

論文 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

佐藤 道生*1・酒井 隆行*2・皆川 浩*3・久田 真*4

要旨: コンクリートの健全性を評価する指標としての比抵抗に着目し、長期モニタリングでの比抵抗の経時変化をもとに、フライアッシュを混和することによる効果について述べる。さらに比抵抗に影響を与える因子として温度の影響について述べ比抵抗の温度補正手法を示した他、表面乾燥による影響についても検討を行った。さらに、環境の異なる全国5か所における調査結果をもとに、コンクリートの比抵抗の増加が約0.03 μm 以下の空隙量と相関が高いことを明らかにした。

キーワード: 比抵抗, 電気抵抗, 温度依存性, 乾燥, フライアッシュ, 耐久性

1. はじめに

フライアッシュは、コンクリートに混和することで、長期にわたる強度増進、耐久性の向上、温度ひび割れの抑制、単位水量の抑制などの効果が期待できるが、中性化の進行が大きくなる、 Cl^-/OH^- 比が増加するなど、鉄筋腐食を促進する負の影響も指摘されている¹⁾。また、フライアッシュを使用したコンクリートでは初期養生が耐久性に大きな影響を与えるので、養生の影響を加味した耐久性の評価が重要である。そこで、筆者らは、劣化予測の精度向上に資するデータ取得を目指して、同じ初期養生を施した大型コンクリート供試体（以下大型供試体と記す）を環境の異なる全国5箇所に設置し、10カ年にわたる長期耐久性モニタリング（以下長期モニタリングと記す）を開始した。コンクリート構造物の劣化予想にあたっては、塩化物イオンのみかけの拡散係数などの潜伏期の予測に必要な各種指標の収集・整理とともに、進展期以降の鉄筋腐食進行速度の評価が重要である。そこで長期モニタリングでは、鉄筋の腐食過程を含めた健全度の評価指標である比抵抗（体積抵抗率）に着目し継続的な計測を実施することとした。

本研究では、神奈川県内での計測結果をもとに、コンクリートの比抵抗の経時変化と各因子の影響について検討した。また、長期モニタリングのコア試料を用いて、材齢1年における比抵抗と細孔径分布の関係を評価した。

2. コンクリートの比抵抗に対する温度・乾燥の影響

2.1 概要

岩石を対象とした実験式であるアーチーの式では岩石の比抵抗 ρ_R を下記のように表している²⁾。コンクリートの場合には、配合や材齢及び混和材の使用により変化

する空隙率 ϕ が物性や耐久性を示す指標と考えられるため、乾燥による影響（水飽和度 S ）およびコンクリート温度の影響（間隙水の比抵抗 ρ_W ）を排除する必要がある。

$$\rho_R = a \times \phi^{-m} \times S^{-n} \times \rho_W \quad (1)$$

ここに ϕ : 空隙率, S : 水飽和度, ρ_W : 間隙水の比抵抗, $a \cdot m \cdot n$: 材料に依存する定数

ここでは長期モニタリングのうち、標準的な暴露環境（神奈川県茅ヶ崎市、海岸から約2km内陸）に設置した供試体の計測結果をもとに比抵抗計測時におけるコンクリート温度並びに表面乾燥の影響について報告する。

2.2 長期モニタリング用大型供試体

(1) コンクリート配合及び使用材料

大型供試体のコンクリート配合を表—1に、使用材料を表—2に示す。配合は、水結合材比は55%、フライアッシュ置換率は普通ポルトランドセメントのみ（以下OPC）、フライアッシュ置換率20%（以下Fa20%）、フライアッシュ置換率30%（以下Fa30%）の3水準とした。使用する配合は予め試験練りによりスランプ12cmとなるよう決定した。

(2) 供試体の作製

コンクリートは練混ぜ後、木製型枠内に打設し、幅77cm、高さ54cm、厚さ30cmの大型供試体を作製した。供試体にはステンレス製の比抵抗計測端子を設置している他、深さ3cm及び15cmに温度計測センサーを設置し、温度履歴を計測できるようにしている。

