。なお、ここでは、練混ぜ開始時の材料投入を一次投入、練混ぜ中の高性能AE減水剤の添加を二次投入と称している。

(3) 実験の変化要因および水準と高強度コンクリートの調合条件

実験の変化要因および水準と高強度コンクリートの調合条件を表-2に示す。高性能AE減水剤の分割割合の影響を検討するために、二次投入する高性能AE減水剤の割合（以下、二次投入割合と称する）を0（一括投入）、20、40、60、80および100%の6水準で変化させた。この場合の調合条件は、水セメント比28%、単位水量170kg/m³、単位粗骨材かさ容積0.525m³/m³とし、一括投入の練上りスランプフロー（以下、SFと称する）が60cmとなるように高性能AE減水剤の総使用量をC×2.6%で一定とした。

また、温度の影響を検討するために、練上りにおけるコンクリート温度および環境温度を10、20および30°Cの3水準で変化させた。この場合の調合条件は、水セメント比38%、単位水量170kg/m³、単位粗骨材かさ容積0.56m³/m³とし、二次投入割合は0（一括投入）および30%の2水準とした。なお、温度20°Cにおける一括投入の練上りSFが60cmとなるように高性能AE減水剤の総使用量は1.4%で一定とした。

(4) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3に示す。SFは、練上りからの経過時間（以下、経時と称す）が0（練上り）、5、30、60および90分後に測定した。また、圧縮強度は、練上りから90分後に採取したφ10×20cmの供試体を脱型後に所定の材齢まで標準養生(20±2°C水中)したものについて、二次投入割合を変化させた場合は材齢7、28および91日、温度を変化させた場合は材齢2、7および28日に試験を行った。

表-3 試験項目および試験方法

| 試験項目 | 試験方法 |
|------|--|
| SF | ・試験方法はJIS A 1150 ・練上りから0,5,30,60,90分後に測定 |
| 圧縮強度 | ・試験方法はJIS A 1108 ・供試体はφ10×20cm(標準養生) ・材齢2,7,28日または7,28,91日 |

2.2 結果および考察

(1) SF 性状

(a) 高性能AE減水剤の分割割合の影響

二次投入割合を変化させた場合のSFの試験結果を図-2に、二次投入割合と各測定時間から次の測定までの間におけるSFの変化量の関係を図-3に示す。図-3におけるSFの変化量の値は、正の場合にSFの増大、負の場合にSFの減少を表している。

図-2によると、二次投入割合が20%および40%の場合、各測定時ともSFは一括投入より大きくなる傾向を示し、二次投入割合が60%より大きい場合は経時30分以降のSFが一括投入より小さくなる傾向を示している。一方、図-3によると、練上りから経時5分までにおけるSFの変化量の値は二次投入割合が大きいほど小さく、経時5分から30分までにおけるSFの変化量の値は、一括投入で正に大きく、二次投入割合が20~80%の範囲では概ね一定となり、二次投入割合100%で負に大きくなった。また、経時30分以降のSFの変化量は、多少のばらつきはみられるが二次投入割合にかかわらず概ね一定であった。この結果は、SFを一定とする場合、本実験の条件では二次投入割合を20~40%程度にすると高性能AE減水剤の使用量が低減できることを示している。また、二次投入割合が大きいほど最大SFは速く得られること、二次投入割合が20~80%の範囲では比較的安定した（経時による変化量の少ない）SFが得られることを示している。

セメント粒子に吸着した高性能AE減水剤が分散に影響²⁾し、液相中に残った高性能AE減水剤がSF保持に影響する³⁾と仮定した場合、この結果から一次投入によりセメント粒子に吸着する高性能AE減水剤の分散効果は、二次投入により吸着する高性能AE減水剤よりも遅く発揮されるものと考えられる。また、練上りから30分以降におけるSFの変化量がほぼ一定であったことから、本実験で用いた高性能AE減水剤のセメント粒子への吸着

