

論文 貧配合コンクリートのスランプロス発生機構とその低減方法に関する研究

高橋 直也*1・鈴木 翔太*1・馬場 勇介*2・笠井 哲郎*3

要旨: 本研究では、貧配合コンクリートのスランプロスの低減を目的とし、その練混ぜ水の保水状態に着目し、保水状態を変化させた試料に関し、流動性を測定することで練混ぜ水の挙動が貧配合コンクリートの流動性および経時変化に及ぼす影響について検討した。その結果、コンクリートの保水性を向上させることでスランプロスを低減できることを明らかとした。これより、増粘剤と AE 減水剤を併用することで貧配合コンクリートのスランプロスを低減することができる一手法を提案した。

キーワード: 貧配合コンクリート, スランプロス, 保水性, 練混ぜ水, 増粘剤

1. はじめに

所要の性能を有するコンクリート構造物を構築するためには、コンクリートの施工が適切に行われることが肝要である。このためには、フレッシュコンクリートがその施工時に作業に適したワーカビリティを有していることが重要である。一般に、ワーカビリティはフレッシュコンクリートのスランプ試験により評価され、このスランプが練混ぜ直後から打設完了までの間に徐々に低下する現象、すなわちスランプロスは施工作业に制限を与えるため、ワーカビリティの向上だけでなくその保持が不可欠となる。このため、現在までに流動化コンクリートの実用化・普及を経て、スランプロスの小さい高性能 AE 減水剤の使用が主流となっている。これは、フレッシュコンクリート中のセメント粒子の分散を一定時間保持することによりスランプロスを低減するものである。これらの高性能 AE 減水剤は中・高強度（低水セメント比）の比較的富配合のコンクリートに使用された場合、良好なスランプロス低減効果を発揮する。しかし、本研究で対象とする土木分野で使用されることの多い低強度（高水セメント比）の単位セメント量の少ない貧配合コンクリートに単独で適用した場合、その効果が得られにくい¹⁾。このため、貧配合コンクリートにおいても、スランプロスの低減方法の確立が求められる。一方、著者らは貧配合に近い条件のコンクリートに関し、練混ぜ水の一部を後添加した場合の流動性の変化について検討し、単位水量が同一でも加水の有無によりスランプに差が現れることを示した²⁾。

本研究では、文献 2) の結果を踏まえ練混ぜ水の挙動がフレッシュ性状に及ぼす影響に着目し、貧配合を想定したプレーンモルタルの練混ぜ方法を変えること、

および AE 減水剤または AE 減水剤と増粘剤を併用して添加することにより保水状態を変化させ、それらのモルタルを加水または脱水して保水性と流動性の関係を計測する。これより、練混ぜ水の挙動が貧配合コンクリートを構成するモルタルの流動性およびその経時変化に及ぼす影響について検討した。また、これらの検討結果をコンクリートに適用することを指向し、AE 減水剤と増粘剤を併用したコンクリートに対し、その流動性の経時変化を計測し、貧配合コンクリートのスランプロス低減法について検討した。

2. モルタル実験

2.1 実験概要

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。その他の使用材料は表-1 に示すとおりである。

(2) 練混ぜ方法

モルタルの保水性を変える目的で以下に示すダブルミキシング工法を用いた。ダブルミキシング (Double Mixing : 以下 DM と称す) とは、セメントペーストの練混ぜの際に、セメントに練混ぜ水の一部である一次水 (W_1) を加えて練り混ぜた後、残りの水である二次水 (W_2) を加えて練り混ぜる方法である。従来の練混ぜ方法 (Single Mixing : 以下 SM と称す) と比べ、一次練混ぜ時の水セメント比 (W_1/C) によってブリーディングやレオロジー特性が大幅に変化し、その最大ブリーディング率は最適の W_1/C では 1/5 に、最悪の W_1/C では 2 倍以上になる³⁾。よって DM で最適な条件で練り混ぜることにより、保水性の向上が期待できる。

