かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能評価のための
ドリルPR法の適用性の検討APPLICABILITY OF DRILL-PR METHOD FOR EVALUATING THE PERFORMANCE
OF CONCRETE COVER TO RESIST THE REBAR CORROSION IN CONCRETE下澤和幸*, 永山 勝**, 今本啓一***, 山崎順二****
二村誠二*****, 三橋博三*****Kazuyuki SHIMOZAWA, Masaru NAGAYAMA, Kei-ichi IMAMOTO,
Junji YAMASAKI, Seiji NIMURA and Hirozo MIHASHI

Durability of reinforced concrete structure depends on the quality of the concrete cover that inhibits the rebar corrosion in concrete. Hence, for evaluating the performance of concrete cover to resist the rebar corrosion in concrete, authors proposed "Drill-PR method" using the permeability velocity and resistivity measured by the hole drilled in the surface of concrete. In this paper, several kinds of concrete were prepared for an experimental study on the application of Figg's intrusive method and resistivity test method (Wenner method) to the Drill-PR method. The Student's t-statistical analysis of the test results indicates a good capability of the air-permeability by Figg's intrusive method for evaluating the performance of concrete cover to resist the rebar corrosion. It was also known that the resistivity test method was significantly affected by the water cement ratio, moisture content of concrete and relative humidity. Based on the results of these experiments, authors proposed a classification for the performance of concrete cover to resist the rebar corrosion in concrete.

Keywords: Concrete cover, In-Situ test method, Air permeability, Resistivity, Minor-destructive test, Hybrid method

かぶりコンクリート, 原位置試験法, 透気性, 比抵抗, 微破壊試験, 複合法

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物が耐久性を確保するためには、コンクリート中の鉄筋腐食を抑制する役割を担うかぶり部のコンクリート（以下、かぶりコンクリートと称す）が、外的因子の侵入・拡散を最小限に止める性能を有することが重要となる。この性能は、かぶりコンクリートの品質に依存し、コンクリートは緻密であることが望まれる。これまで、鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上を目的として、材料面においては、鋭意に研究・開発が進められてきた。コンクリートの材料性能そのものが耐久であることは、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を満足するための必要条件ではあるが、十分条件とは言い難く、コンクリート施工の工程における打込み・締固めおよび養生などが、構造物の耐久性を大きく左右することは明らかである。このことから、各工程を経た鉄筋コンクリート構造物の耐久性を原位置で評価することは、耐久性向上の観点から重要であると言える。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性を評価するための一般的な手法には、中性化深さ測定、塩化物濃度測定、強度試験などがあり、加えて、コンクリートの透気性、透水・吸水性や電気抵抗などを測定する試験法が提案されている^{1),2),4)}。筆者らは、コンクリート中の鉄筋腐食に関する外的因子である二酸化炭素や酸素の透過、水や塩化物の浸透や拡散の難易の程度を、原位置で迅速かつ簡便に評価する

試験法として提案されている、笠井・湯浅らが提案する「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」³⁾（以下、簡易透気試験法と称す）、および「四点電極法(Wenner法)による比抵抗試験」⁴⁾に着目し、その適用性を検討した。しかしながら、これらの試験法は共に、コンクリートの含水状態が測定値に及ぼす影響の大きいことが問題視されている。耐久性の低いコンクリートであっても含水率を高めれば、透気性は小さくなり、耐久性が高いと判断されてしまう恐れがある。また、コンクリートの含水率の高低によって比抵抗は大きく変化する。そこで、両試験法を個別に適用するのではなく、コンクリート表面に設けたドリル孔から得られる透気性と比抵抗の各測定値を組み合わせることによって、かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能を評価する複合法「ドリルPR法」として提案した^{5)~7)}。ドリルPR法は、コンクリート中の鉄筋腐食発生の引き金となる外的因子である二酸化炭素や酸素のコンクリート表層からの透過の難易程度を透気性によって評価し、併せて、コンクリートの含水状態に大きく左右される比抵抗の測定によって、透気試験におけるコンクリートの含水状態の影響の度合いと、腐食発生時の腐食電流の流れ易さの程度を同時に把握することで、かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能を評価する方法である。

本研究は、かぶりコンクリートが持つ物理的な鉄筋腐食抵抗性能を評価するドリルPR法によって、鉄筋コンクリート構造物の竣工

* 財日本建築総合試験所材料部材料試験室 主査

** 財日本建築総合試験所材料部 部長・博士(工学)

*** 東京理科大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)

**** ㈱浅沼組技術研究所 主任

***** 日本住宅管理協会

***** 東北大学大学院工学研究科 教授・工博

Section Chief, Mat. Lab. Mat. Dept., General Building Research Corporation of Japan
Director, Mat. Dept., General Building Research Corporation of Japan, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr. Eng.
Senior Research Engineer, Asanuma Corporation
Japan Housing Maintenance Association
Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

時の耐久性能検証や既存構造物の耐久性診断に活用できるシステムを確立することを最終的な目的とする。

本論では、鉄筋コンクリート構造物の竣工時における耐久性能検証のためのひとつの手段とする「ドリルPR法」の適用性を実験によって検討した。さらに、その結果に基づいた、かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能の等級区分（案）を提案するものである。

