

dr inż. Maciej Zajac^{1)*}

ORCID: 0000-0003-4598-0746

prof. dr hab. inż. Krystyna Kuźniar¹⁾

ORCID: 0000-0003-4617-9117

prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatała²⁾

ORCID: 0000-0002-4071-2358

Numerical analysis of the dynamic properties of the building according to the material of the load-bearing walls

Analiza numeryczna właściwości dynamicznych budynku z uwagi na materiał ścian nośnych

DOI: 10.15199/33.2025.06.01

Abstract. The article addresses an important, insufficiently explored in the literature, problem of dynamic properties of building structures in the context of the influence of the building materials used. Results of a numerical assessment of the impact of load-bearing wall construction material on the frequencies and corresponding mode shapes of natural vibrations of a representative low-rise administrative building are presented. Several construction materials for load-bearing walls were considered, and then, using the finite element method (FEM), three-dimensional (3D) numerical models of the building with different material variants for load-bearing walls were analysed. The influence of the properties of load-bearing wall materials on the frequencies and corresponding mode shapes of vibrations was found.

Keywords: material of building load-bearing wall; numerical 3D model; natural vibration frequency; natural mode shape.

Streszczenie. W artykule poruszono ważny, niewystarczająco w literaturze rozeznany, problem dotyczący właściwości dynamicznych konstrukcji budowlanej w kontekście wpływu zastosowanych materiałów budowlanych. Przedstawiono wyniki numerycznej oceny wpływu materiału konstrukcyjnego ścian nośnych na częstotliwości i odpowiadające im formy drgań własnych reprezentatywnego, niskiego budynku administracyjnego. Wytypowano kilka materiałów budowlanych ścian nośnych, a następnie analizowano, z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), trójwymiarowe modele numeryczne (3D) tego budynku z wybranymi wariantami materiałowymi ścian. Stwierdzono wpływ właściwości materiału ścian nośnych na częstotliwość i odpowiadające jej postacie drgań.

Słowa kluczowe: materiał ściany nośnej budynku; numeryczny model 3D; częstotliwość drgań własnych; formy drgań własnych.

The dynamic analysis of a building structure should consider the natural frequencies and modes of vibration, as well as damping, because these dynamic properties significantly influence the structure's dynamic response to external actions, such as seismic events. The parameters describing dynamic properties can be determined using the Finite Element Method (FEM), a widely used approach in engineering analyses. To determine the dynamic properties of a structure (natural frequencies and modes of vibration), it is necessary to solve the so-called eigenvalue problem. For this purpose, methods such as the Lanczos method [1] for large matrices, the Rayleigh-Ritz variational method [2] for fundamental frequencies, and the Wilson method [3] for nonlinearities are used. Additionally, the Modal Assurance Criterion (MAC) method is employed in modal analysis to assess the agreement between experimental and theoretical mode shapes. This tool is crucial for validating numerical analysis results with measurement data [4].

Analiza dynamiczna konstrukcji budowlanej powinna uwzględniać częstotliwości i formy drgań własnych oraz tłumienie ze względu na to, że właściwości dynamiczne mają istotny wpływ na odpowiedź dynamiczną obiektu na oddziaływania np. typu sejsmicznego. Parametry opisujące właściwości dynamiczne można określić za pomocą metody elementów skończonych (MES), powszechnie stosowanej w analizach zagadnień inżynierskich. Do wyznaczenia właściwości dynamicznych konstrukcji (częstotliwości i postaci drgań własnych) potrzebne jest rozwiązanie tzw. problemu własnego. W tym celu stosuje się np. metodę Lanczosa [1] w przypadku dużych macierzy, metodę wariacyjną Rayleigha-Ritza przy częstotliwości podstawowej [2] oraz metodę Wilsona w przypadku nieliniowości [3]. Z kolei metoda MAC (*Modal Assurance Criterion*) jest stosowana w analizie modalnej do oceny zgodności między eksperymentalnymi a teoretycznymi kształtami form drgań własnych. Narzędzie to jest kluczowe przy weryfikacji wyników analizy numerycznej za pomocą danych pomiarowych [4].

Czynniki wpływające na częstotliwość drgań własnych obejmują konstrukcję budynku, materiały, warunki grunto-we i wodne [5] oraz interakcję pomiędzy fundamentem bu-

¹⁾ University of the National Education Commission, Institute of Technology

²⁾ Cracow University of Technology, Faculty of Civil Engineering

^{*)} Correspondence address: maciej.zajac@uken.krakow.pl

Factors influencing the natural frequencies of vibration include the building's structure, materials, soil and water conditions [5], and the interaction between the building's foundation and the ground [6]. Load-bearing walls, especially in seismic zones, play a significant role in the building's dynamic response. There are few studies presenting results focused on the relationship between a building's dynamic characteristics and the materials used for its load-bearing walls. This gap justifies the need for further research.

In this study, the impact of load-bearing wall materials on the natural frequencies and modes of vibration of buildings was examined using three-dimensional (3D) FEM models. Seven variants of load-bearing wall materials were analysed, proposing and verifying various approaches to 3D modelling with FEM. The study focuses on comparing the numerically determined dynamic properties of buildings with identical structures but featuring load-bearing walls made of different contemporary materials.

Applied construction materials

The article considers selected building materials for load-bearing walls, including:

- **A** – reinforced concrete;
- **B** – high-strength lightweight concrete reinforced with palm shell fibres;
- **C** – cellular concrete, known for its mechanical properties, thermal insulation, and sound absorption;
- **D** – brick, a durable and versatile material;
- **E, F, G** – sand-lime bricks, characterised by low construction costs and environmental friendliness.

The parameters of the analysed materials were selected based on established standards and literature [7 ÷ 11] and are summarised in Table 1.

In practice, the choice of building material depends on various factors, including the type of building, climatic conditions [12, 13], the presence of groundwater [14], and seismic activity [15]. For example, cellular concrete and sand-lime bricks are ideal for buildings designed to withstand static loads and wind gusts, but they should not be used in areas with shallow groundwater or chemical contamination [16]. Masonry buildings provide good thermal insulation but are not suitable for seismic zones [12]. Reinforced concrete is preferred for constructing industrial structures [17].

dynku a gruntem [6]. Ściany nośne, szczególnie w strefach sejsmicznych, odgrywają dużą rolę w odpowiedzi dynamicznej budynku. Niewiele jest prac przedstawiających wyniki badań koncentrujących się na zależnościach charakterystyk dynamicznych budynku od materiału, z którego wykonane są jego ściany nośne. Ta luka uzasadnia potrzebę dalszych badań.

W artykule zbadano, za pomocą trójwymiarowych modeli (3D) MES, wpływ materiałów ścian nośnych na częstotliwość i postacie drgań własnych budynków. Przeanalizowano siedem wariantów materiałów ścian nośnych, proponując i weryfikując różne podejście do modelowania 3D za pomocą MES. Praca skupiała się na porównaniu wyznaczonych numerycznie właściwości dynamicznych budynków o tej samej konstrukcji, ale o ścianach nośnych wykonanych z różnych, współcześnie stosowanych materiałów.