モルタルの製造はホバート型のミキサを使用した。SM では、練混ぜ水にセメントを低速回転 (160rpm)

*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 BASF ジャパン(株) 建設化学品事業部 技術開発センター デプティマネージャー 博(工) (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 使用材料

	種類	記号	物性または主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3300cm ² /g
細骨材	菊川支流産	S	表乾密度：2.59g/cm ³ ，吸水率：2.18，粗粒率：2.42
粗骨材	青梅産	G	表乾密度：2.70g/cm ³ ，最大寸法：20mm
混和剤	増粘剤	V	セルロース系
	AE 減水剤	Ad	高変性ポリオールとポリカルボン酸エーテルの複合体

表-2 実験水準

練混ぜ方法	SM			DM
W/C (%)	50, 55, 60, 65			50, 55, 60, 65, 70
混和剤	無	Ad	V+Ad	無
加水・脱水実験	有	無		有

で0.5分間連続投入し、3.5分間高速回転(330rpm)で練り混ぜた後、細骨材を入れ、高速で1.0分間練り混ぜた。DMでは、一次水にセメントを投入し、高速で2.0分間練り混ぜた後、二次水を投入し1.5分間練り混ぜ、細骨材を入れ、高速で1.0分練り混ぜた。なお、SMとDMで練混ぜ時間の合計が同一となるようにした。増粘剤を添加する場合は、セメントに増粘剤を混ぜ、SMの方法で練り混ぜた。モルタルはフロー値の測定時まで密閉して静置し、測定直前にモルタルの製造時と同一のミキサにて60秒間練返しを行った。

(3) 配合条件

モルタルの配合はSMがW/C=50, 55, 60, 65%, DMがW/C=50, 55, 60, 65, 70%とし、DMのW₁/Cはそのブリーディングが最小となる条件であるW₁/C=24%とした。また、S/C=3.0で一定とした。増粘剤を添加したものはSMの練混ぜ方法でW/C=50, 55, 60, 65%, 増粘剤の添加量をV=0.35%(W×%)、AE減水剤の添加量をAd=1.5%(C×%)とした。

(4) 加水および脱水実験

本実験では、モルタルの保水性と流動性の関係を評価するため、加水および脱水実験を行った。実験水準を表-2に示す。

初期練混ぜ時のW/Cのモルタル(以下ベースモルタルと称す)にW/C換算で5, 10, 15%分の水を加える実験を加水実験、ベースモルタルからW/C換算で5, 10, 15%分の水を除く実験を脱水実験とした。加水はベースモルタルに所定量の水を加える方法で行った。脱水は遠心分離機を使用して、6kgの各配合のモルタルから所定量の水を分離させるのに必要な加速度と脱水時間を事前に計測し行った。5%分の水を除く場合はSMでは20G, DMでは50G, 10%分の場合はSMでは580G, DMでは800G, 15%分の場合はSMでは2050G, DMでは2200Gでそれぞれ30秒間脱水を行った。加水および脱水する時期はベースモルタル練混ぜ直後か

