

Reakcja fundamentu budynku na niskoczęstotliwościowe drgania wzbudzane robotami strzałowymi

The response of building foundation to low-frequency vibration induced by shooting



*Mgr inż. Andrzej Biessikirski**



*Mgr inż. Michał Dworzak**



*Dr inż. Józef Pyra**



*Dr inż. Anna Soltys**

Treść: Porównując zagraniczne skale wpływów dynamicznych z wytycznymi polskimi zauważa się różnice w założeniach będących podstawą do stworzenia norm. Spostrzeżenie to prowadzi do poszukiwania alternatywnych wielkości, na podstawie których można prowadzić ocenę oddziaływania drgań. Zauważa się, że za intensywność drgań w dużej mierze odpowiada masa stosowanego ładunku MW, której maksymalną wartość wyznaczana się z równań propagacji. Müller zaznacza, że uprzednio opracowane zależności matematyczne (np. równanie Kocha) bazują na współczynnikach, które na przestrzeni czasu uległy zmianie. Konsekwencją prowadzonych badań było opracowanie tzw. „teorii oddziaływania chwilowego” oraz wynikającej z niej zależności pomiędzy rejestrowanymi na gruncie parametrami odkształcenia i maksymalnej amplitudy prędkości (*PPV*). Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie poruszanej przez Müllera tematyki oraz rozszerzenie jej o obserwacje relacji odkształcenie – *PPV* dla drgań niskoczęstotliwościowych rejestrowanych na fundamencie wybranego obiektu budowlanego.

Abstract: Comparing the international scale of dynamic influences with procedures in Poland, one can discover the differences in assumptions to develop standards. It allow to search alternative quantities which may enable an assessment of vibration influences. Vibration intensity is largely determined by molecular weight with maximum value evaluated from propagation equation. Müller underlines that the previously elaborated mathematic relations (e.g. the Koch's equation) are based of coefficients which have been changing in the space of years. The result of the conducted research was a development of so called “theory of instantaneous influence” and the resulting relation between the registered deformation parameters on the ground and the maximum amplitude of velocity (*PPV*). This paper may show the subject area, raised by Müller, and expand its content to observation of the deformation – *PPV* relation for low-frequency vibrations registered in the foundation of any selected built features.

Słowa kluczowe:

roboty strzałowe, drgania parasejsmiczne, tensometria, naprężenie

Key words:

hooting, paraseismic vibrations, tensometry, stress

1. Wprowadzenie

Oddziaływanie parasejsmiczne wywoływane podczas prowadzenia robót strzałowych jest impulsowym zdarzeniem dynamicznym charakteryzującym się krótkim czasem trwania. Norma [10] zakłada, że rejestrowane oddziaływania są drganiami harmonicznymi występującymi w sposób długotrwały. Dlatego drgania wywoływane robotami strzałowymi, które poddaje się ocenie oddziaływania (m.in. analizie tercjowej) na podstawie polskiej normy [10] należy kwalifikować z dużą ostrożnością [11, 12, 13, 14]. Spostrzeżenie to zostało poparte przez autorów normy publikacją [2].

Zauważa się, że w wyniku braku zunifikowanych parametrów określających dopuszczalne wartości prędkości (PPV), różny sposób wykonywania pomiarów (pomiar drgań na gruncie według wytycznych amerykańskich, pomiar drgań na fundamencie obiektu budowlanego – większość norm światowych) oraz przede wszystkim występujące różnice w założeniach służących do stworzenia norm, przeprowadzenie jednoznacznej oceny oddziaływania staje się utrudnionym zadaniem. Dlatego należałoby się zastanowić nad wyborem alternatywnych parametrów umożliwiających przeprowadzenie oceny oddziaływania drgań. Müller et. al. zaproponowali tzw. teorię oddziaływania chwilowego umożliwiającą wyznaczenie PPV z zarejestrowanej na gruncie wartości odkształcenia, wywołanego prowadzeniem prac z użyciem MW.

