

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG^{1)*}
mgr inż. Przemysław Kalitowski¹⁾

Most zwodzony przez Martwą Wisłę w Gdańsku-Sobieszewie

Bascule bridge over Martwa Wisla in Gdansk-Sobieszewo – selected dynamic problems

DOI: 10.15199/33.2017.04.11

Streszczenie. W artykule opisano analizę zachowania dynamicznego elementów podwieszenia mostów. Algorytm i rezultaty przedstawiono na przykładzie nowego mostu zwodzonego w Gdańsku-Sobieszewie. Wprowadzono uproszczenia na bazie rezultatów uzyskanych z analizy statycznej, stworzono linię wpływu przemieszczeń dla obciążenia samochodem ciężarowym. Następnie wygenerowano funkcję przemieszczeń w czasie dla punktów zamocowania cięgna, w której uwzględniono dodatkowe niekorzystne uwarunkowania. Wykonano analizę modalną i nieliniową analizę dynamiczną metodą time-step Newmarka-Wilsona. Rezultaty poddano ocenie i porównaniu w celu weryfikacji przyjętych założeń projektowych.

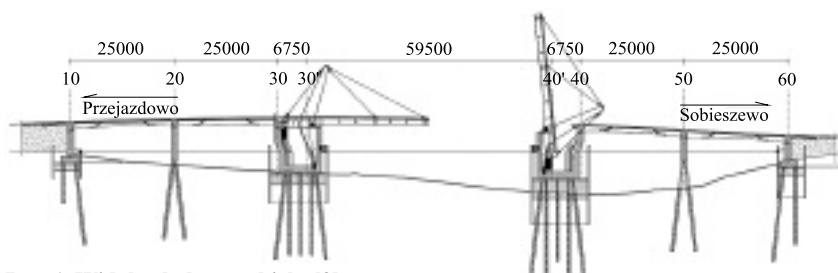
Słowa kluczowe: most zwodzony, wanta, nieliniowa analiza dynamiczna, time-step, analiza Newmarka, metoda elementów skończonych, most w Gdańsku-Sobieszewie.

Abstract. In the paper, dynamic analysis of stay cable in bridges was described. Algorithm and results were presented on example of new bascule bridge in Gdansk-Sobieszewo. Several simplifications were made. On the base of results from static analysis influence line of displacements for truck load was created. Subsequently displacement-time function for cable anchorages was generated. Function includes additional, unfavorable conditions. Modal analysis and nonlinear dynamic analysis with Newmark-Wilson method were done. Results were evaluated and compared for validation of design assumption.

Keywords: bascule bridge, cable, nonlinear dynamic analysis, time-step, Newmark analysis, finite element method, Gdansk-Sobieszewo bridge.

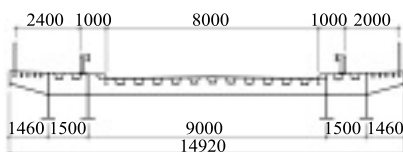
Po wielu latach oczekiwań Wyspa Sobieszewska zostanie połączona z Gdańskiem nowoczesnym mostem.

Zastąpi on dotychczas używany most pontonowy, którego eksploatacja była problematyczna, a koszty utrzymania duże. Generalnym wykonawcą przeprawy jest konsorcjum firm Metrostav SA i Vistal SA realizujące kontrakt dla miasta Gdańsk. Nowy most zaprojektowano jako pięcioprzęsłowy, ze środkową częścią zwodzoną w systemie dwukłapowym (rysunek 1) [2], o rozpiętości 59,50 m. Jego konstrukcję stanowi ruszt składający się z czterech dwuteowych dźwigarów blachownicowych i poprzecznic. Pomost części zwodzonej wykonstruowany został jako płyta ortotropowa z żebrami zamkniętymi w obszarze jezdni i otwartymi w części chodnikowej (rysunek 2). Prześla dojazdowe to ramy dwuprzęsłowe o rozpiętości 2 x 25 m, a ich ustrój niosący stanowią zmodyfikowane dźwigary typu VFT [5, 6]. Każda z części zwodzonych ma dwa wspomagające pylony o wysokości 12,5 m (rysunek 3), do których podwieszono dźwigary główne za pomocą dwóch want prętowych po każdej ze stron. Cięgna pręto-



Rys. 1. Widok z boku na obiekt [2]