なお本論は、文献5)～8)の結果の一部に新たなデータを加筆して、再構成を行ったものである。

2. ドリルPR法の概要

ドリルPR法は、コンクリート表面に設けたドリル孔（φ10 mm、深さ50mm）を利用し、「簡易透気試験法」により透気性を、「四電極法」を改良した方法により比抵抗を求め、各測定値を複合させて、かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能を評価する方法である。

2.1 簡易透気試験法

図1に示す簡易透気試験法は、原位置透気試験として提案されている「削孔法」のひとつであり、その原型はJ.W.Figgが開発し、R.K.Dhirらによって精度改善のための圧力レベルや削孔径の検討がなされた⁹⁾。国内では笠井・湯浅らが削孔間隔・深さなどの検討を行っており、測定値（簡易透気速度）が促進中性化深さに良好な相関のあることを見出し、中性化深さに対する簡易透気速度の区分を提案している³⁾。なお、本研究において提案しているドリルPR法には、笠井・湯浅らの方法を用いている。

この方法は、試験位置に設けたドリル孔をシリコン栓にて密封し、孔内をある程度の余裕をもって減圧させたのち、真空度が特定の圧力まで戻る時間を計測して、式(1)により簡易透気速度を求めるものである。

$$\text{簡易透気速度 (P.V)} = (25.3 - 21.3) / t \quad (1)$$

ここに、 t は孔内の圧力が21.3 kPaから25.3 kPaへ戻るのに要する時間（s）である。なお、式(1)の圧力範囲において $t < 10$ 秒の場合には、13.3 kPaから33.3 kPaの範囲について再測定を実施する。

図1 ドリル削孔を用いた簡易透気試験方法

2.2 改良比抵抗試験法

図2に示す比抵抗試験法は、地球物理学の地下構造探査分野における電気探査手法のひとつである比抵抗法としてF.Wennerが考案した「四電極法」を、P.G.Cavalierや武若・小林などがコンクリートに適用した方法⁴⁾に基づき、筆者らがその一部を改良した方法である。比抵抗を精度良く測定することを目的に、コンクリート表面にドリル削孔を等間隔に4点設け、孔内にφ11mmのステンレスブラシ電極を挿入して測定する。同電極は、同図の写真に示すとおりφ

0.08 mmのステンレス鋼線を用いて、ブラシ状に加工したものである。比抵抗測定では、コンクリートと電極との接触抵抗を小さくするため、削孔内周囲に電極を密接させるために電極径は削孔径よりも大きくした。なお、同電極のブラシ部分は比較的柔らかく、孔内へは容易に挿入できるものである。測定には、同図の写真に示す比抵抗計を用い、100Hzの矩形波電流をC1とC2間に印加して、P1とP2間での電位差を測定し、式(2)によって比抵抗を求める。

$$\text{比抵抗 } (\rho) = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (2)$$

ここに、 ρ は比抵抗（Ω・m）、 a は電極間隔（m）、 V はP1とP2間の電位差（V）および I は印加電流（A）である。

四電極法による比抵抗は、同図の[i]図に示すP1とP2の midpoint 直下の電極間隔 a に相当する点（測定点）における値となる¹⁰⁾。しかしながら、コンクリートを対象とした測定では、その組織が不均質であるため、測定点周辺におけるコンクリートを構成する各材料の影響を含んだ比抵抗（見掛け比抵抗）が得られる。なお、同図に示す電極間隔 a は、内部に存在する粗骨材の大きさより小さい場合には粗骨材の影響を受けることや、同じ削孔を用いて行う簡易透気試験において、削孔間隔が25 mm以上（粗骨材の最大寸法20mmの場合）離れると測定値に影響を受けないこと³⁾、および簡易透気試験での透気領域確認のために行った削孔近傍の圧力変化量の測定結果より、圧力変化は孔から約10 mm程度までの範囲が最も大きく、距離が離れるに従って小さくなること⁷⁾などを考慮し、一般建築物に用いられるコンクリートの粗骨材の最大寸法20 mmの2倍となる40 mmとした。

また本手法では、簡易透気試験に用いるドリル孔深さ（50 mm）に相当する範囲の比抵抗を得るために、測定位置1箇所につき、コンクリートの表層部（[i]図）と深さ30 mm（[ii]図）の2点について測定を行っている。

図2 ドリル削孔を用いた比抵抗試験方法（改良比抵抗試験法）

3. ドリルPR法における各試験法の適用性に関する実験的検討

3.1 原位置試験としての簡易透気試験法の適用性確認

3.1.1 t 検定による検討

簡易透気試験法によるかぶりコンクリートの透気性の評価の可能性を検討するため、生コン工場で製造された呼び強度21、27 および

36の3種類のコンクリートを用いて実験を行なった。各コンクリートの材料には、水(W)は上水道水、セメント(C)は普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³）、細骨材(S)は、山砂（城陽産、密度2.75g/cm³、FM2.80）を70%と砕砂（高槻産、密度2.66g/cm³、FM2.80）を30%として混合したもの、粗骨材(G)は碎石（高槻産、密度2.69g/cm³、実績率58.0%）、混和剤(Ad)はAE減水剤（AE：リグニンスルホン酸系）、または高性能AE減水剤（SP：ポリカルボン酸エーテル系）を用いた。コンクリートの計画調合と物性を表1に示す。

