

Analiza numeryczna uszkodzeń stref zakotwień kabli sprężających konstrukcji mostowej

Jacek Chróścielewski¹, Mikołaj Miśkiewicz¹, Łukasz Pyrzowski¹, Bartosz Sobczyk¹

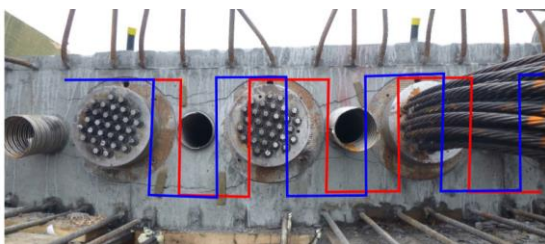
¹Katedra Wytrzymałości Materiałów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska
email: jchrost@pg.gda.pl, mmisk@pg.gda.pl, lpyrzow@pg.gda.pl, barsobcz@pg.gda.pl

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono analizę numeryczną strefy zakotwienia kabli sprężających ustroju nośnego mostu, w której w trakcie sprężania, w obszarze płyt oporowych wystąpiło znaczne zarysowanie betonu. Do odwzorowania procesu sprężania stworzono, między innymi w środowisku MES systemu ABAQUS, tzw. model lokalny fragmentu konstrukcji. W modelu tym uwzględniono zbrojenie ustroju i elementy systemu zakotwienia. Obliczenia przeprowadzono w zakresie geometrycznie i materiałowo (beton) nieliniowym. W opisie betonu wykorzystano związek konstytutywny *Concrete Damage Plasticity* umożliwiający analizę uszkodzenia i śledzenia propagacji rys. Wynik obliczeń odniesiono do morfologii zarysowań konstrukcji rzeczywistej.

SŁOWA KLUCZOWE: awaria konstrukcji, zniszczenie betonu, zarysowanie konstrukcji, analiza MES

1. Cel pracy, opis analizowanego problemu

W trakcie prac budowlanych związanych z wykonaniem centrycznego sprężenia podłużnego przęseł mostu doszło do silnych zarysowań betonu bloków kotwiących. Pojawiły się znaczne rysy/pęknięcia poziome w strefie zakotwień na wysokości zbrojenia siatkami (rys. 1).



Rys. 1. Rysy na zakotwieniu czynnym wraz z naniesionym schematem zbrojenia siatek

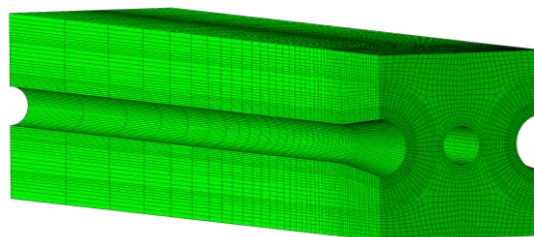
W referacie podjęto próbę opisu mechanizmu zniszczenia strefy zakotwień kabli wewnętrznych sprężenia podłużnego jednego z przęseł mostu z wykorzystaniem środowiska metody elementów skończonych (MES) systemu ABAQUS. Wykonano symulację numeryczną niepożądanych zjawisk lokalnych zarysowania w blokach kotwiących kable, które wystąpiło w trakcie procesu sprężania konstrukcji. Miała to na celu ustalenie, od strony mechaniki, przyczyn ich powstania, w kontekście zaprojektowanego i wykonanego układu zbrojenia.

2. Modelowanie numeryczne

Ze względu na lokalny charakter zjawiska zarysowania, model numeryczny ograniczono do opisu wycinka płyty górnej skrzynki pomostu z jednym nieużywanym tunelem kablowym i dwoma sąsiadującymi kanałami aktywnymi, poprzez które przekazywana jest siła sprężająca na konstrukcję. Biorąc pod uwagę szeregowy układ kotwień grupy kabli sprężanych taką samą siłą (rys. 1), założono na bokach bryły, formowanych płaszczyzną przechodzącą przez środki głowic, obciążenie i warunki brzegowe typu symetrii cyklicznej, zaś na ścianie tylnej warunki odpowiadające symetrii poprzecznej z dodatkową blokadą ruchu pionowego układu (rys. 2). Poza opisem bryły betonu, uwzględniono strukturę zbrojenia głównego mostu i

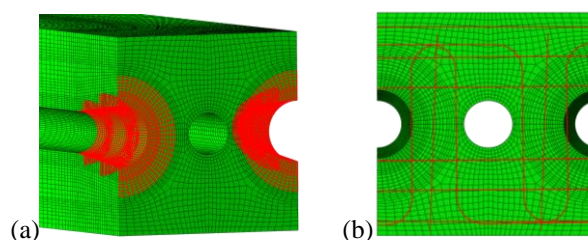
zbrojenie lokalne strefy zakotwienia oraz stalowe płyty oporowe (rys. 3).