2. Teoria momentu

Podstawą do podjęcia prac przez Müllera, było stwierdzenie, że opracowane równania propagacji bazują na współczynnikach, których wartości uległy zmianie ze względu na rozwój technologii wykonywania prac strzałowych w odkrywkowych zakładach surowców skalnych [5].

Równania propagacji umożliwiają obliczenie intensywności drgań przy znanych wartościach: odległości obiektu chronionego od miejsca wykonywania robót strzałowych (r) oraz użytej masy ładunku MW (Q). W przypadku robót prowadzonych z wykorzystaniem odpalania milisekundowego zalecanym parametrem jest ładunek na opóźnienie (Q_z) przy założeniu spełnienia reguły 8 ms.

Założeniem Müllera było określenie schematów odpalania ładunków w układach wieloszeregowych, które nie będą generowały zwiększonego poziomu oddziaływania przy zachowaniu optymalnej fragmentacji urobku. Dodatkowym celem pomiarów było określenie alternatywnego sposobu prowadzenia oceny oddziaływania, poprzez zastąpienie parametru prędkości inną wielkością [5].

Dobór schematów odpalania zaproponowano w oparciu o założenie, że prędkości czoła fal parasejsmicznych wygenerowanych przez odpalenie sąsiadujących otworów strzałowych docierają w tym samym momencie czasu do masywu skalnego. Teorię tę nazwano *momentum theory*, czyli teorią oddziaływania chwilowego (impulsowego).

Zastosowanie tej teorii jest możliwe w przypadku gdy roboty strzałowe wykonywane są według następujących założeń [9]:

- wieloszeregowego odpalania ładunków, rysunek 1,
- stosowania pomocniczych otworów włomowych w kierunku usypu urobku,
- wykonywania włomu bocznego,
- wygenerowania fal parasejsmicznych, które nie są skierowane bezpośrednio w stronę obiektów budowlanych.

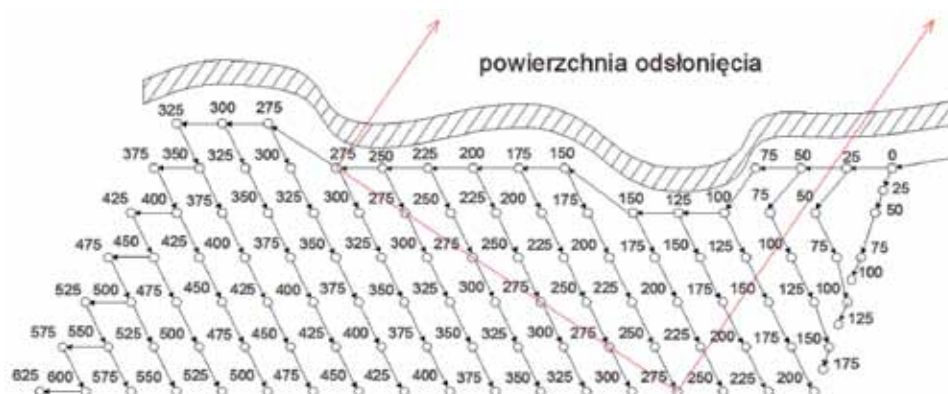
Przedstawione założenia sprowadziły występujące wymuszenie do impulsowego zdarzenia sejsmicznego, które ulega stopniowemu tłumieniu wraz ze wzrostem odległości od miejsca wykonywania robót strzałowych oraz występowaniem zmiennych warunków geologicznych.

Rejestracje odkształceń przy użyciu tensometrów optycznych, wykonano w niewielkiej odległości (około 1 m), za ostatnim rzędem otworów strzałowych. Przykładowy schemat sieci strzałowej oraz zastosowanych opóźnień przedstawiono na rys. 1 [5].

W wyniku prowadzonych prac według schematu przedstawionego na rysunku 1, Müller zaobserwował, że wielkość amplitudy drgań oraz zarejestrowanych odkształceń będzie uzależniona od:

- ładunku MW w otworze (Q), którego wielkość jest uzależniona od długości (l) oraz średnicy otworu strzałowego (d),
- prędkości detonacji materiału wybuchowego (c_{MW}).

