# 論文　フライアッシュコンクリートの強度・耐久性に及ぼす連行空気および収縮低減剤の影響

全　洪珠[*1]・原　貴義[*2]・中村　正俊[*2]・嵩　英雄[*3]

**要旨：**中性化抑制効果のある収縮低減剤と連行空気量の低減により，フライアッシュを用いたコンクリートの初期強度の低下と中性化の増大の問題を解決し，フライアッシュの使用範囲の拡大を図ることを目的として，フライアッシュをセメントに対して外割混合した場合の混合量，連行空気の有無と収縮低減剤の影響について実験した。空気連行のフライアッシュコンクリートと比較して，収縮低減剤を使用した空気非連行性とした場合は、乾燥収縮は40%程度，中性化は40～60%程度、より低減できることが明らかになった。

**キーワード：**フライアッシュ，連行空気，収縮低減剤，圧縮強度，乾燥収縮，中性化

## １．はじめに

わが国のフライアッシュ（以下，FA と略記する）の産出量は，石炭火力発電所の増設に伴い年々増加しているが，そのほとんどがセメントの粘土代替用などに利用され，FA の特性を活かした FA セメントやコンクリート用 FA として利用は少ない。FA 混合量が FA セメントの B 種以下に限定されていること，FA 混合による中性化の増大などが理由と考えられる。

前報[1),2)]では，FA をセメントの内割で大量使用した場合に，単位水量と乾燥収縮の低減効果が大きい反面，コンクリートの初期強度の低下と中性化の増大が著しいことを報告した。

本研究は，FA 混和による中性化の増大の対策として，中性化抑制効果のある収縮低減剤の使用と連行空気量の低減およびセメントに対する FA の外割使用が FA コンクリートの諸性質に及ぼす影響について検討したものである。

## ２．実験概要

### 2.1 実験の要因と水準

**表－１**に実験要因および水準を示す。FA は JIS 規格のコンクリート用 FAⅡ種を使用し，FA の種類，FA の混入率，水セメント比，空気量の有無および収縮低減剤の有無を実験要因として，合計 27 水準の組合せで実験を行った。

### 2.2 使用材料

**表－２**に使用した FA の品質を示す。FA は D 社産の FAⅡ種のもので，比表面積は 4270cm$^2$/g であり，通常の FAⅡ種より若干大きい値であった。

**表－１　実験の要因と水準**

| 要因 | 水準 | | | |
|---|---|---|---|---|
| FA の種類 | 無混入 | FAⅡ種 | － | － |
| FA 混入率 | 0% | 10% | 20% | 30% |
| W/C | 60% | 50% | 43% | － |
| 連行空気 | あり | なし | － | － |
| 収縮低減剤 | 無添加 | 添加 | － | － |

**表－２　使用したフライアッシュの品質**

| 項目 | 種類 | SiO2(%) | 湿分(%) | 強熱減量(%) | 密度(g/cm$^3$) | 比表面積(cm$^2$/g) | フロー値比(%) | 活性度指数(%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | 28 日 | 91 日 |
| JIS 規格値 | － | 45.0 以上 | 1.0 以下 | 5.0 以下 | 1.95 以上 | 2500 以上 | 85 以上 | 80 以上 | 90 以上 |
| 品　質 | FAⅡ種 | 61.1 | 0.0 | 1.2 | 2.27 | 4270 | 108 | 84 | 101 |

*1 工学院大学大学院　工学研究科建築学専攻博士課程　工修　(正会員)
*2 工学院大学　建築学科
*3 工学院大学　建築学科教授　工博　(正会員)

セメントは 2 社の普通ポルトランドセメントを等量混合したもの（密度 3.16 g/cm$^3$，比表面積 3290 cm$^2$/g）を使用した。粗骨材は青梅産硬質砂岩砕石 2005（絶乾密度 2.62 g/cm$^3$，吸水率 1.15%，実積率 58.8%），細骨材は大井川産川砂（絶乾密度 2.58 g/cm$^3$，吸水率 1.52%，粗粒率 2.74）を使用した。

