

Jarosław Przewłócki*

orcid.org/0000-0001-5617-290X

Karol Grębowski**

orcid.org/0000-0003-2342-2970

Monika Zielińska***

orcid.org/0000-0002-0923-6664

Analiza nośności zabytkowych fundamentów w kontekście jakości użytych zapraw

Analysis of the Load-Bearing Capacity of Historical Foundations in the Context of the Quality of Mortar Used

Słowa kluczowe: obiekty zabytkowe, modelowanie zaprawy, fundament kamienny, MES, modelowanie materiałowe

Keywords: historical foundations, mortar modeling, stone foundation, FEM, material models

Wprowadzenie

Dokładna analiza pracy fundamentów obiektów historycznych jest niezwykle trudna lub wręcz niemożliwa. Dzieje się tak z kilku powodów. Parametry fizyczne i mechaniczne mogą się znacząco różnić w zależności od wybranego materiału murowego. Trudno jest również określić wymiary fundamentu. Ponadto na ogół historia obciążeń i inne zjawiska, które wcześniej wpływały na stan i rzeczywiste zachowanie fundamentu, są nieznane. Różne czynniki powodują, że pokruszone kamienie, kamyki i cegła, które często występują w starych fundamentach, tracą konsystencję i stają się zbiorem pojedynczych elementów. Przy ocenie zachowania się takich fundamentów istotne jest określenie stanu zaprawy wiążącej kamienie lub cegły. Szczególną uwagę w fundamentach historycznych należy zwrócić m.in. na degradację zaprawy na skutek zmian poziomu wód gruntowych, nieprawidłową instalację drenażową (w tym przypadku zaprawa jest narażona na duże zawilgocenie), długoterminową eksploatację i możliwe występowanie problemów z karbonatyzacją. Brak precyzyjnych matematycznych metod dokładnej analizy interakcji grunt-fundament, zwłaszcza w od-

Introduction

Accurate analysis of the behavior of the foundations of historical buildings is usually rather difficult or even impossible. This is due to several reasons. The physical and mechanical parameters of masonry component materials can differ significantly. It is also difficult to determine the dimensions of the foundation. Moreover, in most cases, the history of loading and other phenomena that previously influenced the condition and actual behavior of the foundation are unknown. Various factors cause crushed stones, pebbles, and brick, which frequently occur in old foundations, to lose their consistency and become a set of individual elements. In assessing the behavior of such foundations, it is essential to determine the condition of mortar that binds the stones or bricks. In historical building foundations, particular attention should be given to, among others, the degradation of mortar due to groundwater level changes, inadequate maintenance of the building's drainage system (in this case, mortar has been exposed to a high degree of moisture), long-term performance, and possible carbonation problems. There are no precise mathematical methods for exact analy-

* prof. dr hab. inż., Wydział Architektury Politechniki Gdańskiej

** dr inż., Wydział Architektury Politechniki Gdańskiej

*** dr inż., Wydział Architektury Politechniki Gdańskiej

* Prof. D.Sc. Ph.D. Eng., Faculty of Architecture, Gdansk University of Technology

** Ph.D. Eng., Faculty of Architecture, Gdansk University of Technology

*** Ph.D. Eng., Faculty of Architecture, Gdansk University of Technology

Cytowanie / Citation: Przewłócki J., Grębowski K., Zielińska M. Analysis of the Load-Bearing Capacity of Historical Foundations in the Context of the Quality of Mortar Used. *Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation* 2021, 66:92–105

Otrzymano / Received: 7.03.2021 • **Zaakceptowano / Accepted:** 25.03.2021

doi: 10.48234/WK66MORTAR

Praca dopuszczona do druku po recenzjach

Article accepted for publishing after reviews

niesieniu do historycznego charakteru i stanu samego fundamentu. Dlatego obecna wiedza jest wystarczającą jedynie do przybliżonej oceny zachowania historycznych fundamentów. Zrozumienie pracy fundamentów obiektów zabytkowych wymaga głębszej wiedzy nie tylko z zakresu mechaniki gruntów i fundamentów, lecz także historii technologii budowy i materiałów budowlanych.

W większości przypadków najsłabszą częścią historycznych fundamentów jest zaprawa murarska. Zgodnie z literaturą dotyczącą budownictwa historycznego najczęściej używane były zaprawy gliniane, gipsowe i wapienne. Pierwsze, starożytne zaprawy były wykonane z błota lub gliny, jednak rzadko znajdują się w fundamentach istniejących zabytkowych budynków. W tym artykule rozważono cztery rodzaje zapraw: zaprawę cementową, cementowo-wapienną, wapienną i gipsową. Zaprawa gipsowa była szeroko stosowana w średniowieczu w historycznych budynkach Europy. Zaprawę wapienną stosowano najczęściej do budowy murów aż do XX wieku. Z czasem wapno palone było wypalane dokładniej, mieszane z piaskiem (bez domieszek gliny i zanieczyszczeń), często z węglem drzewnym lub dodatkami ceramicznymi, nieraz dodawano kruszony wapień lub gips. W średniowieczu produkowano też specjalną zaprawę z domieszkami substancji organicznych, takich jak roztwory cukru, piwo, miód, mleko czy kurze jaja, które przyspieszały proces wiązania¹. Niekiedy dodawano wywar z szyszek jodłowych, który ze względu na zawartość żywic dodatkowo uszczelniał mur, jednocześnie chroniąc przed pękaniem w wyniku zimna. W ciągu ostatnich 150 lat dodawano również naturalne cementy w celu zwiększenia wytrzymałości na ściskanie i skrócenia czasu utwardzania. W ten sposób powstała zaprawa cementowo-wapienna, która – choć wynaleziona ponad 200 lat temu – zyskała popularność dopiero pod koniec XIX wieku.

Można przypuszczać, że omawiane w artykule cztery rodzaje zapraw wykazują różne wady w kontekście ich zastosowania w elementach fundamentowych. Dzieje się tak zwłaszcza, gdy zmieniają się warunki wodne lub obciążenia. Na przykład właściwości mechaniczne zaprawy gipsowej ulegają znacznemu pogorszeniu w wyniku zmian wilgotności. Wody gruntowe nasycone nadmiarem dwutlenku węgla działają korozyjnie na zaprawę wapienną², która jest znacznie bardziej miękka niż zaprawa cementowa i wykazuje stosunkowo dużą odkształcalność. Fundament kamienny jest przykładem konstrukcji murowanej, dlatego jego zachowanie mechaniczne należy modelować jak każdy mur, w tym konstrukcje historyczne. Przeglądy metod stosowanych w badaniach historycznych konstrukcji murowych przedstawiają Paulo B. Lourenço³, Pere Roca⁴, Maciej Prarat⁵, Monika Zielińska⁶ i Marek Gosztyła⁷.

Do oceny bezpieczeństwa obiektów zabytkowych można z powodzeniem stosować podejścia klasyczne. Ogólnie struktury takie można analizować za pomocą analizy granicznej, metod elementów dyskretnych lub metod elementów skończonych. Metoda elementów

soil-foundation interaction, especially relating to the historical nature and conditions of the foundation itself. Therefore, current knowledge is merely sufficient for an approximate estimation of the behavior of historical foundations. An understanding of the work of foundations of historical buildings requires greater insight into not only soil mechanics and foundations, but also the history of building technology and construction materials.

In most of these cases, the weakest part of historical foundations is mortar. According to the literature on historical buildings, clay, gypsum, and lime mortars were most commonly used. The first, ancient mortars were made of mud or clay. However, these mortars are rarely found in the foundations of existing historical buildings. Four mortar types were considered in this paper: cement, cement-lime, lime and gypsum mortar. Gypsum mortar was widely used in medieval times in historical buildings in Europe. Lime mortar was most commonly used for masonry construction until the 1900s. In time, burnt lime was fired more precisely, mixed with sand (without admixtures of clay or contamination), often with charcoal or ceramic ballast. Sometimes, crushed limestone or gypsum was also added. In the Middle Ages, a special mortar was also produced with admixtures of organic substances, such as sugar solutions, beer, honey, milk, or chicken eggs, to accelerate the bonding process.¹ Sometimes a decoction of fir cones was added, which, due to its resin content, would additionally seal the wall, while at the same time protecting it from cracking in the cold. During the past 150 years, natural cements have sometimes been added to increase compressive strength and reduce curing times. Thus, cement-lime mortar was created, which, although invented over 200 years ago, became popular only during the late nineteenth century.

