

Summary

Reinforced concrete bridge deck slabs without shear reinforcement can be subjected to concentrated or distributed loads of important magnitude. Under these loads their structural response is not always ductile. In particular under concentrated loads their deformation capacity can be limited by shear or punching shear failures, which prevent them from reaching the ultimate load predicted by pure flexural analysis. This problem has been studied in this research by means of an important experimental program and theoretical modeling.

The limited ductility of bridge decks was investigated by means of full scale tests on bridge deck cantilevers under groups of concentrated loads. Six large scale laboratory tests were performed on two bridge deck cantilevers with a span of 2.8 m and a length of 10.0 m. All slabs failed in a brittle manner, in shear or punching shear. The theoretical flexural failure load estimated using the yield-line method was never attained.

Despite the brittle failures, the results of tests on cantilevers have shown that some amount of yielding can occur before the shear failure and therefore reduce the shear strength. This effect was quantified on eleven full scale tests on slab strips without shear reinforcement with a length of 8.4 m. The results clearly show that the increase of plastic strains in the flexural reinforcement leads to a reduction of the shear strength. The measured rotation capacity of the plastic hinge was thus limited by a shear failure.

A particular problem of bridge deck slabs is the introduction of concentrated loads applied by wheels with pneumatic pressure. Punching shear with these loads is usually treated in a manner similar to punching by a column. A punching shear test was performed with a concentrated load simulating a vehicle wheel with pneumatic pressure to investigate the differences. It appears that punching shear with a wheel with pneumatic pressure is less critical because curvatures tend to be distributed over the surface of the applied load rather than concentrated near the edges of the column.

In order to investigate the experimental results on slab strips without shear reinforcement, a mechanical model is proposed to predict the shear strength and rotation capacity of plastic hinges. The shear strength is formulated as a function of the opening of the shear crack and of the strength of the concrete compression zone. The results of the mechanical model are in good agreement with the measured values, both for the shear strength and for the shear carried across the shear crack. Based on the mechanical model, a simplified equation is proposed. The model can also be used to predict the shear capacity of yield-lines.

A non linear finite element model was implemented during this work and used to correctly predict the measured rotations and load-displacements curves of the tested cantilevers and other full scale tests performed by other researchers. The measured

failure loads are accurately estimated by using the results of the non-linear model and the one-way shear and punching shear criteria proposed by Prof. A. Muttoni (Muttoni 2003).

Keywords: Reinforced concrete, ductility, slabs without shear reinforcement, shear and punching shear strengths, yield-line, concentrated loads, wheel loads with pneumatic pressure, plastic hinge, mechanical model, aggregate interlock, non-linear finite element analysis, shear flow.

Résumé

Les dalles des ponts en béton armé sans armature d'effort tranchant peuvent être sollicitées par des charges importantes, concentrées ou uniformément réparties. Le comportement de la structure sous ces charges n'est pas toujours ductile. En particulier, la capacité de déformation sous charges concentrées peut être limitée par une rupture à l'effort tranchant ou par poinçonnement, sans que la charge de rupture par flexion ne soit atteinte. La recherche présentée aborde cette problématique par un programme expérimental important et par une approche théorique.

Une série d'essais à la rupture, effectuée sur des porte-à-faux de ponts de grande échelle soumis à des groupes de charges concentrées a permis de mieux comprendre le comportement réel et d'évaluer la capacité de déformation des dalles de ponts. Six essais ont été réalisés sur deux porte-à-faux d'une portée libre de 2.8 m et d'une longueur totale de 10.0 m. Le comportement observé a été très fragile avec une rupture par poinçonnement ou par effort tranchant. La charge de rupture par flexion, estimée par la méthode des lignes de rupture, n'a jamais été atteinte.

Les essais sur porte-à-faux de ponts ont montré que les armatures de flexion peuvent atteindre la limite d'écoulement avant la rupture par effort tranchant. La plastification des armatures de flexion peut alors réduire la résistance à l'effort tranchant. Cet effet a été quantifié par onze essais à la rupture effectués sur des poutres sans étriers d'une longueur totale de 8.4 m. Les résultats montrent que la plastification de l'armature de flexion mène à une réduction de la résistance à l'effort tranchant. Ces résultats peuvent aussi être décrits comme une limitation de la capacité de rotation des rotules plastiques provoquée par la rupture à l'effort tranchant.

Un problème particulier aux dalles des ponts est l'introduction des charges concentrées par les pneus des véhicules. Ce cas est aujourd'hui traité de façon similaire au poinçonnement d'une dalle par une colonne. Les différences entre les deux cas ont été investiguées par un essai de poinçonnement d'une dalle soumise à une charge simulant un pneu. Il ressort que le poinçonnement par une charge de roue est moins critique, car les déformations de flexion ont tendance à se répartir plutôt qu'à se concentrer près des bords de la colonne.

