

**Zeszyty Naukowe***Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk*

rok 2017, nr 101, s. 45–60

Filip PACHLA*, Tadeusz TATARA**

Odporność zabudowy mieszkalnej i gospodarczej na wpływ eksploatacji górniczej w obszarze górniczym KWK Janina

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane analizy oceny odporności dynamicznej zabudowy mieszkalnej i gospodarczej na wpływ eksploatacji górniczej w obszarze górniczym jednej z kopalń węgla kamiennego. Rozważania ograniczono do dynamicznych efektów związanych z powstawaniem wstrząsów górniczych generowanych podziemną eksploatacją surowca. W ramach pracy wykonano analizę sejsmiczności analizowanego obszaru z uwagi na wpływ rejestrowanych i prognozowanych drgań powierzchniowych na tradycyjną niską zabudowę murowaną. Wykonano modele symulacyjne zbudowane zgodnie z Metodą Elementów Skończonych oraz dobrano kryteria odporności dynamicznej. Kryteria odporności dynamicznej przyjęto zgodnie z obowiązującymi normami i zasadami projektowania budynków murowanych. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem metody spektrum odpowiedzi, która jest normową metodą projektowania obiektów poddanych wpływom wstrząsów górniczych. Takie podejście jest również zalecane przez większość polskich instrukcji i wytycznych dotyczących projektowania budynków w rejonach o sejsmiczności indukowanej działalnością wydobywczą. Efektem analiz było określenie wyężenia podstawowych elementów konstrukcyjnych w przyjętych modelach obliczeniowych. Wyniki analiz skoncentrowanych na wpływie wstrząsów górniczych na zabudowę powierzchniową i sieć infrastruktury technicznej oraz ich zabezpieczeniach w obszarze górniczym ZG Janina mogą być przydatne w kontekście możliwości dalszej eksploatacji pokładów węgla w kolejnych latach, z zachowaniem bezpieczeństwa powszechnego, ochrony obiektów budowlanych, w tym zapobiegania szkodom. Przedstawione w pracy wyniki stanowią również uzupełnienie tworzonej przez autorów od kilku lat bazy obiektów i modeli dynamicznych budowli poddanych wpływom wstrząsów górniczych.

Słowa kluczowe: wstrząsy regionalne, wstrząsy eksploatacyjne, prognoza drgań, budynki, uszkodzenia, modele dynamiczne, odporność dynamiczna

* Dr inż., ** Prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli, Kraków;
e-mail: fpachla@pk.edu.pl, ttatara@pk.edu.pl

Resistance of residential and rural buildings due to mining exploitation in the coal mining area

Abstract: The paper presents selected analyses of the dynamic resistance of residential and rural buildings to the effects of mining exploitation near the operation area of the "Janina" coal mine. Considerations were limited to the dynamic effects of mining shocks generated by underground mining. The analysis of the seismicity of the analyzed area was carried out as a part of the work due to the influence of recorded and predicted surface vibrations on the traditional low-rise masonry buildings. Simulated models were constructed according to the Finite Element Method using Autodesk code, and the criteria for dynamic resistance were chosen. The dynamic resistance criteria were adopted in accordance with the applicable standards and design principles of masonry buildings. Calculations were performed using the response spectrum method, which is a standard method of designing objects subjected to impacts of mining shocks. This approach is also recommended by most Polish guidelines for the design of buildings in seismic areas induced by rockbursts. The results of the analyses were the determination of the stress of the structural elements in the assumed computational models. The results of the analyses focused on the impact of mining shocks on surface structures and the network of technical infrastructure and their security in the considered mining area may be useful in the context of the possibility of further exploitation of the coal seams in subsequent years with universal security, protection of buildings and harm prevention. The results presented in the paper also complement the base of structures and their dynamic models which have been created by authors for several years.

Keywords: regional shocks, operating shocks, vibration prediction, buildings, damage, dynamic models, dynamic resistance

Wprowadzenie

W obszarze górniczym TAURON Wydobyć SA ZG Janina, w okresie od września do listopada 2015 r. miały miejsce bardzo silne wstrząsy górnicze. W 2015 r. Dyrektor Okręgowego Urzędu Górniczego w Katowicach, po stwierdzeniu znacznego przekroczenia zarejestrowanych wartości prognozowanych przyspieszeń drgań gruntu na skutek zaistnienia trzech wysokoenergetycznych wstrząsów górniczych (30.09., 20.10. i 18.11.2015 r.) podjął decyzję o wstrzymaniu ruchu ZG Janina w części dotyczącej dalszej eksploatacji pokładu 207 ścianą 729 na poziomie 500 m do czasu m.in. uzyskania pozytywnej opinii Komisji ds. Ochrony Powierzchni przy Wyższym Urzędzie Górniczym. Na skutek wystąpienia wstrząsów o znacznej intensywności do końca pierwszego kwartału 2016 r. do działu szkód górniczych Kopalni zgłoszono ponad 1700 spraw o odszkodowania. Rodzi się pytanie, czy można wiązać szkody występujące w obiektach budowlanych na obszarze górniczym ZG Janina z tymi wstrząsami, a zatem czy zgłoszenia odszkodowawcze są zasadne. Drgania powierzchniowe generowane wstrząsami o dużej intensywności mogą wywołać uszkodzenia zabudowy powierzchniowej i sieci infrastruktury technicznej, zwłaszcza starej i nieremontowanej (Tatara i Pachla 2012; Tatara 2012). Problem jest o tyle istotny, że na terenach objętych wpływami wstrząsów górniczych zabudowę mieszkalną i o przeznaczeniu gospodarczym stanowią głównie budynki starsze o znacznym stopniu zużycia i bez odpowiednich zabezpieczeń na wpływy wstrząsów. Budynki wznoszone w ostatnich latach posiadają już takie zabezpieczenia (tak z uwagi na wpływy deformacji ciągłych, jak i na wpływy wstrząsów). Infrastruktura techniczna w postaci starszej sieci wodociągowej, gazowej jest również zbudowana z materiałów podatnych na wpływy eksploatacji górniczej (np. z żeliwa).

W pracy przeanalizowano wpływ intensywnych wstrząsów górniczych na zabudowę mieszkalną i gospodarczą. Pominięto wpływ drgań na ludzi, który może być analizowany z wykorzystaniem różnych metod oceny (Kowalska-Koczwara i Stypuła 2017). Wykorzystano modele numeryczne przedmiotowej zabudowy. Wyniki analiz skupionych na wpływie wstrząsów górniczych na zabudowę powierzchniową mogą być przydatne w kontekście możliwości dalszej eksploatacji pokładów węgla w kolejnych latach, z zachowaniem bezpieczeństwa powszechnego, ochrony obiektów budowlanych, w tym zapobiegania szkodom.

