

学 位 論 文 題 名

Interface and Beam Behavior of
PCM-Strengthened Concrete

(PCM 増厚補強されたコンクリートの界面と梁挙動)

学位論文内容の要旨

Polymer Cement Mortar (PCM) possess higher flexural and ductility, impermeability and higher adhesion with substrate concrete compared with normal cement mortars. Therefore PCM has been used widely in all kinds of anticorrosive projects and as repairing materials for concrete structures and pavement. In the PCM applications, the bond between the PCM and concrete usually presents a weak link in the repaired structure. Debonding can start from any discontinuity (boundary, joints or crack cutting the overlay), often with a lifting of the edges of the debonded area. This induces new cracks which accelerate the damage process, and new repair work is needed. On the other hand, no reliable design method is currently available for the practitioner. There are only recommendations relying on experience and very crude design proposals. There is therefore a demand for further study on bond failure behavior.

The research comprises experimental, analytical and numerical investigations of PCM-concrete bond properties subjected to static loading and fatigue loading. Various types of concrete substrates with different compressive strength were prepared to simulate the actual bonding situation in real retrofitting fields. The concrete substrates surfaces were treated by water jet (WJ) method and the roughness was quantified with arithmetic mean value of roughness (Ra). Meanwhile, PCM overlay strengthened beams with different cross-section area of the strengthening bar were tested under monotonic flexure loading. The nonlinear FE analysis was carried out to simulate the debonding failure of PCM-strengthened beam and the debonding failure mechanism was further investigated. The background and objectives of this research are presented in Chapter 1. The major achievements through this research are summarized as follows:

1) In Chapter 2, the origin of the influence of interface roughness and substrate concrete strength on the bond strength was deeply investigated. The condition of fracture surface has important effect on the interface bond strength. For a given kind of PCM, the interface bond strength decreases with an increase in the difference between the compressive strength of PCM and substrate concrete. The interface roughness has a more profound effect on the aggregate interlock and friction than on the joint adhesion. An optimized value of roughness and surface treatment depth for practical application regarding the bond strength and repair cost were proposed.

2) In Chapter 3, the energy based failure mechanism was confirmed to be able to well explain the

interface failure observations. Three point bending test method on composite beam was applied to evaluate the interfacial Mode I fracture behavior of PCM-concrete interface. The interface tension stress- crack opening relation taking into account effects of substrate concrete and interface roughness was presented based on the experimental results with modified J-integral method.

3)The interface fatigue properties are discussed in Chapter 4. A simple and easy handling fatigue analysis method of PCM-concrete composite beam under fatigue flexure has been developed by applying the concept of bridging effect degradation and fictitious crack based on theory of energy conservation. The PCM-concrete interface tensile bridging degradation relation was derived. It can be found that the PCM-concrete interface has higher degradation rate than normal concrete so that more attention should be paid to the PCM-concrete interface during the design of PCM-retrofitted structures under fatigue loading. The S-N relationship of PCM-concrete interface for different failure modes under bending and shear fatigue are derived based on experimental results.

4)Chapter 5 presents the experimental study on strengthened RC beams made using the PCM overlay method. The stress transfer mechanism at the PCM-concrete interface and the debonding strength is investigated. The yielding of reinforcement was found near the support rather than the maximum moment region. This is due to the lower strengthening bars in PCM layer have no contribution to the cross section stiffness after debonding.

5)Chapter 6 presents the joint element representing the PCM-concrete interface which was developed and implemented into 3D FE analysis tool named as CAMUI. The constitutive law of joint element is determined based on experimental and analytical studies of PCM-concrete composite materials. The interface shear stress-slip relation was derived with back analysis based on comparison between results of FEM analytical simulation and experiments. The debonding procedure, stress and strain distribution from the FEM analytical results were compared with experimental result. In view of the good correlation between two sources of data, the FE model of joint element developed in this dissertation can satisfactorily evaluate the debonding failure characteristics of the PCM strengthened beam

Based on the above experimental, analytical and numerical investigations, several design implications are suggested in Chapter 7 as follows:

a)case the compressive strength of substrate concrete is equal or higher than that of PCM, which the failure is most likely occurring at joint adhesion layer, the interface should be roughened enough to ensure the fracture surface has enough aggregate interlock.

b)The economical and efficient option is to choose the PCM that has similar compressive strength as that of substrate concrete. The optimized value of R_a regarding the bond strength and repair cost is around 1.0 mm.

c)In order to achieve a PCM-concrete interface with better fatigue resistance, the porosity and initial drying or shrinkage cracks of adhesion layer should be controlled, or the failure mode of fracturing at concrete cohesion layer should be guaranteed. The first target could be realized by applying the appropriate curing method or adding shrinkage reducing admixtures. The latter target could be implemented by increasing the interface roughness or the adhesion of PCM.

