

氏名	中山 岳彦
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	医工農博甲第147号
学位授与年月日	令和6年3月22日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
専攻名	工学専攻 環境社会システム学コース
学位論文題目	鉄筋コンクリート部材接合部の耐力評価と配筋の合理化に関する解析的研究
論文審査委員	主査 教授 齊藤 成彦 教授 岡澤 重信 准教授 後藤 聡 准教授 吉田 純司 准教授 宮本 崇 准教授 大槻 順朗

学位論文内容の要旨

日本における人口減少・少子高齢化の進行により、建設業は他産業に比べて相対的に生産性が低い状況となった。建設業の中でも特にコンクリート工は、土工とともに生産性の改善が遅れている分野と言われており、土木学会コンクリート委員会ではこれを改善するための問題点が提示されている。この提案は切実な課題と受け止め、ルールの変更や見直しですぐに対応できる事柄は議論を行い、技術的な検討が必要な内容はさらなる研究開発を行い、発注者、設計者、施工者がそれぞれの建設プロセスで具現化していかなければならない。そこで本研究では、配筋に関する生産性向上の提案のうち、鉄筋の過密配置や干渉について着目した。特に部材接合部は、それぞれの部材の配筋が交わることから高密度鉄筋になりやすいため、部材接合部の高密度鉄筋に焦点を当て、生産性向上につながる部材接合部の配筋合理化に関する検討を行った。

部材接合部は構造物の安定性や部材間の断面力の確実な伝達において重要な部位であり、土木分野では一般的に、剛結されることを前提として設計されるため、配筋や構造が仕様規定的に決められるなど、鉄筋の過密配置の傾向が強い。さらに、破壊性状が複雑で正確に耐荷力を把握することが難しく、十分安全側の設計として詳細な検討は後回しにされて

きた。本研究では、ひび割れ等の不連続現象の表現に有利な非線形数値解析手法である剛体バネモデル（RBSM）を利用して、荷重－変位関係、ひび割れ性状、鉄筋ひずみ等から破壊性状を詳細に分析し、接合部の耐力を確保したうえで生産性に配慮した合理的な配筋方法の検討を行った。検討対象とした接合部は、しばしば鉄筋干渉が問題となる部位である基礎杭とフーチングの部材接合、および柱梁の接合部に見られる L 形接合部とした。基礎杭とフーチングの部材接合の検討では、はじめに杭基礎フーチングを模擬した試験体に対する既往の実験結果と本研究で実施した再現解析結果との比較から、解析は実験で確認された押抜きせん断型の複雑な破壊形態を再現できていることを確認した。次に、鉄筋干渉がしばしば問題となるフーチングの下側鉄筋と杭の鉛直方向鉄筋の干渉回避を目的として、フーチングの下側鉄筋のうち杭直上に配置される鉄筋を除外した場合や配置換えをした場合について検討を行った結果、フーチングのようなディープビームに近い耐荷機構ではコンクリートのせん断抵抗力が支配的であるため、軸方向鉄筋の影響が小さく若干の耐荷力の低下があるものの大きな影響はないことが分かった。さらに、杭基礎の鉛直方向鉄筋（杭基礎の軸方向鉄筋）がフーチング内に定着されていることを考慮すると、フーチング下側の軸方向鉄筋の配置変更の影響はさらに小さくなり、フーチング下側鉄筋の配置変更は破壊性状や耐荷力に与える影響が少ないことを明らかにした。

これらの検討をもとに、実構造物スケールの杭が多列配置される杭基礎フーチングをモデル化して解析した結果、この杭基礎フーチングは橋脚壁基部とその近傍直下の杭との間の狭い範囲で荷重を負担するため、鉛直に近いひびわれが発生し、一面せん断型の破壊形態をとることが確認できた。さらに、鉄筋の干渉が課題となっている杭基礎の鉛直方向鉄筋との干渉を避けるようにフーチング下側鉄筋の配置換えを行っても、所定の鉄筋量を確保すれば耐力の低下はなく、破壊挙動に大きな違いは生じないことを確認できた。これにより、フーチングの下側鉄筋と杭基礎の鉛直方向鉄筋の干渉が発生し配筋が難しい場合は、必ずしも杭直上にフーチングの下側鉄筋を配置する必要はなく配置換えを行っても耐荷力に与える影響は少ないことが分かり、杭基礎とフーチングの部材接合において生産性向上につながる結果を示すことができた。なお、地震時荷重のように橋脚に水平力が入力される場合についても鉄筋配置の合理化は有効と考えられるが、別途検討が必要である。

柱梁接合部や RC ボックスカルバートの隅角部等に見られる L 形接合部の検討では、鉄道ラーメン高架橋の L 形柱梁接合部を模擬した実験試験体を対象に解析を行い、実験結果と比較した結果、荷重－変位関係では外側軸方向鉄筋の曲げ内半径や接合部内の補強鉄筋の有無による変化を再現できおり、ひび割れ性状では L 形接合部を開く方向と閉じる方向に載荷した際に発生するひび割れ性状の違いを精度よく表すなど、解析は実験結果をよ

