

# 論文 コンクリートの単位水量と乾燥収縮に及ぼすフライアッシュおよび高性能 AE 減水剤の影響に関する実験研究

守屋 健一<sup>\*1</sup>・全 洪珠<sup>\*2</sup>・嵩 英雄<sup>\*3</sup>

**要旨:** 混合砂を使用したコンクリートは、良質な川砂に比べ、フレッシュコンクリート性状、硬化コンクリート性状、耐久性すべて劣った結果となった。混合砂と普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、AE 減水剤を高性能 AE 減水剤にすることにより単位水量が減り、乾燥収縮が減少する。また、フライアッシュを普通ポルトランドセメントに置換し、AE 減水剤、高性能 AE 減水剤を使用することで単位水量および乾燥収縮率ともに低減する。さらに高性能減水剤を使用することで単位水量および乾燥収縮率ともに大きく低減し、品質改善効果が大きいことが明らかになった。

**キーワード:** フライアッシュ, 単位水量, 細骨材, 高性能 AE 減水剤, 圧縮強度, 乾燥収縮

## 1. はじめに

近年、環境に配慮して骨材の採取規制もあり、良質な骨材採取が困難となっている。良質な天然骨材の枯渇に伴い、細目砂と荒目の砕砂の混合砂の使用による骨材品質の低下、コンクリートの単位水量の増加が問題となっている<sup>1)</sup>。建築学会の JASS 5 の規定値 (185kg/m<sup>3</sup>) 以下に単位水量を抑制するために高性能 AE 減水剤の使用が一般的であるが<sup>2)</sup>、単位水量が減少するにもかかわらず、コンクリートの乾燥収縮は必ずしも低減しないことが指摘されている<sup>3)</sup>。

本研究は、フライアッシュ (以下 FA と略記) の粒形が球形であるため、コンクリートに FA を混和すると、単位水量の減少、乾燥収縮を低減する効果を利用し、細目砂・荒目砕砂の混合砂 (以下混合砂と記す) を用いたコンクリートに

ついて、FA の混和による単位水量および乾燥収縮の抑制効果を実験により確認し、建築用コンクリートの品質改善に資することを目的として行った実験研究である。

## 2. 実験の概要

表 - 1 に実験の組合せを示す。良質な川砂を用いた砕石コンクリートと、混合砂を使用した砕石コンクリートについて、FA 置換率 0%・15%・25%、AE 減水剤 (目標空気量 4.5%±1.0)、高性能 AE 減水剤 (目標空気量 4.5%±1.0) および高性能減水剤 (目標空気量 1.5%±1.0) を使用し、スランプ (12cm)・15cm・18cm・21cm・24cm を要因としてコンクリートのフレッシュ性状、硬化性状および耐久性に及ぼす影響について実験および比較を行った。

表 - 1 実験の組合せ

細骨材	川砂	混合砂							
		AE 減水剤			高性能 AE 減水剤			高性能減水剤	
混和剤	AE 減水剤								
FA 置換率	0%	0%	15%	25%	0%	15%	25%	0%	25%
目標空気量	4.5%	4.5%			4.5%			1.5%	

\*1 工学院大学大学院工学研究科 大学院生 (正会員)

\*2 工学院大学大学院工学研究科 大学院生・修士(工学) (正会員)

\*3 工学院大学工学部建築都市デザイン学科 教授・工博 (正会員)

### 3. 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16 g/cm<sup>3</sup>・比表面積 3290cm<sup>2</sup>/g)を使用した。FA は、表 - 2 に示した品質のように、比表面積は 4270cm<sup>2</sup>/g と細かく、強熱減量は 1.2%と小さく、現在市場流通している FAⅡ種の品質分布<sup>4)</sup>と比較すると、通常の品質よりも良い、JISⅡ種品を使用した。表 - 3に骨材の種類と品質を示す。粗骨材は青梅産硬質砂岩砕石 2005 を使用した。細骨材は細目砂に砕砂を 25～30%程度混合した市販品である混合砂と、比較のために良質な大井川産川砂を使用した。化学混和剤は AE 減水剤標準形(リグニンスルフォ

