

9. Renforcement sismique de colonnes et de cadres à l'aide de FRP

Colonnes en béton armé

Techniques de renforcement pour des colonnes en béton armé

Beaucoup d'anciennes colonnes en béton armé montrent une résistance sismique trop faible:

La ductilité en flexion ou la résistance en flexion de la colonne est insuffisante.

Les problèmes apparaissent d'une part, parce que les rabouts de l'armature interne dans les secteurs de raccordement critiques sont trop courts et d'autre part, parce que la longueur d'ancrage de l'armature interne des éléments de raccordement a été choisie trop courte. Des longueurs de recouvrement typiques dans la zone de compression avec un ordre de grandeur du vingtuple du diamètre de l'armature ne peuvent pas transférer les forces plastiques totales des armatures de béton. Lors d'un séisme, Les armatures de béton non suffisamment ancrées montrent un comportement défavorable. Lors de sollicitations en flexion cycliques et d'éventuels efforts de traction supplémentaires, de tels éléments ont tendance à la défaillance anticipée. Des chevauchements insuffisants des aciers de raccordement sont particulièrement critiques dans le cas de raccordements de fondations. Une articulation plastique indésirable se forme ainsi lors d'une sollicitation sismique. De tels détails de construction insuffisants sont malheureusement fréquemment rencontrés dans des bâtiments et ponts anciens. La capacité de recette de forces transversales des éléments d'appui est également souvent insuffisante.

L'enrobage de tels éléments d'appui insuffisants s'offre comme renforcement ultérieur. La résistance sismique d'un élément de compression enrobé dans le secteur de raccordement est augmentée grâce aux tensions radiales. On dispose de différentes méthodes de confinement (enrobage) ultérieur. Trois différents confinements ont été comparés dans le cadre d'expériences à grande échelle:

- Enrobage en acier
- Enrobage en béton
- Confinement au moyen d'un FRP

Les enrobages en acier et en béton traditionnels sont connus et ne seront pas décrits.

Confinement FRP de colonnes en béton armé

Durant les dernières années, l'effet du confinement FRP de colonnes en béton armé a été vérifié par plusieurs études scientifiques. Les bases de dimensionnement et de planification de confinement FRP sont disponibles (p. ex. Seismic conception and retrofit of bridges de M.J.N. Priestley, F. Seibel, G.M. Calvi).

Un confinement FRP de colonnes rectangulaires est plus problématique qu'un confinement de colonnes rondes. Les tensions radiales se concentrent sur les coins. Afin d'appliquer un effort défini de confinement (tension radiale), S&P a développé un système de précontrainte. Grâce à la précontrainte, un état de tension tridimensionnel défini est produit. Dans le cas de confinements FRP non précontraints, l'état de tension tridimensionnel ne s'ajuste qu'au cours de l'allongement tranchant de l'élément. Grâce à la précontrainte,

le degré de renforcement des confinements FRP peut être augmenté. Une tension radiale suffisamment grande peut ainsi être aussi mobilisée pour des colonnes rectangulaires avec cette nouvelle méthode. Contrairement à des enrobages en acier, les colonnes confinées FRP ne souffrent pas de pertes d'effet. D'autres expériences montraient qu'un confinement FRP peut très efficacement empêcher un possible épuisement en cisaillement. Des confinements FRP n'augmentent la résistance à la flexion involontaire qu'à un minimum. Le dimensionnement d'éléments d'appui confinés FRP est effectué en principe comme le dimensionnement d'étriers de cisaillement en acier. L'allongement limite pour le dimensionnement des FRP est fixé à environ 50% de l'allongement de rupture des fibres. La grande réserve de sécurité garantit que le mécanisme de cisaillement de la colonne en béton armé ne soit pas affaibli par des allongements de béton excessifs.

Les confinements FRP font leurs preuves pour les deux raisons suivantes:

- Le confinement FRP provoque du côté de tension de l'articulation plastique de la colonne que les chevauchements d'armature respectivement l'ancrage de l'armature verticale interne soient améliorés, et que la force plastique des aciers d'armature soit conséquemment pleinement utilisée.
- Le confinement FRP empêche l'infléchissement de l'armature longitudinale sur le côté compression de l'articulation plastique ainsi que l'écaillage de la couverture de béton.

