

Modèle de comportement mécanique du béton armé corrodé

Arnaud Castel, Raoul François, Ginette Arliguie

Laboratoire matériaux et durabilité des constructions, INSA–UPS, 135, avenue de Rangueil,
31077 Toulouse cedex 4, France

Reçu le 26 octobre 2001 ; accepté le 30 octobre 2001

Note présentée par Évariste Sanchez-Palencia.

Résumé

Cet article propose un modèle analytique de fonctionnement mécanique du béton armé dégradé par corrosion des armatures. L'originalité de ce modèle, basé sur une approche locale des phénomènes, est de prendre en compte l'effet couplé de la réduction de section d'acier et de la perte d'adhérence acier-béton en partie tendue dues à la corrosion. Il s'agit d'un outil d'aide au diagnostic destiné à prédire l'évolution du comportement mécanique des ouvrages soumis à des agressions environnementales de type saline. Pour citer cet article : A. Castel et al., C. R. Mecanique 330 (2002) 45–50. © 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

solides et structures / béton armé / fissuration / adhérence / corrosion / modèle / diagnostic

Mechanical model of reinforced concrete damaged by steel corrosion

Abstract

This article deals with an analytical mechanical model of reinforced concrete damaged by steels corrosion. It is based on the taking into account of local bond between steel and the tensile concrete located between the cracks. Then, this model allows to quantify the coupled effect of steel cross section reduction and loss of bond strength due to steel corrosion on mechanical behaviour of reinforced concrete. To cite this article: A. Castel et al., C. R. Mecanique 330 (2002) 45–50. © 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

solids and structures / reinforced concrete / cracking / bond / corrosion / model / diagnostic

Abridged English version

An analytical model of the mechanical behaviour of reinforced concrete after cracking taking into account the stiffening effect of tensile concrete has been recently established and published [3]. This model has a dual originality since on one hand it allows to quantify accurately the local mechanical contribution of tensile concrete located into the flexural cracks and on the other hand, it integrates explicitly the bonding conditions between tensile steels and concrete in the calculation of normal stresses then by homogenisation in the calculation of the local average inertia of the flexed element in reinforced concrete (noted I_m).

Adresses e-mail : arnaud.castel@insa-tlse.fr (A. Castel); raoul.francois@insa-tlse.fr (R. François);
ginette.arliguie@insa-tlse.fr (G. Arliguie).

Quantification of the local mechanical contribution of tensile concrete is achieved through the use of a damage scalar variable of mechanical origin (noted D_m) which evolves according to the loading level. The mechanical damage variable D_m is introduced in the bonding conditions between steel and concrete (1). The Fig. 1 illustrates the strain development of tensile steels and concrete along a beam section between two cracks according to the mechanical damage – D_m – of steel-concrete bond.

The object of this article is to propose an extension of this model to the case of reinforced corroded beams, obtained by adding a parameter of mechanical damage linked to corrosion. The reduction of steel section caused by corrosion is added into the mechanical model in terms of local rate of reinforcement corrosion (noted $c\%$). This local rate of steel corrosion is integrated in the calculation of the residual tensile steel section (2) as well as in the conditions of steel-concrete bond (3) where D_c is an environmental damage variable. D_c is linked [8] to the local rate of reinforcement corrosion by the relation (4).

The Fig. 2 illustrates that the influence of the bonding loss of steel-concrete on the reduction of the I_m average inertia is effective for corrosion rates included between 3 and 30%. We notice that by considering only the reduction of steel section (reduction of I_f inertia), conventional theories dealing with reinforced concrete underestimate strongly the degradation of structural mechanical behaviour in service.

We are proposing a experimental validation carried out on two reinforced concrete beams of three meters loaded in three points flexion. These two beams are 16 years old [1]. The first one is a corroded beam stored in a natural saline environment (noted B2CL) and the other one is a test beam nondegraded (noted B2T). The cracking map caused by corrosion allows to assess [6,7] the distribution of corrosion rates of steels along B2CL (Fig. 3) and therefore to deduce the distribution of inertia. The Fig. 4 represents the force-deflection curves experimentally obtained on the two beams tested, as well as the model predictions for the two structural elements. The theoretical predictions prove to be quite satisfactory both for the tested ($D_c = 0$) and for the corroded beam. The increase of displacements is about 80%. The conventional theories dealing with reinforced concrete [9] which do not take into account the effect of bonding loss of steel-concrete predict a deflection increase of only 20%.

