論文　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

西　祐宜[*1]・高田　良章[*2]・全　洪珠[*3]・嵩　英雄[*4]

要旨：本研究は，非空気連行タイプの耐久性改善剤を用いたフライアッシュコンクリートに着目し，耐久性改善剤の効果，空気量の有無，水結合材比，フライアッシュの置換率の影響について検討した。その結果，空気を連行しない Non－AE コンクリートにすることで，フライアッシュの欠点である初期強度の低下や中性化速度の増大を改善でき，さらに耐久性改善剤を用いることにより，乾燥収縮を大幅に低減し，Non－AE コンクリートの問題点である耐凍害性も向上することが明らかとなった。また，フライアッシュコンクリートを Non－AE コンクリートにすることで空気量調整の手間を省け，品質管理は容易になると考えられる。

キーワード：フライアッシュ，耐久性改善剤，中性化，乾燥収縮，凍結融解，空気量

1. はじめに

近年，石炭火力発電所の増設に伴い，産業副産物である石炭灰も大量に発生しており，今後も発生量は増大すると予測されている。石炭灰のフライアッシュは有効利用を目的として建設分野において過去から多くの研究が進められてきたが，実際に建築構造物としてフライアッシュはあまり使用されていないのが現状である。その主な理由としてはフライアッシュの低活性度に起因する初期強度の低下，ポゾラン反応の自己中性化による pH 低下で起こる中性化速度の増加等が主な原因に挙げられる。また，未燃カーボンに AE 剤が多量に吸着されるため空気量調整が困難であり，空気量の品質確保も問題となる。さらに，産地や発電出力の変動の負荷に伴う品質変動が大きく，均一な性能のフライアッシュの安定供給が困難な現状を抱えている。

これらの背景を基に本研究では，乾燥収縮の低減，凍結融解抵抗性の向上等の作用を有する非空気連行タイプの耐久性改善剤[1)]を用いた Non-AE コンクリートに着目し，耐久性改善剤の効果，水結合材比，フライアッシュの置換率並びに空気量有無の影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表－１に使用材料，**表－２**にフライアッシュの品質を示す。

表－１　使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 3 種等量混合 密度：3.16g/cm^3　比表面積：3283cm^2/g
混和材	フライアッシュ JIS II 種品
細骨材	大井川水系掛川産山砂 絶乾密度：2.56g/cm^3　吸水率：1.72%　F.M：2.67
粗骨材	青梅産硬質砂岩 絶乾密度：2.64g/cm^3　吸水率：0.51%　F.M：6.76
混和剤	AE 減水剤：JIS A 6204 標準形　I 種 フライアッシュ用 AE 剤：非ｲｵﾝ系界面活性剤 耐久性改善剤：ｸﾞﾘｺｰﾙｴｰﾃﾙ系誘導体(非水溶性)

表－２　フライアッシュの品質

記号	強熱減量 (%)	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	MB 吸着量 (mg/g)
FA	1.4	2.24	4160	0.51

2.2 実験因子と水準

表－３に本実験の実験因子と水準を，**表－４**にコンクリートの調合を，**表－５**に記号の説明を示す。本実験のフライアッシュ（以下 FA）はセメントの内割置換とし，耐久性改善剤は 1m^3 当たり 10kg を添加した。添加方法は調合の外割を基本とし，水結合材比 50%のみ水量の一部として添加したものも加えた。AE 減水剤は全調

*1　（株）フローリック　コンクリート研究所　(正会員)
*2　（株）フローリック　コンクリート研究所　主任研究員　(正会員)
*3　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)
*4　工学院大学　工学部建築学科教授　工博　(正会員)

