

Pere Roca*

Contribution of numerical modeling to the study of historical structures

Znaczenie modelowania numerycznego dla badań konstrukcji historycznych

1 Introduction.

Purpose of structural analysis

The purpose of structural analysis lays on the characterization of the response of the structure for a variety of conditions and actions. This characterization involves results on stresses, deformation, displacements and reactions. Non-linear analysis may as well provide results on damage (cracking in tension, crushing in compression...) and reproduce detailed loading processes across the initial, service and ultimate ranges; in particular, it may determine the ultimate capacity of the structure for different actions. Most modern approaches to structural analysis are based on an accurate numerical simulation of the response of the structure throughout the loading process. Structural analysis can contribute to the different phases involved in the study of a historical structure, namely diagnosis, safety evaluation (or reliability verification) and design of intervention.

In all these phases, structural analysis can be used in combination with the other possible sources approaches, including historical research, inspection (including experiments) and monitoring. Conclusions on diagnosis, safety and strengthening should never be derived based solely on structural analysis. The other activities (historical research, inspection, monitoring) are needed to (1) provide essential information (real data) needed to build the model and (2) validate the model by comparison with empirical evidence. The evidence provided by them is to be integrated within a single approach or understanding. The information yielded by structural anal-

1 Wstęp.

Cel analizy konstrukcyjnej

Celem analizy konstrukcyjnej jest scharakteryzowanie reakcji konstrukcji na różnorodne warunki i działania. Charakterystyka taka obejmuje wyniki działania obciążeń, zniekształcenia, przemieszczenia i reakcje.

Nieliniowa analiza może przynieść także informacje o uszkodzeniach (pęknięcie przy rozciąganiu, zmiażdżenie przy ściskaniu) oraz odtworzyć szczegóły procesu obciążenia we zakresach, wstępnych użytkowania i granicznych. W szczególności analiza może ustalić ostateczną nośność konstrukcji wobec różnych oddziaływań. Większość nowoczesnych koncepcji analizy konstrukcyjnej opiera się na dokładnej symulacji cyfrowej różnych reakcji konstrukcji w procesie obciążania. Analiza konstrukcyjna może być przydatna w różnych fazach badania konstrukcji historycznej, fazie diagnostyki, oceny bezpieczeństwa (weryfikacji solidności) i projektowania naprawy czy wzmocnienia..

We wszystkich fazach można łączyć wykorzystanie analizy konstrukcyjnej i innych możliwych źródeł, np. badań historycznych, badań empirycznych (w tym eksperymentów) oraz monitoringu. Wniosków na temat diagnostyki, bezpieczeństwa i wzmocnienia nie wolno nigdy opierać wyłącznie na analizie strukturalnej. Inne działania (badania historyczne, badania empiryczne, monitoring) są potrzebne, aby (1) uzyskać kluczowe informacje (prawdziwe dane) konieczne do stworzenia modelu numerycznego (2) uwiarygodnić model, porównując go z dowodami empirycznymi. Uzyskane w ten

ysis should not be in contradiction with that provided by the other sources [1].

Diagnosis involves the identification of causes of damage and decay and the characterization of the present condition of the structure. In the diagnosis phase, structural analysis can contribute with the simulation of the performance of the structure when subjected to past actions and thus conclude on their possible influence on the present condition and existing damage. Some types of damage may thus be associated to possible causes (fig. 1a).

Safety evaluation consists of determining the acceptability of safety levels by analyzing the present condition of the structure. Structural analysis can contribute with a quantitative measure of the capacity of the structure to resist different actions. Structural analysis provides a deductive approach: A structural model is used to obtain a quantitative prediction of the capacity of the structure subjected to the actions for which safety is to be assessed (dead load, live load, earthquake...). In turn, it provides insight on the structural weaknesses and needs for strengthening (fig. 1b).

In the design of the intervention decisions are taken on how to repair or strengthen the structure. The chosen solution is assessed and developed into detail. Structural analysis, carried out on strengthened models, permits validation and comparison of possible alternative solutions. The solution chosen can then be accurately validated. In that way, structural analysis helps decide about the more efficient and adequate strengthening strategies or measures (fig. 1c).

2. Construction and utilization of models. Input data preparation (phase 1)

Structural analysis is always based on models built from data available on geometry, material properties, morphology and actions. Models are necessarily based on hypothesis on the mechanical nature of the building and are prepared using limited data. Because of the implicit assumptions and limited information, models need to be calibrated through some sort of comparison with experimental observations. Inspection techniques are needed, firstly, to gather the data necessary to prepare the model and, secondly, to provide some empirical (observational, experimental) evidence which can be used to validate the model. This second phase (validation) may be reinforced with evidence stemming

from information to be connected in one approach or concept. Data coming from analysis of structural construction should not be contradictory to data from other sources [1].

Diagnostyka zawiera identyfikację przyczyn uszkodzeń i zniszczenia oraz charakterystykę obecnego stanu konstrukcji. W fazie diagnostyki analiza konstrukcyjna może być pomocna dzięki symulacji skuteczności konstrukcji poddanej wcześniejszym działaniom i przynieść informacje o ich możliwym wpływie na obecny stan i aktualne zniszczenia. W ten sposób można połączyć pewne rodzaje szkód z ich możliwymi przyczynami (rys. 1a).

Ocena bezpieczeństwa polega na ustaleniu akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa poprzez analizę aktualnego stanu konstrukcji. Analiza konstrukcyjna może być przydatna dzięki ilościowym pomiarom odporności konstrukcji na różne działania. Analiza konstrukcyjna oferuje podejście dedukcyjne: używa się modelu konstrukcyjnego do uzyskania ilościowych prognoz nośności konstrukcji przy działaniach, dla jakich ocenia się bezpieczeństwa (obciążenie statyczne, obciążenie dynamiczne, trzęsienie ziemi...). Umożliwia także wejście w nieznany stan konstrukcji i potrzeby w zakresie jej wzmocnienia (rys. 1b).

