

かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する簡易試験法の開発

A STUDY ON SIMPLE TEST METHOD FOR THE EVALUATION OF DURABILITY PERFORMANCE OF COVER CONCRETE

(財) 日本建築総合試験所 材料部材料試験室 下澤 和幸
材料部 永山 勝
足利工業大学工学部 建築学科 今本 啓一
(株) 浅沼組技術研究所 山崎 順二
大阪工業大学工学部 建築学科 二村 誠二

筆者らは、鉄筋コンクリート構造物の耐久性能を簡易かつ迅速に評価する方法として、ドリル削孔を用いた簡易透気試験とコンクリートの比抵抗試験（四点電極法）を利用し、透気性および比抵抗を組み合わせ、かぶりコンクリートの物理的な腐食抑制性能を評価する手法を提案している。本報では、ドリル削孔によって評価している領域や比抵抗と含水状態の関係などについて実験的な検討を行った結果から、本試験法の評価手法としての妥当性について述べる。

キーワード：かぶりコンクリート、耐久性、非破壊試験、透気性、比抵抗、複合法

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物が長期にわたり耐久性を有するためには、外部から水、二酸化炭素および塩化物などの劣化因子の侵入を最小限に止め、コンクリート中の鉄筋が腐食し難い状態とすることが必要である。この性能は、かぶりコンクリートの品質に依存しており、コンクリートは緻密なものであることが望まれる。そのような見地から、コンクリートの耐久性能を評価する手法としては、中性化・塩化物濃度測定や強度試験に加え、コンクリートの透気性や比抵抗を測定する試験法が提案されている。筆者らは、種々の提案がある中、現場で簡便に行える試験法として、笠井らが提案する「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」¹⁾（以下、簡易透気試験法と呼ぶ）と「四点電極法（Wenner 法）²⁾による比抵抗試験方法」が利用できると考えた。しかしながら、筆者らはこれらの試験法が共に、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を問題視している。そこで著者らは、各試験法を単独評価するのではなく、コンクリート表面に設けたドリル孔で測定した透気速度と比抵抗を組み合わせ、かぶりコンクリートの腐食抑制性能を評価する複合法「ドリルPR法」を提案した^{3)~5)}。本試験法開発の目的は、提案した本手法によってかぶりコンクリートの耐久性等級を区分する判定基準を策定し、耐久性診断や竣工時の耐久性能検査に適用できるシステムを確立することである。本報では、ドリルPR法の試験方法の概要と本試験法検討のために行った室内実験の結果について述べる。

2. ドリルPR法の概要

ドリルPR法は、透気性測定には「簡易透気試験法」を、比抵抗測定には「四点電極法」を改良した方法を適用したもので、両法ともコンクリート表層に開けたドリル孔を利用するものである。図1および写真1に示す簡易透気試験法は、竣工時の検査への適用を考えており、笠井らは実験室で確かめたコンクリートの透気性と中性化速度との関係を用いて、耐久性基準を提案¹⁾している。図2および写真2に示す比抵抗試験法は、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(φ10mm)を四点、等間隔に設け、ドリル孔内の比抵抗を求める方法である。なお、同図に示す孔の間隔aは、粗骨材の影響を考慮して40mmとした。測定は1箇所につき、コンクリートの表層

