

Experimental and numerical analyses of a thin cylindrical shell model

Etude expérimentale et numérique d'un modèle de coque cylindrique mince

Oussama Temami^{1✉}, Djamel Hamadi¹, Abdallah Zatar², Ashraf Ayoub³

1 Laboratoire de recherche en Génie Civil, Hydraulique, Développement Durable et Environnement, LARGHYDE, Université de Biskra, B.P. 145 RP, Algeria

2 Département de Génie Civil et Hydraulique, Université de Biskra B.P 07000, Algeria

3 School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London, Northampton Square London EC1V 0HB, U.K

Received 15 June 2016

Revised 16 November 2016

Accepted 29 November 2016

Published online: 22 December 2016

Keywords

Experimental test
Cylindrical shell model
Flat shell element
Numerical analysis

Abstract: The analysis of thin shell structures is generally based on theoretical principles. The experimental tests on this type of structure are important for understanding the effect of loading and the geometrical shapes on its mechanical behavior. In this paper, an experimental test of a cylindrical shell under the effect of concentrated static loads is presented. A comparative numerical study is carried out by using two finite elements: the first element called ACM_RSBE5, recently formulated, and the second one, S4R, of ABAQUS code are used for the study of thin shells. The experimental results are compared with those obtained numerically. The results of both elements, ACM-RSBE5 and S4R, are in agreement with those obtained experimentally. The efficiency and the importance of the approach of the flat shell element for thin shell structures are confirmed.

© 2016 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

Résumé: L'analyse des structures en coques minces est généralement basée sur des principes théoriques. Les essais expérimentaux sur ce type de structures sont importants pour comprendre l'effet de chargement et de la forme géométrique sur leur comportement mécanique. Dans cet article, un essai expérimental d'une coque cylindrique soumise à des charges statiques concentrées est présenté. Une étude numérique comparative est réalisée en utilisant deux éléments finis : le premier élément récemment formulé ACM-RSBE5 et le deuxième élément S4R du code ABAQUS sont utilisés pour l'étude des coques minces. Les résultats expérimentaux obtenus sont comparés à ceux obtenus numériquement. Les résultats des deux éléments sont en accord avec ceux obtenus expérimentalement. L'efficacité et l'importance de l'approche de la coque à facette plane pour l'analyse des structures en coque minces sont également confirmées.

Mots clés : Analyse numérique; Élément coque à facette plane; Essai expérimental; Modèle coque cylindrique.

1. Introduction

L'analyse des structures par des approches numériques a connu une évolution rapide grâce à la diffusion régulière des résultats de recherche et l'utilisation d'ordinateurs et de programmes informatiques, en particulier ceux basés sur la méthode des éléments finis. Dans ce contexte, les ingénieurs traitent le problème de l'analyse des structures par le choix des éléments finis simples, tels que les éléments triangulaires à 3 nœuds, quadrilatères à 4 nœuds ou solides à 8 nœuds et avec le même nombre de degrés de liberté par nœud. Le but est d'éviter les erreurs qui peuvent être engendrées par l'utilisation des éléments de données complexes.

L'application de la méthode des éléments finis dans le processus d'analyse des coques a commencé au début des années 60, en remplaçant la surface incurvée effective de la coque par un

assemblage d'éléments de plaques plates rectangulaires ou triangulaires.

La géométrie de la coque peut être abordée par polygonisation en utilisant des éléments plats. En fait, cette approche garantit la représentation des modes rigides. Par ailleurs, l'élément coque plate est obtenu par la combinaison d'un élément à membrane plane et un élément de plaque de flexion. Cette technique est fréquemment utilisée pour analyser le comportement des structures en coque mince et elle peut facilement être formulée. En outre, elle offre la commodité dans la gestion des conditions de chargement et de limites complexes comme discuté dans le travail d'Ashwell et Sabir (1972). L'analyse des structures de coque comme un ensemble d'éléments de coques plates a été exposée en détail auparavant par Zienkiewicz (1977). Par ailleurs, Cook (1994) a développé un élément de coque à facette plane