また、経年ごとの物性を詳細に評価するためのコンクリートコアを採取できるものとした。大型供試体の外観を図—1に示す。大型供試体は打設後に乾燥防止のため

*1 電源開発(株) 技術開発センター 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 工修 (正会員)

*2 電源開発(株) 技術開発センター 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 博(工) (正会員)

濡れむしろを掛け、散水養生を1週間実施した後に脱枠を行った。脱枠後は、材齢4週にいたるまで温度変化の少ない室内に静置し、材齢4週以降屋外暴露を開始した。

(3) 圧縮強度試験

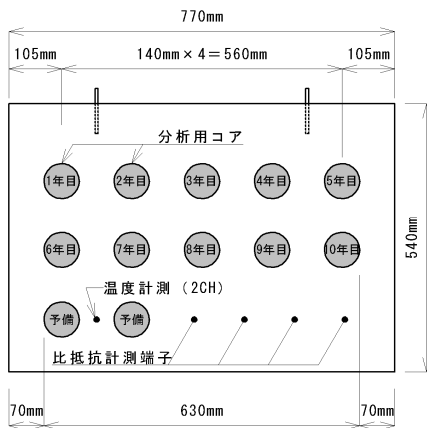
大型供試体の基礎物性を把握する目的で圧縮強度試験を実施した。供試体はφ10×20cmとし、養生は標準

表—1 コンクリート配合

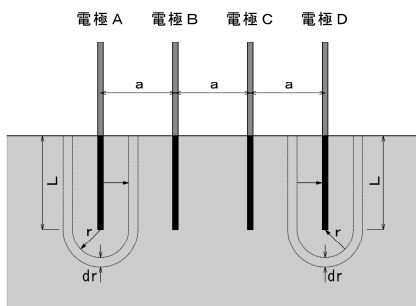
記号	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	F	S	G
OPC	55	0	159	289	0	779	1,144
Fa20%	55	20	151	220	55	785	1,154
Fa30%	55	30	146	186	80	790	1,161

表—2 使用材料

材料名	諸元
普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³ ブレン比表面積 3310cm ² /g
フライアッシュ	密度2.25g/cm ³ ブレン比表面積 3800cm ² /g
細骨材	宮崎産海砂、密度2.57g/cm ³ 吸水率1.30%
粗骨材	玄武岩碎石2005、密度2.85g/cm ³ 吸水率1.58%
混和剤	AE減水剤：リガノール系化合物とホリールの複合体 AE助剤：高アルキルホリオン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体



図—1 大型供試体外観



図—2 供試体内部の電流密度

養生及び現場封緘養生とし、所期の材齢においてJISA1108に準じて試験を実施した。

(4) 比抵抗の計測

供試体内に比抵抗計測用の端子を設置し、4電極法(Wenner法)を参考に実施した。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た。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。供試体の含水率の変化を高周波容量式水分計で計測した。表面の乾燥による影響については、材齢300日頃までは端子の埋込長が10cmであるため影響が少ないと判断し、測定時の供試体への散水は行なっていなかった。しかし、材齢300日以降では表面の乾燥による比抵抗計測値への影響を考慮し、測定前約30分程度供試体表面への散水を十分行なったうえで比抵抗の計測を実施している。

親本ら³⁾は供試体内部の電流密度を図—2のものとし、電極Aから流出して電極Dに流入する電流により電極B、Cに生じる電位差 $\Delta\phi$ を式(2)により算定している。これを参考に端子寸法(a=9cm, L=10cm)を代入し、式(3)により比抵抗 ρ を算定した。

なお、 i は電流(A)、 ρ は比抵抗(Ω m)である。

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

$$\rho = \frac{32.7}{100} \times \pi \times \frac{\Delta\phi}{i} = \frac{32.7}{100} \times \pi \times R \quad (3)$$

