

Pushover analysis of the reinforced concrete frames with soft first storey using a fiber hinge model

Analyse Pushover des portiques en béton armé à premier niveau souple par un modèle de rotule en fibres

Issam Abdesslam[✉], Mekki Mellas

Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université Mohamed Khider Biskra, BP 145 RP 07000 Biskra, Algérie

Received 24 October 2016

Published online: 17 May 2018

Keywords

Soft storey

Pushover analysis

Secant stiffness

Fiber hinge

Abstract: In seismic zones, the problem with the soft storey is amongst the factors that causes the formation of the rupture mechanism in reinforced concrete structures due to variation in the lateral stiffness between levels. Most seismic codes have addressed this phenomenon in realizing the admissible lateral stiffness ratio between levels, without specifying the method to be used in determining this stiffness. The current study is aiming at determining the secant stiffness of each level by using the level capacity curve obtained by nonlinear static pushover analysis, based on a fiber hinge model. The results obtained made it possible to plot a curve that represents the variation of the elastic or secant stiffness ratio between the first level and the second level of a construction as a function of a displacement at the top of the structure. This curve examines the possibility of occurrence of a first soft storey for different points of performance.

© 2018 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

Résumé: Dans les zones sismiques le problème de l'étage souple est parmi les facteurs qui incitent la formation du mécanisme de rupture dans les structures en béton armé, à cause de la différence de la rigidité latérale entre les niveaux. La plupart des codes parasismiques ont abordé ce phénomène par un rapport de rigidité latérale admissible entre les niveaux, toutefois ils ne présentent pas de spécifications concernant la méthode à utiliser pour déterminer cette rigidité. La présente étude vise à déterminer la rigidité sécante de chaque niveau en utilisant la courbe de capacité du niveau obtenue par l'analyse statique non linéaire (Pushover) basée sur un modèle de rotule en fibre. Les résultats obtenus ont permis de tracer une courbe qui représente la variation du rapport de rigidité élastique ou sécante entre le premier et le deuxième niveau d'une structure en fonction du déplacement au sommet de la structure. Cette courbe examine la possibilité de survenance d'un premier niveau souple pour différents points de performance.

Mots clés: Etage souple, Analyse Pushover, Rigidité sécante, rotule en fibre.

1. Introduction

Le séisme de Boumerdes en 2003, est l'un des tremblements de terre qui a conduit à des catastrophes humaines. La présence de l'étage souple et la distribution inégale des masses et des rigidités sont parmi les raisons de l'effondrement des structures (Belazougui 2008). Toutefois, les ingénieurs continuent à opter pour les constructions avec un niveau souple, notamment pour la conception du rez-de-chaussée en tant que parking de véhicule ou locaux commerciaux, où la hauteur du rez-de-chaussée est supérieure à celle des étages au-dessus, ce qui induit la présence du mécanisme de l'étage souple sous une charge sismique donnée.

Les codes parasismiques tel que le code algérien RPA (2003) recommandent d'éviter ce type de systèmes de constructions sous prétexte que le niveau souple présente une rigidité latérale inférieure à 70% de la rigidité latérale du niveau situé immédiatement au-dessus ou inférieure à 80% de la rigidité latérale moyenne des trois niveaux situés immédiatement au-

dessus. Cependant, ces codes ne spécifient pas la méthode d'analyse utilisée pour déterminer la rigidité latérale de ces niveaux, ainsi ils ont adopté le même rapport de rigidité latérale entre les niveaux à travers toutes les zones sismiques, ce qui est irréaliste dans la pratique en considérant la variation des performances de la structure en fonction de l'intensité du séisme.

Dans le cas d'une zone de forte sismicité, une analyse non linéaire peut refléter le comportement réel. La procédure statique non linéaire ou l'analyse Pushover est actuellement l'analyse recommandée pour l'évaluation des performances sismiques à cause de sa simplicité. Cette méthode est appliquée pour l'analyse des structures soumises à des charges gravitaires permanentes et à des charges latérales de modes prédéfinis avec une augmentation progressive jusqu'à un niveau donné de déformation. Les résultats de l'analyse Pushover sont utilisés pour l'estimation de la capacité d'une structure, par l'étude de la variation du déplacement au sommet en fonction de l'effort tranchant à la base, il est possible alors de déterminer la charge de rupture, la capacité de ductilité et la rigidité sécante.

