

Zusammenfassung der Promotionsschrift

Modelling of Cyclic Crack Propagation in Concrete using the Scaled Boundary Finite Element Method

Modellierung der zyklischen Rissausbreitung in Beton mit Hilfe der Scaled
Boundary Finite Elemente Methode

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Omar Alrayes, M.Sc.

geboren am 10. Februar 1988

Status des Doktoranden: Intern

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke

Weimar, April 2023

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Viele Betonkonstruktionen, wie Brücken und Windkraftanlagen, versagen infolge Biegebeanspruchungen oder unter zyklischen Belastungen infolge Ermüdungsbruch, bei denen Risse entstehen und sich ausbreiten. Aus diesem Grund ist eine detaillierte Analyse des Ermüdungsverhaltens und der damit verbundenen Rissausbreitung für einen wirtschaftlichen und zuverlässigen Entwurf von Betonstrukturen erforderlich.
2. Ermüdungsbedingte Schäden lassen sich in Abhängigkeit von Belastungs- und anderen Umweltbedingungen in verschiedene Kategorien einteilen. Die Belastungsbedingungen können dabei in drei Kategorien eingeordnet werden: (a) hohe zyklische Ermüdungsbelastungen mit mehr als 1000 Lastzyklen, (b) niedrige zyklische Ermüdungsbelastungen mit weniger als 1000 Zyklen und (c) sehr geringe zyklische Ermüdungsbelastungen für eine bestimmte Anzahl von Zyklen (z. B. 10 Zyklen).
3. Fahrzeuglastschwingungen werden als hohe zyklische Ermüdung eingestuft, die durch kleine elastische Dehnungen bei einer hohen Anzahl von Lastzyklen verursacht werden. Erdbebenbelastungen hingegen werden als Ermüdung mit geringer Zyklenzahl eingestuft. Zyklische Feuchtigkeitsbelastungen können ebenfalls zum Versagen bewehrter Betonstrukturen durch Korrosionsermüdung führen. Die zeitliche Entwicklung und der Umfang des Schädigungsprozesses der Materialfestigkeit hängt vor allem von der Art der Belastungshäufigkeit ab.
4. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Vorhersage des Risswachstums und der Schadensakkumulation infolge sehr geringer zyklischer Lasten in Betonbauteilen.

Stand der Wissenschaft

5. Bisherige Studien zur Rissausbreitung unter zyklischen Lasten in Beton sind in erster Linie empirisch aufgebaut, bei denen vorrangig eine große Anzahl von experimentellen Daten für die Anpassung der Parameter in numerische Simulation verwendet werden. Phänomenologische Ansätze wie das Pariser Gesetz werden hierbei zur Vorhersage der Ermüdungslebensdauer und der Risswachstumsrate verwendet. Es hat sich jedoch gezeigt, dass solche phänomenologisch basierten Auswertungsverfahren einen Großteil ihrer Vorhersagekraft im Rahmen einer numerischen Simulation verlieren, da der Riss sehr langsam wächst und die Schädigungszone unter zyklischer Belastung für einen großen Teil der Lebensdauer des Betons nicht erkannt wird.
6. In der Literatur wird im Bereich der klassischen Bruchmechanik für die numerische Berechnung das Kohäsionszonenmodell (CZM) eingesetzt, um die Materialschädigung und Rissausbreitung bei monotoner Belastung zu simulieren. Bei zyklischen Belastungsszenarien ist die Vorhersage der Rissausbreitung jedoch noch im Rahmen der genannten Analyseverfahren begrenzt.
7. Bei Beton wurden Schädigungsmodelle, deren Lokalisierung numerisch durch die Finite-Elemente-Simulation bestimmt wurde, dazu verwendet, die Ausbreitung des Bruchs in kohäsiven Prozesszonen unter monotoner Belastung zu simulieren. Die Bestimmung der Schäden erfolgt dabei nur entlang der Be-/Entladepfade.

8. In der Literatur finden sich mehrere Modellierungsansätze, die auf Basis der Finite Elemente Methode (FEM) die Rissausbreitung unter zyklischer und ermüdungswirksamer Belastung beschreiben. In diesem Zusammenhang wurde das Kohäsionszonenmodell (CZM) in die klassische Bruchmechanik implementiert, um die für die Rissimulation erforderliche Netzqualität zu reduzieren.
9. Viele Modelle in der Literatur sind der Simulation des quasi-spröden Bruchverhaltens gewidmet, einschließlich einer Reihe von konstitutiven Gleichungen für monotonen und zyklisches Materialverhalten. Darüber hinaus gibt es mehrere Berechnungsschemata zur Vorhersage des monotonen Zug-, Biege- und Ermüdungsverhaltens von Werkstoffen. Zur konkreten Energiedissipation unter zufälligen Zyklen ist allerdings ein Schadensakkumulationsprozess erforderlich.
10. Eine der wichtigsten Implementierungen der SBFEM ist die Modellierung der Rissentstehung und -ausbreitung unter allgemeinen Belastungsbedingungen. Das kohäsive Bruch- und Spannungsfeld kann mit Hilfe von Grenzflächenelementen der Dicke-Null bestimmt werden, die für nur monotone Belastung direkt in die SBFEM eingefügt sind. Die kohäsiven Zugkräfte und das Spannungsfeld nahe der Risspitze können auf der Grundlage einer analytischen Definition genau berechnet werden. Dies ermöglicht den Rissverlauf vorherzusagen und das korrekte Last-Verformungs-Verhalten für unterschiedliche Lastszenarien zu erhalten.