Planowanie interwencji to decyzje na temat, jak naprawić lub wzmocnić konstrukcję. Wybrane rozwiązanie należy ocenić i doprecyzować szczegóły. Analiza konstrukcyjna modeli wzmocnienia pozwala na uwiarygodnienie i ocenę możliwych rozwiązań alternatywnych. Wówczas można faktycznie uwiarygodnić wybrane rozwiązanie. W ten sposób analiza konstrukcyjna wspomaga decyzję o bardziej efektywnej i adekwatnej strategii lub środkach wzmocnienia (rys. 1c).

2 Tworzenie i stosowanie modeli. Przygotowanie danych wejściowych (faza 1)

Analiza konstrukcyjna zawsze opiera się na modelach wygenerowanych z dostępnych danych o geometrii, właściwościach materiału, morfologii i oddziaływaniach.

Modele muszą bazować na hipotezach o własnościach mechanicznych budynku i są przygotowywane z użyciem ograniczonego zbioru danych. Ze względu na niekwestionowane założenia i ograniczone informacje, modele wymagają kalibracji w formie jakiegoś porównania z obserwacjami eksperymentalnymi. Potrzebne są techniki empiryczne: po pierwsze do zebrania danych koniecznych do przygotowania modelu i po drugie do dostarczenia empirycznych informacji (z obserwacji, ekspe-

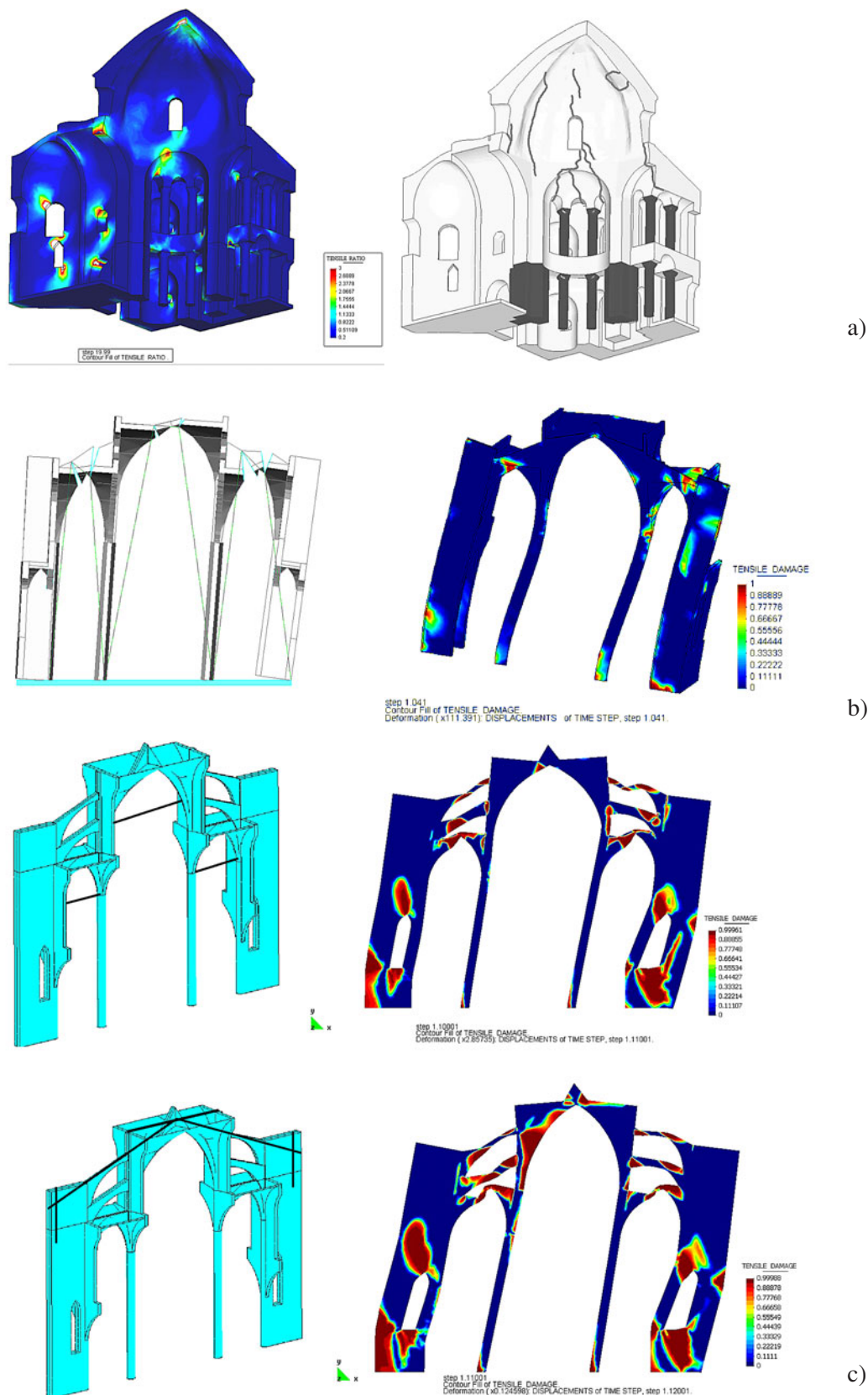


Fig. 1. Roles of structural analysis: (a) diagnosis by simulation of effects due to different actions; (b) safety evaluation for seismic action using different approaches; (c) simulation and comparison of different seismic strengthening strategies. The examples correspond to (a) Küçük Ayasofya in Istanbul, (b) Sta. Maria del Mar church in Barcelona and (c) Mallorca cathedral

Rys. 1. Rola analizy konstrukcyjnej: (a) diagnoza poprzez symulację wyników różnych działań; (b) ocena bezpieczeństwa przy siłach sejsmicznych za pomocą różnych podejść; (c) symulacja i porównanie strategii wzmocnienia przed trzęsieniami ziemi. Przykłady to (a) Kościół św. Sergiusza i Bachusa w Istantule, (b) kościół Sta. Maria del Mar w Barcelonie i (c) katedra na Majorce

from history or from present monitoring. In turn, monitoring may provide accurate information on the present response of the building for a variety of actions (thermal cycles, wind, deterioration processes, micro-tremors and earthquakes...).

