

Joanna KALABIŃSKA*
Politechnika Krakowska

ODPOWIEDŹ DYNAMICZNA MOSTÓW O RÓŻNYCH CHARAKTERYSTYKACH DYNAMICZNYCH NA NIERÓWNIOMIERNE WYMUSZENIE PARASEJSMICZNE

Streszczenie. W artykule przedstawiono porównanie odpowiedzi dynamicznej mostów o różnych charakterystykach dynamicznych (częstotliwościach drgań własnych oraz tłumieniu) na rzeczywiste wymuszenie parasejsmiczne pochodzenia górniczego. W obliczeniach uwzględniono nierównomierność wymuszenia kinematycznego, wynikającą ze skończonej prędkości fali wstrząsowej w gruncie oraz z redukcji amplitud drgań ze zwiększeniem odległości od źródła drgań, właściwą dla terenów górniczych. Otrzymano zwiększenie lub redukcję odpowiedzi dynamicznej mostów w zależności ich od charakterystyk dynamicznych.

DYNAMIC RESPONSE OF BRIDGES OF DIFFERENT DYNAMIC CHARACTERISTICS TO NONUNIFORM PARASEISMIC EXCITATION

Summary. The paper presents comparison of dynamic response of bridges with different dynamic characteristics (natural frequencies and damping) to real non-uniform mining related paraseismic excitation. Non-uniform kinematic excitation, being the result of finite velocity of the shock wave in the soil was considered in calculation. Vibration amplitudes reduction together with the increase of the distance from the vibration source, typical for mining areas were taken into consideration as well. Either an increase or reduction of dynamic response of bridges can occur depending on dynamic characteristics.

1. Wstęp

Na obiekty znajdujące się w obszarach aktywności sejsmicznej lub parasejsmicznej działają znaczące obciążenia dynamiczne, wynikające z ruchu gruntu pod budowlą. W przypadku obiektów o niewielkich rozmiarach można założyć, że na podstawie budowl

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Joanna Dulińska.

działa równomierne wymuszenie kinematyczne. W przypadku budowli wielkogabarytowych, których wymiary porównywalne są z długością fali wstrząsowej, konieczne jest uwzględnienie nierównomierności wymuszenia kinematycznego. Założenie nierównomierności wymuszenia skutkuje otrzymaniem składowej dynamicznej i quasi-statycznej odpowiedzi dynamicznej [4, 7] i prowadzi do istotnych zmian (zwiększenia lub zmniejszenia) całkowitej odpowiedzi dynamicznej obiektu w stosunku do odpowiedzi uzyskanej przy założeniu równomiernego wymuszenia. Do budowli, w przypadku których zachodzi konieczność uwzględnienia nierównomierności wymuszenia kinematycznego, zaliczyć można niewątpliwie mosty [1, 5, 6, 7], które ze względu na rozmaite rozwiązania materiałowe oraz geometryczne, a co za tym idzie, różne charakterystyki dynamiczne, wymagają szczególnie wnikliwej oceny wpływu drgań podłoża na ich odpowiedź dynamiczną.

2. Przyjęty model nierównomiernego wymuszenia kinematycznego

Głównymi przyczynami powstawania nierównomierności wymuszenia kinematycznego są [4, 7]: skończona prędkość propagacji fali w gruncie; utrata spójności fal wynikająca z odbicia, interferencji i rozpraszania fal w podłożu; występowanie zróżnicowanej budowy geologicznej podłoża pod budowlą; redukcja amplitud drgań ze zwiększaniem odległości od źródła (tłumienie geometryczne i absorpcja energii fal).

W pracy przedstawiono odpowiedź dynamiczną dwóch mostów o różnych charakterystykach dynamicznych na wymuszenie parasejsmiczne pochodzenia górniczego. Powszechnie stosowany model równomiernego wymuszenia zakłada, że fala wstrząsowa rozchodzi się z prędkością $v = \infty$. W rzeczywistości jednak prędkość fal zawiera się w przedziale od 200 do 1500 m/s w gruntach (1500-3500 m/s w skałach), co skutkuje opóźnieniem czasowym dotarcia fali do poszczególnych podpór konstrukcji. W przyjętym modelu nierównomiernego wymuszenia uwzględniono efekt opóźnienia czasowego wynikający ze skończonej prędkości fali w podłożu. W przypadku wymuszeń parasejsmicznych pochodzenia górniczego, które ze względu na niewielką energię w stosunku do energii wymuszeń sejsmicznych mają zasięg lokalny, uwzględnia się również redukcję amplitud drgań ze zwiększeniem odległości od źródła, spowodowaną tłumieniem geometrycznym. Przyjęty model nierównomiernego wymuszenia parasejsmicznego, uwzględniający efekt przejścia fali pod budowlą i redukcję amplitud drgań ze zwiększeniem odległości od źródła, został uprzednio zweryfikowany doświadczalnie podczas badań *in situ*

