

論文 コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究

鹿島孝之^{*1}・河野広隆^{*2}・渡辺博志^{*3}・田中良樹^{*4}

要旨：コンクリートの比抵抗の測定値から、耐久性を判断する方法が検討されている。しかし、この比抵抗は電圧、周波数、電極の種類、水セメント比、含水率、塩分含有量等、さまざまな条件の影響を受けるため、比抵抗による耐久性評価に対する信頼性は明確とはなっていない。ここではコンクリートの比抵抗による耐久性評価の可能性を見いだすため、測定条件を変化させながら、種々のコンクリートの比抵抗を測定し、測定条件の及ぼす影響や耐久性との関連性について検討を行った結果を示す。

キーワード：比抵抗、耐久性、測定条件、塩分浸透性、拡散係数

1. はじめに

コンクリート構造物を長期間活用し、しかも、将来の維持管理コストの低減を行っていくためには、コンクリートの物性を正確に把握することが必要になってくる。そのためには、竣工、維持管理時に硬化コンクリートの品質を評価することは重要である。その中でも我が国では特に、塩分浸透性は耐久性を評価する上で重要な指標となる。

塩分浸透性を評価する方法としては、コアコンクリート中の塩分分析結果から、塩分の浸透深さや拡散係数を推定する方法や、急速塩分浸透試験（RCPT 試験 ASTM C1202）等がある。しかし、これらの試験を行うにはコンクリート構造物にコア抜きあるいはドリルによる穴あけを行うため、損傷の著しい構造物でない限りはできればさけたい手法であり、労力コストの点からも測定点数は自ずと制限されてくる。

コンクリートの比抵抗の測定は、その測定方法が比較的簡易なことから、塩分浸透性を評価する手法として、実用化が期待されている。既往の研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾で、比抵抗は塩分浸透性との相

関について明らかにされているが、その測定条件が及ぼす影響については必ずしもまだ十分なデータが得られていない。また、計測はコンクリートを飽水状態に調整するのが一般的であり、現地での計測を考えた場合の含水状態の影響については、まだ不明な点が多い。

本研究では、硬化コンクリートの耐久性に係る塩分浸透性を評価するための手法として比抵抗に着目し、まずその測定条件がどの程度、比抵抗の計測に影響を及ぼすかを確認するため、シリーズⅠで測定法の検討を行い、シリーズⅡで測定条件の検討を行った。さらに、シリーズⅢで室内塩分浸透試験の塩分分析の結果から求めた拡散係数と比抵抗の関係を示し、比抵抗による耐久性評価の可能性を検討した。

2. シリーズⅠ

比抵抗の測定値は測定条件によって変動する。比抵抗の測定値に対する信頼性を高めるためには、測定条件の及ぼす影響を明確にしなければならない。ここでは測定条件のうち特に電氣的な部分に着目し、直流、交流の違い、電極の接

*1 建設省土木研究所コンクリート研究室 交流研究員 工修（正会員）

*2 建設省土木研究所コンクリート研究室 室長 工修（正会員）

*3 建設省土木研究所コンクリート研究室 主任研究員 工修（正会員）

*4 建設省土木研究所コンクリート研究室 研究員（正会員）

続条件の違いが、比抵抗を計測する際、どのように影響を及ぼすかを確認した。

2. 1 実験概要

早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を 30%, 55% とした。

φ100×200mm の円柱供試体を材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日まで水中養生を行った後、湿式切断（厚さ 50mm）した。

2. 2 結果と考察

(1) 交流、直流の違い

図-1 に示す装置によりコンクリート供試体の抵抗計測を交流と直流で行った結果を図-2 に示す。交流では計測開始後、比抵抗はすぐに収束してほぼ一定値を示す。しかし、直流では比抵抗（電流）の収束する時間は遅く、その抵抗値も交流より大きいことが確認できる。また、直流による測定では、高電圧で測定後に同一供試体を用いて、低電圧で再測定すると、前回計測の電位差が影響し、正しく比抵抗を測定できなかった。

