

Bartosz WASILEWSKI\*  
Politechnika Gdańska

## ANALIZA NOŚNOŚCI STREF ZAKOTWIEŃ W KABLOBETONIE NA PRZYKŁADZIE AWARII WIADUKTU B-9 NAD DROGĄ KRAJOWĄ NR 7

**Streszczenie.** W pracy została przedstawiona analiza nośności konstrukcji przęsła w czasie sprężania poprzecznego. Bezpośrednim powodem analizy była awaria w strefach zakotwień kabli sprężających poprzecznic. Opisano model wycinkowy MES zastosowany do analizy i zaprezentowano wyniki. Przyjęta metoda okazała się przydatna w diagnozowaniu przyczyn awarii i w określeniu zapasów nośności.

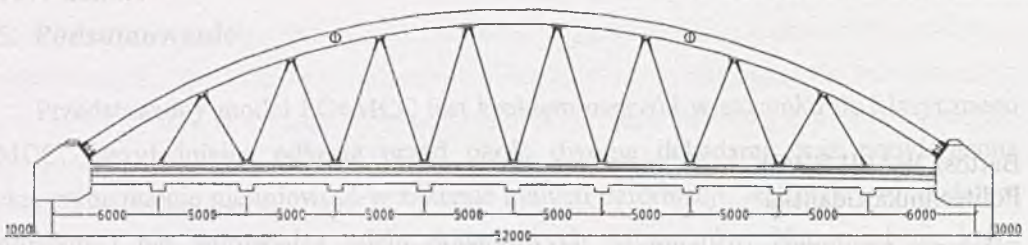
## LOAD CAPACITY ANALYSIS OF ANCHORAGE ZONES IN POST-TENSIONED CONCRETE ON THE BASES OF B-9 BRIDGE FAILURE

**Summary.** In this paper load capacity analysis of span construction during prestressing was shown. Direct reason for that analysis was failure of prestressing tendon's anchorage zones. FEM sector model and results are shown. The applied method is useful for developing the failure mechanism and estimation of load capacity.

### 1. Opis analizowanej konstrukcji

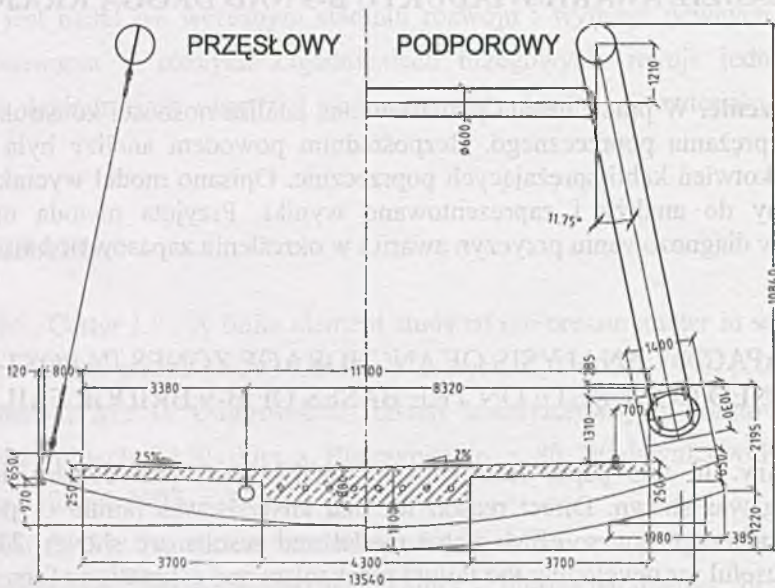
Opisywany obiekt zlokalizowany jest w miejscowości Nowy Dwór Gdański, stanowiąc przekroczenie drogi krajowej nr 7. Składa się on z dwóch łuków stalowych, do których za pomocą skośnych wieszaków podwieszono sprężony betonowy pomost (rys. 1 i rys. 2). Pomost został sprężony podłużnie 8 kablami umieszczonymi w płycie pomostu, natomiast sprężenie porzeczne umieszczono w poprzecznicach (po 2 kable sprężające w każdej poprzecznicy przęsłowej i po 8 w poprzecznicach podporowych). Obiekt zaprojektowano na klasę obciążeń „A” wg normy, natomiast pomost na obciążenie pojazdem specjalnym STANAG 2021 [1].

\* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski.



Rys. 1. Widok z boku wiaduktu

Fig. 1. Bridge end view



Rys. 2. Przekrój poprzeczny wiaduktu

Fig. 2. Bridge cross-section

## 2. Powody przeprowadzenia analizy

W czasie budowy wiaduktu w Nowym Dworze Gdańskim realizowano zgodnie z projektem sprężenie poprzecznic. Po zakończeniu prac pojawiły się na sprężanych wspornikach wyraźne objawy przeciążenia. Na krawędziach bocznych powstały odpryski i zarysowania charakterystyczne dla ściskanych elementów betonowych, będących w fazie granicznej wyłączenia tuż przed zniszczeniem. Badania próbek wbudowanego w konstrukcję betonu wykazały niższą jego wytrzymałość od projektowanej i fakt ten został zinterpretowany jako bezpośrednia przyczyna powstałych uszkodzeń. Wymagania projektowe określały klasę betonu na B60.

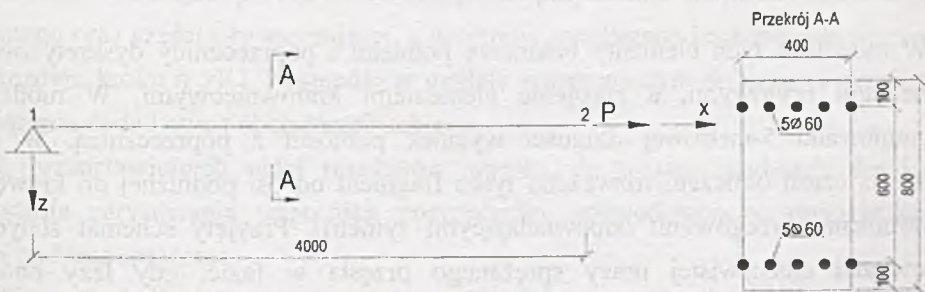
Badania próbek wskazują, że ostatecznie uzyskano klasę betonu B50. W następstwie powstałych uszkodzeń projektant opracował projekt naprawy, który został zrealizowany. Polegał on na odprężeniu uszkodzonych poprzecznic (dotyczy wszystkich poprzecznic poza czterema skrajnymi, przypodporowymi, sprężonymi mniejszą siłą), oczyszczeniu betonu z luźnych elementów i odprysków, następnie wykonaniu w obrębie wsporników żelbetowej, silnie zabrozonej warstwy wzmacniającej, nałożonej metodą torkretowania. Poprzecznice ponownie sprężono i tym samym zakończono proces naprawczy. Nie wykonano iniekcji powstałych rys przed torkretowaniem i nie przeprowadzono badań diagnostycznych mogących ocenić stopień degradacji struktury żelbetowej wsporników. Celem nadrzędnym opracowania, w skład którego wchodziła omawiana analiza, było określenie faktycznej nośności przęsła wiaduktu w świetle uszkodzeń i napraw prowadzonych w trakcie budowy.

### 3. Analiza nośności poprzecznic na podstawie modelu 3D MES

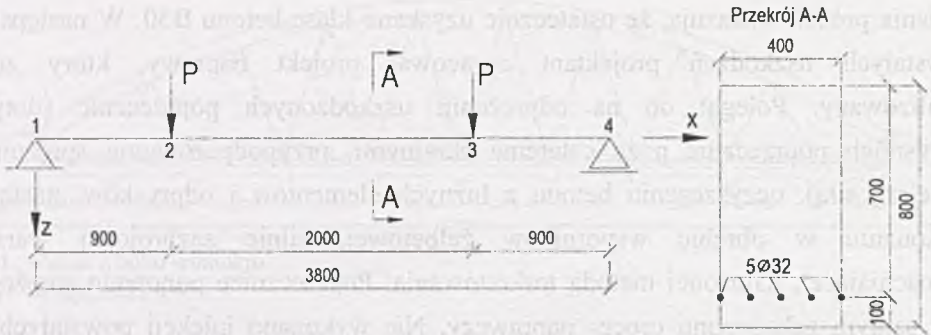
Wszystkie obliczenia MES wykonano w środowisku systemu SOFiSTiK, z wykorzystaniem przestrzennych, 8-węzłowych elementów bryłowych o wzbogaconych polach odkształceń wprowadzających zgięciowe formy deformacji [2]. Podział na elementy skończone był dostosowany do rozwiązań konstrukcyjnych.

