



EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH
ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE

CERN - ST Division

CERN-ST-2000-050

February, 2000

TECHNIQUES ET SYSTEMES DE RENFORT DES STRUCTURES EN BETON

J. Miranda Vizueté

Résumé

Bien qu'appelé « pierre artificielle », le béton est un matériau vivant qui se modifie tout au long de sa vie utile. Il change car la structure dont il fait partie subit elle-même des changements. Ces changements proviennent soit de modifications ou de rénovations, soit d'une altération de sa capacité de support par un accroissement des charges. Dans la plupart des cas, ils nécessitent un renfort. Le renforcement d'une structure en béton consiste à améliorer les caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent, de manière à ce qu'elle offre une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistances ultimes. Ce document présente les méthodes les plus utilisées dans le domaine de renfort des structures dont l'incorporation des profils métalliques, l'augmentation de section structurelle et celle plus récente du renforcement à base d'adjonction de matériaux composites extérieurs.

1 INTRODUCTION

Le projet d'une structure consiste à définir avec précision chacun des éléments qui la composent ainsi que la manière de la construire, le tout en accord avec son usage ou sa fonction finale. Le schéma de sa conception et, plus tard, de sa construction est toujours le même :

- résoudre un schéma structurel,
- comparer les charges majorées et les résistances minorées,
- dimensionner les éléments résistants,
- rédiger le projet,
- exécuter la structure,
- surveiller sa vie en service,
- assurer l'entretien approprié.

Si une structure est bien conçue et correctement exécutée, elle n'aura besoin d'aucun renforcement au moment de sa mise en service.

Cependant, suite à des erreurs dans le projet ou dans l'exécution, ou suite à diverses circonstances lors de la vie en service, des renforts peuvent s'avérer nécessaires. Ce changement de circonstances implique que la nouvelle structure, issue du « projet actualisé », soit plus exigeante que l'antérieure.

Toutes les causes de renforcement peuvent être considérées comme une modification des données initiales du projet, par exemple, le problème du vieillissement qui est traité comme une structure nouvelle avec des matériaux de moindre résistance.

2 LA NECESSITE D'UN RENFORT

Les causes qui conduisent à un renfort structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas devant être considéré comme un cas particulier. Les plus fréquentes sont :

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure :
 - changement d'usage de la structure (ex : bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial),
 - augmentation du niveau d'activité dans la structure (ex : anciens ponts soumis au trafic actuel),
 - installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.
- Défauts dans le projet ou dans l'exécution :
 - armature insuffisante ou mal placée,
 - mauvais matériaux,
 - dimensions insuffisantes des éléments structurels.
- Rénovation des structures anciennes :
 - prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres),
 - connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou période,
 - vieillissement des matériaux avec perte des caractéristiques initiales.

- Changement de la forme de la structure :
 - suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul,
 - ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.
- Dégâts dans la structure :
 - corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton,
 - impacts contre la structure,
 - incendies.
- Nécessité d'améliorer les conditions en service :
 - diminuer les déformations et flèches,
 - réduire la contrainte des armatures,
 - diminuer l'ouverture des fissures.

3 METHODES DE RENFORT

Parmi les nombreuses procédures, les plus courantes sont :

- Incorporation de profils en acier : il s'agit de construire une structure parallèle à celle déjà existante qui supporte les charges. Ce type de structure demande beaucoup d'espace, il est seulement viable pour de grands renforcements.
- Collage d'éléments préfabriqués : cette méthode nécessite des ouvrages spéciaux associés.
- Addition d'armatures en acier sans augmentation de la section en béton : cette technique est normalement employée pour le remplacement d'une ancienne armature, en cas de corrosion.
- Augmentation de la section en béton avec ou sans addition d'armature en acier. Le béton peut être coulé ou projeté.
- Adjonction de platines en acier. L'acier collé au béton augmente la section structurelle résistante. On l'utilise dans les poutres, dalles, murs, piliers.
- Adjonction de lamelles ou bandes de matériaux composites. Le concept est le même que dans le cas précédent, à la différence que l'élément résistant incorporé est fait de lamelles de matériaux composites, habituellement, de résine époxy et de fibres de carbone.

Dans les deux premiers cas, une solution spécifique devra être étudiée et adaptée à chaque chantier. Les autres seront traités dans ce document.

4 PREPARATION DES SURFACES EN BETON

Le fonctionnement d'un renfort dépend de la transmission correcte des efforts entre le béton existant et l'élément additionné. Il doit exister une adhérence parfaite dans l'interface béton-élément de renfort.

La préparation des surfaces consiste à éliminer la laitance superficielle du béton (couche très faible), à nettoyer les particules de poussière (graisses ou saletés), à éliminer les cloques, à créer le degré d'humidité adapté pour accueillir les éléments qui seront ajoutés.

Les opérations de préparation superficielle consistent à traiter les surfaces par moyens manuels ou mécaniques : bouchardage, poinçonnage, nettoyage des poussières et graisses, efflorescence par brossage, jet de sable, hydronettoyage, jet d'eau-sable. Le jet de sable est le plus approprié.

