

PERFORMANCE SISMIQUE DES VOILES DE CONTREVENTEMENT EN BÉTON ARMÉ AVEC OUVERTURES EXCENTRÉES

Rafik Taleb¹⁾, Hakim Bechtoula¹⁾,
Noureddine Bourahla²⁾ et Susumu Kono³⁾

¹⁾ Centre Nationale de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), Algérie. rtaleb@cgs-dz.org

²⁾ Département de Génie Civil, Université Saad Dahleb – Blida, Algérie

³⁾ Department of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Japan

RESUME : Les voiles de contreventement en béton armé disposent souvent d'ouvertures pour des raisons architecturales. La taille et l'emplacement de ces ouvertures affectent leur performance sous sollicitation sismique. Dans cette étude, deux spécimens de voile en béton armé à une travée et trois étages ayant des ouvertures excentrées de différentes tailles ont été construits et testés sous chargement cyclique. L'objectif de ce travail expérimental était d'évaluer le comportement au cisaillement et d'identifier l'influence des ouvertures sur la distribution des fissures et la capacité au cisaillement des voiles de contreventement en béton armé. La capacité au cisaillement des spécimens a été estimée en combinant la capacité au cisaillement d'un voile sans ouvertures et le facteur de réduction dû à la présence des ouvertures. La comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats analytiques a montré que la capacité au cisaillement diffère selon la direction du chargement à cause de l'emplacement excentré des ouvertures.

Mots-clés : Voile de contreventement, Béton armé, Ouvertures excentrées, Capacité au cisaillement.

1. Introduction

Les voiles de contreventement en béton armé sont l'un des principaux éléments résistants aux sollicitations sismiques pour les bâtiments de grande et moyenne hauteur. L'expérience des séismes passés a montré que les bâtiments comportant des voiles structurels bien conçus peuvent réduire considérablement les pertes en vies humaines et matérielles (AIJ, 1998; Bechtoula et Oussaleh, 2005). Les voiles de contreventement peuvent avoir des ouvertures comme les fenêtres et les portes par exemple. La taille et l'emplacement des ouvertures affectent le comportement du bâtiment en réduisant la rigidité et la capacité des voiles. Plusieurs études expérimentales et analytiques ont été menées sur la performance sismique au cisaillement des voiles de contreventement comportant des ouvertures (Ono, 1995; Lopes, 2001; Brun et al., 2011), mais ces études précédentes ne sont pas suffisantes car elles n'ont pas traité le cas des ouvertures excentrées et/ou lorsque les ouvertures sont importantes.

Du fait de la distribution des déformations dans ce type de structures qui est significativement non linéaires, la méthode des éléments finis est souvent utilisée pour analyser leur comportement. Beaucoup de travaux sur l'analyse par éléments finis des voiles de contreventement ont été entrepris auparavant (Mackawa et al., 2003; Kim and Lee, 2003; Balkaya and Kalkan, 2004; Thomson et al., 2009; Guan et al., 2010). De ce point de vue, il est nécessaire d'enrichir davantage les données expérimentales pour clarifier le comportement au cisaillement des voiles de contreventement avec des ouvertures excentrées sous chargement cyclique. Contrairement aux structures en portiques auto-stables où la résistance aux sollicitations sismiques est assurée par un comportement ductile par flexion, la résistance au cisaillement est généralement associée à un comportement fragile pour le cas des voiles. Par conséquent, l'objectif des essais expérimentaux décrits ci-après est non seulement d'appréhender le comportement critique au cisaillement des voiles de contreventement en béton armé, mais également de fournir des données expérimentales indispensables pour le développement de modèles théoriques et analytiques ultérieurs dans ce domaine.