2.3 コンクリートの物性変化

(1) 圧縮強度の変化

標準養生を施した供試体についての圧縮強度を図—3に示す。材齢182日時点ではフライアッシュ置換率に応じて圧縮強度が低下し、OPC>Fa20%>Fa30%である。大型供試体近傍に封緘養生した供試体の28日強度は概ね標準養生供試体の28日強度と同等であった。

(2) 温度の変化

大型供試体中心部の温度の経時変化を図—4に示す。打設後硬化に伴い温度上昇しているが、打設後約10日でほぼ室温と一致している。年間を通じた温度の変化は0.1~41.4℃の範囲にあり、中心部(深さ15cm)と表層(深さ3cm)の温度差は最大10.2℃であるが、年間の平均温度では双方の差は0であった。

(3) 比抵抗の経時変化

材齢約400日までの大型供試体の比抵抗の経時変化を図—5に示す。前述のとおりフライアッシュを混和したコンクリートは圧縮強度が小さいが、比抵抗の順位は、Fa30%>Fa20%>OPCとなり、OPCと比較して6~10倍の値を示す。筆者らは細孔溶液のイオン強度と比抵抗の関係を図—6のように整理し、同一水結合材比ではフラ

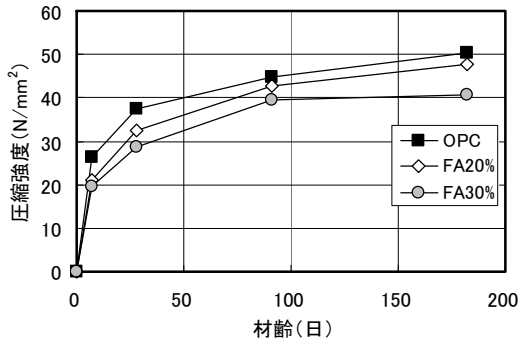


図-3 圧縮強度の経時変化

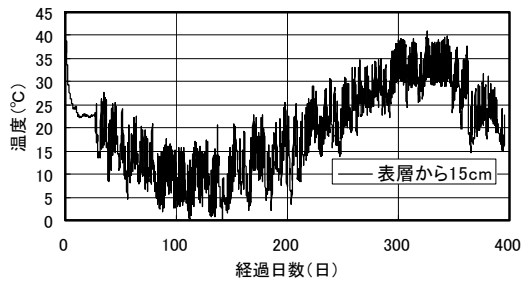


図-4 大型供試体コンクリート温度 (深さ 15cm)

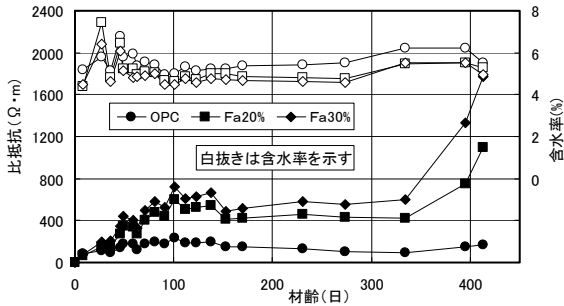


図-5 比抵抗の経時変化 (神奈川県茅ヶ崎市)

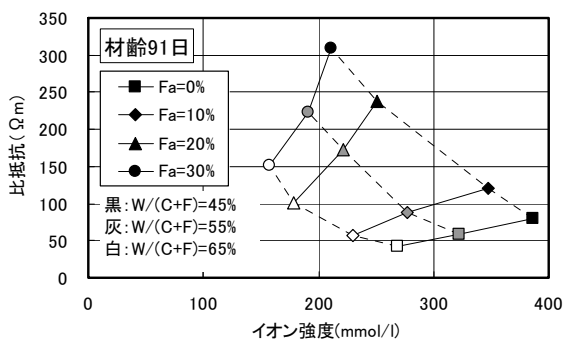


図-6 細孔溶液のイオン強度と比抵抗の関係

表-3 コンクリート配合

記号	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	単位量 (kg/m³)				
			W	C	F	S	G
OPC	55	0	167	304	0	770	1,049
Fa10%	55	10	165	270	30	770	1,048
Fa20%	55	20	159	231	58	776	1,057
Fa30%	55	30	156	199	85	778	1,059

