

報告 有機系短繊維の混入率の違いがフレッシュ状態の繊維補強モルタルの電気的性質に与える影響

加藤 大基*1・鎌田 敏郎*2・内田 慎哉*3・稲熊 唯史*4

要旨：本研究では、有機系短繊維を混入したフレッシュモルタル内の繊維混入率の違いを非破壊で評価する上で適した評価指標を見出すことを目的とした。非破壊評価の手法としては、フレッシュモルタルと有機系短繊維の電気的性質が大きく異なることに着目し、電気的計測を採用した。LCR メータにより計測した電気抵抗、あるいは電気抵抗から算出した電気伝導率に着目することにより、有機系短繊維を混入したフレッシュモルタル内の繊維混入率の違いを非破壊で評価できる可能性を見出した。

キーワード：有機系短繊維補強モルタル、繊維混入率、非破壊評価、電気抵抗、電気伝導率

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリートなどの繊維を混入したセメント系材料を用いた部材あるいは構造物を施工する場合、設計で仮定した安全性や使用性などの性能を確保するためには、打設時において部材内で繊維が均一に分布していることが重要である。そのため、この種類の材料においては、繊維の配向や分布の状況を把握する意義は大きい。しかしながら、これを実現できる現実的な手法が確立されていないのが現状である。そのため、現状では、打設時に別途作製した供試体での圧縮強度や引張強度を把握することにより、部材の力学的性能を間接的に評価しているに過ぎない¹⁾。

そこで、本研究では、繊維の分布状況を評価するための基礎研究として、有機系短繊維を対象に、フレッシュな状態での繊維補強モルタル内での繊維混入率の違いを非破壊で把握する上で適した評価指標を見出すことを目的とした。本研究では、非破壊評価の手法としては、フレッシュモルタルと有機系繊維の電気的性質が大きく異なることに着目し、LCR メータによる電気的計測を採用することとした。具体的な検討手順としては、まず、フレッシュ状態のモルタル供試体を対象に、硬化に伴う電気的性質の変化傾向を確認するとともに、電気的性質のばらつき程度（再現性）を把握した。最後に、有機系短繊維の混入率にバリエーションを設けたフレッシュ状態の繊維補強モルタルを対象に、LCR メータによる電気的性質の計測を行い、繊維混入率の違いが電気的性質に与える影響を把握した。

2. 計測により得られる電気的性質の再現性の把握

2.1 使用材料と配合

モルタルの配合を表-1 に示す。セメントには、早強セメントを使用した。水セメント比は55%とし、混和剤をセメント質量に対して 0.25%添加した。

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
	水 W	セメント C	細骨材 S	混和剤 A
55	214	389	1555	0.972

2.2 電気的計測の概要

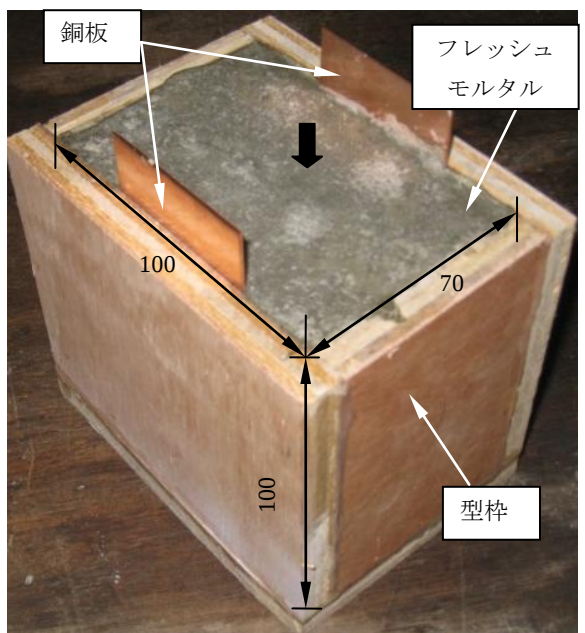
写真-1 に型枠および試料の概要を示す。この図に示すように、幅および高さを 100mm、長さを 70mm とした木製の型枠を作製した。木製型枠の両断面（幅および高さを 100mm の断面）部分には、幅 50mm×高さ 120mm×厚さ 1mm の銅板をそれぞれ設置している。実験は温度 20℃ の室内で行い、モルタルを練り混ぜた直後に、型枠に投入した。LCR メータによる電気的性質の計測状況の概要を**写真-2** に示す。型枠内に設置した 2 つの銅板を電極（電極間距離は約 70mm）として、試料の電気的性質の計測を LCR メータにより行った。この計測は、型枠に試料が投入された直後から 3 時間が経過するまでの間、30 分間隔で実施した。各計測における測定周波数は、周波数の違いが電気的性質に与える影響を把握するため、1Hz、10Hz および 1kHz の 3 ケースに設定した。測定周波数ごとに、電気的性質である静電容量および電気抵抗の計測をそれぞれ行った。また、電気的性質の再現性を把握することを目的に、前述の実験条件を同じにした状態で、2.1 に示す使用材料と配合により再度モルタルを製作し、LCR メータによる計測を前述の計測条件で行った。この作業を計 3 回繰り返し、電