It is only to be expected that the four types of mortar discussed here reveal different weaknesses when they have been used in foundation. This happens especially when water conditions or loads change. For example, the mechanical properties of gypsum mortar are significantly degraded by changes in humidity. Ground water saturated with an excess of carbon dioxide has a corrosive effect on lime mortar,² which is much softer than cement mortar and shows a relatively high deformability. Stone foundations are masonry structures, therefore, their mechanical behavior should be modeled like any masonry, including historical structures. Reviews of methods applicable to the study of masonry historical structures were presented by Paulo B. Lourenço,³ Pere Roca,⁴ Maciej Prarat,⁵ Monika Zielińska⁶ and Marek Gosztyła.⁷

Classical approaches may be used successfully for the assessment of safety of historical structures. In general, such structures can be analyzed by limit analysis, distinct element methods or finite element methods. The finite element method (FEM) for masonry is based on two main modeling approaches, namely, mi-

skończonych (MES) dla murów opiera się na dwóch głównych podejściach do modelowania: mikromodelowaniu i makromodelowaniu⁸. W pierwszym przypadku elementy murowe i zaprawa są modelowane jako kontinuum, a połączenie elementu murowego z zaprawą jest modelowane jako element nieciągły. W drugim – mur jest uważany za jednorodny materiał bez rozróżnienia między elementami murowymi a zaprawą. Ciekawe przykłady zastosowań metod elementów skończonych do analizy historycznych konstrukcji murowych podają m.in. Paulo B. Lourenço⁹ i Aldo Giordano¹⁰. W ostatnim czasie model oparty na degradacji plastycznej, zaproponowany przez Jacoba Lubliner¹¹, jest coraz częściej stosowany w modelowaniu historycznych konstrukcji murowych, m.in. przez Alessandra Fiore¹², Domenico Liberatore¹³ czy Marcina Kujawę¹⁴. Niestety, istnieje niewiele obszernych opracowań poświęconych fundamentom obiektów zabytkowych. Różne aspekty historii budownictwa fundamentowego, ze szczególnym uwzględnieniem jego rozwoju, stosowanych technik, materiałów i metod stabilizacji, opisuje Jarosław Przewłócki¹⁵.

W artykule przeanalizowano wpływ zaprawy jako spoiny łączącej kamienie na zachowanie się fundamentów. Rozważane są cztery rodzaje zapraw: cementowe, cementowo-wapienne, wapienne i gipsowe. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych. Przeanalizowano zarówno stany naprężenia, jak i odkształcenia, porównano wyniki i wyciągnięto pewne wnioski, przebadano wpływ modułu sprężystości każdej zaprawy na sztywność i wytrzymałość podłoża. Zaproponowane podejście zostało zastosowane do istniejącego budynku zlokalizowanego w Polsce, co posłużyło jako częściowa walidacja metody. Degradację materiału zamodelowano poprzez procentowe obniżenie modułu sprężystości, dzięki czemu obliczono wytrzymałość zaprawy i fundamentu.

Studium przypadku – historyczne założenie budynku

Prace związane ze wzmocnieniem konstrukcji kamienicy przy ul. Staromiejskiej w Olsztynie dały początek studium modelowania zapraw w fundamentach obiektów zabytkowych. Jest to budynek podpiwniczony, o trzech kondygnacjach nadziemnych, z poddaszem krytym dachem jednospadowym (ryc. 1). Obiekt jest wpisany do rejestru zabytków pod nr. A-3218 zgodnie z decyzją Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków z 15 listopada 1991. Dodatkowo znajduje się w obrębie układu urbanistycznego starego miasta objętego ochroną konserwatorską na podstawie decyzji WKZ w Olsztynie z 17 września 1957 wpisującej układ urbanistyczny starego miasta do rejestru zabytków województwa warmińsko-mazurskiego pod nr. A-435; w rejestrze znajdują się również, decyzją z 2 lipca 1992, nawarstwienia kulturowe tego obszaru. Wpis do rejestru obiektów dziedzictwa kulturowego to nie tylko przywileje, lecz także obowiązek odpowiedniego utrzymania

cro-modeling and macro-modeling.⁸ In the first case, the units and mortar are modeled as continuum elements and unit-mortar interfaces are modeled as discontinuum elements. In the latter, masonry is treated as a homogenous material without distinguishing between units and mortar. Some interesting examples of applications of finite element methods to analyze historical masonry structures were given, among others, by Paulo B. Lourenço⁹ and Aldo Giordano.¹⁰ Recently, a damage model based on plastic degradation, proposed by Jacob Lubliner,¹¹ has been increasingly used in the modeling of historical masonry structures, e.g. by Alessandra Fiore,¹² Domenico Liberatore,¹³ or Marcin Kujawa.¹⁴ Unfortunately, there are few comprehensive studies devoted to foundations of historical buildings. Various aspects of the history of foundation engineering, with a particular focus on its development, techniques applied, materials used, and stabilization methods, were described by Jarosław Przewłócki.¹⁵

This paper presents an analysis of the influence of mortar as a joint connecting stones on the behavior of foundations. Four types of mortar, namely, cement, cement-lime, lime, and gypsum mortars, are considered. The calculations were performed by the finite element method. Both stress and strain states were analyzed. The results were compared, and some conclusions were drawn. The influence of the elasticity modulus of each mortar on the stiffness and strength of the foundation was analyzed. The proposed approach was applied to an existing building located in Poland, which served as its partial validation. The degradation of material was modeled by the percentage reduction in the modulus of elasticity, which made it possible to calculate the strength of the mortar itself and of the entire foundation.

Case study – historical foundation of the building

Works related to strengthening the structure of a tenement building located in Olsztyn gave rise to the present study on the modeling of mortars in historical building foundations. It is a building with a basement, three stories above-grade, and an attic covered with a pent roof (Fig. 1). The building is listed in the historical monuments register under number A-3218 in accordance with the decision of the Voivodeship Historical Monuments Conservator (hereinafter referred to as MC) of November 15, 1991. Additionally, the building is located within the historical urban layout of the old town, which is protected by a historical preservation ordinance in accordance with the Olsztyn MC's decision of September 17, 1957. It lists the old town urban layout in the historical monuments register of the Warmian-Masurian Voivodeship under number A-435. The historical monuments register also includes cultural stratifications of this area as specified in the decision of July 2, 1992. Listing a building in the historical monuments entails not only



Ryc. 1. Widok budynku położonego w Olsztynie przy ul. Staromiejskiej: a) elewacja tylna, b) elewacja frontowa; fot. M. Zielińska 2012.
 Fig. 1. View of the building located in Olsztyn at Staromiejska Street: a) rear elevation, b) front elevation; photo by M. Zielińska 2012.

nia obiektu. Przywrócenie nieużytkowanego budynku do warunków umożliwiających jego prawidłową eksploatację jest zadaniem trudnym – inżynierowie i projektanci muszą zaplanować prace w taki sposób, by wzmocnić budynek i umożliwić mu spełnianie zamierzonego celu, nie niszcząc historycznej substancji.

Omawiany budynek od lat nie był użytkowany ze względu na zły stan techniczny. Ekspertyzy i inwentaryzacje odkrywkowe, a także planowana zmiana przeznaczenia obiektu zmusiły projektantów do wprowadzenia zmian w konstrukcji. Do najtrudniejszych należała wymiana stropów drewnianych, bardzo zniszczonych i wielokrotnie naprawianych, na stalowe i żelbetowe. Nowe stropy zaprojektowano jako żelbetowe płyty oparte na belkach dwuteowych. Ceglane ściany wzmocniono żelbetowymi ramami. Zaproponowano wykonanie nowej, żelbetowej klatki schodowej, a konstrukcję dachu zaprojektowano jako stalową. Wszystkie prace wiązały się ze znacznym wzrostem obciążenia przenoszonego na średnio-wieczne fundamenty. Wprowadzone zmiany wymusiły konieczność wzmocnienia samych fundamentów, co jest zabiegiem niezwykle skomplikowanym¹⁶, gdyż nieprawidłowa realizacja może doprowadzić do utraty stateczności budynku, jego osiadania lub powstania nowych pęknięć. Właściwe zaplanowanie i wykonanie prac przynosi ogromne korzyści w zakresie stabilizacji budynku.

Fundamenty kamienne budynku (ryc. 2) miały szerokość ok. 60 cm i zróżnicowaną wysokość ze względu na różnice w poziomie przylegającego terenu. Fundament od strony zewnętrznej był zawilgocony i wykazy-

privileges, but also an obligation to ensure its proper maintenance. It is a difficult task to restore an unused building to the conditions that allow its proper use. Engineers and designers need to plan the work in such a way as to strengthen the building and enable it to serve its intended purpose without destroying the historical substance of the building.

The building has not been used for years because of its the poor technical condition. The expertises and stratigraphic surveys conducted, as well as the planned change of the building's use, led to design changes. One of the major changes was the replacement of wooden ceilings with steel and reinforced concrete ones. The wooden ceilings were significantly damaged and had been repaired multiple times. The new ceilings were designed as reinforced concrete slabs resting on I-beam flanges. The building's brick walls were strengthened with reinforced concrete frames. Constructing a new, reinforced concrete staircase was suggested, and the roof structure was designed to be made of steel. All design works were associated with a significant increase in the load transmitted to the medieval foundations. The design changes that were introduced necessitated the strengthening the foundations themselves, which is an extremely complicated procedure.¹⁶ Performing it incorrectly may lead to the loss of the building's stability, its subsidence, or the formation of new cracks. The proper planning and execution of works brings enormous advantages in terms of stabilizing the building.

