

論文 単位水量の変化が高強度コンクリートの諸性状に及ぼす影響

春山 信人^{*1}・中田 善久^{*2}・斉藤 丈士^{*3}・大塚 秀三^{*4}

要旨：現状における高強度コンクリートの単位水量は、高性能 AE 減水剤が普及する以前の AE 減水剤を用いたコンクリートの耐久性や指針の規定値などを重視して設定された可能性が高く、ワーカビリティと乾燥収縮の抑制という2つの観点から見た場合、合理的に設定されていない可能性がある。そこで、単位水量の変化が高強度コンクリートの各種性状に及ぼす影響を明らかにするために実験的検討を行った。その結果、高性能 AE 減水剤を用いる高強度コンクリートの単位水量は、ワーカビリティと乾燥収縮の二つの相反する性能について、ワーカビリティを従来よりも幾分重視して設定できる可能性が示された。
キーワード：高強度コンクリート、単位水量、高性能 AE 減水剤、ワーカビリティ、乾燥収縮

1. はじめに

現行の「建築工事標準仕様書 JASS5(鉄筋コンクリート工事)」の解説においては、単位水量と乾燥収縮に因果関係が存在することを示し、これを単位水量を抑制する根拠としている¹⁾。しかし、ここで示されている単位水量と乾燥収縮の関係は、1985年以前に公表されたデータにもとづくものであり¹⁾、1995年にJIS化された高性能 AE 減水剤²⁾を用いたものはほとんど含まれていないと考えられる。一方、高性能 AE 減水剤を用いるコンクリートの単位水量は、170kg/m³程度を標準としていることが多い³⁾が、これは、日本建築学会より1991年に発刊された「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)」に規定されている単位水量の上限³⁾を考慮して定めた単位水量を踏襲している場合があると考えられる。したがって、現状で多く用いられている単位水量は、高性能 AE 減水剤が普及する以前の AE 減水剤を用いたコンクリートの耐久性や指針の規定値などを重視して設定された可能性が高い。特に、フレッシュコンクリート性状や強度発現性状が従来の AE 減水剤を用いたコンクリートとは大きく異なる高強度コンクリートで用いられる単位水量は、施工の各段階におけるワーカビリティと乾燥収縮の抑制という2つの観点から見た場合、合理的に設定されているとは言えない可能性がある。

そこで、本研究は、高性能 AE 減水剤を用いた高強度コンクリートにおける単位水量の変化がコンクリートの各種性状に及ぼす影響を明らかにするために、単位水量を JASS5 および高強度コンクリート施工指針(案)⁴⁾に規定されている範囲で変化させた高強度コンクリートについて、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリ

ートの諸性状を調べたものである。

本論文は、既に報告している単位水量を変化させた高強度コンクリートの試験結果⁵⁾に、新たに得られた試験結果を追記し論文を再構成するとともに、考察を加筆しとりまとめたものである。ここでは、普通ポルトランドセメントと高性能 AE 減水剤の組合せにおいて、水セメント比を一定として単位水量を 185kg/m³以下の範囲で変化させたコンクリートの性状の変化を検討した結果について述べている。

2. 実験概要

水セメント比を3水準、単位水量を4水準で変化させて高性能 AE 減水剤の使用量によりスランプまたはスランプフローを水セメント比ごとに一定に調整した高強度コンクリートについて、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状を調べた。

2.1 使用材料

セメントに普通ポルトランドセメント、水に上水道水、細骨材に千葉県君津市産の砂、粗骨材に高知県鳥形山産の碎石 2005、化学混和剤に高性能 AE 減水剤を用いた。使用材料の概要を表-1に示す。

表-1 使用材料の概要

種類	名称	概要
セメント	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	上水道水	千葉県浦安市
細骨材	砂	山砂, 千葉県君津市産 表乾密度2.59g/cm ³ , FM2.57
粗骨材	碎石2005	石灰石, 高知県鳥形山産 表乾密度2.71g/cm ³ , FM6.55, 実積率61.2%
化学混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系, 密度1.05g/cm ³
	AE剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

*1 フジミ工研(株) PC営業部 (正会員)

*2 日本大学 理工学部 建築学科 工博 (正会員)