合について結合材重量に対して1%を添加した。空気量の調整は，強い消泡作用を有す耐久性改善剤を添加したものは Non-AE コンクリート(以下 D(Non-AE))となり，耐久性改善剤を用いない Non-AE コンクリート(以下 PL(Non-AE))は消泡剤を使用して所定の空気量に調整した。空気を連行させる調合は FA 用 AE 剤(以下 AE 剤)を使用した。スランプの目標性能は AE 減水剤コンクリート（以下 AE)，Non-AE ともにスランプ 18±1cm に設定した。

表－３ 実験因子と水準

実験因子	水準	目標性能
ﾌﾗｲｱｯｼｭの置換率	0%・15%・25%	ｽﾗﾝﾌﾟ 18±1cm
水結合材比	60%・50%・43%	
空気量	1.5±0.5%・4.5±0.5%	
耐久性改善剤	無添加・添加	

表－４ コンクリートの調合

記号	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³) W	C	FA	S	G	D
Af0−60PL	60	60.0	46.2	182	303	−	856	1014	−
Af0−60AE			44.9	170	283	−	813	1014	−
Af15−60D		70.6	46.9	166	235	42	880	1014	10
Af15−60AE			45.0	166	235	42	815	1014	−
Af25−60D		80.0	46.9	164	205	68	879	1014	10
Af25−60AE			44.6	167	209	70	801	1014	−
Af0−50PL	50	50.0	44.7	182	364	0	806	1014	−
Af0−50D			45.0	174	348	0	814	1014	10
Af0−50inD		47.3	44.7	172	364	0	806	1014	10
Af0−50AE		50.0	43.5	170	340	0	766	1014	−
Af15−50PL		58.8	45.3	174	296	52	823	1014	−
Af15−50D			45.5	166	282	50	831	1014	10
Af15−50inD		55.4	45.3	164	296	52	823	1014	10
Af15−50AE		58.8	43.5	166	282	50	766	1014	−
Af25−50PL		66.7	45.2	172	258	86	820	1014	−
Af25−50D			45.4	164	246	82	829	1014	10
Af25−50inD		62.8	45.2	162	258	86	820	1014	10
Af25−50AE		66.7	43.0	167	251	84	751	1014	−
Af0−43PL	43	43.0	42.2	189	440	0	726	1014	−
Af0−43AE			40.7	178	414	0	684	1014	−
Af15−43D		50.6	43.0	173	342	60	752	1014	10
Af15−43AE			40.3	176	348	61	673	1014	−
Af25−43D		57.3	42.9	171	298	99	748	1014	10
Af25−43AE			39.7	177	309	103	655	1014	−

W/B：水結合材比，D：耐久性改善剤
記号例）**Af15－50D　[FA 置換率－W/B(ｺﾝｸﾘｰﾄの種類)]**
FA 置換率 15%－W/B=50%　D 耐久性改善剤外割

表－５ 記号の説明[ｺﾝｸﾘｰﾄの種類]

記号	種類	AE 減水剤	耐久性改善剤	AE 剤	消泡剤
D	Non-AE	あり	あり(外割)	なし	なし
inD	Non-AE		あり(内割)	なし	なし
PL	Non-AE		なし	なし	あり
AE	AE		なし	あり	なし

2.3 試験項目

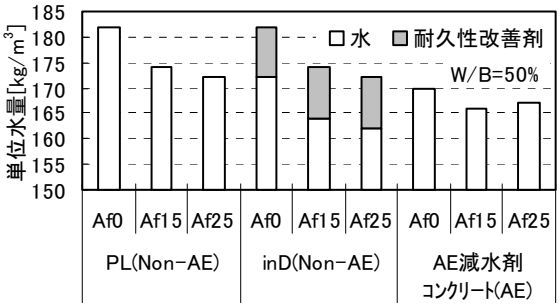
表－６に試験項目を示す。特に本試験では耐凍害性に問題のある Non-AE を対象としていることから凍結融解試験の前養生に乾燥行程を入れ，その影響を検討した。また同時に FA 置換率や AE 剤の有無，耐久性改善剤の有無の影響について気泡組織の面からも検討した。