表1 コンクリートの計画調合および物性

呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
			W	C	S	G	Ad.			
21	63	46.6	184	292	826	974	AE:3.10	16.0	5.9	32.0
27	54	49.2	180	333	860	915	SP:2.90	9.5	5.0	38.7
36	44	48.7	180	409	821	890	SP:4.13	21.5	5.5	44.4

試験体は、外形寸法：幅300mm×高さ300mm×奥行き100mmの平板とし、300×100(mm)の小口より縦打ちでコンクリートを打設した。打設2日後に型枠脱型を行い、一方を標準養生（20℃水中1ヶ月間＋恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて1ヶ月間）、他方を気中養生（型枠脱型の後、恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて2ヶ月間存置）とした2種類を用意した。また、3種類のコンクリートについては、特に海外では透気試験のベンチマーク試験とされているRILEM Cembureau法¹¹⁾（以下、RILEM透気試験と称す）による透気係数、およびJIS A 1153に従う促進中性化試験（促進期間26週）による中性化深さによって、その差異を予め確認した。

簡易透気試験は、材齢約2ヶ月の時点において、試験体の側面（型枠に接していた300×300(mm)面）を対象とし、試験体の各端部より約50mm以上内側の範囲において、計6箇所を測定した。なお、本実験の評価は、RILEM TC-189 NEC “Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover”で実施された方法¹²⁾に準拠し、簡易透気試験による測定結果に対してt検定を行い、その有意差を検証した。

3.1.2 簡易透気速度と中性化深さの関係

本実験では、コンクリート中の鉄筋腐食発生の引き金となる中性化と簡易透気速度の関係について検討することを目的として、試験室で製造した水セメント比30%～100%の全16種類のコンクリートを用いて実験を行なった。各コンクリートの材料には、水(W)は上水道水、セメント(C)は普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³）、細骨材(S)は山砂（枚方産、密度2.57g/cm³、FM2.75）、粗骨材(G)は碎石（高槻産、密度2.68g/cm³、実績率58.0%）、混和剤(Ad)はAE減水剤（N：リグニンスルホン酸系）または高性能AE減水剤（H：ポリカルボン酸系）を用いた。コンクリートの計画調合と物性を表2に示す。

なお本実験では、コンクリート製造に用いる骨材の表面水管理の誤差および何らかの加水による単位水量の大幅な増加によって起こりうるコンクリートの組織構造の変化と、簡易透気速度および中性化深さの関係を検討するため、水セメント比40、50および60%の基準調合に対して、セメント量を変化させずに水量のみを水セメント比5%または10%に相当する量を加減したコンクリートも製造した。また、水セメント比が大きな65%、80%および100%では、比較的多くのブリーディングが生じたが、そのままとした。

表2 コンクリートの計画調合および物性

試験体記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Ad. (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
			W	C	S	G				
30-175	30	46.8	175	583	734	870	H:1.2	---	1.3	71.3
40-175	40	45.7	175	438	754	933	H:0.6	19.0	5.5	46.3
40-197	45	45.7	197	438	754	933	H:0.6	21.0	3.8	40.9
45-175	45	46.8	175	398	787	933	H:0.6	20.0	4.7	44.5
50-162	45	47.4	162	360	805	933	N:1.0	2.0	5.0	40.4
40-219	50	45.7	219	438	754	933	H:0.7	21.0	3.8	31.6
50-180	50	47.4	180	360	805	933	N:1.0	16.5	5.2	33.7
50-198	55	47.4	198	360	805	933	N:1.0	22.0	3.3	32.5
55-180	55	48.2	180	327	831	933	N:1.1	19.0	5.6	30.1
60-165	55	48.8	165	300	853	933	N:1.3	18.0	4.6	25.6
50-216	60	47.4	216	360	805	933	N:1.0	25.5	2.2	30.0
60-180	60	48.8	180	300	853	933	N:1.3	18.0	5.2	23.6
60-195	65	48.8	195	300	853	933	N:1.3	23.0	4.9	25.1
65-180	65	50.2	180	277	887	917	N:1.5	20.0	4.0	16.6
80-200	80	53.5	200	250	977	886	---	5.5	2.6	13.6
100-200	100	54.5	200	200	1018	886	---	18.0	1.0	8.8

※ は基準調合を示し、他は W/C=40, 50 および 60%の基準調合に加水もしくは減水した(±5%または+10%W/C 相当)ものである。
また、圧縮強度は材齢 28 日標準養生によるものである。

簡易透気試験に用いた試験体は、外形寸法：150×150×530(mm)の角柱試験体であり、コンクリート打設2日後に型枠脱型を行い、恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて約2ヶ月間の気中養生を行った。また、3.1.1の実験と同様に、各コンクリートの品質の差異を確認するため、RILEM透気試験用の試験体としてφ150×300(mm)の円柱試験体を作製し、コンクリート打設2日後に型枠脱型を行い、上記の角柱試験体と同様の気中養生を行った後、円柱試験体の中央部をφ150×50(mm)にカット成形した。ここで、型枠脱型からの試験体の養生方法を気中としたのは、原位置でのコンクリートの環境状態を想定したからである。加えて、屋外自然暴露による中性化試験用として、全種類の同一コンクリートによって外形寸法：150×150×530(mm)の角柱試験体を作製し、一方を標準養生（20℃水中1ヶ月間＋恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて1ヶ月間）、他方を気中養生（打設2日後に型枠脱型の後、恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて2ヶ月間存置）とした。また、JIS A 1153に従う促進中性化試験用として100×100×400(mm)の角柱試験体を作製した。

