

論文の要旨

題 目 コンクリート構造物の豆板を対象とした樹脂注入工法の開発
(Development of resin injection repair method of honeycombing in concrete structures)

氏 名 佐々木 尚 美

我が国では、昭和 39 年に開催された東京オリンピックと同時に整備されたインフラなど、高度成長期以降、膨大な数のコンクリート構造物が建設されてきた。コンクリート構造物の早期劣化・剥離剥落の要因の 1 つは、豆板などの初期欠陥である。構造物の新設においては、初期欠陥のない構造物を造ることが重要であり、初期欠陥を出さない取り組みも行われているが、いまだに豆板は発生している。豆板が発生した場合、豆板を取り除いて断面修復する補修（以降、従来補修工法という。）が施されてきたが、健全部と補修部の間に形成される界面において剥離が発生する可能性もあり、将来的な剥落の危険性を内在している。よって、将来的な剥離剥落の発生要因を内在させない豆板の適切な補修方法の確立が強く求められている。

そこで本研究では、豆板を取り除かずに樹脂を注入して補修する工法（以降、提案補修工法という。）を開発した。本論文は、豆板部の力学的特性を健全なコンクリートと同等に改善し、将来的な剥離剥落の可能性を低減できる提案補修工法の研究成果をまとめたものである。本論文は、全 10 章で構成されている。

第 1 章は序論であり、本論文の背景、本研究における目的、論文の構成を述べた。

第 2 章は、豆板をはつり取らないで補修する提案補修工法の概要と、実用化に向けた課題について述べた。また、課題を克服する前提として、状態の明らかな豆板を作製する方法について、ふるい機を用いた作製方法を示した。豆板の性状の評価のため、健全なコンクリートに対する、豆板のコンクリート未充填部の割合を「コンクリート未充填率」として定義し、その妥当性を示した。

第 3 章では、豆板の内部状況の確認方法について、小型カメラを用いた手法について検討した。カメラで撮影した画像を解析することで、豆板内部の空隙量をおおよそ把握できることを示した。また、豆板内部の空隙を充填できる、樹脂の注入方法について検討した。注入孔の形状の異なる供試体で注入試験を行い、直径 10mm 程度の孔を豆板内部に削孔し、自動低圧注入工法を用いて一定の圧力で注入することで、豆板の未充填空隙率に対して、ほぼ 100%充填できることを確認した。

第 4 章では、材料レベルでの力学的特性（圧縮強度、弾性係数、割裂引張強度、直接引張強度、曲げ強度、補修境界面の強度、テンションスティフニング効果）について評価した。従来補修工法に用いられている一般的な断面修復材であるポリマーセメントモルタル供試体は、材料単体の圧縮強度、弾性係数、割裂引張強度、曲げ強度について、健全コンクリート同等以上の値を示した。しかしながら、健全なコンクリートの一部に従来補修工法による補修部を有する供試体では、補修境界面で破壊し、直

接引張強度および補修境界面の強度（曲げ強度）が，健全コンクリートの半分以上となった．一方，樹脂を注入して補修した豆板供試体は，材料単体および健全なコンクリートの一部に補修部を有する供試体のいずれにおいても，健全なコンクリートと同等以上の強度を有した．テンションスティフニング効果については，ポリマーセメントモルタル供試体は，ひび割れ発生荷重も小さく，テンションスティフニング効果は健全供試体よりも小さかった．樹脂を注入して補修した豆板供試体では，豆板の空隙が少ない供試体は健全供試体に近いひび割れ発生挙動やテンションスティフニング効果を示した．豆板の空隙が多く，樹脂注入量の多い補修した豆板供試体は，補修材料自体の強度も高く，また，補修材と鉄筋との付着力も向上し，非常に高いテンションスティフニング効果を示した．

第 5 章～第 8 章では，補修境界面の剥離に着目し，部材レベルでの評価を行った．豆板のない健全試験体，豆板をはつり取ってポリマーセメントモルタルで断面修復した従来補修試験体，豆板をはつり取らずに樹脂を注入して補修した提案補修試験体の 3 種類の試験体を用いて比較した．

第 5 章では，RC ラーメン高架橋の縦ばりを想定し，はり下面のかぶり部に豆板補修部を有する RC はり試験体を用いて，正負の荷重が繰返し作用する曲げ載荷試験を行った．曲げモーメントが卓越する等曲げモーメント区間内の豆板補修部において，曲げひび割れや補修境界面の剥離の発生，および正負の荷重が繰返し作用する場合の水平補修境界面の剥離進展，補修部の剥落，耐疲労性について分析した．従来補修試験体は，ポリマーセメントモルタルの硬化収縮や付着強度の不足により，載荷前から補修中央部や補修端部の鉛直補修境界面に微細なひび割れが発生した．使用限界状態応力レベルでの静的載荷試験では，載荷により生じた曲げひび割れが水平補修境界面に達すると，水平補修境界面には引張応力とせん断応力が働き，水平補修境界面で剥離が生じた．提案補修試験体は，補修境界面での剥離は発生しなかった．樹脂の高い伸び能力により，健全試験体に比べ，曲げひび割れ発生荷重は大きくなり，曲げひび割れ幅は小さくなった．

