

Shear Capacity of RC and Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Flanged Beams

(フランジを有する鉄筋コンクリート及び
超高強度繊維補強コンクリートはりのせん断耐力)

学位論文内容の要旨

Shear resisting and failure mechanism of reinforced concrete is a long-standing key problem, which is not fully clarified and argued from various angles. The better understanding in shear resisting and failure mechanism can lead to the improvement of the shear design method. In this study, the shear resisting mechanism and capacity of reinforced concrete (RC) and ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) beams are focused. This dissertation is divided into five chapters as follows:

Chapter 1 defines the background, aim of the study, research strategy and outline of the dissertation. Chapter 2 presents the outline of the three-dimensional finite element analysis using in this study. The detail of the finite element code are shown following with the constitutive models developed for the simulation of conventional reinforced concrete structure.

In Chapter 3, the study on the shear capacity of RC beams is described. The attention is paid to the beams that built monolithically with the concrete slab on the top part (T-beam). As well known, in the current design codes and previous researches, shear strength of beam can be calculated based on the two-dimensional modified truss theory, in which effects of top flange of T-beam cannot be considered. However, because of the geometry of the top flange, the failure mechanism of T-beam becomes more complicated as a three-dimensional problem. To predict the shear capacity of T-beam more precisely, the effect of top flange on shear resisting mechanism must be clarified. To understand the difference between RC rectangular beam and RC T-beam, experiment and three-dimensional finite element analysis of rectangular and T-beam were conducted. It can be said from the experimental and analytical results that the presence of a top flange truly has significant effects on shear capacity of RC T-beams by changing the governing shear resisting mechanism from truss to arch mechanism due to the formation of the horizontal crack along the boundary between flange and web. Finally, the simplified method to determine the three-dimensional failure criteria of the compression zone that can lead to the modification of shear design equation of RC T-beams is proposed.

In Chapter 4, the study of shear capacity of beams made with UFC is focused on. The properties of UFC is strongly depend on the actual fiber orientation and crack formation in members so the experimental data on structural behaviors become necessary for the evaluation of the shear capacity both experimentally and analytically. The main parameters are assigned as the fiber content and the pres-

ence of shear reinforcement because many previous researches have indicated the positive effect of these factors on shear capacity of beams but there is no previous report on the combination effect of both factors. To study the effect of these main parameters on the shear capacity, the testing of six I-beams and other control specimens were performed. It can be observed from the experimental study that the presence of fiber and shear reinforcement significantly improves the ultimate capacity and structural behaviors of UFC members. However, the combination of both factors may have a negative effect due to the fiber blocking if the enough filling space in concrete mold cannot be provided. For the analytical work, important structural behaviors from the author's and previous experimental data were simulated by 3D finite element code with the aim of applicability verification and modification of the analysis. As a result, the constitutive models for finite element analysis such as tension softening model, tension stiffening model, compression model, shear transfer model and model for steel bar, and analytical technique of UFC element are successfully modified throughout the sensibility analysis. And, in the view of the good correlation between the modified finite element analysis and the experimental results, it can be said that the modified finite element code can truly be used as the analytical tool for the shear failure simulation of UFC beams. Finally, from the finding information throughout the experimental and analytical work, the idea to improve the current empirical design equation for UFC beams is proposed.

Chapter 5 shows the conclusions of this study with the recommendation for the future studies.

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 佐 藤 靖 彦
副 査 教 授 上 田 多 門
副 査 教 授 林 川 俊 郎
副 査 教 授 後 藤 康 明

学 位 論 文 題 名

Shear Capacity of RC and Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Flanged Beams

(フランジを有する鉄筋コンクリート及び
超高強度繊維補強コンクリートはりのせん断耐力)

鉄筋や短繊維などにより補強されたコンクリートはりのせん断抵抗機構及びせん断破壊機構を、明快に説明できる理論は未だ存在しない。それら機構の解明は、コンクリート構造学における世界共通の課題である。すなわち、せん断抵抗機構及びせん断破壊機構の合理的な解釈が可能となれば、コンクリート構造のせん断設計法を飛躍的に高度化させることができる。その成果は、建設コストの削減や独創的構造部材の開発といった形で社会に現れる。

