

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月28日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760428

研究課題名（和文） 簡易透気試験による構造体コンクリートのスケーリング抵抗性推定
および劣化予測研究課題名（英文） Evaluation of Scaling Resistance for Concrete structure by
Rapid Air Permeability Test

研究代表者

権代 由範（GONDAI YOSHINORI）

仙台高等専門学校・建築デザイン学科・助教

研究者番号：00553520

研究成果の概要（和文）：本研究では、実構造物に適用可能な簡易型の非破壊透気試験装置を開発するとともに、透気性指標値に影響を及ぼすと考えられる種々の要因について検討を行い、試験の汎用性や再現性を確保するための測定条件を明らかにした。さらに、コンクリートの透気性とスケーリング抵抗性の関係について検討を行い、簡易透気試験により得られる透気性指標値をスケーリング抵抗性の評価指標として適用できる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, the Rapid Air permeability test apparatus applicable to a concrete structure was developed and various factors which have on air permeability index were examined. As a result, the test condition which secures experimental flexibility and reproducibility was clarified. Moreover, a possibility that air permeability index could apply as an evaluation index of scaling resistance was shown, by investigating the relation between Air permeability indexes and scaling resistance.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2011年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：コンクリート、凍害、スケーリング、透気性、劣化予測

1. 研究開始当初の背景

コンクリートの耐凍害性評価は、従来、供試体の凍結融解試験による相対動弾性係数の低下を指標として行なわれている。これは、T.C.Powers が凍害の発生機構として提唱した水圧説の概念に基づくものであり、凍害の発生を凍結水圧による組織の膨張として捉えた指標である。したがって、相対動弾性係数は、コンクリート組織の膨張、即ち、ひび割れや剥落・崩壊を対象とする評価において

有効な指標となるが、表層劣化であるスケーリングの評価が困難であるという問題を抱えている。T.C.Powers は、後に水圧説で説明しきれないスケーリングの発生機構を浸透圧説で説明したが、現時点において我が国では、浸透圧説で説明されるスケーリングを対象とした耐凍害性評価のための指標は定められていない。このスケーリングは、凍結融解作用によりコンクリート表層が鱗状に剥離する現象であるが、凍結融解と塩化物が複

合的に作用することによって著しく促進されるという特徴を持つ。近年、凍結防止剤（主成分：NaCl）の散布量増加を背景に劣化事例が多数報告され、凍害による劣化問題として注目されている。東北地方における凍害の発生件数を見ると、建築・土木構造物ともにスケーリングの劣化事例が最も多く、凍結防止剤による影響が広範に及んでいることを裏付ける。以上の背景より、積雪寒冷地におけるコンクリートの耐久性照査や維持管理の観点から、早急な対応が望まれる。

ここでスケーリングの劣化外力である水や塩化物に着目すると、本質的にこれらの物質の浸透・拡散がなければ劣化は生じないこととなる。つまり、スケーリングの発生やその後の進展は、コンクリート表層部の物質透過性に大きく依存する。したがって、構造体コンクリートを対象に物質透過性の指標となる透気性の評価が可能となれば、スケーリング抵抗性の評価・推定を行なう上で、有用な情報を提供することができるものと思われる。一方、コンクリートの原位置透気試験法については、欧米諸国において研究が進んでおり、Figg法をはじめ、Hansen法、Torrent法などが代表的試験法として挙げられる。国内においては、笠井らの方法、月永らの方法、今本らの方法および申請者が検討する方法などが挙げられるが、欧米諸国に比べ研究の遅れは否めない。また、これまで種々の透気性試験に関する研究が進められているものの、コンクリート表層部の透気性とスケーリング抵抗性の関連に着目した研究例はない。

2. 研究の目的

本研究は、構造体コンクリートのスケーリング抵抗性を原位置で簡易に評価・推定する手法として、コンクリート表層の透気性を指標とした新たな手法を提案することを目的とする。そこで本研究では、現位置測定可能な透気試験法（以下、簡易透気試験）を開発するとともに、以下の点について検討する。