ン酸塩系)と高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸塩系)を使用し、空気量の調整に非イオン系の FA 用 AE 剤を併用した。

### 4. コンクリートの調合

表 - 4 に計画調合を示す。調合条件として、水

表 - 2 FA 品質

項目	SiO <sub>2</sub> (%)	強熱減 量(%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	フロー値比 (%)	活性度指数(%)	
						28 日	91 日
JIS 規格値	45.0 以上	5.0 以下	1.95 以上	2500 以上	95 以上	80 以上	90 以上
FAⅡ種	61.1	1.2	2.27	4270	108	84	103

表 - 3 骨材の品質

区分	種類	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
粗骨材	砕石	2.63	1.02	58.2	4.79	-
細骨材	川砂(S)	2.61	1.08	-	2.87	1.39
	混合砂(L)	2.55	2.19	-	2.38	4.80

表 - 4 計画調合およびフレッシュ結果 例：スラブ 18cm

記号(*)	FA 置換率 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					フレッシュ性状	
				W	C	FA	S	G	スラブ (cm)	空気量 (%)
SN-AEWR18	0	50	47.8	175	350	0	836	920	18.3	4.6
LN-AEWR18	0	50	44.2	195	390	0	735	944	17.2	4.8
LN-AEHWR18	0	50	47.3	172	344	0	833	944	18.5	4.9
LN-HWR18	0	50	48.5	180	360	0	876	946	16.2	1.6
LF15-AEWR18	15	59	44.3	190	323	57	738	944	18.5	4.7
LF15-AEHWR18	15	59	47.5	167	284	50	834	944	18.3	5.0
LF25-AEWR18	25	67	43.9	190	285	95	725	944	18.9	4.1
LF25-AEHWR18	25	67	47.2	167	251	84	827	944	18.4	5.0
LF25-HWR18	25	67	48.3	175	263	88	868	946	18.4	1.7

(\*) S：川砂 L：混合砂 N：普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート

F15：普通ポルトランドセメントの質量 15%を FA で置換したコンクリート

F25：普通ポルトランドセメントの質量 25%を FA で置換したコンクリート

AEWR：AE 減水剤 AEHWR：高性能 AE 減水剤 HWR：高性能減水剤 18：目標スラブ

結合材比（以下 W/B）を 50%と一定とし、目標空気量は、AE 減水剤・高性能 AE 減水剤を使用したとき  $4.5 \pm 1.0\%$ とし、高性能減水剤を使用したとき  $1.5 \pm 1.0\%$ とした。化学混和剤の使用量は、AE 減水剤は結合材（セメント+FA）の質量に対して 0.25%とし、高性能 AE 減水剤・高性能減水剤の使用量は結合材の質量に対して 1.0%とした。

川砂 (S) を使用した普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート (N)（以下普通コンクリートと略記）は、AE 減水剤 (AEWR) を使用し、目標スランプを 12cm・15cm・18cm・21cm とし、建築学会のコンクリート調合指針を参考に試し練りによって単位粗骨材かさ容積を定め、単位水量を  $163\text{kg/m}^3$  から  $180\text{kg/m}^3$  に変化させ最適な調合を定めた。混合砂 (L) を使用した普通コンクリートは、AE 減水剤、高性能 AE 減水剤 (AEHWR)、高性能減水剤 (HWR) を使用し、SN-AEWR の調合を参考に、粗骨材かさ容積を定め、目標スランプを LN-AEWR, LN-AEHWR は、15cm・18cm・21cm・24cm とし、LN-HWR は、12cm・15cm・18cm・21cm とした。単位水量は、 $162\text{kg/m}^3$  から  $205\text{kg/m}^3$  に変化させ調合を定めた。混合砂を使用した普通ポルトランドセメントに FA を置換したコンクリート（以下 FA コンクリート略記）は、普通コンクリートと粗骨材かさ容積を同一とした。また、FA は、セメント質量の 15% (F15)、25% (F25) 置換し、単位水量を試し練りによって定めた。