The stone foundations (Fig. 2) had a width of about 60 cm and a varied height due to differences in the ground level. The foundation was damp from



Ryc. 2. Widok fundamentu badawczego budynku zlokalizowanego w Olsztynie przy ul. Staromiejskiej: a) na zewnątrz budynku, b) wewnątrz budynku; fot. M. Zielińska 2012.

Fig. 2. View of the position of research foundation of the building located in Olsztyn at Staromiejska Street: a) outside the building, b) inside the building; photo by M. Zielińska 2012.

wał znaczne ubytki zaprawy, które dotychczas nie były uzupełniane. Rozważania nad wzmocnieniem fundamentów skupiono na zaprawie murarskiej, ponieważ jest to zwykle najsłabsza część kamiennych fundamentów (fragment fundamentów ukazano na ryc. 2). Poddano je analizie numerycznej, aby określić, czy zaprawa jest w stanie przetrzymać dodatkowe obciążenia. Wcześniej niewielkie obciążenia przenoszone na fundament, szacowane na ok. 200 kN/m, wzrosły do 280 kN/m ze względu na nową konstrukcję stalową i żelbetową oraz nową funkcję budynku.

Model plastyczno-degradacyjny

Analizę numeryczną pracy fundamentu przeprowadzono, wykorzystując model plastyczno-degradacyjny materiału. Został on po raz pierwszy zaproponowany pod nazwą modelu „Barcelona” przez Jacoba Lubliner¹⁷, a udoskonalony przez Lucię Barbu¹⁸ i Edalata Behbahaniego¹⁹. Lubliner wykazał, że rosnące obciążenie zewnętrzne prowadzi do degradacji materiału, a co za tym idzie: utrata jego nośności wynika ze wzrastających odkształceń plastycznych. Sprzężenie sprzężysto-plastycznej charakterystyki materiału z opisem jego zniszczenia realizowane jest poprzez wyrażenie równań konstytutywnych teorii plastyczności za pomocą naprężeń efektywnych. Z punktu widzenia przyrostowej teorii plastyczności omawiany model charakteryzują:

- powierzchnia plastyczności będąca rozszerzeniem klasycznego modelu Druckera–Pragera, w którym południki (tworzące powierzchnię plastyczności w przekroju merydjalnym) są prostymi, natomiast przekrój dewiatorowy jest niekołowy;
- niestowarzyszone prawo płynięcia, w którym odkształcenia plastyczne wyznaczone są na podstawie powierzchni potencjału plastycznego różnej od powierzchni plastyczności;
- nieliniowe prawo wzmocnienia izotropowego typu dwumechanizmowego (niezależnie dla ściskania

the outside and showed significant mortar losses, which had not been refilled so far. Considerations on strengthening the foundations were focused on mortar, as it was usually the weakest part of the stone foundations. Figure 2 shows a fragment of the foundations analyzed here. The foundations were analyzed numerically, to determine whether the mortar was capable of carrying additional loads. The previously minor loads transferred to the foundation, estimated at about 200 kN/m, increased to 280 kN/m because of the new steel and reinforced concrete structure and the new function of the building.

Plastic damage model

The numerical analysis of the foundation’s behavior was carried out using the plastic damage model of the material. It was first proposed, under the name of the Barcelona model, by Jacob Lubliner,¹⁷ and developed by Lucia Barbu,¹⁸ and Edalat Behbahani.¹⁹ Lubliner demonstrated that an increasing external load leads to the degradation of the material, and hence the loss of its load bearing capacity results from increasing plastic deformations. The coupling of the elastic-plastic characteristics of the material and descriptions of damage to the material is achieved by means of the constitutive equations of the theory of plasticity by the effective stresses. From the perspective of the incremental theory of plasticity, the plastic damage model is characterized by:

- a yield surface that is an extension of the classical Drucker-Prager model, in which the meridians (forming a yield surface in a meridian cross-section) are lines, while the deviatoric cross section is non-circular;
- a non-associative flow rule, in which plastic deformations are determined on the basis of yield surface plastic potential different from the yield surface;
- nonlinear isotropic hardening rules of a bimechanic-

i rozciągania), oparte na hipotezie wzmocnienia odkształceniowego.

Istotą modelu jest zdefiniowanie mechanizmu zniszczenia betonu w stanach jednoosiowych, a następnie prawidłowa transformacja tego mechanizmu na stany bardziej złożone, wieloosiowe. Jednym z podstawowych założeń modelu plastyczno-degradacyjnego jest dekompozycja prędkości odkształceń:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (1)$$

gdzie $\dot{\varepsilon}$ oznacza prędkość odkształceń całkowitych, $\dot{\varepsilon}^{el}$ – prędkość odkształceń sprężystych, a $\dot{\varepsilon}^{pl}$ – prędkość odkształceń plastycznych. Wzór opisujący związki konstytutywne sformułowany jest w postaci:

$$\sigma = (1-d)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (2)$$

gdzie D_0^{el} jest początkową sztywnością nieuszkodzonego materiału.

Wzór opisujący degradację sztywności przedstawiony jest w postaci:

$$D^{el} = (1-d)D_0^{el} \quad (3)$$

gdzie D^{el} jest skalarną zmienną degradacji sztywności, która przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 1.

Wartość 0 oznacza materiał nieuszkodzony, natomiast wartość 1 – materiał całkowicie zniszczony. Parametr ten pozwala połączyć mechanizm zniszczenia w postaci pęknięcia i miażdżenia z redukcją sztywności materiału.

Analiza numeryczna

Prawidłowo zaprojektowany i wykonany fundament powinien być dostosowany nie tylko do przeznaczenia i rodzaju wznoszonego na nim budynku, ale także do warunków geotechnicznych i hydrogeologicznych gruntu. Analizując każdy fundament, należy zweryfikować dwa podstawowe warunki: nośność oraz stan graniczny użyteczności, które są określone w normach. Trzeba zauważyć, że przy przekroczeniu nośności gruntu konieczna jest natychmiastowa interwencja w celu wzmocnienia podłoża lub fundamentu. Interwencja jest również konieczna w przypadku zagrożenia stateczności spowodowanego poślizgiem gruntu. Jeśli chodzi o przemieszczenia poziome i osiadania, określenie ich granicy jest często subiektywne i wymaga odpowiednich ustaleń. Dzieje się tak dlatego, że stare konstrukcje były w stanie przejść duże odkształcenia z niewielkimi uszkodzeniami lub ich osiadanie mogło być ustabilizowane już dawno temu. Określenie maksymalnego naprężenia w fundamencie i podłożu jest istotne przy weryfikacji dwóch warunków normatywnych (stanów granicznych nośności i użyteczności). W starych fundamentach szczególnie duży wpływ na

cal type (independent of compression and tension), based on the hypothesis of deformation hardening.

The main purpose of the model is to define the mechanism of concrete failure in uniaxial states and then to correctly transform this mechanism to represent more complex, multi-axial states. One of the basic assumptions of the plastic damage model is the strain rate decomposition:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (1)$$

where $\dot{\varepsilon}$ is the strain-rate of total deformation, $\dot{\varepsilon}^{el}$ is the strain-rate of elastic strains, and $\dot{\varepsilon}^{pl}$ is the strain-rate of plastic deformation. Constitutive relationships are described by the following formula:

$$\sigma = (1-d)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (2)$$

where D_0^{el} is the initial stiffness of the undamaged material.

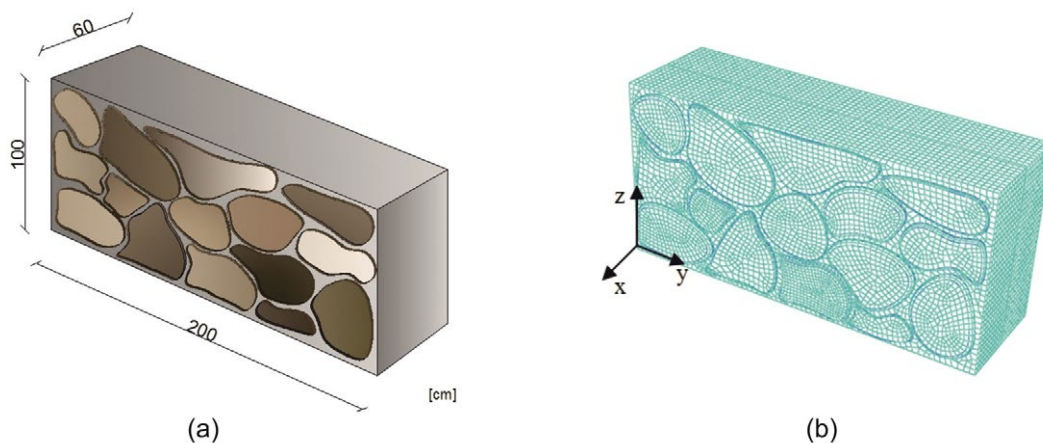
Stiffness degradation is described by the formula:

$$D^{el} = (1-d)D_0^{el} \quad (3)$$

where D^{el} is a scalar stiffness degradation variable that ranges from 0 to 1. A value of 0 indicates that the material is undamaged, while a value of 1 indicates that the material is completely damaged. This parameter makes it possible to combine the failure mechanism of cracking and crushing with the reduction of material stiffness.

