

**Der Einfluss einer zwei axialen Zugbelastung
auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten
von Beton und gemischt bewehrten Bauteilen**

**The influence of a biaxial tensile stress
on the strength and deformation behavior
of concrete and mixed reinforced concrete components**

Kurzfassung und Thesen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden

eingereicht von
Dipl.-Ing. Steffen Schröder
geboren am 11.08.1972 in Erfurt

Eingereicht am
20.08.2012

Kurzfassung

Das Zugtragverhalten von bewehrten und unbewehrten Bauteilen wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Maßgeblich wird es von der Festigkeit des verwendeten Betons, dem Verbundverhalten zwischen Bewehrung und Beton sowie vom vorhandenen Spannungszustand im Bauteil bestimmt. In der Regel werden im täglichen Planungsgeschäft des Ingenieurs einaxiale Spannungszustände unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften des Betons aus den Standardprüfungen betrachtet. Jedoch treten in einer Vielzahl von Anwendungen mehraxiale Spannungszustände auf. Beispielhaft sollen hier Bereiche von zweiachsig spannenden Deckenplatten, in Bereichen von Rahmenecken, rotationssymmetrischen Bauwerkshüllen sowie bei Brückenbauwerken mit durchlaufender Fahrbahn im Bereich der Stützen genannt werden. Normative Regelungen sehen bisher im Falle einer zweiachialen Druckbeanspruchung lediglich die Erhöhung der Druckfestigkeit bzw. Verbundspannung vor. Regelungen zur Festigkeit des Betons unter zweiachialer Zugbelastung existieren dagegen nicht.

Daraus abgeleitet stellt sich die Frage, welchen Einfluss eine zweiachiale Zugbeanspruchung auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten von unbewehrten und bewehrten Bauteilen ausübt. Mit Blick auf übliche Konstruktionsbetone sollen diese Fragestellungen für einen Beton C20/25 und C40/50 geklärt werden.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden hierzu Versuche an unbewehrten Betonsscheiben und gemischt bewehrten Bauteilen durchgeführt. Das im CEB-FIP MODELL CODE 90 vorgestellte Modell zur Beschreibung des einaxialen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens bildet das reale Verhalten von Beton unter zweiachialer Zugbelastung nur ungenügend ab. Hierfür werden Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Beton unter Berücksichtigung von zweiachialen Spannungszuständen für einen Beton C20/25 und C40/50 entwickelt. Weiterhin werden Bruchkriterien für die zwei Betonsorten vorgestellt, mit denen die Zugfestigkeit des Betons unter zweiachialer Zugbelastung bestimmt werden kann. Während bei einem Beton C20/25 die zweiachiale Zugfestigkeit annähernd der einaxialen Zugfestigkeit entspricht, so nimmt die Zugfestigkeit des Betons C40/50 unter zweiachialer Zugbelastung um ca. 25 % ab. Hinsichtlich der Bruchdehnungen unter zweiachialer Zugbelastung wurde festgestellt, dass diese mit steigendem Spannungsverhältnis $\sigma_1 : \sigma_2$ abnehmen. Darüber hinaus bilden die Modelle zur Bestimmung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens des unbewehrten Betons die Versuchsergebnisse sehr gut ab. Mit Hilfe der hier vorliegenden Ergebnisse können somit das Verformungs- und Festigkeitsverhalten von Beton unter zweiachialer Zugbelastung sehr gut abgebildet werden.

In Bauteilversuchen wurde das Verformungsverhalten unter zweiachialer Zugbelastung von gemischt bewehrten Bauteilen untersucht. Die Bestimmung der Verformungen erfolgte hierbei mittels Dehnmessstreifen auf der Betonoberfläche, dem schlaffen Bewehrungsstahl und dem im nachträglichen Verbund liegenden Spannglied. Ein indirekter Nachweis des Einflusses auf das Verbundverhalten des Spanngliedes erfolgte. Es wurde aufgezeigt, dass unter zweiachialer Zugbelastung die Dehnungen im Spannstahl infolge der Längsrisssbildung über dem Hüllrohr abnehmen. Dies lässt die Aussage zu, dass die Verbundwirkung des Spanngliedes durch eine orthogonal wirkende Zugbelastung negativ beeinflusst wird. Aufbauend auf den Versuchsergebnissen wird eine Empfehlung für den Einsatz von Dehnmessstreifen zur Bestimmung der Verformungen auf einbetonierten Betonstählen gegeben. Die Berechnung der Erstrisslasten aus den Bauteilversuchen mit den entwickelten Bruchkriterien hat eine sehr gute Übereinstimmung ergeben.

