

論文 フライアッシュを混和したコンクリートの初期強度改善に関する基礎検討

佐藤 道生^{*1}・今岡 知武^{*2}・安田 幸弘^{*3}・中村英佑^{*4}

要旨：コンクリート構造物を構築する際に排出される CO₂ の削減を図るための一つの手法としてフライアッシュなどの混和材の利用促進が挙げられる。しかし、フライアッシュを混和したコンクリートは耐久性などの利点があるものの初期強度が低いことが利用上の課題となっている。本研究ではフライアッシュを混和したコンクリートの初期強度を改善する方法のうち、ベースセメントとして早強ポルトランドセメントを使用する方法と、凍結融解の可能性が少ない気候の温暖な地域において AE 剤による空気量調整をしない方法に着目し、室内試験及び複数地点での曝露試験を行い、耐久性を含めた物性への影響を評価した。

キーワード：フライアッシュ、初期強度、耐久性、比抵抗、曝露試験

1. はじめに

セメントはコンクリート構造物を構築する際の主要な材料であり、耐久的な社会資本整備に大きな役割を果たしている。一方、セメントの製造に際して発生する CO₂ はセメントクリンカーを 1t 製造するときに約 800kg 発生しており、日本の CO₂ 総排出量の約 4 % を占めていることから、地球温暖化防止の観点から対策が求められている。京都議定書目標達成計画¹⁾では、CO₂ 排出量の削減策の一つとして、セメントの中間製品であるクリンカーに高炉スラグやフライアッシュ等を混合したセメントの生産割合・利用を拡大することを掲げている。

また、地域で発生した産業廃棄物の有効利用を目指し、混合セメントの利用を推進する動きもある。例えば、沖縄県内では遮塩性をはじめとする耐久性向上を目指してフライアッシュセメントの利用が進められている²⁾ほか、北陸地区ではアルカリ骨材反応を抑制する目的でフライアッシュセメントの普及に向けた取り組みが行われている³⁾。このように、地球環境及び地域環境への貢献という観点から混合セメントの導入が求められている。

さらに、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を用いることで塩害など物質透過性に関わる耐久性の向上が期待できる。例えば筆者らは実構造物の調査を通じて得られた情報をもとにフライアッシュを混和したコンクリートが耐久性を改善し維持管理コストの低減に寄与することを明らかにしている⁴⁾。混和材を使用することでコンクリート構造物の高耐久化が期待できる反面、初期材齢における強度が小さい傾向がある。経済産業省の調査⁵⁾によると、フライアッシュを混和したコンクリートは一般的なコンクリートと比べて初期における強度が低いこと

が課題であり、普及を妨げる要因の一つとなっている。

以上を踏まえ、本論文ではフライアッシュを混和したコンクリートの初期強度の改善策として、ベースセメントに普通ポルトランドセメント（以下普通セメントと記す）のかわりに早強ポルトランドセメント（以下早強セメントと記す）を使用する方法と、AE 剤による空気量調整を行わない（以下 nonAE と記す）方法に着目し、室内試験により初期材齢の物性を評価する他、複数地点での曝露試験により長期物性の評価を行うものである。

2. 検討方針

本論文は基礎物性を確認するために実施した室内試験（シリーズⅠ）と、耐久性の検証を目的に実施した曝露試験（シリーズⅡ）により構成される。いずれの試験ともフライアッシュを混和したコンクリートの初期強度の改善効果を評価することを目的とし、ベースセメントを普通セメントのかわりに早強セメントとした場合、及び温暖な地域での利用を想定して nonAE とする場合について検討した。具体的には、表-1 に示すようにフライアッシュ置換率は 20～30% を基本として、フライアッシュをより積極的に利用する場合を想定し早強セメントをベースにフライアッシュを 40% まで高置換したケースを設定した。配合の詳細を表-2 に、使用材料を表-3 に示す。本論文では一般的なコンクリート配合を対象とし、水結合材比は 50% を基本とし、スランプは予め実施した試験練りにより 12cm となるよう決定した。なお、以降の記述では、下記のように配合名を記すこととする。

[セメント名 : N 又は H] + [フライアッシュ置換率 : F0, F20, F30, F40] + [空気量 : 非調整の場合 NA]