Numerical analysis

A properly designed and constructed foundation should be adapted not only to the use or type of the building erected on it, but also to the geotechnical and hydrogeological conditions of the soil it rests on. While analyzing each foundation, it is important to verify two basic conditions: the load-bearing capacity and the limit state of serviceability, which are specified in applicable standards. It should be noted that in case of exceeding the load-bearing capacity of the soil, immediate intervention is necessary to strengthen the substrate or the foundation. Intervention is also necessary in the case of a threat to stability due to slips of the soil. As far as horizontal displacement and subsidence are concerned, the determination of their limit is often subjective and requires appropriate arrangements. This is because old structures were able to accommodate large deformations with slight damage, or their subsidence may have stabilized a long time ago. It is essential to determine the maximum stress in the foundation and in the subsoil when two normative conditions (the ultimate and serviceability limit states) are verified. In the case of old foundations, mortar connecting stones or bricks has an especially



Ryc. 3. Część fundamentu kamiennego poddana analizie: a) geometria modelu, b) model MES; oprac. autorzy.
Fig. 3. Part of the stone foundation subjected to analysis: a) geometry of model, b) FE model; by the authors.

naprężenia i przemieszczenia ma zaprawa łącząca kamienie lub cegły. Dlatego połączenia elementów murewowych i zaprawy należy odpowiednio zamodelować i uwzględnić ich wpływ na zachowanie fundamentów.

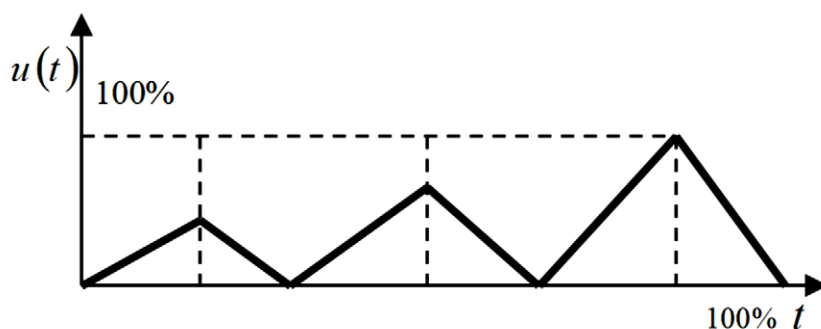
W pracy wykonano analizę numeryczną, uwzględniając kolejno cztery rodzaje zapraw. Obliczenia przeprowadzono odpowiednio dla zaprawy cementowej, cementowo-wapiennej, wapiennej i gipsowej. Pierwszym krokiem w analizie numerycznej jest dobór metody modelowania zaprawy, która w optymalny sposób odwzoruje rzeczywistą pracę tego elementu. Autorzy wybrali model plastyczno-degradacyjny. W badaniu analizę numeryczną przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych (oprogramowanie Abaqus/Explicit). Obliczenia numeryczne wykonano dla równomiernie obciążonej części fundamentu o wymiarach $60 \times 100 \times 200$ cm (ryc. 3a). Model fundamentu kamiennego podzielono za pomocą siatki elementów brylowych. Podstawowy był model 3D; zastosowano w nim kamienie o nieregularnym kształcie i różnych rozmiarach: od ok. 20 cm do nawet 80 cm. Kształt kamieni został odwzorowany na podstawie rzeczywistego fragmentu fundamentu znajdującego się w budynku. Właściwości mechaniczne kamieni przyjęto jako domyślne na podstawie danych zawartych w bazie materiałowej granitu polowego o następujących właściwościach: gęstość nasypowa $2,75 \text{ g/cm}^3$, gęstość pozorną $2,671 \text{ g/cm}^3$, szczelność 0,998, wytrzymałość na ściskanie 220 MPa.

Model numeryczny fundamentu podzielono na 4362 bryłowe elementy sześciennie o zredukowanej integracji z liniową funkcją kształtu typu C3D8R o łącznej liczbie węzłów równej 4568 (ryc. 3b). Obliczenia przeprowadzono dla kilku wymiarów siatki elementów skończonych. Analiza zbieżności polegała na uniezależnieniu wyników naprężeń od gęstości siatki²⁰. Docelową wielkość elementu skończonego przyjęto, gdy różnica między wynikami naprężeń dla poszczególnych siatek wynosiła ok. 3%. Najwyższą zbieżność uzyskano dla siatki o wymiarze ok. 10 mm. Charakterystyczne parametry zapraw wymagane do przepro-

great impact on both stresses and displacements. That is why such joints should be properly modeled, and their influence on the behavior of foundations must be taken into account.

The paper presents a numerical analysis taking into account four types of mortars. The calculations were performed for cement, cement-lime, lime and gypsum mortar, respectively. The first step in the numerical analysis is the selection of a mortar modeling method that optimally reflects the actual work of this element. Such a model is the degradation-plastic model proposed by the authors. In the present study, the structural analysis was carried out by the finite element method (Abaqus/Explicit software). Numerical calculations were performed for a uniformly loaded part of a foundation with dimensions $60 \times 100 \times 200$ cm (Fig. 3a). The stone foundation model was divided using solid elements. The foundation model was a 3D model. The model used stones of irregular shape and different sizes. Their dimensions ranged from about 20 cm to as much as 80 cm. The shape of the stones was mapped based on the actual foundation located at the construction site. The mechanical properties of stones were implemented as defaults based on data contained in the material base for field granite with the following properties: bulk density 2.75 g/cm^3 , apparent density 2.671 g/cm^3 , tightness 0.998, compressive strength 220 MPa.

The numerical model of the foundation was divided into 4362 cubic solid elements of reduced integration with a linear shape function of the C3D8R type with a total number of nodes equal to 4568 (Fig. 3b). The calculations were carried out for several finite element mesh sizes. The analysis of convergence consisted in making the stress results independent of the mesh density.²⁰ The target FE size was accepted when the difference between the stress results for individual meshes was approximately 3%. The highest convergence was obtained for a mesh of 10 mm. The characteristic parameters of mortars required for numerical analysis are



Ryc. 4. Wykres obciążenia jako funkcja przemieszczenia kinematycznego w czasie; oprac. autorzy.

Fig. 4. Load diagram as a function of kinematic displacement over time; by the authors.

wadzenia analizy numerycznej zestawiono w tabeli 1. Obciążenie zostało przyłożone do górnej powierzchni fundamentu. Wyznaczone zostało przemieszczenie węzłów górnej powierzchni elementu w pionie, zmieniające się w czasie (ryc. 4).

Ze względu na ciągłość posadowienia przeprowadzono analizę numeryczną części elementu, zapewniając zgodność rozwiązań poprzez zastosowanie odpowiednich warunków brzegowych na odpowiedniej płaszczyźnie symetrii. Składowe przemieszczenia węzłów leżących na każdej płaszczyźnie symetrii zostały zablokowane, przez co ruch w kierunku osi Y (ryc. 3b) był niemożliwy. W kierunku osi X umożliwiono przemieszczanie węzłów. Fundament został utwierdzony u podstawy, dzięki czemu zablokowane zostały przesunięcia pionowe i poziome. Dla ścian bocznych fundamentu nie zastosowano żadnego ograniczenia w kierunku osi X, założono nacisk boczny wywierany w stanie spoczynku.

Wyniki analizy numerycznej fundamentu kamiennego według modelu plastyczno-degradacyjnego przedstawiono na rycinie 5a w postaci map naprężeń

summarized in Table 1. The load was applied on the upper surface of the foundation. It was described by a vertical displacement of the nodes of the upper surface of the element, varying with time (Fig. 4).

Due to the continuity of the foundation, the numerical analysis was carried out for a part of the element, ensuring the compatibility of solutions by applying appropriate boundary conditions on the corresponding plane of symmetry. The components of the displacement of nodes lying on each plane of symmetry were blocked, so movement in the direction of the y-axis (Fig. 3b) was impossible. In the x-axis direction, the displacement of nodes was enabled. The foundation was fixed at the base, so that vertical and horizontal displacements were blocked. No restriction along the x-direction was applied for the side walls of the foundation. Lateral pressure exerted in the at-rest state was assumed.