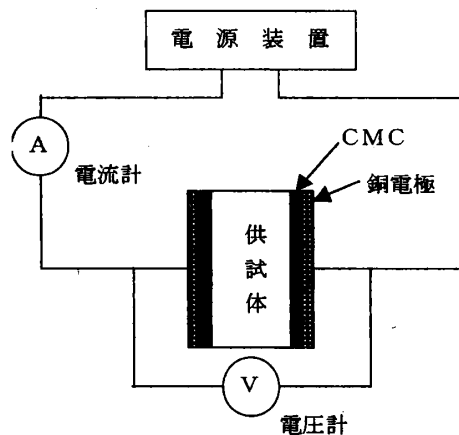


図-1 実験装置

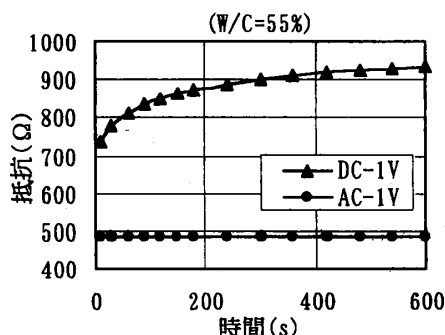


図-2 交流と直流の経時変化

(2) 電極の接続条件の違い

電極はメッシュ状の銅電極を使用し、供試体の端面に取り付けた。電極の接続条件の違いによる比抵抗への影響を確認するため、以下のものを比較した。

- ①カルボキシル・メチル・セルロースを塩化ナトリウムの 5% 溶液で練混ぜてゲル状にした物質（以下、CMC とする）を供試体と銅電極の間に塗布。
 - ②上記の CMC から塩分を除いたものを供試体と銅電極の間に塗布。
 - ③RCPT 試験の実験装置と同じ装置を用い、供試体と銅電極が蒸留水で満たされているもの。
- その結果を図-3, 4 に示す。バラツキはあるものの平均して、②では 100Ω 程度、③では 400Ω 程度高い抵抗値が①に比べて計測された。

以上の結果により、また分極、容量成分等の影響を小さくするため、シリーズⅡ, Ⅲでは、電源装置として既往の文献でも良く使用されている交流(1kHz)を中心に計測を行い、電極と供試体の接続には CMC（塩分有り）を使用することにした。

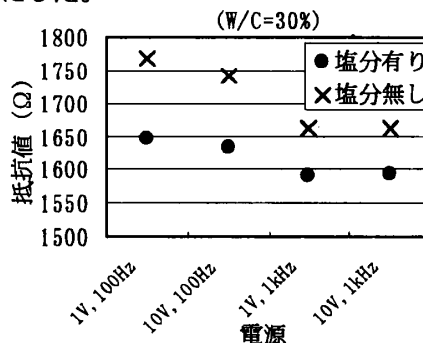


図-3 接続条件の比較 (CMC の塩分の有無)

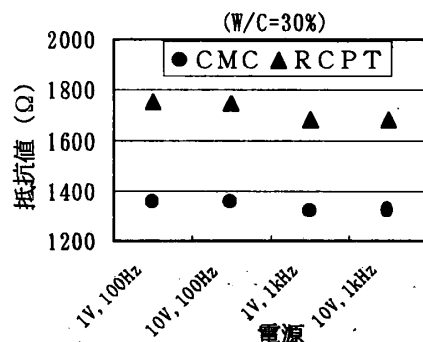


図-4 接続条件の比較 (CMC と RCPT 方式)

3. シリーズⅡ

現地でのコンクリート構造物の耐久性を比抵抗で判断する場合、種々の測定条件が変動する。このため、どのような測定条件が、どの程度比抵抗に影響を及ぼすのかを確認しておく必要がある。ここでは、コンクリート供試体の条件及び交流電圧の条件である電圧、周波数の影響を調べた。

3. 1 実験概要

(1) 配合

普通ポルトランドセメントと高ビークライト系セメントを使用し、水セメント比を 25%, 30%, 40%, 55% として、表-1 の合計 7 種類の配合とした。

(2) 供試体の作製

φ100×200mm の円柱供試体を材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日まで、水中養生を行った。その後、φ100×50mm に湿式切断した。質量、寸法、比重を計測後、表-2 に示す環境に置いた。