ら0, 30, 60, 90分経過後にそれぞれ実施した。

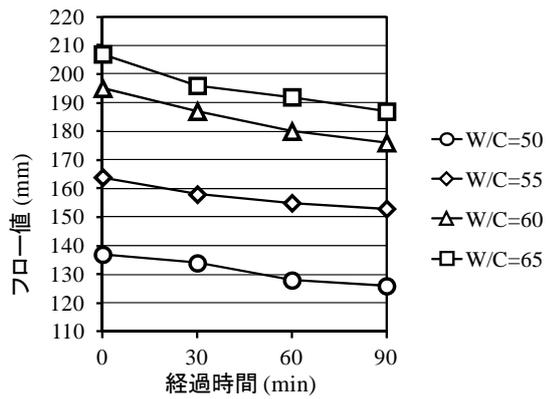
(5) フロー値の測定

モルタルを練り混ぜた後、所定の時間にフロー試験(JIS R 5201)を行い、フロー値を測定した。通常のW/Cで練り混ぜたモルタルは練混ぜ直後と30分経過ごとに、練混ぜ直後から90分まで測定した。加水または脱水したモルタルは加水および脱水直後と30分経過ごとに、ベースモルタルの練混ぜ直後から90分まで測定した。なお本実験では試験室の温度は18~24℃、湿度は45~70%、モルタルの温度は練混ぜ直後から90分経過時において22±2℃の範囲であった。また空気量は混和剤無添加の試料で1.2~3.5%、AE減水剤を添加した場合2.6~3.3%、増粘剤とAE減水剤を併用した場合3.5~4.0%の範囲であった。

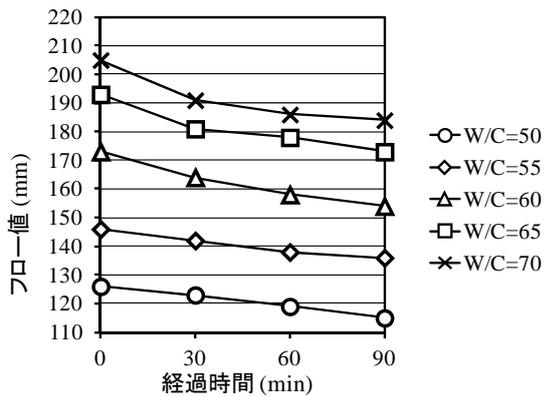
2.2 実験結果および考察

図-1は各配合条件のモルタルのフロー値の経時変化を示したものである。SMとDMのフロー値を同一のW/Cで比べるとDMのフロー値の方が一様に低い。これはDMがSMより保水性が高い凝集構造となることおよび水和反応がわずかに早く進むことが要因であると考えられる³⁾。この結果から、DMのW/CをSMのW/Cより5%分大きくすると、経過時間0分におけるフロー値がほぼ同程度となったため、SM, DM各ベースモルタルの配合を加水実験の場合、SMではW/C=50%、DMではW/C=55%、脱水実験の場合、SMではW/C=65%、DMではW/C=70%とした。

図-2は加水時期がフロー値に及ぼす影響の一例を示したものである。図の凡例はW/C=50%のベースモルタルの練混ぜ直後(T=0分)にW/C換算で5%分を加水し、W/C=55%の配合にしたものをW/C=50-55/T0として示している。その他の配合の名称もこれに準ずるものとした。図-3は図-2の一例で示した結果から各種配合条件における加水および脱水時期がフロー値の変化に及ぼす影響を示したものである。図に示すフロー値の差は、ベースモルタルにそれぞれの時期に加水、脱水したW/Cのモルタルのフロー値から通常のW/Cで練り混ぜたモルタルのフロー値を差し引いた値である。各配合条件において加水および脱水時期0分のフロー値と各経過時間後に加水、脱水したモルタルのフロー値の変化は小さかった。図-3(a)の加水

