

Zusammenfassung der Promotionsschrift

**Experimental and Numerical Analysis of the Effects of
Aggregate Coatings on Concrete Properties**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Yisihak Gebre Tarekegn

Betreuer: Prof. Tom Lahmer, Bauhaus – Universität Weimar

Ko- Betreuer:

Dr. Abrham Gebre (Associate Prof.), Addis Ababa University, AAiT

Dr. Esayas G/Yohannes (Associate Prof.), Addis Ababa University, AAiT

Weimar, April 2024

Problemstellung

1. Dynamische Belastungen, wie Erdbeben, Stöße und Fahrzeuglasten können auf Betonbauten einwirken und erhebliche Schäden am Tragwerk oder von Fahrbahnen verursachen. Dabei verkürzen sie deren Lebensdauer. Um diese Auswirkungen zu verringern, ist es wichtig, die dynamischen Betoneigenschaften zu verbessern.
2. Die breite Anwendung von Beton in der Bauindustrie hat zu einer steigenden Nachfrage nach einer besseren Widerstandsfähigkeit gegen Stoß- und dynamischen Belastungen geführt. Mehrere Forscher haben bereits Beschichtungen der Gesteinskörnungsoberfläche mit verschiedenen Beschichtungsmaterialien und Beschichtungsdicken untersucht, die sich auf die Betoneigenschaften auswirken.
3. Einige der Beschichtungsmaterialien sind jedoch nicht wirksam, da eine schwache Verbindung zwischen der groben Gesteinskörnung und dem Zementmörtel besteht. Daher wurde ein neuer Beschichtungsansatz unter Verwendung von Epoxidharz mit Sand angewandt, um die Grenzflächeneigenschaften der Gesteinskörnungsoberfläche zu verbessern.

Zielsetzung der Arbeit

Ziele dieser Arbeit sind:

4. die Auswirkungen von Gesteinskörnungsbeschichtungen (Epoxid, Epoxid-Sand, Epoxid-Kautschuk und mit Silikon beschichtete Gesteinskörnungen) auf die Betoneigenschaften bei unterschiedlichen Belastungsraten zu untersuchen und eine empirische Formel zu entwickeln, die die Druckfestigkeit von Beton mit Belastungsraten korreliert,
5. die Dämpfungseigenschaften von Beton mit verschiedenen Beschichtungsmaterialien für unterschiedliche Beschichtungsdicken zu untersuchen,
6. die optimale Beschichtungsdicke und das optimale Beschichtungsmaterial zur Verbesserung der Dämpfungseigenschaften von Beton zu ermitteln,
7. die Auswirkung eines teilweisen Ersatzes der groben Gesteinskörnung durch Gummi und sandumhüllte Gummischnitzel auf die Betoneigenschaften zu untersuchen,
8. den Vergleich der Ergebnisse aus experimentellen Prüfungen und numerischen Simulationen (Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory und Abaqus) für die Eigenschaften von Beton mit beschichteten Gesteinskörnungen durchzuführen und damit die Ansätze zu validieren.

Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse

9. Die bisherige Forschung konzentrierte sich hauptsächlich auf die Untersuchung der Druckfestigkeit von Beton mit beschichteten Gesteinskörnungen. Die Verwendung von beschichteten Gesteinskörnungen in Beton wurde hauptsächlich unter statischen Belastungsbedingungen durchgeführt. Die dynamischen Eigenschaften von Beton mit beschichteten Gesteinskörnungen wurden jedoch nur wenig untersucht.
10. In den letzten Jahren wurden viele Studien über die Beschichtung von Gesteinskörnungen durchgeführt. Die Anwendung von Epoxid-, Epoxid-Gummi-, Silikon- und Epoxid-Sand-Beschichtungen ist jedoch selten. Dennoch gibt es nur einige wenige Studien, in denen die Beschichtung von Gesteinskörnungen mit Epoxidharz verwendet wurde. Bei diesen wurden nur die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Betons untersucht.
11. Studien haben gezeigt, dass die Beschichtung von Gesteinskörnungen mit Kunststoffen den Schlagwert der Gesteinskörnung und die Qualität der Gesteinskörnung verbessert. Außerdem kann eine minderwertige Gesteinskörnung durch die Beschichtung mit Polymeren nutzbar gemacht werden.
12. Tonbeschichtungen auf groben Gesteinskörnungen wirken sich auf die Eigenschaften von frischen und ausgehärteten Betonproben aus. Es wurde festgestellt, dass Tone mit kristalliner Quellung höhere Werte des Trockenschwindens im Beton verursachen und dass die Druckfestigkeit von mit Ton beschichteten Gesteinskörnungen deutlich niedriger war als die von Normalbeton.
13. Studien deuten hauptsächlich darauf hin, dass die Verwendung von Altreifengummi als grober Zuschlagstoff in Beton die Druck-, Zug- und Biegefestigkeit des modifizierten Betons verringert. Eine der Hauptursachen war das Versagen der Adhäsion zwischen der Gummioberfläche und dem erhärteten Zementstein. Darüber hinaus haben sich nur wenige Studien auf die Oberflächenbehandlung von Gummischnitzeln zur Verbesserung der Betoneigenschaften konzentriert.

