

CONNEXIONS PAR ADHÉRENCE POUR LES PONTS MIXTES ACIER-BÉTON

THÈSE N° 3381 (2005)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

Institut de structures

SECTION DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Michel THOMANN

ingénieur civil diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Saint-Gall (SG)

acceptée sur proposition du jury:

Dr J.-P. Lebet, directeur de thèse
Dr H.G. Dauner, rapporteur
Prof. M. Fontana, rapporteur
Prof. T. Keller, rapporteur
Prof. J. Raoul, rapporteur

Lausanne, EPFL
2005

RÉSUMÉ

Lors de la construction de nouveaux ouvrages d'art ainsi que lors de travaux de rénovation ou de remplacement de ponts existants, la durée des travaux influence considérablement non seulement les coûts mais également les nuisances générées par le chantier (bruit, pollution, embouteillages, déviations de trafic). Il est donc intéressant de projeter des ouvrages permettant une durée de construction aussi courte que possible. Les ponts mixtes acier - béton répondent très bien à ce besoin: les poutres en acier et la dalle en béton peuvent être préfabriquées en atelier et assemblées dans les meilleurs délais sur le chantier.

Toutefois, les connexions utilisées actuellement pour lier la dalle aux poutres sont mal adaptées aux dalles préfabriquées: elles ralentissent notablement la construction et réduisent la durabilité de la dalle. Il est donc utile de développer de nouveaux types de connexions. Les connexions par adhérence, dont la résistance est due au frottement dans plusieurs interfaces, constituent à cet égard une solution particulièrement prometteuse. Les connaissances actuelles à leur sujet sont toutefois lacunaires et se doivent d'être complétées pour permettre leur mise en œuvre dans la pratique.

Les buts de la présente recherche sont d'évaluer l'intérêt pratique des connexions par adhérence, de développer des outils d'analyse et de calcul permettant de prédire leur comportement et de proposer une méthode de dimensionnement des poutres mixtes avec connexion par adhérence.

Pour atteindre ces objectifs, les exigences auxquelles doivent répondre les connexions des ponts mixtes acier - béton sont définies dans un premier temps. Ensuite, le comportement des connexions par adhérence est étudié selon les étapes suivantes:

- modélisation du comportement des interfaces confinées et cisailées au moyen d'une étude expérimentale et analytique,
- étude du comportement mécanique des connexions par adhérence, et en particulier de leur cinématique de déformation, à l'aide d'essais de type *push-out*,
- création et validation d'un modèle de calcul permettant de prédire le comportement des connexions par adhérence,
- exploitation de ce modèle dans une étude paramétrique dont les résultats servent en particulier à proposer une méthode de calcul simplifiée de la résistance ultime à l'effort rasant,
- développement et validation d'une méthode de dimensionnement pour les poutres mixtes acier - béton avec connexion par adhérence.

Enfin, une comparaison entre les exigences définies en début d'étude et les caractéristiques calculées ou mesurées des connexions par adhérence est effectuée. Cela permet d'évaluer l'intérêt pratique des connexions par adhérence ainsi que les besoins de recherche complémentaire.

Plusieurs conclusions importantes sont tirées de ces travaux. Tout d'abord, il est démontré que les connexions par adhérence possèdent les caractéristiques requises pour répondre aux exigences de robustesse, d'économie et de fiabilité. En particulier, leur résistance à l'effort rasant et leur rigidité élevées assurent un excellent comportement tant sous charges de service qu'à l'état limite ultime. Deuxièmement, il est démontré que le comportement des connexions par adhérence peut être expliqué et modélisé par les lois de comportement des interfaces cisailées et confinées. Le confinement est dû d'une part à la forte interaction qui existe entre les différentes interfaces constituant les connexions par adhérence et d'autre part à l'effet de la dalle en béton située autour du connecteur. Enfin, il est montré que si un calcul plastique de la distribution de l'effort rasant dans une poutre mixte ne peut pas être effectué avec les connexions par adhérence, il est en revanche possible d'effectuer un dimensionnement plastique en section à condition de tenir compte des effets de la formation de cette rotule sur la distribution élastique de l'effort rasant le long de l'axe de la poutre.

Le travail effectué dans cette thèse a permis de proposer des outils de dimensionnement pour les poutres mixtes avec connexion par adhérence. Ces outils, scientifiquement fondés, doivent aider à développer l'utilisation de telles connexions en pratique.