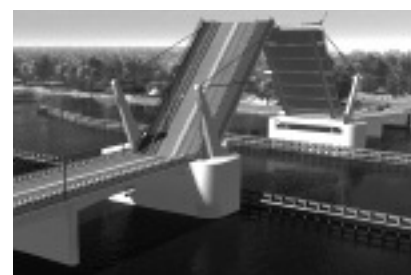
Fig. 1. Side view of the bridge [2]



Rys. 2. Przekrój poprzeczny mostu zwodzonego w części przęsłowej

Fig. 2. Cross section of the span in bascule bridge

we (rysunek 4a) montowane są do wsporników będących przedłużeniem poprzecznic za pomocą łączników widelcowych (rysunek 4b). Odciąg przyjęto w postaci kształtownika stalowego połączonego z częścią podporową przęsła. Prześło zwodzone oparte jest na łożyskach obrotowych, zaś łożyska styczne utrzymują równowagę w pozycji zamkniętej i otwartej. Proces otwierania odbywa się dzięki dwóm parom siłowników (jedna para na przęsło). W obiekcie zastosowa-



Rys. 3. Wizualizacja przeprawy

[EUROPROJEKT Gdańsk]

Fig. 3. Visualisation of the bridge

[EUROPROJEKT Gdańsk]

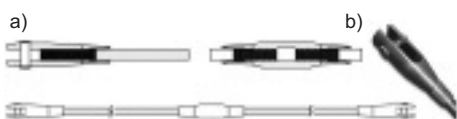
no balastowanie w postaci podwieszonych przeciwwag stalowo-betonowych, które w trakcie otwierania zachowują położenie pionowe dzięki przegubowemu podwieszeniu. Długość want prętowych wynosi 16 m (ϕ 64 mm) i 26 m (ϕ 90 mm). W fazie bezużytkowej występują w nich siły 780 i 410 kN. Ze względu na konstrukcję cięgien pręto-

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

^{*} Adres do korespondencji:

krzysztof.zoltowski@wilis.pg.gda.pl

wych, wyposażonych w pośrednie mufy, podjęto próbę zidentyfikowania ich zachowania dynamicznego podczas eksploatacji.

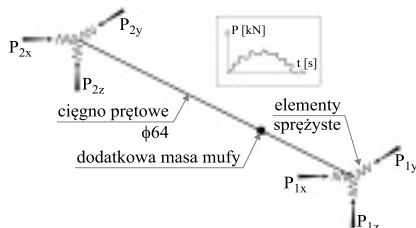


Rys. 4. Przykładowy system podwieszenia prętowego: a) schemat; b) połączenie widelcowe [materiały promocyjne firmy Novocon] Fig. 4. Rod system example: a) scheme; b) fork joint [Novocon promotional materials]

Analiza dynamiczna

W analizie zastosowano metodę time-step Newmarka-Wilsons. W związku z tym, że jest bardzo czasochłonna szczególnie w ujęciu nieliniowym geometrycznie, zdecydowano o wyizolowaniu z ustroju pojedynczej wanty [7]. Naturalnym problemem pojawiającym się przy analizie tzw. modelu wycinkowego jest przyjęcie warunków brzegowych, które odtwarzają sposób zamocowania, sztywność i przemieszczenia, tak jak ma to miejsce w jednolitej konstrukcji. W przedmiotowym przypadku ciężno podparto przegubowo na obu końcach (rysunek 5). Sposób, w jaki konstrukcja oddziałuje na wantę – w odpowiedzi na przejazd pojazdu – odwzorowano odpowiednim przemieszczaniem punktów podparcia.

Przemieszczenia punktów zamocowania wany zostały wyznaczone z analizy statycznej modelu numerycznego całego obiektu



Rys. 5. Schemat modelu wanty Fig. 5. Scheme of the cable model

(rysunek 6). Model zrealizowano z czterowęzłowych elementów powłokowych (blachy), elementów ciągnowych (wanty podwieszenia) i elementów kratownicowych (odciąg). Przed wykonaniem obliczeń z uwzględnieniem przejazdu odtworzono proces budowy obiektu wraz z doбором sił naciągu w wantach i w efekcie uzyskano ich napięcie w fazie bezużytkowej. W kolejnym kroku wykonano linie wpływowe przemieszczeń punktów zamocowania wany od obciążenia pojazdem 4-osiowym [4] o masie 32 t i rozstawie osi 1795 + 3205 + 1400 mm.

