

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14813

研究課題名（和文）耐荷機構に立脚した既設鉄筋コンクリート構造部材のせん断耐力評価式の構築

研究課題名（英文）Construction of evaluating equations for shear capacity of existing RC structural members based on the shear resistance mechanisms

研究代表者

山田 雄太 (YAMADA, Yuta)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：90801035

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：既設鉄筋コンクリート（RC）部材における合理的なせん断耐力評価式を構築することを目的として、劣化した部材や補修および補強された部材のせん断耐荷機構を明らかにすると同時に、せん断耐荷機構の定義に立脚した種々のモデルを構築した。構築したモデルに基づき材料のせん断抵抗力寄与分に関する耐荷機構上の分類を明らかにすることにより、理論的な評価式の構築に至った。既存の設計指針類に採用されている評価式と構築した評価式の精度を比較した結果、構築した評価式は、健全な部材に対してより高い精度でせん断耐力を評価可能であることに加え、劣化した部材や補修および補強された部材に対してもその精度が保たれることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

RC構造部材のせん断破壊は避けるべき破壊形態の1つであるものの、その現象の複雑さゆえに合理的な耐力予測式の構築には至っておらず、主要な設計指針類の多くには統計的な評価手法が採用されている。劣化した部材や補修および補強された部材に対しては、統計的な評価手法の適用は困難である。本研究では、このような部材に対しても一貫して耐荷性能を評価可能な理論的な評価式を構築しており、既設構造部材における維持管理手法の高度化に資する成果が得られた点に社会的意義がある。構築した評価式はせん断耐荷機構の定義に立脚した理論式であることから、せん断耐力評価手法の理論化に資する成果が得られた点に学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The shear resistance mechanisms of deteriorated reinforced concrete (RC) members with strengthening and / or repairing materials were made clear. Simultaneously, the evaluation models to predict shear strengths of those members were constructed based on the definition of the shear resistance mechanisms. The contribution forces of materials to the shear resistance were classified based on the constructed models. Eventually, the theoretical evaluation equation of shear strengths was constructed by the knowledge obtained above. The accuracy of the constructed evaluation equation was compared with that of the ones adopted to major specifications and design codes. As a result, the constructed equation indicated higher accuracy in case of the members without deteriorations, and that the accuracy was maintained even in case of the deteriorated members with strengthening and / or repairing materials.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：せん断 RCはり アーチ機構 ビーム機構 補修 補強 鉄筋腐食ひび割れ FRPシート

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート (RC) 構造部材のせん断問題が顕在化してから、その現象の解明と耐荷性能の評価を目的とした数多くの研究が行われてきた。RC 構造部材のせん断破壊は避けるべき破壊形態の 1 つであるものの、その現象の複雑さゆえに、せん断耐荷機構については完全に解明されておらず、耐荷機構に立脚した理論的な耐力予測式の構築には至っていない状況にあった。このような背景から、国内外における設計指針類の多くには、実験結果から得られた統計的な知見に基づく耐荷性能の評価手法が採用されている。これらの手法では、せん断補強筋の荷重寄与分とそれ以外の荷重寄与分における線形加算則の成立を前提としているものの、前提の妥当性や考慮している影響因子の物理的意味については不明瞭な点を包含している。

劣化した既設部材や補修および補強された部材における耐力の評価に際しては、劣化の原因や補修および補強の効果が同定できた場合でも、統計的な知見に基づく手法では部材の様態等に応じた手法を個別に構築する必要があることから、耐力への影響因子を適切に反映することや部材の状態に応じた耐荷性能を一貫して評価することが困難である。加えて、局所的な挙動を追跡する離散的な数値解析手法では、大局的な挙動や部材の状態に応じた耐荷機構の把握に直結する解が得られるとは限らないことから、耐荷機構に立脚した理論的かつ合理的な耐力予測式の構築が求められていた。

RC 構造部材のせん断耐荷機構が「アーチ機構」と「ビーム機構」の和により表現可能とする概念は、数学的、力学的にも合理性が担保されているものの、アーチ機構の荷重寄与分 (V_a) とビーム機構の荷重寄与分 (V_b) を推定する手法のみならず、実験結果から V_a と V_b を適切に評価する手法も存在していない状況にあった。一方、研究代表者は、耐荷機構の荷重寄与率を定義することで、実験結果から理論的に作用荷重を V_a と V_b に分解する手法^{1),2)}を提案すると同時に、耐荷機構の定義からビーム機構の耐力 (V_{bf}) 予測モデルを構築することに成功していた³⁾。このモデルを補修および補強された劣化部材に拡張することにより、既設構造物の劣化と補修および補強の効果を同時に反映させた合理的な耐力評価手法の確立が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究では、既設 RC 構造部材における劣化と補修および補強の効果を反映させた合理的な耐力評価式を構築すると同時に、RC 構造部材におけるせん断耐力評価手法の理論化を目的としている。具体的には以下の項目を達成することを目的として研究を推進した。