表－６ 試験項目

試験項目	準拠試験方法	養生方法(期間)
圧縮強度	JIS A 1101	標準養生(1･4･13W)
静弾性係数	JIS A 1149	標準養生(4W)
引張強度	JIS A 1113	標準養生(4W)
乾燥収縮	JIS A 1129-1	1W 水中⇒測定 4W 水中⇒測定
凍結融解	JI S A 1148 (水中凍結 A 法)	4W 水中 4W 水中⇒2W 気中 4W 水中⇒4W 気中
促進中性化	JIS A 1152/1153	4W 水中⇒4W 気中
気泡組織	ASTM C 457-98	4W 水中⇒4W 気中

3. フレッシュコンクリート試験結果

図－１に一例として水結合材比 50%の FA 置換率と単位水量の関係を示す。PL(Non-AE)は FA 無置換と比較して置換率 15%で 8kg，置換率 25%で 10kg の単位水量低減効果がみられた。また，耐久性改善剤内割(以下 inD(Non-AE))は，同一スランプにおける見かけ上の単位水量(水+耐久性改善剤)が PL(Non-AE)と同じであることから，ワーカビリティーに与える耐久性改善剤の影響は水と同様の働きをしていると考えられる。一方，AE は置換率 15%で 4kg，置換率 25%で 3kg の単位水量が減少した。Non-AE に比べて FA 置換率に伴う単位水量低減効果は小さく，置換率 25%よりも置換率 15%のほうが単位水量は少ない結果となった。これは水結合材比 60%および 43%についても同様の傾向を示した。

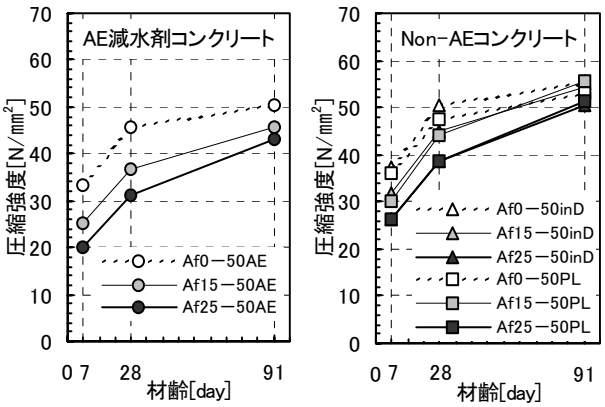


図－１ FA 置換率と単位水量の関係(W/B=50%)