部と深さ 30mm の 2 つとし、ステンレスブラシ電極(φ11mm)を削孔内に挿入して測定する。

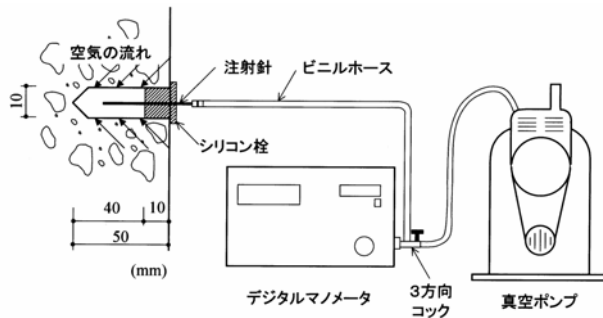


図1 簡易透気試験法¹⁾



写真1 簡易透気試験の状況

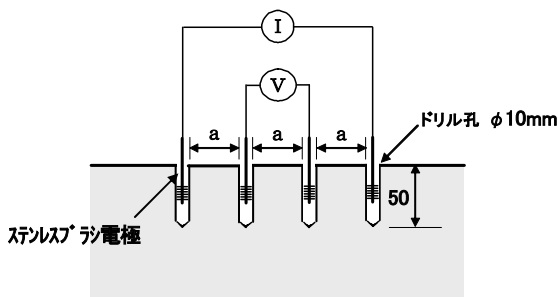


図2 ドリルPR法における比抵抗試験法

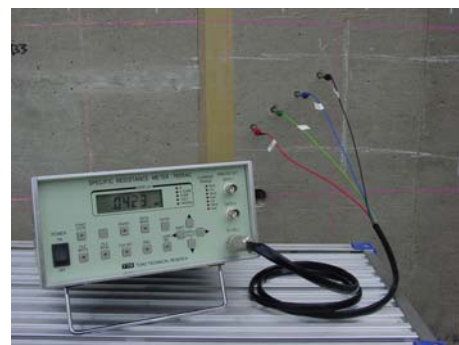
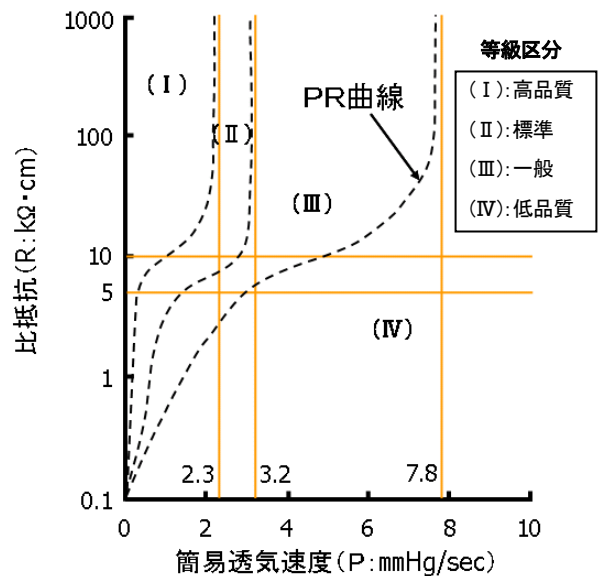


写真2 比抵抗試験の状況

筆者らは、これら両方の測定値を組み合わせる評価(案)を提案しており、図3は、コンクリートのPR曲線(Permeability-Resistivity曲線)による物理的鉄筋腐食抑制性能(以下、単に「耐久性」と呼ぶ)の等級区分(案)である。同図に示したPR曲線の形は確定したものではなく推測で描いたものであり、今後の研究の蓄積によって明らかにする予定である。なお、図中には、簡易透気試験による耐久性基準値(笠井らの提案値¹⁾)、ならびに比抵抗測定試験による耐久性基準値(武若らによる提案値⁶⁾)を軸上に参考として示している。コンクリートの含水状態が変化した場合、コンクリートの耐久性の違いにより、図示したような固有のPR曲線上を動くこととなる。含水率が高くなるとPR曲線上を原点に向かって移動し、反対に、含水率が低くなると原点から離れるように移動すると考えられる。



※各提案値の判定は以下のとおりである。
 $P \leq 2.3$: 長期, $2.3 < P \leq 3.2$: 標準, $3.2 < P \leq 7.8$: 一般
 $R < 5$: 腐食性大, $5 \sim 10$: 不確定, $10 < R$: 腐食性小

図3 ドリルPR法によるコンクリートの耐久性等級区分(案)

3. 簡易透気試験における透気領域

3.1 実験概要

ドリルPR法における簡易透気試験では、ドリル孔内を減圧し、孔内の負圧が大気圧に回復する時間を計測するが、いかにして孔内に空気が流入しているかは定かではない。そのため、孔内周辺の圧力差を直接測定することで、空気の流入状況を確認し、本試験における測定結果との関係を確認した。試験体は300×300×300mmであり、図4のとおりドリル孔の予定位置近傍に真鍮管（外径：φ1.5mm）を埋設して、表1に示す3種類のコンクリート（水セメント比：42.5、55.5および71.5%）を打設した。なお、各試験体の側面（4面）においては、型枠保持材齢（以下、単に材齢と呼ぶ）を1日、3日、7日および14日に変化させて透気性への影響を確認した。測定では、コンクリート内に埋設した真鍮管に圧力センサーを接続したうえで簡易透気試験を行い、減圧時から孔内圧力が回復して透気試験が終了するまでの真鍮管内の圧力変化量を求めた。