*1 大阪大学 工学部地球総合工学科 (学生会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

*3 佐賀大学大学院 工学系研究科都市工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*4 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社 調査事業部開発技術部課長 博士(工学) (正会員)



↓ : 打設方向 [単位:mm]

写真-1 型枠および試料の概要

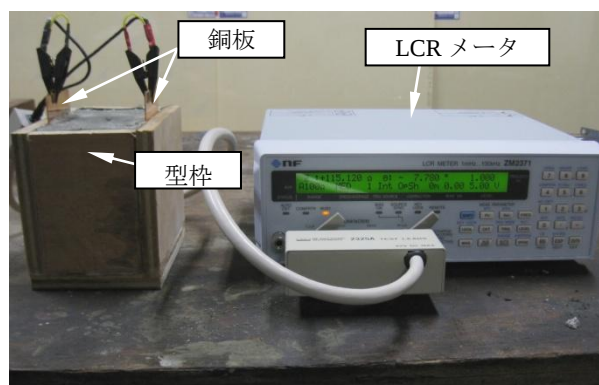


写真-2 計測概要

気的性質のばらつきを把握することとした。

2.3 計測結果および考察

測定周波数 1Hz, 10Hz, 1kHz で計測した静電容量および電気抵抗を表-2 および表-3 にそれぞれ示す。表-2 に示す静電容量は、いずれの測定周波数および測定

表-2 静電容量の計測結果

			打設直後からの経過時間 (hour)						
			0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
測定周波数	1Hz	1 回目	23.10	22.00	20.57	19.93	19.56	17.33	17.10
		2 回目	21.60	21.86	21.09	20.00	19.65	19.31	18.87
		3 回目	22.64	21.92	22.14	22.10	22.14	22.11	21.81
		平均	22.45	21.93	21.27	20.68	20.45	19.58	19.26
	10Hz	1 回目	5.23	4.32	4.17	4.11	3.87	3.53	3.47
		2 回目	4.70	4.53	4.31	4.27	3.99	3.86	3.43
		3 回目	5.41	4.69	4.09	4.01	3.99	3.89	3.66
		平均	5.11	4.51	4.19	4.13	3.95	3.76	3.52
	1kHz	1 回目	0.523	0.416	0.411	0.259	0.344	0.324	0.312
		2 回目	0.441	0.444	0.416	0.384	0.378	0.365	0.369
		3 回目	0.571	0.555	0.570	0.567	0.543	0.511	0.513
		平均	0.511	0.472	0.466	0.404	0.421	0.400	0.398

表-3 電気抵抗の計測結果

			打設直後からの経過時間 (hour)						
			0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
測定周波数	1Hz	1 回目	58.41	61.79	62.08	62.26	62.71	62.79	62.05
		2 回目	61.38	63.47	54.43	64.87	65.00	65.72	65.74
		3 回目	61.27	60.38	61.57	62.32	62.46	62.34	62.25
		平均	60.35	61.88	59.36	63.15	63.39	63.61	63.35
	10Hz	1 回目	54.71	58.14	58.51	57.58	58.59	58.02	59.61
		2 回目	57.07	60.58	60.62	60.78	61.10	61.65	60.45
		3 回目	55.08	55.85	56.87	57.48	57.52	57.50	57.56
		平均	55.62	58.19	58.67	58.61	59.07	59.06	59.21
	1kHz	1 回目	49.56	52.78	53.06	51.95	52.56	52.25	51.85
		2 回目	51.13	53.42	54.49	54.93	54.35	54.65	54.39
		3 回目	51.10	51.21	52.40	52.98	53.11	53.13	53.30
		平均	50.59	52.47	53.32	53.29	53.34	53.34	53.18

