

THÈSE

Pour l'obtention du titre de :

DOCTEUR de L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Spécialité : Sciences des Matériaux

Présentée par :

Wassim JRAD

Dynamic behavior of thin-walled beams: Analytical, numerical and experimental approaches

Composition du jury :

M. Eric JACQUELIN, Professeur, Université Claude Bernard, Lyon1, France
M. Mustapha TAAZOUNT, Professeur, Université de Blaise Pascal, France
Mme Laetitia DUIGOU, MCF, Université de Bretagne Sud, France
M. Salim BELOUETTAR, Professeur, LIST, Luxembourg
M. Erasmo CARRERA, Professeur, Université de Politecnico di Torino, Italie
M. Guillaume ROBIN, IGR., Université de Lorraine, France
M. Foudil MOHRI, MCF-HDR, Université de Lorraine, France
M. El Mostafa DAYA, Professeur, Université de Lorraine, France
M. Jihad AL-HAJJAR, Professeur, Université Libanaise, Liban

Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Directeur
Co-Directeur
Co-Directeur

Abstract

Thin-walled beams with open section constitute main elements in engineering applications fields as civil engineering, automotive and aerospace construction. They are widely adopted for their lightness and realization simplicity. Due to their particular shapes, these sections are very sensitive to torsion and instabilities, present in both statics and dynamics. In statics, overall stability as buckling, and flexural-torsional buckling are common and often important in design criteria. In dynamics, the torsional and flexural-torsional modes of vibration are often lower frequencies compared to the classical plane pure bending modes. Thus, planar failures of such structures are known to be an exception rather than a rule. In torsion, warping is important (non-uniform torsion, Vlasov's model). The static behavior of thin-walled beams in non-uniform torsion is well known, but the dynamic behavior remains open for investigations and especially in the presence of arbitrary open-section beams.

In this thesis work, we are interested with the dynamic behavior of thin-walled beams with arbitrary open cross sections. Based on the Vlasov's model, the 3D motion equations are derived from the Hamilton's principle. Original analytical solutions for different boundary conditions are derived for higher free vibration modes in 3D context. In these solutions, the effects of the inertial rotation terms in bending and torsion are taken into account. These solutions are limited to simple cases. For general cases, a 3D beam finite element model is described and implemented. Compared to conventional 3D beams, warping is considered as an additional Degree Of Freedom (DOF). As a result, 3D beams with 7 DOF are adopted in the mesh process. The mass and stiffness matrices are obtained by numerical integration (Gauss method). In the model, free and forced vibration analyses are possible. In forced vibration, the response is derived in the frequency field. The Rayleigh damping model is adopted. The model is validated by comparison with benchmark solutions found in the literature and other numerical results obtained by new simulations and recent experimental tests. Additional numerical simulations are performed using some available commercial codes.

In order to validate the theoretical and numerical models, laboratory test campaign is undertaken at the LEM3 (Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux). Tests were carried out on thin-walled beams with different boundary conditions at the beam ends and intermediate supports (braces). Tests with shaker and a hammer are performed. In the analysis, the response spectra and vibration modes are searched in the range (1-400 Hz). The dynamic response curves of the beams are measured using accelerometers. In the presence of arbitrary sections, flexural torsional vibration modes are observed. The analytical, the numerical and the experimental solutions are compared and validated. Moreover, the numerical and experimental dynamic response spectra are compared. A good agreement between the various solutions is remarked.

The model is extended to 3D beams in presence of lateral supports (braces) as in bridge structures. 3D elastic and viscous springs are added in the finite element model. The beam behavior in presence of elastic and rigid springs becomes possible in statics and dynamic. The effect of the springs is studied in order to improve the behavior of thin-walled beams against undesirable lateral bending and torsion modes.

Keywords: Thin-walled beam, Arbitrary cross-section, Torsion, Warping, Coupled modes, Free vibration, Forced vibration, Finite element method, Bracing, Dynamic, 3D Open section beam, Experimental test, Elastic spring, Dashpot, vibration control.

Résumé

Les poutres à parois minces à sections ouvertes sont les éléments de base des ouvrages courants en génie civil, de l'automobile et de l'aéronautique. Elles sont abondamment adoptées pour leur légèreté et la simplicité de mise en service. En raison de leurs formes particulières, ces sections sont très sensibles à la torsion et aux instabilités, qui peuvent être présentes en statique et dynamique. En statique, le flambage, le déversement et le voilement sont courants et souvent déterminant dans le dimensionnement. En dynamique, les modes de vibration en torsion et flexion-torsion sont plus dominants par rapport aux modes de flexion couramment utilisés dans l'hypothèse d'un comportement plan. Ainsi, les défaillances planaires de telles structures sont connues pour être une exception plutôt qu'une règle. En torsion, le gauchissement est important (torsion non uniforme, modèle de Vlasov). Le comportement statique des poutres à parois minces en torsion non uniforme est maîtrisé, mais le comportement dynamique et vibratoire reste ouvert et surtout en présence des poutres à sections ouvertes arbitraires.

Dans ce travail de thèse, on s'intéresse au comportement dynamique de poutres à parois minces et à section ouvertes arbitraires. En se basant sur le modèle de Vlasov, les équations de mouvement 3D sont dérivées à partir du principe d'Hamilton. Des solutions analytiques originales pour différentes conditions aux limites sont dérivées pour des modes supérieurs en vibration libre dans le contexte 3D. Dans ces solutions, les effets des termes de rotation inertiels en flexion et torsion sont pris en compte. Ces solutions sont limitées à des cas simples. Pour des cas généraux, un modèle élément fini de poutre 3D est décrit et implémenté. Par rapport aux poutres 3D classiques, le gauchissement est considéré comme degré de liberté (ddl) supplémentaire. De ce fait des poutres 3D à 7 ddl sont adoptées dans le processus de maillage. Toutes les matrices de rigidité masse de base sont calculées par intégration numérique (intégration de Gauss). Dans le modèle, les calculs en vibrations libres et forcées sont possibles. En vibration forcée, la réponse est donnée dans le domaine fréquentiel. L'amortissement type de Rayleigh est adopté. Le modèle est validé par comparaison aux solutions de référence trouvées dans la littérature et à d'autres résultats numériques obtenus par des nouvelles simulations et des tests expérimentaux récents. Des simulations supplémentaires par éléments finis sont effectuées à l'aide de codes commerciaux.

Afin de valider le modèle théorique et numérique utilisé, une campagne d'essais a été suivie au LEM3. Des essais ont été réalisés sur des poutres à parois minces avec différentes conditions aux limites aux bords et intermédiaires (entretoises). Des essais avec pot vibrant et marteau de choc sont effectués. Dans l'analyse, les spectres de réponse et les modes de vibration sont recherchés dans le domaine 1-400 Hz. Les courbes de réponse dynamique des poutres sont mesurées à l'aide des accéléromètres. Les solutions analytiques, numériques et les mesures expérimentales sont comparées et validées. Un bon accord entre les différentes solutions est constaté.

Le modèle est étendu aux poutres 3D retenues latéralement par des entretoises comme dans les ponts. Des ressorts élastiques et visqueux 3D sont ajoutés dans le modèle numérique. Cela permet de modéliser le comportement statique et dynamique des poutres avec entretoises souples ou rigides. L'effet des entretoises est étudié dans le but d'améliorer le comportement des poutres à parois minces vis-à-vis des modes indésirables de type flexion latérale et torsion.

Mots-clés : Poutre à parois minces, Section ouverte, Torsion, Gauchissement, vibration libre, vibration forcée, éléments finis, modes couplés, entretoises, amortissement.