(1) 簡易透気試験の測定条件に関する検討

測定対象となるコンクリート部材の形状が透気性評価に及ぼす影響を把握し、簡易透気試験の汎用性や再現性を確保するために必要となる測定条件を設定する。

(2) 表面含水率が透気性評価に及ぼす影響

コンクリートの透気性評価に大きな影響を及ぼす表面含水率は、実構造物コンクリートの透気性評価を行う場合、重要な要素となるため、透気性評価に影響を及ぼさない表面含水率の範囲を把握する。

(3) 気泡特性と透気性の関係

一般に、適切に空気を連行したコンクリートはスケーリング抵抗性が向上するとされている。そこで、透気性を指標としてスケーリング抵抗性を評価しようとした場合、コン

クリートの気泡特性と透気性の関係について把握する必要がある。

(4) 透気性とスケーリング劣化との関係

スケーリングの促進試験法である ASTM C672 法により得られるスケーリング量と簡易透気試験により得られる透気性指標値の関連について検証し、本研究で検討するスケーリング抵抗性の評価・推定手法の妥当性について検討する。

3. 研究の方法

(1) 簡易透気試験装置の作製

本研究で検討する透気試験は、吸引式の透気試験法であり、試験面に設置した吸引鐘内を減圧し、その後の圧力変化と時間から透気性を評価しようとするものである。既にプロトタイプとして作製した試験装置について、これまでの研究成果をもとに問題点を抽出し、試験精度や汎用性に留意して改良型の試験装置を作製する。

(2) コンクリート部材の寸法に関する検討

本試験はコンクリートに吸引圧力を作用させる方法であり、試験値はコンクリート部材の寸法に影響される可能性がある。そこで、部材厚の違いによる簡易透気係数の変化について評価し、測定対象の部材厚が透気性指標値に及ぼす影響を検証する。また、供試体に歪ゲージを埋設するなどして、簡易透気試験における透気領域（吸引圧力の影響範囲）を明らかにし、簡易透気試験を適用できる部材の寸法条件を決定する。

(3) 表面含水率が透気性に及ぼす影響

透気試験は、コンクリート表層の含水状態（表面含水率）の影響を大きく受けることが指摘されている。そこで、段階的に表面含水率を変えた供試体を対象に簡易透気試験を実施し、コンクリート表層の含水率と簡易透気係数の関係について検討するとともに、測定可能な表面含水率の範囲を明らかにする。

(4) 簡易透気係数と気泡特性に関する検討

コンクリートの気泡特性が簡易透気係数に及ぼす影響を調査する。調査を変化させた供試体を対象に透気試験を実施し、その後、同一供試体を用いて、リニアトラバース法による気泡組織測定を行う。これらの結果からコンクリートの空気量および気泡組織と透気性指標値との関連性について検討する。

(5) 透気試験によるスケーリング抵抗性評価

ASTM C672 法に規定される 6 段階の目視評価とスケーリング量測定により、コンクリートのスケーリング性状を評価する。ここで得られたスケーリング量と同一供試体により得られた透気性指標値との関連性を明らかにするとともに、スケーリング量と気泡特性および透気性と気泡特性との関係について検討する。

4. 研究成果

(1) 簡易透気試験機の作製

図1は、本研究により改良を加えた簡易透気試験装置の接続図を示したものである。吸引鐘(φ120mm)、真空ポンプ、圧力計、パーソナルコンピュータおよび耐圧ホースで構成される。主な改良点は、試験精度の向上を目的とした吸引鐘サイズの変更と接続要素の簡略化である。なお、本装置による透気性指標値(以下、簡易透気係数)は、図2に示す圧力変化量25~60kPaの範囲における圧力変化と圧力変化時間の平方根との関係から、式(1)により求めることとした。

$$\Delta P = \alpha \sqrt{T} \quad (1)$$

ここに、 α : 簡易透気係数 (kPa/sec^{1/2})、 ΔP : 圧力低下量 (kPa)、 T : 圧力低下時間 (sec.)

