

OCHRONA BUDYNKÓW MUROWYCH NA TERENIE GÓRNICZYM. PORÓWNANIE ANALIZ KLASYCZNYCH I WSPÓŁCZESNYCH

Jan Fedorowicz^{1a}, Magdalena Mrozek^{1b}, Dawid Mrozek^{1c}

¹*Katedra Torii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska*

^a*Jan.Fedorowicz@polsl.pl*, ^b*Magdalena.Mrozek@polsl.pl*, ^c*Dawid.Mrozek@polsl.pl*

Streszczenie

W pracy omówiono zasady ochrony istniejącej zabudowy terenu górniczego nieprzystosowanej do przenoszenia wpływów eksploatacji górniczej. Syntetycznie omówiono skutki eksploatacji ujawniające się na powierzchni terenu, a także zasady postępowania oraz metodykę przeprowadzania analizy statycznej budynków o konstrukcji ścianej. Zaprezentowano także wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych zachowania budowli poddanych oddziaływaniom pochodzenia górniczego w warunkach zmian geometrii budynku w wyniku podziału jego bryły przez wprowadzenie dylatacji. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych z wykorzystaniem sprężysto-plastycznego modelu materiału z degradacją. Jako tło analiz pracy statycznej podano wyniki obliczeń sił wewnętrznych w budynku uzyskane klasyczną metodą inżynierską – metodą Budzianowskiego.

Słowa kluczowe: ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych, analizy numeryczne, modele nieliniowe z degradacją

THE PROTECTION OF MASONRY BUILDINGS IN A MINING AREA. COMPARISON OF MODERN AND CLASSICAL ANALYSIS

Summary

In the paper, the principles of existing buildings protection in a mining area, which are not adapted to carry influences of mining, are described. The effects of mining on a subsoil surface are presented, moreover the rules of procedure and methodology for the static analysis of wall structures located within the active mining area and the methodology and capabilities for proceeding with static analysis, which using the Finite Element Method, are also briefly discussed. The paper includes also the results of numerical behaviour analysis of building subjected to mining impacts in conditions of building geometry changes by structure dividing by dilatations. Calculations were carried out by finite element method with using the linear-plastic material model with stiffness degradation. Results of static analysis were obtained from classical engineering method – the method of Budzianowski.

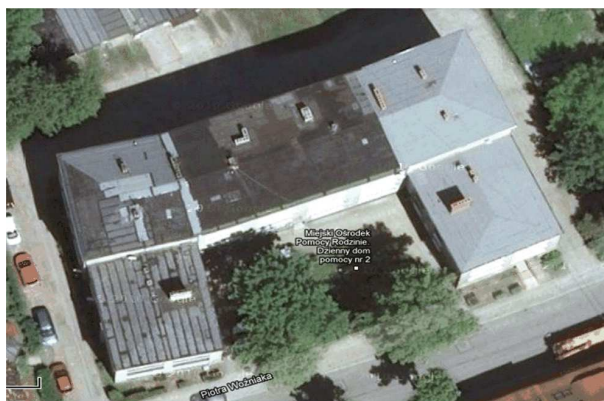
Keywords: Protection of buildings in a mining area, numerical analysis, models of inelastic material degradation

1. WPROWADZENIE

Skutki działalności górniczej ujawniające się na powierzchni terenu w znacznej mierze zależne są od uwarunkowań geologicznych. Wtórny efekt działalności górniczej są zmiany warunków gruntowo-wodnych, które w połączeniu z odwodnieniem górotworu mogą wywołać na powierzchni dodatkowe „nieckowe” obniżenia powierzchni terenu. Przy odpowiednio niekorzystnych

uwarunkowaniach geologicznych (np. w przypadku, gdy złożę eksploatacyjne występuje w spągu zwięzłych, sztywnych skał, a powyżej i poniżej zalegają skały słabe) eksploatacja może być przyczyną gwałtownych przemieszczeń mas skalnych, objawiających się w postaci wstrząsów górniczych mających charakter słabych, lokalnych trzęsień ziemi.