Verwendete Methoden

14. Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften von Beton mit beschichteten Gesteinskörnungen wurden standardisierte Prüfungen wie Druckfestigkeitsprüfung, Spaltzugfestigkeitsprüfung, Schwindprüfung und Prüfung des statischen Elastizitätsmoduls durchgeführt.
15. Zur Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Beton wurden zerstörungsfreie Prüfverfahren wie die Ultraschall-Impulsgeschwindigkeitsprüfung (UPV) und die Schlagresonanzprüfung (IRT) eingesetzt.

16. Die Methoden des freien Schwingungsabfalls und der halben Leistungsbandbreite wurden zur Bestimmung des Dämpfungsgrads von Beton eingesetzt.
17. Numerische Simulationssoftware wie Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory und Abaqus/CAE wurde zur Vorhersage der Eigenschaften von Beton mit beschichteten Zuschlagstoffen verwendet und die Ergebnisse validiert.
18. Ferner wurde ein Python Skript für Abaqus zur Erzeugung von zufällig verteilten kreisförmigen Gesteinskörnungen und Beschichtungsdicken erzeugt.

Wesentliche Ergebnisse

19. Die Beschichtung von Gesteinskörnungen mit Epoxid-Sand führt zu vielversprechenden Ergebnissen bei den mechanischen und dynamischen Eigenschaften von Beton, wobei 15 % mit Epoxid-Sand beschichtete Gesteinskörnungen als optimaler Ersatzwert gelten.
20. Es wurden Verbesserungen der Druckfestigkeit von Beton zwischen 10 % und 18 % festgestellt, im Vergleich zu normalem Beton. Außerdem stiegen die statischen und dynamischen Elastizitätsmodule des Betons mit 10 % bzw. 5 % epoxy-sandbeschichteten Gesteinskörnungen.
21. Eine optimale Druckfestigkeit wurde durch den Ersatz von 15 % epoxid-sandbeschichtetem Gummi erreicht, was einer Steigerung von 12,5 % entspricht.
22. Ein teilweiser Ersatz von gummibeschichteten Gesteinskörnungen im Beton führt zu einer Verringerung der mechanischen Eigenschaften zwischen 3 und 10 %. Die Verwendung von Gummihackschnitzeln und sandumhülltem Gummi im Beton verbesserte jedoch das Dämpfungsverhältnis.
23. Der maximale Anstieg des Dämpfungsverhältnisses für unbeschichtete und mit Epoxid-Sand beschichtete Gummigesteinskörnungen betrug 58 % bzw. 23 % im Vergleich zu herkömmlichem Beton.
24. Eine optimale Beschichtungsdicke für beschichtete Gesteinskörnungen scheint 3,0 mm zu sein, was zu einem Dämpfungsverhältnis von 6,03% für Beton mit 15% Gummi beschichteten Gesteinskörnungen führt.
25. VCCTL und Abaqus Simulationen helfen bei der Vorhersage der Eigenschaften von Beton mit beschichteten Zuschlägen, wobei die Ergebnisse bei den verschiedenen Ansätzen zwischen 1 % und 13 % schwanken. Dies zeigt, dass die simulierten Ergebnisse gut mit den experimentellen Messungen übereinstimmen.
26. Die Druckfestigkeit des Betons, die mit den hier vorgeschlagenen empirischen Beziehungen vorhergesagt wurde, ist eng an die experimentellen Ergebnisse angepasst und stimmt gut mit ihnen überein.

