

Ocena odporności dynamicznej stalowego mostu przenośnikowego poddanego oddziaływaniu wstrząsów górniczych



dr hab. inż.
JANUSZ RUSEK, PROF. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
ORCID: 0000-0003-0368-2580



dr hab. inż.
KAROL FIREK, PROF. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
ORCID: 0000-0002-0985-6003



dr inż.
LESZEK SŁOWIK
Instytut Techniki Budowlanej
ORCID: 0010-0001-8770-1595



dr hab. inż.
KRZYSZTOF TAJDUŚ, PROF. IMG PAN
Instytut Mechaniki Górniczej
Polskiej Akademii Nauk
ORCID: 0000-0003-2014-0900



mgr inż.
DAGMARA RATAJ
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
ORCID: 0000-0002-6782-2602

Wprowadzenie

Skutkiem podziemnej eksploatacji górniczej są wpływy na powierzchnię terenu o charakterze statycznym i dynamicznym [1], [2]. Oddziaływania statyczne powodują dodatkowe wyężenie ustroju nośnego obiektów budowlanych, przenosząc na ich konstrukcję wpływ deformacji ciągłych terenu [3]. Mają one charakter zmienny w czasie i obejmują z reguły dużą powierzchnię terenu. Z kolei oddziaływania dynamiczne są indukowane przez nagłe odprężenie górotworu, które na powierzchni objawia się w postaci drgań gruntu przekazywanych na konstrukcję obiektów [4], [5]. Z uwagi na antropogeniczną genezę tego typu zjawisk wstrząsy górnicze są traktowane jako drgania parasejsmiczne. Obydwa oddziaływania są uwzględniane na etapie projektowania nowych obiektów budowlanych, a metody służące do celów analitycznych są już wystarczająco rozpoznane i stanowią treść wielu dedykowanych norm oraz instrukcji [6]–[9]. Inaczej jest w przypadku istniejących obiektów, których ustrój konstrukcyjny był wymiarowany bez uwzględniania oddziaływań górniczych. Obiekty takie stanowią nadal znaczną część zabudowy terenów górniczych. Pomijając budynki, co do których istnieją i są powszechnie stosowane uproszczone metody oceny odporności statycznej oraz dynamicznej, w gronie zagrożonych obiektów budowlanych występują również liczne przypadki istniejących mostów, wiaduktów, estakad, sieci uzbrojenia terenu i m.in. przemysłowych mostów przenośnikowych. Ocena odporności tego typu obiektów, szczególnie na obciążenia dynamiczne wynikające z wstrząsów górniczych, wymaga każdorazowo indywidualnego podejścia obliczeniowego oraz sformułowania kryteriów bezpieczeństwa.

W ramach niniejszej pracy przedstawiono wyniki autorskiej metodyki, w której ocenę odporności dynamicznej przeprowadza się w sposób obliczeniowy na podstawie analizy oddziaływań kombina-

W ramach niniejszej pracy zaprezentowano wyniki stosowania autorskiej procedury oceny odporności dynamicznej na wpływ wstrząsów górniczych istniejącego mostu przenośnikowego o konstrukcji stalowej.

cji z etapu projektowania oraz rozłącznej kombinacji wyjątkowej, w której uwzględnia się oddziaływanie dynamiczne wstrząsów górniczych.

