
Une approche simplifiée pour la prise en compte de l'effet d'échelle sur la rupture par flexion-cisaillement

Abdelhafid Nouali, Mohammed Matallah

RISAM Université de Tlemcen BP 230, Algérie, mohammed.matallah@gmail.com

RÉSUMÉ. Dans le cadre du concept de dimensionnement en capacité, le but principal de la conception structurelle des éléments en BA est d'éviter les ruptures fragiles et d'assurer un comportement ductile. Sous chargement cyclique, la résistance au cisaillement diminue quand la ductilité flexionnelle augmente. Une bonne estimation du mode de rupture des éléments en BA soumis à une interaction flexion-cisaillement repose sur une bonne prédiction du comportement flexionnel (résistance et ductilité) et de la capacité de cisaillement. Dans le présent article, un modèle simplifié est proposé pour décrire le comportement en flexion. L'effet d'échelle est pris en compte lors de l'évaluation de la ductilité. D'autre part, une formule de capacité de cisaillement est proposée pour évaluer la résistance au cisaillement et son évolution en fonction de la ductilité. La prédiction du mode de rupture est évaluée selon le modèle conceptuel ATC. La comparaison avec des essais expérimentaux montre la capacité de l'approche proposée à prédire correctement les différents modes de rupture et la ductilité correspondante.

ABSTRACT. Following the design capacity concept, the main purpose of structural design of RC elements is to avoid fragile failures and to ensure ductile behavior. Under cyclic loading, the shear strength is reduced by increasing the flexural ductility. A good estimation of the failure mode of RC elements exhibiting a shear flexural interaction relies on a good estimation of the flexural behavior (strength and ductility) and the shear capacity. In the present paper, a simplified model is proposed to describe the flexural behavior. The size effect is taken into account on the assessment of the flexural ductility. On the other hand, a shear capacity formula is proposed to evaluate the shear strength and the shear reduction with increasing ductility. The failure mode prediction is assessed following the ATC conceptual model. Comparison with experimental tests shows the ability of the proposed approach to predict the failure mode and the corresponding ductility.

MOTS-CLÉS : Interaction cisaillement-flexion, Ductilité, effet d'échelle.

KEYWORDS: Shear-flexure interaction, Ductility, size effect.

1. Introduction

Dans le cadre d'une conception sismique basée sur un dimensionnement en capacité, l'objectif principal est d'assurer un comportement ductile et d'éviter les ruptures fragiles. La ductilité est nécessaire pour permettre une déformation importante et une dissipation d'énergie suffisante avant l'effondrement. Pour les éléments en BA, les rotules plastiques, avec un comportement flexionnel inélastique sont des sources importantes de dissipation. Sous chargement sismique, certains éléments structurels (par exemple les piles de ponts) sont soumis à des sollicitations de flexion-cisaillement. La rupture par cisaillement de ces éléments doit être empêchée pour éviter un effondrement brutal. La résistance au cisaillement doit dépasser la résistance à la flexion [PRI 96].

La ductilité a une grande influence sur la résistance au cisaillement. Dans les zones des rotules plastiques, la résistance au cisaillement diminue quand la ductilité augmente [PRI 96]. L'ouverture des fissures de flexion affecte les mécanismes de transfert de l'effort tranchant (zone de compression, l'engrènement des granulats, ...). Les ouvertures de fissures de flexion provoquent une diminution de la capacité de ces mécanismes à transférer des efforts de cisaillement. Ainsi, une rupture brutale par cisaillement peut se produire. Pour éviter une rupture fragile, une bonne estimation de l'interaction flexion-cisaillement est nécessaire. Un certain nombre de modèles ont été proposés pour décrire l'interaction entre la ductilité en flexion et le cisaillement. Pour l'ingénierie pratique, le modèle ATC-6 reste une approche performante simplifiée qui permet de décrire l'interaction flexion-cisaillement et l'évaluation de la réduction de la résistance au cisaillement en fonction de la ductilité (Figure 1). À partir du modèle ATC [ATC 96], trois modes de rupture pourraient être distingués en fonction de l'intersection entre la courbe enveloppe de capacité de cisaillement et la courbe de demande de cisaillement qui correspond à la résistance à la flexion (ou courbe P- δ). Une rupture ductile (A) est produite lorsque la courbe P- δ et la courbe de cisaillement ne se coupent pas. Dans ce cas, la force de cisaillement correspondante à la résistance à la flexion est inférieure à la valeur de cisaillement résiduelle. La rupture "C" apparaît dans la situation où l'intersection se produit avant le début de flexion. Une autre situation existe, qui constitue l'objectif principal de cette étude, où la rupture par cisaillement se produit après la flexion à un certain niveau de ductilité (B).