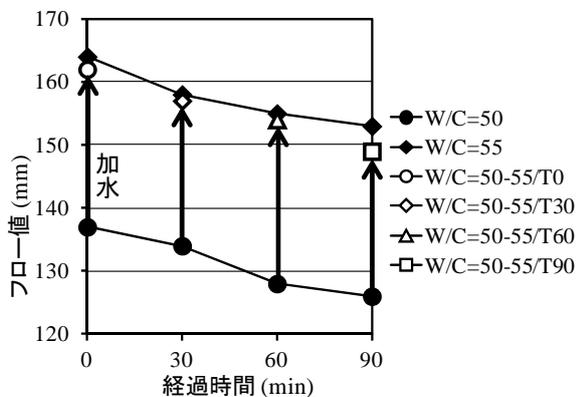


(a) SM で練混ぜたモルタル



(b) DM で練混ぜたモルタル

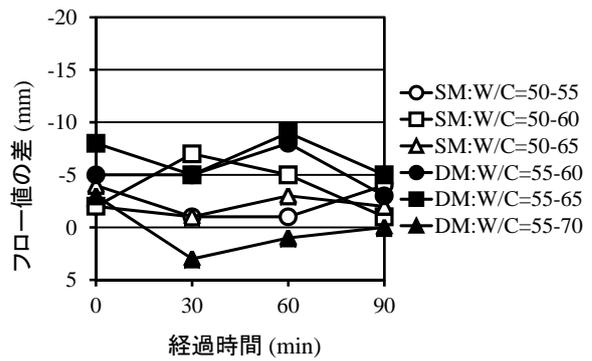
図-1 SM および DM の経過時間とフロー値の関係



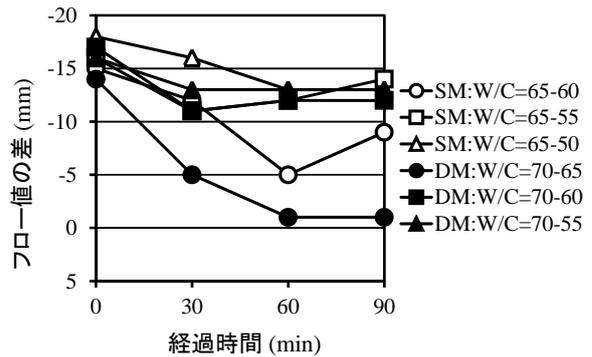
W/C=50%のベースモルタルにW/C換算で5%分の水を加え、W/C=55%の配合にしたモルタル

図-2 加水時期がフロー値に及ぼす影響

ではフロー値の差は最大で 10mm 程度であるのに対し、図-3 (b) の脱水では 20mm 程度とその差が大きく現れており、また、脱水量が多いほどフロー値の差が大きくなる傾向を示している。これは、脱水によりセメント粒子の凝集構造が破壊され、密に再凝集したため、練返しを行っても凝集構造が通常の W/C で練混ぜたモルタルと大幅に異なったことが要因であると推察される。また、W/C 換算で 5, 10, 15%分それぞれ同一の加水量、脱水量で比較した場合、加水では SM、



(a) 加水時期がフロー値の変化に及ぼす影響



(b) 脱水時期がフロー値の変化に及ぼす影響

図-3 加水時期および脱水時期がフロー値の変化に及ぼす影響

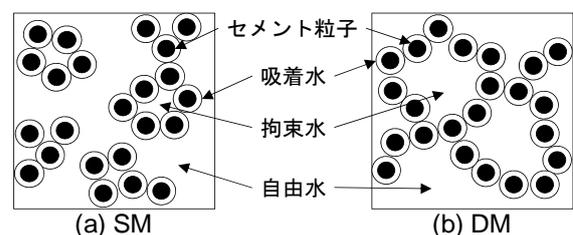


図-4 SM および DM で練混ぜたセメントペーストの粒子凝集構造の模式図

脱水ではDMの方が通常のW/Cで練り混ぜたモルタルのフロー値にわずかに近い値となった。これらのことは、加水した場合はSMで練り混ぜた方が、流動性が増加しやすく、脱水した場合はDMで練り混ぜた方が、流動性が減少しにくいことを示している。

以上のことから、SMはDMに比べ、図-4 (a) のように同じセメント粒子数で構成される凝集構造は拘束水が少なく自由水が多いことから水が移動しやすいため、加水では流動性が上昇しやすく、脱水では下降しやすくなると考えられる。一方DMは最適な条件のW_I/Cで練り混ぜた場合、図-4 (b) のような保水性の高い(拘束水が多い)凝集構造となるため水が移動しにくく、加水では流動性がSMほど大きくならず、脱水では低くなりにくい傾向を示したと考えられる。