本論文は、フランジを有する鉄筋コンクリート (以下「RC」と言う) はりと超高強度繊維補強コンクリート (以下「UFC」と言う) はりのせん断抵抗機構及びせん断耐力を、実験及び解析の両面から解き明かした。以下に章ごとに審査の要旨を述べる。

1 章では、研究の必要性が述べられるとともに、何を目指したのかの目的と論文構成がわかりやすく示されている。

2 章では、本研究で使用した 3 次元材料非線形有限要素法 (以下「3D-FEM」と言う) の概要がわかりやすく示されている。

3 章では、RC はりのせん断耐力に関する検討がなされている。せん断補強筋を有する RC はりのせん断耐力は、上フランジの有無及び大きさの影響を受けることが広く知られている。本論文では、RC はりの曲げせん断試験に基づく実験的検討と 3D-FEM を駆使した解析的検討の両面から、T 型 RC はりのせん断抵抗機構を明らかにするとともに、せん断圧縮破壊に対する破壊基準を提案している。すなわち、3D-FEM 解析が T 型 RC はりのせん断挙動を精度良く再現できることを検証した上で、上フランジとウェブとの境界位置に水平ひび割れが発生することにより、それまでトラス機構が支配的であった抵抗機構からアーチ機構が支配的な抵抗機構へと移行し、その結果、圧縮域での応力分布性状が大きく変化し、水平ひび割れが発生しない場合に比べせん断耐力が低下すること、さらには、せん断耐力時の圧縮域断面での平均せん断応力と破壊を引き起こす位置での最大せん断応力との関係にフランジの大きさの影響が現れるものの、その最大せん断応力は、フランジの有無や大き

さによらずほぼ一定値となることを見出した。最終的に、圧縮域の破壊基準を考慮できる簡易なせん断耐力評価モデルを提案した。

4 章では、UFC はりのせん断耐力に関する検討がなされている。鋼繊維の混入量とせん断補強筋の有無に着目した I 型断面を有する UFC はりの曲げせん断試験を行うとともに、UFC はりの挙動解析に必要な材料構成モデルの開発を行った。具体的には、曲げせん断試験においては、繊維量及びせん断補強筋がはりのせん断耐力を大きく向上させるものの、かぶりやせん断補強筋の間隔が小さければ、せん断補強筋の存在が打設時の繊維の移動（コンクリートの充填性）を阻害する可能性があることを指摘した。また、構成モデルに関しては、繊維量と繊維の配向性の影響を考慮に入れた引張軟化モデルとテンションスティフニングモデルを、さらには、せん断ひび割れ面でのせん断伝達応力が、繊維量が増えるほど大きくなることを表現できる簡易なせん断伝達モデルを提案した。加えて、本論文では、開発した構成モデルを用いた 3D-FEM 解析を実施し、繊維量、せん断補強筋の有無、上フランジの有無がせん断抵抗機構に及ぼす影響を明らかにした上で、既往のせん断耐力式の改善点を指摘した。すなわち、土木学会により提案されている UFC はりに対するせん断耐力式におけるコンクリートが受け持つ分担せん断耐力は、矩形断面を有する UFC はりの耐力を危険側に評価する可能性があり、上フランジの有無及び大きさを考慮できる形に修正されなければならないこと、また、繊維が受け持つ分担せん断耐力は、UFC の引張強度（引張軟化曲線の最大応力）ではなく、繊維量と上フランジの大きさの影響を考慮した斜めひび割れ内の UFC の平均引張応力を用いることにより、より正確に評価可能であることを示した。

5 章は、本論文の成果のまとめであり、上述の成果が適切に示されている。

これを要するに、著者は、フランジを有する鉄筋コンクリートはりとは超強度繊維補強コンクリートはりのせん断抵抗機構とせん断耐力についての新しい知見を得たものであり、コンクリート構造学ならびに構造設計工学に貢献するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。