3.2 実験結果と考察

3種類コンクリートのうち、ここでは一例としてW/C=55.5%の測定結果を図5に示した。各材齢のうち、材齢3日の簡易透気速度が最も大きく、真鍮管内の圧力変化も大きかった。その圧力変化は、孔の近く（A列）、かつ、コンクリート表面に近い管内（1～3の深さ部分）で最も大きく、その他の管内圧力変化は比較的小さなものであった。一方、その他の材齢面は、材齢14日の簡易透気速度が最も小さかったが、型枠保持期間の違いによる簡易透気速度の差異は明瞭ではなかった。また、材齢3日以外のものは、簡易透気試験を通して管内の圧力変化は極めて小さかった。これは、ドリル孔周辺のコンクリート組織がほぼ均一で緻密な状態であるため、透気量が比較的小さくなったと推察する。これらの結果から、本透気試験は、ドリル孔周辺のコンクリート組織の均質性に左右されることが窺える。局所的なクラックや粗骨材表面の性状などによって、透気速度は大きな影響を受けることが推察される。そのため、試験対象位置でのドリル孔数の検討を要する。

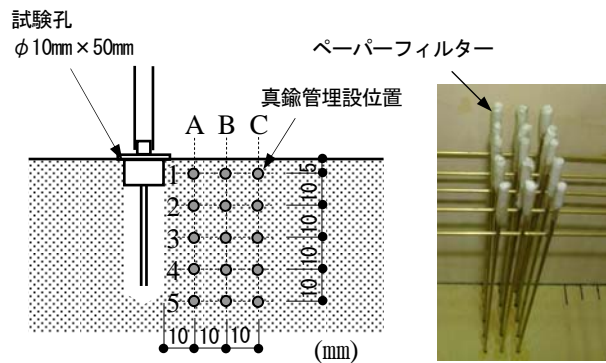


図4 圧力変化測定位置と埋設した真鍮管

表1 コンクリートの調合および使用材料

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | Ad |
|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | W | C | S1 | S2 | G | |
| 42.5 | 45.2 | 174 | 410 | 537 | 230 | 957 | HAE |
| 55.5 | 49.6 | 180 | 325 | 608 | 261 | 909 | AE |
| 71.5 | 51.2 | 180 | 252 | 650 | 279 | 909 | AE |

水(W) : 上水道水
セメント(C) : 普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)
細骨材(S1) : 砕砂(密度2.62g/cm³, 吸水率1.38%)
(S2) : 陸砂(密度2.59g/cm³, 吸水率1.63%)
粗骨材(G) : 砕石(密度2.68g/cm³, 実積率59.0%)
混和材(Ad) : AE … AE減水剤
HAE … 高性能AE減水剤

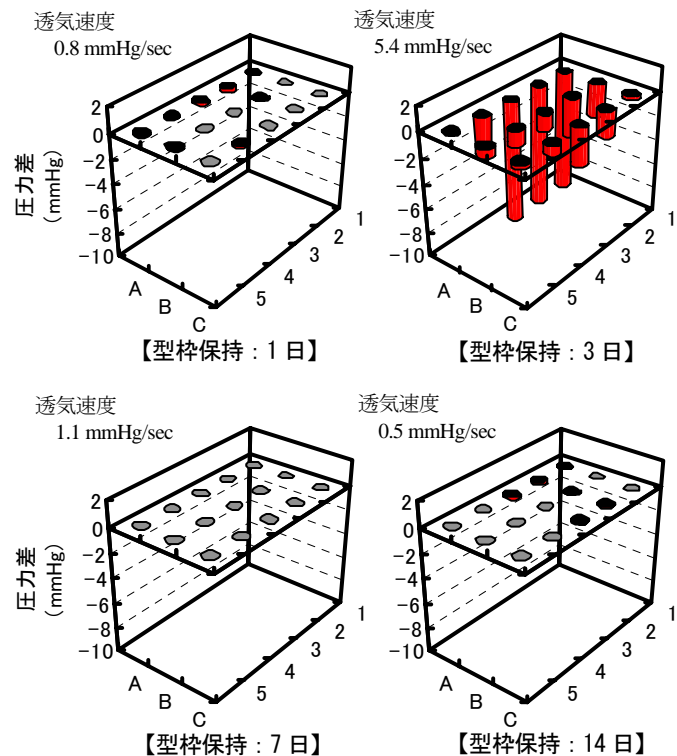


図5 圧力変化量測定結果 (W/C=55.5%)