Zastosowane materiały konstrukcyjne

W artykule wzięto pod uwagę wybrane materiały budowlane stosowane na ściany nośne, w tym:

- **A** – żelbet;
- **B** – wysokowytrzymały lekki beton zbrojony włóknami z łupin palmowych;
- **C** – beton komórkowy, znany ze swoich właściwości mechanicznych izolacji termicznej i dźwiękochłonności;
- **D** – cegłę, trwałą i wszechstronny materiał;
- **E, F, G** – cegły wapienno-piaskowe, które wpływają na niewielki koszt budowy i są przyjazne dla środowiska.

Parametry analizowanych materiałów przyjęto na podstawie norm oraz literatury [7 ÷ 11] i zestawiono w tabeli 1.

W praktyce wybór materiału budowlanego zależy od różnych czynników, w tym rodzaju budynku, warunków klimatycznych [12, 13], obecności wód gruntowych [14] i aktywności sejsmicznej [15], np. beton komórkowy i cegły wapienno-piaskowe są idealne w przypadku budynków zaprojektowanych do przenoszenia obciążeń statycznych i podmuchów wiatru, ale nie powinno się ich stosować w obszarach z płytko zalegającymi wodami gruntowymi lub zanieczyszczeniami chemicznymi [16]. Budynki murowane zapewniają dobrą izolację termiczną, ale nie nadają się do stref sejsmicznych [12]. Żelbet jest preferowany do wznoszenia konstrukcji przemysłowych [17].

Table 1. Parameters of the analysed construction materials

Tabela 1. Parametry analizowanych materiałów konstrukcyjnych

Material /designation/Material/oznaczenie	Elastic modulus [GPa]/Moduł sprężystości [GPa]	Poisson's ratio [–]/Współczynnik Poissona [–]	Density [kg/m³]/Gęstość [kg/m³]
Reinforced concrete/A/Żelbet/A	31,0	0,25	2500
High-strength oil palm shell lightweight reinforced concrete/B/Wysokowytrzymały lekki beton zbrojony włóknami z łupin palmowych/B	13,4	0,20	1900
Cellular concrete/C/Beton komórkowy/C	1,80	0,25	600
Brick/D/Mur ceglany/D	2,85	0,25	1800
Sand-lime brick 1 (class 20)/E/Mur z cegieł wapienno-piaskowych 1 (klasa 20)/E	5,56	0,23	1820
Sand-lime brick 2 (class 15)/F/Mur z cegieł wapienno-piaskowych 2 (klasa 15)/F	6,68	0,21	1810
Sand-lime brick 3 (class 15)/G/Mur z cegieł wapienno-piaskowych 3 (klasa 15)/G	6,94	0,23	1730

Numerical analysis

Analysed variants of load-bearing walls. As mentioned, seven materials for load-bearing walls were analysed. Each external wall includes a load-bearing layer, a thermal insulation layer (polystyrene), and two layers of plaster. Internal load-bearing walls consist of a load-bearing layer and two layers of plaster. Standardly used thicknesses of load-bearing wall layers for the analysed materials were considered. As a result, **seven variants of load-bearing walls were created**. The thicknesses of the load-bearing layers and designations for all considered walls, along with the thicknesses of the thermal insulation and plaster layers, are presented in Table 2. It is worth noting that the mechanical properties (modulus of elasticity, Poisson's ratio) of non-structural materials are significantly different (lower) than the analogous properties of structural materials (see Table 1). For example, the Young's modulus for polystyrene is 0.003 GPa, and the Poisson's ratio for this material is 0.07. Therefore, the impact of such non-structural materials on the dynamic properties and dynamic response of the structure is relatively small.

The thicknesses of the load-bearing layers in Table 2 are typical for the considered materials. However, depending on the type of building, other thickness variants are possible. For example, cellular concrete walls may have load-bearing layers with a thickness of 0.36 m, brick walls may have layers with a thickness of 0.38 m, and sand-lime brick walls may have layers with thicknesses of 0.12 m, 0.22 m, and 0.25 m.

3D FEM numerical model of the building. The numerical analysis of the impact of load-bearing wall materials on the dynamic properties of the structure is based on a selected building. The Finite Element Method (FEM) program ANSYS [18] was used to build a three-dimensional model of the building and calculate the natural frequencies and modes of vibration. The determination of natural frequencies and modes of vibration in ANSYS Mechanical APDL was carried out using the „Damped” method in the „Modal” module, which allows for calculations considering damping. The interaction between the building and the ground was included using spring elements that account for soil stiffness and damping. ANSYS was chosen due to its advanced dynamic modelling options and the ability to create parametric scripts, which saved time and reduced errors in manual data entry. The software tools for calculating frequencies and modes of vibration, including damping, were crucial for simulating real conditions. The three-dimensional model of the analysed building with a finite element mesh is shown in Figure 1. Additionally, the ground floor plan and

Analiza numeryczna

Analizowane warianty ścian nośnych. Jak wspomniano, przeanalizowano siedem materiałów ścian nośnych. Każda ściana zewnętrzna zawiera warstwę nośną, warstwę izolacji termicznej (styropian) i dwie warstwy tynku. Wewnętrzne ściany nośne składają się z warstwy nośnej i dwóch warstw tynku. Zastosowano standardową grubość warstw nośnych ścian w przypadku analizowanych materiałów. W rezultacie **powstało siedem wariantów ścian nośnych**. Grubość warstw nośnych i oznaczenia dotyczące wszystkich rozpatrywanych ścian, wraz z grubością warstw izolacji termicznej oraz tynku, przedstawiono w tabeli 2. Należy podkreślić, że właściwości mechaniczne (moduł sprężystości, współczynnik Poissona) materiałów niekonstrukcyjnych są znacznie mniejsze od analogicznych właściwości materiałów konstrukcyjnych (tabela 1), np. moduł Younga styropianu wynosi 0,003 GPa, a współczynnik Poissona tego materiału 0,07. Tak więc wpływ materiałów niekonstrukcyjnych na właściwości dynamiczne oraz odpowiedź dynamiczną konstrukcji jest niewielki. Grubość warstw nośnych podana w tabeli 2 jest typowa w przypadku rozważanych materiałów, ale w zależności od rodzaju budynku możliwe są inne warianty grubości, np. ściany z betonu komórkowego mogą mieć warstwy nośne o grubości 0,36 m, ściany z cegły 0,38 m, a z cegły wapienno-piaskowej 0,12; 0,22 i 0,25 m.

Model numeryczny 3D MES budynku. Numeryczna analiza wpływu materiału ścian nośnych na dynamiczne właściwości konstrukcji dotyczy wybranego budynku. Program metody elementów skończonych ANSYS [18] wykorzystano do zbudowania trójwymiarowego modelu budynku oraz obliczenia częstotliwości i form drgań własnych. Wyznaczenie częstotliwości i postaci drgań własnych w programie ANSYS Mechanical APDL przeprowadzono z wykorzystaniem metody „Damped” w module „Modal”, która pozwala na obliczenia

z uwzględnieniem tłumienia. Interakcja między budynkiem a gruntem została uwzględniona za pomocą elementów sprężyn z uwzględnieniem sztywności i tłumienia gruntu. Program ANSYS został wybrany ze względu na zaawansowane opcje modelowania dynamicznego oraz możliwość tworzenia skryptów parametrycznych, co zaoszczędziło czas i zmniejszyło błędy ręcznego wprowadzania danych. Narzędzia oprogramowania do obliczania częstotliwości i form drgań, w tym tłumienia, były kluczowe do symulacji rzeczywistych warunków. Na rysunku 1 przedstawiono trójwymiarowy model analizowanego budynku, z siatką elementów skończonych.