✉ Corresponding author. E-mail address: o.temami@univ-biskra.dz

quadrilatérale ayant 24 degrés de liberté (24 DDL), ce qui lui a permis d'obtenir de bons résultats. Parallèlement à ces travaux, un autre élément de type coque avec 24 DDL a été formulé par Poulsen et Damkilde (1996). Djoudi et Bahai (2003) ont mis au point un nouvel élément de coque à base de contrainte pour l'analyse linéaire et non linéaire des coques cylindriques, où l'efficacité de cet élément a été démontrée et une bonne convergence a également été observée.

Récemment, plusieurs éléments finis ont été formulés dans la littérature. Parmi lesquels, on cite celui de Katili et al. (2015) qui est utilisé pour l'analyse numérique des problèmes de coques épaisses et minces avec la prise en compte des effets de membrane, de flexion et de cisaillement. L'élément formulé, baptisé DKMQ24, est un élément simple de type coque quadrilatérale à quatre nœuds avec 24 DDL.

Hamadi et al. (2015) ont présenté un nouvel élément finis ACM-RSBE5 pour l'analyse des structures en coques minces. L'élément formulé est obtenu par la superposition d'un nouvel élément RSBE5 membrane rectangulaire basée sur l'approche de déformation et un autre élément bien connu ACM plaque de flexion (Adini et Clough, 1961; Melosh, 1963). La matrice de rigidité de l'élément coque est obtenue en combinant les deux matrices indépendantes de rigidité en membrane et en flexion. L'élément de coque plat quadrangulaire possède quatre nœuds et 6 degrés de liberté par nœud.

Comme l'analyse des structures de coque mince a généralement été réalisée uniquement sur des bases théoriques, telle que la superposition du comportement membranaire et flexionnel. Toutefois, il est très important d'effectuer des essais expérimentaux complémentaires pour valider ces approches théoriques. Avec cette idée comme objectif, un essai expérimental a été réalisé dans cet article en considérant un modèle de type coque cylindrique mince sous l'effet d'une charge statique concentrée. Egalement, la présente étude compare les résultats numériques obtenus par les éléments finis ACM-RSBE5 et S4R du code ABAQUS avec les résultats du travail expérimental présenté dans cet article.

2. Analyse numérique

La partie numérique est concentré sur la description des deux éléments finis: l'élément ACM-RSBE5 (Hamadi et al. 2015), et l'élément S4R du code ABAQUS (2011).

2.1 Description de l'élément ACM-RSBE5

L'élément de coque quadrangulaire utilisé est obtenu par la superposition des deux éléments finis :(i) l'élément membranaire RSBE5 à champ de déformation et (ii) l'élément de plaque standard ACM de flexion (Adini et Clough, 1961; Melosh, 1963). L'élément de coque à facette plane résultant est appelé ACM-RSBE5. La Figure 1 montre les propriétés géométriques de l'élément RSBE5, ainsi que les déplacements nodaux correspondants. A chaque nœud (i) les degrés de liberté sont u_i , v_i , w_i , θ_x , θ_y et θ_z .

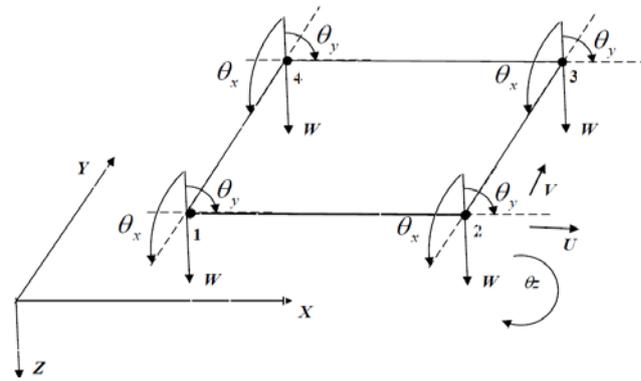


Fig. 1. L'élément de coque ACM-RSBE5 (Hamadi et al. 2015).