[✉] Corresponding author. E-mail address: abdesslamiissam80@gmail.com

De nombreuses études ont été consacrées à l'analyse des structures par la méthode Pushover. Krawinkler et Seneviratna (1998) ont présenté les concepts de base sur lesquels peut s'appuyer l'analyse Pushover, ils ont déduit que l'exécution de cette analyse soigneusement contribue à la compréhension des aspects structuraux qui influent sur les performances lors d'un séisme sévère. Chopra et Goel (2001) ont développé un modèle pour l'analyse Pushover applicable aux constructions de hauteur élevée. Egalement, Kilar et Fajfar (2002) ont appliqué l'analyse Pushover sur des structures en béton armé symétriques et asymétriques et ont conclu que l'analyse Pushover donne des résultats fiables pour ce type de structures. Inel et al (2006) ont étudié l'influence des caractéristiques des rotules plastiques sur la performance sismique d'une structure à l'aide du logiciel SAP 2000, où ils ont utilisé les caractéristiques des rotules prédéfinies et les caractéristiques des rotules définies par l'utilisateur, ils ont constatés que ces dernières produisent des résultats plus précis. Par ailleurs, le modèle de rotule plastique basé sur le concept de fibre a été développé pour contrôler le comportement non linéaire dans la section transversale des éléments du portique et sur la longueur déterminée de la rotule. Dans ce modèle les sections transversales des éléments de portique sont composées en fibres pour représenter le béton confiné, le béton non confiné (béton de couverture) et les aciers.

L'approche de rotule plastique de fibre a été appliquée par Kaba et Mahin (1984) en utilisant la théorie de flexion des poutres en fibres. Ensuite, Spacone et al (1996) ont appliqué la discrétisation des fibres pour étudier le comportement de la section en considérant l'interaction de la force axiale et le moment de flexion. Monteiro et al (2008) ont effectué une analyse sismique basée sur la méthode Pushover pour analyser la structure d'un pont en utilisant un modèle de rotule plastique et un modèle de rotule de fibre, cette étude a permis de comparer les courbes Pushover et de constater une différence de comportement mécanique dans le domaine élastique.

Pour l'étude du mécanisme de rupture d'une structure en portique de dix étages, Koopae et al (2013) ont effectué une analyse Pushover basée sur la rotule en fibre; les caractéristiques des matériaux de chaque fibre ont été précieusement choisies pour représenter le comportement structural réel. Il a été constaté que le modèle en fibre simule le mécanisme d'effondrement de la structure sans les hypothèses prédéfinies pour le modèle de rotule plastique.

Pour la compréhension de l'effondrement du niveau souple, la présente étude est consacrée à l'analyse Pushover par un modèle de rotules en fibre de quatre cas du modèle de portiques en béton armé en faisant varier la hauteur du premier niveau. Les courbes de capacité de chaque niveau des quatre modèles sont utilisées pour déterminer la rigidité sécante correspondant à chaque déplacement latéral. Les courbes qui représentent la relation entre le déplacement au sommet et le rapport de la rigidité élastique ou sécante entre le niveau (1) et le niveau (2) sont proposées pour l'étude de la possibilité d'existence d'un niveau souple lors de secousse sismique.

2. Outil et technique de modélisation

Dans la présente étude, le logiciel SAP2000 basé sur la méthode des éléments finis est utilisé pour l'analyse Pushover des portiques en béton armé en présence d'un premier niveau souple. Le modèle de fibre adopté est illustré sur la figure 1. Dans ce modèle, l'état de contrainte-déformation dans la section est obtenu par l'intégration de la réponse uni-axiale non linéaire des différentes fibres, distinguant l'acier, le béton confiné et non confiné (Casarotti et Pinho, 2006). Les efforts internes dans les éléments sont obtenus par l'intégration de la réponse de la section sur la longueur totale de l'élément ou sur longueur déterminée de la rotule, ce que l'on dénomme l'élément de plasticité concentrée de fibres. Le programme SAP 2000 permet l'utilisation de l'élément de plasticité concentrée de fibres à partir de l'option rotule en fibre «Fibre Hinge», cette dernière permet de calculer la relation moment-rotation dans le sens de flexion pour des niveaux de différentes valeurs de la charge axiale, un modèle de fibre peut représenter la dégradation de rigidité à cause de la fissuration du béton, et la plastification des aciers.

