

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. uczelni^{1*)}

ORCID: 0000-0002-5050-0068

mgr inż. Przemysław Kalitowski¹⁾

ORCID: 0000-0002-2083-1616

Analiza następstw potencjalnej awarii wanty mostu podwieszzonego w Bydgoszczy

Consequences analysis of the potential cable failure of the cable-stayed bridge in Bydgoszcz

DOI: 10.15199/33.2022.04.16

Streszczenie. Most Uniwersytecki został zamknięty po siedmiu latach od oddania do użytkowania. Powodem były widoczne gołym okiem objawy znacznego przeciążenia w obrębie zakotwień. Krytyczne elementy konstrukcji mostu zostały wzmocnione i przywrócono go do ruchu.

W artykule przedstawiono nieliniowe analizy statyczne i dynamiczne wykonane na modelu MES, prezentujące cztery scenariusze przebiegu zachowania konstrukcji po utracie nośności mocowania wanty. Wykazały one, że przy przyjętych założeniach urwanie jednej z want prowadziłoby do nieuchronnej katastrofy.

Słowa kluczowe: most wantowy; analiza dynamiczna; Metoda Elementów Skończonych; zerwanie wanty; nieliniowość geometryczna.

Abstract. The University Bridge was closed seven years after it was put into use. The reason was the notice of symptoms of significant overload in the area of the anchorages. Critical elements of the bridge structure were strengthened and it was brought back into service.

The paper presents nonlinear static and dynamic analyses performed on the FEM model, presenting four scenarios of the behavior of the structure after breaking the cable anchorage. The results showed that, under the adopted assumptions, breaking one of the cables would lead to an inevitable disaster.

Keywords: cable-stayed bridge; dynamic analysis; Finite Element Method; cable break; geometrical nonlinearity.

Przeprawa mostowa w ciągu Trasy Uniwersyteckiej, stanowiącej kluczowy element układu komunikacyjnego Bydgoszczy, składa się z mostu podwieszzonego zwanego Mostem Uniwersyteckim (fotografia 1) i estakad kablobetonowych [1]. Badania i analizy wykazały brak wystarczającej nośności zakotwień want w pomoście. W efekcie zidentyfikowano realne zagrożenie wystąpienia katastrofy postępującej zainicjowanej zerwaniem wanty w zakotwieniu dolnym. W artykule przedstawiono rezultaty analiz obrazujących konsekwencje potencjalnej awarii.



Fot. 1. Most Uniwersytecki w Bydgoszczy
Źródło: Gotowski.pl
Photo 1. The University Bridge in Bydgoszcz

¹⁾ Politechnika Gdańska; Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

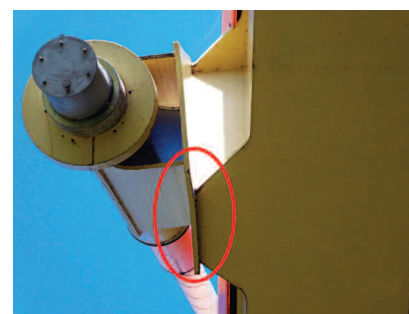
^{*)} Adres do korespondencji: zoltowk@pg.edu.pl

Most Uniwersytecki oddano do użytkowania 30 listopada 2013 r. po przeprowadzeniu próbnego obciążenia [2]. Proces budowy był wspomagany przez zespół doradczy [3]. Projekt realizowano wg PN-85/S-10030. Schemat statyczny mostu to belka ciągła o rozpiętości przęsła 110 + 90 m, podwieszona do pylonu. Przekrój poprzeczny stanowi układ zespolony: żelbetowa płyta z betonu C50/60 oparta na ruszcie z belek stalowych. Przęsła i pylony zaprojektowano i wykonano ze stali S420M, a liny podwieszenia, o różnicowanym przekroju od 72 do 109 splotów o średnicy 15,7 mm, ze stali Y1860. Obiekt został zaprojektowany jako nierównoważony na siły poziome od ciężaru własnego. W efekcie w docelowym łożysku stałym występuje siła pozioma ok. 1400 kN.

Przyczyny wyłączenia mostu z ruchu

W lipcu 2020 r. przeprowadzono, na zlecenie Zarządu Dróg Miejskich i Komunikacji Publicznej (ZDMiKP) w Bydgoszczy, pomiary sił w linach podwieszenia mostu [4]. Identyfikacji dokonano metodą dynamiczną [5, 6].

