

論文 コンクリートの透気性の簡易測定手法に関する研究

平岩 陸^{*1}・田中清人^{*2}・谷川恭雄^{*3}・森 博嗣^{*4}

要旨：本研究では，表面仕上げを含めたコンクリートの透気性を簡便に測定する方法を提案するとともに，この測定方法の適用性について検討した。水セメント比および細骨材量を変化させたモルタルを用いて，本方法によって得られる透気性と，加圧法による透気性とを比較し，さらに中性化促進試験との比較も行った。その結果，本方法による透気性の測定結果は，加圧法による透気性の測定結果および中性化深さと，定性的に良い相関を示すことがわかった。

キーワード：コンクリート，透気性，簡易測定法，中性化，加圧法

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の耐久性に影響する要因は数多いが，その中で最も一般的な要因はコンクリートの中性化である。中性化は，大気中の二酸化炭素によって，コンクリート中のアルカリ分である水酸化カルシウムが炭酸カルシウムとなり，アルカリ性が失われる現象である。これにより，アルカリによって保たれていた鉄筋の不動態皮膜が破壊され，鉄筋が錆び始める。その結果，錆の膨張圧によってコンクリートにひび割れが発生し，コンクリート構造物が劣化していく。

このため，コンクリートの中性化については，多くの研究者によって研究がなされており，水セメント比，セメント種類，骨材種類，施工，仕上げなど，数多くの影響要因が明らかとなっている¹⁾。しかし，中性化の本質的な要因は，コンクリート中のアルカリ量が同一であるとすれば，コンクリート内部への炭酸ガスの流入量である。この流入量は，コンクリートの透気性を測定することによって把握が可能と考えられ，実験的研究^{2),3)}とともに，コンクリート内の気体拡散係数に関する理論的な研究^{4),5)}も行わ

れてきた。従来行われてきた方法は，主として加圧法であるが，加圧室をコンクリート表面に取り付ける方法が煩雑となる。また，減圧法においては，コンクリート表面に削孔する方法が一般的であるが，表面仕上げの影響を考慮することができない。

本研究では，構造物そのものの中性化深さを推定するために，表面仕上げを含めてコンクリートの透気性を測定できる簡便な方法を提案し，その適用性について検討する。今回は，その基礎的な段階として，表面仕上げのないコンクリートを対象として，本手法で測定される透気性と，通常に加圧法によって得られる透気係数および促進試験による中性化深さを比較・検討した。

2. 実験方法

2.1 測定方法の提案

本研究で提案する透気性の測定方法は，図-1に示すようなものである。コンクリートに接した容器部分を真空ポンプによって減圧し，容器に取り付けた圧力計により減圧後の圧力の変化を測定する。圧力の変化量を時間で除して圧力