簡易透気試験は、同一試験体のコンクリート材齢約2ヶ月、3ヶ月、6ヶ月および1年の時点において行った。なお、同試験においては、コンクリートのブリーディングによる測定結果への影響を考慮し、試験体の長手方向の側面（型枠に接していた150×530(mm)面）を測定対象とし、打設面およびその他の端面より約50mm以上内側の位置において測定を実施した。また、測定期間中の試験体は恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて静置した。次に、RILEM透気試験は、約2ヶ月間の気中養生を終えた試験体を、試験前処理として、試験体内の含水状態が平衡となるまで50℃にて乾燥を行ない、試験に供した。加えて、中性化試験では、雨掛かりのない環境下での約4年間の屋外自然暴露試験と、促進期間26週にわたる促進中性化試験を

それぞれ実施し、中性化深さを測定した。

3.1.3 各実験結果と考察

(1) t 検定による検討

3 種類のコンクリートについての RILEM 透気試験による透気係数（以下、RILEM 透気係数と称す）と促進中性化深さを表 3 に示す。同表に示すとおり、コンクリートの呼び強度が大きくなるに伴い、RILEM 透気係数および中性化深さは共に小さくなった。これらは、コンクリート強度から想定される品質の違いによるコンクリートの粗密の程度を、明確に表す結果となった。

次に、表 3 の結果およびコンクリート強度や養生方法の違いから想定される測定値の大小関係（レーティング）に基づき、簡易透気試験の計 6 回の測定結果について t 検定を行った結果を表 4 に示す。ここでは、標準養生を“A”、気中養生を“C”と表記した。例えば「A21」は、呼び強度 21 の標準養生試験体を表す。同表に示すとおり、簡易透気試験の結果は、有意水準 1～5% で 3 種類のコンクリートの透気性の違いを概ね評価できていると考えられた。なお、呼び強度の違いによる評価の有意水準が低いのは、コンクリート中の骨材の偏在や、骨材下面に滞留したブリーディング水が骨材とマトリックスの付着上の弱点（空隙）を形成していることに伴う、測定値のばらつきが影響したものとする。なおこの点については、さらなる検討が必要であるが、試験結果の全般より、本簡易透気試験は、コンクリートの透気性を概ね評価し得るものと考えられた。

表 3 RILEM 透気係数と促進中性化深さ

呼び強度	透気係数 ($\times 10^{-18} \text{m}^2$)			平均値 ($\times 10^{-18} \text{m}^2$)	変動係数 (%)	26 週促進中性化深さ (mm)
21	640	734	840	738	13.6	34.4
27	157	176	172	168	6.0	16.7
36	112	110	115	112	2.2	5.5

表 4 t 検定の結果

変動要因	呼び強度			
比較条件	A21-A27	A27-A36	C21-C27	C27-C36
大小関係 (レーティング)	A21<A27	A27<A36	C21<C27	C27<C36
t	9.07	1.67	8.36	2.62
検定結果	+++	--	+++	++
変動要因	養生方法			
比較条件	A21-C21	A27-C27	A36-C36	
大小関係 (養生方法)	A21>C21	A27>C27	A36>C36	
t	6.24	6.33	7.16	
検定結果	+++	+++	+++	

表中の記号: +++ 有意水準 1% で有意差あり
++ 有意水準 5% で有意差あり
-- 有意差は認められない

(2) 簡易透気速度と中性化深さの関係

実験に用いた全 16 種類のコンクリートの差異は、次のとおりである。各コンクリートによる促進中性化試験および約 4 年間の自然暴露試験（対象：標準養生試験体）における中性化深さについて、 $\sqrt{t}$ 則に基づく両者の中性化速度係数の関係を図 3 に示す。屋外の CO_2 濃度を 0.05% とした場合、理論的には自然暴露による中性化速度係

数は、促進中性化の CO_2 濃度（5%）の平方根となる¹³⁾が、両者の関係はそれを支持する結果となった。

図 3 促進試験と自然暴露試験（約 4 年間）による中性化速度係数

また、各養生方法による自然暴露下での中性化深さを図 4 に示す。同図に示すとおり、いずれの養生方法も水セメント比が大きくなるに伴い、中性化深さが徐々に大きくなる傾向を示した。また、同一水セメント比の場合、標準養生に比して気中養生のものの中性化が進行する傾向を示した。これは、養生方法の違いによって細孔構造に違いが生じ、その結果、物質移動の抵抗性が異なったことによるものである。さらに、水セメント比 40、50 および 60% の基準調査に対して、水量を加減して水セメント比を増減させた試験体については、単位水量の変動によって実際の水セメント比が変化するのに伴い、いずれの養生の場合も中性化深さは増減している。その測定値は、基準調査の中性化深さとほぼ同等であった。