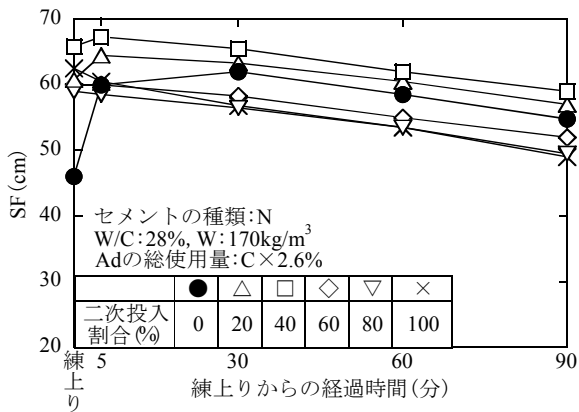


図-2 二次投入割合を変化させた場合のSFの試験結果

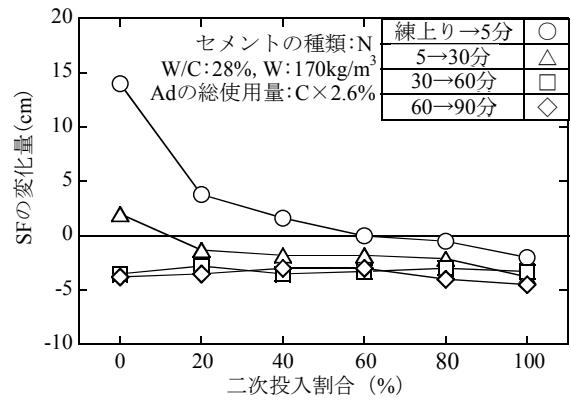


図-3 二次投入割合とSFの変化量の関係

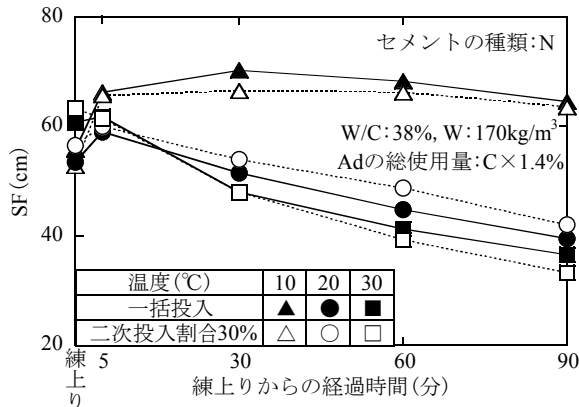


図-4 温度を変化させた場合のSFの試験結果

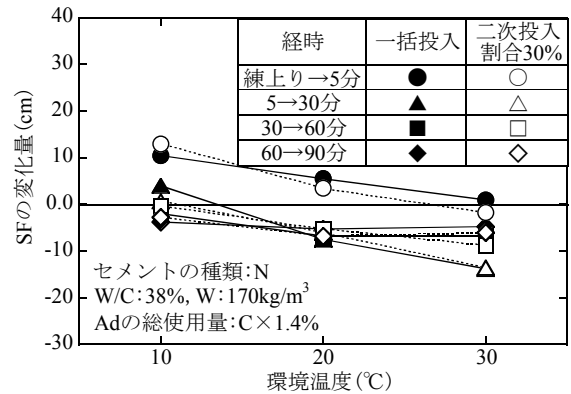


図-5 環境温度とSFの変化量の関係

は練上りから 30 分程度で二次投入割合にかかわらず概ね一定になったと思われる。

なお、二次投入割合 20 および 40%において最大 SF が大きくなったことは、流動化剤において二次投入した場合に一次投入よりも分散効果が高くなる「後添加効果」⁴⁾と同様に、セメント粒子への吸着性状が一次投入と二次投入で異なる²⁾ことが影響していると考えられる。ただし、練混ぜから 30 分以降で一括投入よりも SF が小さかった二次投入割合 60%以上の場合には目視による二次投入前の SF が著しく小さかったことから、練混ぜ中におけるコンクリートの粘性とせん断力の関係などの物理的な要因も最大 SF に影響を及ぼしている可能性がある。

