

Querkraftverstärkung von Bauteilen mit textilbe- wehrtem Beton

Shear Strengthening of Structural Members with Textile Reinforce Concrete

von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Anett Brückner

Kurzfassung & Thesen

Kurzfassung

Die Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils kann durch verschiedene Maßnahmen gesteigert werden. Zu den weltweit anerkannten Verfahren gehört das oberflächige Aufkleben von Bewehrungen aus Stahl oder Faserverbundkunststoffen. Der textilbewehrte Feinbeton hingegen ist eine noch weitgehend unbekannt Alternative. Es fehlen ebenso systematische Untersuchungen zum Tragverhalten einer solchen Querkraftverstärkung wie geeignete Bemessungsmodelle.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Möglichkeiten einer textilbewehrten Querkraftverstärkung zu analysieren. An Stahlbetonbalken unterschiedlicher Querschnittsgeometrie wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die Aufschluss über die Wirkung der Verstärkung sowie typische Versagenszustände geben.

Die für die Querkrafttragfähigkeit entscheidenden Verformungen des Steges wurden durch photogrammetrische Messungen erfasst. Der Vergleich der verstärkten und unverstärkten Probekörper verdeutlicht signifikante Unterschiede. Bei den verstärkten Probekörpern ist die Stauchung des gemittelten Hauptdehnungszustandes steiler geneigt als bei den unverstärkten Probekörpern. Die steilere Neigung der Hauptstauchung, aufgrund der aufgetragenen Verstärkung, hat nach der rechnerischen Tragfähigkeit des Fachwerkmodells zur Folge, dass weniger Lasten über die Stahlbügelbewehrung abgetragen werden können. Die so fehlende Tragfähigkeit gegenüber dem unverstärkten Bauteil muss die Verstärkungsschicht zunächst ausgleichen, bevor eine Traglaststeigerung möglich ist.

Als zweite wesentliche Wirkung begrenzt die textile Bewehrung die Breite der auftretenden Schubrisse wie anhand der gemessenen Rissbreiten nachgewiesen werden konnte. Die Verstärkung verzögert auftretende Schubrisse und begrenzt deren Breite und Ausdehnung. Ein Versagen der Biegedruckzone durch Schubdruckbruch tritt so erst bei deutlich höheren Lasten ein als es bei unverstärkten Stahlbetonbauteilen der Fall ist.

Nach dem herkömmlichen Fachwerkmodell der Stahlbügelbewehrung sind die Stegbewehrungen eines Bauteils in der Biegedruckzone zu verankern. Externe Querkraftverstärkungen können aber nur selten oder mit hohem Aufwand bis zur Höhe der Biegedruckzone geführt werden. Meist behindern anschließende Querschnittsteile die Erreichbarkeit zur Druckzone.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden die Probekörper mit einer U-förmigen Verstärkung außerhalb der rechnerischen Biegedruckzone versehen. Die geprüften Tragfähigkeiten lagen dennoch deutlich über der Tragfähigkeit der unverstärkten Referenz. Eine Verankerung der Verstärkung am Steg des Bauteils scheint demnach möglich.

Das Kräftegleichgewicht einer solchen Verankerung wurde mit einem neu entwickelten Stabwerkmodell nachgewiesen. Die Eignung des Modells zur Berechnung der Tragfähigkeit der Verstärkung wurde durch Nachrechnung der eigenen Versuche geprüft.

Zusätzliche konstruktive Maßnahmen zur Verankerung der Verstärkung wurden an separaten Verbundprobekörpern untersucht. Es wurden verschiedene Verankerungsmittel geprüft, die durch Querdruck die Tragfähigkeit der Verbundfuge von Alt- und Feinbeton erhöhen. Die besten Ergebnisse erreichten Verankerungen mit vorgespannten Ankern. Die Steigerung der Verbundtragfähigkeit ist allerdings gering, da die notwendigen Bohrungen für die Anker die wirksame Fläche der textilen Bewehrung schwächen.