Obliczenia statyczne przejazdu prowadzono dla jednego pojazdu, znajdującego

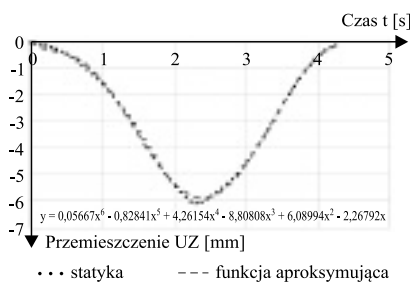
się możliwie blisko krawężnika, z krokiem co 1 m. Przyjmując stałą prędkość samochodów, można w prosty sposób transformować dziedzinę funkcji z aktualnego ustawienia pojazdu na czas przejazdu. Wstępnie przyjęto prędkość samochodu $v = 50$ km/h. Aby otrzymać efekt obciążenia mostu większą liczbą samochodów, wykorzystano zasadę superpozycji. Rezultaty oddziaływania kolumną samochodów otrzymano przez złożenie stanów obciążenia pojedynczym pojazdem.



Rys. 6. Wizualizacja modelu całego mostu zwodzonego, obciążonego statycznie samochodem ciężarowym w środkowej części przęsła. Środowisko MES SOFiSTiK Fig. 6. Visualisation of the global model, loaded by truck in the middle of span. FEM SOFiSTiK Environment

Chcąc zachować możliwość modyfikacji liczby samochodów i odległość między nimi dokonano aproksymacji, otrzymując funkcję ciągłą wyrażoną wielomianem (rysunek 7). Wyznaczono funkcje przemieszczeń węzłów podporowych ciężna we wszystkich trzech kierunkach translacyjnych. Otrzymaną zależność zaimplementowano do programu MES. W celu wprowadzenia dodatkowych, niekorzystnych warunków obciążenia dokonano dwóch modyfikacji funkcji:

- odwzorowanie przejazdu przez przeszkodę umieszczoną w środku rozpiętości przęsła – zwiększenie o 10% wartości funkcji na czas 0,05 s w sąsiedztwie w chwili czasowej odpowiadającej usytuowaniu pojazdu w środku przęsła;
- odwzorowanie dynamicznego zachowania się pojazdu w czasie jazdy – iloczyn



Rys. 7. Aproksymacja wielomianowa funkcji przemieszczeń w czasie dla jednego z zamocowań wanty, na jednym z kierunków globalnego układu współrzędnych Fig. 7. Polynomial approximation of displacement – time function for cable anchorage, for one of coordinate system direction

funkcji przemieszczeń i czynnika harmonicznego wg zależności:

$$F_{pm} = F_{pb} \cdot \left(1 + 0,1 \sin \left[\frac{2\pi}{T} \cdot t \right] \right)$$

gdzie:
 F_{pm} – zmodyfikowana funkcja przemieszczeń;
 F_{pb} – bazowa funkcja przemieszczeń;
 T – okres drgań – przyjęto 0,5 s.

Funkcję F_{pm} określono na podstawie doświadczeń zebranych z próbnych obciążeń dynamicznych na mostach. Uwzględnia ona najczęściej identyfikowaną częstotliwość własną samochodu ciężarowego $f \sim 2$ Hz.

Kolumnę pojazdów przejeżdżających przez obiekt odwzorowano przez powielenie i zsumowanie wyznaczonej funkcji przemieszczeń z odpowiednio dobranym przesunięciem czasowym każdej z nich. Liczbę pojazdów w kolumnie przyjęto tak, by w pewnej chwili czasowej obciążenie znajdowało się na całej długości przęsła zwodzonego. Ustawienie to wywołuje maksymalne statyczne ugięcie dźwigarów. Ostatecznie przyjęto kolumnę sześciu samochodów w odstępach co 6 m. W przypadku prędkości 50 km/h wymuszenia zakotwień wany wywołane przejazdem przez przeszkodę następuwać będą w odstępie czasowym $\Delta t = 1$ s. Funkcję dla kolumny pojazdów zaprezentowano na rysunku 8. Należy zwrócić uwagę, że wprawienie w drgania wany, bazujące na przemieszczeniach z analizy statycznej, może być stosowane z ograniczeniami. Obliczenia otrzymanych przemieszczeń nie uwzględniają wpływu sił bezwładności oraz tłumienia konstrukcji, ale doświadczenia z rozwiązywaniem podobnych problemów pozwalają stwierdzić, że zastosowane uproszczenia umożliwiają oszacowanie badanego zjawiska.