Syntetyczny opis zastosowanej metodyki

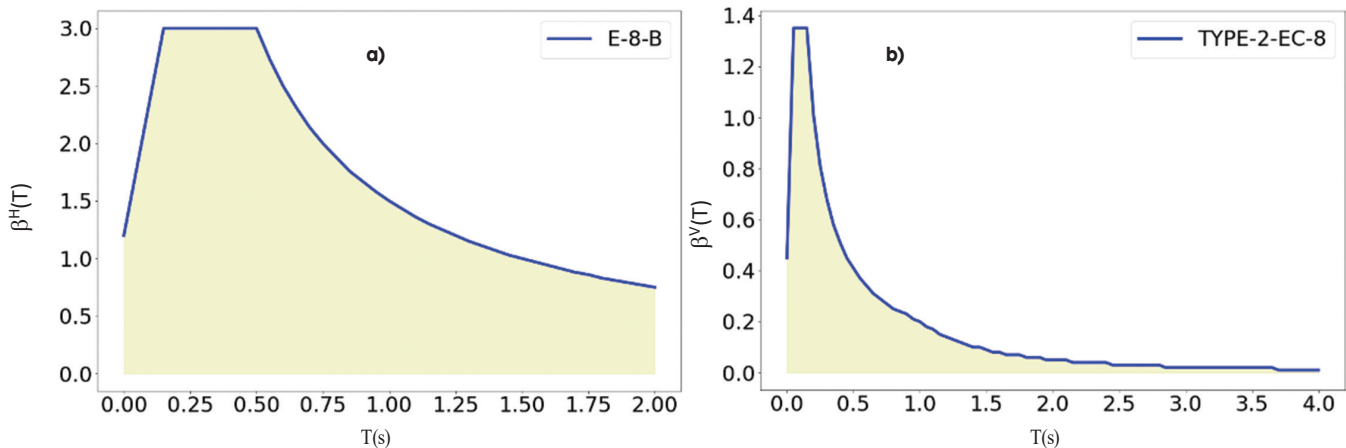
Metodyka zastosowana do oceny odporności dynamicznej obiektów poddanych dynamicznym oddziaływaniom wstrząsów górniczych została szczegółowo opisana w pracach [10]–[12]. Do tej pory zweryfikowano możliwość zastosowania przyjętego podejścia dla obiektów mostowych, hal przemysłowych, słupów sieci elektroenergetycznej oraz konstrukcji wsporczych napowietrznych sieci instalacyjnych. Podejście to zakłada porównanie efektów oddziaływania na konstrukcję obciążeń z etapem projektowania z efektami działania kombinacji wyjątkowej, w której aktualnie uwzględnia się wpływ wstrząsów górniczych [9], [13], [14]. Formalnie można to zapisać jako:

$$\begin{aligned} E_a^{Dyn}(a_x) &= E_{a,x}^{Proj} \rightarrow a_x^{dop} \\ E_a^{Dyn}(a_y) &= E_{a,y}^{Proj} \rightarrow a_y^{dop} \rightarrow \{a_x^{dop}, a_y^{dop}, a_z^{dop}\} \\ E_a^{Dyn}(a_z) &= E_{a,z}^{Proj} \rightarrow a_z^{dop} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$E_a^{Dyn}(a_x), E_a^{Dyn}(a_y), E_a^{Dyn}(a_z)$ – wartość obliczeniowa efektów oddziaływań wyjątkowej kombinacji obciążeń z uwzględnieniem wstrząsów górniczych na rozpatrywanym kierunku wymuszenia,

$E_{a,x}^{Proj}, E_{a,y}^{Proj}, E_{a,z}^{Proj}$ – korespondujące z kierunkiem wymuszenia dynamicznego wartości efektów kombinacji obciążeń etapu projektowania, a_x



Rys. 1. Wykresy wzorcowych przyspieszeniowych spektrów odpowiedzi dla kategorii terenu B: a) krzywa stosowana do wymuszenia dynamicznego w płaszczyźnie poziomej, b) krzywa stosowana do wymuszenia dynamicznego w płaszczyźnie pionowej; opracowanie własne

a_x , a_y , a_z – składowe przyspieszeń drgań gruntu w miejscu lokalizacji obiektu.

Obliczeniowymi wartościami efektów E_d^{Dyn} i E_d^{Proj} w analizowanym przypadku były wartości ekstremalnych naprężeń normalnych (rozciąganie i ściskanie) w przekrojach elementów konstrukcyjnych mostu.

Korespondująca wartość efektu wynikająca z kombinacji projektowej E_d^{Proj} była ustalana zgodnie z kierunkiem oddziaływania wstrząsu górniczego. Wymagało to wyodrębnienia schematów obliczeniowych z etapu projektowania jakościowo pokrywających się z reakcją konstrukcji na działanie kombinacji wyjątkowej. Zapewniało to możliwość analizy wyłączenia tych samych grup elementów konstrukcyjnych. W tym celu konieczne było uwzględnienie zmiennych obciążeń środowiskowych (wiatr, śnieg oraz temperatura) zgodnie z aktualnymi wytycznymi [14].

Z uwagi na charakterystykę dynamiczną długich obiektów rozważono oddziaływanie wymuszenia dynamicznego zarówno dla płaszczyzny poziomej (H), jak i pionowej (V). Stosując w obliczeniach metodę spektrum odpowiedzi [15], jako wymuszenie dynamiczne zastosowano wzorcowe przyspieszeniowe spektra dla płaszczyzny pionowej oraz poziomej, przyjmując kategorię terenu B – rys. 1.