AE減水剤はリグニンスルホン酸系AE減水剤の標準形，AE 剤は非イオン界面活性剤（FA 用 AE 剤）を使用した。

収縮低減剤は F 社産のもの（主成分：グリコールエーテル系誘導体）を使用した。**図－１**に収縮低減剤の構造を示す。

$$R-O-(C_2H_4O)_n-(C_3H_6O)_m-H$$

**図－１　収縮低減剤の構造**

このグリコールエーテル誘導体は乾燥収縮を低減するだけでなく，硬化体中の空隙を減少させ組織を緻密にし，空隙中に水に不溶のグリコールエーテル誘導体が存在することにより炭酸ガスの拡散抑制による中性化の抑制，塩化物イオンの拡散抑制，水密性の向上に寄与し，コンクリートの耐久性を改善すること[3),4)、5)]が報告されている。

### 2.3 コンクリートの調合

FAはセメントの外割混合とし，収縮低減剤はコンクリートに 10kg/m$^3$ 添加された。単位粗骨材かさ容積を 0.62m$^3$/m$^3$ にし，全調合について AE 減水剤は結合材（C+FA）の質量に対して 0.25%を添加した。AE コンクリートの目標空気量を 4.5±1.0%とし，FA 用 AE 剤で空気量を調整した。Non-AE コンクリートの目標空気量を 1.0%とし，FA 無混入の場合は AE 減水剤と消泡剤を用いて空気量を調整した。FA 混入の場合は，消泡剤を使用せず AE 減水剤のみ使用した。収縮低減剤を用いたコンクリート(Non-AE(HB))場合は，グリコールエーテル系誘導体が強い消泡作用を有するため，空気量を 1.0%程度以下に抑えた。目標スランプは AE コンクリート，Non-AE コンクリートともに 18±1.0cm とした。**表－３**にコンクリートの計画調合を示す。

### 2.4 試験項目と試験方法

フレッシュコンクリートの試験は，スランプ，空気量，コンクリート温度および単位容積質量を試験項目とした。

硬化コンクリートは圧縮強度，静弾性係数，乾燥収縮および促進中性化を試験項目とし，それぞれ関連 JIS 案に準拠した。圧縮強度は 20°C 水中養生（1 週，4 週、13 週，26 週），20°C封緘養生（4 週，13 週）と材齢 4 週（水中 5°C，10°C，15°C，20°C,30°C）の供試体で測定した。

