

学 位 論 文 題 名

Interfacial Models for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Sheets Externally Bonded to Concrete

(コンクリート表面に接着された FRP シートの界面モデルに関する研究)

学位論文内容の要旨

With the development of the technology of strengthening existing concrete structures with externally bonded FRP sheets, a number of issues related to the conventional structural behaviors of FRP strengthened RC structures should be studied. Among them, the most important one may be to clarify the mechanisms of the bond between the FRP sheets and concrete. The significance of the bond is due to its critical role on transferring the stress from the existing concrete structures to externally bonded FRP sheets. A good understanding on the interfacial bond is a prerequisite of achieving a safe and appropriate design of FRP sheet strengthened RC structures.

As the most fundamental and important laws to characterize the bond interaction, the constitutive models for FRP sheet-concrete interfaces under different loading conditions have not yet been well studied up to now. Moreover, plenty of previous studies have shown that the FRP sheet-concrete interface always fails bitterly due to the premature peeling of FRP sheets from the concrete at a stress much lower than the real tensile strength of FRP materials. Therefore, the issues on how to improve the interfacial load transferring performances and ductility, moreover, how to improve the strength efficiency of FRP materials should raise more concerning.

Experimental and analytical studies in the present study show that adjusting the shear stiffness of adhesives layers based on suitable bonding method is a selectable way to strengthen the interfacial load transfer performances and improve the utilizing efficiency of FRP materials. Both using lower shear stiffness adhesives and increasing the amount of FRP sheets can improve the load carrying capacity of FRP sheet-concrete interfaces. However, their corresponding bonding mechanisms are different. Based on conventional pullout bond tests, a new analytical method has been proposed for defining accurate interfacial nonlinear bond stress-slip (τ - s) curves, which are most fundamental laws being able to quantify those different bonding mechanisms and describe the bonding characteristics of FRP sheet-concrete interfaces under shear failure (Mode II fracture). By this method, it is not necessary to attach strain gages on the surfaces of FRP sheets to get the local strain and stress information. Instead, the nonlinear interfacial bond stress-slip relationships can be simply derived from the relationships between

the external pullout forces and loaded end slips. Only two parameters, the interfacial fracture energy and a ductility factor, which can consider the effects of all interfacial components, are necessary in the proposed bond stress-slip relationships. In addition, with above two parameters this study proposes a definition for the effective bond length, according to which unified models for predicting the anchorage length and bond strength of FRP sheet-concrete interfaces were built up.

Tension softening behaviors of FRP sheet-concrete interfaces under Mode I fracture were studied as well through a series of three-point bending test of notched composite beams. The interfacial Mode I fracture energy was evaluated parametrically. The relationship between interfacial cohesive stress and the interfacial displacement normal to crack surface ($\sigma \sim w$ relationship) was proposed using the improved J integral methods and then verified through FEM simulation based on Hilliberg's fictitious crack method.

Besides the Mode I and Mode II fractures, Mix-Mode fracture of FRP sheet-concrete interfaces was studied experimentally based on a proposed novel test method, in which the Mode I and Mode II loading conditions can be imposed into the interfaces through adding dowel and bending force to FRP sheet strengthened concrete beams simultaneously. The method for evaluating the interfacial fracture energy components under mix-mode loading condition was developed through beams on the elastic foundation theory and fracture mechanics. A unified energy envelope criteria, which governs the fracture of FRP sheet-concrete interfaces under mix-mode loading condition was obtained through the analysis on the experimental results.

In summary, the Mode I and Mode II constitutive models developed in this study can be used for accurate simulation of the strength and stiffness behaviors of FRP strengthened RC structures and optimizing the interfacial design. The proposed interfacial bond strength and anchorage length models can be used in engineering design. Besides that, the developed analytical methodology can simplify the present shear bond test methods and evaluate the local bond behaviors of FRP sheet-concrete interfaces in a more reasonable way. In addition, the developed test methods in this study can be used to evaluate the fracture toughness of FRP sheet-concrete interfaces under different failure modes. And finally, the results in the present study can help to develop optimum performance-based bonding materials.