Une pratique simple pour prédire la capacité au cisaillement d'un voile de contreventement avec ouverture est basée sur la multiplication de la capacité de cisaillement de ce voile sans ouverture par un coefficient de réduction de la capacité (AIJ, 1999). L'applicabilité de cette approche est limitée pour des ouvertures de ratio moins de 0.4. Le ratio d'ouverture η qui exprime la taille de l'ouverture est défini comme suit:

$$\eta = \max \left\{ \sqrt{\frac{h_u \cdot l_u}{h \cdot l}}, \frac{l_u}{l} \right\} \quad (1)$$

avec l la distance entre les deux poteaux latéraux, h la distance entre les poutres supérieures et inférieures, l_u et h_u est la longueur et la hauteur de l'ouverture, respectivement. Il est à noter que le coefficient de réduction de la capacité est indépendant de l'emplacement de l'ouverture.

2. Programme expérimental

2.1. Spécimens testés

Deux spécimens de voile structurel avec des ouvertures excentrées ont été construits et testés au laboratoire de structure de l'université de Kyoto (Japon). Les variables des testes sont la taille et l'emplacement des ouvertures. Les principaux objectifs de cette recherche sont d'évaluer le comportement au cisaillement, de comprendre l'influence de la taille des ouvertures sur la distribution des fissures et d'identifier le mécanisme de résistance au cisaillement des voiles de contreventement en béton armé sous chargement cyclique.

Comme le montre la figure 1, les spécimens testés (S1 et L1) sont des modèles réduits à 40% de trois étages et une travée. Les ratios d'ouverture sont 0.3 pour le spécimen S1 et 0.46 pour le spécimen L1. Les spécimens sont de 4150 mm hauteur et de 2800 mm de largeur. Les poutres sont de 200 mm de large par 300 mm de hauteur. Les panneaux des voiles ont une épaisseur de 80 mm et de deux poteaux latéraux de section carrée de 300 mm par 300 mm. Pour assurer une bonne fixation à la base, une fondation en béton armé de 600 mm de largeur par 400 mm d'épaisseur et 3600 mm de longueur a été construite liaisonnée avec les voiles. La portée libre est de 2200 mm et la hauteur des poteaux est de 1100, 1100 et 550 mm dans le premier, deuxième et troisième étage, respectivement. Une poutre de chargement de section 400 mm par 400 mm est placée au sommet du voile, et un vérin hydraulique est attaché au modèle à mi-travée de la poutre de chargement. Le troisième étage est fourni afin d'assurer une transmission progressive de la force appliquée au niveau de la poutre de chargement au sommet. Les voiles sont testés sous chargement cyclique inversé dans le sens latéral jusqu'à ruine totale et perte de résistance. Puisque l'un des objectifs de cette étude est de clarifier l'influence des ouvertures sur le comportement en cisaillement des voiles de contreventement, les spécimens ont été dimensionnés pour se rompre au cisaillement, et non pas à la flexion.

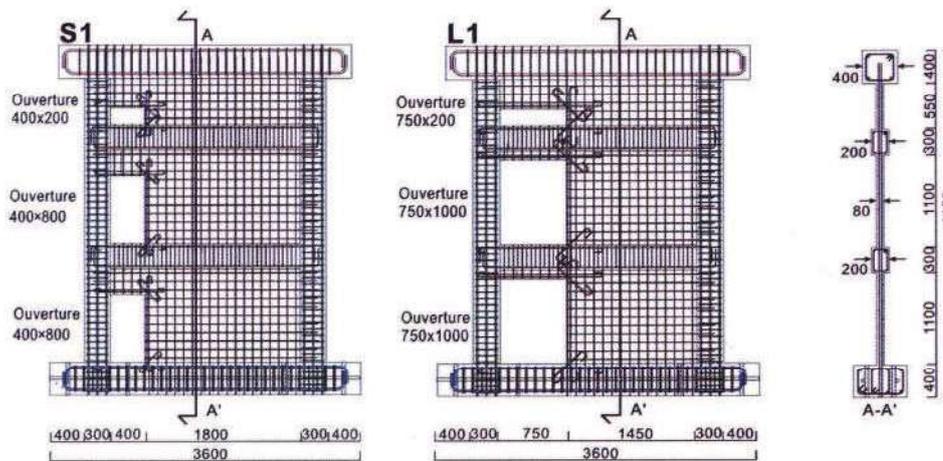


Figure 1 : Configuration des spécimens et arrangement des armatures de renforcement