ZUSAMMENFASSUNG

Beim Bau neuer Kunstbauten ebenso wie bei der Instandstellung oder beim Ersatz von bestehenden Brücken beeinflusst die Dauer der Arbeiten nicht nur wesentlich die Kosten sondern auch die nachteiligen Folgen der Baustelle (Lärm, Luftverschmutzung, Staus, Umleitungen des Verkehrs). Es ist daher von grossem Interesse, Bauwerke so zu projektieren, dass ihre Bauzeit auf ein Minimum beschränkt werden kann. Stahl-Beton-Verbundbrücken erfüllen diese Anforderung in idealer Weise: die Stahlträger und die Fahrbahnplatte aus Beton können im Werk vorgefertigt und dann innert kürzester Zeit auf der Baustelle montiert werden.

Dennoch sind die derzeit für die Verbindung zwischen Fahrbahnplatte und Träger verwendeten Verbindungsmittel schlecht auf vorgefertigte Fahrbahnplatten abgestimmt: sie verzögern den Baufortschritt wesentlich und vermindern die Dauerhaftigkeit der Fahrbahnplatte. Die Entwicklung von neuen Verbindungstypen ist daher von Interesse. Adhäsionsverbindungen, deren Widerstand durch Reibung an mehreren Kontaktflächen zustande kommt, stellen in dieser Hinsicht eine besonders viel versprechende Lösung dar. Die derzeitigen Kenntnisse sind allerdings lückenhaft und müssen vervollständigt werden, um eine Anwendung in der Praxis zu ermöglichen.

Die vorliegende Forschungsarbeit hat zum Ziel, den praktischen Nutzen von Adhäsionsverbindungen zu untersuchen, Hilfsmittel für die Analyse und die Berechnung zu entwickeln, welche die Vorhersage des Verhaltens von solchen Verbindungen ermöglichen, sowie ein Bemessungskonzept für Verbundträger mit Adhäsionsverbindungen vorzuschlagen.

Um diese Ziele zu erreichen, werden in einer ersten Phase die Anforderungen, denen Verbindungen in Stahl-Beton-Verbundbrücken genügen müssen, definiert. Anschliessend wird das Verhalten der Adhäsionsverbindungen in folgenden Schritten untersucht:

- Modellierung des Verhaltens der Kontaktflächen bei Schubbelastung und behinderter Querverformung mit Hilfe einer experimentellen und analytischen Untersuchung,
- Untersuchung des mechanischen Verhaltens anhand von Push-out Versuchen,
- Entwicklung und Validierung eines Rechenmodells zur Vorhersage ihres Verhaltens,
- Anwendung des Rechenmodells für eine Parameterstudie, deren Ergebnisse insbesondere dazu dienen, ein vereinfachtes Rechenmodell für den Schubwiderstand vorzuschlagen,
- Entwicklung und Validierung einer Bemessungsmethode für Stahl-Beton-Verbundträger.

Schliesslich werden die zu Beginn der Untersuchung definierten Anforderungen mit den berechneten oder gemessenen Eigenschaften der Adhäsionsverbindungen verglichen. Dies erlaubt eine Abschätzung des praktischen Nutzens von Adhäsionsverbindungen und des zusätzlichen Forschungsbedarfs.

Mehrere wichtige Schlussfolgerungen werden aus diesen Arbeiten gezogen. Zuerst wird gezeigt, dass Adhäsionsverbindungen die Anforderungen in Bezug auf Robustheit, Wirtschaftlichkeit und Funktionssicherheit erfüllen. Insbesondere garantieren der hohe Schubwiderstand in Längsrichtung und die hohe Steifigkeit ein ausgezeichnetes Verhalten in Bezug auf Gebrauchstauglichkeit und Tragwiderstand. Zweitens kann das Verhalten von Adhäsionsverbindungen nachweislich anhand des Verhaltens der Kontaktflächen bei Schubbelastung und behinderter Querverformung erklärt und modelliert werden. Die behinderte Querverformung ist einerseits auf die starke Wechselwirkung zwischen den verschiedenen, die Adhäsionsverbindung bildenden, Kontaktflächen und andererseits auf die Wirkung der um die Verbindung liegende Fahrbahnplatte aus Beton zurückzuführen.

Schliesslich wird gezeigt, dass wenn eine plastische Berechnung der Schubverteilung in Längsrichtung eines Verbundträgers mit Adhäsionsverbindungen nicht möglich ist, eine plastische Bemessung dagegen im Querschnitt durchgeführt werden kann unter der Bedingung, die Auswirkungen der Gelenkbildung auf die elastische Längsschubkraftverteilung entlang der Achse des Trägers mit zu berücksichtigen.

