

氏名（本籍） やま さき じゅん じ（大阪府）
山 崎 順 二（大阪府）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第967号
学位授与の日付 2018年3月19日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目 各種測定条件の影響を考慮した表層透気性の
評価方法と構造体コンクリートの中性化進行
に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 今本 啓一
教授 郷田 桃代 教授 長井 達夫
准教授 熊谷 亮平 教授 兼松 学
教授 加藤 佳孝
日本大学大学院 生産工学研究科
建築工学専攻 教授 湯浅 昇

論文内容の要旨

鉄筋コンクリート構造物の耐久性や構造安全性は、一般に鉄筋腐食の度合いによって定義される。内在塩分など鉄に対する有害物質が存在しない限り、腐食の進行はかぶりコンクリートの品質に大きく左右され、その部分における物質透過性が小さいほど、鉄筋腐食の進行が抑制されることになる。この鉄筋コンクリート構造物の耐久性確保のために重要な要因となるかぶりコンクリートの物質浸透性を適切に評価することは、構造物の竣工時点での耐久性予測、経過年数に応じた寿命予測、健全性評価、補修時期の立案などに関して、極めて有用な情報を得ることにつながると考えられる。

これまで、鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価のための指標の1つとして、コンクリートの中性化深さが用いられてきている。これは、コンクリートに内在塩分が存在しない場合、かぶりコンクリートの中性化深さが鉄筋位置付近にまで到達することによってアルカリ環境下において鉄筋表面に形成されている不働態被膜が破壊され、水分と酸素の供給によって鉄筋腐食が進行しやすくなるためである。

一方、コンクリートの中性化深さの測定は、通常、構造体コンクリートから破壊もしくは微破壊により採取されたコンクリートコア供試体やドリル削孔粉を用いて、実測により評価することが一般的である。その他、既往の研究により提案されている、調合条件、使

用材料、環境条件に応じた係数などを含んだ中性化進行予測式により推定する場合もある。しかし、実構造物においては降雨の影響や仕上材の影響などによって中性化の進行状況が影響を受けることなどにより、必ずしも中性化予測式による推定精度は高いとは言えず、建物の耐震診断において中性化深さを把握する際にも、構造体コンクリートからコアを数本採取して実測評価しているのが現状である。コア採取などの破壊試験による中性化深さの評価は、鉄筋コンクリート構造物のある部材の局所的な評価であり、採取カ所数も少なく採取位置も限定される場合が多いことから、鉄筋コンクリート構造物全体の耐久性の評価としては情報量が不十分となる場合も考えられる。

このことから、竣工前の鉄筋コンクリート構造物や既存構造物に対して、構造物のおかれる環境状態や測定条件の影響を適切に考慮してかぶりコンクリートの物質透過性、ここでは中性化深さの進行評価が可能となりかつ経過年数に応じて経時的にそれが把握できるような測定技術を提案することは、耐久性評価や健全性評価技術として有用と考える。

本研究では、鉄筋コンクリート構造物の耐久性確保のために重要な要因となるかぶりコンクリートの物質浸透性を、竣工前の鉄筋コンクリート構造物もしくは既存構造物の原位置、つまり構造体コンクリートの原位置において非破壊もしくは微破壊にて適切に評価することを主眼とし、中性化進行速度と高い相関関係にあるとされる透気性に着目し、透気性の測定および評価に影響を及ぼすと考えられる測定条件や各種の透気性試験の関連性などについて検討を行った。

コンクリートの透気性試験は、鉄筋コンクリート構造体の原位置において非破壊もしくは微破壊で実施できるが、現時点では、評価目的に応じた透気性試験の選択方法や試験方法の決定のための情報は必ずしも十分に整備されているとは言えない。また、透気性の良否に関する閾値や評価指標についても、構造物の耐久性評価の現状に即した判定基準を示すまでには至っていない。土木分野においても同様であり、近年、かぶりコンクリートの吸水性試験 (SWAT) とともに主として施工中の表層コンクリートの品質評価として透気試験が適用されるようになってきてはいるものの、測定結果の判定基準については Swiss Standard 基づき評価・判定されているのが現状のようである。