Le comportement non linéaire des éléments de structures en béton armé modélisés par des rotules en fibre est dû au comportement non linéaire des fibres, ainsi les résultats obtenus dépendent des caractéristiques des modèles adoptés pour la matière des fibres (Spacone et al 1996). Dans la littérature, il existe de nombreux modèles de comportement du béton et de l'acier permettant ainsi de mettre en évidence les phénomènes physiques et les caractéristiques principales intervenant lors de la dégradation des matériaux. Pour l'étude du comportement du béton confiné et non confiné, la présente étude adopte le modèle constitutive de Mander et al. (1988), intégré dans le logiciel SAP 2000 (Figure 2a). En revanche, pour la simulation du comportement des armatures, le modèle simple disponible dans le logiciel SAP 2000 est utilisé.

Ce modèle est caractérisé par trois zones qui sont: la zone élastique, la zone parfaitement plastique et la zone d'écroûssage (Figure 2b).

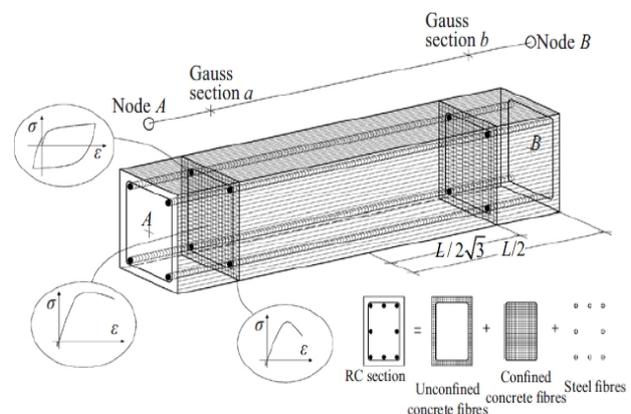


Fig. 1. Discrétisation d'une section de béton armé typique en fibres (Casarotti et Pinho 2006).

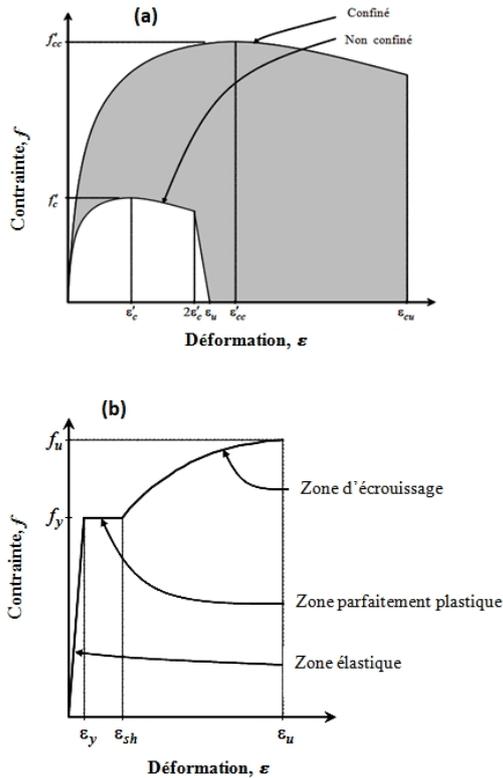


Fig. 2. Courbe contrainte-déformation (CSI 2013) (a) Acier; (b) béton confiné et non confiné.