L'élément de coque obtenu ACM-RSBE5 est composé par l'assemblage de deux éléments RSBE5 et ACM avec une rotation fictive θ_z (Figure 1).

La matrice de rigidité de l'élément de coque ACM-RSBE5 est obtenue par l'utilisation de l'intégration analytique de la matrice de rigidité en membrane et en flexion. Le calcul de la matrice de rigidité élémentaire est effectué par les expressions suivantes:

$$[K_e] = [A^{-1}]^T \left[\iint_S [Q]^T [D] [Q] dx dy \right] [A^{-1}] \quad (1)$$

Où [D] est la matrice reliant le champ de déformation avec les constantes et [A] est la matrice de transformation. Avec:

La matrice de rigidité élémentaire $[K_e]$ devient:

$$[K_e] = [A^{-1}]^T [K_0] [A^{-1}] \quad (2)$$

$$[K_0] = \iint_S [Q]^T [D] [Q] dx dy \quad (3)$$

2.2 L'élément S4R

Le S4R est un élément à 4-nœuds doublement incurvé, utilisé pour les coques minces et épaisses. Il possède 6 DDL à chaque nœud (ABAQUS, 2011) ; à savoir : 3 déplacements (u , v , w) et 3 rotations (θ_x , θ_y , θ_z).

3. Description du travail expérimental

Cette partie d'étude expérimentale a été menée au laboratoire de génie civil à City University de Londres (Royaume Uni); toutes les procédures des essais sont détaillées ci-dessous.

3.1 Configuration du système

La présente étude a été réalisée sur un modèle de coques cylindriques. Ce modèle est fabriqué en acier inoxydable 304 d'épaisseur $t = 2$ mm. Le modèle a une forme d'un demi-cylindre (en raison de symétrie) avec un rayon $R = 160$ mm et une longueur $L = 900$ mm (Figure 2). Les propriétés élastiques du matériau ont été mesurées: Le module d'élasticité $E = 190000$ N/mm², et le coefficient de Poisson $\nu = 0,265$. Une charge statique concentrée est appliquée au sommet.



Fig. 2. Modèle de la coque cylindrique et positionnement des jauges.

Les conditions aux limites du modèle sont : libres le long des quatre bords et fixes au niveau des quatre points d'angle. La Figure 2 montre le modèle de la coque et le positionnement des jauges.

3.2 Appareillages

La machine utilisée est de type 50-C1601 UNIFLEX 300 (Figure 3a), elle a une unité de charge de haute précision pour la mesure de la charge et un grand espace de test pour une large gamme de tests sous la charge et de contrôle du déplacement. Cette machine est connectée à une console de contrôle appropriée 50-C9842 ADVANTEST 9 (Figure 3b). L'ADVANTEST 9 peut être facilement utilisé pour appliquer une charge spécifique, et le contrôle de déplacement et de déformation.

Le déplacement dans la partie supérieure du cylindre, où la charge est appliquée, peut être mesuré par le ADVANTEST 9 qui donne des lectures avec une résolution de 0.001mm, tandis que les autres points, sont mesurés par les jauges ABSOLUTE Digimatic Indicator ID-U Série 575 avec une résolution de 0,01 mm et 25,4 mm de gamme.

3.3 Mesures effectuées

Trois points sont considérés pour enregistrer les déplacements des points 1 et 2, donnés par les jauges. Cependant, le déplacement du point 3 est donné par l'appareil ADVANTEST9. Les positions des points 1, 2 et 3 sont illustrées sur la Figure 4.