Dans la présente étude, le modèle global simplifié développé par Nouali & Matallah [NOU 17] [MAT 17] pour prendre en compte l'effet d'échelle sur la capacité de rotation (ductilité) est utilisé pour l'estimation de la résistance et la ductilité en flexion (voir Figure 2). Puis, à partir d'une comparaison avec les différents modèles de cisaillement existants, nous proposons une nouvelle formule décrivant la résistance au cisaillement qui tient compte de l'influence de la ductilité flexionnelle. La prédiction du mode de rupture est donc basée sur l'intersection entre la courbe de capacité de cisaillement proposée et la courbe de résistance à la flexion (en tenant compte de l'effet d'échelle) en utilisant le concept ATC. Les comparaisons avec les résultats expérimentaux prouvent la capacité de l'approche simplifiée proposée à prédire la rupture flexion-cisaillement et la ductilité correspondante.

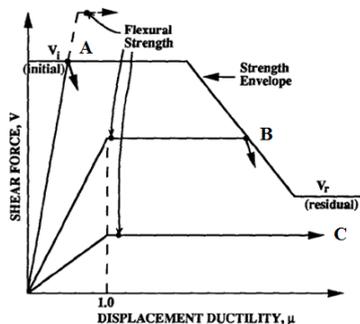


Figure 1. Modèle ATC-6 [ATC 96] pour l'interaction entre la résistance au cisaillement et la ductilité.

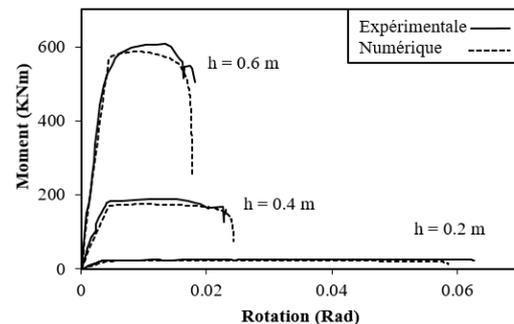


Figure 2. Moment-rotation, comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour $\rho = 1.13\%$, h variable [NOU 17] [MAT 17].

2. Effet d'échelle sur le comportement de cisaillement-flexion

1.1. Comparaison des différents modèles de cisaillement

Les résultats des tests expérimentaux sous chargements cycliques (Ang et al. [ANG 89], Aschheim & Moehle [ASC 92], Wong et al. [WON 93], Moretti & Tassios [MOR 07], Ho & Pam [HO 03], and Lee & Watanabe [LEE 03]) montrent que, dans de nombreux cas, la rupture par cisaillement se produit après flexion (après la plastification des armatures longitudinales). La dégradation de la résistance au cisaillement est attribuée au développement de fissures diagonales dans les zones de rotule plastique. Ainsi l'évaluation de l'interaction cisaillement-ductilité est importante.

Le modèle proposé est capable de reproduire les courbes moment-courbure (et les courbes P-δ) en tenant compte de l'effet d'échelle sur la ductilité en flexion [NOU 17] [MAT 17]. Avant de traiter de la validation du modèle proposé et de sa capacité à évaluer l'effet d'échelle sur la rupture par interaction flexion-cisaillement des éléments en BA, une comparaison des différents modèles de cisaillement proposés dans la littérature est d'abord proposée. Les modèles suivant : Caltrans [CAL 04], Priestley [PRI 94], Sezen and Moehle [SEZ 04], Xiao and Martirosyan [XIA 98], Maekawa and An [MAE 00] ainsi que les codes de conception ACI 318-08 [ACI 08], EC2 partie 1-1 [EC2 04] et EC8 partie 3 [EC8 05] sont comparés.

De l'autre côté, le comportement flexionnel est décrit par les courbes P-δ obtenus en utilisant le modèle proposé par les auteurs. L'effet d'échelle est pris en compte dans le comportement flexionnel. La rupture est décrite par l'intersection entre les courbes de cisaillement (des différents modèles comparés) et les courbes de comportement de flexion. Ainsi, l'intersection (si elle existe) est indiquée pour chaque modèle et la comparaison avec la rupture expérimentale (tests effectués par Weijian et Yanmei [WEI 09]) à la fois pour la résistance au cisaillement et la ductilité est effectuée (voir Figure 3). Pour l'élément présentant une rupture par cisaillement (B60-01), l'intersection entre la courbe numérique P-δ et la courbe de capacité de cisaillement de chaque modèle indique que tous les modèles prédisent une rupture par cisaillement avec une valeur de résistance au cisaillement variable. Dans le cas des éléments où la rupture se produit par cisaillement avec ductilité (après flexion B60-04 et B60-08), certains modèles ne montrent aucune intersection prédisant ainsi une surestimation de la résistance résiduelle de cisaillement. Pour les modèles présentant une intersection avec la courbe P-δ numérique, les modèles EC-2 et Maekawa prédisent une rupture par cisaillement. Les modèles : Caltrans, EC8-3 et Sezen & Moehle prédisent le bon mode de rupture avec une valeur de ductilité plus au moins élevée.