*1 電源開発株式会社技術開発部茅ヶ崎研究所土木技術研究室サブリーダー 工博（正会員）

*2 電源開発株式会社技術開発部茅ヶ崎研究所土木技術研究室 工修（正会員）

*3 株式会社開発設計コンサルタント技術センター所長代理（正会員）

*4 独立行政法人土木研究所材料資源研究グループ基礎材料チーム 研究員 工修（正会員）

表－１ 試験ケース

セメント	W/B	AE	F/B			
			0%	20%	30%	40%
N	50%	AE	NF0	NF20	NF30	—
N	50%	nonAE	—	NF20NA	NF30NA	—
H	50%	AE	—	HF20	HF30	HF40

表－２ コンクリート配合

名称	Air [*] [%]	s/a [%]	F/B [%]	単位量[kg/m ³]				
				W	C	F	S	G
NF0	4.5	47.2	0	165	330	0	827	968
NF20	4.5	46.2	20	159	254	64	814	988
NF30	4.5	45.7	30	156	218	94	806	1000
NF20NA	2.5	47.2	20	169	270	68	835	974
NF30NA	2.5	46.7	30	165	231	99	830	988
HF20	4.5	46.2	20	164	262	66	803	976
HF30	4.5	45.7	30	161	225	97	796	986
HF40	4.5	45.2	40	158	190	126	789	998

*：空気量は目標値。試験では±１％の範囲であった

表－３ 使用材料

材料名	緒 元
セメント	・普通ポルトランドセメント：密度 3.16 g/cm ³ ， 比表面積 3300cm ² /g ・早強ポルトランドセメント：密度 3.14 g/cm ³ ， 比表面積 4490cm ² /g
フライアッシュ	・JIS II 種品：密度 2.30 g/cm ³ ，強熱減量 2.7% 比表面積 4280 cm ² /g
細骨材	・川砂：表乾密度：2.56 g/cm ³ ，吸水率：2.23%
粗骨材	下記の碎石を 1:1 で混合して使用した。 ・5 号碎石：表乾密度 2.67 g/cm ³ ，吸水率 0.43% ・6 号碎石：表乾密度 2.67 g/cm ³ ，吸水率 0.46%
混和剤	・AE 減水剤：リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体 ・AE 助剤：フライアッシュを混和した配合には高アルキルカルボン酸陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を，フライアッシュを混和しない配合では変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を使用

3. シリーズ I 室内試験

3.1 試験方法

コンクリートの練混ぜは 60 リットル水平二軸強制型ミキサーを使用し，JIS A1138「試験室におけるコンクリートの作り方」に準じて実施した。練混ぜは，材料投入（セメント，骨材，混和材）後，から練りを 30 秒行い，混和剤を含む水を投入後，45rpm で 90 秒練混ぜを行った。コンクリートの初期性状のうちスランプは JIS A1101「コンクリートのスランプ試験方法」，空気量は JIS A1128「空気室圧力方法」の要領で試験を実施した。また，コンクリートのブリーディングは JIS A1123「コンクリートのブリーディング試験方法」，凝結時間は JIS A1147「コンクリートの凝結時間試験方法」，圧縮強度は JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」，促進中性化試験は

表－４ 初期物性試験結果

	単位水量 (kg/m ³)	ブリーディング率(%)	凝結硬化	
			始発	終結
NF0	165	2.66	4:29	7:04
NF20	159	2.33	6:13	8:34
NF30	156	1.37	6:14	8:30
NF20NA	169	2.00	6:01	8:10
NF30NA	165	1.38	5:53	8:44
HF20	164	1.63	5:47	7:38
HF30	161	1.64	6:12	8:05
HF40	158	1.21	6:39	8:32

JIS A1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じて試験を実施した。

養生温度の影響を把握することを目的に，標準温度の 20℃に加え，冬期施工を想定した 10℃及び暑中コンクリートを想定した 30℃で養生した場合の圧縮強度試験を実施した。供試体作製時の練り上がり温度も養生温度を目標とし，脱型までは気中養生，脱型後は水中養生を行った。