2.2. Caractéristiques géométriques et mécaniques

Le tableau 1 montre les dimensions transversales des différents éléments constituant les spécimens ainsi que les détails de ferrailage. Le tableau 2

présente le ferrailage prévu aux droits des ouvertures et les ratios d'ouverture. Les propriétés mécaniques de l'acier et du béton adoptées pour les spécimens sont données dans les tableaux 3 et 4, respectivement.

Tableau 1 : Dimensions transversales et détails de ferrailage

	Poutre	Poteau	Panneau du voile	Poutre de chargement	Fondation
Section					
Dimension	200×300	300×300	Epaisseur 80	400×400	400×600
Arm. long.	2-D13	8-D19	Vertical : D6@100	4-D25	8-D25
Arm. trans.	2-D6@100	2-D10@75	Horizontal : D6@100	2-D10@100	4-D10@100

Tableau 2. Ferrailage aux droits des ouvertures

Spécimen	Ratio d'ouverture	Arm. vertic.	Arm. horiz. (Sup.)	Arm. horiz. (Inf.)
S1	0.30	1-D13	2-D10	1-D13
L1	0.46	1-D16	2-D13	1-D16

Tableau 3. Caractéristiques mécaniques du béton

Spécimen	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
S1	25.1	2.2	21.7
L1	28.9	2.5	26.0

Tableau 4. Caractéristiques mécaniques des armatures

Diamètre nominal	Limite élastique σ (MPa)	Résistance ultime σ (MPa)	Module de Young (GPa)
D6	425	538	204
D10	352	496	186
D13	362	529	188
D19	411	605	189

2.3. Montage expérimental et procédure de test

Les détails du système de chargement sont représentés sur la figure 2. La charge latérale Q est appliquée de façon statique via la poutre de chargement par deux vérins hydrauliques de capacité 2000 kN. Une charge horizontale cyclique est appliquée statiquement sur les spécimens dans les directions positives et négatives. Pendant le chargement cyclique horizontal, des charges verticales axiales sont appliquées par deux vérins hydrauliques de 1000 kN chacun en supposant que les spécimens représentent les trois étages inférieurs d'un bâtiment typique en béton armé de six étages. Ainsi, le niveau de force des charges verticales est déterminé en conformité avec les charges permanente et d'exploitation pour un voile à six étages. Une charge verticale de 400 kN a été appliquée par chacun des vérins comme une charge de base représentant l'effet des étages supérieurs. Par ailleurs, en contrôlant les deux vérins hydrauliques verticaux, les deux charges verticales sont ajustées pour varier en fonction de la charge latérale Q de manière à maintenir le ratio de cisaillement ($M/Q.d$) toujours égal à 1.0, où M est le moment de flexion appliquée à la base du voile, Q est la charge latérale appliquée à la poutre de chargement et d est la distance entre les deux poteaux latéraux. Ce contrôle est réalisé afin de s'assurer que les dommages par cisaillement dans le voile précèdent les dommages par flexion.

Le chargement est principalement contrôlé par les déplacements mesurés en termes d'angle de rotation d'étage. Chaque cycle de chargement complet se compose d'un demi-cycle dans le sens positif et un demi-cycle dans le sens négatif. L'histoire de chargement est divisé en deux parties : le premier cycle de chargement est effectué jusqu'à 200 kN, par la suite, deux cycles de chargement répétés sont appliqués pour chaque angle de rotation de valeurs respectives ± 0.04 , ± 0.1 , ± 0.25 , ± 0.5 , ± 0.75 et $\pm 1.0\%$. L'instrumentation a été choisie pour surveiller les charges appliquées, les déformations et les contraintes dans les armatures. Lors des essais, et pour des points bien choisis, les dommages occasionnés sont enregistrés avec des

appareils photographiques et des croquis. La propagation des fissures, l'éclatement du béton et le flambement des barres de renforcement sont aussi documentés.