(3) 比抵抗の計測

供試体を各設置環境から取り出した後、すぐに CMC を塗布し、図-1 に示す実験装置を用いて、コンクリートの比抵抗を交流定電圧で測定した。なお、電圧は 1~45Vrms、周波数は 100Hz ~1kHz の範囲で変化させている。

比抵抗は次式(1)より算出している。

$$\rho = VA / IL \quad (1)$$

ρ : 比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$) V : 交流電圧 (Vrms)

I : 交流電流 (A) L : 供試体の長さ (cm)

A : 供試体の断面積 (cm^2)

3. 2 結果と考察

(1) 電圧、周波数の影響

電圧、周波数を変化させた場合の比抵抗への影響を図-5 に示す。電圧が大きいほど、高周波になるほど比抵抗はわずかながら小さくなる傾向にある。

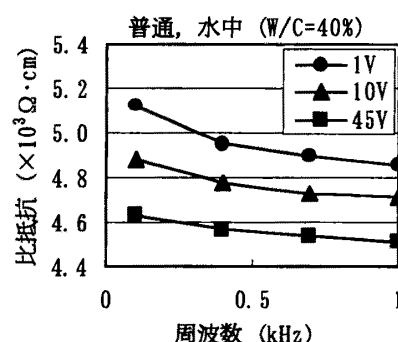


図-5 電圧、周波数の影響

(2) 水セメント比の影響

比抵抗と水セメント比の関係を図-6 に示す。水セメント比が小さくなれば比抵抗は大きくなる傾向にあり、特に高強度になるほどその増加程度は大きくなる。

表-1 コンクリートの配合 (シリーズⅡ)

記号	セメント	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				
					W	C	S	G	SP(Cx%)
L25	高ビークライト系	2.0	25	42.1	160	640	683	956	1.8
L30		2.0	30	45.0	160	533	770	956	1.3
L40		2.0	40	48.3	160	400	880	956	1.5
N25	普通	2.0	25	41.8	160	640	675	956	2.6
N30		2.0	30	44.8	160	533	763	956	1.8
N40		2.0	40	48.2	160	400	874	956	2.0
N55		4.5	55	45.0	165	300	819	1016	0.3

セメント：普通ポルトランドセメント
(3.15 g/cm³)
高ビークライト系セメント
(3.20 g/cm³)
細骨材：鬼怒川産川砂
(2.62 g/cm³)
粗骨材：岩瀬産砕石 2005
(2.66 g/cm³)
混和剤：高性能AE減水剤
(ポリカルボン酸系)

表-2 供試体の設置環境

	供試体数	設置環境
水中	3	水中に放置し、1週間、1ヶ月、3ヶ月後に前処理なしで計測
気中乾燥	2	気中に放置し、1週間、1ヶ月、3ヶ月後に前処理なしで計測
真空飽水	2	湿式切断後、水中に放置し、1週間後、RCPT試験と同条件の前処理を行い、表面を真空飽水処理後に計測

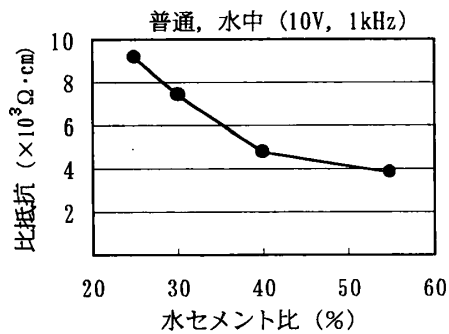


図-6 水セメント比の影響

(3) 比抵抗の経時変化とセメント種類の違い

水中に置いたコンクリートの比抵抗の経時変化を図-7に示す。水中の場合、1週間後はセメントの種類による差は小さいが時間が経つにつれて高ビークライト系セメントの比抵抗が普通ポルトランドセメントよりも大きくなる傾向がある。水中の結果はコンクリートの含水状態の影響が少ないことから、比抵抗が増大した理由は、既往の研究¹⁾で確認されているように、コンクリート中の水和反応の進行に伴い、組織が緻密になったためと考えられる。

