

論文 フライアッシュを混和したコンクリートの暴露試験による長期耐久性モニタリング

有菌 大樹^{*1}・佐藤 道生^{*2}・安田 幸弘^{*3}・木下 茂^{*4}

要旨: 実構造物におけるコンクリート耐久性変化について検討するため、フライアッシュを混和したコンクリートを屋外環境に暴露し、10 年にわたる長期耐久性モニタリングを実施中である。耐久性の経年変化について検討を加えるため、1 年毎にコアの採取・分析・調査を実施しており、現在暴露後 2 年目までの分析が完了した。その結果、比抵抗の計測によってコンクリートの緻密性（遮塩性や細孔径分布）を評価できることおよび暴露環境の違いを加味した耐久性評価を行なえることが明らかになった。

キーワード: 暴露試験, フライアッシュ, 比抵抗, 細孔径分布, 積算温度, 耐久性

1. はじめに

石炭火力発電所から排出されるフライアッシュ（以下 FA と記す）は、コンクリートに混和することで長期にわたる強度増進、単位水量の抑制、温度ひび割れの抑制、耐久性の向上などが期待できる。そのため、ダムや火力発電所などのコンクリートに FA は利用されてきた。コンクリートの耐久性に関しては、FA を混和することによってポゾラン反応が進展し、コンクリート組織が緻密になることで、遮塩性の向上が期待できる。しかしながら、ポゾラン反応に伴うアルカリ消費によって、中性化の進行が早くなること、 CI/OH 比が増加することなど、コンクリート中の鉄筋腐食を促進する負の影響も懸念されている¹⁾。

一般的に、コンクリートの耐久性を評価するために様々な促進試験が実施され、コンクリートの耐久性が評価されている。しかしながら、促進試験と実際のコンクリート利用状況における劣化の関係は必ずしも明確になっておらず、実構造物の耐久性を一意に評価することは困難な状況にある。この原因としては、コンクリート構造物が晒される気象条件、温度条件等の環境条件が構造物毎に大きく異なっていることが挙げられる。

そこで、筆者らは実際のコンクリート利用環境におけるコンクリートの耐久性、特に FA を混和したコンクリートの耐久性評価に資するデータ取得を目的として、10 年にわたる耐久性モニタリングを実施中である。日本全国の様々な屋外環境にコンクリート供試体を暴露し、現在進行形で暴露試験を実施中である。本論では、暴露後 2 年目までのコンクリート性状の変化について検討および考察を加えるものである。

2. 暴露試験計画

2.1 暴露試験概要

同配合の普通コンクリートおよび FA を混和したコンクリートに同じ初期養生を行ない、異なる環境下に暴露した。暴露箇所は、環境条件の異なる日本全国の 5 箇所（内陸の標準的な環境、厳寒部で凍害の厳しい環境、沿岸部で塩害の厳しい環境、それらの複合環境等）である。2009 年度に暴露試験を開始し、2019 年度まで 10 年にわたり各地点毎年 1 本のコア採取・分析・計測等を実施する予定である。配合および初期養生を揃えたコンクリートを異なる環境に暴露することで、暴露環境による耐久性の違いおよび一般的なコンクリートと FA を混和したコンクリートの耐久性の違いを把握することができる。

現在、2010、2011 年度に採取したコアの分析を実施しており、コンクリートの耐久性（中性化、塩分抵抗性、緻密性など）、強度特性（圧縮強度、弾性係数、比抵抗等）、温度特性などに関するデータを経時的に取得している。

2.2 暴露供試体の配合

コンクリート配合を表-1 に、使用材料を表-2 に示す。コンクリート配合は、水結合材比を 55% で固定し、FA 置換率 3 水準（結合材が普通ポルトランドセメントのみ（OPC）、FA の置換率が 20%（FA20）、FA 置換率 30%（FA30））の 3 配合とした。使用する配合は予め試験練りによってスランプ 12cm、空気量 4.5% となるように決定した。

