

Titre : Modélisation de l'amortissement dans les analyses dynamiques non-linéaires de structures en béton armé : modèles matériaux et identification expérimentale

Mots clés : Amortissement, Béton armé, Dynamique, Modèle non-linéaire, Bilan énergétique, Identification et actualisation de l'amortissement

Résumé : En plus de la nouvelle réglementation sismique mise en place en 2011 sur le territoire français, l'accident nucléaire de Fukushima la même année a poussé le gouvernement français à investir pour la sécurité des bâtiments nucléaires. Pour assurer la viabilité de telles structures, des modèles performants sont nécessaires et doivent intégrer une description fine des phénomènes physiques. Dans le cas de structures en béton armé, la plus grande difficulté vient du manque de connaissances sur l'évolution de l'endommagement et la capacité du béton à dissiper de l'énergie.

Depuis les années 1970, l'amortissement est considéré comme un élément prédominant pour l'analyse de structures sous chargements dynamiques. Dans le cas des structures en béton armé, de nombreuses sources d'amortissement agissent en parallèle. Lorsqu'une structure est soumise à un séisme, elle dissipe de l'énergie par hystérésis à l'échelle du matériau et par d'autres phénomènes modélisés par un amortissement visqueux (échelle globale). La revue bibliographique en début de thèse vise à traiter la notion d'amortissement dans la littérature avec des modèles proposés plus ou moins complexes, et l'identification de cette grandeur dans le but d'améliorer les modèles.

Différentes questions relatives à la notion d'amortissement se sont posées dans le cadre de ces travaux : Dans le cadre d'analyses dynamiques non-linéaires, quelles sont les formulations d'amortissement visqueux les plus représentatives des réponses structurales ? Comment évolue l'amortissement au cours d'analyses non-linéaires ? Comment peut-on améliorer les modèles d'amortissement à l'échelle locale pour réduire l'amortissement visqueux nécessaire à l'échelle globale ?

Pour répondre à ces questions, un modèle multi-fibre est développé, sous le logiciel Cast3M, à partir de données expérimentales sur des poutres

en béton armé. Des modèles de comportement non-linéaires pour le béton sont utilisés. Expérimentalement, les armatures en acier n'ont pas plastifié donc les travaux se concentrent sur la fissuration du béton lorsque les aciers d'armature restent dans le domaine linéaire. Le modèle numérique est calibré sur des essais quasi-statiques. Seize formulations de matrices d'amortissement classiques sont ensuite étudiées, sur des essais dynamiques, avec des taux d'amortissement variant de 0.5% à 5%. Les réponses des différents modèles sont comparées grâce aux réponses expérimentales et à des analyses énergétiques. Il apparaît donc nécessaire de modéliser suffisamment de phénomènes physiques à l'échelle locale (fissuration, friction, effet unilatéral) afin d'obtenir des résultats cohérents avec les réponses expérimentales.

Dans le dernier chapitre, une méthode d'identification de l'amortissement est développée sur un modèle à un degré-de-liberté équivalent au modèle multi-fibre de la poutre en béton armé. L'objectif est d'identifier l'évolution temporelle du taux d'amortissement visqueux en parallèle de l'endommagement de la poutre. La principale conclusion est que le taux d'amortissement visqueux évolue exponentiellement par rapport à un indice d'endommagement, défini à partir de la dégradation de la rigidité de la poutre. Cependant, si la valeur d'endommagement est inférieure à 0.6, considérer un taux d'amortissement constant égal à 4% semble adéquat. Finalement, un modèle d'amortissement actualisé à l'échelle locale est proposé en se basant sur le développement des non-linéarités dans le béton. L'avantage de ces modèles, en plus d'être représentatifs des résultats expérimentaux, est alors leur base physique à l'échelle locale du matériau. Les phénomènes principalement influents sont le développement des fissures (endommagement) et le frottement dans les fissures.

Title : Modelling of damping in nonlinear dynamic analyses of reinforced concrete structures : constitutive formulations and experimental identification

Keywords : Damping, Reinforced Concrete, Dynamic, Nonlinear Model, Energy Balances, Damping Identification and updating

Abstract : In addition to the new seismic zoning of the French territory in 2011, the Fukushima nuclear accident the same year prompted the French government to focus on the safety of nuclear buildings. To ensure the viability of such structures, performative models are required, so they must integrate fine physical phenomena descriptions. In the case of reinforced concrete structures, the significant difficulty comes from the lack of knowledge about the damage evolution and the ability of concrete to dissipate energy.

Since the 1970s, damping has been considered a predominant element in analysing structures under dynamic loading. For reinforced concrete structures, many sources of damping act in parallel. When a structure is subjected to an earthquake, it dissipates energy by hysteresis at the material scale and other phenomena modelled by viscous damping (global scale). The bibliographical review at the beginning of the thesis aims to treat the notion of damping in the literature with more or less complex proposed models and the identification of this quantity to improve the models.

Various problematic relating to the concept of damping are of interest in this PhD work : In the framework of nonlinear dynamic computations, which local and global viscous damping formulations best represent the experimental structural response? How are local and global damping energy dissipation mechanisms evolving during nonlinear dynamic computations? How could we improve the damping modelling at the local scale, on a physical basis, to reduce the requirement of arbitrary equivalent viscous damping at the global scale?

A multi-fibre model is developed in Cast3M

software from experimental data on reinforced concrete beams to answer these research questions. Nonlinear behaviour models for concrete are used. Experimentally, the steel reinforcement is not plasticised, so the work focuses on concrete cracking when the steel reinforcement remains in the linear domain. The numerical model is calibrated on quasi-static tests. Sixteen formulations of classical damping matrices are then studied, on dynamic tests, with damping rates varying from 0.5% to 5%. The responses of the different models are compared with the experimental responses and energy analyses. Therefore, it appears necessary to model sufficient physical phenomena at the local scale (cracking, friction, unilateral effect) to obtain results consistent with the experimental responses.

In the last chapter, a damping identification method is developed on a one degree-of-freedom model equivalent to the multi-fibre model of the reinforced concrete beam. The objective is to identify the transient evolution of the viscous damping rate in parallel with the beam's damage. The main conclusion is that the viscous damping rate evolves exponentially with respect to a damage index defined from the degradation of the beam stiffness. However, if the damage value is less than 0.6, considering a constant damping rate equal to 4% seems adequate. Finally, a locally updated damping model is proposed based on the development of nonlinearities in concrete. The advantage of these models is their physical basis at the local scale of the material, in addition to their representation of the experimental results. The main influencing phenomena are crack development (damage) and friction in cracks.