**表－３　計画調合およびフレッシュコンクリートの結果**

| 種類 | FA/C (%) | W/C (%) | W/B (%) | s/a (%) | 単位量（k g/m3） W | C | FA | S | G | AE 剤 (C+FA) ×10$^{-3}$% | ｽﾗﾝﾌﾟ (cm) | 空気量 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AE | 0 | 60 | 60 | 47.1 | 177 | 295 | - | 852 | 966 | 1.1 | 17.8 | 4.1 |
| | | 50 | 50 | 45.3 | 180 | 360 | - | 790 | | 0.9 | 18.0 | 3.7 |
| | | 43 | 43 | 43.1 | 184 | 428 | - | 723 | | 0.9 | 17.8 | 4.3 |
| | 10 | 60 | 55 | 46.4 | 175 | 292 | 29 | 826 | | 1.8 | 17.8 | 4.4 |
| | | 50 | 46 | 44.5 | 176 | 352 | 35 | 766 | | 1.6 | 17.3 | 3.6 |
| | | 43 | 39 | 40.3 | 190 | 442 | 44 | 644 | | 3.0 | 18.6 | 4.4 |
| | 20 | 60 | 50 | 45.0 | 177 | 295 | 59 | 783 | | 2.4 | 18.1 | 4.0 |
| | | 50 | 42 | 42.2 | 182 | 364 | 73 | 696 | | 3.0 | 17.5 | 3.6 |
| | 30 | 60 | 46 | 43.5 | 180 | 300 | 90 | 735 | | 4.0 | 18.0 | 3.8 |
| Non-AE | 0 | 60 | 60 | 48.1 | 188 | 313 | - | 886 | 966 | - | 18.5 | 0.8 |
| | | 50 | 50 | 46.4 | 190 | 380 | - | 826 | | - | 18.0 | 0.7 |
| | | 43 | 43 | 44.0 | 195 | 454 | - | 752 | | - | 17.8 | 0.7 |
| | 10 | 60 | 55 | 47.6 | 184 | 307 | 31 | 866 | | - | 18.2 | 1.5 |
| | | 50 | 46 | 45.6 | 186 | 372 | 37 | 799 | | - | 17.4 | 1.2 |
| | | 43 | 39 | 41.4 | 200 | 465 | 46 | 675 | | - | 18.5 | 1.2 |
| | 20 | 60 | 50 | 46.4 | 185 | 308 | 62 | 826 | | - | 17.0 | 0.8 |
| | | 50 | 42 | 43.2 | 192 | 384 | 77 | 727 | | - | 17.7 | 0.7 |
| | 30 | 60 | 46 | 44.7 | 189 | 315 | 95 | 772 | | - | 18.1 | 0.8 |
| Non-AE (HB) | 0 | 60 | 60 | 48.1 | 182 | 303 | - | 884 | 966 | - | 18.0 | 0.9 |
| | | 50 | 50 | 46.4 | 184 | 368 | - | 825 | | - | 17.8 | 0.8 |
| | | 43 | 43 | 43.9 | 190 | 442 | - | 748 | | - | 18.5 | 0.8 |
| | 10 | 60 | 55 | 47.8 | 176 | 293 | 29 | 874 | | - | 18.2 | 0.7 |
| | | 50 | 46 | 45.9 | 178 | 356 | 36 | 809 | | - | 17.1 | 0.8 |
| | | 43 | 39 | 42.2 | 190 | 442 | 44 | 697 | | - | 18.1 | 0.6 |
| | 20 | 60 | 50 | 46.3 | 180 | 300 | 60 | 822 | | - | 18.4 | 0.9 |
| | | 50 | 42 | 43.9 | 182 | 364 | 73 | 749 | | - | 17.0 | 1.0 |
| | 30 | 60 | 46 | 44.9 | 182 | 303 | 91 | 778 | | - | 18.3 | 0.9 |