Thesen

1. Die Querkrafttragfähigkeit eines Stahlbetonbauteils kann durch das Aufbringen einer textilbewehrten Verstärkung deutlich gesteigert werden. Die experimentellen Untersuchungen an Probekörpern unterschiedlichen Querschnitts und Stützweite belegen Traglaststeigerungen bis hin zur Biegetragfähigkeit.
2. Die Verstärkung beeinflusst das Tragverhalten des Stahlbetonbauteils. Auftretende Schubrisse werden durch die textile Bewehrung stärker begrenzt als es bei unverstärkten Bauteilen allein durch die Bügelbewehrung der Fall ist.
3. Die Hauptstauchungen im Stegbereich sind bei verstärkten Bauteilen steiler als bei unverstärkten Bauteilen geneigt. Auf den Winkel der Hauptdruckspannungen übertragen bedeutet die steilere Neigung, dass die Tragfähigkeit der Stahlbügelbewehrung bei verstärkten Bauteilen im Vergleich zum reinen Stahlbetonbauteil geringer ist.
4. Die Traglastdifferenz zwischen verstärkten und unverstärkten Bauteilen entspricht nicht der Tragfähigkeit der Verstärkung. Die Traglastdifferenz ist kleiner, da die Verstärkung den geringeren Lastabtrag der Stahlbügelbewehrung ausgleichen muss.
5. Die Zugstreben einer Querkraftverstärkung müssen nicht zwingend in der Biegedruckzone eines Bauteils verankert werden. Nach dem entwickelten Stabwerkmodell ist das Gleichgewicht der inneren Kraft auch dann erfüllt, wenn die Zugstreben auf den geneigten Druckstreben des Steges abgestützt werden.
6. Die Verankerung der textilbewehrten Verstärkung kann über den Haftverbund von Altbeton (Stahlbetonbauteil) und Feinbeton (Verstärkung) erfolgen. Zusätzliche konstruktive Maßnahmen der Verankerung sind nach den durchgeführten Verbunduntersuchungen nur eingeschränkt zu empfehlen.
7. Das Stahlbetonbauteil und die textilbewehrte Verstärkung können bei fachgerecht ausgeführter Verbundfuge wie ein monolithisch hergestellter Querschnitt behandelt werden. Die Verbundspannungen zwischen den Querschnittsteilen sind gegenüber den Beanspruchungen infolge der Verankerung der Verstärkung nicht maßgebend.
8. Die Verstärkungswinklung der textilen Bewehrung ist nicht allein auf deren Tragfähigkeit zurückzuführen. Bei Bauteilen mit Gefahr eines Schubdruckversagens bewirkt die textile Bewehrung ein verzögertes Einschüren der Biegedruckzone durch Begrenzung der Schubrisssbreiten. Die Folge ist eine höhere Tragfähigkeit der Bauteile.
9. Mit dem Fachwerkmodell der Stahlbügelbewehrung wird die Tragfähigkeit von gering schubbewehrten Stahlbetonbauteilen deutlich unterschätzt. Zusätzliche Tragmechanismen wie ein Betondruckbogen sind nicht auszuschließen.
10. Die Tragfähigkeit der textilbewehrten Querkraftverstärkung ist experimentell nicht eindeutig zu ermitteln. Sie kann nur über die geprüfte Traglaststeigerung gegenüber der unverstärkten Referenz und den rechnerisch fehlenden Traganteil der Stahlbügelbewehrung eingeschränkt werden.
11. Das neu entwickelte Fachwerkmodell ist für die Berechnung der Tragfähigkeit von Querkraftverstärkungen geeignet. Die rechnerischen Tragfähigkeiten liegen innerhalb des theoretisch möglichen Bereichs.

Abstract

Shear resistance of structural members can be increased by different measures. So far only reinforcements from steel or fibre-reinforced plastic pasted on the surface have been acknowledged worldwide. Textile reinforced fine grained concrete, however, is still mostly an unknown option. Systematic research into the load bearing behaviour of this kind of shear strengthening as well as qualified design rules are missing.

It is the aim of this thesis to analyse the possibilities of textile reinforced shear strengthening. Experimental investigations on RC beams with different cross sectional geometries provided information about the strengthening effect as well as common failure modes.

The web deformations, which are crucial for the shear resistance, were recorded by photogrammetric measurements. A comparison of strengthened and unstrengthened specimen demonstrates significant differences. In case of the strengthened sample, the compressive strain of the averaged principle strain condition has a steeper inclination than in case of the unstrengthened specimen. This steeper inclination ensues from the applied strengthening. According to the calculated load-bearing capacity of the truss model, the steeper inclination results in less loads being removed by the steel stirrup reinforcement. Compared to the unstrengthened structural member, this lack in the load-bearing capacity has to be evened out by the strengthening layer before an increase in the load carrying capacity is possible.

