

Wpływ modelu interfejsu na symulowane zachowanie się zespolonego dźwigara sprężonego typu beton-beton z uwzględnieniem efektów reologicznych i zarysowania

Łukasz Jarno

Streszczenie

Głównym celem niniejszej pracy doktorskiej jest ocena wpływu modelu numerycznego interfejsu na zachowanie przy zginaniu i ścinaniu oraz na nośność zespolonego dźwigara sprężonego wykonanego z betonu o wysokiej wytrzymałości (HSC) połączonego z betonem o normalnej wytrzymałości (NSC). W symulacjach prowadzonych metodą elementów skończonych (MES) z uwzględnieniem etapów konstruowania dźwigara badane są także aspekty reologiczne, w szczególności pełzanie betonu. W analizie założono liniowe zależności kinematyczne, sprężyste zbrojenie i ciągną sprężające.

We współczesnym świecie inżynierii lądowej często wymagane jest łączenie zaawansowanych koncepcji, takich jak konstrukcje zespolone, naprężenie wstępne, materiały o wysokiej wytrzymałości itp., aby spełnić wysokie wymagania dotyczące konstrukcji. Jednym z takich kompleksowych rozwiązań inżynierskich jest prefabrykowany sprężony dźwigar mostowy wykonany z betonu o wysokiej wytrzymałości w połączeniu z płytą pomostową z betonu o normalnej wytrzymałości, wykonywaną na budowie. Ten rodzaj dźwigara łączy najlepsze cechy konstrukcji zespolonych, sprężonych i zaawansowanych materiałów. Zespolony element betonowy jest budowany przez połączenie dwóch różnych elementów betonowych, zintegrowanych ze sobą różnymi rodzajami połączeń. Celem projektowania i budowy takich elementów jest zapewnienie jak najlepszej współpracy dwóch betonów ze względu na jej znaczenie dla nośności dźwigara.

Badania eksperymentalne przeprowadzone przez W. Choi na Uniwersytecie Stanowym Karoliny Północnej w Raleigh były motywacją i dostarczyły obiektu badawczego do oceny dźwigara kompozytowego. Badania eksperymentalne miały na celu ocenę zachowania takich zginanych sprężonych zespolonych dźwigarów betonowych. W badaniu przetestowano trzy typy dźwigarów z wylewaną na mokro płytą o szerokości 1.5 m lub 0.3 m lub bez płyty. W niniejszej pracy doktorskiej wykonano badanie symulacyjne belki z szerszą płytą z uwzględnieniem etapów budowy i dwóch nieliniowych efektów: pełzania lub oddziaływania dźwigara z płytą. Ponadto odtwarzany jest eksperymentalny proces zarysowania.

Obecnie metoda elementów skończonych jest uznawana za ugruntowaną i wygodną technikę komputerowej symulacji złożonych problemów z różnych dziedzin: inżynierii lądowej (w tym geomechaniki), inżynierii mechanicznej, inżynierii nuklearnej, inżynierii biomedycznej, hydrodynamiki, ciepłownictwa, itp. Dzieje się tak, ponieważ MES jest potężnym narzędziem do przybliżonego rozwiązywania równań różniczkowych opisujących różne zjawiska fizyczne i procesy. Główna część rozprawy poświęcona jest zatem analizie modeli MES sprężonego dźwigara mostowego, w tym etapów budowy, specyficznego zachowania konstrukcji kompozytowej i efektów reologicznych. W kontekście niniejszych badań dokładność modelu wyjściowego jest weryfikowana na podstawie wyników eksperymentalnych (stosowana jest zatem idealizacja pęknięcia), a następnie przeprowadzane są bardziej zaawansowane symulacje obliczeniowe w celu zbadania złożonych zjawisk, w szczególności wpływu modelu strefy kontaktu belki sprężonej z płytą na zachowanie dźwigara pod obciążeniem.

Istotnym aspektem analizy jest zatem strefa kontaktu w konstrukcji zespolonej beton-beton. Jest to kluczowa kwestia, jeśli chodzi o nośność dźwigara zespolonego. Dlatego dużą część pracy poświęcono temu zagadnieniu. Analizę połączeń rozpoczęto od omówienia głównych właściwości przekroju zespolonego oraz zjawisk zachodzących w strefie kontaktu. Najpierw opisano najważniejsze zjawiska adhezji i tarcia. Następnie przeanalizowano zachowanie się prętów zbrojeniowych uczestniczących w przenoszeniu wzdłużnego ścinania w strefie zespolenia (tzw. zbrojenie zszywające). Następnie przedstawiono elementy skończone typu interfejsowego wykorzystywane w modelowaniu konstrukcji kompozytowych oraz omówiono opcje ich właściwości. Elementy reprezentujące styk betonów HSC i NSC zostały wprowadzone do metody elementów skończonych, aby uwzględnić zależność między wektorem przemieszczenia względnego dwóch stron interfejsu, a wektorem oddziaływań normalnych i stycznych. Wybór odpowiedniego typu zachowania interfejsu jest ważny dla prawidłowej symulacji kontaktu beton-beton.

