



Étude de l'adhérence des joncs et des plats composite avec le béton par flexion (*beam test*)

Study of the adhesion of composite strips and rods to concrete by bending (the beam test)

Abdelghani Merdas^{a,*}, Bruno Fiorio^b, Nasr-Eddine Chikh^c

^a Département de génie civil, Université Ferhat Abbas de Sétif, Cité Mabouda 19000, Algeria

^b L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, Rue d'Eragny, 95031 Neuville sur Oise cedex, France

^c LMDC, Université Mentouri Constantine, Route Ain El-Bey, Constantine 25000, Algeria

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 15 janvier 2011

Accepté après révision le 18 octobre 2011

Disponible sur Internet le 8 novembre 2011

Mots-clés :

Solides et structures

NSM

CFRP

Beam test

Adhérence

Glissement

Keywords:

Solids and structures

NSM

CFRP

Beam test

Bond

Slip

RÉSUMÉ

La technique Near Surface Mounted (NSM) a été utilisée ces dernières années pour le renforcement des poutres en béton armé. Elle consiste à l'insertion de plats ou de joncs de polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) dans des gravures réalisées préalablement dans le béton d'enrobage des surfaces tendues et remplies de résines époxydiques pour fixation. Pour caractériser le comportement d'adhérence des plats et des joncs de carbone avec le béton, des essais d'adhérence par flexion ont été effectués. La force d'arrachement dans les plats et dans les joncs, le glissement aux extrémités libres et chargées ont été mesurés. Les influences de la résistance du béton, le type de colle et la longueur ancrée sur le comportement d'adhérence entre ces trois matériaux (béton, résine, composite) ont été analysées.

© 2011 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

ABSTRACT

The Near Surface Mounted (NSM) technique has been used in recent years for the strengthening of reinforced concrete beams. It involves the insertion of strips or rods of polymers reinforced with carbon fiber (CFRP) in the groove made previously in the concrete cover of corresponding surfaces, filled with epoxy adhesive for fixation. In order to characterize the bond behavior of the laminate and rods to concrete, an experimental work of pullout-bending tests was carried out. The pullout force at the laminate and the slip at the free and loaded end were measured. The influences of the concrete strength, the strength of the bond, and bond length on the bonding behavior between the three materials concrete, epoxy adhesive and CFRP were analyzed.

© 2011 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

1. Introduction

Parmi les techniques disponibles depuis plus d'une décennie dans le domaine de la réhabilitation, l'une des plus efficaces pour les désordres structuraux des structures en béton est le renforcement par matériaux composites par collage extérieur (EBR : External Bonded Reinforcement). Le processus de l'introduction de ces matériaux a été accéléré par la mise au point

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : Abdelghani.merdas@yahoo.com (A. Merdas), Bruno.fiorio@u-cergy.fr (B. Fiorio), chikh_ne@yahoo.fr (N.-E. Chikh).

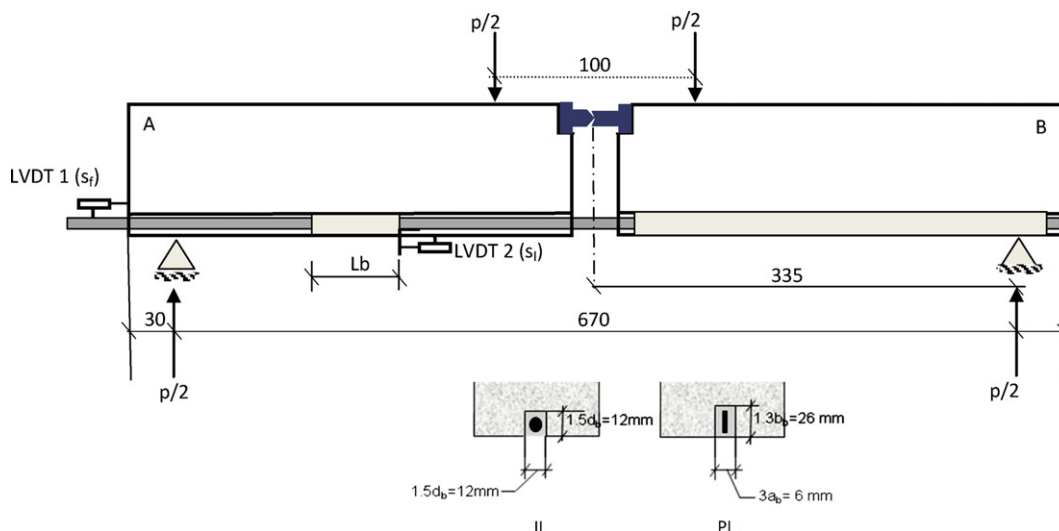


Fig. 1. (a) Géométrie des spécimens et configuration d'essai, pullout-bending test, en (mm); (b) Coupe A-A : dimensions de gravures.