4. 比抵抗試験による含水状態測定精度の確認

4.1 実験概要

ドリルPR法において含水特性を評価する比抵抗については、測定値とコンクリートの含水状態（含水率）との関係は未だ明らかにはなっていない。そこで、表2に示す各種コンクリートのうち表中に「●」を付した供試体を用いて、コンクリート内の含水状態が平衡状態となるまでの各段階において比抵抗を測定し、ドリル孔内の比抵抗と平衡含水率との関係を確認した。実験では、150×250×60mm 試験体を50℃の環境下で質量変化が落ち着くまで乾燥させた後、写真3のとおり、庫内の相対湿度を調湿剤（塩化マグネシウム（約33%）、臭化ナトリウム（約60%）および水（約100%））によって調整したデシケータ内に、試験体を安置させた。なお、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が極めて小さくなった時点を試験体の平衡含水状態とした。

4.2 実験結果と考察

各試験体の含水状態が平衡になった時点で測定した比抵抗測定結果を図6に示す。写真3に示すとおり、ドリル孔は厚さ60mm方向に削孔しており、測定はドリル孔の表層部分と孔深さ30mm部分で行った。各位置での測定結果はほぼ同様の傾向を示しており、試験体中の含水状態が平衡となっていたことが窺えた。ドリルPR法において、比抵抗の評価参考としている武若ら⁹⁾が提案しているコンクリート中の鋼材腐食性評価では、腐食性が大きい場合を5kΩ・cm以下としている。この状態は、コンクリートの含水率が高いことを意味しており、今回の実験で得られた孔深さ30mm部での累乗近似式によれば、ドリル孔内のコンクリート含水率が6.1%以上の場合に、この状態に相当することが判った。

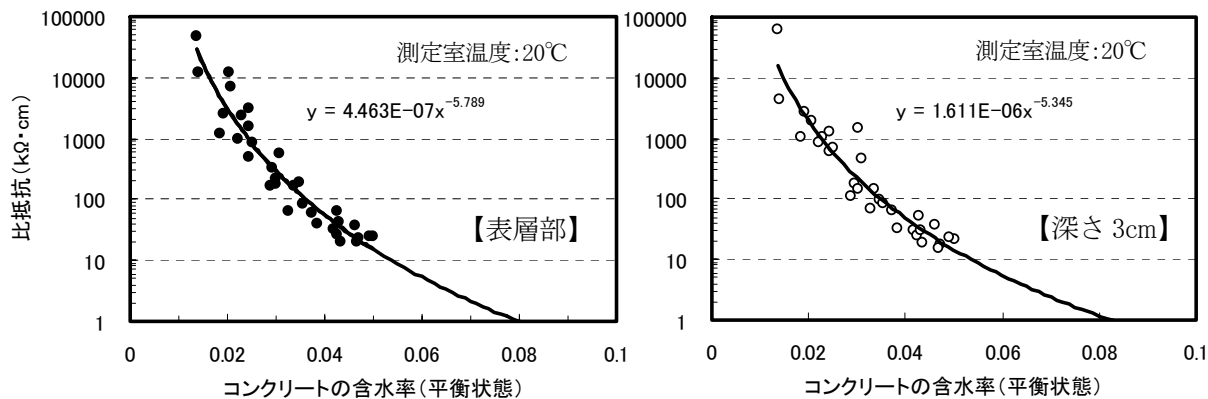
表2 コンクリートの調合および使用材料

| 供試体記号 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | Ad (%) |
|----------|---------|---------|--------------------------|-----|------|-----|--------|
| | | | W | C | S | G | |
| ● 30-175 | 30 | 46.8 | 175 | 583 | 734 | 870 | H:1.2 |
| ● 40-175 | 40 | 45.7 | 175 | 438 | 754 | 933 | H:0.6 |
| 40-197 | 45 | 45.7 | 197 | 438 | 754 | 933 | H:0.6 |
| 40-219 | 50 | 45.7 | 219 | 438 | 754 | 933 | H:0.7 |
| 45-175 | 45 | 46.8 | 175 | 398 | 787 | 933 | H:0.6 |
| ● 50-162 | 45 | 47.4 | 162 | 360 | 805 | 933 | N:1.0 |
| ● 50-180 | 50 | 47.4 | 180 | 360 | 805 | 933 | N:1.0 |
| ● 50-198 | 55 | 47.4 | 198 | 360 | 805 | 933 | N:1.0 |
| ● 50-216 | 60 | 47.4 | 216 | 360 | 805 | 933 | N:1.0 |
| 55-180 | 55 | 48.2 | 180 | 327 | 831 | 933 | N:1.1 |
| ● 60-165 | 55 | 48.8 | 165 | 300 | 853 | 933 | N:1.3 |
| ● 60-180 | 60 | 48.8 | 180 | 300 | 853 | 933 | N:1.3 |
| ● 60-195 | 65 | 48.8 | 195 | 300 | 853 | 933 | N:1.3 |
| ● 65-180 | 65 | 50.2 | 180 | 277 | 887 | 917 | N:1.5 |
| 80-200 | 80 | 53.5 | 200 | 250 | 977 | 886 | - |
| 100-200 | 100 | 54.5 | 200 | 200 | 1018 | 886 | - |