## 5. 実験方法

練混ぜ方法は、温度 20°C の恒温恒湿室で温度 20°C に調整した材料（骨材は表乾状態）を用いて、500 強制練りミキサーで、粉体と細骨材を投入し 30 秒攪拌し、混和剤を予め加えた水を投入し 60 秒攪拌し、粗骨材を投入し 90 秒攪拌した。

試験項目は、練り上がり時点に、スランプ、空気量および単位容積質量とし、硬化後は、圧縮強

度、静弾性係数、乾燥収縮及び促進中性化試験を行った。圧縮強度試験は、標準水中、標準封かん養生した供試体について行い、標準水中は、端面を研磨し、材齢 1, 4, 13 週で試験し、標準封かんは、アンボンドキャッピングをし、材齢 4, 13 週で試験した。静弾性係数は圧縮強度試験と同時にを行った。乾燥収縮は、標準水中養生 1 週後、温度 20°C、湿度 60%R.H. で乾燥材齢 26 週まで測定、促進中性化試験は、標準水中養生 4 週、気中養生 4 週後、温度 20°C、湿度 60%R.H.、CO<sub>2</sub> 濃度 5.0% の環境で促進養生し測定した。

## 6. 試験結果および考察

### 6.1 単位水量

図 - 1 に単位水量とスランプの結果を示す。SN-AEWR と比べ LN-AEWR は、粒度が細かい混合砂を使用しているため、同一スランプを得るため

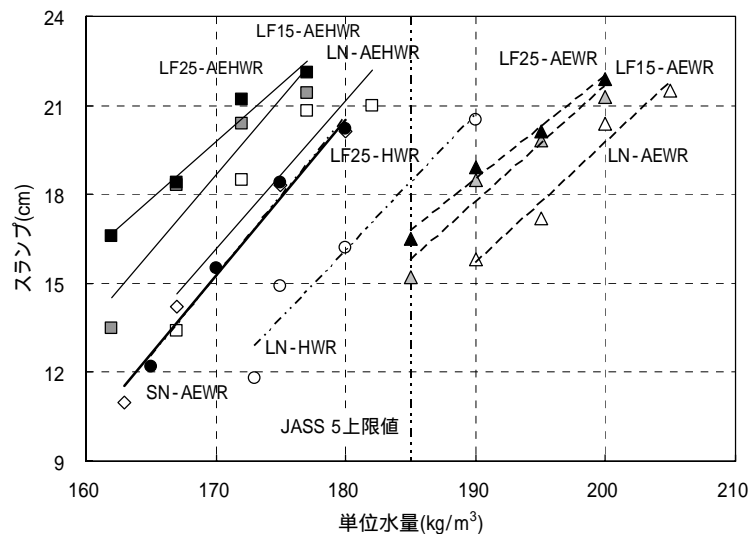


図 - 1 単位水量とスランプの関係

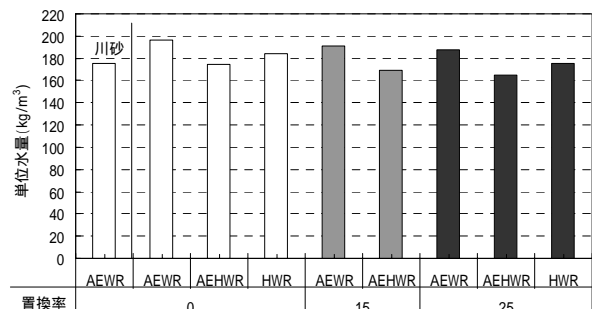


図 - 2 スランプ 18cm の単位水量

の単位水量が  $21\text{kg/m}^3$  増加し、JASS 5 の単位水量下限値の  $185\text{kg/m}^3$  をすべてのスランプで超える結果となった。単位水量は、LN-AEWR は LN-AEWR に比べ  $22\text{kg/m}^3$  低減、LN-AEWR に比べ LF25-AEWR は  $8\text{kg/m}^3$  低減、LF25-AEHWR は  $31\text{kg/m}^3$  低減した。高性能 AE 減水剤と FA を併用することで、単位水量の低減効果は大きい。