Rozwój i upowszechnienie komputeryzacji umożliwiła obecnie przeprowadzenie obliczeń przy wykorzystaniu metod bardziej zaawansowanych w odniesieniu do klasycznych, inżynierskich metod analizy [5], co pozwala na prześledzenie pracy konstrukcji poddanej wpływom eksploatacji górniczej w sposób całościowy. Takie globalne podejście do problemu charakteryzuje się jednak uwzględnieniem wpływu szeregu różnych czynników niemożliwych do przeanalizowania w projektowaniu tradycyjnym. Charakter pracy ze współczesnymi środkami obliczeniowymi wymaga jednak od inżyniera umiejętności modelowania badanego obiektu, tj. budowli, podłoża lub obu tych elementów łącznie, w sposób bez porównania bogatszy aniżeli przy stosowaniu tradycyjnych metod obliczeniowych. Analizie poddano budynek wielorodzinny 3,4-kondygnacyjny o konstrukcji murowej w całości podpiwniczony. Rzut budynku (rys. 1) zbliżony jest w kształcie do litery C i nie został zabezpieczony przed wpływami eksploatacji górniczej. Celem analizy jest określenie możliwości przejścia przez konstrukcję obiektu dodatkowych obciążeń oraz możliwości zabezpieczenia go na te oddziaływania.



Rys. 1. Widok analizowanego budynku z lotu ptaka

2. STAN KONSTRUKCJI ORAZ WARUNKI GEOLOGICZNO-GÓRNICZE

Przedmiotem analizy jest konstrukcja nośna wolno stojącego budynku trzyklatkowego o zewnętrznych wymiarach pokazanych na rys. 9. Fundamenty wykonane są z cegły pełnej o szerokości 64-104 cm. Ściany nośne pierwszych dwóch kondygnacji o grubości 51 cm, na wyższych kondygnacjach o grubości 38cm. Strop nad kondygnacją piwniczną gęstożebrowy, pozostałe stropy drewniane. Nadproża okienne i drzwiowe wykonane jako żelbetowe prefabrykowane.

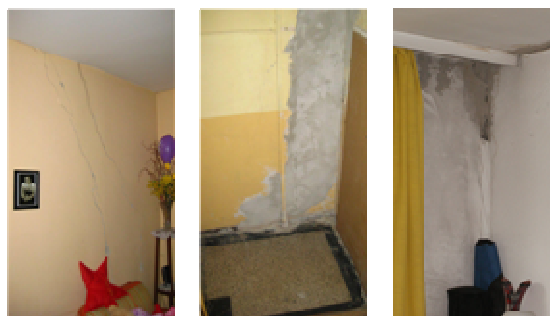
W opinii geologiczno-górnicy stwierdzono, że podstawowe wskaźniki charakteryzujące prognozowaną deformację powierzchni terenu w przypadku eksploatacji dokonanej i bieżącej w rejonie posadowienia analizowanego budynku wynoszą $w_{max}=2.9$ mm/m, $T=2.6$ mm/m i $R_{min}=-27.0$ km $w=260$ mm. Zakończenie prowadzonej aktualnie eksploatacji planowane jest w 2017 roku.

Równocześnie w opinii podano, że dla eksploatacji projektowanej na lata 2020-2040 najbardziej prawdopodobne sumaryczne wpływy eksploatacji charakteryzowane będą wskaźnikami wynoszącymi odpowiednio $w_{max}=1.4$ mm/m, $T=3.3$ mm/m, $R_{min}=41$ km $w=933$ mm, mieszczą się one w II kategorii terenu górniczego.. Dodatkowo na analizowanym obszarze odnotowywano wstrząsy o przyspieszeniu do 700 mm/s². Sytuację geologiczno-górnicy w tym rejonie komplikuje fakt, że w odległości ok. 20 m na wschód od obiektu (w zasięgu prowadzonej i planowanej eksploatacji) na głębokości ok. 80 m zlokalizowano stare, niezlikwidowane wyrobiska po eksploatacji rud cynku i ołowiu.

