

THESE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

Spécialité : Matériaux et Structures

par

Manh Dat NGUYEN

Sujet de thèse :

**Modélisation des couplages entre hydratation et dessiccation
des matériaux cimentaires à l'issue du décoffrage
Etude de la dégradation des propriétés de transfert**

Soutenance prévue le 18 décembre 2009 devant le jury composé de :

Rapporteurs	M. Alain SELIER M. Nicolas BURLION	(LMDC Toulouse) (Laboratoire de Mécanique de Lille)
Examineurs	M. Abdelhafid KHELIDJ M. Mickaël THIERY Mme. Laetitia D'ALOIA	(GeM Saint Nazaire) (LCPC Paris) (CETU Bron)
Directeur de thèse	M. Pierre ROSSI	(LCPC Paris)
Invité	M. Fabien BARBERON	(P.I.M Bouygues TP)

Résumé

La durabilité des structures en béton armé est souvent conditionnée par la diffusion d'espèces chimiques au travers de la couche d'enrobage dont la qualité peut être remise en cause en raison d'une dessiccation trop précoce à l'issue du décoffrage. Cette recherche a pour objectif d'étudier les phénomènes en jeu et de proposer une modélisation des couplages entre l'hydratation et les transferts hydriques au sein des matériaux cimentaires.

En premier lieu est développé un modèle semi-analytique décrivant l'hydratation de matériaux à base de CEM I (avec ou sans incorporation de cendres volantes). Le modèle est juste suffisant pour être couplé avec les transferts d'humidité. Il permet de décrire l'évolution au cours du temps de la teneur en eau, de la porosité, de la température et de la quantité d'hydrates produits (C-S-H, CH, etc.) qui sont des données d'entrée primordiales de la plupart des modèles de durabilité. Une campagne d'analyses thermogravimétriques, ainsi que de porosimétrie accessible à l'eau et par intrusion de mercure, est réalisée sur 3 pâtes de ciment de différents rapports E/C et sur plusieurs mortiers incorporant des cendres volantes. Les changements microstructuraux sont suivis au cours de l'hydratation et l'effet de l'activité pouzzolanique sur la structuration est mis en évidence. Les résultats de cette campagne, ainsi que certains tirés de la littérature scientifique, servent à la validation du modèle d'hydratation développé.

En deuxième lieu, une modélisation simplifiée des transferts hydriques est mise en œuvre. Ce modèle est utilisé pour identifier la perméabilité à l'eau liquide par analyse inverse des cinétiques expérimentales de séchage obtenues sur une large gamme de pâtes de ciment. L'évolution de cette perméabilité au cours de l'hydratation est estimée en utilisant différents modèles de la littérature afin de proposer une loi qui relie la perméabilité du matériau à son degré d'hydratation.

En dernier lieu, une modélisation des couplages entre hydratation et dessiccation est présentée. Le modèle a pour originalité de faire appel à une description détaillée de l'évolution, au cours de la maturation du matériau, de la porosité, des paramètres de transfert (perméabilité) et de la courbe de pression capillaire en désorption. La compétition entre le transport d'eau vers l'extérieur et la consommation d'eau interne par les réactions chimiques est modélisée. Le ralentissement de la cinétique d'hydratation par l'abaissement de l'humidité relative régnant dans les pores est pris en compte. Une campagne expérimentale de dessiccation précoce fournit des suivis de masse, ainsi que des profils hydriques, de porosité et de degré d'hydratation, qui sont analysés afin de mettre en évidence la dégradation des propriétés de durabilité au niveau de l'enrobage et de valider la modélisation proposée.

MOTS CLÉS : matériaux cimentaires, cendres volantes, durabilité, microstructure, modélisation, hydratation, séchage, gammadensimétrie, porosimétrie par intrusion de mercure, analyse thermogravimétrique, perméabilité.

Abstract

The durability of reinforced concrete structures is controlled by the diffusion of aggressive species through the concrete cover whose quality may be jeopardized due to a premature drying after the formwork removal. The purpose of this research is to study the phenomena which are at stake and to propose a modeling of the couplings between hydration and moisture transfers within the cementitious materials.

Firstly, a semi-analytical model describing the hydration of materials made of CEM I (with or without fly ash) is developed. The model is just sufficient to be coupled with moisture transfers. It makes it possible to describe the time evolution of the liquid water content, the porosity, the temperature and the amount of hydration products (C-S-H, CH, etc.) which are the main input data of most durability models. An experimental campaign, including thermogravimetric analysis, mercury intrusion porosimetry, and measurement of accessible-to-water porosity) is performed on 3 cement pastes with various W/C ratios and on several mortars where fly ashes are incorporated. The changes of microstructure during hydration are followed, as well as the effect of the pozzolanic activity on the porosity and on the pore size distribution. The obtained results, as well as data taken from the scientific literature, are used to validate the developed model of hydration.

Secondly, a simplified modeling of moisture transfers is presented. The model is used to identify the water permeability by inverse analysis of the experimental drying kinetics which are obtained for a large range of cement pastes. The evolution of this permeability *vs.* hydration is also assessed by using models of the literature in order to propose a relation linking the permeability of the material to its hydration degree.

Lastly, a modeling coupling hydration and drying is presented. The model takes into account a comprehensive description of the evolution during hydration of the porosity, the transfer properties (permeability), and the capillary pressure curve for desorption. The coupling between moisture transfers to the environment and the internal consumption of water by the chemical reactions is modeled. The slowing down of the hydration kinetics due to the decrease in relative humidity prevailing in the pores is described. An experimental testing, which is performed on materials submitted to premature drying, provides drying kinetics, and profiles of water content, porosity and hydration degree. These data are analyzed to highlight the degradation of the durability properties of the material in the concrete cover layer, and to validate the proposed modeling.

KEY WORDS : cementitious materials, fly ashes, durability, microstructure, modeling, hydration, drying, gammadensimetry, mercury intrusion porosimetry, thermogravimetric analysis, permeability.