Eingesetzten Methoden

11. In der vorliegenden Arbeit wurde ein neuartiges Risschädigungsmodell unter zyklischer Belastung im Rahmen der SBFEM entwickelt. Das Modell geht davon aus, dass das kumulative Rissöffnungs-/Gleitmaß den Schädigungsmechanismus bei unterkritischen Belastungsniveaus dominiert.
12. Ziel dieses Ansatzes ist es, eine zyklischen Schädigungsrate in die effiziente SBFEM zur Modellierung der Rissausbreitung zu integrieren. Durch den Vergleich mit dem konstitutiven Modell für den Bruch können mehrere Aspekte bereitgestellt werden, die den Be- und Entlastungspfad, die Schädigungsentwicklung und das Rissverschiebungsverhalten während des Belastungszyklus einbeziehen. Dieses Modell wurde entwickelt, um die sich ausbreitenden Risse in Abhängigkeit von der Richtung der aufgebrachten Lasten in der Struktur analytisch abzubilden. Es stellt damit ein effizientes Modell zur Simulation und Erfassung des zyklischen Bauteilverhaltens dar.
13. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine allgemeine Herleitung der SBFEM gegeben, um die Rissausbreitung im untersuchten Bereich zu simulieren. Das konstitutive Materialgesetz wird in der SBFEM Berechnung als Interface-Element an der Risspitze eingefügt. Das nichtlineare, konsistente Grenzflächenmodell wird mit Hilfe eines Algorithmus zur Verschiebungskontrolle integriert, um die Lastverschiebung sowohl für monotone als auch für zyklische Belastungsszenarien zu erhalten. Die zyklische Schadensakkumulation während der Be- und Entlastung wird innerhalb des konstitutiven Betonmodells formuliert.
14. Um die entwickelte Methode zu validieren wurden, drei allgemein übliche Probleme der Dreipunkt-Biegung eines Betonträgers untersucht. Außerdem wurden zwei

Probleme der Vierpunkt-Biegung für die Ausbreitung von Rissen bei monotoner und zyklischer Belastung modelliert und die Ergebnisse mit verfügbaren Daten aus mehreren Veröffentlichungen verglichen und diskutiert. Die Simulationsergebnisse zeigten hierbei eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen aus der Literatur.

Wesentliche Ergebnisse

15. Das vorgeschlagene Verfahren stellt ein effizientes Werkzeug zur Abschätzung des Schädigungsgrades von Betonmaterial dar. Es lieferte eine realistische Vorhersage des zyklischen Schädigungsverhaltens bis zu mehreren Lastzyklen.
16. Der skalare Schädigungsparameter ω hat nach dem Spitzenwert der ersten zyklischen Belastung für Dreipunkt-Biegung der kleinen Betonträger einen Wert von mehr als 0,5 und für den großen Betonträger einen Wert von mehr als 0,65.
17. Das vorgeschlagene Modell hat gezeigt, dass es in der Lage ist, das monotone und zyklische Verhalten eines kohäsiven Rissgrenzflächenelements, z. B. einer Betongrenzfläche, zu simulieren.
18. Die Ergebnisse der numerischen Simulation der monotonen Belastungsanalyse zeigten eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Daten aus der Literatur. In der Dreipunkt-Biegung-Simulation wichen die numerischen Ergebnisse nur um 5% von der experimentell ermittelten, maximalen Belastung ab.
19. Das Verhältnis der numerischen Ergebnisse der Nennfestigkeit zu den korrespondierenden experimentellen Daten unter monotoner Belastung variierte zwischen (1,01 - 1,04) für die kleine Größe des getesteten Trägers. Bei den großen geprüften Trägern lag das Verhältnis bei (0,98 - 1,02).
20. Das vorhergesagte Last- Rissöffnung/Gleitverschiebung Verhalten (CMOD/CMSD) lag innerhalb des bei den Versuchen gemessenen Bereiches. Die vorhergesagte Höchstlast beträgt im zweiten Beispiel 3,67 kN, bei einem CMOD von 0,017 mm, und liegt damit nahe der im Experiment auftretenden Höchstlast.
21. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die beiden wichtigsten Faktoren für die Gesamtsimulation der thermodynamische Verfestigungsmodul γ und der Schädigungsfestigkeitsparameter S sind.
22. Die vorgeschlagene Methode ermöglicht es, genaue Stressintensitätsfaktoren für KI und KII direkt aus der SBFEM zu extrahieren, ohne dass ein feines diskretisiertes Netz für verschiedene Spannungszustände erforderlich ist.
23. Die Ergebnisse der zyklischen Belastungssimulation zeigten eine perfekte Übereinstimmung mit den experimentellen Daten aus der Literatur. Für ein Integrationsschema mit 8 Gauß-Punkten auf der Ebene der Materialsimulation konnte eine signifikante Beeinflussung des gesamten zyklischen Verhaltens durch die kohäsive Domäne beobachtet werden.
24. Die vorgeschlagene Analysemethode kann ebenfalls als Werkzeug für die Bewertung von Materialermüdung im Rahmen einer nichtlinearen Finite-Elemente Berechnung verwendet werden.
25. Die entwickelte Methode ist weiterführend auch auf Offshore-Gründungen, Staumauern und unbewehrten Verkehrsflächen anwendbar.

16.02.2023

C. Köhler