

簡易透気性試験による構造体コンクリートの耐久性評価手法に関する研究

Study on Durability Evaluation of Structural Concrete with Rapid Testing Method for Air Permeability

山崎 順二* 立松 和彦*

高見 錦一*

要 旨

本研究の目的は、ドリル削孔による簡易透気性試験を用いた構造体コンクリートの耐久性評価手法を確立することである。本報では、まず、コンクリート製造時の水量変動、含水率および中性化の進行が簡易透気速度に及ぼす影響について、また、簡易透気性と中性化深さの関連性による構造体コンクリートの耐久性評価手法について検討した。さらに実大RC壁の壁面全体の簡易透気速度の偏差および変動量について調査した。その結果、簡易透気速度と中性化深さの間には水セメント比に関わらず極めて高い相関があること、ドリル削孔法による簡易透気速度の平均値に対する変動係数は17%~37%程度とやや大きい値であることなどが分かった。

キーワード：透気性／簡易透気性試験／ドリル削孔法／簡易透気速度／中性化深さ／耐久性評価

1. はじめに

コンクリートの健全性や耐久性さらには劣化診断や余寿命予測などを、ドリル削孔法による簡易透気性試験によって評価する手法を確立することが、本研究の最終目的である。本報では、まずコンクリート製造時の変動による水量増減、中性化の有無および含水率の変化が、ドリル削孔法による簡易透気性にどの程度の影響を及ぼすかについて、室内試験練りにより作製した供試体を用いて確認した。さらに、簡易透気性と中性化深さの関連性から、簡易透気速度に基づくコンクリートの耐久性評価手法についても検討を加えた。

一方、簡易透気性試験を実構造物に適用して簡易透気速度を測定し、ある判定基準に基づいて耐久性評価を行おうとする場合には、実構造物から得られる簡易透気速度の偏差および変動量を把握しておくことが必要となる。そこで、簡易透気性試験の実構造物への適用性を評価するため、高さ3.5m×幅2m×厚さ0.2mのRC造実大壁を作製し、簡易透気速度の壁面全体での偏差および変動量を調査した。また、RILEM法による透気係数と本報に示すドリル削孔法による簡易透気速度との関連性についても検討を加えた。

2. 供試体を用いた実験

2.1 使用材料

供試体作製に用いた材料を表-1に、表-2に供試体の種類および調合を示す。コンクリートの調合は単位水

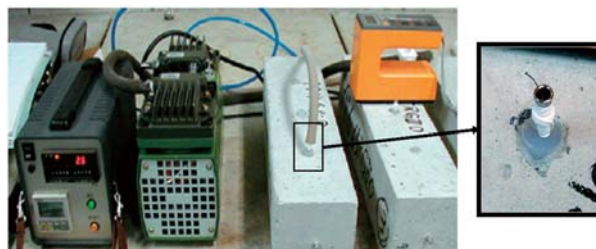


写真-1 簡易透気性試験（ドリル削孔法）の状況

量175kg/m³と180kg/m³を基本としているが、W/C40、50、60%については、単位水量の変動によるコンクリートの品質変化を模擬するため、基準調合のセメント量を変化させずに、水量のみを基準調合のW/Cから5%減、5%増および10%増させた供試体も併せて作製した。

2.2 試験項目および試験方法

試験項目は簡易透気性試験および促進中性化試験とした。簡易透気性試験は、促進中性化試験後の供試体および20℃-60%RHで気中養生した供試体について測定を行った。簡易透気性試験方法は、10×10×40cm供試体の長手方向の側面に削孔した直径10mm深さ50mmのドリル孔を用い、笠井らの研究¹⁾に準じて行った。ただし、孔を塞ぐ栓の形状のみが若干異なる。ドリル削孔法による簡易透気性試験の状況を写真-1に示す。