The preparation and use of the model involves several phases. In a first phase, all the available information provided by historical research and inspection is used to construct the model. The information yield by historical research and inspection may provide data on geometry, internal morphology, mechanical properties of materials and existing damage or alterations, all needed to prepare the model. However, it is important to recognize that this information is always limited and that it will normally permit only a partial definition of the model. In fig. 2, this part of the model is metaphorically represented by a “transparent” region or window.

Models are normally also built on a large number of assumptions (metaphorically represented as a “dark” region or window in fig. 2), involving all the features which do not result (at least, in a direct way) from data collected from these complementary activities. This “dark” region is mostly built based on assumptions done by the analyst. These assumptions may involve geometrical, morphological or material features of the building, or more fundamental aspects such as the type of constitutive equations assumed for the description of the mechanical response of the material. It is important to recognize that, no matter the effort invested, the data made available will not be enough to prepare a fully ob-

rymentów), które mogą zostać użyte do uwiarygodnienia modelu. Ta druga faza (uwiarygodnienie) może zostać uzupełniona informacjami pozyskanymi z historii lub monitoringu budynku. Monitoring może z kolei przynieść dokładne informacje o bieżących reakcjach konstrukcji na różnorodne działania (cykle termiczne, wiatr, procesy niszczenia, mikrodrżania i trzęsienia ziemi...).

Przygotowanie i stosowanie modeli także składa się z różnych faz. W pierwszej z nich na podstawie wszystkich dostępnych informacji uzyskanych dzięki badaniom historycznym i empirycznym budowany jest model. Wiadomości wynikające z badań historycznych i empirycznych mogą być źródłem danych o geometrii, morfologii wewnętrznej, właściwościach mechanicznych materiałów i faktycznych uszkodzeniach lub zmianach, a wszystkie te dane mogą być przydatne w tworzeniu modelu. Ważne jest jednak, aby zdawać sobie sprawę, że informacje te są zawsze ograniczone i że normalnie będą umożliwiały jedynie częściową definicję modelu. Na rys. 2 przedstawiono tę część modelu jako obszar „przezroczysty”.

Modele są zwykle oparte także na dużej liczbie założeń (przedstawionych jako „ciemny” obszar na rys. 2) na temat cech, które nie wynikają (przynajmniej bezpośrednio) z danych zebranych w komplementarnych działaniach. Ten „ciemny” obszar jest budowany głównie w oparciu o założenia dokonane przez analityka, które mogą dotyczyć geometrycznych, morfologicznych lub materialnych cech budynku albo bardziej fundamentalnych zagadnień, takich jak rodzaj równań konstytutywnych przyjętych do opisu mechanicznej reakcji materiału. Ważne jest,

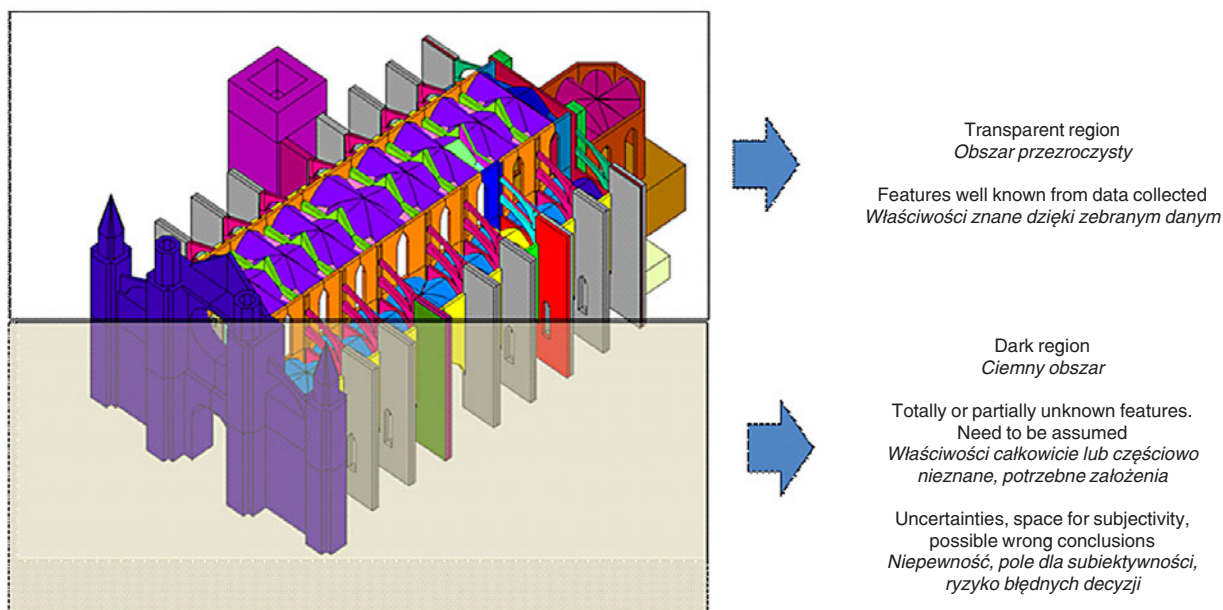


Fig. 2. Elaboration of a structural model, Phase 1. “Transparent” and “dark” regions
Rys. 2. Opracowanie modelu konstrukcyjnego, faza 1. Obszar „przezroczysty” i „ciemny”

