

学 位 論 文 題 名

SHEAR CRACKING BEHAVIOR IN CONCRETE BEAMS WITH SHEAR REINFORCEMENT

(せん断補強筋を有するコンクリートはりのせん断ひび割れ挙動)

学位論文内容の要旨

ABSTRACT

Significant efforts have been put all over the world to investigate the problem of cracking and crack control in reinforced concrete and prestressed concrete members, which adversely affects structural performances in various ways. In order to utilize the performance-based concept in design more efficiently, the clarification of cracking is quite important. Under the performance-based design, crack width is related to various required performances such as appearance, water-tightness and maintainability (reparability) of concrete structures. Crack width also affects durability which is required to keep the performance requirement by preventing degradation of various structural performances, related to mechanical properties, including structural safety.

Although the existing guidelines which are related to crack control in concrete structures provide some design formulae for crack width prediction, most of them were originally developed for tensile and flexural crack width. They were experimentally obtained and cannot be applied directly to shear crack width prediction, because shear cracking is caused by a different mechanism.

The purposes of this study are to clarify the shear cracking behavior in reinforced concrete and prestressed concrete beams based on results of experimental investigations and also to develop a rational prediction method for shear crack spacing and opening displacement which is needed to ensure adequate structural performances.

To achieve the above purposes, detailed information on shear cracking behavior in reinforced concrete beams with shear reinforcement is obtained by conducting the experiment of 10 simply supported beam specimens. The effects of the various influential parameters, such as beam size, shear span to depth ratio, side concrete cover to stirrup, stirrup spacing, stirrup configuration, longitudinal reinforcement ratio, and loading paths (loading, unloading and reloading paths) on the spacings between shear cracks and the relationship between shear crack width and stirrup strain at the intersection with shear cracks were carefully investigated. It was found that shear crack width proportionally increases with both the strain of shear reinforcement and with the spacing between shear cracks. Greater shear crack spacings were found in larger beams and hence resulted in wider shear crack width. The test results also revealed that shear reinforcement characteristics (side concrete cover to stirrup, stirrup spacing and/or stirrup configuration) and longitudinal reinforcement ratio play a critical role in controlling the shear crack

spacings and openings. It was illustrated that the distance of shear crack from the crack tip and the intersection with the nearest reinforcement can significantly affect the variation of shear crack width along the same shear crack. Conversely, the loading paths (loading, unloading and reloading paths) show an insignificant effect on shear crack width-stirrup strain relationship.

Moreover, this study presents a comprehensive review on the prediction models available in the literature to estimate spacing and width of shear cracks in reinforced and prestressed concrete members. Next, shear cracks spacings and openings calculated from each design formula are extensively compared with those obtained from seven experimental investigations on shear cracking behavior including the author's experimental investigation to evaluate the effectiveness and accuracy of the existing prediction models. As a result of this study, a simplified formula for the calculation of shear crack spacing as well as more accurate model for the prediction of shear crack width in reinforced and prestressed concrete beams with shear reinforcement are proposed. The simplified formula to calculate shear crack spacing represents the crack control characteristics of both the longitudinal and transverse reinforcement. The proposed model to predict shear crack width is based on the relationship between shear crack width and stirrup strain at the intersection of stirrup with shear crack taking into consideration the spacing between shear cracks and the additional influential parameters on shear crack width. Finally, spacings and widths of shear cracks estimated by the proposed models show a better correlation (average and coefficient of variation) with the test results compared to the other existing prediction formulae. The effects of prestressing tendon can be considered in the ratio of longitudinal reinforcement and the effective concrete area surrounding longitudinal reinforcement. The models can predict both average and maximum shear crack width and are applicable to fatigue loading.

Keywords: Reinforced concrete beam, prestressed concrete beam, shear crack angle, shear crack spacing, shear crack width, stirrup strain, stirrup configuration, side concrete cover to stirrup, shear reinforcement ratio, longitudinal reinforcement ratio.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 上 田 多 門

副 査 教 授 後 藤 康 明

副 査 准教授 佐 藤 靖 彦

学 位 論 文 題 名

SHEAR CRACKING BEHAVIOR IN CONCRETE BEAMS WITH SHEAR REINFORCEMENT

(せん断補強筋を有するコンクリートはりのせん断ひび割れ挙動)

コンクリートのひび割れは、構造物の美観、水密・気密性、耐久性等、多くの性能に影響を与えるため、その幅や数を定量化することが不可欠である。これまで、多くの研究が行われ、部材断面に作用する軸引張力、曲げにより発生する引張及び曲げひび割れに対しては、その発生機構が明らかにされ、幅や数の定量化が可能となっており、ひび割れ幅の設計式が確立している。一方、発生機構が異なるせん断ひび割れに対しては、これまでの研究も少なく、その幅の定量化が十分にはなされておらず、せん断ひび割れ幅の設計式が確立されている状況ではない。本論文は、このような背景のもと行われた研究の成果をまとめたものであり、その概要を章ごとに示すと以下のようになる。

