

Résumé

Modélisation du comportement mécanique du béton par approche multi-physique (couplage chimie-mécanique) : application au diagnostic des bétons d'ouvrages atteints par la réaction alcali-silice

Raphaëlle Naar

Thèse réalisée au CEMEF (Centre de Mise en Forme des Matériaux), laboratoire de l'Ecole des Mines de Paris, en collaboration avec le DGCE (Département de Génie Civil et Environnemental) de l'Ecole des Mines de Douai et le CMGD (Centre des Matériaux de Grande Diffusion) de l'Ecole des Mines d'Alès et soutenue par l'ATILH (Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques).

La réaction alcali-silice (RAS) est une pathologie des bétons engendrant des désordres et dégradations irréversibles au niveau d'ouvrages de divers types (ponts, barrages, trottoirs, etc.). C'est une réaction chimique entre les alcalins contenus dans la pâte de ciment et la silice contenue dans certains granulats utilisés lors de la confection du béton. Bien que des recommandations existent afin d'éviter le développement de cette pathologie, la modélisation numérique des effets de la réaction alcali-silice sur la tenue mécanique du béton reste un enjeu de première importance pour le génie civil.

L'objectif de cette thèse est de progresser dans la compréhension et la modélisation des phénomènes chimiques, mécaniques et de leurs interactions lors de la RAS.

Une modélisation a d'abord été élaborée afin de rendre compte de la chimie de la réaction alcali-silice. Ce modèle analytique est un modèle couplé à deux variables qui sont les champs de concentration en alcalins et en silice. Il permet de connaître à chaque instant de la réaction et en tout point d'une éprouvette la concentration des différentes espèces. La cinétique de la réaction est aussi prise en compte via un paramètre, la constante cinétique, qui pourra être identifiée numériquement.

Afin de coupler chimie et mécanique, ce modèle a été implémenté dans l'outil numérique FEMCAM (Finite Element Model for Concrete Analysis Method) qui simule le comportement mécanique tridimensionnel des matériaux quasi-fragiles tels que les bétons. C'est une approche mésoscopique qui a été adoptée où le béton est considéré comme un matériau biphasé composé de granulats agglomérés dans une pâte de mortier. Le modèle non local de Mazars avec formulation implicite est implémenté dans cet outil pour rendre compte du comportement élastique endommageable de la pâte de mortier tandis que les granulats sont considérés comme ayant un comportement purement élastique.

Le modèle chimique a ensuite été couplé au modèle mécanique afin de rendre compte des effets de la RAS sur le comportement du béton. Il a été considéré une approche dite de gonflement granulaire dans laquelle ce sont les granulats eux-mêmes qui gonflent dans la pâte de mortier et non le gel formé par la réaction. Le couplage inverse, c'est-à-dire l'influence de la dégradation mécanique du béton sur l'avancement de la réaction, a aussi été modélisé par une loi simple mais facilement évolutive. Le modèle complet a pu être validé grâce à différentes campagnes expérimentales et de nombreuses études de sensibilité ont donc été réalisées afin de mieux comprendre l'influence des différents paramètres mis en jeu dans la réaction.

Mots-clefs : Modélisation numérique, béton, réaction alcali-silice, diffusion chimique, couplages multi-physiques, mécanique de l'endommagement.

Abstract

Modeling of the mechanical behavior of concrete by multi-physical approach (chemical-mechanical coupling): Application to diagnosis of concrete structure affected by alkali-silica reaction

Raphaëlle Naar

CEMEF (Centre de Mise en Forme des Matériaux), laboratory of Ecole des Mines de Paris

DGCE (Département de Génie Civil et Environnemental) of Ecole des Mines de Douai

CMGD (Centre des Matériaux de Grande Diffusion) of Ecole des Mines d'Alès

ATILH (Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques)

Alkali-silica reaction is pathology of concrete causing irreversible damage of various types of structures (bridges, dams, pavements, etc.). It is a chemical reaction between alkalis in cement paste and silica present in some aggregates using during concrete's manufacture. Although recommendations exist to prevent the development of this pathology, numerical modeling of the effects of alkali-silica reaction on mechanical properties of concrete remains an important issue to civil engineering.

This thesis aim to advance in the understanding and modeling of chemical and mechanical processes, and their interactions during the ASR.

A model was first developed to account for the chemistry of the alkali-silica reaction. This analytical model is a coupled model with two variables that are fields of concentration in alkali and silica. It helps to know at each time of the reaction and at every point of a sample the concentrations of different species. The kinetics of the reaction is also taken into account through a parameter, the kinetics constant, which could be numerically identified.

In order to couple chemistry and mechanics, this model was implemented in the numerical tool FEMCAM (Finite Element Model for Concrete Analysis Method) which simulates the 3D mechanical behavior of quasi-brittle materials such as concrete. A mesoscopic approach was adopted and concrete is considered as a two-phase material composed of aggregates embedded in a mortar paste. A non local Mazars model with implicit formulation was implemented in this tool to describe the elastic damage behavior of mortar paste and aggregates are considered as having a purely elastic behavior.

The chemical model was then coupled to the mechanical model in order to reflect the effects of the ASR on the concrete's behavior. A granular swelling was considered in which the aggregates themselves swell in the mortar paste and not the gel formed by the reaction. The inverse coupling, that is to say, the influence of concrete's mechanical degradation on the reaction's progress, was also modeled by a simple but easily scalable law.

The complete model has been validated thanks to different experimental campaigns and numerous sensitivity studies have been done to better understand the influence of the various parameters involves in the reaction.

Keywords: Numerical modeling, concrete, alkali-silica reaction, chemical diffusion, multi-physics coupling, damage.