W czasie badań stwierdzono duże deformacje blach konstrukcji zakotwień (fotografia 2), co opisano w [7, 8]. W efekcie przeprowadzono kompleksowe badania i analizy mające na celu ustalenie przyczyn zaistniałej sytuacji i ocenę zagrożenia konstrukcji.

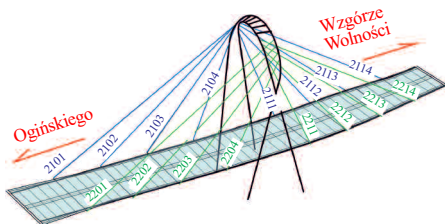


Fot. 2. Przykład zdeformowanych blach zakotwienia
Photo 2. Example of the deformed plates of the anchorage

W ramach analiz teoretycznych opracowano globalny model MES konstrukcji mostu. Wyniki potwierdziły poprawność pracy głównych elementów mostu. W kolejnym kroku stworzono modele szczegółowe węzłów zakotwień [7]. Analizy wykonano z wykorzystaniem uproszczonego, sprężysto-plastycznego prawa materiałowego dla stali S420M.

Uwzględniono również wpływ przemieszczeń na siły wewnętrzne. Obliczenia prowadzono dla trzech istotnych poziomów obciążenia konstrukcji: **Char. Cw.** – siła charakterystyczna w linii pod ciężarem własnym; **Char. Max.** i **Obl. Max.** – odpowiednio maksymalna charakterystyczna i obliczeniowa siła w linii wg PN.

Wyniki analiz potwierdziły przewidywany wstępnie stan zagrożenia. Węzły nr 2101, 2201, 2113 i 2213 (rysunek 1) wykazały brak wystarczającej nośności pod ciężarem własnym (Char. Cw.), co wskazywało na duże prawdopodobieństwo wystąpienia katastrofy budowlanej. Ponieważ do katastrofy nie doszło, przystąpiono do poszukiwania rezerw nośności. Pierwotne obliczenia prowadzono z ograniczeniem wartości odkształceń do max. 5% zgodnie z zaleceniami PN-EN 1993-1-5. Pewne rezerwy można też znaleźć w zastosowanym prawie materiałowym (rysunek 2). Kolejne badania [9] wskazały na większą niż zakładano nośność elementu ze stali S420M w strefie wzmocnienia.

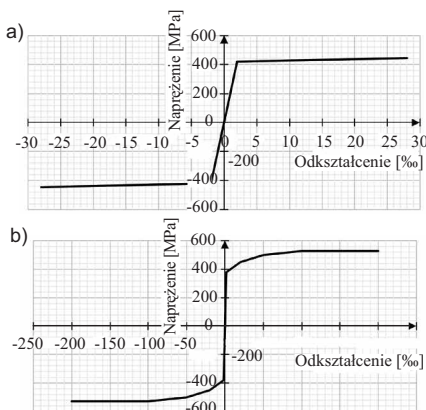


Rys. 1. Schemat mostu z numeracją węzłów zakotwień
Fig. 1. Scheme of the bridge with numbers of the anchorages of cables

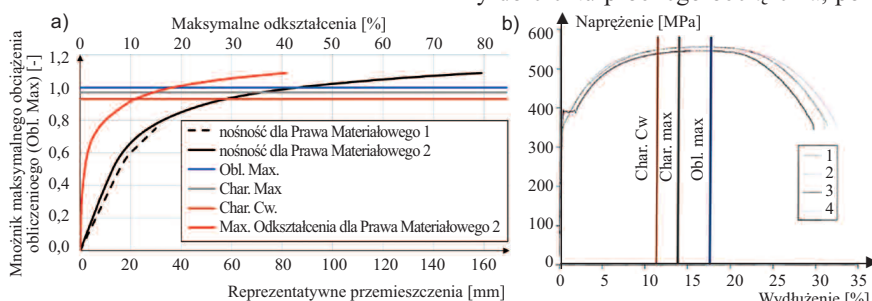
Rozszerzona analiza nośności węzła 2201

W celu poszukiwania rezerw nośności, inspirując się opracowaniem [10], powtórzono analizę węzła 2201 przy alternatywnych założeniach [8]. Nie ograniczono wartości odkształceń i zastosowano prawo materiałowe wg rysunku 2b, odpowiadające w przybliżeniu próbie rozciągania stali pobranej z konstrukcji mostu (rysunek 3b).