回数においても、時間の経過に伴って概ね減少傾向にあることがわかる。これに対して、表-3 に示す電気抵抗は、時間が大きくなると増加する傾向を示した。

このような電気抵抗の傾向は、既往の研究²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾でも確認されている。ここで、各計測で得られたそれぞれの電気的性質のばらつき程度を把握することを目的に、電気的性質ごとに、1 回目から 3 回目までの平均値をそれぞれ算出した。求めた結果を表-2 および表-3 にそれぞれ示す。表-2 に示す静電容量では、いずれの測定周波数においても、計測回数ごとに得られたそれぞれの値は、平均値に対して最大で±10%以上のばらつきを有していることがわかる。一方、表-3 に示す電気抵抗は、3 回の平均値に対して概ね±3%の範囲にあることが確認できる。したがって、本研究の範囲内では、静電容量のばらつきは大きいものの、電気抵抗のばらつきは小さく再現性が極めて高いことを明らかにした。この結果を踏まえて、次章での LCR メータによる電気的性質の計測では、電気抵抗のみに絞ることとした。

続いて、測定周波数の違いが電気的性質に与える影響を把握するため、各電気的性質において算出した平均値を用いて、各経過時間における電気的性質と測定周波数との関係をまとめることとした。ここでは、代表的な経過時間として、0、1、2 および 3 時間での結果を図-1 から図-4 にそれぞれ示す。いずれの経過時間においても、測定周波数が大きいと電気抵抗が小さくなっていることがわかる。野田ら⁶⁾の既往の研究によれば、硬化コンクリート供試体を対象として、LCR メータで計測した電気抵抗から算出した比誘電率は、測定周波数が大きくなると比導電率（電気伝導率）は大きくなることが示されている。通常、電気伝導率と電気抵抗の関係は反比例の関係（本研究の式(1)参照）⁷⁾にあることから、本研究における測定周波数と電気抵抗との関係は、野田らの実験結果と同様の傾向を示し、フレッシュなモルタルにおいても周波数依存性があることを明らかにした。

3. 繊維混入率の違いがフレッシュ状態の繊維補強モルタルの電気的性質に与える影響

3.1 使用材料と配合

有機系短繊維の混入率の違いが電気的性質に与える影響を把握するため、表-1 に示すモルタルに外割で短繊維を 1%および 2%混入させた供試体を打設した。また、比較のため、短繊維を混入していないモルタルも併せて作製した。以降これらをそれぞれ、1%、2%および 0%供試体と呼ぶこととする。使用した短繊維は、ビニロン繊維で、繊維直径 0.66mm、繊維長 30mm、密度：1.3g/cm³である（写真-3 参照）。