図 - 2 にスランプ 18cm の単位水量を示す。スランプ 18cm の単位水量は、SN-AEWR の単位水量  $175\text{kg/m}^3$  に対し、LN-AEWR は  $21\text{kg/m}^3$  (12%) 増加した。化学混和剤を変えると、LN-AEWR の単位水量  $196\text{kg/m}^3$  に対し、LN-AEHWR は  $22\text{kg/m}^3$  (11%) 低減、LN-HWR は  $12\text{kg/m}^3$  (6%) 低減した。また、FA を置換すると、LN-AEWR の単位水量  $196\text{kg/m}^3$  に対し、LF25-AEWR は  $7\text{kg/m}^3$  (4%) 低減、LF25-AEHWR は  $31\text{kg/m}^3$  (16%) 低減、LF25-HWR は  $21\text{kg/m}^3$  (11%) 低減し、FA と高性能 AE 減水剤を併用すると単位水量が小さくなった。なお、FA を 15%置換から 25%置換と増加したほうが  $2\sim 4\text{kg/m}^3$  多く低減した。

## 6.2 圧縮強度

図 - 3 にスランプ 18cm のときの圧縮強度結果を示し、図 - 4 に材齢と標準水中養生圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、SN-AEWR の  $53.6\text{N/mm}^2$  に比べ、LN-AEWR は  $6.4\text{N/mm}^2$  (11.9%) 低下した。

LN-AEWR の  $47.2\text{N/mm}^2$  に比べ LN-AEHWR は  $2.6\text{N/mm}^2$  (5.5%) 増加、LN-HWR は  $6.4\text{N/mm}^2$  (13.6%) 増加した。FA コンクリートは、LN-AEWR の  $47.2\text{N/mm}^2$  に比べ、LF15-AEWR は  $2.6\text{N/mm}^2$  (5.5%) 低下、LF25-AEWR は  $5.1\text{N/mm}^2$  (10.8%) 低下した。また、化学混和剤を変えると、LN-AEWR の  $47.2\text{N/mm}^2$  と比べ LF25-AEHWR は  $7.3\text{N/mm}^2$  (15.5%) 低下、LF25-HWR は  $4.1\text{N/mm}^2$  (8.7%) 低下、LF15-AEHWR は  $1.9\text{N/mm}^2$  (4.0%) 低下した。

FA を置換することで、同一 W/B のとき、圧縮強度は低下するが、FA を 25%置換しても、高性能減水剤を使用することで低下を小さくすることができる。また、LF15-AEHWR にすることで、強度低下が少なくなった。

図 - 5 に標準養生 4 週圧縮強度と封かん養生

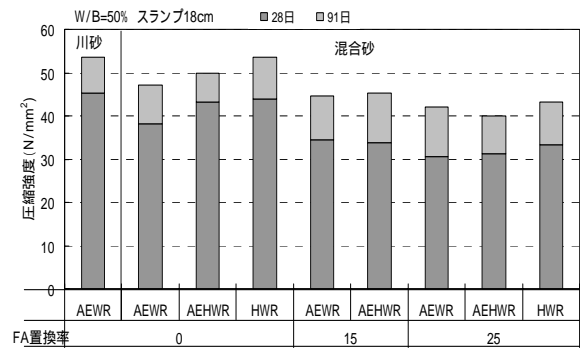


図 - 3 標準水中圧縮強度試験 (スランプ 18cm)

