

令和元年6月17日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18138

研究課題名（和文）有限要素解析と画像解析を併用したT形RCはりのせん断耐荷機構の解明と設計の高度化

研究課題名（英文）Investigation of shear resistance mechanism of RC T-beams based on image analysis and non-linear FEM

研究代表者

中村 拓郎（Nakamura, Takuro）

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（寒地土木研究所）・研究員

研究者番号：20588850

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：圧縮フランジの張出し部を考慮したT形RCはりのせん断耐力の評価方法を確立することを目的に、T形RCはりのせん断破壊挙動について実験および解析的検討を行った。その結果、圧縮フランジ幅や厚さが大きいほどせん断耐力が大きくなること、せん断補強鉄筋を有するT形RCはりでは、圧縮フランジによって斜めひび割れの進展が抑制され、圧縮フランジが分担するせん断耐力を期待できることを示した。さらに、圧縮フランジの張出し部のコンクリート分担分を考慮したT形RCはりのせん断耐力の推定式を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、広く利用されている基本的な構造部材であるT形RCはりに対して、圧縮フランジの張出し部を無視する現行のせん断設計が過度に安全側の評価となる場合があることを示すとともに、圧縮フランジがRCはりのせん断耐力へ寄与する条件を明確化し、圧縮フランジ幅や厚さといったT形断面に由来する形状要因による貢献を考慮できるT形RCはりのせん断耐力の推定式を提案した。

研究成果の概要（英文）：This research aims to propose an evaluation method of shear capacity for RC T-beams that take into account the compression flange. The static bending tests and numerical analyses by 3D non-linear FEM were conducted for RC beams with the various width and height of compression flange, shear span ratio, and shear reinforcement ratio. The experimental and numerical results show that the compression flange of RC T-beams with shear reinforcement resists the progress of the diagonal cracks and contributes the shear resistance. Finally, this study proposes a new equation for the shear capacity carried by the compression flange.

研究分野：土木工学

キーワード：鉄筋コンクリート T形はり せん断耐荷機構 せん断スパン比 せん断補強鉄筋比 有限要素解析

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ラーメン高架橋の上層はりやT形桁、スラブと一体となったはりなどのT形断面を有するRCはり（以下、T形RCはり）は、古くから広く利用されてきた基本的なRC部材のひとつである。多くの既往研究では、T形RCはりにおける圧縮フランジの張出し部がせん断耐力に影響することが示されており、矩形断面とT形断面ではRCはりのせん断耐荷機構が異なる可能性も示唆されている。T形RCはりの場合、RCはりのせん断耐力に寄与する有効高さ、せん断スパン比、せん断補強鉄筋比等に加えて、圧縮フランジ幅や厚さといったT形断面に由来する形状要因がせん断耐力に影響する。そして、大略的には、矩形断面に比べてT形断面の方がせん断耐力は大きくなるとされている。しかしながら、圧縮フランジの張出し部を考慮できるせん断耐力の設計式は定められていないため、安全側の設計として、圧縮フランジの張出し部を考慮しない（無視した）矩形断面のはりとしてT形RCはりのせん断耐力は照査されている。建設・維持管理コストの縮減が避けられない社会情勢において、安全性を損なうことなく、より合理的な構造設計を可能とする技術が強く求められているにもかかわらず、T形RCはりのせん断耐力を過小評価することになる現行の設計法では、建設・維持管理コストに直結する合理的な配筋や、効率的かつ効果的な補修補強のための構造性能評価が難しいのが現状である。

### 2. 研究の目的

圧縮フランジの張出し部を無視した現行のせん断設計では、既設構造物の補強設計等において過度に安全側の評価となる場合があり、圧縮フランジがはりのせん断耐力へ寄与する条件の明確化とその貢献の評価手法が求められる。本研究では、T形RCはりのせん断耐力の評価方法を確立することを目的に、T形RCはりのせん断耐力とせん断破壊挙動について実験および解析的検討を行った。まず、実験的検討として、圧縮フランジ幅や厚さ、せん断スパン比、せん断補強鉄筋比がT形RCはりのせん断破壊挙動に及ぼす影響を検討した。次に、解析的検討として、3次元非線形FEMによる載荷実験の再現解析とパラメトリック解析を行い、T形RCはりのせん断耐力や応力分布等を確認した。そして、これらの実験および解析結果をふまえて、T形RCはりのせん断耐力の推定方法を検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 画像解析を併用した構造実験によるT形RCはりのせん断耐荷機構の検討

