

京都大学	博士（工学）	氏名	林 学
論文題目	供用下における耐震性能の回復・向上を考慮したメタボリズム RC 柱構造の開発		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>地震国では、大地震が発生し、構造物が被災する度に耐震設計に係わる技術基準の見直しが行われてきた。わが国では、兵庫県南部地震以降、建設時の耐震規定を満たしていたものの現状の規定を満足していない、いわゆる既存不適格構造物への対応として、RC 巻き立てなどの耐震補強への取り組みが積極的に行われてきた。一方、将来必ず発生する大地震により、現在の耐震基準も改定されることは確実である。土木構造物の長い供用期間を考えると、全ての土木構造物は将来既存不適格になり得ることから、最新の耐震基準を満たすことのできる補修や補強技術の継続的な開発が必要不可欠である。上記の課題を踏まえ、本論文では将来の耐震基準が変わっても、構造の一部を改変し、求められる耐震性能に適応できるメタボリズム RC 柱構造の実現を目標に研究した成果を取りまとめている。</p> <p>本論文は全 8 章で構成されており、以下に各章の実施内容および主な成果を示す。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究の背景・目的、本論文の内容及び構成を示している。地震被害とそれに起因する道路橋耐震基準の変遷を整理し、全ての構造物は将来の耐震基準にも対応できるよう耐震補修や補強技術の継続的な開発が必要不可欠であることを指摘している。</p> <p>第 2 章は、地震により損傷した橋脚基部の塑性化領域を取り替えることで耐震性能の回復を試みる既往の研究について整理している。耐震性能の回復・向上に関する検討がなされているものの、復旧時にも平時の機能を提供することは機能継続社会のために重要であるにも関わらず、損傷部の取り替え時に軸力支持させることに着目した報告がないことを指摘している。また、近年では工期の短縮や施工における省力化を図るために土木構造物へのプレキャスト化が推進されており、橋脚への導入事例についても整理している。</p> <p>第 3 章は、都市の急速な成長や技術の進歩に応じて、建築物への追加や再構築によって拡張・変形しようとする建築分野でのメタボリズム運動に着想を得て提案された、メタボリズム RC 柱構造の概要を整理している。本構造は、塑性ヒンジ部を永続部と可換部の機能分離型構造とする RC 柱部材であり、将来、可換部を取り替えることで耐震性能を新陳代謝できる構造である。土木分野では、構造物に求める機能や管理者が基本変わらないことが多いため、メタボリズムの理念を実現しやすいと考察している。</p> <p>第 4 章は、メタボリズム RC 柱構造のコンセプト検証を目的とし、軸力を支持しながら損傷した塑性ヒンジ部の取替え可能性について検討を行っている。永続部のヒンジ機能（鉛直・水平方向の荷重伝達・変形の連続性）を固定ゴム支承で実現したコンセプトモデルを用い、鉄筋コンクリート製の可換部を有する試験体を製作し、正負交番載荷実験後、軸力支持下で損傷した可換部を取り替え、再度正負交番載荷実験を行うという一連の取り替え実験を行った。まず、永続部で軸力を支持しながら、残留変形を小さな荷重で除去し、新しい可換部に交換することが可能であることを実証した。一方、永続部の要求性能として、軸力支持に加え、軸沈下を低減できる軸剛性と P-<math>\Delta</math> 効果を打ち消す程度の回転剛性を有することが望ましい、という知見を得た。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	林 学
<p>第5章は、可換部の接合方法に着目した実験的検討を整理している。RC構造は、基本一体構造であるため、明確な継手部は存在しない。永続部を存置しながら可換部を取り替えるためには、水平接合部と鉛直接合部が必要となる。鉛直接合部にはループ継手を、水平接合部には機械式継手を採用し、正負交番載荷実験後に可換部取り替えを実施し、特に可換部の取り替えに伴う水平接合部が耐震性能に与える影響を確認するとともに、軸方向鉄筋の接合方法として機械式継手を用いた場合の施工性や先行して埋め込んだ軸方向鉄筋に関する考察を行っている。あらかじめ可換部内に埋め込まれたねじふし鉄筋にアンボンド処理を施すことで、塑性ヒンジ部の損傷の影響を受けず、取り替え時に確実に継手機能を発揮できることを実証した。</p> <p>第6章は、永続部・可換部ともに鉄筋コンクリート構造としたメタボリズム RC 柱の地震後復旧性に関する検討を行っている。塑性ヒンジ構造にコンクリートヒンジの一種であるメナーゼヒンジを、軸方向鉄筋の接合に埋め込み鉄筋継手を採用したメタボリズム RC 柱構造を提案し、正負交番載荷実験により、提案構造による新設時の耐震性能、損傷した可換部の撤去時における挙動、可換部の取り替えを行った復旧後の耐震性能について検証した。