簡易透気速度K (kPa/sec) は、孔内をX1まで減圧した後、圧力がX1 (kPa) からX2 (kPa) まで復圧するのに要した時間をT (sec) とすると、式(1)により求められる。

$$K = \{(X2 - X1) / T\} \quad (1)$$

*建築研究グループ

表－１ 実験に使用した材料

セメント	普通ポルトランドセメント（太平洋製） 密度：3.16g/cm ³
水	上水道水
細骨材	山砂（枚方産） 密度：2.57g/cm ³ 、FM：2.75
粗骨材	碎石（高槻産） 密度：2.68g/cm ³ 、実積率：58%
混和剤	AE減水剤（エヌエムビー製：15S） 高性能AE減水剤（エヌエムビー製 SP-8SV）

本報では、簡易透気速度（kPa/sec）を得るための圧力の範囲として、X1を21.3（kPa）、X2を25.3（kPa）とした。この範囲は文献¹⁾の160～190（mmHg）に相当する。

促進中性化試験はJIS A 1153に準じて促進材齢26週まで行った。また、簡易透気性試験と同時に、高周波容量式の水分計を用いて供試体の含水率を測定した。

3. 供試体による実験結果および考察

3.1 水量変動が促進中性化深さに及ぼす影響

促進材齢26週での促進中性化深さを図－1に示す。図のX軸の表記は基準調合から加水および減水した量を示しており、例えば「W/C+5%」の場合は、凡例に示す基準調合のW/Cに対して5%に相当する水を加水（セメント量は一定）して作製した供試体を表している。

促進中性化深さはW/Cの増大に伴い大きくなっている。水量変動が中性化深さに及ぼす影響については、水量の増加（W/Cの増大）に伴い中性化深さが大きくなるが、その傾向はセメント量の多い調合（低W/C）ほど顕著となった。単位水量の変動に伴う促進中性化深さの変化量は、セメント量が一定の場合、単位水量20kg/m³当たり約4mm程度であった。

3.2 簡易透気速度に及ぼす各種の影響

(1) 水量変動による影響

図－2に簡易透気速度の測定結果を示す。X軸の表記は図－1と同様である。簡易透気速度はW/Cの増大に伴い大きくなり、W/C60%以上でその傾向が顕著となった。促進中性化深さの場合と同様に単位水量の増減に比例して簡易透気速度も増減しているが、その変化量は、セメント量一定の場合、単位水量20kg/m³当たり約0.04kPa/sec程度であった。

(2) 中性化の進行による影響

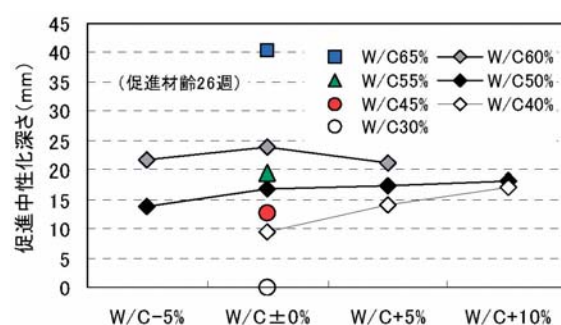
温度20℃・相対湿度60%で養生した供試体〔中性化なし〕と、促進中性化試験後の供試体〔中性化あり〕の簡易透気速度を、同時に測定した結果を図－3に示す。図中の○印は中性化の進行による簡易透気速度の低下率を表す。中性化が十分に進行することによって簡易透気速