Die durchgeführte Arbeit hat somit den Vorschlag von Bemessungshilfsmitteln für Verbundträger mit Adhäsionsverbindungen ermöglicht. Diese wissenschaftlich fundierten Hilfsmittel sollen helfen, die Verwendung solcher Verbindungen in der Praxis durchzusetzen.

SUMMARY

When building new bridge structures, or widening or replacing existing bridges, the duration of on site work has a significant influence not only on the costs, but also on the potentially harmful effects (noise, pollution, traffic jam, deviation) of the construction work. Thus, it is of interest to design structures in such a way as to minimize the construction time. Steel-concrete composite bridges are ideal for this purpose: the steel beams may be welded and the concrete slab precast in the shop, leaving only the erection and assembly work to be performed on site.

Currently, however, the steel-concrete connections used in composite bridges are not well adapted for the use with precast slabs, as they tend to slow down the assembly work and decrease the durability of the slab. Consequently, there is a need to develop new types of connections. Connections by adherence, whose resistance is due to friction between the various interfaces, constitute a very promising solution to this problem. The current state of knowledge is incomplete, however, and should be improved in order to make the use of connections by adherence possible in practice.

The goals of the research presented herein are to evaluate the practical value of connections by adherence, to develop analysis method and tools making it possible to predict their behaviour and to propose a design method for composite beams employing connections by adherence.

To achieve these goals, the requirements that must be met by connections in steel-concrete composite bridges are first defined. Then, the behaviour of connections by adherence is studied in the following steps:

- model the behaviour of confined interfaces loaded in shear with the help of experimental and analytical studies,
- study the mechanical behaviour of connections by adherence, and especially their deformation behaviour, with the help of push-out tests,
- create and validate an analysis tool that makes it possible to predict the behaviour of connections by adherence,
- use this model in a parametric study to obtain results to be used in the development of a simplified design method capable of predicting the ultimate shear resistance,
- develop and validate a design method for steel-concrete composite beams with connections by adherence.

Finally, a comparison between the requirements defined at the beginning of the study and the calculated or measured characteristics of connections by adherence is performed. This makes it possible to evaluate the practical value of these connections and to define the needs for further research.

Several important conclusions are drawn from this work. First, it is shown that connections by adherence meet the specified requirements of robustness, economy and reliability. Their high longitudinal shear resistance and stiffness ensure excellent static behaviour, both under service and ultimate loads. Secondly, it is demonstrated that the behaviour of these connections may be explained and modelled with the help of laws governing the behaviour of confined interfaces loaded in shear. The confinement is due partially to the strong interaction existing between the different interfaces and partially to the effect of the concrete slab around the connector. Finally, it is shown that, although a plastic calculation of the shear forces along the bridge axis can not be performed with these connections, it is possible to perform a plastic design of the cross section provided that the consequences of this calculation on the elastic longitudinal shear force distribution are taken into account.

The work carried out in this thesis has made it possible to propose design tools for composite beams with a connection by adherence. Those tools, scientifically founded, should help to increase the use of such connections in practice.

CONNEXIONS PAR ADHÉRENCE POUR LES PONTS MIXTES ACIER-BÉTON

Michel Thomann, ing. dipl. EPFL

PRÉFACE

La connexion entre le tablier et les poutres métalliques des ponts mixtes se fait depuis environ cinquante ans à l'aide de goujons à tête soudés. Cette technologie a fait ses preuves, mais nécessite des travaux de bétonnage sur le chantier, travaux qui s'accordent mal avec une solution industrielle optimale permettant une construction rapide du pont.

S'inspirant de la construction de ponts précontraints en segments d'une part et de l'efficacité éprouvée des couches d'adhérence entre le revêtement et le tablier métallique de ponts à dalle orthotrope d'autre part, j'ai proposé une solution de connexion où les goujons sont remplacés par deux tôles striées dos à dos et où la surface des poutres métalliques est activée par une couche d'adhérence.

Testée à l'ICOM moyennant de nombreux essais *push-out*, cette solution a donnée d'excellents résultats et soulevé de nombreuses questions au sujet de son comportement.

Le présent travail de doctorat apporte des réponses à ces questions.