Wynik analizy przedstawiono za pomocą wykresu „ścieżki równowagi” (rysunek 3a) obrazującego zależność pomiędzy przemieszczeniami wybranego węzła pierścienia oporowego a obciążeniem. Do klasycznego prze-



Rys. 2. Prawa materiałowe zastosowane w analizach nośności zamocowań want: a) prawo nr 1 – analiza pierwotna; b) prawo nr 2 – analiza rozszerzona
Fig. 2. Material laws utilized in the bearing-capacity analysis of the anchorages: a) material law 1 – primary analysis; b) material law 2 – extended analysis



Rys. 3. Ścieżka równowagi w przypadku węzła 2201 [6] (a); wynik próby rozciągania stali S420M pobranej z mostu [9] (b), z naniesionymi maksymalnymi odkształceniami materiału węzła 2201 w przypadku różnych wartości obciążeń
Fig. 3. Stability path of the 2201 anchorage [6] (a); results of the uniaxial tension test for the steel S420M taken from the bridge [9] (b), with marked maximum material strains of the 2201 anchorage from different characteristic loads

biegu ścieżki równowagi dodano wykres zmienności maksymalnych odkształceń w analizowanym węźle oraz trzy wielkości obciążenia ustalone wcześniej. Na wykresie próby jednoosiowego rozciągania (rysunek 3b) zaznaczono również otrzymane wartości odkształceń stali węzła 2201 od obciążeń charakterystycznych.

Z rysunku 3a wynika, że obciążenie Char. Cw. skutkuje pełnym uplastycznieniem elementów węzła i odkształceniami o wartości maksymalnej 10 – 11%, a obciążenie Obl. Max. aż 17 – 18%. Przy maksymalnym odkształceniu 5% osiągnięto mnożnik obciążenia Obl. Max. wynoszący ok. 0,8. Otrzymane wyniki są niemal identyczne z przedstawionymi w analizie wykonanej przez zespół projektanta [10]. Należy podkreślić, że poziom wiarygodności modelu MES w tym przypadku powinien zostać znacz-

nie ograniczony z uwagi na duże wartości odkształceń ekstremalnych. Niemniej wynik przybliża sytuację, w której znalazło się zakotwienie.

Rezultaty analiz wskazują na nieakceptowalny stan odkształceń materiału kluczowych elementów konstrukcji nawet pod ciężarem własnym. Autorzy opracowania [10, 11] argumentowali swoje wnioski o niezamykaniu mostu faktem przeprowadzenia pozytywnej próby obciążeniowej [3], twierdząc, że występujące podczas niej obciążenia nie mają szansy powtórzyć się w trakcie eksploatacji. Wyniki pomiarów z monitoringu mostu [12] i analizy w [13] rzucają nowe światło na problem bezpieczeństwa konstrukcji. Przyrost sił w krytycznych węzłach, porównywalny do efektu próbnego obciążenia, po-

jawia się jako zjawisko cykliczne, dobowe. Wynika ono ze zmienności dobowej temperatury w otoczeniu mostu. Zatem, oprócz problematyki nośności do-raznej, pojawia się zagadnienie niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej węzłów [14, 15].

Konsekwencje awarii krytycznej wanty

Dotychczasowe prace studyjne pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- stan uplastycznienia materiału węzłów zamocowań want przy odkształceniach na poziomie 10% był niedopuszczalny z punktu widzenia powszechnej wiedzy inżynierskiej, dobrej praktyki, norm i ogólnych wymagań dotyczących poziomu niezawodności konstrukcji;
- rezerwy nośności wykazane w [10] i obliczeniach własnych, potwierdzone

częściowo przez próbne obciążenie, nie mogły być potraktowane jako dowód wystarczający do podjęcia decyzji o dalszym użytkowaniu mostu;

- próbne obciążenie skutkowało wzrostem siły w krytycznym węźle o 2,61% i było testem wytrzymałości doraźnej. Wykazane w [13] cykliczne obciążenia dobowe niekiedy zbliżone są do efektu obciążenia próbnego.

Przedstawione wyniki analiz jednoznacznie wskazują na duże ryzyko awarii konstrukcji. Potencjalny scenariusz katastrofy z pewnością zacząłby się od urwania jednego z krytycznych zamocowań. Na podstawie analiz i badań wytypowano węzły nr 2201 i 2213, których awaria była najbardziej prawdopodobna. Na element 2201 wskazuje maksymalny poziom odkształceń plastycznych osiągnięty w konstrukcji, a na element 2213 nieakceptowalny technicznie poziom odkształceń plastycznych oraz zauważone pęknięcia w najbardziej odkształconych fragmentach węzła [16]. W dalszych analizach przedstawiono teoretyczny scenariusz urwania wanty 2201 lub 2213 i jego następstwa. Przyjęto, że potencjalne urwanie wanty występuje za każdym razem w wyniku zniszczenia jej zamocowania w pomoście. Nośność wanty, określona przez siły w splotach, jest 2–3 razy większa niż nośność zakotwień krytycznych. W rozważaniach uwzględniono również warianty z podporami tymczasowymi, będącymi doraźnym zabezpieczeniem konstrukcji, wprowadzonym po wyłączeniu mostu z eksploatacji.