(2) コンクリート部材の寸法に関する検討

① 部材厚が透気性に及ぼす影響

図3は、コンクリートの部材厚の違いが簡易透気係数に及ぼす影響を示したものである(供試体寸法φ300×100~300mm)。当初、部材厚の減少に伴い部材背面からの空気流入が生じ、簡易透気係数は増加すると想定されたが、部材厚が薄いものほど簡易透気係数は減少する傾向を示した。この要因として、部材側面あるいはシール外周からの空気流入による影響が考えられた。そこで、部材側面およびシール外周を段階的にシリコンシーラントによりシールし、供試体側面およびシール外周からの空気流入を遮断した状態での追加試験を実施した。その結果、部材側面からの空気流入のみを遮断した実験においては、部材厚の減少に伴い簡易透気係数が減少する傾向に変化は見られなかった。

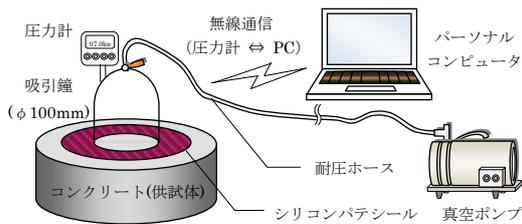


図1 改良型簡易透気試験機の接続図

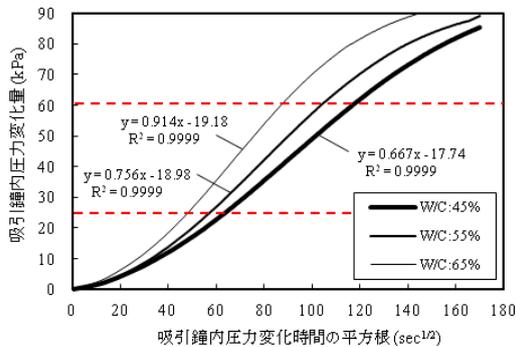


図2 圧力変化量と圧力変化時間の関係

図4は、側面をシールした供試体に対し、さらに試験対象面(吸引鐘外周)をシールし、供試体底面のみが外気に露出した状態で実施した試験の結果である。部材側面および試験対象面を完全にシールすることで、部材厚に起因する試験値の変化は小さくなり、ほぼ一定の値を示した。このことから、簡易透気係数は、測定対象面からの空気流入による影響が卓越し、部材厚さの違いによる影響は極めて小さいものと考えられる。以上より、部材厚の違いが簡易透気係数に及ぼす影響は小さく、部材厚の違いによる透気性の変化は、コンクリート表層に形成される脆弱層(図5)を介したシール外周からの空気流入に依存することを明らかにした。この点について申請者は、別途、部材厚の相違が表層脆弱層の形成に及ぼす影響として検討を進め、部材厚の増加に伴いブリーディング量が増加し、その現象は型枠近傍において顕著となることを明らかにしており(図6)、コンクリート表層の脆弱層の厚さや脆弱度は、部材断面の厚さに起因する可能性があることを示した。

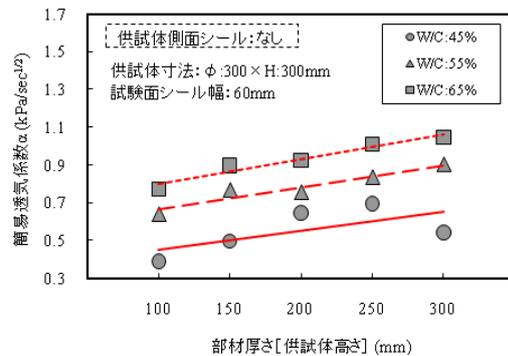


図3 部材厚さと簡易透気係数【側面シール無】

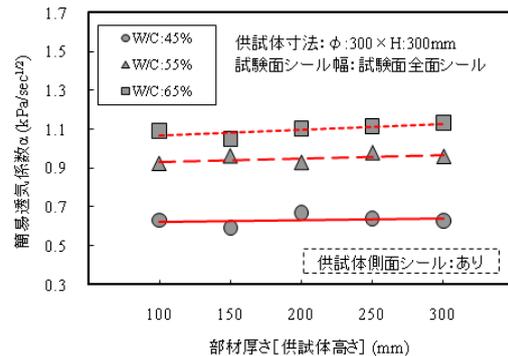
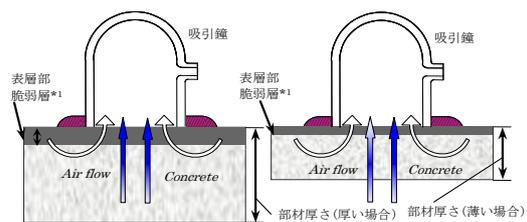