Monsieur Thomann s'est lancé avec enthousiasme dans la recherche scientifique du comportement d'une telle connexion par adhérence. Il a su trouver les réponses qui permettent de comprendre ce comportement et a proposé une solution permettant au praticien le dimensionnement de cette nouvelle connexion entre le béton et l'acier. Cet excellent travail permet d'augurer un bel avenir pour les connexions par adhérence.

Hans-G. Dauner

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	3
REMERCIEMENTS	7
PRÉFACE	9
TABLE DES MATIÈRES	11
NOTATIONS, TERMINOLOGIE ET CONVENTIONS TYPOGRAPHIQUES	15
1 INTRODUCTION	19
1.1 CONTEXTE ET MOTIVATION	19
1.1.1 Développement des ponts mixtes acier - béton	19
1.1.2 Connexions par adhérence	21
1.2 ETAT DES CONNAISSANCES	23
1.2.1 Interfaces cisillées	23
1.2.2 Connexions pour dalles préfabriquées	24
1.2.3 Dimensionnement des ponts mixtes acier - béton	26
1.2.4 Synthèse des besoins de recherche	26
1.3 OBJECTIFS DU TRAVAIL	27
1.4 LIMITES DU TRAVAIL	27
1.5 ORGANISATION DE LA THÈSE	28
2 EXIGENCES RELATIVES AUX CONNEXIONS	31
2.1 INTRODUCTION	31
2.2 RÉSISTANCE À L'EFFORT RASANT	32
2.2.1 Résistance ultime	33
2.2.2 Résistance à la fatigue	35
2.2.3 Résistance sous charges de service	36
2.3 RÉSISTANCE À LA TRACTION	37
2.3.1 Causes de la traction dans la connexion	37
2.3.2 Rotation empêchée de la dalle	38
2.3.3 Soulèvement empêché de la dalle	38
2.3.4 Différence de courbure entre la dalle et la poutre en acier	39
2.3.5 Synthèse	39
2.4 RIGIDITÉ	39
2.5 DUCTILITÉ ET CAPACITÉ DE DÉFORMATION	41
2.6 DURABILITÉ	43
2.7 EXÉCUTION	44
2.8 ECONOMIE	44
2.9 CONCLUSIONS	45
3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	47
3.1 INTRODUCTION	47
3.2 ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT	47
3.2.1 Description des essais	47
3.2.2 Résultats et observations	50
3.2.3 Discussion	54
3.2.4 Synthèse	57
3.3 ESSAIS PUSH-OUT	58
3.3.1 Description des essais	58
3.3.2 Résultats et observations	63
3.3.3 Discussion	68

3.3.4	Synthèse	70
3.4	ESSAIS D'ARRACHEMENT	71
3.4.1	Description des essais	72
3.4.2	Résultats et observations	73
3.4.3	Discussion	73
3.4.4	Synthèse	74
3.5	ESSAIS SUR POUTRES MIXTES	74
3.5.1	Description des essais	74
3.5.2	Résultats et observations	75
3.5.3	Discussion	81
3.5.4	Synthèse	82
3.6	CONCLUSIONS	83
4	COMPORTEMENT DES INTERFACES	85
4.1	INTRODUCTION	85
4.2	LOI CONSTITUTIVE	85
4.2.1	Observations et modélisation	86
4.2.2	Application aux interfaces considérées	88
4.3	LOI CINÉMATIQUE	89
4.3.1	Observations et modélisation	89
4.3.2	Application aux interfaces considérées	91
4.4	CRITÈRE DE RUPTURE	93
4.4.1	Interface tôle striée - coulis de ciment	93
4.4.2	Interface couche d'adhérence - coulis de ciment	101
4.4.3	Interface béton rugueux - coulis de ciment	102
4.5	EFFET D'UN CONFINEMENT	103
4.6	CONCLUSIONS	106
5	MODÉLISATION DE LA CONNEXION	107
5.1	INTRODUCTION	107
5.2	COMPORTEMENT DES CONNEXIONS PAR ADHÉRENCE	107
5.3	MODÈLE MÉCANIQUE	109
5.3.1	Définitions et principe de modélisation	109
5.3.2	Hypothèses	109
5.3.3	Description du modèle	111
5.3.4	Détermination des valeurs des paramètres	115
5.3.5	Résultats et validation du modèle mécanique	121
5.3.6	Etude de sensibilité	125
5.3.7	Synthèse	130
5.4	ETUDE PARAMÉTRIQUE	130
5.4.1	But de l'étude et choix des paramètres	130
5.4.2	Notations et représentation des résultats	131
5.4.3	Position de la surface de rupture	131
5.4.4	Largeurs des interfaces	133
5.4.5	Contraintes normales extérieures	135
5.4.6	Rigidité de la dalle	138
5.4.7	Synthèse	140
5.5	MÉTHODE DE CALCUL SIMPLIFIÉE	141
5.5.1	But et bases de la méthode	141
5.5.2	Paramètres retenus et limites de validité de la méthode	141
5.5.3	Décollement de la couche d'adhérence	142
5.5.4	Connexions de type R	142
5.5.5	Connexions de type RH	144