*3 内山城南コンクリート工業(株) 工博 (正会員)

*4 ものつくり大学 建設技能工芸学科 工修 (正会員)

2.2 コンクリートの配合(調合)

コンクリートの配合(調合)は、水セメント比を 25, 35 および 45% の 3 水準, 単位水量を 170, 175, 180 および 185kg/m³ の 4 水準で変化させ、水セメント比ごとに単位粗骨材かさ容積および練上りのスランプまたはスランプフローを一定としたものである。スランプ(スランプフロー)および空気量の目標値は、JIS A 5308(レディミスクトコンクリート)や JASS5, 高強度コンクリート施工指針(案)などを参考として、配合(調合)条件の水セメント比付近において一般的に使用されるものを採用した。なお、スランプ(スランプフロー)および空気量は、化学混和剤の使用量により練上りにおいて一定になるように調整した。コンクリートの配合(調合)条件を表 - 2 に、コンクリートの配合(調合)を表 - 3 に示す。

2.3 本検討における変化要因の意味合い

本検討における変化要因のイメージを明確にするために、水セメント比 35% の調合を例にとり、調合における各材料の絶対容積を図 - 1 に示した。高性能 AE 減水剤を用いるコンクリートは、単位水量を一定として混和剤の使用量により所要のスランプやスランプフローに調整することが多い³⁾ため、強度を高めると単位セメント量が増すことによりコンクリートの粘性が高まり、ワーカビリティが低下する可能性がある。そこで、フレッシュコンクリートの性状についてより精度良く検討することを目指し、ここでは、硬化コンクリートの品質に極力影響を及ぼさないように、水セメント比および単位粗骨材かさ容積を一定として単位水量を変化させた。すなわち、コンクリートの中のモルタル分におけるセメントペーストと細骨材の割合を変化させている。

2.4 検討した項目

(1) 試験項目および方法

試験項目は、フレッシュコンクリートについてスランプ(スランプフロー)およびこの経時変化量, 50cm フロー到達時間, 空気量, ふるい通過率とした。硬化コンクリートについては、圧縮強度・静弾性係数および長さ変化率を測定した。なお、圧縮強度および静弾性係数は、標準養生した 10×20cm 供試体について、圧縮強度を材齢 2, 7, 28 および 91 日, 静弾性係数を材齢 28 および 91 日で測定した。長さ変化率は、10×10×40cm の供試体を前養生として 7 日間標準養生(20 水中)を行った後、気温 20℃, 湿度 60%R.H. の乾燥条件で、乾燥期間 26 週まで測定した。試験項目および方法を表 - 4 に示す。

(2) ふるい通過率試験の方法

コンクリート中のモルタル分の間隙通過性およびコンクリートのワーカビリティを検討するために、ふるい通過率試験を行った。試験方法は、ふるい震とう機に固定したふるい面 60×40cm, 公称目開き 4.75mm の網ふる

表 - 2 コンクリートの配合(調合)条件

水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	配合(調合)条件
45	170, 175, 180, 185	スランプ: 21±2cm, 空気量: 4.5±1.5% 単位粗骨材かさ容積: 0.602m ³ /m ³
35		スランプフロー: 50±7.5cm, 空気量: 4.5±1.5% 単位粗骨材かさ容積: 0.525m ³ /m ³
25		スランプフロー: 60±10cm, 空気量: 3.0±1.5% 単位粗骨材かさ容積: 0.510m ³ /m ³

表 - 3 コンクリートの配合(調合)

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能AE減水剤	
	水	セメント	細骨材	粗骨材	添加率 (C×%)	使用量 (kg/m ³)
45	170	378	770	998	0.800	3.02
	175	389	748		0.650	2.53
	180	400	726		0.550	2.20
	185	411	704		0.500	2.06
35	170	486	802	871	1.275	6.20
	175	500	778		1.150	5.75
	180	514	754		1.050	5.40
	185	529	728		0.900	4.76
25	170	680	706	846	2.150	14.62
	175	700	677		2.100	14.70
	180	720	647		2.000	14.40
	185	740	618		1.950	14.43

