

prof. dr hab. inż. Zbigniew Zembaty<sup>1\*)</sup>  
 dr inż. Seweryn Kokot<sup>1)</sup>  
 mgr inż. Piotr Bobra<sup>1)</sup>  
 dr inż. Juliusz Kus<sup>1)</sup>

# Projektowanie budowli wg Eurokodu 8 na terenach górniczych LGOM

*Structural design according to Eurocode 8 in LGOM mining region*

DOI: 10.15199/33.2015.06.15

(Artykuł przeglądowy)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono procedury dotyczące implementacji normy Eurokod 8 do projektowania budowli na terenach górniczych Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. Opisano niezbędną procedurę wyznaczenia sił wewnętrznych budowli z zastosowaniem metody spektrum odpowiedzi.

**Słowa kluczowe:** dynamika budowli, wstrząsy górnicze, metoda spektrum odpowiedzi, projektowanie budowli, Eurokod 8.

**Abstract.** This paper describes procedures concerning the implementation of Eurocode 8 for structural design in mining areas of 'LGOM' Copper Basin. The procedure required for internal forces calculation with application of response spectrum method was described.

**Keywords:** structural dynamics, mine tremors, response spectrum method, structural design, Eurocode 8.

Eksploatacja górnicza, której mogą towarzyszyć wstrząsy górnicze, na terenach silnie zurbanizowanych wymaga określania odporności dynamicznej budowli [1]. Szczególnie silne wstrząsy o magnitudzie Richtera  $m_L = 4,3$  występują na terenie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) [2]. Pojawiła się więc potrzeba opracowania praktycznej metody projektowania budowli na efekty prognozowanych wstrząsów górniczych. W latach 2009 – 2012 zespół badawczy z Politechniki Opolskiej, przy współpracy specjalistów z Centrum Inżynierii Sejsmicznej „Eucentre” z Pawii we Włoszech, przygotował wytyczne do projektowania budowli na terenach aktywności parasejsmicznej LGOM [3]. W związku z wprowadzeniem Eurokodu 8 [4], naturalnym wyborem była adaptacja tej normy do projektowania budowli na terenie LGOM. Trudności w praktycznym jej zastosowaniu dotyczyły:

- różnicy zapisów wstrząsów górniczych i trzęsień ziemi (spektra Fouriera, czas trwania);
- problemu uwzględnienia efektów lokalnej amplifikacji podłoża;
- problemu określenia intensywności wstrząsów górniczych oraz zupełnie innej definicji ryzyka sejsmicznego dla trzęsień ziemi i wstrząsów górniczych.

W artykule w syntetyczny sposób przedstawiono opracowaną w Wytycz-

nych [3] procedurę projektowania budowli na dodatkowe siły sejsmiczne wynikające z prognozowanych wstrząsów górniczych na terenie LGOM. Bardziej szczegółowa analiza zastosowanej metody znajduje się w publikacjach [5 ÷ 7].

## Podstawowe założenia procedury projektowania budowli na wstrząsy górnicze

Badania [2, 3] dotyczące oddziaływań dynamicznych od wstrząsów górniczych na obiekty kubaturowe LGOM wykazały, że najlepszym parametrem odzwierciedlającym intensywność wstrząsów górniczych oraz opisującym ich destrukcyjny wpływ na budowlę jest pozioma prędkość gruntu. W związku z tym procedura projektowania opisana w Wytycznych [3] wymaga zdefiniowania na terenach górniczych stref prognozowanej, maksymalnej prędkości podłoża gruntowego  $PGV_{Hmax}$  w okresie użytkowania budowli. W przypadku terenu LGOM określono cztery takie strefy (opisane na szczegółowych mapach oddziaływań wstrząsów [3]):

- strefa I – prognozowana maksymalna prędkość  $PGV_{Hmax} = 1$  cm/s (wpływy parasejsmiczne można pominąć);
- strefa II – prognozowana maksymalna prędkość  $PGV_{Hmax} = 2$  cm/s (zaleca się odpowiednie ukształtowanie konstrukcji oraz sprawdzenie efektu poziomych wartości zastępczych, statycznych sił do projektowania wartości 3% obciążenia ciężarem własnym budowli);
- strefa III – prognozowana maksymalna prędkość podłoża  $PGV_{Hmax} = 4$  cm/s (na-

leży przyjąć do projektowania maksymalne poziome wartości przyspieszeń  $a_p = 40$  cm/s<sup>2</sup>);

- strefa IV – prognozowana maksymalna prędkość pozioma  $PGV_{Hmax} = 6$  cm/s (należy przyjąć do projektowania maksymalne poziome wartości przyspieszeń  $a_p = 60$  cm/s<sup>2</sup>).

Wartości przyspieszenia  $a_p = 10 \times PVG_{Hmax}$  do projektowania w strefie III i IV przyjęto, stosując tzw. przemieszczeniowe podejście w projektowaniu sejsmicznym [6, 7] na podstawie porównywania przemieszczeniowych spektrum odpowiedzi wstrząsów górniczych i projektowego spektrum odpowiedzi Eurokodu 8 (szczegółowe uzasadnienie można znaleźć w pracy [3]).