W dyskretyzacji układu (rys. 2. i 3) zastosowano następujące elementy skończone: bryłowy C3D8 dla części betonowych; powłokowy S4 dla płyt oporowych; kratownicowy T3D2 dla zbrojenia. Wszystkie elementy są klasy C⁰ o liniowej aproksymacji przemieszczeń ([1]).



Rys. 2. Analizowany fragment z siatką bryłowych elementów skończonych

Siatka podziału zawiera łącznie 131741 węzłów. Płyty oporowe (rys. 3a) utworzono przy pomocy funkcji *skin* ([1]), która pozwala na zdefiniowanie elementów powłokowych na wydzielonych powierzchniach obszaru. Elementy te są połączone z bryłą w sposób sztywny. Zbrojenie (rys. 3b) uwzględnia interakcję z betonem typu *embedded region* ([1]), co sprowadza się do sprężenia odpowiednich stopni swobody węzłów związanych ze zbrojeniem ze stopniami swobody węzłów części betonowej.



Rys. 3. Siatka elementów skończonych, na czerwono: (a) płyty oporowe, (b) zbrojenie strefy zakotwienia

Obciążenie odpowiadające realizacji osiowych sił sprężających z uwzględnieniem specyfiki kontaktu prasy naciągowej realizowano przez odpowiednie sprężenie

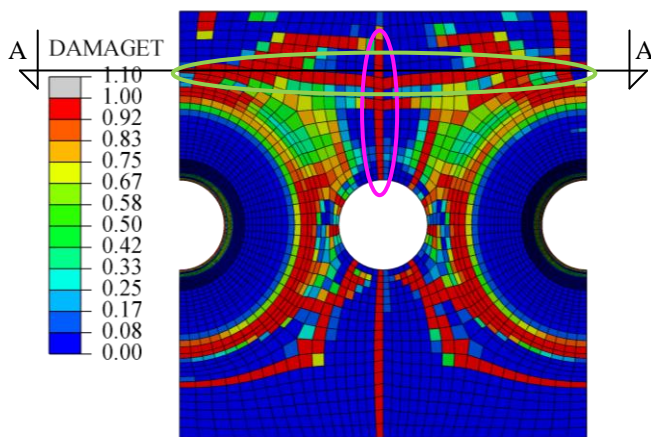
kinematyczne powierzchni czołowej płyty oporowej głowicy do punktów centralnych kanałów kablowych. Na te punkty dodatkowo nałożono warunki brzegowe uniemożliwiające ich ruch pionowy.

Częściom stalowym przypisano materiał sprężysty izotropowy, o standardowych parametrach: $E = 205\text{GPa}$, $\nu = 0.3$. Beton opisuje nieliniowy model materiału *Concrete Damage Plasticity* ([1]) o parametrach przyjętych za pracę [2]. Parametry te odpowiadają materiałowi wbudowanemu w moście. Jest to związek konstytutywny zakładający początkowe wzmocnienie, a następnie osłabienie materiału zarówno przy ściskaniu jak i rozciąganiu. Ponadto, po zapoczątkowaniu procesu osłabienia następuje degradacja ujęta w zmianach parametrów materiałowych.

W pierwszej kolejności podjęto próbę realizacji obliczeń w ramach statyki nieliniowej. Jednak ze względu na trudności ze zbieżnością procesu iteracyjnego ujawniające się na poziomie $\sim 30\%$ obciążenia docelowego, zdecydowano się przejść na analizę typu *dynamic, explicit*. W ramach analizy dynamicznej wzrost obciążenia traktowano jako proporcjonalny w funkcji czasu.