Pour l'analyse des résultats expérimentaux sur des poutres sans étriers, un modèle mécanique est proposé pour calculer la résistance à l'effort tranchant et la capacité de rotation des rotules plastiques des poutres sans étriers. La résistance à l'effort tranchant est une fonction de l'ouverture de la fissure critique et de la résistance de la zone comprimée. Les résultats obtenus avec le modèle mécanique sont en bon accord avec les valeurs mesurées, ceci tant pour la résistance à l'effort tranchant et que pour l'effort tranchant transmis au travers de la fissure critique. Sur la base des résultats obtenus avec le modèle mécanique, une équation simplifiée est proposée. Le modèle peut aussi être utilisé pour estimer la résistance à l'effort tranchant des lignes de rupture.

Un modèle non linéaire aux éléments finis a été implémenté durant ce travail. Le modèle non linéaire prédit correctement les rotations et les flèches mesurées lors des essais effectués sur des porte-à-faux dans le cadre de ce travail et lors d'essais à l'échelle 1:1 réalisés par d'autres chercheurs. Les charges de rupture sont calculées d'après les résultats du modèle non linéaire et les critères de rupture au poinçonnement et à l'effort tranchant proposés par le Prof. A. Muttoni (Muttoni 2003). Les charges de rupture mesurées lors des essais sont ainsi estimées avec une bonne précision.

Mots-clés: Béton armé, ductilité, dalles sans armature d'effort tranchant, résistance à l'effort tranchant, résistance au poinçonnement, charges concentrées, rotule plastique, modèle mécanique, critère de rupture, effet d'engrènement, analyse non linéaire, flux d'effort tranchant.

Resumo

As lajes de pontes em betão armado sem armaduras de esforço transverso (estribos) podem ser solicitadas por cargas elevadas, concentradas ou uniformemente repartidas. Sob estas cargas, a ductilidade da estrutura não está sempre garantida. Em particular, a capacidade de deformação das lajes sem estribos pode ser limitada por uma rotura por esforço transverso ou punçoamento, sem que a carga de rotura por flexão seja alcançada. O presente estudo aborda esta problemática na sua vertente experimental através de um elevado número de ensaios de grandes dimensões, e na sua vertente teórica através da modelação física e numérica.

Foram efectuados vários ensaios à rotura sobre lajes de pontes de grandes dimensões sujeitas a grupos de cargas concentradas. Estes ensaios permitiram uma caracterização do comportamento real das lajes e a avaliação da sua capacidade de deformação. Esta série de ensaios consistiu em seis testes efectuados sobre duas consolas com um vão livre de 2.8 m e um comprimento total de 10.0 m. Observou-se sempre um modo de rotura frágil por punçoamento ou esforço transverso. A carga de rotura por flexão, estimada pelo método das linhas de rotura, nunca foi alcançada.

Os ensaios sobre as lajes de pontes mostraram que a cedência das armaduras de flexão pode ocorrer antes da rotura por esforço transverso ou punçoamento, sem que no entanto a carga de rotura por flexão seja alcançada. De modo a poder quantificar a influência que a cedência das armaduras de flexão tem sobre a resistência ao esforço transverso, efectuaram-se onze ensaios à rotura sobre vigas de betão armado sem estribos, com um comprimento total de 8.4 m. Os resultados mostram que a cedência das armaduras reduz a resistência ao esforço transverso (até 50% de redução). Os resultados observados podem também ser descritos como uma limitação da capacidade de rotação das rótulas plásticas devido a uma rotura por esforço transverso.

Um problema particular das lajes de pontes é a aplicação de cargas concentradas por pneus. Este caso é actualmente, na prática corrente, tratado de maneira similar ao punçoamento de uma laje apoiada em coluna de betão. As diferenças entre os dois casos (punçoamento com pneu e com coluna) foram analisadas num ensaio de punçoamento de uma laje solicitada por uma carga concentrada simulando um pneu. Concluiu-se que o punçoamento causado por um pneu é um fenómeno que apresenta maior ductilidade do que o punçoamento causado por uma coluna. A explicação para este facto é a seguinte: as deformações de flexão têm tendência a distribuir-se na zona sob o pneu, em vez de se concentrarem na região da laje junto aos bordos da coluna.

Neste trabalho é proposto um modelo mecânico para o cálculo da resistência ao esforço transverso e da capacidade de rotação das rótulas plásticas em vigas sem estribos. A resistência ao esforço transverso é definida como uma função da abertura da fissura crítica e da resistência da zona comprimida. Os resultados obtidos com o modelo mecânico coincidem bem com os valores medidos, quer para a resistência ao esforço transverso, quer para o esforço transverso transmitido através da fissura crítica. Uma

equação simplificada é proposta com base nos resultados do modelo mecânico. O modelo pode também ser usado para determinar a resistência ao esforço transversal das linhas de rotura em lajes de betão.