そこで本論では、以上のような現況の中、表層透気性試験による構造体コンクリートの中性化進行評価に基づく耐久性評価手法を確立するにあたり、主として国内で研究されている構造体コンクリートの原位置に適用できる 3 種類の表層透気性試験を選定し、各種の透気性試験の関連性、コンクリートの表層から内部に至る透気領域の検討、透気性試験の測定条件や実大コンクリート部材における測定値の変動とその取扱い、測定値の変動要因に関する検討、測定点数、測定機の検定方法などについて検討し、コンクリート打放し面における透気性試験の評価値を用いた中性化進行評価に基づくかぶり厚さに応じた耐久性評価手法、具体的には建物の供用期間の予測のためのチャートを提案する。

加えて、打放し面における中性化進行評価手法の提案のみではなく、今後の課題として、主として建築構造物を対象とした仕上材表面からの測定による表層透気性の評価手法についても検討した結果を本論末尾に付した。

本論は全6章と本論末尾に付した今後の課題で構成される。以下に各章の概要を示す。

第1章「序論」

研究背景や目的について述べた。

第2章「表層透気性に関する既往の研究」

コンクリートの耐久性評価として位置づけられる主として国内で研究開発されている各種の透気性試験方法を抽出し、既往の研究について整理した。

第3章「各種透気性試験の関連性および透気領域に関する検討」

構造体コンクリートの原位置における中性化進行予測に基づく耐久性評価のための非破壊・微破壊的な手法として主として国内外で研究開発されている、ダブルチャンバー法（DC(TPT)法）、シングルチャンバー法（SCM法）およびドリル削孔法（FIM法）を代表的な表層透気性試験方法として抽出し、これらの透気性試験を実大のコンクリート壁を用いた共通試験（ラウンドロビン・テスト）に適用した。

本章では、共通試験の結果の一部を用いて、まず、透気性のベンチマーク試験として位置付けられる RILEM-CEMBUREAU 法による測定結果と各種の透気性試験結果との比較、各種の表層透気性試験による測定値の相関性について述べた。加えて、各種の透気性試験時のコンクリート表面から内部への透気領域について、モルタル供試体を用いて検討した結果について述べた。

第4章「測定誤差を考慮した実用的評価手法に関する検討」

3章に示した実大コンクリート壁を用いて、ダブルチャンバー法（DC(TPT)法）による同仕様の8台の測定機を用いたラウンド・ロビンテストを実施し、測定機の違いやコンクリートの表層品質の違いに起因する透気性測定値の変動係数を把握することに加え、シングルチャンバー法（SCM法）およびドリル削孔法（FIM法）における測定値の変動係数の把握、Grubbsの棄却検定を適用した透気性測定値の特異値の取扱いに関する考え方、構造部材の平均的な評価を行うことを目的とした場合の測定点数（サンプリング数）の考え方について述べた。加えて、試験機の測定精度の確認のための点検手法についても考察した。

また、透気性試験の測定方法による変動を軽減することを目的として、ダブルチャンバー法（DC(TPT)法）、シングルチャンバー法（SCM法）およびドリル削孔法（FIM法）を用いて同じ位置を複数回繰り返して測定する場合の時間間隔が透気性の測定値に及ぼす影響を確認するため、透気性試験時のコンクリート内部の圧力変化を測定した。併せて、内部圧力の深さ方向の変化から、各種の透気試験における影響深さについても検討した。

さらに、本章の末尾に構造部材の平均的な評価を行う際に必要となる透気性評価値を得るための実用的なフローを示した。フローに従って得られた透気性の評価値を5章に示す耐久性の評価のための中性化速度係数の推定に適用することによって、コンクリート構造体の耐久性評価が可能になることを示した。

第5章「打放し面での透気性とかぶり厚さによる中性化進行評価に基づく耐久性評価」

本章では、評価しようとする構造物のコンクリートの品質変動に起因する透気性の変動を適切に設定し、第4章に準じて得られた透気性の評価値を用いて中性化速度係数を予測

し、それに基づく耐久性評価を行うための標準的な手法を示すことを目的とし、水セメント比 30～100%の範囲のコンクリート供試体に加えて、呼び強度 21,27 および 36 の 3 種類のコンクリートを用いた実大の鉄筋コンクリート壁を打ち込み、室内での RILEM-CEMBUREAU 法と、原位置においてドリル削孔法 (FIM 法) およびシングルチャンバー法 (SCM 法) による透気性試験を行い、中性化速度係数と透気性測定値との相関性を評価した。この結果から、具体例として、4 章に示した各種透気性試験の変動と中性化深さの変動を考慮した透気性測定値による中性化速度の推定式を示し、かぶり厚さと透気性に基づく構造体コンクリートの耐久性評価のためのチャートを提示した。

