



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ

mgr inż. Małgorzata Rodacka

**WPŁYW ZJAWISK REOLOGICZNYCH NA UGIĘCIA
KABLOBETONOWYCH BELEK Z BETONU LEKKIEGO**

**INFLUENCE OF RHEOLOGIC PHENOMENA
ON DEFLECTION OF POST-TENSIONED LIGHTWEIGHT
CONCRETE BEAMS**

Promotor: dr hab. inż. Lucyna Domagała, prof. PK

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Rafał Szydłowski, prof. PK

Kraków, kwiecień 2022

Streszczenie

Konstrukcje sprężone z betonu zwykłego w budownictwie stosowane są w celu osiągnięcia dużych rozpiętości przy małym stosunku grubości do długości elementu. Głównym obciążeniem takich elementów jest ich ciężar własny, który można znacznie obniżyć poprzez zastosowanie lżejszego betonu, jakim jest beton lekki. Konstrukcje sprężone narażone są na pracę w wysokich stanach naprężeń, dlatego betony lekkie do ich budowy muszą osiągać wyższe wytrzymałości. Wysokie wytrzymałości betonów lekkich można osiągać na kruszywach lekkich popiołoporytowych. W ostatnich latach na polskim rynku pojawiło się nowe kruszywo lekkie o nazwie handlowej Certyd wykonane z odpadu spalania węgla brunatnego. W pracy w głównej mierze skupiono się na udowodnieniu, że beton lekki na kruszywie Certyd może być stosowany do konstrukcji sprężonych, a w szczególności, że właściwości reologiczne tego betonu nie wpływają na pogorszenie pracy konstrukcji sprężonych w stosunku do betonu zwykłego.

W pierwszej części pracy omówiono dotychczasowe zrealizowane badania nad betonami lekkimi. W przeglądzie literatury przedstawiono właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne betonów lekkich w porównaniu do betonów zwykłych. W szczególności skupiono się na właściwościach mechanicznych i reologicznych, gdyż to one mają największe znaczenie dla konstrukcji sprężonych. Kolejno omówiono nieliczne badania elementów konstrukcji sprężonych z betonów lekkich takich jak belki i płyty. Omówiono także sposób podejścia do projektowania konstrukcji z betonów lekkich zgodnie z Eurokodem PN-EN 1992 1-1 oraz amerykańskim standardem ACI 318-14. Następnie pokazano przykłady zastosowania betonów lekkich w konstrukcjach inżynierskich i budynkach. Na końcu przeglądu krótko omówiono aspekty ekonomiczne i ekologiczne wynikające ze stosowania betonu lekkiego. Głównym celem przeglądu literatury tematycznej było odniesienie planowanych badań autorki do dotychczasowego stanu wiedzy. Na podstawie tak opracowanego przeglądu literatury przedmiotu zostały opracowane tezy pracy oraz wstępny plan badań eksperymentalnych i analiz numerycznych.

W drugim etapie pracy przedstawiono badania doświadczalne, które zostały wykonane w Laboratorium Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Badania te podzielono na dwa etapy: badania wstępne i badania właściwe. W pierwszym etapie wykonano dwa rodzaje betonów lekkich na bazie kruszywa lekkiego Certyd, dla których przeprowadzono następujące badania: gęstość w stanie suchym i powietrzno-suchym, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie osiowe oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość na zginanie oraz moduł sprężystości po 7, 14 i 28 dniach oraz badania pełzania i skurczu. Pełzanie i skurcz badano przez 1,5 roku na belkach o wymiarach 250x150x1500 mm. Połowa z wykonanych belek została sprężona w celu zadania naprężenia wywołującego pełzanie, pozostałe belki służyły jako referencyjne do pomiaru skurczu. W badaniach uzyskano betony wysokich wytrzymałości zarówno na ściskanie jak i rozciąganie, jedynie moduł sprężystości obu betonów był niższy niż przewidywał Eurokod PN-EN 1992 -1-1 dla uzyskanych klas. Natomiast rozwój pełzania odbiegał od przewidywań Eurokodu PN-EN 1992-1-1. Pełzanie w początkowych kilkudziesięciu dniach narastało wolniej, następnie wartości pełzania szybciej uległy stabilizacji, a wartość końcowa była niższa niż obliczona zgodnie z wytycznymi normowymi. W przypadku skurczu jego rozwój w początkowych dniach był mniej dynamiczny niż przewidziano to w Eurokodzie PN-EN 1992 -1-1, a w kolejnych miesiącach rósł liniowo. Wartości końcowe skurczu dla jednego betonu osiągnęły wartość zbliżoną do obliczonych, a dla drugiego betonu wartość badana była niższa niż obliczona. Badania wstępne potwierdziły, że zastosowanie kruszywa Certyd daje możliwość uzyskania betonów wyższych klas wytrzymałości odpowiednich do stosowania w konstrukcjach sprężonych, a także pozwoliły zoptymalizować procedurę wykonania mieszanki betonowej poprzez proces

wstępnego nawilżenia kruszywa. Po analizie wyników badań wstępnych opracowano plan badań właściwych oraz sposób ich realizacji.