(b) 温度の影響

温度を変化させた場合のSFの試験結果を図-4に、環境温度と各測定時間から次の測定までの間におけるSFの変化量の関係を図-5に示す。図-5におけるSFの変化量は図-3と同様に、正の場合にSFの増大、負の場合にSFの減少を表している。

図-4によると、一括投入と二次投入割合30%を比較すると、温度が10°Cの場合のSFは概ね一括投入の方が大きく、温度が20°Cの場合のSFは前節の場合と同様に二次投入割合30%の方が大きく、温度が30°Cの場合のSFは経時5分および30分でほぼ同等、60分以降で一括投入の方が大きかった。なお、経時5分におけるSFは各温度

とも一括投入と二次投入割合30%の差は小さかった。また、図-5によると、練上りから経時5分および30分までにおけるSFの変化量の値は温度が低いほど正の側に大きく、この傾きは、練上りから経時5分までにおいては二次投入割合30%の方が大きかった。これより、分割添加の有無にかかわらず温度が低いほど最大SFは遅く得られ、また、経時によるSFの低下は小さい傾向にあると言える。なお、一括投入と二次投入割合30%に傾向の違いが見られるのは、主にSFの変化量の値が正の場合、すなわち最大SFが得られる以前である。したがって、前項で触れた一次投入によりセメント粒子に吸着する高性能AE減水剤の分散効果が発揮される速さは、温度により異なる可能性がある。

高性能AE減水剤の使用量が一定の場合に大きなSFが得られれば、同一のSFを得るための高性能AE減水剤の使用量が少なくなるためコストの低下につながる。また、経時による変化量の少ないSFが得られれば、荷卸し地点におけるSFの管理が安定することにつながる。したがって、本実験の範囲では、温度が20°Cの場合に二次投入割合を20~40%程度とすることが製造コストと品質管理の両面から見て望ましいと考えられる。