水(W) : 上水道水
セメント(C) : 普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)
細骨材(S) : 山砂(密度2.57g/cm³, FM:2.75)
粗骨材(G) : 砕石(密度2.68g/cm³, 実積率58%)
混和材(Ad) : N... AE減水剤(リグニルスルホン酸系)
H... 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)



写真3 比抵抗実験(養生と測定状況)



注) 図中の累乗近似曲線は、比抵抗1kΩ・cmまで予想補外している。

図6 ドリルPR法による比抵抗測定値と含水率(平衡状態)の関係

5. 室内実験によるドリルPR法の適用性の確認

5.1 実験概要

ドリルPR法の適用性を検討するため、表2のコンクリート調合および使用材料にて供試体を製作し、次の各試験を行った。コンクリート打設から24~48時間後に脱型の後、2ヶ月間恒温恒湿室(20°C、60%R.H.)にて気中養生を行った150×150×530mm供試体を用いて、ドリルPR法による簡易透気試験および比抵抗試験を実施した。併せて、同種のコンクリート供試体によって、RILEM TC-116-PCD法(Cembureau法)⁷⁾による透気性試験および促進中性化試験(JISA 1153)を実施し、ドリルPR法との関係を検討した。

5.2 実験結果と考察

(1) 図7に示すとおり、簡易透気速度は、W/Cが増大するに従い、大きくなる傾向を示した。また、同様にW/Cの増大に従い、促進中性化深さも大きくなる傾向を示した。なお、簡易透気速度と促進中性化深さには相関があり、W/Cが55%以上の場合、簡易透気性試験によって、中性化抵抗性を簡易に推定できると考える。

(2) 図8に示すとおり、RILEM法による透気係数は、W/Cの増大に従い、大きくなる傾向を示した。今回の実験では、W/Cが50%以上の場合に、簡易透気速度も同様の傾向を示している。これより、簡易透気試験によってW/Cが50%よりも大きくなった場合に、かぶりコンクリートの透気性能を推定できるものと考え、簡易透気試験の適用限界を含めた検討が必要であると考える。

(3) 各種コンクリート供試体の簡易透気速度と比抵抗の各測定値を組み合わせ、上述した評価図(案)に図示したものを図9に示す。同図から、W/Cが65%以上の場合、簡易透気速度は大きく、コンクリート組織は比較的粗いものと考えられ、かつ、比抵抗値からは含水状態が比較的高い状態にあると推定される。W/Cが60%以下の場合、簡易透気速度はいずれも小さく、密実なコンクリートと推定でき、かつ、比抵抗値は5kΩ・cm前後と比較的小さなものもあり、含水状態には違いがあると推定される。すなわち、評価図(案)によって各測定値を複合して評価することで、各測定値がどの程度含水の影響