4. 硬化コンクリート試験結果および考察

4.1 圧縮強度

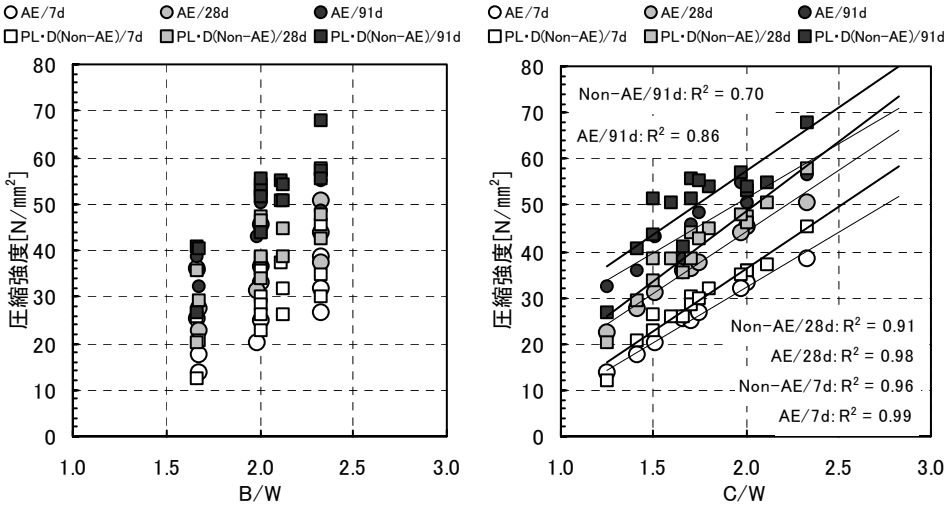
図－２に水結合材比 50%の圧縮強度発現性状の一例を示す。FA 置換率の増加に伴い初期強度は低下している。また，材齢 28 日を基準とした材齢 91 日の圧縮強度比は，FA 無置換が 107～118%に対し，FA15%置換は 111～139%，FA25%置換は 129～149%と置換率の増加に伴い材齢 28 日以降の強度増進は大きい。**表－７**に FA 無置換を基準とした圧縮強度比を示す。材齢 91 日の FA15%置換は FA 無置換と同等程度まで強度は発現しているが，FA25%置換では，まだ強度差が見られる。また，空気量の有無，耐久性改善剤有無に関わらず置換率による圧縮強度の低下傾向に差は見られなかった。**図－３**に結合材水比およびセメント水比と圧縮強度の関係を示す。PL と D の両 Non-AE コンクリートの強度発現に差は見られないため，図中では両者を Non-AE の近似直線として表している。材齢 7 日，28 日のセメント水比と圧縮強度は高い相関関係を示し，若材齢において本実験に用いた FA は強度には寄与していないことがわかる。材齢 28 日以降ではポゾラン反応により FA が強度に寄与し、材齢 91 日のセメント水比との相関関係は低くなる。また，結合材水比と圧縮強度の関係は 1 年程の長期材齢では相関関係は高くなる[2]が，材齢 91 日程度では強度管理を行える相関関係には成り立たない。セメントの内割りで FA を置換した場合は材齢 28 日まではセメント水比で評価でき，結合材水比での評価は材齢 91 日でも材齢期間は短いといえる。**表－８**に圧縮強度に及ぼす空気量の影響を示す。同一水結合材比の Non-AE の圧縮強度は AE より 10～30%程高



図－２ 圧縮強度発現性状(W/B=50%)

表－７ FA 置換率と圧縮強度比

種別	FA 無置換を基準とした圧縮強度比[%]		
	材齢 7d	材齢 28d	材齢 91d
Af0-60PL	100	100	100
Af15-60D	80	82	99
Af25-60D	47	57	65
Af0-60AE	100	100	100
Af15-60AE	70	77	93
Af25-60AE	54	63	84
Af0-50PL	100	100	100
Af15-50PL	84	91	105
Af25-50PL	73	73	97
Af0-50D	100	100	100
Af15-50D	80	83	95
Af25-50D	64	73	81
Af0-50AE	100	100	100
Af15-50AE	75	80	91
Af25-50AE	61	69	86
Af0-50inD	100	100	100
Af15-50inD	85	89	98
Af25-50inD	70	76	92
Af0-43PL	100	100	100
Af15-43D	77	83	78
Af25-43D	66	74	81
Af0-43AE	100	100	100
Af15-43AE	82	87	97
Af25-43AE	69	74	86



図－３ 結合材水比およびセメント水比と圧縮強度の関係

く，その増進の効果は FA を置換したほうが大きい結果となった。

表－８ 空気量有無の圧縮強度比

種別	同置換率の AE 減水剤コンクリートを基準とした圧縮強度比[%]		
	材齢 7d	材齢 28d	材齢 91d
Af0-50PL	108	104	105
Af15-50PL	121	121	121
Af25-50PL	130	124	119
Af0-50inD	112	111	109
Af15-50inD	127	123	118
Af25-50inD	129	123	117