*1 豊田工業高等専門学校助手 建築学科 博士（工学）（正会員）

*2 豊田工業高等専門学校助教授 建築学科 （正会員）

*3 名古屋大学大学院教授 環境学研究科都市環境学専攻 工博（正会員）

*4 名古屋大学大学院助教授 環境学研究科都市環境学専攻 工博（正会員）

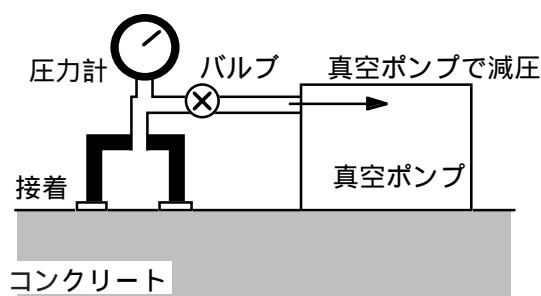


図-1 提案する透気性測定方法の概念図

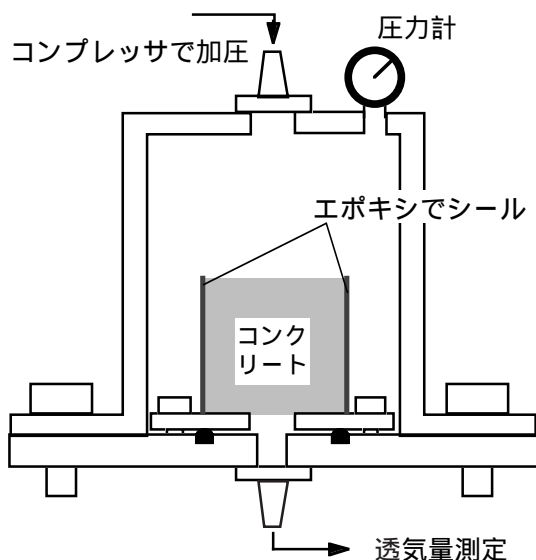


図-2 加圧法の概要

の回復率を算出し、コンクリートの透気性を評価するものである。コンクリートとの接触面は、熱可塑性樹脂によって接着した。まず、透気性のない鉄で試験を行ったところ、-96kPa程度まで減圧することが可能であり、今回の測定範囲である500秒までは、圧力変化がまったく生じなかった。その後、1日経過すると、1.5kPa程度の圧力が回復した。より空気漏れの少ない方法も可能であると考えられるが、今回はこの方法を用いてコンクリートの透気性を測定した。

2.2 実験方法

前述した透気性の測定方法の適用性を検討するために、コンクリートの透気性試験方法として一般的に用いられている加圧法⁹⁾、および中性化促進試験による中性化深さとの比較を行った。

本実験で用いたモルタルの調合を表-1に示す。今回は、水セメント比を3段階、細骨材量を

表-1 調合表

W/C (%)	s/m (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)
40	30	390	976	780
50		428	856	
60		458	763	
40	40	335	836	1,040
50		367	734	
60		392	654	
40	50	279	697	1,300
50		306	612	
60		327	545	

[Notes] W/C: Water-cement ratio, s/m: Volumetric sand-mortar ratio, W: Water, C: Cement, S: Sand

3段階に変化させて調合を決定した。

加圧法による透気性の測定は、図-2に示すような方法で行った。φ5×10cmの円柱供試体を3等分した、打込み最下部のものを使用し、その側面をエポキシ系樹脂接着剤でシールするとともに、穴を開けた金属板の上に固定した。容器内の圧力をほぼ0.4N/mm²とし、空気の流出量が安定し定常状態となったのち、水上置換法により空気の流出量を測定した。透気係数は、得られた流出量から次式を用いて算出した。

$$K = \frac{2LP_2 Q}{P_1^2 - P_2^2 A} \quad (1)$$

ここに、K：透気係数(cm⁴/Ns)、L：供試体厚さ(cm)、P₁：載荷圧力(=40N/cm²)、P₂：大気圧(=10N/cm²として計算)、Q：透気量(cm³/sec)、A：透気面積(cm²)

一方、提案方法による透気性の測定には、図-3に示すように、加圧法で測定した供試体をそのまま用いる方法（実験方法1）と、図-4に示すように、10×20×5cmの直方形供試体を用いる方法（実験方法2）の2種類の方法で実施した。まず、前者は、減圧容器の接着を金属に対して行えるので、接着部分からの漏れがほとんどないと考えられる。一方、後者は実際にコンクリー