1. Charakterystyka sejsmiczności obszaru, stacje sejsmiczne, charakterystyka drgań powierzchniowych i ich prognozowanie

Wstrząsy górotworu indukowane podziemną eksploatacją górniczą ZG Janina mają zróżnicowaną naturę. Zjawiska niskoenergetyczne można wiązać bezpośrednio z prowadzoną eksploatacją (tzw. wstrząsy eksploatacyjne), a wstrząsy wysokoenergetyczne tzw. regionalne mogą być związane z występującymi uskokami. Wstrząsy są wynikiem prowadzonej eksploatacji w pokładzie 207 ścianami: 700, 701, 702 (partia G), 703 i 704 (partia S3) oraz 729 (partia S1). Pokład 207 został udostępniony we wrześniu 2009 r., a pierwszą ścianę uruchomiono w grudniu 2011 r. Z uzyskanych informacji w ZG Janina wynika, że do końca eksploatacji ściany 729 pozostało 4 m. Natomiast trwają przygotowania do eksploatacji ściany 728.

Od początku eksploatacji do marca 2016 r. w pokładzie 207 miały miejsce 3242 wstrząsy o energiach w przedziale od 10^3 do 10^9 J. W tabeli 1 zestawiono liczby wstrząsów o energiach $E \geq 10^5$ J w przedziałach energetycznych. Z analiz danych z tabeli 1 wynika, że najwięcej wstrząsów wysokoenergetycznych o energii $E \geq 10^8$ J, wystąpiło w trakcie eksploatacji ściany 729.

W okresie 01.08.–30.11.2015 r. na szczególne wyróżnienie zasługują trzy silne wstrząsy (oznaczone jako 1, 2 i 3), które wystąpiły w granicach obszaru górniczego OG Libiąż IV, o następujących energiach:

1. $E = 9 \times 10^8$ J z 30.09. – 20 m za frontem ściany,
2. $E = 6 \times 10^8$ J z 20.10. – na uskoku nad chodnikiem nadścianowym, za frontem ściany,
3. $E = 1 \times 10^9$ J z 18.11. – w rejonie uskoku.

W tabeli 2 zestawiono wartości przyspieszeń PGA_{H10max} i prędkości PGV_{max} drgań gruntu obliczonych na podstawie pomierzonych przebiegów drgań na dwóch stacjach sejsmicznych położonych w Żarkach (przy ul. Ściegiennego, obok kościoła, oznaczono dalej jako ŻŚ) i w Libiążu (przy ul. Gen. Sikorskiego 72 w budynku Polskiego Kościoła Narodowego – oznaczono dalej jako LS) dla wstrząsów o energiach $10^5 \leq E \leq 10^7$ J wywołanych eksploatacją pokładu 207 w partii S3, ściany 729 w partii S1 od początku eksploatacji do 2015 r. Te dwie wyżej wymienione stacje sejsmiczne działają od listopada 2014 r.

Aktualnie od 2016 r. ZG Janina jest w posiadaniu sześciu stacji pomiarowych AMAX-GSI, a sąsiadujący z nim ZG Sobieski dysponuje dziewięcioma stanowiskami pomiarowymi. W tabeli 3 zestawiono parametry drgań powierzchniowych wywołanych wspomnianymi wysokoenergetycznymi wstrząsami, zarejestrowanymi na trzech stacjach pomiarowych (stacja w Żarkach (ŻS) przy ul. Ściegiennego, obok kościoła, stacja w Chrzanowie przy ul.

TABELA 1. Liczba wstrząsów w pokładzie 207 o energiach $E \geq 10^5$ J w przedziałach energetycznychTABLE 1. Number of shocks in deck No. 207 with energies $E \geq 10^5$ J in energy divisions

Przedział energetyczny	Ściana					
	700 partia G	701 partia G	702 partia G	703 partia S3	704 partia S3	729 partia S1
$10^5 \leq E < 10^6$ J	16	59	173	21	34	105
$10^6 \leq E < 10^7$ J	5	3	18	0	2	6
$10^7 \leq E < 10^8$ J	1	0	0	0	0	2
$10^8 \leq E < 10^9$ J	0	0	0	0	0	2
$10^9 \leq E < 10^{10}$ J	0	0	0	0	0	1

TABELA 2. Wartości przyspieszeń i prędkości drgań gruntu indukowanych wstrząsami o energiach $10^5 \leq E \leq 10^7$ JTABLE 2. Acceleration and velocity values of vibration on the ground induced by shocks with energies $10^5 \leq E \leq 10^7$ J

Energia [J]	Stacja ŻŚ		Stacja LS	
	PGA _{H10max} [mm/s ²]	PGV _{max} [mm/s]	PGA _{H10max} [mm/s ²]	PGV _{max} [mm/s]
10^5 , partia S3	33–365	0,2–1,3	–	–
10^6 , partia S3	293–392	1,2–1,6	–	–
10^5 , ściana 729 partia S1	2,3–30,9	0,1–1,0	8,3–28,1	0,3–0,8
10^6 , ściana 729 partia S1	20,8–34,1	0,6–1,1	19,2–27,9	0,6–0,9
10^7 , ściana 729 partia S1	102,9–132,7	4,8–5,6	42,8–45,2	1,2–2,3

TABELA 3. Parametry drgań powierzchniowych od wysokoenergetycznych wstrząsów górniczych z 2015 r.

TABLE 3. Parameters of surface vibrations from high energy mining shocks from 2015

	Wstrząs nr		
	1	2	3
Stacja pomiarowa	ŻŚ		
r_e [m]	1499	1468	1603
PGV _{max} [mm/s] – t_v [s]	66,3–1,18	22,4–3,75	47,5–2,03
PGA _{H10max} [mm/s ²] – t_a [s]	1635–1,04	661,4–2,55	1208,2–1,39
Stacja pomiarowa	CP		
r_e [m]	4945	5019	5150
PGV _{max} [mm/s] – t_v [s]	6,6–7,77	7,7–6,72	9,7–7,45
PGA _{H10max} [mm/s ²] – t_a [s]	142–7,08	187,8–6,4	220,2–8,6
Stacja pomiarowa	LS		
r_e [m]	–	2495	2585
PGV _{max} [mm/s] – t_v [s]	–	62,5–3,66	56,1–2,56
PGA _{H10max} [mm/s ²] – t_a [s]	–	1733,7–2,37	1374,4–2,16

Powstańców Styczniowych 15 – oznaczona dalej jako CP oraz stacja w Libiążu uruchomiona po wystąpieniu wstrząsu z 30.09.2015 r.) – oznaczona dalej jako LS. Pomierzone na w/w stacjach sejsmicznych parametry drgań porównano z wartościami uzyskanymi z I prognozy z początku 2015 r. – por. tabela 4.

TABELA 4. Porównanie wartości przyspieszeń pomierzonych i uzyskanych na podstawie I-szej prognozy z początku 2015 r.