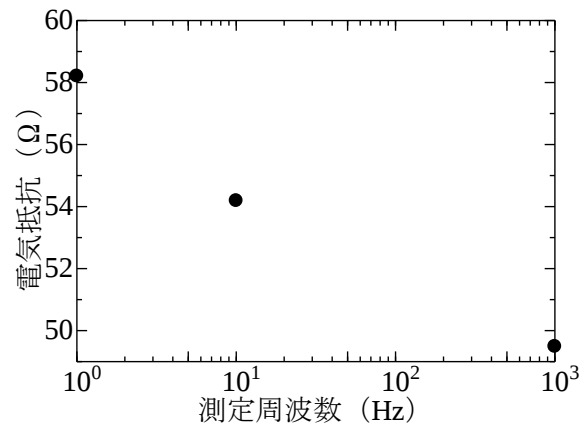


図-1 0時間経過時点での電気抵抗と測定周波数との関係

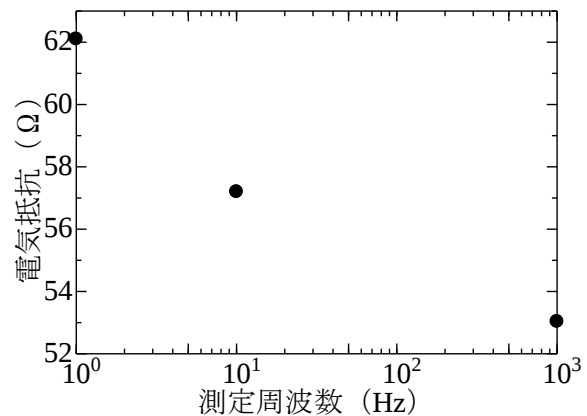


図-2 1時間経過時点での電気抵抗と測定周波数との関係

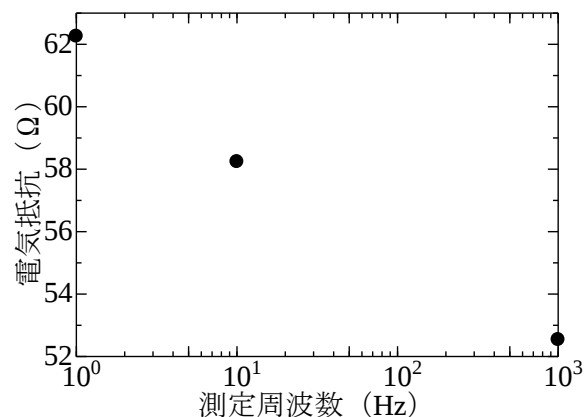


図-3 2時間経過時点での電気抵抗と測定周波数との関係

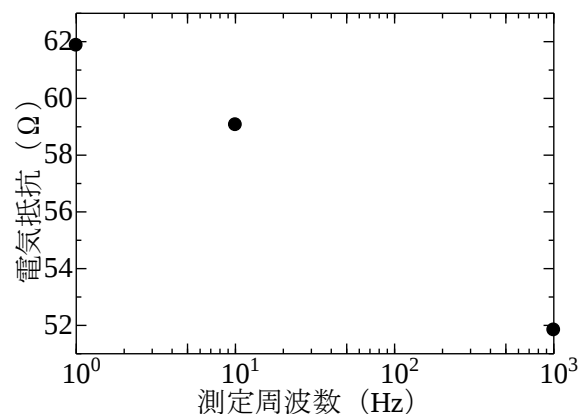


図-4 3時間経過時点での電気抵抗と測定周波数との関係



写真-3 有機系短繊維の外観

3.2 電気的計測の概要

型枠の寸法、計測手順および方法は、2.2 とほぼ同様である。ただし、LCR メータによる計測項目（電気的性質）は、電気抵抗のみである。

3.3 実験結果および考察

測定周波数 1Hz, 10Hz, 1kHz で計測した電気抵抗の計測結果を図-5 から図-7 にそれぞれ示す。

図から明らかとなっており、いずれの測定周波数においても、電気抵抗は繊維混入率の違いに関わらず、時間の経過に伴って概ね増加する傾向を示していることがわかる。しかも、いずれの測定周波数においても、有機系短繊維の混入率が大いとき、電気抵抗も大きくなっていることが同時に把握できる。これは、有機系短繊維（ビニロン繊維）の電気抵抗 $[=1.3 \times 10^{11}]^9$ がモルタルのそれ（表-1 参照）と比べて極めて大きいことが主な原因と考えられる。ここで、この考察を検証するため、LCR メータで計測した電気抵抗から電気伝導率を次式により算出することとした。

$$\kappa = L/RA \quad (1)$$

ここで、 κ ：電気伝導率(mS/cm)、 R ：電気抵抗(Ω)、 L ：試料の長さ(mm)、 A ：試料の断面積(100mm×100mm)：(mm²)である。式(1)に算出した電気伝導率を測定周波数ごとに図-8から図-10に示す。図より、電気伝導率は、いずれの測定周波数においても概ね一定の値になっていることが明らかとなった。しかも、繊維の混入率が大いの方が、電気伝導率は小さくなっていることも同時に確認することができる。これより、電気伝導率の結果からも、繊維の有無や量の程度が把握できる可能性があることがわかる。ただし、電気抵抗および電気伝導率ともに、測定周波数により得られる値が異なっている。したがって、今後は、有機系短繊維の混入率の違いを適確に評価するための、最適な測定周波数についての検討も行う必要がある。また、