Szczegółowe oględziny obiektu pozwoliły na oszacowanie jego stanu technicznego. Stwierdzono, że z uwagi na wiek budynku (lata 20. XX w.) i jego dotychczasowe znaczne uszkodzenia spowodowane wpływami eksploatacji, stan techniczny budynku jest zły. Wystąpiły znaczne uszkodzenia ścian nośnych, głównie w strefie styku części budynku o różnej wysokości. Uszkodzenia te mają charakter naturalnej dylatacji poszczególnych części obiektu. Przykładowe uszkodzenia ściany zewnętrznej zostały zobrazowane na rys. 2. Rys. 3 i rys. 4. pokazują zakres i zasięg uszkodzeń nośnej ściany wewnętrznej oraz klatki schodowej budynku. Równocześnie dokonane przez rzeczoznawcę na zlecenie zarządcy oszacowanie wartości obiektu wskazało na opłacalność przeprowadzenia remontu kapitalnego budynku. Stanowiło to podstawę decyzji zarządcy o przeprowadzeniu pełnego zabezpieczenia obiektu na wpływy górnicze.



Rys. 2. Uszkodzenia ściany zewnętrznej



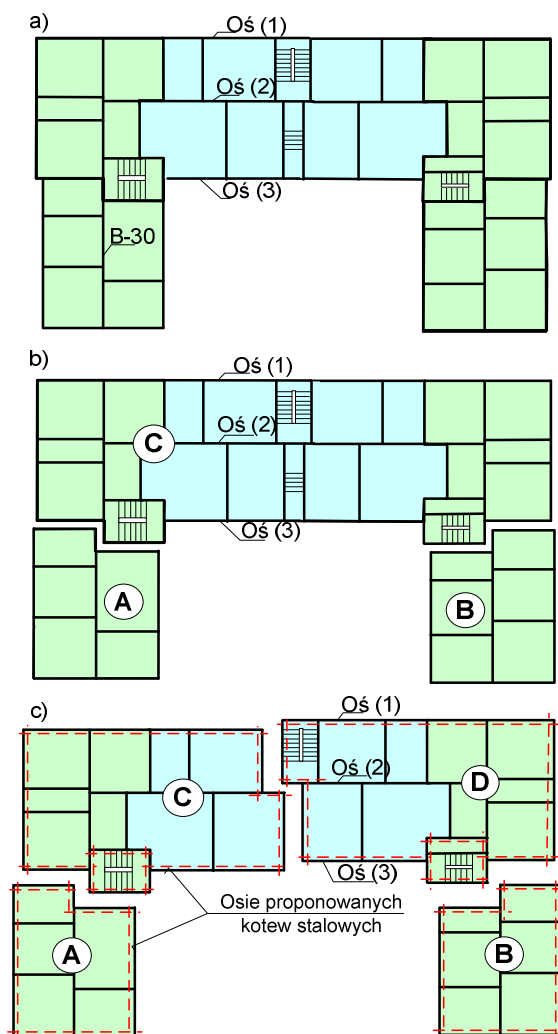
Rys. 3. Uszkodzenia ściany wewnętrznej



Rys. 4. Uszkodzenia klatki schodowej

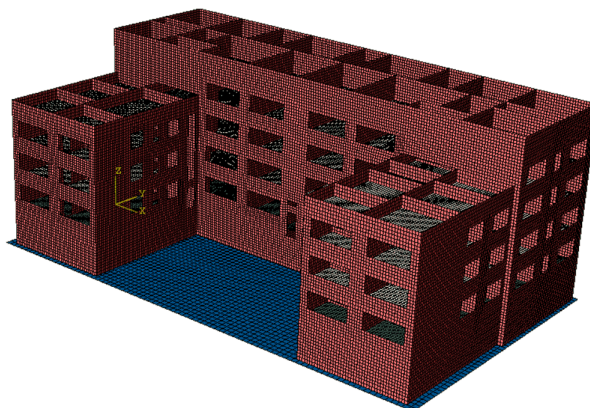
3. ANALIZA NUMERYCZNA BUDYNKU

Analizę statycznej pracy konstrukcji budynku przeprowadzono dwoma metodami: (A) klasyczną – metodą Budzianowskiego [2, 3, 4] z uwzględnieniem wpływów krzywizny podłoża i wg wytycznych [1,5] w odniesieniu do wpływów poziomego rozluźnienia podłoża oraz (B) numeryczną metodą MES wykonaną na modelu przestrzennym [6, 7, 10, 11, 12]. Metodą elementów skończonych obliczenia przeprowadzono trzykrotnie. Analizowano konstrukcję w całości w stanie aktualnie istniejącym (schemat układu ścian uwzględnionych w analizie pokazano na rys. 5a – model (I)) oraz konstrukcję budynku podzieloną dylatacjami na trzy części (schemat układu ścian uwzględnionych w analizie pokazano na rys. 5b – model (II)) i przy pełnym zabezpieczeniu konstrukcji po wykonaniu podziału na cztery części (schemat układu ścian uwzględnionych w analizie pokazano na rys. 5c – model (III)). Jako uzupełnienie pełnego zabezpieczenia budynku przewidziano jego wzmocnienie stalowymi kotwami założonymi na poziomie stropu pierwszej i ostatniej kondygnacji oraz założenie obwodowych opasek żelbetowych na poziomie posadowienia budynku. Położenie i przebieg tego zabezpieczenia schematycznie pokazano na rys. 5c – linie przerywane.



