

## コンクリート構造物の維持管理手法に関する基礎的研究

### 学位論文内容の要旨

コンクリート構造物は、従来耐久性のあるものと認識されてきたが、近年、塩害やアルカリ骨材反応等に代表されるコンクリートの早期劣化が問題視され、適切な維持管理を行わずに構造物を長期間供用することは困難となってきている。構造物に対する維持管理の基本的な流れは、調査、評価、補修・補強であるが、現在のところ、調査項目および手法、調査結果の評価、構造物の性能評価指標および手法、適切な補修・補強工法の選択方法、等の多くの問題が残されている。

本論文は、このような現状を踏まえ、コンクリート構造物に対する維持管理の流れを体系的に捉え、合理的でかつ適切な維持管理が行える手法を提案するものである。本論文は全6章から構成されている。

第1章は緒論であり、本論文の目的および維持管理の現状について述べている。

第2章では、非破壊試験によるコンクリート構造物の調査手法について述べている。すなわち、反撥硬度法・電磁誘導法・レーダー法・超音波法、自然電位法および一部の破壊試験結果を基に、非破壊試験によるコンクリート構造物の合理的な調査手法の提案を行っている。

まず、圧縮強度の推定では、測定者によって反撥硬度にばらつきが生じること、既存の強度推定式は、実強度が大きいほど強度を過小に評価する傾向にあることを明らかにした。この結果に基づき、代表的な箇所の実強度に応じて既存の強度推定式を補正する手法を提案している。次に、鉄筋位置の推定では、まず電磁誘導法もしくはレーダー法により鉄筋位置およびかぶりを推定し、その後より高い精度が必要とされる場合には超音波法によってかぶりを推定する手法を提案している。また、ひび割れ深さの推定では、超音波法による誤差はひび割れ深さに関わらず 20mm 程度であり、超音波法により精度良くひび割れ深さを推定できることを明らかにした。最後に、鉄筋腐食の推定では、ASTM 規格に応じた自然電位により、腐食の有無および腐食程度の定性的な判定が可能であることを明らかにした。

第3章では、表面保護工によるコンクリート構造物の新しい補修工法について述べている。本章では、塩害や化学的劣化のような厳しい環境下においてコンクリートを保護する2つの工法、すなわち、材料の積層化工法およびレジンコンクリートパネルによる保護工法を開発した。

異なる特性を持つ材料を積層化することにより、単体材料では困難であった、塩害対策工に要求される各種の性能、すなわち、塩化物イオン・酸素・水分の遮断性およびひび割れ追従性が満足できることを、種々の試験および解析により明らかにしている。特に、ひび割れ追従性については、材料構成として、第1層には弾性係数が小さい柔軟性を有する材料、第2層には引張強度が高い材料が適していることを実験および解析の両面から明らかにした。また、レジンコンクリートと立体金網よりなるプレキャストパネルの各種促進試験を行った結果、本章で開発したプレキャストパネルは、塩害、中性化、凍結融解および化学的劣化の厳しい劣化条件に対し、優れた耐久性を有することが明らかとなった。ま

た、パネルの継目となる目地部には、パネルと同等の劣化因子の遮断性のみならず、パネルの変形に追従できる伸び能力および十分な付着強度を有する材料である弾性エポキシ樹脂の適用が適切であると考えられた。さらに、パネルと一体化した鉄筋コンクリートはりの静的曲げ試験の結果、目地の位置によりパネルに過大な荷重が作用して引張破壊を生じる場合があるため、施工性に支障の無い範囲で目地間隔をなるべく小さくする必要があることを明らかにした。

本章で開発された工法を実構造物に適用した結果、補修後の再劣化は確認されておらず、工法の有効性が確認された。

第4章では、炭素繊維シートによるコンクリート構造物の補強について述べている。炭素繊維シート（以下、CFS と称す）は高強度・高耐久・軽量等の特性を有し、各種コンクリート構造物の補強に用いられている。しかし、CFS による補強効果は CFS とコンクリートとの付着挙動に大きく影響されることから、CFS の付着性状について非線形有限要素解析を用いた数値解析的検討を行っている。その結果、CFS とコンクリートとの付着面に発生する付着ひび割れが CFS のひずみ分布形状に大きな影響を及ぼすこと、さらに、CFS の剥離破壊は界面の限界付着応力を 4.5MPa とすることにより、解析により得られた剥離性状および剥離耐力が実験結果と概ね一致することを明らかにした。

また、コンクリートはりの引張力作用面に CFS を接着したはり部材の曲げ試験により得られた CFS の荷重-ひずみ関係および付着応力の挙動から、CFS の剥離箇所の推定を行った。その結果、CFS を1層貼付けた場合と3層貼付けた場合とでは剥離発生位置が異なることが明らかになった。すなわち、CFS の剛性が大きいほど端部付近で剥離が発生し、はりの中央部へ剥離が進展する。また、有限要素解析を行った結果、CFS の剛性が大きいほど、CFS 端部において界面に直角方向の引張応力が卓越することが明らかになり、CFS の剥離を界面に発生するせん断応力と引張応力の組み合わせ応力下で考える必要性があることを示した。