せん断スパン比、圧縮フランジ幅、圧縮フランジ厚さ、せん断補強鉄筋比を変えた30体のRCはり（図-1）に対して静的載荷実験を実施し、各実験パラメータがT形RCはりのせん断破壊挙動やせん断耐力に及ぼす影響を検討した。なお、一部の試験体では、載荷実験中に得られた画像データより、画像解析によるひずみの算定も試みている。

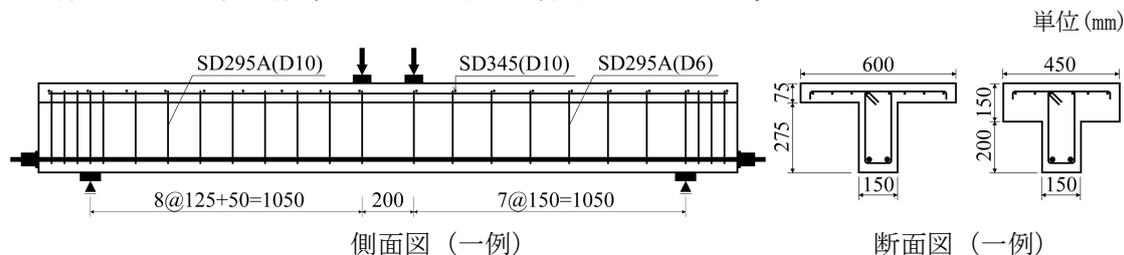


図-1 RCはり試験体の概要図

#### (2) 3次元非線形有限要素解析によるT形RCはりのせん断耐荷機構の検討

圧縮フランジ幅や厚さ、せん断スパン比、せん断補強鉄筋比がT形RCはりのせん断破壊挙動に及ぼす影響について、実験時に生じる可能性のある誤差を含まない検討としてパラメトリック解析を実施した。3次元非線形FEMでは、コンクリートには構造ソリッド要素を、鉄筋には埋め込み鉄筋要素を使用した。コンクリートのひび割れモデルは、直交固定ひび割れモデルを用いており、コンクリートの引張挙動にはHordijkモデルを、圧縮挙動には放物線モデルを、横方向ひび割れによる圧縮強度低減にはVecchio & Collinsモデルを用いた。また、せん断伝達特性にはAl-Mahaidiのせん断伝達モデルを適用した。

解析パラメータは、圧縮フランジ厚さと有効高さの比を3水準、圧縮フランジ幅とウェブ幅の比を4水準、せん断スパン比を3水準、せん断補強鉄筋比を4水準とし、解析ケースはこれらの解析パラメータを組み合わせた計60ケースとした。なお、パラメトリック解析で使用する解析モデルを決定するために、上記(1)のRCはりの載荷実験や既発表論文に示される大型RCはりを対象とした再現解析も行っている。

#### (3) T形RCはりのせん断耐力の予測式の提案

上記(1)(2)の結果から、圧縮フランジがRCはりのせん断耐力へ寄与する条件を明確化し、圧縮フランジ幅や厚さといったT形断面に由来する形状要因による貢献を考慮できるT形RCはり

のせん断耐力の推定式を検討した。さらに、提案式の適用範囲を確認するために、既往文献に示される 102 体の T 形 RC はりの実験データと提案式による計算値の比較を行った。

#### 4. 研究成果

本研究では、圧縮フランジの張出し部を考慮した T 形 RC はりのせん断耐力の評価方法を確立することを目的に、圧縮フランジ幅や厚さ、せん断スパン比、せん断補強鉄筋比が T 形 RC はりのせん断破壊挙動に及ぼす影響について実験および解析的検討を行った。本研究で得られた知見の概要を以下に示す。