Rys. 5. Schematy układu ścian budynku przyjętych w obliczeniach: a) całego budynku, b) budynku po wprowadzeniu dwóch dylatacji, c) budynku po wprowadzeniu trzech dylatacji.

W zbudowanych w programie ABAQUS trzech modelach obliczeniowe MES odpowiadające rzutom poziomym z rys. 5 podział na czworokątne powłokowe elementy skończone o wymiarze boku ok. 0.1 m we wszystkich przypadkach jest jednakowy i pokazany na rys. 6. Podłoże odwzorowano układem sprężystych więzów o cechach podłoża winklerowskiego [3, 8, 9].



Rys. 6. Model (I) z podziałem na elementy skończone

Murowe elementy konstrukcyjne opisane zostały plastyczno-degradacyjnym modelem materiałowym, zwanym Barcelona Model (w skrócie *BM*). Model ten został opracowany z myślą o betonie przez J. Lubliner, a następnie zmodyfikowany przez J. Lee. Adaptację modelu na potrzeby konstrukcji murowych zaproponował A. Cińcio [10].

Zastosowany model materiałowy łączy w sobie charakterystykę przyrostowej teorii plastyczności z kontynualną mechaniką zniszczenia. Takie sprzężenie możliwe jest dzięki wprowadzeniu naprężeń efektywnych do równań przyrostowej teorii plastyczności. Umożliwia to analizę nie tylko odkształceń plastycznych, ale również postępującą wraz z obciążeniem degradację materiału obserwowaną w obliczeniach w postaci zmniejszania się wartości modułu sprężystości. *BM* stanowi rozszerzony model Druckera-Pragera, o niekołowym przekroju dwiatorowym powierzchni plastyczności oraz niestowarzyszonym prawie płynięcia i wzmocnieniu izotropowym typu dwumechanizmowego (dwie zmienne wzmocnienia – osobno w przypadku ściskania i rozciągania). Za degradację materiału w *BM* odpowiedzialne są dwie niezależne zmienne degradacji: d_t (rozciąganie) oraz d_c (ściskanie). Zmienne te narastają monotonicznie z przedziału wartości $\langle 0,1 \rangle$, wartość zero oznacza brak degradacji, natomiast maksymalna wartość, jaką jest 1, odpowiada całkowitemu zniszczeniu materiału.

Wszystkie trzy modele poddano obciążeniu statycznemu wynikającemu z ciężaru własnego i użytkowego, a także wpływom wynikającym z prognozowanej eksploatacji górniczej.