Table 2. Geometric characteristics of the analysed variants of the building's load-bearing walls

Tabela 2. Charakterystyka geometryczna analizowanych wariantów ścian nośnych budynku

Construction material / Material konstrukcyjny	Layer thickness* [m]/Grubość warstwy* [m]						
	external wall (a)/ ściana zewnętrzna (a)				internal wall (b)/ ściana wewnętrzna (b)		
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	W_1	W_2	W_3
A	0,015	0,10	0,15	0,02	0,015	0,10	0,015
B	0,015	0,15	0,15	0,02	0,015	0,15	0,015
C	0,015	0,25	0,15	0,02	0,015	0,25	0,015
D	0,015	0,25	0,15	0,02	0,015	0,25	0,015
E	0,015	0,18	0,15	0,02	0,015	0,18	0,015
F	0,015	0,18	0,15	0,02	0,015	0,18	0,015
G	0,015	0,24	0,15	0,02	0,015	0,24	0,015

* Thicknesses of the layers of the analysed load-bearing walls: (a) external (Z_1, Z_4 – cement-lime plaster, Z_2 – load-bearing layer, Z_3 – polystyrene); (b) internal (W_1, W_3 – cement-lime plaster, W_2 – load-bearing layer) / * Grubości warstw analizowanych ścian nośnych: (a) zewnętrzna (Z_1, Z_4 – tynk cementowo-wapienny, Z_2 – warstwa nośna, Z_3 – styropian); (b) wewnętrzna (W_1, W_3 – tynk cementowo-wapienny, W_2 – warstwa nośna)

the first floor plan of the considered building are shown in Figure 2. The load-bearing walls of the building are marked in blue, and the thermal insulation layer is marked in red.

A linear-elastic material model was assumed for the building elements. The relevant parameters of the analysed load-bearing wall materials are summarised in Table 1. Two types of finite elements were used in the analyses: BEAM188 for continuous



Fig. 1. Three-dimensional model of the analysed building with a finite element mesh

Rys. 1. Trójwymiarowy model analizowanego budynku z siatką elementów skończonych

nych. Dodatkowo, na rysunku 2 przedstawiono rzut parteru i rzut piętra tego budynku. Kolorem niebieskim zaznaczono ściany nośne budynku, a kolorem czerwonym warstwę izolacji cieplnej.

Założono liniowo-sprężysty model materiału elementów budynku. Odpowiednie parametry analizowanych materiałów ścian nośnych zostały przedstawione w tabeli 1. W analizach zastosowano dwa typy elementów skończonych: BEAM188 w przypadku fundamentów ciągłych, ściami

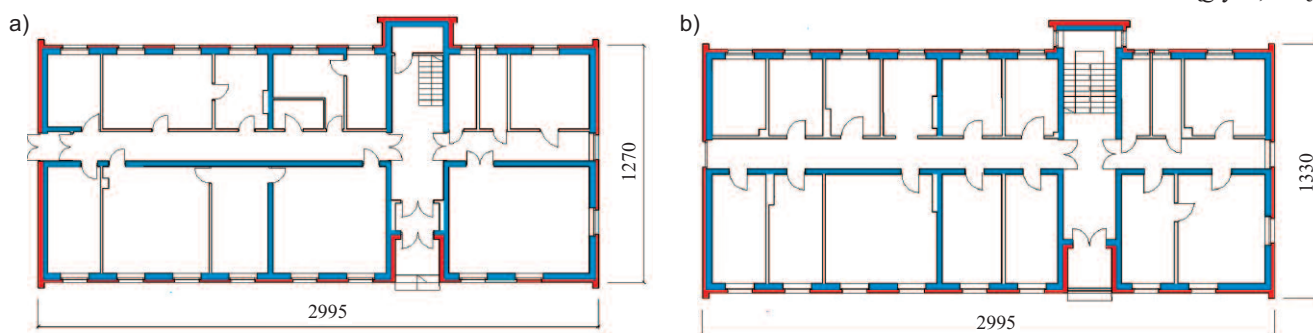


Fig. 2. The building: ground floor plan (a); first floor plan (b)

Rys. 2. Rzut: a) parteru; b) piętra budynku

foundations, foundation ties, and reinforced concrete beams, and SHELL181 for the roof, floors, and walls (load-bearing and partition). Three variants of load-bearing wall models were analysed:

- **model 1** – considers only the stiffness of the load-bearing layer, the mass of the load-bearing layer, and the additional mass from non-load-bearing layers (polystyrene and plaster for external walls, plaster for internal walls);

- **model 2** – uses the average modulus of elasticity, Poisson's ratio, and density for all wall materials, with the wall thickness being the sum of the individual layer thicknesses: $P_{eqv} = (\sum P_i \cdot d_i) / (\sum d_i)$, where: P_{eqv} is the equivalent modulus of elasticity, Poisson's ratio, or density; P_i is the modulus of elasticity, Poisson's ratio, or density of the individual layer respectively; d_i is the thickness of the individual layer;

- **model 3** – each layer is represented by its specific thickness and material properties, making this model the most accurate of the three variants.

It should be emphasised that the proposed models are intended for dynamic structural calculations. For strength analyses, model 2 (with averaged material parameters) should be completely excluded from use for such purposes. Whereas, when using model 3 in such calculations, only the layer made of structural material should be considered as the load-bearing layer (the SHELL181 elements used allow for the cooperation of several layers of different materials and enable the determination of stresses independently in each layer of the element).

gów fundamentowych i wieńców żelbetonowych oraz SHELL181 w przypadku dachu, stropów i ścian (nośnych i działowych). Analizowano trzy warianty modeli ścian nośnych:

- **model 1** – uwzględnia sztywność tylko warstwy nośnej, masę warstwy nośnej oraz dodatkową masę z warstw nienośnych (styropian i tynk ścian zewnętrznych oraz tynk ścian wewnętrznych);

- **model 2** – uwzględnia średni moduł sprężystości, współczynnik Poissona i gęstość w przypadku wszystkich materiałów ścian, przy czym grubość ściany jest sumą grubości poszczególnych warstw: $P_{eqv} = (\sum P_i \cdot d_i) / (\sum d_i)$, gdzie: P_{eqv} – odpowiednio równoważny moduł sprężystości, współczynnik Poissona lub gęstość; P_i – odpowiednio moduł sprężystości, współczynnik Poissona lub gęstość poszczególnych warstw; d_i – grubość poszczególnych warstw;

- **model 3** – każda warstwa charakteryzuje się specyficzną grubością i właściwościami materiałowymi, co czyni ten model najdokładniejszym z trzech wariantów.