Confinement visant l'augmentation de la ductilité de flexion

L'amélioration de la capacité de ductilité est au premier plan. Des colonnes avec une armature de cisaillement interne insuffisante ne peuvent pas subir de grandes rotations inélastiques dans l'articulation plastique. Des confinements FRP se prêtent à l'augmentation de la capacité de ductilité de tels éléments d'appui. Des essais avec des colonnes rondes confinées FRP montraient clairement que la ductilité peut être augmentée plus efficacement en comparaison à des enrobages traditionnels en acier. La raison se trouve dans le comportement élastique linéaire des FRP des confinements. Des déformations en direction tangentielle peuvent apparaître dans le cas d'enrobages en acier sous sollicitation sismique. Après une première sollicitation, des déformations de reste subsistent. L'efficacité de l'enrobage en acier est ainsi diminuée pour un tremblement de terre suivant. Des allongements tangentiels plus élevés sont ainsi nécessaires avec chaque nouveau cycle de chargement. Suite au comportement élastique linéaire des FRP, les endommagements ne se cumulent pas. Des cycles suivants conduisent à des déplacements de même grandeur. Les approches de dimensionnement dérivées des programmes expérimentaux pour confinements FRP prennent en considération cet effet amélioré par rapport à des enrobages en acier.

Colonnes rondes

Le tassement maximale du béton ε_{cu} de la colonne peut être calculé comme suit:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5\rho_s f_{FRP} \varepsilon_{FRP}}{f'_{cc}} \quad [\text{M.J.N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi}]$$

Dans ce cas le rapport de volume des confinements ρ_s est défini pour des colonnes rondes comme suit:

$$\rho_s = \frac{4t_{FRP}}{D}$$

f_{FRP} et ε_{FRP} représentent la contrainte et l'allongement maximal du confinement FRP.

La résistance du béton à la compression f'_{cc} pour une colonne en béton armé confinée est:

$$f'_{cc} = f'_c \left[2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_c}} - \frac{2f'_l}{f'_c} - 1.254 \right] \quad [\text{M.J.N. Priestley, F. Seibel, G.M. Calvi}]$$

f'_c représente la capacité du béton en compression caractéristique dans la formule et f'_l la contrainte latérale de confinement effective (contrainte de la section de fibres théorique).

L'épaisseur nécessaire t_{FRP} (épaisseur théorique du confinement FRP) peut être dérivée des expressions pour ϵ_{cu} et ρ_s :

$$t_{FRP} = \frac{0.1(\epsilon_{cu} - 0.004)Df'_{cc}}{f_{FRP}\epsilon_{FRP}}$$

Colonnes rectangulaires

Des essais pull-push à des colonnes rectangulaires confinées avec des GFRP ont également montré une augmentation de la ductilité. Fig. 12 montre une colonne rectangulaire confinée avec des GFRP après l'épuisement. Une ductilité de déplacement (rupture) de $\mu_{\Delta} = 8$ a été atteinte lors de l'essai. Ceci correspond à un angle de déplacement d'environ 4%.