## Projektowe spektra odpowiedzi z uwzględnieniem efektów amplifikacji ruchu podłoża

Na terenie LGOM, dzięki rozbudowanej sejsmicznej sieci pomiarowej, udało się do 2012 r. zgromadzić znaczną liczbę zapisów wstrząsów górniczych. Wśród nich po raz pierwszy znalazły się zapisy silnych wstrząsów o poziomej prędkości przekraczającej 1 cm/s (w niektórych przypadkach dochodzących do 20 cm/s, przy maksymalnym przyspieszeniu przekraczającym 200 cm/s<sup>2</sup>). Dzięki temu do ustalenia uśrednionego spektrum odpowiedzi wykorzystano wyłącznie zapisy najsilniejszych wstrząsów. Do 2012 r. zebrano ich 18.

Aby możliwa była implementacja Eurokodu 8 do projektowania konstrukcji

<sup>1)</sup> Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:

e-mail: z.zembaty@po.opole.pl

budowli na terenach szkód górniczych, należało zróżnicować parametry projektowe spektrum odpowiedzi w zależności od typu podłoża opisanego uśrednioną prędkością propagacji fal ścinających (shear waves)  $v_{s30}$  w warstwie podłoża pod projektowaną budowlą do głębokości 30 m [4]. Do występującego na większości terenu LGOM podłoża typu B ( $360 \text{ m/s} < v_{s30} < 800 \text{ m/s}$ ) dodano podłoże typu A (określane w Eurokodzie 8 jako skaliste –  $v_{s30} > 800 \text{ m/s}$ ) oraz podłoże typu C ( $180 \text{ m/s} < v_{s30} < 360 \text{ m/s}$ ) [4]. Na tym etapie pominięto słabsze lub nietypowe podłoża Eurokodu 8 (typ D, E, S1 i S2), które nie występują na terenie LGOM.

Do budowy nowego spektrum odpowiedzi wykorzystano 18 zapisów wstrząsów, które uzyskano ze stacji pomiarowych ulokowanych na podłożu typu B. Stosując podejście stochastyczne, wykonano symulacje Monte Carlo, prowadzące do uwzględnienia różnorodnych cech podłoża gruntowego [3, 6 ÷ 9]. W efekcie tych analiz otrzymano uśrednione, projektowe spektrum odpowiedzi przedstawione w pracach [3, 5, 8] i opisane wzorami (1a) i (1b) odpowiednio dla podłoża A, B i C:

$$S_a = a_g \beta(T) = a_g S \begin{cases} \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (2,5\eta - 1) \right] & 0 < T < T_B \\ 2,5\eta & T_B \leq T \leq T_C \\ 2,5\eta \frac{T_C}{T} & T_C < T \leq T_D \\ 2,5\eta \frac{T_C T_D^2}{T^3} & T > T_D \end{cases}$$

podłoża A, B (1a)

$$S_a = a_g \beta(T) = a_g S \begin{cases} \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (2,5\eta - 1) \right] & 0 < T < T_B \\ 2,5\eta & T_B \leq T \leq T_C \\ 2,5\eta \frac{T_C^{1,5}}{T^{1,5}} & T_C < T \leq T_D \\ 2,5\eta \frac{T_C^{1,5} T_D^{1,5}}{T^3} & T > T_D \end{cases}$$

podłoże C (1b)

gdzie:

$T$  [s] – okres drgań własnych oscylatora (budowli);

$a_g$  – projektowe przyspieszenie;

$\beta^s(T)$  – współczynnik dynamiczny (spektrum odpowiedzi);

$\eta$  – współczynnik korekcyjny uwzględniający korektę tłumienia dla innej wartości niż  $\xi = 0,05$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + 100\xi}} \leq 0,55 \quad (2)$$

Pozostałe współczynniki zależą od rodzaju podłoża i wynoszą:  $S = 0,8$ ;  $T_B = 0,1 \text{ s}$ ;  $T_C = 0,85 \text{ s}$ ;  $T_D = 1,3 \text{ s}$  dla podłoża typu A;  $S = 1,0$ ;  $T_B = 0,1 \text{ s}$ ;  $T_C = 0,95 \text{ s}$ ;  $T_D = 1,3 \text{ s}$  dla podłoża typu B;  $S = 1,5$ ;  $T_B = 0,3 \text{ s}$ ;  $T_C = 0,80 \text{ s}$ ;  $T_D = 1,3 \text{ s}$  dla podłoża typu C.