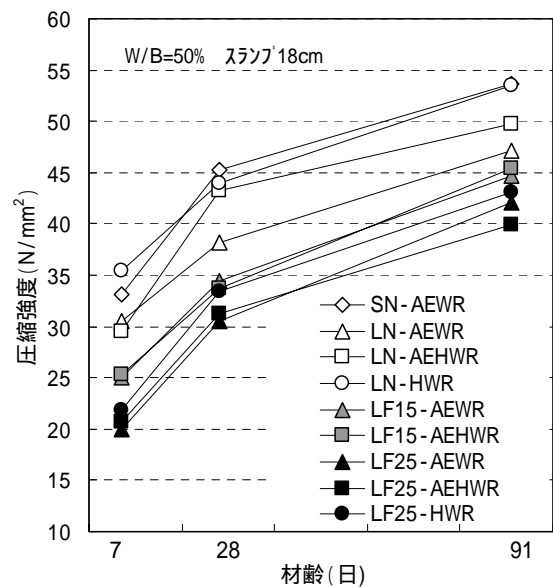


図 - 4 材齢と標準水中養生圧縮強度の関係

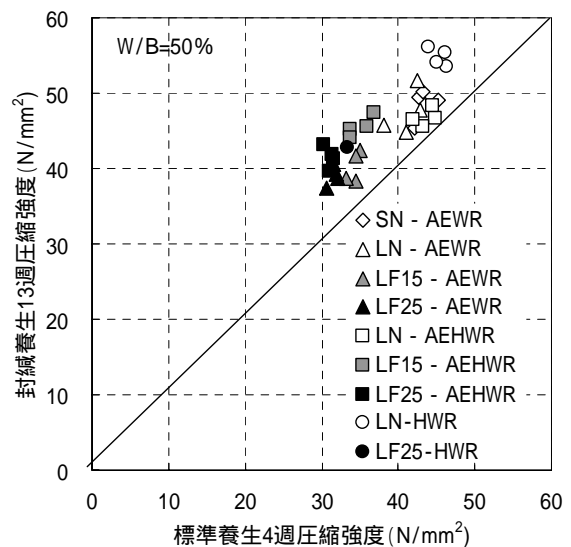


図 - 5 標準水中養生 4 週圧縮強度と標準封かん養生 13 週圧縮強度の関係

13週圧縮強度の関係を示す。封かん養生13週は、砂の違い、FA置換の変化、混和剤に関わりなく標準養生4週圧縮強度より大きくなっている。

### 6.3 静弾性係数

図-6に標準水中養生13週圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。日本建築学会のRC構造計算規準<sup>5)</sup>では静弾性係数を式(1)のように定め、混和材による係数 $k_2$ をFAは $k_2=1.1$ としている。

$$E=33500 \times k_1 \times k_2 \times (\gamma/24)^2 \times (F_c/60)^{1/3} \quad (1)$$

ここに $k_1$ :骨材による係数  $k_2$ :混和材による係数

本研究では、混和材の有無による係数の違いはみられなかったが、川砂を使用したコンクリートは、混合砂を使用したコンクリートより高い静弾性係数となった。

### 6.4 引張強度

図-7に4週圧縮強度と引張強度の関係を示す。傾向としては、引張強度は、圧縮強度の1/10程度で分布しておりSN-AEWRは混合砂を用いたコンクリートより圧縮強度と同様に引張強度も高くなった。また、FAコンクリートは、引張強度も低くなった。

### 6.5 乾燥収縮

図-8に単位水量と乾燥収縮率の関係を示す。SN-AEWRの単位水量が $163 \sim 180 \text{ kg/m}^3$ 、乾燥収縮が $5.75 \times 10^{-4} \sim 6.02 \times 10^{-4}$ に比べ、LN-AEWRは単位水量が $25 \text{ kg/m}^3$ 増加、乾燥収縮が $1.71 \times 10^{-4} \sim 1.92 \times 10^{-4}$ 増加した。LF25-AEWRは、LF-AEWRに比べ単位水量が $7 \text{ kg/m}^3$ 、乾燥収縮が $0.5 \times 10^{-4}$ 程度低減した。一方でLF25-AEHWRは単位水量がもっとも低減したが、乾燥収縮はLF25-AEWRとさほど差がなかった。LF25-HWRはLF-AEWRに比べ単位水量の低減は $21 \text{ kg/m}^3$ だったが、乾燥収縮は $1.26 \times 10^{-4} \sim 1.44 \times 10^{-4}$ 低減した。