W / C = 35%

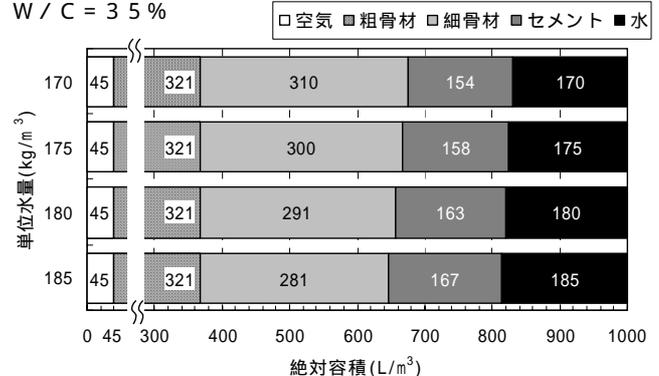


図 - 1 水セメント比 35%における各材料の絶対容積

表 - 4 試験項目および方法

試験項目	試験方法	
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101(2005)
	スランプフロー	JIS A 1150(2001)
	経時変化(45・90分)	スランプまたはスランプフロー
	50cmフロー到達時間	JIS A 1150(2001)
	フローの流動停止時間	JIS A 1150(2001)
	空気量	JIS A 1128(2005)
	ふるい通過率	本文中に記載
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108(2006)
	静弾性係数	JIS A 1149(2001)
	長さ変化率	JIS A 1129-2(2001)

るい(5mmふるい)の上に定量容器(JIS A 1128 に使用するエアメータの容器)により計量したコンクリートを軽く敷き均し、これを一定時間震とうした。このときに網ふるいを通過した質量のコンクリート試料中に含まれるモルタル分の質量に対する割合を「ふるい通過率」とした。なお、ここでは、ふるい震とう機による震とう時間を1分間としてふるい通過率を求めている。ふるい震とう機の外観を写真-1に示す。

3. 結果および考察

3.1 フレッシュコンクリート

(1) 高性能 AE 減水剤のセメント質量に対する添加率

配合(調合)条件を満足した配合(調合)における単位水量とセメント質量に対する高性能 AE 減水剤の添加率の関係を図-2に示す。高性能 AE 減水剤の添加率は、いずれの水セメント比においても、単位水量が多いほど低下する傾向を示した。これは、コンクリート中に占めるモルタル分の量は一定であるが、細骨材とセメントペーストの構成割合が異なるためと考えられる。すなわち、モルタル分の中で流動性に寄与するセメントペースト量が単位水量によって異なるため、コンクリートのスランプ(スランプフロー)を一定にするためには、単位水量が多い(セメントペースト量が多い)ほど、セメントペーストの流動性を小さくしなければならないためと考えられる。

(2) 高性能 AE 減水剤の使用量

単位水量と高性能 AE 減水剤の使用量の関係を図-3に示す。高性能 AE 減水剤の使用量は、水セメント比 45 および 35%において高性能 AE 減水剤のセメントに対する添加率と同様に単位水量が多いほど減少する傾向を

示したが、水セメント比 25%においては、単位水量にかかわらず、ほぼ一定となる傾向にあった。これは、水セメント比が 45 および 35%の場合と 25%の場合とではセメントペーストの量ならびに流動性とコンクリートのスランプ(スランプフロー)の関係が同じではない可能性があると考えられる。つまり、同じ材料を使用した場合には、水セメント比が 25%近辺になるとセメントペーストの粘性が著しく高まるために、セメントペースト量を同じ割合で増加させていった場合には、セメントペーストの流動性を若干大きくしないと、同じスランプ(スランプフロー)を確保できない可能性があると思われる。

(3) 50cm フロー到達時間

単位水量と 50cm フロー到達時間の関係を図-4に示す。水セメント比 45%の場合は、目標スランプが 21cm でスランプフローが 50cm を超えないため、ここでは取り扱っていない。