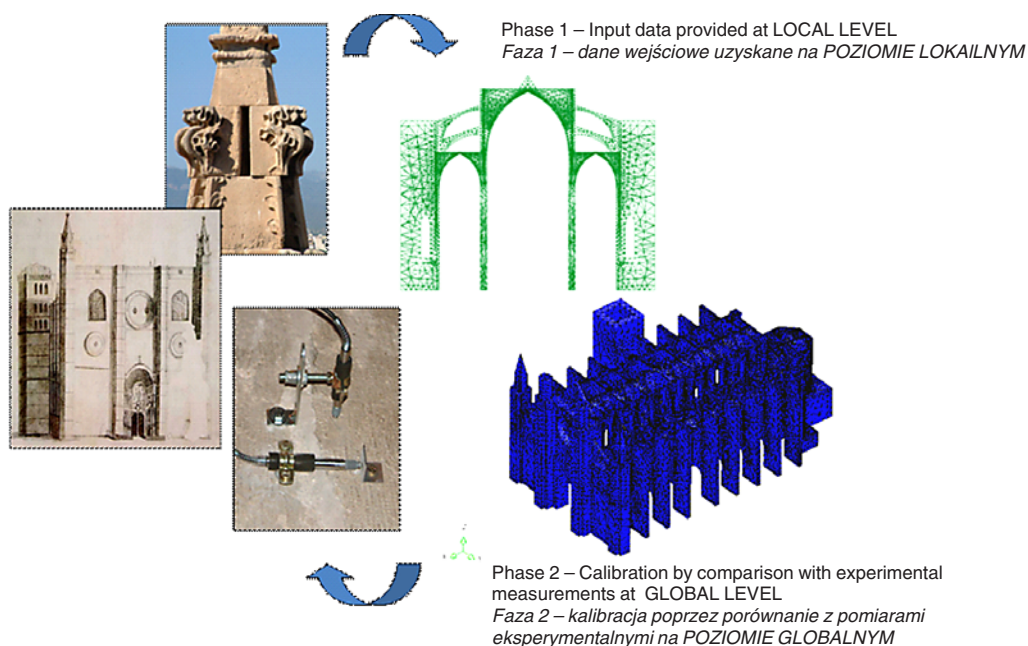


Fig. 3. Bidirectional relationship between the model and parallel activities: Input data preparation (local level) and calibration (global level)

Rys. 3. Dwukierunkowa relacja pomiędzy modelem a działaniami równoległymi: przygotowanie danych wejściowych (poziom miejscowy) i kalibracja (poziom ogólny)

jective model and that a large number of assumptions, either declared or undeclared, will normally be necessary.

This involves significant uncertainty and thus some space for possible subjectivity, leading, in the worst case, to inadequate conclusions. In turn, inadequate (and too conservative) conclusions may lead to over-strengthen the structure and thus cause unnecessary loss of cultural material and historical value. On the contrary, too optimistic conclusions leading to insufficient intervention might endanger the building itself or cause inadmissible risks to people and cultural contents.

3. Calibration (phase 2)

This uncertainty can be partially counteracted by carrying out some calibration based on empirical evidence. This calibration can be performed by comparing the predictions of the model with real observations (as the overall distribution of cracking or deformation) or experimental measurements such as monitored displacements, measured work stresses or measured dynamic properties (natural frequencies, modal shapes...).

Hence, these parallel activities (history, inspection, monitoring), are related with the model in two ways (fig. 3): First, they provide basic information to build the model; second, they permit

żeby zdawać sobie sprawę, że niezależnie od włożonego wysiłku, uzyskane dane nie będą wystarczające do przygotowania całkowicie obiektywnego modelu i że zawsze koniecznych będzie wiele założeń, deklarowanych lub niedeklarowanych.

Niepewność ta pozostawia miejsce na subiektywne wybory, a w najgorszym przypadku grozi nieadekwatnymi wnioskami. Nieadekwatne (zbyt konserwatywne) wnioski mogą prowadzić do nadmiernego wzmocnienia konstrukcji, powodując niepotrzebne straty materiału kulturowego i wartości historycznej. Natomiast zbyt optymistyczne wnioski mogą stać się przyczyną niewystarczającej interwencji, która może zagrozić samemu budynkowi lub stworzyć niedopuszczalne zagrożenie dla ludzi i przechowywanych wewnątrz zabytków.

3. Kalibracja (faza 2)

Niepewności tej można częściowo zapobiegać za pomocą kalibracji opartej o dane empiryczne. Kalibrację można wykonać, porównując przewidywania modelu z obserwacjami faktycznymi (np. ogólny rozkład rys lub zniekształceń) albo z eksperymentalnymi pomiarami, takimi jak monitorowane przesunięcia, zmierzone obciążenia robocze lub zmierzone właściwości dynamiczne (częstotliwości naturalne, kształty modalne...).

Dlatego właśnie te działania równoległe (historia, badania empiryczne, monitoring) są dwójako powiązane z modelem (rys. 3): po pierwsze dostarczają podstawowych informacji, na podstawie których buduje

us to calibrate the model and thus produce a validated one which can be used for further predictions and safety evaluation. While in the first phase, the data utilized concern local properties or features of the building (such as detailed geometry, connections, morphology, damage, material properties...), in the second phase the information used has a “global” character as it concerns measurements or variables involving the entire building.

4. Using the model to evaluate the building (phase 3)

Unfortunately, calibrating and validating based on experimental information is not enough as to grant a reliable predictive capacity to the model. In fact, using the model to draw final predictions and conclude on safety will involve a sort of extrapolation, as the space for which the model has been validated will be surpassed to permit predictions on what is not known. This operation constitutes a new phase (3rd phase in fig. 3) which comes after the previous phases 1st and 2nd, and is characterized by large, but not always recognized, uncertainty.

For instance, the model might be validated based on evidence related to dead loading response, and then used to conclude on the seismic performance. Or the model could be calibrated using dynamic information obtained from ambient vibration measurements (causing very small oscillations) and then used to predict on the performance for a severe earthquake (generating very large oscillations). This kind of extrapolation is an inher-

się model; po drugie umożliwiają kalibrację modeli i w ten sposób pozwalają na stworzenie modelu uwiarygodnionego, który może zostać użyty do dalszych przewidywań i oceny bezpieczeństwa. O ile w pierwszej fazie używane dane dotyczą miejscowych cech lub właściwości budynku (takich jak dokładna geometria, połączenia, morfologia, uszkodzenia, właściwości materiału...), w drugiej fazie stosuje się informacje o charakterze “ogólnym”, dotyczące pomiarów lub parametrów całego budynku.