図 4 各養生方法による自然暴露下での中性化深さ

さらに、RILEM 透気係数と自然暴露による中性化深さ（対象：気中養生試験体）の関係を図 5 に示す。同図に示すとおり、水セメント比が大きくなるに伴い、RILEM 透気係数および中性化深さは共に大きくなった。この傾向は、透気試験の研究論文において一般に指摘のなされるところである¹⁴⁾。

図5 RILEM 透気係数と自然暴露下での中性化深さとの関係

次に、気中養生とした全 16 種類のコンクリートの材齢 2 ヶ月、3 ヶ月、6 ヶ月および 1 年における簡易透気試験の結果を図 6 に示す。

図6 コンクリート材齢の経時に伴う簡易透気速度の変化

同図に示すとおり、本実験の範囲内では、コンクリート材齢が経過するに伴い、簡易透気係数が増減する傾向を示した。材齢 2 ヶ月から 3 ヶ月への経過においては、多少の違いはあるもののほぼ全般に、簡易透気速度が小さくなった。これは、気中環境下ではあるがコンクリートの水和が進み、間隙構造が不連続となったことによるものとする。この点については、ドリル孔近傍での細孔径やその分布あるいは連続性についての確認などによって、今後検討する必要があると考える。また、材齢 3 ヶ月から 6 ヶ月、さらに 1 年の経過においては、いずれも材齢の経過に伴い、簡易透気速度が徐々に大きくなった。これは、一般に指摘のなされるコンクリート表層からの乾燥による水分の逸散によって、含水率が徐々に低下し、透気できる空隙が増加したことによるものとする。ただし、材齢 3 ヶ月から 1 年までの簡易透気速度の変化量は、材齢の経過日数から考えれば小さなものである。このことから、本実験においては、材齢 3 ヶ月時点の簡易透気速度について検討を行うこととした。

加えて、水セメント比 40、50 および 60% の基準調合に対して、水量を加減して水セメント比を増減させた試験体については、上述した中性化深さの結果と同様に、単位水量の変動によって実際の水セメント比が変化するのに伴い、材齢 3 ヶ月以降においては、簡易透気速度も増減している。その簡易透気速度は、基準調合の測定値と大きな違いはなかった。

上記の結果に基づき、材齢 3 ヶ月時点での簡易透気速度と自然暴露下での中性化深さ（対象：気中養生試験体）より算出した中性化速度係数との関係を図 7 に示す。同図に示すとおり、多少のばらつきはあるものの、水セメント比が大きくなるに伴い、簡易透気速度および中性化速度係数は共に大きくなる傾向を示した。なおこの傾向は、図 5 に示した RILEM 透気係数と自然暴露による中性化深さとの関係の傾向に一致するものであった。

図7 簡易透気速度と自然暴露下での中性化速度係数との関係

3.2 原位置試験としての改良比抵抗試験法の適用性確認

原位置での改良比抵抗試験法の適用性を検討するため、次の各実験を行った。なお、比抵抗に影響を及ぼす因子には水分や塩化物などがあるが、ここでは、コンクリートの含水との関係を検討した。各実験には、表 2 に示す各種コンクリートのうち、単位粗骨材量を一定とした水セメント比 40%～65% のコンクリートを用いた。ここで、単位粗骨材量を一定としているのは、一般にマトリックスより

も電気抵抗率が大きいとされる粗骨材の影響を除外するためである。

3.2.1 コンクリートの含水状態と比抵抗の関係

提案した改良比抵抗試験法による比抵抗とコンクリートの含水状態との関係を検討することを目的として、表2に示す各種コンクリートのうち、水セメント比40%、50%および60%（いずれも基準調合のもの）の3種類について、コンクリート内の含水状態をコントロールし、各段階において測定を行った。実験では、外形寸法150×250×60(mm)の試験体（標準養生：20℃水中1ヶ月間＋恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて1ヶ月間としたもの）を50℃で乾燥させた後、写真1に示す、庫内の相対湿度を調湿剤（塩化マグネシウム（約33%R.H.）、臭化ナトリウム（約60%R.H.）および水（約100%R.H.））によって3段階に調整した各デシケータ内に試験体を静置させた。試験体は、定期的に比抵抗および質量を測定し、経時において質量変化量が極めて小さくなった時点（約120～160日後）を試験体の平衡含水状態と仮定した。なお、デシケータは恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）に設置し、各測定も同室内において実施した。

写真1 調湿デシケータと比抵抗測定状況

また本試験法では、ドリル孔内での測定位置を表層部と深さ30mmの2箇所としているが、孔内の測定位置の違いによる比抵抗の変化について確認するため、表2に示す水セメント比40%～60%（5%刻み、いずれも基準調合のもの）の計5種類のコンクリートを対象として測定を行った。試験体は、前述した3.1.2の実験で用いた同一の試験体（150×150×530(mm)、気中養生）であり、材齢3ヶ月、6ヶ月および1年時において比抵抗を測定した。なお、測定期間中の試験体は恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて静置した。