1 章は、研究の背景、目的と対象を説明するとともに、本論文の全体の構成を述べている。2 章では、既往のせん断ひび割れに関する研究成果をまとめ、併せて、引張及び曲げひび割れ挙動との比較を行い、せん断ひび割れ挙動に関する研究の必要性を明らかにしている。

3 章では、せん断ひび割れ挙動を明らかにするために実施した 10 体の鉄筋コンクリートはり供試体による実験概要を説明し、その結果を述べている。すなわち、せん断ひび割れ幅は、せん断補強筋のひずみとせん断ひび割れの間隔に概ね比例すること、はりの高さが高いほど、せん断スパン比が大きいほど、せん断補強筋のかぶりが大きいほど、せん断補強筋の間隔が大きいほど (あるいは、補強筋比が小さいほど)、引張補強筋比が小さいほど、せん断ひび割れ間隔が大きくなり、その結果としてせん断ひび割れ幅が大きくなること、せん断補強筋のかぶりが大きいとコンクリート表面でのせん断ひび割れ幅が大きくなることから、せん断ひび割れの間隔との比例定数が大きくなること、せん断補強筋の定着が不十分であるとせん断ひび割れの間隔には影響を与えないものの、せん断ひび割れ幅が大きくなること、せん断補強筋あるいは引張補強筋とせん断ひび割れとの交差部から離れるほど、せん断ひび割れ幅が大きくなること、せん断ひび割れ幅とせん断補強筋のひずみとの関係は、載荷時、除荷時、再載荷時とも同等であることを、明らかにしている。

4 章では、既往の鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリートはりのせん断ひび割れ間隔の 8 つの算定モデルを比較して示すとともに、本研究での実験結果を含む 7 つのせん断ひび割れ挙動に関する実験結果とそれらの算定結果とを比較し、推定精度の高い算定モデルの必要性を示し、3 章で得られた知見に基づき、新たな算定モデルを提案している。すなわち、せん断ひび割れの間隔の

推定に必要なせん断ひび割れの角度の推定モデルとして、既往の研究で提示されているコンクリートの斜め圧縮力角度の推定モデルにプレストレスの影響を考慮することにより適用できること、せん断ひび割れ間隔の推定モデルに必要な変数として、断面高さの中央点と最も近い引張補強筋までの距離、せん断補強筋のかぶり、引張補強筋とせん断補強筋の間隔、直径、量(補強筋比)と有効コンクリート面積、そして、せん断補強筋の付着性状があること、PC鋼材は引張補強筋と同様に考慮できること、前述の変数を全て考慮した新たに提案する推定モデルが、既往の8つの推定モデルよりも高い精度(平均値と変動係数)で推定結果を示すこと、せん断ひび割れの間隔の平均値がせん断力の増加とともに減少すること、等を明らかにしている。

5章においては、既往の鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリートはりのせん断ひび割れ幅の8つの算定モデルを比較して示すとともに、本研究での実験結果を含む7つのせん断ひび割れ挙動に関する1300点にも及ぶ実験結果とそれらの算定結果とを比較し、推定精度の高い算定モデルの必要性を示し、3章で得られた知見に基づき、新たな算定モデルを提案している。すなわち、せん断ひび割れ幅の推定に必要な変数は、主要なものとしてせん断ひび割れ間隔とせん断補強筋のひずみとがあり、それに加え、せん断補強筋のかぶり、せん断補強筋と引張補強筋比、せん断補強筋の定着タイプ、せん断補強筋の付着のタイプ(異型鉄筋、丸鋼)があること、これらの変数全てを考慮した新たに提案する推定モデルが、既往の8つの推定モデルよりも、鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリートはりの両方の場合において高い精度(平均値と変動係数)で推定結果を示すこと、せん断力の大きさが大きくなるに従いせん断ひび割れ間隔が小さくなっていく事実とせん断ひび割れと補強筋との交差部から遠いほどせん断ひび割れ幅が大きくなる事実とが、せん断ひび割れ幅の推定に対するばらつきを大きくしていること、せん断ひび割れ幅の最大値は平均値の1.4倍程度であること、提案した推定モデルは疲労作用下の鉄筋コンクリートはりの場合にも適用可能なこと、を示している。

6章は、上記の研究成果のまとめと、今後の課題を示している。

以上のように、著者は、鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリートはりのせん断ひび割れ挙動を詳細に観察し、せん断ひび割れ間隔と幅の精度の高い推定式を提示しており、コンクリート構造の設計法の合理化に大変有益な知見を得た上、コンクリート工学の発展に対して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があるものと認められる。