Należy podkreślić, że proponowane modele mają służyć do obliczeń dynamicznych konstrukcji. W przypadku prowadzenia analiz wytrzymałościowych, model 2 (z uśrednionymi parametrami materiałowymi) należałoby całkowicie wykluczyć ze stosowania do takich celów. Z kolei, wykorzystując model 3 w takich obliczeniach, za warstwę nośną trzeba byłoby wziąć tylko warstwę wykonaną z materiału konstrukcyjnego (zastosowane elementy typu SHELL181 umożliwiają uwzględnienie współpracy kilku warstw z różnych materiałów i pozwalają określać naprężenia niezależnie, osobno w każdej z warstw elementu).

In all models, partition walls are made of brick, regardless of the load-bearing wall material. Soil stiffness and damping were modelled using COMBIN14 spring-damper elements in the horizontal and vertical directions. The parameters were determined according to Savinov's theory [19], with a dynamic soil parameter $C_z = 50$ MPa, soil density of 1800 kg/m^3 , and shear wave velocity of 200 m/s . Soil damping in the applied models was considered by defining a linear viscous damping coefficient in the COMBIN14 finite element. This allowed the damping force to be determined as proportional to the relative velocity between the element nodes. The coefficient value was determined based on a formula considering soil density (medium dense sands – 1800 kg/m^3), transverse wave velocity (200 m/s), and foundation area, according to the recommendations in [20].

The 3D FEM model of the building was constructed based on detailed architectural documentation. It is a two-story office building without a basement, supported on reinforced concrete strip foundations at a depth of 1.4 m . The subsoil consists of layers of medium and fine sand with yellow dust. The building dimensions are 12.7 m (x-axis) by 29.9 m (y-axis), and the height is 7.3 m . The structural system consists of load-bearing walls in a transverse-longitudinal arrangement, reinforced concrete floors, and a roof supported on knee walls. The models include all key components, with assigned appropriate material properties and finite element types.

Reinforced concrete foundations were modelled as strip foundations using BEAM188 elements, and foundation walls as reinforced concrete using SHELL181 elements, with typical properties (modulus of elasticity 31.0 GPa , density 2500 kg/m^3 , Poisson's ratio 0.25). On the ground floor and the first floor, load-bearing walls are modelled using SHELL181 elements, in variants for different materials (reinforced concrete, concrete reinforced with palm shell fibres, brick, cellular concrete, sand-lime bricks). Partition walls were modelled using SHELL181 elements (thickness 0.12 m). The first-floor slab was modelled as a reinforced concrete slab using SHELL181 elements, supported on load-bearing walls and floor beams (BEAM188 elements, cross-section $0.24 \text{ m} \times 0.24 \text{ m}$). Prefabricated reinforced concrete roof panels were modelled using SHELL181 elements.

Each of the applied computational models has an identical total number of finite elements, amounting to $17,433$. Calculations were performed using the Ares computer belonging to the Academic Computer Center Cyfronet AGH. This machine has a total of $1,576$ Intel Xeon Platinum 8268 processors (each with 24 cores), operating at a frequency of 2.9 GHz , providing a total computing power of 2.34 PFLOPS . The analysis of a single model case, performed on one core, takes no more than a few seconds. The 3D MES models were verified using experimental data from in situ measurements of a building with load-bearing walls made of material type D (brick) in the Upper Silesian Coal Basin (GZW) region, where mining tremors occurred [6]. For this purpose, the horizontal vibration acceleration components in the x and y directions simultaneously recorded on the ground next to the building

We wszystkich modelach ściany działowe są wykonane z cegły, niezależnie od materiału ściany nośnej. Sprężystość i tłumienie gruntu zostały zamodelowane za pomocą elementów sprężynowo-tłumiących ANSYS COMBIN14 w kierunkach poziomym i pionowym. Parametry były wyznaczone zgodnie z teorią Savinova [19], z dynamicznym parametrem gruntu $C_z = 50$ MPa, gęstością gruntu 1800 kg/m^3 i prędkością fali ścinającej 200 m/s . Tłumienie gruntu w zastosowanych modelach uwzględniono przez zdefiniowanie liniowego współczynnika tłumienia lepkościowego w elemencie skończonym COMBIN14. Dzięki temu możliwe było określenie siły tłumiącej jako proporcjonalnej do prędkości względnej między węzłami elementu. Wartość współczynnika wyznaczono na podstawie wzoru uwzględniającego gęstość gruntu (piaski średnie zagęszczone – 1800 kg/m^3), prędkość poprzeczną fali (200 m/s) i pole powierzchni fundamentu, zgodnie z zaleceniami zamieszczonymi w [20].

Model 3D metody elementów skończonych budynku został zbudowany na podstawie szczegółowej dokumentacji architektonicznej. Jest to dwukondygnacyjny obiekt pełniący funkcję biurową, bez podpiwniczenia, wsparty na żelbetowych ławach fundamentowych na głębokości $1,4 \text{ m}$. Podłoże składa się z warstw średniego i drobnego piasku z żółtym pyłem. Wymiary budynku to $12,7 \text{ m}$ (oś x) na $29,9 \text{ m}$ (oś y), a wysokość $7,3 \text{ m}$. Konstrukcję tworzą ściany nośne w układzie poprzeczno-podłużnym, stropy żelbetowe oraz dach wsparty na ścianach kolankowych. Modele zawierają wszystkie kluczowe komponenty, z przypisanymi odpowiednimi właściwościami materiałowymi i typami elementów skończonych.

Fundamenty żelbetowe zamodelowano jako pasmowe za pomocą elementów BEAM188, a ściany fundamentowe jako żelbetowe za pomocą elementów SHELL181, z typowymi właściwościami (moduł sprężystości $31,0 \text{ GPa}$, gęstość 2500 kg/m^3 , współczynnik Poissona $0,25$). Na parterze i pierwszym piętrze ściany nośne zamodelowano za pomocą elementów SHELL181, w wariantach z różnych materiałów (żelbet, beton zbrojony włóknami z łupin palmowych, cegła, beton komórkowy, cegły wapienno-piaskowe). Ściany działowe zamodelowano za pomocą elementów SHELL181 (grubość $0,12 \text{ m}$), strop pierwszego piętra jako żelbetową płytę za pomocą elementów SHELL181, wspartą na ścianach nośnych i wieńcach stropowych (elementy BEAM188, przekrój $0,24 \text{ m} \times 0,24 \text{ m}$), a dachowe prefabrykowane panele żelbetowe również za pomocą elementów SHELL181.

Każdy z zastosowanych modeli obliczeniowych ma identyczną, łączną liczbę elementów skończonych wynoszącą 17433 . Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem komputera Ares, należącego do Akademickiego Centrum Komputerowego Cyfronet AGH. Maszyna ta dysponuje 1576 procesorami Intel Xeon Platinum 8268 (każdy z 24 rdzeniami), pracującymi z częstotliwością $2,9 \text{ GHz}$, co daje łączną moc obliczeniową $2,34 \text{ MES}$. Analiza pojedynczego modelu, wykonywana na jednym rdzeniu, trwa nie więcej niż kilka sekund. Modele 3D MES zostały zweryfikowane za pomocą danych eksperymentalnych z pomiarów in situ budynku ze ścianami nośnymi z materiału typu D (cegła) w regionie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), w którym występują wstrząsy górnicze [6]. Do tego celu wykorzystano przebiegi składowych przyspieszeń drgań po-

and in the building at the ground floor level, originating from selected mining tremors, were used. Using the proposed models and the measured ground vibrations as excitation, the building vibrations at the sensor location were calculated. Good agreement was obtained between the calculation results and experimental studies [6]. Models whose accuracy was verified for the building's forced vibrations can be used to study the modal parameters of the structure.