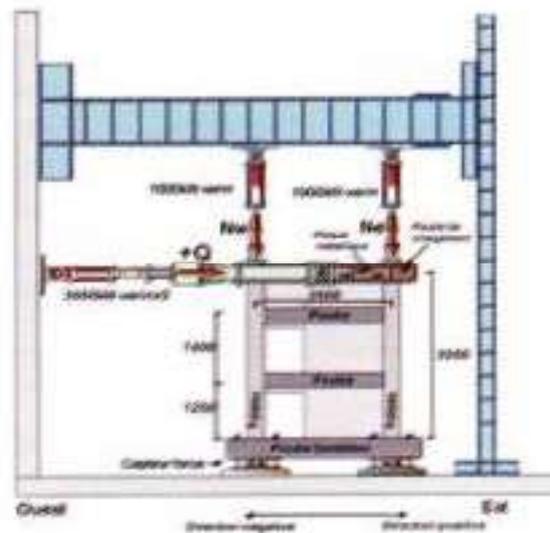


Figure 2 : Détails du système de chargement

3. Interprétation des résultats expérimentaux

3.1. Dommages observés et distribution des fissures

La figure 3 montre les fissures observées dans les spécimens pour un angle de rotation de 0.75%. Les figures 4 et 5 montrent les courbes d'hystérésis ainsi que la propagation des fissures à la fin du test. Les lignes continues montrent les fissures et les parties peintes montrent les zones sévèrement endommagées.

Le processus de fissuration commence par la formation de fissures diagonales dans les panneaux de voile et à la partie supérieure des ouvertures à un angle de rotation d'environ 0.05%. Des fissures de flexion dans le poteau en traction ont également été observées. Avec l'augmentation de l'angle de rotation appliqué, le nombre de fissures de cisaillement augmente dans les panneaux de voile

et s'étend vers le bas en illustrant le chemin de transfert des contraintes. La formation d'un mécanisme de transfert de cisaillement est empêchée et la contrainte de cisaillement a la tendance à se concentrer dans le coin inférieur des ouvertures. Pour l'angle de rotation entre 0.5% et 0.75%, la charge latérale atteint son maximum. A ce stade, certaines barres longitudinales des poutres et le ferrailage des panneaux de voiles sont exposés en raison de l'éclatement du béton d'enrobage. Durant cette étape, le flambement de certaines armatures des panneaux de voiles du premier niveau est observé. Au stade final de chargement, le glissement entre les fissures de cisaillement dans le voile a eu lieu avec diminution significative de la résistance latérale des spécimens. Le processus de fissuration était commun aux deux spécimens testés. Les différences entre les deux spécimens sont résumées comme suit :

Pour le spécimen S1, les fissures de cisaillement dans le panneau de voile du premier étage et les fissures de flexion dans le poteau en traction ont été observées à l'angle de rotation de 0.04%. Ensuite, les fissures de cisaillement augmentent en nombre dans les panneaux de voile et progressent dans les poutres à l'angle de rotation $\pm 0.1\%$. A l'angle de rotation $- 0.5\%$, le béton au coin de l'ouverture du premier étage est sévèrement endommagé (zone A de la figure 3 (a)), et l'éclatement du béton dans le panneau de voile du premier étage et dans la poutre courte du deuxième étage a été observé. Le flambement des barres de renfort verticales autour rotation appliqué, le nombre de fissures de cisaillement augmente dans les panneaux de voile et s'étend vers le bas en illustrant le chemin de transfert des contraintes. La formation d'un mécanisme de transfert de cisaillement est empêchée et la contrainte de cisaillement a la

tendance à se concentrer dans le coin inférieur des ouvertures. Pour l'angle de rotation entre 0.5% et 0.75%, la charge latérale atteint son maximum. A ce stade, certaines barres longitudinales des poutres et le ferrailage des panneaux de voiles sont exposés en raison de l'éclatement du béton d'enrobage. Durant cette étape, le flambement de certaines armatures des panneaux de voiles du premier niveau est observé. Au stade final de chargement, le glissement entre les fissures de cisaillement dans le voile a eu lieu avec diminution significative de la résistance latérale des spécimens. Le processus de fissuration était commun aux deux spécimens testés. Les différences entre les deux spécimens sont résumées comme suit :