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	上 田 多 門
副 査	教 授	三 上 隆
副 査	教 授	城 攻
副 査	教 授	大 沼 博 志
副 査	教 授	角 田 與史雄

学 位 論 文 題 名

Interfacial Models for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Sheets Externally Bonded to Concrete

(コンクリート表面に接着された FRP シートの界面モデルに関する研究)

コンクリート構造物の補強工法として最近多くの適用例がある連続繊維補強材を既設部の表面に接着する方法は、その付着界面での力学特性の解明が合理的な設計法の開発に不可欠である。本論文は、従来研究者によって様々のモデルが提案されていた付着界面の力学モデルに関し、従来から考慮されていた補強材の剛性と既設部のコンクリートの強度に加え、接着剤の剛性の影響をも考慮することにより、汎用性の高いモデルを提案したものである。全体として 6 章から構成されており、以下に各章の内容と審査の概要を示す。

1 章は、序で本論文の目的と全体の構成を示している。2 章は、既往の研究成果のまとめで、本論文の必要性もあわせて指摘している。

3 章では、まず、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維シートを用いた引抜き型の付着試験結果に基づき、付着界面のせん断付着特性 (Mode I) に関し明らかになったことを示している。すなわち、連続繊維シートの種類によらずその軸剛性を大きくすることもしくは接着剤のせん断剛性を小さくすることにより、平均付着強度は増加すること、付着強度時のすべり量は、連続繊維シートの軸剛性が大きいほど、接着剤のせん断剛性が大きいほど小さくなること、有効付着長は、連続繊維シートの軸剛性が大きいほど、接着剤のせん断剛性が小さいほど長くなること、局部付着応力度の最大値は、接着剤のせん断剛性が大きいほど小さくなるが、連続繊維シートの軸剛性が大きくなるほどわずかではあるが大きくなることである。

3 章の後半では、これらの実験結果を推定することが可能な以下のような局部付着応力-すべり関係の数値モデルを提案している。この数値モデルは、従来の多くのモデルとは異なり、実験で観察される連続繊維シートの引張端でのひずみとすべりとの関係から求められている。この方法の特徴は、局部付着応力-すべり関係を実験から直接求める場合と比較するとばらつきの影響が小さくなることにある。この数値モデルにおいては、材料定数として与える必要があるものが、付着界面の剥離破壊エネルギー G_f と局部付着応力-すべり関係の形状 (もしくはそのじん性) を

示す係数 B であるが、どちらに対しても多くの実験結果に基づいた算定式を示している。破壊エネルギーは、接着剤のせん断剛性が小さくなるほど、コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど大きくなる。また、接着剤のせん断剛性が小さくなるほど付着応力-すべり関係はよりじん性のあるものとなる。提案した数値モデルにより、定着強度（平均付着強度）だけでなく、有効定着長も算定が可能であり、どちらも実験結果を精度良く推定可能なことが示されている。

4 章では、炭素繊維シートと既設コンクリートとの付着界面のはく離付着特性（Mode II）を、ノッチのあるひび割れ面を付着界面とした無筋コンクリートはりの曲げ試験を用いて求めている。その結果、剥離破壊エネルギーは、せん断付着特性と異なり接着剤の剛性の影響をあまり受けないこと、既設部コンクリートの特性に大きく依存すること、コンクリートとモルタルとで異なることなどを明らかにしている。また、数値モデルとして、コンクリートとモルタルとの差異や接着剤の剛性の影響を考慮したものを提示している。この数値モデルの妥当性を、はりの曲げ試験結果を数値モデルを適用した有限要素解析結果により精度良く評価できることにより示している。

5 章では、炭素繊維シートと既設部コンクリートとの付着界面のせん断付着とはく離付着の混合モードの付着特性（Mix Mode）を、せん断力とはく離力とを独立に制御が可能な載荷システムを新たに開発することによって、実験的に明らかにしている。せん断力とはく離力との比が異なる 6 つの場合において、せん断付着に対する剥離破壊エネルギーを 3 章で示した数値モデルに基づき、連続繊維シートの最大引張りずみより求め、はく離付着に対する剥離破壊エネルギーをコンプライアンス法に基づく数値的手法で実験結果より求め、両者がお互いに 2 次の相関関係により表現できることを示している。従って、はく離力が純はく離付着強度の半分程度以下の場合、せん断付着強度に与える影響は比較的小さいが、せん断付着-すべり関係の剛性に対しては大きな影響を与える。

6 章では、本論文の成果のまとめを示すとともに、今後の研究の課題として、混合モードでの付着応力-すべり関係、付着界面での力学特性に与える環境作用の影響、補強部材の特性上最適な付着界面での力学特性などの解明を挙げている。

以上をまとめると、本論文は、必要定着長の算定や、補強後の部材の力学挙動の推定に必要な連続繊維補強材と既設部コンクリートとの付着界面特性をせん断付着、はく離付着、および、それらの混合モードにおいて明らかにするとともに、せん断付着モデルの簡易な構築法、混合モード用の新たな試験法なども提示したものである。これらの成果は、より合理的な連続繊維補強材の接着工法の確立に大いに資するものであり、ひいてはコンクリート工学および複合構造工学の発展に寄与するものである。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。