3.2 試験結果

(1)初期物性試験

各配合のブリーディング率及び凝結硬化試験の結果を表－４に示す。普通セメント（NF0）に比べ，フライアッシュを混和した配合では，凝結時間が遅延する傾向を示しており，強度の発現時期が遅延していることがわかる。初期強度改善のためベースセメントを早強セメントとした場合については，NF0 には及ばないものの終結時間が明らかに改善しており，初期強度の改善効果が明らかであった。一方，nonAE とした場合にも改善傾向は見られるがその程度は限定的であった。

(2)圧縮強度試験

nonAE とした場合の圧縮強度の経時変化を図－１に，圧縮強度比を表－５に示す。NF20 と NF20NA，NF30 と NF30NA を比較すると nonAE とした場合には強度が 1 割程度増加し，材齢 91 日まで増加率は変化しない。材齢 28 日に着目すると，NF0 と NF20NA，NF20 と NF30NA がほぼ同等の圧縮強度となっており，nonAE とすることで初期材齢の圧縮強度を損ねることなく，フライアッシュ置換率をより増やせることを示している。養生温度を変化させた場合，低温時ほど圧縮強度比が大きくなる傾向にあり，養生温度 10℃では約 3 割増加する。養生温度が長期強度に影響を与える要因として，水和生成物の分布が不均質になることが挙げられている⁹⁾。nonAE 配合では空隙が少ないため水和生成物がより均質に生成した結果，低温時の強度がより増加したものと推察される。

ベースセメントを早強セメントとした場合の圧縮強度の経時変化を図-2に、早強セメントを使用したときの圧縮強度比を表-6に示す。20℃のときに着目した場合、ベースセメントを早強セメントとすることにより圧縮強度比は材齢3, 5, 7日で2~3割程度増加するが、材齢28日ではほぼ1, 材齢91日では0.85となり、強度の改善は初期材齢に限定される。材齢7日の圧縮強度に着目すると、HF40とNF30, HF30とNF20がほぼ同じ値となっており、ベースセメントを早強セメントとすることにより、初期材齢の圧縮強度を損ねることなく、フライアッシュ置換率をより高めることが可能となる。

養生温度を変化させた場合、nonAEとした場合と同様に、低温時ほど圧縮強度比が大きくなる傾向にあり材齢初期では圧縮強度比が2を超える場合もあるが、材齢の経過とともに圧縮強度比は低下する。これは、早強セメントの効果により初期の強度比は大きい、水和生成物が不均質に析出した結果、長期的には圧縮強度比が低下したものと考えられる。

(3)促進中性化試験

促進中性化試験の結果を図-3及び図-4に示す。いずれの配合も促進材齢4週まで中性化速度係数が変化しており、混和材を混和した場合には前養生期間の延長が必要であることを示している。nonAEとした場合中性化速度が低くなる傾向を示している。一方、ベースセメントを早強セメントとした場合、初期では中性化速度係数

が小さいが、普通セメントをベースとした場合と異なり中性化速度係数が経過とともに増加し最終的にはベースセメント間の差異はほとんど無くなっており、強度改善による中性化速度の改善は見られなかった。以上の結果

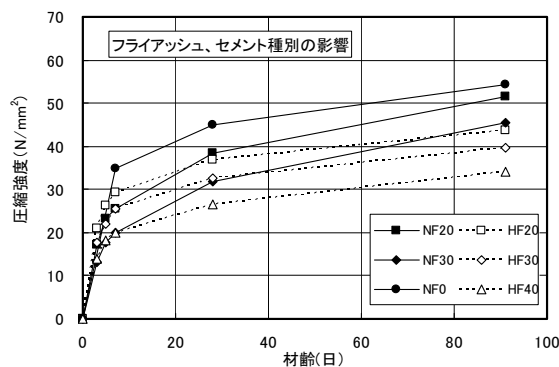


図-2 圧縮強度試験結果 養生温度 20℃
(セメントの影響)

表-6 圧縮強度比 (セメントの影響)

養生温度 (℃)	早強使用時の圧縮強度比 (HPC/OPC)					備考
	材齢3日	材齢5日	材齢7日	材齢28日	材齢91日	
10	1.78	1.44	1.35	1.12	—	HF20 ÷ NF20
20	1.21	1.14	1.14	0.96	0.85	
30	1.31	1.22	1.16	1.00	—	
10	2.04	1.69	1.55	1.25	—	HF30 ÷ NF30
20	1.35	1.23	1.28	1.02	0.87	
30	1.31	1.26	1.11	0.91	—	