1. Introduction

Pouvoir prédire l'évolution du comportement mécanique des structures en béton armé au cours de leur vieillissement est un objectif d'importance majeure pour les maîtres d'ouvrage afin de prévoir éventuellement des réparations, le renforcement de la structure, un programme de maintenance ou, au contraire, la destruction et le remplacement de l'ouvrage...

La principale cause de dégradation des structures en béton armé est la corrosion des armatures. Elle provoque la réduction de section des aciers de renforcement ainsi qu'une perte d'adhérence entre les aciers tendus et le béton, et se traduit par un éclatement du béton d'enrobage. Les méthodes actuelles de dimensionnement négligent le béton tendu situé entre les fissures de service car il n'intervient pas sur la détermination de la capacité portante (Etats Limites Ultimes, E.L.U.). Elles ne permettent donc pas de quantifier l'influence de la perte d'adhérence entre les aciers tendus et le béton sur l'évolution du comportement mécanique de la structure dégradée par corrosion [1,2]. De ce fait, un modèle analytique de comportement mécanique du béton armé après fissuration prenant en compte l'effet raidissant du béton tendu a été récemment établi et publié [3]. Nous proposons, dans cette note, une extension de ce modèle au cas des poutres de béton armé corrodées, obtenue en intégrant un paramètre d'endommagement mécanique lié à la corrosion.

2. Comportement du béton armé après fissuration

Le modèle de comportement du béton armé après fissuration (état de fonctionnement normal des structures) développé au L.M.D.C. [3] a une originalité double : d'une part il permet de quantifier de façon

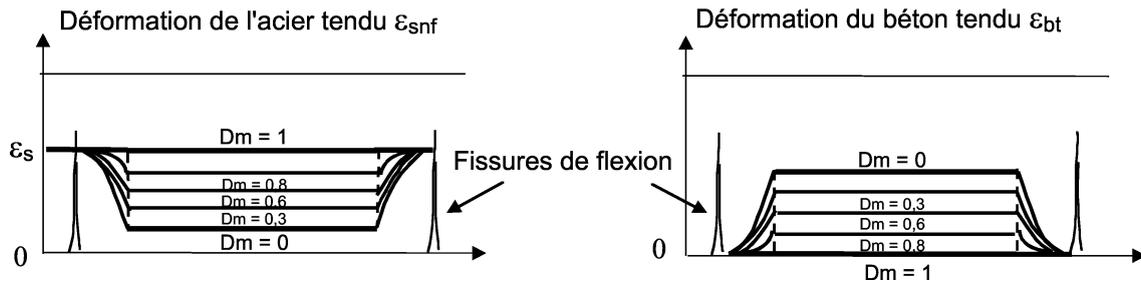


Figure 1. Evolution de la déformation des aciers tendus et du béton long d'un tronçon de poutre, entre deux fissures, en fonction de l'endommagement mécanique D_m de la liaison acier-béton.

Figure 1. Evolution of tensile steels and concrete strain between two flexural cracks versus mechanical damage of steel-concrete interface.

précise la contribution mécanique locale du béton tendu situé entre les fissures de flexion et d'autre part, il intègre de façon explicite les conditions d'adhérence entre les aciers tendus et le béton dans le calcul des contraintes normales puis, par homogénéisation, dans le calcul de l'inertie moyenne locale de l'élément fléchi en béton armé (notée I_m). Dans ce modèle, le comportement global de l'élément de structure résulte de l'intégration des courbures obtenues sur chaque tronçon comportant une fissure de flexion. L'inertie moyenne I_m de ces tronçons est calculée en fonction de l'inertie en section fissurée (calculs classiques de béton armé) et de l'inertie en section non fissurée (située entre les fissures de flexion) qui dépend de la contribution mécanique locale du béton tendu. Cette contribution mécanique locale du béton tendu est quantifiée par l'intermédiaire d'une variable scalaire d'endommagement d'origine mécanique (notée D_m) qui évolue en fonction du niveau de chargement. Cette variable d'endommagement mécanique D_m est introduite dans les conditions d'adhérence entre l'acier et le béton (1).