The results of a numerical analysis of the stone foundation according to the damaged-plastic mortar model are presented in Fig. 5a in the form of stress

Tabela 1. Charakterystyczne parametry zapraw²¹.

| Rodzaj zaprawy | Zaprawa cementowa | Zaprawa cementowo-wapienna | Zaprawa wapienna | Zaprawa gipsowa |
|--|-------------------|----------------------------|------------------|-----------------|
| Moduł Younga E_0 [GPa] | 20 | 12 | 7 | 4 |
| Gęstość ρ [kg/m ³] | 2000 | 1800 | 1500 | 1500 |
| Współczynnik Poissona ν [-] | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| Kąt dylatacji Ψ [°] | 16 | 16 | 14 | 11 |
| Mimośród potencjału plastycznego [-] | 0,050 | 0,047 | 0,042 | 0,038 |
| Stosunek wytrzymałości na ściskanie oznaczonej w stanie dwuosiowym do oznaczonej w stanie jednoosiowym [-] | 1,120 | 1,090 | 1,074 | 1,021 |
| Współczynnik kształtu k_c [-] | 0,635 | 0,598 | 0,474 | 0,352 |
| Parametr wiskotyczny [-] | 0,0020 | 0,0018 | 0,0015 | 0,0014 |
| Maksymalne naprężenia σ_c [MPa] | 7,12 | 4,08 | 3,02 | 2,51 |
| Odkształcenia sprężyste ϵ_c [-] | 0,00202 | 0,00218 | 0,00325 | 0,00421 |
| Degradacja przy ścisaniu d_c | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Odkształcenia sprężyste ϵ_c [-] | 0,00658 | 0,00725 | 0,00847 | 0,00987 |
| Maksymalne naprężenia σ_t [MPa] | 0,68 | 0,38 | 0,29 | 0,23 |
| Odkształcenie spękania ϵ_c [-] | 0,00345 | 0,00436 | 0,00541 | 0,00712 |
| Degradacja przy ścisaniu d_t [-] | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,97 |
| Odkształcenie spękania ϵ_c [-] | 0,00345 | 0,00436 | 0,00541 | 0,00712 |

Źródło: opracowanie własne.

Table 1 Characteristic parameters of mortars.²¹

| Type of mortar | cement mortar | cement-lime mortar | lime mortar | gypsum mortar |
|---|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| Modulus of elasticity E_0 [GPa] | 20 | 12 | 7 | 4 |
| Bulk density ρ [kg/m ³] | 2000 | 1800 | 1500 | 1500 |
| Poisson's ratio ν [-] | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.18 |
| Dilatation angle Ψ [°] | 16 | 16 | 14 | 11 |
| Eccentricity [-] | 0.050 | 0.047 | 0.042 | 0.038 |
| Biaxial/uniaxial compression plastic strain ratio [-] | 1.120 | 1.090 | 1.074 | 1.021 |
| Shape factor k_c [-] | 0.635 | 0.598 | 0.474 | 0.352 |
| Viscosity [-] | 0.0020 | 0.0018 | 0.0015 | 0.0014 |
| max Stress σ_c [MPa] | 7.12 | 4.08 | 3.02 | 2.51 |
| Elastic strain ϵ [-] | 0.00202 | 0.00218 | 0.00325 | 0.00421 |
| Compressive degradation d_c | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| Elastic strain ϵ [-] | 0.00658 | 0.00725 | 0.00847 | 0.00987 |
| max Stress σ_t [MPa] | 0.68 | 0.38 | 0.29 | 0.23 |
| Crushing strain ϵ_c [-] | 0.00345 | 0.00436 | 0.00541 | 0.00712 |
| Tensile degradation d_t [-] | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.97 |
| Crushing strain ϵ_c [-] | 0.00345 | 0.00436 | 0.00541 | 0.00712 |

dla wszystkich rozważanych typów zapraw; wskazano również punkty, w których obliczono odkształcenia. Zależności między naprężeniami i odkształceniami w tych punktach pomiarowych prezentuje rycina 5b.

Wartości szczytowe dla poszczególnych krzywych na rycinie 5b odpowiadają wytrzymałości materiału wyznaczonej na podstawie modelu plastyczno-degradacyjnego – wytrzymałość zaprawy wapiennej jest ponad 50% niższa niż zaprawy cementowej, 30% niższa od zaprawy cementowo-wapiennej i ok. 20% niższa od zaprawy gipsowej.

Sztywność i wytrzymałość fundamentów a sztywność zaprawy

Przesunięcie się zachowania konstytutywnego zaprawy do zakresu nieliniowego związane jest z występowaniem w materiale początkowych defektów, które łączą się i rozprzestrzeniają pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Aby matematycznie uwzględnić to specyficzne zachowanie zaprawy, wykorzystuje się założenia teorii plastyczności. Dopiero po uwzględnieniu degradacji materiału teoria jest w stanie zapewnić pełny obraz działania tak kruchego materiału, jak zaprawa, także poza obszarem sprężystym. W celu zbadania wpływu degradacji zaprawy na wytrzymałość fundamentu wykonano obliczenia numeryczne. Uwzględniono wpływ defektów oraz stopień zniszczenia fundamentów, kontrolując wartość modułu Younga.

Zaprawa jako materiał konstrukcyjny z upływem czasu zmienia swoje właściwości, przez co jej wytrzymałość jest relatywnie mniejsza. Do analizy tego przypadku wzięto pod uwagę degradację materiału. Degradację zaprawy wdrożono poprzez zmniejszenie wartości modułu Younga ze 100% do 0% w krokach co 10%. W ten sposób otrzymano po 10 wykresów wytrzymałości na podstawie modelu plastyczno-degradacyjnego odpowiednio dla zaprawy cementowej, cementowo-wapiennej, wapiennej i gipsowej. Dla każdego z tych wykresów granicę wytrzymałości określono jako wartość szczytową

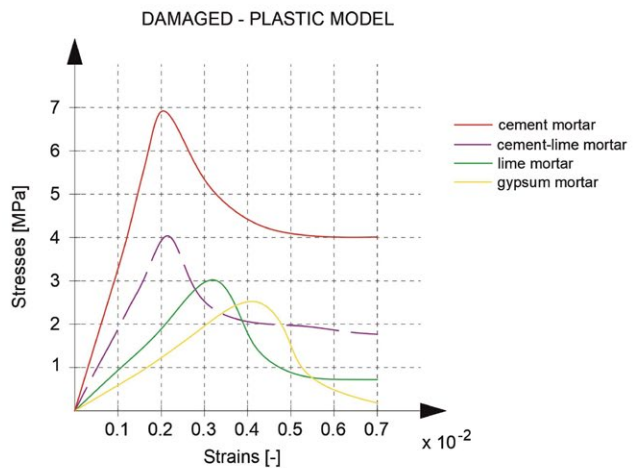
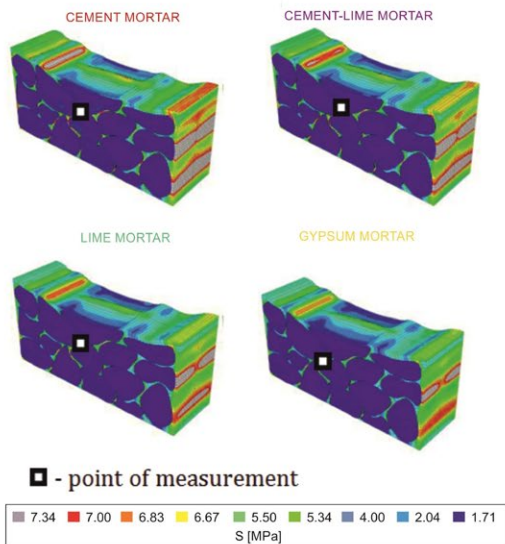
maps for all mortars considered. Points at which strains were calculated have also been indicated. The relationships between stresses and strains at those measurement points have been shown in Fig. 5b.

Peak values for particular curves in Fig. 5b correspond to the strength of the material determined on the basis of the plastic damage model. According to Fig. 5b, the strength of lime mortar is over 50% lower than that of cement mortar, 30% lower than that of cement-lime mortar, and about 20% lower than that of gypsum mortar.