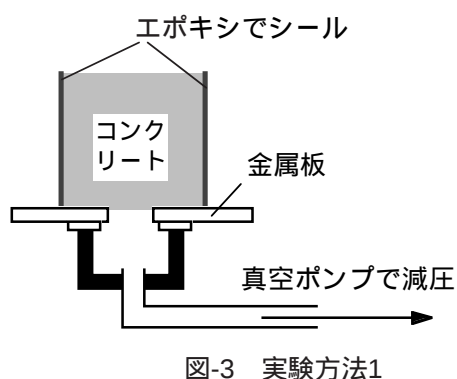


図-3 実験方法1

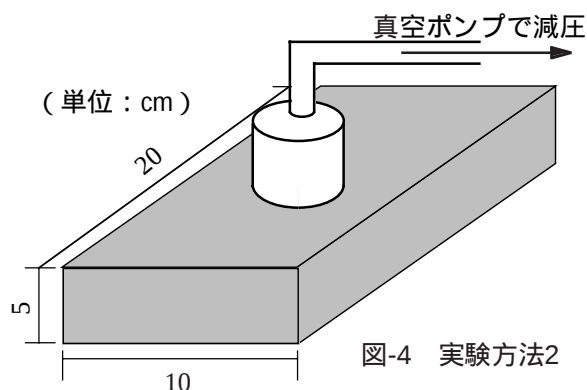


図-4 実験方法2

トに適用する場合の方法であり，この場合，コンクリート部分との接着部からの漏れが問題となる。双方とも，真空ポンプによって5分間減圧し，バルブを閉じて，その後の気圧の変化を測定した。この時の圧力 - 時間曲線の傾きが透気性を示すと考えられる。

これらの供試体は，いずれも脱型後，1ヶ月の水中養生を行い，その後，1ヶ月の空中養生を行ってコンクリートを十分に乾燥させた後，それぞれの透気性試験を行った。

また，同一の調合を用いてφ5×10cmの円柱供試体を作成した。力学特性については，これらを用いて4週における圧縮強度と弾性係数を測定した。また，中性化深さに関しては，エポキシ系樹脂接着剤で側面をシールした円柱供試体を用いて，温度20℃，湿度60%，CO₂濃度5%の環境下で中性化促進試験を行った。促進養生期間を13週とし，所定の材齢に達した供試体を割裂した後，断面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を吹き付けて，中性化深さを測定した。測定した部分は，φ5×10cmの円柱供試体の上下部分であり，3点測定した値を平均した。

3. 実験結果とその考察

3.1 透気性測定結果

(1) 加圧法

図-5は，加圧法による透気係数の測定結果を示したものである。透気係数については対数表示で示した。この図によれば，今回の実験範囲ではそれほど差が現れなかったものの，透気係数は，水セメント比の増加とともに増加し，細

骨材量が増加すると減少する傾向を示している。

(2) 提案方法

まず，金属板を貼りつけた実験方法1の結果を図-6に示す。5秒ごとに100回圧力を測定し，減圧後500秒までの圧力変化を示したものである。圧力は時間が経つにつれてほぼ線形に上昇している。いずれの図においても水セメント比が大きい方が圧力の回復が速く，これを透気性の影響と考えれば，加圧法による結果と同傾向といえる。

次に，既存建築物のコンクリートに適用できる実験方法2で行った結果を図-7に示す。この圧力 - 時間曲線も，実験方法1とほぼ同様の傾向を示している。ただし，全般的に実験方法1よりも圧力の回復が速い。

以上の結果から，提案方法による圧力変化は，ほぼ時間に比例することがわかったため，以後の考察では，圧力 - 時間曲線の傾きを圧力回復率として，この値に関して検討した。図-8は，実験方法1および2の圧力回復率を示したも

