

Analyse numérique expérimentale croisée pour l'identification des mécanismes de transfert de l'effort tranchant

Ahmed Belbachir^{1,2}, Mohammed Matallah¹, Syed-Yasir Alam², Ahmed Loukili²

¹ Laboratoire RiSAM, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Algérie

² Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes, France

RÉSUMÉ. Dans le présent travail, les mécanismes de transfert de l'effort tranchant dans des poutres en béton armé sans armatures transversales sont identifiés. Des poutres géométriquement similaires ont été testées en flexion trois-points avec un rapport $a/d=2.5$. La méthode de corrélation d'images a été utilisée pour suivre la cinématique du processus de fissuration. Les résultats de la corrélation d'image combinés aux résultats des simulations numériques sont utilisés pour identifier la contribution des modes de transmission d'effort tranchant aux supports à différents taux de chargement.

ABSTRACT. In the present paper, shear-transfer mechanisms in RC beams without transverse reinforcement are investigated. Three points flexural tests were performed on RC beams with a span/depth ratio equal 2.5. Digital Image Correlation method was used to follow the kinematics of cracking process. Results from DIC combined with numerical results are used to identify the contribution of each mechanism at different loading stages.

MOTS-CLÉS: cisaillement diagonal, mécanismes de transfert, effet d'échelle.

KEYWORDS: diagonal shear, shear-transfer mechanisms, size effect.

1. Introduction

La résistance au cisaillement des poutres en béton armé ou précontraint avec ou sans armatures transversales est un sujet de grand intérêt pour l'ingénierie des structures. Pour des éléments en béton armé sans armatures transversales, la conception se base encore sur des formules empiriques qui ne sont pas adaptées à toutes les situations. Cela peut conduire à des conceptions dangereuses qui ne respectent pas l'approche sécuritaire exigée par les codes de conception. Le manque d'une théorie adéquate pour la conception des éléments en BA sans renfort transversal soumis à des efforts de cisaillement, est du principalement à un manque de compréhension des mécanismes responsables du transfert de ces efforts à travers une section cisailée. Les principaux mécanismes responsables de ce transfert sont [ASC 98] : le transfert à travers la zone de compression non-fissurée [KAN 66], l'engrènement du granulat dû au frottement entre les lèvres de la fissure [WAL 81], l'effet de goujon dû à la présence de l'armature longitudinale et de l'enrobage du béton [KRE 66], les contraintes résiduelles de traction à travers les lèvres de la fissure dans la pointe de la fissure [HOR 92].

Dans cette contribution, une identification des différents mécanismes est proposée. La technique de corrélation d'image est utilisée pour suivre la cinématique de la fissure diagonale. En parallèle, des formulations théoriques et des simulations numériques sont utilisées pour aider à l'identification de la contribution de chaque phénomène. La présence d'un effet d'échelle sur le comportement global et local est également examinée.

2. Vue globale des poutres testées

Un programme expérimental a été réalisé où des poutres géométriquement similaires sans armatures transversales ont été testées sous flexion trois-points (Figure 1.)

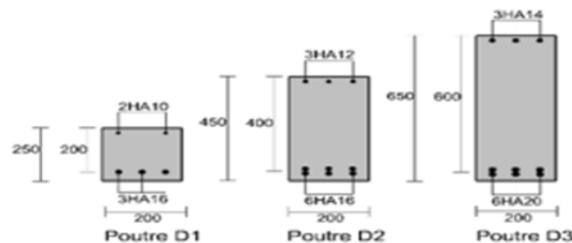


Figure 1. Détails de la géométrie et le ferrailage des poutres testées.

Un béton ordinaire d'une résistance à la traction ($f_t = 3.31 \text{ MPa}$) et à la compression ($f_c = 28.5 \text{ MPa}$) est utilisé. Les armatures utilisées dans ces essais sont des armatures à haute adhérence avec une limite d'élasticité de ($f_y = 500 \text{ MPa}$) et un module de Young de ($E = 200 \text{ GPa}$). Un rapport $a/d=2.5$ a été choisi pour provoquer une rupture par cisaillement avec une fissure diagonale. La technique de corrélation d'image a été utilisée afin de suivre la cinématique de la fissure diagonale de cisaillement.