$$(1 - D_m)\varepsilon_{snf} = \varepsilon_{bt} \quad (1)$$

où ε_{bt} est la déformation de traction du béton au contact des armatures tendues et ε_{snf} est la déformation des aciers tendus entre les fissures de flexion (ε_s est la déformation de l'acier en regard des fissures). Ce n'est pas une variable d'endommagement au sens strict de la mécanique des milieux continus [4] puisqu'elle ne s'intègre pas dans la loi de comportement d'un matériau, mais dans les conditions de liaison entre deux matériaux. La valeur de D_m peut être comprise entre 0 et 1. Lorsque $D_m = 0$, cela signifie une adhérence parfaite entre le béton et l'acier. Puis, lorsque D_m augmente, cela signifie un glissement progressif entre les deux matériaux. Enfin $D_m = 1$, correspond à une perte d'adhérence totale entre l'acier et le béton. Dans ce dernier cas, la participation mécanique locale du béton tendu devient nulle ($\varepsilon_{bt} = 0$) (Fig. 1).

3. Extension au comportement mécanique du béton armé corrodé

La démarche proposée dans cette note vise à coupler un endommagement supplémentaire de l'adhérence dû à la corrosion par l'intermédiaire d'une variable d'endommagement environnementale liée à la réduction de section des armatures corrodées. La réduction de section d'acier due à la corrosion est intégrée dans le modèle mécanique en terme de taux local de corrosion des armatures (noté c %). Ce taux local de corrosion des aciers est pris en compte à la fois dans le calcul de la section d'acier tendu résiduelle et dans les conditions de liaison acier-béton. En situation réelle, la détermination du taux de corrosion des aciers pour réaliser un diagnostic sur une structure peut être réalisée à partir de méthodes non destructives telles que la mesure des ouvertures des fissures issues de l'expansion des produits de corrosion [5,6] ou encore par l'intermédiaire de méthodes électro-chimiques [7].

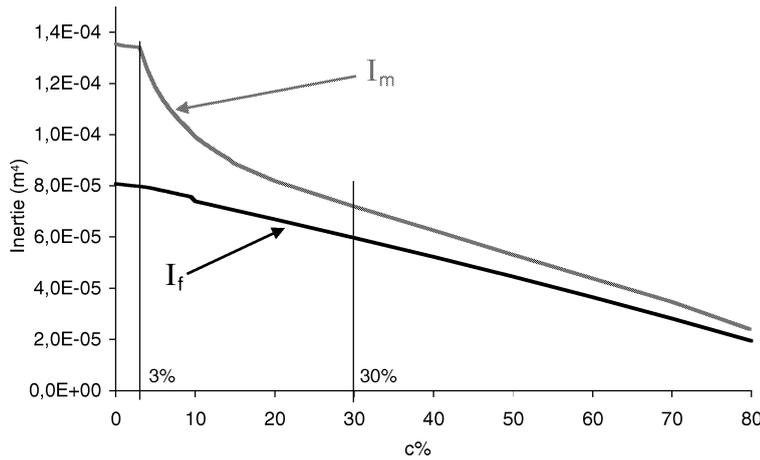


Figure 2. Evolution de l'inertie moyenne d'un tronçon de poutre fissuré I_m ainsi que de l'inertie d'une section fissurée I_f en fonction du taux de corrosion des armatures.

Figure 2. Evolution of I_m average inertia of cracked reinforced concrete and I_f inertia of cracked cross section versus steels corrosion percentage.

La section d'acier résiduelle A_c est donnée par la relation (2)

$$A_c = A \left(1 - \frac{c}{100} \right) \quad (2)$$

La variable d'endommagement environnementale due à la corrosion (notée D_c) est intégrée dans les conditions de liaison acier-béton en partie tendue (relation (3)).

$$(1 - D_c)(1 - D_m)\varepsilon_{snf} = \varepsilon_{bt} \quad (3)$$

La variable d'endommagement environnementale D_c est liée au taux local de corrosion des armatures par la relation (4). Cette relation a été établie expérimentalement à partir de données obtenues sur des poutres en béton armé corrodées conservées en milieu salin depuis 16 ans au LMDC [8].

$$\begin{aligned} c \% < 3 \%, \quad D_c &= 0 \\ c \% \geq 3 \%, \quad D_c &= 1 - \frac{1}{0,33c \%} \end{aligned} \quad (4)$$