Analysis results and discussion

The study analysed the impact of load-bearing wall materials on the dynamic properties of the building by calculating the values of natural frequencies and modes of vibration. The focus was on horizontal vibrations along the transverse (x) and longitudinal (y) axes, as well as torsional vibrations. The natural frequencies of transverse horizontal, longitudinal horizontal, and torsional vibrations were denoted f_x , f_y , and f_t , respectively. The results for models 1, 2, and 3 are presented in Table 3. Of course, building vibrations can be separated into ideally independent vibrations in the x and y directions and torsional vibrations only if the building has two vertical planes of symmetry common to the structure and mass distribution. However, based on the analysis of the load-bearing wall layout on the floor plans (Figure 2), it must be stated that the building lacks symmetry in both directions. For example, the staircase disrupts this symmetry. This causes the building's vibrations to be complex, which is often observed in real structures. However, in such a case, an attempt can be made to isolate the dominant component of the vibration mode (component in the x direction, component in the y direction, torsional vibrations), and the frequency corresponding to this mode can be taken as the frequency of this vibration component.

This study focused on the fundamental (first) frequency of vibration, as experimental studies of real low-rise buildings indicate that the dynamic response of such buildings to kinematic excitations occurs with the first mode of vibration. The second mode of vibration may practically appear in significantly taller buildings (e.g., 11 or 12 stories). Of course, it is possible to attempt to numerically determine the subsequent frequencies of vibration for the considered building models. However, due to the complexity of the vibrations and the specificity of the building structure, it is difficult, if not impossible, to isolate a global second mode of vibration.

Comparing the results presented in Table 3, the impact of the applied load-bearing wall material on the calculated natural vibration frequencies of

ziomych w kierunkach x i y, jednocześnie zarejestrowane na gruncie obok budynku i w budynku w poziomie parteru, których źródłem były wybrane wstrząsy górnicze. Za pomocą zaproponowanych modeli i z użyciem pomierzonych drgań gruntu jako wymuszenia drgań, wyliczono przebieg drgań budynku w miejscu zamocowania czujnika pomiarowego. Uzyskana została dobra zgodność wyników z obliczeń i badań doświadczalnych [6]. Modele, których dokładność została zweryfikowana w przypadku drgań wymuszonych budynku, mogą być użyte do badania parametrów modalnych konstrukcji.

Wyniki analiz i ich dyskusja

W badaniach analizowano wpływ materiałów ścian nośnych na właściwości dynamiczne budynku przez obliczenie wartości częstotliwości i postaci drgań własnych. Skupiono się na drganiach poziomych wzdłuż osi poprzecznej (x) i podłużnej (y) oraz drganiach skrętnych. Częstotliwość drgań własnych poziomych poprzecznych, poziomych podłużnych i skrętnych oznaczono odpowiednio jako f_x , f_y i f_t . Wyniki dotyczące modeli 1, 2 i 3 przedstawiono w tabeli 3. Drgania budynku można oczywiście rozdzielić na idealnie niezależne w kierunkach x i y oraz na drgania skrętne tylko wtedy, gdy budynek ma dwie pionowe płaszczyzny symetrii wspólne w przypadku konstrukcji i rozkładu masy. Na podstawie analizy układu ścian nośnych na rzutach kondygnacji (rysunek 2) stwierdzono brak warunku symetrii budynku w obu kierunkach, np. klatka schodowa zaburza tę symetrię. To powoduje, że drgania budynku są złożone, co często obserwuje się w odniesieniu do rzeczywistych konstrukcji. Można jednak podjąć próbę wyodrębnienia dominującej składowej postaci drgań (składowej w kierunku x, składowej w kierunku y, drgania skrętne) i przyjąć częstotliwość odpowiadającą tej postaci za częstotliwość składowej drgań.

W pracy skoncentrowano się na podstawowej (pierwszej) częstotliwości drgań, gdyż z badań doświadczalnych rzeczywistych budynków niskich wynika, że odpowiedź dynamiczna takich budynków na wymuszenia kinematyczne odbywa się z pierwszą formą drgań. Natomiast druga postać drgań praktycznie może się czasem pojawić w przypadku budynków zdecydowanie wyższych, np. 11-, 12-kondygnacyjnych. Możliwa jest oczywiście próba numerycznego wyznaczenia kolejnych częstotliwości drgań w przypadku rozważanych modeli budynku, ale ze względu na złożoność drgań i specyfikę konstrukcji budynku trudne, a wręcz niemożliwe, jest wyodrębnienie drugiej postaci drgań.

Porównując wyniki zamieszczone w tabeli 3, widać wpływ zastosowanego materiału ścian nośnych na obliczone częstotliwości drgań własnych budyn-

Table 3. Calculated values of the natural vibration frequencies of building models for different variants of bearing-wall materials

Tabela 3. Obliczone wartości częstotliwości drgań własnych modeli budynku w przypadku różnych wariantów materiałów ścian nośnych

Analysed load-bearing wall/Analizowana ściana nośna	Calculated values of the natural vibration frequencies [Hz]/Obliczone wartości częstotliwości drgań własnych [Hz]								
	model 1			model 2			model 3		
	f_x	f_y	f_t	f_x	f_y	f_t	f_x	f_y	f_t
A	5,05	5,58	5,90	5,19	5,70	6,08	5,04	5,57	5,86
B	4,93	5,43	5,73	5,09	5,58	5,95	4,95	5,47	5,78
C	4,72	5,11	5,41	5,11	5,57	5,95	5,05	5,54	5,86
D	4,40	4,80	5,02	4,65	5,09	5,37	4,58	5,03	5,26
E	4,68	5,14	5,40	4,88	5,35	5,67	4,79	5,28	5,54
F	4,74	5,21	5,48	4,92	5,39	5,72	4,82	5,32	5,58
G	4,80	5,28	5,56	4,89	5,32	5,64	4,74	5,23	5,48

the building is evident. For example, analysing the results for model 1, it is found that in the horizontal x direction, the highest value of the fundamental natural vibration frequency was calculated for walls made of material A (reinforced concrete) – $f_{1x} = 5.05$ Hz, and the lowest for brick walls (D) – $f_{1x} = 4.40$ Hz. The impact of the wall material is approximately 15%. For other wall materials, this difference is smaller (Table 3). In the horizontal y direction, the highest value of the fundamental natural vibration frequency was obtained for reinforced concrete walls (A) – $f_{1y} = 5.58$ Hz, and the lowest for brick walls (D) – $f_{1y} = 4.80$ Hz. The impact of the wall material in the y direction is thus slightly greater, amounting to approximately 16.3%. For other materials, this difference is smaller (Table 3). Comparing the calculated values of the fundamental vibration frequencies in the horizontal x and y directions, it is evident that higher values were obtained in the y direction than in the x direction, indicating greater stiffness of the building in the longitudinal y direction. The maximum and minimum torsional vibration values were calculated for reinforced concrete walls and brick walls, respectively, and amounted to 5.90 Hz and 5.02 Hz (the difference amounted to 17.5%). For other materials, the differences were smaller.