2.3 暴露供試体の作製

コンクリートは練混ぜ後、木製型枠内に打設することで幅 77cm、高さ 54cm、厚さ 30cm の暴露供試体を作製した。供試体には内部の温度（深さ 3cm と 15cm）を計測するための温度センサ及び比抵抗測定用のステンレス

*1 電源開発（株） 技術開発部 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室（正会員）

*2 電源開発（株） 技術開発部 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室（正会員）

*3（株）開発設計コンサルタント 技術センター

*4（株）シーテック

表-1 コンクリート配合

名称	W/P [%]	s/a [%]	F/(C+F) [%]	単位量[kg/m ³]				
				W	C	F	S	G
OPC	55	43	0	159	289	0	779	1,144
FA20	55	43	20	151	220	55	785	1,154
FA30	55	43	30	146	186	80	790	1,161

表-2 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 ，ブレン値：3310cm ² /g
FA	JIS II種品，密度：2.25 g/cm ³ ， ブレン値：3800 cm ² /g
細骨材	海砂，密度：2.57 g/cm ³ ，吸水率：1.3%
粗骨材	砕石(G _{max} =20mm)，密度：2.85 g/cm ³ ，吸水率：1.58%
混和材	AE 減水剤：リグニンスルホン酸化合物とポリオール の複合体 AE 助剤：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

表-3 供試体暴露地点の概要

設置箇所 (略称)	環 境	数 量	供試体作製日 暴露開始日 (暴露開始日材齢)
北海道 本別市 (H地点)	寒冷地 内陸	各配合 1 体 (計 3 体)	2009/09/18 2009/11/06 (49 日)
青森県 大間市 (A地点)	寒冷地 海洋環境	各配合 1 体 (計 3 体)	2009/09/15 2009/10/13 (28 日)
神奈川県 茅ヶ崎市 (K地点)	温暖， 海岸より約 2km 内陸	各配合 1 体 (計 3 体)	2009/09/15 2009/10/22 (37 日)
福岡県 北九州市 (F地点)	温暖 海洋環境	各配合 1 体 ×2 箇所 (計 6 体)	2009/09/09 2009/10/07 (28 日)
沖縄県 うるま市 (O地点)	亜熱帯地帯 海洋環境	各配合 1 体 (計 3 体)	2009/09/09 2009/10/09 (30 日)

端子を設置している。また、経年ごとに耐久性評価用の
コンクリートコアを採取できるものとした。暴露供試体
の概要を図-1 に示す。

打設した供試体は、乾燥防止のため濡れむしろを掛け
た後散水養生を実施し、材齢 7 日で脱型を行った。脱型
後は材齢 4 週に至るまで温度変化の少ない室内に静置し、
材齢 4 週以降に屋外暴露を開始した。

2.4 供試体の暴露

作製した供試体は、表-3 に示す 5 地点に暴露した。な
お、F 地点においては、同一敷地内の 2 箇所（いずれも
海岸付近）に供試体を暴露している。

暴露位置を図-2 に、供試体の暴露状況（例として H、
K、F、O 地点）を図-3 に示す。

2.5 分析内容

暴露したコンクリートは、1 年に一度供試体の測定お
よびコアの分析を実施する。暴露供試体については、埋
設した温度計によるコンクリート内の温度計測および 1
年に一度のステンレス端子を用いた比抵抗計測（K 地点