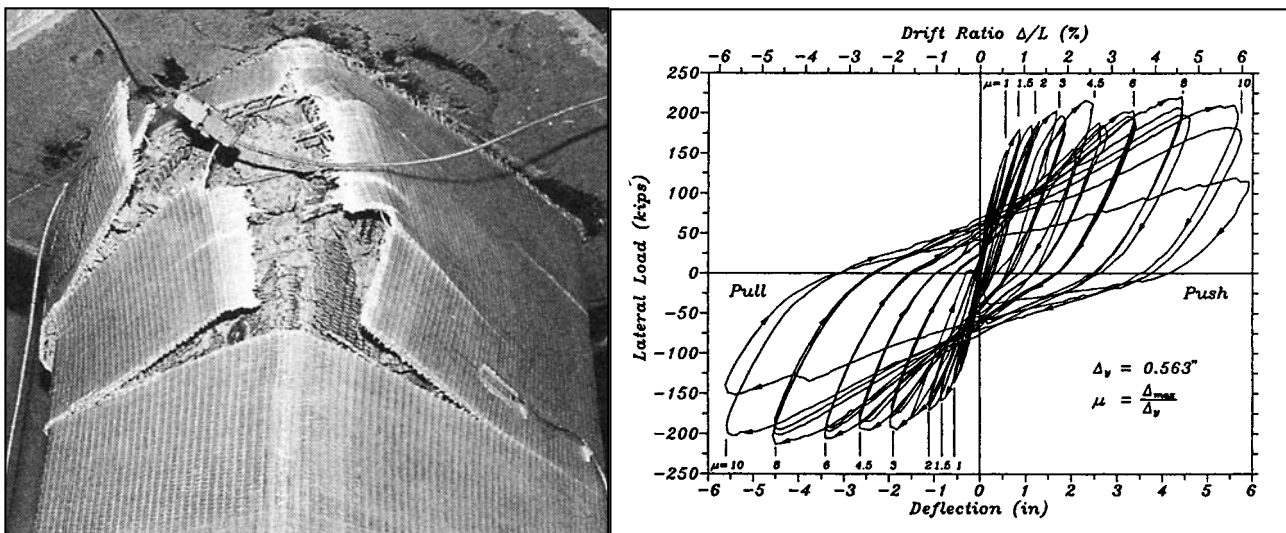


Image 35: Colonne rectangulaire avec confinement GFRP
M.J.N Priestley, F Seible et M. Calvi, "Seismic conceptions and retrofit of bridges"

On a mis en évidence à l'occasion de plusieurs séries d'essais qu'une augmentation de la ductilité d'environ 50% est atteinte avec des sections rectangulaires par rapport à des colonnes rondes de section transversale identique.

Le tassement maximal du béton ε_{cu} de la colonne peut être calculé comme suit:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.25\rho_s f_{FRP} \varepsilon_{FRP}}{f'_{cc}} \quad [M.J.N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi]$$

Le rapport de volume des confinements est considéré pour des colonnes rectangulaires comme suit:

$$\rho_s = 2t_{FRP} \left[\frac{b+h}{bh} \right]$$

b et h signifient les dimensions de la section.

L'épaisseur théorique nécessaire du confinement FRP peut de nouveau être dérivée des expressions pour ε_{cu} et ρ_s :

$$t_{FRP} = \frac{0.4(\varepsilon_{cu} - 0.004)f'_{cc}}{f_{FRP}\varepsilon_{FRP}} \left[\frac{bh}{b+h} \right]$$

Zone de confinement

Les zones de confinement nécessaire (l) sont indiquées dans le tableau 5. On différencie entre colonnes encastrees unilatéralement ou de double faces. L_a et L_b représentent les distances de l'appui jusqu'au moment nul.

Encastrement de la colonne	Diamètre de la colonne	Longueur de la colonne	Zone
Unilatéral	D	L	$D \leq l \leq 0.25 L$
Double face: M_a	D	L_a	$D \leq l \leq 0.25 L_a$
M_b		L_b	$D \leq l \leq 0.25 L_b$

Tableau 5: Zone de confinement

Confinement visant l'amélioration des raboucs de renforcement

Des micro-fissures naissent dans le béton suite à l'introduction d'efforts venant de l'armature. De telles fissures réduisent l'effet de serrage et ainsi l'intégration de l'armature en acier. L'effet de serrage peut être amélioré ultérieurement au moyen d'un confinement FRP (spécialement avec un système de précontrainte FRP).

Le dimensionnement est effectué au moyen de la formule suivante:

$$\rho_s = 2 \left[\frac{A_b f_s / \mu p l_s - f_a}{0.0015 E_{FRP}} \right]$$

- f_a : contrainte de confinement active
- A_b : Aire des armatures en longueur
- f_s : Contrainte des armatures en longueur
- μ : Coefficient de frottement (1.4)
- p : Zone d'influence de la surface fissurée dans la zone de rabout
- l_s : Longueur de rabout

La S&P A-Sheet précontrainte se convient spécialement pour ce domaine d'application. Des tissus avec un module d'élasticité bas, par exemple en fibres G sont moins appropriés pour cette application.