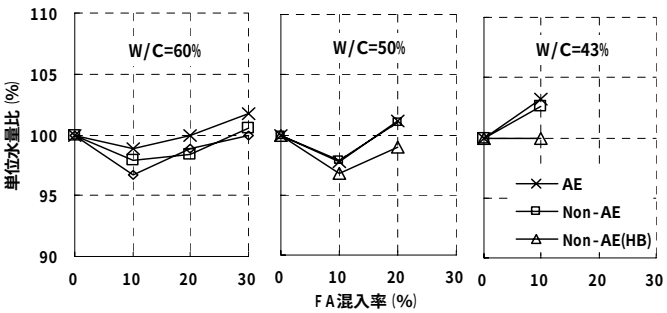
## ３．実験結果および考察

### 3.1 単位水量

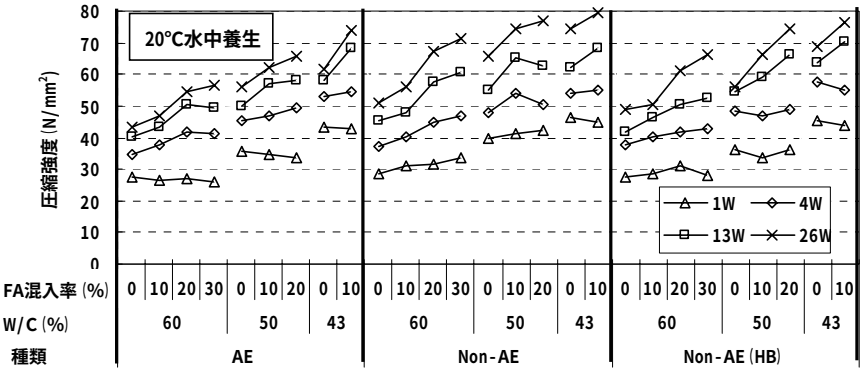
**表－３**にフレッシュコンクリート結果を示す。スランプと空気量とも目標値が得られた。FA 無混入を 100 とした単位水量比と FA 混入率・W/C の関係を**図－２**に示す。

FA を内割置換した場合は，FA の種類・水結合材比に関わらず，FA 置換率の増大に伴い単位水量が低減する[1),2)]。一方，FA を外割混合した場合は，コンクリートの種類に関わらず，FA 混入率の増加に伴い単位水量が増加した。W/C60%の場合は，FA 混入率 20%までは単位水量の低減効果が見られるが，FA30%になると単位水量が増加した。一方，W/C43%では，FA を混入することで，単位水量が増加した。

AE コンクリートに対し，Non-AEコンクリートの単位水量は 10kg 程度増加した。Non-AE(HB)コンクリートの単位水量（水＋収縮低減剤）は Non-AE とほぼ同程度であった。




**図－２　FA 混入率・W/C と単位水量比の関係**



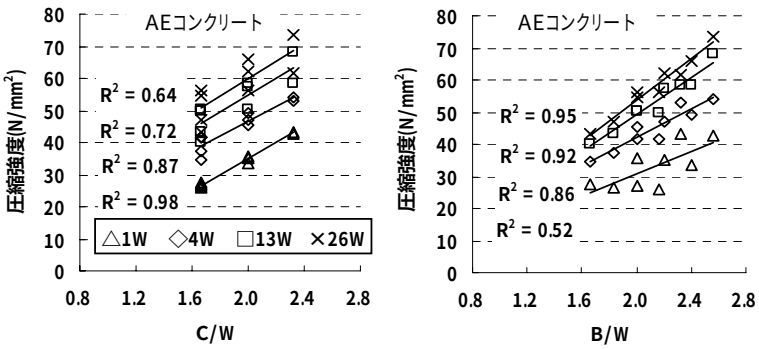

**図－３　20°C水中養生の圧縮強度の試験結果**

### 3.2 圧縮強度

#### (1) 標準養生の圧縮強度

20°C水中養生の圧縮強度の試験結果を**図－３**に示す。FA 無混入を基準とした FA コンクリートの圧縮強度比は，材齢 7 日が 95～118%に対し，材齢 28 日は 102～125%，材齢 91 日は 107～133%，材齢 182 日は 103～152%となった。また，FA 混入率によると，FA 無混入と比べ，FA 混入率 10%が 95～112%，FA20%が 98～142%，FA30%が 96～152%となった。

FA を用いた AE コンクリートの 7 日圧縮強度は FA 無混入より若干低いが，Non-AE および Non-AE(HB)コンクリートは FA 無混入と同等以上の強度が得られた。一方，28 日以降の圧縮強度は FA 無混入より大きく上回り，FA 混入率の増加に伴い強度増進も大きい。これは FA のポゾラン反応の開始時期は，養生温度 20°Cでは 28 日以降である[6)]ため，長期材齢になるほど FA ポゾラン反応によって強度に寄与していることが分かる。