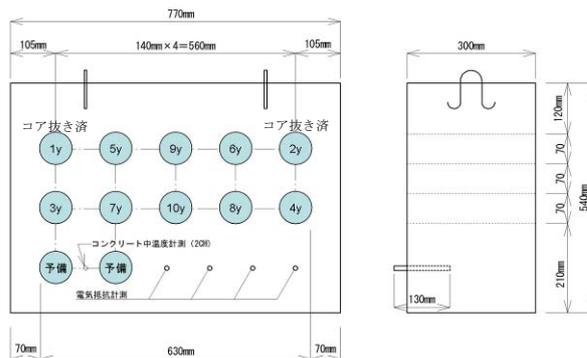


図-1 暴露供試体の概要



図-2 コンクリート供試体暴露地点

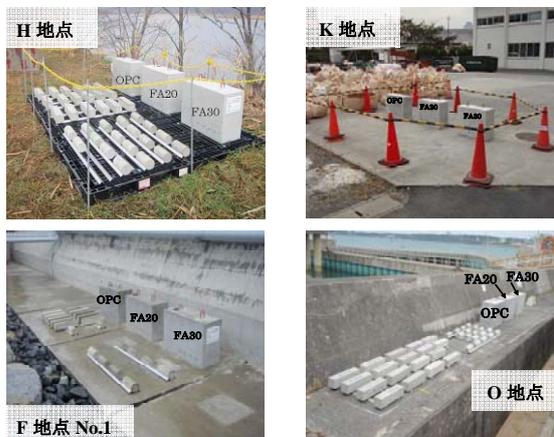


図-3 供試体の暴露状況

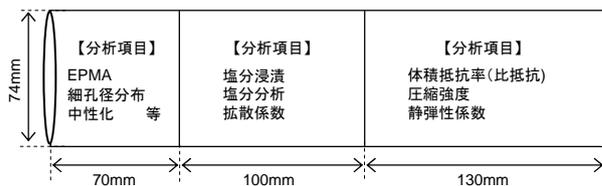


図-4 コアによる分析内容の一例

のみ 1 月に一度) を、コアについては 1 年に一本コアを
採取し、図-4 に示すような分析を実施している。なお、
コア抜き部は補修材で修復し、耐久性変化に影響を与え
ないよう対処している。

表-4 コア採取日およびコア材齢

地点名	1年目コア採取日 (コア材齢[日])	2年目コア採取日 (コア材齢[日])
H地点	2010/10/07 (384)	2011/07/06 (656)
A地点	2010/10/19 (399)	2011/08/31 (715)
K地点	2010/10/22 (402)	2011/10/22 (767)
F地点	2010/10/08 (394)	2011/09/14 (735)
O地点	2010/10/12 (398)	2011/09/21 (742)

表-5 各暴露地点の積算温度 単位：°D・D

暴露地点	1年目		2年目	
	365日	コア採取時	730日	コア採取時
H地点	7,310	7,790	11,060	11,630
A地点	7,820	8,760	—*	15,080
K地点	10,600	11,740	21,090	22,260
F地点	10,560	11,640	20,880	21,090
O地点	12,450	13,430	25,200	25,380

※コア採取時点で730日経過しておらずデータ未回収

3. 計測結果 (暴露2年目まで)

暴露開始から1年後、2年後の各供試体より表-4に示す材齢のコアを採取し、以下に示す各種分析を実施した。

3.1 暴露環境

(1) 温度環境

暴露されたコンクリートがどのような環境条件にあるかを検討するため、供試体に埋設した温度計(図-1参照)によって温度履歴を計測している。下式によって、積算温度 M (°D・D) を算定した。温度は供試体の深さ3cmと15cmで測定しているが、これらの温度の差異が小さかったため、深さ15cmの温度計測結果を基に積算温度を算出している。

$$M = \sum_{z=1}^z (\theta_z + 10) \quad (1)$$

ここに z : 材齢 (日), θ_z : 材齢 z 日の平均温度 (°C)

各地点における積算温度を表-5に示す。寒冷地 (H地点) と亜熱帯地 (O地点) では、約2倍程度積算温度が異なることが分かる。

(2) 年間降水量

各暴露地点の年間降水量を表-6に示す。降水量は、暴露地点に最も近い気象庁アメダスの降水量データを暴露開始時点から積算することで算出している。降水量においても大きく異なる環境下に供試体は暴露されている。