Thesen

- Die Zugfestigkeit des normalfesten Betons wird im Wesentlichen durch die Festigkeit des Zementmörtels, durch den Verbund zwischen Zuschlag und Zementleim und durch den Wasser-Zement-Wert beeinflusst. Die Bestimmung der Zugfestigkeit erfolgt an standardisierten Versuchskörpern unter einaxialer Belastung und unterscheidet sich von der Festigkeit des Betons unter zweiaxialer Zugbelastung.
- Durch das Aufbringen einer zweiten orthogonal zur Hauptzugrichtung wirkenden Zugkraft wird das Verformungs- und Festigkeitsverhalten des Betons beeinflusst.
- Das Verhalten des Betons unter zweiaxialer Zugbelastung ist abhängig von der Betongüte. So übt eine zweiaxiale Zugbelastung einen unterschiedlichen Einfluss auf die Zugfestigkeit des Betons C20/25 und des Betons C40/50 aus. Eine eindeutige Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Beton unter zweiaxialer Zugbelastung existiert nicht. Die Betrachtung in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit ist erforderlich. Die Bruchdehnungen des Betons sind vom Spannungsverhältnis $\sigma_1 : \sigma_2$ abhängig.
- Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Beton wird von der Betongüte beeinflusst. Ein Beton C40/50 weist gegenüber einem Beton C20/25 einen größeren linearelastischen Bereich auf.
- Eine befriedigende Abbildung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Beton kann nicht mit dem im CEB-FIP MODELL CODE 90 vorgeschlagenen Modell unter zweiaxialer Zugbelastung erfolgen. Die hier festgelegte Bruchdehnung von 0,15‰ spiegelt nicht die realen Bruchdehnungen wider und kann nicht auf alle Betone übertragen werden.
- Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter zweiaxialer Zugbelastung ist u. a. von der Betongüte abhängig. Die Berücksichtigung der Nichtlinearität, der Bruchdehnung neben der Betongüte ist unabdingbar.
- Gemischt bewehrte Bauteile, die einer zweiaxialen Zugeinwirkung unterliegen, zeigen gegenüber einer einaxialen Zugeinwirkung ein verändertes Verformungsverhalten. Bauteile unter einer zwei-axialen Zugbelastung weisen gegenüber Bauteilen unter einaxialer Zugbelastung ein verändertes Rissbild auf, die mittleren Rissabstände nehmen mit steigendem Spannungsverhältnis unter zwei-axialer Zugbelastung zu.
- Ebenso wie das Rissbild wird auch das Verbund- und Verformungsverhalten der Bewehrung von den vorherrschenden Spannungszuständen beeinflusst. Durch die indirekte Einleitung von Zugkräften über den Verbund in die Spannstahlbewehrung kann eine qualitative Aussage auf das Verbundverhalten des im nachträglichen Verbund liegende Spannglied getroffen werden.

- Querszuginduzierte Risse üben einen nachhaltigen Einfluss auf Spannstahllitzen im nachträglichen Verbund aus. Mit zunehmender Längsrissweite über den Hüllrohren nehmen die Dehnungen im Spannstahl ab.
- Der Zeitpunkt bzw. das Lastniveau der Längsrissbildung im Bereich des Hüllrohres beeinflusst das Verbund- und Verformungsverhalten des Spanngliedes. Je geringer das Verhältnis von Risskraft zur Maximallast, umso geringer sind die Dehnungen der Spannstahllitze am Versuchsende.

Abstract

The tensile load-bearing characteristics of structural elements made of reinforced or non-reinforced concrete is influenced by a number of factors. Mainly it depends on the strength of the concrete, the interaction between the concrete and the rebar, and the state of stress in the concrete element. Traditionally the designing engineer examines uni-axial stress conditions under consideration of the material properties of the concrete based on standard tests. However, multiple-stress conditions apply for a number of application of such elements, e.g. in concrete slabs designed for bi-axial load bearing, in the joints of frames, in axial symmetrical constructions, or in the intersections of column and deck of multi-span bridges. The commonly used design standard recommends the increase of the compression strength of the concrete or the bond stress for cases of bi-axial load-bearing caused by compression. However, no recommendations are given for the design strength of a concrete under bi-axial tensile stress.