3.1 WYBRANE WYNIKI ANALIZY STATYCZNEJ

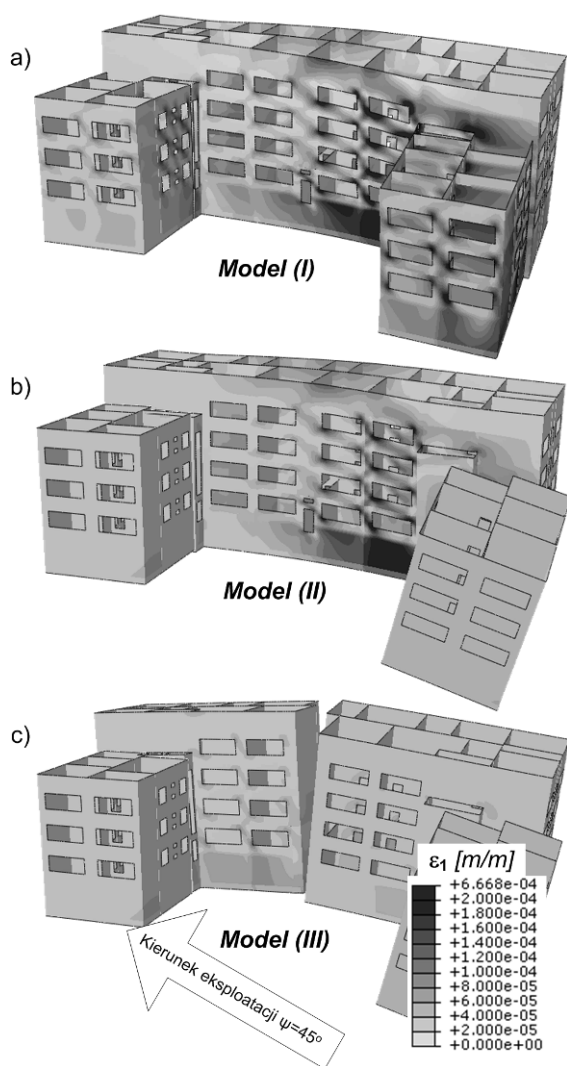
Przeprowadzono analizę statyczną modeli numerycznych budynków w zależności od kąta nachylenia kierunku eksploatacji (ψ) względem osi podłużnej obiektu (rys. 9). Przyjęto obciążenie pochodzenia górniczego wynikające z przejścia niecki obniżeń o parametrach ($R=12$ km) odpowiadających poziomowi granicy II i III kategorii terenu górniczego. Na tym poziomie analizy przyjęto liniowo-sprężystą zależność pracy materiału konstrukcyjnego, aby możliwa była globalna ocena konstrukcji pod względem ilościowym. Analizę słuszności wprowadzenia podziału obiektu na części (rys. 5) wykonano, porównując rozwiązania modeli (I), (II) i (III) oraz przyjmując rozwiązanie modelu (I) porównawcze. W odniesieniu do tego rozwiązania zestawiono w tab 1 ekstremalne wartości i udziały normalnych naprężeń poziomych σ_{11} , naprężeń stycznych σ_{12} oraz odkształceń głównych ϵ_I i postaciowych ϵ_{I2} .

Wyniki przeprowadzonych analiz pozwalają uznać za zasadne proponowane rozwiązanie w postaci zastosowania dylatacji zgodnie z Rys. 5. Biorąc pod uwagę kryterium naprężeniowe i odkształceniowe, ogólnie wartości

wyćżenia konstrukcji w tym przypadku poddanej zginaniu zmniejszają się co najmniej o 70% w porównaniu do wyćżenia konstrukcji bez dylatacji. Stosunkowo duży spadek wyćżenia konstrukcji obserwuje się przy wprowadzeniu przerw dylatacyjnych w przypadku prowadzenia eksploatacji na kierunku ukośnym względem osi podłużnej budynku.

Tab. 1. Zestawienie wybranych wyników obliczeń numerycznych MES budynku

Zginanie podłużne, R=12km, =0°							
Model	σ_{11} [kPa]	udział [%]	σ_{12} [kPa]	udział [%]	ϵ_I [‰]	udział [%]	ϵ_{I2} [‰]
(I)	685	100	486	100	0.419	100	0.555
(II)	622	91	412	85	0.390	93	0.471
(III)	163	24	128	26	0.101	24	0.147
Zginanie poprzeczne, R=12km, =90°							
(I)	255	100	126	100	0.16	100	0.144
(II)	37	30	43	34	0.053	33	0.049
(III)	33	27	40	32	0.050	31	0.046
Zginanie ukośne, R=12km, =45°							
(I)	851	100	546	100	0.666	100	0.624
(II)	593	70	379	69	0.313	47	0.434
(III)	155	18	106	19	0.104	16	0.121

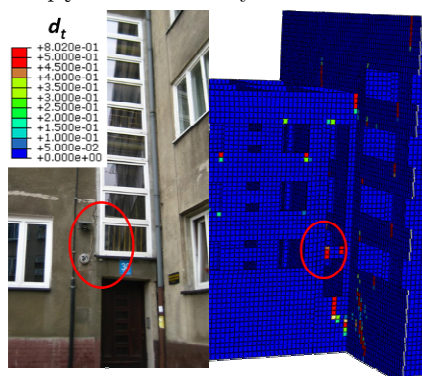


Rys. 7. Mapy rozkładu odkształceń głównych w przypadku zginania ukośnego $R=12$ km:
 a) całego budynku – model (I),
 b) budynku po wprowadzeniu dwóch dylatacji – model (II),
 c) budynku po wprowadzeniu trzech dylatacji – model (III).