TABLE 4. Comparison of measured acceleration and acceleration values based on the first prediction from the beginning of 2015

	Wstrząs nr					
	1		2		3	
	pom.	progn.	pom.	progn.	pom.	progn.
Stacja pomiarowa	ŻŚ					
PGA_{H10max} [mm/s ²]	1635	130	661,4	130	1208,2	–
Stacja pomiarowa.	CP					
PGA_{H10max} [mm/s ²]	142	25	187,8	25	220,2	–
Stacja pomiarowa	LS					
PGA_{H10max} [mm/s ²]	–	–	1733,7	70	1374,4	–

Porównanie maksymalnych wartości PGA_{H10max} uzyskanych na podstawie pomiarów drgań i z prognoz wskazuje na olbrzymie różnice pomiędzy wartościami pomierzonymi, a uzyskanymi z I prognozy z 2015 r. Stosunek tych wartości zawiera się w przedziale od prawie 6 do prawie 25. Tak duże różnice poddają w wątpliwość wiarygodność prognozy i rodzi się pytanie, jakie parametry były przyjęte do tak nietrafnej prognozy PGA_{H10max} ? Można przypuszczać, że I prognoza pomijała fakt występowania uskoków i możliwość powstania wstrząsów regionalnych. Taką sytuację należało przewidzieć mając na uwadze wstrząs regionalny na terenie sąsiadującej z ZG Janina, KWK Piast w 2010 r. (Uskok Błędownski).

Uszkodzenia występujące w konstrukcjach budowlanych lepiej są skorelowane z maksymalną wartością prędkości drgań. Dowodem na to może być przyjęcie skali GSI-GZW_{KW} – 2012 V jako skali podstawowej (Dubiński i in. 2013). Po wstrząsach wysokoenergetycznych (regionalnych), dla projektowanej eksploatacji ZG Janina na lata 2015–2018 w pokładzie 207 wykonana została ponowna II prognoza wstrząsów i ich wpływu na powierzchnię. Przy opracowywaniu II prognozy wstrząsów eksploatacyjnych na lata 2015–2018 analizą objęto cztery ściany 703 (partia S3), 729, 728 i 760 (partia S1) w pokładzie 207. W wyniku analiz otrzymano, że prognozowana energia nie powinna przekroczyć wartości 6E7 J, prognozowane maksymalne wartości przyspieszenia drgań gruntu PGA_{H10max} będą zawierać się w przedziale od 10 do ponad 300 mm/s². W przypadku wstrząsów regionalnych wartości PGA_{H10max} będą w przedziale od 150 do ponad 1600 mm/s², przy energiach powyżej E7 J. Z analizy wyników reprognozy przyspieszeń drgań powierzchni terenu górniczego ZG Janina wynika, że w efekcie omawianych wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu na przeważającym obszarze maksymalne wartości przyspieszeń drgań zawarte będą w prze-

dziale $0,15\text{--}0,9\text{ m/s}^2$, a w niektórych miejscach osiągną wartości z przedziału $0,9\text{--}1,6\text{ m/s}^2$ (dotyczy to zabudowanego terenu miejscowości Żarki oraz terenów na południe i zachód od tej miejscowości). Zabudowa miejscowości Żarki ucierpiała najbardziej na skutek analizowanych trzech wstrząsów wysokoenergetycznych.

2. Charakterystyka zabudowy powierzchniowej, uszkodzeń oraz jej odporność dynamiczna według skali GSI-GZW_{KW} – 2012

W zasięgu wpływów rozpatrywanych wstrząsów górniczych indukowanych działalnością eksploatacyjną ZG Janina zabudowa powierzchniowa jest zróżnicowana. Zabudowa ta składa się z obiektów własnych Zakładu związanych z jego działalnością, obiektów zabudowy mieszkalnej w obszarach miast i obszarach wiejskich, budynków sakralnych, budynków urzędów, szkół i przychodni zdrowia. Znajduje się tam zabudowa dziewięciu miast oraz 30 mniejszych miejscowości, w tym Żarek. Zabudowę miast tworzy zabudowa mieszkalna w postaci zabudowy zwartej typu osiedlowego lub ulicznego lub w postaci rozproszonej (budynki wielorodzinne w technologii tradycyjnej – ulepszonej i uprzemysłowionej oraz zabudowa jednorodzinna w technologii tradycyjnej i tradycyjnej – ulepszonej), zabudowa handlowo-usługowa, obiekty użyteczności publicznej. Mieszkalna zabudowa kubaturowa charakteryzuje się zróżnicowanym okresem użytkowania, stanem technicznym oraz rozwiązaniami konstrukcyjno-materiałowymi. Zabudowa mniejszych miejscowości składa się głównie z mieszkalnych budynków jednorodzinnych (wolnostojące wykonane w technologii tradycyjnej lub tradycyjnej ulepszonej), a także budynki gospodarcze, a pozostałą zabudowę tworzą obiekty użyteczności publicznej. Zabudowę kubaturową miast i mniejszych miejscowości uzupełniają obiekty inżynierskie w postaci mostów, wiaduktów, przepustów, sieci: wodociągowe, gazowe, ciepłownicze, elektroenergetyczne i teletechniczne.

W odniesieniu do skutków na powierzchni mieszkańcy zgłaszali szkody w budynkach na masową skalę. Można więc mówić o masowym, powszechnym zagrożeniu. Po wystąpieniu trzech wysokoenergetycznych wstrząsów do marca 2016 r. z terenu objętego ich wpływami zgłoszono 1705 spraw o odszkodowanie. Największa liczba zgłoszeń uszkodzeń budynków dotyczy miejscowości Żarki (516 zgłoszeń), Libiąża (400 zgłoszeń) i Chrzanowa (222 zgłoszenia). Konsekwencją zaistniałej wysokiej intensywności drgań podłoża jest zagrożenie dla mieszkańców i użytkowników tych obiektów.

Stwierdzone uszkodzenia w budynkach autorzy pracy porównali z opisami uszkodzeń budynków odpowiadającymi poszczególnym stopniom intensywności drgań skali GSI-GZW_{KW} i na tej podstawie określano odporność dynamiczną. Do określenia przybliżonego wpływu oddziaływania wstrząsów górniczych na budynki przyjęto stopień IV+, z uwagi na zaistniałe skutki w niektórych budynkach po wstrząsach wysokoenergetycznych. Po przeanalizowaniu wyników oceny odporności budynków znajdujących się w granicach projektowanej eksploatacji dla wstrząsów eksploatacyjnych nie stwierdzono obiektów budowlanych, dla których kategoria odporności jest niższa od wartości przyspieszeń drgań od prognozowanych wartości. Prognozowana sejsmiczność i jej intensywność drgań od wstrząsów eksploatacyjnych podczas eksploatacji pokładu 207 projektowanymi ścianami 728 i 729 nie będą stanowi-

ły zagrożenia dla zabudowy powierzchniowej w dobrym stanie technicznym; dla budynków o dużym zużyciu naturalnym i złym stanie technicznym może wystąpić intensyfikacja uszkodzeń elementów niekonstrukcyjnych. W terenie Libiąż IV i Babice I w rejonach zabudowanych prognozowane PGA_{H10max} nie powinny przekroczyć 50 mm/s^2 , co nie będzie negatywnie wpływać na infrastrukturę techniczną i budynki (nawet o dużym stopniu zużycia i złym stanie technicznym).