4.2 引張強度

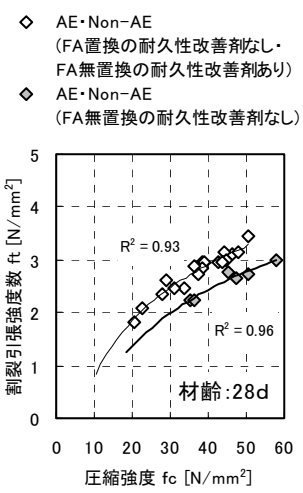
図－４に圧縮強度と引張強度の関係を示す。圧縮強度と引張強度との関係は，FA 置換率，水結合材比，空気量有無による差はなく，圧縮強度に依存しているが，今回の試験結果では FA 無置換で耐久性改善剤を使用しない系のみ引張強度が低下し，同一の線形で近似できない結果となった。

4.3 静弾性係数

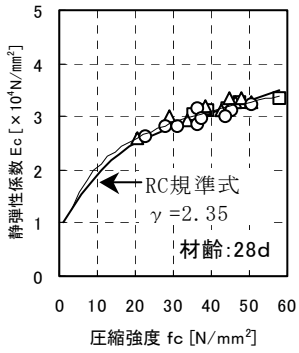
図－５に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。静弾性係数においては, FA 置換率, 水結合材比, 空気量の有無に関係なく圧縮強度との関係は同一の線形で近似される。

4.4 乾燥収縮

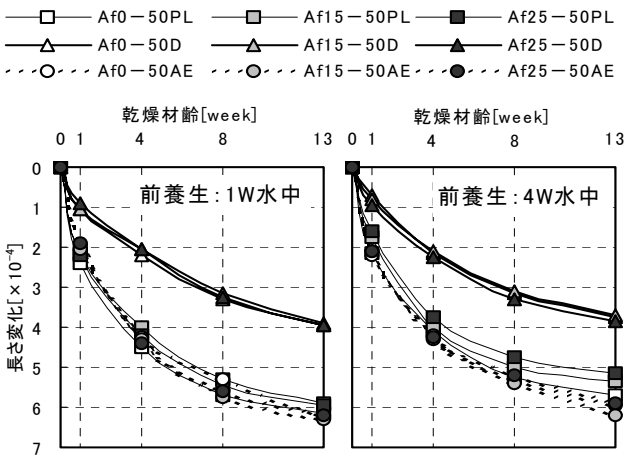
図－６に水結合材比 50%の長さ変化試験結果を，**図－７**に材齢 13 週の長さ変化(1 週水中養生)を示す。乾燥収縮の影響は，Non-AE であり，水結合材比が小さく，FA 置換率が高く，単位水量が少なく，前養生期間が長いほど若干ではあるが小さくなる傾向がみられた。一方，耐久性改善剤を用いた場合には飛躍的な乾燥収縮低減効果があり，耐久性改善剤無添加と比較すると 60%程度まで抑制できる[3)]。これは耐久性改善剤を使用することにより，主成分であるグリコールエーテル系誘導体が毛細管空隙中の空隙水の表面張力を低下させ毛細管張力が低下したこと。また，1%程度しか水に溶解しないグリコールエーテル系誘導体は乾燥が進行しても大部分がコンクリート中に残存し，空隙水の乾燥を妨げることや，剤自身が毛細管空隙内に存在することで乾燥収縮を低減していると推察される。