3. Identification de la contribution de chaque mécanisme

3.1 Engrènement des granulats

Plusieurs approches théoriques ont été proposées dans la littérature pour évaluer la contribution de ce mode de transfert. Dans cette étude le modèle proposé par Walraven [WAL 81] a été retenu pour calculer la valeur de l'effort tranchant transmis par l'engrènement du granulat. Ce modèle permet de lier de manière directe les déplacements relatifs des deux faces de la fissure (ouverture w et glissement Δ) aux contraintes normales (σ_{agg}) et tangentielles (τ_{agg}) par les équations suivantes :

$$\sigma_{agg} = -\frac{f_{cu}}{20} + [1.35w^{-0.63} + (0.191w^{-0.552} - 0.15)f_{cu}]s \quad [1]$$

$$\tau_{agg} = -\frac{f_{cu}}{30} + [1.80w^{-0.80} + (0.234w^{-0.707} - 0.20)f_{cu}]s \quad [2]$$

Les variables cinématiques (w et Δ) sont déterminées par la corrélation d'image. L'effort tranchant d'engrènement du granulat est calculé comme suit :

$$V_{agg} = \int_{\xi=0}^{\xi} b(\tau_{agg}(\xi) \cdot \sin \alpha_{cr}(\xi) - \sigma_{agg}(\xi) \cdot \cos \alpha_{cr}(\xi)) \cdot d\xi \quad [3]$$

3.2 Contraintes résiduelles

Dans la zone de propagation de la fissure, le béton présente une résistance résiduelle à la traction. Cette contrainte contribue au transfert des efforts à travers la fissure. Dans ce travail le modèle Hordijk [HOR 92] a été utilisé. Hordijk a défini la contrainte résiduelle en fonction de l'ouverture de la fissure (w) :

$$\sigma_{res} = f_{ct} \left[\left(1 + \left(b_1 \frac{w}{w_c} \right) e^{-b_2(w/w_c)} - \frac{w}{w_c} (1 + b_1^3) e^{-b_2} \right) \right] \quad [4]$$

Avec : $w_c = 5.14(G_f/f_{ct})$ présente l'ouverture maximale avec $b_1 = 3, b_2 = 6.93$.

La contribution V_{res} est déterminée à l'aide de la formule suivante

$$V_{res} = \int_{\xi=0}^{\xi} b \sigma_{res} \cos \alpha_{\xi} d\xi \quad [5]$$

Les variables cinématiques (ouverture de fissures, directions) sont obtenues par la technique DIC.

3.3 Zone de compression

L'effort de cisaillement peut aussi être transmis par la zone non fissurée du béton (zone de compression). La contribution de cette zone peut être calculée par la théorie classique :

$$V_{cc} = \int_{h_c=0}^{h_c} b \tau_{xy} dh_c \quad [6]$$

Avec : b représente la largeur de la poutre, τ_{xy} contrainte tangentielle, et h_c la hauteur de la zone de compression.

3.4 Effet Goujon (Dowel action)

L'intensité de l'effet de goujon dépend essentiellement du diamètre des armatures longitudinales, de la présence ou non du ferrailage transversal. Il dépend aussi des propriétés géométriques, de la résistance à la traction du béton, de l'enrobage et de la zone d'intersection entre la fissure diagonale et les armatures longitudinales. Afin de quantifier l'effort tranchant transmis par l'effet de goujon, un modèle numérique a été utilisé où les armatures sont suspendues par des éléments barre y ont un comportement non-linéaire (élastique puis adoucissent Figure 2.)