5 METHODE D'ADDITION D'ARMATURE EN ACIER

Le béton aura été enlevé dans les zones où l'armature est dégradée ou corrodée. On ajoute la nouvelle armature en faisant la liaison par soudure, en respectant les longueurs de recouvrement et de scellement.

Après la mise en place des armatures, la géométrie d'origine doit être régénérée avec des mortiers améliorés à base de résines qui augmentent l'adhérence et les résistances mécaniques de l'ensemble.

6 METHODE TRADITIONNELLE D'AUGMENTATION DES SECTIONS AVEC OU SANS ARMATURES

Il s'agit d'augmenter la section d'origine en béton à l'aide d'un coffrage de manière à envelopper l'élément existant. Le béton sera coulé dans ce coffrage.

Il faut utiliser un microbéton autonivelant et autocompactable pour remplir les interstices sans l'usage d'aiguilles vibrantes.

La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy. Ces décaissés seront remplis en béton avant le séchage des résines. S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage. Le béton devra être traité avec des adjuvants pour éviter la vibration et le compactage.

Les endroits les plus communs pour ce type de renfort sont les piliers soumis à compression (en plaçant des couronnes autour de l'élément à renforcer), les éléments (poutres ou dalles) soumis à des moments fléchissants et à des efforts de cisaillement et la partie comprimée des dalles ou plaques.

7 AUGMENTATION DES SECTIONS AVEC OU SANS ARMATURES. MISE EN OEUVRE PAR PROJECTION DU BETON

La préparation est similaire à celle réalisée dans la méthode précédente, mais la mise en place du béton se fait par projection mécanique avec une lance de projection située au bout d'un tuyau qui transporte le mélange depuis une pompe. Il existe deux types de projection :

- voie sèche : transport de ciment et agrégats secs, addition d'eau à la sortie de la lance ;
- voie humide : transport par le tuyau du mélange avec de l'eau.

8 METHODE D'ADJONCTION DES PLATINES EN ACIER

Il s'agit du type de renfort le plus utilisé pour les dalles, les poutres en béton et les piliers en compression. L'union de la platine à la structure peut se faire par collage, vissage, rivetage ou ancrage.

Du point de vue de la transmission des efforts, la meilleure technique est celle du collage. L'adhésif n'apporte pas de résistances mécaniques, mais il doit transmettre les efforts. Pour ce faire, il doit respecter certaines caractéristiques :

- manipulation facile,
- dosage simple,
- longue durée entre sa mise en oeuvre et celle du renfort,
- bonne adhérence béton-acier (après durcissement),
- résistance à la température,
- bonne rhéologie,
- dilatation similaire à celle du béton et de l'acier.

Il existe des résines acryliques, furaniques, polyester, etc., mais la plus performante est la résine époxy.

Pour ce type de renfort, la surface du béton doit être lisse, régulière, sèche, soignée et débarrassée de poussières, peintures, huiles, etc.

La qualité de l'acier des platines doit être inférieure à la qualité de l'acier des armatures.

L'épaisseur doit être d'environ 3 mm. La platine doit être propre, non rouillée et traitée contre la corrosion.

L'exécution se réalise par application de la colle, placement des platines et pression uniforme de 40 N/m².

Les platines peuvent aussi être appliquées pour la reprise d'efforts tranchants, sur les côtés des poutres, afin de couvrir les fissures d'effort tranchant qui présentent une inclinaison de 45°.

On considère le renfort de piliers avec profils en angle comme un renfort par platines en acier. Il s'agit d'un cas de compression.

Les inconvénients du renfort avec platines en acier sont les suivants :

- les platines en acier doivent être découpées en atelier,
- leur transport n'est pas facile,
- les longueurs sont limitées,
- l'adaptabilité aux irrégularités du support n'est pas toujours garantie,
- le croisement des platines est difficilement réalisable dans le cas d'un renfort de dalles,
- parfois des étais sont nécessaires pour travailler,
- des problèmes de durabilité face à la corrosion ou à la fatigue.

9 MÉTHODE D'ADJONCTION DE MATÉRIAUX COMPOSITES

Ce système de renfort est composé de deux produits : un adhésif de résine époxy et des lamelles de composite constituées de polymères renforcés de fibres de carbone enveloppés dans une résine époxy [lamelles « carbon fibre reinforced polymer » (CFRP)].

Mis à part le matériau utilisé, cette méthode est analogue à celle des platines en acier. Toutefois, cette différence de matériau permet d'éviter tous les inconvénients mentionnés ci-dessus.

9.1 Matériaux composites

Les composites sont des matériaux synthétiques fabriqués avec des mélanges intimes (mais rarement chimiques) de matériaux de différent état, composition, et forme. Leurs composants sont toujours clairement différenciés et gardent leur identité séparée. Cependant, ils travaillent de manière solidaire dans le composite, en réunissant des caractéristiques qui ne sont pas atteintes séparément.