Uzyskane w analizach statycznych rozwiązania porównano również pod względem jakościowym, poszukując możliwych miejsc powstania największego wyężenia wywołanego wpływami górnictwymi. Jednym z kryteriów było porównanie rozkładu odkształceń głównych powodujących rozciąganie w części konstrukcji murowej. Na rys. 7 zestawiono rozkłady odkształceń ϵ_1 trzech modeli przy planowanym kierunku eksploatacji prowadzonym ukośnie względem osi podłużnej obiektu. Stan odkształceń został tak przedstawiony, aby wartości większe od $\epsilon_1=0,2$ mm/m oznaczony były kolorem czarnym, natomiast kolor jasny to wartości bliskie zeru. Taka prezentacja wyników umożliwia czytelne zlokalizowanie miejsc, w których wystąpią wartości większe od granicznych (modele (I) i (II) na rys. 7.). Na uwagę zasługuje fakt braku wartości odkształceń poziomych większych od 0,2 mm/m w modelu z trzema przerwami dylatacyjnymi na rys. 7c. Oznacza to, że rozwiązanie takie powinno zwiększyć odporność obiektu na wpływy ciągłej defor-

macji terenu podczas przewidywanej podziemnej eksploatacji górnictwowej.

W pracy, wykorzystując model (I), przeprowadzono także analizę statyczną z uwzględnieniem sprężysto-plastyczno-degradacyjnego modelu pracy materiału konstrukcji murowej. Na rys. 8 pokazano przykładowy rozkład zmiennej degradacji przy rozciąganiu w elementach murowych konstrukcji. Miejsca prawdopodobnej degradacji muru pokrywają się z tymi obserwowanymi spękaniami w rzeczywistości.

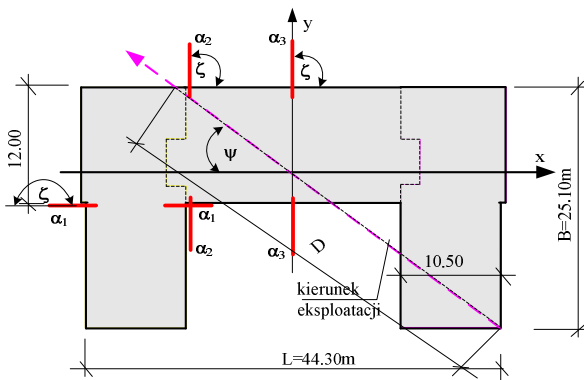


Rys. 8. Rozkład zmiennej degradacji przy rozciąganiu w elementach murowych porównany z istniejącymi uszkodzeniami analizowanego obiektu

4. METODA BUDZIANOWSKIEGO - ZGINANIE BUDYNKU

Jako tło przeprowadzonej analizy numerycznej wykonano obliczenia sił wewnętrznych w budynku bez dylatacji (model (I)), stosując klasyczną inżynierską metodę Budzianowskiego w przypadku jego zginania oraz sposób podawany przez wytyczne [1, 9] w przypadku wpływu poziomego odkształcenia budynku. W tym celu określono wg [9] współczynnik pionowej podatności podłoża C_o , a następnie wykorzystano wzory metody Budzianowskiego [4] określające wartości sił wewnętrznych w przekrojach pokazanych na rys. 9 w odniesieniu do trzech kątów nachylenia kierunku eksploatacji. Obliczono kolejno:

- Q_1^* - wartość uogólnionej siły poprzecznej w konstrukcji sztywnej,
- $M_{z_{g,1}}^*$ - wartość momentu zginającego w konstrukcji sztywnej,
- $M_{s,1}^*$ - wartość momentu skręcającego w konstrukcji sztywnej,
- $R_{gr,2}$ - wartości granicznego promienia krzywizny,