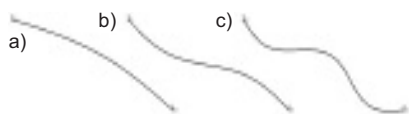
Rys. 8. Wynikowa funkcja przemieszczeń pionowych dolnego zamocowania krótkiej wanty dla przejazdu kolumny sześciu samochodów, z przeszkodą w środku przęsła Fig. 8. Final displacement function for vertical direction in short cable lower anchorage, under 6 trucks load, with threshold in the middle of span

Model numeryczny

Analizie dynamicznej poddano dwie wanty: krótką (16 m) i długą (26 m). Do jego budowy wykorzystano elementy belko-

we o przekrojach odpowiadających przyjętym w projekcie. Dłuższe ciągnie podzielono na 30 elementów skończonych, a krótsze na 20. W związku z tym, że producenci oferują pręty ograniczonej długości, długą wantę połączono w 2/3 długości mufą łącznikową, a krótszą tuż przy dolnym zakotwieniu. Dodatkowy wpływ łączników na prętach odwzorowano przez zastosowanie mas skupionych w odpowiednich węzłach. Podparcie każdego z końców ciągnia zrealizowano zestawem trzech liniowych elementów sprężystych. Przyjęto dużą sztywność ($10e+8$ kN/m), wprowadzając podparcia niepodatne na oddziaływanie naciągu liny czy ciężaru własnego. Ciężna została sprężona siłą występującą w fazie bezużytkowej, odczytaną z modelu globalnego obiektu. Wzbudzenie realizowano przez przemieszczenia punktów podparcia ciągnia.

Wykonano nieliniową analizę statyczną, uwzględniając efekty trzeciego rzędu, aby otrzymać strzałkę ugięcia przy obciążeniu ciężarem własnym i siłą rozciągającą wantę. Geometrię ciągnia zaktualizowano do nowego położenia. Na tak przygotowanym modelu wykonano analizę modalną. Otrzymano efekty zaprezentowane na rysunku 9.



Rys. 9. Formy i częstotliwość drgań własnych wanty: a) pierwsza: 2,42 Hz; b) druga: 4,99 Hz; c) trzecia: 7,63 Hz

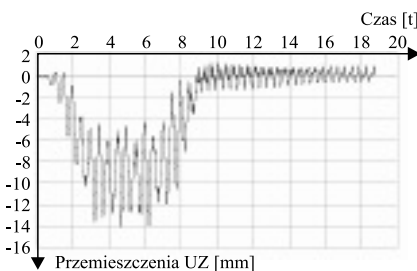
Fig. 9. Cable own vibrations forms and frequencies: a) first 2,42 Hz; b) second: 4,99 Hz; c) third: 7,93 Hz

Prędkość przejazdu $v = 50$ km/h powoduje, że gwałtowne wymuszenie przejazdem przez przeszkodę następuje z częstotliwością 1 Hz. Chcąc zbliżyć częstotliwość wymuszenia do częstotliwości drgań własnych, należałoby zwiększyć prędkość samochodów do 100 km/h z zachowaniem 6 m odstępu między nimi. Z praktycznego punktu widzenia oraz bazując na wynikach przedstawionych w [3], uznano to za nierealne. Co więcej, każde zwiększenie prędkości skutkuje zwiększeniem odległości między pojazdami (np. przy 70 km/h odległość minimalna wg [6] wynosi 30 m). Z tego względu uznano, że zwiększanie prędkości nie sprawia, że oddziaływanie jest bardziej niekorzystne i w dalszej analizie uwzględniano wstępnie przyjęte warunki.

Analizie poddano ciągnie wstępnie napięte i mające strzałkę wynikającą z warunków równowagi statycznej. Wykorzysta-