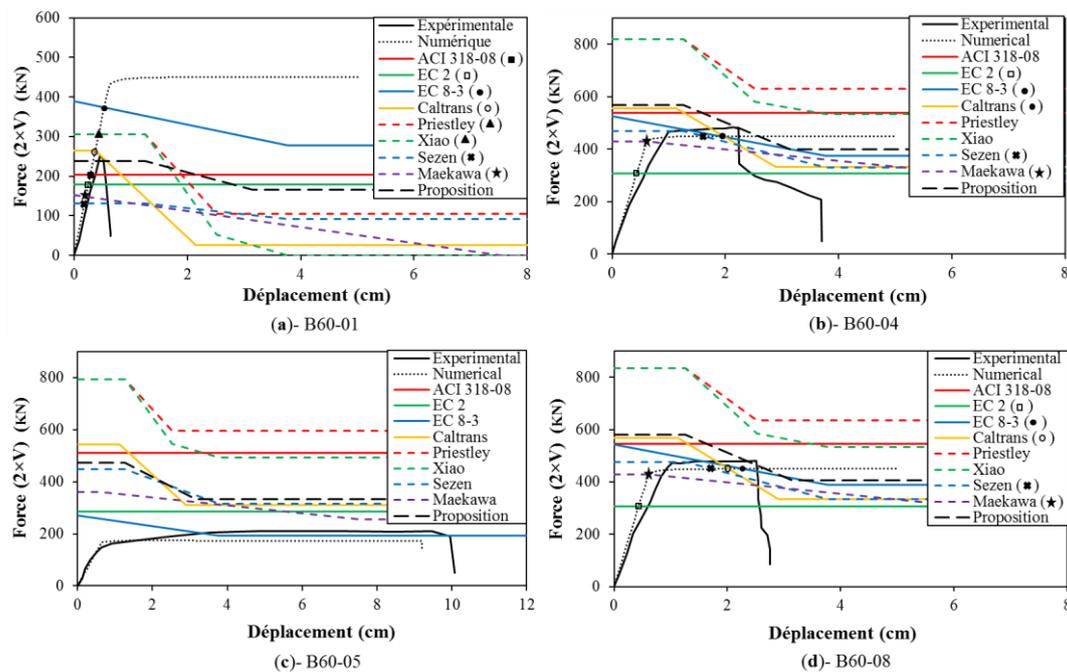


Figure 3. Force-déplacement, comparaison entre les résultats expérimentaux et la prédiction basée sur l'interaction des courbes de flexion et de cisaillement.

1.2. Une nouvelle formule pour la dégradation de la résistance au cisaillement

Sur la base de la comparaison faite ci-dessus, une formule simplifiée est proposée pour décrire l'effet de la ductilité sur la réduction de la résistance au cisaillement en tenant compte ainsi de l'effet d'échelle. La force correspondante à la résistance au cisaillement de l'élément qui est fonction de la ductilité de déplacement est donnée par :

$$V_R(\mu) = k_\mu(V_c + V_s) \quad [1]$$

Avec V_s et V_c sont calculés par les équations du code ACI [ASC 73] (ASCE-ACI Comité 426 Propositions):

$$V_s = \frac{A_{st} f_{yst} d_{st}}{s}, V_c = v_c \left(1 + \frac{3N}{f_c A_c} \right) b d \sqrt{f_c} \quad \text{avec: } v_c = (0.067 + 10\rho) \leq 0.2 \text{ (MPa)} \quad [2]$$

Le facteur k_μ dépend de la ductilité en déplacement. Nous proposons de nouvelles expressions :

$$k_{\mu} = \begin{cases} 1 & \text{if } \mu \leq 2 \\ 1.2 - 0.1\mu & \text{if } 2 < \mu < 5 \\ 0.7 & \text{if } \mu \geq 5 \end{cases} \quad [3]$$

La formule décrivant la réduction de la résistance au cisaillement proposée et la courbe P- δ numérique (résistance à la flexion) sont utilisées pour prédire la rupture par flexion-cisaillement conformément à la philosophie du modèle ATC. La comparaison est faite avec les résultats expérimentaux réalisés par Weijian et Yanmei [WEI 09] dans la Figure 3 (modèle appelé proposition). L'approche simplifiée proposée est capable de reproduire correctement le type de rupture et la ductilité de déplacement correspondante.