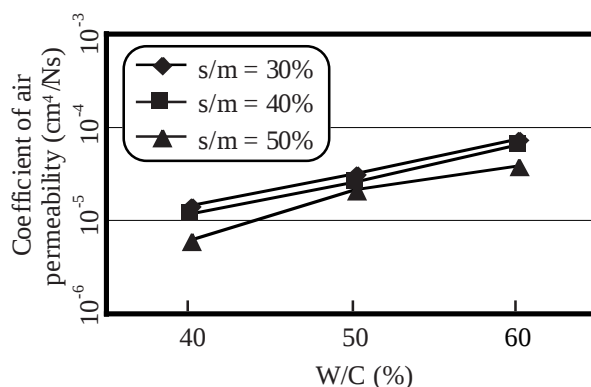


図-5 加圧法による透気係数

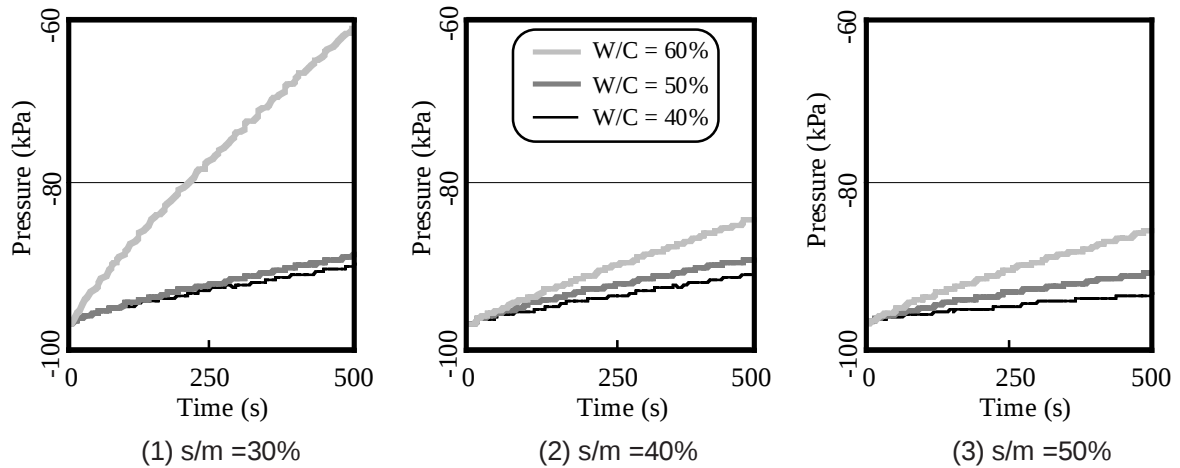


図-6 圧力 - 時間曲線 (実験方法1)

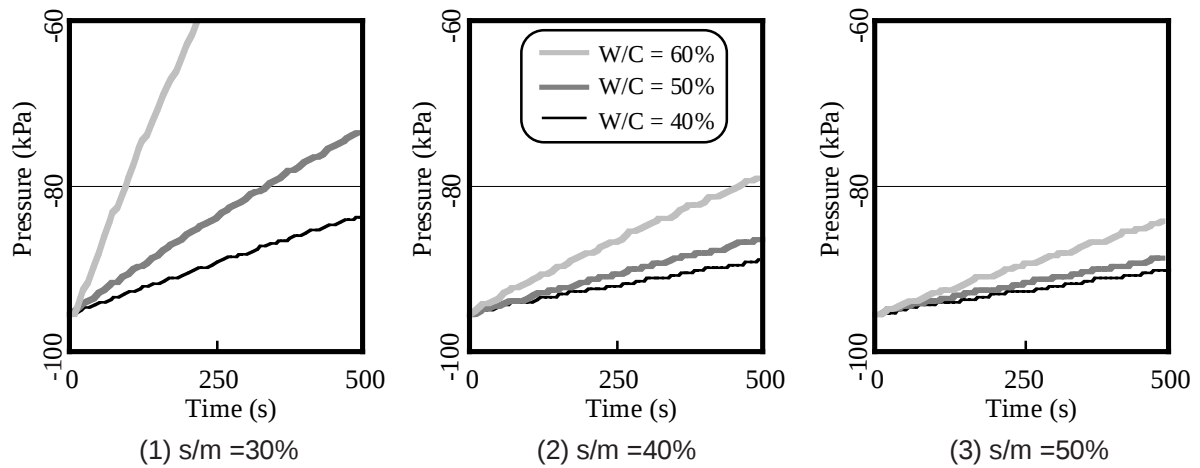


図-7 圧力 - 時間曲線 (実験方法2)