3.2 強度特性

(1) 試験方法

現場養生された材齢28日の供試体 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$)、および暴露後1年目、2年目に供試体から切り出したコア ($\phi 74 \times 130\text{mm}$) の圧縮強度試験を実施した。なお、暴露1年後、2年後のコアはそれぞれ一本しか採取していない為、採取したコア一本のみの圧縮強度である。材齢28日分は、JIS A 1108に準じて、コアはJIS A 1107に準じて試験を行なった。

表-6 年間降水量 単位：mm/Year

暴露地点	暴露後1年目	暴露後2年目
H地点	815	889
A地点	1,338	1,139
K地点	1,775	1,629
F地点	1,736	1,746
O地点	2,841	1,571

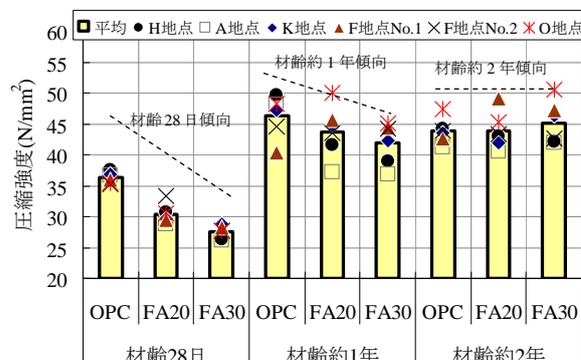


図-5 材齢経過に伴う圧縮強度の変化

(2) 試験結果

図-5は、材齢28日、約1年、約2年における各暴露地点の3種類の配合の圧縮強度を示す。

材齢28日では、OPCの圧縮強度が最も高く、FAを混和するほど圧縮強度が小さくなっている。材齢約1年ではFAを混和したコンクリート圧縮強度はOPCより小さいものの、平均値で比較すると材齢28日よりも圧縮強度の差は小さくなっている。環境別には、積算温度の最も高いO地点でのFA20、FA30の強度増進が著しい。一方、積算温度の小さい寒冷地(H地点、A地点)では特にFA20、FA30の強度増進は温暖地に比べて小さくなっている。材齢約2年の全地点圧縮強度平均値ではOPC、FA20、FA30の間の強度差がほとんど無くなり、また、寒冷地においてもOPCとほぼ同等の強度発現をしている。

3.3 中性化深さ

(1) 試験方法

JIS A 1152に準じて、暴露後約1年目、2年目に採取したコアの中性化深さを測定した。

(2) 試験結果

材齢約1年目、2年目採取したコアの中性化深さを図-6に示す。OPCに比べ、FA20、FA30は中性化の進行が1年目で約1.5~6倍、2年目で約2~20倍程度早く、FAを混和した影響が現れている。また1年目から2年目にかけて中性化深さが小さくなったもの(F地点FA20)や急激に大きくなったもの(F地点FA30)が確認される。材齢2年では、同じ暴露環境においても中性化の進行具合がばらついているが、調査を継続することで暴露環境毎の \sqrt{t} 則に基づく中性化速度係数の違いについて検討を加える予定である。

3.4 塩分浸透特性

(1) 試験方法

採取したコアの塩化物イオン浸透試験として、土木学会規準 (JSCE G 572-2010²⁾) に準拠し、塩化物イオンの見かけの拡散係数 (以下拡散係数と記す) を算定した。温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、濃度 10% の NaCl 水溶液中にコアを 91 日浸漬後、JIS A 1154 のうち電位差滴定法を用いて塩化物イオン濃度を測定した。そして Fick の拡散方程式の解にフィッティングすることで拡散係数を同定した。

(2) 試験結果

図-7 に材齢約 1 年及び 2 年目に採取したコアの拡散係数を示す。OPC では、暴露環境によって拡散係数が大きくばらついた。材齢約 1 年の F 地点 No.2 に暴露した OPC のコアにおいて拡散係数が他の 1/4 以下である以外は、FA を混和することによる遮塩効果が確認できる。FA を混和した供試体のコアにおいては、暴露環境による違い、FA の混和量による違いは材齢 2 年では明確に確認できなかった。