Secondly, the textile reinforcement limits the width of the occurring shear cracks. This could be proven by measuring the crack-width. The strengthening delays occurring shear cracks and restricts their widths and extension. Consequently, failure of the flexural compression zone induced by shear cracks only occurs under significantly higher loads than in unstrengthened RC members.

In the traditional truss model of the steel stirrup reinforcement, the web reinforcements of a structural member have to be anchored in the flexural compression zone. However, external shear strengthening can be pulled up to the height of the flexural compression zone only rarely or with great effort. Often connected parts of the cross section prevent access to the compression zone.

For the purpose of the experimental analysis, the specimens were fit with a U-shaped strengthening layer outside the calculated flexural compression zone. Nevertheless, the measured load-bearing capacities were distinctly higher than the load-bearing capacity of the unstrengthened reference beam. Consequently, anchoring the strengthening at the specimen's web appears to be possible.

The force balance of such an anchorage could be proved with the help of a newly developed strut-and-tie-model. The applicability of the model for calculating the load bearing capacity of the strengthening was checked by recalculating the corresponding test results.

Additional structural measures for anchoring the strengthening were tested on separate bond specimens. Furthermore, various anchorage materials which increase the load carrying capacity of the interface between old and fine grained concrete through transverse pressure were tested. The best results could be achieved with pre-stressed anchorages. However, the resulting load-bearing capacity's increase was only slight because the drill holes required for the anchors reduce the effective area of the textile reinforcement.

Theses

1. The RC member's shear resistance can be distinctly increased by applying textile reinforcement. The experimental tests on samples with differing cross sections and spans proved increases in the load bearing capacity up to flexural capacity.
2. The strengthening affects the load-bearing behaviour of the RC member. The textile reinforcement limits occurring shear cracks better than the exclusive use of the stirrup reinforcement in unstrengthened structural members.
3. In case of the strengthened structural members, the main compressive strain in the web's area has a steeper inclination than in case of the unstrengthened structural members. Regarding the angle of the main compressive stress the steeper inclination indicates that the load-bearing capacity of the steel stirrup reinforcement is lower for strengthened structural members than for the pure RC member.
4. The difference between the ultimate load of the strengthened and the unstrengthened structural member does not correspond with the load bearing capacity of the strengthening. The difference between the respective ultimate loads is smaller because the strengthening layer has to even out the lower load transfer of the steel stirrup reinforcement.
5. The ties of the shear strengthening do not necessarily have to be anchored in the flexural compression zone of the structural member. According to the developed strut-and-tie-model the internal force is also balanced when the ties are supported by the inclined compressive struts of the web.
6. The textile reinforced strengthening layer can also be anchored through the adhesive tensile bond between old concrete (RC member) and fine grained concrete (strengthening). Based on previous bond tests, additional structural anchorage designs can only be partially recommended.
7. The RC member and the textile reinforced strengthening can be treated as monolithically produced section if the bonding joint has been carried out professionally. Compared to the stress resulting from anchoring the strengthening layer, the bond stress between the section's parts is not decisive.
8. The strengthening effect cannot exclusively be reduced to the textile reinforcement's load bearing capacity. In case of structural members which are in danger of shear failure of the compression zone, the textile reinforcement delays the decrease in height of the compression zone due to a limited shear crack width. The result is an increased load-bearing capacity of the structural members.
9. The truss model of the steel stirrup reinforcement results in a distinctive underestimation of the load-bearing capacity of RC members with only a slight shear reinforcement. Additional load-carrying mechanisms such as a concrete compression arch cannot be excluded.
10. The load bearing capacity of the textile reinforced strengthening layer is not clearly indicated by experimental tests. It can only be limited by the examined higher load-bearing capacity compared to the unstrengthened reference beam and the calculative decrease of load bearing capacity of the steel stirrup reinforcement.

11. The new developed strut-and-tie model can be used for the calculation of the load bearing capacity of shear strengthening layer. The calculated results are in the theoretically possible range.