kamiennego wiaduktu łukowego [3, 4]. Redukcję amplitud drgań, wynikającą z rozszerzania się frontu falowego na terenach górniczych, wyznaczono ze wzoru [2]:

$$a(r) = a_e \cdot H(r) \quad (1)$$

gdzie:

$a(r)$ – przyspieszenie drgań w odległości r ,

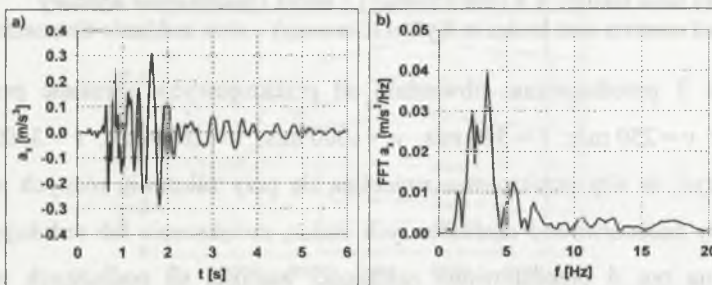
a_e – przyspieszenie drgań w strefie epicentralnej,

r – odległość hipocentralna,

$H(r)$ – funkcja spadku przyspieszeń drgań poza obszarem epicentralnym, gdzie dominuje zjawisko tłumienia geometrycznego. Dla wstrząsów w rejonach GZW, o energii od 10^5 J do 10^8 J oraz odległości epicentralnej $r_e \leq 10$ km, funkcja $H(r)$ przyjmuje postać:

$$H(r) = 1,53 \cdot r^{0,155} \cdot e^{-0,65r} + 0,014 \quad (2)$$

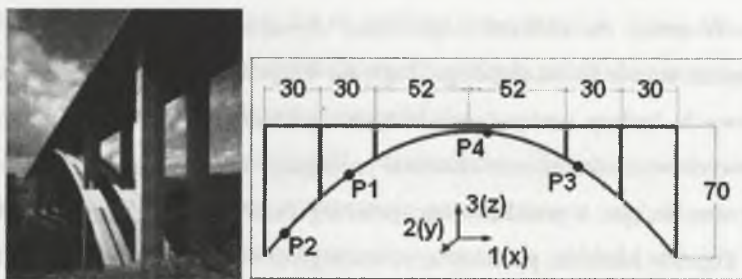
Wstrząsom górniczym towarzyszy emisja fal propagujących się na powierzchni i oddziałujących na obiekty znajdujące się w ich zasięgu. Wstrząsy te charakteryzują się niskimi częstotliwościami drgań i mogą stanowić zagrożenie dla obiektów budowlanych o częstotliwościach drgań własnych zawierających się w paśmie dominujących częstotliwości wymuszenia. W pracy do obliczeń odpowiedzi dynamicznej wykorzystano rzeczywisty, zarejestrowany na terenie Górnosląskiego Zagłębia Węglowego przebieg przyspieszeń drgań powierzchniowych, będący następstwem wstrząsu górniczego [4]. Uwzględniono działanie trzech składowych wymuszenia oraz założono propagację fali wstrząsowej równoległą do osi podłużnej mostu. Na rys. 1 przedstawiono przebieg czasowy i strukturę częstotliwościową przyspieszeń drgań w kierunku poziomym, równoległym do kierunku propagacji fali z terenu GZW. Dominujące częstotliwości zawierają się w przedziale od 2 do 4 Hz.