3.5 細孔径分布

(1) 試験方法

材齢の経過に伴い、セメントの水和反応および FA を混和した配合ではポズラン反応が進展し、組織が緻密になる。その緻密性を評価するために、水銀圧入方式ポロシメータによる細孔径分布計測を実施した。細孔径分布計測用試料は、採取したコアの表層から深さ 20~30mm 部のペースト分を 5mm 角程度にカッターで切断し、凍結乾燥を施したものを用いた。試料はガラス製試験容器 (試料室容積 5ml, キャピラリー容積 0.392ml) に細孔容積がキャピラリー容積の 25~90% となる量の試料を充填し、水銀圧入式ポロシメータにセットした。開気孔を円筒形と仮定し、圧入圧を式(2)により細孔直径に換算した。各圧入圧における水銀の圧入量を細孔量として、細孔径と細孔量を求めた。

$$d = -4\gamma \cos \theta / P \quad (2)$$

ここに d : 細孔径 (直径) γ : 水銀の表面張力 (0.484N/m)

θ : 水銀と試料の接触角 (135°) P : 圧入圧 (MPa)

(2) 試験結果

図-8 に暴露 2 年目における各地点の FA20 から採取したコアの細孔容積と OPC から採取したコアの細孔容積の比を示す。材齢約 2 年が経過しても、ポズラン反応が進展しているため、FA20 では OPC に比べ約 $0.03 \sim 0.3 \mu\text{m}$ の細孔容積が少なく、 $0.03 \mu\text{m}$ 以下の細孔容積が増加していること、また約 $0.003 \sim 215 \mu\text{m}$ の細孔容積総和に着目すると OPC で約 $800 \mu\text{l/g}$ 、FA20 で約 $900 \sim 1000 \mu\text{l/g}$ であることから、FA を混和することによって組織が緻密化していることが確認できる。但し、厳寒地である H 地点、A 地点では、温暖地に比べ $0.03 \sim 0.3 \mu\text{m}$ の細孔容積減少