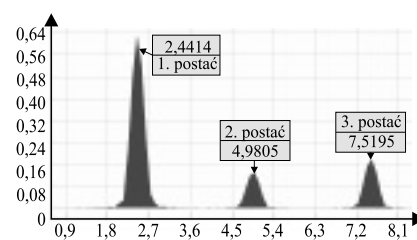
stano metodę Newmarka-Wilsonsą całkowania bezpośredniego macierzowych równań ruchu [1] z uwzględnieniem efektów geometrycznie nieliniowych w każdym kroku. W algorytmie zastosowano współczynniki $\alpha = 0,25$ i $\beta = 0,5$ niwelujące efekt tłumienia numerycznego. W analizie obejmującej czas 18,7 s (9,35 s – wymuszenia siłami; 9,35 s – odpowiedź swobodna) przyjęto krok czasowy $\Delta t = 0,005$ s. Zastosowano model tłumienia Rayleigha. Zgodnie z założeniami modelu dobrano współczynniki definiujące macierz tłumienia z wykorzystaniem macierzy mas i macierzy sztywności. Po wykonaniu obliczeń iteracyjnych ze zmiennymi wartościami współczynników, wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia odczytana z ostatecznego sygnału wynikowego wyniosła 2,2%. Analizy pozwoliły wykreślić zależność przemieszczeń węzłów w funkcji czasu. Na rysunku 10 zaprezentowano rezultaty w przypadku miejsca charakteryzującego się maksymalnymi amplitudami drgań pionowych. Należy zauważyć, że jest to węzeł obciążony dodatkową masą mufy łącznikowej. Z wykresów przemieszczeń w każdym kierunku odczytano największą wypadkową wartość międzyszczytową drgań na poziomie 11,1 mm w przypadku wanty długiej i 1,8 mm – wanty krótkiej. Na podstawie wyników wywnioskowano, że w wantach nie wystąpią niekorzystne efekty dynamiczne. Sygnał odpowiedzi swobodnej wanty (po opuszczeniu obiektu przez wszystkie ciężarówki) poddano analizie częstotliwościowej z zastosowaniem transformaty Fouriera (rysunek 11).

Porównanie częstotliwości drgań własnych wynikających z analizy modalnej i z analizy częstotliwościowej odpowiedzi swobodnej zestawiono w tabeli. Odpowiedź swobodna ciągnia wyznaczona w analizie dynamicznej przebiega w sposób prawidłowy, co potwierdza, że parametry metody Newmarka przyjęto właściwie.



Rys. 10. Zależność przemieszczeń pionowych UZ od czasu dla węzła z mufą długiej wanty

Rys. 10. Chart of vertical displacement-time dependence for node with buckle mass in a long cable



Rys. 11. Rezultaty analizy częstotliwościowej wykonanej na sygnale odpowiedzi swobodnej węzła z mufą długiej wanty

Fig. 11. Results of Fourier (FFT) analysis on the free vibration response signal for node with buckle mass in a long cable

Zestawienie częstotliwości drgań własnych z analizy modalnej i dynamicznej

Comparison of frequencies from modal analysis and dynamic analysis

Charakterystyka	Postać drgań		
	1	2	3
Analiza modalna [Hz]	2,42	4,99	7,63
Analiza dynamiczna [Hz]	2,44	4,98	7,52
Błąd względny [%]	0,8	0,2	1,4

Uzyskane wyniki potwierdziły, że na przedmiotowym obiekcie nie występuje ryzyko nadmiernych drgań want wywołanych ruchem na moście. Zastosowana metoda, w relatywnie prosty sposób, pozwala określić zachowanie się elementów ciągnowych w konstrukcjach mostowych.

Literatura

- [1] Clough Ray W., Joseph Penzien. 1975. *Dynamics of Structures*. Nowy Jork. McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- [2] Europrojekt Gdańsk Sp z o.o. 2010. Budowa mostu zwodzonego w ciągu drogi wojewódzkiej nr 501 nad Martwą Wisłą w Gdańsku-Sobieszewie. Gdańsk.
- [3] Kamińska Joanna, Mieczysław Chalfen. 2016. „Prędkość ruchu jako funkcja odległości między pojazdami”. *Autobusy* (12): 635 – 639.
- [4] Katalog firmy Mercedes-Benz: Actros 6x4 Tipper, 12.2011.
- [5] Lorenc Wojciech, Günter Seidl. 2016. „Trendy w rozwoju konstrukcji zespolonych w mostownictwie”. *Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe Duże Mosty Wieloprzęsłowe, Projektowanie, Technologie Budowy, Monitoring*. Red. J. Biliszczuk, Wrocław.
- [6] Stacewicz Maciej, Tomasz Kołakowski, Witold Kosecki, Wojciech Lorenc. 2016. „Nowatorska konstrukcja zespolona przęsła nowego wiaduktu w ciągu drogi krajowej nr 22 nad linią PKP koło miejscowości Elbląg”. *Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe Duże Mosty Wieloprzęsłowe, Projektowanie, Technologie Budowy, Monitoring*. Red. J. Biliszczuk, Wrocław.
- [7] Żółtowski Krzysztof, Paweł Żółtowski. 2004. „Efekty dynamiczne w ciągnach podwieszonych kładek dla pieszych”. *V Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy Projektowania, Budowy oraz Utrzymywania Mostów Małych i Średnich Rozpiętości*. Red. J. Biliszczuk, Wrocław.

Przyjęto do druku: 17.03.2017 r.