Pour le spécimen S1, les fissures de cisaillement dans le panneau de voile du premier étage et les fissures de flexion dans le poteau en traction ont été observées à l'angle de rotation de 0.04%. Ensuite, les fissures de cisaillement augmentent en nombre dans les panneaux de voile et progressent dans les poutres à l'angle de rotation $\pm 0.1\%$. A l'angle de rotation $- 0.5\%$, le béton au coin de l'ouverture du premier étage est sévèrement endommagé (zone A de la figure 3 (a)), et l'éclatement du béton dans le panneau de voile du premier étage et dans la poutre courte du deuxième étage a été observé. Le flambement des barres de renfort verticales autour de l'ouverture a eu lieu dans le panneau de voile du premier étage à l'angle de rotation de $- 0.75\%$. A l'angle de rotation de -1.0% , le glissement par cisaillement est survenu à la base du panneau du premier étage (zone C dans la figure 4). à cette étape, la résistance au cisaillement a diminué brusquement.

Pour le spécimen L1, les fissures de cisaillement dans le voile du premier étage et les fissures de flexion dans le poteau en traction sont observées

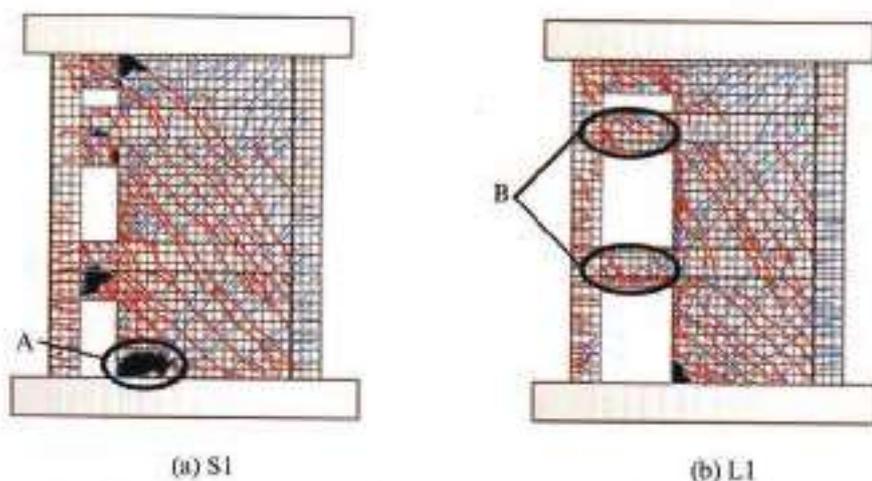


Figure 3 : Schéma de propagation des fissures à l'angle de rotation 0.75%

comme celle de S1 à l'angle de rotation de 0.04%. Les fissures de flexion dans la poutre courte du deuxième et troisième étage n'ont pas été formées autant que pour le spécimen S1 (zone B de la figure 3 (b)). La différence dans l'étendue des dommages est due à la différence dans la longueur des poutres courtes. A l'angle de rotation de - 0.5%, le flambement des armatures longitudinales autour de l'ouverture du premier étage a été observé ainsi qu'un éclatement sévère du béton à cet endroit à l'angle de rotation de - 0.75%. A l'angle de rotation de 1.5%, le glissement par cisaillement a eu lieu dans le panneau du voile du premier étage (zone D dans la figure 5). Toutefois, la capacité n'a pas diminué subitement contrairement au spécimen S1.