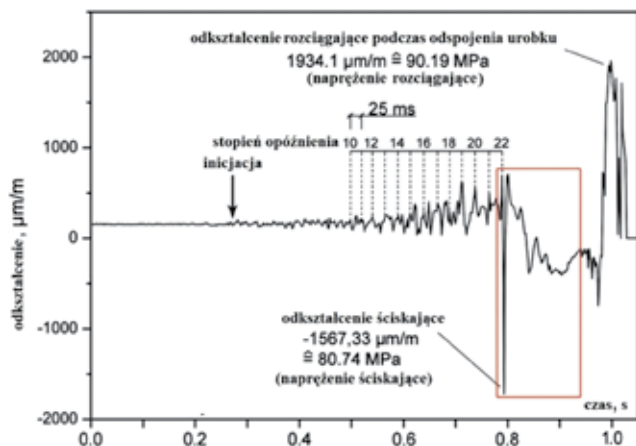
Uzyskane wyniki przyczyniły się do sformułowania wniosku, że ładunki odpalane z takim samym czasem opóźnienia



Rys. 1. Szescioszeregowy schemat odpalania przy użyciu zapalników nieelektrycznych [5]

Fig. 1. Non electric six rows pattern [5]

nie powodują wzrostu wartości mierzonych odkształceń, rys. 2 [5].



Rys. 2. Odształcenia zarejestrowane w odległości 0,8 m od odpalanej serii [6, 9]

Fig. 2. Recorded strain at the distance of 0,8 m from blasthole [6, 9]

Jak wynika z rys. 2, odpalanie ładunków z tym samym czasem opóźnienia powodowało rejestrowanie indywidualnych wartości odkształceń w postaci pików, uzyskanych z każdej odpalanej grupy otworów strzałowych, np. dla opóźnienia 275 ms (czerwona linia na rys. 1). W wyniku detonacji MW dochodzi do silnego ściśnięcia calizny skalnej (odkształcenia ściskające) znajdującej się w niewielkiej odległości od miejsca wykonywania robót strzałowych, a następnie wystąpieniu odkształceń rozciągających pojawiających się podczas przechodzenia fali powierzchniowej.

Wartości zarejestrowanych odkształceń przedstawionych na rysunku 2 przelicza się na naprężenia korzystając z prawa Hooke'a

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (1)$$

gdzie:

- σ – naprężenie, Pa,
- ε – odkształcenie
- E – moduł Younga, Pa.

W wyniku prowadzonych pomiarów, Müller zaobserwował występowanie liniowej zależności pomiędzy maksymalnymi wartościami prędkości (PPV), a generowanymi naprężeniami (σ). Uwzględniając, że wartość wywołanego naprężenia jest uzależniona od masy ładunku (Q), prędkości detonacji MW (c_{MW}) oraz rejestrowanej maksymalnej wartości prędkości, zależność (1) można przedstawić w postaci równania (2) [6, 8]

$$\sigma = PPV \cdot Q \cdot c_{MW} \quad (2)$$

gdzie:

- PPV – maksymalna wartość prędkości, mm/s
- Q – masa ładunku, kg
- c_{MW} – prędkość detonacji, m/s.

Rozpatrując równanie (1) i (2) zauważa się, że istnieje następująca zależność pomiędzy wyznaczonymi naprężeniami, a zarejestrowanymi wielkościami PPV [8]

$$\sigma \sim PPV \quad (3)$$

Wartość naprężenia za ostatnim rzędem otworów strzałowych wyznaczana jest na podstawie zarejestrowanych wartości odkształcenia ε , przy znajomości wartości modułu Younga dla typu skał budujących dany maszy.