3. Conclusion

La rupture par cisaillement des éléments en BA doit être évitée. Sous chargement cyclique, certains éléments de structure sont soumis à une interaction flexion-cisaillement. La capacité de cisaillement est réduite avec la croissance de la ductilité. Le modèle conceptuel ATC est considéré comme une bonne approche pratique capable de prédire le mode de rupture des éléments en BA sous la combinaison flexion-cisaillement. La résistance à la flexion (et la ductilité en flexion) et la capacité de cisaillement doivent être correctement estimées. L'influence de l'effet d'échelle sur la ductilité en flexion a été prise en compte par un modèle simplifié développé par Nouali & Matallah [NOU 17] [MAT 17]. D'autre part, une nouvelle formule a été proposée pour prédire la capacité de cisaillement et son évolution en fonction de la ductilité. La comparaison avec les essais expérimentaux montre que l'intersection entre les deux courbes de résistance proposées donne une bonne estimation du mode de rupture et de la ductilité correspondante.

4. Bibliographie

- [ACI 08] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08). American Concrete Institute. 2008.
- [ANG 89] Ang Beng Ghee, M. J. N. Priestley, and T. Paulay. "Seismic Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns." *ACI Structural Journal* 86 (1). 1989.
- [ATC 83] Applied Technology Council. "Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges." Technical Report ATC 6-2. 1983.
- [ASC 73] ASCE-ACI Joint Task Committee. "Shear Strength of Reinforced Concrete Members." *J. Struct. Engr.* 1973. 1091–1187.
- [ASC 92] Ascheim, M, and JP Moehle. "Shear Strength and Deformability of RC Bridge Columns Subjected to Inelastic Cyclic Displacements." 1992.
- [CAL 04] Caltrans. "Seismic Design Criteria Version 1.3." 2004.
- [EC2 04] Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. 2004.
- [EC8 05] Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings. 2005.
- [HO 03] Ho, JCM, and HJ Pam. "Inelastic Design of Low-Axially Loaded High-Strength Reinforced Concrete Columns." *Engineering Structures*. 2003.
- [LEE 03] Lee, J.-Y., and F. Watanabe. "Predicting the Longitudinal Axial Strain in the Plastic Hinge Regions of Reinforced Concrete Beams Subjected to Reversed Cyclic Loading." *Engineering Structures* 25 (7), 2003, 927–39.
- [MAE 00] Maekawa, Koichi, and Xuehui An. "Shear Failure and Ductility of RC Columns after Yielding of Main Reinforcement." *Engineering Fracture Mechanics* 65, 2000, 1–34.
- [MAT 17] M. Matallah, A. Nouali, and A. Benyacoub. "Size Effect on the Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams: Numerical Investigation vs. Eurocode 8." In 16th World Conference on Earthquake. January 2017.
- [MOR 07] Moretti, M, and TP Tassios. "Behavior of Short Columns Subjected to Cyclic Shear Displacements: Experimental Results." *Engineering Structures*. 2007.
- [NOU 17] A. Nouali, and M. Matallah. "Size Effect on the rotational capacity of RC elements: A step Towards EC8 improvements". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. Soumis. 2017
- [PRI 96] Priestley, M. J. N., F. (Frieder) Seible, and G. M. (Gian Michele) Calvi. *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. Wiley. 1996.
- [PRI 94] Priestley, M. J. N., R. Verma, and Y. Xiao. "Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete" 120, 1994, 2310–29.
- [SEZ 04] Sezen, Halil, and Jack P. Moehle. "Shear Strength Model for Lightly Reinforced Concrete Columns." *Journal of Structural Engineering* 130 (11). American Society of Civil Engineers. 2004, 1692–1703.
- [WEI 09] Weijian, Yi, and Lv Yanmei. "Experimental Study on Shear Failure of High-Strength Concrete Beams with High-Strength Stirrups." *Key Engineering Materials* 400–402, 2009, 857–63.
- [WON 93] Wong, YL, T Paulay, and MJN Priestley. "Response of Circular Reinforced Concrete Columns to Multi-Directional Seismic Attack." *Structural Journal*. 1993.
- [XIA 88] Yan, Xiao, and Martirosyan Armen. "SEISMIC PERFORMANCE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE COLUMNS." *Journal of Structural Engineering* 124 (6), 1998, 241–51.