3.2. Relation charge latérale-angle de rotation

Les figures 4 et 5 montrent les courbes d'hystérésis de la charge latérale en fonction de l'angle de rotation pour les spécimens S1 et L1,

respectivement. Le tableau 5 montre les charges latérales maximales et les angles de rotations correspondants. La force maximale de cisaillement du spécimen L1 est inférieure à celle de S1, que se soit dans la direction de chargement positif ou négatif, parce que le ratio d'ouverture de L1 est le plus grand. La force maximale atteinte dans la direction de chargement positif est plus importante que celle de la direction de chargement négatif dû à l'emplacement d'ouverture excentrée et au mécanisme de transfert du cisaillement. Cependant, pour le comportement post-pic, une dégradation brusque de la capacité est observée pour le spécimen S1, alors que cette dégradation est relativement progressive pour L1.

Le mode de rupture de S1 est un mode fragile du fait de la rupture par cisaillement des poutres courtes. Pour L1 un mode de rupture relativement ductile est observé du fait de la plastification des armatures longitudinales des poutres courtes et des armatures horizontales au dessus des ouvertures avant d'atteindre un stade final avec une rupture par glissement entre les fissures par cisaillement.

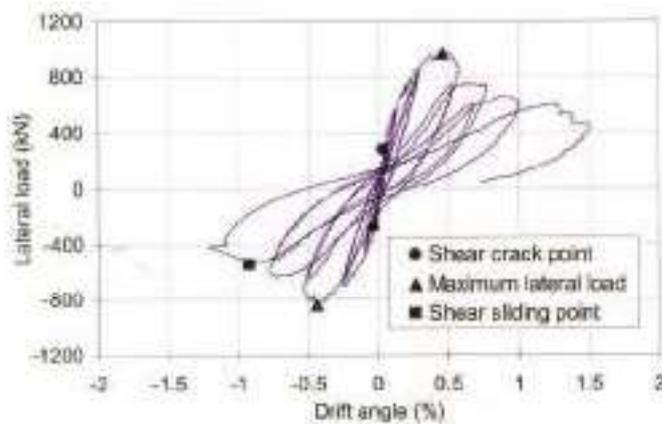


Figure 4 : Courbe d'hystérésis et distribution des fissures à la fin du test pour S1

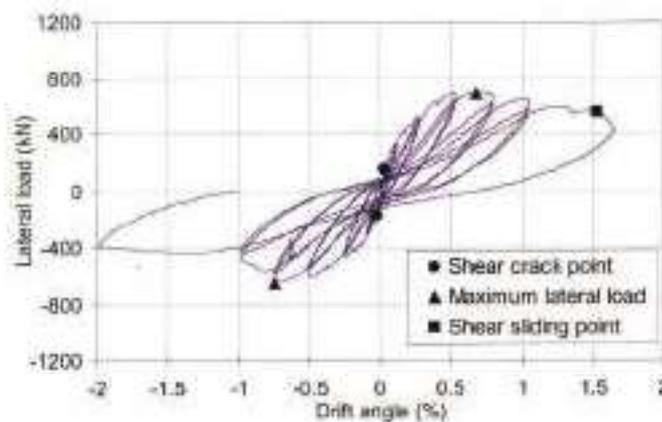


Figure 5 : Courbe d'hystérésis et distribution des fissures à la fin du test pour L1

Tableau 5 : Charge latérale maximale

	Direction positive		Direction negative	
	Charge maximale (kN)	Angle de rotation (%)	Charge maximale (kN)	Angle de rotation (%)
S1	967	0.46	-838	-0.44
L1	686	0.68	-649	-0.74

4. Prédiction de la capacité en cisaillement

4.1. Méthode de la réduction de la capacité en cisaillement selon le code Japonais AIJ

Dans la pratique actuelle du dimensionnement du code japonais AIJ (AIJ, 1999), le facteur de réduction de la capacité au cisaillement adopté r_u , pour calculer la résistance au cisaillement d'un voile avec ouverture, est défini comme suit :

$$r_u = 1 - \eta \tag{2}$$

Pour l'utilisation du principe du facteur de réduction dans l'estimation de la capacité au cisaillement des voiles en béton armé avec ouvertures, le ratio d'ouverture maximale est limité à 0.4 pour le code AIJ