これらの結果から、通常のW/Cで練り混ぜたモルタルの場合は練混ぜ直後のフロー値から経過時間ごとの

フロー値を差し引いた値，加水または脱水したモルタルの場合は各時期が0分のモルタルのフロー値から総経過時間ごとのフロー値を差し引いた値をフローロスとした。図-5は加水および脱水によるフローロスに及ぼす影響の一例について示したものである。図では配合がW/C=60%になるモルタルのフローロスについて示した。通常のW/Cで練り混ぜたモルタルおよび加水または脱水したモルタルをそれぞれ同一のW/Cで経過時間別に比較すると，加水したモルタルは通常のW/Cで練り混ぜたモルタルとほぼ同程度のフローロスとなった。また，脱水したモルタルは通常のW/Cで練り混ぜたモルタルよりもフローロスが大幅に小さい傾向を示した。これは，脱水したモルタルは通常のW/Cで練り混ぜたモルタルと同一のW/Cでも，フロー値そのものが低いことおよび密に再凝集したことが要因であると考えられる。その他の各配合においても同様の結果となった。

図-6はSMおよびDMで練り混ぜたW/C=50%のモルタルのフローロスを示したものであり，各配合で同様の結果となった。DMはSMに比べ，初期水和反応が早いのでフローロスも大きいと考えられるが，図に示すように本実験結果ではほぼ同程度となった。この結果に関し，次の2つの要因が影響しているものとして考察した。①初期水和反応の早さによる影響，②保水性の相違による影響，である。①では水和反応が早く進むことで，流動性が低下する。②では，モルタルはフロー値の測定時まで静置するため，図-7に示すように，その静置期間に発生する材料分離およびブリーディングによりセメント粒子が沈殿し，沈殿物と上澄み水に分離する。この沈殿した部分のモルタルは実際のW/Cより見かけ上低下しており，擬似的に脱水と同様の現象が起きていると考えられる。また，練返しの際は見かけ上W/Cが低下した沈殿部分に上澄み水を練り混ぜることで，加水と同様の現象が起きたと捉えることが出来る。これより加水および脱水したモルタルの場合，どちらもフロー値が通常のW/Cで練り混ぜたモルタルよりも低くなるため，加水および脱水と同様の状態になることで，流動性が低下すると考えられる。以上のことから，SMはDMより①の影響は小さく，②の影響が大きく現れ，DMは①の影響が大きいが，②の影響が非常に小さいため，それぞれのフローロスの差が小さくなったものと考えられる。一方，主にレディーミクストコンクリートの運搬に用いられるアジテータ車の回転数は，1~3rpm程度と遅く，また運搬走行時の振動等により，局所的に短時間の材料分離が生じていると予想され，上述したようなブリーディング発生による脱水とそのブリーディング水の練