Z kolei przy wstrząsach regionalnych stwierdzono 680 obiektów o odporności dynamicznej niższej od prognozowanej. Przykładowo analizując odporność dynamiczną budynków brano pod uwagę stwierdzone uszkodzenia. Na przykład przy ul. Lenartowicza w Żarkach zinventaryzowano 51 budynków. W dwudziestu z nich stwierdzono m.in. pęknięcia ścian o rozwarości do 5 mm, w sześciu pęknięcia ścian o rozwarości od 5 do 20 mm, w czterestu zarysowania ścian o rozwarości do 1 mm, a uszkodzenia nie stwierdzono w 11 budynkach. Pęknięcia ścian nośnych o rozwarości do 5 mm oraz od 5 do 20 mm należy uznać za uszkodzenia konstrukcyjne, a zatem budynki takie mają odporność dynamiczną na wstrząsy o intensywności w IV stopniu skali GSI-GZW_{KW} – 2012. ZG Janina przypisały obiektom z takimi uszkodzeniami, co najwyżej III stopień skali, co wynika, jak przypuszczają autorzy, z prognozy maksymalnych wartości PGA_{H10max} . Niestety takie różnice w określeniu odporności dynamicznej budynków może mieć istotny wpływ na sporządzane plany ruchu kopalni.

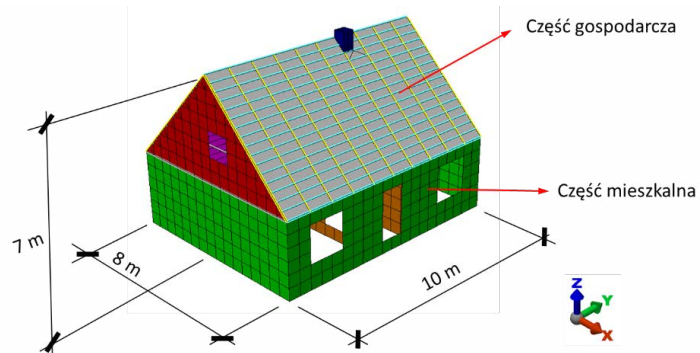
Obiekty liniowe (sieć wodociągowa, gazowa oraz sieć energetyczna) posiadają odporność dynamiczną wynoszącą 300 mm/s^2 , co w przypadku wstrząsów eksploatacyjnych jest odpornością wystarczającą. Biorąc pod uwagę duże wartości prognozowanych parametrów drgań gruntu przy wstrząsach regionalnych należy przeanalizować zachowanie się obiektów infrastruktury poprzez budowę modeli MES i wyznaczanie ich odpowiedzi dynamicznej. Pozwoli to na określenie na drodze numerycznej ich odporności dynamicznej.

3. Analizy dynamiczne z wykorzystaniem modeli symulacyjnych

W pracy zawężono analizę do grupy budynków o konstrukcji murowej tzw. tradycyjnej. Budynki takie występują zarówno na obszarach miejskich, jak i wiejskich, stanowiąc większość budynków niskich. Są to przeważnie budynki jednorodzinne, parterowe lub do trzech kondygnacji, nierzadko zgrupowane w osiedla. Ponieważ problem wzbudzenia drgań powierzchniowych poprzez wstrząsy górnicze i ich działanie na powierzchniową zabudowę jest problemem natury społecznej, budynki tego rodzaju wymagają wnikliwej analizy z uwagi na ich powszechność. Jednym z zasadniczych etapów prowadzonej w pracy analizy jest budowa modeli numerycznych. Do analiz wybrano:

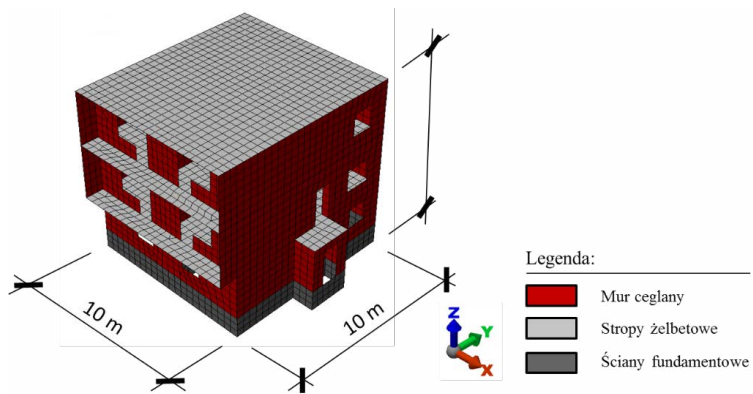
- budynek jednorodzinny parterowy z gospodarczym poddaszem (model nr 1 – por. rysunek 1),
- budynek jednorodzinny trzykondygnacyjny (model nr 2 – por. rysunek 2),
- budynek jednorodzinny trzykondygnacyjny o nieregularnym układzie konstrukcyjnym (model nr 3 – por. rysunek 3).

Budynki te uznano za reprezentatywne dla grupy obiektów zlokalizowanych w obszarze oddziaływania drgań powierzchniowych generowanych wstrząsami górniczymi.