気中乾燥状態における経時変化を図-8に示す。水中の場合に確認されたようなセメントの違いによる比抵抗の違いは確認されなかった。

気中に放置した場合には、水中に放置した場合と比べて、比抵抗の経時的な増加は急激で、特に水セメント比が大きいほど増加の程度は激しい。この結果、水セメント比と比抵抗の相関は水中の場合と大きく異なるものとなった。これは気中に放置した場合、水セメント比が大きいほどコンクリート表面が乾燥しやすいためと考えられ、コンクリートの比抵抗が含水状態に非常に左右されることを示している。そのため、現地で比抵抗を計測する場合は、そのコンクリートの含水状態の把握が非常に重要となる。

(4) 前処理方法の違い

R C P T試験の前処理である真空飽水処理の効果が、水中に放置した場合と比べてどの程度、比抵抗に影響を及ぼすかを確認するため、R C P T試験と同条件の真空飽水処理を行った

後、比抵抗の計測を行った。その結果を図-9に示す。水中に放置した場合とほぼ同程度の比抵抗の値が得られた。

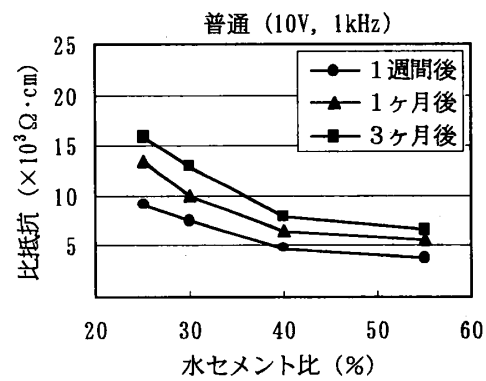
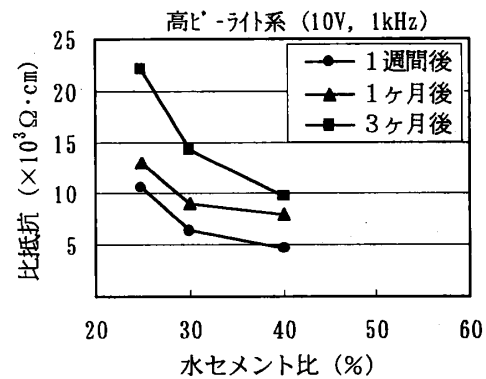


図-7 比抵抗の経時変化 (水中)

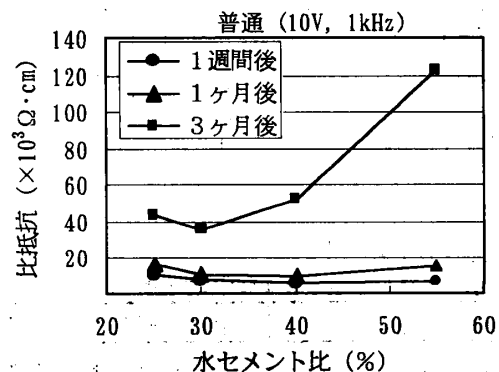
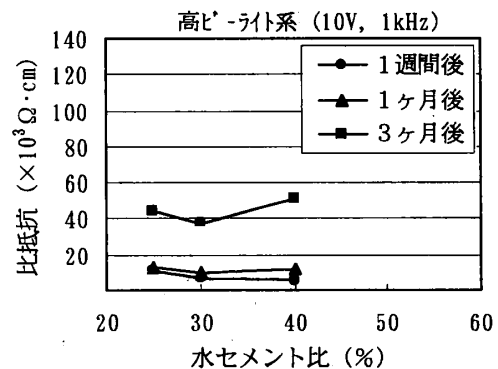


図-8 比抵抗の経時変化 (気中乾燥)