de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement à base d'acier. Ces fibres en carbone, verre ou aramide présentent en effet divers avantages : faible densité, pas de corrosion, bonnes propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de manipulation.

Cependant, l'utilisation du procédé EBR dans le cas des poutres conduit dans certaines situations à une rupture prématurée par décollement aux extrémités du renfort composite, empêchant ainsi le développement de sa pleine capacité en flexion. Ce délaminage aux extrémités est dû à la présence d'une importante contrainte de cisaillement dans la colle. Pour y remédier, une nouvelle technique de renforcement nommée Near Surface Mounted (NSM) a été utilisée ces dernières années pour le cas des poutres fléchies. Elle consiste en l'insertion de renforts de polymères renforcées de fibres de carbone (CFRP) dans des gravures, effectuées préalablement dans le béton d'enrobage des surfaces tendues, remplies de résines époxydiques pour la fixation.

D'après certains résultats expérimentaux antérieurs (Ferreira et al., 2000 [1], Barros et Fortes, 2002 [2], Sena Cruz et al., 2004 [3], Y. Yun et al., 2008 [4]), des hauts niveaux d'efficacité de renforcement avec des poteaux en béton, des poutres et des panneaux en maçonnerie peuvent être atteints. Cette technique ne nécessite pas de préparation de surface et, après la préparation de la gravure, elle ne nécessite que peu du temps d'installation par rapport à la technique de renforcement externe (EBR). Un autre avantage est sa capacité à réduire sensiblement l'effet d'un dommage issu d'un incendie, de désordres mécaniques et du vieillissement.

2. Investigation expérimentale

Pour caractériser le comportement d'adhérence des plats et des joncs de carbone avec le béton, des essais d'adhérence par flexion ont été effectués. Les influences de la résistance du béton, de la longueur d'adhérence et du type de renforts sur le comportement d'adhérence entre ces trois matériaux (béton, résine, composite) ont été considérées.

2.1. Configuration du système d'essai

La disposition d'essai adoptée est similaire à celle proposée par RILEM (RILEM, 1982 [5]) pour évaluer les caractéristiques conventionnelles d'adhérence des barres d'acier. Les dimensions des éprouvettes de béton ont été modifiées afin d'utiliser les moules disponibles. La Fig. 1 montre le dispositif d'essai d'adhérence par flexion (pullout-bending) adopté dans le présent travail. Il est constitué de deux blocs parallélépipédiques en béton (A et B), reliés à leur partie inférieure par le plat ou le jonc en CFRP dont on étudie l'adhérence, et à leur partie supérieure par une rotule en acier. La poutre d'essai est sollicitée en flexion simple (4 points) par deux forces égales et disposées symétriquement par rapport à sa section médiane.

L'action d'une charge verticale sur la poutre provoque la mise en traction du jonc ou du plat de carbone. Etant donné que l'effort de compression dans la section de la poutre à mi-portée est situé au centre de la rotule d'acier, alors le bras de levier du moment interne est constant quelque soit le niveau de chargement. Ceci permet un calcul précis de la force de traction et des contraintes induites dans le jonc ou le plat de carbone.

La zone d'adhérence testée est localisée dans le bloc A, considérant différentes longueurs d'adhérence L_b . Pour assurer un glissement très négligeable du plat ou jonc fixé au bloc B, une longueur d'adhérence de 320 mm a été utilisée. Cela garantit également que la rupture d'adhérence se produit dans le bloc A.

Les différents essais ont été réalisés au niveau du laboratoire L2MGC, université de Cergy-Pontoise en utilisant la machine d'essai Instron (série 5565) avec un chargement piloté en déplacement (0,25 mm/mn). Pour mesurer le glissement, deux



Fig. 2. Renforcement des spécimens d'essai.