第5章では、第2章から第4章で検討した結果を用いたコンクリート構造物の維持管理手法の提案を行っている。すなわち、コンクリート構造物の安全性を表す指標として耐力を、耐久性を表す指標として鉄筋腐食を取り上げ、本論文の第2章で示した調査結果に基づいた、コンクリート構造物の供用期間内の任意の時点での性能評価が可能な手法を示し、さらに、コンクリート構造物の性能評価の結果から、供用期間中の要求性能を満足するような補修・補強の選択が行えるような維持管理手法を提案している。

コンクリート構造物の耐力評価は、鉄筋のかぶりと腐食確率の調査結果に基づき定量的に表した腐食発生率、既往の研究結果に基づき求めた腐食した鉄筋の引張強度、コンクリート強度、かぶり等の調査結果を用いて行う。さらに、鉄筋腐食が塩化物イオン含有量と密接な関係にあることに着目し、Fick の拡散式や差分法による塩化物イオンの浸透予測および既往の腐食ひび割れ発生予測式により評価する方法により、将来の鉄筋腐食および耐力が予測できる。

第6章は結論であり、各章の主な結果をまとめている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 角 田 興史雄  
副 査 教 授 城 攻  
副 査 教 授 佐 伯 昇  
副 査 助 教 授 上 田 多 門

## 学位論文題名

### コンクリート構造物の維持管理手法に関する基礎的研究

コンクリート構造物は一般に耐久性がよく、維持管理が容易と考えられてきたが、近年、塩害やアルカリ骨材反応等による早期劣化が顕在化し、構造物の長期間供用にとって適切な維持管理が不可欠であるとの認識が定着してきた。本論文は、コンクリート構造物の塩害による耐久性を主たる対象に、調査、評価、補修、補強に関する基礎的な検討を行い、合理的な維持管理手法を提案したものであり、全6章からなっている。

第1章では、本論文の目的および維持管理に関する現状について述べている。

第2章では、非破壊試験によるコンクリート構造物の調査手法に関する研究成果について述べている。まず、コンクリートの圧縮強度の推定では、反撥硬度法または反撥硬度法と超音波法を組合せた複合法のいずれによっても、長期材齢のコンクリートに対しては推定精度が十分でなく、実強度が大きいほど推定強度/実強度比が小さくなることを明らかにし、代表的な箇所からコアを採取し実強度に応じて既存の強度推定式を補正する手法を提案している。鉄筋位置およびかぶりの推定では、電磁誘導法およびレーダー法による推定誤差に有意な差がないこと、より高い精度が必要な場合のみ超音波法を用いるのが実用的であること、ひび割れ深さの推定では、超音波法による誤差はひび割れ深さに関わらず 20mm 程度であり、実構造物においても精度良い推定が可能であることなどを明らかにしている。

第3章では、表面保護工によるコンクリート構造物の補修工法の開発研究について述べている。まず、塩害対策工の要求性能である塩化物イオン、酸素および水分の遮断性と、ひび割れ追従性とをともに満足させるためには、異なる特性を持つ複数の材料の積層化が有効であることを種々の試験により明らかにするとともに、材料の適切な構成方法を解析と実験の両面から明らかにし、積層化による優れた補修工法の開発に成功している。次に、レジンコンクリートと立体金網からなるプレキャストパネルによる補修工法について検討し、塩害、中性化、凍結融解および化学的劣化の厳しい条件に対して優れた耐久性を有すること、パネルの破壊を防止するには目地間隔の選定が重要であること、目地部には、劣化因子の遮断性、変形追従性および十分な付着強度を発揮するために弾性エポキシ樹脂の使用が適切であることなどを明らかにしている。また、これら2つの新工法を実構造物の補修に適用し、その有効性を実証している。

第4章では、炭素繊維シートによるコンクリート構造物の補強に関する研究成果について述べている。まず、シートとコンクリートとの付着性状について実験および非線形有限要素解析による検討を行い、シートとコンクリートとの付着面に発生する付着ひび

割れがシートのひずみ分布形状に大きな影響を及ぼすこと、シートの剥離破壊は界面の限界付着応力を 4.5MPa とすることにより、解析による剥離性状が実験結果とほぼ一致することを明らかにしている。次に、引張面にシートを接着した補強ばりの曲げ試験および有限要素解析により、シートの曲げ剛性が大きいほどシート端部における界面に直角方向の引張応力が卓越すること、従って、シートの剥離条件にはせん断応力と引張応力の組み合わせを考慮する必要があることなどを明らかにしている。

第 5 章では、第 4 章までの成果に基づき、コンクリート構造物の合理的な維持管理手法の提案を行っている。構造物の安全性を表す指標として耐力を、使用性を表す指標として鉄筋腐食率を取り上げ、第 2 章の成果に基づき構造物の任意の時点での性能評価を行う手法を提示し、その評価結果によっては、供用期間中に要求性能を満足するような補修・補強の選択を行う。構造物の耐力評価は、鉄筋のかぶりと腐食確率の調査結果に基づき定量的に表した腐食発生率、腐食した鉄筋の引張耐力、コンクリート強度、かぶり等の調査結果を用いて行う。さらに、塩化物イオンの浸透予測および既往の腐食ひび割れ発生予測式に基づき、将来の鉄筋腐食率および耐力を予測する方法を提案している。

第 6 章は結論であり、各章の主な結果をまとめている。

これを要するに、著者はコンクリート構造物の耐久性に関して、非破壊試験による調査、補修、補強、維持管理手法に関し多くの新知見を得たものであり、コンクリート工学および構造工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。