3. Présentation du modèle étudié

La Figure 3 montre le portique en béton armé utilisé pour examiner l’effet d’un premier niveau souple, les poutres ont des travées de longueur identique égale à 4 m, la hauteur des niveaux est égale à 3 m à l’exception du premier niveau où la hauteur est supposée variable pour déterminer le rapport de rigidité inter-étages qui produit un mécanisme d’étage souple. Quatre cas ont été étudiés en variant la hauteur du premier niveau, ce dernier est égale à 3 m; 3,25 m; 3,80 m et 4 m, respectivement pour les cas (1), (2), (3) et (4). Les dimensions des poutres sont (30×50) cm² et celles des poteaux (30×30) cm², les détails du ferrailage sont présentés sur la figure 3.

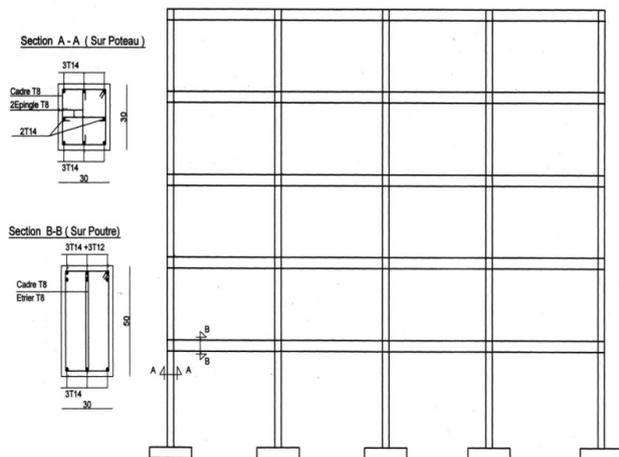


Fig. 3. Portique auto-stable en béton armé.

Le modèle de Mander et al. (1988) intégré dans le logiciel SAP 2000 est adopté pour le béton en considérant une résistance de compression maximale $f'_c=25\text{MPa}$, une déformation $\epsilon'_c = 0,002$ et une déformation ultime $\epsilon_u=0,0035$. La contrainte limite élastique de l’acier $f_y = 400 \text{ MPa}$ et la contrainte ultime $f_u=500 \text{ MPa}$. La section transversale du poteau est composée de 25 fibres, huit fibres de béton non confiné, huit fibres d’acier de ferrailage et neuf fibres de béton confiné (figure 4-a), la section transversale de la poutre est composée de 21 fibres, huit fibres de béton non confiné, quatre fibres d’acier de ferrailage et neuf fibres en béton confiné (figure 4-b).

4. Résultats et discussions

4.1 Evaluation des courbes Pushover

L’analyse Pushover est exécutée pour l’évaluation de la capacité d’effondrement des structures avec une rigidité variable pour le premier niveau. La distribution triangulaire selon le code RPA 99 (2003), est utilisée comme mode de chargement pour l’analyse Pushover.

La figure 5 montre que les courbes Pushover pour les quatre cas présentent la même allure. Il est clair que la rigidité diminue à cause de la fissuration du béton à partir d’un déplacement au sommet supérieur à 0,025 cm, ainsi le modèle de rotule en fibres peut prédire la fissuration du béton dans le domaine élastique avant la plastification de l’acier de ferrailage (Powel 2010).

L’effort tranchant à la base de la structure se stabilise au niveau du palier qui indique la plastification des armatures. Les quatre cas étudiés donnent une résistance différente à l’effort tranchant à la base de la structure. Ainsi, la diminution de la rigidité due à l’accroissement de la hauteur d’étage conduit à la dégradation de la capacité de résistance à l’effort tranchant, ce qui entraîne la possibilité de survenance d’un mécanisme de rupture de l’étage souple.