Les composites sont constitués d'une matrice et de fibres. La matrice est le matériau qui donne le monolithisme à l'ensemble et la protection contre les attaques chimiques, l'abrasion, les intempéries, etc. Il peut s'agir de matériaux thermostables ou thermoplastiques dont la nature doit être adéquate et compatible avec la nature des fibres. Les fibres sont les éléments qui apportent les caractéristiques mécaniques. Parmi les plus connues, on peut citer : le carbone (haut module élastique et résistances mécaniques importantes à la fatigue), le verre (résistances moyennes, très utilisé pour renforcer les bétons) et l'aramide « Kevlar » (de haute résistance à la traction, utilisée en câbles de hautes performances).

9.2 Lamelles « carbon fibre reinforced polymer »

Le système de renfort le plus utilisé est à base de lamelles constituées par un composite de matrice polymérique de résine époxy renforcée par des fibres de carbone (CFRP).

Les fibres de carbone sont fabriquées à partir d'un polymère de polycrinolite (PAN). Les filaments de PAN sont traités à hautes températures (2000–2500°C) pour éliminer les différents composites de carbone et favoriser la formation de cristaux de carbone orientés selon l'axe des lamelles.

Les fibres de carbone ont un comportement pratiquement élastique, sans aucune réserve plastique. Elles sont donc fragiles et représentent 100 % des déformations subies.

Les lamelles CFRP sont fabriquées par extrusion en bandes de 250 à 500 mètres avec plus de 60 % de fibres (en volume). Elles présentent les caractéristiques suivantes :

- couleur : noire,
- épaisseur : 1,2 mm,
- densité : 1,6 kg/cm²,
- résistance à traction : 2400 N/mm²,
- allongement en rupture : 1,4 %,
- largeur : 50 mm.

Le support en béton doit être traité de manière adéquate pour obtenir une surface régulière et propre offrant une bonne résistance. Les lamelles seront appliquées sur des supports nettoyés et soignés. Les lamelles sont plus flexibles et adaptables aux irrégularités mais cela ne veut pas dire que les concavités ou le manque de rugosité soient acceptables.

9.3 Exécution

On applique l'adhésif époxy en couche de 1 mm sur la surface déjà préparée ainsi que sur la face supérieure des lamelles CFRP, préalablement traitées en usine pour avoir la rugosité adéquate, et qui doivent également être propres.

Dans le délai du temps d'application de la résine époxy, les lamelles seront posées à l'aide d'un rouleau pour exercer une pression. L'excédent de résine doit être nettoyé.

Il est recommandé d'ancrer les lamelles dans un béton sain et de disposer de la longueur nécessaire. Certains cas sont traités avec des platines, lamelles croisées, vissées ou rivetées.

9.4 Avantages du renfort avec des lamelles composites (comparé au renfort avec des platines en acier)

Le renfort avec des lamelles comporte de nombreux avantages. En effet, les lamelles sont cinq fois plus légères que l'acier, dix fois plus résistantes (donc plus optimisées), d'une faible épaisseur et d'une grande flexibilité (donc plus faciles à transporter). D'autre part, les unions par soudure n'étant pas nécessaires, leur longueur n'est pas limitée. Grâce à ces caractéristiques, elles s'adaptent plus facilement aux supports ; les croisements de lamelles peuvent se faire sans travaux complémentaires ; on constate moins d'interférence avec le reste des éléments de l'ouvrage ; elles ne produisent pas de bulles d'air durant le collage et ne nécessitent pas d'étais ni d'autre système de maintien provisoire.

Quant à leur durabilité et à leur résistance, elles ne subissent pas de corrosion ni d'autres attaques chimiques ; elles offrent une meilleure résistance au feu et à la fatigue.

Face au feu, que le renfort soit fait avec des platines en acier ou avec des lamelles, la ruine est provoqué par la dégradation de la résine époxy. Mais l'acier se dégrade beaucoup plus vite et présente des risques de chutes par décollement. Les CFRP, par contre, restent accrochées plus longtemps et la transmission de chaleur est moins rapide que dans l'acier ; de plus, comme elles sont légères, les risques d'accident sont écartés.

Le système de renfort avec matériaux composites est aussi recommandé dans certains cas de béton précontraint.

10 CONCLUSION

Ce document a présenté les différentes techniques de renforcement de structures en béton. Pour les techniques traditionnelles, les règles de dimensionnement sont connues et basées sur les principes de la statique et de la résistance des matériaux. Quant à la technique des lamelles collées, les règles ne sont pas encore complètes et parfois même elles sont contradictoires. De nombreuses études expérimentales sont actuellement en cours.

Aucun type de renfort ne peut être recommandé car il faut tenir compte des différentes contraintes : type de matériaux, fonction, usage et vie utile de la structure à renforcer, espace disponible pour l'exécution et l'exploitation, type d'élément structurel à renforcer et coût du renfort. C'est à l'ingénieur qu'il revient de choisir la solution la mieux adaptée à la situation, après en avoir étudié tous les paramètres.