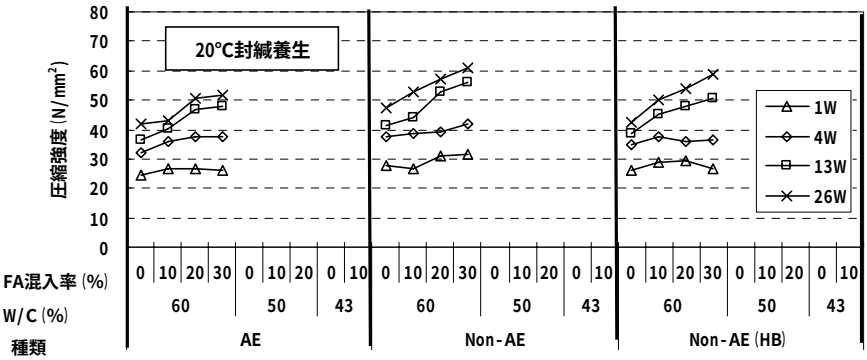



**図－４　C/W・B/W と圧縮強度の関係**

同一 W/C の Non－AE コンクリートの圧縮強度は AE コンクリートより 4～29%程度高く，FA 混入率の増加に伴い圧縮強度の増進も大きい。

20°C水中養生の場合，C/W・B/W と圧縮強度の関係（AE，Non-AE(HB)コンクリートの場合）を**図－４**に示す。セメントの外割で FA を置換した

場合は，材齢 7 日，28 日までは，C/W と圧縮強度とは良い相関を示しているが，B/W と圧縮強度の相関関係が低い。一方，材齢 28 日以降では B/W と圧縮強度はかなり高い相関を示している。Non-AE および Non-AE(HB)コンクリートは，AE コンクリートと同じ傾向を示した。セメントの外割で FA を置換した場合，FA コンクリートの圧縮強度は，材齢 28 日までは C/W で，材齢 28 日以降は B/W で評価できると考えられる。

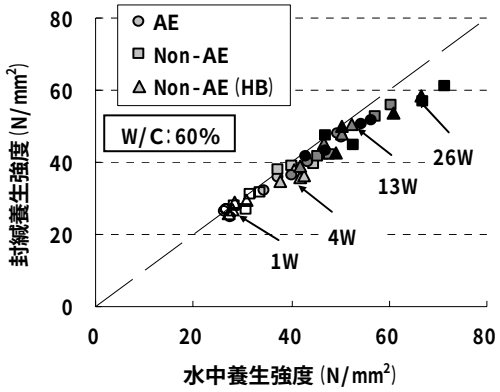



**図－５　20°C封緘養生圧縮強度の試験結果**

**(2) 封緘養生の圧縮強度**

W/C60%の場合，20°C封緘養生の圧縮強度の試験結果を**図－５**に示す。FA コンクリートの材齢 7 日の圧縮強度は FA 無混入とほぼ同等であり，28 日以降の圧縮強度は FA 無混入より高く，FA 混入率の増加に伴い圧縮強度が増加した。

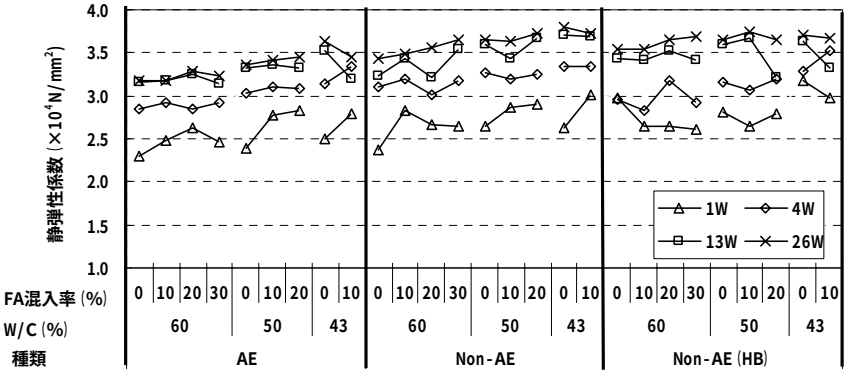
20°Cの封緘養生強度と水中養生強度の関係を**図－６**に示す。コンクリートの種類に関わらず，材齢 91 日までには，封緘養生強度は水中養生強度より若干低くなるが，高い相関関係を示した。一方，材齢 182 日の高強度領域では，水中養生強度より大きく低下した。