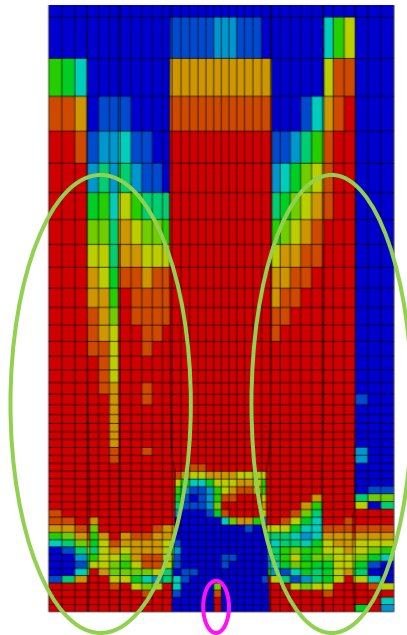
3. Wyniki i porównanie analizy z zaistniałą awarią

W ostatnim kroku analizy dynamicznej (100% projektowanej siły sprężającej) na powierzchni czołowej bryły betonu wystąpił rozkład skalarnego parametru zniszczenia na rozciąganie w betonie *DAMAGE_T* z rys. 4. Parametr ten ma następującą interpretację. *DAMAGE_T* = 0 oznacza, że w betonie nie doszło do zniszczenia, zaś *DAMAGE_T* = 1 wskazuje na całkowicie zniszczony beton przez rozciąganie. Zgodnie z [2] *DAMAGE_T* pozwala na identyfikację powstałych w betonie rozkładów rys.



Rys. 4. Rozkład parametru *DAMAGE_T* na ścianie czołowej bloku oporowego (100% siły sprężającej)

Symulacja procesu sprężania wskazuje głównie rysy propagujące poziomo nad górną częścią płyt oporowych (por. z rys. 1). Na rys. 4 zaznaczono je zielonymi poziomymi elipsami. Podczas oględzin mostu na budowie nie zauważono jednak wyraźne rysy pionowej wykazanej w symulacji, a oznaczonej na rys. 4 różową pionową elipsą. W celu weryfikacji widoczności tych rys w bryle betonu sprawdzono przekrój A-A (rys. 4), dla którego podano na rys. 5 rozkład parametru *DAMAGE_T*. Analizowane rysy z rys. 4 zaznaczono analogicznie na rys. 5 tymi samymi kolorami.



Rys. 5. Rozkład parametru *DAMAGE_T* w przekroju A-A.

Rozkład pola uszkodzeń z rys. 5 wskazuje, że rysa pionowa jest płytka, powierzchniowa i stąd mogła być mało widoczna, w przeciwieństwie do wyraźnej, dominującej rysy, a w zasadzie pęknięcia poziomego penetrującego głęboko w beton.

4. Podsumowanie

W pracy pokazano fragment, tzw. analizę lokalną, z szerszych badań dotyczących mechanizmu uszkodzenia strefy zakotwienia kabli w konstrukcji mostowej, do którego to uszkodzenia doszło w trakcie sprężania obiektu. Przeprowadzone badania dają podstawę do sformułowania następujących wniosków:

- 1) miejscowy charakter zjawiska, wykazany w tzw. analizie globalnej całego układu określającej zakres i obszar jego oddziaływania, uprawnia do prowadzenia analiz na tzw. poziomie lokalnym;
- 2) lokalny model szczegółowy fragmentu ustroju powinien zawierać wszystkie elementy istotne z punktu widzenia badanego zjawiska i ujmować stan całego układu, tutaj podczas sprężania mostu;
- 3) nieliniowe prawo materiałowe z degradacją przyjęte do opisu materiału pozwala na oszacowanie rozkładów powstawania rys w betonie;
- 4) ocena intensywności zarysowań wymaga uwzględnienia ich rozkładów przestrzennych, w tym zasięg ich głębokiej propagacji;
- 5) przeprowadzone analizy lokalne, nawet ograniczone tu tylko do oddziaływań mechanicznych, wskazały, że tego typu uszkodzenia mogą powstać w przypadku stosowanego rozważanego wariantu zbrojenia strefy zakotwienia i zbyt małej objętości betonu w bloku kotwiącym.

Literatura

- [1] Abaqus 6.14 - pomoc.
- [2] Jankowiak T., Łodygowski T. *Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model*, Foundations of Civil and Environmental Engineering, No. 6, pp. 53-69, 2005.