実験では、損傷した可換部を撤去し、永続部で軸力を支持している状態で、可換部をプレキャスト部材に取り替える工法と、型枠を設置して現場打ちにより可換部を製作する2つの工法が実施され、いずれも期待される耐震性能を実現できることを示した。また、メナーゼヒンジ部を柱・フーチング接続部までスパイラル筋により補強することが、永続部として重要であることなど、構造細目に関わる知見を整理した。さらに、実験結果を踏まえ、復旧時を想定した荷重により、永続部であるメナーゼヒンジ部の設計を行った上で、地震時における曲げ耐力やせん断耐力は、永続部の性能を考慮しながら可換部を設計することにより確保するという、実構造物適用へ向けた設計方針を提案している。</p> <p>第7章は、実構造物への適用を想定した試設計例を示している。メタボリズム RC 柱構造が有する特長を踏まえた設計実務における方針や条件を整理し、道路橋橋脚を対象に、メタボリズム RC 柱の設計を行っている。また、比較対象として従来の RC 柱を設計し、耐震補強工法として広く活用されている RC 巻立て工法による復旧について、施工性や経済性の観点で比較検討を行った。地震後の復旧施工性の観点では、RC 巻立て工法が51日を要する一方で、メタボリズム RC 柱は約53%の27日で施工することが可能であるが、経済性の検討では、メタボリズム RC 柱は初期費用が高くなるため、地震後の復旧性を含めたライフサイクルコストでは特筆したコスト減とはならないものの、地震後復旧日数が少なくなることから、早期復旧することによる経済活動を踏まえると、極めて有利となることを試算している。</p> <p>第8章は結論であり、本論文の成果を総括し、今後の課題とともに取りまとめている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、本研究では構造の一部を新しいものに交換する、つまり新陳代謝することで橋脚の耐震性能を回復あるいは向上させることができる耐震橋脚構造を開発することにより、将来の耐震基準が変わっても、求められる耐震性能に適応できるメタボリズム構造の実現を目標に研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) 塑性ヒンジ部を永続部と可換部の機能分離型構造とする柱部材とするメタボリズム RC 柱構造は、将来、要求性能が変化しても、永続部で機能継続しながら可換部を取り替えることで耐震性能を新陳代謝できる構造として提案された。正負交番載荷実験により損傷させた試験体を、軸力支持しながら可換部を取替え、再度正負交番載荷する一連の実験により、期待する性能が発揮できることを実証した。
- 2) メタボリズム RC 柱構造の具体的構造として、塑性ヒンジ構造にコンクリートヒンジの一種であるメナーゼヒンジを、軸方向鉄筋の接合に埋め込み鉄筋継手を採用した柱構造を提案した。実際の施工を考え、損傷した可換部を撤去して永続部で軸力を支持している状態で、可換部をプレキャスト部材に取り替える工法と、型枠を設置して現場打ちにより可換部を製作する工法が検討され、いずれも期待される耐震性能を発揮できることを実証した。
- 3) メタボリズム RC 柱構造の設計手順が提案された。復旧時を想定した荷重により、永続部であるメナーゼヒンジ部の設計を行った上で、地震時における要求性能を、既に設計した永続部を考慮しながら可換部を設計することにより確保するという設計手順は、従来の耐震設計にはない新しいコンセプトとして評価できる。
- 4) メタボリズム RC 柱構造を道路橋橋脚に採用した試設計を行い、従来の耐震補強工法として広く活用されている RC 巻立て工法と施工性や経済性の観点で比較検討した。地震後の復旧施工性の観点では、RC 巻立て工法に比べて約半分程度の工期短縮が可能になる一方、経済性の検討では、メタボリズム RC 柱は初期費用が高くなるため、地震後の復旧性を含めたライフサイクルコストでは特筆したコスト減とはならないものの、早期復旧することによる経済活動を踏まえると、極めて有利となることを試算している。新しい構造開発の評価において、構造物のライフサイクルコストの評価に留まらず、構造物の社会的影響まで踏まえた経済性評価を行っていることが評価できる。

本論文は、鉛直荷重を支持する柱構造について、機能継続しながら将来の耐震性能改変を可能とする構造の開発ならびに設計法について重要な知見を有しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年6月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。