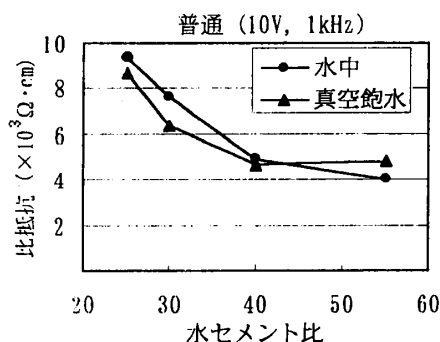


図-9 真空飽水処理による影響

4. シリーズⅢ

コンクリートの耐久性を判断するための指標は数多く存在する。比抵抗を用いた評価を行うためには、こうした指標と比抵抗との相関性を明確にしておく必要がある。ここでは、塩害に対する耐久性と関連性の深い塩化物イオンの拡散係数と比抵抗との相関性を把握するため、室内塩分浸透試験の塩分分析結果から求めた拡散係数と比抵抗の関係を示した。

4.1 実験概要

(1) 配合

コンクリートの配合は、 s/a 一定とし、 $W/C=25\%, 30\%, 40\%, 55\%$ の4種類、 $W/C=30\%$ については単位ペースト量を3種類として、合計6種類の表-4の配合で供試体を作製した。

(2) 室内塩分浸透試験の概要

コンクリート中の塩分の見掛けの拡散係数を算出するため、図-10に示すような円柱供試体（直径10cm、高さ20cm）で室内塩分浸透試験を行った。底面から1次元方向の塩分浸透量を把握するため、側面はすべてエポキシ樹脂を塗布し、塩分濃度5%の人工海水に長軸方向に1/2浸漬した。塩分量の測定は浸漬期間

1年で、下面から50mmまで厚さ10mm毎に試料を採取し、電位差滴定法により塩分量を求めた。

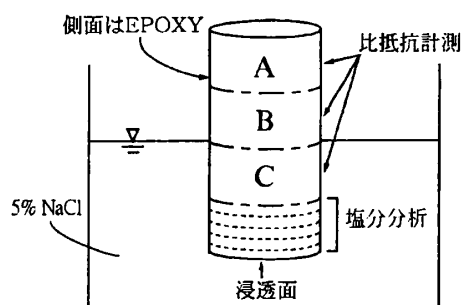


図-10 室内塩分浸透試験

(3) 比抵抗の計測

室内塩分浸透試験の浸透面から5cmごとに切断した供試体を図-10に示すようにA, B, Cとし、それぞれの供試体を前述の真空飽水処理を行った後、図-1の装置で比抵抗の測定を行った。

4.2 実験結果と考察

コンクリート中の塩分含有量より算出した拡散係数と水セメント比の関係を図-11に示す。水セメント比の増加に伴い、拡散係数も増加しており、ほぼ直線的な比例関係が見られる。しかし、ペースト量の違いによる拡散係数の差は水セメント比の差に比べて小さく、明確でない。

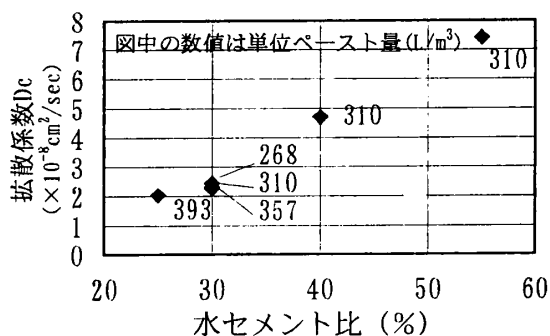


図-11 拡散係数と水セメント比の関係

表-3 コンクリートの配合 (シリーズⅢ)

	単位ペースト量 (L/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量(kg/m ³)			
				W	C	S	G
No.1	310	30	40	150	500	669	1031
No.2	310	40	40	173	433	669	1031
No.3	310	55	40	196	356	669	1031
No.4	268	30	40	130	433	711	1096
No.5	357	30	40	173	577	620	956
No.6	393	25	40	173	692	583	898