**図－６　封緘養生強度と水中養生強度の関係**

### 3.3 静弾性係数

20°C水中養生の静弾性係数の試験結果を**図－７**に示す。AEコンクリートと比べ，Non-AE および Non-AE(HB) コンクリートの静弾性係数が大きい。材齢 4 週の静弾性係数は，FA 無混入と FA 混入はほぼ同等である。材齢 26 週になると，W/C 43%を除いて，FA コンクリートの静弾性係数は FA 無混入より若干大きく，FA 混入率の増加に伴い増加する傾向を示している。




**図－７　20°C水中養生静弾性係数の試験結果**

### 3.4 乾燥収縮

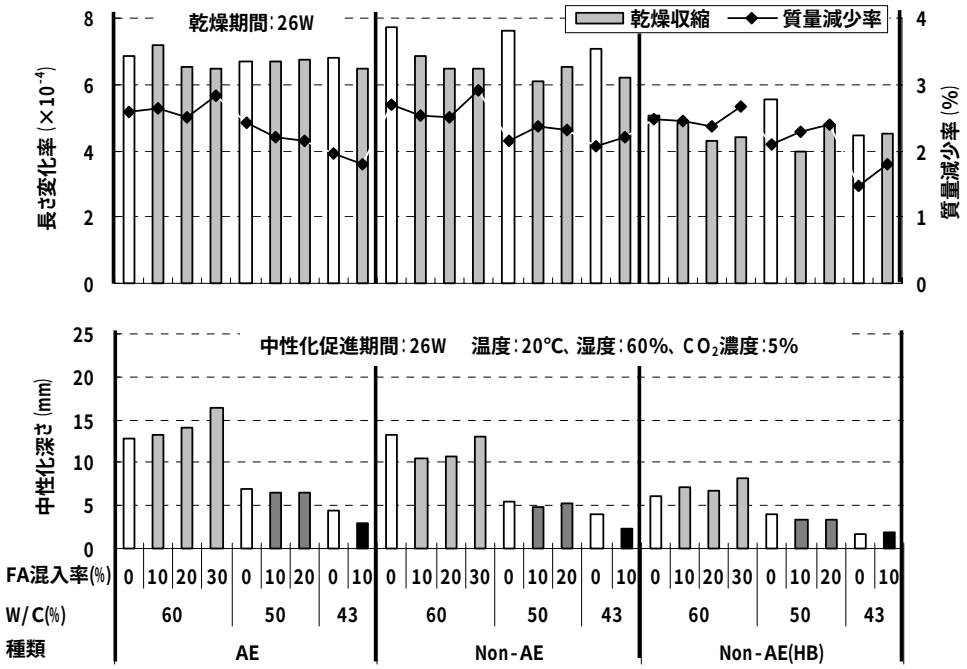
乾燥収縮の試験結果を**図－８**に示す。AE コンクリートの乾燥収縮は，FA 混入率・W/C による影響は少なく，FA 無混入と同程度であった。Non-AE コンクリートは，FA 混入により乾燥収縮が低減し，W/C60%では FA 置換率の高いほど長さ変化率が小さくなるが，W/C50%では逆に大きく

なる傾向が見られた。一方，収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮は著しく低減し，AEコンクリートと比べると40%程度低減できた。これは収縮低減剤としてのグリコールエーテル系誘導体の特徴は水に難溶性であり，大部分のものがコンクリート中に微細な油滴として分散し，空隙水の表面張力を低下させ，乾燥時に水の逸散によって生ずる収縮応力を緩和することで乾燥収縮が低減されると考えられる。