Intensywność drgań zdefiniowana jest za pomocą maksymalnej dopuszczalnej prędkości chwilowej PPV_{max} – zależność (4) oraz maksymalnego odkształcenia dynamicznego ε_{max} – równanie (5) [6]

$$PPV_{max} = k \cdot (W_B \cdot c_{MW} \cdot r^{-n})^m \quad (4)$$

lub

$$\varepsilon_{max} = k' \cdot (W_B \cdot c_{MW} \cdot r^{-n'})^{m'} \quad (5)$$

gdzie:

- ε_{max} – maksymalne odkształcenie dynamiczne, $\frac{mm}{m}$
- PPV_{max} – maksymalna dopuszczalna prędkość chwilowa, $\frac{mm}{s}$,
- r – odległość pomiędzy otworem zawierający największy ładunek MW, a miejscem pomiaru, m,
- k, n, m, k', n', m' – współczynniki statystyczne otrzymane w wyniku korelacji danych statystycznych [3, 4, 6, 7].

Równania (4), (5) nazywane są głównymi równaniami teorii oddziaływania chwilowego i mogą być obciążone błędem dochodzącym do 20 %. Wartość błędu jest uzależniona od dokładności wyznaczenia: masy ładunku MW, prędkości detonacji MW, odległości pomiędzy największym ładunkiem, a miejscem wykonywania pomiaru tensometrycznego, jak również zastosowanymi siatkami oraz schematami inicjowania dla wykonywanych robót strzałowych [3, 4].

Podobnie jak w przypadku zależności zdarzenie impulsowe – odległość, Müller określił równanie dla wielkości: energia – odległość. Jak podano w literaturze [1], wartość energii odkształcenia dla niewielkich odległości może być wyznaczona z zależności (6)

$$E_{SWE} = 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_o \cdot c_p^3 \cdot \int_0^t \varepsilon^2 dt \quad (6)$$

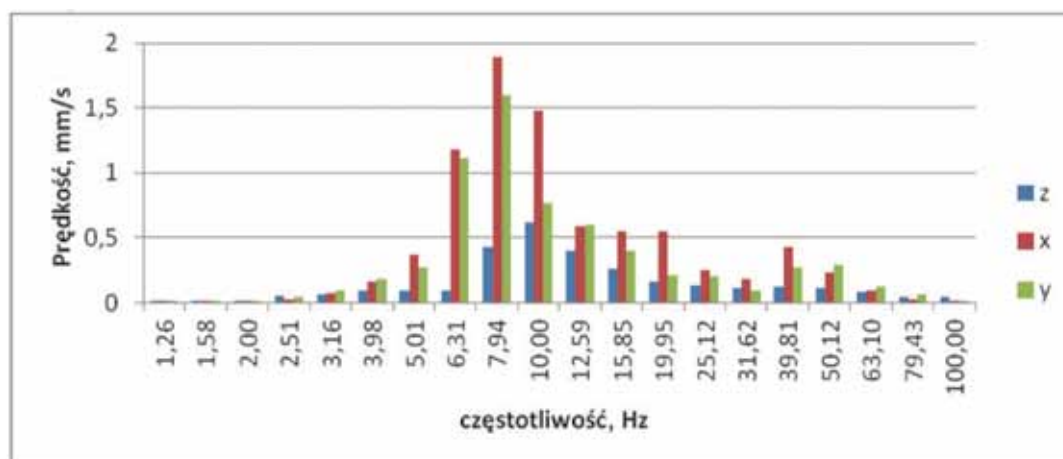
gdzie:

- E_{SWE} – energia naprężenia, Nm
- R – odległość pomiędzy ładunkiem a miejscem wykonywania pomiaru, m
- ρ_o – gęstość ośrodka,
- c_p – prędkość fali podłużnej,
- t – czas, s.

Należy zwrócić uwagę, że Müller et. al badali odkształcenia rejestrowane na gruncie w niewielkich odległościach od miejsca wykonywania robót strzałowych. Na podstawie prowadzonych badań zaobserwowali liniową zależność pomiędzy odkształceniem a PPV . Uwzględniając, że dla różnych typów konstrukcji obiektów budowlanych będą występowały różne wartości współczynnika tłumienia, wydaje się zasadne zbadanie, czy zależność odkształcenie – prędkość, wyznaczona dla wielkości rejestrowanych na gruncie, będzie tożsama z zależnością dla obiektów budowlanych.

