

## 論文の内容の要旨

論文題目 水銀圧入挙動の逆解析による空隙構造評価の高度化と  
微破壊でのコンクリート構造物の品質評価手法への応用

Enhanced evaluation of pore structure by inverse analysis of mercury intrusion porosimetry and  
its application to minimize the destructiveness of concrete quality evaluation

氏 名 田中 俊成

少子高齢化と老朽化構造物の急増を同時に迎えていく中で、社会インフラを支える鉄筋コンクリート構造物の管理に目を向けると、新設構造物においては、より合理的な設計を、既設構造物においては、より適切な劣化進行予測を実現することが求められる。その上で、多孔質材料であるコンクリートの耐久性能や力学的性能には、空隙構造が密接に関係していることから、コンクリートの各種性能を支配する空隙構造を正確に理解することが重要となる。

コンクリートの空隙構造を評価する方法には、電子顕微鏡法、水銀圧入法、X線小角散乱法、サーモポロメトリー、気体吸着法など様々なものがある。その中でも水銀圧入法は、簡便な操作で空隙径の分布を測定でき、数 nm から数百  $\mu\text{m}$  という、コンクリートの物性上重要な空隙径の範囲を評価可能なことから、コンクリートの空隙構造分析において最も一般的に用いられてきた測定方法である。

水銀圧入法で評価可能な情報は、空隙量や空隙径分布（圧入曲線）があり、これらとコンクリートの各種性能を比較して、支配的な空隙構造指標について論じている研究は、ここ十年間で少なくとも数千を数える。しかしながら、各種性能に対する支配的な空隙構造は統一的な理解には至っておらず、支配的空隙構造として示された情報が、異なる研究者同士で整合しないという例も散見される。

水銀圧入法で評価した圧入曲線は、実際の空隙径分布に近いとされる電子顕微鏡法によ

る空隙径分布と数オーダーの乖離があるとされており、その主要な要因となっているのが、空隙径を実際よりも過小評価させる Ink bottle 効果である。この Ink bottle 効果は、試料寸法や空隙率によって影響程度が異なるため、実験条件によって、各種性能に対して支配的と評価される空隙構造を変化させる原因となり得る。一部の研究者は、Ink bottle 効果の影響を考慮することなく水銀圧入法の圧入曲線を評価に使用することに、既に警鐘を鳴らしているが、Ink bottle 効果の影響を定量的に評価する手段がないため、空隙構造と各種性能の関係について、現実との乖離が懸念される知見の蓄積が続いている状況にある。

一方で、コンクリート中の物質移動について理解するためには、空隙径分布の情報だけではなく、空隙構造の屈曲度や連結性も必要となる。水銀圧入法では、水銀が侵入可能な連続する空隙を評価していることから、結果として得られる圧入曲線は、空隙構造の屈曲度や連結性の情報も含んでいるはずであるが、無数に存在する空隙ネットワークへの圧入の結果として得られる圧入曲線からそれらの情報を評価するのは困難とされてきた。したがって、水銀圧入法で得られる情報のみから物質移動を評価することも同様に困難とされてきた。

空隙構造の屈曲度や連結性を評価する手段として、近年では、FIB-SEM や X 線 CT など空隙構造を 3 次元で直接観察する技術が登場してきている。これらは、強力な手段として今後活用が期待されているが、試料の代表性、測定時間、コスト、操作性などを考慮すると現段階では汎用的な手段ではなく、耐久性に関与する空隙構造の解明や評価のために多くの試料を評価するような用途には不向きである。また、FIB-SEM や X 線 CT の分解能は、それぞれ数十 nm、数百 nm であり、sub-nm までの空隙を有するセメント硬化体の空隙構造評価に十分とは言えない。

つまり、現状では水銀圧入法の情報のみから物質移動を評価するのは困難であり、空隙構造の屈曲度、連結性を別の手段で評価する必要があるが、FIB-SEM や X 線 CT は汎用的ではなく、さらに測定可能な空隙径の下限が数十 nm に留まっているという課題がある。

そこで、本論文では、水銀圧入法の圧入曲線から実際の空隙径分布を推定する手法を構築することを目的とした。そして、構築手法を活用して実際の空隙径分布に基づいた評価を行うことで、力学的性能や耐久性能と空隙構造の関係を理解する上で Ink bottle 効果による影響を解消することと、汎用的な水銀圧入法で得られる情報のみで物質移動を評価できるようにすることを目指した。本論文では、上記に挙げた 2 つの活用法に対応する検討をそれぞれ第 4 章と第 3 章で行った。