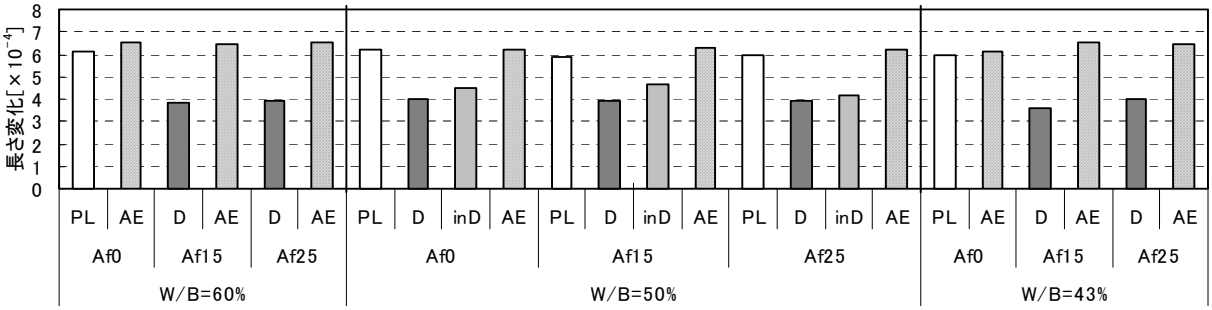
図―４ 圧縮強度と引張強度の関係



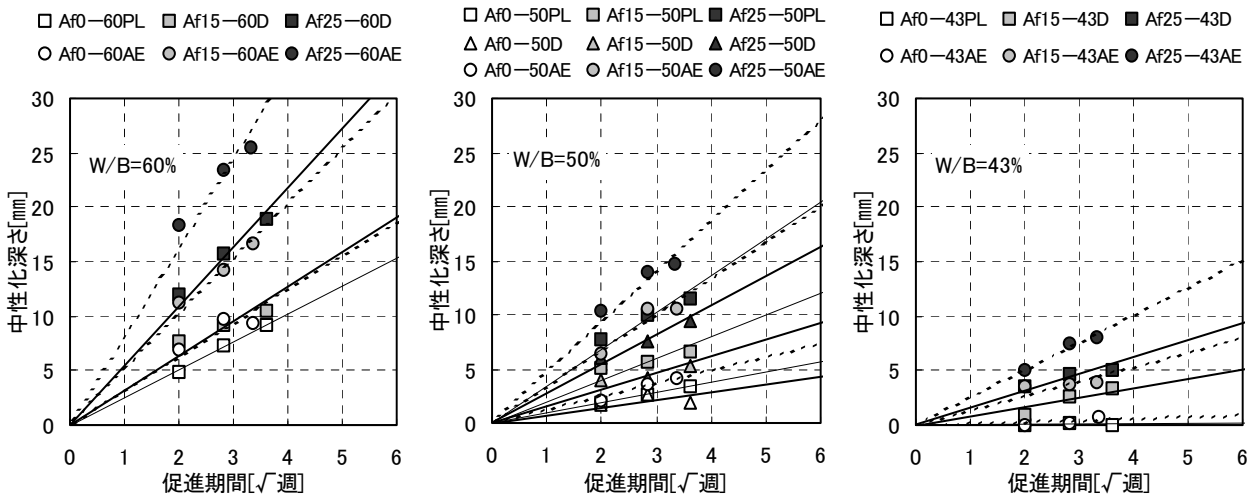
図―５ 圧縮強度と静弾性係数の関係



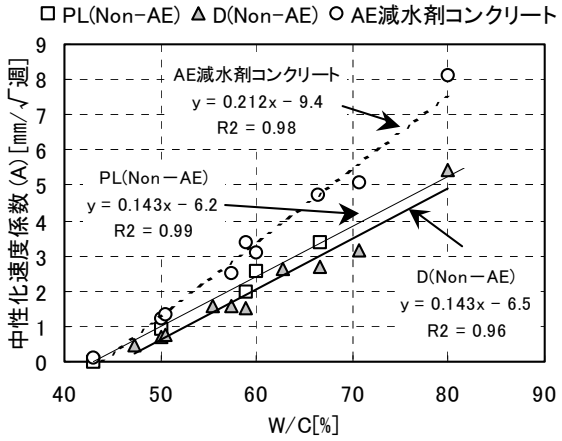
図－６ 長さ変化試験結果(W/B=50%)



図－７ 材齢 13 週の長さ変化(1 週水中養生)