#### 3.1. Dobór materiału

W celu oddania możliwie rzeczywistego zachowania się betonu, który jest materiałem silnie nieliniowym, zastosowano teoretyczny model materiałowy Lade'go [4, 5].



Rys. 3. Schemat statyczny podparcia modelu testowego MES nr 1  
Fig. 3. Support conditions assume in experimental FEM model No. 1



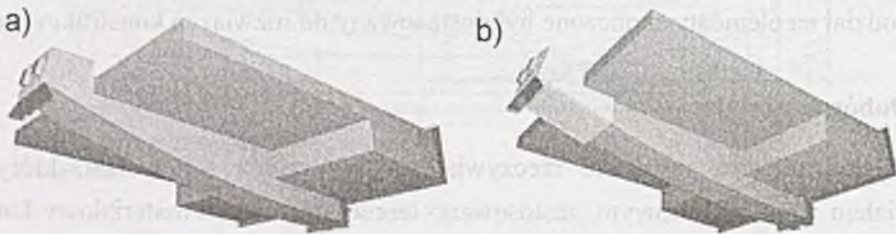
Rys. 4. Schemat statyczny podparcia modelu testowego MES nr 2

Fig. 4. Support conditions assume in experimental FEM model No. 2

Z uwagi na niestandardowy zakres przeprowadzonej analizy zdecydowano się na weryfikację przyjętych założeń teoretycznych przez symulacje numeryczne dwóch przykładów testowych o znanych rozwiązaniach: belki zginanej i pręta rozciąganego.

### 3.2. Założenia obliczeniowe i wykonane modele MES

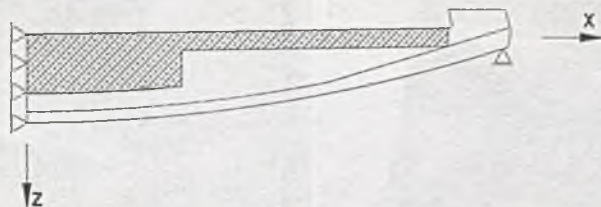
Wykonano dwa docelowe modele MES: konstrukcji wg projektu pierwotnego i konstrukcji o wzmocnionych końcówkach poprzecznic (rys. 5).



Rys. 5. Wizualizacja modelu MES: a) konstrukcji pierwotnej, b) konstrukcji wzmocnionej

Fig. 5. Visualization of FEM model: a) original construction, b) strengthening construction

W modelach tych elementy betonowe pomostu i poprzecznicy dyskretyzowano elementami bryłowymi, a zbrojenie elementami kratownicowymi. W modelach zasymulowano 5-metrowej długości wycinek pomostu z poprzeczną. W celu skrócenia czasu obliczeń, rozważano tylko fragment od osi podłużnej do krawędzi, z warunkami brzegowymi odpowiadającymi symetrii. Przyjęty schemat statyczny odpowiadał rzeczywistej pracy sprężanego przęsła w fazie, gdy leży ono na deskowaniu (na skutek sprężenia poprzecznic wyginają się do góry i konstrukcja przyjmuje pokazany na rys. 6 schemat statyczny).