4.3. Estimation analytique des capacités en cisaillement des voiles avec ouvertures

Dans cette étude, une méthode simple est utilisée pour estimer la capacité en cisaillement Q_s d'un voile structural avec des ouvertures, cette capacité est évaluée comme suit :

$$Q_s = r_u V_u \tag{4}$$

$$V_u = t_w l_{wb} p_s \sigma_{sy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wa} v \sigma_B / 2 \tag{5}$$

$$\tan \theta = \sqrt{(h_w / l_{wa})^2 - 1} - h_w / l_{wa} \tag{6}$$

$$\beta = (1 - \cot^2 \phi) p_s \sigma_{sy} / (v \sigma_B) \tag{7}$$

avec, t_w épaisseur du panneau du voile, h_w épaisseur du voile, l_{wb} et l_{wa} longueurs équivalentes du voile dans le mécanisme de barre et le mécanisme de l'arc respectivement, σ_B résistance caractéristique à la compression du béton, σ_{sy} résistance

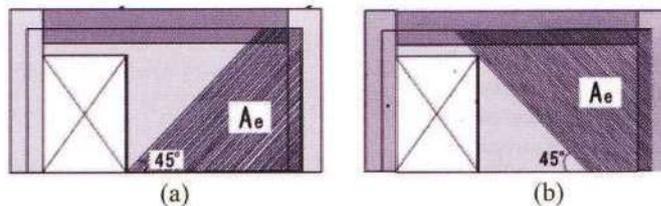


Figure 6 : Surface du panneau du voile formant la zone de compression

4.2. Facteur d'Ono pour la réduction de la capacité en cisaillement

Considérant la zone de compression effective du panneau du voile en béton armé, comme le montre la figure 6, le facteur de réduction de la capacité au cisaillement proposé par Nishiyama et Ono (1995) est défini comme suit :

$$r_u = \sqrt{\sum A_e / hl} \tag{3}$$

avec A_e la surface de la zone de compression diagonale comme le montre la figure 6, h la distance entre la poutre supérieure et inférieure et l la distance entre les deux poteaux d'extrémité. Le facteur de réduction d'Ono tient compte de l'emplacement d'ouverture ainsi que ses dimensions.

caractéristique des armatures de cisaillement dans le panneau du voile, p_s pourcentage des armatures de cisaillement dans le panneau du voile, v facteur d'efficacité de la résistance caractéristique à la compression du béton.

4.4. Résultats de la prédiction de la résistance au cisaillement

La comparaison des capacités au cisaillement selon les deux méthodes mentionnées ci-dessus (méthode AIJ et méthode d'Ono) avec les résultats expérimentaux est résumée dans le tableau 6. Dans ce tableau Q_{Exp} , Q_{AIJ} et Q_{Ono} sont les capacités de cisaillement obtenues à partir d'essais, du code Japonais AIJ et de la méthode d'Ono, respectivement. La capacité au cisaillement calculée selon le code AIJ correspond bien avec les résultats expérimentaux dans la direction négative.

Alors que dans la direction positive, le code AIJ tend à sous-estimer la capacité au cisaillement. Cette différence est due au facteur de réduction du code AIJ qui ne tient pas compte de la direction d'application du chargement. Le facteur de réduction d'Ono a donné une meilleure estimation de la capacité au cisaillement selon les deux directions positive et négative du chargement car la surface effective du voile correspondant au champ de compression dans les deux directions a été prise en compte.