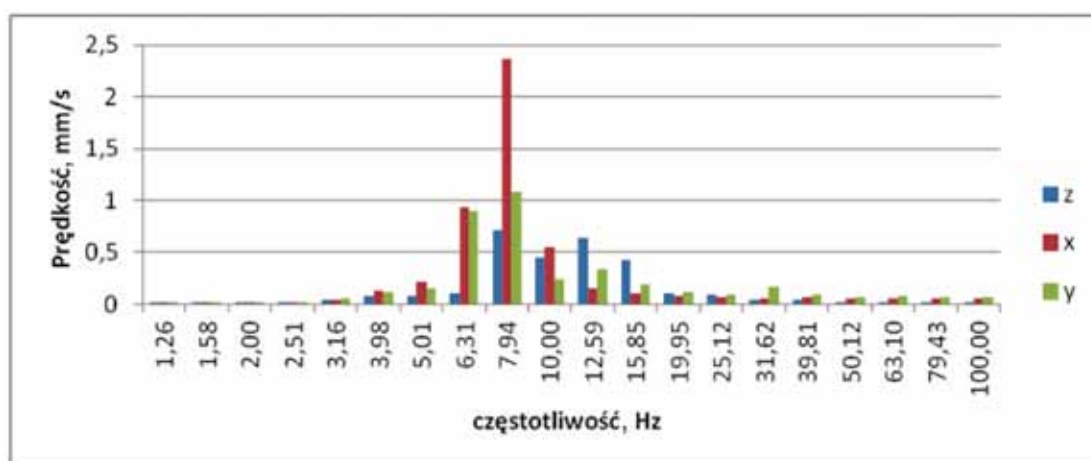
3. Badania terenowe

Badania prowadzono dla obiektu chronionego znajdującego się w otoczeniu kopalni dolomitu. Roboty strzałowe charakteryzowały się następującymi parametrami: liczba otworów $n - 4 \div 6$, zabiór $z - 3$ m, odległość między otworami $a - 3$ m, wysokość ściany $h - 26$ m, ładunek całkowity Q_c około 530 kg (dla $n = 4$) oraz 797 kg (dla $n = 6$), ładunek na opóźnienie $Q_o - 47$ kg. Prędkość drgań oraz odkształcenia rejestrowano odpowiednio na fundamencie obiektu budowlanego przy użyciu sejsmometrów oraz tensometrów elektrooporowych. Zarejestrowane drgania wywołujące odkształcenia na fundamencie obiektu budowlanego charakteryzowały się niskimi częstotliwościami. Strukturę częstotliwościową drgań rejestrowanych na gruncie i obiekcie przedstawiają rysunki 3 i 4.



Rys. 3. Struktura częstotliwościowa drgań zarejestrowana na gruncie

Fig. 3. Frequency characteristic of parasismic vibration recorded on the soil



Rys. 4. Struktura częstotliwościowa drgań zarejestrowanych na fundamencie obiektu budowlanego

Fig. 4. Frequency characteristic of parasismic vibration recorded on the structure foundations

Na podstawie przeprowadzonej analizy – rysunek 4, można stwierdzić, że zarejestrowane drgania charakteryzują się dominującymi niskimi wartościami częstotliwości, w zakresie $5,5 \div 15,85$ Hz, co stanowi zagrożenie dla obiektu budowlanego, ze względu na zakres częstotliwości rezonansowych.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów zarejestrowano zmianę prędkości drgań oraz odkształceń na fundamencie obiektu budowlanego. Korzystając z uogólnionego prawa Hooke'a przeliczono zarejestrowane odkształcenie na naprężenia. Efektem dalszych analiz było otrzymanie wykresów zmiany naprężeń oraz prędkości drgań w dziedzinie czasu. Przy czym kolor zielony przedstawia zarejestrowane prędkości drgań dla składowych x , y , z , a kolor ciemnoczerwony opisuje obliczone naprężenia (σ) dla tych samych składowych, rysunek 5.