The significant impact of the properties of load-bearing wall materials on the natural vibration frequencies of the building is visible. In almost all cases, regardless of the model used, the highest values of natural vibration frequencies (f_x , f_y , and f_t) were obtained for load-bearing wall A (standard reinforced concrete wall with a thickness of 0.10 m). The only exception is the transverse frequency (f_x) obtained for load-bearing wall C (cellular concrete) using model 3. The lowest values (f_x , f_y , and f_t) were calculated for load-bearing wall D (brick). This effect is visible for all applied models.

The greatest impact of the material can be observed in the values of torsional vibration frequencies (f_t), regardless of the numerical model variant used. In the case of model 1, the highest f_t value calculated for reinforced concrete wall A differs from the lowest f_t value calculated for brick wall D by as much as 17.5%. The use of the other two models gives slightly smaller differences – 13.2% and 11.4% for model 2 and model 3, respectively.

The impact of the construction material on the longitudinal vibration frequency (f_y) is slightly smaller. The differences between the highest and lowest f_y frequency values are 16.3%, 12.0%, and 10.7% for model 1, model 2, and model 3, respectively. The relatively smallest impact of load-bearing wall materials on the natural vibration frequency values was observed for transverse vibration frequencies (f_x). In this case, the differences between the highest and lowest f_x frequency values are 14.8%, 11.6%, and 10.3% for model 1, model 2, and model 3, respectively. At first glance, the differences of a few percent between the calculated natural vibration frequency values for the adopted models may seem unrealistic. However, significant differences in the values of the modulus of elasticity and density of load-bearing wall materials should be considered. This is particularly evident for the frequencies calculated for the material described as A, as well as C and D (Table 1 and Table 3).

ku, np. analizując wyniki dotyczące modelu 1 stwierdzono, że w kierunku poziomym x największą wartość podstawowej częstotliwości drgań własnych obliczono w przypadku ścian zbudowanych z materiału A (żelbet) – $f_{1x} = 5.05$ Hz, a najmniejszą w przypadku muru ceglanego (D) – $f_{1x} = 4.40$ Hz. Wpływ materiału ściany wynosi ok. 15%. W ścianach z innych materiałów różnica jest mniejsza (tabela 3). W kierunku poziomym y największą wartość podstawowej częstotliwości drgań własnych uzyskano w przypadku ścian żelbetowych (A) – $f_{1y} = 5.58$ Hz, a najmniejszą w przypadku muru ceglanego (D) – $f_{1y} = 4.80$ Hz. Wpływ materiału ściany dla kierunku y jest zatem nieco większy i wynosi ok. 16,3%. W przypadkach innych materiałów różnica ta jest mniejsza (tabela 3). Porównując obliczone wartości podstawowej częstotliwości drgań w kierunkach poziomych x i y, widać, że większe wartości uzyskano w kierunku y niż w kierunku x, co wskazuje na większą sztywność budynku w kierunku podłużnym y. Maksymalną i minimalną wartość dla drgań skrętnych obliczono w przypadku ścian z żelbetu i muru ceglanego i wynosiła odpowiednio 5,90 Hz oraz 5,02 Hz (różnica 17,5%). W przypadku pozostałych materiałów różnice były mniejsze.

Widoczny jest **znaczny wpływ właściwości materiałów ścian nośnych na wartość częstotliwości drgań własnych budynku**. W prawie wszystkich przypadkach, niezależnie od modelu, największe wartości częstotliwości drgań własnych (f_x , f_y i f_t) uzyskano w przypadku ściany nośnej A (standardowa żelbetowa ściana o grubości 0,10 m). Jedyńm wyjątkiem jest wartość częstotliwości poprzecznej (f_x) ściany nośnej C (beton komórkowy) przy użyciu modelu 3. Natomiast najmniejsze wartości (f_x , f_y i f_t) osiągnięto w przypadku ściany nośnej D (cegła). Dotyczy to wszystkich zastosowanych modeli.

Największy wpływ materiału można zaobserwować w wartościach częstotliwości drgań skrętnych (f_t), niezależnie od użytego wariantu modelu numerycznego. W przypadku modelu 1, największa obliczona wartość f_t dotycząca ściany żelbetowej A różni się od najmniejszej obliczonej wartości f_t w przypadku ściany ceglanej D aż o 17,5%. Użycie pozostałych dwóch modeli daje nieco mniejsze różnice – odpowiednio 13,2% i 11,4% w przypadku modelu 2 i modelu 3.

Wpływ materiału konstrukcyjnego na wartość częstotliwości drgań podłużnych (f_y) jest nieco mniejszy. Różnice między największymi i najmniejszymi wartościami częstotliwości f_y wynoszą 16,3%, 12,0% i 10,7% odpowiednio w modelu 1, modelu 2 i modelu 3. Relatywnie najmniejszy wpływ materiału ścian nośnych na częstotliwość drgań własnych zaobserwowano w przypadku częstotliwości drgań poprzecznych (f_x), gdyż różnica między największymi i najmniejszymi wartościami częstotliwości f_x wynosi 14,8%, 11,6% i 10,3% odpowiednio w modelu 1, modelu 2 i modelu 3. Na pierwszy rzut oka, różnica kilka procent między obliczonymi wartościami częstotliwości drgań własnych w przypadku przyjętych modeli może wydawać się nierealistyczna. Należy jednak wziąć pod uwagę znaczne różnice wartości modułu sprężystości i gęstości materiału ścian nośnych. Jest to szczególnie widoczne w przypadku obliczonych częstotliwości dotyczących materiału opisanego jako A, a także C i D (tabela 1 i tabela 3).

The obtained results indicate differences in the calculated values of fundamental natural vibration frequencies depending on the load-bearing wall material. The differences for the analysed materials do not exceed 20%. It was found that there are no significant differences in the corresponding natural vibration frequency values calculated using the three load-bearing wall models (model 1, model 2, model 3). Of the three FEM model variants, model 3 most accurately represents the actual structure. Nevertheless, the natural vibration frequency values (f_x , f_y , and f_t) from models 1 and 2 are very close to those from model 3, with average differences of 2.0%, 2.2%, and 2.4% for model 1 and 2.5%, 1.7%, and 2.9% for model 2. This makes the simplified models (model 1 and model 2) to be acceptable for further analyses. This approach reduces the number of integration points in the used FEM elements and shortens the calculation time. From an engineering perspective, the natural vibration frequency values of model 1 or model 2 are sufficiently accurate. The impact of the analysed material variants of the building's load-bearing walls on the modes (shapes) of natural vibrations of the building is presented in Table 4 using model 3 as an example.