Keywords: Polymer Cement Mortar (PCM), concrete, interface, bond strength, roughness, Mode I fracture, Mode II fracture, fracture energy, FEM, debonding

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	上 田 多 門
副 査	教 授	横 田 弘
副 査	教 授	杉 山 隆 文
副 査	准教授	佐 藤 靖 彦
副 査	准教授	松 本 高 志

学 位 論 文 題 名

Interface and Beam Behavior of PCM-Strengthened Concrete

(PCM 増厚補強されたコンクリートの界面と梁挙動)

20 世紀に大量に構築されてきた社会基盤施設が、その劣化により必要な性能を確保できず、何らかの対策が必要になっている事例が散見される。欧米の最近の劣化による事故の事例を見ると、性能低下に対する対策が、日本や他のアジア諸国でも重要であることは明らかである。このような主要な対策の一つとして補強があげられるが、既設コンクリート構造物を対象とする典型的な補強法である増厚工法に対しても、その設計法が十分に確立されていない。増厚工法は、特に橋梁床版の疲労などに対する補修工法という位置づけで、広く適用されている。しかし、疲労劣化がある程度抑制されるという定性的な効果しか期待されておらず、増厚工法が本来持っている力学的な性能の向上、すなわち、耐力や剛性の向上に対する効果が定量的に示されるには至っていない。

このような背景の下、本論文は、増厚補強設計法確立のために、増厚部と既設コンクリート部との付着界面の静的および疲労特性の解明と、増厚補強されたはり部材の挙動を接合界面の特性を考慮して検討したものである。なお、増厚材料としては、実際に広く適用されているポリマーセメントモルタル (PCM) を用いている。

第 1 章では、本論文の背景と目的を述べている。

第 2 章では、PCM と既設部コンクリートとの接合界面での静的強度を実験的に解明している。コンクリートの強度と表面粗度をパラメータとした要素試験により、引張付着強度特性とせん断付着強度特性を明らかにしている。界面の割裂引張強度とせん断強度は、表面粗度はあまり影響を与えないが、曲げ引張強度は大きく影響を受ける。これは、割裂引張強度とせん断強度が界面でのひび割れ発生前の現象に支配されているのに対し、曲げ引張強度がひび割れ発生後の、界面のかみ合わせと摩擦作用の影響を受けるためである。界面粗度が大きくなるにしたがい曲げ引張強度は増加し、その後一定値を示すようになる。したがって、曲げ引張強度が一定となるときの粗度が最適な値となる。PCM と母材コンクリート強度の大小関係により、界面破壊の位置が、コンクリート内、PCM-コンクリート界面、あるいは PCM 内のいずれかになる。つまり、界面強度 (引張付着強度、曲げ強度、せん断強度)

は、コンクリートあるいは PCM の小さい方の強度に支配される。

3 章では、PCM-コンクリート界面のモード I 破壊を支配する、界面の引張付着特性を実験的に示している。すなわち、ノッチ付きはりの 3 点曲げ試験により PCM-コンクリート界面に生じたひび割れに着目し、界面はく離エネルギーの概念を適用して、引張応力とひび割れ幅との関係を明らかにしている。これに基づいて、界面粗度と既設部コンクリート強度の影響を考慮した、引張応力-ひび割れ幅の構成則を定式化している。

4 章では、PCM とコンクリート界面の疲労付着特性を実験的に明らかにしている。PCM-コンクリート界面を模擬した要素供試体に繰返し荷重を作用させ、測定された界面でのひび割れ幅の分布から、引張応力-ひび割れ幅の関係を間接的に測定するための簡便な手法を新たに提示している。また、測定された関係から、疲労荷重下の引張応力-ひび割れ幅の構成則を定式化し提示している。本論文で提示した簡便な実験手法は、界面を構成する材料に依存しないとともに類似の補強工法である接着工法にも適用が可能である。本章では、さらに、要素供試体の疲労試験により、付着界面の曲げ強度とせん断強度の S-N 関係 (疲労強度-寿命関係) を明らかにしている。

5 章では、PCM により増厚補強したはりの挙動を実験的に明らかにしている。載荷実験により得られた耐荷力、界面はく離状況、鉄筋のひずみ分布に基づいて、界面はく離が耐荷力、破壊モード、鉄筋降伏へ与える影響について定量的に論じている。

6 章においては、2 章から 4 章で得られた付着界面特性、および 5 章で得られた増厚補強はり供試体の挙動に基づき構築したモデルを用いて、数値解析的に増厚補強部材における界面はく離の性状とそれが部材の全体的な力学挙動に与える影響を明らかにしている。付着界面の構成則は、直応力とせん断応力との相互作用を考慮に入れたものである。はりの耐荷力、破壊モード、付着界面でのはく離現象、鉄筋のひずみ分布などについての解析結果が実験結果とよく一致しており、本数値解析手法の妥当性は明らかである。

7 章は、上記の 2 章から 6 章で得られた成果のまとめを示すとともに、それに基づいて、増厚補強設計に関する提言を示している。

以上のように、著者は、増厚補強設計法の確立に必要な接合界面特性と増厚補強後の部材挙動推測のための解析法を提示しており、コンクリート工学および維持管理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。