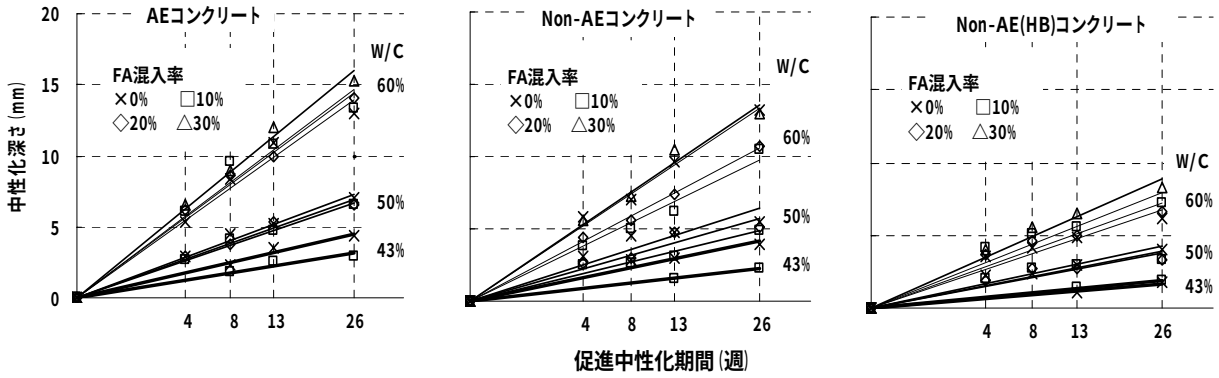
一方，収縮低減剤の添加に関わらず，質量減少率は無添加と差はほとんど認められない。従って，収縮低減効果は水分の逸散を防止することによるものでないことが明らかであり，既往の研究[3)]に見られる傾向と同様であった。

### 3.5 促進中性化

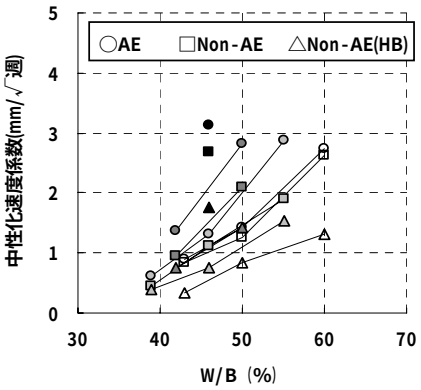
促進中性化の試験結果を**図－8**に，促進期間と中性化深さの関係を**図－9**に示す。FA を外割置換したコンクリートの中性化深さは，コンクリートの種類に関わらず，W/C60%を境としてFAの混入率の増加に伴い中性化抵抗性の傾向は異なる。W/C60%の中性化深さは，FA の混入率の増加に伴い増加するが、W/C50%，43%の場合は若干減少する傾向が見られた。W/C に関わらず，コンクリート種類による中性化深さの差があり，AE コンクリートと比べ，Non-AE にすることで中性化深さ 10%程度減少した。さらに，収縮低減剤を用いたコンクリートの中性化深さは 40～60%減少した。これは収縮低減剤は強力な消泡作用によりコンクリート中の空気を追い出し，コンクリートの組織を緻密化することと，グリコールエーテル系誘導体自身がコンクリート中