Stiffness and strength of foundations vs. stiffness of mortar

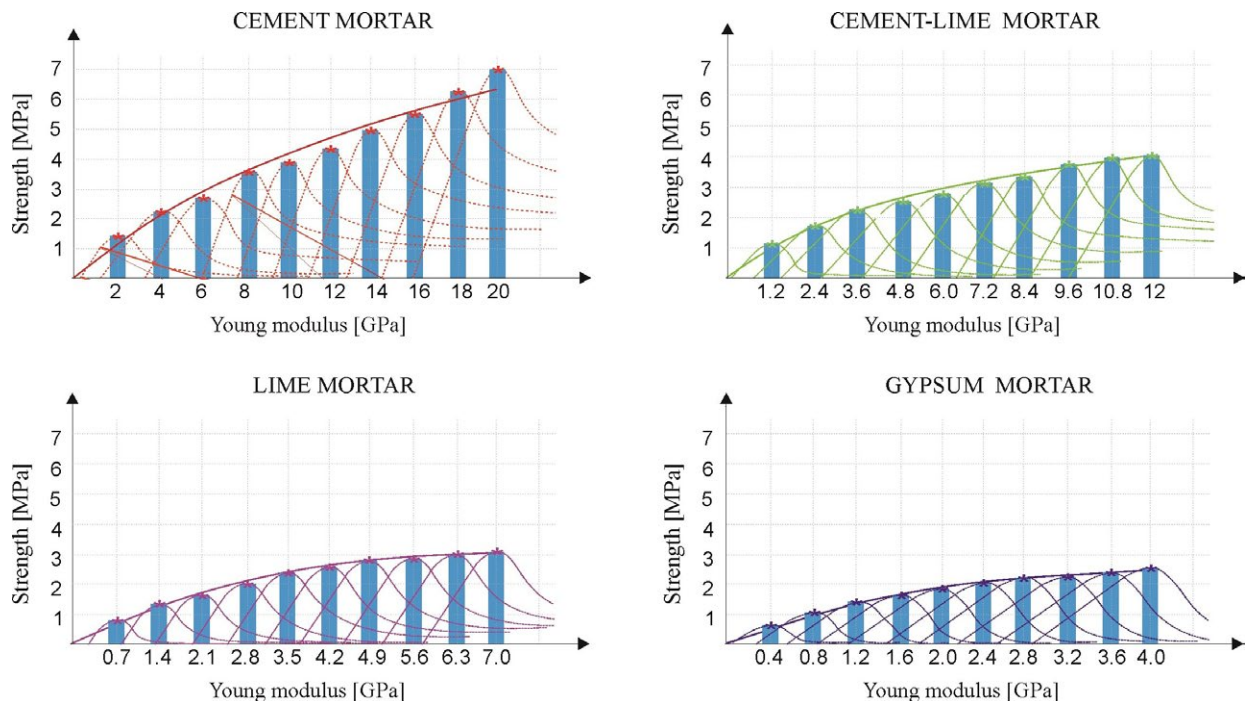
The excursion of the constitutive behavior of mortar to the nonlinear range is related to the occurrence of certain initial defects in the material, which combine and propagate under the influence of external loads. The assumptions of the plasticity theory are used to take mathematical account of this specific mortar behavior. Only after taking the material's degradation into account is the theory capable of providing a complete picture of the performance of such a brittle material as mortar, also outside the elastic area. In order to examine the influence of mortar degradation on the foundation strength, numerical calculations were performed. The influence of defects and the degree of damage to the foundations were taken into consideration by controlling the value of Young's modulus.

Mortar as a construction material changes its properties over time, and consequently its strength becomes relatively lower. To analyze this case, material degradation was taken into account. Mortar degradation was implemented by reducing the value of Young's modulus from 100% to 0% in increments of 10%. Ten strength charts were thus obtained based on the plastic damage model for cement, cement-lime, lime and gypsum mortars, respectively. For each of these graphs, the strength limit was determined as the peak value. These values are marked with a bar graph in Figure 6.



Ryc. 5. Mapy naprężeń fundamentu dla zaprawy cementowej, cementowo-wapiennej, wapiennej i gipsowej (a), wykres naprężeń i odkształceń dla wybranego punktu pomiaru (b); oprac. autorzy.

Fig. 5. Foundation stress maps for cement, cement-lime, lime and gypsum mortar (a), stress and strain diagram for the selected measurement point (b); by the authors.



Ryc. 6. Zależność wytrzymałości zaprawy od stopnia jej degradacji wyrażonego za pomocą modułu Younga; oprac. autorzy.

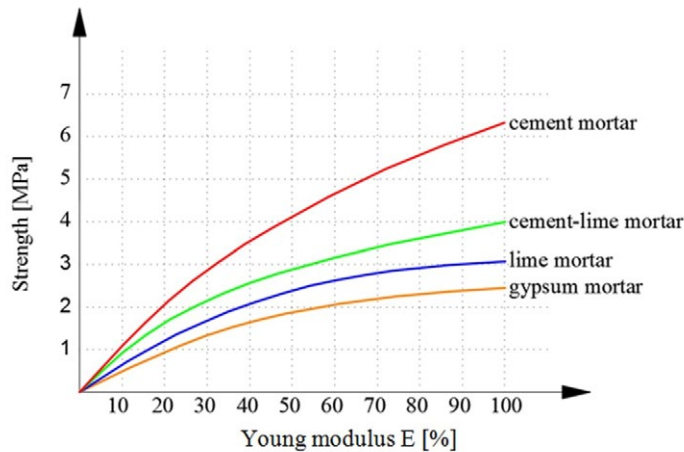
Fig. 6. Dependence of mortar strength on the degree of its degradation expressed by Young's modulus; by the authors.

(wartości te zaznaczono na wykresie słupkowym na ryc. 6). Aproksymacja wyników pozwoliła narysować krzywą określającą zależność między modułem Younga a wytrzymałością końcową (ryc. 6).

Wyniki te posłużyły do skonstruowania wykresów przedstawiających ostateczną zależność między wytrzymałością a modułem Younga dla każdej zaprawy (ryc. 7). Oś pionowa określa wytrzymałość materiału, a oś pozioma odpowiada procentowi jego modułu sprężystości. Procentowe zmniejszenie wartości modułu Younga (ze 100% do 0%) oznacza degradację materiału

Approximation of the results made it possible to draw a curve line determining the relationship between Young's modulus and ultimate strength. The results of the analysis are presented in Figure 6.

These results were used to construct graphs representing the final relations between strength and Young's modulus for each mortar, summarized in Figure 7. The vertical axis defines the strength of the material, whereas the horizontal axis denotes the corresponding percentage of its modulus of elasticity. The percentage reduction in the value of Young's modulus (from 100%



Ryc. 7. Wykres zależności wytrzymałości i modułu Younga dla zaprawy cementowej, cementowo-wapiennej, wapiennej i gipsowej; oprac. autorzy.

Fig. 7. Relation graph of strength and Young modulus for cement, cement-lime, lime and gypsum mortars; by the authors.

do momentu całkowitego zniszczenia. Poszczególne krzywe wyznaczono z połączenia punktów (ryc. 6), w których poszczególne rodzaje zapraw osiągają granice wytrzymałości przy danej wartości modułu Younga.

Fundament kamienny opisanego obiektu zlokalizowanego w Olsztynie wykonano z zastosowaniem zaprawy gipsowej. Używając normowych wzorów dla nieregularnego muru kamiennego²², oszacowano wytrzymałość fundamentu (f_d):

$$f_d = \frac{K \cdot f_b^{0.7} \cdot f_m^{0.3} \cdot \eta}{\gamma_M} \quad (4)$$

Wytrzymałość elementu ceglanego (f_b) przyjęto jako 13 MPa, współczynnik K jako 0,4, a współczynnik bezpieczeństwa (γ_M) jako 2,5. Dodatkowo biorąc pod uwagę obecność połączeń podłużnych, współczynnik η ustalono na 0,8. Wytrzymałość zaprawy (f_m) przyjęto na bazie ryciny 7. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że konieczna jest wymiana starej, zdegradowanej zaprawy na nową. Zaprawę gipsową zastąpiono cementową, ze względu na jej lepsze właściwości wytrzymałościowe. Wytrzymałość fundamentów obliczoną na podstawie wzoru (4) dla oryginalnej zaprawy gipsowej i nowej zaprawy cementowej zaprezentowano na rycinie 8. Wykres przedstawia zależność między degradacją fundamentu a jego sztywnością, gdzie 100% degradacji oznacza brak resztkowej sztywności. Wytrzymałość podana jest w kN/m dla fundamentu o szerokości 60 cm, a wykres pokazuje wartości obciążenia przenoszonego na fundament przed generalnym remontem budynku i po takim remoncie.

Z wykresu wynika, że fundament z zaprawą gipsową przed renowacją był w stanie przenieść obciążenia z wyższych partii budynku nawet przy utracie przez zaprawę 50% pierwotnej wytrzymałości. Jednak po remoncie i zmianie konstrukcji budynku istniejący fundament nie przenosi zwiększonego obciążenia,

to 0%) represents degradation of the material from until its complete damage. Particular curves were determined from the connection of points (Fig. 6), at which individual types of mortars reach the strength limits for a given value of Young's modulus.