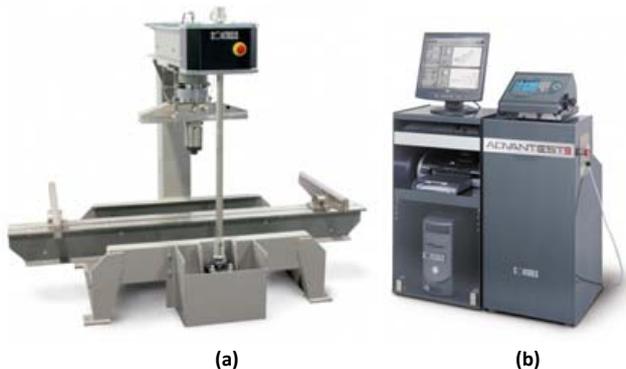


Fig. 3. Appareillage utilisé: (a) machine UNIFLEX 300, (b) ADVANTEST9.

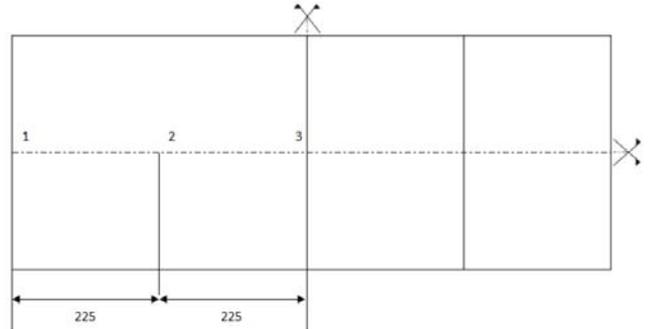


Fig. 4. Emplacement des jauges de déplacement (distance en mm).

La charge appliquée est une charge statique concentrée. La structure est contrôlée par une tige verticale hydraulique serrée et contrôlée permettant d'assurer une rigidité élevée. Elle est équipée de cellules de charge de haute précision pour fournir des résultats précis et des tests fiables. Les tests sous contrôle du déplacement et de la vitesse de déformation ne peuvent être effectués qu'avec l'appareil ADVANTEST 9 (console de commande servo-hydraulique). Les figures 5 (a et b) montrent le modèle expérimental et numérique de la coque à l'état de déformation.

4. Résultats expérimentaux

Dans cette section, les résultats expérimentaux des déplacements obtenus aux points 1, 2 et 3 sont présentés et comparés avec les résultats numériques et les écarts observés sont discutés.

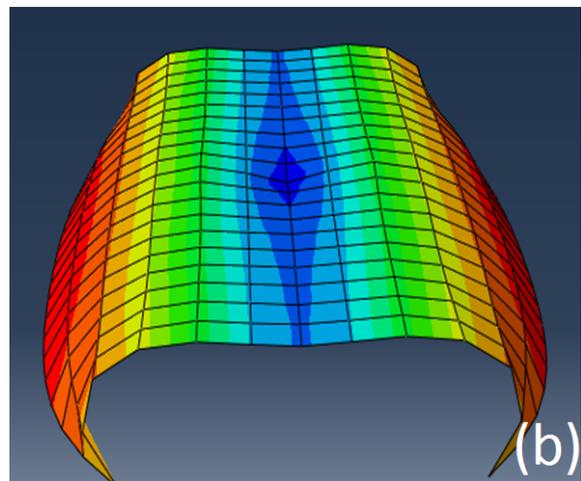
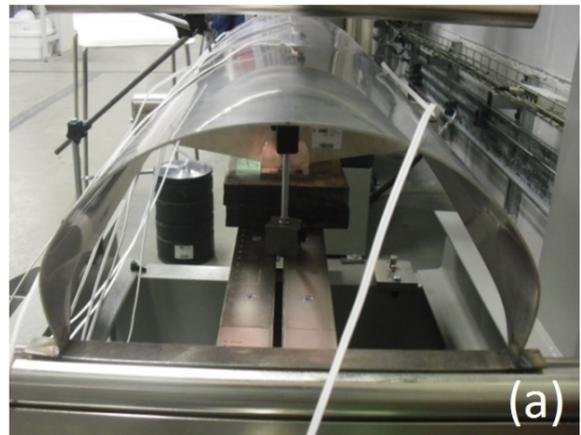


Fig. 5. Déformées de la coque: (a) test expérimental; (b) test numérique.