セメント：早強ポルトランドセメント
(3.14 g/cm³)
細骨材：鬼怒川産川砂
(2.57 g/cm³)
粗骨材：岩瀬産砕石 2005
(2.64 g/cm³)
混和剤：高性能AE減水剤
(ポリカルボン酸系)

比抵抗と拡散係数の関係を図-13に示す。両者の間には相関が確認できる。このことは、真空飽水処理を行えば、比較的簡易な比抵抗の計測によって、拡散係数の推定を行うことが可能であることを示している。

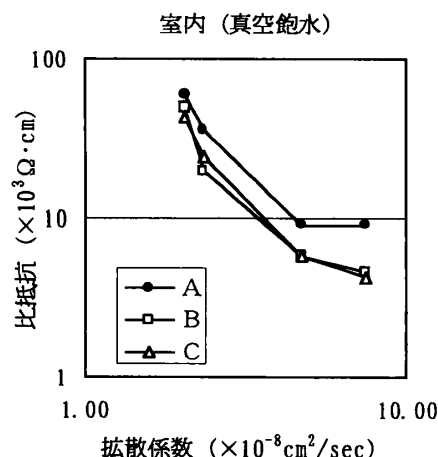


図-13 比抵抗-拡散係数の関係

5. まとめ

コンクリートの耐久性を判断する方法として比抵抗に着目し、耐久性との関連性について示した。その各種のパラメータとの相関については既往の文献でも論じられている。今回のシリーズⅢの結果からも、室内塩分浸透試験の塩分分析の結果から、拡散係数と比抵抗の相関を示すことができた。

しかし、コンクリートの塩分浸透性と比抵抗の相関関係は、どのような測定条件がどれ程影響するのかを確認しておく必要がある。そこで、比抵抗測定における各因子の影響の程度をまとめると、以下ようになる。

- 1) 含水状態を飽水状態で一定にした比抵抗の測定においては、既往の研究¹⁾⁶⁾とほぼ同じ値で安定して計測されていることから、飽水状態での比抵抗の測定にはある程度データの信頼性がある。
- 2) 含水状態を飽水状態で一定にした比抵抗の測定でも、低強度域 ($W/C=40\sim55\%$) では比抵抗の差が少ないので、電圧、周波数、電極等の測定条件には、十分注意が必要である。
- 3) 3ヶ月後には低強度域において比抵抗が、気

中に放置した場合で $120000\Omega\cdot\text{cm}$ 程度、水中放置の場合で $7000\Omega\cdot\text{cm}$ 程度の大きな差を示していることから、含水状態の影響が非常に支配的である。

- 4) 含水状態が一定でない比抵抗の測定においては、含水状態を厳密に管理しなければ、測定時のコンクリートの塩分浸透性を妥当に評価することは出来ない。

なお、シリーズⅢにおける室内塩分浸透試験は、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会との高強度コンクリートに関する共同研究の一環として実施した結果を引用したものである。ご協力して頂いた藤田 学氏(住友建設)をはじめとする関係各位にこの場を借りて感謝致します。

参考文献

- 1) 関 博ほか：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験の一考察，土木学会論文集，No. 451, pp. 49-57, 1992. 8
- 2) 鳥居和之：電氣的促進試験法により求めたセメント硬化体の塩化物イオンの拡散係数，セメント・コンクリート，No. 604, pp18-22, 1997. 6
- 3) 笹谷輝彦，鳥居和之，川村満紀，梶川康男：海洋環境下に長期間暴露したコンクリートへの塩化物イオン，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, , No. 1, pp. 957-962, 1996
- 4) 堀内全・杉山隆文・辻幸和・橋本親典：電氣的手法によるフライアッシュコンクリートの細孔組織の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, , No. 1, pp. 203-208, 1998
- 5) スジョノ，A. S.・関博：導電率によるコンクリート細孔構造の予測について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No2, pp. 727-732, 1998
- 6) 北峯博司・関博・金子雄一：コンクリートの含水比と抵抗率に関する実験的研究，土木学会第45回年次学術講演会概要集，pp. 774-775, 1990