第 6 章「結論」

本研究で得られた知見について総括し、今後の検討課題を述べた。

今後の課題

仕上材付き構造体コンクリートの透気性評価手法の検討を行うことを目的として、建築物に汎用される 3 種類の仕上材をコンクリート面に塗布し、各仕上面において各種の透気性試験を行った。シングルチャンバー法などの表面法のみでは評価が困難となる仕上材が塗布された構造体コンクリートの透気性をドリル削孔法と組み合わせることによって評価する手法「透気ハイブリッド法」の可能性について検討した。現在、実験および検討を継続しており、今後、仕上材付きコンクリート構造体の透気性による耐久西洋化手法としての複合型透気試験「透気ハイブリッド法」を確立を目指したい。(以上)

論文審査の結果の要旨

鉄筋コンクリート構造物の耐久性や構造安全性は、一般に鉄筋腐食の度合いによって定義される。内在塩分など鉄に対する有害物質が存在しない限り、腐食の進行はかぶりコンクリートの品質に大きく左右され、その部分における物質透過性が小さいほど、鉄筋腐食の進行が抑制されることになる。この鉄筋コンクリート構造物の耐久性確保のために重要な要因となるかぶりコンクリートの物質浸透性を適切に評価することは、構造物の竣工時点での耐久性予測、経過年数に応じた寿命予測、健全性評価、補修時期の立案などに関して、極めて有用な情報を得ることにつながると考えられる。

これまで、鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価のための指標の 1 つとして、コンクリートの中性化深さが用いられてきている。これは、コンクリートに内在塩分が存在しない場合、かぶりコンクリートの中性化深さが鉄筋位置付近にまで到達することによってアルカリ環境下において鉄筋表面に形成されている不働態被膜が破壊され、水分と酸素の供給によって鉄筋腐食が進行しやすくなるためである。

一方、コンクリートの中性化深さの測定は、通常、構造体コンクリートから破壊もしくは微破壊により採取されたコンクリートコア供試体やドリル削孔粉を用いて、実測により評価することが一般的である。その他、既往の研究により提案されている、調査条

件、使用材料、環境条件に応じた係数などを含んだ中性化進行予測式により推定する場合もある。しかし、実構造物においては降雨の影響や仕上材の影響などによって中性化の進行状況が影響を受けることなどにより、必ずしも中性化予測式による推定精度は高いとは言えず、建物の耐震診断において中性化深さを把握する際にも、構造体コンクリートからコアを数本採取して実測評価しているのが現状である。コア採取などの破壊試験による中性化深さの評価は、鉄筋コンクリート構造物のある部材の局所的な評価であり、採取カ所数も少なく採取位置も限定される場合が多いことから、鉄筋コンクリート構造物全体の耐久性の評価としては情報量が不十分となる場合も考えられる。

このことから、竣工前の鉄筋コンクリート構造物や既存構造物に対して、構造物のおかれる環境状態や測定条件の影響を適切に考慮してかぶりコンクリートの物質透過性、ここでは中性化深さの進行評価が可能となりかつ経過年数に応じて経時的にそれが把握できるような測定技術を提案することは、耐久性評価や健全性評価技術として有用と考える。

そこで、本研究では、鉄筋コンクリート構造物の耐久性確保のために重要な要因となる表層コンクリートの物質浸透性を、竣工前の新設の鉄筋コンクリート構造物もしくは既存構造物の原位置、つまり構造体コンクリートにおいて非破壊もしくは微破壊にて適切に評価することを主眼とし、中性化の進行速度と高い相関関係にあるとされる透気性に着目し、透気性の測定および評価に影響を及ぼすと考えられる測定条件や各種の透気性試験の関連性などについて検討を行うこととした。

表層透気性試験による構造体コンクリートの中性化進行評価に基づく耐久性評価手法を確立するにあたり、主として国内で研究されている構造体コンクリートの原位置に適用できる 3 種類の表層透気性試験を選定し、各種の透気性試験の関連性、コンクリートの表層から内部に至る透気領域の検討、透気性試験の測定条件や実大コンクリート部材における測定値の変動とその取扱い、測定値の変動要因に関する検討、測定点数、測定機の検定方法などについて実験を行い検討し、コンクリート打放し面における透気性試験の評価値を用いた中性化進行評価に基づくかぶり厚さに応じた耐久性評価手法、具体的には建物の供用期間の予測のためのチャートを提案する。