(2) 圧縮強度

試験材齢ごとの二次投入割合と圧縮強度の関係を図-6に、環境温度と圧縮強度の関係を図-7に示す。

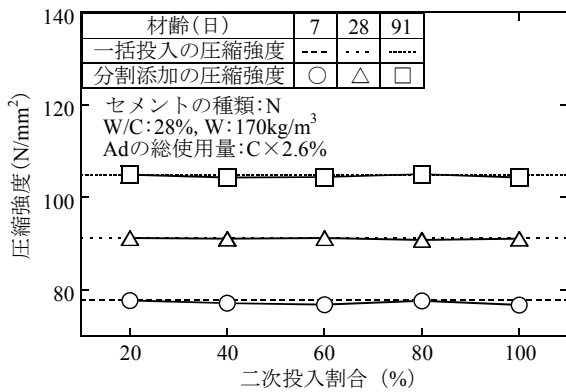


図-6 二次投入割合と圧縮強度の関係

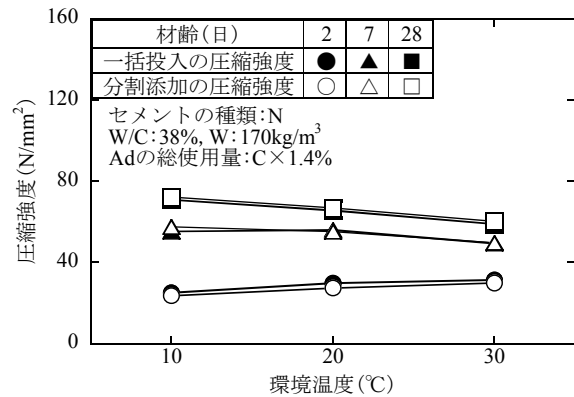


図-7 環境温度と圧縮強度の関係

表-4 実験の変化要因および水準と高強度コンクリートの調合条件

| 変化要因 | 高性能AE減水剤の二次投入割合 (%) | 環境温度 (°C) | セメントの種類 | W/C (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 単位セメント量 (kg/m ³) | 単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³) | 目標SLまたはSF (cm) | |
|---------------|---------------------|-----------|--------------|---------|---------------------------|------------------------------|---|----------------|-----------|
| | | | | | | | | 二次投入前 | 二次投入後 |
| 高性能AE減水剤の分割割合 | 0 | 20 | 普通ポルトランドセメント | 38 | 170 | 447 | 0.56 | SF 50±5.0 | |
| | 21 | | | | | | | SL 21±1.5 | SF 50±5.0 |
| | 38 | | | | | | | SL 15±1.5 | |
| | 49 | | | | | | | SL 8±1.5 | |
| 環境温度 | 0 | 10,20,30 | 普通ポルトランドセメント | 38 | 170 | 447 | 0.56 | SF 50±5.0 | |
| | 32 | 10 | | | | | | SL 15±1.5 | SF 50±5.0 |
| | 38 | 20 | | | | | | | |
| | 37 | 30 | | | | | | | |

図-6によると、各材齢において多少のばらつきはみられるが、いずれの材齢においても圧縮強度は二次投入割合にかかわらず概ね一定となる傾向を示した。また、図-7によると、分割添加の有無にかかわらず、温度が低いほど材齢2日における圧縮強度は低く、材齢28日における圧縮強度は高くなり、一般的な高強度コンクリート⁵⁾と同様の傾向を示した。なお、材齢28日の圧縮強度について一括投入と分割添加の有差検定⁶⁾を行ったところ、いずれの場合においても危険率5%で差がないと判定された。これより、本実験の範囲では、二次投入割合および温度の違いにかかわらず、分割添加が高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

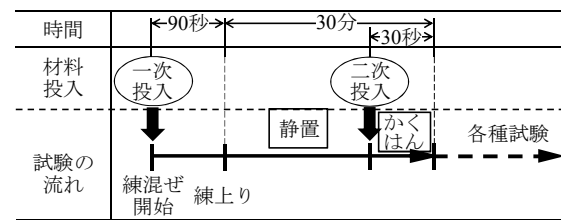


図-8 高強度コンクリートの製造方法

3. 練混ぜ時と荷卸しを想定した時点において高性能AE減水剤を分割添加した高強度コンクリートの性状

3.1 実験概要

練混ぜ開始時にセメント、骨材、水および一部の高性能AE減水剤をミキサに投入して90秒間練り混ぜた後に静置し、荷卸しを想定した30分後に残りの高性能AE減水剤を投入し、30秒間かくはんして所定のSFとした高強度・高流動コンクリートの品質を調べた。

(1) 使用材料

使用材料は、前章の表-1に示したものと同一である。

(2) 高強度コンクリートの製造方法

高強度コンクリートの製造方法を図-8に示す。水平二軸形強制練りミキサに、セメント、骨材、水および一

部の高性能AE減水剤を投入して90秒間練り混ぜた後にコンクリートを練りフネに排出し、乾燥を防止しながら静置した。その約30分後に小形傾胴形ドラムミキサに移し替え、残りの高性能AE減水剤を投入して30秒間かくはんした。一括投入は、全材料をミキサに投入し、90秒間練り混ぜて練上りとした。

(3) 実験の変化要因および水準と高強度コンクリートの調合条件

実験の変化要因および水準と高強度コンクリートの調合条件を表-4に示す。分割添加については、二次投入前における目標SLを21, 15および8cmとして目標SLに対し±1.5cmの範囲となるように一次投入する高性能AE減水剤の量を調整し、二次投入後におけるSFが50±5cmとなるように二次投入する高性能AE減水剤の量を調整した。この結果、温度20°Cにおける二次投入割合は0(一括投入)、21(目標SL21cm)、38(目標SL15cm)および49(目標SL8cm)%の4水準となった。また、前章と同様に温度の影響を検討するために、二次投入前の目標SLが15cmの場合については、練上りにおけるコン