Zone de confinement

Si le renforcement du rabout est la seule raison du confinement FRP, il ne fait pas de sens d'appliquer le confinement au-dessus du rabout. Cette situation n'est nécessaire que lorsque le rabout ne se trouve pas dans le secteur d'une articulation plastique.

Confinement comme renforcement de cisaillement externe

Les confinements FRP sont très efficaces pour améliorer la charge admissible de cisaillement d'un élément comme des enrobages en acier. Puisque les FRP se comportent élastiques linéaires jusqu'à leur rupture, la valeur de dimensionnement pour renforcement externe en acier est légèrement modifiée. Il s'agit de respecter un allongement maximal des FRP de 0.2-0.3% pour le dimensionnement. On utilise idéalement la S&P C-Sheet 640 à haut module avec un allongement de rupture de 0.4% pour cette application.

Le renforcement de cisaillement supplémentaire peut être calculé comme suit:

Colonnes circulaires

$$V_{FRP} = \frac{\pi}{2} t_{FRP} f_{FRP} D \cot \theta \quad [M.J.N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi]$$

D: Diamètre de la colonne

θ : 35°

Colonnes rectangulaires

$$V_{FRP} = 2 t_{FRP} f_{FRP} h \cot \theta$$

h: Dimension de la colonne parallèlement à la sollicitation en cisaillement

θ : 35°

Zone de confinement

Dans les secteurs des articulations plastiques avec capacité de cisaillement réduite, le confinement FRP devrait être appliqué sur une hauteur 2D pour colonnes rondes et 2h pour des colonnes rectangulaires.

Rigidité en flexion de la colonne

La rigidité en flexion de colonnes est augmentée par confinement respectivement enrobage supplémentaire. De cette manière, de plus grandes forces sont serrées. L'attention spéciale revient de droit à ce point. L'augmentation de la rigidité en flexion dépend de la technique de renforcement choisie, des paramètres de matériau ainsi que de la géométrie de la colonne. Le tableau 6 montre l'augmentation de la rigidité en flexion d'une colonne en dépendance du confinement choisi.

Colonne	Type de renforcement	Acier	Béton	FRP
ronde	articulation plastique	10 - 20	20 - 50	0 - 5
	cisaillement	20 - 40	25 - 75	0 - 5
rectangulaire	articulation plastique	20 - 40	20 - 50	0 - 10
	cisaillement	40 - 70	25 - 75	0 - 5

Tableau 6: Augmentation de rigidité (%)

L'augmentation de la rigidité en flexion de la colonne est avec des confinements FRP supplémentaires de façon décisive plus faible qu'avec des enrobages de béton ou en acier.

Comparaison des techniques de renforcement

Les différentes techniques de renforcement sont comparées dans le tableau 7. Les résultats montrent que les confinements FRP se placent bien par rapport aux méthodes classiques. L'avantage principal des confinements FRP est que malgré une amélioration élevée de la ductilité, l'augmentation de la rigidité reste faible. Conséquemment, aucune force supplémentaire n'est serrée par l'élément renforcé. Une défaillance précoce du système-cadre est ainsi exclue.

Un état de contrainte tridimensionnel défini est atteint avec les bandes S&P précontraintes. Une augmentation de la résistance à la compression du béton suite à la précontrainte est possible, sans qu'un grand tassement axial de l'élément en compression n'ait lieu. Dans ce cas, grâce à la résistance à la compression du béton accrue, des efforts plus élevés peuvent être introduits.

Suite à l'application rapide et simple, les interruptions industrielles sont largement réduites lors d'un confinement FRP. En plus, le renforcement FRP à couche plus faible nécessite moins de travaux d'adaptation pour des éléments riverains.

Technique	Augmentation du poids	Réduction de géométrie	Contraintes radiales	Augmentation de rigidité	Application	Corrosion
Enrobage en acier	-	-	-	-	--	--
Enrobage en béton	-	-	-	--	--	0
Confinement FRP	+	+	++*	+	+	++

Tableau 7: Comparaison des techniques de renforcement * précontrainte sans problèmes

Cadres en béton armé

Afin que le staticien soit en mesure de dimensionner correctement des constructions sollicitées à des séismes, il devrait connaître les types de dommages habituels qui peuvent naître lors de ces sollicitations de séisme. Les types de dommages de cadres de béton armé les plus fréquents sont décrits par le suivant.