Rys. 6. Schemat statyczny podparcia przyjęty w modelach MES

Fig. 6. Support conditions assume in FEM models

Przy wykonaniu modeli przyjęto następujące założenia:

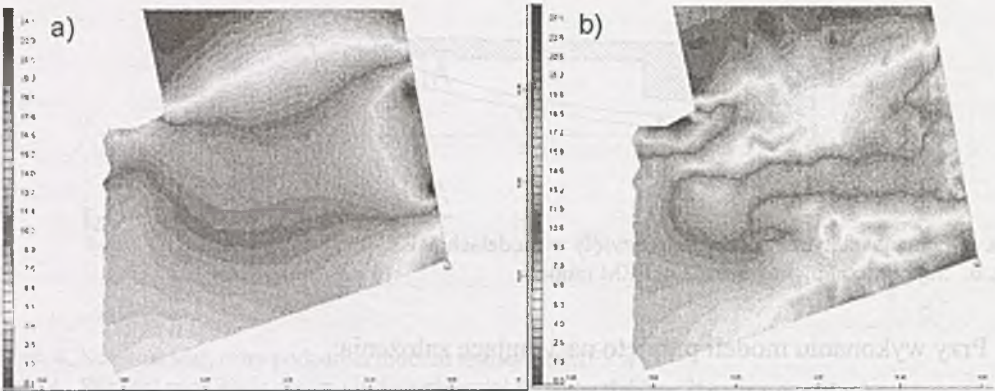
- kable sprężenia pracują jak niezainiektowane,
- nie uwzględniono strat spowodowanych tarciem i osłabieniem struktury otworem na kanał kablowy,
- zbrojenie pasywne opisano na węzłach siatki elementów bryłowych, zapewniając tym samym zgodność deformacji stali i betonu,
- nie uwzględniono poślizgu pomiędzy betonem i stalą w II fazie pracy konstrukcji,
- w wariantcie wzmocnionym założono pełną przyczepność warstwy torkretu do pierwotnej powierzchni betonowej,
- w konstrukcji wzmocnionej nie uwzględniono pierwotnych rys powstałych w wyniku uszkodzeń wywołanych pierwszym sprężeniem,
- wszystkie obciążenia przyjęto jako charakterystyczne.

### 3.3. Obliczenia i uzyskane wyniki

Modele MES obliczono z uwzględnieniem nieliniowości materiału, stosując testowane wcześniej równania konstytutywne Lade'go dla betonu. Modele obciążano stopniowo, symulując proces sprężania przez przyłożenie najpierw 100% ciężaru własnego oraz części siły sprężającej, a następnie zwiększano krokowo siłę sprężającą (w każdym kroku o 5%). Następnie w modelu wzmocnionym dodatkowo przyłożono obciążenia dodatkowe i obciążenie ruchome.

Z przedstawionych niżej rezultatów wynika, iż w obu modelach doszło do powstania zarysowania wspornika poprzecznicę spowodowanego przekroczeniem SGN podczas sprężania.

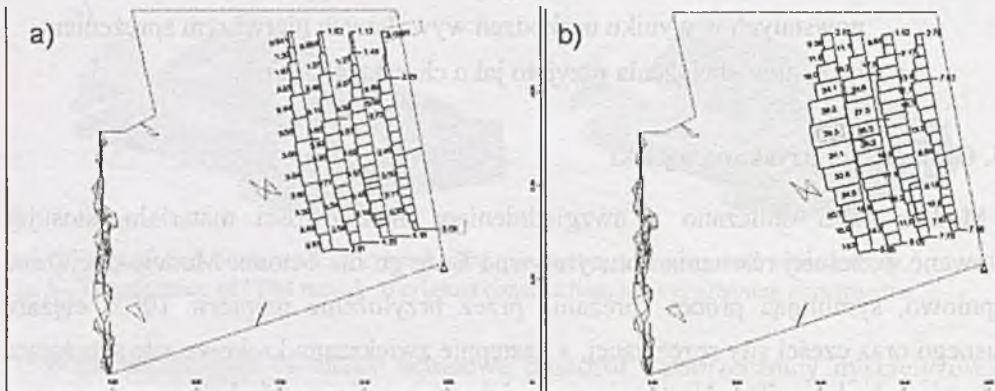
W konstrukcji niewzmocnionej rysa pojawiała się, gdy siła sprężająca osiągała ok. 65% swej wartości docelowej.