Przyjęto, że obiekty budowlane zbudowane są z materiałów, dla których wartości współczynnika Poissona oraz modułu Younga wynoszą: $\nu = 0,2$ oraz $E = 30500 \frac{N}{mm^2}$.

Dla pomiarów niskoczęstotliwościowych drgań parasejsmicznych zarejestrowanych na fundamencie obiektu budowlanego (rys. 5a i 5b), zaobserwowano zależność naprężenia od chwilowych wartości prędkości w całym zakresie sejsmogramu (we wszystkich fazach drgania). W związku z faktem, że na sygnał parasejsmiczny składają się różne typy fal (podłużne

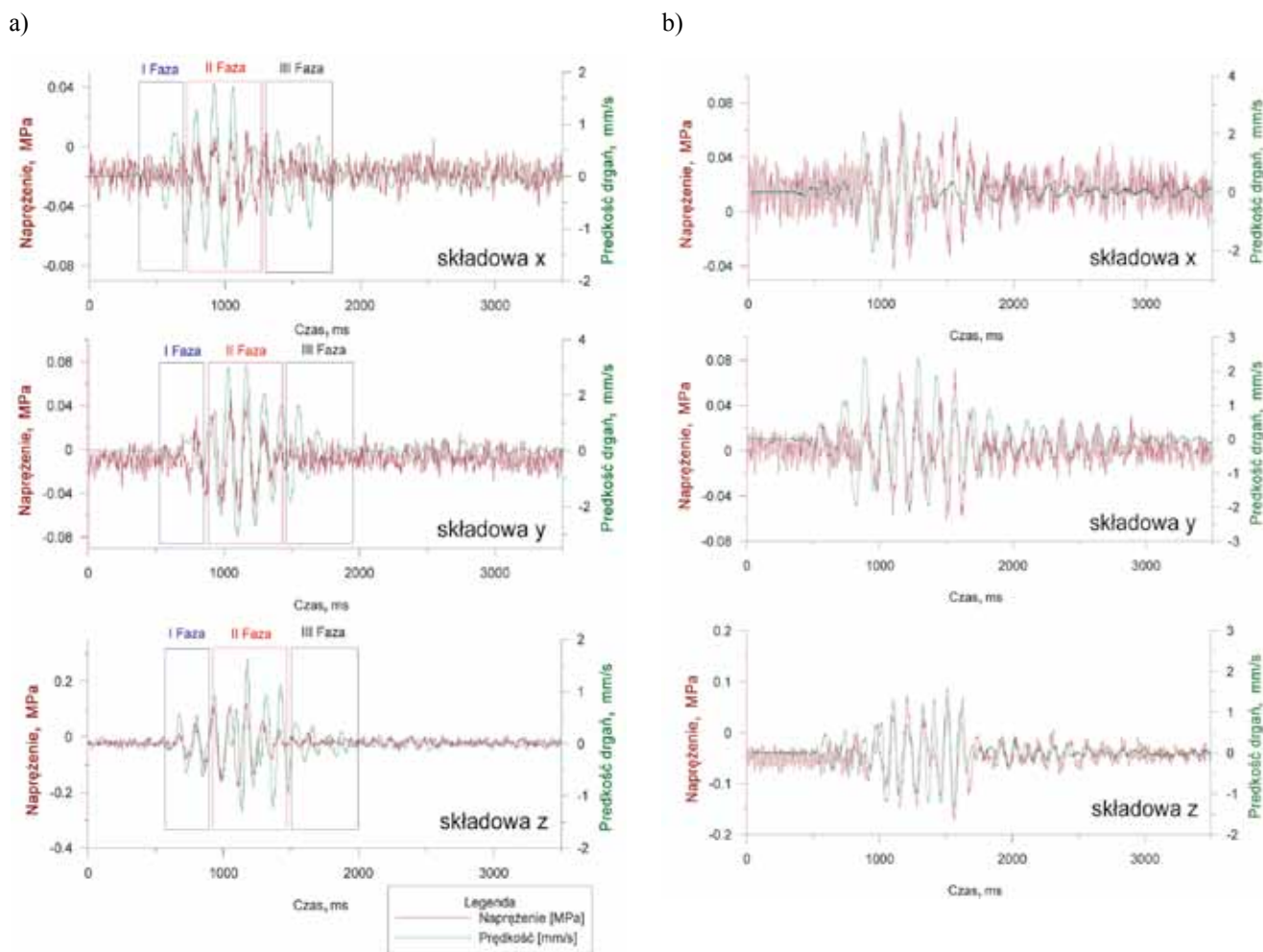
oraz powierzchniowe) odznaczające się różnymi prędkościami propagacji, zarejestrowane przebiegi można podzielić na trzy fazy działania (rys.5a). Faza pierwsza opisywana jest przez wysokie wartości częstotliwości oraz niskie amplitudy prędkości drgań. Faza druga odznacza się wysokimi wartościami amplitudy drgań oraz niskimi wartościami częstotliwości. Trzecia faza jest tzw. fazą wygaszenia.