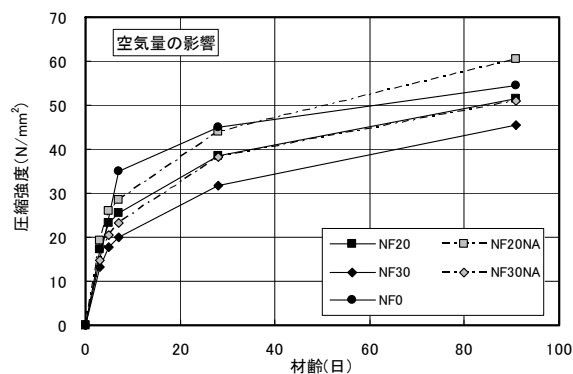


図-1 圧縮強度試験結果 養生温度 20℃
(空気量の影響)

表-5 圧縮強度比 (空気量の影響)

養生温度 (℃)	nonAE時の圧縮強度比(nonAE/AE)					備考
	材齢3日	材齢5日	材齢7日	材齢28日	材齢91日	
10	1.33	1.29	1.24	1.28	—	NF20NA ÷ NF20
20	1.12	1.12	1.11	1.15	1.18	
30	1.13	1.11	1.14	1.13	—	
10	1.36	1.31	1.28	1.28	—	NF30NA ÷ NF30
20	1.11	1.16	1.17	1.20	1.12	
30	1.07	1.11	1.09	1.11	—	

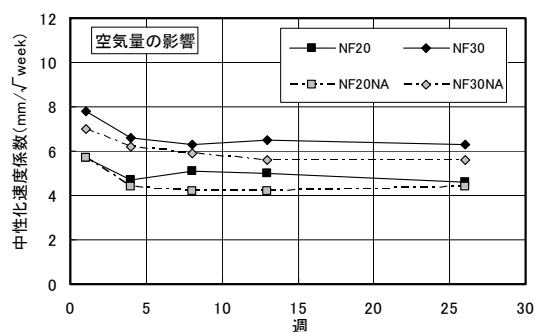


図-3 促進中性化試験結果 (空気量の影響)

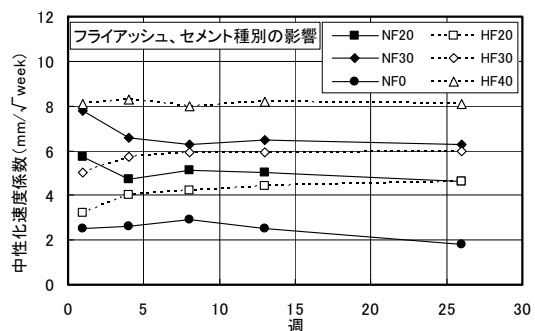


図-4 促進中性化試験結果 (セメントの影響)

より、nonAE とした場合には中性化速度係数は低下するが、中性化速度係数はセメント量に依存する傾向があるため、ベースセメントの変更では中性化速度は改善しないものと考えられる。なお、早強セメントをベースに置換率を高めた HF40 ではフライアッシュ置換率に応じて中性化速度係数が大きくなる傾向を示す。

4. シリーズⅡ曝露試験

4.1 試験方法

シリーズⅠでは、室内試験により圧縮強度を評価した他、促進中性化試験による耐久性への影響を把握した。

シリーズⅡでは長期材齢における物性を評価するため、シリーズⅠで評価した配合を対象に、つくば、新潟、沖縄の3つの曝露場において、長期曝露試験を開始した。つくばは内陸部に、新潟と沖縄は海岸部に位置する。各地点の曝露状況を写真－1に示す。各曝露場の最寄りの気象観測所における2011年度の平均気温、平均湿度、年間降水量は表－7に示す通りである。曝露した配合は表－2に示す8配合であるが、nonAEであるNF20NA、NF30NAは凍結融解の影響を受けない地域への適用を想定していることから、沖縄地点にのみ曝露した。いずれも材齢1日にて脱型後、約40日まで20℃噴霧養生を行ない、曝露地点まで搬送しプラスチック製パレットの上に設置して曝露を開始した。