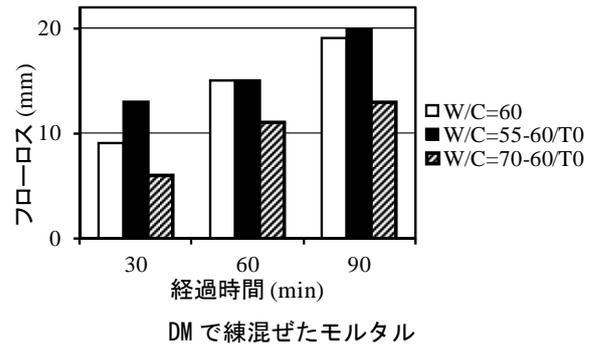


図-5 加水および脱水がフローロスに及ぼす影響

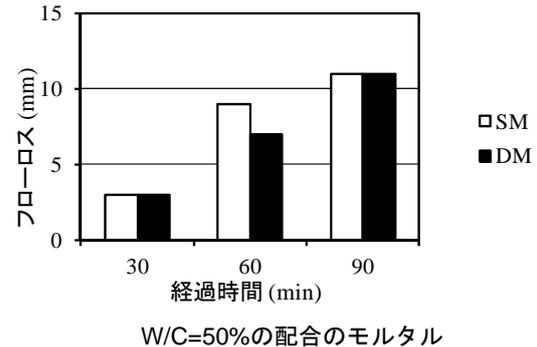


図-6 練り混ぜ方法がフローロスに及ぼす影響

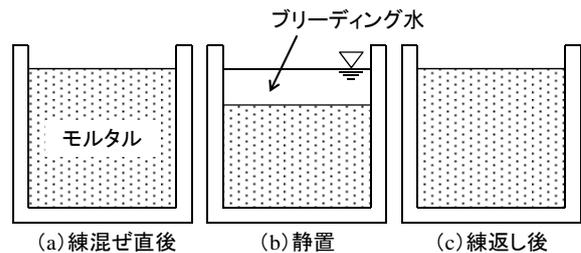
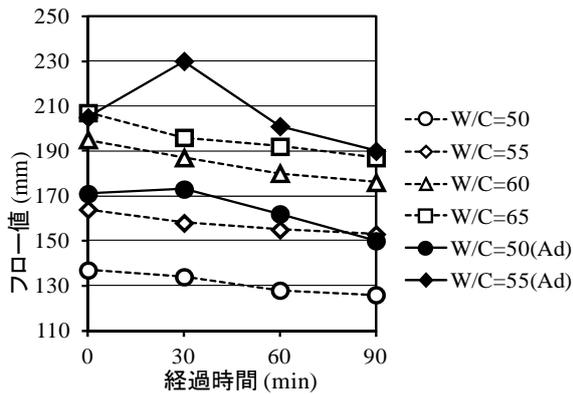


図-7 静置により発生するフローロスの概念図

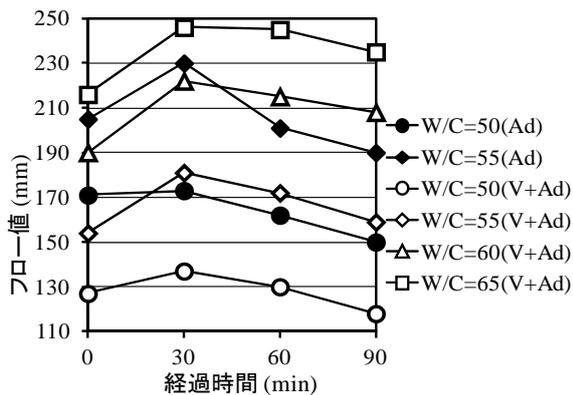
返しによる加水のような現象が繰り返し起きているものと推察される。

以上のことからブリーディングが少ないコンクリートとすることが，貧配合コンクリートのスランプロスを低減する一手法であると考えられ，上述の①の影響が小さく，保水性の高いコンクリートとすることで，スランプロスを低減できると考えられる。そこで，増粘剤とAE減水剤を使用することでその効果が得られるものと推測し，以下の検討を行った。

図-8(a)はAE減水剤を添加したモルタルのフロー値の経時変化を示したものである。練り混ぜ直後のフロー値が同程度となったW/C=55とW/C=50(Ad)およびW/C=65とW/C=55(Ad)を比較すると，AE減水剤の添加により，30分経過時のフロー値はロスしていないが，60，90分経過時ではフロー値が大きく減少しており，無添加のモルタルに近いフロー値となった。前述のとおり，貧配合の場合AE減水剤の流動性の保持効果が得られない結果となった。図-8(b)は増粘剤と