Sledząc na wykresie (rys. 5a oraz 5b), wartości naprężeń można zaobserwować, że są one zmienne w czasie w momencie, gdy nie występują drgania parasejsmiczne. Świadczy to o fakcie, że każdy budynek jest nieustannie obciążony. Zmienne warunki pogodowe (ciśnienie, temperatura, wiatr), jak również niewielkie wartości drgań ziemi występujące w każdej chwili wywołują zmienny stan naprężenia w budynku. Wartości te są jednak bardzo niewielkie i można przyjąć, że są zbliżone do zera. Uzyskaną zależność uzyskano dla wszystkich robót strzałowych niezależnie od stosowanych wielkości ładunku MW.

4. Wnioski

Na podstawie wyników pomiarów Müller zauważył, że [9]:

- fala uderzeniowa oddziałuje na caliznę skalną jako impulsowe zdarzenie sejsmiczne (zdarzenie chwilowe),
- prowadzenie robót strzałowych według opracowanych



Rys. 5. Zarejestrowane wartości prędkości drgań oraz wyznaczone naprężenia dla obiektu budowlanego znajdującego się w otoczeniu kopalni dolomitu: a – z uwzględnieniem faz drgań, b – bez uwzględnienia faz drgań.

Fig 5. Recorded paraseismic velocity and calculated stress for the structure which is in close range from the open pit mine: a – includes phases of vibration, – b without phases of vibration.

- schematów powoduje powstanie pojedynczych częściowych momentów, które pochodzą ze zdetonowanej z danym opóźnieniem kolumny ładunku materiału wybuchowego (czerwona linia na rysunku 1). Efektem tego jest uzyskanie impulsów, które nie nakładają się na siebie w wyniku występowania zmiennej odległości pomiędzy otworami,
- równoczesne odpalenie kilku ładunków powoduje wystąpienie zwiększonej strefy kruszenia oraz poprawę fragmentacji urobku przy odpowiednio dobranym stosunku wielkości zabioru do odległości między otworami. W przypadku stosowania się do założeń teorii zdarzenia impulsowego, nie dochodziło do występowania zwiększonej wartości intensywności drgań parasejsmicznych,
- ładunek na opóźnienie nie może stanowić kryterium w wyznaczaniu dopuszczalnej wielkości ładunku, np. wzór Kocha,
- stosowane materiały wybuchowe powinny charakteryzować się podobną gęstością oraz prędkością detonacji (w przypadku prowadzenia prac strzałowych z użyciem różnych typów MW),
- inicjacja ładunków powinna przebiegać według określonej sekwencji. Efektem tak prowadzonych robót strzałowych może być rozartyżenie kąt rozluźnienia skał w stosunku do ociosu,