リート温度および環境温度を 10, 20 および 30℃の3 水準で変化させた。

(4) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-5 に示す。SF は、二次投入の前後、二次投入後から30および60分後に測定した。また、圧縮強度は、二次投入から60分後に採取したφ10×20cmの供試体を脱型後に所定の材齢まで標準養生(20±2℃水中)したものについて、材齢7, 28 および 91 日に試験を行った。

3.2 結果および考察

(1) SF 性状

(a) 高性能 AE 減水剤の分割割合の影響

二次投入割合と高性能 AE 減水剤の使用量の関係を図-9 に、二次投入割合と各測定時間から次の測定までの間における SF の変化量の関係を図-10 に示す。図-10 における SF の変化量はいずれも負であり、SF の減少を表している。

図-9 によると、荷卸しを想定した時点での SF を一定とした場合、分割添加を行った場合の高性能 AE 減水剤の総使用量は、二次投入割合の違いにかかわらず一括投入よりも少なくなった。これは流動化コンクリートに見られる混和剤の後添加効果⁴⁾と同様に、二次投入した高性能 AE 減水剤のセメント粒子への吸着性状が一次投入と異なる²⁾ためと考えられる。また、図-10 によると、分割添加を行った場合における SF の変化量の値は概ね一括投入よりも負に大きくなり、流動化コンクリート¹⁾と同様の傾向を示した。これより、練混ぜ中に二次投入を行う場合とは異なり、荷卸しを想定した時点で二次投入を行う場合は、所要の SF を得た後は速やかに使用する必要があると思われる。なお、高性能 AE 減水剤の総使用量が最も少なかった二次投入割合は 38% (二次投入前の目標スランプ 15cm) であり、前章において SF が最も大きくなった二次投入割合 40% とほぼ同等であった。これより、本実験の条件で分割添加を行う場合には、二次投入割合が 40% 前後のときに高性能 AE 減水剤の分散効果が高く発揮される可能性が高い。

(b) 温度の影響

環境温度と高性能 AE 減水剤の使用量の関係を図-11 に、環境温度と各測定時間から次の測定までの間における SF の変化量の関係を図-12 に示す。

図-11 によると、分割添加を行った場合における高性能 AE 減水剤の一次使用量および総使用量はともに温度が高いほど多くなったが、総使用量はいずれの温度においても一括投入より少なくなった。また、図-12 によると、分割添加を行った場合における SF の変化量は、環境温度の違いにかかわらず概ね一括投入より負に大きくなる傾向を示したが、一括投入と分割添加の差は温度が高

表-5 試験項目および試験方法

| 試験項目 | 試験方法 |
|------|---|
| SF | <ul style="list-style-type: none"> 試験方法は JIS A 1150 二次投入の前後、二次投入から 30, 60 分後に測定 |
| 圧縮強度 | <ul style="list-style-type: none"> 試験方法は JIS A 1108 供試体は φ10×20cm (標準養生) 材齢 7, 28, 91 日に測定 |

