

博士（工 学） アハミド サブリ アブデル ハミド ファルガリー

学 位 論 文 題 名

Prediction of Punching Shear Strength and Failure Mechanism Based on 3D FEM Analysis for Steel-Concrete Open Sandwich Slabs

（3次元有限要素解析による鋼コンクリートオープンサンドイッチ床版の
押抜きせん断耐力と破壊機構の予測）

学位論文内容の要旨

Constant need for cost-effective structural forms has led to the increasing use of composite construction. Significant economy has been observed in this form of construction. Composite steel-concrete structures are used widely in modern bridge and building construction. A composite member is formed when a steel component, such as an I-section beam, is attached to a concrete component, such as a floor slab or bridge deck. In such a composite T-beam the comparatively high strength of the concrete in compression complements the high strength of the steel in tension. In the composite T-beam the steel top flange, which the studs have been attached to, has no deformation (local bending) because the web prevents the deformation from taking place in the flanges. Meanwhile, in the case of open sandwich slab the steel plate may be affected by the local bending at the position of the studs because there is no web underneath.

Besides, the strength and behavior of open sandwich slabs are governed by the shear interaction between the concrete block and the steel plate. The interaction property depends on several factors and it is not possible to express the relationship from a purely analytical basis. As such, analysis and design methods available today use the interaction property derived from full-scale performance tests. In numerical modeling, the interaction property is obtained from a variety of elemental push-out tests that, for the most part, do not represent actual slab bending. Therefore, a series of open sandwich beam specimens was conducted to propose a numerical model, which simulates the relationship between the transferred shear force and relative displacement of the stud shear connector.

This research comprises experimental, analytical and numerical investigations of open sandwich slabs. The central objective of the experimental work is to develop a test method for evaluating the performance and behavior of open sandwich slabs and also for determining the shear interaction property of shear stud for use in numerical analysis. The parameters of the slab experimental patch are;

concrete compressive strength, shear span-depth ratio, thickness of steel plate, height of stud, and stud spacing.

The analytical study is conducted, using 3D FEM program as a simulation tool, to simulate the punching shear failure of open sandwich slabs. The stud is modeled by two types of element, bond link element represents the shear transfer action between concrete and steel plate, and truss element represents the axial force carried by the stud. The mode of failure (characterized by a localized inclined crack) and the sequence of cracking are reproduced. Non-linear finite element analysis can predict the ultimate shear capacity and the deformation behavior with reasonable accuracy and it is shown to be efficient in simulating punching shear failure for which sensitivity analysis is performed.

The numerical investigation is conducted to demonstrate the punching shear failure mechanism, which is carefully examined in the analysis results observing predicted concrete cracking pattern and concrete crushing. Punching shear failure occurs in the compression zone due to crushing of the concrete near the top surface. Moreover, it was observed that, the concrete layers near the top surface of the slab crushed earlier than the concrete layer far from the top surface. The failure surface could be identified based on the numerical investigation and the experimental results. The failure surface is assumed to be a bi-linear truncated cone. The slope of the part above the neutral axis is 45° , and for the part under neutral axis is 30° , for simplicity. The neutral axis depth is measured from the analytical results. An equation to calculate the neutral axis depth is proposed. The proposed equation is based on the bending theory equation with a certain modification by adding the effect of height of stud and stud spacing. The applicability of the proposed equation is verified by comparing to the 3D FEM analysis results.

The contribution of the concrete was calculated by integrating the stresses along the failure surface. Moreover, the stud and steel plate contribution has been investigated. The integrated concrete stresses under the neutral axis has a slight contribution to the punching shear strength while the vertical component of the compression zone above the neutral axis and the contribution of the stud as shear reinforcement have a pronounced effect. The former is characterized by increase of its value with increase of the concrete compressive strength. The dowel force has a very small contribution, as its value does not exceed 2% of the resisting forces. The contribution of the aggregate interlocking is proved to be very small. Parametric study is conducted to determine the effect of each parameter on the punching shear strength of open sandwich slabs.

Finally, a quantitative study is conducted to develop a simple analytical expression that is suitable for predicting the punching shear strength of open sandwich slabs. Consequently and opposed to most of the existing analytical models, the proposed expression is not based on empirical coefficient because the parameters are derived from numerical simulations of different slabs.

The punching load computed with the developed analytical expression is compared to the one obtained

with numerical simulation illustrating a good agreement. In addition, a comparison with experimental results is investigated and it is shown that the analytical expression enables prediction of the punching shear strength of various slabs. This analytical method can be adopted for design purposes. Safety factors can be included to reduce the values of the compressive and tensile strength of concrete.