繊維混入率と電極間距離の関係も把握し、電気的性質を利用した繊維混入率、繊維の配向および分布状況の非破壊評価手法を確立する予定である。なお、本研究では、一定温度の条件のもとで LCR メータによる計測を行ったため、電気伝導率の温度補正⁹⁾を行っていない。そのため、手法確立に向けての今後の追加実験では、

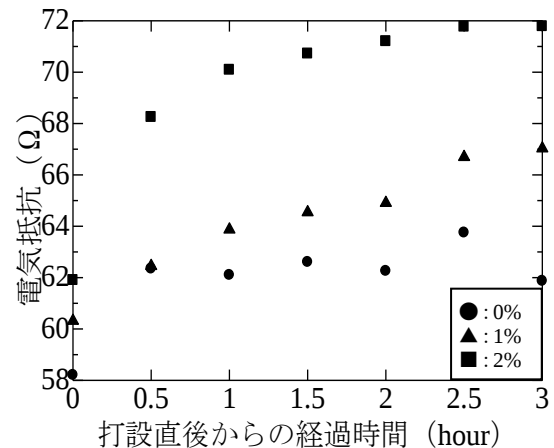


図-5 電気抵抗の計測結果(測定周波数 1Hz)

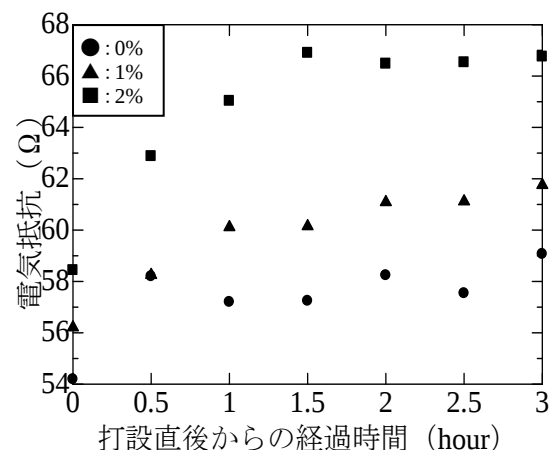


図-6 電気抵抗の計測結果(測定周波数 10Hz)

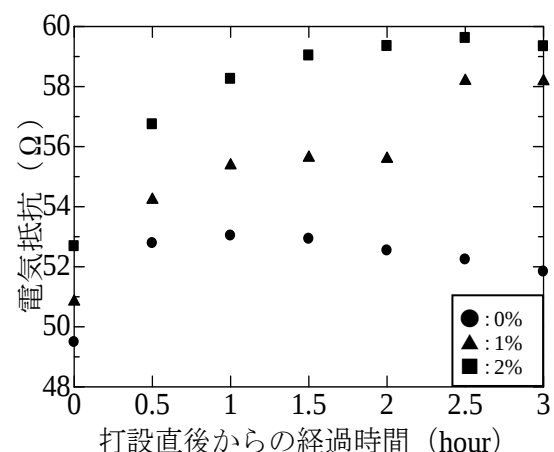


図-7 電気抵抗の計測結果(測定周波数 1kHz)

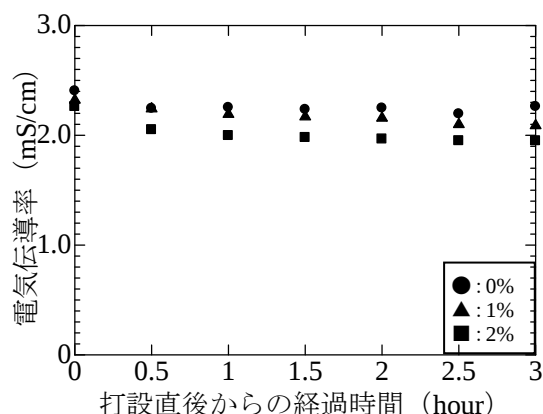


図-8 電気伝導率の算出結果(測定周波数 1Hz)