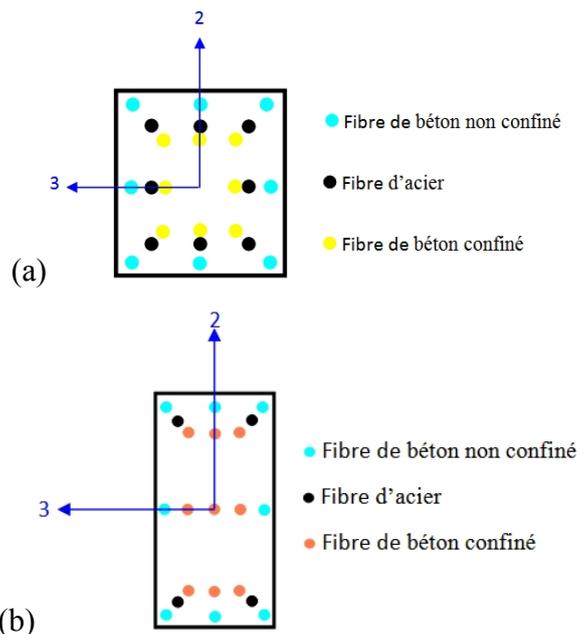


Fig.4. Modèle de fibres des sections transversales (a) Poteau; (b) Poutre.

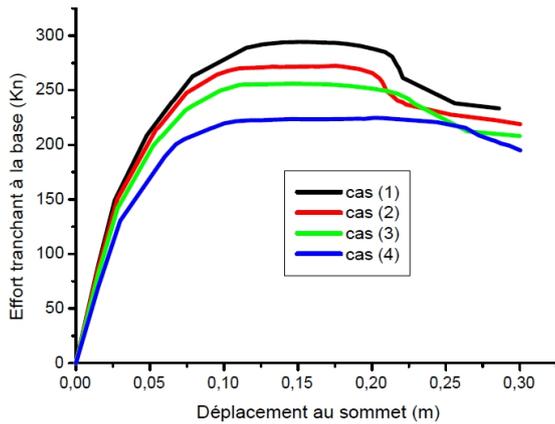


Fig. 5. Courbes Pushover des 4 cas étudié

4.2 Courbes Pushover de niveau

La Figure 6 montre les courbes Pushover pour les différents niveaux en considérant la relation entre l'effort tranchant de chaque niveau et le déplacement relatif correspondant. Il est clair que la diminution de la rigidité du premier niveau entraîne la diminution de la demande de ductilité dans les niveaux supérieurs. Le décroissement de la rigidité du premier niveau entraîne également une concentration de l'effort tranchant à la base accompagnée de grandes déformations dans ce niveau. La figure 6-d montre clairement un changement dans le comportement de la structure entraînant la probabilité de survenance du phénomène de niveau souple. Les courbes de Pushover des niveaux permettent de déterminer la rigidité élastique et sécante dans un niveau pour toutes les valeurs du déplacement latéral de la structure.