曝露試験に用いた供試体の形状を図－5に示す。供試体には、ステンレス鋼製のゲージプラグを4本配置し、コンタクトゲージにより長さ変化を計測する他、ゲージプラグを電極として用いて比抵抗の計測を行った。電流及び電圧の測定にはデジタルマルチメータを使用し、外側の2つの電極で交流電流を印加した。土木学会規準⁷⁾を参考に交流電源装置を用いて印加する電圧は30V、周波数は70Hzとした。比抵抗の算定方法は、親本ら⁸⁾の示す式(1)を参考にし、電極の寸法から $a=50\text{mm}$ 、 $L=40\text{mm}$ を代入して得られる式(2)により算出した。

$$\Delta\phi = 2 \times \int_a^{2a} \frac{i\rho}{2\pi r(r+L)} dr \quad (1)$$

$$\rho = \frac{15.9}{100} \times \pi \times \frac{\Delta\phi}{i} = \frac{15.9}{100} \times \pi \times R \quad (2)$$

ここに、 i ：電流 (A)、 ρ ：比抵抗 (Ω)、 $\Delta\phi$ ：電位差 (V)、 a ：電極間距離 (m)、 r ：電極からの距離 (m)、 L ：電極の埋込長 (m)、 R ：抵抗 (Ω)

比抵抗は温度の影響を受けることから、計測時に供試体温度を計測した上で、20℃の値になるよう温度補正を行った。また、供試体の乾燥による影響を避けるため、測定に先立って30分間供試体表面を濡れウエスで包み

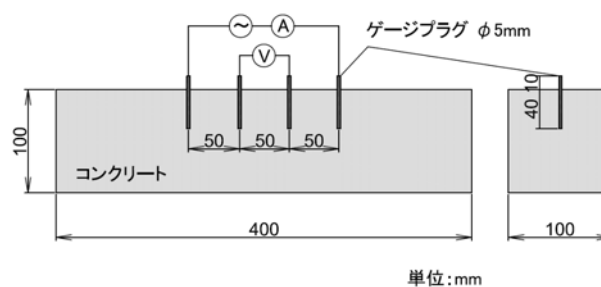
表－7 曝露地点の気象 (2011 年度)

曝露地点	観測所	平均気温	平均湿度	年間降水量
つくば	館野	14.3℃	73%	1014mm
新潟	高田	13.7℃	76%	3274mm
沖縄	名護	22.4℃	74%	2116mm



写真－1 供試体曝露状況

(上：つくば地点、中：新潟地点、下：沖縄地点)



図－5 曝露試験用供試体 概要

供試体を湿潤状態に調整した。この他、超音波測定器により超音波伝播速度を、秤により供試体質量を計測した。

4.2 試験結果

曝露供試体の計測は、屋外への供試体設置時（材齢約40日）に初期値を計測するとともに、材齢約1年（つくば地点371日、新潟地点301日、沖縄地点361日）での計測を行った。曝露試験による測定結果を以下に示す。

(1) 質量変化

材齢約1年における質量変化を図－6に示す。計測時

には濡れウエスによる湿分の調整は行っていない。配合ごとの変化よりも地点ごとの違いが大きく、計測直前の降雨などの影響が大きいものと推察される。

(2) 超音波伝播速度

供試体設置時の超音波伝播速度を図-7に、材齢約1年の超音波伝播速度を図-8に示す。超音波伝播速度の計測時に供試体の湿分調整は実施していない。乾燥の影響の無い供試体設置時(材齢約40日)では、フライアッシュの置換率が高いほど超音波伝播速度が低く、早強セメントを用いた配合は超音波伝播速度が低くなる傾向を示す。一方、設置後約1年経過した時点ではフライアッシュ置換率30%でも普通セメント並みの値を示しており、乾燥状態の異なる3地点とも同様の傾向を示すことを踏まえると、フライアッシュの反応に伴い強度が増加したためと考えられる。一方、早強セメントをベースとした場合乾燥状態は普通セメントのものと同等だが超音波伝播速度は普通セメントのそれより低い傾向が材齢約1年時でも続いている。これは早強セメントによる強度の増加は初期材齢に限られるという、シリーズⅠ室内試験の圧縮強度の結果と符合する。地域の差については温暖な沖縄地点の超音波伝播速度が大きい傾向が見られる。一般に超音波伝播速度は供試体が乾燥するほど低下する傾向がある。図-6に示すように沖縄地点に曝露した供試体は乾燥の影響を受けているにも関わらず、超音波伝播速度は大きい傾向を示しており、温暖な環境の影響によりポズラン反応が進んだことによるものと推察される。