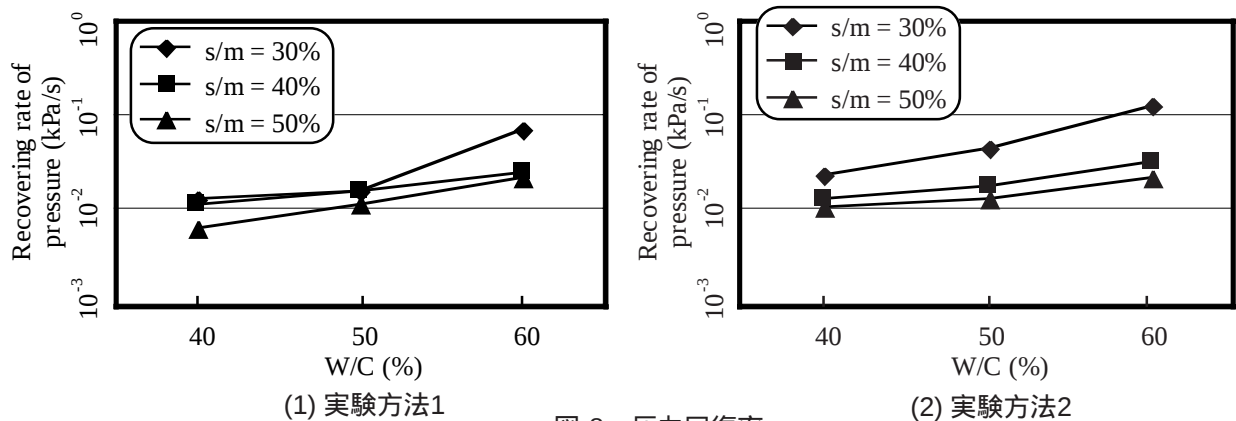


図-8 圧力回復率

のである。いずれの図からも、水セメント比が増加するにつれて、また、細骨材率が減少するにつれて、圧力回復率が増加することがわかる。圧力 - 時間曲線では、 $W/C=60\%$, $s/m=30\%$ で最も圧力の回復が速く、特異な値を示すと思われたが、前掲の図-5の加圧法による透気係数と

同様に圧力回復率を対数表示した場合には、それほど特異な値とはならない。これらの値と加圧法の相関関係を示したものが図-9である。いずれの方法も、絶対的な値は加圧法による透気係数と異なるが、実験方法1では相関が大きく、加圧法とほぼ同様の値を示しているといえる。