4. Stosowanie modelu do oceny budynku (faza 3)

Niestety, kalibracja i uwiarygodnienie w oparciu o dane eksperymentalne nie wystarcza, aby zapewnić modelowi wiarygodną zdolność przewidywania. W rzeczywistości użycie modelu do wyciągnięcia ostatecznych wniosków i sformułowania przewidywań na temat bezpieczeństwa wiąże się z pewną ekstrapolacją, ponieważ dziedzina, dla której uwiarygodniono model, zostaje przekroczona.. To działanie stanowi nową fazę (fazę 3 na rys. 3), która następuje po wcześniejszych fazach 1 i 2, a która charakteryzuje się znaczną, choć nie zawsze uznaną niepewnością.

Na przykład, model można uwiarygodnić w oparciu o reakcje na obciążenie statyczne, a następnie można użyć go do wyciągnięcia wniosków na temat skuteczności na wypadek trzęsienia ziemi. Można też kalibrować model za pomocą danych dynamicznych uzyskanych z pomiarów wibracji środowiskowych (powodujących bardzo małe drgania), a następnie wykorzystać go do przewidywania skuteczności na

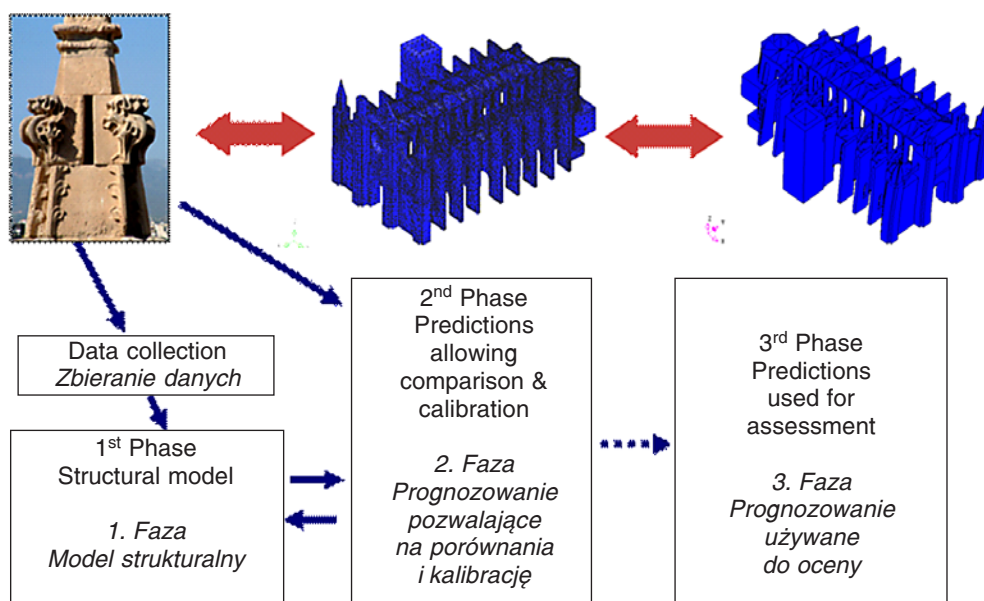


Fig. 4. The overall process, including preparation, validation and prediction
Rys. 4. Cały proces, włącznie z przygotowaniem, uwiarygodnieniem i prognozowaniem

ent stage of any modeling activity. Unfortunately, it constitutes another very important source for uncertainty and subjectivity. In this phase (as in fact, in the previous two ones), the adequate judgment of the analyst becomes extremely relevant. The analyst will have to decide to which extent the “extrapolation” done at the attempt to predict is acceptable or abusive, whether the model is used within the possible limits of its predictive capacity. During the previous phases, he or she had also to decide whether the initial data were sufficient and the calibration effort adequate.

5. Application to real cases

Certainly, models as those shown in fig. 1 encompass “transparent regions” directly based on data available and “dark regions” including large number assumptions based on experience or supposition.

The “transparent” region includes mostly geometry and some morphological traits (as the nature and composition of vault fillings or internal composition of piers and walls). A partial knowledge of the connections among the structural members, the average properties of the materials and the existing damage has been also possible. This knowledge was gained thanks to historical research (construction process, alterations, damage, repairs), visual inspection (composition, connections, damage), non-destructive testing (as GPR on vault fillings, internal composition of piers and walls by seismic tomography), mechanical and chemical tests (in situ, laboratory, and geotechnical research (soundings, georadar, electric tomography, Nakamura, ReMi). Among the better known features is geometry thanks to the wealth of information that is obtained thanks to modern survey technologies. In particular, photogrammetry was fully used for Mallorca Cathedral while Santa Maria del Mar was detailedly surveyed by means of laser-scanner.

The “dark” region includes all the assumptions needed to make up for the unknown features or properties of the building and materials which are required to prepare the model. These include the true and detailed distribution of materials (and material properties, including their scattering) across the entire building, non-visible damage, detailed information on internal morphology extended to the entire building, and non-visible alterations, among many other features. The “parsimony principle” will naturally lead to assume

wypadek silnego trzęsienia ziemi (powodującego duże drgania). Taka ekstrapolacja jest nieuniknionym elementem procesu modelowania. Niestety, zawiera w sobie następne ważne źródło niepewności i subiektywizmu. W tej fazie (podobnie w istocie jak w dwóch poprzednich), właściwa ocena analityka zyskuje ogromne znaczenie. Analityk musi zdecydować, jak daleka “ekstrapolacja” danych, aby próbować przewidzieć, jest akceptowalna, a kiedy przekracza ona dopuszczalne normy oraz czy model jest wykorzystywany w granicach swojej przydatności prognostycznej. W poprzednich fazach analityk musiał także decydować, czy wstępne dane były wystarczające, a kalibracja właściwa.

5. Zastosowanie w konkretnych przypadkach

Z pewnością modele, takie jak omówione na rys. 1 zawierają „obszary przezroczyste”, oparte bezpośrednio na danych oraz “ciemne obszary” oparte na wielu założeniach wynikających z doświadczeń lub domysłów.