Rys. 1. Przebieg czasowy (a) i struktura częstotliwościowa (b) przyspieszeń drgań poziomych
Fig. 1. Time history (a) and frequency spectrum (b) of horizontal vibration accelerations

3. Odpowiedź dynamiczna mostu żelbetowego

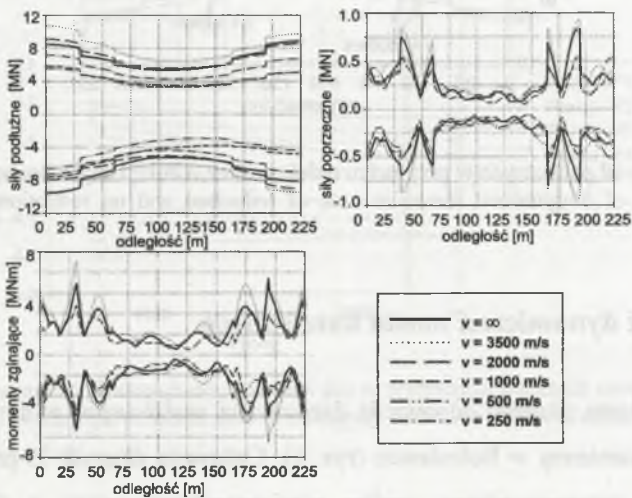
Analizę odpowiedzi dynamicznej przeprowadzono dla żelbetowego mostu łukowego zlokalizowanego w miejscowości Kylltal w Niemczech (rys. 2). Podstawowymi elementami konstrukcyjnymi mostu są dwa łuki o rozpiętości 224 m i wysokości 63 m oraz zmiennej grubości (od 3,5 m przy podporach do 1,5 m w kluczu łuku), niepołączone ze sobą, posadowione na wspólnych fundamentach. W modelu uwzględniono istotne z punktu widzenia sztywności układy elementy – pasy jezdni szerokości 12 m każdy, spoczywające na słupach. Wpływ podłoża gruntowego uwzględniono przez sprężyste zamocowanie fundamentu. Charakterystyki sprężyn odpowiadały własnościom podłoża gruntowego piaszczysto-żwirowego. Obliczenia odpowiedzi dynamicznej mostu na wymuszenia parasejsmiczne wykonano w dziedzinie czasu, z wykorzystaniem programu ABAQUS. Zastosowano elementy belkowe dostępne w bibliotece elementów programu – o przekrojach prostokątnych (dla łuków i słupów) oraz o przekroju teowym (dla jezdni mostu). Tłumienie obiektu założono na poziomie $\xi = 3\%$. Obliczenia odpowiedzi dynamicznej przeprowadzono przy założeniu różnych prędkości fal wstrząsowych w gruncie.



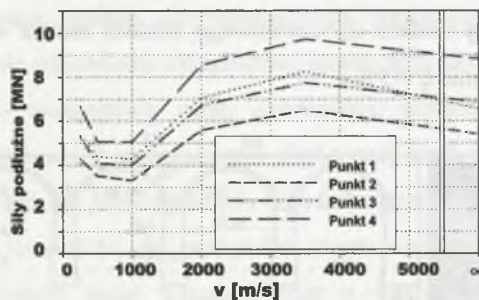
Rys. 2. Żelbetowy most łukowy w Kylltal (Niemcy) – widok i podstawowe wymiary
Fig. 2. Reinforced concrete arch bridge in Kylltal (Germany) – view and basic dimensions

Na rysunku 3 przedstawiono obwiednie sił przekrojowych uzyskane przy założeniu prędkości fali: $v = 250$ m/s, $v = 500$ m/s, $v = 1000$ m/s, $v = 2000$ m/s, $v = 3500$ m/s, $v = \infty$. Można zauważyć, że siły przekrojowe zmieniają się przy założeniu różnych prędkości fali w podłożu. Aby zaobserwować charakter tych zmian, zwiększenie lub redukcję odpowiedzi dynamicznej, na rys. 4 przedstawiono zależności wartości sił podłużnych w wybranych punktach mostu (por. rys. 2) od prędkości fali. W zakresie prędkości od 500 do 1500 m/s następuje znacząca redukcja wartości sił podłużnych przy zmniejszeniu prędkości fali. Jest ona spowodowana spadkiem średnich amplitud wymuszenia kinematycznego na