Rys. 7. Naprężenia zredukowane wg hipotezy HMM w niewzmocnionym wsporniku poprzeczny, przy sile sprężającej równej: a) 60% siły docelowej, b) 65% siły docelowej

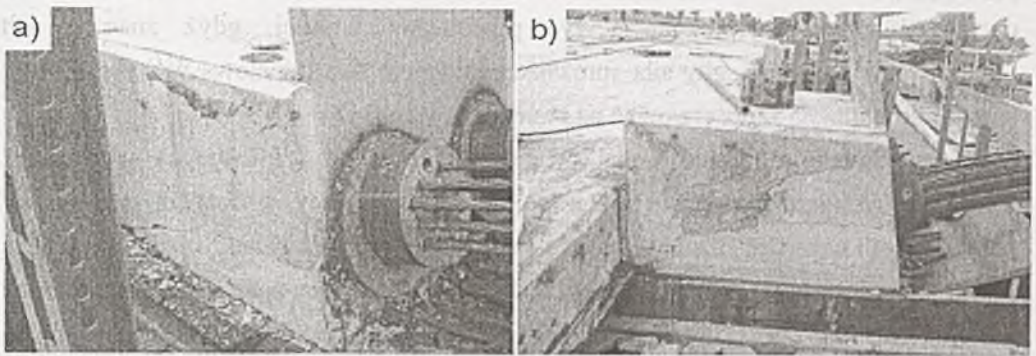
Fig. 7. Von Mises stresses in non-strengthening element for prestressing force equal to: a) 60% of final force, b) 65% of final force

Zarysowanie to miało dość duży zasięg, obejmujący ponad połowę przekroju podłużnego wspornika poprzeczny, co można zaobserwować zarówno na mapach naprężeń w betonie (rys. 7a i 7b), jak i na wykresie sił normalnych w zbrojeniu poprzeczny (rys. 8a i 8b). Odzwierciedla to dość dobrze uszkodzenia, które powstały w rzeczywistej konstrukcji (rys. 9a i 9b).



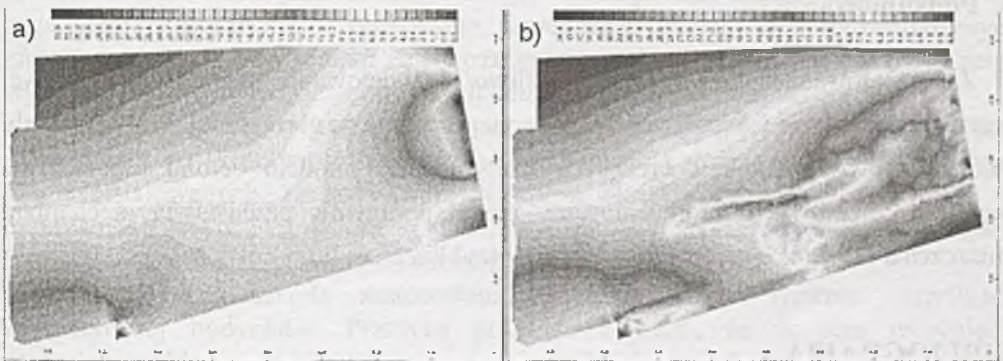
Rys. 8. Siły w zbrojeniu poprzeczny niewzmocnionego wspornika poprzeczny, przy sile sprężającej równej: a) 60% siły docelowej, b) 65% siły docelowej

Fig. 8. Forces in shear reinforcement of non-strengthening element for prestressing force equal to: a) 60% of final force, b) 65% of final force