„Przezroczyste obszary” to przede wszystkim geometria i pewne cechy morfologiczne (np. charakter i skład wypełnień sklepienia lub skład wewnętrzny filarów i ścian). Możliwa jest także częściowa wiedza o powiązaniach między elementami konstrukcyjnymi, przeciętnych właściwościach materiałów i faktycznych zniszczeniach. Tę wiedzę zdobywa się w badaniach historycznych (nad procesem budowy, zmianami, uszkodzeniami, naprawami), ocenie wizualnej (skład, powiązania, uszkodzenia), badaniach nieniszczących (np. test GPR w przypadku wypełnień sklepień, tomografia sejsmiczna w przypadku wewnętrznego składu filarów i ścian), testach mechanicznych i chemicznych (na miejscu i w laboratoriach) oraz badaniach geotechnicznych (sondowanie, georadar, tomografia elektryczna, Nakamura, ReMi). Jedną z lepiej poznanych cech jest geometria dzięki bogactwu informacji uzyskanych za pomocą nowoczesnych technologii badania. Zwłaszcza fotogrametria została w pełni wykorzystana w przypadku katedry na Majorce, zaś kościół Santa Maria del Mar zbadano bardzo szczegółowo za pomocą skanera laserowego.

„Ciemny obszar” obejmuje wszystkie założenia potrzebne, aby uzupełnić nieznanne cechy lub właściwości budynku i materiałów koniecznych do przygotowania modelu, np. faktyczny szczegółowy rozkład materiałów (i ich właściwości, włącznie z rozproszeniem) w całym budynku, niewidoczne uszkodzenia, szczegółowe dane o wewnętrznej morfologii w przełożeniu na cały budynek, niewidoczne zmiany i wiele innych. “Zasada oszczędno-

large uniformity of properties, composition and dimensions wherever no specific information is available.

6. Calibration strategies

Calibration and validation of the models has been based, as aforementioned, on comparison between numerical predictions and experimental observations. When needed, the models have been improved to obtain better agreement between both. The following possibilities were considered for this purpose:

- Measure and comparison of work stresses at critical points. Stresses have been measured by the hole-drilling test (in other cases, they could have been measured with the flat-jack test) and then compared with the corresponding numerical values.
- Dynamic monitoring and ambient vibration recording, permitting characterization of the dynamic properties (frequencies and modal shapes), and comparison with the output of modal analysis. Modal matching has been used to adjust some model parameters.
- Static monitoring involving the characterization of actions (temperature, humidity, wind, microtremors) and response (cracks, displacements, rotations), and comparison with a simulation of the response of the numerical model subjected the same actions.
- Visual inspection, allowing comparison between predicted and actually existing damage or deformation.
- Identification of structural past performance through detailed historical research, and comparison with the corresponding model predictions. In particular, study of past-performance in the case of historical earthquakes.

Sections 5 and following describe the application of this methodology, along phases 1, 2 and 3, to the three case studies considered in the present paper.

7. Example of validation based on work stress measurement

Some attempts have been carried by the authors to calibrate or modify models by comparing their predictions on compression stress levels at critical sections with the corresponding real values, the latter measured in situ by means of the flat-jack test or the hole-drilling one.

The hole-drilling technique [2,3] was successfully used to measure the work stresses at the base

of the structure. This technique is used to measure the work stresses at the base of the structure. This technique is used to measure the work stresses at the base of the structure.

6. Strategie kalibracji

Jak już wspomniano, kalibrację i uwiarygodnienie modeli oparto na porównaniach numerycznych przewidywań i obserwacji eksperymentalnych. W miarę potrzeb modele były poprawiane, aby uzyskać jak największą zgodność między tymi parametrami. W tym celu rozważono następujące możliwości:

- Pomiar i porównanie obciążeń roboczych w punktach krytycznych. Obciążenia mierzono za pomocą testów nawiercania (alternatywnie można było użyć do pomiaru mieszek sprężystych), a następnie porównano z odpowiednimi wartościami liczbowymi.
- Monitoring dynamiki i zapisywanie wibracji zewnętrznych, co pozwala na scharakteryzowanie właściwości dynamicznych (częstotliwości i kształty modalne), oraz porównanie z wynikiem analizy modalnej. Modalne dopasowanie stosowano do korekty parametrów modelu.
- Monitoring statyczny obejmujący charakterystykę zdarzeń (temperatura, wilgotność, wiatr, mikrodrżania) i reakcji (pęknięcia, przesunięcia, rotacja) i porównanie z symulacją reakcji według modelu numerycznego poddanego tym samym zdarzeniom.
- Kontrola wzrokowa, umożliwiająca porównanie przewidywanych i faktycznych uszkodzeń i zniekształceń.
- Identyfikacja przeszłej wydajności konstrukcji w formie starannych badań historycznych i ich porównanie z przewidywaniami modelu. W szczególności badanie wydajności w przeszłości jest przydatne w przypadku historycznych trzęsień ziemi.

Sekcje 5 i kolejne opisują zastosowanie tej metodologii wraz z fazą pierwszą, drugą i trzecią do trzech przypadków omawianych w tym artykule.

7. Przykład uwiarygodnienia w oparciu o pomiar obciążenia roboczego

Autorzy podjęli pewne próby kalibracji lub modyfikacji modeli poprzez porównanie ich przewidywań poziomu naprężeń ściskających w punktach krytycznych z odpowiednimi wartościami faktycznymi, zmierzonych na miejscu za pomocą testu mieszek sprężystych lub nawiercania.

Technikę nawiercania otworów [2,3] zastosowano z powodzeniem do pomiaru obciążeń roboczych

of the piers of Santa Maria del Mar church in Barcelona. In Santa Maria del Mar, a three nave Gothic church with central vaults spanning 13 m, the piers have an octagonal section with circumscribed diameter of 1.5 m, the test was applied to two different piers. Both the stress values and the eccentricity of the load at the base the piers were determined. The latter was measured by executing the test at two opposite faces of the pier in the transverse direction transverse of the building. It was possible to measure maximum and minimum compression stresses of 3.8 and 2.1 MPa, corresponding to an eccentricity of 4 cm. This measurement permitted the identification of the only thrust line solution describing the real equilibrium condition of the building among the infinite solutions provided by limit analysis (fig. 5). It also permitted the confirmation of certain assumptions regarding the distribution and weight of the filling existing over the vaults.