Charakterystyka analizowanego mostu przenośnikowego

Obiekt jest podzielony na fragmenty trójprzęsłowe. Długość całkowita obiektu wynosi 311,29 m, przy czym maksymalna długość przęsła



Rys. 2. Widok części jednego z segmentów mostu przenośnikowego; opracowanie własne

mostu 30,35 m. Elementami nośnymi poszczególnych przęseł są stalowe kratownice połączone poprzecznikami, stężone w poziomie podłogi i stropu stężeniami pościowymi. Kratownice są oparte na podporach wahaczowych oraz na przestrzennych podporach stałych – por. rys. 2. Wymiary poprzeczne przęseł kratownicowych wynoszą: 4,10 m / 3,80 m. Obudowa ścian i pokrycie dachowe są wykonane z płyt warstwowych z rdzeniem z wełny mineralnej.

Prześla mostu spoczywają na stalowych podporach wahaczowych, skratowanych w płaszczyźnie prostopadłej do osi mostu, oraz stałych stalowych podporach przestrzennych wykonanych w formie trójkąta i skratowanych w obu płaszczyznach. Dylatacje ścian oraz dachu zrealizowano na podporach nieprzesuwnych, zapewniających swobodny obrót w płaszczyźnie i prostopadle do płaszczyzny trasy taśmociągu, oraz na podporach przesuwnych, zapewniających swobodne obroty i swobodny przesuw w kierunku trasy (skrócenie lub wydłużenie). Elementy stalowe wykonane z kształtowników stalowych typu HEB oraz IPE i przekrojów złożonych. Obiekt jest posadowiony za pośrednictwem żelbetowych stóp fundamentowych.

Wyniki analiz

Obliczenia przeprowadzono na podstawie utworzonego przestrzennego modelu numerycznego konstrukcji – rys. 3. W ramach obliczeń dynamicznych uwzględniono trzy możliwe kierunki wymuszenia (x, y, z) oraz współczynnik tłumienia konstrukcji równy 5%. Dla każdego z tych kierunków ustalano korespondującą kombinację z etapu projektowego, której działanie generowało odpowiedź konstrukcji zgodną z analizowanym wymuszeniem dynamicznym. Tym samym dla każdej pary porównywanych kombinacji otrzymywano aktywację tych samych grup elementów konstrukcyjnych. To pozwoliło na porównywanie ekstremalnych naprężeń normalnych w przekrojach elementów poszczególnych grup w całej konstrukcji. Ostatecznie uzyskano graniczne wartości składowych przyspieszeń drgań dla wszystkich grup elementów konstrukcyjnych, uwzględniając ich możliwy charakter działania w całości analizowanego ustroju nośnego. Dokonując zawężenia do minimalnych wartości składowych przyspieszeń drgań gruntu dla poszczególnych kierunków, uzyskano następujący zestaw granicznych wartości:

$$\{a_x^{dop} = 1,47 \frac{m}{s^2}, a_y^{dop} = 0,17 \frac{m}{s^2}, a_z^{dop} = 0,19 \frac{m}{s^2}\} \rightarrow \{a_H^{dop} = 0,17 \frac{m}{s^2}, a_V^{dop} = 0,19 \frac{m}{s^2}\} \quad (2)$$

Jak widać, odporność dynamiczna układu jako całości jest determinowana przez jego elementy konstrukcyjne aktywujące się przy działaniu dynamicznym od wstrząsu górniczego wzdłuż osi y (podłużnej względem obiektu – rys. 3.). W analizowanym przypadku elementami determinującymi odporność obiektu w płaszczyźnie poziomej były słupy podpór stałych. Z kolei graniczną wartością składową przyspieszenia drgań gruntu w płaszczyźnie pionowej uzyskano dla wyłączenia dolnego pasa kratownicy przestrzennej przęsła.

Podsumowanie i wnioski końcowe

W artykule zaprezentowano metodykę oceny odporności dynamicznej na wpływ wstrząsów górniczych istniejącego przemysłowego mostu przenośnikowego o konstrukcji stalowej. Zaproponowane podejście polega na zestawieniu efektów od kombinacji wyjątkowej, w której uwzględnia się oddziaływanie dynamiczne wstrząsu, z korespondującymi efektami od kombinacji z etapu projektowania. W wyniku takiego podejścia, stosując jako kryterium wytrzymałościowy stan graniczny nośności (STR), wyznaczono dopuszczalne wartości składowych przyspieszeń drgań gruntu dla trzech ortogonalnych kierunków potencjalnego wymuszenia, zgodnych z geometrią obiektu. Podejście to daje możliwość analizowania również innych obiektów budowlanych, szczególnie tych, których układ konstrukcyjny cechuje się transparentnością (mosty, wiadukty, kominy itd.) oraz istnieją dane dotyczące przyjmowanych na etapie projektowania kombinacji obciążeń.