poszczególnych podporach. Ponadto, jednokrotny ruch podpór może wywołać duże efekty dynamiczne (rezonans) przy częstotliwościach wymuszenia zbliżonych do częstotliwości drgań własnych obiektu (najniższa częstotliwość drgań własnych obiektu mieści się w przedziale częstotliwości dominujących w strukturze wymuszenia – por. rys. 1). Założenie nierównomiernego wymuszenia przeciwdziała rezonansowi, co w przypadku konstrukcji, dla których dominujące są efekty dynamiczne, prowadzi do znaczącej redukcji odpowiedzi. W przedziale prędkości od 200 do 500 m/s następuje zwiększenie odpowiedzi dynamicznej ze zmniejszeniem prędkości fali w podłożu. Efekt ten może być spowodowany efektami quasi-statycznymi, będącymi następstwem niejednakowego ruchu podpór.

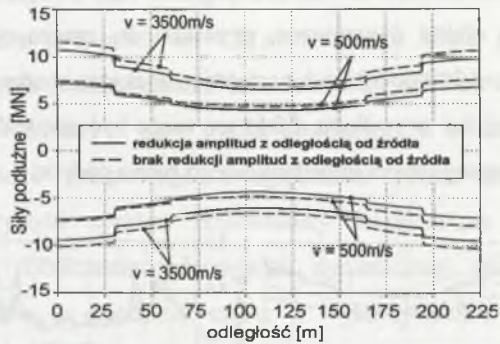


Rys. 3. Obwiednie sił przekrojowych uzyskane przy różnych prędkościach propagacji fali
Fig. 3. Envelopes of sectional forces obtained with different velocities of wave propagation



Rys. 4. Zależność sił podłużnych od prędkości fali w wybranych punktach mostu żelbetowego
Fig. 4. Dependence of longitudinal forces on wave velocities in chosen points of reinforced bridge

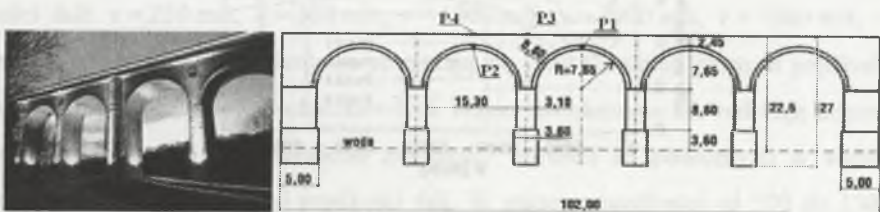
Na rysunku 5 pokazano dodatkowo wyniki uzyskane z zastosowaniem redukcji amplitud drgań ze zwiększeniem odległości od źródła (linia ciągła) i bez redukcji (linia przerywana). Uwzględnienie spadku amplitud drgań wywołanego tłumieniem geometrycznym powoduje dodatkową redukcję sił przekrojowych dochodzącą do 10%.



Rys. 5. Obwiednie sił podłużnych w przypadku redukcji i bez redukcji drgań pochodzenia górniczego
Fig. 5. Envelopes of longitudinal forces in case of reduction and no reduction of mining related vibrations

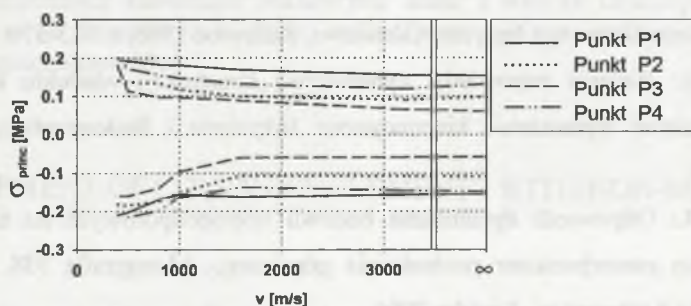
4. Odpowiedź dynamiczna mostu kamiennego

Drugim obiektem, którego odpowiedź dynamiczną analizowano w niniejszej pracy, jest masywny most kamienny w Bolesławcu (rys. 6). Całkowita długość 35-przęsłowego mostu wynosi 489 m (przeprowadzono analizę pięcioprzęsłowej sekcji o długości 102 m). W obliczeniach odpowiedzi dynamicznej posłużono się modelem obliczeniowym obiektu, uwzględniającym wszystkie części składowe konstrukcji mostu – łuki nośne, ścianki czołowe, wypełnienie (zasyпка). Obliczenia wykonano przy użyciu programu ABAQUS. Szczegóły dotyczące konstrukcji i jej modelu obliczeniowego znaleźć można w pracy [4]. Tłumienie obiektu założono na poziomie $\xi = 5\%$.