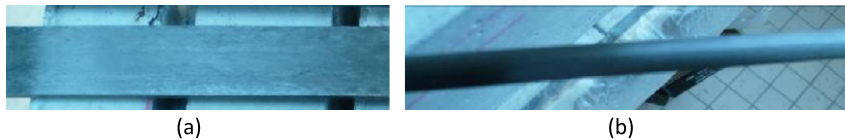


Fig. 3. Renforts utilisés : (a) Plat de carbone lisse $2,5 \times 20$ mm ; (b) Jonc de carbone lisse $\phi = 8$ mm.

capteurs de déplacement (LVDT1 et LVDT2) de 10 mm de course nominale ont été utilisés (voir Fig. 1). LVDT2 mesure le glissement à l'extrémité chargée, S_l , alors que LVDT1 enregistre le glissement à l'extrémité libre, S_f .

Après 28 jours de conservation, des engravures sont effectuées sur les deux blocs de chaque spécimen. Afin d'assurer une surface sèche avant le collage du composite au béton, les engravures réalisées sont nettoyées à l'air comprimé. Lors du collage du CFRP, une procédure de masquage a été adoptée pour éviter de coller l'époxy dans les zones indésirables.

2.2. Programme d'essai

Dans cette investigation expérimentale, le comportement d'adhérence a été étudié en considérant l'influence des paramètres suivants :

- Type de béton : 02 bétons ordinaires (BO30) et (BO50) et un à haute performance (BHP75);
- Longueur ancrée L_b : 15ϕ (120 mm), 10ϕ (80 mm) et 5ϕ (40 mm);
- Type de renfort : plat carbone lisse (PL), jonc carbone lisse (JL).

Le Tableau 1 reprend la dénomination des différentes séries d'essais réalisées.

2.3. Caractéristiques des matériaux

2.3.1. Béton

Les propriétés mécaniques des trois bétons utilisés pour l'essai d'arrachement par flexion (beam test) sont indiquées sur le Tableau 2. Chaque valeur représente au minimum les résultats de trois éprouvettes de même configuration.

Tableau 1
Dénomination des différentes séries d'essais réalisées.

Séries	Matériau	L_b (mm)
BO30, 120	JL, PL	120
BO30, 80	JL, PL	80
BO30, 40	JL, PL	40
BO50, 120	PL	120
BO50, 80	PL	80
BO50, 40	PL	40
BHP75, 120	PL	120
BHP75, 80	PL	80
BHP75, 40	PL	40

Tableau 2
Propriétés mécaniques des trois bétons utilisés pour l'essai d'arrachement par flexion.

Béton	f_{cm} (MPa)	ET*	CV*	f_{ctm} (MPa)	ET	CV	E_c (GPa)	ET	CV
BO30	37,50	1,08	2,88 %	2,97	0,12	4,05 %	33,55	1,07	2,76 %
BO50	57,10	3,65	6,41 %	4,73	0,25	5,49 %	40,56	0,81	1,73 %
BHP75	73,50	0,67	0,88 %	6,01	0,24	4,05 %	47,88	1,21	2,58 %

*ET : Ecart type. CV : Coefficient de variation.

Tableau 3
Les principales propriétés des joncs et plats carbone.

Module de traction	160 GPa
Résistance en traction	3000 MPa
Allongement à rupture	2,0%
Module de compression	120 GPa
Résistance en compression	1800 MPa
Module de cisaillement	3,2 GPa
Résistance en cisaillement	28 MPa

Tableau 4
Les principales propriétés de la colle époxy sous le nom d'EPONAL 371.

Type d'époxy-adhésif	EPONAL 371
Dureté	Dureté shore D
	75
Traction (MPa)	Resistance à la rupture
	Allongement à la rupture
	Module E
	76,8 ± 0,8 4,2 ± 0,2 3400 ± 250

2.3.2. Renforts

Les plats et les joncs en carbone CFRP sont fournis par la société SOFICAR France®. Ce sont des CFRP composés de fibres de carbone unidirectionnelles, liées par une matrice adhésive époxyde. Selon le fournisseur, les principales propriétés sont données en Tableau 3.

2.3.3. Epoxy-adhésif

La colle époxy à faible viscosité utilisée pour coller le stratifié CFRP au béton est fournie par la société BOSTIK® sous le nom de EPONAL 371 (Tableau 4).