図4 部材厚さと簡易透気係数【側面シール有】



*1 部材厚さにより、形成される脆弱層の厚さや脆弱度が異なると思われる。

図5 部材厚さに起因する表層脆弱層の形成

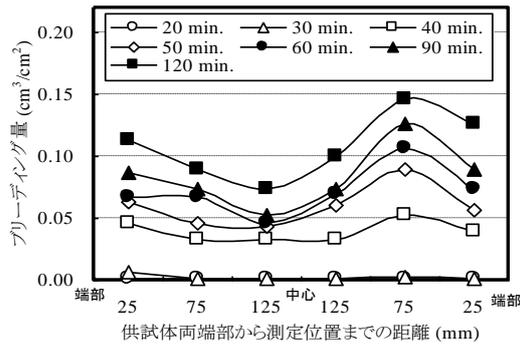


図6 ブリーディング量の経時的推移

② 簡易透気試験の透気領域に関する検討

図7に示すように、コンクリート部材端部から測定位置までの距離の相違は、簡易透気係数に影響を及ぼす可能性がある。そこで、簡易透気試験の透気領域(吸引圧力の影響範囲)を明らかにするため、部材端部から測定位置までの距離を変化させた試験を実施した(供試体寸法: ϕ 175~300mm \times 300mm)。

図8は、直径の異なる供試体について得た簡易透気係数を示したものである。 ϕ 175、~250mmの供試体における簡易透気係数は、直径の増加に伴い減少傾向を示した。これらの供試体については、吸引鐘外周の試験対象面を全てシールしているため、空気の流れとして考えられるのは供試体側面および底面からの流れである。供試体高さが統一されていることを考慮すると、部材端部からの距離の増加により供試体側面からの空気流入が抑制され、簡易透気係数を低下させたものと思われる。ここで、減少傾向を示した ϕ 175~250mmについて、簡易透気係数の減少が有意なものであるかを検証するため、それぞれの試験で得られた簡易透気係数を対象にt検定を行った。その結果、 ϕ 175mmから200mmに変化させた場合の簡易透気係数の減少については「 $t(9)=2.599$ 、 $p<0.05$ 」で有意差が認められた。しかし、 ϕ 200mmから250mmに変化させた場合については「 $t(9)=0.349$ 、 $p>0.1$ 」となり、統計学的に有意な差は認められなかった。以上より、 ϕ 200mm(部材端部から測定位置までの距離: 100mm)以上とすることで部材端部からの距離の影響を無視できるものと思われる。しかし、 ϕ 300mm供試体においては、簡易透気係数の増加が見られた。 ϕ 300mm供試体については、試験面シール幅を60mmとしているため、供試体側面からの空気流入に加え、シール外周からの流れが加わり、簡易透気係数が増加したと思われる。これは、シール幅を60mm以上に拡張することによる試験精度の向上を示唆する。なお、歪ゲージを埋設した供試体による検討では、作用圧力が小さく明確な歪変化は見られなかった。