Les charges suivantes ont été appliquées: 2750N, 3000N, 3250N et 3500N et les déplacements verticaux pour les points 1, 2 et 3 pour chaque charge ont été systématiquement enregistrés. Le tableau 1 présenté ci-dessous montre la convergence des déplacements. Les résultats obtenus pour les déplacements verticaux sont comparés à ceux obtenus par l'utilisation des éléments ACM-RSBE5 et S4R.

4.1 Déplacements verticaux des points 1, 2 et 3

Les résultats normalisés dans le tableau 1 pour le point 1 montrent que l'élément ACM-RSBE5 est meilleur que S4R (ABAQUS) pour le maillage 2x2, mais pour les autres maillages le S4R de ABAQUS donne presque les mêmes résultats que ACM-RSBE5. Les résultats normalisés présentés dans le tableau 1 pour le point 2, montrent que l'élément ACM-RSBE5 est beaucoup mieux pour tous les maillages choisis, et l'élément ACM-RSBE5 converge plus rapidement que l'élément S4R de ABAQUS.

Pour le premier cas de chargement correspondant à 2750 N pour le point 3, on constate que l'élément ACM-RSBE5 montre une très bonne convergence entraînant jusqu'à 98% de précision pour le maillage 8x8 (Tableau 1). En outre, l'élément ACM-RSBE5 converge mieux que l'élément S4R du code ABAQUS. Les autres cas de chargement appliqués présentent aussi une excellente convergence.

4.2 Comparaison

Dans la présente étude, un maillage de 8x8 a été utilisé pour les points 1, 2 et 3 sous différents cas de chargement, et le tableau 2 présente les déplacements verticaux w_i ($i=1, 2, 3$) donnés par des essais expérimentaux et comparés aux résultats numériques obtenus. Les valeurs numériques obtenues montrent que les résultats obtenus par l'élément de Hamadi et al. (2015) (ACM-

RSBE5) et l'élément S4R du code ABAQUS sont très proches avec ceux obtenus via les tests expérimentaux.

5. Conclusion

Une étude expérimentale et des analyses numériques ont été réalisées pour examiner le comportement de flexion d'une coque cylindrique sous des charges concentrées. La présente étude a permis de constater un accord entre les résultats numériques obtenus par les éléments ACM-RSBE5, S4R-ABAQUS et ceux des tests expérimentaux. Aussi, l'élément de coque 'ACM-RSBE5' a été démontré comme étant robuste, efficace et utile pour l'analyse des structures de coque mince.

L'efficacité et la supériorité de l'approche de la coque à facette plane des structures en coque minces ont été confirmées. Ainsi, l'élément ACM-RSBE5 peut être utilisé pour l'analyse des structures en coque, non seulement pour les structures de forme régulières (cylindrique, sphériques...etc.), mais aussi pour les structures de formes géométriques irrégulières. Cependant, il est intéressant d'étendre l'élément présenté ACM-RSBE5 pour tenir compte des effets non linéaires qui seront abordés pour d'éventuels futurs projets de recherche.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes impliquées dans ce travail au Laboratoire de structure à la City University de Londres, en particulier, le Dr. Brett McKinley (Directeur du laboratoire) pour ses précieux conseils sur le banc d'essai, l'instrumentation et le contrôle. L'effort de M. JN Hooker est également reconnu. Les auteurs tiennent aussi à remercier M.S Gendy, M.R. Mohamed, et M.D. Das de leur aide dans la construction des modèles de coques.