(3) 長さ変化

材齢約1年における長さ変化を図-9に示す。長さ変化は概ね0.05~0.01%程度である。nonAEであるNF20NA、NF30NAは長さ変化が大きい傾向を示す。これは、エントレンドエアが少ないために単位水量が多くなったことによる影響と思われる。フライアッシュによる影響は、混和するほど長さ変化が減少するものと増加するものがあり材齢約1年時の計測では明確な傾向は無かった。

(4) 比抵抗

供試体設置時の比抵抗を図-10に、材齢約1年時の比

抵抗を図-11に示す。供試体設置時には配合による明瞭な差はないが、材齢約1年後ではフライアッシュを置換するほど比抵抗が増加する傾向を示す。乾燥状態の異なる3地点でも同様の傾向を示すことから、乾燥による影響は小さいものと推察される。筆者らは、モルタル供試体を対象とした比抵抗の計測を行い、フライアッシュの混和により比抵抗が増加し、物質透過性が改善される傾向があることを確認している⁹⁾。今回の結果はこれまでの知見に沿うものであり、フライアッシュの混和による効果を示している。早強セメントを用いた配合は、普通セメントを用いたものより比抵抗が小さい傾向を示す。これは、早強セメントによる効果が若材齢時に限られ、長期材齢の強度や耐久性の改善につながらないことを示しており、シリーズⅠ室内試験の結果及びシリーズⅡ曝

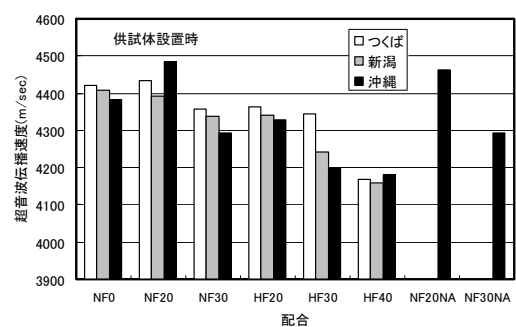


図-7 超音波伝播速度(供試体設置時)

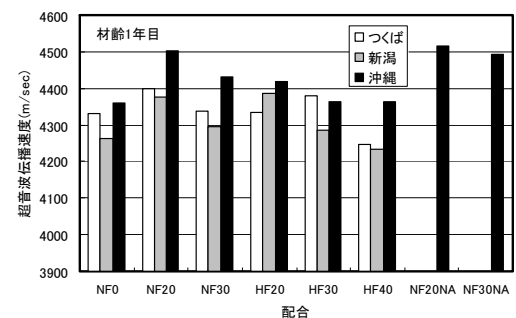


図-8 超音波伝播速度(材齢約1年)

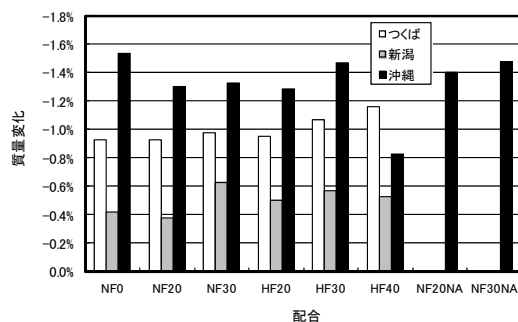


図-6 質量変化(材齢約1年)

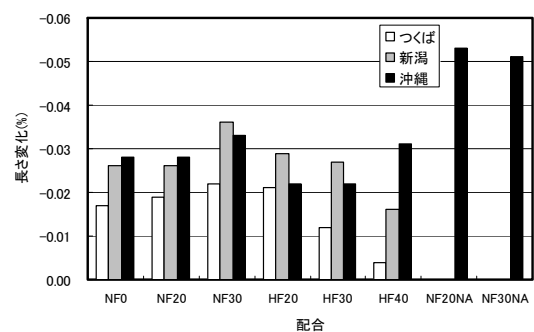


図-9 長さ変化(材齢約1年)