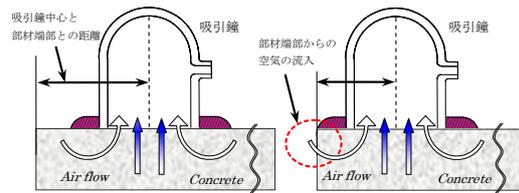


図7 部材端部から測定位置の距離が透気経路に及ぼす影響

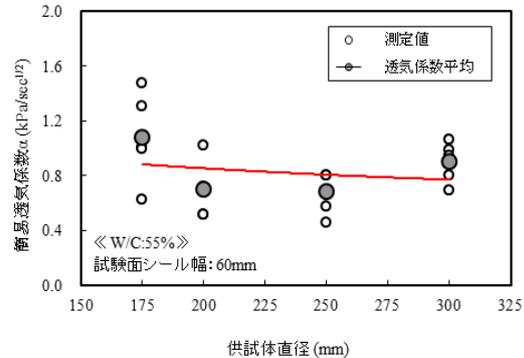


図8 直径の異なる供試体の簡易透気係数

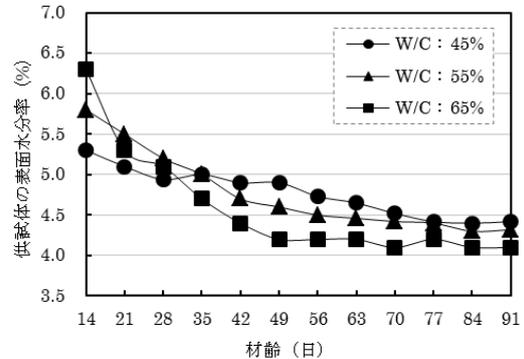


図9 供試体の表面水分率の経時変化(室内静置)

(3) 表面含水率が透気性に及ぼす影響

コンクリートの透気性は、測定対象面の含水状態に大きく影響されることが指摘されており、透気試験を実施する上で供試体の表面水分率は十分に考慮しなければならない。

図9は、養生終了後の供試体を対象に、継続的な表面水分率の推移を計測した結果を示したものである。初期材齢では、各水セメント比において表面水分率は高い値を示すが、材齢の経過に伴い徐々に低下する様相を示し、材齢70日以降では、4.0~4.5%の範囲でほぼ定常状態を示す。この結果から、簡易透気試験の開始時期は、材齢91日以降で、かつ、供試体の表面水分率が4.5%以下となった時点とすることが望ましいと考えられる。しかしながら、実際には供試体を存置する環境の温湿度の変化に追従するように、供試体の含水状態は変化する。さらに、簡易透気試験の実造物への適用を視野に入れているため、表面水分率が透気性にどの程度の影響を及ぼすのか定量的に把握する必要がある。そこで、表面水分率を人為的に変化さ

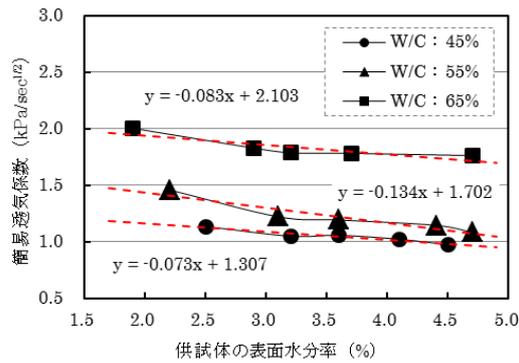


図 10 表面水分率と簡易透気係数の関係

せた供試体を対象に簡易透気試験を実施した。図 10 はその結果を示したものである。水セメント比の相違に関わらず、表面水分率が上昇するにつれ、簡易透気係数は小さくなる傾向を示す。これは、表面水分率の上昇によって、透気経路となるコンクリート表層の空隙に水分が侵入し、空気の流れが抑制されるために生じるものと考えられるが、比較的乾燥状態にあると思われるこれらの供試体においても、簡易透気係数の減少が見られた。このことから、簡易透気試験の再現性や信頼性を確保するためには、コンクリートの表面水分率と透気性の関係について、さらに詳細な検討を加え、表面水分率の変化に伴う補正係数などを設定する必要がある。

(4) 簡易透気係数と気泡特性に関する検討

水セメント比 45、55、65%のコンクリートについて、空気量を 1、3、6%に変化させた供試体を対象に簡易透気試験を実施した。

図 11 は、空気量の相違による簡易透気係数の変化を示したものである。水セメント比 45%における簡易透気係数を比較すると、空気量 1%で最も大きな値を示している。これは、空気量 1%とした場合、良好なワーカビリティが得られず、締め固めに不良が生じ、透気経路となる空隙が増加することに起因すると考えられる。空気量 1~6%の範囲における全体的な傾向としては、増加勾配-0.004と小さな値であるが、空気量の増加に伴う透気係数の減少が見られた。水セメント比 55%についても、水セメント比 45%で得られた傾向と同様に、空気量 1%と 3%を比較すると空気量 1%のケースで簡易透気係数は大きな値を示した。しかし、空気量 1~6%における全体的な傾向としては、増加勾配約 0.05 で空気量の増加に伴って、簡易透気係数も増加する傾向を示した。水セメント比 65%では、データに大きなばらつきが見られるものの、空気量が増加するにつれて、簡易透気係数も増加する傾向を示した。また、平均値のみを見た場合、比較的良好な線形性が認められる。