Metodykę tę, w zależności od wieku ocenianego obiektu, można odnieść również do wytycznych projektowych, które obecnie zostały już wycofane. Dodatkowo, uwzględniając, że w ramach oceny jest ustalana odporność poszczególnych grup elementów konstrukcyjnych obiektu, stosowanie tej metody może pozwolić na ocenę wrażliwości poszczególnych składowych ustroju nośnego pod kątem potencjalnych wzmocnień lub napraw.

Literatura

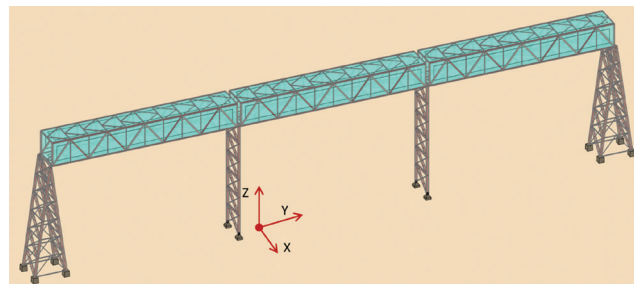
- [1] K. Tajduś, A. Tajduś, and M. Cala, "Seismicity and rock burst hazard assessment in fault zones: a case study," *Arch. Min. Sci.*, pp. 747–765, 2018.
- [2] Z. Niedojadło and W. Gruszczynski, "The impact of the estimation of the parameters values on the accuracy of predicting the impacts of mining exploitation," *Arch. Min. Sci.*, 2015, doi: 10.1515/amsc-2015-0012.
- [3] M. Kawulok, *Szkody górnicze w budownictwie*. Wydawnictwa Instytutu Techniki Budowlanej, 2010.
- [4] Z. Zembaty and S. Kokot, "Adaptacja sejsmicznych norm projektowania konstrukcji do ujęcia wpływu wstrząsów górniczych na budowlę," *Przegląd Górniczy*, vol. T. 70, nr. pp. 72–77, 2014.
- [5] K. Kuźniar, E. Maciąg, and T. Tatar, "Unormowane spektra odpowiedzi od drgań powierzchniowych wzbudzanych wstrząsami górniczymi," *Czas. Inżynierii Łądowej, Środowiska i Archit.*, vol. z. 61, nr. pp. 69–80, 2014.
- [6] ITB. Instrukcja 416/2006. Projektowanie budynków na terenach górniczych. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej, 2006.
- [7] ITB. Instrukcja 364/2007. Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej, 2007.
- [8] ITB. Instrukcja 391/2003. Projektowanie budynków podlegających wpływom wstrząsów górniczych. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej, 2003.
- [9] A. Cholewicki, M. Kawulok, Z. Lipski, and J. Szulc, "Zasady ustalania obciążeń i sprawdzania stanów granicznych budynków zlokalizowanych na terenach górniczych w nawiązaniu do Eurokodów," *Inst. Tech. Bud.*, Warszawa 2012.
- [10] J. Rusek, L. Słowik, K. Firek, and M. Pitas, "Determining the Dynamic Resistance of Existing Steel Industrial Hall Structures for Areas with Different Seismic Activity," vol. Vol. 66, no. No 4, pp. 525–542, doi: 10.24425/ace.2020.135235.
- [11] J. Rusek and W. Kocot, "Proposed Assessment of Dynamic Resistance of the Existing Industrial Portal Frame Building Structures to the Impact of Mining Tremors," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 245, no. 3, doi: 10.1088/1757-899X/245/3/032020.
- [12] J. Rusek, L. Słowik, D. Rataj, and J. Krupa, "Metody oceny odporności dynamicznej obiektów budowlanych poddanych oddziaływaniom parasejsmicznym indukowanym eksploatacją górniczą," *Sci. Stud. Build. Res. Inst.*, vol. 472, pp. 199–211, 2021.
- [13] PN-EN 1990. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [14] PN-EN 1991. Oddziaływania na konstrukcje.
- [15] A. K. Chopra, "Dynamics of structures: theory and applications to," *Earthq. Eng.*, 2017.
- [16] Autodesk, *Robot Structural Analysis Professional*. 2020.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.7982