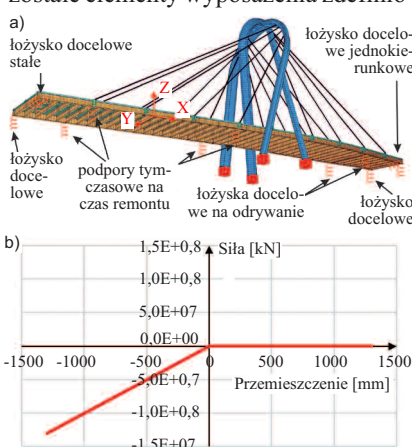
Model numeryczny

Na potrzeby analiz dynamicznych stworzono przestrzenny model numeryczny w środowisku MES SOFiSTiK (rysunek 4a).

Pylon oraz stalowe elementy rusztu pomostu zamodelowano za pomocą jednowymiarowych elementów belkowych, betonową płytę pomostu – czterowęzłowych elementów powłokowych, opisanych na węzłach wspólnych z rusztem pomostu, a wanty za pomocą jednowymiarowych elementów ciągnowych. Połączenie wanty z pomostem uproszczono do elementów o relatywnie dużej sztywności, zamocowanych na przedłużeniu poprzecznic. Zrezygnowa-

no ze szczegółowego odwzorowania problematycznych węzłów. Ich nośność została wyznaczona we wcześniejszych analizach [8, 10] (tabela) i uwzględniona w obliczeniach.

Na rysunku 4a oznaczono lokalizację i opis warunków podparcia, odpowiadający zaprojektowanemu schematowi łożyskowania oraz warunkom w trakcie naprawy. W przypadku podpór nieprzenoszących sił odrywających zastosowano jednostronne więzy sprężyste (rysunek 4b). W geometrii modelu uwzględniono również kapy chodnikowe, a pozostałe elementy wyposażenia zdefinio-



Rys. 4. Wizualizacja modelu numerycznego z opisem warunków brzegowych (a); prawo materiałowe jednostronnych podpór sprężystych (b)

Fig. 4. Numerical model visualization with the description of the boundary conditions (a); material law of the elastic, one-sided supports (b)

wano w postaci obciążenia. Model numeryczny został zwalidowany przez porównanie rezultatów teoretycznych z pierwotnym próbnym obciążeniem obiektu [3]. Uzyskana maksymalna różnica ugięcia wynosi 5%, a po uwzględnieniu pierwszej częstotliwości drgań własnych – 3%.

Analiza dynamiczna

Analizę dynamiczną przeprowadzono metodą bezpośredniego całkowania równań ruchu Newmarka, uwzględniając nieliniowość geometryczną [17]. Przyjęto krok całkowania $\Delta t = 0,005$ s. Całkowity czas trwania analizy ustalono na 5,0 s. Zastosowano tłumienie masowo-szywnościowe Rayleigha o wartości $LDT = 0,04$ w przedziale częstotliwości 0,7–5,0 Hz. Początkową konfigurację układu wyznaczono w geometrycznie

nieliniowej analizie statycznej, z uwzględnieniem ciężaru własnego obiektu i wyposażenia oraz wartości sił w wantach pomierzonych w 2020 r. [4]. Pierwszym krokiem każdej z analiz było zaburzenie stanu równowagi pierwotnej przez wyłączenie ze współpracy wybranej wanty: 2201 albo 2213, które polegało na eliminacji danego elementu z układu statycznego z zachowaniem obciążeń zewnętrznych i stanu sił wewnętrznych.