“Short Column”

Des fissures de cisaillement nées très tôt dans le béton peuvent être attribuées à une capacité de recette de force transversale insuffisante dans le secteur de raccordement colonne/poutre respectivement colonne/dalle. Cette fissuration permet l'ouverture des étriers d'armature de cisaillement interne et conduit à l'épuisement de l'élément d'appui. Cet épuisement peut être empêché au moyen d'un renforcement de force transversale avec un FRP dans le secteur de raccordement des colonnes. Puisqu'il faut de plus surveiller la ductilité générale du bâtiment, le tissu S&P G-Sheet 90/10 se prête spécialement comme confinement FRP. Les confinements FRP à l'aide de fibre C ne conviennent moins pour cette application suite au module d'élasticité élevé. Sous ces circonstances, les critères relatifs à la ductilité de bâtiment seraient moins satisfaits.



Image 36: “Short Column”

Nœuds formés faiblement



Image 37: Nœud formé faiblement

D'autres types d'épuisement sont des nœuds trop faiblement formés ou une charge admissible manquante suite à une section transversale affaiblie. Un type d'épuisement apparaissant souvent supplémentaires est la longueur de recouvrement insuffisante de l'armature verticale interne de l'élément d'appui au niveau du raccordement de la colonne. Un renforcement ultérieur peut avoir lieu au moyen de lamelles CFK entaillées verticalement ou collées superficiellement confinées dans secteur avec la G-Sheet S&P 90/10 dans le secteur du nœud.

Articulations plastiques



Image 38: Epuisement de cisaillement dans le cas d'une articulation plastique

Un épuisement de poutres en flexion peut avoir lieu dans le cas d'articulations plastiques suite à une armature de cisaillement insuffisante, comme représenté dans la figure. Un confinement FRP à haut module C-Sheet S&P 640 est utilisé comme renforcement.

Un autre type d'épuisement est la capacité de flexion de la poutre insuffisante au milieu de la travée respectivement au côté des appuis. Dans ce cas, les lamelles CFK S&P entaillées ou collées superficiellement se prêtent comme mesure de renforcement.

Méthodologie du renforcement FRP

On a mis en évidence dans de nombreux travaux de recherche qu'une amélioration de la résistance portante et ainsi une augmentation de la ductilité résulte lors d'un confinement ultérieur du béton armé dans les zones agissant comme articulation plastique. Au moyen de tests "Pull-Push", l'efficacité de la G-Sheet S&P visant l'augmentation de la ductilité a été prouvée. Les essais ont en outre montré qu'une plus grande augmentation de ductilité peut être atteinte avec des GFRP qu'avec un confinement à fibre de carbone. Cela est dû à l'allongement de rupture plus élevé de la fibre de verre. Des systèmes augmentant soit les efforts de confinement dans les zones d'articulations plastiques ou sur la longueur totale sont utilisés pour le renforcement sismique ultérieur de colonnes.