In Mallorca Cathedral, another three-nave Gothic building with central vaults spanning 20 m, a similar experiment was undertaken to determine the value and direction of the main compression stress at the springing of the flying arches. The values measured were then compared validation with the corresponding prediction of the numerical model at the same sections (fig. 6), showing satisfactory agreement. This comparison provided some indirect appraisal of assumptions on the weight distribution over the building, among other aspects.

More information on this application and similar calibration attempts based on alternative technologies is provided in [4,5]. In turn, information on the numerical approaches utilized is provided in [6].

u podstawy filarów kościoła Santa Maria del Mar w Barcelonie. W tym trójnawowym gotyckim kościele z centralnymi sklepieniami na wysokości 13 m filary mają ośmiokątny przekrój i o średnicy 1,5 m. Test przeprowadzono na dwóch różnych filarach. Ustalono dwie wartości obciążenia i mimośród obciążenia przy podstawie filarów. Tę ostatnią wartość zmierzono, przeprowadzając test na dwóch naprzeciwległych powierzchniach filarów w kierunku poprzecznym do przekroju budynku. Można było zmierzyć maksymalne i minimalne naprężenia ściskające na poziomie 3,8 i 2,1 MPa, co odpowiada mimośrodkowi 4 cm. Pomiar ten pozwolił na identyfikację tylko spękań wpustowych, odpowiadających autentycznemu stanowi równowagi budynku, podczas gdy analiza granic oferuje nieskończoną liczbę rozwiązań (rys. 5). Umożliwił także potwierdzenie pewnych założeń na temat rozkładu i wagi wypełnienia znajdującego się nad sklepieniami.

W katedrze na Majorce, kolejnych trójnawowym gotyckim budynku o centralnych nawach wysokości 20 m wykonano podobny eksperyment, aby ustalić wartość i kierunek głównych naprężeń ściskających przy wiszących łukach. Uzyskane wartości zestawiono następnie z odpowiednimi przewidywaniami według modelu numerycznego dotyczącymi tych samych sekcji (rys. 6). Porównanie wykazało satysfakcjonującą zgodność, przyniosło także pośrednie potwierdzenie założenie o rozłożeniu ciężaru w całym budynku i innych.

Więcej informacji o tym zastosowaniu i podobnych przypadkach kalibracji w oparciu o alternatywne technologie można znaleźć w [4,5]. Natomiast dane o zastosowanych podejściach liczbowych zawarto w [6].

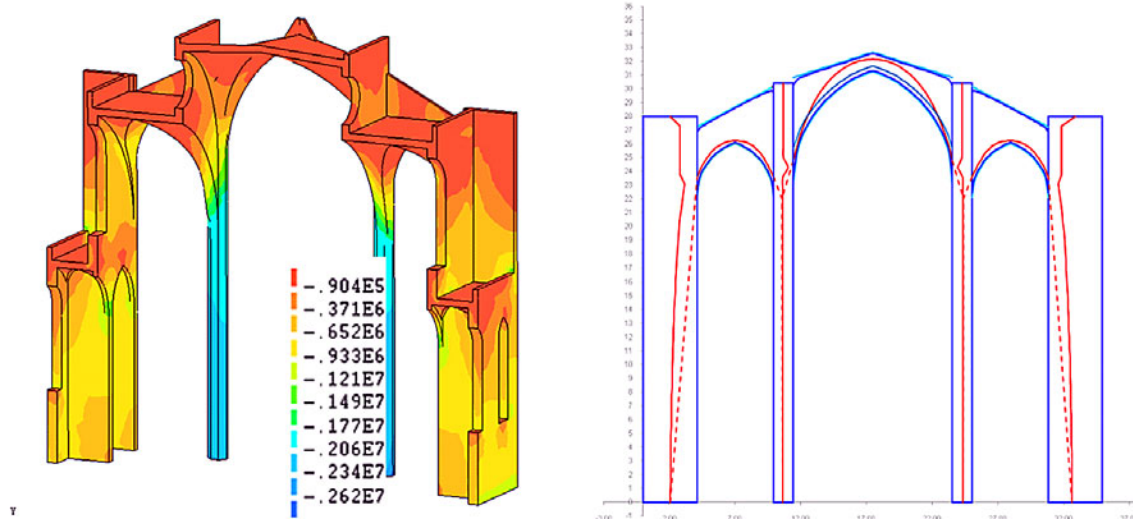


Fig. 5. Top: Validation of FEM model (stresses in Pa) and selection of thrust line solution by comparison with hole drilling tests stress values at the base of piers of Santa Maria del Mar

Rys. 5. U góry. Uwiarygodnienie modelu FEM (obciążenia w Pa) oraz wybór rozwiązania linii spękań wpustowych przez porównanie z testami nawierczanych otworów u podstawy filarów kościoła Santa Maria del Mar