Nośność węzłów łączących wanty z pomostem uwzględniono w sposób pośredni. Przyjęto, że po osiągnięciu siły normalnej w wancie o wartości przekraczającej nośność węzła (tabela), wanta zostaje zerwana i wyłączona z dalszej współpracy. W trakcie przeprowadzonych obliczeń nośność wszystkich węzłów została zmniejszona o 5%, ze względu na możliwość występowania typowego obciążenia eksploatacyjnego obiektu, nieuwzględnionego w analizie. Dodatkowo wzięto pod uwagę następujące warunki pracy konstrukcji:

- nośność poprzeczną łożyska stałego – sprawdzano wartość reakcji w obu kierunkach poziomych. Jeżeli siła wypadkowa była większa niż zadeklarowana nośność poprzeczna łożyska (10030 kN), to podarcie poziome zostało wykluczone z dalszej pracy. W analizach bez uwzględnienia nośności łożyska, reakcja pozioma osiągnęła nierealną wartość ponad 20000 kN, a układ pomimo utraty dwóch lin okazał się stabilny;

- nośność poziomą, poprzeczną łożyska jednokierunkowego – warunki pracy identyczne jak w przypadku łożyska stałego, o nośności na poziomie 3800 kN. Nieuwzględnienie nośności łożyska skutkowało osiągnięciem reakcji poziomej o wartości ponad 6000 kN;

- możliwość zsunienia się z łożysk – przemieszczenie punktu podparcia na kierunku X większe niż wartość graniczna wywoływało wyłączenie danego podparcia pionowego. Na podstawie odległości osi łożyska od krawędzi filara przyjęto wartość graniczną 1 m. Warunek ten zastosowano do podpór docelowych pomostu, nieprzenoszącego odrywania;

- podpory tymczasowe zastosowano jedynie w dwóch wariantach obliczeń.

Wstępne analizy pokazały konieczność uwzględnienia kontaktu pomiędzy

Nośność (zerwanie) zakotwień wanty wyznaczona w [8, 10] i przyjęta w analizie dynamicznej

Break up capacity of the anchorages according to [8, 10], adopted in the dynamic analysis

Charakterystyka	Strona wschodnia								
	2101	2102	2103	2104	2111	2112	2113	2114	
Numer wanty	2101	2102	2103	2104	2111	2112	2113	2114	
Nośność węzła [kN]	11845	12340	14840	20987	19986	16570	13193	11940	
Charakterystyka	Strona zachodnia								
	2201	2202	2203	2204	2211	2212	2213	2214	
Numer wanty	2201	2202	2203	2204	2211	2212	2213	2214	
Nośność węzła [kN]	11607	11005	15296	20395	20130	15834	13003	11871	

pomostem a pylonem. Na pylonie stworzono uproszczoną strefę kontaktu za pomocą relatywnie sztywnych elementów belkowych, o długości odpowiadającej szerokości przekroju pylonu, a także sprężyn kontaktowych (rysunek 5). Odzworowanie miało na celu uwzględnienie ograniczenia w przemieszczaniu poziomym przęsła i uderzenia o pylon. Model nie uwzględnia efektów lokalnych w miejscu kolizji.

Wykonano cztery analizy dynamiczne uwzględniające następujące założenia:

- D2201 – początkowe zerwanie wanty 2201; bez podpór tymczasowych;
- D2201T – początkowe zerwanie wanty 2201; z podporami tymczasowymi;
- D2213 – początkowe zerwanie wanty 2213; bez podpór tymczasowych;
- D2213T – początkowe zerwanie wanty 2213; z podporami tymczasowymi.

Przeprowadzona analiza świadomie została obciążona przyjętymi ograniczeniami. Jej celem była symulacja początkowej fazy potencjalnej katastrofy. Z tego względu nie uwzględniono nieliniowości materiałowej, a jedynie sprawdzono stopień wyężenia elementów w ekstremalnie niekorzystnych fazach. Wartości granicz-

ne przemieszczeń łożysk są orientacyjne, a ich nośności bazowała na wartościach deklarowanych w projekcie. Nie uwzględniono trudnych do przewidzenia zjawisk, takich jak: zaparcie się przęsła na przylegających estakadach betonowych; tarcie pomiędzy przęsłem a podporą po zerwaniu łożysk czy osiadanie podpór.