- a) 耐荷機構に立脚した RC 部材におけるせん断耐力評価式の構築
- b) 劣化した RC 部材におけるせん断耐力評価式の構築
- c) 補修および補強された RC 部材におけるせん断耐力評価式の構築
- d) 補修および補強された劣化 RC 部材におけるせん断耐力評価式の構築

3. 研究の方法

(1) 評価式の構築方法

評価式の構築に際しては、既存の手法のようにせん断補強筋の荷重寄与分とそれ以外の荷重寄与分における線形加算則の成立を前提とせず、アーチ機構とビーム機構の定義式をその礎とし、定義を満足するよう構築した「耐荷機構の耐力予測モデル」から部材の状態に応じた V_a と V_b を導き、それぞれを加算することで耐力の評価式を導出した。

(2) 研究対象と妥当性の検証方法

本研究では、RC 構造部材の中でも主要な部材の 1 つである RC はりを対象として研究を推進した。劣化については RC はりのせん断耐荷機構に大きな影響を及ぼす鉄筋腐食ひび割れを対象とし、補修および補強材料については適用範囲の拡大が予想される繊維補強プラスチック (FRP) シートに主眼を置いた。鉄筋腐食が進行することで鉄筋腐食ひび割れ面のせん断伝達性能が消失した極端な状態を想定し、平滑な人工ひび割れを有する試験体および FRP シートによりせん断補強された試験体を作製し、静的載荷実験により得られた V_a および V_b の実験値と評価式による算定値との比較を行うことにより構築した評価式の妥当性を検証した。

(3) 研究の流れ

健全な RC はりを対象として V_{bf} 予測モデルおよびアーチ機構の耐力 (V_{af}) 予測モデルを構築し、モデルの高度化を推進した後、人工ひび割れを有する RC はり、FRP シート補強された RC はり、FRP シート補強された人工ひび割れを有する RC はりを対象としてモデルを拡張した。モデルの構築と並行して試験体の作製と静的載荷実験を実施した。部材の状態に応じたコンクリートやせん断補強材の抵抗力寄与分に関する耐荷機構上の分類を明らかにするため、耐荷機構の耐力予測モデルに基づき荷重変位関係を予測する新たな数理モデルを解析的手法により構築し、モデルによる計算結果からその分類の解明を試みた。解明された分類に基づき終局時におけるせん断耐力 (V_f) の評価式を導き、評価式による V_f の算定値と実験値や既存の設計指針類に採用されている評価式による算定値を比較することで評価式の妥当性を検証した。

4. 研究成果

(1) 健全な部材における耐荷機構の耐力予測モデルの構築

健全な部材を対象として耐荷機構の耐力を予測する耐荷機構の耐力予測モデルを構築した。構築したモデルは、斜めひび割れ経路と斜めひび割れの開口幅に応じた斜めひび割れ経路上の引張応力およびせん断応力の伝達を考慮するものであり、静的載荷実験および有限要素解析の結果に対して高い精度で耐荷機構の耐力を予測可能であることや既存の設計指針類に採用されている評価式との関連性を示した⁴⁾。主鉄筋比が高い部材に対しても構築したモデルの適用を可能とするために、主鉄筋のダウエル効果を考慮したモデルを構築した。構築したモデルは、主鉄筋のダウエル力および鉄筋とコンクリート間の付着による斜めひび割れの開口抑制効果を考慮するものである。静的載荷実験および有限要素解析の結果から、モデルの適用により、さらに高い精度で耐荷機構の耐力を予測可能であることや、鉄筋とコンクリート間の付着による開口抑制効果は相対的に小さいことを明らかにした。国内外における主要な設計指針類に採用されている評価式と構築したモデルによる耐荷機構の耐力の算定精度を比較した結果、モデルに基づく算定精度が最も高くなることを示した⁵⁾。鉄筋腐食などの劣化により生じた既存のひび割れを有する部材では、健全な部材を対象とした斜めひび割れ開口幅の予測手法は適用できなくなる可能性が高いことから、いかなるひび割れ経路に対しても適用可能な斜めひび割れ開口幅の予測手法を構築した。この手法を適用したモデルは既存の設計指針類に採用されている評価式と同程度の精度で耐荷機構の耐力を予測可能であることを確認した⁶⁾。