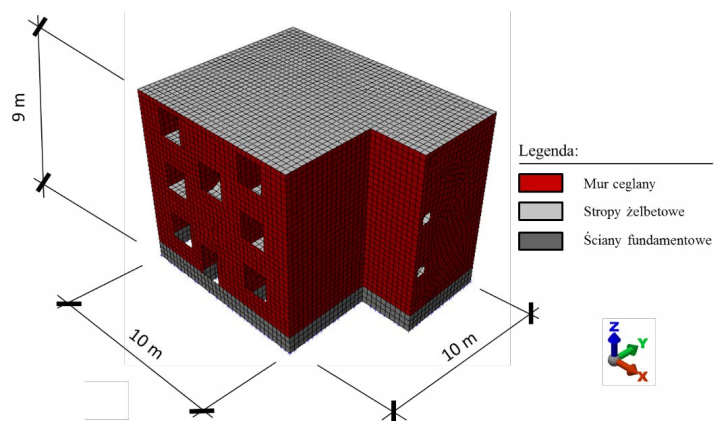
Rys. 1. Model obliczeniowy nr 1

Fig. 1. Computational model no. 1



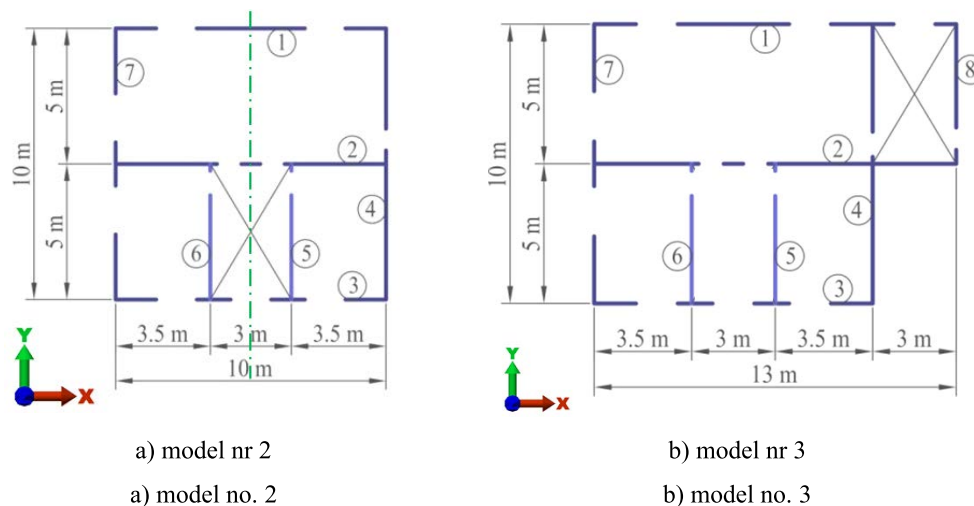
Rys. 2. Model obliczeniowy nr 2

Fig. 2. Computational model no. 2



Rys. 3. Model obliczeniowy nr 3

Fig. 3. Computational model no. 3



Rys. 4. Układ ścian nośnych i klatek schodowych w modelu nr 2 i modelu nr 3

Fig. 4. Distribution of load-bearing walls and staircases in model no. 2 and model no. 3

W przyjętych sprężystych modelach budynków uwzględniono odmienne własności materiałów tworzących układ nośny, obciążenia wynikające z ciężaru wypraw i elementów wykończeniowych, lekkiego ocieplenia stropodachu oraz część długotrwałą (40%) obciążenia użytkowego zgodnie z normą PN-B-02170:2016-12 „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki”. Przyjęcie tylko długotrwałej części obciążenia wynika z faktu, że w trakcie użytkowania obiektu obciążenie zmienne sporadycznie osiąga wartość maksymalną, co w połączeniu z wystąpieniem wstrząsu górnicy jest mało prawdopodobne. Ponadto obciążenie statyczne zgodne z kierunkiem przyspieszenia ziemskiego działa redukująco na rozciągania powodowane wstrząsem górnicy, co prowadzi do bezpieczniejszego oszacowania reakcji obiektu na obciążenia dynamiczne. Przy określeniu wartości modułu Younga muru na zaprawie cementowo-wapiennej posłużono się wynikami badań siecznego modułu sprężystości muru podanymi w pracy (Kubica i in. 1999) i normą PN-B-03002:2007 „Konstrukcje murowe – Projektowanie i obliczenia”. Wartość współczynnika Poissona przyjęto na podstawie wyników badań zawartych w pracy (Drobiec i in. 2000). Parametry pozostałych materiałów przyjęto na podstawie norm budowlanych PN-B-03264:2002 „Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie” oraz PN-B-03150:2000 „Konstrukcje drewniane – Obliczenia statyczne i projektowanie”. Dane materiałowe przedstawiono w tabeli 5.

W modelach analizowanych budynków uwzględniono istotne z punktu widzenia sztywności układy elementy, m.in. biegi schodów, otwory, nadproża. W rozważanych modelach budynków elementy murowe przyjęto jako jednorodne, traktując takie założenie jako wystarczająco dokładne z punktu widzenia dokładności obliczeń inżynierskich (Tatara 2002; Pachla 2011). Elementów wykończeniowych nie modeluje się z wykorzystaniem MES

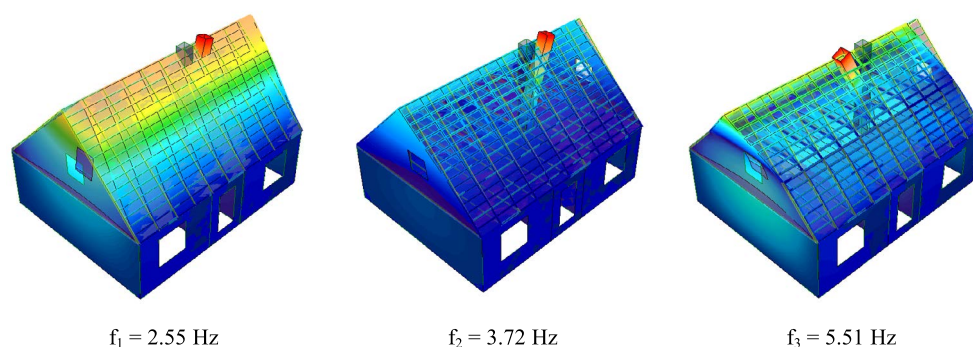
TABELA 5. Parametry materiałowe przyjęte w analizach MES

TABLE 5. Material parameters adopted in FEA analysis

Materiał	Gęstość masy ρ [kg/m ³]	Współczynnik Poissona ν [-]	Moduł Younga E_v [MPa]	Moduł Younga E_h [MPa]
Drewno	380	0,3	9 000 wzdłuż włókien	300 w poprzek włókien
Mur ceglany na zaprawie cementowo-wapiennej	1800	0,25	2616 prostopadle do spoin wspornych	3126 równolegle do spoin wspornych
Beton (Żelbet)	2500	0,25	30 000	

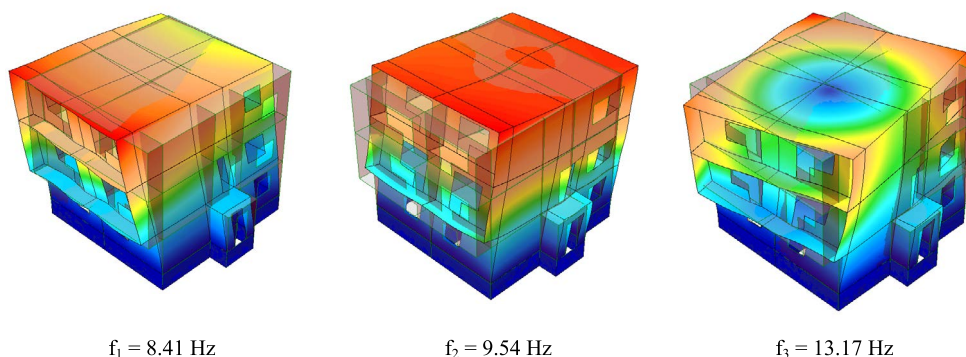
z przyczyn praktycznych. Przyjęto sprężyste podparcie modeli budynków wynikające z posadowienia na podatnym gruncie. Wpływ podłoża gruntowego uwzględniono poprzez sprężyste zamocowanie modeli w podłożu, za pomocą elementów w postaci sprężyn przyłożonych w poziomie spodu fundamentu. Sztywność elementów brzegowych określono według normy PN-80/B-03040 „Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny”, jak dla podłoża III kategorii o średniej sztywności. Dynamiczne współczynniki podłoża dla gruntów w stanie naturalnego zalegania wynoszą wówczas 50 MPa/m.