3.2.2 コンクリートの水セメント比と比抵抗の関係

本実験には、表2に示す各種コンクリートのうち水セメント比40%～65%の計12種類のコンクリートを用いた。表2に示すとおり、水セメント比40%、50%および60%については基準調合を設け、水以外の材料の単位量を一定として、水セメント比を+5%、+10%または-5%と増減させることによって、単位水量を増減している。試験体は、前述した3.1.2の実験に用いた同一の試験体（150×150×530(mm)、気中養生）であり、材齢3ヶ月、6ヶ月および1年時において比抵抗を測定した。

3.2.3 各実験結果と考察

(1) コンクリートの含水状態と比抵抗の関係

調湿した環境下において、コンクリートの含水状態を平衡とした3種類のコンクリートについて各測定を行った。調湿したデシケータ内での試験体質量の経時変化は、いずれの水セメント比も同様の傾向を示したことから、水セメント比60%の結果を図8に示した。

ここでは、各試験体の試験前質量を基準とした質量変化率を示した。同図に示すとおり、相対湿度33%の場合、デシケータ内での存置日数の増加に伴い、コンクリート質量が減少する傾向を示した。また相対湿度100%の場合、日数の増加に伴い、質量が増加する傾向を示した。なお、相対湿度60%の場合、日数が増加しても質量の変化は微小なものであり、若干増加する程度であった。この結果から、コンクリートの含水率は、相対湿度の違いによって増減することが確認された。次に、水分平衡状態となった時点での比抵抗の測定結果を図9に示す。同図に示すとおり、ドリル孔の表層部と内部（深さ30mm位置）における比抵抗は、同じ桁数において多少のばらつきはあるものの、ほぼ一致していることから、試験体中の含水状態が平衡であることが窺えた。比抵抗は、同一コンクリートにおける含水率の高低によって増減しており、反比例の関係にある。これは、比抵抗の大小がコンクリートの含水率に依存していることを示しており、既往の文献¹⁵⁾に示された傾向と一致するものであった。

図8 調湿環境下でのコンクリート質量の経時変化 (W/C60%)

図9 水分平衡状態におけるコンクリートの含水率と比抵抗の関係

また、相対湿度60%をコンクリート中の水分移動があまり起こらない環境と仮定すると、相対湿度33%の場合、図8によればコンクリートの質量は減少しているものの、図9の結果では、相対湿度60%の場合とほぼ同等の比抵抗となっている。一方の相対湿度100%の場合、コンクリートの質量は増加し、比抵抗は相対湿度60%に比して小さくなっている。本実験結果より、国内では外気の相対湿度がおおよそ60%を超え、高温な環境が継続する梅雨から初秋の時期（6～9月頃）における原位置での比抵抗試験では、外気の相対湿度が測定値に影響を及ぼす可能性があると考えられた。

次に、ドリル孔内での測定位置の違いによる測定結果を図10に示す。同図に示すとおり、いずれの水セメント比も材齢が増すに伴い、比抵抗は大きくなり、かつ表層部と深さ30mm位置での比抵抗の差も大きくなった。既往の研究¹⁶⁾によれば、早期に乾燥を受けたコンクリートは、長期にわたり乾燥開始時の細孔構造が反映され、乾燥面に近いほど大きな細孔が残るやすいとされている。本試験体においても、脱型後からの乾燥により、コンクリートのごく表層では内部に比して大きな細孔が存在し、材齢の経過に伴い乾燥が進むにつれて、細孔内の水分移動が起こり、特に表層において比抵抗が大きく変化したものと考えられた。すなわち、コンクリートの比抵抗は含水の影響を大きく受けることが判った。このことから、本手法においては、経時によって生じるドリル削孔の深さ方向における含水状態の違いを考慮し、深さ30mm位置での測定値を試験結果の評価に用いることとした。

図10 ドリル孔内の測定位置の違いによる比抵抗

(2) コンクリートの水セメント比と比抵抗の関係

水セメント比40%、50%および60%の基準調査に対して、水以外の材料の単位量を一定としたうえで、水セメント比を増減させた試験体による比抵抗の測定結果を図11に示す。

ここでは、材齢が経過しても結果の傾向は同じであったことから、材齢3ヶ月の結果（深さ30mm位置）を示した。同図に示すとおり、単位セメント量を一定とし、単位水量を増加させることにより、水

図11 水セメント比と比抵抗の関係

セメント比が大きくなった場合、比抵抗は小さくなった。また、水セメント比を一定とした場合、単位セメント量の減少によって比抵抗は大きくなった。コンクリートの電気抵抗率についての既往の研究¹⁷⁾によれば、実際の水セメント比が大きくなると電気抵抗率は低下する。これは、コンクリート細孔内に存在するイオン濃度が上昇し、セメントペーストの電気抵抗率が低下するからである。また、水セメント比を一定にして単位セメント量を減少させると、電流を流すための電解液が少なくなり、電気抵抗率が高くなるといわれており、本実験結果はいずれも、これらの傾向と一致した。

4. ドリルPR法における評価基準の提案

4.1 簡易透気試験法における評価基準の検討

前記の3.1における実験結果に基づき、簡易透気試験法における評価基準を検討した。中性化深さがかぶり厚さに到達した時点供用期間と定義するTorrentの考え方¹⁸⁾に基づき、中性化深さがかぶり厚さ(T)に達する材齢を構造物の供用期間(S.L.)とすると、その関係は式(3)として表すことができる。

$$S.L. = \{T / (A \cdot \ln(R_{air}) + B)\}^2 \quad (3)$$

ここに、 R_{air} は簡易透気速度となり、AおよびBはコンクリート材料や外部環境条件に応じた引数となるが、この定量化については現時点でのデータも少ないことから、今後の検討が必要と考えられる。なお本論では、図7に示す簡易透気速度と中性化速度係数の関係における近似式より、 $A=1.32$ 、 $B=7.32$ を用いることとした。