(2) 既存のひび割れを有する部材における耐荷機構の耐力予測モデルの構築

健全な部材における耐力予測モデルを拡張することにより、劣化により生じた既存のひび割れを有する部材に対する耐力予測モデルを構築した^{7),8)}。その妥当性の検証に際しては、耐荷機構に大きな影響を及ぼすことが予想される主鉄筋に沿うひび割れとせん断補強筋に沿うひび割れを有する部材を対象とした。人工ひび割れを有する試験体を作製し、静的載荷実験を実施した結果、人工ひび割れが V_a と V_b の推移に及ぼす影響を明らかにするとともに、構築したモデルにより試験体の V_{af} と V_{bf} を精度良く算定可能であることを示した⁹⁾。特に、せん断補強筋に沿う人工ひび割れを有する部材に対しては、(1)で構築した斜めひび割れ開口幅の予測手法が適用可能であることも確認した⁹⁾。

(3) FRP シートにより補強された部材における耐荷機構の耐力モデルの構築

健全な部材における耐力予測モデルを拡張することにより、FRP シートによりせん断補強された部材に対する耐力予測モデルを構築した。その妥当性の検証に際しては、FRP シートによりせん断補強された部材を対象とした。FRP シートによりせん断補強された部材を作製し、静的載荷実験を実施した結果、FRP シートが V_a と V_b の推移に及ぼす影響を明らかにするとともに、FRP シートのダウエル効果や斜めひび割れの開口抑制効果は相対的に小さいことを明らかにした¹⁰⁾。同時に、構築したモデルにより試験体の V_{af} と V_{bf} を精度良く算定可能であることを示した。

(4) 既存のひび割れを有する FRP シートによりせん断補強された部材における耐荷機構の耐力予測モデルの構築

(2) および (3) で構築したモデルに基づき既存のひび割れを有する FRP シートによりせん断補強された部材における耐荷機構の耐力モデルを構築した。

(5) 材料におけるせん断抵抗寄与分の分類

部材の状態に応じたコンクリートやせん断補強材の抵抗力寄与分に関する耐荷機構上の分類を明らかにするため、耐荷機構の耐力予測モデルに基づき荷重変位関係を予測する新たな数理モデルを解析的手法により構築し、モデルによる計算結果からその分類の解明を試みた。構築したモデルを適用して耐荷機構の推移を計算した結果、斜めひび割れ発生荷重はビーム機構の耐力で表されること、終局時のせん断耐力はコンクリートにおけるアーチ機構寄与分、せん断補強材の軸方向力に起因するアーチ機構寄与分、せん断補強材のダウエル力に起因するビーム機構寄与分もしくはビーム機構の耐力の和により表されることをそれぞれ明らかにした。

(6) せん断耐力評価式の定式化

材料におけるせん断抵抗寄与分の分類に基づきせん断耐力評価式を定式化した。例えば、せん断補強筋を有する部材における V_f については、人工ひび割れや FRP シートの有無にかかわらず以下の関係が保たれることから評価式を導いている。

$$V_f = V_{ac(V_b)} + V_{as} + V_{bdw}$$

ここに、 $V_{ac(V_b)}$: コンクリートにおける V_a 寄与分、 V_{as} : せん断補強材における軸方向力に起因する V_a 寄与分、 V_{bdw} : せん断補強材におけるダウエル力に起因する V_b 寄与分である。

(7) 評価式の妥当性の検証

既往の研究による実験結果および研究期間全体を通じて実施した載荷実験の結果を対象として、構築した評価式と既存の設計指針類に採用されている評価式による算定精度の比較を行っ

た。

健全な部材を対象とした場合、構築した評価式は既存の設計指針類に採用されている評価式より高い算定精度を示した。せん断スパンが相対的に小さい場合には、既存の設計指針類に採用されている評価式による算定精度が低下するのに対し、構築した評価式による算定精度は一定に保たれることを確認した。さらに、人工ひび割れを有する部材や FRP シートにより補強された部材、人工ひび割れを有する FRP シートにより補強された部材を対象として算定精度を検証した結果、構築した評価式は健全な部材に対する精度と同程度の精度で V_f を評価可能であることを示した。