水セメント比 35 および 25%における 50cm フロー到達時間は、単位水量の増加に伴いわずかながら短くなる傾



写真-1 ふるい震とう機の外観

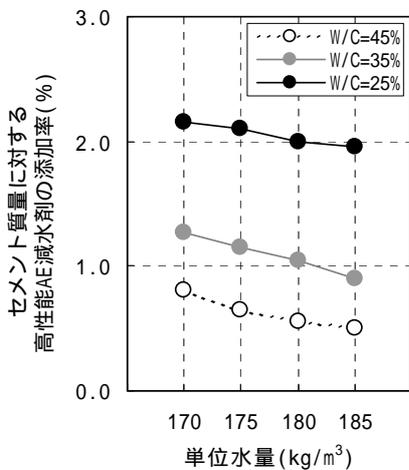


図-2 単位水量とセメント質量に対する高性能 AE 減水剤の添加率の関係

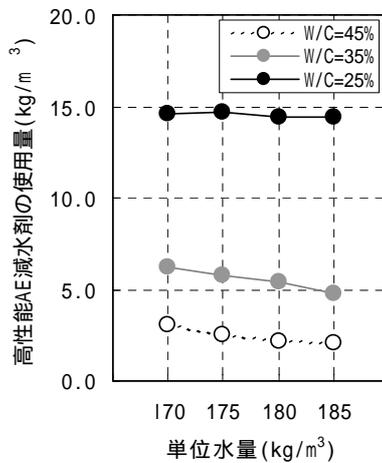


図-3 単位水量と高性能 AE 減水剤の使用量の関係

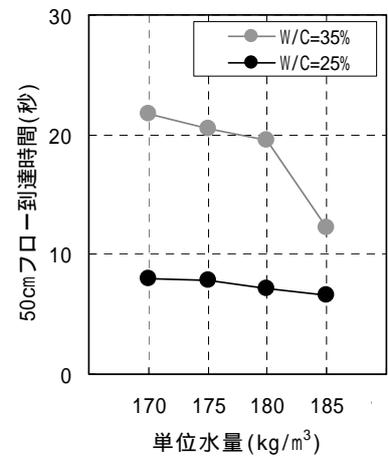


図-4 単位水量と 50cm フロー到達時間の関係

向を示した。これは、単位水量が多いほどモルタル分中の細骨材量が少なくなりセメントペースト量が多くなるため、コンクリートの粘性がやや低くなったことを示していると考えられる。

(4) スランプ(スランプフロー)の経時変化量

水セメント比 45%におけるスランプの経時変化量を図 - 5 に、水セメント比 35 および 25%におけるスランプフローの経時変化量を図 - 6 に示す。それぞれの図中で括弧内に示した数値は、練上りにおけるスランプまたはスランプフローである。

一部を除き、スランプまたはスランプフローの経時変化量は、全体に単位水量が多いほど小さくなる傾向にあり、この傾向は 経時 45 分よりも 90 分で顕著であった。これは、単位水量が多いほど、流動性に寄与するセメントペースト量すなわち空隙の充填に使用されない余剰セメントペースト量が多くなることが影響していると考えられる。また、モルタル量が一定のため、単位水量が多いほど細骨材量が少なくなり、全体の骨材の表面積が小さくなる。このため、骨材の表面を被覆するのに必要なセメントペースト量が少なく、相対的に流動性に影

響するセメントペースト量が多くなるためと考えられる。なお、水セメント比が 25%で単位水量が 185kg/m³の場合の経時 90 分におけるスランプフローの変化量が著しく増大した。この原因は明確でないが、この配合(調合)では、練上りのスランプフローが配合(調合)条件を満足しており良好なワーカビリティを有していたが、経時に伴うワーカビリティの低下が著しかったことが影響していると思われる。また、経時 90 分におけるこのコンクリートは、粘性が高く取り扱いにやや難があったことから、試験前に十分な練り返しができていなかった可能性がある。

(5) ふるい通過率

単位水量とふるい通過率の関係を図 - 7 に示す。ふるい通過率は、全体に単位水量が多いほど増大する傾向を示し、この割合は、水セメント比が大きいほど大きかった。これは、単位水量が大きいほどモルタル分の粘性が低く、また、水セメント比が大きいほど単位粗骨材量が多いため、相対的にモルタル量が少なくなることが影響していると考えられる。なお、単位水量が 185kg/m³の場合のふるい通過率は、水セメント比にかかわらずおよそ