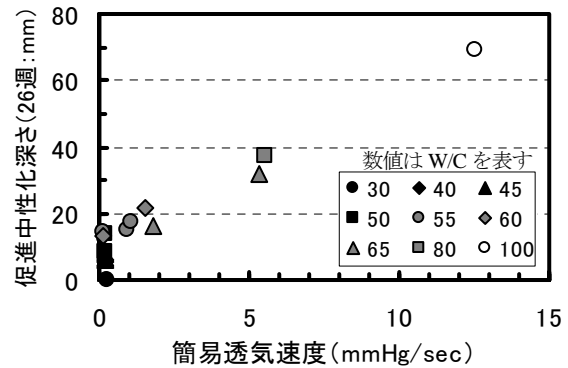


図7 簡易透気速度と促進中性化の関係

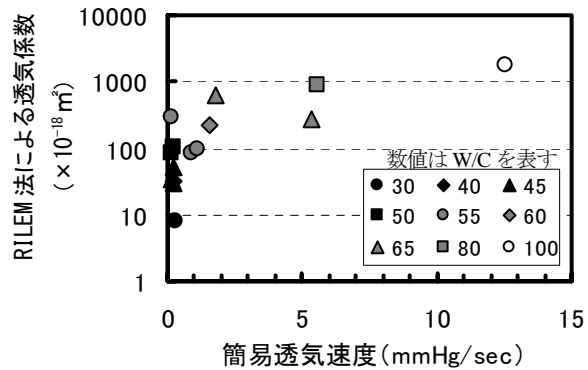


図8 簡易透気速度とRILEM法透気係数の関係

※図中の◇はW/C=50%の実大壁(材齢:4ヶ月)の測定データである(参考値)。

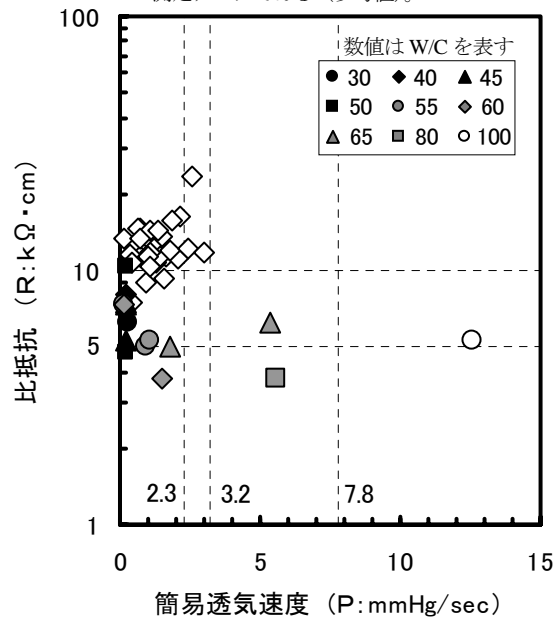


図9 ドリルPR法による試験結果

響を受けているかを推察することができる。なお、図中には W/C=50%のコンクリートによって製作した実大壁を対象とした測定値を◇で示した。材齢4ヶ月を経過し、比抵抗値も $10\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ より大きなものが多く、コンクリート表層部の含水状態は低いものと推察できる。また、簡易透気速度はいずれも 3mmHg/sec よりも小さく、実大壁の全般においてコンクリートは密実な状態であると推定できる。

5. まとめ

ドリル孔を利用して、コンクリート構造物の耐久性能を簡易迅速に評価する試験方法として提案したドリルPR法による各種のコンクリート供試体を用いた室内実験により、以下の知見を得た。

- (1) ドリルPR法における簡易透気試験は、ドリル孔内周辺のコンクリート組織の均質性に左右される試験であり、局部的なクラックや粗骨材表面の性状などによって、透気速度は大きな影響を受けることが推察された。
- (2) ドリルPR法による比抵抗とコンクリートの平衡含水率の関係を求めることができた。本結果をもとに、簡易透気試験の結果に影響を及ぼすコンクリートの含水状態(率)を求めることが、今後の課題となる。
- (3) ドリルPR法における簡易透気試験は、W/Cが50%以上のかぶりコンクリートの透気性能を簡易に推定できる可能性が高い。
- (4) 簡易透気速度と比抵抗値の組み合わせによる評価図によって、コンクリート表層部の含水状態の影響を考慮した判定が可能である。

なお、本手法の判定基準を検討するための実験として、W/Cを3水準設けた実大壁を製作して、現在、各測定値の経時変化データを収集し、検討を進めている。今後、ドリルPR法における簡易透気試験がコンクリート組織の均質性に左右されることを考慮し、既往の研究報告を基に、現場試験としての合理的なドリル孔数を検討することなどが課題となる。

[参考文献]

- 1) 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)、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.699-702、1999
- 2) S.G.Millard : Durability Performance of Slender Reinforced Coastal Defense Units、ACI SP-109-15、1988
- 3) 下澤和幸・田村博・永山勝・今本啓一：かぶりコンクリートの非破壊耐久性評価に関する一実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.523-528、2001
- 4) 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)、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.1007-1008、2004
- 5) 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)、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.1179-1180、2005
- 6) 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
- 7) 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、1999.