以上の研究成果により、補修および補強された劣化部材を対象とした統計的手法に依存しない耐力評価式の構築に至ると同時に、せん断耐力評価手法の理論化にも成功したものと考えている。

<引用文献>

- 1) 山田雄太: 穿孔の導入による応力場の意図的な変化が RC はりのせん断耐荷機構に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.595-600, 2018.7.
- 2) 山田雄太: ひずみエネルギーに基づく種々の荷重状態に適用可能な RC はり部材におけるせん断耐荷機構分解手法の提案, コンクリート工学年次論文集, No.42, No.2, pp.559-564, 2020.7.
- 3) 山田雄太: RC はりのせん断耐荷機構におけるビーム機構の耐力予測式構築に関する試案, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, 第 V 部門, pp. 1007-1008, 2018.8.
- 4) 山田雄太: 斜めひび割れ経路上の応力伝達を考慮した RC はりのせん断抵抗機構におけるビーム機構の耐力予測式構築, 土木学会論文集 E2, Vol. 76, No.4, pp.386-402, 2020.12.
- 5) Yamada, Y.: Theoretical Evaluation Equation for Capacities of Beam Action in Shear Resistance Mechanisms of RC Beams Reflecting Dowel Action of Main Reinforcements, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, No.9, pp.1025-1039, 2021.9.
- 6) 山田雄太: 耐荷機構に立脚した RC はりの耐力予測モデルにおける斜めひび割れ開口幅の理論的予測手法, 土木学会論文集 E2, Vol.78, No.4, pp.264-273, 2022.11.
- 7) 山田雄太: 部材軸方向に既存のひび割れを有するせん断補強筋の無い RC はりに関するビーム機構の耐力予測モデルの提案, 土木学会第 76 回年次学術講演会講演概要集, V-261, 2021.9.
- 8) 山田雄太: せん断補強筋に沿う既存ひび割れを有する RC はりに関するビーム機構の耐力予測モデルの提案, 令和 3 年度 (第 65 回) 日本大学理工学部学術講演会, H-17, 2021.12.
- 9) 山田雄太: せん断補強筋に沿う人工ひび割れを有する RC スレンダービームに対するせん断耐荷機構の耐力予測モデルの適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, pp.919-924, 2023.7.
- 10) 山田雄太: FRP シートによりせん断補強された RC はり部材に対するせん断耐荷機構の耐力予測モデルの拡張, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.871-876, 2022.7.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 山田雄太	4. 巻 45
2. 論文標題 せん断補強筋に沿う人工ひび割れを有するRCスレンダービームに対するせん断耐荷機構の耐力予測モデルの適用性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 919～924
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山田雄太	4. 巻 46
2. 論文標題 RCはりのせん断抵抗機構に立脚した荷重変位関係の予測モデルに基づくせん断補強筋の抵抗力寄与分の分類	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山田雄太	4. 巻 78
2. 論文標題 耐荷機構に立脚したRCはりの耐力予測モデルにおける斜めひび割れ開口幅の理論的予測手法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集E2	6. 最初と最後の頁 264～273
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejmcs.78.4_264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 山田雄太	4. 巻 44
2. 論文標題 FRPシートによりせん断補強されたRCはり部材に対するせん断耐荷機構の耐力予測モデルの拡張	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 871～876
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Yamada	4. 巻 19
2. 論文標題 Theoretical Evaluation Equation for Capacities of Beam Action in Shear Resistance Mechanisms of RC Beams Reflecting Dowel Action of Main Reinforcements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 1025 ~ 1039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.19.1025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Yamada	4. 巻 76
2. 論文標題 CONSTRUCTION OF EVALUATING EQUATION FOR CAPACITIES OF BEAM ACTION IN SHEAR RESISTANCE MECHANISMS OF RC BEAMS BASED ON STRESS TRANSFER ALONG INCLINED CRACK PATHS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E2 (Materials and Concrete Structures)	6. 最初と最後の頁 386 ~ 402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejmcs.76.4_386	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 山田雄太
2. 発表標題 せん断補強筋に沿う既存ひび割れを有するRCはりにおけるビーム機構の耐力予測モデルの提案
3. 学会等名 第65回日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田雄太
2. 発表標題 部材軸方向に既存のひび割れを有するせん断補強筋の無い RCはりにおけるビーム機構の耐力予測モデルの提案
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------