- (1) せん断補強鉄筋を有する T 形 RC はりでは、ウェブやスパン、配筋が等しい矩形断面の RC はりよりもせん断耐力が大きくなり (図-2)、圧縮フランジ幅 (図-3) や厚さ (図-4) が大きくなるほど、圧縮フランジのせん断耐力への貢献が大きいことを確認した。せん断スパン比の等しい試験体では、圧縮フランジの存在やせん断補強鉄筋比による斜めひび割れ発生荷重への影響は認められなかった。また、せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力は、T 形断面と矩形断面の RC はりで有意な違いは認められず、現行のトラス理論による計算値で安全側に評価できることを確認した。

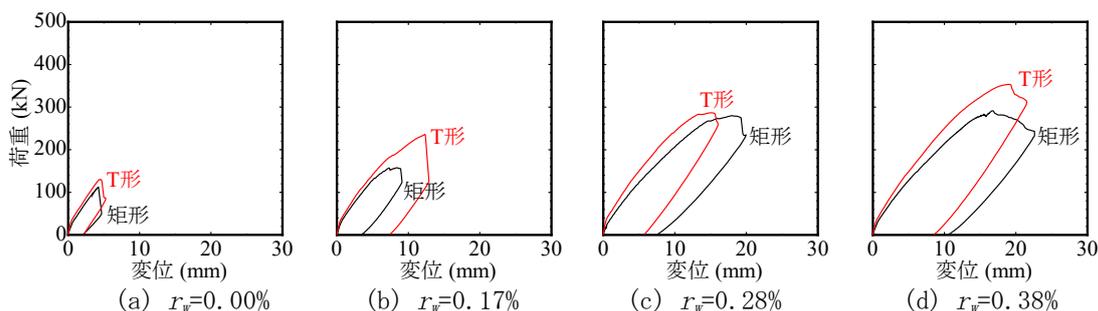


図-2 荷重-変位関係の一例

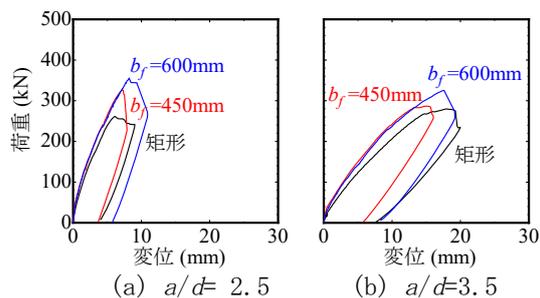


図-3 圧縮フランジ幅の影響

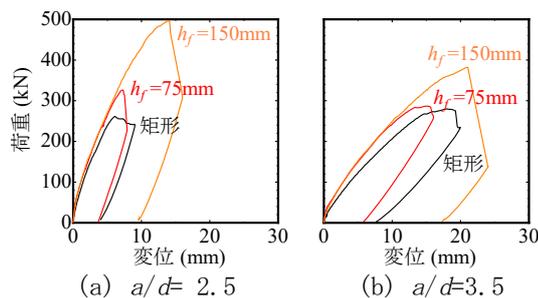
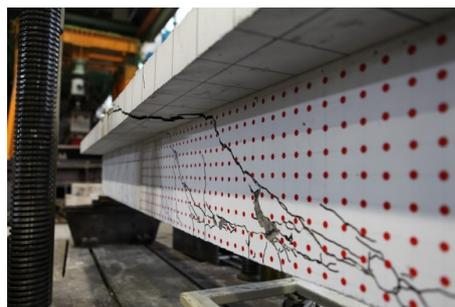