Durante este trabalho foi ainda desenvolvido um modelo não linear de elementos finitos. Este modelo foi usado para calcular as rotações e os deslocamentos medidos durante os ensaios de consolas efectuados no âmbito deste trabalho e de outros ensaios à escala 1:1 efectuados por outros investigadores. As cargas de rotura são calculadas usando os resultados do modelo não linear e os critérios de rotura ao punçoamento e esforço transversal propostos pelo Prof. A. Muttoni (Muttoni 2003). As cargas de rotura medidas nos ensaios são assim correctamente estimadas, havendo pouca dispersão entre os valores medidos e calculados.

Palavras chave: Betão armado, ductilidade, lajes sem estribos, resistência ao esforço transversal, resistência ao punçoamento, cargas concentradas, rótula plástica, modelo mecânico, critério de rotura, efeito de inter-bloqueamento dos inertes, análise não linear, fluxo de esforço transversal.

Zusammenfassung

Brückenfahrbahnplatten aus Stahlbeton oder Spannbeton ohne Schubbewehrung können durch Punkt- oder verteilte Lasten von grosser Intensität belastet werden. Unter diesen Lasten ist das Tragwerksverhalten nicht immer duktil. Insbesondere unter Punktlasten kann ihr Verformungsvermögen durch Schub- oder Durchstanzbrüchen begrenzt werden, was sie davon abhält, die nach reiner Biegelehre vorhergesagte Bruchlast zu erreichen. Dieses Problem wird in dieser Forschungsarbeit mittels eines umfangreichen Versuchsprogramms und theoretischer Modellierung untersucht.

Die begrenzte Duktilität von Brückenfahrbahnplatten wurde anhand von Versuchen im Massstab 1:1 an Kragarmplatten unter zwei Gruppen von Punktlasten getestet. Sechs Laborversuche im Massstab 1:1 wurden an zwei Platten mit Spannweite von 2.8 m und Länge von 10.0 m durchgeführt. Alle Platten versagten spröde, auf Schub oder Durchstanzen. Die theoretische Biegebruchlast nach Fliesslinientheorie wurde nie erreicht.

Trotz der spröden Natur der Brüche haben die Ergebnisse der Versuche an den Kragarmen gezeigt, dass Fliesen zu einem gewissen Masse vor dem Schubbruch auftreten kann und daher die Schubtragfähigkeit reduziert. Dieser Effekt wurde bei elf Plattenstreifen ohne Schubbewehrung mit einer Länge von 8.4 m quantifiziert. Die Ergebnisse zeigen klar, dass eine Zunahme der plastischen Dehnungen in der Biegebewehrung zu einer Abminderung der Schubtragfähigkeit führt. Die gemessene Rotationskapazität des plastischen Gelenks war daher beschränkt durch einen Schubbruch.

Ein besonderes Problem von Brückenfahrbahnplatten ist die Belastung durch konzentrierte Lasten mittels Reifen mit pneumatischem Druck. Durchstanzen durch eine solche Last wird generell auf ähnliche Weise behandelt wie Durchstanzen durch eine Stütze. Ein Durchstanzversuch wurde mit einer Last, die einen Fahrzeugreifen mit pneumatischem Druck simuliert, durchgeführt, um die Unterschiede zu untersuchen. Es zeigt sich, dass Durchstanzen mit einer Reife mit pneumatischem Druck weniger kritisch ist, weil die Krümmung sich über die Lastfläche verteilt, und sich nicht an den Stützenrändern konzentriert.

Ein mechanisches Modell wird vorgeschlagen, um die Schubtragfähigkeit und die Rotationskapazität von Fliessgelenken vorherzusagen. Die Schubtragfähigkeit wird in Abhängigkeit von der Schubrissöffnung und der Festigkeit der Betondruckzone formuliert. Die Ergebnisse des mechanischen Modells sind in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten, jeweils für die Schubtragfähigkeit und für den Teil des Schubs, der über den Schubriss hinweg übertragen wird. Basierend auf dem mechanischen Modell wird eine vereinfachte Gleichung vorgeschlagen. Das Modell kann auch zur Vorhersage des Schubtragvermögens von Fliesslinien verwendet werden.

Ein nichtlineares Finite-Elemente-Modell wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und benutzt, um mit vernünftiger Übereinstimmung die gemessenen Verdrehungen und Last-Verschiebungskurven der getesteten Kragarme und die von Versuchen anderer Forscher im Massstab 1:1 vorherzusagen. Die gemessenen Bruchlasten werden bei Benutzung der Ergebnisse des nichtlinearen Modells und des Schub- und Durchstanzkriteriums, welches von Prof. A. Muttoni vorgeschlagt wurde (Muttoni 2003), akkurat abgeschätzt.

Schlüsselwörter: Stahlbeton, Duktilität, Platten ohne Schubbewehrung, Schub- und Durchstanztragfähigkeit, Fliesslinie, Punktlasten, Reifenlasten mit pneumatischem Druck, plastisches Gelenk, mechanisches Modell, Rissuferverzahnung, nichtlineare Finite-Elemente-Berechnung, Schubfluss