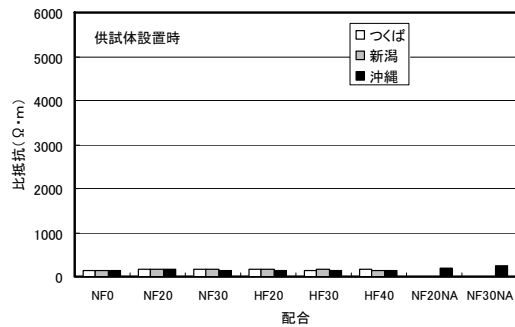


図-10 比抵抗（供試体設置時）

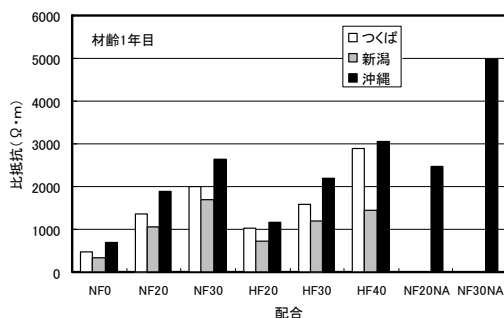


図-11 比抵抗（材齢約1年）

露試験の超音波伝播速度の結果と符合するものである。nonAEであるNF20NA, NF30NAは、NF20, NF30と比べて、やや比抵抗が大きくなる傾向を示す。nonAE配合は、質量変化がやや大きく乾燥による影響もあるが、超音波伝播速度の増加を踏まえると、空隙の減少に伴い比抵抗が増加したものと推察される。

5. 結論

フライアッシュを混和したコンクリートの初期強度を改善するため、ベースセメントを早強セメントに変更する方法とnonAEとする方法に着目し、室内試験及び複数地点での曝露試験を通じて物性の評価を実施した結果、以下の結論が得られた。

- (1) ベースセメントを早強セメントとした場合、凝結時間や初期強度の改善に効果があり特に低温ほど改善効果が大きい。長期強度は初期強度ほどの改善は見られない。材齢約1年の比抵抗の計測結果から物質透過性は普通セメントより劣る傾向であった。
- (2) 温暖な地域でnonAEとする場合、凝結時間には大きな改善はないが、初期から長期材齢まで強度の改善が顕著であった。材齢約1年における比抵抗値から物質透過性が改善することが明らかとなった。
- (3) フライアッシュを20～30%混和したコンクリートは、混和しないものと比べ初期強度が劣るが、材齢約1年時の超音波伝播速度はほぼ同等となる。比抵抗はフライアッシュの混和に応じて大きく増加する傾向

があり、物質透過性が改善される傾向にある。

- (4) ベースセメントを変更、またはnonAEとすることにより、初期強度が改善されることから、積極的に置換率を高めたコンクリートの使用も可能となる。

今後は曝露試験を継続することにより経年変化についての知見を蓄積するとともに、フライアッシュの品質による影響についても検討を行う予定である。

謝辞

本検討は、独立行政法人土木研究所が主催する共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の一環として実施したものであり、実施にあたり同所のご指導ご協力を頂きましたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) 首相官邸地球温暖化対策推進本部：京都議定書目標達成計画，2005.
- 2) 佐藤道生，佐久田朝男，土田茂：フライアッシュセメントを用いたコンクリートの基本性能，電力土木No.330，pp.50-54，2007.
- 3) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会：北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造及び施工マニュアル（案），2012.
- 4) 佐藤道生，有薗大樹，蓮見亮，皆川浩，久田真：調査情報および設備重要度を考慮した発電所の維持管理費用算定手法，土木学会論文集 E2，68(4)，pp.225-237，2012.
- 5) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－報告書，pp.34-136，2009.
- 6) G. J. Verbeck and R. A. Helmuth：Structures and physical properties of cement paste, Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, pp.1-32, 1968.
- 7) 土木学会：四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法（案）（JSCE-K562-2008），2008.
- 8) 親本俊憲，横関康祐，平石剛紀，宮里心一：モルタルの電気抵抗特性に関する電気化学的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.907-912，2005.
- 9) 佐藤道生，蓮見亮，皆川浩，久田真：フライアッシュの混和によるコンクリートの遮塩性能の向上について，土木学会論文集 E2，67(2)，pp.309-321,2011.