Tableau 1. Résultats Normalisés (W_{num}/W_{exp})

point	Maillage	2750N		3000N		3250N		3500N	
		ACM-RSBE5	S4R (ABAQUS)						
(1)	2 x 2	0,61230329	0,39542203	0,59088608	0,38151899	0,58841322	0,37971149	0,5773961	0,37234945
	4 x 4	0,88898426	0,8944206	0,85822785	0,86278481	0,85435086	0,85853886	0,83863444	0,84223919
	6 x 6	0,94964235	0,9527897	0,91670886	0,91898734	0,91275012	0,91437878	0,8956743	0,89694656
	8 x 8	0,97281831	0,97567954	0,93898734	0,94101266	0,93485342	0,93624942	0,91751484	0,91836302
(2)	2 x 2	0,69787937	0,3007436	0,67936118	0,29262899	0,67182593	0,28936743	0,66873964	0,28793532
	4 x 4	0,90994216	0,89727348	0,88550369	0,87297297	0,87595334	0,86294302	0,87168325	0,85862355
	6 x 6	0,95676122	0,95345635	0,93120393	0,92751843	0,92104083	0,91677882	0,91645937	0,91210614
	8 x 8	0,97631506	0,97218397	0,95036855	0,94570025	0,93988336	0,93494841	0,93532338	0,92993367
(3)	2 x 2	0,6246321	0,98279375	0,60466051	0,95158698	0,59323267	0,93378206	0,58640842	0,92335949
	4 x 4	0,8752547	0,84899253	0,84732824	0,82161511	0,83118064	0,80571221	0,82167307	0,7962932
	6 x 6	0,94973964	0,93615576	0,91924468	0,90578546	0,9017646	0,88830271	0,89146769	0,87777592
	8 x 8	0,98347295	0,96988906	0,95198875	0,93832865	0,93396398	0,92013826	0,92319252	0,90916681

Tableau 2. Déplacement vertical W (mm) sous différents cas de chargements des points 1, 2 et 3

	Cas A : 2750 N			Cas B : 3000 N			Cas C : 3250 N			Cas D : 3500 N		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
ACM-RSBE5	3,400	3,545	4,344	3,709	3,868	4,739	4,018	4,190	5,134	4,327	4,512	5,529
S4R ABAQUS	3,410	3,530	4,284	3,717	3,849	4,671	4,024	4,168	5,058	4,393	4,486	5,445
Résultat Exp	3,495	3,631	4,417	3,95	4,07	4,978	4,298	4,458	5,497	4,716	4,824	5,989

Références

- Abaqus (2011) Version 6.14. Dassault Systemes Simulia Corporation.
- Adini, A., R. W. Clough (1961) Analysis of plate bending by the finite element method, Report to the Nat. Sci. Found., U.S.A., G 7337.
- Ashwell, D. G., A. B. Sabir (1972) A new cylindrical shell finite element based on simple independent strain function, *International Journal of Mechanical Sciences* 14 (03): 171-183.
- Cook, R. D. (1994) Four-node 'flat' shell element: drilling degrees of freedom, membrane-bending coupling, warped geometry, and behavior, *Computers and Structures* 50(4): 549-555.
- Djouidi, M. S., H. Bahai (2003) A shallow shell finite element for the linear and nonlinear analysis of cylindrical shells. *Engineering structures* (25): 769-778.
- Hamadi, D., A. Ayoub, O. Abdelhafid (2015) A new flat shell finite element for the linear analysis of thin shell structures, *European Journal of Computational Mechanics* 24(6): 232-255.
- Katili, I. , J. L., Batoz, J. M., Imam, A., Hamdouni, O. Millet (2015) The development of DKMQ plate bending element for thick to thin shell analysis based on the Naghdi/Reissner/Mindlin shell theory, *Finite Elements in Analysis and Design* 100:12-27.
- Melosh, R. J. (1963) Basis of derivation of matrices for the direct stiffness method, *J.AIAA* 1(7): 1631-1637.
- Poulsen, P. N., L. Damkilde (1996) A flat triangular shell element with loof nodes, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39(22): 3867-3887.
- Zienkiewicz, O. C. (1977) *The finite element method*, McGraw-Hill, (UK) London.