3. Résultats expérimentaux

En utilisant les efforts mesurés avec la cellule de charge et le bras de levier interne (l_a), on évalue la force d'arrachement sur le CFRP F_l comme suit :

$$F_l = \frac{P(a_1 - a_2)}{2l_a} \begin{cases} l_a = 74 \text{ mm (jonc)} \\ l_a = 67 \text{ mm (plat)} \end{cases} \quad (1)$$

En fonction des dimensions du renfort (Fig. 4), on obtient :

$$F_{lj} = 1,86P \text{ (jonc)} \quad \text{et} \quad F_{lp} = 2,13P \text{ (plat)}$$

Supposons que les contraintes de cisaillement (τ) sont uniformément réparties sur la longueur d'adhérence, les contraintes moyennes ultimes d'adhérence sont définies par les relations suivantes (de Sena Cruz et de Barros, 2004 [6], De Lorenzis et Teng, 2006 [7], Al-Mahmoud et al., 2010 [8], Sayed Ahmad et al., 2011 [9]) :

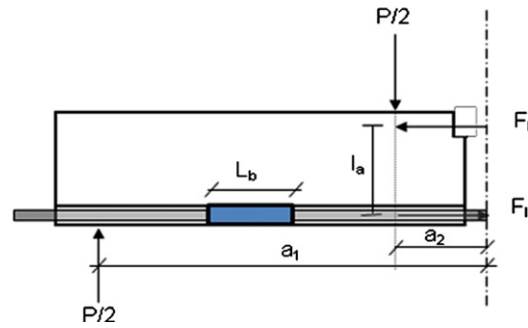


Fig. 4. Le renfort.

Tableau 5
Résultats expérimentaux.

Nom de séries	Matériau	$S_{f\max}$ (mm)	ET	F_{\max} (Kn)	ET	τ_u (MPa)	$S_{l\max}$ (mm)	ET	$\frac{\sigma_{l\max}}{f_{fu}}$
BO30, 120	JL	0,01862	0,53 %	22,54	0,839	7,48	0,5280	14,26 %	18,78
	PL	0,52840	0,04 %	41,72	0,023	8,69	1,1800	5,85 %	34,77
BO30, 80	JL	0,04829	1,15 %	15,491	0,077	7,71	0,2610	3,47 %	12,91
	PL	0,05994	1,94 %	31,852	0,218	9,95	0,5994	9,20 %	26,54
BO30, 40	JL	0,01829	0,84 %	12,643	0,150	12,58	0,4350	6,44 %	10,54
	PL	0,07894	3,64 %	21,137	0,002	13,21	0,3880	0,10 %	17,61
BO50, 120	PL	0,00726	1,79 %	45,028	0,674	9,38	0,9590	24,66 %	37,52
BO50, 80	PL	0,03552	0,78 %	34,478	0,857	10,77	0,5350	29,80 %	28,73
BO50, 40	PL	0,06769	1,41 %	25,494	0,306	15,93	0,4490	20,31 %	21,25
BO75, 120	PL	0,01346	3,91 %	45,952	0,236	9,57	0,5810	1,95 %	38,29
BO75, 80	PL	0,00506	1,49 %	34,147	0,288	10,67	0,5380	8,57 %	28,46
BO75, 40	PL	0,14040	1,95 %	29,117	0,144	18,20	0,5680	15,61 %	24,26

ET : Ecart type.

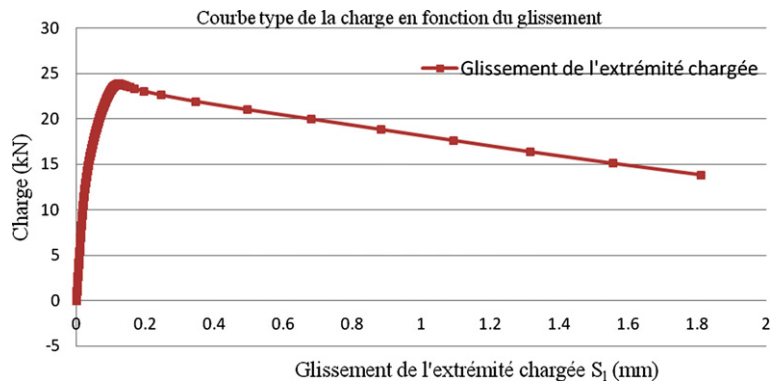


Fig. 5. Courbe d'adhérence typique.

$$\tau_u = \frac{F_{\max}}{\pi \phi L_b} \quad (\text{Jonc}) \quad (2)$$

$$\tau_u = \frac{F_{\max}}{2w_f L_b} \quad (\text{Plat}) \quad (3)$$

F_{\max} étant la force maximale appliquée (N); ϕ et w_f respectivement le diamètre du jonc (mm) et la largeur du plat (mm); L_b étant la longueur ancrée (mm).