- czoła fal parasejsmicznych mogą ulec zmodyfikowaniu na skutek zastosowanego systemu inicjacji (precyzja zadanego czasu opóźnienia),
- Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano zmianę odkształceń w zależności od zmiany prędkości drgań rejestrowanych na fundamencie obiektu budowlanego. Oddziaływanie parasejsmiczne pochodziło od robót strzałowych prowadzonych metodą jednoszeregową, co stanowiło odstępstwo od założenia teorii zdarzenia impulsowego.
- Drgania niskoczęstotliwościowe charakteryzują się bezpośrednią zależnością generowanych naprężeń od prędkości drgania w całym zakresie czasowym przebiegu (we wszystkich fazach drgań). W czasie przeprowadzonych pomiarów zaobserwowano powtarzalność otrzymanych przebiegów odkształceń w zależności od prędkości drgań zarówno dla mniejszych mas ładunku MW (530 kg), jak również większej masy (793 kg).
- Wstępne analizy zarejestrowanych parametrów na fundamencie obiektu potwierdzają liniową zależność prędkości i odkształcenia, podobnie jak w badaniach prowadzonych przez Müllera dla wartości rejestrowanych na gruncie w niewielkiej odległości od detonowanej serii.
- Uwzględniając, że obiekty budowlane odznaczają się różnymi typami konstrukcji, należałoby wyprowadzić przez Müllera zależności skorygować o współczynnik tłumienia

(indywidualny dla każdego obiektu budowlanego). W tym celu należy prowadzić dalsze badania.

Badania zostały zrealizowane z ramach umowy AGH nr 15.11.100.787

Literatura

1. *Hustrulid, W.*: Blasting Principles for Open Pit Mining: Volume 2.— Theoretical Foundations. Rotterdam: Balkema 1999.
2. *Maciąg E., Tatara T.*: Porównanie oceny szkodliwości drgań od wstrząsów górniczych dla niskiego budynku murowanego na podstawie skal SWD i analizy tercjowej. PAN Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Zagrożenia Naturalne w górnictwie. Warsztaty 1999; str. 169÷183.
3. *Müller, B.*: Sprengerschütterungen sind beherrschbar, Teil 1. MIRO Mineralogische; 2005
4. *Müller B.*: Sprengerschütterungen sind beherrschbar, Teil 2. MIRO— Mineralogische Rohstoffe; 2006; str 19÷22.
5. *Müller, B., Baumann I., Meissner, J.*: Prediction and minimisation of vibration during production blasts. Vibrations from Blasting Workshop hosted by Fragblast 9, Granada 11-13.09.2010; str. 47÷55.
6. *Müller, B., Baumann I., Meissner, J.*: The dynamic strain sensor - an optical alternative to geophone measurements. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, EVACES, 24-26.10.2007. Porto. Portugalia; str. 169÷178.
7. *Müller B., Hausmann, J., Niedzwiedz, H.*: Comparison of different methods of measuring and calculation blast vibrations in rock mass. Proc. of EFEE's 3rd World Conf. on Explosives and Blasting Technique. Wiedeń. Austria, 9–11.09.2007; str. 127÷138.
8. *Müller B., J. Hausmann and H. Niedzwiedz.*: Prediction and minimization of vibrations during production blasts. Vibrations from Blasting – Spathis & Noy; 2009; str 47÷55.
9. *Müller B., Hausmann J., Niedzwiedz H.*: The physically interpretable and statistically proved forecast and evaluation of blast vibrations. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, EVACES'07 24 -26.10 2007. Porto. Portugalia; str. 1091÷1098.
10. PN:B-02170:1985, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
11. *Pyra J.*: Ocena oddziaływania górniczych robót strzałowych na obiekty budowlane. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie; rok 2008; nr 3; str. 41÷47.
12. *Winzer J.*: Przyczynek do dyskusji nad oddziaływaniem drgań na obiekty otoczenia kopalń. Przegląd Górniczy; rok 2008; tom 64; nr 2; str. 10–19.
13. *Winzer J., Pyra A.*: Tłumienie drgań parasejsmicznych przy przejściu z podłoża do obiektów. Przegląd Górniczy; rok 2007; tom 63; nr 6; str. 35÷41.
14. *Winzer J., Pyra J., Soltys A.*: Uwagi o ocenie oddziaływania powietrznej fali uderzeniowej na otoczenie przy robotach z użyciem MW. Przegląd Górniczy; rok 2009; tom 65; nr 11-12; str. 94÷102.