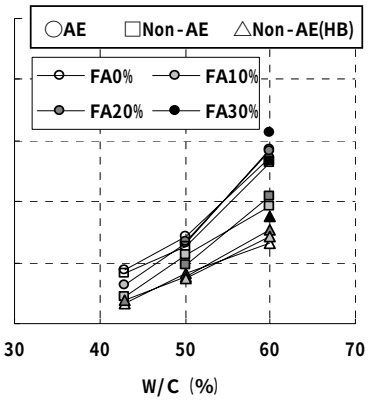

**図－8　乾燥収縮および促進中性化の試験結果**



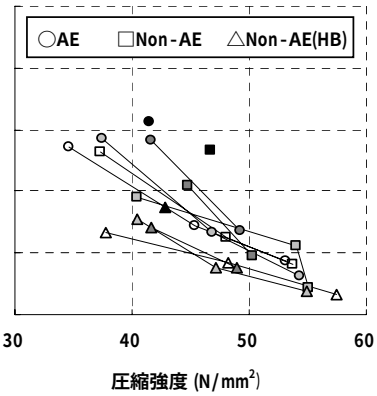

**図－9　促進期間と中性化深さの関係**




**図－10　W/B と中性化速度係数の関係**




**図－11　W/C と中性化速度係数の関係**




**図－12　28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係**

に存在することで間隙を埋め，外部から炭酸ガスの浸入を抑えると考えられる。

中性化深さ C が促進期間 t の平方根に比例する√t 則による C=A√t の回帰式から求めた中性化速度係数 A と水結合材比の関係を**図－10** に，中性化速度係数 A と水セメント比を**図－11** および 28 日圧縮強度と中性化速度係数 A の関係を**図－12** に示す。同一の W/B で比較すると，FA 混入率の増加に伴って中性化速度係数が増加する。W/C の場合も同じ傾向を示した。著者らは、FA を内割混合の場合中性化速度と W/C の関係は FA 種類・置換率に関わらずほぼ直線で表現できると報告した[2)]。しかし，FA を外割混合の場合は FA 混入率の影響が大きく，中性化速度は W/C で制御できない。また、中性化速度は圧縮強度の指数関数で近似でき，同一圧縮強度では、FA 混入率の影響が大きく，FA 混入率の増加に伴い中性化速度係数が増加する傾向を示している。

## ４．まとめ

1) FA コンクリートの 7 日圧縮強度は FA 無混入とほぼ同等であり，28 日以降は FA 無混入より大きく，FA 混入率の増加に伴い強度増進も大きい。
2) FA コンクリートの乾燥収縮は，FA 無混入とほぼ同等である。
3) FA コンクリートの中性化は，W/C60%では FA 無混入より若干大きいが，W/C50%,43%で無混入とほぼ同等である。
4) 収縮低減剤を用いたコンクリートは，無添加と比べ，乾燥収縮は 40%程度低減し，中性化深さも 40～60%減少した。

なお，本研究は工学院大学 EEC 研究，建築学会委託研究「フライアッシュを使用するコンクリートの建築物への適用に関する研究」の一環および竹中育英会研究助成金によって実施した。

### 参考文献

1) 全洪珠，嵩英雄：ﾌﾗｲｱｯｼｭｺﾝｸﾘｰﾄの諸性質に及ぼすﾌﾗｲｱｯｼｭの種類および置換率の影響，ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.189-194，2004.7
2) 全洪珠，土屋清香，渡辺英樹，嵩英雄：ﾌﾗｲｱｯｼｭを大量使用したｺﾝｸﾘｰﾄの強度および耐久性に関する実験的研究（その 1～その 3），建築学会大会学術梗概集，A-1，pp.15-20，2004.8
3) 西祐宜，高田良章，全洪珠，嵩英雄：耐久性改善剤を用いたﾌﾗｲｱｯｼｭｺﾝｸﾘｰﾄの耐久性に関する実験的研究，ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.201-206，2004.7
4) 杉山雅，田中恭一，佐久田昌治，浦野敏晴：乾燥収縮を低減する混和剤を用いたｺﾝｸﾘｰﾄの基礎的性状，ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次論文報告集，Vol.8，pp.281-284，1986
5) 柳橋邦生：超高耐久性コンクリートの開発，ｾﾒﾝﾄ・ｺﾝｸﾘｰﾄ，No.645，pp.6-14，2000.11
6) 小早川真，黄光律，羽原俊祐，友澤史紀：水比，混合率および養生温度がﾌﾗｲｱｯｼｭのポゾラン反応に及ぼす影響，ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.121-126，1999.7