図-9にスラブ18cmの乾燥収縮率の比較を示す。SN-AEWRの乾燥収縮 $5.84 \times 10^{-4}$ に対し、LN-AEWRは $1.82 \times 10^{-4}$ (31.2%)増加した。化学混和剤を変化させると、LN-AEWRの乾燥収縮 $7.66 \times 10^{-4}$ に対し、LN-AEHWRは $0.5 \times 10^{-4}$ (6.6%)低

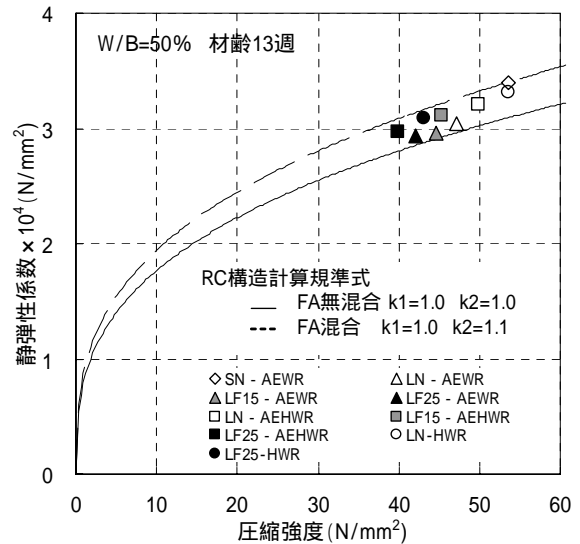


図-6 水中養生13週圧縮強度と静弾性係数の関係

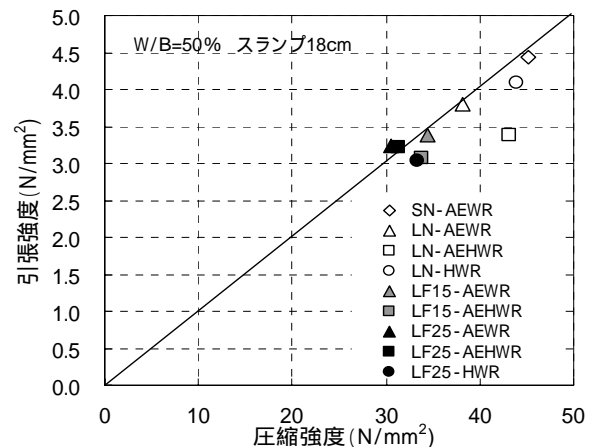


図-7 4週圧縮強度と引張強度の関係

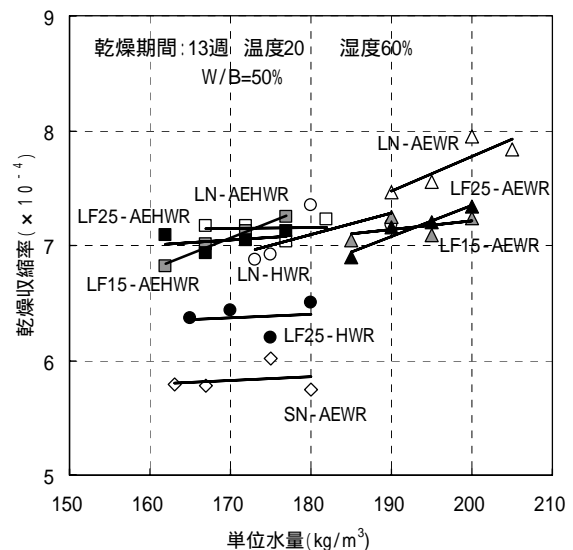


図-8 単位水量と乾燥収縮率の関係

減, LN-HWR は  $0.49 \times 10^{-4}$  (6.6%) 低減することができた。また, FA を置換すると LN-AEWR の乾燥収縮  $7.66 \times 10^{-4}$  に対し, LF25-AEWR は  $0.61 \times 10^{-4}$  (8.0%) 低減, LF25-AEHWR は  $0.62 \times 10^{-4}$  (8.2%) 低減, LF25-HWR は  $1.28 \times 10^{-4}$  (16.8%) 低減することができ, FA と高性能減水剤を併用することでもっとも乾燥収縮の低減効果大きい。