Ainsi, lorsque le taux local de corrosion des aciers approche 30 %, les résultats expérimentaux ont montré que la perte d'adhérence acier-béton est totale. Au contraire, si le taux local de corrosion reste inférieur à 3 %, l'adhérence acier-béton n'est pas affectée. La Fig. 2 présente l'évolution théorique de l'inertie moyenne d'un tronçon de poutre fissuré I_m et de l'inertie d'une section située en regard d'une fissure I_f (où seule l'influence de la réduction de section d'acier est prise en compte) en fonction du taux de corrosion des armatures. L'application est réalisée dans le cas d'une poutre en béton armé de section 280×150 mm, armée de deux armatures HA12, pour une hauteur utile de $d = 258$ mm. La variable d'endommagement d'origine mécanique D_m est fixée à 0.

L'influence de la perte d'adhérence acier béton sur la réduction de l'inertie moyenne I_m est effective pour des taux de corrosion compris entre 3 et 30 %. Nous constatons sur la Fig. 2, qu'en ne prenant en compte que la réduction de section d'acier (réduction de l'inertie I_f), les théories classiques de béton armé sous-estiment fortement la dégradation du comportement mécanique en service des structures.

4. Validation expérimentale – méthodologie de diagnostic

La validation expérimentale est réalisée sur deux poutres en béton armé de trois mètres de longueur chargées en flexion trois points, dont les caractéristiques sont celles utilisées pour le calcul théorique de la

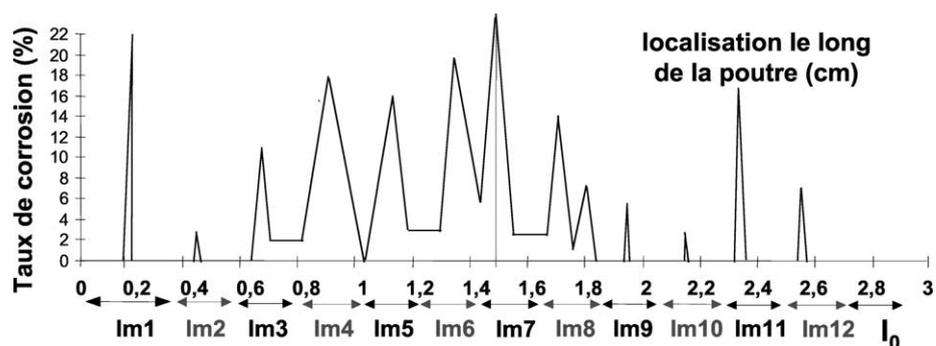


Figure 3. Distribution des taux de corrosion des aciers tendus et des inerties I le long de la poutre corrodée B2CL.

Figure 3. Distribution of steels corrosion percentage and inertia along B2CL corroded beam.

Figure 4. Comparaison des déplacements expérimentaux et théoriques obtenus pour la poutre témoin et la poutre corrodée.

Figure 4. Comparison between experimental and theoretical displacement obtained on control and corroded beams.

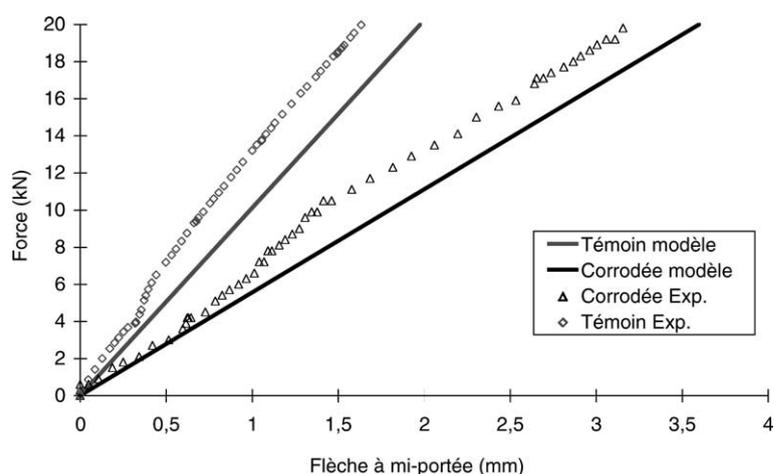


Fig. 2. Ces deux poutres sont âgées de 16 ans. Il s'agit d'une poutre corrodée en milieu naturel salin (notée B2CL) et d'une poutre témoin non dégradée (notée B2T). La méthodologie de diagnostic (non destructif) comprend quatre étapes :