Rezultaty analiz dynamicznych

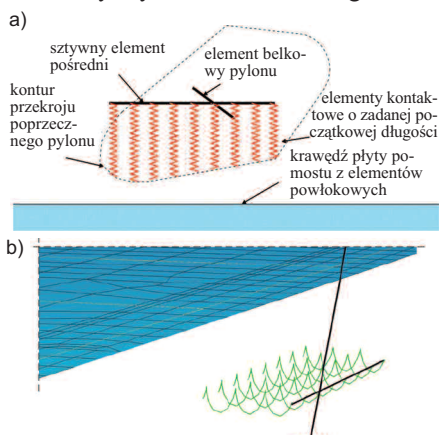
W związku z tym, że syntetyczny charakter artykułu nie pozwala na zaprezentowanie wszystkich otrzymanych wyników, przedstawiono jedynie wybrane wnioski. W każdym wariantcie została wyczerpana nośność poprzeczna łożysk docelowych. W efekcie występowało przesunięcie przęsła i uderzenie w pylon. Lokalne skutki tego kontaktu były niestety trudne do przewidzenia na podstawie przeprowadzonej analizy. Najgorszy rezultat, tożsamy z katastrofą budowlaną, uzyskano w przypadku wariantu zerwania wanty 2213 bez podpór tymczasowych (D2213). Nastąpiło zsuniecie z łożysk docelowych (przemieszczenie o ponad 1 m na kierunku podłużnym) i zerwanie wszystkich want. Wyniki obliczeń wariantów z podporami tymczasowymi pokazują, że dzięki ich zastosowaniu przy zerwaniu wanty 2201 nie następuje zerwanie wanty 2101, a przy zerwaniu wanty 2213 nie następuje postępująca katastrofa budowlana.

Przebieg potencjalnej awarii może obrazować historia wartości sił w kolejnych wariantach po zainicjowaniu procesu, tj. zerwaniu wybranej wanty. Na rysunku 6 przedstawiono wykresy sił w wariantach dla wszystkich wariantów analizy. Kwadratem w krzyżykiem zaznaczono moment, w którym nośność węzła danej wanty została wyczerpana i wanta została zerwana. Natomiast na rysunku 7a przedstawiono naprężenia HMH w najbardziej wyężonych, stalowych elementach pomostu (model powłokowo-

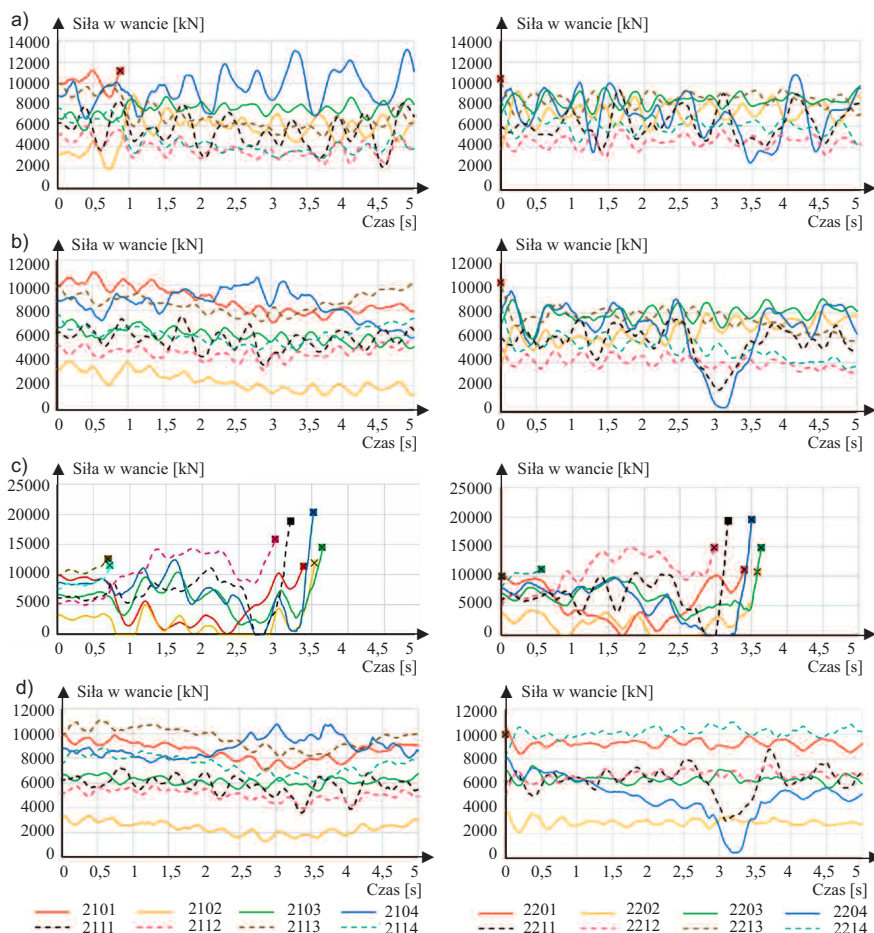
belkowy). Ich lokalizację zaznaczono na rysunku 7b. W przypadku każdej z analiz wybrano element, który wykazywał maksymalne wyężenie w trakcie całego przebiegu czasowego. W wariantach po zerwaniu wanty 2201 ekstremalnie wyężone są elementy tuż przy zakotwieńiu 2103 i 2203. W obu przypadkach naprężenia nie przekraczają granicy plastyczności stali S420. W wariantcie D2213T maksymalne naprężenia uzyskiwane są dla elementu bliskiego miejscu zderzenia się pomostu z pylonem. Przy zastosowanych założeniach, w tym miejscu również nie następuje przekroczenie granicy plastyczności. Zdecydowanie największe naprężenia uzyskano po zerwaniu wanty 2213, bez podpór tymczasowych (D2213). Ekstremalne naprężenia szybko przekraczają granicę plastyczności i wzrastają do 600 MPa, a następnie 1300 MPa. Rezultaty te uzyskano w analizie liniowej materiałowo i nie wystąpiłyby w rzeczywistości. W praktyce tak duże wyężenie materiału prawdopodobnie spowodowałoby zniszczenie przekroju. Analogiczne sprawdzenie przeprowadzono w przypadku pylonu. Nie stwierdzono przekroczenia granicy plastyczności w głównych jego elementach.