## 6.6 促進中性化

図 - 10 に中性化速度係数を示す。川砂を使用したほうが, 混合砂よりも中性化速度係数が小さくなった。また, 高性能減水剤を使用することで, 空気量が少なくなったために, 中性化速度係数は小さくなった。FA コンクリートでは, FA 置換により単位セメント量が減少し, 生成する  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量も減少するため, 中性化速度係数は急激に増加した。

## 7. まとめ

- 1)混合砂を使用した普通コンクリートは, AE 減水剤を高性能 AE 減水剤にすることにより単位水量が減り, 乾燥収縮も低減する。
- 2) 混合砂を使用した FA コンクリートに AE 減水剤を使用したとき, 混合砂を使用した普通コンクリートに高性能 AE 減水剤, 高性能減水剤を使用したときと同様な乾燥収縮となる。
- 3)混合砂を使用したコンクリートに FA と高性能減水剤を併用することで, 単位水量・乾燥収縮ともに大きく減少し, 品質改善効果大きい。
- 4)FA コンクリートの中性化は大きくなるが, 高性能減水剤を使用するとことで改善できる。

結論として, 高性能 AE 減水剤の単位水量の低減効果は FA より大きい, 乾燥収縮の低減効果は FA と同程度である。

## あとがき

なお,本研究は工学院大学 EEC 研究,電力共研究による建築学会受託研究の一環として行ったものである。研究にあたり試料提供その他の便宜を図って頂いた電源開発の石川嘉崇氏および卒論生の和知貴則ほかの諸君に謝意を表す。

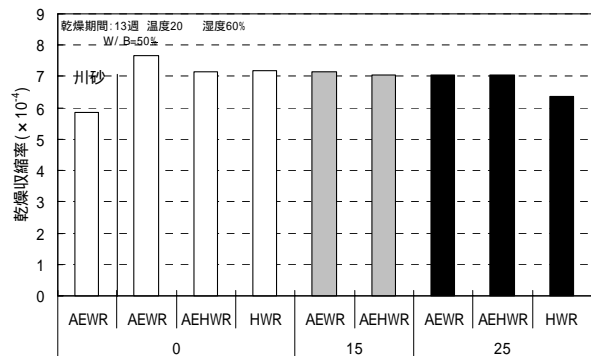


図 - 9 乾燥収縮率の比較 (スラブ 18cm)

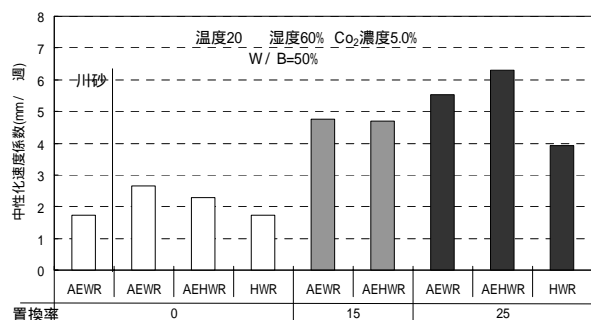


図 - 10 中性化速度係数 (スラブ 18cm)

## 参考文献

- 1) 吉兼亨:生コンクリート工場における骨材対策の現状, コンクリート工学, Vol. 34, No. 7, pp. 81~87, 1996. 7
- 2) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説, JASS 5 鉄筋コンクリート工事, (5 節 pp213-216), 2003. 2.
- 3) 高羽, ほか:各種骨材・混和剤を用いたコンクリートの調合に関する実験(その4 硬化コンクリートの性質), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 789-786, 1993. 9
- 4) 石川, 高田:フライアッシュ JIS 規格品の品質に関する一考察, 第 48 回日本学術会議材料研究連合講演会, pp. 145~146, 2004. 10
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造規準・同解説(許容応力度設計法), pp. 38-40, 1999. 11
- 6) 守屋, 全, 嵩:フライアッシュによる低品質細骨材コンクリートの品質改善に関する研究, 日本建築学会学術講演集, pp.483-484, 2005.9