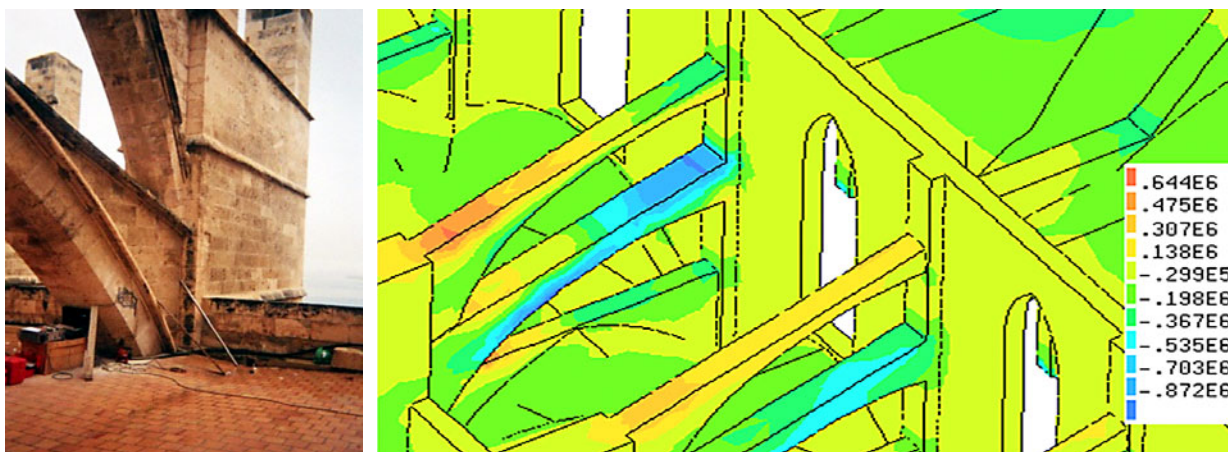


Fig. 6. Measurement of principal compression stress values and directions by hole drilling test and comparison with numerical predictions at the springing of lower flying-arches of Mallorca Cathedral. The figure at the right shows the distribution and values of maximum compression stresses (in Pa)

Rys. 6. Pomiar głównych wartości naprężeń ściskających i jego kierunków w teście nawiercania dziur i porównania z przewidywania liczbowymi w dolnej części wiszących łuków katedry na Majorce. Rycina po prawej przedstawia rozkład i wartości maksymalnych naprężeń ściskających (w Pa)

8. Conclusions

The studies described integrated different research activities, including historical investigation, inspection by NDT and MDT, monitoring and structural analysis. Some methodological issues have been presented on the way the structural analysis needs to be combined by the more observational or empirical activities. In addition to model preparation, these parallel activities are needed to undertake some calibration, attain validation and obtain predictions. Prediction always means some kind of extrapolation beyond the range or space for which the model has been validated, and involves significant uncertainty and risk for subjectivity. Part of this uncertainty may be counteracted for by some sort of “plausibility check” showing the believability of the results or, at least, their compatibility with available observational or historical evidence. Throughout the entire process, engineering experience and judgement are essential to obtain reliable conclusions.

8. Wnioski

Opisane badania łączyły różne działania badawcze: analizy historyczne, badania NDT i MDT, monitoring i analizę strukturalną. Niektóre kwestie metodologiczne przedstawiono w kontekście potrzeby połączenia analizy strukturalnej z bardziej empirycznymi czy też obserwacyjnymi metodami. Oprócz przygotowania modelu, wśród potrzebnych równoległych działań są kalibracja, uwiarygodnienie i przewidywanie. Przewidywanie zawsze łączy się z pewnego rodzaju ekstrapolacją poza zakres lub obszar, dla których uwiarygodniono model, łącząc się z niepewnością i ryzykiem subiektywizmu. Tej niepewności można częściowo zapobiegać, prowadząc “testy prawdopodobieństwa”, które dokumentują wiarygodność wyników lub przynajmniej ich kompatybilność z wynikami obserwacji lub badań historycznych. W trakcie całego procesu konieczne są doświadczenie inżynierskie i umiejętność osądu, aby dojść do konkluzji, na których można polegać.

References • Literatura

- [1] ISCARSAH. *Recommendations for the Analysis and Restoration of Historical Structures*. ISCARSAH – International Committee on Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage, ICOMOS, 2005
- [2] Barrallo J, Zulueta A, Sánchez-Beitia S. *The Donostia Method for stress measurements in architectural heritage*. STRAIN (British Society for Strain Measurement) 35 (3) 107-112, 1999.
- [3] *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. ASTM 837-95 (Standard. American Society for Testing Materials, 1995.
- [4] Roca, P., Clapés, J., Caselles, O., Vendrell M., Giráldez, P., Sánchez-Beitia. *Contribution of inspection techniques to assessment of historical structures*. Proceedings of the International RILEM SACoMATIS 2008 conference, RILEM, Bagnéux, 632-632, 2008.

- [5] Martínez, G., Roca, P., Caselles, O., Clapés, J., Canas, J. A., *Characterization of the dynamic response of the structure of Mallorca cathedral*. 5th Int. Conf. of Structural Analysis of Historical Constructions. New Delhi: MacMillan India Ltd., 2006.
- [6] Clemente, R., Roca, P., Cervera, M., *Damage model with crack localization. Application to historical buildings*. 5th Int. Conf. of Structural Analysis of Historical Constructions. MacMillan India Ltd, New Delhi, 2006.

* Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain
Uniwersytet Techniczny Katalonii, Barcelona, Hiszpania

Abstract

The paper presents a discussion on the possibilities offered by structural analysis, based on numerical simulation, to the study of structures of architectural heritage. Structural analysis can significantly contribute, when used in combination with inspection, historical research and monitoring, to obtain conclusions on the diagnosis and, safety evaluation and take decision on the design of intervention. Some reflections are also provided on the way structural modelling is to be used to grant reliable results. Concerning the application of structural models, the three phases corresponding to (1) input data preparation, (2) calibration or validation and (3) use of models for prediction, are discussed.

Streszczenie

Artykuł dotyczy omówienia możliwości, jakie daje analiza strukturalna, oparta na symulacji liczbowej w dziedzinie badań konstrukcji dziedzictwa architektury. Analiza strukturalna może być bardzo przydatna, jeśli łączy się ją z badaniami empirycznymi, historycznymi i monitoringiem, aby opracować wnioski na temat diagnozy i oceny bezpieczeństwa oraz decyzji o projekcie interwencji. Autorzy zawarli także pewne refleksje na temat modeli strukturalnych, dzięki którym można uzyskać wiarygodne wyniki. Jeśli chodzi o stosowanie modeli strukturalnych, omówiono trzy fazy, odpowiadające (1) przygotowaniu danych wejściowych, (2) kalibracji lub uwiarygodnieniu (3) zastosowaniu modeli do prognozowania.