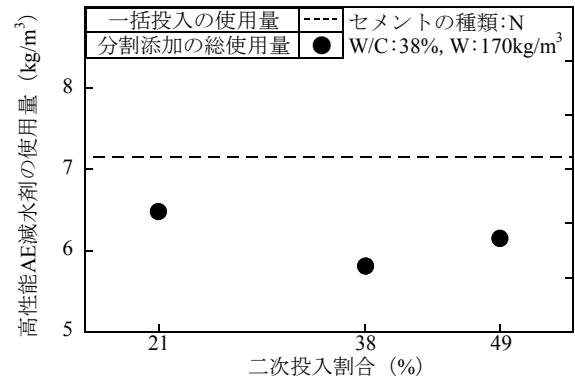


図-9 二次投入割合と高性能 AE 減水剤の使用量の関係

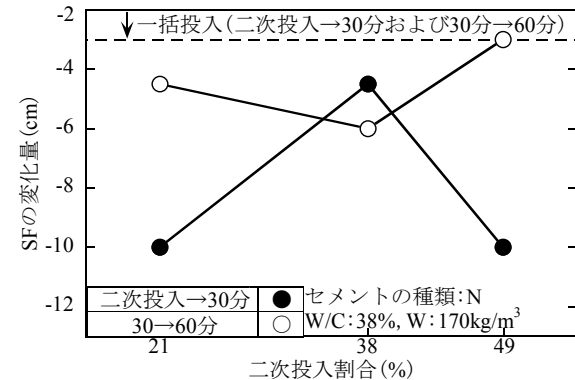


図-10 二次投入割合と SF の変化量の関係

いほど小さかった。この傾向は高性能 AE 減水剤の使用量における一括投入と分割投入の差と同様であることから、経時による SF の変化には、高性能 AE 減水剤の総使用量が関係している可能性がある。

(2) 圧縮強度

試験材齢ごとの二次投入割合と圧縮強度の関係を図-13 に、環境温度と圧縮強度の関係を図-14 に示す。

図-13 によると、各材齢において多少のばらつきはみられるが、いずれの材齢においても圧縮強度は二次投入割合にかかわらず概ね一定となる傾向を示した。このとき、材齢 28 日の圧縮強度について一括投入と分割添加の有意差検定⁶⁾を行ったところ、前章と同様にいずれの二次投入割合においても危険率 5% で差がないと判定された。したがって、二次投入割合および二次投入の時期が異なっても、分割添加が高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、図-14 によると、分割添加の有無にかかわらず温度が低いほど圧縮強度は高くなる傾向を示したが、このときの傾きは、一括投入よりも分割添加で小さかった。これより、荷卸