表-4 使用材料

材料名	諸元
普通ポルトランドセメント	密度3.15g/cm³
フライアッシュ	密度2.25g/cm³ ブレン比表面積 3800cm²/g
細骨材	安倍川産陸砂、密度2.59g/cm³ 吸水率2.16%
粗骨材	青梅産碎石2005、密度2.66g/cm³ 吸水率0.44%
混和剤	AE減水剤：リグニルリン酸化合物とポリオール複合体 AE助剤：高7ルチカルキリン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体

イアッシュの混和とともに細孔溶液のイオン強度が低下し比抵抗が増加することを明らかにしている⁴⁾。また、比抵抗はCIの見掛けの拡散係数との相関性が明らかにされている⁵⁾。これらよりフライアッシュの混和による比抵抗の増加は、細孔溶液のイオン強度低下と間隙比の減少に伴う物質透過性の低下を示すものと考えられる。ただし、比抵抗が大きいフライアッシュを混和したコンクリートは含水率が小さい傾向を示すこと、材齢350日以降の比抵抗の伸びは顕著であることを踏まえると、緻密性向上以外の比抵抗増加の要因があるものと推察される。ここでは、比抵抗の計測値に影響する要因として、コンクリート温度及び乾燥の影響について検討を行った。

2.4 比抵抗計測時のコンクリート温度の影響

先に示した結果では材齢330日以降の急激な比抵抗の増加は気温の低下時期と重なっており、気温の影響が大きいと考えられる。ここでは、コンクリート温度による比抵抗の値への影響を評価するための試験を実施した。

(1) 試験方法

10×10×40cm 角柱供試体に比抵抗計測用端子を設置し、同一日にコンクリート温度を湯煎で変化させ、その温度における比抵抗の計測を実施した。コンクリートの配合を表-3に示す。水結合材比及びスランプは大型供試体と同一とし、フライアッシュの影響を把握するため、フライアッシュ置換率を4ケースとした。材料は表-4に示すものを使用した。供試体には比抵抗計測用端子としてφ5mm ステンレス棒を、中心間隔5cmで4本配置した。差込深さは5cmである。比抵抗計測時の電圧は30V、周波数は70Hzとし、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た。

(2) 計測結果

温度別の計測は同時期に実施しているため硬化体組織の変化を無視できることから、温度ごとの比抵抗の変化は細孔溶液の電気伝導率の温度依存性に起因するものと考えた。電気伝導率は比抵抗の逆数であることから、コンクリート温度と比抵抗の逆数の比で計測結果を整理した。計測結果を図-7に示す。材齢56日までのデータであるが、フライアッシュの混和率によらず直線関係を