W celu określenia odpowiedniej reprezentacji styku stworzony został prosty model obliczeniowy składający się z dwóch elementów sześciennych, pomiędzy którymi znajdują się płaskie elementy interfejsu. Różne modele konstytutywne interfejsu zostały zastosowane w tych elementach, aby sprawdzić ich zachowanie. Przeprowadzana została nieliniowa analiza statyczna. W pierwszej kolejności wykorzystano model tarcia, który wywodzi się z plastyczności Mohra-Coulomba dla elementów ośrodka ciągłego. Następnym analizowanym modelem styku był model "zazębiania" się kruszywa. Koncepcja

tego modelu polega na tym, że siłę przyczepności zwiększa kruszywo użyte w mieszance betonowej. Aby opisać to numerycznie zastosowano dwufazowy model Walravena. Następnie poddano analizie model połączenia wciętego, które w analizie belki nie zostało zastosowane ze względu na stopień skomplikowania geometrii. Ostatni sprawdzany model polega na zastosowaniu zbrojenia zszywającego. Stalowy pręt umieszcza się w środku kostek połączonych interfejsem i odpowiednio łączy z nimi.

W celu uwzględnienia efektów reologicznych (które są bardzo ważne ze względu na różny wiek łączonych betonów) wprowadzany został model lepkosprężysty betonu. Przy użyciu uogólnionego modelu Maxwella, zasady superpozycji dla zachowania lepkosprężystego betonu pod ciągłym obciążeniem i postaci spektralnej funkcji charakterystycznej reprezentującej właściwości materiału, zostało wyprowadzane i zaprogramowane w zastosowanym pakiecie oprogramowania 3D Midas FEA przyrostowe sformułowanie liniowej lepkosprężystości dla niestarzejącego się materiału. Model został przetestowany w 1D oraz 3D.

Badany dźwigar zawiera strzemiona i jest wstępnie sprężony. Został zamodelowany jako swobodnie podparta belka, obciążona aż do zerwania splotów sprężających czyli do zniszczenia. Główna analiza została wykonana dla modelu belki o rozpiętości 12,5 m między podporami, z płytą o szerokości 1.5 m. Dla modelu dźwigara przeprowadzono szereg obliczeń.

Do oceny zarysowania modelu belki wykorzystuje się model zwany Total Strain Crack, dostępny w pakiecie Midas FEA i opisany krótko w załączniku do pracy. Aby zobaczyć możliwości predykcyjne aproksymacji problemu metodą elementów skończonych, model zarysowania został zastosowany do modelu początkowego w celu sprawdzenia rodzajów uszkodzeń, wzorców pęknięć itp. Wyniki tej symulacji zostały porównane z wynikami eksperymentów przeprowadzonych przez Choi'a.

Wpływ procesu budowlanego jest oceniany na podstawie analizy etapowania konstrukcji. Wykonano symulację pełzania betonu podczas etapowania. Aby pokazać długoterminowe zachowanie modelu, wprowadzono również dodatkowy etap o czasie trwania 10000 dni. Następnie porównano wyniki symulacji dla analizowanego dźwigara zespolonego uzyskane z zastosowaniem uogólnionego modelu Maxwella z wynikami uzyskanymi przy użyciu funkcji pełzania zdefiniowanych w zaleceniach CEB-FIP.

Po wykonaniu analizy reologicznej dokonano oceny wyników w kolejnych etapach dla modelu ze strefą połączenia reprezentowaną przez interfejsy. Na podstawie anal-

izy sprawdzane jest maksymalne ugięcie i maksymalne naprężenie rozciągające. Analizowane jest również zachowanie podczas wzdłużnego ścinania. Przedstawiono i omówiono analizę etapu budowy z elementami interfejsu w celu zbadania wpływu różnych typów modelowania strefy kontaktu na zachowanie i nośność konstrukcji zespolonej.

Niniejsza praca pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Wyniki jednoetapowych obliczeń statycznych rozpatrywanego dźwigara znacznie odbiegają od wyników analizy etapowania konstrukcji. W rzeczywistości dla wszystkich konstrukcji sprężonych konieczne jest zastosowanie analizy etapu budowy, a nie jednoetapowej analizy statycznej, ponieważ każda konstrukcja sprężona jest budowana w kilku fazach, a każdy etap należy traktować jako oddzielny krok analizy i historia poprzednich kroków ma znaczący wpływ na kolejne kroki.
2. Istnieje znacząca różnica pomiędzy nośnością dwóch różnych typów strefy połączenia. W szczególności zastosowanie dodatkowego zbrojenia zszywającego w interfejsie ciernym silnie wpływa na zachowanie dźwigara zespolonego. W tym kontekście oczekuje się, że wpływ połączenia wciętego (o wiele trudniejszego do wykonania w praktyce i nieuwzględnianego w obecnej analizie dźwigara zespolonego) byłby jeszcze silniejszy.
3. Zastosowanie bardziej złożonych (wieloparametrowych) modeli reologicznych betonu pozwala na lepsze wykorzystanie nośności rozważanego elementu konstrukcyjnego. Normy i modele pełzania, które zawierają, są bardziej konserwatywnej konstrukcji, co skutkuje wyższym poziomem bezpieczeństwa, ale zmniejszoną efektywnością ekonomiczną. Kiedy zastosowane są zaawansowane modele reologiczne, projektant może lepiej wykorzystać wytrzymałość materiału. Takie modele pełzania pozwalają również odtworzyć całą historię obciążeń zmiennych w czasie działających na element, co nie jest możliwe w przypadku stosowania prostych modeli normowych opartych na współczynniku pełzania.