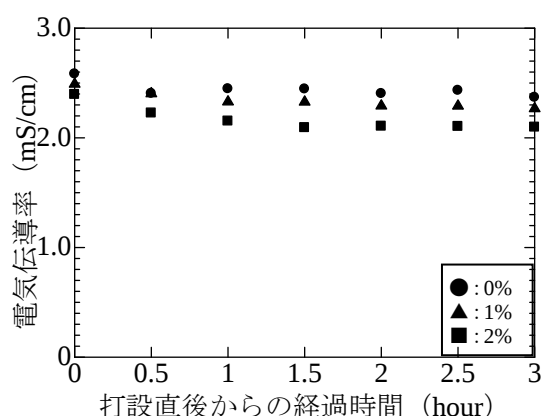


図-9 電気伝導率の算出結果(測定周波数 10Hz)

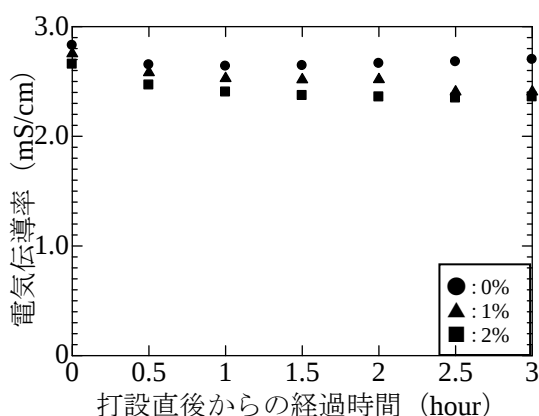


図-10 電気伝導率の算出結果(測定周波数 1kHz)

2.3 で得られた $\pm 3\%$ 程度の電気抵抗のばらつきを低減するために外気温ならびに水和熱による電気伝導率の温度補正について検討を実施する予定である。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 有機系短繊維を混入していないフレッシュ状態の

モルタル 3 体を対象に、LCR メータにより静電容量および電気抵抗の計測を行った結果、モルタルの硬化に伴って、電気抵抗が大きくなる傾向を示した。しかもこの 2 つの電気的性質は、各供試体において同時刻に計測したそれぞれの値は、これらの平均値に対して概ね $\pm 3\%$ の範囲にあった。したがって、本研究で計測した電気抵抗のばらつきは小さく、再現性が高いと考えられる。

- (2) 有機系短繊維の混入率が高い方が、電気抵抗が大きくなることがわかった。これは、有機系短繊維の電気伝導率がモルタルのそれと比較して小さいことが主な原因と考えられる。
- (3) LCR メータにより計測した電気抵抗、あるいは電気抵抗から算出した電気伝導率に着目することにより、有機系短繊維を混入したフレッシュモルタル内の繊維混入率の違いを非破壊で評価できる可能性を見出した。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー 113，pp.69-70，2004
- 2) 大岸佐吉，小野博宣，文 堅：セメント硬化体の電気抵抗と電気容量に及ぼす測定条件の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp.389-392，1990.6
- 3) 大岸佐吉，小野博宣，文 堅：セメント硬化体の電気抵抗に及ぼすセメント種別，調査および空気量の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.435-440，1991.6
- 4) 大岸佐吉ほか：コンクリートの電気的特性の研究・報告 1（電気抵抗に及ぼす各種実験要因の影響），日本建築学会東海支部研究報告集，No.29，pp.17-20，1991.2
- 5) 大岸佐吉ほか：コンクリートの電気的特性の研究・報告 2（電気抵抗に及ぼす資料寸法，空気量等の影響），日本建築学会東海支部研究報告集，No.29，pp.21-24，1991.2
- 6) 野田一弘，河野広隆，久田 真，森濱和正：交流作用時の硬化コンクリートの電気的性質に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.575-580，2003.6
- 7) 黒沢達美：電流と電気伝導，共立出版，pp.1-8，1983.10
- 8) 大沼亥久三ほか：繊維 [3 訂版]，東京電機大学出版局，p.16，1986
- 9) 村上 拡，阿保寿郎，伊与田岳史：コンクリー

ト論文の新たな凝結管理手法の有効性に関する
検討，コンクリート構造物の補修，補強，アッ

ブグレード論文報告集， Vol.11， pp.87-92，
2011.10