加えて、打放し面における中性化進行評価手法の提案のみではなく、今後の課題として、主として建築構造物を対象とした仕上材表面からの測定による表層透気性の評価手法についても検討した。本論は全 6 章と本論末尾に付した今後の課題で構成される。以下に各章の概要を示す。

第 1 章「序論」

研究背景や目的について述べた。

第 2 章「表層透気性に関する既往の研究」

コンクリートの耐久性評価として位置づけられる主として国内で研究開発されている各種の透気性試験方法を抽出し、既往の研究について整理した。

第3章「各種透気性試験の関連性および透気領域に関する検討」

構造体コンクリートの原位置における中性化進行予測に基づく耐久性評価のための非破壊・微破壊的な手法として主として国内外で研究開発されている、ダブルチャンバー法 (DC(TPT)法)、シングルチャンバー法 (SCM 法) およびドリル削孔法 (FIM 法) を代表的な表層透気性試験方法として抽出し、これらの透気性試験を実大のコンクリート壁を用いた共通試験 (ラウンドロビン・テスト) に適用した。

本章では、共通試験の結果の一部を用いて、まず、透気性のベンチマーク試験として位置付けられる RILEM・CEMBUREAU 法による測定結果と各種の透気性試験結果との比較、各種の表層透気性試験による測定値の相関性について述べた。加えて、各種の透気性試験時のコンクリート表面から内部への透気領域について、モルタル供試体を用いて検討した結果について述べた。

第4章「測定誤差を考慮した実用的評価手法に関する検討」

3章に示した実大コンクリート壁を用いて、ダブルチャンバー法 (DC(TPT)法) による同仕様の8台の測定機を用いたラウンド・ロビンをテストを実施し、測定機の違いやコンクリートの表層品質の違いに起因する透気性測定値の変動係数を把握することに加え、シングルチャンバー法 (SCM 法) およびドリル削孔法 (FIM 法) における測定値の変動係数の把握、Grubbs の棄却検定を適用した透気性測定値の特異値の取扱いに関する考え方、構造部材の平均的な評価を行うことを目的とした場合の測定点数 (サンプリング数) の考え方について述べた。加えて、試験機の測定精度の確認のための点検手法についても考察した。また、透気性試験の測定方法による変動を軽減することを目的として、ダブルチャンバー法 (DC(TPT)法)、シングルチャンバー法 (SCM 法) およびドリル削孔法 (FIM 法) を用いて同じ位置を複数回繰り返して測定する場合の時間間隔が透気性の測定値に及ぼす影響を確認するため、透気性試験時のコンクリート内部の圧力変化を測定した。併せて、内部圧力の深さ方向の変化から、各種の透気試験における影響深さについても検討した。さらに、本章の末尾に構造部材の平均的な評価を行う際に必要となる透気性評価値を得るための実用的なフローを示した。フローに従って得られた透気性の評価値を5章に示す耐久性の評価のための中性化速度係数の推定に適用することによって、コンクリート構造体の耐久性評価が可能になることを示した。

第5章「打放し面での透気性とかぶり厚さによる中性化進行評価に基づく耐久性評価」

本章では、評価しようとする構造物のコンクリートの品質変動に起因する透気性の変動を適切に設定し、第4章に準じて得られた透気性の評価値を用いて中性化速度係数を予測し、それに基づく耐久性評価を行うための標準的な手法を示すことを目的とし、水セメント比 30~100% の範囲のコンクリート供試体に加えて、呼び強度 21,27 および 36 の3種類のコンクリートを用いた実大の鉄筋コンクリート壁を打ち込み、室内での RILEM・CEMBUREAU 法と、原位置においてドリル削孔法 (FIM 法) およびシングル

チャンバー法（SCM 法）による透気性試験を行い，中性化速度係数と透気性測定値との相関性を評価した。この結果から，具体例として，4 章に示した各種透気性試験の変動と中性化深さの変動を考慮した透気性測定値による中性化速度の推定式を示し，かぶり厚さと透気性に基づく構造体コンクリートの耐久性評価のためのチャートを提示した。

第 6 章「結論」

本研究で得られた知見について総括し，今後の検討課題を述べた。

本論文は，今後の鉄筋コンクリート造建築物の維持管理に資する情報を取りまとめており，博士（工学）の学位論文として十分に価値のあるものと認められる。

（以 上）