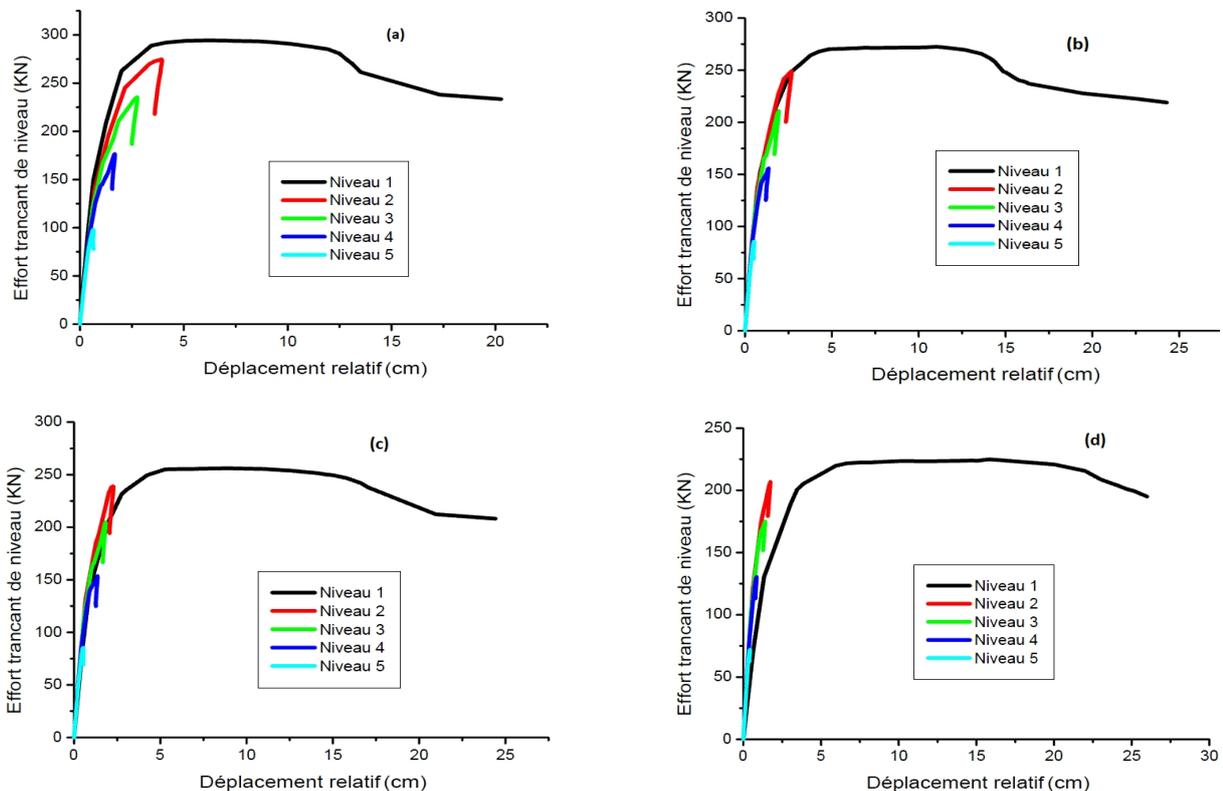


Fig.6. Courbes Pushover du niveau (a) cas 1; (b) cas 2; (c) cas 3, (d) cas 4

4.3 Détermination de la possibilité de survenance d'un premier niveau souple

Lorsque la courbe de capacité obtenue à partir de l'analyse statique non linéaire «Pushover» est une ligne droite, la structure possède une capacité élastique illimitée et la pente de cette droite égale à la rigidité de la structure, alors que la structure ne possède pas réellement une capacité élastique illimitée, la courbe de capacité est constituée de plusieurs segments de droites avec une pente décroissante qui représente la dégradation continue de la rigidité de la structure, la rigidité sécante ou effective représente la pente de la ligne droite tracée de l'origine jusqu'à l'intersection avec la courbe de capacité dans le domaine plastique (ATC 40 1996).

La détermination de la possibilité de survenance d'un premier niveau souple lors d'une excitation sismique donnée est un pas essentiel pour la conception parasismique des structures. La présente étude examine le problème de l'étage souple en proposant une courbe qui montre la variation du rapport de la rigidité élastique ou sécante entre le premier et le deuxième niveau, en utilisant les courbes de capacité des deux niveaux (Figure 7). Ce rapport de rigidité est présenté en fonction du déplacement au sommet de la structure. La courbe de capacité est utilisée pour déterminer le déplacement au sommet qui correspond à la fissuration primaire du béton et au début de la plastification de l'acier dans les sections critiques des éléments de la structure, la fissuration du béton et la plastification de l'acier sont schématisées sur la figure 7 par des lignes.