図 12 は、図 11 に示した結果の平均値をまとめたものである。空気量の相違によって生

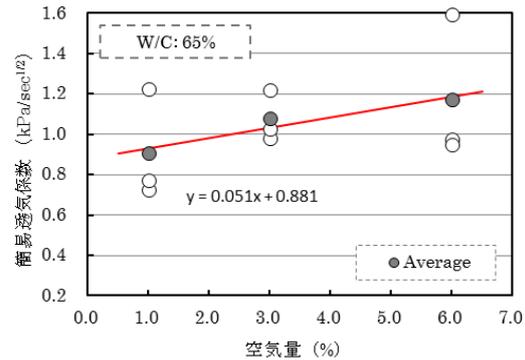
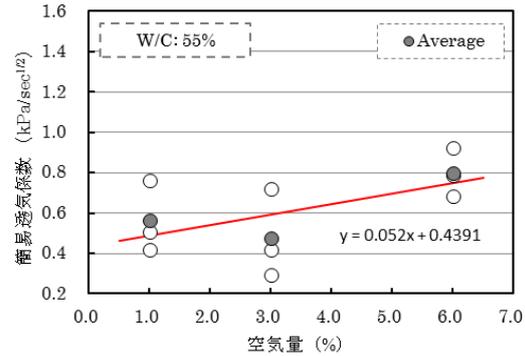
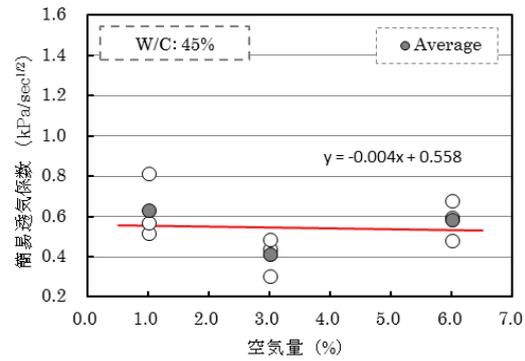


図 11 空気量の違いによる簡易透気係数

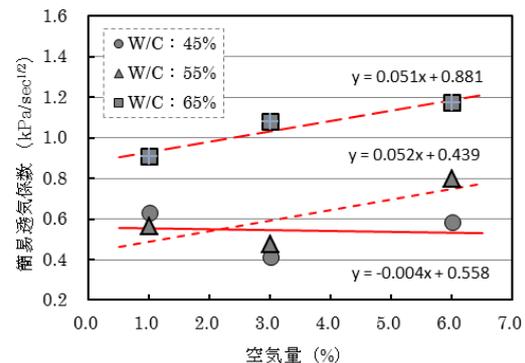


図 12 空気量の違いによる簡易透気係数の変化

じる簡易透気係数の変化は、空気量 1%の結果を除けば、各水セメント比ともに増加勾配 0.05 前後で増加している。なお、気泡間隔係数に関して空気量と同様におおむね簡易透気係数と対応することが認められた。

コンクリートのスケーリング抵抗性を透

気性から評価しようとした場合、空気量、透気性、スケーリング特性の三者の関係から包括的に評価する必要がある。したがって、簡易透気試験法をスケーリング抵抗性評価手法として展開するためには、空気量による影響をさらに詳細に検討し、透気試験により得られる結果を評価する必要がある。