L'expression $\frac{\sigma_{l\max}}{f_{fu}}$ représente le rapport entre la contrainte normale du composite correspondant à la force d'arrachement ultime et la résistance ultime de traction du composite; avec $\sigma_{l\max} = \frac{F_{\max}}{A_f}$ (A_f surface du composite).

Le Tableau 5 récapitule les valeurs moyennes maximales des contraintes d'adhérence (τ_u) et des glissements de l'extrémité libre ($S_{f\max}$) et de l'extrémité chargée ($S_{l\max}$). Chaque valeur représente au minimum les résultats de trois éprouvettes de même configuration.

3.1. Courbe d'adhérence typique

La Fig. 5 illustre l'évolution typique de la courbe charge-glissement mesurée à l'extrémité chargée (LVDT2). Les séquences observées sont comme suit :

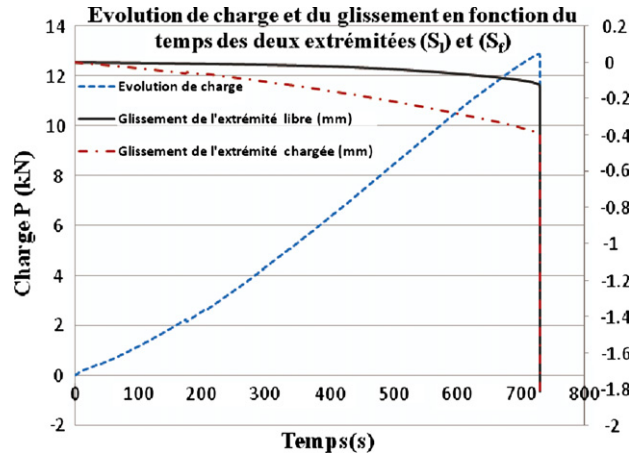


Fig. 6. L'évolution en fonction du temps de la force d'arrachement et des glissements enregistrés aux deux extrémités S_1 et S_f .

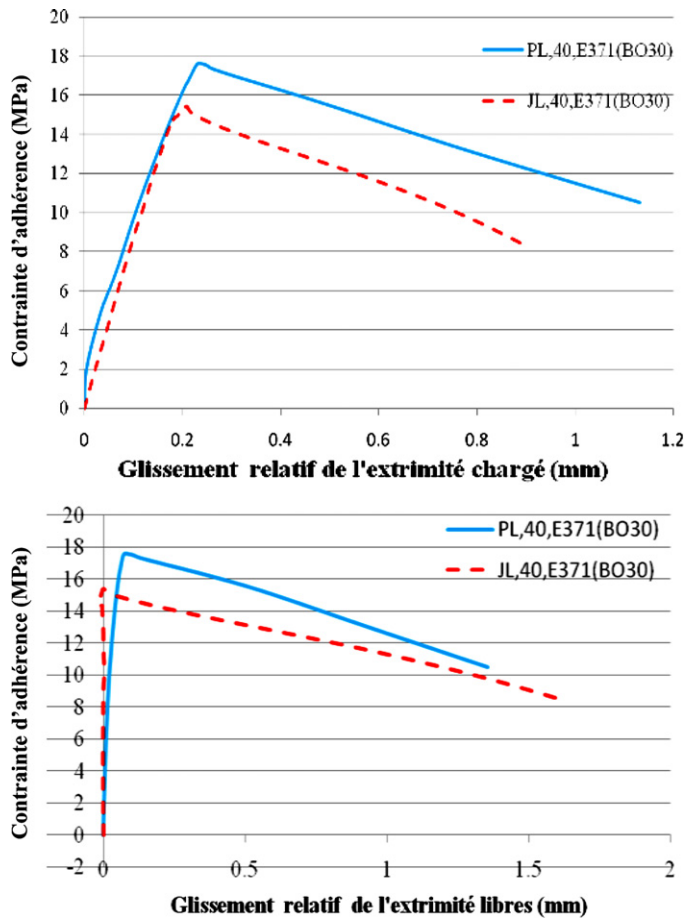


Fig. 7. Performance des renforts sous forme plat par rapport au jonc.