表－2 コンクリートの調合概要

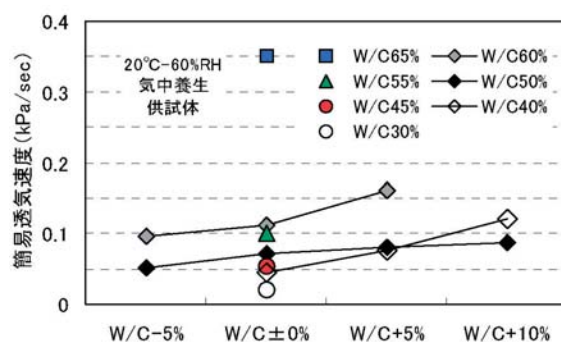
供試体記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m ³)			
			W	Cg	Sg	Gg
● 30-175	30	46.8	175	583	734	870
● 40-175	40	45.7	175	438	754	933
40-197	40(45)	45.7	197	438	754	933
40-219	40(50)	45.7	219	438	754	933
● 45-175	45	46.8	175	398	787	933
50-162	50(45)	47.4	162	360	805	933
● 50-180	50	47.4	180	360	805	933
50-198	50(55)	47.4	198	360	805	933
50-216	50(60)	47.4	216	360	805	933
● 55-180	55	48.2	180	327	831	933
60-165	60(55)	48.8	165	300	853	933
● 60-180	60	48.8	180	300	853	933
60-195	60(65)	48.8	195	300	853	933
● 65-180	65	50.2	180	277	887	917

●は基準調合

W/C欄の（ ）内の数値は水量調整後の実際の水セメント比



図－1 促進中性化試験と水量変動



図－2 簡易透気速度と水量変動

度は小さく（〔中性化なし〕に対して約40%の低下）なり、同じセメント量でも単位水量が大きい供試体ほど低下率の大きい傾向にあった。なお、透気試験時の供試体の含水率は3.0～4.5%であり、中性化ありとなしの同調合での供試体間の差は最大でも0.3%と小さかった。

(3) 含水率の変化による影響

図－4に簡易透気速度とコンクリートの含水率の関係を示す。両者には相関係数0.93と高い負の相関が認められるが、同じ供試体であっても含水率が高くなると簡易透気速度が小さくなり²⁾、含水率の大小に大きな影響を

受ける。そのため、試験時のコンクリートの含水率を把握しておくことが簡易透気性評価のために必要となる。

3.3 簡易透気速度と中性化抵抗性

促進材齢26週での中性化深さと簡易透気速度の関係を図-5に示す。図には両者の回帰線に基づき、文献¹⁾に示された評価基準に対応する領域を示した。両者には相関係数0.98と極めて高い相関があり、この領域による値を基準として適用すれば、簡易透気試験を行うことによってコンクリートの中性化抵抗性、つまり耐久性能を概ね評価することが可能になると考える。

4. 実大RC壁を用いた実験

4.1 実大RC壁の概要

実験を行った実大RC壁は、高さ3.5m×幅2m×厚さ0.2mの大きさである。実大RC壁は東西に面しており、西面の方が日光および雨の影響を受けやすい状況であった。表-3に実大RC壁に用いたコンクリートの使用材料を、表-4に調合の概要を示す。打設したコンクリートは、水セメント比50%、単位水量180kg/m³の呼び強度30のJIS規格品であった。

4.2 試験項目および試験方法

試験項目は、ドリル削孔法による簡易透気性試験、RILEM法による透気性試験、促進中性化試験、含水率およびコア強度試験とした。

簡易透気性試験は、前述の供試体での試験と同じ手法を用い、実大壁の両面において簡易透気速度の測定を行った。測定部位は、図-6に○印で示すように、片面につき水平方向に4カ所、垂直方向に5カ所とし、両面で合計40カ所とした。

簡易透気速度の測定は、1つの測定部位につきドリル孔を2カ所開け、文献¹⁾に準じて1つの孔で簡易透気速度を4回測定し、最初の1回の測定値を除く3回の平均値を1点の簡易透気速度測定値とした。簡易透気性試験と同時に、高周波容量式の水分計を用いて各部位の含水率を測定した。

また、図-6の●印の位置において、高さ方向に8カ所（400mmピッチ）から壁を貫通するようにコア採取を行い、コア強度、静弾性係数および両端面（西面・東面）の中性化深さの測定を行った。

