

## 審査の結果の要旨

氏名 田中 俊成

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。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。しかしながら、水銀圧入法で評価した圧入曲線は Ink bottle 効果により、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いる。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。以上の背景をふまえ、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、また得られた知見に基づいて、コンクリートの性能評価や維持管理に活用することを目的としている。

第 1 章では、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ている。

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ている。3次元の格子上の各パスに、空隙径を与えて圧入状態をシミュレーションすることで、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ている。そして、計算結果を FIB-SEM や WMIP-SEM などの観察結果と比較することで、手法の妥当性を検証している。

第 3 章では、IA-MIP による物質移動抵抗指標の評価を試みている。まず、IA-MIP で得られた 3次元の空隙径配置上で、閾細孔径評価を行い、既存手法で評価した値と比較し、両者が整合することを確認している。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、Lucas-Washburn 式をもとに水の毛管浸透挙動評価を試みた結果、少なくとも短期間に水がコンクリートを貫

通する挙動の実験結果との整合を確認している。以上の結果は、IA-MIP で評価された空隙の配置や連結確率は、コンクリート中の物質移動現象を評価する際にも有効であることを示唆している。

第4章では、IA-MIP を活用し、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構造を検討している。結果として、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に対して支配的と評価される空隙構造が変化し得ることを定量的に確認し、既存研究間の差異を合理的に説明している。この検討の中で、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。この結果を、実務での品質評価に活用することを念頭に置き、直径 1 mm のドリルでも採取可能なドリル掘削粉によって、圧縮強度や耐凍害性を評価するという新しい微破壊評価方法の検討を行なっている。本研究で検討した室内試験体やコアサンプルについては、ドリル掘削粉で評価する空隙量を評価指標とすることで圧縮強度や耐凍害性を高い精度で推定可能であることを確認している。

第5章では、第4章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でき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ている。結果として、試薬により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、中性化深さや塩化物イオン浸透深さを精度良く測定可能なことを示している。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ている。

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ている。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二つの観点から論じている。

以上、MIP により得られた圧入曲線を逆解析することで、これまで把握が困難であった実際の空隙径分布を取得し、その情報を用いて連結性や屈曲度など、MIP で評価することが困難な指標を評価するとともに、これらの情報を用いて実際に液状水浸透挙動の算定を可能にしている。また上記の検討で得られた、空隙構造に関する知見に基づいて、微破壊による新たな品質および劣化進行の評価手法を提案している。これらの成果は、メカニズムに則した適切な設計・維持管理の実現につながるものであり、学術的および工学的観点の両者から研究の意義が認められる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。