- Pour des faibles niveaux de charge (causant moins de 30% de f_{fu}), il n'y a pas de fissures visibles au niveau de la résine et du béton, un faible glissement entre le composite CFRP collé et le béton environnant est enregistré par le capteur LVDT2, ce qui produit une augmentation linéaire de la contrainte d'adhérence [A-B]. Le point [B] correspond au 1^{er} glissement enregistré à l'extrémité libre.
- Au-delà de 30–50% de la contrainte ultime, le glissement devient de plus en plus non linéaire [B-C], suite à la plastification de la résine époxy qui se traduit par le processus de décollement à l'interface composite-résine et béton-résine.

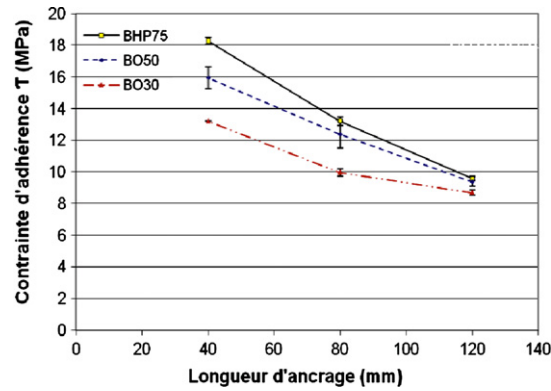


Fig. 8. Evolution de contrainte d'adhérence τ_u en fonction de la longueur ancrée L_b .

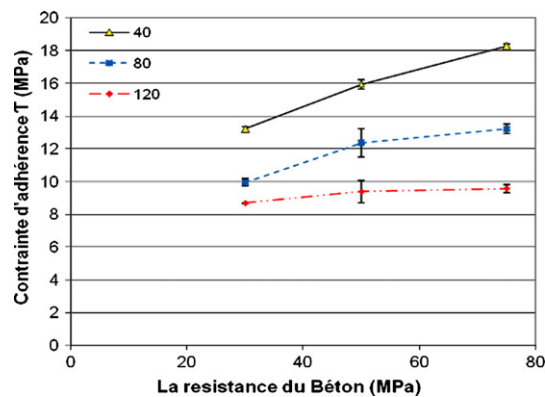


Fig. 9. Evolution de contrainte d'adhérence τ_u en fonction de la résistance du béton.

- Au point C, la contrainte de cisaillement ultime est atteinte, et le glissement se produit de manière brutale dans les deux extrémités S_l et S_f ; la courbe d'adhérence commence à diminuer d'une façon non linéaire jusqu'au point D. La brutalité du glissement est due au fait que l'essai n'est pas directement piloté par le glissement S_l mais par la flèche de l'éprouvette.
- Le point C est considéré comme un séparateur entre 2 tronçons de courbes de pentes différentes, cette transition est due à la dégradation du mécanisme d'adhérence à l'interface composite-résine-béton.

La dernière séquence décrite précédemment est illustrée par la figure suivante retraçant l'évolution en fonction du temps de la force d'arrachement (adhérence) (Fig. 6) et des glissements enregistrés aux deux extrémités S_l et S_f .

3.2. Effet du type de renfort

On constate une meilleure performance des renforts (Fig. 7) sous forme plat par rapport au jonc en termes de force d'arrachement-glissement libre. Bien que présentant des sections similaires, les renforts plats offrent une surface de contact plus grande permettant d'atteindre des taux de contrainte d'adhérence plus élevés avant la rupture.

3.3. Effet de la longueur d'ancrage

La Fig. 8, suivante montre l'évolution de contrainte d'adhérence τ_u en fonction de la longueur ancrée L_b pour les plats. On constate que la contrainte moyenne d'adhérence diminue avec l'augmentation de la longueur d'ancrage L_b , mais le taux de diminution est plus important dans l'intervalle 5ϕ (40 mm) et 10ϕ (50 mm). Par ailleurs, en se référant aux résultats contenus dans le Tableau 5, on remarque que le rapport (σ_{lmax}/f_{fu}) croit toujours avec l'augmentation de la longueur d'ancrage L_b .