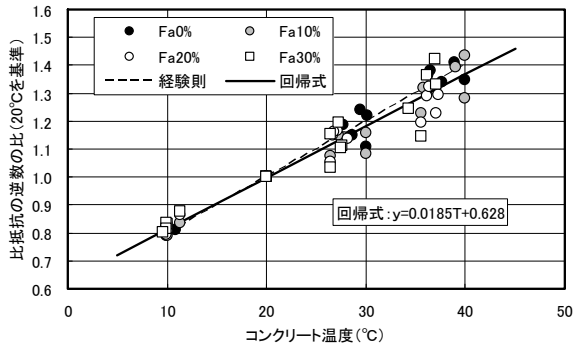


図-7 コンクリート温度による影響

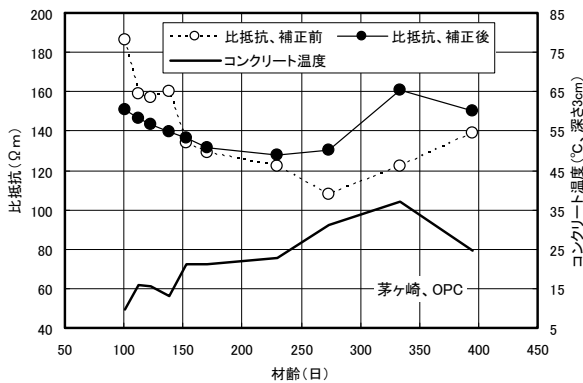


図-8 温度補正の事例

表-5 噴霧による比抵抗の変化

材齢 (日)	表面状態	比抵抗(Ωm)			前1週間の 累積降雨量
		OPC	Fa20%	Fa30%	
334	湿潤前	142	783	1150	0mm
	湿潤後	122	558	781	
	割合	86%	71%	68%	
395	湿潤前	157	1034	1566	25mm
	湿潤後	139	712	1266	
	割合	89%	69%	81%	
413	湿潤前	175	1168	1792	0mm
	湿潤後	159	1039	1672	
	割合	91%	89%	93%	
459	湿潤前	194	1378	2164	59mm
	湿潤後	179	1221	1805	
	割合	92%	89%	83%	

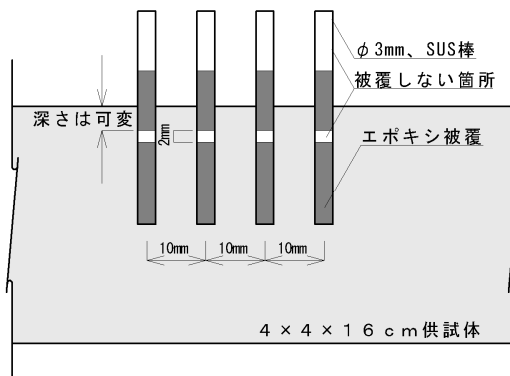


図-9 乾燥による影響評価 供試体概念図

示している。一般に溶液の電気伝導率は1°Cで2%変化するとされている⁹⁾。この経験則による値も図中に併記しているが、試験結果はほぼ同様の結果となっている。

以上より、比抵抗の温度補正は温度補正係数 α_T を乗じることによって算定できる。

$$\rho' = \alpha_T \times \rho = (0.0185 \times T + 0.628) \times \rho \quad (4)$$

ここに、 ρ : 温度補正前の比抵抗 (Ωm), ρ' : 温度補正後の比抵抗 (Ωm), α_T : 温度補正係数, T : コンクリート温度 ($^{\circ}C$)

材齢による物性変化が小さいと考えられる OPC について材齢 100 日以降の計測値を対象に温度補正を行った。図-8 に神奈川県茅ヶ崎地点における大型供試体の比抵抗とコンクリート温度の変化を示す。補正後も若干の変動が見られるものの、その幅は小さくなっている。

2.5 比抵抗計測時の乾燥の影響

(1) コンクリート供試体の計測

比抵抗の計測は晴天時に実施しており、自然の状態では大型供試体のコンクリート表面は乾燥している。乾燥による影響を把握するため、材齢 334 日以降の計測では、自然乾燥の状態と 30 分間断続的に水を霧吹きにより噴霧した後の双方について比抵抗を計測した。計測結果を表-5 に示す。なお、比抵抗は前述の方法により温度補正を行っている。水の噴霧による湿潤作用により、比抵抗は約 70~90%低下する傾向にある。表中には計測前 1 週間の累積降水量を併記しているが、湿潤作用による比抵抗の変化と累積降水量との関係は見られなかった。

(2) モルタルによる乾燥影響の評価

乾燥及び散水による影響がどの程度の深さまで及んでいるかを把握するため、深度ごとの比抵抗を計測できる端子をモルタル供試体中に設置し、表面からの散水前後での比抵抗の変化を計測した。