次に、JASS5¹⁹⁾で検討された計画供用期間の級である「短期：30年」、「標準：65年」、「長期：100年」および「超長期：200年」の各年数をS.L.として、式(3)により求めた簡易透気速度とかぶり厚さの関係を図12に示す。同図より、JASS5における鉄筋コンクリート建築物の主要部材（柱、梁および耐力壁）の屋内の最小かぶり厚さである30mmにおけるS.L.30(0.25kPa/s)とS.L.100(0.038kPa/s)の簡易透気速度を、本試験法の閾値とすることとした。

図12 式(3)による簡易透気速度とかぶり厚さの関係

4.2 改良比抵抗試験における評価基準の検討

改良比抵抗試験による評価基準を、図13に示す簡易透気速度と比抵抗の関係図によって検討した。同図は、表2に示した水セメント比30%~100%の計16種類のコンクリートによる簡易透気速度と比抵抗（深さ30mm位置）の各材齢における測定結果をプロットしたも

のである。同図に示すとおり、水セメント比 30% の材齢 1 年の場合を除き、いずれの水セメント比も比抵抗が $100 \Omega \cdot \text{m}$ を上回っている場合、簡易透気速度の変化量は少ない。また本実験の範囲内では、表層での水分移動が落ち着き、含水状態がある程度安定するのが材齢 3 ヶ月ぐらいであり、比抵抗はいずれの水セメント比も $50 \Omega \cdot \text{m}$ を上回っている。なお、水セメント比 40, 50 および 60% の基準調合に対して、水量を加減して水セメント比を増減させた試験体についても同様であった。前述した 3.2.3(2) のとおり、同一材齢においては、単位セメント量や水セメント比の違いが比抵抗に及ぼす影響はあるものの、水量を加減した後の実際の水セメント比として考えた場合、比抵抗は基準調合の試験体の経時変化による傾向とほぼ同様であると考えられた。

これらの結果より、比抵抗が $50 \Omega \cdot \text{m}$ を上回った場合、ドリル孔の深さ方向のコンクリートの含水状態がある程度安定し始め、さらに $100 \Omega \cdot \text{m}$ を上回った場合、透気性への含水状態の影響は少なくなると考えられた。これら実験的検討により、比抵抗 $50 \Omega \cdot \text{m}$ および $100 \Omega \cdot \text{m}$ を、本試験法の閾値とすることとした。

なお、既存構造物を対象とした場合、建設年代や立地する外部環境によっては、内在または外来した塩化物イオンがコンクリート中に存在することが考えられる。コンクリート中に塩化物イオンが存在することによって、電気的性質を帯びた物質が多くなり、電気抵抗率が小さくなることがわかっている²⁰⁾。これは、コンクリート中の含水率が高い場合と同様、鉄筋腐食発生による腐食電流を流れ易くする要因となる。すなわち、比抵抗も小さくなることが考えら

れる。塩化物イオンの存在が比抵抗に及ぼす影響については、今後確認・検討を行う予定であるが、今回提案した比抵抗の閾値は、コンクリート中の塩化物含有量が規制されている現在の鉄筋コンクリート構造物の竣工時における評価基準としては、妥当なものであると考える。

4.3 かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能の等級区分（案）

4.1 および 4.2 の各試験法における評価基準に基づき、簡易透気係数および比抵抗の閾値による区分を組み合わせ、図 14 にドリル P R 法におけるかぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能の等級区分（案）を示した。同等級区分（案）には、その区分として、等級Ⅰ（高性能）、等級Ⅱ（標準）および等級Ⅲ（低性能）の 3 等級を設けた。例えば、簡易透気速度が 0.038 kPa/s より小さく、かつ比抵抗が $100 \Omega \cdot \text{m}$ より大きい場合は等級Ⅰ（高性能）と評価する。しかし、簡易透気速度が 0.038 kPa/s より小さくても、比抵抗が $50 \sim 100 \Omega \cdot \text{m}$ の場合は等級Ⅱ（標準）、 $50 \Omega \cdot \text{m}$ よりも小さければ等級Ⅲ（低性能）と評価する。なお同図には、水セメント比 50%、単位水量 180 kg/m^3 により作製した幅 $2 \text{ m} \times$ 高さ $3.5 \text{ m} \times$ 厚さ 0.3 m の実大壁モデルを対象に、同手法を適用した結果⁷⁾（比抵抗は深さ 30mm 位置の結果）をプロットした。測定は材齢 4 ヶ月において、壁両面の計 40 箇所で行った。同図のとおり、測定結果の大半は等級Ⅱ（標準）にプロットされた。また、ジャンカ補修跡近傍の結果を●、ひび割れ近傍での結果を●で示した。目視上健全ではあるが透気性の大きな箇所やジャンカ補修が適切に行われていないと考えられる箇所が、等級Ⅲ（低性能）にプロットされた。本事例より、本等級区分（案）によって鉄筋腐食抵抗性能の評価が行える可能性の高いことが判ったが、今後の実構造物での事例の蓄積によって、本等級区分（案）についての検証を行う予定である。