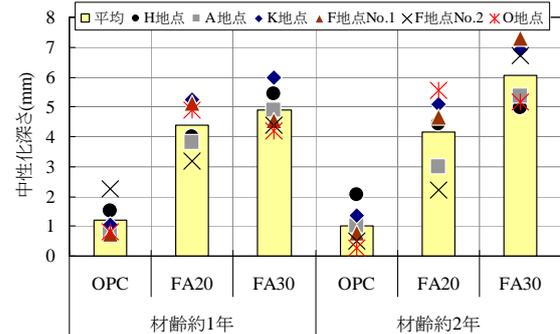


図-6 中性化深さ測定結果

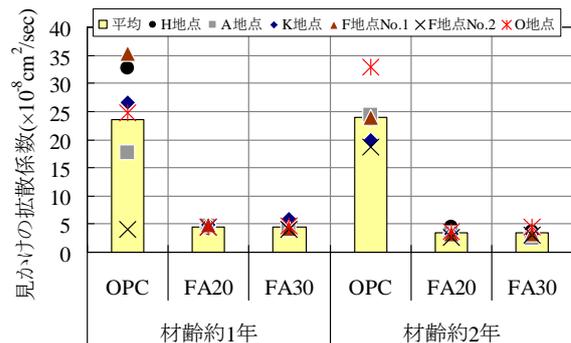


図-7 コアの見かけの拡散係数

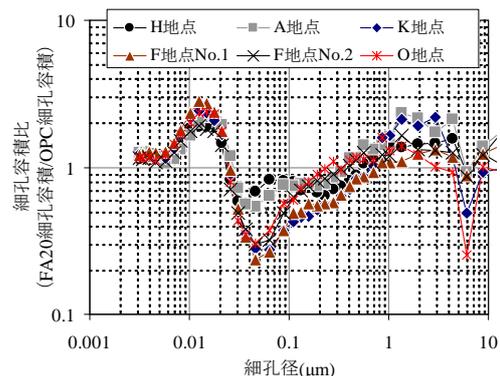


図-8 暴露 2 年目の FA20 と OPC の細孔容積比

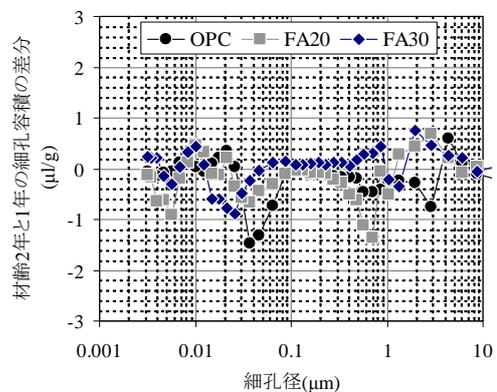


図-9 暴露 1 年目と 2 年目の細孔容積の差 (K 地点)

割合が相対的に小さく、ポズラン反応の進行が遅いことが表れている。

図-9 に K 地点における材齢約 2 年目の細孔径分布と材

齢約1年目の細孔径分布の差分を示す。材齢が1年から2年に増加したのみでは、細孔径分布の微細な領域が増加するという顕著な傾向は見られなかった。上述の様に、同じ暴露環境においてはOPCに比べFA20およびFA30では緻密になっているものの、材齢の増加による各配合の緻密化は確認できなかった。

3.6 コアの比抵抗

(1) 試験方法

採取したコアによる比抵抗（体積抵抗率）計測は、土木学会規準（JSCE K 562-2008³⁾）に準拠し行なった。交流電源で印加する電圧は30V、周波数は70Hzとした。なお、電流および電圧の測定にはデジタルマルチメータを使用した。

コンクリートの比抵抗は温度による影響を大きく受けることが知られている⁴⁾が、本試験は一定温度に保たれた室内で実施されているため、温度の違いによる影響は受けていないと考えられる。

(2) 試験結果

各地点における材齢約1年、2年時点の各配合の比抵抗の変化を図-10に示す。図-10から、FAを混和した配合では、OPCよりも比抵抗が4~10倍以上大きくなっていることが分かる。電氣的抵抗性の観点からは、材齢1年以降でFAを混和した配合のコンクリートでは、OPCよりも電気を通しにくい、すなわち電氣的に緻密な構造となっていることが確認された。また、FA20、FA30では圧縮強度の傾向と同様、寒冷地（H、A地点）では他地点と比較して比抵抗の増加が小さくなることが確認された。これはポゾラン反応の進展が相対的に緩やかであることに起因すると考えられる。また、材齢1年目から2年目にかけては、比抵抗はそれほど変化が見られない。

4. 考察

筆者らは、比抵抗がコンクリートの耐久性評価、特に緻密性の評価に対して非常に有用であると考え、研究を進めている。以下、比抵抗に着目し、暴露された環境条件の違いとコンクリート配合における違いについて考察を加える。

4.1 暴露環境と比抵抗の関係

暴露された環境条件において、コンクリートに最も大きな影響を与える要素の一つは温度であると考えられる。そこで、図-11に積算温度（環境条件の代表的指標）と材齢約1年および2年におけるコアの比抵抗（コンクリート耐久性の指標）の関係を示す。

図-11から同一の配合、同一材齢であれば、比抵抗は暴露環境にかかわらず積算温度と強い正の相関が認められ、積算温度が高いほど比抵抗が大きくなる傾向が確認できる。同一材齢における配合間の違いを比べると、FA