Tableau 6 : Charges latérales maximales

	Direction positive			Direction négative		
	Q_{Ed} (kN)	Q_{Ed} (kN)	Q_{Ed} (kN)	Q_{Ed} (kN)	Q_{Ed} (kN)	Q_{Ed} (kN)
S1	967	750 (1,29)	941 (1,03)	-838	-750 (1,12)	-862 (0,97)
L1	686	582 (1,18)	784 (0,88)	-649	-582 (1,12)	-717 (0,91)

La valeur entre parenthèse est le rapport entre la valeur expérimentale et celle calculée

5. Conclusions

Des essais sous chargement cyclique ont été menés sur deux spécimens en modèle réduit de voile de contreventement en béton armé avec ouvertures excentrées afin d'évaluer leurs comportements au cisaillement. Les principales conclusions sont énumérées ci-après.

La capacité de résistance au cisaillement d'un voile avec ouvertures est différente selon le sens de chargement positif/négatif dû à l'emplacement de l'ouverture excentrée. Par ailleurs, la capacité au cisaillement des voiles avec ouvertures de grandes tailles est moins importante que celle avec petites ouvertures parce que l'existence d'ouvertures excentriques affecte la formation des bielles de compression dans le béton. Le mécanisme de transfert du cisaillement sera interrompu par la présence des ouvertures et des dommages importants aux coins des ouvertures provoquant la ruine par glissement entre les fissures. Ce mode de rupture devra être pris en compte dans le processus de conception.

La capacité de résistance au cisaillement du spécimen S1 avec petites ouvertures est plus importante que celle du spécimen L1 avec ouvertures relativement plus grandes. Toutefois, S1 a montré une chute brusque de la résistance au cisaillement car les poutres courtes ont été endommagées à un niveau de rotation relativement faible. Le spécimen L1 n'a pas montré cette diminution brusque, mais a montré un mode de ruine de type plus au moins ductile.

Parce que le facteur de réduction de la capacité de résistance en cisaillement d'Ono considère la zone de compression effective du panneau du voile, les résultats du calcul de la résistance au cisaillement sont en harmonie avec les résultats expérimentaux.

Les dommages en compression du béton au niveau du premier étage ont été le principal facteur qui a influencé la capacité de résistance en cisaillement.

Références bibliographiques

- [1] Architectural Institute of Japan, *AIJ Standard for Structural Calculation of Reinforced Concrete Structures*, Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan, 1999.
- [2] Architectural Institute of Japan, *Report on the Hanshin-Awaji Earthquake Disaster Building Series Volume 1: Structural Damage to Reinforced Concrete Building*, Architecture Institute of Japan, Tokyo, Japan, 1998.
- [3] Balkaya, C., and Kalkan, E., *Three-Dimensional Effects on Openings of Laterally Loaded Pierced Shear Walls*, ASCE J. Struct. Eng., 130:10, pp 1506-15414, 1984.
- [4] Bechtoula H., Ousalem H., *The 21 May 2003 Zemmouri (Algeria) Earthquake: Damages and Disaster Responses*, Journal of Advanced Concrete Technology, 3(1) 161-174, 2005.
- [5] Brun, M., Labbe, P., Bertrand, D. and Courtois A., *Pseudo-dynamic tests on low-rise shear wall and simplified model based on the structural frequency drift*, Eng. Struct., 33(3):796-812, 2011.
- [6] Kim, H. S. and Lee, D.G., *Analysis of shear wall with openings using super elements*, Eng. Struct., 25(8): 981-991, 2003.
- [7] Lopes, M. S., *Experimental shear-dominated response of RC walls. Part II: Discussion of results and design implications*, Eng. Struct., 23(5): 564-574, 2001.
- [9] Ono, M., *Experimental Study on Reinforced Concrete Opening Wall above Opening*
- [8] Maekawa, K., Pimmanmas, A. and Okamura, H., *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, London, 2003. *Periphery Ratio 0.4, Part1-Part2, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan C-2, Structures IV: 147-150, 1995.*
- [10] Thomson, E. D., Perdomo, M. E., Picón, R., Marante, M. E., Flórez-López, J., *Simplified model for damage in squat RC shear walls*, Eng. Struct., 31(10):2215-2223, 2009.