(5) 簡易透気係数を指標としたスケーリング抵抗性評価

図 13 は、簡易透気試験法により得られた簡易透気係数と凍結融解 60 サイクル時のスケーリング量との関係を示したものである。簡易透気係数の大きいコンクリートはスケーリング量も大きくなり、総合的に評価した場合、両者の間には決定係数 0.79 と比較的よい対応関係が認められる。しかし、高水セメント比では両者の相関性は、低下するように思われる。そこで、W/C : 55% および W/C : 65% について、それぞれ決定係数を算出した結果、W/C : 55% では 0.65、W/C : 65% では 0.63 の値が得られた。総合的に評価した場合と比較し相関性は低下するものの対応傾向にあるものと思われる。このことから、簡易透気係数はコンクリートのスケーリング抵抗性を反映するものと考えられ、コンクリートのスケーリング抵抗性の評価・推定手法として、簡易透気試験法を適用できる可能性が示唆される。また、図 13 には、ASTM C672 法における目視レーティングによる評価区分を例示している。まだ検討の余地は多く残されているものの、ここに示すような性能評価区分を確立することにより、構造体コンクリートの潜在的な耐久性や劣化の程度を評価することが可能となり、効率的な維持管理や耐久性照査が実現できると考える。

本研究では、コンクリート表層を対象とした透過性の直接的評価が可能である透気性試験の適用性について検討し、その妥当性を示すことができたものと思われる。また、透気性指標値によるスケーリング抵抗性の評価区分の足がかりを示すことができた。しかし、現段階においては、実験室レベルの検証にとどまり、実際に簡易透気試験法をスケーリング抵抗性評価手法として、構造体コンク

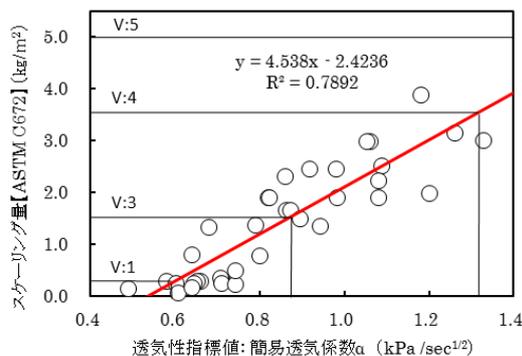


図 13 透気性指標値とスケールリング量の関係

リートに適用しようとした場合、更なるデータの蓄積が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- ① 権代由範、月永洋一、阿波稔、迫井裕樹：吸引鐘を用いたコンクリートの簡易透気試験に関する基礎的検討とスケーリング抵抗性評価への適用の試み、日本建築学会構造系論文集、第 77 巻、第 678 号、掲載決定、2012、査読有
- ② 権代由範、月永洋一、庄谷征美、阿波稔：コンクリート部材の断面厚さの相違が表層脆弱層の形成に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No.64、pp.391-397、2011、査読有
- ③ 権代由範、月永洋一、庄谷征美、阿波稔：塩化物環境下におけるコンクリートのスケーリング抵抗性試験の簡易化に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol.21、No.2、pp.45-56、2010、査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 権代由範、佐藤茂弥、庄司等、月永洋一：コンクリートの表層透気性に及ぼす表面含水率および空気量の影響に関する一考察、第 75 回日本建築学会東北支部研究報告会、2012.06.16、八戸工業大学
- ② 佐藤陽貴、月永洋一、阿波稔、迫井裕樹、権代由範：コンクリート表層部脆弱層の形成に関する研究-断面厚さおよび水セメント比による検討、第 75 回日本建築学会東北支部研究報告会、2012.06.16、八戸工業大学
- ③ 庄司等、権代由範：コンクリートの表層透気性に及ぼす空気量および表面水分率の影響、第 17 回高専シンポジウム in 熊本、2012.01.28、熊本市国際交流会館
- ④ 佐藤茂弥、権代由範：コンクリート表層部に生じる脆弱層に関する基礎的研究、第 17 回高専シンポジウム in 熊本、2012.01.28、熊本市国際交流会館
- ⑤ 権代由範、月永洋一：コンクリートの部材断面厚さによる表層部脆弱層の形成に関する研究、第 73 回日本建築学会東北支部研究報告会、2010.06.19、東北芸術工科大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

権代 由範 (GONDAI YOSHINORI)
 仙台高等専門学校・建築デザイン学科・助教

研究者番号：00553520