RILEM法による透気性試験のための供試体は、西面A列およびD列の1～5の位置からφ150mmのコアを採取し、両列とも表層から厚さ50mmの部分を用いて試験を行った。なおこれらの試験は、実大RC壁打設後、約6ヶ月以上経過した時点で行った。

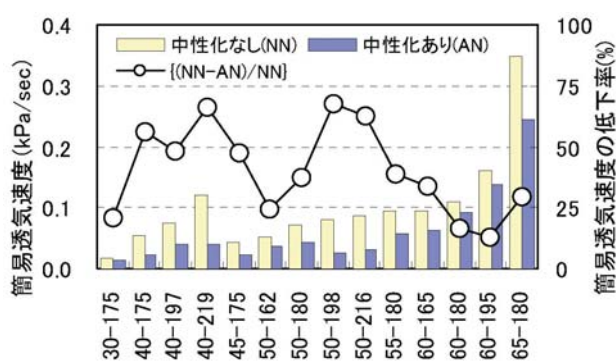


図-3 中性化の有無による簡易透気速度の差

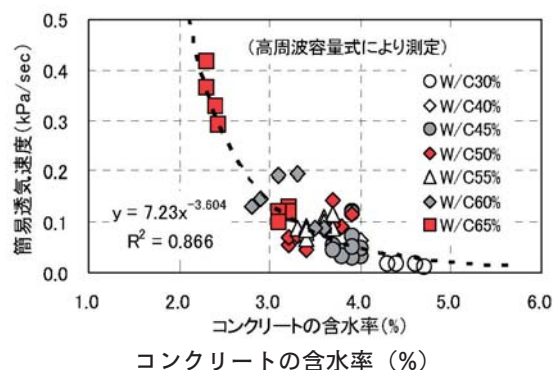


図-4 簡易透気速度とコンクリートの含水率

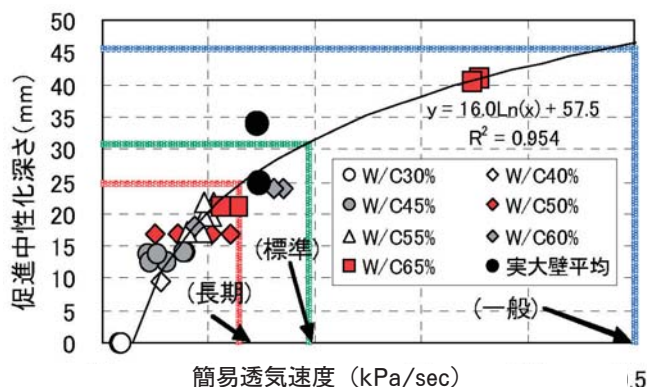


図-5 促進中性化深さと簡易透気速度

表-3 実大RC壁に打設したコンクリートの使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント、密度：3.15g/cm ³
水	上水道水
細骨材	山砂 表乾密度：2.57g/cm ³ 、FM：2.80 砕砂 表乾密度：2.66g/cm ³ 、FM：2.80
粗骨材	砕石 表乾密度：2.69g/cm ³ 、実積率：58.0%
混和剤	高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）

表-4 実大RC壁に打設したコンクリートの調合概要 (kg/m³)

W/C (%)	s/a (%)	C	W	S1	S2	G	SP
50.0	47.4	360	180	401	418	936	2.9

5. 実大RC壁による実験結果および考察

5.1 実大壁のコア強度および中性化深さ

実大壁から採取したコア供試体を用いて、高さ方向の圧縮強度分布を測定した。図-7に供試体の圧縮強度および静弾性係数を示す。壁下部ほど圧密による影響でやコア強度と静弾性係数が大きくなる傾向にあった。図-8に中性化深さを示す。コアNo.5の西面のみ極端に中性化深さが大きくなっているが、これを除くと、西面は平均5.6mm、東面は4.1mmであり、西面の方が中性化速度がやや大きくなった。