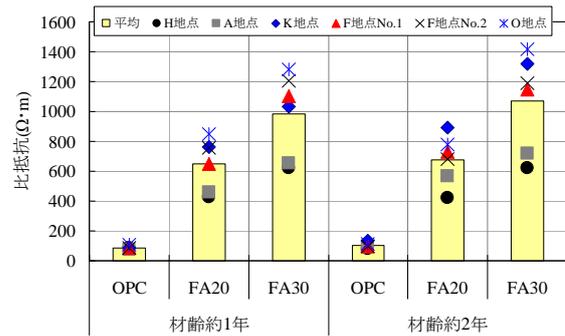


図-10 コアの比抵抗の変化

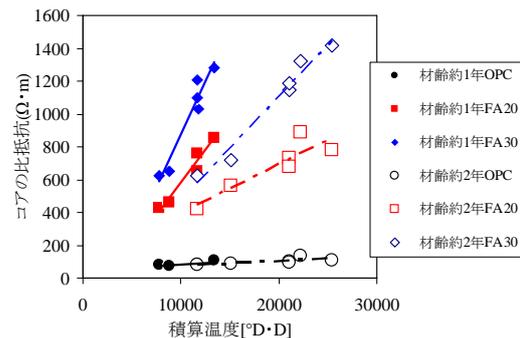


図-11 積算温度と比抵抗の関係

を最も多く混和したFA30において傾きが最も大きくなっており、比抵抗は暴露環境の温度に強く影響を受けていることが分かる。

また、同一配合で材齢1年目と2年目（図-11中実線と破線）を比較すると、材齢2年目では1年目より傾きが小さくなっている。これは、コンクリートの水和およびポゾラン反応の進行が材齢の経過に伴って緩やかとなったため、コンクリートの温度履歴（積算温度）が増加してもコンクリートの緻密さ（比抵抗）がそれほど増加しないと解釈できる。つまり、比抵抗が暴露環境の温度履歴に対して鈍感になっているものと考えられる。この結果は、図-9に示した材齢2年目と1年目の細孔径分布が大きく変化しておらず、水およびポゾラン反応による緻密化が緩やかになっていることと合致する。

また、環境要因として、降雨量と比抵抗の関係についても検討したが、現段階では関連性は認められなかった。

以上より、同一配合のコンクリートでは、比抵抗は積算温度と非常に強い相関関係があり、材齢が経過するほど比抵抗は温度履歴（積算温度）の影響を受けなくなっていくものと推察される。比抵抗はコンクリートの耐久性評価において重要な指標であるため、比抵抗による耐久性評価を行なうための基礎データとして、どの程度の材齢に達すれば比抵抗は温度履歴の影響がなくなるのかを継続的に調査していく。