配合は水セメント比 55%, S/C=3 としフライアッシュは添加しないものとした。使用材料を表-6 に示す。

各供試体には、表面から、0mm, 2mm, 4mm, 6mm, 10mm の5つの深度で幅 2mm のみ導通があるように被覆を施した。供試体の概念図を図-9 に示す。供試体は作製後材齢 4 日まで温度 20°C, 相対湿度 90%以上の湿気箱中で養生し、その後乾燥収縮条件(温度 20°C, 湿度 60%)にて養生を行う。計測は、乾燥状態と表面散水して 1 時間経過し表面水のない状態の 2 回実施した。計測は前述の大型供試体での方法と同様とし、印加電圧は交流 30V, 周波数は 70Hz とした。計測結果を図-10 に示す。

深さ 0 および 2mm では 7 日ごろから、深さ 4,6mm では 112 日から乾燥の影響が出るが、深さ 10mm では乾燥の影響は見られなかった。

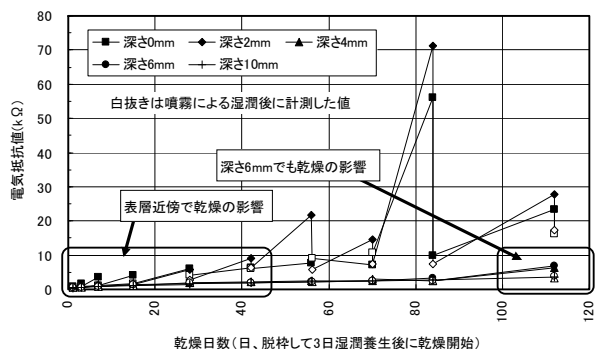


図-10 比抵抗計測時の乾燥及び湿潤の影響

表-7 暴露地点一覧

地点名	環境の特徴	材齢1年までの累積値	
		積算温度 (°D・D)	総降雨量 (mm)
北海道本別町	寒冷地, 内陸部	7,310	815
青森県大間町	寒冷地, 海洋環境	7,820	1299
神奈川県茅ヶ崎市	温帯地域, 内陸部, 標準的環境	10,600	1775
福岡県北九州市	温帯地域, 海洋環境	10,560	1736
沖縄県うるま市	亜熱帯地域, 海洋環境	12,450	2841

※積算温度は、[コンクリート温度計測値+10°C]の総和として計算した

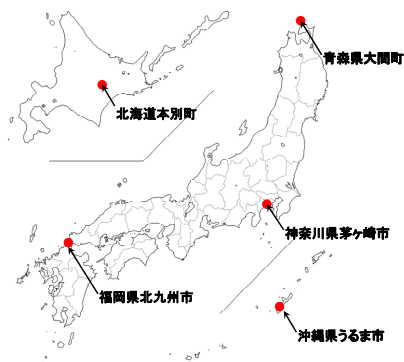


図-11 長期モニタリング実施箇所

表-8 材齢1年における比抵抗

地点名	測定日	コンクリート 温度(°C)	温度補正 係数	比抵抗 (Ωm)		
				OPC	Fa20%	Fa30%
北海道本別町	H22.11.10	10.7	0.83	194	789	1,054
青森県大間町	H22.10.19	13.2	0.87	188	983	1,331
神奈川県茅ヶ崎市	H22.10.25	24.5	1.08	150	770	1,369
福岡県北九州市	H22.10.8	28.0	1.15	178	797	1,111
沖縄県うるま市	H22.10.12	30.7	1.20	193	982	1,412