5.2 ドリル削孔法による簡易透気性試験の結果

図-9にドリル削孔法による西面および東面での簡易透気性試験の結果を示す。簡易透気速度は、豆板付近で測定した部分を除くと、実大RC壁の下部ほど小さくなる傾向にあり、コンクリートがやや密実になっていることが示唆される。

表-5にドリル削孔法による高さ位置ごとの簡易透気速度の平均値、標準偏差および変動係数を示す。簡易透気速度の高さごとの平均値に対する変動係数の平均は、西面が約37%、東面が約17%とやや大きい値であった。図-5に実大RC壁での測定結果の平均を供試体の結果と併せて●印で示した。供試体の結果から得られた回歸線に概ね近似する値であると考えられる。

一方、簡易透気速度は、壁全体のコンクリート品質、打込み欠陥や内部欠損、微細な表面ひび割れなどに影響を受け、目視では健全と判断できる部位でも極端に大き

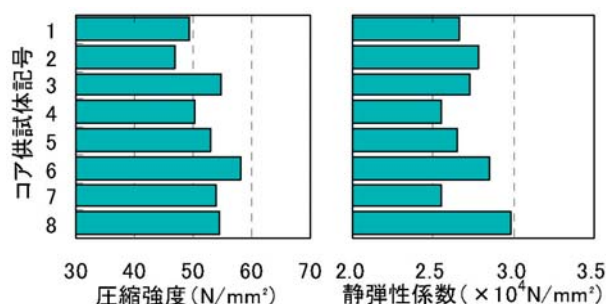


図-7 コア強度および静弾性係数測定結果

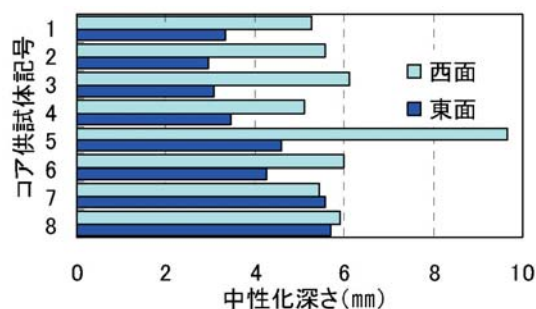


図-8 コア強度および静弾性係数測定結果

な値となる場合がある。そのため、ドリル削孔法による簡易透気性試験により構造物の耐久性評価を行うためには、測定値が明らかに異常と認められる場合や、平均値からの偏差が極端に大きい値を棄却するなどの評価手法を定めておく必要がある。具体的な手法については今後の検討課題である。さらに、簡易透気速度の判定値に関しても、壁全体の簡易透気速度の測定値を平均して1つの代表値として扱うのではなく、同等部位と判断される5～6点程度の簡易透気速度の平均値をその部位の代表