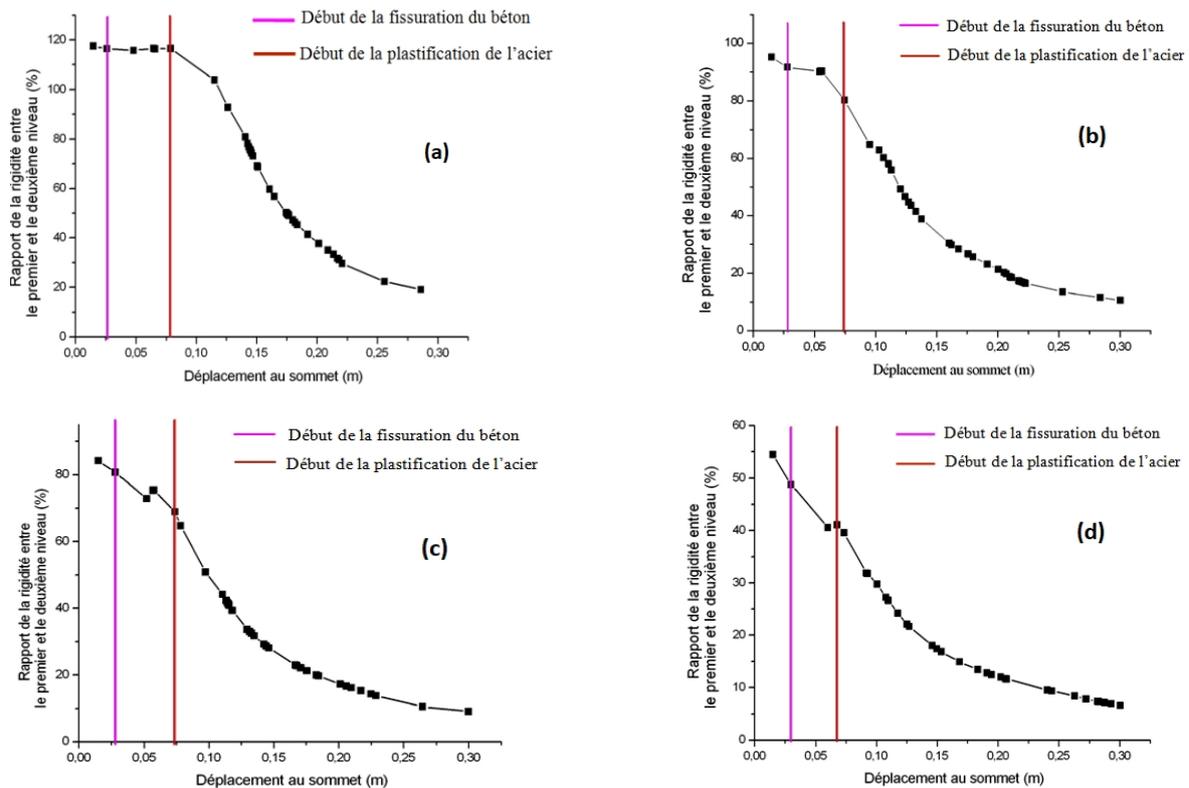


Fig.7. Possibilité de survenance d'un premier niveau souple (a) cas 1; (b) cas 2; (c) cas 3, (d) cas 4.

Dans les cas 1 et 2, les figure 7 a et b montrent qu'avant la plastification de l'acier de ferrailage, le rapport de rigidité entre les niveaux (1) et (2) est supérieur à 70 %, on note que ce taux a été adopté par le code parasismique algérien RPA (2003). Après la plastification, le rapport de rigidité devient inférieur à 70% pour un déplacement au sommet égal à 15 cm et 9 cm respectivement pour le cas 1 et 2, à partir de ces valeurs, le déplacement du premier niveau est important à cause de la concentration de l'effort tranchant dans ce niveau due à la dégradation de sa rigidité, ce qui produit incontestablement le phénomène de niveau souple. On peut constater que le rapport de rigidité initial a été supérieur à 70 %, cependant, après l'analyse par le modèle de rotule en fibre, ce rapport décroît à cause de la dégradation du matériau avec l'augmentation du déplacement.

La Figure 7 c, montre que le rapport de rigidité entre le premier et le deuxième niveau est inférieur à 70 %, juste après le début de plastification de l'acier de ferrailage. L'apparition du mécanisme de niveau souple pour un rapport de rigidité égal à 70 % correspond à un déplacement au sommet de 7,4 cm. Le quatrième cas étudié (figure 7d), permet de constater l'absence d'un mécanisme de niveau souple pour un rapport de rigidité initial entre les deux niveaux (1 et 2) inférieur à 70 %, cela s'explique par les petites valeurs de déplacement qui ne produisent pas la plastification des armatures pour un séisme de faible magnitude. Le mécanisme de l'étage souple n'a pas eu lieu lorsque le rapport de rigidité est égal à 40 % accompagné d'un déplacement au sommet de 7 cm et après le début de la plastification des armatures le mécanisme a eu lieu.