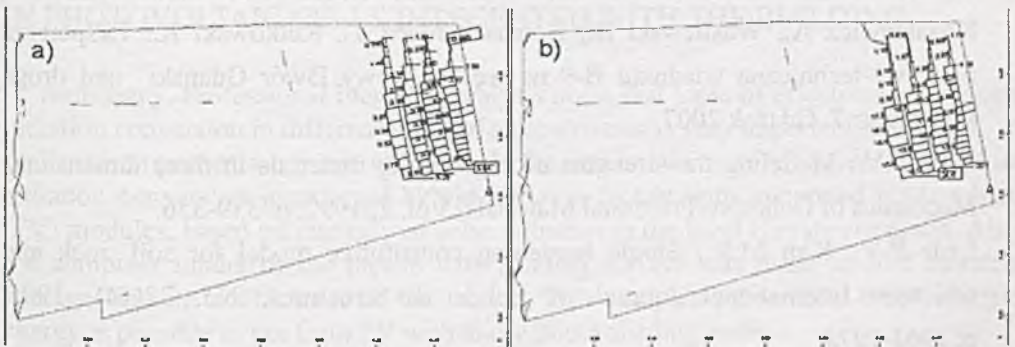
Rys. 9. Uszkodzenia stref zakotwień

Fig. 9. Damage of end blocks



Rys. 10. Naprężenia zredukowane wg hipotezy HMM, we wzmocnionym wsporniku poprzecznicy, przy sile sprężającej równej: a) 85% sily docelowej, b) 100% sily docelowej

Fig. 10. Von Mises stresses in strengthening element for prestressing force equal to: a) 85% of final force, b) 100% of final force



Rys. 11. Siły w zbrojeniu poprzeczny wzmocnionego wspornika poprzecznicy, przy sile sprężającej równej: a) 85% sily docelowej, b) 100% sily docelowej

Fig. 11. Force in shear reinforcement of non-strengthening element for prestressing force equal to: a) 85% of final force, b) 100% of final force

W konstrukcji wzmocnionej pierwsze zarysowania zaczęły się pojawiać później, bo dopiero w momencie, gdy siła sprężająca osiągnęła ok. 90% swej wartości

docelowej. Również propagacja rys przebiegała wolniej, gdyż znaczne ich powiększenie nastąpiło, gdy siła sprężająca osiągnęła swą docelową wartość. Zasięg zarysowania można zaobserwować na rysunkach 10b i 11b.

Uwzględnienie obciążeń dodatkowego i ruchomego (zmiennego) wprowadza zmiany w rozkładzie naprężeń we wsporniku poprzeczny, a dotyczą one spadku poprzecznych naprężeń rozciągających i wzrostu naprężeń ściskających. Zmiany te są niewielkie w stosunku do naprężeń wywołanych sprężeniem oraz ciężarem własnym i to praktycznie nie poprawia zasadniczego wyęźnienia we wsporniku poprzeczny.

#### 4. Podsumowanie

Zaprezentowana analiza pokazuje możliwości modelowania konstrukcji żelbetowej pracującej w II fazie i współpracę zarysowanego betonu ze zbrojeniem. Pomimo wielu założeń upraszczających, dotyczących kontynualnego modelu betonu i połączenia prętów zbrojeniowych, zaprezentowany model poprawnie przedstawia mechanizm zniszczenia i określa z technicznie dobrym przybliżeniem limit nośności.

#### BIBLIOGRAFIA

1. Projekt wykonawczy wiaduktu B-9. Transprojekt Gdański Sp. z o.o. Gdańsk 2005.
2. Instrukcja obsługi do wersji 23. SOFISTIK AG, Oberschleissheim 2007.
3. Chróścielewski J., Żółtowski K., Wilde K., Rucka M., Malinowski M., Kozakiewicz A., Wasilewski B., Romaszkiwicz T., Rutkowski R.: Ekspertyza naukowo-techniczna wiaduktu B-9 na węźle „Nowy Dwór Gdański” nad drogą krajową nr 7. Gdańsk 2007.
4. Lade P.V.: Modeling the strengths of engineering materials in three dimensions. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol. 2, 1997, p. 339-356.
5. Lade P.V., Kim M.K.: Single hardening constitutive model for soil, rock and concrete. *International Journal of Solids & Structures*, No. 32(14), 1995, p. 1963-1978.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Witold Wołowicki