図-4 圧縮フランジ厚さの影響

- (2) T 形 RC はりでは、圧縮フランジとウェブとの接合部において斜めひび割れの進展が抑制され、斜めひび割れ発生後の剛性低下も矩形断面と比べて小さかった。ただし、図-2(a)のように、ウェブにせん断補強鉄筋が配置されていない場合には、圧縮フランジの抵抗よりもウェブにおける斜めひび割れの開口が顕著となり、斜めひび割れ発生直後に荷重が低下するおそれがあることを確認した。また、図-5 に示すように、せん断スパン比 ( $a/d$ ) の違いによって、せん断破壊時のウェブと圧縮フランジのひび割れの連続性が異なることを確認した。なお、画像解析による最大主ひずみ分布は実験時のひび割れ性状と概ね一致していた。



(a)  $a/d = 2.5$  の試験体

(b)  $a/d = 3.5$  の試験体

図-5 圧縮フランジへのひび割れの進展状況

一方、解析においても、実験時のひび割れ性状と同様に、T形RCはりでは、圧縮フランジとウェブとの接合部に沿うように最大主ひずみが増加した(図-6)。また、荷重-変位関係における曲げひび割れおよびせん断補強鉄筋の降伏にともなう剛性の変化や、最大荷重が概ね再現できた。最大荷重以降では、せん断スパンにおける最大主ひずみ分布が拡大しており、いずれの解析ケースもせん断破壊に至ったと考えられる。パラメトリック解析の結果からは、実験結果と同様に、圧縮フランジ幅や厚さが大きいほどせん断耐力が大きくなるという傾向が得られている。

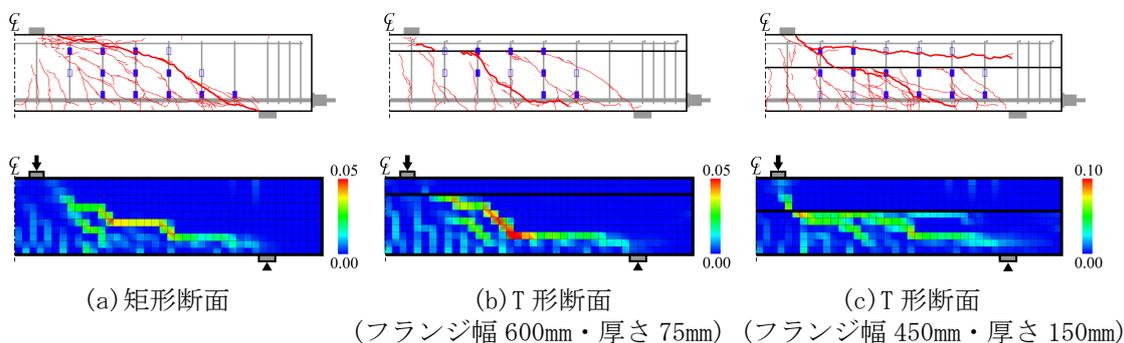


図-6 実験時のひび割れ図とFEMにおける最大主ひずみ分布の一例

(3) 前述の実験結果から、T形RCはり、ウェブの斜めひび割れが急激に開口しない場合に、圧縮フランジとウェブとの接合部において斜めひび割れの進展が抑制され、圧縮フランジによるせん断耐力の分担が期待できると考えられる。そこで、T形RCはりのせん断耐力の算定モデルについては、次の条件が成立することとした。①せん断補強鉄筋が配置されている場合に、圧縮フランジはせん断耐力に貢献する。②せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力は、矩形断面のRCはりと同程度である。③斜めひび割れは、二羽らのせん断強度式による荷重に達した際に発生する。④圧縮フランジ幅や厚さが大きくなるほどせん断耐力は大きくなる。⑤圧縮フランジの張出し部は、引張域を含む断面がせん断耐力に寄与する。⑥圧縮フランジに斜めひび割れが発生するまでは、圧縮フランジはせん断耐力を分担する。これらの条件より、T形RCはりのせん断耐力は、従来の矩形断面のRCはりの設計せん断耐力の算定方法に、圧縮フランジが分担するせん断耐力を付加することで表現することとした。