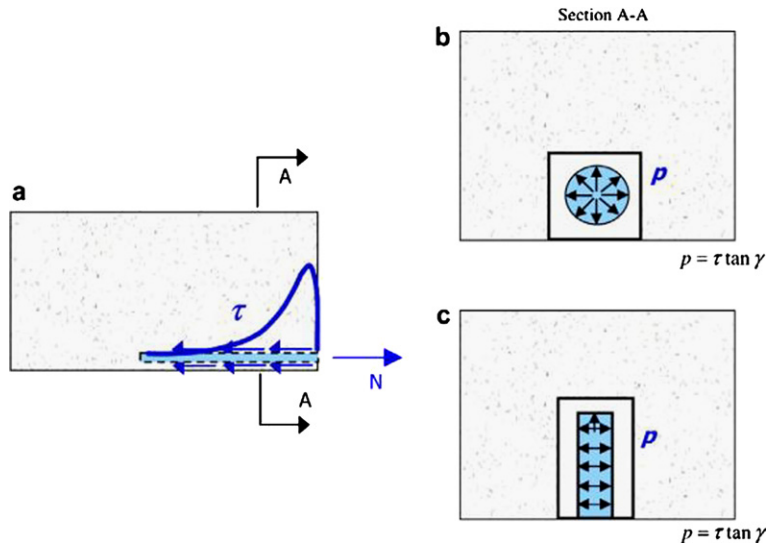


Fig. 10. Schématisation du comportement de l'adhérence de NSM FRP : (a) contrainte d'adhérence dans le plan longitudinal ; (b) contrainte normale dans le plan transversal générée par le jonc de carbone ; (c) contrainte normale dans le plan transversal générée par le plat carbone (L. De Lorenzis et al. [10]).

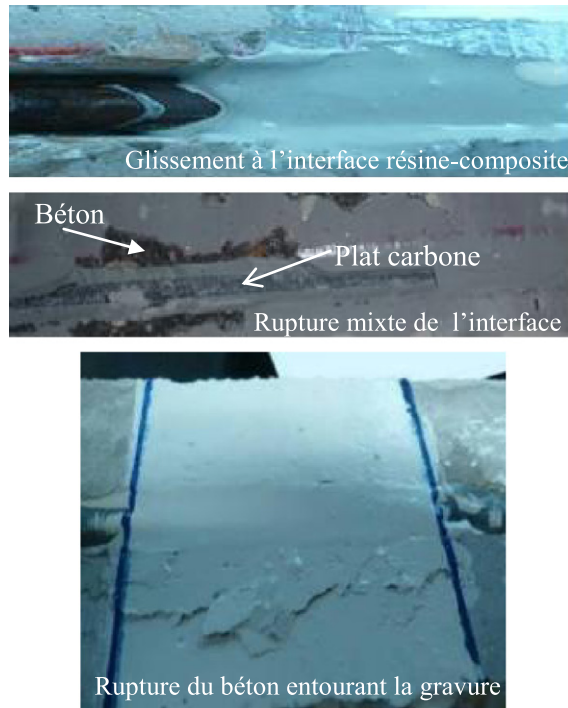


Fig. 11. Différents modes de rupture.

3.4. Effet de la résistance du béton

L'influence de la résistance du béton sur la contrainte d'adhérence τ_u développée est plus prononcée pour les longueurs d'ancrages réduites (5Φ) (Fig. 9). A partir de $L_b = 15\Phi$, l'optimum semble atteint et l'effet de la résistance du béton devient insignifiant.

3.5. Modes de rupture

Le chargement progressif de la poutre d'essai provoque un effort d'arrachement dans la barre FRP qui se transmet dans l'interface par frottement et par l'arc-boutement des bielles de la résine et du béton. Ceci se traduit par une déformation

dans la colle suivie d'une propagation de microfissures transversales de l'extrémité chargée vers l'extrémité libre. Selon les résultats expérimentaux antérieurs (Blaschko [11], Teng et al. [12], De Lorenzis et Nanni [13]), pour tous les types d'essai d'adhérence (beam pull-out, direct pull-out...) la contrainte d'adhérence moyenne diminue avec l'augmentation de la longueur ancrée étant donnée la distribution non uniforme des contraintes d'adhérence le long du renfort composite (voir Fig. 10).

Différents modes de rupture sont observés : rupture de l'interface (résine-composite); rupture mixte de l'interface (résine-composite et résine-béton); rupture béton entourant la gravure (voir Fig. 11).