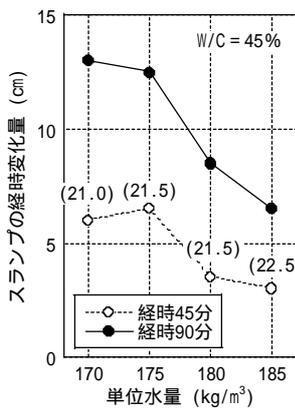


図 - 5 スランプの経時変化量

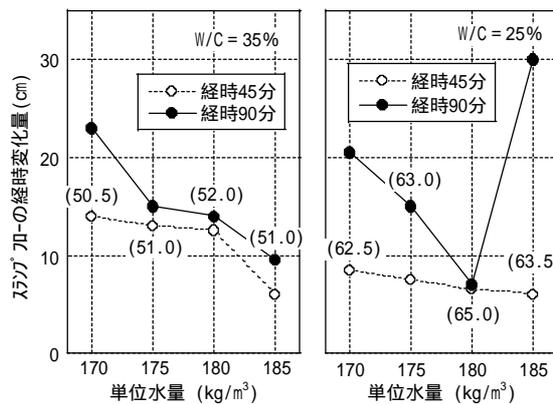


図 - 6 スランプフローの経時変化

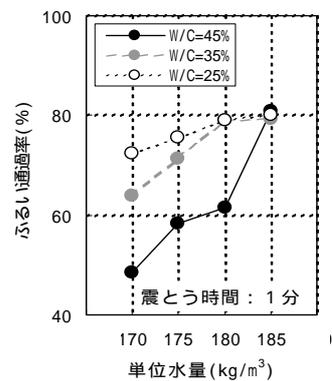


図 - 7 単位水量とふるい通過率の関係

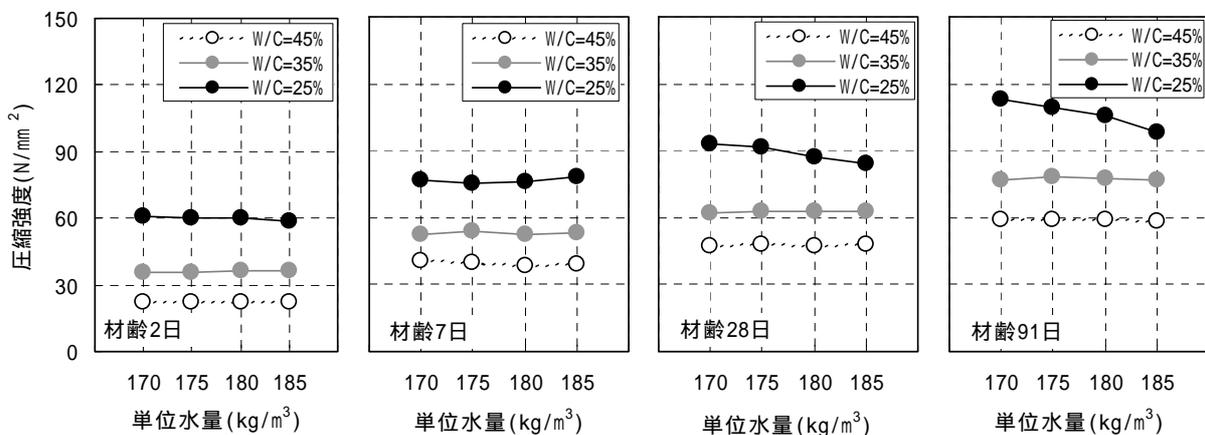


図 - 8 単位水量と圧縮強度の関係

80%程度に収束していたことから、本試験の震とう時間は長すぎる可能性がある。

3.2 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度

材齢ごとの単位水量と圧縮強度の関係を図-8に示す。材齢28日以前においては、若干のばらつきが見られるものの単位水量と圧縮強度の関係に明確な傾向は見られず、同一の水セメント比においては概ね同等の圧縮強度が得られた。しかし、水セメント比25%、単位水量185kg/m³の場合において、材齢28日から91日にかけての圧縮強度の増進が少なくなった。この原因は明らかではないが、単位水量の増加に伴い、セメント量が増加しており、単位セメント量が相当に多くなっていることが影響している可能性がある。なお、この場合を除いて、単位水量が異なっても圧縮強度および圧縮強度の増進は大きな影響を受けていないことから、フレッシュコンクリートにおけるワーカビリティを考慮してJASS5⁶⁾や高強度コンクリート施工指針(案)・同解説⁴⁾において許容されている185kg/m³以下の範囲で単位水量を変化させても、材齢28日までの圧縮強度に及ぼす単位水量の影響は小さいと考えられる。