Rys. 6. Masywny most kamienny w Bolesławcu – widok i podstawowe wymiary
Fig. 6. Massive stone bridge in Bolesławiec – view and basic dimensions

Zależność naprężeń głównych w wybranych punktach środkowej sekcji mostu (por. rys. 6) od prędkości propagacji fali przedstawiono na rys. 7. W przypadku analizy tego mostu zaobserwować można wyraźny wzrost naprężeń przy założeniu prędkości fali poniżej 1000 m/s. Jest to efekt dominującego udziału składowej quasi-statycznej w globalnej odpowiedzi konstrukcji, spowodowany dużą sztywnością obiektu i wysokim tłumieniem (5%). Składowa dynamiczna ma zdecydowanie mniejszy udział w globalnej odpowiedzi dynamicznej również dlatego, że podstawowe częstotliwości drgań własnych obiektu (ok. 4,5 Hz) nie zawierają się w paśmie dominujących częstotliwości wymuszenia kinematycznego. Mniejszy jest również wpływ redukcji amplitud drgań ze zwiększeniem odległości od źródła – spadek wartości naprężeń nie przekracza 4% [4].



Rys. 7. Zależność naprężeń głównych od prędkości fali w wybranych punktach mostu kamiennego
Fig. 7. Dependence of principal tensions on wave velocity in chosen points of stone bridge

5. Wnioski

Analiza porównawcza wyników uzyskanych dla dwóch różnych mostów prowadzi do wniosku, iż zastosowanie modelu nierównomiernego wymuszenia kinematycznego może powodować zwiększenie odpowiedzi dynamicznej konstrukcji lub jej redukcję. W przypadku mostu żelbetowego o stosunkowo małej sztywności, niskich częstotliwościach drgań własnych oraz niskim tłumieniu, uwzględnienie skończonej prędkości propagacji fali skutkuje znaczącym zmniejszeniem sił przekrojowych, a dodatkowe uwzględnienie redukcji amplitud wymuszenia potęguje ten efekt. W przypadku mostu kamiennego o dużej sztywności, wysokich częstotliwościach drgań własnych oraz o wysokim tłumieniu, uwzględnienie redukcji amplitud z odległością od źródła również powoduje spadek naprężeń, natomiast zastosowanie skończonej prędkości fali skutkuje wzrostem odpowiedzi dynamicznej. W rezultacie globalna odpowiedź dynamiczna mostu kamiennego wzrasta. Odmienna reakcja

na nierównomierność wymuszenia kinematycznego w przypadku analizowanych mostów spowodowana jest wrażliwością na efekty dynamiczne (lub quasi-statyczne), co jest ściśle związane z charakterystykami dynamicznymi konstrukcji.

LITERATURA

1. Ciesielski R., Dulińska J., Zięba A.: Dynamic response of long span bridges to spatial ground movement parseismic influence (travelling wave effect). Proceedings of the 4th European Conference on Structural Dynamics: EURODYN'99, Prague 1999.
2. Dubiński J., Mutke G.: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice 1998, s. 533-576.
3. Dulińska J.: Badania odpowiedzi dynamicznej konstrukcji wiaduktu kamiennego na nierównomierne wymuszenie kinematyczne. Inżynieria i Budownictwo, nr 12, 2005, s. 677-680.
4. Dulińska J.: Odpowiedź dynamiczna budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenie parsejsmiczne pochodzenia górniczego. Monografia 338. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
5. Harichandran R., Hawarii A., Sweidan B.: Response of long-span bridges to spatially varying ground motion. Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 5, 1996, p. 476-484.
6. Wang J., Carr A., Cooke N., Moss P.: Effect of spatial variation of seismic input on bridge longitudinal response. 13th Conference on Earthquake Engineering, No. 640, Vancouver 2004.
7. Zembaty Z.: Vibrations of bridge structure under kinematic wave excitations. Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 4, 1997, p. 479-488.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Wawrzynek