曲げひび割れ発生後のコンクリートの引張抵抗を無視した矩形はりおよびT形はりのせん断応力分布モデルを図-7に示す。RCはりに作用するせん断力の増加とともにせん断応力は増加し、ウェブのせん断応力がせん断強度に達した際にウェブに斜めひび割れが発生する。その後、せん断補強鉄筋の存在によって荷重は低下せず、せん断力の増加にともなってせん断応力は増加する。圧縮フランジ下端のせん断応力がせん断強度に達した後に、圧縮フランジにせん断ひび割れが進展あるいは発生すると仮定すると、この時の圧縮フランジの張出し部が受け持つせん断耐力が得られる。

以上の提案式による計算値と従来式による計算値と実験値の関係を図-8に示す。圧縮フランジの張出し部を無視する従来式では、実験値と計算値の比の平均値は約1.6となり、一方、提案式を用いた際の実験値と計算値の比の平均値は約1.2となっている。本提案式は、圧縮フランジとウェブとの接合部を通過するようにせん断補強鉄筋が配置され、ウェブ圧壊や引張鉄筋周辺の割裂引張破壊が生じない限りは、T形RCはりのせん断耐力を安全側に評価できると考える。

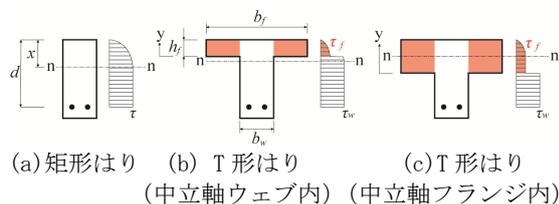


図-7 せん断応力分布モデル

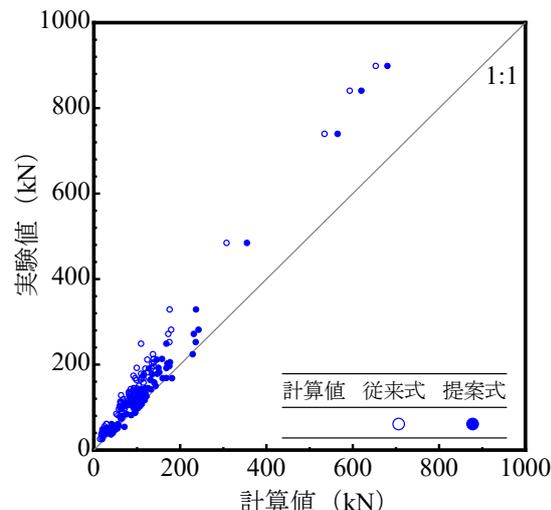


図-8 従来式と提案式の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① 中村 麻美、中村 拓郎、二羽 淳一郎：T形断面 RC はりのせん断破壊性状とせん断応力分布に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 38、No. 2、pp. 709-714、2016.
- ② 中村 拓郎、中村 麻実、二羽 淳一郎：せん断補強鉄筋を有する T 形 RC はりのせん断破壊挙動、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 39、No. 2、pp. 529-534、2017.
- ③ 中村 麻美、中村 拓郎、二羽 淳一郎：せん断スパン比とせん断補強鉄筋比の異なる T 形 RC はりのせん断耐荷機構、土木学会論文集 E2、査読有、73 巻、3 号、pp. 337-347、2017.
- ④ 中村 拓郎、二羽 淳一郎：圧縮フランジを有する T 形はりのせん断耐力に関する解析的検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 40、No. 2、pp. 649-654、2018.
- ⑤ Devin GUNAWAN, Takuro NAKAMURA, and Junichiro NIWA: Reinforcing Effects of Stirrups on Concrete Contribution in Shear, コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 40, No. 2, pp. 655-660, 2018.

〔学会発表〕(計2件)

- ① K. Kobayashi, T. Nakamura, and J. Niwa: The Influence of Flange Width and Thickness on Shear Failure of RC T-Beams, The 8th International Conference of Asian Concrete Federation, 973-981, November 4-7, 2018.
- ② 小林 研太、中村 拓郎、二羽 淳一郎：T形断面を有する RC はりのせん断破壊におけるフランジ幅と厚さの影響、土木学会第 73 回年次学術講演会、pp. 991-992, 2018.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)