(2) 静弾性係数

材齢28および91日における圧縮強度と静弾性係数の関係を図-9に示す。若干のばらつきが見られたが、単位水量の違いが静弾性係数に及ぼす影響に関して明確な傾向は見られず、静弾性係数は、概ね圧縮強度に依存しているようであった。また、圧縮強度と静弾性係数の関係は、構造計算規準に示される式⁶⁾とほぼ同様の傾向を示していた。したがって、本検討の範囲内で単位水量が変化しても、配合(調合)設計において求めた所要の水

セメント比のコンクリートにおいては、一般的な範囲の静弾性係数が得られるものと考えられる。

(3) 長さ変化率

水セメント比ごとの乾燥期間と長さ変化率の関係を図-10に示す。図中には、鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説⁷⁾に示されている収縮ひずみの予測式に単位水量が170~185kg/m³の場合の本検討における各種条件を当てはめて求めた予測値を付記している。

長さ変化率は、概ね指針に示されている予測式と同様のカーブを描いて乾燥期間に伴い大きくなる傾向を示していた。また、長さ変化率を予測値と比較すると、水セメント比45および35%において長さ変化率は予測値よりも全体に大きくなり、水セメント比25%において長さ変化率は予測値とほぼ同等となった。

単位水量と乾燥期間26週における長さ変化率の関係を図-11に示す。乾燥期間26週における長さ変化率は、高強度コンクリート施工指針(案)・同解説⁴⁾に示されるように、単位水量の増加に伴い若干大きくなる傾向にあ