4.2 比抵抗と細孔径分布の関係

コンクリートの比抵抗は、セメント硬化体の比抵抗と

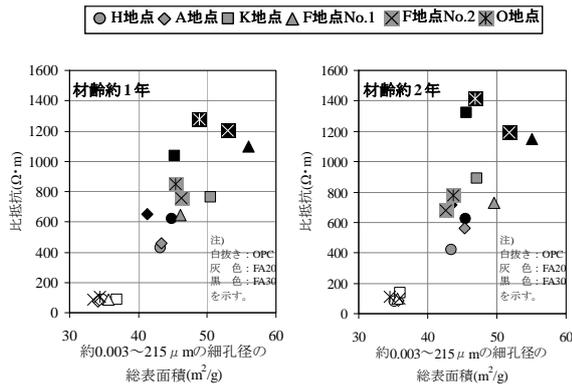


図-12 比抵抗と細孔径表面積の関係

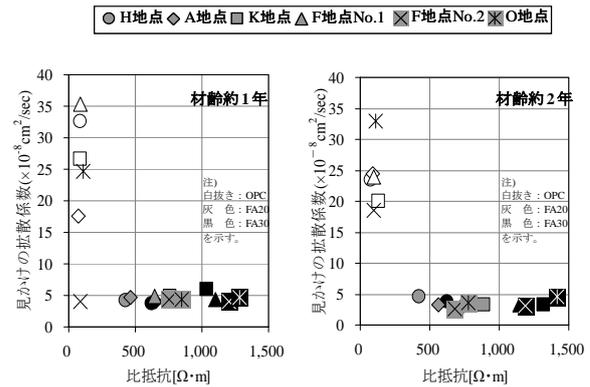


図-13 比抵抗と拡散係数の関係（材齢約1年）

細孔溶液の比抵抗の影響を受けていると考えられる。ここで、セメント硬化体の比抵抗の指標として、水銀圧入法で得られた約0.003~215 μ mの細孔容積から換算した細孔径の表面積総和と採取したコアから得られた比抵抗の関係を図-12に示す。なお、表面積は細孔径を完全な球体と仮定して算出した。

図-12から、いずれの暴露環境、配合条件においても細孔径の表面積総和が大きいくほど比抵抗が大きくなり、細孔径の総表面積と比抵抗の間には正の相関が確認できる。また、FAを混和したコンクリートの比抵抗が大きいのは、ポズラン反応により細孔径の表面積が大きくなる（緻密になる）ことに起因していると考えられる。

比抵抗と細孔径表面積の総和が強い正の相関があることから、コンクリートの比抵抗はコンクリートの細孔径分布（緻密さ）と関連が大きいことが分かる。したがって、比抵抗の測定はコンクリートの緻密さを評価することに非常に有用であると考えられる。

4.3 比抵抗と拡散係数の関係

既往の研究⁵⁾によると、比抵抗と拡散係数には相関関係があり、反比例に近い関係を示すとされている。コアの比抵抗と拡散係数の関係を図-13に示す。図-13より、反比例に近い関係が確認できる。OPCでは、比抵抗の値が同程度でも拡散係数は大きくばらつき、比抵抗から一意に拡散係数を推定することは困難である。FA20およびFA30では、拡散係数は小さいものの比抵抗の大きさととの関連は小さく比抵抗のみで拡散係数を推定することは現時点では困難であった。

拡散係数は暴露環境、材齢および塩化物イオン量に大きく影響を受け変化するものと考えられる。現状では、コンクリート中の塩化物イオンが比抵抗に与える影響は明確となっていないが、比抵抗は暴露環境を表す指標である積算温度および緻密さの指標である細孔径分布と相関が高いため、拡散係数と比抵抗の関連についても継続的に検討していく。

5. まとめ

FAを混和したコンクリートを5箇所の環境条件に暴露し、継続的にコンクリートの耐久性モニタリングを実施中である。現在暴露後2年目までの分析を行っており、そこから得られた結果は以下の通りである。

- 1) FAをコンクリートに混和することで、屋外環境下でもコンクリートの強度は増進していくことを確認した。
- 2) FAを混和したコンクリートは、そうでないものと比較して細孔径が緻密になり、材齢2年までは緻密化が進行し続けていることを確認した。
- 3) コンクリートの比抵抗は積算温度や細孔径分布、拡散係数との相関が強く、比抵抗がコンクリートの耐久性評価に有用であることを確認した。
- 4) コンクリートの比抵抗は温度履歴の影響を強く受けるが、その影響は材齢と共に薄れていくと推察される。

今後、材齢10年までの調査を継続し、屋外暴露環境にあるコンクリートの耐久性評価を実施する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー132 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，2009。
- 2) 土木学会：浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）(JSCE G 572-2010)，2010。
- 3) 土木学会：四電極法による断面修復剤の体積抵抗率測定方法（案）(JSCE G 562-2008)，2008。
- 4) 佐藤道生，酒井隆之，皆川浩，久田真：比抵抗に着目したコンクリートの長期耐久性モニタリング，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，pp.785-790，2011。
- 5) 榎原彩野，皆川浩，久田真：モルタルの電気抵抗率と塩化物イオンの拡散係数との関係に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.789-794，2008。