正負の荷重が繰返し作用する載荷試験では，従来補修試験体における正負の繰返し作用が，水平補修境界面の剥離を進展させ，剥離幅を拡大させる要因となることが示された．提案補修試験体は，水平補修境界面は，健全試験体に近い挙動を示し，試験終了時まで補修境界面の剥離は生じなかった．提案補修試験体が破壊に至るまでの通算載荷回数は健全試験体の 1.6 倍となり，ひび割れ発生状況等からも豆板補修部を有する影響はほとんどなく，健全試験体と同等以上の疲労耐久性能を有した．

第 6 章では，RC はりのせん断スパン内に豆板補修部を有する試験体を用い，曲げせん断破壊挙動について分析した．はりの腹部に比較的大きな領域を占める豆板を，提案補修工法により補修した試験体と健全試験体で比較した．健全試験体および提案補修試験体は，いずれも曲げ降伏後にせん断圧縮破壊した．豆板補修部を有する試験体の斜めひび割れ発生荷重は，健全試験体の約 1.2 倍となった．鉄筋降伏荷重やせん断圧縮破壊荷重は同程度であり，提案補修箇所は，構造的な弱点とならなかったことを

確認した。3次元 FEM 解析により、実験結果を概ね再現することができた。感度解析により、豆板補修部は健全部であるコンクリート以上の引張強度を有することが、豆板補修部の斜めひび割れ発生荷重および破壊挙動に影響を与えることを明らかにした。

第7章では、RC はりの下面に豆板補修部を有する試験体を用い、せん断破壊挙動について分析した。豆板補修部は、はりのせん断スパン内の引張鉄筋位置に沿った補修境界面を有し、従来補修および提案補修工法により補修した。従来補修試験体は、断面修復の際、アンカーを入れた試験体についても比較した。豆板補修部を有する3つの試験体は、水平補修境界面での剥離が生じ、水平補修境界面の端部から斜めひび割れが発生して破壊経路となった。アンカー無しの従来補修試験体の斜めひび割れ発生荷重は、健全な RC はりの算定値の 75%程度で急激に破壊した。引張鉄筋位置の補修境界面で急激に剥離が発生すると同時に、水平補修境界面端部から載荷点までの斜めひび割れが発達し、急激な荷重低下を引き起こした。アンカーを入れた従来補修試験体の斜めひび割れ発生荷重は、健全な RC はりの算定値と同等であった。アンカーの効果により、補修境界面の急激な剥離の拡大が抑制されたためである。提案補修試験体の斜めひび割れ発生荷重は、健全な RC はりの算定値と同程度であった。

従来補修試験体では、荷重の小さい段階から補修境界面剥離が生じたが、提案補修試験体では、補修境界面での剥離は、最大荷重直前まで生じなかったことから、補修境界面の付着強度は、従来補修試験体よりも高いことが示された。提案補修工法による補修は、補修境界面が大きな弱点にはなっていないことを確認した。

第8章では、RC 柱の下端かぶり部に豆板補修部を有する試験体を用い、水平交番載荷試験を行った。試験体は、従来補修および提案補修工法で補修し、耐力比の異なる2種類で試験を行った。耐力比の異なる2種類において、従来補修および提案補修試験体は、健全試験体と同等の耐力および変形性能を有した。破壊形態も健全試験体と同様であった。大変形正負交番載荷を受けても、豆板補修部を有することの影響は無いことを確認した。ただし、従来補修試験体においては、変位が小さい段階から補修境界面に剥離が発生していた。健全部に比べ、補修境界面の付着強度が小さいことが示され、耐久性への影響が懸念された。一方、提案補修試験体においては、同変位時における補修境界面での剥離は確認されず、健全なコンクリートと一体化されていたことが示された。

第9章では、提案補修工法を実構造物へ適用するための検討を行った。これまでにやってきた調査や各種試験の結果を踏まえ、課題に対する解決策を示した。これにより、補修前の豆板の調査から、補修完了に至るまでの一連の補修の流れを実施することが可能となった。実構造物への本提案補修工法の適用にあたり、提案補修工法の一連の流れを示す補修フローについて検討した。

第10章は、本論文の結論と今後の課題を述べた。

以上より、豆板の内部空隙に樹脂を注入して補修することで、初期欠陥である豆板を健全なコンクリートと同等以上の性能に回復させ、連続的な補修境界面を作らないことで、将来的な剥離剥落の可能性を低減できる提案補修工法を開発することができた。