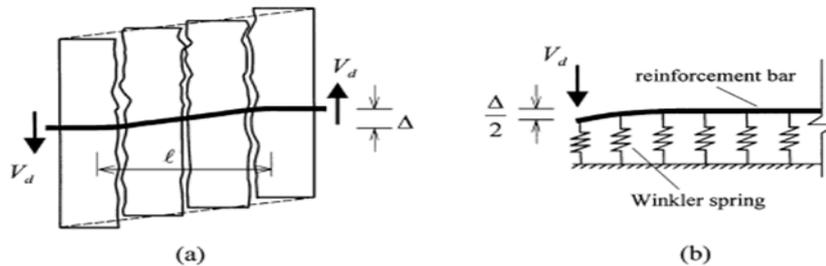


Figure 2. Modélisation de l'effet Goujon.

3.5 Résultats et discussion

Le tableau 1 illustre les contributions de chaque mécanisme. Par application des équations précédentes (3, 5 et 6) et du modèle numérique de la section 3.4. Les valeurs des efforts tranchants de chaque mode de transmission sont évaluées. La contribution totale est comparée à la valeur de l'effort tranchant mesuré expérimentalement V_{exp} à différents états de chargement (100% pic, 95% post-pic, et 87% post-pic). À partir de cette comparaison, les résultats montrent que l'engrènement des granulats présente la contribution la plus

importante. Pour le mode de transmission aux Continents résiduels de traction (20res D) et D3 donnent des valeurs négligeables résultats d'une grande ouverture des fissures critiques. L'augmentation de la taille implique une augmentation du taux de l'effort tranchant transféré par la zone non-fissurée (zone de compression). En revanche, l'effet goujon présente une tendance inverse.

Tableau 1. Comparaison entre l'effort tranchant expérimental et l'effort tranchant de chaque mode de transmission.

Poutres	Chargement	V _{agg} (kN)	V _{res} (kN)	V _{cc} (kN)	V _{dow} (kN)	ΣV _i (kN)	V _{exp} * (kN)
D1	100% Pic	7.99	0.050	0.48	8.10	16.27	61.09
	95% Post-Pic	33.88	0.048	0.45	8.10	42.48	59.08
	87% Post-Pic	51.79	0.011	0.45	8.10	60.31	53.38
D2	100% Pic	21.32	0.065	2.22	7.12	30.72	101.80
	95% Post-Pic	73.87	0.027	1.48	7.12	82.50	96.60
	87% Post-Pic	97.24	0.077	2.02	7.12	106.45	89.70
D3	100% Pic	46.46	0.005	3.25	5.74	55.45	145.63
	95% Post-Pic	115.28	0.00	2.81	5.74	123.83	139.95
	87% Post-Pic	116.64	0.00	2.74	5.74	125.12	131.08

(*) : prise en compte du poids propre des poutres.

4. Conclusions

Dans ce papier, les résultats des essais sur des poutres en béton armé sans armatures transversales soumises au cisaillement ont été analysés pour identifier les mécanismes de transfert de l'effort tranchant. Une combinaison entre la technique de corrélation d'image, des approches théoriques et des résultats de simulation numérique a été utilisée. Il ressort de ces résultats que la contribution du mécanisme résultant de l'engrènement des granulats est dominant pour toutes les poutres. Un effet d'échelle a été observé sur la contribution de tous les phénomènes. Pour la contribution de l'effort d'engrènement des granulats, cet effet d'échelle est très significatif.

Références Bibliographiques

- [ASC 98] ASCE-ACI Committee 445. *Recent approaches to shear design of structural concrete*. *Journal of Structural Engineering*, 124(5), 1998: 1375–1417.
- [HOR 92] Hordijk DA. *Tensile and tensile fatigue behavior of concrete, experiments, modeling and analyses*. *Heron* 37/1. 1992.
- [KAN 66] Kani, G. N. J. 1966. *Basic Facts concerning shear Failure*. *Journal of the American Concrete Institute*, 63(6): 128-147.
- [KER 66] Krefeld W and Thurston Charles W. *Contribution of longitudinal steel to shear resistance of reinforced concrete beams*. *ACI Journal*, 1966, 63(3): 325-344.
- [WAL 81] Walraven JC. *Fundamental analysis of aggregate interlock*. *ASCE Journal Struct Div.* 1981, 107 (11):2245-70.