本論文の第 1 章は、以上で述べた内容に対応しており、本研究の背景に関連する既往研究の整理を行い、問題点の抽出、目的設定について論じた。

第 2 章では、水銀圧入法 (MIP) の圧入曲線から、実際の空隙径分布を推定する手法

(IA-MIP) の構築と検証を行った。3次元の格子状の各要素に、空隙径を与えて圧入状態をシミュレーションし、圧入曲線を再現する空隙径分布として実際の空隙径分布を逆解析で求める方法を構築した。提案手法の妥当性検証のため、提案手法で推定した実際の空隙径分布を、FIB-SEM や WMIP-SEM などの、実際の空隙径分布を評価する既存手法による評価結果と比較した。なお、実際の空隙径分布を推定する過程で得られた3次元の空隙径配置は、各サイズの空隙の構成割合と空隙と空隙の連結確率を平均的に表現したものになっていると考えられる。

第3章では、第2章で構築した IA-MIP による物質移動現象の評価を試みた。この検討は、各サイズの空隙の構成割合と空隙同士の連結確率を平均的に表現した3次元の空隙径配置が、物質移動に関する情報を表現できているのか確認することを目的とした。

まず、IA-MIP で得られた3次元の空隙径配置上で、可能な限り太い径を通して貫通する経路のネック径として閾細孔径を評価し、既存手法で評価した値と比較したところ、両者は良好に一致していた。

次に、IA-MIP の結果として得られた3次元の空隙径配置から水の毛管浸透挙動評価を試みた。まず、セメントペースト部分を表現した空隙径配置の中から、経路を構成する管の径がより太い貫通経路を最速貫通経路（ペースト貫通経路）として抽出し、この貫通経路を通過するのにかかる時間を Lucas-Washburn 式をもとに評価することでペースト部分を貫通するのにかかる時間を評価した。次に、コンクリート中で貫通に寄与するペースト要素だけを通して貫通する経路をコンクリート貫通経路として求めた。コンクリート貫通経路はペースト貫通経路が連結して形成されるものとして、コンクリート貫通経路を水が貫通するのにかかる時間を求めることで、コンクリート全体を水が貫通するのにかかる時間を評価した。このようにして計算した水の貫通時間は、水が短時間でコンクリートを貫通する場合の挙動を定量的に表現可能であった。

以上の結果は、IA-MIP で評価された空隙の配置や連結確率が物質移動現象を評価する上でも有効であることを示し、IA-MIP を活用することで、MIP で得られる情報のみで物質移動現象を評価可能なことを示唆している。

第4章では、IA-MIP を活用して、Ink bottle 効果を除外した実際の空隙径分布上で、コンクリートの力学的性能や耐久性能に支配的な空隙情報を把握し、圧入曲線で支配的な空隙情報を評価した場合とどのような違いがあるのかを検討した。IA-MIP の想定する活用方法として、「力学的性能や耐久性能と空隙構造の関係を理解する上で、誤評価の原因として挙げられている Ink bottle 効果による影響を解消すること」を挙げたが、本論文の範囲内ではまず、Ink bottle 効果の影響が、現実には空隙の情報と各種性能の関係性に違いを与えるほど大きいのか、あるいは無視できる程度であるのかを IA-MIP を活用して定量的に確認することを目的とした。結果として、2.5～10 mm 角という、一般的に MIP に使用される

試料寸法の範囲内であっても、圧入曲線に基づいて空隙量と圧縮強度や耐凍害性の関係を見た場合には、その定量的な関係に有意な差が見られた。このことは、Ink bottle 効果の影響により、一般的な実験条件の範囲でも各種性能と空隙情報の関係が変化し得るということを示すものであり、既往研究間の差異を合理的に説明するものである。

上記の検討の中で、粉末状試料の MIP でも有効に評価可能な微小な空隙径の範囲でも圧縮強度や耐凍害性との相関が見られたという結果に着目し、ドリル掘削粉試料によって、圧縮強度や耐凍害性を評価するというこれまでにない微破壊評価方法の着想を得た。第4章後半では、ドリル掘削粉の MIP により、コンクリートの圧縮強度や耐凍害性を評価するための手法を提案し、本研究で試験した供試体に対しては、圧縮強度や耐凍害性を決定係数 0.8 以上の精度で評価可能であるという結果を得た。コンクリートからのドリル掘削粉の採取は直径 1 mm のドリルでも実施可能なことを確認しており、この方法は、歴史的な重要構造物等を最小限の損傷で評価したい場合等に活用が期待される。

第5章では、第4章後半と同様に実務的な観点から、ドリル掘削粉を採取する際に設けるドリル掘削孔を活用して、コンクリート構造物の耐久性の重要な指標である中性化深さや塩分浸透深さを評価する方法を検討した。結果として、着色したドリル孔内を、直径 0.6 mm のファイバースコープで観察することで中性化深さや塩分浸透深さを精度良く測定可能なことを示した。第4章の内容と併せて、直径 1~2 mm という極めて軽微な損傷で、コンクリート構造物の複数の品質を評価するという新たな評価方法を構築した。

第6章では、これまでの章についてまとめ、得られた知見やその適用範囲を整理した。さらに、本論文での検討内容を踏まえ、逆解析による実際の空隙径分布推定手法 (IA-MIP) について、今後期待される応用方法を、新設構造物の耐久性能確保と既設構造物の品質評価という2つの観点から論じた。