(a) AE 減水剤を添加したモルタル



(b) 増粘剤と AE 減水剤を添加したモルタル

図-8 増粘剤および AE 減水剤を添加したモルタルの経過時間とフロー値の関係

AE 減水剤を併用したモルタルのフロー値の経時変化について示したものである。同じ W/C では混和剤無添加のモルタル (図-8 (a)) と増粘剤, AE 減水剤を併用したモルタルの練混ぜ直後のフロー値は同程度となっており, 30 分経過後にフロー値が増大し, その後フローロスしているが, AE 減水剤のみを添加した場合よりそのロスは小さい傾向となった。また, 図-9 は図-8 (b) の結果より各経過時間のフロー値を練混ぜ直後のフロー値で除した値をフロー値の比率とし, フローロスを表す指標として示したものである。W/C=50(V+Ad) は AE 減水剤のみを添加した W/C=50(Ad) に比べ, フローロス低減効果が 60 分までみられるが, 90 分経過時には同程度のフローロスとなった。増粘剤を加えた W/C=55, 60, 65% のモルタルは比較的良好なフローロス低減効果が得られており, 練混ぜ直後より 90 分経過時の方が高いフロー値となる傾向を示した。これは, AE 減水剤による流動性の確保と増粘剤による保水性の向上が生じていることからフローロスが低減したと考えられる。W/C=50(V+Ad) では, 増粘剤の作用が大きく AE 減水剤の作用が小さかったため, 凝集構造が緻密になったことで効果が得にくかったと推論した。このことから貧

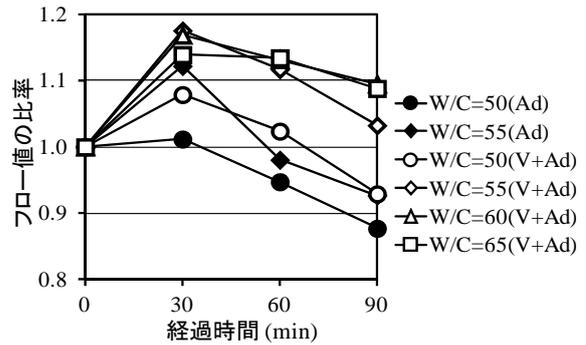


図-9 経過時間とフロー値の比率の関係

配合条件では増粘剤と AE 減水剤を併用することによりフローロス低減効果が得られる事が明らかとなった。

3. コンクリート実験

3.1 実験概要

(1) 使用材料および配合条件

使用材料は前項のモルタル実験と同様である。また, モルタル実験の結果より高水セメント比の領域ほどフローロス低減効果を得られたことから W/C=65% の配合について検討した。単位水量は $W=185\text{kg/m}^3$ と $W=165\text{kg/m}^3$ について増粘剤および AE 減水剤を添加したが, 混和剤無添加のコンクリートと比較するため, $W=195, 190\text{kg/m}^3$ も製造した。増粘剤の添加量は $V=0.35\%$ ($W\times\%$) とし, AE 減水剤は練混ぜ直後のスランブを $W=185\text{kg/m}^3$ では 18cm, $W=165\text{kg/m}^3$ では 15cm となるように添加した。配合を表-3 に示す。

(2) 練混ぜ方法

コンクリートの製造はパン型強制ミキサを用い, セメント・細骨材・粗骨材・増粘剤を投入後 15 秒間空練りし, その後混和剤を含む水を投入し 105 秒間練り混ぜた。コンクリートはスランブ測定時まで密閉して静置し, 測定直前にスコップにて練返し (切返し) を行った。

(3) スランブの測定

スランブ試験は JIS A 1101 に準拠し, スランブを 1mm 刻みに計測した。測定はコンクリートの練混ぜ直後と 30 分経過ごとに, 練混ぜ直後から 90 分まで行った。なお本実験では試験室の温度は $18\sim 24^\circ\text{C}$, 湿度は $45\sim 70\%$, コンクリートの温度は練混ぜ直後から 90 分経過時において $21\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲であった。また空気量は $3.0\sim 5.3\%$ の範囲であった。

3.2 実験結果および考察

図-10 は増粘剤と AE 減水剤を併用したコンクリートのスランブの経時変化について示したものである。混和剤無添加の $W=185$ は時間経過と共にスランブが減少していることがわかる。 $W=185(\text{Ad})$ において練混