W badaniach właściwych zrealizowano główny cel pracy, jakim było porównanie zachowania się belek kablobetonowych z betonu lekkiego i zwykłego o podobnej średniej wytrzymałości na ściskanie poddanych obciążeniu długotrwałemu. W pierwszej kolejności wykonano badania gęstości w stanie suchym, nasyconym i powietrzno-suchym oraz badania mechaniczne betonu lekkiego i zwykłego tj.: wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, modułu sprężystości po 14, 28 i 90 dniach oraz pełzania i skurczu. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie betonu lekkiego i zwykłego zbadane po 28 dniach były zbliżone, co pozwoliło na porównanie pozostałych właściwości betonów i ich pracy w elementach konstrukcyjnych wykonanych z badanych betonów. Zarówno wytrzymałość na rozciąganie, jak i moduł sprężystości obu betonów uzyskały wartości zbliżone do szacowań wg Eurokodu PN-EN 1992 -1-1. Zgodnie z przewidywaniami moduł sprężystości betonu lekkiego był znacznie niższy niż zwykłego. Pomiary odkształceń od pełzania i skurczu badano przez 1,5 roku na małych belkach o wymiarach 200x200x1000 mm, z których połowa została sprężona w celu zadania naprężenia wywołującego pełzanie. Pozostała część belek służyła jako referencyjne do pomiaru skurczu. Rozwój pełzania betonu lekkiego, podobnie jak w badaniach wstępnych, był znacznie wolniejszy w pierwszych kilkudziesięciu dniach, następnie szybciej uległ stabilizacji i osiągnął niższe wartości niż dla betonu zwykłego oraz wartości obliczonych zgodnie z PN-EN 1992 -1-1. Natomiast skurcz betonu lekkiego w początkowych dniach rozwijał się znacznie wolniej niż betonu zwykłego, a następnie rósł liniowo, a jego końcowe wartości były niższe niż dla betonu zwykłego oraz wartości obliczonych zgodnie z PN-EN 1992 -1-1. Z badanych betonów lekkiego i zwykłego wykonano również po dwie belki kablobetonowe o tej samej geometrii 250x350x6100 mm, zbrojeniu zwykłym i sprężaniu. Belki te poddano obciążaniu stałemu za pomocą siłowników hydraulicznych. Belki pracowały pod obciążeniem przez około 1,5 roku. W trakcie działania obciążenia monitorowano zmianę ugięć oraz siły sprężającej w czasie. Analiza rozwoju ugięć belek potwierdziła, że pełzanie betonu lekkiego jest mniejsze niż betonu zwykłego, co obrazuje mniejszy przyrost ugięcia reologicznego dla belek z betonu lekkiego. Następnie, po zdjęciu obciążenia z belek, poddano je zniszczeniu w próbie czteropunktowego zginania. Zniszczenie miało na celu porównanie maksymalnych nośności belek oraz analizę wpływu długotrwałego obciążenia na nośność i zachowanie się belek podczas niszczenia. Przebiegi zależności siły od ugięcia w próbie czteropunktowego zginania były bardzo podobne dla wszystkich czterech belek, a maksymalne nośności belek również były zbliżone. W ostatniej części pracy przedstawiono analizę numeryczną belek kablobetonowych wykonaną w pakiecie Metody Elementów Skończonych ABAQUS odzwierciedlającą pracę i zniszczenie belek w próbie czteropunktowego zginania. Analiza numeryczna pozwoliła prześledzić zmianę naprężenia w całym przekroju belki podczas zniszczenia.

Przeprowadzony przegląd literatury oraz analiza wyników badań pozwalają ocenić, że badany beton lekki na kruszywie Certyd można stosować do konstrukcji sprężonych. Ponadto mniejsze ugięcia belek z betonu lekkiego niż zwykłego pod wpływem działania obciążenia długotrwałego, z uwagi na znacznie niższe pełzanie betonu lekkiego, sprawiają, że beton lekki może stać się bardzo dobrą alternatywą dla betonu zwykłego w zastosowaniu do betonu sprężonego.