### Projektowe spektrum odpowiedzi z uwzględnieniem efektów niesprężystych

Przyjęcie modelu całkowicie liniowej pracy projektowanej budowli podczas wstrząsu górniczego, choć uzasadnione oczekiwaniem jej bezawaryjnej pracy, w praktyce jest jednak nierealne z powodu znacznego wzrostu sił sejsmicznych powodowanych wzrostem przyspieszenia projektowego. W obliczeniach budowli posadowionej na terenie trzęsień ziemi zakłada się znaczne redukcje projektowych przyspieszeń, przez stosowanie specjalnego współczynnika „zachowania” konstrukcji  $q$ , który w zależności od materiału i ukształtowania budowli odzwierciedla dyssypację energii w przegubach plastycznych. Niekiedy pozwala to nawet pięciokrotnie zredukować projektowe siły sejsmiczne. W odniesieniu do wstrząsów górniczych na terenie LGOM przyjęto, że taka redukcja możliwa jest maksymalnie do  $q = 1,5$  (redukcja wynosząca 2/3). Do tego celu należy użyć spektrum odpowiedzi z uwzględnieniem niesprężystej pracy budowli, opisanego wzorami (3a) i (3b) odpowiednio dla podłoża typu A, B i C:

$$S_a = a_g \beta(T) = a_g S \begin{cases} \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] & 0 < T < T_B \\ \frac{2,5}{q} & T_B \leq T \leq T_C \\ \frac{2,5 T_C}{q T} & T_C < T \leq T_D \\ \frac{2,5 T_C T_D^2}{q T^3} & T > T_D \end{cases}$$

podłoża A, B (3a)

$$S_a = a_g \beta(T) = a_g S \begin{cases} \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] & 0 < T < T_B \\ \frac{2,5}{q} & T_B \leq T \leq T_C \\ \frac{2,5 T_C^{1,5}}{q T^{1,5}} & T_C < T \leq T_D \\ \frac{2,5 T_C^{1,5} T_D^{1,5}}{q T^3} & T > T_D \end{cases}$$

podłoże C (3b)

W wyniku analizy Eurokodu 8 w [3] ustalono szczegółowe wytyczne dotyczące dopuszczenia lub wykluczenia podejścia niesprężystego, a nawet możliwość pominięcia obliczeń niektórych konstrukcji na wpływy sejsmiczne.

### Podsumowanie

Procedura obliczeń projektowych na obciążenie budowli od wstrząsów górniczych wdrożona do stosowania na terenach górniczych LGOM [3] wymaga:

- określenia strefy prognozowanej prędkości podłoża  $PGV_{Hmax}$  podczas wstrząsów górniczych na podstawie mapy przygotowanej przez służby planowania ruchu kołpali;

- wyznaczenia na podstawie strefowej prędkości podłoża  $PGV_{Hmax}$  projektowego przyspieszenia  $a_p$ ;

- identyfikacji typu podłoża zgodnie z nomenklaturą Eurokodu 8 [4];

- ustalenia możliwości zwolnień od obliczeń sejsmicznych na podstawie rodzaju konstrukcji budowlanej i poziomu projektowych przyspieszeń  $a_p$  [3];

- podjęcia decyzji dotyczącej stosowania obliczeń w zakresie liniowym lub (w ograniczonym zakresie) niesprężystym (wzory 1a, b albo 3a, b);

- wyznaczenia wartości spektrum odpowiedzi i ich zastosowania do obliczania poziomej siły sejsmicznej (*base shear*) lub wykorzystania komercyjnych programów MES, celem wyznaczenia sił wewnętrznych w projektowanej konstrukcji budowlanej.

### Literatura

[1] Tataro T.: Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, 2012, s. 1 – 258.

[2] Zembaty Z.: Rockburst induced ground motion – a comparative study, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 24, 2004, s. 11 – 23.

[3] Zembaty Z., Lai C., Kokot S., Scandella L., Bozzoni F., Nowak H., Kuś J., Bobra P., Jaśkiewicz K., Król P.: Wytyczne branżowe do projektowania obiektów kubaturowych w LGOM na wpływy dynamiczne od wstrząsów górniczych. Raport Politechniki Opolskiej dla KGHM SA, tom 1 i 2, 2012, s. 1 – 177.

[4] PN-EN 1998-1-6 Eurokod 8: Projektowanie konstrukcji poddanych oddziaływaniom sejsmicznym.

[5] Zembaty Z., Kokot S.: Adaptacja sejsmicznych norm projektowania konstrukcji do ujęcia wpływu wstrząsów górniczych na budowie, Przegąd Górniczy, vol. 70, 2014, s. 72 – 77.

[6] Zembaty Z.: How to model rockburst seismic loads for civil engineering purposes?, Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 9, 2011, s. 1403 – 1416.

[7] Zembaty Z., Kokot S., Bozzoni F., Scandella L., Lai C. G., Kuś J., Bobra P.: A system to mitigate deep mine tremor effects in the design of civil infrastructure, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 74, 2015, s. 81 – 90.

[8] Idriss J., Sun J. I.: SHAKE91 – a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. University of California, Davis, USA, 1992.

[9] Rota M., Lai C. G., Strobbia C.: Stochastic 1D Site Response Analysis at a site in central Italy, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 31, 2011, s. 626 – 39.

Otrzymano 23.04.2015 r.