- Dans un premier temps, la fissuration due à la corrosion, qui longe les armatures longitudinales tendues de B2CL, est finement repérée, à la fois en terme de localisation le long de la poutre mais aussi en terme d'ouverture des fissures.
- Ensuite, des lois de corrélation [6,7] permettent de déduire la distribution des taux de corrosion des aciers le long de la poutre (Fig. 3).
- A partir de ces taux de corrosion, la distribution des inerties moyennes I_m le long de l'élément de structure peut être déterminée (Fig. 3). Généralement, suivant l'évolution du processus de corrosion, la poutre est à inertie variable. Sur cette poutre, douze inerties moyennes ont été calculées. I_0 correspond à l'inertie d'un tronçon de poutre calculée avant fissuration. En effet, dans cette zone près de l'appui, l'élément de structure n'est pas fissuré (consécutivement au chargement) et n'est pas corrodé.
- Enfin, le comportement global (champ de déplacement en particulier) de l'élément corrodé est obtenu en intégrant le champ des courbures moyennes ainsi obtenu par une méthode classique de RDM.

La Fig. 4 représente les courbes force-flèche obtenues expérimentalement sur les deux poutres testées, ainsi que les prédictions du modèle pour les deux éléments de structure.

La Fig. 4 montre que les prédictions théoriques sont très satisfaisantes à la fois sur la poutre témoin ($D_c = 0$) et sur la poutre corrodée. L'augmentation des déplacements est d'environ 80 %. Les théories classiques de béton armé [9] qui ne prennent pas en compte l'effet de la perte d'adhérence acier-béton prédisent une augmentation de la flèche de 20 % seulement.

5. Conclusion

Dans le cadre de ce travail a été établi un modèle de fonctionnement en service des poutres en béton armé dégradées par corrosion des armatures. Il repose sur un modèle récemment publié [3] dont l'originalité est de prendre en compte de façon explicite à la fois la contribution mécanique locale du béton tendu et les conditions de liaison acier-béton en partie tendue entre les fissures de flexion. Le paramètre « taux local de corrosion des armatures » a été intégré dans ce modèle à la fois dans le calcul de la section d'acier tendu résiduelle et dans les conditions de liaison acier-béton. Ainsi, cette démarche permet de prendre en compte l'effet couplé de la réduction de section d'acier et de la perte d'adhérence acier-béton en partie tendue, sur le comportement mécanique des poutres en béton armé corrodées. Un second intérêt de ce modèle basé sur une approche locale des phénomènes est qu'il permet de tenir compte de la distribution des taux de corrosion des aciers le long de l'élément de structure. En effet sur une structure, la corrosion se développe de façon aléatoire à la fois en terme de localisation et d'intensité.

Références bibliographiques

- [1] Castel A., François R., Arliguie G., Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams, part 1: Experimental study of corroded beams, RILEM Materials and Structures 33 (2000) 539–544.
- [2] Castel A., François R., Arliguie G., Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams, part 2: Bond and notch effects, RILEM Materials and Structures 33 (2000) 545–551.
- [3] Castel A., François R., Arliguie G., Modèle de comportement mécanique du béton armé après fissuration, Revue Française de Génie Civil 5 (2001) 527–551.
- [4] Mazars J., Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, France, 1984.
- [5] Andrade C., Alonso C., Molina F.J., Cover cracking as a function of bar corrosion, Materials and Structures 26 (1993) 453–464.
- [6] Cabrera J.G., Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion, Cement and Concrete Research 18 (1996) 47–59.
- [7] Andrade C., Monitoring the corrosion activity of steel in concrete, possibilities and challenges, in: COST521 Workshop, Belfast, 28–31 August 2000, 2000.
- [8] François R., Arliguie G., Maso J.C., Durabilité du béton armé soumis à l'action des chlorures, Annales de l'ITBTP 529 (1994) 1–48.
- [9] Béton Armé aux Etats Limites, Réglementation française de conception, calcul et construction des ouvrages en béton armé par la méthode des états limites, 1991.