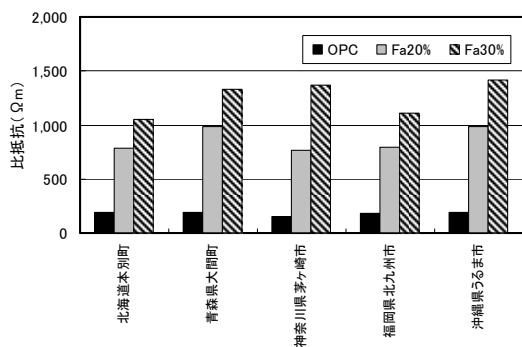


図-12 材齢1年における比抵抗

(3) まとめ

モルタル供試体では表面から数 mm の範囲では乾燥の影響を受けていることがわかった。モルタル配合とコンクリート配合との相違や、長期材齢で更に深部まで乾燥した場合含水率の回復にどの程度の時間を要するのか等については今後の課題としたい。

3. 大型供試体の長期物性の変化

3.1 概要

ここでは長期モニタリングの結果をもとに、材齢1年における大型供試体の比抵抗の変化と、比抵抗に影響を与えると思われる細孔径分布との関係について述べる。

3.2 長期モニタリング用大型供試体

長期モニタリングの供試体は2章で説明したものと同一材料を使用し、同様の方法で作製、設置を行っている。モニタリング実施地点を表-7、図-11に示す。

3.3 長期モニタリングの材齢1年時点の計測結果

(1) 比抵抗の計測結果

表-8及び図-12に各地点の材齢1年における比抵抗の計測結果を示す。当初ボゾラン反応の温度依存性を考えると積算温度に比例して比抵抗が増加するものと予想されたが、比抵抗の地域間での差は小さく、比抵抗と積算温度、降雨量との明瞭な関係はなかった。寒冷地での比抵抗が小さくならなかった理由として、一般に初期養生温度が低いと長期強度の伸びが大きくなる傾向があること、降雨による水の供給の違いが考えられるが、詳細は今後のモニタリングを通じて検証する予定である。

(2) 細孔径分布と比抵抗の関係

比抵抗と組織の緻密さとの関係を評価するために、細孔径分布の計測を行った。細孔径分布の測定用試料は、コア表面から2~3cm付近をダイヤモンドカッターで切り出してアセトン浸漬した後モルタル部分を1辺5mm程度の小片とし、真空乾燥したものをを用いた。

細孔径分布の計測結果を図-13~15に示す。フライアッシュを添加した試料は細孔直径が0.03 μm以下の細孔容積の増加が顕著であり、温暖な地域ほど細孔直径が0.03 μm以下の細孔容積が大きい傾向を示す。北海道や青森など寒冷な地域については、細孔直径が0.03~0.11 μm程度の区間の細孔容積の増加が顕著である。岡本ら⁷⁾はモルタルによる試験結果をふまえ、凍結融解による微視的破壊により約0.1~1.0 μm付近の細孔が増加するとしている。今回の結果から凍結融解による内部組織の変化と判断はできないが、今後継続して評価を行うこととしたい。細孔径を3つに区分し、それぞれの区間の細孔容積と比抵抗の関係を整理すると、図-16の通りとなる。比抵抗は0.026 μm以下の細孔容積と正の相関を示すが、0.031~0.11 μmの細孔容積とは負の相関を

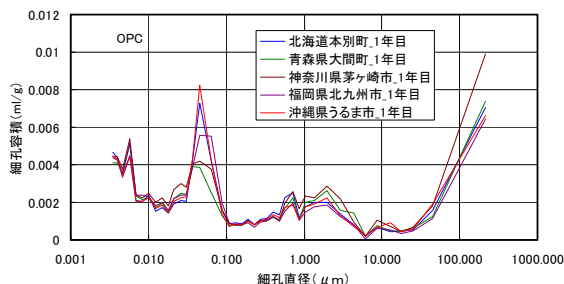


図-1 3 細孔径分布 (OPC, 材齢 1 年)