Na rysunkach 5, 6 i 7 zestawiono po trzy pierwsze obliczone postacie drgań własnych dla każdego z analizowanych modeli budynków murowych. Obliczone postacie drgań własnych są złożone, tak więc przy ustalaniu kolejności częstotliwości drgań własnych kierowano się dominującymi względnymi przemieszczeniami w danym kierunku zobrazowanymi na omawianych rysunkach.



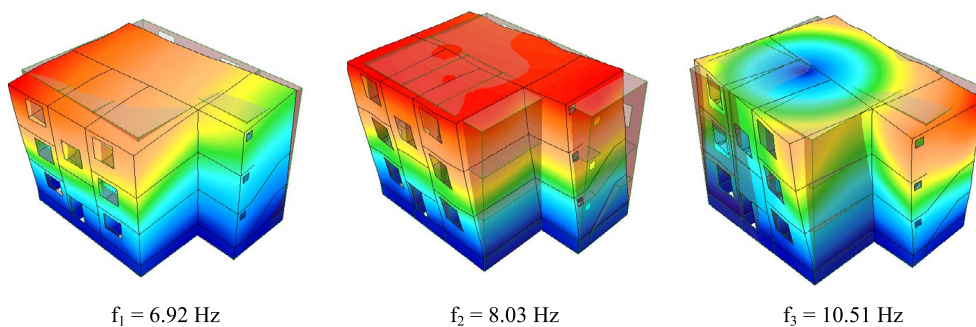
Rys. 5. Wybrane trzy pierwsze postacie drgań własnych wyznaczone dla modelu nr 1

Fig. 5. Selected first three mode shapes of natural frequencies for model no. 1



Rys. 6. Wybrane trzy pierwsze postacie drgań własnych wyznaczone dla modelu nr 2

Fig. 6. Selected first three mode shapes of natural frequencies for model no. 2



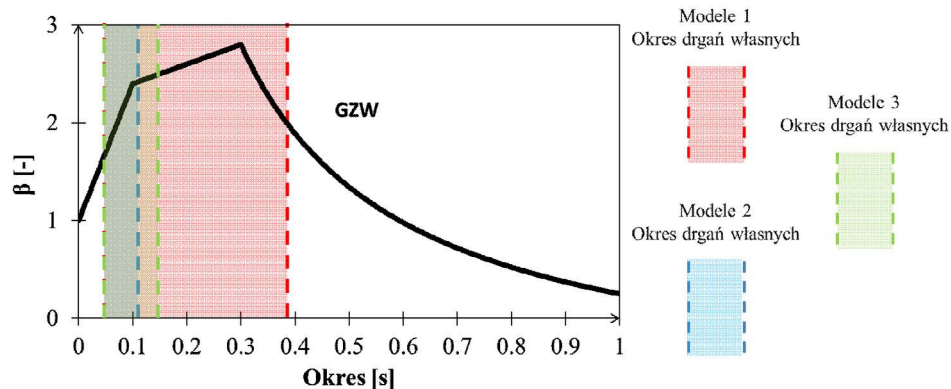
Rys. 7. Wybrane trzy pierwsze postacie drgań własnych wyznaczone dla modelu nr 3

Fig. 7. Selected first three mode shapes of natural frequencies for model no. 3

4. Odpowiedź dynamiczna modeli analizowanych budynków murowych

Do dalszych obliczeń dynamicznych wykorzystano metodę spektrum odpowiedzi (RSA) opisaną szczegółowo w (Tatara 2002; Pachla 2011). W metodzie tej wykorzystuje się model obliczeniowy konstrukcji, w tym przypadku model MES oraz wzorcowe, względne przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi (Ciesielski i in. 1996; Kowalski i in. 1997; Kuźniar i in. 2006; Czerwionka i Tatara 2007; Kuźniar i in. 2010). Pominęto wpływ nierównomiernego wymuszenia kinematycznego (Boroń i Dulińska 2016; Murzyn i Dulińska 2016) z uwagi na niewielkie rozmiary analizowanych obiektów w stosunku do długości fali powierzchniowej generowanej podczas wstrząsów górniczych. Spektra wzorcowe zawierają informacje o strukturze częstotliwościowej zarejestrowanych przebiegów powierzchniowych drgań wzbudzanych wstrząsami górniczymi, mogą być wykorzystywane w obliczeniach dynamicznych przy projektowaniu konstrukcji narażonych na działanie obciążeń kinematycznych.

Poniżej na rysunku 8 przedstawiono wzorcowe przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi dla obszaru GZW wraz zaznaczonymi widmami częstotliwości drgań własnych poszczególnych analizowanych modeli przyjętych w obliczeniach. Obliczenia przeprowadzono dla prognozowanych przyspieszeń drgań gruntu oraz dla przyspieszeń zarejestrowanych na stacjach pomiarowych przedstawionych przedstawionych w rozdziale 2.



Rys. 8. Wzorcowe przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi dla obszaru GZW (Ciesielski i in. 1996; Kowalski i in. 1997) oraz spektrum częstotliwości drgań własnych analizowanych modeli

Fig. 8. Accelerated response spectrum for the USCBA area (Ciesielski et al 1996, Kowalski et al. 1997) and natural frequencies frequency spectrum of the vibrations of the analyzed models

5. Przyjęte kryteria odporności dynamicznej

Projektowanie konstrukcji murowych zazwyczaj ogranicza się do prostych przypadków obciążenia (ściskanie, ścinanie, rozciąganie, oraz zginanie). W przypadku wielokierunkowych oddziaływań, jakimi są wstrząsy górnicze, mur znajduje się w złożonym stanie naprężenia. Zachowania muru nie da się opisać prostymi modelami scharakteryzowanymi parametrami uzyskanymi na drodze badań empirycznych. Zarówno nośność, jak i sposób zniszczenia muru w złożonym stanie naprężenia będą dyktowane wartościami i kierunkami głównych naprężeń rozciągających, kierunkiem ułożenia spoin oraz wytrzymałością elementów murowych i zaprawy wiążącej. Do oceny stopnia bezpieczeństwa materiału w złożonych stanach naprężenia stosuje się odpowiednio sformułowane kryteria wytrzymałościowe. W pracy wykorzystano trzy wybrane kryteria oceny odporności dynamicznej budynków murowych poddanych oddziaływaniom dynamicznym wynikającym z działania wstrząsów górniczych. Są to kryteria:

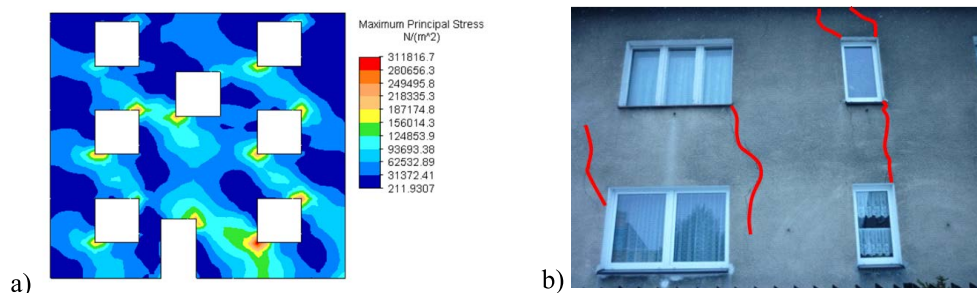
- maksymalnego naprężenia głównego,
- naprężenia ścinającego,
- kąta odkształcenia postaciowego.