Podsumowanie

Decyzja o zamknięciu obiektu Mostu Uniwersyteckiego została podjęta na podstawie teoretycznie zaawansowanych, ale inżynierskich analiz. Dalsze prace o charakterze naukowym przedstawione w [8, 10, 11] i w tym artykule, pomimo rażących różnic interpretacyjnych, naszym zdaniem potwierdzają słuszność podjętych decyzji. Autorzy [10, 11] rekomendowali utrzymanie mostu w ograniczonej eksploatacji. Przedstawiona analiza skutków urwania wanty pokazuje szerszy problem związany z oceną ryzyka dalszej eksploatacji mostu. Z analiz wprost wynika, że awaria jednego z krytycznych zakotwień (nr 2213 wg rysunku 3), w przypadku braku podpór tymczasowych, prowadzi do katastrofy budowlanej. Z powodu znacznych uproszczeń w modelu zobrazowano tylko początek katastrofy. Niezwykle istotny wpływ na wyniki analizy miało wprowadzenie nieliniowych charakterystyk dla warunków brzegowych (podparcia, kontakt). W każdym wariantcie nośność pozioma łożysk

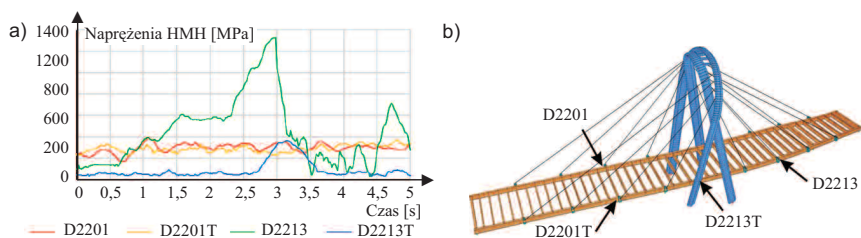


Rys. 5. Schemat strefy kontaktowej przęsła i pylonu w widoku z góry (a); widok na strefę kontaktową w modelu numerycznym (b)
Fig. 5. The scheme of the span and pylon contact zone – top view (a); contact zone in the numerical model (b)



Rys. 6. Przebieg czasowy zmienności sił w wancach we wszystkich przeprowadzonych analizach: (a) D2201; (b) D2201T; (c) D2213; (d) D2213T

Fig. 6. Normal forces on the cables vs. time in all conducted analyzes: (a) D2201; (b) D2201T; (c) D2213; (d) D2213T



Rys. 7. Przebieg czasowy naprężeń HMM najbardziej wyężonych elementów pomostu (a); lokalizacja najbardziej wyężonych elementów (b)

Fig. 7. Von Mises stresses vs. time for the most efforted deck elements (a); location of the most efforted elements (b)

została wyczerpana, co w rzeczywistości oznacza ich zniszczenie i utratę równowagi poziomej konstrukcji (efekt wahadła). Ważnym wnioskiem z analiz jest potwierdzenie zasadności działań prewencyjnych polegających na wykonaniu tymczasowych podpór zabezpieczających konstrukcję przed awarią postępującą.

Zamocowania wiant Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy wzmocniono [18]. Po pozytywnie przeprowadzonych badaniach odbiorowych, 26 stycznia

2022 r. most został przywrócony do eksploatacji. Materiały źródłowe dotyczące całego procesu naprawy są dostępne na portalu ZDMiKP w Bydgoszczy [19].

Literatura

[1] Transprojekt Gdański Sp. z o.o., „Projekt Wykonawczy – Budowa ul. Ogińskiego w Bydgoszczy na odcinku od ul. Powstańców Wielkopolskich do ul. Wojska Polskiego wraz z obiektami inżynierskimi i dojazdami – Most Nurtowy Podwieszony M-2”.