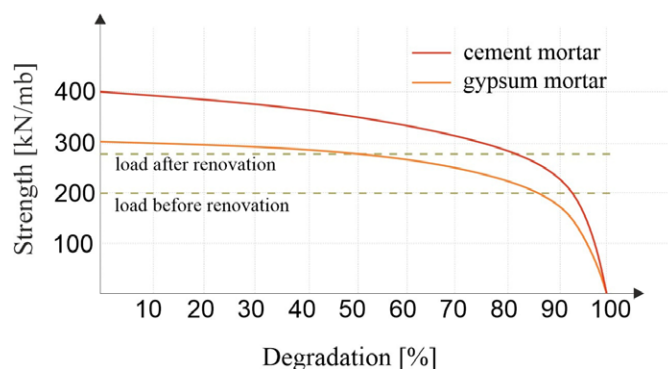
The stone foundation of the building under investigation, located in Olsztyn, was made with the use of gypsum mortar. Using the standard formulas for irregular stone masonry²² the strength of the foundation (f_d) was estimated using the formula below:

$$f_d = \frac{K \cdot f_b^{0.7} \cdot f_m^{0.3} \cdot \eta}{\gamma_M} \quad (4)$$

The strength of a brick element (f_b) was taken as 13 MPa, the coefficient K as 0.4, and the factor of safety (γ_M) as 2.5. In addition, taking into account the presence of longitudinal joints, the η coefficient was established as 0.8. The mortar strength (f_m) was taken from Fig. 7. The results obtained for this case indicated the need to replace the old, degraded mortar with new mortar. It was substituted by cement mortar because of the latter's better strength properties.

The strength of the foundations calculated from (4) for the original gypsum mortar and the new cement mortar is shown in Fig. 8. The diagram shows the relationship between the degradation of the foundation and its stiffness, where 100% degradation means no residual stiffness. The strength is shown in kN/m for a 60-cm-wide foundation, and the graph also shows the values of load transmitted to the foundation before and after the general renovation of the building.

From the graph above it appears that the foundation with gypsum mortar before renovation was capable of transferring the load from higher parts of the building even with the mortar losing 50% of its original strength. However, after the renovation and alteration of the building's structure, the existing foundation fails



Ryc. 8. Wykres zależności wytrzymałość–szytywność (degradacja) dla fundamentu rozpatrywanego obiektu; oprac. autorzy.

Fig. 8. Strength-stiffness (degradation) relation graph for all foundation; by the authors.

zwłaszcza gdy zaprawa utraciła właściwości wytrzymałościowe. Z kolei zaprawa cementowa zapewnia właściwe przeniesienie obciążenia zwiększonego przez zmianę konstrukcji. W omawianym fundamencie zaprawę wymieniono całkowicie tam, gdzie było to możliwe. W miejscach, do których dostęp był utrudniony, wymieniano ją częściowo, jednak nigdzie wymiana nie była mniejsza niż 50% całej zaprawy na danym odcinku. Ze względu na nadzór konserwatorski prace przy budynku przebiegały z niezwykłą starannością.

Na podstawie modelu plastyczno-degradacyjnego ujawniono zależności między wytrzymałością fundamentu a sztywnością poszczególnych typów zapraw (ryc. 8). Z wykresu można odczytać, że dla fragmentu tego typu fundamentu z zaprawą gipsową o szerokości 60 cm wytrzymałość sięgała pierwotnie 300 kN/m. Z biegiem czasu zaprawa ulegała degradacji, a jej wytrzymałość się zmniejszała. Wniosek ten można wykorzystać do wstępnej oceny wytrzymałości zapraw w fundamentach zabytkowych. Jest to istotne, ponieważ nie ma wiarygodnych metod pomiaru wytrzymałości (na ściskanie, rozciąganie) starych zapraw.

Wnioski

Obiekty zabytkowe pozwalają poznać historię miasta i żyjącej w nim niegdyś społeczności. Ingerencja w konstrukcję oraz wizualny aspekt obiektów zabytkowych powinny być więc ograniczone do minimum. Nie zawsze jest to jednak możliwe. W analizowanym obiekcie konstrukcja stropów i dachu została w dużym stopniu zmieniona. Zabieg ten był konieczny ze względu na zły stan techniczny budynku. Wprowadzenie wzmocnień, które obniżają autentyczność zabytku, pozwoliło uzyskać sztywność przestrzenną nie tylko danego obiektu, lecz także kamienic usytuowanych w pierzei.

Dokładna analiza zachowania fundamentów historycznych budynków jest skomplikowana. Ważnymi jej narzędziami są metody numeryczne, w tym metoda elementów skończonych, która może opisywać geometrię kamiennych fundamentów z wystarczającą dokładnością. Przedstawiona w artykule analiza oraz uzyskane wyniki pozwalają oszacować wytrzymałość historycz-

to transfer it the increased load, especially when the mortar has lost its strength properties. Cement mortar, on the other hand, ensures a proper transfer of the load increased by the changed structure. In this foundation, the mortar was completely replaced wherever it was possible. In places where access was difficult, it was replaced partially, but substitution was never smaller than 50% of the entire mortar in a given section. Due to the conservator's supervision, the work on the building was carried out with extreme care.

On the basis of the plastic-damage model, some relationships were revealed between the strength of the foundation and the stiffness of the different types of mortar considered here (Fig. 8). It can be read from the graph that, for a fragment of this type of foundation with gypsum mortar and a width of 60 cm, the strength originally reached 300 kN/m. Over time, the mortar degraded, and its strength decreased. This conclusion can be used for preliminary estimation of the strength of mortars in old building foundations. In this case, it is essential, since there are not reliable methods to measure the (compressive, tensile) strength of old mortars.

Conclusions

The cultural value of historic buildings is a very important element that allows us to learn about the history of a city and the community that once lived within it. Interference with the construction and the visual aspect of historical buildings should therefore be kept to a minimum. However, this is not always possible. In the building under analysis, the structure of the ceilings and the roof were significantly changed. This treatment was necessary due to the poor technical condition of the building. The introduction of reinforcements, which reduce the authenticity of the monument, allowed in this case to obtain spatial rigidity not only of the building in question, but also of tenement houses located within a given frontage.

A thorough analysis of the behavior of historical building foundations is difficult. Numerical methods, including the finite element method seem to be powerful tools for such an analysis. Finite element models can describe the geometry of stone foundations with

nych zapraw i porównać je z zaprawami używanymi obecnie. Nominalną wytrzymałość spoin z zapraw łączących główne elementy nośne (kamienie) oszacowano przede wszystkim na podstawie modułu sztywności zaprawy.

Przy naprawie fundamentów zabytkowych można zaprojektować prawidłowe zbrojenie spoiny i dobrać odpowiednią zaprawę do jej wytrzymałości, określanej na podstawie modułu Younga. Analiza plastyczno-degradacyjna zaprawy jest doskonałym punktem wyjścia do analizy historycznych fundamentów uwzględniającej zjawiska reologiczne. W tym przypadku ważną rolę odgrywa sztywność materiału. Wydaje się, że podejście zaproponowane w artykule może być przydatne w analizie fundamentów zabytkowych budynków, a także innych historycznych elementów murowych. Na podstawie przeprowadzonej analizy można wprowadzić współczynniki korygujące dostosowane do rzeczywistej zaprawy i jej modelowania. Wyniki mogą się okazać przydatne w kolejnych badaniach i analizach numerycznych. Opisane w artykule testy numeryczne będą podstawą do dalszych analiz popartych badaniami eksperymentalnymi.

sufficient accuracy. The analysis presented in this paper and the results obtained make it possible to estimate the strength of historical mortars and to compare them with mortars used today. The nominal strength of mortar joints connecting the main load-bearing elements (stones) was estimated primarily on the basis of the stiffness modulus of the mortar material.

When repairing historical foundations, it is possible to design suitable joint reinforcement, and select an appropriate mortar for its strength, determined on the basis of Young's modulus. The plastic-damage analysis of mortar is an excellent starting point for an analysis of historical foundations that allows for rheological phenomena. In this case, an important role is played by the stiffness of the material. It seems that the approach proposed in this paper can be useful in analyzing not only foundations of historical buildings, but also other old masonry elements. On the basis of the analysis performed, it is possible to introduce some correction coefficients adjusting for the actual mortar and its modeling. The obtained results may prove useful in subsequent studies and numerical analyses. The numerical tests described in this article will be the basis for further studies supported by experimental research.

