

Diss. ETH NO. 23092

# ***ON THE PREDICTION OF CONCRETE SPALLING UNDER FIRE***

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

*FANGXIA LU*

*MEng Bridge and Tunnel Eng, Tongji University*

born on 22.06.1984

citizen of P.R. China

accepted on the recommendation of

*Prof. Dr. M. Fontana, examiner*

*Prof. Dr. V. Kodur, co-examiner*

*Dr. D. Fernando, co-examiner*

*Prof. Dr. M. Knobloch, co-examiner*

2015

## Abstract

Concrete spalling induced by fire exposure is a major concern in the engineering community, especially explosive spalling, which may result in a reduction of cross section area and loading capacity. Therefore, as an important factor for fire resistance in concrete construction, concrete spalling must be evaluated. In this thesis, a spalling criterion has been proposed to predict explosive spalling of concrete and to evaluate protective methods. The proposed criterion is based on a combined stress mechanism, which includes both pore pressure and thermal stress.

To predict the pore pressure, the hot and residual permeability of concrete has been tested. The effects from temperature and moisture content on the permeability have been investigated. A permeability model has been developed and validated based on test results. Applying the permeability model in a thermo-hydro model, the pore pressure has been simulated. The model has been validated against the measured pore pressure reported in the literature and a good agreement has been achieved.

The combined effects from pore pressure and thermal stress have been considered in the spalling criterion. Fire tests on high performance concrete slabs have been simulated and the predicted spalling time and depth were close to the test results. The validated criterion has been applied to carry out parametric studies to quantify the effect of various factors on explosive spalling. The permeability limit for explosive spalling has been proposed to be  $2 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  for exposure to the ISO standard fire. The influences from moisture content and heating rate have also been taken into account, the permeability limit changes with these factors.

To prevent explosive spalling, many protective methods have been tested. It has been shown that both insulating mortar and plates are feasible options. However, the thickness of insulating material must be determined according to the protection level, because fire tests have shown that insufficient thickness may induce deeper and more violent spalling. The proposed criterion can provide a guideline for the use of the insulating materials.

The use of polypropylene fibers (PP-fibers) has been studied by fire tests as well. The amount of  $2 \text{ kg/m}^3$ , which is recommended by Eurocode 2, has been proved effective in preventing explosive spalling, if a satisfactory geometry of the fibers is provided. With the help of the proposed permeability model, the effect from PP-fibers has been included in the spalling model and a reduced risk of spalling has been predicted. With respect to the type and amount of PP-fibers, an increasing factor has been used in the model to evaluate the added PP-fibers.

For the practical assessment of spalling, an evaluation strategy using the spalling criterion has been proposed. Tests are suggested to determine the input for evaluating the spalling risk and for protective methods. For external loads, some pilot investigations have been done and even contradictive results from various tests and literature could be explained by the spalling model. The spalling risk of loaded concrete elements can already be considered by the spalling model, however further validation tests are recommended.

## Zusammenfassung

Abplatzen von Beton infolge Brandeinwirkung ist ein wesentliches Problem im Brandschutzingenieurwesen und kann zu einer bedeutenden Reduktion des Querschnitts und der Tragfähigkeit führen, vor allem wenn es explosionsartig eintritt. Das Abplatzen ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Beurteilung des Brandwiderstandes von Stahlbetonbauteilen. In dieser Dissertation wird ein Kriterium eingeführt, das die Gefahr von explosivem Abplatzen abschätzt und auch Schutzmassnahmen berücksichtigt. Das Abplatzkriterium basiert auf einem überlagernden Spannungszustand, der sowohl den Porendruck als auch die temperaturinduzierten Spannungen berücksichtigt.

Um den Porendruck zu bestimmen, wurde die Heiss- und Residualpermeabilität von Beton gemessen. Die Permeabilität von Beton wurde experimentell untersucht, insbesondere der Einfluss der Temperatur und des Feuchtegehaltes auf die Permeabilität. Ein Permeabilitätsmodell wurde entwickelt und mit den Versuchsergebnissen validiert. Das Permeabilitätsmodell wurde in das thermo-hydro Model integriert, um den Porendruck zu simulieren. Versuchsdaten und Daten aus der Literatur wurden verwendet, um das Modell zu validieren. Es wurde eine gute Übereinstimmung erreicht.

Die gemeinsamen Einflüsse des Porendrucks und der Temperaturspannung werden im Abplatzkriterium berücksichtigt. Das Modell kann den Abplatzzeitpunkt und die Abplatztiefe von durchgeführten Brandversuchen an hochfesten Betonplatten gut voraussagen. Anhand einer Parameterstudie wurde das validierte Kriterium angewandt, um den Effekt verschiedener Faktoren auf das explosive Abplatzen zu bestimmen. Als Grenzwert für die Gefahr von explosivem Abplatzen unter der ISO Normbrandkurve wird eine Permeabilität von  $2 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  vorgeschlagen. Der Feuchtegehalt und die Aufheizgeschwindigkeit beeinflussen diesen Grenzwert.

Um explosives Abplatzen zu verhindern, wurden zahlreiche Schutzmassnahmen getestet. Isolierender Mörtel und Dämmschichtplatten sind beide machbaren Lösungen. Die Dicke der isolierenden Schicht muss anhand des Sicherheitsniveaus festgelegt werden, da ungenügende Dicken zu tieferem und aggressiverem Abplatzen führen. Das eingeführte Kriterium eignet sich grundsätzlich auch zur Beurteilung der Anwendung von isolierendem Material.

Die Verwendung von Polypropylenfasern (PP-Fasern) wurde ebenfalls anhand von Brandversuchen untersucht. Die gemäss Eurocode 2 vorgeschlagene Massendichte von  $2 \text{ kg/m}^3$  PP-Fasern eignet sich, um explosives Abplatzen unter Versuchsbedingungen zu verhindern, sofern eine geeignete Faserform gewählt wird. Das Permeabilitätsmodell kann den Einfluss der PP-Fasern berücksichtigen und das Kriterium prognostiziert ein reduziertes Abplatzrisiko.

Eine Auswertungsmethode basierend auf dem Abplatzkriterium wird eingeführt, um das Abplatzverhalten anwendungsorientiert zu bestimmen. Versuche werden empfohlen um die notwendigen Eingangsparameter genauer zu bestimmen und die Abplatzgefahr sowie Schutzmassnahmen zuverlässiger zu evaluieren. Anhand des Abplatzkriteriums konnten Vorversuche mit belasteten Proben und sogar widersprüchliche Ergebnisse aus der Literatur erklärt werden. Somit kann das Abplatzrisiko von belasteten Betonelementen mit dem Abplatzmodell bereits beurteilt werden. Weitere Validierungsversuche werden aber empfohlen.