く再現できていることが確認できた。また、解析結果を考察し、外側軸方向鉄筋は曲げ内半径を大きくすると負荷荷時の最大水平荷重が増加することや、接合部内の帯状の補強鉄筋は最大水平荷重に与える影響は少ないが、最大水平荷重後の変形特性を向上させる役割があることが確認された。さらに、接合部が開く方向と閉じる方向のそれぞれの載荷時に発生するひび割れに直交するように、接合部内の補強鉄筋を改良した新たな形状の補強鉄筋を提案して検討した結果、最大水平荷重や変形性能が向上することを示した。

実験試験体で得た結果を踏まえ、実構造物大の RC ボックスカルバートの底版と壁からなる L 形隅角部の解析を行った。この RC ボックスカルバートの隅角部は、L 形柱梁接合部と断面形状は近いが、開削工法における高速道路トンネルの構造物であるため奥行き方向に長く、一般に生産性の悪いハンチ構造があるうえに接合部内の補強鉄筋形状が違うなど、構造に多少の違いがある。この実構造物モデルの解析を行った結果から、既往の接合部補強鉄筋やハンチ構造は耐荷性状を大きく向上させていることが確認された。また、この隅角部に L 形柱梁接合部の検討時に提案した新たな補強鉄筋形状を適用して検討した結果、同程度の耐荷力が確認された。さらに、隅角部のハンチ構造をなくして、新たな補強鉄筋形状を適用して検討すると、ハンチのない L 形接合部であってもハンチのある L 形接合部に近い耐荷力を確保できることが分かった。この新たに提案した補強鉄筋は、従来の補強鉄筋に比べて生産性を確保できる形であり、さらにはハンチ構造の省略等 L 形接合部の生産性向上の可能性について示すことができた。

論文審査結果の要旨

本研究は、技術者や技能者の減少から品質を確保したうえでの生産性向上が喫緊の課題となっているコンクリート工において、特に鉄筋の過密配置や干渉により著しい生産性の低下を招いている部材接合部を対象として、高度な非線形数値解析技術を利用した検討により配筋が耐荷挙動に及ぼす影響を詳細に分析したうえで、生産性向上につながる新たな配筋方法の提案を行ったものである。本研究で得られた成果は、杭基礎とフーチングの部材接合部、ならびに柱梁接合部や RC ボックスカルバートの隅角部に見られる L 形接合部の配筋の合理化に資するものであり、実験的研究だけでは困難であった鉄筋コンクリート構造における接合部の耐荷挙動や破壊性状を明らかにした学術的にも重要なものである。研究成果をとりまとめた学位論文は以下の観点から評価を行った。

論文テーマの設定：本研究は、日本が直面している少子高齢社会において建設業が求められているコンクリート工の生産性向上を目的としたものであり、時宜を得た重要なテー

マを扱っている。鉄筋の過密配置や干渉が問題となっている部材接合部は、耐荷挙動や破壊性状が複雑なため、実験的検討に基づいた経験則によって設計が行われており、十分な検討が行われてこなかった経緯がある。近年の発展が目覚ましい非線形数値解析技術を採用した検討は、新規性とともな学術的意義も高く、研究より得られる成果は持続可能な社会の実現に貢献するものであり、本研究は適切なテーマ設定がなされていると判断される。

論文等の論理性：本研究では、特に生産性の低下を招いている部材接合部に着眼し、既往の実験試験体を対象とした検討により解析手法の妥当性を検証したうえで、生産性向上につながる新たな配筋手法の提案を行い、実験での検討が困難な実構造物スケールを対象とした解析的検討によって提案した配筋手法の有用性を示している。本研究で提案された補強鉄筋は、従来から用いられている補強鉄筋形状に比べて、生産性を確保できる形状であり、さらには接合部構造の合理化の可能性を含む生産性向上につながる結果を示しており、論文テーマに沿った研究成果が得られ、論理の一貫性も保たれていることを確認した。

論文等の記述と構成：本論文では、第 1 章で建設業の生産性向上の必要性に関する研究の背景と、研究目的である数値解析技術を駆使した品質を確保した配筋の合理化の提案について示し、第 2 章では部材接合部に関する既往の研究を整理と研究課題の分析を行い、第 3 章では本研究に用いた数値解析技術について概説し、第 4 章および第 5 章では、それぞれ杭基礎フーチングと L 形接合部を対象とした検討により、接合部の構造や配筋の影響について詳細に分析し、それを踏まえた新たな配筋方法を提案している。第 6 章では、本研究で得られた成果をまとめるとともに、残された課題について提示している。これより、本論文の構成と記述は適切であり、研究成果は体系的に示されており、研究成果と考察が整合性を持っていることを確認した。

研究の倫理：本研究の目的や手法は新規性や独創性が高く、得られた成果も独自性を有するものであり、論文の捏造や改ざんのない公正なデータに基づき作成されていることを確認した。

最終試験においては、解析手法の概要、解析手法のキャリブレーション手法、載荷方法に関する検討のケース、接合部配筋の仕様の詳細等について説明がなされ、中間発表で課された課題に対して適切に対応していることを確認した。

以上より、学位論文に係る評価基準を満足するとともに、環境社会システム学コースの履修基準を満たしており、同論文審査委員は全員一致で本論文が博士学位論文として十分な水準にあると判断した。