La rupture de l'interface résine composite est observée dans les éprouvettes dont la longueur ancrée du composite est de 40 mm pour les trois types de bétons utilisés et de 80 mm pour le béton BHP75. Aucune fissure n'est visible au niveau du béton.

Concernant la rupture mixte de l'interface (résine-composite et résine-béton) : elle est constatée dans les poutres où la longueur ancrée du composite est de 80 mm pour les bétons BO30 et BO50, et de 120 mm pour les bétons BO50 et BHP75.

Le mode de rupture béton entourant la gravure se produit seulement dans les éprouvettes du béton BO30 pour un ancrage du FRP de 120 mm.

4. Conclusions

Des essais d'adhérence par flexion ont été effectués pour caractériser le comportement d'adhérence des plats et des joncs de carbone associés au béton. Les paramètres influents considérés sont la résistance du béton $f_{ck} = 30, 50, \text{ et } 75 \text{ MPa}$, la longueur d'adhérence $L_b = 40, 80 \text{ et } 120 \text{ mm}$ et le type de renforts. Les principales conclusions sont :

- Les renforts sous forme de plat présentent une meilleure performance en termes de force d'arrachement-glisement libre, du fait d'une plus grande surface de contact par rapport à celle des joncs.
- La contrainte moyenne d'adhérence diminue avec l'augmentation de la longueur d'ancrage L_b , surtout pour l'intervalle $5\phi - 10\phi$.
- La force d'arrachement augmente avec l'augmentation de la résistance du béton tout en remarquant qu'après une certaine résistance (B50), cette augmentation est modérée.
- L'influence de la résistance du béton sur la contrainte d'adhérence τ_u semble être importante seulement en présence de longueurs d'ancrages réduites (5ϕ).
- Différents modes de rupture ont été constatés, leur occurrence est fonction des paramètres considérés, notamment de la longueur ancrée.

Références

- [1] Ferreira, et al., Reinforced concrete columns strengthened with CFRP laminates, MS thesis, Civil Engineering Department, University of Minho, Portugal, 2000.
- [2] J.A.O. Barros, A.S. Fortes, Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits, in: Proceedings of 5^o Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Madrid, Spain, 2002, 16 pp.
- [3] J.M. Sena Cruz, J.A.O. Barros, R. Gettu, Bond behavior of near-surface mounted CFRP laminate strips under monotonic and cyclic loading, Report No. 04 DEC/E-04, Department of Civil Engineering, University of Minho, Guimarães, 2004, 55 pp.
- [4] Y. Yun, Y.-F. Wu, W.C. Tang, Performance of FRP Bonding Systems Under Fatigue Loading, Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong, May 2008.
- [5] RILEM, Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test, TC9-RC, 1982.
- [6] José Manuel de Sena Cruz, Joaquim Atonio Olivera de Barros, Bond between near-surface mounted carbon-fiber reinforced polymer laminate strips and concrete, Journal of Composites for Construction (November/December 2004).
- [7] L. De Lorenzis, J.G. Teng, Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures, Department of Innovation Engineering, University of Lecce, via per Monteroni, 73100 Lecce, Italy, October 2006.
- [8] Firas Al-Mahmoud, Arnaud Castel, Raoul François, Christian Tourneur, RC beams strengthened with NSM CFRP rods and modeling of peeling-off failure, Composite Structures 92 (8) (July 2010) 1920–1930.
- [9] Firas Sayed Ahmad, Gilles Foret, Robert Le Roy, Bond between carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPC): Experimental study, Construction and Building Materials 25 (2) (February 2011) 479–485.
- [10] L. De Lorenzis, J.G. Teng, Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures, Composites Part B: Engineering 38 (2) (March 2007) 119–143.
- [11] M. Blaschko, Bond behaviour of CFRP strips glued into slits, in: Proceedings FRPRCS-6, World Scientific, Singapore, 2003, pp. 205–214.
- [12] J.G. Teng, L. De Lorenzis, B. Wang, L. Rong, T.N. Wong, L. Lam, Debonding failures of RC beams strengthened with near-surface mounted CFRP strips, J. Compos. Constr. ASCE 10 (2) (2006) 92–105.
- [13] L. De Lorenzis, A. Nanni, Bond between NSM fiber-reinforced polymer rods and concrete in structural strengthening, ACI Struct. J. 99 (2) (2002) 123–312.