Summary of the Doctoral Thesis

Problem statement

1. Dynamic loadings such as earthquakes, impacts, and vehicular loads may be applied to concrete buildings and these loads may cause considerable damage to infrastructures or carriageways and shorten their lifespan. Therefore, improving concrete's dynamic properties is important to reduce these effects and to improve concrete properties.
2. The vast application of concrete in the construction industry has led to an increasing demand for better resistance to impact and dynamic loads. Several researchers have investigated the coating of aggregate surface using different coating materials, and coating thickness, which have an effect on concrete properties.
3. Some of the coating materials are not effective as there is a weak bond between the coarse aggregate and the cement mortar. Therefore, a new coating approach using epoxy - sand was applied to improve the interfacial properties of the aggregate surface.

Objective of the work

The aim of this work is to

4. examine the effects of aggregate coatings (epoxy, epoxy sand, epoxy rubber, and silicon-coated aggregates) on concrete properties under different loading rates, and to develop an empirical formula that correlates the compressive strength of concrete and loading rates,
5. investigate the damping properties of concrete with different coating materials for various coating thicknesses,
6. identify the optimal coating thickness and coating materials to enhance the damping properties of concrete,
7. investigate the effect of partial replacement of coarse aggregate by rubber and sand-coated rubber chips on concrete properties,
8. compare and validate the results obtained from experimental testing and numerical simulations (Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory and Abaqus) for properties of concrete with coated aggregates.

State of scientific knowledge

9. Previous research focused mainly on investigation of the compressive strength of concrete with coated aggregates. So, utilizing coated aggregates in concrete was primarily conducted under static loading conditions. However, dynamic properties of concrete with coated aggregates have been studied to a limited extent.
10. Many studies have been extensively investigated in recent years on aggregate coatings. However, the application of epoxy, epoxy-rubber, silicon and epoxy-sand-coated is rare. Nevertheless, there are a few studies using coating of aggregates with epoxy, but only the physical and mechanical properties of concrete were investigated.
11. Studies showed that, aggregate coating with plastics improves the aggregate impact value and the quality of the aggregate. Moreover, a poor-quality aggregate can be made useful by coating with polymers.
12. Clay coatings on coarse aggregates have an impact on the properties of fresh and hardened concrete samples, and researchers investigated those clays with crystalline swelling cause higher values of drying shrinkage in concrete, and the compressive strength of clay-coated aggregates was significantly lower than the normal concrete.
13. Studies mainly indicate that the utilization of waste tire rubber as a coarse aggregate in concrete reduces the compressive, tensile, and flexural strengths of the modified concrete. One of the main causes was adhesion failure between the surface of the rubber and the hardened cement paste. Additionally, limited studies have focused on the surface treatment of rubber chips to improve concrete properties.

Methods used

14. Standardized tests, such as compressive strength testing, split tensile strength testing, shrinkage testing, and static modulus of elasticity testing, were used to assess the mechanical properties of concrete with coated aggregates.
15. Non-destructive testing methods such as Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) and Impact Resonance Testing (IRT) are employed to determine the dynamic modulus of elasticity of concrete.
16. Free vibration decay and half-power bandwidth methods are employed to determine the damping ratio of concrete.
17. Numerical simulation software, Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory (VCCTL) and Abaqus/CAE, is utilized to predict properties of concrete with coated aggregates.

18. Furthermore, Python script for Abaqus is developed to generate randomly distributed circular aggregates and coatings layer thickness.

Key results

19. Coating aggregate with epoxy-sand yields promising results in the mechanical and dynamic properties of concrete, with 15% epoxy-sand-coated aggregates considered the optimal replacement level.
20. Improvements in compressive strength of concrete ranging from 10% to 18% were observed as compared to normal concrete. Furthermore, static and dynamic moduli of elasticity of concrete increased with 10% and 5% epoxy-sand coated aggregates, respectively.
21. An optimum compressive strength was achieved with the replacement of 15% epoxy-sand coated rubber, which is an increment of 12.5%.
22. Partial replacement of rubber-coated aggregates in concrete shows a reduction in mechanical properties ranging from 3% to 10%. However, using chipped rubber and sand-coated rubber in concrete enhanced its damping ratio.
23. The maximum increment in damping ratios for uncoated and epoxy-sand coated rubber aggregates was found to be 58% and 23%, respectively, as compared to conventional concrete.
24. An optimal coating thickness for coated aggregates appears to be 3.0 mm, resulting in a damping ratio of 6.03% for concrete with 15% rubber coated aggregates.
25. VCCTL and Abaqus simulations help to predict the properties of concrete with coated aggregates, and results vary over the different approaches between 1% and 13%. This indicated that the simulated results are in good agreement with experimental measurements.
26. The compressive strength of concrete predicted using the here proposed empirical relations are closely aligned and in good agreement with the experimental results.