Kryteria te wraz z ich szczegółowym opisem zostały przedstawione w pracy (Pachla 2011).

6. Wnioski z przeprowadzonych obliczeń

Dla każdego z analizowanych modeli sprawdzano przyjęte kryteria odporności dynamicznej. W pracy ograniczono się do przedstawienia wyników reprezentatywnych. W obliczeniach z wykorzystaniem MES, przy użyciu programu komputerowego Autodesk Simulation Mechanical 2017, zakłada się, że spełnienie przyjętych kryteriów odporności dynamicznej odpowiada „granicznej odporności dynamicznej” budynków. Oznacza to, że w budynkach nie powstaną uszkodzenia w elementach konstrukcyjnych, które zagroziłyby bezpieczeństwu użytkownika obiektu, jak również powodowały pogorszenie jego odporności dynamicznej (degradacja sztywności). Dopuszcza się tym samym powstanie zarysowań w elementach niekonstrukcyjnych i elementach wykończeniowych, bez zagrożenia dalszej eksploatacji budynku. Analizy szczegółowego rozkładu przemieszczeń i naprężeń (zarówno głównych, jak i ścinających) w ścianach reprezentatywnych budynków pozwoliły także na jakościową ocenę uzyskanych wyników oraz na wskazanie obszarów ścian szczególnie narażonych na powstanie uszkodzeń w wyniku działania wstrząsów górniczych. W pierwszej kolejności przeanalizowano mapy maksymalnych naprężeń głównych oraz sprawdzono kryterium maksymalnego naprężenia głównego.

Analiza wyników obliczeń dynamicznych przyjętych modeli pozwala stwierdzić, że uzyskane rezultaty korelują z obserwowanymi w rzeczywistości procesami powstawania uszkodzeń w budynkach murowych poddanych działaniom wymuszeń parasejsmicznych. Na rysunku 10a przedstawiono rozkład maksymalnych głównych naprężeń rozciągających powstałych w wybranej ścianie, przy jej wychyleniu w wyniku działania sił bezwładności powstałych od wymuszenia kinematycznego. Na rysunku 9a widać charakterystyczne ukośne pasy maksymalnych naprężeń głównych w ścianie. Odpowiada to głównemu mechanizmowi zniszczenia ścian murowych poddanych kinematycznym ruchom podstawy fundamentu (por. rysunek 9b).



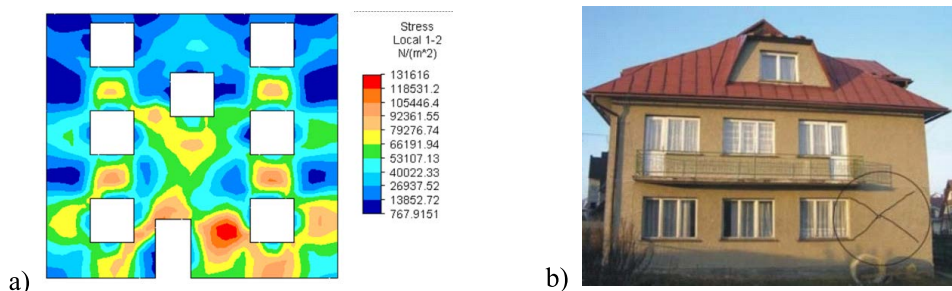
Rys. 9. a) Rozkład maksymalnych naprężeń głównych, b) typowe uszkodzenia obiektów murowanych

Fig. 9. a) Distribution of maximum principal stresses, b) typical damages of masonry buildings

Charakterystyczną cechą rozkładu maksymalnych naprężeń jest fakt, że zawsze maksymalne wartości tych naprężeń koncentrują się w okolicach naroży otworów. Te właśnie miejsca są najbardziej narażone na powstanie zarysowań wywołanych wstrząsem górniczym.

czym. W obliczeniach stwierdzono również przekroczenie granicznych wartości naprężeń rozciągających w kominie (dotyczy modelu 1) dla wartości przyspieszeń drgań powyżej 1200 mm/s^2 oraz w ścianie szczytowej modelu 1, gdzie w wyniku działania sił bezwładności wolnostojąca ściana szczytowa ulega wywróceniu.

Maksymalne wartości naprężeń ścinających powstają zazwyczaj w filarach międzyokiennych (por. rysunek 10a). Powstawanie naprężeń ścinających w filarach międzyokiennych prowadzi do powstania bardzo charakterystycznej postaci zniszczenia tych fragmentów ścian od wymuszeń sejsmicznych i parasejsmicznych. O ile w przypadku wstrząsów górniczych poziom naprężeń powstający w ścianach murowanych jest niewielki (nawet w porównaniu do wartości granicznych naprężeń), co w połączeniu z krótkim czasem trwania intensywnej fazy drgań na ogół nie powoduje powstania uszkodzeń, to w przypadku wstrząsów sejsmicznych taki stan naprężeń powoduje powstanie w filarach międzyokiennych tzw. krzyży św. Andrzeja. Na rysunku 10b przedstawiono powstające w wyniku ścinania filarów międzyokiennych, typowe dla tego typu obciążeń, uszkodzenia. W obliczeniach stwierdzono również obniżenie odporności dynamicznej dla modelu nr 3, o nieregularnym układzie konstrukcyjnym ścian. W tym przypadku na połączeniu zewnętrznej klatki schodowej z bryłą budynku następowało zwiększenie naprężeń ścinających (por. rysunek 11).