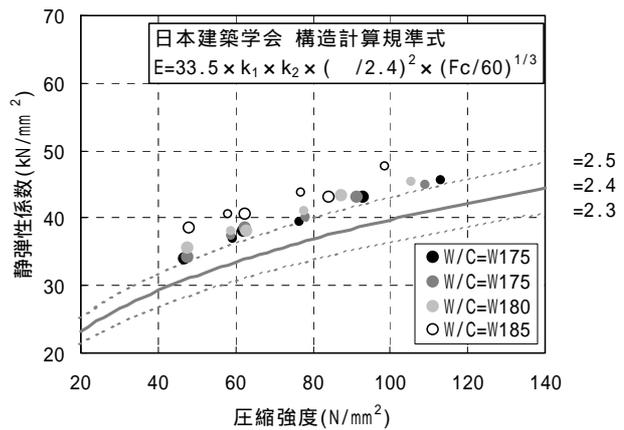


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係

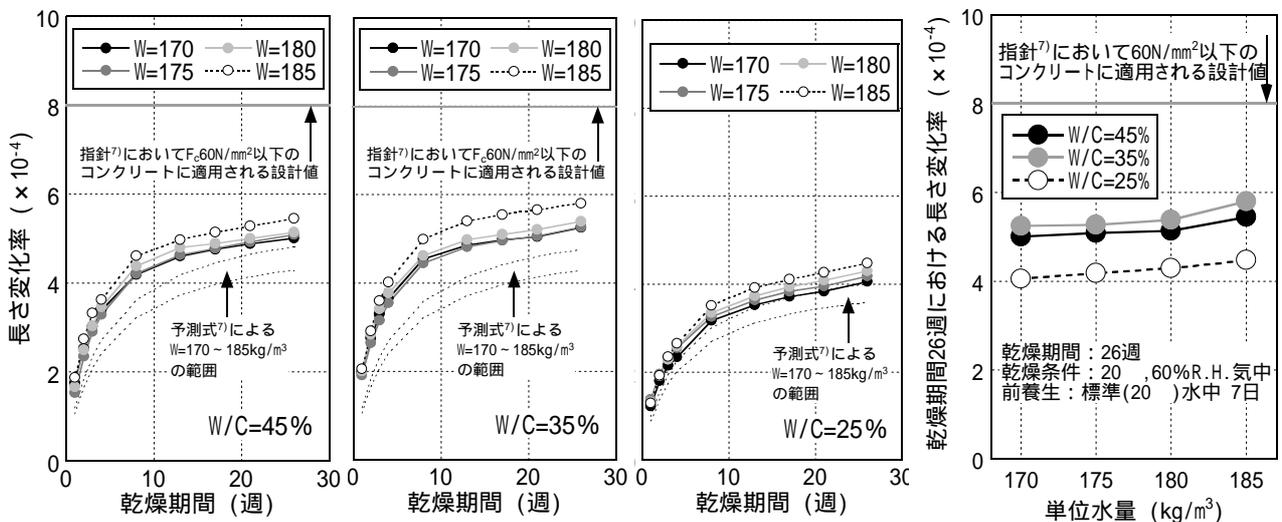


図-10 乾燥期間と長さ変化率の関係

図-11 単位水量と乾燥期間26週における長さ変化率の関係

ったが、ごく僅かな増加であり、水セメント比の違いによる長さ変化率の違いよりもはるかに狭い範囲に分布していた。これは、従来より言われている⁶⁾ように、乾燥に影響する単位水量の違いが乾燥収縮に影響することは当然としても、高性能 AE 減水剤を用いた高強度コンクリートでは、その影響はあまり大きくないことを示唆していると考えられる。

4. まとめ

高性能 AE 減水剤を用いた高強度コンクリートにおける単位水量の変化がコンクリートの各種性状に及ぼす影響を明らかにするために、単位水量を変化させた高強度コンクリートについて、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状の変化を検討した。この結果、185kg/m³以下の範囲で単位水量を変化させた場合、単位水量が大きいほどスランプ(スランプフロー)の経時変化量が小さくなり、また、50cm フロー到達時間が短くなるなど、ワーカビリティの向上につながる可能性のあることがわかった。また、一部で強度の増進が小さくなるなどの現象が見られたが、全体に、単位水量の違いが硬化コンクリートの性状に及ぼす影響は小さかった。

従来は、乾燥収縮すなわち長さ変化率を抑制するために単位水量を極力小さくする調合設計をおこなってきたが、本検討の結果からは、高性能 AE 減水剤を用いる高強度コンクリートにおいては、ワーカビリティと乾燥収縮の二つの相反する性能について、ワーカビリティを従来よりも幾分重視して単位水量を設定できる可能性が示されたと言える。

今後は、セメントの種類や単位粗骨材かさ容積などの配合(調合)の要因を変化させて、同様の検討を行ってい

く予定である。

謝辞

本検討を行うにあたり、元足利工業大学 毛見虎雄博士、日本大学理工学部非常勤講師 飛坂基夫博士、(株)ピーエス三菱技術研究所 藤井和俊博士、(株)内山アドバンス中央技術研究所 白鳥秀幸所長・女屋英明課長より御指導を頂きました。また、山宗化学(株) 榎本哲也氏、日本大学理工学部建築学科 中田研究室およびものづくり大学技能工芸学部建設技能工芸学科 澤本研究室の平成 16 年度および 17 年度 卒業研究生の学生諸君より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) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.214, pp.439, (社)日本建築学会, 2003.2
- 2) 日本工業規格, JIS A 6204, コンクリート用化学混和剤, 2006
- 3) 飯生昌之ほか: 関東地区におけるレディーミクストコンクリート工場の実態調査, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.25 No.1, pp.101 ~ 106, 2003.7
- 4) 高強度コンクリート施工指針(案)・同解説, pp.91, (社)日本建築学会, 2005.2
- 5) 齊藤丈士ほか: 単位水量の違いが高強度コンクリートの諸性質に及ぼす影響(その 1 ~ 3), 日本建築学会大会講演梗概集, pp.59 ~ 64, 2007.8
- 6) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp.39, (社)日本建築学会, 1999.1
- 7) 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, pp.53 ~ 60, (社)日本建築学会, 2006