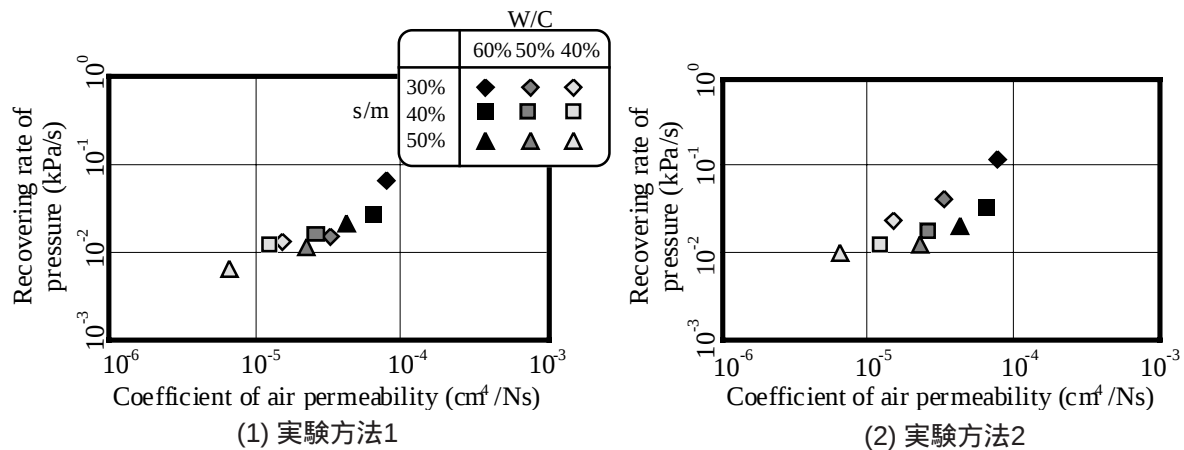


図-9 提案方法による結果と加圧法による結果との比較

一方、実験方法2では、実験方法1に比べて相関が低いことがわかる。この理由として、接着部からの漏れや透気経路の変化の影響が考えられる。

以上の結果から、他の特性との比較は、実験方法1による圧力回復率によって行った。

3.2 圧縮強度の結果および透気性との比較

図-10は、今回の実験で用いたモルタルの圧縮強度を示したものである。細骨材量にかかわらず、水セメント比が上昇するにつれて減少している。一方、細骨材量の増加とともに強度が減少する傾向がわずかに見られるが、その影響は小さい。

図-11は、圧縮強度と圧力回復率の相関を示したものである。圧力回復率が大きいほど強度は低下する傾向があるが、全体としての相関係数は小さく、0.49であった。この理由は、圧力回復率が、水セメント比および細骨材量の両者の

影響を受けるのに対して、圧縮強度は、細骨材量の影響をほとんど受けないためと考えられる。

3.3 中性化深さの結果および透気性との比較

図-12は、中性化深さの測定結果を示したものである。この図によれば、水セメント比が小さくなると、細骨材量にかかわらず中性化深さが低下する。これは、水セメント比が小さくなった場合、内部が緻密になるためである。一方、細骨材量が多くなると、水セメント比にかかわらず中性化深さが低下している。本研究の調査では、細骨材量が増加すれば、セメント量は減少する。アルカリ量はセメント量に依存するため、細骨材量が多い調査では、結果的にアルカリ量は少なくなる。この結果から、細骨材量が多い方が中性化しやすいと考えられる。しかし、実験結果はこの逆となっている。これは、今回の実験では良質な川砂を用いており、細骨