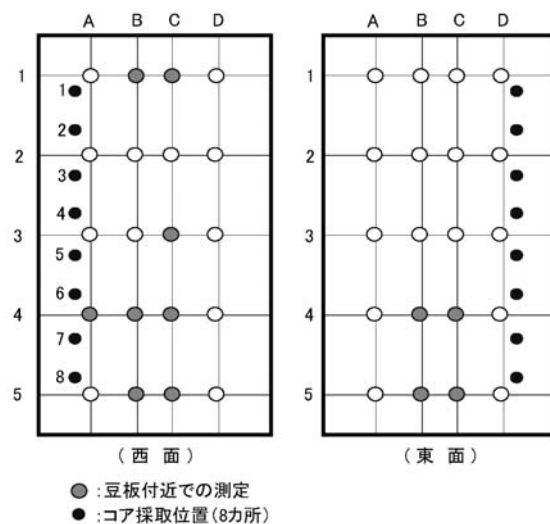


図-6 実大RC壁での簡易透気速度測定位置立面図

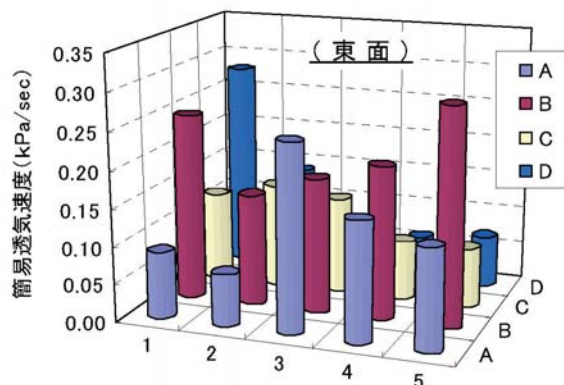
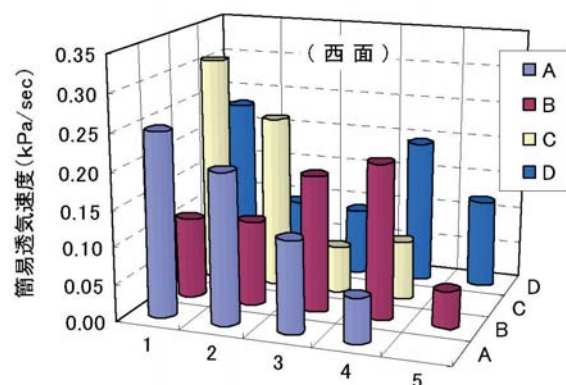


図-9 ドリル削孔法による簡易透気性試験結果

値とし、さらに各部位の代表値の平均を壁全体の簡易透気速度として扱うことで、より正確に構造物全体の性能を評価することが可能になると考える。

なお、コンクリートの含水率が簡易透気速度に大きな影響を及ぼすことが既往の実験結果²⁾や室内試験練りの結果から分かっており、高周波容量式による含水率が約6.0%以上になるとほとんど透気しなくなる。しかし、本実験における簡易透気速度測定時のコンクリートの含水率は、壁全体で3.8～4.5%（西面平均3.9%、東面平均4.4%）であり、各測定部位ともほぼ同程度の含水状態であったことから、測定された簡易透気速度に対する大きな影響はないと考えられる。

5.3 コンクリートの透気性と圧縮強度

西面A列および東面D列において、簡易透気速度およびRILEM法による透気係数と、コンクリートの圧縮強度との関係を図-10に示す。圧縮強度とコンクリートの透気性には良好な関連性があり、一つの部材（本実験で

は壁）であっても圧縮強度が高い部位（壁の下部）ほどコンクリートが緻密になり、透気しにくくなる傾向が認められる。この傾向はRILEM法による透気係数よりも、ドリル法による簡易透気速度の方が顕著であった。

5.4 RILEM法による透気係数とドリル削孔法による簡易透気速度の比較

西面のA列およびD列から採取したφ150mmのコア表層部5cmの部分を用いて、RILEM法により透気係数を測定した。RILEM法による透気係数と、コアと隣接する位置で測定したドリル削孔法による簡易透気速度を高さ位置ごとに図-11に示す。図中には、表-6に示すドリル削孔法による耐久性の評価基準（案）と、RILEM法による透気性の評価基準³⁾を破線で示した。なお、ドリル削孔法による評価基準（案）は、図-5に示した供試体による促進中性化深さと簡易透気速度の関係から、文献¹⁾に示されたJASS5の耐久性区分に対応する簡易透気速度の数値に基づいて設定したものである。図-11より、西面D列の高さ位置3、4、5の供試体にはコンクリート表面に微細な表面ひび割れが見られたために、RILEM法による透気係数が大きくなったと考えられる。またRILEM法においても、前述のドリル削孔法による簡易透気速度と同様に、