図－８ 促進期間と中性化深さの関係



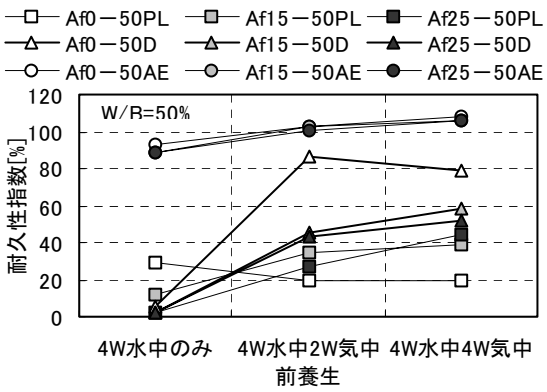
図－９ 水セメント比と中性化速度の関係

4.5 促進中性化試験

図－８に各水結合材比の促進期間の平方根と中性化深さの関係を示す。図中の回帰直線は，中性化深さ(x)が促進期間(t)の平方根に比例する√t 則を基に導いた回帰直線である。FA 混入により中性化深さは増大し，低水結合材比になるほど中性化深さは小さくなる。また，一般的に普通セメントを使用した場合, AE 剤や AE 減水剤を使用すると中性化速度は PL と比較して若干大きくなる[4] とされているが，本実験結果では水結合材比に関わらず AE と Non-AE の中性化速度の差は顕著に現れた。Non-AE にすることでコンクリートの組織が緻密化され，中性化が抑制されていると推察される。**図－９**は**図－８**の x=A√t の回帰式から求めた中性化速度係数(A)と水セメント比の関係を示したものである。AE，PL(Non-AE)，D(Non-AE)は各々の直線で近似され，本実験の 4 週水中 4 週気中の前養生条件下においては, FA のポゾラン反応による自己中性化の影響は無視でき, FA 置換の有無は関係なく同一水セメント比（同一強度）の中性化速度は同等とみなせる。FA コンクリートの中性化速度係数の比は[AE]：[PL(Non-AE)]：[D(Non-AE)]＝1.0：0.7：0.6 となり，Non-AE にすることで著しく中性化速度は減少する。また，耐久性改善剤を用いることにより PL(Non-AE)より若干ではあるが抑制される。

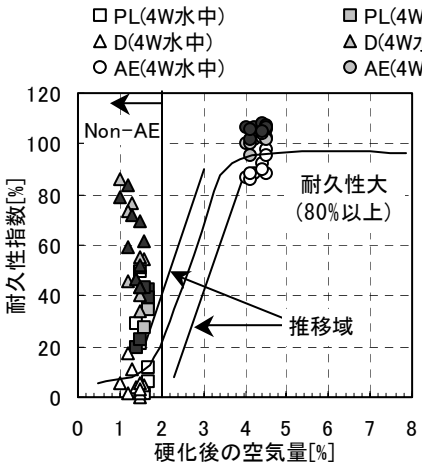
4.6 凍結融解抵抗性

図－１０に前養生の違いによる耐久性指数の関係の一例を，**図－１１**に硬化後の空気量と耐久性指数の関係を，**図－１２**に平均気泡径と耐久性指数の関係を，**表－９**に気泡組織の結果を示す。水結合材比や FA 置換率に関わらず AE は良好な耐凍害性を示した。一方，Non-AE は本実験においても耐久性指数が 40%以下と低い