Rys. 9. Schemat rzutu poziomego budynku

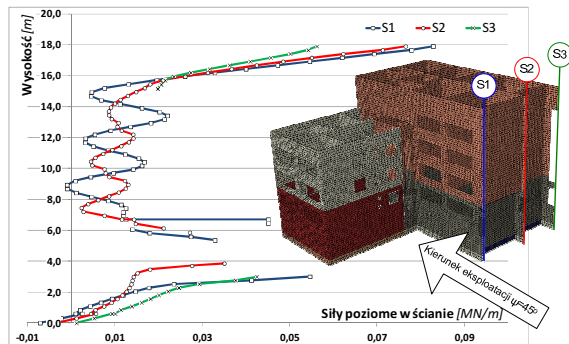
W każdym z przypadków wyznaczono wartości graniczne promienia krzywizny, które posłużyły do otrzymania wartości uogólnionych sił wewnętrznych przy $R_{max}=12$ km w wybranych trzech przekrojach pokazanych na rys. 9. Wyniki te zestawiono w tab.2.

Tab. 2. Wartości sił wewnętrznych w budynku odkształcalnym wyznaczone metodą Budzianowskiego w przekrojach pokazanych na rys. 9. w zależności od kierunku eksploatacji górniczej

kąt	Siła wewnętrzna	przekrój-1	przekrój-2	przekrój-3
90°	Q [MN]	0.36	0.08	0.00
	M_{zg} [MN m]	26.63	47.71	93.61
	M_{sk} [MN m]	29.17	13.96	77.66
0°	Q [MN]	2.05	4.69	0.00
	M_{zg} [MN m]	61.12	472.03	659.12
	M_{sk} [MN m]	132.72	1.89	44.68
45°	Q [MN]	4.24	2.26	0.29
	M_{zg} [MN m]	91.92	232.01	354.31
	M_{sk} [MN m]	103.12	98.84	185.35

5. PORÓWNANIE ANALIZ

Uzyskane rezultaty analiz numerycznych i analitycznych (inżynierskich) dotyczące wartości sił wewnętrznych wynikających z oddziaływania krzywizną terenu na obiekt stały się podstawą do przeprowadzenia porównania.



Rys. 10. Rozkład sił poziomych w ścianach podłużnych przy kierunku eksploatacji $\psi=45^\circ$ i promieniu $R=12$ km

Spśród wszystkich rozwiązań numerycznych do zestawienia z wynikami zadania inżynierskiego wybrano analizę wartości sił poziomych (rys. 10) i momentów w

ścianach podłużnych przekroju α_3 na rys. 9 przy kierunku eksploatacji równym $\psi=45^\circ$.

Analizując sumę wartości sił poziomych w przekroju α_3 modelu (I), stwierdzono oczekiwaną równowagę z wartością wymuszenia powodowanego symulowaną niecką obniżen $R=12$ km. Natomiast wartości momentów zginających z rozwiązania numerycznego w tym przekroju są o ok. 50% mniejsze w porównaniu do wartości uzyskanych z analizy inżynierskiej. Sugeruje to, że określony poziom odporności obiektu na podstawie rozwiązania inżynierskiego będzie niższy niż na podstawie wyników analizy numerycznej. Inżynierska ocena nośności ścian podłużnych pracujących na rozciąganie powodowane odkształceniem poziomym podłoża wskazuje, że nawet w przypadku wpływów o intensywności zakresu I kategorii terenu górnicy analizowana nośność ścian będzie przekroczona.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że podstawowym problemem staje się w tym przypadku wierne odzwierciedlenie warunków gruntowych, które zawsze determinować będą wynik analizy numerycznej. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że przyjęcie jako podstawę oceny odporności obiektu rozwiązania inżynierskiego skutkuje oceną po stronie bezpiecznej, lecz nie zawsze ekonomicznej.