5. Conclusion

Pour l'étude du problème du niveau souple causant l'effondrement de plusieurs structures lors des séismes antérieurs, quatre cas du modèle de portique en béton armé ont été étudiés en variant la hauteur du premier niveau. L'analyse statique non linéaire basée sur le modèle de rotule en fibre a été appliquée en utilisant le logiciel SAP 2000.

La courbe de capacité, obtenue par l'analyse statique non linéaire basée sur le modèle de rotule en fibre, explique clairement la fissuration du béton dans le domaine élastique avant la plastification de l'acier de ferrailage. Ceci est le but principal pour lequel ce modèle a été utilisé, rendant ainsi le modèle plus précis et fiable dans la simulation du mécanisme d'effondrement des structures, parmi lesquelles les structures à niveau souple, objet de la présente étude.

Les courbes Pushover de niveau fournissant une bonne description de la relation entre l'effort tranchant de niveau et le déplacement relatif de ce niveau, la rigidité élastique et sécante pour n'importe quel niveau pour chaque déplacement latéral d'une structure peut être déterminée par le biais de ces courbes.

La courbe de détermination de la possibilité de survenance d'un niveau souple proposée dans cette étude est un outil efficace pour la détermination de la possibilité de survenance d'un niveau souple au point de performance d'une structure lors d'un séisme donné. Ce type de courbe a laissé apparaître clairement dans cette étude que si le rapport de rigidité initiale entre les niveaux (1) et (2) est inférieur à 70 %, le mécanisme de niveau souple ne

peut survenir lors d'un séisme de faible magnitude, comme il a fait apparaître que si le rapport de rigidité initial entre les niveaux (1) et (2) est égal ou supérieur à 100 %, la survenance du mécanisme de niveau souple est possible, mais à des niveaux de déformations importants résultants de séisme de très fortes magnitudes.

Références

- ATC (1996) Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Rep. ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Belazougui, M. (2008). Boumerdes Algeria earthquake of May 21, 2003: Damage analysis and behavior of beam-column reinforced concrete structures. In *14th World Conference on Earthquake Engineering* Beijing, China October 12-17.
- Casarotti, C., R. Pinho, GM. Calvi (2005) Adaptive Pushover based methods for seismic assessment and design of bridge structures, ROSE Research Report No. 2005/06, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Chopra, AK., RK. Goel (2001) A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California Berkeley.
- CSI, Sap2000, Version 16 (2013) Technical note material stress-strain curves, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.
- DTR BC 2-48 (2003) Règles Parasismiques Algériennes RPA99/Version 2003. Centre de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Alger.
- Inel, M., H.B. Ozmen (2006) Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings. *Engineering Structures*, 28(11) : 1494-1502.
- Kaba, S.A., S.A. Mahin (1984) Refined Modeling of Reinforced Concrete Columns for Seismic Analysis. Report No UCB/EERC-84/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Kilar, V., P. Fajfar (2002) Simplified Nonlinear Seismic Analysis of Asymmetric Multistory R/C Building. Proceedings of 12th European Conference on Earthquake Engineering, Paper No.033, pp. 1-10
- Koopae M.E., R.P. Dhakal, B.A. Bradley, G.A. Macrae (2013) Assessment of Collapse Capacity of RC Buildings based on Fiber-element Modelling. Annual Conference NZSEE, Wellington, New Zealand April 26-28.
- Krawinkler, H., G.D.P.K. Seneviratna (1998) Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering structures* 20: 452-464.
- Mander, J.B., M.J. Priestley, R. Park (1988) Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering* 114(8): 1804-1826.
- Monteiro, R., R. Ribeiro, M. Marques, R. Delgado, A. Costa, (2008) Pushover Analysis of RC Bridges Using Fiber Models or Plastic Hinges. In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China October 12-17.
- Powel, H.G. (2010) Modeling for structural analysis. Behavior and basics, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
- Spacone, E., F. C. Filippou, F. F. Taucer (1996). Fibre beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: Part I. Formulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25(7) : 711-725.