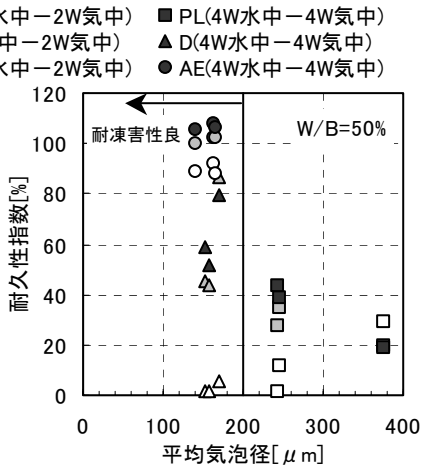


図－１０ 前養生と耐久性指数

値を示したが，水結合材比に関わらず耐久性改善剤を使用した場合には，Non-AE であっても前養生に 2 週間 程度の乾燥行程を入れることにより大幅に耐凍害性が向上した。その作用機構としては，前養生が 4 週水中養生のみの場合や耐久性改善剤を用いない Non-AE に乾燥行程を入れた場合では耐凍害性の大幅な向上は見られないことからも，グリコールエーテル系誘導体が直径 150μm 程度の微細な油滴としてコンクリート中に存在し，空隙水が乾燥する際，毛細管空隙中に一部取込まれ，元の油滴が気泡と同様の役割を果たしたためと推察される。実際の建造物の養生条件は短期間であり型枠脱型後は気中にさらされていることを考慮すると，Non-AE にしても耐久性改善剤を使用することで凍害を防げると考えられる[3)]。また，**表－９**に示す気泡組織は，耐久性改善剤を用いると無添加に比べ気泡数は多く，平均気泡径は小さい。気泡間隔係数は耐凍害性の指標とされる 200～250μm より小さく，硬化コンクリート中に微細な気泡（油滴）が多量に存在していると考えられる。AE と比べると気泡数は若干少ないものの，気泡間隔係数は同程度であり，平均気泡径は AE よりも小さい結果となった。FA を使用した際の気泡組織は，FA 置換率の増加に伴い，気泡間隔係数は小さくなる傾向がみられた。



図－１１ 硬化後の空気量と耐久性指数



図－１２ 平均気泡径と耐久性指数

表－９ 気泡組織（リニアトラバース法）

記号	気泡数 [個]	平均気泡径 [μm]	気泡間隔係数 [μm]	ﾌﾚｯｼｭ時の空気量 [%]	硬化後の空気量 [%]
Af0-50PL	123	374	574	1.4	1.3
Af15-50PL	120	245	449	1.7	1.0
Af25-50PL	161	242	395	1.6	1.1
Af0-50D	393	170	223	1.0	1.8
Af15-50D	476	153	194	1.2	1.9
Af25-50D	523	157	187	1.5	2.0
Af0-50AE	862	163	150	4.4	4.0
Af15-50AE	1019	164	139	4.5	4.6
Af25-50AE	924	141	135	4.1	4.0

全トラバース長：2450mm

5. まとめ

本実験で得た知見は以下に集約される。

1）Non-AE にすることにより，10～30%の圧縮強度増加が見込め，FA コンクリートの欠点である初期強度の低下も改善できる。

2）FA コンクリートの圧縮強度は材齢 28 日ではセメント水比と相関が高く，結合材水比では材齢 91 日でも相関関係は成り立たない。

3）引張強度と静弾性係数は，圧縮強度に依存する。

3）FA コンクリートの中性化は水セメント比を指標とすれば AE，PL（Non-AE），D（Non-AE）の中性化速度係数の比は AE：PL：D＝1.0：0.7：0.6 となる。

4）乾燥収縮は耐久性改善剤を使用することにより無添加に比べ 60%程度に抑制できる。

5）Non－AE の問題点である凍結融解も，耐久性改善剤を使用し，2 週間程の乾燥行程を入れることにより耐凍害性は向上する。

参考文献

1）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，pp6～pp14，No. 645，Nov，2000

2）黄ほか：フライアッシュを大量使用したｺﾝｸﾘｰﾄの微細組織と圧縮強度，日本建築学会構造系論文集，No. 517，11－6，Mar，1999

3）杉山ほか：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講演会論文集，pp281～284，［71］，1986

4）和泉，嵩ほか：ｺﾝｸﾘｰﾄの中性化に及ぼすｾﾒﾝﾄの種類，調合および養生条件の影響について，ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次講演会論文集，pp117～120，［30］，1985