6. PODSUMOWANIE

Eksploatacja węgla kamiennego często jest prowadzona na obszarach, gdzie występują obiekty budowlane niezabezpieczone w ogóle lub zabezpieczone niedostatecznie na dodatkowe wpływy pochodzenia górnicy. Klasyczne metody oceny skutków eksploatacji w budynku oraz ich wyteżenia są czasochłonne, a uzyskane wyniki mogą być zaniżone [2]. Rozwiązania wykorzystujące metody komputerowe w budownictwie powodują skrócenie czasu trwania obliczeń i umożliwiają analizę złożonych przypadków konstrukcyjnych. Pozwalają również na uwzględnienie większej liczby cech fizycznych materiałów i konstrukcji wpływających na jej nośność [10-12]. Problemem w tym przypadku staje się wierne odzwierciedlenie warunków geologiczno-górnicy oraz właściwa interpretacja uzyskanych wyników.

Zamieszczone w pracy wyniki analiz budynku mieszkalnego były podstawą do podjęcia decyzji o sposobie zabezpieczenia obiektu na wpływy górnicy. Przyjęto jako optymalne rozwiązanie zastosowanie podziału budynku na cztery części, które z założenia nie mogło naruszać własności mieszkańców. Każda z wydzielonych części zawierać powinna elementy zabezpieczające w postaci stalowych kotew założonych na poziomie stropu pierwszej i ostatniej kondygnacji oraz obwodowych opasek żelbetowych na poziomie posadowienia budynku. Ostatecznie przyjęto, że analizowany budynek po wprowadzeniu zabezpieczeń będzie w stanie bezpiecznie przenieść oddziaływania wynikające z II kategorii terenu górnicy.

Obliczenia numeryczne wykonano w Akademickim Centrum Komputerowym AGH-Cyfronet na podstawie przyznanych grantów obliczeniowych nr MNiSW/Sun6800/ PŚląska/083/2007, MNiSW/SGI3700/PŚląska/083/2007, a także MNiSW/Sun6800 /PŚląska/084/2007, MNiSW/SGI3700/PŚląska/084/2007.

Literatura

1. Instrukcja 364/2000: Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej, 2000.
2. Fedorowicz L., Fedorowicz J.: Metody oceny wytrzymałości budowli na terenach górniczych. Gliwice: Pol.Śl., 2000. ZN Pol. Śl. s. „Górnictwo”, z. 246.
3. Ochrona powierzchni przed uszkodzeniami górniczymi. Pr. zbior. Katowice: Wyd. Śląsk, 1980.
4. Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Pr. zbior. Katowice: Wyd. GIG, 1997.
5. Instrukcje, Wytyczne, Poradnik 416/2006: projektowanie budynków na terenach górniczych. Warszawa: Wyd. ITB, 2006.
6. Fedorowicz J.: Zagadnienie kontaktowe budowla – podłoże gruntowe. Część II : Kryteria tworzenia i oceny modeli obliczeniowych układów konstrukcja budowlana – podłoże górnicze. Gliwice: Pol. Śl., 2008. ZN Pol. Śl. s. „Budownictwo” nr 1805, z. 114.
7. Majewski S.: Sprężysto-plastyczny model współpracującego układu budynek-podłoże poddanego wpływowi górniczych deformacji terenu. Gliwice: Pol. Śl., 1995. ZN Pol. Śl. s. „Budownictwo” z. 79.
8. Fedorowicz L., Fedorowicz J.: Komputerowe modele przestrzennych układów ścianowych na wyginającym się podłożu górniczym. W: Materiały II seminarium "Budownictwo na Terenach Górniczych". Kamień k. Rybnika, maj, 1991.
9. Fedorowicz L.: Zagadnienia kontaktowe budowla – podłoże gruntowe. Część I : Kryteria modelowania i analiz podstawowych zagadnień kontaktowych konstrukcja budowlana – podłoże gruntowe. Gliwice: Pol. Śl., 2006. ZN Pol. Śl. s. „Budownictwo” nr 1729, z. 107.
10. Cińcio A.: Numeryczna analiza dynamicznej odporności niskiej zabudowy na wstrząsy parasejsmiczne z zastosowaniem przestrzennych modeli wybranych obiektów. Rozprawa doktorska. Gliwice: Pol. Śl., 2004.
11. Mrozek M.: Numeryczna symulacja wzmacniania matami CFRP konstrukcji murowych z cegły. Rozprawa doktorska. Gliwice: Pol. Śl., 2012.
12. Mrozek D.: Nieliniowa analiza numeryczna dynamicznej odpowiedzi uszkodzonych budynków. Rozprawa doktorska. Gliwice: Pol. Śl., 2010.