学位論文審査の要旨

主査	教授	上田	多門
副査	教授	佐伯	昇
副査	教授	大沼	博志
副査	教授	城	攻

学位論文題名

Prediction of Punching Shear Strength and Failure Mechanism Based on 3D FEM Analysis for Steel-Concrete Open Sandwich Slabs

(3次元有限要素解析による鋼コンクリートオープンサンドイッチ床版の
押抜きせん断耐力と破壊機構の予測)

鋼コンクリート合成床版は、施工上の理由などで多用されているが、その構造が多様で、3次元解析が必要なことから、合成床版の押抜きせん断耐力を、精度よく推定できるとはいえないのが現状である。本論文は、合成床版のうち、最も一般的な形式のひとつである曲げ引張側のみに鋼板を有し、シアコネクタとしてスタッドを用いたオープンサンドイッチ床版（いわゆるロビンソン型床版）を、3次元非線形有限要素法により解析し、押抜きせん断破壊機構を解明するとともに、押抜きせん断耐力を算定するマクロモデルを提示したものである。

2章と3章において、3次元非線形有限要素解析における構成モデル、解析結果の妥当性を示している。有限要素解析において必要な、スタッドの伝達せん断力とせん断すべり関係をスタッドの要素実験の結果に基づき、ボンドリンク要素の構成則モデルとして新たに提案している。鋼コンクリートオープンサンドイッチ床版の場合、スタッドの構成モデルは、従来から行われている押抜き型のシアコネクタのせん断試験では、シアコネクタが取り付けられているベースプレートの拘束条件が異なることから求められない。提示したモデルは従来のそれらのモデルと比較するとせん断剛性ははるかに小さく、この差は床版の解析結果にも大きな差として現れることを示している。

スタッドは、シアコネクタとしてのせん断伝達特性はボンドリンク要素として表現するが、せん断補強材としての引張力伝達特性は、トラサ要素として表現している。せん断剛性は、スタッド位置に集中させる離散モデルと、均等に分散させるモデルとを比較し、床版としての挙動には大きな影響を与えないことを示している。したがって、工学的には簡便な分散モデルでよいこととなり、以降の解析も基本的には分散モデルを用いている。

スタッドの高さ、間隔、鋼板厚さ、コンクリート強度などを変数としたオープンサンドイッチはりとは床版の実験結果である、破壊性状、ひび割れ形状、荷重-変形関係、鋼板やスタッドのひずみが、解析結果とよく一致していることから、新たに導入したスタッドのモデルも含めて3

次元非線形有限要素解析の妥当性を示している。

4章では、妥当性の確認された有限要素解析結果を詳細に分析し、押抜きせん断破壊機構を提案し、各種要因がなぜ押抜きせん断耐力に影響を与えるのかを示している。押抜きせん断破壊は、曲げ圧縮部のコンクリートが圧縮強度に達した後に軟化することにより生じることを示している。曲げ圧縮域内に斜めに広がる軟化領域と、それに続く、斜めひび割れ領域とで、押抜きせん断破壊を起こす破壊面と考え、その位置を推定するモデルを提示している。その中には、中立軸位置を推定するためのモデルも含まれている。中立軸は一般的には、曲げ理論で予測されるものよりも高い位置にある。実験で観察されたスタッドの頭を水平に走るひび割れが解析でも生じることを示しているが、押抜きせん断耐力はあくまでもコンクリートの圧縮破壊が主要因であることを明らかにしている。

想定した破壊面に沿って、押抜きせん断力に抵抗する曲げ圧縮領域内のコンクリートの負担分、斜めひび割れ領域内のコンクリートの負担分、スタッドの負担分を計算し、各抵抗分担力が、コンクリートの圧縮強度、鋼板の厚さ、スタッドの高さや間隔といった因子でどのように変わるかを明らかにしている。なお、主要な押抜きせん断抵抗分担力は、曲げ圧縮領域内のコンクリートのせん断抵抗分であり、鋼板のダウエル力による抵抗分は耐力の数%以下であることを示している。

5章において、4章で提示した想定破壊面での曲げ圧縮領域内と斜めひび割れ領域内のコンクリートの負担分、スタッドの負担分を数値実験により定式化したマクロモデルを提示している。このモデルによれば、曲げ領域内のコンクリートの負担分は、コンクリートの強度とスタッド間隔が増加すると増加し、鋼板の厚さとスタッドの高さが増加すると減少することを示している。また、スタッドの抵抗負担分は、破壊面を横切るスタッドの数に比例するが、各スタッドの負担分は、コンクリートの強度とスタッドの高さとともに増加し、スタッドの間隔とともに減少することが示されている。

これを要するに、著者は、従来未解明であった鋼コンクリートサンドイッチ床版の押抜きせん断破壊機構および耐力を推定する手法を新たに示したもので、合成構造の設計に大変有益な知見を得るとともに、その手法は合成構造一般に対する汎用性が高く将来の発展性も大きく、構造工学およびコンクリート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。