表-3 コンクリートの配合条件

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				V (W×%)	Ad (C×%)
			W	C	S	G		
W=195	65	44.9	195	300	768	982	-	-
W=190			190	292	776	993	-	-
W=185			185	285	785	1004	-	-
W=185(Ad)							-	0.1
W=185(V+Ad)							0.35	1.5
W=165			165	254	819	1048	-	-
W=165(Ad)							-	1.3
W=165(V+Ad)							0.35	2.0

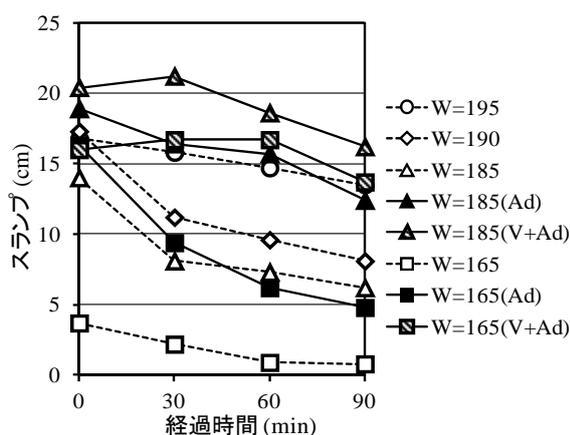


図-10 増粘剤および AE 減水剤を添加したコンクリートの経過時間とスランプの関係

直後のスランプは増大しているが、その後スランプが低下した。W=165(Ad)はW=185(Ad)よりも急激なスランプロスを示しており、経過時間 60 分以降ではW=185 よりもスランプが低くなった。これは前項のモルタル実験でも述べたように貧配合条件では、AE 減水剤のみの使用ではスランプ保持効果があまり得られていないためであると考えられる。また、W=190 はW=185 よりもスランプは増大しているが、スランプロスは同程度生じていることが分かる。しかし、W=195 はスランプの増大は見られないが、スランプのロスが小さい傾向を示した。これは W=190 では十全ではなかった流動性に寄与する自由水が十分に試料内に含まれていることでスランプロスにくい結果になったと考えられる。増粘剤を添加した場合には AE 減水剤のみを添加した試料よりもスランプロス低減効果が大きくなり、さらに W=195 に近いスランプの保持効果がみられる傾向を示した。さらに単位水量を W=185kg/m³ から W=165kg/m³ に小さくした場合でも高いスランプロス低減効果が得られている。

これらのことより増粘剤と AE 減水剤を併用することは、貧配合コンクリートのスランプロスを低減することのできる一手法であると考えられる。

4. 結言

モルタル実験およびコンクリート実験によるフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの流動性への影響を検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 通常の W/C で練り混ぜたモルタルに比べ、加水したモルタルのフローロスほぼ同程度となったが、脱水したモルタルのフローロスは小さくなる傾向を示した。
- (2) SM および DM で練り混ぜたモルタルのフローロスに関する検討からモルタルの保水性を向上させることでそのフローロスを低減できることが判明した。このことは、ブリーディングの小さい貧配合コンクリートとすることで、そのスランプロスを低減できることを示唆するものである。
- (3) 増粘剤と AE 減水剤を併用したモルタルは良好なフローロス低減効果を示し、またコンクリートにおいてもスランプの保持効果を示したことから貧配合コンクリートのスランプロスを低減する有効な手法であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、平成 22-24 年度科学研究補助金(基盤研究(C))を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題(Ⅱ), コンクリート技術シリーズ, 土木学会編, No.54, pp.45-46, 2003
- 2) 馬場勇介・小野広道・笠井哲郎: 練混ぜ水の挙動がフレッシュコンクリートの流動性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1143-1148, 2004
- 3) 田澤栄一・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, No.396/V-9, pp.135-142, 1988