

学 位 論 文 題 名

# Spalling properties of hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures

(高温環境におけるハイブリッド繊維補強高強度コンクリートのスポーリング特性)

## 学位論文内容の要旨

Fire accidents associated with infrastructures such as tunnels and high-rise structures have shown that high strength concrete performance is highly susceptible to high temperature condition. Thermal instability in form of spalling has been observed which leads to breaking-off of layers or pieces of concrete from the thermally exposed surfaces and this significantly compromises the structural integrity of the concrete structures. Thus the material behavior of high strength concrete under fire exposition needs to be clearly understood since it greatly impacts on structural integrity and load-bearing capacity of structural elements.

This dissertation deals with spalling properties of hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. Firstly, Chapter one and two cover the introduction and literature review respectively. In Chapter three, the effect of a pressure measurement system on maximum pore pressures measured in heated concrete was evaluated. Experimental works were conducted utilizing different pressure measurement techniques, which have previously been used by other researchers to measure pore pressure in heated concrete. The main aim was to contribute to the development of a standard pore pressure measurement system in heated concrete, which can be adapted and utilized by engineers worldwide. Results showed that a pressure measurement system utilized to measure pore pressure has a significant effect on the amount of maximum pore pressures measured. Addition of silicon oil and a sintered metal to the measurement system was observed to significantly influence the amount of maximum pore pressures measured. Therefore, a pressure measurement system which comprised of both a sintered metal and silicon oil was found to be the most effective system for pore pressure measurements in heated concrete.

In Chapter four, the effect of the heating rate on maximum pore pressures measured as well as the effect of the test condition on deterioration of high strength concrete under elevated temperatures was carried out. It was observed that fast heating lead to higher pore pressures in the deeper regions compared to slow heating and therefore an increase in the heating rate leads to an increase in pore pressures. Addition of steel fibres played some role in pore pressure reduction in deeper regions of concrete during fast heating.

In Chapter five, an investigation of the role played by fibre type and geometry in mitigating

pressure rise in fibre-reinforced high strength concrete exposed to elevated temperatures was done. Experimental results showed that addition of organic fibres, regardless of fibre type and geometry, significantly contributed towards pore pressure reduction in heated concrete. Also, regardless of the type of organic fibres used, longer fibres made of smaller diameters generally performed better than shorter ones made of larger diameters. It was further observed that regardless of fibre type and geometry used, at least 0.1

In Chapter six, spalling of high strength concrete exposed to severe heating patterns was investigated using a blowtorch test and a furnace test. Results showed that the blowtorch test is a more effective method for carrying out spalling tests and evaluating the effect of fibre type and geometry on spalling in small specimens compared to the furnace test. Therefore, the blowtorch test provides a promising, effective and economical test method for spalling at a small scale level in small unloaded and unrestrained specimens which can help to provide relevant and useful data for mitigation of spalling in realistic size elements. Also, a clear and direct relationship between maximum pore pressures and spalling in heated concrete was observed since there was a similar effect of permeability, fibre type and geometry, and addition steel fibres on maximum pore pressures and spalling. Therefore pore pressure spalling was observed to be one of the important mechanisms for understanding the explosive spalling phenomenon. Consequently, a relationship between relative maximum pore pressures and spalling was developed and used to determine a threshold relative maximum pressure above which spalling will be expected to occur hence predicting the likelihood of spalling in heated concrete. Finally, Chapter seven presented the conclusions from this experimental study.

Therefore, this dissertation proposes useful information for safeguarding against spalling in concrete structures during fires by means of addition of fibres of different types and geometries for different concrete mixes.