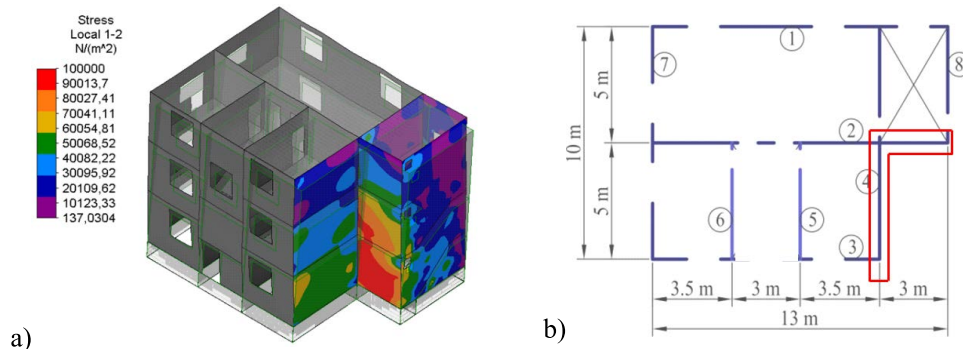


Rys. 10. a) Rozkład naprężeń ścinających, b) krzyż św. Andrzeja (Zembaty i in. 2007)

Fig. 10. a) Distribution of shear stresses, b) cross of Saint Andrew

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pozwoliła określić odporność dynamiczną przedmiotowej zabudowy na wpływy wstrząsów górniczych z wykorzystaniem modeli MES, Metody Spektrum Odpowiedzi i przy użyciu programu komputerowego Autodesk Simulation Mechanical 2017. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że dla przyspieszeń gruntu na poziomie zarejestrowanych zjawisk wysokoenergetycznych $a_p > 1200 \text{ mm/s}^2$ wartości graniczne (w kryterium wytrzymałościowym wartość graniczna głównego naprężenia (rozciągającego) wynosi $0,2 \text{ MPa}$, w kryterium naprężenia ścinającego wartość graniczna wynosi $0,2 \text{ MPa}$, a w przypadku kryterium odkształcenia postaciowego wartość granicznego kąta odkształcenia postaciowego równa się $0,5 \text{ mm/m}$) w przyjętych modelach



Rys. 11. a) Rozkład naprężeń ścinających na połączeniu dwóch brył, b) lokalizacja wraz z układem ścian nośnych

Fig. 11. a) The distribution of shear stress on the combination of two solids, b) location with the distribution of bearing walls

zostały przekroczone. W artykule zwrócono również uwagę na znaczne różnice pomiędzy wartościami prognozowanymi (pierwsza prognoza) i rzeczywiście zarejestrowanymi na powierzchni w analizowanym obszarze – por. tabela 4. Maksymalna wartość stosunku maksymalnej wartości pomierzonego przyspieszenia i prognozowanego wynosiła prawie 25. Należy podkreślić, że dla pełnej analizy przedmiotowej zabudowy należałoby wykonać obliczenia w dziedzinie czasu (metodą historii obciążenia) z wykorzystaniem pełnych zarejestrowanych przebiegów drgań i bardziej wyrafinowanego modelu konstytutywnego opisującego konstrukcję murową. Powyższe wyniki wraz z przedstawioną procedurą obliczeniową skupione na wpływie wstrząsów górniczych na zabudowę powierzchniową mogą być przydatne w kontekście możliwości dalszej eksploatacji pokładów węgla w kolejnych latach, z zachowaniem bezpieczeństwa powszechnego, ochrony obiektów budowlanych, w tym zapobiegania szkodom.

Literatura

- Autodesk Simulation Mechanical 2017.
- Boroń, P. i Dulinska, J. 2016. Dynamic response analysis of multi-storey building to a non-uniform excitation. *Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering* Vol. 107, s. 1–8.
- Ciesielski i in. 1996 – Ciesielski, R., Kowalski, W., Maciąg, E. i Tatar, T. 1996. Spektre odpowiedzi od trzęsień ziemi i wstrząsów górniczych oraz ich zastosowanie. *XLII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB*, Krynica, s. 29–36.
- Czerwionka, L. i Tatar, T. 2007. Wzorcowe spektra odpowiedzi z wybranych obszarów GZW. *Czasopismo Techniczne – seria Budownictwo*, z. 2-B, s. 11–18.
- Drobiec i in. 2000 – Drobiec, Ł., Piekarczyk, A. i Kubica, J. 2000. Wpływ kształtu elementu badawczego oraz kierunku obciążenia na wartość współczynnika Poissona murów z cegły. *XLVI Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB*, Wrocław–Krynica.
- Dubiński i in. 2013 – Dubiński, J., Mutke, G., Tatar, T., Muszyński, L., Barański, A. i Kowal, T. 2013. Zasady stosowania zweryfikowanej Górniczej Skali Intensywności drgań GSI-GZW_{KW} – 2012 do prognozy i oceny

- skutków wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w zakładach górniczych Kompanii Węglowej S.A. na obiekty budowlane i na ludzi. Kompania Węglowa, Katowice (praca niepublikowana).
- Kowalski i in. 1997 – Kowalski, W., Maciąg, E. i Tatar, T. 1997. Wpływ wstrząsów górniczych na budynki i ludzi w nich przebywających. [W:] *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*, Katowice: Wyd. Głównego Instytutu Górnictwa, s. 583–628.
- Kowalska-Koczwar, A. i Stypuła, K. 2017. A comparative analysis of two methods for determining the influence of vibrations on people in buildings. *Technical Transactions*, Y. 114, Vol. 1, s. 53–64, Kraków.
- Kubica i in. 1999 – Kubica, J., Drobiec, L. i Jasiński R. 1999. Badania siecznego modułu sprężystości murów z cegły. *XLV Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB*, Wrocław–Krynica.
- Kuźniar i in. 2006 – Kuźniar, K., Maciąg, E. i Tatar, T. 2006. Acceleration response spectra from mining tremors. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC)*, Geneva, Switzerland, 3–8 September 2006, Paper Number: 665.
- Kuźniar i in. 2010 – Kuźniar, K., Maciąg, E. i Tatar, T. 2010. Prognozowanie spektrów odpowiedzi drgań fundamentów budynków od wstrząsów górniczych z zastosowaniem sieci neuronowych. *Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko*, Kwartalnik nr 4/4, Katowice: GIG, s. 50–64.
- Lipiński, J. 1985. Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny. Arkady, Warszawa.
- Murzyn, I. i Dulinska, J. 2016. The dynamic response of an arch footbridge to selected types of dynamic loading. *Technical Transactions*, Iss. 3-B, s. 1–8, Kraków.
- Pachla, F. 2011. *Analiza metod oceny wpływu wstrząsów górniczych na budynki murowe na przykładzie LGOM*. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków.
- PN-B-02170:2016-12 „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki”.
- PN-B-03002:2007 „Konstrukcje murowe – Projektowanie i obliczanie”.
- PN-B-03264:2002 „Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie”.
- PN-B-03150:2000 „Konstrukcje drewniane – Obliczenia statyczne i projektowanie”.
- PN-80/B-3040 „Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny”.
- Tatar, T. 2002. Działanie drgań powierzchniowych wywołanych wstrząsami górniczymi na niską tradycyjną zabudowę mieszkalną. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej*, seria „Inżynieria Lądowa” nr 74, Kraków.
- Tatar, T. i Pachla, F. 2012. Uszkodzenia w obiektach budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych. *Przegląd Górniczy* nr 7(1076), s. 1–10.
- Tatar, T. 2012. *Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych*. Politechnika Krakowska, Kraków.
- Zembaty i in. 2007 – Zembaty, Z., Jankowski, R., Cholewicki, A. i Szulc, J. 2007. Trzęsienie ziemi w Polsce w 2004 roku. *Czasopismo techniczne*, Kraków.