[2] Aspekt Sp. z o.o. Most Uniwersytecki przez Brdę w Bydgoszczy. Sprawozdanie końcowe

z próbnego obciążenia statycznego oraz dynamicznego obiektu”. Jaworzno, 2013.

[3] Sokołowski W i in. Montaż Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy. Mosty. 2015; t. 5: 43 – 47.

[4] Żółtowski K, Binczyk M, Kalitowski P. Pomiary naciągu wiant Mostu Uniwersyteckiego (most podwieszony M2) wraz z oceną techniczną. Ekspertyza. Kormost. Raport Techniczny, Bydgoszcz, 2020.

[5] Żółtowski K, Binczyk M, Kalitowski P. Pomiar sił w wiantach mostu podwieszony. Materiały Budowlane. 2021; 9: 68 – 72; doi: 10.15199/33.2021.09.08.

[6] Hawryszków P. Badania sił naciągu cięgien systemów podwieszonych mostów z wykorzystaniem metod dynamicznych. Materiały Budowlane. 2015; t. 1, nr 10: 32 – 34; doi: 10.15199/33.2015.10.08.

[7] Żółtowski K, Pełka D, Nowak A. Raport techniczny z analizy nośności węzłów zakotwień w pomoście mostu przez rzekę Brdę w ciągu Trasy Uniwersyteckiej w Bydgoszczy. KBP Żółtowski. Raport Techniczny, Gdańsk, 2021.

[8] Żółtowski K, Binczyk M, Kalitowski P. Most Uniwersytecki w Bydgoszczy. Teoretyczne podstawy decyzji o wyłączeniu obiektu z ruchu. Wrocławskie Dni Mostowe – Bezpieczeństwo Budowli Mostowych – Wrocław, 25-26.11.2021, ss. 71 – 83.

[9] Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy. Laboratorium Badań Materiałowych i Konstrukcji. Sprawozdanie z badań nr 01/2021. Badanie wytrzymałościowe próbek pobranych z konstrukcji stalowej. Bydgoszcz, 2021.

[10] Wilde K i in. Ekspertyza Techniczna: Wykonanie koreferatu do raportów dotyczących Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy wykonanych przez Konsultacyjne Biuro Projektowe Krzysztof Żółtowski. Raport Techniczny, Gdańsk, 2021.

[11] Wilde K i in. Most Uniwersytecki w Bydgoszczy – zaawansowane studium stref zakotwienia systemu podwieszania w pomoście. Wrocławskie Dni Mostowe – Bezpieczeństwo Budowli Mostowych – Wrocław, 25 – 26.11.2021, ss. 85 – 95.

[12] Żółtowski K. Nadzór ekspercki nad podparciem i wzmocnieniem Mostu Uniwersyteckiego. Interpretacja danych archiwalnych pozyskanych z monitoringu elektronicznego. ZDMiKP w Bydgoszczy. Raport Techniczny, Gdańsk, 2022.

[13] Żółtowski K, Binczyk M, Kalitowski P. Zagrożenie katastrofą budowlaną Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy. Analizy i badania. XXX konferencja Awarie Budowlane. Międzyzdroje 2022.

[14] Kowalewski L. Zmęczenie materiałów – Podstawy, Kierunki badań, Ocena stanu uszkodzenia, w Siedemnaste Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, 2011, ss. 1–23.

[15] Dietrich M. Podstawy konstrukcji maszyn Tom 2. Warszawa: WNT, 1995.

[16] KORMOST. Raport ze stwierdzonych niezgodności podczas przeprowadzonych badaniach zakotwień wiant. Raport Techniczny, Bydgoszcz, 2020.

[17] Rakowski G, Kacprzyk Z. Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Oficyna Wydawnicza PW, 2016.

[18] Biliszczuk J i in. Projekt wzmocnienia węzłów zakotwienia wiant w moście Uniwersyteckim w Bydgoszczy. Wrocławskie Dni Mostowe – Bezpieczeństwo Budowli Mostowych – Wrocław, 25 – 26.11.2021, ss. 97 – 108.

[19] Zarząd Dróg Miejskich i Komunikacji Publicznej w Bydgoszczy. Materiały źródłowe dotyczące problematyki wyłączenia mostu z eksploatacji. www.zdmikp.bydgoszcz.pl/pl/component/search/?searchword=raport most (dostęp: 22.03.2022).

Przyjęto do druku: 07.04.2022 r.