# 学位論文審査の要旨

主 査	准教授	堀 口	敬
副 査	教 授	千 歩	修
副 査	教 授	横 田	弘

## 学 位 論 文 題 名

### Spalling properties of hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures

(高温環境におけるハイブリッド繊維補強高強度コンクリートのスポーリング特性)

近年のユーロトンネルの火災事故や Great Belt トンネルの火災事故では、これまで火に強いと考えられていたコンクリート構造物に大きな被害を与えた。これらのコンクリート構造物には高強度コンクリートが使用されており、コンクリートの高強度化に伴う爆裂現象の頻発が大きな問題となっている。またシールドトンネルでは、構造体である一次覆工の耐火被覆も兼ねる二次覆工を省略する事例が増加しており、構造本体の耐火性の維持はきわめて重要な課題となっている。

コンクリートの高強度化に伴うこうした耐火性に関する問題点を解消するため、短繊維による補強が注目されている。短繊維の補強により高強度コンクリートの爆裂現象を緩和し、高温下での力学的挙動を向上させるものである。しかしながら、高温環境下における繊維補強高強度コンクリートの耐火性の研究は始まったばかりであり、詳細な特性は明らかにされていない。

本論文は、高温環境下に曝された繊維補強高強度コンクリートの爆裂 (explosive spalling) およびスポーリング (spalling) に関する挙動を詳しく検討したものであり、その詳細を以下にまとめる。

第 1 章は序論であり、第 2 章は既往の研究についてまとめている。第 3 章においては、コンクリート内部の蒸気圧測定方法が測定値である最大蒸気圧に及ぼす影響について詳しく検討している。試験結果から、蒸気圧測定方法の適切な選択が重要であり、正確な測定値を得るためには圧力ゲージにシリコンオイルと焼結金属の使用が効果的であることを明らかにした。さらに、これらの測定手法による蒸気圧測定法を国際的な標準試験方法として提案している。

第 4 章では、加熱速度がコンクリート内部の蒸気圧に及ぼす影響について検討を行っている。試験結果から、加熱速度の上昇に伴いコンクリート内部に高い蒸気圧が発生することを明らかにしている。ただし、表面近傍では逆に加熱速度の上昇とともに最大蒸気圧は低減することを示し、最大蒸気圧はより深い部分で発生することを明らかにしている。さらに、鋼繊維補強は高い蒸気圧が発生した場合のみに低減効果が認められることを指摘している。

第 5 章では、繊維の種類やその形状が蒸気圧の低減効果に及ぼす影響について詳しく検討し、有機繊維はその種類や形状に関わらずコンクリート内部の蒸気圧の低減に有効であることを明らかにしている。さらに、有機繊維の種類にかかわらず長い繊維で細い繊維径のものがより有効であることを示している。なかでも、ポリプロピレン繊維は PVA 繊維に比較して効果的であり、蒸気圧の低減効果は繊維自体の熔融温度や付着強度に依存するものと推測している。得られた成果から、加熱された高強度コンクリートに発生する最大蒸気圧をコンクリートの強度と使用する繊維の種類や

形状等のパラメータによる予測式を構築している。

第6章では、小型供試体によるスポーリング試験としてバーナー試験と加熱炉試験を実施し、高温下の高強度コンクリートのスポーリング予測の可能性を検討している。試験の結果から、バーナー試験は加熱炉試験に比べ高強度コンクリートのスポーリング予測を行う試験法として優れていることが判明し、繊維の種類やその形状がスポーリングに及ぼす影響を的確に判断することが可能であることを示している。さらに、スポーリング量とコンクリートの内部蒸気圧には明確な関係があることを明らかにし、相対最大蒸気圧とスポーリングとの関係式を構築している。得られた結果から、加熱された高強度コンクリートに発生する最大蒸気圧のスポーリング発生に関する閾値を提示している。

第7章は総括であり、本研究で得られた成果をまとめたものである。

これを要するに、著者は、コンクリート構造物の耐火性を向上するために不可欠な高温下の繊維補強高強度コンクリートの爆裂現象を明らかにする手法に関して、加熱されたコンクリート内部の蒸気圧が爆裂に大きく影響していることを指摘し、その合理的な測定法を提案し、加熱速度や有機繊維の種類、および形状が最大蒸気圧に大きく影響を及ぼすこと、さらにスポーリング予測式により加熱された高強度コンクリートの内部に発生する最大蒸気圧の閾値を提示したことなどの新知見を得たものであり、コンクリート工学および防災工学、維持補修工学の発展に寄与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。