図 13 各材齢における簡易透気速度と比抵抗の関係

図 14 かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能の等級区分（案）

5. 結論

鉄筋コンクリート構造物の耐久性能検証のためのひとつの手段と

して、原位置における透気性と比抵抗の測定値を組み合わせ、かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能を評価する複合法「ドリルPR法」を提案した。本論では、本手法に用いる簡易透気試験および改良比抵抗試験の適用性について実験的な検討を行い、その所産として、かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能の等級区分（案）を示した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 簡易透気試験は、呼び強度 21, 27 および 36 における水セメント比や養生条件の違いによるコンクリートの透気性を、有意水準 1～5%の有意差をもって概ね評価できることが判った。また、全 16 種類のコンクリート (W/C=30%～100%) によった簡易透気速度と中性化深さには相関が認められた。このことから、本試験法は原位置でのかぶりコンクリートの透気性を評価する方法として適用が可能であると考えられた。
- (2) コンクリートの含水率を平衡状態とした水セメント比 40, 50 および 60%の各コンクリートにおける改良比抵抗試験では、含水率の高低により比抵抗は増減し、反比例の関係を示した。また、水セメント比 40%～60%の各コンクリートにおける改良比抵抗試験において、単位セメント量を一定として単位水量を増減させた場合、同一材齢において、実際の水セメント比の増減によって比抵抗は増減し、反比例の関係を示した。
- (3) 中性化深さがかぶり厚さに到達するまでの期間を構造物の供用期間 (S.L.) とする Torrent の考え方に基づき、簡易透気速度の評価基準を、また簡易透気速度と比抵抗の関係図による検討から、比抵抗の評価基準をそれぞれ定め、これらに基づいて、かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能の等級区分（案）を提案した。

謝辞

本研究において、簡易透気試験を実施するにあたり、日本大学生産工学部 湯浅昇准教授にご指導を賜りました。ここに記して、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 氏家勲：実構造物におけるかぶりコンクリートの吸水性、透水性、透気性の測定方法，コンクリート工学，Vol. 32 (No. 12)，pp. 43-47，1994. 3
- 2) 今本啓一・下澤和幸・山崎順二・二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol. 44 (No. 2)，pp. 31-38，2006. 2
- 3) 笠井芳夫・松井勇・湯浅昇・野中英：ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法(その 1)～(その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 699-702，1999

- 4) 武若耕司：コンクリートの非破壊検査方法(原理と手法)―鋼材腐食―，特集*コンクリートの非破壊検査／3. 8，コンクリート工学，Vol. 27 (No. 3)，pp. 69-74，1989
- 5) 下澤和幸・田村博・永山勝：かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する研究 (その 1)，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 1007-1008，2004. 9
- 6) 下澤和幸・永山勝・今本啓一・山崎順二・二村誠二：かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する研究 (その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 1179-1180，2005. 9
- 7) 下澤和幸・永山勝・今本啓一・山崎順二・二村誠二：かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する研究 (その 3)，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 (選抜梗概)，pp. 145-148，2006. 9
- 8) 下澤和幸・永山勝・今本啓一・成田瞬・山崎順二・二村誠二：構造体コンクリートの各種表層透気試験法の評価(その 1)～(その 3)，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 1249-1254，2007. 8
- 9) R. K. Dhir et al. : Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods, Magazine of Concrete Research, Vol. 39, No. 141, pp. 183-195, Dec. 1987
- 10) 物理探査学会：物理探査ハンドブック 手法編，pp. 251-257，1998
- 11) RILEM TC 116-PCD: Recommendations of RILEM TC 116-PCD, Tests for gas permeability of concrete, B. Measurement of the gas permeability of concrete by The RILEM-CEMBUREAU method, Mater. & Struct., Vol. 32, pp. 176-178, Apr. 1999
- 12) RILEM Report 40: Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC 189-NEC "Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover", Edited by R. Torrent and L. Fernandez Luco., 2007
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案) ・同解説，pp. 105-106，2004
- 14) 例えば C. Z. Hong and L. J. Parrott : Air permeability of cover concrete and the effect of curing, British Cement Assoc. Report C/5, Oct. 1989
- 15) 黄光律，野口貴文，友澤史紀：表面電極型の比抵抗によるコンクリート内部含水率の定量化，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22, No. 1，pp. 349-354，2000. 6
- 16) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率，細孔構造の不均質性，日本建築学会構造系論文集，第 509 号，pp. 9-16，1998. 7
- 17) B. P. Hughes et al. : New technique for determining the electrical resistivity of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 37, No. 133, pp. 243-248, Dec. 1985
- 18) R. J. Torrent : Performance-based specification and conformity control of durability, International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, 19-21 Mar. 2006
- 19) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009，pp. 148-154，2009
- 20) 田村博，永山勝，下澤和幸：腐食モニタリングに関わるコンクリートの電気化学的特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No. 1，pp. 509-514，1991

(2009年4月9日原稿受理，2009年8月21日採用決定)