

Titre : Modélisation multi-échelles des propriétés de transport pour l'évaluation de la durabilité du béton armé en milieu marin

Mots clés : Béton; laitiers; Modélisation multi-échelles; Hydratation; Porosité; Diffusion des chlorures

Résumé : La pénétration des chlorures constitue l'une des agressions affectant la durabilité des structures en béton armé, notamment en milieu marin où l'exposition cyclique à l'eau de mer intensifie la pénétration des ions chlorure. Lorsque ces ions atteignent les armatures du béton, ils en provoquent l'oxydation, entraînant une augmentation de leur volume, causant la fissuration du béton d'enrobage.

La résistance à la pénétration des chlorures est déterminée par le coefficient de diffusion du béton, fortement influencé par sa composition. L'incorporation de laitier de haut fourneau amplifie notablement cette résistance. Cette amélioration est due aux modifications de la chimie d'hydratation et aux changements microstructuraux induits, renforçant ainsi la durabilité globale de la matrice cimentaire. Pour modéliser précisément ce processus, un modèle d'hydratation exhaustif a été développé. Ce modèle analytique intègre la description des réactions chimiques d'hydratation du clinker et du laitier, avec plus particulièrement un nouveau modèle cinétique d'hydratation du laitier. Ce modèle a été validé sur une grande base de données et prédit fidèlement l'évolution des phases d'hydratation au cours du temps.

Dans une seconde partie, une modélisation multi-échelles analytique rapide du coefficient de diffusion, spécifique aux ciments avec laitier est mise en œuvre. Elle comprend une représentation de la morphologie des constituants des matériaux cimentaires à différentes échelles de manière physiquement fiable, s'appuyant sur des hypothèses basées sur des paramètres expérimentaux fonder sur des observations morphologiques expérimentales. Les proportions de ces phases sont alimentées par le modèle d'hydratation qui intègre la substitution du laitier. Le coefficient de diffusion des matériaux cimentaires avec laitiers est déterminé alors en fonction de leur composition initiale et de l'évolution de l'hydratation par des techniques d'homogénéisation en champ moyen. Les hypothèses validées par ce modèle reflètent fidèlement les données physiques observées.

En conclusion, ce modèle analytique décrit fidèlement les changements microstructuraux observés expérimentalement, en tenant compte des véritables variations de nature, de quantité et de morphologie des phases hydratées. Il offre ainsi une prédiction fiable du coefficient de diffusion en s'appuyant sur des hypothèses vérifiées, renforçant la durabilité des structures en béton armé.

Title : Multiscale modelling of transport properties for durability assessment of reinforced concrete in marine environment

Keywords : Concrete; Chloride penetration; Multiscale modelling; Hydration; Slag blended cement

Abstract : Chloride ingress represents one of the most severe threats to the durability of cementitious structures, particularly in marine environments where cyclic exposure to water exacerbates the diffusion of chloride ions. When these ions penetrate the concrete cover and reach the steel reinforcement, they initiate oxidation, leading to an increase in rebar volume that causes cracking and structural deterioration. The resistance of concrete to chloride penetration is quantified by the diffusion coefficient, which is heavily influenced by the composition and supplementary materials used in the cement mix. Notably, the incorporation of blast furnace slag has been shown to significantly enhance the resistance to chloride ingress. This improvement is attributed to the alterations in the hydration chemistry and the resultant microstructural changes induced by the slag, thereby enhancing the overall durability of the cementitious matrix. To accurately model these processes, a comprehensive hydration model was developed.

This model integrates an analytical chemical hydration framework that accounts for slag substitution coupled with a literature-based kinetic model of cement hydration and a database-driven model for slag hydration kinetics. The combined model has been validated and effectively predicts the evolution of hydration products through time.

In addition, a microstructural model was formulated based on experimental morphological observations from literature. These observations facilitated the characterization of the geometrical organization and distribution of phases across various length scales. Analytical homogenization techniques, such as the Mori-Tanaka scheme and the self-consistent scheme, were employed to upscale the macroscopic transfer properties from those of each phase at the microscopic scales in order to determine the diffusion coefficient of the cementitious matrix.