The analysis of the calculated generalised relative displacements and their graphical illustration in the form of colour maps in the example building model indicates differences in the determined vibration modes of buildings with load-bearing walls made of different materials. In the illustrations presented in Table 4, for all considered load-bearing wall materials, the applied proportionality scale (magnifying) for the images of relative generalised displacements was the same for a given vibration mode (translational in the x direction, translational in the y direction, and torsional).

The natural vibration modes of the building can vary significantly depending on the materials used. The comparative analysis of different construction materials (Table 4) shows significant differences in transverse and longitudinal horizontal vibrations as well as torsional vibrations. Regarding horizontal vibrations in the x direction, a significant difference in these modes is visible for the applied materials A, B, E, F, and C, D, G. The results of the analysis of relative generalised displacements, shown in the form of colour displacement maps, indicate greater susceptibility of the model variants A, B, E, F compared to the variants C, D, G. In the longitudinal y direction, higher values of relative displacements were obtained for the same variants of the considered load-bearing wall materials A, B, E, F, as evident from the comparison of the colour scale corresponding to the highest displacement values. In the case of torsional vibrations, the highest values of relative rotation angle were obtained for load-bearing walls made of material A. For buildings with the other wall materials, these values are smaller, but the distribution of these generalised relative displacements is also different, as illustrated in the ranges of the individual colour fields. For translational vibrations, the largest relative displacements occur at the ends of the building, indicating potential areas of maximum dynamic response and structural damage.

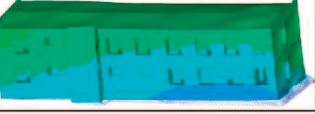
Uzyskane wyniki wskazują na różnice w obliczonych wartościach podstawowych częstotliwości drgań własnych w zależności od materiału ścian nośnych, które nie przekraczają 20%. Stwierdzono, że w odpowiednich wartościach częstotliwości drgań własnych obliczonych z użyciem trzech modeli ścian nośnych (model 1, model 2, model 3) nie widać istotnej różnicy. Z trzech wariantów modeli MES, model 3 najdokładniej odwzorowuje rzeczywistą konstrukcję, ale wartości częstotliwości drgań własnych (f_x , f_y , f_t) z modeli 1 i 2 są bardzo zbliżone do tych z modelu 3. Średnia różnica wynosi 2,0%, 2,2% i 2,4% w przypadku modelu 1 oraz 2,5%, 1,7% i 2,9% – modelu 2. To sprawia, że uproszczone modele (model 1 i model 2) mogą być stosowane do dalszych analiz. Takie podejście zmniejsza liczbę punktów całkowania w użytych elementach MES i skraca czas obliczeń. Z perspektywy inżynierskiej, wartości częstotliwości drgań własnych modelu 1 lub modelu 2 są wystarczająco dokładne. Wpływ analizowanych wariantów materiałowych ścian nośnych budynku na formy (postacie) drgań własnych budynku przedstawiono w tabeli 4 na przykładzie modelu 3.

Analiza obliczonych uogólnionych przemieszczeń względnych oraz ich graficznej ilustracji, w postaci kolorowych map, wskazuje w przykładowym modelu budynku na różnice w wyznaczonych formach drgań budynków ze ścianami nośnymi z różnych materiałów. Na ilustracjach zamieszczonych w tabeli 4, w przypadku wszystkich rozważanych materiałów ścian nośnych, zastosowana skala proporcjonalności (zwiększająca) do obrazów względnych uogólnionych przemieszczeń była taka sama w przypadku danej postaci drgań (translacyjnej w kierunku x, translacyjnej w kierunku y, skrętnej).

Formy drgań własnych budynku mogą znacznie się różnić w zależności od użytych materiałów. Analiza porównawcza różnych materiałów konstrukcyjnych (tabela 4) wykazała znaczne różnice drgań poziomych poprzecznych i podłużnych oraz skrętnych. W odniesieniu do drgań poziomych x widoczna jest istotna różnica w tych formach, w przypadku zastosowanego materiału A, B, E, F oraz C, D, G. Wyniki analizy względnych, uogólnionych przemieszczeń, pokazanych w formie kolorowych map przemieszczeń, wskazują na większą podatność wariantów A, B, E, F modelu w porównaniu z wariantami C, D, G. W kierunku podłużnym y uzyskano większe wartości względnych przemieszczeń tych samych wariantów materiałów ścian nośnych A, B, E, F, co wynika z porównania skali kolorów, odpowiadającej największym wartościom przemieszczeń. W przypadku drgań skrętnych największe wartości względnego kąta obrotu uzyskano w ścianach nośnych wykonanych z materiału A. W budynkach ze ścianami z pozostałych materiałów wartości te są mniejsze, ale też inny jest rozkład uogólnionych względnych przemieszczeń, co widać w zakresach pól poszczególnych kolorów. W przypadku drgań translacyjnych największe przemieszczenia względne występują na krańcach budynku, wskazując na potencjalne obszary maksymalnej odpowiedzi dynamicznej i uszkodzeń konstrukcyjnych.

Table 4. Natural mode shapes of the building for the analysed variants of wall materials (model 3)

Tabela 4. Postacie drgań własnych budynku w przypadku analizowanych wariantów materiałów ścian (model 3)

Analysed load-bearing wall/Analizowana ściana nośna	Mode shapes of natural vibrations/Postać drgań własnych					
	transverse horizontal vibrations (x)/poziome drgania poprzeczne (x)			longitudinal horizontal vibrations (y)/poziome drgania podłużne (y)		
	0 0,00106 0,00238			0 0,00114 0,00251		
A						
B						
C						
D						
E						
F						
G						

Buildings with load-bearing walls of type B exhibit distinctly different vibration modes due to differences in material properties. Walls of type C (cellular concrete) show the largest relative horizontal displacements, while reinforced concrete walls have the smallest values. For example, using model 1, the differences in relative displacements between walls C and A are 24.3%, 20.2%, and 9.9% for transverse, longitudinal, and torsional vibrations, respectively. Torsional vibrations are complex, and the largest relative displacements occur in models with cellular concrete walls, highlighting that this material is not suitable for buildings exposed to uneven dynamic loads. These observations are consistent across all analysed models. There is a fairly good agreement between the corresponding vibration modes determined using the three models. For the natural vibration modes of model 3, only minor, local differences are visible.

Conclusions

The article presents results concerning the natural vibration frequencies for various models of a representative administrative building with load-bearing walls made of various materials. The key conclusions include:

Budynki z nośnymi ścianami typu B wykazują wyraźnie różne postacie drgań z powodu różnych właściwości materiałowych. W ścianach typu C (beton komórkowy) stwierdzono największe względne przemieszczenia poziome, podczas gdy ściany żelbetowe mają te wartości najmniejsze, np. przy użyciu modelu 1 różnica względnych przemieszczeń między ścianami C i A drgań poprzecznych, podłużnych i skrętnych wynosi odpowiednio 24,3%, 20,2% i 9,9%. Drgania skrętne są złożone, a największe względne przemieszczenia występują w modelach ze ścianami z betonu komórkowego, co sugeruje, że materiał ten nie nadaje się do budynków narażonych na nierównomierne obciążenia dynamiczne. Te obserwacje występują we wszystkich analizowanych modelach. Ponadto stwierdzono dość dobrą zgodność między odpowiadającymi sobie postaciami drgań wyznaczonymi za pomocą trzech modeli. W przypadku postaci drgań własnych w modelu 3 widoczne są jedynie niewielkie, lokalne różnice.