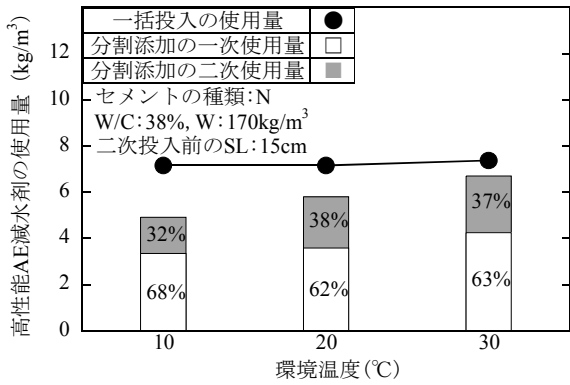


図-11 環境温度と高性能AE減水剤の使用量の関係

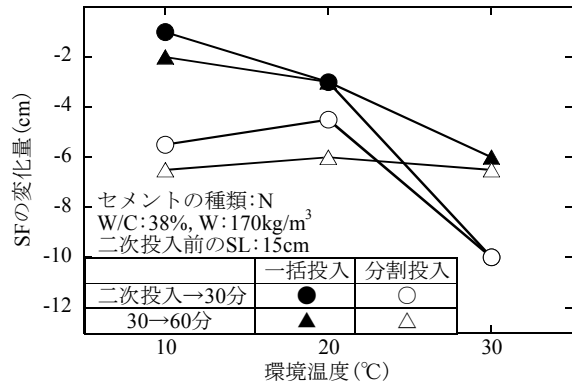


図-12 環境温度とSFの変化量の関係

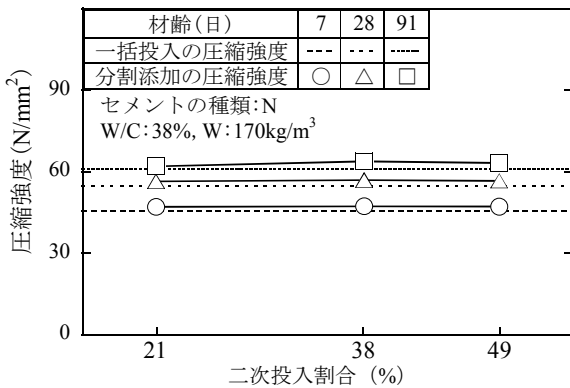


図-13 二次投入割合と圧縮強度の関係

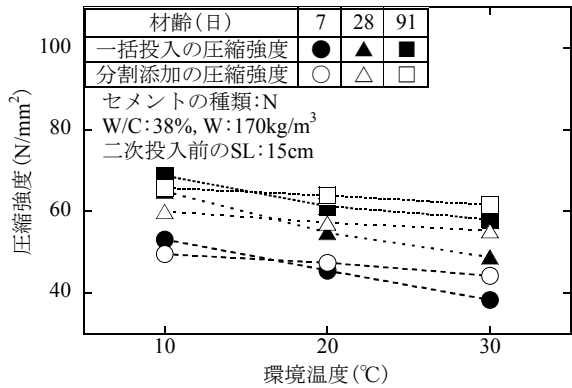


図-14 環境温度と圧縮強度の関係

しを想定した時点で分割添加を行った高強度コンクリートの圧縮強度が温度の違いから受ける影響は、一括投入の場合よりも小さい可能性がある。

4. まとめ

分割添加を行った高強度・高流動コンクリートの性状について検討を行った結果、次の知見を得た。

- (1) 分割添加を行う場合、二次投入割合によりSF性状は変化する。また、高性能AE減水剤の使用量を最も低減できる二次投入割合の存在する可能性がある。
- (2) 練混ぜ中に二次投入を行った場合には二次投入割合が20~80%の範囲で比較的安定したSFが得られたが、荷卸しを想定した時点で二次投入を行った場合は経時によるSFの減少が一括投入の場合より大きかった。
- (3) 分割添加が圧縮強度に及ぼす影響は全体に小さかったが、荷卸しを想定した時点で二次投入を行った場合の圧縮強度が温度から受ける影響は一括投入よりも小さかった。

以上より、分割添加によって高強度コンクリートの製造コストの低下や品質の安定をはかれる可能性が高いと思われる。ただし、適用する季節や二次投入割合、二次投入のタイミングなどを十分に吟味する必要がある。なお、本研究では、すべての実験において同一の高性能AE減水剤を用いたため、減水性能や遅延性、スランプ保持性能などの異なる高性能AE減水剤を用いる場合につ

いては、さらなる検討が必要と考えられる。

謝辞

本実験を行うにあたり、(株)内山アドバンス中央技術研究所の根本所長をはじめとする所員の方々、日本大学中田研究室卒業生の吉田氏(現 フジタ)、村山氏(現 櫻井工業)、卒研生の手島君、宮田君より多大なご協力を頂きました。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会:流動化コンクリート施工指針・同解説, 1989.9
- 2) 西祐宜, 中田善久, 斉藤丈士, 因幡芳樹:高性能 AE 減水剤の再添加がコンクリートの諸性質に及ぼす影響(その4 高性能 AE 減水剤の吸着特性), 日本建築学会大会講演梗概集 A-1, pp.379-380, 2011.8
- 3) 日本建築学会:高性能 AE 減水剤コンクリートの調査・製造および施工指針・同解説, pp.140-148, 1999.10
- 4) 水沼達也:流動化剤, コンクリート混和剤技術, シーエムシー出版, pp.64-76, 2006.9
- 5) 荒島猛ほか:高性能AE減水剤コンクリートの性質に及ぼす温度変化の影響, コンクリート工学年次論文集, pp.373-378, 2000
- 6) 日本規格協会:コンクリート技術者のための統計的方法手引き, pp.116-120, 2001.9