表-5 実大RC壁の簡易透気速度の平均値と標準偏差および変動係数

高さ位置	西 面			東 面		
	平均値 (kPa/sec)	標準偏差 (kPa/sec)	変動係数 (%)	平均値 (kPa/sec)	標準偏差 (kPa/sec)	変動係数 (%)
1	0.225	0.084	37.3	0.185	0.094	50.8
2	0.163	0.068	41.9	0.125	0.037	29.6
3	0.116	0.053	45.5	0.154	0.082	53.5
4	0.136	0.077	56.5	0.126	0.068	53.9
5	0.085	0.049	58.2	0.144	0.102	70.7
平均値に対する 偏差・変動係数	0.145	0.053	36.6	0.147	0.025	16.7

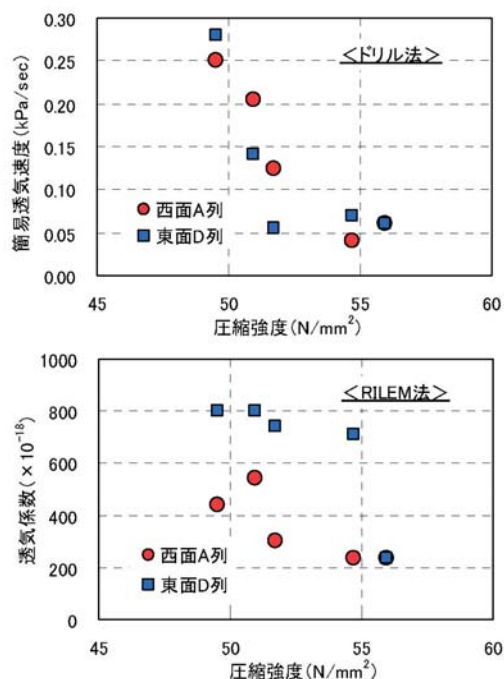


図-10 コンクリートの透気性と圧縮強度

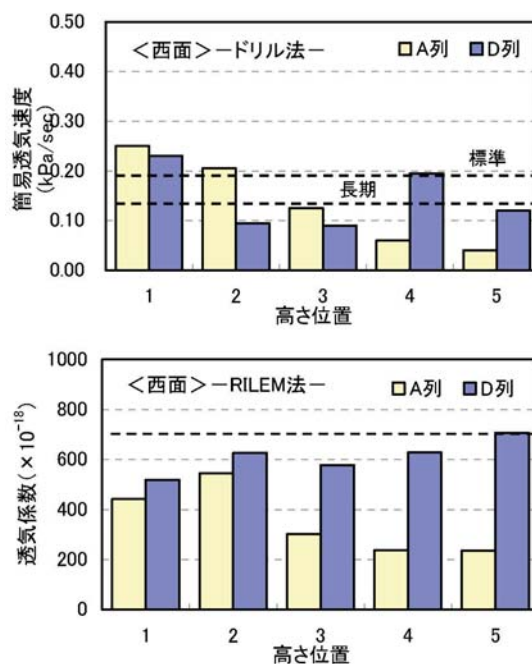
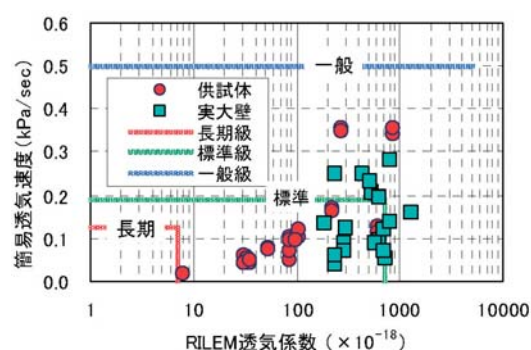