Wnioski

Artykuł przedstawia wyniki dotyczące częstotliwości drgań własnych w różnych modelach reprezentatywnego budynku administracyjnego ze ścianami nośnymi z różnych materiałów. Kluczowe wnioski obejmują:

■ **material impact** – material parameters significantly influence the values of translational and torsional vibration frequencies. The greatest impact of load-bearing wall materials is visible in the value of the torsional natural vibration frequency (f_t). A smaller impact is observed in the values of longitudinal horizontal (f_y) and transverse horizontal (f_x) natural vibrations. The vibration modes corresponding to the natural vibration frequencies differ significantly depending on the load-bearing wall materials, both for translational and torsional vibrations. Similar shapes occur only in the case of load-bearing walls made of reinforced concrete;

■ **building models** – three FEM models were used. Model 1 considers only the stiffness of the load-bearing wall layer, model 2 uses average material properties, and model 3 includes detailed layer parameters. Model 3 is the most accurate, but models 1 and 2 are acceptable for further dynamic analyses. The frequency values in all models are similar, with differences not exceeding a few percent;

■ **future research** – future studies are planned to include the analysis of a larger number of materials, structures, and load-bearing wall thicknesses, the study of other building types, the development of mathematical models for regression analysis, and the exploration of the potential use of artificial neural networks.

Authors gratefully acknowledge Polish high-performance computing infrastructure, PLGrid (HPC Centers: ACK Cyfronet AGH) for providing computer facilities and support within computational grant no. PLG/2024/017388.

*Received: 03.01.2025 r.
Revised: 10.02.2025 r.
Published: 24.06.2025 r.*

■ **wpływ materiału** – parametry materiałowe w istotny sposób wpływają na wartość częstotliwości drgań translacyjnych i skrętnych. Największy jest wpływ materiału ścian nośnych na częstotliwość drgań własnych skrętnych (f_t), a mniejszy na wartość drgań własnych poziomych podłużnych (f_y) i poprzecznych (f_x). Postacie drgań odpowiadające częstotliwościom drgań własnych różnią się znacznie w zależności od materiałów ścian nośnych, zarówno w przypadku drgań translacyjnych, jak i skrętnych. Podobne kształty występują tylko w przypadku ścian nośnych wykonanych z żelbetu;

■ **modele budynku** – zastosowano trzy modele MES. Model 1 uwzględnia tylko sztywność warstwy nośnej ściany, model 2 wykorzystuje średnie właściwości materiałowe, a model 3 zawiera szczegółowe parametry warstw. Model 3 jest najdokładniejszy, ale modele 1 i 2 są akceptowalne do dalszych analiz dynamicznych. Wartości częstotliwości we wszystkich modelach są zbliżone (różnica nie przekracza kilku procent);

■ **przyszłe badania** – planuje się badania obejmujące analizę większej liczby materiałów, struktur i grubości ścian nośnych, badanie innych typów budynków, opracowanie modeli matematycznych do analizy regresji oraz badanie możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych.

Dziękujemy Centrum HPC: ACK Cyfronet AGH za udostępnienie zasobów komputerowych i wsparcie w ramach grantu obliczeniowego nr PLG/2024/017388.

*Artykuł wpłynął do redakcji: 03.01.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 10.02.2025 r.
Opublikowano: 24.06.2025 r.*

Literature

- [1] Lanczos C. An Iteration Method for the Solution of the Eigenvalue Problem of Linear Differential and Integral Operators. J Res Natl Bur Stand. 1950. DOI:10.6028/jres.045.026.
- [2] Ilanko S, Monterrubio LE. The Rayleigh-Ritz Method for Structural Analysis. Wiley, United Kingdom; 2014.
- [3] Bright Wilson E, Decius JC, Cross PC. Molecular Vibrations: the Theory of Infrared and Raman Vibrational Spectra. McGraw-Hill: New York, USA; 1955.
- [4] Pastor M, Binda M, Harcarik T. Modal Assurance Criterion. Procedia Eng. 2012. DOI:10.1016/j.proeng.2012.09.551.
- [5] Maciag E. Experimental Evaluation of Changes of Dynamic Properties of Buildings on Different Grounds. Earthq Eng Struct Dyn. 1986. DOI:10.1002/eqe.4290140608.
- [6] Zajac M, Kuzniar K, Tatara T. Influence of Subsoil and Building Material Properties on Mine-Induced Soil-Structure Interaction Effect. Appl Sci. 2024. DOI:10.3390/app14104164
- [7] PN-EN 1992-1-1: 2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
- [8] Yew MK, Mahmud HB, Ang BCh, Yew MCh. Influence of different types of polypropylene fibre on the mechanical properties of high-strength oil palm shell lightweight concrete. Constr Build Mater. 2015; <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.024>.
- [9] Jarmontowicz R, Sieczkowski J. Odształcalność muru pod wpływem obciążeń. Przegląd Budowlany. 2015; 7-8: 45–8.
- [10] Kubica J, Drobiec Ł, Jasiński R. Badania siecznego modułu sprężystości murów z cegły. Materiały XLV Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB, Wrocław-Krynica 1999, pp. 133–140.

- [11] Jasinski R, Drobiec L, Piekarczyk A. Mechanical Properties of Masonry Walls Made of Calcium Silicate Materials Made in Poland. Part 1. Masonry Properties and Compressive Strength. Proc Eng. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.755>.
- [12] Manos GC, Melidis L, Katakalos K, Kotoulas L, Anastasiadis A, Chatziastrou Ch. Masonry panels with external thermal insulation subjected to in-plane diagonal compression. Case Stud Constr Mat. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00538>.
- [13] Zahra T, Dorji J, Thamboo J, Asad M, Kasinski W, Nardone A. In-plane and out-of-plane shear characteristics of reinforced mortarless concrete block masonry. J Build Eng. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105938>.
- [14] Kwiecień S. Wybrane przykłady wpływu wody gruntowej na realizację głębokiego posadowienia obiektów budowlanych. Materiały Budowlane. 2025; 02:43–6.
- [15] AlHamaydeh M, Galal K, Yehia S. Impact of lateral force-resisting system and design/construction practices on seismic performance and cost of tall buildings in Dubai, UAE. Earthq Eng Eng Vib. 2013. DOI: 10.1007/s11803-013-0180-2.
- [16] Nadh VS, Muthumani K. Critical review on structural light weight concrete. Int J Civ Eng and Technol. 2017; 8 (2): 111–27.
- [17] Bhatt P, Mac Ginley TJ, Choo BS. Reinforced concrete: design theory and examples. 3rd ed. London; New York: Taylor & Francis; 2006.
- [18] Ansys Mechanical APDL Structural Analysis Guide, Release 18.2. ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2017.
- [19] Lipiński J. Fundamenty pod maszyny. Arkady: Warszawa; 1985.
- [20] Wolf J. Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Co.; 1994.