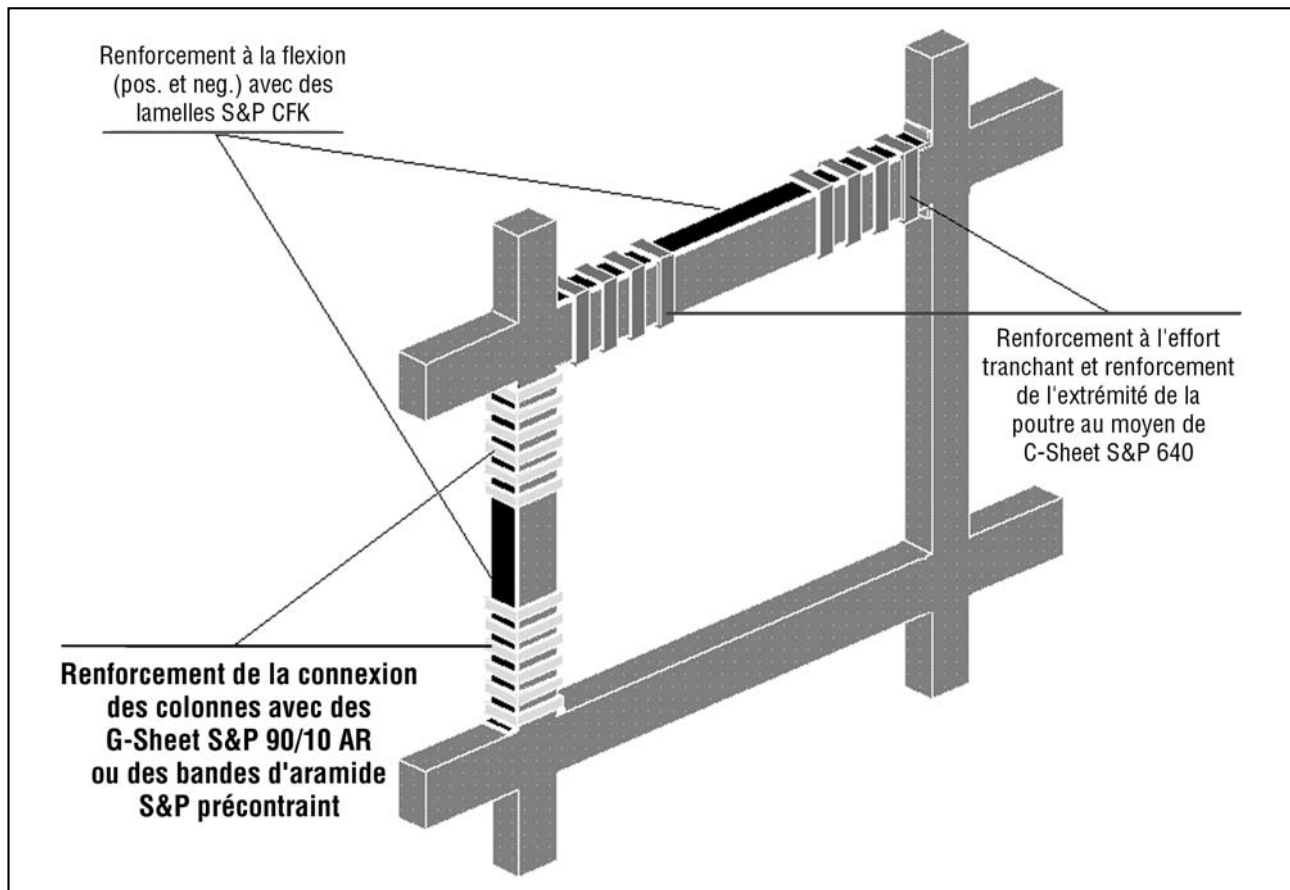


Image 39: Renforcement de cadre en béton armé

Des expériences à grande échelle ont montré que des confinements FRP sont techniquement plus favorables et en outre plus économiques en comparaison à des renforcements au moyen d'enrobages en acier. Grâce à un confinement FRP de la colonne respectivement du raccord de colonne, l'épuisement du béton n'a lieu qu'après de plus grands allongements. L'allongement transversal empêché par le confinement FRP sert en plus de renforcement contre l'infléchissement de l'armature longitudinale.

Avant le confinement FRP, les fissures dans les éléments portants devraient être injectées de façon à transmettre les efforts à l'aide de résines époxy.

10. Protection contre les explosions et les chocs avec des systèmes FRP S&P

Protection contre les explosions

Souvent, il s'agit de réparer des endommagements à des bâtiments nés par des influences martiales ainsi que par des explosions. Le renforcement contre un effet d'explosion est aussi une exigence pour l'industrie chimique. Tandis que des explosions industrielles sont évaluables et peuvent en conséquence être modelées, l'estimation de l'effet résultant d'une bombe est impossible. Les bâtiments industriels traditionnels sont souvent trop peu armés. Des structures portantes en maçonnerie avec un faible armement sont également trouvées dans la pratique. De telles structures portantes ont une résistance minimale contre des effets d'explosion. Des méthodes de renforcement traditionnelles en acier sont coûteuses et pénibles. Les FRP s'offrent comme solution économique en temps et en coûts.