図-11 ドリル削孔法とRILEM法による透気性

表－6 透気性による耐久性の評価基準（案）

	耐久性区分	一 般	標 準	長 期
日大評価基準（OPC） ¹⁾	対応する促進26週の中性化深さ（JIS法）	45.6mm以下	31.0mm以下	25.0mm以下
	簡易透気速度	7.8mmHg/sec以下	3.2mmHg/sec以下	2.3mmHg/sec以下
本報ドリル削孔法 ²⁾	簡易透気速度	0.50kPa/sec以下	0.19kPa/sec以下	0.13kPa/sec以下
RILEM評価基準 ³⁾	区 分	High	Average	Low
	透 気 係 数	$700 \times 10^{-18} \text{m}^2 <$	$7 \times 10^{-18} \sim 700 \times 10^{-18} \text{m}^2 <$	$< 7 \times 10^{-18} \text{m}^2$



図－12 ドリル削孔法とRILEM法による透気性評価

壁下部ほどコンクリートが透気しにくくなり、壁下部ほど密実になっている傾向が認められた。

また図－12には、供試体および実大RC壁から得られたドリル削孔法による簡易透気速度とRILEM法による透気係数の関係に併せて、表－6に示す評価基準をそれぞれ示した。今回の実験結果からは、ドリル削孔法により「長期級」もしくは「標準級」に区分されるコンクリートが、RILEM法では概ね「Average」と評価される範囲に含まれることがわかる。

これより、評価基準は試験法によって異なるものの、コンクリート表面に微細な表面ひび割れや欠損部などがなければ、ドリル削孔法による簡易透気速度とRILEM法による透気係数からは、ほぼ同様の評価が得られると考えられる。今後さらに検討を加えることにより、簡易な手法であるドリル削孔法を用いて、RILEM法と同様に構造体コンクリートの透気性の評価、つまり構造物の耐久性の評価をほぼ適切に行うことができると考えられる。

6. まとめ

簡易透気速度に影響を及ぼす各種の要因と耐久性評価手法について検討し、構造体コンクリートへの簡易透気性試験の適用性について検討するために実大RC壁を作製して実験を行った結果、以下のことが分かった。

- (1) 水量の増加（W/Cの増大）に伴い中性化深さおよび簡易透気速度が大きくなる。
- (2) 中性化が十分に進行したコンクリートの簡易透気速

度は、中性化前と比べて約40%程度小さくなる。

(3) 簡易透気速度と中性化深さの間には水セメント比に関わらず極めて高い相関がある。

(4) ドリル削孔法による

簡易透気速度の平均値に対する変動係数は、本実験の結果からは17～37%であった。

(5) 簡易透気性の評価に用いる簡易透気速度の値については、壁全体の簡易透気速度の測定値を平均して1つの代表値として扱うのではなく、5～6点程度の平均値をその部位の値とし、さらに各部位の値の平均値を壁全体の簡易透気速度の代表値として採用することが必要である。

(6) ドリル削孔法による簡易透気速度とRILEM法による透気係数はほぼ同様の傾向を示していることから、簡易な手法であるドリル削孔法においても、RILEM法と同様に構造体コンクリートの透気性の評価をほぼ適切に行うことができる。

現在、新たに3水準の一般コンクリートを用いた実大壁を作製し、継続して実験を行っている。今後、簡易透気速度の変動量やコンクリートの含水率を考慮した簡易透気速度の評価方法および評価基準の作成に加え、簡易透気性試験の測定点数などについても再検討し、本法（ドリル削孔法）を、早期かつ迅速に行える簡易な耐久性評価のための一手法として確立したい。

〔謝 辞〕

本実験は日本建築総合試験所および足利工業大学共同で行ったものである。ここに記して感謝の意を表します。

〔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、日本建築学会学術講演梗概集A－1（中国）pp.699-700（1350）、1999
- 2) 山崎順二、立松和彦、村上順一、二村誠二：再生骨材を混合使用したコンクリートの透気性について、日本建築学会学術講演梗概集A－1（北海道）pp.381-382（1178）、2004
- 3) Concrete Society Technical Report：Permeability Testing of Site Concrete - A Review Methods and Experience, 1988