Therefore it is interesting to know how a bi-axial tensile stress is influencing the load-bearing and deformation behaviour of structural elements made of reinforced or non-reinforced concrete. This has been investigated for two commonly used concretes (C20/25 and C40/50).

Part of an earlier research programme was to perform trials on slabs made of reinforced and non-reinforced concrete. In result a model CEB-FIP MODELL CODE 90 was introduced to describe the deformation of the slab due to a uni-axial stress. However, the model does not satisfactory describe the real behaviour of the slab under a bi-axial tensile stress. In this dissertation a new model will be presented to describe the deformation behaviour of a Concrete C20/25 and a Concrete C40/50 under bi-axial tensile stress. Furthermore, criteria for the two concretes are introduced to describe the ultimate limit state under bi-axial tensile stress. It has been found the bi-axial tensile strength of a Concrete C20/25 is comparable to its uni-axial strength. In difference, the tensile strength of a Concrete C40/50 is decreased by 25 % when subject to bi-axial stress. The ultimate limit stress due to bi-axial tensile stress decreases with increasing ratio of the stress $\sigma_1 : \sigma_2$. The Strains σ_1 and σ_2 are the strains as a result of the biaxial tensile forces in the main directions. The presented model to describe the strain-stress behaviour of an unreinforced concrete is found to agree well with the observations from the trials. Based on the results of this thesis it is possible to describe the strain-stress behaviour of concrete under bi-axial tensile stress.

The stress-strain behaviour of structural elements has been investigated under bi-axial tensile stresses. Strains have been monitored with strain-gauges fixed to the surface of the concrete, to the rebars and to the post-tensioning tendons. Therefore, the influence to the interaction of tendon and concrete has been demonstrated indirectly. Furthermore, it has been shown the strain of the tendon decreases following the development of cracks along the grout tube due to the application of bi-axial tensile stress. It can be concluded the bound of the tendon is influenced adversely by tensile stresses applied in perpendicular direction. Recommendations are given for the application of strain-gauges to measure strains of rebars set in concrete. Based on these trials, the estimation of the critical stress to develop initial cracks has been found in good agreement to the presented criteria.

Theses

- The tensile strength of a normal strength concrete is mainly influenced by the strength of the cement, the bond between aggregates and cement and the water-cement ratio. The tensile strength is determined based on standardised samples subject to uni-axial stresses. The destined tensile strength under uni-axial stresses is different to the tensile strength under bi-axial stresses.
- The stress-strain behaviour of the concrete is altered if a second tensile force is applied perpendicular to the direction of the main force.
- The behaviour of the concrete subject to bi-axial tensile stress depends on the quality of the concrete. Bi-axial tensile stress influences the tensile strength of a concrete C20/25 and a concrete C40/50 in different ways. A unique model to describe the stress behaviour of concrete subject to bi-axial stress does not exist. It is required to consider the compression strength of the concrete.
- The stress-strain behaviour is influenced by the quality of the concrete. A concrete C40/50 exhibits of wider linear-elastic behaviour compared to a concrete C20/25.
- To describe the strain-stress behaviour of a concrete satisfactory, the introduced CEB-FIP MODELL CODE 90 can not be used. The model criteria of a strain at failure of 0,15‰ does not reflect the true behaviour and should not be adopted for all qualities of concrete.
- The stress-strain behaviour under bi-axial stress depends among others on the quality of the concrete. The consideration of non-linearity, the elongation at break in addition to the concrete quality is essential.
- Structural elements reinforced by rebars and tendons or by rebars only are characterised by a different strain behaviour under bi-axial stresses compared to uni-axial stresses. The crack behaviour and the crack pattern differ too, e. g. the mean distance between the cracks depends on the increasing stress ratio.
- By indirect introduction of tensile forces on the composite in the steel reinforcement, a qualitative statement can be made on the bond behavior of the post-tensioning tendons.
- Cracks induced by lateral stress influence the post-tensioning tendons. The stresses within the tendon decrease with increasing width of the longitudinal cracks above the cladding tube.
- The moment of the development of longitudinal cracks and respectively the associated stresses at the level of the grout tube influence the bond behaviour and strain-stress behaviour of the tendon. The lower the ratio of crack force to the maximum load, the lower the strain of prestressing steel strand at the end of the experiment.