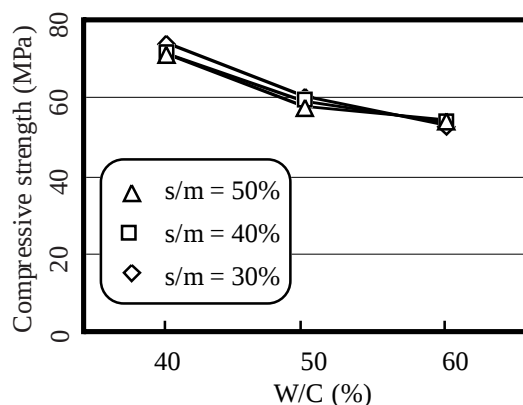


図-10 圧縮強度

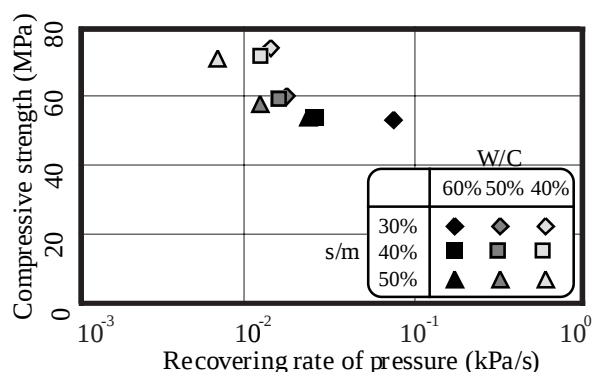


図-11 圧縮強度と圧力回復率の関係

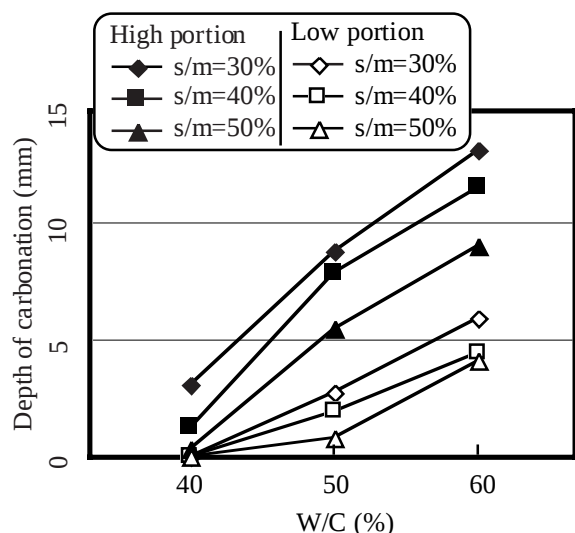


図-12 中性化深さ

材がペースト部分よりも緻密で、透気性が小さいため、細骨材量の増加による透気性減少の影響の方が、アルカリ量の影響よりも大きくなった結果と考えられる。また、供試体上部と下部で中性化深さに差が見られ、これはブリーディングによる影響と考えられる。上部で中性化深さが大きいのは細骨材量にかかわらずすべて同様であるが、細骨材量が多くなるにつれて、また水セメント比が小さくなるにつれて上部と下部の差が小さくなることがわかる。細骨材量が多い場合や水セメント比が小さい場合には、ブリーディング量が少なくなるので、この結果は、供試体上下における中性化深さの差が、ブリーディングによって生じている現象であることを示している。

図-13は、中性化深さと圧力回復率の関係を示したものである。中性化深さは、供試体上部の結果のみを示した。水セメント比が小さくなると、また、細骨材量が多くなると、いずれの値も小さくなっていることがわかる。なお、相関係数は0.78であり、この値からも両者の相関は大きいといえる。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの透気性を測定する簡便な方法を提案するとともに、得られた結果と、加圧法によって得られる透気係数、圧縮

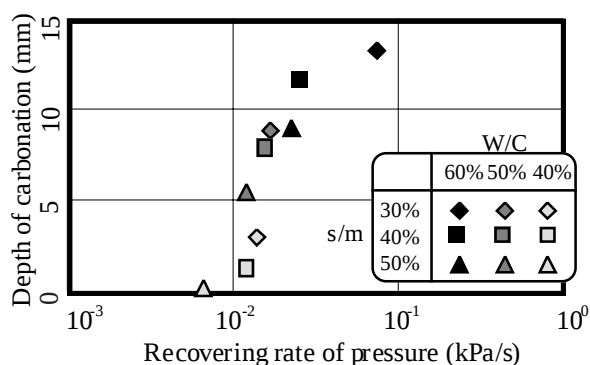


図-13 中性化深さと圧力回復率の関係

強度および中性化深さを比較・検討した。

その結果、既存建築物に適用できると考えられる実験方法2は、改良の余地があると考えられるが、これと同様の概念による実験方法1の結果は、加圧法による透気係数および中性化深さと良い相関があることがわかった。今後、既存建築物に適用できるように改良を行い、さらにデータを蓄積していく予定である。

【謝辞】

本研究の実施に際しては、豊田工業高等専門学校の研究室の方々に多大なご協力をいただいた。また、本実験に用いた測定装置は、豊田高専実習工場にて作成していただいたものである。付記して謝意を表する。

【引用文献】

- 1) 岸谷孝一・西澤紀昭：中性化，技報堂出版，1986.8
- 2) 湯浅昇・笠井芳夫・松井勇：構造体コンクリートの簡易な品質調査方法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集A，pp.1159-1160，1992.8
- 3) 田中享二・端直人・橋田浩：水分を含む状態でのセメントモルタルの透気性，日本建築学会構造系論文集，No.469，pp.9-15，1995.3
- 4) 古澤靖彦：コンクリート中の物質移動評価に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.37，No.4，pp.3-11，1994.4
- 5) 白川敏夫・島添洋治・麻生實・永松静也・佐藤嘉昭：セメント硬化体中への気体の拡散係数測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，No.515，pp.15-21，1999.1
- 6) 笠井芳夫・池田尚治：コンクリートの試験方法（下），技術書院，pp.153-158，1993.1