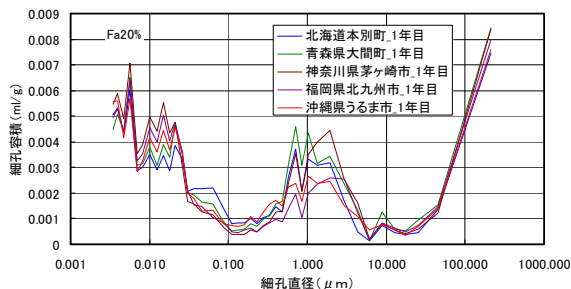


図-1 4 細孔径分布 (Fa20%, 材齢 1 年)

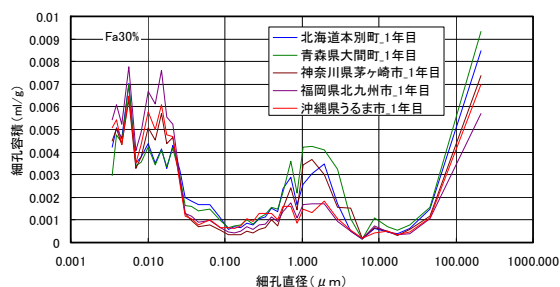


図-1 5 細孔径分布 (Fa30%, 材齢 1 年)

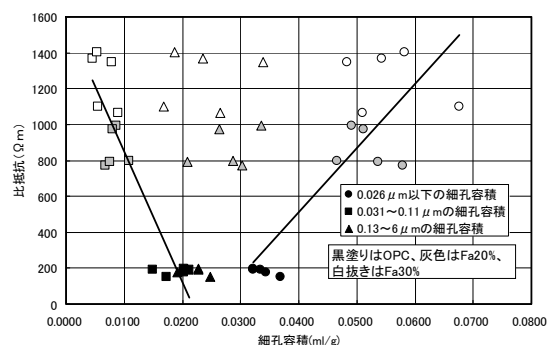


図-1 6 細孔容積と比抵抗の関係

示し、 $0.13 \sim 6 \mu\text{m}$ の細孔容積とは明確な相関を示さない。山本らの調査結果⁸⁾を踏まえると、フライアッシュ周辺に形成された練混ぜ余剰水に起因する空隙がポゾラン生成物に充填され、細孔径 $0.026 \mu\text{m}$ 以下の細孔容積が増加した結果、比抵抗の増加につながったものと推察される。

4. まとめ

フライアッシュを混和したコンクリートを対象に長期モニタリングを実施し、比抵抗をはじめとする耐久性評価を行った。その結果は下記の通りである。

- 1) フライアッシュを混和したコンクリートは普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより圧縮強度が小さい場合であっても、耐久性の評価指標となり得る比抵抗は 6 から 10 倍に達する。
- 2) コンクリート温度の比抵抗への影響を評価し、温度補正係数を提案した。
- 3) 比抵抗は乾燥の影響により 2~3 割程度値が変動する。乾燥の影響範囲は表層から数 mm の範囲であり本研究のように物質透過性を比抵抗で評価する場合は計測前の十分な湿潤工程は必須である。
- 4) 全国 5 箇所で行っている暴露試験の結果、比抵抗と $0.026 \mu\text{m}$ 以下の細孔容積と関係があり、物質透過性と関係があるものと推察された。

謝辞 本研究の遂行にご協力をいただきました東北大学大学院工学研究科喜多雄士君に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリ 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) Arcie, G.E.: the electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, 146, pp54-62, 1942
- 3) 親本俊憲ほか：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, pp907-912, 2005
- 4) 佐藤道生ほか：フライアッシュを混和したコンクリート及びモルタルの比抵抗の経時的変化, コンクリート工学年次論文集, vol.32, No.1, pp695-700, 2010
- 5) 皆川浩ほか：コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, 66(1), pp119-131, 2010
- 6) 日本工業規格 JIS K1030, 電気伝導率測定方法通則, 2008
- 7) 岡本修一, 魚本健人：コンクリートの凍結融解性状に関する基礎的研究(2), 生産研究, Vol.48, No.12, 1996.
- 8) 山本武志, 金津努：フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, 63(1), pp.52-65, 2007