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Rusek Janusz, Firek Karol, Słowik Leszek, Tajduś Krzysztof, Rataj Dagmara, 2022, Ocena odporności dynamicznej stalowego mostu przenośnikowego poddanego oddziaływaniu wstrząsów górniczych, „Builder” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.7982

Streszczenie: W ramach niniejszej pracy zaprezentowano wyniki stosowania autorskiej procedury oceny odporności dynamicznej na wpływ wstrząsów górniczych istniejącego mostu przenośnikowego o konstrukcji stalowej. Obiekt ten stanowi nierzadki element zespołu obiektów przemysłowych kopalni. Podstawą do sformułowania kryteriów do oceny był wytrzymałościowy stan graniczny nośności STR podany przez Eurokody oraz instrukcję ITB dotyczącą zastosowania Eurokodów w celu ustalania wartości obciążeń na terenach górniczych. W ramach analiz dokonano również rozeznania intensywności w zakresie dotychczasowych zjawisk sejsmicznych w obszarze lokalizacji przedmiotowego obiektu. Pozwoliło to na przyjęcie krzywej wzorcowe-



Rys. 3. Przestrzenny model numeryczny analizowanego segmentu mostu przenośnikowego; opracowanie własne na podstawie programu Autodesk Robot Structural Analysis [16]

go spektrum odpowiedzi, które zastosowano w analizie dynamicznej. Finalnie utworzono prętowo-powłokowy model numeryczny obiektu, dla którego przeprowadzono symulacje od obciążeń przyjmowanych do wymiarowania konstrukcji na etapie projektowania. Tak uzyskane wyniki porównano z rezultatami od kombinacji wyjątkowej uwzględniającej wpływ wstrząsów górniczych. Porównanie to pozwoliło wyodrębnić zapas nośności, w ramach którego dopuszczono możliwość przeniesienia przez konstrukcję efektu wywołanego wstrząsem górniczym. Następnie dla wyodrębnionego zapasu nośności wykalibrowano wartości dopuszczalnych przyspieszeń drgań gruntu w płaszczyźnie poziomej i pionowej. W przedstawianej procedurze oceny tak wyznaczone wartości stanowią miarę odporności dynamicznej analizowanej konstrukcji na wpływy oddziaływań wstrząsów górniczych. W ramach pracy wskazano również, że opracowane podejście pozwala na ocenę wrażliwości poszczególnych elementów konstrukcyjnych na wymuszenie dynamiczne generowane wstrząsem górniczym. Ta dodatkowa informacja może być bardzo przydatna na etapie rozważania sposobu wzmocnienia konstrukcji.

Słowa kluczowe: odporność dynamiczna, wpływy parasejsmiczne, oddziaływania górnicze

Abstract: ASSESSMENT OF THE DYNAMIC RESISTANCE OF A STEEL CONVEYOR BRIDGE STRUCTURE SUBJECTED TO THE ACTION OF MINING TREMORS. This article presents the results of the author's procedure for evaluating the dynamic resistance to mining tremors of the existing steel-structure conveyor bridge. This object is a sensitive component of the mine's industrial plant complex. The basis for formulation of the assessment criteria was the STR ultimate limit state given by the Eurocodes and the ITB guidelines on implementation of Eurocodes for determination of load values in mining terrains. The analyses also included a recognition of the intensity of recent seismic events in the area of the object's location. This made it possible to adopt a curve of the standard response spectrum, which was used in the dynamic analysis. Finally, a bar-shell numerical model of the structure was created, for which simulations were performed with respect to loads adopted for dimensioning of the structure at the design stage. The results obtained in this way were compared with the results from the exceptional combination taking into account the influence of mining tremors. This comparison allowed to separate the load-bearing capacity reserve, within which the possibility of carrying by the structure the effect of mining tremors was permissible. Then the limit values of accelerations of ground vibrations in horizontal and vertical planes were calibrated for the extracted load-bearing capacity reserve. In the presented assessment procedure, the so determined values constitute a measure of dynamic resistance of the analyzed structure to the effects of mining tremors. The paper also indicates that the developed approach makes it possible to assess the sensitivity of individual structural members to the dynamic excitation generated by a mining tremor. This additional information can be very useful at the stage of considering the method of strengthening the structure.

Keywords: dynamic resistance, paraseismic actions, mining impacts