5.5.6	Validation de la méthode	146
5.5.7	Détermination de la résistance caractéristique à l'effort rasant	147
5.5.8	Synthèse	147
5.6	REMARQUES ET CONCLUSIONS	148
5.6.1	Remarques	148
5.6.2	Conclusions	149
6	POUTRES MIXTES AVEC CONNEXION PAR ADHÉRENCE	151
6.1	INTRODUCTION	151
6.2	CALCUL ÉLASTIQUE DE LA RÉSISTANCE EN SECTION ET DE LA DISTRIBUTION DE L'EFFORT RASANT	151
6.3	CALCUL PLASTIQUE DE LA RÉSISTANCE EN SECTION ET CALCUL ÉLASTIQUE DE LA DISTRIBUTION DE L'EFFORT RASANT	152
6.3.1	Distribution simplifiée de l'effort rasant - méthode analytique	152
6.3.2	Modèle numérique	157
6.3.3	Comparaison entre méthode analytique et modèle numérique	160
6.3.4	Méthode de dimensionnement proposée	165
6.3.5	Synthèse	165
6.4	CALCUL PLASTIQUE DE LA RÉSISTANCE EN SECTION ET DE LA DISTRIBUTION DE L'EFFORT RASANT	166
6.4.1	Etat des connaissances	166
6.4.2	Limitation du calcul plastique et conséquences sur le dimensionnement	166
6.4.3	Synthèse	167
6.5	MÉTHODES DE CALCUL	167
6.5.1	Recherche de la ductilité	167
6.5.2	Dimensionnement élastique de la connexion et de la section	168
6.5.3	Dimensionnement élastique de la connexion et plastique de la section	168
6.6	CONCLUSIONS	168
7	PERSPECTIVES PRATIQUES	171
7.1	INTRODUCTION	171
7.2	CONNEXION RECOMMANDÉE POUR LA PRATIQUE	171
7.3	ADÉQUATION AVEC LES EXIGENCES	173
7.3.1	Résistance à l'effort rasant	173
7.3.2	Résistance à la traction	176
7.3.3	Rigidité	177
7.3.4	Ductilité et capacité de déformation	177
7.3.5	Durabilité	178
7.3.6	Exécution	178
7.3.7	Economie	179
7.3.8	Synthèse	180
7.4	MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT SIMPLIFIÉE	180
7.4.1	Méthode de calcul simplifiée pour la résistance de la connexion	180
7.4.2	Comparaison avec les règles de dimensionnement proposées par Dauner	183
7.4.3	Méthode de dimensionnement des poutres mixtes acier - béton	184
7.5	TECHNIQUE D'EXÉCUTION	186
7.6	EVOLUTIONS POSSIBLES	187
7.6.1	Connexion avec un double connecteur	188
7.6.2	Connexion avec les stries orientées dans le sens R2	188
7.6.3	Autres matériaux d'injection	190
7.7	CONCLUSIONS	190
8	CONCLUSIONS	193
8.1	OBJECTIFS ET DÉMARCHE DU TRAVAIL	193

8.2	RÉSUMÉ DÉTAILLÉ.....	193
8.2.1	Evaluation de l'intérêt pratique des connexions par adhérence	193
8.2.2	Compréhension du comportement des connexions par adhérence	194
8.2.3	Développement d'un modèle de calcul des connexions par adhérence	195
8.2.4	Détermination d'une méthode de dimensionnement des poutres mixtes	196
8.3	PRINCIPALES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR L'APPLICATION	196
8.3.1	Principales conclusions	196
8.3.2	Recommandations pour l'application	198
8.4	RECHERCHE FUTURE.....	198
	RÉFÉRENCES	201
	ANNEXE A: MESURE DE LA RUGOSITÉ D'UNE SURFACE	207
	ANNEXE B: VALEURS DE u_{conn} ET DE χ	210
	CURRICULUM VITAE	211