Bibliografia / References

Opracowania / Secondary sources

- Alvarez Jose, *Mortars in the Built Heritage*, „Studies on Conservation Science” 2014.
- Barbu Lucia, Martinez Xavier, Oller Sergio, Barbat Alex, *Validation on large scale tests of a new hardening-softening law for the Barcelona plastic damage model*, „International Journal of Fatigue” 2015, t. 81.
- Behbahani Ali Edalat, Barros Joaquim António Oliveira, Ventura-Gouveia Antonio, *Plastic-damage smeared crack model to simulate the behaviour of structures made by cement based materials*, „International Journal of Solids and Structures” 2015, vol. 73–74.
- Fiore Alessandra, Monaco Pietro, Resta Marco, *Non-Linear Finite Element Analysis of Masonry Towers by Adopting the Damage Plasticity Constitutive Model*, „Advances in Structural Engineering” 2013, t. 16.
- Giordano Aldo, Mele Elena, De Luca Andrea, *Modelling of historical masonry structures: Comparison of different approaches through a case study*, „Engineering Structures” 2002, t. 24.
- Goszyła Marek, Sikorski Krystian, *Badania i renowacja murów kościoła i klasztoru Karmelitów Bosych w Przemyslu*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2020, t. 63.
- Grębowski Karol, Rucka Magda, Wilde Krzysztof, *Non-Destructive Testing of a Sport Tribune under Synchronized Crowd-Induced Excitation Using Vibration Analysis*, „Materials” 2019, t. 12.
- Kujawa Marcin, Lubowiecka Izabela, Szymczak Czesław, *Finite element modelling of a historic church structure in the context of a masonry damage analysis*, „Engineering Failure Analysis” 2020, vol. 107.

- Lourenço Paulo B., *Analysis of historical constructions: From thrust-lines to advanced simulations*, „Historical Constructions” 2001.
- Lourenço Paulo B., *Computations on historic masonry structures*, „Progress in Structural Engineering and Materials” 2002, t. 4.
- Liberatore Domenico, Addressi Daniela, Sangirardi Marialuigia, *Nonlinear Analysis of Masonry Walls Based on a Damage-Plastic Formulation*, „Structural Analysis of Historical Constructions” 2019, vol. 18.
- Lubliner Jacob, *Plasticity theory*, Berkeley 2006.
- Lubliner Jacob, Oliver Jolivella, Oller Sergio, Oñate Eugenio, *A plastic-damage model for concrete*, „International Journal of Solids and Structure” 1989, t. 3.
- Prarat Maciej, Zimna-Kawecka Karolina, *Ochrona konserwatorska kamienic w Toruniu – analiza 100 lat doświadczeń i prognozy*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2020, t. 63.
- Przewłócki Jarosław, Dardzińska Iza, Świniański Jerzy, *Review of historical buildings' foundations*, „Geotechnique” 2005, t. 55.
- Roca Pere, *The study and restoration of historical structures: From principles to practice*, „Structural Analysis of Historical Constructions” 2006.
- Roca Pere, Cervera Miguel, Gariup Giuseppe, Pela Luca, *Structural analysis of masonry historical constructions*, „Classical and advanced approaches” 2010, vol. 17 (3).
- Samiei Reza, Daniotti Bruno, Pelosato Renato, Dotelli Giovanni, *Properties of cement-lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates*, „Construction and Building Materials” 2015, t. 84.

Van Balen Koenraad, Van Gemert Dionys, *Modelling lime mortar carbonation*, „Materials and Structures” 1994, vol. 27.

Zielińska Monika, Misiewicz Joanna, *Structural aspects in restoring historical buildings for re-use: the case of a tenement building on Staromiejska Street in Olsztyn*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2016, t. 46.

Zielińska Monika, Rucka Magdalena, *Non-Destructive Assessment of Masonry Pillars using Ultrasonic Tomography*, „Materials” 2018, vol. 11, nr 12.

Normy projektowe / Planning standards

PN-EN 1996-1-1+A1:2013-05. Eurokod 6, *Designing of masonry structures. Part 1 –1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures.*

- ¹ J. Alvarez, *Mortars in the Built Heritage*, „Studies on Conservation Science” 2014.
- ² K. Van Balen, D. Van Gemert, *Modelling lime mortar carbonation*, „Materials and Structures” 1994.
- ³ P.B. Lourenço, *Analysis of historical constructions: From thrust-lines to advanced simulations*, „Hist Constr” 2001, s. 91–116.
- ⁴ P. Roca et al., *Structural analysis of masonry historical constructions*, „Classical and advanced approaches” 2010, vol. 17 (3).
- ⁵ M. Prarat, K. Zimna-Kawecka, *Ochrona konserwatorska kamienic w Toruniu – analiza 100 lat doświadczeń i prognozy*, „Wiadomości Konserwatorskie – Journal of Heritage Conservation” 2020 (dalej: „WK”), s. 63–72.
- ⁶ M. Zielińska, M. Rucka, *Non-Destructive Assessment of Masonry Pillars using Ultrasonic Tomography*, „Materials” 2018, vol. 11, nr 12, s. 1–16.
- ⁷ M. Gosztyła, K. Sikorski, *Badania i renowacja murów kościoła i klasztoru Karmelitów Bosych w Przemysłu*, „WK” 2020, t. 63, s. 69–85.
- ⁸ P. Roca, *The study and restoration of historical structures: From principles to practice*, „Structural Analysis of Historical Constructions” 2006, s. 9–24.
- ⁹ P.B. Lourenço, *Computations on historic masonry structures*, „Progress in Structural Engineering and Materials” 2002, t. 4, s. 301–319.
- ¹⁰ A. Giordano et al., *Modelling of historical masonry structures: Comparison of different approaches through a case study*, „Engineering Structures” 2002, t. 24, s. 1057–1069.
- ¹¹ J. Lubliner et al., *A plastic-damage model for concrete*, „International Journal of Solids and Structure” 1989, t. 3, s. 299–326.
- ¹² A. Fiore et al., *Non-Linear Finite Element Analysis of Masonry Towers by Adopting the Damage Plasticity Constitutive Model*, „Advances in Structural Engineering” 2013, t. 16, s. 791–803.
- ¹³ D. Liberatore et al., *Nonlinear Analysis of Masonry Walls Based on a Damage-Plastic Formulation*, „Structural Analysis of Historical Constructions” 2019, vol. 18, s. 1009–1017.
- ¹⁴ M. Kujawa et al., *Finite element modelling of a historic church structure in the context of a masonry damage analysis*, „Engineering Failure Analysis” 2020, vol. 107, s. 107–121.
- ¹⁵ J. Przewłócki et al., *Review of historical buildings’ foundations*, „Geotechnique” 2005, t. 55, s. 363–372.
- ¹⁶ M. Zielińska, J. Misiewicz, *Structural aspects in restoring historical buildings for re-use: the case of a tenement building on Staromiejska Street in Olsztyn*, „WK” 2016, t. 46, s. 100–109.
- ¹⁷ J. Lubliner, *Plasticity theory*, Berkeley 2006.
- ¹⁸ L.G. Barbu et al., *Validation on large scale tests of a new hardening-softening law for the Barcelona plastic damage model*, „International Journal of Fatigue” 2015, t. 81, s. 213–226.
- ¹⁹ A.E. Behbahani et al., *Plastic-damage smeared crack model to simulate the behaviour of structures made by cement based materials*, „International Journal of Solids and Structures” 2015, vol. 73–74, s. 20–40.
- ²⁰ K. Grębowski et al., *Non-Destructive Testing of a Sport Tribune under Synchronized Crowd-Induced Excitation Using Vibration Analysis*, „Materials” 2019, t. 12, s. 1–19.
- ²¹ R. Samici et al., *Properties of cement-lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates*, „Construction and Building Materials” 2015, t. 84, s. 84–94.
- ²² PN-EN 1996-1-1+A1:2013-05. Eurokod 6, *Designing of masonry structures. Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures.*

Streszczenie

Konstrukcje obiektów zabytkowych mają najczęściej formę elementów murowanych. Najślabszym ich składnikiem jest zaprawa murarska, zwłaszcza w kamiennych fundamentach, często wykonywanych w przeszłości. Celem artykułu jest analiza zachowania się fundamentu, skupiona na modelowaniu zaprawy jako spoiny łączącej kamienie w charakterystycznym średniowiecznym fundamencie. Analizę numeryczną przeprowadzono na przykładzie zlokalizowanego w Polsce obiektu rzeczywistego, w którym fundament wymagał wzmocnienia ze względu na zły stan techniczny i planowany wzrost obciążenia przekazywanego na fundament. Pod uwagę brane są różne rodzaje zapraw, w tym cementowe, cementowo-wapienne, wapienne i gipsowe. Wyniki mogą świadczyć o przydatności i zaletach tego podejścia do fundamentów zabytkowych budynków, a także innych elementów konstrukcji murowanych.

Abstract

Structures of historical buildings usually have the form of masonry elements. The weakest component of such elements is mortar, especially in stone foundations, which were often used in the with a focus on the modeling of mortar as a joint connecting stones in a characteristic medieval foundation. Different types of mortar: cement, cement-lime, lime and gypsum mortars, were examined. A numerical analysis was carried out on the example of an existing structure located in Poland, where the foundation needed reinforcement due to its poor condition and planned load increase. The obtained results may provide some evidence for the usefulness and advantages of this approach to dealing with foundations of historical buildings, as well as some other elements of old masonry structures.